



T/CECSxxx-202x

中国工程建设标准化协会标准

抗疲劳正交异性钢桥面板 焊接残余应力检测标准

Detection standard for welding residual stress of
fatigue resistance orthotropic steel bridge decks

（征求意见稿）

（提交反馈意见时，请将有关专利连同支持性文件一并附上）

XXX 出版社

中国工程建设标准化协会标准

抗疲劳正交异性钢桥面板 焊接残余应力检测标准

Detection standard for welding residual stress of
fatigue resistance orthotropic steel bridge decks

T/CECS xxx—202x

主编单位：

批准单位：中国工程建设标准化协会

施行日期：202X年XX月XX日

中国XX出版社

202X年 北京

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发〈2020 年第二批协会标准制订、修订计划〉的通知》（建标协字〔2020〕第 23 号）的要求，编制组经深入调查研究，认真总结实践经验，参考国内外先进标准，并在广泛征求意见的基础上，制定本规程。

本规程共分 5 章和 1 个附录，主要包括：总则、术语和符号、基本规定、检测方法、报告等。

本规程的某些内容可能直接或间接涉及专利。本规程的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本规程由中国工程建设标准化协会建筑与市政工程产品应用分会归口管理，由 负责具体技术内容的解释。执行过程中，如有意见或建议，请反馈给（地址：，邮政编码： 邮箱： ）。

主 编 单 位：

参 编 单 位：

主要起草人：

主要审查人：

目 次

1 总 则.....	1
2 术语和符号.....	2
2.1 术语.....	2
2.2 符号.....	3
3 基本规定.....	4
4 检测方法.....	7
4.1 一般规定.....	7
4.2 钻孔应变法.....	7
4.3 X 射线衍射法.....	11
4.4 超声波法.....	12
4.5 图像解析法.....	15
5 报告.....	17
附录 A 正交异性钢桥面板焊接残余应力检测报告.....	18
用词说明.....	19
引用标准名录.....	20
附：条文说明.....	21

Contents

1 General provisions	1
2 Terms and symbols.....	2
2.1 terms.....	2
2.2 symbols	3
3 Basicrequirements.....	4
4 Detection method	7
4.1 Generalrequirements	7
4.2 Hole drilling strain-gauge method	7
4.3 X-ray method	11
4.4 Ultrasonic critical refracted longitudinal wave method.....	12
4.5 Digital image correlation method	15
5 Reports	16
Appendix A Orthotropic steel bridge decks Residual stress detection report	17
Explanation of wording	18
List of quoted standards	19
Addition: Explanation of provisions	20

