

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。

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 $8\sim 20\text{kWh}$ 的电（能耗），磨碎工具（如钢球和衬板）的磨损达 $50\sim 1000\text{g}$ （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 19μ ，浮游选矿法是 $5\sim 10\mu$ 。因此，磨碎重选或浮选给料时，产生小于 19μ 或 $5\sim 10\mu$ 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 $0.084\sim 12.7\text{mm}$ ；铁合金厂使用的焦炭还原剂，成品粒度的要求为 $3\sim 15\text{mm}$ 。这时，小于粒度下限（即 $<0.084\text{mm}$ 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 3 mm 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 为給料粒度（即給料中最大块的粒度）， 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 的給料粉碎至 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 的給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 8 mm 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、8 mm），以分出給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 8 mm）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（< 8 mm）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）

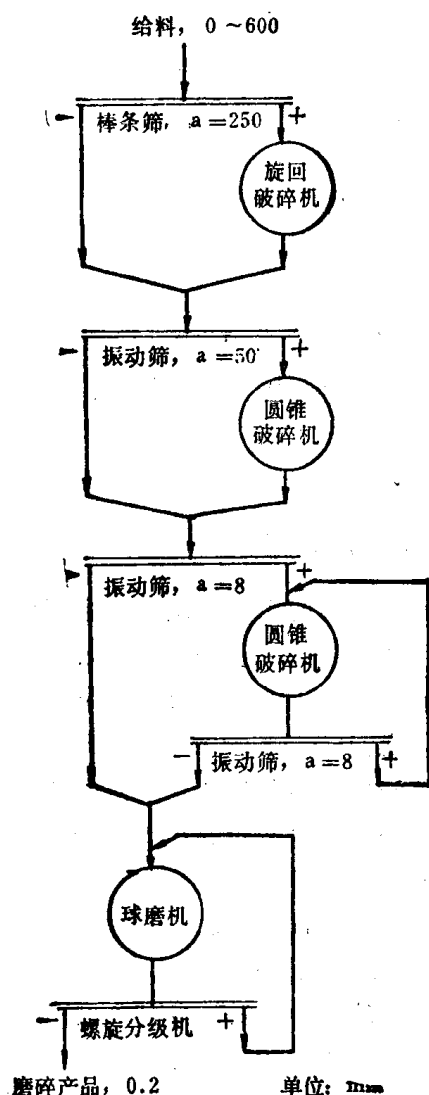


图 1-1 破碎和磨碎流程

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）

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/cm^2 者称为坚硬物料， $400\sim 2500\text{kg/cm}^2$ 者为中硬物料、小于 400kg/cm^2 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 (M. M. Протодяконов) 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 $0.3\sim 20$ ，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						蛇纹石	2.63	3030
喷出火成岩	流纹岩	2.61	2740	钙质沉积岩	石灰石	2.63	1230		板 石	2.74	1540
	粗面岩	2.66	1760		白云石	2.71	1500	区域变质岩	石英岩	2.68~ 2.71	1620~ 2180
	安山岩	2.63	1200		碳酸钙	2.71	377				
	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 (Abrasion)

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,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)。

