



矿山岩层力学

贾喜荣 编著

煤炭工业出版社

矿山岩层力学

贾喜荣 编著

煤炭工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

矿山岩层力学/贾喜荣编著. —北京: 煤炭工业出版社,
1996. 12

ISBN 7-5020-1345-8

I. 矿… II. 贾… III. 矿山—岩层移动—岩石力学 IV.
TD31

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 11152 号



*
煤炭工业出版社 出版发行
(北京安定门外和平里北街 21 号)
煤炭工业出版社印刷厂印刷

*
开本 $850 \times 1168 \text{mm}^{1/32}$ 印张 $18\frac{5}{8}$ 插页 1
字数 491 千字 印数 1—665
1997 年 9 月第 1 版 1997 年 9 月第 1 次印刷
书号 4114 定价 19.50 元

内 容 提 要

本书是一本介绍矿山岩层力学及其在煤矿地下开采中应用的著作。全书较系统地阐述了岩石基本物理力学性质试验与分析、岩石强度准则、岩层的力学性状、节理岩层的工程分类、地壳表层的天然应力状态、构造应力场的力学模型分析、岩层巷道的稳定性及其支护与加固,以及采场薄板矿压理论、采场支承压力及覆岩破断后的稳定状态等内容。全书注重介绍煤系地层的层状介质特征、煤层地下开采的工程特点以及借鉴其他岩体工程的研究方法与成果。书中内容反映了作者近十多年来在矿山岩层力学方面的研究成果。

本书可作为煤炭院校有关专业师生的教学参考书,也可供有关科研工作者和工程技术人员学习参考。

前 言

采场岩层控制是矿山岩石力学的组成部分，岩石力学的基本原理和方法，在岩层控制研究中同样起着重要的指导作用。煤系地层是一种典型的层状介质，所开采煤层是这些岩层中夹持着的薄层状矿体。在开采过程中，煤层及其上覆和下伏岩层的力学过程类同于各种组合形式的薄板的工作状态。因此，煤矿采场岩层控制问题，如：岩层巷道的稳定性；采场顶板岩层的变形、断裂和垮落；支承压力的形成与分布；开采沉陷的力学机制等，都可归结为矿山岩层力学问题。

在围岩结构和围岩载荷方面，都是以层状介质为基本前提。采场围岩的基本特征是在大范围的运动过程中的某种动态平衡，这与那些任何相对静态平衡的岩石工程相比，有极大的不同。因此，解决采场岩层力学问题是最为复杂和困难的工程岩石力学问题。

笔者在1983年建立的“多种支承条件下的薄板”力学模型的基础上，先后对顶板岩层的下沉和断裂过程进行薄板分析，基于“弹性板与铰接板结构”模型，建立起顶板岩层来压步距和来压强度计算的解析分析方法，并在工程中的顶板来压计算预测方面得到了一些应用。

书中较详细地介绍了岩石物理力学性质试验分析的基本内容。结合矿山岩层力学的特点，还介绍了结构面岩层的力学性质、节理岩层的工程分类、岩石强度准则，以及有关弹性薄板理论的基本知识。书中较系统地阐述了采场薄板矿压理论分析方法和工程应用情况。作为内容的扩展，围绕采场岩层控制，介绍了开采沉陷的相关内容和国内外在这方面的研究成果。

应当说，笔者从事岩石力学研究工作的过程，恰好是矿压中心站建立与发展 and 我国矿压理论工作指导煤矿岩层控制技术迅速

发展的重要时期。因此，工作中所取得的某些进展，是与前人已取得的成就和我国煤炭科学技术进步不可分的。这里要真诚地感谢矿压中心站多年来所创造的良好学习、学术交流的氛围，感谢矿压界前辈和同行们的一贯鼓励、支持和合作。

限于水平和经验，书中错误和不妥之处，恳请读者指正。

作 者

1997. 3.

