

# 中华人民共和国国家标准

GB/T 24179—2023

代替 GB/T 24179—2009

## 金属材料 残余应力测定 压痕应变法

Metallic materials—Residual stress determination—  
Indentation strain-gage method

2023-08-06 发布

2024-03-01 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 .....	I
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 符号和说明 .....	1
5 原理 .....	2
6 测量设备和材料 .....	4
7 测量步骤 .....	5
8 应力计算函数的确定 .....	6
9 试验报告 .....	7
附录 A (规范性) 不同测量条件下的应力计算方法 .....	9
附录 B (资料性) 与母材强度不匹配的焊缝应力计算方法 .....	12
附录 C (资料性) 应变函数的数值标定方法 .....	13
参考文献 .....	14

## 前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件代替 GB/T 24179—2009《金属材料 残余应力测定 压痕应变法》，与 GB/T 24179—2009 相比，除结构调整和编辑性改动外，主要技术变化如下：

- a) 将术语“标定系数”更改为“应变函数”(见第 3 章,2009 年版的第 3 章)；
- b) 更改了部分符号和说明(见第 4 章,2009 年版的第 4 章)；
- c) 更改了原理描述(见第 5 章,2009 年版的第 5 章)；
- d) 删除了有关分段线性关系公式(2)说明内容,删除了公式(3)(见 2009 年版的第 5 章)；
- e) 删除了  $60\ \Omega$  应变花电阻值(见 2009 年版的 6.2.1)；
- f) 更改了片基厚度的要求(见 6.2.1,2009 年版的 6.2.1)；
- g) 更改了压头直径上限(见 6.2.3,2009 年版的 6.4.1)；
- h) 删除了规范性引用的 GB/T 230.2(见 2009 年版的 6.4.1)；
- i) 增加了对标定试板热处理消除应力工艺的具体规定(见 8.2.1)；
- j) 明确至少采用 7 个~8 个应力水平进行标定以获得更为精确的应变函数,增加了标定时最大外加应力应小于材料弹性极限而非屈服极限的要求(见 8.3.3,2009 年版的 8.2.3)；
- k) 更改了非主应力方向的标定步骤(见 8.5,2009 年版的 8.4)；
- l) 试验报告中增加了“所用应变计、应变仪、压痕产生设备型号”(见第 9 章,2009 年版的第 9 章)。

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专利的责任。

本文件由中国钢铁工业协会提出。

本文件由全国钢标准化技术委员会(SAC/TC 183)归口。

本文件起草单位：中国科学院金属研究所、东莞材料基因高等理工研究院、哈尔滨锅炉厂有限责任公司、武汉华拓量测科技有限公司、中铝材料应用研究院有限公司、广东火炬检测有限公司、广船国际有限公司、广东省中山市质量计量监督检测所、武汉钢铁有限公司、冶金工业信息标准研究院。

本文件主要起草人：陈静、陈怀宁、李荣锋、王硕、姜云禄、董莉、李淦、牛关梅、黄佳建、宾远红、苏越骁、刘冬、汪选国、宋文涛、申雷、曾志斌、王光培、侯慧宁。

本文件于 2009 年首次发布，本次为第一次修订。

# 金属材料 残余应力测定 压痕应变法

## 1 范围

本文件规定了采用压痕应变法测定金属材料表面残余应力的基本原理、测量设备和材料、测量步骤、应力计算函数的确定和试验报告。

本文件适用于硬度不大于 50 HRC 的各种金属材料表面残余应力的测定。

## 2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；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 231.2 金属材料 布氏硬度试验 第 2 部分：硬度计的检验与校准

JJG 623 电阻应变仪检定规程

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**应变增量 strain increment**

$\Delta\epsilon$

在材料表面产生压痕后，由残余应力场和球形压痕共同诱导的应变变化相互叠加后产生的应变变化（输出）量。

### 3.2

**应变函数 strain calculation function**

应变增量和弹性应变的关系函数。

注：与被测材料、应变花形状、球形压痕大小有关，一般可通过标定试验得到，用于应力计算，也可简称为应力计算函数。

## 4 符号和说明

本文件使用的符号和说明见表 1。

表 1 符号和说明

符号	说明	单位
$A_0$	零应力下的应变增量	—
$A_0 \sim A_3$	应变函数的系数	—
$E$	被测材料的弹性模量	GPa

表 1 符号和说明 (续)

符号	说明	单位
$R_{p0.2}$	被测材料的规定塑性延伸率为 0.2% 时的应力	MPa
$R_{p0.2}^M$	母材的规定塑性延伸率为 0.2% 时的应力	MPa
$R_{p0.2}^W$	焊缝熔敷金属的规定塑性延伸率为 0.2% 时的应力	MPa
$\alpha$	敏感栅 1 的长度方向与主应力 $x$ 方向的夹角	°
$\epsilon_e$	弹性应变	—
$\epsilon_{ex}$	沿 $x$ 方向的弹性应变	—
$\epsilon_{ey}$	沿 $y$ 方向的弹性应变	—
$\epsilon_{t0.2}$	对应于 $R_{p0.2}$ 的应变	—
$\Delta\epsilon$	应变增量	—
$\Delta\epsilon_x$	沿 $x$ 方向的应变增量(沿主应力或平行焊缝方向)	—
$\Delta\epsilon_y$	沿 $y$ 方向的应变增量(沿主应力或垂直焊缝方向)	—
$\eta$	与焊缝材料性质有关的修正系数,取值范围 1~1.1	—
$\sigma_x$	沿 $x$ 方向的应力(沿主应力或平行焊缝方向)	MPa
$\sigma_y$	沿 $y$ 方向的应力(沿主应力或垂直焊缝方向)	MPa
$\sigma_R^M$	采用母材应变函数得到的焊缝应力	MPa
$\sigma_R^W$	修正后的焊缝应力	MPa
$\nu$	被测材料的泊松比	—

## 5 原理

在平面应力场中,由压入球形压痕产生的材料流变会引起受力材料的松弛变形(拉应力区材料缩短,压应力区材料伸长),与此同时,由压痕自身产生的弹塑性区及其周围的应力应变场在残余应力的作用下也要产生相应变化。这两种变形行为的叠加所产生的应变变化量可称之为叠加应变增量(简称应变增量)。利用球形压痕诱导产生的应变增量求解残余应力的方法就叫作压痕应变法。

压痕应变法采用电阻应变计作为测量用的敏感元件,在敏感栅轴线中心点通过机械加载产生一定尺寸的压痕,见图 1,通过应变仪记录应变增量数值,利用事先对所测材料标定得到的弹性应变与应变增量的关系得到残余应变大小,再利用胡克定律求出残余应力。

