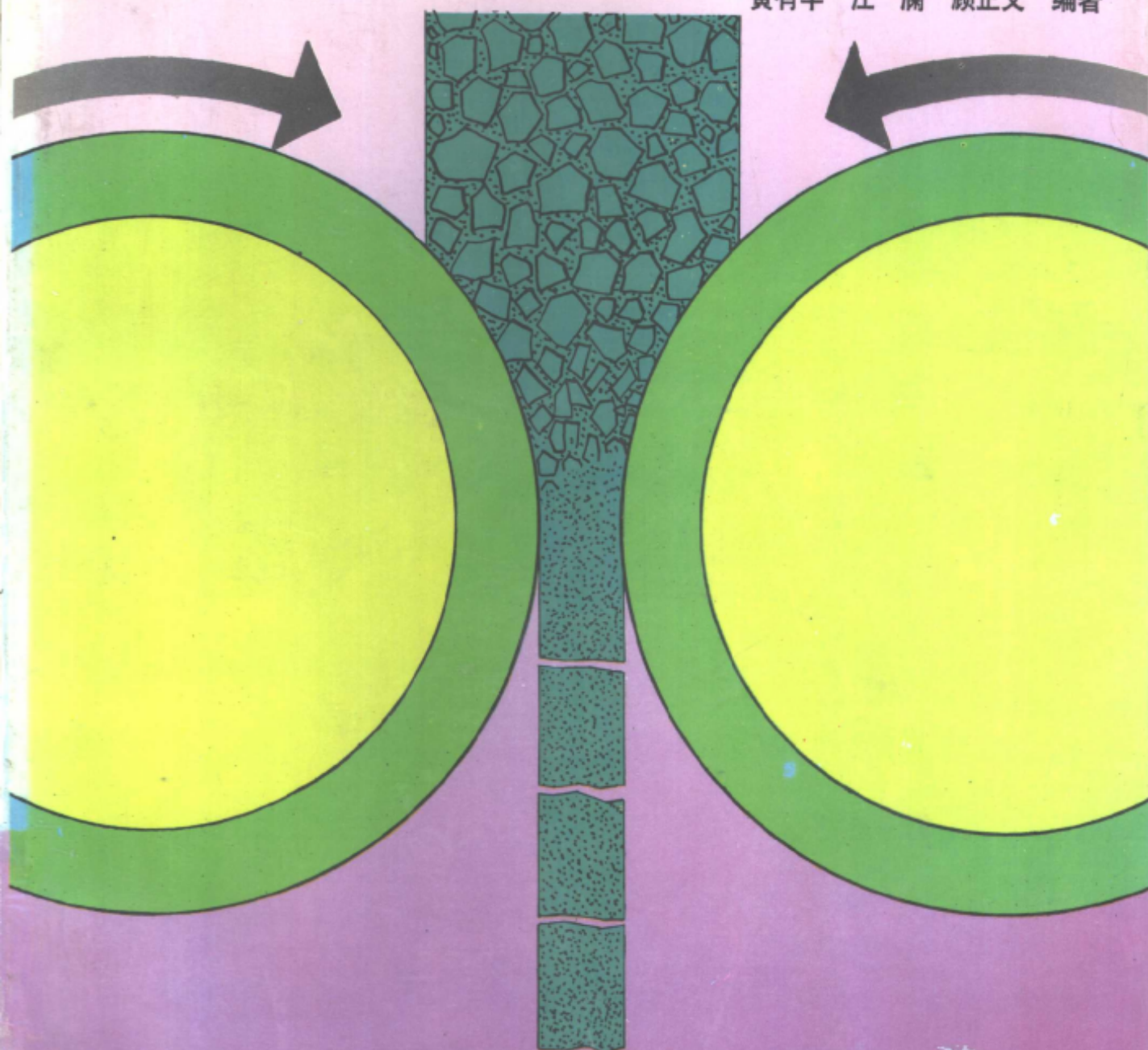


水泥工业新型挤压粉磨技术

黄有丰 汪 澜 顾正义 编著



中国建材工业出版社

水泥工业新型挤压粉磨技术

黄有丰 汪 澜 顾正义

中国建材工业出版社

(京) 新登字 177 号

图书在版编目 (CIP) 数据

水泥工业新型挤压粉磨技术 / 黄有丰等编著. —北京:
中国建材工业出版社, 1995.9
ISBN 7-80090-381-8

I. 水… II. 黄… III. 水泥—粉化, 挤压 IV. TQ172.6
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 11785 号

水泥工业新型挤压粉磨技术

黄有丰 汪 澜 顾正义 编著

中国建材工业出版社出版 (北京海淀区三里河路 11 号)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
河北吴桥县印刷厂印刷

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 14 字数: 336 千字
1996 年 3 月第一版 1996 年 3 月第一次印刷
印数: 1—4000 册 定价: 26 元
ISBN 7-80090-381-8 / TQ · 11

前 言

随着科学技术的日新月异，水泥工业生产技术也取得了长足的进步。七十年代发展起来的悬浮预热和窑外分解技术改变了水泥生产的煅烧过程，把水泥工业生产推向了一个新的水平。八十年代以来，各种新型粉磨技术又向传统的球磨粉碎工艺提出了挑战，其中，挤压粉磨技术以高效、节能、低耗等优点，在世界范围内得到广泛应用，取得了令人瞩目的经济效益和社会效益。从而受到了广泛的重视。

