

含硼低熔化温度非晶母合金精炼渣系分析及试验研究

吕晓芳¹ 张印棠² 陈 洋² 赵定国² 王书桓²

(1.邢台职业技术学院资源与环境工程系; 2.华北理工大学冶金与能源学院)

摘 要 针对熔点为 1 250 ℃ 的非晶母合金,在 CaO-SiO₂-Al₂O₃ 基础渣系中添加 B₂O₃,设计了含硼低熔化温度渣系;采用 FactSage7.2 软件模拟计算,研究了 CaO-SiO₂-Al₂O₃-B₂O₃ 四元精炼渣系相图,B₂O₃ 比例从 7% 增加到 19% 时,相图中的低熔化温度区面积比由 5% 增大至 46%;B₂O₃ 含量控制在 13%~16% 时,熔化温度为 1 100~1 200 ℃,适宜非晶母合金的冶炼;采用熔化温度测定仪开展了热态试验,试验熔化温度在 1 150±25 ℃,与模拟结果符合。

关键词 精炼渣;氧化硼;熔化温度

中图分类号 TG139+.8 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.07.021

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Analysis and Experiments of Low Temperature Refining Slag with Boron Oxide

Lü Xiaofang¹, Zhang Yintang², Chen Yang², Zhao Dingguo², Wang Shuhuan²

(1.Department of Resources and Environmental Engineering, Xingtai Polytechnic College;

2.College of Metallurgy and Energy, North China University of Science and Technology)

Abstract: For the amorphous master alloy with melting point of 1 250 ℃, through adding B₂O₃ to the CaO-SiO₂-Al₂O₃ base slag system, the low melting temperature slag system containing boron was designed. The phase diagram of CaO-SiO₂-Al₂O₃-B₂O₃ quaternary refining slag system was analyzed by Factage7.2 software simulation calculation. With the proportion of B₂O₃ increased from 7% to 19%, the area ratio of low melting temperature in the phase diagram is increased from 5% to 46%. With controlling the content of B₂O₃ at 13%~16%, the melting temperature is 1 100~1 200 ℃, which is suitable for the smelting of amorphous master alloy. The experimental results indicate that the melting temperature is 1 150±25 ℃, which is consistent with the simulated ones.

Key Words: Refining Slag, Boron Oxide, Melting Temperature

铁基非晶合金有很多优良特性,用非晶合金做铁芯生产的新一代节能变压器,节能达 79% 以上,而且非晶合金研究领域也越来越广泛^[1~6]。非晶母合金的生产主要分真空冶炼和非真空冶炼,非真空冶炼生产主要问题是 B 收得率较低、气体含量较高,生产成本相对较高。非晶母合金质量不稳定,对于大批量生产高性能、低成本非晶合金影响较大。付庆林等^[7]利用转炉精炼生产线,与中频炉冶炼联合,开发了相对规模化生产的铁基非晶合金母材工艺技术。一些厂家采用 EBT+LF+VD+铸锭工艺生产非晶母合金,李白松等^[8]经喷带制备非晶合金,性能较优异,成效显著^[8]。

精炼渣成分、熔化温度、粘度等因素综合影响精炼渣性能^[9]。一般精炼渣熔化温度比合金熔点低 50~100 ℃^[10],以确保合金液对精炼渣加热时,渣料快速熔

化,覆盖于合金液上部。精炼渣通常以 CaO、SiO₂ 和 Al₂O₃ 为基本组元,在 CaO-SiO₂-Al₂O₃ 精炼渣系中添加 B₂O₃,有利于精炼渣熔化温度降低。有研究者考察了多元渣系熔化温度与 B₂O₃ 含量的关系^[11~14],发现当碱度一定时,渣熔化温度随 B₂O₃ 含量升高而降低。

精炼渣成分及其物性是影响非晶母合金液质量的重要因素,目前对含硼低熔化温度非晶母合金精炼渣系的研究较少。本课题针对 FeSiB 非晶母合金精炼工序,研究适用于 LF 炉的含硼低熔化温度精炼渣,分析合金液二次氧化及热损失,提高精炼渣吸附夹杂能力,发挥精炼渣的作用,为提高合金液及带材质量提供参考。

