

# 细粒载金黄铁矿纳米气泡浮选与传统浮选的对比试验研究

邓力嘉, 马芳源\*

辽宁科技大学矿业工程学院, 辽宁 鞍山 114051



**摘要:**为了强化细颗粒载金黄铁矿的回收,通过浮选试验、激光粒度分析和粒度回收率计算,研究了细颗粒载金黄铁矿传统气泡浮选与纳米气泡浮选的差异。结果表明:纳米气泡浮选节省了捕收剂和起泡剂的用量,即使在较高的矿浆浓度条件下仍可以获得更高品位的金精矿;纳米气泡浮选速度比传统气泡浮选更快,精矿回收率比传统气泡浮选高8个百分点;相比于传统气泡浮选,纳米气泡的存在使得浮选粒度下限从 $2.6\ \mu\text{m}$ 降低至 $0.2\ \mu\text{m}$ ,平均浮选粒度从 $99\ \mu\text{m}$ 降低至 $26\ \mu\text{m}$ ;纳米气泡可以降低黄铁矿表面电位 $5.36\ \text{mV}$ ,增大黄铁矿表面接触角 $10^\circ$ 。通过降低黄铁矿表面电位以及提高其表面疏水性,纳米气泡起到了强化微细颗粒载金黄铁矿回收的作用。

**关键词:**纳米气泡;细颗粒载金黄铁矿;浮选;粒度;机理

中图分类号:TD923 文献标志码:A 文章编号:1005-2518(2025)06-1232-10 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2025.06.145

引用格式:邓力嘉,马芳源.细粒载金黄铁矿纳米气泡浮选与传统浮选的对比试验研究[J].黄金科学技术,2025,33(6):1232-1241.DENG Lijia,MA Fangyuan.Comparative Experimental Study on the Flotation of Fine Particle Gold-bearing Pyrite with Nanobubbles Flotation and Traditional Flotation[J].Gold Science and Technology,2025,33(6):1232-1241.

随着高品位易选金矿逐渐枯竭,难回收金矿将成为主要的利用资源(田峻华等,2024)。大多数金以黄铁矿为载体,由于黄铁矿具有很好的可浮性,因此浮选法是回收载金黄铁矿的常用方法(王帅等,2024)。然而,对于细颗粒载金黄铁矿,由于常规气泡与细颗粒的碰撞概率和黏附概率较小,而细颗粒从气泡表面脱落的概率明显增加,导致常规浮选法难以回收细颗粒载金黄铁矿(许炜光等,2025)。因此,细颗粒载金黄铁矿的高效回收技术成为近年来研究人员关注的焦点。

对于细颗粒载金黄铁矿的浮选,通常采用选择性絮凝浮选法或减小浮选气泡尺寸的方法(任浏祯等,2024)。其中,选择性絮凝浮选,如改性水溶性聚合物聚乙烯基己内酰胺,有利于细颗粒载金黄铁

矿从细泥中选择性聚集,当细泥金含量为 $3.54\times 10^{-6}$ 时,金从细泥中析出至砂石的比例超过99%(Matveeva et al,2024)。当以橄榄油为捕收剂原料时,预团聚效应可以使得浮选精矿品位从 $46.0\times 10^{-6}$ 提高至 $51.5\times 10^{-6}$ (Kilinc-Aksay et al,2017)。部分学者通过减小浮选气泡尺寸的方法实现细颗粒矿物的有效回收。因此,细颗粒载金黄铁矿纳米气泡浮选也是一项有效的手段。黄铁矿浮选矿浆中引入纳米气泡时可以增强铁矿的可浮性和浮选动力学,并通过增强疏水相互作用提高捕收剂在黄铁矿表面的吸附能力(Wu et al,2023)。纳米气泡的存在可以使得捕收剂在黄铁矿表面的吸附能力提高1.6倍,显著提高了黄铁矿表面疏水性,使得黄铁矿的回收率提高了7%(Heidari et al,2024)。综上所述

收稿日期:2025-04-21;修订日期:2025-06-28

基金项目:辽宁省教育厅高等学校基本科研项目“纳米气泡强化微细颗粒载金黄铁矿浮选机理研究”(编号:LJ212510146016)资助

作者简介:邓力嘉(2000—),男,辽宁鞍山人,硕士研究生,从事细颗粒分选研究工作。E-mail:2784427120@qq.com

\*通信作者:马芳源(1991—),男,辽宁凌源人,讲师,从事细颗粒分选研究工作。E-mail:1209468883@qq.com

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

述,关于纳米气泡浮选与传统浮选对细颗粒载金黄铁矿浮选行为的差异,目前尚未见详细报道。

鉴于此,本文以低品位细颗粒载金黄铁矿作为研究对象,分析了纳米气泡浮选效果与传统浮选效果的差异,阐述了纳米气泡浮选和传统气泡浮选对细颗粒载金黄铁矿浮选行为的影响。在此基础上,揭示了纳米气泡强化细颗粒载金黄铁矿的机理,为细颗粒金纳米气泡浮选的调控提供了理论依据。

## 1 样品与方法

### 1.1 黄铁矿样品

采用细颗粒黄铁矿纯矿物(-74 μm,  $d_{50}=37.6 \mu\text{m}$ )作为接触角测试和 Zeta 电位测试的原材料。黄铁矿 XRD 分析结果见图 1,由图 1 可以看出黄铁矿较纯,未见其他杂质矿物特征峰,这说明黄铁矿纯矿物中其他矿物含量较低。表 1 为黄铁矿纯矿物样品的 XRF 分析结果。由表 1 可知,黄铁矿纯矿物中,Fe 含量为 46.6%,S 含量为 48.6%,SiO<sub>2</sub> 含量仅为 1.8%,其余氧化物含量均为微量。

