

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2024.09.020

预处理二次铝灰制备炼钢用铝酸钙

刘中凯^{1,2}, 康泽双^{1,2}, 田野^{1,2}, 陈开斌^{1,2}, 和新忠^{1,2}, 张腾飞^{1,2}

(1. 中铝郑州有色金属研究院有限公司, 郑州 450041;
2. 国家铝冶炼工程技术研究中心, 郑州 450041)

摘要:二次铝灰是铝工业产生的危险废物,同时也是一种富铝资源。以二次铝灰湿法预处理高铝料和石灰石为原料,通过混合、球磨、成型、烧结工艺制备炼钢用铝酸钙。优选了铝酸钙的最佳制备工艺条件为:高铝料与石灰石质量比 0.50、烧结温度 1 350 ℃、成型压力 10 MPa,制备的铝酸钙样品 Al_2O_3 和 CaO 含量符合《炼钢用预熔型铝酸钙》(YB/T 4265—2011)CA-40 牌号成分要求,主要物相为 $12CaO \cdot 7Al_2O_3$,同时具有低硅、低镁、低氧化铁、低磷、低硫、低氟和低碳的性能,熔点为 1 378 ℃,符合炼钢用预熔型铝酸钙产品质量标准要求。

关键词:二次铝灰;高铝料;炼钢用铝酸钙

中图分类号:TF821;X758

文献标志码:A

文章编号:1007-7545(2024)09-0172-07

Preparing of Calcium Aluminate for Steelmaking by Pretreatment of Secondary Aluminum Dross

LIU Zhongkai^{1,2}, KANG Zeshuang^{1,2}, TIAN Ye^{1,2}, CHEN Kaibin^{1,2},
HE Xinzong^{1,2}, ZHANG Tengfei^{1,2}

(1. Zhengzhou Nonferrous Metals Research Institute Co., Ltd., CHALCO, Zhengzhou 450041, China;

2. National Engineer Research Central of Aluminum Metallurgy, Zhengzhou 450041, China)

Abstract: Secondary aluminum dross is a hazardous waste produced by aluminum industry, and it is also an aluminum-rich resource. Calcium aluminate for steelmaking was prepared by mixing, ball milling, forming and sintering with wet pretreated secondary aluminum ash and limestone as raw materials. The optimum preparation process conditions for calcium aluminate include mass ratio of high alumina material to limestone of 0.50, sintering temperature of 1 350 ℃, and forming pressure of 10 MPa. The Al_2O_3 and CaO contents of the prepared calcium aluminate sample meet the composition requirements of the CA-40 grade in “Pre-melted Calcium-aluminate for Steelmaking” (YB/T 4265—2011), and the main phase is $12CaO \cdot 7Al_2O_3$. It has the properties of low silicon, low magnesium, low iron oxide, low phosphorus, low sulfur, low fluorine, and low carbon, and the melting point is 1 378 ℃, which meets the quality standards of pre-melted calcium aluminate products for steelmaking.

Key words: secondary aluminum dross; high alumina material; calcium aluminate for steelmaking

收稿日期:2024-03-04

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFC1908802)

作者简介:刘中凯(1989-),男,硕士研究生,高级工程师

我国是电解铝、铝加工和再生铝的生产大国。铝灰主要产生于原铝生产、铝材加工、废铝再生及铝灰处理过程的熔铝工序,我国铝灰年产生量超过300万t。《国家危险废弃物名录(2021版)》明确将全行业铝灰列为危险固体废弃物(废物代码:321-024-48、321-026-48、321-034-48)^[1-2]。

铝灰分为一次铝灰和二次铝灰,一次铝灰中含有20%以上金属铝,二次铝灰含有反应性和浸出性物质,直接堆存会对生态环境造成严重危害,堆存过程导致周边地下水和土壤pH升高,并引起氟污染,而且其盐分会缓慢积聚在土壤中导致盐碱化,二次铝灰中的AlN、单质铝、 Al_4C_3 等活性组分,遇水会释放大量的氨气,并产生氢气、甲烷等易燃易爆气体,污染大气环境,存在安全隐患^[3-4]。

