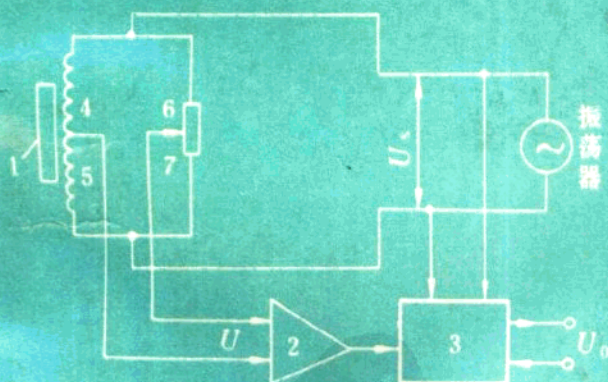


矿压模型试验与 测量技术

李兴伟 汪 茹 任萍沼 编著



煤炭工业出版社

矿压模型试验与测量技术

李兴伟 汪茹 任萍沼 编著

煤炭工业出版社

(京)新登字042号

图书在版编目(CIP)数据

矿压模型试验与测量技术/李兴伟, 汪茹, 任萍沼编著. —北京:
煤炭工业出版社, 1995

ISBN 7-5020-1198-6

I. 矿… II. ①李…②汪…③任… III. ①矿山压力-模型试验
②矿山压力-测量 IV. TD3

中国版本图书馆CIP数据核字(95)第06812号

矿压模型试验与测量技术

李兴伟 汪茹 任萍沼 编著

责任编辑: 黄朝阳 孙辅权 刘瑾

*

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平里北街21号)

北京房山宏伟印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

*

开本787×1092mm^{1/32} 印张11^{3/4} 插页2

字数251千字 印数 1—770

1995年8月第1版 1995年8月第1次印刷

书号 3966 G0326 定价 12.00 元

内 容 提 要

本书在简述矿压模型试验基本原理、测量系统的基本组成的基础上，重点阐述了模型试验物理参数的测量方法、有关传感器的工作原理、结构特点、使用性能 and 设计要求、测量电路和测试误差等内容。

本书可作为矿业高等院校的教学用书和研究生进行模型试验研究的参考书，也可供科研单位和现场工程技术人员参考。

前 言

矿山压力及其控制是煤矿安全开采决策的关键技术之一，其研究方法有现场矿压观测、数学分析和模型试验研究等。矿压模型试验研究是较为有效的一种研究方法，且正在不断发展和完善中。

矿压模型是以矿山岩体及岩层被开采活动所扰动的原型为依据，按照岩体范围、地质条件、开采技术特征岩石性质等相似准则使模型与原型相似建立的。在模型试验研究中，相似材料的配比研究是试验研究的基础，其次是试验过程中的测量技术。模型试验成果的质量在很大程度上取决于测量所获得数据信息的精确性，这除与模型本身质量有关外，其测量技术也是至关重要的。模型一般比原型小若干倍，形式多种多样，应用传感器技术、电测法可以适应矿压模型试验的复杂的测量要求，并构成较完善的测量系统，并获得高质量的试验成果。

本书着重介绍了矿压模型试验中最主要的物理参数测量、载荷测量、位移测量、压力测量、温度与湿度测量，并介绍了各种转换原理、传感器的结构特点、使用性能和设计要求等。

参加本书撰写的有李兴伟同志(第一、二、四、五章)、汪茹同志(第三、六章)、任萍沼同志(第七、八章)。全书由李兴伟同志主编。

ABA25/10 03

由于水平和时间所限，书中难免有错误之处，恳请读者批评指正。

作者

1995年4月

目 录

第一章 引论	1
第一节 矿压显现基本概念	1
第二节 岩石与岩体的特征	3
第三节 采动后岩层活动的影响因素	5
第二章 矿压模型试验基本原理	6
第一节 概述	6
第二节 因次分析	10
第三节 相似理论	16
第四节 模型设计	28
第五节 模型试验测量系统基本组成	55
第三章 载荷测量	113
第一节 应变式测力传感器	113
第二节 压电式力传感器	132
第三节 压磁式测力传感器	156
第四章 位移测量	171
第一节 概述	171
第二节 电位器式位移传感器	173
第三节 应变计式位移传感器	183
第四节 电感式位移传感器	188
第五节 电容式位移传感器	201
第六节 振弦式位移传感器	213
第七节 霍尔效应式位移传感器	223
第八节 光栅式位移传感器	241
第五章 压力测量	251
第一节 应变式压力传感器	251

