

工程力学模块化系列教材



北京市高等教育精品教材立项项目

ENGINEERING MECHANICS  
ENGINEERING MECHANICS

# 工程力学 实验教程

王正道 丁克勤 编著

2-33

0



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

北京市高等教育精品教材立项项目  
工程力学模块化系列教材

# 工程力学实验教程

王正道 丁克勤 编著

TP12-35  
11.15.0

电子工业出版社  
Publishing House of Electronics Industry  
北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书是一本工程力学实验教材或实验指导书。书中不仅介绍了目前的一些力学实验方法的基本测试原理,而且深入讲解了各自的优缺点、适用范围和工程应用,从而使读者可以更有效地运用这些已有实验技术解决实际问题,并对现有方法进行改进扩充,乃至提出新的实验方法和测试原理。

本书是北京市高等教育精品教材立项项目,全书包括两部分,共8章。第一部分是方法篇,介绍力学实验中通常所涉及的4类基本实验技术,即应变电测技术、光测力学技术、磁测技术和超声检测技术的基本原理、测试方法及典型工程应用;第二部分为专题篇,介绍工程力学实验所涉及的一些专题问题及测试技术,包括断裂力学测试技术、材料显微分析技术、微/纳米力学测试技术和相似原理及模型设计。

本书可作为普通高等院校力学及相关专业本科生和研究生的实验教材,也可供从事力学研究和应用的工程技术人员学习和参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

工程力学实验教程/王正道,丁克勤编著. —北京:电子工业出版社,2010.6

(工程力学模块化系列教材)

ISBN 978-7-121-10845-7

I. ①工… II. ①王…②丁… III. ①工程力学—实验—高等学校—教材 IV. ①TB12-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第084722号

策划编辑:余义

责任编辑:李秦华

印刷:北京市顺义兴华印刷厂

装订:三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开本:787×1092 1/16 印张:13.25 字数:339千字

印次:2010年6月第1次印刷

印数:4000册 定价:26.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

# 前 言

本书是为高等院校力学、土木、机械工程、航空航天等专业高年级本科生和研究生编写的一本实验力学教学参考书。了解相关力学实验原理，掌握必要实验技术，这对上述专业学生日后从事与本专业相关的工作是非常必要的。作者多年来一直给硕士研究生讲授“力学实验技术”一课，有感于手头没有一本合适的教材，因此在整理相关讲稿基础上编写了本书。

和现有已出版各类实验力学教材相比，本书在内容设计上主要基于以下几点考虑。首先，现有实验力学教材往往仅限于应变电测和光测实验力学两部分知识的介绍，考虑到超声测试技术和磁测技术在现代实验力学及无损检测领域占据越来越重要的地位，本书在方法篇中增加了对这两类方法的介绍。其次，随着电镜技术的发展，通过观察微观结构，了解材料组分，分析结构破坏原因，这已成为现代工程结构件失效机理分析的一个主要手段，因此，本书在专题篇中有一章专门介绍电镜分析知识。另外，当被测试件尺寸小到微/纳米量级，一些传统力学实验技术往往不再适用，与之相对应建立的一些力学模型也需要做进一步修正，因此，本书专门有一章介绍微/纳米测试技术。同时，作为一本实验教材，本书在编写时力求原理介绍简明扼要，同时注重对不同实验方法的典型应用实例的列举，即强调实用性。

需要说明的是，本书内容主要围绕固体力学以及与固体材料相关的实验力学测试方法，有关流体力学的一些专门实验方法在本教材中未加介绍。

本书前期准备过程中得到了北京市“十一五”精品教材项目的支持，在内容编写过程中参照了国内众多同行编著的相关教材、手册，以及发表的学术论文，并在各章结尾对主要参考文献进行了列举，这里对此一并表示感谢。

