



中华人民共和国国家标准

GB/T 31218—2014

金属材料 残余应力测定 全释放应变法

Metallic materials—Determination of residual stress—
Sectioning relaxation strain-gage method

2014-09-30 发布

2015-05-01 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

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 符号和说明 | 1 |
| 5 原理 | 2 |
| 6 设备和应变计 | 2 |
| 7 测量步骤 | 3 |
| 8 误差分析 | 5 |
| 9 测量报告 | 6 |
| 附录 A (资料性附录) 电阻应变计测量应变方法 | 7 |
| 附录 B (资料性附录) 电阻应变计测量(焊缝)三向残余应力的方法——R-N 切割法及其修正程序 | 9 |
| 参考文献 | 13 |

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由中国钢铁工业协会提出。

本标准由全国钢标准化技术委员会(SAC/TC 183)归口。

本标准起草单位:武汉钢铁(集团)公司、中国科学院金属研究所、深圳万测试验设备有限公司、海军工程大学。

本标准主要起草人:李荣锋、陈怀宁、余立、薛欢、彭文杰、刘冬、祝洪川、安建平、朱利洪、侯海量、汪选国。

金属材料 残余应力测定 全释放应变法

1 范围

本标准规定了采用全释放法测定金属材料表面残余应力的术语和定义、符号和说明、原理、测量设备、测量步骤、试验报告。

本标准适用于各种金属材料一定体积单元内的平均宏观残余应力的测定。

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 13992—2010 金属粘贴式电阻应变计

JJG 623 电阻应变仪

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

释放应变 relaxed strain

$\Delta\epsilon$

在试件被切割后,由于原始残余应力场的释放导致的应变变化量。

4 符号和说明

本标准使用的符号及说明见表 1。

表 1 符号和说明

| 符号 | 说明 | 单位 |
|--------------------|---------------------|-----|
| E | 被测材料的弹性模量 | MPa |
| β | 最大应变与最大主应力的夹角,逆时针为正 | (°) |
| $\Delta\epsilon$ | 释放应变 | — |
| $\Delta\epsilon_1$ | 应变计上应变栅 1 的释放应变 | — |
| $\Delta\epsilon_2$ | 应变计上应变栅 2 的释放应变 | — |
| $\Delta\epsilon_3$ | 应变计上应变栅 3 的释放应变 | — |
| ν | 被测材料的泊松比 | — |
| σ_1 | 沿应变计 1 方向的残余应力 | MPa |

表 1 (续)

| 符号 | 说明 | 单位 |
|------------|----------------------|-----|
| σ_3 | 沿应变计 3 方向的残余应力 | MPa |
| σ_x | 沿 x 方向的残余应力(主应力方向) | MPa |
| σ_y | 沿 y 方向的残余应力(主应力方向) | MPa |

5 原理

在含有残余应力的试件中(如焊接试板),由于材料的整体性经分割切块后,原切割试件中残余应力就要发生变化(所谓的应力释放,见图 1),导致试块的尺寸也要发生相应变化:拉应力区材料缩短,压应力区材料伸长。这种缩短或伸长的变化量可以由长度敏感的测试元件获得,如电阻应变计或机械引伸仪,测得的相对长度变化量就是应变变化,即释放应变。附录 A 介绍了电阻应变计测量应变方法。

释放应变与残余应力的关系始终满足虎克定律,根据一维和二维应力场(由不同类型的应变计获得),采用 7.8 中相应的计算公式即可求出最终的残余应力大小。在附录 B 推荐了三维应力场的测量方法。

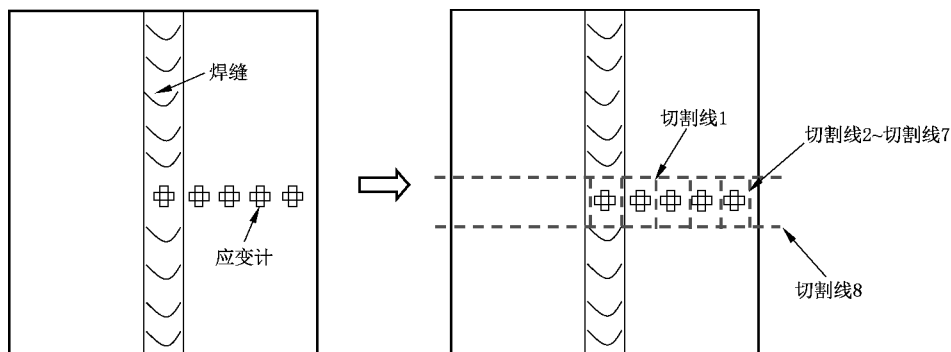


图 1 全释放应变法测量残余应力示意图

6 设备和应变计

6.1 应变记录仪

应变仪至少应满足 JJG 623 中的 1.0 级要求,并经计量部门定期检定。连接应变计和应变仪的导线应尽量短,一般不应超过 10 m。

6.2 应变计

6.2.1 宜选用图 2 所示的单向、双向或三向应变计。图 2c)中敏感栅 1 和敏感栅 3 成 90° ,敏感栅 2 与敏感栅 1 成 45° 或 135° 。常用的应变计为常温箔式应变计(花),电阻值为 120Ω 或 60Ω 。

