



中等职业教育国家规划教材  
全国中等职业教育教材审定委员会审定

# 矿压测控技术

● 主 编 王春城



● 煤炭工业出版社

中等职业教育国家规划教材  
全国中等职业教育教材审定委员会审定

# 矿压测控技术

主 编 王春城  
副主编 武合意  
参编人员 张业胜 孙茂来

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

## 内 容 提 要

本书全面系统地介绍了矿山压力基本理论及岩层运动规律, 矿山压力观测仪器及观测方法, 采煤工作面及巷道矿山压力控制技术。

本书是中等职业学校采矿技术专业国家规划教材, 也可供高等职业技术教育和从事采矿工程的技术人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

矿压测控技术/王春城主编. —北京: 煤炭工业出版社, 2005 (2007.4 重印)

中等职业教育国家规划教材

ISBN 978-7-5020-2694-3

I. 矿… II. 王… III. ①矿山压力-观测-方法-专业学校-教材 ②矿山压力-控制方法-专业学校-教材  
IV. TD326

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 053631 号

煤炭工业出版社 出版  
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)  
网址: [www.cciph.com.cn](http://www.cciph.com.cn)  
北京房山宏伟印刷厂 印刷  
新华书店北京发行所 发行

\*

开本 787mm×1092mm<sup>1/16</sup> 印张 15<sup>1/4</sup>  
字数 356 千字 印数 2,001-4,000  
2005 年 8 月第 1 版 2007 年 4 月第 2 次印刷  
社内编号 5465 定价 28.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

# 中等职业教育国家规划教材出版说明

为了贯彻《中共中央国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》精神，落实《面向21世纪教育振兴行动计划》中提出的职业教育课程改革和教材建设规划，根据教育部关于《中等职业教育国家规划教材申报、立项及管理意见》（教职成〔2001〕1号）的精神，我们组织力量对实现中等职业教育培养目标和保证基本教学规格起保障作用的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和80个重点建设专业主干课程的教材进行了规划和编写，从2001年秋革开学起，国家规划教材将陆续提供给各类中等职业学校选用。

国家规划教材是根据教育部最新颁布的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和80个量点建设专业主干课程的教学大纲（课程教学基本要本）编写，并经全国中等职业教育教材审定委员会审定。新教材全面贯彻素质教育思想，从社会发展对高素质劳动者和中初级专门人才需要的实际出发，注重对学生的创新精神和实践能力的培养。新教材在理论体系、组织结构和阐述方法等方面均作了一些新的尝试。新教材实行一纲多本，以满足不同学制、不同专业和不同办学条件的教学需要。

希望各地、各部门积极推广和选用国家规划教材，并在使用过程中，注意总结经验，及时提出修改意见和建议，使之不断完善和提高。

教育部职业教育与成人教育司

2001年10月

# 前 言

本套教材是中国煤炭教育协会和煤炭工业出版社受教育部职业与成人教育司委托，根据2000年教育部《面向21世纪职业教育课程改革和教材建设规划》采矿技术专业教学指导方案，组织部分职业教育院校的教师编写的。教材编审委员会于2004年11月在北京召开了教材编写大纲审定会议，于2005年3月在无锡召开了审稿会，会后各书主编根据提出的意见进行修改与完善。各书主审人员对书稿进行了认真的审阅。

采矿技术专业中等职业教育国家规划教材会套书共12本，可作为中等专业学校、技工学校 and 职业中学采矿技术专业及相关专业的通用教材，可作为企业在职人员的培训教材，也可作为从事矿井开拓、采煤（矿）、掘进、运输、通风与安会、矿井地质勘探与测量的技术人员以及生产组织管理者的参考用书。

本教材力求内容先进性、实用性和系统性的统一，同时考虑中等职业教育的特点、人才培养的基本规格和知识、能力、素质结构的要求，着重学生生产实践能力培养。使学生在牢固掌握采矿校本专业必需的文化基础知识和专业知识的基础上，具有综合职业技能和全面素质，具有继续学习的能力、创业创新能力。

《矿压测控技术》一书是采矿技术专业中等职业教育国家规划教材中的一本，河南理工大学高职院校王春城编写了绪论，第四章，第五章；石家庄工程技术学校武合意编写了第六章，第八章，实践教学一、四；徐州机电工程高等职业学校孙茂来编写了第一章，第九章，第十章，实践教学二；甘肃煤炭工业学校张业胜编写了第二章，第三章，第七章，实践教学三。山西工业职业技术学院魏胜利担任此书主审，中国矿业大学（北京）的陆明心博士给予此书热情帮助。在此，对本教材成书过程中提供帮助的人士表示感谢。

