

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2021.12.003

冷却方式对散热用 Al-Si-Mg 合金组织与性能的影响

范卫忠¹, 闫俊¹, 黄鹏宇², 王亚婧², 蔡云龙², 朱慧颖², 翁文凭², 长海博文²

(1. 华劲新材料研究院(广州)有限公司, 广东 广州 510000; 2. 苏州大学 沙钢钢铁学院, 江苏 苏州 215000)

摘要:采用不同铸造冷却方式(水冷铜模、风冷、空冷)制备了 Al-9Si-0.3Mg 合金试样,研究了不同冷却条件下 Al-9Si-0.3Mg 合金组织结构及传热性能的影响规律。结果表明,冷却方式对 Al-9Si-0.3Mg 合金强度与热导率影响显著,随着冷却强度提高,初生 α -Al 逐渐趋向均匀,共晶 Si 逐渐变得细小圆整,合金屈服强度、伸长率会显著提高,而热导率小幅下降;当冷却强度较低时,强化元素在 Al 基体中固溶数量减少,更多以析出第二相的方式存在,对提高材料热导率有利。当采用冷却强度居中的风冷方式时,其屈服强度为 126.0 MPa,伸长率为 4.2%,热导率为 141.9 W/m·K,综合性能良好。

关键词: Al-Si-Mg 合金;冷却强度;显微组织;热导率

中图分类号: TG146.2; TG113

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2021)12-1021-05

Effect of Cooling Conditions on Microstructures and Properties of Al-Si-Mg Alloys for Heat Dissipation

FAN Weizhong¹, YAN Jun¹, HUANG Pengyu², WANG Yajing², CAI Yunlong², ZHU Huiying²,
WENG Wenping², Hiromi Nagaumi²

(1. Huajin New Material Research Institute (GUANZHOU) Co., Ltd., Guangzhou 510000, China; 2. School of Iron and Steel, Soochow University, Suzhou 215000, China)

Abstract: Al-9Si-0.3Mg alloy were prepared by different casting cooling methods (such as water-cooled copper mold, forced-cooling, air-cooling), and the effect of different cooling conditions on the microstructure and heat transfer performance of Al-9Si-0.3Mg alloy was studied. The results show that the cooling mode has a significant effect on the strength and thermal conductivity of Al-9Si-0.3Mg alloy. With the increase of cooling strength, the primary α -Al gradually becomes uniform, and eutectic Si gradually becomes fine and round. The yield strength and elongation of Al-9Si-0.3Mg alloy increase significantly, while the thermal conductivity decreases slightly. When the cooling strength is low, the amount of solid solution of reinforcing elements in Al matrix decreases, and more of them exist in the form of precipitation of the second phase, which is beneficial to improve the thermal conductivity of materials. The yield strength, elongation and thermal conductivity are 126.0 MPa, 4.2% and 141.9 W/m·K, respectively, when the forced-cooling mode with medium cooling strength is adopted.

Key words: Al-Si-Mg alloys; cooling rate; microstructures; thermal conductivity

Al-9Si-0.3Mg 合金兼具良好的流动性、强度和导热性能,可通过压铸、挤压铸造及重力铸造多种成型方式制备散热用零部件^[1]。控制冷却速率是调控合金组织性能的最直接最有效的方法之一^[2-4];目前,针对该合金组织结构调控与力学性能优化的研究也非常充分^[5-7]。何志等^[8]研究了炉冷、空冷和水冷

条件下 Al-2.06%Si-1.58%Mg 合金的凝固析出过程,发现冷却速率较低时,其凝固过程为: $L \rightarrow L1 + FCC-Al \rightarrow L1 + FCC-Al + Si \rightarrow L1 + FCC-Al + Si + Mg_2Si$; 而冷却速率较高时,其凝固过程为: $L \rightarrow L1 + FCC-Al \rightarrow L1 + FCC-Al + Mg_2Si \rightarrow L1 + FCC-Al + Si + Mg_2Si$,可见冷却方式会改变合金凝固析出序列。也有研究表明,冷却速率还可能造成合金析出次序、种类数量的改变^[9-10];进而影响到合金的组织生长过程,甚至造成气缩孔、偏析等铸造缺陷,最终降低合金的力学性能^[11]。然而,针对冷却速率对 Al-Si-Mg 合金热传导性能的研究尚不充分,现有研究成果尚难以有效指导散热用 Al-9Si-0.3Mg 合金零部件热传导性能的

