



中华人民共和国国家标准

GB/T 38898—2020

无损检测 涂层结合强度超声检测方法

Non-destructive testing—Testing method for measuring coating bond
strength using ultrasonic wave

2020-06-02 发布

2020-12-01 实施

国家市场监督管理总局 发布
国家标准化管理委员会

目 次

前言 III

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 人员资格 2

5 检测方法 2

6 超声检测设备 5

7 检测条件 5

8 检测要求 5

9 检测报告的编写 6

附录 A（规范性附录） 涂层强度拉伸试验装置示意图 7

附录 B（规范性附录） 涂层强度等级拉伸试样结合模式设计方法 9



前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由全国无损检测标准化技术委员会(SAC/TC 56)提出并归口。

本标准起草单位:北京理工大学、上海材料研究所、中钢集团郑州金属制品研究院有限公司、内蒙古第一机械集团有限公司、北京北方车辆集团有限公司、内蒙古北方重工业集团有限公司、西安先进应力检测控制技术有限公司。

本标准主要起草人:徐春广、贺蕾、张钊、蒋建生、丁杰、李全文、李宏伟、王海岭、杜劭峰、肖定国、周世圆、郝娟、潘勤学、杨超、朱延玲、王秋涛、王军强、栗双怡、宋文渊、卢钰仁、尹鹏。

无损检测 涂层结合强度超声检测方法

1 范围

本标准规定了基于超声波原理的涂层结合强度无损检测方法,包括术语和定义、人员资格、检测方法、超声检测设备、检测条件、检测要求和检测报告编写。

本标准适用于涂层、基体和粘接层均为透声性良好的金属和非金属材料构成的涂层结构,包括粘接、烧结、化学和金属键合形成的耐磨和热障结构涂层结合强度的无损检测。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 8642 热喷涂 抗拉结合强度的测定

GB/T 9445 无损检测 人员资格鉴定与认证

GB/T 12604.1 无损检测 术语 超声检测

GB/T 20737 无损检测 通用术语和定义

GB/T 27664.1 无损检测 超声检测设备的性能与检验 第1部分:仪器

GB/T 27664.2 无损检测 超声检测设备的性能与检验 第2部分:探头

GB/T 27664.3 无损检测 超声检测设备的性能与检验 第3部分:组合设备

GB/T 34018 无损检测 超声显微检测方法

3 术语和定义

GB/T 8642、GB/T 12604.1 和 GB/T 20737 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

