

二次铝灰合成铝酸钙及其物相变化研究

何超¹ 贺永东¹ 赵亿坤¹ 陈长科² 李颜凌¹

(1.新疆大学物理科学与技术学院; 2.新疆众和股份有限公司)

摘要 采用 XRD、SEM、EDS 研究了二次铝灰与氧化钙在不同比例、不同温度下焙烧生成的铝酸钙的物相转变。结果表明,在 1 200 ℃下,主要物相为 $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ (C_{12}A_7),且有少量 $\text{Ca}_{12}\text{Al}_4\text{O}_7$ (CA_2)生成;在 1 400 ℃下,主要物相为 C_{12}A_7 ,且 CA_2 消失,并出现了少量 $\text{Ca}_{12}\text{Al}_2\text{O}_4$ (CA);在 1 600 ℃下,主要物相为 CA ;在 1 200 ℃和 1 400 ℃生成的 A_{12}CA_7 都是立方晶系,属于稳定性 A_{12}CA_7 ,随着温度升高,熟料中 C_{12}A_7 的晶胞体积增大。氧化钙与二次铝灰质量比分别为 0.9、1.0、1.1、1.2 时,在 1 350 ℃下,二次铝灰与 CaO 的质量比在 0.9~1.2 时,主要物相均为 C_{12}A_7 ,并有少量的 CA 生成,生成的 C_{12}A_7 都是立方晶系,属于稳定性 C_{12}A_7 。随着 CaO 与二次铝灰的质量比的升高, C_{12}A_7 含量增加,熟料中 C_{12}A_7 的晶胞体积先增大后减小,二次铝灰与 CaO 的质量比为 0.9 时, CA 含量最多,质量比为 1.0~1.2 时, CA 含量少于质量比为 0.9 时,且在这个阶段内 CA 含量很少,通过 XRD 并不能发现其明显的变化。

关键词 二次铝灰;物相转变;铝酸钙

中图分类号 TG146 文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.11.022

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Synthesis of Calcium Aluminate from Secondary Aluminium Ash and Its Phase Change

He Chao¹, He Yongdong¹, Zhao Yikun¹, Chen Changke², Li Yanling¹

(1.School of Physics and Technology, Xinjiang University; 2.Xinjiang Join World Co., Ltd.)

Abstract: By means of XRD, SEM and EDS, the phase transformation of calcium aluminate produced by calcination of secondary aluminum ash and calcium oxide at different proportions and different temperatures was investigated. The results indicate that at 1 200 ℃, the main phase is C_{12}A_7 with a small amount of CA_2 formed. At 1 400 ℃, the main phase is C_{12}A_7 with the absence of CA_2 and a small amount of CA formed. At 1 600 ℃, the main phase is CA . A_{12}C_7 generated at 1 200 ℃ and 1 400 ℃ is cubic crystal system and belongs to stable C_{12}A_7 . With the increase of temperature, the cell volume of C_{12}A_7 in the clinker is increased. When the mass ratio of calcium oxide to secondary alumina ash are 0.9, 1.0, 1.1 and 1.2, and the mass ratio of secondary alumina ash to calcium oxide is between 0.9 and 1.2 at 1 350 ℃, the main phase is C_{12}A_7 with a small amount of CA generated. The generated C_{12}A_7 is stable, belonging to the cubic crystal system. With the increase of the mass ratio of calcium oxide to secondary aluminum ash, the content of C_{12}A_7 is increased and the cell volume of C_{12}A_7 in the clinker is increased firstly and then decreased. When the mass ratio of secondary aluminum ash to calcium oxide is 0.9, CA content reaches the maximum value. The Ca content in the mass ratio range of 1.0~1.2 is less than that of 0.9, which is little in this stage and hardly found by XRD.

