

# 岩石破碎学

地质出版社



# 岩石破碎学

徐小荷 余 静 编著

煤炭工业出版社  
1985.7.



破碎岩石是采矿工作者的日常基本任务之一。近二、三十年来，在破碎岩石方面有着很大的进展，积累了大量的实际资料，有了初步的理论概括。不过，在现场工作的同志，很难系统地接触到这些文献资料，利用它来改进自己的工作。我们编写这本《岩石破碎学》，就是希望把这些零散的成果汇总成比较完整的体系，献给战斗在第一线的采矿工作人员。

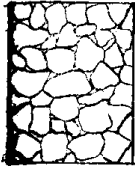
但是，要完成《岩石破碎学》这样庞大的工作，我们是力不从心的，只能先搭个架子，倡导一番，起到抛砖引玉的作用。岩石破碎学是正在发展中的学科，在内容上有待充实，体系上有待完善，特别是它的基础理论和研究方法方面，更有待于探索和发展。这些任务需要广大采矿工作者，尤其是有志于岩石破碎学的同志来共同完成。

在目前阶段，最重要的和最有应用价值的是试验资料、研究方法、实际数据和藉以引出的结论，这些都是进一步提出理论的资料和依据。对于数学推演，我们着重介绍其观点和思路，避免陷于冗繁的推导过程，必要时请参阅相应的文献。考虑读者阅读方便，在内容编排上，各章有相对的独立性。本书内容的一部分，也可选作大学生和研究生课程的材料。

本书第一、二、三、四、六、七、十二、十三章由徐小荷编写，五、八、九、十、十一诸章由余静编写。本书编写过程中除了得到我院岩石破碎研究室同志的大力支持外，高森、张天锡、陶在朴、姜荣超等同志热情地给我们提供了部分资料。阜新矿业学院，武汉地质学院，华北水电学院，武汉建材学院，成都地质学院，北京钢铁学院，中南矿冶学院，西安冶金建筑学院，鞍山钢铁学院，山东冶金学院，河北矿冶学院，沈阳黄金专科学校，长沙矿山研究院，长沙矿冶研究所等单位的有关同志，在编、审本书初稿时都提出了宝贵意见，特此一并致谢。由于我们水平所限，对书中的错误和缺点，恳请读者批评指正。

作者

于东北工学院岩石破碎研究室

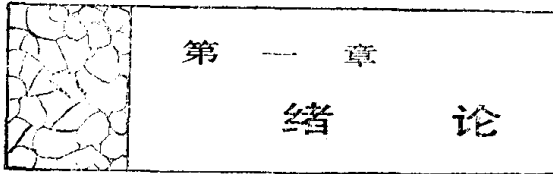


# 目 录

第一章 绪 论 .....	1
第一节 岩石破碎学是采矿工程的基础科学 .....	1
第二节 岩石破碎学的内容和任务 .....	1
第三节 岩石破碎学的研究方法 .....	4
第二章 强 度 理 论 .....	6
第一节 晶体破碎理论简述 .....	6
第二节 力学强度理论问题的提出 .....	10
第三节 剪切破坏的强度理论 .....	11
第四节 脆断破坏的强度理论 .....	17
第五节 C.Д.伏尔柯夫统计强度理论 .....	18
第六节 裂纹的扩展理论 .....	24
参考文献 .....	32
第三章 破碎程度和破碎功 .....	33
第一节 粒度(块度)及其度量 .....	33
第二节 粒度分布的规律 .....	38
第三节 破碎比功的学说 .....	41
第四节 凿岩时的岩粉粒度组成 .....	45
第五节 特征比功 .....	48
第六节 破碎程度和比功的测定 .....	52
参考文献 .....	57
第四章 压头静力侵入岩石 .....	59
第一节 压头侵入岩石的基本现象 .....	59
第二节 压头下的应力分布 .....	60
第三节 侵入硬度 .....	66
第四节 载荷-侵深曲线 .....	74
第五节 压头尺寸和形状的影响 .....	79
第六节 环境对侵入的影响 .....	84
第七节 侵入功 .....	87
第八节 侵入理论分析 .....	90
参考文献 .....	97
第五章 滚压破碎岩石 .....	99
第一节 概述 .....	99
第二节 滚压刀具 .....	100
第三节 滚压破岩原理和基本规律 .....	101

第四节	牙轮钻主要参数的分析和计算原则 .....	108
第五节	掘进机主要参数分析和计算 .....	115
	参考文献 .....	127
第六章	冲击破碎岩石 .....	129
第一节	冲击破碎岩石概述 .....	129
第二节	冲击速度和冲击力 .....	130
第三节	冲击载荷下的岩石强度、硬度及比功 .....	132
第四节	冲击速度和粉碎程度的关系 .....	138
第五节	冲击功和砸碎比功 .....	139
第六节	凿入破碎及其影响因素 .....	142
第七节	凿入系数的测定 .....	153
第八节	冲击破碎岩石的力学分析 .....	155
	参考文献 .....	157
第七章	冲击式凿岩的理论分析 .....	159
第一节	为什么凿岩要研究应力波 .....	159
第二节	扰动的传播就是波 .....	161
第三节	波阵面的守恒条件 .....	163
第四节	波的叠加 .....	165
第五节	波的反射和透射 .....	165
第六节	撞击和入射波 .....	168
第七节	凿入分析 .....	170
第八节	入射波形对凿入效果的影响 .....	172
第九节	波在钎杆中的衰减 .....	175
第十节	凿岩机的推力计算 .....	176
第十一节	钎杆的寿命 .....	178
	参考文献 .....	181
第八章	切削破碎岩石 .....	182
第一节	截、刨、挖、钻的特征和刀具几何参数 .....	182
第二节	切削破岩机理和参数计算 .....	184
第三节	切削参数分析 .....	199
第四节	钻削参数分析 .....	208
第五节	犁松破岩简介 .....	211
	参考文献 .....	213
第九章	研磨破碎岩石 .....	215
第一节	研磨钻探技术概况 .....	215
第二节	金刚石钻进 .....	216
第三节	研磨破岩机理 .....	224
第四节	金刚石钻进参数分析 .....	233
第五节	钢粒钻进 .....	238
	参考文献 .....	242
第十章	水射流破岩 .....	244
第一节	概述 .....	244

