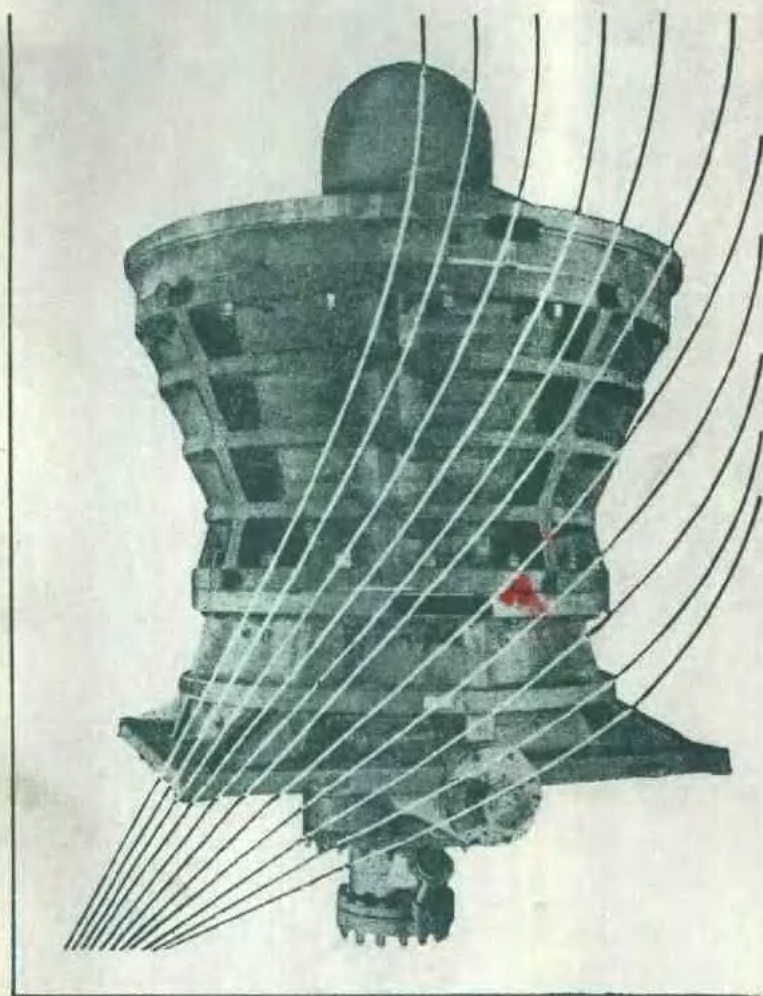


选矿丛书

破碎与磨碎试验技术

王宏勋 编著



冶金部有色金属选矿情报网

1982. 10. 北京

选矿丛书

破碎与磨碎试验技术

冶金部矿冶研究总院 王宏勋 编著

冶金部有色金属选矿情报网

编 者 的 话

《破碎与磨碎试验技术》是冶金工业部有色金属选矿情报网组织编辑出版的《选矿丛书》之一。

本书综合了国内外有关破碎与磨碎试验技术方面主要论述，并重点介绍了美国 Allis-Chalmers 公司试验中心的破碎与磨碎试验方法、设备和实验数据处理，如冲击破碎功指数；棒磨功指数；球磨功指数；金属磨损指数；自磨介质指数；砾磨介质指数等破碎与磨碎参数的测定。此外，本书还编进了北京矿冶研究总院有关破碎与磨碎试验的部分资料。它基本上反映了国内外破碎与磨碎试验技术的现状。

破碎与磨碎是选矿厂生产中极为重要的工艺过程。破碎与磨碎技术是一门专业性极强而应用极为普遍的综合性试验学科。破碎与磨碎试验技术是破碎与磨碎工艺的重要组成部分，在国外日益引起学者们的注意。

破碎与磨碎工艺消耗大量的能和金属，因此近年来选矿工艺节能着眼点都放在如何节省破碎与磨碎工艺过程的能量消耗。这也是引起学者们注意的主要原因。

由于我国破碎与磨碎试验技术的研究工作开展较晚，是一项空白。没有相适应的试验研究组织和机构；没有引起我们各级领导的足够重视；没有引起广大选矿工作者的注意。在编写本书的过程中深感参考资料缺乏。

本书的编写目的在于为从事这方面工作的工程技术人员提供一些基本知识和素材。

在编写过程中承蒙北京矿冶研究总院赵涌泉高级工程师、高琳工程师、臧大谋工程师和邹健、吴建明、李开功等同志大力协助，赵涌泉高级工程师和高琳工程师在审校过程中为本书提出了许多有益的建议，在这里一并致以谢意。