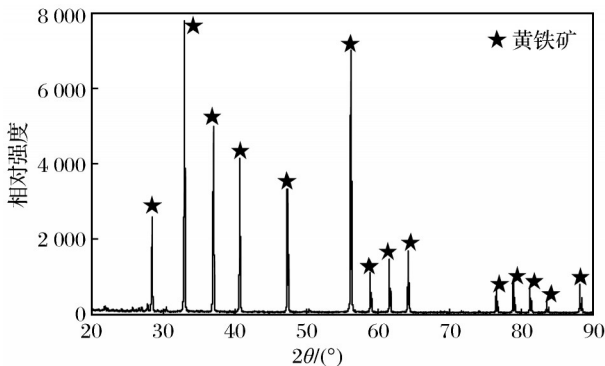


图 1 黄铁矿 XRD 分析结果

Fig.1 Results of XRD analysis of pyrite

表 1 黄铁矿化学多元素分析结果

Table 1 Results of chemical multi-element analysis of pyrite (%)

成分	含量	成分	含量
Fe	46.60	CaO	0.69
S	48.60	MgO	0.86
SiO <sub>2</sub>	1.80	ZnO	0.23
K <sub>2</sub> O	0.22		

### 1.2 原矿样品

(1)XRF 分析。表 2 为样品的化学多元素分析

结果。由表 2 可知,原矿石金含量为  $1.48 \times 10^{-6}$ ,具有较高的回收价值。此外,样品中 Fe 含量为 8.05%,SiO<sub>2</sub> 含量为 52.76%,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量为 15.32,CaO 和 MgO 含量为 1.71%。相比于 Au 元素,其他元素缺乏回收价值。样品中金属硫化物含量高。

表 2 原矿化学多元素分析结果

Table 2 Results of chemical multi-element analysis of raw ore (%)

成分	含量	成分	含量
Au	1.51	Zn	0.05
Ag	2.60	SiO <sub>2</sub>	52.76
TFe	8.05	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.32
As	0.29	CaO	4.09
S	7.02	MgO	1.71
C	0.24		

注: Au 和 Ag 元素含量单位为  $\times 10^{-6}$ ,通过火试金法测得

(2)物相分析。由表 3 可知,原矿样品中金属硫化物含量较高,主要为黄铁矿,含量为 13.85%。除此之外,样品中还含有 1.22% 的石墨,同时含有少量的闪锌矿、黄铜矿、方铅矿和毒砂。非金属矿占比最高,达到 84.66%。对原矿样品进行扫描电镜观察,获得细颗粒金与黄铁矿的共生特征如图 2 所示。由图 2 可知,细颗粒金主要以黄铁矿作为载体,并被黄铁矿包裹,因此黄铁矿是主要的回收对象。黄铁矿具有很好的可浮性,可通过浮选法对其进行富集。

表 3 物相分析结果

Table 3 Results of phase analysis (%)

物相	含量	物相	含量
黄铁矿	13.85	方铅矿	0.03
石墨	1.22	毒砂	0.02
闪锌矿	0.10	非金属矿	84.66
黄铜矿	0.04		

(3)粒度组成。由图 3 可知,样品中的黄铁矿分布粒度范围呈现两端粒级含量低、中间粒级含量高的特点。大部分黄铁矿粒度集中在 +75-53 μm、+53-37 μm 和 +37-20 μm 范围内,其含量分别为 20.56%、23.88% 和 24.50%。值得注意的是,样品中还含有微细颗粒黄铁矿(+10-20 μm)和超细颗粒黄铁矿(-10 μm),含量分别为 6.5% 和 5.0%,这部分

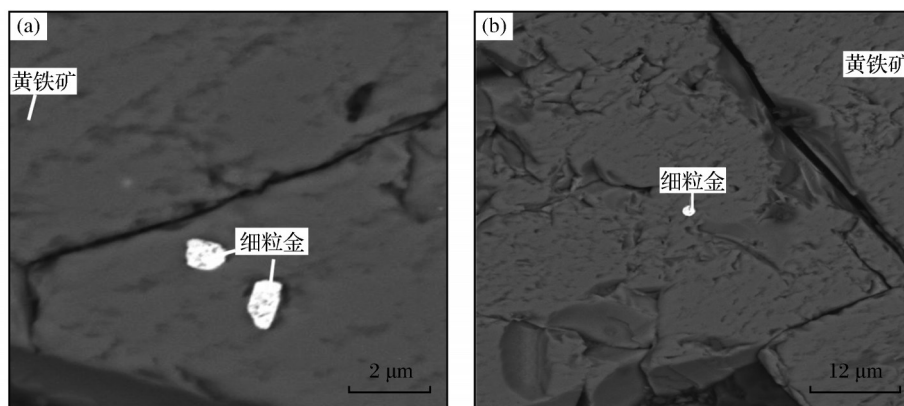


图2 细颗粒金与黄铁矿的共生特征

Fig. 2 Symbiotic characteristics of fine-grained gold and pyrite

黄铁矿由于其自身粒度细,难以被浮选气泡捕获,是导致金流失的主要原因。从累积曲线来看,大部分黄铁矿粒度集中在 $-74\ \mu\text{m}$ 的范围,占比为77.66%。

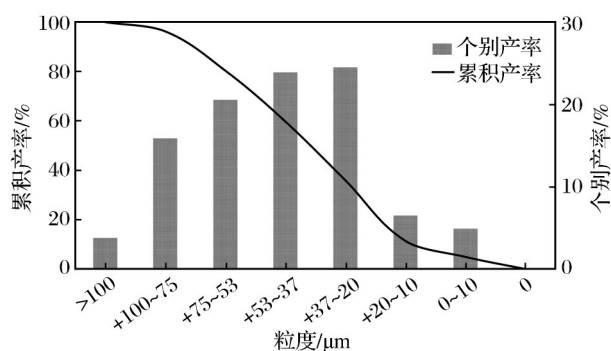


图3 样品中黄铁矿的粒度组成

Fig. 3 Particle size composition of pyrite in the sample

### 1.3 试验装置

将气泡发生器、浮选机和循环泵通过钢管组装在一起,形成如图4所示的试验装置。试验中,当矿浆通过纳米气泡发生器(阀门1关闭,阀门2打开)时,液速迅速增加,此时液压降至溶解气体饱和压力以下。根据水力空化原理,溶解在液体中的空气以空化核或纳米气泡( $<1\ \mu\text{m}$ )的形式在矿物表面或溶液中产生。相反,当阀门1打开,阀门2关闭时,可完成纳米气泡浮选作业;当阀门2关闭,阀门1打开时,可完成常规浮选作业。

