

材料力学性能 与 应力测试

韦德骏 主编

湖南大学出版社

材料力学性能与应力测试

韦 德 骏 主 编

湖南大学出版社

1997·长沙

内 容 提 要

本书是湖南大学工程力学系所编的新的材料力学系列教材之一。全书共分五章:力学实验基础,力学性能测试,应力测量,综合性实验,实验设备简介。全书共计 22 个实验,其中,除了材料力学教学基本要求所规定的全部实验外,还增设了 $\sigma_{0.2}$ 、剪切、 K_{IC} 、粘弹性和复合材料等力学性能测试、梁弯曲变形、拉(压)弯组合变形、动应力、压杆稳定等变形和应力测量以及 3 个综合性实验。在每个实验中,对实验原理、实验目的、实验设备与试件、实验方法与步骤、注意事项、实验报告的要求以及思考题等,均有较详细的叙述和较严格的要求,以配合和推动当前的实验教学改革。

本文可作为高等工业学校工程力学、建筑工程、交通工程、机械工程等多学时专业材料力学的实验教材,经一定取舍后,可作为其他中、少学时专业的教学用书。此外,亦可作为从事强度研究的工程技术人员的参考书。

材料力学性能与应力测试

Cailiao Lixue Xingneng Yu Yingli Ceshi

主编 韦德骏

☐ 责任编辑 卢 宇

☐ 封面设计 吴新霞

☐ 出版发行 湖南大学出版社

社址 长沙岳麓山 邮码 410082

电话 0731-8821691 0731-8821315

☐ 经 销 湖南省新华书店

☐ 印 装 湖南大学印刷厂

☐ 开本 787×1092 16 开 ☐ 11.5 印张 ☐ 266 千字

☐ 版次 1997 年 2 月第 1 版 1997 年 2 月第 1 次印刷

☐ 印数 1-4 000 册

☐ 书号 ISBN 7-81053-060-7/O3·1

☐ 定价 14.50 元

(湖南大学版图书凡属印装差错,请向承印厂调换)

前 言

为了配合和推动材料力学实验教学改革,使学生通过实验课不仅可加深对材料力学基本理论、基本方法和基本概念的理解,而且能拓宽学生的知识面,使其对一些近代力学中新的分支学科有所了解;为了使学生不仅在基本力学测试技能和实验动手能力方面有所提高,而且能初步掌握实验科学的基本规律,学会用实验的方法去发现问题、分析问题和解决问题,我们在原编的《材料力学实验》(湖南大学出版社,1989年)一书的基础上,总结了我校近几年材料力学实验教学改革的一系列成果,吸取了兄弟院校同行们的经验,改编成本书。

本书在实验内容上突破了原书只介绍金属(主要是低碳钢)这种均匀连续、各向同性且其力学性能与时间无关的材料的力学性能测试方法,引入了粘弹性材料、复合材料和断裂韧性等有关力学性能测试的内容。为了使学生具备一定的实验科学基础,书中还增加了“力学实验基础”这一章,集中介绍了材料科学中的有关基本理论,电测法的基本原理,误差分析与数据处理以及相似理论与量纲分析等有关知识。此外,为了改变过去的实验项目单纯地停留在验证理论上的偏向,书中还增设了若干内容较新,测试环节较复杂,有较多思考余地的综合性实验。在编排方式上,该书针对原书“方法、步骤详细,原理简单”之不足,对各实验的原理及其工程应用背景均作了较深入的介绍。为了启发和引导学生的思考,本书对原书每个实验后所附的思考题,也进行了调整和加强,使其更具有针对性。

由于本书主要是供单独开设材料力学实验课或实行材料力学模块式教学使用,因而,在编排顺序上并不完全与材料力学教学进程相一致。使用时,请注意调整。此外,本书作为各专业统一使用的材料力学系列教材之一。对各专业在教学侧重点上的区别,自然无法一一满足。因此,各专业可根据学时及专业的需要,对本书的有关内容进行适当取舍,以便组织教学。

本书由湖南大学工程力学系韦德骏任主编。编写分工如次:韦德骏编写绪论,1.1,1.3,1.4,2.6,2.10,3.7;熊渊博编写1.2,2.11,3.6,4.1;官邑编写2.1,2.2,2.3,4.3;徐雪松编写2.4,2.9,第五章;张琼编写2.5,3.1,3.2,3.3,3.4;许文喜编写2.7,2.8,3.5,4.2;韦怀义教授审阅了全书,提出了许多宝贵的意见,特此表示感谢。

