

JB

中华人民共和国行业标准

JB 4710-92

钢 制 塔 式 容 器

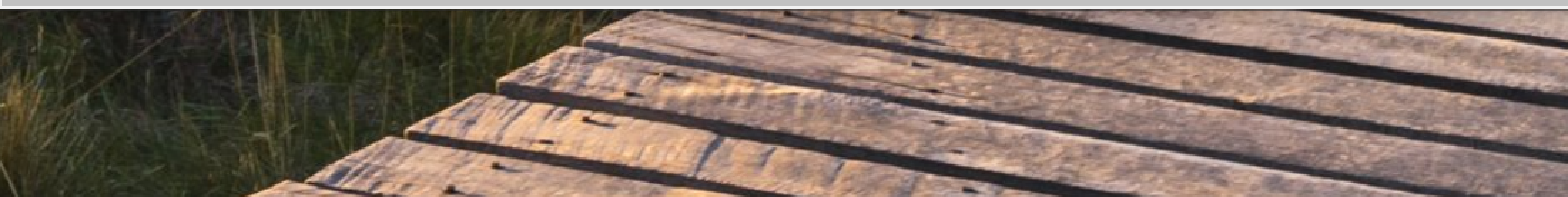
Steel vertical slender vessels

1992-06-05 发布

1992-12-01 实施

中华人民共和国机械电子工业部
中华人民共和国化学工业部
中华人民共和国劳动部

发布



目次

1 主题内容与适用范围.....	(1)
2 引用标准.....	(1)
3 总则.....	(1)
4 材料.....	(5)
5 结构.....	(5)
6 计算.....	(13)
7 制造、检验与验收	(31)
附录 A 塔器高振型计算(补充件)	(34)
附录 B 场地土的分类及近震、远震(补充件).....	(38)
附录 C 全国基本风压分布图(补充件)	(39)
附录 D 塔器挠度计算(参考件)	(42)
附录 E 计算数据(参考件)	(44)
附录 F 计算例题(参考件)	(45)

钢制塔式容器

Steel vertical slender vessels

1 主题内容与适用范围

1.1 主题内容

本标准规定了钢制塔式容器(以下简称塔器)的设计、制造、检验与验收的要求。

1.2 适用范围

1.2.1 本标准适用于高度大于10米,且高度与直径之比大于5的裙座自支承钢制塔器。

1.2.2 塔器的设计压力可以是内压或外压。

1.2.3 本标准不适用于带有拉牵装置的塔器。

2 引用标准

GB 150 《钢制压力容器》;

GB 3323 《钢熔化焊对接接头射线照相和质量分级》;

GB 4334 《不锈钢耐酸钢晶间腐蚀倾向试验方法》;

GBJ 9 《建筑结构荷载规范》;

GBJ 11 《建筑抗震设计规范》;

GBJ 17 《钢结构设计规范》;

JB 1152 《锅炉和钢制压力容器对接焊缝超声波探伤》;

JB 2536 《压力容器油漆、包装、运输》;

《钢制压力容器焊接工艺评定》;

《钢制压力容器焊接规程》;

ZBJ 74003 《压力容器用钢板超声波探伤》。

3 总则

3.1 定义

3.1.1 压力 除注明者外,压力系指表压力。

3.1.2 最大工作压力 最大工作压力系指在正常操作情况下,塔器顶部可能出现的最高压力。

3.1.3 设计压力 设计压力系指在相应设计温度下用以确定塔器壳体厚度的压力,亦即标注在铭牌上的塔器设计压力,其值不得小于最大工作压力。

当塔器各部位或受压元件所承受的液柱静压力达到5%设计压力时,则应取设计压力和液柱静压力之和进行该部位或元件的设计计算。

塔器上装有安全泄放装置时,应按GB 150附录B的相应规定确定塔器的设计压力。

对最大工作压力小于0.1MPa的内压塔器,设计压力取0.1MPa。

真空塔器按承受外压设计,当装有安全控制装置(如真空泄放阀)时,设计压力取 1.25 倍的最大内外压力差,或 0.1MPa 两者中的较小值;当没有安全控制装置时,取 0.1MPa。

3.1.4 金属温度 金属温度系指塔器受压元件沿截面厚度的平均温度。

在任何情况下,元件金属的表面温度不得超过钢材的允许使用温度。

3.1.5 设计温度 设计温度系指塔器在正常操作情况,在相应设计压力下,设定的受压元件的金属温度,其值不得低于元件金属可能达到的最高金属温度。对于 0℃ 以下的金属温度,则设计温度不得高于元件金属可能达到的最低金属温度。

塔器设计温度(即标注在塔器铭牌上的设计温度)是指塔壳的设计温度。

注:对具有不同操作工况的塔器,应在图样或相应技术文件中写明各苛刻工况时的相应设计压力和设计温度。

3.1.6 试验温度 试验温度系指在压力试验时塔壳的金属温度。

3.2 载荷

设计时应考虑以下载荷:

- a. 设计压力;
- b. 液柱静压力;
- c. 塔器自重(包括内件和填料等)以及正常操作条件下或试验状态下内装物料的重力载荷;
- d. 附属设备及隔热材料、衬里、管道、扶梯、平台等的重力载荷;
- e. 风载荷和地震载荷。

必要时,尚应考虑以下载荷的影响:

- f. 连接管道和其他部件引起的作用力;
- g. 由于热膨胀量不同而引起的作用力;
- h. 压力和温度变化的影响;
- i. 塔器在运输或吊装时承受的作用力。

3.3 厚度

3.3.1 厚度附加量

厚度附加量按式(3-1)确定:

$$C = C_1 + C_2 \dots\dots\dots (3-1)$$

式中: C ——厚度附加量,mm;

C_1 ——钢板或钢管的厚度负偏差,按相应钢板或钢管标准选取,mm;

当钢材的厚度负偏差不大于 0.25mm,且不超过名义厚度的 6% 时,可取 $C_1 = 0$ 。

C_2 ——腐蚀裕量,mm;

对于碳素钢和低合金钢,取 C_2 不小于 1mm;

对于不锈钢,当介质的腐蚀性极微时,取 $C_2 = 0$;

对裙座壳取 $C_2 = 2\text{mm}$;地脚螺栓取 $C_2 = 3\text{mm}$ 。

3.3.2 最小厚度

塔壳圆筒不包括腐蚀裕量的最小厚度:

- a. 碳素钢和低合金钢制塔器为 2/1000 的塔器内直径,且不小于 4mm;
- b. 不锈钢制塔器为 3mm。

3.3.3 计算厚度

计算厚度系指按 GB 150 各章及本标准第 6 章公式计算所得的厚度,不包括厚度附加量。

3.3.4 设计厚度

设计厚度系指计算厚度与腐蚀裕量之和。

3.3.5 名义厚度

名义厚度是将设计厚度加上钢材厚度负偏差后向上圆整至钢材标准规格的厚度,即是图样上标注的厚度。

对塔壳和裙座壳,在任何情况下,其名义厚度不得小于最小厚度与腐蚀裕量之和。

3.3.6 有效厚度 有效厚度系指名义厚度减去厚度附加量。

3.3.7 塔器制造单位应根据制造工艺条件,并考虑板材的实际厚度自行确定加工裕量,以确保塔器各部位的实际厚度不小于该部位的名义厚度减去钢材厚度负偏差。

3.4 许用应力

3.4.1 受压元件材料和螺栓材料在不同温度下的许用应力按第 4 章选取。许用应力系按材料各项强度数据分别除以表 3-1 或表 3-2 中的安全系数,取其中的最小值。

表 3-1 钢材安全系数

<div>材 料</div> <div>强度性能 安全系数</div>	常温下最低 抗拉强度 σ_b	常温或设计温度 下的屈服点 σ_s 或 σ_s'	设计温度下经 10 万小时 断裂的持久强度 σ_b		设计温度下经 10 万小时蠕变率 为 1% 的蠕变极限 σ_c
			平均值	最小值	
	n_b	n_s	$n(\sigma)$		n_c
碳素钢、低合金钢、铁 素体高合金钢	≥ 3.0	≥ 1.6	≥ 1.5	≥ 1.25	≥ 1.0
奥氏体高合金钢	—	$\geq 1.5^{1)}$	≥ 1.5	≥ 1.25	≥ 1.0

注: 1) 当部件的设计温度不到蠕变温度范围,且允许有微量的永久变形时,可适当提高许用应力,但不超过 $0.9\sigma_s'$ 。此规定不适用于法兰或其它有微量永久变形就产生泄漏或故障的场合。

表 3-2 螺栓安全系数

材 料	螺栓直径 mm	热处理状态	设计温度下屈服点 σ_s 的 n_s	设计温度下经 10 万小时断裂的持 久强度 σ_b 平均值的 n_b
碳素钢	$\leq M22$ M24~M48	热轧、正火	2.7 2.5	1.5
低合金钢、 马氏体高合金钢	$\leq M22$ M24~M48 $\geq M52$	调质	3.5 3.0 2.7	
奥氏体高合金钢	$\leq M22$ M24~M48	固溶	1.5 1.5	

3.4.2 当温度低于 20℃ 时,取 20℃ 的许用应力。

3.4.3 不锈复合钢板的许用应力

对于复层与基层完全贴合,且对接焊缝完全熔透的不锈复合钢板,在设计计算中如需计入复层材料的强度时,设计温度下的许用应力按式(3-2)确定:

$$[\sigma] = \frac{[\sigma]_1 \delta_1 + [\sigma]_2 \delta_2}{\delta_1 + \delta_2} \dots\dots\dots (3-2)$$

式中: $[\sigma]$ ——设计温度下复合钢板的许用应力,MPa;

δ_1 ——基层钢板的名义厚度,mm;

δ_2 ——复层材料的厚度,不计入腐蚀裕量,mm;

$[\sigma]_1$ ——设计温度下基层钢板的许用应力,MPa;

$[\sigma]_2$ ——设计温度下复层材料的许用应力,MPa。

3.4.4 许用轴向压缩应力

按 GB 150 第 1.7.5 条规定。

3.4.5 非受压元件材料的许用应力,除裙座壳和焊于受压壳体上的重要内件、栅板等支承件的许用应力按受压元件许用应力选取外,其余应按 GBJ 17 的规定选取。

3.5 焊缝系数

焊缝系数 ϕ 应根据塔器受压部分的焊缝型式和无损探伤检验要求选取。

3.5.1 双面焊或相当于双面焊的全熔透对接焊缝:

100%无损探伤 $\phi=1.00$;

局部无损探伤 $\phi=0.85$ 。

3.5.2 单面焊的对接焊缝,沿焊缝根部全长具有紧贴基本金属的垫板:

100%无损探伤 $\phi=0.90$;

局部无损探伤 $\phi=0.80$ 。

3.5.3 无法进行探伤的单面焊环向对接焊缝,无垫板:

$$\phi=0.60$$

此系数仅适用于厚度不超过 16mm,直径不超过 600mm 的塔壳环向焊缝。

3.6 压力试验

塔器制成后必须作压力试验,试验要求和项目应在图样上注明。

压力试验一般采用液压试验,试验液体按 GB 150 中的第 10.9.4.1 条的要求,对不适合进行液压试验的塔器,如塔体内不允许有微量残留液体,或由于结构原因不能充满液体的塔器,可以采用气压试验,作气压试验的塔器必须满足 GB 150 第 10.8.2.1 条和第 10.9.5 条的要求。

真空塔器以内压进行压力试验。

3.6.1 试验压力

液压试验

$$p_T = \begin{cases} 1.25p \frac{[\sigma]}{[\sigma]_t} \\ p+0.1 \end{cases} \quad \text{取两者的较大值} \quad (3-3)$$

气压试验

$$p_T = \begin{cases} 1.15p \frac{[\sigma]}{[\sigma]_t} \\ p+0.1 \end{cases} \quad \text{取两者的较大值} \quad (3-4)$$

式中: p_T ——试验压力,MPa;

p ——设计压力,MPa;

$[\sigma]$ ——塔器元件材料在试验温度下的许用应力,MPa;

$[\sigma]_t$ ——塔器元件材料在设计温度下的许用应力,MPa。

注: ①如因采用 $p+0.1$ 的试验压力,会导致必须增加塔壳厚度时,则允许适当降低试验压力,但不得低于 $1.25p \cdot$

$$\frac{[\sigma]}{[\sigma]_t} \text{ MPa (液压试验) 或 } 1.15p \frac{[\sigma]}{[\sigma]_t} \text{ MPa (气压试验)}.$$

②塔器各元件(圆筒、封头、接管、法兰及紧固件等)所用材料不同时,应取各元件 $\frac{[\sigma]}{[\sigma]_t}$ 之比值中最小者。

③塔器以卧置进行液压试验时,试验压力应为立置时的试验压力 p_T 加液柱静压力。

3.6.2 压力试验时的应力校核

压力试验时,圆筒的薄膜应力按式(3-5)计算:

$$\sigma_T = \frac{p_T(D_i + \delta_e)}{2\delta_e\phi} \dots\dots\dots (3-5)$$

式中: σ_T ——圆筒薄膜应力, MPa;

D_i ——圆筒内直径, mm;

p_T ——试验压力, MPa;

δ_e ——圆筒的有效厚度, mm;

ϕ ——圆筒的焊缝系数。

在液压试验时, 圆筒的薄膜应力 σ_T 不得超过试验温度下材料屈服点的 90% (校核时应计入液柱静压力); 在气压试验时, 此应力不得超过试验温度下材料屈服点的 80%。

3.7 致密性试验

如果图样有要求, 塔器还应进行致密性试验。致密性试验包括气密性试验和煤油渗漏试验, 具体要求及试验方法见 GB 150 第 10.9.6 条。

4 材料

4.1 受压元件

受压元件用钢的选用原则、钢材标准、热处理状态及许用应力等均按 GB 150 第 2 章“材料”、附录 A “材料的补充规定”、附录 C “低温压力容器”和附录 I “钢材高温性能”的规定。

4.2 非受压元件

4.2.1 非受压元件用钢必须是已列入材料标准的钢材。当为焊接件时, 应为焊接性能良好的, 且不会导致降低被焊件性能的钢材。

4.2.2 裙座壳用钢按受压元件用钢要求选取。

4.2.3 地脚螺栓一般选用 Q 235-A(A3) 或 16Mn。

Q 235-A(A3) 的许用应力取 $[\sigma]_b = 147\text{MPa}$; 16Mn 的许用应力取 $[\sigma]_b = 170\text{MPa}$ 。如采用其他碳素钢或优质碳素结构钢作地脚螺栓, 则取 $n_s \geq 1.6$ 。

4.2.4 基础环、盖板及筋板材料的许用应力, 对低碳钢取 $[\sigma]_b = 140\text{MPa}$ 。

5 结构

塔器结构示意图见图 5-1。

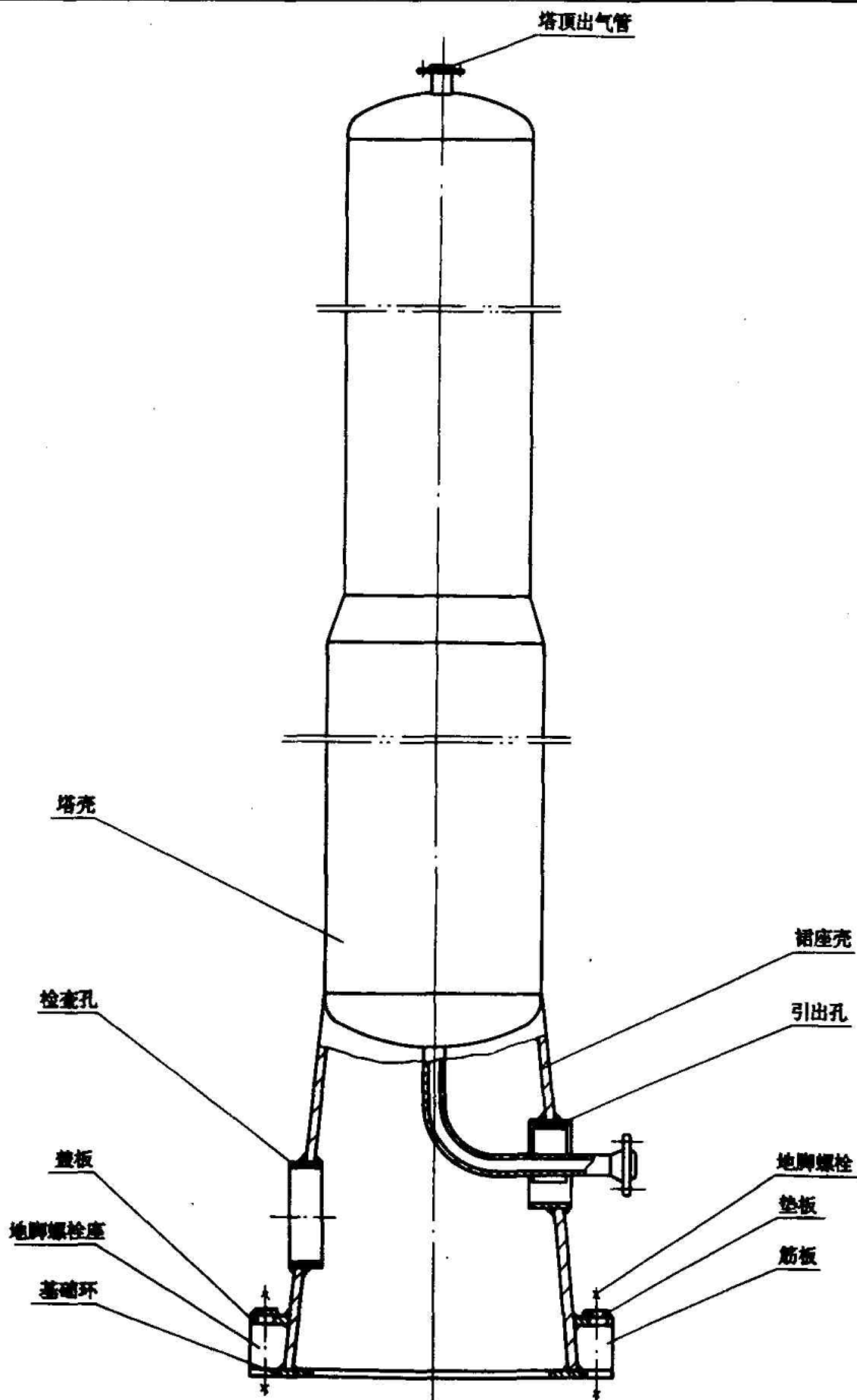


图 5-1

5.1 塔壳

塔壳各元件以及开孔等的结构型式和要求应满足 GB 150 的有关规定。

5.2 裙座

裙座有圆筒形和圆锥形两种型式。圆锥形裙座的半顶角不应超过 15° 。

5.3 裙座与塔壳的连接型式

裙座与塔壳的连接,可采用对接接头或搭接接头的型式。

5.3.1 采用对接接头型式时,裙座壳的外径宜与塔壳下封头的外径相等,裙座壳与塔壳下封头的连接焊缝须采用全焊透连续焊。其焊接结构及尺寸见图 5-2。

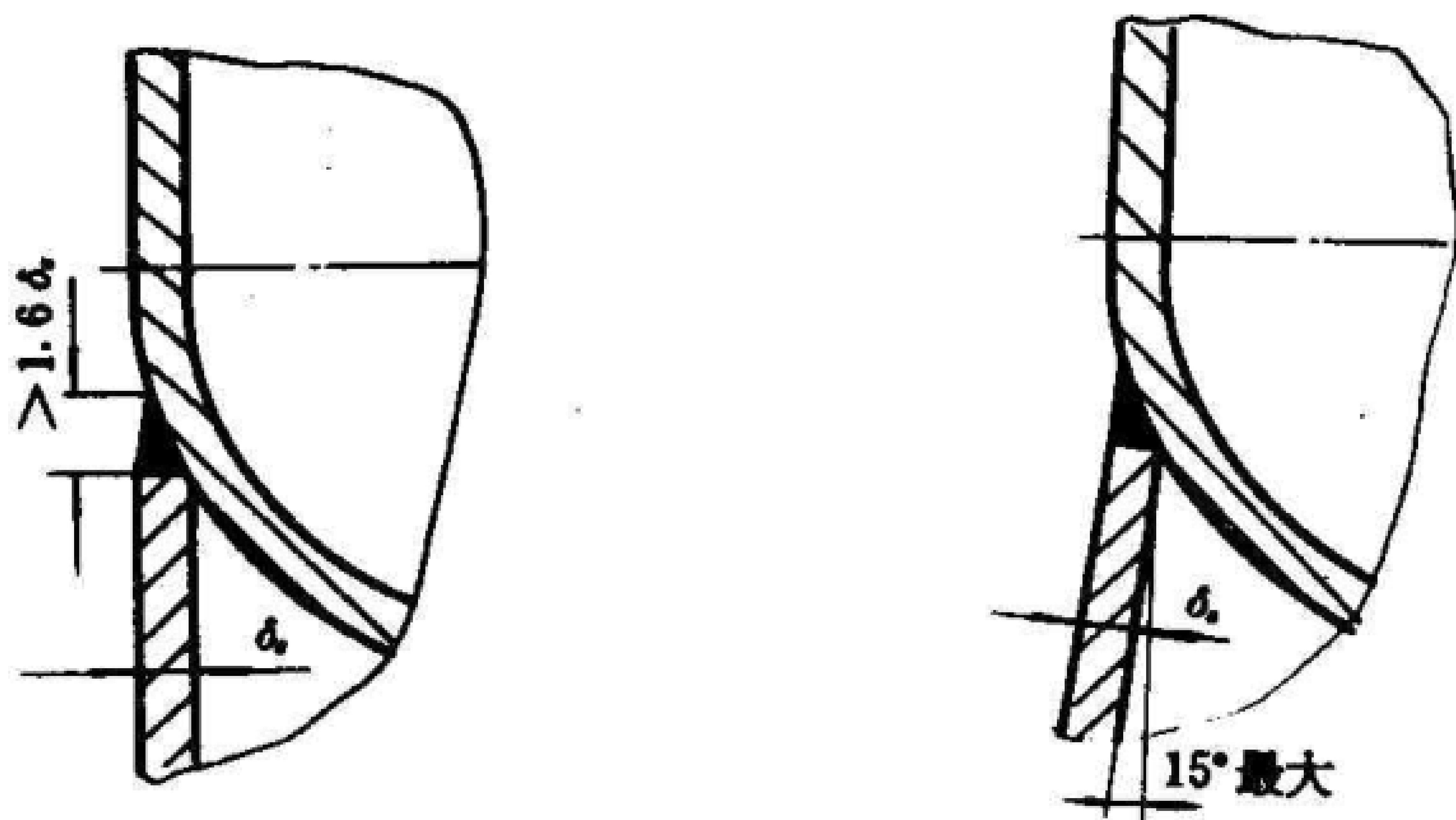


图 5-2

5.3.2 采用搭接接头型式时,搭接部位可在塔壳下封头,也可在圆筒壳上(见图 5-3)。具体要求如下:

a. 当与下封头搭接时,搭接部位必须位于下封头的直边段。此搭接焊缝与下封头的环向连接焊缝距离应在 $(1.7 \sim 3)\delta_s$ 范围内,且不得与下封头的环向连接焊缝连成一体。

b. 与圆筒壳搭接时,此搭接焊缝与下封头的环向连接焊缝距离不得小于 $1.7\delta_s$,下封头的环向连接焊缝必须磨平,且须 100% 探伤合格。

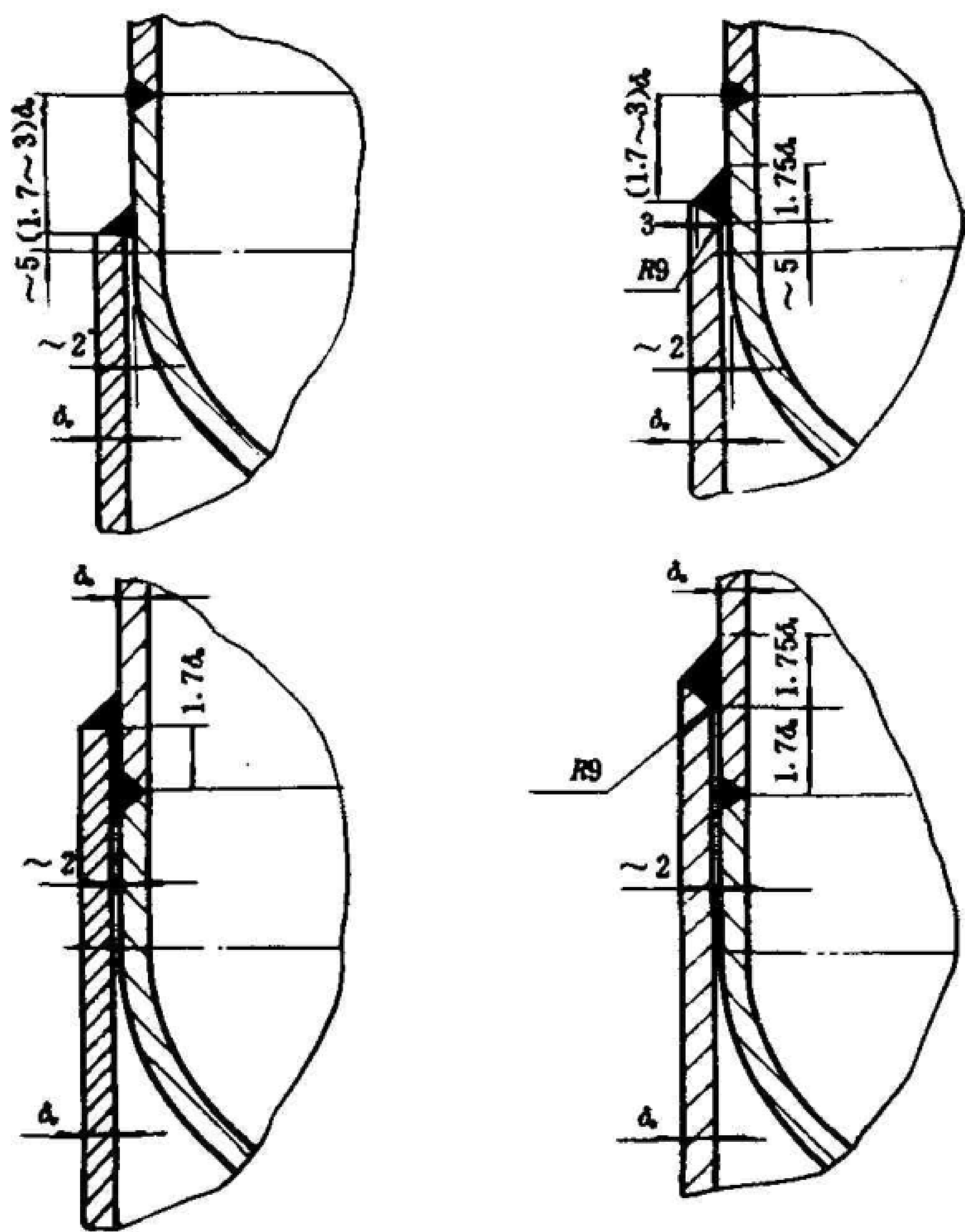


图 5-3

c. 搭接接头的角焊缝必须填满。

5.4 塔壳下封头由多块板拼接制成时,拼接焊缝处的裙座壳应开缺口,缺口型式及尺寸参见图 5-4 和表 5-1。

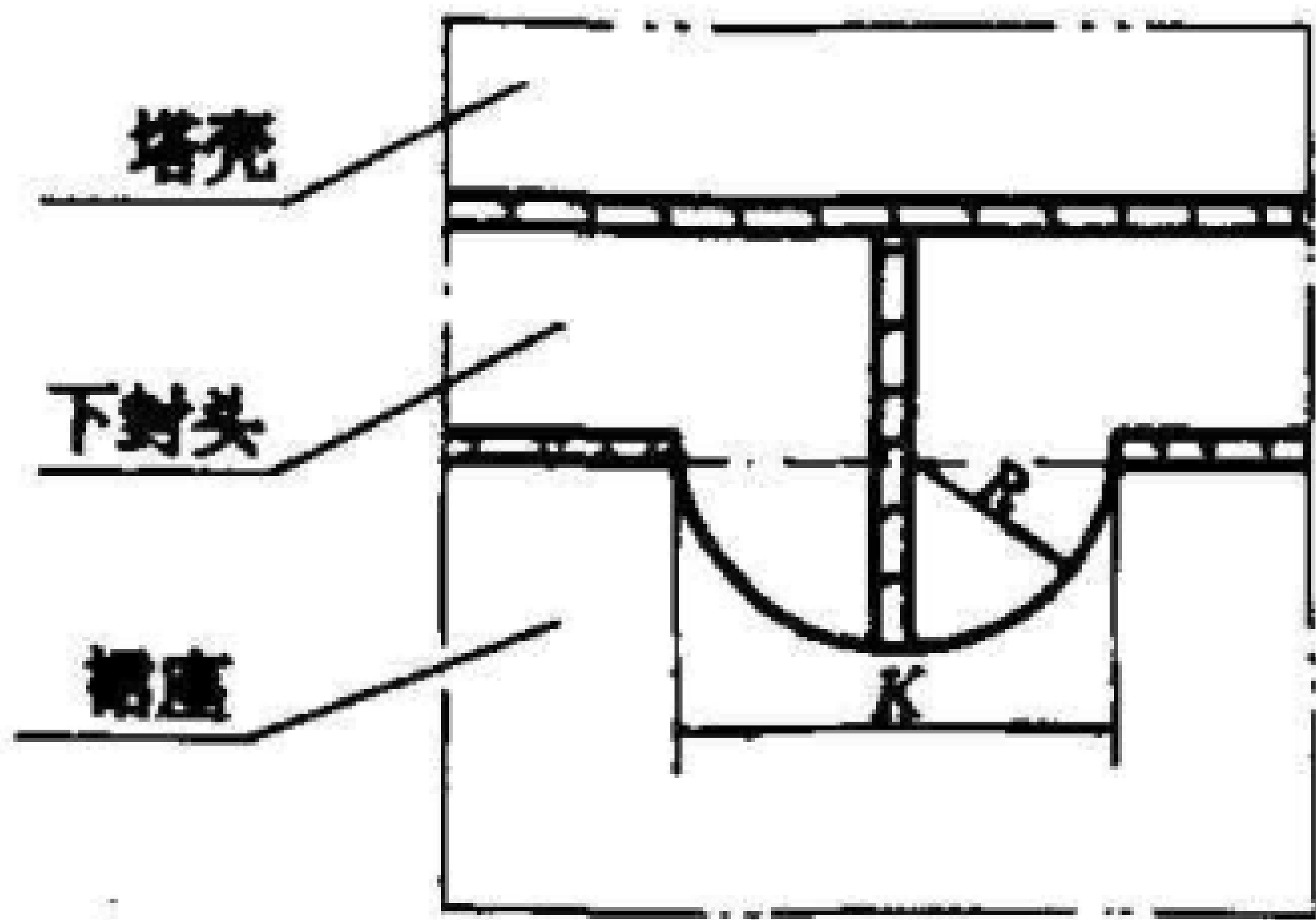


图 5-4

表 5-1 裙座壳开缺口尺寸 mm

封头厚度 δ_h	6~8	10~18	20~26	28~32
宽 度 K	70	100	120	140
缺口半径 R	35	50	60	70

5.5 排气孔或排气管

5.5.1 无保温(保冷、防火)层的裙座上部须开设排气孔,排气孔规格和数量按表 5-2 规定。当裙座上部开有图 5-4 所示缺口时,可不开设排气孔。

表 5-2

塔器内直径 D_i mm	600~1200	1400~2400	>2400
排气孔(管)规格	$\phi 80$ ($\phi 89 \times 4$)	$\phi 80$ ($\phi 89 \times 4$)	$\phi 100$ ($\phi 108 \times 4$)
排气孔(管)数量(个)	2	4	4
排气孔中心距离裙座顶端的距离 mm	140	180	220

5.5.2 有保温(保冷、防火)层的裙座上部应如图 5-5 所示均布设置排气管,排气管规格和数量按表 5-2 规定。

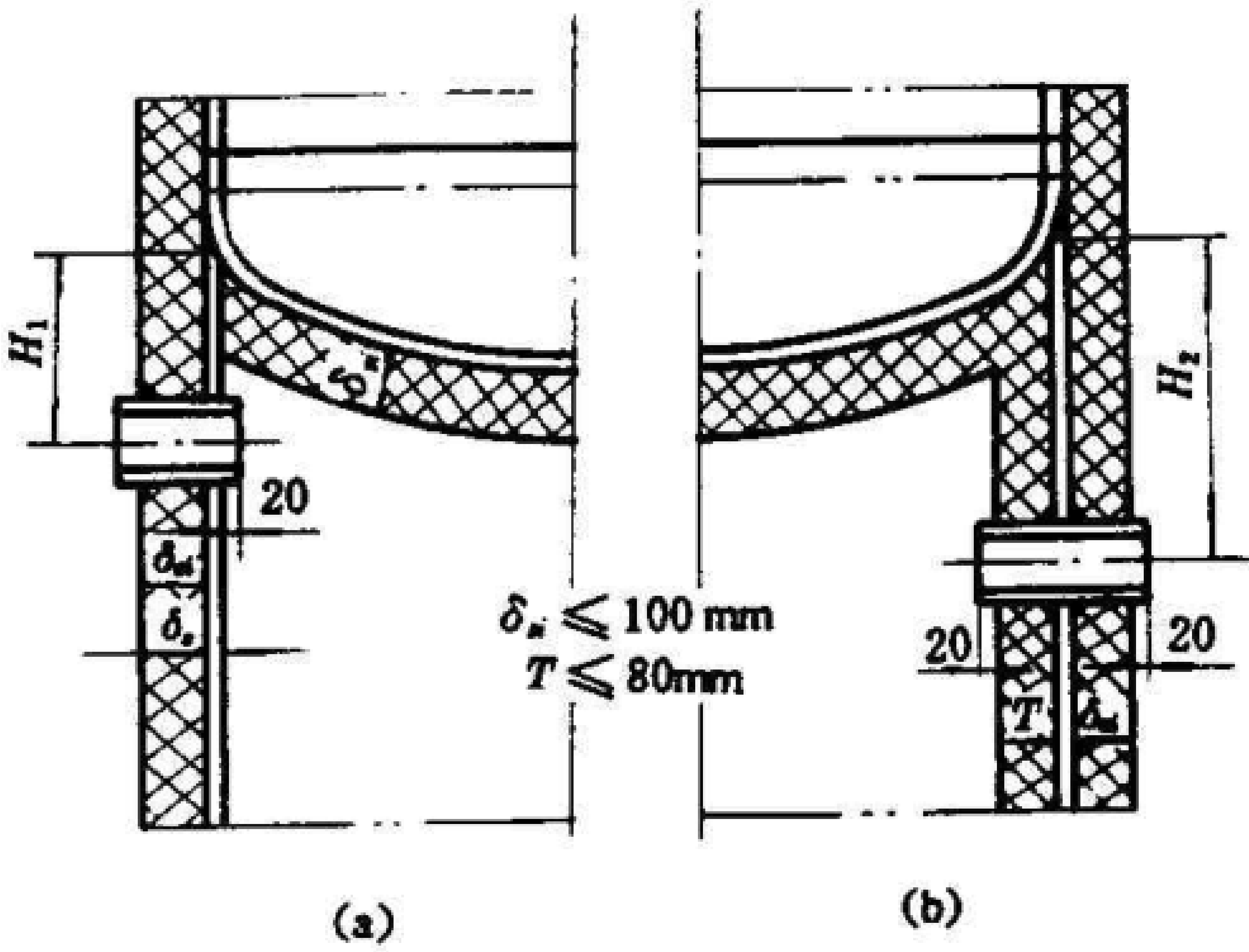


图 5-5

采用图 5-5(a)结构时,排气管中心线至裙座壳顶的距离为:

$$H_1 = b_1 + \delta_n \tag{5-1}$$

采用图 5-5(b)结构时,排气管中心线至裙座壳顶的距离为:

$$H_2 = b_2 + \delta_n \tag{5-2}$$

式中: H_1 、 H_2 ——排气管距裙座顶部的距离,mm;

b_1 、 b_2 ——与封头有关的参数,由表 5-3 查取,mm;

δ_n ——下封头保温(保冷、防火)层厚度,mm。

表 5-3 b_1 和 b_2 值 mm

塔器内径 D_i	b_1	b_2	塔器内径 D_i	b_1	b_2
600~1000	165	220	>3500~4000	225	360
>1000~1500	175	245	>4000~4500	230	380
>1500~2000	185	270	>4500~5000	235	400
>2000~2500	200	290	>5000~5500	240	410
>2500~3000	205	320	>5500~6000	255	430
>3000~3500	215	340			

5.6 引出孔

塔器底部接管一般需伸出裙座外壁,如图 5-6 所示。引出孔尺寸参见表 5-4。
引出孔的加强管上,一般应焊支承板支承(当介质温度低于等于-20℃时,宜采用木垫),支承板与引出管应预留有间隙以考虑热膨胀的需要。

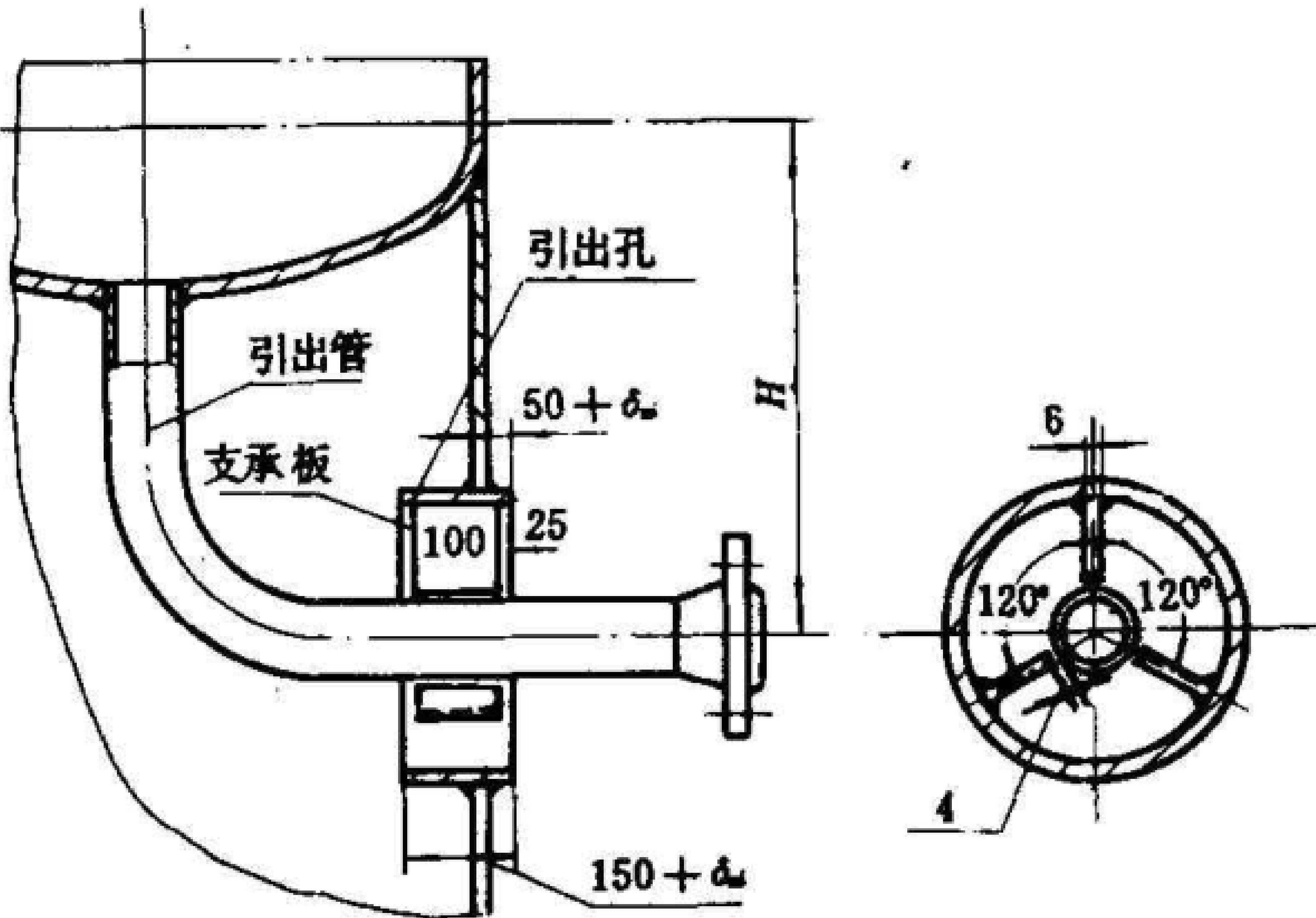


图 5-6

表 5-4 引出孔尺寸 mm

引出管直径		20	32	50	80
		25	40	70	100
引出孔	无缝钢管	$\phi 133 \times 4$	$\phi 159 \times 4.5$	$\phi 219 \times 6$	$\phi 273 \times 8$
	卷焊管	—	—	$\phi 200$	$\phi 250$


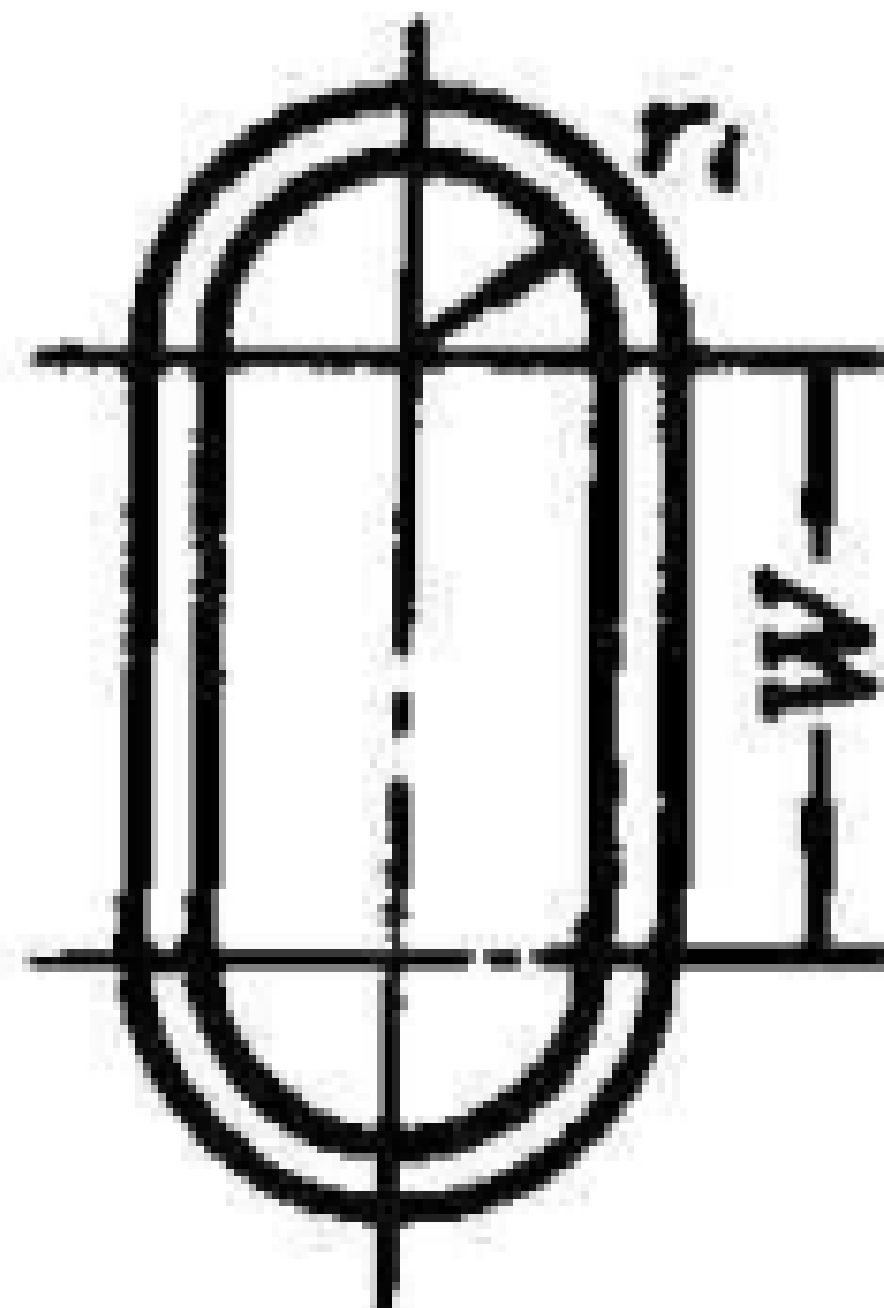
引出管直径		125	200	250	300	350
		150				
引出孔	无缝钢管	$\phi 325 \times 8$	—	—	—	—
	卷焊管	$\phi 300$	$\phi 350$	$\phi 400$	$\phi 450$	$\phi 500$