1 总 则

1.0.1 为了适应钢桥建设的需要，规范抗疲劳正交异性钢桥面板的焊接残余应力检测，制定本规程。

1.0.2 本标准适用于抗疲劳正交异性钢桥面板的焊接残余应力检测。

1.0.3 抗疲劳正交异性钢桥面板焊接残余应力的检测，除应符合本标准规定外，尚应符合国家现行有关标准和行业现行有关标准的规定。

2 术语和符号

2.1 术语

2.1.1 残余应力 residual stress

在没有外力或外力矩作用的条件下构件或材料内部存在并且自身保持平衡的宏观应力。

2.1.2 抗疲劳正交异性钢桥面板 fatigue resistance orthotropic steel bridge decks

由顶板和 U 肋焊接而成的钢桥面板单元，经退火处理，消减焊接残余应力，提高抗疲劳性能的钢桥面板结构。

2.1.3 盲孔 blind via

未穿透板件的孔。

2.1.4 低速钻孔 low-speed drilling

成孔转速为每分钟数千转，尤其指手电钻的加工方式。

2.1.5 应力标定常数 stress calibration constant

联系残余应力和释放应变的比例系数。在钻孔应变法中，与电阻应变计几何尺寸、粘贴位置、孔的形状和大小有关。

2.1.6 应变释放 strain release

对具有应力场的结构件钻孔，其钻孔前后应变的变化量。

2.1.7 衍射角 diffraction angle

入射 X 射线的延长线与衍射线之夹角，亦即衍射峰位角。

2.1.8 换能器 transducer

实现电能转换成超声能并逆向转换功能的元件。

2.1.9 宽化效应 broadening effect

由于 X 射线源具有一定几何尺寸、入射线发散、平板样品聚焦不良、接收狭缝较宽及衍射仪调正不良等造成谱线宽化。

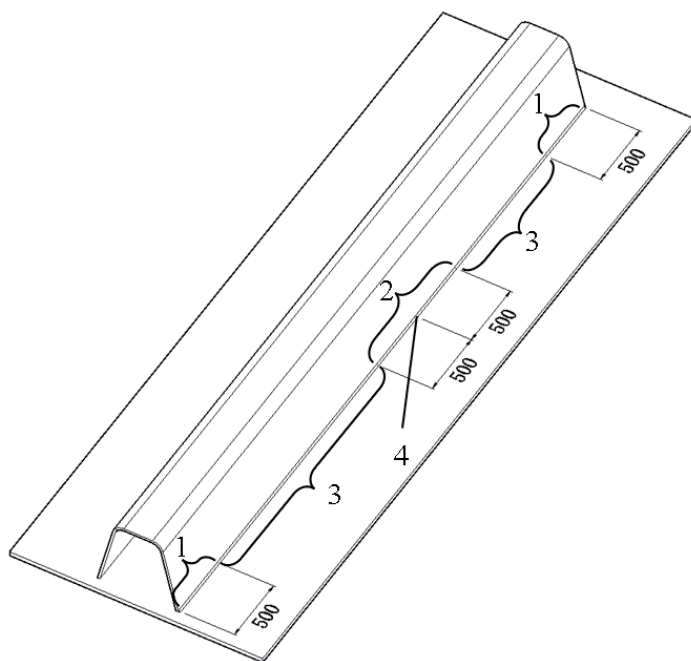
2.2 符号

- A 、 B ——应力标定常数；
- C_1 、 C_2 ——残余应力计算参数；
- D ——应变花上呈环形分布应变敏感格栅的几何中心连接的圆之直径；
- D_0 ——钻孔直径；
- f ——超声波法残余应力检测仪器探头中心频率；
- ILQ——实验室间认证的应力参考试样；
- K ——应力系数；
- LQ——实验室内部认证的应力参考试样；
- p 、 q 、 t ——组合应变，用于钻孔应变法残余应力计算；
- t_0 ——无应力试样的超声传播时间（ns）；
- α ——超声波法残余应力检测深度修正系数；
- Δt ——超声波法的声时差；
- $\Delta \sigma$ ——无应力试样的拉应力变化；
- ε ——应变片所测得的释放应变；
- ε_1 、 ε_2 、 ε_3 ——应变花基线方向、45° 或 135° 方向、垂直基线方向的应变；
- σ ——板件内的残余应力；
- σ_{max} 、 σ_{min} ——最大主应力与最小主应力；
- σ_s ——材料屈服强度；
- σ_0 ——超声波法无应力试样应力；
- ϕ ——衍射晶面法线在试样平面的投影与试样平面上某一指定方向之夹角；
- ψ ——衍射晶面法线与试样表面法线之夹角。

3 基本规定

3.0.1 顶板与 U 肋焊缝测点宜布置在远离其他焊缝位置，如两横肋中部某一区域。

3.0.2 测点应距焊缝起弧、收弧处至少保持 500mm，且不应位于板件边缘，具体位置如图 3.0.2 所示。



1—焊缝端部区域；2—焊缝起弧、收弧附近区域；
3—可布置测点区域 4—焊缝起弧、收弧点

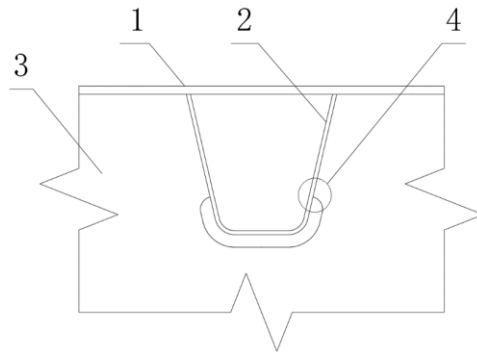
图 3.0.2 顶板与 U 肋焊缝测点布置 (mm)

3.0.3 测点宜布置在焊缝连续，无断焊、外观缺陷位置处。

3.0.4 焊缝表面不平整且材质与母材不同，不宜布置顶板与 U 肋焊缝残余应力测点。

3.0.5 顶板与 U 肋焊缝焊接残余应力应采用焊缝焊趾处或顶板顶面焊缝位置处母材残余应力表示，焊缝焊趾处位于焊缝热影响区，应对焊缝焊趾与母材分别进行标定。

3.0.6 横肋与 U 肋焊缝残余应力测点应布置在该焊缝端部，具体位置如图 3.0.6 所示。



1—顶板；2—U 肋；3—横肋；4—测点位置

图 3.0.6 横肋与 U 肋焊缝测点布置

3.0.7 测点宜布置在焊缝连续，无断焊、外观缺陷位置处。

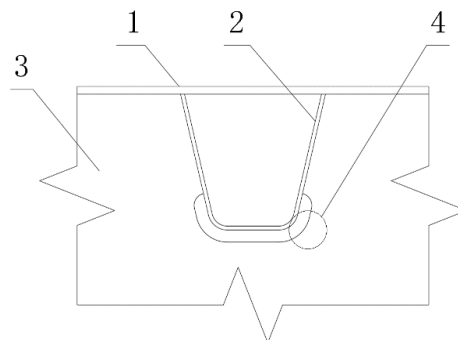
3.0.8 焊缝表面不平整且材质与母材不同，不宜布置横肋与 U 肋焊缝残余应力测点。

3.0.9 横肋与 U 肋焊缝焊接残余应力应采用焊缝端部横肋焊趾处或焊缝端部 U 肋焊趾处母材残余应力表示，焊缝焊趾处位于焊缝热影响区，应对焊缝焊趾与母材分别进行标定。

3.0.10 横肋开孔残余应力方向应取弧形开孔切线方向。

3.0.11 所测区域不应有明显的外观缺陷。

3.0.12 由于横肋开孔形状不同，应在荷载作用下拉应力最大区域处进行残余应力测试。测点位置如图 3.0.12 所示。



1—顶板；2—U 肋；3—横肋；4—测点位置示意

图 3.0.12 横肋开孔处测点布置

3.0.13 对于钻孔应变法，需要粘贴应变计的表面必须光滑平整。粘贴应变计前，工件表面应符合(粘贴应变计)胶粘剂说明书的要求,通常应干净无油脂。应尽量采用对表面残余应力影响较小的抛光方式。

3.0.14 对于 X 射线衍射法，测试点的表面一般应满足如下要求：

1 测试点的表面粗糙度 R_a 应小于或等于 $10\mu\text{m}$ 。

2 测试点应避免无关的磕碰划伤痕迹。

3.0.15 对于 X 射线衍射法，表面处理的基本原则应尽量避免施加任何作用，以维持试样表面原有的应力状态。针对不同情况，表面处理具体办法如下：

1 在被测点有氧化层、脱碳层或油污、油漆等物质的情况下，可采用电解抛光、化学抛光或有机溶剂、化学试剂等方法加以清除。

2 在所选择的测试部位表面粗糙度过大或者存在无关的损伤及异物，需要使用砂轮或砂布打磨的情况下，应在机械打磨之后采用电解或化学抛光的手段去除打磨影响层。

3.0.16 对于超声波法，测试点的表面粗糙度 R_a 应小于或等于 $10\mu\text{m}$ 。

4 检测方法

4.1 一般规定

4.1.1 抗疲劳正交异性钢桥面板残余应力的检测方法应符合国家标准《无损检测 X 射线应力测定方法》GB/T 7704-2017、《金属材料 残余应力测定 钻孔应变法》GB/T 31310-2014、《无损检测 残余应力超声临界折射纵波检测方法》GB/T 32073-2015 的有关规定。

