

ICS 93.160

P 59

SL

中华人民共和国水利行业标准

SL 499—2010

钻孔应变法测量残余应力的 标准测试方法

Standard test method for determining residual stresses
by the hole-drilling strain-gage method
(ASTM E837—08, IDT)

2010-08-20 发布

2010-11-20 实施



中华人民共和国水利部 发布

https://www.sizjxx.com
水利造价信息网

2010年8月20日

中华人民共和国水利部
关于批准发布水利行业标准的公告

2010年第27号

中华人民共和国水利部批准《钻孔应变法测量残余应力的标准测试方法》(SL 499—2010)标准为水利行业标准，现予以公布。

序号	标准名称	标准编号	替代标准号	发布日期	实施日期
1	钻孔应变法测量残余应力的标准测试方法	SL 499—2010		2010.08.20	2010.11.20

二〇一〇年八月二十日

http://www.slzjxx.com
水利造价信息网

目 次

前言	IV
1 范围	1
1.1 残余应力测定	1
1.2 测试范围	1
1.3 工件损伤	1
1.4 安全技术	1
2 规范性引用文件	1
3 符号	1
4 测试方法概要	2
4.1 工件	2
4.2 应变花	3
4.3 钻孔	3
4.4 残余应力计算	3
5 意义和用途	4
6 工件准备	4
7 应变计与仪器	5
7.1 应变花几何形状	5
7.2 标准应变花	5
7.3 安装及使用	6
7.4 仪器	6
8 钻孔步骤	6
8.1 预备工作	6
8.2 钻孔设备和使用	6
8.3 薄工件均布应力钻孔程序	8
8.4 厚工件均布应力钻孔程序	8
8.5 厚工件非均布应力钻孔程序	10
9 均布应力计算	10
9.1 薄工件	10
9.2 厚工件	11
9.3 中等厚度工件	12
10 非均布应力计算	12
10.1 应变值	12
10.2 标定矩阵	12
10.3 应力计算	19
11 报告	21
11.1 测试描述	21
11.2 均布应力薄工件	21
11.3 均布应力厚工件	21
11.4 非均布应力厚工件	21

12 精度和偏差	21
12.1 试验技术	21
12.2 均匀应力测量	22
12.3 非均匀应力测量	22
附录 A (资料性附录) 钻孔偏心的修正	23
附录 B (资料性附录) 孔边塑性变形的修正	25

<http://www.slzjxx.com>
 水利造价信息网

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009《标准化工作导则 第 1 部分：标准的结构和编写》、GB/T 2000.2—2009《标准化工作指南 第 2 部分：采用国际标准》和 SL 1—2002《水利技术标准编写规定》的要求进行编写。

本标准采用翻译法等同采用 ASTM E837—08《Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method》(钻孔应变法测量残余应力的标准测试方法)。

与 ASTM E837—08 相比,本标准在内容方面主要有如下变化:

——增加了引自 GB 3395—92《残余应力测试方法 钻孔应变释放法》的附录 A“钻孔偏心的修正”和附录 B“孔边塑性变形的修正”。

本标准为全文推荐。

本标准附录 A 和附录 B 为资料性附录。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本标准批准部门:中华人民共和国水利部。

本标准主持机构:水利部综合事业局。

本标准解释单位:水利部综合事业局。

本标准主编单位:水利部水工金属结构质量检验测试中心。

本标准出版、发行单位:中国水利水电出版社。

本标准主要起草人:胡木生、张伟平、盛旭军、孙淑云、杜志友、靳红萍、李东明、韩志刚、高志萌、李东风、倪国胜。

本标准审查会议技术负责人:何文垣。

本标准体例格式审查人:乐枝。

本标准系首次发布。

钻孔应变法测量残余应力的标准测试方法

1 范围

1.1 残余应力测定

本标准规定了在各向同性线弹性材料近表面测定残余应力的测试步骤。本标准适用于平面应力梯度较小的残余应力测定。应力分为沿深度变化不大的“均布”应力和沿深度变化较大的“非均布”应力。测试工件分为厚度比钻孔直径小的“薄”工件和厚度比钻孔直径大的“厚”工件。均布应力可使用薄工件和厚工件进行测试，而非均布应力仅能使用厚工件进行测试。

1.2 测试范围

1.2.1 钻孔应变法可测定工件近表面的平面残余应力，即钻孔边界范围内的局部残余应力的大小。

1.2.2 本测试方法仅适用于线弹性材料。理论上，由于应力集中，如果残余应力的应力值（等双轴）超过屈服限的 50% 或任一方向的剪应力超过屈服限的 25% 时，将会在钻孔边沿产生局部屈服，但实际中发现在残余应力不超过材料屈服限的 60% 时，此方法仍然适用。

1.3 工件损伤

其他测定残余应力的机械方法都会造成工件的严重损伤。而钻孔应变法产生的破坏是局部的，且大多数情况下不会明显影响工件的继续使用，故称之为“半无损”的测试方法。但钻孔应变法也会给工件带来微小的损伤，故此方法仅适用于工件是可消耗的或小浅孔不会明显影响工件继续使用的工况。

1.4 安全技术

本标准非安全技术规范，标准使用者有责任在使用本标准之前建立适当的健康安全守则，并决定其适用范围。

2 规范性引用文件

下列文件对于本标准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标准。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本标准。

CB 3395—92 残余应力测试方法 钻孔应变释放法

ASTM E251 粘贴式电阻应变计性能特性试验

3 符号

下述符号适用于本标准：

\bar{a} ——各向同性应力标定常数；

b ——剪应力标定常数；

\bar{a}_{σ} ——各向同性应力标定常数矩阵；

\bar{b}_{σ} ——剪应力标定常数矩阵；

D ——测量圆直径，见表 1；

D_0 ——钻孔直径；

E ——杨氏模量；

j ——钻孔深度增量数；

k ——同一钻孔深度增量的顺序数；

- P ——均布等双向应力（等双轴）；
 P_k ——顺序数为 k 时的均布等双向应力值；
 p ——均布等双向应变（等双轴）；
 p_k ——顺序数为 k 时的均布等双向应变值；
 Q ——45°均布剪应力；
 Q_k ——顺序数为 k 时的 45°均布剪应力值；
 q ——45°均布剪应变；
 q_k ——顺序数为 k 时的 45°均布剪应变值；
 T —— xy 向均布剪应力；
 T_k ——顺序数为 k 时的 xy 向均布剪应力值；
 t —— xy 向剪应变；
 t_k ——顺序数为 k 时的 xy 向剪应变值；
 T^T ——（上标）矩阵的转置；
 α_P —— P 应力正则化系数；
 α_Q —— Q 应力正则化系数；
 α_T —— T 应力正则化系数；
 β —— x 轴（应变计 1）顺时针方向转到最大主应力的方向角；
 ϵ ——均布应力释放应变；
 ϵ_j ——钻孔深度增量数为 j 时的钻孔释放变；
 ν ——泊松比；
 θ ——自 x 轴的应变计角度值；
 σ_{\max} ——最大主应力（通常为拉应力）；
 σ_{\min} ——最小主应力（通常为压应力）；
 σ_x —— x 向均布正应力；
 $(\sigma_x)_k$ ——顺序数为 k 时的 x 向正应力；
 σ_y —— y 向均布正应力；
 $(\sigma_y)_k$ ——顺序数为 k 时的 y 向正应力；
 τ_{xy} —— xy 向均布剪应力；
 $(\tau_{xy})_k$ ——顺序数为 k 时的 xy 向剪应力；
 h ——钻孔深度。

4 测试方法概要

4.1 工件

4.1.1 远离工件边沿选取一个有均布应力的平整表面和一个有非均布应力的平整表面，见图 1，在此表面上进行钻孔，假定 x 向和 y 向残余应力值相等。

4.1.2 图 1a) 中显示残余应力在工件厚度方向上是均布的，各层平面应力用 σ_x 、 σ_y 和 τ_{xy} 表示。均布应力可使用工件厚度比钻孔直径和测量圆直径小的薄工件或使用工件厚度比钻孔直径和测量圆直径大的厚工件进行测试。

4.1.3 图 1b) 中显示残余应力在工件厚度方向上是非均布的。本测试方法描述此残余应力为梯形结构，钻孔测试过程中的钻孔深度梯度相当于深度增量。在顺序数为 k 时，平面应力用 $(\sigma_x)_k$ 、 $(\sigma_y)_k$ 和 $(\tau_{xy})_k$ 表示。非均布应力只能用材料厚度比钻孔直径和测量圆直径大的厚工件进行测试。

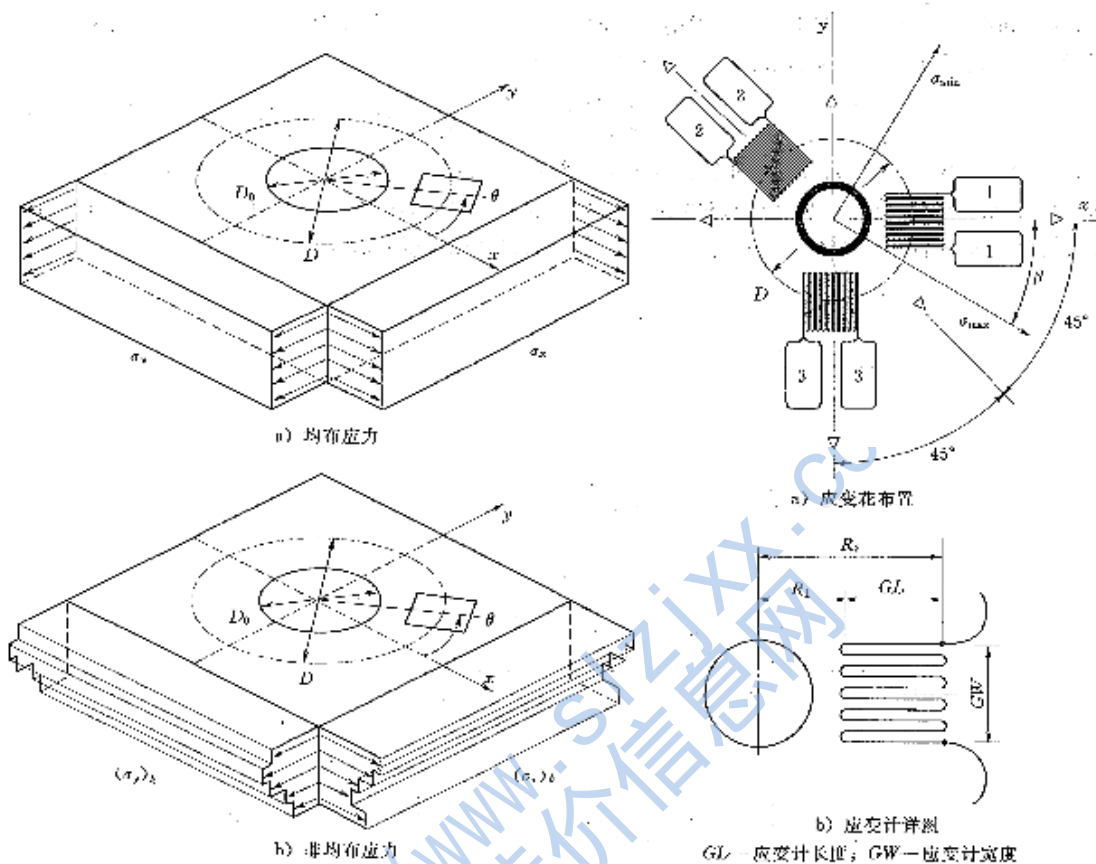


图2 典型3单元顺时针编码规则应变花几何尺寸

注：图中绘制的残余应力均布于整个区域内，但实际上，残余应力均布于如此大的区域内是不可能的。表面钻孔释放应变仅与钻孔边界线范围内的初始应力有关，远离钻孔边界的应力状态并不影响所测得的释放应变。因此，钻孔应变法是一种测定局部残余应力的测试方法。

图1 钻孔尺寸和残余应力

4.2 应变花

在工件测试部位粘贴一个有3只（见图2）或3只以上普通应变计的应变花。

4.3 钻孔

4.3.1 在应变花的几何中心按一组钻孔深度增量钻一个小孔。

4.3.2 钻孔范围内材料的残余应力在钻孔过程中释放，使用合适的电阻应变仪测定各指定钻孔深度增量的释放应变。

4.4 残余应力计算

4.4.1 使用线性理论，钻孔范围内的初始残余应力通过释放应变进行计算，释放应变仅与钻孔范围内的初始应力状态有关。

4.4.2 图1a)所示的均布残余应力与钻孔后得到的释放应变有如下公式(1)：

$$\epsilon = \frac{1+\nu}{E} \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{1-\nu}{E} \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \frac{1}{E} \tau_{xy} \sin 2\theta \dots\dots\dots (1)$$

4.4.3 各钻孔深度单元应力释放应变的标定常数 \bar{a} 和 \bar{b} 为无量纲系数，即独立材料常量，其细微差别在于不同薄工件的通孔和不同厚工件的盲孔。标准应变花的标定常数已使用有限元法计算出，并在

