

高等学校教学用书

钻眼爆破

王文龙 编

煤炭工业出版社

TD23

1

3

高等学校教学用书

钻 眼 爆 破

王文龙 编

煤炭工业出版社

B 188927

内 容 提 要

本书系统地阐述了与钻眼爆破有关的岩石物理力学性质，炸药热化学参数和爆轰参数的计算方法，炸药起爆和传爆机理，爆破器材和各种起爆方法，炸药和岩石的相互作用，炸药动作用在岩体内产生的爆炸应力波，静作用在岩体内产生的静态应力场和抛掷作用，爆破破碎岩石的机理和影响爆破作用的因素，爆破方法和爆破参数的计算，钻眼机具和眼底岩石的破碎机理，以及影响钻眼速度的因素。本书在介绍工艺和施工经验的同时，应用了炸药理论、爆炸力学和岩石力学等学科的基础知识，来研究钻眼爆破的各种现象和发展规律。

本书经煤炭部高校采矿工程教材编审委员会委员杨善元教授主审，并请王廷武副教授、刘积铭副教授复审，同意作为煤炭高等院校矿井建设专业《钻眼爆破》课程的通用教材，也可供高校采矿类学生、科研机关和从事钻眼爆破工作的工程技术人员参考。

责任编辑：莫 国 震

高 等 学 校 教 学 用 书

钻 眼 爆 破

王 文 龙 编

煤炭工业出版社 出版

(北京安定门外和平北路16号)

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 $787 \times 1092^{1/16}$ 印张22

字数522千字 印数1—8,120

1984年11月第1版 1984年11月第1次印刷

书号15035·2665 定价3.15元

前 言

本书是作为煤炭高等院校矿井建设专业《钻眼爆破》课程的通用教材编写的。

1976年，在山东矿业学院召开的煤炭高校矿井建设专业教学计划审定会议上，将课程名称改为《破岩原理与技术》。1980年，编写出试用讲义。经过两次教学实践，对该试用讲义作了删减和修改。1981年，由煤炭部高校采矿工程教材编审委员会委员杨善元教授主持会议，对讲义修改稿进行审议，提出了修改意见，并建议将课程名称仍改为《钻眼爆破》。据此，重新修编，并经过复审、试用、定稿。

《钻眼爆破》课程历来以讲授工艺和施工经验为主。本书保留了这方面的基本内容，同时加强和充实了基础理论，应用炸药理论、爆炸力学和岩石力学等学科的基础知识，来研究钻眼爆破过程中所发生的各种现象和发展规律。

本书第一章到第十五章由王文龙编写，第十六章由张萌编写。在编写过程中，得到了许多兄弟院校的大力支持和帮助。西安矿业学院王廷武副教授和淮南矿业学院刘积铭副教授，受采矿工程教材编审委员会的委托，对本书进行了复审并提出许多宝贵意见。在此一并致谢。

编 者

1983年12月

目 录

前言

第一章 岩石物理力学性质	1
第一节 概述	1
第二节 比重、容重和空隙度	2
第三节 岩石的变形性质、弹性和塑性	3
第四节 岩石的强度性质	7
第五节 岩石的可钻性	9
第六节 岩石的可爆性	11
第七节 岩石坚固性和岩石分级	13
第二章 爆炸及炸药的一般特征	15
第一节 爆炸及炸药的定义	15
第二节 炸药化学变化的型式	16
第三节 炸药爆炸的基本特征	21
第四节 炸药分类	23
第三章 爆炸反应方程, 爆容和有毒气体产物	27
第一节 炸药的氧平衡	27
第二节 爆炸反应方程	29
第三节 爆容与有毒气体产物	34
第四章 爆炸过程的热力学和热化学	33
第一节 热力学的基本概念	38
第二节 热化学基本知识	43
第三节 爆热	43
第四节 爆温	52
第五节 爆压	54
第五章 流体介质中的波	57
第一节 弱扰动与音波	57
第二节 压缩波与稀疏波	61
第三节 冲击波	63
第六章 炸药的爆轰	71
第一节 爆轰波	71
第二节 爆轰波传播的稳定性条件	72
第三节 气体爆轰参数的计算	75
第四节 凝聚体炸药爆轰参数的计算	78
第五节 影响爆速的因素	82
第六节 沟槽效应	87
第七节 爆轰波的反射和折射	89
第七章 炸药的起爆与感度	95

