

# 水泥生产机械设备

武汉建筑材料工业学院 同济大学 编  
南京化工学院 华南工学院



高等学校试用教材

中国建筑工业出版社

高等学校试用教材

# 水泥生产机械设备

武汉建筑材料工业学院 同济大学  
南京化工学院 华南工学院 编

中国建筑工业出版社

本书专论水泥生产过程中所用的机械设备,包括有:破碎机械;粉磨机械;烧成机械;颗粒流体力学及设备;起重运输机械;加料与包装机械等。书中着重介绍了机械设备的类型、主要构造、工作原理、性能、应用以及主要工作参数的确定。

本书是为高等工科院校水泥工艺专业编写的试用教材,也可供科研、设计、生产部门的有关技术人员参考。

高等学校试用教材

### 水泥生产机械设备

武汉建筑材料工业学院 同济大学 编  
南京化工学院 华南工学院

\*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

\*

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 26<sup>1</sup>/<sub>4</sub> 插页: 1 字数: 634千字

1981年9月第一版 1981年9月第一次印刷

印数: 1—7,910册 定价: 2.70元

统一书号: 15040·4150



## 前 言

水泥生产机械设备是生产水泥的重要工具，是提高劳动生产率、降低水泥成本、减轻劳动强度的重要手段。因此，研究水泥生产机械设备是研究水泥生产的一个重要方面。

本课程是高等工科院校水泥工艺专业的重要专业课。该课程的任务是使学生具有对水泥生产机械设备选型和一般技术革新的能力，以及科学研究的初步知识。因此，书中着重介绍水泥生产机械设备的类型、主要构造、工作原理、性能、应用及主要工作参数的确定。

根据水泥工艺专业教材编写会议的要求，将粉磨工艺编在本书内，熟料烧成机械中有关工艺及热工内容编在《硅酸盐工业热工过程及设备》（下册）内。

本书编写分工是：华南工学院张庆今 第一篇及附录，武汉建筑材料工业学院潘孝良 第二、三篇，南京化工学院潘新章 第四篇，同济大学陆厚根 第五、六篇。全书由潘孝良主编。

此书由杨志谦主审，参加审稿的还有初徽、王绍兴、丁长白、董宽良、朱崑泉、杨家柱。审稿同志提出了许多宝贵意见，许多单位和个人提供了大量资料，在此一并表示衷心地感谢。

由于我们水平所限，时间仓促，书中可能有许多缺点和不妥之处。恳切希望读者批评指正。

编 者

1979年6月18日

## 第一篇 破 碎 机 械

|                       |                               |
|-----------------------|-------------------------------|
| 第一章 概论.....1          | 第四章 辊式破碎机.....37              |
| § 1 几个基本概念.....1      | § 1 双辊破碎机工作原理、构造、性能及应用.....37 |
| 一、粉碎.....1            | § 2 双辊破碎机工作参数的确定.....40       |
| 二、粉碎比.....1           | 一、钳角.....40                   |
| 三、粒径表示方法.....2        | 二、辊子转速.....41                 |
| 四、物料的易碎性.....3        | 三、生产能力.....41                 |
| 五、粉碎产品的粒度特性.....4     | 四、功率.....42                   |
| 六、破碎系统.....4          | § 3 单辊破碎机.....43              |
| § 2 粉碎理论.....6        | 第五章 锤式破碎机.....44              |
| 一、表面积假说.....6         | § 1 工作原理及类型.....44            |
| 二、体积假说.....7          | § 2 构造、性能及应用.....44           |
| 三、裂纹理论.....9          | 一、单转子锤式破碎机.....44             |
| § 3 粉碎方法及破碎机分类.....11 | 二、双转子锤式破碎机.....45             |
| 第二章 颚式破碎机.....12      | 三、粉碎粘湿物料的锤式破碎机.....46         |
| § 1 工作原理及类型.....12    | 四、锤子和转子.....46                |
| § 2 构造、性能及应用.....14   | 五、性能及应用.....47                |
| 一、简摆颚式破碎机.....14      | § 3 工作参数的确定.....49            |
| 二、复摆颚式破碎机.....15      | 一、转子转速.....49                 |
| 三、液压颚式破碎机.....15      | 二、功率.....49                   |
| 四、主要工作部件.....16       | 三、生产能力.....50                 |
| 五、性能及应用.....19        | 第六章 反击式破碎机.....51             |
| § 3 工作参数的确定.....20    | § 1 工作原理及类型.....51            |
| 一、钳角.....20           | § 2 构造、性能及应用.....54           |
| 二、偏心轴的转速.....21       | 一、单转子反击式破碎机.....54            |
| 三、生产能力.....22         | 二、双转子反击式破碎机.....55            |
| 四、功率.....23           | 三、反击-锤式破碎机.....58             |
| 第三章 圆锥破碎机.....26      | 四、烘干反击式破碎机.....59             |
| § 1 工作原理及类型.....26    | 五、反击装置和转子.....60              |
| § 2 粗碎圆锥破碎机.....27    | 六、性能及应用.....63                |
| 一、旋回破碎机的构造.....27     | § 3 工作参数的确定.....63            |
| 二、工作参数的确定.....29      | 一、转子的直径与长度.....63             |
| 三、性能及应用.....30        | 二、转子转速.....64                 |
| § 3 中细碎圆锥破碎机.....31   | 三、板锤数目.....65                 |
| 一、构造.....31           | 四、生产能力.....66                 |
| 二、工作参数的确定.....33      | 五、功率.....66                   |
| 三、性能及应用.....36        | 主要参考资料.....67                 |
| § 4 颚旋式破碎机.....37     |                               |