注:①引出管在裙座内用法兰连接时,通道内径必须大于法兰外径。
②引出管保温(冷)后的外径加上 25mm 大于表中的通道内径时,应适当加大通道内径。

5.7 检查孔

裙座应开设检查孔,检查孔分圆形和长圆形两种,其尺寸参见表 5-5。

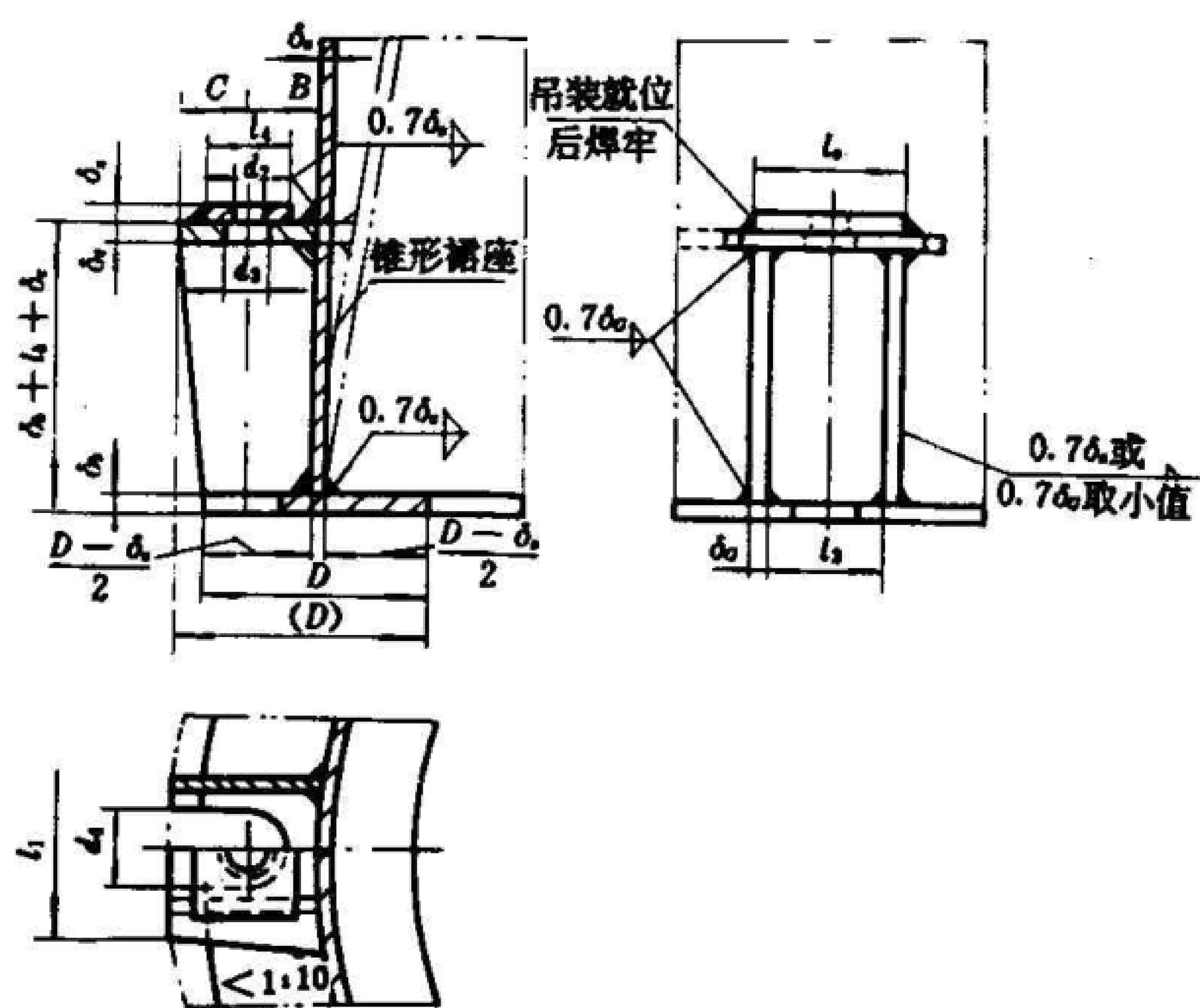
表 5-5 检查孔尺寸

塔器内径 D_i mm		≤ 700	800~1600	> 1600	
圆形		d_i mm	250	450	500
长圆形		r_i mm	—	200	225
		W mm	—	400	450
数量 (个)		1	1	1~2	

5.8 引出孔、检查孔的加强管与裙座壳的连接应采用全焊透结构。

5.9 地脚螺栓座

地脚螺栓座是指盖板、垫板和筋板的组合体,结构参见图 5-7 或图 5-8,尺寸参见表 5-6 或表 5-7。



注: $D = \frac{D_{ob} - D_{ib}}{2}$
 $B + C = l_2$

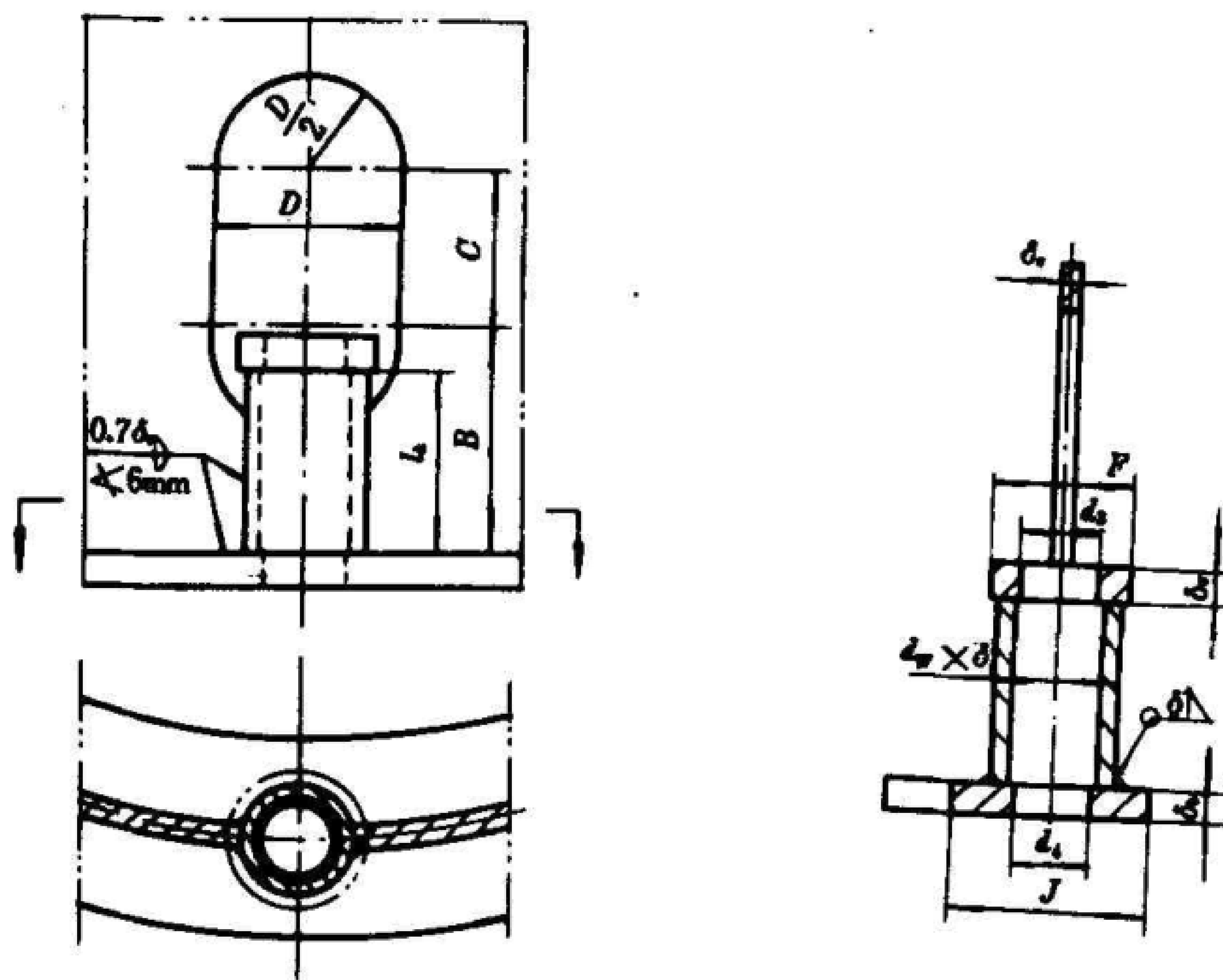
图 5-7

表 5-6 地脚螺栓座尺寸表

mm

螺栓规格	l_k	B	C	D (D)	l_3	δ_G	δ_C	δ_Z	l_1	l_3	l_4	d_2	d_3	d_4
M24×3	200	55	45	160 (190)	70	12	16	12	130	100	50	27	40	50
M27×3	200	60	50	170 (200)	75	12	18	12	140	110	60	30	43	50
M30×3.5	250	65	55	180 (210)	80	14	20	14	150	120	70	33	45	50
M36×4	250	70	60	200 (230)	85	16	22	16	160	130	80	39	50	50
M42×4.5	300	75	65	210 (240)	90	18	24	18	170	140	90	45	60	60
M48×5	300	80	70	220 (260)	100	20	26	20	190	150	100	51	65	70
M56×5.5	350	85	75	240 (280)	110	22	30	22	210	170	110	53	75	80
M64×6	350	90	80	260 (300)	120	22	32	24	220	180	120	67	85	90
M72×6	400	95	85	280 (320)	130	24	36	26	240	190	130	75	95	100
M76×6	400	100	90	290 (340)	135	24	40	26	250	200	140	79	100	110
M80×6	450	105	95	310 (360)	140	26	40	28	270	220	150	83	110	120
M90×6	450	115	105	330 (380)	150	28	46	30	280	230	160	93	120	130

- 5.9.1 盖板 可以分块,需要时也可连成环板。
- 5.9.2 需在盖板上设置垫板时,现场吊装就位后应将盖板与垫板焊牢。



注： $J = \frac{D_{\text{外}} - D_{\text{内}}}{2}$

图 5-8
表 5-7 图 5-8 所示结构尺寸

mm											
螺栓直径	$d_w \times \delta$	l_k	B	C	D	d_3	F	δ_c	d_1	J	δ_b
M24×3	49×8	55	70	90	80	26	60	12	32	80	须经计算确定，但不得小于18
M27×3	57×9	60	75	100	85	30	70	14	36	100	
M30×3.5	57×9	65	85	110	90	32	70	16	38	100	
M36×4	70×10	75	100	125	100	38	80	18	48	120	
M42×4.5	70×10	100	125	140	115	45	80	20	48	120	
M48×5	89×12	125	155	155	130	52	100	24	60	150	
M56×5.5	89×12	155	190	170	145	60	105	28	64	150	
M64×6	111×14	190	230	190	160	68	130	32	76	180	
M72×6	114×14	225	270	220	180	76	130	36	84	180	
M76×6	114×14	260	310	230	190	80	140	38	86	180	

- 尺寸J如因基础表面计算压应力大于基础表面许用压应力时，应适当加大。
- 5.10 吊柱及吊耳
- 5.10.1 吊柱 根据需要，在塔顶可设置吊柱。吊柱中心线与人孔中心线间应有合适的夹角，以使吊钩的垂直中心线可转到人孔附近，便于内件装入或卸出。
- 5.10.2 吊耳 塔器需设置吊耳时，吊耳的结构、位置及数量，应按塔体吊装方式及塔重确定。
- 6 计算

本章规定了塔器的强度及稳定校核。其中各受压元件(包括圆筒、封头、锥壳、开孔及开孔补强和法

兰等)应按 GB 150 相应章节设计。

6.1 符号说明

- B ——系数,按 GB 150 第 1.7.5 条确定,MPa;
 D_i ——塔壳内直径,mm;
 D_{ib} ——基础环内直径,mm;
 D_{ih} ——锥壳任意截面内直径,mm;
 D_o ——塔壳外直径,mm;
 D_{ob} ——基础环外直径,mm;
 D_{oa} ——裙座壳底部外直径,mm;
 E ——设计温度下材料的弹性模量,MPa;
 F_V^{I-I} ——塔器任意计算截面 I-I 处的垂直地震力,N;
 F_V^{0-0} ——塔器底截面处垂直地震力,N;
 g ——重力加速度,取 $g=9.81\text{m/s}^2$;
 H ——塔器高度,mm;
 H_i ——塔器顶部至第 i 段底截面的距离(见图 6-2),mm;
 h ——计算截面距地面高度(见图 6-3),mm;
 h_i ——塔器第 i 段集中质量距地面的高度(见图 6-3),mm;
 h_K ——任意计算截面 I-I 以上集中质量 m_K 距地面的高度(见图 6-3),mm;
 M_e ——偏心质量引起的弯矩,N·mm;
 M_E^{I-I} ——任意计算截面 I-I 处的地震弯矩,N·mm;
 M_E^{0-0} ——底部截面 0-0 处的地震弯矩,N·mm;
 M_{\max}^{I-I} ——任意计算截面 I-I 处的最大弯矩,N·mm;
 M_{\max}^{0-0} ——底部截面 0-0 处的最大弯矩,N·mm;
 M_W^{I-I} ——任意计算截面 I-I 处的风弯矩,N·mm;
 M_W^{0-0} ——底部截面 0-0 处的风弯矩,N·mm;
 m_e ——偏心质量,kg;
 m_i ——塔器第 i 段的操作质量,kg;
 m_{\max} ——塔器最大质量,kg;
 m_{\min} ——塔器最小质量,kg;
 m_0 ——塔器操作质量,kg;
 m_0^{I-I} ——计算截面 I-I 以上的操作质量,kg;
 p ——设计压力,MPa;
 T_1 ——塔器基本自振周期,s;
 T_i ——塔器第 i 阶振型自振周期,s;
 β ——锥壳半顶角,(°);
 δ_b ——基础环计算厚度,mm;
 δ_c ——圆筒或锥壳的有效厚度,mm;
 δ_{ch} ——封头设定的有效厚度,mm;
 δ_{ca} ——各计算截面设定的圆筒或锥壳有效厚度,mm;
 δ_{sa} ——裙座壳设定的有效厚度,mm;
 σ_s ——常温下塔壳或裙座壳材料的屈服点,MPa;
 $[\sigma]$ ——设计温度下塔壳材料的许用应力,MPa;

$[\sigma]_s$ ——设计温度下裙座壳材料的许用应力, MPa;

$[\sigma]_a$ ——设计温度下塔壳或裙座壳材料的许用轴向压应力, MPa;

ϕ ——焊缝系数, 按 GB 150 第 1.8 条选取。

6.2 计算步骤

a. 根据 GB 150 相应章节, 按压力确定圆筒及封头的有效厚度 δ_s 和 δ_{sh} ;

b. 根据地震或风载的需要, 选取若干计算截面(包括所有危险截面), 并考虑制造、运输、安装的要求, 设定各截面处圆筒有效厚度 δ_a 与裙座壳有效厚度 δ_{sa} 。 δ_a 应不小于 δ_s , δ_{sa} 应不小于 6mm;

c. 按第 6.3~6.10 条的规定依次进行校核和计算, 并应满足各相应要求, 否则须重新设定圆筒的有效厚度 δ_a , 直至满足全部校核条件为止。

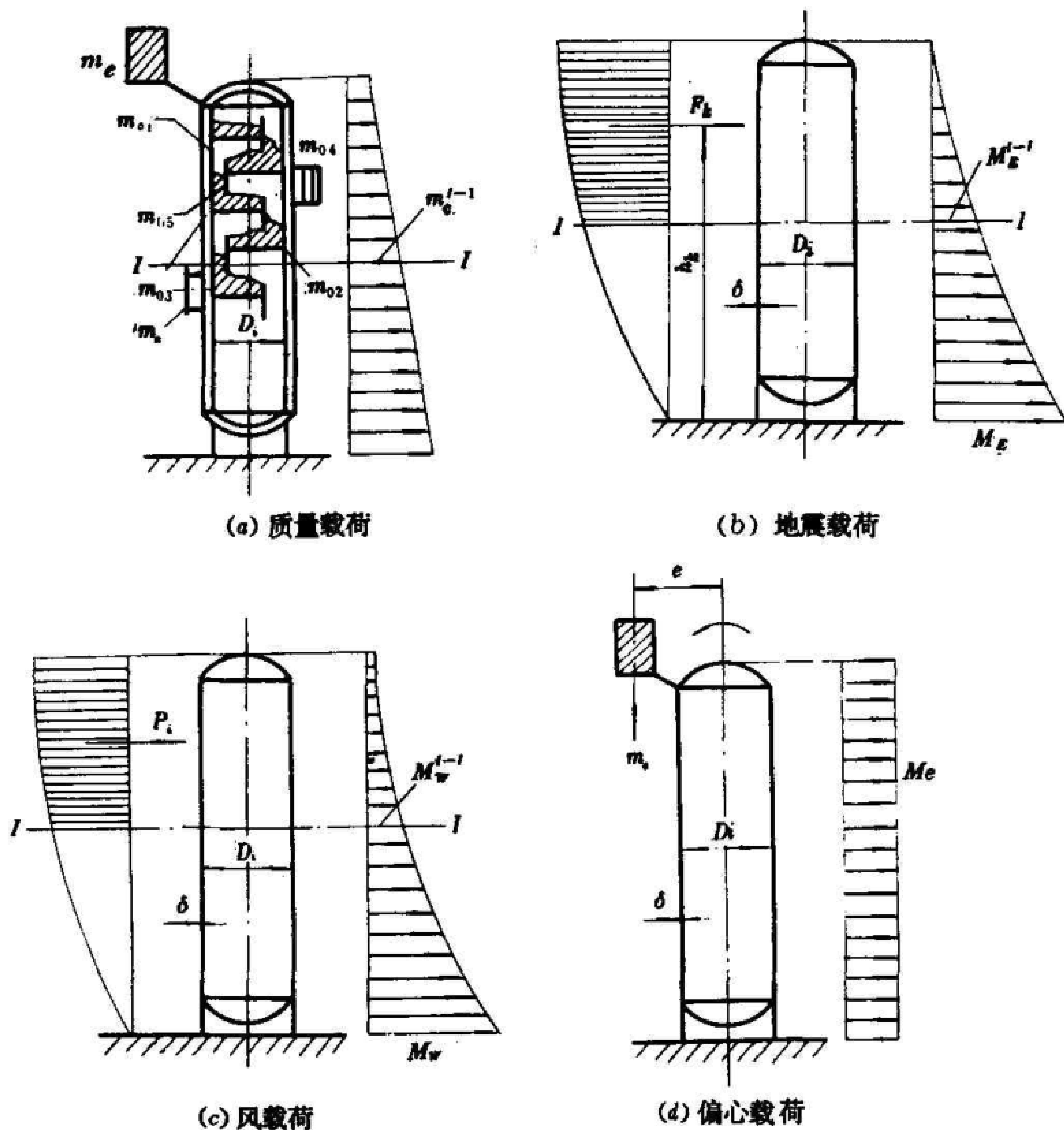


图 6-1 塔器各种载荷示意图

6.3 塔器质量

塔器的操作质量

$$m_0 = m_{01} + m_{02} + m_{03} + m_{04} + m_{05} + m_s + m_e \quad (6-1)$$

塔器的最大质量

$$m_{\max} = m_{01} + m_{02} + m_{03} + m_{04} + m_s + m_w + m_e \quad (6-2)$$

塔器的最小质量

$$m_{\min} = m_{01} + 0.2m_{02} + m_{03} + m_{04} + m_s + m_w \quad (6-3)$$

式中: m_{01} ——塔壳和裙座质量, kg;

m_{02} ——内件质量, kg;

m_{03} ——保温材料质量, kg;

m_{04} ——平台、扶梯质量, kg;

m_{05} ——操作时塔内物料质量, kg;

m_s ——人孔、接管、法兰等附属件质量, kg;

m_w ——液压试验时, 塔器内充液质量, kg。

0.2 m_{02} 系考虑内件焊在塔壳上的部份质量, 如塔盘支持圈、降液管等。当空塔吊装时, 如未装保温层、平台、扶梯, 则 m_{\min} 应扣除 m_{03} 和 m_{04} 。

6.4 自振周期

6.4.1 等直径、等厚度塔器的基本自振周期按式(6-4)计算

$$T_1 = 90.33H \sqrt{\frac{m_0 H}{E \delta_e D_e^3}} \times 10^{-3} \quad (6-4)$$

6.4.2 不等直径或不等厚度塔器自振周期

6.4.2.1 塔器基本振型自振周期, 可将直径、厚度沿高度变化的塔器视为一个多质点体系, 如图 6-2 所示。其基本自振周期按式(6-5)计算。其中直径和厚度不变的每段塔器质量, 可处理为作用在该段高度二分之一处的集中质量。

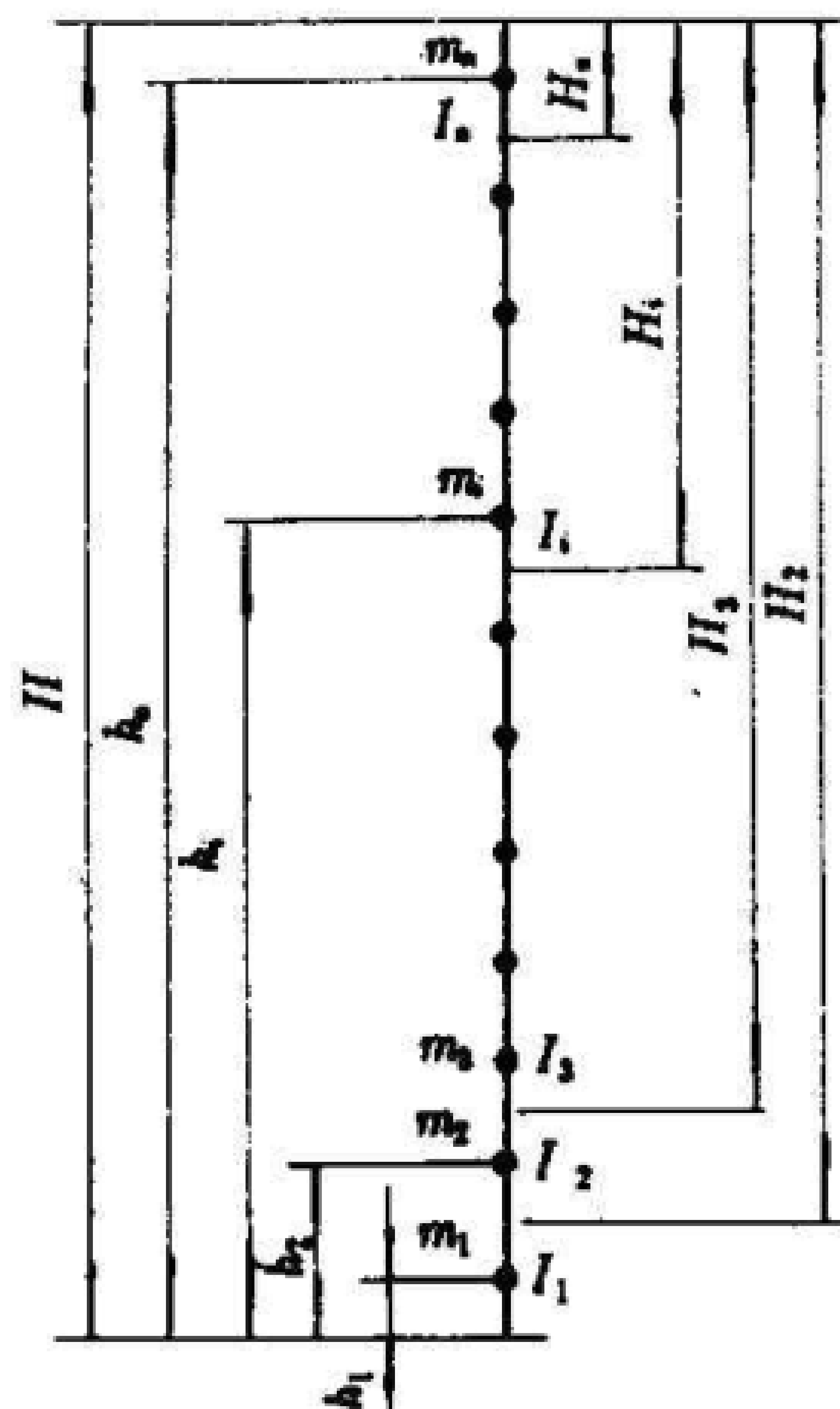


图 6-2

$$T_1 = 114.8 \sqrt{\sum_{i=1}^n m_i \left(\frac{h_i}{H}\right)^3 \left(\sum_{i=1}^n \frac{H_i^3}{E_i I_i} - \sum_{i=2}^n \frac{H_i^3}{E_{i-1} I_{i-1}}\right)} \times 10^{-3} \quad (6-5)$$

式中: E_i, E_{i-1} ——第 i 段、第 $i-1$ 段的材料在设计温度下的弹性模量, MPa;

I_i, I_{i-1} ——第 i 段、第 $i-1$ 段的截面惯性矩, mm^4 ;

$$\text{圆筒段 } I_i = \frac{\pi}{8} (D_i + \delta_{ei})^3 \delta_{ei} \quad (6-6)$$

圆锥段 $I_1 = \frac{\pi D_{ie}^2 D_{if}^2 \delta_{ei}}{4(D_{ie} + D_{if})}$ (6-7)

D_{ie} ——锥壳大端内直径,mm;
 D_{if} ——锥壳小端内直径,mm。

6.4.2.2 塔器高振型自振周期按附录 A 计算。

6.5 地震载荷

6.5.1 水平地震力 任意高度 h_K 处的集中质量 m_K 引起的基本振型水平地震力按式(6-8)计算:

$F_{K1} = C_2 \alpha_1 \eta_{K1} m_K g$ (6-8)

式中: F_{K1} ——集中质量 m_K 引起的基本振型水平地震力, N;

C_2 ——综合影响系数,取 $C_2 = 0.5$;

m_K ——距地面 h_K 处的集中质量(见图 6-3), kg;

α_1 ——对应于塔器基本自振周期 T_1 的地震影响系数 α 值;

α ——地震影响系数,查图 6-4。图中的曲线部分按公式

$\alpha = (\frac{T_g}{T})^{0.9} \alpha_{max}$ (6-9)

计算,但不得小于 $0.2 \alpha_{max}$;

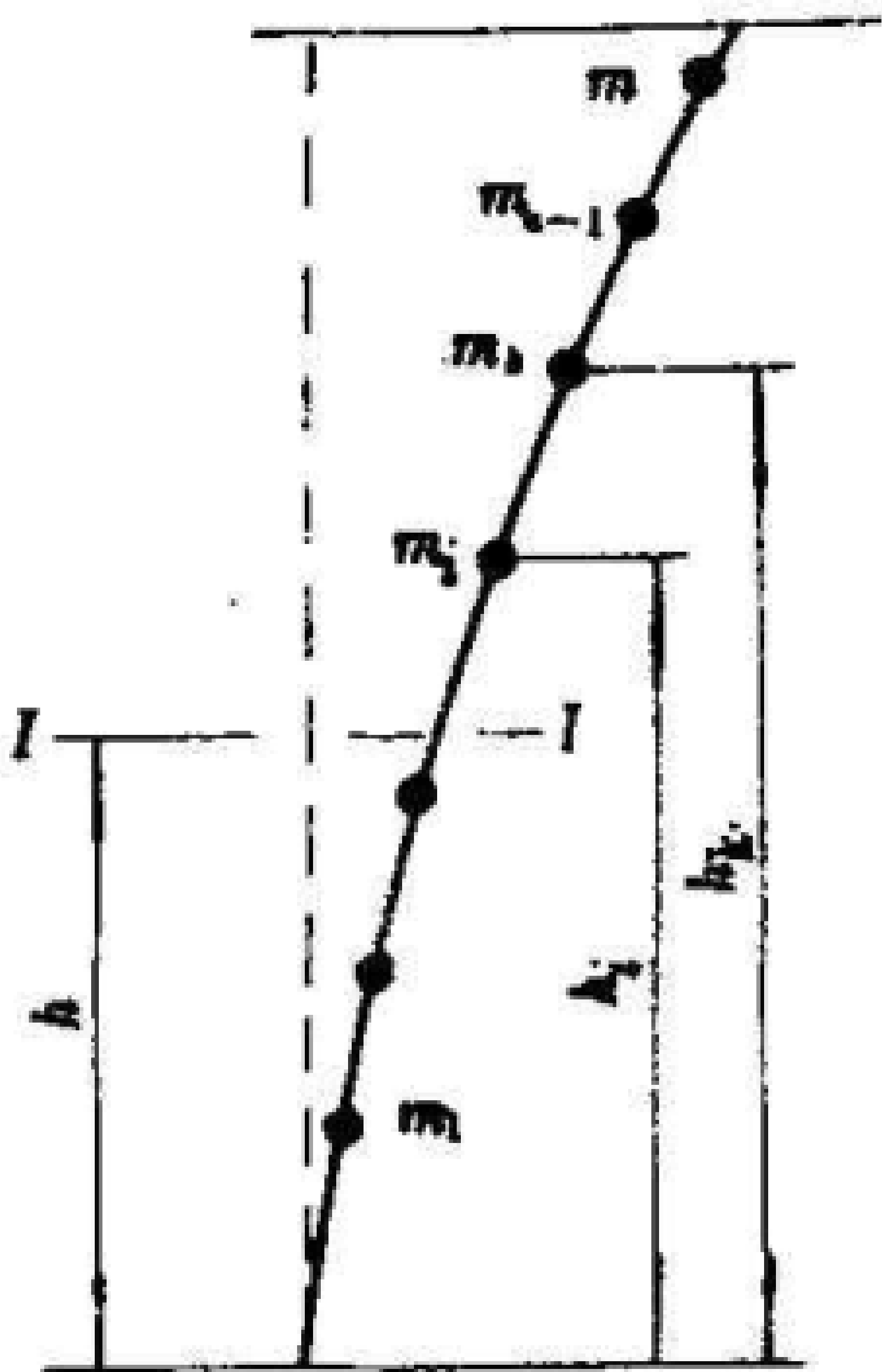


图 6-3

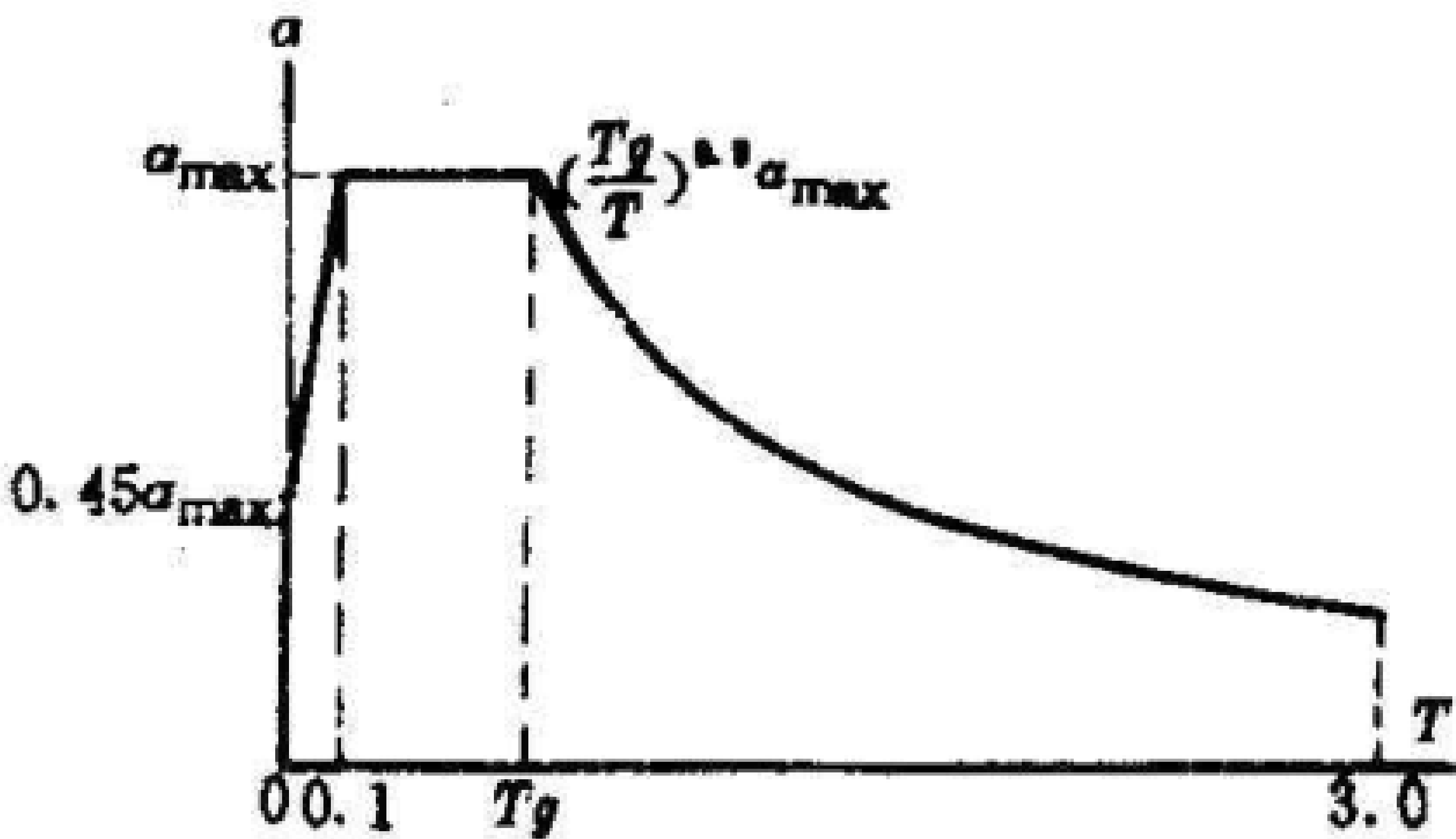


图 6-4

α_{max} ——地震影响系数的最大值,见表 6-1。

表 6-1 地震影响系数 α 的最大值

设 计 烈 度	7	8	9
α_{max}	0.23	0.45	0.90

η_{K1} ——基本振型参与系数;

$\eta_{K1} = \frac{h_K^{1.5} \sum_{i=1}^n m_i h_i^{1.5}}{\sum_{i=1}^n m_i h_i^3}$ (6-10)

T_g ——各类场地土的特征周期,见表 6-2。

表 6-2 场地土的特征周期 T_g

场 地 土	近 震	远 震
I	0.2	0.25
II	0.3	0.40
III	0.4	0.55
IV	0.65	0.85

注：场地土分类及近震、远震见附录 B。

6.5.2 垂直地震力

设防烈度为 8 度或 9 度区的塔器应考虑上下两个方向垂直地震力作用，如图 6-5 所示。

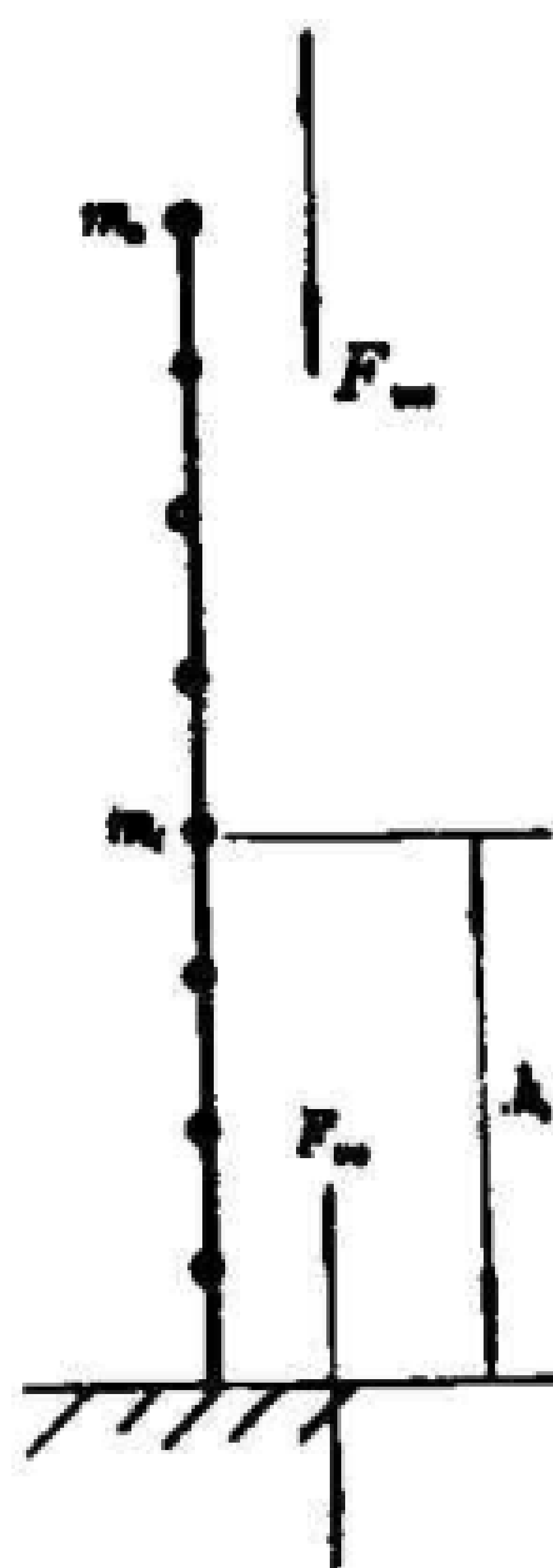


图 6-5

塔器底截面处的垂直地震力按式(6-11)计算：

$$F_v^{0-0} = \alpha_{vmax} \cdot m_{eq} \cdot g \quad (6-11)$$

式中： α_{vmax} ——垂直地震影响系数最大值，取 $\alpha_{vmax} = 0.65\alpha_{max}$ ；

m_{eq} ——塔器的当量质量，取 $m_{eq} = 0.75m_0, \text{kg}$ 。

任意质量 i 处垂直地震力按式(6-12)计算：

$$F_v^{1-1} = \frac{m_i h_i}{\sum_{k=1}^n m_k \cdot h_k} F_v^{0-0} (i=1, 2, \dots, n) \quad (6-12)$$

6.5.3 地震弯矩

塔器任意计算截面 $I-I$ 的基本振型地震弯矩按式(6-13)计算(见图 6-3)：

$$M_{E1}^{1-1} = \sum_{k=1}^n F_{k1} (h_k - h) \quad (6-13)$$

式中： M_{E1}^{1-1} ——任意计算截面 $I-I$ 的基本振型地震弯矩， $N \cdot \text{mm}$ 。

对于等直径、等厚度塔器的任意截面 $I-I$ 和底截面 $0-0$ 的基本振型地震弯矩分别按式(6-14)和式(6-15)计算：

$$M_{E1}^{1-1} = \frac{8C_z \alpha_1 m_0 g}{175H^{2.5}} (10H^{3.5} - 14H^{2.5} \cdot h + 4h^{3.5}) \quad (6-14)$$

$$M_{E1}^{c_0} = \frac{16}{35} C_z \alpha_1 m_0 g H \tag{6-15}$$

当塔器 $H/D > 15$ ，或高度大于等于 20m 时，还须考虑高振型的影响，在进行稳定或其他验算时，地震弯矩按附录 A 计算，也可按式(6-16)计算：

$$M_E^{c_1} = 1.25 M_{E1}^{c_1} \tag{6-16}$$

6.6 风载荷

6.6.1 水平风力 两相邻计算截面间的水平风力按式(6-17)计算：

$$\begin{aligned} P_1 &= K_1 K_{21} q_0 f_1 l_1 D_{e1} \times 10^{-6} \\ P_2 &= K_1 K_{22} q_0 f_2 l_2 D_{e2} \times 10^{-6} \\ P_i &= K_1 K_{2i} q_0 f_i l_i D_{ei} \times 10^{-6} \end{aligned} \tag{6-17}$$

式中： $P_1、P_2、\dots、P_i$ ——塔器各计算段的水平风力，N；

$D_{e1}、D_{e2}、\dots、D_{ei}$ ——塔器各计算段的有效直径，mm；

当笼式扶梯与塔顶管线布置成 180°时：

$$D_{ei} = D_{oi} + 2\delta_{si} + K_3 + K_4 + d_0 + 2\delta_{ps} \tag{6-18}$$

当笼式扶梯与塔顶管线布置成 90°时，取下列两式中较大者：

$$D_{ei} = D_{oi} + 2\delta_{si} + K_3 + K_4 \tag{6-19}$$

$$D_{ei} = D_{oi} + 2\delta_{si} + K_4 + d_0 + 2\delta_{ps} \tag{6-20}$$

D_{oi} ——塔器各计算段的外径，mm；

d_0 ——塔顶管线外径，mm；

f_i ——风压高度变化系数，按表 6-3 选取：

表 6-3 风压高度变化系数 f_i

地面粗糙度类别		A *	B	C
f_i	距地面高度 H_{it}			
5		1.17	0.80	0.54
10		1.38	1.00	0.71
15		1.52	1.14	0.84
20		1.63	1.25	0.94
30		1.80	1.42	1.11
40		1.92	1.56	1.24
50		2.03	1.67	1.36
60		2.12	1.77	1.46
70		2.20	1.86	1.55
80		2.27	1.95	1.64
90		2.34	2.02	1.72
100		2.40	2.09	1.79

注：A 类地面粗糙度系指近海海面、海岛、海岸、湖岸及沙漠地区；B 类系指田野、乡村、丛林、丘陵以及房屋比较稀疏的中小城镇和大城市郊区；C 类系指有密集建筑群的大城市市区。

* 若采用当地气象部门资料时，对 A 类地区高度变化系数 f_i 应取 B 类地区系数；B 类和 C 类地区不变。

h_{it} ——塔器第*i*段顶截面距地面的高度,m;

K_1 ——体型系数,取 $K_1=0.7$;

$K_{z1}, K_{z2}, \dots, K_{zi}$ ——塔器各计算段的风振系数,当塔高 $H \leq 20\text{m}$ 时,取 $K_z=1.70$,当 $H > 20\text{m}$ 时,按式(6-21)计算:

$$K_{zi}=1+\frac{\xi v_i \phi_{zi}}{f_i}$$

(6-21)

ξ ——脉动增大系数,按表 6-4 查取;

表 6-4 脉动增大系数 ξ

$q_1 T_1^2 (\text{NS}^2/\text{m}^2)$	10	20	40	60	80	100
ξ	1.47	1.57	1.69	1.77	1.83	1.88
$q_1 T_1^2 (\text{NS}^2/\text{m}^2)$	200	400	600	800	1000	2000
ξ	2.04	2.24	2.36	2.46	2.53	2.80
$q_1 T_1^2 (\text{NS}^2/\text{m}^2)$	4000	6000	8000	10000	20000	30000
ξ	3.09	3.28	3.42	3.54	3.91	4.14

注:计算 $q_1 T_1^2$ 时,对 B 类 $q_1=q_0$,对 A 类 $q_1=1.38q_0$,对 C 类 $q_1=0.71q_0$ 。

v_i ——第*i*段脉动影响系数,按表 6-5 查取;

表 6-5 脉动影响系数 v_i

<div><div>高度 h_{it} m</div><div>v_i</div></div> <div>粗糙度类别</div>	10	20	40	60	80	100
A	0.78	0.83	0.87	0.89	0.89	0.89
B	0.72	0.79	0.85	0.88	0.89	0.90
C	0.66	0.74	0.82	0.86	0.88	0.89

