

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 对铁基金属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)

6061 铝合金具有良好的力学性能,而且可通过阳极氧化着色,广泛应用于航空、航天、电子及汽车等领域^[1~7]。但是因为 6061 铝合金属于变形铝合金,其铸造性能较差,采用传统的铸造易发生热裂。半固态成形技术可结合固态和液态金属成形的优势,是合适的 6061 铝合金生产工艺。有关变形铝合金半固态成形工艺的研究较多。研究者相继用倾斜板冷却法^[8,9]、自孕育法^[10,11]、CDS^[12]、NRC^[13]、SRC^[14]等方法制备变形铝合金的半固态浆料。在半固态成形技术中,浆料的制备是关键。蛇形通道法制备半固态浆料通道内壁的激冷作用和异质形核,并通过后续的紊流和自搅拌作用下使晶核生长为球状晶,最终获得非枝晶浆料组织^[15~22]。本课题主要研究了浇注温度、通道内径和 Si 含量对 6061 铝合金半固态浆料的影响,旨在为其应用提供参考。

1 试验材料及设备

选用 6061 铝合金,通过加入 Al-44Si 中间合金来调节 Si 含量,试验合金的化学成分见表 1。

表 1 6061 合金的化学成分

合金	w _B								%
	Si	Mg	Cu	Cr	Ti	Fe	Zn	Mn	Al
6061	0.6	1.0	0.3	0.2	0.1	0.2	0.25	0.15	余量
6061-I	0.8	1.0	0.3	0.2	0.1	0.2	0.25	0.15	余量
6061-II	1.0	1.0	0.3	0.2	0.1	0.2	0.25	0.15	余量
6061-III	1.2	0.99	0.3	0.2	0.1	0.2	0.25	0.15	余量

图 1 为 6061 铝合金的 DSC 曲线。其固、液相线温度区间为 578~646 ℃,固、液相温度范围为 68 ℃。

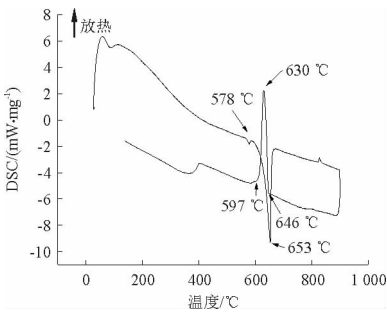


图 1 6061 铝合金的 DSC 曲线

Fig.1 DSC curves of 6061 aluminum alloy

将电阻熔炼炉加热至 800 ℃左右,使 6061 铝合金完全熔化。然后按照计算得到的质量配比向熔化后的合金熔体中加入 Al-44Si 中间合金来调节 Si 含量。保温 1 h 左右,然后精炼、除气、扒渣。待合金液成分均匀后,取出石墨坩埚,对坩埚中的合金熔体进行测温,然后降温至浇注温度。在浇注前,对蛇形通道和石墨坩埚进行预热,将合金熔体以固定的速度倒入石墨制蛇形通道

内,然后在蛇形通道下方将流出的合金熔体收集到坩埚内,采用测温设备对合金熔体在出口处和收集坩埚内熔体的温度进行检测。待合金熔体全部流入到收集坩埚内,将收集到的半固态浆料立即放入冷水中进行冷却(注意不能让冷却水进入坩埚内)。蛇形通道制备半固态 6061 铝合金浆料示意图见图 2。

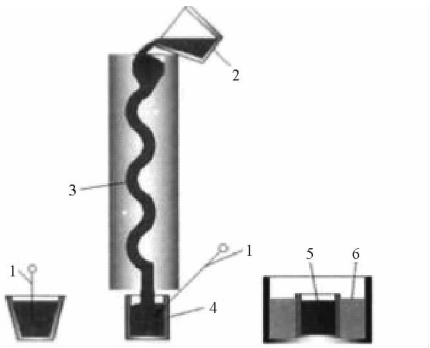


图 2 蛇形通道制备半固态浆料

Fig.2 Preparation of semi-solid slurry by serpentine channel

- 1.K 型热电偶 2.熔化坩埚 3.蛇形通道管 4.收集坩埚
5.浆料 6.冷却水

图 3 为制备 6061 铝合金半固态浆料的金相组织取样示意图。通过 Image-Proplus 软件对晶粒的周长 P 、面积 A 、数目 N 进行统计分析。再通过以下公式计算平均晶粒直径 D 和形状因子 F 。

