

· 煤 · 矿 · 主 · 要 · 灾 · 害 · 防 · 治 · 技 · 术 · 丛 · 书 ·

矿山压力与岩层控制技术

中国煤炭工业劳动保护科学技术学会 组织编著

煤炭工业出版社

煤矿主要灾害防治技术丛书

矿山压力与岩层控制技术

中国煤炭工业劳动保护科学技术学会 组织编著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书比较全面、系统地介绍了我国煤矿矿山压力显现的具体表现形式及岩层实用控制技术,内容包括:顶板事故危害、采场顶板稳定性分析、采场支护、局部冒顶的防治、采场大面积冒顶事故的防治、急倾斜煤层顶板事故的防治等。重点阐述了各类采场顶板事故发生的原因、预防措施、处理方法等。

本书可供煤矿从事采掘生产的工程技术人员及管理干部使用,也可供高等院校采矿工程专业师生、科研院所的工作人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

矿山压力与岩层控制技术 / 中国煤炭工业劳动保护科学技术学会组织编著. —北京: 煤炭工业出版社, 2007. 9
ISBN 978 - 7 - 5020 - 3154 - 1

I. 矿… II. 中… III. ①煤矿开采 - 矿山压力②煤矿开采 - 岩层移动 - 控制 IV. TD32

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 108247 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
煤炭工业出版社印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行



开本 787mm × 1092mm¹/₁₆ 印张 16¹/₂
字数 389 千字 印数 1—4,000
2007 年 9 月第 1 版 2007 年 9 月第 1 次印刷
社内编号 5955 定价 43.00 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

编审委员会名单

主任 赵铁锤

委员 (按姓氏笔画排序)

王宏斌 王岐成 王树玉 刘伯 刘景华

朱锦文 李文俊 运宝珍 邱宝杓 赵益芳

窦永山

主编 窦永山

副主编 朱锦文 王树玉

《矿山压力与岩层控制技术》

主编 王岐成

审稿人 刘过兵

《瓦斯灾害防治技术》

主编 运宝珍 刘洪

审稿人 马尚权

《矿井粉尘防治技术》

主编 赵益芳

编写人 赵益芳 赵森林 薄俊伟 赵树芬 赵光宇

《矿井水害防治技术》

主 编 王宏斌 刘 伯
编写人 王宏斌 刘 伯 才向军 张 林
审稿人 刘国林

《矿井火灾防治技术》

主 编 刘景华
审稿人 方裕璋

前 言

煤炭是我国国民经济发展的主要能源支柱。我国煤炭生产和国外相比，最大的特点之一是以井工生产为主。井工生产除生产过程复杂、环节多、工作地点经常移动外，还要受到矿山压力、瓦斯、火灾、水害、煤尘等自然灾害的威胁。随着矿井机械化程度的不断提高，开采强度的不断加大，煤矿安全问题日趋突出。因此，认真做好煤矿安全工作，对于加强煤矿劳动保护、搞好安全文明生产、加速我国煤炭工业持续稳定地发展具有重要的现实意义。

新中国成立以来，我国在煤矿灾害防治方面积累了丰富的经验，特别是随着《矿山安全法》、《煤炭法》和《安全生产法》等一系列法律法规的颁布与实施，我国煤矿灾害防治工作在理论研究及技术应用方面都取得了显著的进展，这对煤矿安全状况的改善发挥了重要作用。

为了系统地总结目前国内外行之有效的煤矿灾害防治技术，推动煤矿安全技术水平和管理水平的提高，使煤矿安全技术更加系统和完善，中国煤炭工业劳动保护科学技术学会组织从事煤矿安全技术的科研单位、高等院校以及煤炭生产企业的专家学者编写了本套丛书。本套丛书共有《瓦斯灾害防治技术》、《矿井火灾防治技术》、《矿井水害防治技术》、《矿井粉尘防治技术》、《矿山压力与岩层控制技术》5个分册。

