

高等学校教学用书

岩体测试技术

(修订版)

东北工学院 李造鼎 主编

江苏工业学院图书馆
藏书章

冶金工业出版社

高等学校教学用书

岩体测试技术

(修订版)

东北工学院 李造鼎 主编

冶金工业出版社

(京)新登字036号

高等学校教学用书

岩体测试技术

(修订版)

东北工学院 李造鼎 主编

*

冶金工业出版社出版

(北京北河沿大街嵩祝院北巷39号)

新华书店总店科技发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张 13.75 字数 325 千字

1993年4月第一版 1993年4月第一次印刷

印数00,001~1,200册

ISBN 7-5024-1142-9

TD·185 (课) 定价3.65元

第一版 前 言

“岩体测试技术”是在1979年冶金教育工作会议上被列为采矿专业的必修课程。1980年召开的有关的九个院校会议，正式审订了本课程的教材编写大纲。根据编写大纲和学时数（48~54学时）的要求，将教材内容分为四个部分：

一、岩体实验测量信号的分析

结合岩体应力和应变信号的特点，讲授信号的分析原理、信号的统计和传递特性（频率特性），为正确设计岩体实验测量方法，正确选择实验测量的仪器和正确分析岩体应力打下基础。

二、传感器（信号转换）工作原理与构造

讲授岩体实验测量用的各种传感器（换能器、检波器）的信号转换原理、频谱特性和标定方法以及应用情况。

三、测量系统（线路）的仪器选择和组配

概括地介绍岩体实验测量系统所用的放大、检波、调制和解调、记录和显示器的性能，以及选用和组配的知识。

四、实验测量数据的分析和处理

介绍岩体实验测量数据的整理、检验、分析和处理方法，包括误差分析和回归方程的建立。

本教材采用的章节体系是根据东北工学院几年来的教学实践考虑的，不尽适合各校具体情况。各校在使用时，可加以补充和调整。个别章节可作为本科生或研究生自学参考。

本书共介绍了七次实验和一些参考性习题，各校情况不同，可选做一部分实验或某些实验的部分内容。

本教材在一些院校中曾多次试用过；在教材编写过程中兄弟院校提出了许多宝贵意见；东北工学院许多同志审阅过本教材，并提出了一些改进意见。在此，一并致以深深的谢意。

由于编者水平所限，误谬和不足之处在所难免，诚恳地希望读者给予批评指正。

本书由东北工学院李造鼎主编，何修仁参加第八章部分内容的编写，陈耕野、孙家学协助绘制插图、编制参考习题的计算程序和校订工作。

本书可供高等院校采矿专业、采煤专业和矿井建设专业教学使用，也可供研究生和科研、生产单位有关同志参考。

编 者
一九八二年八月

目 录

绪言	1
第一章 岩体电阻应变片测试	4
第一节 概述	4
第二节 电阻应变片工作原理与构造	6
第三节 电阻应变片测量性能	9
第四节 电阻应变片分类	15
第五节 电阻应变片选用与粘贴工艺	16
第六节 电阻应变片测试基本电路	17
第七节 相敏检波器	29
第八节 电阻应变仪简介	30
第九节 构件应变片测量	34
第十节 平面应力测量	38
第十一节 消除测量干扰的方法	44
第十二节 电阻应变仪性能校验	48
实验〔一〕、〔二〕与参考题	50
主要参考书	51
第二章 岩体应力及变形测试	52
第一节 概述	52
第二节 应力恢复法	53
第三节 孔底应力解除法	54
第四节 孔壁应变法	60
第五节 孔径变形法	63
第六节 水压致裂法	65
第七节 岩体变形测试	68
实验〔三〕与参考题	73
主要参考书	73
第三章 岩体振动测试	74
第一节 振动测试原理	74
第二节 测振仪响应特性	79
第三节 振动测试参数选择与简单波形处理	85
第四章 随机振动测试	88
第一节 随机振动分类	88
第二节 随机波振幅概率密度函数	90

第三节	相关函数	93
第四节	随机数据处理过程	95
第五章	频谱分析	96
第一节	谱的概念	96
第二节	富氏谱	96
第三节	功率谱	101
第四节	响应谱	104
第五节	频谱分析的应用	106
第三、四、五章实验[四]与参考题		109
主要参考书		110
第六章	岩体声波探测法	111
第一节	基本原理	111
第二节	岩体特点对弹性波传播的影响	122
第三节	岩体声波检测仪	127
第四节	岩体声波探测法应用	131
第五节	岩石声发射技术	140
实验[五]、实验[六]与参考题		143
主要参考书		144
第七章	测量数据记录与分析仪器	145
第一节	记录仪器	145
第二节	分析仪器	152
实验[七]		154
第八章	传感器工作原理与构造	155
第一节	概述	155
第二节	传感器分类及性能要求	155
第三节	电感式传感器(变磁阻式传感器)	156
第四节	差动变压器式传感器	160
第五节	振弦式传感器	163
第六节	磁电式传感器	166
第七节	压电晶体式传感器	168
第八节	压磁式传感器	171
第九章	传感器设计与标定	174
第一节	传感器设计	174
第二节	传感器性能检验	180
第三节	传感器标定	180
第八、九章实验[八]与参考题		184
主要参考书		185
第十章	岩体测试误差分析与离散性	186
第一节	岩体测试数据基本性质	186