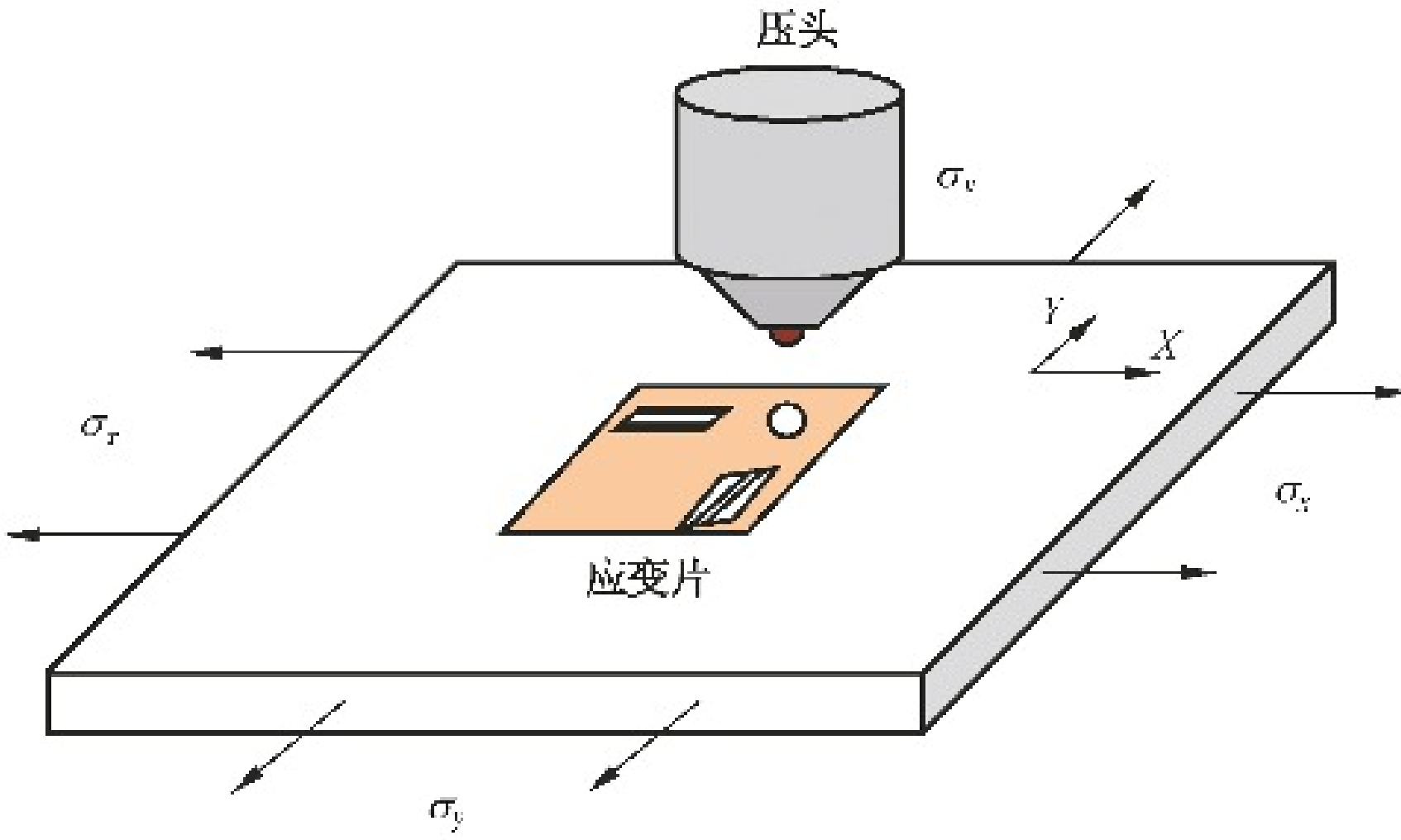


图 1 压痕应变法测量残余应力示意图

研究表明,一定尺寸的球形压痕在残余应力场中产生的应变增量与残余弹性应变之间存在确定的三次方关系(见图 2 所示的拉伸应变区规律,压缩应变区类似),即可将应变增量  $\Delta\epsilon$  与弹性应变  $\epsilon_e$  的关系用公式(1)表示。

$$\Delta\epsilon = A_0 + A_1\epsilon_e + A_2\epsilon_e^2 + A_3\epsilon_e^3 \dots\dots\dots(1)$$

