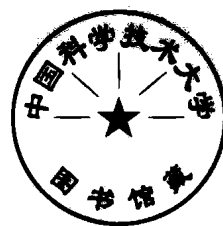


高等学校教学用书

岩体测试技术

东北工学院 李造鼎 主编



冶金工业出版社

高等学校教学用书

岩体测试技术

东北工学院 李造鼎 主编

*

冶金工业出版社出版

(北京灯市口74号)

新华书店北京发行所发行

冶金工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 1/16 印张 15 字数 357 千字

1983年8月第一版 1983年8月第一次印刷

印数00,001~3,100册

统一书号: 15062·4024 定价1.55元

前 言

“岩体测试技术”是在1979年冶金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 电阻应变片测量原理	4
第一节 概述	4
第二节 电阻应变片工作原理、构造与分类	6
第三节 电阻应变片的测量性能	14
第四节 电阻应变片的参数、选用与粘贴工艺	18
第五节 电阻应变片测量基本电路(电桥)	21
第六节 相敏检波器	33
第七节 电阻应变仪简介	35
第八节 简单拉压应力的测量	39
第九节 平面应力的测量	43
第十节 消除测量干扰的方法	48
第十一节 电阻应变仪性能校验	56
实验(一)、(二)与参考题	59
主要参考书	60
第二章 岩体应力测量原理	61
第一节 测量方法分类	61
第二节 孔底应力解除法	63
第三节 孔壁变形法	68
第四节 孔径变形法	75
第五节 孔径变形预应力法	78
第六节 钻孔变形计与应力计工作原理	81
第七节 应力解除法效果的探讨	82
第八节 应力恢复法	83
第九节 岩体位移测量	84
实验(三)与参考题	86
主要参考书	86
第三章 岩体振动测量原理	87
第一节 振动测量原理	87
第二节 测振仪的响应特性	93
第三节 振动测量参数的选择与简单波形的处理	99
第四章 随机振动测量数据的分析和处理	102
第一节 随机振动测量数据的分类	102
第二节 随机波的表示法	104
第三节 随机波振幅概率密度函数	104
第四节 相关函数	107
第五节 随机数据处理过程	111
第五章 频谱分析	112

第一节 谱的概念	112
第二节 富氏谱	112
第三节 功率谱	118
第四节 响应谱	122
第五节 频谱分析的应用	123
第三、四、五章实验(四)、参考题与计算机计算程序清单	127
主要参考书	137
第六章 岩体声波探测法	138
第一节 基本原理	138
第二节 岩体声波探测仪	150
第三节 岩体特点对弹性波传播的影响	156
第四节 岩体声波探测法的应用	160
实验(五)与参考题	169
主要参考书	170
第七章 测量数据记录与分析仪器	171
第一节 记录仪器	171
第二节 分析仪器	182
实验(六)	184
主要参考书	184
第八章 传感器工作原理与构造	185
第一节 概 述	185
第二节 电感式传感器	185
第三节 差动变压器式传感器	190
第四节 振弦式传感器	193
第五节 磁电式传感器	196
第六节 压电晶体式传感器	198
第七节 压磁式传感器	202
第九章 传感器设计与标定	204
第一节 传感器的设计	204
第二节 传感器性能检验	212
第三节 传感器的标定	213
第八、九章实验(七)与参考题	217
主要参考书	218
第十章 测量数据误差分析与经验公式建立	219
第一节 测量数据基本性质	219
第二节 测量数据误差分析	219
第三节 测量数据误差处理	227
第四节 经验公式的建立	231

绪 言

(一)

科学技术的发展与实验测量技术的发展是息息相关的。历史上许多次科学技术的重大突破,都是莫基于实验测量技术的进展之上的,因为实验测量技术是认识客观事物最直接最有效的方法,解决科学技术疑难问题必须依赖先进的实验测量技术。

地下岩体采掘工程的实验测量技术(通称之为岩体测试技术),则发展比较迟缓,这是由于岩体实验测量技术难度大的缘故。为了改变单纯依靠经验类比办法进行岩体工程设计和施工的落后状况,必须把近代的实验测量技术和仪器引进岩体工程,以促进岩体力学科学研究水平的提高。

由于岩体赋存条件的独特性和复杂性,大部分岩体是处于三维应力状态之下,而且普遍存在着应力集中现象。因此,用理论分析和解析运算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。这些理论研究成果的重要意义,仅在于指引解决问题的方向和简化问题的途径。解决岩体工程问题的正确办法,只能是理论研究与实验研究相结合。具体地讲,就是在实验测量的基础上,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,以求得问题的正确解决。

