



选择性磨矿研究概述

杨金林,莫凡,周文涛,薛天利,马少健,杨晓静
(广西大学 资源与冶金学院,广西 南宁 530004)

摘要:选择性磨矿是指多种矿物组成的矿石在磨矿过程中,由于矿物与矿物之间硬度的不同,致各矿物的破碎程度不同的一种磨矿现象。论文基于选择性磨矿现象和应用,介绍了物料性质、磨矿机械、操作条件等因素对选择性磨矿的影响规律,认为合理调控选择性磨矿影响因素对于提高磨矿效率和优化磨矿产物粒度组成具有重要意义。

关键词:选择性磨矿;影响因素;磨矿效率;磨矿优化

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2017.05.001

中图分类号:TD921 文献标志码:A 文章编号:1000-6532(2017)05-0001-06

磨矿时,由于矿石的各种组成矿物之间的机械性差异,导致各矿物在磨碎过程中表现出不同的磨碎行为,其中硬度大的矿物被磨碎程度较小,产品粒度较粗,硬度小的矿物被磨碎的程度较大,产品粒度较细,这种现象称为矿物的选择性磨矿现象^[1]。该现象广泛存在,随着矿产资源日趋贫、细、杂化,选择性磨矿将有广阔的应用空间。应用选择性磨矿原理,可以减少有用矿物的泥化,从而减少有用矿物的浪费;可以在矿物在尽量粗的情况下排出不需要继续磨细的矿粒,减少不必要的破碎,降低能耗;应用选择性磨矿原理,还可以得到有利于下步分选的产品,甚至取代某些分选作业。

1 选择性磨矿研究现状及应用

1.1 选择性磨矿研究现状

关于选择性磨矿的研究,昆明理工大学段希祥教授主编出版了《选择性磨矿及其应用》专著。关于锰矿、萤石、钨矿、红柱石矿、滑石、锡石、废旧电路板等选择性磨矿现象及其影响有少量研究报导^[2-6]。近十年来,为开发利用低品位铝土矿,我国就铝土矿的选择性磨矿进行了比较深入的研究,研

究内容涉及磨机型式^[7-9]、介质^[10]、助磨剂^[11-12]等因素对铝土矿选择性磨矿的影响和控制。

1.2 选择性磨矿应用

目前,选择性磨矿已经在煤矿、金属矿及非金属矿等矿物原料的磨矿作业中得到应用^[13-15]。选择性磨矿的应用,按照其目的的不同可分为五大类:(1)增强矿物选择性解离的磨矿:选矿中的磨矿目的是使有用矿物解离,或者是使互相粘结的矿物颗粒分离,无论是哪一种,均是增强矿物解离选择性。(2)选择性地磨细脉石矿物的磨矿:当脉石矿物的硬度小而有用矿物的硬度大时,可以考虑磨细脉石矿物,使其在细粒级排出;如金钢石矿磨矿时就是磨细硬度低的脉石,使脉石在细粒级排出。(3)选择性地保护待回收的有价矿物的磨矿:这是选择性磨矿研究的重点,磨矿过程中减少有价矿物过粉碎,可以提高产品的回收率和质量;如煤在磨矿中要求煤粒在粗粒级下解离和回收,以减少煤泥生成;石棉矿磨矿时要求保护石棉纤维的天然长度及强度。(4)选择性地减少脉石矿物粉碎的磨矿:减少不必要的破碎,是碎矿磨矿遵守的原则,在保证有用矿物充分解离的条件下应尽量减少脉石磨碎,使脉石在尽可能粗

收稿日期:2016-03-12;改回日期:2016-04-20

基金项目:国家自然科学基金(51264001);973计划前期研究专项(2014CB460606);广西高校矿物工程重点实验室资助项目。

作者简介:杨金林(1975-),男,博士,副教授,主要从事矿物加工工程专业教学与科研工作。

的粒度下被抛弃。(5)选择性地扩大有价矿物与脉石矿物之间的粒度差或者形状差的磨矿:如金刚石矿的磨矿、磁铁石英岩的细磨细筛磨矿等^[16]。

2 选择性磨矿的主要影响因素

选择性磨矿产生主要是由矿石中各种矿物机械性质不同导致,也与磨碎机械的施力方式、操作条件、大小等有关。

2.1 物料性质

自然界的矿物按照晶体化学的分类方法可分为六大类^[17],即自然元素、硫化物及其类似化合物、氧化物与氢氧化物、含氧盐、卤化物、有机矿物。各类矿物具有不同的机械性质,当受到磨碎作用时表现出不同的磨矿行为。另外,各矿物在磨碎过程中还存在着相互作用,主要表现为硬矿物对软矿物的屏蔽作用和软矿物对硬矿物的催化作用。

