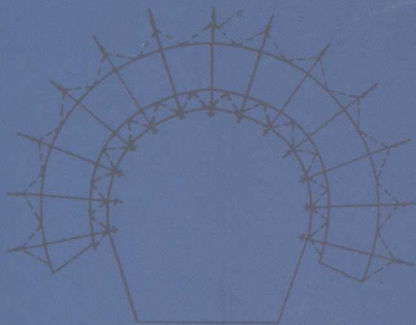


HUICAIHANGDAOBAOCENGFUHEDINGBAN
KONGZHIJISHUJIGONGCHENGSHIJIAN

回采巷道薄层复合顶板 控制技术及工程实践

孙久政 万清生 刘钦德 编著



煤炭工业出版社

回采巷道薄层复合顶板 控制技术及工程实践

孙久政 万清生 刘钦德 编著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

回采巷道薄层复合顶板控制技术及工程实践 / 孙久政, 万清生, 刘钦德编著. —北京: 煤炭工业出版社, 2008. 7

ISBN 978 - 7 - 5020 - 3336 - 1

I. 回… II. ①孙…②万…③刘… III. 回采巷道-顶板管理 IV. TD353

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 080924 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
北京房山宏伟印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

*
开本 850mm × 1168mm¹/₃₂ 印张 4¹/₂ 插页 2
字数 115 千字 印数 1—1,500
2008 年 7 月第 1 版 2008 年 7 月第 1 次印刷
社内编号 6141 定价 15.00 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

内 容 提 要

本书论述了回采巷道薄层复合顶板的力学特征、变化规律及其影响因素，回采巷道薄层复合顶板变形破坏机理，归纳回采巷道薄层复合顶板变形破坏规律，分析回采巷道薄层复合顶板控制原理及其主要支护方法，结合双鸭山矿区回采巷道顶板赋存状况，描述典型回采巷道薄层复合顶板控制技术应用实例。

本书可作为从事煤矿开采的工程技术人员、管理人员，科研机构的研究人员，以及煤炭类院校的教师、学生的参考书。

前 言

回采巷道布置于煤系岩层中，受力情况较复杂，受采动影响较大，是煤矿巷道围岩控制的难点，当围岩强度及其稳定性较差时，部分回采巷道会发生大范围的支护失效和顶板冒落现象，不仅给井下作业人员人身安全带来威胁，而且导致矿山企业巨大的经济损失。而回采巷道薄层复合顶板控制技术的研究及应用，为煤矿企业在复杂地质条件下的高产、高效安全生产起到了积极促进作用。

本书论述了层状岩体的变形特征及其强度特征，进而分析了回采巷道薄层复合顶板的力学特征、变化规律及其影响因素；论述回采巷道薄层复合顶板变形破坏机理，归纳回采巷道薄层复合顶板变形破坏规律，分析回采巷道薄层复合顶板控制原理及其主要支护方法，并结合双鸭山矿区回采巷道顶板赋存状况，描述典型回采巷道薄层复合顶板控制技术应用实例。

本书第1章、第2章分别论述岩石、层状岩体变形与强度特征，第3章分析回采巷道薄层复合顶板变形与破坏，第4章探讨回采巷道薄层复合顶板控制技术，第5章介绍回采巷道薄层复合顶板控制技术应用于东荣二矿17号煤层回采巷道围岩控制的典型实例。

本书的出版得到了双鸭山矿业集团领导的关心和支持，东荣二矿的管理及工程技术人员给予了积极的配合，书中部分内容是黑龙江科技学院李凤仪教授主持的相关科研项目研究成果的发展和应用，黑龙江科技学院硕士研究生王维维、牛旭琼作了大量的工作，在此，作者向上述人员表示衷心感谢！

