

# 磨矿对矿物浮选行为的影响及助磨剂的作用

毛勇, 王泽红, 田鹏程, 高伟, 周鹏飞

东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819

中图分类号: TD921<sup>+</sup>.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2020)06-0162-07  
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2020.07.013

**摘要** 磨矿是个复杂的物理化学过程,通过改变矿物的表面性质和矿浆性质进而影响矿物的浮选行为。在磨矿过程中,磨矿方式、磨矿介质、磨矿细度以及药剂的添加都会对矿物的浮选行为产生影响。从磨矿过程中的电化学、溶液化学、机械力化学三个主要方面总结了磨矿影响矿物浮选的机理。助磨剂改善了磨矿产品中合格粒级的含量,可显著提高磨矿效率,降低能耗,并对磨矿-浮选体系起显著影响。

**关键词** 磨矿;浮选;助磨剂

磨矿是选矿工艺的主要组成部分,磨矿作业的目的在于使脉石矿物与目标矿物充分实现单体解离,并为后续选别作业提供粒度适宜的物料。选矿厂的能耗和钢材主要消耗在磨矿阶段,据统计,磨矿过程的电耗大约占选矿厂总电耗的50%~60%;磨矿过程钢球的消耗量约为0.5~1.5 kg/t 矿石;衬板的磨损也很严重,磨耗平均为0.25 kg/t 矿石,寿命只有3~9个月<sup>[1]</sup>。磨矿作业对后续选别作业,特别是浮选作业的影响很大。从整个磨矿-浮选体系来看,磨矿是个复杂的物理、化学及物理化学过程,会引起矿物的表面性质、晶体结构、粒度及其组成、矿浆溶液化学等性质发生一系列的变化,同时也会导致一系列的问题,如细磨引起的矿泥罩盖、被磨矿物氧化速度加快和磨矿效率低下等问题<sup>[2]</sup>。矿物的浮选行为主要由矿物表面性质和矿浆性质所决定,而这两个决定性的因素会受分选作业之前磨矿过程的影响。

为了降低磨矿能耗和提高磨矿效率,人们做了大量的研究工作,其中在磨矿过程中添加助磨剂就是一种有效的方法。我们把在磨矿过程中,能显著提高磨矿效率和降低能耗的化学添加剂称为助磨剂。应用助磨剂可在不增加任何设备、不改变现有生产流程的前提下,显著提高磨矿效率,增加磨机生产能力,降低磨矿能耗和钢耗,是企业降低生产成本、提高经济效益的

有效措施<sup>[3]</sup>。助磨剂在水泥工业、磷肥生产和陶瓷制造中都有广泛的应用,在矿物加工领域应用较少,目前的研究主要集中在铁矿石和铝土矿的助磨效果上。

本文重点论述了磨矿对矿物浮选行为的影响,以及磨矿过程中添加的助磨剂对整个磨矿-浮选体系的影响,并对助磨剂在选矿领域的应用提出了新的研究方向。

## 1 磨矿对矿物浮选行为的影响

### 1.1 磨矿方式

不同的磨矿方式对浮选的影响不同,目前的研究主要集中在干磨与湿磨、球磨、高压辊磨、水射流磨矿以及不同的磨矿工艺上,不同的磨矿方式直接影响矿物颗粒表面的晶格缺陷程度,从而影响矿物表面离子的溶解和反应活性,进而影响矿物的浮选行为<sup>[4]</sup>。

#### 1.1.1 干磨与湿磨

干磨与湿磨对矿物浮选的影响主要是针对硫化矿研究的,硫化矿经干磨后表面变得粗糙,无定型化程度较高,容易形成晶格缺陷,但是与湿磨相比,干磨更容易引起颗粒团聚,因此物料经过干磨与湿磨后,会产生不同的浮选行为<sup>[5]</sup>。

收稿日期:2020-11-11

基金项目:国家自然科学基金(51874073)

作者简介:毛勇(1996-),男,陕西汉中,硕士研究生,主要从事选矿理论的研究,E-mail: 1978560611@qq.com。

通信作者:王泽红(1969-),男,山西永济人,副教授,博士,主要从事矿物加工工程领域的教学和科研工作,E-mail: wangzehong@mail.neu.edu.cn。

Feng D 研究了干磨与湿磨对南非 Merensky Reef 复杂硫化矿浮选行为的影响,相同条件下与湿磨后产品相比,干磨后的颗粒浮选泡沫更稳定、浮选速度更快,湿磨后矿物表面较光滑,而干磨后矿物表面较粗糙,矿物表面能量会以晶体缺陷的形式储存,这样增加了捕收剂 SIBX(异丁基钠黄药)与硫化矿作用的活性位点,因此硫化矿经干磨后比湿磨浮选效果更好,但是硫化矿的浮选是个复杂的体系,还应该考虑到氧化程度对磨矿-浮选体系的影响<sup>[6]</sup>。

