

微细粒矿物浮选技术在磨矿-调浆-分选体系的研究进展^①

顾帼华¹, 李青柯¹, 巫璠东², 王艳红¹

(1.中南大学 资源加工与生物工程学院, 湖南 长沙 410083; 2.紫金矿业集团股份有限公司, 福建 上杭 364200)

摘要: 从磨矿、调浆、分选等方面叙述了微细粒矿物浮选技术研究进展, 并对微细粒矿物浮选技术的研究方向进行了展望。

关键词: 微细粒矿物; 浮选工艺; 磨矿; 调浆; 分选

中图分类号: TD923

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2023.02.009

文章编号: 0253-6099(2023)02-0040-04

Progress in Research of Micro-Fine Mineral Flotation Technology in Terms of Grinding, Pulping and Separation System

GU Guohua¹, LI Qingke¹, WU Luandong², WANG Yanhong¹

(1.School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China; 2.Zijin Mining Group Co Ltd, Shanghang 364200, Fujian, China)

Abstract: The progress in the research of micro-fine mineral flotation process is reviewed in terms of grinding, pulping, separation, and finally a prospect for the research direction of micro-fine mineral flotation process is presented.

Key words: micro-fine mineral; flotation process; grinding; pulping; separation

随着矿产资源长期开采利用,我国天然矿产资源贫、细、杂化局面已经十分凸显。近些年,对环境保护的重视以及天然矿产资源逐渐减少,新老尾矿、废渣及再生资源的综合利用越来越受到关注,这类资源同样具有粒度细、品位低、高泥、高氧化率等特点,微细粒矿物已经成为现有资源回收的一个重要组成部分,开展与微细粒矿物资源高效利用相关的基础研究,开发行之有效的微细粒矿物加工技术势在必行,这对我国低品位矿产资源和尾矿资源的开发和综合利用、减少环境污染以及保证国民经济的可持续发展均具有重要意义。浮选是回收利用微细粒矿物的有效方法,多年来学者们在细粒矿物特别是微细粒矿物浮选领域开展了大量研究,并取得显著进展。本文从磨矿、调浆和分选体系叙述了微细粒矿物浮选的研究进展,并在此基础上对其未来的研究方向进行了展望。

1 微细粒矿物磨矿体系研究进展

磨矿是入选矿浆的准备工序,磨矿体系的研究包括两个方面:一方面是传统意义上对磨矿作用的理解,

另一方面是关于磨矿对矿物浮选行为的影响。

传统意义上的磨矿,针对嵌布粒度细、复杂共生矿石需要细磨等问题,围绕如何提高有用矿物解离度和磨矿效率、降低碎磨能耗,在高效磨矿设备的开发、磨矿介质的选择^[1-3]、入磨矿石预处理手段的强化^[4-5]及工艺流程的优化^[6]等方面开展了研究。特别是在超细粉磨设备的研发方面有重要进展,世界各国已开发出如振动磨、胶体磨、离心磨、气流磨及搅拌磨等设备,其中搅拌磨具有能量密度高、占用空间小、粉磨效率高、工艺简单和产品粒度分布均匀等特点,成为矿物加工领域细磨和再磨的重要装备^[7-10]。国外 Metso 公司的 Verti 磨机及 Stirred Media Detritor (SMD) 磨机, Xstrata 公司的 ISA 磨机已在生产中得到成功应用。国内形成了 JM、KLM、CSM、GJ5×2 等多个系列搅拌磨,其中长沙矿冶研究院有限责任公司的 JM 型立式螺旋搅拌磨机已在多种矿物磨矿生产中应用 400 余台套^[11];矿冶科技集团有限公司自主研发的 KLM 型立式螺旋搅拌磨机也已在国内铁矿获得应用^[12]。在数值模拟等方面,对磨机内部微观动态及磨矿机制有了更

① 收稿日期: 2022-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(52074358);国家重点研发计划政府间国际科技创新合作项目(2021YFE0106800)

