

热处理对砷酸钙晶型演变影响和砷溶出研究^①

李中林^{1,2}, 彭彪^{1,2}, 许晔^{1,2}, 罗文彬^{1,2}, 王露森^{1,2}, 王胜杰³, 李义兵^{1,2}

(1.桂林理工大学 材料科学与工程学院, 广西 桂林 541004; 2.桂林理工大学 有色金属及材料加工新技术教育部重点实验室, 广西 桂林 541004; 3.广西锰资源高值化利用重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 考察了砷酸钙热处理过程中焙烧温度和升温速率对砷酸钙晶型转化的影响, 使用强酸(硫酸、硝酸、盐酸、王水)对热处理后的砷酸钙进行浸出, 研究了砷酸钙晶型转变程度与砷浸出量之间的关系。结果表明, 焙烧过程中砷酸钙发生明显晶型转变, 且焙烧温度越高, 砷酸钙晶型转变程度越高; 对热处理后砷酸钙进行酸浸, 砷浸出量随着焙烧温度升高而减少; 砷酸钙经 500 °C 焙烧后, 酸浸液中砷含量符合 GB 5085.3—2007 标准要求, 砷酸钙经 900 °C 及以上温度焙烧后浸出液中砷含量满足 GB 3838—2002 标准要求。

关键词: 砷酸钙; 热处理; 晶型转变; 砷溶出; 焙烧; 固砷

中图分类号: TF111

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2025.03.028

文章编号: 0253-6099(2025)03-0168-05

Effect of Heat Treatment on Crystalline Form Evolution of Calcium Arsenate and Arsenic Leaching

LI Zhonglin^{1,2}, PENG Biao^{1,2}, XU Ye^{1,2}, LUO Wenbin^{1,2}, WANG Lusen^{1,2}, WANG Shengjie³, LI Yibing^{1,2}

(1.School of Materials Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China; 2.Key Laboratory of New Processing Technology for Nonferrous Metals & Materials, Ministry of Education, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China; 3.Guangxi Key Laboratory of High Value Utilization of Manganese Resources, Guilin 541004, Guangxi, China)

Abstract: Effects of roasting temperature and heating rate on the crystalline form evolution of calcium arsenate during heat treatment were investigated. The heat-treated calcium arsenate was leached by strong acids (sulfuric acid, nitric acid, hydrochloric acid, aqua regia), and the relationship between the crystalline form of calcium arsenate and arsenic concentration in leaching solution was investigated. The results show that calcium arsenate undergoes significant crystalline form transition during roasting process, and higher roasting temperature can result in higher degree of crystallization. The heat-treated calcium arsenate is leached with acids and it is shown that less arsenic is leached out as the roasting temperature rises. After calcium arsenate is subjected to roasting at 500 °C, the concentration of arsenic in the leaching solution can meet GB 5085.3—2007. After calcium arsenate is subjected to a roasting process at 900 °C and above, the concentration of arsenic in the leaching solution satisfied GB 3838—2002.

Key words: calcium arsenate; heat treatment; crystal form transition; arsenic leaching; roasting; arsenic fixation

有色金属冶金过程中常产出大量高酸度和高砷含量的废水和污泥^[1-2], 处理不当会导致严重的环境问题^[3-4]。学者们探讨了含砷废水和污泥处理方法^[5-9], 如通过电石渣和漂白粉联用对含砷污泥进行稳定固

化、使用水泥回转窑共处置含砷污泥、利用三维电极反应器电吸附深度处理含砷废水、使用石灰沉淀法处理含砷废水等, 这些方法产出的含砷废渣中砷以砷酸钙形态存在, 但此类砷酸钙稳定性较差, 长期堆存, 砷离

① 收稿日期: 2024-12-08

基金项目: 广西科技计划项目重大专项(桂科 AA22068078-4); 国家自然科学基金(U23A20557); 广西科技计划项目(桂-2023AB25007)

作者简介: 李中林(1997—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为有色金属冶炼。E-mail: dahe121133@163.com

通信作者: 李义兵(1973—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为有色金属冶炼。E-mail: lybgems@glut.edu.cn

