

金属切削应力光测技术

张维纪 著

9
2

浙江科学技术出版社

金属切削应力光测技术

张维纪 编著

浙江科学技术出版社

(浙)新登字第3号

责任编辑:曾勇新

封面设计:曹霞

金属切削应力光测技术

张维纪 编著

*

浙江科学技术出版社出版

浙江新华印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

浙江省上虞科技外文印刷厂排版

开本: 787×1032 1/32 印张: 2.625 字数: 55,000

1993年2月 第一版

1993年3月 第一次印刷

印数: 1—1,001

ISBN 7-5341-0475-0/TG·4

定 价: 2.50 元

前 言

对金属切削过程的研究,是金属切削基本理论研究的一个根本问题。随着科技事业的迅速发展,要求更加深入地掌握金属切削过程的规律,以便创造出更为先进的切削方法和高效率的刀具,达到最佳的经济效益。

金属切削过程中,在切削力的作用下,刀具和工件内部产生了很大的应力。刀具的应力分布状态,影响着刀具的变形、磨损、破损、断裂等;工件内部应力的分布状态,关系到工件的表面硬化、残余应力等表面层材质的变化。

由于切削过程的复杂性,在进行切削应力的理论计算时,常需作一些假设及理想化,而且必须在建立正确的数学模型的前提下,运用实验方法来验证才能得出正确的结果。有时计算中的许多参数也要靠实验来确定,尤其是对三维(斜角)切削,靠理论解析方法来求解是十分困难的,甚至无法实现。但如能利用光弹性实验应力分析来进行切削过程的应力计算,则可不受任何限制而能得到满意的结果。光弹性实验应力分析是一种光学的应力测量方法,直观性强,可以直接观察和获得刀具或工件模型内部的应力分布情况。

因此,对金属切削中的刀具进行光弹性实验应力分析仍然是金属切削过程基础理论研究的重要内容之一。近几年来,随着光塑理论的进一步完善和新型光塑材料的出现,还为对工件变形区进行光塑性实验应力分析创造了条件。

本书主要介绍光弹性实验应力分析在金属切削研究中的应用,汇集了作者近几年来在这方面的研究成果。内容包括:对金属切削进行光弹性实验应力分析所用的特殊实验装置;根据光弹性实验中所获得的等差线、等倾线求一般二维(直角)切削中刀具的应力分布;利用光弹性的冻结切片法求三维(斜角)切削中刀具流屑剖面内前刀面上的应力分布;工件变形区的光塑性应力分析等。考虑到为使不是从事于光弹性实验应力分析的读者能较方便地掌握这方面的内容,书中还就光弹性实验应力分析方法的基本原理、平面光弹性应力计算以及三维光弹性的冻结切片法等作了简要的综述。

编 者

1991年9月

目 录

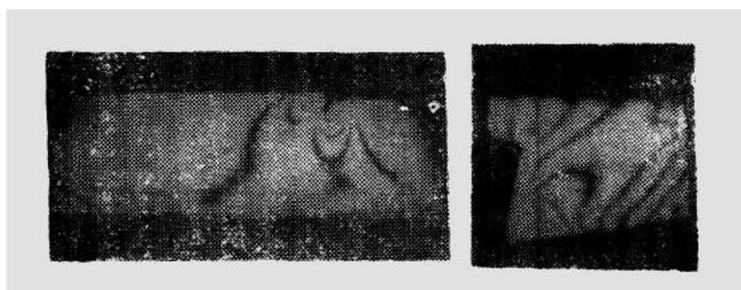
一、光弹性实验应力分析的基本原理	1
(一) 光学基本知识	2
1. 光波	2
2. 自然光和平面偏振光	3
3. 双折射	4
4. 圆偏振光, $1/4$ 波片	5
(二) 光弹性仪的基本结构及调整	7
1. 光弹性仪的基本结构	7
2. 光弹性仪的调整	8
(三) 平面应力—光学定律	9
(四) 平面偏振布置中受力模型的光弹性效应	10
1. 光场分析	11
2. 等倾线、等差线的形成	12
(五) 圆偏振布置中受力模型的光弹性效应	15
1. 暗场光效应分析	15
2. 亮场光效应分析	17
二、等差线和等倾线	19
(一) 等差线的观测及其级数的确定	19
1. 白光入射时的等差线(等色线)	19
2. 等差线条纹级数的确定	21

