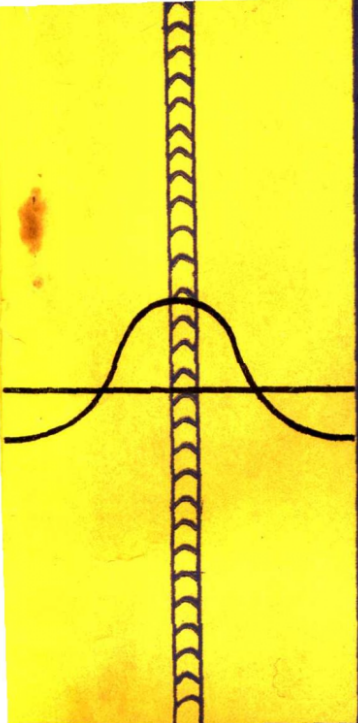


CANYUYINGLICESHI
XIAOKONGSHIFANGFA



残余应力测试

——小孔释放法——

陆才善 著



西安交通大学出版社

残余应力测试

——小孔释放法——

陆才善 著

西安交通大学出版社

内 容 简 介

本书介绍测量残余应力的小孔释放法的已有成就。先介绍基本力学原理，然后循序渐进地介绍二维残余应力的测量，包括薄板通孔、深盲孔与浅盲孔等三种情况，最后为三维残余应力测量。本书内容，主要根据作者多年研究成果，并综合了国内外数十篇论文，说明了哪些问题已经解决，哪些则尚待研究。

本书可供从事与残余应力有关工作的工程技术人员与科研人员阅读使用，也可供大专院校有关专业的教师、研究生与高年级学生学习参考。

残余应力测试 ——小孔释放法——

陆才善 著

责任编辑 路江

*

西安交通大学出版社出版

邮政编码 710049

西安电子科技大学出版社印刷厂印装

陕西省新华书店经售

*

开本 787×1092 1/32 印张 2.875 字数: 58 千字

1991年6月第1版 1991年6月第1次印刷

印数: 1—2000

ISBN7-5605-0373-X/O·65 定价: 1.80 元

序 言

各种制造工艺，如：焊接、铸造、热处理、切削等，以及由于超载，使机械零件、工程结构的构件产生塑性变形，它们都会形成残余应力。所以残余应力是一种普遍存在的应力，与很多行业有关。至于残余应力的存在，是不利因素，是有利因素，还是无关紧要，这是另外一个研究领域。但要研究残余应力的影响，必须要有测试方法，以知道残余应力的应力状态。各种消除残余应力的方法，其效果如何，也必须要测试方法才能判定。在制造机械零件或工程结构之前，要预知残余应力情况，现在可用电子计算机算得，计算结果与实际情况是否相符，也要有测试方法加以验证。

小孔释放法是测试残余应力的一种较为成熟和可靠的方法，是机械法中破坏最少的一种。美国 ASTM 标准 E837-81“用钻孔应变测量决定残余应力的标准方法”的颁布，说明小孔释放法已可实用于工业。

本书有选择地收集了散见于国内外各杂志的几十篇论文，首次整理出系统，循序渐进地介绍小孔释放法，介绍哪些问题已经解决，哪些问题还需继续研究。本书侧重介绍方法中的力学原理部分。至于测试技术部分，除少数专用设备外，并无定规，所以从简。

在介绍力学原理部分时，本书力求把问题的提出、需要的条件及最后的结果交代清楚，尽量避免数学推导，目的是为了读者便于应用。假如需要深入了解，本书列出各个问题的出处。

要求读者必须学过材料力学，主要是应力状态分析部

分。最好能有弹性力学基础知识，主要是 Kirsch 解及叠加法。塑性力学如能大致知道一些，则就更好。实验力学中的电测法，在材料力学实验中已接触过。有限元法计算，则各人情况相差很大，难作要求。