第二节	高压水射流发生装置的工作原理 .....	244
第三节	高压水射流破岩理论 .....	247
第四节	水射流破岩基本参数分析 .....	255
第五节	水射流破岩有关参数的计算 .....	262
	参考文献 .....	267
第十一章	岩石的热破碎 .....	269
第一节	概述 .....	269
第二节	高温下岩石的物理力学性质 .....	270
第三节	岩石内的热传导和热应力 .....	278
第四节	岩石的热破碎理论 .....	283
第五节	热发生装置和破碎效果 .....	285
	参考文献 .....	301
第十二章	岩石坚固性及其分级 .....	303
第一节	岩石坚固性的概念和观点 .....	303
第二节	测定岩石坚固性的常用方法 .....	308
第三节	岩石组成和结构对坚固性的影响 .....	321
第四节	岩石坚固性的离散系数和分级依据 .....	326
第五节	主要分级表 .....	333
	参考文献 .....	343
第十三章	岩石的磨蚀性 .....	346
第一节	研究岩石磨蚀性的意义 .....	346
第二节	磨蚀作用的物理实质 .....	347
第三节	研究岩石磨蚀性的一般方法和观点 .....	349
第四节	岩石磨蚀性的基本关系 .....	353
第五节	冷却和冲洗液对磨蚀性的影响 .....	357
第六节	不同工具材质的磨损 .....	359
第七节	冲击磨损 .....	361
第八节	岩石的结构组成和磨蚀性的关系 .....	363
第九节	岩石按磨蚀性分级 .....	365
第十节	磨蚀对破碎效率的影响及工具的消耗率 .....	367
	参考文献 .....	371
	人名翻译索引 .....	374



## 第一节 岩石破碎学是采矿工程的基础科学

在采矿作业中经常遇到的、最简单的、最基本的过程，便是从岩体中破碎出岩块来，同时，在被破碎的岩体中所形成的空间，又要加以维护，以保持该空间的稳定性。防止周围岩石的破碎。在采矿工程中，用锹镐挖掘，钎子打眼、炸药爆破、滚刀碾压、水流喷射，以及用火焰喷烧、激光照射、电子束切割等破碎方法，都是为了解决变岩体为岩块的问题；而井巷支护、露天边坡、注浆固结、充填空场、存留矿柱等维护手段，都是为了保持岩体的稳定性防止其破碎。光面爆破和预裂爆破等都是利用破碎的手段来达到防止破碎的目的。煤矿中所谓“综采”，则是将破碎和防止破碎结合成一体。

从广义来看，破碎岩石和维护岩体的稳定性在空间上的布局和在时间上的顺序，便构成了平常所谓的开拓方案和采矿方法。

由此可见，破碎岩石和防止岩石的破碎，是采矿工程中所特有的根本矛盾。这一矛盾的不断产生和不断解决，维持着采矿的正常生产，也推动采矿技术的发展。“科学研究的区分，就是根据科学对象所具有的特殊的矛盾性。因此，对于某一现象的领域所特有的某一种矛盾的研究，就构成某一门科学的对象”（《矛盾论》）。因此，抓住采矿科学的这个特有矛盾的研究，逐步建立和完善这一基础科学，必将推动采矿工程技术的发展。探讨最经济、最有效的破碎技术和理论问题，就是岩石破碎学的主要任务。

## 第二节 岩石破碎学的内容和任务

近二十年来，国内外在岩石破碎的研究方面作了大量的工作，所涉及的主要内容，大致可以归纳为以下九个方面。

### 一、破碎岩石的功能转化

各种破碎方法都将消耗一定的能量，而得到的是一定数量的不同粒度的岩块。能耗和岩块数量、粒度间的关系，是岩石破碎的一个基本问题。

还在1867年和1885年，黎金格（Rittinger）的新表面理论和盖克（Kick）的相似理论企图回答这个问题。1952年又有邦德（Bond）的所谓第三破碎理论，它是从实际资料中归纳出来的。这些理论在选矿破碎方面得到广泛应用，近年来，在采矿的各种破碎工艺上也开始应用，在一定程度上反映了原因和效果之间的联系，但对于采矿中的复杂情况，还需要验证和做更深入的研究。

### 二、破碎效果的规律性

所谓破碎效果，是指破碎后的块度分布规律和破碎的范围。在破碎后岩石的块度分布方面，一般引用指数函数来表示其筛下累计量。近些年来，有些人主张用对数正态分布函

数来描述块度分布，得到较好的结果。不过各种破碎工艺和这些分布函数间的吻合程度，尚须作进一步证实。但分布参数和破碎参数或物理力学过程之间有何种内在联系，是一个很有意义的问题。

爆破破碎方法，不仅需控制块度，控制破碎范围也是一个至关重要的课题。

各种机械破碎方法，都首先要使工具侵入岩石，因此，研究工具侵入岩石的规律，可以提高破碎效率和指导工具的设计。目前基本搞清的规律有：侵深-载荷曲线具有跃进式变化、载荷和侵深及崩碎坑投影面积在统计上有比例关系、破碎角变化不大等关系。