(二)等倾线绘制和主应力判别	23
1. 等倾线的特征	23
2. 等倾线的测绘	25
3. 主应力 σ_1 或 σ_2 的判别	27
4. 主应力迹线与最大剪应力迹线	27
(三)应力条纹的冻结	29
三、平面光弹性应力计算	32
(一)材料条纹值 f_0 的测定	32
(二)模型任意截面上应力的计算	33
1. 剪应力的计算	33
2. 正应力 σ_x 的计算	34
3. σ_y 的计算	36
4. 应力计算步骤	37
(三)模型应力换算为原型应力的公式	39
四、切削机构—光弹性仪装置	41
(一)切削机构—光弹性仪装置	41
(二)二维(直角)切削过程的模拟	43
(三)三维(斜角)切削模型的冻结	45
五、刀具模型应力计算	47
(一)二维(直角)自由切削	47
1. 刀具模型切削受力时的应力条纹	47
2. 刀具模型应力计算	49
(二)三维(斜角)自由切削	53
1. 斜角切削变形机理	54
2. 斜角切削刀具模型应力条纹的冻结及切片	56

3. 流屑剖面应力计算	58
六、工件变形区的光塑性实验应力分析	64
(一) 光塑性实验基础	64
1. 光塑性模型材料必须满足的条件	64
2. 光塑性的应力—光学定律	66
3. 其他	66
(二) 二维(直角)切削刃前区的光塑性应力条纹 分析	67
1. 应力条纹图	67
2. 工件模型塑性区的确定	68
3. 工件模型塑性区应力场的观察分析	69
附录 实验指导书	71
实验(一) 二维切削刀具的光弹性实验应力分析	71
实验(二) 三维切削刀具光弹性冻结切片法实验应力 分析	72
参考资料	75

一、光弹性实验应力分析的基本原理

光弹性实验应力分析是一种光学的应力测量方法，它采用具有双折射性能的透明塑料，如环氧树脂、聚碳酸酯等制成与试件形状几何相似的模型，使模型受力情况与试件的载荷相似，将受力后的塑料模型置于偏振光场中可获得干涉条纹，如图1-1所示。这些条纹指示了模型边界和内部各点的应力情况，依照光弹性原理，即可算出模型各点应力的大小和方向，真实试件上的应力可根据模型相似理论换算求得。



(a) 工件模型; (b) 刀具模型

图 1-1 受力模型在偏振光场中的干涉条纹

利用这种方法进行金属切削过程的应力分析，不仅能准确地解决二维(直角)切削中的问题，而且利用光弹性的冻结切片法，还可以有效地解决三维(斜角)切削中的问题。它能较迅速地获得模型内各截面的应力分布，能准确地测定切屑与刀具的接触负载等。

(一) 光学基本知识

1. 光波

对于光弹性实验中呈现的光学现象，一般用光的波动理论来解释，即认为光是一种电磁波，它的振动方向垂直其传播方向，是一种横波，如图 1-2 所示，光以正弦波表达为

$$E = a \sin(\omega t + \phi_0) \quad (1-1)$$

式中 E ——光矢量；

a ——振幅；

ω ——圆频率；

t ——时间；

ϕ_0 ——初相位。

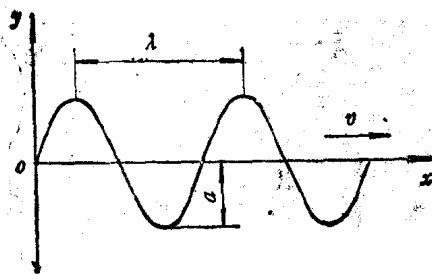


图 1-2 光波

当 $\phi_0 = 0$ 时，它具有最简单的形式

$$E = a \sin \omega t \quad (1-2)$$

如以光程表达，则为

$$E = a \sin \frac{2\pi}{\lambda} vt \quad (1-3)$$

式中 λ ——波长，用埃 ($\text{\AA}$) 来度量， $1 \text{\AA} = 10^{-8} \text{ cm}$ ；

v ——光波传播速度,在不同介质中其值不同。

2. 自然光和平面偏振光

(1) 自然光〔图 1-3(a)〕

如太阳光、白炽光,它们所发出的光波是由无数个互不相干的波组成的,在垂直于光波传播方向的平面内,这些波的振动方向可取任何可能的振动方向,没有一个方向较其他方向更占优势。即在所有可能的方向上,振幅都是相等的。

