

化学工程手册

《化学工程手册》编辑委员会

第 23 篇

粉碎、分级及团聚

化学工业出版社

化 学 工 程 手 册

第 23 篇

粉碎、分级及团聚

《化学工程手册》编辑委员会

化 学 工 业 出 版 社

本篇是《化学工程手册》第23篇，介绍粉碎、分级与团聚的生产工艺与设备。全书共分九章，内容有粉碎、破碎、分级、筛分、风力和水力分级、团聚、粉碎与团聚的工艺流程、粉碎分级与团聚试验等。

本书可供化学工业及有关工业部门的设计、研究人员、工厂技术人员及有关院校师生参考。

化 学 工 程 手 册

第 23 篇

粉碎、分级及团聚

编写人 任德树

责任编辑：谢丰毅

封面设计：任 辉

化学工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

开本787×1092¹/₁₆印张20³/₄字数523千字印数1—8,670

1985年12月北京第1版1985年12月北京第1次印刷

统一书号15063·3774定价 4.40 元

《化学工程手册》总篇目

1. 化工基础数据
2. 化工应用数学
3. 化工热力学
4. 流体流动
5. 搅拌及混合
6. 流体输送机械及驱动装置
7. 传热
8. 传热设备及工业炉
9. 蒸发及结晶
10. 传质
11. 蒸馏
12. 气体吸收
13. 气液传质设备
14. 萃取及浸取
15. 增湿与减湿
16. 干燥
17. 吸附及离子交换
18. 薄膜过程
19. 颗粒及颗粒系统
20. 流态化
21. 气态非均一系分离
22. 液固分离
23. 粉碎、分级及团聚
24. 化学反应工程
25. 化工自动控制
26. 化工系统工程

《化学工程手册》编辑委员会成员

主任

冯伯华 化学工业部

副主任

陈自新 化学工业部橡胶司 李步年 陕西省化工设计院

苏元复 华东化工学院 蔡剑秋 化学工业出版社

汪家鼎 清华大学

委员

卢焕章 化学工业部化工设计公司 林纪方 大连工学院

区灿棋 中国石油化工总公司 杨友麒 化学工业部计算中心筹备处

邓颂九 华南工学院 张洪沅 成都科技大学

朱亚杰 华东石油学院 张剑秋 北京燕山石油化学总公司研究院

朱自强 浙江大学

余国琮 天津大学 郑 炽 上海医药设计院

时 钧 南京化工学院 郭慕孙 中国科学院化工冶金研究所

沈 复 华东石油学院 傅举孚 北京化工学院

吴锡军 南京化学工业公司化工 萧成基 化学工业部第六设计院

研究院

第23篇 《粉碎、分级及团聚》

编写人 任德树

前 言

化学工程是研究化工类型生产过程共性规律的一门技术科学，是化工类型生产重要的技术和理论基础。化学工程学科的内容主要包括：传递过程原理及化工单元操作；化学反应工程；化工热力学及化工基础数据；化工系统工程学等。研究和掌握化学工程，对于提高化工生产效率和经济效益，加速新技术的开发，提高科研、设计和生产技术水平，有着十分重要的作用。因此，对化学工业来说，化学工程是涉及提高技术水平的主要环节之一。

建国以来，我国的化学工程技术工作逐步发展，已经初步具有一定的基础，并取得了一定的成果。但是，目前国内还缺少一套较为完整实用的化学工程参考资料。编辑出版一套适合国内需要的，具有一定水平的《化学工程手册》，是化工技术工作者多年来的宿愿。早在五十和六十年代，国内的化学工程专家就曾酝酿和筹备组织编写《化学工程手册》，一九七五年化学工程设计技术中心站又曾组织讨论过编写计划。今天，在党中央提出加快实现四个现代化宏伟目标的鼓舞下，在化学工业部和中国化工学会的领导下，于一九七八年正式组成《化学工程手册》编委会，经过化工界许多同志的共同努力，《化学工程手册》终于与广大读者见面了。

希望这部手册的出版，将有助于国内的化工技术人员在工作中掌握和运用化学工程的科学技术原理，更好地处理和解决设计、科研和生产中遇到的化工技术问题。

本手册是一本通用性的工作手册。内容以实用为主，兼顾理论；读者对象为具有一定化工专业基础知识的工程技术人员和教学人员；内容取材注意了结合国内的情况和需要，并反映国内工作已取得的成果；对于国外有关的技术及数据，也尽量予以吸收。

根据当前国内的实际情况，计量单位一律采用“米-公斤（力）-秒”工程制(MKfS制)。但是考虑到我国将逐步过渡到采用国际单位制(SI)，除了在第一篇中列出详细的单位换算表外，并在每篇之末加列简明的MKfS制-SI换算表。

参加本手册编写工作的，有全国各有关的设计、科研和高等院校等共二十多个单位，近二百人。此外，还有其它许多单位和人员提供资料或间接参与手册的有关工作。《化学工程手册》编辑委员会负责指导手册工作的开展，研究和确定编审工作中一些原则问题，并负责书稿的最后审定工作。手册编写的日常组织工作，由化工部化学工程设计技术中心站负责。

