

doi:10.3969/j.issn.1671-9492.2024.04.005

浮选体系中气泡运动特性研究进展

李东林^{1,2}, 张金英³, 王伟之^{1,2}, 韩继康⁴, 李凤久^{1,2}

- (1. 华北理工大学 矿业工程学院, 河北 唐山 063009;
2. 河北省矿业开发与安全技术实验室, 河北 唐山 063009;
3. 华北理工大学 轻工学院, 河北 唐山 063009;
4. 中国矿业大学 化工学院, 江苏 徐州 221116)

摘 要: 浮选作为一种高效的选矿方法, 更适于处理品位低、嵌布粒度细、矿物组成复杂的矿石资源, 其研究和应用逐渐成为矿物加工领域关注的焦点。在浮选体系中, 气泡作为浮选体系中“运输”矿物颗粒的载体, 它的运动特性直接影响着矿物浮选的选别效果, 因此, 研究气泡的运动特性, 对于优化浮选工艺与改善浮选效果有着重要意义。首先简述了浮选中常见的气泡生成方式, 主要有机械搅拌发泡、气泡发生器发泡、电解发泡及超声波发泡四种方式。介绍了气泡参数中的形态特征参数、运动特征参数和分布特征参数的含义和计算公式; 然后重点阐述了浮选中起泡剂、捕收剂、抑制剂、浮选机叶轮参数、浮选柱气泡发生器及充气量对气泡参数的影响; 归纳了纳米气泡在微细粒矿物浮选中的应用。目前, 浮选体系中气泡运动特性的研究存在着较多的理想假设和一定的局限性, 与实际工艺条件相比存在着很大差距。因此, 完善气泡测量方法、侧重于气泡在实际浮选环境中的运动特性研究以及研发新型纳米气泡生成设备将是未来的发展方向, 通过提高气泡参数准确性及深入了解气泡在实际浮选环境中的运动特性, 为浮选过程中气泡参数的调整及浮选设备的设计优化提供重要的参考依据。

关键词: 浮选气泡; 运动特性; 气泡参数

中图分类号: TD989; TD923+.7

文献标志码: A

文章编号: 1671-9492(2024)04-0049-10

Research Progress of Bubble Movement Characteristics in Flotation System

LI Donglin^{1,2}, ZHANG Jinying³, WANG Weizhi^{1,2}, HAN Jikang⁴, LI Fengjiu^{1,2}

- (1. College of Mine Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063009, Hebei, China;
2. Mining Development and Safety Technology Key Lab of Hebei Province, Tangshan 063009, Hebei, China;
3. School of Light Industry, North China University of Science and Technology, Tangshan 063009, Hebei, China;
4. School of Chemical Engineering and Technology, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

Abstract: As an efficient mineral processing method, flotation is more suitable for processing ore resources with low grade, fine embedded particle size and complex mineral composition, and its research and application have gradually become the focus of attention in the field of mineral processing. In the flotation system, bubbles are used as the carrier of "transporting" mineral particles in the flotation system, and its motion characteristics directly affect the selection effect of mineral flotation, so studying the motion characteristics of bubbles is of great importance for optimizing the flotation process and improving the flotation effect. This paper first briefly describes the common bubble generation methods in

收稿日期: 2023-04-30

基金项目: 河北省自然科学基金资助项目(E2017209214, E2022209123); 中央引导地方科技发展资金项目(226Z4102G)

作者简介: 李东林(1993—), 男, 河北邯郸人, 硕士研究生, 主要从事矿物分选理论及工艺研究。

通信作者: 王伟之(1974—), 女, 河北定州人, 博士, 教授, 硕士研究生导师, 主要从事难选矿物分选理论及工艺研究。

flotation, including mainly mechanical stirring foaming, bubble generator foaming, electrolytic foaming and ultrasonic foaming. The meanings and calculation formulas of morphological feature parameters, motion characteristic parameters and distribution characteristic parameters in bubble parameters are introduced. Then, the effects of flotation foaming agent, collector, inhibitor, flotation machine impeller parameters, flotation column bubble generator and inflation amount on bubble parameters were emphasized. The application of nanobubbles in fine-grained mineral flotation was summarized. At present, the study of bubble motion characteristics in flotation system has many idealized assumptions and certain limitations, and there is a big gap compared with the actual process conditions. Therefore, it is pointed out that improving the bubble measurement method, focusing on the study of the motion characteristics of bubbles in the actual flotation environment and the research and development of new nano-bubble generation equipment will be the future development direction. Improving the accuracy of bubble parameters and in-depth understanding of the motion characteristics of bubbles in the actual flotation environment would provide an important reference for the adjustment of bubble parameters in the flotation process and the design and optimization of flotation equipment.

Key words: flotation bubble; motion characteristics; bubble parameters

浮选作为一种有效分选细粒、微细粒矿物的方法,在金属矿和非金属矿选矿中得到了广泛应用,此外,浮选还应用于其他工业领域,如污水处理^[1]、纸张脱墨^[2]、油脂回收^[3]、微生物分离^[4]和塑料回收^[5]。浮选体系由气、液、固三相组成,气泡和矿粒在浮选设备内部发生矿化,完成碰撞、黏附和脱附三个子过程。而气泡的矿化程度即其携带矿物的能力主要受气泡尺寸、分布、速度、轨迹及气含率等参数的直接影响。因此,对浮选体系中气泡运动特性及其与矿粒间相互作用的研究受到了众多学者的重视。本文综述了浮选体系中常用的气泡生成方式、气泡参数、影响气泡运动特性的主要因素以及纳米气泡在浮选体系中的应用,旨在阐明气泡运动特性在矿物浮选过程中的重要作用。气泡运动特性的研究对浮选过程中气泡的调整及浮选设备的设计优化等具有重要的理论意义。

1 浮选中气泡生成方式

1.1 机械搅拌发泡

机械搅拌发泡已广泛应用于矿物浮选,发泡过程如图 1 所示,空气被引入叶轮高速搅拌形成的负压区域,然后,空气在强烈搅拌下被剪切成微气泡。叶轮转速较高时更有利于产生微气泡,也有利于提高气泡与矿粒的碰撞及黏附概率。研究发现,机械搅拌式浮选机的叶轮类型、直径、转速和数量等对气泡的产生有着综合影响。

