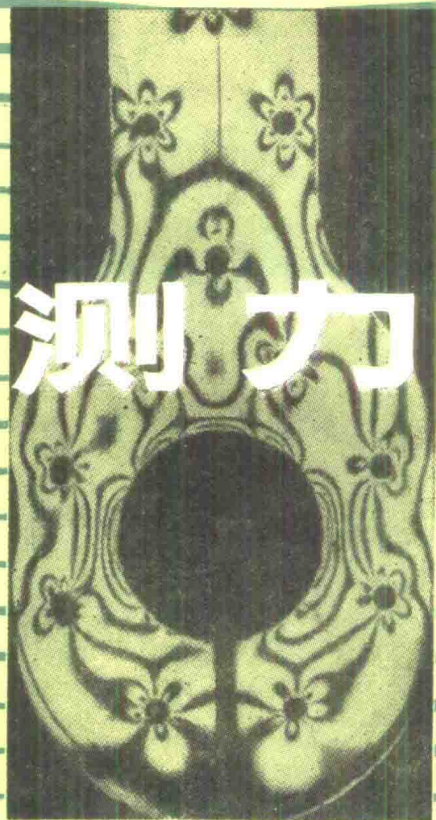


光测力学



同济大学光测实验力学研究室 赵清澄主编

上海科学技术出版社

光 测 力 学

同济大学光测实验力学研究室 赵清澄主编

上海科学技术出版社

内 容 简 介

本书是根据多年来教学工作和科研工作的实践经验总结编写而成的。对经典的和近代发展起来的光测法都作了较详细较完整的介绍。介绍时既着重物理概念的阐述,又注意数学分析的推演。因此,本书在编写上是兼顾了教材和科技参考书两者的要求的。对基本的和加深的内容,书中都作了适当编排,以便选读。

本书由赵清澄主编。参加编写的有:赵清澄(第一、二、三、四、八、十二章),张祖巡(第五章和§7-1,兼初审),顾绍德(第六章和§7-2),方如华(第九章),胡德敬(第十章),丁祖泉、鲍乃铿(第十一章中的第一部分),曹正元、李伊凡(第十一章中的第二部分)和王汝鹏、郭孔屏(第十一章中的第三部分)。全书插图由张林春绘制,部分照片由周培英摄影。

封面设计 周养安

光 测 力 学

同济大学光测实验力学研究室 赵清澄主编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 上海商务印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 14.5 字数 341,000

1982年10月第1版 1982年10月第1次印刷

印数 1—4,200

统一书号: 15119·2215 定价: (科五) 1.50 元

导 言

光测力学是实验应力分析中的重要方法之一,它是用模型或实物来测定应力、应变和位移的。过去主要采用经典的光弹性法测得模型中的应力,通常称为光测弹性力学。近年来由于激光干涉计量法的迅速发展,使光测弹性力学研究的范围迅速扩大。它不仅可用模型测定,也可用实物直接测定其应力,还可以测定其位移和应变。这些内容都将在本书中得到完整的反映,因此,本书取名为光测力学。

经典的光弹性法是用模型测定应力的,而模型是由一种专门的光弹性材料制成的。这种材料各向同性且透明,当受力时用偏振光照射,就出现暂时双折射(人工双折射)效应。这种效应与模型中各点的应力大小和方向有关。将模型中得到的应力,应用确定的模型定律,在一定的假设条件下,再换算到被研究的实物上去,对于平面问题和空间问题都能得到足够精确的定量应力分析结果。

光弹效应一般都认为是1815年由布卢斯特(D. Brewster)发现的,因此后来人们把这种效应称为布卢斯特定律。可是,该定律差不多经过了一个世纪之后才开始在实际问题中应用,以后由于人造模型材料(玻璃除外)和光弹性仪器的进一步改善,光弹效应的应用才在更晚的时期内有了明显的进步,并直到1931年才正式形成一门学科,叫光测弹性力学。在我国,则直至解放以后才比较为人们所注意,而正式应用到工程中解决生产问题,还是在本世纪五十年代的事。然而,历史虽短,却进步较快。目前,国内各有关研究单位和高等学校,都早已建立起完整的光弹性实验室,开展了大量的研究工作,获得了很多极有价值的成果,并已成为解决工程问题的有力工具。1979年7月在天津召开了全国第二届实验应力分析学术交流会,并正式宣布成立全国实验应力分析专业委员会。1980年5月我国第一次参加了在美国波士顿(Boston)召开的国际实验力学学术交流会,同年9月在青岛又召开了全国光弹性材料学术交流会。通过会议,检阅了我国实验力学的队伍,促进了我国实验力学的向前发展。