第一节	起爆能和感度的概念	95
第二节	炸药爆炸反应的机理	95
第三节	热爆炸机理	96
第四节	热点形成机理	100
第五节	炸药对热作用的感度	101
第六节	炸药对机械作用的感度	103
第七节	炸药对冲击波作用的感度和殉爆	105
第八节	炸药对起爆冲能的感度	108
第九节	炸药对静电火花作用的感度	110
第八章	炸药的爆炸特性及爆炸作用	113
第一节	炸药爆炸的动作用和静作用	113
第二节	炸药的猛度	113
第三节	炸药的爆力	115
第四节	炸药的能量平衡	119
第五节	聚能效应	120
第九章	矿用炸药	123
第一节	硝酸铵系列非安全炸药	123
第二节	安全炸药理论和煤矿许用炸药	127
第三节	浆状炸药和水胶炸药	134
第四节	乳化炸药	136
第五节	硝化甘油炸药	137
第十章	起爆技术和起爆器材	139
第一节	导火索起爆法	139
第二节	导爆索起爆法	140
第三节	新型非电起爆法	143
第四节	电力起爆法	145
第十一章	岩体内的爆炸应力波	165
第一节	基本概念	165
第二节	岩体内的冲击波	167
第三节	弹性波的波动方程	169
第四节	平面、球面和柱面弹性波	171
第五节	岩体内应力波参数	177
第六节	应力波的反射和折射	179
第七节	应力波的干涉	184
第八节	表面波和地震波	189
第十二章	岩体内的爆破作用原理	193
第一节	装药的内部作用和外部作用	193
第二节	爆炸应力波的内部破坏作用	196
第三节	应力波的外部破坏作用	198
第四节	气体静压的破坏作用	204
第五节	应力波和气体的综合破坏作用	205
第六节	岩石爆破的能量原理	206

第七节 爆破抛掷作用	209
第十三章 影响爆破效果的因素	211
第一节 炸药性能的影响	211
第二节 装药结构的影响	212
第三节 炮泥的影响	214
第四节 装药爆轰方向和起爆点数目的影响	218
第十四章 井巷掘进爆破技术	221
第一节 概述	221
第二节 掏槽爆破	221
第三节 钻眼爆破参数	226
第四节 微差爆破	235
第五节 光面爆破	240
第六节 井巷工作面的炮眼布置	246
第七节 钻眼爆破说明书和爆破图表	250
第八节 天井超深孔爆破	251
第十五章 地面爆破的一些基本方法	253
第一节 炸大块孤石	253
第二节 梯段爆破	254
第三节 硐室爆破	257
第四节 特种爆破工作	264
第十六章 钻眼方法及钻眼机具	270
第一节 钻眼方法分类	270
第二节 风动凿岩机	270
第三节 凿岩机的性能参数	279
第四节 推进机构和安装设备	284
第五节 冲击式凿岩工具	293
第六节 冲击凿岩原理	297
第七节 冲击凿岩的钻速及其影响因素	301
第八节 电动凿岩机和液压凿岩机	303
第九节 旋转式电钻	308
第十节 旋转式钻眼工具	309
第十一节 旋转钻眼原理	312
第十二节 轴压和转速对旋转式钻眼速度的影响	216
附 表	
1. 某些岩石的动态特性参数	318
2. 岩石的静载强度、内摩擦角和内摩擦系数	318
3. 岩石可爆性按波阻抗分级表	319
4. 普氏岩石分级表	319
5. 常用化合炸药的结构式和特性	320
6. 某些化合物炸药和混合炸药常用组分的氧平衡	321
7. 某些化学反应的平衡常数表	323
8. 炸药和某些物质的生成热	324

9. 卡拉什法计算燃烧热的修正值	325
10. 各种气体和固体产物从291K到T(K)的内能变化值(千卡/克分子)	329
11. 国产铵梯岩石炸药的组成和性能	330
12. 国产铵梯露天炸药的组成和性能	330
13. 廉价炸药的组成和性能	331
14. 高威力硝铵炸药的组成和性能	331
15. 钝感高威力硝铵炸药的组成和性能	332
16. 国产铵梯煤矿炸药的组成和性能	332
17. 水胶炸药的组成和性能	333
18. 乳化油炸药的组成和性能	333
19. 国产胶质炸药的组成和性能	334
20. 国产电雷管参数	334
21. 国产电容式发爆器	336
22. 线路电桥和爆破用欧姆表	338
23. 国产杂散电流仪	338
24. 破坏震动对巷道围岩造成的破坏	338
25. 硐室爆破的单位耗药量(公斤/米 ³ , 2号岩石炸药)	339
26. 国内、外凿岩机技术特征	339
27. 掘进台车的类型及技术特征	340
28. 碳化钨类硬质合金片主要性能	341
29. 电动凿岩机的类型及技术特征	342
30. 液压凿岩机的技术特征	342
31. 煤电钻技术特征	343
32. 岩石电钻的技术特征	343

