

Sc、Ti 及短时时效热处理对 Al-Si 合金性能的影响

杨湘杰¹ 郭洪民² 康跃华³ 周志明⁴ 杨浩坤⁵

(1.南昌大学先进制造学院;2.南昌大学材料科学与工程学院;3.广东省科学院新材料研究所;
4.重庆理工大学材料科学与工程学院;5.香港生产力促进局智能制造部)

摘要 通过在 Al-Si 合金中加入 Sc 和 Ti 元素,经过 180 ℃×2 h 或 220 ℃×3 h 短时时效热处理来调控铸造 Al-Si 合金的导热、热膨胀及力学性能。采用光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)、X 射线能谱仪(EDS)等方法观察合金元素及短时时效热处理对铸造 Al-Si 合金组织演化的影响,并建立微观组织与材料导热系数、热膨胀系数和力学性能之间的关系。结果表明,Si 含量的增加能促进粗大初生 Si 相的析出,弱化 Al-Si 合金的导热和力学性能,抑制材料的热膨胀程度。Sc 或 Ti 的加入能抑制初生 Si 相的粗化,细化次生 Si 相,提升 Al-12Si 合金的抗拉强度;同时,可以降低材料的热膨胀系数。短时时效热处理可缓解材料元素偏聚现象,显著提升 Al-Si 合金导热系数,但会降低铸造 Al-Si-(Sc, Ti)合金的导热系数。

关键词 铸造 Al-Si 合金;Sc;Ti;短时时效热处理;力学性能

中图分类号 TG146.21;TG156.92 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.05.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Sc, Ti and Short-time Aging Treatment on Properties of Al-Si Alloys

Yang Xiangjie¹, Guo Hongmin², Kang Yuehua³, Zhou Zhimin⁴, Yang Haokun⁵

(1.School of Mechanical Engineering, Nanchang University; 2.College of Materials Science and Engineering, Nanchang University; 3.Institute of New Materials, Guangdong Academy of Sciences;
4.College of Materials Science and Technology, Chongqing University of Technology;
5.Smart Manufacturing Division, Hong Kong Productivity Council)

Abstract: The thermal conductivity, thermal expansion and mechanical properties of casting Al-Si alloys were regulated by introducing Sc and Ti elements into Al-Si alloys, combining with short-time aging heat treatment at 180 ℃ for 2 h or 220 ℃ for 3 h. Effects of alloying elements and short-time aging treatment on the microstructure evolution of casting Al-Si alloy were investigated by optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM), X-ray energy dispersive spectrometer (EDS), and the relationship between microstructure and thermal conductivity, thermal expansion as well as mechanical properties of the alloy was established. The results indicate that the increase of Si addition promotes the precipitation of the coarse primary Si phase, thereby weakening the thermal conductivity and mechanical properties of the Al-Si alloy, while effectively inhibiting the thermal expansion of the alloy. The addition of Sc or Ti can inhibit the coarsening of primary Si phase and refine secondary Si phase, thus improving the tensile strength of Al-12Si alloy, which can also reduce the thermal expansion coefficient of Al-Si alloy. Short-time aging treatment can alleviate the segregation of elements, significantly improving the thermal coefficient of Al-Si alloys, and reducing the thermal coefficient of Al-Si-(Sc, Ti) alloys.

Key Words: Casting Al-Si Alloys, Sc, Ti, Short-time Aging Treatment, Mechanical Properties

随着通讯、无人驾驶、大型计算模拟等领域的快速发展,计算设备的芯片及其电路的设计和制造集成度越来越高,导致单位体积内的功率密度也越来越大^[1]。研究表明,高功率工作状态会急剧增加电子器件温度,且每升高 2 ℃,芯片工作可靠性下降约 10%;当温度升高到 50 ℃时,电子器件的寿命缩短至 25 ℃时的 1/6。进一步升高温度,电子器件的失效率将呈指数级增加^[2-3]。因此,对电子产品的导热、散热性能提出了更严苛要求。

收稿日期:2022-07-03
基金项目:国家自然科学基金资助项目(50474007);江西省重大研发计划资助项目(20161ACE50021);重庆市技术创新与应用产业类重点资助项目(cstc2019jsex-fxydX0072);重庆市英才计划资助项目(2020RC22);香港生产力促进局 Commercial Research & Development(CRD) (10010788)
第一作者简介:杨湘杰,男,1960 年出生,教授,南昌(330031),E-mail: yangxj@ncu.edu.cn
通信作者:杨浩坤,男,1989 年出生,博士,中国香港(999077),E-mail: hkyang@hkpc.org
引用格式:杨湘杰,郭洪民,康跃华,等. Sc、Ti 及短时时效热处理对 Al-Si 合金性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(5):577-582.
YANG X J, GUO H M, KANG Y H, et al. Effects of Sc, Ti and short-time aging treatment on properties of Al-Si alloys[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(5):577-582.

