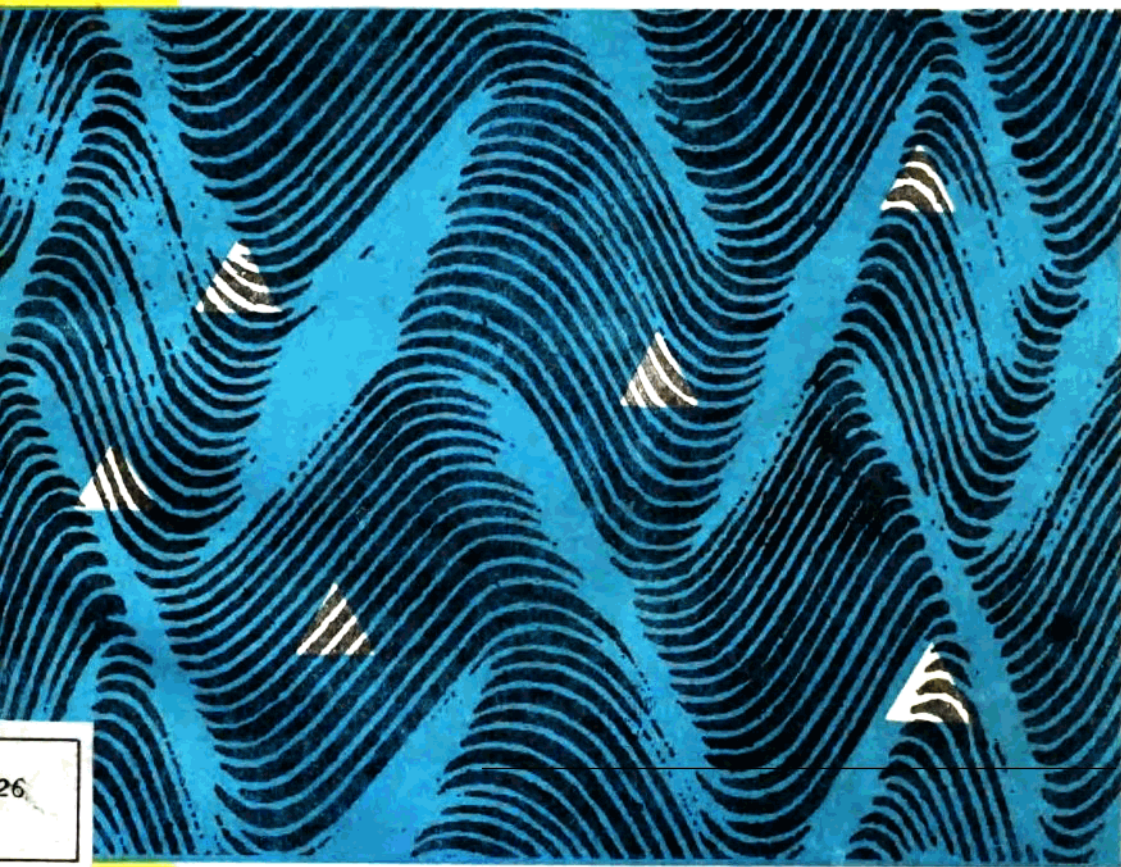


高等学校教学参考书

矿山压力实测技术

周楚良 编



26

中国矿业大学出版社

BX05/28

矿山压力实测技术

周楚良 编

中国矿业大学出版社



B

489677

内 容 提 要

矿山压力现场观测(简称实测)是研究矿山压力力学过程的基本方法。随着煤矿生产和科研的需要,我国和世界各主要产煤国家煤矿矿山压力现场量测技术和仪器正在迅速发展。本文较好的总结了国内外矿山压力实测技术的现状和方向,系统地介绍了反映当代矿压实测技术水平的各类实测方法和实测仪器,有较强的实用性。

全书包括常用的传感器、岩体应力测量、岩体变形和位移测量、岩体内应力测量、现场原岩力学性能测定、几种地球物理方法的应用及矿山压力监测预警等内容。

本书可作高校采矿工程专业选修课教材或教学参考书,亦可供矿山有关工程技术人员参考。

责任编辑:刘泽春

技术设计:周立钢

责任校对:俞应平

高等学校教学参考书

矿山压力实测技术

周楚良 编

中国矿业大学出版社 出版

江苏省新华书店发行 中国矿业大学印刷厂 印刷

开本787×1092毫米1/16 印张12.5 字数294千字

1988年6月第1版 1988年6月第1次印刷

印数1—3000册

ISBN 7-81021-038-6

TD 22 定价: 10.00元



前 言

矿山压力问题的研究，多年来一直为广大采矿工程技术人员所重视。但是，由于地下岩体赋存的地质条件和地下应力场的复杂性，矿山压力问题的解决及基础数据的取得，通常要靠现场实测。随着测试技术水平提高，现场实测逐步向纵深发展，进一步促进了矿山压力理论研究，提高了解决采矿工程实际问题的能力。矿山压力实测技术作为矿山压力研究的组成部分，已成为采矿工程专业的一门课程。

近三十年来，国内外的矿山压力实测技术发展很快。由于声学、电学、光学、磁学及地球物理方法等的广泛应用，多测点自记遥测系统和数据智能处理也逐渐引入矿山压力的监测预警，直接为生产服务。最近十年是我国矿山压力实测技术发展最快的时期，研制了许多新型仪器，仪器的数量和质量较以前有很大提高，并逐渐形成系列。本书是在1982年编写的“矿山压力实测技术”讲义基础上，结合五年来对研究生的教学实践，增添了新的资料，几经修改完成的。