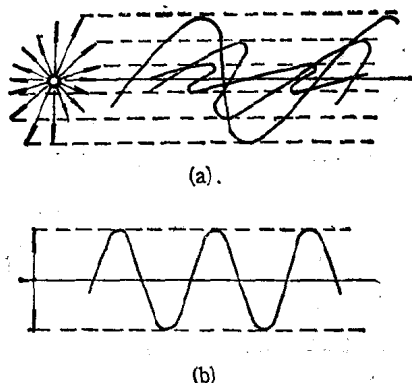


图 1-3 自然光和平面偏振光

(a) 自然光; (b) 平面偏振光

(2) 平面偏振光〔图 1-3(b)〕

光波在其传播方向仅单一地在一个平面内振动。它可通过某种器件的反射、折射或吸收,仅让自然光中某一振动方向的分量射出而获得。如图 1-4 所示。当自然光射入以聚乙烯醇为主的人造二色性晶体薄片后,即分解为两束振动方向互相垂直的平面偏振光,晶体对它们的吸收能力差别很大,有一束被完全吸收,另一束射出即为单一的平面偏振光。此晶体薄片称偏振片。

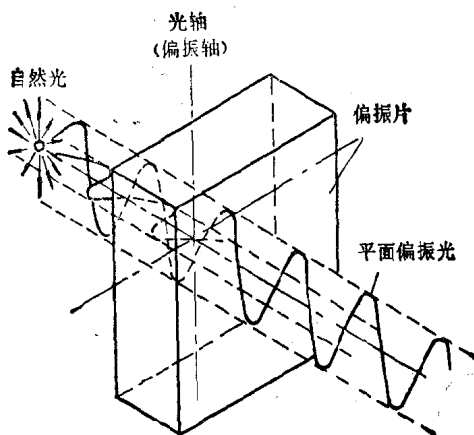


图 1-4 平面偏振光的产生

3. 双折射

对于光学各向同性的介质,光学性质在所有方向上均相同,即只有一个折射率,入射时仅产生一束折射光线。但当入射到各向异性的晶体上时,如方解石、云母等,一般会分解成两束折射光线,如图 1-5 所示,这种情况称双折射。这两束光线在晶体内传播速度不同。遵守折射定律的叫寻常光 o , 不遵守折射定律的叫非常光 e 。 o 光和 e 光可以认为是互相垂直平面内的平面偏振光。这种晶体有一个特定方向,当光沿此方向入射时不发生双折射,这个特定方向称为晶体光轴。二色性晶体产生偏振光也是一种双折射现象,只不过一束被吸收,一束从晶体射出。天然各向异性晶体产生的双折射现象,是其固有的特性,称永久双折射。有些各向同性的透明非晶体材料,如环

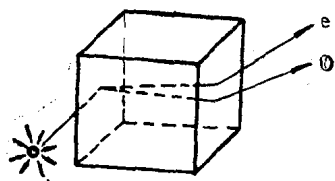


图 1-5 双折射现象

面偏振光。这种晶体有一个特定方向,当光沿此方向入射时不发生双折射,这个特定方向称为晶体光轴。二色性晶体产生偏振光也是一种双折射现象,只不过一束被吸收,一束从

晶体射出。天然各向异性晶体产生的双折射现象,是其固有的特性,称永久双折射。有些各向同性的透明非晶体材料,如环

氧树脂、聚碳酸酯等塑性材料,在其自然状态时,不会产生双折射现象,但当受有载荷作用时,它就同晶体一样,呈现光学各向异性,产生双折射现象,而且光轴方向与应力方向重合。当一束光线垂直入射到受力的塑料模型时,光将沿着主应力 σ_1 和 σ_2 方向分解成两束平面偏振光,其振动方向互相垂直,且传播速度不同,当载荷卸去后,双折射现象也即消失,这种现象称暂时(或人工)双折射。