铝硅(Al-Si)合金具有优良的铸造性能,且密度低、收缩率和热裂倾向小,已经成为汽车、5G 通信、工程机械制造领域中品种最多、用途最广的一类铝合金材料^[4-5]。纯铝的热导率 $[87.8 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}^2/(\text{g} \cdot \text{K})]$ 远高于纯铜的 $[44.9 \times 10^{-6} \cdot \text{m}^2/(\text{g} \cdot \text{K})]$,非常适合散热设备轻量化的设计趋势^[6]。但是铝及其合金的热膨胀系数在 $(20 \sim 32) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 之间^[7-8],远高于电子芯片硅衬底的热膨胀系数 $[(2.8 \sim 7.2) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}]$ 。因此,作为电子设备的散热器件,传统铝制散热器件受热产生膨胀,导致高达 120 MPa 以上的内应力,进而对芯片和电路板产生结构性破坏^[9]。对于目前常见铸造用 Al-Si 合金材料,如 YL102、YL104 等,其 Si 含量为 9%~12%,组织中含有大量的粗大块状初晶 Si 和针片状共晶 Si,割裂了铝基体,导致 Al-Si 合金的热导率仅为 $90 \sim 110 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ^[10]。析出相呈脆性,引起 Al-Si 合金塑性恶化,易在热膨胀作用下产生裂纹而失效。由此可见,用于散热器件制造的 Al-Si 合金材料不仅要具备高导热和优良的力学性能,同时降低材料的热膨胀系数也是关键指标之一。

铸态 Al-Si 合金基体中含有很多非平衡凝固相及夹杂物,且形貌上存在尖锐倒角,极易引起合金脆性断裂^[11]。为优化 Al-Si 合金性能,常采用 $(510 \pm 5)^\circ\text{C} \times 5 \text{ h}$ 的固溶处理,再进行 $(190 \pm 2)^\circ\text{C} \times 10 \text{ h}$ 的 T6 热处理工艺来缓解析出相引起的脆化问题^[12]。但是长时间的高温退火会造成晶粒粗大、强度降低且消耗过多能源等问题。为此,提出短时人工时效热处理以优化铸造 Al-Si 合金的力学和热学性能^[11,13]。此外,通过对 Al-Si 合金材料微合金化,如添加 Ti 和 Sc 元素,可显著细化铸态合金颗粒,提高合金的强度和韧性^[14-15]。本研究采用 Sc 和 Ti 元素合金化以及短时时效热处理对 Al- $x\text{Si}$ ($x=8, 12, 20, \%$, 质量分数)合金的组织进行优化处理,考察微观组织演化对 Al-Si 合金力学和热学性能的影响规律,旨在为高导热、低热膨胀性 Al-Si 合金的设计提供参考。

1 试验方法与材料

设计了 5 种 Al-Si 合金,其成分分别为 Al-8Si、Al-12Si、Al-20Si、Al-12Si-0.19Sc 和 Al-12Si-0.15Ti(质量分数,%)。根据合金成分比例配料,将工业纯铝(纯度为 99.0%)、Al-20Si 合金锭(纯度为 99.5%)在 $740 \sim 770^\circ\text{C}$ 下熔化,保温 $30 \sim 60 \text{ min}$;随后将混合熔体降温至 $710 \sim 720^\circ\text{C}$,然后加入 Al-10Ti 或 Al-2Sc 中间合金,保温 $15 \sim 30 \text{ min}$;最后精炼静置至少 30 min 后进行浇注,模具材质为低碳钢,浇注前在 250°C 下预热 2 h 。

将浇注的 5 种 Al-Si 合金进行 3 等份线切割,分别

进行无后续热处理, $180^\circ\text{C} \times 2 \text{ h}$ 并随炉冷却,以及 $220^\circ\text{C} \times 3 \text{ h}$ 并随炉冷却的短时时效热处理。将热处理前后的试样靠中心部位截取拉伸试样,见图 1,拉伸试样采用尺寸为 $\phi 10 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 的狗骨头棒状试样。拉伸试验在 25°C 下进行,设备为 Zwick/Roell Z250,应变速率为 $6.7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,每组测试两次。金相试样也取自试样中心部位,采用机械抛光至 2000 号砂纸,采用 SiO_2 悬浊液进行精抛,直至达到镜面效果。

