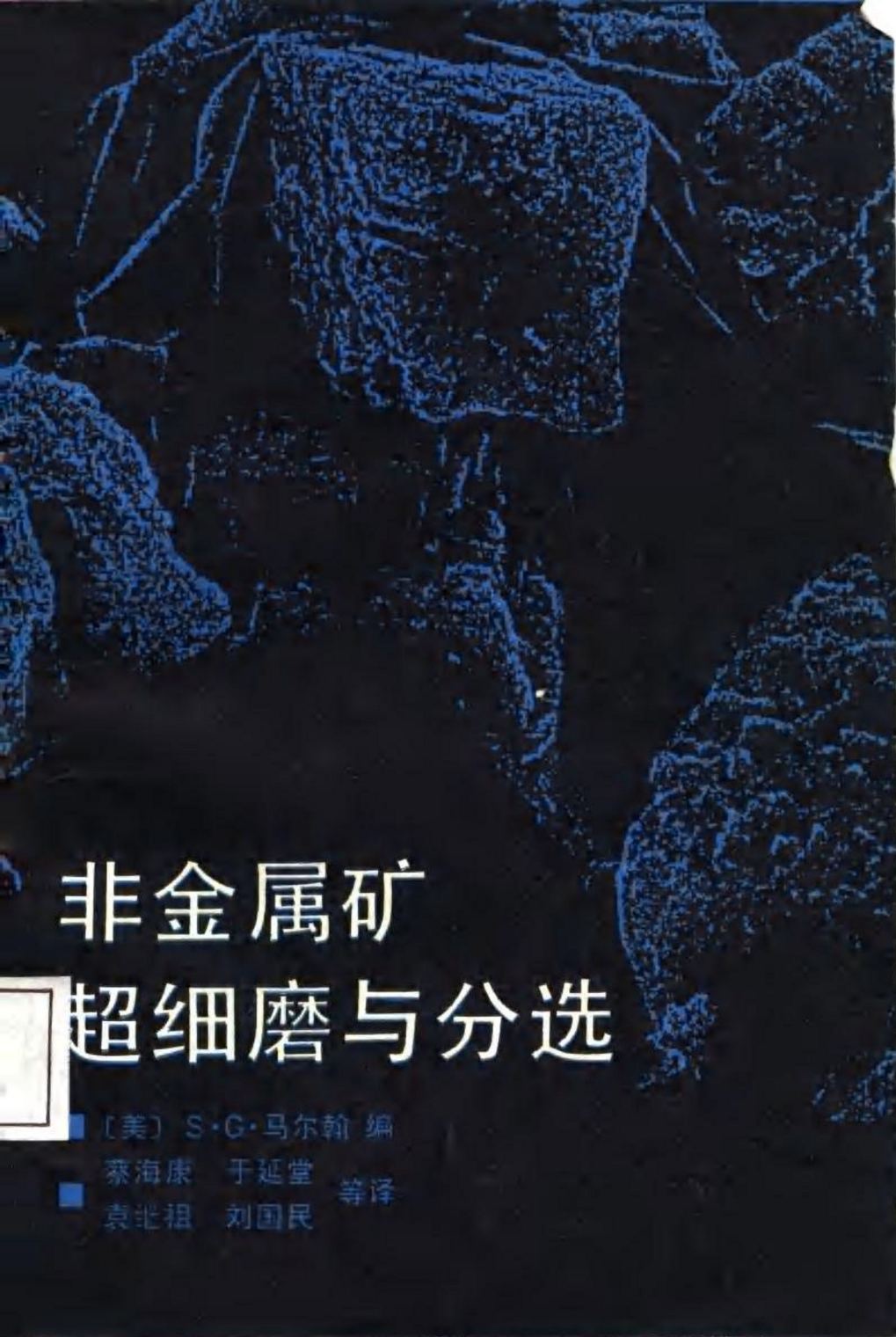




非金属矿 超细磨与分选

■ [美] S·G·马尔翰 编

■ 蔡海康 于延堂 等译
袁继祖 刘国民

非金属矿超细磨与分选

[美] S.G. 马尔翰 编

蔡海康 于延堂 等译

袁继祖 刘国民

中国建筑工业出版社

本文集是美国第112届采矿工程师协会会议上发表的论文汇编。共收入112篇文章,分为“非金属矿物的超细磨”和“超细非金属矿物的分选”两大部分。文章内容涉及以研磨作用、流体能量作用为基础的超细磨设备;应用细粒介质的超细磨设备;超细粒度分布的数学描述;超细磨矿中的机械化学效应;采用空气分级、高梯度磁选、载体浮选、选择性絮凝和水力旋流器等方法进行超细粒非金属矿的分选;描述超细粒表面的特性等。文集中介绍的各項技术反映了目前美国在非金属矿方面的生产技术水平,对我国从事非金属矿生产、科研、应用、教学等人员有较高的参考价值。

参加本书翻译和校订的有蔡海康、于延堂、袁继祖、宋杨、袁澄波、郭蕃桦、刘国民等。

Ultrafine Grinding and
Separation of Industrial Minerals

Súbhas G. Malghon

Editor

Published by Society of Mining Engineers
of The American Institute of Mining, Metallurgical
and Petroleum Engineers, Inc.

New York, NY-1983

非金属矿超细磨与分选

蔡海康 于延堂 等译

袁继祖 刘国民

中国建筑工业出版社出版(北京西便门大街26号)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
北京市平谷县大华印刷厂印刷

开本: 850×1168毫米 1/32 印张: 67/8 字数: 185千字

1988年2月第一版 1988年2月第一次印刷

印数: 1—1,890册 定价: 1.45元

ISBN7-112-00389-X/TU·277