编著者深感知识不足，水平所限，所以错误难免，请批评指正，俾能及时修订。

王宏勋

1982年9月9日 于北京

目 录

编者的话		三、显微镜法	(20)
主要符号意义		四、仪器测定法	(20)
第一章 绪论	(1)	第三章 破碎与磨碎的耗功学说	(28)
§ 1.1 引	(1)	§ 3.1 概述	(28)
§ 1.2 破碎和磨碎对象(岩石和矿石)的基本知识	(1)	§ 3.2 P. R. Rittinger的理论—面积说	(29)
一、矿床种类	(1)	§ 3.3 F. Kick的理论—体积说	(32)
二、矿石和岩石的物理与力学性质	(3)	§ 3.4 关于Rittinger理论和Kick理论	(35)
§ 1.3 破碎和磨碎过程	(4)	§ 3.5 F. C. Bond的理论—裂缝说	(38)
一、概述	(4)	第四章 选矿工艺常用参数的测定方法	(40)
二、破碎和磨碎的分段	(5)	§ 4.1 比面积的测定	
§ 1.4 破碎比	(5)	一、筛分分析法	(40)
一、概念	(5)	二、渗透法	(42)
二、破碎比表示方法	(6)	三、吸附法	(44)
§ 1.5 解离度	(7)	四、比浊法	(45)
一、概念	(7)	五、溶解度法	(45)
二、单体解离度的测定	(7)	六、抗磁顽力测定法	(45)
§ 1.6 破碎和磨碎主要方法	(9)	§ 4.2 比重的测定	(45)
第二章 物料粒度及其组成表示方法		一、概述	(45)
§ 2.1 颗粒物料的粒度尺寸	(11)	二、砾石和碎石比重的测定	(45)
一、单颗粒块状物料的粒度尺寸	(11)	三、粉状物料比重的测定	(46)
二、形状复杂的单颗粒物料粒度尺寸	(11)	四、Beckman比重测定仪测定比重	(47)
三、细颗粒物料粒度尺寸	(12)	§ 4.3 容积比重的测定	
§ 2.2 物料粒级表示法	(13)	一、定义	(48)
§ 2.3 物料颗粒组成表示法	(13)	二、测量方法	(48)
一、物料颗粒组成粒度尺寸表示法	(13)	§ 4.4 硬度的测定	
二、平均粒度和物料均匀度	(14)	一、莫氏硬度分类法	(48)
§ 2.4 粒度组成的测定	(15)	二、L. E. Ding heuzian 矿石硬度分类法	(48)
一、筛析法	(15)	三、普氏硬度系数分类法	(49)
二、分散分析法	(19)		

§ 4.5 摩擦角的测定	(49)	四、中细碎之锥式破碎机选择	
§ 4.6 内摩擦角和安息角的测定		计算	(82)
.....	(49)	§ 6.4 经验参照法	(84)
§ 4.7 冲功耗的测定	(51)	一、开路破碎处理能力计算	(84)
一、Prony 法	(51)	二、闭路破碎处理能力计算	(86)
二、扭矩传感器法	(52)	三、光面对辊式破碎机处理能力	
第五章 矿石破碎试验方法和金属磨		计算	(86)
损指数的测定	(52)	第七章 常规磨矿的试验	(86)
§ 5.1 抗压指数测定		§ 7.1 概述	(86)
一、概述	(53)	§ 7.2 Bond 棒磨机闭路可磨度试	
二、试验设备	(53)	验和功指数计算	(87)
三、试验方法	(54)	一、概念	(87)
§ 5.2 自然颗粒碎断力测定	(55)	二、试料	(87)
§ 5.3 可碎性试验 Bond 冲击破碎		三、试验设备	(87)
功指数测定	(57)	四、试验方法	(88)
一、概述	(57)	五、Allis—Chalmers 公司测试	
二、试验设备	(57)	数据	(89)
三、试验方法	(58)	§ 7.3 Bond 棒磨机开路可磨度试验	
四、试验数据及处理	(59)	一、概述	(93)
§ 5.4 金属磨损指数的测定	(67)	二、试料	(93)
一、概述	(67)	三、试验设备	(93)
二、磨损指数试验器	(69)	四、试验方法	(93)
三、磨损指数测定方法	(70)	§ 7.4 Bond 球磨机闭路可磨度	
四、经验公式	(71)	试验和功指数计算	
五、应用实例	(72)	一、概念	(94)
六、测定结果	(74)	二、试料	(94)
第六章 破碎机的选择计算	(76)	三、试验设备	(94)
§ 6.1 概述	(76)	四、试验方法	(96)
§ 6.2 破碎机选择计算通用指南		五、实例	(98)
(通用原则)	(77)	六、北京矿冶研究总院试验结果	
一、破碎比范围	(77)		(104)
二、设计计算的通用原则	(77)	§ 7.5 Bond 球磨机开路可磨度试	
§ 6.3 功指数算法	(77)	验	
一、概述	(78)	一、概述	(108)
二、第一段破碎机(粗碎机)选		二、试料	(108)
择计算	(78)	三、试验设备	(108)
三、中细碎闭路作业时给矿粒度		四、试验方法	(108)
尺寸的修正	(82)	§ 7.6 Hardgrove 可磨度试验	(109)
		§ 7.7 相对可磨性系数法	(110)

§ 7.8	超声侵蚀速度测定可磨度	(113)
§ 7.9	功耗试验法	(113)
第八章	自磨的试验程序和方法	
§ 8.1	概述	(114)
§ 8.2	自磨试样的采取	(115)
一、	样点的布置	(115)
二、	试验样的种类	(115)
三、	试样的数量	(115)
四、	试样的混匀	(115)
§ 8.3	国外自磨的试验程序和方法	(116)
一、	Koppers (原Hardinge) 公司试验程序和方法	(117)
二、	Allis—Chalmers 公司试验程序和方法	(120)
§ 8.4	关于改进我国自磨程序的看法	(126)
§ 8.5	北京矿冶研究总院试验程序	(128)
一、	实验室试验	(129)
(一)	了解矿石和岩石的物理机械性质	(129)
(二)	矿石可磨度试验	(129)
(三)	落重试验	(129)
(四)	介质适应性试验	(130)
(五)	试验室连续自磨试验	(135)
二、	半工业连续试验	(135)
§ 8.6	砾磨的试验程序和方法	(136)
第九章	棒磨机 and 球磨机的选择计算	
§ 9.1	概述	(136)
§ 9.2	功指数算法 (功耗法)	
一、	概述	(137)
二、	选择棒磨机和球磨机的计算步骤	(138)
三、	磨矿机的选择计算	(138)
§ 9.3	容积法磨矿机的选择计算	(149)
§ 9.4	磨矿机的选择	(151)

