

机械工程实验译文集

(一)

浙江大学机械系工程实验教研室

一九八三年十二月

机 械 工 程 实 验 译 文 集 (一)

(内部交流)

编者：浙江大学机械系工程实验教研室

印刷：浙 江 大 学 印 刷 厂

开本： 787×1092 1/16

总字数： 126千

8.00

序

实验能力的培养是工程技术教学的主要任务之一。我系以往的实验教学，均随有关课程开设，着重于理论教学的验证，难以全面地达到能力培养的目的。近年来，“机械工程实验”独立设课，统筹安排教学内容，情况有所好转。但是实验项目和教学方法，依然受到原有方式的约束，存在不少问题。为此，我们拟陆续选择一些国外著名大学的实验教学资料，以供今后改革的参考。鉴于国情、学制、专业和学校的不同，我们应该按照“洋为中用”的原则，从中吸取可供借鉴之处，促进实验教学的研究。因为现有资料的限制，所选的内容并不理想，希望看到这本译文的同志，能积极提出意见，推荐或提供有关资料，共同搞好这项工作。

目 录

硬度测量.....	(1)
用光弹法测定应力集中系数.....	(11)
厚壁圆筒和薄壁圆筒.....	(16)
金属切削.....	(19)
过程温度控制的精度(1)	
——两位控制和纯比例控制.....	(30)
过程温度控制的精度(2)	
——积分控制和微分控制.....	(37)
机械工程控制实验	
——液压马达的速度控制与稳态响应.....	(43)
空气压缩机试验.....	(47)
消音器特性.....	(52)
齿轮实验.....	(59)
滑动轴承实验.....	(64)
单自由度弹性质量系统的线性阻尼振动.....	(70)
机床进给传动模拟装置.....	(72)
适用于机械工程系学生的模拟实验课.....	(78)

硬度测量实验

一、前言

金属的硬度通常被定义为它抵抗其它物体压入表面的能力。硬度计的压头，在规定载荷下压入试件表面，并保持一定时间，当状态稳定后，通过测量压痕的大小或深度来表示试件的硬度。

测量硬度的方法很多，其中布氏硬度(Brinell)测定法，维氏硬度(Vickers)测定法及洛氏硬度(Rockwell)测定法等三种最常用。

(a)布氏硬度测定法(B.S.*240:Part1:1962)

由直径为 D 的淬硬钢球所构成的压头，在载荷 F 的作用下，压入材料表面，则布氏硬度 HB 的值为：

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad [kgf/mm^2]$$

式中：

F = 作用载荷 $[kgf]$ 或 $[N]$ (牛顿)；

D = 钢球直径 $[mm]$ ；

d = 试件表面压痕的平均直径 $[mm]$ (沿相互垂直的二个方向测量)。

布氏硬度应该取两次测量的平均值。各次测量的误差一般不应超过2%。对于 $D = 10mm$ 和 $D = 5mm$ 的钢球，其直径误差不应超过0.05mm，而对 $D = 2.5mm$ 的钢球，则不应超过0.01mm。

用布氏法测量硬度时，假设载荷卸除后，材料表面仍旧保持一个半径为 $D/2$ 的球形压痕；事实上，由于试验材料的弹性复原，压痕深度是减少的，计算的压痕面积和作用载荷之间的关系并不是常数。当钢球的直径相同时，则硬度值 HB 随着载荷的增加而增加。这种增加的敏感性，随被试验材料硬度的提高而增加。反之，同样大小的作用载荷，则随着钢球直径的增大，硬度值 HB 将减小。

根据上面所讲的关系，可知布氏硬度法所测得的硬度值，随作用载荷和钢球直径的变化而变化，因此，只有当 F/D^2 之比，对应于试验材料给定的一个常数时，所测得的硬度值才能相互比较。这时，压痕角 ϕ 为常数(见图一)。