收稿日期: 2021-09-24

基金项目: 苏州大学第二十三批大学生课外学术科研基金项目 (KY20210880B)

作者简介: 范卫忠(1968—), 广东广州人, 硕士, 高级工程师, 主要从事高性能压铸铝合金材料研究方面的工作。

电话: 18922767888, Email: gisfanweizhong@hotmail.com

提升。本文作者通过不同冷却条件制备 Al-9Si-0.3Mg 合金试样,分析冷却方式对 Al-9Si-0.3Mg 合金组织结构与性能的影响,重点分析了不同冷却条件下合金的热传导性能,为散热用 Al-9Si-0.3Mg 合金组织性能优化提供指导。

1 实验材料与方法

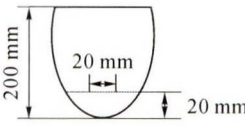
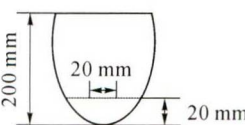
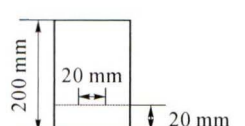
实验原料为纯铝(99.9%)、工业纯镁(99.8%)和 Al-20Si 中间合金,通过直读光谱测定的实验合金化学成分见表 1。

表1 实验合金的化学成分 w(%)
Tab.1 Chemical compositions of experimental alloys

Si	Mg	Fe	Mn	Ti	Al
8.96	0.32	0.12	0.33	0.11	余量

熔炼和浇注在自主设计的熔炼平台上进行,主要设备包括中频感应炉、电阻熔炼炉、水冷铜模、精炼除气装置和测温装置。采用 3 种冷却方式获得铸锭,分别为合金熔炼结束后随坩埚放置炉外空冷;合金熔炼结束后随坩埚放置炉外冷却风强制冷却;合金熔炼结束后熔体浇注于水冷铜模制备;各试样的冷却方式及取样位置详见表 2。

表 2 实验样品冷却条件
Tab.2 Cooling conditions of experimental samples

试样编号	冷却方式	冷却强度评价	取样位置
I	坩埚空冷	低	
II	坩埚风冷	中	
III	水冷铜模	高	

采用光学显微镜观察合金的微观结构;利用台式扫描电镜观察合金第二相及断口形貌;按照《GB/T 228.1 2010》加工拉伸试样,然后采用万能电子拉伸机测试拉伸性能;通过激光闪射仪测量合金常温(25℃)下的热导率。

2 实验结果与分析

2.1 力学物理性能

图 1 为不同冷却条件下 Al-9Si-0.3Mg 合金铸态试样的室温拉伸实验结果。可以看出,试样 I 屈服强度和伸长率都处于最低水平,屈服强度为

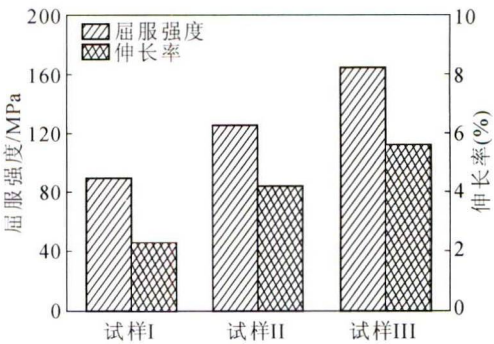


图 1 Al-9Si-0.3Mg 合金试样的室温力学性能
Fig.1 Mechanical properties of experimental Al-9Si-0.3Mg alloys at room temperature

89.0 MPa,伸长率为 2.3%;试样III力学性能均为最优,试样的屈服强度为 165.0 MPa,伸长率达到 5.6%。由此说明,冷却条件显著影响合金的屈服强度及伸长率,在较大冷却速率的条件下,合金具有较高的强度与塑性。试样III屈服强度和伸长率相较试样 II 分别提升了 31.0%和 33.3%,较试样 I 更是显著提升了 85.4%、143.5%。