4.1.2 残余应力的检测方法宜遵循以下原则：应尽量选择无损检测；操作步骤应与所选检测方法相一致。

4.1.3 检测程序应包含划定检测区域，布置检测点位，表面处理，检测设备调试，零应力校准，应力检测，计算等步骤。

4.1.4 残余应力检测设备应有相应的产品说明书和质量证明书。在残余应力检测前，要对设备进行校验。各种计量仪表应按照标准规定经计量检验合格。使用前，按规定进行校准。

4.1.5 残余应力检测零配件（应变片、钻头、射线管、换能器等）的制造厂应具有相应资质，所使用的零配件应有质量证明书。

4.1.6 残余应力检测设备精度应按照标准规定进行，超过精度要求的需在校准后进行残余应力检测，校准后依然无法达到标准要求的，不能用来检测。

4.2 钻孔应变法

I 检测设备

4.2.1 钻孔应变法所采用的应变箱应具有多通道，以保证同时采集应变响应。

4.2.2 应根据检测要求选择合适的应变花尺寸。大应变花可以测量较深范围内的残余应力；小应变花测得局部数据更加精确。A 型应变花的应变敏感栅与基准线分别成 0° 、 90° 和 225° 角，常规情况下推荐使用 A 型应变花。B 型应变花中的敏感栅应分布在同一侧，适用于测点附近有障碍物的情况。C 型应变花是较为特殊的一种样式，它由三组成对分布的敏感栅组成，可连接成三个半桥电路。它主要适用于对敏感性和温度稳定性要求较高的场合。A、B、C 型应变花

如图 4.2.2 所示。

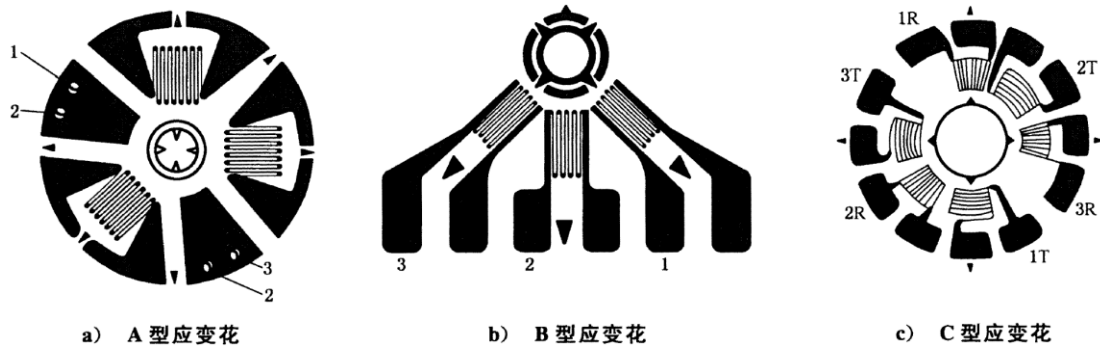


图 4.2.2 应变花型号

4.2.3 应变记录仪的分辨率应优于 $\pm(1 \times 10^{-6})$ ，短时稳定性和重复性至少为 $\pm(1 \times 10^{-6})$ 。连接应变花的导线应越短越好，对 A 型和 B 型应变花可采用三线温度补偿电路，对于 C 型应变花可采用半桥连接电路。输出结果分别定义为 ε_1 、 ε_2 、 ε_3 。

II 无应力试样标定

4.2.4 采用低速钻残余应力测量方法时应进行无应力试样标定。

4.2.5 标定试验应在无应力板件上进行，在对其施加单向应力场后进行标定，即施加一个已知的单向应力场，使其中一个电阻应变计平行于外力方向，即最大主应力等于外加载荷引起的应力 σ ，钻盲孔，测量钻孔前后的释放应变按下列公示计算 A、B 值。

$$A = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2\sigma} \quad (4.2.5-1)$$

$$B = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{2\sigma} \quad (4.2.5-2)$$