在“七·五”和“八·五”期间，国家建材局分别将“挤压粉磨新工艺及设备的研究”列为国家重点科技项目，推动了挤压粉磨技术的引进吸收和开发研制及应用。

当前，我国已在日产 1000 吨、2000 吨、4000 吨的大中型水泥厂和年产 30 万吨的地方水泥厂采用挤压磨技术。国家建材局合肥水泥研究设计院和江苏省海安建材机械厂开发的 $\phi 800 \times 200$ 和 $\phi 1000 \times 300\text{mm}$ 挤压磨，已生产制造有 100 多台、多数为地方水泥厂应用。设备制造技术已趋成熟，已取得很大成就。值得总结提高。

本书是为了适应挤压粉磨技术的发展和应用，与海安建材机械厂合作共同编写的。旨在使更多的水泥工作者了解和掌握这一技术，促进这一技术更为广泛的应用，并能对挤压粉磨技术的进一步开发研究有所帮助。本书既有学术性，又有实用性，理论与实践结合，深入浅出通俗易懂，对生产实践有较强的指导性。

全书分为十二章，由黄有丰、汪澜、顾正义撰写。附录“操作规程和安装注意事项”由海安建材机械厂于旺江撰写。

书中若有不够完善或错误之处，欢迎广大读者批评指出。

著者 1994 年 8 月

目 录

第一章 简介	1
挤压粉磨概述	1
挤压粉磨的历史及发展现状	1
第二章 挤压粉碎理论研究进展	3
粉碎机理的研究	3
解析粉磨速度论和磨矿动力学数学模型	9
挤压磨层压应力的数学模型	15
第三章 挤压磨的研究发展	22
舒纳德研究工作介绍	22
挤压磨在我国的研究发展	28
第四章 挤压磨的工艺参数选值	29
挤压粉磨的工艺过程	29
压辊直径与宽度的选择	30
压辊工作压力的选择	33
压辊的周边速度、辊间距的选择及物料通过量的计算	33
挤压磨的适宜工艺参数	35
第五章 挤压磨的设计及结构	36
挤压磨的设计原则及简介	36
挤压磨的主机架结构及设计	37
挤压磨的轴系结构及设计	43
挤压磨的进料装置	51
挤压磨的压辊结构及设计	52
挤压磨的自控装置	54
主轴传动的结构与设计	55
液压、润滑系统的结构与设计	65
检测系统及安全保护系统	70
第六章 挤压粉磨系统工艺流程	72
第七章 选粉机技术	75
选粉机技术发展状况	75
LSXF 型高效螺浆离心式选粉机	75
高效旋风式选粉机	83
O-Sepa 选粉机	89
Sepax 选粉机	91
DS 型组合式高效选粉机	93

各种类型选粉机的综合分析	107
第八章 打散分级机	110
第九章 优化磨机技术	114
磨机仓室长度的选择	114
磨机衬板型式的调整	114
不同研磨体的比较选择	119
钢球级配的技术	124
磨球对材质性能要求	129
磨球的分类	130
磨球的选择	131
国内外磨球应用情况浅析	131
国内外磨球材质发展趋势	134
第十章 挤压磨对物料有关性能的要求	137
关于喂料粒度	137
关于喂料的水分含量	137
关于物料的易磨性	138
第十一章 挤压磨终粉磨系统的研究	141
挤压磨终粉磨系统的简介	141
终粉磨水泥的性能	141
终粉磨水泥系统实例	147
终粉磨对水泥性能的影响及改善措施探讨	149
第十二章 挤压粉磨技术应用实例	166
$\phi 1000 \times 300\text{mm}$ 挤压磨在江阴水泥厂的应用	166
$\phi 1000 \times 250\text{mm}$ 挤压磨在木渎水泥厂的应用	173
引进挤压粉磨技术应用举例	177
附录一	183
附录二 HFC 型挤压磨的安装及调试	187

第一章 简介

一、挤压粉磨概述

挤压磨或称辊压磨，是八十年代中期发展起来的一种新型粉磨设备，是粉磨技术的突破。在水泥工业中，人们认为它是继窑外分解技术之后的又一重大技术进步。挤压磨的应用可大幅度地提高产量，降低能耗。

在水泥工业中，以传统的球磨机为主的粉磨作业耗电量约为总耗电量的 65%~70%。而球磨机的粉磨有效功仅占提供给磨机运转总能量的 2%~5%。能量利用率非常低。据有关资料对球磨机能量消耗的分析，螺栓摩擦损失 4.3%，齿轮摩擦损失 8.1%，筒体热损失 6.4%，空气热吸收 31.4%，产品热吸收 47.6%。可见大部分能量没有真正用于粉碎物料上，有 85% 以上转变成了热能损耗。热能损耗主要归因于球磨机内钢球间以及钢球与衬板间的无用撞击和摩擦。

挤压粉碎过程与球磨机粉磨截然不同。在挤压粉磨过程中，物料首先被喂入挤压磨，由于挤压磨两磨辊的相向运动的作用而被带入两辊之间，磨辊对物料床施加强大的压力；随着磨辊的转动，磨辊间的物料逐渐下沉，受压的强度愈来愈大，直至辊缝的最狭处，压力强度达到最大值。这时物料被高压彻底粉碎，形成薄片状料饼被卸出。在整个挤压过程中，物料是被封闭在狭小的空间里，无逃逸的余地，也不产生相对运动，很少有动能和热能转换而带来的浪费，这就大大减少了粉碎功的损失，提高了输入能量的利用率。

挤压磨首先在水泥工业中得到应用。主要用于粉碎原料、熟料和矿渣，也可用于粉碎煤炭。经过一段时间的生产实践考验及相应的技术改进，挤压粉磨技术已日臻完善。目前全世界已有三百多台大型挤压磨用于生产，我国也有数百家水泥生产企业用上了各种类型的挤压磨。另外，挤压磨也正逐渐推广应用于采矿、化工、电力、煤炭和冶金等工业部门。可见挤压磨技术先进可靠，经济效益显著，有着广阔的应用前景。