### 三、各种破碎方法的外载荷特点

为了深化岩石破碎的研究，就不能停留在破碎“之前”和“之后”的简单联系上，还要揭露破碎进行的过程。为此，首先要知道外加载荷有哪些特点，外载荷不清楚，破碎机具的强度设计就没有依据。采矿工程中用来破碎岩石的载荷，往往不是恒定的静力，而是爆炸、冲击、碾压，以及局部骤热之类的载荷。这些载荷在短暂的时间内发生很大的变化。近年来的研究，初步搞清了凿岩、爆破时应力波的某些性质，所以才有可能提出载荷和岩石性质相匹配的问题，指明改善爆破效果而不多费炸药的途径、提高凿岩速度而不增大钎头、钎杆的受力的可能性。

### 四、岩石的破碎判据

在相当长的时间里，总是把材料力学中的强度极限当作岩石的破碎判据。实际上岩石的破碎过程和材料力学中梁、轴、柱的破坏有着本质的区别。岩石由不同坚固程度的矿物所组成，常带有很多弱面，破碎载荷又常是动态的集中力；并且，在岩石破碎学中还要研究破碎程度和范围，因此，只用破坏的拉、压、剪应力极限作判据，就很不充分了。

近年来，有利用断裂力学的断裂韧性作为破碎判据的，这是一个进展，但还不能解决破碎的全部问题，因为它只研究单个裂纹的开裂和扩展。还有利用统计强度理论来适应岩石的离散性，但也只是个开端。总之，必须根据岩石的破碎特点和要求，而不是构件的不破坏特点，来研究恰当的破碎判据，才能正确反映岩石破碎的过程。

### 五、破碎指标的测定

既然岩石破碎的判据尚不清楚，就更谈不上数值的大小了。为实际应用，在规定条件下测定坚固性指标就比较现实可行了。这些指标大体上可分成两类，一类是能量的比耗，如凿碎比功、炸药单耗、邦德系数、捣碎粉末量等；另一类是力的强度，如侵入硬度、凿入系数、切削系数，以及抗压强度、点载荷强度等。此外，如反弹硬度是间接指标，普氏坚固性系数  $f$  是综合指标。这些众多的指标是否存在相互联系和关联的程度，以及它们和破碎工艺之间又有什么联系等，都是值得研究的课题。

许多近代的试验表明，只讲平均值之间的联系是不够的，还必须指明这种联系的离散系数（或相关系数）。在较好的情况下，这种联系的离散系数在百分之十几，如果离散系数很大就没有什么意思了。

一个好的破碎指标，应当反映破碎工艺的实质，相关性要好，又必须简单可行。1978年，国际岩石力学协会推荐用肖氏硬度和回弹锤（施密脱锤），作为岩石硬度指标，看来也不是理想的。

### 六、岩石按坚固性分级

岩石是自然赋存物，本身有很大的不均一性和离散性，这是个不容回避的客观存在。



由于破碎方法不同，破碎指标的离散系数由十几到几十。各种破碎方法的坚固性又不完全一致。在这样的客观条件下，如何从数量上反映岩石坚固性的程度，就是按坚固性分级的问题，其中还包括许多需要研究的问题，如：按什么指标分级；只用一个指标还是要用多个指标来综合表示；要有几种分级还是统一的一个分级，各又有什么用处；级和级之间的粗细如何才恰当，等等。近年来“数量分类学”在生物分类上取得很大的成功，想来它在岩石分级上也会有所作为的。

岩石按坚固性分级，无论是对正确选取破碎方式、破碎设备，或是现代化管理，都具有重大意义。新近提倡的采矿系统工程，也不能没有岩石按坚固性分级。

### 七、确定破碎工艺的合理工作参数

如确定爆破时合理孔网尺寸、微差起爆间隔时间、装药结构、炸药性能等，在穿孔上要确定合理的轴压、转速、钻头的布齿，等等，这种试验往往是用来确定一种新破碎工艺的工作规范，或在既定岩石中充分发挥其工作效能。这方面的试验，过去已经作过许多，但缺乏系统总结，每遇新条件又要重头试验一遍。

在现阶段，参数试验要和设备的自动控制结合起来，以使设备能够经常地自动保持在最优状态下工作。

### 八、岩石的磨蚀性

用机械方法破碎岩石，就不可避免地发生岩石对工具的反作用——磨损工具。工具的磨损和消耗，是机械方法破碎坚固岩石的关键问题。岩石对工具的磨蚀有哪些基本规律，以及如何去测定岩石的磨蚀性，都是尚待解决的问题。一般认为工具的磨损体积和摩擦功成正比例，而岩石的磨蚀性在很大程度上取决于石英的含量。对于冲击磨损的机理和规律，目前还没有充分地研究过。

在国内，还没有把岩石磨蚀性的研究提到日程上来。其实岩石的磨蚀性在矿山不仅和工具密切相关，对于电铲牙尖、溜井井壁、溜道、破碎机的衬板，以及管道运输等方面也都是个重要问题。在研究岩石磨蚀性的基础上，寻求抗磨损材料，采取有效的抗磨损措施，制定工具的消耗定额，也都有着现实意义。

### 九、寻求新的破碎方法

传统的凿岩爆破方法目前仍然是矿山破碎坚固岩石的主要手段，但总摆脱不了机械破碎时工具的严重损耗和爆破作业的间断性。近二十年来，各国都在研究突破这种状态的方案，试验许多新的破碎方法，几乎凡是有可能破碎岩石的原理，都有人研究它用于采矿工程的可能性，如喷气技术、激光、高能电子束、等离子焰、高压脉冲水射流、电弧、微波、连续爆破、炮弹射击，以至热核爆破，等等。这些方法目前单独用作开采中的破碎工艺，还有一定困难，但作为机械破碎的辅助措施，却十分有前途。有的，如高压水射流，已经运用于某些破岩实践。