本书最后的附录是供有弹性力学基础知识的读者复习 Kirsch 解用的。

本书希望具有中专毕业以上程度的有关工程技术人员、工科院校有关专业的大学本科及专科学生都能读得懂、用得上。同时对于从事残余应力实测及计算研究的工程科技人员及研究生们也有参考价值。

承陕西机械学院袁发荣教授审阅全书，提出很多宝贵意见，在此表示深切的感谢。

本书的写成与出版，还与家姐夫田积圭和家姐陆才敏的鼓励与资助，以及西安交大出版社的支持是分不开的，也在此致谢。

目 录

序 言	
第一章 绪论	1
第二章 小孔释放法的力学原理	3
§ 2-1 小孔释放在力学效应上等效于反向加载	3
§ 2-2 反向加载的载荷计算	5
§ 2-3 反向加载在平板内引起的应力场	6
(一) 孔型的分类	6
(二) 通孔的 Soctc 解	6
(三) Soctc 解的改进	7
第三章 钻通孔测量薄板的残余应力	10
§ 3-1 小孔的加工技术	10
(一) 喷砂打孔法	11
(二) 极高速钻孔法	11
§ 3-2 用应变花测量残余主应力及主应力方向 ...	15
(一) 用应变花测量残余主应力及主应力方向 ...	15
(二) 贴片点与孔中心之间距离 r 值的取法	19
(三) 设计应变花时 r 值的选择	23
§ 3-3 两孔互不干扰的孔心距	25
§ 3-4 偏心钻孔时残余主应力的误差估计	26
§ 3-5 高残余应力时塑性变形的影响	29
(一) 单向应力状态	30
(二) 二向均匀应力状态	30

(三) 二向一般应力状态	32
§ 3-6 其它测量方法的应用	36
第四章 钻深盲孔测量残余应力	40
§ 4-1 力学原理	40
§ 4-2 沿孔深残余应力非均匀分布	41
(一) 沿孔深残余应力线性分布时 Scaramangas 的研究	42
(二) Kelscy 方法	46
§ 4-3 钻阶梯形孔法测量深层平面残余应力	50
(一) 方法简介	50
(二) 存在的问题	51
(三) 附加应力问题的解决	52
(四) 实验验证	55
(五) 测量技术	57
§ 4-4 高残余应力时孔边塑性变形的影响	59
第五章 钻浅盲孔测量残余应力	62
§ 5-1 释放系数 A , B 的近似简易标定方法	62
(一) 力学原理	62
(二) 实验标定	67
(三) 测试技术中存在的问题	68
§ 5-2 释放系数 A , B 的有限元计算	68
第六章 钻孔法测量三维残余应力	73
§ 6-1 应用广义胡克定律的测量方法	73
§ 6-2 应用三维静力平衡方程式的测量方法	76
结束语	81
附录 Kirsch 解	82

第一章 绪 论

测量残余应力的方法有两大类，即机械法及物理法。机械法以小孔释放法为主；物理法以 x 光衍射法为主。

小孔释放法是在要测残余应力的点上，加工一个小孔，由于孔壁原有残余应力的释放，在孔附近引起线应变，测量线应变便可换算出孔壁原有的残余应力值。

小孔释放法能测量所有已存在的应力，如：加载构件中的工作应力；构件自重引起的自重应力；焊接等制造工艺引起的残余应力等。但以残余应力为主。

工作应力的测量，在实验力学中有很多方法，其中最容易为工程技术人员接受的是电阻应变片法，简称电测法。这种方法的原理是：在未加载到加载完毕的加载过程中，构件中的线应变发生变化，即产生应变增量，电阻应变片是一种转讯器，它将应变增量讯号转换成电讯号，而由电阻应变仪读出。

残余应力测量的困难，在于我们贴电阻应变片时，加载过程已经结束（例如焊接已经完成），所以应变已经不发生变化，没有应变增量，电阻应变片无讯号可转换，电阻应变仪也就无读数可读。