第二节 岩体测试误差分析与离散性..... 187

第三节 测试数据误差处理..... 199

第四节 经验公式建立..... 203

主要参考书..... 212

绪 言

(一)

科学技术的发展与试验测试技术发展息息相关。历史上一些科技的重大突破，都是奠基于试验测试技术。因为，试验测试是认识客观事物最直接最有效的方法，是解决科技疑难问题的必要手段。试验测试对保证工程质量，促进科学的发展，具有越来越重要的地位和作用。

岩体地下建筑与采掘工程的试验测试，则发展的比较迟缓，这是由于难度大的缘故。为了改善仅用经验类比法进行岩体工程设计与施工的现状，提高岩体力学的研究水平，必须大力发展岩体测试技术。

由于岩体赋存条件的多样性和复杂特点，大部分岩体是处于三维应力状态，且普遍存在应力集中。因此，用理论解析办法解决岩体工程问题是极其困难的，甚至是不可能的。目前有关岩体工程的荷载和内力、应力和变形的理论研究成果，一般都偏离实际甚远，其重要意义在于指引解决和简化问题的途径。解决岩体工程问题的办法，只能是理论研究与试验测试相结合，在试验测试的基础上，进行合理的假设和简化，建立起数学模型，再做解析运算，辅之以经验类比法，以求得问题的解决。

我们知道，经过多年的世界性原岩应力场测试，才揭露出原岩中存在着一个处于动态平衡的水平应力场。这一发现把岩石力学研究提到新的高度，成功地解决了一些岩体工程的合理设计和稳定性问题，以及岩爆的预测。更值得提出的是奥地利N.Labczewicz创立的隧道新奥施工法(NATM)。它也是建立在岩体测试之上的，从根本上改善了隧道施工技术，成为理论研究与实验测试相结合的范例。

近年来，我国在大型岩体工程(水坝、地下厂房、地下建筑和大型矿井等)的设计和施工中，都投入大量人力和物力，进行岩体实验测试。

综上所述，可以认为，对于从事岩体地下建筑与采掘工程的科技人员来说，不掌握现代的试验测试原理，不能正确的选择测试仪器和方法，不会分析与处理测试数据，就不能胜任自己的工作。

(二)

从广义讲，试验测试是人们借助于测量手段，通过试验或实验方法，对客观事物和自然现象，取得数量与质量的认识过程。具体讲，岩体测试技术是测量、分析、处理与研究岩体和地下建筑结构，在荷载作用或赋存条件变化时所出现的力和变形等信息的原理与技术。岩体测试课是建立在信息学、电子学、计算数学、物理学、岩体力学与工程等学科之上。

岩体中的应力变化，能使岩体介质的电阻率、磁化率、声波特征等发生变化，也能产生光弹效应和X射线衍射。因之，从理论上讲，可以通过这些物理量测试岩体的应力。但是，这些物理量与岩体应力之间的定量关系尚不清楚。所以，目前的岩体测试，主要是指岩体变形(应变)的测量，而且多限于岩体表层的变形。测得的应变可换算成应力。应力状况是岩体最本质的物理性状，不但能反映岩体所经历的力和运动的情况，而且能反映其

它物理特征。所以说岩体应力测试是最重要的，最根本的。

为满足岩体与结构工程的科学研究、设计和安全施工的需要，“岩体测试”的主要内容，归纳如下：

(1) 测试岩体的原始应力场（地应力场）；

(2) 测试岩体被采掘后，应力的重新分布、变形和破坏情况，以及作用到支护结构的荷载（压力）；

(3) 测试岩体与地下结构在动荷载（爆炸、冲击等）作用下，各种动力学和运动学参数及特征；

(4) 测量岩体工程地质和岩石力学常数（包括实验室和野外现场测试）。

在岩体测试中，最困难的是原始应力场测试。实测表明，原始应力场是三维的，三个不等的主应力多不在水平或垂直方向上。目前所用的主要方法有：应力解除法、水压致裂法、声波法等。

