

综合利用与环保

引文格式:王日昕,曾邦兴,曾思琪,等.二次铝灰中金属铝、氮化铝碱溶规律及碱浸渣烧结合制备镁铝尖晶石材料[J].中国有色冶金,2025,54(4):108-116.

WANG Rixin, ZENG Bangxing, ZENG Siqi, et al. Alkaline dissolution of aluminum and aluminum nitride in secondary aluminum ash and preparation of magnesium aluminum spinel material by sintering alkaline leaching residue[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2025,54(4):108-116.

二次铝灰中金属铝、氮化铝碱溶规律及碱浸渣烧结合制备镁铝尖晶石材料

王日昕¹, 曾邦兴¹, 曾思琪¹, 邓雅坤¹, 韦江¹, 王国庆², 张勇¹

(1. 江西省科学院应用物理研究所, 江西 南昌 330006; 2. 江西华赣恒昊环保科技有限公司, 江西 抚州 331800)

[摘要] 二次铝灰中含有大量 Al、Al₂O₃, 以及一定量的 MgAl₂O₄ 和 AlN, 直接堆存会造成环境污染及资源的浪费, 而铝灰中 Al、AlN 及部分杂质在碱性浸出条件下可以溶出, 剩余残渣成分与镁铝尖晶石材料(MA)成分较为接近。本研究以二次铝灰为主要原料, 采用碱浸预处理联合火法烧结合的方法, 并以 MgO 为调配剂, 制备 MA 材料, 研究过程考察了碱浸工艺参数对 Al 及 AlN 浸出率的影响, 分析了二次铝灰碱浸机理, 并考察了烧结合工艺参数对所制备镁铝尖晶石材料性能的影响, 得到以下主要结论。碱浸试验表明, 增大 NaOH 浓度、提高浸出温度、增大液固比、加快搅拌速率均有利于提高 Al 及 AlN 浸出率; 在温度 80 °C、NaOH 浓度 1.6 mol·L⁻¹、搅拌速率 300 r·min⁻¹、液固比 12:1 的优化碱浸条件下, Al 浸出率达到 80.35%, AlN 浸出率达到 53.21%; 二次铝灰中 Al 及 AlN 浸出反应本质上是水解反应, 碱性体系促进其水解反应进行; 以碱浸残渣为原料, 按照 MA 材料配比 MgO, 在烧结合温度 1300~1400 °C、烧结合时间 3 h 的条件下可制备晶型完整、结晶度高的尖晶石材料; 1400 °C 条件下制备的 MA 材料显气孔率为 31.56%, 抗压强度为 50.22 MPa, 高于国家行业标准《镁砖和镁铝砖》(GB/T2275—2007)(40 MPa)。

[关键词] 二次铝灰; 碱性浸出; 烧结合; MgO 调配剂; 镁铝尖晶石(MgAl₂O₄, MA)

[中图分类号] X758; TF821 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2025)04-0108-09

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2025.04.012

0 引言

随金属铝、电解铝熔炼及铝合金生产规模不

断扩大, 铝灰产量也逐年递增。2024 年全国铝灰渣堆存量超过 500 万 t, 目前大部分铝灰并未充分回收^[1]。铝灰中铝的质量分数在 10%~80% 不等, 如能经济有效地利用和治理铝灰, 对实现铝二次资源的有效循环利用具有积极意义^[2-3]。由于铝灰来源不同, 铝灰成分差异明显。电解原铝及铸造等不添加盐熔剂过程中产生的一次铝灰主要成分为金属铝和铝氧化物的混合物, 铝含量可达 15%~70%; 经盐溶液处理回收一次铝灰或铝合金精炼产生的二次铝灰主要成分为 NaCl、KCl、氟化物、氧化铝和铝的混合物^[4]。尽管二次铝灰中

[收稿日期] 2024-11-20

[第一作者] 王日昕(1983—), 男, 内蒙古人, 硕士, 副研究员, 主要从事固体废物资源化利用方面的研究。

[通信作者] 张勇(1989—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事固体废物资源化利用方面的研究。

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(52004113); 江西省科学院院长基金(2022YCXZD2001); 江西省科学院博士项目(2025YYB02)。

铝含量较一次铝灰低,二次铝灰中依然含有大量 Al、Al₂O₃,以及一定量的 MgAl₂O₄和 AlN,直接堆放、填埋或作为路基材料不仅有可能造成环境污染,而且造成资源浪费^[5]。

二次铝灰碱性浸出可以除去部分可溶性物质。AlN 及少量碳化物,硫化物和磷化物遇水易发生水解反应,释放出氮、磷化氢和甲烷等有毒气体。水浸出过程在除去部分 AlN 的同时,也会生成 Al(OH)₃,NaOH 的存在会加快 AlN 的水解^[6]。文献[7]报道,碱性浸出可以使二次铝灰中 AlN 去除率达到 98.3%,同时 Al 也会一定程度上发生反应;另外,碱催化水解还可以实现可溶性氟化物的去除,在 NaOH 浓度 10%、浸出温度 80 ℃、液固比 4:1、浸出时间 20 min 的条件下,活性氟化物浸出率达 95.8%。碱性浸出对无机盐、NaCl、KCl 也有一定程度的浸出。