子可能重新进入土壤或水体,对环境造成潜在危害。为了使砷酸钙中砷离子稳固化或无害化,前人进行了大量研究^[10-12],尝试了诸多处理方法,其中热处理砷酸钙固砷是较佳选择。本文通过液相法合成砷酸钙,然后对砷酸钙进行热处理,通过 XRD、FTIR、SEM-EDS 等微观表征手段研究不同焙烧温度下砷酸钙晶型转变规律,并通过酸浸法研究砷酸钙晶型与固砷之间的关系,可为含砷废渣无害化处理或砷固化提供一定的理论依据。

1 试验部分

1.1 试验试剂及设备

试验试剂氢氧化钠、盐酸、硫酸、硝酸、氯化钙均为分析纯,雌黄为工业级试剂。

试验设备包括磁力搅拌器(ZNCL-TS)、抽滤机、小型管式炉(OTF-1200X)。

1.2 试验方法

1.2.1 砷酸钙制备

1) 碱浸:称取 50 g 雌黄,取与雌黄反应化学计量过剩 20% 的氢氧化钠溶于 300 mL 纯水中,缓慢将雌黄加入氢氧化钠溶液中,常温(28.5 °C)条件下使用磁力搅拌器搅拌浸出 1 h,最后通过抽滤获得砷酸钠溶液。

2) 沉淀:将砷酸钠溶液与过量的质量分数 20% 的氯化钙溶液混合,得到砷酸钙沉淀。将获得的砷酸钙沉淀分离、过滤、洗涤、干燥 2 h,研磨成粉末,即为砷酸钙粉末。

1.2.2 砷酸钙热处理和浸出

取 0.5 g 砷酸钙粉末,放入小型管式炉中,以某一升温速率升至所需温度,恒温焙烧 2 h 后取出。管式炉后设置了挥发砷的收集装置。

采用红外光谱、扫描电镜及能谱等分析不同焙烧温度下热处理后砷酸钙的晶型转变情况。

取 1 g 不同焙烧温度所得热处理砷酸钙粉末,加入 50 mL 不同强酸中,置于磁力搅拌器中以 300 r/min 持续搅拌 5 min,稀释 500 倍后,以 ICP 测试浸出砷浓度,验证砷酸钙晶型转变程度和固化砷的效果。

将热处理后的砷酸钙按照 HJ/T 299—2007《固体废物 浸出毒性浸出方法 硫酸硝酸法》进行破碎和浸出,采用电感耦合等离子体发射光谱仪测出浸出液砷浓度,对其进行毒性分析。

2 试验结果与讨论

2.1 砷酸钙表征

所制备的砷酸钙 XRF 分析结果如表 1 所示,XRD 图谱如图 1 所示。砷酸钙主要元素为 As、Ca、O,其他

元素为 Fe、Al、S 等杂质。砷酸钙 XRD 图谱为漫散射图形,没有出现明显的衍射峰,砷酸钙主要以非晶型结构存在。这种状态下所固化的砷极容易渗出。砷酸钙的砷浸出毒性测定结果表明,浸出液中砷质量浓度为 16.2 mg/L,远超过 GB 5085.3—2007《危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别》以及 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》的限值,因此需要对其进行稳固化处理。

表 1 砷酸钙 XRF 分析结果(质量分数)