岩体开挖引起应力重新分布，其大小和方向都有很大变化，应力集中程度比原始应力大许多倍。应力重新分布的测试，主要是用声波法和应力解除法。

矿山压力测量，多用电阻式和钢弦式压力盒或机械式压力计等。

岩体振动参数测试，包括岩体或结构在动力作用下的加速度、速度、位移、动应变、动压力和自振频率等，目前多用机械式、压电式、磁电式传感器测定。

岩体或岩石试样的工程地质参数和力学常数（变形常数和强度指标等）测量，有实验室和野外现场实测法，在有关专业课中介绍。

建立实验室与现场实测岩体（石）之间的关系，也是岩体测试的一个待研究课题。今后必须制定实验室操作规范，以及对比的修正方法等。岩体测试精度与其它测量一样，根据需要而定，所用仪器的灵敏度、线性度、准确度和精确度，必须达到足以察觉出岩体在空间的微小变化。

(三)

岩体是非均质的不连续的地质体，其应力状态除与所受荷载有关外，还与所受地质作用过程有关，力学现象相当复杂。但是，到目前为止，大多数测试表明，在一般有限荷载和时间作用下，多数岩体的应力和应变关系，仍然近似于线性关系。在测试中，一般加于岩体的荷载是微小的，时间是短暂的，测量的应力范围是有限的。因之，对测量结果的分析与处理，可以利用连续介质力学的方法。把岩体或结构假定为连续性介质，就是说其应力分布是不间断的，为坐标的函数，符合微分的概念，整体性质可与无限小体积相联系。从而，有可能用测试岩体或结构中某些点，即“无限小体积”的性质，推算出整体的性质。

为了使连续性假设与实际情况相符，所谓的“无限小单元体”，并非真正小到无限，而是具有有限尺寸，使数学解析方法对它仍近似有效。当然，这个程度也就决定了利用“单元体”研究岩体或结构测试结果的精确度和准确度，它可用概率方法推算。

深入了解岩体与结构的基本力学性能（连续性、稳定性、均匀性和各向同性），是采用连续介质力学的前提，也是岩体测试的前提。

(四)

大多数岩体测试是属于非电量电测技术。其实质是将待测的非电量，通过传感器转换成电信号，然后利用电测技术。电测方法的优越性大，应用广泛。

进行岩体测试，首先要根据被测对象的性质、环境特点及对测试精度的要求等，作好传感器的选用或设计及标定；其次是选择电测系统（仪器与线路）。传感器是测试即科学实验收集数据的基本工具。传感器设计的好坏直接影响测试结果。

电测线路的选择，是从属于传感器和指示或记录仪器的。它把传感器的电信号，送给指示或记录仪表。组配电测线路的关键问题，是选好各仪表的灵敏度，以及它们之间的匹配关系。

测试的最后一项工作，是对测试数据运用数学方法进行分析处理，从而由试验测试的结果，找出反映事物内在的规律性，即引出科学的结论。上面谈到的这些工作就是科学实验的全过程。

显然，试验测试工作及其结果的精度分析和数据处理，在科学研究中，在工程建设和产品生产过程中，是必不可少的而且工作量很大。

(五)

在学习本课时，不要把岩体测试技术仅仅视为一种测量手段，应该视为针对岩体或结构工程特定情况，进行科学实验的基础训练，通过它来发现和解决问题，培养独立和动手实践研究工作的能力。一般，在测试之前，要进行试（实）验设计。在具体测试时应当贯彻试验设计的思路、方法和步骤，以达到学习本课的基本目的。测试技术种类繁多，应用领域广阔，测试方法和仪表，日新月异、发展迅速。学习时必须掌握基本原理和要求，理论与实践并重，举一反三。

第一章 岩体电阻应变片测试

第一节 概 述

电阻应变片测试技术是岩石实验应力分析的主要方法之一，在原岩应力、采掘地压、支护内力及岩体变形的测量中，起着重要作用。通过岩体表面的应力应变测量，可取得关于岩体的静力或动力学参数，提供采矿工程设计与施工的原始资料和信息。