1 非晶母合金精炼渣计算与模拟

在精炼炉内用非晶母合金精炼渣精炼非晶母合金

收稿日期:2020-09-12;修改稿收到日期:2021-03-13
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51774139);河北自然科学基金资助项目(E2020209014);国家留学基金资助项目(201908130086);邢台市重点研发资助项目(2020ZC025)
第一作者简介:吕晓芳,女,1979 年出生,讲师,河北邢台(054000),E-mail:gyyzhao@163.com
通信作者:赵定国,男,1981 年出生,教授,河北唐山(063000),E-mail:zhaodingguo@ncst.edu.cn
引用格式:吕晓芳,张印棠,陈洋,等. 含硼低熔化温度非晶母合金精炼渣系分析及试验研究[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(7):896-900.
LÜ X F, ZHANG Y T, CHEN Y, et al. Analysis and experiments of low temperature refining slag with boron oxide[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(7):896-900.

液时,精炼渣的熔化温度应当低于非晶母合金液的熔点。FeSiB 非晶合金主要化学成分(质量分数)为 5.48% 的 Si, 2.51% 的 B, 0.04% 的 C, 0.05% 的 Mn, 0.01% 的 P, 0.005% 的 O, 0.005% 的 N, 0.004% 的 S, 0.003% 的 Ni, 0.005% 的 Al, 0.002% 的 Mo, 其余为 Fe。按照合金熔点计算公式 $T=1\,535-8[C]-80[B]-65[C]-30[P]-80[O]-90[N]-25[S]-2.5[Ni]-2.7[Al]-1.7[Mo]$, 其中, $[M]$ 为元素的质量分数, M 代表各组成元素, 可得 FeSiB 非晶合金熔点为 $1\,251\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

精炼渣中加入 B_2O_3 组元的主要作用是降低精炼渣熔化温度, 非晶母合金的精炼渣中加入一定质量分数的 B_2O_3 , 增大四元等温相图的低熔化温度区。 B_2O_3 能够破坏 Si-O 键, 有利于熔渣形成较均匀的熔融层, 同时对母合金液又有较好的保护作用。 B_2O_3 在精炼渣熔化时主要有 $[\text{BO}_3]$ 、 $[\text{BO}_4]$ 两种存在形式。当 B_2O_3 质量分数增加, 旧键断裂, 形成新键, 使得熔渣结构变得松散, 流动性变好。FeSiB 合金熔点为 $1\,250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右, 因此设定 $1\,100\sim 1\,200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为精炼渣低熔化温度区。

根据 FactSage7.2 软件模拟得知 B_2O_3 质量分数在 7% 以下对 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 基础精炼渣系的熔点降低幅度少, 低熔点区域范围小, 因此从 B_2O_3 质量分数大于 7% 的精炼渣开始进行热力学计算。 B_2O_3 质量分数大于 20% 会导致精炼渣熔点过低, 且高温下 B_2O_3 挥发量大, 质量分数过高的 B_2O_3 精炼渣在生产实际中应用很少, 因此 B_2O_3 质量分数大于 20% 的精炼渣不进行研究, 由此选择 B_2O_3 含量范围为 7%~20%。

在 FactSage7.2 模拟软件中, 应用 FToxid 数据库和 Phase Diagram Equilib 平衡模块进行 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ 四元精炼渣相图计算, 绘制不同 B_2O_3 含量下 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 三元等温相图, 确定精炼渣的低熔化温度区(即模拟相图中的阴影区域)。

$\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 三元等温相图见图 1。可以看出, 没有低于 $1\,200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低熔化温度区, 所以向 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 三元系中加入不同含量的 B_2O_3 。使用软件作出 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-}x\text{B}_2\text{O}_3$ 的相图($x=7\%, 10\%, 13\%, 16\%, 19\%$)。分析不同 B_2O_3 含量时 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ 四元等温相图, 可得低熔化温度区范围。

图 2 是 B_2O_3 含量为 7% 时, $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ 四元等温相图。低熔化温度区范围为: ①CaO: 区域 1 为 $17.2\%\sim 34.2\%$, 区域 2 为 $35.8\%\sim 38.2\%$; ② SiO_2 : 区域 1 为 $39\%\sim 57.6\%$, 区域 2 为 $32.8\%\sim 36.7\%$; ③ Al_2O_3 : 区域 1 为 $9.95\%\sim 18.8\%$, 区域 2 为 $19.5\%\sim 23.2\%$ 。 B_2O_3 含量为 7% 时四元等温相图中低熔化温度区面积占比为 5%。