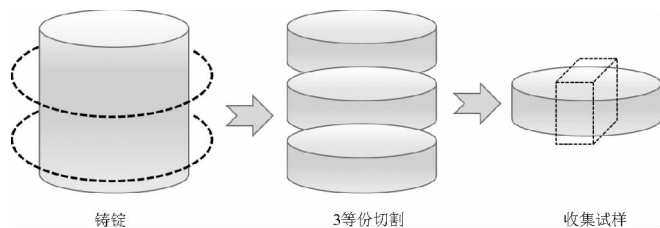


图 1 试样取样过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of sampling process

Al-Si 合金的热导率和热膨胀系数的测定分别采用 LFA467 激光导热分析仪和 DIL402 热膨胀仪进行,测试温度为 $25 \sim 300^\circ\text{C}$,采用 Keyence VHX7000 金相显微镜进行 Al-Si 合金微观组织观察,采用 JEOL JXA-8100 扫描电镜进行析出物形貌观察和元素成分测定。

2 试验结果与讨论

2.1 金相组织

图 2 为经过不同短时时效热处理后的 Al-Si 合金的金相组织。对于铸态 Al-Si 合金,Si 含量达到 20% 时,初生 Si 相的体积和数量达到顶峰。此外,随着 Si 含量增加,基体 Al 的组织连续性被初生和次生 Si 相破坏。随着短时时效热处理的引入,Al-8Si 组织形貌改变不大,但是 Al-12Si 和 Al-20Si 合金中的初生 Si 相的尖角逐渐球化(见图 2e、图 2f、图 2h 和图 2i),并且次生 Si 相发生了粗化,即次生相的宽度和间距增加。

图 3 为对经过不同短时时效热处理后的 Al-12Si-(Sc, Ti)合金的金相组织。可以看出,初生 Si 相的析出和长大被 Sc 或者 Ti 所抑制,次生 Si 相得到细化,即次生相的间距和宽度明显降低。此外,通过 Sc 或者 Ti 合金化之后,Al 基体的形貌分别为椭圆形(Al-12Si-Sc)或近球形(Al-12Si-Ti),被初生和次生 Si 相割裂的程度有所缓解。但是铸态 Al-12Si-Sc 和 Al-12Si-Ti 合金的 Al 基体聚集现象明显。随着短时时效热处理的引入,初生 Si 相的体积逐渐减小,且次生 Si 相发生了粗化现象,这与 Al-12Si 中一致。此外,通过短时时效热处理之后,Al 基体的聚集现象得到缓解。对 Al-12Si-(Sc, Ti)合金进行短时时效热处理,可以有效提升铝基体组织的连续性,同时抑制 Al 基体的团聚现象(见图 3e、图