电阻应变片测试的基本原理是利用敏感元件的物理效应，将待测的岩石应变量转换成

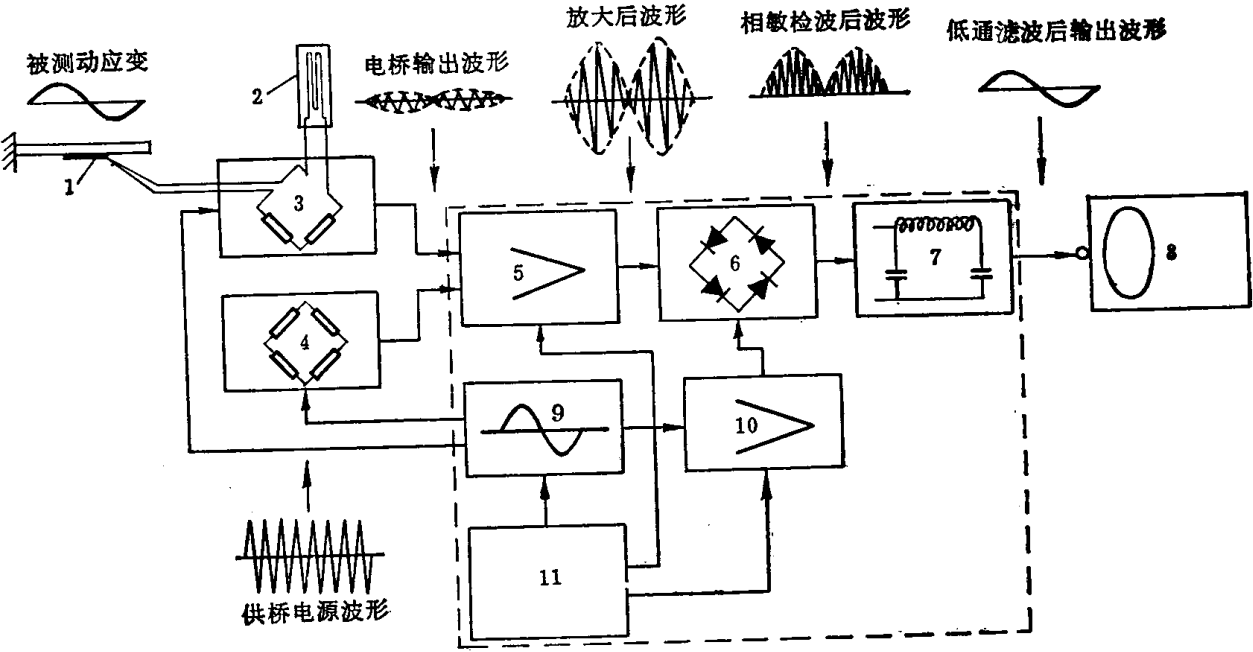


图 1-1 电阻应变片测试系统

1—应变片；2—补偿应变片；3—测量电桥；4—标定电桥；5—放大器；6—相敏检波器；7—低通滤波器；8—记录器；9—振荡器；10—缓冲器；11—电源

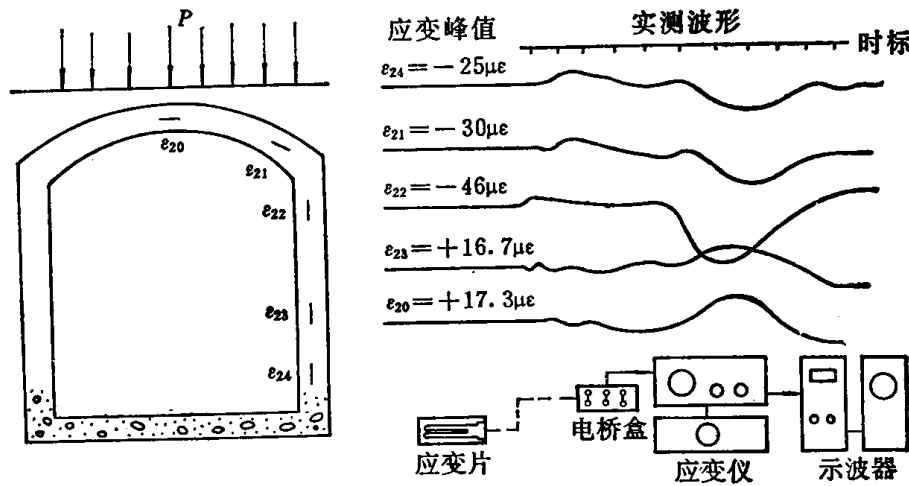


图 1-2 电阻应变片支护内力测试系统及实测波形

电阻值的变化，建立非电量与电量的等效联系。

根据测量信号频率和使用的应变仪，电阻应变片测试分为静态、动态和超动态三种类型。电阻应变片测量系统一般由电阻应变片、电阻应变仪和记录仪器组成，如图1-1所示。

岩体或构件的变形引起应变片电阻值的变化，并经电桥转为电压变化，再由电阻应变仪

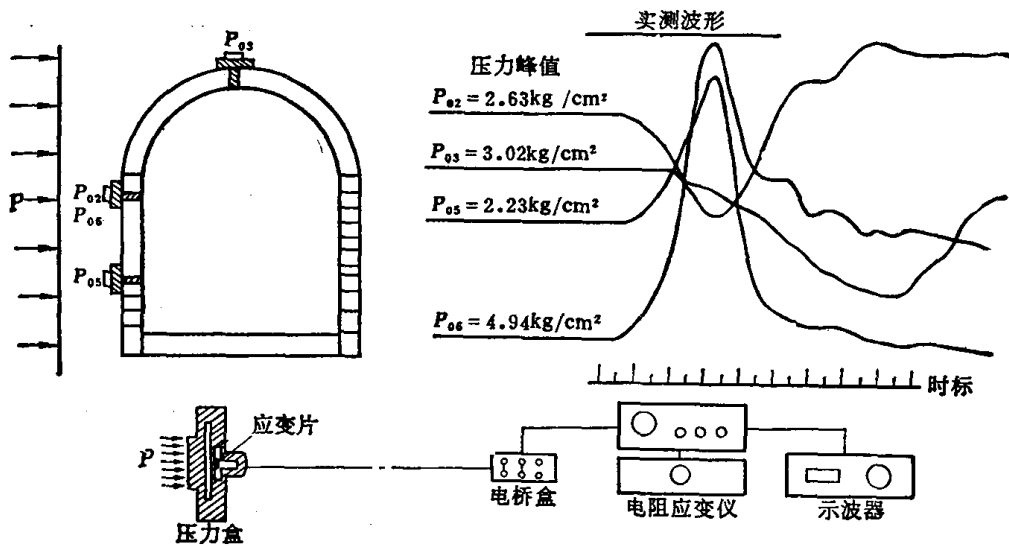


图 1-3 电阻应变式地压测试系统及实测波形