本书所介绍的测试仪器，有些由于结构上和使用上存在某些问题，未能推广应用，例如DJ-Ⅳ型顶板下沉速度报警仪等。但是，这些仪器在工作原理上有独到之处，本书也作了介绍。

本书可作为高等学校培养研究生和本科生的教学用书，也可作为采矿工程技术人员参考书。

由于本人理论水平、实践经验和掌握资料所限，书中难免有不当之处，恳请读者批评指正。并借此向提供有关资料的同志和单位表示衷心感谢。

编 者
1987年5月

绪 论

一、现场观测在矿山压力研究中的地位和作用

矿山压力研究的目的是,为了获得安全的生产环境和谋求最好的开采经济效益,它与保证生产安全,确定合理的煤柱尺寸减少地下资源的损失,提供控制顶板参数,改善开采技术,改善顶板控制方法,提高采煤经济效益等均有直接关系^[1]。

矿山压力研究的基本问题,主要是研究回采工作面 and 巷道周围岩体内,由于地下开采活动引起的应力作用,发生变形破坏的稳定特征,及保持其相对稳定的技术措施。天然岩体是带有一定概率性的地质体,具有明显的不连续性、非均质性和各向异性,受力作用后变形破坏的力学特性,至今尚未研究清楚。地下开采活动引起应力重新分布,与原始赋存的应力场、巷道布置和作业方式、岩体的力学特性、地质条件等因素有关,至今也尚未研究清楚。因此,采用数学力学方法来求解矿山压力问题,目前还存在很大困难。

目前研究矿山压力通常采用如下三种方法^{[2][3]}:

1. 数学力学分析方法:该法是将天然岩体作某些简化处理,例如假定岩体为均质弹性体、弹塑性体、弹塑粘性体、松散体、块状结构体等,采用相关的力学理论及有限元、边界元等解析方法,并借助于电子计算机进行分析计算。但是,迄今为止,这种方法还需要将复杂多变的因素作某些简化处理,也需要通过现场观测提供有关参数,如岩体的力学特性参数等,否则计算出的结果将远离实际。目前采用的数学力学方法,由于将复杂多变的现场条件过于简化,提供的计算参数不足,所以计算的成果往往只能反映某个或某几个因素互相变化的定性关系。

2. 模拟试验方法:该法是采用人工材料代替天然岩体,制成模型后进行开采活动的模拟试验。它有相似材料、光学材料、砂子材料及石蜡材料等模拟试验。模型试验的力学边界不同,可分为平面应力、平面变形及立体模型和离心模型等模拟试验。在模型上可以模拟开采时在工作面或巷道周围“岩体”内的应力、变形位移及设置在工作面或巷道内的模拟支架受力变形等,通过设置有关仪器,可进行各种参数的测定。模拟试验便于逐个改变某种因素而又可以保持其它条件不变,就可得到某些因素对矿山压力显现的影响规律。

模拟试验方法实际上是将现场复杂多变因素简化后在实验室内再现,带有研究人员的一定主观性,而且是在某种假定理论指导下进行的。模拟试验是以现场实测资料为依据,试验成果所达到的正确程度也依赖现场实测资料来判释,经过不断反复提高模拟试验技术,使模拟试验更有实际意义。但是,模拟试验方法尚存在不少问题,例如:模型与现场实际不可能完全相似;人工相似材料与天然岩体物理力学特性的相似性还很差,又不好判断等。所以,目前采用模拟试验所测得的成果,只是定性地反映某个或某几个因素的相对变化关系。

3. 现场实际观测方法:该法是根据地下开采活动引起的矿山压力显现的特征,直接在现场进行观测和记录,利用各种仪器仪表量测支架载荷、岩体变形位移、岩体内应力、

岩体力学特性等数值大小,从而可以分析得到地质、生产技术因素与矿山压力显现的经验函数关系,用以解决实际生产技术问题。同时,在汇总大量观测数据与调查资料的基础上,将能总结出矿山压力的普遍规律,促进矿山压力理论研究的发展。

由于现场观测获得的资料是反映多种因素综合作用下的实际情况,利用这些较为可靠的资料论证分析,就可以解决某个矿井或某个采面的具体矿压问题。进行现场观测需要有明确的目的性,并要有符合实际的理论指导,才能使测得的成果发挥更大作用。所以,现场观测需要模拟试验和数学力学分析的成果作指导,以便改进观测方法和正确分析测得的资料。而模拟试验和数学力学分析又需要现场观测所得资料与数据作为根据,它们的研究成果的正确程度也需要现场观测资料来判释。因此,矿山压力的三种研究方法是互为补充的,而现场观测是基础。

二、现场观测的目的和主要内容^[2]

矿山压力现场观测的目的,是通过对于矿山压力显现特征的观测,达到安全有效地支护采掘作业空间,进行监测预警防止顶板事故发生。例如:要想研制或合理选用支架结构形式,必须弄清围岩的变形破坏特性、支架承载的大小等,这是确定支架参数的主要依据,根据测得的矿山压力显现特征量,为监测预警提供临界参数(尤其对冲击地压的预测预报),从而可以防止重大恶性事故发生,或尽量减少事故发生造成的损失,保证生产正常进行。

现场观测的主要内容^[47]:

1. 地质及生技术资料的收集^[2]

现场观测是在特定条件下进行的,首先要作好基础资料、数据与图表的收集工作。矿山压力显现是自然地质条件与生产技术因素综合作用的结果,要尽可能多地收集地质和生产技术资料,并在汇总大量资料的基础上,找出矿山压力显现与这些因素的函数关系。