总括起来说，岩石破碎学的主要任务，在于揭露破碎岩石的能耗和破碎效果间的联系，探求破碎载荷的大小及其特点和破碎参数及岩石坚固性间的关系，用以指导研制高效能的采掘机械、工具和器材，合理地运用破碎工作参数，预估破碎的工程效果，或寻求新的破碎方法，以便从根本上改变采矿的面貌。

### 第三节 岩石破碎学的研究方法

岩石破碎学是一门新的学科，还没有一套成熟的研究方法，目前所采用的大致有下述几种，这些方法各有所长，实际上也往往相互配合、交替使用，视研究对象和目的不同，而有所侧重。

#### 一、力学分析

主要是利用弹性力学的方法来分析岩石破碎时的受力状况。由于破碎岩石的载荷往往是局部的、动态的、分析起来很困难，在较好的情况下也只能给出近似解。但更重要的实质性困难首先还在于岩石达到破碎前，已经不符合弹性条件了，而且岩石经常有裂纹、弱面等缺陷，破碎的物理过程不明，力学分析的根基就不牢靠。其次，是由于岩石的材料“常数”离散度很大，作为计算出发点的数据往往就会有所偏离，得出的结果甚至难以置信。从许多这方面的工作效果来看，起锦上添花的作用胜过解决实际问题的作用。但是，力学分析方法在以下两个方面可以有较好的收效：一是分析外载荷的性质，它不涉及破碎岩石，故较为可靠；二是岩石破碎前的应力分布状况，它对破碎范围和程度可作出一些定性的判断。

#### 二、基本因素试验

即在破碎过程中，只改变其中某些因素并观察它的影响。例如，研究冲击式凿岩时，可以分别改变冲击速度、冲击频率、活塞质量、钎杆长度、钎杆断面、钎头直径、钎头形式、钎刃构造、岩石坚固性等因素，逐个加以试验，分别阐明它们对凿岩速度的影响。也可利用方差分析进行多因素的综合试验。这种方法是基本的和常用的，其优点是能够得到实际的结果。其缺点是工作量较大，如果不加以综合概括，难以建立一个明确的概念。如钎头直径对凿岩速度的影响，就试验得出许多不同结果，很难普遍实际应用。

对于常规的破碎方法，已经有了很多基本因素的试验结果，目前主要是改进试验方法，并从理论上说明试验结果。对于新的破碎方法，基本因素试验是确定这种新方法有效工作范围的基础研究，是不能不作的。

#### 三、统计相关分析

为了实际需要，如要预估天井钻机或牙轮钻的速度和能耗，可以预先测定各种岩石侵入硬度和穿孔速度之间的关系，这样的关系是统计性的，它是在一定范围内波动的关系。以后，只要测定岩石的侵入硬度，就能预估出这种岩石中牙轮穿孔或天井钻进的速度。美国德雷塞公司就是利用这种办法来估计牙轮钻在我国矿山的穿孔速度的。

苏联斯可钦斯基采矿研究院、以巴隆（Барон）为首的机械破碎研究室，就特别推崇这种研究方法，他们强调岩石的离散性，认为力学分析的准确性还不及简单的经验公式；认为作为岩石破碎的指标，只要和开采工艺上实质相近即可，不必拘泥于模仿实际机具，也不必苛求严密精确，只有这样才能测得大量的实际数据，才能针对岩石的离散性作出有相当可靠的结果。在这个指导思想下，二十年来搞了很多种破碎岩石的指标，如岩石的砸碎指标、岩石自然表面侵入硬度、岩石的断裂抗力、岩石的摩擦系数和磨蚀性、岩石的综合坚固性等，他们把这样的方法称之为“相关比不变性原则”。利用这一方法，对许多岩石作了系统的测定，据说利用所测定的数据指导设计掘进机，达到了预期的结果。

统计相关分析的实用性强，符合岩石离散性的特点。按现今科学水平能够预估出破碎

效果，虽不特别准确，但也可敷实际应用。但是这种方法的缺点在于它不追求物理过程，不说明何以会有这种或那种联系，在条件变化之后，这种联系又会起何种变动。

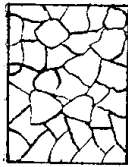
#### 四、现场标定

这是比较原始的常用的基本方法，现在还可以作为一个基本手段。但是，近来因为破岩机械越来越大，价格也很高，如牙轮钻就不能象凿岩机那样随便到哪里打个眼，试试在那里的生产效率和合理工作参数。设计一台掘进机，如果事先没有较准确的估计，就会造成很大的浪费。在这种情况下，利用现场标定就不大可能了。

为了克服大机器在试验上的困难，也有采用模型试验办法的，如用小牙轮钻在桌子上打个眼，用以估计真实钻机的效率。不过这种试验，只是外表按几何相似来作，并没有在力学上和破碎准则上相似。而如何能达到后者的相似，却是个没有研究清的难题。所以这样的所谓微型试验，只起到测定破碎指标的作用。

#### 五、破碎机理研究

开采工艺的破碎岩石过程是很复杂的，为了搞清楚破碎的物理过程，可以将其“纯”化。例如，用玻璃代替岩石，用光弹和高速摄影技术，就能看到裂纹的形成、应力波的传播等基本过程。工具侵入岩石，岩石在冲击作用下的破碎，同样可采用这种研究方法。研究破碎岩石的机理，对生产不一定显现直接效果，但没有这种研究，破碎过程的本质是难以搞清楚的。当搞清了破碎过程之后，反过来就能推动生产技术的发展。



## 第二章

# 强度理论

固体的破碎理论，平常将它称作强度理论。它对岩石破碎学的研究有一定的指导意义，研究强度理论还可以进一步认识岩石破碎理论的特点。强度理论一般又分为物理的和力学的两个方面，前者研究破碎的物理实质，后者研究破碎的力学特征。

