

浇注温度对重力铸造 Al-10Si-0.3Mg 合金力学性能和热导率的影响

石 帅¹, 闫 俊², 范卫忠², 高伟全²

(1. 河钢集团钢研总院, 河北石家庄 050023; 2. 华劲新材料研究院(广州)有限公司, 广东广州 510115)

摘要: 主要研究了Al-10Si-0.3Mg铝合金重力铸造过程中不同浇注温度对铝合金的力学性能、热导率和微观组织的影响。结果表明: 当浇注温度为650 ℃时, 合金的力学性能与热导率最优; 随着浇注温度的升高, 力学性能与热导率均下降, α 固溶体及初晶硅的尺寸逐渐增大, 共晶硅呈条状, 合金中AlFeSi相由汉字状 α -AlFeSi相转变为大量针状 β -AlFeSi, 严重地割裂了基体, 从而使合金的力学性能下降; 同时共晶Si相逐渐变为细条状, 有害Fe相在合金中的分布较为集中, 从而使得合金晶体的晶格畸变加强, 合金的热导率下降。

关键词: 铝合金; 力学性能; 热导率; 浇注温度; 共晶硅

当今电子信息技术快速发展, 高功率、轻量化、集成化是电子设备的发展方向, 所以, 电子设备的散热面临着挑战。铝合金具备良好的综合性能, 其强度高、密度小、导电导热性能好, 并且易加工切削等优点能满足各种结构件散热系统的要求, 可以广泛地应用于新能源汽车、通讯及电子等领域^[1-4]。高导热材料研究主要集中在变形铝合金及复合材料, 但是其成本较高且成形性较差。铸造铝合金具有良好的流动性, 并且成本较低, 但是热导率较低, 因此开发具有高强高导热的铸造铝合金变得更加重要^[5-6]。

重力铸造过程中主要的参数有温度、速度、时间等, 本次试验主要对温度加以分析。浇注温度是重力铸造过程中重要的热因素之一, 对铸件的质量有重要的影响。当浇注温度过低, 前端合金液遇冷后极易凝固, 流动性变差, 充型困难; 浇注温度升高, 合金结晶前沿温度梯度变大, 形成柱状结晶, 枝状晶组织的倾向增大, 使金属液中悬浮晶尺寸减小, 排气补缩条件得到改善; 过高的浇注温度使合金的收缩增大, 气体在金属液中的溶解度增大以及金属液的氧化加剧, 铸件内部容易形成疏松和气孔等缺陷^[7-8]。本试验结合Al-10%Si-0.3%Mg的液相线温度及铸造生产经验, 在其他参数不变的情况下选择三个浇注温度: 650 ℃、680 ℃、720 ℃。

1 试验方案

1.1 合金成分

本试验设计的Al-10Si-0.3Mg系合金是自行设计的成分, 综合考虑流动性、成形、强度及导热性, 其化学成分如表1所示; 采用的主要原料为99.9%纯铝、2202结晶硅、纯镁锭、75%铁添加剂。

表1 合金的主要成分
Table 1 Main composition of the alloy

	Si	Mg	Fe	Sr	B	Mn	Zn	Al
	10	0.3	0.6	< 0.000 2	0.02	0.006 2	0.017 9	余量

作者简介:

石 帅(1992-), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为高性能铝合金开发与应用。电话: 13840350095, E-mail: 18232538992@163.com

通信作者:

闫 俊, 男, 工程师。电话: 15989182518, E-mail: yanjun615@163.com

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2021)

06-0695-05

收稿日期:

2021-01-19 收到初稿,
2021-03-01 收到修订稿。

1.2 重力铸造过程

配制合金200 kg, 在300 kg电阻炉中熔化。首先进行烘炉, 待炉温达到700 ℃时加入99.9%纯铝锭, 熔化3 h, 待铝锭完全熔化并且铝液温度达到800 ℃时加入2202结晶硅, 升温至850~900 ℃熔硅, 期间不断搅拌, 直至完全熔化。加入铁添加剂, 搅拌, 待完全熔化后加镁块, 镁块完全浸入铝液中, 杜绝明火燃烧, GBF精炼, 铝液温度710~730 ℃, 精炼时间20 min, 转速250~350 rpm, 气体流量5~10 L/min。气体精炼完毕后, 搅拌5 min后进行溶剂精炼, 精炼温度710~730 ℃, 精炼剂使用量按2 kg/t, 精炼时间20 min。扒渣、取样、成分达到设计值稍高时, 搅拌10 min后进行气体精炼。取样, 在斯派克M12 (LAB) 直读光谱仪上进行分析, 采用金属型铸造, 模具预热温度为160 ℃。所成形的标准拉伸试棒 ($\Phi 12$ mm) 见图1。为了研究浇注温度对试样显微组织、力学性能及热导率的影响, 试验一共制备了650 ℃、680 ℃、720 ℃三组浇注温度的试样。

1.3 组织性能分析

采用深圳三思电子万能试验机测试拉伸试棒的力学性能, 拉伸速率为1 mm/mm; 从拉伸试棒顶端取样 (见图1), 通过线切割制成 $\Phi 12.7$ mm \times 2 mm的标准试样, 采用德国耐驰LFA467激光闪射仪测试热导率; 从拉伸试棒中间标距段内取样 (见图1), 通过标准制样程序制备金相试样后, 采用Olympus GX53型显微镜及Phenom XL台式扫描电镜对试样进行显微组织观察和分析。

2 试验结果与讨论

2.1 不同浇注温度下Al-10Si-0.3Mg 铝合金力学性能

为了研究不同浇注温度下合金的力学性能, 本文对试样进行拉伸测试, 并分析试样的抗拉强度、屈服强度和伸长率。取10组同样试件在相同条件下的平均值作为试验值。

从图2中可以看出, 随着浇注温度的升高, 合金的力学性能逐渐下降, 这是因为随浇注温度升高, 金属液吸气倾向会逐渐增大, 金属液的收缩也会增大, 因此铸件的气孔和夹渣等缺陷会增加, 所以会引起力学性能的下降。浇注温度为650 ℃时, 合金的力学性能最优; 当浇注温度从650 ℃升到680 ℃, 抗拉强度和屈服强度分别下降6.7%、8.3%, 伸长率下降14.2%; 当浇注温度从680 ℃升到720 ℃时, 抗拉强度和屈服强度分别下降3.8%、3.0%, 伸长率下降2.6%。随着浇注温度升高, 合金力学性能下降趋势减缓。

2.2 不同浇注温度下Al-10Si-0.3Mg 铝合金热导率及密度

从图3中可以看出, 随着浇注温度的升高, 合金的热导率和密度均下降, 且随着浇注温度升高, 这种下降趋势增加。当浇注温度为650 ℃时, 合金的热导率和密度最高, 分别为172 W/(m·K)和2.65 g/cm³。

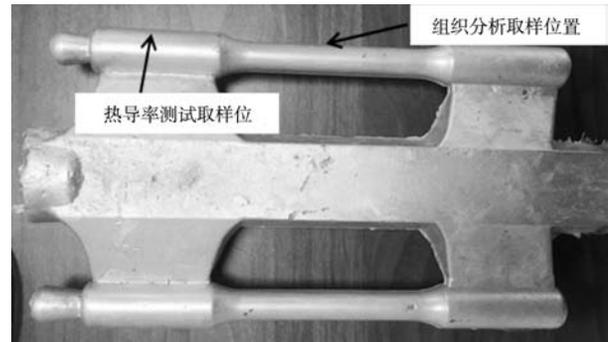


图1 重力铸造力学性能试棒

Fig. 1 Gravity cast tensile bars for testing mechanical properties

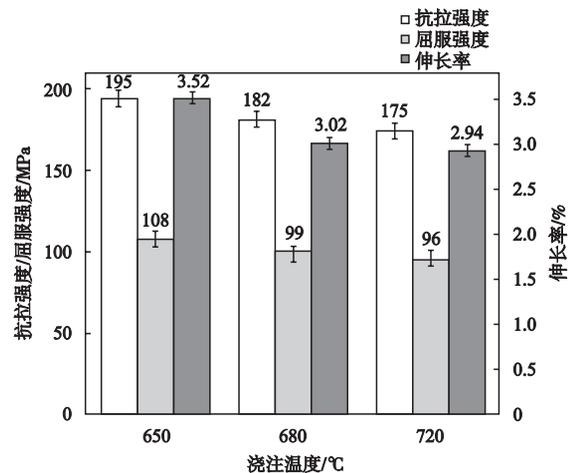


图2 不同浇注温度下Al-10Si-0.3Mg铝合金的力学性能

Fig. 2 Mechanical properties of Al-10Si-0.3Mg aluminum alloy specimens prepared at different pouring temperatures