图 3 是 B_2O_3 含量为 10% 时, $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$

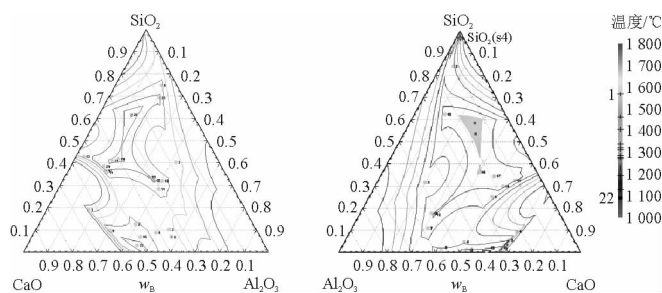


图 1 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 三元等温相图

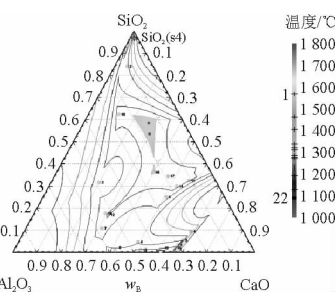


图 2 B_2O_3 含量为 7% 的等温相图

Fig.1 Ternary isotherm phase diagram of $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ Fig.2 Isotherm phase diagram of 7% B_2O_3

B_2O_3 四元等温相图。低熔化温度区范围为: ①CaO 含量为 $11.16\%\sim 45.04\%$; ② SiO_2 含量为 $24.8\%\sim 56.3\%$; ③ Al_2O_3 为 $7.92\%\sim 30.51\%$ 。 B_2O_3 含量为 10% 时四元等温相图中低熔化温度区面积占比为 11%。

图 4 是 B_2O_3 含量为 13% 时, $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ 四元等温相图。低熔化温度区范围: ①CaO 含量为 $9.2\%\sim 50.5\%$; ② SiO_2 含量为 $0\sim 57.7\%$; ③ Al_2O_3 含量为 $8.4\%\sim 54.7\%$ 。 B_2O_3 含量为 13% 时四元等温相图中低熔化温度区面积占比为 25%。

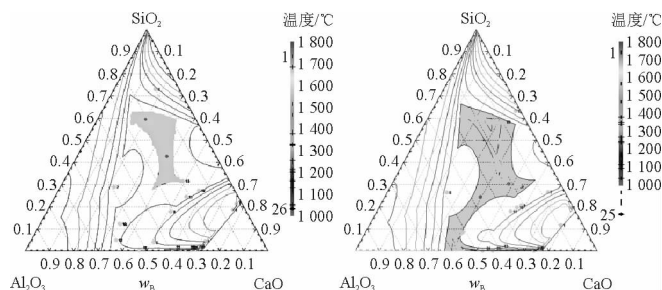


图 3 B_2O_3 含量为 10% 的等温相图

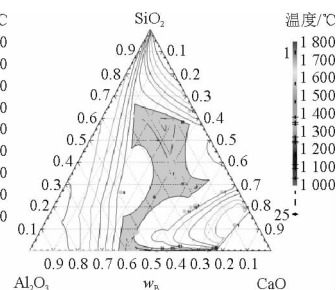


图 4 B_2O_3 含量为 13% 的等温相图

Fig.3 Isotherm phase diagram of 10% B_2O_3

Fig.4 Isotherm phase diagram of 13% B_2O_3

图 5 是 B_2O_3 含量为 16% 时, $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ 四元等温相图。低熔化温度区范围为: ①CaO 含量为 $0\sim 57\%$; ② SiO_2 含量为 $0\sim 61\%$; ③ Al_2O_3 含量为 $0\sim 52.5\%$ 。 B_2O_3 含量为 13% 时四元等温相图中低熔化温度区面积占比为 36%。

图 6 是 B_2O_3 含量为 19% 时, $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ 四元等温相图。低熔化温度区范围为: ①CaO 含量为 $0\sim 67.7\%$; ② SiO_2 含量为 $0\sim 52.5\%$; ③ Al_2O_3 含量为 $12.8\%\sim 100\%$ 。 B_2O_3 含量为 19% 时四元等温相图中低熔化温度区面积占比为 46%。低于 $1\,200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低熔化温度区各成分范围见表 1。