主要符号意义

R	破碎比
R_u	极限破碎比
R_A	表面破碎比
R_w	实际破碎比
R_0	平均破碎比
R_{80}	80%破碎比
γ	重量百分含量%
d	产品粒度尺寸
F	单体解离度%
f	单体颗粒数量
S_z	真比重
S_v	容积比重
W	比功率
W_{ic}	破碎功指数
W_{ib}	球磨功指数
W_{ir}	棒磨功指数
A_i	金属磨损指数
W_{im}	自磨介质功指数
F_{80}	给矿中80%重量通过的粒级尺寸
P_{80}	产品中80%重量通过的粒级尺寸
$G_{b,p}$	球磨可磨度
$G_{r,p}$	棒磨可磨度
C	冲击可碎性系数
P_t	试验筛孔
Q	处理能力
n	转速
n_c	临界转速
N	功率

第一章 绪 论

§ 1.1 引

定义：破碎和磨碎，在大多数情况下，是处理固体有用矿物和岩石物料的第一个阶段。通常这是一个分阶段进行的过程。在这个过程中，依次应用特别适合的机械将矿物、岩石或块状物料的尺寸逐渐减小，以适应工艺过程对粒度的需要。

由此可见，在把原料变成为最终产品的许多加工处理过程中，破碎与磨碎是一个非常重要的工艺过程。在冶金、化工、建筑材料和火力发电等工业部门中，每天都有大量的物料需要进行破碎和磨碎。就是涂料、食品、粮食和药物等许多工业部门也在某种情况下会遇到破碎和磨碎加工。有人做了统计，仅在矿物加工方面，七十年代经过破碎和磨碎加工的矿石量年平均就接近25亿吨^{[1] [2]}，即使如此，它与未来的要求相比，仍感不足。生产实践资料表明，以浮选厂为例，破碎和磨矿车间的费用，在全厂总费用中占有很大比重。例如，设备费约占总设备费的65~70%，经营费约占总经营费的50~65%，电费约占总电费的50~55%^[2]。

由此可见，在进行选矿厂设计时，正确地选择和计算破碎和磨碎设备具有非常重要的意义。美国、英国、西德、日本、加拿大、瑞典和澳大利亚等国普遍采用功耗法计算和选择破碎机和磨矿机。这种方法的要点是先测出 Bond 功指数或单位重量产品能量消耗。因此如何测得 Bond 功指数，如何测得单位产品净功耗，也就是怎样对矿石或岩石进行破碎和磨碎的试验（实验室试验和半工业试验）是首先需要解决的问题。有些国家也采用其它的试验和计算方法。

破碎和磨碎的对象是矿石和岩石。众所周知，矿石和岩石是性质极其复杂的各种矿物的集合体。这些集合体的物理力学性质，有用矿物嵌布状态，结晶颗粒大小，岩石的节理发育程度，裂纹的大小和多少，结晶界面性质等都影响破碎和磨碎的效果。欲研究和探讨破碎和磨碎的原理，试验方法和设备选择等工程需要解决的问题需要有专门的知识，而这方面的知识几乎最近才引起各国学者的注意。

§ 1.2 破碎和磨碎对象（岩石和矿石）的基本知识^[3]

一、矿床种类

地壳的坚硬外层是由岩石组成，而岩石又是矿物的集合体。自然界中的矿物或岩石，可供人类利用者，就叫有用矿物。凡含一种或几种有用矿物的集合体叫做矿床，凡是直接或经过适当加工后在工业上能够利用的金属或非金属矿物的集合体则称为矿石。矿石是埋藏在地下不同深度的有用岩石。

