



中华人民共和国国家标准

GB/T 33210—2016

无损检测 残余应力的电磁检测方法

Non-destructive testing—Test method for determining residual stresses
by electromagnetic technology

2016-12-13 发布

2017-04-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局
中国国家标准化管理委员会 发布

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：中国特种设备检测研究院、西安交通大学、北京中检希望科技有限公司、厦门市特种设备检验检测院、中国矿业大学。

本标准起草人：丁克勤、王振山、王洪柱、陈力、殷春浩、黄学斌、伏喜斌、赵娜、刘琳琳、辛伟、张理京、何亚莹。

无损检测 残余应力的电磁检测方法

1 范围

本标准规定了铁磁性材料表面残余应力的电磁检测的技术和方法。

本标准适用于制造、安装、使用过程中的铁磁性材料(例如焊缝、热影响区、母材)及其各种形式的结构件。

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 12604.5 无损检测 术语 磁粉检测

GB/T 20737 无损检测 通用术语和定义

3 术语和定义

GB/T 12604.5 和 GB/T 20737 界定的术语和定义适用于本文件。

4 人员要求

按本标准进行检测的人员应经过专业培训。

5 检测前的准备

在进行检测前,需要通过资料审查和现场实地考察获取一些基本信息,至少应包括如下的要素:

- a) 检测人员的要求;
- b) 检测计划;
- c) 检测仪器设备;
- d) 仪器状态;
- e) 信号记录;
- f) 记录表格和报告格式;
- g) 母材的材料;
- h) 加工工艺;
- i) 其他有助于应力检测的结构信息。

6 检测系统

6.1 检测仪器

6.1.1 概述

检测仪器应得到有资质的第三方测试认证,并获得测试证书,方可使用。其测试证书内容至少包

括：灵敏度、误差、可重复性、连续供电时间和数据存储量等。

检测仪器应具有检测数据存储的功能，且至少满足 6.1.2~6.1.4 的要求。

6.1.2 灵敏度

仪器对应力的灵敏度应大于或等于 $10\ \mu\text{A}/\text{MPa}$ 或者 $100\ \mu\text{V}/\text{MPa}$ 。

6.1.3 误差

直接测量最大剪应力和主方向角重复误差应分别小于 20 MPa 和 7° 。

6.1.4 外观要求

检测仪器应做到防尘、轻便，便于现场的残余应力检测。

6.2 残余应力检测传感器

传感器应小巧，以保证与被测工件的耦合，并要求表面平整度和粗糙度与用于标定的试样基本相同。

6.3 附件

6.3.1 探头延伸电缆

在保证整个系统功能、灵敏度和误差的情况下，可用延伸电缆连接探头和仪器主机。

6.3.2 数据传输线

采用数据传输线连接检测设备和电脑，可将保存的检测数据传输至电脑，便于进行数据分析和评价。

6.3.3 充电器

充电应能正常使用外接电源，且保证充电时间不超过 7 h。

6.4 检测设备的维护

应对仪器设备进行周期性的检查和调节来校正仪器的功能。在现场进行检测时，如发现仪器设备产生错误或部分变化，也应对仪器进行功能的检查和调节。维护工作应按照制定的书面程序进行，并应对每次维护检查的结果进行记录。

7 检测程序

7.1 试样制备

7.1.1 用于标定的试样所选取的材料应与被检材料的种类和化学成分相同，且拥有相同热处理条件的标准拉压试样。

7.1.2 标定试验前，用于标定的试样应经过消应力处理。

7.1.3 用于标定的试样表面应无污垢、油膜、厚氧化层。不满足探头测量所需表面公差等级时，应进行清理或打磨。非接触测量时，可贴不同厚度的聚氯乙烯薄膜。

7.2 标定

7.2.1 在用于标定的试样两侧贴双向电阻应变片，准确地测量一点的应力状态，并防止试样在拉压过

程中产生偏心。

7.2.2 在标定时应把探头固定在标定位置。

7.2.3 与测试仪器联机,测定应力和输出电流或电压的关系。

7.3 确定频率和最佳励磁电流

7.3.1 根据测量深度选择励磁频率。

7.3.2 改变励磁电流,根据灵敏系数确定最佳励磁电流。

7.3.3 加载范围一般为 $0 \sim 0.9\sigma_s$ 。

7.3.4 反复加载应力以检查其重复性。

7.4 制定标定曲线

7.4.1 概述

确定单向拉伸与压缩条件下的主应力差与电流差(或电压)的关系,绘制标定曲线,确定灵敏度系数。

7.4.2 主应力差与电流差之间的关系

利用二极探头测量时,测量探头与 X 轴成 0° 、 45° 、 90° 的电流信号与主应力差的关系,见式(1)、式(2):

$$(\sigma_1 - \sigma_2) = \frac{I_{90} - I_0}{\alpha \cos\theta} \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$\theta = -\frac{1}{2} \tan^{-1} \left(\frac{2I_{45} - I_0 - I_{90}}{I_{90} - I_0} \right) \quad \dots\dots\dots(2)$$