本套丛书立足于现场应用，在内容上以矿井灾害防治理论与技术实践为基础，汇集了近年来国内外矿井灾害防治最新科研成果，具有先进性、科学性和较强的实用性。

本套丛书适合从事煤矿安全工作的科研、设计、生产的工程技术人员和管理人员阅读，也可供煤炭高等院校采矿、通风安全专业师生参考。

由于编者水平所限，书中缺点和错误在所难免，恳请广大读者批评指正。

编审委员会

2007年6月

目 录

第一章 矿山压力控制及顶板管理概述	1
第一节 概述.....	1
第二节 岩石的主要性质.....	2
第三节 影响煤矿生产的主要地质因素	11
第四节 矿山压力	19
第五节 顶板分类	28
第二章 顶板事故的危害	32
第一节 顶板事故的统计分析	32
第二节 采场顶板事故类型及比例	40
第三节 采场顶板事故原因分析	41
第三章 采场顶板稳定性分析	49
第一节 采场上覆岩层移动规律及直接顶厚度确定	49
第二节 采场初次来压前后的矿山压力显现及对直接顶的稳定性分析	52
第三节 采场基本顶来压后的矿山压力显现及对基本顶稳定性分析	58
第四节 分层开采时的矿压显现与顶板管理	61
第五节 影响采场矿压的主要因素	65
第四章 采场支护	71
第一节 采场支架的工作状态	71
第二节 采场支架的基本结构及主要性能	74
第三节 采场支架与围岩的关系	90
第四节 采场控顶距及支护密度的确定	99
第五节 液压支架在特殊条件下的使用及倒架压架的处理.....	106
第五章 局部冒顶的防治	110
第一节 局部冒顶的原因分析.....	110
第二节 局部冒顶的预防.....	120
第六章 采场大面积冒顶事故的防治	135
第一节 大面积冒顶事故的原因分析.....	135

第二节	大面积冒顶事故的预防·····	143
第三节	采场冒顶的预兆·····	150
第四节	用树脂锚杆及聚氨酯加固煤岩预防采场顶板冒落·····	151
第七章	急倾斜煤层采场顶板事故防治·····	158
第一节	急倾斜煤层回采工作面矿压显现特征·····	158
第二节	急倾斜煤层回采工作面顶板事故的分类及原因分析·····	163
第三节	急倾斜煤层回采工作面顶底板事故的防治措施·····	167
第八章	采场顶板事故处理·····	174
第一节	顶板事故处理的一般原则·····	174
第二节	采场冒顶事故的处理·····	175
第九章	巷道顶板事故的预防及处理·····	180
第一节	支护原理与种类·····	180
第二节	巷道顶板事故的类型·····	183
第三节	巷道冒顶事故的原因分析·····	187
第四节	巷道冒顶事故的预防·····	195
第五节	巷道冒顶、片帮的处理·····	210
第十章	采场矿山压力监测及预测预报实例·····	217
第一节	矿压监测基础工作·····	217
第二节	采场矿压监测的常用仪器·····	219
第三节	单体液压支柱采场矿压监测·····	225
第四节	采场顶板预测预报实例·····	230
第十一章	冲击地压防治·····	235
第一节	冲击地压概述·····	235
第二节	冲击地压的危害·····	236
第三节	冲击地压的发生机理及分类·····	237
第四节	冲击地压的诱发因素·····	240
第五节	冲击地压的预测·····	246
第六节	冲击地压发生的一般规律及征兆·····	250
第七节	冲击地压的防治·····	251

第一章 矿山压力控制及顶板管理概述

第一节 概 述

煤矿作为高危行业之一，在其生产过程中受到“五大灾害”，即水、火、瓦斯、煤尘、顶板等自然灾害的威胁，井下作业的工作场所潮湿、阴暗而且狭窄，开采技术复杂，生产环节多，不安全因素时刻存在。

一、顶板事故的危害

顶板事故是煤矿生产过程中发生的“五大灾害”之一，也是煤矿生产建设中最常见、最易发生的事故。据国内外统计资料分析，目前顶板事故在各类事故统计中占较大比重。我国从1953年至1987年35年间，全国煤矿顶板事故死亡人数每年平均1200人左右，占煤矿事故的44%，居各类事故首位。1988年全国煤矿发生3人以上重大顶板事故60起，死亡人数211人，其中统配煤矿17起，死亡人数59人。

