

热处理对高导热 Al-11Si 合金性能的影响

杨坤义^{1,2} 廖光明³ 胡文杰^{1,2} 余词胜^{1,2} 郭洪民^{1,2}

(1.南昌大学材料科学与工程学院; 2.江西省高性能精确成型重点实验室; 3.江西万泰铝业有限公司)

摘 要 对铸造 Al-11Si 合金进行 T6 热处理[500 ℃×2 h 固溶+(260~360) ℃×(1~8) h 时效]试验,研究时效温度与时间对导热性能的影响。结果表明,铸态和热处理态合金的热导率分别为 138.5 W/(m·K) 和 156.6 W/(m·K),T6 热处理后 Al-11Si 合金的热导率提高了 14%。相比于时效温度为 260 ℃,320 ℃时效后合金的电导率在 2 h 可达到峰值 29.05 MS/m,时效温度继续升高至 360 ℃后合金电导率变化不大。T6 热处理后 α-Al 树枝晶长大且更圆整,共晶 Si 发生球化且分布更均匀,抗拉强度有所下降,伸长率提升明显。α-Al 中 Si 相的析出行为会导致基体晶格常数波动明显。

关键词 导热性能;铸造铝硅合金;铈变质;固溶度

中图分类号 TG132.3;TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.10.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Heat Treatment on Properties of High Thermal Conductivity Al-11Si Alloy

Yang Kunyi^{1,2}, Liao Guangming³, Hu Wenjie^{1,2}, Yu Cisheng^{1,2}, Guo Hongmin^{1,2}

(1.School of Materials Science and Engineering, Nanchang University; 2.Key Laboratory of Near-net Forming in Jiangxi Province; 3.Jiangxi Wantai Aluminium Co., Ltd.)

Abstract: T6 heat treatment[solution 500 ℃×2 h+(260~360) ℃×(1~8) h] experiments were conducted to investigate the effect of ageing temperature and time on the thermal conductivity of Al-11Si cast alloy. The results reveal that the thermal conductivity of as-cast and heat-treated Al-11Si alloy reach 138.5 W/(m·K) and 156.6 W/(m·K), respectively, which is increased by 14% after T6 treatment. Compared to that treated at aging temperature of 260 ℃, the electrical conductivity of the alloy treated at aging temperature of 320 ℃ can reach a peak value of 29.05 MS/m within 2 h, of which the enhancement is slight when temperature is increased up to 360 ℃. After T6 heat treatment, α-Al dendrite grows and becomes more rounded, and the eutectic Si becomes spheroidal and more uniformly distributed, where the tensile strength is decreased, and the elongation is increased significantly. The precipitation behavior of the Si phase in α-Al leads to significant fluctuations of the lattice constant of the matrix.

Key Words: Thermal Conductivity, Al-Si Cast Alloy, Sr Modification, Solid Solubility

金属材料是利用自由电子运动和晶格弹性振动(声子)实现导热的,当电子和声子的运动自由平滑时,合金具有良好的导热性。但合金并不是理想晶体,其内部存在的固溶原子和析出相降低了电子的平均自由程,因此合金的导热系数普遍低于纯金属。影响合金导热性能的因素除了基础金属元素自身性质外,主要与合金内部的点缺陷(空位、间隙原子、置换原子)、线缺陷(位错)、面缺陷(晶界、相界)、体缺陷(第二相、夹渣、缩松缩孔)等对电子的散射有关^[1,2]。

点缺陷引起的晶格畸变使得自由电子在运动过程中受到的散射作用增强,因平均自由程的降低造成电子自由运动过程中的热量传递减少,因此选择添加合金元素的种类和占比尤为重要。另外,合金中第二相的存在会阻碍热传导电子的热运输,使合金的热导率降低,而第二相的尺寸、形状、分布和界面的复杂程度(共格与非共格)是影响合金热导率的重要因素。同时要注意的是,不能忽视第二相在合金中的强化作用,特别是高导热铝合金结构件。李斌^[3]发现 Al-Si-Cu 合金经 T6 热

收稿日期:2021-12-12;修改稿收到日期:2022-01-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51764040)

第一作者简介:杨坤义,男,1997 年出生,硕士研究生,南昌(330031),E-mail:3067258481@qq.com

通信作者:郭洪民,男,1976 年出生,教授,南昌(330031),E-mail:guohongmin@ncu.edu.cn

引用格式:杨坤义,廖光明,胡文杰,等. 热处理对高导热 Al-11Si 合金性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(10):1 274-1 278.

