

铝灰资源化(专题)

引文格式:曾邦兴,曾思琪,邓雅坤,等. 铝灰渣焙烧矿相重构-磁选除杂试验研究[J]. 中国有色冶金, 2026, 55(2): 1-8.

ZENG Bangxing, ZENG Siqi, DENG Yakun, et al. Mineral phase reconstruction and magnetic separation impurity removal of aluminium dross sintering process[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2026, 55(2): 1-8.

铝灰渣焙烧矿相重构-磁选除杂试验研究

曾邦兴¹, 曾思琪¹, 邓雅坤¹, 练以诚², 王日昕¹, 张 勇¹

(1. 江西省科学院 材料与智能制造研究所, 江西 南昌 330006;

2. 中铝环保节能集团有限公司, 河北 雄安新区 071000)

[摘 要] 铝灰渣属于铝工业产生的危险废弃物,其中含有大量的Al,而Ca、Si、Mg等杂质元素限制了其高值化利用。依据Fe、Ca、Si、Mg等元素可以生成辉石类磁性物质进而可以磁选去除的机理,本文采用焙烧-磁选工艺对铝灰渣进行除杂研究。采用热力学软件进行分析,得到生成辉石类磁性物质的合适元素配比,进而根据配比配制铝灰渣;然后考察温度对配制铝灰渣焙烧产物的影响,并通过热重-差热分析、表征分析探讨物相重构特征;最后进行磁性分析验证辉石类磁性物质的生成。研究结果:含铁辉石类磁性物质主要生成的温度区间集中在1 100~1 300℃范围内,在1 250℃和1 350℃的焙烧温度条件下,配制铝灰渣焙烧产物分别为Ca(Fe,Mg)Si₂O₆和Ca(Mg,Fe,Al)(Si,Al)₂O₆;对生成的辉石类物质进行磁性分析,结果显示其具备软磁性材料特征,在1 250℃和1 350℃温度下,剩余磁化强度分别为0.12 T和0.07 T,可满足磁选分离的工艺要求。采用铝灰渣进行焙烧验证,试验结果与配制铝灰渣焙烧结果吻合,即铝灰渣中的Ca、Si、Mg杂质能够生成磁性物质辉石类产物,并通过磁选工艺将其与焙烧试样分离;1 250℃和1 350℃磁选后铝灰渣中SiO₂、CaO和Fe₂O₃含量减少(1 250℃下磁性物质比例占比6.5%,1 350℃下占比5.3%),磁选后铝灰渣可以作为高铝料应用在高端陶瓷领域。本研究结果表明,铝灰渣焙烧过程能够生成具有磁性的物质,通过磁选技术可进一步实现杂质去除和品质提升,这为铝灰渣的高值化利用提供了新思路。

[关键词] 铝灰渣; 配制铝灰渣; 焙烧; 矿相重构; 辉石类物质; 磁性物质; 磁选除杂

[中图分类号] TF821; X785 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2026)02-0001-08

DOI: 10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2026.02.001

0 引言

铝灰渣是电解铝及铝材加工等过程中产生的

危险废弃物,其主要成分包括金属铝、氧化铝、氮化铝、铝镁尖晶石、氟化物、氮化物以及盐类(如氯化钾、氯化钠)等多种物质^[1]。若铝灰渣未能妥善处置,不仅会导致铝资源的极大浪费,还可能引发土壤和水质等环境的严重污染^[2,3]。因此,开发无害化处理技术,寻求更广泛的资源化和高值化利用途径,对铝行业的可持续发展及环境保护均具有重要意义。

目前,铝灰渣的资源化利用方面的研究主要从以下几方面展开。

1)提取有价值组分。以铝灰渣为原料,通过盐酸酸浸-碱性沉淀法制备Al(OH)₃,再经煅烧制备纳米

[收稿日期] 2025-10-20 [修订日期] 2025-12-04

[录用日期] 2025-12-07 [出版日期] 2026-04-01

[第一作者] 曾邦兴(1998—),男,江西吉安人,硕士,助理研究员,主要从事无机非金属材料、固废资源化领域研究。

[通信作者] 张勇(1989—),男,江西南昌人,博士,助理研究员,主要从事固体废物资源化利用研究。

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

Al_2O_3 粉体^[4], 煅烧产物中氧化铝含量可达 71% 以上。此外, 铝灰渣还可作为还原剂, 与钢渣混合发生还原反应, 回收钢渣中的低磷生铁^[5]; 铝灰渣与硫酸铵焙烧反应制备硫酸铝, 再通过水浸方式能实现铝的浸出^[6]; 铝灰渣经水解-酸浸-聚合可制备氯化铝高分子絮凝剂^[7]。

