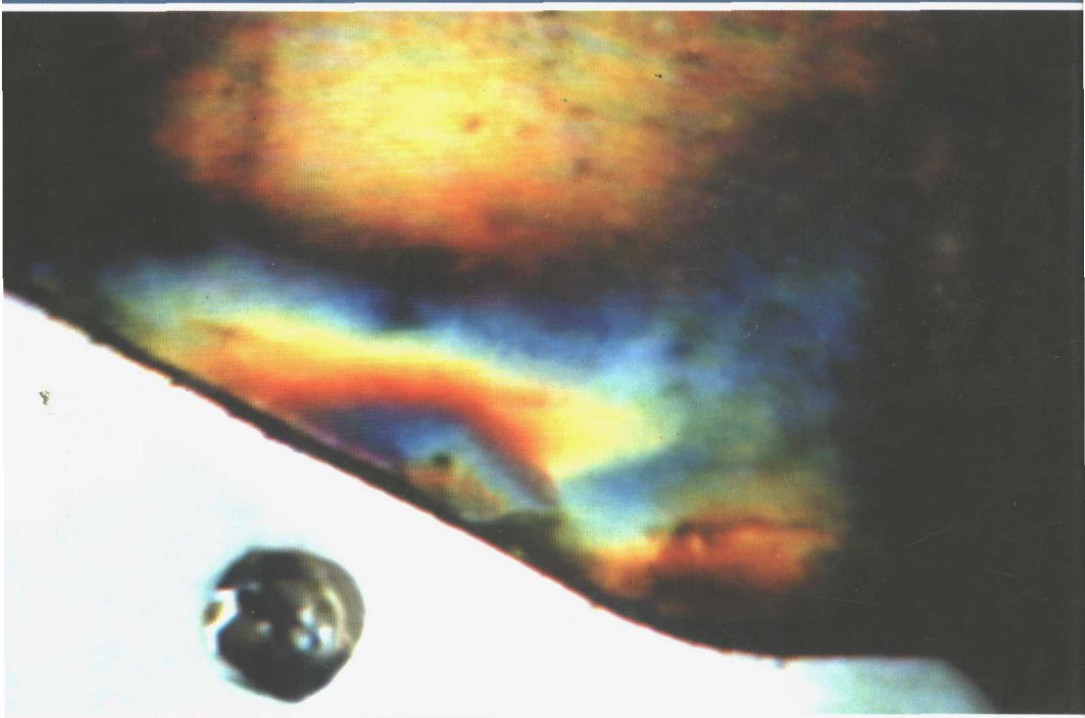


光弹性贴片技术及工程应用

PHOTOELASTIC COATINGS TECHNIQUE and ITS APPLICATION IN ENGINEERING

严承蔼 等著



國防工業出版社

光弹性贴片技术 及工程应用

PHOTOELASTIC COATINGS TECHNIQUE and ITS
APPLICATION IN ENGINEERING

严承蔼 等著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

光弹性贴片技术及工程应用/严承蕙等著. —北京:
国防工业出版社, 2003. 7

ISBN 7-118-03084-8

I. 光... II. 严... III. 光弹性 - 变形体工程力学
IV. TB124

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 110610 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥隆印刷厂

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 7 1/4 插页 1 174 千字

2003 年 7 月第 1 版 2003 年 7 月北京第 1 次印刷

印数: 1—2500 册 定价: 21.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金
评审委员会**

国防科技图书出版基金

第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员	陈达植				
顾问	黄宁				
主任委员	刘成海				
副主任委员	王峰	张涵信	张又栋		
秘书长	张又栋				
副秘书长	彭华良	蔡镭			
委员	于景元	王小谟	甘茂治	冯允成	
(按姓名笔画排序)	刘世参	杨星豪	李德毅	吴有生	
	何新贵	佟玉民	宋家树	张立同	
	张鸿元	陈火旺	侯正明	常显奇	
	崔尔杰	韩祖南	舒长胜		

前 言

某些工程构件,特别是一些重要的承载构件,它们所处工况很复杂,具有随机性、弹塑性、非线性、不确定性以及装配时的大变形等现象,这些情况的汇集,绝非是有限元数值计算所能完成的,所以对一些安全性、可靠性要求严格的构件(如:飞机的起落架、大梁及核压力容器等)的样机都要进行实际应力测量。虽然应力测量的方法有很多种,但就工程而言,只需测出构件的表面应变(应力)通常即可满足工程要求。在众多的表面应变(应力)测量方法中,常用的不外两种,即电阻应变片法和光弹性贴片法。