YANG K Y, LIAO G M, HU W J, et al. Effects of heat treatment on properties of high thermal conductivity Al-11Si alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(10):1 274-1 278.

处理后热导率达到 166.7 W/(m·K),抗拉强度为 246 MPa。原料及铸造过程中引进的杂质、缩松、缩孔等也是影响合金导热性能的重要因素。

以 5G 通讯用散热结构材料为例,目前研究和应用最广的是 Al-Si 系铸造合金。试样为满足流动性要求,合金中 Si 含量一般在 7%~12%之间,Fe、Cu、Mg 等元素常被作为强化元素添加,但不能大幅牺牲铝合金的热导率。Si 在 α -Al 中的最大固溶度为 1.65%,室温下只有 0.05%左右,且 Al-Si 二元合金之间不会形成化合物^[4],Si 多以单质的形式存在合金中,这也是影响铸造铝合金导热性能最主要的原因。因此对 Si 的探究及调控一直是研究的热点,主要分为两大方向:变质处理和热处理工艺。其中变质剂 Sr 的作用得到重视。张瑞忠等^[5]发现 Al-12Si-Fe 合金经变质和热处理后热导率达到 172 W/(m·K)。因单质 Si 晶体学各向异性导致其凝固过程中特殊的生长方式,杂乱分布的针状共晶 Si 加入变质剂后变为纤维絮状及少量细小颗粒状。杂质诱发孪晶机理是广泛接受的共晶 Si 变质机理^[6,7],变质剂吸附在硅相表面生长台阶上,阻止 Si 原子的吸附以此来毒化硅相生长面。同时,Si 原子在杂质原子上生长,改变了 Si 原子堆垛顺序,实现了杂质诱发孪晶,使得 Si 相的生长特性转变为各向同性。最常见的高导热铝合金热处理工艺有固溶和时效处理,固溶处理有利于针状共晶部分 Si 发生溶断并逐渐球化。未变质的共晶 Si 要球化成颗粒是较为困难的,当变质处理后,絮状共晶 Si 的尺寸较小,共晶 Si 不需熔断过程可直接球化。搭配时效处理是为了析出各种沉淀相从而提高热导率和力学性能^[8,9]。总之,变质处理和合适的热处理工艺可以有效调控合金中固溶元素的含量及第二相形态,实现铝合金较高的热导率。

根据 Wiedemann-Franz 定律,可知金属的电导率和热导率之间存在一定的数学关系^[2~4],因此可以通过测量电导率来研究高导热性能的 Al-Si 系合金。同时为准确测量合金的热导率,增加激光闪光法测量热导率以验证数据的准确性,旨在为 Al-Si 合金的应用提供参考。

1 试验方法

为满足 5G 通讯散热设备要求,铸件通常薄壁且形状复杂,兼具很好的导热性能,选用应用广泛、铸造性能突出的 Al-Si 系合金^[10~12],试验研究采用 Si 含量为 11%的合金,具体成分见表 1。首先将合金加热熔炼,除气精炼后在 680 ℃浇入金属型模具,模具预热温度为 120 ℃。利用线切割加工尺寸为 20 mm×20 mm×3 mm 的块状试样,固溶工艺为 500 ℃×2 h^[8],再分别进

行 260、320、360 ℃,1~8 h 的人工时效。通过 FQR 型涡流导电仪测量试样的电导率,测量前需用砂纸将试样表面打磨光滑。通过 LFA-500 型激光闪射仪测量试样的热导率,试样为 ϕ 12.7 mm×2 mm 的圆片,测试温度为 20 ℃。利用 D/max-2400 型 X 射线衍射仪分析不同热处理条件下的物相组成及含量,扫描角度范围为 10°~90°。通过 Qaunta 200F 型扫描电镜进行合金的显微组织及断口形貌分析。材料的拉伸性能在 MTS-810型万能试验机上测定,按 GB/T228.1-2010 进行,拉伸速率为 1 mm/min。