对二次铝灰碱浸渣进行物相矿物学分析,发现其可以作为烧结制备镁铝尖晶石的材料^[8-9]。镁铝尖晶石(MgAl₂O₄)是一种熔点高(2 135 ℃)、抗热震性好、抗冲击、电绝缘性好、抗碱侵蚀能力强的镁铝氧化物材料。以二次铝灰碱浸渣为主要原料制备晶相为镁铝尖晶石的耐火材料,一方面可以减轻二次铝灰对环境的潜在危害,另一方面可以拓宽耐火材料制备领域。镁铝尖晶石材料具有许多优良性能,如高熔点、耐高温、强机械性能、耐热和耐酸碱,因此镁铝尖晶石在炉衬挂壁和建筑材料中被广泛应用。

由此可见,二次铝灰碱浸渣可作为低成本生产镁铝尖晶石的潜在原料^[10-11]。

目前,二次铝灰的资源利用可分为湿法、火法两大类。湿法处理杂质去除率稍低,较难提升全铝资源综合利用效率,传统火法烧结需采用破碎样品-多步烧结的方法来提升烧结体性能,能耗高。本研究以二次铝灰为主要原料,采用碱浸预处理联合火法烧结的方法,并以氧化镁为调配剂,制备镁铝尖晶石材料。研究过程考察了碱浸工艺参数对 Al 及 AlN 浸出率的影响,分析了二次铝灰碱浸机理,并考察了烧结工艺参数对所制备镁铝尖晶石材料性能的影响,研究结果可提升全铝资源综合利用效率提供技术支撑。

1 原料与方法

1.1 实验原料

二次铝灰取自江西某再生铝企业熔炼工艺段。将供试原料于刚玉研钵中磨细,过 100 目(165 μm)筛后保存备用。表 1 为二次铝灰化学成分分析,X 荧光光谱仪分析表明,二次铝灰主要成分为铝和氧化铝,分别占铝灰质量的 23.67%和 23.58%,此外,还含有少量的 Na、Mg 和 Si。SEM/XRD 分析结果如图 1 所示,可以看出供试铝灰表面呈不均匀、疏松多孔状,且铝灰中主要晶相结构为 Al、Al₂O₃、MgAl₂O₄及 AlN,同时含有 ZnS 等成分。

表 1 二次铝灰化学成分(质量比)

Table 1 Chemical composition of second aluminum dross (mass percent) %

成分	Al	Al ₂ O ₃	MgO	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	TiO ₂
含量/%	23.67	23.58	10.65	15.55	4.86	3.44	2.78	2.68

1.2 实验方法

根据具体实验条件称取一定量铝灰置于平底烧瓶中,移取一定量 NaOH 溶液,调控温度,控制反应一段时间,快速抽滤分离,滤液定容稀释待测分析,滤渣清洗烘干;添加 MgO 进行 MgAl₂O₄(MA)成分配比(根据化学反应 MgO + Al₂O₃ = MgAl₂O₄,计算烧结制备镁铝尖晶石物相反应所需氧化镁和氧化铝含量,调控配比铝灰渣和 MgO 质量(4:1));配制完成的 MA 物料置于强力振动搅拌机混炼 3 min,混炼物料外加 3% 聚乙烯醇溶液作为粘结剂,采用半干

成型法制备圆柱试样(外形尺寸:直径 25.4 mm,高 50 mm);将试样在 105 ℃烘箱中干燥 2 h,后置于管式烧结炉中保温烧结,反应结束后管式炉自然冷却,取出物料待测分析,试验工艺流程见图 2。

试验在 500 mL 装有搅拌粒子的球形反应器中进行,反应器置于水浴锅中,采用单因素试验研究温度、碱度、液固比及搅速对二次铝灰中其余可溶性铝及氮化铝的浸出规律,参数设计如下所述。

1) 考察温度的影响。固定参数为 $M_{\text{NaOH}} = 0.8 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、碱液体积与铝灰质量比 8:1 (mL:g)、

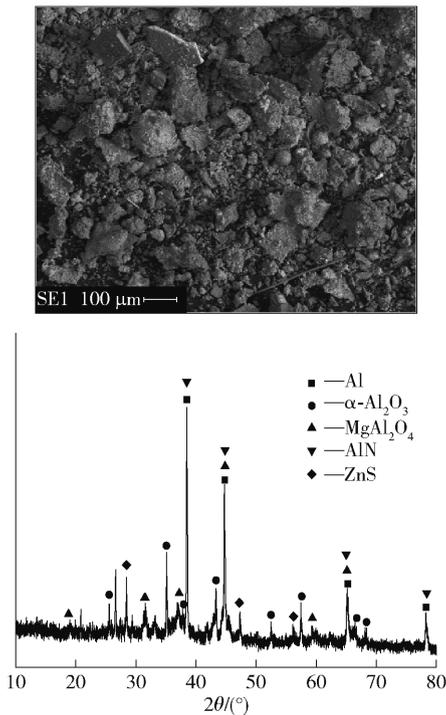


图1 二次铝灰 SEM/XRD 图谱

Fig.1 SEM/XRD pattern of second aluminum dross

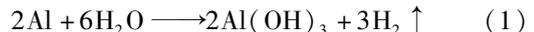
2.0 mol·L⁻¹和 2.4 mol·L⁻¹。

3) 考察搅拌速度的影响。固定参数为 $M_{NaOH} = 0.8 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、碱液体积与铝灰质量比 8 : 1、温度 313 K、反应时间 5 min; 搅拌速度设置为 50 r·min⁻¹、100 r·min⁻¹、150 r·min⁻¹、200 r·min⁻¹、250 r·min⁻¹ 和 300 r·min⁻¹。