Table 1 XRF analysis of calcium arsenate %			
Ca	As	O	其他
21.91	34.94	40.32	2.83

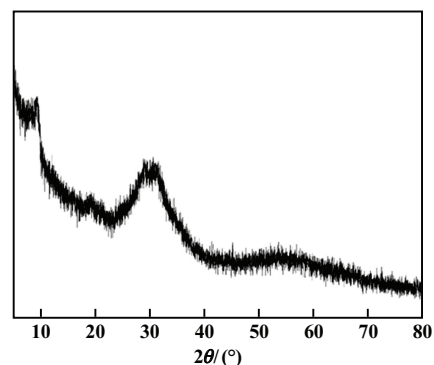


图 1 砷酸钙 XRD 图谱

Fig. 1 XRD pattern of calcium arsenate

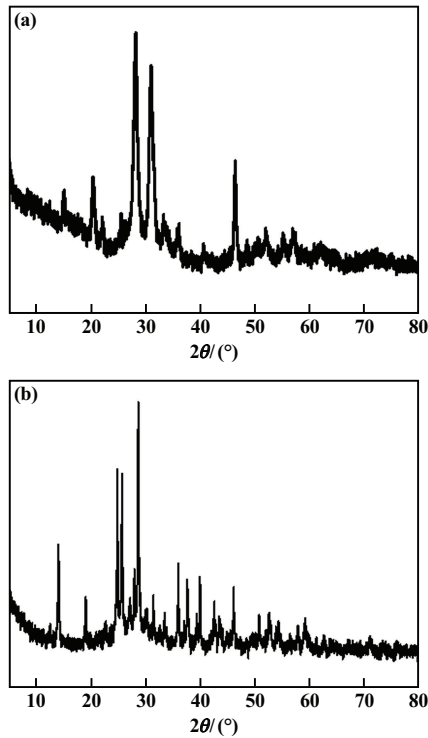
2.2 升温速率对砷酸钙晶型转变的影响

升温速率 5 和 10 °C/min 条件下 700 °C 焙烧所得砷酸钙 XRD 图谱如图 2 所示,经过焙烧后,砷酸钙出现了衍射峰,其晶型有了一定变化;对比焙烧前样品 XRD 图谱,发现衍射峰峰强和位置变化不大,说明升温速率对晶型转变影响较小。

2.3 焙烧温度对砷酸钙晶型转变的影响

2.3.1 XRD 分析

升温速率 10 °C/min,未焙烧以及不同焙烧温度焙烧后所得砷酸钙 XRD 图谱如图 3 所示。砷酸钙焙烧前后 XRD 图谱有明显差异,焙烧后样品衍射峰越来越分明,焙烧温度越高,衍射峰峰强越明显,砷酸钙晶型结构越好。焙烧温度 500 °C 时,材料中开始出现衍射峰,经过物相分析,其对应的峰主要为 $Fe_4As_2O_{11}$,有关砷酸钙的峰还不明显。焙烧温度 700 °C 时,出现了 $Ca_3(AsO_4)_2 \cdot 8H_2O$ 衍射峰。焙烧温度 800 °C 时,衍射峰更明显,主要物相为 $FeAsO_4$ 与 $Ca_2As_2O_7$,其中 $Ca_3(AsO_4)_2 \cdot 8H_2O$ 脱离结合水转变为 $Ca_2As_2O_7$,砷酸钙盐脱离结晶水,砷酸钙晶型开始由非晶态向晶态转变,其内部结构也更稳定。焙烧温度 900 °C 时,砷酸钙



(a) 5 °C/min; (b) 10 °C/min

图2 不同升温速率条件下700 °C焙烧所得磷酸钙XRD图谱

Fig.2 XRD patterns of calcium arsenate roasted at 700 °C with different heating rates

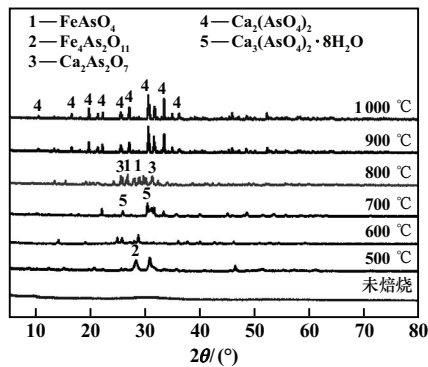


图3 未焙烧以及不同焙烧温度下所得磷酸钙XRD图谱

Fig.3 XRD patterns of calcium arsenate before and after roasting at different temperatures

物相主要以 $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ 形式存在,无明显杂峰,基本完成非晶态向晶态的转变。其主要原因是大部分 AsO_4^{3-} 在高温条件下与 Ca^{2+} 结合,形成稳定的砷酸盐;此外,磷酸钙经过高温稳定后,As 参与反应,形成相应的玻璃体,具有很好的稳定性,磷酸钙中砷的浸出毒性大大降低。