表 1 Al-11Si 合金的化学成分
Tab.1 Chemical composition of Al-11Si alloy %

ω_B				
Si	Fe	Cu	Sr	Al
11	0.14	0.08	0.05	余量

2 试验结果与讨论

2.1 电导率

图 1 为不同时效温度下电导率随时间的变化。可以看出,铸态和固溶态 Al-11Si 合金的电导率分别为 25.40 和 24.80 MS/m,经时效处理后电导率又大幅提高。当时效温度为 260 ℃时,电导率随时间的增加而增加且 6 h 后趋于稳定;当时效温度为 320 ℃时,电导率在 2 h 达到峰值 29.05 MS/m,5 h 后略有下降;当时效温度为 360 ℃时,电导率在 2 h 达到峰值,4 h 后下降至 28.30 MS/m。虽然固溶处理使得合金整体均匀化,如铸造过程中带来的缺陷、偏析、空位等的减少有利于电导率的提升,但电导率对固溶引起的晶格畸变尤为敏感^[13],导致合金整体电导率表现为下降。260 ℃下时效析出速率慢,需要较长时间;320 ℃以上时效析出速率快,短时间便可大量析出。

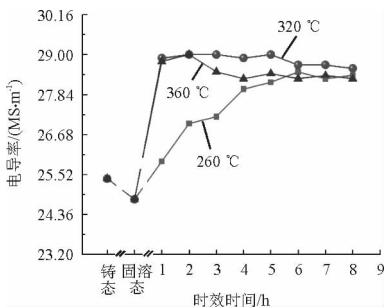


图 1 不同时效温度下电导率随时间的变化
Fig.1 Variation curves of electrical conductivity with aging time at different temperatures

2.2 热导率

图 2 为 260 ℃和 320 ℃下不同时效时间处理的合

金热导率变化。可以看出,当时效温度为 260 ℃时,随时效时间的延长,热导率在 7 h 时升高至 153 W/(m·K),增长速率逐渐变缓;时效温度为 320 ℃时,热导率在 2 h 内快速升高至 156.6 W/(m·K),后缓慢降低。对比图 1 可知热导率与电导率的变化趋势基本一致,但与利用 Wiedemann-Franz 定律计算的热导率结果相差

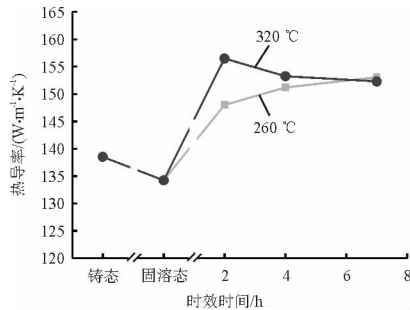


图 2 不同时效温度下合金的热导率随时间的变化
Fig.2 Variation curves of thermal conductivity with aging time at different temperatures