二、挤压粉磨的历史及发展现状

利用两辊运动粉碎粒状物料是人类早期的实践活动。我国劳动人民在古代就发明和利用石辊挤压粉碎谷物等，并通过不同辊面间的运动组合，使产品达到不同的细度要求。外国学者把石辊磨归入中国古代的重要技术发明之列，并认为这一技术的应用早于西方国家十多个世纪。在机械得到应用的初期，这一技术的发展导致轮磨机以及在本世纪辊式破碎机的产生和应用。而其最新发展就是挤压磨。

挤压磨是辊式破碎机的直接继承和发展。挤压磨从外形上看很象通常的辊式破碎机，都是由两个相向转动的辊子组成，两辊间的物料受辊子的压力而被粉碎。但挤压磨使用有自动控制的液压系统，对物料施加的压力高达 50~300MPa，而辊式破碎机只用弹簧加压，压力不足 10MPa。由于压力不同，粉碎效果也大不一样。挤压磨粉碎的粒度为 μm ~mm，包括四个数量级，并使物料颗粒产生裂纹，降低其硬度；而辊式破碎机的破碎粒度为 mm~cm 两个数量级，破碎比仅为 3~5，破碎后的物料仍保持了原来的硬度。因此挤压磨和辊式破碎机在设备结构和产品质量尤其是粉碎原理上有着很大的不同。

早在 1933 年卡里 (Carey) 就注意到向两水平支撑辊施加压力可大大提高粉碎效果。他的建议受到了郎夫 (Rumpf) 及弗格 (Feige) 等人的重视, 他们分别在 1962 年和 70 年代进行了大量的试验工作, 并制造出挤压磨的试验样机。由于随后舒纳德 (Schonert) 的出色工作, 这一技术终于得到了工业性应用。

至 1985 年德国洪堡 (KHD) 公司研制的第一台挤压磨用于生产以来, 世界各大水泥机械制造公司, 包括德国伯力鸠斯 (Polysius) 公司、丹麦史密斯 (FLS) 公司及美国富勒 (Fuller) 公司竞相开发研制, 许多水泥厂家也争相应用, 这引起了我国有关部门和水泥工作者的重视。我国的新疆、洛阳、本溪、牡丹江等水泥厂都先后进口了挤压磨, 用于生料和水泥的粉磨作业。合肥水泥工业研究设计院、南京水泥工业设计研究院、天津水泥工业设计研究院等单位也开展了挤压磨的研究设计工作。1986 年国家建材局将“挤压粉磨新工艺及设备研究”列为国家“七·五”重点科技攻关项目, 并于 1988 年引进了德国洪堡 (KHD) 公司的制造技术。目前已有哈尔滨、抚顺、双阳等水泥厂采用了引进技术在国内制造的设备。值得一提的是由合肥水泥工业研究设计院和海安建材机械厂合作研制的、适合我国水泥工业发展状况的中小型挤压磨最为引人注目。由海安建材机械厂造出的我国第一台挤压磨于 1989 年 4 月在江阴水泥厂进行了工业性试验, 并于 1990 年 12 月通过国家建材局部级鉴定。测试结果表明, 该机的各项技术指标已达国际同类产品的先进水平。此外, 南京水泥工业设计研究院与上海重型机器厂合作以及唐山水泥机械厂研制的挤压磨也相继投入试运行。洛阳冶金矿山机械厂, 天津水泥工业设计研究院, 中国建材科学研究院等单位也在进行有关的研制工作。

经过几年来各单位的努力, 以及国外技术的引进消化, 我国目前已有与日产 4000 吨、2000 吨、1000 吨、700 吨水泥生产线配套的挤压磨系列, 这些设备已完全或大部分采用国产材料和部件。而适用于 10 万吨水泥生产线的小型挤压磨已有 100 多台投入运行, 取得了良好的经济效益, 标志着我国水泥粉磨技术应用及设备制造达到了一个新的水平。

挤压磨以其极大的增产、节能优势受到了普遍重视, 它在我国的发展正方兴未艾。国家建材局又将“无球磨挤压水泥粉磨系统的研究”列入国家“八·五”重点科技攻关项目, 并组织中国建材院、合肥水泥院和南京水泥院与武汉工业大学北京研究生部协作攻关。这对挤压磨的发展和应用又注入了新的动力。可以断言, 挤压磨的研制和应用在我国将会得到更大的发展, 成为用先进科学技术改造传统产业的重大的举措, 这对我国水泥工业的发展及技术进步将有着极大的推动作用。

第二章 挤压粉碎理论研究进展

一、粉碎机理的研究

1. 粉碎的物理原理

物料的粉碎过程是一个非常复杂的粒度减小过程，涉及到许多无法估计的因素和参变量。例如：物料的强度、硬度、韧性、形状、尺寸、湿度、密度、均匀性，以及外部条件——施力方式、应力类型、应力强度、应力速度、颗粒群体在粉碎过程中瞬时相互作用力及其分布等。以强度为例，就同一种矿石而言，差异也是十分明显，甚至是十分悬殊的。强度主要取决于物料内聚力的大小。内聚力一般分为两种：第一种内聚力作用在物料晶体内部，即晶体各质点之间，另一种内聚力作用在晶体与晶体之间。两种内聚力物理性能相同，但前者在数值上比后者大许多倍。由于粉碎过程的复杂性，至今还不能得出统一、严密、完整的数理理论来描述这一变化。