中等职业学校“采矿技术专业”

教材编审委员会

2005年6月

# 目 录

绪 论	1
第一章 煤岩体的基本性质	5
第一节 岩石的基本性质	5
第二节 岩体的基本性质	10
第三节 岩体的原始应力特征	13
第二章 巷道围岩应力分布及矿山压力显现规律	20
第一节 巷道围岩应力分布	20
第二节 采准巷道矿山压力显现规律	24
第三章 采煤工作面上覆岩层活动及矿山压力显现规律	31
第一节 概述	31
第二节 直接顶的初次垮落	35
第三节 基本顶的初次来压	36
第四节 基本顶的周期来压	39
第五节 采煤工作面围岩的应力分布	41
第六节 放顶煤开采工作面矿压显现的基本规律	44
第七节 影响矿山压力显现的主要因素	49
第四章 矿山压力观测仪器	52
第一节 机械式矿压观测仪器	52
第二节 液压式矿压观测仪器	57
第三节 振弦式矿压观测仪器	63
第四节 矿压遥测仪	65
第五节 数字式矿压观测仪器	68
第五章 采煤工作面矿山压力观测	73
第一节 概述	73
第二节 顶底板移近量和活柱下缩量观测	74
第三节 支架载荷观测	84
第四节 采煤工作面顶板状况统计观测	95
第五节 采煤工作面上覆岩层移动和破坏过程的观测	101

第六节	采煤工作面顶板运动的预测预报	104
第七节	底板载荷集度的测定	108
第八节	单体支柱工作面支护质量监控	112
<b>第六章</b>	<b>巷道矿山压力观测</b>	<b>119</b>
第一节	概述	119
第二节	巷道围岩相对移近量观测	120
第三节	巷道支架载荷与变形观测	123
第四节	巷道围岩应力观测	127
第五节	巷道围岩松动圈的测定	129
<b>第七章</b>	<b>矿压观测数据的分析与处理</b>	<b>133</b>
第一节	观测数据的误差分析	134
第二节	矿压观测数据的分析方法	136
第三节	矿压观测报告的编写	139
<b>第八章</b>	<b>采煤工作面顶板控制</b>	<b>147</b>
第一节	顶板分类	147
第二节	支架工作特性及实际支撑能力	150
第三节	单体支柱工作面顶板控制分析	159
第四节	综采工作面顶板控制分析	174
第五节	日常顶板控制	178
第六节	常见顶板事故控制	180
<b>第九章</b>	<b>巷道矿山压力控制</b>	<b>187</b>
第一节	巷道变形与破坏	187
第二节	巷道矿压控制原理	190
第三节	减轻巷道受压的主要措施	193
第四节	采准巷道支护	196
第五节	巷道冒顶的预防与处理	203
<b>第十章</b>	<b>煤矿动压现象及其控制</b>	<b>208</b>
第一节	冲击矿压的特征及分类	208
第二节	冲击矿压发生的条件及原因	211
第三节	冲击矿压的预测预报	213
第四节	冲击矿压的防治	216
第五节	顶板区域性切冒	219

附 实践教学.....	228
I  矿山压力观测仪器实训.....	228
II 采煤工作面顶底板移近量与活柱下缩量观测实训.....	229
III 采煤工作面支架载荷观测实训.....	230
IV 巷道矿山压力观测实训.....	232
参考文献.....	234



# 绪 论

## 一、矿压测控技术在采矿工业中的重要作用

矿山压力的观测与控制是实现矿山生产科学管理必不可少的基础工作，是采矿技术各发展阶段围岩控制的重要保障，一直被广大采矿工程技术人员所重视。

在煤炭开采过程中，采煤工作面顶板事故频繁，巷道维护困难，在煤矿瓦斯、水、火、顶板、矿尘等五大灾害中，顶板事故的事故率达40%以上，顶板事故引起的人员伤亡，一直占据煤矿各类事故的首位。20世纪90年代以前，顶板事故死亡人数占全部事故死亡人数的45%以上，随着支护技术的进步，这一比例有所下降，但问题仍然严重。据最新资料统计，顶板事故的死亡人数仍高达25%以上，给国家财产和人民的生命安全带来极大威胁，严重影响矿山生产的正常进行。据资料统计，采煤工作每年因顶板事故而影响产量变化在5%~10%之间。这些数字迫使人们深入地研究矿山压力显现规律及其控制方法，采取切实有效的控制手段，改善开采技术，完善顶板控制方法，以防止顶板事故的发生，为矿山安全生产提供有力的保障，实现安全生产，减少煤炭资源的损失，提高经济效益。