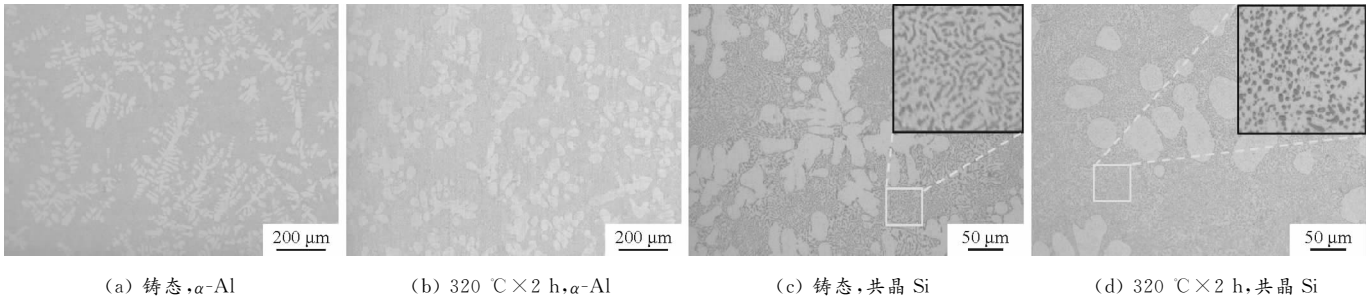


图 3 铸态及热处理态合金的显微组织
Fig.3 Microstructures of as-cast and heat-treated alloys

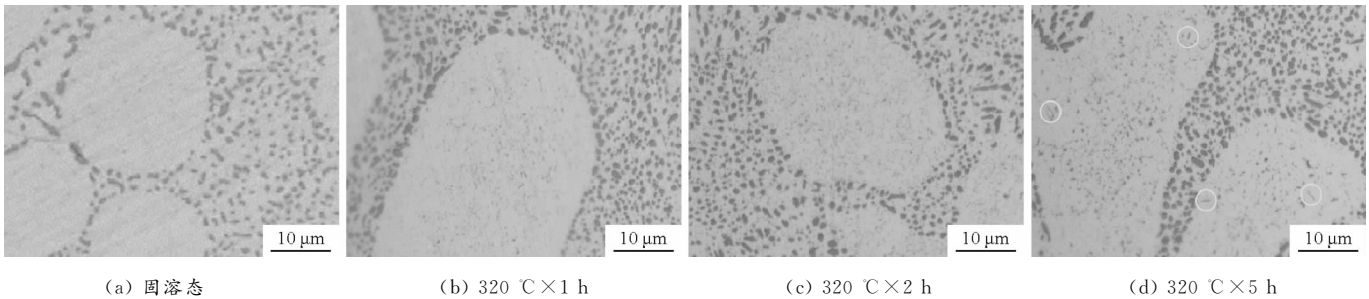


图 4 合金在 320 ℃ 下不同时效时间的显微组织
Fig.4 Microstructure of alloy at 320 ℃ for different aging time

长,而在 $\{111\}_{\text{Si}}$ 界面上由于缺乏生长凸台,导致垂直于这些平面的生长受到抑制,从而形成高纵横比的板条状 Si 相^[14~17]。

溶质元素 Si 在 α -Al 中的分布情况的 EDS 面扫描见图 5。在 α -Al 中可以看到 Si 元素团聚区,而在图 4a 中没有这么多的细小球状 Si 相,LIU M W 等^[14]发现该 Si 原子团簇区是过饱和条件下在 α -Al 中偏聚的结果,可以为平衡 Si 相提供较好的形核条件。随时效时间延长,Si 相数量逐渐增加,且当时效时间增加至 5 h

较大。因此通过测定合金电导率对热导率的一般规律性探索具有一定意义,但很难准确表征热导率数值。

2.3 微观组织

图 3 为光学显微镜下铸态和热处理态显微组织照片。可以看出,320 ℃时效处理后 α -Al 树枝晶发生长大,形状更加圆整,有从树枝晶向等轴晶转变的趋势, α -Al 相晶界总面积减少使自由电子的散射减弱,有利于热导率的升高。此外,絮状的共晶 Si 发生球化,长径比下降,而球状的共晶 Si 更有利于自由电子运动。

图 4 为 500 ℃×2 h 固溶处理和 320 ℃时效处理后的显微组织。可以看出,固溶处理后 α -Al 中存在极少的细小球状 Si 相。随着时效时间延长,细小球状 Si 相数量逐渐增多。由图 4d 可知,当时效时间增加至 5 h 时, α -Al 中细小球状 Si 相变粗,并且出现板条状的 Si 相。析出的 Si 相形状随时效时间而变化,随着时效时间的增加,Si 相首先呈球形,然后沿 $\{111\}_{\text{Si}}$ 平面快速生