二次铝灰是铝工业生产产生的危险废弃物,同时也是一种富铝的资源,二次铝灰资源化利用技术包括生产净水剂、铝酸钙、氧化铝、耐火材料、陶瓷、水泥等^[5-8],但是在资源化利用之前,需针对二次铝灰的危害特性采取预处理措施,以达到安全、清洁和高效的资源化利用效果。

二次铝灰采用湿法水解预处理可实现其AlN等活性组分的解离,以消除反应性,同时在湿法水解过程能实现二次铝灰中可溶性氯化盐的浸出,以达到脱氮、脱盐的目的,特别是资源化制备炼钢用铝酸钙产品,氮和氯的脱除,能够减少对钢品质的影响^[9-14]。本文采用二次铝灰湿法预处理的高铝料与石灰石混合、球磨、成型、烧结制备炼钢用铝酸钙产品,研究原料配比、烧结温度、时间等对产品质量的影响,并成功制备出符合炼钢用的铝酸钙产品,为二次铝灰清洁资源化利用提供技术支持。

1 试验部分

1.1 试验原料

二次铝灰由河南某铝加工企业提供,为灰色粉末状。采用MagiX(PANalytical)荧光分析仪分析二次铝灰主要元素组成,结果为(%) : Al 36.40、O 23.33、Mg 4.77、Cl 14.59、F 1.34、Si 0.69、Na 7.32、K 4.56、Ca 0.95、Ti 0.42、Fe 0.54。二次铝灰的XRD谱采用X'Pert PRO型X射线衍射仪测定,结果如图1所示。可以看出,二次铝灰的矿物组成复杂,主要物相为 α -氧化铝、氮化铝、镁铝尖晶石、金属铝、氯化钠、氯化钾和氟化钙。其中,氮化铝是铝精炼时铝液与氮气反应生成的;氟主

要来源于加入的添加剂,包括 CaF_2 等氟化盐;氯主要来源于加入的精炼剂,以氯化钠和氯化钾形式存在。

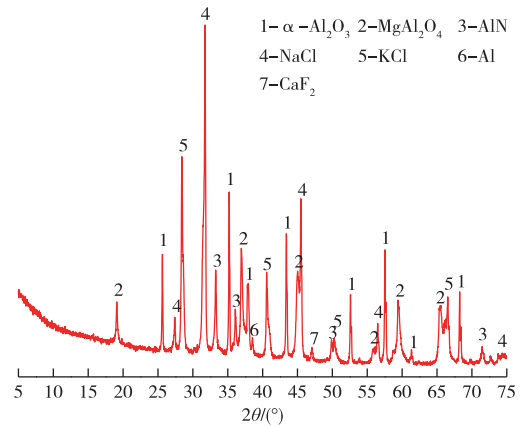


图1 二次铝灰的XRD谱

Fig. 1 XRD pattern of secondary aluminum dross

1.2 试样制备

1) 二次铝灰湿法预处理

采用专利技术(CN202211505167.4二次铝灰的处理装置及方法)对二次铝灰进行湿法预处理,二次铝灰在液固比4、保温90℃下湿法水解浸出反应,实现了氮化铝、金属铝和碳化铝的高效水解反应以及氯化盐和氟化盐的高效浸出,再经过滤、洗涤烘干得到惰性高铝料。高铝料样品的主要元素的组成(%) : Al 37.42、O 38.31、Mg 4.98、Ca 1.21、Fe 0.65、F 0.95、Si 0.71、Ti 0.42、K 0.20、Cl 0.08、Na 0.22。高铝料中的Cl含量0.08%,铝元素含量37.42%,折算氧化铝含量为72.50%。通过物相分析(图2),二次铝灰处理后的高铝料主要成分为 α -氧化铝、氢氧化铝、镁铝尖晶石和氟化钙。