第二节 电容式压力传感器	262
第三节 压电式压力传感器	267
第四节 压阻式压力传感器	291
第五节 振弦式压力传感器	295
第六章 温度、湿度测量	298
第一节 温度测量	298
第二节 湿度测量	322
第七章 传感器的检验与标定	326
第一节 测力和称重传感器检定	326
第二节 压力传感器(静态)检定	331
第三节 位移传感器的标定方法	333
第八章 测试误差与误差分类	339
第一节 测试误差的基本概念及类型	339
第二节 误差的表示法及误差分布	346
参考文献	357

第一章 引 论

第一节 矿压显现基本概念

一、矿山压力

地下岩体在采动以前，由于岩体自重的作用，在其内部引起的应力，通常称为原岩应力。开采前岩体处于相对静止状态，所以原岩体应力是平衡的。当开掘巷道或进行回采工作时，扰动或破坏了原来的应力平衡状态，引起岩体内部的应力重新分布。重新分布后的应力超过煤、岩的极限强度时，就使巷道或回采工作面周围的煤、岩发生破坏，这种情况将持续到煤、岩内部再次形成新的应力平衡为止。此时，巷道或回采工作面周围煤、岩体内形成一个与原岩应力场显然不同的新的应力场，有时称为二次应力场。其形成过程就是煤、岩体中应力重新分布的过程。这种由于在地下进行采掘活动而引起的存在于井巷、硐室及回采工作面周围煤、岩体中的力，就叫做矿山压力，简称矿压。

二、矿压显现

在矿山压力作用下，将引起一系列力学现象，如围岩变形或挤入巷道，岩体离散、移动或冒落，煤被压松、片帮或突然抛出，木材支架压裂或折断，金属支架变形或压弯，液压支架的活柱下沉，充填物产生沉缩以及岩层和地表发生移动或塌陷等。这些由于矿山压力作用，使围岩、煤体和各种人工支撑物产生的种种力学现象统称为矿山压力显现，简称

矿压显现。

三、矿压控制

在大多数情况下，矿压显现会给地下开采工作造成不同程度的危害。为使矿压显现不致于影响正常的开采工作和保证生产安全，就必须采取各种技术措施加以控制，对巷道及回采工作空间进行支护，对软弱的煤和岩体进行加固，用各种方法使巷道或回采工作空间得到卸压，对采空区进行充填，或用人力的方法使采空区顶板按预定要求冒落等。此外，人们对矿山压力的控制不仅在于消除和减轻矿压对开采工作造成的危害，还包括合理地利用矿山压力的天然能量为开采工作服务。例如，利用矿山压力的作用压松煤体以利于落煤工作，借助采空区上覆岩层压力压实已冒落的矸石形成再生顶板等等。所有这些人地调节、改变和利用矿山压力作用的各种措施，叫做矿山压力控制，简称矿压控制。

四、矿山压力及其控制的研究方法

掌握矿山压力显现的规律，进而有效地控制矿山压力是煤矿地下开采特有的基本任务。在整个矿井开采期间、无论是巷道的掘进和支护、回采工作面的采煤和顶板管理、井下巷道的布置和维护、井下各部份合理的开采布置，以及采煤综合机械化和“三下”采煤的应用等等，都离不开对矿山压力显现规律的认识和控制。开采技术发展愈完善，对矿山压力显现规律也认识的愈透彻；反过来说，对矿山压力显现规律认识愈深刻，就更能够利用它来改进开采技术。随着矿山压力问题研究的广泛发展和不断深入，人们越来越多地认识了岩石的力学性质和开采过程中岩体内发生的自然力学现象和规律，并在此基础上逐渐形成了一个新的学科分支——矿山岩体力学。矿山岩体力学研究采用了现场观测、理论分析

和实验室模型试验等性质不同的研究方法。在实验室模型试验研究方面，除大量进行岩石抗压、抗拉、抗剪和变形参数（弹性模量和泊松比）的常规试验外，也进行岩石流变试验；利用相似材料模型，进行采场矿山压力显现规律、支架与围岩相互作用、巷道支护形式以及锚杆支护作用机理方面的研究。

第二节 岩石与岩体的特性

一、岩石的结构和构造特征

岩石是组成地壳的自然物体。由岩石的结构和构造特征形成了岩石的非均匀性、各向异性和裂隙性，是岩石的最突出的结构特征。

岩石组成物质的颗粒大小所形成的结构，决定了岩石的非均质性。颗粒愈均匀，岩石的力学性质也愈均匀。颗粒大小也影响岩石的力学性质，一般来说，组成岩石的物质颗粒愈小，则该岩石的强度愈大。