地质条件包括:煤层开采深度、煤厚及其变化范围、煤层倾角;局部地质构造、断层的产状、节理发育程度;围岩的物理力学性质及岩层柱状图,其中应注明岩层性质、分层厚度、节理裂隙发育状况、煤层的结构、各岩层的岩石强度;地下水的分布状况及其性能等。

生产技术条件包括:回采工作面或巷道的位置,与相邻采区或邻近煤层开采的关系;采掘的作业方式;支架的工作特性;采掘推进速度;支架的支护状况及其破坏统计,等等。

根据上述资料,选择具有代表性的观测区及确定测点的布设,使测得的资料更有代表性和有效性。

2. 支架载荷观测

回采工作面或巷道支架承受载荷大小是支架研制和选型合理性和经济性的依据。为此,国内外研制了大量的测定支架载荷的仪器仪表。支架载荷测定包括:支架承受的总载荷测定;支架各部件分布载荷的测定;支架各部件受力变形的测定等。

3. 回采工作面或巷道围岩变形位移和破裂的观测

回采工作面或巷道围岩变形位移和破裂的变化,是各种因素综合影响的结果,是反映采掘作业空间支护安全程度的主要指标,可用来检查所采用的支护技术措施是否有效和经济合理。因此,通常进行围岩相对移近量、深部岩体变形位移、深部岩体破碎带、深部岩体断裂位置及回采工作面顶板破碎度等测量。

4. 岩体内应力测量^{[27][24]}

岩体内的应力场,包括原始赋存的应力(自重应力和地质构造应力等)和开采活动引起的二次应力。在应力作用下使围岩发生变形破坏的规律,只有通过现场实测才能得到。应力测量可分:岩体表面应力和钻孔深部应力测量;相对应力和绝对应力测量;平面应力和空间应力(全应力)测量。应力测量数据对于深入研究矿山压力发生机理,是不可缺少的数据。但是,目前应力测量技术比较复杂,工作量较大,技术也还不完善,在矿山压力观测时普遍使用尚有一定困难。所以,通常在专题性较强的观测中采用。

5. 原岩体力学特性测定^{[27][28]}

原岩体力学特性是矿山压力显现特征的内因,是矿山压力研究的基础。在应力(外力)作用下,围岩的变形位移和破裂取决于岩体的力学特性。为研究岩体力学特性,通常需进行岩体强度特征和变形特征的测定、岩体表面和钻孔深部岩体测试以及单轴应力和三轴应力状态下的测试。原岩体力学特性试验,目前采用的技术也因工作量较大,所需设备较庞大和昂贵,在矿山压力观测中还不能普遍采用。但在一般情况下,可采用简易方法测定,测定要有足够数量,然后进行数学统计分析处理,也可得到较有效的数据。实验室测得岩块的力学指标与实际岩体相差较大,只能作定性的参考。

6. 矿山压力的监测与预警

多年来,煤矿顶板事故占煤矿安全事故的百分之四十以上。因此,进行矿山压力监测预警,防止矿井顶板恶性事故发生,已引起国内外广泛重视。随着开采深度加大,冲击地压威胁日益严重,进行预测预报就更为重要。矿山压力监测预警,可采用监测一项指标进行预警,最好是采用监测多项指标多种因素进行综合分析对比预警,使监测预警更具有科学性和可靠性。但是,由于矿山压力影响因素的复杂性,目前对监测的指标还较难进行定量,正有待进一步研究使之不断完善。

三、我国煤矿矿山压力现场观测概况^{[1][47]}

随着矿山压力研究工作的深入开展,世界各国对实测技术普遍重视^[3]。1977年国际岩石力学学会召开了现场测试技术专题会议^[13]。现场测试也是历届国际岩石力学学术会议的主要议题之一。有一些国家成立地下量测仪器的专业公司(如:美国的科罗拉多等)^[12]。国外还流行一种以测试为手段的“现场监控设计法”,就是通过现场实测来获得设计的定量参数,作为岩体工程设计的依据。我国在1966年召开了全国岩、土力学测试技术专题会议^[27],1981年煤炭部门召开了岩移、矿压现场观测仪器讨论会,1983年召开了全国现场岩体观测及测试技术讨论会,1985年中国岩石力学与工程学会成立了岩石力学测试专业委员会。这些学术活动及专业机构的成立,对现场测试技术的提高和发展,起着积极的推动作用。

近三十年来,我国煤矿围绕改革采煤方法,推广新型支架,改进巷道布置和维护,逐步开展了现场矿山压力研究工作。在矿山压力现场实测方面,早在五十年代中期已开始进行回采工作面顶底板移近量和支柱受载荷大小的观测。六十年代初期,为了配合推广摩擦式金属支柱和金属铰接顶梁,以及推广应用无密集放顶,大规模地开展了回采工作面矿山压力现场观测研究。到1980年为止,全国先后在350个采煤工作面中进行了矿山压力观测,对单体支柱工作面中顶底板移近量及支柱载荷等取得了大量数据,使得对矿山压力显现规律有了更深刻的认识。1973年以来,我国为应用自移式液压支架,先后在一百多个综采工

作面中进行了矿山压力现场观测，为支架的正确选型、各种液压支架的工作特性及合理参数的确定等研究提供了数据。为研究开采引起的回采工作面上覆岩层移动和破坏的规律，及其与工作空间顶板下沉和支架载荷的关系，部分矿区在井下巷道内或通过地面打孔，设置深部测点，进行岩层内部移动规律的观测研究。