从图 2~图 6 可见, $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-B}_2\text{O}_3$ 四元精炼渣系的最小最低温度为 $820\text{ }^{\circ}\text{C}$, 最大最低温度为 $1\,086\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温度要低于不含 B_2O_3 的 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ 三

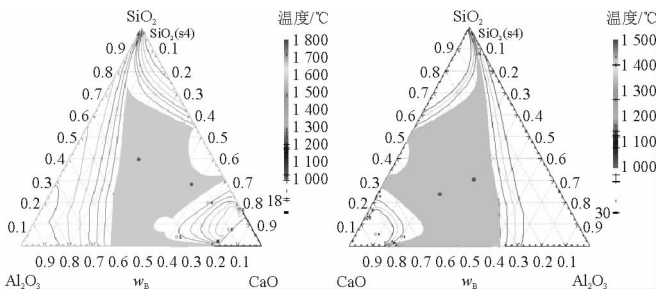


图 5 B₂O₃ 含量为 16% 的等温相图

Fig. 5 Isotherm phase diagram of 16% B₂O₃

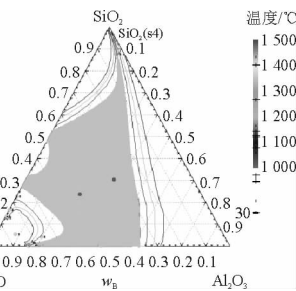


图 6 B₂O₃ 含量为 19% 的等温相图

Fig. 6 Isotherm phase diagram of 19% B₂O₃

表 1 不同 B₂O₃ 含量下低熔化温度区各组分范围
Tab.1 Content range of each component in the low melting point region with different contents of B₂O₃ %

B ₂ O ₃	w _B		
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃
7	17.2~34.2/ 35.8~38.2	39~57.6/ 32.8~36.7	9.95~18.8/ 19.5~23.2
10	11.16~45.04	24.8~56.3	7.92~30.51
13	9.2~50.5	0~57.7	8.4~54.7
16	0~57	0~61	0~52.5
19	0~67.7	0~52.5	12.8~100

元精炼渣系的最低温度为 1 184 ℃。CaO-SiO₂-Al₂O₃-B₂O₃ 四元精炼渣系等温相图低熔化温度区比不含 B₂O₃ 的 CaO-SiO₂-Al₂O₃ 三元等温相图低熔化温度区要大。随着 B₂O₃ 含量增加,CaO-SiO₂-Al₂O₃-B₂O₃ 三元精炼渣系等温相图低熔化温度区的面积也在增大,从 5% 到 46%。B₂O₃ 含量为 7% 时,四元等温度相图的低熔化温度区分为两个区域;当 B₂O₃ 含量增加为 10% 时,低熔化温度区开始增大并且开始连成一片;当 B₂O₃ 含量继续增加为 13% 时,低熔化温度区增大,向下部区域扩展;当 B₂O₃ 含量增加至 16% 时,低熔化温度区增大并向外扩展;当 B₂O₃ 含量增加至 19% 时,低熔化温度区明显左移,CaO 质量分数减小,Al₂O₃ 质量分数增加,不利于低氧控制,所以将 B₂O₃ 含量控制为 16% 较适宜。

四元等温相图上小于 1 200 ℃ 的低熔化温度区面积比见图 7。由图 7 可见,CaO-SiO₂-Al₂O₃-B₂O₃ 四元精炼渣中添加 B₂O₃ 的质量分数从 7%~19%,低熔化温度区面积比呈增大趋势。当 B₂O₃ 含量为 19% 时,低熔化温度区面积占比达到 46%,精炼渣低熔化温度物质比例过大。精炼渣熔化温度过低会增加钢水面裸露和二次氧化的风险、钢水中的夹杂物、精炼渣的消耗、成本,所以精炼渣的温度不宜过低,控制四元 CaO-SiO₂-Al₂O₃-B₂O₃ 渣系中 B₂O₃ 含量在 13%~16% 为宜。

随 B₂O₃ 质量分数增加,低于 1 200 ℃ 的低熔化温度区不断扩大。在 CaO-SiO₂-Al₂O₃-B₂O₃ 四元等温相图低熔化温度区内选取 10 组精炼渣,即相图中黑色点