6.2.2 为了测量的方便性和准确性,所选用的应变计(花)外形基底尺寸不宜太大,长宽尺寸推荐 5 mm ~ 10 mm;敏感栅的长宽尺寸为 1 mm ~ 3 mm。

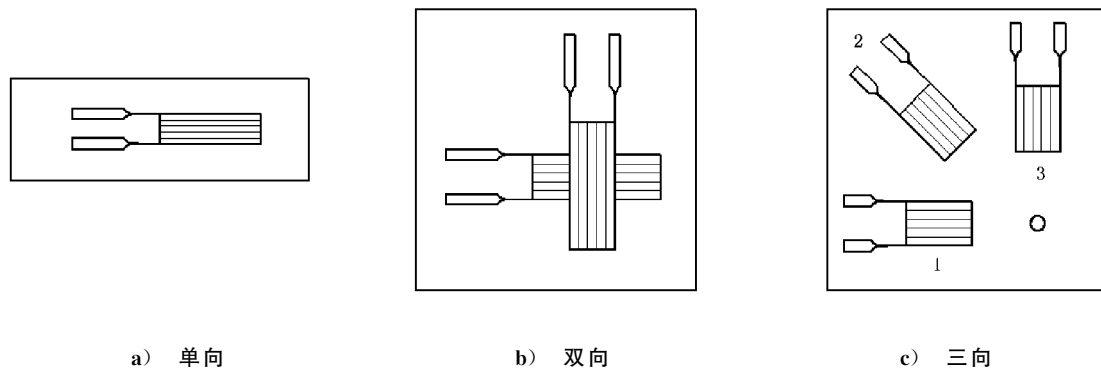


图 2 全释放应变法测量残余应力用应变计示意图

7 测量步骤

7.1 被测构件的表面准备

7.1.1 确定测量位置

测量位置的划定原则是根据应力分布特点和应力分析要求进行,还需考虑被测构件表面附近的实际空间状态。

7.1.2 表面处理

对于不平整的测量表面,如焊缝或氧化皮等,需事先进行适当的磨光处理。采用机械磨削有可能引入新的应力,打磨时要用力均匀、适当、轻柔,避免磨削量过大致使温度过高而产生新的应力。经过粗磨的或原始平整的表面,采用抛光砂布轮进行抛光处理,或直接采用 100#~200# 的砂布(纸),在平整的表面作手工打磨处理,打磨时可在两个相互垂直的方向上来回进行。

7.2 应变计的选用

7.2.1 根据不同的应力场选用相应应变计:单向应力场选用单向应变计,双向应力场选用双向或三向应变计。

7.2.2 如要测量确定方向的平面应力,可直接选用双向应变计,粘贴应变计时应使两个相互垂直的应变栅与所求应力的方向平行;如要测量主应力大小和方向,则应选用三向应变计。

7.3 粘贴应变计

7.3.1 按应变计生产厂家的推荐要求粘贴应变计,构件表面应事先进行彻底的清洗和脱脂。

7.3.2 等待 10 min 或更长时间,沿与应变计表面平行方向缓慢揭起塑料膜,仔细观察应变计,确保粘贴牢固。

7.3.3 应变计自然干燥 1 h 左右,检查应变平衡情况,如果出现读数明显不稳的情况,应查找原因并解决,无法解决的应重新贴片。

7.3.4 如条件容许,可以将工件整体放入烘箱进行 60 °C~70 °C 保温 0.1 h~1 h(取决于板厚)的升温干燥,不能放入烘箱的可采取局部加热保温的办法,使包含应变计的材料经受高温烘烤,避免后期切割加工引起应变计读数飘移。

7.4 应变计防护

7.4.1 应变计经过高温烘烤后进行表面防护。

7.4.2 应变计防护前应将应变栅引出线固定好,防护用的物质可以根据切割时的环境选用石蜡、环氧树脂、硅胶等。

7.4.3 由于需要进行切割,应变计的防护十分重要,目的是避免应变计受潮和碰撞。

7.5 应变初值的读取

应变计防护结束后,进行应变计初始平衡值的读取并记录,经过 1 h~12 h 后可再次读取初值并进行比较。如果 2 次的应变输出值相差较大,如大于 $50 \mu\epsilon$,应间隔相同的时间再次读取。如第 2 次和第 3 次的读数差值仍然大于 $50 \mu\epsilon$,则应重新贴片。

