

黄铜矿与砷黄铁矿的脉动高梯度强磁预选分离 机理与试验研究

戴普林¹, 陶明昱¹, 刘潇倩¹, 黄会春², 任祥君², 陈禄政^{1,2*}

(1. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明, 650093; 2. 磁选设备江西省重点实验室 赣州金环磁选科技装备股份有限公司, 江西 赣州, 341000)

摘要: 针对当前高砷铜矿浮选分离效率低、药剂消耗大的难题, 本文提出脉动高梯度磁选 (PHGMS) 预选分离铜砷技术, 系统揭示了黄铜矿与砷黄铁矿的磁性差异机理。晶体场理论分析表明, 黄铜矿中 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 处于四面体场, 其低分裂能 (Δ_t) 促使高自旋态磁矩显著 (4.90~5.92 B.M.), 而砷黄铁矿中 Fe^{2+} 因八面体场高分裂能 (Δ_o) 导致低自旋态磁矩为零, 为选择性磁选分离提供了理论依据。采用SLon-100磁选机分离某高砷铜矿的试验结果表明, 在最佳分离条件下, 即磨矿细度-200目占60%、磁介质丝直径2.0 mm、磁感应强度1.5 T、脉动冲次200 r/min和矿浆流速3.0 cm/s, 通过SLon-100磁选机一粗一扫流程, 磁选铜精矿中铜品位从0.71%提升至0.93%, 铜回收率达93.30%; 砷品位从0.95%降至0.61%, 砷去除率35.79%; 分离效率达到33.31%。PHGMS技术通过强化磁选分离铜砷, 铜回收率高, 节能环保, 为复杂高砷铜矿的绿色高效开发提供了一种新的技术途径。

关键词: 铜砷分离; 脉动高梯度磁选分离; 磁预选; 分离机理

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-4734(2025)05-1005-12

第一作者: 戴普林, 男, 1997年生, 博士研究生, 矿物加工工程专业。E-mail: 237812313@qq.com。

A study on the pre-concentration and experiment of pulsating high gradient magnetic separation of chalcopyrite and arsenian pyrite

DAI Pulin¹, TAO Mingyu¹, LIU Xiaoqian¹, HUANG Huichun², REN Xiangjun², CHEN Luzheng^{1,2*}

(1. School of L and Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan 650093, China; 2. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Magnetic Separation Equipment, SLon Magnetic Separator Co., Ltd., Ganzhou Jiangxi 341000, China)

Abstract: To address the challenges of low separation efficiency and high reagent consumption in the flotation of high-arsenic copper ores, in this study, we proposed a copper-arsenic ore pre-concentration technology by using the Pulsating High Gradient Magnetic Separation (PHGMS), and systematically revealed the mechanism of magnetic susceptibility differences between chalcopyrite and arsenian pyrite. Crystal field theory analysis revealed that Fe^{2+} and Fe^{3+} ions in chalcopyrite occurred in the tetrahedral fields whose low crystal field splitting energy (Δ_t) resulted in the significant high-spin magnetic moments (4.90–5.92 B.M.). In contrast, Fe^{2+} in arsenian pyrite, occurred in the octahedral fields whose high splitting energy (Δ_o) resulted in zero magnetic moment under a low-spin state. These findings provided a theoretical basis for selective magnetic separation of chalcopyrite and arsenian pyrite. The experimental results for the separation of a certain kind of high-arsenic copper ore by using the SLon-100 magnetic separator show that under the optimal separation conditions including the grinding fineness of 60% passing 200 mesh, magnetic wire diameter of 2.0 mm, magnetic induction intensity of 1.5 T, pulsation frequency of 200 r/min, and slurry flow rate of 3.0 cm/s, through a PHGMS roughing-scavenging of the SLon-100 PHGMS separator, the obtained copper concentrate has the increased copper grade of 0.93% from 0.71% at a

copper recovery of 93.30%, while the obtained copper concentrate has the decreased arsenic grade of 0.61% from 0.95% at an arsenic removal rate of 35.79%. The separation efficiency of 33.31% has been achieved for the separation of the high-arsenic copper ore by using this technique. The concentrate of the copper-arsenic separation through the intensified magnetic separation of the PHGMS technique has relatively high copper grade at high copper recovery, offering reduced environmental impact. It provides an innovative solution for the green and efficient utilization of complex high-arsenic copper ores.

Keywords: copper-arsenic separation; pulsating high-gradient magnetic separation; magnetic pre-concentration; separation mechanism

铜作为一种重要的基础工业金属,广泛应用于电力、交通、建筑及新能源等多个领域,是现代社会发展不可或缺的战略资源^[1,2]。然而,随着易选铜矿资源的逐步枯竭,高砷铜矿等复杂难处理铜矿的高效开发,已成为行业的热点问题^[3,4]。砷在高砷铜矿中的赋存不仅会显著降低铜精矿的品位,且在后续冶炼过程中,可能释放出剧毒气体,如 As_2O_3 带来的严重环境污染与健康风险^[5,6]。尽管浮选法在铜砷分离中得到了广泛应用,但其对矿物表面性质的依赖性强,药剂消耗大,以及对紧密嵌布或高氧化率矿石的适应性差等问题,显著制约了其处理复杂铜矿的经济性和环保性^[7,8]。因此,开发一种高效、绿色且无需化学药剂的预分离技术,实现铜砷矿物的选择性分离,成为矿物加工工程领域的一个技术难题。

近年,脉动高梯度磁选(PHGMS)技术因不依赖化学药剂、低能耗及环保等优势,在铜-钼^[9,10]、铜-滑石^[11]等分离中取得了显著成效。该技术通过高梯度磁场与脉动流体的协同作用,依据矿物的磁化率差异实现高效分离。然而,对铜砷矿石的脉动高梯度磁选分选仍存在一些关键难题。其一,黄铜矿(CuFeS_2)与砷黄铁矿(FeAsS)间的磁性差异尚未得到系统阐明,导致分选过程缺乏理论基础;其二,磁感应强度、矿浆流速、磁介质特性等工艺参数对分选效率的影响规律尚不明确,限制了该技术的工业化应用。