式中:  
 $A_0$  —— 零应力下的应变增量;  
 $A_1, A_2, A_3$  —— 多项式常数,由标定曲线确定。

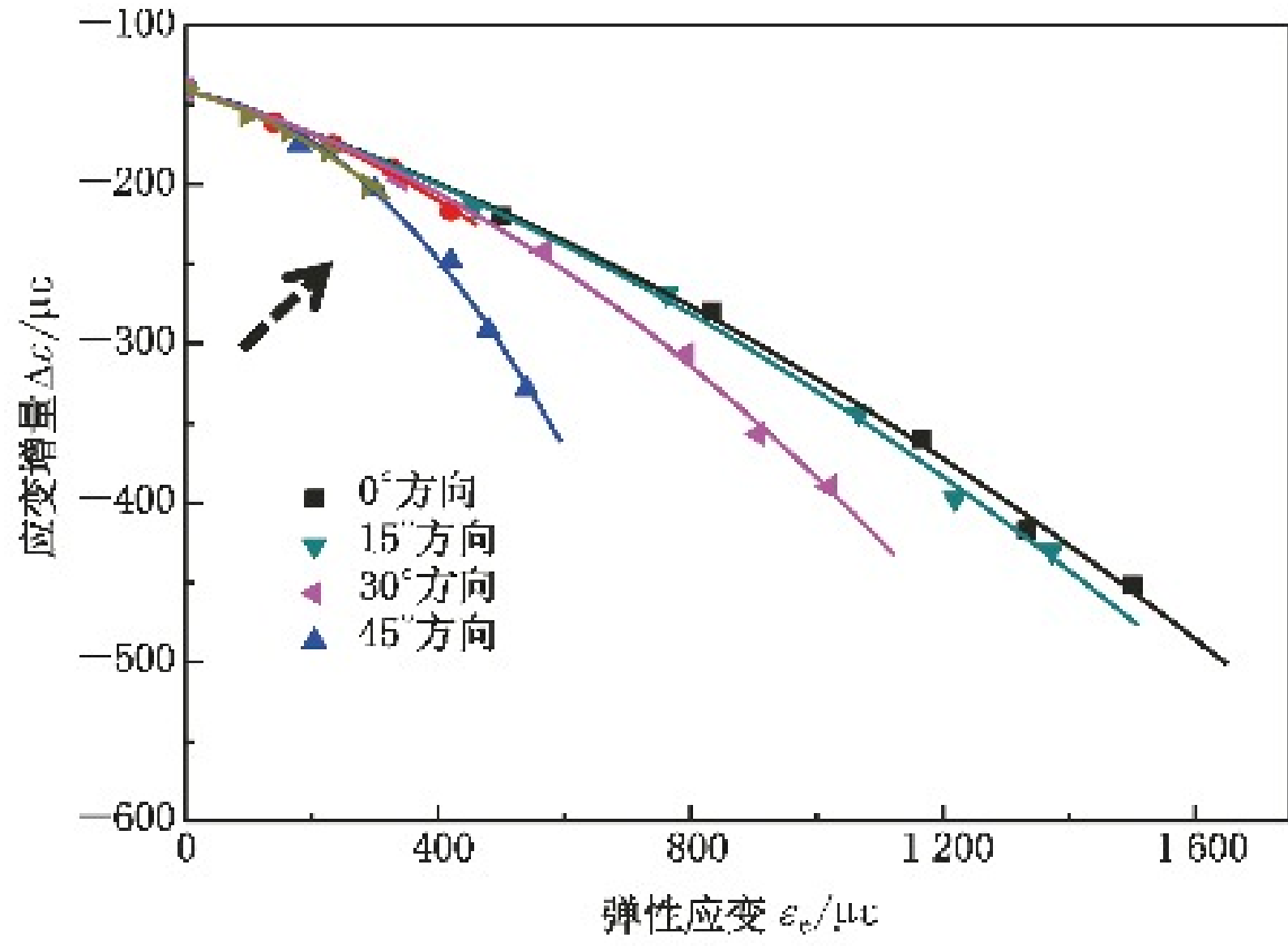


图 2 应变增量与弹性应变之间的关系

当在非主应力方向标定或测量应力时,如果此时主应力大于  $0.3R_{p0.2}$  或夹角大于  $10^\circ$ ,则常数  $A_1 \sim A_3$  要发生变化( $A_0$ 值不变),它是一个与主应力方向夹角  $\alpha$  有关的函数,见图 2,其关系如公式(2)所示,由标定曲线确定:

$$\Delta\epsilon = \frac{a_1 + a_2\epsilon_e + a_3\epsilon_e^2 + a_4\epsilon_e^3 + a_5\alpha}{1 + a_6\epsilon_e + a_7\epsilon_e^2 + a_8\alpha + a_9\alpha^2} \dots\dots\dots(2)$$

式中:  
 $a_1 \sim a_9$  —— 拟合系数;  
 $\alpha$  —— 应力方向与加载方向的夹角,以逆时针转到主应力方向为正,范围  $\pm 45^\circ$ 。

## 6 测量设备和材料

### 6.1 应变记录仪

应变记录仪至少应满足 JJG 623 中的 1.0 级要求。

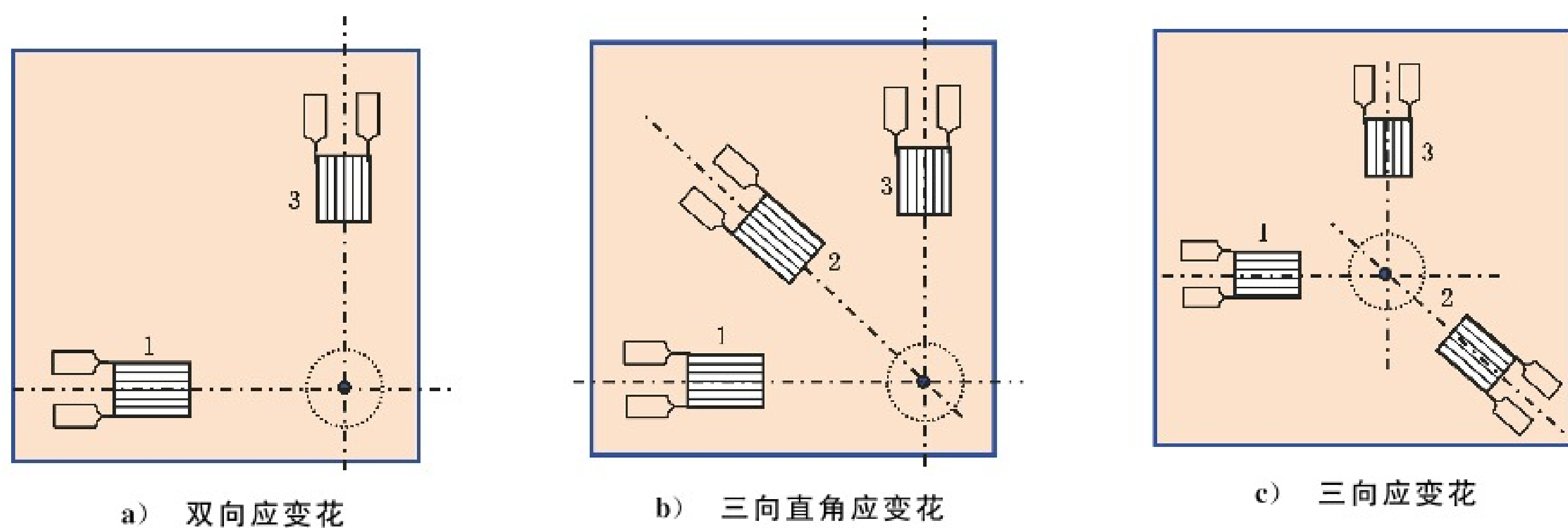
### 6.2 应变计

6.2.1 应选双向或三向直角应变花(见图 3)。应变计电阻值为  $120\ \Omega$ ,片基厚度应不大于  $50\ \mu\text{m}$ 。

6.2.2 为测量的方便性和准确性,所选用的应变计外形尺寸不宜太大,长宽尺寸推荐  $5.0\ \text{mm}\sim 10.0\ \text{mm}$ ;敏感栅尺寸的长宽尺寸为  $1.0\ \text{mm}\sim 2.0\ \text{mm}$ 。

6.2.3 敏感栅端到压痕中心的距离与产生的压痕直径有关。压头直径一般在  $1.0\ \text{mm}\sim 2.0\ \text{mm}$ ,对应的压痕直径在  $0.8\ \text{mm}\sim 1.5\ \text{mm}$ ,敏感栅端到压痕中心距离在  $2.5\ \text{mm}\sim 4.0\ \text{mm}$  较为适宜。

6.2.4 为便于产生压痕,应变花上应刻有敏感栅轴线的交点标记作为压痕中心点。



标引序号说明:

1、2、3——敏感栅。

敏感栅 1 与敏感栅 3 成  $90^\circ$ ,敏感栅 2 与敏感栅 1 成  $45^\circ$  或  $135^\circ$ 。

图 3 压痕应变法测量残余应力用应变花

### 6.3 压痕对中装置

为准确地在应变计敏感栅轴线的交点位置上产生压痕,需要事先通过光学放大镜对中并通过相应装置确保对中精度。建议选用放大倍数 20 倍~40 倍、内置十字刻度线的显微镜。

### 6.4 压痕产生装置

6.4.1 试验应采用硬质合金球形压头,压头直径范围为  $1.0\ \text{mm}\sim 2.0\ \text{mm}$ 。所采用硬质合金压头应符合 GB/T 231.2 中对硬质合金球的要求。