### 1.4 试验方法

(1)纳米气泡尺寸表征。当含起泡剂的水溶液通过气泡发生器(图4中阀门2关闭,阀门1打开)

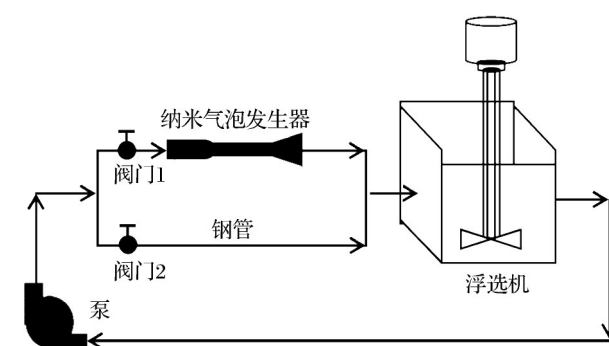


图4 试验装置图

Fig. 4 Diagram of the test setup

时,基于水力空化原理形成体相纳米气泡。在MIBC(甲基异丁基甲醇)浓度为 $30\ \text{mg/L}$ ,pH值为7,循环流速为 $13.78\ \text{L/min}$ ,循环时间为 $2\ \text{min}$ 的条件下,得到纳米气泡水溶液。然后用 $10\ \text{mL}$ 一次性注射器取 $5\ \text{mL}$ 样品,置于Zeta电位分析仪中测试,获得纳米气泡的粒径分布特征。

(2)浮选试验。采用图4所示的装置进行浮选条件试验和浮选动力学试验。若无特殊强调,试验均在如下条件下进行:磨矿细度( $-0.074\ \text{mm}$ 粒度占比)为90%,丁铵黑药用量为 $100\ \text{g/t}$ ,起泡剂(2#油)用量为 $40\ \text{g/t}$ ,矿浆质量浓度为25%,矿浆循环时间为 $3\ \text{min}$ ,浮选时间为 $4\ \text{min}$ 。

(3)精矿粒度表征。在(1)的浮选试验条件下,获得纳米气泡浮选精矿泡沫产品和传统浮选精矿泡沫产品,经过抽滤、烘干和缩分获得代表性样品。最终,采用激光粒度分析仪分别对上述2种精矿进行粒度组成表征,进而评价纳米气泡浮选和传统浮

选对细颗粒载金黄铁矿的回收效果。

(4)接触角和Zeta电位测试。以纯黄铁矿作为给矿,采用图4所示的装置在(1)设定的浮选条件下分别获得有无纳米气泡的矿浆样品和泡沫产品。其中,采用丹东百特仪器有限公司制造的纳米粒子Zeta电位分析仪(BeNano-90)测试有无纳米气泡情况下的矿浆表面电位,而泡沫产品经过过滤、烘干和压片后,采用上海中晨数字技术设备有限公司制造的接触角仪(JC2000C1)对压片表面的接触角进行测试。测试时,每个样品测试5次,计算5次试验的平均值作为最终的试验值。通过有无纳米气泡情况下矿浆Zeta电位和泡沫产品表面的接触角差异进而评价纳米气泡强化细颗粒载金黄铁矿的浮选机理。

## 2 结果与讨论

### 2.1 纳米气泡尺寸分布

图5所示为纳米气泡尺寸的分布情况。由图5可以看出,气泡的尺寸为 $d_{50}=425$  nm, $d_{90}=510$  nm, $d_{30}=360$  nm。此外,大多数气泡的尺寸为300~720 nm,455 nm的气泡占比最高,约为37%,与之前的研究测试结果略有不同。前人研究测量得到的纳米气泡尺寸范围为150~220 nm(Rosa et al, 2018)或220~280 nm(Oliveira et al, 2018)。不同研究者的测试结果略有差异,主要原因是纳米气泡尺寸的分布与溶液的pH值、空化时间、起泡剂浓度和充气量等因素有关(Zhang et al, 2020)。

### 2.2 磨矿细度

由图6可知,纳米气泡浮选的精矿回收率明显高于传统浮选。当磨矿细度为90%左右时,纳米气

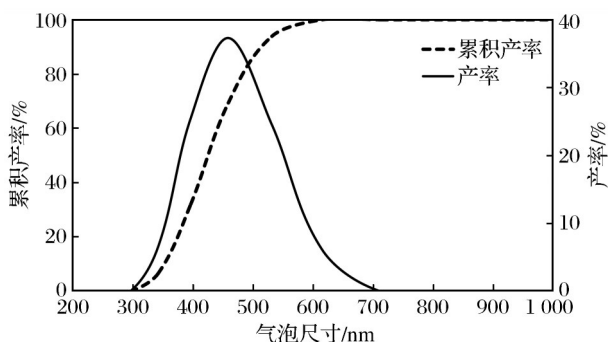


图5 纳米气泡尺寸分布

Fig. 5 Size distribution of nanobubbles

泡浮选精矿回收率约为83%,而传统气泡浮选精矿回收率约为76%,即浮选方法由传统气泡浮选改为纳米气泡浮选后精矿回收率提高了7个百分点。当磨矿细度高于90%时,精矿浮选回收率几乎不随磨矿细度的增加而发生变化,而传统气泡浮选回收率从76%降低至73%,说明纳米气泡的存在可以有效强化细颗粒载金黄铁矿的回收。事实上,矿物颗粒能否成为精矿产品是由颗粒与气泡的碰撞概率、颗粒在气泡表面的黏附概率以及颗粒从气泡表面脱落的概率的乘积决定的(Ma et al, 2022a)。当颗粒粒度过细时,颗粒与气泡的碰撞概率和黏附概率显著降低,从而导致细颗粒矿物难以被捕获。然而,提高细颗粒矿物的浮选概率可以通过减小气泡尺寸实现,传统气泡的直径远远大于纳米气泡,即使在更细的粒度条件下,纳米气泡的存在仍旧可以有效维持细颗粒矿物的回收率。由图6可知,随着磨矿细度的增加,精矿品位呈降低趋势。但是纳米气泡浮选精矿品位略高于传统气泡浮选,这是因为纳米气泡有效改善了浮选的选择性。因此,纳米气泡可以更好地回收传统浮选不能回收的细颗粒载金黄铁矿,这对于细颗粒难回收金的高效利用意义重大,可显著提升经济效益。