标记。精炼渣成分含量选取远边界的低碱度点,确定的精炼渣试样成分见表 2。

表 2 各组试样成分与温度
Tab.2 Component and temperature of samples

试样 分组	w _B /%				R	开始熔化 温度/℃	完全熔化 温度/℃
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	B ₂ O ₃			
1	25	24	32	19	1.0	772	1 119
2	25	32	20	19	0.78	772	1 071
3	25	34	25	16	0.73	772	1 137
4	34	42	8	16	0.80	870	1 141
5	35	35	17	13	1.0	870	1 150
6	30	22	35	13	1.36	936	1 219
7	27	45	18	10	0.6	819	1 146
8	18	54	18	10	0.33	878	1 190
9	38	38	17	7	1.0	1 012	1 245
10	28	56	9	7	0.5	870	1 226

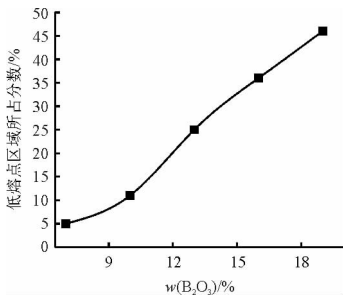


图 7 不同 B₂O₃ 含量下低熔化温度区比例
Fig.7 Proportion of low melting area with different B₂O₃ content

B₂O₃ 含量在 19% 时两组试样半球点温度均与低熔化温度区温度较大,精炼渣造渣困难,故 1、2 两组不合适。精炼渣熔化温度要求低于母合金 50~100 ℃,第 3、7、8 组试样的完全熔化温度不符合要求,同时 3、6、7、8 组试样半球点温度低于 1 100 ℃,也不满足拟定的 1 100~1 200 ℃ 温度区间。9 组半球点温度因接近于 1 200 ℃,同时完全熔化温度为 1 245 ℃,而 10 组完全熔化温度为 1 226 ℃,高于 1 200 ℃ 较多,且 CaO 质量分数低,导致精炼渣熔化后流动性不好,故也不合适。综合来看,4、5 两组均符合要求,因此选择这两组成分进行热态试验研究。

2 热态试验方法及过程

采用半球点法测定非晶母合金精炼渣熔化温度。试验设备为熔化温度测定仪,包括控温装置、测温装置、加热装置和图像采集及处理装置。加热装置部分采用铂铑丝(最高测定温度为 1 500 ℃),管式炉炉膛恒温带长度为 10 mm。试样熔化过程由摄像机实时捕捉显示在计算机屏幕上并自动保存数据,见图 8。

首先将精炼渣原料 CaO、SiO₂、Al₂O₃、B₂O₃ 按比例配制,放入球磨机中研磨至 200 目。取混和均匀的渣样 5~10 g,与无水乙醇混合,在制样器内压制成直径为

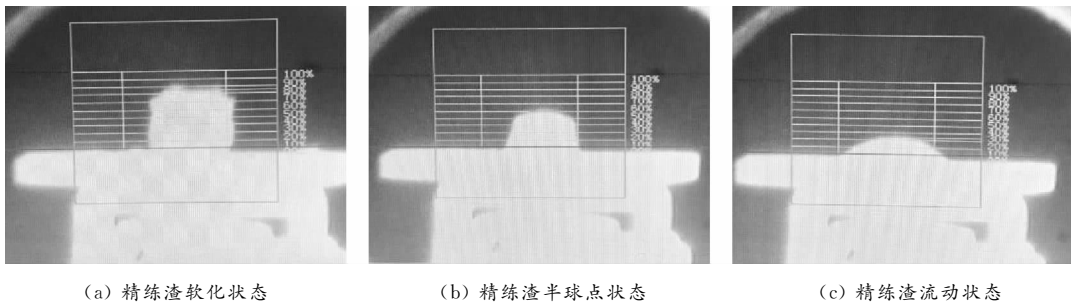


图 8 精炼渣熔化过程

Fig.8 Melting process of refining slag

3 mm、高为 3 mm 的圆柱试样,每组试样 3 个。管式炉预热达到 200 ℃,用镊子把试样置于托样管上。管式炉升温,开展熔化温度测定试验。试验完成后,管式炉降温,用镊子取出试样。

3 试验结果及分析

试验过程中,当试样的高度降低至原始高度 75% 时的温度称为“软化温度”(softening temperature);当试样的高度降低至原渣柱高度 50% 时的温度称为“半球点温度”或“熔化温度”(melting temperature),试样顶部变为半球形;当试样高度降低至原高度 25% 时的温度称为“流淌状态”(flowing temperature);当试样由固体全部转变为液体的临界温度称为完全熔化温度。熔化收缩率 k 是指试样在不同温度下加热熔化体积与试样熔化前总体积的比值。