## 二、矿山压力的研究方法

地下采矿工程是在复杂的原岩体中进行的，由于原岩体的非均质性和各向异性，加之地质构造和上覆岩层的活动影响，目前，还没有精确的计算公式计算出矿山压力，这就需要对矿山压力进行全面的研究所。矿山压力的研究方法有：现场观测方法，实验室研究方法，数学力学分析方法。

### 1. 现场观测方法

现场观测方法就是利用各种观测仪器和工具对采煤工作面和巷道围岩的变形与破坏、支柱压缩和载荷、支架变形和折损、煤壁片帮等宏观矿压显现进行观测和研究，通过整理和分析，从而掌握采煤工作面矿压显现规律、围岩应力分布和岩层内部移动规律的方法。

这种方法及时准确，真实可靠，对解决煤矿或某个区域的矿压问题意义重大，是目前广泛采用的有效方法，也是研究矿山压力的重要方法，但这种方法费用高，研究周期长。

随着现代科学技术的发展，现代的采矿设备、先进的测控仪器、计算机信息处理以及新的采矿技术和工艺层出不穷。微震仪、地质雷达、电磁辐射监测仪、可弯曲光导纤维岩层窥视仪、红外线钻孔探测摄像仪等观测仪器，已取代过去单一的机械式仪表，先进的红外遥感、遥控和自动监测，计算机数据处理逐步取代现场人工操作。

### 2. 实验室研究方法

实验室研究方法是在实验室应用模拟材料模拟和光弹模拟，从而总结出矿山压力的相关规律，指导矿山生产的方法。这种方法简单，可确定单因素的影响，对处理宏观问题比较好，但关键是针对性差，模拟能否相似。

实验室模拟研究主要有以下三个方面：

(1) 岩石物理力学性质研究。包括岩石抗压、抗拉、抗剪、变形性质试验，岩石流变试验，三轴试验和利用刚性压力机进行岩石变形破坏全过程试验。

(2) 利用模拟材料模型进行模拟研究。在平面模拟试验装置基础上，进一步发展立体模拟实验台，也可利用光弹模型进行模拟研究。

(3) 在实验条件下研究支架的整体性能和有关参数，建成具有先进水平的大型自移支架实验装置，卧式和立式、单架及多框架多功能巷道支架实验台。

### 3. 数学力学分析方法

数学力学分析方法是根据地質信息和采矿工程条件抽象出力學模型，通过数学力学分析，计算应力应变分布及破坏条件的方法。

数学力学分析方法比较严密、速度快，但是参数难以确定，况且煤矿地质条件和开采条件千差万别，准确性受到质疑。

主要的数学工具有经典数学理论、模拟数学理论、随机数学理论和近代数学理论。

主要研究方法：

(1) 解析分析方法。

(2) 数值分析方法。

(3) 模糊分析、概率分析、随机分析、灵敏度分析、超量分析等方法。

(4) 近代数学、力学计算机科学方法。

近年来，断裂力学、损伤力学、分形几何、分叉、混沌、突变理论等学科渗透到矿业科学领域，推动了矿山压力控制学科的发展。

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，所以利用这些较为可靠的资料求证分析，就可以解决整个矿井或某个工作面的具体矿压问题。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的作用。所以，现场观测需要模拟实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，而模拟实验和数学力学分析又需要现场观测所得资料与数据作为依据，它们研究成果的正确程度，也需要现场观测资料来判断。因此，矿山压力的三种方法是互为补充的，而现场观测是基础。

## 三、矿压测控技术的发展

### 1. 对矿山压力的认识

我国是世界上从事采矿最早的国家之一。明代末年所出的《天工开物》一书中，已具体地记述了用立井开采及在井下进行支护的情况。也就是说，那时人们对矿山压力及控制已经有了初步认识。欧洲国家对矿山压力的认识开始于15世纪。19世纪后期到20世纪，开始利用简单力学原理解释出现的一些矿山压力现象，有代表性的是提出“压力拱假说”和岩石坚固性系数。20世纪30年代到50年代，使用弹性理论研究矿山压力问题。矿山压力控制手段也取得一些突破，出现拱形可缩性金属支架、摩擦式金属支柱、锚杆支架和自移式液压支架。