## 第二篇 粉 磨 机 械

|                |               |
|----------------|---------------|
| 第一章 球磨机.....68 | § 1 概述.....68 |
|----------------|---------------|

|                              |     |                  |     |
|------------------------------|-----|------------------|-----|
| 一、特点                         | 68  | 三、煤的粉磨目的和细度要求    | 108 |
| 二、类型                         | 69  | § 2 粉磨作业的基本流程    | 108 |
| 三、研磨体粉碎物料的基本作用               | 69  | 一、基本概念           | 108 |
| § 2 构造                       | 70  | 二、开路与闭路系统的比较     | 110 |
| 一、构造概述                       | 70  | 三、生料和水泥的粉磨系统     | 110 |
| 二、筒体                         | 75  | § 3 粉磨速度方程       | 114 |
| 三、衬板                         | 76  | § 4 粉磨产品的颗粒分布    | 117 |
| 四、隔仓板                        | 81  | § 5 影响磨机产质量的主要因素 | 118 |
| 五、主轴承                        | 86  | 一、入磨物料的物理化学性质    | 118 |
| 六、进、出料装置                     | 87  | 二、助磨剂            | 121 |
| 七、传动系统                       | 89  | 三、粉磨产品的细度        | 122 |
| § 3 研磨体运动分析                  | 93  | 四、设备及流程          | 123 |
| 一、研磨体运动的基本方程式                | 93  | 五、研磨体            | 124 |
| 二、研磨体运动的脱离点轨迹 $\widehat{AC}$ | 94  | 六、干法磨机通风         | 129 |
| 三、研磨体运动降落点轨迹 $\widehat{DB}$  | 95  | 七、干法磨水冷却         | 130 |
| 四、研磨体最内层轨迹 $\widehat{CD}$    | 96  | 八、磨机的操作          | 131 |
| 五、研磨体在磨机筒体横断面<br>上的分布        | 96  | 第三章 其他粉磨机械       | 132 |
| § 4 磨机主要参数的确定                | 97  | § 1 无介质磨         | 132 |
| 一、磨机转速                       | 97  | § 2 碾磨机          | 135 |
| 二、磨机的功率计算                    | 100 | 一、碾磨机的类型、构造与工作原理 | 135 |
| 三、磨机产量计算                     | 105 | 二、碾磨机的应用、流程及优缺点  | 140 |
| 第二章 粉磨工艺                     | 107 | § 3 粉磨机械的发展概况    | 141 |
| § 1 物料粉磨的目的和细度要求             | 107 | 一、磨机的规格和类型       | 141 |
| 一、生料的粉磨目的和细度要求               | 107 | 二、衬板的结构和材料       | 142 |
| 二、熟料的粉磨目的和水泥的细<br>度要求        | 107 | 三、研磨介质           | 143 |
|                              |     | 四、磨机传动方式         | 143 |
|                              |     | 主要参考资料           | 144 |

### 第三篇 烧 成 机 械

|              |     |                     |     |
|--------------|-----|---------------------|-----|
| 第一章 回转窑的类型   | 145 | § 4 窑外分解窑           | 157 |
| § 1 湿法长窑     | 145 | 一、工艺流程              | 157 |
| 一、构造概述       | 145 | 二、分解炉的工作原理与结构<br>概述 | 157 |
| 二、窑内热交换装置    | 146 | 三、热工管道的保温隔热与<br>热补偿 | 159 |
| 三、优缺点        | 148 | 四、优缺点               | 160 |
| § 2 立波窑      | 149 | 第二章 回转窑的结构          | 160 |
| 一、构造及工作原理    | 149 | § 1 筒体              | 160 |
| 二、加热机的构造     | 150 | 一、筒体形状              | 161 |
| 三、加热机需用功率的计算 | 153 | 二、筒体的材质与厚度          | 161 |
| 四、操作注意事项及优缺点 | 154 | 三、筒体的热变形及其影响因素      | 161 |
| § 3 悬浮预热窑    | 154 | 四、筒体弯曲              | 162 |
| 一、旋风预热窑      | 154 |                     |     |
| 二、立筒预热窑      | 157 |                     |     |

|                      |     |                    |     |
|----------------------|-----|--------------------|-----|
| 五、加固圈 .....          | 163 | § 3 其他冷却机 .....    | 201 |
| 六、筒体上的开孔 .....       | 163 | 一、立筒式冷却机 .....     | 201 |
| § 2 支承装置 .....       | 164 | 二、重力式冷却机 .....     | 202 |
| 一、轮带 .....           | 164 | 第四章 机械立窑 .....     | 202 |
| 二、托轮组 .....          | 166 | § 1 概述 .....       | 202 |
| 三、挡轮组 .....          | 168 | 一、立窑的煅燃方法 .....    | 204 |
| § 3 传动装置 .....       | 172 | 二、窑体结构 .....       | 204 |
| 一、传动系统类型 .....       | 172 | 三、烟囱 .....         | 205 |
| 二、大齿轮的安装方式 .....     | 174 | § 2 加料装置 .....     | 205 |
| 三、回转窑需用功率计算 .....    | 175 | § 3 卸料装置 .....     | 207 |
| § 4 密封装置 .....       | 181 | 一、辊式卸料篦子 .....     | 207 |
| 一、密封装置的作用及其要求 .....  | 181 | 二、塔式卸料篦子 .....     | 209 |
| 二、密封装置的结构 .....      | 182 | 三、盘式卸料篦子 .....     | 209 |
| § 5 窑体窜动及其调整 .....   | 184 | 四、往复卸料篦子 .....     | 210 |
| 一、回转窑筒体轴向窜动的原因 ..... | 184 | § 4 卸料密封装置 .....   | 210 |
| 二、窑体窜动的调整 .....      | 187 | 一、三道闸门卸料密封装置 ..... | 211 |
| 第三章 冷却机 .....        | 189 | 二、轮式卸料机 .....      | 212 |
| § 1 筒式冷却机 .....      | 189 | 三、料封卸料装置 .....     | 212 |
| 一、单筒冷却机 .....        | 189 | § 5 成球盘 .....      | 213 |
| 二、多筒冷却机 .....        | 190 | 一、构造 .....         | 213 |
| § 2 篦式冷却机 .....      | 192 | 二、工作原理 .....       | 214 |
| 一、推动篦式冷却机 .....      | 192 | 三、成球的工艺问题 .....    | 214 |
| 二、振动篦式冷却机 .....      | 198 | 主要参考资料 .....       | 216 |
| 三、回转篦式冷却机 .....      | 200 |                    |     |