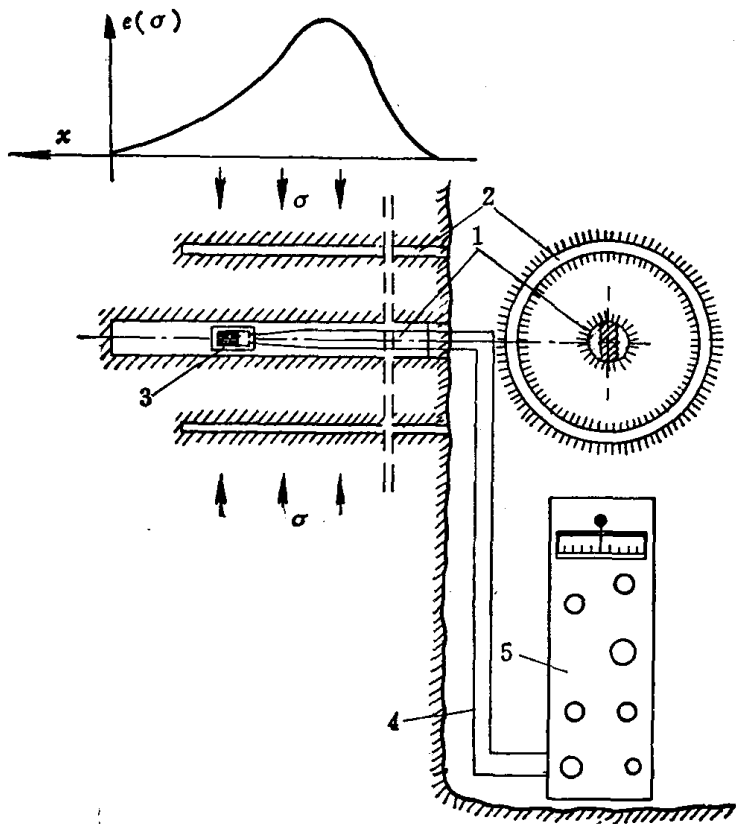


图 1-4 电阻应变式应力解除法测岩体原始应力
1—测孔；2—套孔（解除孔）；3—应变片；4—导线；5—应变仪

放大、相敏检波和滤波之后，送到记录仪器，把电压信号记录下来。最后，利用应变值和电压值之间的标定关系，将电压信号换算成被测量的应变值。

为适应不同的测量参数（应变、位移和压力等）和测量条件，可直接在被测试件上粘贴应变片。例如，在测量矿山巷道支护的应变（内力）时，是把应变片贴在支护内的钢筋上或专设的预埋件上。人工动荷载作用下巷道支护的电阻应变片测量系统及实测波形图，如图1-2所示。

测量支护受到的地压，要用专门设计的膜片式压力盒。应变片是贴在压力盒的弹性膜片上，膜片受力变形后使应变片产生应变。其测量系统及实测波形如图1-3所示。

又如，测量岩体原始应力场所用的钻孔应力解除法，就是把应变片贴在事先钻好的测孔孔底或孔壁上，再利用套孔解除应力，用电阻应变仪测出应力解除前后的孔壁或孔底的应变，最后经应力分析得岩体的原始应力，如图1-4所示。