统一书号: 15040·5306



前 言

对超细非金属矿物需要量的增长，是由于其在塑料、油漆、造纸等工业中作为填料、填充剂和涂料所起的重要作用。随着能源价格的提高和高品位矿石资源的枯竭，开发出较为完善的超细磨和分选的方法已经显得非常重要了。新方法的研究、开发和工业试验在近几十年已出现了快速的进展。在美国采矿工程师协会（AIME）的选矿（破碎和磨矿）委员会和非金属矿物部共同努力下使该文集得以出版，其目的是确认这方面的进展，并交流非金属矿超细磨和分选课题方面的资料。本文集汇集了在佐治亚州亚特兰大召开的第112届AIME会议期间三次讨论会上发表的15篇文章。这些文章在本书中归纳为“非金属矿的超细粉碎”和“超细非金属矿物的分选”两大部分。

编辑本文集的目的是为非金属矿超细磨和分选方面提供一次难得的信息交流机会。所收入的文章不仅包括对超细粒生产技术水平评述的内容，还介绍了这方面已出现的最新技术进展。主要涉及以研磨作用、流体能量作用为基础，以及应用细介质方面的超细磨设备；超细粒度分布的数学描述；超细磨矿过程中的机械化学效应的描述；用空气分级、高梯度磁选、载体浮选、选择性絮凝和水力旋流器等进行的超细粒分选的描述；以及超细粒度和表面特性的描述。

本文集（会议录）的出版是许多同事热情支持和努力工作的结果。我要感谢Bruce H. Mason先生和Nikilc. Trivedi先生在组织三次讨论会上给予的帮助。没有每篇文章作者付出的辛勤劳

动和才能，就谈不上本文集的出版。还要感谢AIME采矿工程师协会的Marianne Snedeker大力帮助。

编者S.G.马尔翰

1983年7月15日于得克萨斯州

Houston

目 录

第一部分 非金属矿物的超细磨

第一章	超细磨的设备类型、能力和选择·····	3
第二章	细粒干式球磨的破碎速率和粒度分布·····	11
第三章	在超细磨矿中机械化学的作用·····	26
第四章	非金属矿物的研磨·····	45
第五章	生产细粉的流体能量磨矿和干燥·····	63
第六章	用细粒磨矿介质干法或湿法磨细非金属矿物·····	82
第七章	在塔式磨机里的超细研磨·····	89