岩石的各向异性是由其生成条件决定的。煤系地层为沉积岩，其构造特征最普遍的是层状；层理是指沉积岩中，由于岩石的成分或结构上的变化所表现出的层状构造。上述的这些构造，当沿着这些结构面时，表现为明显的软弱面。在垂直于该面的方向上，承受拉力性能很差；沿此弱面的抗剪能力也很弱；岩石受压力作用时，因岩石结构面的方向不同而表现出强度也不同。所以岩石的力学性质，总的来说是各向异性的。

岩石构造的另一种特征是孔隙，岩石存在微孔和裂隙。由于岩石孔隙度的不同，所表现的岩石物理性质和力学性质也不同。

表 1-1

特征	岩 石	岩 体
物质组成	由结晶矿物、非晶质基质、碎屑颗粒、胶结物质分别组合构成	由一种或一种以上的岩石组合而成，是岩块的集合体，即由结构面和结构体共同组成
结构	根据成分及矿物颗粒性质不同，可分结晶结构、碎屑结构及生物化学和胶体化学沉积的致密结构	根据结构面、结构体性质不同，大体分为整体结构、块状结构、层状结构、碎裂结构及散体结构
完整性	除受构造影响而有一些隐微裂隙外，一般完整性好，不易分散解体	由于结构面发育程度不同，结构体形态、大小不一，其完整性悬殊
均质性	绝大多数岩石致密均质，可看作均匀介质	由于岩石组合不同，结构面和结构体特征不同，呈明显的非均质性
各向异性	岩石内包含层面时具各向异性特点，同一层面内则显示各向同性，一般岩石为各向同性体	不论岩石组合状况如何，由于结构面方位、发育程度及充填情况不一，岩体有明显的各向异性
连续性	矿物颗粒一般接触紧密，其间空隙充填胶结较好，可认为是连续体	多裂隙岩体由于各种结构面发育，一般属于非连续体
强度特征	由微小结构起控制作用，其整体强度较为均一	主要受软弱结构面及岩石组合控制。由于结构面、结构体的特性不同，其整体强度悬殊很大，有明显强度不均一性。
破坏机理	岩石在单向受压时以剪切破坏为主，有时出现拉断破坏，在围压状态下是剪切破坏	多裂隙岩体为无拉伸材料，受拉极易开裂，受压时沿结构面破坏

二、岩体

岩体是指地下工程周围较大范围的岩石。掌握矿井采掘空间围岩的物理力学性质，应该是在现场条件下确定岩石物理力学性质，即在岩体测试基础上获得。但是，在现场对岩体测试较困难且劳动量很大。通常是从岩体中取出的岩石试件，对岩石试件进行测试，其数据作为岩体性质分析的基础，也就是矿山岩体受采掘影响所显现的力学现象的研究基础。矿压模型试验所模拟的大多数是矿山岩体，因此，也要相似的将相似材料的性质做为建立模型的模型材料模拟岩体的研究基础。

三、岩石与岩体特征比较

岩石与岩体特征比较见表1-1。

第三节 采动后岩层活动的影响因素

矿山岩体受采掘扰动后，影响岩层活动的因素有以下四个方面：

- (1) 岩体的岩石物理、力学性质，岩层的地质构造；
- (2) 回采工作面、掘进工作面的工艺过程；
- (3) 支护设备的特性及支护形式；
- (4) 采掘空间的几何尺寸。

综合起来，如方框图1-1所示。

第二章 矿压模型试验基本原理

第一节 概 述

一、矿压模型试验的目的

矿压模型试验是实验力学的一种，是研究矿山岩体结构分析的重要手段。近年来，由于电子计算机和有限元法的发展，计算力学得到广泛的应用。但对矿山岩体力学，特别是顶板岩层受采动扰动后的应力重新分布以及它的显现规律是个非常复杂的力学问题，数学模型不可能模拟所有重要的物理现象，或者模拟某些物理现象还有困难。很多问题往往需要借助于物理模型进行试验研究。在物理模型试验方法中，用电测法做模型试验研究，是一种广泛应用的实验力学方法。

矿山岩体属层状、各向异性、非均质的脆性材料，脆性材料模型试验的原型，要用脆性材料构成试验模型。为了与原型材料物性相似，通常采用石膏类、砂、水泥、粘土等混合材料，按照相似理论要求制作模型，进行试验，以研究模型的应力、变形和稳定性，以及其破坏垮落规律等。

脆性材料模型试验可分为线弹性应力模型试验和破坏试验两类。线弹性应力模型试验又简称为线弹性模型试验。它研究矿山岩体在重力场作用下的线弹性应力和变形状态。破坏试验则是研究采场上覆岩层的破坏垮落规律。