第一章 岩石物理力学性质

第一节 概 述

井巷工程施工的基本方法是钻眼爆破法。它是井巷施工各主要工序（破、通、装、运、支）的先行工序，直接影响着其他工序和整个井巷工程施工的速度、质量、安全和成本。目前，钻眼爆破工序正向着进一步提高机械化水平并与其他工序配套，形成一条完善的施工机械化作业线的方向发展。在钻眼机械化方面，当前我国主要是先推广使用中、高频气腿式凿岩机，积极研制和试用液压凿岩机和凿岩台车，并在立井内推广使用伞形钻架。国外的发展动向是：采用高效、重型导轨式凿岩机，大量使用自移式凿岩台车和发展凿岩台车一机多用，用功率大、效率高、钻进快、适应性强、噪音小、污染少的液压凿岩机取代风动凿岩机。在爆破方面，国内、外的发展动向是：推广使用威力大、防水性强、安全性好、管道效应小、原材料来源广、制造工艺简单的水胶炸药和乳化炸药，以及随着凿岩机功率的提高和台车化，加大炮眼直径和炮眼深度，采用直眼掏槽、微差爆破、光面爆破和实现装药机械化。

在具体情况下，炸药类型、爆破参数、钻眼方法、钻机类型、钻眼工具、钻机工作参数等的选择，首先决定于岩石的组成、结构、构造及其物理力学性质。

岩石是组成地壳的自然材料。在地质上，根据成因将岩石区分为岩浆岩、沉积岩和变质岩三类。无论那种岩石，都是矿物颗粒的集合体。在自然界中，虽然存在单一元素的矿物，但大多数矿物则是包含两种或两种以上元素，并在重量上有其固定比例的化合物。由一种矿物颗粒组成的岩石叫做单矿岩石，由几种矿物颗粒组成的岩石叫做多矿岩石。岩石内的矿物颗粒，或由其直接接触面上发生的互相作用力来联结，或由外来的胶结物联结。多数岩石是由没有规则几何外形的矿物晶粒组成的，非晶质岩石只占少数。每种矿物都有它各自的物理力学性质、晶体结构和破裂特点。由矿物颗粒组成的岩石的性质，除受岩石内矿物组成和矿物性质的影响外，在很大程度上决定于岩石组构和结构的影响。

组构指矿物颗粒在小块岩石内的组织特征，包括矿物颗粒的大小、形状、表面特性和颗粒间联结的方式，岩块内存在的微观裂隙和缺陷等。

大范围内的岩石称为岩体。岩体内存在的层理、片理、不规则裂纹等称为结构。节理是在分布上具有一定方向性的规则裂纹，在岩体内分布较广，距离变化较大。在沉积岩中，通常产生垂直层理面的两组节理。层理、片理也可以看作是有确定方向的裂纹。除此之外，岩体内还有无确定方向的不规则裂纹。规则或不规则裂纹间的接触面称为结构面。在张口裂纹中，往往充填有水或其它矿物杂质。由于结构面的存在，岩体整体性和连续性遭到破坏，被分割成大小不同的岩块。因此，岩体也可以看作是由岩块组成的地质体。岩体的性质除决定于岩块性质外，在很大程度上受其结构的影响。

结构面除能够降低岩体的强度外，具有一定方向的结构面，还能使岩体在不同方向上具有不同的性质。这种性质称为各向异性，其表现程度可用各向异性系数 K_a 来表示，

$$K_a = \sqrt{\frac{x_{\parallel}}{x_{\perp}}} \quad (1-1)$$

式中 $x_{\parallel}$ ——平行结构面的物理力学性质指标;

$x_{\perp}$ ——垂直结构面的物理力学性质指标。

在钻眼爆破中,有效地利用岩石各向异性,能提高破岩效率和降低能量消耗。

存在规则和不规则裂纹的岩体称为裂隙性岩体。因裂纹能降低岩体强度,故与相同岩性的整体岩石比较,爆破裂隙性岩体所需单位耗药量较小。此外,裂纹还会影响爆破崩落岩石的块度,其影响程度与岩石性质、裂纹发育分布情况、裂隙内填充的物质等因素有关。

为估计裂纹对爆破的影响,按裂纹发育程度,对裂隙性岩体进行分类的一种方法如表 1-1 所示。

表 1-1 裂隙性岩体的分类

类 别	裂 纹 发 育 程 度	裂纹间的平均 距 离 (米)	每米裂纹数目	不同块度(毫米)所占百分数 (%)		
				+ 300	+ 700	+ 1000
I	极发育,分割块度很小	<0.1	>10	<10	≈ 0	0
II	发育较强,分割块度中等	0.1~0.5	2~10	10~70	<30	<5
III	发育中等,分割块度较大	0.5~1.0	1~2	70~100	30~80	5~40
IV	发育较弱,分割块度很大	1.0~1.5	1.0~0.65	100	80~100	40~100
V	发育很差,可视为整体	>1.5	<0.65	100	100	100