* B.S.为英国标准的缩写。

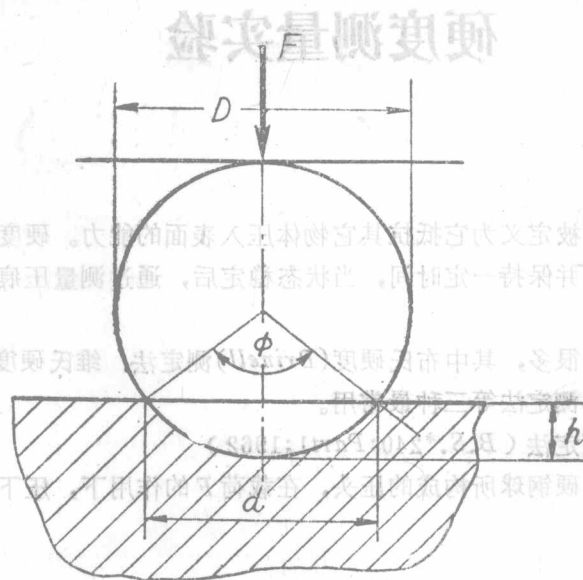


图1 压痕几何图

常用的四个 F/D^2 的标准值如下:

典型试件材料	布氏硬度近似值	F/D^2
钢和铸铁	100以上	30
铜, 铜合金和铝合金	30—200	10
铝	15—100	5

铅, 锡及它们的合金

3—20

这时, 试验所得的压痕直径应在下列范围之内:

$$0.25D < d < 0.6D$$

倘若试件表面的压痕小于上面的参考值, 就应该改用较大的载荷重作试验, 反之, 则应改用较小的载荷重作试验。

(b) 维氏硬度测定法 (B.S. 427: Part I: 1961)

维氏硬度 HV , 是用相对面夹角为 136° 的正四棱锥体的金刚石为压头, 在一定载荷 F 的作用下压入试样表面的。 HV 的计算公式如下:

$$HV = 1.854 \frac{F}{d^2} \quad [kgf/mm^2]$$

式中: F = 作用载荷 $[kgf]$ 或 $[N]$ (牛顿);

d = 压痕二对角线 d_1 和 d_2 的算术平均值 $[mm]$;

压痕的深度按下式确定:

$$h = \frac{d}{7}$$

式中: h 为压痕深度 [mm]。

因为正四棱锥体的压痕保持几何相似, 所以维氏硬度的测量不受作用载荷大小的影响, 试验时负荷可任意选择, 所得的硬度值相同。

根据需用载荷的大小, 维氏硬度可区分为宏观硬度和微观硬度。

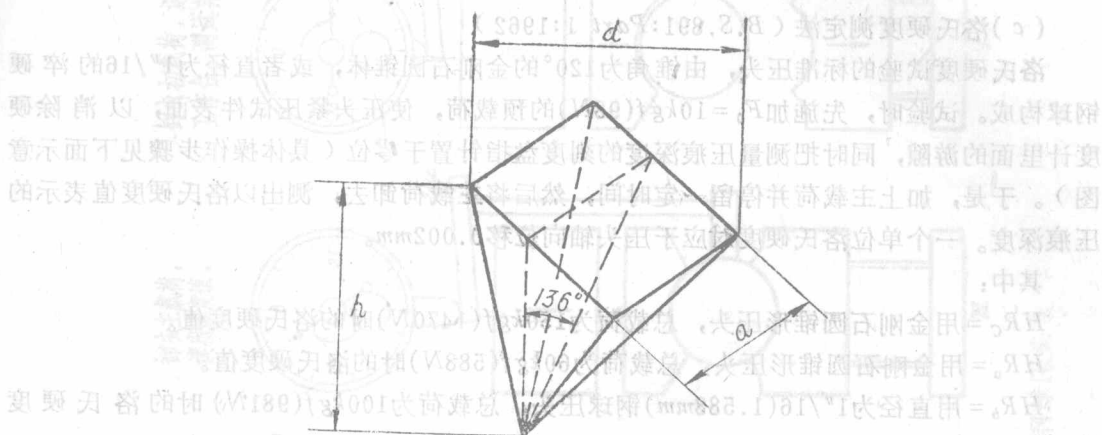


图2 洛氏硬度计压头

宏观维氏硬度

宏观维氏硬度常用的加载重量如下:

$F = 5; 10; 20; 30; 40; 50; 100$ 和 125kgf (对应于 $49; 98; 196; 294; 392; 490; 980$ 和 1226N) *

