

山东省教育委员会“九五”立项教材

矿山岩体力学

Mines
Rockmass
Mechanics

高延法 编 著
张庆松

中国矿业大学出版社

山东省教育委员会“九五”立项教材

矿山岩体力学

高延法 张庆松 编著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书系统地论述了矿山岩体力学的理论及应用问题。全书共分9章,内容包括:岩石的强度实验;岩石强度理论与岩体损伤力学;岩石本构关系;非连续岩体的力学性能;岩石力学数值分析方法与位移反分析;矿山岩体结构特征与可靠度分析;矿山井巷稳定性分析;采场围岩的变形破坏规律;矿山岩体测试技术与模拟实验。

本书可作为采矿、地质、矿建、冶金、交通、岩土工程、水利水电和地下建筑等专业的研究生教材,亦可供从事采矿工程和岩土工程研究的高等院校、科研院所和工程一线的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

矿山岩体力学/高延法等编著. —徐州:中国矿业大学出版社,2000.11(2005.7重印)

ISBN 7 - 81070 - 256 - 4

I. 矿… I. 高… I. 岩体力学—高等学校—教材
IV. TU45

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第58593号

- 书 名 矿山岩体力学
编 著 者 高延法等
责任编辑 陈玉和
责任校对 社锦芝
出版发行 中国矿业大学出版社
(江苏省徐州市中国矿业大学内,邮编 221008)
网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com
排 版 中国矿业大学出版社排版中心
印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司
经 销 新华书店
开 本 787×1092 1/16 印张 13 字数 330 千字
版次印次 2000年11月第1版 2005年7月第3次印刷
印 数 2001~3000册
定 价 25.00元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

岩石力学与工程科学研究近年来发展迅速。随着岩土工程建设规模的不断扩大,计算机和信息科学的飞速发展以及向岩石力学领域的不断渗透,岩石力学实验方法、本构关系、数值分析以及工程技术中的新理论和新方法不断涌现,从而促进了岩石力学的发展。

矿山岩体力学是岩石力学的一个重要组成部分,现在尚没有关于矿山岩体力学内容的明确界定。但可以认为,矿山岩体力学应该以岩石力学理论作为自己的理论基础,以矿山开采过程中的井巷、采场围岩稳定性与控制以及矿山安全所涉及的岩石力学问题为研究对象,由特定的研究内容,特定的稳定性控制要求和独具特色的工程理论及方法,构成矿山岩体力学的理论体系。矿山岩体力学有着众多的研究课题和丰富的理论内容,如井巷稳定性控制、采场底板变形规律、采场顶板运动与控制、覆岩变形破坏与结构演变、岩层与地表移动规律及控制、矿山动力现象与防治等。

矿山岩体力学是采矿学科硕士研究生的一门专业基础课。本教材是山东省教委1998年度“高等教育面向21世纪教学内容和课程体系改革计划”项目。本书第五章的第一节至第三节、第六章和第九章由张庆松编写,其余由高延法编写。

作者感谢山东省教委和山东科技大学教务处对本书出版给予的支持和资助。中国矿业大学出版社和责任编辑陈玉和博士为本书出版付出了辛勤努力,山东科技大学资环学院牛学良、谢兴华等为本书出版做出了贡献,在此表示感谢。恳切希望广大读者对本书提出批评指正。

作 者

2000年11月

目 录

前 言

第一章 岩石力学试验	1
§ 1.1 简单应力状态下的岩石力学试验	1
§ 1.2 常规三轴压力试验与围压效应	6
§ 1.3 真三轴压力试验与中间主应力效应	9
§ 1.4 岩石压缩变形破坏过程.....	13
§ 1.5 岩石细观结构模型与压缩破坏机理.....	17
§ 1.6 岩石的应力应变关系.....	20
第二章 岩石强度理论与岩体损伤力学	22
§ 2.1 岩石强度准则.....	22
§ 2.2 岩石强度极限曲面回归分析.....	26
§ 2.3 岩石断裂力学.....	28
§ 2.4 格林菲斯强度理论.....	31
§ 2.5 损伤力学基础.....	33
§ 2.6 依据裂纹应力场的岩体损伤理论.....	36
第三章 岩石本构理论	42
§ 3.1 岩石非线性弹性本构理论.....	42
§ 3.2 岩石弹塑性本构理论.....	45
§ 3.3 岩石粘弹性本构理论.....	52
§ 3.4 岩石内时粘弹塑性理论.....	61
第四章 非连续岩体的力学性能	64
§ 4.1 岩体结构面的类型.....	64
§ 4.2 岩体结构面几何参数分布.....	67
§ 4.3 岩体结构面的力学性质.....	70
§ 4.4 软弱夹层的力学特性.....	74
§ 4.5 裂隙岩体强度分析.....	82
§ 4.6 岩体结构面网络的计算机模拟.....	85
第五章 岩石力学数值分析方法与位移反分析	87
§ 5.1 岩石力学的有限单元法.....	87

§ 5.2	岩石力学的边界元法	100
§ 5.3	岩石力学的离散元法	107
§ 5.4	位移反分析的基本理论	114
§ 5.5	线弹性位移反分析问题的有限元数值逆算法	117
§ 5.6	位移反分析问题正算法的工程应用	118
第六章	矿山岩体结构特征与可靠度分析	123
§ 6.1	矿山岩体结构特征	123
§ 6.2	可靠性分析理论	124
§ 6.3	可靠性分析中的常用概率分布及其选择方法	130
§ 6.4	可靠性分析的动态模型	134
§ 6.5	矿山岩土工程可靠性分析与设计	138
第七章	矿山井巷稳定性分析	146
§ 7.1	工程岩体分类	146
§ 7.2	巷道围岩应力场	152
§ 7.3	软岩巷道支护理论与技术	155
§ 7.4	深井巷道稳定性控制	158
第八章	采场围岩的变形破坏规律	161
§ 8.1	采场底板变形破坏规律	161
§ 8.2	采场覆岩变形破坏规律	166
§ 8.3	开采沉陷控制方法	171
第九章	矿山岩体测试技术与模拟实验	175
§ 9.1	矿山岩层移动变形监测方法	175
§ 9.2	地应力测量方法	183
§ 9.3	岩体渗透性测量方法	187
§ 9.4	相似材料模拟试验理论	191
§ 9.5	相似材料模拟实验方法	196
参考文献	201