第二节 比重、容重和空隙度

在岩石内,矿物颗粒或集晶间存在有空隙。单位实体体积(不包括空隙)的岩石重量称作比重(注意与物理学中的比重概念不同)。岩石比重决定于矿物组成和矿物比重。

包括空隙在内的单位体积岩石重量称作容重;若将重量换成质量,则称作密度。容重或密度又分为湿和干的两种,后者不包括空隙内水的重量。岩石容重可利用任意形状的试块来测定。在测定干容重 γ_v 时,先称出烘干试块在空气中的重量,然后将试块敷蜡,再分别称出它在空气和水中的重量,将测定结果代入下式计算:

$$\gamma_v = \frac{G_a \gamma_w \gamma_p}{\gamma_p (G_{Pa} - G_{Pw}) - (G_{Pa} - G_a) \gamma_w} \quad (1-2)$$

式中 G_a ——试块在空气中的重量;

G_{Pa} ——敷蜡试块在空气中的重量;

G_{Pw} ——敷蜡试块在水中的重量;

γ_p ——石蜡比重;

γ_w ——水的比重。

岩石内空隙体积占岩石体积的百分数称作空隙度 P_r :

$$P_r = \frac{G_s - G_a}{V_r \gamma_w} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中 V_r ——岩石试块体积;

G_s ——水饱和后的试块重量。

岩石比重、容重和空隙度的关系为：

$$P_r = \frac{\gamma_s - \gamma_v}{\gamma_s} \times 100\% \quad (1-4)$$

岩石按空隙度可分为三类：

1. 低空隙度岩石, $P_r < 5\%$;
2. 中等空隙度岩石, $20\% > P_r > 5\%$;
3. 高空隙度岩石, $P_r > 20\%$ 。

与岩浆岩比较, 沉积岩的容重一般较低, 空隙度较大。不过, 即便是同一种岩石, 空隙度或容重的变化范围也很大。

第三节 岩石的变形性质、弹性和塑性

岩石在外力作用下产生变形, 其变形性质可用应力-应变曲线来表示, 并区分为弹性变形、弹塑性变形、塑性变形等。

弹性变形几乎是随着载荷的作用即刻发生的, 并具有可逆性, 即消除载荷后, 变形也跟着消失。弹性变形又有线性的和非线性的两种。线性弹性变形又称作理想的弹性变形, 其应力-应变关系遵循虎克定律, 而且在加载和卸载的一个循环过程中, 不产生弹性后效和能量逸散。

塑性变形则是不可逆的, 消除载荷后, 变形仍继续保留, 而且, 即便是保持载荷不变, 随着时间的推移, 变形也将继续增大。

一般来说, 岩石在外力作用下, 既产生弹性变形, 又产生塑性变形。因此, 总变形为两者之和, 即:

$$\varepsilon = f_1(\sigma) + f_2(\sigma, \tau) \quad (1-5)$$

式中 $f_1(\sigma)$ ——弹性变形分量, 表示为应力的函数;

$f_2(\sigma, \tau)$ ——塑性变形分量, 表示为应力和时间的函数。

如果岩石在破碎前, 不产生明显的塑性变形, 就可将岩石看作是弹性的。理想的弹性岩石称作弹脆性岩石, 产生弹性后效的弹性岩石称作粘弹性岩石。在外力作用下, 只产生弹性变形的岩石称作理想的塑性岩石。既产生弹性变形, 又产生塑性变形的岩石称作弹塑性岩石。一般情况下, 只在应力超过一定限度后, 塑性变形才比较明显。

但须指出, 即便是同一种岩石, 由于所加应力的类型、大小和特性不同, 也可具有不同的变形性质。因此, 上述根据变形性质对岩石的划分不是绝对的。例如, 在压应力作用下表现为弹塑性的岩石, 在拉应力作用下可变成弹脆性岩石; 在单轴应力作用下为弹脆性岩石, 在三轴或多轴应力作用下可变为弹塑性岩石; 在静载作用下是理想的塑性岩石, 在冲击载荷作用下, 可变为脆性岩石。

在分析岩石破碎问题时, 须首先根据破坏载荷的性质和破碎条件, 确定岩石的变形性质和合理的岩石模型。

应力卸除后, 能恢复原有形状和大小的能力, 定义为岩石的弹性。弹性用弹性常数来评价。从弹性理论中知道, 要确定各向同性介质的弹性性质, 在五个弹性常数中 (E, ν, K, G, λ), 知道其中两个弹性常数, 其余三个便可根据公式计算出来。在工程中, 常用