$$D=2(A/\pi)^{1/2} \tag{1}$$

$$F=4\pi A/P^2 \tag{2}$$

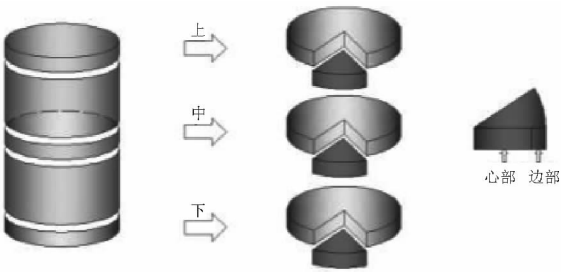


图 3 6061 铝合金半固态浆料金相试样取样位置

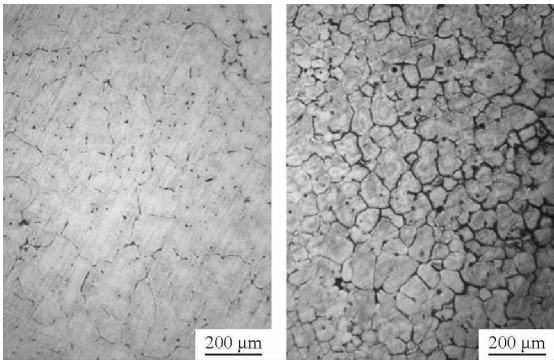
Fig.3 Metallographic specimen sampling of semi-solid 6061 aluminum alloy slurry

2 试验结果分析

2.1 6061 铝合金的显微组织

图 4 为两种工艺下制备的 6061 铝合金的显微组织。由图 4a 看出,传统工艺(未采用蛇形通道)制备的铝合金铸态组织中初生 α -Al 晶粒为白色的枝晶,尺寸较大,在 100 μm 以上,非平衡共晶在晶界呈不连续网状分布,晶内还存在很多不均匀分布的点状和针状相。图 4b 中蛇形通道弯道数量为 4、通道内径为 20 mm,浇注温度为 690 ℃。可以看出,初生 α -Al 相得到了明显

的细化和球化,表现出比常规铸造更圆整的形态,平均晶粒直径和形状因子分别为 $64.51\ \mu\text{m}$ 和 0.73。对比图 4a 和图 4b 可得出,蛇形通道能明显改善 6061 铝合金的组织形貌,使得初生 $\alpha\text{-Al}$ 晶粒变得细小和圆整。



(a) 传统凝固组织 (b) 蛇形通道凝固组织

图 4 两种工艺制备 6061 铝合金的凝固组织

Fig.4 Microstructure of 6061 aluminum alloy prepared by tradition casting and serpentine channel method

2.2 浇注温度对 6061 铝合金半固态浆料组织的影响

采用弯道数量为 4,通道内径为 25 mm 的蛇形通道制备半固态 6061 铝合金浆料。选取的浇注温度分别为 660、675、690、705、720 $^{\circ}\text{C}$ 。所得半固态 6061 铝合金浆料组织见图 5。可以看出,当浇注温度为 660 $^{\circ}\text{C}$ 时,

浆料边部组织球化和细化效果较好,大多为球状晶和近球状晶,心部浆料组织中树枝晶比例明显增多,只有少数的球状晶,大小分布都很不均匀。当浇注温度为 675 $^{\circ}\text{C}$ 时,浆料边部组织晶粒尺寸略有增加,晶粒大小和分布都较为均匀,心部组织中球状晶所占比例略小,晶粒大小分布不均匀;当浇注温度为 690 $^{\circ}\text{C}$ 时,浆料边部组织的球化和细化效果显著,晶粒几乎由球状和近球状晶粒组成,有少量的大尺寸的蔷薇状晶粒,晶粒尺寸也比较均匀;心部组织与边部组织相差不大,尺寸略有增加,晶粒也几乎由近球状晶组成;当浇注温度为 705 $^{\circ}\text{C}$ 时,边部的浆料组织存在明显的固液偏析,蔷薇状晶粒占比较大,且尺寸都比较大,最大的尺寸达 $130\ \mu\text{m}$;心部的浆料组织较边部的组织,晶粒有所细化,但组织中存在很多明显的树枝晶。当浇注温度为 720 $^{\circ}\text{C}$ 时,边部浆料中初生相绝大多数是蔷薇状晶粒,只有少量的近球状晶粒,初生 $\alpha\text{-Al}$ 相晶粒尺寸比较大,且分布不均匀;心部浆料组织中初生 $\alpha\text{-Al}$ 相主要由树枝状晶粒和蔷薇状晶粒组成,还有一部分条状晶粒,各晶粒尺寸差异较大,且分布不均匀。从图 5 还可以看出,当浇注温度为 690 $^{\circ}\text{C}$ 时,边部的浆料组织和心部浆料组织大体相同,表明边部和心部的温度场和浓度场均较均匀。结果表明,采用 4 弯道、内径为 25 mm 的蛇形通道、690 $^{\circ}\text{C}$ 的浇注温度