编 者

1996.9

目 次

0 绪 论

0.1 实验在材料力学课程中的地位与作用	1
0.2 固体力学实验概述	2
0.3 实验内容和实验须知	3

1 力学实验基础

1.1 应力状态软性系数与力学状态图	5
1.2 电测法基本原理与桥路实验	8
1.3 误差分析与实验数据处理	26
1.4 相似理论与量纲分析	39

2 力学性能测试

2.1 拉伸实验	45
2.2 弹性模量 E 和泊松比 μ 的测定	53
2.3 条件屈服极限 $\sigma_{0.2}$ 的测定	57
2.4 压缩实验	59
2.5 剪切实验	62
2.6 扭转实验	65
2.7 冲击实验	73
2.8 疲劳实验	77
2.9 平面应变断裂韧性 K_{IC} 的测定	81
2.10 有机玻璃的粘弹性实验	86
2.11 单层复合材料弹性常数的测定	90

3 应力测量

3.1 电测弯曲正应力实验	96
3.2 梁弯曲变形实验	98
3.3 弯扭组合变形实验	100
3.4 偏心压缩实验	104
3.5 动应力应变测定	106
3.6 压杆稳定实验	111
3.7 光弹性实验	116

4 综合性实验

4.1 横力弯曲组合梁应力分析实验	128
4.2 框架内力分析实验	132
4.3 真应力-真应变曲线的测试	135

5 实验设备简介

5.1 万能材料试验机	139
5.2 扭转试验机	143
5.3 冲击试验机	146
5.4 疲劳试验机	147
5.5 引伸仪、传感器和标测定仪	150
5.6 电阻应变仪	154
5.7 x - y 记录仪、光线示波器	162
5.8 光弹仪	174

CONTENTS

0 Introduction

0.1 Status and Function of Experiments in Mechanics of Materials	1
0.2 Outline of Experiments in Solid Mechanics	2
0.3 Experiment Contents and Notices	3

1 Fundamental Theory of Mechanical Experiment

1.1 Stress State Soft Coefficient and Mechanical State Diagram	5
1.2 Fundamental Principles of Resistance Strain Measurement Method and Experiment of Bridge Circuit	8
1.3 Error Analysis and Experimental Data Handling	26
1.4 Resemblance Theory and Dimension Analysis	44

2 Mechanical Properties Testing

2.1 Tension Test	45
2.2 Measurements of Elastic Modulus E and Poisson's Ratio μ	53
2.3 Measurement of Conditioned Yield Strength $\sigma_{0.2}$	57
2.4 Compression Test	59
2.5 Shear Test	62
2.6 Torsion Test	65
2.7 Shock Test	73
2.8 Fatigue Test	
2.9 Measurement of Plane Strain Fracture Toughness K_{IC}	81
2.10 Visco-elasticity Test of Plexiglass	86
2.11 Measurements of Elastic Coefficients of Single-layer Composite Materials	90

3 Stress Measurements

3.1 Direct Bending Stress Test by Resistance Strain Measurement Method	96
3.2 Beam Flexural Deformation Test	98
3.3 Combined Bending and Torsional Deformation Test	100
3.4 Eccentric Compression Test	104
3.5 Dynamic Stress Measurement	106
3.6 Buckling Test of Column	111
3.7 Photoelastic Test	116

4 Synthetic Test

4.1 Test of Stress Analysis of Composite Beam in Transverse Bending	128
4.2 Test of Internal Force Analysis of Frame	132
4.3 Measurement of True Stress-Strain Curve	135

5 Brief Introduction to Experimental Equipments

5.1 Universal Testing Machine	139
5.2 Torsional Testing Machine	143
5.3 Shock Testing Machine	146
5.4 Fatigue Testing Machine	147
5.5 Extensometer, Sensor and Demarcated Instrument	150
5.6 Resistance Strain Instrument	154
5.7 x-y Recorder and Ray Oscilloscope	162
5.8 Polariscope	174