Key Words: Secondary Aluminum Ash, Phase Transformation, Calcium Aluminate

中国作为全球最大的铝生产国,2020 年铝产量为 3 708 万 t^[1],占世界铝产量 6 527 万 t 的 57%。铝灰是铝冶金过程中产生的工业废料,铝灰的主要来源有 3 方面:电解铝灰(可以直接回槽);熔铸铝灰(每吨铝产生 30~40 kg 铝灰);废铝再生及加工铝灰(产生 3%~10%)^[2,3]。二次铝灰是利用含铝高的一次铝灰回收金

属铝的冶炼过程产生的,其成分中大部分都是含铝的化合物,具有很高的回收利用价值^[4,5]。但国内对铝灰的综合利用率较低,大多是直接填埋或堆积处理,其中大量氟化物、氰化物、碳化铝、氮化铝等有毒有害物质会带来环境污染问题^[6~8]。

二次铝灰中含有大量的 Al_2O_3 ,可以与 CaO 在一

收稿日期:2021-06-07;修改稿收到日期:2021-07-20

基金项目:新疆维吾尔自治区科技厅重点研发专项基金资助项目(2020B02007);国家自然科学基金资助项目(51861033)

第一作者简介:何超,男,1994 年出生,硕士研究生,乌鲁木齐(830046),E-mail:970916893@qq.com

通信作者:贺永东,男,1965 年出生,教授,乌鲁木齐(830046),E-mail:hydongq@126.com

引用格式: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):1 436-1 440.

HE C, HE Y D, ZHAO Y K, et al. Synthesis of calcium aluminate from secondary aluminium ash and its phase change[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(11):1 436-1 440.

定比例、温度下烧结制成铝酸钙^[9]。根据铝酸钙矿物中 CaO 与 Al₂O₃ 比例不同,可以把铝酸钙分为 CaAl₂O₄ (简称 CA)、CaAl₄O₇ (CA₂)、Ca₁₂Al₁₄O₃₃ (C₁₂A₇)、Ca₃Al₂O₄ (C₃A)、CaAl₁₂O₁₉ (CA₆)^[10]。温元波等^[11]探讨了吸附时间、溶液初始 pH 值、吸附剂加入量、初始氟离子浓度及竞争阴离子等因素对氟离子吸附效果的影响。YI H C 等^[12]采用 Ti、B₂O₃、Al、CaO 为原料,通过燃烧合成制备出了铝酸钙和硼化钛复合粉体。ILYINA E V 等^[13]用麻岩 C₁₂A₇ 化学计量学方法制备了铝酸钙气凝胶,经二苯胺吸附后,C₁₂A₇ 气凝胶表面出现了二苯氧基硝基自由基,在 500 ℃焙烧试样表面的形成,表明在无定形气凝胶的表面存在能够稳定氧活性形式的铝酸钙。CHOU K S 等^[14]观察了 CaO 和 Al₂O₃ 之间反应中的一系列化合物,提出 C₁₂A₇ 可能是第一个形成的化合物。MOHAMED B M 等^[15]在形成 C₃A₆ 时,C₁₂A₇ 和 CA 的阶段被观察为反应中间体。来自氧化物的 CA 的形成动力学遵循金斯特林的扩散控制模型。但国内外对二次铝灰和氧化钙在不同温度和不同原料配比下的铝酸钙物相变化的研究报道较少。

本课题以 CaO、二次铝灰为原料,在不同温度、配比下焙烧,通过 XRD、SEM、EDS 分析熟料的形貌和微区组成,以期对二次铝灰的再利用提供参考。

1 试验方法与材料

以新疆众和粒径小于 425 μm 的铝灰、去离子水、CaO(纯度≥99%)为原料,铝灰水洗,烘干,其化学组成见表 1。称取 18 g 的 CaO 与 20 g 水洗后的铝灰混匀,压制成 φ10 mm×5 mm 的料饼,置于耐火砖上,放入硅碳棒加热炉中,以 7 ℃/min 的升温速率分别升到 1 200、1 400、1 600 ℃,在设定温度下保温 1 h 后随炉冷却至 200 ℃取出;称取 20 g 水洗后的铝灰,CaO 与二次铝灰质量比分别为 0.9、1.0、1.1、1.2,以 7 ℃/min 的升温速率升到 1 350 ℃并保温 1 h 后,随炉冷却到 200 ℃取出;将取出的熟料粉碎磨至 90 目,采用 X 射线衍

