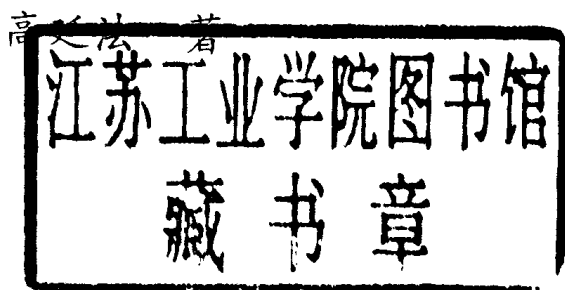


岩石真三轴压力试验 与岩体损伤力学

高延法 著

地震出版社

岩石真三轴压力试验 与岩体损伤力学



66-24/06

地震出版社

内 容 提 要

本书主要包括三部分内容：①岩石真三轴压力试验与岩石强度理论研究；②多裂隙岩体力学性质研究；③矿井采场底板岩层变形破坏观测与位移反分析研究。

真三轴压力试验应用电液伺服刚性真三轴压力机，试件为红砂岩，共进行不同 σ_3 条件下的三组试验；通过对八种岩石强度准则的回归分析对比，推荐出两种三参数的双剪应力和八面体剪应力强度准则。针对几何损伤力学应用于多裂隙岩体所存在的问题，提出了依据裂纹应力场的多裂隙岩体有效应力计算方法，建立了裂纹应力常数、损伤体积特征参数和损伤弹性矩阵等概念，求出了裂纹应力常数矩阵。采场底板变形破坏观测包括：底板岩层渗透性、底板岩层移动和采场超前支承压力等，并进行了底板岩层位移反分析数值计算，求得了底板岩层应力场。

本书可供岩土工程、采矿、地质、土木工程等专业的工程技术人员、科研人员和研究生参考使用。

岩石真三轴压力试验与岩体损伤力学

高廷法 著

责任编辑：蒋乃芳

责任校对：张晓梅

*

地 震 出 版 社 出版发行

北京民族学院南路9号

北京地大彩印厂印刷

全国各地新华书店经售

*

850×1168 1/32 4.5印张 120千字

1999年2月第一版 1999年2月第一次印刷

印数 001—600

ISBN 7-5028-1638-0/P·998

(2105) 定价：10.00元

目 录

绪论	(1)
第一章 岩石强度实验综述	(4)
§ 1.1 简单应力状态下的岩石强度试验	(4)
§ 1.2 常规三轴压力试验	(12)
§ 1.3 真三轴压力试验与中间主应力效应	(16)
§ 1.4 岩石压缩变形破坏过程的微观观测	(21)
§ 1.5 岩石断裂力学试验	(27)
§ 1.6 混凝土强度试验简述	(29)
§ 1.7 岩石强度理论	(32)
第二章 岩石真三轴压力试验与强度理论研究	(39)
§ 2.1 概述	(39)
§ 2.2 砂岩真三轴压力试验	(40)
§ 2.3 岩石断裂初度等力学参数测试	(50)
§ 2.4 岩石真三轴试验成果统计分析	(52)
§ 2.5 应力空间岩石强度极限曲面回归分析与岩石 强度理论探讨	(55)
§ 2.6 岩石细观结构模型与压缩破坏机理	(63)
第三章 依据裂纹应力场的裂隙岩体损伤力学理论研究 ..	(71)
§ 3.1 损伤力学及其在岩石力学中的应用	(71)
§ 3.2 平面裂纹问题有效应力的计算方法	(75)
§ 3.3 三维 裂纹问题有效应力计算方法	(84)
§ 3.4 多裂隙岩体的有效应力系数矩阵 与损伤弹性矩阵	(89)
§ 3.5 裂纹应力常数矩阵	(94)

§ 3.6	压剪应力状态下的裂纹应力常数矩阵	(96)
§ 3.7	损伤演变方程及损伤理论的工程应用	(97)
第四章 采场底板岩层变形破坏观测与位移反		
	分析研究	(102)
§ 4.1	矿井底板灰岩突水研究概述	(102)
§ 4.2	矿井与采场的地质开采概况	(105)
§ 4.3	综合观测方案与实测结果	(106)
§ 4.4	采场底板位移反分析	(113)
§ 4.5	采场底板岩层渗透性与裂隙扩展规律研究 ...	(121)
英文摘要		(128)
参考文献		(130)

绪 论

岩石力学属于应用基础性学科，是一门新兴的综合性边缘学科。岩石力学作为研究岩石的力学理论和应用科学，是探讨岩石对其周围物质环境中力场的反应的力学分支。这个定义指出了岩石作为一种天然材料与其赋存的地质环境、形成历史以及工程因素之间的关系。