本手册系按篇分册陆续出版，今后还将定期修订再版并出版合订本。希望广大读者对本手册提出宝贵意见，以便再版时改进。

《化学工程手册》编辑委员会
1979年7月

导 言

本篇较详细地叙述了粉碎、分级与团聚的生产工艺与设备，内容力求完整。即使过去对此接触较少的同志，也可以从中得到系统的理解与知识。

粉碎、分级与团聚的生产工艺与设备的关系很紧密。因此，本篇除讨论生产工艺外，对各种设备进行了较为全面地介绍。对每种设备都列出表格，介绍其技术特征，供选择与计算时参考。

除重点讨论国产的各种设备外，国外一些在生产中经受考验的先进设备也适当地加以介绍。

各种设备必须互相配合，才能满足生产要求：例如粉碎车间使用各种破碎机、磨碎机、筛子、分级机；团聚车间使用各种团聚机、破碎机、磨碎机、筛子、分级机等。本篇的第8章讨论粉碎与团聚的工艺流程，使读者了解到这些设备如何互相配合，以达到生产的目的。

为了使粉碎、分级与团聚技术建立在科学的基础上，必须加强对物料的试验研究工作。第9章将讨论各种最常用的试验方法。

篇末附有参考文献，有关细节（如公式推导、某些设备的详细构造等）可查阅这些专门论著。

目 录

导 言

23.1 粉碎	1
23.1.1 概述	1
23.1.2 粉碎的费用和过粉碎	1
23.1.3 粉碎常用的术语	2
23.1.4 物料的性质	3
23.1.5 颗粒的形状	5
23.1.6 物料的粒度和粒度分布	7
23.1.7 粉碎机的施力作用和粉碎 能耗假说	13
23.2 破碎	20
23.2.1 概述	20
23.2.2 颚式破碎机	21
23.2.3 旋回破碎机	32
23.2.4 圆锥破碎机	43
23.2.5 锤式和冲击式破碎机	54
23.2.6 辊式和其它型式破碎机	74
23.3 磨碎	90
23.3.1 概述	90
23.3.2 球磨机和棒磨机	90
23.3.3 自磨机	133
23.3.4 其它细磨及超细磨机	142
23.3.5 磨机动力学、助磨剂和深冷 磨碎技术	162
23.4 分级	171
23.4.1 概述	171
23.4.2 筛分	171
23.4.3 水力和风力分级	182

23.5 筛分	188
23.5.1 概述	188
23.5.2 振动筛	188
23.5.3 弧形筛、概率筛、细筛	209
23.6 风力和水力分级	220
23.6.1 概述	220
23.6.2 干法分级机(选粉机)	220
23.6.3 湿法分级机	226
23.7 团聚	239
23.7.1 概述	239
23.7.2 压块过程与设备	240
23.7.3 造球过程与设备	244
23.7.4 烧结过程与设备	247
23.7.5 球团过程与设备	267
23.7.6 其它的团聚过程	276
23.8 粉碎与团聚的工艺流程	278
23.8.1 粉碎的段数	278
23.8.2 粉碎流程	279
23.8.3 各生产部门的粉碎流程举例	283
23.8.4 团聚流程	288
23.9 粉碎、分级与团聚试验	293
23.9.1 粉碎试验	293
23.9.2 筛分试验	300
23.9.3 细粒物料粒度组成的测定	301
23.9.4 粉末比表面的测定	316
23.9.5 团聚试验	321
参考文献	324

23.1 粉 碎

23.1.1 概 述

粉碎是将松散物料用机械方法粉碎为小粒度的过程，其目的是：

(a) 使物料的比表面增加，则物料颗粒同周围介质的接触面积大，反应速度快，如催化剂的接触反应、固体燃料的燃烧与气化、物料的溶解、吸附、干燥，以及利用粉末流化床的接触面积大来强化传质与传热等。

(b) 在水泥工业中提高水泥的标号。水泥熟料同石膏一起磨碎成最终产品。磨碎的粒度越细，比表面越大，水泥的标号就越高。

(c) 在选矿之前使矿石中的有用成分解离。由于矿石中有用成分同杂质紧密地结合在一起，只有经过破碎或磨碎之后产生“解离”，才能用选矿方法剔除杂质，得到较纯净的精矿和中间产品。许多金属矿石要在选矿之前磨碎至0.074mm以下才能充分解离。

(d) 为原料下一步加工作准备，如在炼焦、烧结、球团、陶瓷、玻璃、粉末冶金等部门，必须把原料碎磨至一定粒度以下，以满足下一步加工的粒度要求。

(e) 便于使用。在食品、化工、医药、化肥、农药等工业部门中，常将产品碎磨成粉末状态向用户销售。

(f) 便于贮存和运输，粉末物料或料浆可利用风力或水力运输。

(g) 制备混凝土时，如天然砂供应不足，可将岩石粉碎以制备人造砂，但人造砂的粒度组成需符合严格的规定（表2-20）。

(h) 为了保护环境，将城市垃圾进行粉碎并处理。

23.1.2 粉碎的费用和过粉碎

在一些工业部门中，碎磨车间的投资和生产费用占据很大的比重，例如在金属矿石选矿厂，碎磨车间约占全厂投资费用的60%，生产费用的40%以上。生产费用中包括能耗和钢耗。视物料的性质和磨碎的粒度，磨碎一吨物料通常要消耗8~20kWh的电（能耗），磨碎工具（如钢球和衬板）的磨损达50~1000g（钢耗）以上。