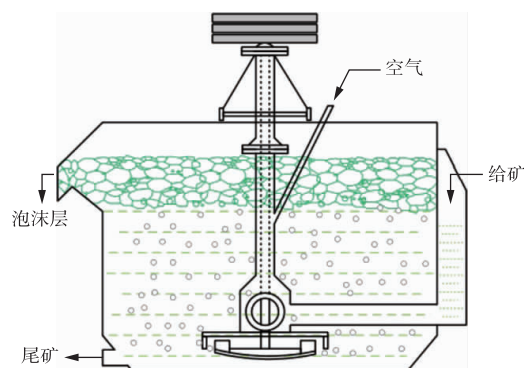
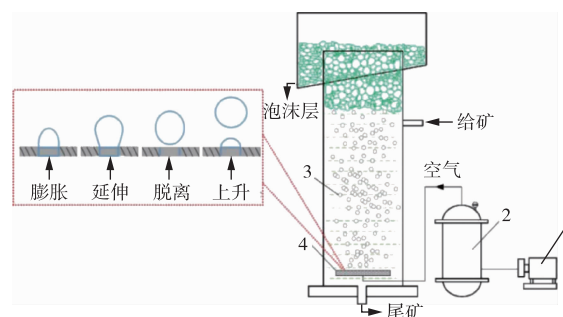


图 1 机械搅拌发泡过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of mechanical stirring foaming process

1.2 气泡发生器发泡

空气压缩机将气体保存到储气罐,然后由气泡发生器产生气泡,发泡过程如图 2 所示。浮选柱的



1—空气压缩机;2—储气罐;3—浮选柱;4—气泡发生器。

图 2 发泡器产生气泡过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of bubble generation process of foaming machine

气泡发生器有两种:内部气泡发生器和外部气泡发生器。与内部气泡发生器相比,外部气泡发生器具有起泡性能强、易更换、耐磨等优点,逐渐受到研究人员的青睐,成为研究的主流方向^[6]。

1.3 电解发泡

电解发泡技术可以产生微米级气泡,在电解发泡过程中,电场可以将水电解击穿,产生直径在17~105 μm 内的微气泡(氢气泡和氧气泡)^[7-9]。1904年,ELMORE首次提出电解浮选的概念^[10]。与浮选机机械搅拌产生的气泡相比,电解浮选产生的气泡尺寸小,有利于气泡与微细粒矿物间的碰撞及黏附,适于处理微细粒矿物。

1.4 超声波发泡

超声波的频率在20~40 KHz(千赫兹)内,可以通过空化效应产生气泡^[11],该技术应用于浮选领域的原理是处理溶液时产生的空化效应和Bjerknes效应,如图3所示。除此之外,超声波在矿物浮选时具有清洁、溶蚀及脱硫作用^[12]。

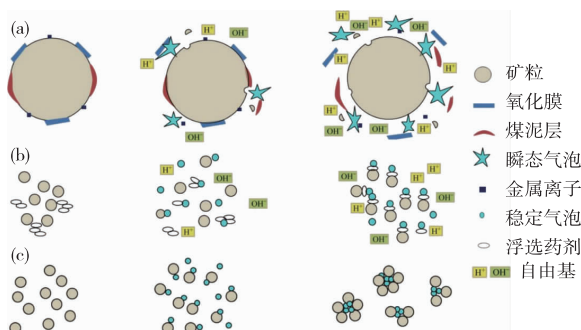


图3 超声瞬态空化(a)稳态空化(b)和Bjerknes效应(c)对矿物浮选的影响

Fig. 3 Effect of ultrasonic transient cavitation(a), steady-state cavitation(b) and Bjerknes effect (c) on mineral flotation

机械搅拌发泡、气泡发生器发泡、电解发泡以及超声波发泡是浮选过程中常用的气泡生成方式,实际应用中,不同的发泡方式可以产生不同运动特性的气泡。

2 浮选气泡参数

根据气泡的不同特征,可以把气泡参数分为三类:形态特征参数、运动特征参数以及分布特征参数。

2.1 气泡形态特征参数

1) 气泡大小参数

通常用气泡的直径和体积等参数来描述浮选体系中气泡的大小。气泡直径可分为气泡等效直径和

Sauter直径^[13],气泡等效直径多用于描述单气泡的大小,气泡Sauter直径用来描述气泡群直径的大小。与单个气泡具有相等表面积的圆的直径,称为气泡等效直径,计算公式如式(1)所示。

$$d_e = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (1)$$

式中, d_e 为气泡等效直径,mm; A 为气泡表面积,mm²。

气泡Sauter直径是描述气泡群中气泡大小的重要参数,计算公式如式(2)所示。

$$d_{32} = \frac{\sum_{i=1}^N d_i^3}{\sum_{i=1}^N d_i^2} \quad (2)$$

式中, d_{32} 为Sauter平均直径,mm; d_i 为气泡等效直径,mm; N 为气泡个数。

与气泡直径相比,气泡体积的求解过程相对复杂,且易造成较大误差,尤其是变形较大的气泡。随着数字图像处理技术的发展和高速摄像机的更新,国内外研究人员进行了一系列的探索,使得气泡体积的求解过程变得越来越简单,误差也逐渐降低。近年来,部分学者利用重建算法来获取气泡的体积。重建算法是在气泡图像二维信息的基础上,假设沿气泡的每个截面为椭圆,然后进行尺寸标定,建立像素长度与气泡物理长度之间的关系,与将整个气泡视为球体或者椭球相比,重建算法的误差更小^[14]。式(3)为表示各层的椭圆方程。

$$\frac{\left(x - \frac{a_i - a_1}{2}\right)^2}{\left(\frac{a_i}{2}\right)^2} + \frac{\left(y - \frac{b_i - b_1}{2}\right)^2}{\left(\frac{b_i}{2}\right)^2} = 1 \quad (3)$$