### 1.1.2 球磨与水射流磨矿

球磨过程中由于磨矿介质的存在,会改变矿物的表面电性,影响浮选药剂在矿物表面上的吸附,而水射流磨矿可以减弱这种影响,可以保持一些矿物的天然可浮性。冯宏杰等研究了水射流磨矿和球磨磨矿(铁介质球和玛瑙介质球)对闪锌矿浮选的影响,结果表明闪锌矿在不同的磨矿方式下浮选回收率大小为:水射流磨矿最大,玛瑙介质球磨次之,铁介质球磨最小;浮选速度为:水射流磨矿最快,铁介质球磨最慢。作者认为导致上述结果的主要原因是:水射流磨矿可使闪锌矿瞬间粉碎解离,从而保持了闪锌矿良好的天然可浮性<sup>[7]</sup>。梁朝胜比较了不同磨矿方式对闪锌矿抑制剂作用效果的影响,在无抑制剂时,水射流磨矿产品的浮选回收率大于球磨(铁介质);在抑制剂存在条件下,抑制剂对水射流磨矿后的闪锌矿的抑制效果比球磨效果好。这主要归因于闪锌矿表面与铁球发生了反应,生成大量亲水性的羟基铁化合物,不利于抑制剂与闪锌矿表面产生作用<sup>[8]</sup>。

### 1.1.3 不同的磨矿工艺

高压辊磨-球磨产品的矿物平均单体解离度比颚式破碎-球磨产品的高,因此前者往往表现出较好的浮选指标。许云鹏研究了高压辊磨和球磨条件下方解石颗粒的浮选行为,结果表明,当磨矿细度较低时,高压辊磨制备的方解石在使用油酸钠和十二胺作捕收剂时,浮选指标比其它磨矿方式好<sup>[9]</sup>。马英强以某含金铜矿石为研究对象,在磨矿细度-74 μm 占 75% 条件下,高压辊磨-球磨产品浮选获得的含金铜精矿产率较颚式破碎-球磨提高 0.14%,金品位提高 0.64 g/t,金回收率提高 2.80 个百分点,铜品位提高 0.73 个百分点,铜回收率提高 6.19 个百分点<sup>[10]</sup>。

## 1.2 磨矿介质

磨矿介质对浮选影响的研究主要集中在铁介质、陶瓷介质、玛瑙介质和锆石球上。磨矿过程中磨矿介质与矿粒连续碰撞,介质成分会对矿物表面性质产生

重要影响。江宏强等研究发现,采用陶瓷介质磨矿后,方铅矿浮选效果均优于铁介质磨矿;同时,相比于铁介质磨矿,陶瓷介质磨矿后方铅矿的浮选速度更快,说明瓷磨更有利于方铅矿的快速浮选<sup>[11]</sup>。呼振峰研究了磨矿介质对长石和石英浮选行为的影响,在油酸钠作捕收剂的条件下,磨矿介质是锆石球时,石英和长石浮选回收率都很差;磨矿介质是铁球时,石英和长石才存在选择性分离的可能<sup>[12]</sup>。李茂林研究了不同磨矿介质对方铅矿矿浆化学性质的影响,结果表明,不同的磨矿介质会对矿浆的 pH 值、矿浆电位、矿浆中溶解氧含量、 $Pb^{2+}$  和  $Fe^{3+}$  浓度造成较大的差异,从而影响方铅矿的浮选行为<sup>[13]</sup>。聂梦宇研究了闪锌矿在不同磨矿介质下可浮性的差异,结果表明,在相同药剂条件下,陶瓷介质湿磨后闪锌矿的可浮性比钢球介质好;不同的磨矿介质对闪锌矿最佳浮选 pH 值几乎没有影响。陶瓷介质湿磨后闪锌矿表面较为平整,表面覆盖的金属氧化物较少<sup>[14]</sup>。