7.6 切割分块

7.6.1 在获得稳定的初始应变读数后,就可以采用必要的方法实行工件或试板的切割分块。

7.6.2 切割的目的是让包含应变计单元的材料与周围分离,因而切割工具可以是各种锯切设备、线切割设备、套孔钻具等。

7.6.3 为避免切割过程中引起包含应变计的材料单元温度升高超过事先烘烤的温度,应在切割过程中注意降温。推荐采用自然降温法,必要时也可采用辅助冷却液,冷却液最好是绝缘体。

7.6.4 切割顺序一般不作规定,但应尽量从利于切割块散热角度出发,先切易于升温的试块。如相关标准无特殊规定,在图 1 中,一般先按切割线 1 进行切割,然后按切割线 2~切割线 7 进行。切割线 8 也可以不进行(实际上此时的应力已经释放),但要保证切割线 2~切割线 7 应该足够深,建议超过应变计栅端 10 mm 以上(见图 3)。

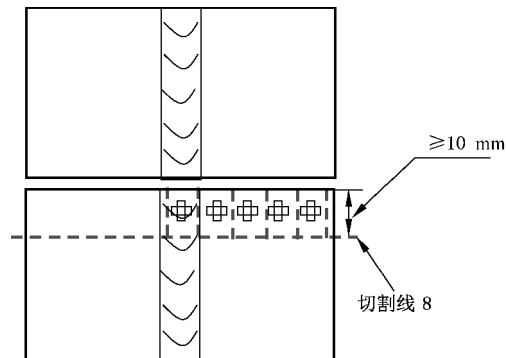


图 3 切割线深度示意图

7.6.5 除非相关产品标准有特殊规定,为了使应力释放完全,理论上切割的试块越小越好。但是过小的试块不仅增加切割难度,同时可能造成应变计升温过高甚至引入切削应变。一般情况下,采用边长为 10 mm~20 mm 的正方形尺寸比较合适。应力梯度越大,切割块应越小,应变栅尺寸的长宽尺寸也应尽量小。

7.6.6 切割一般只在平面内进行。如果厚度方向应力梯度较大,还需要沿厚度方向进行分解。

7.6.7 如果切割不能当天一次完成,建议记录中间数据,作为最终数据之参考。

7.7 释放应变的获取

切割完毕后,待切割试块冷却到室温环境时,读取此时的应变平衡值,用该值减去切割前的初始应变值即可得到释放应变 $\Delta\epsilon$ 。

7.8 数据处理

全释放应变法的残余应力计算采用经典的虎克定律:

采用单向应变计用式(1)计算:

$$\sigma_1 = -E\Delta\epsilon_1 \quad \dots\dots\dots(1)$$

采用双向应变计用式(2)计算:

$$\begin{cases} \sigma_1 = -\frac{E}{1-\nu^2}(\Delta\epsilon_1 + \nu\Delta\epsilon_3) \\ \sigma_3 = -\frac{E}{1-\nu^2}(\Delta\epsilon_3 + \nu\Delta\epsilon_1) \end{cases} \quad \dots\dots\dots(2)$$

采用三向应变计用式(3)计算:

$$\tan 2\beta = \frac{2\Delta\epsilon_2 - \Delta\epsilon_1 - \Delta\epsilon_3}{\Delta\epsilon_1 - \Delta\epsilon_3} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\begin{cases} \sigma_1 = -\frac{E}{1-\nu^2} \left[\frac{1+\nu}{2}(\Delta\epsilon_1 + \Delta\epsilon_3) \pm \frac{1-\nu}{\sqrt{2}} \sqrt{(\Delta\epsilon_1 - \Delta\epsilon_2)^2 + (\Delta\epsilon_2 - \Delta\epsilon_3)^2} \cos 2\beta \right] \\ \sigma_3 = -\frac{E}{1-\nu^2} \left[\frac{1+\nu}{2}(\Delta\epsilon_1 + \Delta\epsilon_3) \pm \frac{1-\nu}{\sqrt{2}} \sqrt{(\Delta\epsilon_1 - \Delta\epsilon_2)^2 + (\Delta\epsilon_2 - \Delta\epsilon_3)^2} \cos 2\beta \right] \end{cases}$$