2.3.2 FTIR 分析

升温速率 10 °C/min,未焙烧以及不同焙烧温度所得磷酸钙的 FTIR 图如图 4 所示。400~900 cm^{-1} 出现

较明显的吸收峰,对应 AsO_4^{3-} 的振动条带;随着焙烧温度上升, AsO_4^{3-} 的峰强越来越小。这是因为红外吸收峰的强度与分子振动时偶极矩变化值的平方成正比,振动时瞬间偶极矩变化越大,吸收峰越强,而偶极矩变化值又与分子结构对称性有关,分子结构越对称,偶极矩变化值越小,吸收峰峰强也就越弱。说明随着焙烧温度升高, AsO_4^{3-} 分子结构对称性越来越好,进一步说明随着焙烧温度提高,磷酸钙晶型转变程度越来越高。

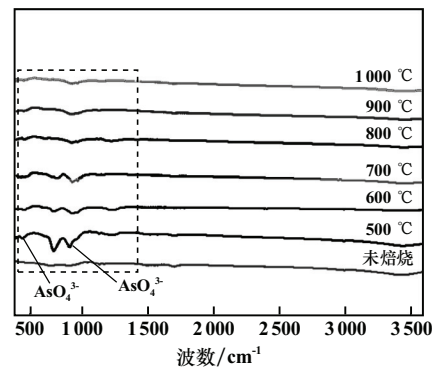


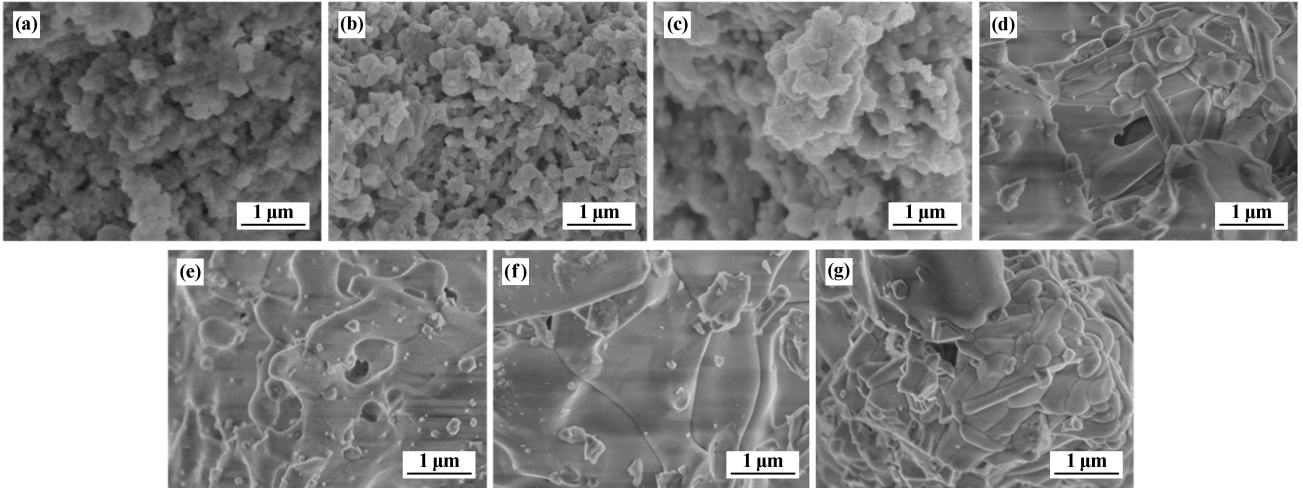
图4 未焙烧以及不同焙烧温度下所得磷酸钙的 FTIR 图

Fig.4 FTIR spectra of calcium arsenate before and after roasting at different temperatures