我们知道,经过多年的世界性原岩应力场的实验研究,才揭露了原岩中存在着一个处于动态平衡的水平应力场。这一重要发现把岩石力学的理论研究提高到了新的高度,成功地解决了一些岩体工程的合理设计和稳定性问题,也为岩爆的预测创造了条件。更值得一提的是,奥地利N.Labcewicz创立的隧道新奥施工法(NATM),也是建立在实验测量基础之上的,它从根本上改善了隧道施工技术,成为理论研究与实验研究相结合的典范。

近年来,我国大型岩体工程(水坝、地下厂房、大型矿井等)的设计和施工都投入大批人力和物力从事这方面的实验研究,

综上所述,可以毫不夸张地讲,对于从事采掘工程的工程师来说,不掌握近代的实验测量技术原理,不能正确的选择实验测量手段和方法,不会分析和处理实验测量的数据,就不能胜任自己的工作,不能适应四化建设的要求。

(二)

岩体实验测量学科是用实验测量的方法测定、分析和研究岩体工程由于静动荷载的作用和赋存条件的改变,所引起的应力和变形的一门学科。它主要是研究岩体应力和变形等信息的取得、传递、检验、分析和处理的原理和技术。它是建立在信息学、电子学、计算数学、物理学以及岩体力学的基础之上的。

岩体中的应力变化能使岩体介质的电阻率、磁化率、声波穿透速度等发生变化,也能产生光弹效应和X射线衍射效应。因之,从理论上讲,可以通过这些物理量测量岩体的应力。但是,这些物理量与岩体应力之间尚无明确的定量关系。所以,目前的岩体实验测

量,主要是指岩体变形(应变)的测量,而且只限于岩体表层的变形。测得的应变,再通过虎克定律换算成岩体的应力。岩体的应力状况是其最本质的物理性状,它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。所以说岩体应力的实验测量是最重要的、最根本的岩体测量。

为满足岩体工程的科学研究、设计和安全生产的需要,“岩体实验测量”的主要内容,可归纳如下:

(1) 岩体原始应力场(地应力场)的实验测量;

(2) 在岩体中进行采掘工作后,岩体中应力的重新分布、变形和破坏情况,以及作用到支护结构上的压力的实验测量;

(3) 岩体和地下结构在动荷载(包括爆炸、冲击等)作用下,各种动力学和运动学参数的实验测量;

(4) 岩体的工程地质与力学常数及其加固效果的实验测量(包括实验室和野外测量)。

在岩体实验测量中,最困难的是岩体原始应力场的测量。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。目前原始应力场的测量主要是用应力解除法。

岩体开挖后将引起原始应力的重新分布,应力的方向和大小都有很大变化,应力集中程度可比原始应力大许多倍。应力重新分布的测量,主要是用声波法和深孔应力解除法等。

矿山压力的测量,多用钢弦式和电阻式压力盒(传感器)或机械式压力传感器等。

岩体振动参数的测量,包括岩体和地下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的测定,目前多用机械式、磁电式、压电式传感器的测定方法。

对岩体和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)的测定,有实验室测定方法和各种野外的实测方法。

建立实验室岩石试件力学常数的试验结果与现场岩体实测力学常数之间的关系,也是实验测量技术的一个研究方向。为此必须研究实验室操作方法的标准化,以及现场实测与实验室对比的修正方法等。岩体实验测量的精度和其它测量工作一样,应当根据需要来决定。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。

岩体通常是非均质的和不连续的集合体(地质体)。岩体内部的应力状态除与岩体所受荷载有关外,还与岩体所受的地质作用过程有关,力学现象是相当复杂的。但是,到目前为止,大多数实测结果表明,在一般的有限荷载和时间作用的情况下,岩体的应力和应变关系,仍然近似于线性关系。

在实验测量过程中,加于岩体上的荷载也是微小的,作用的时间是短暂的,测量的应力范围是有限的,因之,对测量结果的分析 and 处理,可以利用连续介质力学的方法。

把岩体和地下结构假定为连续性介质,就是说在岩体或地下结构中应力的分布是不间断的且为坐标的函数,符合于微分的概念。岩体和地下结构的整体性质和无限小体积相联系,从而有可能用测量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”，并非真正小到无限的一个点，而是具有有限尺寸的，只是小到数学解析方法对它仍近似有效的程度。当然，这种程度也就决定了利用“单元体”研究岩体和结构测量所得结果的精确度和准确度，这个程度可用概率方法进行推算。