### 2. 矿山压力测控的理论研究和工程试验

自20世纪50年代，矿山压力的理论与工程实践两方面都取得了长足进展，主要包括采煤工作面围岩控制和巷道围岩控制。

## 1) 采煤工作面围岩控制理论与实践的发展

(1) 采煤工作面上覆岩层“砌体梁”结构力学模型及“关键层”理论。采煤工作面上覆岩层形成结构的特点及其形态一直为采矿工作者所重视。20世纪60年代提出开采后上覆岩层呈“砌体梁”结构力学模型,为论证采煤工作面矿山压力控制参数奠定了基础。在此基础上,提出岩层断裂前后的弹性基础梁力学模型及各种不同支撑条件下顶板的力学模型,为基本顶来压预报提供理论依据。对坚硬岩层承受载荷及变形规律的分析,提出了“关键层”理论,进一步修正了采煤工作面来压规律,能较准确地判断上覆岩层内部裂隙分布、离层区位置和识别对地表破坏起主导作用的岩层。

(2) “砌体梁”平衡的关键块研究。“砌体梁”力学模型是一个大结构,其中主要影响采煤工作面顶板控制的是离层区附近的几个岩块即关键块体。因此,在研究“砌体梁”结构的前提下,重点分析关键块的平衡关系,提出“砌体梁”关键块的滑落与转动变形失稳条件。“砌体梁”关键块的研究为采煤工作面直接顶的上部边界提供了条件,为直接顶稳定性奠定了基础。

(3) 采煤工作面“支架—围岩”关系研究及整体力学模型的建立。“支架—围岩”关系的研究主要是分析支架性能、结构对支架及围岩移动的影响,选择合理支架结构及参数,防止顶板事故的发生。在中厚煤层开采条件下,视直接顶为“似刚体”,影响支护参数选择主要是支架工作阻力与顶板下沉量的关系曲线。放顶煤开采时,直接顶不再是“似刚体”,提出了“松脱体压力”与“回转变形压力”观点,论证了由于直接顶的变形致使“砌体梁”对直接顶的回转变形载荷有可能被破碎了的直接顶所吸收,从而影响在该情况下的支架工作阻力与顶板下沉量曲线关系,最终建立采煤工作面整体力学模型。

(4) 采煤工作面矿山压力与支护质量监测。采矿工程环境恶劣,地质条件复杂多变,及时地进行监测是采煤工作面进行安全生产的根本保证。我国自20世纪80年代开始大规模进行采煤工作面顶板与支护质量监测,使采煤工作面顶板事故大幅度减少,取得了良好的社会、经济效益。目前已研制出一系列监测仪表并开发出了支护质量检测软件。

## 2) 巷道围岩控制理论与实践的发展

(1) 巷道布置改革及无煤柱护巷技术。我国对巷道受采动影响期间的围岩分布及矿压显现规律进行了深入研究,查明了地质及生产技术因素对巷道矿压显现的影响,掌握了巷道从掘进到废弃的全过程中巷道围岩变形随时间、空间的变化规律。在采准巷道矿压理论指导下,形成了完善的巷道合理布置系统。在分析开采引起的围岩应力重新分布规律的基础上,研究沿空巷道一侧煤柱边缘带的应力重新分布和支架与围岩关系,掌握无煤柱护巷机理,推进无煤柱护巷技术。同时,发展整体浇筑式巷旁充填技术,为扩大沿空留巷开辟了广阔前景。

(2) 采煤工作面巷道支架与围岩关系的研究及先进支护技术的使用。在以变形为主的巷道围岩中,为了适应巷道复杂的矿山压力和变形特征,研究巷道支架的合理性能和结构形式,使其既能有效抑制围岩变形,又能与围岩变形相互协调,减少支架损坏和改善巷道维护,研制了适用于不同条件的可缩性支架,完善了辅助配套设施,发展了支架壁后充填。锚杆支护是在围岩内部对围岩加固的一种支护手段。重视发层可拉伸锚杆、桁架锚杆、预应力锚索,推广“锚—梁—网”组合锚杆、“锚杆—棚子”联合支护、锚注支护。

(3) 软岩巷道围岩控制技术。自20世纪70年代以来,对软岩巷道围岩控制的基础理论、

软岩的岩性分析、围岩变形力学机制、巷道支护设计、施工工艺及监测进行了系统研究。针对软岩的类别和变形力学机制，发展了锚喷网支护技术、U型钢支护壁后充填技术、防治底鼓封闭支护技术、围岩爆破卸压和注浆加固技术。

(4) 巷道支护质量与顶板动态监测。实行巷道支护质量与顶板动态全过程监测是通过现场监测、信息反馈而实现的，根据监测结果不断修正支护设计和调整支护参数。使巷道围岩控制逐步由经验判断和定性评估向定量分析和科学管理转化。