由于我们的水平有限，以及编写时间的仓促，本书难免存在许多不足之处，敬请读者批评、指正。

编 者

2009年12月2日

# 目 录

绪论 .....	(1)
----------	-----

## 第一部分 方法篇

<b>第 1 章 应变电测技术 .....</b>	<b>(6)</b>
1.1 应变电测基础 .....	(6)
1.1.1 应变电阻效应 .....	(6)
1.1.2 电阻应变计 .....	(7)
1.1.3 应变电测法的优缺点 .....	(9)
1.2 电测组桥技术 .....	(10)
1.2.1 惠斯通电桥 .....	(10)
1.2.2 半桥、全桥法 .....	(11)
1.2.3 几种接桥示例 .....	(12)
1.3 应变电测若干技术问题 .....	(14)
1.3.1 应变片粘贴技术 .....	(15)
1.3.2 应变片粘贴方位误差的影响 .....	(15)
1.3.3 长导线影响及修正 .....	(16)
1.3.4 温度变化影响及补偿 .....	(16)
1.4 典型电阻应变式传感器简介 .....	(17)
1.4.1 测力传感器 .....	(17)
1.4.2 扭矩传感器 .....	(18)
1.4.3 压力传感器 .....	(19)
1.4.4 位移传感器 .....	(19)
1.4.5 加速度传感器 .....	(19)
1.5 SHPB 动态冲击变形测量方法 .....	(20)
1.5.1 SHPB 发展历史 .....	(21)
1.5.2 SHPB 测试系统及实验原理 .....	(22)
1.5.3 SHPB 实验的几个基本问题 .....	(24)
1.6 参考文献 .....	(27)
<b>第 2 章 光测力学技术 .....</b>	<b>(29)</b>
2.1 云纹法 .....	(29)
2.1.1 简介 .....	(29)
2.1.2 基本原理 .....	(30)
2.1.3 云纹法测量物体面外位移 .....	(34)

2.1.4	云纹干涉法	(38)
2.2	光弹性力学实验	(43)
2.2.1	光学基础知识	(44)
2.2.2	应力-光学定律	(45)
2.2.3	等倾线和等差线	(46)
2.2.4	光弹应力测试技术	(47)
2.3	散斑测试技术及其应用	(52)
2.3.1	概述	(52)
2.3.2	散斑场的获得	(54)
2.3.3	电子散斑干涉技术	(55)
2.3.4	数字散斑相关技术	(57)
2.3.5	散斑测试技术工程应用	(59)
2.4	参考文献	(62)
<b>第3章</b>	<b>磁测技术</b>	<b>(64)</b>
3.1	基本概念	(64)
3.1.1	磁场强度、感应磁场、磁导率	(64)
3.1.2	铁磁性材料及磁滞回线	(65)
3.1.3	磁畴和磁畴结构	(65)
3.1.4	磁致伸缩效应和逆磁致伸缩效应	(66)
3.2	磁粉探伤	(67)
3.2.1	磁粉探伤的优缺点	(67)
3.2.2	磁粉探伤的影响因素	(68)
3.2.3	磁粉探伤的工程应用	(68)
3.3	漏磁检测	(69)
3.3.1	测试原理	(70)
3.3.2	缺陷的漏磁场信号特点	(70)
3.3.3	漏磁场信号影响因素	(71)
3.3.4	漏磁检测中缺陷的量化	(72)
3.3.5	漏磁场检测工程应用	(77)
3.4	巴克豪森磁噪声法	(78)
3.4.1	检测原理	(78)
3.4.2	巴克豪森磁噪声信号影响因素	(78)
3.4.3	巴克豪森检测法的工程应用	(81)
3.5	磁声发射检测	(83)
3.5.1	检测原理	(84)
3.5.2	应力的影响	(85)
3.5.3	MAE 检测系统	(85)
3.5.4	应用示例	(86)

3.6	金属磁记忆法 .....	(88)
3.6.1	检测原理 .....	(88)
3.6.2	工程应用 .....	(89)
3.6.3	研究进展 .....	(93)
3.7	参考文献 .....	(94)
<b>第4章</b>	<b>超声检测技术 .....</b>	<b>(96)</b>
4.1	超声波检测的物理基础 .....	(96)
4.1.1	超声波的波形 .....	(97)
4.1.2	超声波的传播速度 .....	(99)
4.1.3	超声波传播过程中的衰减 .....	(100)
4.2	超声线性表征技术 .....	(100)
4.2.1	前言 .....	(100)
4.2.2	检测系统 .....	(101)
4.2.3	影响缺陷回波幅度的因素 .....	(104)
4.2.4	实际缺陷的定量评定方法 .....	(105)
4.2.5	不同波形的激发 .....	(107)
4.2.6	线性表征参数 .....	(109)
4.3	超声非线性检测技术 .....	(115)
4.3.1	前言 .....	(115)
4.3.2	测试原理和理论模型 .....	(116)
4.3.3	超声非线性应用 .....	(117)
4.4	参考文献 .....	(119)