深入了解岩体和地下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，也是岩体和结构的实验测量的前提。

大多数岩体实验测量技术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，然后用电技术测量。电测方法的优越性大，应用广泛。

进行岩体实验测量，首先要根据被测对象的性质、环境特点及对测量结果精度的要求，作好传感器的设计和标定，其次是选择电测线路（系统）。

传感器是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到测量结果。

电测线路的选择，是从属于传感器和指示或记录仪器的。电测线路是把传感器的电信号，送给指示或记录仪表。

现有岩体实验测量系统，随传感器工作原理不同主要有两类：一类是调幅测量系统，一类是调频测量系统。

实验测量工作的最后一项工作，是对实测获得的数据运用数学方法进行分析处理，从而由实验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，实验测量工作及其结果的精度分析和数据处理，不但是科研工作中，也是生产过程的必不可少的而且是工作量很大的工作。

第一章 电阻应变片测量原理

第一节 概 述

电阻应变片测量系统，一般是由电阻应变片、电阻应变仪和记录仪器等组成的，如图 1-1 所示。

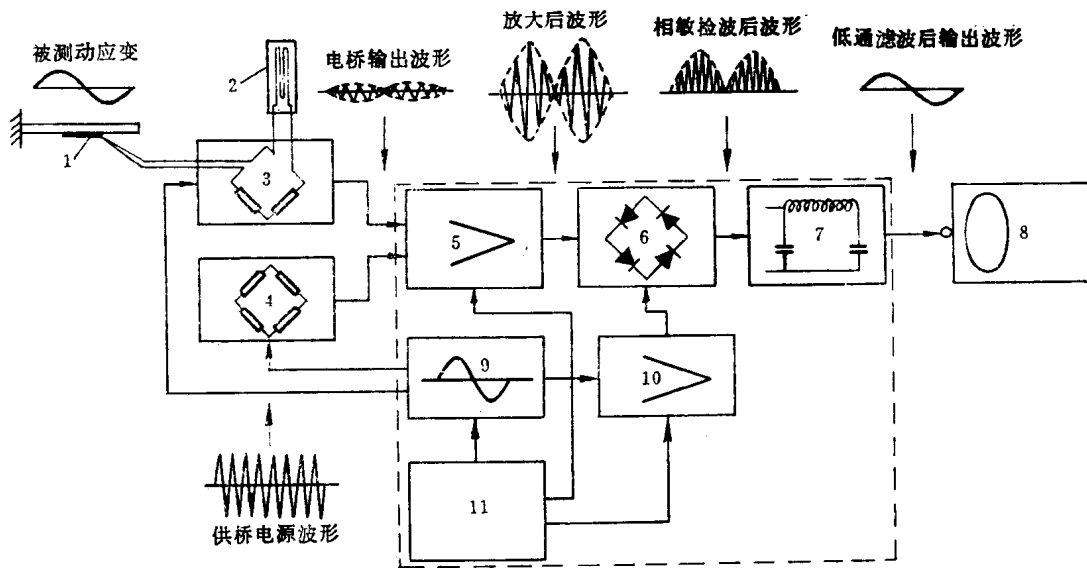


图 1-1 电阻应变片测量系统

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

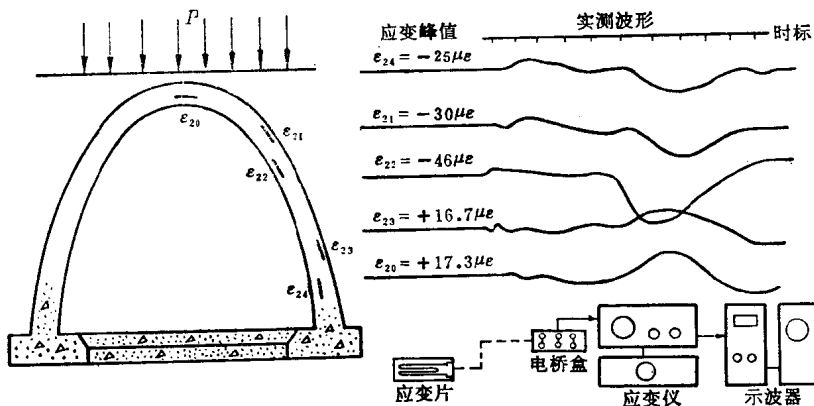


图 1-2 电阻应变片支护内力测量系统及实测波形

电阻应变片是转换敏感元件，它将待测的应变量转换成电阻值的变化，起着把非电物理量变为电量的作用。

电阻应变仪将应变片电阻值的变化转为电压的变化，再经过放大、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的应变值。