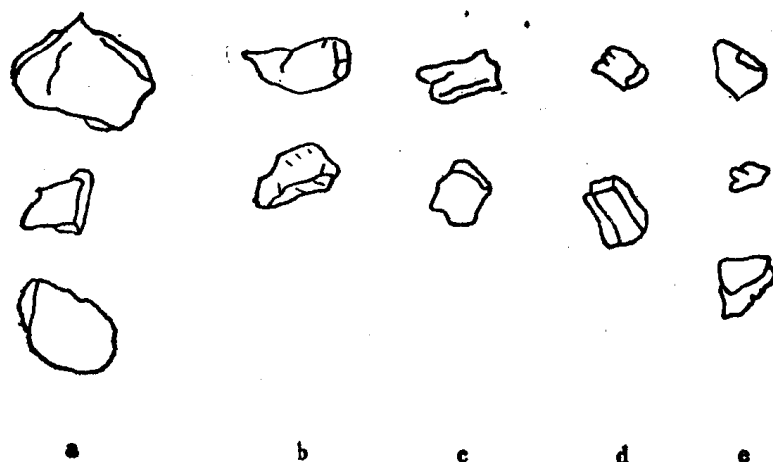


图 1-2 物料的颗粒形状

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）还可利用颗粒形状系数 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 $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3 \dots \gamma_n$ ，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、 $1.414(=\sqrt{2})$ 、 $1.189(=\sqrt[3]{2})$ 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，还可采用：（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 ^{1/2}	5600	20	850	120	125	2 ^{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 ^{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 $\frac{1}{2}$	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_x 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_x (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 β_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

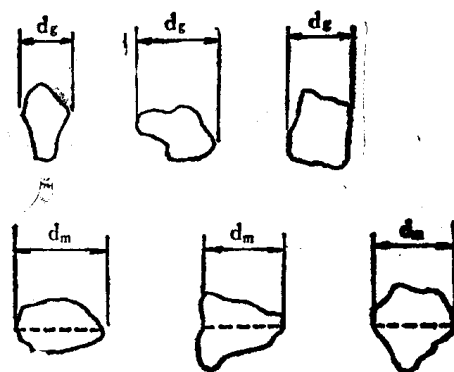


图 1-3 定向粒度 d_k 和定向面积等分粒度 d_m

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。

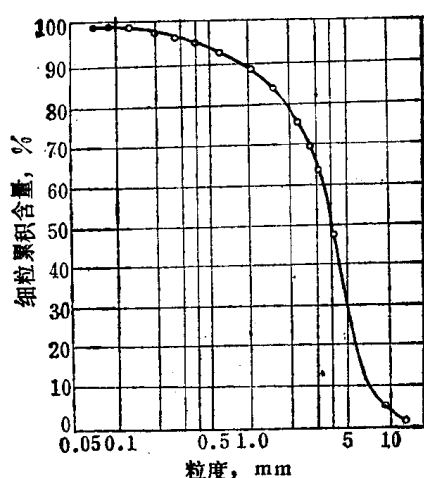


图 1-4 横坐标为对数坐标的粒度曲线

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

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

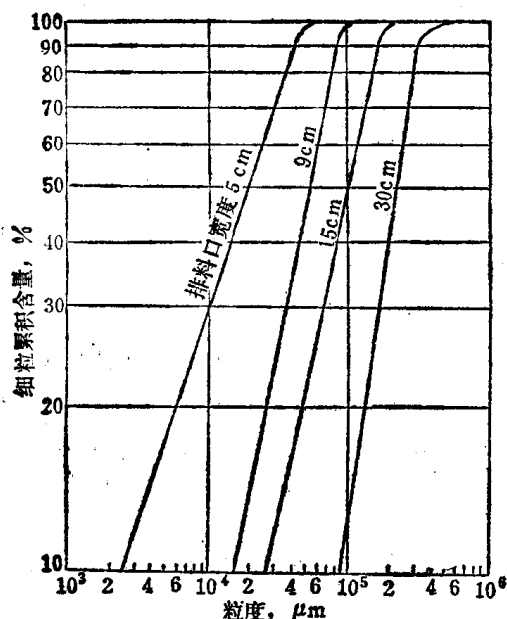


图 1-5 全对数坐标的粒度曲线

c. 粒度公式

粒度公式是表明颗粒群中累积含量同粒度之间的关系的表达式。由于物料性质、粉碎机理、机械、操作等因素的变化很复杂，粉碎产品的粒度特性往往难以用一个公式来概括，而

数坐标。图1-7是纵坐标为粒级含量的粒度分布柱形图。由图可见，这种表示方法使曲线更为直观。

单位粒级分布曲线（也称粒级频度曲线）的纵坐标是单位粒级含量、横坐标仍是粒度坐标。单位粒级含量是在某一粒度下粒级含量的变化率：

$$F = \frac{d\beta_+}{d(d)} \quad \text{或} \quad F = \frac{d\beta_-}{d(d)} \quad (1-3)$$