回顾光测力学发展的历史情况,首先应当肯定的是1931年柯克-菲隆(E. G. Coker-L. N. G. Filon)的第一本光弹性书的出现,书名: A Treatise on Photo-Elasticity, Cambridge 1931。这部著作有700页,其内容包括了经典的光弹性实验和理论的全部研究。接着,1935年出现了浮普尔和诺贝尔(L. Föppl und H. Neuber)合著的第一本德文书,书名是 Festigkeitslehre mittels Spannungsoptik, München-Berlin 1935。以后,弗洛赫特(M. M. Frocht)在1941年和1948年相继出版了光测弹性力学(Photoelasticity) I、II册。还有浮普尔和孟希(L. Föppl und E. Mönch),杰索卜(H. J. Jessop),酷斯克(A. Kusko)等,以及日本的辻二郎(Tuzi)和很多其他学者都对光弹性的发展作出了贡献。

五十年代期间环氧树脂材料的出现,给光弹性的发展带来了一次飞跃;尤其,在六十年代初激光器出现之后,极大地推动了光测弹性法,使研究的范围迅速扩大,有了更新的内容。现在除了经典的透射式光弹性法、贴片光弹性法外,还有全息光弹性法,激光散光法等。全息光弹性法可以直接获得等主应力和条纹(等和线或等厚线),现正探索把它应用在三维问

题和动应力问题中。而散光法提供了解决三维问题的理论和实验的基础,对解决三维问题带来了新的希望。还有,目前正迅速发展起来的激光全息干涉法、激光散斑法和云纹法等,对解决三维问题也有一定的前途。

光弹性法用模型测应力时有它独自的特点,可概括如下:

1. 可以清晰地反映出“应力”。“应力”,本来是一个抽象的概念,是看不见的。可是用光测法研究结构的强度时,它却能将结构中应力分布的全貌以条纹图反映出来。直观性强,一目了然。

2. 可以逐点求出应力,也可以求出任意位置处的应力。特别对于应力集中区域非常明显。应力集中程度和应力集中系数都可方便地得到。

3. 可以迅速、准确地获得边界应力。

4. 在比较结构的几种设计方案或改进设计时,应用光测法帮助分析也是很经济、省时和有效的。

5. 尤其对于几何形状比较复杂的构件,应用光测弹性法进行应力分析,更有明显的优点。

例如,图 0-1a 表示挖了若干洞孔的某一等厚度眼杆,今欲求出杆内应力分布规律及其最大值。对于这样一个问题,用理论分析或其他实验手段,显然都是难于解决的。图 0-1b 就是光测实验时拍摄的等色线条纹照片。根据这张条纹图,立即可以获得各边界应力值;如果再加上由全息光弹法获得的等和线资料,马上就可以得到杆内的应力分布规律及其应力的数值。用光测弹性法解决这样的问题又迅速,又经济,又精确。

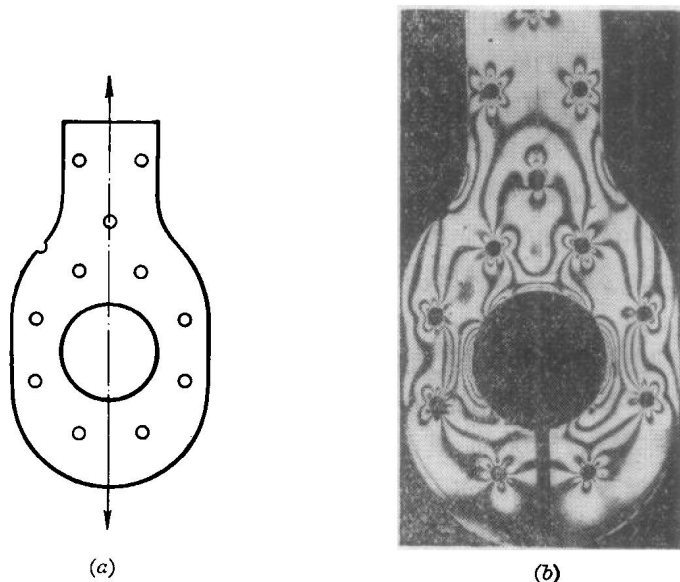


图 0-1 等厚度眼杆
(a) 眼杆模型 (b) 模型等色线

光测弹性法应用的范围很广,如航空、机械、造船、建筑、国防工业等,其中大量复杂的问题都用光测弹性法解决。对于平面静力光弹性问题的解法早已成熟,而三维问题的冻结切片法也正大量用于解决各种生产实际问题中。这个方法现正向动光弹、热光弹、光塑性、全息干涉法和激光测位移等方面发展。

当然,光测弹性法也有它一些不足之处:首先,对条纹的解释不能为大众所掌握,还需要配备有这方面知识的专门人才;其次,光测弹性仪和实验技术等方面也还存在着一些不理想的地方,有待今后进一步提高,例如仪器自动化,条纹记录和数据处理自动化,以及如何缩短三维冻结切片法的周期等等。如何解决这些问题和继续提高光测实验技术的水平,还有待广大光测工作者们的共同努力。