2.3.3 SEM-EDS 分析

升温速率 10 °C/min,未焙烧以及不同焙烧温度下所得磷酸钙 SEM 图如图 5 所示。未焙烧磷酸钙原料微观形貌松散,无晶型;随着焙烧温度升高,晶体形态开始变得规则,500 °C 焙烧所得磷酸钙形貌变得紧致,结晶度增加,逐渐呈现一定的晶体形态,600 °C 焙烧所得磷酸钙微观形貌转变程度更明显,晶体形态开始变得规整,700~900 °C 焙烧所得磷酸钙晶体为块状,结构紧致,1000 °C 焙烧所得磷酸钙结构致密。随着焙烧温度升高,磷酸钙微观形貌变得越来越紧致,晶型转变程度越来越高。一定的焙烧温度有利于形成结晶度高,形貌较好的晶体,这可能是由于在相对较高温度时磷酸钙具有较高的热力学稳定性。500~600 °C 焙烧时,磷酸钙形貌呈小颗粒球形,随着焙烧温度升高,聚集的颗粒(直径约 0.3 μm) 形态逐渐转变为表面光滑的平整块状形态。这些非晶态、弱结晶态和结晶态的典型形态证实了磷酸钙的结晶过程。

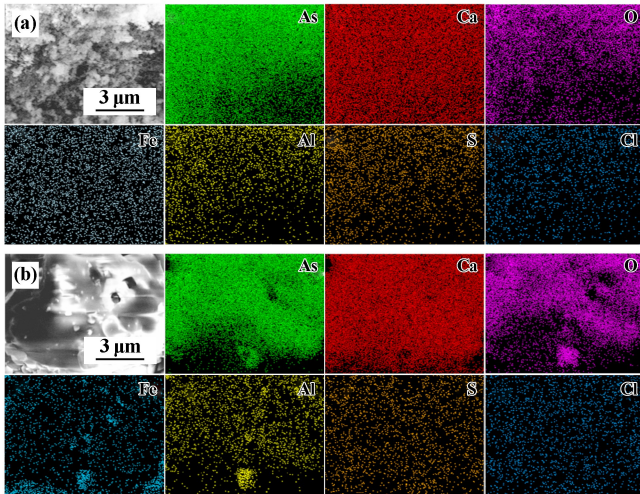
图 6 为未焙烧和 1000 °C 焙烧后磷酸钙 EDS 图谱,两种样品 EDS 元素质量对比结果见表 2。未焙烧磷酸钙主要元素为氧、砷、钙,含有少量铁、铝杂质。磷酸钙由硫化砷、氢氧化钠、氯化钙制备而来,存在微量的硫、氯元素是合理的。焙烧后其主要元素没有改变,杂质元素质量比降低,说明通过高温焙烧后磷酸钙更纯净。



(a) 未焙烧; (b) 500 °C; (c) 600 °C; (d) 700 °C; (e) 800 °C; (f) 900 °C; (g) 1000 °C

图 5 未焙烧以及不同焙烧温度下所得砷酸钙 SEM 图

Fig.5 SEM images of calcium arsenate before and after roasting at different temperatures



(a) 未焙烧; (b) 1000 °C 焙烧后

图 6 未焙烧和 1000 °C 焙烧后砷酸钙 EDS 图谱

Fig.6 EDS patterns of calcium arsenate before and after roasting at 1000 °C

表 2 未焙烧与 1000 °C 焙烧砷酸钙 EDS 元素组成(质量分数)

Table 2 EDS elemental analysis of calcium arsenate before and after roasting at 1000 °C

样品	O	As	Ca	Fe	Al	S	Cl
未焙烧	36.61	34.62	21.86	4.48	1.29	0.99	0.15
1000 °C 焙烧后	40.24	33.60	21.58	3.83	0.63	0.06	0.06

2.4 焙烧温度对砷浸出量的影响

升温速率 5 和 10 °C/min,各焙烧温度下焙烧所得砷酸钙在盐酸中浸出,砷浸出量如图 7 所示。从图 7 可直观看出,焙烧温度越高,砷浸出量越低。这是因为高温焙烧后,砷酸钙从松散的晶型转变成块状紧致的