第一章 岩石力学试验

§ 1.1 简单应力状态下的岩石力学试验

一、岩石单轴压缩试验

岩石单轴压缩试验是最简单的岩石力学试验,通常岩石试件做成棱柱体或圆柱体,要求圆柱体高径比大于 2~3,试件端面光洁、平整,两端面平行且垂直于轴线。岩石的单轴抗压强度和弹性模量等力学参数取决于岩石的组成结构、矿物颗粒性质以及微观裂隙等。虽然单轴压缩是最简单的强度实验,但因与许多因素相关,岩石试件内的应力分布,破坏方式和强度值都会受到影响。这些因素包括:① 压力试验机的刚性;② 承压板与试件端面的摩擦;③ 试件的几何形态(形状、高径比和尺寸);④ 加载速度。

1. 刚性压力机的原理

所谓刚性压力机是相对于一般普通压力机而言的。一般压力试验机其整体结构刚度较小,在进行岩石压缩试验时,当载荷达到岩石的强度极限后,由于岩石试件抗变形能力降低,而压力试验机因刚度小所积累的弹性变形能较大,这种弹性变形能会发生瞬时释放,使岩石试件在极短时间内发生类似于爆炸性的崩解破坏。当刚性压力试验机的整体结构刚度较大时,试验过程中达到岩石强度极限后,压力机释放出的弹性变形能较小,岩石试件不会瞬时破坏,试验能够继续平稳进行,从而实验测试出岩石达到强度极限后的应力应变关系,获得岩石的全应力应变曲线。

在进行岩石压力试验时,压力达到岩石的单轴抗压强度极限后,岩石试件的稳定性分析如下。

刚度 K 定义为:

$$K = \frac{P}{\delta} \quad (1-1)$$

式中 P ——作用力, kN;

δ ——在压力 P 作用下沿 P 作用方向的位移, cm;

K ——刚度, MPa·cm。

可见刚度即是引起单位位移所需的力。对于岩石试件来说,由弹性定律及应力应变定义可得:

$$K = \frac{EF}{l} \quad (1-2)$$

式中 E ——材料的弹性模量;

F, l ——试件的截面积和长度。

压力机的整体刚度用 K_m 表示,岩石试件的刚度用 K_r 表示,例如某种砂岩的弹性模量 $E = 2.4 \times 10^4$ MPa,则长方体试件(5 cm×5 cm×10 cm)的刚度为 $K_r = 6 \times 10^4$ MPa·cm。

如图 1.1 所示,在岩石压力试验时,压力机和岩石试件构成一个力学系统,压力机对岩石

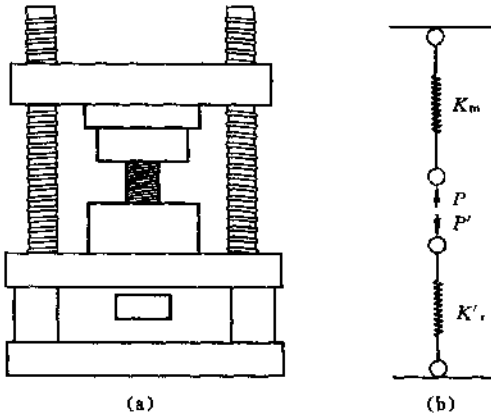


图 1.1 压力机与岩石试件相互作用示意图

试件的作用力为载荷 P ，则岩石试件也对压力机有一反作用力 P' 。

压力机和岩石的压力位移曲线如图 1.2。图中岩石的压力位移曲线为 $OA \rightarrow ABC$ ，压力机的压力位移曲线为 $OD \rightarrow DEF$ 。设岩石达到强度极限之前的变形刚度为 K_r ，达到强度极限之后的变形刚度为 K'_r ，压力机的刚度为 K_m 。

在岩石的整个受力变形过程中，压力机对岩石的压力 P 和岩石对压力机的反作用力 P' ，是一对作用力与反作用力，大小相等，方向相反。

当岩石试件达到强度极限状态后，压力机与试件处于暂时的平衡状态，当有一扰动力 ΔP 作用时，将打破原有平衡状态，如图 1.2 所示。

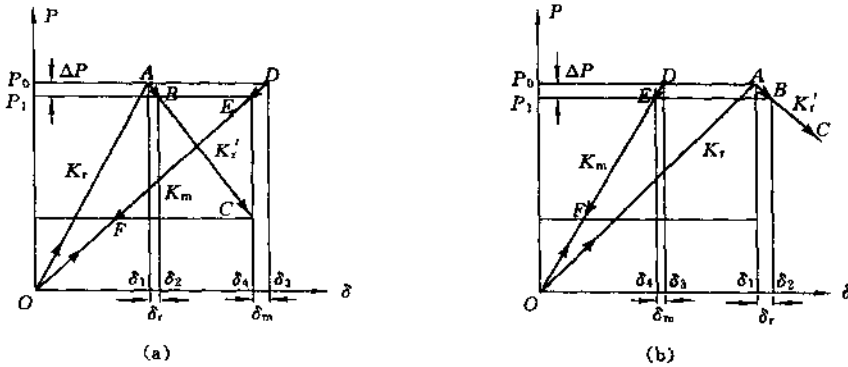


图 1.2 压力与位移关系曲线

由于岩石试件已达到其强度极限，所以一旦受到扰动力 ΔP 的作用，岩石试件承载能力由 P_0 下降为 $P_1 = P_0 - \Delta P$ ，岩石试件的变形则由 δ_1 增加到 $\delta_2 = \delta_1 + \delta_r$ ， $\delta_r = \Delta P / K'_r$ 。在岩石压力位移曲线上，其状态由曲线上的 A 点移动至 B 点。