但挤压粉磨技术的发展仍是与近代粉碎理论的研究发展分不开的。粉碎物理学是一个复杂的科学领域，它研究物料受到各种机械应力的结构变化。有关这些应力最重要的参数是它们的分布和施加的速度，另外物料的具体力学性质也应予以考虑。粉碎的结果是物料结构的变化，包括建立新的表面及被粉碎和物料内部的缺陷。

断裂力学是描述颗粒受力时破裂情况的学科。断裂性能是以开始形成裂缝的临界过程为研究基点的。应用断裂力学有可能测定可发生微裂纹和造成物料断裂的各种机械应力的条件。物料的断裂过程首先是裂纹的产生和蔓延，随后是裂纹的扩展直至断裂。物料的断裂强度是试样在最大应力区域内所测出的最大裂缝数目和尺寸的函数。若已知二个决定微裂缝扩展的参数：微裂缝的平均尺寸和比断裂能 r_F ，就可能计算出物料的断裂强度，而当外部压力超过物料强度，物料将被破碎。比断裂能是指为扩展裂缝每单位释放表面所需的能量。脆性物料的断裂能约为 $5J/m^2$ ，塑性物料为 $10J/m^2$ ，而金属为 $500J/m^2$ 。这种能量较表面能，一般为 $0.05 \sim 0.5J/m^2$ ，也就是破坏存在于表面上的分子键所需的能量要高得多。表面能与比断裂能间的差值表明，用来展开两边以扩展裂缝所需的能量，要比用理想方法破坏分子表面键所需能量大得多。这一差值可解释为由于所施加的使裂纹扩展所必需的各种力，在裂缝边缘附近产生高度的应力集中，并由于不可逆的能量损失造成物料本身的塑性变形。正如上述断裂能数值表明的那样，物料的力学性质越是塑性，则这种能量损失越大。

以钢棒受力为例。当一钢棒受力时，它的内应力的变化是增大的。图 2-1 显示了钢棒的标准应力应变曲线。这条曲线由两部分组成，即弹性应变区和塑性应变区。图 2-1 中直线部分表示弹性应变区，表明物料在卸载后弹性回复到初始状态的能力。如果当物料加载后的应力一旦超过了屈服点，曲线的形状就变成非线性凸圆形，这时达到了塑性变性区，也就表明物料在卸载后弹性不能回复到初始状态。典型的脆性物料的应力应变曲线比塑性物料的陡。岩石和矿石在加载挤压过程中也显示了类似的弹性应变和塑性应变特性。

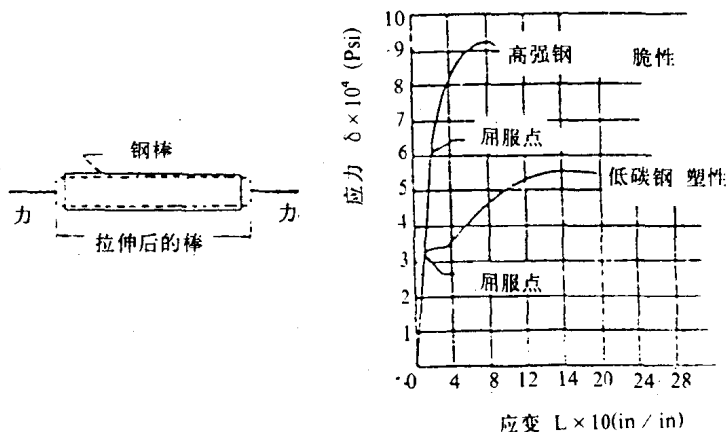


图 2-1 钢的典型应力应变曲线

图 2-2 就是一种典型水泥熟料挤压状态下的应力应变曲线，曲线的形状一般来说是中凹的。它不同于常态的钢材所呈现的曲线形状，难于确定屈服点的位置，但可推断出曲线塑性应变部分较陡。对显微组织呈非均质的脆性矿物颗粒床来说，也应有同样的应力应变分布模式。这说明了由于物质内部结构的不同，其粉碎性能也有较大差异。这样也有可能更完整地解释所观察到的工业熟料易磨性的差异。

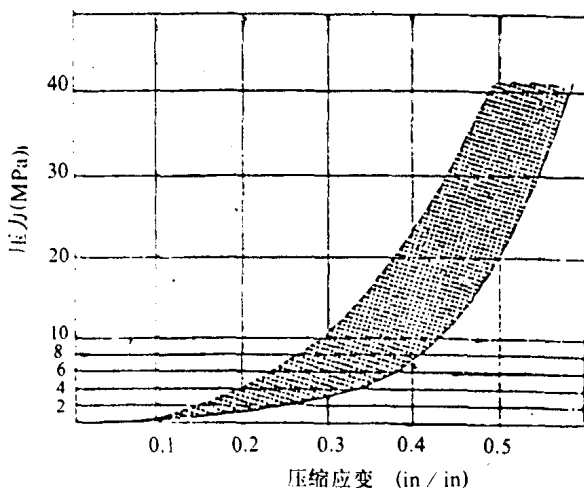


图 2-2 压力下熟料样品的典型应力应变曲线

裂缝扩展的能量是由施加到物料上的弹性应力场所提供。随着裂缝的扩展，弹性应力场的强度减小，以能量来说，部分能量被转化成比断裂能。有关的数量级如下：Q 为断面，L 为长度，横向断裂要求 $2Qr_F$ ，它必须由此应力场提供，因此必须要使 $2Qr_F < \frac{\sigma^2}{2E} QL$ ，或 $L > 4FE \frac{r_F}{\sigma}$ 。也就是说，始于弹性应力场的裂缝扩展，只有在此种应力所施加的体积超过一定尺寸才是可能的。以玻璃为例，上述公式得到的数量级为微米，对塑性物料为毫米。这说明挤压粉磨对被挤压颗粒粒度的要求及细磨的困难性。有关物料 r_F 值列于表 2-1 中。