硬矿物对软矿物的屏蔽作用。当入磨物料中存在硬度不同的两种或多种矿物时,同时受到磨碎作用时,由于矿物之间机械作用的相互干扰,使得物料在受到磨碎作用时硬矿物对软矿物产生“屏蔽作用”。当两个钢球相接触时,如果处于接触点上的是软矿物颗粒,并且周围都是不直接处于其它接触点硬矿物,当软矿物受到磨碎作用粒度减小时,周围硬矿物颗粒对钢球破碎作用的阻碍作用大于软矿物颗粒,所以接触点上的软矿物颗粒遭受的破碎作用将比周围都是软矿物颗粒时的弱,硬矿物的存在阻碍软矿物被进一步的破碎,这种作用就是硬矿物对软矿物的屏蔽作用。由于入磨物料是多种矿物相互混合的,软矿物周围有硬矿物的情况总会存在,所以硬矿物对软矿物的屏蔽作用,在混合矿物的磨碎过程中是普遍存在的。此外,由屏蔽作用的原理可以得出,软硬矿物的硬度差别越大,屏蔽作用就越强;反之,软硬矿物的硬度差别越小,屏蔽作用就越弱。

软矿物对硬矿物的催化作用。与硬矿物对软矿物的屏蔽作用原理相似,软矿物对硬矿物的催化作用的产生也是由于矿物之间机械作用的相互干扰。当两个钢球相接触时,如果处于接触点上的是硬矿物颗粒,并且周围都是不直接处于其它接触点软矿物,当硬矿物受到磨碎作用粒度减小时,周围软矿物颗粒对钢球破碎作用的阻碍作用小于硬矿物颗粒,所以接触点上的硬矿物颗粒遭受的破碎作用将比周围都是硬矿物颗粒时的强,软矿物的存在加快了硬

矿物颗粒的磨碎速度,这就是软矿物对硬矿物的催化作用。此外,与硬矿物对软矿物的屏蔽作用相似,软硬矿物的硬度差别越大,催化作用越强,硬度差别越小,催化作用就越弱。

2.2 磨矿机械

不同类型的矿物,由于各种机械性质的差异,在磨矿设备中普遍存在选择性磨矿现象。但是,不同类型的磨矿设备由于其施力的方式和大小不同,也会使入磨的物料具有不同的选择性磨矿效果。现今选矿厂常用的磨矿设备有球磨机、棒磨机、振动磨机、自磨机和半自磨机等,这几种磨矿设备磨碎原理不尽相同,它们磨矿作用和选择性磨矿效果也不完全相同。

2.2.1 球磨机的选择性磨矿

球磨机是一种传统的物料破碎装置,至今已有一百多年的发展历史,在磨矿作业过程中占有不可取代的地位。现广泛用于冶金、化工、水泥、陶瓷、建筑等工业部门,可对各种矿石及物料进行干式和湿式粉磨。球磨机的工作原理是通过滚筒带动钢球运动,钢球被提升到一定高度后自由抛落或者沿着钢球堆斜面滚下,期间对磨机内的物料产生冲击和研磨作用。

球磨机对物料产生磨矿作用是靠磨机内的磨矿介质运动来实现的,对于球磨机内钢球的运动状态研究,自20世纪20年代E. W. DAVIS提出磨矿理论研究成果^[18]以来,国内外学者在该领域进行了大量的研究,并提出了许多观点,这些观点大体可分为三相混合运动理论、纯二相运动理论、脉动冲击运动理论和肾形蠕动区运动理论。

关于球磨机内钢球的运动规律的研究,国内也有相关的研究报告。司亚梅和吕一波^[19]借助图像处理技术,分析不同转速及不同介质充填率对磨矿介质的运动状态的影响,并探讨了磨机内磨矿介质运动轨迹、公转和自转运动规律。董为民、文书明、刘道玉等^[20]对超临速球磨机磨矿介质运动的三个阶段运动规律进行了研究,并推导出球磨机超临速条件下磨矿介质的运动轨迹方程、冲击力公式和冲击次数等。吴文广和张荣曾^[21]从磨矿介质运动的散体性质入手,分析介质的受力及运动形态,建立和论证了一个描述磨矿介质运动状态的散体理论。