2) 协同其他固废高值化利用。将铝灰渣与赤泥按一定比例混合, 调控反应时间和烧结温度, 投入回转窑中进行烧结可制备多孔陶瓷复合材料。该材料目前应用于生物膜反应器载体陶瓷, 用于工业废水生物净化领域^[8]。在水泥烧结制备领域, 铝灰渣可替代铝矾土制备硅酸盐水泥^[9], 铝灰渣占总烧结物料质量的 5%, 所制备水泥料养护 3 d 抗压强度达 5.3 MPa, 养护 8 d 抗压强度达 70.1 MPa。此外, 在铝灰渣中添加 MgO 进行烧结可制备方长石和铝酸镁尖晶石耐火材料^[10]。

3) 铝灰渣中有害元素的脱除。有学者通过添加无机盐脱除铝灰渣中 AlN^[11], 在固体 Na_2CO_3 的添加比 1.1:1、1 200℃ 烧结 4 h 的条件下, F 和 Cl 脱除比例分别达到 94.3% 和 98.8%; 有学者采用氧化焙烧脱除铝灰渣中 AlN, 在焙烧温度 1 100℃、通氧量 60 mL/min、焙烧时间 2 h 的条件下, AlN 完全转化为氧化铝, 同时 F、Cl 的脱除率分别达到 84% 和 99%, 焙烧后的铝灰渣符合国家危废处理要求, 可用于生产耐火材料^[12]。

然而, 提取有价值组分现阶段存在生产工艺技术路线长、生产场地占地面积大、投资能耗及水电成本较高等问题; 协同固废处置当下在产品目标导向、产品反应适应场景以及产品性能可控调节等方面存在问题。

大量研究表明, 杂质元素的脱除对铝灰渣后期湿法或火法利用及提高产品性能具有促进作用。铝灰渣中的 Al_2O_3 主要用于耐火材料和建筑材料, 而铝灰渣中的 Ca、Si、Fe 等元素在高温下与 Al_2O_3 反应形成低熔点化合物, 影响材料性能^[13-15]。目前, 针对铝灰渣中 Ca、Si、Mg 等元素的脱除研究较少, 若铝灰渣中的 Fe 能与 Ca、Si、Mg 等元素结合生成含铁类化合物, 则可通过磁选去除。

本研究采用热力学软件分析在铝灰渣相当条件下 Fe、Ca、Si、Mg 等元素生成辉石类磁性物质的元素配比及条件, 并依据配比配置试样模拟铝灰渣进行实验研究, 明确了磁性化合物的形成过程, 并对

焙烧粉末的磁学特性进行表征, 最后采用铝灰渣样品进行试验验证。该研究结果可为铝灰渣采用焙烧-磁选工艺除杂后制备高品质高铝料提供了理论依据和技术支撑。

1 实验介绍

1.1 实验原料

1.1.1 铝灰渣原料

铝灰渣样品取自某再生铝企业的熔炼工艺过程中产生。将铝灰渣置于刚玉研钵中磨细, 并通过 100 目 (165 μm) 筛后保存备用。铝灰渣化学分析结果见表 1, 主要成分为 Al_2O_3 , 质量占比 74.54%; 此外, 还含有 SiO_2 、MgO、CaO、 Fe_2O_3 等成分, 分别占其质量的 6.27%、3.71%、3.37% 和 2.66%。杂质的存在不利于铝灰渣焙烧制备高品质高铝料, 降低高铝料品位。

表 1 铝灰渣化学成分(质量分数)

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

组分	Al_2O_3	SiO_2	MgO	CaO	Fe_2O_3	Cl	F	其他
含量	74.54	6.27	3.71	3.37	2.66	1.55	1.25	6.7

1.1.2 配制铝灰渣

采用 FactSage7.1 软件进行热力学计算, 计算的气压选择一个标准大气压, 起始温度设置为 500℃, 终点温度为 1 500℃, 设计步长为 100℃。模拟计算结果确定了 Fe 与 Ca、Si 等元素结合形成复杂化合物 ($\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$) 的温度区域及其具体化学组成。当焙烧温度低于 1 100℃ 时, 生成的 $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$ 且含量随温度升高变化不大; 而在 1 100~1 200℃ 的温度区间内, $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$ 物相发生转变其含量明显下降。参考磁性产物化学组成, 结合铝灰渣的主要成分(表 1), 确定物料体系如表 2 所示, 具体参数为 $W_{\text{CaO}\%}=4$, $W_{\text{MgO}\%}=2\%$, $W_{\text{Fe}\%}=5$, $W_{\text{O}_2\%}=1$ (弱氧化气氛), Al_2O_3 与 SiO_2 体系中总占比为 88%。通过计算分析各相区的平衡物相, 筛选出 Fe 与 Ca、Si 等元素结合形成复杂化合物的相区, 根据该相区占比, 确定 Al_2O_3 含量范围, 并取该相区中 Al_2O_3 含量作为实验组分点, 从而得出 SiO_2 在体系中含量为 88% 减去 Al_2O_3 含量。由此, 焙烧试样的组分得以确定。

实验所用试剂包括氧化钙(CaO, CAS NO. 1305-

表 2 焙烧试样化学成分(质量分数)