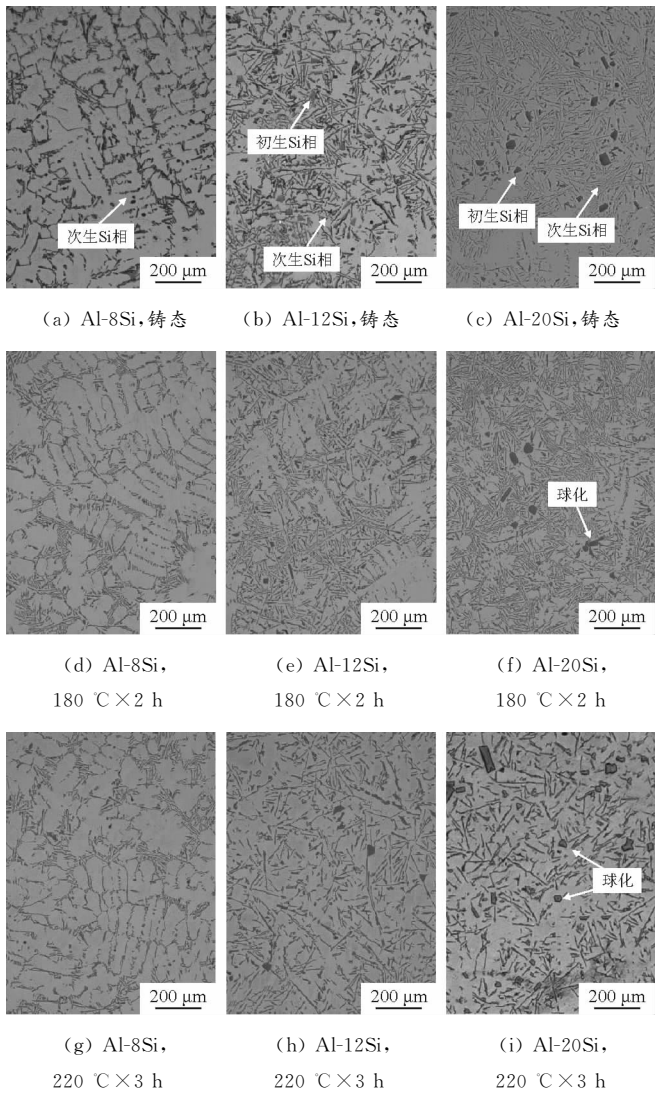


图 2 经过不同短时效热处理后的 Al-Si 合金的金相组织

Fig.2 Metallographic structure of Al-Si alloys with various short-time aging treatments

3f、图 3h 和图 3i)。

通过 X 射线能谱仪对短时效热处理前后的 Al-Si-(Sc, Ti)合金的基体、初生和次生 Si 相中的 Al 和 Si 元素含量进行对比,结果见表1和表2。对于Al-Si合

表 1 不同热处理下 Al-Si 合金的基体、初生和次生 Si 相的元素成分

Tab.1 Chemical composition of matrix, primary and secondary Si phases in Al-Si alloys under various heat treatments										
试样	时效处理	位置	$w_B/\%$		位置	$w_B/\%$		位置	$w_B/\%$	
			Al	Si		Al	Si		Al	Si
Al-8Si	无	基体	98.64	1.36	初生 Si 相			次生 Si 相	8.29	91.71
	180 ℃×2 h		100	0					28.93	71.07
	220 ℃×3 h		100	0					10.34	89.66
Al-12Si	无		100	0		1.71	98.29		8.52	91.48
	180 ℃×2 h		100	0		1.75	98.5		17.23	82.77
	220 ℃×3 h		100	0		1.66	98.34		21.63	78.37
Al-20Si	无	98.34	1.66	1.32	98.68	17.97	82.03			
	180 ℃×2 h	98.44	1.56	1.3	98.7	34.02	68.98			
	220 ℃×3 h	100	0	1.61	98.39	14.82	85.18			

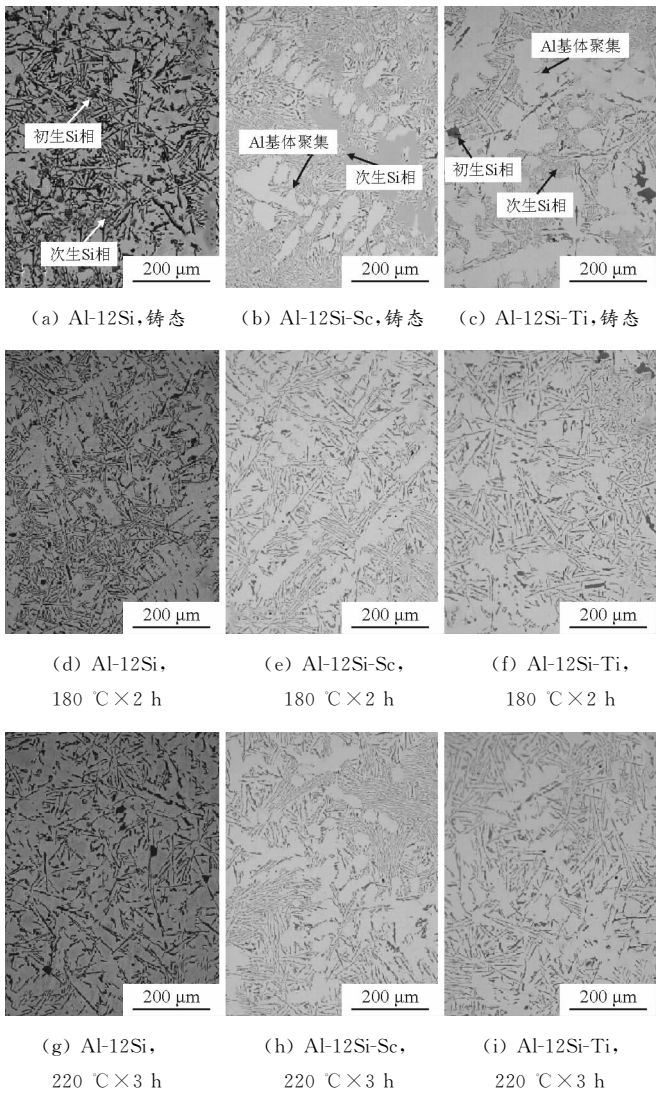


图 3 经过不同短时效热处理后的 Al-12Si-(Sc, Ti)合金的金相组织

Fig.3 Metallographic structure of Al-12Si-(Sc, Ti) alloys with various short-time aging treatments