虽然粉碎物料时要求把全部或大部分（例如80%或95%）物料粉碎至要求的粒度以下，但其中小于某一粒度下限的产品应力求减少，这种在粉碎过程中产生的小于规定粒度下限的产品，称为过粉碎。例如在选矿厂，重力选矿法通常能处理的粒度下限是19 μ ，浮游选矿法是5~10 μ 。因此，磨碎重选或浮选给料时，产生小于19 μ 或5~10 μ 的粒级，就分别为过粉碎。又如用镁法生产的海绵钛，成品粒度的要求为0.084~12.7mm；铁合金厂使用的焦炭还原剂，成品粒度的要求为3~15mm。这时，小于粒度下限（即<0.084mm或3mm）的过粉碎粒级，有的当作废品处理，有的需大幅度减价处理，使经济上蒙受损失。

在某些用户部门中，除了对产品的粒度上限和粒度下限有要求外，还对中间某些粒级的含量波动范围有规定，人造砂就是一例（表2-20）。为此，需采用比较复杂的碎磨流程，而且对设备的选型、操作等的要求也更高。

人们通常把粉碎产品粒度（指产品中最大颗粒的粒度）大于3~5mm时称为破碎，在60 μ 至3mm之间称为磨碎，小于60 μ （有时可达几个 μ ）时称为超细磨碎。进行超细磨碎的物料量虽然不多，但磨碎费用高、技术上难度大，需要采取一些专门的措施或使用特殊的设备，如果用常规的小型球磨机进行超细磨碎，效果就不理想：开始时产品粒度随磨碎时间的增加而变细，但经过一定时间之后将达到所谓“磨碎限”，这以后尽管磨碎时间增加，产品粒度却不变细，或变化很小，甚至由于颗粒表面积的增加而出现聚集现象，表现为粒度更粗了。

23.1.3 粉碎常用的术语

粉碎产品的粒度在1~5mm以上的作业，称为破碎；在1~5mm以下的作业称为磨碎。破碎和磨碎可以统称为粉碎或者碎磨。令D为给料粒度（即给料中最大块的粒度），d为破碎或磨碎产品的粒度（即产品中最大颗粒的粒度），则D/d比值称为粉碎比，通常用i表示，也就是物料经过破碎或磨碎后其粒度减小的倍数。各种破碎机或磨碎机的粉碎比互不相同：对于坚硬物料，破碎机的粉碎比在3~10之间，磨碎机的粉碎比可达40~400以上。

在实际应用中，总粉碎比往往较大，例如把600mm的给料粉碎至0.2mm以下，总粉碎比达3000以上。这不是一台破碎机或磨碎机能完成的，而需要使物料经过几次破碎和磨碎以达到最终的粒度：如先将粒度为600mm的给料送入一台旋回破碎机破碎至250mm以下，再送入中碎和细碎圆锥破碎机分别破碎至50和8mm以下，最后送入磨碎机内磨碎至最终产品粒度（即0.2mm），如图1-1所表示。这种表示破碎和磨碎过程的作业图，称作破碎流程和磨碎流程，或统称碎磨流程。由图还可看出，物料在给入旋回破碎机、中碎和细碎圆锥破碎机之前，先进行过筛，筛子的筛孔大致等于破碎机排料（破碎产品）的粒度（在此分别为250、80、8mm），以分出给料中已经小于破碎机排料粒度的那部分物料，减轻破碎机的负荷。这种筛分称作“预先筛分”。在细碎圆锥破碎机之后有所谓“检查筛分”，其筛孔尺寸（此处为8mm）大致等于或略大于预先筛分的筛孔尺寸：筛上产品为粒度太粗（>8mm）的不合格产品，被送回破碎机再度破碎，筛下产品（<8mm）为合格产品，送至后面的球磨机进行磨碎。球磨机的磨碎产品，送螺旋分级机进行所谓“检查分级”，得出合格的（<0.2mm）细粒产品以及粒度太粗（>0.2mm）

