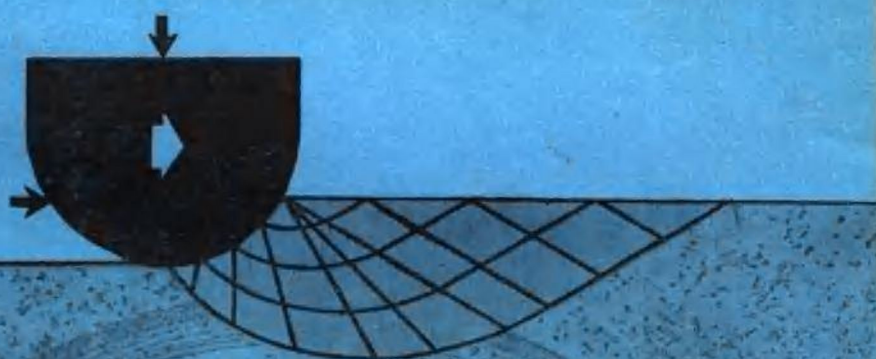


高等学校教材

# 岩石破碎学

屠厚泽 高森 编



地质出版社

TD231.1

3  
2

高等学校教材

# 岩石破碎学

屠厚泽 高 森 编

1015

地质出版社

**B** 727951

## 内 容 简 介

本书是高等学校探矿工程专业高年级学生的《岩石破碎学》教材（适用于60学时左右）。全书的内容包括：岩石的强度理论和破碎理论；岩石的物理学性质及其测定；岩石的研磨性；岩体及孔壁的稳定性；岩石可钻性及其分级；岩石的切削；金刚石钻头破碎岩石；动载破碎岩石；破碎岩石的新方法等九章。

书中较详细地介绍了80年代国内、外岩石破碎学专家和岩石破碎学著述中的岩石破碎理论与技术成果，对有关的理论公式及实验结果都作了较详细的推导和论证，并附有必要的图表资料。

本书不仅可作为探工专业科技人员研究岩石破碎的基本读物，还可供有关专业的研究生参考。

### 高等学校教材 岩石破碎学 屠厚泽 高森 编

责任编辑：郇泰宁 李源明

地质出版社出版

（北京和平里）

地质出版社印刷厂印刷

（北京海淀区学院路29号）

新华书店总科技发行所经销

开本：850×1168<sup>1/32</sup> 印张：11.3125 字数：297000  
1990年11月北京第一版·1990年11月北京第一次印刷  
印数：1—2305册 定价：2.70元  
ISBN 7-116-00686-9/P·584

# 前 言

《岩石破碎学》是研究岩石在不同性质的外载作用下，其应力、应变的变化规律以及破碎前的预兆；阐述在钻探工程、采掘工程中所采用的主要破岩方法条件下的碎岩基本理论和破碎过程。它是探矿工程专业本科高年级学生的一门专业课教材，同时亦适用于选修该课程的研究生以及从事岩石破碎研究的工程技术人员、教师参考。

本教材总结了各兄弟院校长期讲授《岩石破碎学》课程中所使用的各种类型的教材和讲义，同时也归纳了作者和其它国内、外研究工作者在本专题范围内所取得的研究成果。因而，本教材具有如下的一些特点：

- 一、对于与岩石破碎有关的力学、物理性质以及钻进时的力学过程，教材中作了重点介绍；
- 二、较系统地阐述了现代破碎岩石的基本理论与基本观点；
- 三、对各种类型的钻进方式和破岩方法的实质过程，作了较为详细的介绍。

本教材的绪论部分，第一、三、五、七章是由屠厚泽编写；第二、四、六、八、九章系由高森编写。最后，由屠厚泽对全稿进行了编纂。

中南工业大学杨锡林教授对本书进行了详细认真的审阅，并提出了宝贵而具体的修改意见。中国地质大学（武汉）鄢泰宁副教授任本教材的责任编辑，他除了作例行性的编辑加工外，对全稿还作了若干订正工作。编者在此谨向他们表示深切的感谢。