0 绪 论

0.1 实验在材料力学课程中的地位与作用

实验是进行科学研究的重要方法,中外科学史上的许多重大发现都是靠科学实验得到的。材料力学中的许多结论及公式也是通过实验而建立起来的。例如,达·芬奇(Leonardo da Vinci)就是通过对各种不同长度的铁丝和梁作试验来研究材料的强度。他认为实验和观察是正确知识的唯一来源,他十分重视实验结果的“再现性”。伽里略(Galileo)是第一个把实验引进力学的科学家,他利用实验和数学相结合的方法确定了一些重要的力学定律。例如,摆的等时性定律,自由落体定律(据说他所做的落体实验就是在比萨斜塔上公开进行的)等。在材料力学方面,他阐述了关于梁的弯曲试验,正确地断定了梁的抗弯能力与其几何尺寸的力学相似关系,指出了受集中载荷作用的简支梁上的最大弯矩就在载荷作用处,且与它到两支点的距离之积成比例。胡克(Robert Hooke)在1660年通过一系列的弹簧试验,发现螺旋弹簧的伸长量与所受的拉力成正比,从而建立了著名的胡克定律。^{*}实际上,近代塑性理论中的应力应变关系,高温蠕变的基本规律,金属疲劳的持久极限以及近代许多新的力学分支(如断裂力学、复合材料力学、生物力学等)中的许多结论,也都是在试验的基础上建立的。因此,可以毫不夸张地说,实验是一切科学理论的基础。

此外,力学实验还是解决工程实际问题的重要手段。例如,为了解决工程设计中的强度、刚度和稳定性问题,就必须了解材料的力学性能,而材料的力学性质只有通过试验才能测定;在研究新材料和热处理新工艺时,也需要测定其力学性质以检验它们的质量指标和工艺要求;在研究焊接技术时,就需要对焊接结构的强度和变形进行测试以及对热影响所引起的残余应力进行测量;在研究桥梁的强度和刚度时,就需要对它的上、下部结构进行缺陷的无损检测、模态分析和应力测试。有些复杂的工程实际问题,用理论分析往往无法得出可靠的结论,这时,实验方法常常是解决这些问题的有效途径。特别是对于某些边界条件不明确,甚至连材料性质都不清楚的问题,理论分析和数值计算均已无法进行,但却可以通过实验来测出其应力和变形数据,从而解决这些问题。可见,力学实验是工科各专业学生应该掌握且可用来解决许多工程实际问题的基本方法之一。

在材料力学课程中,通过这一实验教学环节不仅可以使学生巩固、加深理解材料力学的基本概念、基本理论和基本方法,而且可以使学生掌握测定有关材料的力学性质以及用

^{*} 我国东汉经学家郑玄比胡克早1500年就曾作出关于力和变形成正比关系的记载。

实验方法对机械和结构物进行应力分析的基本技能。此外,通过实验还可以培养学生的观察能力、分析能力、操作能力、思维能力、创造能力、编写技术文件和组织实验的能力;可以培养学生实事求是,严谨的科学态度;认真负责,一丝不苟的工作作风,使之具备一个科学工作者应有的良好素质。

0.2 固体力学实验概述

力学实验所涉及的范围非常广泛。大致可将其分为:固体力学实验、流体和气动力学实验以及振动实验这三大类。其中每一类又包含了非常丰富的试验方法,例如,固体力学实验中,就包含了各种工程材料(如金属材料、陶瓷、高分子材料和复合材料等)在静载、冲击、疲劳、蠕变、硬度、腐蚀、磨损、接触等条件下的力学性能和断裂韧性的测试,以及用实验方法对各种机械与结构物进行应力、应变或位移测量的实验应力分析等。

所谓材料的力学性能是指材料在力、能量的作用下或力与环境因素(温度、介质等)联合作用下所表现的力学行为。这种力学行为通常表现为材料的变形和断裂。材料的力学性能所反映的正是材料抵抗变形和断裂的能力。

材料的力学性能所包括的特性有:强度、刚度、弹性、塑性、冲击韧性、疲劳和断裂韧性等。其相应的指标有:强度指标 $\sigma_s, \sigma_{0.2}, \sigma_b, \tau_s, \tau_{0.2}, \tau_b$, 弹性常数 E, μ, G , 塑性指标 δ, ψ , 冲击韧性指标 a_k , 疲劳强度指标 σ_{-1} , 断裂韧性指标 K_{IC}, δ_C, J_{IC} 等等。材料的力学性能优劣就是用这些指标的具体数值来衡量的。这些指标不仅是工程机械和结构设计中的重要数据,而且是新材料能否由研制状态进入工程应用的基本考核依据。

材料的力学性能决定于它的化学成份、组织结构、冶金质量、表面和内部缺陷等内在因素。而诸多的外在因素,如载荷性质(静载、动载、冲击载荷、交变载荷等)、应力状态(如拉、压、剪、扭、弯、接触应力及各种组合变形)以及温度和环境介质等,对材料的力学性能也有很大的影响。为避免各种失效现象的产生,必须通过材料在不同内在和外在条件下的各类试验,测出相应的各种力学性能指标,以便为结构零件的选材和预防失效提供可靠的依据。