涂层结合强度 coating bond strength

涂层与基体之间界面的单位面积内的平均抗拉伸强度或等效结合强度。

注:涂层结合面开裂时对应的最大拉伸力与受拉伸涂层截面积之比,单位为牛每平方米(N/m^2)。

3.2

点结合强度 point bond strength

超声束可检测到的最小粘接面积内的结合强度。

注:单位为牛每平方米(N/m^2)。

3.3

当量结合强度 equivalent bond strength

涂层与基体之间界面的当量面积内的平均抗拉伸强度或等效结合强度。

注:涂层结合面开裂时对应的最大拉伸力与受拉伸涂层当量截面积之比,单位为牛每平方米(N/m^2)。

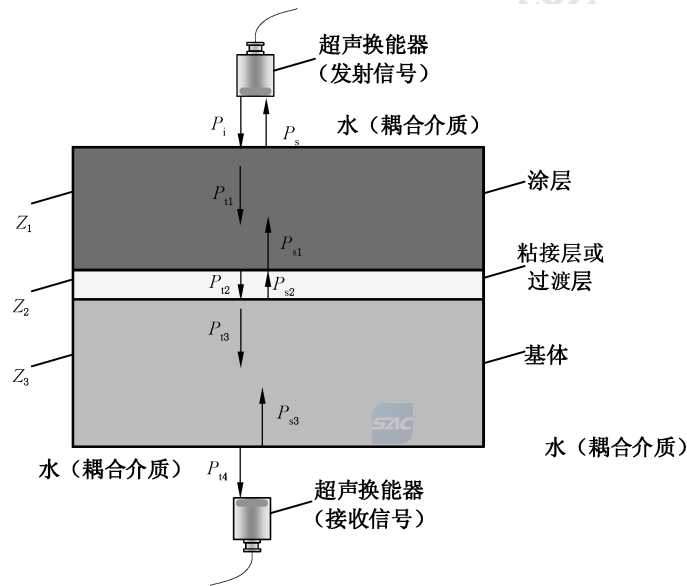
4 人员资格

采用本标准进行检测的人员,应按照 GB/T 9445 或合同各方同意的体系进行超声检测资格鉴定与认证,并由雇主或代理对其进行岗位培训和操作授权。

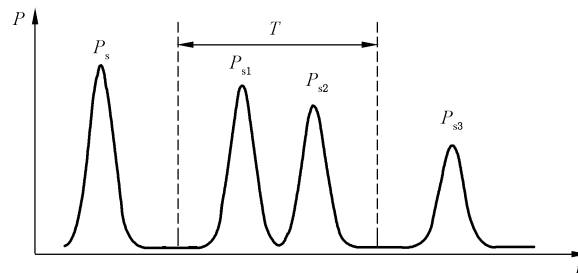
5 检测方法

5.1 基本原理

采用脉冲回波方法检测时,对于涂层结合完好的状态,超声波完全穿透涂层结合界面进入基体后,基体底波反射回波能量大,结合界面能量反射率低、透射率高;对于涂层完全脱落或未结合的状态,超声波能量被涂层脱粘界面完全反射而形成涂层底面反射回波,结合界面能量反射率高、透射率低;对于涂层结合不够好或弱结合的状态,涂层与基体界面都存在一定程度的反射回波和透射回波,超声波能量透射率越高、结合状态越好、结合强度越高,反之亦然;因此,对涂层回波、基体回波和结合界面回波的幅值或能量检测,便可获得涂层结合状态。基本检测原理示意如图 1 所示。

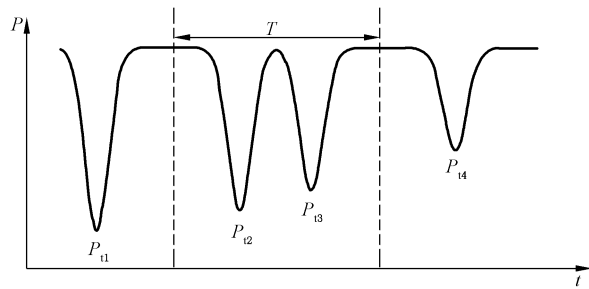


a) 涂层结构及超声脉冲信号传播过程



b) 涂层结构各界面超声脉冲反射信号(能量)时序

图 1 涂层结合强度超声脉冲全时域波形检测原理示意图



c) 涂层结构各界面超声脉冲透射信号(能量)时序

说明:

P_i ——耦合介质中进入涂层的入射超声能量;

P_s ——涂层表面的反射超声能量;

P_{t1} ——从耦合介质透入到涂层中超声能量;

P_{s1} ——涂层底界面的反射超声能量;

P_{t2} ——从涂层透入到粘接层或过渡层中的超声能量;

P_{s2} ——粘接层或过渡层与基体界面的反射超声能量;

P_{t3} ——从粘接层透入到基体介质中的超声能量;

P_{s3} ——基体底面的反射超声能量;

P_{t4} ——从基体透射到耦合介质的超声能量;

Z_1 ——涂层的声阻抗;

Z_2 ——粘接层的声阻抗;

Z_3 ——基体的声阻抗。

图 1 (续)

涂层结构不同结合强度不同,为获得每种涂层结构的结合强度的具体数值,宜制备相应涂层结构不同结合强度的标准拉伸试样,通过拉伸试验确定标准试样的结合强度等级,涂层强度拉伸试验装置示意图见附录 A,涂层强度等级拉伸试样结合模式设计方法见附录 B。