ϕ_{zi} ——第*i*段振型系数,根据 h_i/H 与 u 查表 6-6。

表 6-6 振型系数 ϕ_{zi}

<div><div>ϕ_{zi}</div><div>u</div></div> <div>相对高度 h_{it}/H</div>	1	0.8	0.6
0.1	0.02	0.02	0.01
0.2	0.07	0.06	0.05
0.3	0.15	0.12	0.11
0.4	0.24	0.21	0.19
0.5	0.35	0.32	0.29
0.6	0.48	0.44	0.41
0.7	0.60	0.57	0.55
0.8	0.73	0.71	0.69

续表 6-6

<div><div><div>ϕ_2</div><div>u</div></div><div>相对高度 h_{it}/H</div></div>	1	0.8	0.6
0.9	0.87	0.86	0.85
1.0	1.00	1.00	1.00

注：表中 u 为顶、底有效直径之比。

K_3 ——笼式扶梯当量宽度；当无确切数据时，可取 $K_3=400\text{mm}$ ；

K_4 ——操作平台当量宽度， mm ；

$$K_4=\frac{2\sum A}{l_0}$$

(6-22)

$\sum A$ ——第 i 段内平台构件的投影面积(不计空档投影面积)， mm^2 ；

l_i ——第 i 计算段长度(见图 6-6)， mm ；

l_0 ——操作平台所在计算段的长度， mm ；

q_0 ——基本风压值，各地区的基本风压值见附录 C“全国基本风压分布图”或按当地气象部门资料，但均不应小于 250N/m^2 。

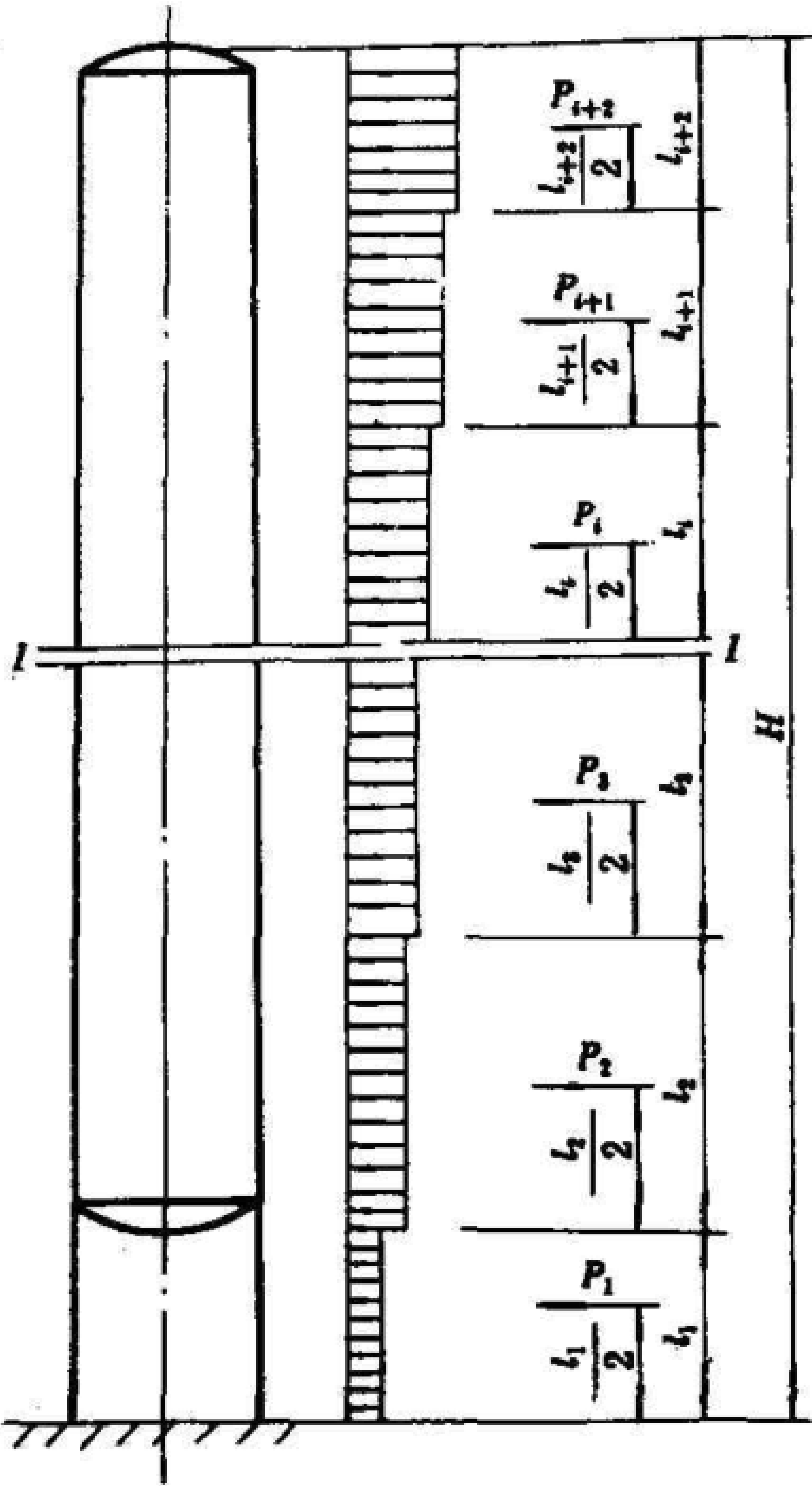


图 6-6 风弯矩计算简图

δ_{ps} ——管线保温层厚度， mm ；

δ_n ——塔器第 i 段保温层厚度, mm。

6.6.2 风弯矩 塔器任意计算截面 I-I 处的风弯矩按式(6-23)计算:

$$M_w^{I-I} = P_i \frac{l_i}{2} + P_{i+1} (l_i + \frac{l_{i+1}}{2}) + P_{i+2} (l_i + l_{i+1} + \frac{l_{i+2}}{2}) + \dots \quad (6-23)$$

塔器底截面 0-0 处的风弯矩按式(6-24)计算:

$$M_w^{0-0} = P_1 \frac{l_1}{2} + P_2 (l_1 + \frac{l_2}{2}) + P_3 (l_1 + l_2 + \frac{l_3}{2}) + \dots \quad (6-24)$$

6.7 偏心弯矩 偏心质量引起的弯矩按式(6-25)计算(见图 6-1(d)):

$$M_e = m_e g e \quad (6-25)$$

式中: e ——偏心质量重心至塔器中心线的距离, mm。

6.8 最大弯矩 塔器任意计算截面 I-I 处的最大弯矩按式(6-26)计算:

$$M_{\max}^{I-I} = \begin{cases} M_w^{I-I} + M_e \\ M_E^{I-I} + 0.25M_w^{I-I} + M_e \end{cases} \quad \text{取其中较大值} \quad (6-26)$$

塔器底部截面 0-0 处的最大弯矩按式(6-27)计算:

$$M_{\max}^{0-0} = \begin{cases} M_w^{0-0} + M_e \\ M_E^{0-0} + 0.25M_w^{0-0} + M_e \end{cases} \quad \text{取其中较大值} \quad (6-27)$$

6.9 圆筒轴向应力校核

6.9.1 圆筒轴向应力 圆筒任意计算截面 I-I 处的轴向应力分别按式(6-28)、式(6-29)和式(6-30)计算:

由内压或外压引起的轴向应力

$$\sigma_1 = \frac{pD_i}{4\delta_{ei}} \quad (6-28)$$

式中: σ_1 ——由内压或外压引起的轴向应力, MPa;

其中设计压力 p 取绝对值。

操作或非操作时重力及垂直地震力引起的轴向应力

$$\sigma_2 = \frac{m_0^{I-I} g \pm F_v^{I-I}}{\pi D_i \delta_{ei}} \quad (6-29)$$

式中: σ_2 ——重力及垂直地震力引起的轴向应力, MPa;

其中 F_v^{I-I} 仅在最大弯矩为地震弯矩参与组合时计入此项。

弯矩引起的轴向应力

$$\sigma_3 = \frac{4M_{\max}^{I-I}}{\pi D_i^2 \delta_{ei}} \quad (6-30)$$

式中: σ_3 ——最大弯矩引起的轴向应力, MPa。

6.9.2 圆筒稳定校核

圆筒许用轴向压应力按式(6-31)确定:

$$[\sigma]_{cr} = \begin{cases} KB \\ K[\sigma] \end{cases} \quad \text{取其中较小值} \quad (6-31)$$

式中: K ——载荷组合系数, 取 $K=1.2$ 。

圆筒最大组合压应力按式(6-32)或式(6-33)校核:

$$\text{对内压塔器} \quad \sigma_2 + \sigma_3 \leq [\sigma]_{cr} \quad (6-32)$$

$$\text{对外压塔器} \quad \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \leq [\sigma]_{cr} \quad (6-33)$$

6.9.3 圆筒拉应力校核

圆筒最大组合拉应力按式(6-34)或式(6-35)校核:

$$\text{对内压塔器} \quad \sigma_1 - \sigma_2 + \sigma_3 \leq K[\sigma] \phi \quad (6-34)$$

对外压塔器

$$-\sigma_2 + \sigma_3 \leq K[\sigma]'\phi \quad (6-35)$$

式中: K ——载荷组合系数, 取 $K=1.2$ 。6.9.4 如不能满足 6.9.2 和 6.9.3 条件时, 须重新设定有效厚度 δ_{ei} , 重复上述计算, 直至满足要求。

6.10 锥壳轴向应力校核

6.10.1 锥壳轴向应力

锥壳任意计算截面 I-I 处的轴向应力分别按式(6-36)、式(6-37)和式(6-38)计算:

由内压或外压引起的轴向应力

$$\sigma_1 = \frac{pD_{ih}}{4\delta_{ei}} \cdot \frac{1}{\cos\beta} \quad (6-36)$$

式中: σ_1 ——由内压或外压引起的轴向应力。其中设计压力 p 取绝对值。

操作或非操作时重力及垂直地震力引起的轴向应力

$$\sigma_2 = \frac{m_0^{1-1} g \pm F_v^{1-1}}{\pi D_{ih} \delta_{ei}} \cdot \frac{1}{\cos\beta} \quad (6-37)$$

式中: σ_2 ——重力及垂直地震力引起的轴向应力, MPa。其中 F_v^{1-1} 仅在最大弯矩为地震弯矩参与组合时计入此项。

弯矩引起的轴向应力

$$\sigma_3 = \frac{4M_{max}^{1-1}}{\pi D_{ih}^2 \delta_{ei}} \cdot \frac{1}{\cos\beta} \quad (6-38)$$

式中: σ_3 ——最大弯矩引起的轴向应力, MPa。

6.10.2 锥壳稳定校核

锥壳许用轴向压应力按式(6-39)确定:

$$[\sigma]_{cr} = \begin{cases} KB\cos^2\beta \\ K[\sigma]' \end{cases} \text{取其中较小值} \quad (6-39)$$

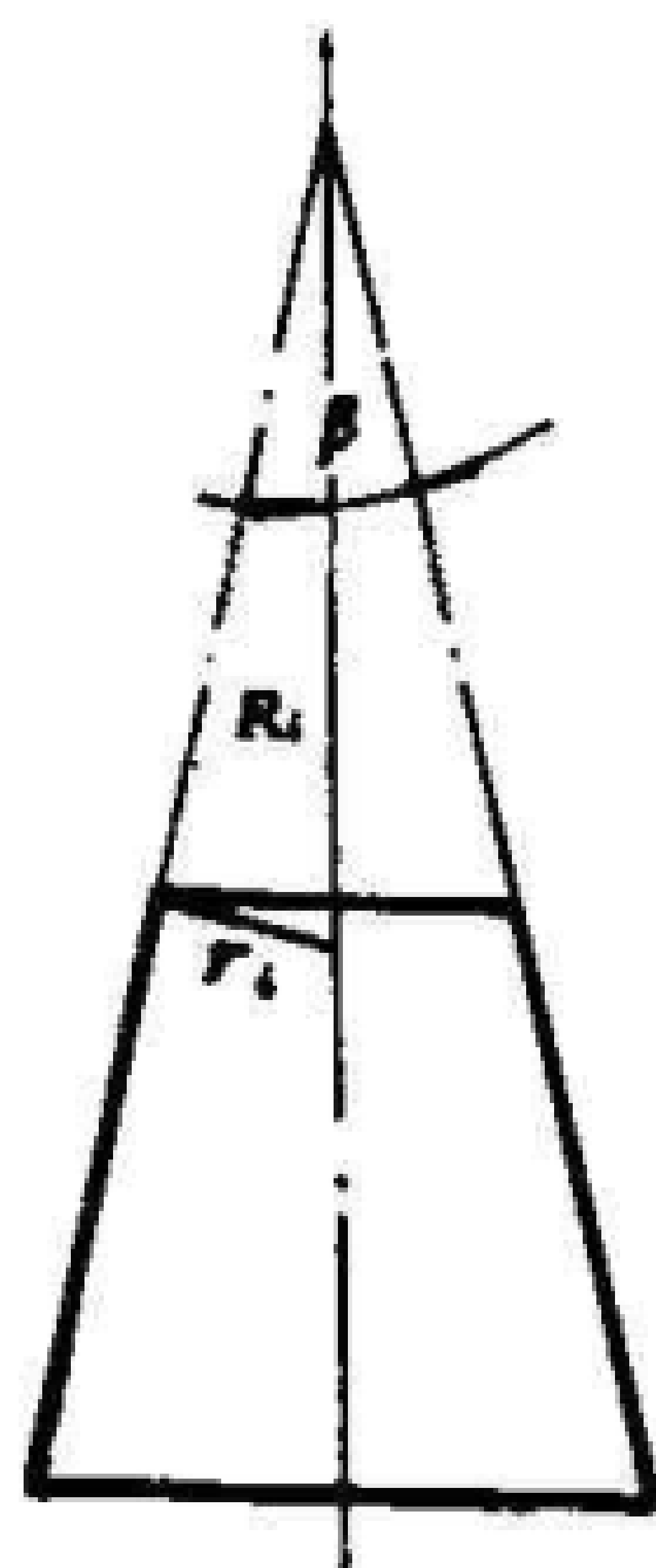
式中: K ——载荷组合系数, 取 $K=1.2$ 。求取锥壳的 B 值时, R_i 应为锥壳小端曲率半径 r_i , 见图 6-7。

图 6-7

锥壳最大组合压应力按式(6-40)或式(6-41)校核:

对内压塔器

$$\sigma_2 + \sigma_3 \leq [\sigma]_{cr} \quad (6-40)$$

对外压塔器

$$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \leq [\sigma]_{cr} \quad (6-41)$$

如不能满足上述条件时,须重新设定有效厚度 δ_e ,重复上述计算,直至满足要求。

6.10.3 锥壳拉应力校核 锥壳最大组合拉应力按式(6-34)或式(6-35)校核。

6.11 塔器压力试验时的应力校核

6.11.1 圆筒应力

对选定的各计算截面按式(6-42)、式(6-43)、式(6-44)和式(6-45)计算:

试验压力引起的周向应力

$$\sigma = \frac{(p_T + \gamma H / 9.81)(D_i + \delta_e)}{2\delta_e} \quad (6-42)$$

式中: σ ——试验压力引起的周向应力,MPa。

γ ——试验介质的密度,(当介质为水时, $\gamma = 0.001 \text{ kg/cm}^3$), kg/cm^3 ;

H——液柱高度,cm。

气压试验时,无液柱静压力。

试验压力引起的轴向应力

$$\sigma_1 = \frac{p_T D_i}{4\delta_e} \quad (6-43)$$

式中: σ_1 ——试验压力引起的轴向应力,MPa。

重力引起的轴向应力

$$\sigma_2 = \frac{m_T^{I-I} g}{\pi D_i \delta_e} \quad (6-44)$$

式中: σ_2 ——重力引起的轴向应力,MPa;

m_T^{I-I} ——液压试验时,计算截面 I-I 以上的质量(只计入塔壳、内构件、偏心质量、保温层、扶梯及平台质量),kg。

弯矩引起的轴向应力

$$\sigma_3 = \frac{4(0.3M_W^{I-I} + M_e)}{\pi D_i^2 \delta_e} \quad (6-45)$$

式中: σ_3 ——弯矩引起的轴向应力,MPa。

6.11.2 应力校核

压力试验时,圆筒及锥壳材料的许用轴向压应力按式(6-46)确定:

$$[\sigma]_{cr} = \begin{cases} KB \\ 0.9K\sigma_s \end{cases} \text{取其中较小值} \quad (6-46)$$

式中:K——载荷组合系数,取 $K=1.2$ 。

压力试验时,圆筒及锥壳的最大组合应力按式(6-47)、式(6-48)、式(6-49)、式(6-50)或式(6-51)校核:

$$\text{液压试验时} \quad \sigma \leq 0.9\sigma_s \phi \quad (6-47)$$

$$\text{气压试验时} \quad \sigma \leq 0.8\sigma_s \phi \quad (6-48)$$

$$\text{液压试验时} \quad \sigma_1 - \sigma_2 + \sigma_3 \leq 0.9K\sigma_s \phi \quad (6-49)$$

$$\text{气压试验时} \quad \sigma_1 - \sigma_2 + \sigma_3 \leq 0.8K\sigma_s \phi \quad (6-50)$$

$$\sigma_2 + \sigma_3 \leq [\sigma]_{cr} \quad (6-51)$$

式中:K——载荷组合系数,取 $K=1.2$ 。

6.12 裙座壳轴向应力校核

6.12.1 裙座壳底截面的组合应力按式(6-52)和式(6-53)校核:

$$\frac{1}{\cos \beta} \left(\frac{M_{max}^{0-0}}{Z_{ab}} + \frac{m_0 g + F_V^{0-0}}{A_{ab}} \right) \leq \begin{cases} KB \cos^2 \beta \\ K[\sigma] \end{cases} \quad (6-52)$$

其中 $F_v^{0.0}$ 仅在最大弯矩为地震弯矩参与组合时计入此项。

$$\frac{1}{\cos \beta} \left(\frac{0.3M_w^{0.0} + M_e}{Z_b} + \frac{m_{\max} g}{A_b} \right) \leq \begin{cases} KB \cos^2 \beta \\ 0.9K\sigma_s \end{cases} \quad (6-53)$$

式中: A_b ——裙座圆筒或锥壳的底部截面积, mm^2 ;

$$A_b = \pi D_b \delta_s \quad (6-54)$$

D_b ——裙座壳底部内直径, mm ;

Z_b ——裙座圆筒或锥壳底部截面系数, mm^3 ;

$$Z_b = \pi D_b^2 \delta_s / (4 \cos \beta) \quad (6-55)$$

K ——载荷组合系数, 取 $K=1.2$ 。

6.12.2 裙座壳检查孔或较大管线引出孔(见图 6-8) $h-h$ 截面处组合应力按式(6-56)和式(6-57)校核:

$$\frac{1}{\cos \beta} \left(\frac{M_{\max}^{h-h}}{Z_{sm}} + \frac{m_0^{h-h} g + F_v^{h-h}}{A_{sm}} \right) \leq \begin{cases} KB \cos^2 \beta \\ K[\sigma] \end{cases} \quad (6-56)$$

$$\frac{1}{\cos \beta} \left(\frac{0.3M_w^{h-h} + M_e}{Z_{sm}} + \frac{m_{\max}^{h-h} g}{A_{sm}} \right) \leq \begin{cases} KB \cos^2 \beta \\ 0.9K\sigma_s \end{cases} \quad (6-57)$$

其中 F_v^{h-h} 仅在最大弯矩为地震弯矩参与组合时计入此项。

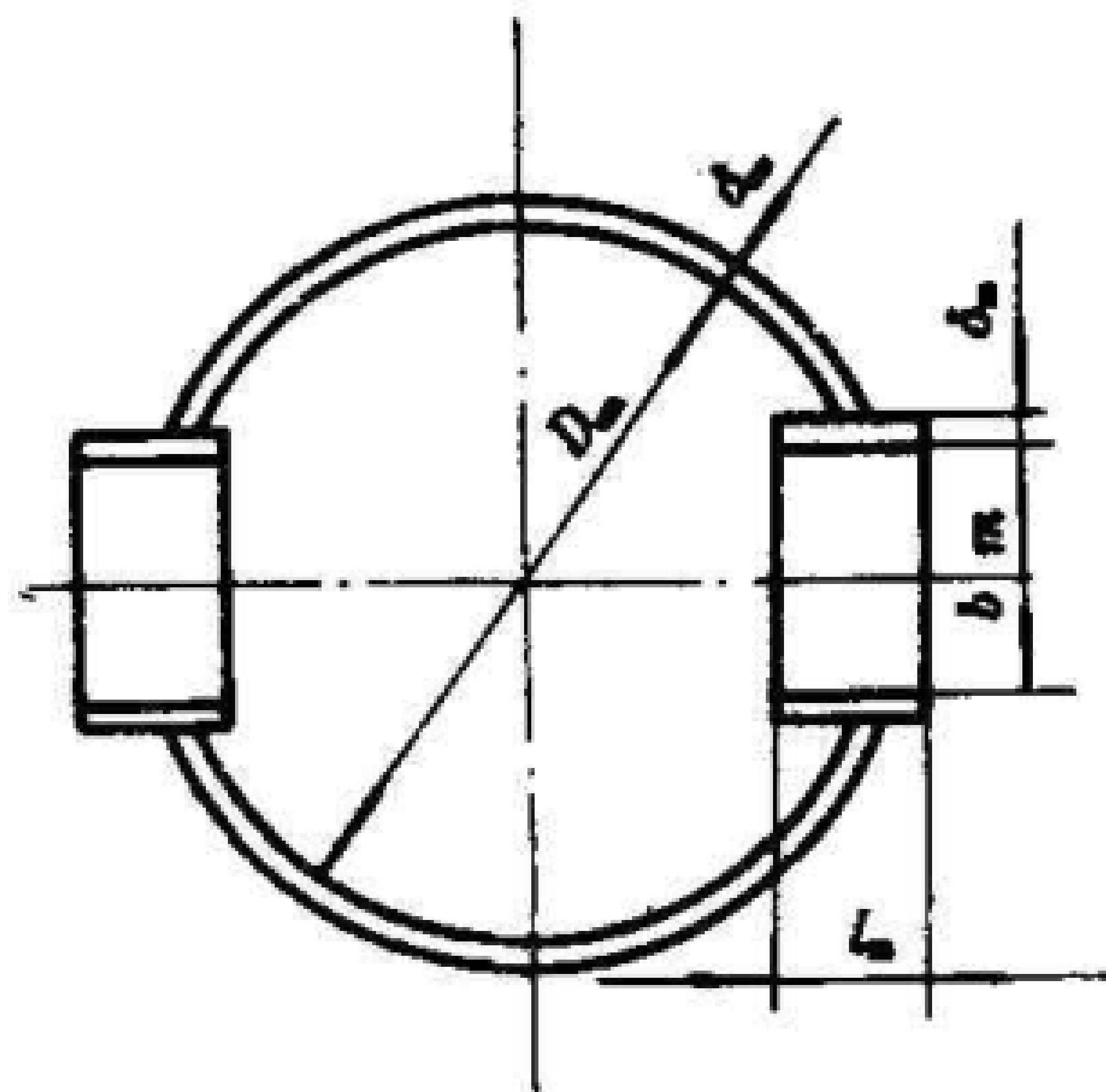


图 6-8

式中: A_{sm} —— $h-h$ 截面处裙座壳的截面积, mm^2 ;

$$A_{sm} = \pi D_{im} \delta_{cs} - \sum [(b_m + 2\delta_m) \delta_{cs} - A_m] \quad (6-58)$$

$$A_m = 2l_m \delta_m \quad (6-59)$$

b_m —— $h-h$ 截面处水平方向的最大宽度, mm ;

D_{im} —— $h-h$ 截面处裙座壳的内直径, mm ;

F_v^{h-h} —— $h-h$ 截面处的垂直地震力。但仅在最大弯矩为地震弯矩参与组合时计入此项, N ;

l_m ——检查孔或较大管线引出孔加强管长度, mm ;

M_{\max}^{h-h} —— $h-h$ 截面处的最大弯矩, $\text{N} \cdot \text{mm}$;

M_w^{h-h} —— $h-h$ 截面处的风弯矩, $\text{N} \cdot \text{mm}$;

m_{\max}^{h-h} —— $h-h$ 截面以上塔器压力试验时的质量, kg ;

m_0^{h-h} —— $h-h$ 截面以上塔器的操作质量, kg ;

Z_{sm} —— $h-h$ 截面处的裙座壳的截面系数, mm^3 ;

$$Z_{sm} = \frac{\pi}{4} D_{im}^2 \delta_{cs} - \sum (b_m D_{im} \frac{\delta_{cs}}{2} - Z_m) \quad (6-60)$$

$$Z_m = 2\delta_m l_m \sqrt{\left(\frac{D_{im}}{2}\right)^2 - \left(\frac{b_m}{2}\right)^2} \quad (6-61)$$

δ_m ——h-h 截面处加强管的厚度(见图 6-8), mm。

如不满足上述条件时,须重新设定裙座壳有效厚度 δ_m ,重复上述计算,直至满足要求。

6.13 地脚螺栓座

6.13.1 基础环设计

a. 基础环内、外径(见图 6-9、6-10)可参考式(6-62)、式(6-63)选取:

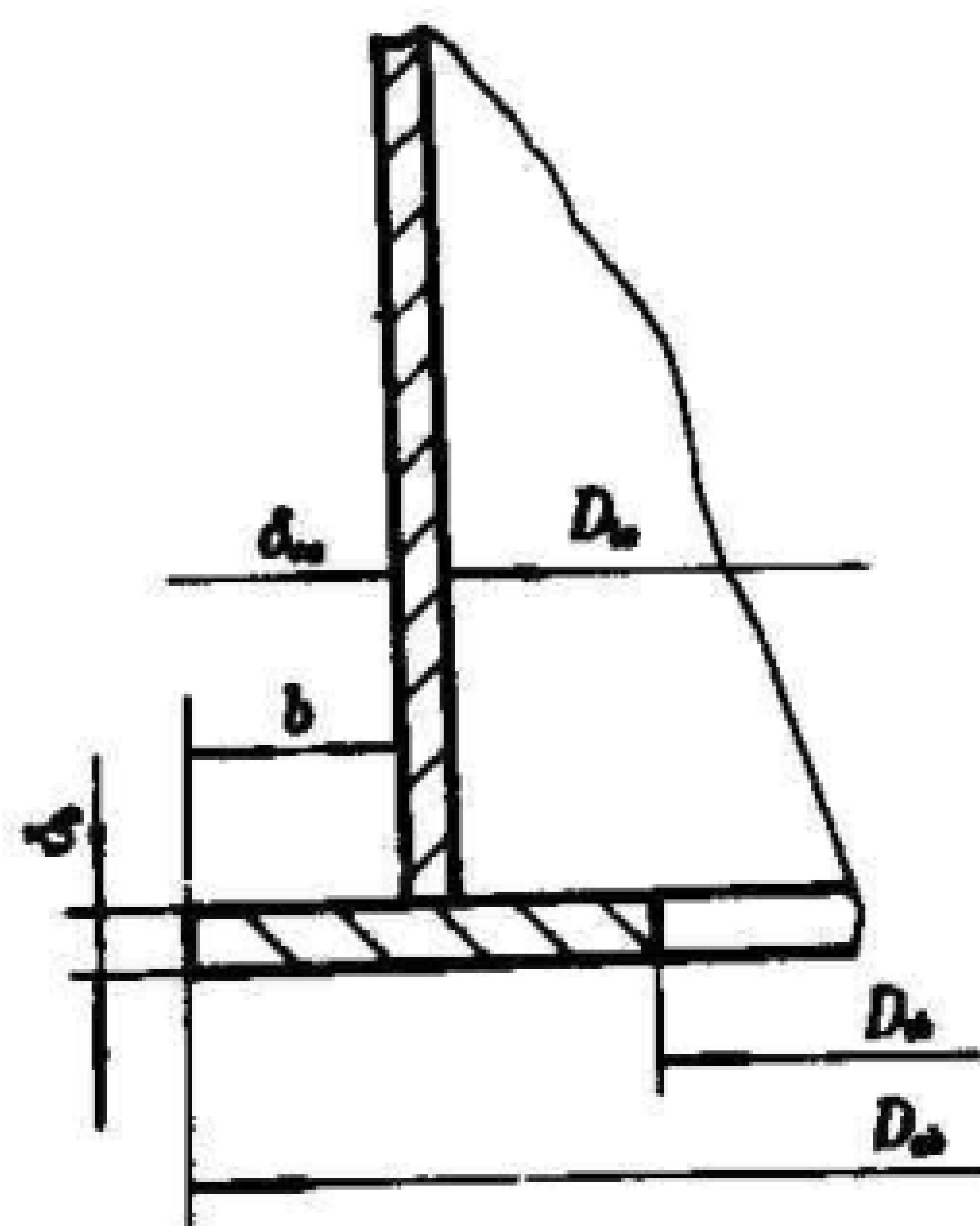


图 6-9

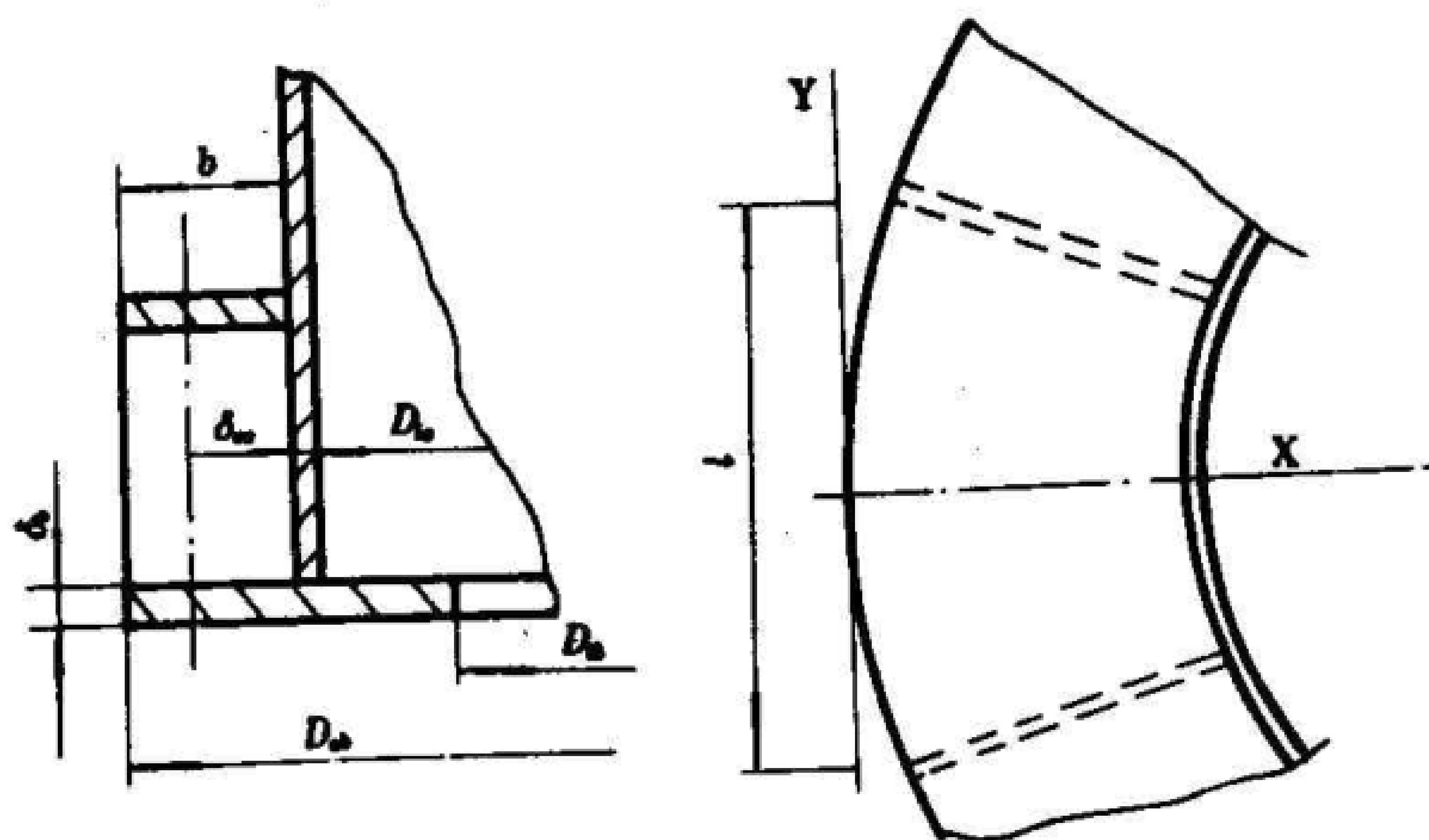


图 6-10

$$D_{ob} = D_{is} + (160 \sim 400) \quad (6-62)$$

$$D_{ib} = D_{is} - (160 \sim 400) \quad (6-63)$$

b. 基础环厚度按式(6-64)或式(6-65)计算。

无筋板时(见图 6-9)基础环厚度:

$$\delta_b = 1.73b \sqrt{\frac{\sigma_{bmax}}{[\sigma]_b}} \quad (6-64)$$

式中: δ_b ——基础环厚度, mm;

$[\sigma]_b$ ——基础环材料的许用应力,按 4.2.4 条选取,MPa;

σ_{bmax} ——混凝土基础上的最大压应力,MPa。

$$\sigma_{bmax} = \begin{cases} \frac{M_{max}^{0.0}}{Z_b} + \frac{m_0 g}{A_b} \\ \frac{0.3M_W^{0.0} + M_e}{Z_b} + \frac{m_{max} g}{A_b} \end{cases}$$

取其中较大值

(6-65)

有筋板时(见图 6-10)的基础环厚度:

$$\delta_b = \sqrt{\frac{6M_e}{[\sigma]_b}}$$

(6-66)

表 6-7 矩形板力矩计算表

b/l	$M_x \left(\begin{smallmatrix} x=b \\ y=0 \end{smallmatrix} \right)$	$M_y \left(\begin{smallmatrix} x=0 \\ y=0 \end{smallmatrix} \right)$	b/l	$M_x \left(\begin{smallmatrix} x=b \\ y=0 \end{smallmatrix} \right)$	$M_y \left(\begin{smallmatrix} x=0 \\ y=0 \end{smallmatrix} \right)$
0	$-0.500\sigma_{bmax}b^2$	0	1.6	$-0.0485\sigma_{bmax}b^2$	$0.126\sigma_{bmax}l^2$
0.1	$-0.500\sigma_{bmax}b^2$	$0.0000\sigma_{bmax}l^2$	1.7	$-0.0430\sigma_{bmax}b^2$	$0.127\sigma_{bmax}l^2$
0.2	$-0.490\sigma_{bmax}b^2$	$0.0006\sigma_{bmax}l^2$	1.8	$-0.0384\sigma_{bmax}b^2$	$0.129\sigma_{bmax}l^2$
0.3	$0.448\sigma_{bmax}b^2$	$0.0051\sigma_{bmax}l^2$	1.9	$-0.0345\sigma_{bmax}b^2$	$0.130\sigma_{bmax}l^2$
0.4	$-0.385\sigma_{bmax}b^2$	$0.0151\sigma_{bmax}l^2$	2.0	$-0.0312\sigma_{bmax}b^2$	$0.130\sigma_{bmax}l^2$
0.5	$-0.319\sigma_{bmax}b^2$	$0.0293\sigma_{bmax}l^2$	2.1	$-0.0283\sigma_{bmax}b^2$	$0.131\sigma_{bmax}l^2$
0.6	$-0.260\sigma_{bmax}b^2$	$0.0453\sigma_{bmax}l^2$	2.2	$-0.0258\sigma_{bmax}b^2$	$0.132\sigma_{bmax}l^2$
0.7	$-0.212\sigma_{bmax}b^2$	$0.0610\sigma_{bmax}l^2$	2.3	$-0.0236\sigma_{bmax}b^2$	$0.132\sigma_{bmax}l^2$
0.8	$-0.173\sigma_{bmax}b^2$	$0.0751\sigma_{bmax}l^2$	2.4	$-0.0217\sigma_{bmax}b^2$	$0.132\sigma_{bmax}l^2$
0.9	$-0.142\sigma_{bmax}b^2$	$0.0872\sigma_{bmax}l^2$	2.5	$-0.0200\sigma_{bmax}b^2$	$0.133\sigma_{bmax}l^2$
1.0	$-0.118\sigma_{bmax}b^2$	$0.0972\sigma_{bmax}l^2$	2.6	$-0.0185\sigma_{bmax}b^2$	$0.133\sigma_{bmax}l^2$
1.1	$-0.0995\sigma_{bmax}b^2$	$0.105\sigma_{bmax}l^2$	2.7	$-0.0171\sigma_{bmax}b^2$	$0.133\sigma_{bmax}l^2$
1.2	$-0.0846\sigma_{bmax}b^2$	$0.112\sigma_{bmax}l^2$	2.8	$-0.0159\sigma_{bmax}b^2$	$0.133\sigma_{bmax}l^2$
1.3	$-0.0726\sigma_{bmax}b^2$	$0.116\sigma_{bmax}l^2$	2.9	$-0.0149\sigma_{bmax}b^2$	$0.133\sigma_{bmax}l^2$
1.4	$-0.0629\sigma_{bmax}b^2$	$0.120\sigma_{bmax}l^2$	3.0	$-0.0139\sigma_{bmax}b^2$	$0.133\sigma_{bmax}l^2$
1.5	$-0.0550\sigma_{bmax}b^2$	$0.123\sigma_{bmax}l^2$			

注: l 为两相邻肋板最大外侧间距(见图 6-10)。

式中: M_e ——计算力矩,取矩形板 X 、 Y 轴的弯矩 M_x 、 M_y 中绝对值较大者, M_x 、 M_y 按表 6-7 计算, $N \cdot mm/mm$ 。

无论无筋板或有筋板的基础环厚度均不得小于 16mm。

6.13.2 地脚螺栓

地脚螺栓承受的最大拉应力按式(6-67)计算:

$$\sigma_B = \begin{cases} \frac{M_W^{0.0} + M_e}{Z_b} - \frac{m_{min} g}{A_b} \\ \frac{M_E^{0.0} + 0.25M_W^{0.0} + M_e}{Z_b} - \frac{m_0 g - F_v^{0.0}}{A_b} \end{cases}$$

取其中较大值

(6-67)

其中 $F_v^{0.0}$ 仅在最大弯矩为地震弯矩参与组合时计入此项。

式中: σ_B ——地脚螺栓承受的最大拉应力,MPa;

A_b ——基础环面积, mm^2 ;

$$A_b = \frac{\pi}{4} (D_{ob}^2 - D_{ib}^2) \quad (6-68)$$

Z_b ——基础环的截面系数, mm^3 。

$$Z_b = \frac{\pi(D_{ob}^4 - D_{ib}^4)}{32D_{ob}} \quad (6-69)$$

当 $\sigma_B \leq 0$ 时, 塔器可自身稳定, 但为固定塔器位置, 应设置一定数量的地脚螺栓。

当 $\sigma_B > 0$ 时, 塔器必须设置地脚螺栓。地脚螺栓的螺纹小径可按式(6-70)计算:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4\sigma_B A_b}{\pi n [\sigma]_{bt}}} + C_2 \quad (6-70)$$

式中: d_1 ——地脚螺栓螺纹小径, mm ;

C_2 ——地脚螺栓腐蚀裕量, 按 3.3.1 选取, mm ;

n ——地脚螺栓个数, 一般取 4 的倍数; 对小直径塔器可取 $n=6$;

$[\sigma]_{bt}$ ——地脚螺栓材料的许用应力, 按 4.2.3 选取, MPa 。圆整后地脚螺栓的公称直径不得小于 M24。

6.13.3 筋板

筋板的压应力按式(6-71)计算:

$$\sigma_G = \frac{F}{n_1 \delta_G l_2} \quad (6-71)$$

式中: σ_G ——筋板的压应力, MPa ;

F ——一个地脚螺栓承受的最大拉力, N ;

$$F = \frac{\sigma_B A_b}{n} \quad (6-72)$$

n_1 ——对应一个地脚螺栓的筋板个数;

l_2 ——筋板宽度, mm ;

δ_G ——筋板厚度, mm 。

筋板的许用压应力按式(6-73)或式(6-74)计算:

当 $\lambda \leq \lambda_c$ 时

$$[\sigma]_c = \frac{[1 - 0.4(\frac{\lambda}{\lambda_c})^2][\sigma]_G}{\nu} \quad (6-73)$$

当 $\lambda > \lambda_c$ 时

$$[\sigma]_c = \frac{0.277[\sigma]_G}{(\lambda/\lambda_c)^2} \quad (6-74)$$

式中: $[\sigma]_c$ ——筋板的许用压应力, MPa ;

λ ——细长比, 按式(6-75)计算, 且不大于 250;

$$\lambda = \frac{0.5l_k}{i} \quad (6-75)$$

i ——惯性半径, 对长方形截面的筋板取 $0.289\delta_G$, mm ;

l_k ——筋板长度, mm ;

λ_c ——临界细长比, 按式(6-76)计算;

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.6[\sigma]_G}} \quad (6-76)$$

E ——筋板材料的弹性模量, MPa ;

$[\sigma]_G$ ——筋板材料的许用应力, 按 4.2.4 选取, MPa ;

ν ——系数；

$$\nu = 1.5 + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^2 \quad (6-77)$$

筋板的压应力应等于或小于许用应力, 即 $\sigma_c \leq [\sigma]_c$ 。但 δ_c 一般不小于 $2/3$ 基础环厚度。

6.13.4 盖板

6.13.4.1 分块盖板最大应力按式(6-78)或式(6-79)计算；

无垫板时

$$\sigma_s = \frac{Fl_3}{(l_2 - d_3)\delta_c^2} \quad (6-78)$$

有垫板时

$$\sigma_s = \frac{Fl_3}{(l_2 - d_3)\delta_c^2 + (l_4 - d_2)\delta_s^2} \quad (6-79)$$

式中: σ_s ——盖板的最大应力, MPa；

d_2 ——垫板上地脚螺栓孔直径, mm；

d_3 ——盖板上地脚螺栓孔直径, mm；

l_2 ——筋板宽度, mm；

l_3 ——筋板内侧间距, mm；

l_4 ——垫板宽度, mm；

δ_c ——盖板厚度, mm；

δ_s ——垫板厚度, mm。

一般, 分块盖板厚度不小于基础环厚度。

6.13.4.2 环形盖板的最大应力按式(6-80)或式(6-81)计算；

无垫板时

$$\sigma_s = \frac{3Fl_3}{4(l_2 - d_3)\delta_c^2} \quad (6-80)$$

有垫板时

$$\sigma_s = \frac{3Fl_3}{4(l_2 - d_3)\delta_c^2 + 4(l_4 - d_2)\delta_s^2} \quad (6-81)$$