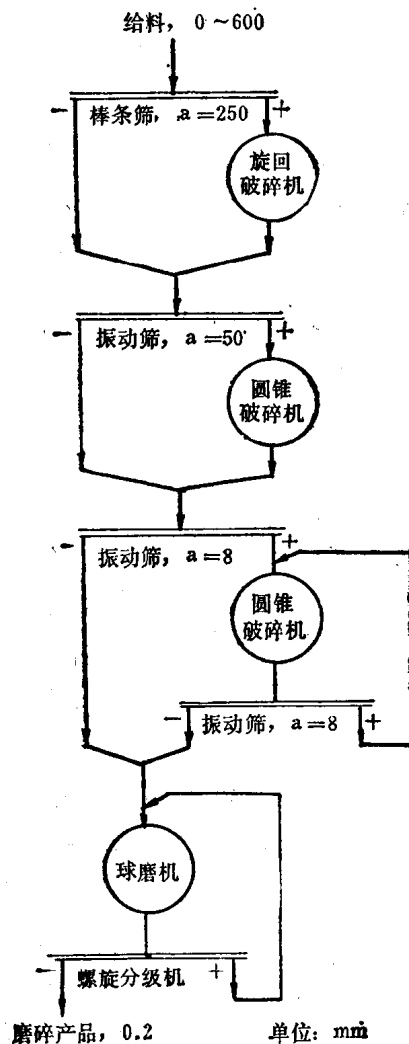


图 1-1 破碎和磨碎流程

单位：mm

的不合格产品。后者应送回球磨机再度进行磨碎。检查分级得出的细粒产品，有时还送至第二次检查分级，以得出更细的产品，第二次检查分级也称作“溢流控制分级”，在许多情况下，将球磨机的给料送入所谓“预先分级”，在分出给料中的合格细粒级后，才送入球磨机。

物料每经过一次破碎机或磨碎机，称为一个破碎段或磨碎段。图 1-1 的碎磨流程中，有三个破碎段和一个磨碎段，分别称作粗碎段、中碎段、细碎段和磨碎段。有的磨碎段还分为粗磨段和细磨段。与此对应，用于粗碎、中碎和细碎段的破碎机，分别称为粗碎机、中碎机和细碎机。各个破碎段和磨碎段的划分将在 23.8.1 详述。

这种分类法主要适用于颚式、旋回、圆锥、辊式等破碎机，而另一些破碎机如锤式或冲击式破碎机，能将 1000mm 左右的大块物料一次破碎至 10~30mm 以下。又如一段自磨机能将 600mm 的大块物料直接磨碎至 0.1mm 以下，即一台机器兼有粗、中、细碎或粗、中、细碎及磨碎的功能，这种分类方法就不适用了。

规模较小的金属矿石选矿厂，多采用两段或三段破碎流程，而日产量达数万吨的大型选矿厂通常采用四段破碎流程。磨碎方面视选矿厂的规模 and 要求的磨矿细度，采用一段或两段磨碎流程。

23.1.4 物料的性质

就粉碎而言，例如碎磨机械的选型与计算、流程的编制、粉碎产品的粒度组成和颗粒形状、粉碎工具的磨损等与物料的下述性质有直接关系。

(1) 强度、硬度和脆性

物料的强度同粉碎物料时的阻力、碎磨机械的选型、受力和参数等有密切的关系。同一种物料，强度与其粒度有关：粒度小的颗粒的宏观和微观裂纹少，强度则较高。强度还同硬度有关：硬度高的物料，其强度和粉碎时的阻力往往也较大，故强度高的物料有时称为坚硬物料，反之称为软物料。

如以试验室材料试验机测定的物料抗压强度为标准，可将抗压强度大于 2500kg/cm² 者称为坚硬物料，400~2500kg/cm² 者为中硬物料、小于 400kg/cm² 者为软物料。表 1-1 列出某些类型岩石的平均抗压强度。

普氏硬度系数 f (М. М. Прото́дьяконов) 用于将物料按其对于粉碎的阻力进行分类， f 值大致等于抗压强度的 1/100。可按 f 值将岩石分为 10 级，相应的 f 值为 0.3~20，我国一些金属矿石的普氏硬度系数 f 列于表 1-2。

(2) 水分和泥质含量

物料的表面水分对粉碎有一定的影响。如原料的水分含量较高而且含有较多的泥质，在干法破碎、磨碎、贮存、运输时就易于粘连和堵塞（在细碎机和磨碎机内尤其如此），故通常水分应限制在 10% 以下。如果原料水分过高，可采取如下措施：

a. 采用湿法磨碎，这种方法适用于下一步是湿法作业（如浮选、湿法磁选、湿法生产水泥等）的场合，如原料中水分不足，还可加入一定量的水。采用湿法磨碎时给料和产品都呈料浆的形态。

b. 用粉碎与干燥的联合装置。典型例子是热电厂在粉碎煤粉时使热风流过磨碎机。热风的作用一是使磨碎的煤粉排出，一是把煤干燥。由于磨碎后煤颗粒的表面暴露在外，干燥的效果较好，产品水分可降至 1% 以下。

表 1-1 岩石的平均抗压强度

类 别	矿石名称	比重	抗压强度 kg/cm ²	类 别	矿石名称	比重	抗压强度 kg/cm ²	类 别	矿石名称	比重	抗压强度 kg/cm ²
侵入火成岩	花岗岩	2.63	1760	硅质沉积岩	砾 石	2.64	1400	接触变质岩	片麻岩	2.68	1680
	正长岩	2.71	1890		砂 岩	2.48	1620		页 岩	2.74	—
	闪长岩	2.87	700		页 岩	2.66	700		大理石	2.71	960
	辉长岩	2.93	2940	钙质沉积岩	石灰石	2.63	1230		蛇纹石	2.63	3030
喷出火成岩	流纹岩	2.61	2740		白云石	2.71	1500		板 石	2.74	1540
	粗面岩	2.66	1760		碳酸钙	2.71	377	区域变质岩	石英岩	2.68~ 2.71	1620~ 2180
	安山岩	2.63	1200								
	玄武岩	2.84	3310								