由于水平所限，书中定有错误和不足之处，恳希使用本教材的读者批评指正。

编 者

1989.12.20

# 目 录

绪 论	1
§ 1. 岩石破碎学的研究目的和意义	1
§ 2. 岩石破碎学所研究的内容和范围	1
§ 3. 岩体的基本地质特征	3
§ 4. 岩块的结构与构造	5
§ 5. 破碎岩石方法的分类	6
第一章 岩石强度理论和破碎理论	7
§ 1. 岩石物理学的一些问题	7
§ 2. 岩石力学强度理论	10
§ 3. 莫尔及库伦-纳维尔-莫尔准则	26
§ 4. 平面的格里菲斯准则	32
§ 5. 格里菲斯准则的默雷尔推广	34
§ 6. 钻进中应力波传播的基本问题	36
§ 7. 半无限平面及半无限体中的应力分布问题	47
§ 8. 断裂破碎	54
§ 9. 工具与岩石接触时的应力和破碎状态	63
§ 10. 钻进过程的破碎力能学基础	84
第二章 岩石的物理力学性质及其测定	89
§ 1. 概述	89
§ 2. 岩石的密度和水理性质	91
§ 3. 岩石的热学性质	95
§ 4. 岩石的单轴抗压强度	95
§ 5. 岩石的抗拉强度	97
§ 6. 岩石的抗剪强度	100
§ 7. 岩石的硬度	102

§ 8. 岩石的动载性质 .....	110
§ 9. 岩石的三轴强度 .....	113
§ 10. 破碎比功的测定 .....	116
§ 11. 岩石的弹性 .....	119
§ 12. 岩石的塑脆性 .....	127
§ 13. 影响岩石强度的因素 .....	129
§ 14. 影响岩石硬度的因素 .....	135
<b>第三章 岩石的研磨性 .....</b>	<b>144</b>
§ 1. 概述 .....	144
§ 2. 工具和岩石的摩擦 .....	145
§ 3. 磨损原理 .....	151
§ 4. 工具磨损的测量方式 .....	152
§ 5. 岩石的矿物成分和机械性能对研磨性的影响 .....	153
§ 6. 岩石研磨性的测定 .....	155
§ 7. 润滑机理及润滑对工具磨损的影响 .....	159
§ 8. 岩石研磨性的分级及岩石研磨性的量度 .....	161
<b>第四章 岩体及孔壁的稳定性 .....</b>	<b>164</b>
§ 1. 概述 .....	164
§ 2. 岩体中的原生应力场 .....	167
§ 3. 风化作用和水对岩体的影响 .....	169
§ 4. 岩体的工程分级 .....	170
§ 5. 岩石变形的基本规律 .....	173
§ 6. 岩石破坏后的性质 .....	177
§ 7. 岩石的流变性质 .....	180
§ 8. 岩石的流变模型 .....	184
§ 9. 钻孔围岩应力及地压 .....	186
§ 10. 影响地压显现的物理化学因素 .....	189
§ 11. 水力压裂 .....	192
<b>第五章 岩石可钻性及其分级 .....</b>	<b>195</b>

§ 1. 概述 .....	195
§ 2. 岩石可钻性的研究方法 .....	196
§ 3. 岩石按物理力学性质分级 .....	196
§ 4. 利用现场实际钻进资料 (即实钻法)和比功法 进行岩石可钻性分级 .....	200
§ 5. 利用模拟钻进实验台对岩石进行可钻性分级 .....	203
§ 6. 国外研究岩石可钻性的现状 .....	210
<b>第六章 岩石切削</b> .....	214
§ 1. 岩石切削特点及切削具作用下的应力分布 .....	214
§ 2. 岩石切削理论和切削力计算 .....	219
§ 3. 岩石切削时的振动 .....	225
§ 4. 岩石切削的数学模型 .....	230
§ 5. 影响岩石切削效率的因素 .....	233
§ 6. 切削岩石过程中切削具的磨损 .....	239
<b>第七章 金刚石钻头破碎岩石</b> .....	244
§ 1. 概述 .....	244
§ 2. 表镶金刚石钻头的钻进原理及工艺 .....	245
§ 3. 孕镶金刚石钻头的钻进破岩机理 .....	256
§ 4. 孕镶金刚石钻头钻进的井底过程 .....	260
§ 5. 孕镶金刚石钻头的自锐过程 .....	264
§ 6. 提高孕镶钻头中金刚石与胎体粘结力的措施 .....	276
§ 7. 金刚石钻头钻进的溫度规程 .....	281
§ 8. 复合式金刚石切削具的破岩机理 .....	294
<b>第八章 动载破碎岩石</b> .....	299
§ 1. 动载特性 .....	299
§ 2. 表面动载作用下脆性半空间的破坏 .....	303
§ 3. 动载时岩石力学性质的变化 .....	306