## 1.3 磨矿细度

磨矿作业的主要作用就是给后续浮选作业提供合格的粒度产品,磨矿细度对浮选的影响至关重要,矿浆中矿物的粒度及其组成直接影响浮选的回收率。入浮物料太粗,有用矿物的单体解离度不高,颗粒太大不易被泡沫浮起,最终造成目的矿物回收率低下;入浮颗粒太细会导致浮选药剂的选择性降低,不仅会造成精矿品位的低下,还会大大增加浮选药剂的用量<sup>[15]</sup>。而对于大多数矿石而言,磨矿细度-74 μm 含量直接影响浮选回收指标,适宜的磨矿细度不仅决定了浮选回收率,还能降低磨机的能耗和钢耗。沈传刚研究了钼矿石磨矿细度对浮选指标的影响,试验结果表明,在磨矿细度-74 μm 占 65% 的条件下,可以获得较好的综合回收率和精矿品位。后续的工业试验表明,将现场的磨矿细度-74 μm 占 60.13% 优化到 65.22% 后,钼的回收率提高了 0.83 个百分点,钼精矿品位提高了 0.78 个百分点,并且降低了球磨机的电耗和钢耗<sup>[16]</sup>。杨稳权对不同类型胶磷矿进行了磨矿细度试验研究,结果表明,细磨有利于磷矿物与脉石矿物单体充分解离,提高精矿的回收率,过细会增加磨矿成本和药剂消耗,最适宜的磨矿细度是-0.074 mm 粒级含量 93% 以上,此时精矿产率为 89.98%<sup>[17]</sup>。章晓林发现不同的磨矿细度对钛精矿的浮选指标影响很大,-0.074 mm 含量为 85% 时的钛精矿  $TiO_2$  回收率为 55%<sup>[18]</sup>。

## 1.4 药剂

### 1.4.1 浮选药剂

生产实践证明,如果将浮选使用的调整剂和捕收

剂等提前加入到磨机中,使其与矿物解离过程中产生的新鲜表面充分接触,延长作用时间,可达到改善磨矿指标和提高药效,进而可保持或改善浮选指标<sup>[3]</sup>。卜显忠等在研究铜锌分离时,将相同用量的石灰分别加入到浮选槽或球磨机中,试验结果表明,石灰提前加入到磨机内能显著提高铜锌矿物浮选效果,铜的回收率增加4.75个百分点,铜精矿锌含量降低0.47个百分点。机理分析表明,石灰加入磨机中产生的氢氧化钙粒子在磨矿过程中起到助磨剂的作用,导致有用矿物解离度提高,增加了易浮粒级 $-0.075 + 0.044$  mm的含量,进而提高了浮选指标<sup>[19]</sup>。何向文将胶磷矿调整剂YP1和YP11提前加入到磨机中,并与直接添加到浮选槽作对比,结果表明,调整剂加入到磨机后,精矿 $P_2O_5$ 的回收率提高4.82个百分点,尾矿 $P_2O_5$ 含量降低1.52个百分点;这两种调整剂具有良好的分散效果,能减弱矿泥对浮选的不利影响,加入到磨机中改善了矿浆的流变性和颗粒表面的电性,降低了胶磷矿矿浆黏度,从而提高了浮选效果<sup>[20]</sup>。

#### 1.4.2 助磨剂

有些捕收剂提前加入到磨机中,增加了捕收剂和矿物表面接触反应的时间,有利于气泡矿化,从而提高了浮选回收率<sup>[21]</sup>;还有一些药剂加入球磨机可起到提高磨矿效率和降低能耗的作用,即起到了助磨剂的作用。助磨剂的加入会改变磨矿环境,会对矿物的表面性质和溶液化学性质产生重要影响,因此对浮选过程也会产生影响,但是相应的机理研究几乎没有报道<sup>[22]</sup>。梁冰以ZJ-02助磨剂对鞍山式微细粒贫赤铁矿进行磨矿及浮选研究,试验结果表明,助磨剂用量在0.3%时,可以改善微细粒贫赤铁矿的磨矿效率,对后续浮选没有不利的影 响,但随着ZJ-02用量增大,精矿品位明显降低<sup>[23]</sup>。王泽红研究了不同助磨剂在油酸钠和十二胺作捕收剂的条件下,对石英浮选行为的影响,研究结果表明,在球磨机中添加丙酮、氯化铵和氯化钠三种助磨剂后,磨矿产品石英的浮选回收率均有所下降,而添加三乙醇胺后石英的回收率分别提高了5.83个百分点和4.94个百分点<sup>[24]</sup>。

## 2 磨矿影响矿物浮选体系的机理分析

矿物的浮选分离主要受矿物表面物理化学性质和矿浆性质的影响,矿物的表面性质主要包括硬度及强度、表面形貌、润湿性、表面电性和表面张力等;矿浆的性质主要包括黏度、pH值、电位和矿浆组分等,而矿物的表面性质和矿浆性质在很大程度上受磨矿作业的影响,在整个磨矿-浮选体系中,矿物的表面性质和矿浆性质主要是磨矿过程中的电 化学、溶液化学以及机械