作者简介: 顾帼华(1968—),女,江西南昌人,博士,教授,博士研究生导师,主要研究方向为浮选化学、生物冶金。

深入的认识^[13-14],为搅拌磨的优化设计提供了指导。

自 Rey 和 Formank 首先认识到磨矿对浮选的影响后^[15],在常规磨矿细度范围内,磨矿对矿物粗选行为产生影响已获得国内外矿物加工领域学者的认可。学者们通过研究揭示了磨矿过程中磨矿方式(干磨或湿磨)、磨矿介质、磨矿气相环境和药剂添加方式等的变化对矿物浮选行为的影响规律^[16-18];并从机械活化、摩擦化学、电化学等角度揭示磨矿对矿物表面性质及浮选行为的影响机制等^[19],这些研究成果在提高选矿效益的实践中发挥了重要的指导作用。

在此启示下,国内外学者发现细磨体系中磨矿对微细粒矿物浮选行为存在更加复杂的影响。文献[20]和文献[21]分别在1982年和1999年就发现磨矿机碎磨机制不同得到的磨矿产品粒度分布不同;近年来的研究发现磨矿机碎磨机制不同还对矿物解离颗粒形状^[22]、矿物解离程度^[23]以及细粒级解离方式^[24]都有影响,进而影响后续解离矿物的浮选行为。文献[25]发现磨矿环境的变化对-10 μm 粒级矿物浮选行为存在重要影响。文献[26]针对黄铜矿、黄铁矿体系的研究表明,再磨过程中磨矿机的碎磨机制、磨矿介质类型及矿浆中铜离子等影响上述2种矿物后续的浮选行为。然而有关细磨机制、磨矿环境等对微细粒矿物生成以及对其后续搅拌-浮选行为的影响的研究还有待加强。

2 微细粒矿物浮选分离体系研究进展

微细粒矿物浮选分离体系一直是研究的热点,相关研究重点围绕造成微细粒矿物难选的两个主要方面进行:①微细粒矿物质量小、粒度小导致了疏水性矿粒在矿浆中的动量小,与气泡的碰撞概率小,难以克服矿粒与气泡之间的能垒而不能黏附于气泡表面,从而影响其浮选回收率;②微细粒矿物比表面积大、表面能高、容易形成异相团聚,导致矿泥罩盖机械夹杂,造成其分选选择性差。学者们从动力学和热力学角度,同时结合浮选药剂的作用开展了大量理论研究,并在此基础上开发了相应的分选设备和技术。

1948年 Sutherland 首次提出了微细粒矿物与气泡碰撞的数学模型^[27];1961年 Derjaguin 与 Dukhin 从动力学角度首次正式提出影响微细粒矿物浮选的3个重要因素^[28]:矿粒-气泡间的碰撞过程、黏附过程以及黏附过程的稳定性;1993年 Yoon 在推导矿粒附着概率模型后提出了以较小气泡提高矿粒-气泡碰撞附着概率的观点^[29]。国内外学者对微气泡和纳米气泡提高微细矿物颗粒浮选效率^[30-35]方面进行了深入研究,并

对流体动力学持续关注,特别是考虑微细粒矿物自身特性,对气泡、颗粒密切相关的微观湍流作用开展了基础研究^[36-38],为新型微细粒矿物浮选设备的研制和优化提供了依据,并开发了相应的分选技术,如基于旋流静态微泡浮选柱、精锐微泡浮选机强化微细粒浮选的微泡浮选技术^[39-40],其基本思想是通过减小气泡粒径或通过强化搅拌提高湍流强度等方式来增大微细颗粒和气泡的碰撞概率和黏附概率,达到提高浮选效率的目的。该分选技术在国内煤浮选得到了成功应用,相关研究也逐渐向金属及非金属矿山的微细粒矿物浮选推广^[41-42]。另外,学者们在药剂开发方面的研究以及通过研究微细矿物颗粒之间的相互作用形成的高分子絮凝理论、疏水团聚理论等也为微细粒矿物分选技术的开发提供了理论依据^[43-46],形成了选择性絮凝浮选、剪切絮凝浮选、载体浮选以及油团聚浮选等分选技术,其基本思想是通过使微细粒疏水矿物选择性聚团、絮凝以增大其“表观粒径”,使矿物粒度达到能够用常规浮选设备有效回收,这些技术在金矿、钨和铅锌等金属矿、赤铁矿等氧化矿、石墨等非金属矿和煤矿得到了应用^[47]。学者们在理论、药剂、设备和技术方面卓有成效的研究成果极大地提高了微细粒矿产资源的回收利用。