§ 4. 冲击载荷能量的传输效率 .....	310
§ 5. 动静载碎岩效果的对比 .....	312
§ 6. 冲击参数对碎岩效果的影响 .....	314
§ 7. 牙轮钻头的碎岩特点 .....	321
§ 8. 冲击磨损 .....	325
<b>第九章 破碎岩石新方法</b> .....	<b>332</b>
§ 1. 高压水射流破碎岩石 .....	332
§ 2. 火钻 .....	344
§ 3. 激光破碎岩石 .....	346
§ 4. 等离子体破碎岩石 .....	347
§ 5. 电子束破碎岩石 .....	348
§ 6. 微波破碎岩石 .....	349
§ 7. 其它破碎岩石的新方法 .....	350
<b>主要参考文献</b> .....	<b>353</b>



# 绪 论

## § 1. 岩石破碎学的研究目的和意义

随着工业和社会经济活动日益发展，人们从事的岩土破碎工作量也日益增多。众所周知的固体、气体、液体矿床的勘探开采和加工等，都要对从最松散土层直到最坚硬的岩层进行破碎和剥离。而且其开采和加工工作量的增长速度远远超过勘探工作量。全世界消耗在岩石破碎和剥离的资金和材料，是一个非常巨大的数字。因此，哪怕是稍稍地提高破岩效率，降低材料比耗，实际上所产生的经济效益是相当可观的。各国的学者都从不同方面和角度从事着这方面的工作。

完善破碎岩石的方法，包括对碎岩工具的材质、形状的改善，对破碎岩石的方法和方式的改进。但这些改进的基础必须统一在对岩石的破碎机理有明确认识后才能进行。复杂的是钻进和凿岩时岩石破碎是发生在不能直接观察到的井底，这通常用“井底过程”这一术语来描述，它是研究生产过程中岩石实际破碎状态的重要环节。由于各种测试技术，遥感技术和数据自动采集与处理技术的发展，目前我们已逐步地对这种“井底过程”的了解，由定性过渡到定量并期望能达到逼真程度。

## § 2. 岩石破碎学所研究的内容和范围

岩石破碎学研究的内容从宏观的角度来看包括：破碎的形式和效果，破碎的比能耗，破碎矿物的粒度等等；从微观的角度，则主要包括破碎过程的发展，破碎前的应力分布状况，破碎前的

各种征兆和数据等等。由于目前所用破碎岩石的手段和方式不同（如机械式破碎、热力式破碎、高压水射流式破碎及各种电磁、超声波、激光等方式的应用和探索）使岩石破碎机理存在着很大差异。加之岩石这一被破碎对象是不同造岩矿物所组成的集合体。具有各种天然应力所造成的软弱面及不同的组织构造，性质差异极大，所以，破碎的效率很不相同，因而研究岩石破碎必须和具体的岩石地质特征、外载性质与条件相联系起来。

在各种工程施工时，人们总是在不断努力改善岩土破碎效果，以加快施工进度。为此，人们致力于改进碎岩工具和方法，以利于破碎岩石。但为了施工能得到继续有效地进行，还希望被施工的岩石具有一定稳定性和牢固性，以保持施工后的形态。所以，从广义的角度来看，岩石破碎实际上是包括了破碎和稳定的两个范畴。即岩石在各种外载和物化作用下的破碎规律、破碎效果、破碎过程，以及在上述作用下保持稳定的极限条件。