表 2-1 有关物料的 r_F 值

材 料	r_F Joules / m ²	材 料	r_F Joules / m ²
煅烧粘土	5.5~40	干燥粘土	7.3~25.3
平板玻璃	3.5	Al ₂ O ₃	20~50
陶 瓷	20~60	耐 火 砖	30~50
天然石材	3.7~59	NaCl+纤维	200

粉碎研究方面另一个特别重要的参数是结构缺陷的平均尺寸。实验表明在圆柱体上加上简单压力可造成不稳定的开裂，也就是说要获得裂缝扩展必须提供过量的弹性能，接着裂缝扩散以不受控制的方式进行，而过量的能量被转化成碎片的分裂能。这种作用的效率，即弹性能转变为断裂能的比例与物料中断裂开端的平均尺寸 a_0 成正比。因此物料的全部断裂性能可以用两个固有的参数 r_F 和 a_0 来描述。表 2-2 是两种常用物料的 r_F 和 a_0 值的例子。到目前为止，根据材料的成分并考虑其热处理的情况，来测定熟料的 r_F 和 a_0 值所做的研究很少。但研究也表明，建立上述生产工艺参数与比断裂能间的关系是可能的。

表 2-2 有关物料的 r_F 和 a_0 值

材 料	r_F Joules / m ²	a_0 μm
煅烧粘土	5.5~40	100~1500
玻 璃	3.5	20

依据断裂力学理论可以认为，物料的挤压粉碎特性取决于自身的性质，包括其内部的显微组织、结构缺陷以及颗粒粒径和破碎比，同时与外力施加的方式和速度也有密切的关系。

对物料施加应力可产生裂纹扩展并导致断裂。施加应力可用三种方式进行，如图 2-3 所示，相应的工艺措施分别为挤压磨、球磨和冲击磨。由于单颗粒粉碎由两块颧板间缓慢加压力得到最好的粉碎效果，因而此种方法受到了重视和进一步研究。



图 2-3 施加应力的三种方式

2. 单颗粒粉碎

通常矿石粗碎和中碎属于单颗粒粉碎，且对于单颗粒的挤压粉碎，也有三种不同的加载方式，图 2-4 分别描绘了它们的变形曲线。当试样承受点负载时，应变曲线的斜率很小，即曲线是平坦的，这是因为试样只在受载点上承受较高的局部压力；当承受线载时，

应变曲线就变陡了些；单轴向加载状态下，物料的应变曲线是最陡的，并显示了在不易变形表面之间加载于一个固体物料的关系。一般单颗粒粉碎过程都是在单轴加载下进行的。

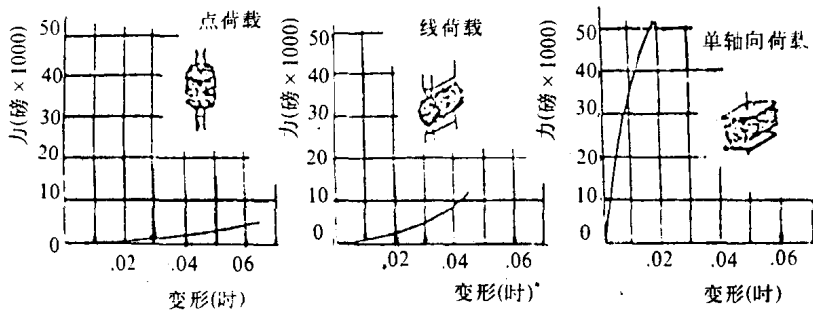


图 2-4 各种荷载时力与变形效果

施威廷格 (Schwending) 是单颗粒粉碎的最早研究者，舒纳德 (Schonert) 也对此进行了系统研究。据沙丁 (Schardin) 对单颗粒粉碎行为的高速摄影分析 (快门速度 5×10^{-5} Sec)，矿石单颗粒粉碎分为四个阶段：

- (1) 由应力集中引起裂缝扩展；
- (2) 产生众多的微裂纹；
- (3) 形成表面裂纹；
- (4) 颗粒粉碎，形成新的表面。

郎夫 (Rumpf) 等人的研究指出：较规则的物体，如球形，破碎时，裂纹形状有四种，即环形、圆锥形、放射形和内部不规则形。典型的裂纹形状如图 2-5 所示。

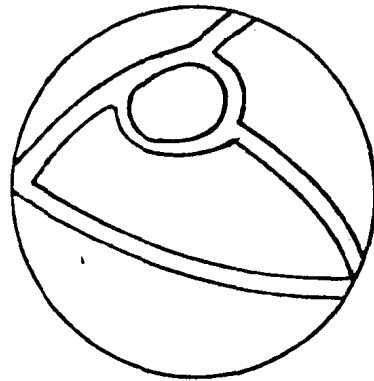


图 2-5 单颗粒破碎时的裂纹形状

进一步的研究表明，对于非规则形物料受到外界压力后，将产生压缩变形，形成内部应力集中。当应力达到颗粒在某一最弱的

轴向上的破坏应力时，该颗粒就会在该轴向上发生碎裂和粉碎。颗粒受压而被粉碎的形式主要有：楔形断面引起的断裂，沿三维空间某一轴向发生的剪裂，以及不具有特殊形式的碎裂。研究实验表明，坚硬的物料，例如结构和构造比较固定，内部应力状态比较稳固的匀质和较匀质的矿石和烧结物，受压而被粉碎的碎块、碎屑或粉末，多数具有相同的断裂形式，往往呈楔形断裂或轴向剪裂状。而一些较松软的物料，因其内部结构存在较多的脆弱部位，受压粉碎后的碎块、碎屑等，多数呈无规则的碎裂形式，碎料的形状带有很大的随机性。