因水平所限，书中难免有错误与不当之处，敬请读者批评指正。

编著者

2008年5月

目 次

1 岩石变形及强度特征	1
1.1 岩石变形性质及破坏形式	1
1.2 岩石强度特征	4
1.3 岩石在单轴压力作用下的变形特征	10
1.4 岩石在单轴拉伸作用下的变形特征	18
1.5 岩石在三轴应力作用下的变形及强度	20
1.6 岩石流变变形	25
2 层状岩体变形及强度特征	32
2.1 岩体破坏形式	32
2.2 岩体变形特征	34
2.3 结构面变形与强度	48
2.4 岩体强度	56
2.5 层状岩体变形与强度	64
3 薄层复合顶板变形破坏特征	74
3.1 相对完整状态的复合顶板变形移动规律	74
3.2 类似散体软岩状态的复合顶板变形移动规律	76
3.3 无支护条件下巷道顶板层状岩体垮落高度的 估算	77
4 回采巷道薄层复合顶板控制技术	79
4.1 回采巷道围岩控制技术概论	79
4.2 锚网索联合支护原理	84

4.3	巷道锚注支护技术	89
4.4	施工检测与工程监测	103
4.5	回采巷道薄层复合顶板控制技术	111
5	回采巷道薄层复合顶板控制技术应用实例	121
5.1	工程背景	121
5.2	17号煤层回采巷道顶板围岩控制情况分析	122
5.3	17号煤层回采巷道薄层复合顶板系列支护 方案	123
5.4	工程检测与监测	127
5.5	工程效果分析	131
	参考文献	133

1 岩石变形及强度特征

本章将岩石视为一种连续介质材料即岩块，讨论其变形及强度特征，作为后续研究的基础。

1.1 岩石变形性质及破坏形式

在工程上，岩石变形主要是指岩石在力的作用下所发生的形状及体积改变；岩石破坏主要是指岩石在力的作用下由于发生屈服、张裂、剪裂、扭曲、破碎及流变等变形而导致强度降低，乃至失去承载力。

1.1.1 岩石变形性质

岩石在应力作用下，呈现弹性、塑性及黏性 3 种性质各异的基本变形。

1.1.1.1 岩石的弹性变形

岩石在外力作用下发生变形，外力撤去后能够恢复的变形称为弹性变形。在弹性变形过程中，若应力 σ 与应变 ε 呈线性变化关系，即 $\sigma = k\varepsilon$ ， k 为线弹性模量，称为线弹性，如图 1-1a

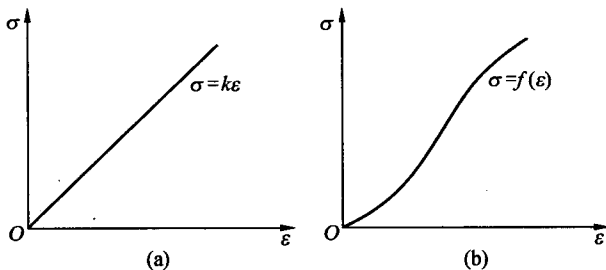


图 1-1 弹性变形应力与应变之间关系曲线

所示；若应力 σ 与应变 ε 之间呈非线性变化关系，即 $\sigma = f(\varepsilon)$ ， f 为非线性函数，称为非线性弹性，如图 1-1b 所示。

1.1.1.2 岩石的塑性变形

岩石受力超过其屈服极限，外力撤去后不能恢复的变形称为塑性变形。屈服极限又叫屈服应力 σ_y ，塑性变形应力 σ 与应变 ε 之间关系曲线如图 1-2 所示。理想塑性变形应力 σ 与应变 ε 之间关系曲线如图 1-2a 所示，应力 σ 保持为屈服应力 σ_y 不变，应力 σ 与应变 ε 之间关系曲线为平行于 ε 轴的水平线，即有 $\sigma = \sigma_y$ 。

另一种岩石材料，在应力 σ 超过其屈服应力 σ_y 之后，应力 σ 与应变 ε 之间关系曲线为倾斜曲线或直线，如图 1-2b 所示。即有 $\sigma = \sigma_y + g(\varepsilon)$ ， g 为线性或非线性增函数，应力 σ 随应变 ε 增加而增大，外力撤去后变形保存下来，这种现象称为应变硬化。