Table 2 Chemical composition of roasted samples
(mass fraction) %

组分	Al ₂ O ₃ +SiO ₂	CaO	MgO	Fe	O ₂
含量	88	4	2	5	1

78-8, Reagent Grade)、氧化镁(MgO, CAS NO. 1309-48-4)、氧化铝(Al₂O₃, CAS NO. 1344-28-1, Reagent Grade)、铁粉(Fe, CAS NO. 7439-89-6, Reagent Grade)和二氧化硅(SiO₂, CASN. 7631-86-9, Analytical Grade)。

1.2 实验方法

计算焙烧试样成分比例依次配制物料,每组试样配制质量为 100 g,分别在混料机上混匀 2 h,加入适量无水乙醇作黏结剂,进入液压成型机压制成圆柱状(成型条件:成型压力 20 MPa,保压时间 2 min),圆柱生料脱模后置于马弗炉(RJF-15-10)中烧结。根据前期试验探索,烧结温度设置为 1 350℃、1 250℃、1 000℃和 900℃,升温速率 5℃/min,保温时间 4 h,每组试样均采用随炉自然冷却的方式,冷却至室温后取出焙烧粉体,研磨至 200 目(74 μm)以下,装袋待检测与分析。

1.3 测试与分析

采用 X 射线衍射仪(XRD, Rigaku, Mini Flex 600, Japan)对焙烧样品的物相成分进行检测分析;利用扫描电子显微镜(SEM, Tescan Mira4 FESEM, Czech)观察焙烧试样的微观形貌,并通过能谱分析仪(EDS, Oxford X-Plore30, Britain)进行点扫描与面扫描,分别确定合成物相的元素组成及分布情况;使用同步热分析仪(TG-DSC, NETZSCH, STA 449F3 Jupiter, Germany)分析试样在升温及降温过程中的质量变化和吸放热情况;借助振动样品磁强计(VSM, Lake Shore 8604, America)对焙烧粉末进行磁性分析,获取磁滞回线。

2 结果与讨论

2.1 配制铝灰渣焙烧体系热力学分析

为了阐明铝灰渣焙烧过程中的脱硅脱钙反应机理,采用 FactSage7.1 软件对配制铝灰渣中 Fe-SiO₂-CaO-O₂ 四元体系在标准状态下可能发生的反应及对应的标准状态吉布斯自由能进行分析,结果见图 1。图 1 显示,标准状态下式(1)-(10)在低温状

态下, Ca₃Fe₂Si₃O₁₂(反应(1)产物)倾向于优先生成,而 CaSiO₃(反应(10))的优先程度相对较低。尽管 CaFe₂O₄ 和 Ca₂Fe₂O₅ 钙铁氧体(反应(3)和(2))在标准状态下比其他钙硅酸盐和 Fe₂SiO₄(反应(4))更易形成,但在铝灰渣烧结过程中并不常见,这是因为铝灰渣中存在较高的 SiO₂。与此同时,根据反应(5)-(10)标准状态吉布斯自由能与温度的关系,表明 Fe、O₂ 存在的情况下,配制铝灰渣体系理论上更容易生成 Ca-Fe-Si-O 类辉石化合物(反应(5)和(6))。

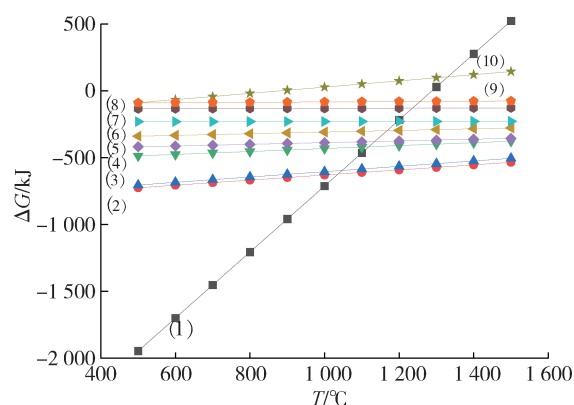
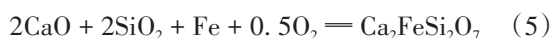
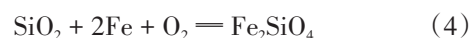
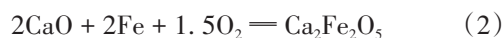
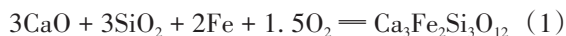


图 1 Fe-SiO₂-CaO-O₂ 四元体系的标准状态吉布斯自由能变化

Fig. 1 Standard Gibbs free energy change of Fe-SiO₂-CaO-O₂ quaternary system



计算不同焙烧温度下制备的 CaFeSi₂O₆ 物相含量,结果如图 2 所示。当焙烧温度低于 1 100℃时, CaFeSi₂O₆ 的含量随温度升高变化不大;而在 1 100~1 200℃的温度区间内, CaFeSi₂O₆ 物相发生转变致使其含量明显下降;当焙烧温度超过 1 200℃时, CaFeSi₂O₆ 未计算到,这表明 1 100~1 200℃是 CaFeSi₂O₆ 物相转变的关键温度区间。热力学计算