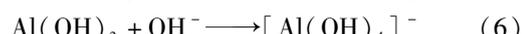
4) 考察碱液体积与铝灰质量比的影响。固定参数为 $M_{NaOH} = 0.8 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、搅速 100 r·min⁻¹、温度 313 K、反应时间 5 min; 液固比 (mL : g) 设置为 4 : 1、8 : 1、12 : 1、16 : 1、20 : 1 和 24 : 1。

1.3 二次铝灰碱浸机理

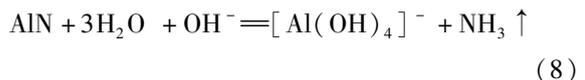
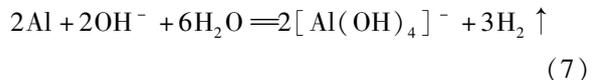
二次铝灰中可溶性铝在 NaOH 体系中的浸出本质是可溶性铝与 OH⁻ 反应, NaOH 的存在可加速水解反应的进行。从铝灰中物质的成分来看, 铝灰中铝分为三类: 游离铝 (金属铝及无定型铝)、氮化铝和不溶铝 (刚玉、镁铝尖晶石)。前两类铝在一般条件下可浸出, 而刚玉、镁铝尖晶石的化学性质极其稳定, 通常认为是不可浸出的。金属铝、氮化铝浸出反应本质是其水解反应, 碱性体系可促进水解反应的进行^[17]。金属铝、氮化铝发生的水解反应分别见式(1)(2)。



Al³⁺ 在碱性体系中不能存在, 会与 OH⁻ 生成不同羟基数的羟基铝络合物 [Al(OH)]²⁺、[Al(OH)₂]⁺、Al(OH)₃, 最终生成 [Al(OH)₄]⁻。相关反应见式(3)~(6)。



综上所述, 金属铝、氮化铝浸出的总反应式见式(7)(8)^[18]。



NaOH 体系下 3 个中间产物 [Al(OH)]²⁺、[Al(OH)₂]⁺ 和 Al(OH)₃, 反应继续进行得到 [Al(OH)₄]⁻, 反应机理示意图 3。

1.4 镁铝尖晶石合成机理

MgAl₂O₄ 生成过程形成 2 个界面, MgO-MgAl₂O₄

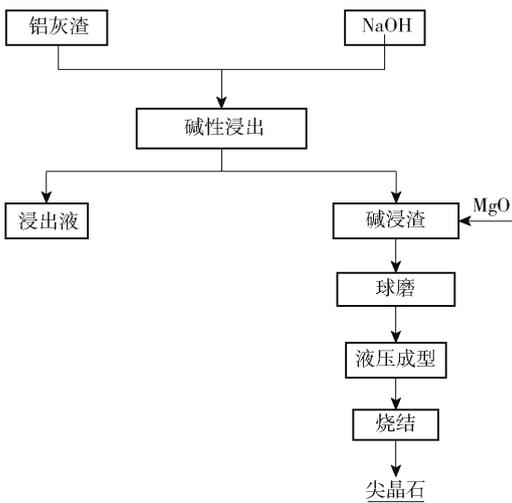


图2 试验工艺流程图

Fig.2 Schematic of the experimental procedure

搅速 100 r·min⁻¹、反应时间 5 min; 温度设置为 313 K、323 K、333 K、343 K、353 K 和 363 K。

2) 考察 NaOH 浓度的影响。固定参数为搅速 100 r·min⁻¹、碱液体积与铝灰质量比 8 : 1 (mL : g)、温度 313 K、反应时间 5 min; NaOH 浓度设置为 0.4 mol·L⁻¹、0.8 mol·L⁻¹、1.2 mol·L⁻¹、1.6 mol·L⁻¹、

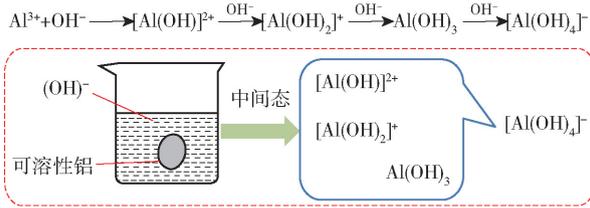
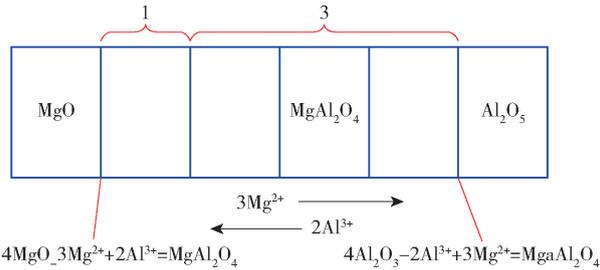


图3 二次铝灰与NaOH反应机理示意图

Fig. 3 Reaction mechanism diagram of secondary aluminum ash and NaOH

和 Al_2O_3 - MgAl_2O_4 界面,为维持电中性, 3Mg^{2+} 扩散到 Al_2O_3 边界, 2Al^{3+} 扩散到 MgO 边界, 4MgO 和 2Al^{3+} 形成 $1\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 。理论上, Al_2O_3 边界形成 MgAl_2O_4 与 MgO 边界形成 MgAl_2O_4 厚度比为 3:1,说明 Mg^{2+} 扩散快于 Al^{3+} [23]。镁铝尖晶石合成示意图 4。

图4 MgAl_2O_4 形成机制 Al^{3+} 和 Mg^{2+} 反向扩散 [23]Fig. 4 Spinel formation mechanism through the counter-diffusion of Al^{3+} and Mg^{2+} cation

