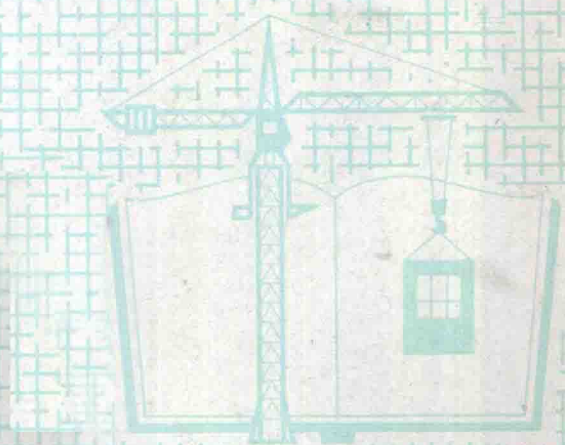


水泥工业粉磨工艺及设备

北京市建筑材料工业学校
安徽省建筑工程学校 合编
天津建筑材料工业学校



06
高等专业学校试用教材

中国建筑工业出版社

15129

TQ172.06

3

中等专业学校试用教材

水泥工业粉磨工艺及设备

北京市建筑材料工业学校

安徽省建筑工程学校 合编

天津建筑材料工业学校

中国建筑工业出版社

80/4 7/10

本书概括地介绍了水泥生产中物理过程的一些基本原理，较系统地阐述了常用的机械设备的类型、构造、工作原理及主要参数计算，对设备的使用与维护也作了简要的说明。全书包括物料的破碎、物料的粉磨、颗粒物料流体力学基本概念及分级设备、气力输送设备、除尘设备、起重运输机械和包装机械等七章。

本书除作中等专业学校水泥专业试用教材外，还可供其它专业师生、水泥工业技术人员、技工学校师生及技术工人参考。

中等专业学校试用教材
水泥工业粉磨工艺及设备
北京市建筑材料工业学校
安徽省建筑工程学校 合编
天津建筑材料工业学校

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：24½ 字数：596 千字
1981年7月第一版 1983年12月第二次印刷
印数：12,301—23,900册 定价：1.95元
统一书号：15040·4114

前 言

本书是根据1978年8月水泥工艺专业教材编写会议制定的《水泥工业粉磨工艺及设备教学大纲》编写的，经各校试用一段时间后，又根据1980年召开的审稿会议的意见进行了修改。

本课程的任务是：使学员初步掌握水泥生产中物理过程的一些基本理论与应用，以及常用机械设备的构造、工作原理、主要参数计算、分类与选型、操作维修的简要知识；与生产实习相配合，使学员进一步掌握各种设备的性能，具有正确使用、维护与管理设备的能力。

在讲授本课程时要尽量做些实物模型，进行直观教学（有条件的也可采用现场教学）；采用由个别（设备）到一般的讲法，着重讲述一般规律性的内容；有些内容可留给学员自学，有些内容则可在学员下厂劳动中讲解或指导学员阅读，以便培养学员的自学与独立思考能力。

本书基本采用国际单位制，但考虑到目前技术书籍中多数图表及数据是工程单位制，故引用时基本保留，在书末附有关于国际单位制的说明，换算简表。

本书由杨树森主编。各章编写人员及分工如下：北京市建筑材料工业学校杨树森（一、三、四、五、七章）、陶天全（第二章），安徽省建筑工程学校王占魁（第一章），天津建筑材料工业学校贺文斌（第六章）。

本书由武汉建筑材料工业学院杨志谦主审。参加审稿的还有：琉璃河水泥厂郭根信、山东建筑材料工业学院吴惠诚、洛阳建筑材料工业学校黄书谋。杨志谦副教授和郭根信工程师为本书的修改提供了部分资料，在此一并表示感谢。