## 第四篇 颗粒流体力学及设备

|                        |     |                         |     |
|------------------------|-----|-------------------------|-----|
| 第一章 颗粒流体力学的基本概念 .....  | 217 | § 2 离心式选粉机(内部循环式) ..... | 234 |
| § 1 颗粒状物料的基本性质 .....   | 217 | 一、构造 .....              | 234 |
| 一、粒径 .....             | 217 | 二、工作原理 .....            | 234 |
| 二、颗粒形状 .....           | 219 | 三、主要参数的确定 .....         | 235 |
| 三、粒度分布 .....           | 220 | § 3 旋风式选粉机 .....        | 237 |
| 四、粒群堆积状态 .....         | 222 | § 4 其他分级设备 .....        | 238 |
| § 2 颗粒沉降速度的概念和计算 ..... | 224 | 一、弧形筛 .....             | 238 |
| 一、沉降原理与沉降速度计           |     | 二、新型选粉机简介 .....         | 239 |
| 算公式 .....              | 225 | 第三章 收尘设备 .....          | 241 |
| 二、阻力系数 .....           | 227 | § 1 收尘效率与收尘器分类 .....    | 241 |
| 三、沉降速度的求法 .....        | 228 | 一、收尘效率 .....            | 241 |
| 四、沉降速度的讨论 .....        | 229 | 二、收尘设备分类 .....          | 243 |
| 第二章 流体分级设备 .....       | 232 | § 2 降尘室(烟室) .....       | 244 |
| § 1 粗分级机的构造与工作原理 ..... | 233 | § 3 旋风收尘器 .....         | 245 |
| 一、构造 .....             | 233 | 一、工作原理 .....            | 245 |
| 二、工作原理 .....           | 233 | 二、类型、特性和应用 .....        | 247 |

|                  |     |                           |     |
|------------------|-----|---------------------------|-----|
| 三、工作性能的影响因素      | 257 | 二、流态化主要参数计算               | 293 |
| 四、主要工作参数与选型计算    | 259 | § 2 气力输送系统与装置的类型          | 300 |
| § 4 袋式收尘器        | 264 | § 3 空气输送斜槽                | 301 |
| 一、概述             | 264 | 一、构造及工作原理                 | 301 |
| 二、过滤收尘原理         | 265 | 二、应用与特性                   | 302 |
| 三、过滤阻力           | 265 | 三、主要参数的选择与计算              | 302 |
| 四、纤维层收尘效率        | 266 | § 4 螺旋式气力输送泵              | 304 |
| 五、滤布材料           | 267 | § 5 仓式气力输送泵的类型、构造、性能和参数计算 | 305 |
| 六、清灰方式           | 268 | § 6 气力提升泵的构造、性能和主要参数      | 308 |
| 七、使用要点           | 268 | § 7 喷射泵的构造、性能与应用          | 310 |
| 八、常用的各类袋式收尘器     | 269 | § 8 柱塞式气力输送装置的构造与系统性能     | 310 |
| 九、袋式收尘器的选型计算     | 272 | § 9 管道、弯管和专用阀门            | 312 |
| § 5 电收尘器         | 273 | 一、选用和设计气力输送管路的注意点         | 312 |
| 一、工作原理、构造与类型     | 273 | 二、管道                      | 312 |
| 二、主要参数的计算与选型     | 276 | 三、弯管                      | 312 |
| 三、影响操作的因素        | 280 | 四、阀门                      | 313 |
| 四、新型电收尘器         | 281 | § 10 气力输送系统的设计计算          | 313 |
| § 6 其他收尘器        | 282 | 一、空气消耗量的确定                | 313 |
| 一、颗粒层收尘器         | 282 | 二、输送管道直径的确定               | 313 |
| 二、超声收尘器          | 283 | 三、总压力损失计算                 | 314 |
| § 7 收尘系统及其设计计算   | 284 | 四、长距离气力输送                 | 318 |
| 一、收尘系统选择         | 284 | 主要参考资料                    | 321 |
| 二、收尘器选型          | 285 |                           |     |
| 三、吸尘罩与风管设计       | 286 |                           |     |
| 第四章 气力输送         | 291 |                           |     |
| § 1 流态化技术的基本原理   | 291 |                           |     |
| 一、气(液)固系统流态化状态分析 | 291 |                           |     |

