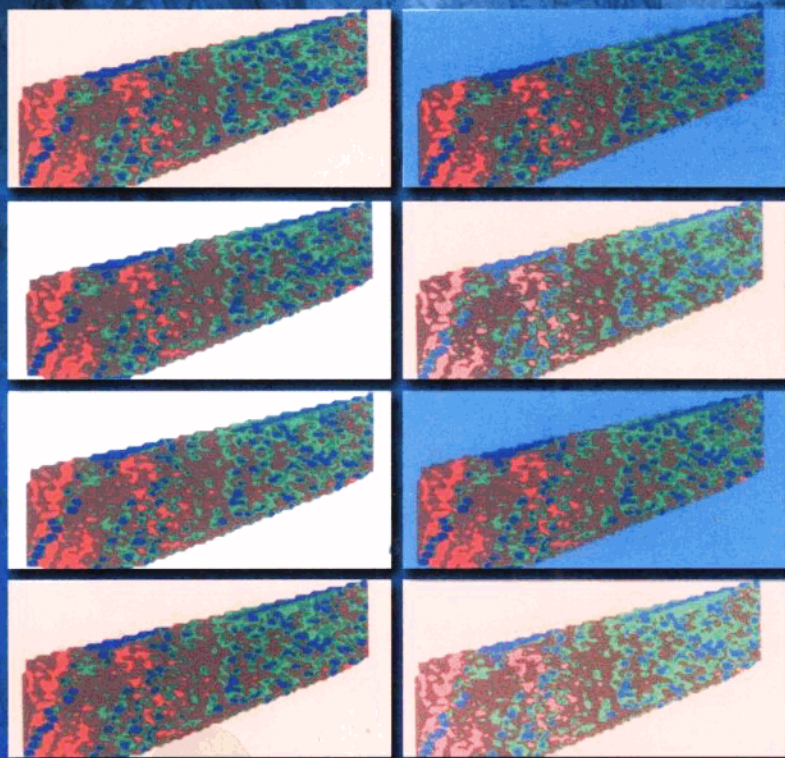


矿山岩体探测技术

于师建 王玉和 编著
程久龙 王渭明



地震出版社

矿山岩体探测技术

于师建 王玉和
程久龙 王渭明 编著

地震出版社

图书在版编目(CIP)数据

矿山岩体探测技术/于师建等编著. —北京:地震出版社, 2004.8

ISBN 7-5028-2497-9

I. 矿... II. 于... III. 矿山—岩体应力—探测

IV. TD311

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 036574 号

地震版 XT200400129

内 容 提 要

本书重点介绍矿山地下工程中涉及到的岩体探测技术和方法。内容包括:电阻应变测试技术及电阻应变式传感器、原岩应力测量方法,采矿工程围岩(地下峒室围岩、采场上覆岩层及下伏岩层)移动和破坏探测方法,岩体声波探测的原理、技术、方法及应用,直流电阻率法、大地电磁测深及无线电波透视等探测技术。

本书可作为高等院校岩石力学、采矿工程、安全技术与工程、应用地球物理、水文地质与工程地质等相关专业的教学参考用书,也可供科研、现场工程技术人员参考。

矿山岩体探测技术

于师建 王玉和 程久龙 王渭明 编著

责任编辑:李和文

责任校对:孙铁磊

出版发行:地震出版社

北京民族学院南路 9 号 邮编:100081

发行部:68423031 传真:88421706

门市部:68467991 传真:68467972

总编室:68462709 传真:68467972

E-mail: seis@ht.rol.cn.net

经销:全国各地新华书店

印刷:山东科技大学印刷厂

版(印)次:2004 年 8 月第一版 2004 年 8 月第一次印刷

开本:787×1092 1/16

字数:240 千字

印张:9.375

印数:0001~1000

书号:ISBN 7-5028-2497-9/TD·22(3120)

定价:24.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现印装问题,本社负责调换)

前 言

岩体探测技术是用实验测量的方法测定、分析和研究岩体工程，由于动静荷载的作用和赋存条件的改变，所引起的岩体应力和变形以及地球物理场响应特征的一门学科。它既包含基本的岩体应力测量方法，又包含地球物理探测技术，是建立在信息学、电子学、计算数学、地球物理学及岩石力学基础之上的一门综合性很强的学科。

本书共分五章：

第一章论述了电阻应变测试技术。主要包括电阻应变片的结构、工作原理及分类。电阻应变仪的结构、原理及类型。对应变测量电桥的工作原理重点介绍了电桥的加减特性以及利用这一特性实现复合应力测量、温度补偿和提高测量精度的方法。最后介绍了利用应变片和弹性元件制作的压力、压强、变形及加速度传感器。