矿床的种类是非常繁多的，按着它的性质和它在工业上的主要用途可以为四大类。

1. 金属矿床

其矿石经加工后可提炼某种金属，如铁、铅、锌、铜、钨、钼等。

2. 非金属矿床

包括一系列硅酸盐、磷酸盐、硫酸盐等，如长石、云母、石英、石棉、滑石、石膏等。

3. 建筑材料

为可用于建筑工业上的非金属矿物原料，包括一系列可当做石材的天然矿石，如花岗

岩，石灰岩、砂、砾石等

4. 可燃性有机岩

包括煤、油母页岩，石油等

矿床的工业价值取决于它的贮量，有用矿物成份的含量，地理与交通条件，采矿技术，加工技术以及国民经济的需要等许多因素。

通常，人们习惯于把金属矿物矿床称为矿石，而把非金属矿物矿床称为岩石。

矿床按照它们不同的生成原因可以分为火成岩，沉积岩和变质岩三大类。分类列于表 1—1 中。

岩石分类

表 1—1

喷出岩	流纹岩：是岩浆喷发到地面后堆积而形成。其成份与花岗岩差不多，但颗粒较细，这种岩石和明矾石有密切地关系。
	玄武岩：是颗粒细、坚硬、较难破碎的岩石，它和铜矿，银矿有联系
	安山岩
火成岩	花岗岩：质硬、致密、主要成分为白花石英，肉色的长石和黑色的云母，都是均匀颗粒紧合一起，不易破碎，并且难磨。
	伟晶花岗岩：成分与花岗岩同，颗粒较大、由巨大的长石结晶和块状石英组成。较难破碎
	闪长岩：颗粒比花岗岩细。性比花岗岩软，比砂岩硬是很好的建筑材料，易碎
	橄辉岩：结构均匀，比花岗岩重，它与铬、镍、铂等贵金属有联系。难碎难磨，
岩石矿床	砂岩：大都由很多细的砂粒组成有的疏松，有的坚硬。
	页岩：细小颗粒一层层排列，不太硬，用手指甲可刻划、易碎。
	砾岩：铺路用，它和自然铜有联系，难磨。
沉积岩	石灰岩：建筑材料，炼铁炉用熔剂，易碎。
	石油：液体，
	煤：可燃，性脆而软较为易碎易磨。
	油母页岩：是一种含有机质的沉积页岩，易碎
变质岩	板岩：建筑材料软，易碎。
	片岩：火成岩经过变化作用后生成，比较松软，较易碎。
	片麻岩：它是由火成岩变化而来，结晶颗粒和花岗岩差不多，比片岩、砂岩硬，较难碎难磨。
	石英岩：是由砂岩经变质作用而生成的，质硬成层状与铁矿有密切地关系，易碎、难磨。

二、矿石与岩石的物理与力学性质〔4〕〔5〕〔8〕

破碎与磨碎是研究矿石在外界作用下改变其粒度的科学，而这种外界作用所取得的效果与矿石的构造和结构特点有着密切的关系。研究矿石的可碎性和可磨性的规律，就构成了粉体工学科学这一分支。

各种机械破碎和磨碎方法都是将连晶中 useful 矿物与脉石以及有用矿物互相间分离开来。即所说的单体解离。选别作业所需破碎与磨碎粒度和破碎与磨矿产品的性质则取决于矿石构造和结构特点。

由于在破碎过程中矿块的断裂面不一定沿着矿物颗粒接触面，而是一种复杂的现象。从统计学观点分析，是与矿石构造（指矿物集合体的形状、大小和空间分布关系）和矿石的结构（指矿物结晶颗粒的形状、大小和空间分布关系）密切相关。也就是说和矿石的物理力学性质有关。

1. 岩石和矿石的颗粒

有些岩石和矿石是具有规则排列的晶体物，如火成岩和某些变质岩。这些结晶的岩石和矿物，在晶体之间往往没有晶间物质而直接联系着，因而质硬，强度较大，故不易破碎。但也有少数是通过晶间物质使晶体相互联系。这种矿石和岩石的颗粒较均匀，而且细小。

沉积岩的颗粒形状和大小不一，是矿物和岩石碎屑粘结在一起而成。颗粒之间有各种胶结物质，有的是粘性强的硅质和石灰质，有的则是粘性较差的粘土质或白垩质等。故质地较软，易于破碎。

2. 岩石和矿石的非均质性

岩石和矿石的非均质性表现在其结构单元，粘结质，晶间质以及孔隙度（裂缝度）形状、大小、分布与排列等许多方面。这些都对破碎和磨碎有很大影响。

3. 岩石和矿石有层理性

岩石和矿石由于生成条件所决定，必然呈现出其有层理性，层理性使其碎磨产品的粒度不均匀。

4. 岩石和矿石的裂缝性

岩石和矿石的裂缝性，更是其突出的结构特征，所有使岩石固结强度削弱的面，不论小到几微米，大到几厘米或数十厘米都可以认为是裂缝。节理也可以看到是一种裂缝。由于多种原因，大自然的长期影响和作用，在自然界中完全没有裂缝的岩石是不存在的。

岩石和矿石的非均质性，层理性及裂缝性对岩石和矿石的物理力学性质有很大影响。岩石和矿石物理力学性质的连续或不连续；均匀或不均匀；各向同性或各向异性都是根本取决于其本身结构特性的。种些性质有的是有利于破碎与磨碎的，有的则不利于破碎与磨碎。定性甚至定量地研究这些性质对破碎与磨碎的影响，是一项艰巨的课题，有待于人们对它进行探讨。

矿石构造的特点是从宏观现象的观察结果，主要的矿石构造有以下几种类型：

块状构造。

浸染状（嵌布）构造。

斑状构造。

角砾状构造。

鲕状构造。

胶状构造。

结核状构造。

条带状构造。

矿石的结构是从矿石标本显微镜观察的结果，其中包括矿物包体形状和共生性质描述以及浸染粒度特性的测定。如：

矿物包体形状和共生性质的观察与描述为：

包体形状 { (1) 等轴颗粒或近等轴颗粒；
(2) 长形颗粒（针状，柱状，线状等）；
(3) 薄层状颗粒；
(4) 不规则颗粒。

共生性质 { (1) 结合面光滑平坦的；
(2) 结合面呈不规则的复杂的流纹状，锯齿状等。

矿石浸染粒度特性，是指有用矿物及脉石相互共生嵌镶的粒度关系可分为：

- (1) 极粗粒浸染矿石，矿物包裹体尺寸为200~20毫米。
- (2) 粗粒浸染矿石，矿物包裹体尺寸为20~2毫米。
- (3) 中等浸染粒度矿石，矿物包裹体尺寸为2~0.2毫米。
- (4) 细粒浸染矿石，矿物包裹体尺寸为0.2~0.02毫米。
- (5) 微粒浸染矿石，矿石包裹体尺寸为20~2微米。
- (6) 次显微浸染矿石，矿石包裹体尺寸为2~0.2微米。
- (7) 胶体分散矿石，矿石包裹体尺寸为0.2微米以下。