二、相似与模型试验

相似理论是说明自然界和工程中各种相似现象相似原理

的学说。它的理论基础，是关于相似的三个定理。

相似方法可以定义为：是一种可以把个别现象的研究结果，推广到所有相似的现象上去的科学方法。因此，相似方法也是现象模拟方法的基础。所谓模拟，一般情况是指在实验室条件下，用缩小的（特殊情况下也有放大的）模型来进行现象的研究。这样又引伸出模型试验的概念：模型试验是相似方法的重要内容，在近代科学研究和设计工作中，起着很重要的作用，研究矿压显现问题也不例外。

模型是与物理系统密切有关的装置，通过对它的观察或试验，可以在需要的方面精确地预测系统的性能。这个被预测的物理系统，通常被叫做“原型”。根据这个定义，为了利用一个模型，当然有必要在模型和原型间满足某种关系。这种关系通常称为模型设计条件，或系统的相似性要求。

由此可见，相似理论与模型试验的关系是十分密切的，是整个问题的两个组成部分。

三、模型试验的意义

模型试验的意义，从以下五个方面来说明。

（1）模型试验作为一种研究手段，可以严格控制试验对象的主要物理参数而不受外界条件和自然条件的限制，做到结果准确。

（2）模型试验有利于在复杂的试验过程中突出主要矛盾，便于把握、发现现象的内在联系，并且有时可用来对原型所得的结论进行校验。

（3）由于模型与原型相比，尺寸一般都是按比例缩小的，故制做容易，试验人员少，比做实物原型试验，能节省资金、人力和时间。

（4）模型试验能预测尚未进行直接研究的实物对象的

物性，有时则用于探索一些未尽了解的物理现象或矿山岩体结构的基本性能。

(5) 当其他各种研究方法(现场观测或数理分析方法)不可能采用时，模型试验就成了现象相似性问题唯一的和最为重要的研究手段。

因此，将相似理论和模型试验方法用于矿山岩体受采动影响的矿压显现规律方面的科学研究，为促进这个领域科学技术的发展，有极其重要的意义。

四、模型试验的缺点

(1) 试验用模型虽可在许多基本假设和主要因素方面，做得与实物名义一致，但在一些局部的、细节性的因素方面很难模拟实物原型，如某些应力集中因素等，这种由于尺寸大小而引起的影响，称为“尺寸效应”。

(2) 由于模型和原型的相似条件实际上不可能完全满足，在模型制作中的比例也不可能百分之百地准确，因此，不可避免地包含了所谓“比例效应”误差。

(3) 由于试验模型本身的刚度、质量等较小，对外界附加影响比较敏感，有时就会给试验带来很大困难。

(4) 从制做模型的材料来说，还有相似性不能完全满足要求，受外界温度、湿度的影响较大等。

五、在矿压模型上有可能解决的采矿问题

(1) 矿层及其采掘空间，由于采动影响，在其上或其下的岩层引起的岩体变形和破坏的确定。

(2) 由于深部开采造成的岩层移动或浅部回采形成的地表下沉和塌陷。

(3) 确定采空空间顶板暴露面积的临界值，或无支护的顶板暴露面积的临界值。

(4) 分析已采空空间上方顶板岩层断裂和下沉机理。

(5) 分析研究支架与围岩的相互作用。

在模型上研究这些问题时,可以预测其危险状态,如相邻矿层或巷道破坏、地表塌陷、顶板冒落、冲击地压、长壁工作面初次来压和周期压力的出现规律等,同时还可以选择合理的预防措施。

应用物理模拟的模型试验方法,是试验或论证新的回采方法、解释具体地质构造、岩体强度参数和新的巷道布置方案的具体研究方法。

模型相似材料模拟岩体的物理基础,是基于尺寸分析的力学相似理论。为了保持所研究模型与原型之间的力学相似,应使所研究的力学现象参数的无因次系统保持相等。

六、其他物理模拟形式

(1) 光弹材料模拟方法。它采用具有双折射性能的透明塑料制成与原型形状几何相似的模型,使模型受力情况与原型的载荷相似。将受力后的塑料模型置于偏振光场中,可获得干涉条纹图。这些条纹指示了模型边界和内部各点的应力情况。依照光弹性原理,即可算出模型各点应力的大小与方向,原型上的应力可根据模型相似理论换算求得。因此,光弹性实验是以光学和力学紧密结合的一种试验技术。由于是用模型进行试验,故还必须以相似理论为指导。

研究矿山岩体,将具有光双折射的透明材料做成岩体的剖面,在岩体剖面上模拟采掘空间的断面形状,然后,在偏振光场中获得应力分布状况的干涉条纹。还可以做成各种不同的地质模型,研究应力分布状况。

(2) 用各种几何形状的岩体模拟块体,构成各种形式的岩体块体系统模型,来研究具有不同结构的岩体模型,受