第二部分 超细非金属矿物的分选

第八章	超细粒的粒度和表面特性检测技术的发展趋势·····	95
第九章	用选择性磨矿和空气分级提高粘土矿的质量 以供生产波特兰水泥 ·····	108
第十章	超细粉的空气分级 ·····	120
第十一章	超细非金属矿物和煤的磁选 ·····	131
第十二章	用载体从粘土中浮选锐钛矿及其物理化学机理 ·····	149
第十三章	分离非金属矿物的水筛 ·····	168
第十四章	水力旋流器用于超细物料分离的实例研究 ···	187
第十五章	精选的高岭土上残留浮选油的定性测定 ·····	203

第一部分

非金属矿物的超细磨

第一章 超细磨的设备类型、能力和选择

摘 要

超细磨设备的选择要考虑到若干不同类型的干、湿磨碎装置。根据研磨物料的要求，系统地分析设备的生产能力和局限性，必须很重视设备选择的工作。

颗粒强度、最大和平均尺寸是控制磨矿作用和选择有效磨矿设备的主要变量。这些是素为人知的，它们为决策创造良好的开端。

在磨矿的动态条件下，颗粒所处空间的要求随其形状和粒度分布的不同有30X之多的变化。这个重要的变量没有被广泛的认识，它为确定磨矿过程的结构和程序提供一个坚实的基础，有必要对其加以详细的说明。

设备的能力和局限性

以平均粒度作基础的典型干、湿磨矿设备的工作范围，如列线图1-1和图1-2所示。通过图表的比较，说明可采用一种方法或两种方法结合来获得超细产品。当采用适当的设备和操作程序时，干、湿磨矿需要的能量没有很大的不同。所需的能量与表面积成比例，由第二个相应的标轴表示。有效的设备对中等强度物料研磨到某一平均粒度所需的累积能量是：

平均 粒度	(微米) 16, 8, 4, 2, 1 (最大(微米) = 5 X ~ 20 X)
累积 能量	(千瓦时/吨) 20, 40, 80, 160, 320, (通常范围 ± 50%)