1988年至2003年，随着煤矿机械化程度的提高，全国统配煤矿顶板事故有所下降，顶板事故占煤矿各类事故总数的60%以上，伤亡人数占各类事故死亡总数的40%左右。但由于近些年来乡镇、个体煤矿的兴起，使顶板事故非但未得到控制，而且呈上升趋势。顶板事故的发生严重地制约和束缚了煤矿的发展，使煤矿工人的生命安全受到极大威胁。山西省1988年顶板事故占全省煤矿事故总数的56.25%。阳泉矿务局从1949年至1988年间，因顶板事故死亡523人，占全局事故死亡人数的46.12%。其中，3人以上顶板死亡事故发生8起，占全局多人重大事故的57.14%。1988年1月至1989年7月由于顶板事故造成的经济损失达9.78万元。抚顺矿务局1972年发生各类顶板事故295起（发生在回采工作面的198起），丢失煤炭近70万吨，造成经济损失近亿元。在这些事故中，共死亡19人，占全局本年度各类事故死亡人数的80.28%。

顶板事故非但有其自身的危害，同时它还可以引起其他事故的发生。

顶板事故俗称冒顶。在厚煤层分层开采时，由于冒顶产生的浮煤，高顶积存的瓦斯和积蓄的矿井水，当开采下分层时，一旦管理失控可导致内因火灾、瓦斯事故和矿井水灾。总之，顶板事故对煤矿生产影响极大，实现安全生产的有效途径之一就是加强顶板管理工作。

二、顶板管理的概念和内容

煤矿地下开采所处的深度一般都在几百米乃至千米以上，采掘工作面要受到矿山压力、构造应力、温度应力和膨胀应力的影响。巷道周围的围岩也对采掘工作面有较大的影响。因此，在回采过程中必须深入了解、掌握矿山压力活动显现规律和岩石性质。所以我们把控制矿山压力显现的方法叫做顶板管理。

顶板管理的内容是采场支护和采空区处理。回采工作面的回采过程包括：破煤、装煤、运煤、支护、处理采空区五道工序，又称回采工艺。前三者是为了把煤采出来，简称为“采”；后两者是为了控制顶板，简称为“控”。在工作面生产中经常可以遇到多种矛盾，如落煤与运煤、设备使用与检修等，但在回采工艺发展过程中始终起主导作用的是“采”与“控”这对相互依赖又相互斗争的矛盾。在这对矛盾中，“控”是为了“采”，“采”必须很好地“控”。

采场支护的原则要求如下：

(1) 支护要及时。这是为充分缩短控顶时间，防止围岩变形、破坏和移动。

(2) 合理、正确选择和确定支护形式。煤矿巷道支架按其作用、材质分，种类较多，一般选择支护形式主要应考虑矿山压力，围岩性质和服务年限等因素。

(3) 提高支护质量。依据支护形式，参照质量标准和作业规程架设支架。

采空区的处理方法一般分为垮落法、充填法（局部充填法、全部充填法）、煤柱支撑法和缓慢下沉法。当采用垮落法处理采空区时，在控制顶板的过程中同样存在一对矛盾，这就是采场支护与采空区处理之间的矛盾。采场支护是控制围岩的变形、破坏和移动，但是随着回采工作面的不断推进，又要对曾支护过的顶板进行垮落或人工强制垮落，无论是采场支护还是采空区处理，虽然过程不同，但其目的是统一的，那就是保证回采工作面的安全。

顶板事故不仅发生在回采工作面，在掘进工作面和巷道维护中仍可发生顶板事故。因此，做好顶板管理工作，预防顶板事故应注重煤矿开采的全过程，控制和减少顶板事故的发生，实现安全生产。

第二节 岩石的主要性质

一、岩石性质的概念

岩石是传递矿山压力的介质，又是巷道和回采工作面支护的对象，因此，为了有效地管理顶板，必须深入了解和掌握岩石的性质。岩石在自然产状下的性质是多方面的，它包括岩石的物理性质、岩石的化学性质和岩石的力学性质等。

煤系地层岩石主要由沉积岩组成，在局部范围内也有岩浆岩侵入。在地表浅部为表土层，一般为松散沉积物，如黄土、粘土、砂、砾等。在表土层以下的岩层称为基岩，如煤层、页岩、砂岩、砂页岩、石灰岩等。