金,短时效热处理可以降低铝基体中的 Si 含量,同时促进 Al 向初生和次生 Si 相中扩散。热处理可以缓解因为浇注过程中快速冷却导致的元素聚集问题,即减弱组织中的元素过饱和现象;对于含有 Sc 或者 Ti 作为添

表 2 不同热处理下 Al-12Si-(Sc, Ti)合金的基体、初生和次生 Si 相的元素成分

Tab.2 Chemical composition of matrix, primary and secondary Si phases of Al-12Si-(Sc, Ti) alloys under various heat treatments													
试样	时效处理	位置	$w_B/\%$			位置	$w_B/\%$			位置	$w_B/\%$		
			Al	Si	其他		Al	Si	其他		Al	Si	其他
Al-12Si-Sc	无	基体	97.90	1.70	0.40	初生 Si 相	2.71	96.76	0.53	次生 Si 相	3.14	96.18	0.68
	180 ℃×2 h		97.98	1.56	0.46		2.04	97.47	0.49		8.03	91.67	0.03
	220 ℃×3 h		98.37	1.09	0.54		2.37	97.10	0.53		2.87	96.72	0.41
无	97.66		1.78	0.56	1.31		98.10	0.59	3.04		96.34	0.62	
Al-12Si-Ti	180 ℃×2 h	基体	98.02	1.31	0.67	初生 Si 相	1.65	97.99	0.36	次生 Si 相	2.43	96.59	0.98
	220 ℃×3 h		98.12	1.23	0.65		1.40	98.12	0.48		2.99	96.56	0.45

加元素的 Al-12Si-(Sc, Ti)合金,添加的合金元素抑制了初生 Si 相的长大和元素偏析,因此短时时效热处理对基体和析出相中固溶元素的析出作用影响有限。

2.2 力学性能

图 4 为经过不同短时时效热处理后的 Al-Si-(Sc, Ti)合金的拉伸曲线。从图 4a~图 4c 可以看出, Si 含量的增加会严重恶化 Al-Si 合金的塑性,使其伸长率从 2.35%(Al-8Si)降低至 0.38%(Al-20Si);同时还会降低

Al-Si 合金的抗拉强度,从 134 MPa(Al-8Si)逐渐降低到 122 MPa(Al-12Si),直至 110 MPa(Al-20Si)。此外,短时时效热处理对 Al-Si 合金的塑性提升仅发生在低 Si 含量的 Al-8Si 合金中,而对 Al-12Si 和 Al-20Si 的塑性影响较小;短时时效热处理对 Al-8Si 和 Al-12Si 合金的抗拉强度影响不大;Al-20Si 合金抗拉强度的变化与短时时效热处理之间无明显关联,这主要是因为 Al-20Si 的塑性太低,其抗拉强度无法体现。

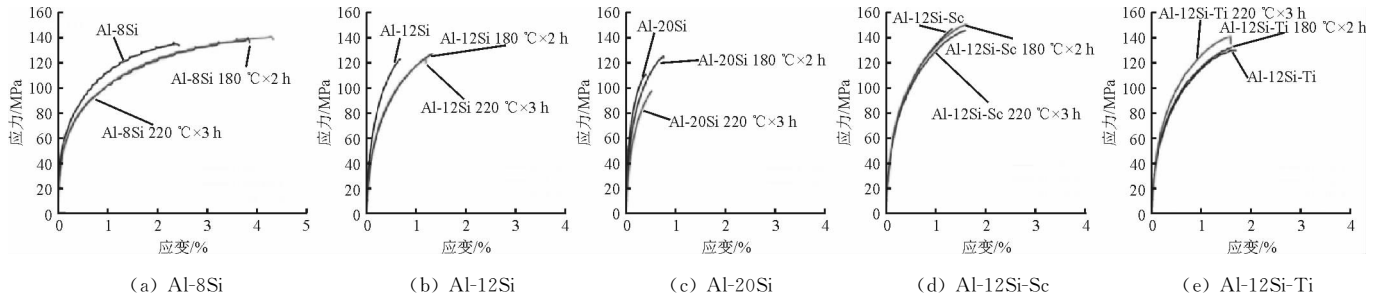


图 4 经过不同短时时效热处理后的 Al-Si-(Sc, Ti)合金的拉伸曲线

Fig.4 Tensile curves of Al-Si-(Sc, Ti) alloys with various short-time aging treatments