而且能直接测定出的弹性常数是弹性模量 E 和泊松比 ν 。这两个弹性常数和其它弹性常数（体积压缩模量 K ，拉梅常数 λ 和 G ，其中 G 又称为剪切模量）之间存在下列关系：

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (1-6)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (1-7)$$

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (1-8)$$

弹性模量 E ，是根据单轴试验得到的应力-应变曲线来确定的。弹性模量区分为初始弹性模量 E_i ，割线弹性模量 E_s 和切线弹性模量 E_t （图1-1）。通常所说的弹性模量 E 系指初始弹性模量。因岩石拉伸和压缩的应力-应变曲线不同，静态和动态的应力-应变曲线也不同，所以又区分为拉伸、压缩、静态和动态的弹性模量。在岩石工程计算中，采用的弹性模量为压缩弹性模量。拉伸弹性模量一般比压缩弹性模量小。

因大多数造岩矿物的比重差别不大，所以岩石的弹性主要受岩石内部结构即矿物颗粒大小、岩石致密程度、容重和空隙度的影响较大。研究指出，大多数岩石的静态弹性模量与容重之间有下列经验关系：

$$E = (7.2\gamma_r - 13.05) \cdot 10^5 \quad (1-9)$$

岩石静态泊松比是根据一定载荷条件下测得的纵向和横向相对变形来确定的。统计分析表明，在静态泊松比和弹性模量间也存在相关关系，如图1-2所示。弹性模量高的岩石，其泊松比大体上是一个固定不变的常数（0.25~0.3）；弹性模量低的岩石，其泊松比也低，而且变化较大。

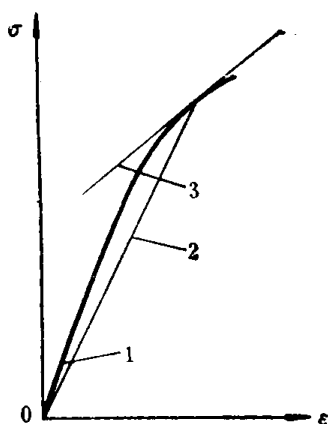


图 1-1 岩石弹性模量表示方法

1—初始弹性模量；2—割线弹性模量；3—切线弹性模量

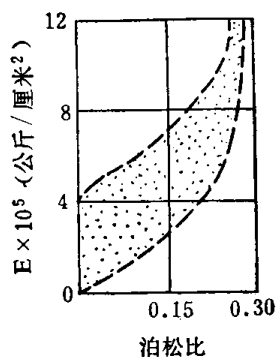


图 1-2 岩石弹性模量与泊松比关系

在动载作用下，应力或变形以波的形式在岩石内传播。在弹性岩石内传播的波称为弹性波。岩石内部传播的弹性波有纵波（P波）与横波（S波）两种。此外，沿岩石表面还能传播表面波，其中一个主要的表面波与流体重力表面波类似，称为瑞利波。这三种波的波速不同：纵波波速 > 横波波速 > 瑞利波波速。各种岩石的弹性波有其固定的波速，而且只决定于岩石的动态弹性性质。因此，只要测定出岩石中传播的弹性波波速，按已知公式

就能确定出岩石的动态弹性常数。确定的方法有以下几种：

1. 测出岩体内纵波和横波的波速，按下式计算动态泊松比和弹性模量：

$$\nu = \frac{c_P^2 - 2c_S^2}{(2c_P^2 - c_S^2)} \quad (1-10)$$

$$E = \frac{c_P^2 \rho_r (1 + \nu)(1 - 2\nu)}{1 - \nu} = 2c_S^2 \rho_r (1 + \nu) \quad (1-11)$$

式中 c_P ——岩体内纵波波速；

c_S ——岩体内横波波速；

ρ_r ——岩石密度。

2. 测出岩石细长杆件和岩体内的纵波波速（两者波速不同），按下式计算动态弹性模量和泊松比，

$$E = (c_P^b)^2 \rho_r \quad (1-12)$$

$$\nu = \frac{\left(\frac{c_P^b}{c_P}\right)^2 - 1 + \sqrt{\left[\left(\frac{c_P^b}{c_P}\right)^2 - 5\right]^2 - 16}}{4} \quad (1-13)$$

式中 c_P^b ——岩石细长杆件内的纵波波速。

3. 测出岩体内纵波波速和沿岩石表面传播的瑞利波波速，根据两者的比值 c_R/c_P (c_R —瑞利波波速) 应用图1-3中的克诺波弗曲线确定泊松比，再按公式 (1-11) 确定弹性模量。