对于压力机来说，在扰动力 ΔP 作用下，岩石的承载力下降了 ΔP ，则岩石反作用于压力机上的压力 P' 也必然下降 ΔP ，则岩石作用于压力机上的压力为 $P_1 = P_0 - \Delta P$ 。由于作用力的下降，则压力机的压缩位移要减少 δ_m ，即由 δ_3 减少到 $\delta_4 = \delta_3 - \delta_m$ ， $\delta_m = \Delta P / K_m$ 。在压力机位移曲线上，其状态由 D 点移动至 E 点。即有：

	压力 P	位移 δ	状态
岩石试件	$P_0 \rightarrow P_1 = P_0 - \Delta P$	$\delta_1 \rightarrow \delta_1 + \Delta\delta_r \quad \delta_r = \Delta P / K'_r$	$A \rightarrow B$
压力机	$P_0 \rightarrow P_1 = P_0 - \Delta P$	$\delta_3 \rightarrow \delta_3 - \Delta\delta_m \quad \delta_m = \Delta P / K_m$	$D \rightarrow E$

岩石试件达到强度极限状态后，是否变形稳定，其平衡条件应该是：

$$\delta_m \leq \delta_r \quad (1-3)$$

即压力机在扰动压力 ΔP 作用下所产生的位移值 δ_m ，要小于或等于岩石试件在扰动压力 ΔP

作用下自身所产生的压缩位移 δ_r 。

这是因为,压力机的位移 δ_m 是对岩石试件的压缩位移,如果 $\delta_m > \delta_r$,则岩石试件会继续压缩变形,岩石试件的承载能力继续下降,则岩石试件的变形会因扰动压力 ΔP 的作用一直发展下去,其过程很短暂,表现为岩石瞬时破坏。当 $\delta_m \leq \delta_r$ 时,即压力机在 ΔP 作用下对岩石的压缩位移小于岩石试件自身的压缩位移,则岩石的变形不会因 ΔP 的作用发展下去,所以岩石会处于稳定变形状态。

由(1-3)式和(1-1)式可以得出在岩石强度极限后,岩石稳定变形的条件为:

$$K_m \geq K', \quad (1-4)$$

即压力机的变形刚度要大于岩石破坏后的变形刚度。

2. 试件的破坏形态

岩石试件单轴受压时,由于受到多种因素的干扰,真实的破裂形式不太明确,常常观察到的是剪切破坏、锥形破坏和劈裂破坏,如图 1.3 所示。对试件破坏形态影响最大的是端摩擦约束效应,对于比较坚硬的脆性岩石,当采取减少端面摩擦约束的措施时,出现纵向劈裂破坏。

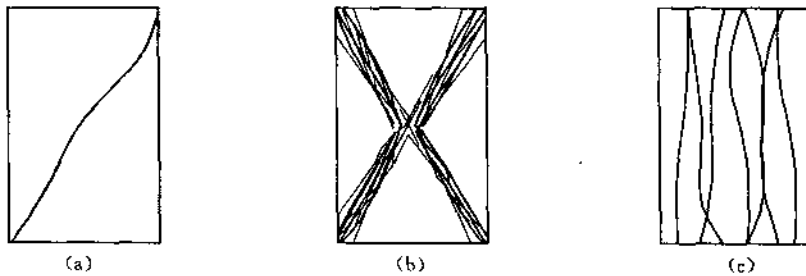


图 1.3 岩石在单轴压缩时的破坏形态
(a) 剪切破坏 (b) 锥形破坏 (c) 劈裂破坏

对单轴压缩时试件的破坏形式可以分为三类。

(1) 由靠近试件表面中间平行于加载方向发生许多裂缝向端面扩张,并伸入试件中心而破裂,试样两端形成锥体状。这种破裂形式在端面存在约束时产生。

(2) 平行于加载方向出现一条或多条主要裂纹,裂纹发展至试件两端形成劈裂破坏形式。这种破坏方式一般在端面摩擦约束消除后出现。

(3) 沿单向倾斜方向剪切。这种破坏方式可能是由于承压板滚动或相对承压板之间的侧向移动引起的。

试验条件影响岩石试件的破坏方式,那么同一种岩石试件会出现不同的破坏方式就不足为奇了。根据已有实验资料分析,劈裂可以说是一般坚硬脆性岩石的固有破坏形式。

3. 试件端面摩擦约束效应

如上所述,试件的端部效应对试件的破坏方式有较大影响。究其原因,是由于端面摩擦约束效应左右了试件中的应力分布。当把单轴抗压强度 σ_0 作为一个强度准则应用时,就必须尽量排除外部因素对试件应力场的干扰,从而获得均匀的单向压应力场,以得到真实的岩石单轴抗压强度和破坏方式。试件端面效应主要表现为两个方面:① 承压板变形对试件端面周边的约束。由于试验机承压板大于试件端面,加载时承压板因受力面变形,对试件的周边产生横向约束;同时承压板的变形还会改变对试件作用的纵向应力分布。② 端面摩擦。试件发生横向变

形时,承压板对试件端面产生摩擦力,从而影响试件的应力分布。

为减少、消除试件端面摩擦约束,做过多种尝试。由于通常承压板的刚度比试件大,端面效应主要是摩擦力的作用;可以用石墨、流化钼以及其他一些固体润滑物减轻摩擦阻力,或在端面垫以纸、铅等延性材料,容许试件侧面膨胀时,应当注意润滑物侵入试件引起径向拉应力,促使试件产生劈裂的问题;可选用与试件端面相同、侧面膨胀相同(即泊松比 ν /弹性模量 E 值相等)的金属块加于试件两端,以消除端面效应,那么在弹性阶段端部效应就不出现。多数岩石都可找到适当的金属。这是一种十分巧妙而有效的方法。Hawkes 和 Mellor、Peng 都曾研究过减小或消除端部效应的问题。M. S. Paterson 把这些方法归纳为如下几点:① 在试件端面与承压板之间嵌放适宜的薄层材料,如二硫化钼,附加有滑石的硬酯酸、聚四氟乙烯、硬纸板、金属薄板等;② 使承压板与试件性质更好地匹配;③ 采用特殊的试件形状。

