

第 24 篇 粉碎、分级及团聚

主稿人 任德树 冶金部北京冶金设备研究院 教授

编写人 陈丙辰 沈阳东北工学院 教授

杨忠高 北京科技大学 高级工程师

符号说明	24-3	(4)	冲击颚式破碎机	24-19
1 粉碎	24-4	(5)	其他类型颚式破碎机	24-19
1.1 概述	24-4	2.1.2	颚式破碎机的参数	24-21
1.2 粉碎费用和过粉碎	24-4	(1)	啮角	24-21
1.3 粉碎常用术语	24-5	(2)	偏心轴的转速	24-21
1.4 物料的性质	24-5	(3)	处理能力	24-22
1.4.1 强度、硬度、脆性、可碎性和可磨性	24-5	(4)	电动机功率	24-23
1.4.2 水分和泥质含量	24-5	2.2	旋回和圆锥破碎机	24-23
1.4.3 磨蚀性	24-6	2.2.1	旋回破碎机的构造	24-23
1.4.4 晶粒结构和内部组织	24-6	(1)	机械支承式旋回破碎机	24-23
1.4.5 其他性质	24-7	(2)	液压旋回破碎机	24-23
1.5 颗粒的形状	24-7	(3)	颚-旋式破碎机	24-26
1.6 物料的粒度和粒度分布	24-7	2.2.2	旋回破碎机的参数	24-26
1.6.1 单颗粒粒度的表示方法	24-7	(1)	啮角	24-26
1.6.2 颗粒群的粒度表示方法	24-10	(2)	转速	24-26
1.6.3 粒度坐标和粒度曲线	24-10	(3)	处理能力	24-27
(1) 粒度表格	24-10	(4)	电动机功率	24-27
(2) 粒度曲线	24-10	2.2.3	圆锥破碎机的构造	24-27
1.6.4 粒度公式	24-12	(1)	弹簧式圆锥破碎机	24-27
(1) 指数公式	24-12	(2)	液压圆锥破碎机	24-29
(2) Rosin-Rammler 公式	24-12	(3)	其他型式圆锥破碎机	24-30
1.7 粉碎机械的施力作用和粉碎能耗假说	24-12	2.2.4	圆锥破碎机的参数	24-31
1.7.1 粉碎机械的施力作用	24-12	(1)	啮角	24-31
1.7.2 粉碎能耗	24-13	(2)	转速	24-32
(1) 表面积假说	24-14	(3)	处理能力	24-32
(2) 体积假说	24-14	(4)	电动机功率	24-33
(3) Bond 粉碎能耗的裂缝假说	24-15	(5)	圆锥破碎机的产品粒度特性	24-33
2 破碎和破碎设备	24-15	2.3	锤式和冲击式破碎机	24-33
2.1 颚式破碎机	24-16	2.3.1	类型和构造	24-33
2.1.1 类型和构造	24-16	(1)	锤式破碎机 (简称锤碎机)	24-33
(1) 简摆型颚式破碎机	24-17	(2)	冲击式破碎机	24-34
(2) 复摆型颚式破碎机	24-18	(3)	其他型式的锤式和冲击式破碎机	24-36
(3) 直接传动颚式破碎机	24-18	2.3.2	锤式和冲击式破碎机的应用	24-39

2.3.3 锤式和冲击式破碎机参数	24-39	3.5.1 雷蒙磨	24-70
(1) 锤碎机的参数	24-39	3.5.2 弹簧辊式盘磨机	24-71
(2) 冲击式破碎机的参数	24-40	3.5.3 钢球盘磨机	24-72
2.4 辊式破碎机	24-40	3.6 搅拌磨、胶体磨	24-72
2.4.1 辊式破碎机的类型和构造	24-40	3.6.1 搅拌磨	24-72
(1) 双辊破碎机	24-41	(1) 塔式磨	24-72
(2) 单辊破碎机	24-42	(2) 周期式搅拌磨	24-73
(3) 三辊和四辊破碎机	24-42	(3) 环型搅拌磨	24-74
2.4.2 辊式破碎机的参数	24-43	(4) 氮化硅高能搅拌磨	24-74
(1) 辊子直径	24-43	3.6.2 胶体磨	24-74
(2) 辊面的圆周速度和辊子的转速	24-44	3.7 气流磨	24-75
(3) 处理能力	24-44	3.7.1 旋流-喷射气流磨	24-75
(4) 电动机功率	24-44	3.7.2 椭圆管式气流磨	24-78
2.5 辊压机	24-44	3.7.3 对喷式气流磨	24-78
2.5.1 工作原理和技术	24-45	3.7.4 复合式气流磨	24-78
2.5.2 辊压机的技术特性	24-45	4 筛分和筛分设备	24-81
2.5.3 辊压机系统的工艺流程	24-45	4.1 筛分	24-81
2.5.4 辊压机的主轴承和耐磨辊面	24-46	4.1.1 筛分作业的应用	24-81
2.5.5 辊压机应用实例	24-48	4.1.2 筛面	24-81
3 磨碎和磨碎设备	24-49	(1) 筛面的种类	24-81
3.1 磨碎	24-49	(2) 筛面的材料	24-84
3.2 球磨机、管磨机和棒磨机	24-49	4.1.3 筛分效率及其影响因素	24-85
3.2.1 类型和构造	24-49	(1) 筛分效率计算	24-85
(1) 球磨机、管磨机和棒磨机的工作原理	24-49	(2) 影响筛分效率的因素	24-85
(2) 溢流型球磨机	24-51	4.2 筛分设备	24-86
(3) 格子型球磨机	24-53	4.2.1 振动筛和概率筛	24-87
(4) 棒磨机	24-53	(1) 圆运动惯性振动筛	24-88
(5) 管磨机和多仓管磨机	24-55	(2) 直线运动惯性振动筛	24-89
3.2.2 磨机的操作和控制	24-55	(3) 振动筛的参数	24-90
3.2.3 球磨、棒磨和管磨机的工作参数	24-56	(4) 概率筛	24-92
(1) 转速	24-56	4.2.2 弧形筛和细筛	24-93
(2) 磨介充填率	24-57	(1) 弧形筛	24-93
(3) 钢球的配比	24-57	(2) 细筛	24-96
(4) 钢棒的配比	24-60	5 分级和分级设备	24-97
(5) 磨机的功率消耗	24-60	5.1 概述	24-97
(6) 处理能力	24-61	5.2 湿式分级设备	24-97
(7) 水分含量、料浆浓度、给料和磨碎		5.2.1 机械分级机	24-97
产品粒度	24-61	(1) 螺旋分级机	24-97
3.3 自磨机	24-61	(2) 耙式分级机	24-99
3.3.1 一段自磨机	24-61	(3) 浮槽分级机	24-99
3.3.2 砾磨机	24-63	(4) 立式耙式分级机(水力分离机)	24-100
3.3.3 半自磨机	24-63	5.2.2 非机械分级机	24-100
3.4 振动磨、行星磨和离心磨	24-63	(1) 圆锥分级机	24-100
3.4.1 振动磨	24-63	(2) 多室水力分级机	24-101
3.4.2 行星磨	24-67	(3) 水力旋流器	24-104
3.4.3 离心磨	24-68	(4) 卧式离心分级机	24-109
3.5 盘磨机	24-70	5.3 干式分级设备	24-110