其中: β 是 σ_1 、 σ_3 中的较大值与最大应力的夹角,逆时针为正,范围 $\pm\pi/4$,单位弧度。

如直接求解主应力,则有:

$$\begin{cases} \sigma_x = -\frac{E}{1-\nu^2} \left[\frac{1+\nu}{2}(\Delta\epsilon_1 + \Delta\epsilon_3) \pm \frac{1-\nu}{\sqrt{2}} \sqrt{(\Delta\epsilon_1 - \Delta\epsilon_2)^2 + (\Delta\epsilon_2 - \Delta\epsilon_3)^2} \right] \\ \sigma_y = -\frac{E}{1-\nu^2} \left[\frac{1+\nu}{2}(\Delta\epsilon_1 + \Delta\epsilon_3) \pm \frac{1-\nu}{\sqrt{2}} \sqrt{(\Delta\epsilon_1 - \Delta\epsilon_2)^2 + (\Delta\epsilon_2 - \Delta\epsilon_3)^2} \right] \end{cases} \quad \dots\dots\dots(4)$$

夹角 β 求解方式同上,意义为 $\Delta\epsilon$ 中的较大值与最大主应力的夹角。

8 误差分析

任何一种残余应力的测量方法均会产生一定的误差。全释放应变法测量残余应力的主要误差来源有以下几个方面:残余应力场的不均匀性、应变计粘贴质量、切割过程的可靠性等。

8.1 残余应力的影响

残余应力场的不均匀性分为平面不均匀性和厚度方向不均匀性,两者均对残余应力测量结果造成影响,影响程度一方面取决于不均匀性的梯度,一方面取决于切割试块的大小。

8.2 应变计粘贴质量

应变计的粘贴应保证胶底整体均匀,同时胶层不能太厚。

8.3 切割过程可靠性

在切割过程中,要保证温升低于应变计烘烤温度,要使切割边缘尽量接近应变计,利于应力完全释放;但又要保证一定的距离,避免切割边的塑性变形和高温造成附加应力。一般推荐的边缘距离为3 mm~5 mm。

9 测量报告

测量报告至少应包括如下内容：

- a) 本标准编号；
- b) 测点位置；
- c) 测试条件说明,包括被测试材料牌号,所采用的应变计等；
- d) 残余应力测量结果。

附录 A

(资料性附录)

电阻应变计测量应变方法

A.1 试验原理

将电阻应变计粘贴在试样表面,通过电阻应变仪测量试样受力变形时所引起的电阻变化,并将其变化量转化为应变值。

A.2 试验仪器

A.2.1 测量用的静态电阻应变仪或动态应变仪应按 JJG 623 进行检验。

A.2.2 电阻应变计应符合 GB/T 13992—2010 中的 A 级要求。

A.3 试样

A.3.1 试样的制备及加工应符合本试验方法标准的规定要求。

A.3.2 弯曲试样应符合相关试验标准或产品的技术要求规定。

A.3.3 试样尺寸应满足应变计的尺寸要求,对于矩形截面试样最小宽度不小于应变计基底宽度+2 mm,对于圆截面试样其平行长度部分直径应不小于 10 mm。

A.4 试验

A.4.1 外观检查应变计,丝栅引线是否牢固,电阻有无明显变化或出现飘移等现象,每个应变栅之间的阻值偏差最好不超过 $\pm 0.1 \Omega$ 。

A.4.2 试样贴片处应进行必要的机械打磨,表面粗糙度 Ra 在 $1.6 \mu\text{m} \sim 2.5 \mu\text{m}$ 为宜。用划针在测点处划出贴片定位线,用浸有丙酮或无水乙醇脱脂棉球将贴片位置及周围擦洗干净,直至棉球洁白为止。

A.4.3 在应变计基底面涂抹一层薄薄的粘结胶,然后将应变计对准试样的贴片标记处,用一小片塑料薄膜盖在应变计上,再用大拇指揞压,从应变计一端开始作无滑动的滚动,将应变计下的多余胶水或气泡排除。

A.4.4 推荐在拉、压试样轴线两侧对称位置各贴一电阻应变计。

A.4.5 已安装完毕的电阻应变计,应进行应变计质量检查,检查是否有断丝现象,阻值是否与原来相同,绝缘电阻是否满足测量要求。

A.4.6 测量导线与应变计引出线连接的焊点要小而牢固,并保证焊点与被测表面的良好绝缘。

A.4.7 导线焊好后,要进行良好的固定。在潮湿和腐蚀环境下,应对应变计及其附近区域均匀涂上保护层。

A.4.8 电阻应变计与应变仪的桥路连接通常采用半桥(见图 A.1)或全桥(见图 A.2)方式连接。

A.4.8.1 半桥接法:将试样两侧各粘贴的沿轴向两电阻应变计(简称工作片)的两端分别接在应变仪的 A、B 接线端上,温度补偿片接到应变仪的 B、C 接线端上。当试样轴向受力时,电阻应变仪即可测得对应试验力下的轴向应变 e_l 。