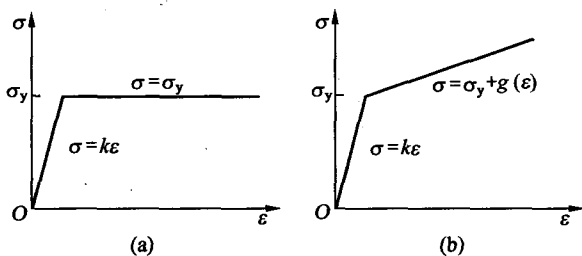


图 1-2 塑性变形应力与应变之间关系曲线

1.1.1.3 岩石的黏性变形

岩石在外力作用下变形，且应变速率 $d\varepsilon/dt$ 是应力 σ 的函数，随着应变速率 $d\varepsilon/dt$ 增大，应力 σ 也上升，当外力撤去后不能恢复其原始形状及体积，这种变形性质称为黏性，所发生的变形称为黏性变形。理想的黏性变形应力 σ 与应变速率 $d\varepsilon/dt$ 的关系曲线为通过原点的直线，即 $\sigma = \eta d\varepsilon/dt$ ， η 为黏滞系数，如图 1-3 所示。应变速率 $d\varepsilon/dt$ 随着应力 σ 而变化的变形也称为流

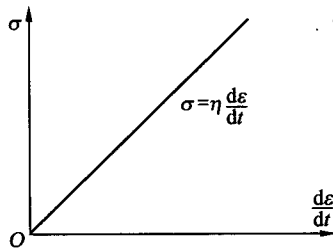


图 1-3 黏性变形应力与应变速率之间关系曲线

变变形或流动变形。

在外力作用下，岩石变形往往是集两种或两种以上变形性质于一体，如弹塑性、黏弹性、黏塑性及弹 - 黏塑性等的变形性质。

1.1.2 岩石破坏形式

根据岩石破坏之前所产生变形量的大小，可以将岩石破坏形式划分为脆性破坏和延性破坏两种基本类型。

1.1.2.1 脆性破坏

绝大多数岩石在常温常压或较低温压条件下均表现为脆性破坏。在外力作用下，岩石在破坏之前的变形量很微小，表现为突然破坏。脆性破坏的另一特征是出现明显的破裂面或非连续面，并且产生各种碎裂岩块。

1.1.2.2 延性破坏

延性破坏又称为塑性破坏或韧性破坏，在较高温压条件下，或存在地下水等流体作用时，岩石往往表现为延性破坏。在外力作用下，岩石在破坏之前的变形量较大，表现出很明显的塑性变形或流动变形。延性破坏的另一形式是不产生明显的破裂面，而是表现为应变逐渐加强的狭长高应变带，如图 1-4 所示。

研究表明，岩石脆性是其中的微裂隙及在变形过程中产生的次生微裂隙逐渐扩展的结果（均可以归为剪裂隙的扩展），而延

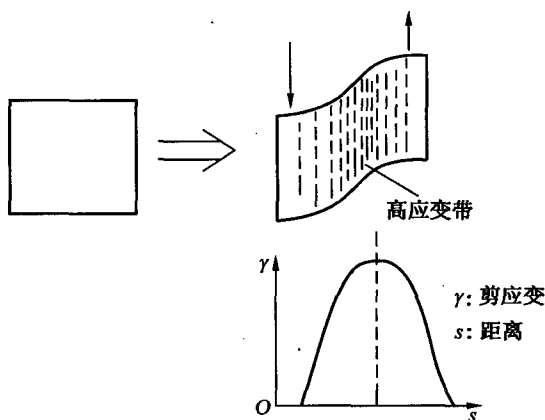


图 1-4 岩石延性破坏示意图

性破坏则是其组成矿物晶体位错的结果（包括晶体位错滑移及攀移等）。岩石脆性破坏与延性破坏一般是伴随发生的，随着环境及外力作用条件的变化又可以相互转化。

依据岩石破坏之前的变形量、作用力性质及微观破坏机制 3 个方面，可以将岩石破坏划分为剪破、张裂、破碎、塑流及挠曲 5 种类型。在工程载荷作用下，岩石的实际破坏可能同时表现出多种破坏形式。