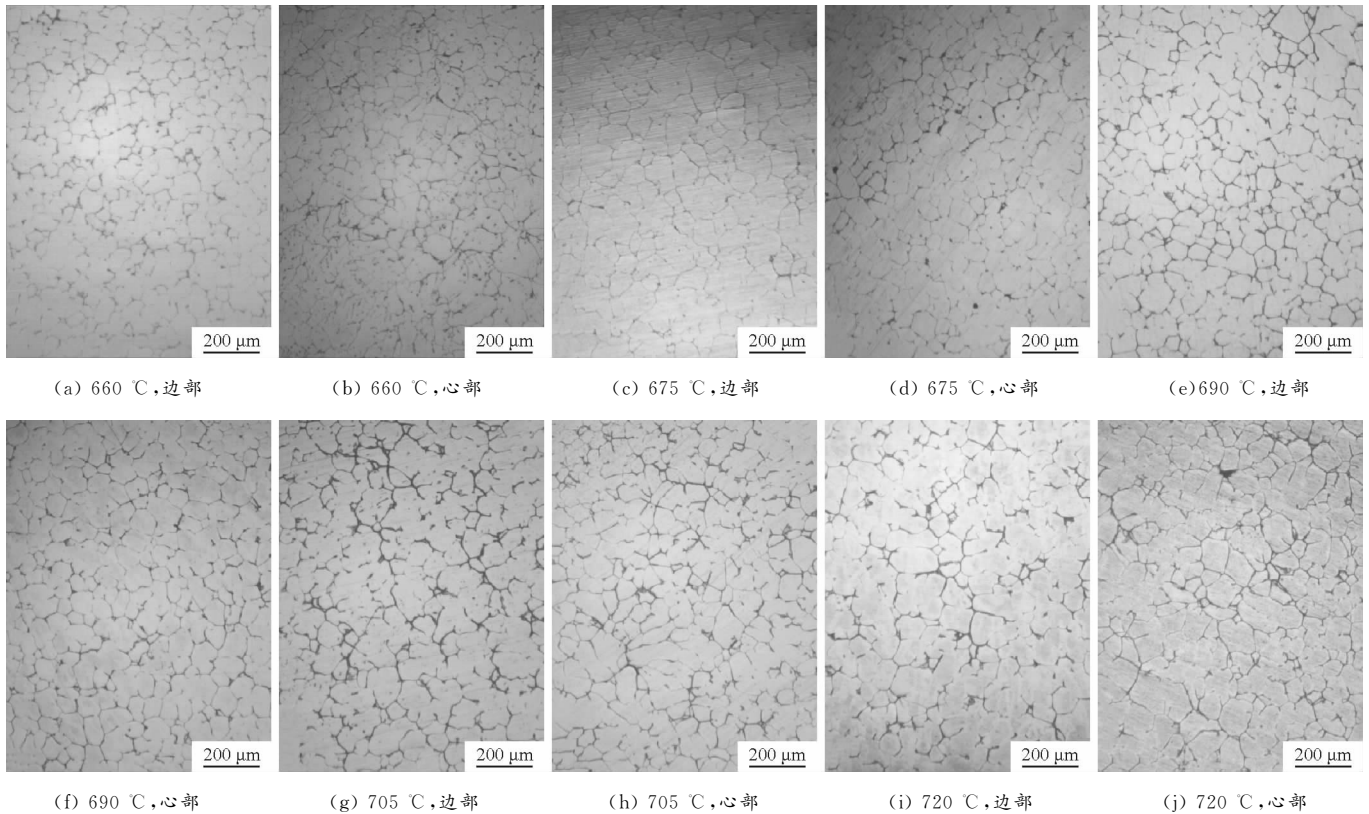


图 5 通道内径为 25 mm、不同浇注温度下半固态 6061 铝合金浆料的显微组织

Fig.5 Microstructure of semi-solid 6061 aluminum alloy slurry with the channel inner diameter of 25 mm at different pouring temperatures