## 第二部分 专题篇

<b>第5章</b>	<b>断裂力学测试技术 .....</b>	<b>(122)</b>
5.1	断裂力学基础 .....	(122)
5.1.1	断裂机理及三种基本裂纹形态 .....	(122)
5.1.2	断裂强度因子 .....	(123)
5.1.3	$J$ 积分 .....	(124)
5.1.4	裂尖张开位移 .....	(124)
5.2	线弹性断裂参数 $K_{Ic}$ .....	(125)
5.2.1	平面应变断裂韧性 $K_{Ic}$ 的确定 .....	(125)
5.2.2	表面裂纹 $K_{Ic}$ 的确定 .....	(128)
5.3	弹塑性断裂 COD 和 $J$ 积分 .....	(130)
5.3.1	COD 临界值 $\delta_c$ 的确定 .....	(130)
5.3.2	$J$ 积分临界参数 $J_{Ic}$ 的确定 .....	(134)
5.4	基本断裂功 .....	(137)
5.4.1	前言 .....	(137)
5.4.2	基本原理 .....	(138)

5.4.3	研究进度 .....	(139)
5.5	参考文献 .....	(142)
<b>第6章</b>	<b>材料显微分析技术 .....</b>	<b>(145)</b>
6.1	光学显微镜 .....	(145)
6.1.1	前言 .....	(145)
6.1.2	原理及应用 .....	(146)
6.2	透射电子显微镜 .....	(149)
6.2.1	基本结构 .....	(149)
6.2.2	明暗场成像原理及操作 .....	(151)
6.2.3	高分辨透射电镜在材料科学中的应用 .....	(153)
6.3	扫描电子显微镜 .....	(158)
6.3.1	工作原理 .....	(159)
6.3.2	基本结构 .....	(159)
6.3.3	主要性能指标 .....	(161)
6.3.4	断口分析和表面形貌观察 .....	(162)
6.4	参考文献 .....	(167)
<b>第7章</b>	<b>微/纳米力学测试技术 .....</b>	<b>(168)</b>
7.1	绪论 .....	(168)
7.1.1	微/纳米尺度下的力学问题 .....	(168)
7.1.2	微/纳米力学测试基本方法 .....	(169)
7.1.3	微/纳米力学测试关键技术 .....	(169)
7.2	纳米压痕技术 .....	(170)
7.2.1	测试原理 .....	(170)
7.2.2	相关力学量的测定 .....	(172)
7.2.3	影响测试精度的关键因素 .....	(173)
7.3	微弯曲实验 .....	(174)
7.3.1	微梁法 .....	(175)
7.3.2	微桥法 .....	(177)
7.4	单轴微拉伸实验 .....	(178)
7.5	其他微/纳米力学测试技术 .....	(181)
7.5.1	鼓膜实验 .....	(181)
7.5.2	纳米划入实验 .....	(183)
7.6	参考文献 .....	(184)
<b>第8章</b>	<b>相似原理及模型设计 .....</b>	<b>(186)</b>
8.1	前言 .....	(186)
8.2	相似第一定理 .....	(187)
8.2.1	相似常数 .....	(187)
8.2.2	相似常数间的关系 .....	(188)



8.3	用分析物理方程的方法求相似判据 .....	(189)
8.3.1	物理方程为代数方程时求相似判据 .....	(189)
8.3.2	物理方程为微分(积分)方程时求相似判据——“积分”相似法 .....	(190)
8.4	量纲分析和相似第二定理 .....	(192)
8.4.1	力学量纲和量纲公式 .....	(192)
8.4.2	物理方程量纲的均匀性和齐次性 .....	(193)
8.4.3	$\pi$ 定理 .....	(194)
8.5	弹性力学静力问题的相似关系 .....	(194)
8.5.1	非线性弹性力学问题 .....	(194)
8.5.2	线弹性力学问题 .....	(196)
8.5.3	非线性平面应力问题 .....	(197)
8.5.4	线性平面应力问题 .....	(198)
8.5.5	量纲分析法注意事项 .....	(199)
8.5.6	相似第三定理 .....	(199)
8.7	参考文献 .....	(200)