第二章论述了原岩应力测试技术。钻孔应力解除法作为原岩应力间接测量方法介绍了三种：孔底应力解除法、孔径变形法和孔壁变形法，并且还介绍了确定原岩空间应力的三孔汇交法，这些方法是目前国际岩石力学学会有关机构推荐使用的方法。另外还详述了岩体应力的直接测量方法：水力压裂法和应力恢复法。

第三章介绍了采矿工程围岩（地下峒室围岩、采场上覆岩层及下伏岩层）移动破坏探测方法。主要包括水文地质钻孔探测法、钻孔分段注水法、岩层移动钻孔探测法、钻孔超声成像探测法和孔间无线电波透视法。另外还详述了小波多分辨分析和正交小波变换的原理以及在放顶煤开采顶煤残余煤厚探测中的应用。

第四章介绍了声波探测技术。重点论述了声波探测的基本原理、声波探测方法及其应用。对最近几年发展起来的声速 CT 探测技术、大功率超磁致伸缩声波换能器也作了简要介绍。

第五章介绍了综合地球物理探测技术。主要包括形变电阻率法、高密度电阻率法、电磁波透视法、地质雷达以及大地电磁测深法。这些方法在解决矿井顶底板水探测、地质构造探测、地下水探测、采空区探测等方面发挥了重要作用。

本书由于师建（绪论、第一章、第三章、第四章的第1、2节）、王渭明（第二章）、王玉和（第五章）、程久龙（第四章的第3、4、5节）分别编写，徐波协助绘制插图和部分校订工作。全书由于师建统一审核和定稿。

由于作者水平有限，加之时间仓促，错误与不当之处在所难免，敬请读者批评指正，不吝赐教。

编著者

2004.3.25

目 录

绪论	(1)
第一章 电阻应变测试技术	(3)
§ 1.1 电阻应变片	(3)
1.1.1 电阻应变片的结构、工作原理及分类	(4)
1.1.2 电阻应变片的工作特性及参数	(6)
§ 1.2 电阻应变仪	(9)
1.2.1 应变仪的结构原理及类型	(10)
1.2.2 应变电桥的工作原理	(12)
§ 1.3 电阻应变测量	(14)
1.3.1 应变片的粘贴与防护	(14)
1.3.2 应变片的接桥方式	(15)
1.3.3 电阻应变测量	(18)
§ 1.4 电阻应变式传感器	(21)
1.4.1 基本原理	(21)
1.4.2 电阻应变式测力传感器	(24)
1.4.3 电阻应变式压强传感器	(26)
1.4.4 电阻应变式位移传感器	(27)
1.4.5 电阻应变式加速度传感器	(27)
第二章 原岩应力测量	(28)
§ 2.1 钻孔应力解除法	(30)
2.1.1 应力解除法的基本原理	(30)
2.1.2 孔底应力解除法	(32)
2.1.3 孔径变形法	(36)
2.1.4 确定原岩空间应力的三孔汇交法	(38)
2.1.5 孔壁应变法	(44)
§ 2.2 水力压裂法	(49)
2.2.1 基本原理	(49)
2.2.2 试验程序	(51)
2.2.3 钻孔裂隙方位测定	(52)
§ 2.3 应力恢复法	(52)
2.3.1 基本原理	(52)
2.3.2 试验程序	(53)
2.3.3 测试结果的修正	(54)
第三章 采矿工程围岩移动破坏探测	(55)
§ 3.1 围岩移动破坏规律	(55)

3.1.1 巷道围岩的移动破坏规律·····	(55)
3.1.2 采场覆岩移动破坏规律·····	(56)
3.1.3 采场底板岩层移动破坏规律·····	(57)
§ 3.2 围岩移动破坏探测技术·····	(58)
3.2.1 水文地质钻孔探测法·····	(58)
3.2.2 钻孔分段注水法·····	(61)
3.2.3 岩层移动钻孔探测法·····	(62)
3.2.4 钻孔超声成像探测法·····	(64)
3.2.5 孔间无线电波透视法·····	(66)
§ 3.3 小波多分辨分析在煤厚探测中的应用·····	(69)
3.3.1 小波多分辨分析和正交小波变换·····	(70)
3.3.2 采场顶煤残余厚度探测方法·····	(71)
3.3.3 应用实例·····	(72)
第四章 岩体声波探测技术 ·····	(76)
§ 4.1 声波探测原理·····	(76)
4.1.1 无限弹性介质中的波·····	(76)
4.1.2 声波在岩体中的传播特性·····	(80)
4.1.3 声波探测应用的参量·····	(84)
4.1.4 声速与岩体力学性质及结构状态的关系·····	(85)
4.1.5 声波振幅特征与岩体特性的关系·····	(87)
§ 4.2 声波探测仪器·····	(88)
4.2.1 声波激发方式·····	(88)
4.2.2 声波换能器·····	(88)
4.2.3 岩体声波探测仪器·····	(90)
4.2.4 声波参数的测量·····	(91)
§ 4.3 声波探测方法·····	(92)
4.3.1 换能器与被测岩体(石)的耦合·····	(92)
4.3.2 现场岩体声波探测方法·····	(93)
4.3.3 室内岩石试件测试·····	(94)
§ 4.4 声波探测的应用·····	(95)
4.4.1 岩体力学参数测定·····	(95)
4.4.2 岩体工程地质分类·····	(96)
4.4.3 围岩松动圈的探测·····	(97)
4.4.4 采场底板破坏深度探测·····	(98)
4.4.5 在冻结法凿井中的应用·····	(101)
4.4.6 声波测井·····	(102)
§ 4.5 声发射与微震技术·····	(103)
4.5.1 基本原理·····	(103)
4.5.2 监测方法及仪器·····	(104)
4.5.3 应用实例·····	(105)