时可以观察到较多的板条状 Si 相。

对 Si 相在 α -Al 中的长大行为进行了探究,发现固溶条件下 Si 原子团簇区的出现为后续 320 ℃下时效时 Si 相的析出提供条件,为其快速析出打下基础,因此热导率也得到迅速提升。其次,随着时效时间延长,球状 Si 相的数量和尺寸逐渐增加,当时效时间当 5 h 时,球状 Si 相因不同方向的生长速率不同而逐渐转变为板条状,Si 相形状的改变使得自由电子运动更加困难,导致热导率下降。

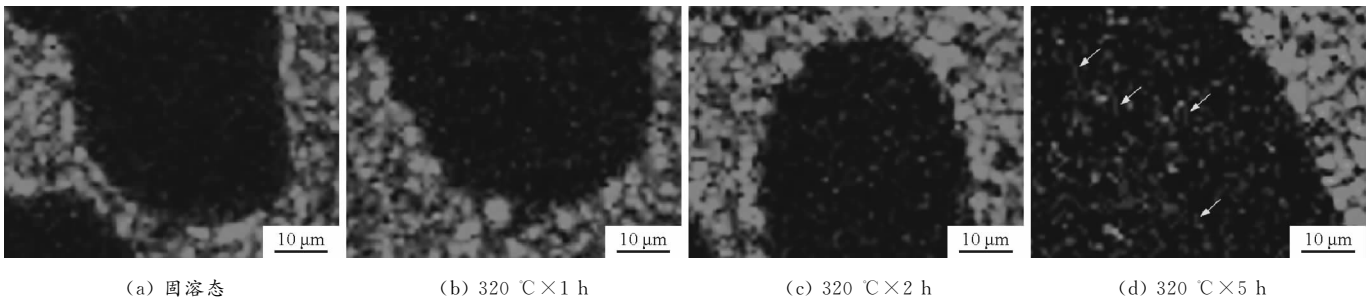


图 5 合金在 320 °C 下不同时效时间的 EDS 面扫描

Fig.5 EDS surface scanning of alloy at 320 °C for different aging time

2.4 力学性能

图 6 为不同状态下合金的力学性能。可以看出，铸态和固溶态合金的抗拉强度分别为 138 MPa 和 152 MPa。当时效温度为 260 °C 时，随着时间的延长抗拉强度逐渐降低，而 320 °C 和 360 °C 下都在 2 h 时达到最低点 110 MPa 和 115 MPa 后又逐渐升高。铸态合金的伸长率最低，260 °C 下伸长率随时效时间延长逐渐升高，而 320 °C 和 360 °C 时抗拉强度和伸长率呈正相关，即随着时效时间延长，强度和伸长率都是先降低后升高。

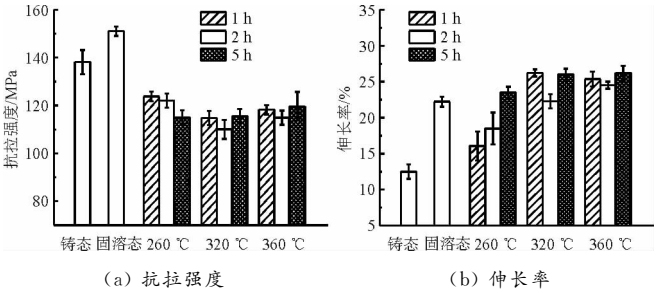


图 6 不同状态下合金的力学性能

Fig.6 Mechanical properties of alloy under various states

图 7 为铸态和 320 °C × 2 h 时效后合金的断口形貌。铸态断口中可以看到韧窝和解理平面，同时还有尺寸较大的裂纹。而 320 °C × 2 h 时效后的断口中可以看到密而深的韧窝，几乎看不到脆性断裂特征。拉伸断口在热处理前后出现较大差异的根本原因是硬脆的条状共晶 Si 发生球化，极大地降低共晶 Si 对基体的割裂作用^[14~17]。合金中晶界总面积减少和 Si 相球化使位错