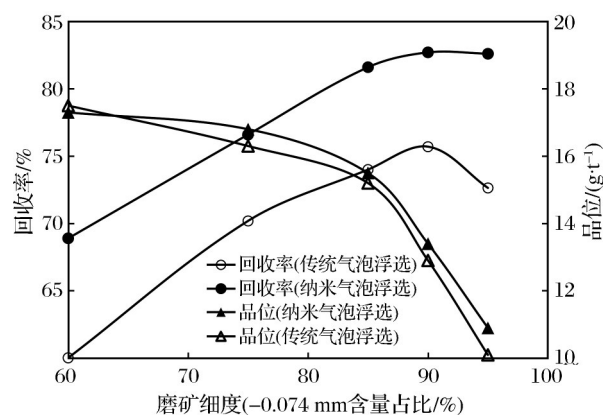


图6 磨矿细度试验结果

Fig. 6 Results of grinding fineness test

### 2.3 捕收剂

图7所示为不同捕收剂用量条件下纳米气泡浮选和传统气泡浮选精矿指标差异。由图7可以看出,随着捕收剂用量的增加,精矿回收率呈增加趋势。不同的是纳米气泡浮选精矿回收率总是高于传统气泡浮选的回收率。在丁铵黑药(捕收剂)

用量为 125 g/t 的条件下,纳米气泡存在时精矿回收率约为 87%,而纳米气泡不存在时精矿回收率仅为 79%,即与传统气泡浮选相比,纳米气泡的存在使得精矿回收率提高了 8 个百分点。值得注意的是,在 73% 的精矿回收率情况下,纳米气泡浮选消耗的丁铵黑药为 75 g/t,而传统气泡浮选消耗的丁铵黑药为 100 g/t,即纳米气泡的存在使得丁铵黑药用量降低了 25 g/t。图 7 还表明纳米气泡存在时精矿品位相对传统气泡浮选更高。根据以往研究,纳米气泡可以促进捕收剂在矿物表面的吸附,提高矿物表面对捕收剂的吸附量(Tang et al, 2023),同时黄铁矿表面的疏水性比没有纳米气泡时更强,因此纳米气泡的存在有效改善了浮选过程的选择性。然而,随着捕收剂用量增加至 150 g/t,无论纳米气泡是否存在,精矿品位几乎相同。这是因为捕收剂用量的增加有利于捕收剂在黄铁矿表面的吸附,因此纳米气泡不存在时,黄铁矿表面的疏水性也得到了良好的改善,使得浮选选择性差异减小。总体来说,纳米气泡浮选可以有效降低捕收剂用量,在工业化生产中对于节约捕收剂成本的意义重大,同时捕收剂用量的减少将极大地缓解药剂带来的环保问题。

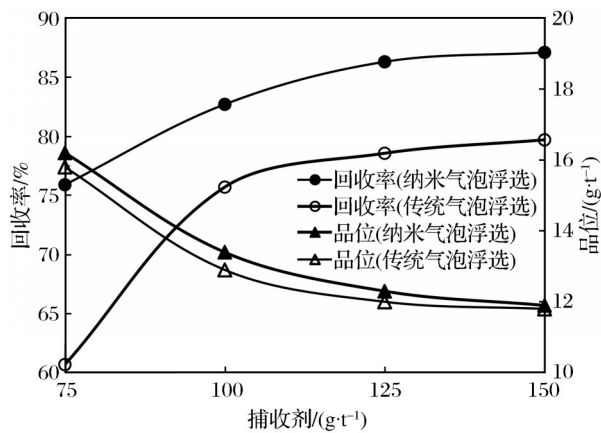


图7 捕收剂用量试验结果

Fig. 7 Results of collector dosage test

## 2.4 起泡剂

图 8 所示为不同起泡剂用量条件下纳米气泡浮选和传统浮选结果的差异。由图 8 可以看出,精矿回收率随着起泡剂用量的增加呈增高趋势。然而,当纳米气泡存在时,随着起泡剂用量的增加,浮选精矿回收率增高趋势较缓,表明纳米气泡浮选在

较小的起泡剂用量情况下,仍旧可以维持较高的回收率。在 2#油(起泡剂)用量为 20 g/t 的条件下,纳米气泡存在时精矿回收率约为 81%,而纳米气泡不存在时精矿回收率约为 57%,即纳米气泡浮选精矿回收率比传统气泡浮选精矿回收率高 24 个百分点。在回收率为 81% 的情况下,纳米气泡浮选需要消耗 2#油 20 g/t,而传统气泡浮选需要消耗 2#油 60 g/t,即纳米气泡的存在降低了 2#油的消耗量,降低幅度为 40 g/t。图 8 还表明,随着起泡剂的用量从 20 g/t 增加至 60 g/t,纳米气泡浮选精矿品位略高于传统气泡浮选精矿。然而,当起泡剂用量大于 60 g/t 时,无论纳米气泡是否存在,精矿品位差异均明显减小。由于起泡剂用量增加,气泡浓度显著增加,使得气泡负载能力增加,容易使得脉石颗粒被夹带进入到泡沫产品中,导致浮选选择性降低,因而精矿品位差异减小。总体来说,纳米气泡浮选可以有效降低起泡剂的用量,对于工业化生产中节约起泡剂成本十分有利。