能够获得具有非枝晶的浆料组织,且细化与球化效果均较好。

合金液流经蛇形通道时,蛇形通道内壁温度比较低,会产生激冷效果,在一定的过冷度下形核;同时通道内壁还能充当形核基底,形核功变小,使得形核更容易发生。当浇注温度较高时,合金熔体过冷度较小,形核率比较低,初生 α -Al 晶核数量少。一开始受到激冷作用产生的部分晶核极易受到后续留下来的高温熔体的冲刷和重力作用而发生重熔,使得一部分晶核没有办法继续保留,导致形核率降低,有一部分没有被重熔的晶粒保留下来,在大的冷却速度下很容易向着树枝晶生长。一部分树枝晶会在之后的高温熔体的重力作用下受到冲刷以及蛇形通道内部的自搅拌作用下发生枝晶臂的断裂,进而向蔷薇晶和颗粒晶转变,所以当浇注温度比较高时,半固态浆料组织中是存在比较高比例的树枝晶和蔷薇晶,还有一部分不规则的颗粒晶,球状晶的比例较低。当浇注温度较低时,内壁的骤冷效果较温度高时更加明显,合金熔体整体过冷度比较大,合金熔体的异质形核和激冷形核比较明显,初生 α -Al 相的形核率比较高,能产生较多的初生 α -Al 晶核,而且合金熔体整体温度比较低,所以初生晶核不易发生重熔,绝大多数的初生 α -Al 晶核能够被保留下来。合金熔体在通道

内经过弯道时,熔体的流动状态属于紊流,此处的结构起伏和浓度起伏变大,也有利于形核,使形核数量变多,也会抑制树枝晶状晶粒的生长,使得晶粒中树枝晶的比例大大降低。少量的树枝晶也会在后续熔体的冲刷作用下变为蔷薇状晶和近球状晶,所以浇注温度较低时能获得组织性能良好的 6061 铝合金半固态浆料。

2.3 通道内径对 6061 铝合金半固态浆料的影响

采用弯道数量为 4、通道内径为 20,不同浇注温度下获得的半固态 6061 铝合金浆料的显微组织见图 6。结果表明,当通道内径为 20 mm 时,细化效果和球化效果均优于通道内径为 25 mm 时的浆料(见图 5),所以小的通道内径能够获得更为理想的 6061 铝合金半固态浆料。通道内径小能够获得更为理想的 6061 铝合金半固态浆料。若通道内径减小,蛇形通道内所能容纳的容量也减小,合金熔体散热要较大通道内径加快,更容易达到温度场和浓度场的均匀,合金熔体的形核率增加。而且通道内径减小,流动的熔体需要和通道内壁接触的就变多,而且通道内径减小,曲率会增加,有利于异质形核。同时,改善通道中熔融合金的自搅拌效果可使温度场和浓度场更加均匀,从而促进晶粒的游离。这些初生晶粒游离有利于后续晶核的增殖,从而获得均匀且细小的理想组织。

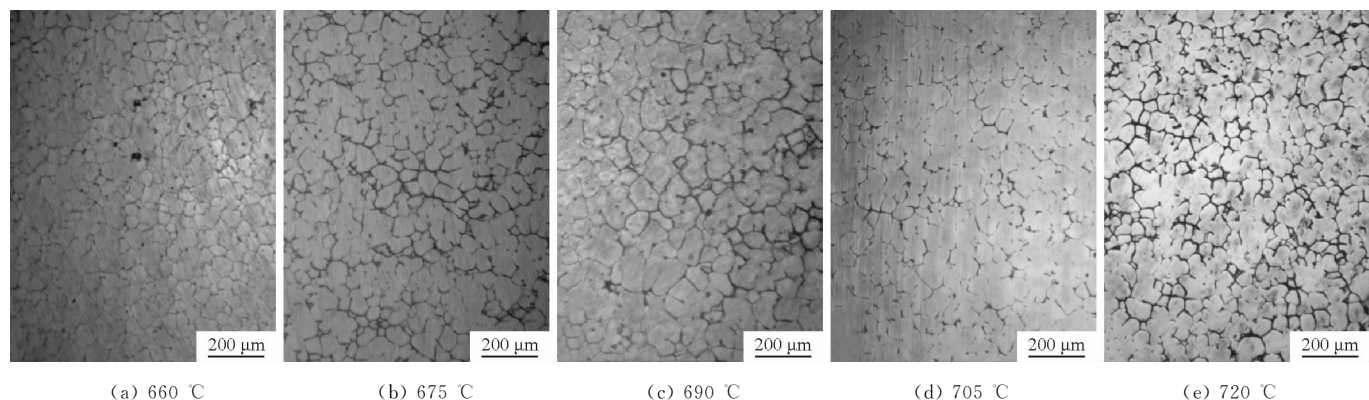


图 6 通道内径为 20 mm 时的 6061 铝合金半固态浆料的显微组织

Fig.6 Microstructure of semi-solid 6061 aluminum alloy slurry with the channel inner diameter of 20 mm