从图 4d 和图 4e 可以看出, Al-12Si-Sc 和 Al-12Si-Ti 合金的伸长率分别为 1.29%和 1.68%,说明 Sc 或者 Ti 的加入可明显提升 Al-12Si 合金的塑性。Sc 的加入对 Al-12Si 合金的抗拉强度提升明显,从 122 MPa 提升到 146 MPa。但是 Ti 对 Al-12Si 合金抗拉强度的影响较弱, Al-12Si-Ti 合金的抗拉强度仅提升了 7 MPa。此外,短时时效热处理对 Al-12Si-(Sc, Ti)合金拉伸性能影响不大, Al-12Si-Sc 合金的抗拉强度和伸长率波动范围为 146~149 MPa 和 1.29%~1.59%, Al-12Si-Ti 合金则为 129~140 MPa 和 1.58%~1.68%。

拉伸结果表明, Al-Si 合金的伸长率和抗拉强度均随着 Si 含量的增加而急剧降低,这主要是由于粗大的脆性初生 Si 相降低了材料的塑性变形能力^[16-17]。合金化处理可有效提升 Al-12Si 的塑性变形能力,且 Sc 还具有同时提升 Al-Si 合金强度的作用,但 Ti 对 Al-12Si 合金强度提升不明显。通过短时时效热处理,可显著提升低 Si 含量的(Al-8Si)合金的塑性,但是对 Al-12Si、Al-20Si 以及 Al-12Si-(Sc, Ti)合金的拉伸性能影响不大。

2.3 热学性能

2.3.1 导热系数

图 5 为 Si 元素以及短时时效热处理对铸造 Al-Si 合金热导率的影响。可以看出,随着 Si 含量增加, Al-Si 合金的热导率在 25~300 ℃范围内整体上呈降低的趋势,这是由于随着 Si 含量增加,粗大的初生 Si 相对 Al 基体产生了割裂破坏,导致 Al 基体中的电子通过合金的阻力增加,电子运动的平均自由程降低,最终恶化导热能力^[18]。此外,随着短时时效热处理温度提升, Al-12Si 和 Al-20Si 合金热导率逐步提升,推测是因为短时时效热处理可以弱化因浇注过程中快速冷却导致的合金元素在初生和次生 Si 相中过高的固溶度,并且次生相发生粗化,减弱了对基体 Al 相的割裂。因此,降低了电子通过合金组织的阻力,进而有效恢复 Al-Si 合金导热性能^[19]。但是随着短时时效热处理温度和时间的提升, Al-8Si 合金的热导率呈现先升高后降低的趋势,这可能是过时效热处理引起基体 Al 相弥散析出不稳定的 Si 相导致的^[20]。

Sc 或者 Ti 元素的添加对 Al-Si 合金的热导率的变化影响不大,且随着短时效热处理的引入,Al-12Si-Sc 和 Al-12Si-Ti 合金的热导率有所减小,见图 5d 和图 5e。由表 2 可知,短时效处理后,Al 基体中 Si 含量有

所降低,即 Si 颗粒有可能从基体中析出,导致材料整体导热能力恶化^[20]。由此可见,采用短时效热处理,对 Al-12Si-Sc 和 Al-12Si-Ti 合金的导热性能影响不如对 Al-Si 合金的影响作用显著。