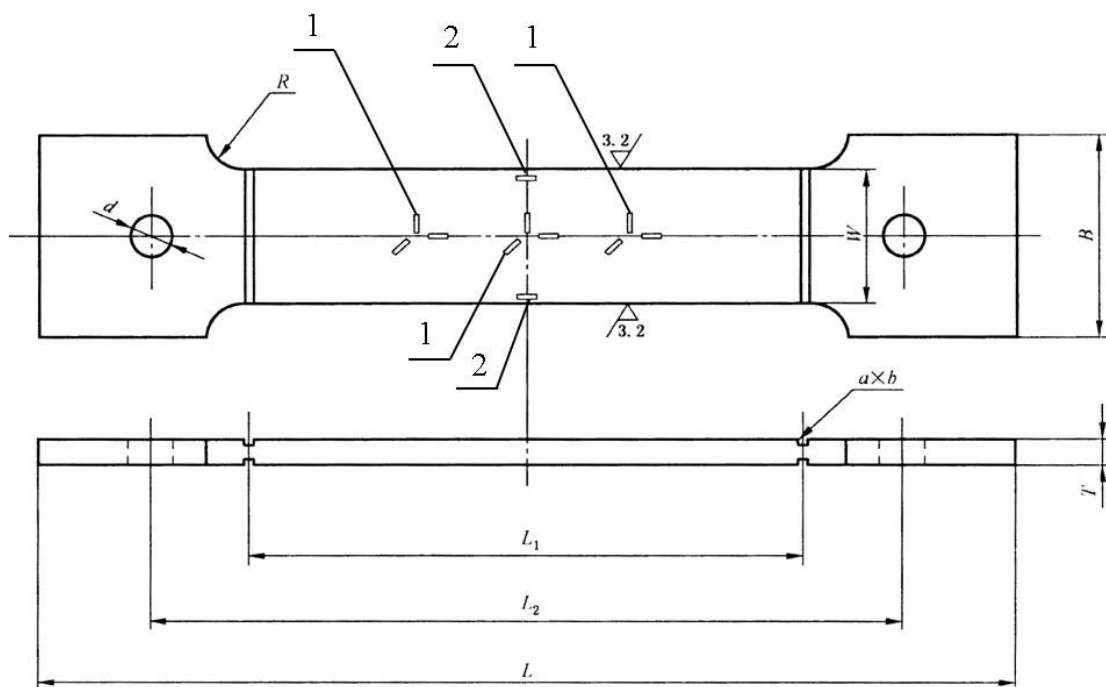
式中：A、B——应力标定常数；

ε_1 、 ε_3 ——分别为平行、垂直外加载荷方向的敏感栅所测应变；

σ ——外加载荷引起的应力（MPa）。

4.2.6 标定试样所用的材料应与待测材料相同。应先进行机械加工再进行消除应力退火处理，避免退火表面产生新的应力。为避免退火试样表面氧化严重，可以采用真空退火或气氛保护退火工艺。

4.2.7 标定试验板件尺寸应符合图 4.2.7 所示的规定。



1—标定电阻应变花；2—监视电阻应变计

图 4.2.7 钻孔应变法标定试样

表 4.2.7 标定用试样推荐尺寸

T	B	W	L_1	L_2	R	d	a	b
$5D_0$	$60D_0$	$40D_0$	$150D_0$	$200D_0$	$10D_0$	$12D_0$	$1.0D_0$	$0.75D_0$

4.2.8 标定试验所用的电阻应变花应与测定残余应力时所用的应变花相同，互相垂直的两电阻应变计的方向应与标定试样的长度和宽度方向相一致。

4.2.9 为了更准确描述高残余应力区应力分布，A、B 常数应采用分级标定。一般情况下 A、B 常数的标定应力可以分为 $0.3\sigma_s$ ， $0.7\sigma_s$ ， $0.9\sigma_s$ ，可视试验精度要求增加分级级数。

4.2.10 标定试样受力后，横截面上的应力分布必须均匀，即横截面上不得有弯曲应力。试验时，应在试样两侧粘贴如图 4.2.7 所示的监视电阻应变计，使其应变读数差小于 5%。

4.2.11 标定试验程序如下：

1 将粘贴好电阻应变花的标定试样安装在材料试验机上,并将测量导线接至应变仪上调零,接上电源,加载至材料屈服强度的 0.5 倍,然后卸载,如此反复 1 次,观察应变输出的稳定性。如果数据稳定,卸载后的应变基本恢复到初值(最大

误差应小于 $10\mu\varepsilon$),则进行以下步,否则重新贴片

2 将试样拉伸至 $0.3\sigma_s$, 记录加载时的应变读数。然后进行钻孔, 孔的直径和深度应与实测时相同, 即深度等于 1.2 倍孔径。记录钻孔后的应变读数。

3 重复步骤 2, 将加载应力分别改为 $0.7\sigma_s$, 和 $0.9\sigma_s$ 。

4.2.12 常数 A、B 的测量次数应不少于 2 次, 如果 2 次比较误差超过 10%, 应重新标定。2 次标定得到 A、B 常数取平均值使用。

III 检测

4.2.13 抗疲劳正交异性钢桥面板的钻孔应变法残余应力检测应采用低速钻残余应力测量方法。

4.2.14 钻孔应符合表 4.2.14 的规定:

表 4.2.14 钻孔要求

应变花类型	钻通孔时板厚条件	钻盲孔时板厚条件
A 型或 B 型	$\leq 0.4D$	$\geq 1.2D$
C 型	$\leq 0.48D$	$\geq 1.44D$

注: D 为由应变花上呈环状分布应变敏感栅的几何中心连接的圆之直径。

4.2.15 应变记录仪的分辨率应优于 $\pm(1 \times 10^{-6})$, 短时稳定性和重复性至少为 $\pm(1 \times 10^{-6})$ 。连接应变花的导线应越短越好, 对 A 型和 B 型应变花可采用三线温度补偿电路。

4.2.16 在工件表面钻孔时, 应采用合适的工装, 以确保钻孔与应变花上圆心的偏离在 $\pm 0.004D$ 以内。每次钻孔的深度偏差应控制在 $\pm 0.004D$ 以内。

4.2.17 当采用低转速进行钻孔时, 应进行应力标定。

4.2.18 每个钻头钻孔数量一般不应超过 15 个~20 个。

4.2.19 采用低速钻孔时, 常用钻孔刀具为直径 1.5mm 或 2.0mm 的麻花钻头, 转速为 1500r/min~3000r/min 的传统手电钻。钻孔深度为 1.2 倍钻头直径 D_0 。

IV 计算

4.2.20 残余应力大小按照下列公式计算:

$$p = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1}{2} \quad (4.2.20-1)$$

$$q = \frac{\varepsilon_3 - \varepsilon_1}{2} \quad (4.2.20-2)$$

$$t = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2}{2} \quad (4.2.20-3)$$

$$\sigma_{max}, \sigma_{min} = \frac{P}{2A} \pm \sqrt{\frac{q^2}{2} + \frac{t^2}{2}} / 2B \quad (4.2.20-4)$$

