

粉碎试验技术

Comminution Test Technology

吴建明 编著



冶金工业出版社
www.cnmp.com.cn

粉碎试验技术

吴建明 编著

北 京
冶 金 工 业 出 版 社
2016

内 容 提 要

本书对矿物加工粉碎试验技术进行了较全面的归纳和总结,内容包括粉碎及其试验技术的理论基础,粉碎试验操作技术,粉碎试验有关工艺和设备参数的测定技术,试验室、半工业和工业粉碎试验方法,涵盖了目前国内外最新、最先进的试验方法,以及一些试验实例。

本书力求内容的系统性、先进性、新颖性、实用性、完整性以及技术的深度和广度,为粉碎试验技术的研究、开发、设计、应用和教学提供了丰富的资料和信息。本书可供矿业领域科研、设计单位,矿业公司技术部门,粉碎机械制造企业技术部门的科研、设计、技术人员参考,也可作为高等院校矿物加工专业师生的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

粉碎试验技术/吴建明编著. —北京:冶金工业出版社,
2016. 4

ISBN 978-7-5024-7197-2

I. ①粉… II. ①吴… III. ①粉碎—试验 IV. ①TB4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 060523 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjcs@cnmp.com.cn

策划编辑 张 卫 责任编辑 赵亚敏 美术编辑 吴 霜 彭子赫 版式设计 彭子赫

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7197-2

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2016 年 4 月第 1 版,2016 年 4 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 15 印张; 287 千字; 222 页

61.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街46号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjcs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

据考证，我国夏代就出现了青铜器。考古中，在长江流域发现了多处商代中期的铜采场遗迹，商代晚期的铜绿山古铜矿遗址已经存有粉碎的遗迹。那时，当还不知道矿石怎样才容易粉碎，应该粉碎到什么程度时，想起来总是要先试一试的吧，那么这“试一试”是否就是最初的粉碎试验呢？

时光荏苒，粉碎试验逐渐成为一种人类有意识、有目的的活动。在不知不觉中，粉碎试验发展起来了。随着人类生产规模的日益扩大，生产行为的日益复杂化，粉碎试验的种类日益繁多，技术水平日益提高。

我国的粉碎试验技术是怎样发展起来的，已难寻根溯源。20 世纪 70 年代后期开始的改革开放之前，国内一般采用前苏联的试验方法。改革开放使我们引进了西方的试验技术，其中最引人注目的当属美国的 Bond 试验体系和半工业试验方法。80 年代后期到 90 年代，我国选矿工业进入一个低潮时期。就在我们谈论选矿是不是夕阳工业时，国外的粉碎试验技术仍在持续发展。当我们迈入 21 世纪，举目远眺，发现国外的粉碎试验技术呈现出与以往完全不同的面貌，大型数据库、数学模型、地质矿物学使我们耳目一新。

粉碎试验之所以必要，原因在于粉碎是矿物加工过程中的重要作业阶段，其重要性不仅在于选别作业依赖粉碎作业提供单体解离的物料颗粒，从而实现矿物加工过程的产品目标，而且在于粉碎作业电能消耗量和金属材料磨损消耗量极其巨大，对矿物加工作业的经济性有至关重要的影响。采用适当的粉碎试验技术进行试验，获得必要的试验数据和结果，用于选矿厂设计中粉碎流程设计和设备选型计算，能够合理地确定粉碎流程，正确地进行设备选型，从而在未来选矿厂建设中投入较低的基本投资，在未来生产中以较低的生产操作成本达到预期的设计技术指标，获得尽可能高的经济效益和产品质量。

本书尝试将粉碎试验技术进行系统的归纳和总结,使之形成一个专门的技术体系。同时对国内外粉碎试验技术,特别是对最新、最先进的粉碎试验方法进行全面的总结和介绍,为选矿厂设计中粉碎流程设计和设备选型试验方法的开发和选用提供借鉴,为这一领域技术的研究、开发、设计、教学提供资料和信息,促进矿物加工技术的发展。

本书内容包括粉碎及其试验技术的理论基础、粉碎试验操作技术、粉碎试验有关工艺和设备参数的测定技术。本书全面介绍了试验室、半工业和工业粉碎试验方法,重点介绍了主要的试验室试验方法,其中包括目前国内外最新、最先进的试验方法。在介绍试验方法之余,还尽可能介绍了后续的试验结果应用,以及试验及应用实例。