在研究岩石破碎和失稳时，根据实验研究的条件不同，具体分成两大类：一类是施工现场原生岩体的破坏与失稳；一类是生产条件下井底岩石破碎过程及井壁岩体的稳定。后者将是我们首先要关注和研究的问题。

岩体的性质往往是不能用岩块性质来代表的，岩体是地质体的一部分，是处在一个特定的地质环境中受到各种地质构造（如节理、层理等不连续面的切割）和风化，蠕变，松弛等各种应力场的影响，因而具有各种形态的不整合与天然的软弱面。而岩块则是从天然岩体中，取出的较为标准的样块，人为地排除了大部分天然的软弱面——如明显的空隙，裂隙，风化等等构造；在取样时也必然地改变了岩体的天然应力场。上述这些结构和应力场的不同，使岩体和岩块间的力学性质上产生了明显的差异。这种现象伯诺利（L. Brolli）作了简要的概括：即岩体结构对岩体力学性质的影响远远大于岩块。岩体强度是不同结合程度的多块体的残余强度。岩体的变形与组成该岩体的单元活动性密切相关。岩体结构特征决定于岩体的机械强度和变形的难易，岩体的物理

力学性质与结构面的状态密切相关。但由于测定原生岩石的物理力学性质的复杂性和井底过程监测的困难性，采用岩块来进行实验室研究，依此作为重要的参考数据和对比资料，在当今的技术水平条件下，仍是必要而不可缺的。而且，当前正在继续追索这两者之间的统计相关性。因此，研究岩石破碎学时，对岩体和岩块力学的研究是不能忽略的。

目前，用机械方式破碎岩石的比例仍占90%以上。机械方式破碎岩石时，很重要的环节是碎岩工具的磨损与消耗问题。岩石在破碎过程中以其坚硬的矿物颗粒和不平整的粗糙面，摩擦和磨损工具的刃棱、刃面，急剧地削弱了工具进一步有效碎岩的能力，改变了工具破岩时的压强，使岩石内部的应力分布状态亦有所改变，导致岩石破碎状态相应地起了变化。由于岩石与切削工具间的磨损，除了这两者材质的内在因素外，所施加的外载性质也起着重要的作用，它会改变相互作用面的性能和磨损、摩擦的状态。因此，研究岩石破碎过程就必然要和磨擦、磨损相联系。

### § 3. 岩体的基本地质特征

岩石是一种或多种矿物组合成的集合体。它往往经过生成和改造两个过程。如：沉积岩一般要经过母岩的破坏，搬运，沉积，压密，胶结等过程而形成岩体。这些岩体不仅具有一定的物质成分和构造特征，而且，在这些运动与建造过程中还具有一定的岩体力学特性。岩浆岩是由于埋藏在地壳内部的岩浆侵入和喷出到地表后，经过冷却和结晶而成。变质岩的形成是一种渐变过程，它的转化主要由母岩所处的物理化学环境所决定，如温度、压力、介质环境等等。岩浆岩经过变质后，通常情况下其力学性质是向“坏”的方向发展，即发育了片理结构，增加了含水的矿物组，使其强度变低、变形增大。沉积岩经过变质作用后，其力学性质一般变“好”。岩石在地质作用形成后，经过大自然的剥蚀、风化，形成裂隙，有的甚至在长期风化作用下变成极其破碎

的非连续体。地壳运动有时使风化过的岩体又埋入深处，而将内部的岩石出露到地表。当岩石受到温度和压力的反复变化后，使其天然应力场发生变化，使出露于地面的岩体产生卸荷裂隙。这种由地壳运动而产生的构造运动，其特点是：作用的范围大，时间长，次数频繁，使岩石变成断层、节理纵横交错的多裂隙体。显然构造作用次数愈多，岩体破碎愈剧，其力学性能愈差。岩体的生成规律主要是：沉积岩具有层理；变质岩具有片理；岩浆岩具有水平节理。