射(XRD,D8 Advance)、扫描电镜(SEM,S4800)、X 光微区分析(EDS)分析熟料的物相组成。

表 1 水洗烘干后的铝灰的化学成分
Tab.1 Chemical composition of aluminum ash after washing and drying

washing and drying										%
w _B										
Al	O	F	Si	Fe	Mg	Na	C	N	Ca	Ti
43.22	46.88	0.09	1.83	0.36	1.74	1.25	3.10	0.93	0.49	0.11

2 试验结果与分析

2.1 不同温度对铝酸钙物相的影响

图 1 为 m_C/m_A=0.9(m_C、m_A 分别为 CaO、Al₂O₃ 的质量)时,不同温度下焙烧生成的铝酸钙的 XRD 分析结果。由图 1 可知,在 1 200 ℃出现了 CA₂ 和 C₁₂A₇ 的特征峰,且 C₁₂A₇ 的特征峰较明显;当温度升到 1 400 ℃时,出现了 CA 的特征峰,C₁₂A₇ 特征峰减弱,CA₂ 特征峰消失;当温度升到 1 600 ℃时,C₁₂A₇ 特征峰完全消失,全部转化成 CA。这说明在 1 200 ℃,C₁₂A₇ 是第 1 个形成的化合物,同时也可能形成了 CA,但存在的量较少。随着温度升高(1 400 ℃),之前生成的 C₁₂A₇ 与 CA₂ 和 Al₂O₃ 反应生成 CA。在 1 600 ℃时,首先生成的 C₁₂A₇ 和 CA₂ 就会向 CA 转化。

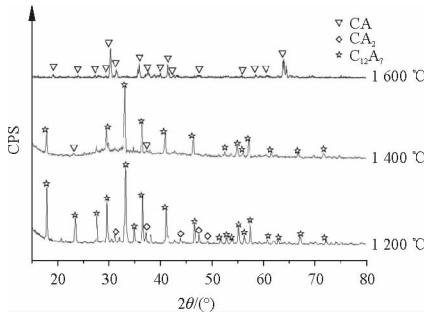


图 1 不同温度下焙烧生成的铝酸钙的 XRD 分析
Fig.1 XRD analysis results of calcium aluminate prepared by calcination at different temperatures

不同温度熟料的 CA、C₁₂A₇ 的晶体参数以及最强衍射峰处的晶面间距,结果见表 2。

表 2 不同温度铝酸钙熟料晶体参数

Tab.2 Crystal parameters of calcium aluminate clinker at different temperatures									
温度/℃	C ₁₂ A ₇				CA				
	a=b=c/nm	V/nm ³	d/nm	α=β=γ/(°)	a/nm	b/nm	c/nm	V/nm ³	d/nm
1 200	1.192 8	1.774 573	0.271 71	90	—	—	—	—	—
1 400	1.224 1	1.776 952	0.270 54	90	1.087 4	1.085 1	1.511 5	1.067 583	0.297 61
1 600	—	—	—	—	1.056 3	1.090 2	1.512 4	1.073 534	0.299 48

由表 2 可知,在 1 200 ℃和 1 400 ℃生成的 C₁₂A₇ 都是立方晶系,属于稳定型 C₁₂A₇,随着温度升高,熟料中 C₁₂A₇ 的晶胞体积增大,2θ=33.42°,晶面指数为(420)的晶面间距逐渐减小,CA 的晶胞体积和 2θ=37.18°,晶面指数为(123)的晶面间距均逐渐增大。

当 m_C/m_A=0.9 时,不同温度焙烧生成的铝酸钙的 SEM 及 EDS 谱图见图 2。可以看出其物相成颗粒状,而与其对应的 EDS 谱图中 Ca、Al 质量比为 1.28,与 C₁₂A₇ 中 Ca、Al 理论质量比 1.26 接近,再根据其 XRD 的分析结果,可以确定图 2a 中的颗粒状物相为 C₁₂A₇。