在通常的单轴压缩试验中,一般说来,端部效应总是很难完全消除的。这样,试件中的应力分布就不是简单的压应力场。因而分析计算试件中的真实应力场,对于岩石破坏机理研究和获得更可靠准确的岩石单轴抗压强度都是十分必要的。

Hawkes 和 Mellor 进行了端部采用完全径向约束的单轴压缩试件内弹性应力分布的分析,计算结果如图 1.4,图中等值线表示所受应力的相对强度,它是以带有闭合裂隙的修正的格林菲斯(Griffith)破坏准则求得的,阴影区为最强应力区。

二、岩石单轴拉伸实验

岩石单轴抗拉强度 σ_t 也是岩石的一个重要强度指标。由于抗拉强度远小于抗压强度,所以岩体中一旦出现拉应力区,往往该区域就会最先破坏。岩石抗拉强度室内测试方法分为两类:一类是直接法;另一类是间接法。

1. 直接法

应用直接拉伸的方法测定岩石单轴抗拉强度,其主要困难在于试件如何夹持和如何保证平行于试件轴向施加拉伸荷载。既要有足够的力夹牢试件,又不能损伤试件表面。如果加载方向不能与试件轴向严格平行,就会产生弯矩作用,试件出现弯曲和应力集中。为克服上述困难,可以把岩石试件的端部用环氧树脂直接粘到与试件横截面相同的钢端块上,钢端块与柔性缆索相连,通过缆索施加拉伸荷载,从而使传到试件上的弯曲应力减到最小。为了同样的目的,有人使用球形接头安装加力杆件。南非的 Hoek 曾把岩石试件加工成特殊形状,即中部细两端粗(与金属的单轴拉伸试件类似),用一般的楔形夹持器夹持这种试件试验,得到了令人满意的结果。

2. 间接法

岩石单轴抗拉强度的直接法测试,试验技术复杂,要求高,因而各种间接测试方法被人们所应用。这类方法包括巴西法、弯曲法、水压致裂法以及各种与巴西法类似的测试方法。运用各种间接测试方法测定岩石的单轴抗拉强度,一般是根据弹性力学理论,求出试件内的应力分

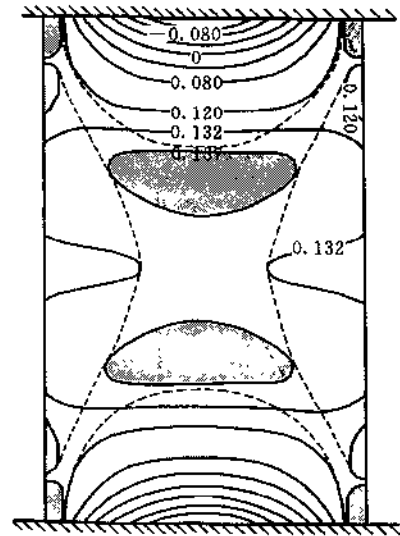


图 1.4 试件端部完全径向约束时的应力分布

布,再由试验测定的极限载荷求岩石试件的极限应力作为岩石的抗拉强度,如巴西法和水压致裂法。弯曲法的应力计算中则进一步应用了材料力学中关于梁的弯曲变形的基本假设。这样,各种间接法都存在一定程度的应力集中、应力梯度、应力状态和局部破坏等问题。这些都是值得进一步探讨的课题。

巴西法(即劈裂法)简单易行,实验结果最接近直接法而获得广泛应用。为保证巴西法试验的正确性,要求圆盘的破坏从试件中心开始,并沿加载方向发展,即破裂面平行于加载方向。用修正的格林菲斯准则分析巴西法试验的有效性,试件的破坏必须从圆盘中心开始,这种条件只有通过加载点垫卡片纸和木材,用以分布荷载才能达到。Fairhurst 根据格林菲斯理论分析了巴西法试验得出结论:① 加荷垫条角度(或宽度)较小时, σ_t 的计算公式为:

$$\sigma_t = -F/(\pi r_0 t) \quad (1-5)$$

式中 F ——载荷;

r_0, t ——圆盘半径与厚度。

应用公式(1-5)求出的 σ_t 偏小。② 这样测定抗拉强度取决于窄条的角度,抗拉强度对窄条的依赖性随压缩—拉伸强度比值的增加而减小。③ 较大窄条角度,临界受拉区就较大,则抗拉强度值更能代表整体试件的特征,而不是一个点。



图 1.5 巴西法测试岩石抗拉强度示意图
(a) 劈裂拉伸(巴西法试验) (b) 四点挠曲

应用梁的弯曲法测出的强度值过大,这是因为存在应力梯度和最大应力区过小造成的。

加载速率和试件尺寸同样也影响单轴抗拉强度的测定值。在巴西法试验中,随加载速率提高,强度增大;试件尺寸增加,则强度降低。

三、岩石的抗剪强度试验

类同于金属材料,对岩石也提出了抗剪强度的概念。尽管常规三轴压力试验中,即使围压很小时岩石也表现出剪切破坏的性质,但是在简单的纯剪应力状态下,岩石是否存在剪切破坏,不仅没有可靠的肯定性的试验依据,与此相反,一般较坚硬的脆性岩石却表现出拉伸破坏的性质。抗剪强度的概念有四种:

- (1) 纯剪应力状态下的抗剪强度。
- (2) 在垂直破坏面的应力等于零的条件下破坏时的应力。
- (3) 固体力学中取决于施加应力的剪力图解。
- (4) 摩尔应力包络线。