### 第一节 晶体破碎理论简述

对于固体为什么会破碎的问题，迄今还没有一个令人信服的完善的理论解释。只是在晶体的破碎和变形方面，才有比较深入的了解。

晶体的构成有一个特点，构成它的基本质点——离子、原子或分子——在空间中作有几何规则的周期性排列，每一个周期就构成了一个晶胞，它是构成晶体的基本单位。图2-1即为NaCl型立方晶胞模型。

构成晶体的质点，籍相互间的吸引力和排斥力而保持在平衡位置。但是这种平衡并非绝对静止，而是以这个位置为中心作前后左右的振动，偶而也发生脱离这个位置向他处转移的情况，这种振动称热振动。

晶胞中质点间的相互距离，通常以Å表示(1Å = 10<sup>-7</sup> 毫米)。质点间相互的吸引，主要产生自异性静电荷的库仑力。它和质点间距离的平方成反比。

假如质点间只存在着吸引力，那么所有的质点将全聚成一堆，恩格斯在《自然辩证法》中曾经指出：“真正的物质理论应当给予排斥和吸引同样重要的地位；只以吸引为基础的物质理论是错误的，不充分的片面的”。当两质点充分接近时，其外围电子云之间就产生了相互排斥的倾向。电子轨道相互侵占时，更发生强烈的排斥作用。所以晶体质点间的排斥力在距离相当近时才有显著的作用，并随着距离缩小而急剧增大。

在图2-2中绘出了质点间的引力、斥力和质点间距离的关系。斥力随距离增加而迅速减小，而当靠近时却猛然增长。引力也作这样的变化，不过比起斥力来显得缓和些。这两种力的综合效果就是质点间的互作用力，它的大小如图2-2中曲线P所示。

由于质点间存在着互作用力，在构成晶体时也就具有一定的能量，这称之为结合能(U)，它的大小可由下式表出<sup>[2-1]</sup>

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

式(2-1)中右侧第二项是由斥力造成的。r为质点间距离。指数n和晶体类型有关，对于离子型晶体，n = 9~11；对于分子型晶体(例如金属) n = 2~3。B是和结晶构造有

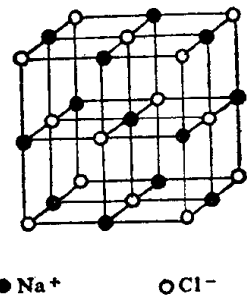


图 2-1 NaCl型晶体模型

关的常数。式(2-1)中右侧第一项是由引力所造成的。 $e$ 为质点所带的电荷量。 $A$ 称麦德隆常数,它取决于晶胞质点的排列方式,对于一维空间,按正负质点相间穿插排列的方式, $A$ 值可由下式给出:

$$\begin{aligned} \text{吸引能} &= -\frac{Ae^2}{r} = 2\frac{e^2}{r} \left(1 - \frac{1}{2} + \frac{1}{3} - \frac{1}{4} + \dots\right) \\ &= \frac{2e^2 \ln 2}{r} \end{aligned} \quad (2-2)$$

故  $A = 2 \ln 2 = 1.39$

对于空间排列的质点,还要计及其他方面的影响。这样求得的结合能,和实验观测值只相差百分之几;若再考虑到质点间的范德瓦力、零点振动等因素,还可以得出更精确的结果。

图2-2中的曲线 $U$ ,表示了结合能和质点距离的关系。在引力和斥力相等的位置( $r = r_0$ ),结合能数值最小,这就是平衡的位置。假如增大或减小质点间的距离,都将导致结合能的增大,也就是说需要外力对它做功。质点间的相互作用力( $P$ )等于结合能对距离的微分,即

$$P = \frac{dU}{dr} = \frac{Ae^2}{r^2} - \frac{nB}{r^{n+1}} \quad (2-3)$$

当 $r = r_0$ 时,质点处于平衡位置, $P = 0$ , $U$ 有最小值 $U_0$ ,代入式(2-3)得

$$B = \frac{Ae^2}{n} r_0^{n-1} \quad (2-4)$$

再将式(2-4)代入(2-1)可得

$$U = \frac{Ae^2}{r} \left[ \frac{1}{n} \left( \frac{r_0}{r} \right)^{n-1} - 1 \right] \quad (2-5)$$

$r = r_0$ 时,

$$U_0 = \frac{Ae^2}{r_0} \left( \frac{1-n}{n} \right) \quad (2-6)$$

式(2-4)代入(2-3)得

$$P = \frac{Ae^2}{r^2} \left[ 1 - \left( \frac{r_0}{r} \right)^{n-1} \right] \quad (2-7)$$

当晶体受到外力而被压缩时, $r < r_0$ ,这时斥力增大超过了引力的增大,剩余的斥力支撑着外力的压迫;当晶体受到外力而伸张时, $r > r_0$ ,引力的减小少于斥力的减小,所多余的引力抗御着外力的拆散作用。但随着质点间距离的进一步增加,引力的绝对数值是减小的,故伸张到一定程度,当 $r = r_m$ 之后(见图2-2)质点间相互作用力 $P$ 不可能再增大了,晶