式中, i 为沿气泡高度的某一层; a_i 和 b_i 分别为在 i 层截取的长轴和短轴长度,mm。

2) 气泡形状参数

浮选体系中涉及到气-液-固三相之间的相互作用,并且具有多尺度的特点,是一个不断变化的复杂体系,气泡形状变化复杂,为了准确描述气泡的形状,浮选及相关领域的研究人员引入圆形体^[15]、纵横比^[16]以及气泡倾角^[17]用于描述气泡的形变程度。圆形体计算公式如式(4)所示。

$$C = \frac{2\sqrt{\pi S}}{P} \quad (4)$$

式中, C 为圆形体; S 为气泡面积,mm²; P 为气泡周长,mm。 C 越接近1,气泡越趋近于圆形。

气泡的纵横比是指气泡的长轴与短轴之比,气泡在运动过程中,纵横比越大,气泡的变形程度越

大,计算公式如式(5)所示。

$$E = \frac{D_b}{D_a} \quad (5)$$

式中, E 为纵横比; D_b 为气泡短轴, mm; D_a 为气泡长轴, mm。

气泡倾角的定义为气泡长轴方向与水平线之间的夹角,可以用来描述气泡的晃动和翻转的变化程度。

2.2 气泡运动特征参数

气泡运动特征参数主要分为轨迹和速度,求解此参数之前,首先要确定气泡的质心坐标 $(\bar{x}, \bar{y})$, 即气泡区域内 $(x$ 或 $y)$ 像素点的总和与气泡区域内像素点总和之比^[18], 计算公式如式(6)所示。

$$\bar{x} = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N xf(x,y)}{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x,y)}, \bar{y} = \frac{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N yf(x,y)}{\sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N f(x,y)} \quad (6)$$

通过得出的质心坐标,可以求出气泡在二维平面的速度和轨迹,在此基础上,结合相机标定技术,经过相机内外参数的获取和空间坐标系转换,可以得出气泡的三维坐标,进而得出气泡的运动轨迹及速度,空间坐标系转换过程如图4所示。

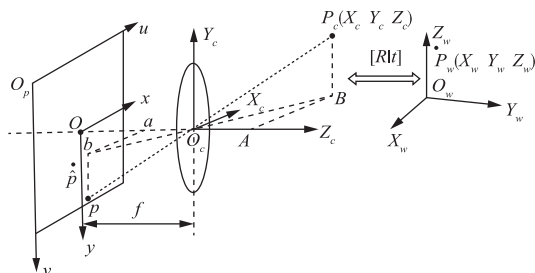


图4 空间坐标转换示意图

Fig. 4 Schematic diagram of space coordinate transformation

由图4可知,将世界坐标系 $O_w - X_w Y_w Z_w (m)$ 中的点 P_w 转换到像素坐标系 $O_p - uv (pixel)$ 下的点 $p(u, v)$, 需经过相机坐标系 $O_c - X_c Y_c Z_c (m)$ 再到图像坐标系 $O - xy (m)$ 的转换。世界坐标系经过刚体变换到相机坐标系,再经过透视投影到图像坐标系,最后经过二次转换到像素坐标系^[19-20], 由此可以得到气泡的三维质心坐标。将不同的质心坐标相连接,便可以得到气泡轨迹;将相邻的质心坐标相减,然后除以运动时间,由此得到气泡速度。

目前,大多数学者采用一台高速摄像机对气泡参数进行求解,停留在二维空间的研究,得出的结果较为片面,为了获取更加精确的气泡参数,在此基础上,添加一台高速摄像机或者根据镜面反射原理,可

得到两个方向上的气泡图像,获取的气泡信息更加全面,并且可以求出气泡的三维参数,如速度、轨迹以及体积等。气泡在 X 、 Y 、 Z 轴方向上的速度公式如(7)~(9)所示。

$$V_x = \frac{\bar{x}_{i+l} - \bar{x}_i}{\Delta t} \quad (7)$$

$$V_y = \frac{\bar{y}_{i+l} - \bar{y}_i}{\Delta t} \quad (8)$$

$$V_z = \frac{\bar{z}_{i+l} - \bar{z}_i}{\Delta t} \quad (9)$$

式中, $(\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i)$ 、 $(\bar{x}_{i+l}, \bar{y}_{i+l}, \bar{z}_{i+l})$ 分别为 t_i 和 t_{i+l} 时刻的气泡质心坐标。

2.3 气泡分布特征参数

为了清晰的描述气泡在浮选设备内的分布情况,可以选择气含率作为一种衡量气泡分布情况的指标。气含率是指气体占浮选设备中两相或三相总体积的百分比^[17], 如式(10)所示。

$$\epsilon_g = \frac{V_g}{V_g + V_l} \quad (10)$$

式中, ϵ_g 为气含率, %; V_l 为浮选设备中液体所占的体积, mm^3 ; V_g 为浮选设备中气体所占的体积, mm^3 。气含率是影响浮选效果的重要参数之一, 直接决定气泡承载上浮矿粒的数量, 从而决定了精矿的产率和回收率。

3 气泡运动特性影响因素研究现状

近年来,国内外学者对浮选体系中气泡参数的研究越来越多,主要集中在气泡尺寸、轨迹、速度、形变以及气含率的研究。在研究各种因素对气泡参数影响的基础上,得到气泡运动特性的变化规律,为浮选设备的合理化放大和优化提供重要的参考。但是,目前的研究存在着较多的理想假设和一定的局限性。

气泡参数的变化主要受到浮选药剂和浮选设备的影响,常见的浮选药剂主要有起泡剂、捕收剂和抑制剂,它们通过改变溶液的表面张力和黏度等因素,使得气泡参数发生变化,其中气泡的形变系数(圆形度和纵横比)变化较为明显;浮选机的叶轮转速和浮选柱气泡发生器的孔径决定气泡尺寸的大小,而充气量是影响气泡速度的重要因素之一。

3.1 起泡剂对气泡参数的影响

起泡剂的浓度和种类对气泡参数的变化有着重要的影响。通过调节起泡剂的浓度可以改变溶液的表面张力和黏度,并因此改变气泡的尺寸,不同种类的起泡剂具有不同的 CCC 值(临界兼并浓度值),当