结果显示,在 1 100 ~ 1 300℃ 范围内,反应过程中 $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$ 物相转变,并且随着焙烧温度的升高, $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$ 减少明显。

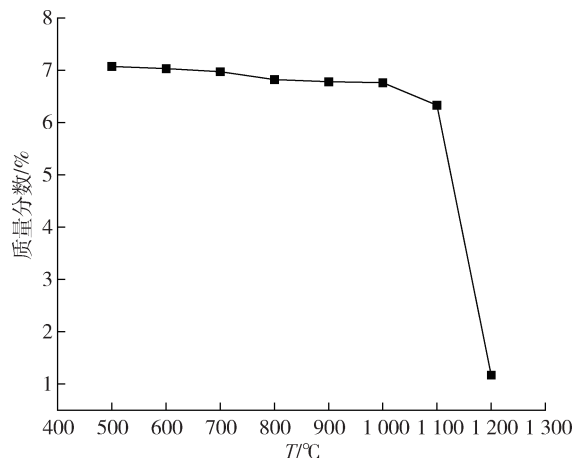


图2 焙烧温度对 $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$ 质量分数的影响

Fig. 2 Mass percentage of Minerals containing ferropseudobrookite with roasting temperature

2.2 配制铝灰渣体系热重与差热分析

对配制铝灰渣焙烧试样进行热重与差热分析,实验条件:升温速率 $10^\circ\text{C}/\text{min}$,空气气氛,刚玉坩埚,降温过程自然冷却,焙烧试样的 TG-DSC 曲线如图 3 所示。

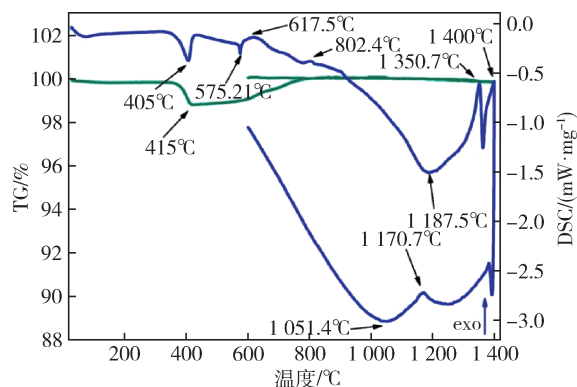


图3 焙烧试样 TG-DSC 曲线

Fig. 3 TG-DSC curves of roasted samples

第一阶段:在 405°C 之前,热重曲线和差热曲线基本与温度轴平行,未出现明显的吸放热峰,表明试样处于稳定的升温过程,无明显物理化学反应发生。

第二阶段:当温度升至 405°C 附近, DSC 曲线呈现典型的吸热峰,同时 TG 曲线下降。这是由于该温

度下刚玉 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 中结晶水发生分解。结晶水以特定化学计量比存在于矿物晶格中,与晶格中的原子通过氢键、配位键、共价键等相互作用。脱除结晶水需克服晶体与结晶水间的相互作用,使水分子脱离,此过程需吸收热量^[16,17]。

第三阶段:在 $405 \sim 802.4^\circ\text{C}$ 范围内, TG 曲线缓慢上升,反应体系质量增加。这是因为体系中 Fe 与空气中 O_2 反应生成了 FeO 及 Fe_2O_3 , 质量增加。在 575.21°C 处出现小的吸热峰,这是试样中 SiO_2 由 α -石英转变为 β -鳞石英的吸热反应。

第四阶段:在 $802.4 \sim 1187.5^\circ\text{C}$ 范围内,试样质量保持不变, TG 曲线基本与温度轴平行, DSC 曲线呈下降趋势,表明体系吸热但无质量变化。热力学计算显示,体系中存在过量 Fe 粉,此温度段主要发生 $\alpha\text{-Fe}(\text{BCC})$ 到 $\gamma\text{-Fe}(\text{FCC})$ 的晶型转变,需吸收能量完成原子重新排列,形成新晶体结构。当温度升至 1187.5°C 时,出现显著吸热峰,随后 DSC 曲线上升,表明吸热反应转为放热反应。 1187.5°C 后出现明显放热双峰,为液相熔融峰。在 1000°C 左右, DSC 曲线斜率增加,表明吸热速率进一步增大,可能是体系中 SiO_2 与 MgO 、FeO 等反应吸热,叠加 Fe 晶型转变吸热所致。

第五阶段:在 $1187.5 \sim 1400^\circ\text{C}$ 范围内, TG 曲线与温度轴平行,无增重过程; $1300 \sim 1400^\circ\text{C}$ 左右出现两个连续放热峰,热力学计算表明,该阶段体系中仅存在液相、 $\gamma\text{-Fe}$ 及过剩 SiO_2 三种相,液相量在此温度范围内迅速增加,这是 SiO_2 、 CaO 、 MgO 、 Al_2O_3 共同进入液相的结果^[16]。这与热力学计算 $1100 \sim 1200^\circ\text{C}$ 液相量迅速增加的结果相符。