沉积岩具有多方面的特征，其中与矿山压力有直接关系的是它的力学性质。与矿山压力有关的不仅是小块岩石的力学性质，而且更重要的是大块岩石和岩体的力学性质。

岩石的物理性质包括：岩石的非均质性、层理性、裂隙性、容重、密度、孔隙率、温度、碎胀性、耐风化侵蚀性等。

岩石的力学性质包括：岩石的变形特征、岩石的强度特征、岩石的坚硬性等。

二、岩石的物理性质

(一) 岩石的结构特征

岩石的非均质性、岩石的层理性以及岩石的裂隙性是岩石区别于其他力学对象（材

料)的最突出的结构特征,也是在顶板管理过程中应该考虑的因素。

1. 岩石的非均质性

矿物的集合体叫做岩石,它是地壳发展的一定阶段中地质作用的产物。由于组成岩石的矿物的结晶程度、颗粒大小、形状、分布排列以及胶结物的性质不同,使岩石具有非均质性。例如,煤系地层大多为沉积岩,由于沉积岩是由形状各异、颗粒大小不均匀的矿物和岩石碎屑胶结而成的,在颗粒间的各种胶结物质,有胶结强度大的硅质和钙质,有胶结强度较弱的粘土质和泥质,并有层理性和裂隙性的特点,所以岩石具有非均质性。

2. 岩石的层理性

沉积岩形成时,由于岩石成分、颗粒大小和颜色深浅不同,可显示出形态不同的层状构造,这样的层状构造就是层理。层理是沉积岩的重要构造特征,但某些变质岩如片麻岩也有层理。沉积岩的层理从地质剖面图上,不仅可以看出种类不同的许多岩层,而且同一层岩石的内部还可见许多分层。所以沉积岩的层理形态多样,不易分辨。

3. 岩石的裂隙性

岩石按成因不同分为岩浆岩、变质岩和沉积岩。在成岩过程中和成岩之后,由于受各种因素影响,岩石中都存在裂隙。岩石的裂隙分为原生裂隙和次生裂隙两种。由于裂隙的存在使岩体的连续性和完整性遭到破坏,从而削弱了岩体内的连接力,降低了岩体的坚固性和稳定性,不利于顶板管理。

1) 原生裂隙

原生裂隙是指在成岩过程中生成的裂隙,又叫成岩裂隙,如沉积岩的层理面、节理面、不整合面以及在成岩过程中因脱水密实而出现的与层理垂直或斜交的有一定分布规律的裂隙面。裂隙面与岩石成分有关,如黏土岩及泥灰岩的裂隙面较光滑,砂岩及砾岩的裂隙面较粗糙且有凸出的砂粒及砾石。原生裂隙一般没有擦痕和位移痕迹存在。

2) 次生裂隙

次生裂隙是在岩层生成以后才产生的,主要有构造裂隙和矿压裂隙。

构造裂隙是在岩体形成后、地壳运动过程中产生的,在岩体内除了一些明显裂隙外,还有很多闭合的、很难分辨的细微裂隙。由于地质构造作用力的不同,构造裂隙又可分为张裂隙和剪裂隙。在岩体内由于存在着这些大小不同的裂隙,因而在岩体中形成了明显的分离界线,称之为弱面。所以在开采过程中,经常会在没有任何预兆的情况下,发生冒顶事故。