目 录

前言

第 1 章 岩石基本物理力学性质试验与分析	1
1.1 引言	1
1.2 实验室试件样品及其制备	2
1.2.1 样品选取	2
1.2.2 样品制备	4
1.2.3 试验样品的数量	5
1.3 岩石的基本物理性质	7
1.3.1 岩石的密度	7
1.3.2 岩石的视密度	8
1.3.3 岩石的孔隙性	8
1.3.4 岩石的水理性质	10
1.3.5 岩石的碎胀性	15
1.4 单轴压缩下岩石的变形性质	16
1.4.1 岩石的弹塑性特征	18
1.4.2 岩石的全程应力应变曲线	19
1.4.3 岩石的横向变形和体积变化特征	21
1.5 岩石的单轴抗压强度	25
1.5.1 岩石的单轴抗压强度试验	25
1.5.2 单轴压缩试件的应力分析	26
1.5.3 单轴压缩试件的破裂形式及其破坏机理	28
1.5.4 试件几何形态对抗压强度的影响	30
1.5.5 试验环境对抗压强度的影响	34
1.6 岩石的抗拉强度试验	40
1.6.1 直接拉伸法	40
1.6.2 间接拉伸法	41
1.7 岩石的抗弯强度试验	46

1.8	岩石的点载荷试验和捣碎试验	47
1.8.1	点载荷试验	47
1.8.2	捣碎法试验	48
1.9	岩石的抗剪强度及其变形	51
1.9.1	岩石的抗剪强度试验	51
1.9.2	岩石的抗剪强度特性	54
1.10	岩石物理力学性质间的相关性	70
1.11	岩石力学性质的各向异性特征	76
1.12	岩石强度准则	79
1.12.1	岩石力学中应力和应变的约定	79
1.12.2	单元体的应力状态和 Mohr 应力圆	82
1.12.3	岩石强度准则	97
1.13	岩石的流变性质与模型理论	110
1.13.1	岩石的流变性质	110
1.13.2	流变模型理论	117
1.13.3	岩石的长时强度	132
第2章	岩层的力学性状	135
2.1	引言	135
2.2	岩层的结构特征	143
2.2.1	构造特征的主要类型	144
2.2.2	结构面的描述及其类级	146
2.3	结构面的剪切性状	157
2.3.1	剪切试验	157
2.3.2	粗糙度与法向应力间的相互关系	159
2.3.3	剪胀与抗剪强度间的相互关系	165
2.3.4	结构面的刚度	168
2.3.5	含充填物结构面的抗剪强度特征	170
2.4	多结构面岩层的力学性质	174
2.4.1	单结构面岩层的力学性质	174
2.4.2	多结构面岩层的力学性质	178
2.4.3	岩层连续的相关性	179
2.5	节理岩层(岩体)的工程分类	185
2.5.1	Terzaghi 岩石载荷分类	186

2.5.2 Stini 和 Lauffer 分类	188
2.5.3 Deere 的岩石质量指标 (RQD)	190
2.5.4 节理岩层 (岩体) 的 RMR 分类	194
2.5.5 NGI 隧道质量指标	201
2.5.6 节理岩层 (岩体) 分类法的综合讨论	210
2.6 节理岩层 (岩体) 的变形特性及其强度准则	211
2.6.1 岩体变形特性	211
2.6.2 Hoek-Brown 准则	211
2.6.3 Barton 准则	214
第3章 地壳运动及其表层的天然应力状态	223
3.1 地球及其构造的一般概念	223
3.2 地壳运动	225
3.2.1 运动发生的时期	229
3.2.2 运动的方式和方向	230
3.2.3 运动的起源和动力来源	236
3.3 原岩应力	245
3.3.1 地壳浅部原岩应力实测成果	246
3.3.2 自重应力	251
3.3.3 构造应力	254
3.3.4 形成断层时应力状态的推断	267
3.3.5 原岩应力状态的影响因素	271
第4章 岩层巷道的稳定性	273
4.1 引言	273
4.2 整体岩层中巷道围岩的应力状态	275
4.2.1 主应力迹线的流线比拟	275
4.2.2 双向等压圆形巷道的弹性应力状态	277
4.2.3 双向不等压圆形巷道的弹性应力状态	282
4.2.4 岩层面对弹性应力分布的影响	284
4.2.5 双向等压圆形巷道围岩应力的弹塑性分析	292
4.3 层状岩体中巷道顶板变形的力学机制	298
4.3.1 巷道设计的基本要素	298
4.3.2 岩层对巷道开挖的反应	299
4.3.3 顶板岩层变形的力学机制	301