本标准中给定。

4.4.4 如图 1b) 所示, 在 $1 \leq k \leq j$ 时的钻孔深度增量中, 材料中初始存在的非均匀应力与钻孔深度增量数为 j 时所测得的表面释放应变有如下公式 (2):

$$\varepsilon_j = \frac{1}{E} \frac{1-\nu}{2} \sum_{k=1}^j \bar{a}_{jk} \left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right)_k + \frac{1}{E} \sum_{k=1}^j \bar{b}_{jk} \left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)_k \cos 2\theta + \frac{1}{E} \sum_{k=1}^j \bar{b}_{jk} (\tau_{xy})_k \sin 2\theta \dots \dots (2)$$

4.4.5 标定常数矩阵 \bar{a}_{jk} 和 \bar{b}_{jk} 表示在钻孔深度增量数为 j 时的释放应变与顺序数为 k 时的单元应力关系。图 3 是钻孔深度增量数为 4 时的钻孔横截面示意图, 在此图中, 钻孔深度增量数 3 的标定矩阵包含钻孔深度增量数 2 的单元应力反应。标准应变花的标定常数已使用有限元法计算出, 并在本标准中给定。

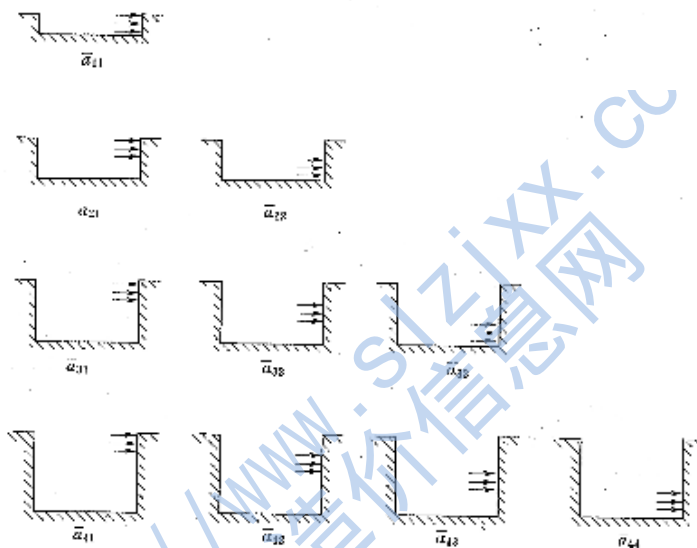


图 3 标定常数矩阵的物理说明

4.4.6 所测得的一系列钻孔深度增量的释放应变提供了充足的数据来计算应力增量 σ_x , σ_y 和 τ_{xy} , 通过这些应力增量, 可求得主应力 σ_{max} , σ_{min} 和方向角 β 。

4.4.7 释放应变反映的是近表面残余应力值, 内部应力的影响随着钻孔深度的加大而减弱。因此, 钻孔应变法仅能测定近表面的残余应力, 深层内部应力不能由此方法测定。详见 8.4.4 注。

4.4.8 理论上, 由于应力集中, 可能会在钻孔边缘产生局部屈服。如果残余应力 (等双轴) 超过屈服限的 50% 或剪应力超过屈服限的 25% 会产生屈服, 但实际上发现在残余应力不超过材料屈服限的 60% 时, 此方法仍然适用。

5 意义和用途

残余应力几乎在所有的材料中都存在, 它们可能是在制造过程中形成, 也可能是在材料的服役寿命期内产生。如果在设计过程中没有进行验算和解决, 残余应力可能是材料失效的主要原因, 尤其是在承受交变荷载或腐蚀环境的情况下。残余应力也可能是有益的, 例如由喷丸强化所产生的压应力。钻孔应变测试技术是一种测定残余应力的有效方法。

6 工件准备

6.1 对薄工件, 在测试表面上钻一通孔。当使用 A 型或 B 型应变花时, 工件厚度不得大于 $0.4D$, 使用 C 型应变花时, 工件厚度不得大于 $0.48D$, 见图 4。

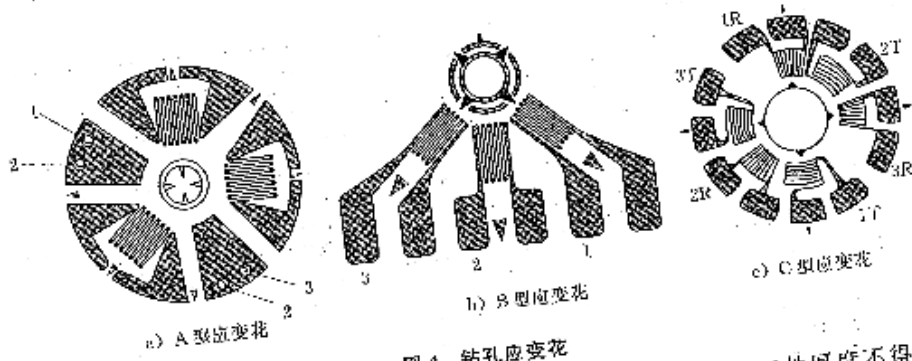


图4 钻孔应变花

- 6.2 对厚工件，在测试表面上钻一直孔。当使用 A 型或 B 型应变花时，工件厚度不得小于 $1.2D$ ，使用 C 型应变花时，工件厚度不得小于 $3.44D$ ，见图 4。
- 6.3 安装应变计的表面应打磨抛光，应使用化学腐蚀方法而尽量避免使用机械磨削，且不得采用会明显改变测试表面应力状况的刮磨或研磨。
- 6.4 粘贴应变计前的表面预处理应符合粘贴应变计的胶粘剂说明书要求，且应进行彻底的清洗和脱脂。表面预处理应严格限制，不得使用会明显改变表面残余应力状况的方法，尤其对于近表面有较大应力梯度的工件。

7 应变计与仪器

7.1 应变花几何形状

7.1.1 应变花包含 3 只或 3 对应变计，应变计的编码应遵循顺时针 (CW) 编码规则。
 注 1: 图 2 所示的应变花的应变计编码规则与普通用途或其他类型应变花的逆时针 (CCW) 编码规则不同。如果使用逆时针编码规则来编码应变计，本测试方法中所述的残余应力计算步骤仍然可用，区别在于应变计 1 和应变计 3 的位置进行了互换；应变倍率所定义的最大主应力 σ_{max} 的方向应沿新定义的应变计 1 逆时针旋转。

注 2: 推荐采用 ASTM E251 标准对应变计进行校准。

- 7.1.2 应变计应阵列于圆形图样上，和应变花中心等距离。
- 7.1.3 应变计分别对应于 3 个坐标方向，如图 2 所示，“1”为基准方向，“2”为与基准方向成 45° 或 135° 夹角的方向，“3”为基准方向的垂直方向。方向“2”在方向“1”和方向“3”的角平分线上。
- 7.1.4 图 1 中应变计 1 的方向定义为测试方向的 x 轴， y 轴为 x 轴逆时针旋转 90° 。
- 7.1.5 应变花测试圆的中心应能清晰可辨。

7.2 标准应变花

7.2.1 不同类型的应变花能满足不同范围内残余应力的测试需要。标准应变花的应用可使残余应力计算变得非常简便。图 4 画出了 3 种不同类型的应变花，表 1 列出了其对应尺寸。

表 1 应变花直径表

应变花类型		D	GL ^a	GW ^a	R ₁ ^b	R ₂ ^b
A 型	尺寸	D	0.309D	0.309D	0.3454D	0.6546D
	0.75mm (1/32in)	2.57 (0.101)	0.79 (0.031)	0.79 (0.031)	0.89 (0.035)	1.68 (0.066)
	1.59mm (1/16in)	5.13 (0.202)	1.59 (0.062)	1.59 (0.062)	1.77 (0.070)	3.34 (0.132)
3.18mm (1/8in)	10.25 (0.404)	3.18 (0.125)	3.18 (0.125)	3.54 (0.140)	6.72 (0.264)	

续表

应变花类型		D	GL^a	GW^a	R_1^b	R_2^b
B型	尺寸	D	$0.356D$	$0.223D$	$0.3455D$	$0.4545D$
	1.59mm (1/16in)	5.13 (0.202)	1.59 (0.062)	1.14 (0.045)	1.77 (0.070)	3.36 (0.132)
C型	尺寸	D	$0.176D$	30°扇形	$0.412D$	$0.568D$
	1.59mm (1/16in)	4.32 (0.170)	0.76 (0.030)	30° (30°)	1.78 (0.070)	2.54 (0.100)

a 直径为 mm, 括号中数据为英寸。
b 应变花直径为图 2 中定义的尺寸。

7.2.2 图 4 中 A 型应变花有几种不同的几何尺寸, 为通用类型。

注: 应变花几何尺寸的选择是首要问题。大尺寸的应变花具有良好的散热性, 测试稳定, 钻孔深度和钻孔直径都较大; 小尺寸的应变花适用于小工件, 钻孔深度和钻孔直径都较小。

7.2.3 图 4 中 B 型应变花的应变计都位于同一侧, 适用于障碍物附近的测试。

7.2.4 图 4 中 C 型应变花为特殊用途应变花, 通过 3 个半桥电路将 3 对方向相反的应变计连接起来, 适用于应变灵敏度和热稳定性要求较高的测试。

7.3 安装及使用

7.3.1 应变花应粘贴于离测试工件边缘至少 $1.5D$ 的位置, 或由多种材料组成的工作的材料分界线上。

7.3.2 如果使用 B 型应变花在障碍物附近进行测试, 应变花中心距障碍物至少 $0.5D$, 且各应变计应处于障碍物切线的法线上。

7.3.3 操作应变计(粘贴、焊引线、防护涂层)时应遵循制造厂的建议, 并在钻孔过程中保护好应变计。

7.3.4 应变计应保证永久性连接, 安装稳定性应予以确认。对地绝缘电阻应不小于 $20000M\Omega$ 。

7.3.5 应变计安装完毕后应进行检查。如果可能, 加上适量的机械荷载以产生适度的应变, 当荷载撤除后, 应变计读数应重返零点。使用肉眼观察应变计是否粘贴好, 如果未粘贴好, 应重新使用新购应变计进行精贴。

7.4 仪器

测量残余应力释放应变的电阻应变仪的分辨力应不低于 $\pm 1 \times 10^{-6}$, 测量稳定性和重复性应高于 $\pm 1 \times 10^{-6}$ 。连接每只应变计的导线应尽可能短, 且 A 型和 B 型应变花应采用三线温度补偿电路, C 型应变花应采用半桥电路; 输出结果以标定的 ϵ_1 , ϵ_2 和 ϵ_3 表示。

8 钻孔步骤

8.1 预备工作

应大量阅读能指导实际操作和介绍高水平残余应力测试的相关文献。这些文献对于准备工作有非常好的帮助, 尤其对于不经常进行钻孔应变测试的操作者来说。

8.2 钻孔设备和使用

8.2.1 在测试工件上钻孔时, 必须使用工装进行控制。此工装所控制的钻孔中心与应变花测量圆的中心不重合度误差应小于 $\pm 0.004D$, 钻孔深度误差应小于 $\pm 0.004D$ 。图 5 为其中一种类型钻孔控制工装。

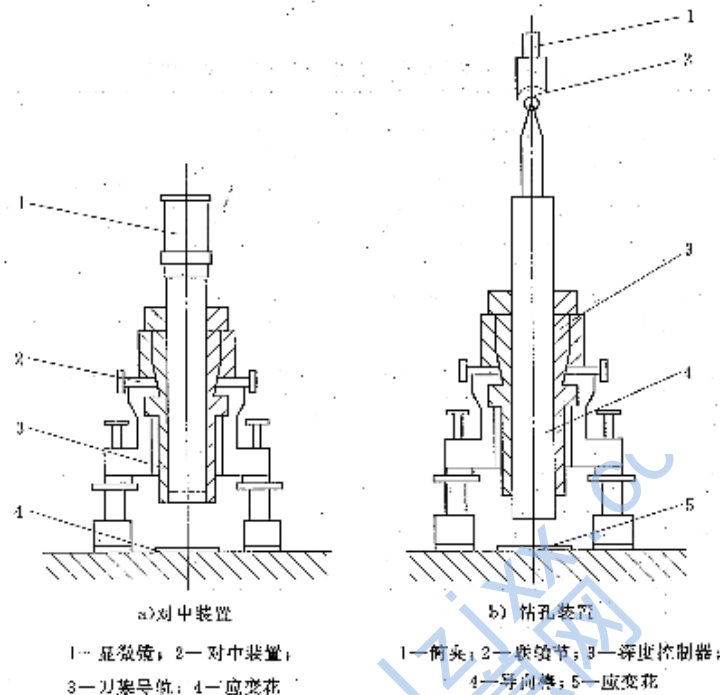


图5 典型钻孔装置

8.2.2 已有多种钻孔技术被研究并证明能有效应用于本测试方法。除对碳化钨钻合金等超硬合金外，最常用的钻孔技术为50000~400000r/min的高速气动涡轮或电动钻孔技术。因会在孔的边沿产生附加应力，低速钻孔技术如钻床或手持式电钻不推荐使用。

8.2.3 对于超硬材料，推荐采用气动喷砂研磨钻孔技术，即用含有优质研磨剂的小径高速空气流喷嘴，对准工件进行喷射研磨钻孔。因钻孔形状和钻孔深度不能精确控制；气动喷砂研磨钻孔技术不适用于较软的材料，且不适用于非均匀布应力的测试。