(1)	不带运动部件的风力分级机	24-111
(2)	带运动部件的风力分级机	24-113
6	团聚和团聚设备	24-116
6.1	压片和压片设备	24-116
6.1.1	压片机	24-116
(1)	单冲压片机	24-116
(2)	旋转式压片机	24-117
(3)	高速压片机	24-118
6.1.2	对辊压型机	24-118
6.1.3	切块机和螺旋挤压机	24-119
6.1.4	压片和压块的粘合剂	24-119
6.2	造球和造球设备	24-120
6.2.1	造球过程	24-120
6.2.2	造球设备	24-122
6.3	烧结和烧结设备	24-123
6.3.1	烧结过程	24-123
6.3.2	烧结设备	24-125
6.4	球团矿生产工艺与设备	24-128
6.4.1	球团矿生产工艺	24-128
6.4.2	球团矿生产设备	24-129
6.4.3	球团矿技术的新进展	24-132

(1)	金属化球团矿	24-132
(2)	水硬性球团矿	24-132
(3)	碳酸化固结球团矿	24-132
6.5	喷射造粒	24-133
6.5.1	喷雾干燥法	24-133
6.5.2	喷丸法	24-133
6.5.3	流态化床层法	24-134
7	粉碎和团聚流程	24-135
7.1	粉碎段数	24-135
7.2	粉碎流程	24-135
7.2.1	破碎流程	24-136
7.2.2	磨碎流程	24-137
7.3	工业部门的粉碎流程举例	24-138
7.3.1	铁矿选厂的粉碎流程	24-138
7.3.2	碎石厂的粉碎流程	24-139
7.3.3	水泥熟料的磨碎流程	24-140
7.3.4	磨碎煤粉的流程	24-140
7.3.5	自磨机的粉碎流程	24-141
7.4	团聚流程	24-142
	基本参考文献	24-144

符号说明

a_x	筛孔尺寸, mm
A	粉碎比能耗; 单位粉碎能耗, kW·h/t
	筛子振幅, mm
b	颗粒三维尺寸的宽度, mm
B	颚式破碎机给料口或排料口宽度, m 或 mm
C	(1) 离心力
	(2) 返砂比
D	(1) 动锥底部直径, m
	(2) 螺旋分级机的螺旋直径, m
	(3) 颗粒粒度, mm
D_{80}, D_{95}	给料中 80% 或 95% 能通过的筛孔尺寸, mm
d	(1) 粉碎机的排料粒度, mm
	(2) 分级机溢流中的最大粒度, mm
d_{80}, d_{95}	排料中 80% 或 95% 能通过的筛孔尺寸, mm 或 μm
$d_{\max}$	颗粒最大粒度, mm
d'	颗粒名义粒度, mm 或 μm
D_B	补加钢球的直径, mm
e	(1) 破碎机排料口宽度, cm,
	辊式破碎机排料口宽度, mm
	(2) 板锤与冲击板的径向间隙

E	分级的量效率
F	(1) 颗粒在 xy 平面上的投影面积
	(2) 单位粒级含量
	(3) 筛面的有效面积, m^2
f	摩擦系数
G	(1) 锤子重量, kg
	(2) 钢球重量, kg
	(3) 磨介层的总重力, kgf
G_m	最大块物料重量, kg
h	颗粒三维尺寸的高度; 或板锤伸出转子的 高度
H	破碎腔高度, cm
i	破碎比
K	修正系数, 常数
l	颗粒三维尺寸的长度, mm 或 μm
L	破碎腔长度, cm 或 m, 辊子长度, m
m	螺旋分级机的螺旋个数
N_m	安装功率, kW
N	(1) 电动机功率, kW
	(2) 钢球重量的径向分力, kgf
n	转速, r/min
n_c	球磨机的临界转速, r/min
p_1, p_2	颚板垂直作用力, kgf

第 24 篇 粉碎、分级及团聚

主稿人 任德树 冶金部北京冶金设备研究院 教授

编写人 陈丙辰 沈阳东北工学院 教授

杨忠高 北京科技大学 高级工程师

符号说明	24-3	(4)	冲击颚式破碎机	24-19
1 粉碎	24-4	(5)	其他类型颚式破碎机	24-19
1.1 概述	24-4	2.1.2	颚式破碎机的参数	24-21
1.2 粉碎费用和过粉碎	24-4	(1)	啮角	24-21
1.3 粉碎常用术语	24-5	(2)	偏心轴的转速	24-21
1.4 物料的性质	24-5	(3)	处理能力	24-22
1.4.1 强度、硬度、脆性、可碎性和可磨性	24-5	(4)	电动机功率	24-23
1.4.2 水分和泥质含量	24-5	2.2	旋回和圆锥破碎机	24-23
1.4.3 磨蚀性	24-6	2.2.1	旋回破碎机的构造	24-23
1.4.4 晶粒结构和内部组织	24-6	(1)	机械支承式旋回破碎机	24-23
1.4.5 其他性质	24-7	(2)	液压旋回破碎机	24-23
1.5 颗粒的形状	24-7	(3)	颚-旋式破碎机	24-26
1.6 物料的粒度和粒度分布	24-7	2.2.2	旋回破碎机的参数	24-26
1.6.1 单颗粒粒度的表示方法	24-7	(1)	啮角	24-26
1.6.2 颗粒群的粒度表示方法	24-10	(2)	转速	24-26
1.6.3 粒度坐标和粒度曲线	24-10	(3)	处理能力	24-27
(1) 粒度表格	24-10	(4)	电动机功率	24-27
(2) 粒度曲线	24-10	2.2.3	圆锥破碎机的构造	24-27
1.6.4 粒度公式	24-12	(1)	弹簧式圆锥破碎机	24-27
(1) 指数公式	24-12	(2)	液压圆锥破碎机	24-29
(2) Rosin-Rammler 公式	24-12	(3)	其他型式圆锥破碎机	24-30
1.7 粉碎机械的施力作用和粉碎能耗假说	24-12	2.2.4	圆锥破碎机的参数	24-31
1.7.1 粉碎机械的施力作用	24-12	(1)	啮角	24-31
1.7.2 粉碎能耗	24-13	(2)	转速	24-32
(1) 表面积假说	24-14	(3)	处理能力	24-32
(2) 体积假说	24-14	(4)	电动机功率	24-33
(3) Bond 粉碎能耗的裂缝假说	24-15	(5)	圆锥破碎机的产品粒度特性	24-33
2 破碎和破碎设备	24-15	2.3	锤式和冲击式破碎机	24-33
2.1 颚式破碎机	24-16	2.3.1	类型和构造	24-33
2.1.1 类型和构造	24-16	(1)	锤式破碎机 (简称锤碎机)	24-33
(1) 简摆型颚式破碎机	24-17	(2)	冲击式破碎机	24-34
(2) 复摆型颚式破碎机	24-18	(3)	其他型式的锤式和冲击式破碎机	24-36
(3) 直接传动颚式破碎机	24-18	2.3.2	锤式和冲击式破碎机的应用	24-39