本书共分十二章,前三章介绍平面光弹性的原理、应用和计算应力的方法;还有,光弹性仪及仪器各部件的作用;围绕这些内容简单介绍了必要的物理光学基础知识,其中特别讨论了在本书中要应用到的重要内容——光的干涉和双折射。另外,详细介绍了等色线、等倾线条纹出现的原因,以及如何观测、描绘、解释及其具体应用。为了提高等色线的测量精度,还介绍了等色线条纹窄化和倍增的实验装置,及照片迭合法的具体应用和原理。最后根据获得的条纹资料,介绍计算应力的各种方法,并举例说明。为了节省计算时间,末尾还给出了在计算机上使用的源程序。

第四章介绍光弹性实验中的相似律,即把从光弹模型中获得的应力,通过相似关系转换到实物上去的定律;包括弹性静力严格相似律和近似相似准则及其具体应用。还介绍了如何正确决定模型的尺寸(即如何选择尺寸比例数),以及在光弹性实验中将出现的误差,并如何正确估计这类误差。

到此,平面问题讨论即告结束,接着就介绍光弹性材料和模型,这就是第五章的内容。该章中介绍了制作平面光弹性材料和模型加工,制作三维光弹性材料和浇铸模型,以及从材料配方到模型制作的全套工艺。还介绍了蜡模浇铸法的制作工艺。为了适应下面即将讨论三维光弹性的需要,还介绍了冻结应力法,光弹性材料的热光曲线原理及实测。

第六章介绍三维光弹性原理及分离应力的方法。主要讨论了冻结切片法逐点分析原理和测试过程,简述了这里所必需的预备知识——应力分量的坐标变换,还介绍了正射法和斜射法,并比较了两者的优缺点。同时提出浸没液的配制和提高斜射精度的措施,介绍了三维剪应力差法和迭代法、五次投射法的概念。对三维光弹性应力分析的较深入的探讨则是第七章的内容。该章介绍了偏光显微镜在三维光弹实验中的应用,包括原理、构造、应用及其旋转台。还专门介绍了连续分析法原理及应用实例。

接着,第八章介绍激光散光法,其中有散光法的原理,散射光的性质,散射光强度与观测方向间的关系,散射条纹成因及散射光强度分析,散射等色线、等倾线等。还介绍了散射实验装置,并给出了简单拉伸和自由扭转的散射条纹照片,最后讨论了一般问题的散光法解法和轴对称问题解法。

还有很多工程实际问题,常常不要求出整个构件中的应力场,而只要求出最大的应力值及其部位,或只需要在表面某一小范围内考察其应力情况,这就是第九章中介绍的贴片法。该方法不一定要用模型测定,可以直接在实物上进行,这是和其他光测方法不同之点。在这一章中,介绍了贴片法的原理及应力-光定律,比较了它与普通透射式光弹法的不同,并提出贴片光弹材料及其工艺过程的要求。对加强效应也略加讨论,最后有一实例说明其全过程。

第十章主要介绍平面全息光弹性的基本理论和实验。其特点是能测取等和线。本章在简单介绍全息照相基本知识的基础上,用圆偏振光场下全息照相两次曝光法来建立全息光弹性的基本方程,即主应力和与等和线条纹级数的定量关系。然后进一步介绍有实用价值的

分离等和线与等色线条纹的三种方法。另外,对实验设备和技术也作了较详细的叙述,并结合实例对比了全息光弹法和普通透射式光弹法的结果。对全息光弹其他领域,如全息动光弹、全息热光弹、三维全息光弹的发展动向也作了粗浅的介绍。

第十一章中阐述的是新近发展起来的全息干涉法、激光散斑法和云纹法。全息干涉法测量位移、应变,而不直接测量应力,这是与前面所讨论的光弹性法完全不同之处。这里简要叙述了该方法的特点和发展概况;并围绕三维位移定量分析为中心,概述了四类基本的全息条纹解释技术,对其中常用的ZF法和FO法的算法及用以求解二维和有一定代表性的三维问题的具体方法,结合实例作了介绍。此外,还对影响测量精度的因素、刚体位移补偿法、大变形和高变形梯度的测量等重要问题作了简要分析;并简单列举了求应变的几种方法。对激光散斑干涉法,简要叙述了散斑图的生成和性质,着重就双曝光散斑图的两种基本分析方法——逐点分析法和全场分析法的原理和计算公式作了较详细的说明,并分别给出了应用实例。对云纹法,阐述了云纹条纹的生成及其性质、云纹条纹的测试原理和分析方法。还介绍了云纹实验的操作要点。最后举了两个例题,并给出了云纹条纹的照片。第十二章即最后一章补充了相似原理和量纲分析^①。这是考虑到一个光测实验工作者,可能在自己的工作中,会遇到更广泛的实验工作,故特介绍了如何用相似原理,量纲分析和 π 定理等来组织实验、指导实验工作。文中还举了很多实例帮助理解和掌握。