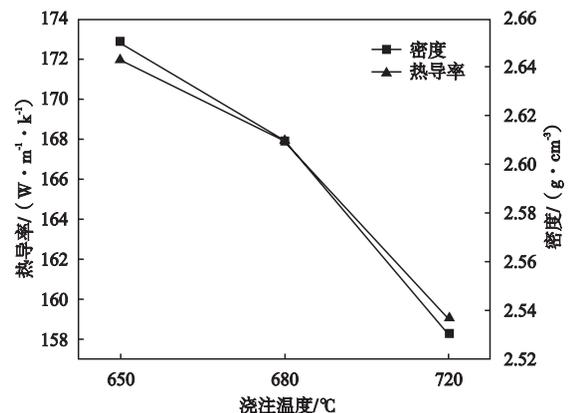


图3 不同浇注温度时Al-10Si-0.3Mg铝合金的热导率与密度

Fig. 3 Thermal conductivity and density of Al-10Si-0.3Mg aluminum alloy specimens prepared at different pouring temperatures

2.3 不同浇注温度下 Al-10Si-0.3Mg 铝合金显微组织

图4分别为不同浇注温度下铸件的金相图，随着浇注温度的升高， α 固溶体及初晶硅的尺寸逐渐增大，共晶硅呈条状，浇注温度从650 °C升到680 °C时，未发现明显的气孔，当浇注温度为720 °C时，金相中发现的明显气孔（图4c）是造成密度下降趋势增大的主要原因。

为进一步分析浇注温度对合金力学性能和热导率的影响，对合金的试样进行扫描电镜观察，如图5所示，并对不同浇注温度下的铸件特征部位进行能谱分析。金相界的灰白色的为共晶硅，以针片状分布在 α (Al) 的晶界上，而且数量比较多， α (Al) 枝晶取向杂乱。浇注温度为650 °C时（图5a），从A点成分来看只含有Al元素是 α (Al)，

从B点的成分含有Al、Si、Fe三种元素，确认是AlFeSi相，Fe通常是以 α -AlFeSi、 β -AlFeSi两种相存在， α -AlFeSi相是以汉字状存在，可以提高合金的强度和硬度， β -AlFeSi相以针状存在，降低合金的韧性^[9-10]。从C点的EDS成分分析来看含有Al、Si、Fe、Mg四种元素，确认是W相。由于铸态下 Mg_2Si 的含量较少，未检测到。

图6所示为浇注温度为650 °C时合金化学元素扫描分析图，其中Al元素的部分呈深红色，含Si元素的部分呈亮黄色，红棕色区域代表Mg元素的分布区域，青蓝色区域为Fe元素分布图。从图中清晰地发现，红色Al元素占据了整个金相照片的视野，证明合金灰黑色色相应为 α (Al) 基体相，青蓝色区域为Fe元素形状。