矿压裂隙主要是在开采过程中,由岩体内矿山压力所造成的,其特点是裂隙方向与回采工作面煤壁平行,裂隙面暗淡,没有擦痕或滑面。

由上可知,天然岩体总是被各种裂隙分割成块体,这些块体之间处在既相互联系同时又被分割的状态。

岩石的非均质性、层理性、裂隙性对岩石的物理力学性质有重大影响,岩石物理力学性质的连续或不连续、均匀或不均匀、各向同性或各向异性,都是根本取决于这些结构特征的。

(二) 岩石的密实度

岩石的比重、容重、孔隙度反映了岩石的密实度。

1. 岩石的比重

岩石的比重是岩石试件内固体部分实体积（不包括空隙体积）的重量与同体积水重量的比值，计算公式如下：

$$\Delta = \frac{G}{V_0 \gamma_w}$$

式中 Δ ——岩石的比重；

G ——绝对干燥时岩石固体实体积的重量；

V_0 ——岩石固体部分实体积；

γ_w ——水的容重。

岩石的比重的大小取决于组成岩石的矿物比重，而与岩石的空隙和含水情况无关。一般岩石的比重接近于岩石矿物成分的比重。岩石的比重可用于计算岩石孔隙率和孔隙比。

2. 岩石的容重

岩石的容重就是单位体积（包括空隙体积）岩石的重量。岩石在自然条件下容重的计算公式如下：

$$\gamma = \frac{G}{V}$$

式中 γ ——自然条件下岩石的容重， t/m^3 ；

G ——岩石在自然条件下的重量， t ；

V ——岩石在自然条件下的体积， m^3 。

岩石的容重不仅与组成岩石的矿物成分有关，而且与岩石的孔隙中的含水量有关。

岩石的容重是研究矿山压力问题的参考指标。一般认为，容重大的岩石，其抗压强度也大。常见岩石的容重见表 1-1。

表 1-1 各种岩石的孔隙率及容重

岩石名称	平均孔隙率/%	平均容重/($t \cdot m^{-3}$)
花岗岩	1.0~1.2	2.5~2.7
玄武岩	1.0~1.8	2.6~2.8
石灰岩	3~5	2.0~2.7
页岩	4.0	2.4~2.5
砂岩	4~30	1.8~2.6
砂土	20~35	1.6~1.8
黏土	15~35	1.7~2.0
泥灰岩	35	1.9~2.1
砂砾岩	35~45	2.0

3. 岩石的孔隙率

岩石内有各种各样的孔洞和裂隙，我们把它统称为孔隙。孔隙体积占总体积（总体积包括颗粒体积和孔隙体积）的百分率，称为孔隙率，计算公式如下：

$$\eta = \frac{V - V'}{V} = \left(1 - \frac{V'}{V}\right)\%$$

式中 η ——孔隙率, %;

V' ——岩石颗粒实体体积;

V ——岩石总体积, 即外形体积, 包括岩石颗粒体积和孔隙体积。

由上可知, 岩石的孔隙率增大可使岩石的容重和强度降低, 同时使塑性变形和透水性增加, 同样不利于顶板管理。

岩石的密实度影响着岩石的强度、弹性等力学性质。一般认为, 岩石的密实程度愈高岩石就愈坚硬。

岩石的孔隙率变动范围很大。一般岩浆岩的孔隙率较小, 只有 0.5% ~ 2.0%; 沉积岩的孔隙率较大, 一般为 2.5% ~ 15%; 而表土层的孔隙率则更大, 超过 15%, 有的甚至达到 50% 以上。

几种常见的岩石的孔隙率见表 1-1。

(三) 岩石的湿度

岩石的湿度是煤岩含水性的数量指标, 通常用岩石所含水分的重量和干燥岩石重量的百分比 w 来表示。

$$w = \frac{P_1 - P_2}{P_2} \times 100\%$$

式中 P_1 ——湿岩石的重量;

P_2 ——干岩石的重量。

在岩体的空隙、层理、节理、断层以及溶洞中, 常会积存地下水, 这对岩体的力学性质影响较大。空隙越大, 含水越多, 岩石强度将显著降低。如孔隙率大的砂岩和石灰岩被水饱和后, 强度比原来降低 25% ~ 45%; 空隙率较大的细砂岩受水影响后, 强度也会降低 15% ~ 20%。

由于水的侵入, 会使岩石的弹性系数降低, 如砂岩被水饱和后其弹性系数可比干燥砂岩的弹性系数小 2/3。当岩石为泥质或钙质胶结时, 遇水后可能膨胀或溶解, 引起顶板淋水或底板岩层膨胀鼓起, 这些对采掘工作都是非常不利的。

(四) 岩石的碎胀性

岩石破碎之后比破碎前的体积要增大, 这种体积增大的性质称为岩石的碎胀性。一般用岩石碎胀系数 K 来表示, 即

$$K = \frac{V'}{V} > 1$$

式中 K ——岩石碎胀系数;

V' ——岩石破碎后的体积;

V ——岩石破碎前的体积。

也可以用岩石破碎前后的容重来表示:

$$K = \frac{\gamma}{\gamma_{破}}$$

式中 γ ——破碎前的岩石容重;