一般环形盖板厚度不小于基础环厚度。

盖板最大应力应等于或小于盖板材料的许用应力。盖板的许用应力按 4.2.4 选取。

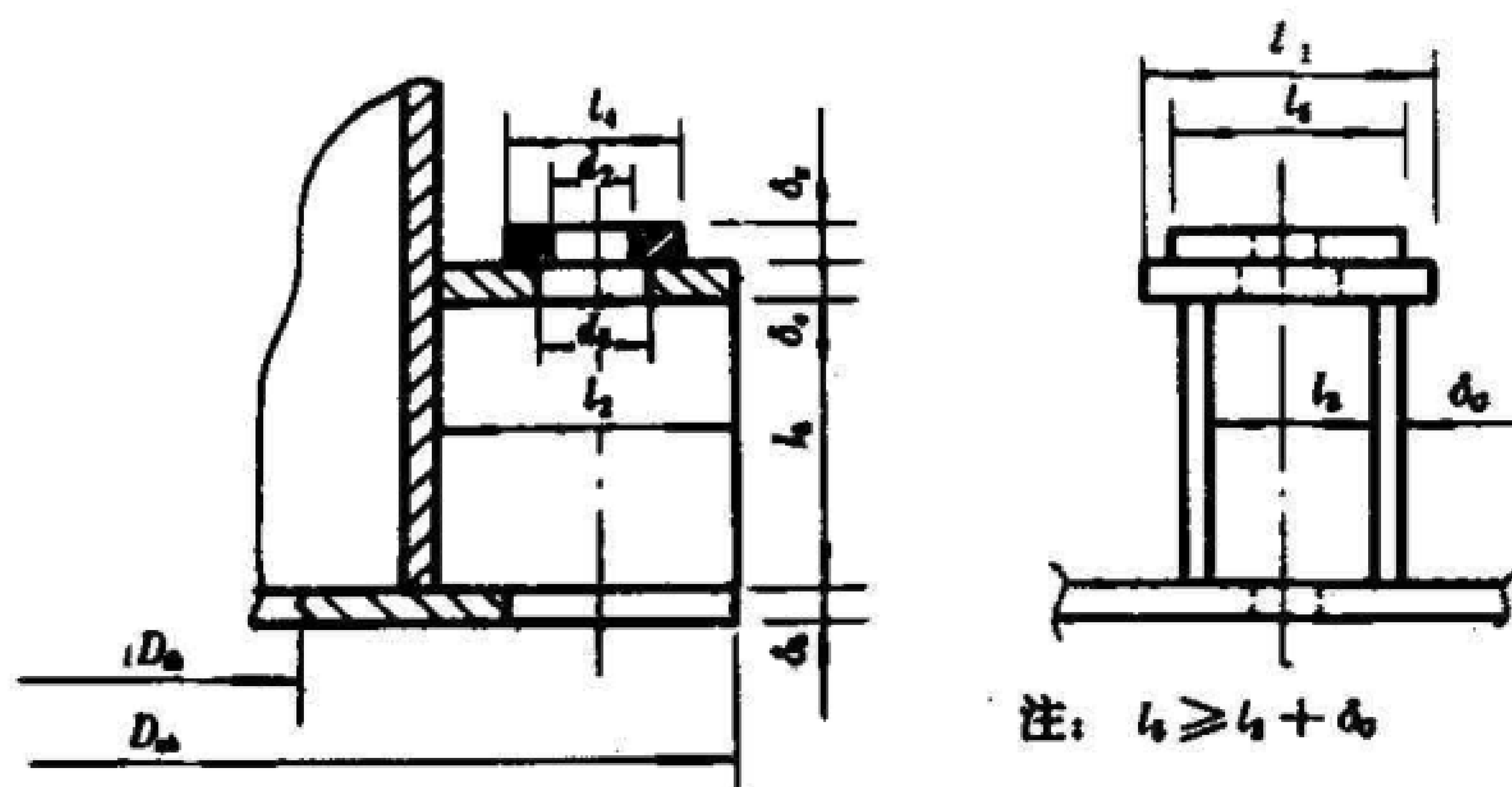


图 6-11 地脚螺栓座尺寸

6.14 裙座与塔壳搭接焊缝

6.14.1 裙座与塔壳搭接焊缝

J-J 截面处搭接焊缝(见图 6-12)的剪应力按式(6-82)或式(6-83)校核:

$$\frac{M_{\max}^{J-J}}{Z_w} + \frac{m_0^{J-J}g + F_V^{J-J}}{A_w} \leq 0.8K[\sigma]_w \quad (6-82)$$

$$\frac{0.3M_w^{J-J} + M_c}{Z_w} + \frac{\dot{m}_{\max}^{J-J}g}{A_w} \leq 0.8 \times 0.9K\sigma_s \quad (6-83)$$

其中 F_V^{J-J} 仅在最大弯矩为地震弯矩参与组合时计入此项。

式中: A_w ——焊缝抗剪断面面积, mm^2 ;

$$A_w = 0.7\pi D_{ot}\delta_{es} \quad (6-84)$$

D_{ot} ——裙座壳顶部截面的外直径, mm ;

F_V^{J-J} ——搭接焊缝处的垂直地震力, N ;

M_{\max}^{J-J} ——搭接焊缝处的最大弯矩, $\text{N} \cdot \text{mm}$;

m_{\max}^{J-J} ——压力试验时塔器的最大质量(不计裙座质量), kg ;

m_0^{J-J} ——J-J 截面以上塔器操作质量, kg ;

Z_w ——焊缝抗剪截面系数, mm^3 ;

$$Z_w = 0.55D_{ot}^2\delta_{es} \quad (6-85)$$

$[\sigma]_w$ ——设计温度下焊接接头的许用应力, 取两侧母材许用应力的小值, MPa 。

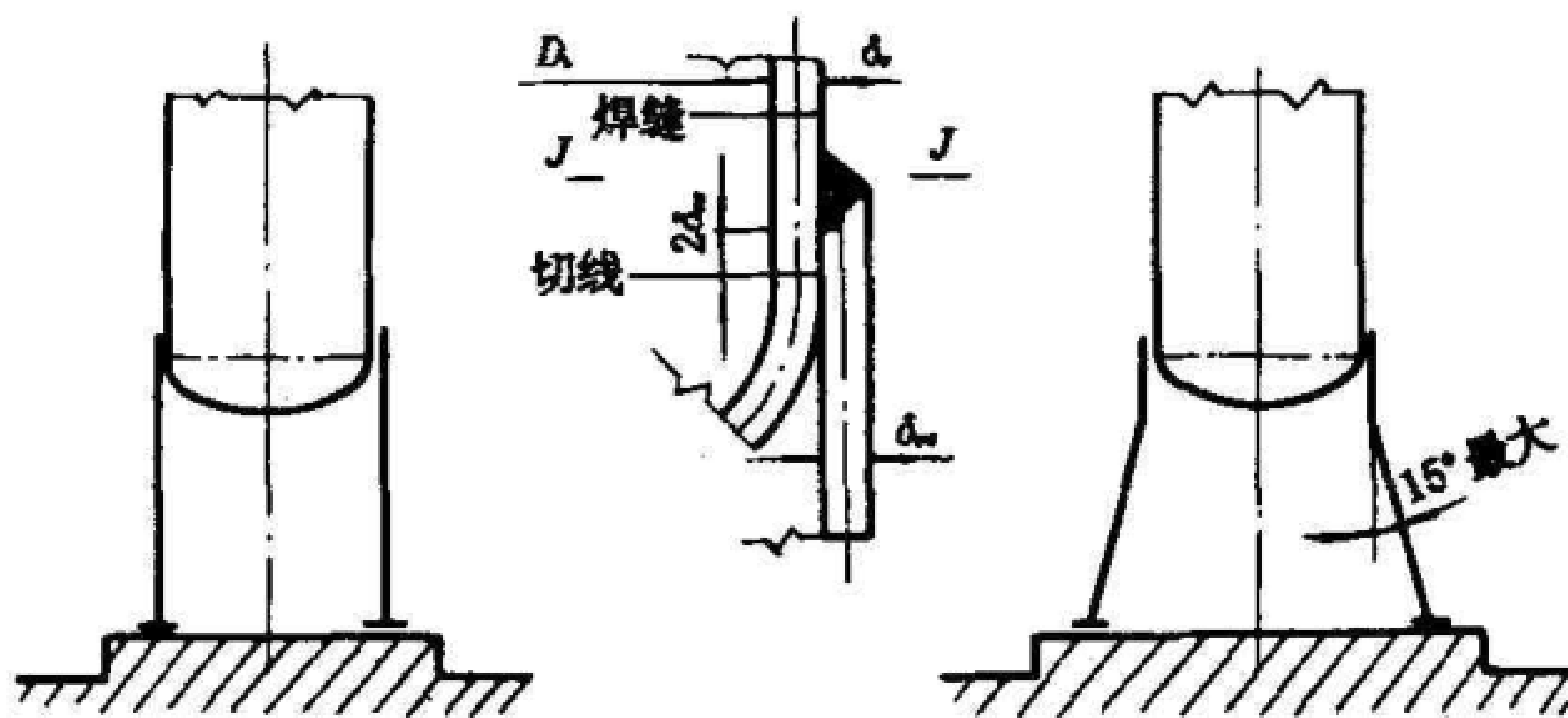


图 6-12

6.14.2 裙座与塔壳的对接焊缝

对接焊缝 J-J 截面处(见图 6-13)的拉应力按式(6-86)校核:

$$\frac{4M_{\max}^{J-J}}{\pi D_{it}^2\delta_{es}} - \frac{m_0^{J-J}g - F_V^{J-J}}{\pi D_{it}\delta_{es}} \leq 0.6K[\sigma]_w \quad (6-86)$$

其中 F_V^{J-J} 仅在最大弯矩为地震弯矩参与组合时计入此项。

式中: D_{it} ——裙座顶截面的内直径, mm 。

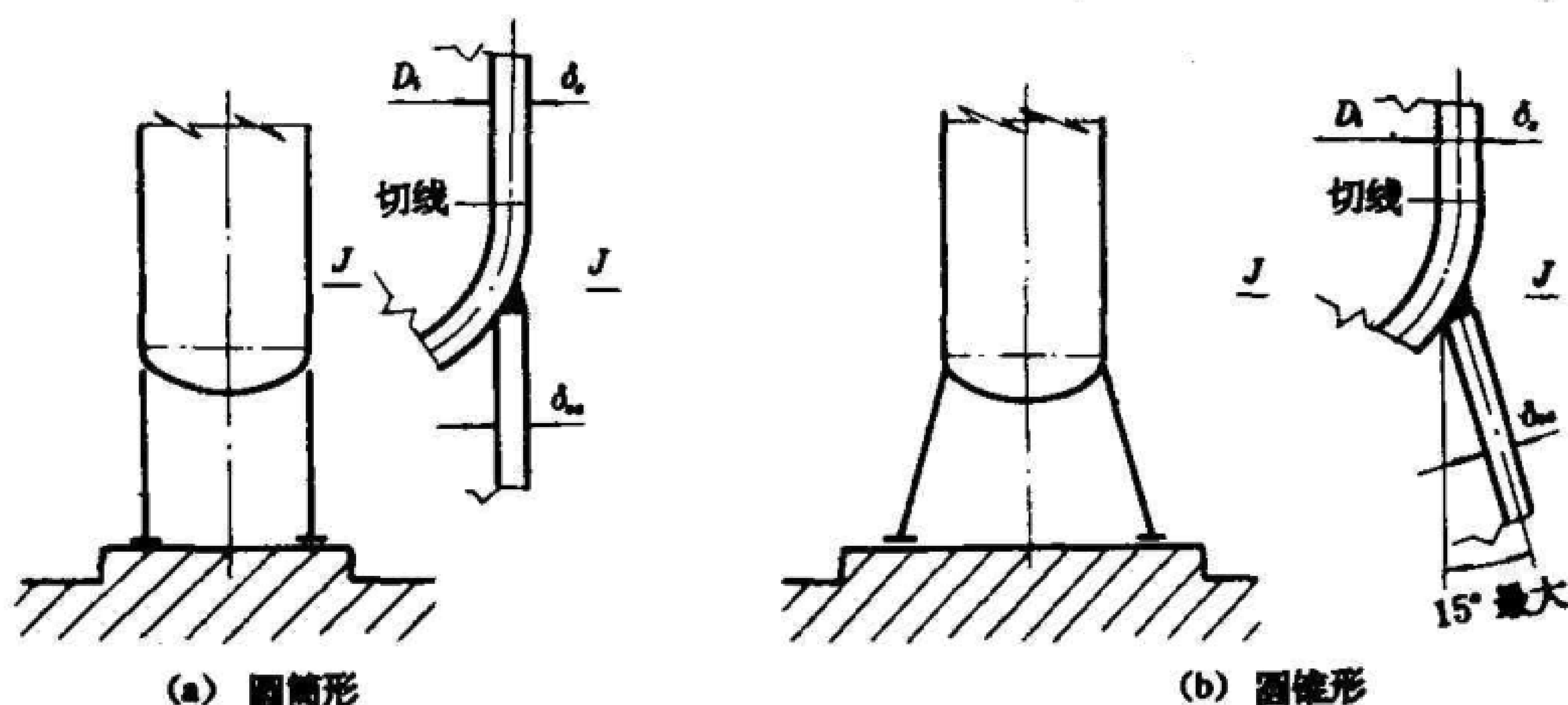


图 6-13

6.15 塔器法兰当量设计压力

塔壳各段采用法兰连接时,法兰应同时考虑内压、轴向力和外力矩的作用,其当量设计压力按式(6-87)确定。

$$p_e = \frac{16M}{\pi D_G^3} + \frac{4F}{\pi D_G^2} + p \quad (6-87)$$

式中: p_e ——法兰的当量设计压力,MPa;

D_G ——垫片压紧力作用中心圆直径,按 GB 150 第 7 章规定,mm;

F ——轴向外载荷,拉力时计入,压缩时不计,N;

p ——设计压力,MPa;

M ——外力矩,应计入法兰截面的最大力矩 M_{max} 、管线推力引起的力矩和其它机械载荷引起的力矩,N·mm。

7 制造、检验与验收

7.1 塔器的制造、检验及验收必须符合 GB 150,且应遵守本章规定。

7.2 外形尺寸偏差应符合图 7-1、图 7-2、图 7-3 和表 7-1 的规定。

7.3 需进行整体热处理的塔器,热处理前应将需要焊在塔壳上的连接件(包括梯子、平台连接件、保温圈、防火层固定件、吊耳等)焊于容器上,热处理后不得再在塔壳上进行焊接。

7.4 符合下列条件之一者,应作磁粉或渗透探伤。

- a. 塔壳材料标准抗拉强度 $\sigma_b \geq 540\text{MPa}$ 时,裙座与塔壳的连接焊缝;
- b. 裙座壳材料为 16Mn 且名义厚度大于 30mm 的裙座与塔壳连接焊缝;
- c. 吊耳与塔壳之间的焊缝。

7.5 分段交货的塔器

7.5.1 分段交货的塔器,制造厂应对其进行预组装,组装后的外形尺寸偏差应符合 7.2 条规定。

7.5.2 对接焊缝的坡口应由制造厂加工、检验、清理并在坡口表面及其内、外边缘 50mm 的范围内涂可焊性防锈涂料。

7.5.3 现场组装的焊缝如需进行热处理,应在设计图纸中注明。

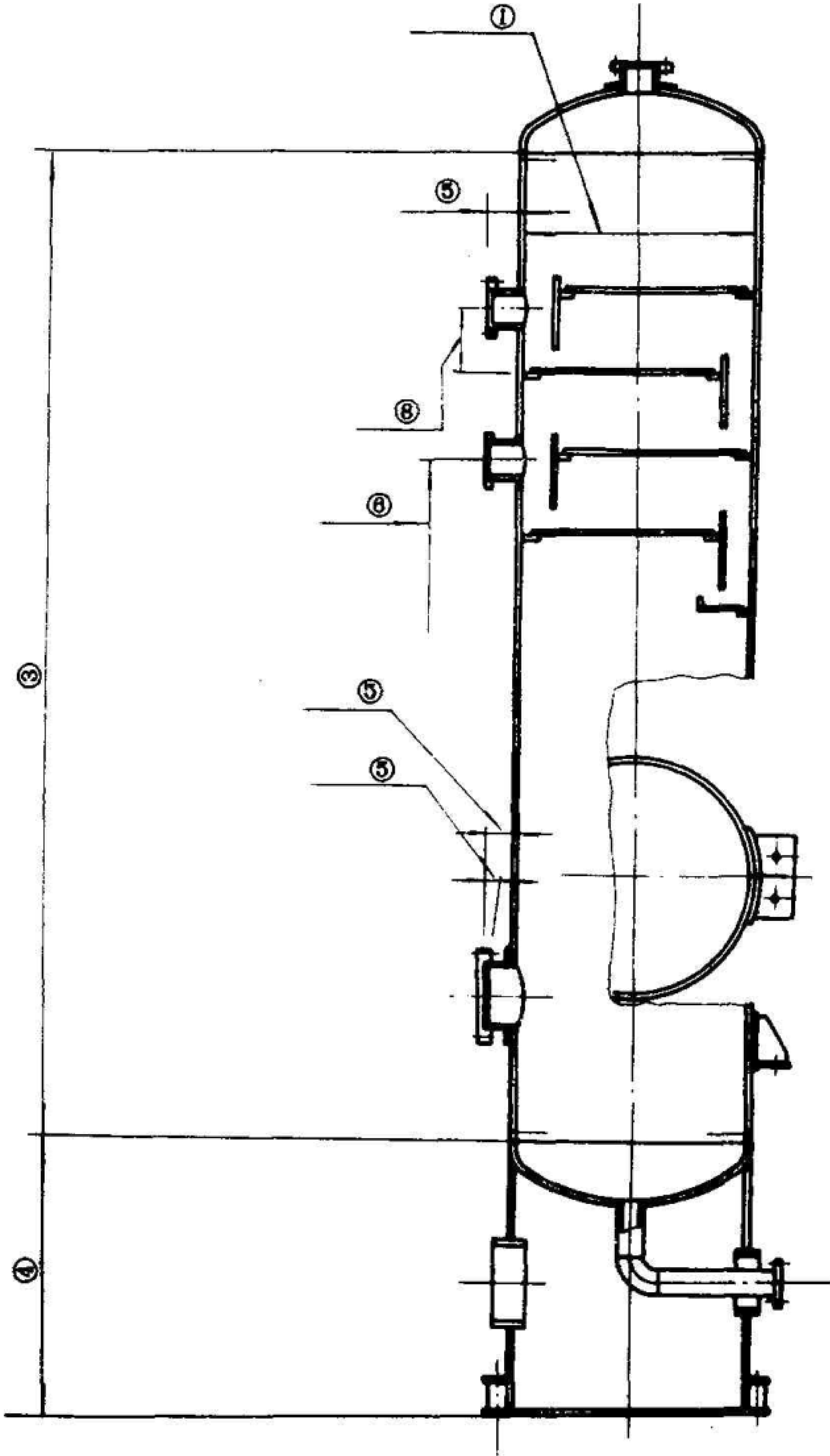


图 7-1

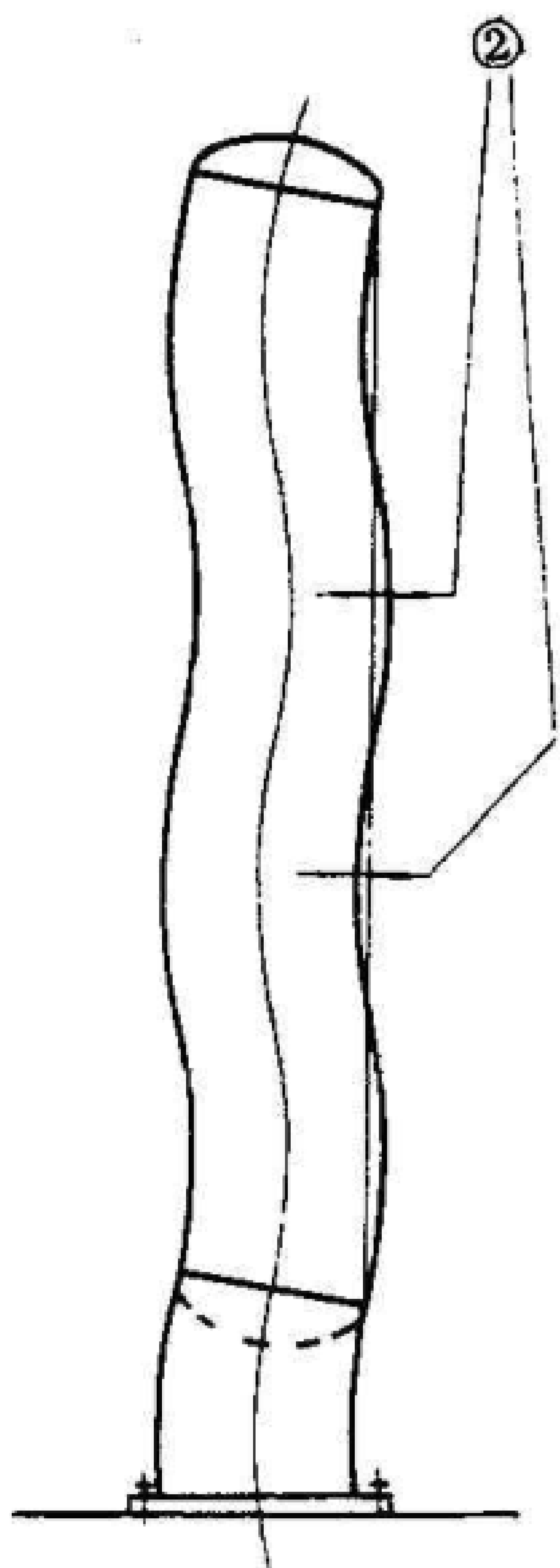


图 7-2

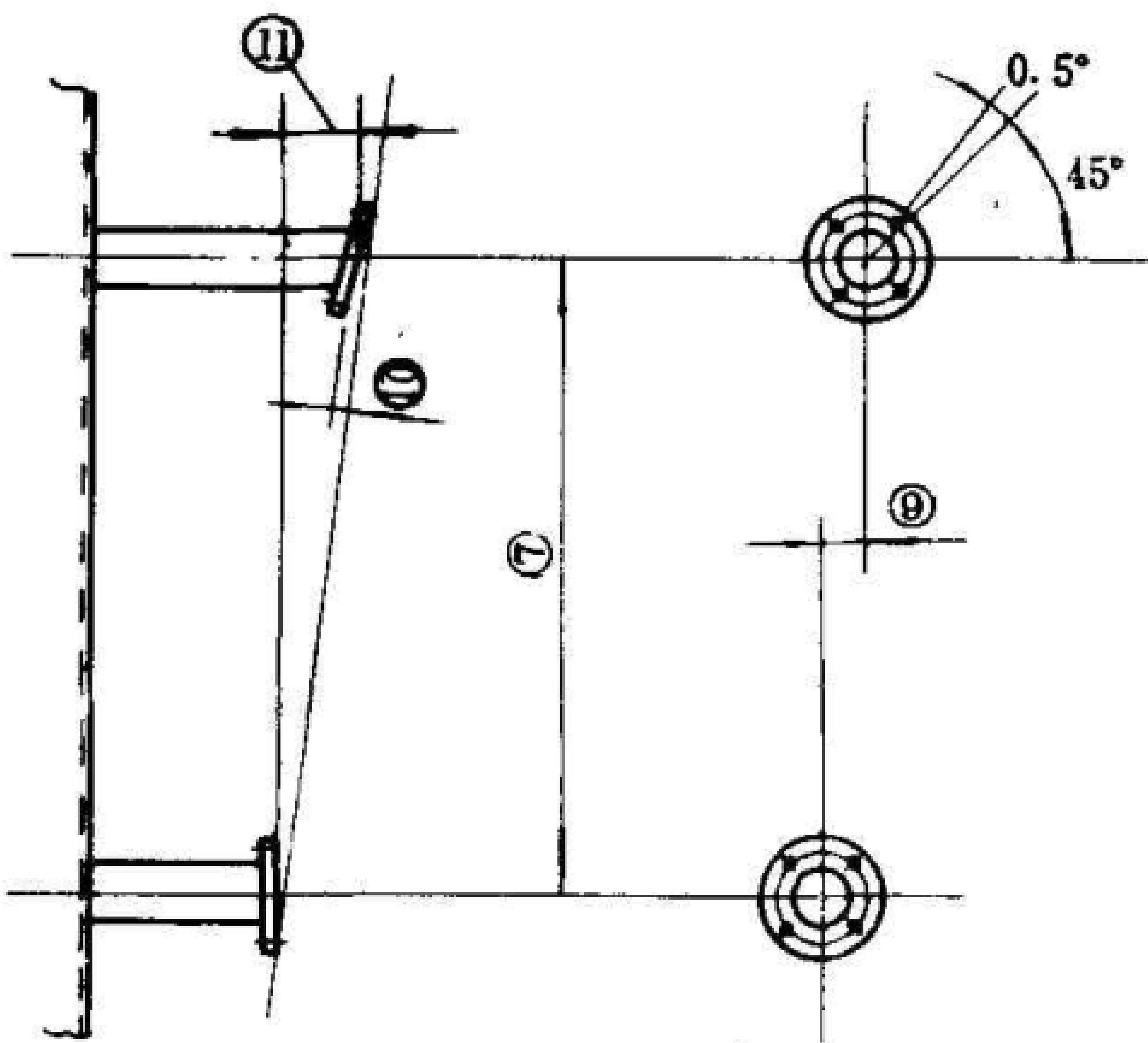


图 7-3

表 7-1 塔器外形尺寸允许偏差 mm

序号	检 验 项 目		允 许 偏 差
1	圆度		按 GB 150
2	直线度		任意 3000mm 长圆筒段偏差不得大于 3mm 圆筒长度 L 小于等于 15000mm, 偏差不大于 L/1000, 长度 L 大于 15000mm 时, 偏差不大于 (0.5L/1000+8)。
3	上、下两封头外侧之间的距离		±1.5mm/m, 且不大于 ±50
4	基础环底面至塔器下封头与塔壳连接焊缝距离		1000mm 裙座长, 偏差不得大于 2.5mm 且最大值为 6mm。
5	接管法兰至塔器外壁及法兰倾斜度		±5mm 倾斜度 ≤ 0.5°
6	接管或人孔的标高	接管	±6mm
		人孔	±12mm
7	液面计对应接口间的距离		±3mm
8	接管中心线距塔盘面的距离		±3mm
9	液面计对应接口周向偏差		1mm
10	液面计法兰面的倾斜度		0.3mm
11	液面计两接管长度差		5mm

附录 A

塔器高振型计算

(补充件)

本附录给出了裙座自支承的塔器考虑高振型时自振周期和地震弯矩的计算。

A1 自振周期

把多自由度体系的塔器沿轴向分成若干单元,且每个单元应具有连续分布的刚度和质量。

只须考虑三阶振型时,一般单元数 n 不小于 10。

A1.1 多自由度体系自由振动方程

$$[U_N]\{X_N\}^{(r-1)} = \lambda_N^{(r)}\{X_N\}^{(r)} \quad (\text{A1})$$

式中: $[U_N]$ ——第 N 振型的动力矩阵;

$\{X_N\}$ ——第 N 振型的振型向量;

λ_N ——第 N 振型的特征值;

$(r-1)$ 、 (r) ——上标,迭代次数。

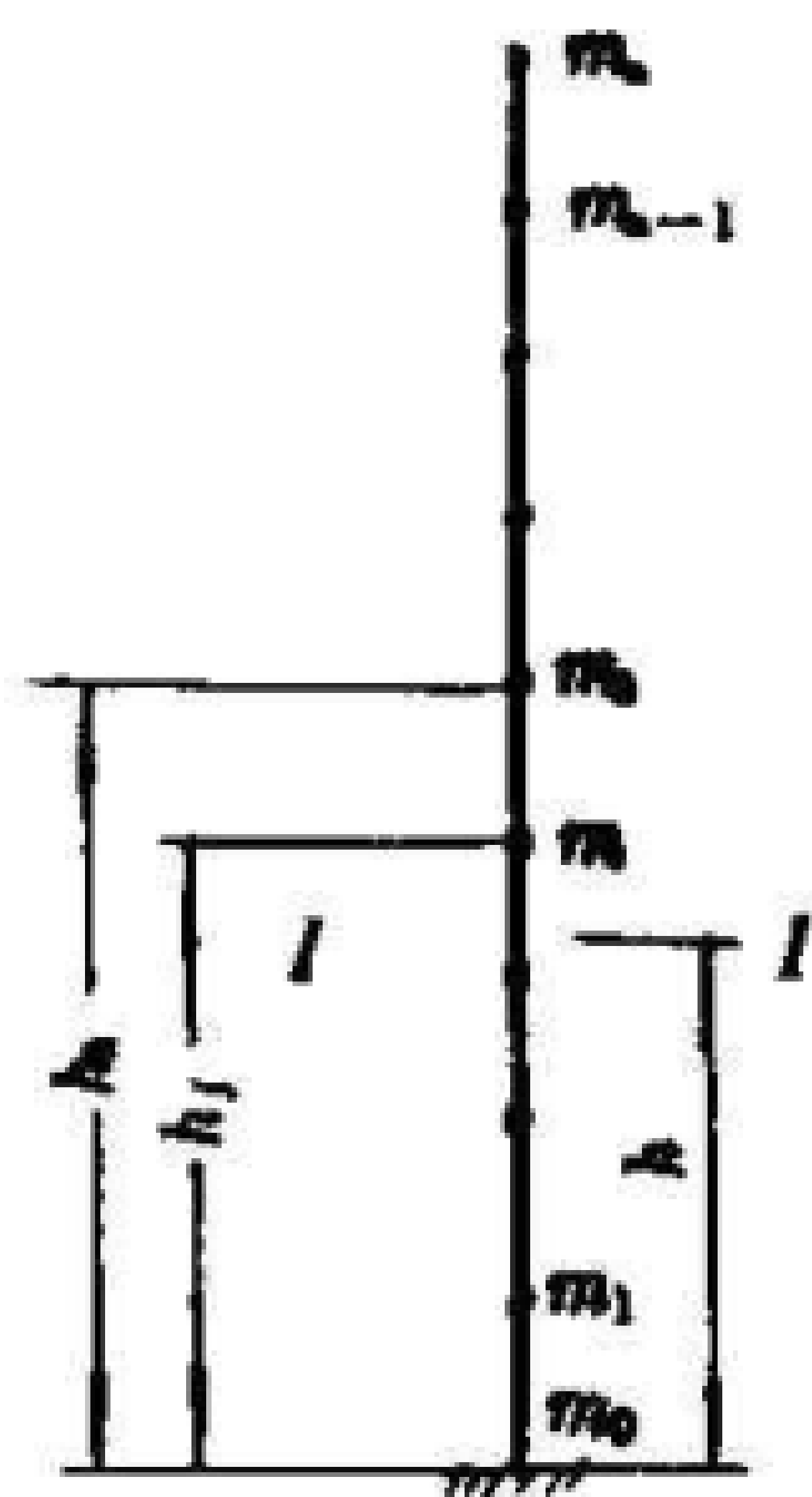


图 A1

A1.2 质量矩阵

每个单元的连续分布质量按静力等效原则分别集中于该单元的两端,一 endpoint 处相邻单元的集中质量应予迭加,如图 A-1 所示。

体系的质量矩阵如式(A-2)所示:

$$[m] = \begin{bmatrix} m_1 & & & & \\ & m_2 & & & \\ & & m_j & & \\ & & & m_{n-1} & \\ 0 & & & & m_n \end{bmatrix} \quad (\text{A2})$$

式中: $[m]$ ——质量矩阵;

m_j ——第 j 质点的质量, $j=1, 2, \dots, n$ 。 kg

A1.3 柔度矩阵

体系的柔度矩阵如式(A3)所示:

$$[\delta]=\begin{bmatrix}\delta_{11} & \delta_{12} & \cdots & \delta_{1n} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \cdots & \delta_{2n} \\ & & \delta_{ij} & \\ \delta_{n1} & \delta_{n2} & \cdots & \delta_{nn}\end{bmatrix}$$

(A3)

式中:[δ]——柔度矩阵;

δ_{ij} ——柔度矩阵元素,即单位载荷作用于*i*点时在*j*点产生的位移。mm/N

视塔器为底端固定的悬臂梁,不考虑地基的影响,用静力学的图乘法求取 δ_{ij} ,如图 A2 所示。

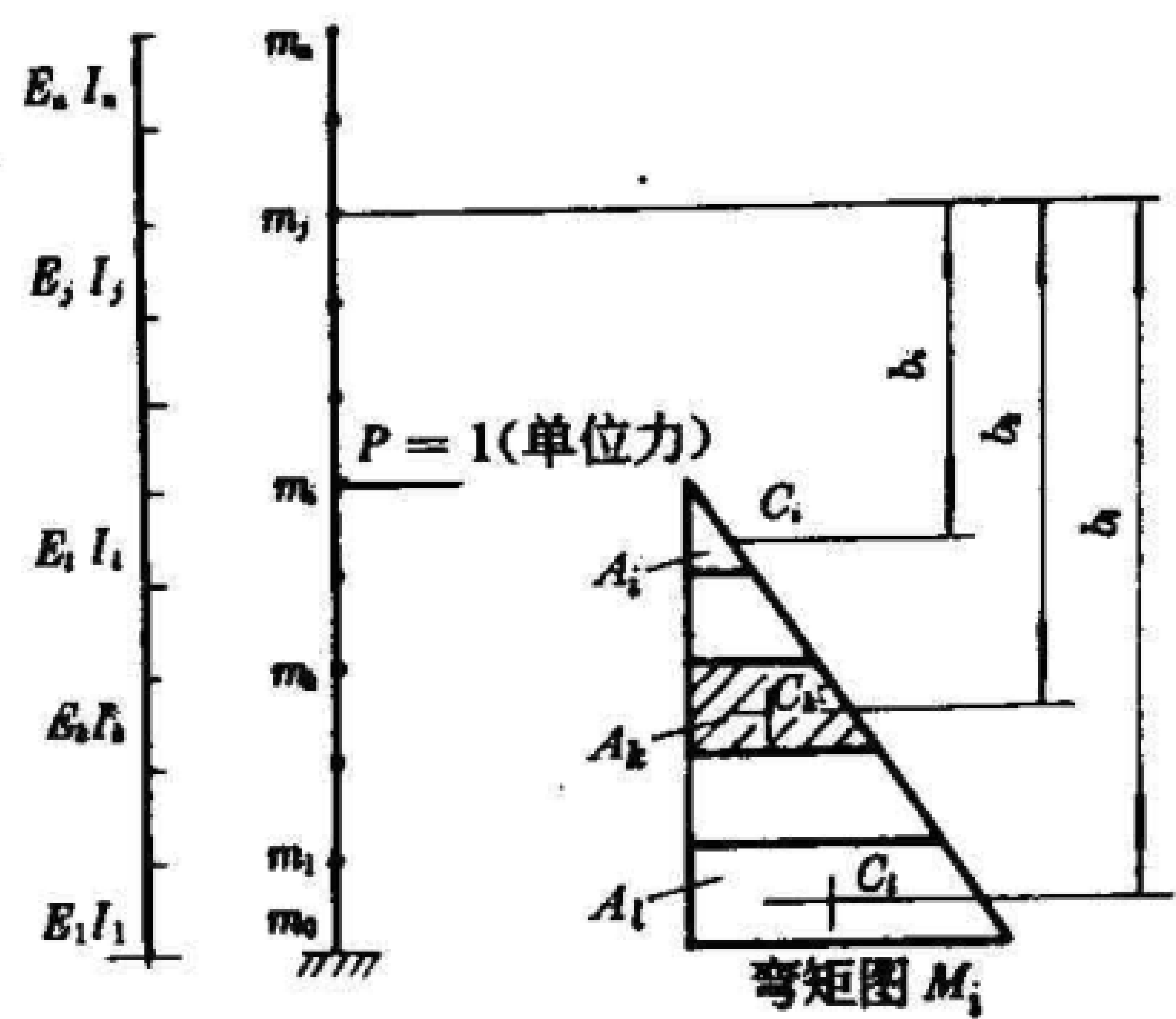


图 A2 位移计算图

将单位力作用于悬臂梁的质点 m_i 上,画出弯矩图 M_i ,再以质点 $m_k(k=1,2,\cdots,i)$ 所在位置,在弯矩图上划分出 i 个区段,得到一个三角形和 $(i-1)$ 个梯形,最后确定出这些图形的形心位置 $C_k(k=1,2,\cdots,i)$ 。

柔度矩阵元素按式(A4)计算:

$$\delta_{ij}=\delta_{ji}=\sum_{k=1}^i \frac{A_k b_k}{E_k I_k}$$

(A4)

式中: A_k ——弯矩图 M_i 上的第 K 区段面积,mm²;

b_k ——形心 C_k 至质点 m_i 的距离,mm

E_k ——第 k 单元材料的弹性模量,MPa;

I_k ——第 k 单元的截面惯性矩,mm⁴。

A1.4 第一阶振型的特征值 λ_1

a. 动力矩阵如式(A5)所示:

$$[U_1]=[\delta][m]$$
$$=\begin{bmatrix}m_1\delta_{11} & m_2\delta_{12} & \cdots & m_n\delta_{1n} \\ m_1\delta_{21} & m_2\delta_{22} & \cdots & m_n\delta_{2n} \\ & & m_j\delta_{ij} & \\ m_1\delta_{n1} & m_2\delta_{n2} & \cdots & m_n\delta_{nn}\end{bmatrix}$$

(A5)

b. 选取一个归一化的初始振型向量 $\{X_1\}^{(0)}$, 即规定其中的元素 X_{1n} 为 1, 根据第一振型的振幅可近似定出其它元素 X_{1j} ($j=1, 2, \dots, n-1$).

c. 以动力矩阵 $[U_1]$ 左乘 $\{X_1\}^{(0)}$, 得到一个新的向量, 再进行归一化处理, 就得到一个归一化的振型向量 $\{X_1\}^{(1)}$ 和 $\lambda_1^{(1)}$, 即有:

$$[U_1]\{X_1\}^{(0)} = \lambda_1^{(1)}\{X_1\}^{(1)} \quad (A6)$$

d. 重复上述步骤,

$$[U_1]\{X_1\}^{(r-1)} = \lambda_1^{(r)}\{X_1\}^{(r)} \quad r=1, 2, 3, \dots \quad (A7)$$

直至 $|X_{1j}^{(r)} - X_{1j}^{(r-1)}| \leq 10^{-5}$, $j=1, 2, \dots, n$.

此时得到的 λ_1 即为第一阶振型的特征值, $\{X_1\}$ 为第一振型时的振型向量(见图 A3).

$$\{X_1\} = \begin{bmatrix} X_{11} \\ X_{12} \\ \vdots \\ X_{1n} \end{bmatrix} \quad (A8)$$

A1.5 第二阶振型的特征值 λ_2

a. 动力矩阵如式(A-9)所示:

$$[U_2] = \begin{bmatrix} m_1 a_{11} & m_2 a_{12} & \dots & m_{n-1} a_{n,n-1} & 0 \\ m_1 a_{21} & m_2 a_{22} & \dots & m_{n-1} a_{n,n-1} & 0 \\ \dots & & m_j a_{ij} & \dots & \\ m_1 a_{n1} & m_2 a_{n2} & \dots & m_{n-1} a_{n,n-1} & 0 \end{bmatrix} \quad (A9)$$

$$\text{式中: } a_{ij} = \delta_{ij} - \delta_{in} X_{1j} \quad \begin{matrix} i=1, 2, \dots, n; \\ j=1, 2, \dots, n-1 \end{matrix} \quad (A10)$$

b. 选取一个归一化的初始振型向量 $\{X_2\}^{(0)}$, 即规定其中的元素 X_{2n} 为 1, 根据第二振型的振幅可近似定出其它元素 X_{2j} ($j=1, 2, \dots, n-1$).

c. 以动力矩阵 $[U_2]$ 左乘 $\{X_2\}^{(0)}$, 得到一个新的向量, 再进行归一化处理, 就得到一个归一化的振型向量 $\{X_2\}^{(1)}$ 和 $\lambda_2^{(1)}$, 即有:

$$[U_2]\{X_2\}^{(0)} = \lambda_2^{(1)}\{X_2\}^{(1)} \quad (A11)$$

d. 重复上述步骤,

$$[U_2]\{X_2\}^{(r-1)} = \lambda_2^{(r)}\{X_2\}^{(r)} \quad r=1, 2, 3, \dots \quad (A12)$$

直至 $|X_{2j}^{(r)} - X_{2j}^{(r-1)}| \leq 10^{-5}$, $j=1, 2, \dots, n$.

此时得到的 λ_2 即为第二阶振型的特征值, $\{X_2\}$ 为第二振型时的振型向量(见图 A3).

$$\{X_2\} = \begin{bmatrix} X_{21} \\ X_{22} \\ \vdots \\ X_{2n} \end{bmatrix} \quad (A13)$$

第三阶振型的特征值 λ_3

a. 动力矩阵

$$[U_3] = \begin{bmatrix} m_1\beta_{11} & m_2\beta_{12} & \cdots & m_{n-2}\beta_{1,n-2} & 0 & 0 \\ m_1\beta_{21} & m_2\beta_{22} & \cdots & m_{n-2}\beta_{2,n-2} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ m_1\beta_{n1} & m_2\beta_{n2} & \cdots & m_{n-2}\beta_{n,n-2} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (A14)$$

式中: $\beta_{ij} = a_{ij} - a_{i,n-1}r_{ij}$ (A15)

$$r_{ij} = \frac{X_{1j} - X_{2j}}{X_{1,n-1} - X_{2,n-1}} \quad \begin{matrix} i=1,2,\cdots,n \\ j=1,2,\cdots,n-1 \end{matrix} \quad (A16)$$

b. 选取一个规一化的初始振型向量 $\{X_3\}^{(0)}$, 即规定其中的元素 X_{3n} 为 1, 根据第三振型的振幅可近似定出其它元素 X_{3j} ($j=1,2,\cdots,n-1$).

c. 以动力矩阵 $[U_3]$ 左乘 $\{X_3\}^{(0)}$, 得到一个新的向量, 再进行规一化处理, 就得到一个规一化的振型向量 $\{X_3\}^{(1)}$ 和 $\lambda_3^{(1)}$, 即有:

$$[U_3]\{X_3\}^{(0)} = \lambda_3^{(1)}\{X_3\}^{(1)} \quad (A17)$$

d. 重复上述步骤,

$$[U_3]\{X_3\}^{(r-1)} = \lambda_3^{(r)}\{X_3\}^{(r)} \quad r=1,2,3,\cdots \quad (A18)$$

直至 $|X_{3j}^{(r)} - X_{3j}^{(r-1)}| < 10^{-5}$, $j=1,2,\cdots,n$.

此时得到的 λ_3 即为第三阶振型的特征值, $\{X_3\}$ 为第三振型时的振型向量(见图 A3)。

$$\{X_3\} = \begin{bmatrix} X_{31} \\ X_{32} \\ \vdots \\ X_{3n} \end{bmatrix} \quad (A19)$$



图 A3 第 1、2、3 振型振型曲线

自振周期

第 N 振型的自振周期按式(A20)计算:

$$T_N = 2\pi \sqrt{\lambda_N} \quad (A20)$$

式中: λ_N ——第 N 阶的特征值, $N=1,2,3$ s.