此外，还对一般岩层、松软岩石及应用锚杆支护的各种巷道进行了大量的矿山压力现场实测。近几年来，随着无煤柱护巷的应用和发展，许多矿井广泛地进行了沿空掘巷和沿空留巷条件下采区巷道的现场观测。为了查明巷道附近煤层或岩体内的矿压显现规律，进行了顶底板移近量、侧帮的移近量、岩体内钻孔位移和钻孔应力、支架载荷以及岩体内声波传播特性等测量，探测了巷道周围松动圈的范围和岩体内的应力状态。这些测试成果对于选择合理的巷道位置，改善巷道维护状况，确定合理的煤柱尺寸，以及推行无煤柱护巷，提供了科学依据。

有些矿区为了解决坚硬顶板的管理、“三下”（铁路下、建筑物下和水体下）采煤、水力采煤，以及开采有冲击地压、煤和瓦斯突出危险的煤层，曾采用地音仪和微震仪监测顶板动态，用钻孔电视设备观测岩层移动、难冒落顶板人工爆破处理效果，以及开采后顶板的断裂、离层、垮落情况的观测。此外还应用其它地球物理方法进行了有关矿山压力显现的观测。

通过以上一系列现场矿山压力观测工作，对防治我国煤矿井下冒顶事故，改善顶板安全状况均起了良好作用。曾有效地进行周期来压预报，直接为生产管理服务。

随着矿山压力现场观测工作的开展，实测所需的仪器仪表，从无到有、从简到繁地开始形成系列。我国各科学研究单位、高等院校及厂矿等，先后仿制和研制了一些较为成熟的仪器仪表，这就为我国实测仪器仪表研究制造工作进一步发展奠定了基础。尤其近三十年来，现场实测技术，从过去主要测量支架载荷和围岩表面相对移近量，逐步向纵深发展，已开展岩体内的应力、变形位移、破裂等的测试工作，而且广泛地应用了电学、声学、光学、磁学、放射性测定及其它物理地球方法等先进测试技术。还实现了多点自记遥测系统和自动采集信号输入计算机进行数据分析处理。但是，我国的现场实测仪器仪表与先进技术国家相比，在仪器仪表的稳定性和智能性方面还有一定差距。

目 录

前言

绪论	(1)
第一章 矿山压力观测中常用的几种传感器	(1)
第一节 传感器的一般知识	(1)
第二节 电阻应变式传感器	(2)
第三节 振弦式传感器	(16)
第四节 电感式传感器	(29)
第五节 其它几种传感器	(32)
第六节 传感器的检验与标定	(37)
第二章 支架外载荷量测及其仪器	(45)
第一节 概 述	(45)
第二节 机械式测力计的结构原理及其量测方法	(46)
第三节 振弦传感式测力计的结构原理及其量测方法	(52)
第四节 电感式传感测力计的结构原理及其量测方法	(56)
第五节 电阻应变传感测力计的结构原理及其量测方法	(58)
第六节 光弹应变传感测力计的结构原理及其量测方法	(64)
第三章 岩体变形、位移和破裂的量测技术	(67)
第一节 概 述	(67)
第二节 围岩相对移近量及破碎度观测	(67)
第三节 岩体内钻孔位移观测	(71)
第四节 岩体内钻孔轴向应变观测	(82)
第五节 岩体内钻孔倾斜观测	(84)
第六节 岩层移动钻孔观测	(86)
第七节 岩层断裂破坏观测	(87)
第四章 岩体内应力测量	(91)
第一节 钻孔变形测量	(91)
第二节 钻孔应变测量	(97)
第三节 钻孔应力测量	(101)
第四节 岩体内绝对应力测量	(109)
第五节 岩体内全应力测量	(116)
第五章 现场岩体力学性能测定	(122)
第一节 概 述	(122)
第二节 岩体块抗剪强度试验	(123)
第三节 钻孔抗剪强度试验	(126)

第四节	岩体变形平板加荷试验.....	(130)
第五节	钻孔变形试验.....	(133)
第六节	现场三轴试验.....	(138)
第六章	几种地球物理方法的应用.....	(142)
第一节	概 述.....	(142)
第二节	声波探测法.....	(143)
第三节	岩体电阻率探测法.....	(154)
第四节	岩体无线电波透视法.....	(160)
第五节	放射性探测法.....	(162)
第七章	矿山压力的监测预警.....	(165)
第一节	概 述.....	(165)
第二节	岩体变形位移监测预警方法.....	(166)
第三节	岩体变形位移速度监测预警方法.....	(168)
第四节	支架载荷的监测预警方法.....	(171)
第五节	利用微震仪的监测预警方法.....	(175)
第六节	其它监测预警方法.....	(183)
参考文献	(187)

第一章 矿山压力观测中常用的几种传感器

第一节 传感器的一般知识

一、非电量电测法和传感器

在矿山压力现场量测技术中，除了机械式量测方法以外，广泛采用非电量电测法进行各种力学参数测定。

所谓非电量电测法，就是把需要量测的非电量（例如：力、压力、应力、变形、位移等）通过一种器件转换为电量（例如：电阻、电频率、电感、电压、电流等），再依一定的函数关系，将测得的电量变换成所需测定的非电量的方法。其中把非电量转换成电量的器件称为传感器，也称变换器、换能器或探头等。〔4〕〔5〕

非电量电测法的主要优点：

- （1）灵敏度高，量程范围大；
- （2）量测精度高；
- （3）便于实现遥测，多点自动自记量测；
- （4）便于实现智能处理，可以输入微处理计算机，直接显示被测非电量数值及进行数据分析处理。