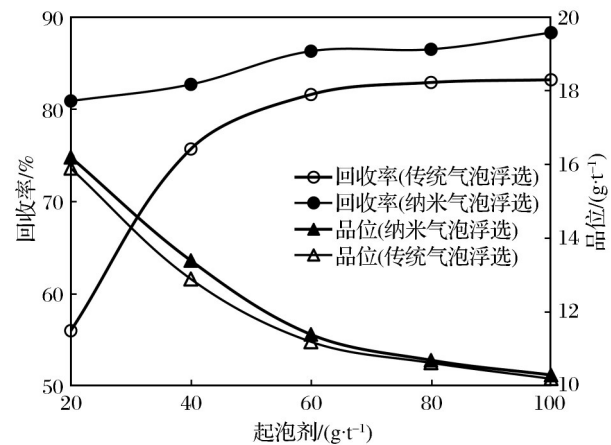


图8 起泡剂用量试验

Fig. 8 Results of foaming agent dosage test

## 2.5 矿浆浓度

不同矿浆浓度条件下,纳米气泡浮选和传统浮选的浮选指标差异如图 9 所示。由图 9 可以看出,随着矿浆浓度的增加,精矿回收率呈现降低趋势。然而,纳米气泡存在时精矿回收率随矿浆浓度的变化幅度较小,且纳米气泡浮选精矿的回收率总是高于传统气泡浮选精矿的回收率。例如:在 30% 的矿浆浓度条件下,纳米气泡存在时获得的精矿回收率约为 82%,而纳米气泡不存在时获得的精矿回收率

约为66%,即纳米气泡的引入使得精矿回收率增加16个百分点。

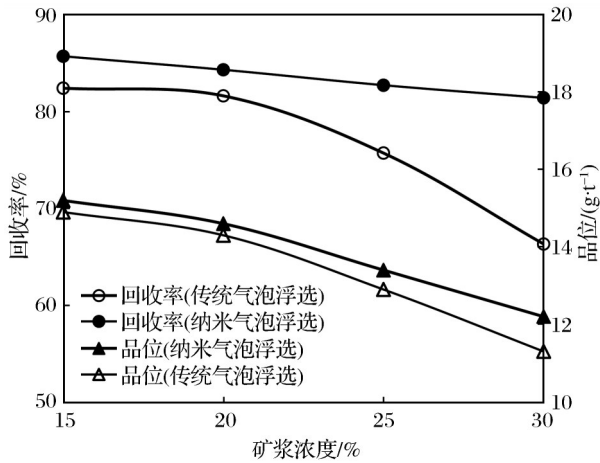


图9 矿浆浓度试验结果

Fig. 9 Results of pulp concentration test

事实上,纳米气泡的个数浓度远高于常规气泡。根据以往的报道,纳米气泡的数量浓度范围为 $2.39 \times 10^8 \sim 4.92 \times 10^8$ 个/mL(孟令轩等,2023),而常规气泡的数量浓度约为 $3.1 \times 10^3$ 个/mL(Vinnett et al, 2016)。换言之,纳米气泡的浓度是单位体积常规气泡浓度的5个数量级倍,因此较高的矿浆浓度条件下仍可以维持较高的气泡负载能力,有效维持精

矿回收率。此外,纳米气泡的尺寸远远小于传统气泡,具有超大的表面积(Zhang et al, 2020),可以提高气泡一颗粒的矿化效率,进而保持更高的精矿回收率。图9还表明不同的矿浆浓度条件下,纳米气泡浮选精矿的品位明显高于传统浮选精矿,且随着矿浆浓度的增加,精矿品位提高越来越明显,这说明纳米气泡浮选在较高的矿浆浓度条件下仍可以保持较好的浮选选择性,有效缓解脉石颗粒被夹带进入到泡沫产品中。综上所述,纳米气泡浮选在较高的浓度条件下依然可以获得较好的浮选指标,在工业生产中对于提高细颗粒载金黄铁矿浮选处理量具有重要意义。

## 2.6 浮选动力学

纳米气泡浮选和传统气泡浮选动力学试验结果如图10所示。由图10可知,纳米气泡的存在使得浮选速率明显加快。当纳米气泡存在时,浮选90 s时回收率几乎接近平稳值(81%)。然而,当纳米气泡不存在时,浮选130 s时回收率(73%)几乎不再变化。纳米气泡浮选比传统气泡浮选提前40 s完成浮选作业,且回收率提高了8个百分点。这与前人对其他矿物的研究结论完全一致,如石墨浮选(李明娇等,2024)。

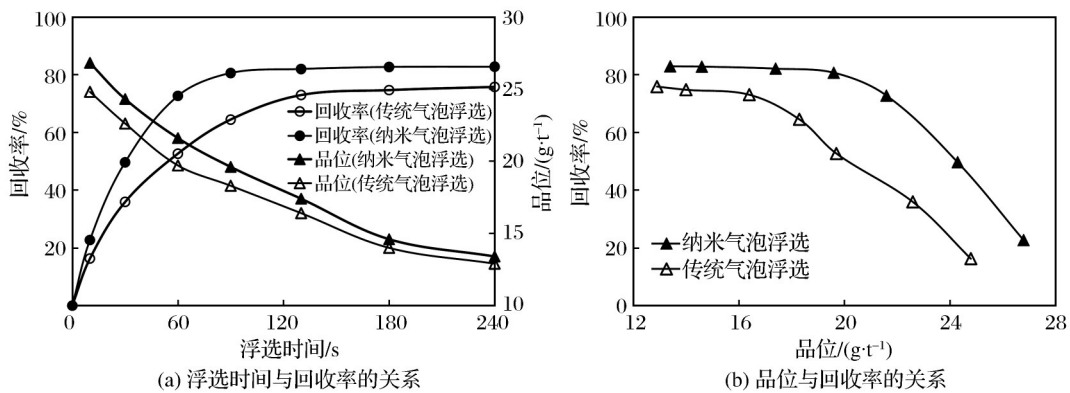


图10 浮选动力学试验结果

Fig. 10 Results of flotation kinetics test

进一步分析图10可知,纳米气泡浮选精矿品位高于传统气泡浮选,这表明纳米气泡浮选具有很好的选择性。在浮选时间为90 s的条件下,纳米气泡浮选精矿品位约为 $20 \times 10^{-6}$ ,而传统气泡浮选精矿品位仅为 $18 \times 10^{-6}$ ,即纳米气泡的存在使精矿品位提高了 $2 \times 10^{-6}$ 。然而,随着浮选时间的增加,品