地震弯矩的计算

A2.1 水平地震力

第 N 振型时, 在高度 h_k 处的集中质量 m_k 所引起的水平地震力按式(A21)计算, 见图 A1.

$$F_{kN}=C_z\alpha_N\eta_{kN}m_kg \tag{A21}$$

式中： F_{kN} —— k 质点处 N 振型的水平地震力， N ；
 C_z ——综合影响系数，取 $C_z=0.5$ ；
 g ——重力加速度，取 $g=9.81m/s^2$ ；
 m_k ——距地面高度 h_k 处的集中质量， kg ；
 α_N ——第 N 振型时的地震影响系数，根据图 6-4 查取，当 $T=T_N$ 时查得 α_N ， $N=1,2,3$ ；
 η_{kN} ——第 N 振型时的振型参与系数；

$$\eta_{kN}=\frac{X_{kN}\sum_{j=1}^n m_jX_{jN}}{\sum_{j=1}^n m_jX_{jN}^2} \tag{A22}$$

m_j ——第 j 个质点的集中质量， kg ；
 X_{jN} ——第 N 振型向量中第 j 个元素的值， mm ；
 X_{kN} ——第 N 振型向量中第 k 个元素的值， mm 。

地震弯矩

第 N 振型时，任意计算截面 I—I 处的地震弯矩按式(A23)计算，见图(6-3)

$$M_{EN}^{I-I}=\sum_{k=N}^3 F_{kN}(h_k-h) \tag{A23}$$

式中： M_{EN}^{I-I} ——计算截面 I—I，在 N 振型时的地震弯矩， $N\cdot mm$ ；
 h ——计算截面 I—I 距地面的高度， mm ；
 h_k ——计算截面 I—I 以上集中质量 m_k 距地面的高度， mm ；

第三振型以上各阶振型对直立容器的影响甚微，可不予考虑。工程上仅考虑前三个振型的地震弯矩组合。

计算截面 I—I 处的地震弯矩按式(A24)计算：

$$M_E^{I-I}=\sqrt{(M_{E1}^{I-I})^2+(M_{E2}^{I-I})^2+(M_{E3}^{I-I})^2} \tag{A24}$$

式中： M_{E1}^{I-I} 、 M_{E2}^{I-I} 、 M_{E3}^{I-I} ——分别为第一、第二、第三振型时，计算截面 I—I 处的地震弯矩， $N\cdot mm$ 。

附 录 B
场地土的分类及近震、远震
(补充件)

B1 场地土的类型，宜根据土层剪切波速按表 B1 划分。

表 B1 场地土的类型划分

场 地 土 的 类 型	土 层 剪 切 波 速(m/s)
坚硬场地土	$V_{sm}>500$
中硬场地土	$500\geq V_{sm}>250$
中软场地土	$250\geq V_{sm}>140$
软弱场地土	$V_{sm}\leq 140$

注： V_s 为土层剪切波速； V_{sm} 为土层平均剪切波速，取土面下 15m 且不深于场地覆盖层厚度范围内各土层剪切波速，按土层厚度加权的平均值。

B2 当无实测剪切波速时，可按表 B2 划分土的类型，并可按下列原则确定场地土类型：当为单一土层

时,土的类型即为场地土的类型;当为多层时,场地土类型可根据地面下 15m 且不深于场地覆盖层厚度范围内各土层类型和厚度综合评定。

表 B2 土的类型划分

土的类型	岩 土 名 称 和 性 状
中硬土	中密、稍密的碎石土,密实、中密的砾、粗、中砂, $f_k>200$ 的粘性土和粉土。
中软土	稍密的砾、粗、中砂,除松散外的细、粉砂, $f_k\leq 200$ 的粘性土和粉土, $f_k\geq 130$ 的填土。
软弱土	淤泥和淤泥质土,松散的砂,新近沉积的粘性土和粉土, $f_k<130$ 的填土。

注: f_k 为地基土静承载力标准值(KPa)

B3 场地覆盖层厚度,应按地面至剪切波速大于 500m/s 的土层或坚硬土顶面的距离确定。

B4 场地类别,应根据场地土类型和场地覆盖层厚度转分为四类,并宜符合表 B3 的规定。当有充分依据时可适当调整。

表 B3 场地类别划分

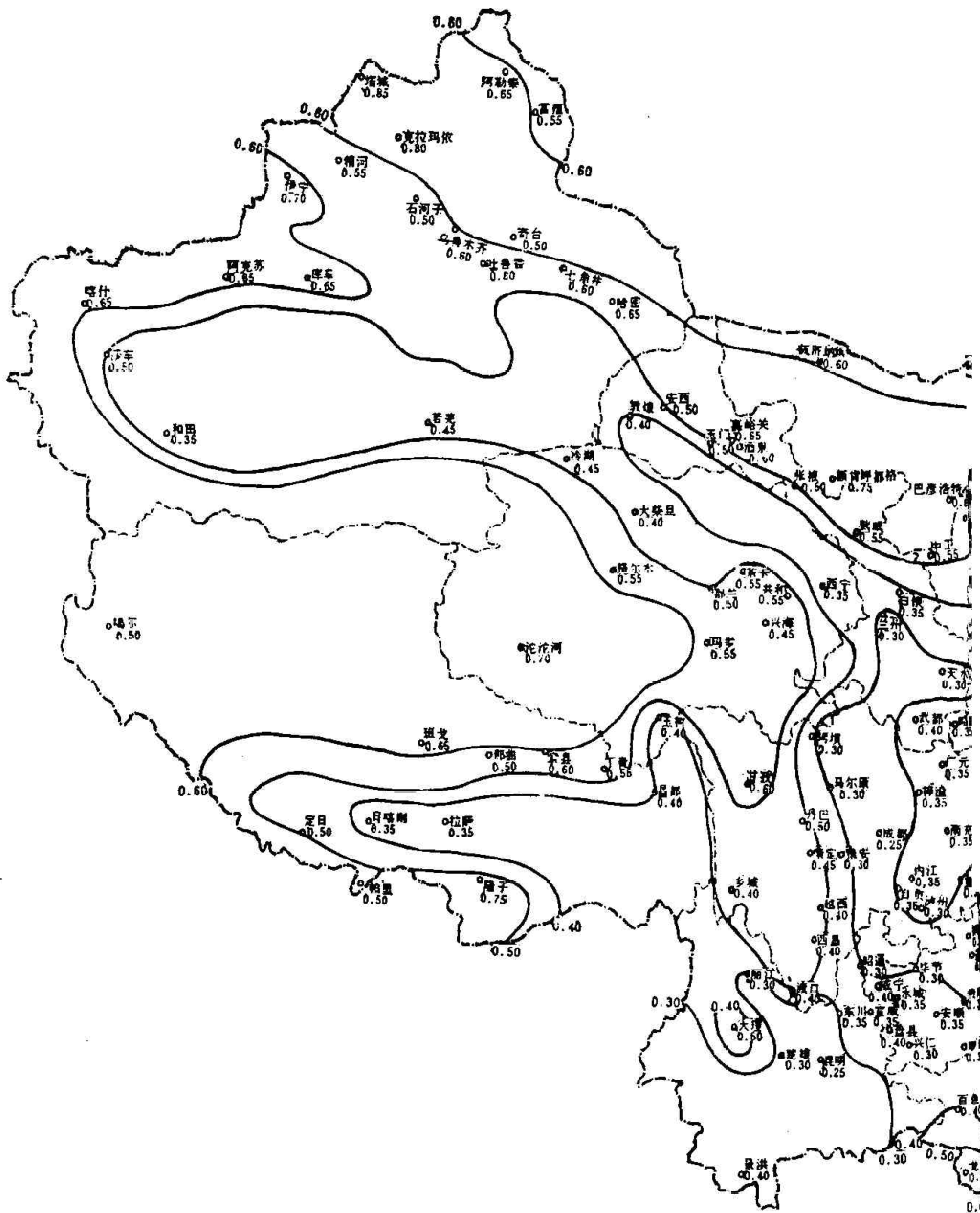
场地土类型	场地覆盖层厚度 d_{ov} m				
	0	$0<d_{ov}\leq 3$	$3<d_{ov}\leq 9$	$9<d_{ov}\leq 80$	$d_{ov}>80$
坚硬场地土	I				
中硬场地土		I		I	
中软场地土		I	II		III
软弱场地土		I	II	III	IV

注:以上摘自 GBJ 11—89《建筑抗震设计规范》。

B5 近震、远震的规定

当塔器所在地区遭受的地震影响来自本设防烈度区或比该地区设防烈度大一度地区的地震时,抗震设计应按本规范有关设计近震的规定执行;当塔器所在地区遭受的地震影响可能来自设防烈度比该地区设防烈度大二度或二度以上地区的地震,应按本规范有关设计远震执行。

附 录 C
全国基本风压分布图
(补充件)



附 录 D
塔器挠度计算
(参考件)

D1 符号说明 D_e ——塔器有效直径, mm; D_{ei} ——第 i 段塔器有效直径, mm; D_i ——塔器内径, mm; D_{ji} ——塔器第 j 段内直径, mm; D_{ei} ——塔器第 j 段有效直径, mm; E ——材料在设计温度下的弹性模量, N/mm²; H ——塔器的总高度, mm; H_i ——塔器顶部至第 i 段底截面的距离, mm; H_j ——塔器第 j 段底截面至 i 段底截面的距离, mm; K_1 ——体型系数, 取 $K_1=0.7$; P_i ——塔器第 i 段顶截面处单位长度风载荷, N/mm;

$$P_i = K_1 f_i q D_{ei} \times 10^{-6} \quad (D1)$$

 P_0 ——距地面 10 米高度处单位长度的风载荷, N/mm;

$$P_0 = K_1 q D_e \times 10^{-6} \quad (D2)$$

 P_t ——塔器顶部的风载荷, N/mm;

$$P_t = K_1 q f_t D_e \times 10^{-6} \quad (D3)$$

 I ——塔器截面惯性矩, mm⁴;

$$I = 0.785 (D_i + \delta_e)^3 \delta_e \quad (D4)$$

 I_i ——塔器第 i 段的截面惯性矩, mm⁴; I_j ——塔器第 j 段的截面惯性矩, mm⁴; a_i ——塔器顶部距 i 段顶截面的距离, mm; f_i ——第 i 段顶截面处风压高度变化系数, 见表 6-3; f_t ——塔器顶端处风压高度变化系数, 见表 6-3; q_0 ——基本风压值, 见附录 C, 但不小于 250 N/m², N/m²; l_i ——塔器第 i 段的长度(见图 D3), mm; y ——塔器顶部挠度, mm; δ_{ei} ——第 i 段的有效厚度, mm; δ_{ej} ——第 j 段的有效厚度, mm。**D2 挠度计算**

等直径等厚度的塔器顶部挠度(见图 D1)按式(D5)计算:

$$Y = \left[\frac{11(P_0 - P_t)}{120} + \frac{P_0}{8} \right] \frac{H^4}{EI} \quad (D5)$$

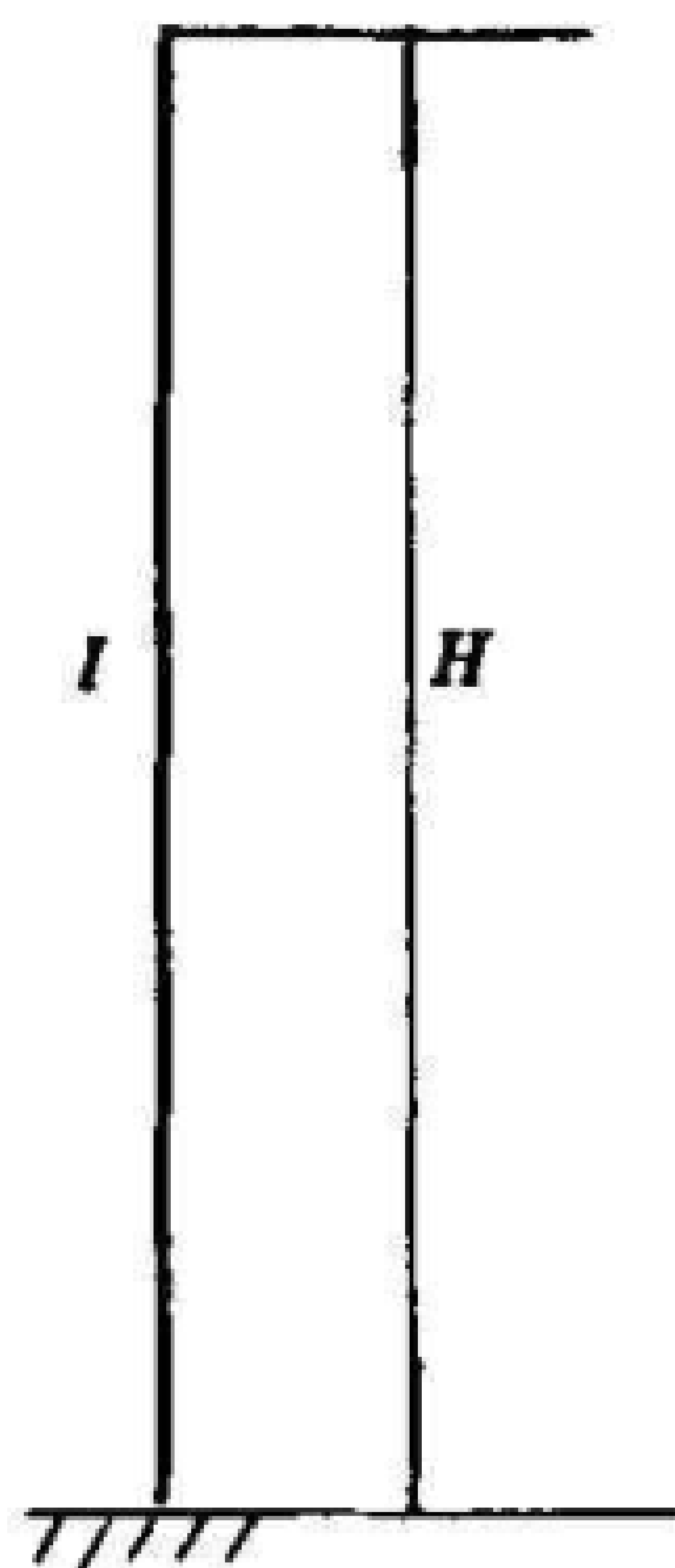


图 D1

等直径不等厚度塔器顶部挠度(见图 D2)按式(D6)计算:

$$Y = \left[\frac{11(P_D - P_0)}{120E} + \frac{P_0}{8E} \right] \times \left[\sum_{i=1}^n \frac{H_i^4}{I_i} - \sum_{i=2}^n \frac{H_i^4}{I_{i-1}} \right] \quad (D6)$$

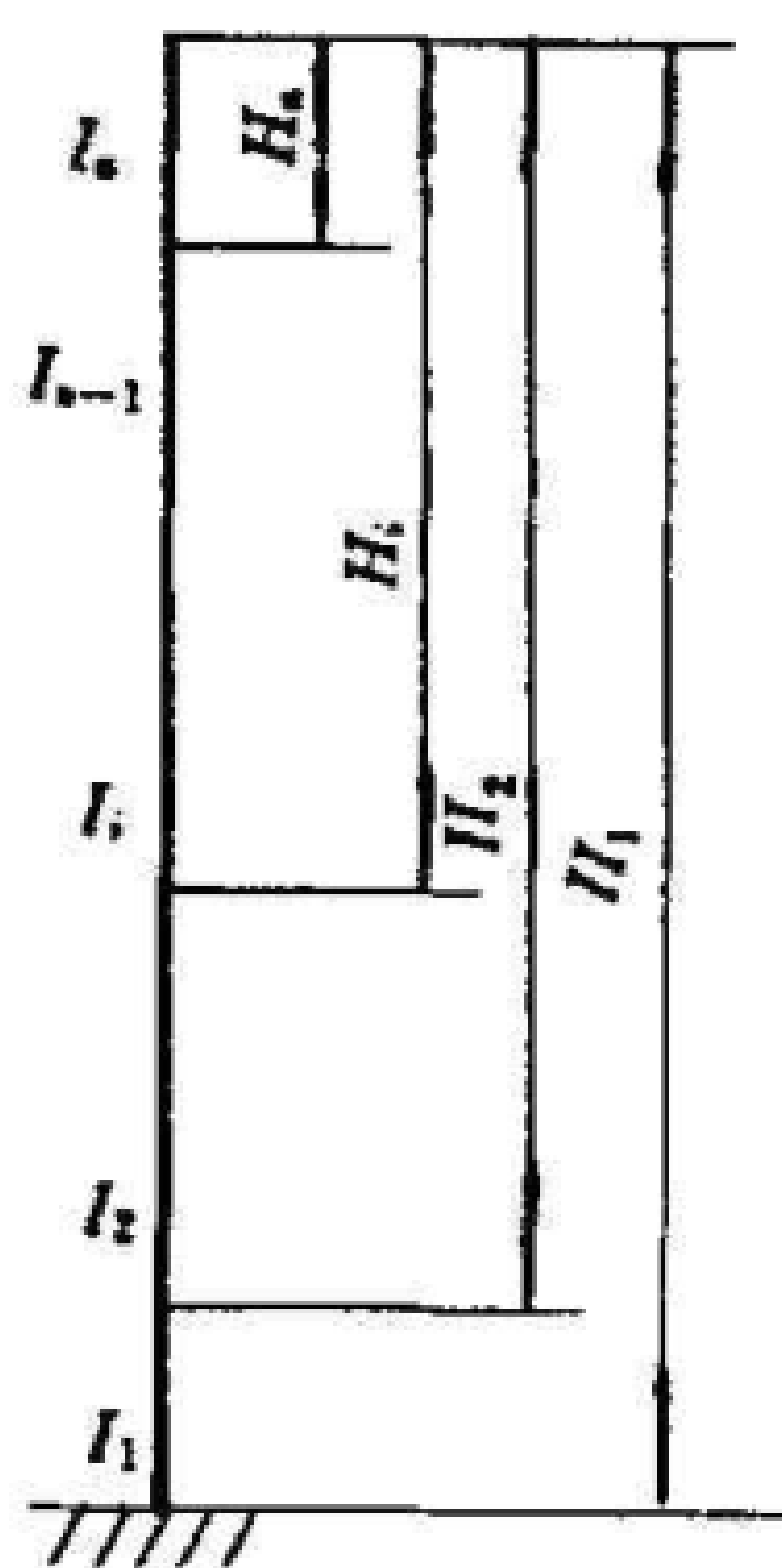


图 D2

不等直径、不等壁厚塔器顶部挠度(见图 D3)按式(D7)计算:

$$Y = \sum_{i=1}^n \left\{ \frac{P_i}{8E} \left[\frac{l_i^4}{I_i} + \frac{4a_i}{3} \times \frac{l_i^3}{I_i} \right] + \frac{P_i l_i}{12E} \left[4 \left(\sum_{j=1}^{i-1} \frac{H_j^3}{I_j} - \sum_{j=2}^{i-1} \frac{H_j^3}{I_{j-1}} \right) + 3(3l_i + 2a_i) \right. \right. \\ \left. \left(\sum_{j=1}^{i-1} \frac{H_j^2}{I_j} - \sum_{j=2}^{i-1} \frac{H_j^2}{I_{j-1}} \right) + 6(l_i^2 + a_i l_i) \right. \\ \left. \left. \left(\sum_{j=1}^{i-1} \frac{H_j}{I_j} - \sum_{j=2}^{i-1} \frac{H_j}{I_{j-1}} \right) \right] \right\} \quad (D7)$$

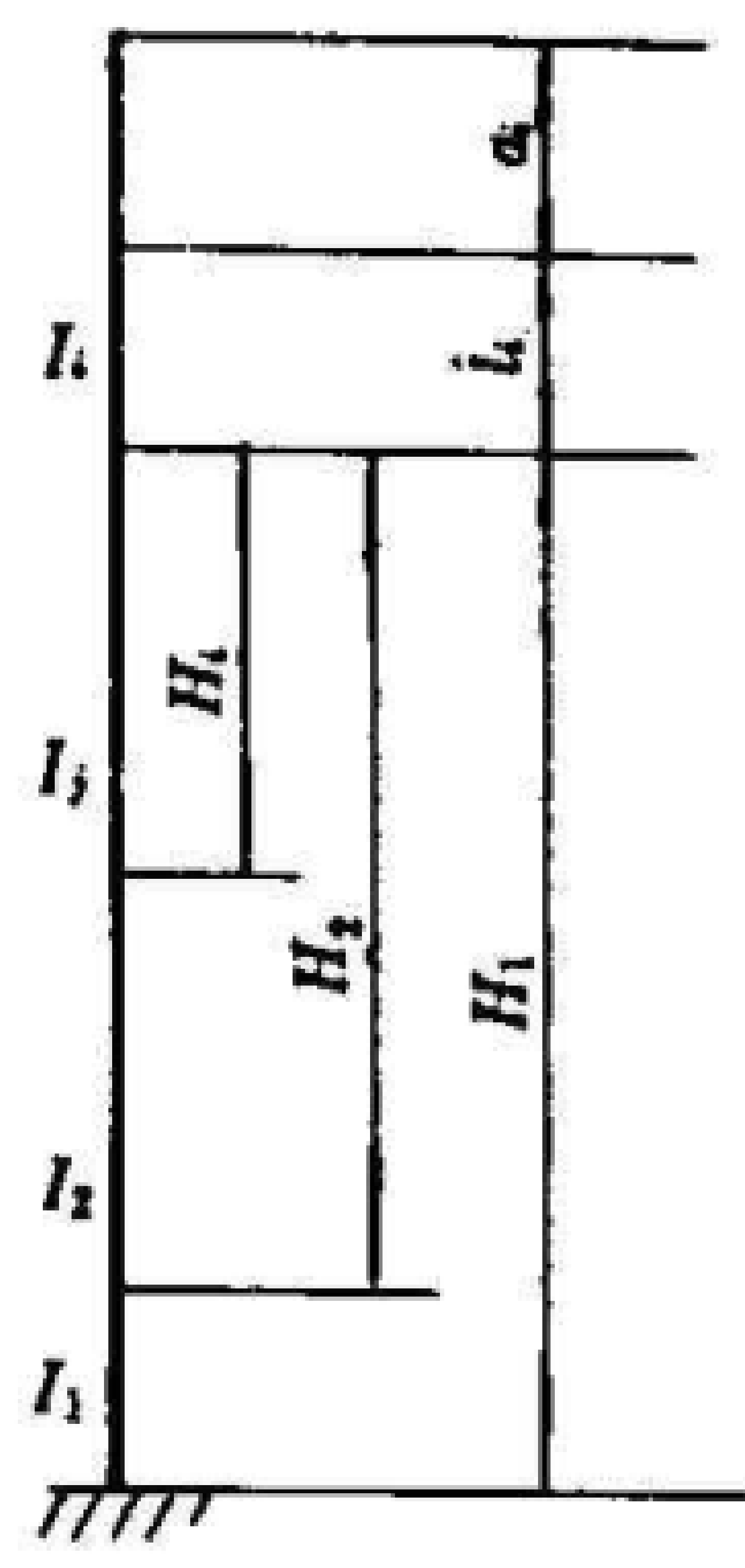


图 D3

D3 塔器顶部挠度控制值按工程设计要求确定。

附录 E
计算数据
(参考件)

E1 质量参考值

表 E1

名 称	笼式扶梯	开式扶梯	钢制平台	圆泡罩塔盘	条形泡罩塔盘
单位质量	40kg/m	15~24kg/m	150kg/m ²	150kg/m ²	150kg/m ²
名 称	舌形塔盘	筛板塔盘	浮阀塔盘	塔盘充液重	
单位质量	75kg/m ²	65kg/m ²	75kg/m ²	70kg/m ²	

E2 当量直径参考值

笼式扶梯系数 $K_3=400\text{mm}$

操作平台系数 $K_4=600\text{mm}$

E3 裙座与封头对接时,裙座顶端距封头切线的尺寸

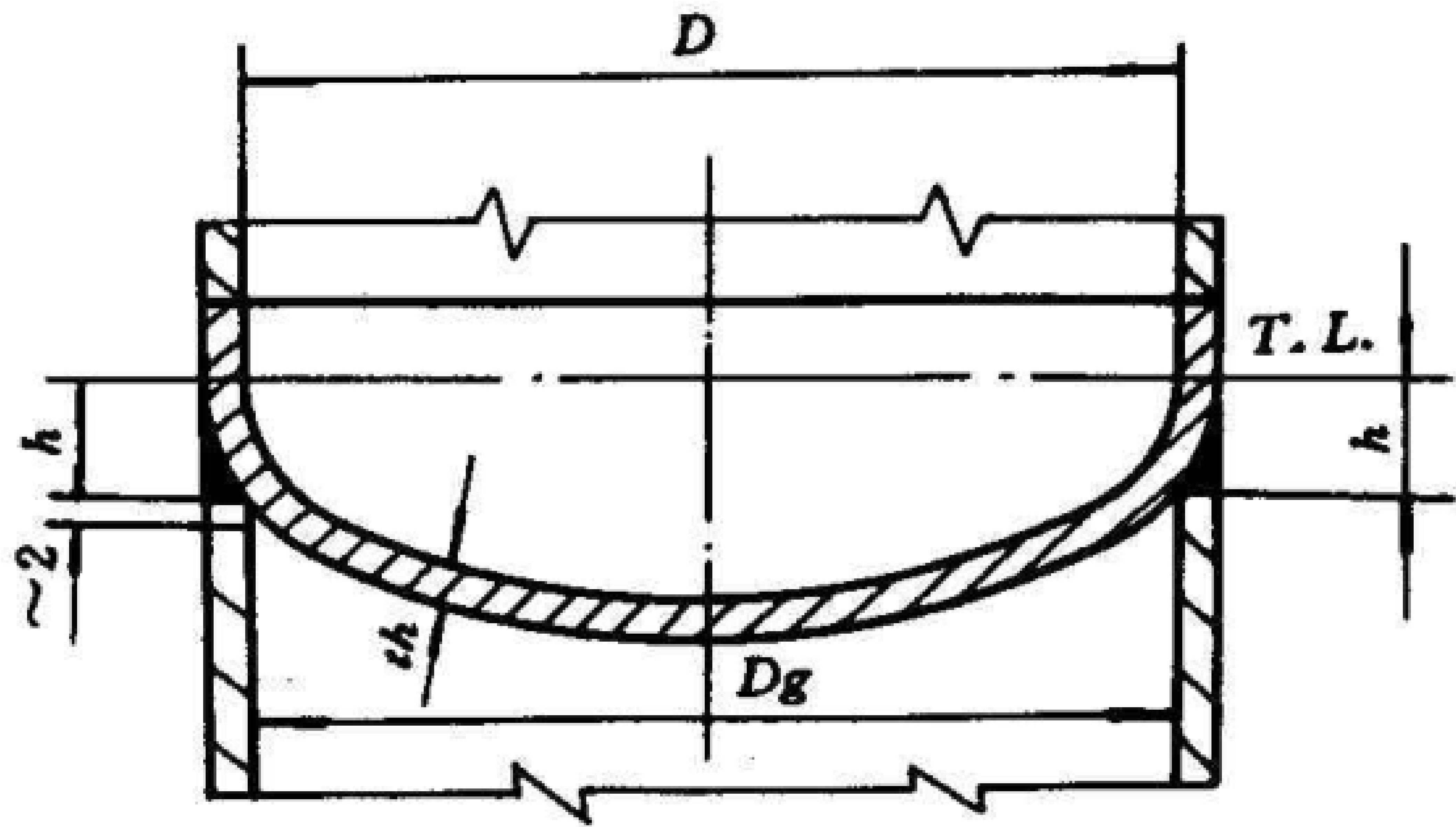


表 E2 mm

<div><div>D</div><div>t_b</div></div>	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34
	h														
600	31	36	41	45	49	53	57	60	64	67	70	74	77	80	83
700	33	39	44	48	53	57	61	64	68	72	75	78	82	85	88
800	36	41	47	51	56	60	64	68	72	76	79	83	86	90	93
900	38	44	49	54	59	63	68	72	76	80	83	87	91	94	97
1000	40	46	52	57	62	67	71	75	79	83	87	91	95	98	102
1200	43	50	56	62	67	72	77	82	86	90	94	98	102	106	110
1400	46	54	61	67	72	78	83	88	92	97	101	105	109	114	117
1600	50	58	65	71	77	83	88	93	98	103	107	112	116	120	125
1800	53	61	68	75	81	87	93	98	104	108	113	118	122	127	131
2000	55	64	72	79	86	92	98	103	109	114	119	124	128	133	138
2200	58	67	75	83	90	96	102	108	114	119	124	129	134	139	144
2400	61	70	79	86	93	100	107	113	118	124	129	135	140	145	149
2600	63	73	82	90	97	104	111	117	123	129	134	140	145	150	155
2800	65	76	85	93	101	108	115	121	127	133	139	145	150	155	161
3000	68	79	88	96	104	112	119	125	132	138	144	149	155	160	166

附 录 F
计 算 例 题
(参考件)

例题 1

已知 $\phi 800/\phi 400/\phi 800 \times 18400\text{mm}$ 填料塔(如图 F1-1)的设计条件如下

设置地区的基本风压值 $q_0 = 294\text{N/m}^2$; 地震烈度为 8 度; 场地土类型为 III 类, 远震; 塔壳与裙座对接; 在 $\phi 400\text{mm}$ 内径的塔段装填料, 填料密度为 505kg/m^3 ; 塔体外表面附有 80mm 厚保温层, 保温材料密度 300kg/m^3 ; 塔体每隔 5m 安装一层操作平台, 设计压力 $p = 0.2\text{MPa}$, 设计温度为 40°C ; 壳体厚度附加量 3mm , 裙座厚度附加量 2mm 。对该塔进行强度和稳定校核。

1. 圆筒和封头的强度计算

圆筒和封头材料选用 20R, 裙座材料选用 Q235—A(A3)

(1) 直径 $D_i = 800\text{mm}$ 段圆筒和封头 $[\sigma]' = 133\text{MPa}$

$$\text{圆筒: } \delta = \frac{pD_i}{2[\sigma]'\phi - p} = \frac{0.2 \times 800}{2 \times 133 \times 0.85 - 0.2} = 0.7\text{mm}$$

$$\text{封头: } \delta_h = \frac{pD_i K}{2[\sigma]'\phi - 0.5p} = \frac{0.2 \times 800 \times 1}{2 \times 133 \times 0.85 - 0.5 \times 0.2} = 0.7\text{mm}$$

(2) 直径 $D_i = 400\text{mm}$ 段圆筒:

$$\delta = \frac{pD_i}{2[\sigma]'\phi - p} = \frac{0.2 \times 400}{2 \times 133 \times 0.85 - 0.2} = 0.35\text{mm}$$

2. 塔器质量计算

因钢板的最小厚度为 4mm , 故加上厚度附加量并圆整后取圆筒、封头、裙座厚度均为 8mm 。

$$\begin{aligned} \text{圆筒和裙座质量 } m_{01} &= \frac{\pi}{4} [(0.416^2 - 0.4^2) \times 8.6 + (0.816^2 - 0.8^2) \times (18.4 - 8.6)] \times 7.85 \times 10^3 \\ &= 2254\text{kg} \end{aligned}$$

$$\text{附属件质量 } m_s = 0.25m_{01} = 564\text{kg}$$

$$\begin{aligned} \text{保温层质量 } m_{03} &= \frac{\pi}{4} [(0.576^2 - 0.416^2) \times 8.6 + (0.976^2 - 0.816^2) \times (18.4 - 8.6 - 5)] \times 300 \\ &= 646\text{kg} \end{aligned}$$

$$\text{笼式扶梯单位质量为 } 40\text{kg/m}, \text{ 故梯子质量} = 40 \times 18.4 = 736\text{kg}$$

钢制平台单位质量为 150kg/m^2 , 设平台宽 1.0m , 平台数为 3 个。故

$$\begin{aligned} \text{平台质量} &= \frac{\pi}{4} [(0.976 + 2)^2 - 0.976^2] \times 1 \times 150 + \frac{\pi}{4} [(0.576 + 2)^2 - 0.576^2] \times 2 \times 150 \\ &= 2416\text{kg} \end{aligned}$$

$$m_{04} = \text{扶梯} + \text{平台} = 736 + 2416 = 3152\text{kg}$$

$$\text{物料质量 } m_{05} = \frac{\pi}{4} \times 0.4^2 \times 8.6 \times 505 + \frac{\pi}{4} \times 0.8^2 \times 4.8 \times 1000 = 2959\text{kg}$$

$$\text{水压试验时质量 } m_w = \frac{\pi}{4} (0.4^2 \times 8.6 + 0.8^2 \times 4.8) \times 1000 = 3493\text{kg}$$

$$\begin{aligned} \text{塔器操作质量 } m_0 &= m_{01} + m_{02} + m_{03} + m_{04} + m_{05} + m_s \\ &= 2254 + 0 + 646 + 3152 + 2959 + 564 = 9575\text{kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{塔器最大质量 } m_{\max} &= m_{01} + m_{02} + m_{03} + m_{04} + m_w + m_s \\ &= 2254 + 0 + 646 + 3152 + 3493 + 564 = 10109\text{kg} \end{aligned}$$

$$\text{塔器最小质量 } m_{\min} = m_{01} + 0.2m_{02} + m_{03} + m_{04} + m_s = 6616\text{kg}$$

3. 塔的基本自振周期计算

本设备的截面变化为三次变化, 自振周期计算列于表 F1-1 和表 F1-2

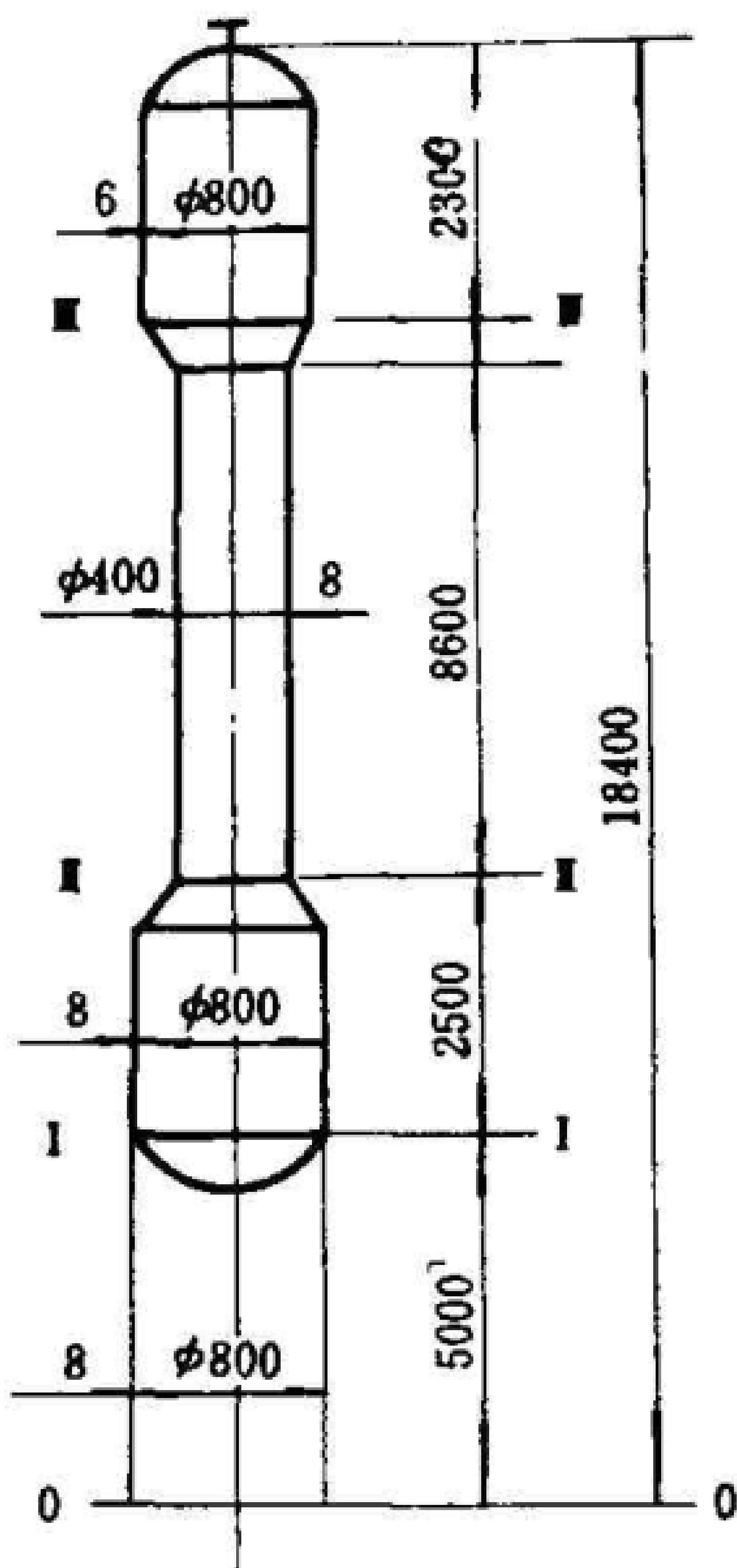


图 F1-1
表 F1-1

塔段号	1	2	3	4	5	6	7	8
$m_{m1}+m_s(\text{kg})$	498.2	498.2	498.2	221.4	221.4	221.4	201.3	458.3
$m_{o3}(\text{kg})$	0	0	169	82.3	82.3	82.3	75	155
$m_{o4}(\text{kg})$	100	100	1030.7	88	830.7	88	822.7	92
$m_{o5}(\text{kg})$	0	0	1257	140	140	140	127	1156
$m_w(\text{kg})$	0	0	1257	276.5	276.5	276.5	251	1156
$m_o(\text{kg})$	598.2	598.2	2954.9	531.7	1274.4	531.7	1226	1861.3
$m_{max}(\text{kg})$	598.2	598.2	2954.9	668.2	1410.9	668.2	1350	1861.3
$m_{min}(\text{kg})$	598.2	598.2	1697.9	391.7	1134.4	391.7	1099	705.3

表 F1-2

塔段号	1	2	3	4	5	6	7	8
各段重心距地面高度 h_i	1250	3750	6250	8600	10800	13000	15100	17250
各段操作质量 m_i	598.2	598.2	2954.9	531.7	1274.4	531.7	1226	1861.3
h_i/H	0.0679	0.2038	0.3397	0.4674	0.5870	0.7065	0.8207	0.9375
$(h_i/H)^3$	3.1305×10^{-4}	8.4653×10^{-3}	3.9191×10^{-2}	10.2109×10^{-2}	20.2262×10^{-2}	35.2644×10^{-2}	55.2781×10^{-2}	82.3975×10^{-2}
$m_i(h_i/H)^3$	0.1873	5.0639	115.8055	54.2914	257.7627	187.5008	677.7095	1533.6647
$\sum_{i=1}^8 m_i(h_i/H)^3$	2831.9858							

续表 F1-1

塔段号	1	2	3	4	备 注
塔顶距 <i>i</i> 截面底部 高度 H_i	18400	13400	10900	2300	$E=2.06\times 10^5$
I_i	1.24293×10^9	1.03577×10^9	0.13336×10^9	1.03577×10^9	
H_i^3/I_i	5011.95	2323.01	9710.78	11.75	$\sum_{i=1}^4 \frac{H_i^3}{I_i}=17057.49$
H_i^3/I_{i-1}	—	1935.8	1250.3	91.2	$\sum_{i=2}^4 \frac{H_i^3}{I_{i-1}}=3277.3$
T_1	$T_1=114.8\sqrt{\sum_{i=1}^4 m_i\left(\frac{h_i}{H}\right)^3\left(\sum_{i=1}^4 \frac{H_i^3}{E_i I_i}-\sum_{i=2}^4 \frac{H_i^3}{E_{i-1} I_{i-1}}\right)}\times 10^{-3}=1.58\text{ 秒}$				

$I_1=\frac{\pi}{8}(D_1+\delta)^3\delta_e=\frac{\pi}{8}(800+8)^3\times(8-2)=1.24293\times 10^9\quad \text{mm}^4$

$I_2=\frac{\pi}{8}(800+8)^3\times(8-3)=1.03577\times 10^9\quad \text{mm}^4$

$I_3=\frac{\pi}{8}(400+8)^3\times(8-3)=0.13336\times 10^9\quad \text{mm}^4$

$I_4=\frac{\pi}{8}(800+8)^3\times(8-3)=1.03577\times 10^9\quad \text{mm}^4$

4. 地震载荷和地震弯矩的计算

将塔沿高度方向分成 8 段,视每段高度之间的质量为作用在该段高度二分之一处的集中质量,各段集中质量对该截面所引起的水平地震力和地震弯矩列于表 F1—3(分段图 F1-2)

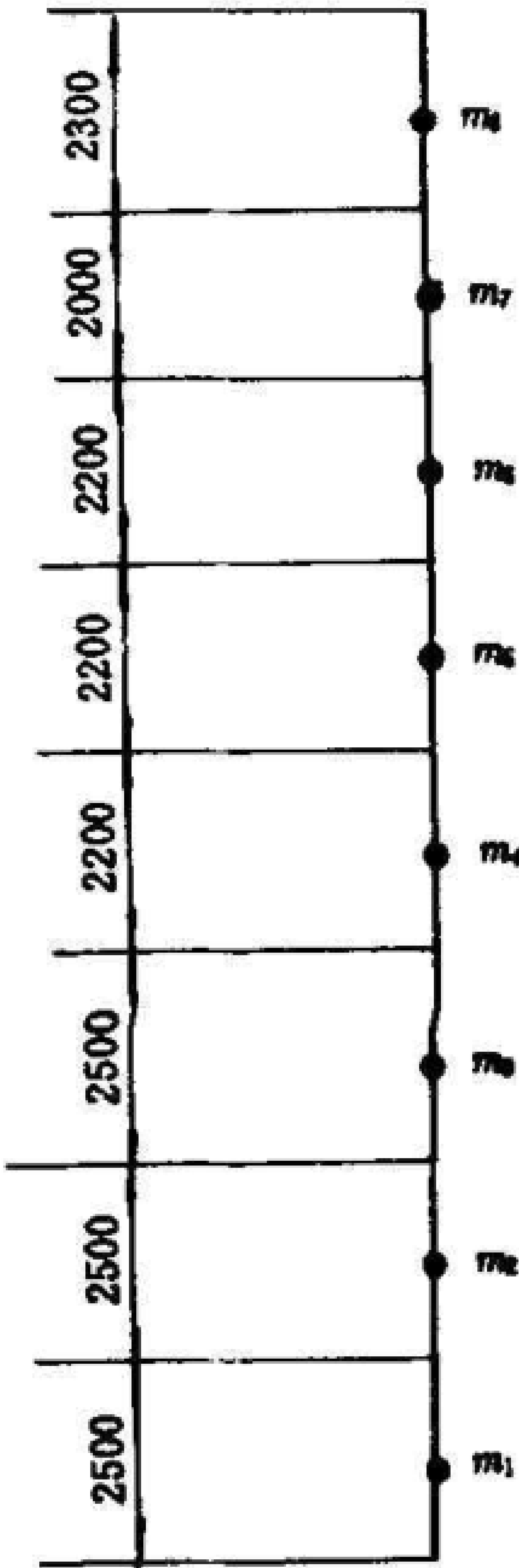


图 F1-2

表 F1-3

塔 段 号	1	2	3	4	5	6	7	8	备 注
操作质量 m_i	598.2	598.2	2954.9	531.7	1274.4	531.7	1226	1861.3	$A = \sum_{i=1}^8 m_i h_i^{1.5}$
m_i 点距地面高 h_i	1250	3750	6250	8600	10800	13000	15100	17250	$= 1.076 \times 10^{10}$
$h_i^{1.5}$	4.4194×10^4	2.2964×10^5	4.941×10^5	7.975×10^5	1.122×10^6	1.482×10^6	1.856×10^6	2.266×10^6	$B = \sum_{i=1}^8 m_i h_i^3$
$m_i h_i^{1.5}$	2.644×10^7	1.374×10^8	1.460×10^9	4.240×10^8	1.43×10^9	7.881×10^8	2.275×10^9	4.217×10^9	$= 1.764 \times 10^{10}$
$m_i h_i^3$	1.168×10^{12}	3.155×10^{13}	7.214×10^{14}	3.382×10^{14}	1.605×10^{15}	1.168×10^{15}	4.221×10^{15}	9.554×10^{15}	$A/B = 6.0998 \times 10^{-7}$
$\eta_{h1} = h_1^{1.5} \frac{A}{B}$	0.027	0.140	0.301	0.486	0.684	0.904	1.132	1.382	
C_s	0.5								
a_1	$a_1 = (T_g/T)^{0.9} a_{\max} = \left(\frac{0.55}{1.58}\right)^{0.9} \times 0.45 = 0.174$ (■类场地土且远震)								
$F_{h1} = C_s a_1 \eta_{h1} m_{h1} g$	13.8	71.5	759.1	220.5	744.0	410.2	1184.5	2195.4	$F_{h1}^0 = 2.061 \times 10^4$
$m_i h_i$	7.478×10^5	2.243×10^6	1.847×10^7	4.573×10^6	1.376×10^7	6.912×10^6	1.851×10^7	3.211×10^7	$\sum_{i=1}^8 m_i h_i = 9.733 \times 10^7$
$F_v = F_{h1}^{0.6} \frac{m_i h_i}{\sum_{i=1}^8 m_i h_i}$	158.3	475.0	3911.1	969.4	2913.7	1463.6	3919.6	6799.4	
$F_{h1} h_{h1}$	1.725×10^4	2.681×10^5	4.744×10^6	1.896×10^6	8.035×10^6	5.333×10^6	1.789×10^7	3.787×10^7	$\sum_{i=1}^8 F_{h1} h_{h1} = 7.605 \times 10^7$

$$M_{E1}^{0-0} = \sum_{i=1}^8 F_{k1} h_i = 7.605 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

因为 $H/D_1=23>15$,故考虑高柔性,即 $M_E^{0-0}=9.506 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{mm}$

5. 风弯矩计算

将塔沿高分成五段,计算各段风载荷 P_i 及风弯矩,结果列入表 F1-4。

水平风载荷 $P_i = K_1 K_{z1} q f_i l_i D_{ei} \times 10^{-6} \text{ N}$

式中: $K_1=0.7 \quad K_{z1}=1.70 \quad q=294 \text{ N/m}^2$

$K_3=400 \quad K_4=600$

$D_{ei} = D_{oi} + 2\delta_{si} + K_3 + K_4 + d_o + 2\delta_{ps}$
 $= D_{oi} + 2 \times 80 + 400 + 600 + 100 + 2 \times 80 = D_{oi} + 1420 \text{ mm}$