岩石力学是由于岩体工程实践的需要而发展形成的。它的研究对象是岩体这种地质材料。从根本上说，岩石力学属于固体力学的范畴。但正如人们已认识到的那样，岩体作为一种地质材料，与固体力学所研究的材料有很大不同。通常岩体具有非均质性和各向异性，岩体中存在断裂构造和地下水。因此，岩石力学的研究内容和方法与固体力学的常规方法有很大差别。岩体结构和构造的探测、原始地应力的测量和各种岩体工程条件下岩体的应力应变计算等，都是岩体力学的重要研究课题。尽管如此，岩石作为岩体的组成材料，其力学性质的研究仍是十分重要的。岩石的强度理论和本构关系作为岩石的基本力学性质是岩石力学研究的中心内容。特别是随着计算机和数值计算方法的发展，以及位移反分析方法的广泛应用，使岩体工程中的应力应变计算有了较大发展。相比之下，岩石的本构关系和强度理论研究成为薄弱环节。进入 80 年代以来，本构关系研究成为热点，但是应该说，岩石强度理论的研究进展比较缓慢，还不能适应岩石力学的发展，与岩体工程的需要尚有较大距离。

对于一般材料来说，在载荷作用下的破裂是一种极为复杂的和非常多样的现象，它取决于材料的构造和物理状态，以及载荷的作用特征和状况，而物理状态又随载荷本身而变化。由此可见，

材料的破坏是一个涉及材料结构的复杂的物理力学过程。材料的强度和断裂问题成为物理学的一个专门领域，需要复杂和细致的实验，并运用最完善的数学和力学工具。同时，在研究材料强度时不可能脱离现代关于材料结构的概念；它应该由此获得用以阐明断裂现象的资料，同时，应用由断裂现象所得到的结论可以充实关于物质结构的理论。弹塑性理论所应用的关于材料是均匀连续性的假设只是抽象而间接地反映了关于物质的构造概念。

岩石材料的结构有其显著特点。首先是结构面，包括裂隙、节理、颗粒界面和晶界等；其次是非均质性，岩石一般都由多种矿物岩石的颗粒通过胶结物联结而成，而不同的矿物岩石颗粒具有不同的力学性质。裂隙介质属性和细观非均质属性对岩石本构关系与强度特性的影响，是岩石力学最基本的研究课题。若能建立其理论，则有希望成为岩石力学进一步发展的基础，或成为岩石力学基础的一个重要组成部分。以往大量的岩石力学实验已发现了许多岩石变形破坏现象和规律，如岩石变形破坏的四个阶段：扩容、非一致屈服、围压作用下脆性与韧性转变和中间主应力效应等。这些实验现象背后蕴藏着岩石变形破坏的固有力学规律。对于这些规律，目前尚不十分清楚，同时也成为十分诱人的研究课题。本书对该课题的研究仅是初步尝试。

实际岩体工程中，岩石一般处于压剪应力状态。压剪应力状态下的岩石强度一直是研究的主要内容。在压剪应力作用下，岩石的破坏往往是许多成某种分布的微裂纹扩展、连接的结果。因此，在进行了大量的岩石力学实验，总结了岩石的变形破坏规律的情况下，要进一步发展岩石的强度理论，就必须在更深入的材料结构层次上去探讨。根据这一指导思想，本书回顾总结了前人在岩石力学强度实验和强度理论研究领域取得的成果与进展，进行了真三轴岩石强度实验，收集总结了前人的真三轴岩石强度实验资料；在分析岩石结构特征的基础上，提出了“岩石细观结构模型”的概念；应用电算数值分析的方法，根据简化的岩石细观

结构模型，分析了由于岩石的非均质性产生的局部应力场，从而解释了在压应力作用下，岩石裂纹的萌生和稳定扩展现象，同时解释了岩石的扩容、单轴应力状态下的劈裂破坏和围压效应等实验现象。

裂隙介质属性是岩体的主要特点。多裂隙岩体的力学性质研究一直为人们所重视，近年来损伤力学方法被引入多裂隙岩体力学性质的研究。本文应用损伤力学关于损伤和有效应力的概念，提出了描述和计算岩体损伤程度和有效应力的新概念与新方法，提出的方法具有两个特点：①依据裂纹应力场确定有效应力；②全面考虑裂隙的分布密度和裂隙大小，由这两个参数反映岩体的损伤程度。同时，该方法计算比较简明、准确。

采场底板岩层变形破坏观测与位移反分析研究，是为解决采场底板突水问题提出的。在实际采场进行了超前支承压力、钻孔注水和底板岩层移动等观测。根据实测位移，进行了位移反分析计算，求出了底板岩层的应力场。还进一步分析了岩层应力与渗透性的关系。