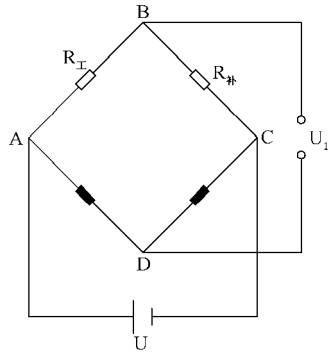


图 A.1 半桥接法

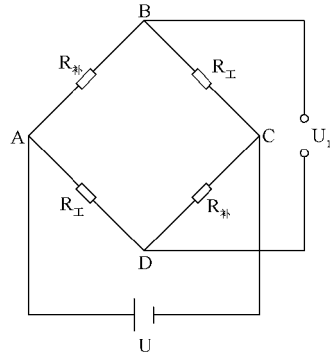


图 A.2 全桥接法

A.4.8.2 全桥接法:把两片轴向的工作片和两片温度补偿片按图示方法接入应变仪的 A、B、C、D 接线端中。当试样轴向受力时,电阻应变仪即可测得对应试验力下的轴向应变 e_l , 因为应变仪显示的应变是两片应变计的应变之和, 所以试样轴向应变应为应变仪所显示值 $e_{仪}$ 的一半, 见式(A.1)。

$$e_l = \frac{1}{2}e_{仪} \quad \dots\dots\dots (A.1)$$

附录 B

(资料性附录)

电阻应变计测量(焊缝)三向残余应力的方法——R-N 切割法及其修正程序

R-N 切割法是三维残余应力测量方法中最常用的一种,最初由美国的 Rostenthal 和 Norton 提出^[1],后由日本神户制钢中心研究所高桥英司等人进一步完善^[2]。该方法原理比较简单,不需要专门设备,由于采用切割解剖的方法,使应力释放比较充分,可靠性好,常用此法验证其他测试方法的精度。

B.1 R-N 切割法程序

采用此法测定三向残余应力时,必须准备两块同样的试板。一块用于沿(焊缝)轴向切取纵向薄片,一块用于沿垂直(焊缝)方向切取横向薄片,如图 B.1 所示。

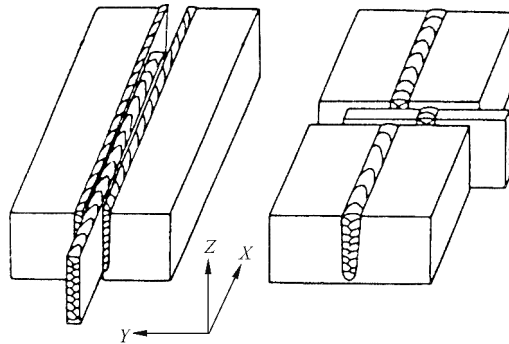


图 B.1 三维残余应力检测中的薄片试样切割

在切割纵向薄片时,在 X-Z 平面上,作用在截面上的 σ_y 、 τ_{xy} 、 τ_{yz} 将得到完全释放。对于切应力 τ_{xy} ,因为它用来满足端部附近在 X 方向上力的平衡,因此在薄板中截面上可认为是零。但是由于 τ_{xy} 的释放引起板条的弯曲,故在板条中心产生了沿焊缝轴向的均匀应力,这样由于 τ_{xy} 释放的结果,在均匀应力场中,沿焊缝方向的应力应变变化就是厚度的线性函数。至于 τ_{yz} ,不论其幅值有多大,对沿焊缝方向的应力应变变化都没有直接影响,因为它只与 Y、Z 轴方向上的应力平衡有关。然而, τ_{yz} 的松弛将会引起 σ_y 、 σ_z 的释放。如果和厚度相比,板条的宽度足够窄,那么 σ_y 会完全释放掉。因此,有必要考虑 τ_{yz} 的松弛引起 σ_z 的变化情况。若薄片的宽度足够窄,可以假定由于作用在截面上的 τ_{yz} 的松弛将会释放掉所有 σ_z ,那么就认为 X 向的应力应变变化是由于 σ_y 、 σ_z 的完全释放引起的。