第二节 电阻应变片工作原理与构造

（一）电阻丝应变效应

电阻丝因受力沿轴向产生变形时，其电阻值将随之发生变化。这一现象称为应变效应。

电阻丝电阻的相对变化与几何改变程度之间的关系，可从物理上做出分析，如图1-5所示。电阻丝的电阻、几何尺寸和电阻率的关系如下

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

式中 R ——电阻丝电阻（ Ω ）；

ρ ——电阻丝电阻率（ $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ）；

S ——电阻丝横截面积（ mm^2 ）；

L ——电阻丝长度（ m ）

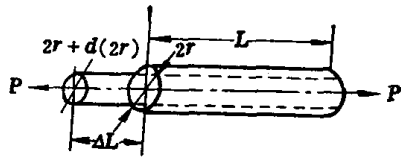


图 1-5 电阻丝受力与变形

将式1-1取对数并微分得电阻丝电阻变化率

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

式中 $\frac{dL}{L}$ ——电阻丝长度的相对变化，用轴向应变 ϵ_x 来表示。

$\frac{dS}{S}$ ——电阻丝截面积的相对变化。对半径为 r 、泊松比为 ν 的电阻丝有

$$\frac{dS}{S} = \frac{2dr}{r} = 2\epsilon_y = -2\nu\epsilon_x \quad (1-3)$$

式中 ϵ_y ——电阻丝径向变形。

对于电阻率变化率 $\frac{d\rho}{\rho}$ ，经J.H.Meier的研究，认为 $\frac{d\rho}{\rho}$ 是由于电阻丝体积 V 的改变，使电阻丝中载流子密度发生变化的结果。电阻率变化率与体积变化率有如下线性关系

$$\frac{d\rho}{\rho} = C \frac{dV}{V} = C \frac{d(S \times L)}{S \times L} = C(1-2\nu)\epsilon_x \quad (1-4)$$

式中 C ——取决于电阻丝材料和加工方法的常数。

将式1-3、1-4代入式1-2得

$$\frac{dR}{R} = [(1 + 2\nu) + C(1 - 2\nu)]\epsilon_x \tag{1-5}$$

由上式可以看出，当电阻丝只受到轴向拉伸或压缩时，在不超过弹性极限的范围内， ν 和 C 都是常数，电阻丝应变 ϵ_x 与其电阻变化率 $\frac{dR}{R}$ 呈线性关系，比例常数为