表 1-2 我国一些金属矿石的普氏硬度

矿石名称	普氏硬度系数 f	矿石名称	普氏硬度系数 f	矿石名称	普氏硬度系数 f
大孤山赤铁矿	12~18	大冶铁矿	10~16	水口山铅锌矿	8~10
大孤山磁铁矿	12~16	大吉山钨矿	10~14	青城子铅锌矿	8
东鞍山铁矿	12~18	通化铜矿	8~12	凹山铁矿	8~12
南芬铁矿	12~16	桓仁铅锌矿	8~12	因民铜矿	8~10
海南铁矿	12~15	新冶铜矿	8~10	双塔山铁矿	9~13

表 1-3 物料的粉碎强度分类

软质物料	中硬物料	坚 硬 物 料		最 坚 硬 物 料	
石棉矿	石灰石	花岗岩	石英岩	铁燧岩	硬质石英岩
石膏矿	白云石	铁矿石	暗色岩	花岗岩	硬质暗色岩
板 石	砂 岩	砾 石	玄武岩	花岗岩砾石	
软质石灰石	泥灰石	斑麻岩	辉绿岩	刚 玉	
烟 煤	岩 盐	辉长岩	金属矿石	碳化硅	
褐 煤	杂有石块的粘土	矿 渣	电 石	硬质熟料	
粘 土		烧结产品	韧性化工原料	烧结镁砂	

c. 在破碎机某些部件上进行局部加热, 如使锤碎机或冲击式破碎机的衬板或冲击板加热, 可减少物料粘连。

(3) 磨蚀性 (Abrasiveness)

物料的磨蚀性是物料对粉碎工具 (齿板、板锤、钢球、衬板等) 产生磨损程度的一种性质。粉碎工具的磨损程度称为钢耗, 通常以粉碎一吨物料时粉碎工具的金属消耗量 (钢单耗, 简写钢耗, 以 g/t 表示) 来表示。

物料的磨蚀性虽然同物料的强度、硬度有关, 但仍有区别。例如粉碎某些坚硬物料时, 粉碎工具的磨损量并不成正比地增加。例如, 抗压强度、普氏系数 f 基本相等的大孤山和南芬磁铁矿石岩, 用同样的美制牙轮钻头 HH77, 在大孤山的平均寿命是 863 米, 在南芬的平均寿命是 183 米。

矿石或岩石中的石英含量和煤中的灰分含量, 对物料的磨蚀性有较大的影响: 矿石或岩石中的石英含量越高, 或煤中的灰分含量越高, 其磨蚀性也越强。岩石的表面状态也影响其磨蚀性: 矿物颗粒大小相间而呈粗糙表面的矿石或岩石, 其磨蚀性常较强。

磨蚀性是物料本身固有的特性，可用（1）单位压力下单位摩擦路程的粉碎工具的磨损量；（2）标准物料和待测物料在相同条件下对粉碎工具的磨蚀之比值；（3）特定粉碎工具在标准条件下的磨损量或（4）矿石或岩石的石英含量等来表示物料的磨蚀性（参见第23.9章）。

（4）晶粒结构及内部组织

许多粉碎物料是矿物晶粒或质点的集合体。就晶粒大小而言，有粗粒或细粒结构之分；就结构形状而言，有块状结构、纤维状结构、海绵状结构之分。这些性质对粉碎能耗、粉碎产品的颗粒形状及粒度分布等产生影响。

某些物料有明显的解理面，解理是由分子或原子定向排列所造成，在粉碎时易于沿着这些解理面发生粉碎。物料颗粒可以有一个、两个或多个解理面。另一些物料没有明显的解理面，它们沿着不同方向粉碎的难易程度是近似的。

物料颗粒粉碎后具有不同形状的断裂面，这也是由物料的内部组织所决定的。在粉碎实践中，分为光滑、不平整、交错（锯齿状）、贝壳等断裂面形状。

（5）其它性质

包括物料的松脆性、腐蚀性、易碎性、杂质（如某些物料中的铁）含量等。松脆性指物料在粉碎时分散成大量碎粒的倾向。这类物料很容易粉碎，例如砂砾。

23.1.5 颗粒的形状

物料的颗粒形状与其成分、解理、结构等因素有关，主要有：

- a. 块状，其中有的近似于球形体，有的近似于立方体。
- b. 棱角状，如石英岩颗粒常具有这种形状，如图1-2a。当破碎机设计或操作不合理（如发生堵塞现象）时，产品颗粒的棱角将磨圆，这在有些情况下是不利的。
- c. 扁尖状（图1-2b），一头略尖，又称鱼状。有些铁矿石破碎后呈扁尖状。
- d. 片状（图1-2c），云母等片状结构的物料，破碎后颗粒呈片状。
- e. 柱状（图1-2d）。
- f. 不规则形状，如卵石状、树枝状、海绵状、盘状、洋葱状等（图1-2e）。