σ_y 的释放将引起在 X 和 Z 方向数值为 $\nu\sigma_y/E$ 的变形,把在 X、Z 方向上的这个值看作是固有应变,在 X 轴方向的分布是均匀的。按弹性理论,当一个薄板的长度与其厚度相比足够长时(至少是 2 倍以上),如果在其长轴方向给一个均匀的固有应变,那么在长轴方向上产生的应变在其厚度方向上就按线性分布。这样,由于 σ_y 的释放,在 X 轴方向上产生的应变变化在厚度方向上就呈线性变化。

由于 σ_z 的消失引起应变的改变,在 X、Z 方向也必须考虑固有应变,其值分别为 $\nu\sigma_z/E$ 和 $-\sigma_z/E$ 。可以认为,由于 σ_z 的消失在 X 方向上引起的应变变化仅由 X 方向上均匀的固有应变所表示,其值为 $\nu\sigma_z/E$,这样它就成为厚度和由于 σ_y 的释放在 X 方向产生的应变变化的线性函数。

从上述结果就可以得到均匀应力场中由 σ_y 和 σ_z 的释放引起的纵向应力和应变的变化量:

$$\Delta\sigma_{x,1}(Z) = \mu [\sigma_y(Z) + \sigma_z(Z)] - \mu \cdot \int_{-h/2}^{+h/2} [\sigma_y(Z) + \sigma_z(Z)] dZ/h - 3\mu \cdot Z \int_{-h/2}^{+h/2} [\sigma_y(Z) + \sigma_z(Z)] Z dZ/2 (h/2)^3$$

$$\Delta\varepsilon_{x,1}(Z) = \mu \cdot \int_{-h/2}^{+h/2} [\sigma_y(Z) + \sigma_z(Z)] dZ/hE + 3\mu \cdot Z \int_{-h/2}^{+h/2} [\sigma_y(Z) + \sigma_z(Z)] Z dZ/2 (h/2)^3 E$$

.....(B.1)

这里 E, ν 和 h 分别为弹性模量、泊松比和板的厚度。从方程中可以看出,应变变化量 $\Delta\epsilon_{x,1}$ 是厚度的线性函数,而应力变化量 $\Delta\sigma_{x,1}$ 由于 σ_y 和 σ_z 在厚度方向的分布原因,就变得非线性了。

因此,当切割纵向薄片时,在长轴 X 方向上的应力变化呈非线性,而应变变化是线性的。假定 $\Delta\epsilon_{xT}$ 和 $\Delta\epsilon_{xB}$ 分别代表上下表面的应变变化,那么在不同 Z 坐标(深度)上的应力释放值见(式 B.2):

$$\Delta\sigma_x = E [\Delta\epsilon_{xB} + (\Delta\epsilon_{xT} - \Delta\epsilon_{xB})Z/h] + \nu(\sigma_y + \sigma_z) \dots\dots\dots (B.2)$$

在切取横向薄片时,不存在任何均匀的残余应力场。考虑由于切割截面上应力的松弛导致 Y 方向应力的变化情况。作用于该截面上的应力松弛导致了在 Y 方向上的应力应变变化,此时可以按上述纵向薄片上平行于 $Y-Z$ 平面上应力松弛时导致的应力应变变化情况作类似考虑。在这个截面上,应力 τ_{xz}, τ_{xy} 和 σ_x 被释放,若薄片足够窄,可以将 $Y-Z$ 平面看作对称平面,剪应力 τ_{xz}, τ_{xy} 的值就可以忽略。由于 σ_x 的释放,导致在 Y 方向上的应力应变变化与厚度呈非线性关系,这是因为在此情况下,不存在沿 Y 轴方向上的均匀应力场,而且由于 σ_x 的释放引起 σ_z 的变化,不过这个变化经数值分析表明并不明显,可以忽略。所以就可以从切割的横向薄片直接测取厚度方向上的 σ_z 分布。

这样看来,切割横向薄片时产生的应力应变变化 $\Delta\sigma_y$ 和 $\Delta\epsilon_y$ 与厚度呈非线性关系,然而若把 $\Delta\epsilon_y$ 看作厚度的线性函数,纵向残余应力 σ_x 的计算仍可以获得很好的精度。原因就在于 $\Delta\epsilon_y$ 对厚度函数的线性偏差是由残余应力 σ_x 的释放引起的,其值最多是 0.3 倍的 σ_x/E , 该值的 0.3 倍,即 0.09 倍的 σ_x/E 再贡献到 σ_x 的计算中就显得较小了。如此假定 $\Delta\epsilon_y$ 是厚度的线性函数后,就有下面的计算公式(式 B.3):

$$\Delta\sigma_y = E [\Delta\epsilon_{yB} + (\Delta\epsilon_{yT} - \Delta\epsilon_{yB})Z/h] + \nu\sigma_x \dots\dots\dots (B.3)$$