实际上矿石中矿物包裹体的尺寸总是不均匀的，因此在进行破碎和磨碎研究时，不仅要知道包裹体的大小，而且需要知道不同粒级包裹体的百分含量，即浸染粒度的特性。浸染粒度特性是用欲测矿石的光片，在显微镜下测得的。

矿物包裹体大小，浸染特性可以帮助我们确定破碎和磨碎最终产品粒度的大致尺寸，确定合理破碎和磨碎段数，选择合理的试验方法和确定合理的破碎和磨碎流程。

§ 1.3 破碎和磨碎过程 [7][8][9]

一、概述

破碎和磨碎过程是物料块在外力的作用下，分裂成若干个部分的过程，一部份物料块从另一部分物料块上不断分离出来。

破碎和磨碎过程是一个非常复杂的减少物料块粒度尺寸的过程。因为这个过程常常与许多无法估计的因素有关。其中主要的是以破碎抗力来测量的物料块坚固性和硬度。除了物料块的硬度，强度和韧性之外，物料块的形状，尺寸，湿度，密度的均质性；以及外部条件如物料块群在破碎和磨碎瞬间相互分布情况，物料块群在机器中的运动特性等也都影响破碎和磨碎过程。所有上述这些因素都使破碎和磨碎过程的物理变化复杂化了，以致于到现在还不能创造出某一种统一的严密完整的数理理论，阐述这一过程。

破碎和磨碎过程中，外力必须克服固体物料的各质点间的内聚力。内聚力的大小，甚至对同一种矿物物料块来说，由于种种原因，相差也是十分悬殊的。一般说来，物料愈坚硬，

则为了克服内聚力而使之破碎的力也愈大。

物料块破碎时，系沿最脆弱的断面裂开。在破碎后所生成的碎块上，这些脆弱面就不存在了。所以在破碎时，脆弱点和脆弱面逐渐消失，随着物料粒度的减小，物料变得越来越坚固。从这一观点出发，组成矿石物质的分子，是物料块进行机械分离时可能达到的最小质点，因此物质分子是最坚固的。上述观点与实际情况相符。破碎过程的产品大部分大于5毫米，磨碎过程的产品都小于5毫米。

二、破碎和磨碎的分段

从矿山的露天采矿场或矿井中开采之矿石，通常是由多种粒度的矿块群组成的。矿块的大小与该矿区的开采方法及矿床的特点有关。

我们知道，通常从露天采矿场送到选矿厂或破碎筛分厂去的最大矿块尺寸可达1000毫米以上，甚至有的矿山达到1300~1500毫米。苏联罗尔哈什和马格尼托格尔斯克选矿厂粗碎机给矿粒度达到了1300~1500毫米。美国双峰铜选矿厂，平托一瓦利铜选矿厂，杜瓦尔铜选矿厂，巴巴特铁选矿厂，加拿大洛耐克斯，卡洛尔铁矿都装设了60"旋迴式破碎机，给矿粒度允许达到1200~1300毫米。

破碎和磨碎过程是选别前的准备作业，选别前最终矿石物料粒度视矿石中有用成分浸染细度和所采用的选别方法而异。

为了避免有用成份在破碎和磨碎过程时变成灰尘而逸失（这类灰尘是很难于进行选别而固收的，并且大多数情况下是损失掉的），合理地选择破碎机和磨矿机的型式和规格，合理地选择破碎和磨碎流程是非常重要的。

根据破碎和磨碎前物料粒度与破碎和磨碎后物料粒度的大小，可分为如下的破碎和磨碎段数。

1) 粗碎（第一段破碎）：给矿粒度为1500~600毫米，大约破碎到250~125毫米（个别情况有400~600毫米的）。

2) 粗一中碎：给矿粒度约为600毫米，大约破碎到200~125毫米（在近代大型选矿厂，采用四段破碎流程时用粗一中碎作业）。

3) 中碎（第二段破碎）：给矿粒度为400~125毫米，大约破碎到100~25毫米。

4) 细碎（第三段破碎）：给矿粒度为100~25毫米，大约破碎到25~5毫米。

5) 超细碎（第四段破碎）：给矿粒度为75~25毫米，大约破碎到—6毫米占60%左右。

6) 粗磨（第一段磨矿）：给矿为经过细碎后之产品，粒度为25~5毫米，磨至1~0.3毫米。

7) 中磨（第二段磨矿）：给矿粒度25~5毫米，磨后产品约为0.074毫米或更细一些。

8) 细磨（第二或第三磨矿）：给矿粒度在1毫米以下，把它磨至—200目，—270目，—325目。

9) 超细磨：磨碎产品粒度达10微米以下。

破碎和磨碎阶段的划分，在一定程度上是有条件的。小选矿厂第一段破碎也叫粗碎，但此段给矿粒度为200~350毫米左右，然而在上述阶段的划分中，这种粒度的破碎属于中碎段。

§ 1.4 破碎比〔7〕

一、概念

送到选矿厂的原矿，井下开采一般在300—600毫米，露天采矿可达1000—1300毫米。要把这样大的矿块破碎到适合于选别作业要求的粒度，是破碎和磨碎的根本任务，即要生产出合格粒度的矿石产品，供给下一段工序的正常生产。

如果送到选矿厂去的最大矿块粒度为600毫米，那末，当破碎得出的产品最大粒度为30毫米，矿块的尺寸就减少到原来的1/20，而当破碎后得出最大粒度为4毫米产品时，矿块的尺寸就减少到1/150。这个表示破碎尺寸变化效果的指标通常称为破碎比。一般说来，破碎比就是给矿中最大矿块尺寸与破碎后产品中最大矿块尺寸之比值。