### 3. 矿山压力测控技术的发展方向

当今世界自然科学与技术以前所未闻的速度发展。依赖于数学、力学理论的新进展，矿山岩石力学逐步形成为一门新兴的学科分支，现代的采矿设备、先进的测控仪器、计算机信息处理管理以及新的采矿技术和工艺层出不穷，使得矿山压力研究既与岩石力学前沿接轨，又在采矿工程实践中有广阔的应用领域。未来的发展方向是光学方法+传感技术+数据收集整理技术，在测试技术发展后，深部应力及位移的测试将极大地促进采矿技术的发展。为适应采矿工业的发展，矿山压力研究不断开创新的研究领域：

(1) 采煤工作面矿压理论与控制体系，包括岩层控制的关键层理论、放顶煤高产高效开采技术和高产高效开采故障诊断技术与保障系统等。

(2) 巷道矿压理论与控制技术，包括采动影响巷道矿压理论、煤巷锚杆支护技术、围岩注浆加固及充填技术和巷道底鼓控制技术。

(3) 开采新方法、新工艺和新技术，包括煤炭地下气化、“三下”环保开采、地热的开发利用等。

(4) 矿井深部开采和高地应力引起的冲击矿压的预测和预报。

## 四、本课程的特点及内容

### 1. 本课程特点

矿压测控技术是采矿技术专业的一门主干专业课程，是基于工程实践的岩层控制理论体系与工程技术互相交叉、相互渗透的独立的分支学科。

矿山压力观测目的是控制矿山压力，而要切实有效地控制矿山压力，必须对矿山压力进行观测，但这都必须是以矿山压力基本理论为基础的。

矿山压力观测与生产关系十分紧密，研究顶板来压规律，进行顶板来压预测预报，合理进行支架和采煤机械选型，确定采煤工作面的支护形式和支柱密度，研究采动影响规律以改革采煤方法等，都需要进行矿压观测。另外，实验室研究及数学力学研究所需的原始参数都来自观测，而对某成果进行验证，也离不开矿压观测。

### 2. 本课程主要内容

矿山测控技术的重点是“测”和“控”。本教材在介绍矿山压力的基本概念、岩层运动规律、矿山压力及其显现规律、采煤工作面上覆岩层运动规律的基础上，重点介绍了矿山压力观测和预报的目的、项目、方法和结果处理，并且根据基础理论和矿压观测的结果采取有效措施，对采煤工作面围岩进行控制，解决采掘工作中的实际问题。对煤矿的动压现象及其控制也作了较详细的介绍。

# 第一章 煤岩体的基本性质

## 第一节 岩石的基本性质

岩石是矿物的集合体,即是由各种造岩物或岩屑在地质作用下按一定规律组合而成的。岩石在自然产状下的物理性质是指岩石在作为物体的基本特征以及在其他物质或物理现象作用下所表现的性质。

### 一、岩石的物理性质

#### 1. 岩石的密度

岩石的密度是指单位体积岩石(包括空隙体积)的质量。

岩石的密度不仅与组成岩石的矿物成分有关,而且与岩石的空隙度和其中的含水量有关。

#### 2. 岩石的空隙性

岩石的空隙性是指岩石中空隙和裂隙的发育程度,它还常用空隙率来表示。而孔隙率(孔隙度)就是岩石中的各种孔隙、裂隙体积的总和与岩石总体积之比,以百分数表示。

岩石的孔隙率对岩石的其他性质有显著的影响。一般说来,孔隙率增大可使岩石的密度和强度降低,使岩石的塑性变形和透水性增大。

#### 3. 岩石的碎胀性

岩石的碎胀性是指岩石被破碎以后的体积和将比原来完整岩石体积要大的一种性质,常用岩石的碎胀系数表示。岩石被破碎以后处于松散状态下的体积与岩石破碎前处于完整状态下的体积比称为岩石的碎胀系数。

岩石的碎胀系数对矿山压力控制,特别是对采煤工作面的顶板控制有重要的意义。岩石的碎胀系数与岩石的物理性质、破碎后块度大小及排列状态等因素有关。煤矿常见岩石的碎胀系数一般在1.06~1.8之间。

岩石破碎后,在其自身质量和外载荷的作用下将逐渐压实、体积逐渐减少的性质称为岩石的压实性。其规律是坚硬岩石呈大块破坏且排列整齐时,岩石碎胀系数较小;岩石破碎后的块度较小且排列杂乱,则岩石碎胀系数较大。岩石被压实后的体积与岩石破碎前的原始体积之比,称为残余破胀系数。煤矿常见的岩石残余破胀系数一般在1.01~1.15之间。