为了适应不同的测量参数（应变、位移和压力等）和不同的测量条件，可以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进行的。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。

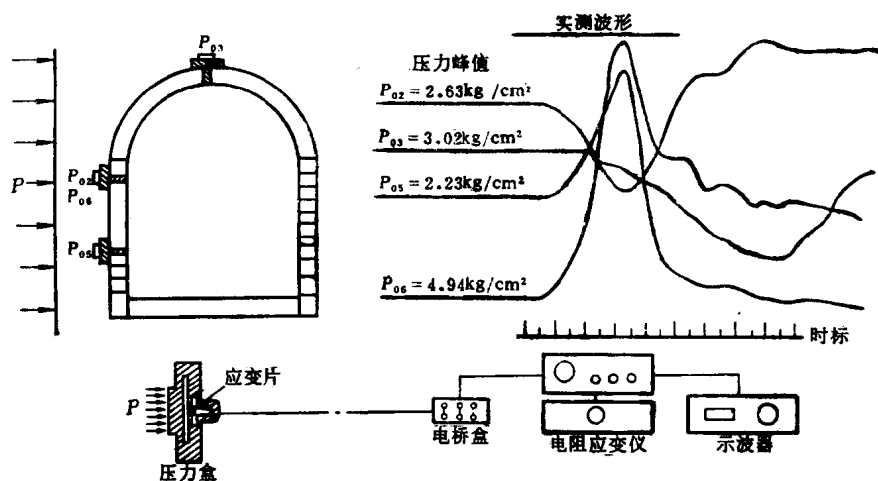


图 1-3 电阻应变式地压测试系统及实测波形

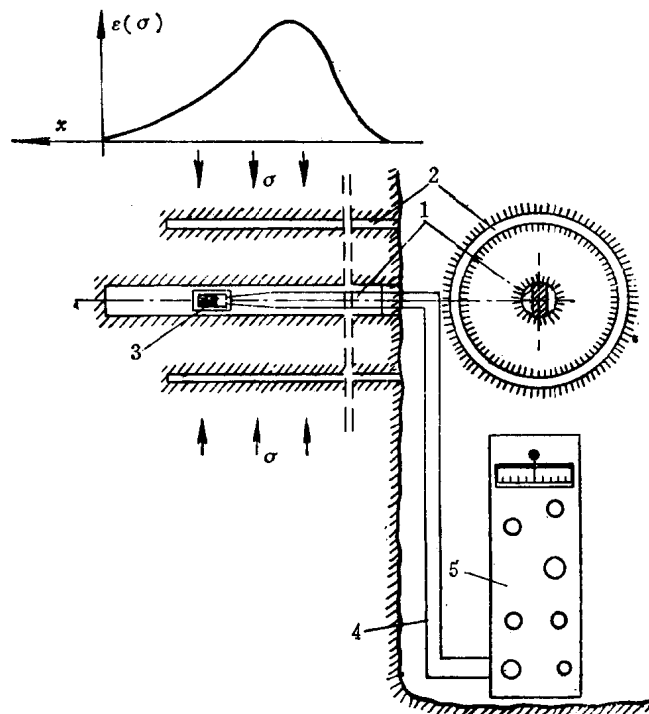


图 1-4 电阻应变式应力解除法测岩体原始应力

1—测孔；2—套孔（解除孔）；3—应变片；4—导线；5—电阻应变仪

如果测量支护受到的地压，则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、构造与分类

(一) 应变片的工作原理和构造

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 1-5 (a) 所示。

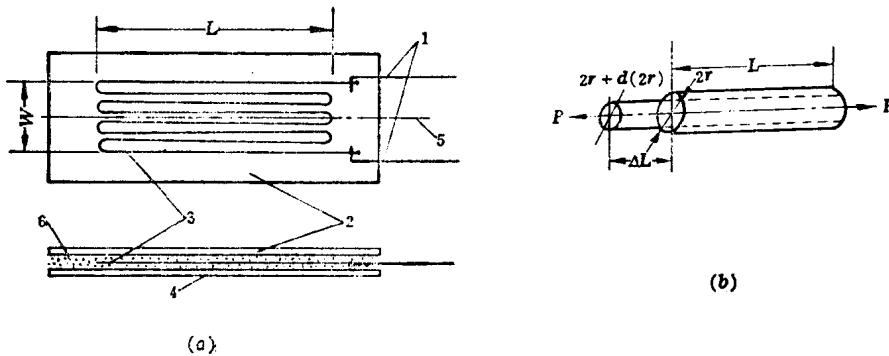


图 1-5 电阻应变片构造

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—粘剂

粘贴在被测试件上的电阻应变片，受到试件变形的作用后，产生电阻值的变化，这个变化是由于组成应变片的电阻丝的“应变效应”引起的。

我们知道，一根金属丝（电阻丝）的电阻与其几何尺寸和电阻率的关系如下：

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

式中 R ——电阻丝的电阻 (Ω)；

ρ ——电阻丝的电阻率 (系数) ($\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$)；

S ——电阻丝的横截面积 (mm^2)；

L ——电阻丝的长度 (m)。

当电阻丝受轴向拉伸或压缩变形作用后，其电阻的相对变化（电阻变化率），除随应变 ε 变化外，还要随温度 T 的变化而变。即电阻丝电阻总的变化率为：

$$\frac{dR}{R} = \left(\frac{dR}{R} \right)_{\varepsilon} + \left(\frac{dR}{R} \right)_T \quad (1-2)$$

故将 (1-1) 式取对数并微分后代入 (1-2)，得：

$$\frac{dR}{R} = \left(\frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial \varepsilon} - \frac{1}{S} \frac{\partial S}{\partial \varepsilon} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial \varepsilon} \right) d\varepsilon + \left(\frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial T} - \frac{1}{S} \frac{\partial S}{\partial T} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \right) dT \quad (1-3)$$