$$K_s = [(1 + 2\nu) + C(1 - 2\nu)]$$

$$\frac{dR}{R} = K_s \epsilon_x \tag{1-6}$$

K_s 表示电阻丝电阻变化率随应变变化的敏感程度，称为电阻丝的灵敏度（系数）。此外，上式还说明电阻丝的灵敏度是仅与电阻丝材料有关的常数。

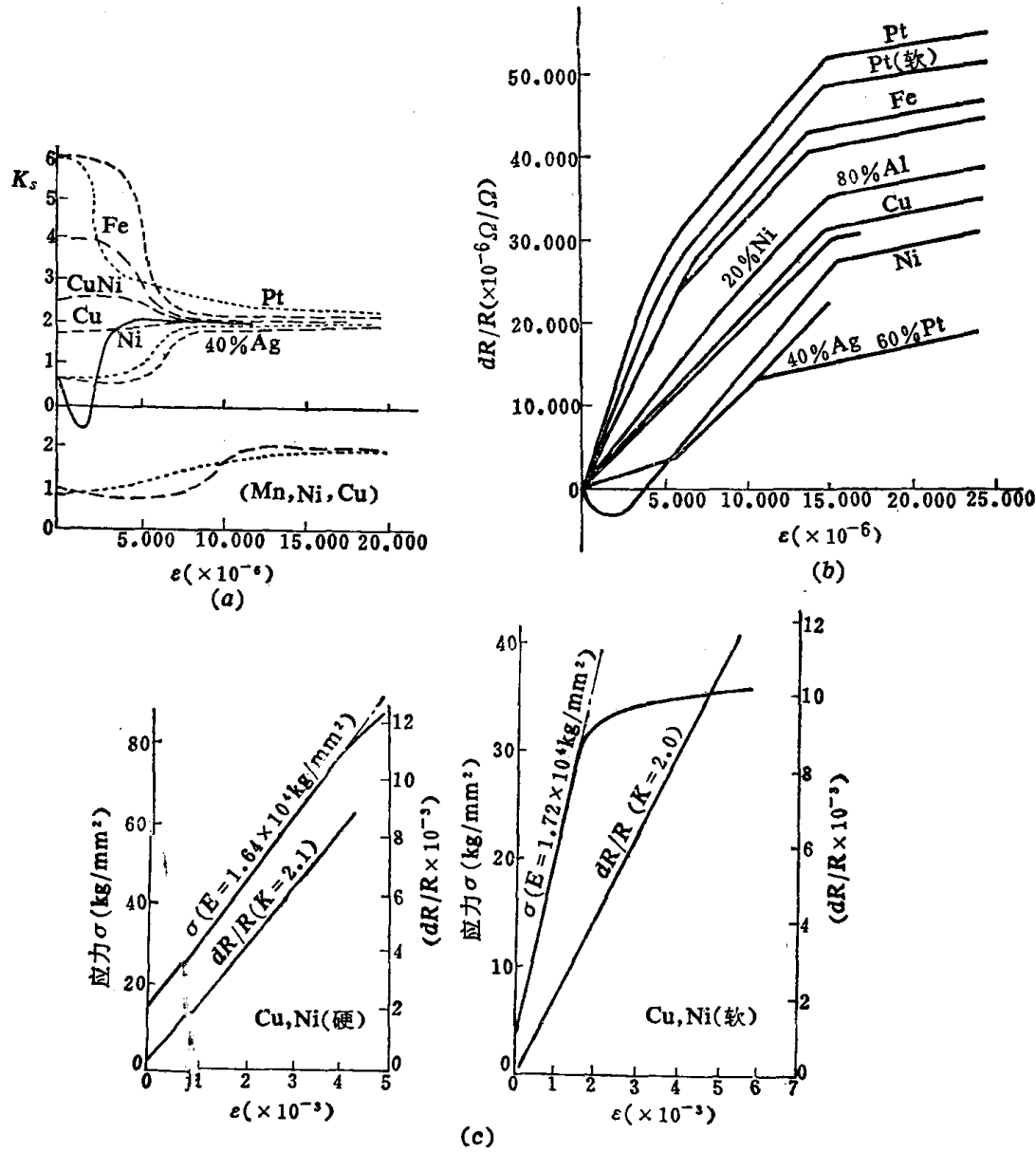


图 K-6 合金丝的 K_s - ϵ (a)、 $\frac{dR}{R}$ - ϵ (b)和 ϵ - σ (c)特性图

电阻丝与物体表面发生共同变形,通过电阻丝应变效应的作用,将应变直接变为电阻变化率,即可利用电量测量方法来进行应变的测量。电阻应变片就是根据这一原理制成的。

用于制做应变片的合金丝物理性能见图1-6。常用的有铜镍(康铜)、镍铬合金丝。

一般的金属材料,在弹性范围内变形时,其泊松比 $\nu \approx 0.3$,故影响电阻丝灵敏度的主要因素是C值。

当 $C > 1$ 时, $K_s > 2$; $C < 1$ 时, $K_s < 2$ 。而在塑性范围内,一般金属材料的泊松比 $\nu \approx 0.5$,故 $2\nu \approx 1$,其灵敏系数 K_s 接近于2。

(二) 应变片构造

1. 构造 一般的电阻应变片是由引出线1、覆盖层2、电阻丝栅(敏感栅)3和基底4所组成的,如图1-7所示。

2. 应变传递过程 电阻应变片的敏感栅经基底用粘贴剂固定在被测物上。当被测物发生应变时,带动粘贴层,并以剪应力的形式把应变传递到基底和敏感栅。剪应力分布为两端大,中间为零。由于剪应力的作用,敏感栅受轴向力而发生应变,故敏感栅各截面的应变是不均匀的。两端均有一段(如图1-8所示)是应变变化带。基底端部和敏感栅端部内侧的应变 ϵ_s 小于被测试件表面的应变 ϵ_h ;而靠近敏感栅端部外侧,由于应力集中,应变 ϵ_s 局部大于 ϵ_h 。此带受电阻丝截面积和弹性模量,以及粘结层厚、粘结层弹性模量和泊松比等的影响,因此敏感栅两端各有一小段不能很好的工作,从而降低了应变片的有效工作长度和灵敏度。若使基底长度大于敏感栅长度 $2a$ 以上,则可消除基底端部变化带的影响,但敏感栅端部变化带的影响则无法避免。