编 者

1980年7月

目 录

前 言

第一章 物料的破碎	1
第一节 概述	1
一、几个基本概念	1
二、水泥生产中物料破碎的意义	3
三、物料粉碎理论	3
四、破碎方式、破碎机械与基本流程	8
第二节 颚式破碎机	10
一、颚式破碎机的结构及工作原理	10
二、颚式破碎机的主要部件	15
三、颚式破碎机的主要参数	16
四、操作与维护要点	21
第三节 锤式破碎机	22
一、锤式破碎机的构造与工作原理	22
二、锤式破碎机主要参数的确定	25
三、锤式破碎机操作维护要点	27
第四节 反击式破碎机	27
一、反击式破碎机的构造及工作原理	27
二、反击式破碎机的主要部件	31
三、反击式破碎机的主要技术参数	32
四、反击式破碎机操作与维护要点	34
第五节 辊式破碎机	35
一、辊式破碎机的构造与工作原理	35
二、辊式破碎机的主要技术参数	38
三、辊式破碎机操作与维护要点	41
第六节 圆锥式破碎机	41
一、圆锥式破碎机的构造与工作原理	41
二、圆锥式破碎机的操作维护要点	43
第七节 淘泥机	45
一、淘泥机的构造及工作原理	45
二、淘泥机的主要参数	45
三、淘泥机的操作与维护要点	47
第八节 破碎系统选择与破碎机选型	47
一、破碎系统的选择	48
二、破碎机的选型	48

第二章 物料的粉磨	51
第一节 概述	51
一、水泥生产中物料粉磨的意义	51
二、球磨机的工作原理及分类	51
三、球磨机的优缺点	52
四、水泥工业粉磨技术发展趋向	53
第二节 物料粉磨工艺流程	54
一、粉磨流程的选择	54
二、生料粉磨系统	55
三、水泥粉磨系统	56
第三节 磨机的构造	57
一、筒体	57
二、进料和卸料装置	58
三、衬板	60
四、隔仓板	65
五、主轴承	68
六、磨机传动	68
七、几种不同规格磨机的构造	71
第四节 研磨体的运动分析	76
一、研磨体脱离点轨迹	77
二、研磨体降落点轨迹	79
三、研磨体最内层轨迹	80
四、研磨体降落高度与脱离角的关系	81
五、最适宜的脱离角	82
第五节 磨机主要参数的计算	82
一、磨机的转速	82
二、磨机的功率	84
三、磨机产量的计算	87
四、磨机的通风量	90
五、磨机通风量的测量计算	91
第六节 磨机的研磨体	93
一、研磨体的种类	93
二、研磨体的填充率	94
三、研磨体的级配	96
四、研磨体填充率与级配的检验方法	97
五、研磨体的补充	100
第七节 影响粉磨过程的因素	102
一、磨机各仓的长度	102
二、入磨物料粒度	102
三、物料的易磨性	103
四、入磨物料的温度	104
五、入磨物料的水分	104

六、粉磨产品的细度	104
七、磨机通风	105
八、喂料的均匀性	105
九、选粉效率与循环负荷率	106
十、球料比	106
第八节 提高磨机产质量的途径	107
一、采用助磨剂	107
二、湿法磨采用磨尾喷浆	108
三、水泥磨磨内喷水	109
四、分别粉磨	110
五、缩小入磨物料粒度	110
六、开路系统改为闭路系统	111
七、用电耳控制磨机均匀喂料	111
第九节 磨机的操作及维修	111
一、磨机的试运转与正式投产	111
二、开车和停车	112
三、正常情况下的操作	112
四、不正常情况下的操作	113
五、磨机的保养与维修	114
第十节 其它磨机介绍	116
一、辊式磨	116
二、无介质磨	117
三、气流喷射磨	119
第十一节 磨机的喂料设备	119
一、圆盘喂料机	119
二、电磁振动喂料机	120
三、皮带喂料机	122
四、自动定量电子胶带秤	123
第十二节 粉磨车间设计的有关问题	124
一、喂料系统	124
二、磨机系统	125
三、除尘系统	125
四、粉磨车间的工艺布置	127
第三章 颗粒物料流体力学基本概念及分级设备	128
第一节 颗粒物料基本性质	128
一、颗粒物料的凝聚性	128
二、颗粒物料的湿润性	128
三、颗粒物料的荷电性	128
四、颗粒物料的燃烧爆炸性	129
五、物料的自然休止角与内摩擦角	129
六、容积密度与孔隙率	129
七、粒径大小表示法	130