5.2 涂层界面超声波能量反射与透射

为了从能量上表述涂层结合强度,在已知耦合介质声速和声程、涂层声速和厚度、粘接层声速和厚度、以及基体声速和厚度的条件(制备标准试样)下,通过超声 A 扫信号对涂层与粘接层界面进行识别,利用超声扫查系统或面阵列超声检测系统对涂层结构进行超声反射或透射 C 扫,在准确获得超声全时域波形的基础上,对指定时间长度窗[图 1 b)和图 1 c)所示的“T”内结合层的反射或透射超声能量进行求和,与 10 个等级结合强度拉伸标准试样的超声检测能量比对,得到被测涂层的结合强度等级数值。结合强度等级可按需要增加等级数量。

图 1 a)为超声波能量在涂层、粘接层(或过渡层)和基体等界面的反射和透射示意图;涂层与粘接层界面的超声能量反射系数表达式为式(1),粘接层与基体界面的超声能量反射系数表达式为式(2)。

$$r_{s1} = \frac{P_{s1}}{P_{t1}} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \dots\dots\dots (1)$$

$$r_{s2} = \frac{P_{s2}}{P_{t2}} = \frac{Z_3 - Z_2}{Z_2 + Z_3} \dots\dots\dots (2)$$

式中:

r_{s1} ——超声波能量在涂层与粘接层界面的能量反射系数;

r_{s2} ——超声波能量在粘接层与基体界面的能量反射系数;

P_{t1} ——从耦合介质透入到涂层中超声能量；
 P_{s1} ——涂层底界面的反射超声能量；
 P_{t2} ——从涂层透入到粘接层或过渡层中的超声能量；
 P_{s2} ——粘接层或过渡层与基体界面的反射超声能量；
 Z_1 ——涂层的声阻抗；
 Z_2 ——粘接层的声阻抗；
 Z_3 ——基体的声阻抗。

式(1)中反射系数反映涂层与粘接层界面的结合状态或强度,式(2)中反射系数反映粘接层与基体界面的结合状态或强度。反射系数分析法适合超声脉冲反射检测方法,如图 1 b)所示。

涂层与粘接层界面的超声能量透射系数表达式为式(3),粘接层与基体界面的超声能量透射系数表达式为式(4)。

$$t_{t1} = \frac{P_{t2}}{P_{t1}} = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} \dots\dots\dots (3)$$

$$t_{t2} = \frac{P_{t3}}{P_{t2}} = \frac{2Z_3}{Z_2 + Z_3} \dots\dots\dots (4)$$

式中:

t_{t1} ——超声波能量在涂层与粘接层界面的能量透射系数；
 t_{t2} ——超声波能量在粘接层与基体界面的能量透射系数；
 P_{t1} ——从耦合介质透入到涂层中超声能量；
 P_{t2} ——从涂层透入到粘接层或过渡层中的超声能量；
 P_{t3} ——从粘接层透入到基体介质中的超声能量；
 Z_1 ——涂层的声阻抗；
 Z_2 ——粘接层的声阻抗；
 Z_3 ——基体的声阻抗。

式(3)中透射系数反映涂层与粘接层界面的粘接状态或强度,式(4)中透射系数反映粘接层与基体界面的粘接状态或强度。透射系数分析法适合超声脉冲透射检测方法,如图 1 c)所示。

5.3 涂层结合强度 σ

假设超声扫查时的反射系数 r_{s1} 或 r_{s2} 均为 0 或最小值、透射系数 t_{t1} 或 t_{t2} 均为 1 或最大值,则说明在超声束对应点位的涂层和粘接层界面完全粘接,超声信号能量出现全透射,此时对应的点结合强度为 1 或最大值或当量值 σ_{th} 。

假设超声扫查时的反射系数 r_{s1} 或 r_{s2} 均为 1 或最大值、透射系数 t_{t1} 或 t_{t2} 均为 0 或最小值,则说明在超声束对应点位的涂层和粘接层界面出现脱粘,超声信号能量出现全反射,此时对应的点结合强度为零或最小值。

涂层结合强度 σ 的表达式为式(5)。

$$\sigma = \sigma_{th} \cdot K_r \text{ 或 } \sigma = \sigma_{th} \cdot K_t \dots\dots\dots (5)$$