图 2 为不同冷却条件下 Al-9Si-0.3Mg 合金的热导率测试结果。可以看出,空冷条件下合金热导率最高,试样 I 的热导率达到 157.3 W/m·K;而在风冷和水冷铜模制备试样中,铸态下合金的热导率较为明显的下降,其中试样 II 的热导率为 141.9 W/m·K,试样 III 的热导率为 127.2 W/m·K。由此可见,冷却速率对合金热导率的影响规律与力学性能的影响规律刚好相反,合金热导率随着冷却速率的提高而逐步降低,图 2 中空冷条件下试样 I 的热导率较试样 II 高出 10.9%,而相比水冷铜模试样 III 的热导率超过 23.6%。另一方面,相比较于冷却方式对力学性能的影响,冷却方式对合金热导率的影响的幅度略小一些。

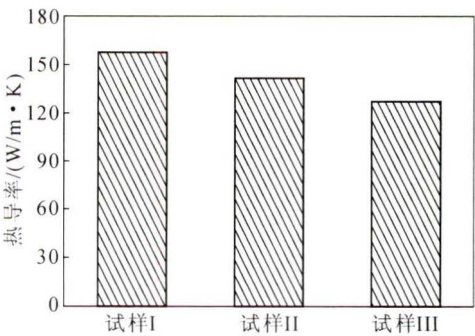


图 2 Al-9Si-0.3Mg 合金试样的室温热导率
Fig.2 Thermal conductivity of experimental Al-9Si-0.3Mg alloys at room temperature

2.2 显微组织(OM)

图 3 为 Al-9Si-0.3Mg 合金铸态组织。可以看出,实验制备的 Al-9Si-0.3Mg 合金主要由 α-Al、共晶 Si 组成,对于合金中可能出现的 Mg₂Si 及含 Fe

表 3 实验制备的 Al-9Si-0.3Mg 合金试样的性能
Tab.3 Properties of experimental Al-9Si-0.3Mg alloys

试样编号	抗拉强度 /MPa	屈服强度 /MPa	伸长率 (%)	热导率 /(W/m·K)
I	223.6	89.0	2.3	157.3
II	238.4	126.0	4.2	141.9
III	252.7	165.0	5.6	127.2

相,由于放大倍数的限制,在金相结果中并没有观察到。图中灰白色为初生 α -Al,3 种冷却方式下初生 α -Al 的晶粒尺寸和分布没有明显区别,在高冷条件下试样 III 的初生 α -Al 的晶粒尺寸大小略细小。由此可见,冷却方式的变化对于 Al-9Si-0.3Mg 合金的初生 α -Al 的组织结构特征影响不明显。

图 4 为 Al-9Si-0.3Mg 合金高倍组织,图中条状灰黑色为共晶 Si 相。可以看出,冷却方式对合金共晶 Si 相大小、分布和形态产生重要的影响:图 4(a)中共晶 Si 相呈现典型的粗大条带层片状,部分区域共晶 Si 相割裂基体;图 4(b)中共晶 Si 相开始细化,形态逐步转向纤维状,到图 4(c)中,这种转变更为明显。

为进一步准确分析冷却方式对 Al-9Si-0.3Mg 合金共晶 Si 相的影响,采用金相分析软件 Image-Pro plus 6.0 进一步统计分析了 3 种试样的共晶 Si 组织结构特征(长短轴比和面积分数),具体结果见表 4 所示。可以看出,冷却方式对铸态 Al-9Si-0.3Mg 合金中的共晶 Si 所占的面积分数影响不大。空冷下

表 4 铸态下实验合金共晶 Si 相形态特征
Tab.4 Morphology characteristics of eutectic Si phase in the as-cast experimental alloys

试样编号	面积分数(%)	长短轴比
I	41.18	3.86
II	44.56	3.39
III	46.77	3.17

的试样 I 中的共晶 Si 面积分数最小为 41.18%,而风冷和水冷铜模条件下的试样的共晶 Si 面积分数都有略微增加,其中试样 II 的共晶 Si 面积分数为 44.56%,试样 III 中共晶 Si 面积占比为 46.77%。另一方面,冷却速率对 Al-9Si-0.3Mg 合金中共晶 Si 的组织结构特征的影响也较为显著。试样 I 长短轴比最大为 3.86,试样 II 的长短轴比有所减小,为 3.39,试样 III 长短轴比最小,为 3.17,说明冷却速率的提高,Al-9Si-0.3Mg 合金的共晶 Si 逐渐变得细小圆整,向短棒状甚至颗粒状转变。