第一章 岩石强度实验综述

对一般岩体工程而言,岩体强度是一个十分重要的问题。现场岩体强度问题是比较复杂的,受岩体的结构、构造和地下水等多种因素的影响。因而,岩体强度与岩石强度是不同的概念。在实际工程中一般进行岩体分级,综合考虑多种因素。有时需要对特定的构造或软弱夹层进行专项研究。尽管这样,岩石强度仍是岩体强度的一个重要基础。一方面,岩石强度是岩体工程分级和完整岩体强度判定的依据;另一方面,岩石的强度理论也是建立岩体强度理论的依据。

所谓岩石强度理论,就是建立岩石在不同应力状态下破坏的应力(或应变)准则。在应力空间(或应变空间)中,岩石的强度极限构成一个连续曲面。所谓建立岩石强度准则,就是把有限个点的强度值推广,根据有限个点建立强度曲面。

岩石强度理论的依据是岩石力学实验。大量富有成果的岩石力学强度实验,早在六七十年代就已完成,后来的发展主要表现为刚性压力机的推广应用、真三轴实验的进一步完善和岩石断裂韧度的测试等方面。本章是对以往岩石力学强度实验的回顾和总结,是后文进一步探讨岩石强度问题的试验依据。

§ 1.1 简单应力状态下的岩石强度试验

一、岩石单轴压缩试验

岩石的单轴压缩试验是最简单的强度试验。通常将岩石试件做成棱柱体或圆柱体,要求圆柱体高径比大于 $2\sim 3$,试件端面光洁、平整,两端面平行且垂直于轴线。岩石单轴抗压强度值取决于岩石的组成、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,但因许多因素的干扰,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承压板与试件端面的摩擦;②试件的几何形态(形状、高径比和尺寸);③加载速度;④环境因素(如试件的含水性、温度等)。

1. 单轴压缩强度试验时试件的破坏形态

岩石试件在单轴受压时,由于受到多种因素的干扰,真实的破裂形式不大明确,常常观察到的是剪切破坏、锥形破坏和劈裂破坏。对试件破坏形态影响最大的是端面摩擦约束效应。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。Jaeger 研究了直到非常低的围压下岩石试件的破坏,他注意到随围压降低,强度值连续减小,而且直到围压为 9MPa 的情况下试件仍保持剪切破坏的形式。由此他推论,单轴压缩下的破坏也是由剪切破裂产生的^[1]。

V. S. Vutukuri 等对单轴压缩时试件的破坏形式进行了比较细致的描述^[2],把破坏形式分为以下三类:

(1) 由靠近试件表面中间平行于加载方向发出许多裂缝向端面扩张,并伸入试件中心而破裂,试件两端形成锥体状。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成劈裂形式。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。Hankes 和 Mellor 认为这种破坏方式可能是由于承压板滑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,这与 Jaeger 的推论不同。

2. 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很大影响。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_c 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而变形,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。文献[1]认为: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;指出用石墨、硫化钼以及其它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;并建议选用与试件端面相同、侧面膨胀相同(即泊松比 ν /弹模 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^[3]、Peng^[4]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^[5]: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。

3. 试件在单轴压缩时的应力分布

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^[3]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 1.1,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。

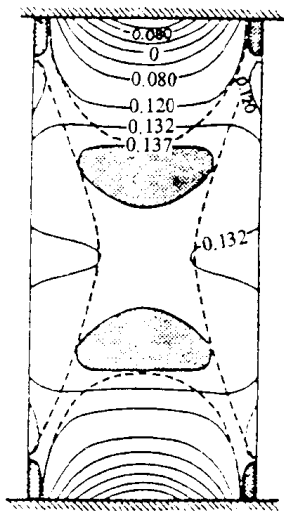


图 1.1 试件端部完全径向约束时的应力分布

许多学者研究过存在端部效应时的岩石内应力分布问题，由于各人对端部约束条件的假设不同，得出的理论计算结果也各不相同，如图 1.2。白世伟等应用有限元数值模拟方法研究了单轴压缩试验时圆柱状岩石试件应力分布均匀性问题^[6]，由于采用了节理单元模拟试件端面的接触，可反映出变形过程中试件与接触材料的相对错动，得出的结果比前人的更合理，研究结果表明：直接在压力机承压板间压缩试件，必然导致不均匀的应力分布，即使减少试件端部摩擦也无济于事，这是由于试件端面尺寸与承压板尺寸不匹配造成的。同时指出，在加入与试件直径相同的刚性垫块的同时，改善端面摩擦条件是进一步提高试件内应力均匀程度的关键。此外，Brady 也曾应用有限法研究了岩石试件存在端面效应时的试件内的应力状态^[7]。Peng 用插入刚性垫块的方法进行花岗岩单轴压力试验，得到了基本均匀的应力分布^[4,8]。Al-chalabi