第六阶段:热重分析结束,炉温冷却至室温。

2.3 配制铝灰渣焙烧试样物相与形貌分析

$900 \sim 1350^\circ\text{C}$ 焙烧试样进行 XRD 分析,结果如图 4 所示。在 1250°C 和 1350°C 焙烧,试样均检测到 SiO_2 的存在,同时发现辉石类矿物。这是因为 Fe 与 Ca、Si、Mg、Al 等元素形成了一系列连续固溶体,即 $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$ 或 $\text{Ca}(\text{Fe}, \text{Mg})\text{Si}_2\text{O}_6$ 。而对于 900°C 和 1000°C 焙烧的试样进行物相分析,除了 SiO_2 外,还检测到 Fe_2O_3 , 但未发现辉石类物相。

对 1350°C 试样中的亮白色与深灰色区域进行 SEM/EDS 分析,结果见图 5 和表 3。亮白色区域的 C 点扫描分析结果为 $\text{Ca}_{1.005}(\text{Fe}_{0.446}\text{Mg}_{0.863})\text{Si}_{2.109}\text{O}_{5.513}$, 与 XRD 分析中发现的透辉石 $\text{Ca}(\text{Fe}, \text{Mg})\text{Si}_2\text{O}_6$ 物相基

本一致,属于辉石类矿物。这与文献报道相符,Ca元素集中分布在Mg或Fe元素分布的区域。Fe与Mg元素之间由于类质同相替代,占据相同的晶格位置,呈现相同的元素分布。Al则分别与位于硅氧四面体骨干单链外的Mg、Fe元素,或是硅氧四面体内的Si元素发生类质同相替代,表现出与Mg、Fe、Si三种元素相同的元素分布特征^[17]。

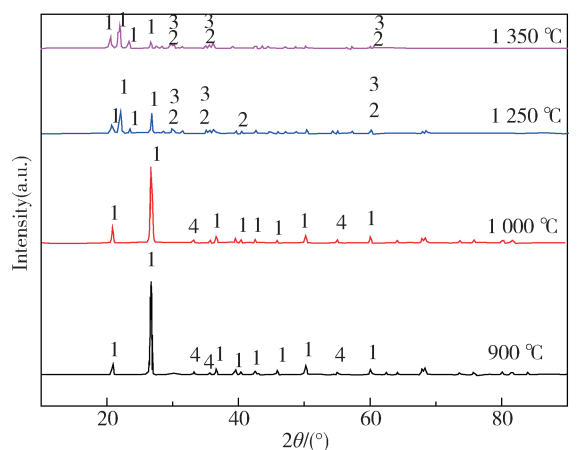

$$1\text{-SiO}_2; 2\text{-Ca(Mg, Fe, Al)(Si, Al)}_2\text{O}_6; 3\text{-Ca(Fe, Mg)Si}_2\text{O}_6; 4\text{-Fe}_2\text{O}_3$$

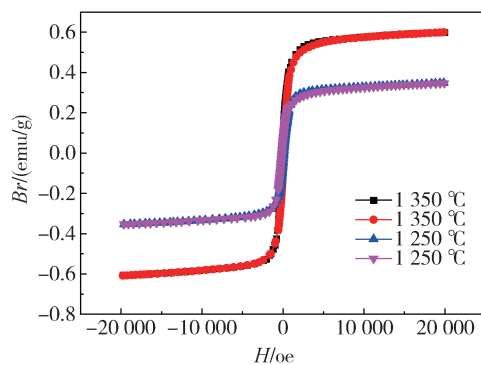
图4 不同焙烧温度下试样XRD图

Fig. 4 XRD pattern of roasted sample at different sintering temperature

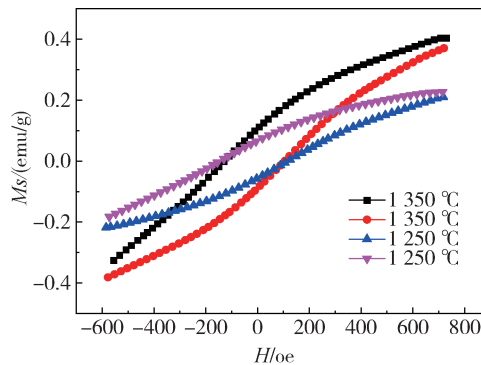
焙烧结束进行磁选操作,磁选后样品中磁性物质比例为7.7%(1 250℃,样品1#)和7.2%(1 350℃,样品2#),对磁选后铝灰渣样品进行成分分析,结果见表4。数据显示,样品中SiO₂、MgO、CaO、Fe₂O₃成分含量减小。