式中:

σ_1 ——最大主应力;

σ_2 ——最小主应力;

$\sigma_1 - \sigma_2$ ——主应力差;

I_0 、 I_{45} 、 I_{90} ——探头在 0° 、 45° 、 90° 方向电流输出值,单位为微安(μA);

θ ——最大主应力方向与 X 轴夹角;

α ——电流灵敏度系数,单位为微安每兆帕($\mu\text{A}/\text{MPa}$)。

7.4.3 主应力差与电压之间的关系

利用四极或九极探头测量残余应力时,残余应力输出四极探头的磁极分布如图 1 所示。探头对称设置 4 个脚,分别在对角线脚上绕两个磁化用和输出用线圈。磁化线圈通交流电流。将探头放在钢板上,没有应力时,探头两输出脚都处在等磁位点,输出两脚的线圈没有输出信号,此时输出电压为零,如图 1a)所示,当钢板有残余应力时,残余应力引起磁各向异性,此时两输出脚的磁性发生了变化,即两脚的磁位不同,如图 1b)所示。因此当磁化信号呈周期性变化时,输出线圈中就会产生输出信号电压。

实际测量时,测量探头与 X 轴成 0° 的电压信号与应力差的关系,见式(3):

$$V_0 = K(\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\theta \quad \dots\dots\dots(3)$$

测量探头与 X 轴成 45° 方向的电压信号与应力差的关系,见式(4):

$$V_{45} = K(\sigma_1 - \sigma_2) \cos[2(\theta + 45^\circ)] \quad \dots\dots\dots(4)$$

根据应力差 $(\sigma_1 - \sigma_2)$ 及 θ 与电压信号 V_0 、 V_{45} 的关系,可得到式(5)、式(6):

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{1}{K} \sqrt{(V_0^2 + V_{45}^2)} \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$\theta = -\frac{1}{2} \tan^{-1} (V_{45}/V_0) \dots\dots\dots (6)$$

式中：

V_0 ——测量探头与 X 轴成 0° 时的输出电压，单位为微伏(μV)；

V_{45} ——测量探头与 X 轴成 45° 时的输出电压，单位为微伏(μV)；

K ——电压灵敏度系数，单位为微伏每兆帕($\mu\text{V}/\text{MPa}$)。

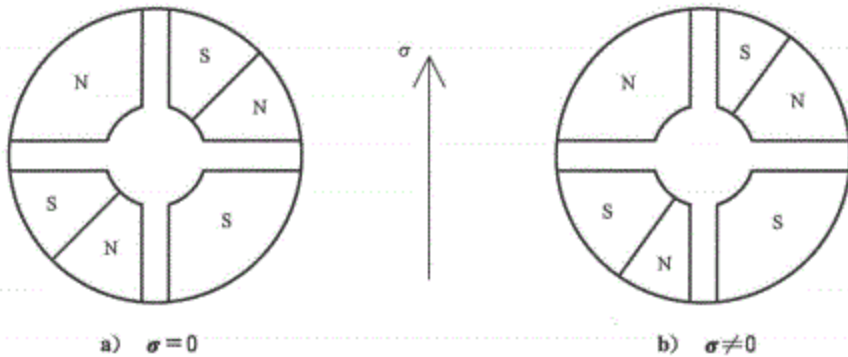


图 1 四极传感器的磁极分布

残余应力输出九极探头的磁极分布如图 2 所示。九极探头的应力测试方法与四极探头近似。只是在得到主应力差($\sigma_1 - \sigma_2$)及主应力角时，探头不需要旋转。其中，九极传感器中间极为激磁绕组，圆周八个极为感应绕组。