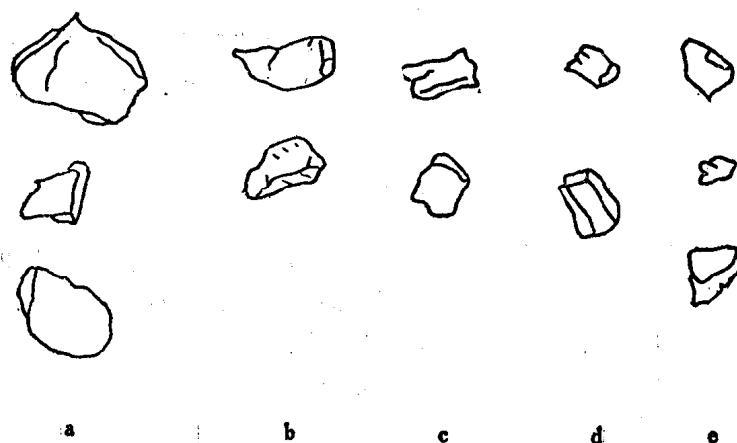


图 1-2 物料的颗粒形状

g. 纤维状。石棉一类物料，破碎后产品呈柱状（图 1-2 d），也可能分散成纤维状。

过去，破碎时只对产品的粒度和过粉碎等方面有要求，由于技术的不断进步，目前有些工业部门对破碎产品的颗粒形状也有要求。例如西德公路规程规定粒度为 5~35mm 的铺路石料中，立方体颗粒不得少于 80%，以保证公路的质量。所谓立方体，是指在颗粒的三维尺寸 a、b、c（其中 $a > b > c$ ）中， a/c 不得大于 3。对于立方体的定义西德颁布了国家标准 DIN52114。

如破碎机操作正常，产品中立方体颗粒的含量可以较高：例如用西德 CALIBRATOR 圆锥破碎机破碎玄武岩，给料粒度 12~25mm，排料口宽度 7.5mm，破碎产品中 >5mm 的产率约为 65%，其中各粒级的立方体颗粒含量分别为：

粒级, mm	5~8	8~11	11~16
立方体颗粒含量, %	89.6	95.4	95.9

又如，某厂用冲击式破碎机破碎黑斑岩，给料粒度 55~100mm，破碎产品中 >5mm 的产率约为 67%，其中各粒级的立方体颗粒含量为：

粒级, mm	5~8	8~11	11~16	16~22	22~32	32~45
立方体颗粒含量, %	70.3	74.6	80.8	87.4	84.0	96.2

物料颗粒的形状（特别是颗粒群的颗粒形状）还可用颗粒形状系数 ψ_m 表示。对于一个颗粒来说，其比表面是颗粒的表面积除以颗粒体积或重量的商。球形颗粒的比表面 S_{sb} 最小。令球的直径为 D，其表面积和体积分别为 πD^2 和 $\frac{\pi}{6} D^3$ ，故 $S_{sb} = 6/D$ 。由于一般颗粒不是球形，其比表面 S_s 较大，颗粒形状系数 ψ_m 定义为：

$$\psi_m = \frac{S_{sb}}{S_s} \quad (1-1)$$

当颗粒形状同球状的差别愈大， ψ_m 则愈小。

鉴于物料颗粒群通常由各种粒度的颗粒所组成，今设粒度为 d_1 、 d_2 、 $d_3 \dots d_n$ 的颗粒占颗粒群总重量的百分率（称为产率、粒级含量或重率）分别为 γ_1 、 γ_2 、 $\gamma_3 \dots \gamma_n$ ，设颗粒为球形，则颗粒群的平均比表面 $\bar{S}_{sb}$ 可算出：

$$\bar{S}_{sb} = \frac{1}{100} \left(\frac{d_1}{6} \gamma_1 + \frac{d_2}{6} \gamma_2 + \dots + \frac{d_n}{6} \gamma_n \right) \quad (1-2)$$

由于实际的颗粒形状不是球形，颗粒群的平均比表面可用试验方法求出。试验时将颗粒群铺成固定床，测出流体在各种流速下通过床层的压力降，并根据压力降按公式求出颗粒群的平均形状系数 ψ_m 。表 1-4 列出几种物料的形状系数。

表 1-4 物料的形状系数

物 料	砂	焦炭	煤粉	烟灰	云母片	纤维尘
平均形状系数 ψ_m	0.75	0.55~0.70	0.65	0.55	0.28	0.30

23.1.6 物料的粒度和粒度分布

物料的粒度和粒度分布是粉碎物料时一个很重要的性质。鉴于物料颗粒的形状不规则，测定颗粒粒度的方法以及表达的方式很多，这个问题的复杂性也相应地增加了。

(1) 单体颗粒的粒度表示方法

a. 颗粒的三维尺寸

把颗粒放稳（重心最低），设想一个外切于颗粒的长方体，则长方体的长度×宽度×高度即表示颗粒的三维尺寸。

这种方法只适用于大块颗粒（>200mm），特别是当颗粒运动时要通过一个孔口（如破碎机的给料口、料仓的排出口等）的场合。例如某厂生产三种不同规格的圆锥破碎机，其最大给料粒度分别规定为350×250×150、500×300×200、600×400×300mm。

b. 用筛孔尺寸表示

设颗粒能通过筛孔尺寸为 a_{n+1} 的筛孔，但被尺寸为 a_n 的筛孔所阻留（ $a_{n+1} > a_n$ ），则颗粒的粒度为 $a_n \sim a_{n+1}$ 。