4.4	节理岩体中巷道围岩的稳定性	305
4.4.1	设计要素	305
4.4.2	潜在破坏方式的判别	306
4.4.3	最佳方位和开挖尺寸对围岩控制的影响	309
4.5	巷道围岩的支护与加固	312
4.5.1	支护与加固原理	312
4.5.2	有冒落危险的岩楔或岩块的支护	319
4.5.3	不注浆锚杆的有效支护	320
4.5.4	围岩-支护系统间相互作用分析实例	324
4.5.5	岩体的预加固	346
4.5.6	支护与加固的经验性设计原则	351
4.5.7	新奥法 (NATM)	360
第5章	长壁工作面采场矿压	367
5.1	引言	367
5.2	采场矿压基本概念	368
5.2.1	顶板、底板和采场	369
5.2.2	矿压术语	372
5.3	顶板岩层的断裂机制及其运动过程	372
5.3.1	直接顶	372
5.3.2	基本顶	379
5.4	采煤工作面矿压特征	382
5.4.1	生产过程对顶板的扰动	383
5.4.2	顶板初次来压与周期来压	387
5.4.3	顶板的合理支护强度	390
5.4.4	矿压观测实例分析	396
5.5	顶板分类	408
5.6	底板的力学特征及其分类	420
5.7	库兹涅佐夫铰接岩块矿压假说	433
5.8	采场薄板矿压理论	437
5.8.1	薄板理论的形成与发展	439
5.8.2	弹性薄板理论的一般概念和基本方程	445
5.8.3	顶板岩层的挠曲及其应力分布	454
5.8.4	顶板岩层的工作状态与破断形式	463

5.8.5	直接顶的极限跨距	467
5.8.6	基本顶初次断裂步距与二次断裂步距	469
5.8.7	基本顶周期断裂步距	477
5.8.8	顶板来压强度计算及其参数的确定	479
5.8.9	顶板来压计算参数相关性分析	491
5.8.10	初撑力对支架工作状态的影响	497
5.9	采场支承压力	503
5.9.1	支承压力的一般特征	504
5.9.2	支承压力在下伏岩层中的传递过程	520
5.9.3	采区平巷合理位置的选择	531
5.10	采场上覆岩层的稳定状态	541
5.10.1	垮落带	543
5.10.2	断裂带	547
5.10.3	弯曲带	550
附录一	缓倾斜煤层采煤工作面顶板分类	560
附录二	缓倾斜煤层采煤工作面底板分类	573
参考文献		582

第1章 岩石基本物理力学性质 试验与分析

1.1 引言

在所有的岩石工程中，对岩体进行破碎与维护其稳定的两个方面，构成了工程岩石力学的一对基本矛盾。无论是破岩还是支护与加固，为了取得最佳经济效益和确保工程的安全可靠性，没有任何事情比掌握岩石特性方面的知识更为重要。

固体力学的基本研究方法是根据外载条件和材料的力学性能来推断物体的变形或破坏。岩石的力学性质主要取决于其矿物成分和结构与构造特征，同时还取决于其物理性质（如含水率、孔隙率等）。

工程岩体通常包含有各种节理和由其分割的岩石单元（完整的岩石块体）。完整岩石试件的力学性质不仅取决于各种矿物的性质，而且决定于各种矿物的组合方式。有关这方面的资料，要从充分的岩石学方面的描述来提供，它们包括晶体、颗粒、胶结物、变异产物的矿物成分以及结构和构造（包括晶体、颗粒、孔隙和裂纹的大小、形状、分布和方位）。均质性和各向异性的程度是岩石力学性质的重要特征，它往往随所研究的岩石体积的大小而异。例如，在片岩、片麻岩或其他叶理化岩石中，甚至微观尺度上，其基本性质也随方向不同而异，以致使小块试件的力学性质也受其影响。然而，在一般纹理化的沉积岩中，在一个纹层之内的岩石可能是相对均质的；反之，如果包含纹层之间的分离面，则同一岩石也可能是相对各向异性的。

在决定测试岩石物理力学性质的试验方案中，所研究的工程规模中岩体的相对尺寸是一个重要的影响因素。如在岩石粉碎、研

磨和钻凿等作业中,岩石的弱面通常并不是一个有意义的问题。然而,所研究的岩体是大规模的,其破坏面通常由弱面控制,则岩块的力学性质可能就显得并不十分重要。

事实上,关于岩石的力学性质的全部数据都是得自小型试验和有限规模的原位试验。人们试图通过在数量上和体积上有限的试件试验,应用分析的方法来确定不同载荷条件下岩体的强度和变形性状,以设法满足工程设计的要求。