4. 圆偏振光、1/4 波片

从一块双折射晶体上,平行其光轴方向切出一薄片,将一束平面偏振光垂直入射其上,即被分解为两束振动方向互相垂直的平面偏振光,其中一束比另一束更快地通过晶体,以相差一个相位差 ϕ 射出,它们的传播方向一致,频率相等,而振幅可以不等,如 a_1 、 a_2 ,可分别表达为

$$E_1 = a_1 \sin \omega t \quad (1-4)$$

$$E_2 = a_2 \sin(\omega t + \phi) \quad (1-5)$$

将式(1-4)、式(1-5)合成,并消去时间 t ,即得到光路上一点的合成矢量末端的运动轨迹方程式为

$$\frac{E_1^2}{a_1^2} + \frac{E_2^2}{a_2^2} - \frac{2 E_1 E_2}{a_1 a_2} \cos \phi = \sin^2 \phi \quad (1-6)$$

这是一个椭圆方程,当 $a_1 = a_2 = a$, $\phi = \pm \frac{\pi}{2}$ 则成为圆的方程

$$E_1^2 + E_2^2 = a^2 \quad (1-7)$$

即凡光路上任一点合成矢量末端轨迹符合此方程的偏振光称为圆偏振光,在光路上,合成光矢量末端的轨迹是一条螺旋线(图 1-6)。因此,要产生圆偏振光,必须有两束振动平面互相垂直的平面偏振光,且频率相同,振幅相等,相位差为 $\frac{\pi}{2}$ 。如图

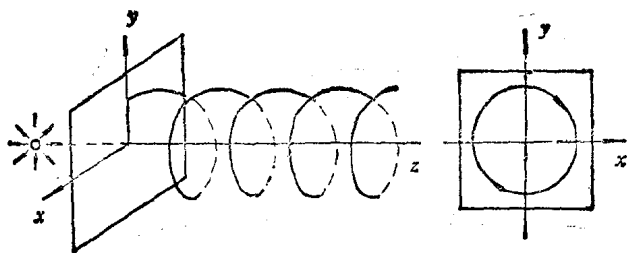


图 1-6 圆偏振光

1-7 所示，当使入射到具有双折射特性的薄片的平面偏振光的

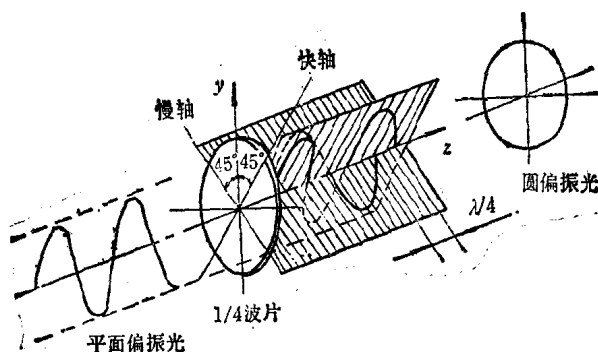


图 1-7 圆偏振光的产生

振动方向与将分解为振动方向互相垂直的两束平面偏振光的方向各成 45° 时，则分解后的两束平面偏振光的振幅相等，由于它们在薄片中的传播速度不同，通过薄片后，产生了相位差，只要适当选择薄片的厚度，使相位差为 $\frac{\pi}{2}$ ，它相当于光程差的 $\lambda/4$ (λ 为波长)，就满足了组成圆偏振光的条件。此薄片称 $1/4$ 波片。其上，平行于行进速度较快的那束偏振光振动平面的方向称快轴；与此垂直的方向称慢轴。

(二) 光弹性仪的基本结构及调整

1. 光弹性仪的基本结构

常用的平行光式光弹性仪的光路系统如图 1-8 所示, 由下列部件组成:

(1) 光源, 有产生白光的白光灯; 产生黄光的钠灯。

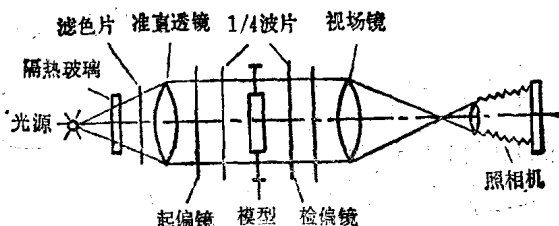


图 1-8 平行光式光弹性仪光路图

(2) 隔热玻璃, 用来吸热, 保护其后面的光学元件。

(3) 滤色片, 使光变为单色光波。

(4) 准直透镜, 使光变成平行光, 保证垂直通过模型。

(5) 起偏镜与检偏镜, 由偏振片制成, 靠近光源的称起偏镜, 把来自光源的自然光变为平面偏振光; 后面的称检偏镜, 用来检验光波通过的情况。当起、检偏镜的偏振轴互相垂直放置时称正交平面偏振布置, 此时, 如中间没有放置试验模型, 或模型的应力为零, 则在检偏镜后观察到的光场为暗场; 如两镜的偏振轴互相平行布置, 则称平行平面偏振布置, 检偏镜后看到的光场为亮场。