扭转试验时,试件处于纯剪应力状态,测出的抗剪强度是第(1)种概念的强度。大量试验表明,扭转时试件的破坏面为螺旋形,破坏面与剪应力方向成 45° 角,破坏面的法线方向为拉应力方向。因此,试验中岩石的破坏实际上并不是剪切破坏,而是在拉、压两个应力作用下的拉

伸破坏。这一试验事实对于我们认识岩石在脆性域内的破坏机理和强度性质具有重要意义。

岩石在纯剪应力状态下的破坏是拉伸破坏。这一事实说明,在围压为零时(围压不为零时,岩石的破坏机理有变化),岩石在纯剪应力状态下的破坏是拉伸型,而不是剪切型。这样,“岩石剪切强度”的概念因无实验事实的支持,其意义也就丧失了。

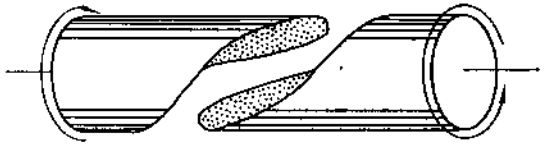


图 1.6 岩石扭转破坏形态

其他的剪切试验方法还有:冲剪、变角板剪切、水平推剪、围压下的冲剪和常规三轴等。各种试验方法得出的抗剪强度值各不相同。冲剪、变角板剪切和水平推剪等,形式上岩石的宏观破裂面是剪应力分布面,但这是由于实验强制地只允许岩石在这一断而可产生相对剪切位移,而这些试验中,对岩石内部的应力分布状态、细观破坏机理和破坏发展过程并不十分清楚,所以并没有可靠的证据证明岩石是剪切破坏。

四、岩石强度指标的相关性

实验表明,岩石的各种强度指标往往是相关的。一种强度值大,则其余的强度值也会较大,这是由岩石的物质组成和结构所决定的。研究岩石强度的相关性,对于根据一种强度参数估算其它强度参数是很有意义的。原苏联的 Н. В. Мельников 等利用统计方法研究了岩石强度性质指标的相关性。他收集了大量岩石强度指标的实测资料,统计表明,岩石强度指标具有相当密切的相关关系。对于火成岩、沉积岩和变质岩来说,它们的相关方程是相近的。他得出抗压强度 σ_c 、抗拉强度 σ_t 、抗剪强度 τ_0 和粘结力 C 的相关关系如下:

$$\begin{aligned} \sigma_c &= 10\sigma_t & (\sigma_t \text{ 的系数变化范围为 } 6 \sim 20) \\ \sigma_c &= 5\tau_0 & (\tau_0 \text{ 的系数变化范围为 } 2.5 \sim 7.5) \\ \tau_0 &= 1.8\sigma_t & (\sigma_t \text{ 的系数变化范围为 } 0.9 \sim 3.0) \\ \tau_0 &= 0.7C & (C \text{ 的系数变化范围为 } 0.3 \sim 1.1) \end{aligned}$$

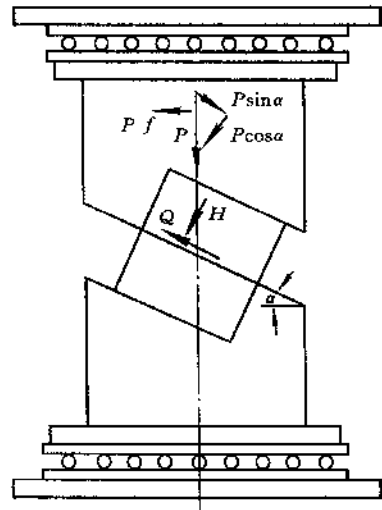


图 1.7 岩石抗剪断实验

§ 1.2 常规三轴压力试验与围压效应

自从 1911 年 Von. Karman 首创三轴压力试验以来,岩石的常规三轴压力试验得到了长足发展,研究已经十分深入。多年来,常规三轴压力试验一直是认识岩石在复杂应力状态下力学性质的主要手段,也是建立强度理论的主要试验依据。像摩尔-库仑强度理论中的强度包络线就是由常规三轴压力实验成果绘出的。实际岩体工程中,特别是在地下岩体工程中,岩石一般处于三向应力状态。另外,岩石与金属在力学性质上的一个重要区别就在于岩石对静水压力的敏感性。所以,三轴压力岩石力学试验具有特别重要的意义。

一、试验设备与方法

常规三轴压力试验,就是岩石试件受三向压应力作用,而且, $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$, 即两个较小的主

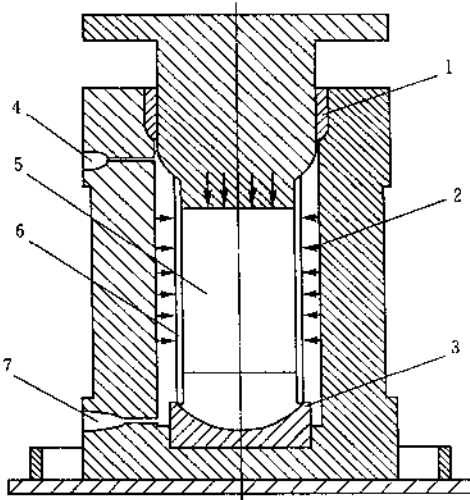


图 1.8 常规三轴压力试验机结构示意图
1—密封装置;2—侧压力;3—球型底座;4——出口;
5—岩石试件;6—乳胶隔离膜;7——进油口

部的轴向应变和周边应变(见图 1.9)。

轴向压力 σ_1 由压力机施加,侧向压力 $\sigma_2 = \sigma_3$ 由另一套液压系统加压,两套加压系统是独立的。

国内常见的岩石三轴压力机有:① 国产 TYX—500 型岩石三轴压力机,可施加轴压最大 5 MN,围压最大 150 MPa;② 美国 MTS 公司的岩石伺服试验机,可施加轴压 4.5 MN,围压最大 150 MPa。