# 绪 论

## 1. 概述

力学是一门工程应用性很强的基础学科。从 17 世纪伽利略在比萨斜塔上同时下落一大一小两个铁球，通过比较二者谁先着地来揭示自由落体下落过程中速度与物体重量无关的普适性规律，到后来发展的材料力学、断裂力学、损伤力学，以及目前为广大力学工作者所普遍关注的极端环境下材料的力学行为、微/纳米力学、多场耦合、生物力学等一些力学研究前沿领域，实验在其中均起着不可替代的作用。可以说，近现代实验技术的进步为力学学科的发展提供了重要的保障和支撑作用。

从材料和结构受力变形角度来说，应力和应变是力学中关注的两个最基本的物理量。工程力学实验就是介绍如何用实验方法有效确定试件（或构件）中的应力与应变，进而利用力学专业知识对试件（或构件）应力状态和损伤程度进行评价。因此，工程力学实验主要可以解决以下问题：

(1) 通过实验获得材料和结构的一些基本力学参数（如弹性模量、剪切模量、泊松比、屈服强度、破坏强度、延伸率等）。

(2) 在结构设计过程中，通过测量结构或模型中不同位置的应力和变形状态，进行合理几何尺寸选择和结构优化。

(3) 通过实验测定在役设备中各部件的真实应力和变形状态，找出最大应力和变形的位  
置和数值，以此作为设备运行安全可靠评估依据。

(4) 对已破坏构件进行应力分析，判断失效原因，提出改进措施。

(5) 测定构件工作载荷及影响参数（温度、加速度等）。

(6) 校核理论计算结果。

在工程力学实验课程学习过程中，主要需要掌握以下两点：

(1) 有哪些主要力学测试方法，各种测试方法的基本原理是什么？

(2) 不同测试方法的特点、优缺点和适用范围是什么？

## 2. 为什么要学习工程力学实验

虽然实验在促进力学学科发展中所起的作用毋庸置疑，但长期以来，大家对从事力学实验技术的研究重视不够，部分存在重理论、轻实验的现象，甚至有些人认为只要有先进的设备，就可以得到很好的实验结果。正如一位长期从事计算力学的加拿大教授在他个人主页上所描述的：

“所有人都不相信计算结果，除了从事计算者；所有人都相信实验结果，除了从事实验者。”

计算结果需要用其他方法辅助验证，这是目前大家普遍接受的观点。那么，为什么这

位学者又提到“所有人都相信实验结果，除了从事实验者”？我个人理解这位教授实际想表达的意思是：大多数人都觉得只要有合适的仪器，按规定的步骤操作，就可以得到满意确定的结果，即实验是由仪器主导的，而非人主导的，因此“所有人都相信实验结果”；而真正从事实验工作者才知道，实验过程中存在许多不确定因素，要想得到准确的测试结果，必须具备系统的专业知识。这就是我们要学习力学实验的关键所在：**真正了解各种力学实验方法，熟悉它们的测试原理、优缺点和适用范围**。只有这样，才能对一些实验测试结果有一个准确的分析判断。下面以两个简单的例子加以说明。

**例 1：**通常在测定胶黏剂的黏接强度时采用以下方法：取两块铝合金金属薄片，如图 1(a) 所示将一侧打磨、清洗后用被测胶黏剂部分黏接，通过试验机进行拉伸加载，获得两铝合金试件在黏接部位脱开过程中所对应的最大载荷  $P$ ，再除以有效黏接面积  $S$ ，即为该胶黏剂的黏接强度：

$$\tau = \frac{P}{S}$$

直观感觉上述过程不存在任何问题。但是，当仔细看其加载示意图时就会发现许多问题。首先，试件不是对中拉伸，除轴向拉伸载荷外，还存在弯矩作用，这是一个复杂受力变形方式，而上式建立的基础是均匀轴向加载，忽略了弯曲载荷的作用；其次，在两铝合金黏接区域的左右端部显然存在应力集中，整个黏接面沿加载方向应力分布大致如图 1(b) 所示，从实验操作中很容易发现黏接面开裂处起源于左右接触端部，而上式给出的是整个接触面的平均剪应力，显然该实验值要远小于材料的实际黏接强度。