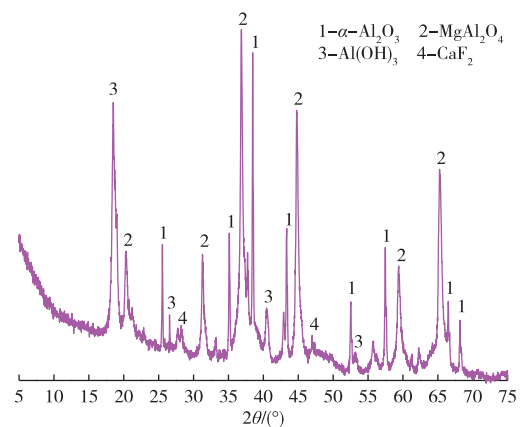


图2 高铝料样品的XRD谱

Fig. 2 XRD pattern of high alumina samples

2) 铝酸钙材料制备

根据铝酸钙矿物中 CaO 与 Al₂O₃ 比例不同, 铝酸钙分为 12CaO · 7Al₂O₃、CaO · Al₂O₃、3CaO · Al₂O₃、2CaO · Al₂O₃ 等矿物。炼钢用铝酸钙是以 12CaO · 7Al₂O₃ 为主要成分的化合物, 由于该渣系 12CaO · 7Al₂O₃ 含量较高、并且能吸收大量的铝脱氧产物, 具有熔点低、脱硫效果好、熔化速度快等优点^[15]。采用二次铝灰湿法预处理后的高铝料制备铝酸钙反应过程中, 碳酸钙分解的 CaO 与高铝料中的 Al₂O₃ 结合生成铝酸钙, 其制备过程要考虑原料 CaO 和 Al₂O₃ 的配入比例以及高温合成温度, 以使烧成的铝酸钙成分及矿相符合钢铁精炼要求。

将二次铝灰预处理后得到的高铝料与石灰石按照配比称量, 然后放入球磨机中混合球磨 40 min, 得到混合生料, 混合生料倒入 $\Phi 50$ mm × 50 mm 的圆柱模具, 通过压片机在一定压力下干压, 制成圆柱形试块, 然后将压制好的试块放入高温马弗炉内进行高温烧结, 烧结好的试块冷却后取出, 再对样品进行破碎处理和性能检测。

1.3 性能检测

考察高铝料与石灰石制备铝酸钙精炼渣过程中原料配比、烧结温度、成型压力条件对产品性能的影响。铝酸钙主要性能测试指标参照《炼钢用预熔型铝酸钙》(YB/T 4265—2011), 重点对其化学成分、物相组成、体积密度和显气孔率进行分析。按照 GB/T 2997—2000 分析试样的体积密度和显气孔率; 样品的化学成分采用 MagiX(PANalytical) 荧光分析仪分析; 样品的 XRD 谱采用 X'Pert PRO 型 X

射线衍射仪分析; 样品的微观形貌采用 JSM-6360LV 扫描电子显微镜观察。

2 结果与讨论

2.1 原料配比对试样性能的影响

高铝料与石灰石按照不同比例进行称量混合, 然后采用球磨磨细粒度—0.098 mm, 采用压片机进行压制成型, 压片机模具直径 50 mm, 成型压力 5 MPa。压制好的样块, 在烧结温度 1 300 °C、烧结时间 1 h 的条件下, 研究原料配比对制备铝酸钙精炼剂的化学成分、显气孔率和体积密度的影响。

对不同高铝料和石灰石质量比 ($m_{\text{高铝料}}/m_{\text{石灰石}}$) 下制备的铝酸钙进行成分分析, 通过表 1 数据可以看出, 不同质量配比条件下烧制出的铝酸钙的成分差异比较大, 随着高铝料掺配比例的增加, 产品中 Al₂O₃ 含量逐步增加, CaO 含量逐步降低。由于原料配比是按照标准《炼钢用预熔型铝酸钙》(YB/T 4265—2011) 中不同牌号 (CA-50、CA-45、CA-40、CA-35 和 CA-30) 的 Al₂O₃ 和 CaO 比例进行推算的, 经过烧结反应后得到的不同配比产品的成分比例也基本符合各牌号的成分要求。另外除了 Al₂O₃ 和 CaO 成分, 从产品的 SiO₂、MgO、Fe₂O₃、TiO₂ 和 S、P、F、C 的成分分析看, 具有低硅、低氧化铁、低磷、低硫和低氟的性能, 其中前三组配比, 即高铝料与石灰石配比低于 0.50 条件下, 制备铝酸钙产品 MgO < 4.0%, 具备低镁的条件。鉴于工业使用较多的牌号为 CA-40, 基于原料配比研究的结果, 选取高铝料与石灰石配比 0.50。