（5）既能用于静态非电量测量，又能用于动态非电量测量。

正因为非电量电测法具有这些优点，在现代科学技术发展中得到了广泛的应用，成为工程测试技术中的一种主要量测手段。

二、传感器的种类

随着科学研究和现代生产发展的需要，对测试技术提出了更高和更精的要求，因此，非电量电测法正在不断完善和发展。目前量测各种参数的传感器种类繁多，分类标准也不统一。以下介绍几种在矿山压力测试研究中常用的传感器：

- （1）电阻式：滑线电阻式、压阻式、非粘贴电阻丝式、粘贴电阻丝式；
- （2）振弦式：单线圈间歇激振式、双线圈连续自激式、永磁场连续自激式；
- （3）电感式：可变间隙式、可动铁芯式；
- （4）电容式；
- （5）压磁式；
- （6）压电式；
- （7）光电变换器；
- （8）霍尔式传感器。

评定传感器的主要指标是：

1. 准确度和精确度要高。测定值与真值的偏差大小即为准确度。在重复测定时，各测定值之间的偏差大小即为精确度。精确度高有时准确度不一定高，要注意仪器存在的系统误差。

2. 灵敏度要高。要求反映被测最小非电量的能力要高。即传感器的输出量和输入量

的比值（也称传感器的灵敏度系数）要高。

3. 线性度要好。要求传感器输出量和输入量之间的变化呈线性关系，即传感器的灵敏度系数为一个常数。

4. 稳定性要好。要求在一定的使用条件下，能较长时间正常地工作，测得稳定、可靠的量测结果。

5. 动态特性要好。传感器的自振频率和被测信号频率之比要符合一定要求，一般要高于7~10倍，以减少由于振幅和相位畸变所造成的误差。

此外，适于矿井现场观测的传感器，除要求结构简单和机构可靠以外，还要求密封、防尘、防潮以及符合煤矿井下防爆安全要求。

三、传感器的量测系统

传感器的量测系统，基本形式如图

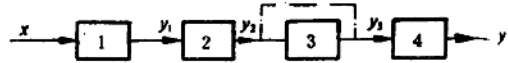


图 1-1 传感器的量测系统示意

1—传感器；2—测量放大器；3—智能处理；4—显示记录器

1-1所示。

传感器的量测系统是先将被测非电量 x 输入到传感器 1，经传感器转换为电量 y_1 ，并输入到测量放大器 2，再将电量 y_1 放大为 y_2 ，然后送入智能处理 3，经电量数字化后送入运算器或分析器处理后输出 y_3 ，随后 y_3 送入显示记录器 4，即可得到 y 电信息值或 y 经转化变换后得到被测非电量 x 的数值。也可以将传感器 1 接到多点巡回检测器上，即可实现多点自动检测。这几部分的不同组合，可以形成不同档次的量测仪器。还可以将传感器和测量放大器作成一体，实现远距离传输和遥测。一般的量测仪器只是由测量放大器和显示器组成。较高档次的量测仪器是由测量放大器、智能处理微电脑、数字显示及打印机组成。

由于集成电路和微型元件的发展，可以较容易地实现将放大电路和传感器作成一体。这样可使传感器的性能提高一步，就能输出较大幅度的信号，给信号处理和记录带来很大方便。

在量测系统中，通常称传感器为一次仪表，称量测仪器和显示记录仪器为二次仪表。本章着重讨论煤矿适用的传感器。

第二节 电阻应变式传感器^{[4][5]}

电阻应变式传感器是电阻式传感器的一种，是结构简单而用途很广的一种传感器。电阻式传感器是根据金属电阻丝受到拉伸或压缩时长度或横截面改变，从而引起电阻值发生相应变化的原理制成的传感器。金属丝的电阻值可用下式表示：

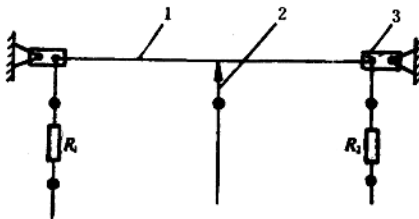


图 1-2 滑线电阻器传感示意

1—电阻丝；2—滑动触头；3—绝缘端子

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

式中 R ——金属丝电阻， Ω ；
 ρ ——电阻系数， $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ；
 S ——金属丝截面积， mm^2 ；
 l ——金属丝长度， m 。

一、电阻式传感器的几种形式

(一) 滑线电阻式传感器

滑线电阻传感器由一根张紧的金属电阻丝或绕组电阻器和被测物相连接的滑动接触点

所组成(图1-2)。这种传感器是根据改变金属电阻丝的长度 l 使电阻值变化的原理制成的。

这种传感器的量测精度主要决定于滑动触头2与电阻丝1之间接触电阻的大小。为了保持测量精度,滑动触头2与电阻丝1要紧密接触。这种传感器常用于量测变形较大,而精度要求不高的参数。

(二) 压阻式传感器^[4]

压阻式传感器是利用半导体硅材料作成弹性元件,然后在其上面通过氧化、光刻、扩散等工艺制成多个电阻,并联成电桥,当外力作用时, ρ 值改变,电阻值产生相应的变化。利用这一原理,在国外已有将测量电桥、电源电路、放大电路等都集成在一块单晶片上的制品。这样将使压阻传感器在性能、结构乃至加工制造等方面产生根本性的变化。

压阻传感器的构造如图1-3所示。它主要由压阻敏感元件硅环2、支座1和硅膜片4所组成。引线3连接外部量测导线。这种传感器可以制作成小尺寸、高灵敏、动态特性又好的测压传感器。但是,这种传感器受温度变化影响较大,性能稳定性较差。