图 9 为本试验试样不同状态下的测定温度。对比 CaO-SiO₂-Al₂O₃ 精炼渣系各组试样的熔化状态可见, B₂O₃ 对渣系的开始软化温度和半球点温度均有降低作用。试样 10 开始软化到半球点温度速率变化较快,半球点温度到完全熔化温度变化较慢。

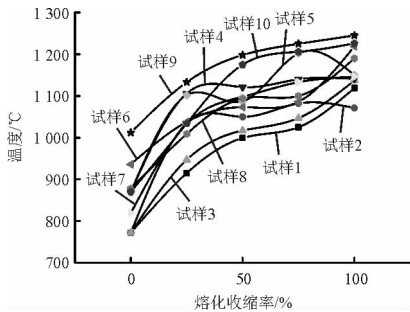


图 9 试样的熔化收缩率与温度之间的关系
Fig.9 Relationship between melt shrinkage and temperature of samples

与软件模拟的结果相比,第 4 组试验结果半球点温度约高 20 ℃,而第 5 组试验结果半球点温度约低 30 ℃,二者结果与模拟结果相一致。第 4 组完全熔化温度为 1 161 ℃,碱度与半球点温度符合要求,第 5 组完全熔化温度为 1 216 ℃,虽超过 1 200 ℃,由于碱度与半球

点温度也符合要求,精炼渣熔化温度超过较少,基本符合要求。总之第 4、5 组试样半球点温度约为 1 150 ℃,适合做非晶母合金的精炼渣。

由软件模拟计算的精炼渣熔化收缩率与温度之间的关系可见,模拟的完全熔化温度高于试验值,模拟的开始熔化温度低于试验值,但均相差不大,精炼渣的最主要温度是半球点温度;软件模拟与试验结果基本一致,变化趋势相符。

4 结 论

(1) B₂O₃ 的加入可降低精炼渣熔化温度,精炼渣中 B₂O₃ 含量控制在 13%~16% 时,熔化温度在 1 100~1 200 ℃,对非晶母合金冶炼较适宜。软件模拟表明, CaO-SiO₂-Al₂O₃-B₂O₃ 四元渣系中 B₂O₃ 比例从 7% 到 19% 变化时,等温相图中低熔化温度区面积占比由 5% 增大至 46%。

(2) 从 CaO-SiO₂-Al₂O₃-B₂O₃ 四元相图中选取了适宜成分的精炼渣,确定了不同 B₂O₃ 含量下的渣系成分。精炼渣熔化温度试验表明,4、5 组试样半球点温度均约为 1 150 ℃,试验结果与模拟结果相一致。

(3) 结合软件分析与试验,得到 CaO-SiO₂-Al₂O₃-B₂O₃ 四元精炼渣中 B₂O₃ 含量为 13%~16% 较合适,优化的精炼渣成分为 16% 的 B₂O₃, 34% 的 CaO, 42% 的 SiO₂, 8% 的 Al₂O₃, 或 13% 的 B₂O₃, 35% 的 CaO, 35% 的 SiO₂, 17% 的 Al₂O₃。

参 考 文 献

[1] 李春燕,朱福平,丁娟强,等. 非晶合金热塑性微成型技术研究概况及发展趋势[J]. 功能材料,2018,49(11):11 033-11 040.
[2] 李翔,吕方,陈晨,等. 非晶合金的性能、形成机理及应用[J]. 有色金属材料与工程,2016,37(5):233-237.
[3] WANG T, YANG X, LI Q. Effect of Cu and Nb additions on crystallization kinetics of Fe₈₀P₁₃C₇ bulk metallic glasses[J]. Thermochimica Acta, 2014, 579: 9-14.
[4] ZHANG H, ZHU L, JIANG S S, et al. Recovering the bending ductility of the stress-relieved Fe-based amorphous alloy ribbons by cryogenic thermal cycling[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 790: 529-535.