起泡剂浓度超过 CCC 值时,气泡尺寸基本不再发生变化^[21]。

彭德强等^[15]基于高速动态摄像技术研究了气泡在松油醇-乙醇液相体系中的运动行为变化,试验结果表明,气泡直径和圆形成度随着松油醇浓度的增加而减小,同时,气泡直径概率呈双峰分布,气泡速度呈现出周期性变化。与添加单一药剂相比,ZHU 等^[22]研究了加入十二胺(DDA)、甲基异丁基甲醇(MIBC)、仲辛醇(2-Octonal)、DDA-MIBC 混合药剂以及 DDA-2-Octonal 混合药剂后的 5 种水溶液中气泡纵横比和上升速度的变化规律,研究表明,添加单一药剂时,气泡纵横比的大小顺序为:DDA > 2-Octonal > MIBC;气泡上升速度的大小顺序为:MIBC > 2-Octonal > DDA。添加混合药剂时,气泡的纵横比在加入 DDA-2-Octonal 混合药剂的水溶液中较大,而气泡上升速度在加入 DDA-MIBC 混合药剂的水溶液中较快。相较于传统的起泡剂添加方式,ZHU 等^[23]通过改变 MIBC 和 2-Octonal 的添加方式,研究了药剂在气态(药剂加热到汽化时,与空气混合后添加入水中)和液态(药剂以液态形式直接添加入水中)添加方式下对气泡上升速度和精煤产率的影响。结果表明,同种药剂浓度相同时,与液态添加方式相比,气态添加方式时的气泡上升速度更快,精煤产率也较高;在液态添加方式下,气泡在 MIBC 溶液中的上升速度大于在 2-Octonal 溶液中的气泡上升速度,而在气态添加方式下,气泡在 MIBC 溶液和 2-Octonal 溶液中的上升速度较为接近。

3.2 捕收剂对气泡参数的影响

在矿物浮选过程中,将捕收剂添加到矿浆中可以增强矿粒表面的疏水性,并且对气泡的稳定性产生影响^[24-25]。当矿浆中存在少量捕收剂时,捕收剂分子易于吸附到起泡剂分子的非极性基团上,疏水性增加,提高气泡稳定性。当矿浆中捕收剂较多时,更多的捕收剂分子吸附在气液界面,从而促进气泡的破碎与融合,降低气泡的稳定性^[26]。

韩继康等^[27]利用高速摄像机和图像处理技术研究了加入阳离子捕收剂 GE-609 后水溶液中气泡形状和 Sauter 直径的变化规律,数据分析发现,随着 GE-609 浓度的增加,气泡由不规则形状逐渐转变为圆形,捕收剂浓度超过 2.56 mg/L 时,气泡形状基本保持不变。捕收剂 GE-609 在抑制气泡直径方面略高于松油醇,因此,气泡 Sauter 直径在加入 GE-609 水溶液中较小。朱一民等^[28]采用 HUT 气泡尺寸测

量系统研究了添加胺类捕收剂十二胺、十四胺、十六胺和癸醚胺后 4 种水溶液中气泡 Sauter 直径的变化规律。研究表明,当达到 CCC 值时,气泡 Sauter 直径由大到小依次为:十六胺 > 十四胺 > 癸醚胺 > 十二胺。随着药剂浓度的增加,气泡 Sauter 直径在添加十二胺和癸醚胺的水溶液中减小后基本不变;在添加十四胺和十六胺时,气泡 Sauter 直径呈现出先减小后增加的趋势,最后趋于稳定。

3.3 抑制剂对气泡参数的影响

矿物浮选过程中涉及到起泡剂、捕收剂以及抑制剂之间的协同作用,一般情况下,为了达到“提质降杂”的目的,抑制剂的应用是提高浮选效率的重要途径之一。

羧甲基纤维素(CMC)是多种矿物浮选中常用的一种抑制剂,XU 等^[29]利用高速动态摄像技术记录了加入 CMC 后水溶液中气泡的运动过程,通过数字图像处理技术,获取了气泡尺寸、速度和形状等空间信息。研究结果表明,CMC 溶液浓度较低时,气泡先沿直线上升,逐渐变为椭球型并加速上升,随后气泡运动轨迹左右摆动,最后气泡速度和形变呈现出规律化;CMC 溶液浓度较高时,气泡一直沿直线上升,形状和速度趋于稳定状态。OSHAGHI 等^[30]对气泡在 CMC 溶液中的上升行为做了试验研究,结果表明,气泡在上升过程分为三个阶段:开始阶段,气泡在圆形和半圆形之间转变,速度也随之减缓;然后,气泡保持椭圆形,速度暂时下降,后增至终速度;最终,气泡形状几乎不变,保持稳定状态。周宸等^[31]通过自主搭建的可视化气泡运动行为试验平台研究了气泡在 CMC 溶液中的运动过程,研究表明,气泡在 CMC 溶液中的上升轨迹趋于直线型,相较于常规水溶液体系中的“S”型轨迹更加稳定。随着充气量的增加,气泡脱离气孔的时间逐渐减小,而气泡等效脱离直径逐渐增加。

3.4 叶轮参数对气泡参数的影响

机械搅拌式浮选机是常用的浮选设备之一,而叶轮的形状以及转速是调节气泡比表面积大小的重要因素^[32]。

费之奎等^[33]设计了一种新型浮选装置一喷射-搅拌自吸气浮选装置,为了研究该装置产生气泡的能力,采用控制变量法,研究了叶轮转速及吸气量变化对气泡尺寸分布和气泡 Sauter 直径的影响,研究发现,叶轮转速 610 r/min 和吸气量 4.08 L/min 时是气泡 Sauter 直径的最小值临界交点,当小于临界转速时,气泡 Sauter 直径与叶轮转速呈负相关;当大

于临界转速时,随着叶轮转速的增加,气泡 Sauter 直径先呈现出增大的趋势,然后保持不变,气泡分布也更加均匀。朱宏政等^[34]研究了机械搅拌式浮选机的叶轮转速、吸气量和药剂浓度(2-Octonal)对气泡 Sauter 直径的影响,结果表明,气泡 Sauter 直径随着叶轮转速的增加而逐渐减小,当药剂浓度未达到 CCC 值时,由于气泡之间的融合,气泡 Sauter 直径受到叶轮转速的影响较大,当药剂浓度达到 CCC 值时,受到叶轮转速的影响较小。高淑玲等^[35]研究了 KYF 型浮选机的叶轮转速、叶轮直径和叶轮离底间隙对气泡尺寸分布特征的影响。研究结果表明,叶轮转速和直径的增加以及叶轮离底间隙的减小,均可以使气泡尺寸减小,并且气泡尺寸分布愈加均匀。叶轮转速与叶轮直径及叶轮离底间隙之间存在着明显的协同交互作用,叶轮转速在 300~400 r/min 的工业操作范围内时,对气泡尺寸特征的调节效果更为显著,有利于提高浮选效率。