式中 F ——单位粒级含量；
 β_+ 或 β_- ——粗粒或细粒累积含量，%；
 d ——粒度。

图1-8是单位粒级含量曲线。相当于纵坐标为最大的粒度，表示在该粒度附近的颗粒最多。在两个粒度之间（如4~6mm）的粒级含量，用曲线下的阴影面积表示。

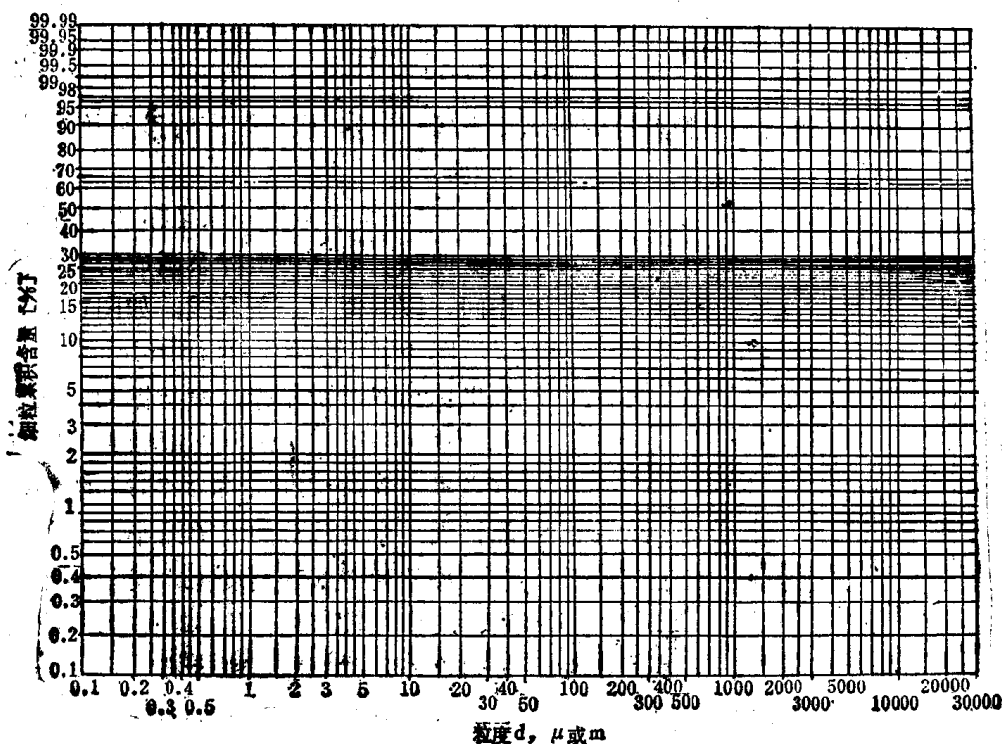


图 1-6 Rosin-Rammler坐标的粒度曲线

仅能近似地或在一定粒度范围内用公式来表示。常用的粒度公式有二：

(a) 指数公式

A. M. Gaudin, R. Schumann等人提出下列粒度公式：

$$\beta_- = 100 \left(\frac{d}{d_{\max}} \right)^n \quad (1-4)$$

式中 β_- ——相当于粒度 d 的细粒累积含量，
%

d ——粒度；

$d_{\max}$ ——颗粒最大粒度。

实践表明，对于多数物料，在中间粒度区间这公式是适用的，而在粒度较小或接近 $d_{\max}$ 的区间这个公式的误差较大。在全对数坐标上，按这个粒度公式画成的粒度曲线成为直线。