球磨机主要是靠钢球的研磨和冲击作用使物料被磨碎的。球磨机选择性磨矿优点是钢球在破碎时

与物料呈点接触,在接触点上的容易形成应力的集中度集中、破碎作用力强,物料容易被破碎;缺点是接触点上破碎力作用的准确性差,导致物料的选择性解离差,容易造成物料的过粉碎。

2.2.2 棒磨机的选择性磨矿

棒磨机的构造与球磨机的大致相同,应用程度也仅次于球磨机,它通过筒带带动磨矿介质运动,介质被提升到一定高度后自由抛落或者沿着介质堆斜面滚下,期间对磨机内的物料产生冲击和研磨作用。不同的是磨矿介质,棒磨的磨矿介质是长圆钢棒,工作特性与钢球相差较大;球下落时球与球之间是点接触,棒与棒之间则是线接触;当棒荷之间夹有矿粒时,首先破碎的是粗矿粒,细矿粒在中间受到保护,故棒的破碎作用具有选择性。

同时,棒条夹有矿粒而上升时,棒条之间的细粒会从缝隙之间通过,从而使粗矿粒集中在磨矿介质打击的地方。因此,棒磨机只比较适合嵌布粒度粗的矿石磨矿,磨矿效率较高,破碎产品粒度均匀过粉碎轻,介质消耗量低,常用于锡、钨和其他稀有金属矿石的磨矿作业,以减少有用矿物的过磨和过粉碎^[22-23]。对于嵌布粒度细的矿石磨矿,就会凸显棒磨机选择性磨矿的劣势。

2.2.3 振动磨机的选择性磨矿

振动磨机是利用振动原理进行磨矿的设备,主要运用于物料的细磨作业。振动磨机的工作原理具体过程如下:振动磨机靠激振源产生不平衡的周期性作用力带动整个磨机运动;磨筒内的物料和介质直接或通过其他介质和物料接受来自磨筒的运动,进一步由自身的运动传给其他物料或介质,使得物料和介质作为一个整体处于最佳振动状态,进行着细小而激烈的跳动,一边相互碰撞,一边进行着与电机的转向相反的公转,进而使得物料和介质、物料和物料、物料和筒壁、介质和介质、介质和筒壁之间有冲击、研磨和剪切作用^[24]。

振动磨机自1934年取得专利以来^[25],国内外学者对其磨矿理论进行了大量的研究工作,主要涉及振动磨机的运动学和动力学分析、能量分布和提高能量利用率两个大方向^[26]。对于振动磨机的运动学和动力学分析的研究内容主要涉及到三个方面:(1)把磨矿介质作为一个理想的质点的圆形振动轨迹的数学描述;(2)单一自由度、偏心单质点振子、有阻尼振动系统的机械模型^[27];(3)二自由度系

统^[24],改系统在微分方程中引入四个集中质量的偏心振子,并考虑磨介、磨管以及偏心质量。对于振动磨机的能量分布及利用率方面,目前存在两大主流观点:一是主张低转速($n=1000\text{ r/min}$)、大振幅($A=12\text{ mm}$);一是主张高转速($n=1500\text{ r/min}$)、小振幅($A=6\text{ mm}$)^[28]。我国对于振动磨机的研究起步较晚,20世纪60年代才由北京水泥研究院研制出国内第一台振动磨机^[29];王树林通过高速摄像对振动磨进行研究,提出了“离心粉碎应力场”的理论^[30-31];王则胜对振动磨的介质运动状态做了高速摄像分析^[32]。总的来说,振动磨机的磨矿理论还处在研究阶段,还未形成一套完整的理论体系。

振动磨机中的物料主要受到高频冲击作用,高频的冲击作用能使物料在矿物的结合的脆弱面产生裂纹,使不同的矿物在磨碎过程中解离,由于这一特性使得振动磨机具有较好的选择性磨矿效果。