晶型,使得砷更难以被浸出,这与焙烧温度越高晶型转化程度越高相吻合。晶型转换程度越高,砷酸钙固化的砷就越稳定,浸出率越低。通过对比可知,焙烧时升温速率的变化对砷浸出量的影响不大,进一步说明了焙烧的升温速率对晶型转变程度影响不大。通过控制焙烧温度,砷酸钙可高温固化形成一种稳定的固体,显著降低砷酸钙中砷的浸出毒性,实现砷的固化。有研究表明,这类化学稳定性与玻璃固化体的形成及砷被包裹或参与玻璃体结构形成密切相关^[13]。

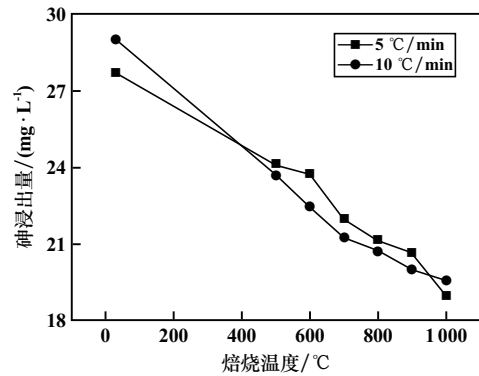


图 7 不同焙烧温度下砷酸钙在盐酸中的砷浸出量

Fig.7 Concentration of arsenic in hydrochloric acid leaching solution of calcium arsenate after roasting at different roasting temperatures

2.5 不同强酸对砷浸出量的影响

升温速率 10 °C/min,不同焙烧温度砷酸钙在硫酸、硝酸、盐酸及王水等强酸中的砷浸出量如图 8 所示。随着焙烧温度升高,各强酸的砷浸出量都越来越少,这说明随着焙烧温度提高,砷酸钙固化砷的效果更好,也进一步说明松散的砷酸钙结构向整体玻璃化结

构发展,酸浸过程中,砷浸出量降低,说明砷酸钙稳定性更高了。

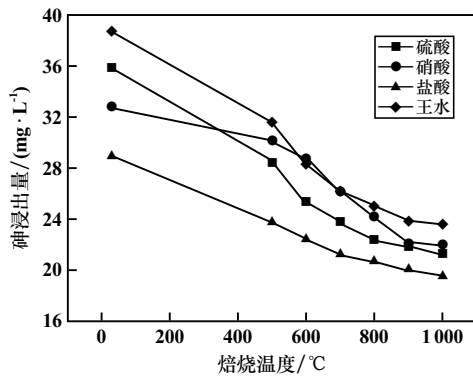


图8 不同焙烧温度砷酸钙在强酸中的砷浸出量

Fig.8 Concentrations of arsenic in leaching solution of calcium arsenate roasted at different temperatures with strong acid

2.6 不同温度条件下砷酸钙毒性浸出分析

按标准 HJ/T 299—2007《固体废物 浸出毒性浸出方法 硫酸硝酸法》进行破碎和浸出,不同温度下砷酸钙中砷浸出量如表 3 所示。500 °C 焙烧后砷酸钙浸出液中砷含量符合 GB 5085.3—2007 标准要求,焙烧温度 900 °C 以上焙烧后砷酸钙浸出液中砷含量满足 GB 3838—2002 标准要求。

表 3 不同温度下砷酸钙中砷浸出量

Table 3 Concentrations of arsenic in leaching solution of calcium arsenate roasted at different temperatures

温度/°C	砷浸出量/(mg·L ⁻¹)	标准限值
室温	7.633 1	
500	1.573 6	
600	1.296 2	GB 5085.3—2007
700	0.701 6	5 mg/L
800	0.202 7	
900	0.096 2	GB 3838—2002
1 000	0.087 6	0.1 mg/L

3 结论

1) 砷酸钙经高温热处理后晶型由无定形态、稳定性低的砷酸钙类化合物向具有特定晶型、稳定性高的砷酸钙转变,使得原本溶解度大的砷酸钙转变为溶解度小的砷酸钙,焙烧温度越高,酸浸时砷浸出量越小。焙烧温度越高,砷酸钙 XRD 衍射峰越明显,表明热处理后物相晶型发育趋于完整,非晶态转变为具有一定晶型的形态,达到了稳定的化学状态。