由于有些力学性能指标不仅与材料本身的固有属性有关,而且往往还与试样的形状、尺寸、表面加工精度等因素有关。因此,为了能使试验结果互相比对,国家对各种试验的试样取材、形状尺寸、加工精度、试验手段和方法,以及数据处理等均作了统一规定,即国家标准(其代号为GB)。材料的各种力学性能测试均应在符合国家标准的前提下进行。

实验应力分析是一种用实验方法测定构件中应力和变形的方方法。目前,它已成为解决工程强度问题的重要手段。对合理使用材料,挖掘设备潜力,寻求最佳设计方案,进行失效分析评定,改进产品性能以及探索新的理论起到了重大作用。

随着电子技术、激光技术和计算机技术的发展,实验应力分析得到了迅速的发展。现已具有十几种可供实际应用的实验方法,如电测法、光弹性法、脆性涂层法、比拟法、云纹法、激光全息干涉法、全息光弹性法、散斑干涉法、散光法、焦散线法、X光衍射法、磁测法、声发射法……等等。这些方法不仅可以用来测定应变、应力及位移,而且还可测定压力、加速度、裂纹扩展位移和速率,以及构件的残余应力等物理量。在这些方法中,目前在

工程中应用得最广泛的还是电测法和光弹性法。本书将主要介绍这两种方法。

0.3 实验内容和实验须知

(1) 内容简介

本教材的内容由五个部分组成:

第一部分:力学实验基础。这是学习力学实验应具备的共同基础,其中包括:应力状态软性系数与力学状态图,电测法基本原理与桥路实验,误差分析与实验数据处理,相似理论与量纲分析等。

第二部分:力学性能测试。这部分内容,除了有配合教学所必需的基本力学性能指标的测试外,还增加了泊松比 μ , 剪切弹性模量 G , 条件屈服极限 $\sigma_{0.2}$, 直接剪切的抗剪极限强度 τ_s , 断裂韧性 K_{IC} , 粘弹性材料的弹性模量以及复合材料弹性常数的测试等新项目。

第三部分:应力测量。这部分内容既包括了用电测法和机械测量法验证弯曲正应力、弯曲变形、拉(压)弯组合变形、弯扭组合变形、动应力以及压杆稳定的临界应力等有关结论和公式,还介绍了光弹性原理以及材料条纹值 f 和应力集中系数的测定方法。

第四部分:综合性实验。在这部分内容中安排了一些测试环节较复杂,内容较新、需要进行综合分析、有较多思考余地的实验。例如组合梁的应力分析与框架的内力分析以及真应力-真应变曲线的测试等。

第五部分:实验设备简介。主要介绍了有关试验机、引伸仪、应变仪、记录仪、光弹仪的构造、工作原理、使用说明、操作规程和注意事项等,供学生在实验前的预习时阅读。

(2) 实验须知

为了确保实验教学的顺利进行,以获得预期效果,参与实验者应做到下列几点:

①及时做好实验前的准备工作。其中包括:

(a)预习实验教材,了解本次实验的有关原理,明确其实验目的、方法和步骤。做好实验前回答教师检查预习情况的提问准备。

(b)阅读有关机器、仪器的使用说明,了解其结构、工作原理及操作规程(可去实验室面对所使用的机器、仪器进行该项预习)。

(c)确定本次实验的加载方案,明确必须掌握的有关参数及其需测试的数据。事先做好有关的记录表格。

(d)明确同一实验小组内各人的分工,并互相协调,使每人都有动手完成所有实验环节的机会。

②严肃认真地进行实验。具体要求是:

(a)实验前,要认真回答教师检查预习情况的提问。

(b)注意听取教师对本次实验的有关讲解。

(c)由实验小组组长清点由小组掌握使用的有关设备、试件及器材。如有遗缺,应及时向指导教师提出。

(d)认真、细致地按照实验教材中所要求的方法和步骤,并严格地遵照有关机器的操作规程,逐步进行实验。对于可能出设备或人身事故的实验,在正式开动机器、仪器前,应

请指导教师检查,检查通过后,方可开机实验。

(e)在实验过程中,应密切注意观察实验现象,并记录下所需的全部测量数据及其相应的环境条件(如温度和湿度等)。对原始数据不得任意修改。实验中若发现异常情况或故障,应及时向指导教师报告。