美国学者伯格斯特龙 (Bergstrom) 也进行过矿石单颗粒破碎试验，并用特殊胶体物质承接破碎后飞溅出的碎片，经计算得出结论：矿石在破碎机械中进行破碎时，飞溅出去的破碎残片有 45% 破碎能没有得到利用。

舒纳德在 1971 年开始对单颗粒破碎进行了大量的、系统的研究，通过可变参数，如应力类型、应力强度、应力速度、物料种类和颗粒形状等试验结果的数据分析后认为：如以单颗粒破碎能量消耗利用率为 100%，则各种破碎机械均不超过 40%，只有辊式破碎

机可高达 70% 以上。可见单颗粒挤压粉碎有较高的能量利用率。

我国北京矿冶研究总院王宏勋和他的研究生丁培法利用 INSTRON 压力机对自然颗粒状岩石、玻璃球进行了单颗粒和层压破碎试验，认为单颗粒破碎大致分为下列三个阶段：

(1) 破裂阶段

在外力作用下吸收能量，生成裂纹并发生破裂，形成主要的几个大片和一些粉末。

(2) 压碎阶段

几个大片继续被压成片或被压折，各种块间间隙较多，能耗不很高。

(3) 压实阶段

片状物料继续被压折断，并生成更小的碎块及粉末而被压实，由于细颗粒（或粉末）填满了料块间隙，颗粒间接角面增大，压力急剧增高。

图 2-6 描写了上述单颗粒破碎的物理过程。图 2-7 为 $\phi 19\text{mm}$ 的中碱玻璃球的压力—位移曲线，图 2-8 为 $\phi 20\text{mm}$ 石灰球的压力—位移曲线，（加载速度为 50kgf/s ）。

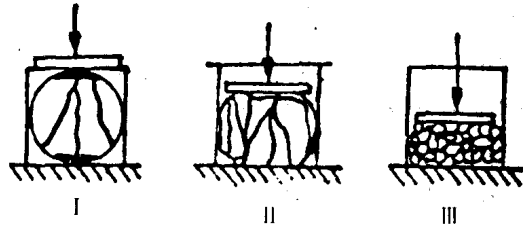


图 2-6 压碎过程中的球体

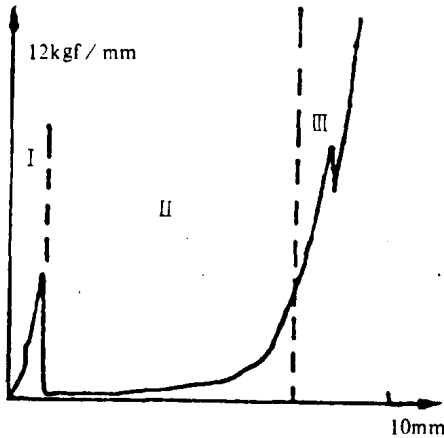


图 2-7 $\phi 19\text{mm}$ 玻璃球的压力—位移曲线

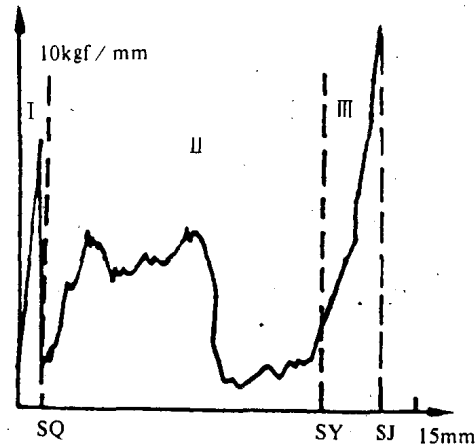


图 2-8 $\phi 20\text{mm}$ 石灰石的球压力—位移曲线

王宏勋指出：对脆性较大的物料，飞溅能逸出是惊人的，应加以利用；对脆性不大的物料，飞溅能是不显著的。因此利用层压粉碎是有条件的。

舒纳德认为单颗粒粉碎，即一粒一粒地缓慢加压，得到最好的粉磨效果。但可惜这种过程不可能在工业条件下进行，因为这将导致粉碎能力降低。很多颗粒一起破碎与单独破碎相比显示出能量损失，但从能量的观点仍然是最好的方法之一，更为重要的是利用层压

粉碎可以实现机械化。

3. 层压粉碎

物料细碎和细磨作业是矿石颗粒群体在多层集合状态下进行粉碎的复杂的粒度减小过程，这就是所谓层压粉碎。在各种粉碎机械中，由于粉碎条件不同，并非全部达到理想的层压粉碎条件罢了。越是接近理想的层压粉碎条件，则粉碎效率也越高。因为，理想纯静压应力条件下的层压粉碎，颗粒所产生的应变五倍于剪应力产生的应变，故粉碎效率高。在球磨机中，由于钢球在冲压物料时，颗粒之间、料层之间会产生摩擦而消耗了大量的能量；加上钢球冲击时因接触区并不“封闭”，层压条件不充分，破碎物料“飞溅能”损失大，合格细料有时不能及时排出，产生所谓“过粉磨”现象；某些难磨的粒子的“负磨效应”；过细微粒因“晶体粉碎”存在静电吸附效应，产生“糊球”等现象，大大地降低了磨矿效率。所以，严格说来，球磨机中物料的层压粉碎是很不理想的，或者是不彻底的。