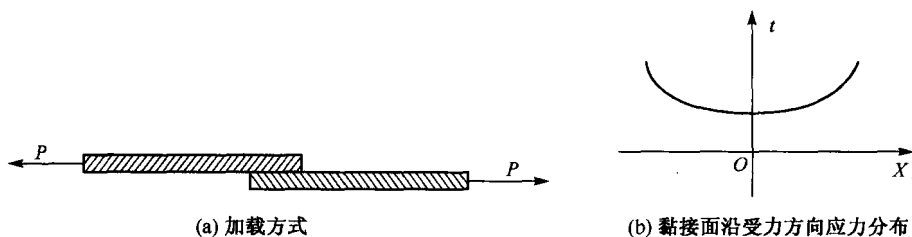


图 1 胶黏剂黏接强度测试示意图

**例 2：**材料的拉伸断裂强度可以用最为熟知的单向拉伸加载确定，也可以用三点弯曲加载测定（被测试件下端中间部位为单一最大拉应力作用位置）。那么大家是否考虑过，对同种材料上述两种实验方法得到的结果是否一致？如果不一致，为什么？事实上，在实验力学中对同一物理量往往可以采用多种方法予以测定。那么，不同方法测得的同一力学量是否具有可比性，如果不一致，原因是什么？怎么具有可比性？这是学习工程力学实验必须关注的问题。

### 3. 本书的主要内容和特色

这是一本力学实验方法及工程应用教材。全书主要包括两部分，第一部分是方法篇，主要介绍工程力学实验所涉及的应变电测技术、光测力学技术、磁测技术及超声检测技术 4 类方法的基本原理、测试方法及工程应用；第二部分为专题篇，介绍工程力学实验所涉及的一些专题问题及测试技术，包括断裂力学测试技术、材料显微分析技术、微/纳米力学测试技术和相似原理及模型设计。

在本书的撰写过程中，我们主要遵循以下一些原则：

(1) **实验方法介绍力求系统全面。**从大的测试原理来说，工程力学实验主要包括应变电测技术、光测力学技术、磁测技术和超声检测技术4大类。目前关于应变电测技术、光测力学实验教材及参考书较多，但相比较而言，超声检测和磁测实验教材非常缺乏。这方面已出版的一些专著也主要偏重于理论分析，缺乏从工程实验技术角度给予介绍。考虑到超声检测和磁测技术在现代实验力学和无损检测领域均占有越来越重要的地位，读者在科学研究和工程实践中有可能涉及，本书对这两类测试技术进行了专门的介绍。

(2) **测试原理描述尽量简明扼要。**本书是一本实验教程，因此不特别强调系统全面的理论框架体系建立（如超声检测中的弹性波理论、磁测应力中的电磁学理论），而是从实验测试角度介绍各种测试方法的基本原理、测试方法、优缺点以及工程应用，尤其强调工程应用性。书中每章在对各类实验方法基本原理介绍的基础上，均列举了大量典型应用实例。

(3) **适当注重一些工程力学实验前沿新方法的介绍。**例如，传统超声检测和磁测应力技术适合对已有宏观裂纹的测定，随着工程界对结构在役安全和剩余生命的关注，构件由于制造装配造成的应力集中以及由于长期服役造成的性能退化越来越受到重视。因此，书中适当引进了这部分内容，在超声检测中介绍了材料或构件早期性能退化的超声非线性检测技术，在磁测技术部分介绍了材料或构件应力集中的金属磁记忆技术检测方法，等等。

工程力学实验是一门综合性的应用学科，它牵涉的知识面较广，特别是应用它来解决实际问题时更是如此。介绍各类实验方法，必然离不开对其基本操作步骤、注意事项等的介绍，但仅限于此，则会成为一本工程师的操作手册。考虑到本书使用对象是力学及相关专业本科生和研究生，在编写过程中我们更为强调学生对各类实验原理内在物理意义的了解和掌握，注重让学生清楚现有各类力学实验方法各自存在的局限性。

知其不足方能有所创新！希望学生首先能很好掌握现有各类力学实验技术，在此基础上，通过不断努力，提出和建立新的力学实验测试技术和实验标准，这对该学科的发展和工程应用具有更为重要的意义。