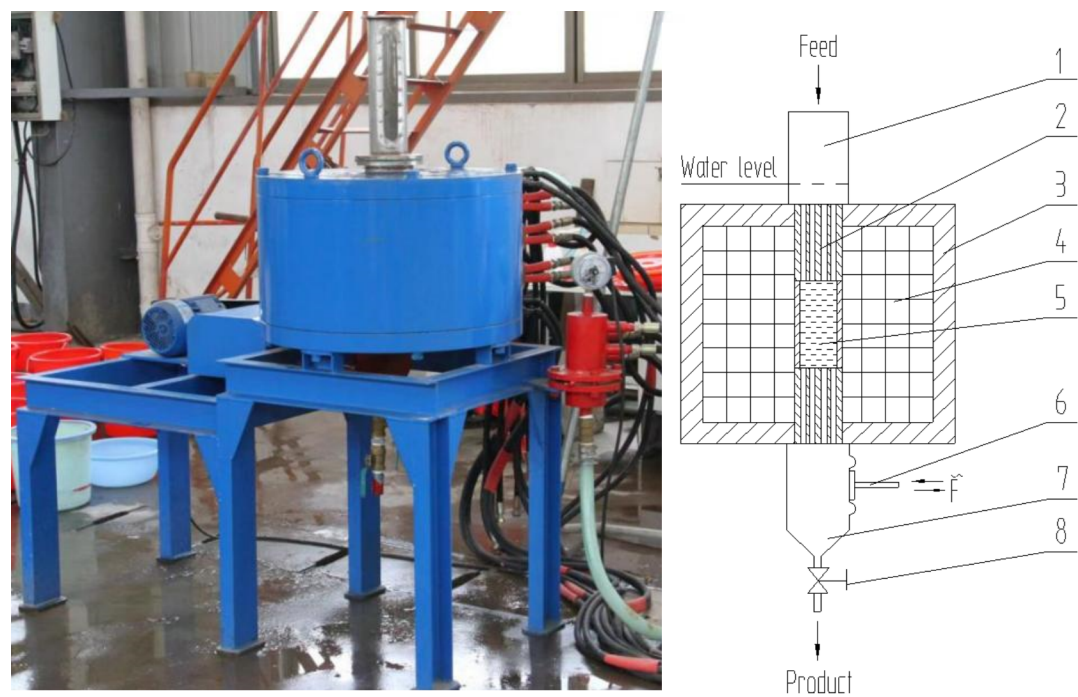
本研究以云南某高砷铜矿为研究对象,围绕脉动高梯度磁选技术开展铜砷矿物预分离机理与工艺优化研究。该作业定位于选矿流程的前端,针对原矿直接进行磁选脱砷处理,旨在通过高梯度磁选手段优先剔除主要含砷矿物(如砷黄铁矿),从源头上降低入浮原料中的砷含量,从而为后续铜浮选作业创造更加有利的分选环境。首先,基于晶体场理论,分析黄铜矿与砷黄铁矿中 $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ 电子结构的差异,揭示其磁化率差异的机制;其次,采用SLon-100周期式脉动高梯度磁选机,系统研究矿物粒度、磁感应强度、脉动冲次等关键参数对分选效果的影响,优化分选流程;最后,通过结合磁去除率(R_{As})与分离效率(SE)等指标,综合评估技术的可行性与经济性。研究结果不仅为绿色高效开发高砷铜矿提供了理论依据与技术支持,也为复杂多金属矿的资源化利用开辟了新的技术途径。

1 试验设备与试验试样

1.1 SLon-100磁选机及工作原理

实验使用的磁选设备为SLon-100周期式脉动高梯度磁选机,产自赣州金环磁选科技装备股份有限公司。如图1所示,该磁选机主要由磁极、磁轭、励磁线圈和脉动机构等组成。

设备工作时,先注水充满分选腔,使磁介质完全浸没且让脉动机构产生的脉动力传递到分选区域;同时,开启励磁电流,使分选腔内产生均匀磁场。然后,自给矿口给入矿浆,磁性矿物和非磁性矿物在分选腔内受到磁场力、重力及脉动流体动力的联合作用,其中磁性颗粒被磁介质吸附,而非磁性颗粒则在无磁力的影响下随矿浆流出,形成非磁性产物。给矿完毕后,关闭励磁电流,用清水将捕获的磁性矿粒冲洗出来得到精矿产品。



1-给矿筒; 2-磁极; 3-磁轭; 4-激磁线圈; 5-磁介质; 6-脉动机构; 7-接矿斗; 8-排矿阀。

图1 SLon-100周期式脉动高梯度磁选机结构图

Fig. 1. Structure of the SLon-100 cyclic PHGMS separator

1.2 试样性质

若选矿环节未能有效抑制含砷矿物，使其进入最终铜精矿，高砷铜矿的经济回收价值严重降低，该类矿石因此被归为难处理资源。某云南高砷铜矿的铜含量为0.71%，砷含量为0.95%，属于典型的高砷铜矿。为了生产出更优质的铜精矿产品，并在尽可能降低成本的前提下实现环保和高效，本文进行高梯度磁选分离试验，制定可用于指导现场生产的技术方案。

为全面了解原矿的工艺矿物学特征，采用化学多元素测试、X射线衍射（XRD）及物相分析等手段开展系统研究。原矿的元素组成详见表1，铜与砷的物相分布结果见表2，XRD图谱结果展示于图2。

多元素分析结果表明，原矿中铜含量为0.71%，为主要可回收金属。铜物相分析显示，铜以硫

表 1 高砷铜矿的多元素分析结果

Table 1. Chemical compositions of the high-arsenic copper ore

元素	Cu	As	S	Bi	Pb	WO ₃
含量/%	0.71	0.95	8.46	0.0155	0.040	0.046
元素	Zn	Au*	Fe	SiO ₂	CaO	MgO
含量/%	0.011	0.011	15.18	32.18	13.75	4.24

注：“*”表示单位为g/t。

表 2 高砷铜矿的物相分析结果

Table 2. Copper phase analysis results of the high-arsenic copper ore

物相	次生硫化铜Cu	结合氧化铜Cu	自由氧化铜Cu	原生硫化铜Cu	总铜Cu
含量/%	0.016	0.016	0.027	0.651	0.71
分配率/%	2.24	2.24	3.83	91.69	100