式中:

σ ——涂层结合强度,单位为牛每平方米(N/m²)；
 σ_{th} ——当量结合强,单位为牛每平方米(N/m²)；
 K_r ——超声反射法结合强度系数,超声反射扫查的反射系数与全反射系数 r_{sth} 之比；
 K_t ——超声透射法结合强度系数,超声透射扫查的透射系数与全透射系数 t_{tth} 之比。

涂层结合强度是一定结合面积内强度的平均值,因此,结合强度系数是指定扫查面积积分条件下的能量反射或透射系数与能量全反射或全透射系数之比,超声反射法结合强度系数 K_r 的表达式为式

(6), 超声透射法结合强度系数 K_t 的表达式为式(7)。

$$K_r = \frac{\oint r_{s1} dS + \oint r_{s2} dS}{\oint r_{sth} dS} \dots\dots\dots (6)$$

$$K_t = \frac{\oint t_{t1} dS + \oint t_{t2} dS}{\oint t_{Tth} dS} \dots\dots\dots (7)$$

式中:

- r_{s1} —— 超声波能量在涂层与粘接层界面的能量反射系数;
 - r_{s2} —— 超声波能量在粘接层与基体界面的能量反射系数;
 - r_{sth} —— 超声波能量在涂层与粘接层界面的能量全反射系数;
 - t_{t1} —— 超声波能量在涂层与粘接层界面的能量透射系数;
 - t_{t2} —— 超声波能量在粘接层与基体界面的能量透射系数;
 - t_{Tth} —— 超声波能量粘接层与基体界面的能量全透射系数;
 - dS —— 涂层的粘接面积;
 - K_r —— 超声反射法结合强度系数, 超声反射扫查的反射系数与全反射系数 r_{sth} 之比;
 - K_t —— 超声透射法结合强度系数, 超声透射扫查的透射系数与全透射系数 t_{Tth} 之比。
- 按本标准方法所检测的结合强度, 是被检件涂层区域的点结合强度的平均值。

6 超声检测设备

超声反射式和超声透射式扫查设备均可用于涂层结合强度的无损检测; 对于透声性良好的涂层结构, 宜采用满足 GB/T 27664.3 或 GB/T 34018 的超声反射式扫查设备, 具备 C 扫功能, 涂层越薄, 检测用超声频率越高、扫查装置运动精度越高; 对于透声性不好的涂层结构, 宜采用满足 GB/T 27664.1 的超声透射式扫查设备或采用相关技术完成超声透射检测, 涂层越厚, 透声性越差, 检测用超声频率越低, 粘接状态的检测分辨力越低。

涂层结合强度超声检测仪应至少具有以下功能:

- a) 仪器应满足检测构件的频率要求;
- b) 滤波设置;
- c) 超声激励电压控制;
- d) 超声接收增益控制;
- e) 仪器的综合稳定度优于 1%。

应定期对检测仪进行综合性能校准, 校准间隔不超过一年。

7 检测条件

- 7.1 检测过程在常温环境(10℃~35℃)下进行, 通常使用不含气体的脱氧水(或蒸馏水)作为耦合剂。
- 7.2 待检构件表面应光滑平整, 并保持检测声束与待检构件表面法向一致。
- 7.3 在换能器与待检构件之间充满耦合剂, 且二者间的垂直距离应小于换能器的焦距长度。

8 检测要求

8.1 当量结合强度测定

针对被测涂层结构制备不同结合强度等级的标准拉伸试样, 涂层强度拉伸试验装置示意图及涂层

强度等级拉伸试样结合模式设计方法如附录 A 和附录 B 所述,对标准涂层拉伸试样进行检测,以获得每种结合强度等级的当量结合强度值 σ_{th} 。

8.2 检测仪器标定

涂层结合强度检测前应对检测仪器进行标定。

8.3 超声换能器选择

超声换能器应满足 GB/T 27664.2 的要求,在有清晰超声反射波或透射波的条件下,尽可能选择高频超声聚焦超声换能器,以获得更高的涂层结合强度状态检测分辨率,以表征结合界面强度分布细节。