式中：p、q、t——组合应变；

ε_2 ——与应变花基线方向成 45° 或 135° 方向的敏感栅所测应变；

$\sigma_{max}, \sigma_{min}$ ——最大主应力与最小主应力（MPa）。

4.2.21 如果计算沿应变计 1 和 3 方向的应力值,则应按照下列公式计算：

$$C_1 = (A + B) / 4AB \quad (4.2.21-1)$$

$$C_2 = (B - A) / (A + B) \quad (4.2.21-2)$$

$$\sigma_1 = C_1 (\varepsilon_1 + C_2 \varepsilon_3) \quad (4.2.21-3)$$

$$\sigma_3 = C_1 (\varepsilon_3 + C_2 \varepsilon_1) \quad (4.2.21-4)$$

式中：C₁、C₂——残余应力计算参数。

4.3 X 射线衍射法

I 检测设备

4.3.1 X 射线衍射应力测定仪器应符合国家标准《无损检测 X 射线应力测定方法》GB/T 7704-2017 中第 6 章的规定。

4.3.2 设备应配置 X 射线管和探测器，且备确定 ϕ 角、改变 Ψ 角和在一定的 2θ 范围自动获得衍射曲线的功能。

4.3.3 设备应能满足相关的角度范围要求和整机测试精度。软件具有按照本标准规定进行数据处理、确定衍射峰位和计算应力值的功能。

4.3.4 设备应配备零应力粉末试样和观察 X 射线光斑的荧光屏。

4.3.5 设备应根据其辐射剂量的大小具备合适的 X 射线防护设施。

4.3.6 设备应定期检定。设备的机械或者电子器件有重要变化之后,也应对设备

重新进行检定。

4.3.7 应尽量选择微型设备以满足复杂构造处焊缝附近的残余应力测试。

II 无应力试样标定

4.3.8 应使用荧光屏和无应力粉末参考样品检验此重合精度和测定准确度。

4.3.9 设备检定应包括一个无应力的参考样品和一个应力参考样品(ILQ 试样或 LQ 试样)的测试。

4.3.10 使用的无应力粉末参考样品应该有一个与被测试样品衍射峰相似位置的衍射峰。粉末应有细晶粒度以及足够的衍射强度。必要时可以对粉末进行退火处理,以减小衍射峰的宽化效应。

4.3.11 应力参考样品应具有微观结构的高度均匀性以及应力的时间稳定性;晶粒细小、无织构;表面平整、粗糙度低;在沿深度和沿着表面的应力或成分梯度可忽略不计。

4.3.12 参考样品衍射角和入射角的选择应该与待测材料的测试参数相一致,可增加计数曝光时间以减少随机误差。

III 检测

4.3.13 测量过程一般应由仪器按照选定的测量条件和参数自动完成,必要时,可以辅以人工操作。

4.3.14 测试过程中应保证 X 射线管电压和电流的稳定性,并应保证 X 射线光路畅通。

4.3.15 测试过程中测角仪的动作不可受到干涉。

4.4 超声波法

I 检测设备

4.4.1 残余应力超声检测仪应符合国家标准《无损检测 残余应力超声临界折射纵波检测方法》GB/T 32073-2015 的有关规定。

4.4.2 残余应力超声检测仪应至少具有如下功能:频率设置;滤波;超声激励电

压控制；超声接收增益控制；超声临界折射纵波传播时间和残余应力值的计算。

4.4.3 应定期对检测仪进行综合性能校准，以确认其检测数值的准确性。校准间隔最长不超过一年。

4.4.4 应能实现超声临界折射纵波的发射和接收。

4.4.5 用于检测的探头（至少包含两个换能器），按国家现行标准《无损检测 超声检测 测量接触探头声束特性的参考试块和方法》GB/T 18852 规定的方法测试，其性能参数应相同。

4.4.6 检测所用的探头应是应力系数标定和零应力校准时所用探头。

4.4.7 探头接触面与被检件表面应良好耦合，如果被检件表面为曲面，耦合状态应符合现行国家标准《焊缝无损检测—超声检测—技术、检测等级和评定》GB/T 11345 的有关规定。

4.4.8 应使用适当的耦合剂，以保证在工作温度范围内探头与被检件表面具有稳定可靠的超声耦合。应力系数获得、零应力校准和检测过程中应使用相同的耦合剂，并保持相同的耦合状态。

II 无应力试样标定

4.4.9 无应力试样应采用与被检板件相同厚度、金相组织状态和表面粗糙度相同的材料。

4.4.10 试块的形状如图 4.4.10 所示，尺寸范围如表 4.4.10 所示，允许误差±0.1mm。标定区域的表面粗糙度 Ra 应小于 10μm。

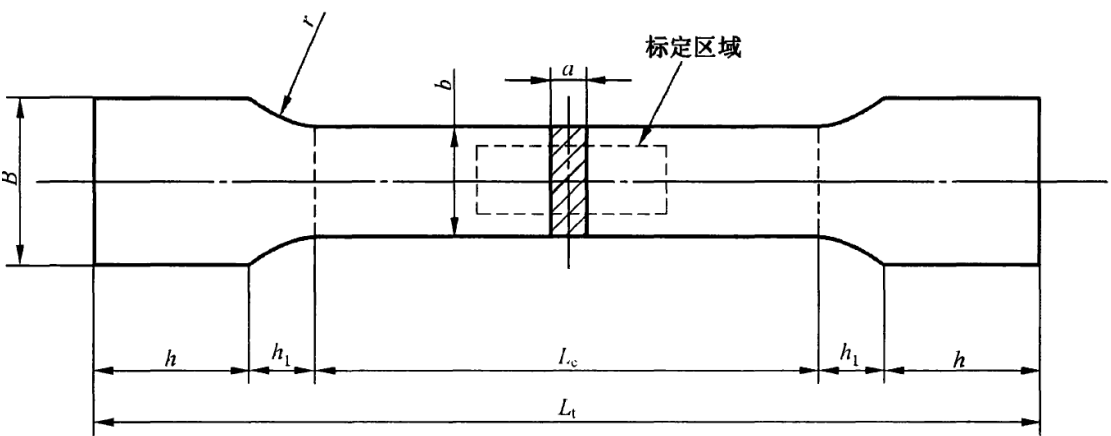


图 4.4.10 超声波法标定试样

表 4.4.10 标定用试样推荐尺寸(mm)