3.5 气泡发生器对气泡参数的影响

作为浮选柱的核心部件,气泡发生器的结构特点和性能是影响气泡参数变化的因素之一,进而直接影响浮选效率。目前,气泡发生器的发展趋势向外置式和不停产更换的方向发展。

旋流-静态微泡浮选柱是由中国矿业大学开发的一种新型浮选柱,它的自吸式气泡发生器安装方式为外置式,具有耐磨和易换修等优点。刘佳林^[36]为了解决旋流-静态微泡浮选柱中最大充气量受限于浮选柱循环量的问题,将自吸式气泡发生器改为微孔陶瓷气泡发生器,与之前相比较,空气通过微孔陶瓷可产生稳定且细小的气泡,在此基础上,探究了充气量和循环量对气含率和气泡尺寸的影响,研究发现,气含率和气泡直径随着循环量的增加呈现出减小的趋势,随着充气量的增加呈现出增大的趋势。韩继康^[37]借助高速摄像机,在添加浮选药剂的条件下,研究了喷枪式气泡发生器生成的气泡参数特征,并提取了气泡发生器的孔径特征。结果表明,随着药剂浓度的增加,开始阶段,气泡 Sauter 直径显著减小,随后减小的趋势逐渐减缓,最后达到药剂浓度的 CCC 值,不再发生变化,其中药剂浓度的 CCC 值由低到高顺序为:仲辛醇<GE-609<松油醇。气泡发生器的平均孔径为 133.619 μm ,50~200 μm 内的小孔最多,可以使得柱内气泡细小均匀。程敏等^[38]研制了新型堇青石微孔气泡发泡器,并且考察了不同聚苯乙烯(PS)微球粒径对气泡发生器发泡性能的影响。结果表明,添加的微球粒径为 5/10 μm 时,气泡

的平均尺寸为 25.86 μm ,同时产生的气泡数量较多,气泡发生器的综合性能最好。

3.6 充气量对气泡参数的影响

充气量是单位时间内充入浮选设备内的气体体积,充气量可以直接影响气泡在浮选设备中的尺寸分布,进而影响气泡与矿粒之间的矿化过程,因此,探究充气量对气泡参数的影响,显得尤为重要。

梁冰等^[39]考察了一种新型气泡发生器在不同充气条件下的气泡参数特征,研究表明,随着充气量增加,气泡尺寸分布逐渐变宽,微气泡数量逐渐减少,气泡直径逐渐增加。在充气量 $Q=4\text{ L/min}$ 时,微气泡占比较大,气泡尺寸分布也比较均匀,有利于矿物浮选。冯来宏等^[40]研究了充气量和起泡剂浓度(2-Octonal)对充气式液固流化床分选区域内气泡运动行为的影响,研究结果表明,气泡 Sauter 直径与药剂浓度大小呈负相关,与充气量大小呈正相关。随着充气量的逐渐增加,气泡速度加快,使得气泡的碰撞概率增加,进而导致气泡间相互融合,因此,气泡 Sauter 直径随之增大。张世杰等^[41]研究了充气量、起泡剂种类及其用量对气泡 Sauter 直径的影响,结果表明,气泡尺寸分布受到充气量、起泡剂种类及其用量的综合影响。起泡剂浓度较高时,随着充气量的增加,气泡 Sauter 直径迅速增加;起泡剂浓度较低时,降低了充气量对气泡 Sauter 直径的影响,气泡 Sauter 直径增加的幅度减小。

4 纳米气泡在微细粒矿物浮选中的应用进展

根据气泡尺寸的不同,可将气泡分为常规气泡、微气泡和纳米气泡^[42],分别适用于不同粒度矿粒的浮选。其中纳米气泡是指直径小于 100 nm 的气泡,根据存在形式的不同,可分为界面纳米气泡和体相纳米气泡^[43-44]。纳米气泡具有尺寸小、比表面积大、疏水性强和生存周期长等优势,可克服微细粒矿物浮选过程中存在的矿物粒度小、质量轻及表面能高等问题^[44],因此,在微细粒矿物浮选过程中,纳米气泡的使用不仅可提高矿物回收率,又能降低药剂用量。近年来,纳米气泡在赤铁矿、白钨矿、黑钨矿、锡石、石英、石墨、磷酸盐以及煤炭等微细粒矿物浮选中得到了广泛应用^[45]。

徐冬林等^[46]根据水力空穴原理制备了纳米气泡,在不同浮选药剂条件下,研究了纳米气泡对赤铁矿浮选效果的影响,结果表明,纳米气泡浮选可显著提高浮选指标,同时减少药剂用量。与常规浮选相

比,选用石灰作为活化剂时,纳米气泡浮选使得铁精矿的回收率大约提高了7%~17%;选用捕收剂TD-II时,纳米气泡浮选使得铁精矿的回收率大约提高了7%~11%。冯其明等^[47]在纳米气泡应用于微细粒白钨矿的浮选研究中提出,纳米气泡在油酸钠溶液中具有很强的稳定性,能够存在1小时以上;由于纳米气泡促进了微细粒矿物与气泡的矿化,微细粒白钨矿的浮选效率和回收率也随之增加。马芳源^[48]针对细粒石墨回收率低和浮选流程长等问题,研究了纳米气泡对细粒石墨浮选过程的影响,研究结果表明,相较于传统的浮选工艺,磨矿和浮选段数减少至三段,精矿品位和回收率分别提高了0.2和14.73个百分点,并且减少了药剂用量。TAGHAVI等^[49]对比了浮选柱和浮选机两种浮选工艺对磷酸盐浮选过程的影响,研究发现,与纳米气泡不存在的情况相比,应用了纳米气泡后磷酸盐的回收率在浮选机工艺流程和浮选柱工艺流程下分别提高了11.36和8.52个百分点。雷汪^[50]进行了低灰煤浮选和高岭土夹带浮选试验,研究表明,相较于常规浮选,纳米气泡浮选低灰煤时的浮选速率更高,可燃体的回收率也更高。常规浮选体系和纳米气泡浮选体系中的夹带因子分别为0.677和0.816,由此说明,纳米气泡促进了高岭土夹带,使得纳米气泡浮选体系中高岭土夹带回收率更高。