早在 1962 年，美国的伯格斯特龙 (B·H·Bergstrom) 等人便提出了采用层压粉碎以提高能量利用率的观点。以此为起点，许多外国公司研制了具有新型破碎腔的高效破碎机。1964 年施密特 (P·Schmidt) 就对层压粉碎进行了研究。格鲁沃特 (Greewood) 等人还于 1967 年在环形碾磨机内用钢球为介质对不同给料量进行层压粉碎试验，发现当给料量较多时颗粒具有强烈的相互作用，而给料量较少时，又表现为单颗粒粉碎行为；在层压粉碎时，破碎函数 B 相近时，选择函数 S 是不同的。鲁斯 (Loos) 在 1969 年对玄武岩、花岗岩在容器内进行 20MPa 的层压粉碎试验结果表明：颗粒分布函数值与压力间的关系在对数坐标上呈直线关系。戈尔 (Goll) 则证明影响层压粉碎产品粒度分布的主要因素是压力，物料的其它性质属于次要因素。霍夫曼 (Hoffmann) 等人对几种不同规格的玻璃球和石英颗粒在较大应力强度范围内进行层压粉碎研究，测量了应变曲线、功耗、粉碎几率和粒度分布函数等参数。阿齐兹 (Aziz) 等人还对水泥熟料的单颗粒和料层粉碎进行过研究。施文廷 (Schwending) 还应用加载辊在辊道上进行过层压粉碎试验，得出了某些有价值的结果。

舒纳德在上述众多学者的研究基础上，从矿石粉碎能量需要的观点出发，系统地研究了不同粉碎方式下矿石单颗粒粉碎的能耗。同时又进行了一系列层压粉碎试验后指出：“物料不是在破碎机工作面上或其它粉磨介质间作单颗粒的粉碎（破碎或粉磨），而是作为一层（或一个料层）得到粉碎。该料层在高压下形成，压力导致颗粒挤压其它临近颗粒，直到其主要部分破碎、断裂，产生裂缝或劈碎”。他的研究结果表明：脆性矿石用高压粉碎方式 (50~300MPa)，进行层压粉碎时所需能耗远远低于传统的粉碎方式（如冲击、剪切等）。另外，物料受压粉碎的难易程度也可用简单的脆性值 B_r 概念来衡量。

即： $B_r = N_c / N_t$

式中： N_c = 抗压强度

N_t = 抗拉强度

物料的脆性值 B_r 越大，就越容易被压碎。表 2-3 中列出了水泥工业中几种常见物料的脆性值 B_r 。

由此可知，对于砂岩、矿渣等较难粉磨的物料，受压的粉碎性则与较易粉碎的石灰石基本相同。层压粉碎在机械上的实现，其效率也必将优越于传统的粉磨机械。

表 2-3 几种常见物料的脆性值

物 料	B_r	物 料	B_r
石灰石	12~18	熟 料	10~14
砂 岩	12~18	混凝土	6~10
矿 渣	14~18	铸 铁	3~4
页 岩	6~12		

二、解析粉磨速度论和磨矿动力学数学模型

1. 国内外学者的研究概述

与粉碎机理的试验研究的同时,国内外不少学者尝试用数理方法对物料的粉磨过程进行描述,以探讨其规律性。

古典的粉磨理论把固体物料的粉碎过程描写为物料的平均粒度随时间减小或平均粒比表面积随时间增加的连续速度过程。例如未塔格 (C·mittag) 在 1928 年用图形法描绘了被磨物料粗级别残余量沿磨机长度减少的规律,但没有给出精确的计算公式。吉尔伯特 (W·Gilbet) 在 1932 年提出了在连续出料和周期装载的磨机内粉磨过程完全相同的结论。直到 1935~1937 年间,斯坦纳 (P·Steinet) 和萨古计休金 (A·И·загужин) 才先后提出了粗级别减少与磨矿延续时间的关系,并用动力学方程进行了描写。

事实上,实际的粉磨过程是固体物料多次反复碎裂的非线性过程,并非单一的速度过程。布朗 (Brown) 于 1941 年首先提出了分布函数的概念。爱泼斯坦 (B·Epstein) 在 1948 年首先利用统计原理研究固体物料的破裂规律,在此基础上提出了选择函数 S 和破裂函数 B 的概念。1953~1954 年,高登 (A·M·Gaudin) 和巴斯 (L·Bass) 等人相继采用示踪原子或其它方法研究固体物料的破裂行为。布罗德本特 (S·R·Broadbent) 和卡尔卡特 (T·G·Callcott) 在 1956 年发表论文,首次采用矩阵模型描写固体物料的破裂行为,这项研究对于用数学方法描述离散的粉碎物料及其粉碎过程具有巨大的意义。以后,加德纳 (R·Gradnet)、奥斯汀 (L·G·Austin)、凯尔萨尔 (D·E·Kelsall) 等人先后发表论文,介绍磨矿动力学数学模型方面的研究成果。里德 (K·J·Reid) 于 1965 年在《分批磨矿方程的一种解》论文中,根据总体平稳磨矿动力学 (积分—微分) 方程,导出了时间连续、粒度离散的分批磨矿动力学模型,该模型能用磨矿工业实践。

近二十多年来,许多科研工作者提出若干测定 S_i 、 B_{ij} 的方法,如示踪法、基于非线性最优化的反算法、零阶产出率法、奥斯汀—勒基理论简算法 (BI、BII、BIV 法) 及其它的算法、理想混合模拟器模拟算法 (E·φ·Морегов, B·K·шутайинов, 1983)、卡普尔的 G-H 算法和经验公式法等。