岩石的残余破胀系数反映破碎岩石被压实的程度,它与岩石自身的物理力学性质、外加载荷的大小及破碎后经历的时间长短有关。

#### 4. 岩石的吸水性

岩石在一定试验条件下的吸水性能称为岩石的吸水性。通常用岩石的吸水率、饱水率

和饱水系数表示。

(1) 岩石的吸水率。它是指岩石试件在 $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$  压力下吸入水的质量与岩石的烘干质量之比值，以百分数表示。

(2) 岩石的饱水率。它是指岩石在高压（一般为 $15 \text{ MPa}$ ）条件下及在真空情况下吸入水的质量与岩石烘干质量之比值，以百分数表示。

(3) 岩石的饱水系数。它是指岩石的吸水率与饱水率之比值。岩石的饱水系数反映了岩石大开型空隙与小开型空隙的相对数量。岩石的饱水系数越大，岩石的大开型空隙越多，而小开型空隙越少。岩石的饱水系数一般在 $0.5 \sim 0.8$  之间。

#### 5. 岩石的透水性

岩石在地下水的压力差作用下，能被水透过的性能称为岩石的透水性。岩石的透水性一般用渗透系数来表示，其大小主要取决于岩石孔隙的大小、数量和相互贯通等情况。

#### 6. 岩石的软化性

岩石浸水后强度降低的性质称为岩石的软化性。岩石的软化性通常与岩石的空隙性、矿物成分、胶结物质等有关。其大小常用岩石的软化系数来衡量。

岩石浸水后的软化程度，与岩石中亲水性矿物和易溶性矿物的含量、孔隙裂隙的发育程度、水的化学成分以及岩石浸水时间等因素有关。其规律为是软化系数越小，岩石受水的影响就越小。

岩石软化系数一般情况下都小于 $1.00$ 。软化系数大于 $0.75$ ，岩石的软化性弱，抗水、抗风化和抗冻性能强；软化系数小于 $0.75$ ，岩石的工程地质性能较差。我们研究岩石的软化系数对用高注水软化方法控制坚硬难冒的顶板有着重要意义。煤矿常见岩石软化系数在 $0.08 \sim 0.97$  之间。

## 二、岩石的变形性质

岩石受外部载荷作用时首先发生变形，当载荷增加到超过岩石变形极限强度后，就会导致岩石破坏。因此，岩石的变形和破坏是其在载荷作用下力学性质变化过程中的两个阶段。

### 1. 岩石的弹性和塑性

岩石的弹性变形是指卸载后岩石变形能完全恢复到原始状态的性质；岩石的塑性变形是指岩石在外力作用下当超过其屈服极限应力时仍然发生变形，撤去外力后不能恢复其原始状态的性质，也称为残余变形。

岩石受外部载荷作用之后，既可出现弹性变形，又可出现塑性变形。

岩石与一般而体材料变形的性质不一样，它的弹性变形和塑性变形常常同时出现。实验证明，岩石在弹性变形阶段就已或多或少地发生塑性变形，甚至在刚开始出现弹性变形的那一时刻，也出现了塑性变形。所以岩石是兼有弹性和塑性的材料。

岩石的变形特性与岩石类型、加载方式、载荷大小、载荷作用时间和岩石的物理状态等有关。

### 2. 岩石在单向压缩下的变形性质

#### 1) 脆性岩石变形性质

图1—1 所示的是脆性岩石的应力应变曲线。其特点是岩石在破坏前有明显地发生塑性

变形的迹象，通常在外力作用下破坏前的总应变小于3%的岩石，叫做脆性岩石。

根据图1-1的脆性岩石应力应变曲线，可将脆性岩石变形过程大致划分为三个阶段：

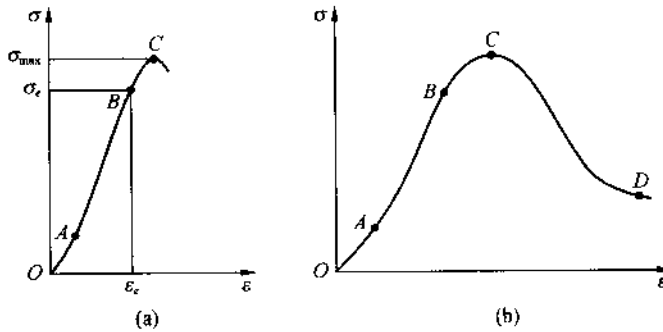


图1-1 脆性岩石的应力—应变曲线

a—普通刚度试验机试验结果；b—刚性试验机试验结果

(1) 压密阶段。岩石受力初期，引起的应变较大，但随着载荷加大，应变反而逐渐减少，如图1-1中OA段。这是由于岩石空隙压密所致。

(2) 直线变形阶段。随着载荷量的加大，应力与应变基本上按比例增长，只有不大的、实际上可以忽略的偏离，如图1-1中AB段，呈近似直线。

(3) 破坏阶段。随着载荷量的继续加大，并超过一定的极限值后，应力与应变的增长关系将失去比例，这时由直线转为曲线，即应变比应力的增长率大得多，最后岩石样件破坏，如图1-1中BC段。实验表明，岩石因其矿物组成和结构不同，岩石的应力应变关系是复杂的。