2.3.3 锤式和冲击式破碎机参数	24-39	3.5.1 雷蒙磨	24-70
(1) 锤碎机的参数	24-39	3.5.2 弹簧辊式盘磨机	24-71
(2) 冲击式破碎机的参数	24-40	3.5.3 钢球盘磨机	24-72
2.4 辊式破碎机	24-40	3.6 搅拌磨、胶体磨	24-72
2.4.1 辊式破碎机的类型和构造	24-40	3.6.1 搅拌磨	24-72
(1) 双辊破碎机	24-41	(1) 塔式磨	24-72
(2) 单辊破碎机	24-42	(2) 周期式搅拌磨	24-73
(3) 三辊和四辊破碎机	24-42	(3) 环型搅拌磨	24-74
2.4.2 辊式破碎机的参数	24-43	(4) 氮化硅高能搅拌磨	24-74
(1) 辊子直径	24-43	3.6.2 胶体磨	24-74
(2) 辊面的圆周速度和辊子的转速	24-44	3.7 气流磨	24-75
(3) 处理能力	24-44	3.7.1 旋流-喷射气流磨	24-75
(4) 电动机功率	24-44	3.7.2 椭圆管式气流磨	24-78
2.5 辊压机	24-44	3.7.3 对喷式气流磨	24-78
2.5.1 工作原理和技术	24-45	3.7.4 复合式气流磨	24-78
2.5.2 辊压机的技术特性	24-45	4 筛分和筛分设备	24-81
2.5.3 辊压机系统的工艺流程	24-45	4.1 筛分	24-81
2.5.4 辊压机的主轴承和耐磨辊面	24-46	4.1.1 筛分作业的应用	24-81
2.5.5 辊压机应用实例	24-48	4.1.2 筛面	24-81
3 磨碎和磨碎设备	24-49	(1) 筛面的种类	24-81
3.1 磨碎	24-49	(2) 筛面的材料	24-84
3.2 球磨机、管磨机和棒磨机	24-49	4.1.3 筛分效率及其影响因素	24-85
3.2.1 类型和构造	24-49	(1) 筛分效率计算	24-85
(1) 球磨机、管磨机和棒磨机的工作原理	24-49	(2) 影响筛分效率的因素	24-85
(2) 溢流型球磨机	24-51	4.2 筛分设备	24-86
(3) 格子型球磨机	24-53	4.2.1 振动筛和概率筛	24-87
(4) 棒磨机	24-53	(1) 圆运动惯性振动筛	24-88
(5) 管磨机和多仓管磨机	24-55	(2) 直线运动惯性振动筛	24-89
3.2.2 磨机的操作和控制	24-55	(3) 振动筛的参数	24-90
3.2.3 球磨、棒磨和管磨机的工作参数	24-56	(4) 概率筛	24-92
(1) 转速	24-56	4.2.2 弧形筛和细筛	24-93
(2) 磨介充填率	24-57	(1) 弧形筛	24-93
(3) 钢球的配比	24-57	(2) 细筛	24-96
(4) 钢棒的配比	24-60	5 分级和分级设备	24-97
(5) 磨机的功率消耗	24-60	5.1 概述	24-97
(6) 处理能力	24-61	5.2 湿式分级设备	24-97
(7) 水分含量、料浆浓度、给料和磨碎		5.2.1 机械分级机	24-97
产品粒度	24-61	(1) 螺旋分级机	24-97
3.3 自磨机	24-61	(2) 耙式分级机	24-99
3.3.1 一段自磨机	24-61	(3) 浮槽分级机	24-99
3.3.2 砾磨机	24-63	(4) 立式耙式分级机(水力分离机)	24-100
3.3.3 半自磨机	24-63	5.2.2 非机械分级机	24-100
3.4 振动磨、行星磨和离心磨	24-63	(1) 圆锥分级机	24-100
3.4.1 振动磨	24-63	(2) 多室水力分级机	24-101
3.4.2 行星磨	24-67	(3) 水力旋流器	24-104
3.4.3 离心磨	24-68	(4) 卧式离心分级机	24-109
3.5 盘磨机	24-70	5.3 干式分级设备	24-110

(1)	不带运动部件的风力分级机	24-111
(2)	带运动部件的风力分级机	24-113
6	团聚和团聚设备	24-116
6.1	压片和压片设备	24-116
6.1.1	压片机	24-116
(1)	单冲压片机	24-116
(2)	旋转式压片机	24-117
(3)	高速压片机	24-118
6.1.2	对辊压型机	24-118
6.1.3	切块机和螺旋挤压机	24-119
6.1.4	压片和压块的粘合剂	24-119
6.2	造球和造球设备	24-120
6.2.1	造球过程	24-120
6.2.2	造球设备	24-122
6.3	烧结和烧结设备	24-123
6.3.1	烧结过程	24-123
6.3.2	烧结设备	24-125
6.4	球团矿生产工艺与设备	24-128
6.4.1	球团矿生产工艺	24-128
6.4.2	球团矿生产设备	24-129
6.4.3	球团矿技术的新进展	24-132

(1)	金属化球团矿	24-132
(2)	水硬性球团矿	24-132
(3)	碳酸化固结球团矿	24-132
6.5	喷射造粒	24-133
6.5.1	喷雾干燥法	24-133
6.5.2	喷丸法	24-133
6.5.3	流态化床层法	24-134
7	粉碎和团聚流程	24-135
7.1	粉碎段数	24-135
7.2	粉碎流程	24-135
7.2.1	破碎流程	24-136
7.2.2	磨碎流程	24-137
7.3	工业部门的粉碎流程举例	24-138
7.3.1	铁矿选厂的粉碎流程	24-138
7.3.2	碎石厂的粉碎流程	24-139
7.3.3	水泥熟料的磨碎流程	24-140
7.3.4	磨碎煤粉的流程	24-140
7.3.5	自磨机的粉碎流程	24-141
7.4	团聚流程	24-142
	基本参考文献	24-144

符号说明

a_x	筛孔尺寸, mm
A	粉碎比能耗; 单位粉碎能耗, $\text{kW} \cdot \text{h/t}$
	筛子振幅, mm
b	颗粒三维尺寸的宽度, mm
B	颚式破碎机给料口或排料口宽度, m 或 mm
C	(1) 离心力
	(2) 返砂比
D	(1) 动锥底部直径, m
	(2) 螺旋分级机的螺旋直径, m
	(3) 颗粒粒度, mm
D_{80}, D_{95}	给料中 80% 或 95% 能通过的筛孔尺寸, mm
d	(1) 粉碎机的排料粒度, mm
	(2) 分级机溢流中的最大粒度, mm
d_{80}, d_{95}	排料中 80% 或 95% 能通过的筛孔尺寸, mm 或 μm
$d_{\max}$	颗粒最大粒度, mm
d'	颗粒名义粒度, mm 或 μm
D_B	补加钢球的直径, mm
e	(1) 破碎机排料口宽度, cm,
	辊式破碎机排料口宽度, mm
	(2) 板锤与冲击板的径向间隙

E	分级的量效率
F	(1) 颗粒在 xy 平面上的投影面积
	(2) 单位粒级含量
	(3) 筛面的有效面积, m^2
f	摩擦系数
G	(1) 锤子重量, kg
	(2) 钢球重量, kg
	(3) 磨介层的总重力, kgf
G_m	最大块物料重量, kg
h	颗粒三维尺寸的高度; 或板锤伸出转子的 高度
H	破碎腔高度, cm
i	破碎比
K	修正系数, 常数
l	颗粒三维尺寸的长度, mm 或 μm
L	破碎腔长度, cm 或 m, 辊子长度, m
m	螺旋分级机的螺旋个数
N_m	安装功率, kW
N	(1) 电动机功率, kW
	(2) 钢球重量的径向分力, kgf
n	转速, r/min
n_c	球磨机的临界转速, r/min
p_1, p_2	颚板垂直作用力, kgf