上式右边第一项代表电阻丝受应变影响产生的电阻变化率；第二项代表受温度影响产生的电阻变化率。

在温度不变的情况下 ($dT=0$)，电阻丝只受到轴向拉伸或压缩，其电阻变化率由(1-3)式求得：

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dS}{S} \quad (1-4)$$

对半径为 r 、泊松比为 ν 的电阻丝有 (图1-5b)：

$$\frac{dL}{L} = \varepsilon_x; \quad \frac{dS}{S} = \frac{2dr}{r} = 2\varepsilon_y = -2\nu\varepsilon_x \quad (1-5)$$

式中 ε_x ——电阻丝的轴向应变；

ε_y ——电阻丝的径向应变；

$\frac{d\rho}{\rho}$ ——电阻丝的电阻率变化率。

经J.H.Meier的研究，认为 $\frac{d\rho}{\rho}$ 是由于电阻丝体积 V 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：

$$\frac{d\rho}{\rho} = C \frac{dV}{V} = C \frac{d(S \times L)}{S \times L} = C(\varepsilon_x - 2\nu\varepsilon_x) \quad (1-6)$$

式中 V ——电阻丝的体积， $V = S \times L$ ；

C ——取决于电阻丝材料和加工方法的常数。

将(1-5)和(1-6)式代入(1-4)式，最终得：

$$\frac{dR}{R} = [(1+2\nu) + C(1-2\nu)]\varepsilon_x \quad (1-7)$$

电阻丝的应变不超过弹性极限时， ν 和 C 都是常数。即电阻丝的应变 ε_x 与其电阻变化率 $\left(\frac{dR}{R}\right)$ 成线性关系，其比例常数为：

$$K_s = \frac{dR/R}{\varepsilon_x} = [(1+2\nu) + C(1-2\nu)]$$

或

$$\frac{dR}{R} = K_s \varepsilon_x \quad (1-8)$$

从上式看出， K_s 表示电阻丝的电阻变化率随应变变化的敏感程度。故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。

上面谈到的就是电阻应变片能进行应变测量的基本原理。

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 $C \approx 0$ ，其灵敏系数 K_s 接近于 2。