4. 当泊松比在0.2~0.4范围内变化时，弹性波波速的相对变化量为：纵波 $\Delta c_P = 41.1\%$ ，横波 $\Delta c_S = -4.9\%$ ，瑞利波 $\Delta c_R = -3\%$ 。由此可见，横波和瑞利波的波速变化不大。因此，可取岩石平均波松比为0.25，并根据其中一种波速近似估算岩石的弹性模量。按瑞利波波速计算弹性模量的公式为：

$$E = \frac{2\rho_r c_R^2 (1 + \nu)^3}{(0.87 + 1.12\nu)^2} \quad (1-14)$$

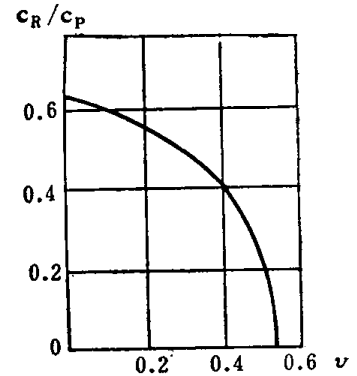


图 1-3 瑞利波与弹性纵波波速比值和泊松比的关系

研究在动载作用下，岩石内产生的应力场和破碎过程时，波阻抗也是一个很重要的动态弹性常数。波阻抗又称声阻抗或特性阻抗，即介质密度与纵波波速的乘积。

根据声波探测确定出的某些岩石的动态特性参数列于附表 1。

由于岩体内存在节理、裂隙等结构面，所以岩体的弹性常数和岩体中的波速不同于岩石试件，如表1-2所示。从表中可以看出，与试件比较，岩体的泊松比较大，而其他弹性常数和波速则较小。因此，在实际工作中，常根据岩体和试件的波速比来评价岩体的完整性，并将该比值称为岩体的完整性系数。

与静态参数比较，除岩石的动态泊松比较小外，其余动态弹性常数则较大。这说明在动载作用下岩石的弹性增大。

应力卸除后保留变形的能力称为塑性。岩石的塑性用塑性系数来表示，其值等于破坏岩石所需总功与弹性能的比值。在应力-应变曲线中（图1-4），破坏单位体积岩石所需总功等于面积OAB，其中弹性能等于面积ODE，因此塑性系数表示为：

表 1-2 岩体和岩石试件的弹性常数和波速

项 目	岩 石 名 称											
	块状裂隙 石灰岩		弱石英化 正长岩		强石英化 正常岩		正长闪岩		再石英岩		花岗闪长岩	
	岩体	试件	岩体	试件	岩体	试件	岩体	试件	岩体	试件	岩体	试件
岩石密度 (公斤/米 ³)	2615		2650	2720	2980	—	2335	2630	2480	2530	2410	2520
纵波速度 (米/秒)	2730		2500	3692	3570	4406	3300	4524	1140	1796	2230	3021
横波速度 (米/秒)	1515		1360	2268	1945	2521	1800	2585	625	1197	1230	1993
声阻抗 ($\frac{\text{公斤} \cdot \text{米}}{\text{米}^3 \cdot \text{秒}} \times 10^5$)	7.1		6.4	9.8	10.6	11.8	7.7	11.9	2.83	4.55	5.37	7.6
剪切模量 (公斤/厘米 ² × 10 ⁵)	0.62		0.48	1.5	1.15	2.1	0.77	2.2	0.09	0.36	0.37	1.0
纵弹性模量 (公斤/厘米 ² × 10 ⁵)	0.83		0.68	3.6	1.63	5.3	1.09	5.5	0.14	0.30	0.54	2.3
拉梅常数 (公斤/厘米 ² × 10 ⁵)	0.76		0.67	0.7	1.58	1.81	1.05	1.93	0.13	0.12	0.48	0.38
体积压缩模量 (公斤/厘米 ² × 10 ⁵)	1.16		0.99	1.6	2.33	2.5	1.58	2.6	0.20	0.32	0.75	1.0
泊松比	0.276		0.291	0.17	0.289	0.26	0.287	0.26	0.291	0.10	0.282	0.12

$$K_P = \frac{\text{面积OAB}}{\text{面积ODE}}$$

塑性系数的倒数称为脆性系数。

岩石的塑性是随着应力状态和加载速度而变化的。大多数岩石在受到拉力或单向压力作用时，塑性系数都很小。静载作用下塑性系数较大的岩石，若提高加载速度，也会增大屈服极限和减少塑性系数（图1-5）。