5 结论与展望

1)了解每一种气泡参数测量方法的适用条件及局限性,以将其准确地应用于研究中,这仍是现阶段气泡运动特性研究中需重点考虑的问题。除此之外,传统的测量方法大多数情况下得到是气泡的二维信息,不能获取气泡的三维空间位置,如何实现气泡的三维测量将成为今后研究的热点。

2)作为浮选体系中“运输”矿物颗粒的载体,气泡的运动特性直接影响着浮选指标的好坏。然而,目前的研究主要集中在静止的溶液体系中,对于实际浮选环境中气泡运动行为的研究较少,因此,应该从更深层次研究气液固三相浮选体系中气泡的运动特性及气泡矿化过程,与实际生产相衔接。

3)虽然纳米气泡在微细粒矿物浮选中得到了广泛应用,但在实际工业应用中仍然存在大量的技术问题,另外,生成优良纳米气泡困难和纳米气泡生成装置耗能高的问题也尚未解决,如何研发出低成本和高性能的新设备仍是现阶段面临的重点问题。

参考文献

- [1] SANTO C E, VILAR V J, BOTELHOET C M S, et al. Optimization of coagulation-flocculation and flotation parameters for the treatment of a petroleum refinery effluent from a Portuguese plant [J]. Chemical Engineering Journal, 2012, 183(5): 117-123.
- [2] TSATSIS D E, PAPACHRISTOS D K, VALTA K A, et al. Enzymatic deinking for recycling of office waste paper [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2017, 5(2): 1431-1442.
- [3] PINTOR A M, ARIANA V J, BOTELHO R A R, et al. Oil and grease removal from wastewaters: sorption treatment as an alternative to state-of-the-art technologies: a critical review [J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 297(2): 229-255.
- [4] MATHIAZAKAN P, SHING S Y, YING S S, et al. Pilot-scale aqueous two-phase floatation for direct recovery of lipase derived from Burkholderia cepacia strain ST8 [J]. Separation and Purification Technology, 2016, 171(9): 206-218.
- [5] TDNA B, TMAT C, PTH D, et al. Selective flotation separation of ABS/PC from ESR plastic wastes mixtures assisted by ultrasonic catalyst/H₂O₂-ScienceDirect [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2019, 7(5): 103-114.
- [6] 王宾, 蒋昊. 浮选柱的研究与应用 [J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(4): 1027-1041.
WANG Bin, JIANG Hao. Research and application of flotation column [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(4): 1027-1041.
- [7] 童志明, 江南, 韦树霞, 等. 电化学水处理体系中气泡特征行为研究进展 [J]. 应用化工, 2020, 49(12): 3150-3154, 3161.
TONG Zhiming, JIANG Nan, WEI Shuxia, et al. Research progress of bubble characteristic behavior in electrochemical water treatment system [J]. Applied Chemical, 2020, 49(12): 3150-3154, 3161.
- [8] JIMÉNEZ C, TALAVERA B, SÁEZ C, et al. Study of the production of hydrogen bubbles at low current densities for electroflotation processes [J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology, 2010, 85(10): 1368-1373.
- [9] TADESSE B, ALBIJANIC B, MAKUEI F, et al. Recovery of fine and ultrafine mineral particles by electroflotation: a review [J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2018, 40(2): 108-122.
- [10] 董继发, 方建军, 张铃, 等. 电解浮选技术在选矿及废水处理中的研究进展 [J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(4): 146-151.
DONG Jifa, FANG Jianjun, ZHANG Ling, et al.

- Research progress of electrolytic flotation technology in mineral processing and wastewater treatment [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(4): 146-151.
- [11] 梁艳男,王海楠,周若谦,等. 浮选微泡调控及其作用机制的研究进展[J]. 矿产综合利用, 2022(2): 158-166.
LIANG Yannan, WANG Hainan, ZHOU Ruoqian, et al. Research progress in flotation microbubble regulation and its mechanism [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(2): 158-166.
- [12] 陈兰兰,卢东方,王毓华,等. 超声波技术在矿物浮选中的研究、应用现状及发展趋势[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(4): 1042-1056.
CHEN Lanlan, LU Dongfang, WANG Yuhua, et al. Research, application status and development trend of ultrasonic technology in mineral flotation [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2021, 31(4): 1042-1056.
- [13] 陈日健,闫红杰,刘柳,等. 底吹过程中基于图像处理技术的气泡直径分布特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2018, 49(6): 1541-1547.
CHEN Rijian, YAN Hongjie, LIU Liu, et al. Bubble diameter distribution characteristics based on image processing technology during bottom blowing [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2018, 49(6): 1541-1547.
- [14] ZHANG T, QIAN Y, YIN J, et al. Experimental study on 3D bubble shape evolution in swirl flow [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2019, 102: 368-375.
- [15] 彭德强,樊玉萍,董宪姝. 松油醇液相体系中气泡的特性研究[J]. 煤炭工程, 2020, 52(6): 142-147.
PENG Deqiang, FAN Yuping, DONG Xianshu. Study on the characteristics of bubbles in the liquid phase system of terpineol [J]. Coal Engineering, 2020, 52(6): 142-147.
- [16] 高丹,戈立宁,潘勇,等. 不同浓度离子溶液中气泡运动特性的试验研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2022, 22(32): 1-9.
GAO Dan, GE Lining, PAN Yong, et al. Experimental study on bubble motion characteristics in ionic solutions with different concentrations [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2022, 22(32): 1-9.
- [17] 唐瑶. 静水中单气泡运动特性及其机器学习预测研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2019.
TANG Yao. Research on the motion characteristics of a single bubble in still water and its machine learning prediction [D]. Changsha: Changsha University of Technology, 2019.
- [18] 周云龙,周红娟,宋连壮,等. 基于图像法的气液两相稀疏泡状流气泡参数分析[J]. 核科学与工程, 2012, 32(2): 110-115.
ZHOU Yunlong, ZHOU Hongjuan, SONG Lianzhuang, et al. Bubble parameter analysis of gas-liquid two-phase sparse bubbly flow based on image method [J]. Nuclear Science and Engineering, 2012, 32(2): 110-115.
- [19] 石岩青,常彩霞,刘小红,等. 面阵相机内外参数标定方法及进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(24): 9-29.
SHI Yanqing, CHANG Caixia, LIU Xiaohong, et al. Calibration methods and progress of internal and external parameters of area array camera [J]. Progress in Laser and Optoelectronics, 2021, 58(24): 9-29.
- [20] 黄文文,彭小红,李丽圆,等. 相机标定方法及进展研究综述[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 36(5): 1-17.
HUANG Wenwen, PENG Xiaohong, LI Liyuan, et al. Summary of camera calibration methods and progress [J]. Progress in Laser and Optoelectronics, 2022, 36(5): 1-17.
- [21] 程雅丽,付晓恒,杨晓冉,等. 浮选起泡剂的研究进展[J]. 煤炭工程, 2017, 49(9): 142-145.
CHENG Yali, FU Xiaoheng, YANG Xiaoran, et al. Research progress of flotation frother [J]. Coal Engineering, 2017, 49(9): 142-145.
- [22] ZHU H Z, ALEJANDRO L V, ZHU J B, et al. Effect of dodecylamine-frother blend on bubble rising characteristics [J]. Powder Technology, 2018, 338(3): 586-590.
- [23] ZHU H Z, ZHU J B, VALDIVIESO A L, et al. Effect of frother addition mode on gas dispersion and coal flotation in a downflow flotation column [J]. Fuel, 2020, 273(9): 21-36.
- [24] 陈建华. 浮选捕收剂的结构及其作用机理研究[J]. 矿产保护与利用, 2017, 36(4): 98-106.
CHEN Jianhua. Study on the structure and action mechanism of flotation collectors [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2017, 36(4): 98-106.
- [25] 孟晓光. 捕收剂和起泡剂作用机理分析[J]. 煤炭加工与综合利用, 2017(5): 44-46.
MENG Xiaoguang. Analysis of action mechanism of collector and foaming agent [J]. Coal Processing and Comprehensive Utilization, 2017(5): 44-46.
- [26] WANG H N, YANG W Q, YAN X K, et al. Regulation of bubble size in flotation: a review [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2020, 8: 56-75.
- [27] 韩继康,王伟之. 基于图像处理技术的新型阳离子捕收剂起泡特性研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2020(3): 126-131.
HAN Jikang, WANG Weizhi. Study on foaming