2.2.4 自磨机和半自磨机的选择性磨矿

自磨是指物料在磨机中靠物料本身或物料与筒体衬板之间的相互冲击、研磨而破裂的过程^[33]。自磨可分为矿块自磨、半自磨、砾磨和岩矿自磨四种,对应的磨机分别为自磨机、半自磨机和砾磨机。自磨的过程与球磨过程基本相似,影响自磨机的生产能力和条件的参数与球磨机相类似,但磨机的形式有较大的区别。

1899年,科学工作者发现了矿石自磨的现象^[33];1932年,世界上第一台自磨机于研制成功^[34];20世纪50年代末自磨机开始应用于矿山工业生产^[35],这比常规磨矿晚了几十年。因此,矿石自磨的原理研究尚不够深入。关于矿石自磨的原理,有三种不同的观点^[36]:(1)干式自磨机的设计者D. Weston提出自磨的磨矿作用有三种,即矿块自由下落时的冲击作用、矿石由压应力突变为张应力的瞬间应力作用、矿块之间的相互磨矿作用,此观点的争议点在瞬间应力作用上;(2)F. C. 邦德的学生C. A. Rowland认为,自磨机中更多的是研磨作用,冲击作用较少;(3)还有一种观点认为,自磨机中的磨矿作用和球磨机中的一样,仍是冲击和研磨两种作用。上述三种观点都还缺乏足够的资料和研究来证明,因此现阶段很难统一。

总的来说,关于自磨机中的磨矿作用尚缺乏统一的认识和观点,自磨机的选择性磨矿效果还有待进一步的研究。

2.3 操作条件

在磨矿作业中除了入磨物料和磨矿机械的类型外,磨机的操作参数对物料的选择性磨矿也有重要的影响。这些操作参数主要有磨矿时间、磨矿浓度、磨机充填率、磨机转速、助磨药剂等。

2.3.1 磨矿时间对选择性磨矿的影响

磨矿时间主要影响磨矿产品的粒度,一般来说,磨矿产品的粒度随着磨矿时间的增加而减小。矿粒的机械强度随着粒度的减小而增加,当矿粒的粒度较粗时,机械强度较低,容易被破碎;当矿粒的粒度较细时,机械强度较大,难被破碎。因此,随着磨矿时间的增加,各矿物的粒度减小,机械强度增加,导致各矿物之间的强度差缩小,选择性磨矿现象减弱。所以磨矿时间过长,将减弱物料的选择性磨矿效果,且容易造成矿物的过粉碎。

2.3.2 磨矿浓度对选择性磨矿的影响

磨矿浓度主要通过影响矿浆的粘性和流动性来影响磨矿介质的破碎力和物料被磨时间的长短,从而影响着物料在磨机中的选择性磨矿效果。磨矿浓度越高,矿浆的粘性就越大,流动性就越差,介质受到矿浆浮力阻力变大,对物料的打击效果也随之变差;然而,高浓度的矿浆中含的矿粒较多,被介质打中的矿粒也就较多。而矿浆浓度低时情况则刚好相反。

在研究钢球在湿式磨矿过程中的磨损机理时发现,会有一层矿浆覆盖在钢球表面,这层矿浆就被称为罩盖层^[37-38]。罩盖层的存在影响着介质与介质、介质与物料、介质与衬板之间的相互接触,从而影响着物料在磨机中的磨矿效果。矿浆流变特性研究表明,罩盖层的厚度主要取决于矿浆的粘度^[39];矿浆的粘度主要与矿浆浓度有关,当矿浆压力、温度、粒度分布及颗粒形状保持不变时,罩盖层的厚度主要与矿浆的浓度有关。矿浆浓度对罩盖层厚度的影响存在临界值,当矿浆浓度低于临界值时,罩盖层厚度随着矿浆浓度的增大而缓慢增加;当矿浆浓度高于临界值时,罩盖层厚度随着矿浆浓度的增大而急剧增加。当矿浆浓度较低时,介质表面罩盖层较薄,介质与介质、介质与衬板之间的磨损量大,矿粒的粉碎几率小;随着矿浆浓度的增大,介质表面罩盖层厚度增大,当介质与介质、介质与衬板相互碰撞时,罩盖层内的矿粒被粉碎的概率增大,磨矿效率提高^[40]。当矿浆浓度超过临界值时,介质表面罩盖层厚度急剧增大,罩