力化学共同作用的结果<sup>[25]</sup>。磨矿过程对浮选影响的机理研究主要集中在硫化矿上,对于氧化矿及硅酸盐矿物报道较少。

### 2.1 电 化学作用

磨矿过程的电 化学作用主要是针对硫化矿物进行研究的,大部分硫化矿物是半导体,在磨矿体系中,单一硫化矿物形成局部电池,不同的硫化矿物以及矿物与磨矿介质之间形成伽伐尼电偶,从而造成矿物表面电位发生改变<sup>[26]</sup>。当磨矿介质是铁介质时,由腐蚀电 化学的宏观表现为金属表面的破坏可知,磨矿过程伴随着金属腐蚀,是一个阳极氧化并伴随着表面氧化剂吸收阳极电子的阴极过程<sup>[20]</sup>,同时氢氧化物会罩盖在矿物表面上,影响浮选药剂在矿物表面上的吸附,这会对浮选指标产生重要影响。另外,在磨矿过程中硫化矿物的自身氧化也是电 化学作用的结果,氧使矿物的表面正电性增加,有利于捕收剂在矿物表面吸附;硫化矿物自身氧化也会导致无捕收剂浮选<sup>[27]</sup>。硫化矿物的氧化产物受矿浆体系以及矿物表面的氧化程度影响,氧化产物的种类将显著影响浮选指标<sup>[28]</sup>。采用不同的磨矿介质以及磨矿方式,硫化矿物的氧化产物以及电 化学作用不同,从而导致矿物的浮选行为不同,由此可知,自磨可以减弱介质与硫化矿物之间的电 化学作用,有利于硫化矿物的浮选<sup>[29]</sup>。

### 2.2 溶液化学作用

矿物在溶液中会发生溶解,盐类矿物有较大的溶解度,在它们的饱和水溶液中溶解了大量的晶格离子;盐类矿物的矿浆还具有一定的缓冲作用,pH值会稳定在一定范围内,这些都会对浮选产生一定的影响<sup>[30]</sup>。不同的磨矿环境会对盐类矿物在溶液中的溶解平衡产生不同的影响,改变矿浆的pH值、动电位和离子浓度,从而影响盐类矿物的浮选<sup>[31]</sup>。Sui CC发现在黄铁矿、磁黄铁矿、方铅矿和闪锌矿的体系中,矿浆溶液中金属离子的产物将受到磨矿介质、矿浆pH和捕收剂存在与否的影响<sup>[32]</sup>。Corin KC发现,磨矿介质会改变硫化矿矿浆的pH值、矿浆电位和溶解氧含量,还原性更高的介质更容易被氧化,消耗更多的氧,降低了矿浆中溶解氧含量,而磨矿介质的形状对浮选影响较小<sup>[33]</sup>。

### 2.3 机械力化学作用

在磨矿过程中矿物受到机械力作用,化学组成或结构发生改变时,称为机械力化学激活。Balaz等研究发现,机械力化学反应会促进硫化矿物的氧化分解,形成缺金属表面,并有 $S^0$ 、金属氧化物、硫酸盐和碳酸盐

等生成<sup>[34]</sup>。磨矿方式或时间的不同会引起矿物晶体缺陷,矿物的晶体缺陷越多,其化学性质越活泼<sup>[35]</sup>。磨矿还会使矿物的晶格键断裂,使矿物表面产生大量的不饱和键,促使矿物同周围环境中的介质发生反应,改变矿物的表面性质<sup>[36]</sup>。胡岳华等研究表明,随着磨矿介质和机械力改变,方铅矿的电位会发生改变,而电极电位是影响硫化矿物浮选的决定性因素<sup>[37]</sup>。

### 3 助磨剂对磨矿-浮选体系的影响

助磨剂能提高磨矿产品中合格粒级的含量,进而提高磨矿效率,降低磨矿能耗。助磨剂在磨矿过程中的作用机理主要以两大学派为主导,即吸附降低硬度学说和以降低矿浆黏度为主导的流变学理论<sup>[38]</sup>。吸附降低硬度学说的主要观点是:矿物表面存在着大量的不饱和键能,可通过吸附其周边物质来降低自己表面能量,使自身达到稳定结构,而助磨剂分子的加入正好弥补了这一能量,使得矿物颗粒晶格产生了缺陷,从而降低颗粒的强度和硬度;同时阻止新生裂纹的闭合,促进裂纹的扩展。以降低矿浆黏度为主导的流变学理论认为:助磨剂通过改善矿浆的流变学特性,降低了矿浆的黏度,促进颗粒的分散,同时阻止颗粒在研磨介质及衬板上的黏附及颗粒之间的团聚作用,从而提高磨矿效率<sup>[39-40]</sup>。助磨剂的加入改变了矿物的表面性质和矿浆性质,进而影响整个磨矿-浮选体系。