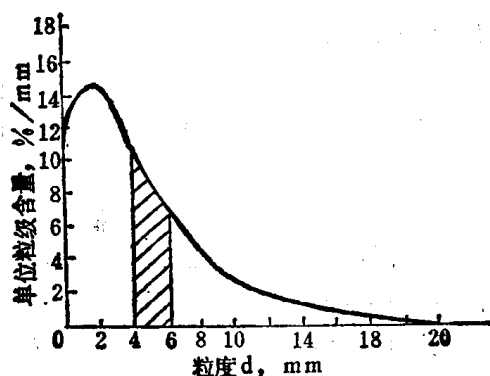


图 1-8 单位粒级分布曲线

n 、 b ——常数 $\left(b = \frac{1}{d'^n} \right)$ ，

d' ——颗粒群的名义粒度（不难证明，此粒度相当于 $\beta_+ = 36.82\%$ 的粒度）。

对公式 (1-5) 取两次对数，得出

$$\ln \left(\ln \frac{100}{\beta_+} \right) = \ln b + n \ln d = n \ln d + K \quad (1-6)$$

式中 K ——常数。

从而，当纵坐标用双对数坐标、横坐标用一般对数坐标（图1-6）时，公式 (1-5) 和 (1-6) 所表示的颗粒群粒度曲线，成为斜率为 n 的一条直线。实际上，多数粉碎产品在 Rosin-Rammler 坐标（图1-6）上画出的粒度曲线，仅在中间一段近似于直线。

d. 颗粒群的名义粒度

(a) 用颗粒群的粒度范围或最大粒度来表示

设颗粒群能全部通过100mm筛孔而被25mm筛孔所阻留，则颗粒群的名义粒度是25~100mm，或写成+25~100mm。如颗粒群能全部通过100mm筛孔，但粒度下限为0，可称

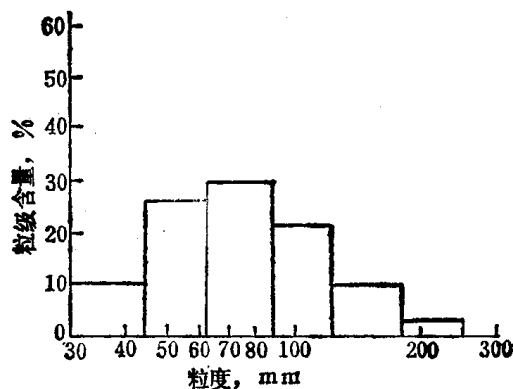


图 1-7 粒级分布曲线

(b) Rosin-Rammler公式

此公式由Rosin-Rammler于1934年用统计方法研究粉碎产品的粒度特性而导出：

$$\beta_+ = 100e^{-bd^n} = 100e^{-\left(\frac{d}{d'}\right)^n} \quad (1-5)$$

式中 β_+ ——相当于粒度 d 的粗粒累积含量，
%

d ——粒度；

该物料的最大粒度是100mm，或称该物料粒度为0~100mm。

(b) 用磨矿细度或<200目的(细粒)累积含量来表示

习惯上，磨矿细度是指磨碎产品中相当于细粒累积含量为95~98%时的粒度。磨碎产品中<200目的累积含量，也反映产品的粒度。磨矿细度同磨碎产品中<200目的累积含量间通常存在着表1-9的关系。

表 1-9 磨矿细度同磨碎产品中<200目的累积含量的关系

磨矿细度, mm	0.4	0.3	0.2	0.15	0.1	0.074
磨矿产品中<200目的累积含量, %	35~45	45~55	55~65	70~80	80~90	95

颗粒群的名义粒度，视其用途及粒度要求也可以用<170目或小于任一筛孔尺寸的累积含量来表示。

(c) 用相当于细粒累积含量为80%或95%的粒度来表示

令破碎机或磨碎机的给料为D，则相当于细粒累积含量为80%或95%的粒度 D_{80} 或 D_{95} ，可表示给料的名义粒度。同样， d_{80} 或 d_{95} 表示破碎或磨碎产品的名义粒度。

在破碎作业中物料的粒度较大，以采用 D_{80} 或 d_{80} 为宜，因为偶然杂入一个大颗粒或漏掉一个大颗粒，对粒度曲线的粗粒部分影响将较大，即 D_{95} 或 d_{95} 的变化较大，而 D_{80} 或 d_{80} 的波动较少。在磨碎作业中物料粒度小，以用 D_{95} 或 d_{95} 较适宜。