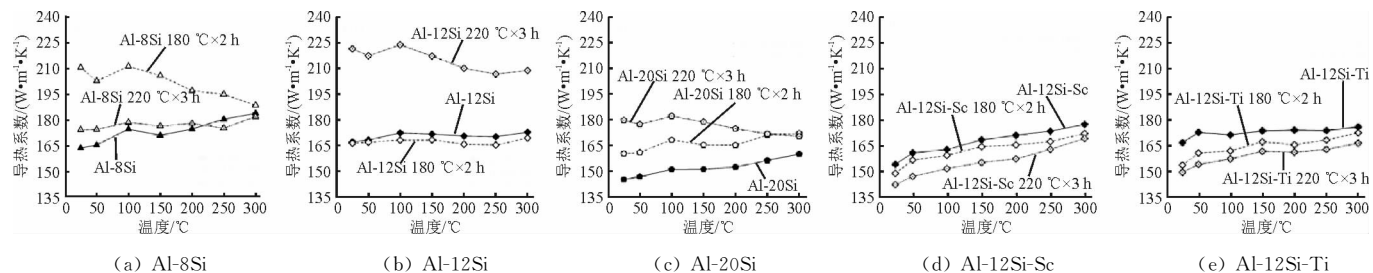


图 5 经过不同短时效热处理后的 Al-Si(Sc, Ti)合金的热导率

Fig.5 Heat conductivity of Al-Si(Sc, Ti) alloys with various short-time aging treatments

2.3.2 热膨胀系数

Si 含量的增加以及引入短时效热处理,对 Al-8Si 和 Al-12Si 合金的热膨胀系数影响不大,见图 6。在相同的测试温度和热处理工艺下,热膨胀系数的差值范围均为 $(-8.2 \sim +4.2) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 。但在 200~300 °C 范围内,无热处理的 Al-20Si 合金热膨胀系数相比于 Al-

8Si 和 Al-12Si 合金而言明显降低;随短时效热处理温度升高,Al-20Si 合金的热膨胀系数呈现先增大后减小的趋势。而 Al-12Si-(Sc, Ti)合金的热膨胀系数随着短时效热处理温度的升高而升高,但是 Al-12Si 二元合金的热膨胀系数则对短时效热处理相对不敏感(见图 6b,图 6d 和图 6e)。

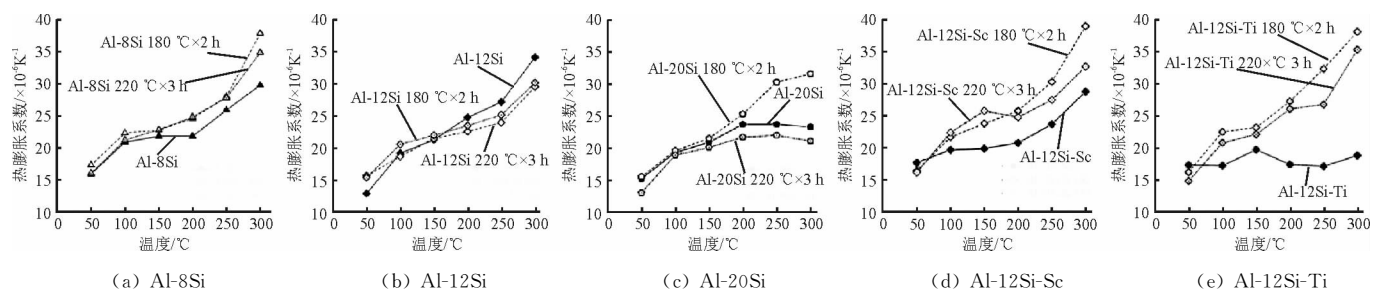


图 6 经过不同短时效热处理后的 Al-Si(Sc, Ti)合金的热膨胀系数

Fig.6 Thermal expansivities of the Al-Si(Sc, Ti) alloys with various short-time aging treatments

由图 2 和图 3 可知,Al-Si 合金可以被看作是以 Si 含量为主的初生和次生 Si 相与 Al 基体组成的复合材料。在室温下,Si 相的热膨胀系数为 $(2.8 \sim 7.2) \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$,基体 Al 相的热膨胀系数则为 $23.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ^[21]。由此看来,Si 相在铝基体中起到了钉扎作用,并且 Si 相与基体铝相的界面接触面积越大,即界面分数越高,抑制合金热膨胀的效果越明显。因此 Al-20Si 合金相比于 Al-8Si 和 Al-12Si 合金具有更低的热膨胀系数。但是对于 Al-Si 合金进行短时效热处理之后,Al-8Si、Al-12Si 和 Al-20Si 合金的热膨胀系数都表现出了一定增加趋势,这主要是由于次生 Si 相的粗化,导致 Si 相与 Al 基体之间的界面分数降低所致。

此外,Sc 或者 Ti 合金化后,Al-12Si-(Sc, Ti)合金的热膨胀系数降低显著,即 Sc 或者 Ti 的加入可以有效细化次生 Si 相,增加 Si 相与 Al 基体的界面分数以抑制 Al-12Si-(Sc, Ti)合金的热膨胀趋势。但是随着短时效热处理的引入,次生 Si 相开始粗化,与 Al 基体的