(f)实验完毕后,应将实验数据交由指导教师检查并签字。否则,其所做的实验报告,不予认可。

(g)离开实验室前,应清理所用的机器、仪器及试件(包括已被破坏的试件),并由组长负责归还借用的有关器材。

③独立完成实验报告。

实验报告是实验成果的总结。通过实验报告的书写,可以提高学生的观察能力、思维能力、分析能力,创造能力和撰写技术文件的能力,因此,每位学生应独立完成实验报告。一份理想的实验报告应该是:实验目的及测试条件明确,实验原理正确,实验方法及步骤清晰、有条理,实验数据完整,字迹工整,曲线图表齐全,数据处理及其计算准确无误,并要对本次实验作出定量或定性的(在只进行一次的实验中)误差分析。此外,还应该结合实验所得的结果,作出自己的分析和讨论。对于有理论解的问题,还应该将其与实验结果进行比较。作为启发和引导,本书在每一实验后均附有若干思考题。因此,报告的最后应回答教师指定的思考题。各个实验项目的实验报告均应在该项实验完成后的一周之内交由实验室批改。

1 力学实验基础

1.1 应力状态软性系数与力学状态图

1.1.1 应力状态软性系数

材料在不同的应力状态下常常有不同的力学性能响应。例如,低碳钢在静拉伸时先产生弹性变形,然后达到屈服极限,产生了显著的塑性变形,最后,在形成颈缩后产生韧性断裂,从而显示了良好的塑性特征。但是,当低碳钢材料承受交变应力时,它却在低于屈服极限的应力下产生断裂。而且,在断裂的试件上已看不到宏观的塑性变形。至于低碳钢在低温下承受静拉伸时,则完全表现出了明显的脆性行为。又如,灰铸铁在拉伸和硬度试验中的结果是,前者呈脆性断裂,而后者则可出现明显的压痕而不发生破坏,表现出明显的韧性。由此可见,同一种材料在某种应力状态下,其材料性能可以表现出“软”的方面(即易产生塑性变形、韧性断裂),而在另一种应力状态下,又可能表现出“硬”的方面(即不易变形,表现出脆性断裂)。为了便于区分材料在不同的力学性能试验方法(即加载方式)下,亦即材料在不同的应力状态下,其表现出的力学性能“软”、“硬”的差异,以帮助实验者选用某种较适宜的试验方法,从而较准确地测出所需的性能指标,我们应了解下述“应力状态软性系数”的概念。

材料力学中的应力状态与强度理论告诉我们,材料内任一点的应力状态可以用一在该点附近取出的单元体上作用着的六个应力分量(其中,三个为正应力,三个为剪应力)来表示。另外,任一点的应力状态必定存在着三个主应力,按其代数值大小排列为 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$,则该点的最大剪应力为

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

按第二强度理论所得出的相应应力(亦即相当的最大正应力)为

$$\sigma_{\text{eq2}} = \sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)$$

式中 μ 为材料的泊松比。

最大正应力与最大剪应力在材料的变形和断裂过程中所起的作用是不同的。一般说来,最大剪应力引起塑性变形,使材料产生韧性断裂;而最大正应力通常导致脆性断裂。所以,从宏观上讲,我们可以用不同应力状态中的最大剪应力 $\tau_{\max}$ 与最大正应力 $\sigma_{\max}$ 的比值,来判断材料在所受加载方式下趋于何种变形与断裂。该比值

$$\alpha = \frac{\tau_{\max}}{\sigma_{\max}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2[\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)]} \quad (1.1.1)$$

称为应力状态软性系数。

α 值越大,最大剪应力的份量越大,表示该应力状态越“软”,材料越容易产生塑性变形和韧性断裂。反之, α 值越小,表示该应力状态越“硬”,材料则越容易产生脆性断裂。

表 1.1.1 中给出了 $\mu=0.25$ 的材料在几种常见的加载方式下的应力状态软性系数值。

表 1.1.1 不同加载方式下的应力状态软性系数($\mu=0.25$)

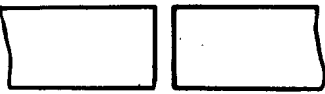
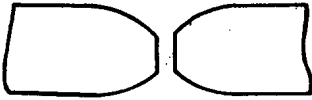
加 载 方 式	主 应 力			软性系数 α
	σ_1	σ_2	σ_3	
三向不等拉	σ	$(8/9)\sigma$	$(8/9)\sigma$	0.1
单向拉伸	σ	0	0	0.5
扭转	σ	0	$-\sigma$	0.8
二向等压	0	$-\sigma$	$-\sigma$	1
单向压缩	0	0	$-\sigma$	2
三向不等压	$-\sigma$	$-(1/3)\sigma$	$-(1/3)\sigma$	4