随着选用加载值的增加, 测量硬度值的精度也随着提高。不过, 为了避免损坏金刚石四棱锥体压头, 一般不推荐选用 $F \geq 50\text{kgf}$ (490N) 的加载值。但是最小加载重量至少要能产生对角长度 $d = 0.1\text{mm}$ 的压痕。

同一压痕两条对角线长度间的误差不能超过 2%, 但对各向异性材料, 可以略大一些。

微观维氏硬度

维氏硬度测量中, 上面列举的从 $5 \sim 125\text{kgf}$ ($49 \sim 1226\text{N}$) 的加载重量, 不适用于由非均质合金制造的结构零件, 也不适用于表面留有粗糙的切削加工刀纹的情况。同样, 对于薄脆的金属也很少采用这样大的加载重量。这时候, 加载的重量不应该超过 1kgf (9.8N), 分档如下:

$5; 10; 20; 50; 100; 200; 500$ 和 1000gf
($0.049; 0.098; 0.196; 0.49; 0.98; 1.96^*; 4.9$ 和 9.8N)

* 原文: (对应于 $49; 98; 196; 294; 396; 490$ 和 1226N)。

应为: (对应于 $49; 98; 196; 294; 392; 490; 980$ 和 1226N) ——译注。

* 原文: 1.86, 应为 1.96 ——译注。

因为得到的压痕很细，所以对角线长度要用专门的光学系统测量（400倍的显微镜）。因为光学系统的分辨率很高，所以所测的对角线误差可以达到 ± 0.2 。但由于对角线长度对硬度的影响是平方关系，所以对于小压痕来说，其硬度误差在 $\pm 4\%$ 范围内。对角线长度大于 $25\mu^*$ 时，所测的硬度值可精确到 $\pm 2\sim 3\%^{**}$ ，当加载重量小于 $10gf$ 时，则加载的误差应该小于 $\pm 1gf(98\pm 9.81\mu N)^{***}$ 。

(c) 洛氏硬度测定法 (B.S.891:Part 1:1962)

洛氏硬度试验的标准压头，由锥角为 120° 的金刚石圆锥体，或者直径为 $1''/16$ 的淬硬钢球构成。试验时，先施加 $F_0 = 10kgf(98N)$ 的预载荷，使压头紧压试件表面，以消除硬度计里面的游隙，同时把测量压痕深度的刻度盘指针置于零位（具体操作步骤见下面示意图）。于是，加上主载荷并停留一定时间，然后将主载荷卸去，测出以洛氏硬度值表示的压痕深度。一个单位洛氏硬度对应于压头轴向位移 $0.002mm$ 。

其中：

HR_C = 用金刚石圆锥形压头，总载荷为 $150kgf(1470N)$ 时的洛氏硬度值。

HR_e = 用金刚石圆锥形压头，总载荷为 $60kgf(588N)$ 时的洛氏硬度值。

HR_b = 用直径为 $1''/16(1.588mm)$ 钢球压头，总载荷为 $100kgf(981N)$ 时的洛氏硬度值。

洛氏硬度值按下列关系确定：

$$(1) \quad HR_C = 100 - \frac{h - h_1}{C} \quad (\text{金刚石圆锥压头})$$

式中：100是硬度计刻度盘的划分的格数，每一格相当于压头压入试件 $0.002mm$ 。

h = 预载荷引起的压入深度

h_1 = 卸除主载荷，消除弹性变形后（预载荷仍保留）的压痕深度

C = 常数($0.002mm$)

$$(2) \quad HR_b = 130 - \frac{h - h_1}{C} \quad (\text{淬硬钢球压头})$$

因为硬度值数字愈大，表示试件硬度愈高；而压痕深度愈深，则表示试件硬度愈低。所以加载时指针的转动方向与刻度盘上所印的读数增加方向相反（即读数顺序沿顺时针方向增加，指针按逆时针方向转动）。