位增加幅度相对减小,这表明浮选选择性有所下降。此外,在浮选精矿品位相同的条件下,传统浮选法的精矿回收率明显低于纳米气泡浮选法,如在精矿品位为 $20 \times 10^{-6}$ 的条件下,当纳米气泡存在时精矿回收率约为81%,而纳米气泡不存在时精矿回收率仅约为53%,即纳米气泡的存在使得精矿回收

率提高了28个百分点。综上所述,纳米气泡的存在可以提高单位时间内浮选给矿的处理量,在工业化方面对于产能的提高意义重大。

### 2.7 精矿粒度差异

图11所示为纳米气泡浮选和传统气泡浮选精矿的粒度组成。由图11可以看出,纳米气泡浮选精矿的平均粒度约为26 μm,而传统气泡浮选精矿平均粒度约为99 μm,即纳米气泡的存在使得精矿平均粒度降低了73 μm,这说明纳米气泡浮选可以回收粒度更细的金,所以平均粒径有所降低。由图11可知,纳米气泡浮选精矿中最小粒度约为0.4 μm,而传统气泡浮选精矿最小粒度约为2.6 μm,即纳米气泡的存在使得浮选捕收粒度下限降低了2.2 μm,说明纳米气泡能够捕收传统气泡不能捕收的微细甚至超细颗粒,进而使得浮选精矿的回收率更高。Zhang et al(2023)在微细石墨浮选的研究中也发现,相比于传统气泡浮选,纳米气泡的引入使得浮选粒度从18 μm降低至1 μm,与本研究的结论相同。总体来说,纳米气泡降低了细颗粒载金黄铁矿的浮选粒度下限,显著提高了细颗粒难回收金的回收率,对于促进细颗粒难选金资源的利用意义重大。

### 2.8 接触角和Zeta分析

对矿浆样品进行Zeta电位测试,对泡沫产品进行接触角测试,结果如图12所示。由图12(a)可知,纳米气泡存在时黄铁矿表面电位为-6.72 mV,而纳米气泡不存在时黄铁矿表面电位为-12.08 mV,即纳米气泡的存在使得黄铁矿表面电位降低了5.36 mV,这一结论在其他研究中也得到了证明(Ma et al, 2022b)。众所周知,纳米气泡的存在使得微细颗粒发生疏水性团聚(Knöpfer et al, 2017;

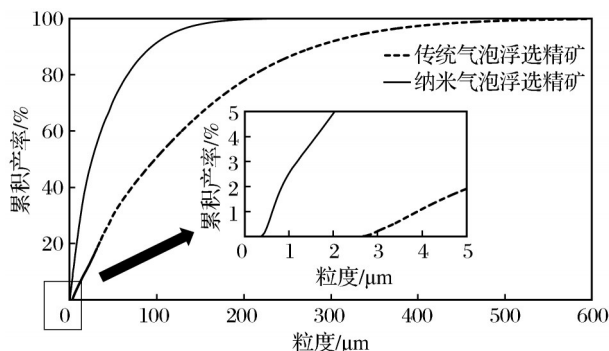


图11 浮选精矿激光粒度分析结果

Fig. 11 Laser particle size analysis results of flotation concentrate

Wang et al, 2019),通过增大细颗粒矿物的表观尺寸从而提高细颗粒矿物的浮选概率。进一步地,纳米气泡引起的表观尺寸较大疏水性团聚体的稳定性与细颗粒之间的作用力性质有关,纳米气泡在黄铁矿表面改变黄铁矿表面原有的性质,降低了其表面电位,直接使得细颗粒黄铁矿间的静电斥力减小。因此,疏水性团聚体更加稳定,可以确保微细颗粒黄铁矿被有效回收。

由图12(b)可知,纳米气泡浮选泡沫产品表面的接触角为84.22°,而传统气泡浮选泡沫产品表面的接触角为74.42°,即表面接触角增加了约10°。这表明纳米气泡的存在可以促进捕收剂在黄铁矿表面的吸附,提高黄铁矿表面的疏水性,改善浮选过程的选择性,这与前人的研究结论基本一致(Knöpfer et al, 2017)。以往研究还表明纳米气泡可以提高捕收剂在矿物表面的吸附速率(Ma et al, 2022c; Deng et al, 2024),进而快速提高矿物表面的疏水性,与本研究的浮选动力学试验结果完全吻合。

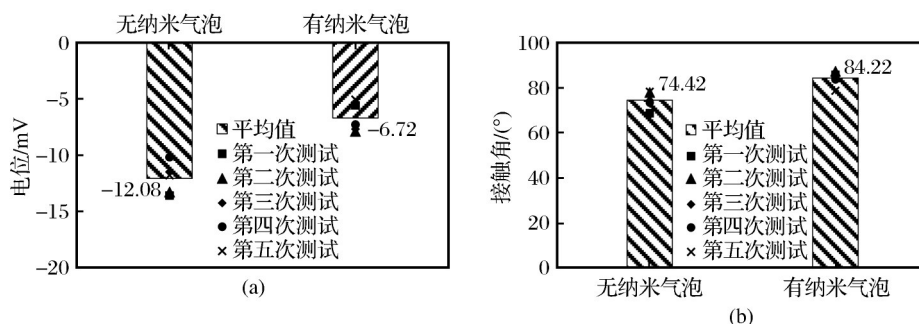


图12 Zeta电位和接触角测试结果

Fig. 12 Test results of Zeta potential and contact angle

### 3 结论

(1) 纳米气泡浮选有效地节省了捕收剂和起泡剂的用量,即使在较高的矿浆浓度条件下仍表现出较好的浮选选择性,显著降低了药剂成本。此外,相比于传统浮选,纳米气泡浮选速率更快,精矿回收率明显高于传统气泡浮选。