8.2.4 钻刀、铣刀、碳化倒锥形钻刀、小型碳化铣刀等是比较合适的切削刀具。市场上有多种类型，但并不是所有的类型都适合于钻孔法残余应力测试。因此，如无经验，应在测试前进行钻孔技术和钻刀的选择与验证试验。钻刀的选择与验证试验为在相同化学成分退火后的无应力试样上，采用相同的应变花进行钻孔测试，如果所测得的应变在 $\pm 8\mu\epsilon$ 范围内，则由此钻孔技术和钻刀产生的附加应力符合要求。

8.2.5 如果验证试验产生了明显的附加应变，或者试样材料很难加工，可在钻削过程中添加合适的液体润滑剂。液体润滑剂应是绝缘体，不得使用水或其他导电润滑剂，因为导电材料会渗入应变计导电线路中，对应变计的读数产生影响。

8.2.6 刀具端面切削边缘径向间隙角度不应超过 1° 。此要求是为了确保钻孔深度均匀，误差小于刀具直径的1%。

8.2.7 倒锥形钻刀在端面有最大直径，尖端对应于刀杆。渐缩形状为钻孔切削端面提供了余隙，减少了刀具与孔边沿的摩擦面，减小了附加应变的产生。为确保钻孔直径，锥角不得超过 5° 。

8.2.8 钻孔过程中可采用高级轴向阶跃送进技术，或选择轨道运行技术。轨道运行技术故意将刀具旋转轴偏移孔轴，先送进刀具轴向，之后绕轴向旋转，钻孔直径比刀具直径更大。轴向阶跃送进技术有明显的优势，轨道运行技术的优点在于钻孔直径可通过装置调节，圆柱形切削刃口直到末端，有利于切屑流出。

8.2.9 表 2 列举了不同类型应变花的钻孔推荐值。不同类型适用于不同的均布应力和非均布应力测试。

表 2 根据工件厚度推荐钻孔直径和钻孔深度增量^a

应变花 类型	测量圆 直径 D	薄工件最 大厚度	厚工件最 小厚度	均布应力			非均布应力			
				最小钻孔 直径 D_{min}	最大钻孔 直径 D_{max}	增量 ^b	最小钻孔 直径 D_{min}	最大钻孔 直径 D_{max}	增量 ^b	
A 型	尺寸 D	$0.4D$	$1.2D$	$0.4D_{max}$	D_{max}	$0.05D$	D_{min}	D_{max}	$0.01D$	
	0.79mm (1/32in)	2.57 (0.101)	1.03 (0.040)	3.08 (0.121)	0.41 (0.024)	1.01 (0.040)	0.25 (0.005)	0.93 (0.037)	1.00 (0.040)	0.025 (0.001)
	1.59mm (1/16in)	5.13 (0.202)	2.06 (0.081)	5.17 (0.242)	1.52 (0.059)	2.54 (0.100)	0.25 (0.010)	1.88 (0.075)	2.12 (0.085)	0.05 (0.002)
B 型	尺寸 D	$0.4D$	$1.2D$	$0.6D_{max}$	D_{max}	$0.05D$	D_{min}	D_{max}	$0.01D$	
	1.59mm (1/16in)	5.13 (0.202)	2.06 (0.081)	5.17 (0.242)	1.52 (0.059)	2.54 (0.100)	0.25 (0.010)	1.88 (0.075)	2.12 (0.085)	0.05 (0.002)
	尺寸 D	$0.48D$	$1.44D$	$0.6D_{max}$	D_{max}	$0.05(5D)$	D_{min}	D_{max}	$0.01(5D)$	
C 型	1.59mm (1/16in)	4.32 (0.170)	2.07 (0.082)	6.22 (0.245)	1.52 (0.060)	2.54 (0.100)	0.25 (0.010)	1.88 (0.075)	2.12 (0.085)	0.05 (0.002)

a 直径为 mm，括号中数据为英寸。

b 见 8.4.3 注。

8.2.10 测试应变计的几何尺寸与钻孔直径成正比，因此，大孔径是首选。如果采用阶跃进给技术，刀具直径与孔径相等。如采用轨道技术，刀具直径应是孔径的 60%~90%，选择合适的调节装置使得钻孔直径与预期孔径相等。

8.2.11 钻孔应在相同的温度条件下进行。每完成一个钻孔增量，应有足够的刀具停顿时间，以使钻孔过程中产生的温度波动稳定，空气涡轮排空，可不必缩回刀具。应变读数应稳定 5s 以上才能读取数据。

8.2.12 按 8.3 测定薄工件的均布应力，8.4 测定厚工件的均布应力，8.5 测定厚工件的非均布应力。

8.3 薄工件均布应力钻孔程序

8.3.1 对于 6.1 定义的薄工件，钻孔操作前，读取每一只应变计的初始值。

8.3.2 轴向缓慢推进钻孔，直至在工作件上钻一通孔。如采用轨道运行技术，刀具同时在环形轨道上运行。停止刀具运转，抽回刀具，读取一组 ϵ_1 、 ϵ_2 和 ϵ_3 测试数据。

8.3.3 测量孔径，并确保它在表 2 的目录指定范围内。

8.3.4 检查钻孔中心与应变花测量圆中心的重合度，确保误差在 8.2.1 规定的范围内。

8.3.5 按 9.1 计算均布残余应力值。

8.4 厚工件均布应力钻孔程序

8.4.1 对于 6.2 定义的厚工件，钻孔操作前，读取每一只应变计的初始值。轴向缓慢推进钻孔，直至完全穿透应变花背面材料，并在工件表面轻轻勾画，此点即为钻孔深度零点。

注：部分从业者使用专门的电子技术连接刀具与工件，以此识别钻孔深度零点。

8.4.2 到达零点后，停止刀具运转，并确认应变计读数没有明显的改变。使用新的读数作为零点读数进行后续测试。

8.4.3 A型和B型应变花以0.05D, C型应变花以0.06D的增量逐步钻孔。如采用轨道运行技术, 刀具同时在环形轨道上运行。停止刀具运转, 抽回刀具, 读取一组 ϵ_1 , ϵ_2 和 ϵ_3 测试数据。其他深度增量测试时与此类似。不过, 此计算方法并不方便, 因为要对表3的标定系数进行插值处理。

注: 实际测试过程中, 0.79mm (1/32in) 的A型应变花刀具前进增量为0.125mm, 1.59mm (1/16in) 的A型、B型和C型应变花刀具前进增量为0.25mm, 3.18mm (1/8in) 的A型应变花刀具前进增量为0.5mm (见表2)。指定的0.05D或0.06D增量对残余应力计算结果影响并不大。

表3 标定常数 \bar{a} 和 \bar{b} 取值表

	标定常数		\bar{a}					\bar{b}				
	l/D	D_H/D	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
A型应变花	0.00		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	0.05		0.027	0.037	0.049	0.063	0.080	0.051	0.069	0.090	0.113	0.140
	0.10		0.050	0.081	0.108	0.138	0.176	0.118	0.159	0.206	0.255	0.317
	0.15		0.085	0.115	0.151	0.192	0.238	0.180	0.239	0.305	0.375	0.453
	0.20		0.101	0.137	0.177	0.223	0.273	0.227	0.299	0.377	0.463	0.548
	0.25		0.110	0.147	0.190	0.238	0.288	0.259	0.339	0.428	0.513	0.603
	0.30		0.113	0.151	0.195	0.243	0.293	0.270	0.364	0.454	0.544	0.638
	0.35		0.113	0.151	0.195	0.243	0.292	0.292	0.379	0.472	0.566	0.657
	0.40		0.111	0.149	0.192	0.239	0.289	0.297	0.387	0.482	0.578	0.668
	钻孔		0.080	0.122	0.160	0.203	0.249	0.288	0.377	0.470	0.562	0.651
B型应变花	0.00		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	0.05		0.029	0.039	0.053	0.068	0.086	0.058	0.078	0.102	0.123	0.157
	0.10		0.063	0.087	0.116	0.148	0.189	0.134	0.179	0.231	0.288	0.355
	0.15		0.090	0.123	0.163	0.208	0.254	0.203	0.260	0.343	0.419	0.504
	0.20		0.107	0.145	0.189	0.236	0.280	0.250	0.330	0.423	0.511	0.605
	0.25		0.116	0.156	0.202	0.251	0.305	0.292	0.381	0.476	0.571	0.668
	0.30		0.120	0.160	0.206	0.256	0.300	0.315	0.410	0.506	0.603	0.707
	0.35		0.120	0.160	0.206	0.256	0.308	0.330	0.427	0.529	0.641	0.730
	0.40		0.118	0.158	0.203	0.253	0.305	0.337	0.437	0.541	0.644	0.743
	钻孔		0.096	0.131	0.171	0.216	0.265	0.329	0.428	0.531	0.630	0.725
C型应变花	0.00		0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
	0.05		0.065	0.084	0.106	0.130	0.157	0.195	0.182	0.186	0.185	0.217
	0.10		0.147	0.191	0.238	0.293	0.361	0.250	0.314	0.373	0.440	0.519
	0.15		0.218	0.281	0.347	0.420	0.506	0.392	0.484	0.570	0.658	0.754
	0.20		0.270	0.343	0.421	0.504	0.595	0.506	0.617	0.719	0.818	0.912
	0.25		0.302	0.381	0.465	0.554	0.648	0.591	0.712	0.823	0.923	1.015
	0.30		0.321	0.403	0.491	0.583	0.679	0.650	0.773	0.893	0.994	1.081
	0.35		0.331	0.415	0.505	0.599	0.698	0.690	0.822	0.935	1.041	1.125
	0.40		0.336	0.421	0.512	0.608	0.700	0.710	0.851	0.970	1.073	1.154
	钻孔		0.316	0.399	0.494	0.597	0.707	0.623	0.723	0.795	0.873	0.959

8.4.4 重复上述步骤,在整个钻孔过程中读取 8 组应变测试数据。A 型和 B 型应变花达到最后的 $0.4D$ 孔深深度, C 型应变花达到最后的 $0.48D$ 孔深深度。

注:使用 $0.4D$ 或 $0.48D$ 作为最终孔深,是因为钻孔深度到此后,奥氏应变就停止变化,测试应变主要取决于近表面的应力值,A 型和 B 型应变花在钻孔深度超过 $0.2D$, C 型应变花在钻孔深度超过 $0.3D$ 时,应变变化趋于零。当然,钻孔应变测试技术对近表面、 $0.2D$ 或 $0.3D$ 的深度进行加权平均计算。

8.4.5 测量孔径,并确保它在表 2 的目录指定范围内。

8.4.6 检查钻孔中心与应变花测量圆中心的重合度,确保误差在 8.2.1 规定的范围内。

8.4.7 按 9.2 计算均布残余应力值。

8.5 厚工件非均布应力钻孔程序

8.5.1 钻孔操作前,读取每一个应变计的初始值。轴向缓慢推进钻孔,直至完全穿透应变花背面材料,并在工件表面轻轻勾画,此点即为钻孔深度零点(见 8.4.1)。

8.5.2 到达零点后,停止刀具运转,并确认应变计读数没有明显改变。使用新的读数作为零点读数进行后续测试。

8.5.3 0.79mm ($1/32\text{in}$) 的 A 型应变花以 0.025mm 的增量, 1.59mm ($1/16\text{in}$) 的 A 型、B 型和 C 型应变花以 0.05mm 的增量, 3.18mm ($1/8\text{in}$) 的 A 型应变花以 0.025mm 的增量逐步钻孔。停止刀具运转,记录每一组 ϵ_1 , ϵ_2 和 ϵ_3 测试数据。

8.5.4 当使用 A 型或 B 型应变花时,以相同增量重复钻孔并记录相关测试数据,重复 20 次。

8.5.5 当使用 C 型应变花时,以相同增量重复钻孔并记录相关测试数据,重复 25 次。

8.5.6 测量孔径,并确保它在表 2 的目录指定范围内。

8.5.7 检查钻孔中心与应变花测量圆中心的重合度,确保误差在 8.2.1 规定的范围内。

8.5.8 按第 10 章,计算非均布残余应力值。

9 均布应力计算

9.1 薄工件

9.1.1 通过测试应变 ϵ_1 , ϵ_2 和 ϵ_3 计算复合应变 p 、 q 和 t , 见公式 (3) ~ 公式 (5):

$$p = (\epsilon_2 + \epsilon_1) / 2 \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$q = (\epsilon_3 - \epsilon_1) / 2 \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$t = (\epsilon_3 + \epsilon_1 - 2\epsilon_2) / 2 \quad \dots\dots\dots (5)$$

9.1.2 根据钻孔直径和应变花型号按表 3 确定标定常数 a 和 b 的值。

9.1.3 根据三相复合应变 p 、 q 和 t 计算三相复合应力 P 、 Q 和 T , 见公式 (6) ~ 公式 (8):

$$P = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} = -\frac{Ep}{a(1+\nu)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$Q = \frac{\sigma_y - \sigma_x}{2} = -\frac{Eq}{b} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$T = \tau_{xy} = -\frac{Et}{b} \quad \dots\dots\dots (8)$$