小孔释放法是针对上述困难而提出来的一种方法。它的作用，是人为地制造出一个“加载过程”来。钻孔前，相当加载前；钻孔后，相当加载后，钻孔过程，就是加载过程。有了加载过程，就有应变增量，从而可用电阻应变片进行测

分。最好能有弹性力学基础知识，主要是 Kirsch 解及叠加法。塑性力学如能大致知道一些，则就更好。实验力学中的电测法，在材料力学实验中已接触过。有限元法计算，则各人情况相差很大，难作要求。

本书最后的附录是供有弹性力学基础知识的读者复习 Kirsch 解用的。

本书希望具有中专毕业以上程度的有关工程技术人员、工科院校有关专业的大学本科及专科学生都能读得懂、用得上。同时对于从事残余应力实测及计算研究的工程科技人员及研究生们也有参考价值。

承陕西机械学院袁发荣教授审阅全书，提出很多宝贵意见，在此表示深切的感谢。

本书的写成与出版，还与家姐夫田积圭和家姐陆才敏的鼓励与资助，以及西安交大出版社的支持是分不开的，也在此致谢。

第二章 小孔释放法的力学原理

§ 2-1 小孔释放在力学效应上等效于 反向加载

有残余应力的平板，取直角坐标轴如图 1 所示。忽略不计 z 方向的应力分量 ($\sigma_z, \tau_{xz}, \tau_{yz}$)，在厚为 H 的平板上要测量 A 点的应力分量 ($\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$)，则以 A 点为圆心，加工出一个半径为 a ，深为 h 的小孔，如图 2 所示。加工手段过去常用钻孔方法。小孔释放法是逐点测量，不是全场测量。

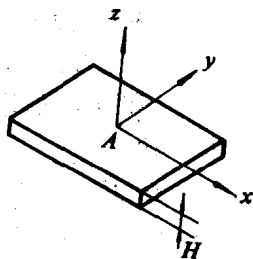


图 1

钻孔后，孔壁的应力释放。

对孔壁应力释放在板中产生的力学效应进行分析：先设想用材料力学中的截面法概念，在板中截出这个小孔来。根据截面法原理，在孔壁上出现极坐标中的应力分量 ($\sigma_r, \tau_{\theta r}$) 如图 3(b) 所示。假设：在小孔区域内应力是均匀的。因为小孔的直径很小，一般为 $1 \sim 2\text{mm}$ ，所以这个假设比较符合实际。由这一假设，可认为孔壁的应力分量即 A 点的应力分量。因为截面法是一种虚拟的方法，所

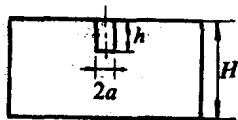


图 2

以在孔壁出现这两个应力分量，并不扰动平板其它各处的应力，即无应力增量，根据胡克定律，当然也无应变增量。

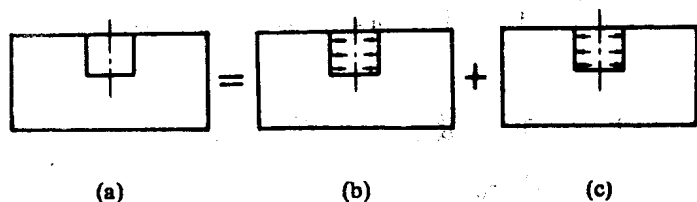


图 3

实际上是钻孔，并非虚拟的截面法，所以孔壁是自由表面，上面并无应力分量 $(\sigma_r, \tau_{\theta r})$ 如图 3(a)所示。假如在孔壁上加反向的应力分量 $(-\sigma_r, -\tau_{\theta r})$ 如图 3(c)所示，则图 3(a)等于图 3(b)和图 3(c)的叠加($\tau_{\theta r}$ 不易在图上表示，所以未画)。