6.4.2 压痕产生可采用静力加载方式,也可采用冲击加载方式。无论采用何种加载方式,为确保测量过程中获得确定的压痕尺寸,应保证测量时所用力量或能量与试验标定时所用的相同。

6.4.3 压痕深度宜控制在  $0.1\ \text{mm}\sim 0.3\ \text{mm}$ 。

## 7 测量步骤

### 7.1 概述

压痕应变法测量残余应力的过程可分为 4 个步骤：被测构件的表面准备、应变计的粘贴、压痕产生和数据处理。

### 7.2 被测构件的表面准备

表面准备是指为了满足粘贴应变计和产生压痕的需要而进行的表面平整过程，一般按以下顺序进行。

- 确定测量位置：测量位置的划定要根据应力分析的要求和被测构件表面附近的空状态来确定。
- 表面粗磨：对焊缝或氧化皮严重的测量位置进行平整处理，打磨时应用力均匀、适当，避免打磨时表面过热变色。
- 表面抛光：对于经过粗磨或原始平整的表面，采用抛光轮进行表面抛光处理，便于粘贴应变计并能减小由于表面粗磨可能造成的附加应力影响。
- 手工打磨：采用 100# ~ 200# 的砂布，对抛光过的表面作进一步手工打磨处理，打磨时可在两个相互垂直的方向上来回进行。通过此步骤可以使应变计粘贴更牢固，也可以进一步减小可能由机械打磨或抛光引入的附加应力。

### 7.3 应变计的粘贴

7.3.1 若已知主应力方向，可以采用双向应变计测量残余应力：将两个垂直敏感栅分别沿主应力方向粘贴，或在测量焊接残余应力时，将敏感栅沿与焊缝平行（X 向）和垂直（Y 向）方向粘贴。否则采用三向应变计。

7.3.2 按应变计使用说明粘贴应变计，建议采用应变计粘贴专用胶水，通过手指挤压的方式保证应变计下方的胶层尽量薄。

7.3.3 待应变计粘贴后 30 min 或更长时间，按图 4 所示的应变计切割线在压痕产生点附近用刀片划断应变计基底。仔细观察应变计，确保粘贴牢固，并且应变计上方无多余胶水。