9.1.4 计算平面笛卡尔坐标系下应力值 σ_x 、 σ_y 和 τ_{xy} , 见公式 (3)、公式 (10):

$$\sigma_x = P - Q \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\sigma_y = P + Q \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\tau_{xy} = T \quad \dots\dots\dots (11)$$

9.1.5 计算主应力 σ_{\max} 和 σ_{\min} , 见公式 (12):

$$\sigma_{\max}, \sigma_{\min} = P \pm \sqrt{Q^2 + T^2} \quad \dots\dots\dots (12)$$

9.1.6 最大拉应力(或最小压应力) σ_{\max} 位于图 2 中, 应变计 1 沿顺时针方向旋转 β 角处。最小拉应

力（或最大压应力） σ_{\max} 位于应变计3沿顺时针方向旋转 β 角处。

9.1.7 计算 β 角度值，见公式（13）：

$$\beta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{-T}{Q}\right) \dots\dots\dots (15)$$

9.1.8 建立在普通计算理论上的反正切函数算得的 β 角度值，可能存在 $\pm 90^\circ$ 的偏差。正确的角度方向需要把分子和分母的符号都考虑进去。或者， β 角的计算结果通过表4来确定适当的增加或减少 90° 。

表4 主应力角 β 安置表

项 目	$Q > 0$	$Q = 0$	$Q < 0$
$T < 0$	$45^\circ < \beta < 90^\circ$	45°	$0^\circ < \beta < 45^\circ$
$T = 0$	90°	无意义	0°
$T > 0$	$-90^\circ < \beta < -45^\circ$	-45°	$-45^\circ < \beta < 0^\circ$

9.1.9 正值 β ，如 30° ，指的是 σ_{\max} 位于应变计1沿顺时针方向旋转 30° ；负值 β ，如 -30° ，指的是 σ_{\max} 位于应变计1沿逆时针方向旋转 30° 。通常， σ_{\max} 的方向非常接近于最大负释放应变（压缩）的方向。

注：第9.1.7条定义的顺时针（CW）编码规则确定角度 β 的方法仅适用于如图2顺时针编码规则的应变花，逆时针（CCW）编码规则的应变花确定角度 β 时旋转角度方向相反。即在一个应变花中，应变计1和应变计3以顺时针方向互换位置，新的应变计1变成基准应变计，逆时针编码规则的应变花，正值 β ，如 30° ，表示 σ_{\max} 位于以应变计1的方向逆时针旋转 30° 。残余应力标定的其他内容同样有顺时针和逆时针两种情况。

9.1.10 只要有一个计算主应力超过材料屈服限的60%，就会在钻孔边缘发生局部屈服。在此情况下，测试结果在数值上是不准确的，必须在报告中予以“注明”。如果计算应力超过屈服限的60%，则计算应力被高估了，实际应力通常比计算应力小。

9.2 原工件

9.2.1 绘制应变（ $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ ）—孔深图，确认所组成的图像为光滑曲线。对明显偏离曲线外的数据进行分析，如果需要，重新进行钻孔测试。

9.2.2 对每组测试应变（ $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ ），用公式（3）~公式（5），计算复合应变 p, q 和 t 。

9.2.3 确认残余应力在孔深方向上是否一致。首先挑选出复合应变 q 或 t 中的较大绝对值者，计算各组 p 、较大绝对值者与最大钻孔深度时的 p 、较大绝对值者的百分比，绘制释放应变百分比—孔深图。曲线上的数据点分布应与图6中的曲线非常接近，如果数据点超出图6中曲线的 $\pm 3\%$ ，则表明

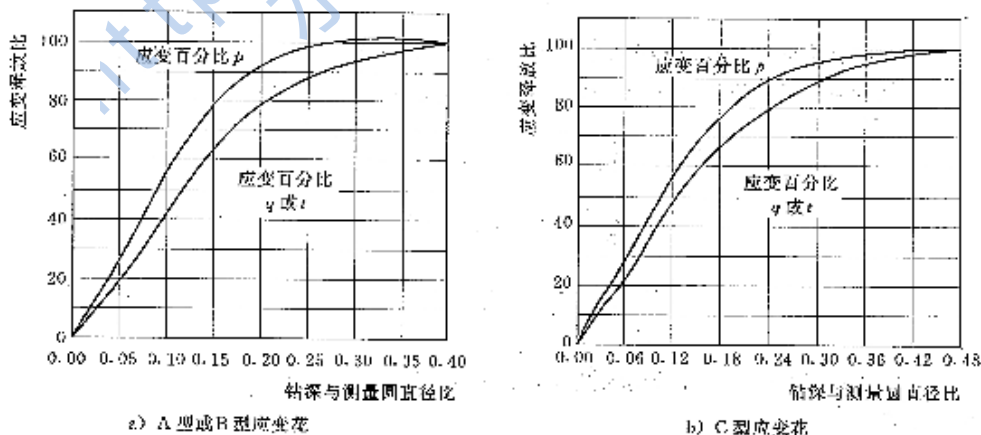


图6 应力百分比—孔深曲线图

注：此图表不是应力分布是否均匀的灵敏指示，应力分布不均匀的工件也可能生成如图6所示的释放应变百分比—孔深图。确认的主要目的是为了确定应力非常不均匀的区域和应变测量误差。这种应力均匀性测试仅可用于原工件。

沿厚度方向的残余应力分布不均匀或测试错误。此两种情况下,测试数据均不能使用均布残余应力计算方法计算,进一步的测试应使用非均布残余应力理论比较合适,见 8.5 条。

9.2.4 每一次钻孔都获得 8 组测量应变 $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)$, 根据钻孔深度、直径和应变花型号按表 3 确定标定常数 \bar{a} 和 \bar{b} 的值。表 3 中数据都来源于有限元法的分析计算。

9.2.5 根据三相复合应变 p 、 q 和 t 计算三相复合应力 P 、 Q 和 T , 见公式 (14)~公式 (16):

$$P = \frac{E}{(1+\nu)} \frac{\sum(\bar{a}p)}{\sum(\bar{a}^2)} \quad \text{..... (14)}$$

$$Q = E \frac{\sum(\bar{b}q)}{\sum(\bar{b}^2)} \quad \text{..... (15)}$$

$$T = E \frac{\sum(\bar{b}t)}{\sum(\bar{b}^2)} \quad \text{..... (16)}$$

式中:

\sum ——8 个孔深数据的求和。

注:运用公式 (5)~公式 (8), 也可仅使用一组测试应变数据 $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)$ 计算复合应力 P 、 Q 和 T , 譬如使用最大孔深时候的数据。但 9.2.5 中描述的均值法是首选, 因为它使用了所有的应变测量数据, 并能明显有效地减少测量的随机误差。

9.2.6 计算笛卡尔坐标系下的应力值 σ_x 、 σ_y 和 τ_{xy} , 按 9.1.5 和 9.1.7 计算主应力 σ_{\max} 、 σ_{\min} 和主应力角 β 。

9.3 中等厚度工件

介于薄工件和厚工件之间的中等厚度工件不属于本标准的测试范围。如果上述工件存在的是均布应力, 采用通孔或盲孔插值对表 3 的标定常数进行计算, 可以计算出其近似残余应力值。

10 非均布应力计算

10.1 应变值

10.1.1 绘制应变 $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)$ —孔深图, 确认所组成的图像为光滑曲线。对明显偏离曲线外的数据进行分析, 如果需要, 重新进行钻孔测试。

10.1.2 通过测试应变 ε_1 、 ε_2 和 ε_3 计算复合应变向量 p_j 、 q_j 和 t_j , 见公式 (17)~公式 (19):

$$p_j = (\varepsilon_3 + \varepsilon_1)_j / 2 \quad \text{..... (17)}$$

$$q_j = (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)_j / 2 \quad \text{..... (18)}$$

$$t_j = (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)_j / 2 \quad \text{..... (19)}$$

式中:

下标 j ——随着不同钻孔深度得到的连续的测试应变的序号。

10.1.3 计算复合应变的标准偏差 p_{std} 、 q_{std} 和 t_{std} , 见公式 (20)~公式 (22):

$$p_{std}^2 = \sum_{j=1}^{n-3} \frac{(p_j - 3p_{j+1} + 3p_{j+2} - p_{j+3})^2}{20(n-3)} \quad \text{..... (20)}$$

$$q_{std}^2 = \sum_{j=1}^{n-3} \frac{(q_j - 3q_{j+1} + 3q_{j+2} - q_{j+3})^2}{20(n-3)} \quad \text{..... (21)}$$

$$t_{std}^2 = \sum_{j=1}^{n-3} \frac{(t_j - 3t_{j+1} + 3t_{j+2} - t_{j+3})^2}{20(n-3)} \quad \text{..... (22)}$$

式中:

n ——不同钻孔深度得到的连续的测试应变的序号, 且有 $1 \leq j \leq n-3$ 。

10.2 标定矩阵

10.2.1 若使用 A 型应变花, 由表 5 中的标定常数组成标定矩阵 α_{jk} 和 \bar{b}_{jk} 。排列的数据为最常用的 1.59mm (1/16in) 应变花的相关数据。若使用 0.79mm (1/32in) 的应变花, 则每个孔深和孔深应力乘以 0.5; 若使用 3.19mm (1/8in) 的应变花, 则每一个孔深和孔深应力乘以 2。

10.2.2 若使用B型应变花,由表6中的标定常数组成标定矩阵 a_{jk} 和 b_{jk} 。若使用C型应变花,由表7中的标定常数组成标定矩阵 a_{jk} 和 b_{jk} 。B型和C型应变花常用的只有1.59mm(1/16in)。

10.2.3 表5~表10中排列的相关数据,为钻孔直径为2mm时的相关数据。调整为当前钻孔直径的方法为:表中数据乘以(钻孔直径/2mm)²。

注:表5~表10中保留了五位小数,是为了减少矩阵计算时的圆整误差。此格式精度超过单个数据的精度。

表5 1.59mm(1/16in)A型应变花2mm孔深标定常数 a 的矩阵表^a

应力梯度										
钻孔深度(mm) (in)	0.002 (0.05)	0.004 (0.10)	0.006 (0.15)	0.008 (0.20)	0.010 (0.25)	0.012 (0.30)	0.014 (0.35)	0.016 (0.40)	0.018 (0.45)	0.020 (0.50)
0.05	-0.00679									
0.10	-0.00815	-0.00714								
0.15	0.00937	-0.00844	-0.00731							
0.20	0.01046	-0.00960	-0.00858	-0.00739						
0.25	-0.01141	-0.01063	-0.00968	0.00866	-0.00728					
0.30	-0.01225	-0.01152	0.01064	-0.00960	-0.00839	-0.00701				
0.35	-0.01291	-0.01227	0.01147	-0.01050	-0.00936	-0.00806	-0.00659			
0.40	-0.01360	-0.01287	-0.01207	-0.01132	-0.01015	-0.00883	-0.00759	-0.00615		
0.45	-0.01416	-0.01344	-0.01264	-0.01184	-0.01082	-0.00970	-0.00846	-0.00712	-0.00567	
0.50	0.01463	-0.01392	-0.01312	-0.01225	-0.01134	0.01031	0.00917	-0.00793	-0.00657	-0.00511
0.55	-0.01508	-0.01434	-0.01354	-0.01270	0.01173	-0.01072	-0.00977	-0.00854	-0.00730	-0.00580
0.60	-0.01545	-0.01471	0.01391	-0.01306	-0.01211	-0.01115	-0.01013	0.00896	-0.00791	-0.00670
0.65	-0.01573	-0.01503	0.01432	-0.01340	-0.01243	-0.01146	-0.01049	0.00938	-0.00842	-0.00722
0.70	0.01608	0.01531	-0.01450	-0.01366	-0.01271	-0.01175	0.01078	-0.00970	-0.00869	-0.00765
0.75	0.01623	-0.01554	-0.01473	-0.01390	-0.01294	0.01198	-0.01102	-0.00996	-0.00892	-0.00795
0.80	0.01643	-0.01574	-0.01493	-0.01410	-0.01313	0.01217	-0.01123	-0.01018	-0.00919	-0.00815
0.85	-0.01665	-0.01590	-0.01510	-0.01426	0.01330	0.01234	-0.01138	-0.01036	-0.00938	-0.00836
0.90	-0.01679	-0.01604	-0.01523	-0.01441	0.01344	-0.01248	-0.01151	-0.01049	-0.00955	-0.00852
0.95	-0.01692	-0.01617	-0.01536	-0.01453	-0.01357	-0.01261	-0.01164	-0.01063	-0.00967	-0.00866
1.00	-0.01704	-0.01628	-0.01548	-0.01463	-0.01368	-0.01272	-0.01176	-0.01074	-0.00978	-0.00877
钻孔深度(mm) (in)	0.022 (0.55)	0.024 (0.60)	0.026 (0.65)	0.028 (0.70)	0.030 (0.75)	0.032 (0.80)	0.034 (0.85)	0.036 (0.90)	0.038 (0.95)	0.040 (1.00)
0.55	-0.00464									
0.60	-0.00543	-0.00411								
0.65	-0.00604	0.00485	-0.00364							
0.70	-0.00655	-0.00544	-0.00431	-0.00316						
0.75	-0.00693	-0.00589	0.00484	-0.00478	-0.00270					
0.80	-0.00716	-0.00624	-0.00524	-0.00425	0.00328	-0.00231				
0.85	-0.00738	-0.00644	0.00555	-0.00464	-0.00373	-0.00283	-0.00195			
0.90	-0.00755	-0.00665	-0.00574	-0.00492	0.00405	-0.00313	-0.00241	-0.00162		
0.95	-0.00770	-0.00679	-0.00592	-0.00508	-0.00432	-0.00353	0.00277	-0.00203	-0.00131	
1.00	-0.00781	-0.00690	-0.00605	-0.00521	-0.00443	-0.00374	-0.00303	-0.00234	-0.00167	-0.00103