- characteristics of new cationic collectors based on image processing technology[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2020(3):126-131.
- [28] 朱一民,杨雪莹,乘舟越洋,等.不同胺类捕收剂泡沫性能及其机理研究[J].*金属矿山*,2020,49(7):99-104.
ZHU Yimin, YANG Xueying, CHENG Zhouyueyang, et al. Study on the performance and mechanism of foam with different amine collectors[J]. *Metal Mine*, 2020, 49(7):99-104.
- [29] XU X, ZHANG J, LIU F, et al. Rising behavior of single bubble in infinite stagnant non-Newtonian liquids[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2017, 95(8):32-41.
- [30] OSHAGHI M R, SHAHSAVARI M, AFSHIN H, et al. Experimental investigation of the bubble motion and its ascension in a quiescent viscous liquid[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2019, 103(8):56-77.
- [31] 周宸,林文博,王勇军,等.黏性流体中气泡上升运动行为的试验研究[J].*浙江理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 45(6):780-785.
ZHOU Chen, LIN Wenbo, WANG Yongjun, et al. Experimental study on the rising motion of bubbles in viscous fluids [J]. *Journal of Zhejiang University of Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 45(6):780-785.
- [32] 郭柄霖,杨润全,王怀法.叶轮转速与通气量对宽粒级煤泥浮选影响的研究[J].*中国煤炭*, 2015, 41(5):99-104.
GUO Binglin, YANG Runquan, WANG Huaifa. Research on the effect of impeller speed and ventilation rate on the flotation of wide-size coal slime[J]. *China Coal*, 2015, 41(5):99-104.
- [33] 费之奎,朱金波,朱宏政,等.喷射-搅拌自吸气浮选装置气泡尺度分布及影响因素[J].*中国矿业大学学报*, 2018, 47(3):662-670.
FEI Zhikui, ZHU Jinbo, ZHU Hongzheng, et al. Bubble size distribution and influence factors of jet stirring self-priming flotation device[J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2018, 47(3):662-670.
- [34] 朱宏政,王海艳,王海楠,等.机械搅拌式浮选装置中气泡粒径分布规律[J].*煤炭学报*, 2018, 43(4):1140-1145.
ZHU Hongzheng, WANG Haiyan, WANG Hainan, et al. Bubble size distribution law in mechanical stirring flotation device [J]. *Journal of Coal*, 2018, 43(4):1140-1145.
- [35] 高淑玲,孟令国,孙文瀚,等.浮选机叶轮工作参数对气泡尺寸分布特征的影响[J].*中国矿业*, 2020, 29(12):134-139.
GAO Shuling, MENG Lingguo, SUN Wenhan, et al. Effect of working parameters of flotation machine impeller on bubble size distribution characteristics [J]. *China Mining Magazine*, 2020, 29(12):134-139.
- [36] 刘佳林.旋流-静态微泡浮选柱充气方式优化与分选试验研究[D].徐州:中国矿业大学,2017.
LIU Jialin. Research on the optimization and separation test of the charging mode of the cyclone-static microbubble flotation column [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [37] 韩继康.一种新型浮选柱捕集区气泡行为特征研究[D].唐山:华北理工大学,2020.
HAN Jikang. Study on bubble behavior characteristics of a new flotation column capture area [D]. Tangshan: North China University of Technology, 2020.
- [38] 程敏.堇青石板式陶瓷膜微泡发生器的研究[D].贵阳:贵州大学,2019.
CHENG Min. Research on the cordierite plate-type ceramic membrane microbubble generator [D]. Guiyang: Guizhou University, 2019.
- [39] 梁冰,韩苗苗,韩继康,等.一种新型浮选柱发泡器生成气泡特性研究[J].*矿产综合利用*, 2020(3):190-196.
LIANG Bing, HAN Miaomiao, HAN Jikang, et al. Study on bubble characteristics of a new type of flotation column foaming machine [J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(3):190-196.
- [40] 董继发,方建军,张铃,等.充气式液固流化床气泡尺寸分布及 Sauter 直径预测[J].*煤炭学报*, 2019, 44(增刊 2):650-656.
DONG Jifa, FANG Jianjun, ZHANG Ling, et al. Bubble size distribution and Sauter diameter prediction in gas-filled liquid-solid fluidized bed [J]. *Journal of Coal*, 2019, 44(Suppl. 2):650-656.
- [41] 张世杰,刘文礼,赵树凯,等.起泡剂与充气量对浮选气泡粒度影响规律研究[J].*煤炭工程*, 2015, 47(3):119-121, 125.
ZHANG Shijie, LIU Wenli, ZHAO Shukai, et al. Research on the influence of foaming agent and air volume on the flotation bubble size [J]. *Coal Engineering*, 2015, 47(3):119-121, 125.
- [42] 李福强,雷免涛,陈用泷,等.微气泡水处理技术研究进展[C]//中国环境科学学会 2022 年科学技术年会论文集.南昌:中国环境科学学会,2022:238-245.
LI Fuqiang, LEI Miantao, CHEN Yonglong, et al. Research progress of microbubble water treatment technology [C]//Proceedings of the 2022 Science and Technology Annual Conference of the Chinese Society of Environmental Sciences. Nanchang: Chinese Society of Environmental Sciences, 2022:238-245.
- [43] 马利凤,高淑玲,孟令国,等.浮选气泡及其与颗粒作用研究进展[J].*金属矿山*, 2017, 46(8):20-26.
MA Lifeng, GAO Shuling, MENG Lingguo, et al.