(2) 纳米气泡浮选可以降低浮选粒度下限。纳米气泡浮选精矿中最小粒度约为 $0.4\ \mu\text{m}$ ,而传统气泡浮选精矿最小粒度约为 $2.6\ \mu\text{m}$ ,纳米气泡的存在使得浮选捕收粒度下限降低了 $2.2\ \mu\text{m}$ 。同时,精矿平均粒度降低了 $73\ \mu\text{m}$ ,显著提高了细颗粒难回收金的利用率。

(3) 纳米气泡可以降低黄铁矿表面电位 $5.36\ \text{mV}$ ,增大黄铁矿表面接触角 $10^\circ$ ,增强疏水性团聚体的稳定性和改善浮选选择性,进而起到强化微细颗粒黄铁矿回收的作用。

#### 参考文献 (References):

- Deng L J, Ma F Y, 2024. Study on dynamic behavior and mechanism of reverse flotation of micro-fine hematite (MFH) enhanced by nanobubbles (NBs) [J]. *JOM*, 76 (12): 7387-7397.
- Heidari H, Azizi A, Hassanzadeh A, 2024. An investigation on pyrite floatability using stable micro-nanobubble-assisted flotation [J]. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, (5): 193611.
- Kilinc-Aksay E, Akar A, 2017. Effect of pre-agglomeration on the flotation of fine-sized gold particles in the presence of vegetable oils [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 10 (15): 325.
- Knüpfer P, Ditscherlein L, Peuker U A, 2017. Nanobubble enhanced agglomeration of hydrophobic powders [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 530: 117-123.
- Ma F Y, Tao D P, 2022a. A study of mechanisms of nanobubble-enhanced flotation of graphite [J]. *Nanomaterials*, 12 (19): 3361.
- Ma F Y, Tao D P, Tao Y J, 2022b. Effects of nanobubbles in column flotation of Chinese sub-bituminous coal [J]. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 42 (4): 1126-1142.
- Ma F Y, Zhang P, Tao D P, 2022c. Surface nanobubble characterization and its enhancement mechanisms for fine-particle flotation: a review [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 29 (4): 727-738.
- Matveeva T N, Getman V V, Karkeshkina A Y, 2024. Effect of modified polyvinyl caprolactam on gold recovery from fine slime in gold ore flotation [J]. *Journal of Mining Science*, 60 (3): 494-500.
- Oliveira H, Azevedo A, Rubio J, 2018. Nanobubbles generation in a high-rate hydrodynamic cavitation tube [J]. *Minerals Engineering*, 116: 32-34.
- Rosa A F, Rubio J, 2018. On the role of nanobubbles in particle-bubble adhesion for the flotation of quartz and apatitic minerals [J]. *Minerals Engineering*, 127: 178-184.
- Tang C L, Ma F Y, Wu T Y, et al, 2023. Study on surface physical and chemical mechanism of nanobubble enhanced flotation of fine graphite [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 122: 389-396.
- Vinnett L, Ledezma T, Alvarez-Silva M, et al, 2016. Gas holdup estimation in flotation machines using image techniques and superficial gas velocity [J]. *Minerals Engineering*, 96/97: 26-32.
- Wang Y F, Pan Z C, Luo X M, et al, 2019. Effect of nanobubbles on adsorption of sodium oleate on calcite surface [J]. *Minerals Engineering*, 133: 127-137.
- Wu Z X, Tao D P, Tao Y J, et al, 2023. New insights into mechanisms of pyrite flotation enhancement by hydrodynamic cavitation nanobubbles [J]. *Minerals Engineering*, 201: 108222.
- Zhang D, Ma F Y, Tao Y J, 2023. Study on effect of nanobubble on ultra-fine flake graphite (UFG) flotation [J]. *Particulate Science and Technology*, 41 (7): 1062-1070.
- Zhang X Y, Wang Q S, Wu Z X, et al, 2020. An experimental study on size distribution and zeta potential of bulk cavitation nanobubbles [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 27 (2): 152-161.
- 李明娇, 南楠, 马芳源, 等, 2024. 微细鳞片石墨纳米气泡浮选与传统浮选的对比研究 [J]. *矿产保护与利用*, (1): 40-45. Li Mingjiao, Nan Nan, Ma Fangyuan, et al, 2024. Comparative study of nanobubble flotation and traditional flotation for micro-fine flake graphite [J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, (1): 40-45.
- 孟令轩, 赵通林, 范兆琳, 等, 2023. 纳米气泡强化超细颗粒浮选机理研究现状及展望 [J]. *矿产保护与利用*, 43 (2): 162-168. Meng Lingxuan, Zhao Tonglin, Fan Zhaolin, et al, 2023. Research status of nanobubble enhanced flota-

- tion mechanism of ultrafine particles[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 43(2): 162-168.
- 任浏祎, 肖丹丹, 覃文庆, 2024. 微细粒矿物浮选综述: 增大颗粒表观尺寸与减小气泡直径[J]. 矿产保护与利用, 44(1): 1-15. Ren Liuyi, Xiao Dandan, Qin Wenqing, 2024. Review on fine mineral flotation: increasing apparent particle size and decreasing bubble diameter [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 44(1): 1-15.
- 田竣华, 龚潇, 杨同正, 等, 2024. 工艺矿物学在难处理金矿物加工中的应用[J]. 世界有色金属, (3): 190-192. Tian Junhua, Gong Xiao, Yang Tongzheng, et al, 2024. Application of process mineralogy in the processing of refractory gold minerals[J]. World Nonferrous Metals, (3): 190-192.
- 王帅, 宋宝旭, 马芳源, 等, 2024. 不同药剂体系下载金黄铁矿的浮选泡沫性能[J]. 中国有色金属学报, 34(11): 3832-3842. Wang Shuai, Song Baoxu, Ma Fangyuan, et al, 2024. Flotation foam performance of gold-bearing pyrite from different reagent systems [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 34(11): 3832-3842.
- 许炜光, 李文娟, 韩宝成, 等, 2025. 微泡浮选促进细粒级锑金矿物回收的研究[J]. 有色金属(选矿部分), (9): 138-144. Xu Weiguang, Li Wenjuan, Han Baocheng, et al, 2025. Research on micro-nanobubble flotation to promote the recovery of fine-grained antimony gold minerals [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), (9): 138-144.