表 1 不同原料配比下制备铝酸钙的化学成分

编号	$m_{\text{高铝料}}/m_{\text{石灰石}}$	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	S	F	C
Sample 1	0.33	28.26	60.35	0.56	3.06	0.51	0.36	0.025	0.25	0.035
Sample 2	0.40	33.28	55.80	0.63	3.38	0.59	0.39	0.021	0.27	0.027
Sample 3	0.50	37.95	51.22	0.71	3.82	0.65	0.37	0.022	0.31	0.026
Sample 4	0.67	42.34	45.86	0.81	4.45	0.76	0.48	0.024	0.38	0.039
Sample 5	1.00	49.85	35.89	0.92	5.32	0.88	0.65	0.028	0.43	0.036

采用 XRD 对不同高铝料和石灰石质量比下制备的铝酸钙进行物相分析, 如图 3 所示。从物相衍射分析结果可以看出, 在高铝料与石灰石质量比例为 0.33 的条件下制备的铝酸钙样品物相以 3CaO · Al₂O₃ 和 12CaO · 7Al₂O₃ 为主, 同时含有少量 CaO 物相。这是由于石灰石比例过高, 有部分分解产生的 CaO 未完全与 Al₂O₃ 结合。随着高铝料掺量逐渐增加, 制备的铝酸钙的样品中 3CaO · Al₂O₃

的物相逐渐减少, 生成的 12CaO · 7Al₂O₃ 物相逐渐增加, 在高铝料与石灰石质量比为 0.50 和 0.67 的条件下, 制备的铝酸钙样品基本以 12CaO · 7Al₂O₃ 物相为主, 当高铝料和石灰石的质量比提高到 1.0 的条件下, 烧成铝酸钙体系中氧化铝组分占比增加, 制备的铝酸钙样品物相中以 CaO · Al₂O₃ 和 12CaO · 7Al₂O₃ 为主, 含有少量 CaO · 2Al₂O₃^[16-18]。

分析高铝料和石灰石不同质量比下制备的铝酸

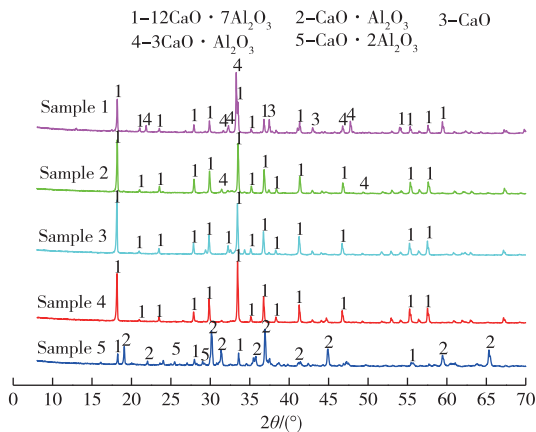


图 3 不同原料配比下制备铝酸钙的 XRD 谱
Fig. 3 XRD patterns of calcium aluminate prepared with different raw material ratios

钙的体积密度和显气孔率变化,从图 4 数据可以看出,随着高铝料掺量配比的增加,铝酸钙的体积密度逐渐增加,显气孔率逐渐下降,充分考虑制备试样物相和成分组成,选取高铝料和石灰石质量比 0.50 为优化配料比例。此种配比下制备的铝酸钙体积密度为 2.32 g/cm³,显气孔率为 15.28%,对照标准《炼钢用预熔型铝酸钙》(YB/T 4265—2011)中关于体积密度的要求,体积密度要 ≥2.6 g/cm³。因此,需要从烧结温度和成型压力条件优化产品的性能。

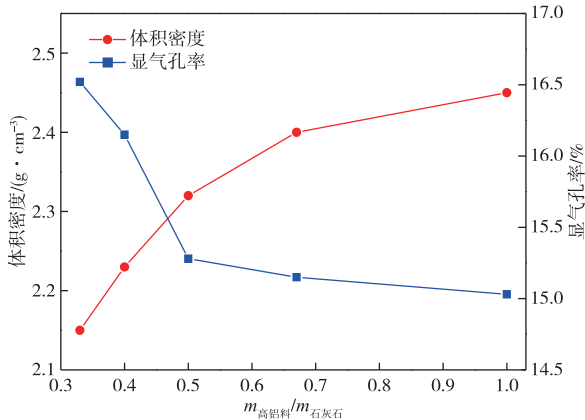


图 4 不同原料配比下制备铝酸钙的物理性能
Fig. 4 Physical properties of calcium aluminate prepared with different raw material ratios