表 F1-4

塔 段 号	1	2	3	4	5
塔段长度(m)	0~5	5~7.5	7.5~11.8	11.8~16.1	16.1~18.4
l_i	5000	2500	4300	4300	2300
f_i	0.8	0.9	1.05	1.16	1.21
D_{ei}	2076	2236	1836	1836	2236
$P_i = K_1 K_{z1} q f_i l_i D_{ei} \times 10^{-6}$	2905.2	1760.1	2900.2	3204.0	2177.1

$$M_W^{0-0} = P_1 \frac{l_1}{2} + P_2 (l_1 + \frac{l_2}{2}) + P_3 (l_1 + l_2 + \frac{l_3}{2}) + P_4 (l_1 + l_2 + l_3 + \frac{l_4}{2}) + P_5 (l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + \frac{l_5}{2})$$

$$= 2905.2 \times \frac{5000}{2} + 1760.1 (5000 + \frac{2500}{2}) + 2900.2 (7500 + \frac{4300}{2}) + 3204.0 (11800 + \frac{4300}{2})$$

$$+ 2177.1 (16100 + \frac{2300}{2})$$

$$= 1.285 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$M_W^{1-1} = P_2 \frac{l_2}{2} + P_3 (l_2 + \frac{l_3}{2}) + P_4 (l_2 + l_3 + \frac{l_4}{2}) + P_5 (l_2 + l_3 + l_4 + \frac{l_5}{2})$$

$$= 1760.1 \times \frac{2500}{2} + 2900.2 (2500 + \frac{4300}{2}) + 3204 (6800 + \frac{4300}{2}) + 2177.1 (11100 + \frac{2300}{2})$$

$$= 7.103 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$M_W^{2-2} = P_3 \frac{l_3}{2} + P_4 (l_3 + \frac{l_4}{2}) + P_5 (l_3 + l_4 + \frac{l_5}{2})$$

$$= 2900.2 \times \frac{4300}{2} + 3204 (4300 + \frac{4300}{2}) + 2177.1 (8600 + \frac{2300}{2}) = 4.813 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$M_W^{3-3} = P_5 \frac{l_5}{2} = 2177.1 \times \frac{2300}{2} = 2.504 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

7. 塔壳稳定或强度验算

因 $M_E^{0-0} + 0.25M_W^{0-0} = 1.272 \times 10^8 < M_W^{0-0} (=1.285 \times 10^8)$ 故 $M_{max}^{0-0} = 1.285 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{mm}$ (风弯矩控制)

$M_E^{1-1} + 0.26M_W^{1-1} = 7.801 \times 10^7 > M_W^{1-1} (=7.103 \times 10^7)$ 故 $M_{max}^{1-1} = 7.801 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{mm}$ (地震弯矩控制)

$M_E^{2-2} + 0.25M_W^{2-2} = 5.623 \times 10^7 > M_W^{2-2} (=4.813 \times 10^7)$ 故 $M_{max}^{2-2} = 5.623 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{mm}$ (地震弯矩控制)

$M_E^{3-3} + 0.25M_W^{3-3} = 3.782 \times 10^6 > M_W^{3-3} (=2.504 \times 10^6)$ 故 $M_{max}^{3-3} = 3.782 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{mm}$ (地震弯矩控制)

现将各段塔壳的稳定或强度验算列于表 F1-5。

表 F1-5

计 算 截 面		I — I	II — II	III — III
塔壳有效厚度 δ_e	(mm)	5	5	5
计算截面以上操作质量	(kg)	8378.6	5423.7	1861.3
计算截面横截面积 $\pi D_i \delta_e$	(mm ²)	12566.4	6283.2	6283.2
计算截面断面系数 $\frac{\pi}{4} D_i^2 \delta_e$	(mm ³)	2512000	628000	628000
最大弯矩 M_{max}	(N · mm)	7.801×10^7	5.623×10^7	3.782×10^6
允许轴向压应力 $[\sigma]_c$ (取小值) (MPa)	1.2B	$1.2 \times 120 = 144$	$1.2 \times 145 = 174$	$1.2 \times 145 = 174$
	$1.2[\sigma]^t$	159.6	$1.2 \times 133 = 159.6$	159.6
操作时引起的轴向应力 $\sigma_1 = p D_i / 4 \delta_e$	(MPa)	8.0	4	8
m_o 引起的轴向应力 $\sigma_2 = m_o g / \pi D_i \delta_e$	(MPa)	6.54	8.47	2.91
M_{max} 引起的轴向应力 $\sigma_3 = 4 M_{max} / \pi D_i^2 \delta_e$	(MPa)	31.05	89.54	6.02
轴向压应力 $\sigma_c = \sigma_2 + \sigma_3$	(MPa)	37.59	98.01	8.93
轴向拉应力 $\sigma_t = \sigma_1 - \sigma_2 + \sigma_3$	(MPa)	32.51	85.07	11.11
$\sigma_c \leq [\sigma]_c$		$37.59 < 144$	$98.01 < [\sigma]_c = 159.6$	$8.93 < [\sigma]_c = 159.6$
$\sigma_t \leq 1.2\phi[\sigma]^t = 1.2 \times 0.85 \times 133 = 135.66$		$32.51 < 1.2\phi[\sigma]^t$	$85.07 < 1.2\phi[\sigma]^t$	$11.11 < 1.2\phi[\sigma]^t$

8. 裙座稳定计算

0—0 截面(圆筒形裙座):

$$\frac{M_{max}^{0-0}}{Z_{sb}} + \frac{m_o g + F_v^{0-0}}{A_{sb}} = \frac{1.285 \times 10^8}{\frac{\pi}{4} \times 800^2 \times 6} + \frac{9575 \times 9.81}{\pi \times 800 \times 6} = 48.86 < 153.6 \text{ MPa}$$

$$\frac{0.3M_w^{0-0} + M_e}{Z_{sb}} + \frac{m_{max} g}{A_{sb}} = \frac{0.3 \times 1.285 \times 10^8}{\frac{\pi}{4} \times 800^2 \times 6} + \frac{10109 \times 9.81}{\pi \times 800 \times 6} = 19.37 < 153.6 \text{ MPa}$$

$$\begin{cases} KB\cos^2\beta = 1.2 \times 128 \times 1 = 153.6 \\ K[\sigma]^t = 1.2 \times 133 = 159.6 \end{cases} \text{ 取 } 153.6 \text{ MPa}$$

$$\begin{cases} KB\cos^2\beta = 153.6 \\ 0.9K\sigma_c = 0.9 \times 1.2 \times 235 = 253.8 \end{cases} \text{ 取 } 153.6 \text{ MPa}$$

1_m—1_m 截面(人孔所在截面):

人孔: $l_m = 120\text{mm}$ $b_m = 450\text{mm}$ $\delta_m = 10\text{mm}$

$A_m = 2l_m\delta_m = 2 \times 120 \times 10 = 2400$

$A_{sm} = \pi D_{im} \delta_{es} - 2[(b_m + 2\delta_m)\delta_{es} - A_m]$
 $= \pi \times 800 \times 6 - [(450 + 2 \times 10) \times 6 - 2400] = 14659.6\text{mm}^2$

$Z_m = 2\delta_e l_m \sqrt{(\frac{D_{im}}{2})^2 - (\frac{b_m}{2})^2} = 2 \times 6 \times 120 \sqrt{400^2 - 225^2} = 476235.2\text{mm}^3$

$Z_{sm} = \frac{\pi}{4} D_{im}^2 \delta_{es} - (b_m D_{im} \frac{\delta_{es}}{2} - Z_m)$
 $= \frac{\pi}{4} \times 800^2 \times 6 - 2(450 \times 800 \times \frac{6}{2} - 476235.2) = 2.4122 \times 10^8\text{mm}^3$

$$M_w^{1_m-1_m} = \frac{l_1 - 1000}{l_1} P_1 \frac{l_1 - 1000}{2} + P_2(l_1 - 1000 + \frac{l_2}{2})$$

$$+ P_3(l_1 - 1000 + l_2 + \frac{l_3}{2}) + P_4(l_1 - 1000 + l_2 + l_3 + \frac{l_4}{2}) + P_5(l_1 - 1000 + l_2 + l_3 + l_4 + \frac{l_5}{2})$$

$$= 1.158 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$M_E^{I-1} = 8.806 \times 10^7 \quad \text{N} \cdot \text{mm}$$

$$M_E^{I-1} + 0.25M_W^{I-1} = 1.170 \times 10^8 \quad \text{N} \cdot \text{mm} > M_W^{I-1} = 1.158 \times 10^8 \quad \text{N} \cdot \text{mm}$$

故 $M_{\max}^{I-1} = 1.170 \times 10^8 \quad \text{N} \cdot \text{mm}$ (地震弯矩控制)

$$\frac{M_{\max}^{I-1}}{Z_{\max}} + \frac{m_o^{I-1}g + F^{I-1}}{A_{\max}} = \frac{1.170 \times 10^8}{2.4122 \times 10^6} + \frac{9455.4 \times 9.81 + 12.7}{14659.6} = 54.83 < 153.6$$

$$\frac{0.3M_W^{I-1} + M_E}{Z_{\max}} + \frac{m_o^{I-1}g}{A_{\max}} \approx \frac{0.3 \times 1.170 \times 10^8}{2.4122 \times 10^6} + \frac{9989.36 \times 9.81}{14659.6} = 21.24 < 153.6$$

9. 塔器立置液压试验时的应力校核:

由试验压力引起的环向应力:

$$\begin{aligned} \sigma &= (p_T + \text{液柱静压力})(D_i + \delta_{ei}) / 2\delta_{ei} \\ &= (1.25 \times 0.2 + 0.134)(800 + 5) / (2 \times 5) = 30.9 \quad \text{MPa} \end{aligned}$$

由试验压力引起的轴向应力

$$\sigma_1 = p_T D_i / 4\delta_{ei} = 1.25 \times 0.2 \times 800 / (4 \times 5) = 10 \quad \text{MPa}$$

由质量引起的轴向应力

$$\sigma_2 = m_T^{I-1} g / \pi D_i \delta_{ei} = 8378.6 \times 9.81 / (\pi \times 800 \times 5) = 6.54 \quad \text{MPa}$$

由弯矩引起的轴向应力

$$\sigma_3 = 4(0.3M_W^{I-1} + M_E) / \pi D_i^2 \delta_{ei} = 4(0.3 \times 7.103 \times 10^7) / (\pi \times 800^2 \times 5) = 8.48 \quad \text{MPa}$$

液压试验时最大组合压应力 $([\sigma])_{\sigma} = 144 \quad \text{MPa}$

$$\sigma_2 + \sigma_3 = 6.54 + 8.48 = 15.02 < 144 \quad \text{MPa}$$

液压试验时周向应力 $\sigma = 30.9 < 0.9\sigma_{\phi} = 187.4 \quad \text{MPa}$

液压试验时, 最大组合压应力 $\sigma_1 - \sigma_2 + \sigma_3 = 11.94 < 0.9K\sigma_{\phi} = 224.9 \quad \text{MPa}$

10. 基础环厚度计算

$$\text{基础环外径 } D_{ob} = D_{is} + (160 \sim 400) = 800 + 300 = 1100 \text{mm}$$

$$\text{基础环内径 } D_{ib} = D_{is} - (160 \sim 400) = 800 - 300 = 500 \text{mm}$$

$$Z_b = \frac{D_{ob}^4 - D_{ib}^4}{10D_{ob}} = \frac{1100^4 - 500^4}{10 \times 1100} = 1.2742 \times 10^8 \text{mm}^3$$

$$A_b = \frac{\pi}{4}(D_{ob}^2 - D_{ib}^2) = \frac{\pi}{4}(1100^2 - 500^2) = 7.54 \times 10^5 \text{mm}^2$$

$$\sigma_{b\max} = \frac{M_{\max}^{o-o}}{Z_b} + \frac{m_o g}{A_b} = \frac{1.285 \times 10^8}{1.2742 \times 10^8} + \frac{9575 \times 9.81}{7.54 \times 10^5} = 1.13 \text{MPa}$$

基础环无筋板时的厚度 $([\sigma])_b = 140 \text{MPa}$

$$\delta_b = 1.73b \sqrt{\sigma_{b\max} / K[\sigma]_b} = 1.73 \times 297 \sqrt{1.13 / (1.2 \times 140)} = 42.14 \text{mm}$$

故取 $\delta_b = 46 \text{mm}$

11. 地脚螺栓计算

$$\sigma_{B\max} = \begin{cases} \frac{M_W^{o-o}}{Z_b} - \frac{m_{\min} g}{A_b} = \frac{1.285 \times 10^8}{1.2742 \times 10^8} - \frac{6616 \times 9.81}{7.54 \times 10^5} = 0.922 \text{MPa} \\ \frac{M_E^{o-o} + 0.25M_W^{o-o}}{Z_b} - \frac{m_o g - F_v^{o-o}}{A_b} = \frac{9.506 \times 10^7 + 0.25 \times 1.285 \times 10^8}{1.2742 \times 10^8} - \frac{9575 \times 9.81 - 2.061 \times 10^4}{7.54 \times 10^5} = 0.95 \text{MPa} \end{cases}$$

故 $\sigma_B = 0.95 \text{MPa}$

地脚螺栓的螺纹小径 d_1 ($[\sigma]_B = 147 \text{MPa}$)

$$\begin{aligned} d_1 &= \sqrt{4\sigma_B A_b / (\pi n[\sigma]_B) + C_2} \\ &= \sqrt{4 \times 0.95 \times 7.54 \times 10^5 / (\pi \times 8 \times 147)} + 3 = 30.86 \text{mm} \end{aligned}$$

取地脚螺栓为 M36, 8 个。

12. 裙座与塔壳连接焊缝验算(对接焊缝):

$$M_{\max}^{I-I} \approx M_{\max}^{I-I} = 7.683 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$m_o^{I-I} \approx m_o^{I-I} = 8378.6 \text{ kg}$$

$$D_{ii} \approx D_i = 800 \text{ mm} \quad \delta_{es} = 6 \text{ mm}$$

$$\frac{4M_{\max}^{I-I}}{\pi D_{ii}^2 \delta_{es}} - \frac{m_o^{I-I} g}{\pi D_{ii} \delta_{es}} = \frac{4 \times 7.683 \times 10^7}{\pi \times 800^2 \times 6} - \frac{8378.6 \times 9.81}{\pi \times 800 \times 6} = 20.04 < 95.76 \text{ MPa}$$

$$0.6K[\sigma]_w = 0.6 \times 1.2 \times 133 = 95.76 \text{ MPa}$$

验算合格。

例题 2

已知 $\phi 2400 \times 73300 \text{ mm}$ 浮阀塔(如图 F2-1)的设计条件如下:

设置地区的基本风压值 $q_0 = 294 \text{ N/m}^2$; 地震设防烈度为 8 度; 塔内装有 155 层浮阀塔盘, 每块存留介质高 100mm, 介质密度 800 kg/m^3 ; 塔壳外表面保温层 100mm, 保温材料密度 300 kg/m^3 ; 塔上每隔 9m 安装一层操作平台, 共 8 层, 平台宽 1.2m, 单位质量 150 kg/m^2 , 包角 180° ; 设计压力 2.2MPa; 设计温度 125°C ; 塔壳厚度附加量 3mm, 裙座厚度附加量 2mm, 裙座高 3.8m。

以该塔为例, 进行强度和稳定计算。

1. 塔壳强度计算

塔壳材料 16MnR, $[\sigma]' = 163 \text{ MPa}$

$$\text{圆筒} \quad \delta = \frac{pD_i}{2[\sigma]'\phi - p} = \frac{2.2 \times 2400}{2 \times 163 \times 0.85 - 2.2} = 19.2 \text{ mm}$$

$$\text{封头} \quad \delta = \frac{pD_i K}{2[\sigma]'\phi - 0.5p} = \frac{2.2 \times 2400 \times 1}{2 \times 163 \times 0.85 - 0.5 \times 2.2} = 19.1 \text{ mm}$$

取塔壳厚度为 24mm, 裙座壳厚度为 24mm。

2. 质量载荷计算

$$\begin{aligned} \text{塔壳和裙座质量 } m_{01} &= \frac{\pi}{4} (2.448^2 - 2.4^2) \times 73.3 \times 7.85 \times 10^3 \\ &= 105164 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\text{人孔、法兰、接管等附属件质量 } m_s = 0.25m_{01} = 26291 \text{ kg}$$

$$\text{内构件质量 } m_{02} = \frac{\pi}{4} \times 2.4^2 \times 155 \times 75 = 52590 \text{ kg}$$

$$\begin{aligned} \text{保温材料质量 } m_{03} &= \frac{\pi}{4} (2.648^2 - 2.448^2) \times (73.3 - 3.8) \times 300 \\ &= 16690 \text{ kg} \end{aligned}$$

平台、扶梯质量(扶梯单位质量 40 kg/m)

$$\begin{aligned} m_{04} &= 40 \times 73.3 + \frac{\pi}{4} [(2.648 + 2.4)^2 - 2.648^2] \times 150 \times 8 \times \frac{180^\circ}{360^\circ} \\ &= 11636 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\text{操作时塔内物料质量 } m_{05} = \frac{\pi}{4} \times 2.4^2 \times 0.1 \times 800 \times 155 = 56096 \text{ kg}$$

$$\text{充水质量 } m_w = \frac{\pi}{4} \times 2.4^2 \times (73.3 - 3.8) \times 1000 = 314410 \text{ kg}$$

$$\text{塔器的操作质量 } m_o = m_{01} + m_{02} + m_{03} + m_{04} + m_{05} + m_s = 268467 \text{ kg}$$

$$\text{塔器的最大质量 } m_{\max} = m_{01} + m_{02} + m_{03} + m_{04} + m_s + m_w = 526781 \text{ kg}$$

$$\text{塔器的最小质量 } m_{\min} = m_{01} + 0.2m_{02} + m_{03} + m_{04} + m_s = 170299 \text{ kg}$$

将塔沿高度分为 10 段; 每段高为 7330mm(如图 F2-2 所示)其质量列入表 F2-1。

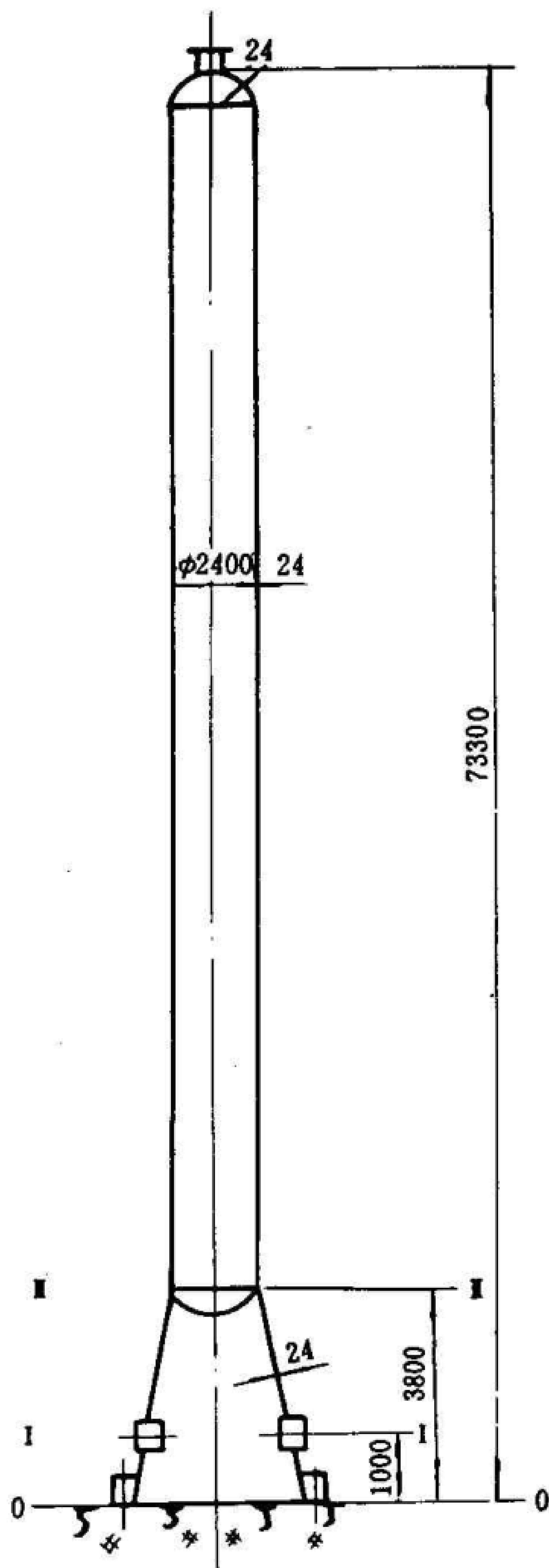


图 F2-1

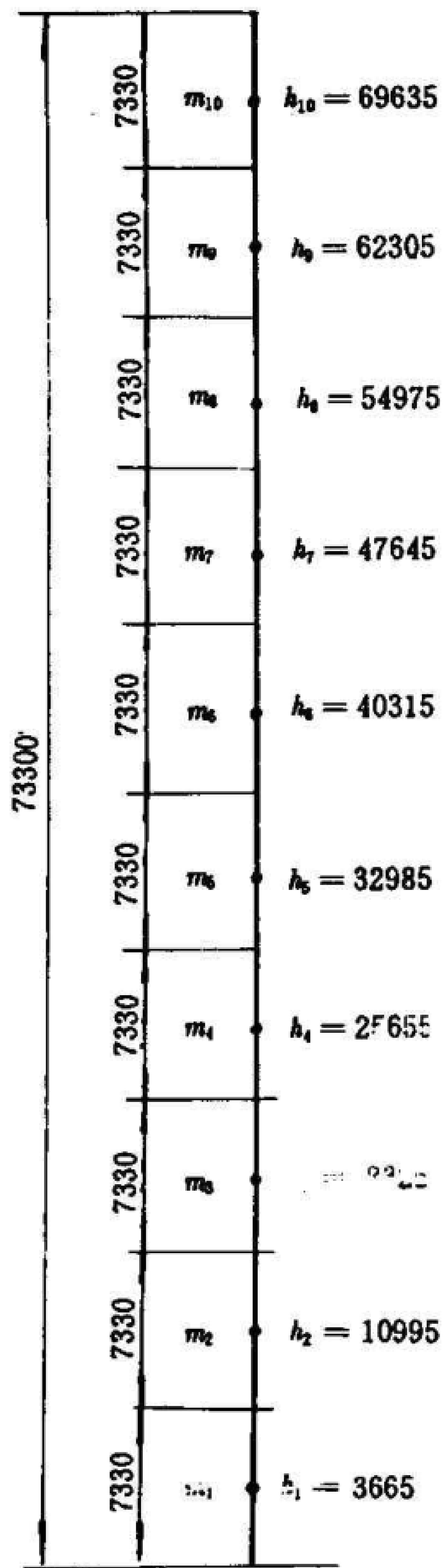


图 F2-2

表 F2-1 kg

质 段 号 量	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$m_{01}+m_s$	13145.5	13145.5	13145.5	13145.5	13145.5	13145.5	13145.5	13145.5	13145.5	13145.5
m_{02}	2670	5550	5550	5550	5550	5550	5550	5550	5550	5520
m_{03}	850	1760	1760	1760	1760	1760	1760	1760	1760	1760
m_{04}	290	1382	1382	1382	1382	290	1382	1382	1382	1382
m_{05}	2537	5951	5951	5951	5951	5951	5951	5951	5951	5951
m_w	15970	33160	33160	33160	33160	33160	33160	33160	33160	33160
m_0	19492.5	27788.5	27788.5	27788.5	27788.5	26696.5	27788.5	27788.5	27788.5	27758.5
m_{max}	32925.5	54997.5	54997.5	54997.5	54997.5	53905.5	54997.5	54997.5	54997.5	54967.5
m_{min}	14819.5	17397.5	17397.5	17397.5	17397.5	16305.5	17397.5	17397.5	17397.5	17391.5

3. 塔的自振周期计算

$$T_1=90.33H\sqrt{\frac{m_0H}{E\delta_iD_i^3}}\times10^{-3}$$
$$=90.33\times73.3\sqrt{\frac{268467\times73300}{2.08\times10^5\times21\times2400^3}}\times10^{-3}$$
$$=3.78\text{ s}$$

取 $T_1=3.0s$

4. 地震载荷及地震弯矩计算

表 F2-2 地震力和地震弯矩

塔 段 号 项 目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
操作质量 m_i kg	19492.5	27788.5	27788.5	27788.5	27788.5	26696.5	27788.5	27788.5	27788.5	27758.5
集中质量距地面高度 h_i mm	3665	10995	18325	25655	32985	40315	47645	54975	62305	69635
$h_i^{1.5}$	2.219 $\times10^5$	11.529 $\times10^5$	24.807 $\times10^5$	41.092 $\times10^5$	59.907 $\times10^5$	80.947 $\times10^5$	103.998 $\times10^5$	128.898 $\times10^5$	155.519 $\times10^5$	183.756 $\times10^5$
$m_ih_i^{1.5}$	4.311 $\times10^9$	32.037 $\times10^9$	68.935 $\times10^9$	114.188 $\times10^9$	166.472 $\times10^9$	216.100 $\times10^9$	288.995 $\times10^9$	359.188 $\times10^9$	432.164 $\times10^9$	510.079 $\times10^9$
$m_ih_i^3$	0.0959 $\times10^{16}$	3.693 $\times10^{16}$	17.100 $\times10^{16}$	46.922 $\times10^{16}$	99.727 $\times10^{16}$	174.925 $\times10^{16}$	300.550 $\times10^{16}$	461.700 $\times10^{16}$	672.099 $\times10^{16}$	937.300 $\times10^{16}$

续表 F2-2

塔段号 项目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$A=\sum_{i=1}^{10}m_ih_i^{1.5}$	2.192×10 ¹²									
$B=\sum_{i=1}^{10}m_ih_i^3$	2.714×10 ¹⁹									
$\eta_{k1}=\frac{h_k^{1.5}A}{B}$	0.0179	0.0931	0.2003	0.3318	0.4838	0.6537	0.8399	1.0410	1.2560	1.4841
C_s	0.5									
$a_1=(\frac{T_g}{T})^{0.9}a_{max}$	$(\frac{0.4}{3})^{0.9}\times0.45=0.0734$ (Ⅲ类场地土、近震)									
$g, m/s^2$	9.81									
$F_{k1}=C_s a_1 \eta_{k1} m_k g, N$	125.6	931.4	2004.0	3319.6	4840.4	6283.0	8403.2	10415.2	12566.2	14831.8
$a_{vmax}=0.65a_{max}$	0.65×0.45=0.2925									
$m_{eq}=0.75m_0, kg$	201350.25									
$F_v^{0-0}=a_{vmax}m_{eq}g, N$	0.578×10 ⁶									
$m_k h_i$	7.14 ×10 ⁷	30.55 ×10 ⁷	50.92 ×10 ⁷	71.29 ×10 ⁷	91.66 ×10 ⁷	107.63 ×10 ⁷	132.42 ×10 ⁷	152.77 ×10 ⁷	173.14 ×10 ⁷	193.29 ×10 ⁷
$\sum_{k=1}^{10}m_k h_k$	10.108×10 ⁹									
F_v^{i-1}, N	4082.83	17469.2	29117.29	40765.35	52413.41	61545.45	75720.97	87357.60	99005.66	110527.91
$F_{k1}h_i, N \cdot mm$	0.46 ×10 ⁶	10.24 ×10 ⁶	36.72 ×10 ⁶	85.16 ×10 ⁶	159.66 ×10 ⁶	253.30 ×10 ⁶	400.37 ×10 ⁶	572.58 ×10 ⁶	782.94 ×10 ⁶	1032.81 ×10 ⁶
$M_{E1}^{0-0}=\sum_{k=1}^i F_{k1}h_i, N \cdot mm$	3.3×10 ⁹									

∴H/D_i=30.5>15,须考虑高振型影响:
M_E⁰⁻⁰=1.25M_{E1}⁰⁻⁰=1.25×3.3×10⁹=4.125×10⁹N·mm

I—I截面地震弯矩:

M_Eⁱ⁻¹=1.25∑_{k=1}¹⁰F_{k1}(h_k-h)=1.25×[125.6×(3665-1000)+931.4×(10995-1000)+2004

$$\begin{aligned}
 & \times (18325 - 1000) + 3319.6 \times (25655 - 1000) + 4840.4 \times (32985 \\
 & - 1000) + 6283 \times (40315 - 1000) + 8403.2 \times (47645 - 1000) + 10415.2 \\
 & \times (54975 - 1000) + 12566.2 \times (62305 - 1000) + 14831.8 \times (69635 - \\
 & 1000) \} \\
 & = 4.088 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm}
 \end{aligned}$$

I—I 截面地震弯矩:

$$\begin{aligned}
 M_E^{I-I} &= 1.25 \sum_{k=2}^{10} F_{k1} (h_k - h) = 1.25 [931.4 \times (10995 - 3800) + 2004 \times (18325 - 3800) \\
 & + 3319.6 \times (25655 - 3800) + 4840.4 \times (32985 - 3800) + 6283 \times (40315 \\
 & - 3800) + 8403.2 \times (47645 - 3800) + 10415.2 \times (54975 - 3800) + \\
 & 12566.2 \times (62305 - 3800) + 14831.8 \times (69635 - 3800)] \\
 & = 3.786 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm}
 \end{aligned}$$

5. 风载荷和风弯矩计算

将塔沿高分成 8 段(如图 F2-3 所示), 计算结果见表 F2-3。

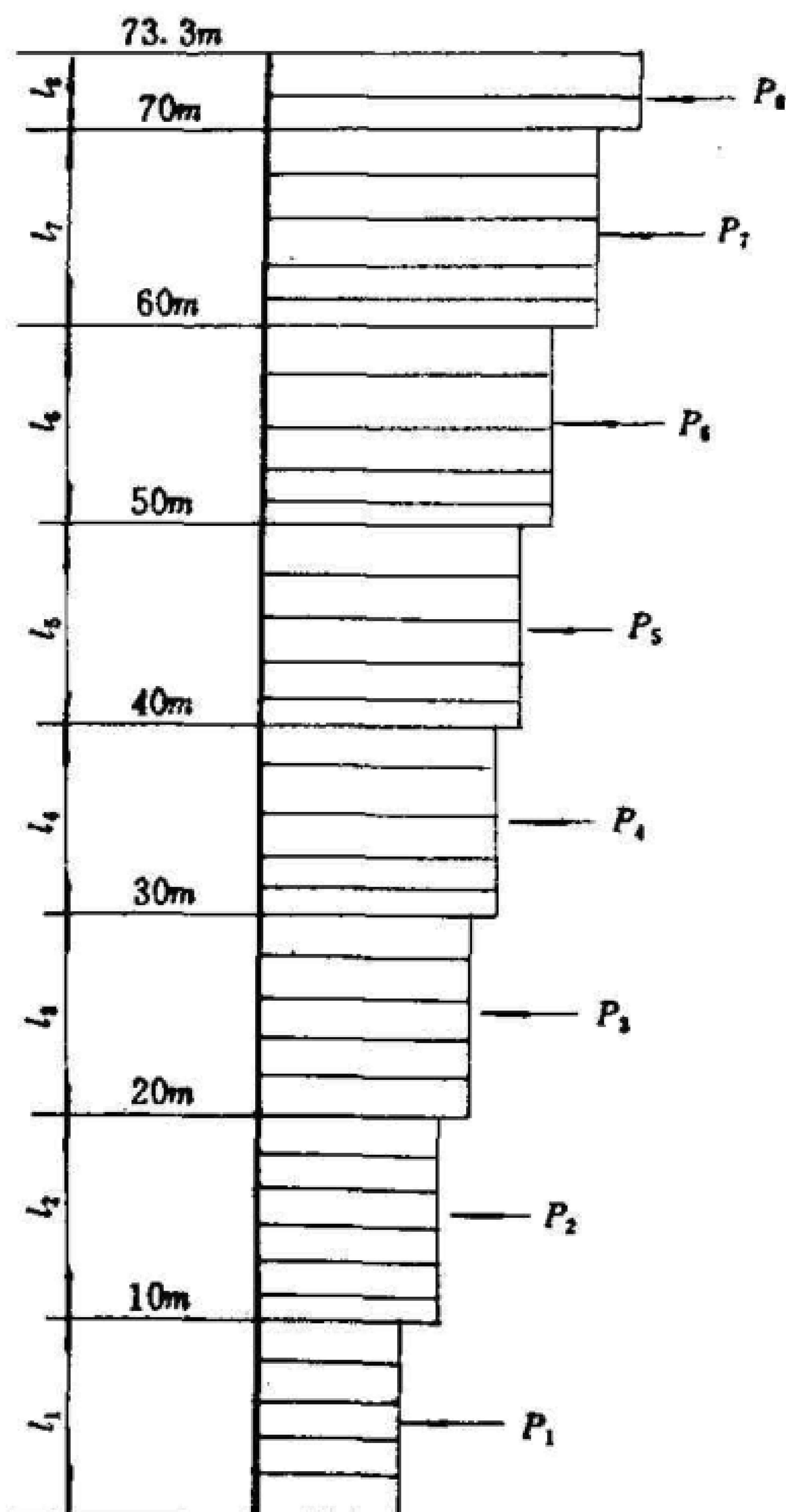


图 F2-3

表 F2-3 风载荷和风弯矩计算

塔 段 号 项 目	1	2	3	4	5	6	7	8
塔段长度 m	0~10	10~20	20~30	30~40	40~50	50~60	60~70	70~73.3
q_0 N/m ²	294							
K_1	0.7							
ξ (B类)	2.89							
v_i (B类)	0.720	0.790	0.820	0.850	0.865	0.88	0.885	0.885
ϕ_i	0.020	0.074	0.187	0.325	0.497	0.665	0.852	0.970
f_i (B类)	1.00	1.25	1.42	1.56	1.67	1.77	1.86	1.89
$K_2=1+\frac{\xi v_i \phi_i}{f_i}$	1.041	1.135	1.312	1.511	1.743	1.955	2.172	2.312
l_i mm	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	3300
K_3 mm	400							
K_4 mm	600							
D_{ei} mm	3958							
$P_i=K_1K_2q_0f_iD_{ei}\times 10^{-6}$ N	8479.53	11556.52	15175.51	19200.40	23710.19	28186.50	32907.43	11745.85
$M_w^0=P_1\frac{l_1}{2}+P_2(l_1+\frac{l_2}{2})+\dots$ N·mm	6.865×10 ⁹							

I—I 截面风弯矩

$$M_w^{I-I}=0.9P_1\frac{l_1-1000}{2}+P_2(l_1-1000+\frac{l_2}{2})+P_3(l_1-1000+l_2+\frac{l_3}{2})+\dots$$
$$=0.9\times 8479.53\times 4500+11556.52\times 14000+15175.51\times 24000+19200.4\times 34000$$
$$+23710.19\times 44000+28186.5\times 54000+32907.43\times 64000$$
$$+11745.85\times 70650=6.714\times 10^9\quad \text{N}\cdot\text{mm}$$

II—II 截面风弯矩

$$M_w^{II-II}=0.62P_1\frac{l_1-3800}{2}+P_2(l_1-3800+\frac{l_2}{2})+P_3(l_1-3800+l_2+\frac{l_3}{2})+\dots$$
$$=0.62\times 8479.53\times 3100+11556.52\times 11200+15175.51\times 21200+$$
$$+19200.4\times 31200+23710.19\times 41200+28186.5\times 51200+$$
$$+32907.43\times 61200+11745.85\times 67850=6.29\times 10^9\quad \text{N}\cdot\text{mm}$$

6. 最大弯矩
塔底部截面 0—0 处

$M_{max}^{0-0} = \begin{cases} M_W^{0-0} + M_e \\ M_E^{0-0} + 0.25M_W^{0-0} + M_e \end{cases}$ 取其中较大值

$M_W^{0-0} = 6.865 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm}$

$M_E^{0-0} + 0.25M_W^{0-0} = 4.125 \times 10^9 + 0.25 \times 6.865 \times 10^9 = 5.841 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm}$

$\therefore M_{max}^{0-0} = 6.865 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm}$ (该塔由风弯矩控制)

I—I 截面 $M_{max}^{I-I} = M_W^{I-I} = 6.714 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm}$

II—II 截面 $M_{max}^{II-II} = M_W^{II-II} = 6.29 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm}$

7. 圆筒应力校核

验算塔壳 II—I 截面处操作时和压力试验时的强度和稳定性。计算结果见表 F2-4。

表 F2-4

计 算 截 面		I—I
计算截面以上的塔操作质量 m_0^{I-I}	kg	261500
计算截面的横截面积 $A = \pi D_i \delta_e$	mm ²	158336.3
塔壳有效厚度 δ_e	mm	21
计算截面的截面系数 $Z = 0.785 D_i^3 \delta_e$	mm ⁴	94953600
最大弯矩 M_{max}^{I-I}	N·mm	6.29×10^9
许用轴向压应力 $[\sigma]_{cr} = \begin{cases} 1.2B \\ 1.2[\sigma] \end{cases}$ 取小值	MPa	168
许用轴向拉应力 $1.2[\sigma]'\phi$	MPa	166.26
操作压力引起轴向拉应力 $\sigma_1 = \frac{PD_i}{4\delta_e}$	MPa	62.86
重力引起轴向应力 $\sigma_2 = \frac{m_0^{I-I}g}{A}$	MPa	16.20
弯矩引起的轴向应力 $\sigma_3 = \frac{M_{max}^{I-I}}{Z}$	MPa	66.24
轴向压应力 $\sigma_2 + \sigma_3 \leq [\sigma]_{cr}$	MPa	$82.44 < 168$
组合拉应力 $\sigma_1 - \sigma_2 + \sigma_3 \leq K[\sigma]'\phi$	MPa	$112.9 < 166.26$
P_T +液柱静压力	MPa	3.445

续表 F2-4

计 算 截 面		I — I
液压试验时,计算截面以上的塔的质量 m_T^{I-I}	kg	205404
许用轴向压应力 $[\sigma]_\sigma = \begin{cases} KB \\ 0.9K\sigma_s \end{cases}$ 取小值	MPa	168
许用周向应力 $0.9\sigma_s\phi$	MPa	248.6
许用轴向拉应力 $0.9K\sigma_s\phi$	MPa	298.4
周向应力 $\sigma = \frac{(p_T + \text{液柱静压力})(D_i + \delta_s)}{2\delta_s} < 0.9\sigma_s\phi$	MPa	$198.6 < 248.6$
压力引起的轴向应力 $\sigma_1 = \frac{P_T D_i}{4\delta_s}$	MPa	78.6
重力引起的轴向应力 $\sigma_2 = \frac{m_T^{I-I} g}{A}$	MPa	12.7
弯矩引起的轴向应力 $\sigma_3 = \frac{0.3M_z^{I-I}}{W}$	MPa	19.9
轴向压应力 $\sigma_2 + \sigma_3 \leq [\sigma]_\sigma$	MPa	$32.6 < 168$
组合拉应力 $\sigma_1 - \sigma_2 + \sigma_3 \leq 0.9K\sigma_s\phi$	MPa	$85.8 < 298.4$

8. 裙座壳轴向应力校核

a. 0—0 截面

裙座壳为锥形,半顶角为 β 。裙座材料为 Q235—A(A3)。

$$\beta = \arctg \frac{0.5(3000 - 2400)}{3676} = 4.67^\circ$$

$$A = \frac{0.094 \times 22}{0.5 \times 2408.4} = 0.0017 \quad \text{查 } B = 157 \text{ MPa}$$

则 $KB\cos^2\beta = 187.15 \text{ MPa} \quad K[\sigma]_s = 135.6 \text{ MPa}$

$$0.9K\sigma_s = 243 \text{ MPa}$$

$$Z_{sb} = 0.785D_{is}^2\delta_{es}/\cos\beta = \frac{0.785 \times 3000^2 \times 22}{\cos 4.67^\circ} = 1.559 \times 10^8 \text{ mm}^3$$

$$A_{sb} = \pi D_{is}\delta_{es} = 3.14 \times 3000 \times 22 = 2.073 \times 10^5 \text{ mm}^2$$

$$\frac{1}{\cos\beta} \left(\frac{M_{\max}^{0-0}}{Z_{sb}} + \frac{m_0 g}{A_{sb}} \right) \leq \begin{cases} KB\cos^2\beta \\ K[\sigma]_s \end{cases}$$

$$\frac{1}{\cos 4.67^\circ} \left(\frac{6.865 \times 10^9}{1.559 \times 10^8} + \frac{268467 \times 9.81}{2.073 \times 10^5} \right) = 56.93 < \begin{cases} 187.15 \\ 135.6 \end{cases} \text{ MPa}$$

$$\frac{1}{\cos\beta} \left(\frac{0.3M_w^{0-0}}{Z_{sb}} + \frac{m_{\max} g}{A_{sb}} \right) \leq \begin{cases} KB\cos^2\beta \\ 0.9K\sigma_s \end{cases}$$

$$\frac{1}{\cos 4.67^\circ} \left(\frac{0.3 \times 6.865 \times 10^9}{1.559 \times 10^8} + \frac{526781 \times 9.81}{2.073 \times 10^5} \right) = 38.26 < \begin{cases} 187.15 \\ 243 \end{cases} \text{MPa}$$

b. I-I 截面

$$h = 1000 \text{mm} \quad \delta_{\text{es}} = 22 \text{mm} \quad b_{\text{m}} = 500 \text{mm}$$

$$\delta_{\text{m}} = 22 \text{mm} \quad l_{\text{m}} = 120 \text{mm} \quad D_{\text{im}} = 2836 \text{mm}$$

$$m_0^{i-1} = 266700 \text{kg}$$

$$A_{\text{sm}} = \pi D_{\text{im}} \delta_{\text{es}} - \sum [(b_{\text{m}} + 2\delta_{\text{m}})\delta_{\text{es}} - A_{\text{m}}]$$

$$= 3.14 \times 2836 \times 22 - 2 \times [(500 + 2 \times 22) \times 22 - 2 \times 120 \times 22]$$

$$= 182534.8 \text{mm}^2$$

$$Z_{\text{m}} = 2\delta_{\text{es}} l_{\text{m}} \sqrt{\left(\frac{D_{\text{im}}}{2}\right)^2 - \left(\frac{b_{\text{m}}}{2}\right)^2}$$

$$= 2 \times 22 \times 120 \times \sqrt{\left(\frac{2836}{2}\right)^2 - \left(\frac{500}{2}\right)^2}$$

$$= 7369760 \text{mm}^3$$

$$Z_{\text{sm}} = \frac{\pi}{4} D_{\text{im}}^2 \delta_{\text{es}} - \sum (b_{\text{m}} D_{\text{im}} \frac{\delta_{\text{es}}}{2} - Z_{\text{m}})$$

$$= \frac{\pi}{4} \times 2836^2 \times 22 - 2 \times (500 \times 2836 \times \frac{22}{2} - 7369760)$$

$$= 1.22 \times 10^8 \text{mm}^3$$

$$\frac{1}{\cos \beta} \left(\frac{M_{\text{max}}^{i-1}}{Z_{\text{sm}}} + \frac{m_0^{i-1} g}{A_{\text{sm}}} \right) \leq \begin{cases} KB \cos^2 \beta \\ K(\sigma)_i \end{cases}$$

$$\frac{1}{\cos 4.67^\circ} \left(\frac{6.714 \times 10^9}{1.22 \times 10^8} + \frac{266700 \times 9.81}{182534.8} \right) = 69.59 < \begin{cases} 187.15 \\ 135.6 \end{cases} \text{MPa}$$

$$\frac{1}{\cos \beta} \left(\frac{0.3 M_{\text{w}}^{i-1}}{Z_{\text{sm}}} + \frac{m_{\text{max}}^{i-1} g}{A_{\text{sm}}} \right) \leq \begin{cases} KB \cos^2 \beta \\ 0.9 K \sigma \end{cases}$$

$$\frac{1}{\cos 4.67^\circ} \left(\frac{0.3 \times 6.714 \times 10^9}{1.22 \times 10^8} + \frac{525014 \times 9.81}{182534.8} \right) = 44.86 < \begin{cases} 187.15 \\ 248 \end{cases} \text{MPa}$$