化态形式为主, 占比达93.93%, 其中氧化态铜占2.24%, 自由态氧化铜占3.83%。整体氧化率为6.07%, 依据氧化率划分标准, 该矿属于典型的硫化铜矿。X射线衍射图谱(图2)显示, 主要矿物包括白云石、方解石、石英、黄铁矿, 以及少量黄铜矿与砷黄铁矿, 该结果与元素组成及物相分析高度一致。

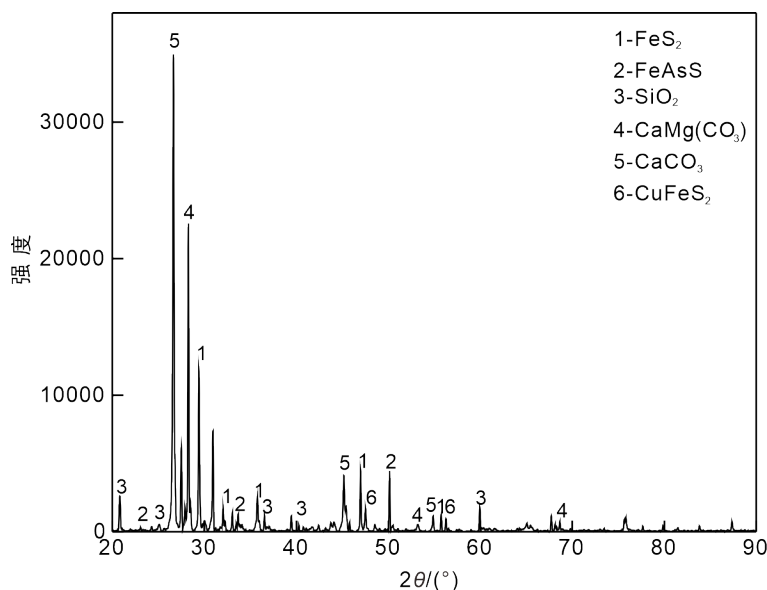


图2 高砷铜矿的X射线衍射分析图谱

Fig. 2. The XRD pattern of the high-arsenic copper ore

2 黄铜矿与砷黄铁矿的磁性差异分析

2.1 黄铜矿与砷黄铁矿的晶体结构

矿物中的金属离子在不同的晶体场中会展现出不同的自旋状态, 而中心金属离子的自旋状态则会对矿物的整体性质产生影响^[12]。因此, 运用晶体场理论分析两种矿物中Fe离子的d轨道电子构型, 有助于揭示它们在磁化率上的差异。

如图3所示, 黄铜矿和砷黄铁矿中的Fe离子分别位于规则四面体和八面体晶体场中。

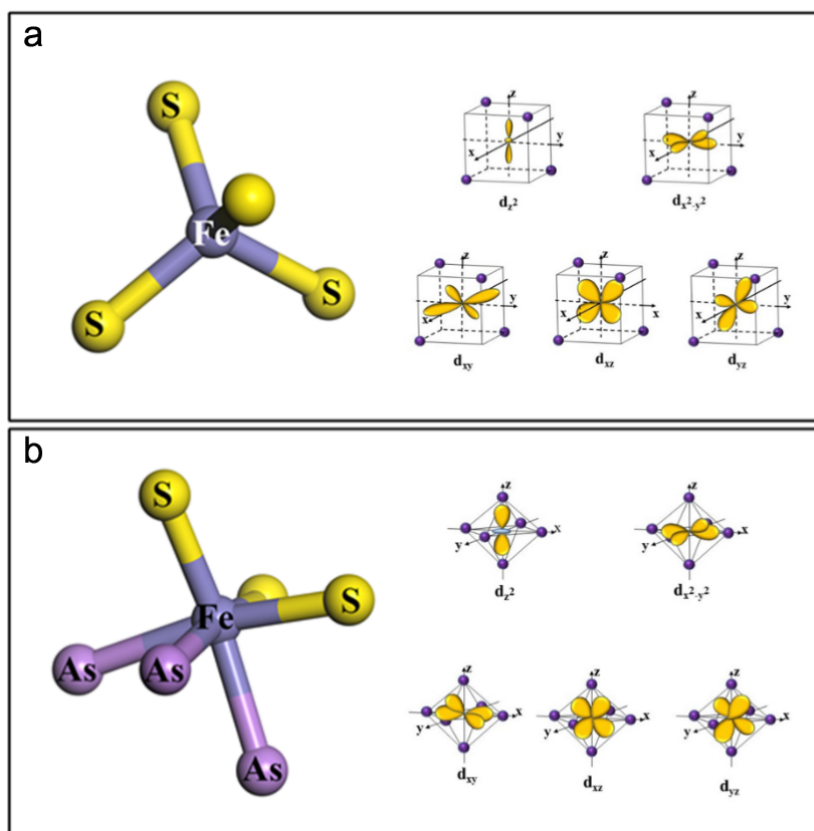
在黄铜矿中, Fe离子位于S原子的中心, 其d轨道(即 d_{xy} 、 d_{xz} 和 d_{yz})指向立方体边缘的中心, 而 $d_{x^2-y^2}$ 和 d_z^2 轨道则指向立方体的中心。这些结果表明, 作为中心的Fe离子未受到配位S原子足够的排斥, 因此其分裂能(Δ_t)较低。在砷黄铁矿中, 铁离子的 $d_{x^2-y^2}$ 和 d_z^2 轨道指向配体As和S原子, 而 d_{xy} 、 d_{xz} 和 d_{yz} 轨道则指向配体与铁离子之间夹角的中间位置。这些结果表明, 铁离子受到配体的明显排斥, 因此其能级分裂(Δ_o)较高。这一结果导致了Fe 3d轨道上电子排列的差异, 进而使得两种矿物中铁原子的磁矩不同, 从而造成了它们磁性质的差异。