# 第一部分 方法篇

第1章 应变电测技术

第2章 光测力学技术

第3章 磁测技术

第4章 超声检测技术

# 第 1 章

## 应变电测技术

从19世纪英国工程师汤姆逊在铺设海底电缆时发现材料的电阻-应变效应，到1921年世界上第一个电阻应变计的诞生，此后应变电测技术得到迅速发展。作为一类最基本也是最为成熟的力学测试方法，应变电测技术目前已经广泛应用于工业现场和实验室研究，并开发出了各类基于该方法的标准测试传感器，如力传感器、位移引伸计、速度（加速度）传感器等。

本章首先扼要介绍电阻应变测量原理及应变片种类、选片方法等；在此基础上，较为详细地介绍了惠斯通电桥的全桥、半桥、1/4 桥接桥方法及应用，应变片电测试验中需要注意和解决的问题，以及一些典型电测传感器的工作原理等；最后，作为一类典型动态电测实例，对目前广泛应用的研究材料冲击特性的实验方法——SHPB 实验原理和测试方法进行了简要介绍。

### 1.1 应变电测基础

应变电测基本原理和具体步骤可分别简述如下：

(1) **基本原理**：利用电阻应变片测量试件表面应变，再依据所测材料的应力-应变关系，获得试件的表面应力状态。

(2) **具体步骤**：在被测试件上粘贴应变片；当试件受力变形时，粘贴在试件表面的应变片发生跟随变形，应变片电阻丝由于机械变形导致其阻值发生变化；利用应变仪记录其电流（或电压）变化信号，根据应变仪的预先标定值得到应变片的应变值，即为试件的应变值；进而根据试件的材料应力-应变本构关系得到其应力值。

#### 1.1.1 应变电阻效应

应变片电测原理是利用金属电阻丝的应变-电阻效应，通过测量应变片电阻值的变化确定材料的受力变形特征。金属电阻丝的应变-电阻效应最早是在 19 世纪由英国工程师汤姆逊（W. Thomson）首先发现的。汤姆逊在参与铺设英法海底电缆时发现：

(1) 相同长度、同种金属电缆芯在海底不同水深处电阻值不同。

(2) 相同长度、不同电缆芯（铜、铝）其电阻值随海底水深变化的变化率不同。

现象(1)是由于海底不同水深处压力不同，电缆实际应变值不同，造成其电阻值变化不同；现象(2)是由于不同材料的应变-电阻效应敏感系数不同。

由物理学可知，长度为  $L$ ，电阻率为  $\rho$ ，横截面积为  $A$  的金属电阻丝，其电阻值为

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (1-1)$$

若金属电阻丝受拉伸（或压缩）变形，则金属丝的长度 $L$ 、横截面积 $A$ 和电阻率 $\rho$ 都将变化，所产生的电阻值的相对变化率为

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dA}{A} \quad (1-2)$$

式中： $dL/L$ 为金属丝导线长度的相对变化率，可用应变表示，即

$$\frac{dL}{L} = \varepsilon \quad (1-3)$$

不失一般性，对于直径为 $\phi$ 的金属电阻丝，其横截面积的相对变化为

$$\frac{dA}{A} = 2 \frac{d\phi}{\phi} = -2\mu\varepsilon \quad (1-4)$$

式中： $\mu$ 为金属丝材料的泊松比。

将式(1-3)、式(1-4)代入式(1-2)，得金属电阻丝受拉伸（或压缩）变形过程中的电阻值的相对变化率为

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + (1+2\mu)\varepsilon \quad (1-5)$$

式中，前一项是由金属丝变形后电阻率发生变化引起的；后一项是由金属丝变形后几何尺寸发生变化所引起的。实验表明，许多金属材料在弹性变形范围内，电阻丝的相对电阻变化与其轴向拉伸（或压缩）应变成正比，即

$$\frac{dR}{R} = K_s \varepsilon \quad (1-6)$$

式中： $K_s$ 为金属丝的灵敏系数，它等于

$$K_s = \frac{d\rho}{\rho} / \varepsilon + (1+2\mu) \quad (1-7)$$

式(1-6)表明：金属电阻丝受拉伸（或压缩）变形时，其电阻变化率与其电阻丝的应变成正比，这一物理现象称为金属电阻丝的应变-电阻效应，这是电阻应变测试的物理基础。利用这一规律，采用在变形过程中能够较好地产生电阻变化的材料，制造将应变信号转换为电信号的敏感元件，称为电阻应变计。由于电阻应变计一般为片状膜结构，通常也称为电阻应变片。