由上表可见,三向不等拉伸和三向不等压缩是两种极端状态,而单向拉伸的 $\alpha=0.5$,“软”、“硬”比较适中,这正是它在材料所有的力学试验中应用最广的主要原因。

1.1.2 力学状态图

由材料力学的强度理论知,屈服与断裂是材料破坏的两种基本形式(或称材料的两种失效形式)。而断裂这种破坏形式又可以按断裂前所产生的塑性变形,或断裂过程中所吸收的能量大小,分为韧性断裂或脆性断裂两种类型。若根据断裂面的取向,断口与其最大正应力(或最大线应变)、最大剪应力方向之间的关系,又可将断裂方式分为正断和切断两种方式。所谓正断,即其断口与最大正应力(或最大线应变)的方向垂直,此时,材料是被最大正应力所拉断的;如果断口与最大剪应力的方向一致,则这种断裂方式被称为切断,亦即材料是被最大剪应力所剪断的。上述断裂类型的分类方法及其特征如表 1.1.2 所示。

表 1.1.2 断裂分类及其特征

分 类 方 法	名 称	断 裂 示 意 图	特 征
根据断裂前塑性变形大小分类	脆性断裂		断裂时没有明显的塑性变形,断口形貌是光亮的结晶状
	韧性断裂		断裂时有塑性变形,断口形貌是暗灰色纤维状
根据断裂面的取向分类	正断		断裂的宏观表面垂直于 $\sigma_{\max}$ 方向
	切断		断裂的宏观表面平行于 $\tau_{\max}$ 方向

在材料、加载方式和环境等因素已给定的情况下,人们自然希望对该材料可能发生的断裂类型能有一种粗略的估计方法,以便使人们采取一定措施,避免可造成灾难性事故的脆性断裂的发生。力学状态图就是一种可协助人们对断裂类型作粗略判断的较好工具。

力学状态图实际上就是材料力学中的联合强度理论。图 1.1.1 即为某材料的力学状态图。图中以第三强度理论所给出的最大剪应力 $\tau_{\max}$ 为纵坐标,以第一或第二强度理论所给出的最大正应力或相当应力 $\sigma_{\max}$ (即 $\sigma_{\text{eq2}} = \sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)$) 为横坐标。图中过坐标原点的各直线的斜率即代表该材料在各种不同加载方式下的应力状态软性系数 α 。此外,图上还有反映该材料对屈服、切断和正断这三种失效状态抗力指标的三条直线:剪切屈服线 τ_s 、切断线 τ_k 和正断线 $\sigma_{k\text{正}}$ 。这三条直线上的各点分别表示要使材料发生屈服、切断和正断所需的极限应力。其中,材料的切断抗力 τ_k 可通过扭转试验测得,而正断抗力 $\sigma_{k\text{正}}$ 即为静拉伸试验中可测得的屈服极限 σ_s 或真实的抗拉强度(材料在发生颈缩瞬间的真实应力)。正断线 $\sigma_{k\text{正}}$ 在 τ_s 线以下部分与纵坐标轴平行,超过 τ_s 线后,因其将随塑性变形的发展而增大,故变为上斜线。

从图 1.1.1 可清楚地看到,力学状态图被这三条线围成了四个区域:在切断线 τ_k 以上的区域为切断区;在切断线 τ_k 与剪切屈服线 τ_s 之间为塑性变形区;在剪切屈服线 τ_s 以下、及其与正断线 $\sigma_{k\text{正}}$ 所围的区域为弹性变形区;在正断线 $\sigma_{k\text{正}}$ 的右侧区域则为正断区。

力学状态图可被用来判断该材料在任何一种加载方式的过程中所表现的有关力学行为和可能发生的失效状态。例如,图 1.1.1 所示的材料在单向拉伸的加载情况下($\alpha=0.5$),其射线是先与 τ_s 线相交,后与 $\sigma_{k\text{正}}$ 线相交。这说明该材料