#### 3.1 助磨剂对磨矿产品粒度及粒度组成的影响

##### 3.1.1 单一助磨剂

助磨剂目前使用较多的是一些盐类和醇胺类化学药剂,如六偏磷酸钠、油酸钠和三乙醇胺等。罗春华在铝土矿磨矿过程中分别添加无水碳酸钠、六偏磷酸钠和RC等助磨剂,与不加助磨剂相比,磨矿细度 $-0.075+0.038$  mm含量分别提高了0.58个百分点、0.5个百分点和0.35个百分点;磨矿细度 $-0.038$  mm含量分别降低了0.12个百分点、0.12个百分点和0.21个百分点,可见无水碳酸钠、六偏磷酸钠和RC对铝土矿 $-0.075$  mm粒级有较好的助磨作用,对小于 $0.038$  mm的物料有阻磨作用,有利于选择性磨矿<sup>[41]</sup>。邓善芝研究了聚丙烯酸钠、顺丁烯二酸酐、DA分散剂和六偏磷酸铵四种助磨剂在磨矿质量浓度为85%、球料比为 $0.75$ 、介质质量配比为 $m(\Phi 30\text{ mm}):m(\Phi 20\text{ mm}):m(\Phi 15\text{ mm})=31\%:23\%:46\%$ 的条件下,助磨剂用量对铝土矿粉磨效率的影响。研究发现,四种助磨剂分别在最佳用量 $0.7\%$ 、 $0.5\%$ 、 $0.5\%$ 和 $0.5\%$ 时,磨矿产品中 $-0.074$  mm含量分别提高了5.45个百分点、4.64个百分点、3.64个百分点和3.73个百分

点<sup>[42]</sup>。李炼在研究助磨剂对赤铁矿磨矿效率的影响时发现,在磨矿质量浓度为70%时,加入碳酸钠、六偏磷酸铵和焦磷酸铵三种助磨剂,明显改善了磨机排矿产品粒级,即 $-0.074$  mm含量分别提高了5.53个百分点、8.26个百分点和6.6个百分点; $-0.038$  mm含量分别提高了2.89个百分点、5.72个百分点和6.09个百分点。而适量的石灰和氢氧化钙对磨机排矿产品粒级含量的改善不明显<sup>[3]</sup>。蔡先炎研究了鲕状赤铁矿在 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度加热处理下,添加油酸钠、木质素磺酸钠和十二烷基磺酸钠三种助磨剂对其解离度的影响,在最佳磨矿条件下与未经热处理的矿石相比,磨矿产品中 $-0.074$  mm粒级的含量分别提高8.70个百分点、7.20个百分点和5.80个百分点;磁铁矿的解离度分别提高了16.62个百分点、10.60个百分点和11.80个百分点,这三种助磨剂都具有明显的助磨效果<sup>[43]</sup>。

##### 3.1.2 复配助磨剂

单一助磨剂有时候并不能显著改善磨矿效率,近年来关于复配助磨剂的研究,也有一些报道。徐冬林研究了NM-3、乙酸铵和焦磷酸钠三种助磨剂复配对赤铁矿磨矿效率的影响,正交试验发现,三种助磨剂同时加入磨机时起阻磨作用,当加入 $0.30\%$ 的NM-3和 $0.134\%$ 的乙酸铵时,磨矿产品 $-0.074$  mm粒级含量与不加助磨剂相比提高了9.98个百分点,NM-3和乙酸铵复配起到了助磨的作用<sup>[44]</sup>。李三华研究了两种不同的复配助磨剂对钠长石磨矿效果的影响,结果表明,偏磷酸铵与偏磷酸钠复配,比三乙醇胺和三异丙醇胺复配对钠长石的助磨效果好,在前者条件下磨矿产品 $-0.074$  mm粒级含量比不加助磨剂提高了12.60个百分点,后者提高了8.45个百分点<sup>[45]</sup>。李海兰将六偏磷酸钠和无水碳酸钙助磨剂混合使用,研究其对攀枝花钒钛磁铁矿的磨矿效果,结果表明,这两种助磨剂在 $1:1$ 的质量配比下,磨矿产品中 $-0.074$  mm粒级含量为75.36%,比不加助磨剂提高了7.36个百分点<sup>[46]</sup>。

#### 3.2 助磨剂对矿物表面性质的影响

在磨矿过程中加入适量的助磨剂,可以改变矿物颗粒的硬度及强度、表面形貌、表面电位以及表面能量,进而改变物料的易粉碎性及分散性,从而提高磨矿效率和降低能耗,并会对后续的浮选作业产生影响。

##### 3.2.1 颗粒硬度及强度

不同助磨剂对矿石的作用效果不同,这样可以扩大矿石各种机械强度的差异,强化矿物之间的选择性磨碎作用,为后续的浮选作业提供合适的入选粒度,有

利于实现矿物的选择性分离<sup>[41]</sup>。王怀研究了不同助磨剂对铝土矿球磨邦德功指数和单轴抗压强度的影响,结果表明,加入 Z-64D、Z-D162C 和六偏磷酸钠后,铝土矿的球磨邦德功指数比不加助磨剂时的分别下降了 3.79%、3.28% 和 4.80%,单轴抗压强度分别下降了 42.79%、43.52% 和 45.21%,这三种助磨剂都能降低矿石的硬度及强度<sup>[1]</sup>。