2.2 黄铜矿与砷黄铁矿的铁原子的磁矩

为深入揭示黄铜矿和砷黄铁矿的磁性质差异, 本文利用式(1)^[13]计算两种矿物中Fe原子的自旋磁矩。

$$\mu_s = \sqrt{n(n+2)} \quad (1)$$

式中, μ_s 为玻尔磁子(B.M.)中的自旋磁矩, n 为单电子数。



a. 黄铜矿; b. 砷黄铁矿。

图3 铁离子的配位结构

Fig. 3. Coordination structures of iron ions

对于砷黄铁矿而言, 其 Fe^{2+} 的分裂能(Δ_o)较高, 且超过了电子成对能(P)。由于 Fe^{2+} 位于矿物中的规则八面体场中, 因此, 在该环境下, Fe^{2+} 的d轨道电子首先占据三个单电子的轨道, 优先克服成对能 P , 并排列在较低能的 t_{2g} 轨道中, 如图4所示。

由式(1)可知, $\mu_s=0 \text{ B.M.}$, 因此砷黄铁矿中 Fe^{2+} 的电子处于低自旋状态, 自旋磁矩为零, 无法在高梯度磁选过程中被磁介质捕获。在黄铜矿中, 高能级的分裂能 $\Delta_t < \text{电子成对能 } P^{[14]}$, 这是由于矿物中的Fe处于规则的四面体场中。因此, Fe的d轨道上的电子优先克服 Δ_t 占据 t_2 轨道。通过利用两个单电子占据轨道后, 电子具有较高的能量, 如图5所示。另一方面, 对于黄铜矿, 由式(4)可得 $\mu_s=4.90 \text{ B.M.} (\text{Fe}^{2+})$ 或 $5.92 \text{ B.M.} (\text{Fe}^{3+})$ 。因此, 该矿物中的Fe原子电子处于高自旋状态, 使得黄铜矿在高梯度磁选过程中能够被磁介质捕获。

根据上述分析, 黄铜矿的磁化率明显高于砷黄铁矿。因此, 利用脉动高梯度磁选法, 基于磁性差异, 能够有效地实现这两种矿物的分离。

3 结果与讨论

3.1 矿物粒度对分选效果的影响

矿物粒度对磁选效果具有显著影响。一般而言, 颗粒粒度越小, 其所受磁力、重力及流体阻力之间的竞争关系越明显。为了探究粒度对铜砷高梯度磁选的具体影响规律, 本研究设计了不同粒度条件下的磁选试验。试验中, 控制-200目颗粒的占比分别为55%、60%、65%和70%, 以此作为变

量进行对比。其他试验参数保持不变,包括:给矿量250 g、磁感应强度1.5 T、脉动频率200 r/min、脉动冲程5 mm、矿浆流速3 cm/s,以及磁介质丝直径2 mm。

试验结果如图6所示。随着-200目颗粒占比从55%增加到70%,铜和砷的回收率分别降低了6.51%和9.88%。这一现象的主要原因在于粒度的减小导致部分物料所受磁力减弱,无法克服流体阻力而未被磁介质捕获,从而进入尾矿。相比之下,铜的回收率下降幅度明显小于砷。这是因为黄铜矿的磁化率较砷黄铁矿更高,在相同的磁感应强度条件下,黄铜矿受到的磁力更大,因此更能抵抗

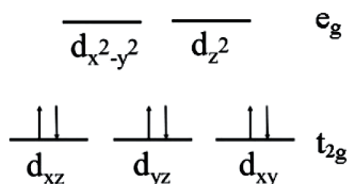


图4 砷黄铁矿 Fe^{2+} 的自旋电子排布

Fig. 4. Spinning arrangements of Fe^{2+} in arsenian pyrite



a. Fe^{2+} ; b. Fe^{3+} 。

图5 黄铜矿Fe的自旋电子排布

Fig. 5. Spinning arrangements of Fe^{2+} (a) or Fe^{3+} (b) in chalcopyrite

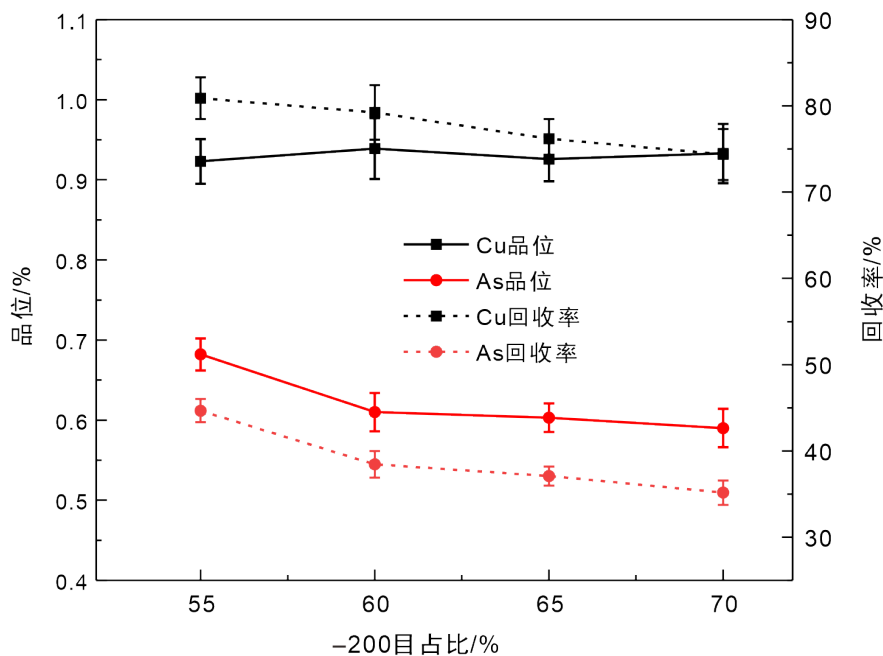


图6 矿物粒度对铜、砷回收率及品位的影响

Fig. 6. Effect of the mineral sizes on separation performances

流体阻力, 提升了其被捕获的可能性。

当磨矿细度从-200目占比55%增加到60%时, 铜的回收率下降了1.65%, 而砷的回收率则显著下降, 达6.2%。随着磨矿细度进一步提高, 铜回收率的下降幅度逐渐增大, 而砷回收率的下降趋势开始趋于缓和。综合试验结果分析, 最佳磁选给矿粒度为-200目占比60%。