硬度计指示盘上有黑、红两种颜色的刻度（用金刚石锥体压头时由黑色刻度示值，用直径为 $1''/16$ 的钢球压头时由红色刻度示值）。其中，黑色刻度的零位与指针的初始位置重合。而红色刻度的零位在黑色刻度30的地方。偏移红色刻度零位的目的是，使钢球压痕深度允许大于 $0.2mm$ （即可达到 $0.26mm$ ），这里假设钢球压痕深度始终大于 $0.06mm$ 。因此，红色刻度零位的偏移，可以避免测量软金属时出现“负”读数（等效于指针的转动可

* 原文：“…大于25时”，应为“…大于 25μ 时”——译注

**原文：“…精确到 $\pm 2+3\%$ ”，应为“…精确到 $\pm 2\sim 3\%$ ”——译注

*** 原文： $(98\pm 981\mu N)$ ，应为 $(98\pm 9.81\mu N)$ ——译注

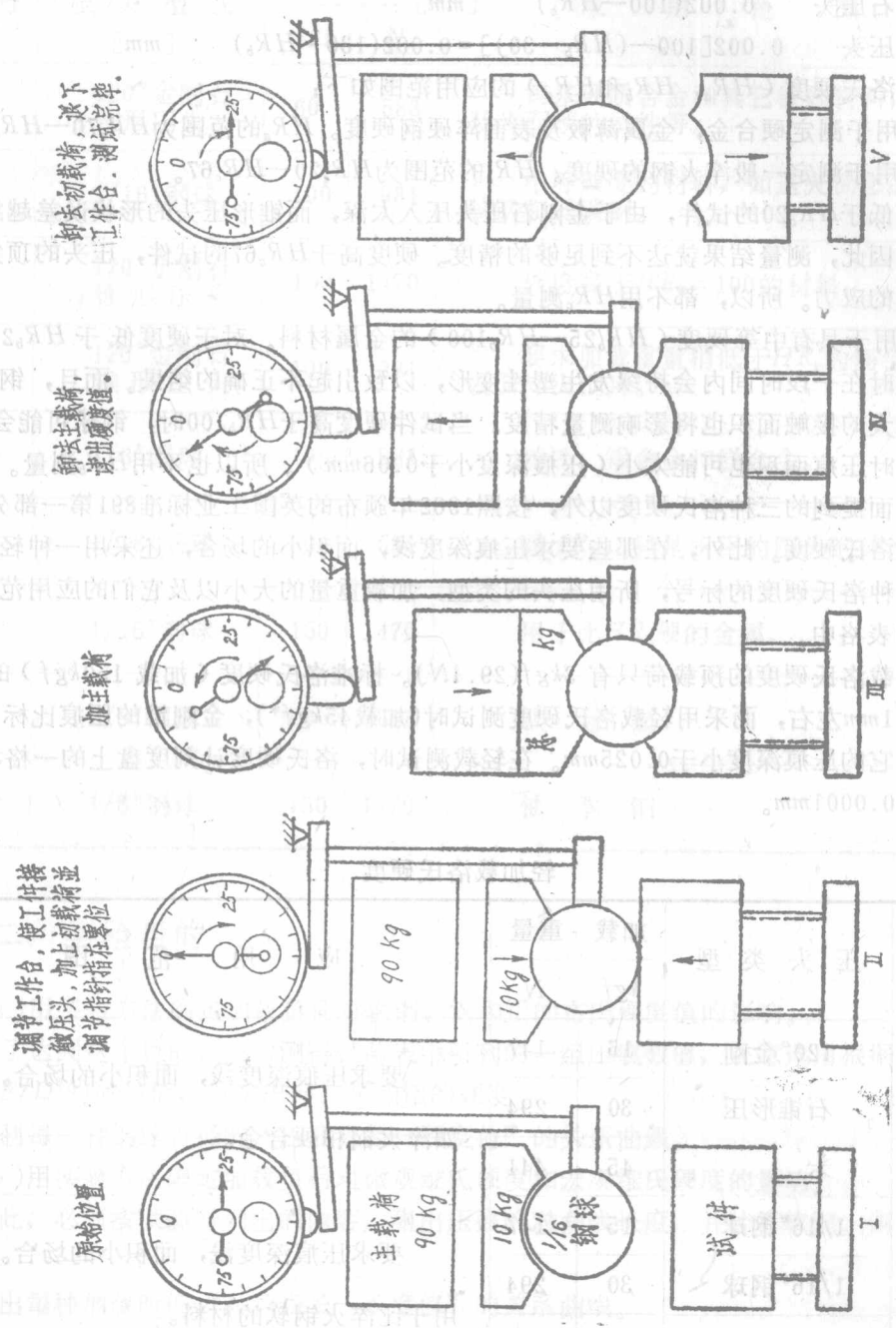


图3 洛氏硬度测试过程示意图 (钢球压头)