$\gamma_{\text{破}}$ ——破碎后的岩石容重。

岩石碎胀系数的大小主要取决于岩石的组织结构,以及破碎后的岩块形状和大小。一

表 1-2 岩石碎胀系数

岩石名称	碎胀系数
砂	1.06 ~ 1.15
黏土	< 1.20
碎煤	< 1.30
黏土页岩	1.40
砂质页岩	1.06 ~ 1.80
硬砂岩	1.50 ~ 1.80

般愈是致密而坚硬的岩石,其碎胀系数愈大。

对于同一种岩石,其碎胀系数 K 值并不是一个固定值。岩石刚破碎时 K 值最大,随着时间的推移,岩石由于自身重量、外来压力和水的作用, K 值将逐渐减小。

岩石碎胀系数 K 值一般介于 1.05 ~ 2.20 之间。常见岩石的碎胀系数 K 值见表 1-2。

岩石的碎胀系数对矿山压力控制,尤其是对回采工作面的顶板管理有着重要意义。

三、岩石的力学性质

岩石在载荷作用下首先发生变形,当载荷增大或超过极限强度时,岩石将发生破坏。因此,岩石的变形和破坏,是岩石在载荷作用下力学性质变化过程中的两个阶段。即在变形阶段包含着岩石的破坏因素,而在破坏阶段也可视为变形不断发展的结果。

(一) 岩石的弹性和塑性

岩石受力后既可出现弹性变形,也可出现塑性变形。岩石在弹性变形阶段就已伴随着一定程度的塑性变形,甚至在刚开始出现变形的时刻,便出现了塑性变形。因此岩石是同时具有弹性和塑性的材料。

1. 弹性变形

岩石在载荷作用下改变自身的形状和体积,当去掉载荷后又能恢复其原来的形状或体积,这种变形叫做弹性变形。如石灰岩顶板受压弯曲,在岩层折断后,会出现弹性恢复。

2. 塑性变形

岩石在载荷作用下发生变形,当去掉载荷后变形不能恢复,这种变形叫做塑性变形。如在软岩中掘进巷道时出现的底鼓,就是明显的塑性变形。因为塑性变形是不可逆的,当作用在岩石上的载荷去掉后,此种变形仍将保留。

(二) 岩石在单向压缩下的变形性质

岩石由于成因、结构、矿山压力及构造运动的影响,其物理力学性质都有较大差异,因此,岩石在受力变形过程中,所表现出的弹性变形和塑性变形有着明显区别。根据实验结果,把单向压缩时的岩石变形性质分为两类。

1. 脆性岩石的变形性质

脆性岩石的应力应变曲线如图 1-1 所示,它的特点是岩石在破坏前没有明显的塑性变形,总应变量较小。据测定,一般在外力作用下破坏前总应变量小于 3% 的岩石,叫脆性岩石。

在图 1-1 中,岩石受力初期,应力应变曲线出现向上弯的曲线。OA 段是由于岩石中的各种空隙受压闭合而造成的,称为岩石的压密阶段。图中 AB 接近于直线,可近似地称

为线弹性阶段。这时可认为岩石处于弹性状态，即随着载荷增加，其变形基于符合虎克定律。

B 点为弹性极限，自 B 点开始岩石内部微破裂不断出现，到 C 点发生破坏，故 BC 段可称为破裂发展阶段。

当应力达到极限值 σ_{\max} （图中 C 点）时，岩石突然发生破坏，该点即为岩石的强度极限。此时岩石试块破坏，发出巨大的声响，且碎块强烈弹出，这就是岩石的脆性破坏。通过实验得知相当多数量的沉积岩是属于脆性变形的。

2. 塑性岩石的变形性质

塑性岩石的应力应变曲线如图 1-2 所示，它的特点是岩石在破坏前的总应变变量较大。一般把外力作用下破坏前的总应变变量大于 5% 的岩石，叫做塑性岩石。

在图 1-2 中，塑性岩石的应力应变曲线的斜率开始较陡，以后逐渐平缓。工程上将开始变缓的转折点（应力增加很少而变形有很大增长的点）称为屈服点，该点的应力值称为屈服极限 σ_r 。为了方便，也可将 OEF 曲线简化为 OEG 折线。此时认为岩石在达到屈服极限以前处于近似弹性状态，而 σ_r 表示塑性流动开始。从图中还可看出，岩石产生的塑性变形要比弹性变形大得多。