2.2 煅烧温度试验

按照高铝料与石灰石 0.50 的质量比配料,研究不同烧结温度 1 250、1 300、1 350、1 400 和 1 450 °C 下对铝酸钙显气孔率和体积密度的影响,通过图 5 数据可以看出,随着烧结温度的升高,烧制的铝酸钙产品的体积密度逐渐增加,显气孔率逐渐降低,1 350 °C 后体积密度和显气孔率的变化不大,体积

密度为 2.62 g/cm³,显气孔率为 14.85%,说明在 1 350 °C 后烧结温度的增加对其产品的体积密度和显气孔率影响不明显。

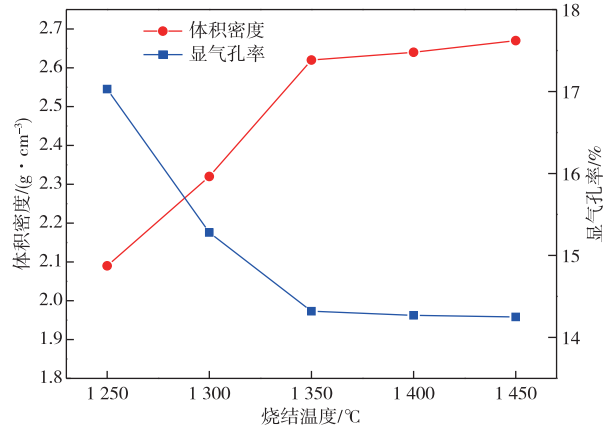


图 5 不同烧结温度下制备铝酸钙的物理性能
Fig. 5 Physical properties of calcium aluminate prepared at different sintering temperature

不同烧结温度下制备的铝酸钙的 XRD 谱如图 6 所示。从物相衍射分析结果可以看出,1 250 °C 烧结的铝酸钙以 12CaO · 7Al₂O₃ 物相为主,同时还有 CaO · Al₂O₃、CaO · 2Al₂O₃ 和 MgAl₂O₄ (镁铝尖晶石) 物相,随着温度的升高,铝酸钙中 12CaO · 7Al₂O₃ 的衍射峰逐渐增强,在 1 300、1 350 和 1 400 °C 烧结温度下,铝酸钙基本以 12CaO · 7Al₂O₃ 物相为主,烧结温度升高至 1 450 °C 后,除了 12CaO · 7Al₂O₃ 物相外,出现了 CaO · Al₂O₃ 和 CaO · 2Al₂O₃ 物相,这是因为温度较高,12CaO · 7Al₂O₃ 会继续和 Al₂O₃ 反应,生成 CaO · Al₂O₃ 和 CaO · 2Al₂O₃ [17-18]。从样品的烧成形态看,1 350 °C 烧成的铝酸钙部分出现液相,

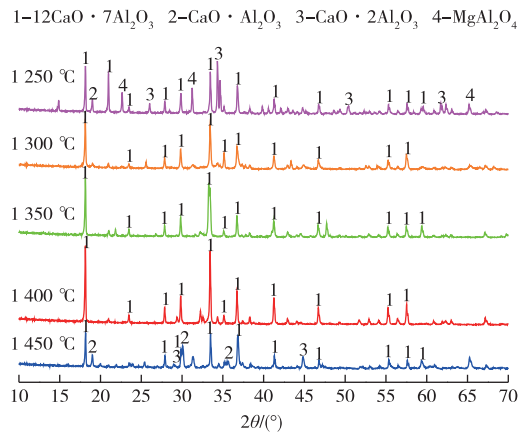


图 6 不同烧结温度下制备铝酸钙的 XRD 谱
Fig. 6 XRD patterns of calcium aluminate prepared at different sintering temperature