(d) 用粒度模数来表示

这种表示颗粒群综合粒度的方法在国外用于建材工业部门，计算方法是规定粒度的粗粒累积含量相加($\Sigma\beta_+$)，除以100，称作砂子的粒度模数。不难看出，这种方法只是在采用统一的筛分粒度时，求出的粒度模数才能互相对比，如表1-10所示。

表 1-10 粒度模数

粒度(美国标准筛网目号)	粗粒累积含量 β_+ , %	粒度(美国标准筛网目号)	粗粒累积含量 β_+ , %
8	9	$\Sigma\beta_+$	288
16	46		
30	66		
50	81	粒度模数	$\Sigma\beta_+/100=2.88$
100	92		

(e) 颗粒群的名义粒度

颗粒群的名义粒度有多种计算方法：设粒度为 $d_1, d_2 \dots d_n$ 的粒级重量分别为 $w_1, w_2 \dots w_n$ ，粒级含量分别为 $\beta_1, \beta_2 \dots \beta_n$ ，则各种计算名义粒度的方法列于表1-11。表中的 w_i 是粒度 d_i 的粒级重量。也可以用各粒级的颗粒个数 n_i 代替 w_i 来求颗粒群的名义粒度，但在实用中，用称重法可以比较方便地求出各粒级的重量 w_i ，因而用各粒级重量求名义粒度的方法较常用。

计算时，粒度 $d_1, d_2 \dots d_n$ ，是筛析时相邻筛孔尺寸的平均值，最好用几何平均值，以更多地考虑细粒影响。例如，对于1~2mm的粒级，其平均粒度为 $\sqrt{1 \times 2} = 1.414$ 。

表(1-11) 计算比表面平均直径 $\bar{d}_s$ 的 $\bar{S}_v$ 为颗粒群的平均比表面(cm^2/g)， ρ 为物料密度(g/cm^3)，中径 d_{50} 为颗粒群中相当于细粒(或粗粒)累积含量为50%时的粒度。

表 1-11 颗粒群的名义粒度

算术平均直径	$\bar{d}_1 = \sum w_x d_x / \sum w_x = \sum \beta_x d_x / 100$
几何平均直径	$\bar{d}_2 = (d_1^{w_1} \cdot d_2^{w_2} \cdots d_n^{w_n})^{1/\sum w_x}$ 或 $\lg \bar{d}_2 = \frac{w_1 \lg d_1 + w_2 \lg d_2 + \cdots + w_n \lg d_n}{\sum w_x} = \frac{\beta_1 \lg d_1 + \beta_2 \lg d_2 + \cdots + \beta_n \lg d_n}{100}$
调和平均直径	$\bar{d}_3 = \frac{\sum w_x}{\sum (\frac{w_x}{d_x})} = \frac{100}{\sum (\frac{\beta_x}{d_x})}$
面积长度平均直径	$\bar{d}_4 = \sum w_x d_x^2 / \sum w_x d_x$
体积面积平均直径	$\bar{d}_5 = \sum w_x d_x^3 / \sum w_x d_x^2$
表面积平均直径	$\bar{d}_6 = [\sum w_x d_x^2 / \sum w_x]^{1/2}$
体积平均直径	$\bar{d}_7 = [\sum w_x d_x^3 / \sum w_x]^{1/3}$
比表面平均直径	$\bar{d}_8 = 6 / \bar{d}_6$
中径	d_{50}