1.5 分析及计算方法

二次铝灰微观形貌分析采用 JSM-6360V 扫描电子显微镜(日本电子公司),铝灰中主要元素及其含量分析采用 AXIOS 型 X 荧光光谱仪(荷兰 PANalytical),物相组成分析采用 D/MAX 2500X 型 X 射线衍射仪(日本理学公司) [12]。水质氨氮的测定方法采用 HJ 536-2009 水杨酸分光光度法,铝测定方法采用 GB-T 9734-2008 化学试剂通用方法;试样成型采用 YLJ-40T 压力机;试样显气孔率与体积密度采用阿基米德排水法(GB1996-80)测量;试样抗压强度采用 TYA-100C 型电液式抗折抗压试验机测定。二次铝灰中可溶性铝和 AIN 浸出率分别记为 x_1 和 x_2 ,计算公式见式(9)(10)。

$$x_1 = VC_1M_1/m\omega_1\% \quad (9)$$

$$x_2 = VC_2M_2/m\omega_2\% \quad (10)$$

式中: m 为二次铝灰质量, g; ω_1 和 ω_2 为二次铝灰中总铝和 AIN 质量百分数, %; V 为浸出液体积, L; C_1 和 C_2 为浸出液中 Al^{3+} 浓度, $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$; M_1 和 M_2 分别为 Al 原子质量、AIN 分子量, $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

其余可溶性铝浸出率记为 x_3 , 计算公式见式(11)。

$$x_3 = (m_3 - m_2)/m_3\% \quad (11)$$

式中: m_2 为溶出的 AIN 质量, g; m_3 为溶出可溶性铝的质量, g。

2 结果与讨论

2.1 碱浸工艺对 Al 及 AIN 浸出率的影响

按照试验设计考察碱浸工艺参数对二次铝灰中 Al 及 AIN 浸出率的影响,结果如图 5 所示。

图 5 表明,随着温度升高,Al 及 AIN 浸出率均增大。当温度从 30°C 升高到 80°C 时,Al 浸出率由 31.55% 增大为 74.80%, AIN 浸出率由 10.71% 增大至 40.71%。分析指出,随温度升高,粒子运动速度加快,反应体系液相黏度降低,铝灰颗粒表面的薄膜包裹程度降低,扩散阻力减小,从而浸出率提高 [13-14]。结果指出,NaOH 浓度升高,Al 及 AIN 浸出率增大。NaOH 浓度从 $0.4 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 升到 $1.6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,Al 浸出率由 20.05% 增大至 73.36%;当 NaOH 浓度增至 $2.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,AIN 浸出率由 12.59% 增大至 52.09%。这是因为反应物的 OH^- 浓度增大,有利于促进反应向生成 $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ 的方向进行,从而使得 Al 及 AIN 浸出率增加。NaOH 浓度由 $2.0 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 增加至 $2.4 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,Al 及 AIN 浸出率增幅较小(不超过 5%),说明生成 $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ 的反应趋于平衡。结果表明,Al 及 AIN 浸出率随搅拌速率的增大而增加。当搅拌速率从 50 r/min 升高到 300 r/min 时,Al 浸出率由 37.19% 增大至 59.89%, AIN 浸出率由 8.97% 增大至 36.19%。结果表明,液固比越大,Al 及 AIN 浸出率越高。当液固比从 4:1 升到 12:1 时,Al 浸出率由 23.31% 增大至 82.64%, AIN 浸出率由 13.79% 增大至 29.29%。这是因为液固比增大时,可以减小溶液黏度和溶剂扩散阻力,使得固体颗粒在碱溶液中更分散,反应物混合更均匀,从而增加 Al 和 AIN 浸出率 [15]。浸出反应结束,浸出液保留待测含量,浸出渣烘干备用。