2.4 配制铝灰渣体系焙烧试样的磁性分析

对焙烧试样中合成的辉石类物质进行磁性分析,磁滞回线如图6所示。由试样的磁滞回线可以



(a) 剩余磁化强度



(b)饱和磁化强度

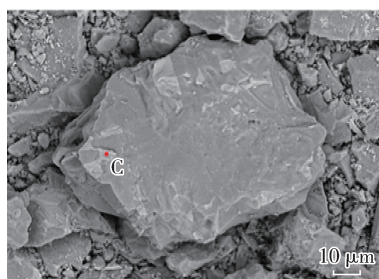


图5 1 350℃试样的SEM

Fig. 5 SEM diagram of sample 1 350°C

表3 点C中EDS含量分析

Table 3 The EDS of point C

元素	O	Mg	Al	Si	Ca	Fe
质量分数/%	37.48	8.92	0.72	25.17	17.12	10.58
原子比/%	55.13	8.63	0.63	21.09	10.05	4.46

表4 焙烧试样化学成分(质量分数)

Table 4 Chemical composition of roasted samples
(mass fraction) %

组分	Al ₂ O ₃ +SiO ₂	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃
样品 1 [#]	82.1	1.93	0.9	2.3
样品 2 [#]	84.3	2.82	1.7	4.2

得出磁学性能的主要参数:矫顽力(H_c)、剩余磁化强度(Br)、饱和磁化强度(Ms)。1 350℃、1 250℃焙烧试样的 H_c 相同,这可能是由于两个样品虽然升温到达最高温度不同,但都在液相线以上,经历了相同的保温时间与冷却方式,依次缓慢经过辉石类物相的热力学平衡区,发生固溶置换、相变等过程,从而提供了基本相同的条件。1 250℃、1 350℃试样的剩余磁化强度(Br)分别为0.12 T和0.07 T。结合XRD分析可知,样品磁性来源于含铁物相(钙铁辉

图6 1 250和1 350℃焙烧试样磁滞回线图

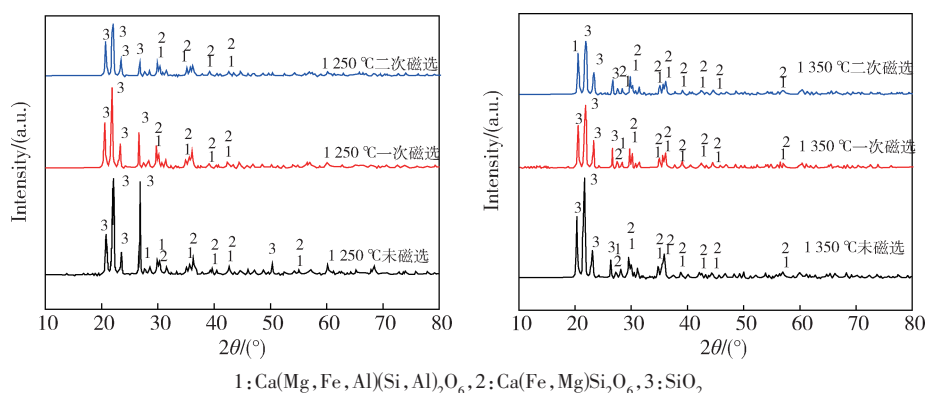
Fig. 6 Plots of hysteresis loops of roasted samples 1 250°C and 1 350°C

石类矿物),样品中已无单质铁以及其他含铁物相。饱和磁化强度(M_s)与该矿物的含量成正比,进一步说明了高温促进钙铁辉石的生成,使得晶体具有良好的结晶度,与钙铁辉石类矿物XRD衍射峰相对高度相一致。1 250、1 350℃焙烧试样磁滞回线虽具有较低的矫顽力、剩余磁化强度,但均表明其符合软磁性材料的磁学特性^[18]。

2.5 铝灰渣体系焙烧验证

取原料铝灰渣分别在1 250℃和1 350℃下进行焙烧,并对焙烧产物进行XRD物相分析及成分分

析,结果见图7、表5。结果表明,在两个焙烧温度下的产物均存在钙铁辉石类物相。经过磁选处理后,磁选后铝灰渣中 SiO_2 、 CaO 和 Fe_2O_3 含量降低,1 250℃磁选后,铝灰渣中 SiO_2 、 CaO 和 Fe_2O_3 含量依次为:4.22%、1.6%和1.50%,1 350℃磁选后,铝灰渣中 SiO_2 、 CaO 和 Fe_2O_3 含量依次为:4.80%、1.82%和1.62%,磁性物质比例占比6.5%(1 250℃)和5.3%(1 350℃),实验结果与之前的配制铝灰渣结果较吻合。磁选后铝灰渣中 SiO_2 、 CaO 和 Fe_2O_3 减少,磁选后铝灰渣可以作为高铝料应用在高端陶瓷领域。



1: $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$, 2: $\text{Ca}(\text{Fe}, \text{Mg})\text{Si}_2\text{O}_6$, 3: SiO_2