^a排列的数据为1.59mm(1/16in)应变花的。如用0.79mm(1/32in)应变花,应力梯度乘以0.5,用3.18mm(1/8in)应变花,应力梯度乘以2。

表 6 1.59mm (1/16in) A 型应变花 2mm 孔深标定常数 \bar{b} 的矩阵表^a

		应力梯度									
钻孔深度(mm) (in)	0.002 (0.05)	0.004 (0.10)	0.006 (0.15)	0.008 (0.20)	0.010 (0.25)	0.012 (0.30)	0.014 (0.35)	0.016 (0.40)	0.018 (0.45)	0.020 (0.50)	
0.05	-0.01261										
0.10	-0.01470	-0.01352									
0.15	0.01656	-0.01534	-0.01414								
0.20	0.01821	-0.01735	-0.01611	0.01449							
0.25	-0.01867	-0.01807	-0.01789	0.01642	-0.01458						
0.30	-0.02092	-0.02038	-0.01945	-0.01815	0.01647	-0.01439					
0.35	-0.02197	-0.02159	-0.02083	-0.01988	0.01815	-0.01623	-0.01395				
0.40	-0.02308	-0.02256	-0.02182	-0.02112	-0.01952	0.01778	-0.01576	-0.01348			
0.45	-0.02400	-0.02351	-0.02280	0.02202	-0.02072	-0.01917	-0.01735	-0.01525	0.01289		
0.50	-0.02481	-0.02434	-0.02386	-0.02273	0.02167	-0.02031	-0.01868	-0.01678	-0.01460	0.01216	
0.55	-0.02554	-0.02507	0.02440	-0.02362	-0.02239	0.02103	-0.01981	0.01793	-0.01599	-0.01388	
0.60	0.02616	-0.02571	-0.02505	0.02428	-0.02303	-0.02177	-0.02045	-0.01890	0.01715	-0.01522	
0.65	-0.02668	0.02625	-0.02561	-0.02487	-0.02364	-0.02239	0.02109	-0.01948	-0.01813	-0.01623	
0.70	-0.02715	-0.02673	0.02611	-0.02536	-0.02417	-0.02294	-0.02164	0.02012	-0.01866	0.01708	
0.75	-0.02753	-0.02713	-0.02653	0.02582	-0.02463	-0.02341	-0.02213	-0.02064	-0.01911	-0.01767	
0.80	-0.02785	0.02749	-0.02690	-0.02620	0.02502	-0.02382	0.02255	-0.02108	-0.01968	-0.01807	
0.85	-0.02821	-0.02781	-0.02722	-0.02652	0.02536	-0.02417	-0.02292	-0.02146	-0.02007	-0.01850	
0.90	0.02848	-0.02809	-0.02750	0.02682	-0.02565	0.02447	-0.02324	-0.02176	-0.02041	-0.01885	
0.95	-0.02871	-0.02832	-0.02774	-0.02706	-0.02591	-0.02473	-0.02350	-0.02204	-0.02067	-0.01916	
1.00	-0.02880	-0.02841	-0.02784	-0.027272	0.02612	-0.02495	-0.02373	-0.02227	-0.02089	-0.01940	
钻孔深度(mm) (in)	0.022 (0.55)	0.024 (0.60)	0.026 (0.65)	0.028 (0.70)	0.030 (0.75)	0.032 (0.80)	0.034 (0.85)	0.036 (0.90)	0.038 (0.95)	0.040 (1.00)	
0.55	-0.01158										
0.60	-0.01310	-0.01081									
0.65	-0.01430	-0.01226	0.01013								
0.70	0.01531	-0.01345	-0.01149	-0.00944							
0.75	-0.01598	-0.01439	-0.01260	0.01073	-0.00875						
0.80	-0.01652	-0.01511	-0.01340	-0.01172	-0.00995	-0.00812					
0.85	-0.01698	-0.01549	-0.01408	-0.01251	0.01089	-0.00921	0.00747				
0.90	0.01736	-0.01590	-0.01441	-0.01312	-0.01159	0.01004	-0.00847	0.00688			
0.95	-0.01769	0.01624	-0.01480	-0.01340	-0.01215	-0.01072	-0.00928	-0.00781	-0.00632		
1.00	-0.01796	-0.01655	-0.01511	-0.01367	-0.01243	-0.01121	0.00989	-0.00856	0.00719	-0.00581	

^a 排列的数据为 1.59mm (1/16in) 应变花的。刻用 0.79mm (1/32in) 应变花, 应力梯度乘以 0.5, 用 3.18mm (1/8in) 应变花, 应力梯度乘以 2。

表 7 1.59mm (1/16in) B 型应变花 2mm 孔深标定常数 $\bar{\alpha}$ 的矩阵表

应力梯度

孔径深度(mm) (in)	0.002 (0.05)	0.004 (0.10)	0.006 (0.15)	0.008 (0.20)	0.010 (0.25)	0.012 (0.30)	0.014 (0.35)	0.016 (0.40)	0.018 (0.45)	0.020 (0.50)
0.05	-0.00726									
0.10	-0.00878	-0.00766								
0.15	-0.01013	-0.00909	-0.00788							
0.20	-0.01133	-0.01037	0.00924	-0.00793						
0.25	-0.01237	-0.01140	-0.01043	0.00821	-0.00781					
0.30	-0.01324	0.01245	-0.01147	-0.01033	0.00901	-0.00751				
0.35	-0.01397	0.01326	-0.01235	-0.01129	0.01004	-0.00863	-0.00704			
0.40	-0.01471	-0.01388	0.01297	-0.01211	-0.01088	0.00956	-0.00811	-0.00654		
0.45	-0.01533	-0.01450	-0.01360	0.01258	-0.01161	-0.01038	0.00904	-0.00758	-0.00599	
0.50	-0.01587	0.01504	-0.01414	-0.01313	0.01217	-0.01105	-0.00931	-0.00845	-0.00696	-0.00536
0.55	-0.01634	-0.01550	0.01460	-0.01367	-0.01257	0.01147	-0.01046	-0.00909	0.00774	-0.00633
0.60	-0.01672	-0.01589	-0.01500	0.01405	-0.01299	-0.01190	0.01082	-0.00964	-0.00839	0.00708
0.65	-0.01705	-0.01621	-0.01532	-0.01441	0.01332	-0.01225	-0.01118	-0.00997	-0.00882	-0.00762
0.70	-0.01735	-0.01651	-0.01561	-0.01468	-0.01362	0.01255	-0.01148	-0.01031	0.00921	-0.00810
0.75	-0.01759	-0.01675	-0.01585	-0.01493	-0.01387	-0.01280	0.01174	-0.01059	-0.00945	-0.00840
0.80	-0.01781	-0.01697	-0.01607	-0.01515	-0.01408	-0.01302	-0.01196	0.01080	-0.00974	-0.00860
0.85	-0.01799	-0.01715	-0.01625	-0.01533	0.01426	-0.01320	-0.01213	-0.01099	-0.00992	-0.00883
0.90	-0.01814	-0.01730	-0.01640	-0.01550	-0.01441	0.01334	-0.01229	-0.01114	-0.01008	-0.00897
0.95	-0.01829	-0.01744	-0.01654	-0.01565	-0.01454	-0.01347	0.01242	-0.01129	-0.01021	-0.00912
1.00	-0.01843	-0.01757	-0.01666	-0.01575	-0.01463	-0.01355	-0.01253	-0.01140	0.01035	-0.00925
孔径深度(mm) (in)	0.022 (0.55)	0.024 (0.60)	0.025 (0.65)	0.028 (0.70)	0.030 (0.75)	0.032 (0.80)	0.034 (0.85)	0.036 (0.90)	0.038 (0.95)	0.040 (1.00)
0.55	-0.00786									
0.60	-0.00572	-0.00430								
0.65	0.00637	-0.00505	-0.00378							
0.70	-0.00691	0.00571	-0.00450	-0.00327						
0.75	-0.00730	-0.00619	0.00505	-0.00392	-0.00277					
0.80	-0.00753	0.00655	-0.00543	-0.00443	0.00339	-0.00234				
0.85	-0.00775	-0.00674	0.00581	-0.00484	-0.00387	0.00291	-0.00195			
0.90	-0.00793	-0.00695	-0.00598	-0.00514	-0.00423	0.00343	-0.00246	-0.00162		
0.95	0.00809	-0.00710	-0.00617	0.00528	-0.00449	-0.00366	0.00285	-0.00207	-0.00131	
1.00	-0.00822	-0.00724	-0.00632	-0.00541	-0.00456	-0.00389	0.00314	-0.00242	-0.00172	0.00104

表 8 1.59mm (1/16in) B 型应变花 2mm 孔深标定常数 b 的矩阵表

应力 应变

钻孔深度(mm) (in)	0.002 (0.05)	0.004 (0.10)	0.006 (0.15)	0.008 (0.20)	0.010 (0.25)	0.012 (0.30)	0.014 (0.35)	0.016 (0.40)	0.018 (0.45)	0.020 (0.50)
0.05	-0.01417									
0.10	-0.01653	-0.01516								
0.15	0.01866	-0.01746	-0.01585							
0.20	-0.02050	0.01953	-0.01810	-0.01624						
0.25	-0.02222	-0.02138	-0.02012	-0.01824	-0.01634					
0.30	0.02385	-0.02290	-0.02190	-0.02040	-0.01848	0.01674				
0.35	-0.02435	0.02437	-0.02340	-0.02214	0.02039	-0.01823	-0.01564			
0.40	-0.02610	-0.02547	0.02459	-0.02375	-0.02195	-0.01997	-0.01789	-0.01510		
0.45	-0.02715	-0.02656	-0.02571	0.02479	-0.02231	-0.02154	-0.01947	-0.01709	-0.01440	
0.50	-0.02806	0.02750	-0.02670	-0.02561	0.02440	-0.02282	-0.02097	-0.01879	-0.01631	-0.01353
0.55	0.02888	-0.02833	-0.02755	-0.02634	-0.02517	0.02363	-0.02225	0.02008	-0.01787	0.01546
0.60	-0.02958	0.02906	-0.02830	-0.02740	-0.02599	-0.02450	0.02298	-0.02119	0.01919	-0.01690
0.65	-0.03019	-0.02968	0.02894	-0.02808	-0.02665	-0.02521	-0.02370	-0.02186	-0.02030	-0.01816
0.70	-0.03072	-0.03023	-0.02950	0.02864	-0.02727	0.02584	-0.02435	-0.02257	-0.02089	-0.01910
0.75	-0.03116	-0.03068	0.02995	-0.02914	0.02773	-0.02628	-0.02481	-0.02310	-0.02139	-0.01976
0.80	0.03158	-0.03108	-0.03038	-0.02956	-0.02822	0.02684	-0.02539	0.02356	-0.02202	0.02022
0.85	-0.03192	-0.03143	-0.03073	-0.02990	0.02859	-0.02723	-0.02580	-0.02410	0.02247	-0.02071
0.90	0.03221	-0.03173	-0.03104	-0.03022	-0.02891	0.02756	-0.02615	-0.02444	-0.02287	-0.02112
0.95	-0.03247	-0.03200	-0.03132	-0.03048	-0.02910	-0.02785	-0.02645	-0.02475	-0.02317	-0.02146
1.00	-0.03268	-0.03222	-0.03154	-0.03074	-0.02944	-0.02810	-0.02671	-0.02501	-0.02342	-0.02173
钻孔深度(mm) (in)	0.022 (0.55)	0.024 (0.60)	0.026 (0.65)	0.028 (0.70)	0.030 (0.75)	0.032 (0.80)	0.034 (0.85)	0.036 (0.90)	0.038 (0.95)	0.040 (1.00)
0.55	-0.01265									
0.60	-0.01460	-0.01292								
0.65	-0.01596	0.01367	-0.01126							
0.70	-0.01710	-0.01498	-0.01278	-0.01046						
0.75	0.01795	-0.01603	0.01401	-0.01188	-0.00964					
0.80	-0.01846	0.01585	-0.01493	-0.01298	-0.01100	-0.00895				
0.85	0.01899	-0.01720	-0.01467	-0.01300	-0.01207	-0.01019	0.00825			
0.90	-0.01942	-0.01779	-0.01608	-0.01459	-0.01288	-0.01115	-0.00940	-0.00762		
0.95	-0.01979	-0.01817	-0.01650	-0.01493	-0.01340	-0.01191	-0.01030	-0.00866	-0.00700	
1.00	-0.02008	-0.01848	-0.01684	-0.01521	-0.01389	-0.01245	-0.01098	-0.00948	-0.00795	-0.00641