试验标准化是岩石试验应该遵循的一个基本原则。众所周知,岩石试验的测试成果,既取决于岩石本身的性质,也受试件形态、测试条件和试验环境的影响,因此它只能是某种指定条件下的特征值。但由于岩石力学还是一门新兴的学科,在试验方法方面还不完善,目前各有关部门都制订了一些相应的试验规程。如现行煤炭工业部颁发的《煤和岩石物理力学性质测定方法》(1987年),地质矿产部颁发的《岩石物理力学性质试验规程》(1988年),电力工业部和水利部颁发的《水利水电工程岩石试验规程》(1981年)等均属行业试验规程。国际岩石力学学会(ISRM)(International Society for Rock Mechanics)早在1967年就成立了专门的岩石实验室和现场试验标准委员会,编制了室内和现场岩石力学试验《建议方法》⁽⁴⁾,并建议各会员国译成本国文本,以便在世界范围内推广试行。显然,这种在一定程度上的标准化,并不意味着限制测试技术的发展与改进,而且正是力图最大可能地将相近试验条件下获得的试验成果进行广泛交流,并应用于工程实践中。

1.2 实验室试件样品及其制备

岩石试件的工程取样和样品制备是一项很细致的工作。采取样品必须能真实地反映岩体客观情况。通常制备样品要比试验花费更多的时间。如果试验的结果很分散,则要有足够的试件才能满足试验的要求。

1.2.1 样品选取

由于对选取样品进行性质测定是为了能反映岩体的客观实

际，所以正确取样是一项十分重要的工作。一般地说，岩体是一种非均质体，从不同部位（包括同一岩层）采集的样品，其性质往往有很大的差异。这就要求应当从岩体（层）的各个部位采取样品。若岩体的某些部位缺乏样品，则从试验结果计算得到的平均值就会受到影响。

为了保证正确取样，要对岩体组成特征进行分析，并将矿物成分、胶结材料的性质、结构和风化程度等有显著差异的情况标绘在岩体剖面图上。在层状岩体中，层面是很容易识别的重要控制线。在煤系地层中，不同成分的岩石，其性质的变化是很大的，而且也很容易用肉眼观察，并可把层面划分为不同的剖面。

叶理、节理、裂缝和其他不连续面的存在也应予以考虑，并沿岩体横剖面的这些区域应分别采取样品。断层、岩脉和褶皱区域的岩石性质变化很大，这些构造的出现，也要引起足够的重视。

若样品取自工程母体或大块岩石，在软弱岩石的情况下（如煤、页岩和岩盐等），要用专门的机器从岩体上切割。对于坚硬岩石，用彼此接触的排孔法钻取。制样时，要保持叶理或其他弱面不受扰动。当需要测定地下深部的岩石性质时，须采用金刚石钻钻取岩芯。

有时，大的岩块是用爆破方法采取。这种岩块受到了在爆破时很强烈的冲击应力波的作用，使得其原生裂隙扩展，甚至产生某些新的微裂隙。在地下开采中，通常是从巷道或工作面采取小尺寸样品。采取这些样品比较容易，但其本质的缺陷是软弱的部分易破裂成碎块，而通常取得的总是岩体中较强的部分。此外，采取的这些样品，往往又很难说是代表哪一部分。况且由于采动的影响，样品经受了高应力的作用。如果样品是从人工打碎的一块或几块的岩石中采取，则可以克服某些不利的影响。

应在图上标明所取的样品在原来岩体中所处的部位和方向。

采好岩样后，用纸包好，标明编号，浸蜡整体封固。对于松软易吸水风化的样品，最好在现场立即包装封固。在运输样品过程中，需要注意的是不要过分震动，以免样品产生新的裂缝或使

原有裂缝扩展。

1.2.2 样品制备

试验试件的形状可以分为三类：规则试件（圆柱体、棱柱体或立方体）、不规则试件、特殊形状的试件。

在力学性质试验中，大多数规则试件是用薄壁钻头钻取成圆柱体，可制备成直径为 1.3~15.0cm，但典型试件的直径多采用 2.5~5.0cm。试件的高度是按照不同参数测定的要求，用圆盘锯将岩芯切割成所需要的高度。棱柱体试件的制备是用圆盘锯将样品先切割成板状，再切割成条状，最后加工成一定高度的棱柱体。在岩石很脆且强度很低的情况下，加工比较困难，此时可将样品埋入硬蜡中，然后再进行切割。

在试件进行强度试验之前，试件端面要符合某一标准的要求，这一点很重要。因为在加载过程中，会在试件端面的横沟和孔洞处形成应力集中点，使试件在低载荷情况下发生破坏，从而导致试验失败。端面粗糙度对试验值的影响也比较大，而且对高强度岩石的影响要比对软弱岩石的影响更为敏感。对于所有类型的岩石，试验结果的标准差都是随着试件表面结构的变化而增加。