2.3 断口与形貌(SEM)

图 5 是扫描电镜观测的 Al-9Si-0.3Mg 合金拉伸断口形貌。可以看出,不同冷却方式下,试样的断口形貌差异明显:试样 I 断口形貌中大多呈现浅平的棱状断口形貌,韧窝数量少,由此可见其断裂模式主要偏向脆性断裂;而在快冷条件下的试样 III,其断口形貌中韧窝数量最多,并且比试样 I 和试样 II 更深,由此可见此时试样断裂模式会更多呈现出塑性断裂的特征。在空冷条件下试样 I 的共晶 Si 呈现粗

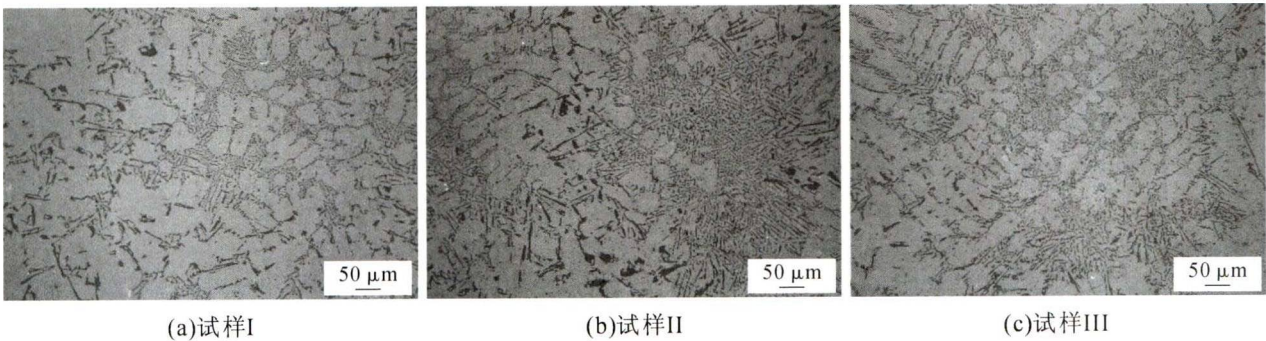


图 3 Al-9Si-0.3Mg 合金的金相结果(低倍)

Fig.3 Optical micrographs of experimental Al-9Si-0.3Mg alloys under different cooling conditions

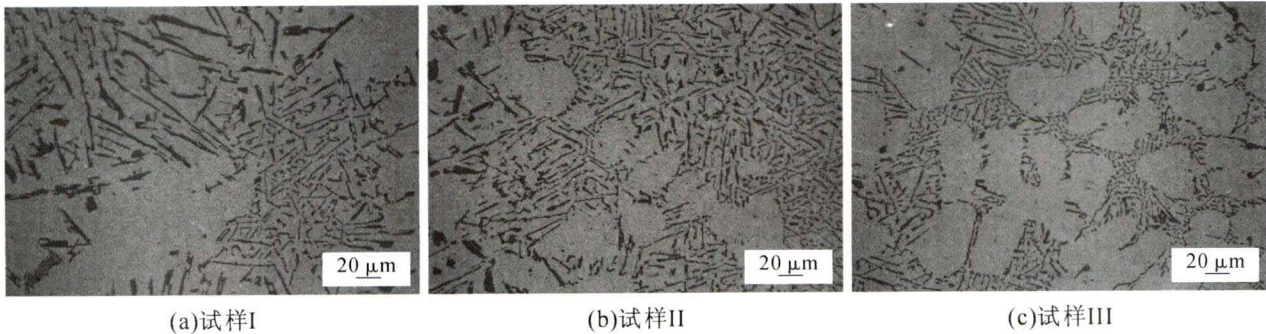


图 4 实验制备 Al-9Si-0.3Mg 合金的金相结果(高倍)

Fig.4 Optical micrographs of experimental Al-9Si-0.3Mg alloys under different cooling conditions