八、“平均”粒径的计算	130
第二节 流体中颗粒物料的沉降	134
一、重力作用下颗粒物料的沉降速度	134
二、惯性离心力作用下的沉降速度	138
三、临界粒径	139
第三节 物料在气流中的悬浮与输送速度	140
一、颗粒物料在气流中的悬浮速度	140
二、颗粒物料在管路中的输送速度	142
三、厂区内粉尘的产生与扩散	143
第四节 粗粉分离器	145
第五节 离心式选粉机	147
一、普通型离心式选粉机	147
二、串流式高细选粉机	154
三、离心式选粉机使用与维护要点	158
第六节 旋风式选粉机	159
一、旋风式选粉机的结构与工作原理	159
二、旋风式选粉机主要参数的确定	160
三、旋风式选粉机的规格和技术性能	161
第七节 弧形筛	162
一、弧形筛的结构与工作原理	163
二、弧形筛的主要参数	164
三、弧形筛的技术经济效果	167
第四章 气力输送设备	169
第一节 流态化与气力输送基本概念	169
第二节 空气输送斜槽	171
一、空气输送斜槽的结构及工作原理	171
二、空气输送斜槽参数的选取与计算	176
三、空气输送斜槽操作注意事项	180
第三节 螺旋气力输送泵	180
一、螺旋气力输送泵的构造与工作原理	180
二、螺旋气力输送泵主要参数的确定	181
三、螺旋气力输送泵的操作	183
第四节 仓式气力输送泵	184
一、仓式气力输送泵的构造与工作原理	184
二、仓式气力输送泵主要参数的确定	188
三、仓式气力输送泵的操作	191
第五节 气力提升泵	192
一、气力提升泵的构造与工作原理	192
二、气力提升泵的主要参数	193
三、气力提升泵的性能及操作	197
第六节 脉冲栓塞式气力输送	199
第七节 输送管道与阀门	202

一、管道	202
二、气力输送用换向阀门	205
三、分离器	205
第八节 气力输送系统选型计算	207
一、料气混合比的确定	207
二、管道中平均风速的确定	207
三、压缩空气消耗量的确定	208
四、输送管道管径的确定	209
五、压缩空气工作压力的确定	209
六、长距离气力输送的设计计算	212
七、混合比定律及其应用	212
第五章 除尘设备	217
第一节 概述	217
一、除尘的重要意义	217
二、粉尘概念与除尘设备的效率	218
三、除尘设备分类及常用的除尘器	223
第二节 重力沉降室	224
第三节 旋风除尘器	226
一、旋风除尘器的工作原理	226
二、旋风除尘器的设计计算	227
三、影响旋风除尘器性能的因素	231
四、旋风除尘器的型式	233
第四节 袋式除尘器	249
一、过滤除尘原理	249
二、袋式除尘器计算	254
三、袋式除尘器的型式	256
第五节 湿式除尘器	268
一、泡沫除尘器	269
二、水浴除尘器	270
三、CLS型水膜除尘器	271
第六节 电除尘器	273
一、电除尘器的工作原理	273
二、电除尘器几个主要参数的计算	276
三、电除尘器的结构	279
四、电除尘器的选型	282
第七节 颗粒层除尘器	286
一、带梳耙旋风式单颗粒层除尘器	286
二、带梳耙旋风式双颗粒层除尘器	287
第八节 除尘系统的设计	288
一、除尘系统设计的一般要求	288
二、主要生产设备的除尘	289
三、除尘系统的计算	296

第六章 起重运输机械	301
第一节 抓斗桥式起重机	301
一、概述	301
二、抓斗桥式起重机的构造	302
三、抓斗桥式起重机的选型计算	306
第二节 胶带输送机	312
一、胶带输送机的布置形式	313
二、胶带输送机的构造及应用	313
三、胶带输送机的选型计算	321
第三节 斗式提升机	335
一、概述	335
二、水泥厂常用的斗式提升机	337
三、斗式提升机主要零部件的构造	339
四、斗式提升机的装料及卸料过程	343
五、斗式提升机的选型计算	346
第四节 螺旋输送机	351
一、螺旋输送机的构造及应用	351
二、螺旋输送机的选型计算	356
第五节 板式输送机	360
一、概述	360
二、板式输送机的零部件构造	361
三、板式输送机的选型计算	365
第六节 振动输送机	366
一、概述	366
二、振动输送机的构造及工作原理	366
三、振动输送机主要参数的计算及选择	367
四、其它一些参数的选择	368
第七章 包装机械	369
第一节 概述	369
第二节 散装水泥用库底、库侧卸料设备	371
一、库底、库侧卸料器	371
二、库底卸料机	374
三、机械卸料系统	374
第三节 包装机	374
一、固定式包装机	374
二、回转式包装机	378
三、水泥包装与叠包的联动线	379
附录 关于国际单位制的说明	383