第五章 岩体综合地球物理探测技术·····	(107)
§ 5.1 岩体直流电阻率法探测技术·····	(107)
5.1.1 直流电阻率法的理论基础·····	(107)
5.1.2 形变电阻率法·····	(112)
5.1.3 高密度电阻率法·····	(112)
5.1.4 工作面底板直流电透视法·····	(114)
5.1.5 应用实例·····	(115)
§ 5.2 岩体电磁波探测技术·····	(119)
5.2.1 矿井电磁波透视法·····	(119)
5.2.2 地质雷达·····	(129)
§ 5.3 大地电磁测深技术·····	(135)
5.3.1 探测原理·····	(136)
5.3.2 工作方法·····	(137)
5.3.3 影响因素及应用分析·····	(138)
5.3.4 应用实例·····	(139)
参考文献·····	(141)

绪 论

矿山开采使地下岩体失去原始应力平衡状态,经过一系列矿山压力显现后,又使岩体内应力场建立起新的平衡状态。地下采矿工程中出现的各种地质灾害,如巷道失稳、顶板冒落、地表沉陷、顶底板突水等,都是在这一过程中出现的。从本质上讲,矿山开采活动是一个力学过程,用岩石力学的方法研究矿山开采过程中的矿压显现规律具有重要意义。但由于岩体赋存条件的独特性和复杂性,大部分岩体处于三维应力状态下,且岩体具有非均质性和各向异性,岩体中存在断裂构造和地下水等,用理论分析和解析运算的方法解决岩体工程问题是极其困难的,甚至是不可能的。理论研究的意义仅在于指引解决问题的方向和简化问题的途径。解决矿山岩体工程问题的正确方法只能是理论研究和实验研究相结合,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,再做解析或数值运算,以求得问题的正确答案。因此,岩体测试与探测技术也是岩石力学研究的重要学科分支。实际上,岩石力学的发展也是建立在实验基础之上的。例如,经过长期的世界性原岩应力场的实测研究,才揭示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一个新的高度,成功地解决了一些岩体工程的稳定性问题。隧道新奥施工法,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,成为理论与实验研究相结合的典范。

在岩体应力场变化的同时,岩体介质的电阻率、磁化率、声波穿透速度等也相应发生了变化,这些物理场量的变化是矿山开采应力场变化的结果。因此,可以通过这些物理场量的测量研究岩体的应力、结构、含水性等状况。虽然这些物理场量与岩体应力之间尚无明确的定量关系,但研究应力场变化引起的物理场响应特征无疑是非常重要的。岩体变形测量可以通过虎克定律换算成岩体的应力,而岩体的应力状况是其最本质的物理性状,它不仅能反映岩体所经历的力和运动的情况,而且能反映其他物理特征。如果说岩体应力的实验测量是最重要的、最根本的岩体测量,那么岩体物理场探测则是解决地下工程实际问题的重要手段。

综上所述,岩体探测技术是用实验测量的方法测定、分析和研究岩体工程由于动静荷载的作用和赋存条件的改变,所引起的应力和变形以及地球物理场响应特征的一门学科。它既包含基本的岩体应力测量方法又包含地球物理探测技术,是建立在信息学、电子学、计算数学、地球物理学及岩石力学的基础之上的,是一门综合性很强的学科。

岩体探测技术的主要研究内容可归纳如下:

- (1) 岩体原岩应力场的实验测量;
- (2) 在地下岩体的采掘过程中,岩体中应力的重新分布、变形和破坏、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;
- (5) 岩体含水性探测;
- (6) 采空区探测;