## 第五篇 起重运输机械

|                   |     |                 |     |
|-------------------|-----|-----------------|-----|
| 第一章 抓斗桥式起重机       | 323 | 一、输送能力的计算       | 344 |
| § 1 抓斗桥式起重机的构造    | 324 | 二、输送带宽度的计算      | 347 |
| 一、桥架及其运行机构        | 324 | 三、张力和功率的计算      | 348 |
| 二、抓斗取货机构和卷扬机构(小车) | 325 | 四、拉紧装置计算        | 351 |
| § 2 抓斗桥式起重机的选型    | 327 | 五、其它参数的计算       | 351 |
| 一、选型注意事项          | 328 | § 3 夹钢绳芯胶带输送机   | 354 |
| 二、选型计算            | 328 | 第三章 螺旋输送机       | 356 |
| 第二章 胶带输送机         | 333 | § 1 螺旋输送机的构造及应用 | 356 |
| § 1 胶带输送机的构造及应用   | 333 | 一、构造            | 356 |
| 一、构造              | 333 | 二、应用            | 359 |
| 二、应用范围            | 342 | § 2 螺旋输送机的选型计算  | 360 |
| § 2 胶带输送机的选型计算    | 344 | 一、输送能力的计算       | 360 |
|                   |     | 二、螺旋轴的极限转数      | 361 |



|                        |     |                        |     |
|------------------------|-----|------------------------|-----|
| 三、螺旋直径的确定 .....        | 361 | 第五章 埋刮板输送机 .....       | 374 |
| 四、功率计算 .....           | 362 | § 1 埋刮板输送机的构造及性能 ..... | 375 |
| 第四章 斗式提升机 .....        | 364 | 一、输送原理 .....           | 375 |
| § 1 斗式提升机的构造及性能 .....  | 364 | 二、性能 .....             | 375 |
| 一、构造 .....             | 364 | 三、构造 .....             | 375 |
| 二、类型及性能 .....          | 369 | 第六章 装卸机械 .....         | 382 |
| § 2 斗式提升机的选型计算 .....   | 371 | § 1 抓斗门式起重机 .....      | 382 |
| 一、输送能力的计算 .....        | 371 | § 2 卸车机 .....          | 382 |
| 二、料斗的选择 .....          | 371 | § 3 单斗装载机 .....        | 383 |
| 三、运动阻力和驱动功率 .....      | 372 | § 4 机械落包胶带装车机 .....    | 384 |
| § 3 大型斗式提升机的发展概况 ..... | 374 | 主要参考资料 .....           | 385 |

## 第六篇 加料与包装机械

|                     |     |                     |     |
|---------------------|-----|---------------------|-----|
| 第一章 加料机 .....       | 387 | 二、构造及类型 .....       | 402 |
| § 1 概述 .....        | 387 | 第二章 包装机 .....       | 402 |
| § 2 电磁振动加料机 .....   | 390 | § 1 概述 .....        | 402 |
| 一、构造 .....          | 390 | 一、水泥的装运方法 .....     | 402 |
| 二、工作原理 .....        | 391 | 二、包装机的种类及其性能 .....  | 403 |
| 三、运动学参数的选择与计算 ..... | 394 | § 2 固定式包装机 .....    | 404 |
| 四、调整与调谐 .....       | 400 | § 3 固定式包装机的改进 ..... | 407 |
| § 3 圆盘加料机 .....     | 400 | § 4 回转式包装机 .....    | 408 |
| 一、工作原理 .....        | 401 | 主要参考资料 .....        | 409 |

# 第一篇 破碎机械

## 第一章 概 论

### § 1 几个基本概念

#### 一、粉碎

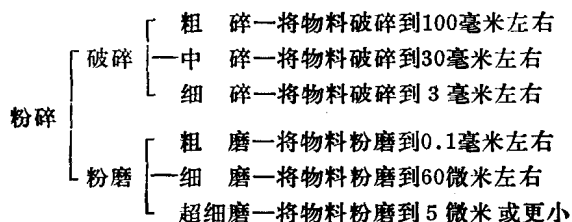
固体物料在外力作用下,克服了内聚力,使固体物料破碎的过程,称为粉碎。

施加外力的方法可用人力,机械力、电力或是采用爆破等方法。矿山采石多数采用爆破方法,而将大的块粒物料碎裂为小块粒多数采用机械方法。

随着粉碎的进行,物料的总表面积在不断地增加。因此,固体物料碎裂成小块或细粉之后,可以提高物理及化学作用的反应速度。此外,几种不同固体物料的混合,也必须在细粉状态下才能得到均匀的效果。

在水泥厂中,数量很大的固体原料,燃料和半成品等都需要经过粉碎。每生产1吨水泥需要粉碎的物料量约4吨以上,而用于粉碎的电费占总电费的70%左右。同时,粉碎作业情况还直接关系到产品的质量。可见,粉碎是很重要的操作过程。

输入工厂的原料有细至粉末,大至超过1米以上的料块。工厂中原料或半成品必须经过各种不同程度的粉碎,使其块度达到各工序所要求的大小,以便于操作加工。因处理物料尺寸大小的不同,可将粉碎分为破碎和粉磨两个阶段。将大块物料碎裂成小块的过程称为破碎;将小块物料碎裂为细末的过程称为粉磨。为了更明确起见,通常按以下方法加以进一步划分:



#### 二、粉碎比

原来尺寸为 $D$ 的物料,经过某台粉碎机械粉碎后尺寸变为 $d$ ,把 $D/d = i$ 称为物料的粉碎比。对破碎而言,称为破碎比。近来也有把粉碎比与产量的乘积称作质量系数,把它作为对破碎机技术评价和对比的指标之一。

粉碎机械工作的基本技术经济指标是单位电耗(单位质量粉碎产品的能量消耗)和粉碎比。

单位电耗用以判别粉碎机械的动力消耗是否经济;粉碎比用来说明粉碎过程的特征及

鉴定粉碎质量。两台粉碎机械单位电耗即使相同，但粉碎比不同，则这两台粉碎机械的经济效果还是不一样的。一般说来，粉碎比大的机械工作得较好。因此，要鉴定一台粉碎机械的好坏，应同时考虑其单位电耗及粉碎比的大小。