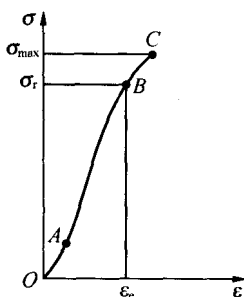


图 1-1 脆性岩石的应力应变曲线

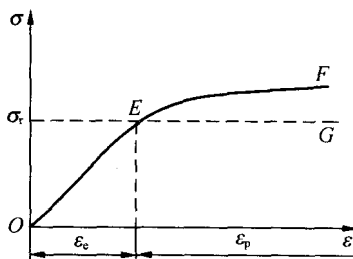


图 1-2 塑性岩石的应力应变曲线

3. 岩石在三向压缩下的变形性质

一般情况下岩石在简单受力时，呈现明显的脆性破坏，但在三向受力时则呈现塑性阶段，而且随着侧向力的变化而出现各种不同的力学特征。自然状态下岩体绝大多数是处于三向压缩状态。煤矿巷道、硐室周围的煤（岩）体，实际上也是处于三向（或双向）应力状态。因此，研究岩石在三向压缩下的变形性质，对搞好顶板管理具有一定的实际意义。砂岩受三向压缩下的变形性质遵循如下规律：

(1) 当岩石受三向压缩时，应力应变初始阶段岩石属弹性变形。

(2) 砂岩试块受三向压缩时，其峰值的轴向应变大致相同，但随着侧向应力的增大，岩石试块的塑性变形也相应增大。说明岩石的脆性和塑性是相对的，在单向应力或较低的三向应力状态下表现为脆性的岩石，在高压三向应力状态下破坏前也表现出很大的塑性。

(3) 三向压缩时，随着侧向应力和应力差值的增加，强度极限（峰值）也随之增大。

(4) 岩石在三向压缩条件下发生破坏后，虽然其结构发生了变化，但仍然保留一定的承载能力。实践证明，侧向应力愈大，其残余强度也愈大。这个规律对于在井下控制煤

柱和岩体的稳定性具有现实意义。

4. 岩石的流变性质

岩石的流变性质是指岩石在长期静载荷作用下应力应变曲线随时间增加而变化的性质，又称岩石的流变。不同岩石其流变性有很大差别。花岗岩显示与时间相关的应变不够明显，而泥质页岩等的流变应变就十分明显。岩石的流变速率对不同岩石其差异很大。例如，在软岩中开掘巷道，由于流变变形作用的影响，经过一段时间后，会使巷道断面缩小到难以正常使用；位于砂岩、石灰岩中的巷道可以不进行支护，也能保证安全生产。一般把随时间因素而变化的应力应变现象叫做流变。在恒定载荷持续作用下，应变随时间增加而变化的现象称为蠕变，表示这一特征的变形—时间曲线叫做蠕变曲线。

实验表明，岩石的蠕变曲线大致分为稳定蠕变、非稳定蠕变。

1) 稳定蠕变

岩石在恒定载荷作用下，首先出现瞬时应变 ε_r ，随着时间增加，应变量开始增加较快，以后逐渐减慢，最后趋于稳定的极限值 ε_k ，如图 1-3 所示。随着施加载荷不同， ε_k 也不同。通常 ε_k 比初始时瞬时应变 ε_r 增加 20% ~ 30%。

2) 非稳定蠕变

岩石在恒定载荷作用下，同样先产生瞬时应变 ε_r ，以后应变量随着时间增加而不断增加，直至导致岩石破坏，如图 1-4 所示。这种曲线不像稳定蠕变曲线那样有一个稳定的极限值。