电阻应变片法是基于金属丝的应变-电阻效应来进行被测构件表面应变(应力)测量的,虽然电阻应变片的基长和栅宽可以做得很小,但所测得的值仍然是构件表面被测量这一很小区域内的应变平均值,得不到确定点的确定值。光贴片法又称光弹性贴片法,它是在光弹性技术基础上发展起来的一种方法,是介于光弹性和电阻应变片两者之间的技术,它与电阻应变片不同的是与光弹性技术一样,是基于光敏材料应变-光学干涉效应来测量构件表面应变(应力)的,可以大面积的显示构件表面的应变(应力)状态,故得到的信息不是一个小区域的平均应变值,而是一个相当大面积上确定值和主方向连续分布的应变,也就是说得到的是一个应变(应力)场。它具有电阻应变片测量技术的优点,操作简单,可以直接用于工程现场的测量,而不像光弹性技术,只能在实验室内作模型实验。

光贴片技术除能大面积显示应变场之外,另外的一些特点也是其它方法不可比的,如:能直观、形象、非接触式测量(包括应变

的大小和方向),可以广泛地用于不同材料(包括金属、非金属等)在不同状态(弹性、弹-塑性及塑性等)下的应变测量等,所以多年来无论是核能、航空、航天、化工、机械,还是土建、交通、矿冶等行业均提出过各式各样的不同要求,希望能用光贴片技术解决本行业中的强度问题。但因该技术涉及力学、光学、材料、图像处理及数码技术等有关的多种学科,对实验人员的素质要求较高,所以就是在国外,虽然这项技术尽管已经有几十年的使用历史,也还是集中在有数的几家大公司的实验室内,他们有许多研究人员,从事基础研究和应用开发。然而随着聚碳酸酯等新材料的使用、图像处理及数码技术的发展,这项技术已今非昔比,它的操作、运算已大大简化,已相当的“傻瓜化”了。而且由于曲面光贴片的研发成功,现在可以这样说,一切采用电阻应变片的地方,基本上都可以使用光贴片,只是测量精度暂时还略显逊色,但除特殊情况外满足工程要求是没有问题的。

早在 20 世纪 70 年代末期美国维谢公司曾出版过一本关于光贴片的书,但受当时条件的限制,那本书不能反映当今光贴片的技术水平,据此不能使光贴片技术得到普及。

作者从事光贴片技术的研究已有三十余年,为该项技术的实用化做了一些有益的工作,为了适应我国经济建设的需要,特将研究成果予以总结写成此书,旨在使该项技术在一定程度上得到推广。

本书通过介绍光贴片法的原理、实验技术中的具体经验和方法,使一般有大学水平的工程师可以看懂,无论是专业的还是非专业的技术人员,在本书的指引下,均能很快地掌握光贴片技术,并且借以筹建实验室和进行实际操作。同时,本书还可作为工科院校本科生及有关专业研究生的学习参考之用书。

全书共分十二章,第一章首先作了一般的介绍(贾有权),在第二章(严承蔼)、第三章(戴积林、严承蔼)、第四章(严承蔼)中,分别讲述了光贴片法所需要的力学和光学知识及光贴片法的原理,第五章(严承蔼、戴积林、范广宏)、第六章(范广宏、严承蔼)、第七章

和第八章(严承蔼)讲述了光贴片法的各项实验技术,第九章(严承蔼)讲如何分解主应力,第十章(严承蔼、戴积林)介绍光贴片技术在工业中的应用,第十一章和第十二章(严承蔼)介绍的是一些其它方面的问题。

在本书的书写过程中,得到原机械工业部北京机电研究所及中国人民解放军北京军区空军装备部科研处的大力支持和帮助,杜豪年教授并多次提出修改的建议,对此作者深表谢意。全书经作者导师天津大学贾有权教授审阅,提出了许多宝贵的意见,并为本书写了绪论,在此特致以衷心的感谢。

最后,对于中国核动力研究设计院的韩柏桥、李天勇、梁光远等,北京军区空军装备部的张宪政、黄开华、陈建华等,还有北京机电研究所楼捷、张浩、王丽霞、董正、刘淑敏、尹成一、陈思浩、柳忠山、李祁前等,以及当前的合作者李亚军、刘志宏、李江国、杨志毅等众多同志多年愉快的合作,作者深表感谢。