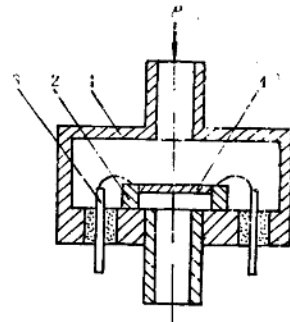


图1-3 压阻式传感器示意图
1—支座;2—硅环件;3—引线;
4—硅膜片

(三) 非粘贴式电阻传感器

非粘贴式电阻传感器,是将金属电阻丝缠绕在能够产生相对位移的支点上制成的。当外力作用时,电阻丝产生弹性变形,从而使电阻值发生改变。这种传感器有两组电阻丝绕组。当一个绕组拉长时另一个绕组缩短,利用差动原理可作成差动式电阻传感器。

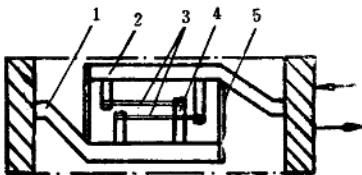


图1-4 差动电阻式传感器示意
1、2—支架;3—金属电阻丝绕组;
4—绝缘柱;5—弹簧片

差动电阻式传感器的构造如图1-4所示。在两端头板上连接支架1、2,两支架之间用两个弹簧片5相连,使之只产生纵向位移。用两根高强度的细钢丝作为电阻丝3,紧紧缠绕在两支架的绝缘柱4上,形成两组电阻丝绕组,且有一定的电阻值。当端头板之间距离变化时,一个绕组拉伸而另一个绕组压缩,即可用比例电桥测定电阻值相对变化量,测得两端头位移量的大小。这种传感器测量精度较高,而量程较小。

(四) 粘贴式电阻应变传感器

这种传感器已从1925年应用至今。它是利用电阻应变片粘贴在各种不同性能的弹性元件上,组成各种不同特性的传感器。当弹性元件受力变形时,电阻应变片的电阻值随之改变。电阻值相对变化率是反映弹性元件的应变变化,故也称电阻应变式传感器。它由弹性元件、电阻应变片和其它附件构成。这种传感器构造简单,使用灵活方便,是应用最广泛的一种传感器,也是本节主要介绍的内容。

二、电阻应变片(也称应变计)

电阻应变片是粘贴式电阻应变传感器的主要元件,将电阻应变片粘贴在各种不同弹性性能的元件上,就可以制成不同用途的电阻应变式传感器。许多工业部门广泛使用电阻应变片直接粘贴在工件上进行各种参数的测量。因此,使用电阻应变片进行测试已成为测试

技术最基本的方法，无论在室内或在现场都可得到最广泛的应用。

(一) 电阻应变片的构造

电阻应变片的构造如图 1-5 所示。它由金属电阻丝栅 3 粘在基底 4 上，并在其上加覆盖层 2 所组成，引出导线 1 用以连接量测仪器。图中 l 称金属电阻栅丝基长， a 称栅丝的宽度。

电阻应变片的主要参数：

1. 电阻值 R 。市售的电阻应变片阻值大都为 120Ω ，也有 350 ， 500Ω 等多种阻值。

2. 灵敏度系数 k 。市售的电阻应变片大都在 $1.8\sim 2.6$ 之间，它是通过抽样标定确定，通常由制造厂家提供。半导体应变片灵敏度系数可达 $60\sim 80$ 。

3. 几何形状和尺寸。电阻应变片有各种不同形状，基长从 $0.2\sim 100\text{mm}$ 有各种规格尺寸。

电阻应变片的规格，一般以其类别、基底材料、电阻值大小及使用面积 ($a \times l$) 来表示。

制作电阻应变片的金属电阻丝栅，需要采用具有灵敏度高、强度大、丝的直径细（约为 $0.02\sim 0.05\text{mm}$ ）、电阻率 ρ 高等特性的材料。常用的电阻丝材料主要有康铜和镍铬丝。康铜丝是由铜 60% 和镍 40% 组成的合金。镍铬丝是由镍 72% 、铬 11% 、铁 12% 和锰 2% 组成的合金等。还可用其它金属电阻丝制成的电阻应变片。

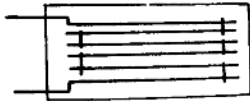


图 1-6 短接式电阻应变片

测精度不太高，其横向变形对精度的影响较大。

2. 短接式电阻应变片。它是在一排拉直的电阻丝之间，在预定的标距上用较粗的导线相接，如图 1-6 所示。它克服了丝绕式横向变形的影响，而且几何形状也较容易得到保证。但制作工艺较复杂，成本也稍高。要求量测精度较高时，通常选用。

3. 箔式电阻应变片。它是在合金箔（康铜箔或镍铬箔）的一面涂胶形成胶底膜，通过片刻、腐蚀等工艺制成，如图 1-7 所示。它可以制成任意形状，尺寸精确，而且电阻丝栅部分是平而薄的矩形截面，容易粘固。将栅丝端头制作得粗些，可克服横向变形的影响，提高量测精度。栅丝成箔式后，通入电流后散热好，对提高量测的稳定性有益。虽然这类电阻应变片制作稍复杂些，成本稍高。但近几年来发展较快，使用日趋广泛。

4. 半导体电阻应变片。在胶底和覆盖层之间为半导体片（P-si 单晶片），它是利用其

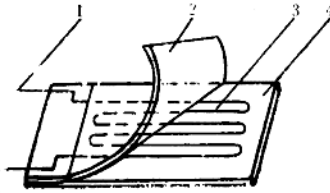


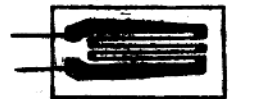
图 1-5 电阻应变片的构造

1—引出导线；2—覆盖层；
3—电阻栅丝；4—基底

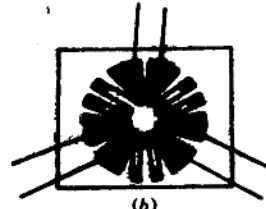
(二) 电阻应变片的种类

目前常见的电阻应变片主要有如下几种。

1. 丝绕式电阻应变片。它是用金属电阻丝盘绕而成。其盘绕方式广泛使用半圆弯头平绕式，如图 1-5 所示。基底通常用拷贝纸和纸盖，也有用胶基的。这类应变片量



(a)