表 9 1.59mm (1/16in) C 型应变花 2mm 孔深标定常数 a 的矩阵表

应力梯度

钻孔深度(mm) (in)	0.002 (0.05)	0.004 (0.10)	0.006 (0.15)	0.008 (0.20)	0.010 (0.25)	0.012 (0.30)	0.014 (0.35)	0.016 (0.40)	0.018 (0.45)	0.020 (0.50)
0.05	-0.01704									
0.10	-0.02008	-0.01741								
0.15	0.02285	-0.02043	-0.01749							
0.20	-0.02531	0.02315	0.02047	0.01730						
0.25	0.02748	0.02557	0.02316	0.02024	0.01681					
0.30	-0.02945	-0.02757	-0.02547	-0.02310	-0.01965	0.01608				
0.35	-0.03124	-0.02938	-0.02730	-0.02526	-0.02312	-0.01885	0.01523			
0.40	-0.03282	-0.03092	-0.02886	-0.02668	-0.02402	-0.02133	-0.01775	0.01417		
0.45	-0.03422	-0.03230	-0.03023	-0.02806	-0.02549	-0.02306	-0.01888	-0.01638	0.01307	
0.50	-0.03545	-0.03347	-0.03137	-0.02921	-0.02669	-0.02422	-0.02148	-0.01857	-0.01521	0.01192
0.55	-0.03649	-0.03451	-0.03241	-0.03020	-0.02774	-0.02530	-0.02269	-0.02012	-0.01685	-0.01388
0.60	-0.03735	-0.03534	-0.03324	-0.03108	-0.02865	-0.02621	-0.02379	-0.02123	-0.01824	-0.01546
0.65	-0.03810	-0.03609	-0.03399	-0.03178	-0.02942	-0.02706	-0.02448	-0.02212	-0.01920	-0.01661
0.70	-0.03872	-0.03672	-0.03461	-0.03241	-0.03006	-0.02771	-0.02513	-0.02268	-0.02005	-0.01753
0.75	-0.03927	-0.03727	-0.03516	-0.03293	-0.03059	-0.02826	-0.02568	-0.02320	-0.02064	-0.01823
0.80	-0.03972	-0.03772	-0.03563	-0.03343	-0.03101	-0.02868	-0.02615	-0.02371	-0.02117	-0.01877
0.85	-0.04014	0.03811	-0.03600	-0.03382	-0.03141	-0.02905	-0.02654	-0.02411	-0.02161	-0.01924
0.90	-0.04050	-0.03845	-0.03632	-0.03412	-0.03173	-0.02935	-0.02688	-0.02445	-0.02198	-0.01964
0.95	-0.04083	-0.03874	-0.03658	-0.03436	-0.03198	-0.02960	-0.02712	-0.02477	-0.02230	-0.01996
1.00	-0.04110	-0.03899	-0.03682	-0.03458	-0.03223	-0.02983	-0.02735	-0.02497	-0.02256	-0.02024
1.05	-0.04131	-0.03920	-0.03702	-0.03477	-0.03244	-0.03010	-0.02756	-0.02513	-0.02274	-0.02048
1.10	-0.04149	-0.03938	-0.03720	-0.03492	-0.03262	-0.03028	-0.02775	-0.02531	-0.02290	-0.02064
1.15	0.04162	-0.03952	-0.03734	-0.03509	-0.03275	-0.03043	-0.02790	-0.02548	-0.02306	-0.02077
1.20	-0.04175	-0.03965	-0.03748	-0.03521	-0.03287	-0.03052	-0.02802	-0.02561	-0.02320	-0.02091
1.25	-0.04188	-0.03977	-0.03759	-0.03535	-0.03298	-0.03061	-0.02811	-0.02572	-0.02330	-0.02103
钻孔深度(mm) (in)	0.022 (0.55)	0.024 (0.60)	0.026 (0.65)	0.028 (0.70)	0.030 (0.75)	0.032 (0.80)	0.034 (0.85)	0.036 (0.90)	0.038 (0.95)	0.040 (1.00)
0.55	-0.01074									
0.60	0.01243	-0.00949								
0.65	0.01385	0.01110	-0.00835							
0.70	-0.01492	-0.01248	0.00983	0.00728						
0.75	-0.01572	-0.01344	-0.01102	0.00864	0.00630					
0.80	-0.01633	-0.01408	-0.01185	-0.00978	-0.00753	0.00540				
0.85	-0.01682	-0.01459	-0.01245	-0.01052	-0.00831	0.00653	0.00456			
0.90	-0.01724	-0.01501	-0.01295	-0.01100	-0.00924	-0.00742	-0.00561	0.00381		
0.95	0.01756	-0.01540	-0.01354	-0.01142	-0.00968	-0.00810	-0.00639	-0.00476	-0.00317	
1.00	-0.01785	0.01567	0.01366	0.01175	0.01008	0.00849	-0.00699	-0.00547	-0.00401	-0.00258
1.05	-0.01808	-0.01589	-0.01388	-0.01204	-0.01037	0.00883	-0.00733	-0.00596	-0.00458	-0.00335

续表

钻孔深度(mm) (in)	0.022 (0.55)	0.024 (0.60)	0.026 (0.65)	0.028 (0.70)	0.030 (0.75)	0.032 (0.80)	0.034 (0.85)	0.036 (0.90)	0.038 (0.95)	0.040 (1.00)	
1.00	-0.01828	-0.01609	-0.01410	-0.01224	0.01062	-0.00909	-0.00765	0.00631	-0.00514	-0.00392	
1.15	-0.01843	-0.01621	0.01429	-0.01242	0.01081	-0.00934	-0.00788	0.00653	-0.00541	-0.00434	
1.20	0.01855	-0.01643	-0.01444	-0.01258	-0.01098	0.00945	-0.00807	-0.00673	0.00563	-0.00463	
1.25	0.01866	-0.01652	-0.01455	-0.01271	-0.01111	0.00964	-0.00822	-0.00695	0.00581	-0.00485	
钻孔深度(mm) (in)	0.042 (1.05)	0.044 (1.10)	0.046 (1.15)	0.048 (1.20)	0.050 (1.25)						
1.05	0.00210										
1.10	-0.00278	0.00168									
1.15	-0.00331	-0.00230	-0.00137								
1.20	-0.00367	0.00275	-0.00182	0.00105							
1.25	-0.00393	0.00304	-0.00227	0.00151	-0.00076						

表 10 1.59mm (1/16in) C型应变花 2mm 孔深标定常数 k 的矩阵表

应力梯度

钻孔深度(mm) (in)	0.002 (0.05)	0.004 (0.10)	0.006 (0.15)	0.008 (0.20)	0.010 (0.25)	0.012 (0.30)	0.014 (0.35)	0.016 (0.40)	0.018 (0.45)	0.020 (0.50)	
0.05	-0.02533										
0.10	-0.02358	-0.02675									
0.15	-0.03345	-0.03103	-0.02767								
0.20	-0.03653	-0.03504	-0.03209	-0.02808							
0.25	-0.04004	-0.03862	-0.03554	-0.03258	0.02758						
0.30	-0.04202	0.04154	-0.03970	0.03704	-0.03244	-0.02744					
0.35	-0.04555	-0.04435	0.04258	-0.04050	-0.03641	0.03194	-0.02670				
0.40	0.04790	-0.04676	-0.04511	0.04293	-0.03861	-0.03407	0.03095	-0.02583			
0.45	-0.05005	-0.04892	0.04728	-0.04526	-0.04211	-0.03909	-0.03458	-0.02976	0.02442		
0.50	-0.05209	-0.05084	-0.04918	-0.04711	-0.04419	0.04115	-0.03730	-0.03340	-0.02817	-0.02304	
0.55	-0.05383	-0.05233	-0.05082	-0.04881	-0.04589	-0.04307	-0.03955	0.03501	-0.03129	-0.02654	
0.60	-0.05495	-0.05391	-0.05237	-0.05036	-0.04758	-0.04467	-0.04136	-0.03798	0.03362	-0.02932	
0.65	-0.05614	-0.05513	-0.05362	-0.05164	-0.04893	-0.04609	-0.04280	-0.03962	-0.03548	-0.03152	
0.70	-0.05714	-0.05615	-0.05469	-0.05276	-0.05007	-0.04719	-0.04397	-0.04073	0.03696	-0.03323	
0.75	-0.05804	-0.05706	-0.05560	-0.05371	-0.05103	-0.04823	-0.04503	-0.04179	-0.03811	-0.03461	
0.80	-0.05882	-0.05782	-0.05635	-0.05448	-0.05188	-0.04915	-0.04590	-0.04273	-0.03812	-0.03465	
0.85	-0.05949	-0.05850	-0.05704	-0.05514	-0.05255	-0.04985	-0.04664	-0.04350	-0.03936	-0.03637	
0.90	-0.06006	-0.05908	-0.05762	-0.05571	-0.05315	-0.05044	-0.04727	-0.04412	-0.04005	-0.03704	
0.95	-0.06051	-0.05955	-0.05811	-0.05622	-0.05364	-0.05100	-0.04781	-0.04465	-0.04125	-0.03799	
1.00	-0.06091	-0.05997	-0.05854	-0.05664	-0.05407	-0.05142	-0.04828	-0.04513	-0.04176	-0.03850	
1.05	-0.06124	-0.06030	-0.05888	-0.05703	-0.05444	-0.05175	-0.04865	-0.04559	-0.04218	-0.03895	
1.10	-0.06153	-0.06059	-0.05918	-0.05733	-0.05478	-0.05208	-0.04898	-0.04592	-0.04254	-0.03932	
1.15	-0.06175	-0.06083	-0.05943	-0.05757	-0.05505	-0.05232	-0.04927	-0.04618	-0.04282	-0.03962	
1.20	-0.06195	-0.06104	-0.05965	-0.05779	-0.05528	-0.05267	-0.04953	-0.04644	-0.04308	-0.03986	
1.25	-0.06211	-0.06122	-0.05984	-0.05801	-0.05547	-0.05285	-0.04972	-0.04667	-0.04331	-0.04000	

续表

钻孔深度(mm) (in)	0.022 (0.55)	0.024 (0.60)	0.026 (0.65)	0.028 (0.70)	0.030 (0.75)	0.032 (0.80)	0.034 (0.85)	0.036 (0.90)	0.038 (0.95)	0.040 (1.00)
0.55	-0.02155									
0.60	-0.02458	-0.01984								
0.65	-0.02713	-0.02289	0.01627							
0.70	-0.02935	-0.02559	-0.02113	-0.01677						
0.75	-0.03085	-0.02745	-0.02345	-0.01944	-0.01536					
0.80	-0.03202	-0.02862	-0.02506	-0.02168	-0.01784	0.01406				
0.85	-0.03300	-0.02956	-0.02634	-0.02314	-0.01978	0.01633	-0.01275			
0.90	-0.03382	-0.03048	-0.02723	0.02407	0.02126	-0.01813	-0.01487	-0.01149		
0.95	0.03448	0.03124	0.02759	-0.02492	-0.02211	-0.01956	-0.01647	0.01341	-0.01034	
1.00	0.03505	-0.03182	-0.02864	-0.02531	-0.02290	-0.02031	-0.01771	-0.01495	-0.01216	-0.00935
1.05	-0.03550	-0.03229	-0.02915	-0.02620	-0.02348	-0.02095	0.01842	-0.01600	-0.01363	0.01102
1.10	-0.03590	-0.03269	-0.02961	-0.02666	0.02400	-0.02148	-0.01909	-0.01675	0.01459	-0.01227
1.15	-0.03623	-0.03308	0.02999	0.02710	-0.02444	-0.02191	-0.01955	-0.01733	-0.01523	-0.01311
1.20	-0.03650	-0.03337	-0.03030	-0.02743	-0.02480	-0.02229	-0.01996	-0.01773	-0.01575	-0.01373
1.25	-0.03674	-0.03361	-0.03055	-0.02770	-0.02507	-0.02253	-0.02028	-0.01810	-0.01609	0.01420
钻孔深度(mm) (in)	0.042 (1.05)	0.044 (1.10)	0.046 (1.15)	0.048 (1.20)	0.050 (1.25)					
1.05	-0.00845									
1.10	0.01000	-0.00775								
1.15	-0.01116	-0.00907	-0.00703							
1.20	-0.01191	-0.01010	-0.00824	-0.00637						
1.25	-0.01241	-0.01031	-0.00836	0.00751	0.00582					

10.3 应力计算

10.3.1 使用整体计算原理，每一钻孔深度增量的残余应力通过释放应变与矩阵关系式计算，见公式(23)~公式(28)：

$$\bar{a}p = \frac{E}{1+\nu} \bar{b} \quad \dots\dots\dots (23)$$

$$bQ = E\bar{q} \quad \dots\dots\dots (24)$$

$$\bar{b}T = E\bar{t} \quad \dots\dots\dots (25)$$

$$P_k = [(\sigma_r)_k + (\sigma_z)_k] / 2 \quad \dots\dots\dots (26)$$

$$Q_k = [(\sigma_r)_k + (\sigma_z)_k] / 2 \quad \dots\dots\dots (27)$$

$$T_k = (\tau_{rz})_k \quad \dots\dots\dots (28)$$

其中：复合应变由公式(17)~公式(19)计算，应力由公式(23)~公式(25)计算。因有较多孔深增量数据，矩阵 a 和 b 将变得非常复杂，在此情况下，微小的测试应变误差将导致非常大的计算应力误差。为减小这些误差，使用如下的吉洪诺夫(Tikhunov)正则化方法。