通常所说的粉碎比系指平均粉碎比，即粉碎前后物料的平均直径比值，它主要用来表明物料粉碎前后粒度变化的程度，并能近似地反映出机械的作业情况。另外，为了简易地表示和比较各种破碎机械的这一主要特征，也可用破碎机的最大进料口宽度与最大的出料口宽度之比来作为破碎比，称为公称破碎比。破碎机的平均破碎比一般都较公称破碎比低，这在破碎机选型时应特别注意。

每一种粉碎机械所能达到的粉碎比是有一定限度的。破碎机的破碎比一般约为3~100；粉磨机的粉碎比较大，可达500~1000或更大。

由于破碎机的破碎比较小，如果要求达到的破碎比超出上述范围，就得接连使用两台或更多台破碎机来进行破碎，才能达到要求值。接连使用几台破碎机的破碎过程称为多级破碎。破碎机串联的台数叫破碎级数。这时原料尺寸与最后破碎产品尺寸之比叫作总破碎比，在多级破碎时，如果各级的破碎比分别为 $i_1, i_2, \dots, i_n$ ，则总破碎比 $i_0$ ：

$$i_0 = i_1 i_2 \dots i_n \quad (1-1)$$

即总破碎比等于各级破碎比之乘积。如果已知破碎机的破碎比，即可根据总破碎比求得所需的破碎级数。

### 三、粒径表示方法

无论是原料或是粉碎产品都是由大小不同的料块或颗粒组成，粒度都不可能是均匀划一的，因此除了特别声明之外，物料直径一律要用平均直径表示。平均直径大小，又要根据各块或各颗物料的尺寸算出。虽然物料的形状是不规则的，但也可以使用“直径”一词来表示各块或各颗物料的大小。如果在三个互相垂直的方向上料块或颗粒的尺寸为 $l, b, h$ ，则其直径随条件的不同，一般可用下述任何一式确定：

$$d = \frac{l+b+h}{3} \text{ 或 } d = 3\sqrt{lbh} \quad (1-2)$$

$$d = \frac{l+b}{2} \text{ 或 } d = \sqrt{lb} \quad (1-3)$$

$$d = b \quad (1-4)$$

当料块的三个方向皆可量度时，可用式(1-2)定出物料的直径。显然，唯有大料块才能这样做。当颗粒只有两个方向可以量度，例如在显微镜下观测颗粒的大小时，就要用式(1-3)定出颗粒直径。如果颗粒只有一个方向可以量度，例如用筛析方法确定颗粒的大小时，就要用式(1-4)定出颗粒直径，也即用筛孔尺寸表示物料的尺寸。筛析方法在水泥工业用得较多。如果相邻两层筛面筛孔尺寸分别为 $b_1$ 和 $b_2$ ，则残留在这两层筛面之间的颗粒直径就应该是：

$$d = \frac{b_1+b_2}{2}, \text{ 或 } d = \sqrt{b_1 b_2}, \text{ 或 } d = \frac{b_1 b_2}{\frac{b_1+b_2}{2}} \quad (1-5)$$

这三式分别以上下两层筛面筛孔的算术、几何、调和平均值作为残留在这两层筛面之间的颗粒的直径。在标准筛序中， $b_1$ 与 $b_2$ 相差不大，这时上面三式的计算结果相差不大。

当使用筛析方法，将物料试样分成若干狭窄粒级，每一狭窄粒级的直径用式（1-5）确定，分别为 $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ …… $d_n$ ，且其相应质量分别为 $q_1$ 、 $q_2$ 、 $q_3$ …… $q_n$ 时，则物料的平均直径为：

算术平均直径

$$d_m = \frac{q_1 d_1 + q_2 d_2 + \dots + q_n d_n}{q_1 + q_2 + \dots + q_n} = \frac{\sum q d}{\sum q} \quad (1-6)$$

几何平均直径

$$d_m = \sqrt[n]{d_1^{q_1} d_2^{q_2} \dots d_n^{q_n}} \quad (1-7)$$

或两端取对数

$$\lg d_m = \frac{q_1 \lg d_1 + q_2 \lg d_2 + \dots + q_n \lg d_n}{q_1 + q_2 + \dots + q_n} = \frac{\sum q \lg d}{\sum q} \quad (1-7a)$$

调和平均直径

$$d_m = \frac{q_1 + q_2 + \dots + q_n}{q_1 \frac{1}{d_1} + q_2 \frac{1}{d_2} + \dots + q_n \frac{1}{d_n}} = \frac{\sum q}{\sum \frac{q}{d}} \quad (1-8)$$

这样利用筛析结果从式（1-6）～（1-8）可求得平均直径 $d_m$ ，计算式要视所讨论问题性质不同来选用。一般是假设有一堆球形物料与这一堆尺寸不等物料对生产过程有等效的影响，然后利用这种等效关系对比求得等值直径，即平均直径。

工业上大多用筛析法来确定物料的尺寸，因此，式（1-6）经常被用以表示物料的平均直径。但是应当指出：不管所讨论问题的性质如何，轻率使用算术平均直径来表示物料直径的作法，常会导致严重错误。

#### 四、物料的易碎性

物料粉碎的难易程度，谓之易碎性。同一粉碎机械在相同的操作条件下粉碎不同的物料时，生产能力是不同的，这说明各种物料的易碎性不同。易碎性与物料的强度、硬度、密度、结构的均匀性、含水量、粘性、裂痕、表面情况以及形状等因素有关。强度与硬度皆表示物料对外力抵抗能力，故强度和硬度都大的物料是较难粉碎的。但是硬度大的物料并不一定很难粉碎，因为物料的破碎是一块块分裂开来的，故破碎难易的决定因素是物料的强度。硬度大而强度不大（即结构松弛而性脆）的物料比之强度大而硬度小（即韧而软）的物料易于破碎。显然硬度大的物料不一定很难破碎，但是却难以粉磨，同时也使粉碎机械的工作表面容易磨损。这是因为粉磨过程与破碎过程不同，前者是工作体在物料表面不断磨削而生成大量细粉的过程，故粉磨过程中硬度比强度的影响较大。