Q	单位时间的处理量;处理能力,t/h
$Q_{\text{闭}}$	闭路粉碎时圆锥破碎机的处理能力,t/h
q	单位排料口宽度的处理能力,t/(m ² ·h)
q_0	闭路工作时单位排料口宽度的处理能力,t/(h·mm)
R	筒体半径,m或mm;或短路系数
S	颗粒表面积,cm ² 或mm ² ;或动颚在排料口的水平行程,cm
S_s	等重球体的表面积,cm ²
S'	动颚平均作用力处的行程,cm
t	颚机每1/3转的时间,min;或时间,min
V	颗粒体积,cm ³ 或mm ³ ;或辊面圆周速度,m/s;或球磨机筒体圆周速度,m/s
W_i	功指数,kW·h/t
W_0	粉碎比能耗,kW·h/t
W	(1)钢球重量,kg (2)水力旋流器的水流量,m ³ /s
α	(1)啮角,度 (2)钢球抛射点同圆心连线同垂线夹角,度 (3)分级机坡度,度 (4)产率,%
β	粒级含量,%
β_+	粗粒级累积含量,%
β_-	细粒级累积含量,%
γ	物料表观密度(又称松散容重),t/m ³ ; 或大钢球累积含量,%
δ	物料密度,t/m ³
ϵ	分级的质效率,%
ψ	球磨机转速率,%
ψ_m	颗粒形状系数
ϕ	摩擦角;或锤碎机转子直径,m或mm; 或辊碎机辊子直径,m或mm
μ	物料松散系数
μ_m	球料比;物料充填率,%
η	传动效率,%

1 粉 碎

1.1 概 述

粉碎是将大块物料用机械方法碎裂为小粒度的颗粒过程,其目的是:

(a) 使物料的比表面增加,物料同周围介质的接触面积大;使反应速度增大,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来强化传质与传热等。

(b) 在水泥、陶瓷、玻璃等工业中,粉状物料有利于促进生产过程中多相反应速度,也有利于多种原料进行混合均化和分离分级等操作,改善成品半成品工艺性能。

(c) 在选矿之前使矿石中的有效成分解离。矿石中 有用成分同杂质往往紧密地嵌布在一起,需经过破碎或磨碎之后使其互相分离(解离),再用选矿方法剔除杂质,得到较纯净的精矿和中间产品。

(d) 为原料下一步加工作准备,在炼焦、烧结、球团、陶瓷、玻璃、粉末冶金等部门,必须把原料磨碎至一定粒度以下进行加工。

(e) 便于使用。在食品、化工、医药、化肥、农药等工业部门中,需将产品碎磨成粉末状态才能发挥效用。

(f) 便于储存和运输,粉末物料和料浆可利用风力和水力输送。

(g) 制备混凝土时,如天然矿供应不足,可将岩石粉碎以制备符合粒度规定的人造砂。

(h) 为了保护环境,将城市垃圾进行粉碎并处理。

1.2 粉碎费用和过粉碎

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,例如在一些金属矿石选矿厂,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。视物料的可磨性和磨碎的粒度,磨碎一吨物料通常要消耗8~25kW·h的电(能耗),磨碎工件(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(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,这种在粉末过程中产生小于规定粒度下限产品的现象,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 m,浮游选矿法是5~10 μ m。因此,磨碎重选或浮选给料时,产生小于19 μ m或5~10 μ m的粒级,就属于过粉碎粒级。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,只能当作废品或大幅度减价处理,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。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。

通常粉碎产品粒度(指产品中最大颗粒的粒度)大于1~5mm时称为破碎,在60 μ m至1~5mm之间称为磨碎,小于60 μ m(有时可达几个 μ m)时称为超细磨碎。进行超细磨碎的物料磨碎费用高、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往往不理想。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,使能耗及费用上升。

1.3 粉碎常用术语

粉碎产品的粒度在 $1\sim 5\text{mm}$ 以上的作业,称为破碎,在 $1\sim 5\text{mm}$ 以下的作业称为磨碎。破碎和磨碎统称粉碎或碎磨。令 D 为给料粒度(即给料中最大颗粒的尺寸), d 为破碎或磨碎产品的粒度(即产品中最大颗粒的尺寸),则 D/d 的值称为粉碎比,通常用 i 表示,即物料经过破碎或磨碎后其粒度减小的倍数。各种碎磨机械的粉碎比不相同:对于坚硬物料,破碎机的粉碎比在 $3\sim 10$ 之间,磨碎机的粉碎比达 $40\sim 400$ 以上。

在实际应用中,需要的粉碎比往往较大,例如把 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,最后送入磨碎机磨碎至最终产品粒度(如 0.2mm),如图1-1所示。图1-1表示粉碎作业的过程,称做粉碎(或破碎及磨碎)流程。由图还可看出,物料在给

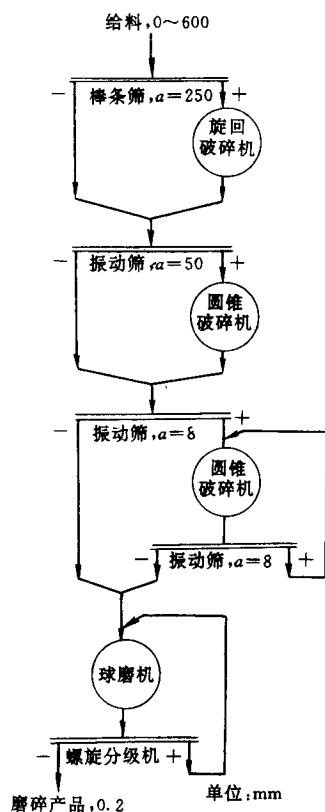


图1-1 破碎和磨碎流程

入各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。这种筛分称做“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(在此为 8mm)大致等于预先筛分的筛孔尺寸。检查筛分的筛上产品为粗度 $>8\text{mm}$ 的不合格产品,被送回破碎机再度破碎,筛下产品为 $<8\text{mm}$ 的合格产品,送至磨碎机进行磨碎。球磨机的磨碎产品,送螺旋分级机进行“检查分级”,分出 $<0.2\text{mm}$ 的合格产品及 $>0.2\text{mm}$ 的不合格产品,后者送回球磨机再度磨碎。

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的粉碎流程有三个破碎段和一个磨碎段,有时磨碎段还再分成粗磨段和细磨段。

上述按粒度大小的分类方法仅适用于颚式、旋回、辊式等破碎机,对于另一些破碎机则不适用,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 $10\sim 30\text{mm}$ 以下,又如一段自磨机(2.5节)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、细碎或兼有破碎与磨碎的功能。

1.4 物料的性质

粉碎机械的选型计算,流程编制、粉碎产品的粒度组成和颗粒形状及粉碎工作件的磨损等,与物料的下述性质有关。

1.4.1 强度、硬度、脆性、可碎性和可磨性

物料强度同物料的种类和形态等有关。对于同一物料,强度还与其粒度有关,粒度小的颗粒的宏观和微观裂纹较少,强度较高。强度还往往同硬度有关,硬度高的物料,其强度和对粉碎的阻力也较大。普氏硬度系数 f 值用于将物料按强度或对粉碎阻力分为10级,大致等于物料抗压强度(kgf/cm^2)的 $1/100$ 。岩石的抗压强度见表1-1。我国一些金属矿石的普氏硬度系数列于表1-2。物料的脆性或韧性无确切的概念,粉碎作业处理的物料多呈脆性,韧性物料需要用特殊方法,例如高速冲击剪切或超低温进行粉碎。可碎性和可磨性是指物料粉碎难易程度,用一定的试验方法定量测定其标准产品单位指定产品粉碎能耗或单位能耗指定产品产量表示。物料的粉碎强度分类见表1-3。

1.4.2 水分和泥质含量

物料的表面水分和泥质含量对粉碎影响较大,如在粉碎、贮存和运输时发生粘结和堵塞。通常将水分限制在 $5\sim 10\%$ 以下。如原料水分过高,则采取如下措施:

(a) 采用湿法磨碎。用球磨机进行湿法磨碎时,在给料中要加适量的水,磨碎产品为料浆状态;

表 1-1 岩石的平均抗压强度

类 别	矿石名称	相对密度	抗压强度 kgf/cm ²	类 别	矿石名称	相对密度	抗压强度 kgf/cm ²	类 别	矿石名称	相对密度	抗压强度 kgf/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	区域变质岩	板 石	2.74	1540
	粗面岩	2.66	1760		白云石	2.71	1500		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	

(b) 对物料进行干燥，或采用兼有粉碎和干燥的联合装置；

(c) 在破碎机某些部件上局部加热（锤碎机或冲击或破碎机的衬板或冲击板），可减少粘连。

1.4.3 磨蚀性

物料的磨蚀性 (Abrasiveness) 是物料对粉碎工作件 (齿板、板锤、钢球、衬板等) 产生磨损程度的一种性质。粉碎工作件的磨损程度称为钢耗，通常以粉碎一吨物料时粉碎工作件的金属消耗量 (钢耗，g/t) 表示。

物料的磨蚀性虽然同物料的强度、硬度有关，但后两者还不能完全反应磨蚀性。例如抗压强度和普氏硬度系数相近的鞍山大孤山和南芬磁铁矿石英岩，用同样的美制牙轮钻头 HH77 对两者钻孔，钻头寿命分别为 863 和 183m。

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，含量越高，磨蚀性越强。岩石的表面形态 (粗糙度) 和是否颗粒大小相间也影响其磨蚀性。

1.4.4 晶粒结构和内部组织

许多物料是矿物晶粒或质量的集合体，晶粒有粗粒或细粒之分，集合体可以是块状、纤维状或海绵状结构。它们在粉碎时将影响粉碎能耗、粉碎产品的颗粒形状及粒度组成等产生影响。

有些物料有明显的解理面。解理由分子或原子定向排列造成，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，沿着不同方向粉碎的难易程度无差别。

物料粉碎后具有不同形状的断裂面，这也是由其内部组织所决定的。在粉碎实践中，可产生光滑、不平整、交错 (锯齿状)、贝壳等形状的断裂面。

1.4.5 其他性质

松散性、腐蚀性、易碎性、杂质含量等。松散性是物料粉碎时分散成大量碎粒的性质，如砂砾就具有这种性质。

1.5 颗粒的形状

物料颗粒形状与其种类、成分、解理、结构等因素有关，有块状（近似于球体或立方体），棱角状（图 1-2a），扁尖状（又称鱼状，图 1-2b），片状（最典型的是云母，图 1-2c），柱状（图 1-2d），不规则形状（卵石状、树枝状、海绵状、盘状、洋葱状等，图 1-2e）和纤维状（如石棉）。

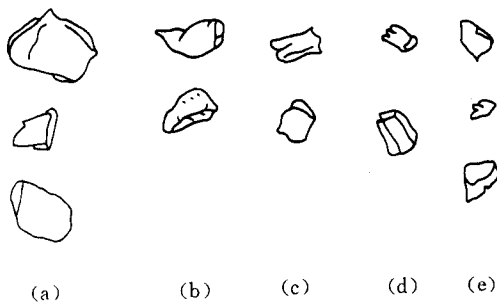


图 1-2 物料的颗粒形状

磨碎作业通常仅对磨碎细度（如小于 75μm 的百分率或比表面）有要求，而某些破碎作业除对产品粒度有要求外，还对颗粒形状有要求。如德国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%。所谓立方体，是指在颗粒的三维尺寸 a 、 b 、 c （其 $a>b>c$ ）中， a/c 不得大于 3。破碎产品中立方体含量同破碎机设计和操作有关。如用 Calibrator 圆锥破碎机破碎某玄武岩时，给料粒度 12~25mm，排料口宽度 7.5mm，破碎产品粒度 $>5\text{mm}$ 为 65%，其中各粒级立方体颗粒含量分别为：5~8mm 粒级 89.6%；8~11mm 粒级 95.4%；11~16mm 粒级 95.9%。

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

颗粒的形状还可利用颗粒形状系数 ψ_m 和形状指数 ψ_s 等多种方法表示 ψ_m 是颗粒表面积 S 与相同质量球体的表面积 S_s 之比值（又称球形度）：

$$\psi_m = \frac{S_s}{S} \tag{1-1}$$

颗粒形状同球状差别越大， ψ_m 越小。表 1-4 列出几种物料的形状系数。

1.6 物料的粒度和粒度分布

鉴于物料颗粒的形状不规则，粒度的表示方法较多，单颗粒和颗粒群粒度有其表示方法。

1.6.1 单颗粒粒度的表示方法

(1) 颗粒的三维尺寸

将颗粒放稳（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×高度表示颗粒的三维尺寸。此法适用于大块颗粒（ $>200\text{mm}$ ），特别是当颗粒要通过一个孔口时（如破碎机给料口，料仓的排出口等），要规定颗粒的最大尺寸。

(2) 颗粒的名义（平均）粒度

设颗粒的三维尺寸分别是 l 、 b 、 h （ $l>b>h$ ），可以把中间尺寸 b 当作颗粒的名义粒度，也可以把这三个尺寸的算术平均值 $\left(\frac{l+b+h}{3}\right)$ 或几何平均值 $(\sqrt[3]{lbh})$ 当作颗粒的名义粒度。对于粉末，可用显微镜直接测出颗粒在 x 和 y 方向的尺寸 l 和 b ，算出 l 和 b 的算术平均值 $\left(\frac{l+b}{2}\right)$ 或几何平均值 $(\sqrt{lb})$ 作为名义粒度。还可测出颗粒在 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 ，可算出颗粒的球名义粒度 $(\sqrt[3]{6V/\pi})$ 和立方体名义粒度 $(V^{1/3})$ 。颗粒名义粒度的表示方法列于表 1-5。颗粒定向粒度 d_g （Feret 径）和定向面积等分粒度 d_m 等也是（也称 Martiw 径）表示。单颗粒名义粒度的方法，如图 1-3 和表 1-5 所示。

表 1-5 颗粒的名义粒度

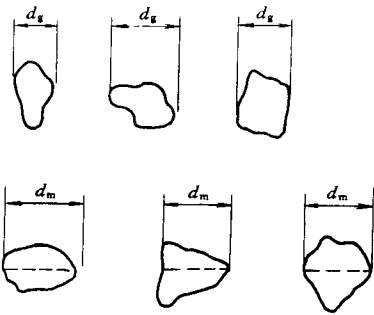
名 称	定 义
中间值名义粒度	当 $l>b>h$ 时的 b 值(设 $l\leq 2b$, 则 b 值也是颗粒能通过的方形筛孔的边长)
三维算术平均粒度	$(1+b+h)/3$
三维几何平均粒度	$(lbh)^{1/3}$
二维算术平均粒度	$(l+b)/2$
二维几何平均粘度	$(lb)^{1/2}$
正方形名义粒度	$F^{1/2}$
圆名义粒度	$(4F/\pi)^{1/2}$
立方体名义粘度	$V^{1/3}$
球名义粒度	$(6V/\pi)^{1/3}$
定方向粒度	d_g (图 1-3)
定方向面积等分粒度	d_m (图 1-3)