单位为毫米

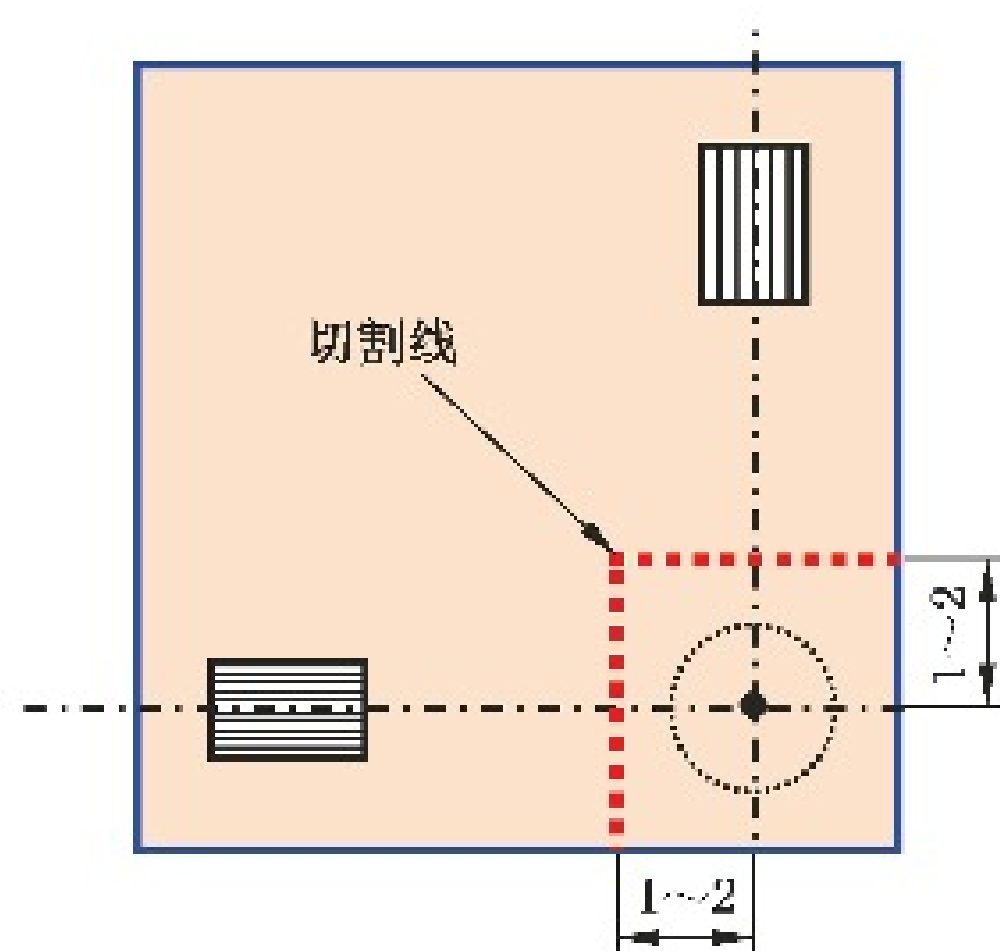


图 4 应变计切割线

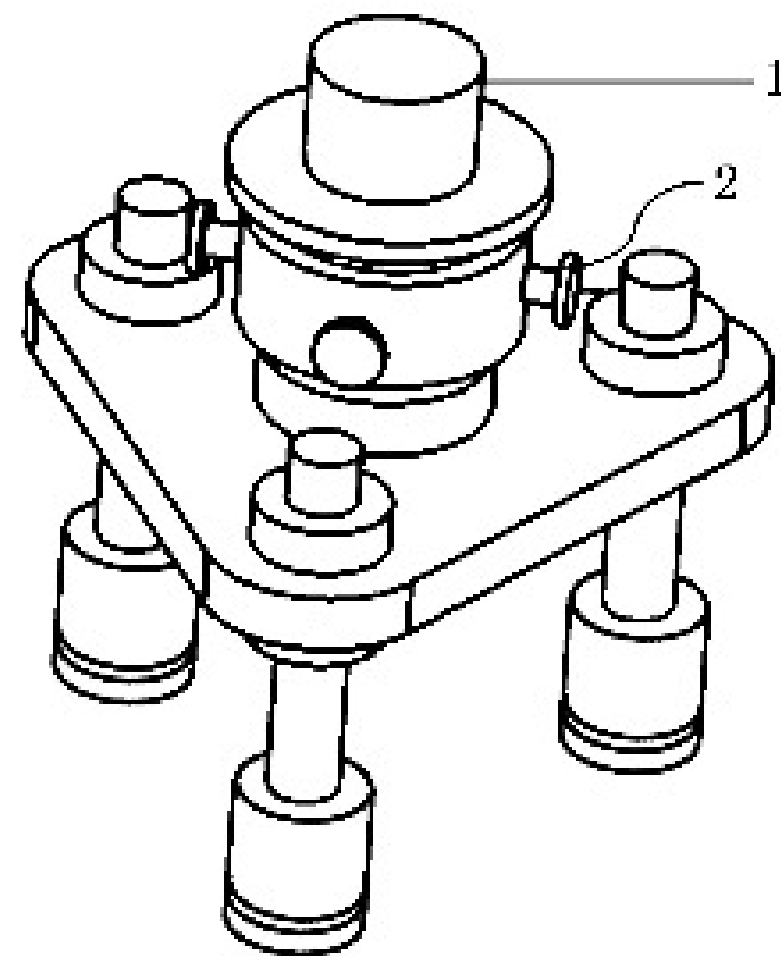
### 7.4 压痕产生

粘贴应变计 1 h ~ 4 h 后，将应变计上的压痕产生点与显微镜中心点调节至重合。压痕的对中偏差



应不大于 0.05 mm。显微镜和压头用对中、导向装置对中调节时可采用与图 5 类似的三爪固定装置辅助完成。

注：粘贴应变计干燥时间与温度有关，环境温度越高，测量工件表面温度越高，粘贴剂达到符合要求强度的干燥时间越短。过短的干燥时间会影响应力传递。



标引序号说明：

1——导向筒；

2——对中微调螺钮。

图 5 显微镜和压头用对中、导向装置示意图

## 7.5 数据处理

7.5.1 记录压痕产生前后的应变差值(应变增量)。

7.5.2 根据公式(1)或公式(2)和图 6 得到相应的弹性应变。

7.5.3 按平面胡克定律计算残余应力,计算方法按照附录 A 的要求执行,误差修正可见附录 B。

## 8 应力计算函数的确定

### 8.1 通则

应力测量前,一般需要根据被测材料通过标定试验确定公式(1)中的系数,非试验的数值标定可参照附录 C。

### 8.2 标定试板

8.2.1 标定用试板应采用与待测结构相同的材料制作,同时标定试板应先经过机械加工再进行消除内应力。采用热处理方法消除内应力时,应采用足够高的温度和时间,确保处理后的试板内含残余应力在±20 MPa 范围内(可采用 X 射线或全释放应变法检测),但同时应避免热处理引起材料性能发生明显变化,例如应保证强度下降不超过 30 MPa 或 10% $R_{p0.2}$ (取数值较小者)。

8.2.2 推荐采用的标定试板尺寸:长 200 mm~500 mm(短长度用于压缩标定),宽 50 mm~100 mm,厚度一般不小于 12 mm。对于厚度小于 6 mm 且大于 2 mm 的薄板,产生压痕时可在试板背面紧贴一块衬板以增加试板刚度。

### 8.3 标定方法

8.3.1 从试板中心部位开始,向两侧粘贴双向应变花,两个应变花的间距应不小于 20 mm。粘贴应变花时的注意事项如 7.3 所述。应变花两个相互垂直的敏感栅方向应与试板的长度(同拉伸方向)和宽度一致。

8.3.2 应变计固化 1 h~4 h 后,在加载设备上首先用  $0.8R_{p0.2}$  的应力水平拉伸试板一次,观察卸载后应变计的应变变化情况,确定粘贴质量。加载方法尽量采用单向拉伸和压缩,条件受限时可以考虑采用三点弯曲的方法,但应注意应变花粘贴位置要避开加载位置的圣维南效应。

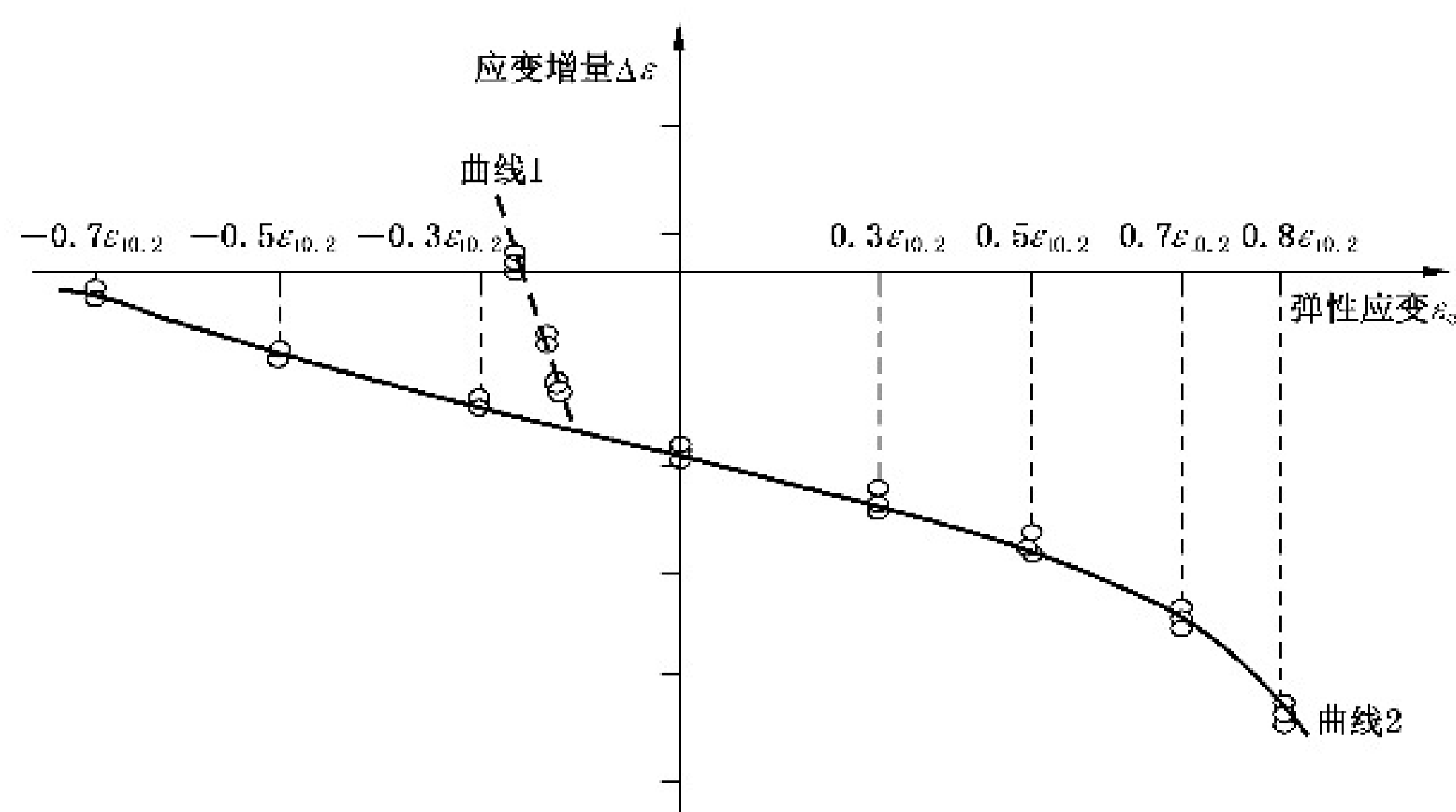
8.3.3 为了拟合出光滑曲线,至少选择 7 个~8 个不同的应力水平进行标定,尤其是拉应力下要有足够的标定点数。建议的标定应力水平为: $-0.7R_{p0.2}$ 、 $-0.5R_{p0.2}$ 、 $-0.3R_{p0.2}$ 、 $0$ 、 $0.3R_{p0.2}$ 、 $0.5R_{p0.2}$ 、 $0.7R_{p0.2}$ 、 $0.8R_{p0.2}$ 。如果各点之间的数值差别有突变,应增加标定点数。无论哪种材料,均应确保最大标定应力不超过材料的弹性极限。