图(c)的 $(-\sigma_r, -\tau_{\theta r})$ 即为小孔释放法人为制造出来的加载，以后称为反向加载。这个载荷对平板其它各处的应力当然有扰动，因此就有应力增量，也有应变增量，于是就能用电阻应变片进行测量。电阻应变片测量所得的应变增量只与反向加载 $(-\sigma_r, -\tau_{\theta r})$ 有关，即只与 A 点的原有残余应力 $(\sigma_r, \tau_{\theta r})$ 有关，而与电阻应变片所贴地方的残余应力无关。这是因为贴电阻应变片时，该处的残余应力早已存在的缘故。

假如 A 点原为两向不等拉(即 $\sigma_1 \neq \sigma_2$)应力状态，钻孔后 A 点的拉应力释放，将使所钻的圆孔变形为椭圆形。这和原来为圆孔，孔壁上反向加载后变为椭圆形完全相同，所以小孔处的应力释放，和反向加载 $(-\sigma_r, -\tau_{\theta r})$ 的力学效应一样。

将应力释放理解为反向加载后，板内有关应力、应变的分析，就是受载的弹性力学或塑性力学的问题了。

§ 2-2 反向加载的载荷计算

假设在孔深 h 内, 主应力 (σ_1, σ_2) 沿孔深均匀分布。若在 A 点取高为 h 的正方柱形单元体, 其俯视投影如图 4(a) 所示。但所钻小孔是圆形的, 所以应取高为 h 的圆柱形单元体才对。正方柱形单元体上的直角坐标中的主应力为 (σ_1, σ_2) , 它与圆柱形单元体上的极坐标中的应力分量 $(\sigma_r, \tau_{\theta r})$ 之间的换算, 可由应力状态分析中的应力圆来完成。

见图 4(a), 在正方柱形单元体上用截面法截出长为 ds 的截面, 这个截面上的极坐标中的应力分量 $(\sigma_r, \tau_{\theta r})$ 可由应力圆计算, 见图 4(b)。可知

$$\sigma_r = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)\cos(2\theta) \quad (1)$$

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

因为圆柱形单元体的圆边界是由 $\theta=0\sim 2\pi$ 的无限多 ds 所组成的, 所以圆柱形单元体圆边界上的极坐标中的应力分量即式(1), (2)。

由于反向加载, 圆孔孔壁上的载荷为

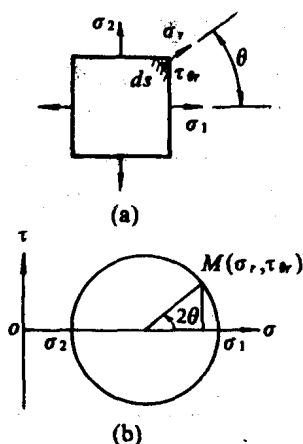


图 4

$$\sigma_r = -\frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) - \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)\cos(2\theta) \quad (3)$$

$$\tau_{\theta r} = -\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)\sin(2\theta) \quad (4)$$

§ 2-3 反向加载在平板内引起的应力场

(一) 孔型的分类

孔型可作下列分类

- (1) 通孔: $h = H$;
- (2) 深盲孔: $h < H$, $h \geq (1 \sim 1.2)(2a)$;
- (3) 浅盲孔: $h < H$, $h < (1 \sim 1.2)(2a)$ 。

式中:

H : 板厚;

h : 小孔深度;

a : 小孔半径。

(二) 通孔的Soctc^[1]解

对可钻通孔的薄板来说, 可以认为孔壁应力沿孔深均匀分布。

Soctc 解还有“孔附近为均匀应力场”的条件。

如图 5 所示, 是从孔周围附近的均匀应力场中用截面法

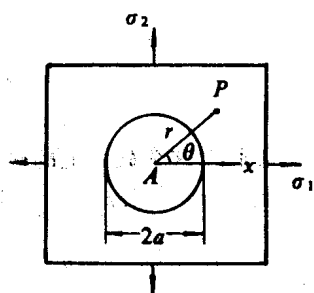


图 5

截出的部分平板。假如这部分平板相对小孔为相当大, 及在这部分平板的边界上作用的 (σ_1, σ_2) 与 A 点的相同, 于是图 5 所示带圆孔的板的应力场为两个 Kirsch 解的叠加 (Kirsch 解见附录, 也可参阅任一本弹性力学书籍)。 P 点的