表 1-6 标准筛制

ISO 565:1990(E)	中国标准筛			美国 ASTM			德国 DIN-1171			泰勒氏			日本 JIS			英 IMM		前苏联 ГОСТ		
孔隙, μm	日	孔/英寸	孔径	筛号	孔径	筛号	网目	孔径	孔径	网目	孔径	孔径	筛号	孔径	孔径	网号	孔径	筛号	孔径	筛网有效面积 %
		mm	mm	mm	mm	cm	cm	mm	mm	mm	mm	mm	μm	mm	mm	in	mm	mm	mm	
125											26.67									
90											18.85									
63											13.33									
45	4	5.1		2.5	8	1.83				2.5	7.925	2.235	9520	9.52	2.3					
31.5				3	6.75	1.65	1			3	6.68	1.778	6730	6.73	1.8					
22.4				3.5	5.66	1.45	1	6	3.4	3.5	5.691	1.651	5660	5.66	1.6			5000	5	1.1
				4	4.76	1.27				4	4.699	1.651	4760	4.76	1.24			4000	4	1
				5	4	1.12				5	3.962	1.118	4000	4.0	1.08			3300	3.3	0.9
16	6	3		6	3.36	1.02	2	4	3	6	3.327	0.914	3360	3.36	0.87			2800	2.8	0.8
				7	2.83	0.92				7	2.794	0.833	2830	2.83	0.8	5	2.54	2300	2.3	0.7
	8	2.5		8	2.38	0.84				8	2.262	0.813	2380	2.38	0.8			2000	2	0.7
11.2	10	2.0		10	2	0.76	3	9	2	9	1.981	0.838	2000	2.0	0.76			1700	1.7	0.6
8																				
5.6	12	1.6		12	1.68	0.69	4	16	1.5	10	1.651	0.889	1680	1.68	0.74	8	1.57	1400	1.4	0.55
				14	1.41	0.61	5	25	1.2	12	1.397	0.711	1410	1.41	0.71					
4	16	1.25														10	1.27			
				16	1.19	0.52	6	36	1.02	14	1.168	0.635	1190	1.19	0.62			1200	1.20	0.5
2.8	18	1		18	1	0.48				16	0.991	0.597	1000	1.0	0.59	12	1.00	1000	1	0.45
				20	0.9													850	0.85	0.4
2	24	0.8		20	0.84	0.42				20	0.833	0.437	840	0.84	0.43	16	0.79			
1.4	26	0.71		25	0.71	0.37	8	64	0.75	24	0.701	0.358	710	0.71	0.35			700	0.70	0.35
	28	0.63					10	100	0.6	0.4						20	0.64			
1	32	0.56		30	0.59	0.33	11	121	0.54	0.37	28	0.589	0.318	590	0.59	0.32		600	0.6	0.3
	35	0.5		35	0.5	0.29	12	144	0.49	0.34	32	0.495	0.3	500	0.5	0.29		500	0.5	0.25

续表

[illegible]

图 1-3 定向粒度 d_g 和定向面积等分粒度 d_m

1.6.2 颗粒群的粒度表示方法

(1) 用筛孔尺寸表示。设颗粒群能通过尺寸为 a_{n+1} 的筛孔, 但被尺寸为 a_n 的筛孔所阻留 ($a_{n+1} > a_n$), 则该组颗粒群的粒度为 $a_n \sim a_{n+1}$ 。

此为最常用的测定颗粒粒度的方法, 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, 其正方形筛孔的边长为筛孔尺寸。标准筛相邻筛孔的尺寸以几何级数递增, 公比为 2、 $\sqrt{2}$ (1.414)、 $\sqrt[3]{2}$ (1.189) 和 $\sqrt[10]{10}$ (1.259)。

除了用方形筛孔的边长表示筛孔尺寸外, 还可用网目和每平方厘米的筛孔数目表示, 网目是每英寸长度的筛孔数目 (Mesh)。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。用每平方厘米的筛孔数目表示筛孔尺寸时, 常用的有 900 孔/cm² 和 4900 孔/cm², 其网丝直径也做了统一规定。表 1-6 列出各国的标准筛。

(2) 用 <200 目的细粒含量 (称筛下) 或 >200 目的粗粒含量 (称为筛余) 来表示。这种方法常用于表示磨碎产物的细度: 当 <200 的含量越高 (即 >200 目的筛余越低), 则磨碎产品越细。

(3) 用相当于细粒累积含量为 80% 或 95% 时的相应粒度来表示。令粉碎机给料粒度和排料粒度分别以 D 和 d 表示, 则给料中相当于细粒含量为 80% 和 95% 的给料粒度以 D_{80} 和 D_{95} 表示, 相应的排料粒度以 d_{80} 和 d_{95} 表示。在破碎作业中物料的粒度较大, 常用 D_{80} 和 d_{80} 表示给料和排料粒度, 而磨碎作业中常用 D_{95} 和 d_{95} 表示给料和排料粒度。

(4) 颗粒群的名义 (平均) 粒度有多种表示方法。设粒度为 $d_1, d_2, \dots, d_n$ 的粒级重量分别为 $w_1, w_2, \dots, w_n$, 相应的粒级含量分别为 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$, 则各种计算名义粒度的方法列于表 1-7。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, 以较多地考虑细粒影响。例如, 对于 1~2mm 的粒级, 其几何平均值为 $\sqrt{1 \times 2} = 1.414\text{mm}$ 。

在表 1-7 中, 比表面平均直径 $\bar{d}_s$ 公式中的 $\bar{S}_s$ 为颗粒群的质量平均比表面 (cm²/g), δ 为物料密度 (g/cm³), 中径 d_{50} 为颗粒群中相当于细粒累积含量为 50% 时的粒度。

表 1-7 颗粒群的名义粒度

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

1.6.3 粒度坐标和粒度曲线

由于颗粒群由各种粒度的颗粒群 (称为粒级, 或级别) 组成, 为表示各种粒级占总颗粒群的含量, 通常用粒度表格、粒度曲线和粒度公式表示。

(1) 粒度表格

物料在一组筛孔不同的筛子 (称为套筛) 上进行筛分 (筛析), 得出粒度为 $a_1, a_2, \dots, a_n$ 的 n 个粒级, 各粒级占全部粒级的含量分别为 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$, 称作各粒度的粒级含量或粒级产率。如将小于某一粒度 a 的各个粒级含量累加, 则为该粒度的细粒累积含量或细粒累积产率。反之, 如将大于某一粒度 a 的各个粒级含量累加, 则为该粒度的粗粒累积含量或粗粒累积产率。将每个粒级含量或累积含量列成表格, 以表达颗粒群的粒度分布, 如表 1-8 所示。

(2) 粒度曲线

(2.1) 用累积含量表示的粒度曲线 曲线的横坐标为粒度, 纵坐标为累积含量, 从曲线的形状可看出物料的粒度分布。为了使细粒级在横坐标上分散开 (特别是当颗粒群的粒度范围较广时), 横坐标可用对数坐标 (图 1-4)。