第一章 物料的破碎

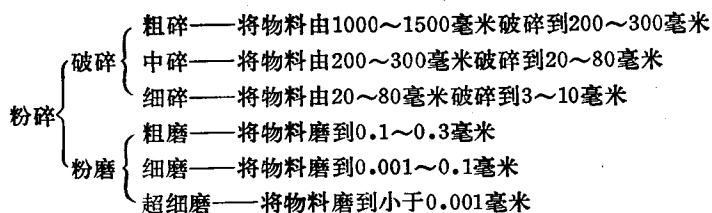
第一节 概 述

一、几个基本概念

(一) 粉碎

使固体物料在外力作用下克服内聚力而碎裂的过程称作粉碎。外力可以是人力、机械力、电力或者爆破力等。

在水泥工业中，根据固体物料粉碎后的尺寸大小不同，将粉碎分为破碎与粉磨两个阶段。将大块物料碎裂成小块物料的过程称作破碎；将小块物料磨成细粉的过程称作粉磨。通常按以下方式加以划分：



(二) 平均粉碎比

粉碎前物料的平均直径 D 与粉碎后物料的平均直径 d 的比值 i 称作平均粉碎比，即 $D/d=i$ ，一般简称粉碎比，对破碎来说，称作破碎比。它主要用来表明物料粉碎前后粒度变化程度，并能近似地反映出粉碎机械的作业情况。

为了简易地表示和比较各种破碎机的这一特性，通常用破碎机的允许最大进料粒度与最大出料粒度尺寸之比作为破碎比，称作公称破碎比。实际生产中，为了保证破碎机械正常运行，最大进料块尺寸总小于设备的允许最大进料粒度，因此破碎设备的实际破碎比都较公称破碎比低。在选择破碎机时应注意这一点。

由于各种破碎机的破碎比有一定范围，而生产过程中要求的破碎比大，就得接连使用两台或多台破碎机进行破碎。这时串联使用的破碎机数量称作破碎级数，如：两台连用，就称作二级破碎；三台连用时，称作三级破碎（或多级破碎）。这时第一级破碎的人料平均粒径与最末一级破碎的出料平均粒径之比称作总破碎比。总破碎比也可由各级破碎机的破碎比乘积来表示。即：

$$i=i_1 i_2 \cdots i_n \quad (1-1)$$

式中 i ——多级破碎系统的总破碎比；

$i_1 \cdots i_n$ ——代表各级破碎机的破碎比。

已知破碎机的破碎比和要求的总破碎比，即可由上式求得所需要的破碎级数。

(三) 平均粒径表示法

由于破碎前、后物料的形状都是不规则的，因此很难用一种方法来求算各种形状物料

的平均粒径。为了简化计算，对于能在料块三个互相垂直方向上量得尺寸的可近似地用式(1-2)求平均粒径；对于只能在两个垂直方向上量得尺寸的（如在显微镜下观测到两个互相垂直方向尺寸），可用式(1-3)求得；如果是用方孔筛测量，就以方孔边长代替平均粒径。

$$d_c = \frac{l+b+h}{3} \quad (1-2)$$

式中 d_c ——平均直径；

l, b, h ——表示在料块三个互相垂直方向上测得的尺寸。

$$d_c = \frac{l+b}{2} \quad (1-3)$$

式中 d_c ——表示平均粒径；

l, b ——表示料粒在两个互相垂直方向上测得的尺寸。

至于形状、大小不同的颗粒物料堆，其平均粒径就更难求了，对于物料的某一破碎系统来说，可用下式近似地求得：

$$d_c = \frac{G_1 d_1 + G_2 d_2 + \dots + G_n d_n}{G_1 + G_2 + \dots + G_n} \quad (1-4)$$