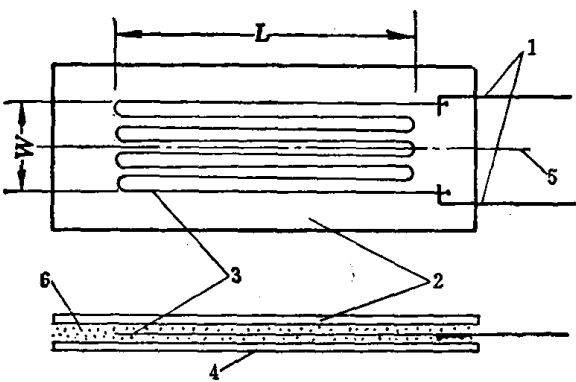


图 1-7 电阻应变片构造

L —标距; W —工作宽度;
1—引出线; 2—覆盖层; 3—电阻丝栅;
4—基底; 5—灵敏轴线; 6—粘结剂

3. 应变片主要参数

(1) 几何参数。常用标距 L 和敏感栅宽度 W 的乘积表示应变片的规格。圆角丝栅标距从圆角顶部算起,箔式丝栅标距从横向粗线内沿算起。

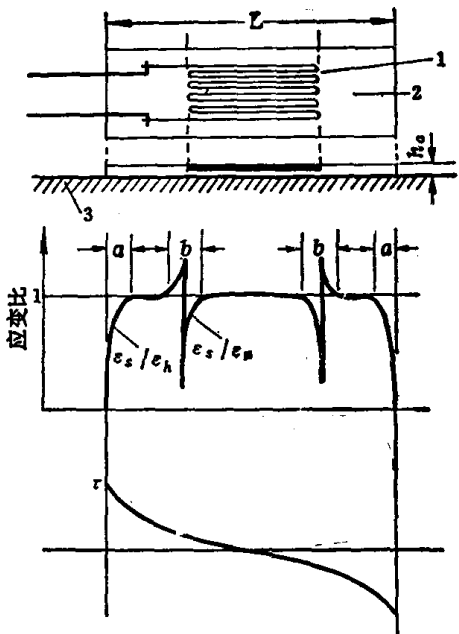


图 1-8 应变片受力分析

1—电阻丝栅; 2—基底; 3—被测试件表面;
 ϵ_s —基底的应变值或敏感栅的应变值;
 ϵ_h —被测物表面的应变值

(2) 电阻值。绝大多数应变片原始电阻值为 60Ω 、 120Ω 、 350Ω 、 600Ω 、 1000Ω ，其中最常用的电阻值为 120Ω 。

(3) 灵敏度(系数)。它是表示应变片变换性能的重要参数。康铜材料制的应变片灵敏度一般为2.0左右。

(4) 允许电流。应变片的电阻丝直径很细，其基底和粘贴剂也只能在一定的温度范围内工作，因此通过应变片的允许电流主要受其耗散功率的限制。例如纸基丝式应变片的允许电流为 20mA ，超过该值应变片将要失效或烧毁。而胶基箔式应变片，由于箔栅宽而薄，耗散功率增大许多，其允许电流可达 200mA ，这样就有可能不用应变仪，直接用指示仪表测量。

(5) 其它表示应变片性能的参数，还有极限工作温度、绝缘电阻、极限应变、疲劳寿命和横向灵敏度等，可参看一般参考书，这里不再详述。

第三节 电阻应变片测量性能

应变片的测量性能主要是指电阻丝的“应变效应”。除此之外，应变片横向效应、温度、测量系统的非线性和频率响应等因素，都能使电阻丝的电阻发生变化，造成测量误差，特别是温度造成的误差影响较大。为了保证测量精度，必须设法将这些误差加以消除或补偿。

(一) 应变片灵敏度及标定方法

电阻丝灵敏度是为说明一段电阻丝沿轴向产生的应变 ε_x 与其电阻变化率 $\frac{dR}{R}$ 之间的关系而引入的概念。在实际测试中，粘贴于被测试件上的传感元件是应变片。应变片灵敏度所反映的是应变片感受到的机械应变 ε 与应变片电阻变化率 $\frac{\Delta R}{R}$ 的关系，定义为下式

$$K = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\varepsilon} \quad (1-7)$$

由于横向效应的存在，电阻应变片的灵敏度 K 要略低于电阻丝的灵敏度 K_s ，但它们是与材料有关的常数，表达着量与量之间的线性关系。从本质上讲，应变片灵敏度是受多种因素制约的综合性参数，需要通过标定获得。

应变片灵敏度 K 值的实验测定，称为应变片标定，一般使用标准梁进行。标准梁有纯弯曲梁和等强度梁，如图1-9和图1-10所示。

标准梁处于单向受力状态，应变片粘贴在梁上，其敏感栅的灵敏轴线应与主应变方向一致，并应在室温条件下进行测定。两种标准梁测定法基本原理相同。现以纯弯曲梁为例，说明 K 值的标定过程。

矩形截面梁的两端由槽口支承，在荷载 P 作用下，产生弯曲变形。由材料力学可知，在 $\frac{P}{2}$ 力作用下，梁中点的挠度和弯矩为

$$f_1 = \frac{\frac{P}{2} L_2 (3L^2 - 4L_1^2)}{48EI} \quad (1-8a)$$