以多于100格)。

压痕深度可按下列关系计算:

金刚石压头 $0.002(100-HR_c)$ [mm]

钢球压头 $0.002[100-(HR_b-30)]=0.002(130-HR_b)$ [mm]

三种洛氏硬度 (HR_a , HR_b 和 HR_c) 的应用范围如下:

HR_a 用于测定硬合金, 金属薄板及表面淬硬钢硬度。 HR_a 的范围为 HR_a70-HR_a85 。

HR_c 用于测定一般淬火钢的硬度。 HR_c 的范围为 HR_c20-HR_c67 。

硬度低于 HR_c20 的试件, 由于金刚石压头压入太深, 而锥形压头的形状误差越靠近根部越大, 因此, 测量结果就达不到足够的精度。硬度高于 HR_c67 的试件, 压头的顶尖必须承受过大的应力。所以, 都不用 HR_c 测量。

HR_b 用于具有中等硬度 (HR_b25-HR_b100) 的金属材料。对于硬度低于 HR_b25 的试件, 测试时在一段时间内会持续发生塑性变形, 以致引起不正确的结果。而且, 钢球和试件之间过大的接触面积也将影响测量精度。当试件硬度高于 HR_b100 时, 钢球可能会发生变形, 同时压痕面积也可能太小 (压痕深度小于 $0.06mm$)。所以也不用 HR_b 测量。

除上面提到的三种洛氏硬度以外, 按照1962年颁布的英国工业标准891第一部分, 还有另外几种洛氏硬度。此外, 在那些要求压痕深度浅, 面积小的场合, 还采用一种轻载洛氏硬度。各种洛氏硬度的标号, 所用压头的类型, 加载重量的大小以及它们的应用范围, 列于下面的表格中。

轻加载洛氏硬度的预载荷只有 $3kgf(29.4N)$ 。标准洛氏硬度 (加载 $150kgf$) 的压痕深度达 $0.1mm$ 左右, 而采用轻载洛氏硬度测试时 (加载 $45kgf^*$), 金刚锥的压痕比标准压痕小得多, 它的压痕深度小于 $0.025mm$ 。在轻载测试时, 洛氏硬度计刻度盘上的一格相当于压头移动 $0.0001mm$ 。

轻加载洛氏硬度				
标 号	压 头 类 型	加 载 重 量		应 用 范 围
		kgf	N	
15N	120°金剛 石锥形压 头	15	147	要求压痕深度浅, 面积小的场合。 如淬火钢和硬合金。
30N		30	294	
45N		45	441	
T 15	1/16"钢球	15	147	要求压痕深度浅, 面积小的场合。 用于比淬火钢软的材料。
T 30	1/16"钢球	30	294	
T 45	1/16"钢球	45	441	

* 原文: 加载 $41kgf$, 应为: 加载 $45kgf$ ——译注

标准洛氏硬度

金属材料硬度试验

标 号	压 头 型 式	加 载 重 量		应 用 范 围
		kgf	N	
A	120°金刚石锥形压头	60	588	钨基硬质合金和其它极硬材料，以及薄而硬的试件等。
B	1/16"钢球	100	981	中等硬度的材料，如退火状态的中碳钢和低碳钢。
C	120°金刚石锥形压头	150	1470	硬度高于 $HR_{0.05} = 100$ 的材料。
D	120°金刚石锥形压头	100	981	要求加载重量稍低于 $HR_{0.05}$ 的场合。如表面淬火钢片。
E	1/8"钢球	100	981	铸铁、铝合金和镁合金。
F	1/16"钢球	60	588	同 HR_E ，只是所用的压头钢球为1/16"。
G	1/16"钢球	150	1470	用于比 $HR_{0.05}$ 硬的金属。
H	1/8"钢球	60	588	软 金 属
K	1/8"钢球	150	1470	轴 承 钢