这个比值可以说明破碎机和磨矿机在缩小原矿粒度尺寸方面的性能。可作为破碎机和磨矿机工作时机械负荷的局部指标，也可作为确定破碎机和磨矿机处理能力的要素和确定破碎机和磨矿机效率的因素之一。然而在实际生产中，没有一种破碎比的计算方法可以得出确切的数值满足上面列举的情况。因此，在破碎和磨碎时物料粒度减小的程度—破碎比，我们可采用各种不同的方法来表示，并给以适当的名称。

二、破碎比表示方法

1. 极限破碎比 R_L

极限破碎比 R_L 是破碎机的给矿能够通过筛孔大小与其破碎产品能够完全通过的筛孔大小之比（筛孔形状相同，筛分机类型与工作条件相同）。然而必须指出，粗碎机的给矿常常或根本不作筛分，所以在确定粗碎机的破碎比时，是用采场供矿的最大矿块来决定的。而测定其产品尺寸，则通常采用方形孔筛或圆孔筛。不管用那种方法去测量，要得到较为准确的极限破碎比，对于粗碎机而言是比较困难的。

2. 表面破碎比 R_A

表面破碎比 R_A 是破碎机给矿口工作宽度 B 与排矿口工作宽度 S_e 之比。

排矿口宽度，在速度小的粗碎机中，采取最大宽度。在速度大的二次（中、细）破碎中，采取最小宽度。

由产品筛析结果可知，这一方法不能反映出真正的矿块缩减程度，但可以作为说明破碎机在一个工作循环中，可能给出的最大破碎比。

3. 实际破碎比 R_w

实际破碎比 R_w 是给矿中最大矿块尺寸与破碎机排矿口的工作宽度 S_e 的比值。

4. 平均破碎比 R_U

平均破碎比 R_U 是给矿平均尺寸与产品平均尺寸之比值。

苏联学者C、E、安德列也夫教授采用下式计算平均破碎比。

$$R_a = \frac{\sum \gamma_i}{\sum \frac{\gamma_i}{d_i}} \quad (1-1)$$

式中 γ_i 任意粒级的百分含量%，

$\frac{\gamma_i}{d_i}$ 任意粒级的百分含量粒度尺寸之比值。

平均破碎比能比较准确的代表了机器工作的技术性能，因此多为现场所采用。

5. 80%的破碎比 R_{80}

80%破碎比 R_{80} 就是可以通过80%原料的方形筛和可以通过80%产品的方孔筛筛孔大小的理论上的比值。这种方法是用在有若干数量板状结构的大块矿石的情况下，于计算极限破

碎比时，作为消除误差之用。

如多段破碎或磨碎时其总破碎比为

$$R_T = R_1 R_2 R_3 \cdots \cdots R_n \quad (1-2)$$

多段破碎的总破碎比等于各段破碎比的连乘积。

式中 R_T 为总破碎比。

$R_1 \cdots \cdots R_n$ 为各阶段的破碎比。

§ 1.5 解离度〔7〕〔9〕〔10〕

一、概念

磨碎作业的功用和目的依其所磨原料的不同而不同，在选矿厂中磨碎的主要任务是将矿物原料粉磨，以使其有用矿物的绝大部分得以从脉石中解离出来，并在许多情况下使两种有用矿物互相分离开来；其次一个任务是将单体的有用矿物依其粒度的必要而缩小，以适应下一选别过程的要求。

所谓矿物的单体解离意思就是组成岩石的各矿物的相互分离。在理论上曾经计算过：如果矿石是由两种有用成分组成的，而各矿物又均以同等大小的立方体形式存在，在体积上作等量的均匀分布，则此时如果将矿石破碎，使破碎后的立方体为原有立方体大小之半时，那么，只要破碎不是选择性的沿矿物的接触表面进行，则在所得到的破碎粒子中只能有 $1/8$ （12.5%）是纯净的单体分离的粒子；而如果需要使90%的矿粒达到单体分离，那就须要将矿粒破碎到原有粒度的 $1/32$ ，要想近乎100%的解离，则破碎粒度应是原有粒度的 $1/512$ 。

如果矿物的含量不是相等的，则对于含量小的矿物来说上述数字仍将是差不多的，但对于含量大的矿物，其解离百分数却将大大地超出前述的数值。例如，当岩石中两种矿物的体积含量是按10:1的比例存在时，则将岩石破碎到矿物的固有粒度，对于含量大的矿物将会有50%达到解离，而当破碎到固有粒度的大小的 $1/4$ 时，则可有90%达到单体分离。当其中的一种矿物体积含量约占4%时（此时相当于很富的铜矿物的含量），则破碎到矿物固有粒度的一半大小时，则会有92%被解离出来。

一般说来，矿物在接触面的结合力通常是小于矿粒本身的内聚力，当将矿石磨碎到一定大小时，例如磨碎到含量小的那种矿物的颗粒粒度时，将会有80~90%的颗粒小于矿物颗粒的一半，而有70~80%小于矿物颗粒的 $1/4$ ，并有60~70%是小于它的 $1/10$ 。由此可知，在不进行任何选择性沿边界表面破碎的情况下，将比较富的矿石磨碎到有用矿物占优势的粒子尺寸时，其所解离的产品中，尽管有用矿物已有近本身全部粒子的70%得到了单体分离，但至少来说在最大的粒子中，脉石仍占了80%，而就全部解离的粒子来说，脉石则远远超过了90%。在一般矿石中，沿边界表面发生的选择性破碎，可以将此解离度的百分数再提高。其所提高的程度足以使这样一种规律能够成立，即在破碎时只要破碎到有用矿物的占优势的粒子尺寸时，就算可以了。