由于物料的易碎性与许多因素有关，一般用相对易碎系数来表示物料的易碎性。某一物料的易碎系数 $K_M$ 是指采用同一台粉碎机械，同一物料尺寸变化条件下，粉碎标准物料的单位电耗 $E_0$ （千瓦·时/吨）与粉碎风干状态下同一物料的单位电耗 $E$ （千瓦·时/吨）之比，即

$$K_M = \frac{E_0}{E} \quad (1-9)$$

物料的易碎系数愈大，愈容易粉碎。水泥工业中，一般选用中等易碎性的回转窑水泥熟料作为标准物料，取其易碎系数为1。

已知某一种粉碎机械在粉碎某一种物料的生产能力 $Q$ ，利用易碎系数，就可求出这台机械在粉碎另一种物料时之生产能力 $Q_1$ ，即

$$\frac{Q_1}{Q} = \frac{K_{M1}}{K_M} \quad (1-10)$$

为了进一步比较物料粉磨的难易程度，还常以易磨性系数作为指标来表示其易磨性能。易磨系数的测定见附录。

## 五、粉碎产品的粒度特性

在水泥厂中，原料和粉碎产品都是由各种粒度的混合物料组成。为了鉴定这些混合物料的粒度分布情况，通常采用筛析方法将它们按一定的粒度范围分成若干粒级。

筛析所得数据可整理在筛析结果记录表上，用来说明物料的颗粒组成特性。为了能明显地比较物料的粒度组成情况，通常根据筛析所得数据作出物料的粒度组成特性曲线（或称筛析曲线）来表示。一般是在普通的直角坐标上绘制曲线如图1-1，用左纵坐标轴表示粗粒级的累积百分数，右纵坐标轴表示细粒级的累积百分数，横坐标轴表示料粒尺寸（或筛孔尺寸）。

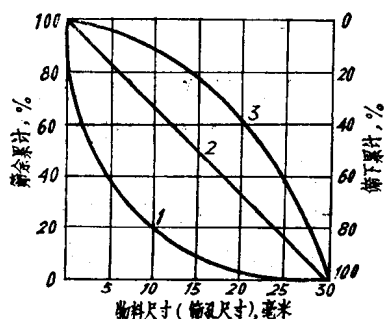


图 1-1 粒度组成特性曲线

根据筛析特性曲线可清楚地判断物料粒度分布情况。如图1-1中直线2表明此物料全部大小颗粒是均匀分布的；图1-1中凹形曲线1表明粉碎产品生成较多的细小粒级；图1-1中凸形曲线3，则表明粉碎产品中粗粒级物料占多数。另外，一般中等硬度的物料具有接近于直线的示性曲线。

作出筛析曲线，不仅可以求得筛析表中没有绘出的任意中间粒级百分数，同时还可以检查和判断粉碎机械的工作情况。为了比较依次在同一机械中

粉碎的各类物料的特性，或比较依次在不同机械中粉碎的同一物料的粒度，可将两条、三条或更多条的筛析曲线放在同一图表中，如图1-1，以便于比较研究。

用普通直角坐标绘制的筛析曲线的缺点，在于表示细粒级的一段曲线不易绘出，因为1毫米以下颗粒之间的各个间隔非常小。为了将曲线绘得更精确，必须采用较大的比例或对数坐标绘制。

## 六、破碎系统

破碎作业可以通过不同的破碎系统来完成。根据破碎的物料性质、粒度大小、要求的破碎比、生产规模以及使用的破碎机等，可能有各种不同的破碎系统。

破碎系统包括破碎级数和每级中的流程两个方面。破碎系统的级数主要决定于物料要求的破碎比与破碎机的类型。当选用一种破碎机就能满足破碎比及生产能力的要求时，采用一级破碎系统；如果需要选用两种或三种破碎机，进行几级破碎才能满足要求时，采用二级或三级破碎系统。

破碎的级数愈多，系统愈复杂，不仅设备和土建的费用投资增加，而且劳动生产率，经常维护费用高，扬尘点也多，因此应力求减少破碎的级数。但是，随着水泥厂矿山规模的扩大，破碎系统的入料粒度也增大，要求的破碎比也相应提高。为了适应破碎比提高的需要与减少破碎级数的要求，促使破碎机向大破碎比、高效能和大型化发展。近年制

造的新型锤式破碎机和反击式破碎机，其破碎比已提高到50以上，可使大型水泥厂石灰石的破碎采用一级破碎。从而简化破碎系统，节省占地面积和基建投资费用，降低电耗和生产费用。

由于破碎机的不断改进和发展，破碎系统的改进和发展就有了良好的条件。目前破碎系统不仅向减少破碎级数、简化生产流程，而且在单一工序中同时进行破碎、烘干等方向多种作业的方向发展。

至于破碎系统中每级的流程，也可以有不同的方式。破碎系统的基本流程如图 1-2 所示。图1-2 (a) 为单纯的破碎流程；图1-2 (b) 为带有预先筛分的破碎流程；图1-2(c) 为带有检查筛分的破碎流程；图1-2 (d) 为带有预先筛分与检查筛分的破碎流程。