2.4 Si 含量对 6061 铝合金半固态浆料的影响

图 7 是弯道数量为 4、内径为 20 mm 的蛇形通道下制备的不同 Si 含量的铝合金半固态浆料的显微组织。可以看出,随着 Si 含量增加,初生 α -Al 晶粒球化和细化效果越来越好。当 Si 含量为 0.6% 时,初生 α -Al 的平均晶粒直径和形状因子分别为 $66.37 \mu\text{m}$ 和 0.69;当 Si 含量增加至 1.2% 时,初生 α -Al 的平均晶粒直径和形状因子为 $42.85 \mu\text{m}$ 和 0.83。而且晶界处由于 Mg 和 Si 元素的富集,变得极易被腐蚀。

Si 是 6 系铝合金中主要的合金元素, Si 含量的增加可以提高 Si 析出物及 β 相的析出密度。这是由于基

体中过饱和的 Si 会促进沉淀物的形核和长大过程。4 种 Si 含量的铝合金的 Mg、Si 质量比分别为 1.67、1.17、0.95、0.76,均小于 1.73,都属于 Si 过剩型合金。随着 Si 含量增加, Mg、Si 质量比逐渐减小。过剩的 Si 导致形核质点增加,铸态组织晶粒细化效果显著。但是, Si 含量不宜过多, Si 过多会在晶界处产生偏析,导致塑性降低,局部晶界脆化。此外,张志行^[23]通过对 6061 铝合金热裂倾向的正交试验得出当 Si 含量为 1.2%, Mg 含量为 1.0% 时, 6061 铝合金的热裂倾向明显改善。且 Si 含量超过 1.2% 时,对热裂性的改善效果不明显。而且有研究表明,过剩 Si 易在晶界上偏聚形成游离态的 Si,

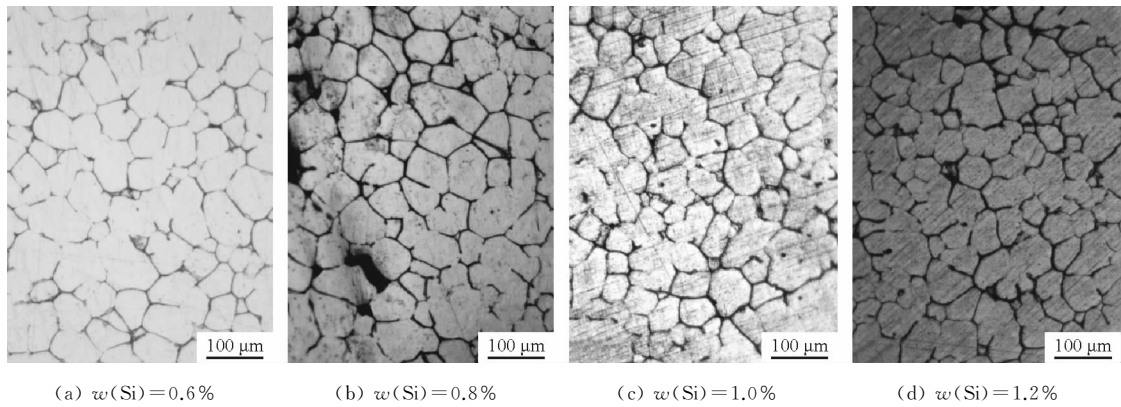


图 7 浇注温度为 690 ℃ 时不同 Si 含量铝合金的半固态浆料显微组织

Fig.7 Microstructure of semi-solid aluminum alloy slurry with different Si contents when the pouring temperature is 690 ℃

从而引起晶界附近 Si 元素贫乏,降低合金的抗腐蚀性和氧化着色能力。由图 7 可知,当 Si 含量在 1.0%~1.2% 时,对于半固态 6061 铝合金浆料组织的球化效果是最好的。对于 Si 含量需要结合对 6061 铝合金流变压铸试样的阳极氧化效果来确定。