### 3.2.2 矿物表面形貌

王泽红结合磨矿产品的 SEM 图,分析了 DA 助磨剂对铝土矿颗粒形貌的影响,添加 DA 助磨剂后,颗粒的整体外形趋于球形,有利于降低颗粒流动时的阻力,提高矿浆的流动性<sup>[47]</sup>。李国峰研究了 Z-164D 对鲕状赤铁矿表面性质的影响<sup>[48]</sup>,与不加助磨剂相比,Z-164D 的添加使得磨矿产品表面凹凸不平,在磨矿过程中由于助磨剂的侵蚀,使得赤铁矿表面出现了裂缝,提高了磨矿效率。

### 3.2.3 矿物表面电位

助磨剂能改善矿浆的流动性,主要是由于助磨剂分子增大了矿物颗粒表面电位的绝对值,增大了双电层的排斥力和空间位阻效应,促进了矿物颗粒的分散。李炼研究了六偏磷酸钠对赤铁矿表面电位的影响,结果发现,当加入六偏磷酸钠后矿浆的 pH 值迅速下降,矿物颗粒的表面电位向负值移动,且绝对值增大,促进了颗粒分散,降低了矿浆的黏度<sup>[3]</sup>。邓善芝研究了助磨剂六偏磷酸钠对铝土矿颗粒表面电性的影响,添加六偏磷酸钠后,矿浆电位由 -28 mV 下降到了 -82 mV,矿浆中的带电离子增多,使得矿物颗粒表面的动电位增加,由扩展的 DLVO 理论可知,增大电位的绝对值,可以增大双电层的排斥力,因此提高了矿浆的分散性<sup>[42]</sup>。

### 3.2.4 矿物表面能量

矿物颗粒表面有大量的不饱和键能,在磨矿过程中,其通过吸附周围物质来降低自己的能量,使表面趋于稳定,助磨剂的加入补偿了这一能量,降低了矿物表面的自由能。王泽红研究了助磨剂对云母表面破裂能的影响,云母在 10 mmol/L 的柠檬酸钠溶液中,与其在水中相比,云母破裂能降低了约 20%,即助磨剂吸收了接近 20% 的破裂能<sup>[49]</sup>。

## 3.3 助磨剂对矿浆性质的影响

### 3.3.1 黏度

在磨矿过程中加入一定量的助磨剂可以降低矿浆

的黏度,提高矿物颗粒之间的分散性,进而改善矿浆的流动性,提高磨矿效率。田祎兰研究了不同矿浆浓度下助磨剂 DA 对铝土矿矿浆黏度的影响,在矿浆浓度为 70% 时,助磨剂 DA 对矿浆黏度的影响不明显;在矿浆浓度为 80% 时,与不加助磨剂相比,矿浆黏度由 1 665 Pa·s 降低到 1 281 Pa·s,明显降低了矿浆黏度<sup>[50]</sup>。

### 3.3.2 pH 值

助磨剂作为一种化学添加剂,按照其化学性质和结构可以分为无机盐类、醇胺类、醇类和糖类及其衍生物类<sup>[51]</sup>,这些助磨剂特别是无机盐类,如六偏磷酸钠、乙酸钠、油酸钠和碳酸钙等的添加会明显改变矿浆的 pH 值,而矿浆的 pH 值会直接影响矿物表面电位,因此助磨剂会影响浮选药剂在矿物表面的吸附,进而改变矿物的浮选行为。

## 4 结论

(1) 磨矿是个复杂的物理、化学及物理化学过程,不同的磨矿方式、磨矿介质以及磨矿细度都会对矿物的浮选行为产生重要的影响。磨矿影响矿物浮选行为的机理研究主要是集中于硫化矿物,在磨矿过程中矿物的表面性质和矿浆性质主要受电化学、溶液化学和机械力化学等多种作用因素的影响,应将磨矿和浮选作业看成一个整体,综合考虑两者之间的影响。

(2) 助磨剂在选矿中的应用相对较少,主要集中在用于铁矿和铝土矿。助磨剂能提高磨矿产品中合格粒级的含量,进而提高磨矿效率,降低磨矿能耗。一般情况下使用复配助磨剂比单一助磨剂的效果更好,但是关于复配助磨剂提高磨矿效率的作用机理报道较少。助磨剂通过改变矿物的表面性质以及矿浆性质影响整个磨矿-浮选体系,在讨论复配助磨剂对矿物浮选行为的影响及其作用机理时,应从助磨剂改变矿物表面性质和矿浆物理化学性质两个方面入手,这是助磨剂应用的研究方向之一。