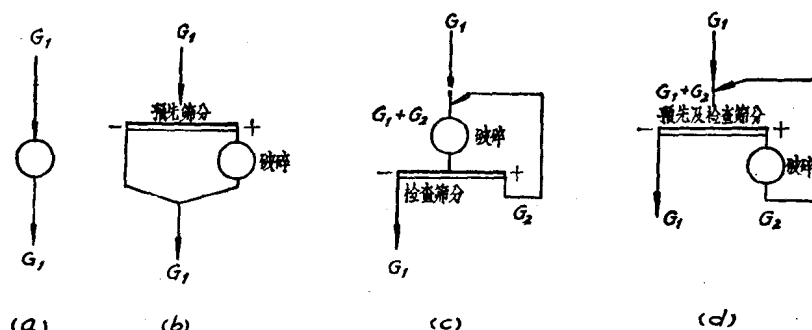


图 1-2 破碎系统的基本流程

单纯的破碎作业流程简单，设备布置与车间的建筑也相应地简化，操作控制也较为方便，但是，往往由于条件的限制，它可能没有充分发挥破碎机的生产能力，甚至有时还不能满足生产的工艺要求。

带有预先筛分的破碎流程如图 1-2 (b) 及 (d)，由于预先除去物料中不需要破碎的细粒，使破碎系统的总产量有所增加，同时也减少了动力消耗，破碎机的工作部件的磨损及粉尘的形成，这在物料的细粒含量愈多的情况下就愈有利。

至于带有检查筛分的后两种破碎流程，可以获得全部合乎要求粒度的产品，为下一阶段的粉碎作业（例如粉磨）创造有利条件。采用此种流程时，主要用于最后一级的破碎作业。

对于同一破碎机就生产能力而言，第三种流程较前面两种为低。至于第四种流程，则应视具体情况而定，在一般情况下比第一种流程略低。但原料及破碎后产品如颗粒含量很大时，则反而会比第一种流程高。

在布置上，第三、四种流程比较复杂，建筑投资较大，操作管理也比较麻烦。因此，第三种流程实际上极少采用。第四种流程往往由于必需的工艺要求才能采用，而且只用于多级破碎系统中的最后一级。

凡是不带筛分或仅有预先筛分的破碎流程，从破碎机卸出的物料全部作为产品，不再经破碎机循环，称为开路（或开流）流程如图 1-2 中 (a) 及 (b)。凡是有检查筛分的破碎流程，从破碎机卸出的物料要经过检查筛分，粒度合乎要求的颗粒作为产品，其余作为循环料重新送回破碎机，再次进行破碎，称为闭路（或圈流）流程，如图 1-2 中 (c)



及(d)。开路流程的优点是比较简单,设备少,扬尘点也比较少。缺点是当要求破碎产品粒度较小时,开路流程的破碎效率低,在用一级或二级破碎时,产品有时会含有少数大于合格产品的料块。闭路流程可以将大块筛去,保证产品粒度合格,破碎效率较开路为高。若当水泥厂的石灰石矿山与其它企业联合使用时,因不同工业对产品粒度的大小有不同的要求(如炼铁高炉需要20~50毫米的石灰石,石灰窑需要80毫米以上的石灰石等),又各需一定的数量,此时选用闭路流程较易满足这些要求。但闭路流程需要设备较多,流程较复杂。目前,我国水泥厂的石灰石破碎多数采用开路流程,有时在中碎机的入料溜子处加设倾斜的固定格筛起了一些预先筛分,减轻堵塞与磨损,提高产量等作用。

闭路流程的检查筛分,一般可设在第二级破碎机的前后,如图1-2中(c)及(d)。当第一级破碎机的出料中合格产品较少时,宜在第二级破碎后进行筛分,可采用图1-2(c)的流程;当第一级出料中合格产品较多或需供给其它企业较大粒度的产品时,则宜预先筛分,然后进行第二级破碎,可采用图1-2(d)的流程。当入筛粒度较大时,宜采用双层筛,以保护筛孔较小的下层筛网不致迅速磨损。

## § 2 粉 碎 理 论

关于确定粉碎过程所需要的能量问题是极其复杂的。因为粉碎能量的消耗与很多因素有关,譬如物料的物理机械性质、所采用的破碎方法、在粉碎瞬间各物料之间所处的相互位置、物料的形状和尺寸以及物料的湿度等等。因此,要想用一个完整的严密的数学理论来解决粉碎过程所消耗的能量是不可能的。在某些情况下,必须同时广泛地应用实际资料。

目前计算粉碎物料所需要能量的理论主要有以下三种:

### 一、表面积假说

这是雷廷智(Rittinger, P.R.)于1876年提出来的,又称雷廷智假说。其内容是:粉碎物料所需的功与粉碎过程中新增加的表面积成正比。

对于由等直径球形颗粒的物料,其单位质量所具有的表面积(比表面积)为

$$S = \frac{\pi D^2 Z}{\frac{\pi}{6} D^3 \rho Z} = \frac{6}{D \rho} \text{ (米}^2\text{/千克)} \quad (1-11)$$

式中  $D$ ——物料颗粒直径(米);

$Z$ ——1千克物料的颗粒数目;

$\rho$ ——物料密度(千克/米<sup>3</sup>)。

对于 $m$ 千克物料,粉碎前的直径为 $D$ ,比表面积为 $S_1$ ,经粉碎后直径为 $d$ ,比表面积为 $S_2$ 。在粉碎过程中物料表面积的增量为

$$\Delta S_m = (S_2 - S_1)m = \frac{6}{\rho} \left( \frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right) m \text{ (米}^2\text{)}$$

根据表面积假说粉碎功与 $\Delta S_m$ 成正比,令比例系数为 $K_s$ ,则粉碎 $m$ 千克物料所需的粉碎功为

$$A = K_s \frac{6}{\rho} \left( \frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right) m \text{ (焦)} = K_s \left( \frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right) m \text{ (焦)} \quad (1-12)$$