以上就是本书所介绍的全部内容。

近年来,电子计算技术迅速发展,在力学问题上得到了广泛的应用,这是好事。可是,有人却因此怀疑是否还有必要用实验的办法来解决力学上的问题了,甚至认为可全以电算技术代替之。我们认为这种看法是片面的。诚然,某些问题可以依靠电算解决,电算的结果与实验的结果也很接近。可是,电算也有局限的方面,如应力集中难以解决。特别是对于某些复杂的课题来说,还要受到容量的限制。并且,电算的结果还需要用实验(或别的办法)来检验其正确性,更何况在大量的新领域中,例如非均质材料,复合材料,特殊的工作条件,复杂的载荷等。这些新课题的发展尚有待于实验资料的积累,以获得对于事物客观规律的了解,建立新的理论。再者,光测力学早已形成一门独立的学科,自成体系,不会受到电算发展的干扰。它们两者,应各自发挥所长,彼此弥补不足,相互促进,共同来解决工程实际问题。我们觉得很重很需要的是,尽快把电子计算技术引用到实验测试方法中去,使仪器设备自动化,数据分析程序化,例如把条纹图通过设备自动转化成最后的应力值表达出来,做到一般技术人员对光测资料都能分析,都能解释。这样,光测法就会发挥更大的作用了。

赵清澄

一九八〇年八月

^① 第四章和第十二章编成两章(不合并)的原因,是便于教学和易于理解。第四章必修;第十二章视具体情况而定,多数情况下为选修。

目 录

导 言

第一章 光弹性基本原理

§ 1-1 认识实验	1
1. 单向均匀受拉模型实验	1
2. 纯弯曲梁模型实验	2
§ 1-2 光弹性仪及其部件	3
§ 1-3 光的干涉和双折射	5
1. 光的干涉	5
2. 双折射	8
§ 1-4 平面光弹性的应力-光定律	9
§ 1-5 平面受力模型在平面偏振光中的光弹效应	11
1. 偏振片放置法——光场分析	11
2. 平面受力模型置于平面偏振光场中	12
§ 1-6 等色线、等倾线的形成	13
1. 等色线的形成	13
2. 等倾线的形成	14
§ 1-7 平面受力模型在圆偏振光中的光弹效应——用四分之一波片消除等倾线	15
1. 四分之一波片放置法——光场分析	15
2. 平面受力模型置于圆偏振光场中	16

第二章 等色线和等倾线的应用

§ 2-1 材料条纹值的测定	19
1. 用纯弯曲梁测定	19
2. 用对径受压圆盘测定	20
§ 2-2 等色线级数的确定	21
§ 2-3 非整数级条纹的确定——补偿法	22
§ 2-4 边界应力符号的确定——钉压法	25
§ 2-5 等倾线的测绘	28
1. 等倾线的测绘	28
2. 等倾线的特征	29
§ 2-6 主应力迹线	30
§ 2-7 等色线的进一步应用	32
1. 确定弯矩零点的位置	32
2. 比较设计方案	34
§ 2-8 等色线窄化及倍增	35

1. 等色线窄化	35
2. 等色线倍增	36
§ 2-9 光弹性“照片迭合”法	37
1. “照片迭合”法操作工艺	37
2. “照片迭合”法原理	38

第三章 平面模型中的应力计算法

§ 3-1 剪应力差法	40
§ 3-2 差分法求主应力和	45
§ 3-3 厚度测定法	47
§ 3-4 计算对称截面上的应力——柯克、菲隆算法	48
§ 3-5 拉梅-马克斯威尔方程的推导	52
§ 3-6 平面模型计算应力的源程序(适用于 719 机)	55
1. 剪应力差法	55
2. 求主应力和法	56

第四章 光弹性实验中的相似律

§ 4-1 基本原理	58
§ 4-2 一般应力状态下的广义静力相似律	60
§ 4-3 特殊问题的广义相似律	62
1. 板的弯曲	62
2. 壳体	63
3. 平面弯曲问题	63
§ 4-4 比例数的选择	64
§ 4-5 光弹性实验中误差的估计	64
§ 4-6 例题	65

第五章 光弹性材料和模型

§ 5-1 光弹性材料	70
§ 5-2 环氧树脂平板材料	70
§ 5-3 聚碳酸酯平板材料	73
§ 5-4 三维光弹性模型	74
§ 5-5 光弹性模型粘结	77
§ 5-6 材料的冻结性能及热光曲线	78

第六章 三维光弹性原理和方法

§ 6-1 应力分量的坐标变换	81
§ 6-2 次主应力	83
§ 6-3 三维光弹性实验中的应力-光定律	85
§ 6-4 三次正射法	85

1. 基本原理	85
2. 沿主方向三次正射	87
3. 自由表面切片应力测定	87
§ 6-5 斜射法	88
1. 基本原理	88
2. 自由表面切片应力测定	89
3. 绕主应力方向旋转测定	90
4. 浸没液	91
5. 斜射时位置的修正	91
6. 五次投射法	94
§ 6-6 三向剪应力差法	94