图 1-5 是横坐标和纵坐标都是对数坐标的粒度曲

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	—

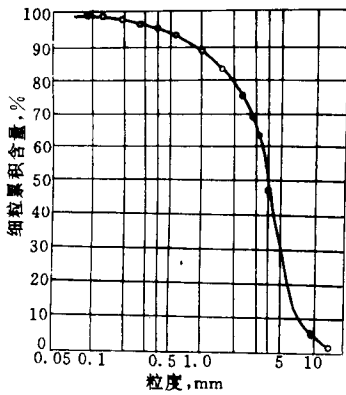


图 1-4 粒度曲线

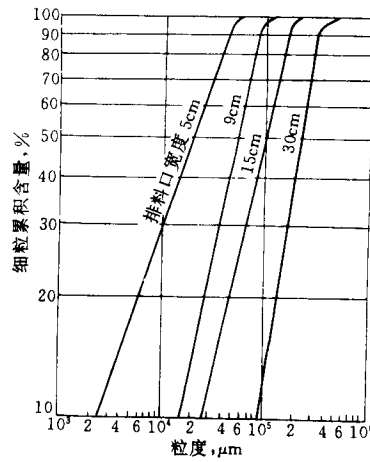


图 1-5 全对数坐标的粒度曲线

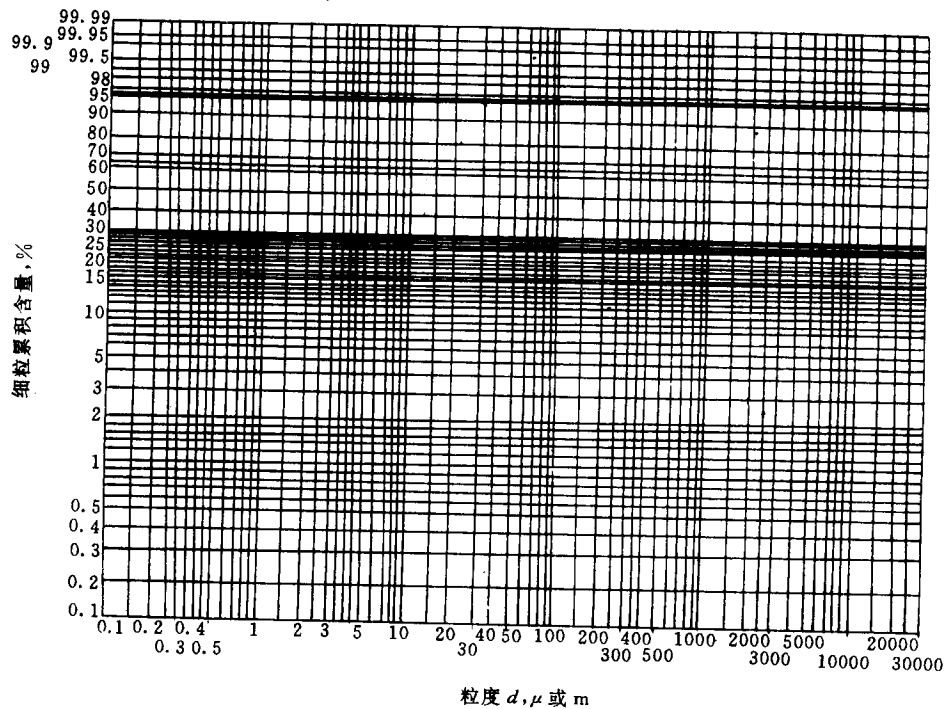


图 1-6 Rosin-Rammler 粒度曲线

线。许多物料的粒度分布画在这种坐标上时,中间一段近似于直线。

图 1-6 是 Rosin-Rammler 粒度曲线,其纵坐标是双对数坐标,横坐标为一般对数坐标。这种坐标系统的纵坐标在两端(累积含量 $< 25\%$ 和 $> 75\%$ 的区间)的间隔较大。

在粒度曲线上,如曲线的斜度大,表示多数颗粒集中于较窄的粒度范围内,即为窄粒度分布。如斜度小,为宽粒度分布。

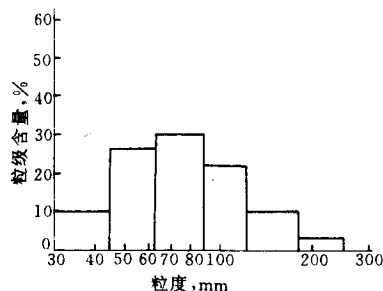


图 1-7 粒级分布曲线

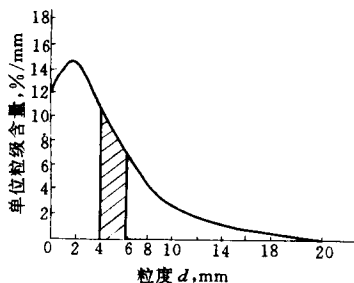


图 1-8 单位粒级分布曲线

(2.2) 粒级分布柱形图和单位粒级分布曲线 粒级分布柱形图(图 1-7)和单位粒级分布曲线(图 1-8)的横坐标都是对数坐标,前者的纵坐标为在某一粒度区间的粒级含量,后者的纵坐标为单位粒级含量,也称粒度频度曲线。单位粒级含量是在某一粒度下粒级含量的变化率:

$$F = \frac{d\beta_+}{d(d)} \text{ 或 } F = \frac{d\beta_-}{d(d)} \quad (1-2)$$

式中 F ——单位粒级含量;

β_+ 或 β_- ——粗粒或细粒累积含量, %;

d ——粒度。

曲线上相当于纵坐标为最大点的粒度,表示在该粒度附近的颗粒最多。曲线下的阴影面积表示在两个粒度之间(如 4~6mm)的粒级含量。

1.6.4 粒度公式

粒度公式是物料累积含量同粒度之间的关系的表达式。由于物料性质和粉碎条件变化较大,粉碎产品的粒度特性难以用一个公式来概括,仅能近似地和在一定粒度范围内用公式来表示。

(1) 指数公式

A. M. Gaudin 和 R. Schumann 等人提出下列粒度

公式:

$$\beta_- = 100 \left(\frac{d}{d_{\max}} \right)^n \quad (1-3)$$

式中 β_- ——在粒度 d 的细粒累积含量, %;

d ——颗粒粒度;

$d_{\max}$ ——最大颗粒的粒度。

对于多数物料,在中间粒度区间此公式较适用。在全对数坐标上,按此粒度公式画成的粒度曲线近似于直线。

(2) Rosin-Rammler 公式

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

$$\beta_+ = 100e^{-bd^n} = 100e^{-\left(\frac{d}{d'}\right)^n} \quad (1-4)$$

式中 β_+ ——相当于粒度 d 的粗粒累积含量, %;

d ——粒度;

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

d' ——颗粒群的名义粒度(此粒度相当于 $\beta_+ = 36.79\%$ 的粒度)。

对式(1-4)取两次对数,得出

$$\ln \left(\ln \frac{100}{\beta_+} \right) = \ln b + n \ln d = n \ln d + k \quad (1-5)$$

式中 k ——常数。

在以纵坐标用双对数坐标、横坐标为一般对数坐标(图 1-6)上绘制物料粒度曲线时,如粒度分布符合于式(1-4)或(1-5),则给出一条斜率为 n 的直线。实际上,多数粉碎产品在 Rosin-Rammler 坐标上画出的粒度曲线,仅在中间一段近似于直线。

1.7 粉碎机械的施力作用和粉碎能耗假说

1.7.1 粉碎机械的施力作用

粉碎机械利用粉碎工作件(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。为了有助于粉碎工作件咬住物料,减少粉碎阻力和过粉碎,粉碎工作件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)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向、与施力方向成 45° 角或沿着颗粒内部的脆弱面方向发展(图 1-11)。