二、单体解离度测定

常用的测定磨矿产品单体解离度的方法如下：

1. 采取有代表性试样；
2. 筛分分析试样；
3. 称量每一个粒级的重量；

4.自每一个粒级制取团块并磨成光片；

5.在显微镜下测定每种矿物单体颗粒和各种不同比率连生体颗粒的量。然后按下式计算单体分离度F：

$$F = \frac{f}{f + \sum f_i} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中F——被测矿物的单体解离度(%)。

f——被测矿物单体颗粒粒数。

$\sum f_i$ ——各种不同比率连生体折算成同粒级纯被测矿物颗粒量之和。例如，四颗含1/4被测矿物的连生体颗粒即可析为一颗纯矿物颗粒。

将测定结果填入一定格式的表中。表1—2就是一个铅锌矿石磨矿产品单体解离度测定的例子。矿石含铅8.4%，含锌7.7%。

××铅锌矿石磨矿产品单体解离度测定

表1—2

项 目	粒 度 范 围					
	A	B	C	D	E	F
1 粒度 (M)						
方铅矿	105—75	75—52	52—37	37—26	26—18	—18
闪锌矿	105—105	105—75	75—52	52—37	37—26	—26
脉 石	210—150	150—105	105—75	75—52	52—37	—37
2 重量百分数	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
方铅矿单体	7.1	8.6	8.6	8.4	8.1	9.3
闪锌矿单体	10.3	11.6	11.3	10.7	10.3	10.4
脉石单体	59.2	68.0	75.6	79.9	81.5	80.3
(1/2)方铅—闪锌连生体	16.2	8.3	3.2	0.9	0.1	
(1/4)方铅—闪锌连生体	3.9	1.9	0.7	0.1	0.0	
(1/4)闪锌—脉石连生体	2.4	1.2	0.5	0.0	0.0	
(1/5)方铅—闪锌—脉石连生体	1.0	0.4	0.1	0.0	0.0	
3 每一个粒级对总重的百分数	1.5	7.3	14.6	16.2	9.7	50.7
4 各粒级的单体解离度(%)						
方铅矿	43	65	83	94	99	100
闪锌矿	53	71	87	96	99	100
脉 石	92	97	99	100	100	100
5 整个试样平均解离度 方铅矿 911.3% 闪 锌92.8% 脉石99%						

§ 1.6 破碎和磨碎的主要方法^{[1][2]}

现代科学发达的今天，矿石物料破碎和磨碎的方法也同样取得了很大发展。巨大的颗粒状矿石采用各种不同的破碎方法可以获得几个微米甚至小于1个微米的产品以适应各种工艺的需要。

在矿山工业生产中，目前广泛应用的破碎和磨碎方法，仍然是机械力破碎和磨碎方法。主要有以下几种方式。

一、挤压破碎

被破碎物料被夹在两个表面之间，在比较缓慢增长的压力下被挤压碎裂，如图1—1所示。

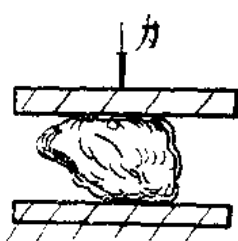


图1—1 挤压破碎

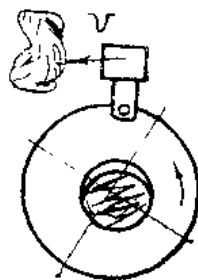


图1—2 冲击破碎 (1)

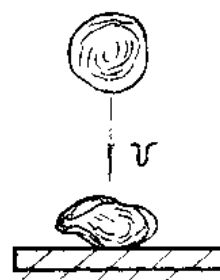


图1—3 冲击破碎 (2)

二、冲击破碎

冲击破碎在破碎和磨碎工作中占有很重要的地位。因为破碎机和磨矿机研磨介质都是以一定速度运动的，破碎和磨碎是在运动中的进行的，就其实质不可能产生纯挤压破碎作用，而主要是冲击作用的结果。在破碎机和磨矿机中冲击破碎作用有下述4种方式。

(1) 迅速运转的另件（如锤和打击板）冲击给入的矿石料块而使其破碎（图1—2）。

(2) 研磨介质冲击处于某一表面上的物料，如棒磨机、球磨机、自磨机等磨矿机械中的研磨介质在磨机中从某一高度落下冲击筒体下部的物料块，而使其被冲击破碎。如图1—3所示即为这种破碎方式。

(3) 迅速飞起的矿石块冲击到固定钢板上，如反击式破碎机和锤式破碎机中矿石块被打击板和锤打击而迅速飞起与反击板发生强烈冲击而使矿石块破碎（图1—4）。

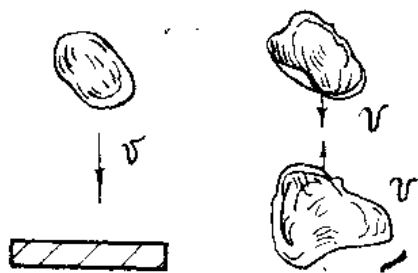
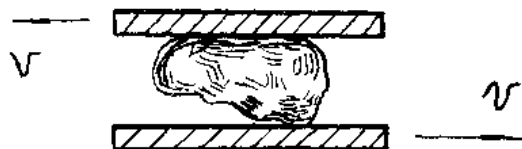


图1—4 冲击破碎 (3)