#### 8.4 标定数据的处理

8.4.1 在取得上述不同应力水平下的应变增量数据后,可按照以下方法进行标定数据的处理。

8.4.2 将所得数据绘制成如图 6 所示的标定曲线。

图 6 中横坐标为标定过程中对应于外加应力的弹性应变( $\epsilon_e$ ),纵向坐标为压痕应变增量( $\Delta\epsilon$ ),即在特定压痕制造系统下(固定的压头尺寸和压力),与弹性应变对应的输出应变值。



标引序号说明:

曲线 1—— $\epsilon_e$  和  $\Delta\epsilon$  的关系曲线;

曲线 2—— $\epsilon_{er}$  大于  $0.5\epsilon_{0.2}$  时 Y 向应变增量的修正曲线。

图 6 标定数据的处理

8.4.3 图 6 中虚线是将  $0.5R_{p0.2}$ 、 $0.7R_{p0.2}$  和  $0.8R_{p0.2}$  拉应力下横向应变计的应变增量连线后得到的。此时横向应变计受到外加压缩应变(数值等于  $-\nu\epsilon_e$ ),但输出的应变增量变化规律与直接受压缩时纵向应变计输出的应变增量有所不同。这是在高值拉伸应力情况下,横向应变输出偏离呈直线规律的一种现象,此现象在高值的双向拉伸应力场中同样存在。

#### 8.5 非主应力方向的应力计算函数确定

如果需要确定非主应力方向的应变增量与弹性应变之间的关系,可以采用类似方法进行不同角度方向的标定,即粘贴应变花时将某一敏感栅与拉伸方向成一系列夹角,如  $0^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$  等,然后获得对应角度下一系列类似于公式(2)所表达的应变增量与弹性应变的关系。

## 9 试验报告

试验报告至少应包括如下内容:

- a) 本文件编号；
- b) 所用应变计、应变仪、压痕产生设备型号；
- c) 残余应力测点位置及测量结果；
- d) 测试材料(包括焊缝金属)及状态(是否热处理等)的说明,特别应注明材料的实际塑性延伸强度。

附录 A

(规范性)

不同测量条件下的应力计算方法

A.1 已知主应力方向

在获得应变增量  $\Delta\epsilon_x$ 、 $\Delta\epsilon_y$  后,利用公式(1)求得弹性应变  $\epsilon_{ex}$ 、 $\epsilon_{ey}$ ,然后按公式(A.1)计算残余应力  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ :

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_{ex} + \nu\epsilon_{ey}) \\ \sigma_y &= \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_{ey} + \nu\epsilon_{ex}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (A.1)$$

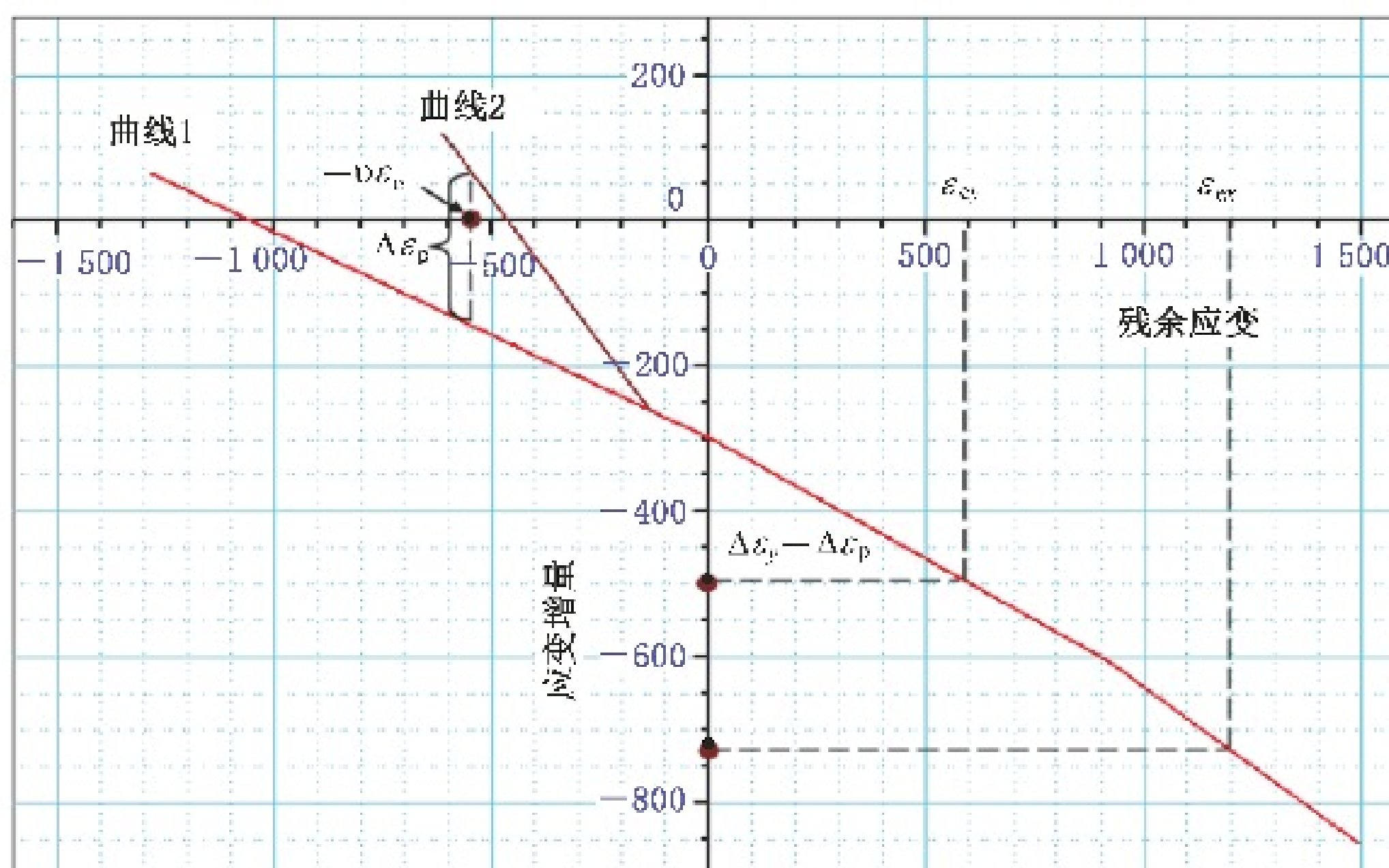
式中:

$E$  ——弹性模量;

$\nu$  ——泊松比。

如果此时计算得到的某方向弹性应变  $\epsilon_e$  大于  $0.5\epsilon_{t0.2}$ ,而另一方向的弹性应变  $\epsilon_e$  小于  $0.5\epsilon_{t0.2}$ ,则需要对小应变方向的应变增量进行修正,按修正后的应变增量重新计算弹性应变<sup>[3]</sup>。具体修正过程如下(见图 A.1,假定此时弹性应变  $\epsilon_{ex}$  大于  $0.5\epsilon_{t0.2}$ ):

- a) 由应变增量  $\Delta\epsilon_x$  得到弹性应变  $\epsilon_{ex}$ ;
- b) 按  $-\nu\epsilon_{ex}$  得到  $\Delta\epsilon_p$ ;
- c) 按  $\Delta\epsilon_y - \Delta\epsilon_p$  (而不是按  $\Delta\epsilon_y$ ) 得到弹性应变  $\epsilon_{ey}$ 。



标引序号说明:

曲线 1—— $\epsilon_e$  和  $\Delta\epsilon$  的关系曲线;

曲线 2—— $\epsilon_{ex}$  大于  $0.5\epsilon_{t0.2}$  时 Y 向应变增量的修正曲线。

图 A.1 X 单向弹性应变大于  $0.5\epsilon_{t0.2}$  时对 Y 向应变增量的修正

A.2 未知主应力方向

在任意方向的应力场中,如果获得的最大拉伸弹性应变小于  $0.3\epsilon_{10.2}$ ,或者已知所贴应变花与主方向的夹角小于  $10^\circ$ ,则仍可采用公式(A.1)的方法进行测量和计算。

若不满足上述条件,要求解主应力或任意方向的应力值,就需要通过三向应变花分别得到应变增量  $\Delta\epsilon_1$ 、 $\Delta\epsilon_2$ 、 $\Delta\epsilon_3$ 。假设采用的  $45^\circ$ 三向直角应变花,获得对应的弹性应变  $\epsilon_{e1}$ 、 $\epsilon_{e2}$ 、 $\epsilon_{e3}$ ,敏感栅 1 或敏感栅 3 与主应力方向的夹角为  $\alpha$ ,则敏感栅 2 为  $(45^\circ - |\alpha|)$ ,由公式(A.2)计算  $\epsilon_{e1}$ 、 $\epsilon_{e2}$ 、 $\epsilon_{e3}$  和  $\alpha$ :

$$\begin{cases} \Delta\epsilon_1 = \frac{a_1 + a_2\epsilon_{e1} + a_3\epsilon_{e1}^2 + a_4\epsilon_{e1}^3 + a_5|\alpha|}{1 + a_6\epsilon_{e1} + a_7\epsilon_{e1}^2 + a_8|\alpha| + a_9\alpha^2} \\ \Delta\epsilon_2 = \frac{a_1 + a_2\epsilon_{e2} + a_3\epsilon_{e2}^2 + a_4\epsilon_{e2}^3 + a_5(45 - |\alpha|)}{1 + a_6\epsilon_{e2} + a_7\epsilon_{e2}^2 + a_8(45 - |\alpha|) + a_9(45 - |\alpha|)^2} \\ \Delta\epsilon_3 = \frac{a_1 + a_2\epsilon_{e3} + a_3\epsilon_{e3}^2 + a_4\epsilon_{e3}^3 + a_5|\alpha|}{1 + a_6\epsilon_{e3} + a_7\epsilon_{e3}^2 + a_8|\alpha| + a_9\alpha^2} \\ \alpha = \frac{1}{2} \times \left( \arctan \frac{2\epsilon_{e2} - \epsilon_{e1} - \epsilon_{e3}}{\epsilon_{e1} - \epsilon_{e3}} \right) \times \frac{180}{\pi} \end{cases} \dots\dots\dots(A.2)$$

获得的弹性应变值若不需要修正,可直接代入公式(A.3)计算出主应力  $\sigma_{11}$  和  $\sigma_{33}$ :

$$\left. \begin{matrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{33} \end{matrix} \right\} = \frac{E(\epsilon_{e1} + \epsilon_{e3})}{2(1-\nu)} \pm \frac{\sqrt{2}E}{2(1+\nu)} \times \sqrt{(\epsilon_{e1} - \epsilon_{e2})^2 + (\epsilon_{e2} - \epsilon_{e3})^2} \dots\dots\dots(A.3)$$

如果弹性应变  $\epsilon_{e1}$  或  $\epsilon_{e3}$  中有大于 50% 的屈服应变而且角度  $|\alpha| < 10^\circ$ ,则在计算残余应力前要对弹性应变进行修正,修正方法同 A.1。

若需直接求解沿敏感栅 1 和敏感栅 3 方向的残余应力,见图 3,则可利用公式(A.4)直接进行计算:

$$\left. \begin{matrix} \sigma_1 = \frac{E}{2(1-\nu)}(\epsilon_{e1} + \epsilon_{e3}) + \frac{E}{\sqrt{2}(1+\nu)} \sqrt{(\epsilon_{e1} - \epsilon_{e2})^2 + (\epsilon_{e2} - \epsilon_{e3})^2} \cos 2\alpha \\ \sigma_3 = \frac{E}{2(1-\nu)}(\epsilon_{e1} + \epsilon_{e3}) - \frac{E}{\sqrt{2}(1+\nu)} \sqrt{(\epsilon_{e1} - \epsilon_{e2})^2 + (\epsilon_{e2} - \epsilon_{e3})^2} \cos 2\alpha \end{matrix} \right\} \dots\dots\dots(A.4)$$

A.3 应力计算示例

对于已知主应力方向的应力计算(以 X 和 Y 方向示意),若 X 方向弹性应变  $\epsilon_{ex}$  大于  $0.5\epsilon_{10.2}$ ,而 Y 方向弹性应变  $\epsilon_{ey}$  小于  $0.5\epsilon_{10.2}$ ,此种情况下需要对 Y 向的应变增量进行修正。

以某一低合金钢 P 材料( $0.5\epsilon_{10.2} = 1\ 380$ ,  $E = 210\ \text{GPa}$ ,  $\nu = 0.28$ )为例,说明应力计算时如何进行修正。P 材料的压痕应变法应变函数见公式(A.5)和公式(A.6),其中  $Y_1$  曲线和  $Y_2$  曲线及相关参量示意可见图 6 和图 A.1 中的曲线 1 和曲线 2:

$Y_1$  曲线:  $\Delta\epsilon = -226 - 0.123\ 2\epsilon_e + 2.104\ 0 \times 10^{-5}\epsilon_e^2 - 2.459\ 3 \times 10^{-8}\epsilon_e^3 \dots\dots\dots(A.5)$

$Y_2$  曲线:  $\Delta\epsilon = -585 - 0.978\ 2\epsilon_e \dots\dots\dots(A.6)$

下面选取两组应变增量数据( $\Delta\epsilon_x$ ,  $\Delta\epsilon_y$ )进行说明应力计算时如何进行修正,其中 A 组(-375, -240),B 组(-726, -49),计算数据见表 A.1。

表 A.1 A 组和 B 组的应力计算

数据组	A 组		B 组	
应变增量 $\Delta\epsilon$	-375	-240	-726	-49
依 $Y_1$ 曲线计算 $\epsilon_e$	1 137	116	2 367	-1 034
是否大于 1 380	否	否	是	否

表 A.1 A 组和 B 组的应力计算 (续)

数据组	A 组		B 组	
$\Delta\epsilon_p$	—	—	—	191
$\Delta\epsilon - \Delta\epsilon_p$	—	—	—	-240
修正后的应变增量 $\Delta\epsilon$	—	—	-726	-240
依 $Y_1$ 曲线计算 $\epsilon_e$	—	—	2 367	116
计算应力 $\sigma/\text{MPa}$	266	99	547	177

附录 B

(资料性)

与母材强度不匹配的焊缝应力计算方法

在保证各种试验技术要求的情况下,测定焊接残余应力时可能带来的误差往往由焊缝和母材的力学性能差异所造成。例如在测定焊缝中的残余应力时,由于标定所用材料一般均是同质母材,但所测焊缝处的材料往往与母材有所区别(主要是塑性延伸强度上的差别)。例如现场采用 CO<sub>2</sub> 气体保护焊来焊接 Q235 钢,若采用 ER49-1 焊丝,则得到的熔敷金属塑性延伸强度和 Q235 母材的塑性延伸强度差别可达到 100 MPa 左右,这样对焊缝的应力计算结果( $\sigma_R^W$ )会产生很大影响。为解决这一问题,可借用与焊缝塑性延伸强度相等或接近材料(强度误差不大于 5% 或 30 MPa)的标定关系进行计算,也可直接采用原母材的标定关系,再利用母材和焊缝塑性延伸强度(分别为  $R_{p0.2}^M$  和  $R_{p0.2}^W$ )之比参照公式(B.1)进行修正(修正前应力为  $\sigma_R^M$ ):

$$\sigma_R^W = \eta \cdot \frac{R_{p0.2}^M}{R_{p0.2}^W} \cdot \sigma_R^M \quad \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

$\eta$ ——与材料性质有关的修正系数,当所测位置的焊缝金属受母材稀释作用较小时可取 1,否则取 1.1。

需要指出,公式(B.1)及其系数  $\eta$  并不是唯一确定的,它与采用的压痕系统和材料有关,用户应根据实际标定曲线的规律进行修正,必要时还需参照有限元计算结果。

## 附录 C

(资料性)

## 应变函数的数值标定方法

目前,应变函数的确定都是采用试验标定的方法获得,试验标定所用试板的应力状态和试板尺寸都有较高的要求,有时可能出现无法提供符合条件的标定试板,标定试验无法完成。虽然采用有限元数值模拟技术,可以实现应变函数的非试验确定,但要掌握有限元模拟技术并能获得准确结果,对于普通技术人员难度较大。

对于合金钢类的材料,研究表明,只要获得待标定材料的力学性能,并能从尺寸较小的无应力材料上得到零应力下的应变增量值,就可以获得应变增量与弹性应变之间的函数关系,虽然这种函数关系与公式(1)形式不同,但可以完全转换成与公式(1)类似的形式。具体实施步骤如下:

- a) 获得待测材料的无应力小块试样,尺寸满足 30 mm×30 mm×5 mm(厚度)即可;
- b) 通过压痕试验获得无应力小块试样的应变增量  $\Delta\epsilon_0$ ;
- c) 通过拉伸试验获得待测材料的力学性能参数,包括屈服比  $R_{p0.2}/R_m$  及屈服应变  $\epsilon_{0.2}$ ;
- d) 将  $x = \epsilon/\epsilon_{0.2}$  及  $y = R_{p0.2}/R_m$  代入公式(C.1)中,得到不同弹性应变下的应变增量:

$$\Delta\epsilon = \frac{1.026 + 0.695x - 1.229x^2 + 0.973x^3 - 1.034\ln y - 0.677\ln^2 y}{1 - 1.309x + 0.544x^2 - 1.391\ln y - 2.513\ln^2 y - 1.942\ln^3 y} \cdot \Delta\epsilon_0 \dots\dots\dots (C.1)$$

- e) 标定过程类似,按图 6 所示的标定曲线计算出不少于 7 种弹性应变条件下的应变增量值,再采用数据处理软件按 3 次方函数形式进行数据拟合,即可得到如公式(1)所示的具体函数形式及相应系数  $A_0 \sim A_3$ 。

需要说明的是,公式(C.1)仅仅适用于低合金钢类材料,其中压头直径为 1.588 mm,应变计型号为 BA(E)120-1BA-ZKY。对于不锈钢、铝合金或钛合金来说,公式可能呈现不同的形式。



参 考 文 献

- [1] GB/T 228.1 金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法
- [2] GB/T 7314 金属材料 室温压缩试验方法
- [3] 刘生,陈怀宁,陈静,等.未知主应力方向的压痕应变法测量及其程序设计[J].压力容器,2013,30(2):36-40.
- [4] 孟宪陆,陈怀宁,林泉洪,等.不同残余应力场中静载压痕周围的塑性区问题[J].兵器材料科学与工程,2007,30(6):50-53.
- [5] 陈静,陈怀宁,黄春玲.三点弯曲标定试验中双向主应变之间的关系[J].兵器材料科学与工程,2008,31(6):37-40.
- [6] 陈亮山,董秀中,潘兴.冲击压痕测定残余应力研究[A].第七次全国焊接学术会议论文集(5)[C],哈尔滨:中国焊接协会,1993:21-24.
- [7] 曲鹏程,陈怀宁,林泉洪,等.屈服强度对压痕应变法测量焊接应力中应变增量的影响[J].机械强度,2007,29(6):904-907.
- [8] 陈静,阚盈,姜云禄,等.压痕应变法应力计算常数的数值模拟[J].焊接学报,2019,40(1):147-150.
- [9] 陈静,阚盈,姜云禄,等.压痕应变法应力计算函数和低合金钢力学性能的关系[J].焊接学报,2019,40(7):133-138.
-