(b)

图 1-7 箔式电阻应变片

虽然这类电阻应变片制作稍复杂些，成本稍高。但近几年来发展较快，使用日趋广泛。

压阻效应（主要是电阻常数 ρ 的改变）而制成的。其结构形式如图1-8所示。

半导体电阻应变片最大的特点是灵敏度较高，相当于一般电阻丝应变片的30~40倍。它的体积可以做得很小。但是，它受温度影响的稳定性较差，而且在大变形作用下灵敏度系数的非线性影响较大。

除上述四种形式外，根据量测要求，可以用电阻应变片贴成几组彼此绝缘的应变花，用来直接测定平面主应变的方向和大小。常用的有用二片电阻应变片贴成的直角应变花，用三片电阻应变片贴成互成45°或互成60°的应变花。还可以作成其它类型的应变花（图1-7b）。各种类型应变花均有定型产品可供选用。

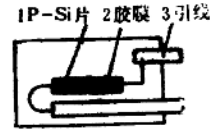


图1-8 半导体电阻应变片

1—P-si片；2—胶膜；
3—引线

· (三) 电阻应变片的选用

根据量测要求选用所需的电阻应变片，通常要考虑下列内容。

1. 选种类和片基材料：选种类主要考虑横向变形对量测精度的影响。选片基材料主要考虑使用时间长短和环境条件。如在室内作短期量测，可选用纸底丝绕式的电阻应变片。若需要在潮湿环境条件下使用，而且需要在较长时间内使用，最好选用胶底箔式电阻应变片。对于精度要求较高的二维应力测量，可选用箔式电阻应变花。至于半导体电阻应变片，建议在要求输出电信号特别大时选用，例如用于遥测信号发射器和测量极微小动态应变场合。

2. 选尺寸：用电阻应变片测得的应变量为其覆盖面积内的平均值。选电阻应变片的尺寸，主要考虑被测应变梯度或应力梯度的大小。一般说，应变梯度大的地方应选择尺寸较小的电阻应变片。基长 l 通常选用5~20mm。但应注意到基长较长的电阻应变片比基长较短的质量要好，其几何形状和尺寸精度较高，而且也容易粘贴牢固。在被测材料均匀性较差的场合，应选用基长较长的电阻应变片，如混凝土构件受力试验，常用基长为50~100mm的长电阻应变片。

3. 选电阻值：选用电阻应变片的电阻值一定要与测量应变的电阻应变仪相符。通用的静态电阻应变仪都是以120 Ω 为标准，如选用其它电阻值时需要按曲线修正。作动态测量时，选用较大的电阻值可以提高输出电压。在作静态多点测量时，接于一台电阻应变仪上的多个电阻应变片的电阻值，分散度不应超过 $\pm 0.5\Omega$ ，否则就会超出仪器的调节范围。

电阻应变片（也称应变计）的型号由汉语拼音和数字组成，见下列说明：

标称电阻值 (Ω)		应变计的栅长 (mm)				极限工作温度 ($^{\circ}\text{C}$)
基底材料种类	应变计类别	敏感栅的结构型式				
	B E	120	-3	AA	150	(11)
S-丝绕式	F-酚醛树脂	5	12	02	可温度自补偿材	
D-短接式	B-玻璃纤维	60	15	03	料的线膨胀系数	
	布浸胶	120	20	05	($\times 10^{-6}/0^{\circ}\text{C}$)	
B-箔式	P-金属薄片	200	30	1		
T-特殊用途	E-聚乙烯醇	240	50	2	11	
	缩甲乙醛	350	100	3	16	
	S-聚乙烯醇	500	4	4	23	
	缩丁醛	650	5			
	Q-纸浸胶	1000	6			
	J-聚胺脂		7			
	Y-有机硅树脂		8			
	Z-纸基		10			

三、电阻应变片的量测灵敏度

电阻应变式传感器在量测的过程中，当其弹性元件受力变形时，被粘贴的金属电阻丝也随之发生变形，同时电阻值发生改变。

当金属电阻丝发生 ϵ 应变时，其长度的改变为：

$$l' = l + \epsilon l = l(1 + \epsilon)$$

当金属电阻丝发生 ϵ 应变时，其截面积的改变为：

$$S' = \frac{\pi}{4}(d - \nu d\epsilon)^2 = \frac{\pi d^2}{4}(1 - \nu\epsilon)^2 = S(1 - \nu\epsilon)^2$$

式中 d ——电阻丝直径，

ν ——电阻丝材料的泊松比。

将 l' 、 S' 和 $\rho' = \rho + \Delta\rho$ 代入式(1-1)得：

$$R' = \rho' \frac{l'}{S'} = (\rho + \Delta\rho) \frac{l(1 + \epsilon)}{S(1 - \nu\epsilon)^2} = R \left(1 + \frac{\Delta\rho}{\rho} \right) \frac{1 + \epsilon}{(1 - \nu\epsilon)^2}$$