- Research progress in flotation bubbles and their interaction with particles[J]. Metal Mine, 2017, 46(8): 20-26.
- [44] 赵玉龙, 张鹤, 余俊甫, 等. 纳米气泡在微细粒矿物浮选中的应用研究现状[J]. 净水技术, 2021, 40(2): 127-135.
- ZHAO Yulong, ZHANG He, YU Junfu, et al. Research status of application of nano-bubbles in flotation of fine minerals [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(2): 127-135.
- [45] 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, 38(3): 81-86.
- LIU An, HAN Feng, LI Zhihong, et al. Research progress in the application of nano-bubbles in the flotation of fine minerals [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2018, 38(3): 81-86.
- [46] 徐冬林, 陶东平, 吴中贤, 等. 纳米气泡在鞍山式铁矿反浮选中效果探索[J]. 金属矿山, 2020, 49(8): 83-90.
- XU Donglin, TAO Dongping, WU Zhongxian, et al. Exploration on the effect of nano-bubbles in the anti-flotation of Anshan iron ore [J]. Metal Mine, 2020, 49(8): 83-90.
- [47] 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, 48(1): 9-15.
- FENG Qiming, ZHOU Weiguang, SHI Qing. The formation of nano-bubbles and its effect on the flotation of fine minerals[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(1): 9-15.
- [48] 马芳源. 石墨矿纳米气泡高效浮选及其机理研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2021.
- MA Fangyuan. High-efficiency flotation of graphite ore with nano-bubbles and its mechanism [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [49] TAGHAVI F, NOAPARAST M, POURKARIMI Z, et al. Comparison of recovery of fine phosphate minerals by flotation machine and flotation column in the presence of nano-bubbles [J]. Journal of Central South University, 2022, 29(1): 102-115.
- [50] 雷汪. 纳米气泡的制备及其对煤泥浮选影响研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2020.
- LEI Wang. Study on the preparation of nano-bubbles and their influence on coal slime flotation[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2020.
- (本文编辑 刘水红)

(上接第 39 页)

- [14] 杨超, 王怀, 郝福来, 等. 贵州某卡林型金矿浮选试验研究[J]. 黄金, 2018, 39(6): 56-59.
- YANG Chao, WANG Huai, HAO Fulai, et al. Experimental study on flotation of a carlin-type gold ore from Guizhou[J]. Gold, 2018, 39(6): 56-59.
- [15] 周渝, 董菁, 刘亮. 江西遂川某金矿工艺矿物学研究[J]. 中国金属通报, 2019(9): 253-254.
- ZHOU Yu, DONG Qin, LIU Liang. Research on process mineralogy of a gold mine in Suichuan, Jiangxi province[J]. China Metal Bulletin, 2019(9): 253-254.
- [16] 温利刚, 付强, 贾木欣, 等. 工艺矿物学自动分析仪(BPMA)在影响金氰化浸出的工艺矿物学因素研究中的应用[J]. 中国矿业, 2021, 30(增刊 2): 195-200.
- WEN Ligang, FU Qiang, JIA Muxin, et al. Application of automated mineralogy analyzing system in the study of process mineralogical factors affecting gold cyanide leaching[J]. China Mining Magazine, 2021, 30(Suppl. 2): 195-200.
- [17] AGORHOM E A, SKINNER W, ZANIN M. Influence of gold mineralogy on its flotation recovery in a porphyry copper-gold ore [J]. Chemical Engineering Science, 2013, 99: 127-138.
- [18] 赵晖, 金自钦. 某金矿工艺矿物学研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2023(1): 10-15.
- ZHAO Hui, JIN Ziqin. Process mineralogy study on a gold ore [J]. Journal of Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2023(1): 10-15.
- [19] 王越, 王婧, 李潇雨, 等. 川西某金矿工艺矿物学研究及对选矿工艺的影响[J]. 矿产综合利用, 2021(4): 206-210.
- WANG Yue, WANG Jing, LI Xiaoyu, et al. Process mineralogy study of gold deposit in western Sichuan area and its influence on mineral processing technology[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(4): 206-210.
- [20] 于淙权, 李光胜, 朱幸福, 等. 黄铁矿和毒砂分离浮选研究[J]. 科技与创新, 2023(4): 73-75.
- YU Congquan, LI Guangsheng, ZHU Xingfu, et al. Study on separation and flotation of pyrite and arsenopyrite[J]. Science, Technology and Innovation, 2023(4): 73-75.
- [21] 吕俊俊. 工艺矿物学[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2011: 269.
- LYU Xianjun. Process mineralogy [M]. Changsha: Central South University Press, 2011: 269.
- (本文编辑 汪东芳)