大片状结构,而提高冷却速率后,在水冷铜模制备的试样III,合金中共晶 Si 的尺寸明显细化,并且长短轴比明显下降,其形貌从层片状转变为较为圆整的纤维状。进一步分析认为,在室温拉伸过程中,Al-9Si-0.3Mg 合金中共晶 Si 相在强化基体强度的同时,也与试样中的缺陷一起构成裂纹源^[12],因此共晶 Si 相组织结构上的改变会显著增强合金塑韧性,导致其断口形貌发生转变并进一步影响其力学性能^[13]。由此可见,冷却方式对 Al-9Si-0.3Mg 合金的屈服强度与伸长率影响显著。

为分析冷却方式对合金传热性能的影响规律,采用扫描电镜分析了 3 种试样凝固过程中形成的第二相数量和分布。结果见图 6、图 7 和表 5 所示。文献表明^[14],铸态下 Al-9Si-0.3Mg 合金主要由初生 α -Al、共晶 Si 和第二相组成,从图 6 和表 5 的结果中可以看出,实验制备的合金中其第二相主要有 AlSiMnFe 相和 AlSiMgFe 相组成。进一步观察三种

表5 图6中A、B相的能谱分析结果 w(%)
Tab.5 EDS analysis results of A and B phase in Fig.6

	Al	Si	Mg	Mn	Fe
A	70.76	11.68	-	10.94	6.63
B	48.95	28.31	18.20	-	4.54

试样中第二相的数量和分布,结果如图 7 所示。可以看出,冷却强度较弱时,合金中析出第二相数量多,并其更为粗大,具体见图 7(a) (b) (c)所示。由此可见,冷却强度对合金铸态下析出第二相的数量和分布造成影响,当冷却强度更大时,凝固过程中合金中强化元素 Mg、Mn 来不及析出,更多固溶在基体中形成固溶体;当冷却强度逐步降低时,强化元素更多析出基体而形成第二相。另一方面,由于 Mg、Mn 原子尺寸、电子价态都与基体 Al 存在较大差异,因此固溶在基体中的强化元素会构成晶格畸变,或者破坏 Al 基体中点阵的电势场周期性,导致自由电子运动的散射几率增加,最终降低合金的热导率。

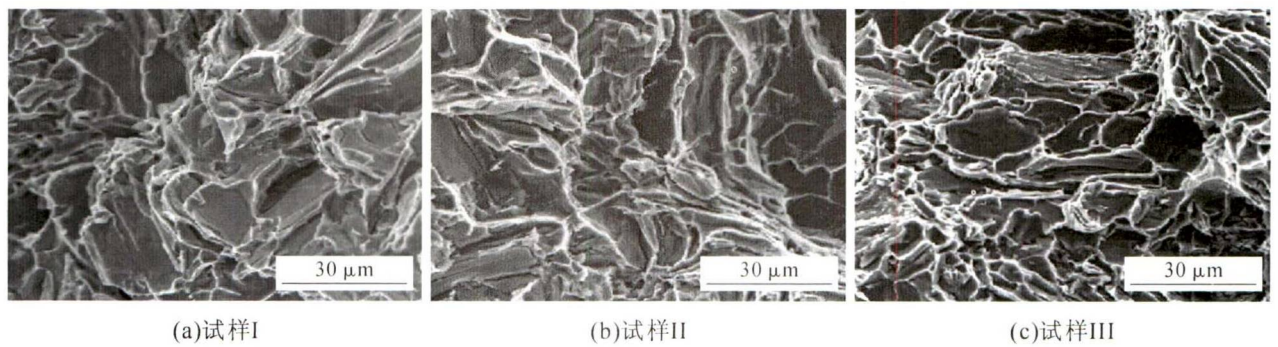


图5 实验制备的 Al-9Si-0.3Mg 合金的拉伸断口形貌图
Fig.5 Tensile fracture surface of experimental Al-9Si-0.3Mg alloys under different cooling conditions

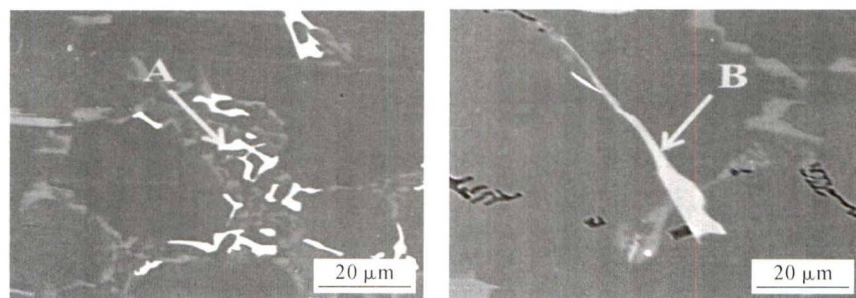


图6 Al-9Si-0.3Mg 合金第二相能谱分析
Fig.6 EDS analysis of second phases in Al-9Si-0.3Mg alloys