(7) 岩体中地质异常体探测。

在岩体探测技术中,最根本也是最困难的是岩体原岩应力场的测量。按照测量原理的不同,将测量方法分为直接法和间接法两大类。直接测量法是测量仪器直接测量和记录各种应力量,并由这些应力量 and 原岩应力的相互关系计算获得原岩应力值。在计算过程中不涉及不同物理量的相互换算,不需要知道岩石的物理力学性质和应力应变关系。水压致裂法和应力恢复法是实际测量中较为常用的测试方法。间接测量法不是直接测量应力量,而是借助某些传感元件或某些媒介,测量和记录岩体中某些与应力有关的间接物理量的变化,如岩体中变形或应变,岩体的密度、磁导率、电阻率、弹性波传播速度的变化等,然后由测得的间接物理量的变化,通过已知的公式计算岩体的应力值。为了计算应力值应确定岩体的物理力学性质以及所测物理量和应力的相互关系。钻孔应力解除法以及地球物理方法等都是间接法中较为常用的测试方法。

电阻应变测量技术是目前测量岩体在动静荷载作用下,所产生应变的最准确和最成熟的测试方法。钻孔应力解除法中常用的孔底应变计、孔径变形计、孔壁应变计以及测量压力、压强、扭矩、加速度等传感器都是用应变片作为敏感元件,配以不同类型的弹性元件制作而成的。

对涉及到采场上覆岩层和下伏岩层移动破坏探测,由于岩体不仅产生弹塑性变形和破坏而且还存在整体刚性位移,因此需要设计特殊的探测方法。本书介绍了水文地质钻孔探测法、钻孔分段注水法、岩层移动钻孔探测法、钻孔超声成像探测法和孔间无线电波透视法。这些探测方法是作者参与“六五”、“七五”大型湖泊下采煤,受奥灰承压水威胁煤层开采国家攻关项目中,研究采场覆岩移动破坏和底板伏岩破坏规律时采用的方法。采用声波反射法探测顶煤厚度的关键问题是识别煤岩界面的弱反射波。在煤厚探测信号处理中采用小波多分辨率分析方法,将实测信号按频段进行分解,借助于小波分析对信号突变点识别能力强的特点,清晰地获得了煤岩界面的反射波信号,取得了理想的探测效果。

岩体声波探测是利用声波作为信息的载体,测量声波在岩体内传播的波速、振幅、频率、相位等特征,来研究岩体的物理力学性质、构造特征及应力状态的方法。声波频率高,波长短,因而分辨率很高,对于岩石的若干微观结构也能有反映,而且具有简便、快速、经济,便于重复测试,并且具有对岩体无损检测等突出的优点,是了解岩体力学性质、确定岩体弹性参数、划分岩体强度、测定峒室和采空区围岩松动圈、探测应力重新分布以及变形和破坏情况的一种重要测试手段。弹性波CT探测技术的应用已使测试精度大大提高,大功率超磁震源的应用大大提高了岩体探测的范围。

综合地球物理探测技术(直流电阻率法、大地电磁测深、无线电波透视、地质雷达等)是近十几年对围岩移动和破坏探测、采场顶底板含水性探测、工作面隐伏构造探测研究中具有明显效果的一些方法。

随着科学技术的飞速发展,岩体探测的新技术不断涌现,信息处理技术更加先进,探测的准确度得到了大幅度提高。为了适应时代要求,在本书编写过程中尽量把比较先进的技术,特别是最近 10 年来在岩体探测方面比较重要的进展编入本书。随着岩体工程对岩体探测技术要求的提高和计算机控制及电子技术的发展,岩体探测技术在探测效率、探测精度等方面必将取得更快更大的发展。可以预言,随着科学技术的发展与完善,岩体探测技术在岩体工程中将会发挥越来越重要的作用。

第一章 电阻应变测试技术

在解决工程结构、巷道围岩等应力-应变问题时，实验应力-应变分析与理论应力-应变分析是互相并列的重要分支。由于当前还有许多实际问题尚不能用理论求解，需要通过试验的检验才能做出最后的结论，因此，实验应力-应变分析就显得愈来愈重要，用试验的方法来研究被测对象的应力-应变规律。目前，采矿工程中岩体和井上下结构的应力-应变与振动形态等方面的研究工作，以及相似模拟试验中普遍采用了电阻应变测试技术。

电阻应变测试的基本原理是：用电阻应变片作为传感元件，把力学参数（如压力、载荷、位移、应力或应变）转换成与之成比例的电学参数，在工作过程中引起电阻应变片的电阻变化，通过测量电桥使这一微小的电阻变化转换成电压或电流的变化，再经电子放大器放大，并根据某一比例常数关系，将其转换成试件的应变值而显示出来。完成上述工作的仪器叫做电阻应变仪。我们把用电阻应变片作为敏感元件，用电阻应变仪作为测量仪器的测量方法，称为电阻应变测量。