式中 d_c ——混合料平均粒径；

G_1, \dots, G_n ——每一部分物料的质量；

d_1, \dots, d_n ——每一部分物料的平均粒径。

(四) 物料的易碎性

物料粉碎的难易程度称作易碎性。物料的易碎性与它本身的强度、硬度、密度、结构的均匀性、粘性、裂痕、含水量以及表面形状等因素有关。

强度与硬度都表示物料对外力的抵抗能力，所以强度和硬度都大的物料比较难粉碎。但是硬度大的物料不一定难破碎；破碎的难易的决定因素是物料 的强度。硬度大而强度小，即结构松弛而脆性的物料比强度大而硬度小的韧而软的物料易于破碎。硬度大的物料不一定难破碎，但难以粉磨，同时对粉碎机械的工作表面磨蚀较大。因为粉磨过程主要是工作体对物料表面不断地磨剥而产生大量细粉的过程。所以在粉磨过程中，物料的硬度对粉磨的影响比强度对粉磨的影响大。

物料的易碎性通常用易碎性系数来表示。物料的易碎性系数，是以某标准物料的单位动力产量为基准，作相对比较得出的。可用下式表示：

$$K_m = \frac{E_b}{E} \quad (1-5)$$

式中 K_m ——物料的易碎性系数；

E_b ——某标准物料的单位电耗（千瓦·时/吨）；

E ——与标准物料粒度相同，磨至相同程度的物料的单位电耗（千瓦·时/吨）。

物料的易碎性系数愈大，就愈容易粉碎。水泥工业中一般是选用易碎性中等的回转窑熟料作为标准物料，取它的易碎性系数为 1。由于试验时选用的中等硬度的熟料是有差别的，所得出的各种物料易碎性系数就不可能是准确值，但可作为相对比较用。

对于一台粉碎机械，它在粉碎某一种物料时的生产能力是 G ，易碎性系数是 K_m ，就

可求出这台设备当粉碎易碎性系数 K'_m 的物料时的生产能力 G' ，即：

$$G' = \frac{K'_m}{K_m} \cdot G \quad (1-6)$$

应当指出，测定易碎性系数的方法不同，得到的易碎性系数值也不同。为了比较，必须采用统一的方法和相同的标准物料。

二、水泥生产中物料破碎的意义

在水泥生产过程中，大量的固体原料、燃料和半成品需要破碎，目的在于提高烘干和粉磨设备的效率，同时亦便于运输和储存。每生产1吨水泥，需要粉碎4吨以上的物料，其中约有2.5吨左右的物料需要破碎。如以生产1吨水泥的电耗为100%，那么用于破碎与粉磨物料的电耗约占70%左右。表1-1列出了生产1吨水泥电耗的大致分配情况。

生产1吨水泥时电耗的大致分配情况

表 1-1

作业项目	电能消耗 (千瓦·时/吨)	电能消耗 (%)	作业项目	电能消耗 (千瓦·时/吨)	电能消耗 (%)
原料开采	4.0	3.5	磨制水泥	38.0	34.0
原料破碎	12.0	10.5	混合材烘干	6.0	5.0
磨制生料	18.0	15.5	辅助生产车间	8.0	7.0
粉碎燃料	14.0	12.0	其它消耗	6.0	5.0
煨烧熟料	9.0	7.5	总计	115.0	100.0

由表1-1数据看出，研究降低物料粉碎的电能消耗对于降低水泥生产成本是很重要的。生产和科研实验资料指出：物料破碎得愈细，就能愈均匀地控制入磨物料，提高磨机的产质量，且破碎与粉磨的总电耗也愈小。这可由表1-2中研究资料来说明。

熟料粒度大小对破碎、磨碎总电耗及产量的影响

表 1-2

破碎后熟料粒度 (毫米)	破碎机产量		破碎机电耗		磨机产量		磨机电耗		总的电耗	
	(吨/时)	(%)	(千瓦·时/吨)	(%)	(吨/时)	(%)	(千瓦·时/吨)	(%)	(千瓦·时/吨)	(%)
25	223.75	100	—	—	26	100	29	100	29	100
8	70.00	30	1.1	100	28.6	110	26	90	27.1	93
2	17.00	8	4.4	400	31.2	120	23	80	27.4	94

三、物料粉碎理论

粉碎理论主要是研究物料粉碎过程中能量消耗问题。因为物料粉碎过程中消耗的能量与很多因素有关，如：物料的物理力学性质、几何形状、粒度大小及其分布规律，采用的破碎方法，粉碎时各物料间的相对位置等等。所以想建立一个严密完整的数学解析式来求解粉碎物料消耗的能量是很困难的。下面介绍的粉碎理论，是不完备的，在某些情况下必须同时应用一些实际资料作为参考。