径向应力分量 σ_r' 为

$$\sigma_r' = \left[\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \frac{a^2}{r^2} \right) + \left(\frac{1}{2} + \frac{3}{2} \frac{a^4}{r^4} - 2 \frac{a^2}{r^2} \right) \cos(2\theta) \right] \sigma_1 + \left[\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{2} \frac{a^2}{r^2} \right) - \left(\frac{1}{2} + \frac{3}{2} \frac{a^4}{r^4} - 2 \frac{a^2}{r^2} \right) \cos(2\theta) \right] \sigma_2 \quad (5)$$

式中: a : 孔半径;

r, θ : P 点的极坐标。

但在未钻孔前, P 点原有的主应力(σ_1, σ_2)用极坐标表示的径向应力分量为

$$\sigma_r'' = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_2) + \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)\cos(2\theta)$$

所以钻孔后 P 点径向应力分量增量(即应力的变化)为

$$\sigma_r = \sigma_r' - \sigma_r'' = \left[-\frac{1}{2} \frac{a^2}{r^2} + \left(\frac{3}{2} \frac{a^4}{r^4} - 2 \frac{a^2}{r^2} \right) \cos(2\theta) \right] \sigma_1 + \left[-\frac{1}{2} \frac{a^2}{r^2} - \left(\frac{3}{2} \frac{a^4}{r^4} - 2 \frac{a^2}{r^2} \right) \cos(2\theta) \right] \sigma_2 \quad (6)$$

式(6)即 Soctc 解。

务请注意: 图 5 的应力场为两个 Kirsch 解的叠加, 原因是板的边界上的载荷为均布的(σ_1, σ_2)。边界上所以有均布的(σ_1, σ_2), 是因为在未钻孔前, 孔附近板中为均匀应力场。由于在 P 点沿径向贴电阻应变片时, 均匀应力 σ_r'' 已经存在, 所以电阻应变片不能反映 P 点原有残余应力 σ_r'' 的信息。电阻应变片只能测出 Soctc 解的应力场, 测不出 Kirsch 解的应力场, 因为电阻应变片对已存在的应力是无能为力的。

(三) Soctc 解的改进

值得指出的是，Soctc 解需要“孔附近为均匀应力场”的条件，而且为了能用 Kirsch 解，这个均匀应力场相对于小孔还要相当大，这在残余应力场中很难找到。据此进行残余应力测量，似乎在理论上存在与适用条件不相符的问题。其实这一问题并不存在。本书作者等^[2]已论证了 Soctc 解并不需要这一条件。介绍如下：