10.3.2 组建如下 3 条斜对角线式的二阶导数矩阵见公式 (29):

$$c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & & & & \\ -1 & 2 & -1 & & & \\ & -1 & 2 & -1 & & \\ & & -1 & 2 & -1 & \\ & & & -1 & 2 & -1 \\ & & & & 0 & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (29)$$

其中: 行数为深度增量数, 第一行和最后一行为 0, 其余各行有 [-1 2 -1] 并成斜线排列。

10.3.3 对公式 (23) ~ 公式 (25) 计算的残余应力值, 用矩阵 c 使用吉洪诺夫 (Tikhonov) 二阶导数正则化方法进行正则化, 见公式 (30) ~ 公式 (32):

$$(\bar{a}^T \bar{a} + \alpha_P c^T c) P = \frac{E}{1+\nu} \bar{a}^T p \dots\dots\dots (30)$$

$$(\bar{b}^T \bar{b} + \alpha_Q c^T c) Q = E \bar{b}^T q \dots\dots\dots (31)$$

$$(\bar{t}^T \bar{t} + \alpha_T c^T c) T = E \bar{t}^T t \dots\dots\dots (32)$$

10.3.4 正则化系数 α_P 、 α_Q 和 α_T 为正则化控制量。正则化将圆整测试应力结果, 其中的 0 值使公式 (30) ~ 公式 (32) 等同于未正则化的公式 (23) ~ 公式 (25), 正系数将导致正则化 (圆整) 过程中随着选定的系数变大。应力测试过程中的干扰因数随着正则化消失, 过度正则化将失真应力测试结果, 最佳的正则化将平衡这两种情况。

10.3.5 先假设一个待求值 α_P 、 α_Q 和 α_T , 其值应在 10^{-7} ~ 10^{-6} 之间。通过公式 (30) ~ 公式 (32) 计算应力 P 、 Q 和 T 的值。

10.3.6 在计算应力 P 、 Q 和 T 时, 正则化过程将导致未被正则化的应变未被公式 (23) ~ 公式 (25) 纳入对应变 p 、 q 和 t 的计算。失配向量代表应变偏差, $p_{mismatch}$ 、 $q_{mismatch}$ 、 $t_{mismatch}$ 见公式 (33) ~ 公式 (35):

$$p_{mismatch} = p - \frac{1+\nu}{E} \bar{a}^T P \dots\dots\dots (33)$$

$$q_{mismatch} = q - \frac{1}{E} \bar{b}^T Q \dots\dots\dots (34)$$

$$t_{mismatch} = t - \frac{1}{E} \bar{t}^T T \dots\dots\dots (35)$$

10.3.7 计算失配向量的名义向量 p_{rms} 、 q_{rms} 、 t_{rms} , 见公式 (36) ~ 公式 (38):

$$p_{rms}^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (p_{mismatch})_j^2 \dots\dots\dots (36)$$

$$q_{rms}^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (q_{mismatch})_j^2 \dots\dots\dots (37)$$

$$t_{rms}^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (t_{mismatch})_j^2 \dots\dots\dots (38)$$

10.3.8 如果 p_{rms}^2 、 q_{rms}^2 和 t_{rms}^2 的值与公式 (20) ~ 公式 (22) 中 p_{std}^2 、 q_{std}^2 和 t_{std}^2 的值偏差在 5% 以内, 计算应力值 P 、 Q 和 T 则可接受。如果超出此范围, 则需进行新的正则化系数假设, 见公式 (39) ~ 公式 (41):

$$(\alpha_P)_{new} = \frac{p_{std}^2}{p_{rms}^2} (\alpha_P)_{old} \dots\dots\dots (39)$$

$$(\alpha_Q)_{new} = \frac{q_{std}^2}{q_{rms}^2} (\alpha_Q)_{old} \dots\dots\dots (40)$$

$$(\alpha_T)_{new} = \frac{t_{std}^2}{t_{rms}^2} (\alpha_T)_{old} \dots\dots\dots (41)$$

10.3.9 用公式 (30) ~ 公式 (41) 重新计算, 直至偏差在 5% 范围内, 得到最终可接受的应力值 P 、 Q 和 T 。

10.3.10 计算笛卡尔坐标下的应力值 σ_x 、 σ_y 、 τ_{xy} ，见公式 (42)~公式 (44)：

$$(\sigma_x)_j = P_j - Q_j \quad \dots\dots\dots (42)$$

$$(\sigma_y)_j = P_j + Q_j \quad \dots\dots\dots (43)$$

$$(\tau_{xy})_j = T_j \quad \dots\dots\dots (44)$$

10.3.11 计算主应力 σ_{\max} 、 σ_{\min} 和方向角 β ，见公式 (45) 和公式 (46)：

$$(\sigma_{\max})_k; (\sigma_{\min})_k = P_k \pm \sqrt{Q_k^2 + T_k^2} \quad \dots\dots\dots (45)$$

$$\beta_k = \frac{1}{2} \arctan \frac{-T_k}{-Q_k} \quad \dots\dots\dots (46)$$

10.3.12 用反正切函数求得方向角 β 的正确象限。或者， β 角的计算结果通过表 4 来确定适当增加或减少 90° 。

10.3.13 正值 β ，如 30° ，指的是 σ_{\max} 位于应变计 1 沿顺时针方向旋转 30° ；负值 β ，如 -30° ，指的是 σ_{\max} 位于应变计 1 沿逆时针方向旋转 30° 。

10.3.14 通常， σ_{\max} 的方向非常接近于最大负释放应变（压缩）的方向。如果 $Q=0$ 且 $T=0$ ，则为一种单向应力状态， β 角无意义。

10.3.15 绘制 σ_{\max} —孔深图和 σ_{\min} —孔深图，如果有多个计算应力明显超过屈服限的 60%，则测试结果是不准确的，必须在报告中“注明”。总体来说，如果计算应力超过屈服限的 60%，则计算应力被高估了，实际应力通常比计算应力小。

11 报告

11.1 测试描述

- a) 测试工件的描述；
- b) 材料；
- c) 相关机械性能；
- d) 应变花粘贴部位；
- e) 应变花的型号和类型；
- f) 应变花几何尺寸；
- g) 钻孔方法。

11.2 均布应力薄工件

- a) 应变花中每个应变计的读数；
- b) 计算每个应变花的主应力和 xy 向剪应力。

11.3 均布应力厚工件

- a) 绘制每个应变花中应变计的应变—孔深曲线；
- b) 列表每个应变花的应变 ϵ_1 、 ϵ_2 和 ϵ_3 ；
- c) 计算每个应变花的主应力和 xy 向剪应力。

11.4 非均布应力厚工件

- a) 绘制每个应变花中应变计的应变—孔深曲线；
- b) 列表每个应变花的应变 ϵ_1 、 ϵ_2 和 ϵ_3 ；
- c) 估算每个应变花的标准应变偏差；
- d) 列表每个应变花的 xy 向剪应力—孔深并绘图；
- e) 列表每个应变花的主应力和方向角。

12 精度和偏差

12.1 试验技术

12.1.1 操作技术和专业知识是测试结果的最大影响因素。应大量阅读能指导实际操作和介绍高水平

残余应力测试的相关文献。这些文献对于准备工作有非常好的帮助，尤其对于不经常进行钻孔应变测试的操作者来说。

12.1.2 不确定的钻孔测试技术操作规程易导致不精确的测试结果。

12.1.3 虽然没有证明材料，但本标准推荐对不同的测试部位分别进行残余应力测试，譬如对弯曲或扭曲梁进行4点测试以了解其应力状态分布。如果有可能，应对钻孔应变法与其他技术进行验证，进行不确定性分析，以确定和量化其测量不确定度，提高测试精度。

12.1.4 小尺寸的应变花可测量近表面的残余应力值，但此类应变花产生的测量误差通常比大尺寸应变花大（如钻孔精度、孔深等）。

12.2 均布应力测量

12.2.1 使用钻孔方法，在不产生明显的加工应力状况下，整个孔深范围内测定的残余应力偏差不超过 $\pm 10\%$ 。但因图6对残余应力是否沿孔深变化并不敏感，所以识别残余应力沿孔深方向是否有明显变化是非常困难的事情。残余应力通常是由于对目标表面的不同的加工、组合、焊接和其他过程预留的能量产生的，所以，近表面残余应力通常存在应力梯度，均布残余应力很少存在。如果非均布残余应力的分布未被认识到，测试误差将远远超过 10% ，并且通常将低估最大残余应力值。

12.2.2 使用零应力处理后的AISI 1018号碳钢进行循环比对试验。分别采用高速（气动涡轮）、低速（常规钻孔）和空气研磨钻孔方法进行钻孔，8个实验室分别对8个试样共进行26次测试，得到残余应力标准偏差量为14MPa。

12.2.3 使用零应力处理后的304号不锈钢进行循环比对试验。35个实验室分别使用不同的测试方法对46个试样进行测试，其中46个采用高速钻孔和空气研磨钻孔得到的残余应力标准偏差量不超过12MPa，而另外6个采用低速钻孔方法的值测与此不一致。

12.2.4 使用有应力试样进行比对试验的效果可能会比无应力试样更好。美国材料试验协会实验力学残余应力科学技术分会正参与ASTM E28.13标准委员会的有应力不锈钢试样循环比对试验。

12.2.5 应用于碳钢和不锈钢的测试方法的精度估计不可应用于其他材料，其加工特性与钢材，甚至钢材本身彼此都有较大的不同。对铜、铝、镁及钨钼钨硬质合金等金属材料使用高速钻孔方法是比较有效的。

12.2.6 读数误差、应变计畸形、测试环境的变化等都有可能引起随机实验误差。公式(15)~公式(17)可减少残余应力随机实验误差，提高测试精度。

12.2.7 采用6单元的C型应变花。对于一个给定的残余应力水平，与采用3单元的A型应变花和B型应变花相比，增加了电量输出，增加的电流灵敏度提高了钻孔测试精度。但6单元的C型应变花安装复杂，成本较大，对于普通测试工作，A型应变花和B型应变花就能满足测试要求。C型应变花适用于重要测量和低传导率材料的测量。

12.3 非均布应力测量

12.3.1 大量的非均布应力测试精度评估计划还未进行，但其标准偏差预计比均布应力测试结果大。已进行了一些采用钻孔方法对喷丸产生的非均布应力测试的研究，由于尖锐的应力梯度，单个不确定值或标准偏差不能等同于全部，应力测试值的比较必须在较大的孔深范围内进行，结果表明，标准偏差都比均布应力的测试结果大，尤其在接近表面的地方。

12.3.2 影响测试精度和准确性的因素如下：钻头未对准、近表面的较大应力梯度、第一步钻孔时的小计量输出和零点基准面的确定等。

12.3.3 在近表面的测试过程中基准面的识别尤为重要。这个位置的确定将影响第一个增量应力的计算不确定性，因此，此不确定性与表面粗糙度有关。

附录 A
(资料性附录)
钻孔偏心的修正

A.1 为了保证测量精度,要求应变花测量中心与钻孔中心完全重合。当钻孔中心与应变花中心的不重合度误差在 $1(0.004 \sim 0.05)D$,且不可重复测量时,可按本方法进行修正其近似值。

A.2 当测量残余应力采用直角应变花时,若钻孔有偏心,如图 A.1 所示,孔心与应变花心偏离为 e ,则以孔心 O 为原点的坐标系 X 、 Y ,以花心 O' 的坐标系为 X' 、 Y' 。此时,孔心与应变片中心的距离由 R_1 、 R_2 、 R_3 变成 R'_1 、 R'_2 、 R'_3 ,并与花心到应变片中心的连线形成 α_1 、 α_2 、 α_3 角。同时应变释放系数 A 值、 B 值也因距离 R 的变化而变成 A_1 、 B_1 、 A_2 、 B_2 、 A_3 、 B_3 。