盖层的粘性阻力对磨矿介质的冲击起缓冲作用^[39],物料被粉碎概率减小,磨矿效率也随之降低。

2.3.3 充填率对选择性磨矿的影响

介质充填率是指磨矿介质在磨机内的堆积体积所占磨机有效容积的百分数,或是磨矿介质所占断面面积与磨机有效断面面积的比值^[41-42]计算公式为:

$$\Phi = \frac{V_c}{V_0} \times 100\% \text{ 或 } \Phi = \frac{F_c}{F_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: V_c 、 F_c —分别为磨矿介质所占体积和断面面积; V_0 、 F_0 —分别为磨机有效体积和有效断面面积。

在其他条件不变的情况下,提高磨矿介质充填率,相当于增加磨机内进行磨碎的有效介质数目,从而增加磨机生产能力。但是,当介质充填率过高时,介质堆积也相对较高,相对的减少了介质抛离点与抛落点之间的距离,从而减少了介质的有效冲击高度,进而减弱介质的冲击磨矿作用,对磨矿作业造成不利的影响。同时磨机内介质运动肾形蠕动运动理论研究表明,介质在磨机中运动时介质层中心区域形成-肾形内核^[43-45],此肾形内核内介质相对运动甚微,仅仅进行缓慢蠕动,基本上不起磨矿作用,但对磨矿效率、钢耗及能耗有影响;肾形内核的大小、方位与磨机的充填率、转速、介质形状、衬板类型以及被磨物料的物理化学性质有关。

总的来说,介质的充填率影响着磨机的冲击作用的强度和肾形内核的方位与大小,从而影响着物料在磨机中的选择性磨矿效果。

2.3.4 转速对选择性磨矿的影响

磨机的转速率是指实际转速与临界转速的百分比,计算公式为:

$$\psi = \frac{n}{n_c} \times 100\%, n_c = \frac{30}{\sqrt{R-r}} \quad (2)$$

式中: ψ —磨机的转速率; n —磨机实际转速; n_c —磨机的临界转速; R —磨机的半径; r —磨矿介质的半径。

关于转速率对磨机磨矿效果的影响有一些相关的报道,主要涉及最优转速率^[46-48]、磨机功耗^[49-50]、磨矿的细度^[51]及介质运动状态^[52]等。

磨机转速率主要影响磨矿介质的运动状态,从而影响着物料在磨机中的选择性磨矿效果。磨机内介质的运动分析表明,充填率和转速率共同决定着磨机内介质的运动状态。当磨机的充填率在 30% ~ 50% 之间时,随着转速率的增加介质由泻落式转变

为抛落式,磨机消耗的功率逐渐增加,生产率也逐渐增加;当磨机的转速率超过100%时,将有部分介质做离心运动,做离心运动的介质没有磨矿作用。磨矿介质在不同的运动状态下具有不同的磨矿作用,也就具有不同的选择性磨矿效果,其中介质处于泻落状态是以研磨作用为主,处于抛落状态时具有较强的冲击和研磨作用。

2.3.5 助磨药剂对选择性磨矿的影响

研究表明,助磨药剂可以通过改变矿物表面粗糙度进而改变矿浆的流变学特性。如六偏磷酸钠、无水碳酸钠通过改变矿物表面电位绝对值增强了矿浆流变性,减弱了软硬矿物之间的“屏蔽”和“催化”作用,强化了铝土矿的选择性磨矿^[53];多磷酸钠聚合物中的一种六聚体能够增强鞍山式微细粒贫赤铁矿矿物颗粒间排斥作用,进而增强了矿浆中的悬浮颗粒的分散性,达到提高磨矿效率、降低过磨、提高选择性磨矿的目的^[54]。

3 结 论

论文基于选择性磨矿现象和应用,介绍了物料性质、磨矿机械、操作条件等因素对选择性磨矿的影响规律。在选择性磨矿过程中,影响磨矿效率的因素较多,这些因素多数只能定性判断,难以定量分析。因此,在实际磨矿生产中,利用上述影响规律,结合现场情况和因素影响定性结果来全面分析、合理调控选择性磨矿影响因素,对于提高磨矿效率和优化磨矿产物粒度组成具有重要意义。

参考文献:

- [1] 段希祥. 选择性磨矿及其应用[M]. 北京:冶金工业出版社,1991.
- [2] P. Tucker. The influence of pulp density on the selective grinding of ores[J]. International Journal of Mineral Processing, 1984, 12(4): 273-284.
- [3] S. Koyanaka, S. Endoh, H. Ohya. Effect of impact velocity control on selective grinding of waste printed circuit boards[J]. Advanced Powder Technology, 2006, 17(1): 113-126.
- [4] 李翠芬, 苏成德. 萤石矿的选择性磨矿试验[J]. 河北理工学院学报, 2006, 28(2): 7-10.
- [5] 刘敏婕. 辉钼矿选择性磨矿现象及其对选矿工艺的影响[J]. 中国铝业, 1995, 57(19): 38-44.
- [6] 段希祥. 锡矿的选择性磨碎现象研究[J]. 云南冶金, 1981(2): 17-26.
- [7] 曾桂忠, 段希祥. 立式球磨机在铝土矿选择性磨矿的试验研究[J]. 矿山机械, 2009, 37(17): 58-60.
- [8] 韩跃新, 朱一民, 田祎兰, 等. 低品位铝土矿在振动磨机中的选择性磨矿研究[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2009(10): 1489-1492.
- [9] 魏新超, 韩跃新, 印万忠, 等. 河南铝土矿选择性磨矿的试验研究[J]. 黄金学报, 2001, 3(3): 192-195.
- [10] 张国范, 冯其明, 陈启元, 等. 铝土矿选择性磨矿中磨矿介质的研究[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2004, 35(4): 552-556.
- [11] 田祎兰, 韩跃新, 杨小生, 等. 用助磨剂强化铝土矿选择性磨矿研究[J]. 金属矿山, 2006, 357(3): 42-45.
- [12] 袁致涛, 王泽红, 印万忠, 等. 助磨剂对铝土矿选择性磨矿过程强化的研究[J]. 金属矿山, 2004, 337(7): 22-24.
- [13] 陈天虎, 黄明康, 庆承松. 大别山区低品位滑石选择性磨矿分选工艺初步研究[J]. 矿产保护与利用, 1994(2): 26-28.
- [14] 罗春梅, 肖庆飞, 段希祥. 氧硫混合铅锌矿的选择性磨矿研究与实践[J]. 矿产综合利用, 2013(3): 26-30.
- [15] 王翠花, 支永勋, 李学忠. 选择性磨矿在萤石选矿工艺中的应用[J]. 化工矿物与加工, 2013(6): 37-39.
- [16] 段希祥. 选择性磨矿的应用研究[J]. 云南冶金, 1990(3): 21-24.
- [17] 李胜荣, 许虹, 申俊峰, 等. 结晶学与矿物学[M]. 北京:地质出版社, 2008.
- [18] E. W. DAVIS, TRANS. AIME[J]. 1919, 61: 250-296.
- [19] 司亚梅, 吕一波. 磨机中磨矿介质的运动规律[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2006, 57(5): 40-43.
- [20] 董为民, 文书明, 刘道玉, 等. 超临速球磨机磨矿介质运动学规律研究[J]. 有色金属: 选矿部分, 2006(2): 33-35.
- [21] 吴文广, 张荣曾. 磨矿介质运动形态分析的散体理论[J]. 煤炭加工与综合利用, 1995(2): 24-27.
- [22] 段希祥, 曾庆学, 杨志慧. 周边排料棒磨机碎锡矿石的应用研究[J]. 昆明工学院学报, 1982(1): 104-113.
- [23] 张忠汉, 张先华, 叶志平, 等. 难选白钨矿重-浮选新工艺的研究[J]. 广东有色金属学报, 2001, 11(2): 79-83.
- [24] 张世礼. 振动粉碎理论及设备[M]. 北京:冶金工业出版社, 2005.
- [25] Dr-Ing K-E Kurrer, Prof Dr-Ing E Cock. Effect of the operating conditions on motion and impact processes in vibration tube mills. Berlin: Aufbereitung-Technik, 1986(10).
- [26] 阎民, 郭天德, 曹维庆. 振动磨理论研究进展[J]. 西安理工大学学报, 1998, 14(4): 417-421.
- [27] Roese H E, Sullivan R M E. Vibration mills and vibration