岩石的风化程度可以通过三种指标来衡量：第一种是矿物风化指标，这个指标是伦布（P. Lumb）在研究花岗岩风化性质时提出的，主要是指风化与新鲜岩石中石英与石英加长石重量间的变化值；第二种指标是指波速风化指标，是指在岩石中纵波速度随风化程度而降低的规律。用相对比值来评价岩石的风化程度指标，是由伊利伊夫所提出的；第三种指标是风化空隙度指标；它是指岩石快速浸水后风化岩石中水的重量与干燥岩石重量的比值。这个值可以近似地表示风化后岩石中空隙度的大小，它是由汉罗尔（Hanlure）提出的。

风化作用不仅改变了岩石的结构与构造，还可以改变岩石的矿物组成。随着风化程度加大，岩石的空隙度和变形也增大，其力学性质变差，工程性质亦降低。

岩体除受风化作用外，主要还受着软弱面网络的控制，使其与岩块在力学性质上有重大差异。这种软弱面的成因大致分三类：第一类是原生软弱面，是在形成岩体过程中形成的。如岩浆岩流通构造面和其冷却时形成的原生裂隙面，浸入体与接触带的构造面；沉积岩体内的层理面不整合面；变质岩的片理面以及片麻构造面。这些界面均构成非均匀连续体而形成不同性质与状态的软弱面。这些原生软弱面除了由于严重风化和构造运动形成脱裂面外，均具有一定的连接力和一定的强度。第二类是构造软弱面，这是在岩体形成后，由于构造运动所产生的各种破裂面，如断裂面，层间错动面，各种断层和裂隙。这种软弱面的特

点是除了有些已胶结的外，大部分是脱开的。裂隙大的多数充填有厚度不同、类型和连续程度不同的充填物，有的泥化为或是变为软弱夹层。大部分夹层面的工程性质很差，强度多接近于残余强度。第三类是次生软弱面，主要是前述的一般风化裂隙面、卸荷裂隙面等。风化裂隙面发育深度一般较浅，方向紊乱，连续性很差，但会影响岩体的强度和变形模量。

#### § 4. 岩块的结构与构造

一般从微观的角度来分析岩块的结构，它是指岩块中矿物颗粒的结晶程度，颗粒大小，形状及其空间排列的定向性等所反映的特征。矿物颗粒分为晶体和非晶体两类。组成晶体的微粒是有规律地、周期地排列成晶粒，具有有序性，使许多物理性质具有各向异性的特征；非晶体中的微粒其分布不具有有序性，因而不具有许多晶体的特性（如面角定律，规则的几何外形等）。

当矿物组成一定时，晶体颗粒愈小，则呈现细（微）晶，微晶和隐晶时，岩块的强度往往增大。反之亦然。一般条件下粘土矿物的晶粒愈小，愈不易形成定向排列。因此某些细晶的岩块（如一些喷出岩）往往没有各向异性。矿物颗粒形状对岩块的力学性质也有作用。片状的矿物颗粒较易形成定向排列，而粒状矿物颗粒则不易形成。所以其它条件相同时，含片状矿物较多的岩块，其各相异性就明显。

岩块的构造是指矿物颗粒集合体之间、矿物颗粒集合体与其它组成部分之间的排列方式与充填方式，以及岩块中的显微裂隙和分离程度很低的密闭裂隙的发育特征。它能使岩块的力学性质具有不连续性。

由于岩块的各向异性与不连续性较为显著，而在研究岩块力学性质时，尽管也必须注意到上述岩块的非连续性和各向异性，但常常在作室内实验时近似地视为均质的、各向同性的、具有连续力学性质的固体材料。