则发生 ϵ 应变时电阻值的变化量为：

$$\begin{aligned} \Delta R &= R' - R = R \left[\left(1 + \frac{\Delta\rho}{\rho} \right) \frac{1 + \epsilon}{(1 - \nu\epsilon)^2} - 1 \right] \\ \frac{\Delta R}{R} &= \left(1 + \frac{\Delta\rho}{\rho} \right) \frac{1 + \epsilon}{(1 - \nu\epsilon)^2} - 1 \end{aligned} \quad (1-2)$$

式(1-2)表示电阻应变片的电阻变化率 $\frac{\Delta R}{R}$ 与应变 ϵ 之间函数关系式，也就是电阻应变片量测应变的基本方程式。

对(1-2)式求导数得：

$$\frac{d \frac{\Delta R}{R}}{d\epsilon} = \frac{1 + 2\nu - 2\nu^2\epsilon - \nu^2\epsilon^2}{(1 - \nu\epsilon)^4} \left(1 + \frac{\Delta\rho}{\rho} \right) \quad (1-3)$$

式(1-3)表示电阻应变片的量测灵敏度，也就是由于应变 ϵ 的变化量 $d\epsilon$ 而引起电阻率 $\frac{\Delta R}{R}$ 的变化量 $d \frac{\Delta R}{R}$ ，其比值越大表示越灵敏。当量测应变变量很小（一般在 $2000 \times 10^{-6} \mu\epsilon$ 左右）时， $\nu\epsilon$ 各项足够小，可以略去不计。则其灵敏度可近似看成是一个常系数 k 。

$$\frac{d \frac{\Delta R}{R}}{d\epsilon} = k = (1 + 2\nu) \left(1 + \frac{\Delta\rho}{\rho} \right)$$

积分上式得：

$$\frac{\Delta R}{R} = k\epsilon \quad (1-4)$$

式(1-4)表示当量测的应变变量比较小时，其 $\frac{\Delta R}{R}$ 与 ϵ 可以近似为线性关系，而且与电阻

应变片的基长 l 无关。即不管 l 大小如何，其灵敏度 k 是相同的。这个特点对于量测资料整理分析及其资料的对比性均是有很大好处的。式(1-4)是电阻应变片在实际量测中所依据的基本关系式。

从式(1-3)可知，若不考虑 ρ 的变化，灵敏度系数 k 主要与金属电阻丝材料的泊松比 ν 有关。一般金属材料取 ν 为 0.3 时，则 k 也只有 1.6，这与通常使用的电阻应变片的灵敏系数 2 左右是比较接近的。但对于镍、铂、合金铝等材料作成电阻丝的灵敏度系数，则与式(1-3)相差很大。关于电阻应变片的灵敏度在理论上与实际之间的差别较大，这是与细或薄的金属材料电阻系数 ρ 发生改变有关。半导体电阻应变片由于电阻系数 ρ 的改变而有较高的灵敏度。

四、电阻应变片的应变测量方法

(一) 电阻应变片应变测量的工作原理

电阻应变片的应变测量，是根据式(1-4)，通过测量电阻变化率 $\frac{\Delta R}{R}$ 来进行的。通常将粘在各种试件、结构物或传感器的电阻应变片（或与精密电阻）组成一个惠斯登电桥来进行测量。

测量电桥如图 1-9 所示。图中 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 为四个桥臂电阻，它们可以都用电阻应变片，此时称为全桥接法。也可以 R_1 、 R_2 用电阻应变片， R_3 、 R_4 由仪器中的精密电阻代替，此时称半桥接法。桥路 AC 两端接供桥电源 U ，根据电路定律可求得 BD 端输出电压 U_0 为：

$$U_0 = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} U \quad (1-5)$$

由上式可知，应变 ϵ 反映到电阻应变片上使电阻值变化 ΔR ，通过测量桥路，以式(1-5)的固定关系输出 U_0 ，

从而完成了非电量 ϵ 到电量 U_0 的转换。作为二次测量仪表的电阻应变仪，就是对 U_0 进行测量，并将此读数换标成应变单位。从式(1-5)还可以知道电路电桥的一个重要特性，即当 $R_1 R_3 = R_2 R_4$ 时，电桥平衡，输出电压 $U_0 = 0$ 。利用这一特性，通过对电桥电阻调试平衡的办法来进行应变值的测定。在电桥路中的供桥电压 U 应保持不变。

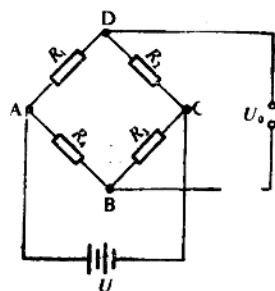


图1-9 测量电桥

(二) 电阻应变片的几种工作方式^[5]

在实际应用中电阻应变片的工作方式如表 1-1 所示。电阻应变片常用的工作方式为：单向受拉或受压；纯弯矩作用；纯扭转作用；弯曲和拉或压的组合；扭转和拉或压的组合以及扭转和弯曲的组合等。还可改变电阻应变片的不同连接方法，分别测量组合作用的各自分量。电阻应变片工作片有如下几种连接方式：

1. 在电桥臂粘贴一个工作的电阻应变片。如表 1-1 中的简单受拉(压)情况， R_1 为工作的电阻应变片。贴电阻应变片的工件发生变形时，则 $R_1 = R + \Delta R$ 电阻值改变，以 $R_2 = R_3 = R_4 = R$ 代入式(1-5)得：

$$U_0 = \frac{(R + \Delta R)R - R^2}{(2R + \Delta R)2R} U = \frac{\Delta R}{4R + 2\Delta R} U \approx \frac{\Delta R}{4R} U$$

上式中，受拉(压)变形产生的 ΔR 电阻变化值通常是较小的，与电阻值 R 相比可以