90年代,特别是2000年以来,随着粉碎试验技术的不断发展和成熟,试验方法向小型化和简化方向发展。例如自磨(半自磨)试验,已基本摒弃了消耗大量人力、物力、财力和时间的半工业试验方法,而代之以各种与大型数据库和计算机模拟相结合的现代小型试验室试验方法,大大减少了试验工作量,降低了试验成本,强调试验方法的科学性,使粉碎流程设计和设备选型更加准确,并且随着生产时间的推移始终保持其准确性。本书反映了这方面粉碎试验技术的发展特点。

随着技术的发展,粉碎流程和设备都在不断进步和演变,新型粉碎设备和技术不断成熟并获得应用。辊压机(高压辊磨机)、VertiMill立式磨机(塔磨机)和IsaMill搅拌磨机等新型粉碎设备正在进入粉碎领域。为适应这些技术发展的需要,出现了相应的粉碎试验技术及其设备选型方法。本书反映了这方面粉碎试验技术的最新发展。

本书面向矿业领域科研单位、设计单位、矿业企业技术部门、粉碎机械制造企业技术部门的科研、设计、技术人员,以及大专院校矿物加工专业师生。本书内容适用于矿物加工粉碎专业科研、设计方面的试验研究和教学工作,矿物加工粉碎作业生产流程考察和检测技术工作。

近些年来,我国矿业经济和技术有了很大发展,已成为矿业大国,但在粉碎试验技术方面发展相对缓慢,与国外的持续快速发展相比,差距较大,与我国粉碎工业的发展不相适应。希望本书对我国粉碎试验技术以及粉碎技术的发展有所助益。

未来的粉碎试验技术将是怎样的面貌，现在很难预料。可以想象的是，会有更多先进技术融入，其中还有现在尚未出现的新技术。无论如何，本书介绍的粉碎试验技术是从以往通向未来的桥梁。本书相信，未来的粉碎试验技术一定更完美。

由于本人水平所限，书中错误和不足之处在所难免，欢迎广大粉碎界同仁和读者批评指正。

吴建明

2016年1月

目 录

1 粉碎试验基础	1
1.1 概述	1
1.1.1 粉碎	1
1.1.2 粉碎试验	1
1.2 粉碎方式、粉碎阶段和破碎比	2
1.2.1 粉碎方式	2
1.2.2 粉碎阶段和破碎比	4
1.3 粉碎理论、原理和原则	6
1.3.1 粉碎能耗理论	6
1.3.2 离散数学和分形理论	8
1.3.3 多碎少磨原则	9
1.3.4 料层粉碎原理	11
1.4 粉碎机械概述	12
1.5 粉碎试验室	14
1.5.1 粉碎试验设备	14
1.5.2 样品制备设备	16
1.5.3 检测仪器	16
1.5.4 试验辅助设施	16
1.5.5 办公设施	17
参考文献	17
2 粉碎试验方案的制定	19
2.1 粉碎试验方法的选择确定	19
2.1.1 粉碎试验的分类	19
2.1.2 试验方法的选择确定	21
2.2 粉碎试验设计	22
2.2.1 试验设计的基本概念	23
2.2.2 试验设计方法	23

2.2.3 粉碎试验的试验设计	26
参考文献	27
3 物料主要特性参数的测定	28
3.1 物料的颗粒粒度及其测定方法	28
3.1.1 颗粒粒度的表示方法	28
3.1.2 颗粒粒度的试验室测定方法	33
3.1.3 连续湿式粉磨过程中矿浆颗粒粒度的在线测定方法	51
3.2 物料的物理性质及其测定方法	51
3.2.1 密度	51
3.2.2 容积密度	54
3.2.3 矿浆密度	54
3.2.4 矿浆浓度	55
3.2.5 含水率	57
3.2.6 自然堆角、摩擦角和排放角	58
3.2.7 矿浆黏度	59
3.3 物料的粉碎特性及其测定方法	59
3.3.1 物料的机械特性和普氏系数	60
3.3.2 物料的硬度	60
3.3.3 金属材料的硬度	61
3.3.4 相对可碎性(可磨性)系数	61
3.3.5 Bond 功指数	61
3.3.6 颗粒粒度对粉碎难易程度的影响	62
3.4 物料的磨蚀性	62
3.5 物料的颗粒形状	62
3.5.1 粉碎产生的颗粒形状	62
3.5.2 颗粒形状对物料性质的作用 and 影响	62
3.5.3 颗粒形状的表示方法	63
参考文献	63
4 粉碎试验操作技术	65
4.1 取样	65
4.1.1 物料样品	65
4.1.2 采样	67
4.1.3 制样	68