3.2 磁感应强度对分选效果的影响

磁感应强度是决定磁性矿粒受磁捕获力大小的关键因素, 对分选过程中磁性矿粒的运动轨迹和捕获行为具有显著影响, 也是影响磁选精矿品位和回收率的重要变量。为研究不同磁感应强度对磁选效果的影响并确定最佳参数, 进行了条件试验, 设置磁感应强度为0.8、1.0、1.2、1.5和1.7 T进行对比。试验中其他参数均保持不变, 具体条件为: 给矿量250 g、磨矿细度-200目占比60%、脉动频率200 r/min、脉动冲程5 mm、矿浆流速3 cm/s, 以及磁介质丝直径2 mm。磁感应强度对铜砷高梯度磁选分离效果的影响见图7。

试验结果如图7所示, 随着磁感应强度的增加, 铜和砷的回收率均呈上升趋势, 且铜的回收率增幅明显高于砷。这一现象的原因在于黄铜矿的磁化率较高, 因此其在较强磁场中的捕获能力更强。从0.8 T增加到1.7 T, 铜的回收率从65.04%提高至86.09%, 而砷的回收率从25.66%提高至40.33%。在较低磁感应强度下, 许多低品位的连生体矿粒未能有效被捕获, 但随着磁感应强度的提升, 这些矿粒所受磁力增大, 从而被更有效地捕获并进入精矿产品中。因此, 为了更好地回收黄铜矿, 较高的磁感应强度是必须的。

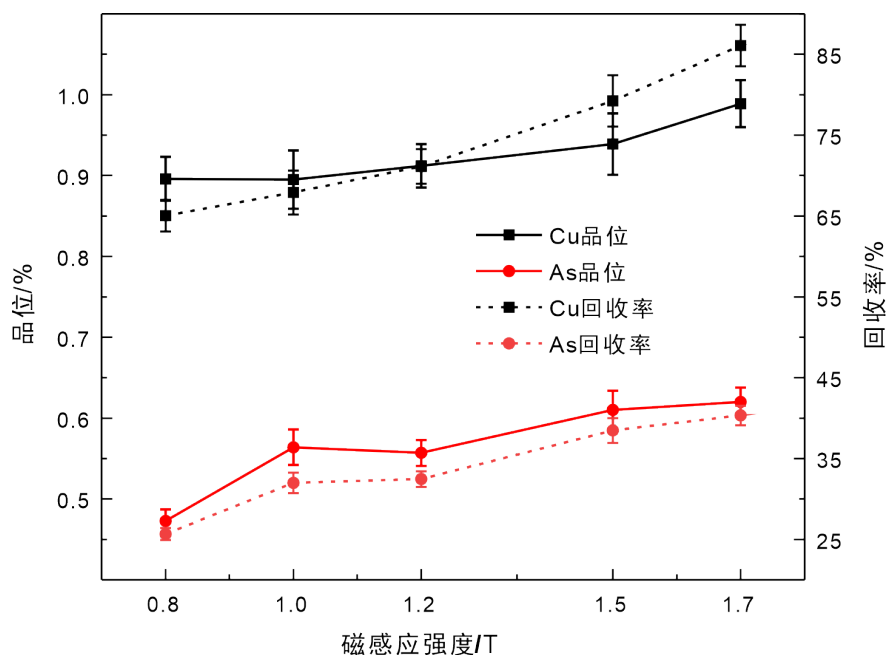


图7 磁感应强度对铜、砷回收率及品位的影响

Fig. 7. Effect of the magnetic induction on the separation performance

尽管将磁感应强度从1.5 T提升到1.7 T时, 铜的回收率仍然增加了6.86%, 但长时间在极限磁感应强度下运行, 磁选设备容易过热, 且磁系的冷却效果不足, 可能导致磁感应强度下降。综合考虑后, 确定1.5 T的磁感应强度为最佳选择, 此时高梯度磁选铜砷分离的效果最佳。

3.3 脉动冲次对分选效果的影响

脉动冲次是提高磁选精矿质量的重要因素,它能够显著改善磁选产品的品质。脉动冲次指脉动装置产生脉动的频率,能够有效地分散磁介质捕获的颗粒,使夹杂在磁性矿物中的非磁性矿物在水流冲击下流入尾矿。若脉动冲次过低,流体的竞争力不足,无法有效分散附着在磁介质上的颗粒,导致分选过程缺乏选择性。相反,脉动冲次过高虽然可以更有效地分散颗粒并抛出非磁性物质,但也可能导致流体竞争力过强,使得磁性颗粒从磁介质上脱离,从而对回收效果产生不利影响。为此,本试验通过设置不同的脉动冲次(150、200、250、300 r/min)进行测试,以确定最佳脉动冲次。其他参数保持不变,具体设置为:给矿量250 g、磨矿细度-200目占比60%、磁感应强度1.5 T、脉动冲程5 mm、矿浆流速3 cm/s以及磁介质丝直径2 mm。

试验结果如图8所示,当脉动冲次为150 r/min时,铜和砷的回收率保持在相对较高水平。然而,随着脉动冲次增至200 r/min,脉动产生的竞争力有效地分散了磁介质表面的成团颗粒,提高了磁选铜精矿中铜品位的同时,也显著降低了砷品位。增加脉动冲次会强化流体对弱磁性杂质的干扰作用,使其得到有效分散,从而降低有害杂质的含量。同时,含铜颗粒和连生体因受流体影响而难以有效进入铜精矿,导致回收率出现明显下降。将脉动冲次从150 r/min增加到200 r/min时,铜和砷的回收率分别下降了6.59%和16.26%。这表明在这个条件下,铜和砷的分离选择性明显增强,然而继续增加脉动冲次可能不利于铜的回收。综合考虑后,确定最佳的脉动冲次为200 r/min。