厚度 a	小宽度 b	过渡半径 r	平行长度 L_c	总长度 L_t	大宽度 B	h_1	h
3~10	15~40	≥ 20	60~240	170~350	30~60	≥ 15	40~60

4.4.11 可对试块进行退火处理获得零应力试样。

4.4.12 调整和设置检测仪器，将探头稳固耦合在零应力试块的待标定区域内，应符合现行国家标准《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》GB/T 228.1 的有关规定，在常温环境(22 ± 2)℃下，对零应力试样进行拉伸试验。

4.4.13 在材料弹性范围内，记录检测仪器的声时差 Δt 和拉伸试验设备输出的拉伸应力变化 $\Delta \sigma$ 。测量点不少于 10 点，重复拉伸次数不少于 5 次，取平均值，绘制出拉伸应力值与声时差的坐标图。对数据进行线性拟合，得到的直线斜率的倒数即为应力系数 K。

4.4.14 检测被检件时的环境温度与应力系数标定时的环境温度差异应在 ± 15 ℃ 范围内，并应根据温度差对检测到的残余应力数值进行温度补偿修正，如果超出该温度范围，应该选用特殊探头或耦合剂，重新校准应力系数和零应力声时。

III 检测

4.4.15 抗疲劳正交异性钢桥面板焊接残余应力的超声波检测方法应符合现行国家标准《无损检测 残余应力超声临界折射纵波检测方法》GB/T 32073 的有关规定。

4.4.16 检测区域的大小与探头尺寸和检测频率有关，如图 4.4.16 所示。测区域长度 L 为临界折射波传播距离(即探头间距,通常为 5 mm~100 mm)，检测区域宽度 W 为换能器晶片宽度或直径(通常为 5mm~30 mm)，检测区域深度 D 由频率决定，按照下式计算：

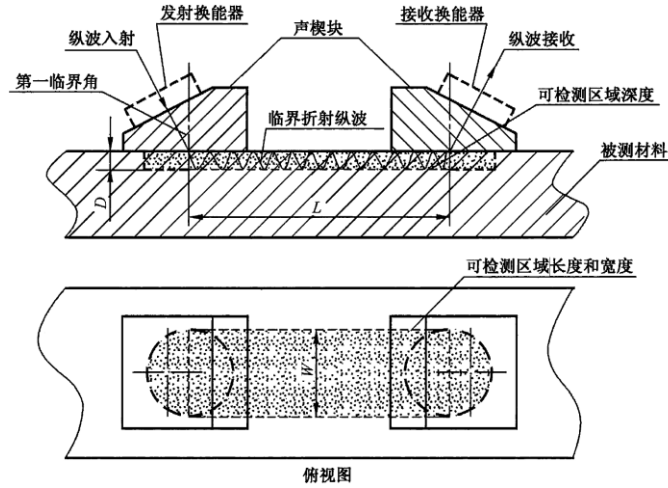


图 4.4.16 超声法(临界折射纵波)收发原理及残余应力检测区域

$$D = \alpha \times f^{-0.96} \quad (4.4.16)$$

式中： D ——检测区域深度（mm）；

α ——检测深度修正系数,常用金属材料参考值（mm/ns），钢材取值 5.98；

f ——探头中心频率（MHz）。

IV 计算

4.4.17 被检件残余应力大小按照下式进行计算：

$$\sigma = K(t - t_0) + \sigma_0 \quad (4.4.17)$$

式中： σ ——被检件应力（MPa）；

K ——应力系数（MPa/ns）；

t ——被检件的超声传播时间（ns）；

t_0 ——无应力试样的超声传播时间（ns）；

σ_0 ——无应力试样应力（MPa）。

4.5 图像解析法

I 检测设备

4.5.1 图像解析法焊接残余应力检测设备应具有采集并生成被检件表面 3D 数据的功能，并能够根据被检件焊接前后表面变形以及材料参数推算出被检件表面

残余应力。

4.5.2 应根据被测物大小和要求等选择与之对应的摄相设备，如普通的数码照相机，高速数码照相机等。

II 无应力试样标定

4.5.3 图像解析法无应力试样的材质、尺寸、允许误差、表面粗糙度等与本标准中超声波法标定试样相同。具体按照本标准（4.4.9~4.4.12）条执行。

4.5.4 采用预定摄影设备根据需要对全试验过程中零应力试块的待标定区域进行拍照。通过计算机解析软件对获得的图像进行计算处理，得出物体表面标定区域各位置因变形所产生的位移大小和应变分布数据。最后与万能材料试验机记录的载荷—位移曲线的数据进行比较分析，确认拍照设备以及解析软件的分析精度和信赖性。

4.5.5 上述拉伸试验在材料弹性限度范围内，重复拉伸次数不少于 3 次，每次分别记录拉伸载荷和标定区域变形数据并与图像解析处理的结果进行比较。

III 检测

4.5.6 摄相设备在被测物变形前后尽量保持在同一位置进行拍摄。

4.5.7 根据需要可以对被测物变形前后的图像进行必要的补偿处理，以提高解析精度。

5 报告

5.0.1 检测报告的内容应至少包括下列信息：

- 1 检测单位、人员、日期等；
- 2 被检部位板件的材料、厚度、表面粗糙度和曲率等；
- 3 设备相关参数。如，应变花的型号和几何尺寸；探头中心频率和间距、及检测仪器的滤波带宽、增益和采集频率等；晶体结构类型以及测试点部位、应力方向，衍射角度等；
- 4 检测时的环境温度；
- 5 检测区域；
- 6 残余应力数值。