式中  $K_s'$  为产生 1 米<sup>2</sup> 表面积所需的功 (焦/米<sup>2</sup>)，而  $K_s = K_s' \frac{6}{\rho}$ ，其他符号意义同前所述。

上式是假定直径皆为  $D$  的球形物料，粉碎后直径仍皆为  $d$  的球形物料。但实际上并非如此。假若粉碎后经筛析得出的粉碎产品，其颗粒尺寸为  $d_i$ ，质量为  $q_i$ ，则把  $q_i$  的物料粉碎到  $d_i$  所需的功为

$$A_i = K_s \left( \frac{1}{d_i} - \frac{1}{D} \right) q_i$$

各个粒级物料粉碎功之总和等于粉碎全部物料所需的功，即

$$A = \sum A_i = \sum K_s \left( \frac{1}{d_i} - \frac{1}{D} \right) q_i \quad (\text{焦}) \quad (1-13)$$

粉碎前后物料颗粒的尺寸如用平均直径表示，并使由式 (1-12) 与式 (1-13) 计算所需要的粉碎功相同时，则

$$K_s \left( \frac{1}{d_m} - \frac{1}{D_m} \right) m = K_s \left( \frac{1}{d_i} - \frac{1}{D_m} \right) q_i$$

$$m = \sum q_i$$

于是

$$\sum \frac{q_i}{d_m} - \sum \frac{q_i}{D_m} = \sum \frac{q_i}{d_i} - \sum \frac{q_i}{D_m}$$

$$d_m = \frac{\sum q_i}{\sum \frac{q_i}{d_i}}$$

由此可见，在运用表面积假说时应该用调和平均直径来表示物料的尺寸。

## 二、体积假说

这是基克 (F. Kick) 于 1885 年提出来的，又称基克假说。其内容是：在相同技术条件下，使几何相似的同类物体的形状发生同一变化所需的功，与物料的体积或质量成正比。

根据物体受外力而引起变形的结果来看，当物体受外力后必然在内部引起应力。随着外力的增加，物体的应力及变形亦随之加大。当应力达到物料的强度限时，则外力的稍微增加即使物料破坏。对于脆性岩而言，这种应力与变形的关系，在实际运算时往往取其应力—应变图上曲线所对应的弦来表示。故可认为被粉碎物料受到外力后的变形符合直线变形法则。

假设物料沿压力的作用方向为等截面体，根据虎克定律物体的变形为

$$\Delta L = \frac{PL}{EF}$$

式中  $\Delta L$ ——物体的变形；

$P$ ——压力；

$L$ ——物体原长度；

$E$ ——物体弹性模数；

$F$ ——物体的横截面积。

物体变形所需的功为

$$A = \int_0^L Pd(\Delta L) = \int_0^P P \frac{L}{EF} dP = \frac{LP^2}{2EF}$$

而变形时所产生的应力  $\sigma$  为

$$\sigma = \frac{P}{F} \quad \text{或} \quad P = \sigma F$$

所以

$$A = \frac{\sigma^2 LF}{2E} = \frac{\sigma^2 V}{2E} \quad (1-14)$$

式中  $V$ ——变形物体的体积。

对两个几何相似，体积分别为  $V_1$  及  $V_2$  的同一种物体而言，按照式 (1-14)，粉碎时需要功之比为

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{V_1}{V_2} \quad (1-15)$$

因此，对于粉碎  $m$  千克物料所需的粉碎功可引用一比例系数  $K$  来表示，即

$$A = Km \quad (1-16)$$

于是，粉碎  $m$  千克物料，经几级粉碎后所需的功为

$$A = nKm \quad (1-17)$$

若物料粉碎前的尺寸为  $D$ ，经几级粉碎后尺寸变为  $d$ ，每级粉碎比均为  $i$ ，则总粉碎比  $i_0$  为

$$i_0 = \frac{D}{d} = i^n \quad (1-18)$$

将式 (1-18) 两端取对数，则

$$\lg i_0 = n \cdot \lg i \quad \text{或} \quad n = \frac{\lg i_0}{\lg i}$$

将  $n$  值代入 (1-17) 式得

$$A = \frac{\lg i_0}{\lg i} Km = \frac{K}{\lg i} \lg i_0 m$$

令  $\frac{K}{\lg i} = K_v$ ，则

$$A = K_v \cdot \lg i_0 \cdot m = K_v \left( \lg \frac{1}{d} - \lg \frac{1}{D} \right) m \text{ (焦)} \quad (1-19)$$

从式 (1-19) 中看出： $K_v$  值相当于粉碎单位体积（或单位质量）的物料，粉碎比为 10 时的能量消耗，它与物料的物理机械性质密切相关。

这里顺便指出：虽然公式 (1-13) 和 (1-19) 中功的单位以“焦”计，然而在工业生产中，时间和质量的单位往往分别用“小时”和“吨”来表示，因而粉碎的物料所需功的单位常用“千瓦·时/吨”表示。

当使用体积假说来计算物料的粉碎功时，应该使用几何平均直径来表示物料的尺寸。

当粉碎比小于 8 时，按体积假说计算的粉碎功较表面积假说计算出来的大。这是由于粉碎比小时，物料新表面积形成的比较少，因而，消耗在形成新表面积上的能量也少，此时能量主要消耗在物料的变形上。一般说来，利用体积假说计算破碎机的能量消耗是比较合适的。当粉碎比  $i$  继续增大时，物料形成的新表面积剧增，因而所需能量也要增大。然而按体积假说计算所需要的能量消耗却增加得不快，显然，这与实际情况是不相符合的。