8.4 超声换能器安装

反射或透射换能器的声束应与样品表面法向一致,检测表面耦合液不含气泡。

8.5 超声换能器对焦

在 A 扫模式下,通过调节换能器与待检构件表面间的距离使超声检测系统接收到的反射或透射信号的幅值达到最大,使声束聚焦在结合界面上,推荐 3 dB 经验原则。

8.6 检测区域选择

应在待检构件上选择与附录 B 规定的结合强度标准试样涂层面积大小相当的区域进行检测,计算出超声反射法结合强度系数 K_r 或超声透射法结合强度系数 K_t 。

8.7 涂层结合强度 σ 计算

由超声反射法结合强度系数 K_r 或超声透射法结合强度系数 K_t ,和测定的标准试样的当量结合强度值 σ_{th} ,根据式(5)计算出涂层的结合强度 σ 。

9 检测报告的编写

9.1 检测报告内容一般包括下列信息:

- 检测单位、人员信息、检测日期等;
- 被检测涂层结构件的材料类型、制备工艺、涂层结构尺寸描述等;
- 超声换能器型号厂商与声学参数;
- 标准试样的当量结合强度值 σ_{th} ;
- 超声反射法结合强度系数 K_r 或超声透射法结合强度系数 K_t ;
- 结合强度值 σ 。

9.2 客户若有要求,需要提供原始记录时,一般包括下列信息:

- 扫描横向和纵向步长;
- 分辨率和速度;
- 扫描面积(X-Y 尺寸);
- 脉冲收发仪能量、增益、带宽、重复频率、接收衰减、阻尼、采样率和滤波等相关参数。

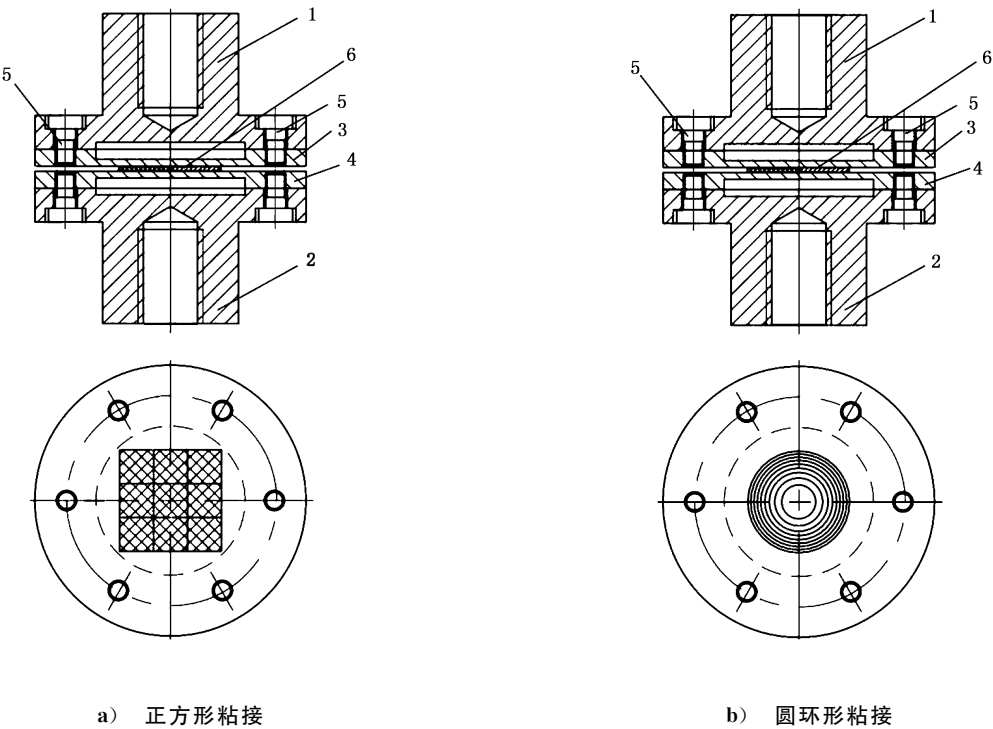
附 录 A

(规范性附录)