从图 2b 可以看到有颗粒状和较少的片状物相生成,结合 EDS 谱图中 Ca、Al 质量比和 XRD 分析结果可知,

颗粒状物相为 $C_{12}A_7$ 。从图 2c 可以看到板状物相,结合 EDS 谱图中 Ca、Al 质量比和 XRD 的分析结果可

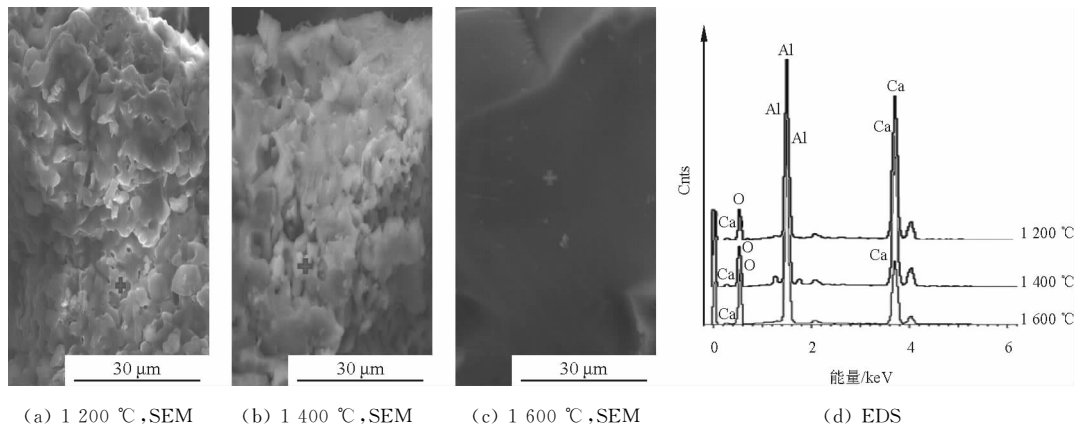


图 2 不同温度焙烧生成的铝酸钙的 SEM 照片及 EDS 谱图

Fig.2 SEM images and EDS patterns of calcium aluminate prepared by calcination at different temperatures

知,板状物相为 CA。

2.2 不同 m_C/m_A 对铝酸钙物相的影响

对烧结温度为 1350 °C,保温时间为 1 h, m_C/m_A 为 0.9~1.2 的烧结熟料进行 XRD 分析,结果见图 3。 m_C/m_A 为 0.9~1.2 时,主要物相均为 $C_{12}A_7$,且有少量的 CA 生成,随着 m_C/m_A 的升高, $C_{12}A_7$ 含量增加, m_C/m_A 为 0.9 时,CA 含量最多, m_C/m_A 为 1.0~1.2 时,CA 含量减少,且在这个阶段内 CA 含量很少,但通过 XRD 并不能发现其明显的变化。

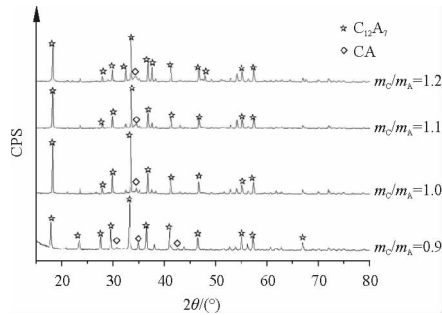


图 3 不同 m_C/m_A 焙烧生成的铝酸钙 XRD 分析结果
Fig.3 XRD analysis results of calcium aluminate prepared by calcination with different m_C/m_A

不同 m_C/m_A 熟料的 $C_{12}A_7$ 的晶体参数以及最强衍

射峰处的晶面间距,结果见表 3。可以看出,在 m_C/m_A 为 0.9~1.2 生成的 $C_{12}A_7$ 都是立方晶系,属于稳定性 $C_{12}A_7$,随着 m_C/m_A 的升高,熟料中 $C_{12}A_7$ 的晶胞体积先增大后减小, $2\theta = 33.398^\circ$,晶面指数为 (420) 的晶面间距逐渐减小。