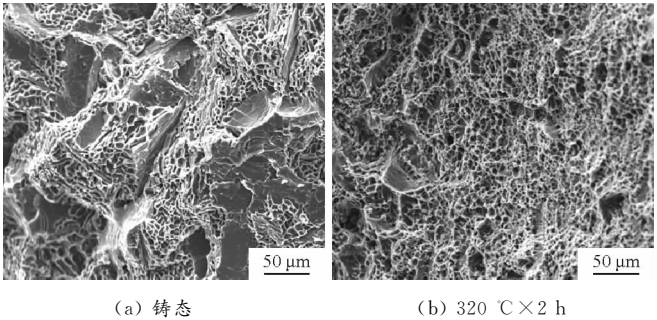


图 7 铸态和热处理态断口的微观形貌

Fig.7 Micro fracture morphologies of as-cast and heat-treated alloy

更易滑移且不容易造成集中，同时缺陷自修复有利于减少裂纹源，韧性得到较大提升。

相较于铸态，热处理态合金抗拉强度下降的原因是 α -Al 固溶体中溶质原子得到释放，晶格畸变减弱，同时共晶 Si 球化、树枝晶长大更加圆整都更容易造成位错运动；而伸长率和电导率升高的原因是铸造凝固过程中带来的大部分缺陷（偏析、空位等）经热处理后发生自修复，共晶 Si 由长条状变成球状且在共晶组织中分布更均匀，减少应力集中和裂纹源的萌生。

2.5 XRD 分析

Si 主要以两种状态分布合金中，即单质 Si 和固溶在 α -Al 中的 Si 原子。图 8 为不同状态下合金的 Si 相 3 个晶面衍射峰，通过对比 Si(111) 面的衍射峰强度可知，T6 态合金中 Si 含量大于铸态和固溶态，固溶态含量最少，与图 1 实际测量电导率变化趋势一致。因此认为当合金中 Si 含量一定时，单质 Si 含量越多则 Si 的固溶量越少，热导率也更高。

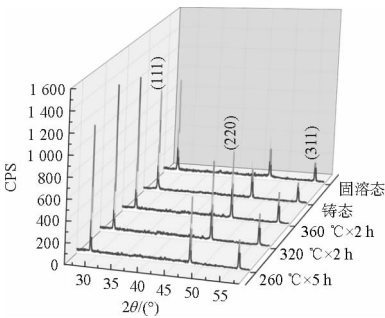
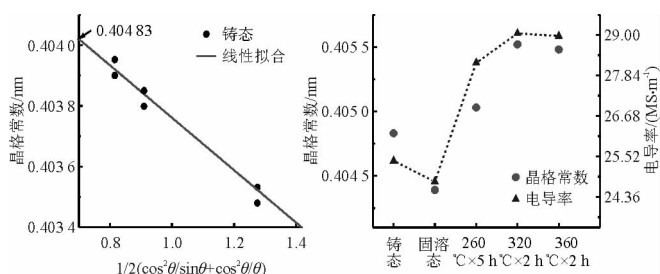


图 8 合金中单质 Si 的 XRD 分析图谱

Fig.8 XRD patterns of silicon phase in the alloy

Si 原子固溶于基体会导致 α -Al 晶格常数发生改变，结合 XRD 数据，利用尼尔逊外推法计算晶格常数。已知 Si 固溶 Al 基体形成置换固溶体，且 Si 原子半径小于 Al 原子半径，导致 α -Al 晶格常数的减小，结果见图 9。在 T6 热处理的过程中，固溶处理使得 α -Al 晶格常数降低，而时效处理使得晶格常数又升高且超过铸态的。可知 Si 在热处理过程中的溶解与析出行为会改变合金的晶格畸变程度，从而影响热导率。



(a) 尼尔逊外推法

(b) 不同状态下 α-Al 晶格常数

图 9 尼尔逊外推法计算不同状态下 α-Al 晶格常数

Fig.9 The lattice constants of α-Al in different states calculated by Nelson's extrapolation method

3 结 论

(1) Al-11Si 合金进行 T6 热处理后电导率和热导率得到提升,时效温度对电导率的影响存在差异。时效温度为 320 °C 时溶质原子扩散速率比 260 °C 下更快,析出激活更容易,电导率在 2 h 达到峰值 29.05 MS/m;而 360 °C 下时效时,电导率峰值与 320 °C 下基本相同,但随着时效时间延长,电导率逐渐下降。