涂层强度拉伸试验装置示意图

A.1 涂层强度拉伸试验装置

涂层强度拉伸试验装置示意图见图 A.1。



说明：

- 1、2——连接法兰；
- 3、4——拉伸试样粘接体；
- 5 ——固定螺钉；
- 6 ——粘接系统。

图 A.1 拉伸试验装置示意图

A.2 涂层强度拉伸试验装置设计原则

为使拉力能均匀地作用于试样的粘接面积上而没有任何扭曲动作，在与试样粘接平面垂直的方向上施加拉伸应力，准确得出破坏试样粘接的拉力。不同涂层强度等级拉伸试样结合模式见附录 B。

A.3 制备方法

尽可能选用与实际应用相同类型的材料作为试样的底材,底材应平整且没有变形。根据附录 B 规定的不同等级标准拉伸试样的结合模式,将粘接体系均匀涂于十级正方形标准粘接拉伸试样或十级圆形标准粘接拉伸试样的结构中。

涂层粘接体系固化后,将粘接的试样组合置于适宜的拉力试验机上,粘接的试样经可控的拉力试验(拉开法试验),测出破坏涂层/底材间附着所需的拉力,计算得出相应等级的当量结合强度。



附录 B
(规范性附录)

涂层强度等级拉伸试样结合模式设计方法

B.1 十级正方形粘接拉伸试样结构示意图

十级正方形粘接拉伸试样结构示意图见图 B.1。

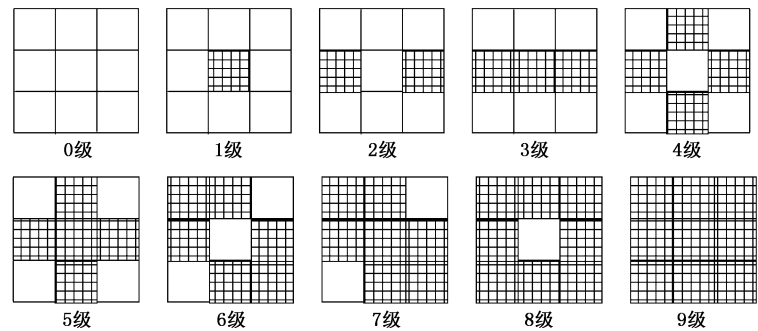
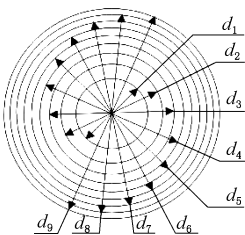


图 B.1 涂层强度十级正方形粘接拉伸试样结构示意图

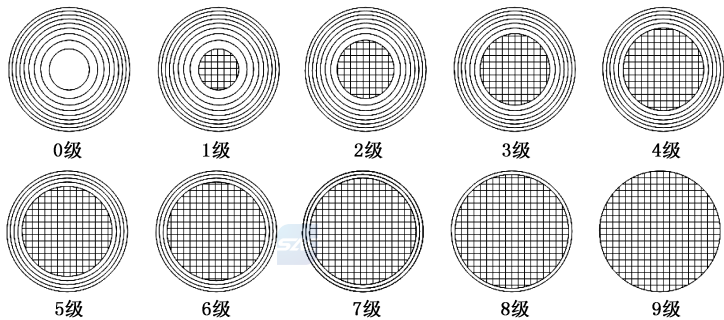
B.2 十级圆环形粘接拉伸试样结构示意图

十级圆环形粘接拉伸试样结构示意图见图 B.2。



由内向外,圆的直径分别为 $d_i (i=1,2,\dots,9)$,
 $d_i^2 - d_{i-1}^2 = d_1^2 (i>1)$

a) 粘接环的直径要求



b) 各级粘接要求

图 B.2 涂层强度十级圆环形粘接拉伸试样结构示意图