电阻应变测量根据载荷性质分为静态测量和动态测量。对恒定的载荷或短时稳定的载荷的测量称为静态测量；对载荷在2~5000Hz范围内变化的测量，称为动态测量。

一、电阻应变测量具有如下优点：

(1) 测量范围广、灵敏度和精确度高。最小可测1~5微应变，最大可测2万~3万微应变。其测量误差一般小于2%。

(2) 频率响应快，机械滞后很小。不仅可以测量静载下的应变，而且可以测量动载以及冲击载荷下的应变。

(3) 应变片尺寸小，重量轻，惯性小，对被测试件工作状态和应力状态影响极小。

(4) 适用范围广，高温、低温、高压、高速、旋转等特殊环境下均可使用。也可将应变片做成各种形式的弹性元件，用以测量拉、压、弯、加速度、位移、重量等物理力学参数。

(5) 能实现远距离测量和自动记录。

二、电阻应变测量的缺点是：

(1) 常规应变片在大应变状态下，电阻变化率与应变的关系呈现较大的非线性。

(2) 普通电阻应变片输出信号较小，在强电磁场内易受干扰。

(3) 即使应变片很小，测出的仍是一小块面积的平均应变，对几何尺寸较小的被测件就难以显示其应力梯度和应力分布情况。

(4) 使用仪器复杂，易出故障，而且排除故障的技术也较难掌握。电阻应变片即使有以上缺点，但由于它的优点突出，当前仍然应用得十分广泛。

§1.1 电阻应变片

电阻丝式变换元件是一种能将机械构件的应变转换为电阻值变化的变换元件，一般都做成片状，通常称为电阻应变片或电阻应变计，简称应变片。

1.1.1 电阻应变片的结构、工作原理及分类

1. 电阻应变片的结构

常用的电阻应变片由三部分组成，如图1.1.1所示。

(1) 电阻丝栅是由电阻丝（如锰铜丝、康铜丝等）绕制成的回形丝栅，或用合金箔片经光刻、腐蚀制成的箔栅。其电阻值随应变而变化。

(2) 基底与盖层是为电阻丝定位，起保护作用，并使之与被测构件绝缘。

(3) 引出线是用于连接测量电路的导线。一般用直径0.15~0.3mm的铜线，焊接在丝栅两端。

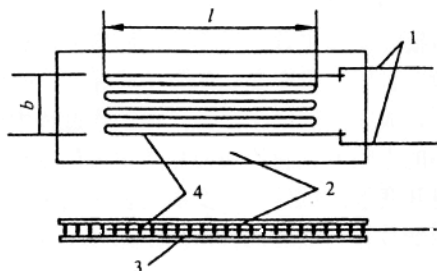


图1.1.1 电阻应变片结构示意图

1. 引出线；2. 盖层；3. 基底片；4. 电阻丝栅

l 为应变片长度； b 为应变片宽度

2. 电阻应变片的工作原理

电阻应变片的工作原理是基于它的“应变电阻效应”，即在导体产生机械变形时，它的电阻值相应发生变化。

电阻丝的电阻、电阻率与电阻丝的几何尺寸有如下关系：

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (1.1.1)$$

式中， R ——电阻丝的电阻， Ω ； ρ ——电阻丝材料的电阻率， $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ； l ——电阻丝的长度， m ； S ——电阻丝的横截面积， mm^2 。

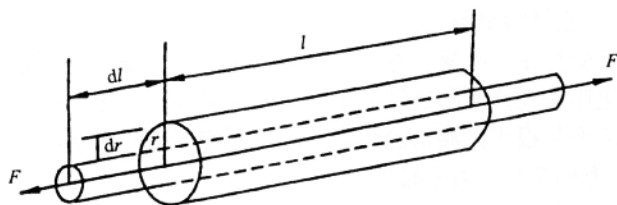


图1.1.2 电阻丝受力变形图

如图1.1.2所示的一根电阻丝，当导线两端承受机械应力 F 时，则电阻丝的电阻 R 、电阻率 ρ 及几何尺寸 l 和 S 均发生变化。将式（1.1.1）两端取对数再进行微分即得：

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dS}{S} \quad (1.1.2)$$

其中 $\frac{dl}{l} = \varepsilon$ ，表示电阻丝轴向的相对变化，而

$$\frac{dS}{S} = \frac{\pi(r+dr)^2 - \pi r^2}{\pi r^2} = 2 \frac{dr}{r} = -2\mu\varepsilon$$

式中， r ——电阻丝的半径； μ ——丝材的泊松比。

所以

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

或

$$\frac{\frac{dR}{R}}{\varepsilon} = 1 + 2\mu + \frac{\frac{d\rho}{\rho}}{\varepsilon}$$

令

$$K = \frac{\frac{dR}{R}}{\varepsilon} = 1 + 2\mu + \frac{\frac{d\rho}{\rho}}{\varepsilon} \quad (1.1.3)$$