(一) 物料粉碎原理

选取两块性质与外形相同的物料，当用一定大小的力打击其中的一块时，物料将碎裂成一部分大颗粒和较多的小颗粒，还有一定数量的中间颗粒。而对另一块物料则加大打击能量，碎裂后较大颗粒的粒径减小，颗粒数增多；小颗粒的数目增加很多，但粒度变化不

大。这说明粉碎与物料的内部结构及受到的外力具体情况有密切关系。还可以用海武德（H. Heywood）在小磨机中研磨煤的一系列实验来说明，实验结果如图1-1所示。其中产品颗粒粒度分布是以磨机转数的函数表示的。当磨机转数一定时，粒度分布情况是以粒径变化1微米时该粒径所占的质量百分比来表示的。

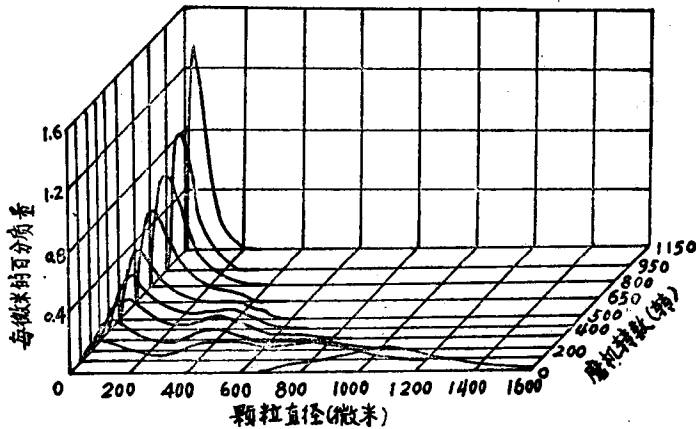


图 1-1 研磨的次数对物料粒度分布的影响

图 1-1 中，刚喂入磨机时煤的粒度分布是个单峰型，它表明1000微米左右的粒子占的质量百分比较大。当磨开始运转后，随着粉碎程度逐渐增加，这个峰型逐渐向粒度减小的方向移动，且峰值逐渐减小，同时在一特定的粒度区域内产生了第二个峰型。随着第一个峰型逐渐消失，第二个峰型的一定粒度范围的质量百分比值增加很快。这个实验表明了，在一定条件下粉碎所需的能量与该物料的内部结构有关。由于粉碎一定量细物料时它的表面积增加值远较粉碎粗物料大，因此细磨时就需要很大的能量。

从能量有效利用程度来看，粉碎是一个效率很低的过程。对于破碎机械来说，有效系数一般在0.2~0.4范围内，而粉磨机械一般在0.05~0.15范围内。所加的负荷方式和量值大小对粉碎过程效率影响很大。对物料所产生作用力的性质也很重要，看它主要产生的是压缩力，还是冲击力，或剪切力。假如对物料施加的是压缩力，且没有超过它的弹性限度，在负荷解除后物料又恢复原来状态，则施加的力没有作有用功，消耗的能量以热能（或声）的形式表现出来。但是当施加给物料的力稍微大于物料的耐压强度极限时，物料就被破碎。由于物料一般都不是规则形状的，内部结构也是不均匀的，有缺陷和裂纹，因此施加的力首先作用在接触面（或点）上，使局部产生很大的应力和较高的温度。对均质物料来说，接触部位先破碎；对非均质物料来说，外力超过最薄弱缺陷处的极限强度时，就产生裂纹，由此而使其周围发生形变，裂纹迅速扩大最后破裂。施加力的速率也很重要，因为在达到最大负荷与开始破碎之间有一段持续时间，因此在保持施加力有充分的作用时间的前提下，只需稍加较小的力就可以使物料破碎。施加力的速率愈大，能量利用效率愈低，因为产生了过多的超过要求的细物料。

（二）粉碎物料的能量

准确地估计粉碎某一种物料需要的能量是不可能的，从不同角度提出的以实验为基础的理论，常被引用的有“表面积假说”、“体积假说”和“裂纹理论”。

1. 表面积假说

粉碎过程所消耗的功，与被粉碎物料新增加的表面积成正比。粉碎 1 千克物料所需的能量，可由下式表示：

$$N = 294 \cdot \frac{A_1 K}{\gamma} \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right) \quad (\text{千焦/千克力})$$

$$= 0.0816 \cdot \frac{A_1 K}{\gamma} \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right) \quad (\text{千瓦·时/千克力}) \quad (1-7)$$