粗糙的试件周边，必须修整光滑。特别在用电阻应变片测变形时，这项工作会显得更为重要。试件上下端面应当彼此平行，而且垂直于试件的轴线。磨光试件的上下端面是最好的方法，这样容易保证两端面垂直于岩芯轴线，而且彼此之间的平行度可控制在合理界限之内。

通常，在钻、切和磨光等操作过程中，需要用冷却剂消散刀具在加工过程中产生的热量，否则极易损坏试件和刀具。水是最常用的冷却剂，在水对岩石性质有影响的情况下，可用压缩空气作为冷却剂，但冷却作用缓慢。刀具常需调换，以便使刀具和样品能得到适当的冷却。此时还要增加吸尘设备。

在采取不规则试件时，要用小锤轻敲去尖角，按照样品的重量选择它的大小。

特殊形状的试件是根据专门的试验要求而制备的。如在直接

拉伸试验中，考虑到试件的夹持问题，要求加工成变直径试件。南非国立工程力学研究所岩石力学部采用的抗拉试验试件如图 1.1 所示。这种试件是在安装有金刚石砂轮的车床上完成的，用水作为冷却剂。

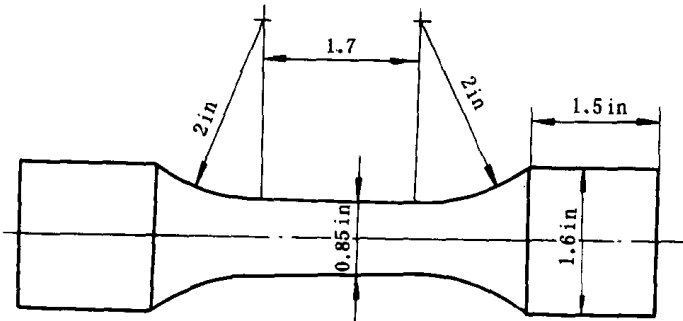


图 1.1 南非国立工程力学研究所用的抗拉样品图

圆环形试件是用于间接拉伸试验的一种试件；空心圆柱体试件是用于三轴强度试验的另一种试件。这种试件的制作，是靠备有水冲洗的双层金刚石空心钻头在岩石样品上取芯来实现的。

在某些情况下，也采用球形试件，主要用于测定岩石在不同方向的某些性质。

1.2.3 试验样品的数量

由于岩石的非均质性，单个样品试验结果不能说明岩体的情况。理论上不可能得到绝对值，但大量样品试验结果会接近绝对值。然而有限的试验费用不可能提供大量的试验结果，因此需要确定试验样品的最小数量。

确定试验样品的数量，必须考虑试验结果的波动幅度和平均值的精度与可靠性。波动幅度取决于岩石的非均质性和样品的尺寸等。较小的样品往往显示出较大的偏差。所以实验室用小样品进行试验，相应的样品数量需要多些。

为了便于试验结果的比较，ISRM 陆续提出关于岩石试件的

形状、尺寸、数量、加工精度、加载速度和加载时间的建议。有关岩石试件性质试验的主要内容见表 1.1。

表 1.1 ISRM(1979 年)有关建议表

项 目		单轴压缩	单 轴 拉 伸		三轴压缩
			直 接	间 接	
试件形状		圆柱体 ⁽¹⁾	圆柱体	圆柱体	圆柱体
试件直径(mm)		$\geq 54^{(1)}$	≥ 54	≥ 54	≥ 54
高 径 比		2.5~3.0 ⁽¹⁾	2.5~3.0	0.5	2~3
试件直径与 最大粒径之比		10 : 1	10 : 1	10 : 1	10 : 1
试件数量		≥ 5	≥ 5	≥ 10	≥ 5
含 水 量		天然	天然	天然	天然
保存天数(d)		30	30	30	30
加 工 精 度 要 求	端面磨平度 (mm)	0.02 ⁽²⁾	0.02	0.25	0.02
	轴线垂直度	0.001 弧 度 或 3.5", 或每 50mm 不 超过 0.05mm	同左	0.25°	同单轴压缩
	侧面不平度 (mm)	≤ 0.3	≤ 0.1	厚度不平度 <0.025	≤ 0.3
加荷速度(MPa/s)		0.49~0.98	0.49~0.98	>200N/s	0.49~0.98
加荷时间(min)		5~10	5~10	>15~30s	5~10

注：(1) 我国煤炭、地质部门规定可采取直径为 50mm，高径比为 1 : 2~2.5 的圆柱体试件，也可采用 5×5×5cm³ 的立方体试件。

(2) 我国煤炭、地质部门规定不大于 0.1mm。