4.2 粉碎试验流程考察	72
4.2.1 粉碎试验流程考察的方法和内容	72
4.2.2 粉碎流程和设备参数的测定和计算	72
4.2.3 粉碎工艺流程的计算和粉碎工艺流程图	82
4.3 粉碎试验数据处理	90
4.3.1 粉碎试验数据和结果的表达	90
4.3.2 粉碎试验数据误差分析	91
4.4 粉碎试验报告的编写	93
参考文献	94
5 粉碎试验室试验技术	95
5.1 Bond (低能) 冲击破碎功指数试验	95
5.1.1 试验设备	95
5.1.2 试验方法	96
5.1.3 数据处理和试验结果	96
5.1.4 试验实例	97
5.1.5 试验结果的应用	99
5.2 高能冲击破碎功指数试验	99
5.2.1 试验设备	100
5.2.2 试验方法	100
5.2.3 数据处理和试验结果	101
5.2.4 试验实例	101
5.2.5 试验结果的应用	104
5.3 Bond 棒磨功指数试验	104
5.3.1 试验设备	104
5.3.2 试验方法	105
5.3.3 数据处理和试验结果	106
5.3.4 试验实例	106
5.3.5 试验结果的应用	109
5.4 Bond 球磨功指数试验	111
5.4.1 试验设备	111
5.4.2 试验方法	111
5.4.3 数据处理和试验结果	113
5.4.4 试验实例	113
5.4.5 试验结果的应用	116

5.5 Bond 粉磨功指数的简化试验、模拟计算和特殊确定方法	117
5.5.1 部分测定和模拟计算法	118
5.5.2 模拟计算方法	120
5.5.3 特殊试验方法	126
5.5.4 Bond 粉磨功指数与其他物理参数的关系	127
5.5.5 推测法	128
5.5.6 简化试验、模拟计算和特殊确定方法的讨论	131
5.6 操作功指数的测定	132
5.6.1 操作功指数的概念	132
5.6.2 测定步骤	133
5.6.3 测定实例	133
5.7 金属磨损指数试验	134
5.7.1 试验设备	134
5.7.2 试验方法	134
5.7.3 数据处理和试验结果	136
5.7.4 试验实例	136
5.7.5 试验结果的应用	138
5.8 容积法可磨度试验	138
5.8.1 试验设备	138
5.8.2 试验方法	138
5.8.3 试验结果和数据处理	139
5.8.4 试验实例	139
5.8.5 试验结果的应用	140
参考文献	142
6 自磨（半自磨）试验技术	144
6.1 试验室湿式分批自磨（半自磨）试验	144
6.1.1 试验设备	144
6.1.2 试验方法	144
6.1.3 数据处理和试验结果	145
6.1.4 试验结果的应用	145
6.1.5 试验实例	145
6.2 JKMRC 自磨（半自磨）试验室试验	146
6.2.1 JKTech 落重试验（冲击（高能）粉碎试验）	147
6.2.2 磨剥（低能）粉碎试验	148