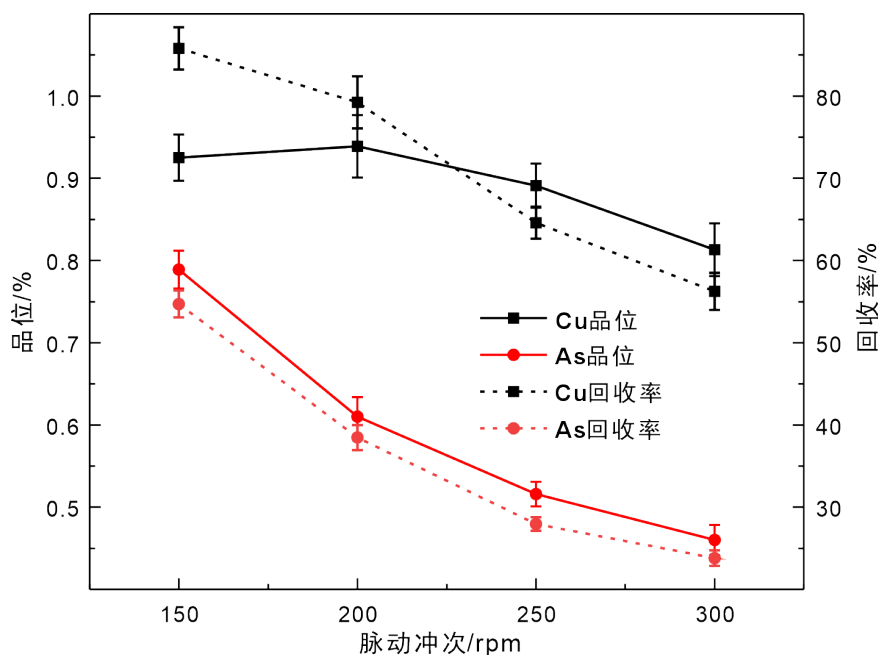


图8 脉动冲次对铜、砷回收率及品位的影响

Fig. 8. Effect of the pulsating frequency on the separation performance

3.4 矿浆流速对分选效果的影响

矿浆流速是指非磁性颗粒在分选区域中的流出速度。较低的矿浆流速意味着矿物颗粒在分选腔内停留的时间较长,这样一来,磁性和非磁性颗粒都有更多的机会被磁介质捕获,从而进入精矿产品。相反,矿浆流速过高会导致矿物颗粒在分选腔内停留时间缩短,部分磁性颗粒未能及时被磁介质捕获,直接流出分选腔,进而导致矿物的回收率降低。为了确保目标矿物的有效回收,并排除非目标矿物,

本研究进行了条件试验以确定最佳矿浆流速。实验分别在2、3、4、5 cm/s的流速下进行, 其他参数保持一致, 具体设置为: 给矿量250 g、-200目占比60%、磁感应强度1.5 T、脉动冲次150 r/min、脉动冲程5 mm、磁介质丝直径2 mm。

根据图9的试验结果显示, 随着矿浆流速的增加, 铜和砷的回收率都出现了不同程度的下降。这种现象是由于矿浆流速增加导致部分颗粒在磁介质周围的运动时间显著减少, 使得这些颗粒未能被磁介质捕获而在流体作用力下流出, 最终成为尾矿。

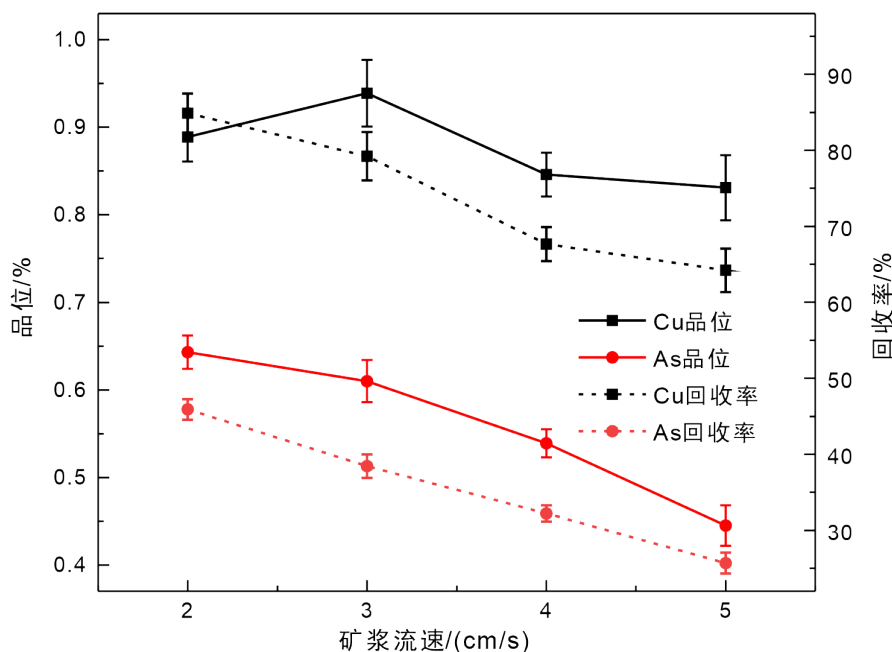


图9 矿浆流速对铜、砷回收率以及品位的影响

Fig. 9. Effect of the Slurry flow rate on the separation performance

当矿浆流速从2 cm/s增加到5 cm/s时, 铜的回收率下降趋势逐渐趋于平缓, 而砷的回收率则明显下降。这是因为大部分磁性颗粒在与磁介质接触的瞬間即可被捕获, 而少部分磁性颗粒需要在磁介质周围多次往返运动后才能被捕获, 从而导致铜的回收率持续下降。相较而言, 由于砷矿物颗粒的比磁化系数显著低于铜矿物颗粒, 其受到的磁力较弱, 更容易受到流体作用力的影响, 因此砷回收率下降幅度更为显著。在矿浆流速从2 cm/s增加到3 cm/s的过程中, 铜和砷的回收率分别下降了5.71%和7.45%, 其中铜回收率下降的幅度小于砷。这表明在该条件下, 既能保障铜的回收率, 又能够有效抛除砷。综合考虑试验结果, 确定实际操作中矿浆流速的最佳值为3 cm/s。

3.5 磁介质丝径对磁选的影响

磁介质丝直径与颗粒受到的磁力呈负相关关系。在其他参数保持不变的情况下, 磁介质丝直径越小, 颗粒所受的磁力就越大。为了研究目标矿物颗粒的选择性回收, 本研究进行了一系列条件试验, 以确定最佳的磁介质丝直径。本研究分别选择了1、1.5、2、3 mm四种直径进行试验, 同时保持其他参数恒定。具体参数包括: 给矿量为250 g、-200目颗粒占60%、磁感应强度为1.5 T、脉动冲次为150 r/min、脉动冲程为5 mm、矿浆流速为3 cm/s。