则

$$\frac{dR}{R} = K\varepsilon$$

式中， K ——电阻丝的灵敏系数，表示电阻丝产生单位变形 ε 时，电阻相对变化的大小。其数值由实验来确定。

式 (1.1.3) 建立了电学量与力学量的比例关系，是应变片的一个重要参数。

3. 电阻应变片的分类

目前在常温条件下使用的应变片有：

(1) 丝绕式应变片 (图1.1.3)。

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不同方向的应变。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。

(2) 短接丝式应变片 (图1.1.4)。

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而成。它的横向

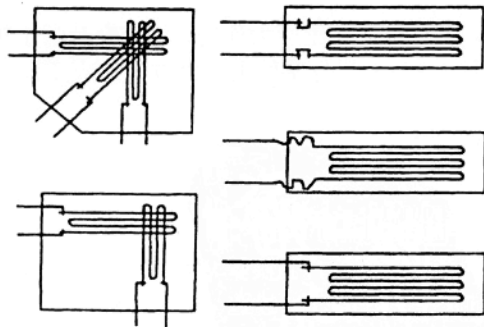


图1.1.3 丝绕式应变片

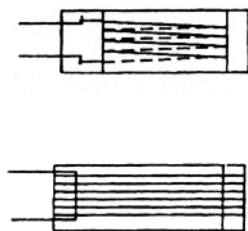


图1.1.4 短接丝式应变片

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1.1.5)。

其敏感元件是通过光刻、腐蚀等工序制成的一种很薄的金属箔栅，其基底与盖层多为胶质膜。与金属丝式应变片比较，箔式应变片很薄 ($3\sim 5\mu\text{m}$)，惯性小，贴在被测构件上更易反映构件的应变状态；箔材表面积大，散热好，可通过较大电流，增大输出信号；箔栅端部较宽，横向效应小。箔式应变片的种类很多，有常用的单应力方向的应变片 (图1.1.5a)，测量扭转的应变片 (图1.1.5b)，以及压力传感器专用的应变片 (图1.1.5c) 等。

(4) 半导体应变片 (图 1.1.6)。

这种应变片是应用固体物理学原理，半导体集成工艺，以单晶膜片为敏感元件制成的，分为体型半导体应变片、薄膜型半导体应变片和扩散型半导体应变片。其突出的优点是灵敏度高，比金属丝式应变片灵敏度高 $50\sim 80$ 倍；尺寸小，横向效应小；滞后和蠕变小，适用于动态测量。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。

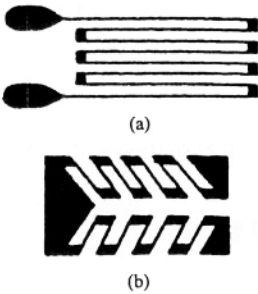


图1.1.5 箔式应变片

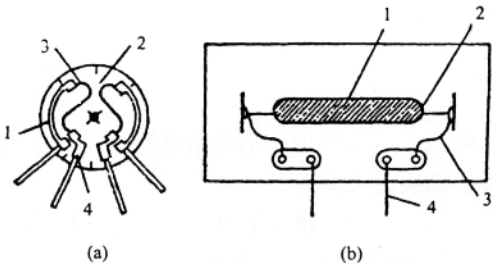


图1.1.6 半导体应变片
1.P-Si片；2.胶模基底；3.内引线；4.外引线

1.1.2 电阻应变片的工作特性及参数

在使用电阻应变片的过程中，要正确了解它的特性和参数，否则会产生较大的测量误差，甚至得不到正确的测量结果。下面我们仅就几个主要特性加以概述：

1. 电阻应变片的工作特性

(1) 灵敏系数 K 。

应变片的灵敏系数 K 一般由实验方法测定，若试件受一维应力作用，当应变片的主轴线方向与主应力方向一致时，则应变片电阻变化率 ($\Delta R/R$) 与试件主应力方向的应变 ϵ_x (线应变为 $\frac{\Delta l}{l}$) 之比称之为应变片的实际灵敏系数，即：

$$K = \frac{\Delta R/R}{\epsilon_x} \tag{1.1.4}$$

由式 (1.1.4) 可知，应变灵敏系数是按一维应力定义的，但实验却是在二维应变场下进行的，所以必须规定试件的泊松比，对固定横向应变的影响，一般选取 $\mu=0.285$ 的钢试件来确定 K 值。生产厂家在每批产品中抽取一定百分比的产品进行标定，然后取其平均值作为这批产品的灵敏系数。