自前苏联的阿略夫金 (B·B·AngBgnh) 在 1937 年提出磨矿时间—粒度关系的一阶磨矿动力学模型后,随后他又凭实践和经验修改为 n 阶磨矿动力学模型,接着相继出现了用相对磨矿速度表示的 n 阶磨矿动力学模型和用比表面积增大表示的模型。其中前苏联学者卡尔玛金 (B·И·Картазин)、申柯莱柯 (С·φ·Шинкореко) 在 1982 年把磨矿过程看作一种不可逆的热力学过程,根据粉碎作业最终状态的热力学概率是与该系统

的能量成比例的观点，用热力学理论推导出另一种型式的磨矿动力学方程，引起了人们广泛的注意。

我国在磨矿动力学方程的研究方面也取得了很大成就。其中东北工学院的陈炳辰在大量试验的基础上，认为 n 阶磨矿动力学方程式不能普遍描述磨矿给料、产品粒度上磨矿时间的关系，根据实际结果，推导出新的 n 阶磨矿动力学模型，并给出了磨矿速度常数 $k(d)$ 、磨矿动力学指数 $n(d)$ 随产品粒度 d 而变化的一系列函数关系，在第二、三届国际选矿会议上发表后，得到国外学者的高度评价。同时，他和他的同事们在用磨矿动力学模型指导工业生产的研究方面，同样取得了很大成就。中南工业大学的熊维平等人在对“奥—勒”算法方面进行了一些改进，用辛卜生数值积分求出物料被磨碎量，然后导出计算破裂函数 B_{ij} 的通式，其计算精度与“奥—勒 BⅢ法”相近，而且简单易行，其精度高于零阶产出率法。

2. 几种磨矿动力学数学模型

(1) 以时间—粒度关系表示的 n 阶磨矿动力学方程

a. 阿略夫金的 n 阶磨矿动力学方程式

$$\text{式} \quad \begin{cases} R = R_0 \cdot e^{-kt^n} \\ R = R_0 \cdot \exp(-kt^n) \end{cases} \quad (1)$$

式中： R_0 —— t 为零时，被磨物料中粗级别筛余(%)；

R —— t 时刻的被磨物料中粗级别筛余(%)；

t ——磨矿时间；

k ——磨矿速度常数；

n ——磨矿动力学指数，与物料特性和机器性能有关，且 $n > 0$ 。

由 (1) 求一阶导数，得磨矿速率为

$$\frac{dr}{dt} = -knt^{n-1} \cdot R_0 e^{-kt^n} = -knt^{n-1} \cdot R \quad (2)$$

公式(2)表明：只有磨矿时间 $t \rightarrow 0$ 。粗级别筛余 R 才等于零。这当然不符合事实。但在 $R = 5\% \sim 100\%$ 时， n 阶磨矿动力学方程式还是与一阶磨矿实际情况相吻合，所以该方程获得了广泛的应用。

该方程反映了磨矿过程中被磨物料粗级别含量与磨矿延续时间 t 、相对磨矿速率之间的函数关系。

b. 申柯林柯的不可逆热力学过程磨矿动力学方程式

$$R = R_0 \cdot \exp\{-Km[t \cdot \ln(t+1)]^n\} \quad (3)$$

$$Km = K_1 \left[\left(\frac{C}{C_0} \right) \frac{N_p}{K_2} \right]^n \quad (4)$$

式中: C ——因磨矿过程温度增加时,矿石所接受的热量(温度间隔时的热焓,常数);

C_0 ——常数, $C_0 = 1 \text{ J} / ^\circ\text{C}$;

K_1 ——无因次比例系数;

K_2 ——常数, $K_L = 1 \text{ J}$;

n ——指数,表示矿石在强度方面的均匀度;

N_p ——有用功率系数;

t ——磨矿时间。

c. 陈炳辰提出的 n 阶磨矿动力学方程式

$$R = R_0 \cdot \exp[-k(d)t^{n(d)}] \quad (5)$$

陈炳辰在 1985 年首次公布了他由实验结果导出的 n 阶磨矿动力学方程式, 式中 $k(d)$ 、 $n(d)$ ——和产品粒度 d 有关的磨矿动力学参数。即

$$\begin{cases} k(d) = a_0 + a_1 d^{t_1} \\ n(d) = C_0 + C_1 d^{t_2} \end{cases} \quad (6)$$

式中 a_0 、 a_1 、 C_1 、 C_0 、 t_1 、 t_2 各常数可由粒度方程中的 b 、 m 拟合。由试验求得下列方程可用:

$$\begin{cases} k(d) = 0.00034 + 0.0078d^{0.3420} \\ n(d) = 0.08674 + 0.3671d^{0.1948} \end{cases} \quad (7)$$

(2) 用矩阵表示的磨矿动力学数学模型

澳大利亚的林奇 (A. J. Lynch) 教授系统地总结了前人的矩阵模型, 在大量试验的基础上, 得出各种粉碎矩阵模型。设 F 和 P 分别代表磨矿过程给料和产品粒度分布, 这样 F 和 P 可用矢量表示如下:

$$F = [f_1, f_2, f_3, \dots, f_n]_{L \times n}^t \quad (8)$$

$$P = [P_1, P_2, P_3, \dots, P_n]_{L \times n}^t \quad (9)$$

式中: t ——矩阵转量。

应用数学模型的“黑箱理论”把 F 和 P 联系起来:

$$XF = P \quad (10)$$

式中: X ——碎解矩阵 (下三角阵), 其型式为

$$C = \begin{bmatrix} X_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ X_{21} & X_{22} & 0 & \dots & 0 \\ X_{31} & X_{32} & X_{33} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{n1} & X_{n2} & X_{n3} & \dots & X_{nn} \end{bmatrix}_{nn} \quad (11)$$