### 参考文献:

- [1] 王怀. 助磨剂对矿石粉碎特性的影响及其作用机理研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2013.
- [2] 何发钰. 磨矿环境对硫化矿物浮选的影响[D]. 沈阳: 东北大学, 2006.
- [3] 李炼. 赤铁矿磨矿助磨剂的试验研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2019.
- [4] MIKA PELTONIEMIA, RITA KALLIOA, ANTTI TANHUA. Mineralogical and surfacechemical Characterization of flotation feed and products after wet and dry grinding[J]. International Journal of Minerals Processing, 2020, 156: 106500.
- [5] 王怀. 助磨剂对矿石粉碎特性的影响及其作用机理研究[D]. 沈阳: 东

- 北大学,2013.
- [6] FENG D, ALDRICH C. Comparison of the flotation of ore from themerensky reef after wet and dry grinding[J]. *International Journal of Minerals Processing*, 2000(2): 115-129.
- [7] 冯宏杰,王建英,王介良,等. 不同磨矿方式对闪锌矿浮选的影响[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2018(4): 35-40.
- [8] 梁朝胜,王建英,张雪峰. 磨矿方式影响闪锌矿抑制剂性能的机理研究[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2019(5): 76-80.
- [9] XU PENGYUN, LI JING, HU CONG, et al. Surface property variations in flotation performance of calcite particles under different grinding patterns [J]. *Journal of Central South University*, 2018(6): 1306-1316.
- [10] 马英强,吴凯,印万忠,等. 不同粉碎方式对含金铜矿石浮选的影响[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2015(5): 60-65.
- [11] 江宏强. 磨矿介质对方铅矿浮选行为的影响及消除方法研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2019.
- [12] 呼振峰,孙传尧. 磨矿介质对长石和石英浮选行为的影响及机理分析[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2018(3): 62-66.
- [13] 李茂林,江宏强,崔瑞,等. 磨矿介质对方铅矿浆化学性质的影响[J]. *矿产保护与利用*, 2018(1): 91-95.
- [14] 聂梦宇,韩跃新,李艳军. 磨矿介质对闪锌矿浮选行为的影响研究[J]. *金属矿山*, 2019(2): 163-167.
- [15] 肖庆飞,康怀斌,肖琛,等. 碎磨技术的研究进展及其应用[J]. *铜业工程*, 2016(1): 15-27.
- [16] 沈传刚,肖庆飞,宋念平. 磨矿细度对辉钼矿浮选的影响[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2017(1): 51-54.
- [17] 杨稳权. 磨矿细度对胶磷矿浮选精矿产率和  $P_2O_5$  回收率的影响[J]. *磷肥与复肥*, 2012(4): 17-19.
- [18] 王怀. 助磨剂对矿石粉碎特的影响及其作用机理研究[D]. 沈阳:东北大学,2013.
- [19] 章晓林,徐翔. 磨矿细度对钛铁矿浮选指标的影响[J]. *昆明冶金高等专科学校学报*, 2010(5): 6-9.
- [20] 何向文,谢国先,杜灵奕. 药剂不同添加方式对胶磷矿浮选的影响研究[J]. *化工矿物与加工*, 2012(3): 4-5.
- [21] 王岚. 改进药剂制度提高浮选指标[J]. *有色金属*, 1959(15): 21-22.
- [22] 高伟,王泽红,毛勇. 助磨剂在石英粉磨中的应用研究现状及发展趋势[J]. *金属矿山*, 2019(9): 22-27.
- [23] 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(12): 1419-1422.
- [24] 王泽红,周鹏飞,高伟,等. 助磨剂对石英磨矿效果及浮选行为的影响[J]. *金属矿山*, 2020(3): 138-142.
- [25] 呼振峰. 磨矿因素对典型硅酸盐矿物浮选的影响[D]. 北京:北京科技大学,2017.
- [26] 冯其明,许时,陈蓁. 硫化矿物浮选电化学[J]. *有色金属(选矿部分)*, 1990(3): 35-39.
- [27] 冯其明. 硫化矿浆体系中的电偶腐蚀及其对浮选的影响(I): 电偶腐蚀原理及硫化矿浆体系中的电偶腐蚀模型[J]. *国外金属选矿*, 1999(9): 2-4.
- [28] 王淀佐,龙翔云,孙水裕. 硫化矿的氧化与浮选机理的量子化学研究[J]. *中国有色金属学报*, 1991(1): 15-23.
- [29] MCCARRON JJ, WALKER GW, BUCKLY AN. An X-ray Photoelectron Spectroscopic Investigation of Chalcopyrite and Pyrite Surface after Conditioning in Sodium Sulfide Solution [J]. *International Journal of Minerals Processing*, 1990, 30(1): 1-16.
- [30] PEASE JD, CURRY DC, YOUNG MF. Designing Flotation Circuits for High Fines Recovery [J]. *Minerals Engineering*, 2006, 19(6): 831-840.
- [31] 王淀佐,胡岳华. 浮选溶液化学[M]. 长沙:湖南科学技术出版社, 1988.
- [32] SUI CC, BRIENNE SHR, RAMACHANDRA RAO S, et al. Metal Ton Production and Transfer between Sulphide Minerals [J]. *Minerals Engineering*, 1995(12): 1523-1539.
- [33] CORINA KC, SONGA ZG, WIESEA JG, et al. Effect of using different grinding media on the flotation of a base metal sulphide ore [J]. *Minerals Engineering*, 2018(126): 24-27.
- [34] 格列姆博茨基 BA, 郑飞. 浮选过程物理化学基础[M]. 北京:冶金工业出版社, 1985.
- [35] BALAZ P, BRIANCIN J, TUCANIOVA L. Thermal Decomposition of Mechanically Activated Tetrahedrite [J]. *Thermochimica Acta*, 1995, 249: 375-38.
- [36] В. И. ТИОПЛИКОВА, 罗绍宏. 硫化矿微粒的晶格结构和浮选行为特征[J]. *国外金属选矿*, 1985(8): 7-10.
- [37] 胡岳华,孙伟,覃文庆. 方铅矿浮选的机械电化学行为[J]. *中国有色金属学报*, 2002(5): 1060-1064.
- [38] 谢冬冬,侯英,盖壮,等. 助磨剂对氧化铁矿石磨矿动力学行为的影响[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2020(2): 279-286.
- [39] FEI AY, LI DX, ZHANG SP, et al. Effect of polyglycerol cement grinding aid mechanism [J]. *Modern Chemical Industry*, 2014(6): 80-83.
- [40] SOMASNDARAN P, SHROTRI S. Grinding aids: a review of their use, effects and mechanisms [J]. *Mineral and Metall*, 1994(3): 161-175.
- [41] 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.
- [42] 邓善芝. 助磨剂对铝土矿磨效率的影响及作用机理研究[D]. 沈阳:东北大学,2011.
- [43] 蔡炎炎. 热处理-助磨剂对鲕状赤铁矿解离的影响[D]. 武汉:武汉科技大学,2019.
- [44] 徐冬林,王冬,张旭,等. 基于正交试验的赤铁矿石助磨剂筛选试验研究[J]. *矿产综合利用*, 2018(3): 81-84.
- [45] 李三华,周崇安,张甲宝. 复配助磨剂在长石湿法磨矿中的应用研究[J]. *矿产综合利用*, 2019(6): 129-131.
- [46] 李海兰,王增军,龚志辉,等. 攀枝花钒钛磁铁矿助磨剂研究[J]. *非金属*, 2019(1): 67-69.
- [47] 王泽红,邓善芝,于福家,等. DA分散剂对铝土矿磨效率的影响及其作用机理[J]. *中国矿业*, 2012(2): 96-98.
- [48] 李国峰,王泽红,徐昌,等. 助磨剂提高鲕状赤铁矿磨效率试验研究[J]. *中国矿业*, 2014(3): 110-113.
- [49] 王泽红,蔡珊,邓善芝,等. 助磨剂对云母破裂能的影响[J]. *金属矿山*, 2010(6): 80-84.
- [50] 田祎兰. 助磨剂在铝土矿选择性磨矿中的应用研究[D]. 沈阳:东北大学,2005.
- [51] 邓善芝,王泽红,程仁举,等. 助磨剂作用机理的研究及发展趋势[J]. *有色矿冶*, 2010(4): 25-27.