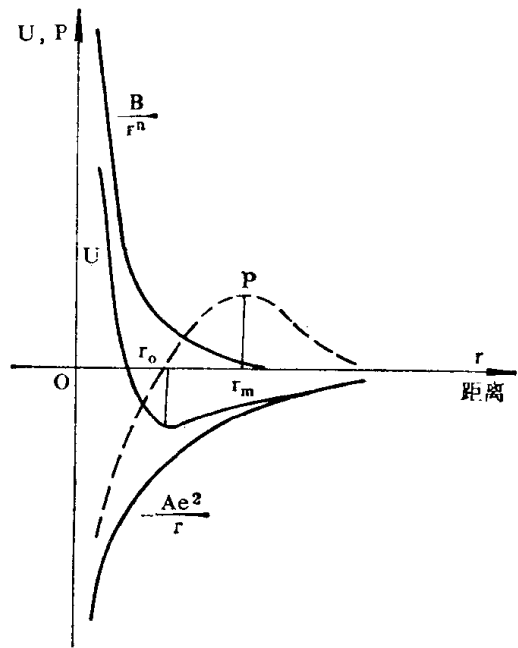


图 2-2 晶胞中质点间距和相互作用力及结合能的关系  
 $U$ —结合能; $P$ —相互作用力; $r_0$ —平衡时质点间距; $r_m$ —断裂时质点间距; $\frac{B}{r^n}$ —由斥力造成的结合能; $-\frac{Ae^2}{r}$ —由引力造成的结合能

体终于抵制不住外力的拉伸而被破碎。也即施于晶体上的外力若超过了最大可能的相互作用力，晶体就被支解了。所施加的外力不一定是机械力，如在电场中，便会导致电的击穿。

晶体在破碎之前到破碎之后，所接受的是一定量的能量 ( $\Delta U$ )；所产生的效果是增加了若干新的表面面积 ( $\Delta S$ )。由于居于物体表面的晶胞所具有的结合能多于中心部分的晶胞，产生单位新表面面积就需要能量，称之为表面能，以  $\gamma$  表示，即

$$\gamma = \frac{\Delta U}{\Delta S} \quad (2-8)$$

NaCl型晶体沿[100]面破裂时，其表面能可由下式算出<sup>[2]</sup>

$$\gamma_{[100]} = \frac{1}{2r_0^2} (U_{\text{表}} - U_0) = 0.016 \frac{e^2}{r_0^3} \quad (2-9)$$

式(2-9)中， $U_{\text{表}}$ 为表面晶胞的结合能。当 $e$ 用静电单位 ( $e = 4.803 \times 10^{-10}$ )、 $r_0$ 用厘米作单位 (对于NaCl  $r_0 = 2.81 \text{ \AA} = 2.81 \times 10^{-8}$ 厘米)时，算得  $\gamma_{[100]} = 166$  尔格/厘米<sup>2</sup>。

用熔盐法测得的NaCl表面能是 114 尔格/厘米<sup>2</sup>。NaCl型晶体，沿[110]及[111]晶面破裂时，其表面能各是沿[100]面的 $\sqrt{2}$ 和 $\sqrt{3}$ 倍。

表面能越大，晶体就越坚固。图2-3给出了几种标准矿物的表面能数值。金刚石在[111]方向的表面能是 11400 尔格/厘米<sup>2</sup>。

实际的晶体，由于存在质点排列上的缺陷 (如位错) 或构造上的缺陷，常常使破裂所需的外力大幅度地降低，和理论计算有很大的出入。

晶体的力学性质可以利用刚性系数  $K_0$ ，体积压缩率  $K_0$ ，弹性模量  $E$ ，剪切弹性模量  $G$  等表示出来。这些指标都和晶体的

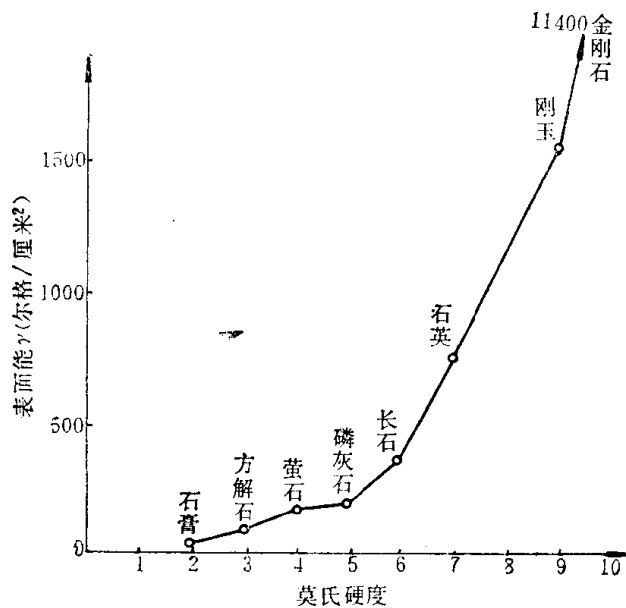


图 2-3 标准矿物的表面能<sup>[12]</sup>

刚性系数  $k_0$  有关。所谓晶体的刚性系数就是晶体单位变形所须施加的力，即

$$k_0 = \left( \frac{dp}{dr} \right)_{r=r_0} = \left( \frac{d^2u}{dr^2} \right)_{r=r_0} = -\frac{Ae^2}{r_0^3} (n-1) \quad (2-10)$$

体积压缩率  $K_0$  可以求得，它和  $k_0$  的关系如下<sup>[2-3]</sup>

$$K_0 = \frac{f^{\frac{2}{3}}(\mu)}{6.868\pi^{\frac{4}{3}} r_0} k_0 \quad (2-11)$$

式(2-11)中  $f(\mu)$  为泊桑比  $\mu$  的函数，它由下式给出

$$f(\mu) = \left[ \frac{1+\mu}{3(1+\mu)} \right]^{\frac{3}{2}} + 2 \left[ \frac{2(1+\mu)}{3(1-2\mu)} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (2-12)$$

单向压缩弹性模数  $E$  和  $K_0$  的关系，可先利用弹性力学中  $E$  和  $K_0$  的关系换算，再用式(2-11)便可得出

$$E = 3(1 - 2\mu) K_0 = \frac{3(1 - 2\mu)f^{\frac{2}{3}}(\mu)}{6.868\pi^{\frac{4}{3}}r_0} k_0 \quad (2-13)$$