二、围压效应

大理岩在室温下进行的三轴压力试验,如图 1.10 所示。由此可以研究岩石随围压的增大由脆性向延性转变的特性,随围压的增大,大理岩的应力应变曲线出现三种重要效应:当围压超过 20 MPa 时,该大理岩由脆性转变为延性;围压越高,应力应变曲线的总水平也变得较高;应力应变曲线上的应变值有持续增大的趋势。

Von. Karman 用铜套保护的 Carrasa 大理岩三轴试验结果如图 1.11 所示。

根据已有岩石三轴压缩试验结果,围压效应可以总结如下:

(1) 岩石随围压的增加,延性变形逐渐增大,对于一定的岩石,当围压达到一定值后,岩石

应力相等。与单轴压缩试验相比,常规三轴压力试验增加了围岩 σ_2, σ_3 的作用。在 σ_2, σ_3 作用下,岩石的强度显著提高,所以进行岩石常规三轴试验,需要三轴压力室和大吨位的压力试验机。常规三轴压力试验的结构如图 1.8 所示,三轴压力室的结构如图 1.9 所示。

三轴试验是用圆柱体试件进行的,试件的制备方法与单轴压缩试验的相同。试件放在压力室内,在试件的圆柱形侧面施加液压 σ_3 。通常要用橡皮膜将试件与施加围岩的液体(一般用油)隔开。轴向应力 σ_1 由穿过三轴室顶部衬套的活塞,通过淬过火的钢制端面帽盖施加于试件之上。孔隙压力可以通过一个管道施加和进行测量,该管道一般穿过三轴室底部与试件相联接。通过装在三轴室内的差动变压器可以监测试件的轴向变形。通过贴在试件表面的电阻应变片,可以测量局

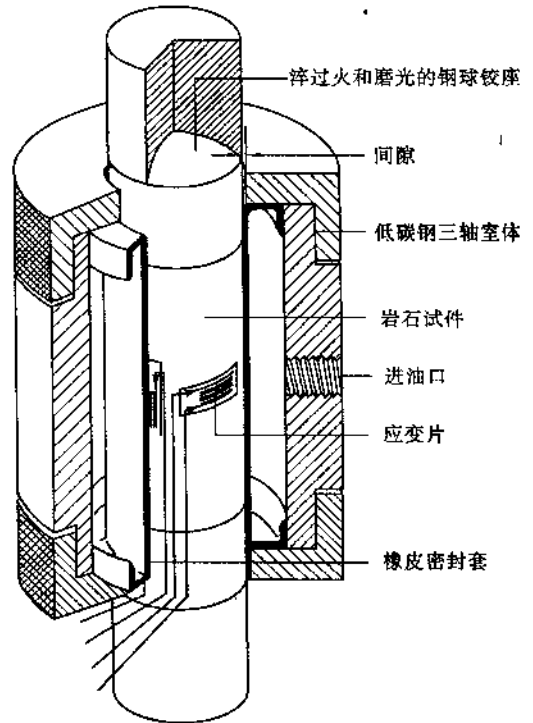


图 1.9 三轴压力机结构示意图

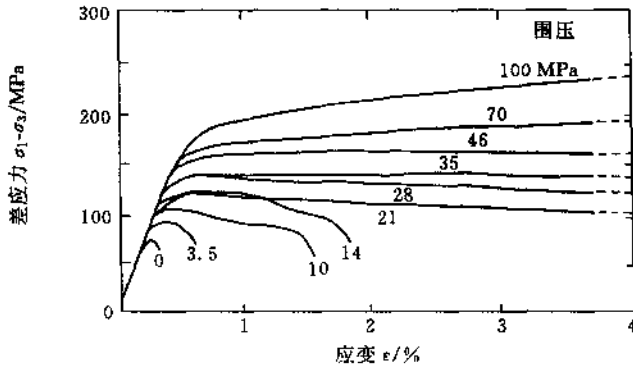


图 1.10 大理岩三轴压缩试验应力应变曲线

由线弹性材料转变为弹塑性材料。

(2) 岩石越坚硬, 则脆性—延性转变所需的围压值越高。

(3) 随围压的增加, 岩石强度(σ_{1c})增大。

(4) 岩石试件的破坏形态, 由围压为零时的劈裂破坏, 随围压的增大而逐步转变为以剪切面形式的剪切破坏、以剪切带形式的剪切破坏, 以至演变为延性变形。

(5) 微观观测以及声发射和弹性波速等测试表明, 在脆性—延性转变前后, 岩石都有微破裂发生。

从脆性破裂到延性流动, 岩石随围压而转变的变形破坏方式如图 1.12 所示。

三、岩石变形破坏的围压效应之物理力学机理

Paterson 总结解释了岩石在围压作用下脆性—延性转变的物理力学机理。他首先论述了延性性态的各种形变过程, 以及与这些活动过程有关的一些几何约束条件。形变过程一般分为下列几类。

(1) 破裂流动 这是一个仅限于岩石形变理论的概念。它描述了因分散的破裂使材料分成碎片, 以及这些碎片的相对运动联合造成的永久性应变。破裂流动的重要性取决于两个因素: ① 滑动部分之间的摩擦; ② 孔隙度发生变化和与碎片重新分布有关的试件体积的变化。因为围压对作用于滑动面或裂隙上的法向力有影响, 从而也影响到摩擦力, 因此破裂流动的阻力对压力变化反应灵敏。

(2) 晶体塑性 这是指结晶材料中由于其晶粒内部的滑动或双晶作用而产生的永久变形。如果原始孔隙崩塌所造成的伴随效应可以忽略不计, 那么与破裂流动相反, 晶体塑性主要是岩石发生体积保持常量时的形变, 而且它与围压的关系很轻微。

(3) 扩散流动 这是指物质从物体的某一部分向另一部分扩散所引起的该物体的形状变化, 而不管其扩展途径。

围压效应的物理力学机理可以概述如下:

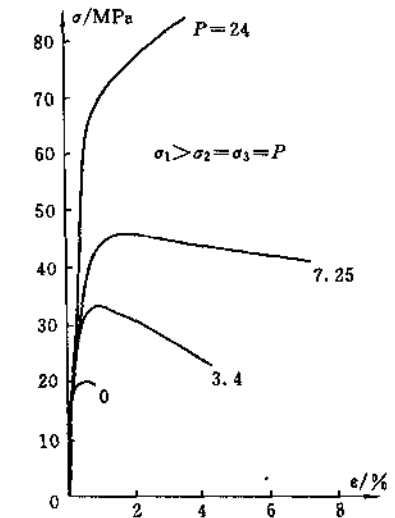


图 1.11 Carrara 大理岩三轴试验结果

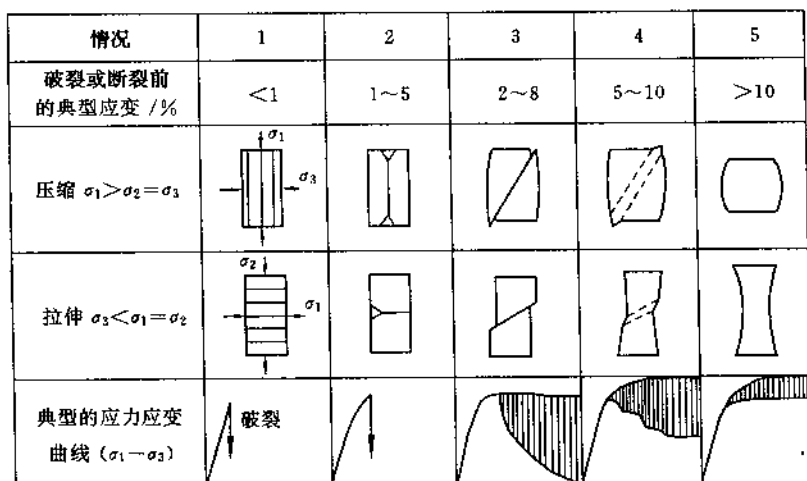


图 1.12 从脆性破裂到延性流动岩石力学的性质转变示意

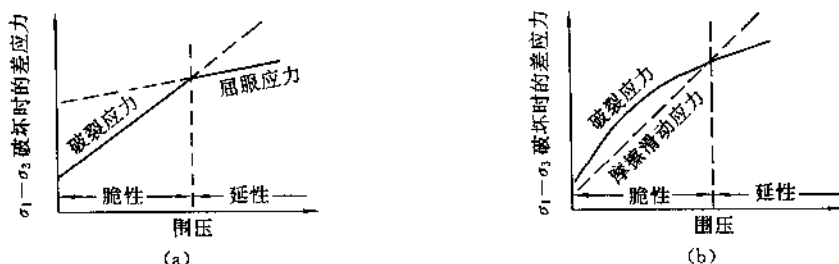


图 1.13 脆性—延性转变的简单模式

由于在延性范围内有各种潜在的形变机制，可以预料到脆性—延性转变的特点是多种多样的。可以用简单的图解来说明这种转变的两种极端情况，即可以设想在较低温度下的延性范围内的形变全部是晶体塑性形变，或全部是碎裂形变：

(1) 简单的塑性流动(图 1.13a) 当围压增大时，导致脆性破裂的差应力也显著增大。另一方面，塑性变形的屈服应力对围压的作用并不敏感。所以围压增大时，脆性—延性的转变是上述两种破坏倾向的交叉。

(2) 简单的碎裂流动(图 1.13b) 假定破裂应力趋向对压力依赖性不大；或比摩擦滑动应力具有更强的非线性，则就会发生两特性曲线的交叉，从而发生脆性—延性转变。

§ 1.3 真三轴压力试验与中间主应力效应

岩石一般处于三向应力状态，岩石的变形和破坏是在复杂应力状态下实现的。一般应力状态下岩石强度理论研究是岩石力学的基本课题之一。

常规三轴压力试验使人们认识了围压对岩石变形和破坏的影响。这种试验中，三轴压力中的中间主应力 σ_2 和最小主应力 σ_3 是相等的。不等压三轴应力状态下的岩石力学性质中中间主应力 σ_2 对岩石变形强度特性的影响，一直是人们所探索的问题。为此曾进行过各种一般应力

状态下的强度试验：在围压下空心圆柱体的扭转；在压力下的冲孔试验；在压力下的巴西法试验。在这些实验中，要对岩石作线弹性变形的假设，应用线弹性理论计算应力。由于在一般三轴应力状态下的应力应变关系是未知的，且试验中应力分布是非均匀的，应力梯度影响岩石的变形强度性质，所以，一般试验结果难以解释。

一般说来，用三对应力垂直于正六面体的表面加力可以得到均匀三轴应力。若通过钢制垫块来施加压力，则垫块与试件之间的摩擦力和试件端部的应力集中会影响试验结果，早期的许多三轴试验就是这样进行的。Hojem 和 Cook 则对加载方法作了一些改进，用两对钢板扁千斤顶独立地施加最小压力和中间压力。茂木找到了一种很好的加压方法：用液压施加最小应力，用横向固体活塞施加中间压力，如图 1.14 所示。茂木的方法其最突出优点是：最小主应力用液压，使得应力均匀，精度高，易于控制。因最小主应力比中间主应力对岩石的力学性质影响大得多，所以最小应力均匀与高精度是十分重要的。另外，用液压施加最小主应力，就有了进行应变测量的侧面。茂木的这一加压方式为后来的许多真三轴压力机所采用。他设计的三轴压力机也作为定型产品为人们所肯定。