表 3 不同 m_C/m_A 铝酸钙熟料晶体参数

Tab.3 Crystal parameters of different m_C/m_A calcium aluminate clinkers

m_C/m_A	$C_{12}A_7$			
	$a=b=c/\text{nm}$	V/nm^3	d/nm	$\alpha=\beta=\gamma/(\circ)$
0.9	1.198 2	1.720 573	0.268 08	90
1.0	1.198 9	1.723 250	0.268 00	90
1.1	1.198 7	1.722 390	0.267 96	90
1.2	1.198 6	1.721 961	0.267 94	90

图 4 为不同 m_C/m_A 下焙烧生成的铝酸钙的 SEM 照片及 EDS 谱图。可以看出, $m_C/m_A=0.9$ 时,形成的物相为多孔的颗粒状(见图 4a),对其进行 EDS 分析(见图 4b),其主要元素为 O、Al、Ca,结合 EDS 谱图中 Ca、Al 原子质量之比和 XRD 的分析结果可得,颗粒状物相为 $A_{12}C_7$; $m_C/m_A=1.2$ 时,形成了块状物相(见图 4c),对其进行 EDS 分析(见图 4d),其主要元素为 O、Al、Ca,并含有少量的 Si,其中 Si 来自二次铝灰,因为含量

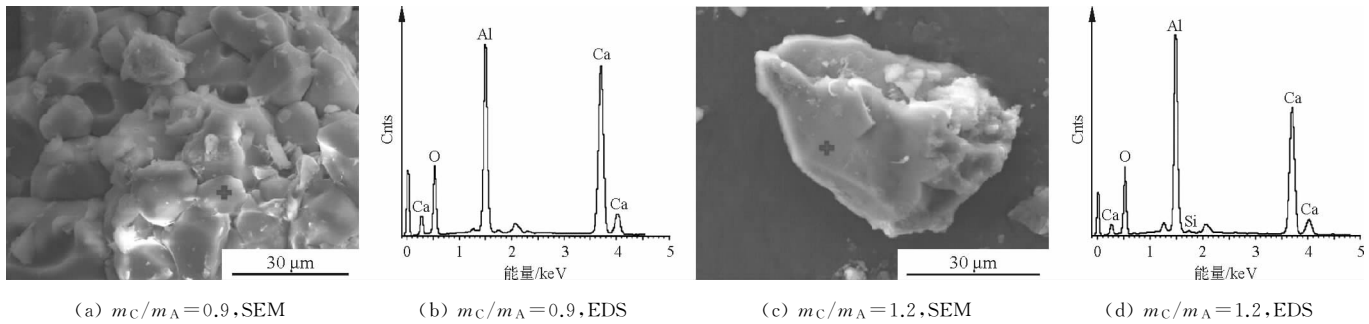


图 4 不同 m_C/m_A 下焙烧生成的铝酸钙的 SEM 照片及 EDS 谱图

Fig.4 SEM images and EDS patterns of calcium aluminate prepared by calcination with different m_C/m_A

很少,所以 XRD 并未检测到与其相关的化合物。为了分析熟料中 Ca、Al 和 O 元素分布情况,对图 4c 进行面扫描,结果见图 5,可以看出,熟料颗粒区域主要有 Ca、Al 和 O 元素,因此, $C/A=1.2$ 时熟料中主要含铝物相为 $C_{12}A_7$ 。

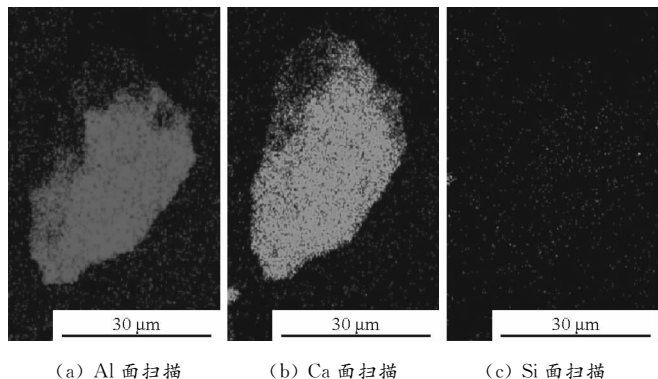
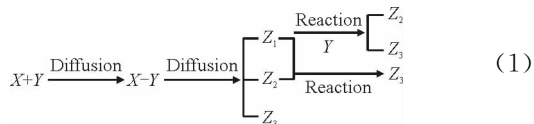