同样可得到剪切弹性模量G为

$$G = \frac{3(1 - 2\mu)}{2(1 + \mu)} K_0 = \frac{3(1 - 2\mu)f^{\frac{2}{3}}(\mu)}{2(1 + \mu) \times 6.868\pi^{\frac{4}{3}}r_0} k_0 \quad (2-14)$$

实际资料表明，许多纯金属晶体的弹性模量确实和 $k_0^2$ 成正比例（如图2-4所示）。

实际资料还表明，晶体的维氏（Vickers）微痕硬度，赫鲁晓夫（XPYIII0B）耐磨性，真实断面的抗拉强度等机械性质，都和 $k_0^2$ 成正比例，虽然也有少数例外。图2-5，2-6，2-7表示了这一情况。

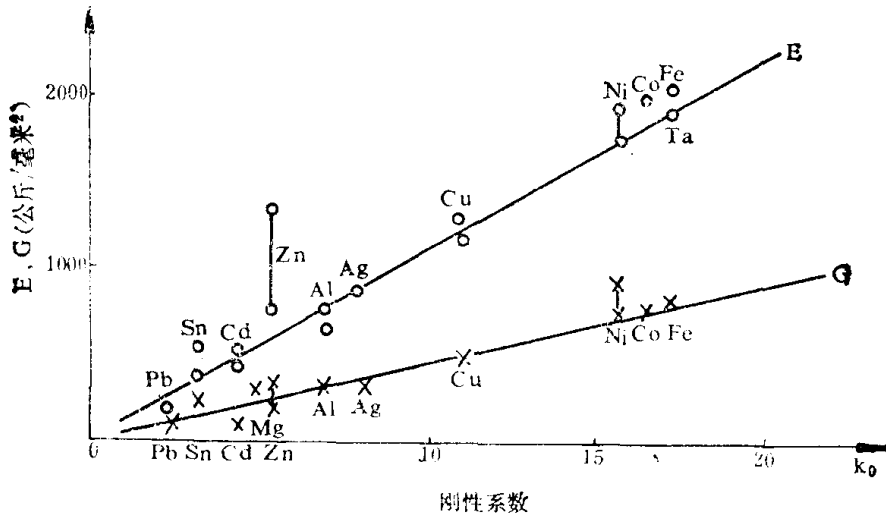


图 2-4 弹性模量和晶体刚性系数关系

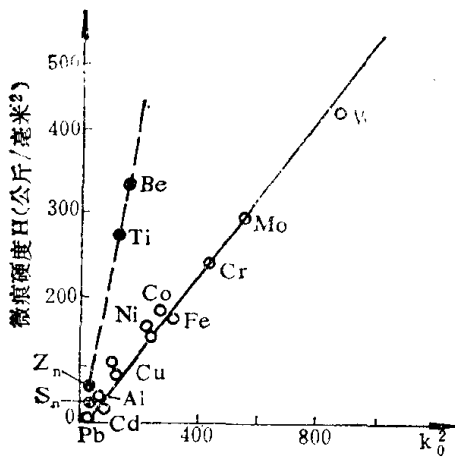


图 2-5 微痕硬度和晶体刚性系数关系

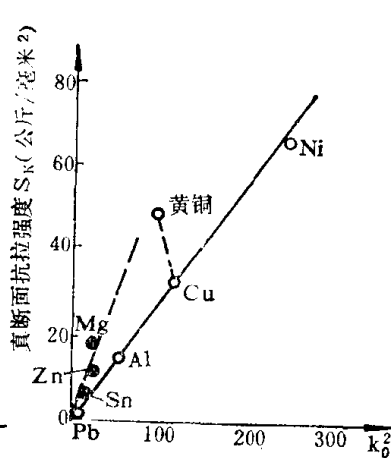


图 2-6 真断面抗拉强度和晶体刚度系数关系

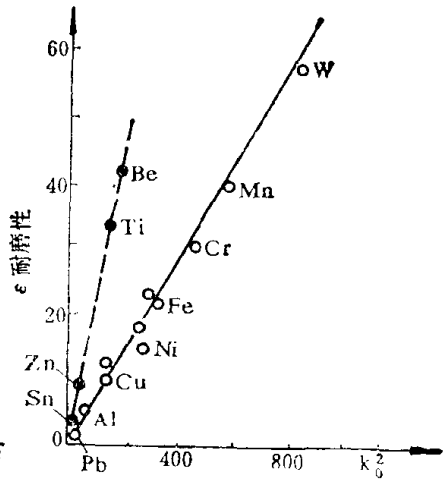


图 2-7 耐磨性和晶体刚性系数关系

虽然上面列举的都是纯金属晶体，但如此众多的材料力学性质都和晶体的结构参数有关，使我们可以想象一般固体的各种破碎性质之间也许存在某种联系。

晶体的力学性质取决于质点之间相互作用力及晶胞的结构形式，这是容易理解的。晶胞中质点间距离越近，也就是每克原子的容积越小时，晶体将越坚固。离子的价数越高，所带电荷就越强，晶体也就会越坚固。当然晶体的坚固与否，还和它的构造形式有关，在表

2-1中列出了其他条件相类似的情况下,晶体的莫氏硬度和质点间距离的关系<sup>(2-4)</sup>。在表2-2中则列出了质点间距相等的情况下,莫氏硬度和原子价数的关系。在这两个表中,除了个别的例外大体都符合以上论述。ZnO预期硬度可达到8左右,实际上只有5,可能是晶型有八面体的趋向。在表2-2末尾,K(NiF<sub>3</sub>)和K(NbO<sub>3</sub>)的硬度比较中还可看出,组成“根”或“基”的原子集团内部引力较大时,硬度也较大。