用筛孔尺寸来表示颗粒粒度是常用的方法，试验很简便，适用于测定粒度为0.037~200mm的颗粒。

对于尺寸较小的筛孔，各国制定了标准筛，以便统一规格，并能将试验结果互相对比。标准筛的筛孔为正方形，用正方形的边长表示筛孔尺寸，相邻标准筛的筛孔的尺寸以几何级数递增，公比分别为2、 $1.414(=\sqrt{2})$ 、 $1.189(=\sqrt[4]{2})$ 和 $1.259(=\sqrt[10]{10})$ 。

表1-5和表1-6分别列出美国、英国、西德和法国的标准筛。

除了用方形筛孔的边长表示筛孔尺寸外，还可用：（a）网目；网目是每英寸长度的筛孔数目。网目数越高，筛孔尺寸越小，常用的有200网目（或称200目）和100网目。为了网目数能表示筛孔的精确尺寸，必须对编织筛网的网丝直径或筛孔净尺寸做统一规定。（b）用每平方厘米的筛孔数目来表示筛孔大小；常用的有900孔/cm²和4900孔/cm²。同网目表示法相似，只有当网丝为标准直径时，这种方法才能精确地表示筛孔尺寸。

表 1-5 美国标准筛

ASTM ^① E11-70 (ANSI ^② Z23-1)						Tyler					
网目	μ	网目	μ	网目	μ	网目	μ	网目	μ	网目	μ
3 $\frac{1}{2}$	5600	20	850	120	125	2 $\frac{1}{2}$	7925	14	1168	80	175
4	4750	25	710	140	106	3	6680	16	991	100	147
5	4000	30	600	170	90	3 $\frac{1}{2}$	5613	20	833	115	124
6	3350	35	500	200	75	4	4699	24	701	150	104
7	2800	40	425	230	63	5	3962	28	589	170	88
8	2360	45	355	270	53	6	3327	32	495	200	74
10	2000	50	300	325	45	7	2794	35	417	250	61
12	1700	60	250	400	38	8	2362	42	351	270	53
14	1400	70	212			9	1981	48	295	325	43
16	1180	80	180			10	1671	60	246	400	38
18	1000	100	150			12	1397	65	208		

① 美国材料试验学会

② 美国国家标准协会

表 1-6 英国、西德、法国、苏联标准筛

DIN ^① 4188(1977)AFNOR ^② NF X11-501(1970)					BS ^③ 410:1976						ГОСТ ^④ 3584-53		
筛孔尺寸, μ					网目	mm	网目	mm	网目	μ	筛孔尺寸, μ		
6300	2000	630	200	63	3	5.6	16	1.00	85	180	2500	500	160
5600	1800	560	180	56	3 1/2	4.75	18	0.850	100	150	2000	450	140
5000	1600	500	160	50	4	4.00	22	0.710	120	125	1600	400	125
4500	1400	450	140	45	5	3.35	25	0.600	150	106	1250	355	112
4000	1250	400	125	40	6	2.80	30	0.500	170	90	1000	315	100
3550	1120	355	112	36	7	2.36	36	0.425	200	75	900	280	90
3150	1000	315	100	32	8	2.00	44	0.355	240	63	800	250	80
2800	900	280	90	28	10	1.70	52	0.300	300	53	700	224	71
2500	800	250	80	25	12	1.40	60	0.250	350	45	630	200	63
2240	710	224	71	22	14	1.18	72	0.212	400	38	560	180	

① 西德工业标准。筛孔尺寸最大为125mm, 最小20 μ , 此处仅列举22~6300 μ

② 法国工业标准

③ 英国工业标准

④ 苏联工业标准

c. 颗粒的名义粒度

设颗粒的三维尺寸分别为 l 、 b 、 h ($l > b > h$), 可以把中间尺寸 b 当作颗粒的名义粒度, 也可以求出这三个尺寸的算术平均值 (三维平均粒度 $\frac{l+b+h}{3}$)。或几何平均值 (长方体名义粒度 $\sqrt[3]{lbh}$), 当作颗粒的名义粒度, 如表1-7所示。