9. 基础环设计

$$D_{\text{ob}} = D_{\text{is}} + (160 \sim 400) = 3380 \text{mm}$$

$$D_{\text{ib}} = D_{\text{is}} - (160 \sim 400) = 2680 \text{mm}$$

$$[\sigma]_{\text{b}} = 140 \text{MPa}$$

$$A_{\text{b}} = \frac{\pi}{4} (D_{\text{ob}}^2 - D_{\text{ib}}^2) = 3.33 \times 10^6 \text{mm}^2$$

$$Z_{\text{b}} = \frac{\pi (D_{\text{ob}}^4 - D_{\text{ib}}^4)}{32 D_{\text{ob}}} = \frac{\pi}{32} \times \frac{3380^4 - 2680^4}{3380} = 2.29 \times 10^9 \text{mm}^3$$

$$b/l = 16.6/26.2 = 0.634$$

$$\sigma_{\text{bmax}} = \begin{cases} \frac{M_{\text{max}}^{0-0}}{Z_{\text{b}}} + \frac{m_0 g}{A_{\text{b}}} \\ \frac{0.3 M_{\text{w}}^{0-0}}{Z_{\text{b}}} + \frac{m_{\text{max}} g}{A_{\text{b}}} \end{cases} \quad \text{取其中较大值}$$

$$\sigma_{\text{bmax}} = \frac{6.865 \times 10^9}{2.29 \times 10^9} + \frac{268467 \times 9.81}{3.33 \times 10^6} = 3.8 \text{MPa}$$

查表 $M_{\text{x}} = -6724 \sigma_{\text{bmax}}$

$$M_{\text{y}} = 34.7 \sigma_{\text{bmax}}$$

$$\because |M_{\text{x}}| > M_{\text{y}}$$

$$\therefore M_{\text{s}} = |M_{\text{x}}| = 6724 \sigma_{\text{bmax}} = 25551.2 \text{N} \cdot \text{mm}$$

$$\delta_b = \sqrt{\frac{6M_s}{[\sigma]_b}} = \sqrt{\frac{6 \times 25551.2}{140}} = 33.09\text{mm}$$

取 $\delta_b = 40\text{mm}$

10. 地脚螺栓

地脚螺栓承受的最大拉应力:

$$\sigma_b = \begin{cases} \frac{M_w^{0-0}}{Z_b} - \frac{m_{\min}g}{A_b} \\ \frac{M_E^{0-0} + 0.25M_w^{0-0}}{Z_b} - \frac{m_0g - F_v^{0-0}}{A_b} \end{cases} \text{取其中较大值}$$

$$\sigma_b = \begin{cases} \frac{6.865 \times 10^9}{2.29 \times 10^9} - \frac{170299 \times 9.81}{3.33 \times 10^6} = 2.496\text{MPa} \\ \frac{4.125 \times 10^9 + 0.25 \times 6.865 \times 10^9}{2.29 \times 10^9} - \frac{268467 \times 9.81 - 0.578 \times 10^6}{3.33 \times 10^6} = 1.93\text{MPa} \end{cases}$$

地脚螺栓螺纹小径:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4\sigma_b A_b}{\pi n[\sigma]_{b1}}} = \sqrt{\frac{4 \times 2.496 \times 3.33 \times 10^6}{\pi \times 24 \times 147}} = 54.77\text{mm}$$

取地脚螺栓为 M64, 24 个。

11. 筋板

$$n_1 = 2 \quad \delta_G = 22\text{mm} \quad l_2 = 166\text{mm}$$

$$F = \frac{\sigma_B A_b}{n} = \frac{2.496 \times 3.33 \times 10^6}{24} = 346320\text{mm}^2$$

$$\lambda = \frac{0.5l_K}{i} = \frac{0.5 \times 350}{0.289 \times 22} = 27.5$$

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.6[\sigma]_G}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \times 0.192 \times 10^6}{0.6 \times 140}} = 150.2$$

$$\because \lambda < \lambda_c$$

$$\text{筋板许用压应力} [\sigma]_c = \frac{[1 - 0.4(\frac{\lambda}{\lambda_c})^2][\sigma_G]}{\nu} = \frac{[1 - 0.4 \times (\frac{27.5}{150.2})^2] \times 140}{1.5 + \frac{2}{3}(\frac{27.5}{150.2})^2}$$

$$= 90.7\text{MPa}$$

$$\text{筋板压应力 } \sigma_G = \frac{F}{n_1 \delta_G l_2} = \frac{346320}{2 \times 22 \times 166} = 47.4 < 90.7\text{MPa}$$

12. 盖板

$$l_2 = 166\text{mm} \quad l_3 = 120\text{mm} \quad l_4 = 120\text{mm}$$

$$d_3 = 85\text{mm} \quad d_2 = 67\text{mm} \quad \delta_c = 40\text{mm}$$

$$\delta_z = 40\text{mm}$$

环形盖板加垫板结构

$$\sigma_z = \frac{3Fl_3}{4(l_2 - d_3)\delta_c^2 + 4(l_4 - d_2)\delta_z^2} = \frac{3 \times 346320 \times 120}{4 \times (166 - 85) \times 40^2 + 4 \times (120 - 67) \times 40^2}$$

$$= 131.6\text{MPa} < 140\text{MPa}$$

13. 裙座与塔壳对接焊缝校核

$$\frac{4M_{\max}^{1-1}}{\pi D_n^2 \delta_{en}} - \frac{m_0^{1-1}g - F_v^{1-1}}{\pi D_n \delta_{en}} \leq 0.6K[\sigma]_w$$

$$\frac{4 \times 6.29 \times 10^9}{\pi \times 2400^2 \times 22} - \frac{261500 \times 9.81}{\pi \times 2400 \times 22} = 47.7 < 0.6 \times 1.2 \times 113 = 81.36 \text{ MPa}$$

例题 3

已知 $\phi 1000 \times 46000\text{mm}$ 的浮阀塔(如图 F3-1)的设计条件如下:

设置地区的基本风压值 $q_0 = 400\text{N/m}^2$; 地震设防烈度为 7 度; 塔体与裙座对接; 塔体每隔 5m 安装一包角为 270° 的环形平台; 塔体外表面附有 100mm 保温层, 保温材料密度 300kg/m^3 ; 塔内共装 102 块塔盘, 每块塔盘存留介质高 100mm, 介质密度 800kg/m^3 ; 塔底悬挂一重沸器, 其操作质量 3500kg; 设计压力 2.3MPa; 设计温度 $\leq 200^\circ\text{C}$ 。对该塔进行强度和稳定性验算。

1. 圆筒和封头的强度计算

圆筒和封头材料均选用 16MnR, $[\sigma]' = 170\text{MPa}$ 。

圆筒:

$$\delta = \frac{pD_i}{2[\sigma]'\phi - p} = \frac{2.3 \times 1000}{2 \times 170 \times 0.85 - 2.3} = 8.02\text{mm}$$

封头:

$$\delta_h = \frac{KpD_i}{2[\sigma]'\phi - 0.5p} = \frac{1 \times 2.3 \times 1000}{2 \times 170 \times 1.0 - 0.5 \times 2.3} = 6.79\text{mm}$$

厚度附加量: 圆筒取 3mm, 封头取 3mm, 裙座取 2mm。

经圆整后, 壁厚分别取为 12mm, 14mm, 16mm 和 20mm, 裙座厚度取为 16mm(材质为 16MnR)。见图 F3-1。

2. 质量载荷计算

壳体和裙座质量:

$$m_{01} = \frac{\pi}{4} [(1.024^2 - 1^2) \times 8 + (1.028^2 - 1^2) \times 10 + (1.032^2 - 1^2) \times 14 + (1.040^2 - 1^2) \times 9 + (1.332^2 - 1.3^2) \times 5] \times 7850 + 137 + 203$$

$$= 18964 \text{ kg}$$

人孔、接管、法兰等附件质量

$$m_a = 0.25m_{01} = 0.25 \times 18964 = 4741 \text{ kg}$$

内构件质量:浮阀塔盘 75 kg/m^2

$$m_{02} = \frac{\pi}{4} \times 1^2 \times 75 \times 102 = 6005 \text{ kg}$$

保温材料质量

$$m_{03} = \pi \times 1.116 \times 0.1 \times 41 \times 300 = 4312.4 \text{ kg}$$

平台、梯子质量

平台单位质量为 150 kg/m^2 ; 笼式扶梯单位质量为 40 kg/m 。扶梯质量: $40 \times 46 = 1840 \text{ kg}$

$$\text{平台质量: } \frac{\pi}{4} [(1.116 + 2)^2 - 1.116^2] \times 150 \times 9 \times \frac{270^\circ}{360^\circ} = 6727 \text{ kg}$$

$$m_{04} = 1840 + 6727 = 8567 \text{ kg}$$

操作时塔内物料质量

$$m_{05} = \frac{\pi}{4} \times 1^2 \times 0.1 \times 800 \times 102 = 6405.6 \text{ kg}$$

液压试验时充水质量

$$m_w = \frac{\pi}{4} \times 1^2 \times (46 - 5) \times 1000 = 32185 \text{ kg}$$

偏心质量

$$m_e = 3500 \text{ kg}$$

操作质量:

$$m_0 = m_{01} + m_{02} + m_{03} + m_{04} + m_{05} + m_a + m_e$$

$$= 18964 + 6005 + 4312 + 8567 + 6405.6 + 4741 + 3500$$

$$= 52504 \text{ kg}$$

最大质量

$$m_{\max} = m_{01} + m_{02} + m_{03} + m_{04} + m_a + m_w + m_e$$

$$= 18964 + 6005 + 4312 + 8567 + 4741 + 32185 + 3500$$

$$= 78283 \text{ kg}$$

最小质量

$$m_{\min} = m_{01} + 0.2m_{02} + m_{03} + m_{04} + m_a + m_e$$

$$= 18964 + 0.2 \times 6005 + 4312 + 8567 + 4741 + 3500$$

$$= 41294 \text{ kg}$$

3. 自振周期计算

将塔沿高度分成 10 段, 每段的质量列于表 F3-1, 分段图见图 F3-2。

表 F3-1

段号 质 量	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
m_{01}	2595	2263	2263	2004	2004	1603	1750	1750	1197	1197
m_{02}	—	659	659	732	732	586	732	732	586	586
m_{03}	—	473	473	526	526	421	526	526	421	421
m_{04}	200	927	927	947	947	907	947	947	907	907
m_{05}	—	703	703	781	781	625	781	781	625	625
m_s	567	566	566	501	501	401	437	437	299	299
m_w	—	3533	3533	3925	3925	3140	3925	3925	3140	3140
m_e	3500	—	—	—	—	—	—	—	—	—
m_{max}	6862	9066	9066	9416.0	9416	7683	9098	9098	7175	7175
m_{min}	6862	5006	5006	4906	4906	4074	4587	4587	3566	3566
m_o	6862	5591	5591	5491	5491	4543	5173	5173	4035	4035

本设备截面有 5 次变化,按不同截面惯性矩将全塔分成 5 段,计算结果列于表 F3-2;分段图见图 F3-3。

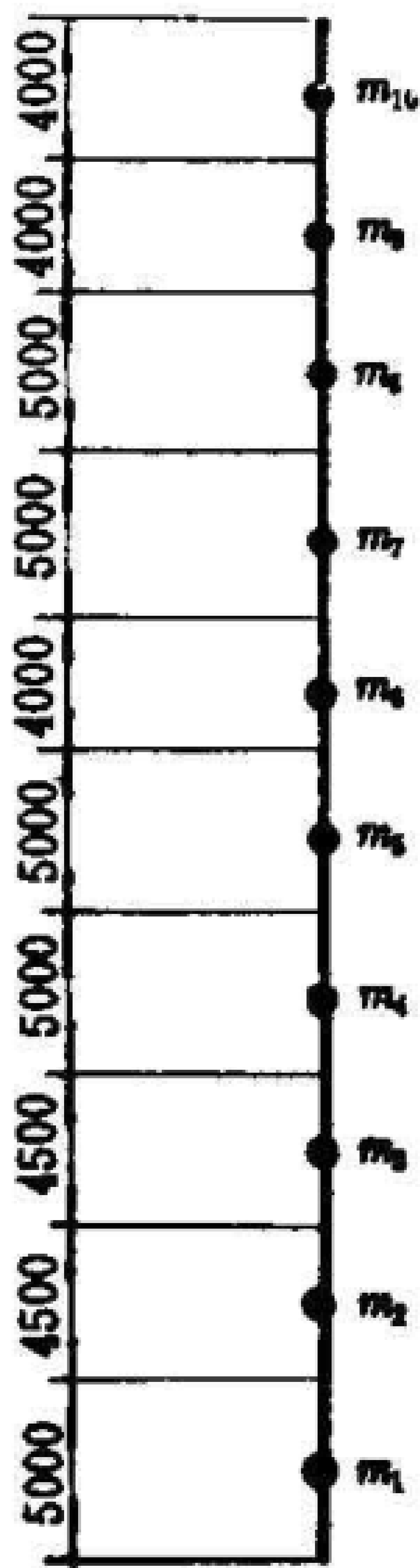


图 F3-2

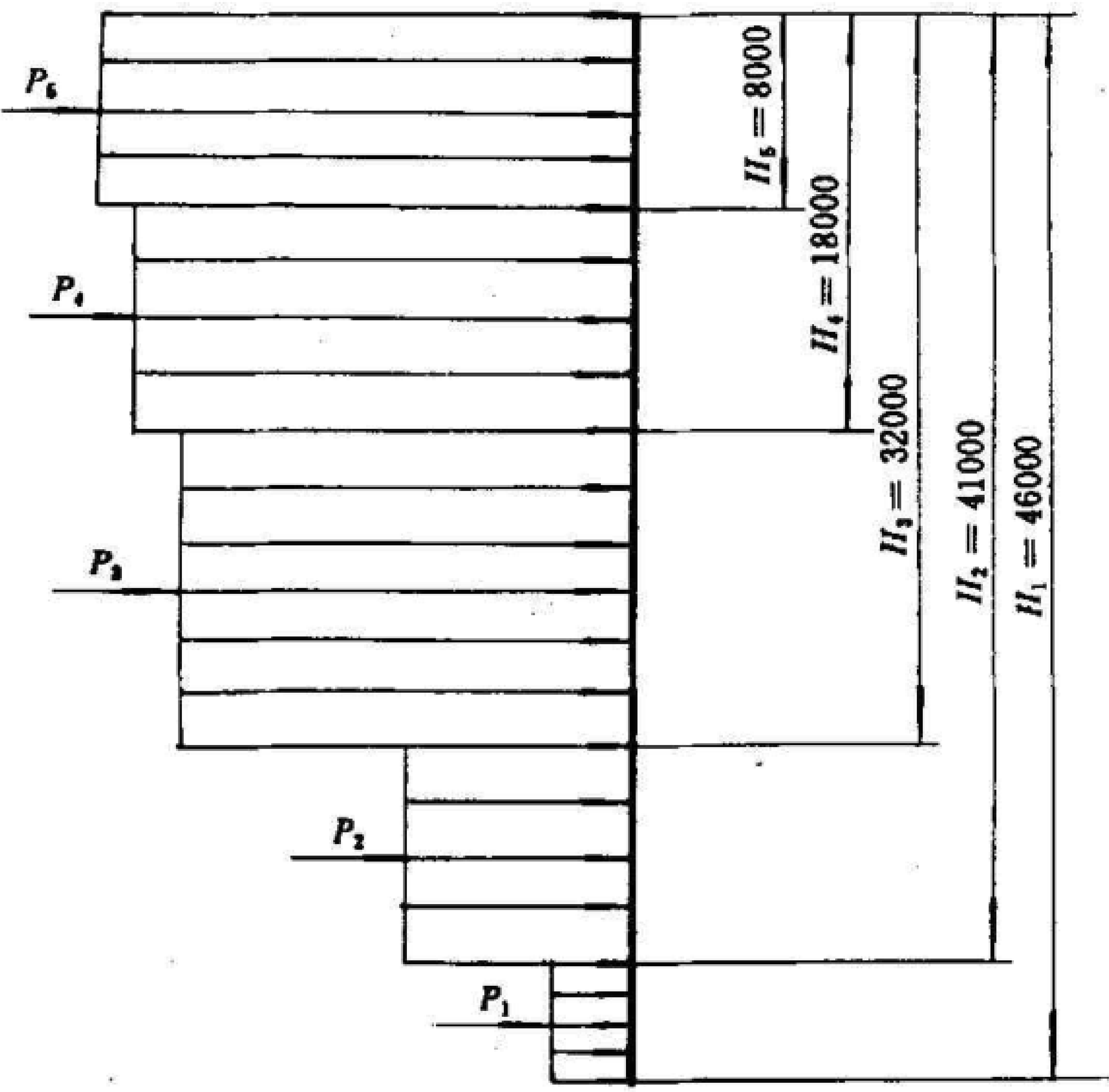


图 F3-3

表 F3-2

段号 i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
m_i kg	6862	6236	6236	6272	6272	5168	5954	5954	4660	4660
h_i mm	2500	7250	11750	16500	21500	26000	30500	35500	40000	44000
$(\frac{h_i}{H})^3$	0.000161	0.003915	0.01667	0.04615	0.1021	0.18057	0.29149	0.45963	0.65752	0.87515
$m_i(\frac{h_i}{H})^3$	1.1048	24.414	103.954	289.453	640.371	933.186	1735.53	2736.64	3064.04	4078.20

$$\sum_{i=1}^{10} m_i(\frac{h_i}{H})^3 = 13606.893$$

段号 i	1	2	3	4	5	
H_i mm	46000	41000	32000	18000	8000	$E=1.86 \times 10^5$ MPa
I_i mm ⁴	9.4×10^9	6.214×10^9	5.354×10^9	4.504×10^9	3.663×10^9	
$\frac{H_i^3}{I_i}$	10355	11092	6120	1295	140	$\sum_{i=1}^5 \frac{H_i^3}{I_i} = 29001.$
$\frac{H_i^3}{I_{i-1}}$	—	7332	5273	1089	114	$\sum_{i=2}^5 \frac{H_i^3}{I_{i-1}} = 13808$

$$T_1 = 114.8 \sqrt{\sum_{i=1}^{10} m_i(\frac{h_i}{H})^3 (\sum_{i=1}^5 \frac{H_i^3}{E_i I_i} - \sum_{i=2}^5 \frac{H_i^3}{E_i I_{i-1}})} \times 10^{-3} = 3.827 \text{ 秒}$$

$$I_1 = \frac{\pi \times 1600^2 \times 1008^2 \times 14}{4(1600 + 1008)} = 10.97 \times 10^9 \text{ mm}^4$$
$$I_2 = \frac{\pi}{8} \times 1020^3 \times 17 = 7.085 \times 10^9 \text{ mm}^4$$
$$I_3 = \frac{\pi}{8} \times 1016^3 \times 13 = 5.354 \times 10^9 \text{ mm}^4$$
$$I_4 = \frac{\pi}{8} \times 1014^3 \times 11 = 4.504 \times 10^9 \text{ mm}^4$$
$$I_5 = \frac{\pi}{8} \times 1012^3 \times 9 = 3.663 \times 10^9 \text{ mm}^4$$

4. 地震载荷和地震弯矩计算

将塔沿高度分成 10 段,视每段高度之间的质量为作用在该段高度二分之一处的集中质量载荷。各段集中载荷 m_i 对该截面引起的水平地震力和底部截面的地震弯矩列于表 F3-3。

表 F3-3

段号 <i>i</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	备 注
m_i	6862	6236	6236	6272	6272	5168	5954	5954	4660	4660	$A = \sum_{i=1}^{10} m_i h_i^{1.5}$
h_i	2500	7250	11750	16500	21500	26000	30500	35500	40000	44000	$B = \sum_{i=1}^{10} m_i h_i^3$
$h_i^{1.5}$	1.25×10^5	6.173×10^5	1.274×10^6	2.12×10^6	3.15×10^6	4.19×10^6	5.33×10^6	6.69×10^6	8×10^6	9.23×10^6	$\eta_{k1} = h_1^{1.5} \frac{A}{B}$
$m_i h_i^{1.5}$	8.58×10^5	3.85×10^6	7.94×10^6	1.329×10^{10}	1.977×10^{10}	2.167×10^{10}	3.171×10^{10}	3.982×10^{10}	3.728×10^{10}	4.301×10^{10}	$A = 2.192 \times 10^{11}$
$m_i h_i^3$	1.072×10^{14}	2.376×10^{15}	1.012×10^{16}	2.817×10^{16}	6.233×10^{16}	9.083×10^{16}	1.689×10^{17}	2.664×10^{17}	2.982×10^{17}	3.97×10^{17}	$B = 1.324 \times 10^{18}$
η_u	0.0207	0.1020	0.2105	0.3502	0.5204	0.6922	0.8805	1.105	1.322	1.525	
C_z	0.5										
a_1	$a_1 = (Tg/T_1)^{0.9} a_{max} = (\frac{0.4}{3})^{0.9} \times 0.23 = 0.0375$ (I类场地土、远震)										
F_u	26.13	117.0	241.45	404.01	600.36	658	964.29	1201.16	1133.15	1307.15	$F_u = C_a a_1 \eta_u m_u g$
$F_u h_u$	65325	848250	2.837×10^6	6.666×10^6	1.297×10^7	1.711×10^7	2.941×10^7	4.264×10^7	4.533×10^7	5.751×10^7	
M_E	$\sum_{i=1}^{10} F_u h_u = 2.154 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{mm}; 1.25 M_E = 2.69 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{mm}$										
$m_i h_i$	1.716×10^7	4.521×10^7	7.327×10^7	1.035×10^8	1.348×10^8	1.344×10^8	1.816×10^8	2.114×10^8	1.864×10^8	2.050×10^8	$\sum_{i=1}^{10} m_i h_i = 1.293 \times 10^9$
$\frac{m_i h_i}{\sum_{i=1}^{10} m_i h_i}$	0.0127	0.0338	0.0548	0.0804	0.1047	0.1043	0.1410	0.1641	0.1447	0.1592	
$F_v^{0.9}$	$F_v^{0.9} = a_{vmax} m_{v0} g = 0.65 a_{max} \times 0.75 m_{v0} g = 0.65 \times 0.23 \times 0.75 \times 51510 \times 9.81 = 56658$										
$F_v^{1.1}$	751.9	1981	3211	4535	5907	5889	7958	9263	8168	8983	$F_v^{1.1} = \frac{m_i h_i}{\sum_{i=1}^{10} m_i h_i} F_v^{0.9}$

5. 风载荷和风弯矩计算

将塔沿高度分成 5 段, 计算各段风载荷, 结果列于表 F3-4。

表 F3-4

塔段号 i	1	2	3	4	5	备 注
l_i (mm)	5000	9000	14000	10000	8000	
K_1	0.7					
$q_0(N/m^2)$	400					
ξ	3.032					查表 6-4
μ (B 类)	0.72	0.72	0.793	0.829	0.853	查表 6-5
ϕ_{μ}	0.02	0.075	0.302	0.623	0.887	查表 6-6
f_i (B 类)	0.8	1.112	1.386	1.532	1.626	查表 6-3
$K_{\mu}=1+\frac{\xi\mu\phi_{\mu}}{f_i}$	1.0546	1.1472	1.5239	2.0221	2.4109	
D_{ei} mm	2532*	2240	2232	2228	2224	* 为 $\phi 1000/\phi 1600$ 裙锥
P_i N	2991	7201	18480	19326	19529	

基底截面 0—0 的风弯矩

$$\begin{aligned} M_{w-0}^0 &= P_1 \frac{l_1}{2} + P_2(l_1 + \frac{l_2}{2}) + P_3(l_1 + l_2 + \frac{l_3}{2}) + P_4(l_1 + l_2 + l_3 + \frac{l_4}{2}) + P_5(l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + \frac{l_5}{2}) \\ &= 2991 \frac{5000}{2} + 7201(5000 + \frac{9000}{2}) + 18480(5000 + 9000 + \frac{14000}{2}) \\ &\quad + 19326(5000 + 9000 + 14000 + \frac{10000}{2}) + 19529(5000 + 9000 + 14000 + 10000 + \frac{8000}{2}) \\ &= 1.922 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm} \end{aligned}$$

I—I 截面的风弯矩

$$\begin{aligned} M_{w-I}^I &= \frac{5000-1000}{5000} P_1 \frac{l_1-1000}{2} + P_2(l_1-1000 + \frac{l_2}{2}) + P_3(l_1-1000 + l_2 + \frac{l_3}{2}) \\ &\quad + P_4(l_1-1000 + l_2 + l_3 + \frac{l_4}{2}) + P_5(l_1-1000 + l_2 + l_3 + l_4 + \frac{l_5}{2}) \\ &= 0.8 \times 2991 \times \frac{4000}{2} + 7201(4000 + \frac{9000}{2}) + 18480(4000 + 9000 + \frac{14000}{2}) \\ &\quad + 19326(4000 + 9000 + 14000 + \frac{10000}{2}) + 19529(4000 + 9000 + 14000 + 10000 + \frac{8000}{2}) \\ &= 1.855 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm} \end{aligned}$$

II—II 截面的风弯矩

$$\begin{aligned} M_{w-II}^{II} &= P_2 \frac{l_2}{2} + P_3(l_2 + \frac{l_3}{2}) + P_4(l_2 + l_3 + \frac{l_4}{2}) + P_5(l_2 + l_3 + l_4 + \frac{l_5}{2}) \\ &= 7201 \frac{9000}{2} + 18480(9000 + \frac{14000}{2}) + 19326(9000 + 14000 + \frac{10000}{2}) \\ &\quad + 19529(9000 + 14000 + 10000 + \frac{8000}{2}) = 1.592 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm} \end{aligned}$$

III—III 截面的风弯矩

$$M_{w-III}^{III} = P_3 \frac{l_3}{2} + P_4(l_3 + \frac{l_4}{2}) + P_5(l_3 + l_4 + \frac{l_5}{2})$$

$$=18480 \frac{14000}{2} + 19326(14000 + \frac{10000}{2}) + 19529(14000 + 10000 + \frac{8000}{2})$$

$$=1.043 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Ⅳ—Ⅳ截面的风弯矩

$$M_{\text{w}}^{\text{Ⅳ-Ⅳ}} = P_4 \frac{l_4}{2} + P_5(l_4 + \frac{l_5}{2})$$

$$=19326 \frac{10000}{2} + 19529(10000 + \frac{8000}{2}) = 3.7 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Ⅴ—Ⅴ截面的风弯矩

$$M_{\text{w}}^{\text{Ⅴ-Ⅴ}} = P_5 \frac{l_5}{2} = 19529 \times \frac{8000}{2} = 7.812 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

6. 偏心弯矩计算

$$M_e = m_e g e = 3500 \times 9.81 \times 1600 = 5.494 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

7. 最大弯矩

0—0截面

$$M_{\text{w}}^{0-0} = 1.922 \times 10^9 > M_{\text{E}}^{0-0} + 0.25M_{\text{w}}^{0-0} = 2.69 \times 10^8 + 0.25 \times 1.922 \times 10^9 = 7.495 \times 10^8$$

$$\therefore M_{\text{max}}^{0-0} = 1.922 \times 10^9 + 5.494 \times 10^7 = 1.977 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Ⅰ—Ⅰ截面

$$M_{\text{w}}^{\text{Ⅰ-Ⅰ}} = 1.855 \times 10^9 > M_{\text{E}}^{\text{Ⅰ-Ⅰ}} + 0.25M_{\text{w}}^{\text{Ⅰ-Ⅰ}} = 2.607 \times 10^8 + 0.25 \times 1.855 \times 10^9 = 7.245 \times 10^8$$

$$\therefore M_{\text{max}}^{\text{Ⅰ-Ⅰ}} = 1.855 \times 10^9 + 5.494 \times 10^7 = 1.910 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Ⅱ—Ⅱ截面

$$M_{\text{w}}^{\text{Ⅱ-Ⅱ}} = 1.592 \times 10^9 > M_{\text{E}}^{\text{Ⅱ-Ⅱ}} + 0.25M_{\text{w}}^{\text{Ⅱ-Ⅱ}} = 1.821 \times 10^8 + 0.25 \times 1.592 \times 10^9 = 5.8 \times 10^8$$

$$\therefore M_{\text{max}}^{\text{Ⅱ-Ⅱ}} = 1.592 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Ⅲ—Ⅲ截面

$$M_{\text{w}}^{\text{Ⅲ-Ⅲ}} = 1.043 \times 10^9 > M_{\text{E}}^{\text{Ⅲ-Ⅲ}} + 0.25M_{\text{w}}^{\text{Ⅲ-Ⅲ}} = 1.238 \times 10^8 + 0.25 \times 1.04 \times 10^9 = 3.85 \times 10^8$$

$$\therefore M_{\text{max}}^{\text{Ⅲ-Ⅲ}} = 1.043 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Ⅳ—Ⅳ截面

$$M_{\text{w}}^{\text{Ⅳ-Ⅳ}} = 3.7 \times 10^8 > M_{\text{E}}^{\text{Ⅳ-Ⅳ}} + 0.25M_{\text{w}}^{\text{Ⅳ-Ⅳ}} = 4.59 \times 10^7 + 0.25 \times 3.7 \times 10^9 = 1.384 \times 10^8$$

$$\therefore M_{\text{max}}^{\text{Ⅳ-Ⅳ}} = 3.7 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

Ⅴ—Ⅴ截面

$$M_{\text{w}}^{\text{Ⅴ-Ⅴ}} = 7.812 \times 10^7 > M_{\text{E}}^{\text{Ⅴ-Ⅴ}} + 0.25M_{\text{w}}^{\text{Ⅴ-Ⅴ}} = 1.011 \times 10^7 + 0.25 \times 7.812 \times 10^7 = 2.964 \times 10^7$$

$$\therefore M_{\text{max}}^{\text{Ⅴ-Ⅴ}} = 7.812 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

8. 塔壳稳定校核

验算塔壳各计算截面的稳定或强度,结果列于表 F3-5。

表 F3-5

计算截面	Ⅰ—Ⅰ	Ⅱ—Ⅱ	Ⅳ—Ⅳ	Ⅴ—Ⅴ
有效厚度 mm	17	13	11	9
计算截面以上操作质量 m_0 kg	45642	34460	18935	8070
横截面积 $\pi D_s \delta_n$ mm ²	53470	40841	34558	28274
截面系数 $\frac{\pi}{4} D_s^2 \delta_n$ mm ³	1.335×10^7	1.021×10^7	8.635×10^6	7.065×10^6
M_{max} N·mm	1.592×10^9	1.043×10^9	3.7×10^8	7.812×10^7

续表 F3-5

计算截面	I — I	II — II	IV — IV	V — V
许用轴向压缩应力 $[\sigma]_c$ (取小值) $\begin{cases} 1.2 B \\ 1.2[\sigma]^t \end{cases}$	<div>174 190.8</div>	<div>170 204</div>	<div>168 204</div>	<div>162 204</div>
操作压力引起的轴向应力 σ_1	33.82	44.23	52.27	63.89
M_{max} 引起的轴向应力 σ_3	119.25	102.15	42.85	11.06
m_0 引起的轴向应力 σ_2	0.85	0.84	0.55	0.29
轴向压应力 $\sigma_c = \sigma_2 + \sigma_3$	136.22	103.10	43.464	11.39
轴向拉应力 $\sigma_t = \sigma_1 - \sigma_2 + \sigma_3$	172.39	145.43	94.508	74.62
$\sigma_c \leq [\sigma]_c$	136.22 < 174	103.1 < 170	43.464 < 168	11.39 < 162
$\sigma_t \leq 1.2\phi[\sigma]^t$	152.22 < 162.18	145.54 < 173.4	94.57 < 173.4	74.66 < 173.4

9. 裙座稳定计算

0-0 截面

$$\frac{1}{\cos\beta}(\frac{M_{max}^{0-0}}{Z_{sb}} + \frac{m_0g}{A_{sb}}) \leq \begin{cases} KB\cos^2\beta \\ K[\sigma]^t \end{cases}$$
$$\frac{1}{\cos\beta}(\frac{0.3M_w^{0-0} + M_c}{Z_{sb}} + \frac{m_{max}g}{A_{sb}}) \leq \begin{cases} KB\cos^2\beta \\ 0.9K\sigma_s \end{cases}$$

其中:锥体半顶角 $\beta = \arctg \frac{(1600-1000)/2}{5000-50} = 3.46823^\circ$

系数 $A = \frac{0.094}{r_i/\delta_{es}} = \frac{0.094}{500.9/14} = 0.00263$ 查图得 $B = 144$

$KB\cos^2\beta = 1.2 \times 144 \times \cos^2 3.46823^\circ = 172.29 \text{ MPa}$

$K[\sigma]^t = 1.2 \times 170 \text{ MPa} = 204 \text{ MPa}$

$0.9K\sigma_s = 0.9 \times 1.2 \times 345 = 372.6 \text{ MPa}$

$Z_{sb} = \frac{\pi}{4} D_{is}^2 \delta_{es} / \cos\beta = 0.785 \times 1600^2 \times 14 / \cos 3.4682^\circ = 2.817 \times 10^7 \text{ mm}^3$

$A_{sb} = \pi D_{is} \delta_{es} = \pi \times 1600 \times 14 = 70372 \text{ mm}^2$

$$\frac{1}{\cos\beta}(\frac{M_{max}^{0-0}}{Z_{sb}} + \frac{m_0g}{A_{sb}}) = \frac{1}{\cos 3.46823^\circ}(\frac{1.977 \times 10^9}{2.817 \times 10^7} + \frac{52504 \times 9.81}{70372})$$
$$= 77.64 < KB\cos^2\beta < K[\sigma]^t$$

$$\frac{1}{\cos\beta}(\frac{0.3M_w^{0-0} + M_c}{Z_{sb}} + \frac{m_{max}g}{A_{sb}})$$
$$= \frac{1}{\cos 3.46823^\circ}(\frac{0.3 \times 1.922 \times 10^9 + 5.494 \times 10^7}{2.817 \times 10^7} + \frac{78283 \times 9.81}{70372})$$
$$= 33.41 \text{ MPa} < KB\cos^2\beta < K[\sigma]^t$$

I — I 截面

$$\frac{1}{\cos\beta}(\frac{M_{max}^{I-I}}{Z_{sm}} + \frac{m_0^{I-I}g}{A_{sm}}) \leq \begin{cases} KB\cos^2\beta \\ K[\sigma]^t \end{cases}$$
$$\frac{1}{\cos\beta}(\frac{0.3M_w^{I-I} + M_c}{Z_{sm}} + \frac{m_{max}^{I-I}g}{A_{sm}}) \leq \begin{cases} KB\cos^2\beta \\ 0.9K\sigma_s \end{cases}$$

其中: $A_{sm} = \pi D_{im} \delta_{es} - \sum [(b_m + 2\delta_m) \delta_{es} - A_m]$

$$A_m = 2l_m \delta_m = 2 \times 130 \times 12 = 3120 \text{ mm}^2$$

$$A_{sm} = \pi \times 1468 \times 14 - 2[(450 + 2 \times 12) \times 14 - 3120] = 57534 \text{ mm}^2$$

$$Z_{sm} = \frac{\pi}{4} D_{im}^2 \delta_{es} - \sum (b_m D_{im} \frac{\delta_{es}}{2} - Z_m)$$

$$Z_m = 2\delta_{es} l_m \sqrt{(\frac{D_{im}}{2})^2 - (\frac{b_m}{2})^2}$$

$$= 2 \times 14 \times 130 \sqrt{(\frac{1468}{2})^2 - (\frac{450}{2})^2} = 2.543 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

$$Z_{sm} = \frac{\pi}{4} \times 1468^2 \times 14 - 2(450 \times 1468 \times \frac{14}{2} - 2.543 \times 10^6)$$

$$= 1.952 \times 10^7 \text{ mm}^3$$

$$\frac{1}{\cos 3.46823^\circ} (\frac{1.910 \times 10^9}{1.952 \times 10^7} + \frac{51974 \times 9.81}{57534})$$

$$= 106.82 \text{ MPa} < K B \cos^2 \beta < K[\sigma]_s (K=1.2)$$

$$\frac{1}{\cos 3.46823^\circ} (\frac{0.3 \times 1.855 \times 10^9 + 5.494 \times 10^7}{1.952 \times 10^7} + \frac{\pi 610.6 \times 9.81}{57534})$$

$$= 44.64 \text{ MPa} < K B \cos^2 \beta < 0.9 K \sigma_s$$

10. 液压试验时的应力校核

由试验压力引起的环向应力

$$\sigma = \frac{(p_T + \text{液柱静压力})(D_i + \delta_{ei})}{2\delta_{ei}}$$

$$= \frac{[2.8 + (0.46 - 0.05)](1000 + 17)}{2 \times 17} = 90.02 \text{ MPa}$$

由试验压力引起的轴向应力

$$\sigma_1 = \frac{p_T D_i}{4\delta_{ei}} = \frac{2.8 \times 1000}{4 \times 17} = 41.18 \text{ MPa}$$

液压试验时重力引起的轴向应力

$$\sigma_2 = \frac{m_1^{1-1} g}{\pi D_i \delta_{ei}} = \frac{71421 \times 9.81}{\pi \times 1000 \times 17} = 13.12 \text{ MPa}$$

由弯矩引起的轴向应力

$$\sigma_3 = \frac{0.3 M_w^{1-1}}{\pi D_i^2 \delta_{ei}} = \frac{0.3 \times 1.592 \times 10^9}{0.785 \times 1000^2 \times 17} = 35.79 \text{ MPa}$$

校核:

$$\sigma = 90.02 < 0.9 \sigma_s \phi = 0.9 \times 325 \times 0.85 = 248.625 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 + \sigma_3 = 13.12 + 35.79 = 48.91 < [\sigma]_{cr} = 177 \text{ MPa}$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 + \sigma_3 = 63.85 \text{ MPa} < 0.9 K \sigma_s \phi = 0.9 \times 12 \times 325 \times 0.85 = 268.5 \text{ MPa}$$

校核通过。

11. 基础环厚度计算

$$\sigma_{bmax} = \frac{M_{max}^{0-0}}{Z_b} + \frac{m_0 g}{A_b}$$

$$\text{式中: } Z_b = \frac{D_{ob}^4 - D_{ib}^4}{10 D_{ob}} = \frac{1950^4 - 1440^4}{10 \times 1950} = 5.21 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

$$A_b = \frac{\pi}{4} (D_{ob}^2 - D_{ib}^2) = \frac{\pi}{4} (1950^2 - 1440^2) = 1.357 \times 10^6 \text{ mm}^2$$

$$\sigma_{bmax} = \frac{1.977 \times 10^9}{5.21 \times 10^8} + \frac{52504 \times 9.81}{1.357 \times 10^6} = 4.17 \text{ MPa}$$

有筋板的基础环厚度:

$$\delta_b = \sqrt{\frac{6 M_s}{[\sigma]_b}}$$

式中: M_s ——计算力矩, 按表 6-7 计算

$$b/l = (1950 - 1632)/(2 \times 100) = 1.59$$

查表 6-7 得 $M_s = -0.0544\sigma_{b\max} \times b^2 = 0.0544 \times 4.17 \times 159^2 = 5735$

$$\delta_b = \sqrt{\frac{6 \times 5735}{140}} = 15.67 \text{ mm}$$

取 $\delta_b = 20\text{mm}$

12. 地脚螺栓计算

$$\sigma_B = \begin{cases} \frac{M_W^{0-0} + M_e}{Z_b} - \frac{m_{\min}g}{A_b} \\ \frac{M_E^{0-0} + 0.25M_W^{0-0} + M_e}{Z_b} - \frac{m_0g - F_V^{0-0}}{A_b} \end{cases} \quad (\text{取大值})$$

$$\frac{M_W^{0-0} + M_e}{Z_b} - \frac{m_{\min}g}{A_b} = \frac{1.922 \times 10^9 + 5.494 \times 10^7}{5.21 \times 10^8} - \frac{41294 \times 9.81}{1.357 \times 10^6}$$

$$= 3.495 \text{ MPa}$$

$$\frac{M_E^{0-0} + 0.25M_W^{0-0} + M_e}{Z_b} - \frac{m_0g - F_V^{0-0}}{A_b}$$

$$= \frac{2.69 \times 10^8 + 0.25 \times 1.922 \times 10^9 + 5.494 \times 10^7}{5.21 \times 10^8} - \frac{52504 \times 9.81 - 56658}{1.357 \times 10^6}$$

$$= 1.544 - 0.34 = 1.204 \text{ MPa}$$

$$\sigma_B = 3.495 \text{ MPa}$$

地脚螺栓的螺纹小径计算

$$d_1 = \sqrt{\frac{\sigma_B A_b}{\frac{\pi}{4} n [\sigma]_{bt}}} + C_2$$

$$= \sqrt{\frac{3.495 \times 1.357 \times 10^6}{\frac{\pi}{4} \times 32 \times 147}} + 3 = 35.84 + 3 = 38.84 \text{ mm}$$

取地脚螺栓为 M48—32 个。

13. 筋板验算

一个地脚螺栓所承受的最大拉力

$$F = \frac{\sigma_B A_b}{n} = \frac{3.495 \times 1.357 \times 10^6}{32} = 1.482 \times 10^5 \text{ N}$$

结构中: $l_k = 350\text{mm}$, $l_3 = 190\text{mm}$, $l_2 = 155\text{mm}$, $\delta_G = 16\text{mm}$

筋板的压应力

$$\sigma_G = \frac{F}{n_1 \delta_G l_2} = \frac{1.482 \times 10^5}{2 \times 16 \times 160} = 28.95 \text{ MPa}$$

筋板的细长比

$$\lambda = \frac{0.5l_k}{0.289\delta_G} = \frac{0.5 \times 350}{0.289 \times 16} = 37.85$$

临界细长比

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.6[\sigma]_G}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \times 2.1 \times 10^5}{0.6 \times 140}} = 157.08$$

$$\lambda < \lambda_c$$

筋板的许用压应力

$$[\sigma]_G = \frac{\left[1 - 0.4\left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2\right][\sigma]_G}{\nu}$$

$$\text{其中: } \nu = 1.5 + \frac{2}{3}\left(\frac{\lambda}{\lambda_c}\right)^2 = 1.5 + \frac{2}{3}\left(\frac{37.85}{157.08}\right)^2 = 1.539$$

$$[\sigma]_c = \frac{\left[1 - 0.4 \left(\frac{37.85}{157.08}\right)^2\right] \times 140}{1.539} = 88.88 \text{ MPa}$$

$$\sigma_G < [\sigma]_c.$$

14. 盖板 为有垫板的环形盖板

$$\sigma_z = \frac{3Fl_3}{4(l_2 - d_3)\delta_c^2 + 4(l_4 - d_2)\delta_z^2}$$

其中: $l_2 = 155\text{mm}$, $d_3 = 60\text{mm}$, $l_4 = 110\text{mm}$, $d_2 = 52\text{mm}$, $l_3 = 190\text{mm}$, $\delta_c = \delta_G = 32 \text{ mm}$

$$\sigma_z = \frac{3 \times 1.482 \times 10^5 \times 190}{4(155 - 60)32^2 + 4(110 - 52)32^2} = 134.8 \text{ MPa}$$

$\sigma_z < [\sigma]_t = 140\text{MPa}$, 故取盖板、垫板均厚 32 mm。

15. 裙座与塔壳对接连接焊缝的验算

对接焊缝的拉应力计算

$$\sigma_w = \frac{M_{\max}^{I-I}}{\frac{\pi}{4} D_{it}^2 \delta_{es}} - \frac{m_0^{I-I} g}{\pi D_{it} \delta_{es}}$$

式中: $M_{\max}^{I-I} = M_{\max}^{1-1}$, $m_0^{I-I} = m_0^{1-1}$

$$D_{it} = 1012\text{mm}, \delta_{es} = 14\text{mm}$$

$$\sigma_w = \frac{1.592 \times 10^9}{0.785 \times 1012^2 \times 14} - \frac{45642 \times 9.81}{\pi \times 1012 \times 14} = 131.33 \text{ MPa}$$

$$\sigma_w > 0.6K[\sigma]_w^t = 0.6 \times 1.2 \times 170 = 122.40 \text{ MPa}$$

强度不够。调整裙座厚度为 20mm, $\delta_{es} = 18\text{mm}$ (16MnR)

$$\sigma_w = \frac{1.592 \times 10^9}{0.785 \times 1000^2 \times 18} - \frac{45642 \times 9.81}{\pi \times 1000 \times 18} = 104.75\text{MPa}$$

$$\sigma_w < 0.6K[\sigma]_w^t = 122.40 \text{ 通过。}$$

例题 4

已知 $\phi 1400/\phi 1200 \times 48000\text{mm}$ 浮阀塔 (如图 F4-1) 设计条件如下:

设置地区的基本风压值 $q_0 = 540\text{N/m}^2$; 地震设防烈度为 8 度; 塔壳与裙座对接; 塔内装有 105 层浮阀塔盘, 每块塔盘存留介质层高度 100mm, 介质密度 $\gamma = 800\text{kg/m}^3$; 塔体外表面附有 100mm 厚保温层, 保温材料密度 $\gamma = 300\text{kg/m}^3$; 塔体上每隔 5m 安装一层操作平台; 塔底裙座中间悬挂一台重沸器, 操作时质量 $m_s = 4000\text{kg}$; 设计压力 $P = 2.3\text{MPa}$; 设计温度 150°C ; 圆筒和封头壁厚附加量 3mm, 裙座厚度附加量为 2mm。对该塔进行强度和稳定性验算。

1. 圆筒和封头强度计算

圆筒和封头材料均选用 20R $[\sigma]^t = 126\text{MPa}$

圆筒壁厚和封头壁厚计算

(1) 直径 $D_i = 1400\text{mm}$ 段圆筒及下封头:

$$\text{圆筒 } \delta = \frac{pD_i}{2[\sigma]^t \phi - p} = \frac{2.3 \times 1400}{2 \times 126 \times 0.85 - 2.3} = 15.2\text{mm}$$

$$\text{下封头 } \delta_h = \frac{pD_i K}{2[\sigma]^t \phi - 0.5p} = \frac{2.3 \times 1400 \times 1}{2 \times 126 \times 0.85 - 0.5 \times 2.3} = 15.1\text{mm}$$

(2) 直径 $D_i = 1200\text{mm}$ 段圆筒及上封头:

$$\text{圆筒 } \delta = \frac{pD_i}{2[\sigma]^t \phi - p} = \frac{2.3 \times 1200}{2 \times 126 \times 0.85 - 2.3} = 13.0\text{mm}$$

$$\text{上封头 } \delta_h = \frac{pD_i K}{2[\sigma]^t \phi - 0.5p} = \frac{2.3 \times 1200 \times 1}{2 \times 126 \times 0.85 - 0.5 \times 2.3} = 12.95\text{mm}$$

2. 容器的质量计算

按 6.3 节计算塔的操作质量 m_0 、最小质量 m_{\min} 和最大质量 m_{\max} 以及沿塔高分段的各段操作质量 m_i

(计算略),列入表 F4-1。

表 F4-1

塔 段 号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
塔各段最小质量 m_{min}	9920	5250	7010	7010	6950	6120	5620	5620	5620	5500
塔各段操作质量 m_i	10950	11450	9150	9150	9000	8470	7300	7300	7300	6350
塔最小质量 $m_{min}=64620$			塔操作质量 $m_o=86420$				塔最大质量 $m_{max}=122000$			

3. 塔的基本自振周期(第一振型)计算

本设备的截面变化为二次变化,自振周期按式(6—5)计算。计算 $\sum_{i=1}^n m_i (\frac{h_i}{H})^3$ 时,将塔沿高度分成十等段(见图 F4-2),计算自振周期时,按不同惯性矩将全塔高分成三段,计算结果见表 F4-2。

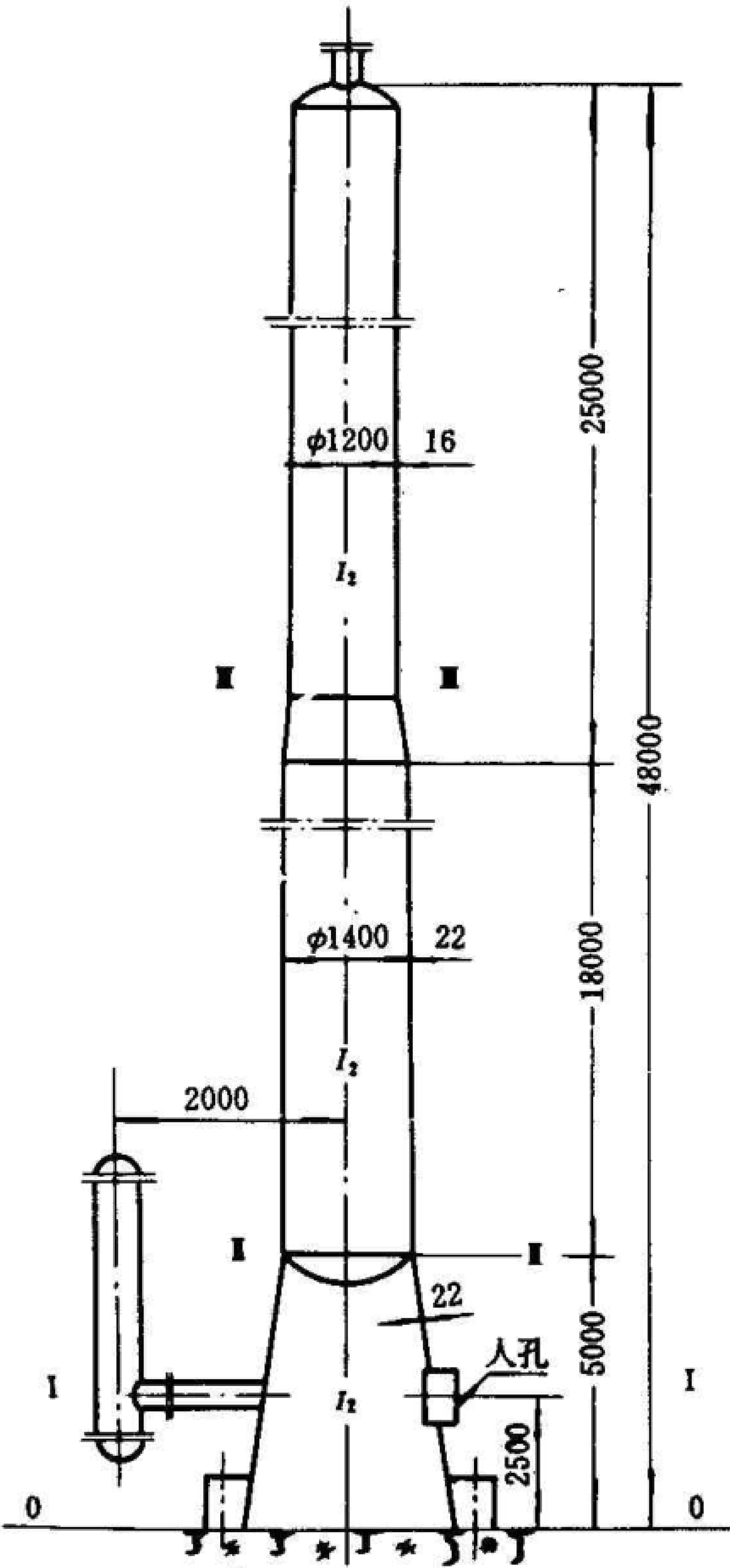


图 F4-1

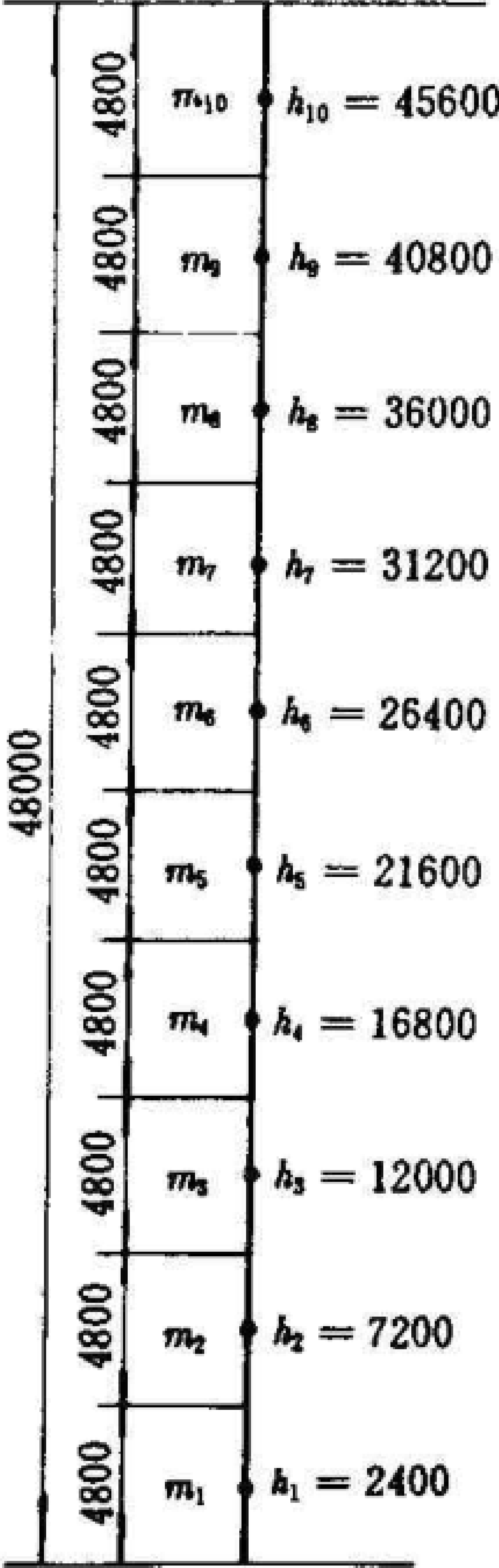


图 F4-2

表 F4-2

塔 段 号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
塔各段操作质量 m_i	10950	11450	9150	9150	9000	8470	7300	7300	7300	6350
各段集中质量距地高 h_i	2400	7200	12000	16800	21600	26400	31200	36000	40800	45600
$(h_i/H)^3$	1.25×10^{-4}	33.75×10^{-4}	156.25×10^{-4}	428.75×10^{-4}	911.25×10^{-4}	1663.75×10^{-4}	2746.25×10^{-4}	4218.75×10^{-4}	6141.25×10^{-4}	8573.75×10^{-4}
$m_i(h_i/H)^3$	1.37	38.6	143	392	820	1409	2005	3080	4483	5444
$\sum_{i=1}^{10} m_i(h_i/H)^3$	17816									
塔 段 号	1	2	3	备 注						
H_i	48000	43000	25000	$E=1.89 \times 10^5 \text{MPa}$						
I_i	33.83×10^9	21.45×10^9	9.18×10^9	$\sum_{i=1}^3 \frac{H_i^3}{I_i} = 8677.8$						
H_i^3/I_i	3269.1	3706.6	1702.1	$\sum_{i=1}^3 \frac{H_i^3}{I_{i-1}} = 3078.6$						
H_i^3/I_{i-1}	—	2350.2	728.4							
T_1	$T_1 = 114.8 \sqrt{\sum_{i=1}^{10} m_i(h_i/H)^3} \left(\sum_{i=1}^3 \frac{H_i^3}{E_i I_i} - \sum_{i=1}^3 \frac{H_i^3}{E_{i-1} I_{i-1}} \right) \times 10^{-3} = 2.64 \text{ 秒}$									

表中：

$$I_1 = \frac{\pi D_{ie}^2 D_{if} \delta_{ei}}{4(D_{ie} + D_{if})} = \frac{\pi \times 1906^2 \times 1400^2 \times 20}{4(1906 + 1400)} = 3.382 \times 10^{10}$$

$$I_2 = \frac{\pi}{8} (D_i + \delta)^3 \delta_{ei} = \frac{\pi}{8} (1400 + 22)^3 \times 19 = 2.145 \times 10^{10}$$

$$I_3 = \frac{\pi}{8} (D_i + \delta)^3 \delta_{ei} = \frac{\pi}{8} (1200 + 16)^3 \times 13 = 9.18 \times 10^9$$

4. 地震荷载和地震弯矩的计算

将塔沿高分成十等段按 6.5 节计算各段集中质量对该截面引起的水平地震力、垂直地震及底部截面的地震弯矩，结果列于表 F4-3。

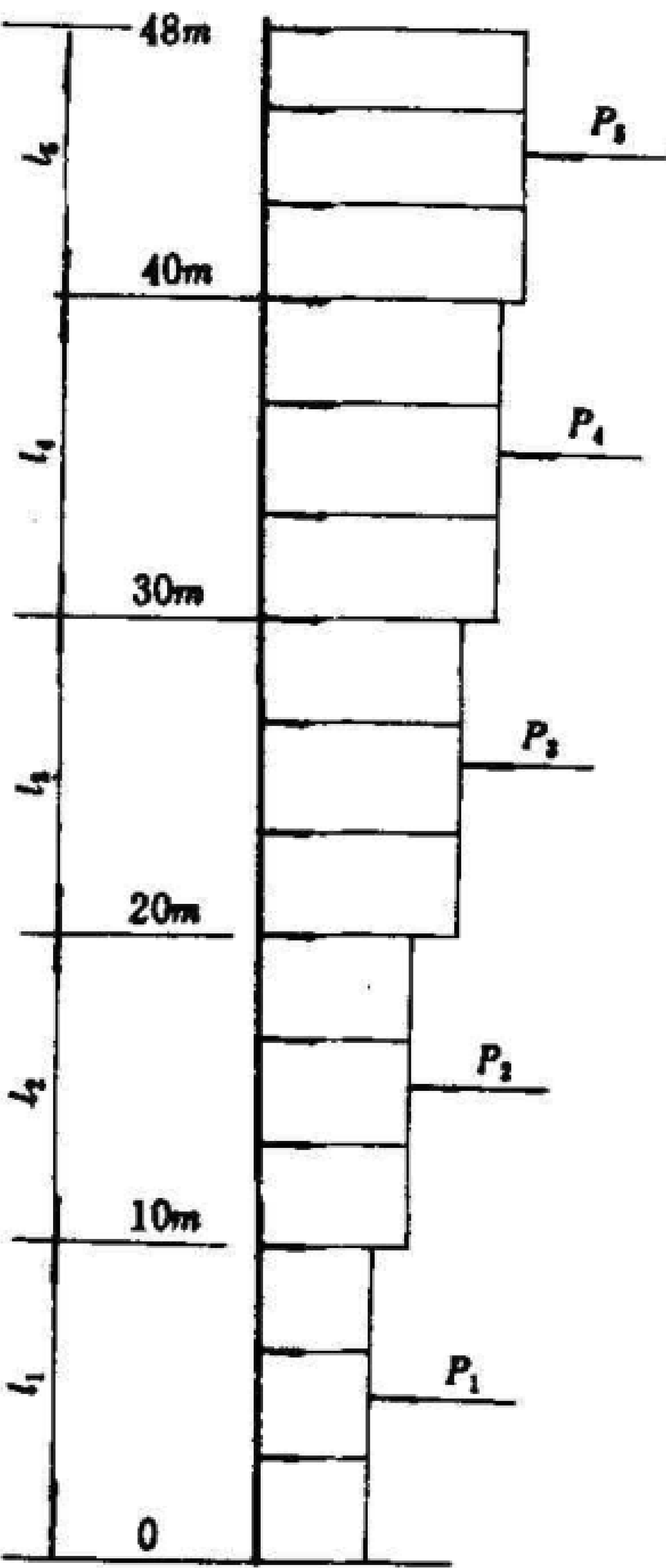


图 F4-3

表 F4-3

段 号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	备 注
m_i	10950	11450	9150	9150	9000	8470	7300	7300	7300	6350	$A = \sum_{i=1}^{10} m_i h_i^{1.5}$ $= 3.172 \times 10^{11}$ $B = \sum_{i=1}^{10} m_i h_i^3$ $= 1.970 \times 10^{14}$ $\frac{A}{B} = 1.61 \times 10^{-7}$
h_i	2400	7200	12000	16800	21600	26400	31200	36000	40800	45600	
$h_i^{1.5}$	1.176×10^5	6.109×10^5	1.315×10^6	2.178×10^6	3.175×10^6	4.289×10^6	5.511×10^6	6.831×10^6	8.241×10^6	9.737×10^6	
$m_i h_i^{1.5}$	1.287×10^9	6.995×10^9	1.203×10^{10}	1.992×10^{10}	2.857×10^{10}	3.633×10^{10}	4.023×10^{10}	4.986×10^{10}	6.016×10^{10}	6.183×10^{10}	
$m_i h_i^3$	1.51×10^{14}	4.274×10^{15}	1.581×10^{16}	4.339×10^{16}	9.07×10^{16}	1.558×10^{17}	2.217×10^{17}	3.406×10^{17}	4.958×10^{17}	6.021×10^{17}	
$\eta_0 = h_i^{1.5} \frac{A}{B}$	0.019	0.098	0.212	0.351	0.511	0.691	0.887	1.10	1.327	1.568	
C_s	0.5										
a_1	$(T_s/T)^{0.9} a_{max} = (0.3/2.64)^{0.9} \times 0.45 = 0.0636$ (I类场地土,近震)										
F_u	64.9	350.1	605.1	1001.9	1436.7	1825.8	2020	2505	3022	3106	
$m_i h_i$	2.128×10^7	8.244×10^7	1.098×10^8	1.537×10^8	1.944×10^8	2.236×10^8	2.278×10^8	2.628×10^8	2.978×10^8	2.896×10^8	$F_V^{0-0} \approx 1.86 \times 10^4$
F_V^{-1}	261.7	820.9	1093.3	1530.4	1935.7	2226.4	2268.2	2616.7	2965.2	2883.6	$\sum_{i=1}^{10} m_i h_i = 1.868 \times 10^9$
$F_L h_i$	1.558×10^5	2.52×10^6	7.26×10^6	1.683×10^7	3.103×10^7	4.82×10^7	6.302×10^7	9.018×10^7	1.233×10^8	1.416×10^8	
M_{E1}^{0-0}	5.24×10^8										$1.25 M_{E1}^{0-0} = 6.55 \times 10^8$

5. 风载荷和风弯矩计算

将塔沿高度分成五段(如图 F4-3),按式(6-17)计算各段风载荷 P_i ,其结果列入表 F4-4。

$$P_i=K_1K_{z_i}qf_i l_i D_{ei} \times 10^{-6}$$

式中: $K_1=0.7$ $q=540\text{N/m}^2$

$$D_{ei}=D_{oi}+2\delta_{si}+K_3+K_4 \text{ 或 } D_{ei}=D_{oi}+2\delta_{si}+K_4+d_o+2\delta_{ps}$$

表 F4-4

塔段号	1	2	3	4	5	备 注
塔段长度(m)	0~10	10~20	20~30	30~40	40~48	
ξ	3.056					查表 6-4
$\alpha_i(\text{B 类})$	0.72	0.79	0.83	0.85	0.867	查表 6-5
ϕ_a	0.022	0.13	0.354	0.619	0.886	查表 6-6
$f_i(\text{B 类})$	1.00	1.25	1.42	1.56	1.65	查表 6-3
$K_{z_i}=1+\xi\alpha_i\phi_a/f_i$	1.048	1.251	1.632	2.031	2.423	
l_i	10000	10000	10000	10000	8000	
$D_{ei}\approx$	3200	2920	2400	2350	2350	按(6-18)式估算
$P_i=K_1K_{z_i}qf_i l_i D_{ei} \times 10^{-6}$	12677	17260	21024	28145	28411	

基底截面 0-0 的风弯矩按式(6-24)计算

$$\begin{aligned} M_{W-0}^0 &= P_1 \frac{l_1}{2} + P_2(l_1 + \frac{l_2}{2}) + P_3(l_1 + l_2 + \frac{l_3}{2}) + P_4(l_1 + l_2 + l_3 + \frac{l_4}{2}) + P_5(l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + \frac{l_5}{2}) \\ &= 12677 \times \frac{10000}{2} + 17260(10000 + \frac{10000}{2}) + 21024(20000 + \frac{10000}{2}) + 28145(30000 + \frac{10000}{2}) \\ &\quad + 28411(40000 + \frac{8000}{2}) \\ &= 3.083 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm} \end{aligned}$$

6. 偏心质量引起的偏心弯矩

$$M_e=m_ege=4000 \times 9.81 \times 2000=7.848 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

7. 塔壳稳定或强度验算

按 6.8 节最大弯矩的计算如下:

0-0 截面

$$M_{W-0}^0+M_e=3.083 \times 10^9+7.848 \times 10^7=3.161 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

$$M_E^0+0.25M_{W-0}^0+M_e=6.55 \times 10^8+0.25 \times 3.083 \times 10^9+7.848 \times 10^7=1.504 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm}$$

故 $M_{max}^0=M_{W-0}^0+M_e=3.161 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{mm}$ (风弯矩控制)

1-1 截面

$$\begin{aligned} M_E^{1-1} &= 1.25[F_{k1} \frac{4800-2500}{4800}(\frac{4800-2500}{2}) + F_{k2}(4800-2500 + \frac{4800}{2}) + F_{k3}(2300+4800 + \frac{4800}{2}) \\ &\quad + F_{k4}(2300+9600 + \frac{4800}{2}) + F_{k5}(2300+14400 + \frac{4800}{2}) + F_{k6}(2300+19200 + \frac{4800}{2}) \\ &\quad + F_{k7}(2300+24000 + \frac{4800}{2}) + F_{k8}(2300+28800 + \frac{4800}{2}) + F_{k9}(2300+33600 + \frac{4800}{2}) \\ &\quad + F_{k10}(2300+38400 + \frac{4800}{2})] = 4.843 \times 10^8 \times 1.25 = 6.054 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{mm} \end{aligned}$$

$$M_W^{I-I} = P_1 \frac{10000-2500}{10000} \cdot \frac{10000-2500}{2} + P_2(7500 + \frac{10000}{2}) + P_3(7500 + 10000 + \frac{10000}{2}) + P_4(27500 + \frac{10000}{2}) + P_5(37500 + \frac{8000}{2})$$
$$= 2.818 \times 10^9 \quad \text{N} \cdot \text{mm}$$

$$M_E^{I-I} + 0.25M_W^{I-I} = 6.054 \times 10^8 + 0.25 \times 2.818 \times 10^9 = 1.310 \times 10^9 \quad \text{N} \cdot \text{mm}$$

故 $M_{max}^{I-I} = M_W^{I-I} + M_E = 2.818 \times 10^9 + 7.848 \times 10^7 = 2.90 \times 10^9 \quad \text{N} \cdot \text{mm}$

I - I 截面:

$$M_W^{I-I} = P_1 \frac{10000-5000}{10000} \cdot \frac{5000}{2} + P_2(5000 + \frac{10000}{2}) + P_3(15000 + \frac{10000}{2}) + P_4(25000 + \frac{10000}{2}) + P_5(35000 + \frac{8000}{2})$$
$$= 2.561 \times 10^9 \quad \text{N} \cdot \text{mm}$$

故 $M_{max}^{I-I} = M_W^{I-I} = 2.561 \times 10^9 \quad \text{N} \cdot \text{mm}$

II - II 截面

$$M_W^{II-II} = P_3 \frac{(30000-23000)}{10000} \cdot \frac{(30000-23000)}{2} + P_4(7000 + \frac{10000}{2}) + P_5(17000 + \frac{8000}{2})$$
$$= 9.859 \times 10^8 \quad \text{N} \cdot \text{mm}$$

故 $M_{max}^{II-II} = 9.859 \times 10^8 \quad \text{N} \cdot \text{mm}$

按式(6-28)~(6-35)验算塔壳各计算截面 I - I , II - II 的稳定或强度,列入表 F4-5(风弯矩控制最大弯矩)。

表 F4-5

计算截面		I - I	II - II
塔壳计算壁厚 δ_s		22-3=19	16-3=13
计算面以上操作质量 m_0		75000	26425
计算截面的横截面积 $A=\pi D_s \delta_s$		83600	49000
计算截面截面系数 $z=\frac{\pi}{4} D_s^2 \delta_s$		2.92×10^7	1.47×10^7
最大弯矩 M_{max}		2.561×10^9	9.859×10^8
允许轴向压应力 $[\sigma]_c$ (取小值)	1.2B	175	165.6
	$1.2[\sigma]'$	151.2	158.4
	$[\sigma]_c$	151.2	158.4
p 引起的轴向拉应力 $\sigma_1=pD_s/4\delta_s$		42.4	53.1
m_0 引起的轴向应力 $\sigma_2=m_0g/A$		9	5.3
M_{max} 引起的轴向应力 $\sigma_3=M_{max}/Z$		87.7	67.07
轴向压应力 $\sigma_c=\sigma_2+\sigma_3$		96.7	72.37
轴向拉应力 $\sigma_t=\sigma_1-\sigma_2+\sigma_3$		121.1	114.87
校核 $\sigma_c \leq [\sigma]_c$		$96.8 < 151.2$	$72.37 < 158.4$
校核 $\sigma_t \leq 1.2[\sigma]'$ $\phi=128.5, 134.6$		$121.1 < 128.5$	$114.87 < 134.6$

8. 裙座稳定计算

按 6.12 条验算圆锥体裙座的稳定性

锥体半顶角 $\beta = \arctg \frac{0.5(1906-1400)}{4859} = 3.3118^\circ$ (尺寸见图 F4-4)

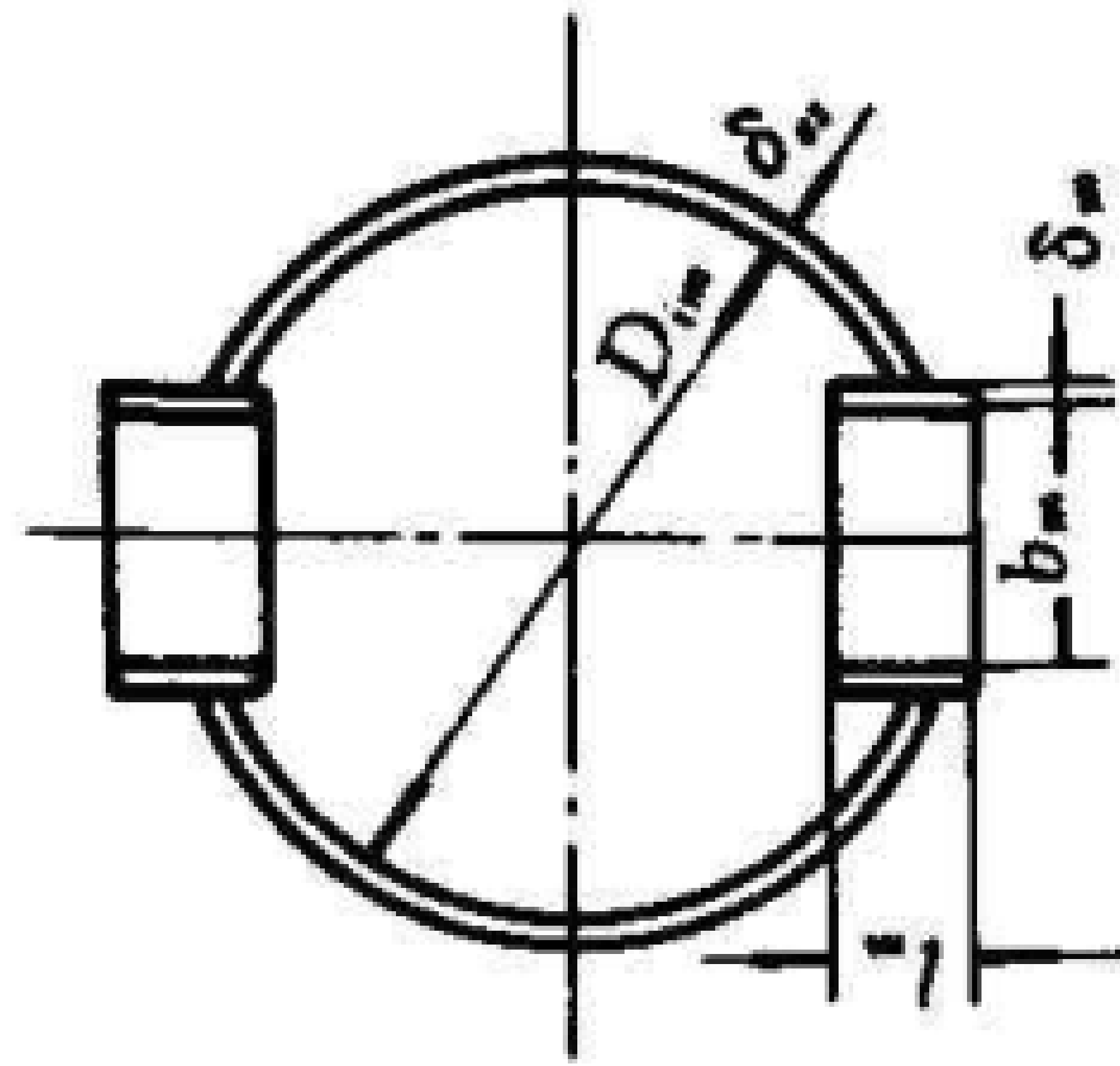


图 F4-4

求 B 值: $A = 0.094 \frac{20}{701} = 0.00268$ 查图得 $B = 147$ MPa

$$\left. \begin{aligned} 1.2B\cos^2\beta &= 1.2 \times 147 \times \cos^2 3.3118^\circ = 176 \text{ MPa} \\ 1.2[\sigma]_t &= 1.2 \times 140 = 168 \text{ MPa} \end{aligned} \right\} \text{取 } 168 \text{ MPa}$$

$$\frac{1}{\cos\beta} \left(\frac{M_{\max}^{0-0}}{Z_{sb}} + \frac{m_0 g}{A_{sb}} \right) = \frac{1}{\cos\beta} \left(\frac{3.161 \times 10^9}{5.711 \times 10^7} + \frac{86420 \times 9.81}{1.198 \times 10^5} \right) = 62.51 < 168 \text{ MPa}$$

$$A_{sb} = \pi D_{is} \delta_{es} = \pi \times 1906 \times 20 = 1.198 \times 10^5 \text{ mm}^2$$

$$Z_{sb} = \frac{\pi}{4 \cos\beta} D_{is}^2 \delta_{es} = \frac{\pi}{4} \times 1906^2 \times 20 / \cos 3.3118^\circ = 5.711 \times 10^7 \text{ mm}^3$$

$$\left. \begin{aligned} 0.9 \times 1.2\sigma_s &= 0.9 \times 1.2 \times 235 = 253.8 \text{ MPa} \\ 1.2B\cos^2\beta &= 176 \text{ MPa} \end{aligned} \right\} \text{取 } 176 \text{ MPa}$$

$$\frac{1}{\cos\beta} \left(\frac{0.3M_w^{0-0} + Me}{Z_{sb}} + \frac{m_{\max} g}{A_{sb}} \right) = \frac{1}{\cos 3.3118^\circ} \left(\frac{0.3 \times 3.083 \times 10^9 + 7.848 \times 10^7}{5.711 \times 10^7} + \frac{122000 \times 9.81}{1.198 \times 10^5} \right) = 27.6 < 176 \text{ MPa}$$

$I-I$ 截面(尺寸见图 F4-5) $b_m = 450 \text{ mm}$ $l_m = 130 \text{ mm}$ $D_{im} = 1660$

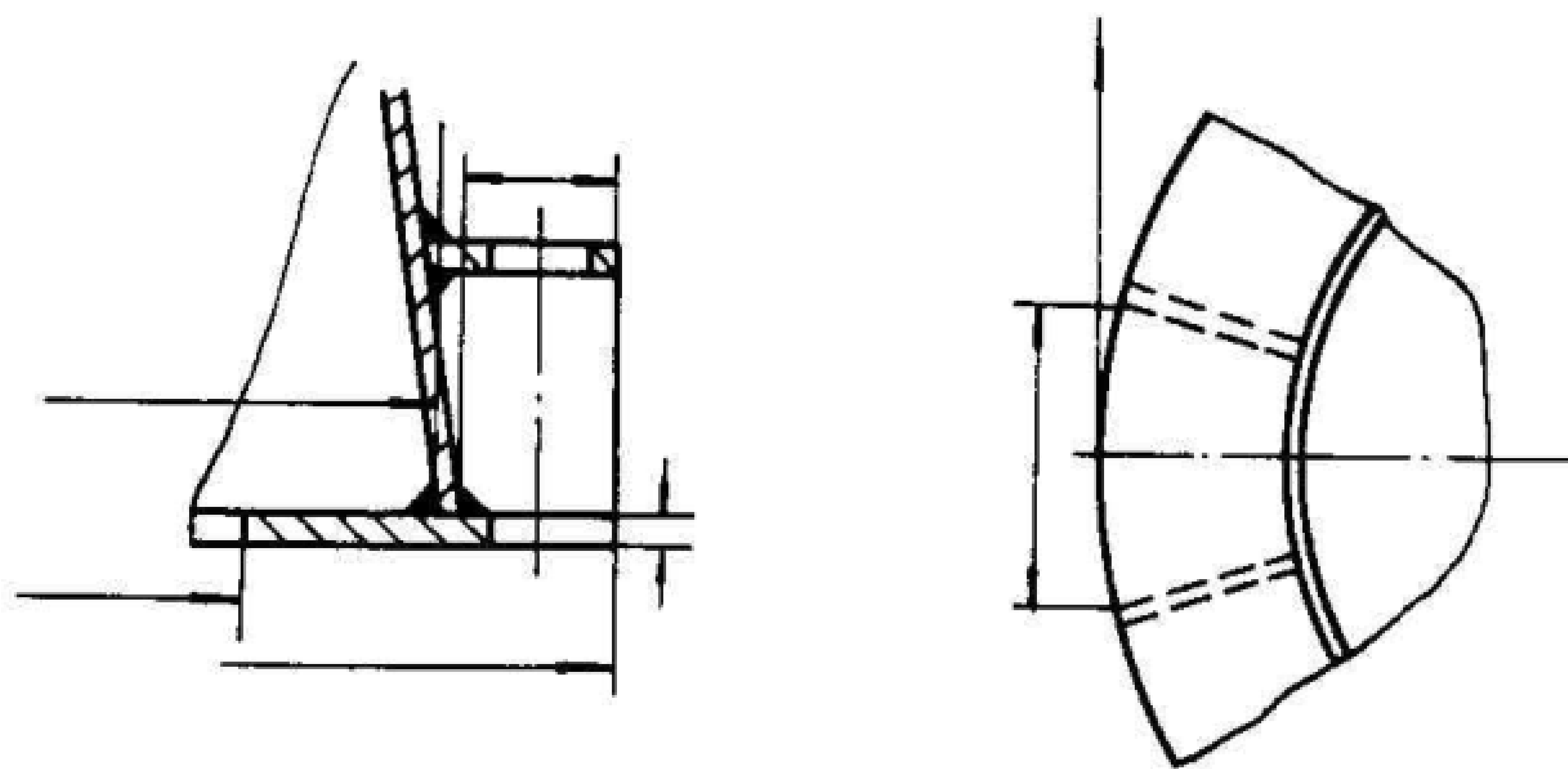


图 F4-5

$$A_m = 2l_m \delta_m = 2 \times 130 \times 20 = 5200 \text{ mm}^2$$

$$m_0^{I-I} \approx 84000 \text{ kg}$$

$$A_{sm} = \pi D_{im} \delta_{es} - \Sigma[(b_m + 2\delta_m)\delta_{es} - A_m]$$

$$m_{\max}^{I-I} \approx 119600 \text{ kg}$$

$$= \pi \times 1660 \times 20 - 2(490 \times 20 - 5200) = 9.91 \times 10^4 \text{ mm}^2$$

$$Z_m = 2\delta_{es} l_m \sqrt{\left(\frac{D_{im}}{2}\right)^2 - \left(\frac{b_m}{2}\right)^2} = 4.154 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

$$E_{sm} = \frac{\pi}{4} D_{im}^2 \delta_{es} - \Sigma (b_m D_{im} \frac{\delta_{es}}{2} - Z_m) = 3.66 \times 10^7 \quad \text{mm}^3$$

$$\frac{1}{\cos \beta} \left(\frac{M_{\max}^{I-I}}{Z_{sm}} + \frac{m_0^{I-I} g}{A_{sm}} \right) = \frac{1}{\cos 3.3118^\circ} \left(\frac{2.90 \times 10^9}{3.66 \times 10^7} + \frac{84000 \times 9.81}{9.51 \times 10^4} \right) = 88 < 168 \text{ MPa}$$

$$\frac{1}{\cos \beta} \left(\frac{0.3 M_w^{I-I} + Me}{Z_{sm}} + \frac{m_{\max}^{I-I} g}{A_{sm}} \right) = \frac{1}{\cos 3.3118^\circ} \left(\frac{0.3 \times 2.818 \times 10^9 + 7.848 \times 10^7}{3.66 \times 10^7} + \frac{119600 \times 9.81}{9.67 \times 10^4} \right) = 37.8 < 176 \text{ MPa}$$

验算通过。

9. 水压试验时的应力校核

试验压力引起的周向应力

$$\sigma = \frac{(P_T + \text{液柱静压力})(D_i + \delta_e)}{2\delta_e} = \frac{(1.25 \times 2.3 + 3.41)(1400 + 19)}{2 \times 19} = 122.67 \text{ MPa}$$

试验压力引起的轴向应力

$$\sigma_1 = \frac{P_T D_i}{4\delta_e} = \frac{1.25 \times 2.3 \times 1400}{4 \times 19} = 53 \quad \text{MPa}$$

操作质量引起的轴向应力 $m_T^{I-I} \approx 85600 \quad \text{kg}$

$$\sigma_2 = \frac{m_T^{I-I} g}{\pi D_i \delta_e} = \frac{85600 \times 9.81}{\pi \times 1400 \times 19} = 10 \quad \text{MPa}$$

弯矩引起的轴向应力

$$\sigma_3 = \frac{4(0.3 M_w^{I-I} + Me)}{\pi D_i^2 \delta_e} = \frac{4(0.3 \times 2.561 \times 10^9)}{\pi \times 1400^2 \times 19} = 26 \quad \text{MPa}$$

$$\text{故 } \sigma_2 + \sigma_3 = 36 < 1.2B = 175 \quad \text{MPa}$$

$$\sigma = 122.67 < 0.9\sigma_s \phi = 180 \quad \text{MPa}$$

$$\sigma_1 - \sigma_2 + \sigma_3 = 69 < 0.9 \times 1.2\sigma_s \phi = 215.7 \quad \text{MPa}$$

验算通过。

10. 基础环厚度计算

按 6.13.1 条计算基础环厚度(有筋板)

$$Z_b = \frac{\pi (D_{ob}^4 - D_{ib}^4)}{32 D_{ob}} = \frac{\pi (2200^4 - 1560^4)}{32 \times 2200} = 7.96 \times 10^8 \quad \text{mm}^3$$

$$A_b = \frac{\pi}{4} (D_{ob}^2 - D_{ib}^2) = \frac{\pi}{4} (2200^2 - 1560^2) = 1.89 \times 10^6 \quad \text{mm}^2$$

$$\sigma_{bmax} = \frac{M_{\max}^{0-0}}{Z_b} + \frac{m_0 g}{A_b} = \frac{3.161 \times 10^9}{7.96 \times 10^8} + \frac{86420 \times 9.81}{1.89 \times 10^6} = 4.4 \quad \text{MPa}$$

$$\delta_b = \sqrt{\frac{6M_s}{1.2[\sigma]_b}}$$

式中 $[\sigma]_b = 140 \quad \text{MPa}$

M_s 按 $b/l = \frac{125}{200} = 0.625$ 查表 6-7 得:

$$M_x = -0.248\sigma_{bmax} \times b^2 = -0.248 \times 4.4 \times 125^2 = -17050 \quad \text{N} \cdot \text{mm/mm}$$

$$M_y = 0.0492\sigma_{bmax} l^2 = 0.0492 \times 4.4 \times 200^2 = 8659.2 \quad \text{N} \cdot \text{mm/mm}$$

$$|M_x| > |M_y| \quad \text{故取 } M_s = |M_x| = 17050$$

$$\delta_b = \sqrt{\frac{6 \times 17050}{140}} = 27 \quad \text{mm}$$

故取 $\delta_b = 30 \quad \text{mm}$

11. 地脚螺栓计算

地脚螺栓承受的最大拉应力

$$\sigma_B = \begin{cases} \frac{M_w^{0.0} + M_e}{Z_b} - \frac{m_{\min} g}{A_b} \\ \frac{M_E^{0.0} + 0.25M_w^{0.0} + Me}{Z_b} - \frac{m_0 g - F_v^{0.0}}{A_b} \end{cases} \quad \text{最大值}$$

$$\text{故 } \sigma_B = \frac{M_w^{0.0} + Me}{Z_b} - \frac{m_{\min} g}{A_b} = \frac{3.161 \times 10^9}{7.96 \times 10^8} - \frac{64620 \times 9.81}{1.89 \times 10^5} = 3.64 \text{ MPa}$$

$$[\sigma]_B = 147 \text{ MPa} \quad n = 28$$

$$d_1 = \sqrt{\frac{4\sigma_B A_b}{\pi n [\sigma]_B}} = \sqrt{\frac{4 \times 3.64 \times 1.89 \times 10^6}{\pi \times 24 \times 147}} = 49.83 \text{ mm}$$

取地脚螺栓为 M56—24 个。

12. 筋板

$$n_1 = 2 \quad \delta_G = 22 \text{ mm} \quad l_2 = 160 \text{ mm}$$

$$F = \frac{\sigma_B A_b}{n} = \frac{3.64 \times 1.89 \times 10^6}{28} = 2.46 \times 10^5 \text{ N}$$

$$\sigma_G = \frac{F}{n_1 \delta_G l_2} = \frac{2.46 \times 10^5}{2 \times 22 \times 160} = 34.94 \text{ MPa}$$

$$\lambda = \frac{0.5l_k}{i} = \frac{0.5 \times 350}{0.289\delta_G} = \frac{0.5 \times 350}{0.289 \times 22} = 27.5$$

$$\lambda_c = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{0.6 \times 1.2 [\sigma]_G}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \times 1.89 \times 10^5}{0.6 \times 1.2 \times 140}} = 136.04$$

$$\text{故 } \lambda < \lambda_c, [\sigma]_c = [1 - 0.4(\lambda/\lambda_c)^2][\sigma]_G/\nu$$

$$\nu = 1.5 + \frac{2}{3} \left(\frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^2 = 1.5 + \frac{2}{3} \times 0.2^2 = 1.53$$

$$[\sigma]_c = (1 - 0.4 \times 0.2^2) \times 140 / 1.53 = 90.04 \text{ MPa}$$

$$\sigma_G = 34.94 < [\sigma]_c = 90.04 \text{ MPa}$$

13. 盖板(有垫板且为环形)

$$l_2 = 160 \text{ mm} \quad l_1 = 110 \text{ mm} \quad l_3 = 110 \text{ mm}$$

$$d_2 = 53 \text{ mm} \quad d_3 = 75 \text{ mm} \quad \delta_c = 30 \text{ mm}$$

$$\delta_z = 22 \text{ mm} \quad F = 2.46 \times 10^5 \text{ N}$$

$$\sigma_z = \frac{3}{4} \frac{Fl_3}{(l_2 - d_3)\delta_c^2 + (l_1 - d_2)\delta_z^2} = \frac{0.75 \times 2.46 \times 10^5 \times 110}{(160 - 75) \times 30^2 + (110 - 53) \times 22^2} = 195 \text{ MPa}$$

$$[\sigma]_z = 140 \text{ MPa}$$

故 $\sigma_z > [\sigma]_z$ 验算不合格, 重新调整盖板、垫板的厚度

$$\text{取 } \delta_c = 36 \text{ mm} \quad \delta_z = 26 \text{ mm}$$

$$\sigma_z = \frac{0.75 \times 2.46 \times 10^5 \times 110}{(160 - 75) \times 36^2 + (110 - 53) \times 26^2} = 136.5 \text{ MPa} < [\sigma]_z$$

验算通过。

14. 裙座与塔壳的焊缝验算

本例焊缝为对接焊缝

$$\frac{4M_{\max}^{1-1}}{\pi D_{ii}^2 \delta_{es}} - \frac{m_0^{1-1} g}{\pi D_{ii} \delta_{es}} \leq 0.72 [\sigma]_w^1$$

$$D_{ii} = 1402 \text{ mm}$$

$$m_0^{1-1} \approx 75000 \text{ kg}$$

$$\frac{4 \times 2.561 \times 10^9}{\pi \times 1402^2 \times 20} - \frac{75000 \times 9.81}{\pi \times 1402 \times 20} = 90.35 < 0.72 [\sigma]_w^1 = 0.72 \times 126 = 90.72 \text{ MPa}$$

焊缝验算合格。