## § 5. 破碎岩石方法的分类

根据目前已经用于生产的，或者有使用前景的破碎岩石的方法来看，基本上分为两大类。

第一类，机械式破碎。在生产上已广泛采用的有以下几种：

回转式破碎——金刚石钻进、硬质合金钻进、钢粒钻进、牙轮钻进、刮刀钻进等。

冲击式破碎——风动或液动式冲击钻进、钢绳冲击式钻进等。

冲击回转破碎——液动式冲击回转钻进、风动式冲击回转钻进等。

振动式破碎——振动钻进、振动回转钻进。

第二类，无钻头新式破碎：

热力破碎——熔融式热力钻进，高温高压热气流钻进等。

水力破碎——高压水射流钻进、水射流机械回转联合钻进。

激光破碎和超声破碎——这两者目前仍局限在室内破碎岩块，或者对局部岩石进行切割。

电磁破碎——高频电磁破岩等。

水电效应破碎——在液体中进行放电破岩。

# 第一章 岩石强度理论和破碎理论

## § 1. 岩石物理学的一些问题

岩石是从熔融物中凝固和析出的各种不同形态和结构的固体。尽管它与其它固体物质相比，其不均匀性非常显著，但外形轮廓仍能体现物质晶体结构的某些特点。而作为组成岩石的矿物，则具有良好的晶体结构。在自然界的条件下单个晶体自由生长的机会是罕见的，矿物结晶是在大量矿物同时结晶而开始生长的，晶体间互相接触，在继续生长过程中，结晶物就充填在晶体空间，从而形成晶粒和不规则的微晶。具有理想晶体结构的固体，其强度称为理论强度。它可以计算出来，其值往往超出实测技术强度的数百倍至数千倍。如锌可达4500倍；岩盐达900倍；石英达90倍。其巨大差别的原因是由于实际晶体结构不完备，存在有点、线、面缺陷引起的。点缺陷是由于晶体节点上未被质点占据而出现空位，或者晶体间有离子侵入，以及异种原子和离子进入晶格，造成晶体结构畸变和局部减弱；线缺陷，或通常所谓的位错，是破裂表面的边缘形成的边缘位错及晶体的这一部分对另一部分移动所形成的螺旋位错；面缺陷是指具有自由面的表面，也可以视为晶体结构的一种缺陷形式，因为处于表面，和体内的质点相互间联系能量状态不同，两者之间的差值即为表面能。

### 一、固体的理论强度

固体质点间存在着吸引力和排斥力，才能保证整个质点系的平衡，否则诸质点就会在自重下慢慢靠近以致达到完备的物理接触，成为理想刚体。质点间的吸力与斥力是随距离而改变的，但斥力反应更为激烈。在质点间距离很近时，斥力占优势，反之则

吸力占优势。固体拉伸时，要使原来质点间的距离增大，引力占主导地位；当各向压缩时，其抗压缩阻力则取决于斥力。

图1—1是质点相互作用能的曲线。质点间距离为 $r_0$ ，作用合力等于零的平衡状态时，相互作用能最小。当承受拉伸力 $P_1$ 和压缩力 $P_2$ 时，质点间的距离相应地由 $r_0$ 变为 $r_1$ 或者 $r_2$ 时，所消耗的功值为 $\Delta W$ ，如欲完全破碎质点间的联接，所消耗的能相当于 $r_0$ 处纵坐标所表示的功。