1.2 岩石强度特征

1.2.1 岩石抗压强度

岩石抗压强度是指岩石在单轴压力作用下的极限强度，在数值上等于破坏时的最大压应力。岩石抗压强度是对岩石试件进行加压试验测得的，如图 1-5 所示。根据试验结果，按下式计算岩石抗压强度：

$$R_c = \frac{P_c}{S} \quad (1-1)$$

式中 R_c ——岩石单轴抗压强度；

p_c ——岩石试件破坏时所加的轴向压力；
 S ——岩石试件横断面面积。

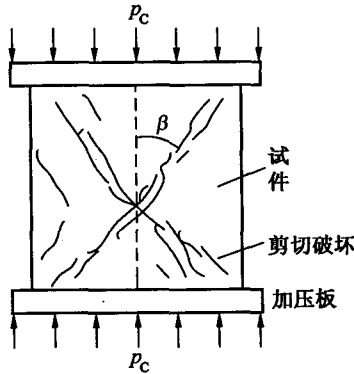


图 1-5 岩石抗压强度试验

岩石试件通常取圆柱体或长方体。圆柱体试件断面直径取 $D = 5\text{cm}$ 或 7cm ，高取 $h = (2 \sim 2.5)D$ 。长方体试件断面取 $S_0 = 5\text{cm} \times 5\text{cm}$ 或 $7\text{cm} \times 7\text{cm}$ ，高取 $h = (2 \sim 2.5)\sqrt{S_0}$ 。当试件高度不足时，其两端与加压板之间的摩擦力将影响强度测定结果。当试件破坏时，其破裂面与载荷轴线的夹角近似为 $\beta = \frac{\pi}{2} - \frac{\varphi}{2}$ ， φ 为岩石内摩擦角。

岩石抗压强度影响因素可以归纳为两方面，即岩石自身因素及试验因素。

岩石自身因素有矿物组成、结构与构造、重力密度、风化程度及含水状况等。矿物结晶程度和粒度对于岩石抗压强度的影响也是显著的，一般来说，结晶岩石比非结晶岩石强度高，细晶岩石比粗晶岩石强度高（这是因为细晶粒总接触面积大，联结力强）。对沉积岩来说，影响或制约岩石抗压强度的因素主要有碎屑类型和粒度、胶结物类型及胶结形式等。风化作用会导致岩石

抗压强度大幅度降低（有时岩石强度降低 20 ~ 30 倍甚至更多），例如新鲜花岗岩抗压强度一般超过 100MPa，而强风化花岗岩抗压强度仅为 4MPa。当岩石浸水时，水便沿着裂隙及孔隙进入岩石内部，改变了矿物的物理状态，削弱了矿物颗粒间联结力。所以，岩石饱水状态抗压强度（湿抗压强度）较其干燥状态抗压强度小，前者与后者的比值称为软化系数。一般的讲，岩石重力密度越大，岩石抗压强度便越高，例如石灰岩重力密度从 14kN/m^3 增至 27kN/m^3 ，则其抗压强度便由 5MPa 增加到 180MPa。对于具有层理或其他结构面的岩石来说，其抗压强度往往表现出各向异性，一般而言，垂直于层理的抗压强度 R'_c 大于平行于层理的抗压强度 R''_c ，并且岩石越硬， R'_c/R''_c 比值越小，岩石越软， R'_c/R''_c 比值越大。

影响岩石抗压强度的试验因素主要有岩石试件形状和尺寸、试件加工程度、加压板与试件之间接触情况及加载速率等。一般来说，圆柱体试件的抗压强度高于棱柱体试件的抗压强度，这是由于后者在棱角上发生应力集中的缘故，这种影响称为形状效应。试件尺寸越大，则抗压强度越低，反之抗压强度越高，这种影响称为尺寸效应。由于广泛分布于岩石中的各种微观或细微裂隙是岩石受力破坏的基础，当试件尺寸越大，所包含的裂隙就越多，破坏概率便越大，抗压强度也越低。岩石抗压强度与试件断面尺寸之间关系存在如下经验公式：