5.0.2 检测记录及报告示例见附录 A。

附录 A 正交异性钢桥面板焊接残余应力检测报告

表 A.0.1 正交异性钢桥面板焊接残余应力检测报告

检测单位：

检测日期：

钢桥面名称			钢桥面编号		
钢 材 牌 号			厚 度		
检 测 方 法			表 面 粗 糙 度		
检 测 标 准			曲 率		
设备参数					
检测记录					
检测时间		检测地点		环境温度	
测点位置 1					
测试值 1	测试值 2	测试值 3	测试值 4	测试值 5	测试值 6
测点位置 2					
测试值 1	测试值 2	测试值 3	测试值 4	测试值 5	测试值 6
测点位置 3					
测试值 1	测试值 2	测试值 3	测试值 4	测试值 5	测试值 6
测点位置示意图	(测点位置增加可另附页)				

检测人员：

负责人：

用词说明

为便于在执行本规程条文时区别对待，对要求严格程度不同的用词说明如下：

- 1 表示很严格，非这样做不可的：

正面词采用“必须”，反面词采用“严禁”。

- 2 表示严格，在正常情况下均应这样做的：

正面词采用“应”，反面词采用“不应”或“不得”。

- 3 表示允许稍有选择，在条件许可时首先应这样做的：

正面词采用“宜”，反面词采用“不宜”。

- 4 表示有选择，在一定条件下可以这样做的，采用“可”。

引用标准名录

本规程引用下列标准。其中，注日期的，仅对该日期对应的版本适用于本规程；不注日期的，其最新版适用于本规程。

《金属材料 拉伸试验 第 1 部分:室温试验方法》GB/T 228.1

《无损检测 X 射线应力测定方法》GB/T 7704-2017

《焊缝无损检测—超声检测—技术、检测等级和评定》GB/T 11345

《无损检测 超声检测 测量接触探头声束特性的参考试块和方法》GB/T 18852

《金属材料 残余应力测定 钻孔应变法》GB/T 31310-2014

《无损检测 残余应力超声临界折射纵波检测方法》GB/T 32073-2015

中国工程建设标准化协会标准

抗疲劳正交异性钢桥面板
焊接残余应力检测标准

T/CECS xxx—2022

条文说明

制定说明

本规程《抗疲劳正交异性钢桥面板焊接残余应力检测标准》制定过程中，编制组深入开展了前期调研工作，进行了专题研究，总结了近年来国内外残余应力检测的规范和经验，吸纳其中成熟的技术和工艺，借鉴了国内外相关标准，并进行了钻孔应变法、X 射线法、超声波法残余应力检测试验研究，正交异性钢桥面板焊接残余应力检测技术成果。

为便于广大技术和管理人员在使用本规程《抗疲劳正交异性钢桥面板焊接残余应力检测标准》时能正确理解和执行条款规定，编制组按章、节、条顺序编制了本规程的条文说明，对条款规定的目的、依据以及执行中需注意的有关事项等进行了说明。本条文说明不具备与规程正文及附录同等的法律效力，仅供使用者作为理解和把握规程规定的参考。

目 次

1 总 则.....	23
2 术 语.....	24
3 基本规定.....	25
4 检测方法.....	26
4.2 钻孔应变法.....	26
4.3 X射线衍射法.....	27
4.4 超声波法.....	28
4.5 图像解析法.....	28

1 总 则

1.0.1 残余应力是一组作用在结构不同部位的独立于外部荷载的拉压应力自平衡力系，焊接残余应力的分布是不均匀的,焊后收缩区域应力为拉应力并随着收缩趋势的增大而增大,最大值可达到材料的屈服强度，而存在拉伸残余应力会使疲劳强度会有所下降。因此必须重视残余应力对疲劳寿命的影响。

1.0.2 近年来，随着进一步对正交异性钢桥面板疲劳性能的深入研究，国内出现了通过实施焊接后退火工艺处理消减正交异性钢桥面板残余应力，对解决焊接细节复杂、焊缝数量庞大的桥梁结构问题提供了一个新技术措施。也引起了残余应力对疲劳寿命机理的探讨。

1.0.3 本规程的制订借鉴相关行业残余应力检测的经验与规范，针对正交异性钢桥面板提出了一系列残余应力检测的方法。为今后同类型结构残余应力检测提供参考。为提高业内对残余应力的重视，关注残余应力对疲劳性能的影响有重要意义。

2 术语

2.1.2 残余应力是一组作用在结构不同部位的独立于外部荷载的拉压应力自平衡力系，各种机械加工工艺如铸造、切削、焊接、热处理、装配等都会产生不同程度残余应力。这里主要是指由焊接规程产生的残余应力。

2.1.4 低速钻技术(一般为手电钻)钻孔时的加工应变特别明显。该方法经常用在高残余应力场合，需要通过试验标定方法获取应力标定常数。

3 基本规定

3.0.6 横肋与 U 肋焊缝焊端部为疲劳裂缝常发区域，因此应在横肋与 U 肋焊缝焊端部的横肋焊趾处或 U 肋焊趾处布置测点。

3.0.15 在此应注意防止因某种化学反应腐蚀晶界或者优先腐蚀材料中的某一相而导致的局部应力松弛。

4 检测方法

4.2 钻孔应变法

4.1.2 钻孔应变法是一种测定残余应力的方法。钻孔法用于测定各向同性线弹性材料近表面的残余应力。其步骤包括:在被测物体表面贴上应变花,随后在该应变花上钻孔,再测量被测物体表面所释放的应变。将所测得的应变代入一系列公式便可计算出已去除材料所在部位的残余应力。钻孔法对被测工件所造成的破坏仅局限于一个较小的区域,对于较厚的材料而言,通常不会对其正常使用造成严重影响,所以称其为“半无损”测试。相对而言,其他大多数机械性残余应力测试方法都会对被测工件造成严重破坏。由于钻孔法多少会对工件造成一定的破坏所以该方法仅针对在工件上钻孔(或钻孔后经焊补修磨)并不严重影响其使用功能的情况下使用。