今有存在残余应力的、尺寸相对于小孔为相当大的平板。

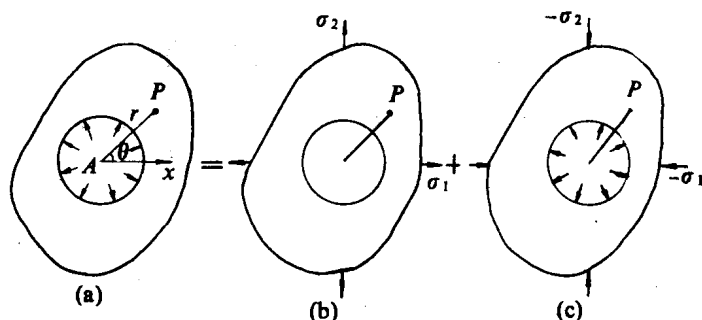


图6

图 6(a)所示为平板钻孔后，以反向加载来代替应力释放 (τ_{θ} 难于表示未画出)。载荷见式(3)，(4)。

图 6(b)为平板中有小孔，孔壁上无载荷，平板边界上的载荷为 A 点的主应力(σ_1 ， σ_2)。

图 6(c)为平板中有小孔，孔壁有如式(3)，(4)所示的载荷(τ_{θ} 未画出)，平板边界上的载荷为($-\sigma_1$ ， $-\sigma_2$)。

显然，图 6(a)等于图 6(b)与图 6(c)叠加。

图 6(b)的应力解为两个 Kirsch 解的叠加，见式(5)。

图 6(c)的平板内为均匀两向压应力场, P 点的主应力即 $(-\sigma_1, -\sigma_2)$, 极坐标中的径向应力分量即式(3).

所以图 6(a)的应力解是式(5)与式(3)叠加, 径向应力分量为

$$\sigma_r = \left[-\frac{1}{2} \frac{a^2}{r^2} + \left(\frac{3}{2} \frac{a^4}{r^4} - 2 \frac{a^2}{r^2} \right) \cos(2\theta) \right] \sigma_1 + \left[-\frac{1}{2} \frac{a^2}{r^2} - \left(\frac{3}{2} \frac{a^4}{r^4} - 2 \frac{a^2}{r^2} \right) \cos(2\theta) \right] \sigma_2$$

这结果和 Soctc 解式(6)完全一样。由此可见在推导过程中并不需要“孔附近为均匀应力场”的条件。

图 6(a)所示 P 点的切向应力分量 σ_θ 同样可由图 6(b)与图 6(c)的叠加而得, 为

$$\sigma_\theta = \left[\frac{1}{2} \frac{a^2}{r^2} - \frac{3}{2} \frac{a^4}{r^4} \cos(2\theta) \right] \sigma_1 + \left[\frac{1}{2} \frac{a^2}{r^2} + \frac{3}{2} \frac{a^4}{r^4} \cos(2\theta) \right] \sigma_2 \quad (7)$$

上述论证说明, 孔附近可以为任意应力场, 均匀应力场是任意应力场中的一个特殊情况, 所以 Soctc 推导的是一个特例。根据现在的改进, 应用 Soctc 解进行残余应力测量, 就不存在与适用条件不符的问题了。对非均匀分布的焊接残余应力完全可以用小孔释放法进行测量。

参考文献

- [1] Soctc, W. and Vancrombrugge, R.: *An Industrial Method for the Determination of Residual Stresses*, Proc. SESA Vol. 8 No.1, 1950
- [2] 陆才善、侯得门: 钻孔法的三个问题, 《西安交通大学学报》, Vol. 19 No. 3, 1985

第三章 钻通孔测量薄板的 残余应力

§ 3-1 小孔的加工技术

用麻花钻或端铣刀加工小孔，由于切削而在孔壁引起塑性变形，以致产生新的残余应力，称为加工应力。加工应力与反向加载所产生的应力(见式(6)，(7))相叠加，使测量所得的应力中包括了加工应力，它所引起的误差可能很大，甚至可导致结果错误。

由加工应力所引起的线应变称加工应变。

Flaman^[1]对普通转速的端铣加工小孔，提供了一些加工应变的数据，见表1。

Flaman认为，这几种材料，由于加工应变太大，因此都不能用普通转速的端铣来加工小孔。要知道，这里应变与应力的联系，并不按胡克定律。以后可知，即使加工应变最小的软钢，只产生 $(-40\mu\epsilon)$ 的加工应变，也相当在孔壁上要加很大的载荷才能引起。但实际上这些加工应变是由加工小孔产生的，并非由残余应力释放所致，假如都

表1 在应力释放试件上3个敏感栅测得的总平均加工应变($\mu\epsilon$)

材 料	加工应变
软 钢	-40
不 锈 钢	-293
镍	-169
铝	-169
纯 铜	-2894