式中 A_1 ——粉碎时每产生单位破碎面消耗的粉碎功(千克力·厘米/厘米²)；

γ ——物料的重度(千克力/米³)；

d ——粉碎后物料粒径(厘米)；

D ——粉碎前物料粒径(厘米)；

K ——物料颗粒不规则形状修正系数，它与物料的物理性质和粉碎方法有关，根据实验 K 值为 1.2~1.7。

表面积假说主要是从粉碎物料新生成表面的多少来推导能量消耗量的，它忽略了被粉碎物料的内部结构及物理力学性质，因此它对于近似均质、各向同性物料的粉磨过程比较适用。这可由表 1-3 中实验资料来说明。然而大多数矿石都是非均质各向异性的，它们的晶体结构等特性又是各种各样的，所以这时用表面积假说来确定粉碎所消耗的能量是不可能准确的。另外，由于测定粉碎后物料新生成的表面积比较困难，文献资料中介绍的测定物料表面积方法，均为测定相对的比表面积值，并且各种测法得到的结果又相差较大，因此表面积假说在实际应用中受到了限制。

在球磨机中粉碎水泥熟料的能耗实验

表 1-3

研磨时间 (分)	单位电能消耗 $\frac{N}{N}$ (千瓦·时/吨)	物料的比表面积 $\frac{S}{S}$ (厘米 ² /克)
10.4	4.8	510
20.8	9.7	1060
31.2	14.6	1570
41.6	19.4	2080
52.0	24.2	2520
72.7	34.1	3200

根据上述资料，任取两组数据相比，可看出表面积假说的适用性。比如：

$$\frac{N_3}{N_1} \approx \frac{S_3}{S_1}; \quad \frac{14.6}{4.8} \approx \frac{1570}{510} \approx 3$$

2. 体积假说

在相同的技术条件下，使几何体相似的同类物料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。

当物体受外力时，必然在内部产生应力。随着外力的增加，物体的应力及变形随着加大，应力达到物料的强度极限时，外力稍微增加就能使物料发生破坏。对于脆性物料来说，这种应力与变形的关系，在实际运算中往往取它的应力——应变图上曲线所对应的弦来表示。这是假定被破碎物料受到外力后的变形符合直线变形原则。故可导出粉碎功与体积成比例的表达式。

设物料沿压力的作用方向为等截面体，根据虎克定律可推导出物体变形所需功为：

$$A = \frac{\sigma^2 V}{2E} \quad (1-8)$$

式中 A ——物体变形所需功；
 σ ——物体变形时产生的应力；
 E ——物体的弹性模数；
 V ——变形物体的体积。

取几何体相似的 V_1 、 V_2 两块物料，它们的粉碎功之比为：

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{\frac{\sigma^2 V_1}{2E}}{\frac{\sigma^2 V_2}{2E}} = \frac{V_1}{V_2} \quad (1-9)$$

当我们把 V_1 、 V_2 看作是两个边长为 l_1 、 l_2 的立方体体积时，则：

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{l_1^3}{l_2^3} \quad (1-10)$$

这就是体积假说的另一表达式：粉碎物料所需的功与被粉碎物料的线性长度的立方成比例。

根据粉碎功与粉碎物料质量成比例的关系，又可推出另一表达式。对于粉碎 m 千克物料所需的粉碎功，可引用一个比例系数 K 建立下式：

$$A = Km$$

当被粉碎的 m 千克物料经 n 次粉碎，则所需功为：

$$A = nKm$$

物料粉碎前的尺寸为 D ，经 n 次粉碎后尺寸变为 d ，每一级的粉碎比均为 i_1 ，则总粉碎比 i 为：

$$i = \frac{D}{d} = i_1^n$$

将上式两端取对数得：

$$\lg i = n \cdot \lg i_1, \quad n = \frac{\lg i}{\lg i_1}$$

故：

$$A = n \cdot Km = \frac{\lg i}{\lg i_1} Km$$

令 $\frac{K}{\lg i_1} = K_v$ ，则：

$$\begin{aligned} A &= K_v \lg i m = K_v \left(\lg \frac{D}{d} \right) m = K_v \left(\lg \frac{1}{\frac{d}{D}} \right) m \\ &= K_v \left(\lg \frac{1}{d} - \lg \frac{1}{D} \right) m \end{aligned} \quad (1-11)$$