应变片常用的铜镍(康铜)、镍铬合金丝的灵敏度 K_s 和应变的关系，应力与应变的关

系，以及电阻变化率 $\frac{dR}{R}$ 与应变的关系，如图1-6所示。

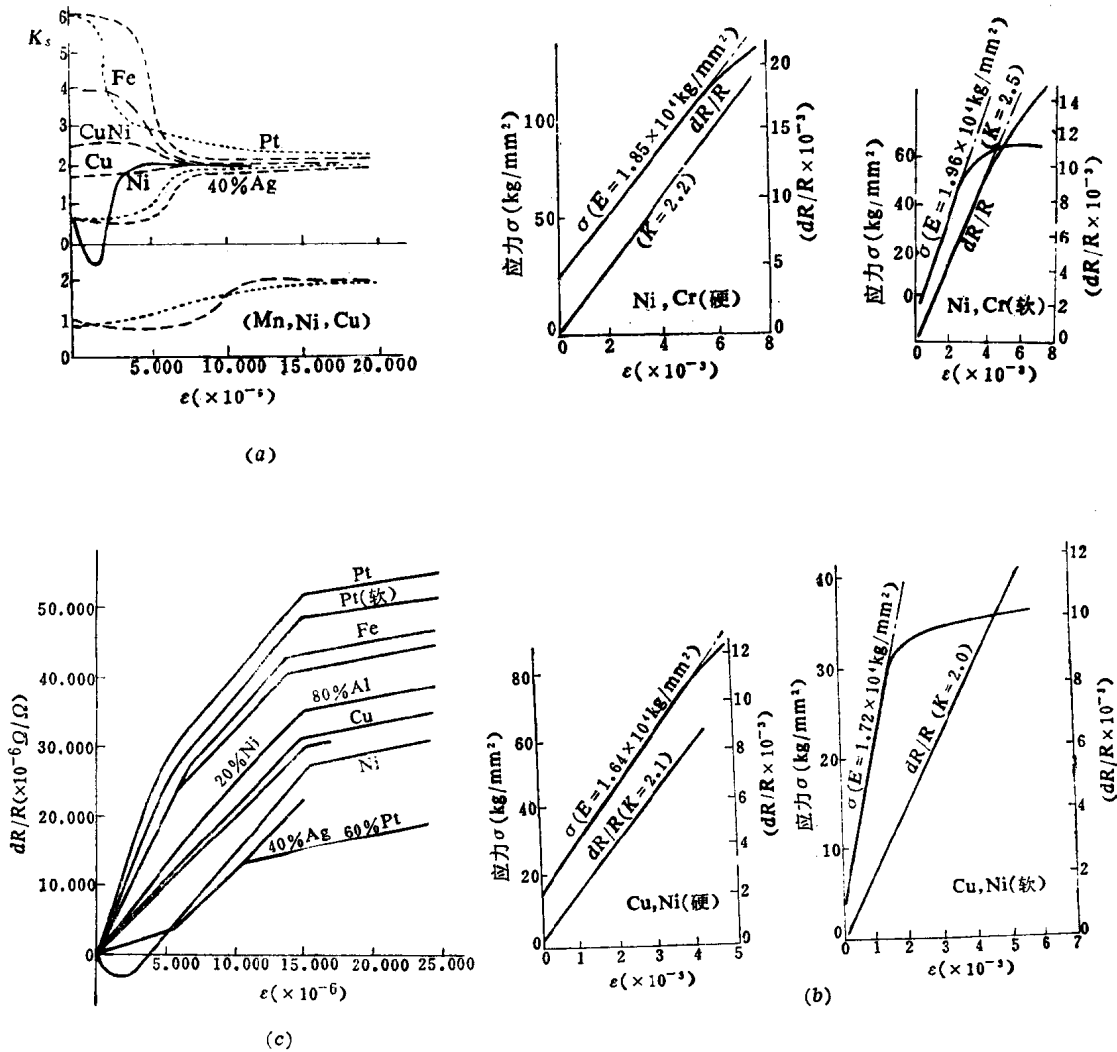


图 1-6 合金丝的 K_s 、 ϵ (a)、 ϵ - σ (b)和 $\frac{dR}{R}$ - ϵ (c)特性图

几种应变片用合金丝的物理性能，如表1-1所示。

(二) 应变片的分类

目前在常温条件下使用的应变片有：

1. 丝绕式应变片 (图1-7) 丝绕式应变片有纸基和胶基两种。按敏感栅配置分为单轴型、多轴型。单轴型用于测单向应变，多轴型 (应变花) 用于测同一点处几个方向的应变。由于丝绕式应变片敏感栅两端有圆弧部分，会感受横向应变，一般都有横向灵敏系数，在精密测量时对测量结果应加以修正。这种应变片容易粘贴，价格便宜，目前还常用。