23.1.7 粉碎机的施力作用和粉碎能耗假说

(1) 粉碎机的施力作用

粉碎机的粉碎工具（如齿板、锤头、钢球等）对物料施力使其粉碎，施力种类有压力、弯曲、剪切、劈碎、研磨、打击、冲击等，如图1-9所示。施力的作用很复杂，往往是若干

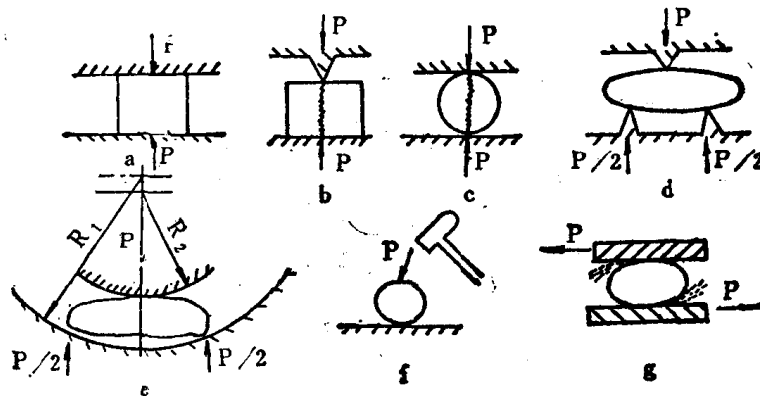


图 1-9 粉碎工具的施力作用

a、b、c——压碎；d、e——弯曲；f——冲击或打击；g——研磨

种施力作用同时存在。

大多数待粉碎物料呈脆性。为了有助于粉碎工具咬住物料、减少粉碎阻力和过粉碎，粉碎工具制成具有尖锐程度不同的刃，称为齿牙。施力开始时，物料在同齿牙接触的部分首先发生局部粉碎，然后产生较大的裂缝，最终导致物料全部粉碎。图1-10为产生局部粉碎（在同齿牙接触处产生许多碎末）和全部破碎的示意图。

由于脆性物料的抗拉和抗剪强度大大低于抗压强度，粉碎时产生的裂缝往往顺着施力方

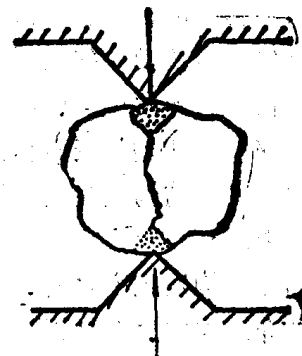


图 1-10 局部粉碎和全部破碎

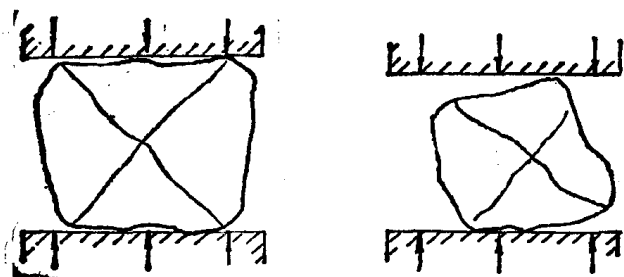


图 1-11 颗粒粉碎时的裂缝

向、与施力方向成 45° 角度或沿着颗粒内部的脆弱面方向发展(图1-11)。

在打击或冲击粉碎时,粉碎工具或颗粒的动能迅速转变为物料的变形功,产生较大的应力集中导致物料粉碎。物料在打击或冲击作用下,在颗粒内部产生向四方传播的应力波,并在内部缺陷、裂纹、晶粒界面等处产生应力集中,使物料

首先沿这些脆弱面粉碎,而粉碎产品的内部微观裂纹和脆弱面的数目相对地减少了,粉碎产品的强度较粉碎前的物料的高。这一点对于建材工业破碎石料很重要,使破碎后的石块强度较高,以满足混凝土或铺路石块在强度上的要求。

对于组织不均匀或由多种成分组成的物料,在所谓自由破碎(颗粒破碎时有一定的自由伸展余地)的条件下,裂缝或断裂面将首先发生于强度低的成分的表面及其内部。在破碎产品中,强度高的成分的粒度较大,强度低的成分的粒度较小,产生所谓“选择性破碎”作用。例如煤中含有矸石和黄铁矿杂质,其强度较煤本身的强度高。有一种“圆筒式碎煤机”利用选择性破碎的原理,使煤破碎至较小的粒度,矸石和黄铁矿则破碎至较大的粒度,并通过筛分将煤同矸石或黄铁矿分开,以得到高质量的精煤。