一、真三轴压力仪及试验技术

(一) 真三轴压力仪

继茂木、Hojem 和 Cook 等研制出真三轴压力仪之后，许多学者相继研制出了各具特点的真三轴压力仪。李小春系统地收集和分析了这些真三轴压力仪的性能和特点。真三轴压力仪按其框架结构特点分为：整体固定框架式和活动框架式两类。前者的三个加压系统相互牵引，存在试件端面易出现剪应力和两相对面的应力不对称性问题；后者的框架结构稍复杂，但克服了这两个问题，并省去了一半千斤顶。按加载方式可分为刚性加载和柔性加载两类（柔性加载又有：压力枕、充液胶囊和直接用液压三种方法）。如前所述，三个方向刚性加载，存在端部摩擦和应力集中等问题，而直接用液压加载则具有突出优点。近年来中国和日本研制的真三轴压力仪情况如表 1-1 所列。

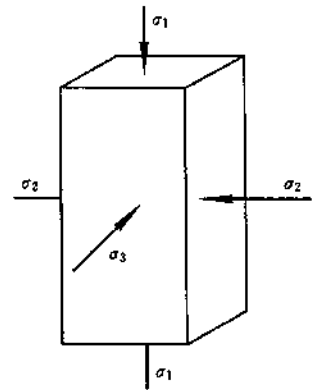


图 1.14 真三轴压力试验的加压方式

表 1-1 真三轴压力仪性能表

研 制 单 位	研制时间	主要技术指标			加载控制及方式	
		MPa		试体尺寸/cm×cm×cm		
日本东京大学	1971	4 000	650	650	1.5×1.5×30	手动、 σ_2 液压
	1981	280	60	60	5×5×10	手动、 σ_3 液压
日本通产省地质调查队	1980	800	150	150	5×5×10	电液伺服控制、 σ_3 液压
云南地震局	1986	1 000	25	25	7.1×7.1×14.2	电液或手动、 σ_3 液压囊
湖南省水利勘测设计院	1989	800	200	200	5×5×10	电液伺服控制、 σ_3 液压
中科院武汉岩土所	1989	800	200	200	5×5×10	手动、 σ_3 液压

(二) 应变测量

应用液压施加 σ_3 为应变测量提供了方便。茂木、许东俊和李小春等采用的三向应变的测量方法如图 1.15 所示。

(三) 试件的防油措施

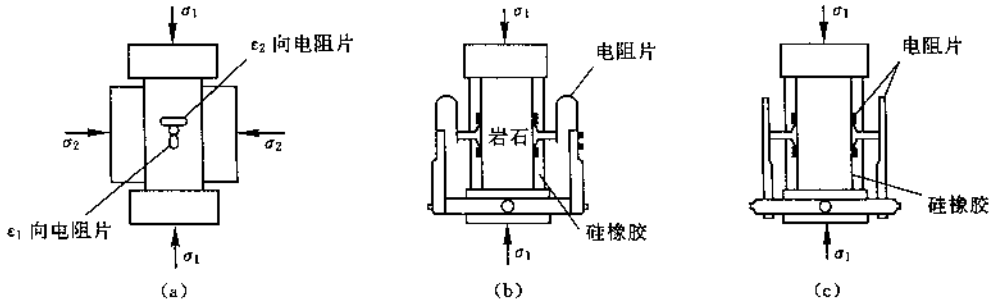


图 1.15 真三轴压力状态下的三向应变测量方法

为防止油液浸入试件,在试件表面涂 1~2 mm 厚的 703 硅胶能保证试件在发生很大变形时,硅胶涂层仍然完好。

(四) 端部处理

减小试件端部约束和摩擦效应是获得试件内均匀应力场的重要条件。在茂木等的试验中,由于采用与试件等断面的金属块加压,所以不存在加压板变形面引起的试件端部侧向约束问题,为减少摩擦力在试件与横向端块之间加了铜片和特氟隆。茂木曾指出,在这种试件装配里,在横向垫块边缘附近,应力可能集中,但是,在围压下,可大大减小应力集中效应。茂木曾在垫块与试件之间分别加入聚四氟乙烯板和厚橡皮板,试验表明两种方法并无明显差异。

二、中间主应力效应

(一) 中间主应力 σ_2 对最大主应力 σ_1 极限载荷的影响

如前所述,在应力空间中岩石强度极限构成一个曲面,曲面上每一点都代表岩石发生破坏时的一种应力组合。真三轴压力试验时,人们最为关心的是中间主应力 σ_2 的变化对最大主应力 σ_1 极限载荷的影响,所以许多试验设计都是给最小主应力 σ_3 一个定值,测试不同的 σ_2 值时的最大主应力 σ_1 的极限载荷。

关于中间主应力 σ_2 对最大主应力 σ_1 的极限载荷的影响,在真三轴压力仪研制和真三轴压力试验之前,有些学者根据其它类型的三轴试验结果,曾给出了一些不同定性结论。真三轴试验结果如图 1.16 和图 1.17 所示。

真三轴压力试验,现已有不少试验成果,已有几十条不同岩石、不同 σ_3 条件下的实测 σ_{1c} — σ_2 曲线,这些成果是研究岩石强度理论的重要基础。

为具体分析中间主应力对岩石强度的影响程度,定义中间主应力影响系数 β : 在 σ_3 一定的条件下,设当 $\sigma_2 = \sigma_3$ 时,最大主应力的极限荷载为 σ_{1c} ,在 σ_2 由 σ_3 的值逐渐增大至 σ_1 的值过程中, σ_{1c} 取得极大值 $\sigma_{1,max}$ 。则定义中间主应力影响系数 β 为:

$$\beta = \frac{\sigma_{1,max} - \sigma_{1c}}{\sigma_{1c}} \quad (1-6)$$

由 σ_{1c} — σ_2 曲线求得的中间主应力影响系数 β 如表 1—2 所列。

根据表 1—2 可以得出如下结论:

- (1) 各种岩石都存在中间主应力效应。根据所收集的资料,花岗岩中间主应力效应最大。
- (2) 中间主应力影响系数 β 一般为 0.2~0.5。根据所收集的资料, β 的平均值为 0.30(不计表 1—2 中的 β 最大值 0.75,该值偏差过大),即中间主应力可使 σ_{1c} 增大 30%。