(2) 横向效应。

一根直的电阻丝绕成丝栅制成应变片后,当沿电阻片轴向拉伸时,与处在同样应变状态下,长度相同的直丝材相比较,其电阻值变化要小,这种现象称为应变片的横向效应,用横向灵敏度 H 表示。用同一批生产的应变片,分别以基长和基宽测同一单向应变,后者与前者应变读数之比即为该批应变片的横向灵敏度:

$$H = \frac{\frac{\Delta R_b}{R}}{\frac{\Delta R_l}{R}} = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_l} \quad (1.1.5)$$

式中, ΔR_b 、 ΔR_l 分别是用应变片基宽与基长测同一单向应变时引起的电阻变化量, H 的取值范围一般为 $0.1\% \sim 0.3\%$ 。

(3) 温度效应。

在使用电阻应变片测量应变时,希望它的电阻值变化只和应变有关,不受其他因素的影响。实际上,任何金属丝都有电阻温度系数 α_0 , 温度改变时,应变片的电阻值也将发生相应的变化,这种现象称为温度效应。由温度效应产生的应变是虚假应变,在测量中需设法消除。

环境温度变化引起的电阻变化主要有两方面的原因:一是应变片丝栅材质本身电阻温度系数的影响;二是电阻丝材料与试件材料温度线膨胀系数的影响。

当温度变化 Δt 时,由以上两方面原因产生的应变量为:

$$\varepsilon_t = \left[\frac{\alpha_0}{K} + (\beta_g - \beta_s) \right] \Delta t \quad (1.1.6)$$

式中, α_0 ——电阻丝材料的电阻温度系数,表示温度变化 1°C 时,电阻的相对变化; β_g ——试件材料的线膨胀系数; β_s ——电阻丝的线膨胀系数; K ——应变片的灵敏系数。

由上式可知,环境温度变化而引起的附加电阻变化,除与环境温度变化 Δt 有关外,还与应变片本身的参数 α_0 、 K 、 β_s 以及被测试件的 β_g 有关。在使用应变片时,必须设法消除,否则会产生较大的误差,一般补偿方法分为自补偿法(对丝栅处理法和双金属丝栅法)和电路补偿法。

① 自补偿法。这种补偿方法的原理是使应变片的总温度系数为 0。即当温度变化时,应变片的总阻值保持不变,这种具有自身补偿功能的应变片称为自补偿应变片。其方法有两种:一是对敏感栅材料进行处理,对一定的试件材料,其线膨胀系数 β_g , 为常数,选择电阻丝的温度系数 α_0 和线膨胀系数 β_s , 使 $\alpha_0 = -K(\beta_g - \beta_s)$, 则由式 (1.1.6) 知: $\varepsilon_t = 0$, 实现温度补偿。二是采用双金属丝栅法,用两种具有不同符号的电阻温度系数(一个为正,一个为负)的金属丝制成复合型应变片,可使应变片在一定温度变化范围内的电阻变化为 0,从而达到温度补偿的目的。以上两种方法尽管效果不错,但都有其局限性:或仅适用于某一特定 β_g 的试件;或仅适用于某一温度范围,超出使用范围时补偿效果变差。

② 电路补偿法。关于电路补偿法的补偿原理将在 1.2 节专门讲述。

(4) 应变极限。

当粘贴在试件上的应变片承受较大应变时,胶和基底传递应变的能力减弱,试件的真实应变不能全部作用在应变片的金属丝上,测出的应变值比实际应变值要小。另外,在应变值

超出金属丝弹性极限时，也破坏了 R 与 ε 的正比关系。在应变片的特性中规定了应变片的应变极限，用它来描述应变片的非线性。

应变片的应变极限是指，当温度一定时，指示应变数值为真实应变的 90% 时所对应的真实应变值称为应变片的应变极限。它规定了应变片所能测出的最大应变值。

(5) 应变片的机械滞后、零漂和蠕变。

应变片的机械滞后是指对已贴好的应变片，在温度一定时，增加和减少机械应变过程中同一机械应变量下指示应变的最大差值 $\varepsilon_{\text{滞}}$ （图 1.1.7）。产生机械滞后的原因，主要是金属丝、粘贴剂和基底在承受机械变形后都留有残余变形。为了减少机械滞后，要选择性能良好的粘贴剂和基底，以及对金属丝进行适当热处理。另外，对新贴好的应变片进行 3 次以上加、卸载循环可减少滞后带来的误差。

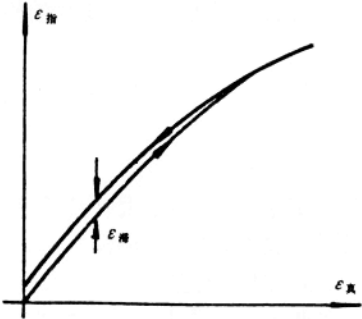


图 1.1.7 机械滞后

零漂是指在一定的温度和无机械应变条件下指示应变值随时间的变化。蠕变是指在温度一定并承受固定机械应变条件下，指示应变值随时间的变化。零点漂移和蠕变都表示应变片特性对时间的稳定性，前者发生在不承受应变情况下，后者发生在承受应变情况下，因此蠕变包括了零漂。制造应变片时内部产生的内应力，粘贴剂和基底在温度和载荷作用下内部结构的变化，都是产生零漂和蠕变的原因。