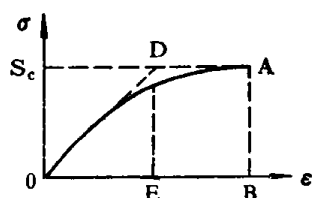


图 1-4 计算岩石塑性系数示意图
Sc—岩石抗压强度

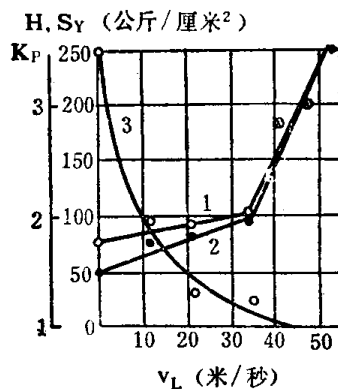


图 1-5 岩石硬度、屈服极限、塑性系数与加载速度的关系（大理岩）
1—硬度H，2—屈服极限S_Y，3—塑性系数K_P

第四节 岩石的强度性质

使岩石发生破坏（脆性破坏或塑性破坏）所需的载荷值，是影响破坏效果的一个重要因素。

无论对岩石施加何种载荷，破坏的类型只有三种：

1. 断裂破坏，断裂面垂直于主拉应力；
2. 剪切破坏，剪切面倾斜于主应力方向；
3. 复杂破坏，同时具有断裂和剪切破坏的特点。

因此，无论在岩体内产生的应力状态如何，破坏都是由于拉应力或剪应力引起的，真正压坏的情况很少。而且，在压力作用下发生的破坏，主要也是由于产生拉伸或剪切变形引起的。

在正应力或剪应力、或在这两种应力共同作用下，物体抵抗机械破坏的能力称为强度。强度分为抗拉强度、抗剪强度、抗压强度。但须指出，通常对岩石试件进行抗压试验时，由于在试件端面上产生摩擦力，妨碍其横向伸长，故在多数情况下观察到的破坏为剪切破坏。

岩石在简单应力作用下的强度，是组成复杂应力状态下破坏准则或强度条件的基础。岩石强度性质的特点是，抗压强度>抗剪强度>抗拉强度。因强度与加载速度有关，故分为静载强度和动载强度。静载试验时，加载速度约为3~5公斤/厘米²·秒。

岩石静载单轴抗压强度可用岩蕊试件来确定，但试验结果受试件长度与直径比值L/D的影响，它们之间的关系为：

$$S_0 = S_{00} \left(0.8 + \frac{0.2}{L/D} \right) \quad (1-15)$$

式中 S_{00} ——标准试件L/D=1的抗压强度。

该式表明，当L/D→0时，抗压强度将趋于无限大，类似流体静载条件下的强度值，而当增大L/D时，抗压强度将趋于某固定值，该值与岩石纯剪切强度间有一定关系。试验时，通常取L/D=1~2。

统计资料表明，在岩石抗压强度、岩石密度、弹性模量之间存在着相关关系，如图1-6，a、b所示。抗压强度与静态弹性模量的关系，可用下列经验式表示：

$$S_0 = 42 \cdot 10^{-4} \cdot E - 445 \quad (1-16)$$

加拿大亨特克公司的研究指出，静载抗压强度与动态弹性模量和剪切模量之间同样存在着相关关系，而且与后者的关系更加密切。

岩石静载单轴抗拉强度可利用拉伸试验直接测定，也可以利用压缩试验间接测定，直接测定的缺点是制作和在试验机上卡装试件较困难，测定结果的精度不高。较好的方法是利用圆片试件进行间接测定（图1-7）。测定时，对圆片试件加压使之发生纵向劈裂，并按下式计算抗拉强度：

$$S_T = \frac{2P}{\pi dh} \quad (1-17)$$

式中 P——试件发生劈裂时所加的压力；

d——试件直径；

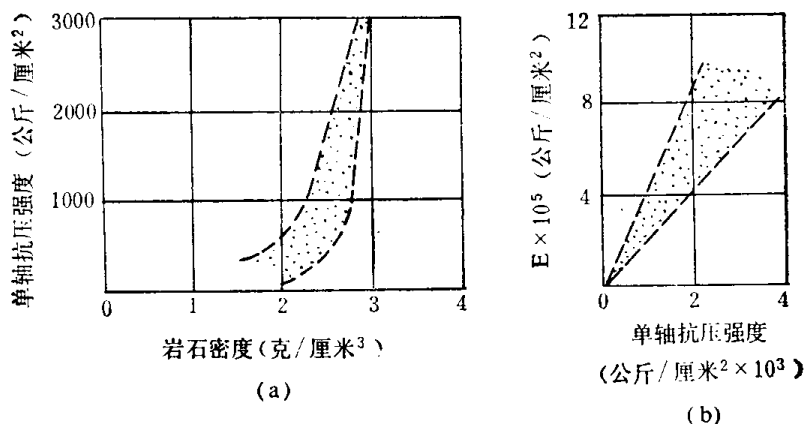


图 1-6 岩石抗压强度与密度、弹性模量的关系
a—抗压强度和岩石密度的关系；b—抗压强度和弹性模量的关系

h ——试件厚度。

间接测定也可以采用不规则形状试件，并按下式计算抗拉强度：

$$S_T = \frac{P}{d^2} \quad (1-18)$$

但式中 d 为加载点间的距离。

岩石的抗压强度和抗拉强度的比值一般为 8~14。

按库仑强度理论，材料的剪切强度 $[\tau] = S_s + \mu_i \sigma$ ，其中 S_s 为纯剪切强度， μ_i 为内摩擦系数， σ 为作用在剪切面上的正应力。纯剪切强度又称单轴抗剪强度，可利用岩蕊试件来测定（图1-8）。内摩擦系数 $\mu_i = \tan \psi$ ，其中 ψ 称为内摩擦角，可按下列公式来确定：