在单向拉伸时,将先产生弹性变形,然后发生宏观塑性变形,最后以正断式的韧性断裂而告终。而该材料在扭转加载方式($\alpha=0.8$)情况下,射线是先后与 τ_s 和 τ_k 线相交的。这表明该材料在受扭时,将在发生弹性变形、塑性变形后,最后表现为切断式的韧性断裂。至于该材料在三向不等拉伸($\alpha<0.5$)时,因其射线只与 $\sigma_{k\text{正}}$ 线相交,故该材料在断裂前将无塑性变形,并最后产生正断式的脆性断裂。

温度和加载速度的改变对断裂类型的影响也可以从力学状态图上反映出来。一般来说,温度和加载速度对 τ_s 有较大影响(τ_s 将会随湿度的下降或加载速度的提高而上升),但它们对 τ_k 和 $\sigma_{k\text{正}}$ 的影响却较小,可近似地视其为不受影响。图 1.1.2 分别给出了某材料在室温和低温下的 τ_s 线,从该图可看出,该材料在室温下单向拉伸时,材料表现为正断式韧性断裂,而在低温下,同样的加载方式却出现了正断式脆性断裂。这就是为什么材料会出现冷脆转变的原因。同理,材料的脆性断裂倾向还可以通过改变加载方式(如将单向拉伸改为三向不等拉伸等)以及提高加载速度而得到加强。

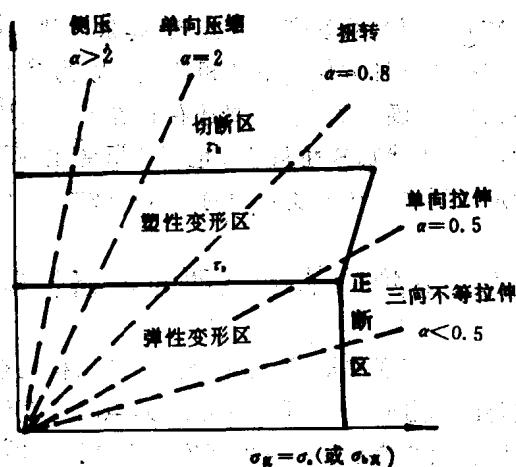


图 1.1.1 某材料的力学状态图

综上所述,力学状态图有下列用途:

①预测断裂类型:即预测材料在某应力状态下将可能产生正断还是切断,是属于韧性断裂还是脆性断裂。

②合理地选择和利用材料:根据力学状态图可确定已定应力状态的构件,应选用具有何种性能的材料才不致产生脆性断裂;或在已定材料性能的情况下,确定该材料在什么样的应力状态之下才能安全工作。

③正确选择力学性能的试验方法:由于材料在不同应力状态下表现的行为不同,故为充分显示材料的某种力学性能,必须根据应力状态来选择相应的力学性能试验方法。

应当指出,这种把两种强度理论(纵、横坐标)、材料性能($\tau_s, \tau_k, \sigma_{k\pi}$)、加载方式(软性系数 α 射线)、断裂类型与方式(屈服、切断、正断)联系在一起的力学状态图,只能作为强度问题的一种近似性解释和估计。因为绝大多数金属材料的 τ_s, τ_k 均多少与应力状态有关,而且正断抗力 $\sigma_{k\pi}$ 本身还存在着定义上和测定上的困难,更何况当材料产生塑性变形后,其应力状态软性系数 α 也将有所变化,而不再保持直线。尽管如此,力学状态图仍不失为定性阐述材料强度问题的一种有效方法。

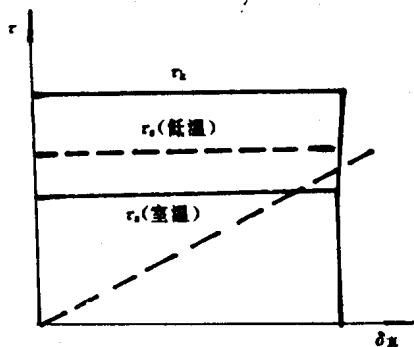


图 1.1.2

1.2 电测法基本原理与桥路实验

电阻应变测量(简称电测法),在工程上被广泛地用来测量构件的应力。它的测量系统主要由电阻应变片(简称应变片),电阻应变仪和记录器三部分组成。其基本原理是:将作为传感元件的应变片粘贴或安装在被测试件表面指定点,然后接入测量电路,当构件受力变形时,应变片的电阻值发生相应变化,测量电路将这电阻变化转换成电压(或电流)信号,经放大器放大后由指示仪表或记录器指示或记录,亦可直接用计算机进行记录及数据处理,得到所需的应变或应力值。这是一种将机械量转换为电学量的测量方法。