图 5 $m_C/m_A=1.2$ 铝酸钙熟料微观形貌和元素分布

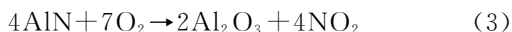
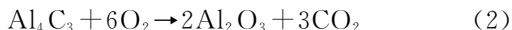
Fig.5 Micromorphology and element distribution of calcium aluminate clinker with $m_C/m_A=1.2$

3 讨 论

CaO 与 Al_2O_3 进行固相反应,可以描述为



式中, X 为 CaO; Y 为 Al_2O_3 ; $X-Y$ 是扩散形成的分子对; Z_1 、 Z_2 、 Z_3 是 $X-Y$ 反应形成的单个分子产物,在 $1\,200\,^{\circ}\text{C}$ 时, CaO 与 Al_2O_3 的反应体系中,当反应初期,反应物之间的接触面很大,但固相界面阻碍了反应物之间的相互扩散。随着温度升高,扩散阻力变小,反应被引发,当温度高于 $500\,^{\circ}\text{C}$ 时,二次铝灰中 Al_4C_3 、AlN 在高温下与氧气发生反应生成 Al_2O_3 :



Al_4C_3 、AlN 转化为 Al_2O_3 后,使原料中的 m_C/m_A 下降,随着反应进行, CaO 向 Al_2O_3 扩散。根据铝酸钙不同物相的生成驱动力大小顺序是: $C_{12}A_7 > CA \geq CA_2 > C_3A$, 又根据 CaO- Al_2O_3 的二元系相图^[16], 所以首先 CaO 与 Al_2O_3 反应生成 $C_{12}A_7$ 。



此反应消耗了大量的 CaO,且原料中的 Al_2O_3 含量大于 CaO,所以 Al_2O_3 与 CaO 反应生成 CA 很少甚至没有,因此 XRD 未能检测到:



随着反应进行,生成的 $C_{12}A_7$ 会阻碍 CaO 与 Al_2O_3 的接触,所以原料中的 Al_2O_3 又会向生成的 $C_{12}A_7$ 扩

散,生成 CA_2 或 CA:



因为式(6)比式(7)更容易发生,所以在 $1\,200\,^{\circ}\text{C}$ 主要物相为 $C_{12}A_7$ 、 CA_2 。

在 $1\,400\,^{\circ}\text{C}$ 时,由于 CaO 向 Al_2O_3 扩散的速度较快,扩散到 Al_2O_3 界面的 CaO 很多,在反应初期,根据式(4)有大量的 $C_{12}A_7$ 生成,同时式(6)、式(7)也在进行,由于生成 CA_2 较少,且较 $C_{12}A_7$ 生成的时间晚,因此生成的 CA_2 部分会附着在 $C_{12}A_7$ 上,并和 $C_{12}A_7$ 发生反应生成 CA:



因此,生成 CA 的也会附着在 $C_{12}A_7$ 表面。

在 $1\,600\,^{\circ}\text{C}$ 条件下,在反应初期式(2)为主要反应,在反应后期式(7)、式(8)为主要反应,故生成大量的 CA。

在 $1\,350\,^{\circ}\text{C}$ 下,当 $m_C/m_A=0.9$ 时, Al_2O_3 与 CaO 主要发生式(4)的反应,有大量的 $C_{12}A_7$ 生成,因为温度较高,所以式(5)也在进行,生成了部分 CA。当 $m_C/m_A=1.0\sim1.2$ 时, CaO 含量逐渐增加,且 Al_2O_3 与 CaO 生成的 $C_{12}A_7$ 所需的驱动力最小,所以其生成的 $C_{12}A_7$ 的衍射峰的强度逐渐增强。根据 CaO- Al_2O_3 的二元系相图, CaO 与 Al_2O_3 氧化铝的质量比超过 1.0 时,应该有 C_3A 生成,但试验未检测到 C_3A 的。因为所用的二次铝灰中除了 Al_2O_3 外,含有 Al_4C_3 、AlN 杂质,在其转化为 Al_2O_3 后,使原料中的 CaO 与 Al_2O_3 的配比下降,所以实际反应中, CaO 与 Al_2O_3 的比例并没有达到 m_C/m_A 比,故没有 C_3A 生成。

4 结 论

(1)CaO 与二次铝灰质量比为 0.9 时,以 $7\,^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速率分别升到 $1\,200$ 、 $1\,400$ 、 $1\,600\,^{\circ}\text{C}$,保温 1 h 后随炉冷却到 $200\,^{\circ}\text{C}$ 取出,在 $1\,200\,^{\circ}\text{C}$ 下,主要物相为 $C_{12}A_7$,且有部分 CA_2 生成;在 $1\,400\,^{\circ}\text{C}$ 下,主要物相为 $C_{12}A_7$,且 CA_2 消失,并出现了少量 CA;在 $1\,600\,^{\circ}\text{C}$ 条件下,主要物相为 CA。

(2)以 $7\,^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的升温速率升到 $1\,350\,^{\circ}\text{C}$ 并保温 1 h 后随炉冷却到 $200\,^{\circ}\text{C}$ 取出,二次铝灰与 CaO 的质量比在 $0.9\sim1.2$ 时,主要物相均为 $C_{12}A_7$,且有少量的 CA 生成,随着 CaO 与二次铝灰质量比的升高, $C_{12}A_7$ 含量增加,二次铝灰与 CaO 质量比为 0.9 时, CA 含量最高,质量比为 $1.0\sim1.2$ 时, CA 含量低于质量比为 0.9 时的。

参 考 文 献

- [1] 中国 2020 年铝产量 3 708 万 t[J].特种铸造及有色合金, 2021, 41 (2): 188.

冷却速率对 Cu-30Cr₂Nb 合金组织与抗电弧烧蚀行为影响

韩建军¹ 钱文晓¹ 郭金刚¹ 党乐¹ 张俊双¹ 袁 竭^{2,3} 刘 源^{2,3}

(1.国网内蒙古东部电力有限公司电力科学研究院; 2.清华大学材料学院; 3.河北清华发展研究院)

摘 要 通过铜模快速凝固制备了 Cu-30Cr₂Nb 合金,在空气中分别开展了该合金及纯铜的烧蚀试验,研究了其烧蚀行为。研究表明,冷却速率是影响 Cu-30Cr₂Nb 合金中 Cr₂Nb 尺寸和形貌的主要因素,随冷却速率升高,Cr₂Nb 平均尺寸降低,同时其形貌由长条状转变为短棒状再变为细颗粒状;相对于纯铜,Cu-30Cr₂Nb 合金弧斑面积增大、电流密度降低、弧斑更平整,Cu-30Cr₂Nb 合金抗烧蚀性能的提升与电流密度的降低和 Cr₂Nb 相的热发射电子相关。

关键词 电极材料;烧蚀;高压隔离开关

中图分类号 TG146.1⁺1 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.11.023

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Cooling Rate on Microstructure and Electric-ablation Behavior of Cu-30Cr₂Nb Alloy

Han Jianjun¹, Qian Wenxiao¹, Guo Jingang¹, Dang Le¹, Zhang Junshuang¹, Yuan Jie^{2,3}, Liu Yuan^{2,3}

(1.East Inner Mongolia Electric Power Co., Ltd.; 2.School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University; 3.Institute of Tsinghua University, Hebei)

Abstract: The Cu-30Cr₂Nb alloy was prepared by rapid solidification in copper mould. The electric-ablation behaviors of the Cu-30Cr₂Nb alloy and pure copper was investigated comparatively by discharging in air. The results indicate that cooling rate is the main factor affecting the size and the morphology of Cr₂Nb phase. With the cooling rate increasing, the average size of Cr₂Nb particles is decreased and the morphology is transformed from long bars to short rods, then to fine spherical particles. Compared with pure copper, Cu-30Cr₂Nb alloy exhibits larger arc spot area, lower current density and smoother arc spot. The higher electric-ablation resistance of Cu-30Cr₂Nb alloy is related with the reduced current density and the heat emission of electrons from Cr₂Nb particles.