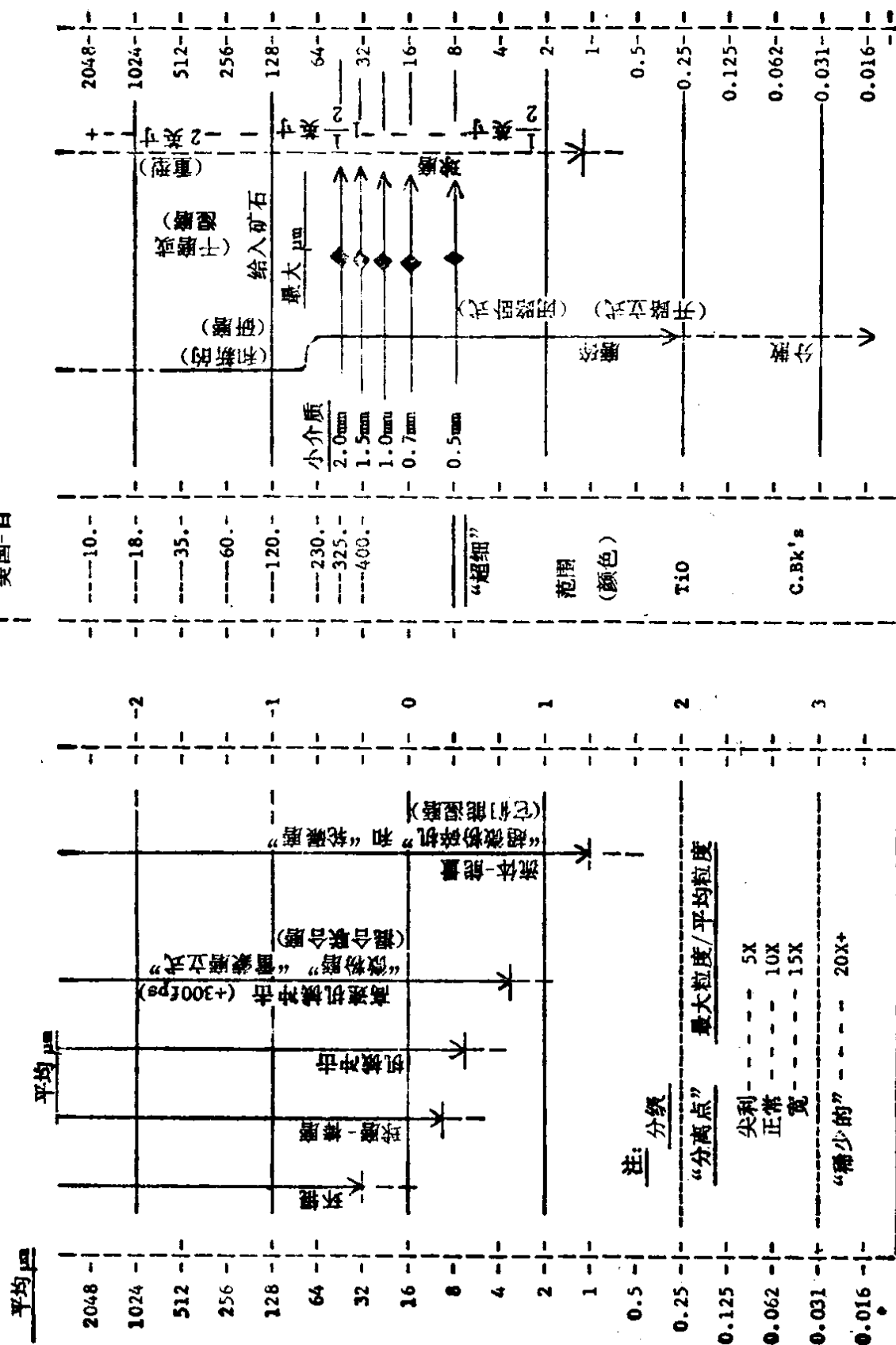


图 1-1 干磨设备

图 1-2 湿磨设备

因此选择设备的主要根据是在其它方面。考虑的重要条件是給料中粒度的大小，要求的产品是干的状态还是湿的状态。通常第二个考虑是根据现有的设备类型和新设备的价格而定的。

在这些考虑中，如果不必进行调查和试验就可做出决策的话，那就取决于人们对设备研磨作用和分级效率的必要认识。

干磨

从一适度的粗粒物料着手，将其磨至超细范围有三种基本的机理，它们是压碎、机械冲击、速度超过900厘米/秒(300转/分)的颗粒直接研磨。所有细粒都需或多或少的排出累积的细粒，以维持效率。

环滚磨矿装置是通过在压实的颗粒群上压碎作用工作的。重型棒磨机 and 球磨机就是以此为主要磨碎作用的，也有适量的低速机械冲击作用。

与干物料压碎装置一起应用的分级过程，对平均粒度小至10微米的颗粒不会有困难。大约在这种粒度下，颗粒间的接触可能开始超过600万/英寸²次，且由于颗粒再度压紧而使磨矿作用受到限制。

普通锤式磨是在低颗粒浓度下，借助物粒与各种旋转棒，固定的格栅或筛网的高速冲击而工作的。机内有分级作用，但为了把物料磨细到超细范围的上半部的细度，机外分级设备是需要的。

诸如Raymond立式冲击磨或Mikro-Pulverizer等速度很高的冲击磨，机内都有很好的连续分级作用。这类磨机能进行更细的破碎。然而，在旋转速度超过300吨/秒时，颗粒间就产生相当大的直接研磨作用，它们的研磨功能不是单方面而是混合的。

直线流体能量磨，如“Wheeler”和“Micronizer”型磨机，通常用来将物料磨到超细范围的下半部的粒度，直至平均粒度为1微米以下。这些磨机几乎完全是靠颗粒间的研磨及机内高效的分级来进行工作的。