3 结 论

(1)采用低的浇注温度制备的 6061 铝合金半固态浆料边部和心部组织均匀,球化和细化效果比较好。但是浇注温度不宜过低,否则容易造成蛇形通道堵塞,影响制备效率。制备 6061 铝合金半固态浆料的适宜温度为 690 ℃ 左右。

(2)通道内径减小,弯道处的曲率半径减小,有助于加强弯道处的紊流效果。蛇形通道的通道内径为 20 mm 时,能获得球化和细化效果更好的半固态 6061 铝合金组织。

(3)Si 含量增加也会使半固态浆料的球化和细化效果更明显。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。

参 考 文 献

[1] MARIOARA C D, ANDERSEN S J, JANSEN J, et al. Atomic model for GP-zones in a 6082 Al-Mg-Si system[J]. Acta Materialia, 2001, 49(2): 321-328.

[2] 林康,董铭锋,刘刚华.6061 铝合金硬质阳极氧化膜性能及腐蚀机理分析[J].轻工科技, 2020, 36(12): 17-18.

[3] 刘伟,吴远志,邓彬.挤压态 6061 铝合金的力学性能及显微组织[J].金属热处理, 2020, 45(9): 172-177.

[4] 付靖.浇注温度对挤压铸造 6016 铝合金组织及力学性能的影响[J].热加工工艺, 2020, 49(21): 57-59.

[5] 刘宏,赵刚,刘春明.6000 系铝合金组织性能的研究进展[J].机械工程材料, 2004, 28(6): 1-4.

[6] 陈勇.6061 铝合金在近快速条件下的凝固行为[D].沈阳:沈阳航空航天大学,2014.

[7] 刘天湖,孙友松.新材料新工艺在新型汽车开发中的应用[J].精密成形工程, 2001, 19(1): 49-52.

[8] 管仁国,赵占勇,钞润泽,等.倾斜板振动熔体处理技术研究与应用进展[J].特种铸造及有色合金, 2012, 37(3): 230-237.

[9] 周麟,杨湘杰,郭洪民.冷却倾斜管法制备铝合金半固态浆料的工艺参数研究[J].热加工工艺, 2008, 37(3): 13-16.

[10] 李元东,杨健,马颖.自孕育半固态制浆技术研究[J].特种铸造及有色合金, 2010, 30(3): 227-230.

[11] 郑宏强,李元东,李明.浇注温度对自孕育法制备半固态 6061 合金组织的影响[J].特种铸造及有色合金, 2015, 35(1): 44-48.

[12] LIU J, CHENG Y S, CHAN S W N, et al. Microstructure and mechanical properties of 7075 aluminum alloy during complex thixo-extrusion[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(12): 3 173-3 182.

[13] 程书建,赵宇宏,侯华,等.蛇形通道浇注法制备半固态 ZL101 铝合金浆料[J].特种铸造及有色合金, 2015, 35(10): 1 067-1 069.

[14] 曹苗,赵娟娟,张琦.SIMA 法制备半固态材料过程中球状晶粒粗化机制的研究[J].精密成形工程, 2020, 12(6): 37-43.

[15] KOMON S. The Controlled Diffusion Solidification Processing: Fundamentals and Principles [D]. Worcester: Worcester Polytechnic Institute, 2009.

[16] KAUDMANN H, MUNDI A, UGGOWITZER P J, et al. An update on the new rheo-casting-development work for Al and Mg alloys[J]. Die Casting Engineer, 2002(4): 16-19.

[17] HELMUT K, UGGOWITZER P J. Metallurgy and processing of high-integrity light metal pressure casting[J]. Aluminum, 2007, 83(7-8): 96-97.

[18] 毛卫民.半固态金属成形技术[M].北京:机械工业出版社, 2004.

[19] 王子超,谭建波.半固态合金浆料制备技术的研究现状[J].工艺技术, 2016(5): 17-22.

[20] 毛卫民,高冲,朱达平.蛇形通道制备半固态铝合金浆料的研究[J].特种铸造及有色合金, 2009, 29 (10): 915-917.

[21] 陈正周,毛卫民,吴宗阔.蛇形通道浇注制备半固态 A356 铝合金浆料微观组织的演变[J].特种铸造及有色合金, 2011, 31(1): 32-35.

[22] 朱文志,毛卫民,涂琴.蛇形通道浇注制备半固态浆料组织的演化[J].铸造, 2014, 63(4): 341-346.

[23] 张志行.6061 铝合金热裂性的影响因素[D].北京:北京科技大学, 2017.

(编辑:刘晨辉)