3 微细粒矿物浮选调浆作业研究进展

浮选前搅拌调浆的主要目的是实现矿物颗粒的充分分散以及与药剂的充分作用。近些年,随着微细粒矿物分选技术的发展,特别是以浮选柱为代表的“无搅拌”浮选技术的应用,选煤领域浮选调浆作业得到重视。微细粒矿物具有质量小、比表面积大的基本特性,在调浆过程中因获得的搅拌动能小,难以突破颗粒表面的水化斥力,微细颗粒容易随着流体一起运动,形成相对固定的运动轨迹,造成药剂难以与微细颗粒矿物作用和有效吸附。另外,矿物被细磨后,其比表面增大、棱角增多,而棱角处未补偿键力的不饱和程度高,往往是矿物表面吸附其他物质的“活性中心”,即矿物磨得越细,活性也越强。微细粒矿物所具有的这种高反应活性使得其在搅拌或浮选过程中容易发生互凝并造成脉石矿物夹杂在有用矿物絮团中,这将影响药剂对矿物的选择性吸附并最终影响浮选分离效率。针对这些问题,学者们在选煤体系借助三维动态粒子分析仪、激光多普勒测速仪以及粒子成像测速仪等检测,结合三维流场数值模拟^[48],从浮选搅拌的界面效应、搅拌体系高剪切强湍流的流体特性等方面开展了基础研究,并开发出了有效的调浆方法和设备,它们在煤矿、

低品位铝土矿、钼矿的应用实践表明,微细粒矿物的浮选效率得到明显提高^[49]。其他矿产类型方面,有学者开展了强搅拌调浆对硫化镍矿浮选影响的研究^[50]。鉴于微细粒矿物自身的特性,浮选前的调浆作业应该被作为一个单独的过程开展研究。

4 微细粒矿物浮选技术研究方向的展望

从国内外学者在微细粒级矿物浮选技术的研究成果可以看到,围绕与浮选方法相关的磨矿、调浆、分选3个主要过程,在分选过程领域的研究成果较多,但主要是为克服微细粒矿物质量小、粒度小、比表面积大、表面能高的自身特性带来的问题,从减小气泡粒径、增大微细矿物颗粒“表观粒径”、提高流场强度角度开展理论研究及技术开发;磨矿体系主要关注提高有用矿物解离度、降低碎磨能耗等问题,在高效细磨设备开发等方面取得了重要进展,同时也开始关注到细磨对生成的微细粒矿物的浮选行为存在影响;浮选前调浆过程的研究则主要是针对选煤体系,涉及有色金属微细粒浮选领域的研究不多。

基于文献资料并结合笔者所在课题组开展的相关研究及思考,微细粒矿物浮选技术还可在以下几个方面加强基础研究和相应的技术开发,为微细粒矿产资源的高效利用提供支撑。

1) 磨矿体系,研究不同碎磨机制(摩擦、碰撞、挤压)、不同磨矿介质与微细粒矿物生成的关联机制,寻找干预获得有效单体解离、窄级别磨矿产品的控制因素和途径,为后续的搅拌以及调节和优化浮选设备流体动力学条件、强化微细颗粒矿物-药剂-气泡间相互作用创造条件。

2) 搅拌体系,目前涉及有色金属微细粒浮选领域的研究不多,但搅拌调浆是一个绝对不可忽视的作业段,而且在研究过程中需考虑不同矿物类型自身特点对搅拌调浆过程的影响和要求。比如硫化矿,其半导体性带来的微细粒矿物表面性质、界面行为及矿浆氧化还原性质与搅拌过程固液界面的药剂传质、颗粒之间的聚团程度、聚团粒度变化等的关联是什么?因此需加强微细粒矿物高效调浆的研究,为从搅拌调浆过程调整浮选体系特征(选择性与可浮性)提供依据。

3) 浮选体系,加强浮选与磨矿-调浆优化体系之间的关联,结合对设备、药剂的开发或优化研究,达到增大气泡与疏水性矿粒之间的碰撞概率和黏附效率,同时克服脉石矿粒夹杂问题的目的,实现微细粒矿产资源的高效利用。

参考文献:

- [1] Matthew D Sinnott, Paul W. Is media shape important for grinding performance in stirred Mill[J]. Minerals Engineering, 2011,24:138-151.
- [2] 曾桂忠. 磨矿介质尺寸与形状对镍矿石磨矿及选别的影响研究[D]. 昆明:昆明理工大学国土资源工程学院, 2003.
- [3] 段希祥,曹亦俊. 球磨机介质工作理论与实践[M]. 北京:冶金工业出版社, 1999.
- [4] 钱功明,张博,李漫漫,等. 微波预处理条件对鄂西鲕状赤铁矿磨矿效率的影响[J]. 武汉科技大学学报, 2016,39(1):1-6.
- [5] GUO Sheng-hui, CHEN Guo, PENG Jin-hui, et al. Microwave assisted grinding of ilmenite ore[J]. Journal of Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011,21(9):2122-2126.
- [6] 彭会清,胡海洋,李骥,等. 浮选中矿选择性分级再磨工艺机理研究[J]. 矿业研究与开发,2010,30(5):29-34.
- [7] Jankovic A. Variables affecting the fine grinding of minerals using stirred Mills[J]. Minerals Engineering, 2003,16:337-345.
- [8] 高明炜,李长根,崔洪山. 细磨和超细磨工艺的最新进展[C]//第23届国际矿物加工大会论文集, 2006:19-23.
- [9] 崔瑞,李茂林,王光辉. 国内外矿用搅拌磨的应用及研究现状[J]. 矿山机械,2012,40(12):4-10.
- [10] 卢世杰,韩登峰,周宏喜. 立式螺旋磨矿技术在选矿中的发展与应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2011(S1):90-95.
- [11] 张国旺,赵湘,肖骁. 大型立式螺旋搅拌磨研发及其在金属矿山选矿中的应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2011(S1):191-194.
- [12] 卢世杰,周宏喜,何建成,等. KLM型立式螺旋搅拌磨机的研究与应用[J]. 有色金属工程, 2014,4(2):69-72.
- [13] 王鑫,肖正明,龙稳. 基于离散元法的塔磨机介质运动仿真分析[J]. 矿山机械, 2015,43(7):74-78.
- [14] 母福生,杨鹏. 搅拌磨机介质运动离散元数值模拟分析[J]. 中国机械工程, 2011,23(20):2465-2468.
- [15] Rey M, Formanek V. Some factors affecting the selectivity in the differential flotation of lead-zinc ores in the presence of oxidized lead mineral[C]//Proc 5th Int Min Proc Congr Inst Mining and Met, 1960:343-352.
- [16] Thornton E. The effect of grinding media on flotation selectivity[C]//Proc 5th Annual Meeting of Canadian Mineral Processors, 1973:224.
- [17] 顾幅华,钟素姣. 方铅矿磨矿体系表面电化性质及其对浮选的影响[J]. 中南大学学报, 2008,39(1):54-58.
- [18] 何发钰. 磨矿环境对硫化矿物浮选的影响[D]. 沈阳:东北大学资源与土木工程学院, 2006.
- [19] GU Guo-hua, DAI Jing-ping, WANG Hui. Galvanic coupling and its effect on origin potential flotation system of sulfide minerals[J]. J Cent South Univ, 2004,11(3):275-279.
- [20] Kelly Z G, Spottiswood D J. Introduction to Mineral Processing[M]. New York: Wiley, 1982.
- [21] Hogg R. Breakage mechanisms and mill performance in ultrafine grinding[J]. Powder Technol, 1999,105(1):135-140.
- [22] Vizcarra T G, Wightman E M, Johnson N W, et al. The effect of breakage mechanism on the mineral liberation properties of sulphide ores[J]. Minerals Engineering, 2010,23(5):374-382.