$$R_c = R_{c0} \left(\frac{D_0}{D} \right)^m \quad (1-2)$$

式中 R_c ——截面直径或边长为 D 的抗压强度；

R_{c0} ——截面直径或边长为标准值 D_0 的抗压强度；

m ——变化于 0.1 ~ 0.5 之间的指数（与岩石中裂隙含量成正比）。

由于快速加载具有动力特性，加载速率越快，抗压强度越大。加压板与试件之间接触面有摩擦，则有利于轴向受力的侧向扩展，从而提高抗压强度。

1.2.2 岩石抗拉强度

岩石抗拉强度是指岩石在单轴拉伸作用下达达到破坏的极限强度，在数值上等于破坏时的最大拉应力。据试验结果，岩石抗拉强度比抗压强度要小得多，即使是最坚硬的岩石，其抗拉强度也只有 30MPa 左右。许多岩石抗拉强度均不超过 2MPa。一般情况下，岩石抗拉强度不超过其抗压强度的 1/10。

测定岩石抗拉强度的直接试验如图 1-6 所示。试验时，将试件两端用夹子固定于拉力机上，然后对试件施加轴向拉力至破坏。根据试验结果，按下式计算岩石抗拉强度：

$$R_t = \frac{P_t}{S} \quad (1-3)$$

式中 R_t ——岩石单轴抗拉强度；
 P_t ——岩石试件破坏时所加的轴向拉力；
 S ——岩石试件横断面面积。

以上直接抗拉强度试验的缺点是，试件制作困难，试件不易与拉力机固定，试件固定附近往往出现应力集中，并且试件两端面难免有弯矩产生。所以，这种试验方法不常用。

目前，常用劈裂法测定岩石抗拉强度。一般采用圆柱体或立方体试件，如图 1-7a 所示。沿着圆柱体直径方向施加集中压力 p （可以在试件上下承压板接触处各放一根钢线来实现），这样，试件将沿着受力的直径方向裂开，如图 1-7b 所示。由弹性力学理论处理试验结果，沿着施加集中压力 p 的直径方向产生近似均匀分布的水平拉应力，其平均值 σ_x 为