归纳起来,施力种类因物料性质、粒度及对粉碎产品的要求而异:

- (a) 粒度较大或中等的坚硬物料—压碎、冲击,粉碎工具有形状不同的齿牙;
- (b) 粒度较小的坚硬物料—压碎、冲击,粉碎工具的表面无齿牙,是光滑的;
- (c) 粉状或泥状物料—研磨、冲击、压碎;
- (d) 磨蚀性弱的物料—冲击、打击、劈碎、研磨,粉碎工具有锐利的齿牙;
- (e) 磨蚀性强的物料—以压碎为主,粉碎工具表面是光滑的;
- (f) 韧性物料—用剪切或快速冲击;
- (g) 建材工业的石料—冲击、打击、压碎作用下的自由粉碎;
- (h) 多成分物料—冲击作用下的选择性粉碎。

(2) 粉碎能耗假说

粉碎物料时,粉碎工具对颗粒施力,当作用力超过颗粒之间的结合力时,产生粉碎,外力做的功称为粉碎能耗。粉碎能耗消耗于以下几方面:

- a. 粉碎机械传动中的能耗;
- b. 颗粒在粉碎发生之前的变形能;
- c. 粉碎产品新增加表面积的表面能;
- d. 颗粒表面结构发生变化所消耗的能,例如产生表面活性点,表面形成无定形层或氧化层;
- e. 晶体结构发生变化所消耗的能;
- f. 磨介之间的摩擦、振动及其它能耗。

研究工作者曾对球磨机的能耗进行测定分析,发现输入的能量的大部分以热的形式散掉,如表1-12所示。

表 1-12 粉碎能耗的分析

能 耗 类 别	功率, kW	占总能耗的百分数, %
1. 轴承、齿轮等机械传动的损失能耗	57	12.3
2. 单位时间内粉碎产品带走的热	222	47.6
3. 单位时间内筒体辐射的热	30	6.4
4. 单位时间内气流带走的热	144	31.0
5. 单位时间新生表面的表面能	3	0.6
6. 其它损耗:		
磨介的摩擦	5	} 2.1
磨介温升散热	2	
振动、水分蒸发及其它	3	
总 计	466	100.0

关于粉碎能耗同给料和产品粒度之间的关系, 有以下三种常用的假说:

(2.1) 表面积假说

此假说由 P. R. von Rittinger 提出。鉴于粉碎后产品的比表面大大增加, 输入的粉碎能量越多, 产品的粒度越细, 比表面越大, 故 Rittinger 提出所谓“表面积假说”: 粉碎能耗与粉碎后物料的新生表面积成正比, 或粉碎单位重量物料的能耗与新生的比表面成正比:

$$A \propto \Delta S = K_1 \Delta S \quad (1-7)$$

式中 A ——粉碎能耗;

ΔS ——物料经粉碎后所增加的表面积;

K_1 ——比例常数。

对于名义粒度为 D 的颗粒, 其表面积为 $K'_1 D^2$, 重量为 $K''_1 \delta D^3$ (K' 、 K'' 为系数, δ 为物料密度), 则比表面 S'_1 为:

$$S'_1 = \frac{K'_1 D^2}{K''_1 \delta D^3} = \frac{K_2}{\delta D} \quad \left(K_2 = \frac{K'_1}{K''_1} \right)$$

对于颗粒群, 令名义粒度为 D_1 、 $D_2 \cdots D_n$ 的级别含量分别为 β_1 、 β_2 、 $\cdots \beta_n$, 则比表面 S_1 为:

$$S_1 = \frac{K_2}{100\delta} \left(\frac{\beta_1}{D_1} + \frac{\beta_2}{D_2} + \cdots + \frac{\beta_n}{D_n} \right)$$

$$\text{按表 1-11, } \frac{\beta_1}{D_1} + \frac{\beta_2}{D_2} + \cdots + \frac{\beta_n}{D_n} = \sum_{i=1}^n \frac{\beta_i}{D_i} = \frac{100}{\bar{D}}$$