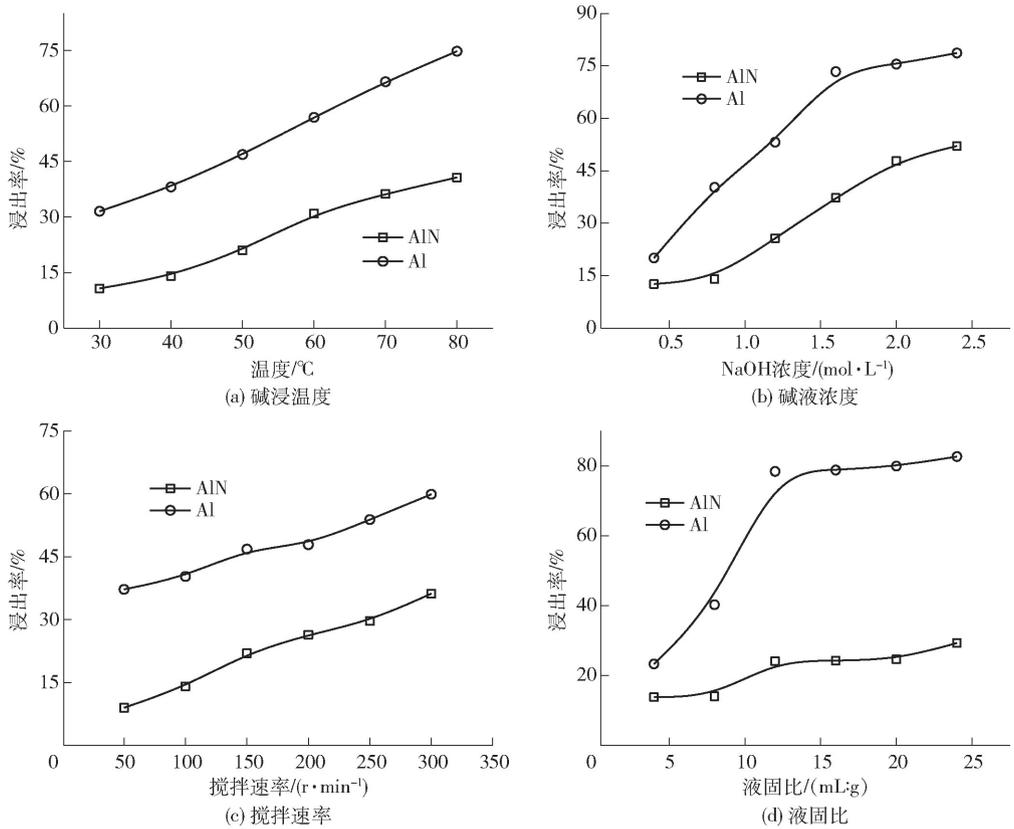


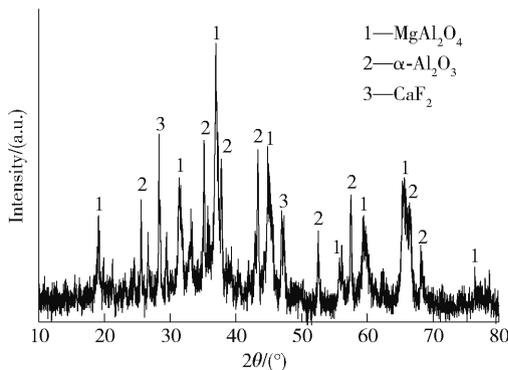
图5 碱浸工艺参数对 Al 及 AlN 浸出率的影响

Fig.5 Effect of alkaline leaching process on the leaching rate of Al and AlN

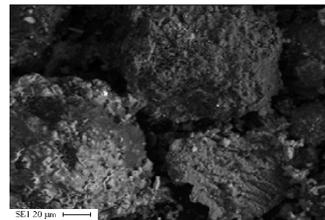
2.2 碱浸渣 XRD 与 SEM 分析

选取碱浸条件为浸出温度 80 °C、NaOH 浓度 1.6 mol·L⁻¹、液固比 12:1、搅拌速度 300 r·min⁻¹、浸出时间 30 min, 浸出渣 SEM/XRD 分析结果见图 6。

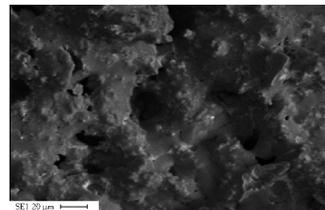
从图中可以看出,残渣的主要物相为刚玉相和尖晶石相。残渣 XRD 谱图呈现面包状,这是由于晶格存在缺陷,导致有序度下降,粒子结构趋于无定型;另外,试样中含少量 Ca、Si 等杂质氧化物,这些杂质在



(a) 浸出渣XRD谱图



(b) 浸前



(c) 浸后

图6 浸出前后二次铝灰 XRD/SEM

Fig.6 XRD/SEM images of the dross before and after reacted with NaOH

高温烧结作用下可起到熔剂作用,降低烧结温度,为制备镁铝尖晶石提供可能^[16]。碱浸前铝灰表面粗糙,形貌凹凸不平,主要表现为不规则多孔结构;碱浸后,二次铝灰表面光滑呈现胶凝状况。

2.3 碱浸渣制备镁铝尖晶石的 SEM/XRD 分析

1 200 ~ 1 500 °C 温度下烧结 3 h 制备的镁铝尖晶石 SEM 谱图如图 7 所示。

从图 7 可以看出,1 200 °C 烧结 3 h 的试样,正八面体 $MgAl_2O_4$ (MA) 结构明显,晶粒之间有较为明显

的微小空隙;试样经 1 300 °C 烧结 3 h 后, $MgAl_2O_4$ 正八面体结构明显可见,结构致密性进一步加强,这是因为高温增加了 MA 材料结构中正负离子扩散速度,利于结晶过程强化;烧结温度过高(1 500 °C),液相转变为玻璃相,导致烧结后 MA 材料结晶度降低。图 6 显示,5 个温度都出现 $MgAl_2O_4$ 晶相,且随烧结温度的升高,MA 晶型愈发完整,结晶度更好,峰形变得高耸尖锐。综合不同烧结温度下材料微观形貌,1 300 °C 烧结 3 h 较优。