2) 高温热处理前,砷酸钙晶体微观形貌松散,颗粒分明,表明粗糙孔洞多,整体呈现为颗粒球形;热处

理后,砷酸钙晶粒变大充填,转变为紧致的块状,呈现良好的结晶度。且焙烧温度越高,其形貌转变程度越高,亦可证明升高焙烧温度有利于提高砷酸钙的稳定性。

3) 将不同焙烧温度的砷酸钙按标准 HJ/T 299—2007《固体废物 浸出毒性浸出方法 硫酸硝酸法》进行破碎和浸出,毒性浸出结果表明:500 °C 焙烧后砷酸钙浸出液中砷含量符合 GB 5085.3—2007 标准要求,900 °C 以上焙烧后砷酸钙浸出液中砷含量满足 GB 3838—2002 标准要求。

参考文献 (References):

- [1] WU C, ZOU Q, XUE S G, et al. The effect of silicon on iron plaque formation and arsenic accumulation in rice genotypes with different radial oxygen loss (ROL)[J]. Environmental Pollution, 2016,212:27-33.
- [2] MARCASON W. What are the current findings concerning arsenic in foods? [J]. Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics, 2015, 115:1028.
- [3] NAZARI A M, RADZINSKI R, GHAREMAN A. Review of arsenic metallurgy: Treatment of arsenical minerals and the immobilization of arsenic[J]. Hydrometallurgy, 2017,174:258-281.
- [4] 丁嘉琪,王鑫,王琳玲,等. 含砷工业污泥特性及处置技术研究进展[J]. 环境工程, 2019,37(12):167-172.
DING Jiaqi, WANG Xin, WANG Linling, et al. A review of industrial arsenic-containing sludge: Characteristics and treatment technologies[J]. Environmental Engineering, 2019,37(12):167-172.
- [5] LUO Y H, WANG Y Y, HE Z D, et al. Removal of arsenic from arsenic-containing solution in a three-dimensional electrode reactor[J]. Journal of Central South University, 2024,31(2):443-459.
- [6] YANG N, QI X, LI Y, et al. Highly effective remediation of high arsenic-bearing wastewater using aluminum-containing waste residue [J]. Journal of Environmental Management, 2023,325:116417.
- [7] LEI J, PENG B, MIN X B, et al. Modeling and optimization of lime-based stabilization in high alkaline arsenic-bearing sludges with a central composite design [J]. Journal of Environmental Science and Health, Part A, 2017,52(5):449-458.
- [8] 庞博,李瑞冰,马雁鸿,等. 砷酸钙渣水泥固化的实验研究[J]. 沈阳化工大学学报, 2023,37:421-424.
PANG Bo, LI Ruibing, MA Yanhong, et al. Experimental study on cement solidification of calcium arsenate slag[J]. Journal of Shenyang University of Chemical Technology, 2023,37:421-424.
- [9] 熊民,史冠勇,田磊,等. 碳热焙烧还原砷酸钙制备金属砷[J]. 工程科学学报, 2022,44(5):886-893.
XIONG Min, SHI Guanyong, TIAN Lei, et al. Preparation of metallic arsenic from calcium arsenate by carbon thermal roasting reduction[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022,44(5):886-893.
- [10] ZHANG D, WANG S F, WANG Y, et al. The long-term stability of calcium arsenates: Implications for phase transformation and arsenic mobilization[J]. Journal of Environmental Sciences, 2019,84:29-41.

(下转第 179 页)

且 AlN 在氧化铝表面生成。

参考文献(References):