浇注温度680 °C时合金的SEM形貌和EDS成

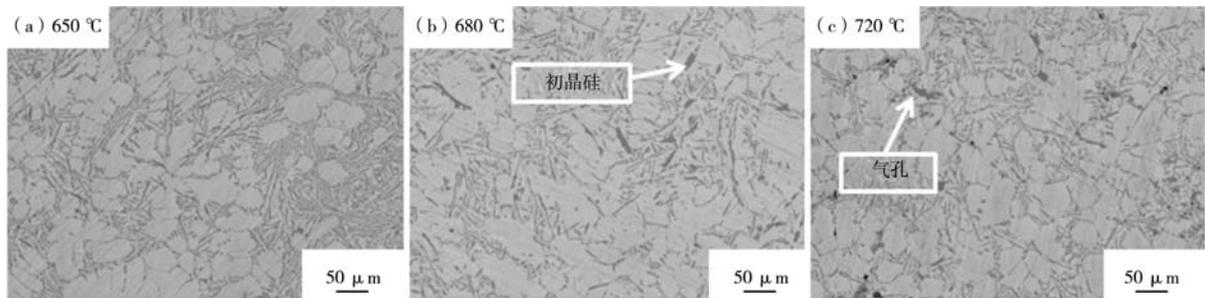


图4 不同浇注温度时Al-10Si-0.3Mg铝合金的微观组织

Fig. 4 Microstructure of Al-10Si-0.3Mg aluminum alloy specimens prepared at different pouring temperatures

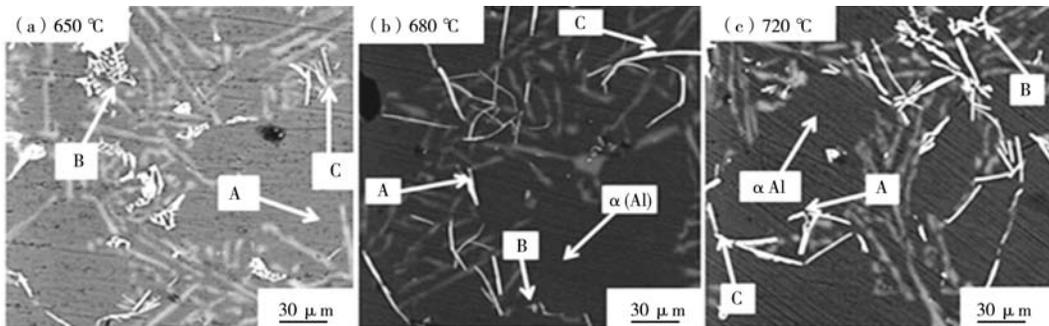


图5 不同浇注温度时Al-10Si-0.3Mg铝合金的SEM形貌

Fig. 5 SEM morphologies of Al-10Si-0.3Mg aluminum alloy specimens prepared at different pouring temperatures

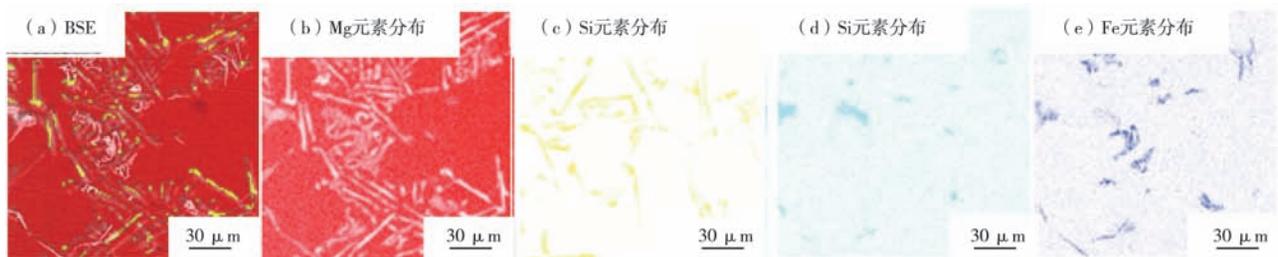


图6 浇注温度为650 °C时合金的面扫描图

Fig. 6 Elemental maps of alloy with pouring temperature of 650 °C

分如图5b及表2所示。A点的成分只含有Al、Si元素，确认是AlSi共晶体，B点和C点都是只含有Al、Si、Fe三种元素，确认是AlFeSi相。相对于650℃时，AlFeSi相由汉字状 α -AlFeSi相转变为大量针状 β -AlFeSi，且分布杂乱无章，严重的割裂了基体，从而使合金的力学性能下降。从图7浇注温度680℃合金的面扫描图中可以看出，Si元素由650℃的汉字状变为细条状，同时呈青色细条状的铁元素在合金中的分布较为集中，从而使得合金晶体的晶格畸变加强，使合金的热导率下降。