## 1.1.2 电阻应变计

### 1. 金属电阻应变计

如图1-1所示，电阻应变计主要由三部分组成。

- (1) 敏感栅：利用金属丝的应变-电阻效应制成的栅状线；
- (2) 基体：电绝缘有机材料，利用黏合剂将敏感栅黏接在其上面，对敏感栅起固定、支撑作用，并实现敏感栅与被测试件之间的电绝缘；
- (3) 引出线：从敏感栅引出的丝状或带状金属导线。



除此之外,对于长期使用的电阻应变计,为了避免潮湿短路、机械损坏和高温氧化,在敏感栅上面会涂一层与基体材料类似地有机胶液(如环氧树脂、酚醛树脂等),称为表面保护层。

敏感栅是用合金丝或合金箔制成的栅,它能将被测构件表面的应变转换为电阻相对变化值,是电阻应变计的核心组成部分,它的特性对于电阻应变计的性能有决定性的影响。表 1-1 列举了几种敏感栅常用金属的物理性能,其中市场上最为常见的应变计为康铜丝应变片。图 1-2 是几种典型金属箔式应变片。

表 1-1 常见的应变电阻合金材料的性能

金属类型	成分%	电阻率 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	灵敏系数	电阻温度系数 $10^{-6}/\text{C}$	线膨胀系数 $10^{-6}/\text{C}$	最高使用温度 $^{\circ}\text{C}$
铜镍合金 (康铜)	Ni45, Cu55	0.45~0.52	1.9~2.1	$\pm 20$	15	300(静态) 400(动态)
镍铬合金	Ni80, Cr20	1.0~1.1	2.1~2.3	110~130	14	400(静态) 800(动态)
铁镍铬合金	Ni74, Cr20 Fe3, Al3	1.24~1.42	2.4~2.6	$\pm 20$	13.3	450(静态) 800(动态)
铁铬铝合金	Fe70, Cr25, Al15	1.3~1.5	2.8	30~40	14	450(静态) 1000(动态)
贵金属及合金	Pt Pt92, W8	0.09~0.11 0.68	4.0~6.0 3.5	3900 227	8.9 8.3~9.2	800(静态) 1000(动态)

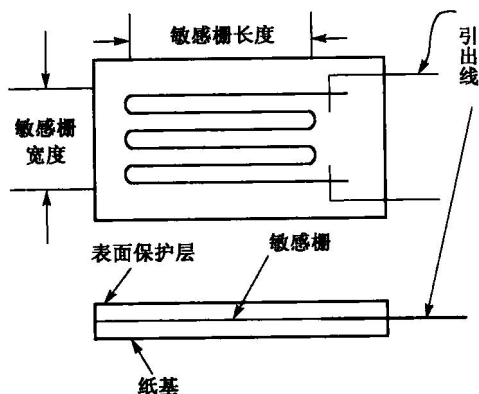


图 1-1 金属电阻应变计

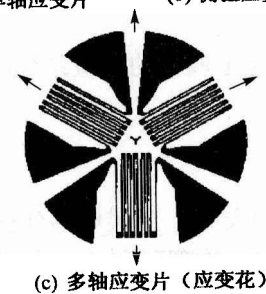


图 1-2 金属箔式应变计

## 2. 半导体电阻应变计

以金属材料为敏感栅的电阻应变计具有经济可靠等优点,但其灵敏系数较低。为了提高应变计的灵敏系数,可以利用硅、锗、铋化钢、磷化镓等半导体材料作为敏感栅制成半导体电阻应变计。当半导体材料受到机械应力作用时,其电阻率会发生较大变化,这种性质称为半导体的压阻效应。

半导体电阻应变计灵敏系数可达 150 左右,这对于某些特殊场合需要高测量信噪比时具有突出优势。图 1-3 为利用霍普金森实验装置进行聚氨酯泡沫冲击压缩实验结果,图 1-3(a)为利用金属电阻应变计测得的入射、反射波形,从图中可以看出,入射、反射波幅值基本相同,这时如果仍利用金属电阻应变计记录透射波信号,则有用信号将完全被背景噪声信号