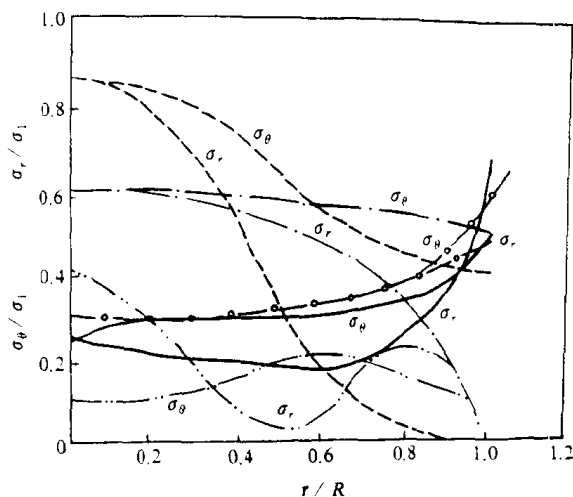


图 1.2 不同约束条件下的试件端部应力分布

采用光弹试验方法验证了试件内的应力分布^[9]。

二、岩石单轴抗拉强度试验

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。即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),Hoek 曾报导,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比较可靠,但试验技术复杂,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。Corback 用修正的格林菲斯准则分析了巴西试验的有效性。他指出,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试验^[10]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:

$$\sigma_t = -F/(\pi r_0 t) \quad (1.1)$$

式中, F 为荷载; r_0 、 t 分别为圆盘半径与厚度。应用公式(1.1)求出的 σ_t 偏小。②这样测定的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。

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。在巴西试验中,随加载速率提高,强度随之增大。试件尺寸增加,则强度降低。

另有学者研究岩石抗拉强度的其它方面的问题。寇绍全和 O. Alm 研究了含有微裂隙的花岗岩的抗拉强度^[11],通过热处理使岩石试件产生微裂隙,通过对微裂隙特征和试件宏观力学参数测试,建立了抗拉强度与微裂隙密度的关系。蔡跃军等通过提高加载系统的刚度的方法,测试了巴西试验时圆盘试件的应力—应变全过程曲线^[12],指出其应力—应变曲线与弯曲变形试验相似,圆盘的直径与厚度之比以及加载区的应力集中是影响试验结果的主要因素。

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) 摩尔应力包线。

扭转试件时,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° ,破坏面的法线方向为拉应力方向^[13,14]。因此,试验中岩石的破坏实际上并不是剪切破坏,而是在拉、压两个应力状态下的拉伸破坏。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。

其它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。可见，抗剪强度的概念和试验是比较杂乱的。

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。一种强度值较大，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^[15]。他收集了大量岩石强度指标的实测资料，尽管资料不系统和存在偶然性，而统计表明，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：

$$\sigma_c = 10\sigma_t \quad (\sigma_t \text{ 的系数变化范围为 } 6 \sim 20) \quad (1.2)$$

$$\sigma_c = 5\tau_0 \quad (\tau_0 \text{ 的系数变化范围为 } 2.5 \sim 7.5) \quad (1.3)$$

$$\tau_0 = 1.8\sigma_t \quad (\sigma_t \text{ 的系数变化范围为 } 0.9 \sim 3.0) \quad (1.4)$$

$$\tau_0 = 0.7C \quad (C \text{ 的系数变化范围为 } 0.3 \sim 1.1) \quad (1.5)$$

五、小结与评述

(1) 岩石的单轴抗压强度 σ_c 是最基本的强度指标。准确测定 σ_c 的条件是能够消除或减小岩石试件的端部摩擦约束效应。消除端部效应的最佳方法是在试件与承压板之间加入与试件等截面的一定厚度的垫块，且垫块的侧向膨胀性能与试件相同，即 (ν/E) 值相等。单轴压缩试验若能消除端面效应，劈裂破坏是一般坚硬脆性岩石的固有破坏方式。

(2) 测试岩石的单轴抗拉强度有直接法和间接法两类。直接法结果比较可靠，但试验较复杂，要求较高。间接法中巴西法比较简单易行，实验结果最接近直接法。应用巴西法应注意受力点的应力集中问题，应保证试件是在圆盘中心首先开裂。

(3) 岩石的剪切强度有多种不同的概念，这是由于测试或确定剪切强度的方法不同而形成的。重要的是不同的概念不可混淆。实验表明：岩石在纯剪应力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。另一方面，对其它剪切试验（如冲剪、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面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，这是值得进一步探讨的。

§ 1.2 常规三轴压力试验

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的力学性质的主要手段，也是建立强度理论的主要试验依据。象摩尔—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、围压效应

Paterson 用大理岩在室温下进行了三轴压力试验，以研究岩石随围压的增大由脆性向延性转变的特性^[16]，并总结出随围压的增大，大理岩的应力—应变曲线出现的三种重要效应（图 1.3）：

- （1）当围压超过 20MPa 时，该大理岩由脆性转变为延性。
- （2）围压越高，应力—应变曲线的总水平也变得较高。
- （3）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 1.4 所示。