实验结果如图10所示, 在磁介质丝直径为1 mm的情况下, 铜和砷的回收率保持在较高水平, 但铜的品位较低, 而砷的品位较高。这是因为磁介质丝直径较细, 颗粒被捕获更多, 导致铜的品

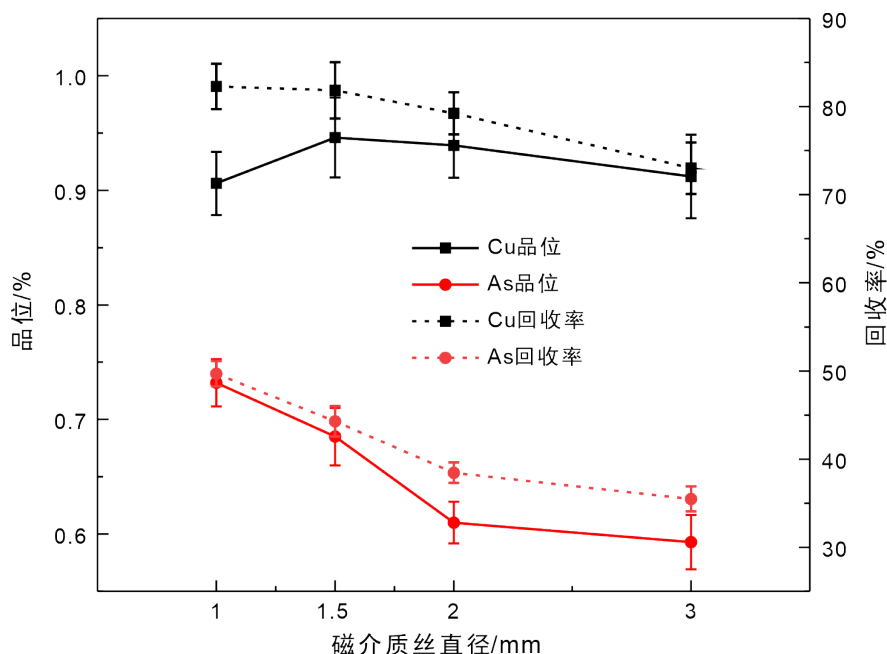


图10 磁介质丝径对铜、砷回收率以及品位的影响

Fig. 10. Effect of the magnetic matrix wire diameter on the separation performance

位减低。实验中发现, 1 mm的磁介质丝直径排布更密集, 与其他较粗磁介质丝直径相比, 磁介质丝之间的间隙更小, 部分粗颗粒可能会困在磁介质中, 导致颗粒堵塞, 进而有害矿物进入精矿, 导致目的矿物品位降低。随着磁介质丝直径增加, 颗粒堵塞情况消失, 目的矿物与非矿物的分离状况得到改善。在2 mm磁介质丝直径下, 铜的回收率较高, 但砷的回收率较低, 目的矿物得到有效回收。而更粗的磁介质丝直径由于颗粒所受磁力降低, 导致铜和砷的回收率降低。

随着磁介质丝直径从1.5 mm增大到2 mm, 铜和砷的回收率分别下降了2.61%和5.83%, 其中砷的回收率下降更为显著, 而铜回收率则呈现出较为缓慢的下降趋势。这一变化的原因在于较粗的磁介质丝直径消除了颗粒堵塞的现象, 非目标矿物得到了更好的分散, 流入了尾矿中。继续增大磁介质丝直径时, 铜的回收率下降更加明显, 相比砷的回收率下降更加剧烈。综合考虑这些因素, 最终确定最佳的磁介质丝直径为2 mm。

3.6 高梯度磁选全开路试验

在完成粗选试验后, 进一步开展了全流程的开路流程测试, 以优化扫选次数的设置。在扫选过程中, 将磁感应强度提高至1.7 T, 在有效抛砷的同时实现铜的进一步回收。全流程开路试验的工艺流程如图11所示。

开路试验表明, 随着扫选次数的增加, 铜的回收率总体呈上升趋势。然而, 在本流程中, 第二次和第三次扫选的铜回收率较低, 且富集效果不明显。进一步分析结果表明, 增加扫选次数并未显著提升铜的回收效率, 反而导致磁选精矿中砷含量升高, 造成分离难度加大并对产品质量产生不利影响。鉴于此, 在工艺优化过程中, 取消了第二次和第三次扫选, 以简化流程、降低杂质富集风险并提高分选稳定性。最终确定采用“一粗一扫”的高梯度磁选工艺, 以实现较优的选矿性能和工艺经济性。

采用“一粗一扫”的高梯度分离流程可以富集铜产品并有效降低砷含量, 最终结果如表3所示。铜的最终品位可达到0.93%, 回收率为93.30%; 砷的最终品位则降至0.61%, 对应的回收率为