现在剩下的工作就是测取残留在纵向和横向薄片中的残余应力。为了达到这一目的,可继续使用切片法,即将应变计粘贴这些板条的中间截面上,在纵向薄片上水平贴上测取纵向应力的应变计,将测取横向应力和厚度方向应力的应变计按各自方向贴在横向薄片上。假定残留在各自薄片中的应力分别为 σ_{xR} 和 σ_{yR} , 则最终的 X 和 Y 方向的残余应力就由式(B.4)计算:

$$\begin{cases} \sigma_x = \Delta\sigma_x + \sigma_{xR} \\ \sigma_y = \Delta\sigma_y + \sigma_{yR} \end{cases} \dots\dots\dots (B.4)$$

在一般的测量中,需要根据释放应变直接计算最终残余应力大小,同时忽略厚度方向应力 σ_z 的影响(当厚度不是很大时)。为方便使用,以下给出由于两次切割释放得到的上下表面的最终残余应力(σ_{xT}, σ_{yT})和(σ_{xB}, σ_{yB})以及不同厚度方向上的残余应力 σ_{xi}, σ_{yi} 的计算公式式(B.5)、式(B.6)和式(B.7):

$$\begin{cases} \sigma_{xT} = \frac{E}{1-\nu^2} [(\Delta\epsilon_{xT} + \Delta\epsilon_{x0}) + \nu(\Delta\epsilon_{yT} + \Delta\epsilon_{y0})] \\ \sigma_{yT} = \frac{E}{1-\nu^2} [(\Delta\epsilon_{yT} + \Delta\epsilon_{y0}) + \nu(\Delta\epsilon_{xT} + \Delta\epsilon_{x0})] \end{cases} \dots\dots\dots (B.5)$$

$$\begin{cases} \sigma_{xB} = \frac{E}{1-\nu^2} [(\Delta\epsilon_{xB} + \Delta\epsilon_{x0}) + \nu(\Delta\epsilon_{yB} + \Delta\epsilon_{y0})] \\ \sigma_{yB} = \frac{E}{1-\nu^2} [(\Delta\epsilon_{yB} + \Delta\epsilon_{y0}) + \nu(\Delta\epsilon_{xB} + \Delta\epsilon_{x0})] \end{cases} \dots\dots\dots (B.6)$$

$$\begin{cases} \sigma_{xi} = \frac{E}{1-\nu^2} \left\{ \Delta\epsilon_{xi} + (\Delta\epsilon_{xT} - \Delta\epsilon_{xB}) \frac{z}{h} + \nu \left[\Delta\epsilon_{yi} + (\Delta\epsilon_{yT} - \Delta\epsilon_{yB}) \frac{z}{h} \right] \right\} \\ \sigma_{yi} = \frac{E}{1-\nu^2} \left\{ \Delta\epsilon_{yi} + (\Delta\epsilon_{yT} - \Delta\epsilon_{yB}) \frac{z}{h} + \nu \left[\Delta\epsilon_{xi} + (\Delta\epsilon_{xT} - \Delta\epsilon_{xB}) \frac{z}{h} \right] \right\} \end{cases} \quad i = \frac{z}{h}, \dots, h - \frac{z}{h} \dots\dots\dots (B.7)$$

B.2 三向残余应力测定的修正程序

采用 R-N 全释放解剖法测量残余应力时,如果线性和协调条件满足得好,测量的结果就更精确。

如果我们能在切割过程中尽量使内部的应力释放量少,即使应力足够多地留在板内,同时保证试板具有足够的刚度以防弯曲造成附加变形,就可能进一步提高测量的准确程度。

当所测试板的应力梯度较大时,如表面压应力处理的状态(喷丸等),此时如果还采用 R-N 薄片切条法,本质上讲就不可能实现三维残余应力的正确检测。例如当切出纵向薄片时,由于应力 σ_x 、 τ_{xy} 的释放,将导致该薄片的缩短(σ_y 的释放也可能使该薄片产生缩短),缩短的结果与薄片仍然残留的表面层中的压应力叠加,使得薄片产生了超过材料屈服点的压缩塑性变形。由于该变形的不可恢复性,必然影响表面层附近压应力在下一步切割时的有效释放,从而不可能测出正确结果。所以必须对上述方法的测量过程进行修正。另外,测量三维残余应力时如果只采用一块试板就能完成,也可看作对上述方法的改进。

对于表层附近存在着很大的应力梯度的情况,为了使得切片时应力释放尽量小,可采用如图 B.2 所示的单板三维应力检测解剖程序,具有较高的精度。为进一步减少第一次切割时产生的应变释放量,避免可能产生弯曲,还可以采用如下切割解剖方法,如图 B.3 所示。