近代的固体理论,在热学、电学、磁学、和光学行为方面,都得到了根本的理论说明。在固体的力学行为方面,虽然也有很大进展,但还难以指导工程计算,因此,在工程技术上,普遍采用力学强度理论来解决实际问题。后者以某种力的状况作为破碎的终极原因,避开了固体为什么会破坏的问题,而采取了直接测量的办法。这些力学破碎判据的选取,都是以一定的工程问题作为背景的,如何适应采矿工程中的破碎问题,还有待于进一步研究。

表 2-1 质点间距和晶体硬度比较

化合物分子式	晶体质点间距离 (Å)	莫氏硬度
LiF	2.02	3.3
LiCl	2.57	3.0
LiBr	2.75	2.5
NaF	2.31	3.2
NaCl	2.81	2.5
NaBr	2.95	2.4
MgO	2.10	6.5
CaO	2.40	4.5
SrO	2.57	3.5
BaO	2.77	3.3
CaS	2.81	4
CaSe	2.96	3.2
CaTe	3.17	2.9
BeO	1.65	9
ZnO	1.97	5
BeS	2.10	7.5
BeSe	2.22	5.5

表 2-2 离子价数和晶体硬度比较

化合物分子式	晶体质点间距离 (Å)	价数	莫氏硬度
LiCl	2.57	1	3.0
SrO	2.57	2	3.5
NaCl	2.81	1	2.5
BaO	2.77	2	3.3
LiCl	2.57	1	3.0
MgS	2.59	2	4.5~5
NaCl	2.81	1	2.5
CaS	2.84	2	4
LiBr	2.75	1	2.5
MgSe	2.73	2	3.5
KI	3.53	1	2.2
BaTe	3.49	2	2.6
NaBr	2.98	1	2.4
CuSe	2.96	2	3.2
SeN	2.23	3	7~8
TiC	2.23	4	8~9
K(NiF <sub>3</sub> )	4.01	—	3.5
K(NbO <sub>3</sub> )	4.01	—	4.5

## 第二节 力学强度理论问题的提出

当研究岩石破碎问题的时候,力学可以用来分析任何指定部位的受力状况。但是多大力或多大的各种力的组合才会导致破碎的问题,仅靠去分析力的状况是解决不了的,必须借助于实际的测量;不过实际测量总是有限的,在最简单的情况下,我们常用单位断裂面上受力的极限——极限强度,来表示断裂的条件。岩石的极限强度是通过实际测量的途径来取得的,虽然测量用的试块大小和实际破碎条件并不相同。我们一般总认为单位面积上



允许承受的力是不变的，这样把强度当作岩石材料常量的观点也不是没有探讨的余地，不过总还算是一种解决工程问题的办法。

在多向受力的复杂情况下，这样的办法就行不通了。在断裂部位，一般地说，受到三个正应力和三个剪应力的综合作用，我们不可能把岩石的各种可能的应力组合（有无穷多种）统统事先测量一遍，得出相应于各种情况的岩石强度数值来。在这种情况下，就要借助于理论思维，就需要用一种统一的理论来回答在无限多种导致破碎的应力组合之中，到底是那一种应力、应变的极限状态或其组合导致破碎的发生。实际测量的作用，在于用来检验理论答案是否正确；另一方面是在有限的简单测量数据中，提供岩石破碎的材料常量，以备用来计算各种不同的具体情况。如果理论是正确的，那么我们就可以用它来回答各种情况下岩石破碎能否发生，以及破碎的范围和效率等问题，这就是所谓力学强度理论的实质所在。

由于对破碎的认识不同和观察研究的角度不同，就有多种强度理论。从大体上分，物体破坏时有两种不同的现象，一种是“滑移”，一种是“脆断”。对这两种破坏在理论上也就分成两个大类。

塑性材料常显滑移型破坏，如锡在受力时可以看到最典型的滑移线迹，滑移线迹和剪应力方向大略相吻合。脆断面则常常和正应力方向相垂直，如铸铁、陶瓷、造岩矿物等常有脆断的特征，破碎时没有明显的残余变形。不过在岩石破碎学的范围内，破碎也不是“滑移”和“脆断”两种类型所能全面概括的，如在压头的下方，炸药的邻近，岩石被挤成粉末状破碎，如岩石和工具的磨蚀等现象，也难以归入上述两种类型。这些破碎或破坏的类型，都是没有被研究清楚的问题。

即使在滑移型破坏的范围内，岩石的塑性变形和金属的塑性变形有着实质的差别。金属的塑性是晶粒本身的塑性变形；而造岩矿物本身却几乎完全没有塑性，或很不显著。所以岩石的塑性变形主要地决定于晶粒之间的滑动。两者塑性变形的区别列于表 2-3。

表 2-3 金属和岩石塑性变形的区别

比 较 项 目	金 属	岩 石 或 矿 物
1.单晶体塑变	主要是金属滑移	双晶作用或小的滑移
2.多晶塑变	取决于单个晶粒	主要是晶粒界面
3.晶粒大小	晶粒细的塑性小	晶粒粗的塑性小
4.应力状态	在任何应力状态下出现	只在多向压缩时出现
5.速度的影响	阻力随变形速度而增加	和速度少有关系
6.抗剪强度和变形的关系	随变形而增大	随变形而减小
7.松弛和热处理效果	初始的力学性质逐渐恢复	力学性质不能恢复
8.尺寸效应	小	大
9.强度的离散度	约 5% 以下	高达 15~40%

由表2-3可见，在金属的塑性变形和岩石的塑性变形之间，存在着显著的区别。因此，对于金属的塑性变形及滑移型强度理论，移植到岩石破碎学上来时要慎重处理。

### 第三节 剪切破坏的强度理论

剪切破坏的强度理论认为，物体中只要剪应力增长到某个极限，物体就要产生大的塑