浇注温度720℃时合金的SEM形貌和EDS成

分，如图5c及表2所示。从A、B两点EDS中可以看出都含有Al、Si、Fe、Mg四种元素，从C点的EDS成分分析来看，含有Al、Si、Fe，从分子比例来看，确定为 β -Al₁₈Fe₂Si相，黄色Si元素所占据的呈板条状的灰色相应该为共晶Si相。结合图8面扫描分析，Al-10%Si-Mg-Fe四元合金中的相组成包括：白色基体相 α (Al)、灰色板条状共晶Si相、黑色树枝晶Mg₂Si相以及白色针条状AlFeSi相，可以发现硅相变成更加细小的长条状，使得合金的力学性能和热导率进一步下降。

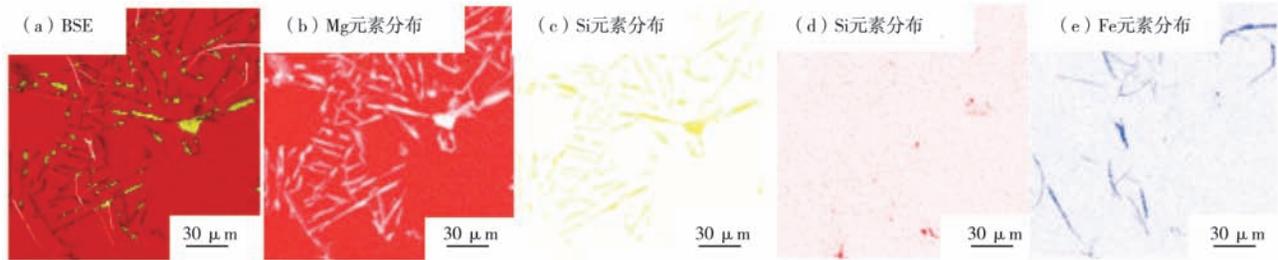


图7 浇注温度680℃合金的面扫描图

Fig. 7 Elemental maps of alloy with pouring temperature of 680 °C

表2 不同浇注温度时Al-10Si-0.3Mg铝合金的EDS成分

Table 2 EDS composition of Al-10Si-0.3Mg aluminum alloy specimens prepared at different pouring temperatures

浇注温度/℃	位置	w _B /%			
		Al	Si	Mg	Fe
650	A点	100			
	B点	59.52	26.21		14.26
	C点	83.33	6.18	0.68	4.81
680	A点	70.67	29.33		
	B点	83.33	6.18		10.04
	C点	71.25	15.47		12.87
720	A点	89.89	6.61	1.10	2.40
	B点	89.89	5.40	1.67	2.28
	C点	72.73	9.09		18.18

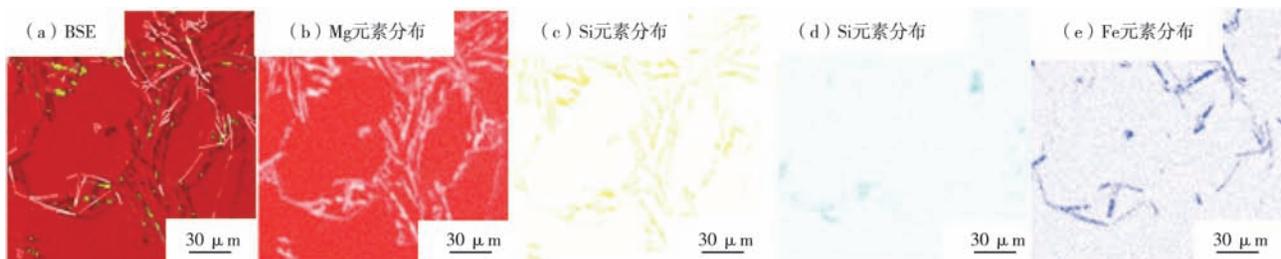


图8 浇注温度720℃合金的面扫描图

Fig. 8 Elemental maps of alloy with pouring temperature of 720 °C

3 结论

(1) 随着浇注温度升高,力学性能与热导率均下降。浇注温度为650℃时,合金的力学性能与热导率为最优,抗拉强度195 MPa,屈服强度108 MPa,伸长率3.52%,热导率为172 W/(m·K)。