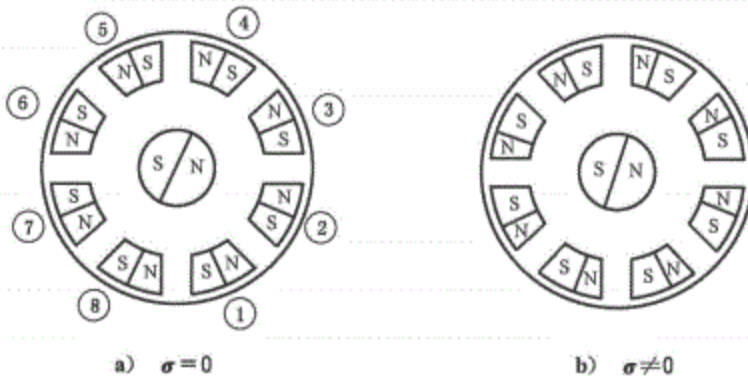


图 2 九极传感器的磁极分布

实际测量时，图 2 所示的九极传感器相当于①③⑤⑦极构成一个四极传感器，测量探头与 X 轴成 0° ，电压信号与应力差的关系同式(3)；②④⑥⑧极构成另一个四极传感器，测量探头与 X 轴成 45° ，磁信号与应力差的关系同式(4)；得到的主应力差($\sigma_1 - \sigma_2$)及 θ 与电压信号 V_0 、 V_{45} 的关系，同式(5)和式(6)。

7.4.4 确定灵敏度系数

灵敏度系数 α 或 K 由单向拉压或四点弯曲试验确定。单向加载条件下，加载应力 σ 与 $\Delta I = I_{90} - I_0$ ， σ 与 $V = \sqrt{V_0^2 + V_{45}^2}$ 近似呈线性关系，为通过原点的一条近似直线。该直线为绘制的标定曲线，直线的斜率为灵敏度系数 α 或 K 值。加载不同的应力值，得到应力 σ 与电流 ΔI 和电压 V 的关系，见式(7)、式(8)：

$$\alpha_i = \frac{\Delta I_i}{\sigma_i} \dots\dots\dots (7)$$

$$K_i = \frac{V_i}{\sigma_i} \quad \dots\dots\dots(8)$$

式中:

σ_i ——单轴应力,单位为兆帕(MPa);

$\Delta I_i = (I_{90} - I_0)_i$ ——垂直于应力方向与应力方向电流差,单位为微安(μA);

$V_i = \sqrt{(V_0^2 + V_{45}^2)}_i$ ——垂直应力方向与应力方向电压差,单位为微伏(μV)。

由式(5)和式(6)确定灵敏度系数 α 和 K 的表达式分别为式(9)、式(10):

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i}{n} \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n} \quad \dots\dots\dots(10)$$

7.5 校准

对用于标定的试样加载并分别比较电磁检测法与应变片法所测得的应力值。

当电磁检测法与应变片法测量误差在 5% 以内时,本次试验结束。否则应分析原因并重新绘制标定曲线,确定灵敏度系数。

7.6 表面准备

检查被测构件表面是否平整,是否有锈蚀。如不符合要求应对表面进行打磨处理,以确保探头能与被测构件表面充分接触。

检查被测构件表面是否有磁屏蔽材料涂层或包覆层,如有需要剥除。

7.7 检测

7.7.1 检测步骤

检测步骤如下:

- a) 检测前对检测部位材料进行分析,不同的材料应用不同的标定系数。
- b) 检测前确定下检测深度,不同的检测深度应用不同的激励参数。
- c) 将探头接触被检测结构工件,确保探头与检测面完全接触,调整探头测量方向并固定牢固,同一平面内,探头的方向不一致,结果不同。
- d) 把主机调整到工作状态。现场使用的仪器设备,在去现场前应当彻底检查。
- e) 保证传感器与测试部位接触是否和标定试样基本一致。如满足不了要求,可用贴薄膜方法进行非直接接触测量。
- f) 根据检测者的需要命名一个文件,用来保存待检测的数据。
- g) 对主机进行调零。
- h) 检测完毕,检测仪会将检测到的数据存入主机。
- i) 相应的进行数值分析与计算,编号会自动加 1,进行下一点的检测。检测完毕后进行数据的保存。

7.7.2 检测结果处理

对两极探头,每一测点在 0° 、 45° 和 90° 方向提取电流差信号,利用式(1)和式(2)计算出主应力差的大小和方向;对四极和九极探头,每一测点在 0° 和 45° 方向提取差分电压信号,利用式(5)和式(6)计算

出主应力差的大小和方向,然后再进行应力分解得到主应力的方向和大小,计算方法如下:

连续介质中的主应力分解方法如图 3 所示。作用于正方体各面的平均应力分为垂直成分 σ 和平行成分 τ 。假定正方体的上下面没有受到应力的作用,则 x 方向的合力,见式(11):

$$\sigma_c = \sigma_a + (\tau_b - \tau_d) \quad \dots\dots\dots(11)$$

式中:

- σ_a —— a 点的主应力,单位为兆帕(MPa);
- σ_c —— c 点的主应力,单位为兆帕(MPa);
- τ_b —— b 点的切向应力,单位为兆帕(MPa);
- τ_d —— d 点的切向应力,单位为兆帕(MPa)。

根据弹性解析理论,作用于 b 面的剪切应力 τ_b 即为该点的 τ_{xy} ,它与主应力差的关系,见式(12):

$$\tau_{xy} = -\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)\sin 2\theta \quad \dots\dots\dots(12)$$

θ ——主应力 σ_1 与 x 轴之间的夹角,即从主应力 σ_1 的方向开始,沿逆时针旋转到 x 轴方向所成的角;

τ_{xy} ——切向应力,与 b, d 点的切向应力 τ_b, τ_d 大小相等,单位为兆帕(MPa)。

利用式(12)就可以求出 τ_b, τ_d ,然后由式(11)求出作用于 C 面的垂直应力 σ_c (此时令 $\sigma_a = 0$,因 a 点处在端面), σ_c 即为 c 点的应力,也是 c 点的 σ_x 。同理,可依次求出 e 点和 f 点的应力 σ_e 和 σ_f ,即为 e 点和 f 点的 σ_x 。

由弹性解析理论可得到 σ_y 的表达式,见式(13):

$$\sigma_y = \sigma_x - (\sigma_1 - \sigma_2)\cos 2\theta \quad \dots\dots\dots(13)$$

这样在已知主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_2)$ 和角度 θ 的条件下,由式(11)~式(13)能够求出相应各点的应力在 x 轴和 y 轴上的分量 σ_x, σ_y 和剪切应力 τ_{xy} 。

再根据弹性解析理论,可得式(14):

$$p = \sigma_1 + \sigma_2 = \sigma_x + \sigma_y \quad q = \sigma_1 - \sigma_2 \quad \dots\dots\dots(14)$$

由式(14)可推导出式(15):

$$\sigma_1 = \frac{1}{2}(p + q) \quad \sigma_2 = \frac{1}{2}(p - q) \quad \dots\dots\dots(15)$$

这样利用式(15)就可以确定图 3 中各点的主应力 σ_1 和 σ_2 。

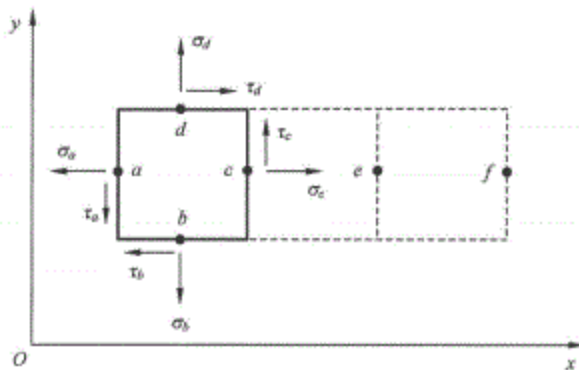


图 3 正方体的应力成分

7.8 检测注意事项

7.8.1 检测要求

对焊接试件多次(不少于 5 次)重复测量残余应力主应力差平均波动应不超出 ± 25 MPa 范围;对已

知应力试样重复测量多次波动应小于 20 MPa。

7.8.2 灵敏度要求

对于一般情况下,要求灵敏系数 α 大于或等于 $10 \mu\text{A}/\text{MPa}$ 或者 K 大于或等于 $100 \mu\text{V}/\text{MPa}$ 。

7.9 数据查看

利用仪器主机可回放检测结果,也可应用计算机进行进一步的数据分析计算。

8 检测报告

检测报告的内容应当根据检测要求制订,应至少包括以下要素:

- a) 检测单位的名称(如适用);
- b) 材料;
- c) 材料厚度;
- d) 验收标准;
- e) 表面准备;
- f) 用图标示的检测部位;
- g) 用于标定的试样;
- h) 检测仪器;
- i) 检测条件(如温度、灵敏度等);
- j) 检测结果;
- k) 残余应力检测的可能影响因素;
- l) 检测人员姓名和检测日期;
- m) 用户签名和有关资质授权签字(如适用)。