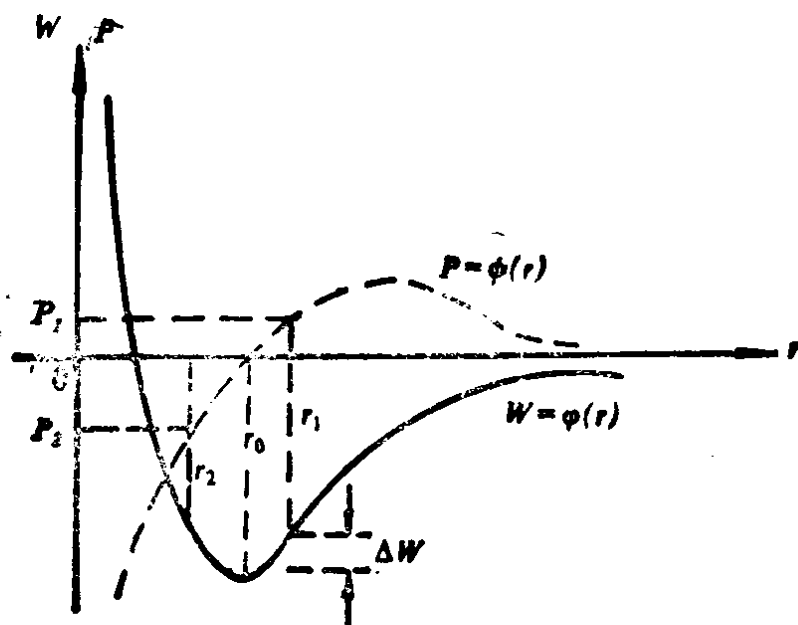


图 1—1 质点相互作用能与距离关系曲线

岩石矿物的颗粒属于无机化合物。其晶体晶格上相互作用力基本上是电性质的，在晶格节点上，是正负离子相间隔，因而质点间相互作用力主要是静电力决定的。晶体晶格能 $V$ 可以用下式表示：

$$V = -\frac{Ae^2}{r} + \frac{B}{r^n} \quad (1-1)$$

式中第一项是由引力产生的，第二项是由质点间斥力引起的。

式中  $A$ ——麦德隆常数（等于 1.39）；

$e$ ——质点所带的电荷；

$B$ ——与晶体结构有关的常数；

$n$ ——与晶体类型有关的指数（离子型晶体  $n = 9 \sim 11$ ；

分子型  $n = 2 \sim 3$ ）。



晶体内的连接强度取决于静电吸引力。离子距离减少，吸引力增大强度增加，同样硬度值亦随着距离减少而增加。金刚石属于原子晶体，其中碳原子距离很近，所以金刚石具有特别大的硬度。

金属的物理性质与离子及无机化合物的物理性质相差很大，这是由于金属内的全部电子不仅属于邻近的原子而且属于整个金属中的晶体所造成的电子系，其质点的互作用力远比离子晶格和原子晶格复杂。

## 二、尺寸效应

在实验室进行岩样实验时，通常发现的现象是小尺寸试样的强度要比大尺寸的高。在某些具体条件下，非常小尺寸的材料之实际强度可以达到理论强度。如由熔融石英作成直径约为 $1\mu\text{m}$ 的细丝，其抗拉强度差不多是 $10000\text{N}/\text{mm}^2$ ，相当于结晶石英的理论强度，是石英为粗试件的实际强度的100倍。以石英试件为例，当直径从小于 $1\text{mm}$ 开始，逐渐减小试件，其强度逐步增大。

图1—2表示石英的抗拉强度与试件直径的关系。

试样在承受压缩时，其强度也有随线性尺寸减少而增大的现象。强度随着直径减小而增大的原因，有些学者认为是：在较粗的试样中，容易碰到具有明显的表面和体积缺陷。

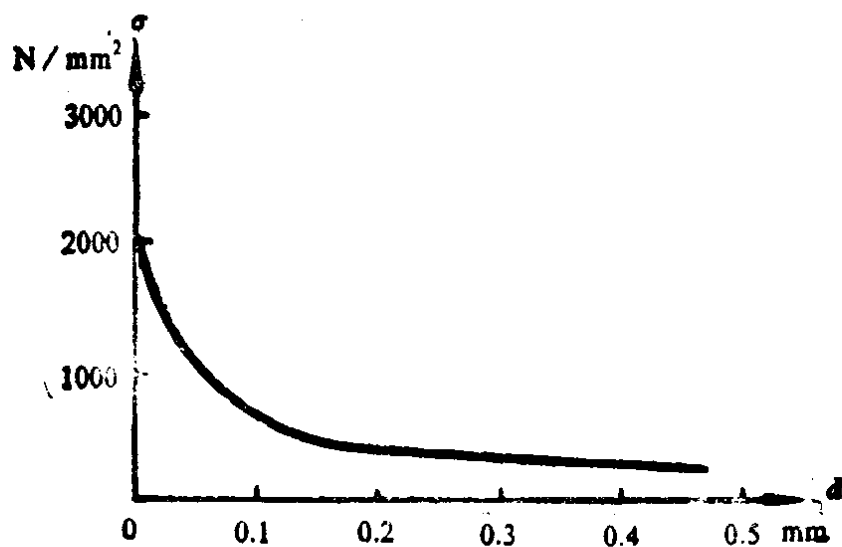


图 1—2 石英抗拉强度与试件直径的关系