第七章 三维光弹性的补充

§ 7-1 偏光显微镜在三维光弹性实验中的应用	99
1. 偏光显微镜的原理及构造	99
2. 偏光显微镜在光弹性实验应用上的特点	100
3. 等倾线测量	100
4. 光程差测量	101
5. 用偏光显微镜测量等倾线和等色线的步骤	101
6. 费德罗夫旋转台	102
§ 7-2 应力连续分析法	103
1. 分析原理	103
2. 举例	106

第八章 激光散光法

§ 8-1 概述	113
§ 8-2 散射光的特性及光的散射性质	113
1. 散射光的特性	113
2. 光的散射性质	114
§ 8-3 光在双折射介质中的散射	115
§ 8-4 散光强度(条纹)的数学分析	118
1. 光强 I_s 与观察方向 θ 间的关系	119
2. 光强 I_s 与偏振方向 α 间的关系	120
3. 光强 I_s 与相位差 $\varphi(\delta)$ 间的关系	120
§ 8-5 圆偏振光入射时条纹分析	122
§ 8-6 散射光的应力-光定律和实验装置	125
1. 散射光的应力-光定律	125
2. 实验装置	126
§ 8-7 散光法简单实验举例	127
1. 轴向拉伸	127
2. 纯弯曲实验	128
3. 纯扭转实验	128

§ 8-8 一般问题求解	130
1. 任意平面问题求解	130
2. 轴对称问题求解	131
3. 一般三维问题求解	132
§ 8-9 补充两个证明	132
1. 同周期共线振动的合成	132
2. 求椭圆方程(8-6)的主轴位置及其长度	133

第九章 光弹性贴片法

§ 9-1 概述	135
§ 9-2 反射式光弹仪	135
1. V型光路	135
2. T型光路	136
§ 9-3 光弹性贴片法的光弹效应	136
1. 应力-光定律	136
2. 光弹性贴片材料应变条纹值 f_{σ} 的测定	138
3. 贴片的灵敏度	138
4. 等色线与等倾线的量测	139
§ 9-4 应力分离法	139
1. 条带法	140
2. 斜射法	141
§ 9-5 材料浇制与粘贴工艺	142
1. 平板贴片材料	142
2. 曲面贴片材料	142
3. 贴片的粘贴	143
§ 9-6 光弹性贴片法的增强效应	143
1. 平面应力状态	143
2. 弯曲问题	145
§ 9-7 光弹性贴片法应用实例——角柱型井塔节点应力分析	146

第十章 全息光弹性法

§ 10-1 概述	150
§ 10-2 全息光弹性的物理基础	150
§ 10-3 全息光弹性的基本实验设备和技术	152
§ 10-4 全息光弹性的基本原理	154
§ 10-5 等和线与等色线的分离	157
1. 两个模型法	158
2. 石英旋光器法	158
3. 磁偏转法	160
4. 其他条纹分离方法	160
§ 10-6 实例	160

§ 10-7 全息干涉法在光弹性其他方面的应用	163
1. 测取等倾线	163
2. 动荷全息技术	163
3. 测定热应力和温度场	164
4. 测定三维应力	164

第十一章 现代光学法测位移

第一部分 激光全息干涉法测位移	165
§ 11-1 概述	165
§ 11-2 基本的全息干涉法	165
1. 单次曝光法(实时法)	166
2. 两次曝光法	166
3. 连续曝光法(时间平均法和频闪法)	166
4. 双波长曝光法	167
§ 11-3 全息干涉条纹解释技术	167
1. 条纹定位法 (FL 法)	167
2. 条纹计数法 (FC 法)	167
3. 零级条纹法 (ZF 法)	168
4. 等倾干涉条纹法 (HF 法)	168
§ 11-4 用 ZF 法和 FC 法作位移定量分析的计算方法	169
1. 零级条纹法 (ZF 法)的计算方法	169
2. 条纹计数法 (FC 法)的计算方法	171
§ 11-5 ZF 法和 FC 法在位移定量分析中的实际应用	172
1. 用 ZF 法解二维问题(两张全息图法)	172
2. 用 ZF 法解三维问题(三张全息图法)	173
3. 用 FC 法解三维问题	176
4. 各种方法的特点比较	180
§ 11-6 位移测量中的几个问题	181
1. 影响测量精度的主要因素	181
2. 刚体位移的补偿	181
3. 大变形和高变形梯度测量	181
§ 11-7 应变分析	182
1. 线应变计算法	182
2. 图解法和列表法	182
3. 样条函数法	82
4. 与有限元法的结合	83
5. 光学微分法	83
§ 11-8 几个公式的补充推导	183
1. 实时法干涉条纹的光强分布规律式(11-1)的推导	183
2. 反射式两次曝光全息图所记录之干涉条纹的光强分布表达式(11-3)的推导	183
3. 三维形变解析计算公式(11-15)的推导	184
第二部分 激光散斑干涉法	181

§ 11-9 概述	184
§ 11-10 散斑图及双曝光散斑图	185
1. 散斑场的形成	185
2. 散斑场的特点	185
3. 双曝光散斑图	185
§ 11-11 双曝光散斑图分析	185
1. 逐点分析法	185
2. 全场分析法	188
第三部分 云纹法	191
§ 11-12 概述	191
§ 11-13 云纹条纹的生成及简单分析	192
1. 云纹条纹的生成	192
2. 云纹条纹的测试和分析	196
§ 11-14 云纹法实验操作简介及例题	198