(6) $1/4$ 波片, 产生圆偏振光。第一块的快、慢轴与起偏镜偏振轴成 45° 角, 从而把来自起偏镜的平面偏振光变为圆偏

振光。通过后，快轴上的光波较慢轴的领先 $1/4$ 波长。第二块的快、慢轴恰好与第一块的快、慢轴正交，因而可抵消第一块产生的相位差，将圆偏振光还原为自起偏镜发出的平面偏振光。再经检偏镜，如检、起偏镜的偏振轴互相垂直，则无光射出，呈暗场，称双正交圆偏振布置；如检、起偏镜的偏振轴平行，则得到亮场，称平行圆偏振布置。

(7) 加载架，使模型受力。

(8) 视场镜，使平行光聚焦，在照相机镜头后成象在底片上。

(9) 照相机，供拍照用。

2. 光弹性仪的调整

(1) 调整光源及各镜片的中心线在同一条水平线上。

(2) 正交平面偏振布置的调整：卸下 $1/4$ 波片，旋转起偏镜或检偏镜，使呈现暗场，表示偏振轴互相正交。将一个圆盘模型放在加载架上，开白光源，使模型平面与光路垂直，并承受沿垂直方向的径向压力，同步旋转起、检偏镜，直至圆盘模型上出现正交黑十字形，这时表明，两镜片的振轴不仅正交，而且指示刻度分别在水平位置的 0° 和垂直位置的 90° 。

(3) 双正交圆偏振布置的调整：在上述基础上，先装入一块 $1/4$ 波片，并旋转，使检偏镜后看到的光场最黑，表示 $1/4$ 波片的快、慢轴分别与起、检偏镜的偏振轴平行；后将 $1/4$ 波片向任意方向转动 45° 角，再把第二块 $1/4$ 波片装入，并旋转，使光场再次最黑，表示两块 $1/4$ 波片的轴是互相正交的。四块镜片构成了双正交圆偏振布置（暗场），此时 $1/4$ 波片的指示刻度应为 45° 。

(三) 平面应力—光学定律

如图 1-9 所示,当平面偏振光垂直射入平面应力模型时,因暂时双折射,即沿模型上射入点的应力轴方向分解成两束平面偏振光,其传播速度不同,通过模型后,产生了光程差 Δ 。

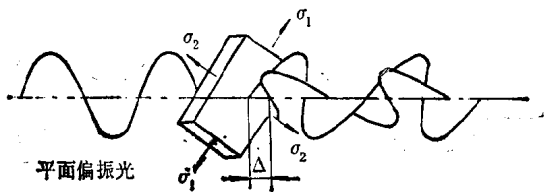


图 1-9 平面偏振光通过受力模型

实验证明:模型上任一点的主应力与折射率的关系为

$$\left. \begin{aligned} n_1 - n_0 &= A\sigma_1 + B\sigma_2 \\ n_2 - n_0 &= A\sigma_2 + B\sigma_1 \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

式中 n_0 ——无应力时模型材料的折射率;

$n_1(n_2)$ ——模型材料对振动方向为 $\sigma_1(\sigma_2)$ 方向的一束平面偏振光的折射率;

A, B ——模型材料的绝对应力光学系数。

从式(1-8)消去 n_0 , 并令 $C = A - B$ 得

$$n_1 - n_2 = c(\sigma_1 - \sigma_2) \quad (1-9)$$

式中 c ——模型材料的应力光学系数。

在模型内,沿 σ_1, σ_2 方向振动的两束平面偏振光传播的速度为 v_1, v_2 , 通过模型的时间 t_1, t_2 为

$$\left. \begin{aligned} t_1 &= \frac{B}{v_1} \\ t_2 &= \frac{B}{v_2} \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$