(2) 随着浇注温度的升高,金相中 α 固溶体及初晶硅的尺寸逐渐增大,共晶硅呈条状,当浇注温度为720℃时,金相中发现明显的气孔,气孔是造

成密度下降趋势增大的主要原因。

(3) 通过扫描电镜观察,浇注温度升高时,合金中AlFeSi相由汉字状 α -AlFeSi相转变为大量针状 β -AlFeSi,严重的割裂了基体,从而使合金的力学性能下降;同时共晶Si相逐渐变为细条状,有害Fe相在合金中的分布较为集中,从而使得合金晶体的晶格畸变加强,使合金的热导率下降。

参考文献:

- [1] HISCH J, AL-SAMMAN T. Superior Light metals by texture engineering: Optimized aluminum and magnesium alloys for automotive applications [J]. Acta Materialia, 2013, 765: 54.
- [2] TZOU G J, TSAO C C, LIN Y C. Improvement in the thermal conductive of aluminum substrate for the desktop PC Central Processing Unite (CPU) by the taguchi method [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2010, 34 (6): 706-709.
- [3] SHAJI M C, RAVIKUMAR K K, RAVI M, et al. Development of a high strength cast aluminum alloys for possible automotive applications [J]. Materials Science Forum, 2013, 667: 69.
- [4] 贲能军, 孙瑜, 周鹏飞. Mg含量对AlSiMg合金组织演变及性能的影响[J]. 铸造, 2020, 69 (9): 929-933.
- [5] 牛艳萍, 赵禹凯, 王顺成, 等. Si含量对Al-Si-Mg合金铸造流动性、热导率和力学性能的影响[J]. 铸造, 2016, 165 (4): 367-369.
- [6] 王慧, 李元东, 罗晓梅, 等. 高导热铝合金的开发与研究进展[J]. 铸造, 2019, 68 (10): 1104-1110.
- [7] 陈才, 陈建立. 铸造浇注温度对电器外壳用铝合金性能的影响[J]. 热加工工艺, 2020, 49 (3): 81-83.
- [8] 左强, 洪润洲, 周永江, 等. ZL114A铝合金充型能力的试验与仿真研究[J]. 铸造, 2018, 67 (5): 428-431.
- [9] 赵清汝. 第二相对铝合金导电及力学性能的影响与调控[D]. 济南: 山东大学, 2016.
- [10] 张瑞忠, 张保存, 邹纯, 等. 高导热AlSi12Fe铸造铝合金的组织 and 性能[J]. 轻合金加工技术, 2018, 146 (8): 19-22.

Effect of Pouring Temperature on Mechanical Properties and Thermal Conductivity of Gravity Cast Al-10Si-0.3Mg Alloy

SHI Shuai¹, YAN Jun², FAN Wei-zhong², GAO Wei-quan²

(1. HBIS Group Technology Research Institute, Shijiazhuang 050023, Hebei, China; 2. Huajin New Material Research Institute (Guangzhou) Co., Ltd., Guangzhou 510115, Guangdong, China)

Abstract:

This paper presents a study on the effects of different pouring temperatures on the mechanical properties, thermal conductivity and microstructure of Al-10Si-0.3Mg aluminum alloy that is prepared using gravity casting method. The study results show that when the pouring temperature is 650℃, the mechanical properties and thermal conductivity of the alloy are optimal. With an increase in the pouring temperature, the mechanical properties and thermal conductivity of aluminum alloy show a downward trend, the sizes of α solid solution and primary silicon gradually increase, the eutectic silicon is in the shape of strips, and the AlFeSi phase with a Chinese character shape transforms into a large amount of needle-shaped β -AlFeSi, severely splitting the matrix, thereby reducing the mechanical properties of the alloy. At the same time, the eutectic Si phase gradually becomes thin strips, and the harmful Fe phase is more concentrated in the alloy. As a result, the lattice distortion of the alloy crystal is strengthened, and the thermal conductivity of the alloy is reduced.

Key words:

aluminum alloy; mechanical properties; thermal conductivity; pouring temperature; eutectic silicon