由于作者水平有限,经验不足,书中错误之处在所难免,希望有关方面的专家和读者予以批评指正。

严承蔼

2003.2.18

内 容 简 介

本书是作者多年来从事工程光贴片技术研究成果的总结,书中较系统地介绍了光贴片法所涉及的有关理论及技术特点,包括必要的力学和光学基础知识,光贴片法的基本原理及特点,光贴片材料及制作技术,胶粘剂,测量装置的设计,信息采集与处理等,最后并列举了在机械、航空、核能等领域应力、应变测试等实例。

本书阐述力求深入浅出,内容紧密结合实际,可作高等学校有关专业本科生、研究生以及工程技术人员的参考书。

This book is a sum-up that author has engaged in research and application of photoelastic coating technic for about forty years. Many aspects involved by photoelstic coating method are introduced in this book. The contents of the book involve 12 chapters. It include the basic knowledge of mechanics and optics , fundamental principle of photoelastic coating method, photoelstic coating materials and adhesive , measure device , information collection and process , the separation of principal stresses and application instances, etc.

The author explains the profound in simple terms in this book. Its content combines with practice closely. It can be used as reference book of university students, postgraduate students, engineering technologist who works in the correlative field.

目 录

第一章 绪论	1
1.1 光贴片技术的基本概念	1
1.2 光贴片技术的发展过程	2
1.3 应用概况	4
1.4 光贴片法的未来	6
参考文献	7
第二章 基本力学概念	8
2.1 应力、应变概念	8
2.1.1 应力	8
2.1.2 应变	9
2.1.3 应力、应变关系	10
2.2 一点的应力状态	11
2.2.1 用单元体各面的应力表示一点的应力状态	11
2.2.2 剪应力互等定律	13
2.2.3 单元体应力状态的分类	14
2.3 平面应力状态	15
2.3.1 斜截面应力计算	15
2.3.2 主应力与主平面	17
2.3.3 最大剪应力	20
2.4 平衡方程	20
2.4.1 直角坐标系的平衡方程	20
2.4.2 两向应力状态的平衡方程	21
2.4.3 边界平衡条件	22
2.5 应变分析	23

2.5.1 平面应力状态下的应变与位移关系·····	23
2.5.2 平面应力状态下的应变分析·····	24
2.6 应力、应变关系·····	25
2.6.1 三向应力状态下的虎克定律·····	25
2.6.2 两向应力状态下的应力应变关系·····	26
2.6.3 平面应变问题·····	27
2.6.4 单向应力状态下的应力应变关系·····	27
2.6.5 G, E, μ 的关系·····	27
2.7 主应力和的微分方程·····	28
2.8 光弹性试验中常用的几个力学概念·····	29
2.8.1 叠加原理·····	29
2.8.2 加力点影响的局部性·····	29
2.8.3 惟一性原理·····	30
参考文献·····	31
第三章 光学基础知识与光贴片基本原理 ·····	32
3.1 光的本性与有关表达式·····	32
3.2 自然光和偏振光及单色光与白光·····	33
3.2.1 自然光与偏振光·····	33
3.2.2 单色光与白光·····	34
3.3 几个有关的光学性能·····	35
3.3.1 光的反射与折射·····	35
3.3.2 光的干涉·····	36
3.3.3 双折射·····	37
3.3.4 光程和光程差·····	38
3.4 视域·····	39
3.4.1 概述·····	39
3.4.2 视见函数·····	39
3.5 应力-光学定律·····	41
3.5.1 一般应力-光学定律·····	41
3.5.2 两向光弹性实验的应力-光学定律·····	42

3.6 偏振光通过受力模型后的光效应·····	44
3.6.1 平面偏振场与圆偏振场的布置·····	44
3.6.2 平面偏振光通过受力模型后的光效应·····	46
3.6.3 圆偏振光通过受力模型后的光效应·····	50
参考文献·····	53
第四章 等差线和等倾线的测定及应力分析 ·····	54
4.1 等差线与等倾线的分辨·····	54
4.2 整数级等差线的观测·····	56
4.3 小数级次等差线的测定·····	59
4.3.1 石英楔体补偿器(巴比涅-索利尔补偿器)·····	60
4.3.2 塔迪补偿法(一种检偏振镜补偿法)·····	61
4.3.3 四分之一波片补偿法(另一种检偏振镜补偿法)·····	65
4.4 等倾线的观测及主应力迹线·····	66
4.4.1 等倾线的测定方法·····	66
4.4.2 应力分离时的等倾线及全场等倾线的记录·····	72
4.4.3 主应力迹线·····	72
4.4.4 主应力迹线的特征及其应用·····	73
4.5 光贴片法的光路布置·····	74
4.6 光贴片法的应力分析·····	76
4.7 光贴片法测弹塑性应变·····	78
4.7.1 单向应力状态·····	78
4.7.2 平面应力状态·····	80
参考文献·····	81
第五章 光贴片材料 ·····	82
5.1 环氧树脂(Ep)光敏贴片·····	83
5.2 聚碳酸酯(PC)光敏贴片·····	86
5.2.1 聚碳酸酯的有关特性及由其颗粒原材料制作 光敏贴片·····	87
5.2.2 曲面光贴片的制作·····	91
5.3 栅状光敏贴片·····	93