在评价所有这些高速磨矿装置时，有两点要承认，即(1)磨碎作用与颗粒浓度有关，因而磨矿浓度应保持在最佳状态；(2)

分级能力通常决定平均粒度的下限。

干磨设备的进一步发展看来主要出现在细介质设备领域内。长期以来由于介质磨损及连续工作的设备所带来的困难，阻碍了其发展。

湿磨

除对较弱的结块和聚集物的破碎外，所有商业类型的湿磨机都通过这种或那种介质对悬浮在液体中的颗粒施加足够的力。

粗粒磨矿时，用外带的分级和循环能提高效率。但湿式分级比干式分级困难大，当平均粒度减少到10微米以下，更是如此。在这样条件下，物料的有效磨细是通过磨机的设计，阶段磨矿，逐渐降低介质尺寸而达到的。

在重型球磨机中进行粗磨时，介质的尺寸范围从最大80毫米到20毫米；中等粒度磨矿和细磨时，介质尺寸降至最小8毫米。大约介质尺寸低于16毫米时，磨机排出混合产物变的困难，介质尺寸限制为12毫米左右。

最大的颗粒粒度决定介质粒度的下限，以提供足够的力，达到满意的磨碎作用。因此对粗粒给料来说，单位磨机体积中的介质接触较少，从而导致了统计效率较差。用于有效的细磨及超细磨的小介质类型磨机的情况正好相反。利用较少介质的 Segvari 研磨磨 (union process 公司仍在出售) 是正在发展的 搅拌磨 (Stirred mills) 系列中的一种。这是一个间歇的工艺设备，使用的介质尺寸为10~3毫米，磨后混合物的排出是主要的操作问题。

这种小介质磨系列中的第二种是砂磨 (Sand Grinder)，0.7毫米的石英砂用来作低廉的介质。从1940年末 (S. Hochberg pat. 1952) 到1958年 (D. Bosse equipment pat. 1958) 的进展，是产生了一种高效的连续磨机，以后由 Dupont 在国际上取得了许可证。然而在这种介质尺寸下工作主要是为了物料的分散，实际研磨应用只限于在15微米以下的颗粒。

从带长滚搅拌的 Attritor 磨机和带有多个高速 (大约35英

尺/秒) 盘式搅拌器的连续Sand Grinder磨机开始, 现在已演变出各种立式和卧式的小介质磨的组合型式, 其中包括一种连续型的Attritor磨。

所有这些小介质磨的磨矿能力是由下面两种作用的特定组合来控制的: (1) 搅拌转子对混合物料——介质群所施的剪切应力; (2) 单位介质对夹在其中颗粒上的力的增加倍数。施加的剪切应力范围, 从开口立式磨机的0.5磅/英寸²到密闭压力磨机的1磅/英寸², 为了有效工作, 密闭压力磨大多数是卧式设备, 当设计中采用低速的旋转部件时, 剪切力可高达若干磅/英寸²。力倍增的系数(D_m/D_p) 给在表1-1中。小介质磨矿设备的统计效率, 能用减小给入磨机中最大颗粒的尺寸及适当降低介质尺寸的办法来提高。这是一个从湿或干的预磨操作上选择交叉点的问题, 最大的颗粒强度和颗粒尺寸是两个应考虑的量。

介质直径和接触点、相对力的比较 表 1-1

介质直径 (mm)	个数 ^① (cm ⁻¹)	力的倍增系数 50μm 的颗粒	25μm 颗粒
4.00	16	6400	25600
3.00	37	3600	14400
2.00	125	1600	6400
1.00	296	900	3600
0.75	1000	400	1600
0.50	8000	100	400

① 高剪切率下的动态压实。

新型的和进一步的设备开发主要在大型的连续小介质磨类型中, 因为这个类型磨机才可能既经济又产量高。介质尺寸和现有介质材料应是充足的。问题是要找出一个能充分地将热量排出的改进结构。