$$\psi = 2 \tan^{-1} \frac{S_c}{S_T} - 90^\circ \quad (1-19)$$

该式表明，内摩擦角与岩石抗压强度和抗拉强度的比值有关。该比值随岩石塑性增大而减小。因此，内摩擦角也是随着岩石塑性性质的增加而减小的。

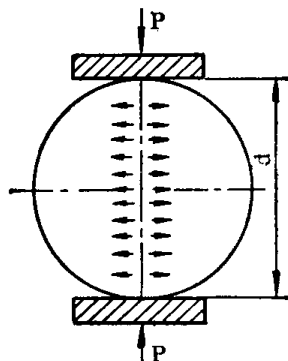


图 1-7 利用劈裂法确定抗拉强度

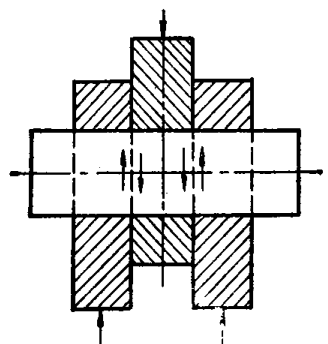


图 1-8 利用岩蕊试件测定抗剪强度

在附表 2 中，给出了若干岩石试件的静载单轴强度、内摩擦角和内摩擦系数值，同时给出了它们的静弹性常数。

在动载作用下，岩石强度与加载速度有关。加载速度提高，强度也相应提高。岩石抗压或抗拉强度与加载速度的关系一般表示为：

$$S = K_M \lg V_L + S_0 \quad (1-20)$$

其中 K_M 为比例系数， S_0 为静载强度。

上式表明，在岩石强度和加载速度的对数之间存在着线性关系。比例系数 K_M 为直线斜率，它代表加载速度对岩石强度的影响程度。该系数决定于岩石的种类和强度类型，见表1-3所示。

表 1-3 比 例 系 数 K_M

岩 石 名 称	抗 压 强 度		抗 拉 强 度	
	S_0	K_M	S_0	K_M
石 灰 岩	308	69	18	2.7
砂 岩	1145	88	43	5.3
辉 长 岩	1920	140	163	18.1

若加载速度由1公斤/厘米²·秒提高到10⁸公斤/厘米²·秒（爆炸加载速度为10⁷~10⁹公斤/厘米²·秒），按（1-20）公式计算表1-3中三种岩石的强度变化如表1-4所示：

表 1-4 加载速度由1提高到10⁸公斤/厘米²·秒时岩石的强度变化

岩 石 名 称	抗 压 强 度			抗 拉 强 度		
	S_0	$\Delta S = K_M \lg V_L$	$\Delta S/S_0$	S_0	$\Delta S = K_M \lg V_L$	$\Delta S/S_0$
石 灰 岩	308	552	1.79	18	21.6	1.2
砂 岩	1145	704	0.61	43	42.4	0.99
辉 长 岩	1920	1120	0.58	163	144.8	0.89

从表1-4可以看出，静载强度高的岩石，若提高加载速度，强度增量虽高，但相对增量却减小。

但某些研究结果指出，加载速度只影响抗压强度，对抗拉强度的影响则很小。

对大多数岩石来说，在复杂应力状态下，若其中有一个主应力为拉应力，则其破坏形式主要决定于拉应力和岩石的抗拉强度，而后者不受应力状态的影响。当岩石处于各向压缩状态时，破坏前将产生较大的塑性变形，而且抗压强度也会急剧增高。研究指出，在爆炸载荷作用下，近爆炸区内处于各向压缩状态的岩石，其抗压强度约为静载单轴抗压强度的10~15倍。

由于岩体内存在节理、裂隙等结构面，所以，岩体强度低于试件强度。若岩体完整性系数为 K_c ，抗压强度大约下降 K_c^2 倍。

第五节 岩石的可钻性

在岩石上钻眼的难易性称为可钻性。选用钻眼机械、钻具、钻眼工艺参数和编制钻眼工作定额等，都需要了解岩石的可钻性。