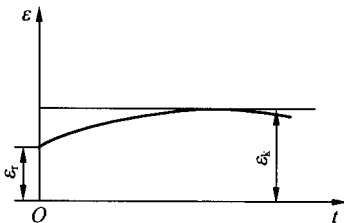


图 1-3 岩石的稳定蠕变曲线

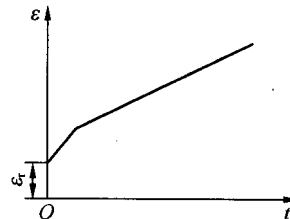


图 1-4 岩石的非稳定蠕变曲线

由蠕变造成的应变，最后能否趋于稳定，取决于所施加的恒定载荷值的大小，以及能使这种岩石的蠕变量保持稳定的临界载荷值的大小。这个临界载荷值对于需要考虑蠕变影响的工程设计有很大意义。如果岩石承受的恒定载荷小于这个临界值，那么，即使产生蠕变，也只是出现稳定蠕变，不会造成工程破坏；反之，则将出现非稳定蠕变。这样，在长期作用下，蠕变量可能超过允许的应变量，而最终导致工程破坏。

四、岩石的强度特征

岩石的强度特征反映了岩石抵抗破坏的能力，用单位面积上所受力的大小来表示，其单位为 Pa（帕）。岩石强度的大小，一般按下列顺序排列：

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

由以上不难看出，岩石的抗压强度最高，抗拉伸强度最低。因此，在采掘工程设计和施工以及巷道维护中，要尽量克服和避免岩石的抗拉伸强度低的弱点。

(一) 岩石的单压抗压强度

岩石试块在单向压缩时能承受的最大压应力值，称为岩石的单向抗压强度。它是目前井巷工程中使用最广泛的岩石力学参数，在煤矿研究岩石分类，确定破坏准则以及表达围岩坚硬程度时，经常采用这个指标。

通常在岩石中含强度高的矿物多，矿物颗粒间粘结力大，空隙小，则岩石的抗压强度大。煤矿中几种常见岩石的单向抗压强度实验数据见表1-3。

(二) 岩石的单向抗拉强度

岩石试块在单向抗拉时能承受的最大拉应力值，称为岩石的单向抗拉强度，它也是岩石力学性质中的重要指标。岩石的抗拉强度约为抗压强度的3%~30%，见表1-3。岩石抗拉强度对研究矿山压力、顶板管理问题有重要意义。

(三) 岩石的抗剪强度

岩石的抗剪强度是指岩石抵抗剪切作用的能力，它同样是反映岩石力学性质的重要参数之一。煤矿中几种常见岩石的抗剪强度值见表1-3。

表1-3 岩石的强度指标

岩石种类		抗压强度/ (Pa · cm ⁻²)	抗拉强度/ (Pa · cm ⁻²)	抗剪强度/ (Pa · cm ⁻²)
砂岩类	细砂岩	1.06 ~ 1.46	0.056 ~ 0.180	0.178 ~ 0.545
	中砂岩	0.875 ~ 1.36	0.061 ~ 0.143	0.136 ~ 0.372
	粗砂岩	0.58 ~ 1.26	0.055 ~ 0.119	0.126 ~ 0.310
	粉砂岩	0.37 ~ 0.56	0.014 ~ 0.025	0.070 ~ 0.117
砾岩类	砂砾岩	0.71 ~ 1.24	0.029 ~ 0.099	0.072 ~ 0.294
	砾岩	0.82 ~ 0.96	0.041 ~ 0.120	0.067 ~ 0.117
页岩类	砂质页岩	0.40 ~ 0.92	0.040 ~ 0.121	0.210 ~ 0.305
	页岩	0.19 ~ 0.40	0.028 ~ 0.055	0.160 ~ 0.238
灰岩类	石灰岩	0.54 ~ 1.61	0.079 ~ 0.141	0.100 ~ 0.310
煤		0.05 ~ 0.50	0.020 ~ 0.050	0.011 ~ 0.165

(四) 岩石的三向抗压强度

岩石试块在三向压应力作用下所能抵抗的最大轴向应力（或最大主应力 σ_{\max} ）称为岩石的三向抗压强度。

实验表明，侧压力加大，岩石的三向抗压强度增加，但不成线性关系，而且随着岩石类型不同而有所不同。随着侧向压力增加，某些岩石强度增长率一直较大，而另一些岩石在侧压力较小时强度增长显著，在侧压力增大时强度增长减小。煤矿中常见的几种煤、岩的三向抗压强度见表1-4。

(五) 影响岩石强度的主要因素

1. 岩石性质

岩石中因矿物成分、颗粒大小及胶结物的种类不同，其强度大小也不同，即便同一种