- [1] 蒋太波. 铝灰综合利用技术及应用研究[J]. 有色金属加工, 2024,53(2):65-70.
JIANG Taibo. Research on comprehensive utilization technology and application of aluminum dross [J]. Nonferrous Metals Processing, 2024,53(2):65-70.
- [2] 陈安柱,周鹏飞. Zr 对 Al-Si-Mg-Mn 合金凝固过程、时效组织和性能的影响[J]. 矿冶工程, 2024,44(3):156-160.
CHEN Anzhu, ZHOU Pengfei. Effect of Zr on Al-Si-Mg-Mn alloy solidification process and its microstructure and properties after aging treatment[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2024,44(3):156-160.
- [3] 林立健,张勇,郑许,等. 分级淬火对 7N65 铝合金微观组织和断裂韧性的影响[J]. 矿冶工程, 2023,43(5):149-153.
LIN Lijian, ZHANG Yong, ZHENG Xu, et al. Effect of interrupted quenching on microstructure and fracture toughness of 7N65 aluminum alloy[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023,43(5):149-153.
- [4] 侯佳鑫,李占兵,李少鹏,等. 二次铝灰酸解渣温和脱硅制备镁铝尖晶石[J]. 有色金属(冶炼部分), 2022(10):58-66.
HOU Jiaxin, LI Zhanbing, LI Shaopeng, et al. Preparation of magnesium aluminate spinel and mild desilication of acidolysis residue from secondary aluminum dross[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2022(10):58-66.
- [5] 邢修君,吴跃东. 国内外铝灰资源化利用技术发展现状[J]. 环境工程, 2021,39(3):148-152.
XING Xiujun, WU Yuedong. Review on development on the utilization

- of aluminum dross [J]. Environmental Engineering, 2021,39(3):148-152.
- [6] 李燕龙,张立峰,杨文,等. 铝灰用于钢包渣改质剂试验[J]. 钢铁, 2014,49(3):17-23.
LI Yanlong, ZHANG Lifeng, YANG Wen, et al. Development of ladle slag reducer using aluminum dross[J]. Iron and Steel, 2014,49(3):17-23.
- [7] 张光宗. 铝灰熔融还原改质镍渣的基础研究[D]. 沈阳:东北大学, 2021.
ZHANG Guangzong. Fundamental research on smelting reduction of modified nickel slag by aluminum dross[D]. Shenyang: Northeastern University, 2021.
- [8] 王文虎,李冰,孟显祖,等. 工业铝灰(AD粉)在炼钢生产中应用与分析[J]. 河南冶金, 2010,18(6):43-45.
WANG Wenhui, LI Bing, MENG Xianzu, et al. Industrial aluminum ash(AD powder)in steelmaking production application and analysis[J]. Henan Metallurgy, 2010,18(6):43-45.
- [9] 刘建,王华昆,宋立秋,等. 钒氮微合金化高强度钢的研究及应用[J]. 四川冶金, 2006,28(1):24-27.
LIU Jian, WANG Huakun, SONG Liqiu, et al. Research and application of VN microalloying high strength steels[J]. Sichuan Metallurgy, 2006,28(1):24-27.

引用本文:丁万武,袁浩登,魏国立,等. 铝灰直接氮化法增氮过程实验研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(3):173-179.

DING Wanwu, YUAN Haodeng, WEI Guoli, et al. Experimental study on direct nitridation of aluminum ash for nitrogen enrichment [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(3):173-179.

(上接第 172 页)

- [11] LEI J, PENG B, LIANG Y J, et al. Effects of anions on calcium arsenate crystalline structure and arsenic stability [J]. Hydrometallurgy, 2018,177:123-131.
- [12] ZHAO Z W, CHAI L Y, PENG B, et al. Arsenic vitrification by copper slag based glass: Mechanism and stability studies [J]. Journal of Non-crystalline Solids, 2017,21:466-467.
- [13] 张楠,方紫薇,龙华,等. 砷碱渣稳定化处理合成臭葱石晶体固砷[J]. 中国有色金属学报, 2020,30(1):203-213.
ZHANG Nan, FANG Ziwei, LONG Hua, et al. Stabilization of arse-

nic from arsenic alkali residue by forming crystalline scorodite [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020,30(1):203-213.

引用本文:李中林,彭彪,许晔,等. 热处理对磷酸钙晶型演变影响和砷溶出研究[J]. 矿冶工程, 2025,45(3):168-172.

LI Zhonglin, PENG Biao, XU Ye, et al. Effect of heat treatment on crystalline form evolution of calcium arsenate and arsenic leaching [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2025,45(3):168-172.