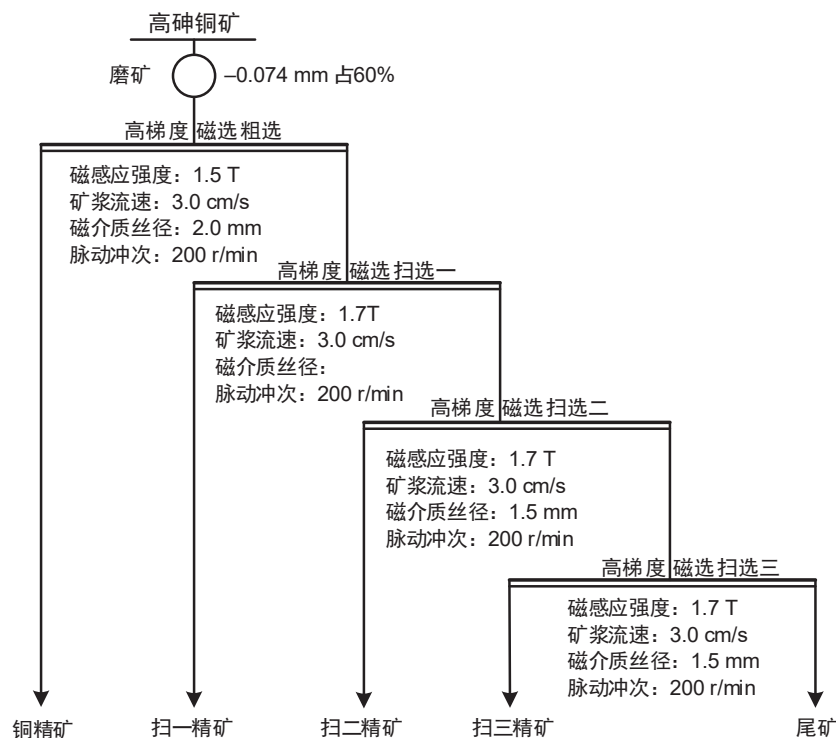


图11 高梯度磁选全开路流程

Fig.11. Open circuit test process of the high gradient magnetic separation

表 3 高梯度磁选一粗一扫试验结果

Table 3. Results of a PHGMS roughing-scavenging process

产品名称	产率/%	品位/%		回收率/%	
		Cu	As	Cu	As
磁选精矿	71.23	0.93	0.61	93.30	45.74
磁选尾矿	28.77	0.17	1.79	6.70	54.26
给矿	100.00	0.71	0.95	100.00	100.00

45.74%。上述数据表明, 在本次选矿试验条件下, 铜和砷分别实现了较为明显的富集与脱除。为了评价PHGMS在铜砷分离中的性能, 本研究引入了两个关键参数: 铜精矿中砷的去除率 (R_{As}) 和分离效率 (SE)^[15], 这些参数计算如下:

$$R_{As} = \frac{\beta_{F,As} - \beta_{Cu,As}}{\beta_{F,As}} \quad (2)$$

$$SE = \frac{\beta_{Cu,Cu} \cdot (\beta_{F,Cu} - \beta_{As,Cu}) \cdot (\beta_{F,As} - \beta_{Cu,As})}{\beta_{F,Cu} \beta_{F,As} \cdot (\beta_{Cu,Cu} - \beta_{As,Cu})} \quad (3)$$

式中, $\beta_{F,Cu}$ 和 $\beta_{F,As}$, $\beta_{As,Cu}$ 和 $\beta_{Cu,As}$ 分别为给矿和铜精矿的Cu和As品位; $\beta_{F,Cu}$ $\beta_{As,Cu}$ 为非磁性产物的Cu品位。根据式(2)和式(3)计算, R_{As} 和 SE 分别为35.79%和33.31%。这些结果表明, PHGMS作为一种环保、经济的铜砷预分离方法具有广阔的应用前景。

4 结论

1) 砷黄铁矿中的 Fe^{2+} 分裂能(Δ_o)较高,超过了电子成对能(P)。由于 Fe^{2+} 位于八面体场中,其d轨道电子优先占据三个单电子轨道并排列在较低能的 t_{2g} 轨道,导致 Fe^{2+} 处于低自旋状态,自旋磁矩为零,因此无法在高梯度磁选过程中被磁介质捕获。相比之下,黄铜矿中的Fe位于规则四面体场中,其高能级分裂能 $\Delta_t < P$,致使Fe的d轨道电子优先占据 t_2 轨道,从而使铁原子处于高自旋状态,磁矩不为零。这使得黄铜矿能够在高梯度磁选过程中被磁介质有效捕获。

2) 试验结果表明,采用“一粗一扫”的高梯度磁选分离试验流程,不仅能够有效富集磁选精矿中铜品位,还显著降低砷含量。经过该流程处理后,铜品位可达到0.93%,回收率为93.30%;砷品位降至0.61%,回收率为45.74%。同时,砷去除率和分离效率分别为35.79%和33.31%,体现了磁选预处理在铜-砷分离中的优越效果。

参考文献:

- [1] 彭勃, 马骏, 王华俊. 我国铜消费情况及发展趋势[J]. 资源再生, 2018(2): 34–36.
- [2] 许成健. 鹰潭市铜产业发展战略研究[D]. 南昌: 江西财经大学, 2018.
- [3] 李成胜. 循环经济下铜产业创新驱动发展研究[J]. 合作经济与科技, 2019(19): 36–37.
- [4] 刘畅. 我国铜产业发展现状研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017.
- [5] 姚瑛瑛, 郭莉, 胡中求, 等. 超声辅助碱浸铜冶炼烟灰中铜砷分离[J]. 化工学报, 2018, 69(09): 3983–92.
- [6] 沈忱, 闵小波, 史美清, 等. 砷滤饼的铜砷分离[J]. 中国有色金属学报, 2017, 27(2): 356–362.
- [7] 王艳荣, 张国刚, 郑晔, 等. 含高砷、银铜矿石微捕收浮选新工艺试验研究[J]. 黄金, 2008, 29(2): 31–35.
- [8] López Valdivieso A, Sánchez López A A, Ojeda Escamilla C, et al. Flotation and depression control of arsenopyrite through pH and pulp redox potential using xanthate as the collector[J]. International Journal of Mineral Processing, 2006, 81(1): 27–34.
- [9] 张铂华, 邵延海, 熊涛, 等. SLon-500磁选机分离细粒铜钼混合精矿研究[J]. 有色金属(选矿部分), 2022(2): 53–57+94.
- [10] Chen L Z, Xiong T, Xiong D H, et al. Pulsating HGMS for industrial separation of chalcopyrite from fine copper-molybdenum co-flotation concentrate[J]. Minerals Engineering, 2021, 170: 106967.
- [11] Xian Y J, Hong Y, Li Y R, et al. Pulsating high-gradient magnetic separation of chalcopyrite and talc[J]. Minerals Engineering, 2022, 178: 107410.
- [12] Chen J H. The interaction of flotation reagents with metal ions in mineral surfaces: A perspective from coordination chemistry[J]. Minerals Engineering, 2021, 171: 107067.
- [13] 陈建华, 朱阳戈, 李玉琼, 等. 有色金属硫化矿浮选配位化学[J]. 有色金属(选矿部分), 2024(8): 1–17+30.
- [14] Chen J H, Wang J M, Li Y Q, et al. Effects of surface spatial structures and electronic properties of chalcopyrite and pyrite on Z-200 selectivity[J]. Minerals Engineering, 2021, 163: 106803.
- [15] Chen L Z, Ding L, Zhang H F, et al. Slice matrix analysis for combinatorial optimization of rod matrix in PHGMS[J]. Minerals Engineering, 2014, 58: 104–107.