(6) 疲劳寿命。

在一定特定频率（30Hz）特定动荷载重复作用下（ $\pm 1500\mu\varepsilon$ ），不会使应变片遭到疲劳破坏的最大循环次数称为应变片的疲劳寿命。一般为 $10^5 \sim 10^7$ 次。箔式比纸基式应变片的疲劳寿命要长得多。

(7) 动态特性。

前已叙及，应变片是反映应变丝栅覆盖面积下即基长和基宽范围内的平均纵向应变，测量静态应变或频率较低的应变时，它能正确反映构件的真实应变。然而，当被测应变的变化频率较高时，构件内各点的应变变化是应变波在试件和粘结层中的传播，应变片反映的平均应变和瞬时应变相差很大，产生失真。因此，动态应变测试必须考虑应变片的动态特性。一般取应变波长 λ 是应变片基长的 20 倍以上，此时相对误差可小于 0.5%，故应变片可测动态频率与基长的关系为：

$$f = \frac{v}{\lambda} = 0.05 \frac{v}{l} \tag{1.1.7}$$

式中， v ——应变波在试件中的传播速度，可近似看成为声速。例如钢材的应变波传播速度为 5000m/s，测量频率为 250、83、50、25、11.5 和 5kHz 的动态应变时相应的应变片基长为 1、3、5、10、20 和 50mm。故应变频率越高，应变片的基长应越小。

以上介绍了应变片的几个主要特性，对分析测量精度有很大帮助。为了更好地使用应变片，还须知道应变片的主要参数。

2. 电阻应变片的参数

(1) 几何尺寸。

应变片的几何尺寸主要是敏感栅基长 l 和基宽 b 。

敏感栅基长：应变片敏感栅在纵轴方向的长度，对丝绕式的敏感栅，指圆弧内侧之间的距离；对短接式或有横栅的箔式应变片，指两横栅内侧之间的距离。

敏感栅基宽：在与应变片轴线相垂直的方向上，应变片敏感栅外侧之间的距离。

(2) 应变片初始电阻 R_0 。

R_0 指应变片在未贴之前，在室温下测得的电阻，有 60、90、120、300、350、500、600、1000 Ω 等多种，其中 120 Ω 最常用。通常称上述电阻为名义电阻或标称电阻。普通应变片规格是以使用面积，名义电阻及其偏差范围来表示，如 3mm $\times$ 20mm，(120 $\Omega \pm 0.5\%$)。

(3) 允许工作电流。

允许工作电流指应变片丝栅允许通过的最大电流。它受基底、粘结剂和丝径的影响，纸基丝绕式应变片在静态测量时的允许电流为 20~25mA，动态测量为 75~100mA，箔式应变片可达 200mA 以上。表 1.1.1 列出了国产常用电阻应变片规格。

§1.2 电阻应变仪

在进行应变测试时，应变片的电阻变化是很小的，用一般的仪表难以测量。必须有专门的电子仪器，配合应变片组成电桥，并对电桥输出信号进行放大、检波等环节的处理，直接从应变的标度来显示测试电桥中应变片的电阻变化率。这种仪器就是电阻应变仪。

表 1.1.1 常用应变片技术规格

名称	型号	敏感栅尺寸/mm	名义电阻/ Ω	灵敏系数 K	极限工作温度/ $^{\circ}\text{C}$
纸基 丝绕式 应变片	PZ-15	1.8 $\times$ 15	120	1.0~1.1	
		1.8 $\times$ 17	120	1.95~1.10	
	PZ-17	2 $\times$ 5	120	1.0~1.3	
		2 $\times$ 10	120	1.0~1.3	
		3 $\times$ 4	120	1.0~1.3	
		3 $\times$ 5	120	1.0~1.3	
		3 $\times$ 15	120	1.0~1.3	
		3 $\times$ 20	120	1.0~1.3	
		5 $\times$ 40		1.0~1.3	
		5 $\times$ 100		1.0~1.3	
		5 $\times$ 150		1.0~1.3	
胶基 丝绕式 应变片	PJ-60	3 $\times$ 12	60	1.9~1.1	100
	PJ-120	5 $\times$ 13	120	1.9~1.1	100
	PJ-200	9 $\times$ 12	200	1.0~1.1	100
	PJ-320	11 $\times$ 11	320	1.0~1.1	100