5.4 退火处理	98
5.5 自动控温系统简介	99
5.6 材料在常温下的性能及其测定	100
参考文献	102
第六章 胶粘剂	104
6.1 对胶粘剂的要求	104
6.2 光贴片中所用胶粘剂的概况	105
6.3 JDS 型专用胶粘剂	106
6.3.1 原材料确定	106
6.3.2 配制过程及性能测定	111
参考文献	113
第七章 测量系统	114
7.1 光贴片法常用的仪器	114
7.2 几种测量系统的建立	116
7.2.1 离散型系统的建立	116
7.2.2 现场实测用的测试系统	117
7.2.3 透射、反射两用系统	119
7.2.4 变波长测试系统	121
参考文献	123
第八章 信息采集与处理	124
8.1 光贴片条纹图像的特点	124
8.2 图像采集与处理	125
8.2.1 图像采集	125
8.2.2 YWMU 光贴片图像处理软件包简介	126
8.3 YWMU 软件包的应用	128
参考文献	130
第九章 主应力分离	131
9.1 斜射法	131
9.1.1 斜射装置	131
9.1.2 斜射表达式	133

9.2 不用等倾线求解应力分量	137
9.3 栅片法	140
9.4 混合法	142
9.5 测厚法	143
参考文献	144
第十章 光贴片技术的应用	146
10.1 应力集中分析	146
10.1.1 多孔板的应力集中系数测定	146
10.1.2 螺旋副的应力分析	148
10.2 超薄、小型、超静定结构的应力分析	149
10.2.1 4×4 定位格架实际弹簧片的应变分析	153
10.2.2 模型弹簧片的试验研究	154
10.3 断裂分析	156
10.3.1 带有裂纹的管道	157
10.3.2 爆破试验	161
10.3.3 残余应变场的显示	162
10.4 光敏传感器的应用	163
10.4.1 压力传感器	163
10.4.2 J1516 型 160t 压铸机现场标定	165
10.5 优化装配工艺	167
10.5.1 测量部位的确定及光敏贴片的粘接	168
10.5.2 装配应力的测定	170
10.6 现场实测	174
10.6.1 飞机座舱盖应力的现场测试	174
10.6.2 新产品评定	177
参考文献	181
第十一章 光贴片法测量残余应力	183
11.1 焊接残余应力的概况	183
11.2 基本方法及原理简介	188
11.2.1 方法简介	188

11.2.2 原理简介	190
11.3 专用盲孔器	193
11.4 测量系统	196
11.5 影响测量精度的因素	198
参考文献	198
第十二章 弹塑性应变的测定及其它	199
12.1 弹塑性分析	199
12.1.1 单孔拉伸	199
12.1.2 残余弹塑性应变测定	201
12.2 动态应力测定	202
12.3 检查内部缺陷	203
12.4 其它	204
结束语	205

CONTENTS

CHAPTER 1 INTRODUCTION	1
1.1 Elementary concept of photoelastic coating technics	1
1.2 Developing process of photoelastic coating technics	2
1.3 General application situation	4
1.4 Future of photoelastic coating technics	6
References	7
CHAPIER 2 ELEMENTARY CONCEPT OF MECHANICS	8
2.1 Elementary concept of stress and strain	8
2.1.1 Stress	8
2.1.2 Strain	9
2.1.3 Relations between stresses and strians	10
2.2 Stress state at a point	11
2.2.1 Expressing stress state at a point with stresses of each surface of unit body	11
2.2.2 Mutual equal law of shear stresses	13
2.2.3 Classification of stress state of unit body	14
2.3 Plane stress state	15
2.3.1 Counting stresses on inclined section	15
2.3.2 The principal plane and the principal stresses	17
2.3.3 Maximum shear stress	20
2.4 Equations of equilibrium	20
2.4.1 Equations of equilibrium in rectangular co-ordinates system	20
2.4.2 Equations of equilibrium of two-dimensions stress	