二、实验目的

(a) 用实验方法确定加载负荷对软钢、铜和铝的布氏硬度值的影响。

为了达到这个目的，必须测得试验表中所列的一组压痕数值，注意选用根据该数值计算出的 F/D^2 的适当值，以定出钢、铜和铝的硬度。

绘制每一种钢球直径的“压痕直径—硬度值”的关系曲线。

(b) 用实验方法确定加载负荷对微观维氏硬度和宏观维氏硬度的影响。

为此，必须按试验所列出的内容，测出压痕的对角线长度，并计算软钢、铜和铝的硬度。

绘出每种加载时的“对角线长—硬度值”的关系曲线。

(c) 用实验方法测定工具钢、软钢、钛、铜、铝、镁和锌的洛氏硬度值。注意，按照应用图表，选择适当的洛氏标号，就是选择适当的压头形式和加载组合方案。

不能用钢球压头去测很硬材料的硬度，否则钢球必然要受到损伤。

也不能选用测量硬材料的测试方法去测试软金属，否则压头将压入材料中很深，以致

损坏试件和底座。

(d) 对所得到的各项硬度值进行细致的比较。

三、实验装备及试验材料

(a) 硬度机

(1) “Wolpert” 通用硬度机, 该硬度机上不仅装有蔡司光学系统, 而且还装有和深度测量装置结合使用的调焦屏。这种硬度机可以用布氏, 维氏和洛氏中任何一种硬度测量法进行硬度测试。

用布氏硬度测试法时的加载重量为:

5, 10, 15.625, 31.25, 62.5, 125, 187.5, 250 kgf

对应于: 49, 98, 153, 306, 613*, 1226, 1839, 2452 N

用维氏硬度测试法时的加载重量为:

1, 2, 3, 4, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 125 kgf

对应于 9.8, 19.6, 29.4, 39.2**, 49, 98, 196, 294, 392***, 490, 1226 N

用洛氏硬度测试时的加载重量分别为:

HR_c ——150 kgf (1471 N)

HR_b ——100 kgf (981 N)

HR_a ——60 kgf (588 N)

根据荧光屏上所显示的压痕大小的要求, 光学系统具有如下各种放大率:

140倍, 70倍及20倍。

(2) “Leitz” 微载微观硬度机, 可以用作维氏法和其它方法的硬度测试。压痕的金刚石压头同带有两组显微物镜的能转动的转头相连接, 这两组物镜则可准确地转动以对准压痕位置。一组低倍率的物镜用于选择试样上合适的测压区域; 另一组40倍的高倍率物镜则用来测量压痕的对角线长度。测量时通过具有0.5μ刻度的目镜测微计进行计量。

具备的加载重量为:

15, 25, 50, 100, 200, 300, 500, 1000 gms。

(3) “Avery” 洛氏硬度机只适用于洛氏测试法。具备的加载重量为:

150 kgf, 100 kgf, 60 kgf。

(4) “Avery” 6403型洛氏硬度机, 装备有独立的测量显微镜来测量压痕的尺寸。

备有的加载重量为:

从250 kgf到3000 kgf, 间隔为250 kgf。

(b) 试验材料

准备好经磨削加工的纯铜, 软钢和铝合金试件。测试前, 试样表面应磨到具有0号砂纸得出的光洁度。

* 原文6.3, 应为613 **原文39.6, 应为39.2

*** 原文396, 应为392——译注

四、实验步骤

(1) Wolpert 硬度机

(a) 选定需要的硬度测试类型：先放松复位手柄，然后移动硬度机顶面右方位的选择旋钮，旋转时必须把旋钮向前拉出；

(b) 装好所需要的压头，检查一下是否已准备好适用的物镜，开启灯光；

(c) 按下相应的控制按钮，选好所需要的加载重量；

(d) 用布氏法和维氏法测试时：

把试样放在工作台适当位置上，通过转动手轮升高工作台，直到一个放大的试件表面清楚地出现在调焦屏上为止。

用洛氏法测试时：

把试件置于工作台的适当位置，转动手轮升高工作台，直到压头顶尖与试样接触；而后再升高试样直到刻度盘上的指针转动二转半为止。

(e) 加载压出压痕，求出压痕的对角线或直径的尺寸；

(f) 用已知硬度值的专用试样块校核硬度计的精确度。

(2) Avery 洛氏硬度机

(a) 装上所需要的压头；

(b) 加上适当砝码以选用所需的加载；

(c) 把试件放在工作台的适当位置，升高工作台使压头顶尖与试件接触，同时继续升高试件的位置，直到刻度盘上的指针转动三转为止。然后转动刻度盘的外圈以改变刻度盘的位置，使指针指零；

(d) 放松操作手柄，加载得到压痕；

(e) 卸载读出硬度值；

(f) 用已知硬度的专用试样块校核硬度机的精确度。

(3) Leitz 微载硬度计

(a) 装上所需要的压头；

(b) 在金刚石四棱锥压头上加砝码，以决定所需要的加载；

注意：最小加载量 15gms 就是金刚石压头本身的重量，不必另加任何附加载荷。

(c) 把试件放在工作台上适当位置，选用 40 倍的物镜并聚焦于试件表面；

(d) 转动测试转头，使金刚石压头在试件的上方；

(e) 利用“钢索放松机构”松开压头，使它压在测试表面上，压出压痕；

(f) 加载保持 15 秒钟，然后通过设在转动头另一边的旋钮把金刚石压头从试件上提起；

(g) 测量压痕的对角线长度；

(h) 用标准试样块检查硬度机的精确度。

(4) Avery 布氏硬度测试见使用手册第 8 页。

五、注意事项

实验前必须先熟悉硬度机的性能。首先必须认真阅读使用说明书并了解测试方法,如若还有不明确的地方,可以询问有关指导人员。这种实验设备是很珍贵的,甚至最轻微的损坏,也可能使设备停用几个月。这些不用多说了。

六、参考文献

- [1] Operational Instructions No. MO—56(Pos.10/1)。
- [2] Method for Brinell Hardness Test Part 1: BS.240 Part 1: 1962/MS—57 Pos.10/1。
- [3] Method for Vickers Test Part 1: BS.427 Part 1: 1961/MS—536, Pos.10/1。
- [4] Method for Rockwell Test Part 1: BS.891: Part 1: 1962/MS—535, Pos.10/1。
- [5] General Instructions No.MG—522(Pos.10/1)。

译自 “Undergraduate Laboratories for Department of Mechanical Engineering” University of Manchester and University of Birmingham。

(姚交兴译 阮鹿令校)

用光弹法测定应力集中系数实验

一、前言

如果在机械零件上切一个缺口,或者钻一个孔,那么在缺口或钻孔附近所导致的最大应力,通常要比平均应力或者名义应力大很多。这种在零件局部出现的最大应力与名义应力之比,定义为应力集中系数($s.c.f$)^{*}。它是一个极重要的系数,对于承受交变载荷的机械零件更为重要。在以前,某些重大事故发生的原因,就是因为没有掌握这个应力集中系数的关系。

光弹技术是用实验方法测定应力集中系数独特而又方便的方法。实际上,这种方法正是目前工业设计单位和工业研究单位所一直在广泛应用的光弹技术的一个缩影。现在这个光弹实验,是同一年级修的实验 I、实验 II 密切联系的,所以需要学生把实验 I,实验 II 的指导说明书和实验结果一起带来参考。

要测出应力集中系数,必须先测出试验零件有关点在给定载荷下所出现的光的等差线条纹级数($fringe\ order$)。不过,由于机械加工,受潮等原因,零件可能存在一些残余应力。在这种情况下,必须在加载测定以前判断出这种残余应力的正负符号,以及相应的光线条纹级数。由于残余应力一般不会很大,所以,必须掌握光的非整数条纹级数的测量方法。本实验将应用附录所叙述的光学测量方法。