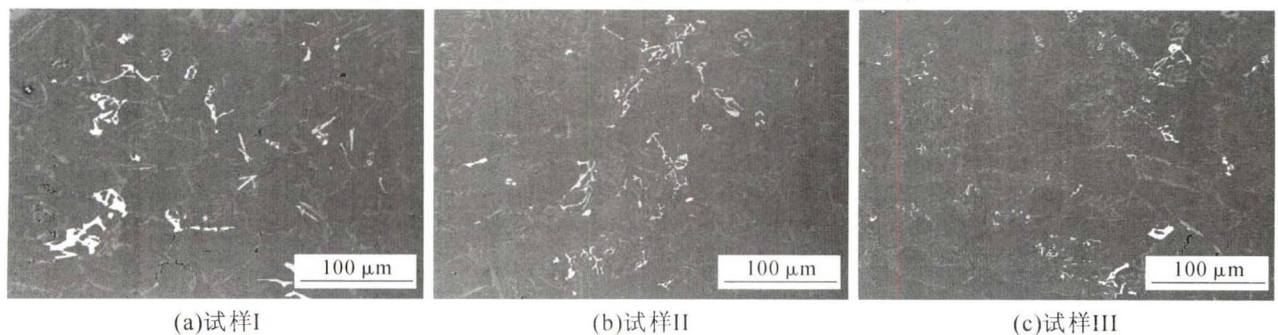


图7 Al-9Si-0.3Mg 合金 SEM 图像
Fig.7 SEM images of experimental Al-9Si-0.3Mg alloys under different cooling conditions

另一方面,由于 Si 属于半导体,共晶 Si 相为弱导热相,提高冷却强度可细化共晶 Si 尺寸并促进其形态趋于圆整,这种组织结构上的改变会有利于合金热导率的提升^[13]。但是,溶质固溶在基体中对合金导电导热能力的下降程度,明显高于以第二相析出的影响,因此冷却强度对 Al-9Si-0.3Mg 合金的热导率的影响刚好相反:随着冷却速率增大,合金力学性能随之改善,热导率则显著降低。

3 结论

(1)冷却方式显著影响 Al-9Si-0.3Mg 合金的力学及传热性能。当冷却强度提高时,合金屈服强度、伸长率显著提高,而热导率小幅下降。当采用冷却强度居中的风冷方式制备合金试样时,其屈服强度为 126.0 MPa,伸长率为 4.2%,热导率为 141.9 W/m·K,可以获得良好的综合性能;

(2)冷却强度显著影响 Al-9Si-0.3Mg 合金共晶 Si 相尺寸和形貌。当冷却方式从随坩埚空冷转变为水冷铜模浇注时,冷却强度提高,共晶 Si 相明显细化,长短轴比从 3.86 变为 3.17。这种共晶 Si 相组织结构的转变影响了试样室温拉伸的断裂模式,并改变了试样断口形貌,具体而言,冷却强度较高时,合金屈服强度为 165.0 MPa,伸长率为 5.6%,为力学性能最优的工艺条件;

(3)冷却强度对 Al-9Si-0.3Mg 合金强化元素的存在状态有明显影响。当提高冷却强度时,合金中强化元素来不及析出,倾向于形成过饱和固溶体,此时基体中晶格畸变程度增加,降低合金热导率。当采用缓慢冷却的方式制备试样 I 时,其热导率最优可达到 157.3 W/m·K。

参考文献:

- [1] 田荣璋. 铸造铝合金[M]. 长沙:中南大学出版社, 2006.
- [2] 刘永勤,宋文韬,朱满,等. 冷却速率对 Al-Si-Mg 合金次生相形成的影响[J]. 热加工工艺, 50(11): 6.
- [3] CEYLAN M, AKSOY I, KUZUCU V, et al. The influence of the cooling rate on the microstructure of Al-Cu-Si, Al-Si and Al-Zn alloys [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 65(1): 41-51.
- [4] ESKIN D, DU Q, RUVALCABAD, et al. Experimental study of structure formation in binary Al-Cu alloys at different cooling rates [J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 405(1): 1-10.
- [5] 胥涛,郭永春,李建平,等. 冷却速率对共晶型活塞铝合金铸态组织及性能的影响[J]. 热加工工艺, 2017(3): 54-57.
- [6] 蒋朝军,张文达,杨晶,等. 热速处理对 Al-7Si-Mg 合金组织与性能影响[J]. 热加工工艺, 2013, 42(4): 219-222.
- [7] 刘萍. 冷却速度对 Mg₂Si 增强过共晶 Al-Si 合金组织与性能的影响[J]. 铸造技术, 2006, 27(7): 715-718.
- [8] 何志,张瑞杰,介万奇. 冷却速率对 Al-Si-Mg 三元合金凝固过程的影响. 铸造, 2005, 54(2): 187-189.
- [9] ZHANG L Y, ZHOU B D, ZHAN Z J, et al. Mechanical properties of cast A356 alloy, solidified at cooling rates enhanced by phase transition of a cooling medium [J]. Materials Science & Engineering A, 2007, 448(1-2): 361-365.
- [10] FFI W D, KANG S B. Effects of cooling rate on solidification process in Al-Mg-Si alloy [J]. Journal of Materials Science Letters, 1995, 14(24): 1795-1797.
- [11] LI P, NIKITIN V I, KANDALOVA E G, et al. Effect of melt overheating, cooling and solidification rates on Al-16wt.% Si alloy structure [J]. Materials Science & Engineering A, 2002, 332(1-2): 371-374.
- [12] 曹思婷,郭永春,夏峰. 微观组织对 Al-Si 活塞合金高周疲劳性能的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47(6): 83-87.
- [13] 杨蕾,周鹏飞,翁文凭,等. Mg 含量对 Al-9Si-xMg 合金组织和性能的影响[J]. 轻合金加工技术, 2020, 48(11): 14-19.
- [14] 李佳双,屈敏,崔岩,等. Si, Mg 含量对 Al-Mg-Si 合金显微组织及显微硬度的影响[J]. 金属热处理, 2016, 41(12): 69-74.

(上接第 1020 页)

冶金技术, 2020, 38(1):59-65.

- [7] KHOND A, ADIL S, GURUVIDYATHRI K, et al. Kinetics and phase formation during crystallization of Hf₆Cu₁₈Ni₁₈ amorphous alloy[J]. Phase Transitions, 2021, 94(2): 110-121.
- [8] ZHANG Y, CHEN J, CHEN G L, et al. Glass formation mechanism of minor yttrium addition in CuZrAl alloys, Appl. Phys. Lett. 89 (2006) 131904.
- [9] LIU Y, YANG G. Non-isothermal crystallization kinetics of polyamide-6/graphite oxide nanocomposites [J]. Thermochemica Acta, 2010, 500(1-2): 13-20.
- [10] 张宝庆,曹国华,战再吉,等. Zr₂(47)Cu₂(44)Al₉ 大块非晶合金的变温晶化行为[J]. 材料热处理学报, 2009, 30(6):1-4.
- [11] KISSINGER H E. Reaction kinetics in differential thermal analysis [J]. Analytical chemistry, 1957, 29(11): 1702-1706.

- [12] OZAWA T. Kinetic analysis of derivative curves in thermal analysis[J]. Journal of thermal analysis, 1970, 2(3): 301-324.
- [13] ZHANG Y, LIN X, GAO X, et al. Crystallization mechanism of Zr₃₅Cu₃₀Al₁₀Ni₅ metallic glass in an extended range of heating rates [J]. Intermetallics, 2021, 136: 107256.
- [14] U X F, HAY J N. Isothermal Crystallization Kinetics and Melting Behavior of Poly (Ethylene Terephthalate) [J]. Polymer, 2001, 42 (23): 9423.
- [15] UI J, LI J S, WANG J, et al. Crystallization kinetics of Cu₃₈Zr₄₆Ag₈Al₈ bulk metallic glass in different heating conditions [J]. Non-Cryst. Solids 2014, 404:7.
- [16] 徐旋旋. Cu-Zr-Al 基非晶合金的超塑性及晶化动力学研究[D]. 西安:西安工业大学, 2018.