Key Words: Electrode Materials, Electric-ablation, High Voltage Isolating Switch

收稿日期:2021-04-14;**修改稿收到日期:**2021-05-31
第一作者简介:韩建军,男,1966 年出生,高级工程师,呼和浩特(010090),E-mail:hjj0296@sina.com
通信作者:刘源,男,1974 年出生,副教授,北京(100084),E-mail:yuanliu@tsinghua.edu.cn
引用格式:韩建军,钱文晓,郭金刚,等.冷却速率对 Cu-30Cr₂Nb 合金组织与抗电弧烧蚀行为影响[J].特种铸造及有色合金,2021,41(11):1 440-1 445.
HAN J J, QIAN W X, GUO J G, et al. Effects of cooling rate on microstructure and electric-ablation behavior of Cu-30Cr₂Nb alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(11):1 440-1 445.

[2] 张宁燕,宁平,谢天鉴,等.铝灰有价值组分回收及综合利用研究进展[J].硅酸盐通报,2017,36(6):1 951-1 956.

[3] 侯惠萍,丁文捷,王冠,等.废铝熔炼中的铝灰产量模型与影响因素研究[J].轻金属,2015(8):26-30.

[4] 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(3):148-152.

[5] 郭学益,李菲,田庆华,等.二次铝灰低温碱性熔炼研究[J].中南大学学报(自然科学版),2012,43(3):809-814.

[6] 李瑞仙,刘婧晶,李玉泽.铝灰主要污染成分及其对周围土壤环境的影响和治理措施[J].矿产勘查,2019,10(6):1 513-1 516.

[7] 贾栋渊.铝灰中氟化物对土壤污染的风险评估及其控制措施[D].兰州:西北师范大学,2018.

[8] 国家危险废物名录(2021 年版)[R].中华人民共和国国务院公报,2021(4):18-46.

[9] MAILAR G, SUJAY R N, SREEDHARA B M, et al. Investigation of concrete produced using recycled aluminium dross for hot weather concreting conditions[J]. Resource-Efficient Technologies, 2016, 2(2):68-80.

[10] ROBERT I, IOAN L, CORNELIA P, et al. Fuel mixture ap-

proach for solution combustion synthesis of Ca₃Al₂O₆ powders[J]. Cem. Concr. Res., 2009, 39:566-572.

[11] 温元波,张陆军,王宁宁,等.水化氯铝酸钙去除水中氟及其动力学研究[J].应用化工,2021,50(2):311-315.

[12] YI H C, GUIGNE J Y, MOORE J, et al. Preparation of calcium aluminate matrix composites by combustion synthesis[J]. J. Mater. Sci., 2002, 37:4 537-4 543.

[13] ILYINA E V, GERUS Y Y, CHEREPANOVA S V, et al. Synthesis of C₁₂A₇ calcium aluminate aerogels[J]. Materials Letters, 2021, 293:129 699.

[14] CHOU K S, BURNET G. A reply to a discussion by S. Chandra of a formation of calcium aluminates in the lime-sinter process. Part II. Kinetic study[J]. Pergamon,1981,11(5-6):817-818.

[15] MOHAMED B M, SHARP J H. Kinetics and mechanism of formation of tricalcium aluminate, Ca₃Al₂O₆ [J]. Thermochemica Acta, 2002, 388(1):105-114.

[16] 杨守磊,肖国庆,丁冬海,等.CaO-Al₂O₃-CaCO₃-O₂体系燃烧合成铝酸钙热力学研究[J].硅酸盐学报,2016,44(6):908-913.

(编辑:栗万仲)