二、实验装置

光弹实验台,一些试验模型和移动式显微镜。

三、实验步骤

象实验 I 和实验 II 所叙述的那样,应用水银灯单色光源,放置好偏振片及四分之一波片以获得圆偏振光暗场。固定好试验模型,使它便于加载,同时保证放在试验台的中心位置,加一个小载荷以便消除松动。之后,调节显微镜,使它聚焦于模型上,而且显微镜从这一边移到另一边时,它的焦点仍旧落在模型上。

确定出图一或图二中 A, B 两点的残余应力,然后开始逐渐加载,当观察点 A、B 处的条纹出现时,要立刻记清楚条纹数,否则条纹的散乱边纹**可能使条纹级数弄错。加载停止时,所选择的条纹级数要把它保存在单独一组内,如果时间允许,应该取几种载荷的条纹级数。不过模型加载的量级不能超过条纹级数 5,否则模型可能破损。

* $s.c.f$ 为 "stress concentration factors" 的缩写——译注

** 指等倾线的干扰纹——校注

测量图一或图二中 A 、 B 两点的条纹级数（可以用附录所述的方法来测量）。因为加载时可能存在一些弯曲情况，所以这时可以取 A 、 B 两点的平均值，以消除这个弯曲影响，这一点很重要。

四、应力集中系数的计算

(a) 两侧带凹口的矩形条块（图 1）

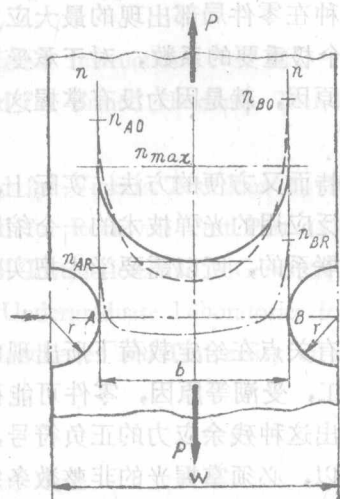


图 1 带凹口矩形条块的应力条纹数分布

$$\sigma_{nominal} = P/bt$$

$$n_{nominal}^* = \sigma_{nominal}/F = P/Fbt$$

假定如图一所示， A 、 B 点的残余应力是拉力（在实验中可能假设不成立），则：

$$n_A = A_{AO} - n_{AR}$$

及 $n_B = n_{BO} - n_{BR}$

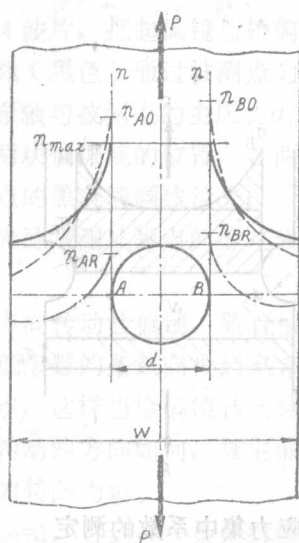
式中：下标 O 表示观察点， R 表示残余应力。
因此：

$$N_{max}(\text{平均}) = \frac{n_A + n_B}{2}$$

及 $S.C.F = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nominal}} = \frac{n_{max}}{n_{nominal}}$

* n 条纹级数， F 材料条级值——校注

(b) 中间带孔的矩形条块 (图 2)



- - - 为载荷下观察到的条纹级数
 ——— 为经校正的条纹级数
 - - - 为残余应力引起的条纹级数
 t 材料厚度

图 2 中间带孔洞矩形条块的应力条纹数分布

这时 $\sigma_{nominal} = P/(W - d)t$, 其余计算方法与带凹口的条块相同。

五、实验结果

求出应力集中系数的值, 如果做了好几次, 得到了足够资料的话, 作出应力集中系数值与 r/b 或者 $d/(W - d)$ 之间的函数关系曲线。把你所得到的结果同任一本参考书中给出的结果进行比较。

六、参考书目

- [1] Photoelastic Analysis——A.W.Hendry
- [2] Photoelasticity, Vols.I and II——M.M.Frocht
- [3] Design by Photoelasticity——R.B.Heywood
- [4] Engineering Design——J.H.Faupel
- [5] Stress Concentration Design Factors——R.E.Peterson