4.2.2 钻孔会导致盲孔周边的残余应力释放,而形成一个新的应力场,通过应变计来检测钻孔前后应变的变化情况。最后根据应变和应力之间相互关系来计算获得构件表的残余应力。为了测定构件中残余应力的分布,通常在构件表面粘贴一个标准的三向应变花(0° , 90° , 225°),如图 1 所示。然后在应变花中心钻一个直径 D_0 、深度为 h 的小孔。对于各向同性材料,根据 Kirsch 的通孔理论公式,三向应变花所测应变可表示为:

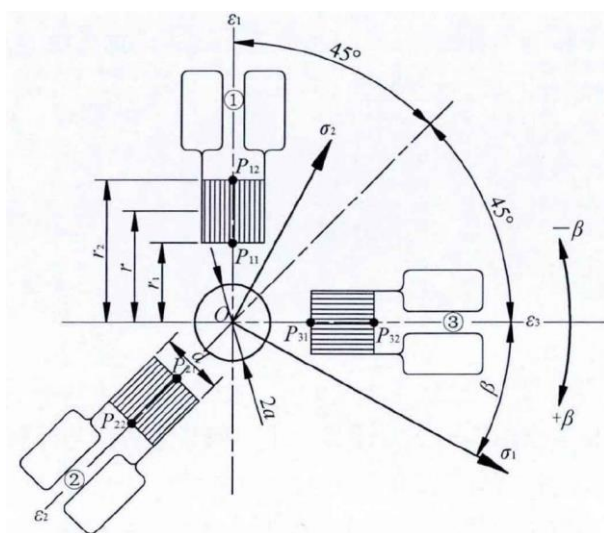


图 1 典型三向应变花的布局与几何尺寸

4.2.11 理论上,如果各向同性(等轴)残余应力超过材料屈服强度的 50%,或任一方向上的切应力超过屈服强度的 25%,钻孔周边可能因应力集中而发生局部屈服,而本标准所测量的焊缝残余应力最高可达材料屈服点,此时需要一套特殊的试验

标定技术,即国家标准《无损检测 X 射线应力测定方法》GB/T 7704-2017 中规定的方法 B——低速钻残余应力测量方法。

4.3 X 射线衍射法

4.3.1 对于多晶体材料而言,宏观应力所对应的应变被认为是相应区域里晶格应变的统计结果,因此依据 X 射线衍射原理测定晶格应变可计算应力。

4.3.2 X 射线测量的基本方程为布拉格方程。由于相邻两晶面的反射线要产生衍射的必要条件为光程差 $\Delta = n\lambda$, 于是由图 2 衍射示意图得到布拉格方程:

$$2d \cdot \sin\theta = n\lambda \quad (4-1)$$

式中: d ——晶面的间距 (nm);

θ ——衍射角;

n ——光程差中的波长数目;

λ ——X 射线波长 (nm)。

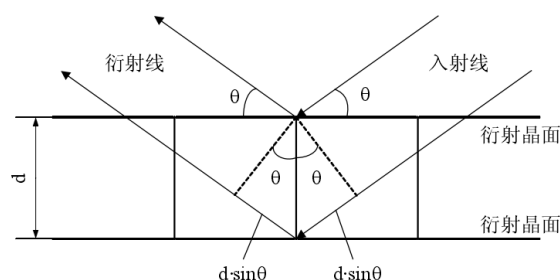


图 2 布拉格方程示意图

1 在 X 射线测量微观应变是测量晶面间距的相对量 $\Delta d/d_0$, 而根据布拉格方程测量 d 实际就是测量衍射角 θ 。对布拉格方程两边求微分, 得

$$\frac{\Delta d}{d} = -\cot\theta \cdot \Delta\theta \quad (4-2)$$

式中: Δd ——晶面的间距的变化量 (nm);

$\Delta\theta$ ——衍射角的变化量;

2 任意点任意方向正应力的测定原理如图 3 所示: 在物体表面过 σ_ψ 作平面 P 的垂直面, 在这些垂直面上取与 ε_3 成 ψ 角的应变 $\varepsilon_{\psi,\varphi}$ 。只要 θ 角足够大, ψ 角足够小, 衍射线就一定能射出物体表面, 从而可测定 $\theta_{\psi,\varphi}$ 。只要测定了 $\theta_{\psi,\varphi}$, 就

能得到 $\varepsilon_{\psi,\varphi}$ ，再根据弹性力学求得所对应的 ε_{ψ} 及 θ_{φ} 。X射线残余应力测量就是按照这样的方法进行的。

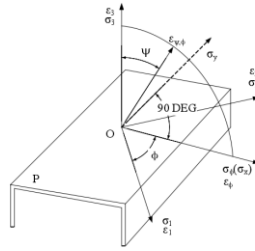


图3 表面任意一点处残余应力测量

4.4 超声波法

4.4.1~4.4.3 超声波法是利用材料的声弹效应(即施加在材料上的内应力变化引起超声波传播速度的变化,其大小取决于超声波的波型、传播方向、材料组织和应力状况等),通过准确测定超声波在构件内传播速度的变化得出应力分布。

4.4.13 温度改变会影响材料内超声纵波传播速度，从而影响到残余应力的检测准确性。为提高检测准确性，应对检测到的残余应力值进行温度补偿和修正。补偿之前可从材料手册或试验方法（如 GB/T 23900）获得在工作温度范围内被检件材料的声速温度关系。

4.5 图像解析法

4.5.1 图像解析法的原理是计算机通过被测件变形前后图像对比，找到图像相关区域从而计算出物体表面位移及应变分布。整个测量过程只需以一台或两台 3D 采集头对形变前后待测物图像进行拍摄，经运算即可获得全场范围内的 3D 数据。

4.5.7 为提高解析精度，可以根据相机分辨率以及测量视野范围，结合图像采集系统参数，在被测件表面制作散斑，用以增强图像采集精度。