1 400 ℃烧成的铝酸钙全部转化成液相,说明此温度下已达到铝酸钙的熔点。综合考虑,选择 1 350 ℃为较优的烧成温度。

2.3 成型压力试验

按照高铝料与石灰石质量比 0.50、烧结温度 1 350 ℃,研究不同成型压力 0、5、10、15 和 20 MPa 下对铝酸钙显气孔率和体积密度的影响,结果如图 7 所示。从图 7 可以看出,随着成型压力的增加,制备的铝酸钙精炼剂产品的体积密度逐渐增加,样品的显气孔率逐步降低,成型压力升高到 10 MPa 以后,体积密度和显气孔率的变化不明显,在成型压力为 10 MPa 下样品的体积密度达到了 2.71 g/cm³。

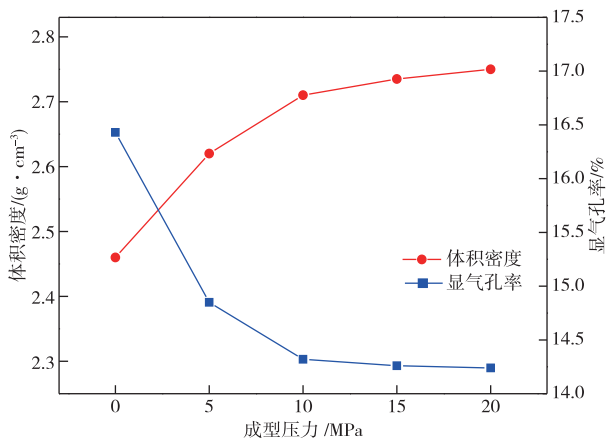


图 7 不同成型压力下制备铝酸钙的物理性能
Fig. 7 Physical properties of calcium aluminate prepared with different molding pressures

基于以上研究,优选了铝酸钙制备条件为:高铝料与石灰石质量比 0.50、烧结温度 1 350 ℃、成型压力 10 MPa。优选条件下制备的铝酸钙精炼渣外观形貌如图 8 所示。对此条件下制备的铝酸钙成分进行分析,结果如表 2 所示,铝酸钙样品的 Al₂O₃ 和 CaO 符合《炼钢用预熔型铝酸钙》(YB/T 4265—2011)中 CA-40 牌号的成分要求。另外,从样品的 SiO₂、MgO、Fe₂O₃、TiO₂ 和 S、P、F、C 的成分看,制备的铝酸钙具有低硅、低镁、低氧化铁、低磷、低硫、低氟和低碳的特性。

图 9 为制备的铝酸钙的 SEM 形貌。可以看出,铝酸钙微观结构呈现坚固、密实的不规则块状和片状。



图 8 优选条件下制备的铝酸钙精炼渣
Fig. 8 Calcium aluminate refining slag prepared under optimal conditions

表 2 优选条件下制备的铝酸钙精炼渣的化学成分

名称	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	S	P	F	C
铝酸钙精炼渣	38.03	51.33	2.61	3.53	0.76	0.021	0.032	0.011	0.026
YB/T 4265—2011	35~40	50~55	≤4.0	≤4.0	≤1.5	≤0.05	≤0.05	≤1.5	≤0.05

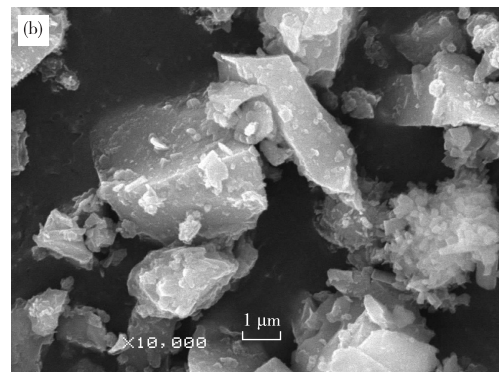
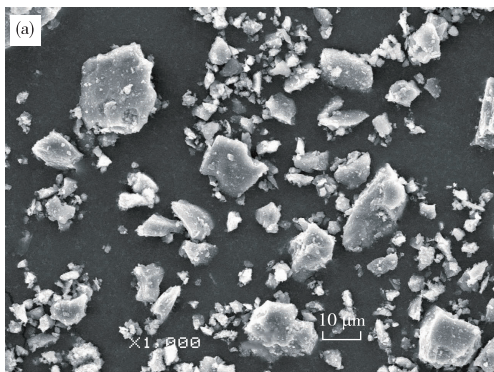