应变片常用合金丝性能表

表 1-1

合金类型	化学成分	电 阻 率 ρ ($\Omega \text{mm}^2/\text{m}$)	电阻温度系数 α ($10^{-6} \Omega/\Omega^\circ\text{C}$)	灵敏系数 K_s	线膨胀系数 β ($10^{-6}/^\circ\text{C}$)	拉伸强度 σ_p (kg/mm^2)	最高使用温度 T ($^\circ\text{C}$)
铜镍合金 (康铜)	Cu55% Ni45%	0.45~0.52	± 20	1.9~2.1	15	45~70	300 (静态) 400 (动态)
镍铬合金	Ni80% Cr20%	1.0~1.1	110~130	2.1~2.3	14	65~100	450 (静态) 800 (动态)
镍铬铝合金	Ni74% 6J22Cr 20% Al3% Fe3%	1.24~1.42	± 20	2.4~2.6	13.3	3	450 (静态) 800 (动态)
	Ni75% 6J23Cr 20% Al3% Cu2%	1.3~1.5	30~40	2.8	14	2~3	700 (静态) 1000 (动态)
铁铬铝合金	Fe70% Cr25% Al5%	0.09~0.11	3900	4~6	8.9	7.6	800 (静态) 1000 (动态)
贵金属合金	Pt92% W8%	0.68	227	3.5	8.3~9.2	6.1	800 (静态) 1000 (动态)

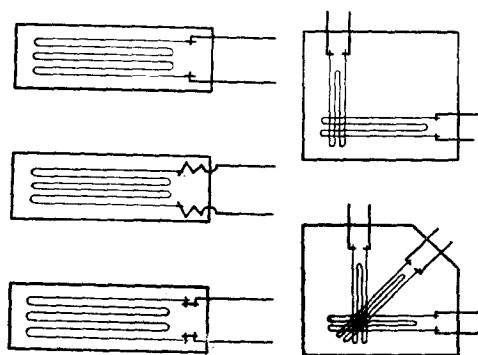


图 1-7 丝绕式应变片

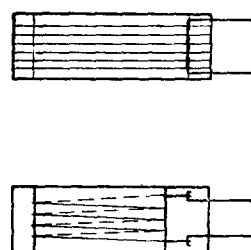


图 1-8 短接丝式应变片

2. 短接丝式应变片(图1-8) 短接丝式应变片是多根平行的电阻丝, 两端由横向放置的镀银铜线焊接成的, 多数为胶基, 并且做成温度自补偿式应变片。它的横向效应小, 适于高精度测量, 但短接部分易出现应力集中, 影响疲劳寿命。

3. 箔式应变片(图1-9) 箔式应变片是由应变合金轧制成的箔材, 经热处理后, 涂一层树脂, 再经聚合处理形成基底。在涂树脂的一面用光刻腐蚀工艺做成敏感栅, 焊上引线, 再涂一层表面保护层。这种应变片的电阻丝栅薄而宽, 尺寸准确, 线条均匀, 表面积

大，散热条件好，其电阻温度系数和横向效应也小，从而能提高测量精度。此外还能制成超小型或各种形状的特殊用途应变片。由于具有上述优点，因之，已被广泛采用。

箔式应变片目前有单轴型和多轴型（应变花）。

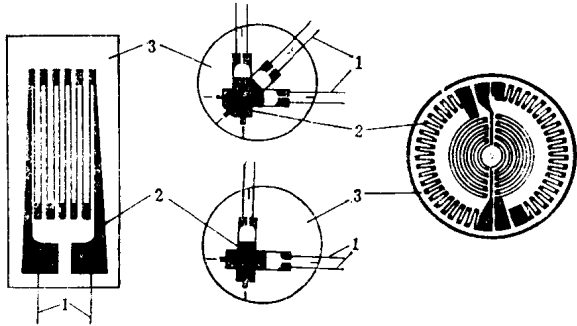


图 1-9 箔式应变片

1—引出线；2—敏感栅；3—基底

4. 半导体应变片（图1-10） 半导体应变片是利用半导体材料的压阻效应制成的。应变片的敏感栅是由半导体材料做的，最常用的是单晶硅。它比前几种应变片有灵敏度高且无横向效应，机械滞后小和频率响应宽等优点；并能做成超小型的。其缺点是应变和电阻变化率之间的非线性较大，灵敏度是变化的，即漂移较大。其次是受温度变化影响较大，即温度系数大。