第十二章 相似原理和量纲分析

§ 12-1 概述	201
§ 12-2 相似原理	201
§ 12-3 关系方程为一组多项式	203
§ 12-4 量纲分析	207
§ 12-5 π 定理	210
附录	217
一、三角函数公式	217
(一) 基本关系	217
(二) 和(差)角公式	217
(三) 倍角公式	217
(四) 半角公式	217
(五) 和差化积公式	217
二、色谱表	217
三、药液配方	218
(一) 显影液	218
(二) 漂白液	218
(三) 清洗除斑液	218
(四) 停显液	218
(五) 定影液	219
(六) 手指及器皿污染去渍液	219
四、人名索引	219
五、主要参考书目	220

第一章 光弹性基本原理

§1-1 认识实验

把光弹性平面模型放在光弹性仪器中,使其受力,观察其受力后发生的现象。结果发现,模型受力后,出现了黄、红、蓝、绿的彩色条纹。产生这些彩色条纹的光源是白色光源,我们知道,白光里包含着红、橙、黄、绿、青、蓝、紫七种单色光。在具体进行实验时,还要用到单色光,一般使用的是钠光灯,发出的是黄色光;也有使用水银灯,再加滤色片近似作为单色光使用的。现在再用钠光灯作为光源来观察同一模型,结果是,刚才的彩色条纹不见了,却出现了黑白相间的条纹。我们把彩色条纹(白光光源)或黑白条纹(单色光源)通称为等色线,把这种条纹图称为等色线图或应力光图。为了了解条纹所表示的物理意义,现用两种典型受力的模型进行实验,以获得经典光弹性法研究的内容的一些感性认识。

1. 单向均匀受拉模型实验

(1) 单色光 把拉伸试件模型(图 1-1)放置于偏振光场中,进行加载,观察加载过程中模型均匀应力部分内亮度变化的现象及过程。当载荷为零时,整个模型完全黑暗(无初应力时),然后连续地增加载荷,模型内部即随之由暗逐渐变亮,至最亮时又逐渐由亮变暗。继续增加载荷,则模型又由暗变亮,由亮变暗地不断循环变化。这样,把由暗变亮,再由亮变暗的第一次循环称为第一级,第二次循环称为第二级,依次称为三级、四级……。

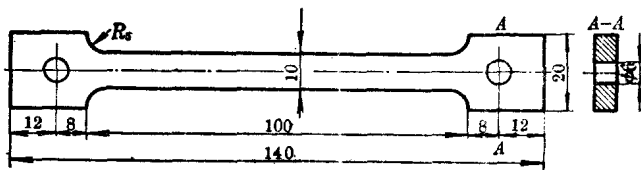


图 1-1 拉伸试件

从应力分析中已经知道,模型均匀受拉部分内的最大剪应力(或最大正应力),在一定的外力作用下,其数值是相同的。在本实验中可以看出,由于载荷不同,模型的明暗程度也是不同的,但在同一载荷作用下,模型内却出现了同一的明暗程度。由此可以知道,在相同明暗程度下(包括循环的次数),它表示了模型内的最大剪应力(或最大正应力)是同一个数值。

(2) 白光 现在改用白色光源来观察,其他条件不变。当载荷为零时,模型仍旧全部黑暗。然后逐渐增加载荷,模型开始出现黄色。继续增加载荷,模型由黄逐渐变为红、蓝、绿的颜色。再加载荷,又逐渐按黄、红、蓝、绿的颜色顺序循环。以后继续增加载荷,模型内颜色的变化仍大致按以上顺序循环,但随着循环的次数增加,颜色则逐渐浅淡下去,并且约在三、四次循环以后,黄、蓝二色不易分清,只能看清浅红、浅绿二色。这里,我们把黄、红、蓝、绿的第一次循环称为第一级,第二次循环称为第二级,以后依次称为三级、四级……。同时把红绿交界处作为划分级数的标准。