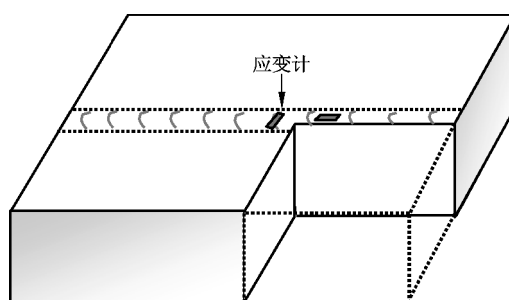


图 B.2 采用单块试板检测三维应力的方法

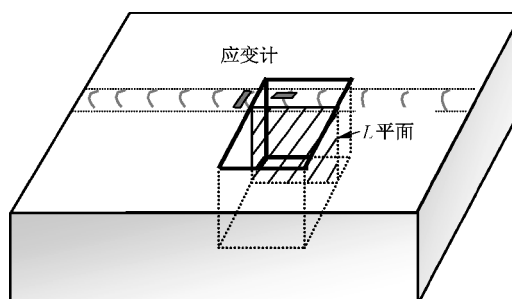


图 B.3 经过修正的单块试板检测三维残余应力的解剖方法

先在试板中心部位切出一个槽,槽的旁边表面事先贴有应变计。在切出的槽与焊缝平行的 L 平面上粘贴纵向沿厚度方向分布的应变计;然后将包含所有纵向应变计的部位切割下来。由于此时将粘贴横向应变计的部位沿厚度方向粘贴的空间暴露出来,可以在厚度方向粘贴横向应变计。最后将包含所有横向应变计的部位切割下来。

考虑到压应力层的深度较浅,在整个截面上所占分量较轻,因而在进行切割释放时,需要格外小心。因为切割边缘如果离应变栅较远,由于压应力释放不充分,表面释放应变受整个截面的影响可能得不到正确结果;但如果离得太近,又有可能破坏应变计,因此可采用分步锯切法,即首次切割要离应变计较近,但必须保证不损伤应变计;再次切割时可尽量靠近应变计,使释放应变更准确,同时小心应变计损坏。

某个带有焊缝的复合板经过表面温差处理后的最终残余应力沿厚度方向分布的结果示于图 B.4 中,图中的虚线是原始焊接残余应力分布的参考曲线^[3]。

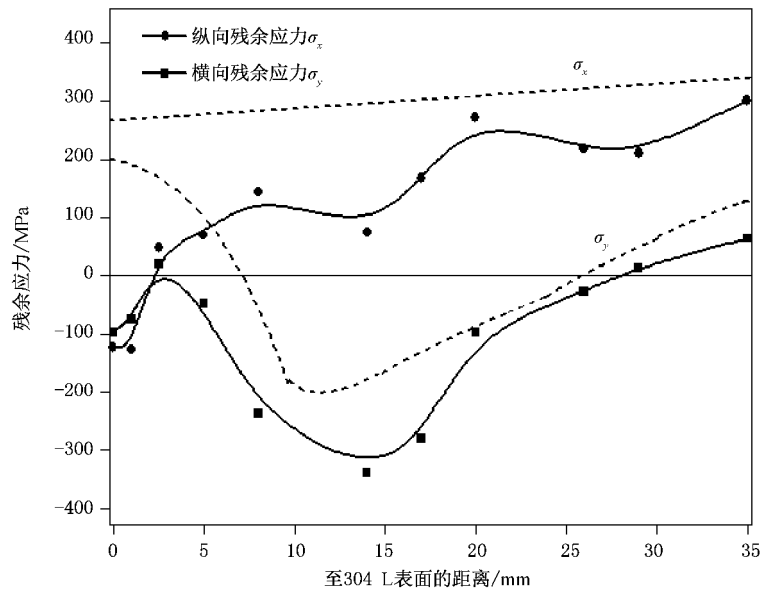


图 B.4 复合板纵向和横向残余应力沿厚度方向的分布

参 考 文 献

- [1] D.Rosenthal and J.T.Notton , A method of measuring triaxial residual stress in plates, *Welding Journal*, 1949, 24(6):296s-307e.
- [2] E.Takahashi, K.Iwai, R.Satoh. A method of measuring triaxial residual stress in heavy section butt weldments. *Trans.of the Japan Welding Society*, 1979, 10(1): 36-45.
- [3] 陈怀宁,林泉洪,陈亮山. 逆焊接加热处理三维残余应力分布及测定方法的研究[J]. *机械强度*, 1999, 21(3):192-196.
-