## Comparative Experimental Study on the Flotation of Fine Particle Gold-bearing Pyrite with Nanobubbles Flotation and Traditional Flotation

DENG Lijia, MA Fangyuan

*School of Mining Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, Liaoning, China*

**Abstract:** Fine particulate gold, which is challenging to recover, is anticipated to become a primary resource for future utilization as larger and more easily processed gold deposits are increasingly depleted. Traditional flotation methods exhibit limited efficacy in collecting fine-grained minerals due to the large size and specific surface area of conventional flotation bubbles. To address this limitation, nanobubble flotation technology has been implemented to enhance the recovery of fine particulate gold-bearing pyrite. This study examines the distinctions between traditional bubble flotation and nanobubble flotation for fine particulate gold-bearing pyrite through a series of flotation experiments, laser particle size analyses, and calculations of particle size recovery. Experimental investigations into grinding fineness reveal that nanobubble flotation technology consistently achieves a higher recovery index compared to traditional flotation methods, even when dealing with relatively finer particle sizes. Additionally, nanobubble flotation demonstrates superior selectivity in the flotation process. Nanobubble flotation has demonstrated a significant reduction in the required dosages of collectors and frothers while still achieving higher-grade concentrates, even under conditions of increased pulp concentration. The flotation kinetics experiments indicate that nanobubble flotation completes the process 70 seconds faster than traditional flotation methods, with an 8% improvement in concentrate recovery. Furthermore, when achieving equivalent concentrate grades, the recovery rate with nanobubble flotation is notably superior to that of conventional flotation techniques. Particle size analysis of the flotation concentrate reveals that the lower limit of flotation particle size decreases from 2.6  $\mu\text{m}$  to 0.2  $\mu\text{m}$  in the presence of nanobubbles, compared to traditional bubble flotation, and the average particle size is reduced from 99  $\mu\text{m}$  to 26  $\mu\text{m}$ . This effectively facilitates the efficient recovery of fine particle gold. Additionally, nanobubbles decrease the surface potential of pyrite and increase the contact angle on the pyrite surface. In the absence of nanobubbles, the surface potential of pyrite decreases by 5.36 mV, and the surface contact angle increases by 10°. This indicates that the presence of nanobubbles mitigates the electrostatic repulsion among pyrite particles while enhancing hydrophobic

attraction. Consequently, this leads to the formation of more stable hydrophobic aggregates of fine particle gold-bearing pyrite, thereby maintaining a larger apparent size of fine-grained loaded pyrite and increasing the likelihood of flotation interactions between bubbles and particles. Thus, the presence of nanobubbles significantly enhances the recovery of fine particle gold-bearing pyrite.

**Key words:** nanobubbles; fine particle gold-bearing pyrite; flotation; particle size; mechanism

### 内蒙古全面提升矿产资源保障能力

12月24日,自治区政府新闻办召开新闻发布会,就“内蒙古全面提升矿产资源保障能力,建设国家重要能源和战略资源基地”介绍了相关情况。

自治区自然资源厅党组成员、副厅长张颖达介绍,作为国家重要能源和战略资源基地,“十四五”期间,内蒙古深入推进新一轮找矿突破战略行动,持续强化资源要素保障,稳步推动资源优势向经济优势、发展优势转化,为全区高质量发展和国家能源资源安全筑牢坚实基础。目前,全区已查明资源储量的矿产达到152种,其中煤炭、稀土、萤石等20种矿产保有资源量位居全国首位,钼、晶质石墨等55种矿产保有资源量位居全国前三位。

“十四五”期间,内蒙古立足资源禀赋和战略需求,科学划定了16处能源资源基地、70处国家规划矿区、15处战略性矿产重点勘查开采区,通过优化资源配置、统筹勘查开发布局,推动资源开发向规模化、集群化方向迈进。矿山规模结构不断优化,全区非油气、非放射性矿产大中型矿山占比从28%提升至44%,建成绿色矿山398家。“新账不再欠、老账加快还”,全区生产矿山累计完成矿区生态修复治理1100余平方公里,构建起资源开发与生态保护协同发展的良好格局。全面实施新一轮找矿突破战略行动,中央财政、自治区财政及社会资金投

入协同发力,一批优势和紧缺战略性矿产实现大幅增储。其中煤炭新增资源量近200亿吨、铁矿石新增资源量12亿吨、锂新增资源量60余万吨、铜矿新增资源量50余万吨、金新增资源量300余吨。深化矿业权管理制度改革,通过11条改革举措减少企业申报要件40%以上、缩减审批时限30%以上,审批服务效能大幅提升。

作为国家重要能源和战略资源基地,内蒙古肩负着保障国家能源资源安全的重大使命。记者了解到,内蒙古矿产资源“十五五”规划主要以提升资源安全保障能力为目标,持续深化新一轮找矿突破战略行动,全面提升资源集约高效利用,全力促进矿业绿色低碳发展。“十五五”期间,自治区自然资源厅将优先在华北陆块北缘成矿带、大兴安岭成矿带中南段等重点区域开展地质调查及战略性矿产调查,聚焦铁、铜、金、稀土、锂、锡、锌、铌、钽、锆等国家紧缺和自治区优势矿产,新圈定一批找矿靶区、发现一批矿产地;大力推进非煤矿山整合重组和增储上产,力争到2030年全区大中型非煤矿山比例提升至50%以上,基本形成规模化、集约化、智能化、绿色化的开发格局;持续推进绿色矿山建设,确保90%的大型矿山、80%的中型矿山达到绿色矿山标准。

(来源:内蒙古日报)