- milling constable. London, 1961.
- [28] Dr-Ing J-J Jeng, Prof Dr-Ing E Gock. Sizing of tube vibration mills with the aid of simulation model based on machine dynamics. *Aufbdrei tungs-Technik* 1992, 33(7).
- [29] 郭天德. 振动磨的发展及降低能耗途径[J]. *中国非金属矿工业导刊*, 1999(5): 79-84.
- [30] 王树林. 高效率振动磨机功率吸收及其动力学特性[J]. *矿山机械*, 1987(3): 24-29.
- [31] 王树林. 振动磨机内部动力学的研究[J]. *矿山机械*, 1994(5): 2-5.
- [32] 王则胜. 振动磨双区内阻装置的试验研究[J]. *矿山机械*, 1993(7): 25-30.
- [33] 符寒光, 许军, 吴建中. 自磨机衬板的应用和发展[J]. *选矿机械*, 1994(4): 31.
- [34] 雅申 BM, 波尔特尼科夫 AB. 自磨理论和实践[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1982.
- [35] 张光烈. 国外自磨技术的进展[J]. *国外金属矿山*, 1995(9): 40.
- [36] 段希祥. 磨碎与磨矿[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
- [37] I. Iwasaki, K. A. Natarajan. Corrosive and abrasive wear in ore grinding, *Wear*, 1985, 103: 253.
- [38] 张一清. 湿式磨矿过程中钢球磨损机理的研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 1999.
- [39] 杨小生, 陈苒. 选矿流变学及其应用[M]. 2版长沙: 中南工业大学出版社, 1995: 183.
- [40] 谢恒星, 李松仁, 张一清, 等. 磨矿条件对钢球磨损的影响[J]. *武汉化工学院学报*, 2000, 22(1): 34-36.
- [41] 刘敏婕. 关于球磨机中钢球充填率大小的探讨[J]. *中国铝业*, 1998, 6(22): 54-58.
- [42] 郑伟德. 球磨机钢球充填率的计算及测定[J]. *华东电力*, 1996, 4(2): 14-19.
- [43] A. H. МармМа, ИЭВ. ВУЗ. Гор. жур[J]. 1981(1): 101-107.
- [44] A. H. МармМа, ИЭВ. ВУЗ. Гор. жур[J]. 1981(4): 98-104.
- [45] A. H. МармМа, ИЭВ. ВУЗ. Гор. жур[J]. 1981(5): 108-111.
- [46] 刘基博. 球磨机一种新的最优转速率[J]. *矿山机械*, 2007, 35(1): 18-20.
- [47] 刘基博. 球磨机钢球抛落运动中的第四种最优转速率研究[J]. *矿山机械*, 2012, 40(4): 79-83.
- [48] 卢建坤, 马伟, 王继生, 等. 考虑物料破碎形式的球磨机最优转速率研究[J]. *矿山机械*, 2013, 41(9): 72-75.
- [49] 孙军锋, 董为民, 张建勇, 等. 填充率与转速率对球磨机功率影响的研究[J]. *矿山机械*, 2009, 37(9): 76-78.
- [50] 曾义根. 磨机转速率和充填率对功耗的影响[J]. *矿冶工程*, 1988, 8(2): 26-28.
- [51] 李鸿程, 董为民, 姚辉, 等. 转速率与填充率对球磨机磨矿产品粒度影响的试验研究[J]. *有色金属: 选矿部分*, 2013(3): 45-48.
- [52] 刘宇, 万卉, 刘丽萍, 等. 球磨机内单个研磨介质运动的理论分析[J]. *中国粉体技术*, 2010, 16(4): 61-64.
- [53] 罗春华. 助磨剂对河南低品位铝土矿助磨效果的研究[D]. 长沙: 中南大学, 2008.
- [54] 梁冰, 尹小波, 赵礼兵, 等. 助磨剂对微细粒贫赤铁矿磨矿作用机理研究[J]. *辽宁化工*, 2015, 44(12): 1420-1422.

Review of Research on Selective Grinding

Yang Jinling, Mo Fan, Zhou Wentao, Xue Tianli, Ma Shaojian, Yang Xiaojing

(School of Resources and Metallurgy, Guangxi University, Nanning, Guangxi, China)

Abstract: Selective grinding is a grinding phenomenon with the different crushing extent of the minerals for the difference of the hardness between the minerals in the grinding process. Based on selective grinding phenomena and applications, the effects of material properties, grinding machinery and operation conditions on selective grinding are introduced. It is obvious that regulating factors of selective grinding reasonably has an important significance for improving grinding efficiency and optimizing size composition of grinding product.

Keywords: Selective grinding; Influence factors; Grinding efficiency; Grinding optimization