(2) Al-11Si 合金共晶组织主要在固溶处理阶段发生较大转变,共晶 Si 发生球化且分布更均匀,时效过程中变化不大;α-Al 树枝晶在固溶处理后长大并更加圆整,时效处理阶段 Si 相逐渐析出并长大。

(3) Al-11Si 合金在 T6 热处理后抗拉强度有所下降,而伸长率提升明显。

(4) 从工艺和性能上综合考虑,对 Al-11Si 合金来说,500 °C × 2 h 固溶 + 320 °C × 2 h 时效是比较好的热处理工艺参数。

参 考 文 献

- [1] 吴孟武,华林,周建新. 导热铝合金及铝基复合材料的研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(9): 1 486-1 495.
- [2] 王慧,李元东,罗晓梅. 高导热铝合金的开发与研究进展[J]. 铸造, 2019, 68(10): 1 104-1 110.
- [3] 李斌. Si、Cu 和热处理工艺对 Al-Si 合金性能的影响[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- [4] 温澄. 高导热 Al-Si 系铸造铝合金的组分设计与应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- [5] 张瑞忠,张保存. 高导热 AlSi12Fe 铸造铝合金的组织 and 性能[J]. 铝合金加工技术, 2018, 46(8): 18-23.
- [6] 郭宇. 高导热铝硅合金设计制备及其导热机理[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2020.
- [7] 陈伟文. 高导热铝合金材料及其制备方法[J]. 有色金属材料与工程, 2019, 40(6): 53-57.
- [8] LIN Y C, LUO S C, HUANG J, et al. Effects of solution treatment on microstructures and micro-hardness of a Sr-modified Al-Si-Mg alloy[J]. Materials Science and Engineering, 2018, 725: 530-540.
- [9] 黄志翔,同洪,王志伟. 铈变质及热处理对 ADC12 合金显微组织及

力学性能的影响[J]. 中南大学学报, 2018, 25(6): 1 263-1 273.

- [10] 刘文水,王日初,彭超群. 喷射沉积电子封装用高硅铝合金的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(12): 3 446-3 455.
- [11] LUMLEY R, POLMEAR I, GROOT H, et al. Thermal characteristics of heat-treated aluminum high-pressure die-castings[J]. Scripta Materialia, 2008, 58: 1 006-1 009.
- [12] GUO Y, WANG Y, YANG J, et al. A study of the mechanical and thermal characteristics of an Al-Si-Fe alloy fabricated by rolling and heat treatment[J]. Metals, 2018, 9(1): 9.
- [13] WENG Z. Cryogenic thermal conductivity of 7050 aluminum alloy subjected to different heat treatments[J]. Cryogenics, 2021, 103 305.
- [14] LIU M W, FU H, TIAN L X, et al. Nucleation and growth mechanisms of nano-scaled Si precipitates in Al-7Si supersaturated solid solution[J]. Materials and Design, 2017, 121: 373-382.
- [15] ZHANG D L, ZHENG L H. Effect of solution treatment temperature on tensile properties of Al-7Si-0.3Mg(%) alloy[J]. Materials Science & Technology, 1998, 14: 619-625.
- [16] 胡勇. Al-Si 高导热铝合金组织与性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
- [17] WANG Y J, LIAO H H, WU Y, et al. Effect of Si content on microstructure and mechanical properties of Al-Si-Mg alloys[J]. Materials & Design, 2014, 53: 634-638.

(编辑: 栗万仲)

《特种铸造及有色合金》征稿启事

《特种铸造及有色合金》杂志,是中国科学技术协会主管,中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,SA、CA、MA、AJ、Scopus 等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国 60 年有影响力的期刊、湖北十大有影响力的自然学术期刊等。

本刊面向国内外广大科技工作者征稿,征稿内容包括:各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料的成形理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,此外还包括各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、新能源材料、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊合、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术和技术研究成果等。

《特种铸造及有色合金》杂志社

地址:武汉市江岸区江大路 26 号

邮编:430019

电话:027-85358206,85486024

传真:027-85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