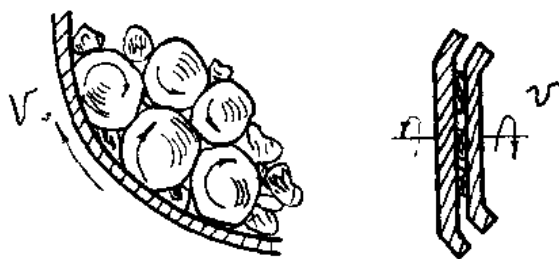


图1—5 研磨破碎

三、研磨破碎

矿石物料在移动着的金属表面之间或在不同型式的研磨体之间，物料与物料之间借摩擦作用，以及相互间的研磨（摩擦）作用下而被磨碎。图1—5所示为这种磨碎方法。实际工作中的各种磨矿机的研磨破碎就属这种破碎方式。

四、劈裂破碎

由于楔状物体作用于矿石块的结果而使其破碎。颚式破碎机中的待破碎物料受衬板齿尖作用即属这一种破碎（图1—6）。



图1—6 劈裂破碎

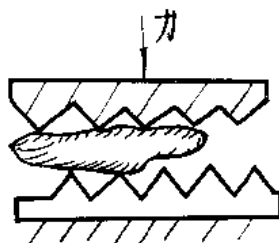


图1—7 弯曲破碎

五、弯曲破碎

和一根楔承受载荷情况相似，矿石块在两个或几个支点中间部分受到弯曲力作用而被破碎（图1—7）。严格讲弯曲应属于劈裂破碎类，不必视为单独的破碎方法。

此外，还有非机械力作用的破碎方法。如：

六、爆破破碎

采用炸药对矿石块炸碎。这种破碎主要用于从采矿场运来的过大块矿石块，这样大的块不能直接给入粗碎机，必须经过加工处理后才能给入粗碎机。现场人员通常称为二次爆破。

七、超声破碎

超声波破碎是利用超声频振荡而破碎矿石，通过理论计算和实验均证明，破碎矿石的效果是随振荡频率的提高而增加。一定频率和强度的声波振荡将在水中引起空穴现象。这种效应能使甚致于最坚硬的矿石遭到破碎。因此，如果超声波在水中和固体的支界面上集中地形成空穴（足够强烈的）可使矿石强烈的破碎。用超声波破碎也可以由振动空穴共同完成。

八、热裂破碎

矿石受热后，体积和形状都有所改变（膨胀和伸长）而后使其受再发性突然作用，即迅速改变其周围的压力作用而破碎。又称为减压破碎。

美国斯奈德采用这种原理进行了半工业试验并取得了斯奈德破碎法的专利。

九、高频电磁波破碎

利用超高频电磁波来破碎矿石是近二十年来正在引人注意的一项新技术。这种方法的特点是具有较高的效率对矿石进行破碎。其原理为由大功率的磁控管来发生高频或超高频电磁波，其频率一般高达3000兆周/秒以上。根据实验结果，在矿石表面产生高热，在加热深度

达到数十毫米时，由于矿石膨胀产生张力而破裂，但是大规模的采用，尚存在一些技术问题有待解决。

十、水电效应破碎

当脉冲电压通过离子性液体时，由于离子性液体对作用时间暂短的脉冲高压所呈现的介质作用特性，在液体中就引起了非常特殊的放电现象，即电水锤效应（水电效应）。因为这种能量的转换是由脉冲电能不经过中间过程能转换，而直接转变为冲击的机械能。因此就非常强烈，使矿石在液体中被破碎。

十一、水力破碎

把水经过增压之后，使其成为高压或超高压状态，经喷嘴以极大的速度喷射而出，作用于矿块之上使之破碎。这种方法被广泛应用于开采煤和砂岩，砂矿等软脆性物料的破碎。

此外在破碎过程中有加入适量的药剂，强化破碎和磨碎作业，改变矿石的机械性能，使之易于破碎和磨碎。

现在在生产中使用的各种破碎机和磨矿机往往是几种破碎方法的综合作用结果。很难以做成单一作用的破碎机和磨矿机。

第二章 颗粒物料及其组成表示法^{[8][9]}

§ 2.1 颗粒物料的粒度尺寸

由于从工作面上开采出来的矿石或者经破碎后矿石的形状是极其不规则的，因此颗粒状物料的尺寸，通常很难以用简单而精确的数值来表示。一般说来，颗粒状物料可分为：

块状物料：长度 a 与宽度 b 和高度 c 之比的范围是 $1:1:0.5$ ；

楔状物料： $c < 0.5b$ ；

针状物料： $a > 1.5b$ 。

一、单颗粒块状物料的粒度尺寸

对于形状接近于立方体或球形的颗粒物料，它的粒度尺寸通常采用一个数值表示。一般用长度来表示，此时

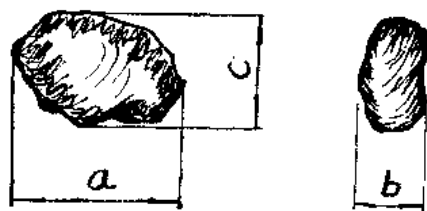


图 2—1 颗粒形状尺寸表示法

$$d = a$$

(2—1)

式中： d —为矿石的粒度。

a —为矿石的长度。

二、形状复杂的单颗粒物料粒度尺寸

如楔形和针状物料块，其颗粒尺寸有以下几种表示法。

(1) 最大尺寸表示法：用颗粒的长度尺寸（最大尺寸）表示颗粒的粒度。

$$d = a$$

(2—2)

(2) 长、宽平均尺寸法：