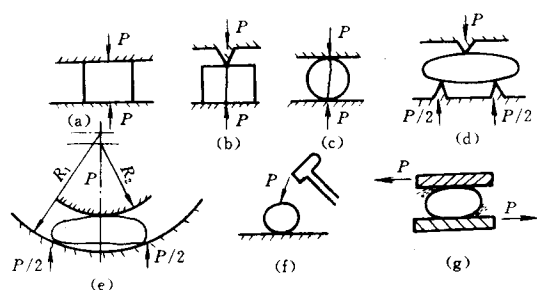


图 1-9 粉碎工作件的施力作用

(a)、(c) 压碎；(b) 劈碎；(d)、(e) 弯曲；
(f) 冲击或打击；(g) 研磨

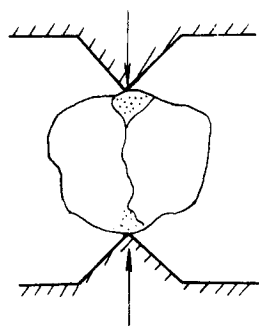


图 1-10 局部粉碎和全部粉碎

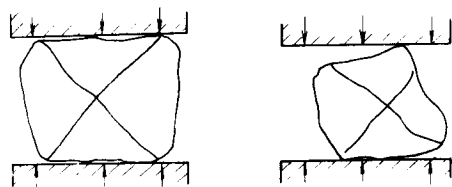


图 1-11 颗粒粉碎时的裂缝

在打击或冲击粉碎时，粉碎工作件或颗粒的动能迅速转变为物料的变形功，并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，物料将首先沿这些脆弱面粉碎。

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（颗粒发生破碎时有一定自由伸展余地）条件下，裂缝和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，强度高的成分粒度较大，强度低的成分粒度较小，产生所谓“选择性破碎”作用。例如煤炭中含的矽石和黄铁矿杂质，其强度较煤本身的强度高。利用选择性破碎原理的“圆筒式碎煤机”将原煤破碎后，

产品中煤本身的粒度较小，而矽石和黄铁矿破碎后则粒度较大。通过对破碎产品进行筛分可将煤同矽石或黄铁矿分开，从得到高质量的煤炭。

在实践中，施力种类因物料性质、粒度及对粉碎产品的要求而异：

(a) 粒度较大和中等坚硬物料 用压碎、冲击，粉碎工作件上有形状不同的齿牙；

(b) 粒度较小的坚硬物料 用压碎、冲击、粉碎工作件表面光滑，无齿牙；

(c) 粉状或泥状物料 用研磨、冲击、压碎；

(d) 磨蚀性弱的物料 冲击、打击、劈碎、研磨，粉碎工作件上有不同锐利程度的齿牙；

(e) 磨蚀性强的物料 以压碎为主，粉碎工作件表面光滑；

(f) 韧性物料 用剪切或快速冲击；

(g) 建筑行业的石料 用冲击、打击、压碎作用下的自由粉碎；

(h) 多成分物料 用冲击作用下的选择性粉碎。

1.7.2 粉碎能耗

粉碎物料时外力做的功称为粉碎能耗。粉碎能消耗于以下几方面：

(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，如产生表面活性点，表面形成无定形层或氧化物层；

(e) 晶体结构发生局部错位变化所消耗的能；

(f) 工作件与物料磨介与磨介之间的摩擦、振动及其他能耗。

研究工作者曾对球磨机的能耗进行测定，发现输入的能量中大部分以热的形式散掉（表 1-9）。

表 1-9 粉碎能耗分析

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. 其他损耗：		
磨介的摩擦	5	} 2.1
磨介温升散热	2	
振动、水分蒸发及其他	3	
总 计	466	100.0

关于粉碎能耗与物料粒度的关系,有三种常用的假说。

(1) 表面积假说

鉴于粉碎后产品的表面大大增加,产品的粒度越细,单位质量物料表面越大,输入的粉碎能量越多。P. R. Von Riffinger 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表面成正比:

$$A \propto \Delta S = K_1 \Delta S \quad (1-6)$$

式中 A ——粉碎能耗;

ΔS ——粉碎后物料表面积的增加;

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'_1, K''_1 为系数, δ 为物料密度),则比表面 S'_1 为:

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

对于颗粒群,令名义粒度为 $D_1, D_2 \dots D_n$ 的级别含量分别为 $\beta_1, \beta_2 \dots \beta_n$, 则比表面 S_1 为:

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

$$\text{按表 1-8, } \frac{\beta_1}{D_1} + \frac{\beta_2}{D_2} + \dots + \frac{\beta_n}{D_n} = \sum_{i=1}^n \frac{\beta_i}{D_i} = \frac{100}{\bar{D}}$$

式中 $\bar{D}$ ——颗粒群的调和平均粒度(即表 1-7 的 d_3)将 $\bar{D}$ 代入, 则

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

同理,令粉碎产品中名义粒度 $d_1, d_2 \dots d_n$ 的级别含量分别为 $\beta_1, \beta_2 \dots \beta_n$, 则粉碎产品的调和平均粒度 $\bar{d}$ 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(式(1-6), 粉碎单位质量物料的能耗 A 等于

$$\begin{aligned} A &= K_1 \Delta S \\ &= K_1 (S_2 - S_1) \\ &= \frac{K_1 K_2}{\delta} \left(\frac{1}{\bar{d}} - \frac{1}{\bar{D}} \right) \\ &= K_0 \left(\frac{1}{\bar{d}} - \frac{1}{\bar{D}} \right) \end{aligned} \quad (1-7)$$

式中 K_0 ——系数 ($K_1 K_2 / \delta$)。

实践表明, Rittinger 假说对于粉碎产品最大粒度在 0.01~1mm 的磨碎作业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 $\bar{d}$ 的能耗已知,可按式(1-7)求出系数 K_0 。已知 K_0 后,从给料粒度 $\bar{D}$ 磨碎至任何产品粒度 $\bar{d}$ 的能耗都可求出。但在实用中,由于调和平均粒度的计算较繁,常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。

(2) 体积假说

Kick 和 Кирпичев 的体积假说,认为粉碎所消耗的能量,同颗粒体积成正比,粉碎后颗粒粒度也呈正比减小。粉碎能耗同给料及粉碎产品粒度之间的关系,按体积假说推导如下:

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。设每次破碎使粒度减小一半,能耗为 A_1 , 即

$$\text{第 1 次 能耗} = A_1, \text{破碎后产品粒度} = \frac{D}{2}$$

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

⋮

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

$$n \text{ 次破碎的总能耗 } A = n A_1 \quad (1-8)$$

令 i 为 n 次破碎后的总粉碎比,

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

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

代入式(1-8),

$$\text{能耗 } A = n A_1 = \frac{\lg i}{\lg 2} A_1 = K \lg \frac{D}{\bar{d}} \quad (1-9)$$

式中 K 为常数 ($= A_1 / \lg 2$)

设破碎产品在粒度 $d_1, d_2 \dots d_n$ 的粒级含量分别为 $\beta_1, \beta_2 \dots \beta_n$, 其平均粒度 $\bar{d}$ 可按下式求出:

$$\begin{aligned} 100 \lg \bar{d} &= \beta_1 \lg d_1 + \beta_2 \lg d_2 + \dots + \beta_n \lg d_n \\ &= \sum_{i=1}^n \beta_i \lg d_i \end{aligned}$$

按表 1-7, $\bar{d}$ 是粉碎产品的几何平均粒度,因此,以给料和破碎产品的几何平均粒度代入式(1-9),得出破碎能耗 A :

$$A = K \lg \frac{\bar{D}}{\bar{d}} \quad (1-10)$$

当粉碎产品的粒度大于 10mm (粗碎和中碎) 时,粉碎能耗可用式(1-10)来计算。这时,由于粉碎产品的粒度较大,颗粒表面积增加不显著,从而表面能及表面和颗粒内部结构变化等消耗的能较少,局部破碎作用也是次