- [23] Roufail R, Klein B. Mineral liberation and particle breakage in stirred mills[J]. *Can Metall Q*, 2010,49(4):419-428.
- [24] Vizcarra T G, Harmer S L, Wightman E M, et al. The influence of particle shape properties and associated surface chemistry on the flotation kinetics of chalcopyrite[J]. *Minerals Engineering*, 2011,24(8):807-816.
- [25] Stephen Grano. The critical importance of the grinding environment on fine particle recovery in flotation[J]. *Minerals Engineering*, 2009, 22:386-394.
- [26] CHEN Xumeng, PENG Yongjun. The effect of regrind mills on the separation of chalcopyrite from pyrite in cleaner flotation[J]. *Minerals Engineering*, 2015, 83:33-43.
- [27] Sutherland K L. Physical chemistry of flotation XI kinetics of the flotation process[J]. *Journal of Physical and Colloid Chemistry*, 1948, 52:394-425.
- [28] Derjaguin B V, Dukhin S S. Theory of flotation of small and medium-size particles [J]. *Bulletin Institution of Mining and Metallurgy*, 1961, 651:241-246.
- [29] Yoon R H. 矿粒-气泡作用中的流体动力学及表面力[J]. *国外金属矿选矿*, 1993(6):5-11.
- [30] Calgaroto S, Wilberg K Q, Rubio J. On the nanobubbles interfacial properties and future applications in flotation[J]. *Minerals Engineering*, 2014,60(6):33-40.
- [31] 冯其明,周伟光,石 晴. 纳米气泡的形成及其对微细粒矿物浮选的影响[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2017(1):9-15.
- [32] 骆庆群,杨洁明. 基于纳米气泡的煤炭浮选模型研究[J]. *太原理工大学学报*, 2014(2):201-209.
- [33] 刘 安,韩 峰,李志红,等. 纳米气泡在微细粒矿物浮选中的应用研究进展[J]. *矿产保护与利用*, 2018(3):81-86.
- [34] 廖世双,欧乐明,周伟光. 空化过程微纳米气泡性质及其对细粒矿物浮选的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2019,29(7):1567-1574.
- [35] 曾维能,任润祯,魏鹏刚,等. 微纳米气泡对典型细粒氧化矿物浮选的影响及机理[J]. *金属矿山*, 2020(10):156-160.
- [36] 曹亦俊,闫小康,王利军,等. 微细粒浮选的微观湍流强化[J]. *矿产保护与利用*, 2017(2):113-118.
- [37] 苏子旭. 微细粒分选的湍流过程强化及涡流矿化管优化设计[D]. 徐州:中国矿业大学化工学院, 2021.
- [38] TAO Xihuan, LIU Yefei, JIANG Hong, et al. Microbubble generation with shear flow on large-area membrane for fine particle flotation[J]. *Chemical Engineering & Processing: Process Intensification*, 2019, 145:107-671.
- [39] 刘炯天. 旋流-静态微泡柱分选方法及应用(之一):柱分选技术与旋流-静态微泡柱分选方法[J]. *选煤技术*, 2000(1):42-44.
- [40] 陈晓东. 精锐微泡浮选机强化微细粒浮选的机理与实践[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2021(1):112-116.
- [41] 姚 伟,李茂林,崔 瑞. 微细粒矿物的分选技术[J]. *现代矿业*, 2015(1):66-69.
- [42] 刘炯天,李小兵,王永田. 旋流-静态微泡浮选柱浮选某难选钨矿的试验研究[J]. *中南大学学报*, 2008,39(4):300-305.
- [43] 卢寿慈,翁 达. 界面分选原理及应用[M]. 北京:冶金工业出版社, 1992.
- [44] 邱冠周. 颗粒间相互作用与细粒浮选[M]. 长沙:中南工业大学出版社, 1993.
- [45] 宋少先. 细粒矿物絮团浮选的理论及应用[J]. *国外金属矿选矿*, 2007(5):4-9.
- [46] YIN W, YANG X, ZHOU D, et al. Shear hydrophobic flocculation and flotation of ultrafine Anshan hematite using sodium oleate[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011,21(3):652-664.
- [47] 蔡振波,徐会华. 微细粒矿物选矿技术研究现状及展望[J]. *现代矿业*, 2015(11):74-77.
- [48] 李 振,刘炯天,曹亦俊. 浮选过程搅拌调浆技术评述[J]. *金属矿山*, 2009(10):5-11.
- [49] LI J H, MA L Q, XIAO X W, et al. Numerical Simulation of Multi-Impeller High Intensity Conditioning in Fine Coal Flotation[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2014,508:121-124.
- [50] 冯 程,卢毅屏,冯其明,等. 强搅拌调浆对硫化镍矿浮选的作用[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2016,47(11):3621-3626.

引用本文: 顾帼华,李青柯,巫塞东,等. 微细粒矿物浮选技术在磨矿-调浆-分选体系的研究进展[J]. *矿冶工程*, 2023,43(2):40-43.