6.2.3 测定物料密度	149
6.2.4 试验结果的应用	150
6.2.5 试验和应用实例	152
6.3 JKMAC 旋转破碎试验	153
6.3.1 试验设备	153
6.3.2 试验方法	154
6.3.3 试验结果的应用	155
6.4 半自磨机粉碎 (SMC) 试验	156
6.4.1 试验设备	156
6.4.2 试验方法	156
6.4.3 数据处理和试验结果	157
6.4.4 试验结果的应用	159
6.5 半自磨功率指数 (SPI) 试验	160
6.5.1 试验样品	160
6.5.2 试验工作	161
6.5.3 粉碎经济性评价工具 (CEET)	162
6.5.4 用 CEET 进行 SPI 试验数据处理和半自磨—球磨流程设计	164
6.5.5 试验实例一	167
6.5.6 试验实例二	174
6.6 MacPherson 半自磨可磨性试验	175
6.6.1 试验流程和设备	175
6.6.2 试验方法	176
6.6.3 数据处理和试验结果	176
6.7 标准自磨设计 (SAG Design) 试验	177
6.7.1 试验设备	177
6.7.2 试验方法	177
6.7.3 数据处理和试验结果	178
6.7.4 试验结果的应用	178
6.7.5 试验实例	179
6.8 芬兰 Outokumpu 公司自磨流程试验	179
6.8.1 坠落试验	179
6.8.2 介质能力试验	180
6.8.3 自磨可磨性试验	180
6.8.4 功指数试验	180
6.9 南非 Mintek 公司自磨 (半自磨) 试验室和半工业试验	180

6.9.1 试验室分批试验	180
6.9.2 半工业试验	181
6.9.3 数学模型和计算机模拟	182
6.10 自磨介质适应性试验	182
6.10.1 试验设备	183
6.10.2 试验方法	183
6.10.3 数据处理和试验结果	183
6.10.4 试验结果的应用	185
6.10.5 试验实例	186
6.11 自磨(半自磨)半工业试验	188
6.11.1 试验样品	188
6.11.2 基本试验工艺流程和主要试验设备	188
6.11.3 试验内容、操作和考察	190
6.11.4 数据处理和试验结果	193
6.11.5 试验结果的应用	193
参考文献	194
7 其他粉碎试验技术	196
7.1 德国 ThyssenKrupp Polysius 公司的辊压机(高压辊磨机)试验 技术	196
7.1.1 POLYCOM 粉磨指数(PGI)试验	196
7.1.2 初步探索试验	197
7.1.3 辊面磨损试验	197
7.1.4 半工业试验	198
7.1.5 球磨试验	199
7.1.6 试验数据处理	199
7.1.7 试验结果的应用	201
7.2 德国 KHD Humboldt Wedag 公司的辊压机(高压辊磨机)试验 技术	203
7.2.1 试验设备	203
7.2.2 试验程序和试验方法	204
7.2.3 数据处理、试验结果及其应用	205
7.2.4 试验实例	215
7.3 IsaMill 搅拌磨机试验技术	217
7.3.1 试验设备	218

7.3.2 试验方法	218
7.3.3 数据处理和试验结果	220
7.3.4 IsaMill 搅拌磨机的按比例放大	220
7.3.5 试验实例	220
参考文献	222

1 粉碎试验基础

1.1 概述

1.1.1 粉碎

粉碎是对粉碎对象施加外力，使其颗粒粒度减小的加工过程。粉碎分为破碎和粉磨两个阶段，一般来说粉碎产品粒度大于 5mm 的为破碎，小于 5mm 的为粉磨^[1]。生产性的粉碎过程主要由粉碎机械完成。

本书涉及的粉碎对象是脆性物料，包括金属矿石（黑色金属矿石、有色金属矿石和贵金属矿石等）、非金属矿石、化工矿物、建材原料、筑路、筑坝石料和人工砂等。

物料的粒度是粉碎加工程度的基本标志性指标和粉碎量的度量，也是粉碎终点的标志性指标。粉碎终点粒度是由粉碎产品的应用要求或下一步加工要求所决定的。对于工业矿物来说，粉碎产品往往是最终产品，粉碎终点主要由产品粒度要求决定。对于矿物加工来说，粉碎是选前准备作业，其产品必须满足后续选别作业的要求，即物料颗粒必须达到一定的单体解离度。

1.1.2 粉碎试验

粉碎试验是使用一定的粉碎试验设备、物料样品和试验方法进行的试验。

粉碎是消耗大量电能、钢材和其他原材料的作业过程。粉碎产品合格与否对后续选别作业效果有直接影响，从而影响着整个选矿厂的产品品位、回收率等主要技术指标和经济效益。因此，粉碎工艺流程和设备选择正确与否对选矿厂基本投资、生产操作成本和经济效益有重要影响。粉碎试验就是解决上述问题的科学而有效的方法，其目的有：