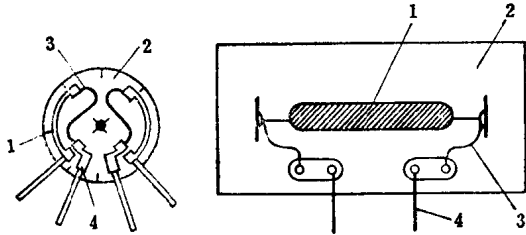


图 1-10 半导体应变片

1—P-Si片；2—胶模基底；3—内引线；4—外引线

5. 薄膜式应变片 这种应变片是将电阻合金或半导体材料用真空蒸发或沉积在基底上，形成薄膜，作为敏感栅。基底表面是涂有绝缘材料的绝缘层，因此敏感栅很薄，故与被测试件能接触的很好，其稳定性、机械滞后和蠕变也小。此种应变片宜于作小型传感器使用。

6. 特殊用途应变片 特殊用途的应变片有高温或低温应变片、温度自补偿应变片、测应力的应变片、大变形应变片和耐疲劳应变片，以及各种传感器用的应变片等。

（三）应变片的灵敏度

电阻应变片的灵敏度 K 与电阻丝的灵敏度 K_s 不同。应变片是粘贴在被测试件上的，粘贴好的应变片感受到的机械应变 ϵ 与其电阻变化率 $\frac{dR}{R}$ 之间，仍可认为保持下列线性关系：

$$K = \frac{\Delta R}{R} / \varepsilon \quad (1-9)$$

但，电阻应变片的灵敏度比电阻丝灵敏度低，其主要原因如下：

(1) 丝绕式电阻应变片的敏感栅有许多半圆形回弯段，它与直线段方向不同，在受力时产生横向效应，使直线段的应变被抵消一部分，降低了灵敏度，如图1-11所示。

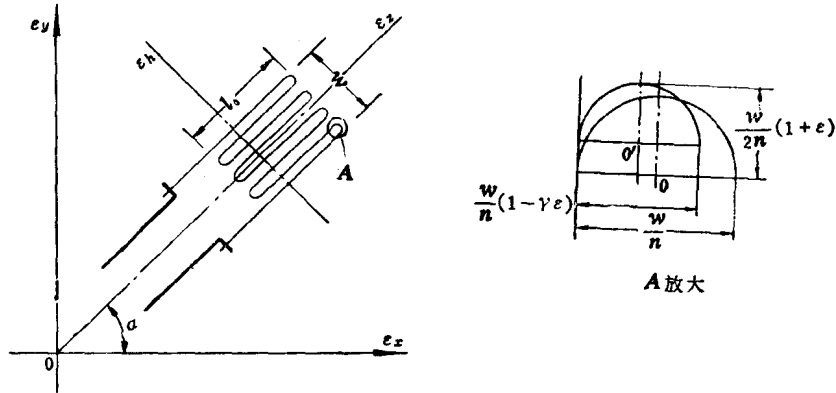


图 1-11 丝绕式应变片回弯段

对应变片的横向效应，可做如下分析。

当丝绕式应变片贴在任意平面应变场中，且整个坐标平面内各点的应变状态均相同，并设应变 ε_x 和 ε_y 方向为 ox 和 oy ，应变片轴线与 x 轴夹角为 α ，沿应变片轴向的应变为 ε_x ，垂直于轴向的应变为 ε_y ，电阻丝栅有 n 个直线段，每段长为 l 。可以认为直线段只受 ε_x 的作用。有 $(n-1)$ 个半圆回弯段，回弯段同时受 ε_x 和 ε_y 的作用。在此情况下，可以用横向灵敏度 K_h ，表示应变片的横向效应的大小。根据理论计算得：

$$K_h = K_s \frac{n\pi r}{2L_0} \quad (1-10)$$

而应变片的轴向灵敏度 K_z ：

$$K_z = K_s \left(1 - \frac{n\pi r}{2L_0} \right) \quad (1-11)$$

式中 L_0 ——应变片电阻丝的总长度， $L_0 = (n+1)l + n\pi r$ ；

r ——电阻丝栅回弯段半径。

应变片的实际灵敏度 K 应当是：

$$K = K_z \left(1 + \frac{K_h}{K_z} \cdot \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right) = K_z \left(1 + H \frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} \right) \quad (1-12)$$

$$\text{由 (1-10)(1-11) 式得: } H = \frac{K_h}{K_z} = \frac{n\pi r}{2L_0 - n\pi r} \quad (1-13)$$

称 H 为应变片的横向效应系数。

当被测试件的泊松比为 ν ，即 $\varepsilon_y = -\nu\varepsilon_x$ 时，由(1-11, 1-12)式得应变片的实际灵敏度为：