式中 $\bar{D}$ ——颗粒群的调和平均直径 (即表 1-11 中的 d_3)。

将 $\bar{D}$ 代入, 则

$$S_1 = \frac{K_2}{\delta \bar{D}}$$

同理, 令破碎产品中名义粒度为 d_1 、 $d_2 \cdots d_n$ 的级别含量分别为 β_1 、 $\beta_2 \cdots \beta_n$, 则破碎产品的调和平均直径 $\bar{d}$ 和比表面 S_2 分别为:

$$\bar{d} = \frac{100}{\frac{\beta_1}{d_1} + \frac{\beta_2}{d_2} + \dots + \frac{\beta_n}{d_n}}$$

$$S_2 = \frac{K_2}{\delta \bar{d}}$$

按 Rittinger 假说 (公式1-6), 粉碎单位重量的能耗 A 等于:

$$A = K_1 \Delta S = K_1 (S_2 - S_1) = \frac{K_1 K_2}{\delta} \left(\frac{1}{\bar{d}} - \frac{1}{D} \right) = K_0 \left(\frac{1}{\bar{d}} - \frac{1}{D} \right) \quad (1-8)$$

式中 K_0 ——系数 ($= K_1 K_2 / \delta$);

实践表明, Rittinger 假说对于磨碎 (粉碎产品的粒度在 0.01~1mm 之间) 能耗计算是较为适用的。例如, 设物料自粒度 $\bar{D}$ 磨碎至某一粒度 $\bar{d}_1$ 时的能耗已知, 即可按公式 (1-8) 求出系数 K_0 。求出 K_0 后, 则从粒度 $\bar{D}$ 磨碎至任何粒度 $\bar{d}$ 的能耗都可求出。

实用中, 由于调和平均粒度的计算较繁, 常采用相当于累积细粒含量为 95% 的给料和产品粒度 D_{95} 和 d_{95} 来代替。显然, 按某一组 D_{95} 和 d_{95} 值求出的 K_0 值, 只适用于今后计算中公式 (1-8) 的粒度也用 D_{95} 和 d_{95} 表示的场合。

Rittinger 假说认为粉碎能耗同物料在磨碎时的表面积增加呈正比关系, 但这并不意味着粉碎能耗等于粉碎产品新生面积的表面能。实际上, 新生面积的表面能只占全部粉碎能耗一个很小的比例。但物料粉碎时消耗的表面能、变形功、摩擦损失功、颗粒表面结构和内部结构变化所消耗的能, 以及噪音、热能等的总和, 同物料粉碎后表面积的增加成正比的关系。

(2.2) 体积假说

这个假说由 Kick 和俄国的 Кирпичев 首倡, 认为粉碎所消耗的能, 同颗粒的体积成正比, 粉碎后颗粒粒度也呈正比减小。粉碎能耗同给料及破碎产品粒度之间的关系, 可按体积假说近似地推导如下:

今有粒度为 D 的一颗物料, 对其进行若干次破碎, 由于物料总的体积不变, 按体积假说, 每次破碎的能耗应相等, 设每次破碎的能耗为 A_1 , 破碎后使粒度减小一半, 即

第 1 次 能耗 = A_1 破碎后产品粒度 = $D/2$

第 2 次 能耗 = A_1 破碎后产品粒度 = $\frac{D}{2 \cdot 2} = \frac{D}{4} = \frac{D}{2^2}$

⋮

第 n 次 能耗 = A_1 破碎后产品粒度 = $\frac{D}{2^n}$

n 次破碎的总能耗 A 等于:

$$A = n A_1 \quad (1-9)$$

令 i 为 n 次破碎后的总粉碎比, 即

$$i = \frac{D}{d} = \frac{D}{D/2^n} = 2^n$$

$$n = \frac{\lg i}{\lg 2}$$

代入公式 (1-9),