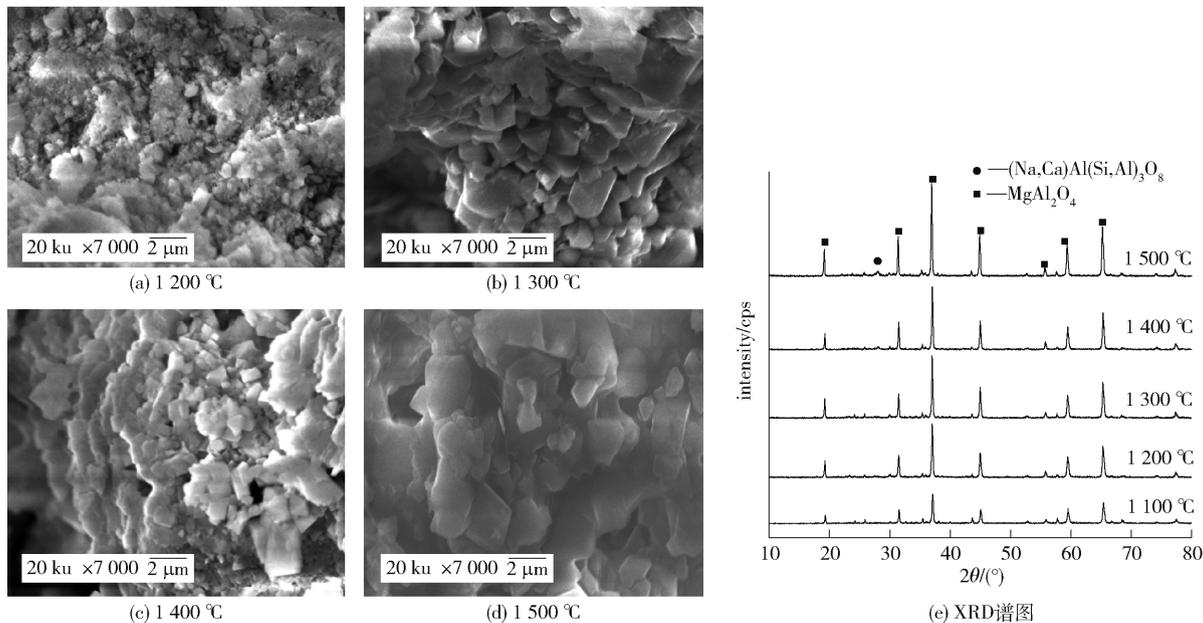


图 7 不同温度镁铝尖晶石 SEM/XRD 谱图

Fig. 7 SEM/XRD patterns of spinel with different temperature

1 200 °C 下,试样中主要物相为 MA,未发现明显刚玉相和 MgO 等其他杂质相,说明残渣与 MgO 已经参与反应且反应较为彻底。1 300 °C 和 1 400 °C 下,烧结产物 MA 结晶相差不大,但相比 1 200 °C 烧结试样,晶型更完美,致密度更高;这是因为温度升高,提供扩散所需的能量加大,使得扩散阻力减小,扩散速度加快,一方面有利于 $MgAl_2O_4$ 生长发育,另一方面有利于残渣中 SiO_2 等杂质成分形成 Al_2O_3 - MgO - SiO_2 等低熔点相,低熔点相在高温条件下会形成液相进入 $MgAl_2O_4$ 晶格中,液相的形成利于尖晶石相结构致密性的提升。因此,高温有利于烧结^[19-20]。在 1 500 °C 下保温 3 h 后所得的烧成样品中有少量钙长石相出现,表明铝灰中存在的 Ca、Si、Na 等杂质元素在较高温度下会向长石晶相转化。

综上,1 300 °C 烧结温度下,制备的镁铝尖晶石

晶相比较好,晶粒尺寸范围为(37.6 ~ 53.1) nm。与常规采用工业氧化铝为原料、1 700 °C 以上合成镁铝尖晶石工艺相比,本方法在原料选取及能耗方面均表现出一定优势^[21]。

2.4 镁铝尖晶石材料显气孔率和抗压强度

不同烧结温度下所制备的镁铝尖晶石材料试样的显气孔率和抗压强度如图 8 所示。由图 8 可以发现,随着烧结温度提高,试样显气孔率呈现先上升后下降的趋势。在 1 300 °C 时,气孔率上升至 37.14%,1 400 °C 时下降至 31.56%,1 500 °C 继续下降至 31.02%;随着烧结温度提高,试样抗压强度呈现先下降后上升的趋势,在 1 300 °C 时,抗压强度下降至 43.5 MPa,1 400 °C 时上升至 50.22 MPa,1 500 °C 时上升至 69.8 MPa,变化趋势与显气孔率的变化相反。这是因为烧结温度较低时,烧结不完

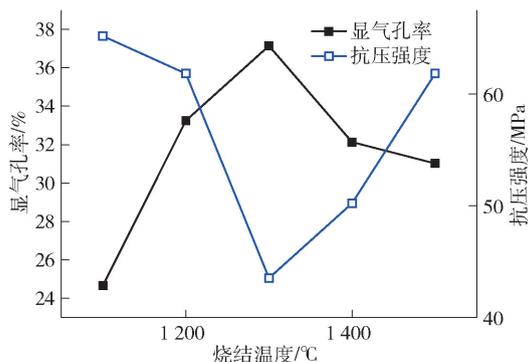


图8 不同烧结温度镁铝尖晶石材料显气孔率和抗压强度

Fig.8 Apparent porosity and compressive strength of MA spinel materials at different sintering temperatures

全,反应不彻底,因此气孔率较低,抗压强度较高;随烧结温度的提高,镁铝尖晶石生成的过程中伴随着体积膨胀,使得试样显气孔率增加^[22],同时抗压强度降低;1 300 ℃之后,主晶相反应完成,体系内 Na、Si 等杂质随烧结温度的升高产生液相,使得体系黏度降低,流动性增大,更多液相渗入气孔使得烧结体更加致密,因而,烧结体的显气孔率降低,抗压强度增加。综合能耗因素,较优烧结温度为 1 400 ℃,材料抗压强度高于国家行业标准《镁砖和镁铝砖》(GB/T2275—2007)(40 MPa)。

3 结论

针对二次铝灰资源化利用问题,本研究以二次铝灰为主要原料,采用碱浸预处理联合火法烧结的方法制备镁铝尖晶石材料,研究过程考察了碱浸工艺参数对 Al 及 AlN 浸出率的影响,分析了二次铝灰碱浸机理,并考察了烧结工艺参数对所制备镁铝尖晶石材料性能的影响,得到以下主要结论。