- (1) 为设计选择确定适宜的粉碎工艺流程提供依据；
- (2) 为选择适宜的粉碎设备类型、确定其规格和数量提供依据；
- (3) 为评价粉碎生产工艺流程和设备的工作效果提供依据；
- (4) 为生产中由于物料性质变化而对粉碎流程和设备进行必要的调整提供依据；
- (5) 为新型粉碎设备的研制和应用提供数据和资料。

粉碎试验的意义和重要性还在于用较少的人力、物力和时间即可获得确定大规模

工业粉碎生产的工艺流程和设备选型,以及生产操作技术条件所需的数据和结论。

粉碎试验方法本身也在不断发展,其发展有两个主要特点:

(1) 随着试验技术的成熟,试验方法向小型化和简化方向发展。例如自磨(半自磨)试验,20世纪90年代前还需要消耗大量人力、物力、财力和时间进行半工业试验,90年代后,特别是2000年以后已基本摒弃了半工业试验,而代之以各种小型试验室试验与计算机模拟相结合的现代方法,大大减少了试验工作量,降低了试验成本。

(2) 随着某种粉碎设备的技术成熟和广泛应用,出现了为其服务的试验方法。例如随着辊压机(高压辊磨机)的成熟和普遍应用,产生了其专门的试验方法。

1.2 粉碎方式、粉碎阶段和破碎比

1.2.1 粉碎方式

1.2.1.1 单颗粒粉碎方式

任何大批物料的粉碎过程都是由无数的单颗粒粉碎过程汇集成的。单颗粒粉碎即粉碎力通过粉碎元件直接施加在物料颗粒上的粉碎。单颗粒粉碎有挤压、冲击、弯曲、磨剥、剪切、劈裂、拉伸等粉碎方式,如图1-1所示。粉碎方式的不同及其不同组合造就了形形色色的粉碎机械和粉碎方法。

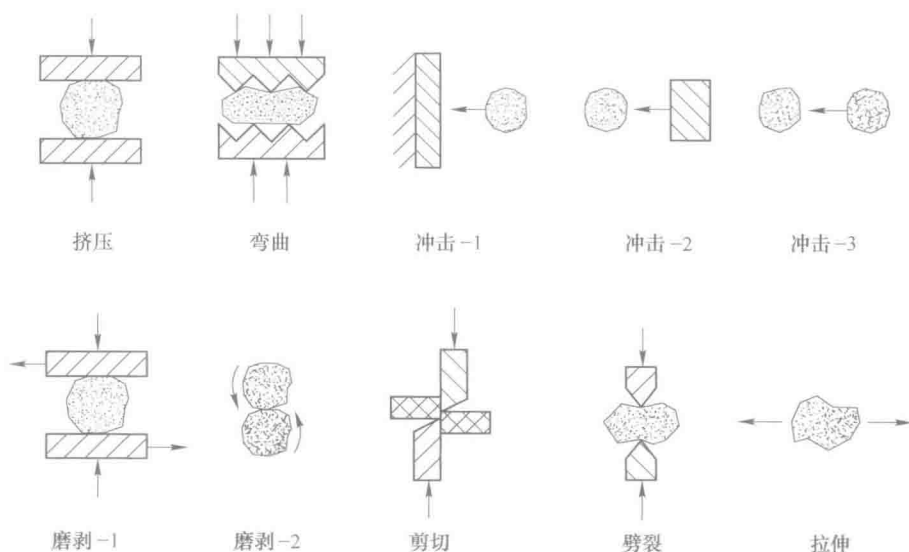


图 1-1 物料的粉碎方式

A 挤压

将被粉碎物料颗粒置于两个粉碎元件之间，以较为缓慢的速度施加粉碎力，物料颗粒受压而被粉碎。挤压是机械设备最容易实现的粉碎方式之一，因此常见于脆性物料粉碎中。由材料力学可知，物料颗粒的抗压强度随加压速度的提高而增大，因此降低挤压速度可提高粉碎效率，最理想的是静压粉碎。但实际中无法做到纯粹的静压粉碎，只能尽可能降低加压速度。