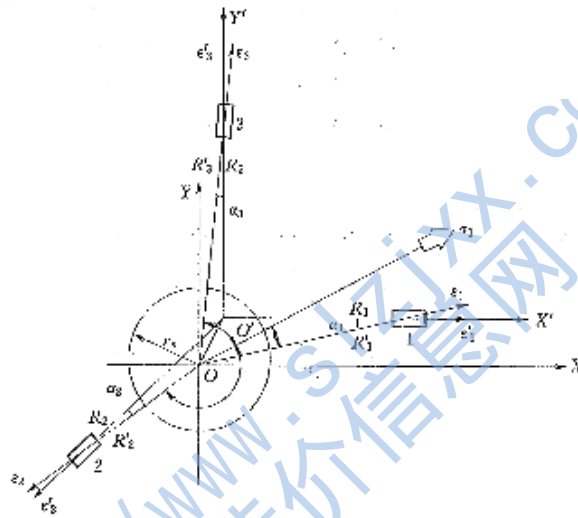


图 A.1 钻孔偏心的坐标系

A.3 按中心钻孔法测量各应变片的释放应变 ϵ_1 、 ϵ_2 、 ϵ_3 。

A.4 用刻度显微镜(最小读数为 0.01mm)测量孔心到应变片中心距离在 X 轴、 Y 轴方向上的分量 x 值、 y 值。

A.5 按公式(A.1)~公式(A.3)计算孔心到3个应变片中心的距离 R'_1 、 R'_2 、 R'_3 :

$$R'_1 = \sqrt{(R_1 + x)^2 + y^2} \quad \text{..... (A.1)}$$

$$R'_2 = \sqrt{(0.707R_2 - x)^2 + (0.707R_2 - y)^2} \quad \text{..... (A.2)}$$

$$R'_3 = \sqrt{x^2 + (R_2 + y)^2} \quad \text{..... (A.3)}$$

A.6 按公式(A.4)、公式(A.5)计算3个应变片的应变释放系数 A_1 、 B_1 、 A_2 、 B_2 、 A_3 、 B_3 。

$$A = \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{2\sigma} \quad \text{..... (A.4)}$$

$$B = \frac{\epsilon_1 - \epsilon_3}{2\sigma} \quad \text{..... (A.5)}$$

A.7 按公式(A.6)~公式(A.8)计算 α_1 、 α_2 、 α_3 ,然后按公式(A.9)~公式(A.11)计算 γ_1 、 γ_2 、 γ_3 :

$$\alpha_1 = \arctan \frac{y}{R_1 + x} \quad \text{..... (A.6)}$$

$$\alpha_2 = \arctan \frac{0.707R_2 - y}{0.707R_2 - x} \quad \frac{\pi}{4} \quad \text{..... (A.7)}$$

$$\alpha_3 = \arctan \frac{z}{R_3 \cdot l \cdot y} \quad (\text{A. 8})$$

$$\gamma_1 = \beta - \alpha_1 \quad (\text{A. 9})$$

$$\gamma_2 = 45^\circ - (\beta + \alpha_2) \quad (\text{A. 10})$$

$$\gamma_3 = 90^\circ - (\beta + \alpha_3) \quad (\text{A. 11})$$

A. 8 按公式 (A. 12)、公式 (A. 14) 计算偏心时各应变片的径向应变:

$$\epsilon'_1 = \epsilon_1 \cos \alpha_1 \quad (\text{A. 12})$$

$$\epsilon'_2 = \epsilon_2 \cos \alpha_2 \quad (\text{A. 13})$$

$$\epsilon'_3 = \epsilon_3 \cos \alpha_3 \quad (\text{A. 14})$$

A. 9 按公式 (A. 15)、公式 (A. 18) 计算 H 、 M 、 P 、 Q :

$$H = A_1 - B_1 \cos 2\gamma_1 \quad (\text{A. 15})$$

$$M = A_1 - B_1 \cos 2\gamma_1 \quad (\text{A. 16})$$

$$P = A_3 + B_3 \cos 2\gamma_3 \quad (\text{A. 17})$$

$$Q = A_3 - B_3 \cos 2\gamma_3 \quad (\text{A. 18})$$

式中:

H 、 M 、 P 、 Q ——假设的过渡系数。

A. 10 按公式 (A. 19)、公式 (A. 20) 计算偏心钻孔时的残余应力:

$$\sigma_1 = \frac{M \epsilon'_1 - Q \epsilon'_1}{MP - QH} \quad (\text{A. 19})$$

$$\sigma_2 = \frac{P \epsilon'_1 - H \epsilon'_1}{MP - QH} \quad (\text{A. 20})$$

附录 B
(资料性附录)
孔边塑性变形的修正

B.1 修正原理

在所测量的总应变 ε 中, 包含如公式 (B.1) 所示的 3 部分应变:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_p + \varepsilon_s \quad \text{..... (B.1)}$$

式中:

- ε ——释放应变的测量值;
- ε_0 ——因钻削加工引起的塑性应变;
- ε_s ——纯弹性释放应变;
- ε_p ——由应力集中引起的塑性应变。

因钻削加工和钻孔应力集中引起的塑性应变 ε_0 和 ε_p 的确定和消除则是提高测量精度的关键。

B.2 钻孔加工塑性应变修正法

对无应力试样按本标准方法钻孔测定 ε_0 , 然后从测量的总应变 ε 中将其减去。

B.3 钻孔应力集中塑性应变修正法**B.3.1 多次迭代修正法:**

B.3.1.1 当测量的残余应力值超过 1/2 材料屈服点时, 用测得的释放应变 ε_1 和 ε_2 代替纯弹性释放应变 ε_0 和 ε_{30} , 按公式 (B.2) ~ 公式 (B.4) 计算 Q_1 和 Q_3 :

$$Q_1 = \frac{3\gamma - 1}{3 - \gamma} \varepsilon_1 + \varepsilon_{30} \quad \text{..... (B.2)}$$

$$Q_3 = \frac{3\gamma - 1}{3 - \gamma} \varepsilon_2 + \varepsilon_{30} \quad \text{..... (B.3)}$$

$$\gamma = \frac{\varepsilon_{30}}{\varepsilon_{11}} \quad \text{..... (B.4)}$$

式中:

- Q_1 、 Q_3 ——过渡系数;
- ε_1 、 ε_2 —— x 、 y 方向应变片中的弹性释放应变。

B.3.1.2 当应变片, 钻孔参数选定为某一数值后, 即可按公式 (B.5) 和公式 (B.6) 计算一组因应力集中引起的塑性应变 ε_{1p} 和 ε_{30p} ,

$$\varepsilon_{1p} = 0.4Q_3 + 78.4 \quad \text{..... (B.5)}$$

$$\varepsilon_{30p} = 0.2Q_3 + 39.3 \quad \text{..... (B.6)}$$

B.3.1.3 由于测得的释放应变中, 包括纯弹性应变和由应力集中引起的塑性应变, 故将算出的 ε_{1p} 和 ε_{30p} 从 ε_1 和 ε_2 减去, 即得到接近的 ε_{1e} 和 ε_{30e} 的 ε_1 和 ε_2 。

B.3.1.4 重复上述过程, 用经过修正的 ε_1 和 ε_2 , 再按公式 (B.2) 和公式 (B.3) 计算 Q_1 、 Q_3 , 再按公式 (B.5) 和公式 (B.6) 重新算出一组 ε_{1p} 和 ε_{30p} , 并从已修正过的 ε_1 和 ε_2 中将其减去, 又得到更接近的 ε_{1e} 和 ε_{30e} 的 ε_1 和 ε_2 。如此一次次迭代逼近, 即可得到真实的 ε_{1e} 和 ε_{30e} , 从而可按公式 (B.7)、公式 (B.8) 计算出残余应力的真实值。

$$\sigma_x = \frac{B(\varepsilon_x + \varepsilon_y) + A(\varepsilon_s + \varepsilon_p)}{4AB} \quad \text{..... (B.7)}$$

$$\sigma_y = \frac{B(\varepsilon_x + \varepsilon_y) - A(\varepsilon_s - \varepsilon_p)}{4AB} \quad \text{..... (B.8)}$$

B.3.2 应变释放系数分级计算法:

B.3.2.1 A、B 系数分级的依据。当残余应力的方向已知时, 用公式 (B.7)、公式 (B.8) 计算残

余应力。

在弹性范围内，应变释放系数 A、B 均为常数。而当孔边材料屈服时，塑性应变的数值随应力水平变化，A、B 也将有一系列数值，公式 (B.7)、公式 (B.8) 可改写为公式 (B.9) 和公式 (B.10)。

$$\sigma_x = \frac{\sigma}{2} \left[\frac{\epsilon_{xp} - \epsilon'_{xp}}{\epsilon_{xp} - \epsilon'_{xp}} + \frac{2\epsilon_s}{2\epsilon_s - (\epsilon'_{xp} - \epsilon_{xp})} \right] \dots\dots\dots (B.9)$$

$$\sigma_y = \frac{\sigma}{2} \left[\frac{\epsilon_{yp} - \epsilon'_{yp}}{\epsilon_{yp} - \epsilon'_{yp}} - \frac{2\epsilon_s}{2\epsilon_s - (\epsilon'_{yp} - \epsilon_{yp})} \right] \dots\dots\dots (B.10)$$

式中：

- ϵ_{xp} 、 ϵ_{yp} ——实测应变中 x、y 方向的塑性应变分量；
- ϵ'_{xp} 、 ϵ'_{yp} ——单向标定应变中 x、y 方向的塑性应变分量；
- σ ——标定时的外加应力，其数值从零到材料的屈服点，N/mm²；
- ϵ_s ——标定材料的屈服应变。

从公式 (B.9)、公式 (B.10) 可以看出，测量误差的大小决定比值 m。

$$m = \frac{\epsilon_{xp} \pm \epsilon_{yp}}{\epsilon'_{xp} \pm \epsilon'_{yp}} \dots\dots\dots (B.11)$$

公式 (B.11) 中的分子项是实测时的释放应变量，分母项为标定时的释放应变量。

当 m=1 时，说明实测的和标定时的塑性应变相等，在运算中塑性应变可以基本消除，计算的应力值即为残余应力的真实值。

当 m>1 时，说明实测应变中的塑性应变大于 A、B 中的塑性应变，计算应力值大于真实应力值，测量结果有一定的误差。

当 m<1 时，说明实测应变中的塑性应变小于 A、B 中的塑性应变，计算应力小于真实应力，测量结果具有一定的负偏差。

对于 m>1 和 m<1 的情况，虽然不能完全消除实测应变中的塑性应变，但其影响已大为降低，为便于使用，将应变释放系数 A、B 按应力水平分为若干等级使用，从而大为降低实测中塑性应变的影响，提高了测量精度。

B.3.2.2 A、B 系数分级计算方法。根据标定时的应力档次及塑性变形量的大小，将 A、B 系数分四级。A、B 分级数值及其他使用条件见表 B.1。

表 B.1 A、B 系数分级推荐值及其使用条件

电阻桥基		阻值 (Ω)	孔径 D ₀ (mm)	孔深 h (mm)	h/D ₀	孔片中心 距 P ₀ (mm)	残余应力 初算值 (N/mm ²)	应变释放系数		钻削应力 修正 (ε _s)		
长×宽 (mm)	分级 数							A (×10 ⁻² mm ² /N)	B (×10 ⁻² mm ² /N)			
低 碳 钢	1×1	120	1.0	1.0	1.0	2.0	≤190	1	-2.75	-6.20	35	
							191~300	2	-3.71	-8.37		
							301~450	3	-4.66	-10.50		
							≥450	4	-5.48	-11.65		
	2×2	120	2.0	2.0	1.0	4.0	≤190	1	-2.76	-5.67		
							191~310	2	-3.48	-7.34		
							311~450	3	-4.29	-8.80		
							≥450	4	-5.56	-11.80		
	3×2	120	3.0	3.0	1.0	6.0	≤190	1	-2.63	-5.85		25
							191~300	2	-3.44	-7.74		
							301~450	3	-4.38	-9.66		
							≥450	4	-5.26	-11.20		

续表

电阻栅基		阻值 (Ω)	孔径 D_0 (mm)	孔深 h (mm)	$\frac{h}{D_0}$	孔片中心 距 (mm)	残余应力 初算值 (N/mm^2)	应变释放系数		钻制应变 修正 (%)	
长	宽							分级 数	A ($\times 10^{-7} \text{mm}^2/\text{N}$)		B ($\times 10^{-7} \text{mm}^2/\text{N}$)
奥 氏 体 不 锈 钢	3×2	120	3.0	3.0	1.0	6.0	≤160	1	-2.42	-2.73	40
							161~250	2	-2.80	-3.64	
							251~350	3	-4.28	-5.82	
							≥350	4	-7.15	-16.20	
	4×2	120	4.0	4.0	1.0	8.0	≤180	1	-2.71	-3.13	60
							181~350	2	-4.22	-5.24	
							351~450	3	-6.00	-12.00	
							≥450	4	-9.00	-19.00	

注：用麻花钻头钻孔时， $h/D_0 = 1.15 \sim 1.20$ 。

B.3.2.2.1 对实测应变 ε_x 、 ε_y ，先用公式 (B.7)、公式 (B.8) 及表 B.1 中与孔径相对应的第一级 A、B 计算，得出残余应力初算值。

B.3.2.2.2 根据初算值在表 B.1 中哪一数值范围，换用与之相对应的 A、B 重新进行计算，第二次计算的结果，即为经过修正的残余应力值。

B.3.2.2.3 残余应力初算值 σ_x 、 σ_y ，其中任一个超过第一级 A、B 应用范围时，均需换用与初算值相应的 A、B 值进行第二次计算，如果两个数值同时超过，则须根据绝对值最大的一个选用与之相对应的 A、B 值进行第二次计算，所得结果即为修正后的实际应力值。

B.3.2.2.4 A、B 分级算法，一般只需进行两次计算，当测量应变中不含塑性应变时，初算值即为真实应力值而不需进行第二次计算。