蛇形通道制备工艺对 6061 铝合金半固态浆料的影响

耿晓鑫 毛卫民 李乃拥
(北京科技大学材料与科学工程学院)

摘 要 采用石墨蛇形通道制备了 6061 铝合金半固态浆料,研究了浇注温度、弯道内径以及 Si 含量对半固态浆料组织的影响。结果表明,蛇形通道制备的 6061 铝合金半固态浆料比传统铸造工艺得到的组织球化和细化效果更好。初生 α -Al 晶粒细化至 66.37 μm 。随着 Si 含量增加,晶粒球化效果和细化效果更显著。当 Si 含量为 1.2% 时,初生 α -Al 晶核的平均晶粒直径和形状因子分别为 42.85 μm 和 0.83。当浇注温度为 660~690 $^{\circ}\text{C}$,通道内径为 20 mm 时,制备的 6061 铝合金半固态浆料更好。

关键词 蛇形通道;6061 铝合金;半固态;组织演变

中图分类号 TG146.21;TG249.2 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.07.022

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effect of Serpentine Channel Preparation Method on Semi-solid Slurry of
6061 Aluminum Alloy

Geng Xiaoxin, Mao Weimin, Li Naiyong

(School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing)

Abstract: The semi-solid slurry of 6061 aluminum alloy was prepared via a serpentine pouring channel. The influences of pouring temperature, bend inner diameter and the content of Si element on microstructure of the alloy slurry were investigated. The results indicate that the semi-solid slurry prepared by the serpentine channel has superior spheroidization and refinement effects to the traditional casting process, where the primary α -Al grains are refined to 66.37 μm . With the Si content increasing, the spheroidizing and refining effect of grains become more significant. When the Si content is 1.2%, the average grain diameter and shape factor of the primary α -Al grain are 42.85 μm and 0.83, respectively. When the pouring temperature is 660~690 $^{\circ}\text{C}$ and the channel inner diameter is 20 mm, the prepared semi-solid slurry of 6061 aluminum alloy has a desirable effect.

Key Words: Serpentine Channel, 6061 Aluminum Alloy, Semi-solid, Microstructure Evolution

收稿日期:2020-10-08;修改稿收到日期:2021-01-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51771032)

第一作者简介:耿晓鑫,女,1996 年出生,硕士研究生,北京(100083),E-mail:gxx19801207274@163.com

通信作者:毛卫民,男,1958 年出生,教授,北京(100083),E-mail:mao_wm@ustb.edu.cn

引用格式:耿晓鑫,毛卫民,李乃拥. 蛇形通道制备工艺对 6061 铝合金半固态浆料的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(7):900-904.

GENG X X, MAO W M, LI N Y. Effect of serpentine channel preparation method on semi-solid slurry of 6061 aluminum alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(7):900-904.

[5] BHARATH K, AROUT CHELVANE J, MAHESH KUMAR KU-MAWAT, et al. Theoretical prediction and experimental evaluation of glass forming ability, density and equilibrium point of Ta based bulk metallic glass alloys[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2019, 512:174-183.

[6] 傅明喜, 李岩, 查燕青, 等. Cu 和 Ni 对铁基合金玻璃形成能力及热稳定性的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2006, 26(4):196-198, 189.

[7] 付庆林, 尹卫平. 双联法冶炼铁基非晶合金母材的工业化技术开发[J]. 山东冶金, 2015, 37(5):8-9.

[8] 李百松, 姚书芳, 韩欢庆, 等. Fe 基非晶合金熔渣的性能研究[J]. 铸造技术, 2015, 36(1):1-3.

[9] 赵和明, 谢兵. LF 炉精炼渣冶金性能的研究现状[J]. 钢铁钒钛, 2002, 23(4):53-58.

[10] 曹立军, 王静松, 黄书友, 等. 覆盖渣技术在重熔非晶母合金中的应用[J]. 过程工程学报, 2010, 10(S1):48-52.

[11] WEN G H, SRIDHAR S, TANG P, et al. Development of fluoride-free mold powders for peritectic steel slab casting[J]. ISIJ International, 2007, 47(8):1 117-1 125.

[12] DGC R S O. Kinetic model for refining by submerged power injection: Part 1 Transitory and permanent contact reactions[J]. Iron-making and Steelmaking, 1984, 11:262-265.

[13] 巨建涛, 吕振林, 焦志远, 等. CaF_2 - SiO_2 - CaO 渣系的非等温挥发行为[J]. 过程工程学报, 2012, 12(4):618-624.

[14] YOU X M, JIANG Z H, LI H B. Ultra-Pure ferritic stainless steels-grade, refining operation, and application[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2007, 14(4):24-30.

(编辑:张正贺)