B 弯曲

从两个相反的方向、在相互交错的位置上对被粉碎物料颗粒施加粉碎力，物料颗粒受弯力而断裂粉碎。弯曲是脆性物料最常见的粉碎方式之一。

C 冲击

物料颗粒与粉碎元件之间产生高速相对运动，物料颗粒在瞬间受到巨大的冲击力而被粉碎。冲击也是脆性物料最常见的粉碎方式之一。冲击可以由机械高速运动或振动（机械振动或超声波）形成，也可以通过高速气流或高速水射流产生。高速冲击可产生强大的粉碎力，但同时物料颗粒也会表现出较高的强度。为了提高冲击的效果，应使前者的增幅远高于后者。研究表明，一次冲击的效率低于挤压粉碎，但其后往往跟随着二次冲击和更多的剩余冲击，使效率有所弥补。

D 磨剥

物料颗粒与粉碎元件之间或物料颗粒之间互相摩擦而粉碎。磨剥是最常见的粉碎方式之一，尤其在细粒度物料的粉碎中常见。

E 剪切

对物料颗粒施加两个方向相反、位置相互交错的粉碎力，使物料颗粒沿剪切面产生错位而粉碎。剪切是最常见的粉碎方式之一，尤其常用于塑性材料的粉碎。

F 劈裂

粉碎元件的尖端刺入被粉碎物料内，使被粉碎物料向两个方向开裂而粉碎。这种粉碎方式多见于以齿形元件粉碎的情况。

G 拉伸

对物料颗粒（或单体）施加拉力，使其受力超过极限而断裂。一般来说，物料的抗拉强度都小于抗压强度，因此拉伸可以产生更好的粉碎效果。但是，对脆性物料颗粒很难施加拉力，只有在高温热膨胀等特殊情况下才产生拉力，如在热应力粉碎、高压电脉冲粉碎和 Snyder 减压粉碎中发生的拉伸粉碎。但这些特殊粉碎方法应用尚不普遍或者尚未获得应用。因此拉伸并不多见于脆性物料粉碎中，而更多见于塑性材料粉碎中。

实际粉碎过程很少由单纯一种粉碎方式实现，绝大多数粉碎过程是以一种粉

碎方式为主，伴随其他一种或数种粉碎方式的复杂过程。在有些粉碎过程中，机械能是由电能、热能、化学能、原子能等转化而来的：例如爆破的粉碎过程就是在瞬间和狭小空间内，化学能转化为机械能时高温、高压、冲击的作用过程；热应力粉碎是热能转化为机械能的作用过程；高压电脉冲粉碎是电能转化为机械能的作用过程等。

1.2.1.2 批量物料的粉碎方式

实际生产中物料的粉碎都是以批量物料的形式出现的，粉碎机械的工作方式决定了通过该机械的物料颗粒受到的粉碎方式。这个问题将在本章最后一节介绍粉碎机械的部分一起介绍。

1.2.2 粉碎阶段和破碎比

1.2.2.1 粉碎阶段

脆性物料的粉碎可分为破碎和粉磨两个加工阶段，破碎和粉磨各自又分为几个分阶段，粉碎阶段划分见表 1-1。非脆性物料的粉碎阶段划分可参考表 1-1。

表 1-1 粉碎阶段划分

粉碎阶段	分 阶 段		给料粒度/mm	产品粒度
破碎	粗碎		1500~350	400~125mm
	中碎		400~125	100~40mm
	细碎		100~40	25~12mm
	超细碎		50~25	12~5mm
粉磨	粗磨	自磨、半自磨	400~150	5.0~0.15mm
		常规粉磨	25~5	
	细磨		5~1	0.15~0.075mm
	再磨		—	75~10 μ m
	超细磨		—	10~0.1 μ m
	纳米粉磨		—	100~10nm

注：表中粒度值为物料中最大颗粒的粒度。最大颗粒粒度可视为物料中筛下累积产率占 95% 的颗粒粒度。

1.2.2.2 破碎比

破碎比是指某一粉碎阶段或某一粉碎设备粉碎前后物料粒度的比值，反映了物料粒度减小的程度，是评价粉碎过程效果和粉碎设备性能的技术参数。破碎比可以用不同的方法表示，从不同的角度反映这一参数。