### 2) 塑性岩石变形性质

图1-2所示为塑性岩石的应力应变曲线。其特点是岩石在破坏前的总应变较大，通常把外力作用下破坏前的总应变大于5%的岩石，称为塑性岩石。

根据图1-2所示，塑性岩石的应力应变曲线的斜率开始较陡，随后逐渐变缓。通常把开始变缓的转折点，即应力增加很少而变形量有很大增长的点，称为屈服点，这点的应力值称为屈服极限 $\sigma_T$ 。有时为了方便起见，也将OEF曲线简化为OEG折线。认为岩石在达到屈服极限以前处于近似弹性状态，而 $\sigma_T$ 表示塑性流动开始。

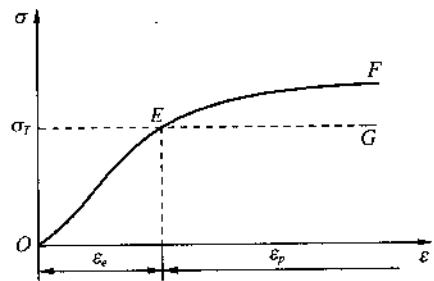


图1-2 塑性岩石的应力—应变曲线

### 3. 岩石在三向压缩下的变形性质

通常岩石在简单受力时呈现明显的脆性破坏，但在三向受力时均呈现塑性变形，并随着侧向力的变化而出现不同的力学性质。因为在自然界中，岩石往往处于三向应力状态。人们用特殊的实验装置，对岩石在三向压缩下的变形特征进行了研究。实验表明，随着侧压的增加，岩石的应力应变曲线呈现以下主要特征：

(1) 岩石的弹性阶段的斜率变化不大, 即弹性模量和泊松比 (岩石在单向压缩条件下横向应变和轴向应变的比值) 在单轴压缩下基本相同。这一性质意味着可以通过简单的单轴压缩实验来确定岩石复杂应力状态下的弹性常数。

(2) 某些岩石在一定的侧压下, 出现塑性流动现象。

(3) 岩石的屈服极限、强化程度、韧性 (峰值时的极限应变) 以及强度峰值等参数, 都与侧压的大小成正比。

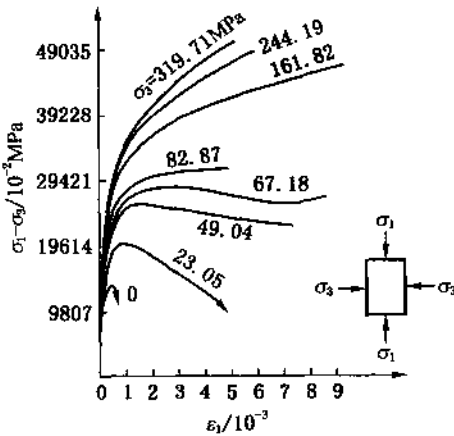


图1-3 大理石三向压缩应力—应变曲线

图1-3所示是一组大理石在三轴压缩实验下的应力应变曲线。

#### 4. 岩石的蠕变性质

在恒定载荷持续作用下, 岩石变形随时间增长所表现出的特性, 称为岩石的蠕变性。岩石的蠕变性分为稳定蠕变性和不稳定蠕变性两类。岩石稳定蠕变性是指岩石在恒载荷作用下, 应变量增加, 然后逐渐减缓, 最后趋于一个稳定数值; 岩石不稳定蠕变性是指岩石在恒定载荷作用下, 应变量随着时间增长而不断增加, 直到岩石破坏。煤矿井下某些含有粘土矿物的岩石蠕变性相当突出, 例如井下一些软岩层的巷道, 可经过几天甚至几小时, 就使巷道断而缩小到行人很难通过的程度。