2. 纯弯曲梁模型实验

现在再用一个简支梁模型来观察, 梁上作用两个对称载荷而使梁的中段部分承受纯弯曲(图 1-2)。下面主要观察纯弯曲部分内条纹变化的情况。

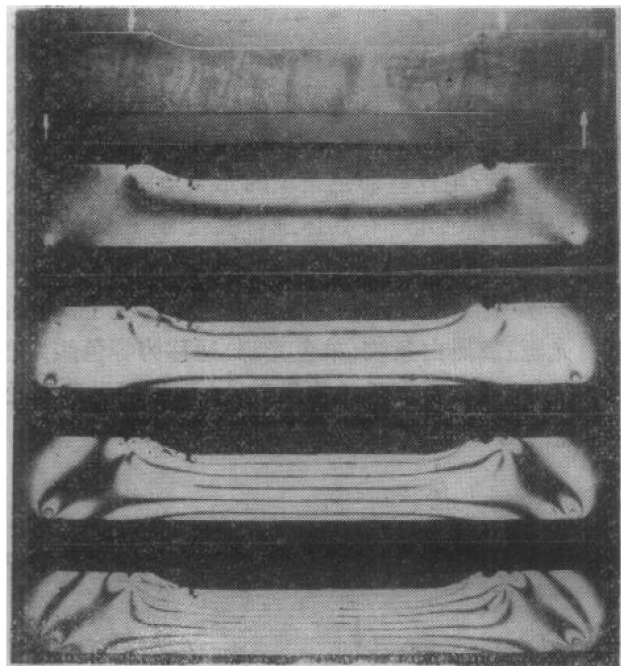


图 1-2 纯弯曲梁实验照片

- (1) 单色光 在没有载荷时, 模型全部黑暗(图 1-2a)。逐渐增加载荷后, 梁的上下边界部分首先变亮(图 1-2b); 继续增加载荷, 边缘变至最亮后又由亮逐渐变暗, 以至又出现了一条黑线(图 1-2c)。而梁中部的水平黑线则一直不变, 这种不随载荷大小变化, 始终呈黑线(或黑点)的条纹称为零线(或零点), 也称零级, 即条纹的序数为零。边界上出现的第一条黑线就称为一级。在计数条纹时, 首先要找出零点(零线)即零级, 靠近零级的为一级, 依次为二级、三级、四级挨次数下去。例如图 1-2d 中靠近边界的条纹为两级。

现在继续增加载荷, 梁边缘又变亮, 继而又由亮变暗, 循环变化, 于是形成黑白相间的水平条纹(图 1-2e)。随着载荷逐渐增大, 条纹则逐渐向梁中的零级靠近, 并且条纹越来越密(见图 1-2e), 所以条纹的疏密是与载荷的大小有关的, 亦即是与模型内产生的应力大小和应力梯度有关, 条纹越稀, 应力变化越缓慢, 条纹越密, 应力变化越大。因此, 对应力集中的部位, 条纹总是较密的, 对于条纹较密的地方, 应予特别的注意。

(2) 白光 现在改用白光观察, 其他条件不变。当没有载荷时, 模型全部为黑暗, 逐渐增加载荷后, 梁中部的一条水平黑线不变, 仍为黑线, 这就是零级。但在梁的上下边界处开始变色, 依次为黄、红、蓝、绿, 是为第一级; 再继续加载, 梁的边界又继续按黄、红、蓝、绿的顺序变化, 是为第二级。继续加载, 按颜色变化的顺序, 三级、四级……挨次数下去。这时, 在梁的同一高度上条纹的颜色是相同的, 即形成的条纹是水平的。这些条纹向梁中部的水平黑线靠近, 且逐渐增多; 条纹随载荷的增大而变密, 颜色却随条纹级数的增高而变淡, 在梁边界上是最淡的。

由以上演示实验, 说明了如下的一些问题:

第一, 试件内出现的同一颜色(白光光源)或同一亮度(单色光光源)线或区域, 说明该线(区域)上产生的最大剪应力的数值是相同的, 也就是两主应力之差是相同的, 因为

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma}{2} \quad (\text{单向受力时})$$

或

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \quad (\text{两向受力时})$$

而在单向均匀受拉和纯弯曲的情况下,只不过另一主应力为零。因此,可以这样说,最大剪应力相等处,亦即是两主应力之差相等之处,在光弹性实验中是以等色线显示出来的,这就是等色线所表示的物理意义。所以等色线也称等差线,或称最大等剪应力线。这是光弹性实验中重要的条纹之一,今后将逐渐进一步深入讨论。

第二,在白光中,载荷越大,颜色越淡,等色线级数就越高。这样,根据颜色的深浅就比较容易辨认等色线条纹级数的高低,这是使用白光观察等色线时的最大优点。黑色之处永远是零级。并按黄、红、蓝、绿循环为级次升高,反之为级次降低。计数时,以红绿色交界处作为划分级次界限。

§1-2 光弹性仪及其部件

现在,简单地介绍一下光弹性仪的组成,图 1-3 为平面偏振光装置的光弹性仪排列图。

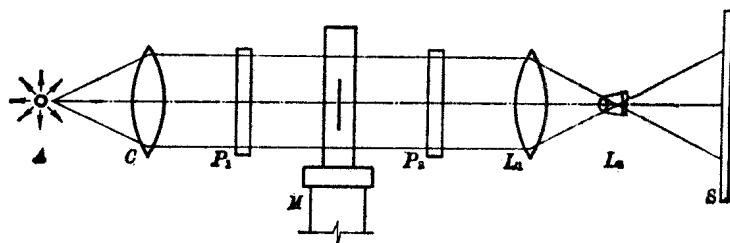


图 1-3 平面偏振光装置的光弹性仪排列图

图中符号表示:

A——光源。一般有白光和单色光两种。光源发出的光在均匀介质(能传播光的物质)中是直线传播的,所以通常把光叫做光线。光的传播速度是非常快的,在真空中的速度大约是每秒 30 万公里。

光传播通过不同介质时,将发生折射和反射(参阅图 1-4)。

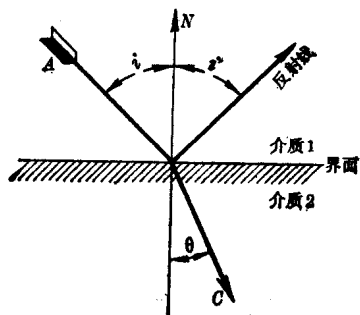


图 1-4 光的折射和反射

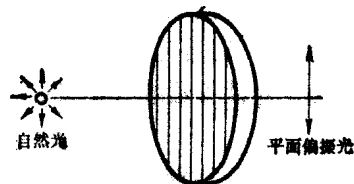


图 1-5 平面偏振光

折射定律 光从一种透明介质 1 入射到第二种透明介质 2 时,其传播方向和速度都发生改变,其传播方向变化的现象称为光的折射。光的入射线 A、折射线 C 和界面的法线 N 在同一平面内;光在两种介质中的速度之比就是入射角和折射角的正弦之比,称为相对折射率,即

$$N_{21} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin i}{\sin \theta} \quad (1-1)$$

N_{21} 称为第二种介质对于第一种介质的相对折射率。若介质 1 为真空, 光速为 v_0 , 则得到介质 2 的绝对折射率为

$$C = \frac{v_0}{v_2} \quad (1-2)$$

如 634* 环氧树脂, 其绝对折射率大约为 1.578。

反射定律 光从一种介质传播到另一种介质时, 在两种介质的分界面上, 传播方向发生改变, 其中仍返回原来介质的现象, 叫光的反射。入射角 i 等于反射角 i' 。

C——准直镜。把从光源发出的光变为平行光。

P_1 ——偏振片。通过它将平行光变为平面偏振光。根据近代物理学的研究, 光在传播过程中又具有波动性, 因此光又叫做光波, 一束自然光的振动平面有无数个。但若一束光波的振动全在同一方向的平行平面中发生, 则这种光便称为平面偏振光。偏振片就是产生平面偏振光的一种光学部件(图 1-5)。所以又称起偏振片。能使光波通过的那个方向叫做偏振片的偏振轴。

M——置于加力架上, 用光弹性材料制成的实验用模型, 是研究的对象。视实验的需要, 可通过加力架使模型受拉、压、弯等各种载荷。

P_2 ——分析片, 也是一个偏振片。仅由于放置的位置不同而称作分析片。

当偏振片和分析片的偏振轴平行时, 光线全部通过, 这时幕上最亮, 称为明场(图 1-6a); 但当它们的偏振轴正交时, 光线不能通过, 这时幕上最暗, 称为暗场(图 1-6b)。把受载模型置于偏振片和分析片之间, 就能将模型的应力光图显示出来了。

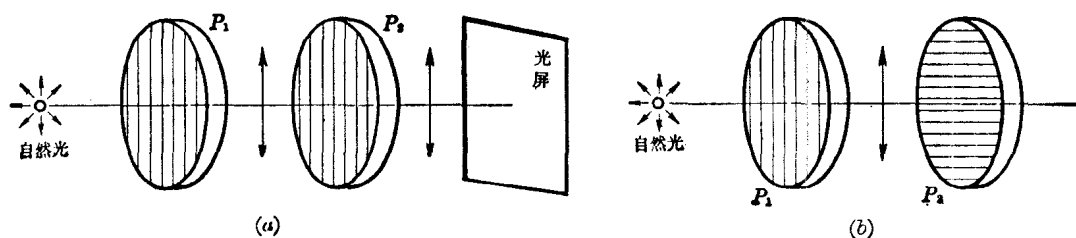


图 1-6 明暗场简示图

(a) 明场 (b) 暗场

L_1 ——视场镜(准直镜), 也称聚光镜。把从分析片透射出来的平行光会聚于一小范围内, 使光线全部通过成像透镜 L_2 。

L_2 ——成像透镜(通常是透镜组)。使受载模型的像投影到光屏上。

S——光屏(屏幕)。呈现应力光图用。

完整的光弹性仪器装置中还有两个重要部件(图 1-7)叫四分之一波片。其性质和作用见下节。

使用仪器时应特别注意, 所有的镜片不能用手去触摸。调整仪器时应注意以下各点:

第一, 要求光源、偏振片、分析片、四分之一波片以及各透镜的中心要在同一轴线上, 模型应放置于光场的中心部位。

第二, 开启光源后, 须调节光源与聚光镜间的距离以产生平行光线。

第三, 调节明场和暗场。拿去两个四分之一波片, 使偏振片的偏振轴对准刻度盘的零度, 调节分析片与偏振片的偏振轴使其相互平行成为明场, 使二者相互垂直即成暗场。此