图 9 铝酸钙精炼渣的 SEM 形貌

Fig. 9 SEM morphologies of calcium aluminate refining slag

对制备的铝酸钙采用差热法测定熔点,熔点是指物质从固态转变为液态时所对应的温度。将DSC曲线上斜率最大值定为初熔时的熔点(初熔点) T_1 ,而当固体刚好全部熔化,所对应的温度称为终熔点(T_2)。熔点为初熔点与终熔点的平均值。如图10所示,铝酸钙的 $T_1=1\ 362\ ^\circ\text{C}$, $T_2=1\ 394\ ^\circ\text{C}$,熔点为 $1\ 378\ ^\circ\text{C}$,低于 $1\ 400\ ^\circ\text{C}$,符合钢铁精炼熔点的要求。

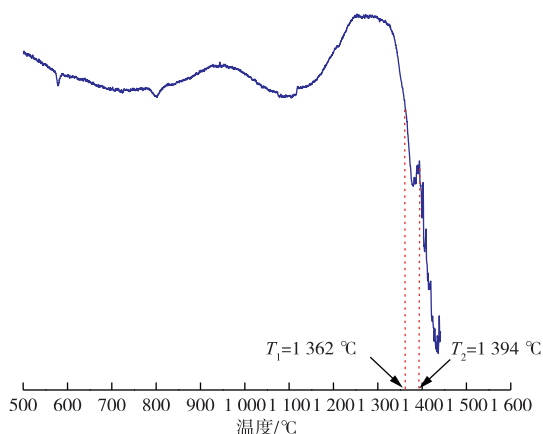


图10 铝酸钙精炼渣 DSC 曲线

Fig. 10 DSC curve of calcium aluminate refining slag

3 结论

1) 二次铝灰经湿法预处理实现其氮化铝、金属铝和碳化铝的高效水解反应,脱除了反应性并实现可溶盐的高效浸出,湿法预处理后的惰性高铝料主要成分为 α -氧化铝、氢氧化铝和镁铝尖晶石,可以作为制备炼钢用铝酸钙的原料。

2) 优选了铝酸钙的最佳制备条件为:高铝料与石灰石质量比 0.50、烧结温度 $1\ 350\ ^\circ\text{C}$ 、成型压力 10 MPa,该条件下制备的铝酸钙 Al_2O_3 和 CaO 含量符合《炼钢用预熔型铝酸钙》(YB/T 4265—2011) CA-40 牌号成分要求,主要物相为 $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$,同时具有低硅、低镁、低氧化铁、低磷、低硫、低氟和低碳的特性,铝酸钙熔点温度为 $1\ 378\ ^\circ\text{C}$,符合炼钢用预熔型铝酸钙产品质量标准要求。

参考文献

[1] 康泽双,刘中凯,田野,等. 国内铝工业全行业铝灰特性和利用处置技术研究进展[J]. 有色金属(冶炼部分), 2022(9):28-35.
KANG Z S, LIU Z K, TIAN Y, et al. Research progress on characteristics of aluminum ash and practice of utilization and disposal technology in

aluminum industry[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2022(9):28-35.

[2] 刘宏博,郝雅琼,吴昊,等. 铝冶炼行业危险废物产生和利用处置现状与管理对策建议[J]. 环境工程学报, 2021, 11(6):1273-1280.

LIU H B, HAO Y Q, WU H, et al. Present situation of production, utilization and disposal of hazardous waste in aluminium smelting industry and management countermeasures [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(6):1273-1280.

[3] 李勇. 二次铝灰的危险特征及其转化机制[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2021.

LI Y. Dangerous characteristics of secondary aluminum ash and its transformation mechanism[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2021.

[4] HONG J P, WANG J, CHEN H Y, et al. Process of aluminum dross recycling and life cycle assessment for Al-Si alloys and brown fused alumina[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(11): 2155-2161.

[5] 孙德强,王旭江,李敬伟,等. 铝灰资源化与无害化处置技术研究现状[J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(6): 1734-1746.