### 三、岩石强度的性质

岩石抵抗外来载荷而不发生破坏的能力称为岩石强度。外来载荷过大并超过岩石所能承受的能力时, 便造成岩石的破坏, 此时的岩石强度称为岩石的极限强度。按外载荷的作用方式不同, 岩石强度分为抗压强度、抗拉强度和抗剪强度。

#### 1. 岩石的抗压强度

岩石试件在压缩时所能承受的最大压应力的值, 称为岩石的抗压强度。

岩石的抗压强度分为两类: 一是岩石试件在无侧压且只受轴向载荷作用下, 所能承受的最大压应力值称为岩石的单向抗压强度; 二是岩石试件在三向压应力作用下所承受的最大轴向应力称为岩石的三向抗压强度。

通常, 岩石中含强度高的矿物多、矿物颗粒间的连结力大、空隙度小的岩石抗压强度大。另外, 在一定变化范围内, 试件尺寸越小, 加载速度越大, 则抗压强度越大。岩石的单向抗压强度是目前井下使用最广泛的岩石力学性质参数。煤矿常见的岩石单向抗压强度实验数据见表1-1。

#### 2. 岩石的抗拉强度

岩石在单向拉伸破坏 (断裂) 时的最大拉应力, 称为岩石的抗拉强度。在实验室主要用劈裂法 (又称为径向压裂法) 来测量岩石的抗拉强度。

岩石是脆性材料, 其抗拉强度大约为抗压强度的3%~30%, 而抗拉强度高主要受其内部因素的影响, 如果组成岩石的矿物强度高, 颗粒之间的连结力强, 且空隙不发育, 则其抗拉强度高。煤矿常见岩石的抗拉强度见表1-1。



表1-1 煤矿常见岩石强度

岩石种类		抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	抗剪强度/ MPa
砂岩类	细砂岩	106.0~146.0	5.6~18.0	17.8~54.5
	中砂岩	87.50~136.0	6.1~14.3	13.6~37.2
	粗砂岩	58.0~126.0	5.5~11.9	12.6~31.0
	粉砂岩	37.0~56.0	1.4~2.5	7.0~11.7
砾岩类	砂砾岩	71.0~124.0	2.9~9.9	7.2~29.4
	砾岩	82.0~96.0	4.1~2.5	6.7~26.9
页岩类	砂质页岩	40.0~92.0	4.0~12.1	2.1~30.5
	页岩	19.0~40.0	2.8~5.5	1.6~23.8
灰岩类	石灰岩	54.0~161.0	7.9~14.1	10.0~31.0
煤		5.0~50.0	2.0~5.0	1.1~16.5

### 3. 岩石的抗剪强度

岩石抵抗剪破坏时的最大应力称为抗剪强度。根据工程实际的剪切破坏情况，常分为抗剪强度（岩石试件在法向压应力作用下，并在水平方向施加一个能剪切滑动的最大剪应力，这就是岩石的抗剪强度）、抗切强度（是指剪切面上不加法向载荷，只在水平方向施加剪切力，直到岩石剪断为止）和摩擦强度（是指岩石试件内已经有断裂面存在时，在某一法向应力和水平方向施加一剪切力的作用下能够抵抗的最大剪应力）。

测定岩石的抗剪强度一般在实验室采用直接剪切仪进行直接剪切实验、采用楔形剪切仪进行楔形剪切实验或采用三轴压力仪进行三轴压缩实验。煤矿常见的是被剪切时最大应力，其值见表1-1。

### 4. 岩石各种强度间的关系

岩石因受力状态不同，其极限强度相差很大。根据实验研究可知，岩石在不同应力状态下的各种强度值，一般符合下列顺序：

三向等压 > 三向非等压 > 双向压力 > 单向压力 > 剪切 > 弯曲 > 单向拉伸

一般岩石的单向抗拉强度仅为单向抗压强度的1/5~1/30，双向抗压强度为单向抗压强度的1.5~2.0倍。

岩石的强度越高，其抵抗外力使岩石变形、破坏的能力越强，则巷道就越稳定。有的巷道处在强度较高的围岩中，不支护（裸巷）就可维持巷道的稳定。

## 四、岩石的破坏机理

岩石的破坏方式主要是拉断、剪断、塑性变形等。其原因不仅取决于岩石本身的性质（成分、结构和构造），在很大程度上还取决于外界条件，例如岩石所处的应力状态、温度、静水压力（围压）、水分和受载时间等。一般情况，岩石在常温、低围压和高应变率条件下，呈现脆性破坏，而在高温、高压、多水分和低应变率的条件下时呈现为塑性破坏。

不论岩石处在何种状态，从岩石的破坏方式和机理看，归纳起来分为拉断破坏和剪切破坏两种基本类型。