1) 碱浸试验表明,增大 NaOH 浓度、提高浸出温度、增大液固比、加快搅拌速率均有利于提高 Al 及 AlN 浸出率;铝灰碱性浸出适宜条件为温度 80 ℃、NaOH 浓度 $1.6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、搅拌速率 $300 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 、液固比 12:1,该条件下,Al 浸出率达到 80.35%,AlN 浸出率达到 53.21%;二次铝灰中 Al 及 AlN 浸出反应本质上是水解反应,碱性体系促进其水解反应进行。

2) 以碱浸残渣为原料,按照 MA 材料配比 MgO,在烧结温度 1 300 ~ 1 400 ℃、烧结时间 3 h 的

条件下可制备晶型完整、结晶度高的尖晶石材料;1 400 ℃条件下制备的 MA 材料显气孔率为 31.56%,抗压强度为 50.22 MPa,高于国家行业标准《镁砖和镁铝砖》(GB/T2275—2007)(40 MPa)。

[参考文献]

- [1] 杜永立. 中国再生铝产业状况及发展趋势[J]. 有色金属再生与利用, 2004(1): 35-37.
DU Yongli. Status and development trend recycled aluminum industry in China [J]. Non-ferrous Metal Regeneration and Utilization, 2004(1): 35-37.
- [2] 余剑,闫飞飞,潘锋,等. 铝工业危废铝灰的高效处置新技术[J]. 绿色矿冶,2024,40(5):25-33.
YU Jian, YAN Feifei, PAN Feng, et al. New Technology of efficient disposal of aluminum ash in aluminum industry [J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40(5): 25-33.
- [3] ZHU X Y, JIN Q, YE Z. Life cycle environmental and economic assessment of alumina recovery from secondary aluminum dross in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 277: 123291.
- [4] 李帅,刘万超,刘中凯,等. 铝灰处理技术现状及展望[J]. 有色金属(冶炼部分), 2018(10): 25-30.
LI Shuai, LIU Wanchao, LIU Zhongkai, et al. Technical state and prospect on processing of Aluminum dross [J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2018(10): 25-30.
- [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] 李玲玲,宋明,靳强. 铝灰回收利用的研究进展[J]. 无机盐工业, 2018, 50(8): 6-11.
LI Lingling, SONG Ming, JIN Qiang. Research progress of recovery and utilization of aluminum dross [J]. Inorganic Chemicals Industry, 2018, 50(8): 6-11.
- [7] 黄形中,李占兵,李少鹏,等. 二次铝灰水解渣分质利用研究[J]. 轻金属, 2022(1): 40-46.
HUANG Xingzhong, LI Zhanbing, LI Shaopeng, et al. Study on the separate utilization of hydrolyzed residue from secondary aluminum dross [J]. Light Metals, 2022(1): 40-46.
- [8] 杨航,申士富,刘海营,等. 二次铝灰工艺矿物学特性研究[J]. 有色金属工程, 2019, 9(10): 117-125.
YANG Hang, SHEN Shifu, LIU Haiying, et al. Study on mineralogical characteristics of secondary aluminium ash [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2019, 9(10): 117-125.
- [9] 颜正国,于景坤. 添加剂对镁铝尖晶石烧结性能的影响[J]. 材料科学, 2019(12): 1048-1054.
YAN Zhengguo, YU Jingkun. Effect of additives on the sinterability of magnesium aluminate spinel [J]. Material Sciences, 2019(12): 1048-1054.
- [10] 钟超. 二次铝灰渣检验及应用前景探讨[C]//2021年中国铝

- 加工产业年度大会暨中国(湖州)铝加工绿色智造高峰论坛论文集(下册), 2021: 76-84.
- ZHONG Chao. Inspection and application prospect of secondary aluminum ash and slag [C]//2021 China Aluminum Processing Industry Annual Conference and China (Huzhou) Aluminum Processing Green Intelligent Manufacturing Summit Forum Collection (Volume 2), 2021:76-84.
- [11] 张勇, 何小娟, 喻成龙, 等. 二次铝灰烧结制备镁铝尖晶石材料[J]. 有色金属科学与工程, 2021(6): 33-40.
- ZHANG Yong, HE Xiaojuan, YU Chenglong, et al. Sintering fabrication of magnesia-alumina spinel by secondary aluminum [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2021(6): 33-40.
- [12] HU S Y, WANG D Y, HOU D, et al. Research on the preparation parameters and basic properties of premelted calcium aluminate slag prepared from secondary aluminum dross [J]. Materials, 2021, 14(19): 5855-5855.
- [13] 张勇, 郭朝晖, 王硕, 等. 响应曲面法对铝灰中 AlN 的水解行为[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(4): 919-928.
- ZHANG Yong, GUO Zhaohui, WANG Shuo, et al. Hydrolysis behavior of AlN in aluminum dross with response surface methodology [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26(4): 919-928.
- [14] 李登奇, 秦庆伟, 刘文科, 等. 从再生铝二次铝灰中浸出铝的动力学试验研究[J]. 湿法冶金, 2020, 39(5): 371-375.
- LI Dengqi, QIN Qingwei, LIU Wenke, et al. Leaching kinetics of aluminum from secondary aluminum dross [J]. Hydrometallurgy of China, 2020, 39(5): 371-375.
- [15] DAVID E, KOPAC J. Hydrolysis of aluminum dross material to achieve zero hazardous waste [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 209-210: 501-509.
- [16] 黄形中, 李占兵, 李少鹏, 等. 二次铝灰水解渣分质利用研究[J]. 轻金属, 2022(1): 40-46.
- HUANG Xingzhong, LI Zhanbing, LI Shaopeng, et al. Study on the separate utilization of hydrolyzed residue from secondary aluminum dross [J]. Light Metals, 2022(1): 40-46.
- [17] ZHANG Y, GUO Z H, HAN Z Y, et al. Effects of AlN hydrolysis on fractal geometry characteristics of residue from secondary aluminum dross using response surface methodology [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(12): 2574-2581.
- [18] XUE S G, KONG X F, ZHU F, et al. Proposal for management and alkalinity transformation of bauxite residue in China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016, 23(13): 12822-12834.
- [19] SHI M, LI Y, SHI J J. Fabrication of periclase and magnesium aluminate spinel refractory from washed residue of secondary aluminum dross [J]. Ceramics International, 2022, 48(6): 7668-7676.
- [20] 张勇, 郭朝晖, 王硕, 等. 二次铝灰烧结制备钙铝黄长石/镁铝尖晶石复相材料[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(2): 334-349.
- ZHANG Yong, GUO Zhaohui, WANG Shuo, et al. Calcium-aluminum yellow feldspase/magnesium-aluminum spinel compound material was prepared by secondary aluminum ash sintering [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(2): 334-349.
- [21] GUO A R, LIU J C, XU R, et al. Preparation of mullite from desilication-flyash [J]. Fuel, 2010, 89(12): 3630-3636.
- [22] YU Z Y, ZHAO N Q, LIU E Z, et al. Fabrication of aluminum matrix composites with enhanced mechanical properties reinforced by in situ generated MgAl₂O₄ whiskers [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2012, 43(4): 631-634.
- [23] BRAULIO M A L, RIGAUD M, BUHR A, et al. Spinel-containing alumina-based refractory castables [J]. Ceramics International, 2011, 37(6): 1705-1724.