从式(1-11)中看出， K_v 值相当于粉碎单位质量(或单位体积)物料，粉碎比为10的能量消耗。它与物料的物理机械性质密切相关。

当使用体积假说计算物料的粉碎功时，应当用几何平均直径来表示物料的尺寸。

当粉碎比 $i < 8$ 时，按体积假说计算的粉碎功比用表面积假说计算出来的数值大。这是因为粉碎比小时，产生的新表面积比较少，消耗在形成新表面上的能量就少，这时能量主要消耗在物料的变形上。当粉碎比 i 继续增大时，形成的新表面积也急剧增加，因而需

要的能量也随之增大。这时按体积假说计算出的功耗比较低，与实际情况相差较大；而用表面积假说计算功耗比体积假说要较为接近实际一些。因此在有些著作中，当研究破碎比 $i < 8$ 的破碎过程时，应用体积假说估算功耗，而对粉碎比 i 很高的粉磨过程来说，常用表面积假说来估算功耗。

应当指出，上述粉碎功的计算式，是依据虎克定律建立起来的，而公式(1-8)只有在不超过该物料的弹性限度的应力下才适用。显然，对于粉碎来说，不仅应当超过应力 σ ，而且应超过物料的强度极限后才能破裂，因此用它来推导公式计算破碎功就不十分严格。虽然在计算中 σ 用物料的强度极限值代替，但由于物料的强度在各个方向上不可能相同，确定物料的抗压强度极限值和选取弹性模数 E 时必然产生误差，因而使用体积假说计算物料破碎功时，也只能得出近似的结果。

3. 裂纹理论（又名邦德理论）

这个理论是邦德（F.C.Bond）在他提出的邦德第一原理和第二原理基础上建立起来的，于1951年^①正式发表。当时为与表面积假说、体积假说相区别，称作物料粉碎第三假说，现在广泛称它为邦德理论。

邦德第一原理指出，粉碎过程中的能耗是入料的累积能耗与产品的累积能耗的差值。累积能耗是指，将一块理论上无限大的物体粉碎到一定粒度时，单位质量产品消耗的总能量。所以任何物质都具有累积能耗，其值随颗粒粒度的减小而增加。第二原理指出，粉碎的能耗与裂纹长度成正比，对那些形状规则并相似的颗粒物料来说，单位体积内物料的裂纹长度与颗粒直径的平方根成反比。根据上述原理，邦德提出：在粉碎过程中，有用功与新产生的裂纹总长度成正比，与颗粒“直径”的平方根成反比（因为裂纹长度与产品颗粒“直径”平方根成反比）。其表达式为：

$$A = C' \left(\frac{1}{\sqrt{d}} - \frac{1}{\sqrt{D}} \right) = \frac{10W_i}{\sqrt{d}} - \frac{10W_i}{\sqrt{D}} \quad (1-12)$$

式中 A ——粉碎单位质量（或单位体积）物料所需功（千瓦·时/吨）；
 D ——粉碎前物料尺寸^②（微米）；
 d ——粉碎后物料尺寸（微米）；
 C' ——物料性质系数，其值由表1-4中选取；

物料性质系数 C'

表 1-4

矿石种类	C' 值	矿石种类	C' 值
闪长岩、片麻岩	300~315	白云石、磷镁矿	160~170
安山岩、玄武岩、辉长岩	250~280	磁铁矿石、铝锌矿	150~160
花岗岩、砾岩	220~240	黄铁矿	130~140
正长岩、砂、石英、赤铁矿石	190~210	石膏	100
石灰石、锰矿石	180~190	重晶石	70

注：表中 C' 值，在粗碎、中碎、细碎时都适用，但在使用球磨时， C' 值应减小15~25%。

① 过去一些著作中引为1952年，但1962年美国 Chemical Engineering 杂志第三期 F.C.Bond 本人文章中讲的是1951年正式发表。

② D 与 d 用物料80%质量能通过筛孔尺寸表示。