图7 不同焙烧温度下试样磁选XRD图

Fig. 7 Magnetic separation XRD pattern of roasted sample at different sintering temperature

表5 1 250和1 350℃焙烧试样化学成分(质量分数)

Table 5 Chemical composition of roasted samples at 1 250℃ and 1 350℃(mass fraction) %

成分	铝灰渣	1 250℃磁选后 铝灰渣	1 350℃磁选后 铝灰渣
Al_2O_3	74.54	81.86	80.39
SiO_2	6.27	4.22	4.80
MgO	3.71	2.18	2.35
CaO	3.37	1.56	1.82
Fe_2O_3	2.66	1.50	1.62
Cl	1.55	0.18	0.08
F	1.25	—	—

3 结论

针对铝灰渣中杂质元素Ca、Si、Mg等含量高,限制其高值化利用的问题,本研究采用焙烧-磁选工艺对铝灰渣进行了除杂研究,在热力学分析基础上,对配比、温度等影响因素进行了优化试验,还对

产物进行了物相表征分析、磁性分析,得到以下主要结论。

1)热力学分析表明,含铁辉石类磁性物质主要生成的温度区间集中在1 100~1 300℃范围内,在1 250℃和1 350℃的焙烧温度条件下,配制铝灰渣焙烧产物为辉石类复杂矿物,分别为 $\text{Ca}(\text{Fe}, \text{Mg})\text{Si}_2\text{O}_6$ 和 $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$ 。

2)对生成的辉石类物质进行磁性分析,结果显示其具备软磁性材料特征,在1 250℃和1 350℃温度下,剩余磁化强度分别为0.12 T和0.07 T,可满足磁选分离的工艺要求。

3)采用铝灰渣进行焙烧验证,试验结果与配制铝灰渣焙烧结果吻合,能够生成磁性物质,可通过磁选工艺将辉石类产物与焙烧试样分离,达到Ca、Si、Mg杂质元素脱除目的。1 250℃和1 350℃磁选后铝灰渣中 SiO_2 、 CaO 和 Fe_2O_3 含量减少(1 250℃下磁性物质比例占比6.5%,1 350℃下占比5.3%),磁选后铝灰渣可以作为高铝料应用在高端陶瓷领域。

[参考文献]

- [1] 张勇, 何小娟, 何运财, 等. 二次铝灰烧制镁铝尖晶石固相反应动力学及材料耐水室性能[J]. 有色金属科学与工程, 2022, 13(6): 123-126.
ZHANG Yong, HE Xiaojuan, HE Yuncui, et al. Solid-state reaction kinetics and water corrosion resistance of magnesia-alumina spinel by sintering of secondary aluminium dross [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2022, 13 (6) : 123-126.
- [2] ZHU Xinghan, YANG Jinzhong, YANG Yufei, et al. Pyrometallurgical process and multipollutant co-conversion for secondary aluminum dross: a review [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022(21): 1196-1211.
- [3] YANG Jinzhong, TIAN Lu, MENG Lingyi, et al. Thermal utilization techniques and strategies for secondary aluminum dross: a review[J]. Journal of Environmental Management, 2024 (351): 939-949.
- [4] MOSTAFA Mahinroosta, ALI Allahverdi. Enhanced alumina recovery from secondary aluminum dross for high purity nanostructured γ -alumina powder production: Kinetic study[J]. Journal of Environmental Management, 2018(212): 278-291.
- [5] XU Lei, Li Xubiao, Liu Yang, et al. Recovery of low phosphorus iron from steel slag using secondary aluminum dross as the reductant [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2023, 11(5): 973-982.
- [6] 朱方方, 雷泽, 高毅颖, 等. 硫酸铵焙烧法回收二次铝灰中的铝[J]. 化工设计通讯, 2017, 43(3): 99-101.
ZHU Fangfang, LEI Ze, GAO Yiyi, et al. Recovery of aluminum from secondary aluminum ash by ammonium sulfate roasting [J]. Chemical Engineering Design Communications, 2017, 43(3):99-101.
- [7] 张勇, 何小娟, 喻成龙, 等. 二次铝灰烧制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, 12(6): 42-49.
- [8] LOU Bingjie, SHEN Hanlin, LIU Bo, et al. In-situ preparation of porous metal-ceramic composite from secondary aluminum dross and red mud for adsorption of organic pollutant[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024(986): 135-144.
- [9] 马文青, 李灿华, 都刚, 等. 二次铝灰部分替代矾土制备铝酸盐水泥[J]. 有色金属科学与工程, 2024, 15(4): 527-534.
MA Wenqing, LI Canhua, DU Gang, et al. Preparation of aluminate cement by using the secondary aluminum ash as a partial substitute for alumina[J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2024, 15(04): 527-534.
- [10] SHI Ming, LI Ying, SHI Junjie. Fabrication of periclase and magnesium aluminate spinel refractory from washed residue of secondary aluminum dross [J]. Ceramics International, 2022, 48(6): 7668-7676.
- [11] XIE Huimin, GUO Zhaohui, XU Rui, et al. Synergistic effect of inorganic salt and AlN removal in the secondary aluminum dross during the roasting process [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023(966): 171-181.
- [12] 李雪倩, 申士富, 王玲, 等. 二次铝灰的焙烧特性和有害元素脱除研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2020(9): 69-74.
LI Xueqian, SHEN Shifu, WANG Lin, et al. Study on roasting characteristics and removal of harmful elements of secondary aluminum ash [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2020(9): 69-74.
- [13] 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.
- [14] 钟文, 卢忠远, 李军, 等. 铝灰替代部分高铝矾土制备铝酸盐水泥熟料的研究[J]. 水泥, 2018(9): 9-13.
ZHONG Wen, LU Zhongyuan, LI Jun, et al. Study on preparation of aluminate cement clinker by replacing part of high bauxite with aluminum ash [J]. Cement, 2018(9): 9-13.
- [15] LONG Yuyang, SONG Yuhe, WANG Xitong, et al. Secondary aluminum dross self-heating enhances hazardous waste vitrification[J]. Waste Management, 2025(193): 453-461.
- [16] 张林, 张涛, 付念新, 等. 钒渣钙化焙烧热分析及物相转变机理分析[J]. 中国有色冶金, 2024, 53(4): 142-148.
ZHANG Lin, ZHANG Tao, FU Nianxin, et al. Thermal analysis of calcified roasting of vanadium slag and analysis of phase transformation mechanism [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2024, 53(4): 142-148.
- [17] 彭志忠. 结构矿物学的新成果(续)[J]. 地质科技情报, 1985 (2): 55-63.
PENG Zhizhong. New achievements in structural mineralogy (continued) [J]. Geological Science and Technology Information, 1985(2):55-63.
- [18] WASNIK P B, REWATKAR K G, SURYAWANSHI S M, et al. Structural and magnetic properties of aluminium substituted Ni-Cu spinel ferrite [J]. Nano-Structures & Nano-Objects, 2024(39): 1325-1335.