Alkaline dissolution of aluminum and aluminum nitride in secondary aluminum ash and preparation of magnesium aluminum spinel material by sintering alkaline leaching residue

WANG Rixin¹, ZENG Bangxing¹, ZENG Siqi¹, DENG Yakun¹, WEI Jiang¹, WANG Guoqing², ZHANG Yong¹

(1. Institute of Applied Physics, Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330006, China;

2. Jiangxi Huagan Henghao Environmental Protection Technology Company, Fuzhou 331800, China)

Abstract: Secondary aluminum ash contains a large amount of Al, Al₂O₃, as well as a certain amount of MgAl₂O₄ and AlN. Direct storage would cause environmental pollution and waste of resources. However, Al, AlN and some impurities in aluminum ash can be dissolved under alkaline leaching conditions, and the remaining residue composition is relatively close to that of magnesium-aluminum spinel material (MA). In this study, secondary aluminum ash was used as the main raw material, and the method of alkali leaching pretreatment combined with pyrometallurgical sintering was adopted. MgO was used as the modifier to prepare MA materials. The research process investigated the influence of alkali leaching process parameters on the leaching rates of Al and AlN,

analyzed the alkali leaching mechanism of secondary aluminum ash, and investigated the effect of sintering process parameters on the properties of the prepared magnesium-aluminum spinel materials. The following main conclusions are obtained. The alkali leaching test shows that increasing the concentration of NaOH, raising the leaching temperature, increasing the liquid-solid ratio, and accelerating the stirring rate are all conducive to improving the leaching rates of Al and AlN. Under the optimized alkali leaching conditions of a temperature of 80 °C, a NaOH concentration of 1.6 mol·L⁻¹, a stirring rate of 300 r·min⁻¹, and a liquid-solid ratio of 12:1, the leaching rate of Al reached 80.35% and that of AlN reached 53.21%. The leaching reaction of Al and AlN in secondary aluminum dross is essentially a hydrolysis reaction, and the alkaline system promotes the progress of this hydrolysis reaction. Spinel materials with complete crystal form and high crystallinity can be prepared by using the alkali leaching residue as raw material and the MA material ratio of MgO under the sintering conditions of 1 300 – 1 400 °C and sintering time of 3 hours. The apparent porosity of the MA material prepared at 1 400 °C is 31.56%, and its compressive strength is 50.22 MPa, which is higher than the national industry standard “Magnesia Bricks and Magnesia-alumina Bricks” (GB/ T2275—2007) (40 MPa).

Key words: secondary aluminum ash; alkaline leaching; sintering; MgO formulation; Magnesium-aluminum spinel (MgAl₂O₄, MA)

中国恩菲主编的阴极铜产品碳足迹核算标准发布

近日,中国恩菲信息技术有限公司主编的行业标准《温室气体 产品碳足迹量化方法与要求 阴极铜》YS/T 1807—2025、TCNIA 0258—2024 由工业和信息化部批准发布,将于 2026 年 2 月 1 日起正式实施,标志着我国在有色金属行业碳足迹管理领域迈出了重要一步。

该标准将为阴极铜产品碳足迹量化提供指引、为企业节能减排提供决策依据,有助于铜企准确评估产品碳排放情况,可有效应对国际绿色贸易壁垒,提高产品低碳竞争力。

此外,中国恩菲信息技术有限公司还参编了同批发布的铅锭产品碳足迹核算标准《温室气体 产品碳足迹量化方法与要求 铅锭》YS/T 1805—2025、TCNIA 0259—2024,锌锭产品碳足迹核算标准《温室气体 产品碳足迹量化方法与要求 锌锭》YS/T 1806—2025、TCNIA 0260—2024,为有色金属行业碳足迹标准体系的构建提供了有力支撑。

(资料来源:中国恩菲)