电测法的主要特点是:测量灵敏度和精度高,其最小应变读数为一个微应变($1\mu\epsilon = 10^{-6}$),一般常温静态应变测量的精度可达 1.5~3%;应变片尺寸小、质量小、安装方便,对被测构件的工作状态和应力分布不会产生干扰,宜于进行大规模的多点测量,也能满足应力梯度较大情况下的应变测量;可测静应变,也可测频响范围在 0~500 千赫的动应变;由于其输出为电信号,故易于实现测试过程自动化和数字化,并能进行远距离测量及无线电遥测;应变片可以做成各种型式,或配合专门的弹性元件制成各种型式的传感器,来测量力、压强、扭矩、位移、加速度等参数,以满足力学测量上的多种需要。当然电测法也有其局限性,例如除对塑料、混凝土等一些便于安装内埋式应变片的构件可测量其内部应变外,一般只能测量试件的表面应变,由于这是一种逐点式测量方法,因而不能得到试件上应力分布的全貌;另外测量系统所使用的仪器和连接导线较多,而测量转换的输出电信号较弱,故很易受测试环境因素(如温度、湿度、强磁场等)的影响。尽管如此,电测法因为具

有众多的优点,因而几乎在国民经济各部门和科学研究中都得到了广泛的应用。

下面将从电阻应变片和测量电桥电路来介绍电测法的原理,并通过桥路实验来熟悉测量电桥的应用。

1.2.1 电阻应变片的工作原理

1.2.1.1 电阻应变的基本构件

电阻应变片(简称应变片)的结构型式有很多种。它们是随制造材料、工作特性、应用场合和工作条件等的不同而不同的,图 1.2.1 中列举了几种典型的结构型式。它们的结构

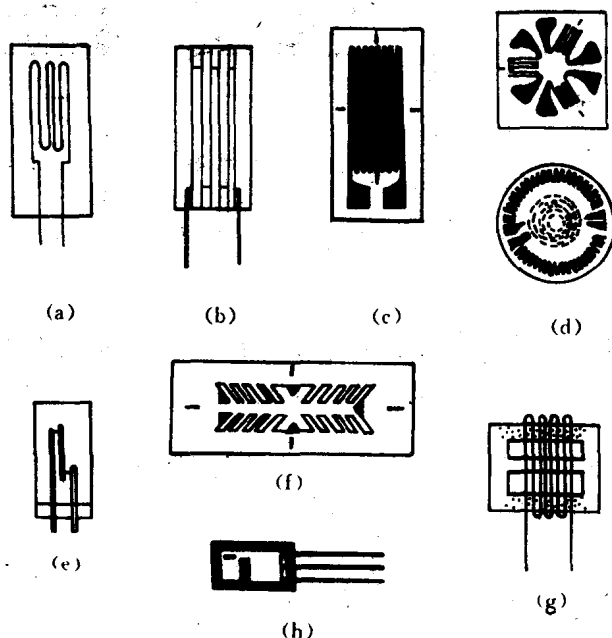


图 1.2.1 电阻应变计的几种典型结构型式

- (a)丝绕式应变计; (b)矩接式应变计; (c)箔式应变计; (d)多轴应变计;
(e)半导体应变计; (f)复式应变计; (g)临时基底应变计; (h)焊接式应变计

型式虽有不同,但基本构造则是大致相同的,主要由敏感栅、基底、引线、粘结剂和表面覆盖层等五部分组成(见图 1.2.2)。

敏感栅是应变片中把应变量转换成电阻变化量的关键部分。一般用直径为 $0.003 \sim 0.01\text{mm}$ 的合金丝绕成栅状(丝绕式应变片)或用厚度为 $3 \sim 5\mu\text{m}$ 的合金箔片经光刻腐蚀加工制成栅状(箔式应变片),其规格用栅长 L 和栅宽 B 来表示。各类应变片的栅长一般为 $0.2 \sim 100\text{mm}$,电阻值通常为 $60 \sim 350\Omega$ 。

引线是用来引出敏感栅的输出电信号,而比敏感栅丝尺寸大的金属导线。为了减少引线带来的误差,通常采用低电阻率和电阻温度系数较小的材料制成,其形状有细丝和扁带两种。

基底的作用是保持敏感栅的几何形状和相对位置,并保证敏感栅和被测试件之间良好的绝缘;表面覆盖层是用来保护敏感栅的。它们的材料通常是纸、有机树脂膜、粘结剂胶膜和浸胶玻璃纤维布等。