SUN D Q, WANG X J, LI J W, et al. Research status of aluminum dross resourceful and harmless utilization processes [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(6):1734-1746.

[6] 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 S, LIU W C, LIU Z K, et al. Technical state and prospect on processing of aluminum dross [J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2018(10): 25-30.

[7] LI A P, ZHANG H J, YANG H M. Evaluation of aluminum dross as raw material for high-alumina refractory[J]. Ceramics International, 2014, 40(8): 12585-12590.

[8] 杨群,李祺,张国范,等. 铝灰综合利用现状研究与展望[J]. 轻金属, 2019(6):1-5.

YANG Q, LI Q, ZHANG G F, et al. Research and prospect of the status of comprehensive utilization of aluminum ash[J]. Light Metals, 2019(6):1-5.

[9] 贺永东,李颜凌,马斌,等. 湿法工艺对二次铝灰无害化脱氮的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(6): 679-683.

HE Y D, LI Y L, MA B, et al. Effects of wet process on harmless nitrogen removal from secondary Al ash[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(6):

- 679-683.
- [10] 刘吉. 铝灰渣性质及其中的 AlN 在焙烧和水解过程中的行为研究[D]. 沈阳:东北大学,2008.
LIU J. Study on properties of aluminum dross and behaviors of AlN in hydrolysis and roasting processes [D]. Shenyang: Northeastern University, 2008.
- [11] 崔维, 易武平, 蔡安. 超声波强化浸出二次铝灰中氯的机理[J]. 过程工程学报, 2017, 17(4): 757-762.
CUI W, YI W P, CAI A, et al. Mechanism of ultrasound-assisted leaching chlorine from aluminum dross[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2017, 17(4): 757-762.
- [12] 姜澜, 邱明放, 丁友东, 等. 铝灰中 AlN 的水解行为[J]. 中国有色金属学报, 2013, 22(12): 3555-3561.
JIANG L, QIU M F, DING Y D, et al. Hydrolysis behavior of AlN in aluminum dross[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 22 (12): 3555-3561.
- [13] 刘桂华, 黄文强, 熊德芬, 等. 铝灰中活性物相的反应行为[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(11): 2341-2350.
LIU G H, HUANG W Q, XIONG D F, et al. Reaction behavior of active phases in aluminum dross[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28 (11): 2341-2350.
- [14] 张宇, 李勇, 李春雷, 等. 二次铝灰中氮化铝的特性及其脱除工艺研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(2): 144-149.
ZHANG Y, LI Y, LI C L, et al. Characteristics and removal process of aluminum nitride in secondary aluminum dross; a review [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021, 41 (2): 144-149.
- [15] 韩金珊, 左正平, 赵洪亮, 等. 二次铝灰处置及利用现状及其在炼钢中的应用[J]. 中国冶金, 2022, 32(5): 16-24.
HAN J S, ZUO Z P, ZHAO H L, et al. Disposal and utilization of secondary aluminum dross and its application in steelmaking [J]. China Metallurgy, 2022, 32 (5): 16-24.
- [16] 谢明壮, 单迪, 韩金珊, 等. 铝灰中有害元素脱除及钙化转相制备铝酸钙[J]. 中国冶金, 2023, 33(6): 115-121.
XIE M Z, SHAN D, HAN J S, et al. Removal of harmful elements from aluminum dross and preparation of calcium aluminate by calcium conversion[J]. China Metallurgy, 2023, 33(6): 115-121.
- [17] 柏阳, 赵志强, 陈福新, 等. 利用二次铝灰钙化焙烧合成铝酸钙过程基础研究[J]. 轻金属, 2023(10): 12-18.
BAI Y, ZHAO Z Q, CHEN F X, et al. Basic research on the process of synthesizing calcium aluminate using secondary aluminum ash calcification and baking[J]. Light Metals, 2023(10): 12-18.
- [18] 何超, 贺永东, 赵亿坤, 等. 二次铝灰合成铝酸钙及其物相变化研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(11): 1436-1440.
HE C, HE Y D, ZHAO Y K, et al. Basic research on the process of synthesizing calcium aluminate using secondary aluminum ash calcification and baking[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41 (11): 1436-1440.