Mineral phase reconstruction and magnetic separation impurity removal of aluminium dross sintering process

ZENG Bangxing¹, ZENG Siqi¹, DENG Yakun¹, LIAN Yicheng², WANG Rixin¹, ZHANG Yong¹

(1. Institute of Materials and Intelligent Manufacturing, Jiangxi Academy of Sciences, Nanchang 330006, China;

2. Chinalco Environmental Protection and Energy Conservation Group Co., Ltd, Xiong'an New Area 071000, China)

Abstract: Aluminium slag belongs to hazardous waste generated by the aluminium industry, containing a large amount of Al, while impurity elements such as Ca, Si, and Mg limit its high-value utilisation. Based on the mechanism that Fe, Ca, Si, Mg and other elements can form pyroxene-type magnetic substances which can then be removed by magnetic separation, this study adopts a roasting-magnetic separation process to investigate impurity removal from aluminium slag. Thermodynamic software was used for analysis to obtain the appropriate elemental ratio for forming pyroxene-type magnetic substances, and aluminium slag was then prepared according to this ratio; the effect of temperature on the roasted products of the prepared aluminium slag was studied, and thermogravimetric-differential thermal analysis and characterisation analysis were used to explore the phase reconstruction characteristics; finally, magnetic analysis was conducted to verify the formation of pyroxene-type magnetic substances. the main temperature range for the formation of iron-bearing pyroxene-type magnetic substances is concentrated between 1 100–1 300°C. Under the roasting temperatures of 1 250°C and 1 350°C, the roasted products of the prepared aluminium slag were $\text{Ca}(\text{Fe}, \text{Mg})\text{Si}_2\text{O}_6$ and $\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Al})(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6$, respectively; magnetic analysis of the generated pyroxene substances showed that they have soft magnetic material characteristics, with remanent magnetisation of 0.12 T and 0.07 T at temperatures of 1 250°C and 1 350°C respectively, meeting the requirements for magnetic separation processes. The aluminum ash slag was used for roasting verification, and the test results were consistent with the prepared aluminum ash slag. That is, the Ca, Si, and Mg impurities in the aluminum slag can generate magnetic material pyroxene products, which are separated from the roasted sample by magnetic separation process. After magnetic separation at 1 250°C and 1 350°C, the content of SiO_2 , CaO and Fe_2O_3 in aluminum slag decreased (the proportion of magnetic substances at 1 250°C was 6.5%, and the proportion at 1 350°C was 5.3%). The aluminum ash after magnetic separation can be used as high aluminum material in the field of advanced ceramics. The results show that the roasting process of aluminum slag can generate magnetic substances, and the impurity removal and quality improvement can be further realized, which provides a new idea for the high-value utilization of aluminum slag.

Key words: aluminium dross; prepared aluminium slag; roasting; mineral phase reconstruction; pyroxene material; magnetic material; magnetic separation impurity removal