所有湿磨设备的磨矿效率还在很大程度上依赖于加工中颗粒

的浓度，这个变量还需要进行更详细的调查。

颗粒变量和流体力学

工艺设备中特定物料的行为，是由体积浓度以及使颗粒旋转的流动条件下颗粒的最终间隙所决定。干磨中固、气体积比 SV/GV 或湿磨中固、气体积比 SV/LV 与有效的颗粒间隙的关系需要给以定义，弄清并用来控制磨机中的磨矿作用。

均一的球体是描述在流动情况下颗粒浓度和间隙的基本参照系统。颗粒间隙趋向于均匀化时，很容易计算出任何给定的 SV/GV 或 SV/LV 的间隙。直接供球体磨矿介质用的这个数学关系，对非对称的颗粒要进一步转化。

高剪切率作用间隙减少到零时，颗粒浓度可以直接或间接地在固液混合物中测量。在这个临界点上的 SV/LV 数值，可定义为特定颗粒材料的“真正膨胀（粘度增加凝成固体的）点”（ TDP ）。均匀球体的真正膨胀点示于图1-3。

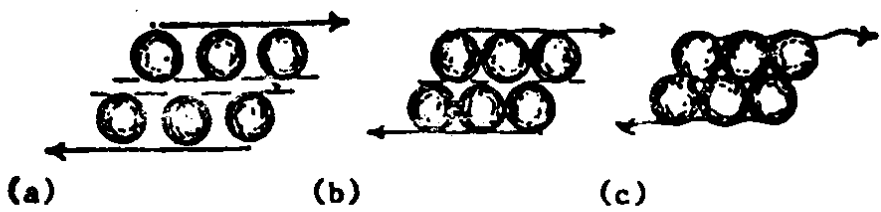


图 1-3 颗粒间隙与 SV/LV 和 TDP 的对应关系
(a) $SV/LV < \bullet TDP$; (b) $SV/LV = TDP$; (c) $SV/LV > \bullet TDP$

对均匀球体来说，在 TDP 点上混合物的 SV/LV 为1.1。它减小，间隙随着流体阻力的相应减少而迅速的增加；相反，提高混合物的 SV/LV ，将导致颗粒重叠覆盖，直至产生振荡运动，使流

① 原文漏，此处拟为 <——译者注。
② 原文漏，此处拟为 >——译者注。

体有一个低的剪切率并在剪切率增大到足够大的时候，导致机械固结。假如 SV/LV 增高到 TDP 点的40%，混合物将全部固结。

非对称的颗粒形状会使 TDP 值以及等效流体行为的 SV/LV 或 SV/GV 减少10倍之多。由于颗粒分布能产生相反的效应，小颗粒能进入大颗粒之间，且两种变量的联合效应引起颗粒 TDP 值变化在 $0.1 \sim 3.0SV/LV$ 的范围内（见图1-4）。

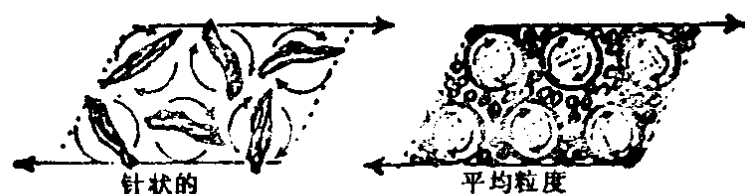


图 1-4 形状相对粒度分布和 TDP 的关系

干磨的研究

颗粒形状和粒度分布会改变某一给出平均颗粒尺寸时接触点的数目。因此，与挤压破碎作用相对照，磨矿下限出现在宽粒度分布的平均尺寸较大的对称颗粒位置上，反之亦然。这些变量会影响设备表面的粘着聚集以及团聚。

如机械冲击和流体能量类型的设备那样，在颗粒浓度相对低时，从磨矿作用角度来看，颗粒形状不那么重要，但粒度分布却很重要。因为细粒部分有效的起着缓冲作用，减少这种类型的磨矿作用。