# Effect of Grinding Process on Mineral Flotation Behavior and the Role of Grinding Aids

MAO Yong, WANG Zehong, TIAN Pengcheng, GAO Wei, ZHOU Pengfei

*College of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China*

**Abstract:** Grinding is a complex physical and chemical process, which affects the flotation behavior of minerals by changing the mineral surface properties and slurry properties. In the process of grinding, different grinding methods, grinding media, grinding fineness and the addition of reagents will affect the flotation behavior of minerals. The mechanism of grinding affecting mineral flotation was summarized from three main aspects: electrochemistry, solution chemistry and mechanical chemistry. Grinding aids improve the content of qualified particles in grinding products, significantly improve grinding efficiency and reduce energy consumption. The influence of grinding aids on grinding flotation system under different grinding conditions is reviewed. The future development direction of grinding aids was prospected.

**Key words:** grinding; flotation; grinding aids

引用格式:毛勇,王泽红,田鹏程,高伟,周鹏飞.磨矿对矿物浮选行为的影响及助磨剂的作用[J].矿产保护与利用,2020,40(6):162-168.

Mao Y, Wang ZH, Tian PC, Gao W, and Zhou PF. Effect of grinding process on mineral flotation behavior and the role of grinding aids [J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2020, 40(6): 162-168.

投稿网址:<http://kcbh.cbpt.cnki.net>

E-mail:[kcbh@chinajournal.net.cn](mailto:kcbh@chinajournal.net.cn)