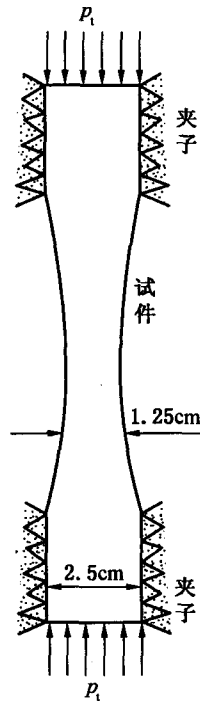


图 1-6 岩石抗拉强度试验

$$\sigma_x = \frac{2p}{\pi DL} \quad (1-4)$$

式中 p ——作用于岩石试件上的压力；
 D ——岩石试件直径；
 L ——岩石试件长度。

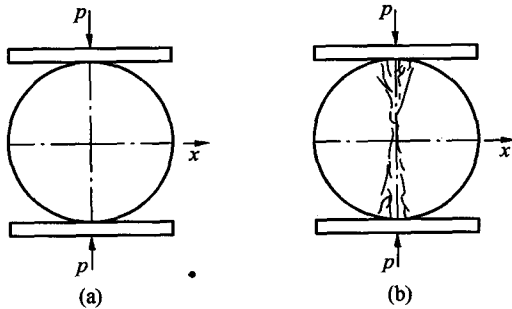


图 1-7 岩石劈裂试验

用试件破坏时的最大压力 p_{\max} 代替式 (1-4) 中的 p 即可得岩石抗拉强度 R_t 为

$$R_t = \frac{2p_{\max}}{\pi DL} \quad (1-5)$$

如果为立方体试件，则岩石抗拉强度 R_t 为

$$R_t = \frac{2p_{\max}}{\pi a^2} \quad (1-6)$$

式中 a ——立方体试件边长。

有时，也可以采用近似方法估算岩石抗拉强度 R_t 。将不规则试件（尽量取接近于球状的岩块）放到压力机上加压至破坏，采用下式计算岩石抗拉强度 R_t ：

$$R_t = \frac{p_{\max}}{V^{2/3}} \quad (1-7)$$

式中 p_{\max} ——岩石试件破坏时所加的最大压力；

V ——岩石试件体积。

由以上各式可看出，岩石抗拉强度与抗压强度之间存在线性关系，两者关系可以近似表示为

$$R_c = CR_t \quad (1-8)$$

式中 C ——岩石类型系数，一般变化于 4~10 之间。

1.2.3 岩石抗剪强度

岩石抗剪强度是指岩石抵抗剪切破坏或滑动的极限强度，以岩石发生剪切破坏或滑动时的极限应力表示。岩石抗剪强度的力学指标为内聚力 C 和内摩擦角 φ ，通过各种岩石剪切试验进行测定。岩石抗剪强度划分为抗剪断强度、抗剪强度及抗切强度 3 种类型。

1.2.3.1 抗剪断强度

抗剪断强度是在垂直压力 p 作用下，在水平方向施加剪切力 T ，直到岩石试件被剪断为止，如图 1-8a 所示。此时，剪切面上正应力 σ 及剪应力 τ 分别为

$$\begin{cases} \sigma = \frac{P}{S} \\ \tau = \frac{T}{S} \end{cases} \quad (1-9)$$

式中 p 、 T ——试件剪断时所施加的最大垂直压力、最大水平剪切力；

S ——剪切面面积。

由莫尔-库仑强度理论可知，岩石抗剪断强度 τ_f 为

$$\tau_f = \sigma \tan \varphi + C \quad (1-10)$$

1.2.3.2 抗剪强度

抗剪强度是岩石试件预先具有剪切面时，在垂直压力 p 作用下，在水平方向施加剪切力 T ，直到试件发生剪切滑动为止，如图 1-8b 所示。此时，剪切面上正应力 σ 及剪应力 τ 计算公式同式 (1-9)。

由莫尔-库仑强度理论可知，岩石抗剪强度 τ_f 为

$$\tau_f = \sigma \tan \varphi \quad (1-11)$$

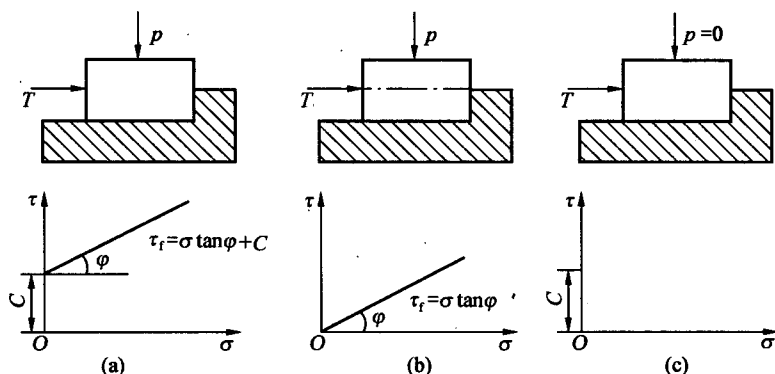


图 1-8 岩石试件剪切试验示意图

岩石抗剪强度大大低于抗剪断强度。

1.2.3.3 抗切强度

抗切强度是没有垂直压力 p 作用条件下，在水平方向施加剪切力 T 直到岩石试件剪断为止，如图 1-8c 所示。此时，剪切面上无正应力 σ ，仅有的剪应力 τ 为

$$\tau = \frac{T}{S} \quad (1-12)$$

式中 T ——试件剪断时所施加的最大水平剪切力。

由莫尔-库仑强度理论可知，岩石抗切强度 τ_f 为

$$\tau_f = C \quad (1-13)$$

此外，可以利用岩石抗剪强度试验确定岩体中软弱结构面的抗剪强度。测定岩石抗剪断强度、抗剪强度的试验分为现场试验及室内试验两大类。现场试验主要为直接剪切试验，有时也作三轴强度试验，室内试验常用直接剪切仪、棱形剪切仪及三轴压缩仪等。

1.3 岩石在单轴压力作用下的变形特征

1.3.1 变形阶段

图 1-9 所示为单轴压缩试验所得到的岩石变形应力-应变