至目前为止，为得到最大的磨矿效率所需的这二个变量和颗粒密度之间的具体关系，就作者们所知，还没有建立起一个数值关系。但他们能按湿磨混合物料时所采用的办法来建立。

湿磨的研究

任何类型的湿磨设备中，混合物料组成必须小心地加以调整，以得到有效的磨矿作用。颗粒浓度要求尽可能的高，只要在介质接触点不产生多余的流体阻力或太大的流体缓冲作用。该功能的目标是在介质接触点间置入多量的颗粒。为得到均匀的破碎，要防止颗粒被冲洗到周围空间去，并使介质的作用集中在大

颗粒上。

达到最佳磨矿作用的颗粒浓度与设备类型和所用的介质尺寸有关。但对任何一种特定的设备和介质来说,最佳浓度直接地和被磨物料的TDP成正比。取得后一种数据不难,这些资料有助于大量的减少必须做的试验。

需要用小介质磨进行最终湿磨的地方,应考虑作用在介质上的驱动力要相对的低。因为该力被带圆盘式转子的设备中的液相传播到介质中,在操作温度下,液相的粘度也不一定太低。如果温度不太高,由于液体粘度较低,可使颗粒浓度提高,通常效率就高。

颗粒絮凝和凝聚的形成也能阻碍磨矿,如果不通过混合物料的组成来适当控制,也能进一步限制在某些情况下的颗粒浓度。当颗粒封闭时,有助于把颗粒留在介质接触点间,一定数量的这种结构,是有利于磨矿的。顶部絮凝问题,仅是重量很少的极细颗粒使絮凝物有很大的不同,这个现象不应忽视。

当然,还有许多其它重要的流体力学细节未包括在这里,因此期待着这里提供有用的资料。

总 结

有大量的设备类型可用于干的或湿的超细磨。根据某一特定设备采用的磨矿机理,为达到超细粒级的最终粒度,设备还存在一定的限制。磨矿过程的变量——介质大小和密度,介质运动类型,固、液或固、气比,最大颗粒粒度与介质粒度的比例等等,在决定细粒生产的最终效率方面起着重要作用。设备进一步开发的方向是制造出大规模、连续的小介质磨,这种磨机将是既经济而且超细粒产量又大的设备。

D.G.Bosse 著

宋 扬 译

刘国民 校

第二章 细粒干式球磨的破碎速率和粒度分布

摘 要

定量研究有关物料随细磨而出现细粒破碎速率变化的方法已经出现。较硬而脆且无覆盖膜的物料如石英，破碎速率的降低最初只在粗粒磨矿中较明显，并在闭路磨矿系统生产较粗产品 $P_{80} = 75\mu\text{m}$ 时不易察觉。然而，细磨系统例如 $-10\mu\text{m}$ 组分的磨矿中，也开始出现这种情况，并且分级变的更加困难。细粒的形成引起了磨矿效率的降低。综合这些问题，在细磨范围得到累积重量的粒度分布也是难的。

引 言

长期来人们都认识到，用滚动球磨机将脆性物料干磨到超细粒度时，有别于较粗物料磨矿时所观察到的“正常”行为。这种情况是由于球面形成了一层致密的、细粒的粘结覆盖层，或细粒的造球作用形成了坚实的大颗粒，或颗粒因破碎而变小后使Griffithth裂纹消失，从而大大地增大了细粒的强度。众所周知，长时间的球磨会使延展性物料相互作用而形成合金，如果非常细的颗粒显示出非脆性，就有可能出现塑性流引起的表面熔化的情况。表面活性剂（助磨剂）对细颗粒磨矿过程的影响可归结为他们对这些机理的影响。

由于缺少对细颗粒的破碎速率变化进行跟踪的方法，以及未能精确地对所谓“正常”行为和“不正常”行为加以说明，所以，对这些现象的定量研究工作遭到阻碍。Austin和Bagga在若干物料的分批细磨中，进行了比破碎速率变化的分析，他们发现可以用一次破碎方程来说明正常区。按下式定义，