对于粉末, 可将粉末颗粒置于显微镜的载物片上, 利用带测微镜的目镜直接测出颗粒在 x 和 y 方向上的尺寸 l 和 b , 算出 l 和 b 的算术平均值 (二维平均粒度 $\frac{l+b}{2}$) 或几何平均值 (外接矩形平均粒度 $\sqrt{lb}$), 作为颗粒的名义粒度, 或估计出颗粒在 xy 平面上的投影面积 F , 求出颗粒的正方形名义粒度 ($\sqrt{F}$) 或圆名义粒度 ($\sqrt{4F/\pi}$)。如已知颗粒体积 V , 则可算出颗粒的球名义粒度 ($\sqrt[3]{6V/\pi}$) 和立方体名义粒度 ($V^{1/3}$)。还可以将颗粒的定向粒度 d_s 和定向面积等分粒度 d_m (图1-3) 表示颗粒的粒度。颗粒名义粒度的各种表示方法列于表1-7。

表 1-7 颗粒的名义粒度

名 称	定 义	名 称	定 义	名 称	定 义
中间值名义粒度	当 $l > b > h$ 时的 b 值 (设 $l \leq 2b$, 则 b 值也是颗粒能通过的正方形筛孔的边长)	长方体名义粒度	$(lbh)^{1/3}$	立方体名义粒度	$V^{1/3}$
		二维平均粒度	$(l+b)/2$	球名义粒度	$(6V/\pi)^{1/3}$
		外接矩形名义粒度	$(lb)^{1/2}$	定方向粒度	d_s (图1-3)
		正方形名义粒度	$F^{1/2}$	定方向面积等分粒度	d_m (图1-3)
三维平均粒度	$(l+b+h)/3$	圆名义粒度	$(4F/\pi)^{1/2}$		

(2) 颗粒群的粒度表示方法

a. 粒度表格

将物料试样置于套筛上进行筛分（称作筛析），得出粒级为 $a_1、a_2\cdots a_n$ 的 n 个产品，其重量占试样总重的百分率（粒级含量，以字母 β 表示）分别为 $\beta_1、\beta_2\cdots\beta_n$ （各粒级的重量百分率有时也称产率、重率或出量，以字母 γ 表示）。

习惯上，除粒级含量外，还常用“累积含量”或“累积产率”这个术语。累积含量有“粗粒累积”和“细粒累积”之分，它们分别是大于或小于某一粒度 a 的全部粒级含量之和，用 β_{+a} 和 β_{-a} 来表示。

将每个粒级含量或累积含量列成表格，即表示颗粒群的粒度分布，如表1-8所示。

b. 粒度曲线

(a) 用累积含量表示的粒度曲线

这种曲线的横坐标为粒度，纵坐标为累积含量（粗粒累积或细粒累积含量），曲线的位置与形状即表示颗粒群的粒度分布。为了使细粒

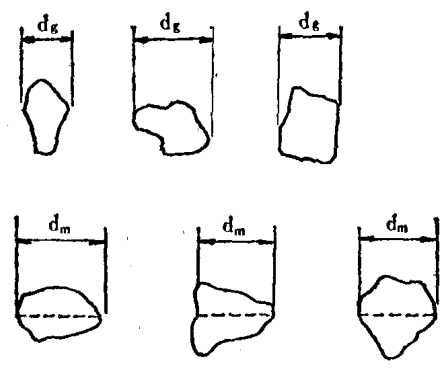


图 1-3 定向粒度 d_g 和定向面积等分粒度 d_m

表 1-8 粒度表格

粒级,mm	重量, g	粒级含量 β , %	粗粒累积含量 β_{+} , %
12~16	225	15	15
8~12	300	20	35
4~8	450	30	65
2~4	225	15	80
0~2	300	20	100
共 计	1500	100	—

级在横坐标上分散开（特别是当颗粒群的粒度范围较广时），横坐标有时用对数坐标，如图1-4所示。

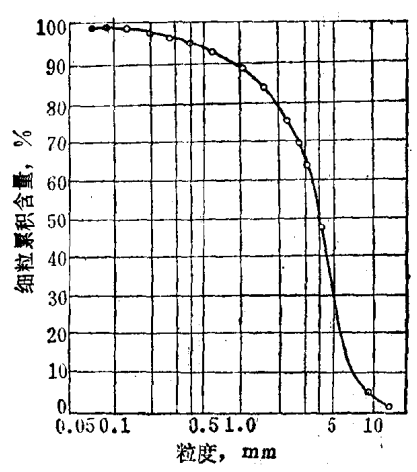


图 1-4 横坐标为对数坐标的粒度曲线

这种曲线的纵坐标为粒级含量（不是累积含量）或单位粒级含量，横坐标仍为粒度的对

图1-5是横坐标、纵坐标都是对数坐标的粒度曲线。以这种坐标系画成的粒度曲线，在中间一段近似于一条直线，如图1-5所示。

图 1-6是 Rosin-Rammler 粒度曲线，其纵坐标为双对数坐标，横坐标为一般对数坐标。这种坐标制的纵坐标颇为特殊，其两端（当累积含量 $<25\%$ 和 $>75\%$ 的区间）的间隔扩大，中间部分的间隔缩小。

如粒度曲线的斜度大，表示多数颗粒的粒度，集中在较窄的范围内，称为窄粒度分布，如斜度小，称为宽粒度分布。

(b) 粒级分布柱形图和单位粒级分布曲线