界面分数降低,进而导致了 Al-12Si-(Sc, Ti)合金在经过 180 °C 和 220 °C 短时效热处理之后的热膨胀系数增加。

热学性能测试结果表明,短时效热处理可有效提升 Al-Si 合金的导热性能,但会导致合金的热膨胀系数提升。同时,对 Al-12Si-(Sc, Ti)合金的导热系数产生抑制作用,且无法抑制 Al-12Si-(Sc, Ti)合金的热膨胀趋势,表现出短时效热处理对 Al-12Si-(Sc, Ti)合金的热学性能恶化的现象。此外,Sc 或者 Ti 的合金化作用可以抑制 Al-12Si 合金的热膨胀系数,尤其是 Ti 的作用更加明显,但两种合金元素对导热性能影响不显著。随着短时效热处理的引入,Al-12Si-(Sc, Ti)合金的热膨胀系数迅速提升,合金化对抑制 Al-12Si 合金热膨胀的效果失效。

3 结 论

(1)短时效热处理可对 Al-Si 合金中的初生 Si 相

起到一定的球化作用,且对次生 Si 相有粗化作用。

(2) Sc 或者 Ti 对 Al-Si 合金的初生和次生 Si 相分别起到了抑制和细化作用,且同时促进基体 Al 相的球化。通过后续短时效热处理,基体 Al 相的团聚现象得到缓解。

(3) Si 含量的增加会急剧恶化 Al-Si 合金的塑性,通过加入 Sc 或者 Ti 可以有效抑制粗大的初生 Si 相的析出,提升 Al-12Si 合金的塑性。

(4) 短时效热处理可有效提升 Al-8Si 合金的塑性,但是对 Al-12Si 和 Al-20Si 合金的塑性影响不明显。此外,短时效热处理对 Al-Si-(Sc, Ti) 合金的抗拉强度影响不显著。

(5) 短时效热处理可以提升 Al-Si 合金的导热性能,但是对 Al-12Si-(Sc, Ti) 合金的热导率和热膨胀性能有恶化作用,即热导率降低且热膨胀系数增加。

(6) Sc 或者 Ti 对 Al-Si 合金热导率影响不大,但是可以有效抑制 Al-Si 合金的热膨胀系数。

参 考 文 献

- [1] 朱雨生,施静,陈承.混合集成技术代际及发展研究[J].中国电子科学研究院学报, 2021, 16(5): 438-450.
- [2] JANICKI M, NAPIERALSKI A. Modelling electronic circuit radiation cooling using analytical thermal model[J]. Microelectronics Journal, 2000, 31(9-10): 781-785.
- [3] ZWEBEN C. Advances in high-performance thermal management materials: A review[J]. Journal of Advanced Materials, 2007, 39(1): 3-10.
- [4] 徐通,张宇飞,李咏凯.高性能亚共晶铝硅合金的研究[J].材料研究与应用, 2017, 11(4): 236-239.
- [5] 李宏宝,涂浩,彭浩平,等. Al-3B 变质共晶铝硅合金的显微组织与力学性能[J].中国有色金属学报, 2019, 29(8): 1 599-1 605.
- [6] 张晓辉,王强. 电子封装用金属基复合材料的研究现状[J].微纳电子技术, 2018, 55(1): 18-25, 44.
- [7] 黄晓明,孙杰,李剑峰,等. 7050-T7451 铝合金预拉伸板材热膨胀系数变化规律及机理[J].中国有色金属学报, 2013, 23(12): 3 282-3 288.
- [8] 李萍,吴广善,黄彪,等.往复挤压对 A390 铝合金力学及热膨胀性能的影响[J].塑性工程学报, 2019, 26(6): 1-6.
- [9] PEI C, CHEN C T, SUGANUMA K, et al. Thermal stability of silver paste sintering on coated copper and aluminum substrates[J]. Journal of Electronic Materials, 2018, 47(1): 811-819.
- [10] 周玉立,邹纯,赵明宝,等. Mg、Sc 对铸造铝合金导热和力学性能的影响[J].特种铸造及有色合金, 2019, 39(4): 353-356.
- [11] 熊歆晨.高导热低膨胀高硅铝合金的研究[D].武汉:华中科技大学, 2017.
- [12] 姜华文.耐热低膨胀高硅铝合金的研究[D].武汉:华中科技大学, 2009.
- [13] 刘芳,于福晓,赵大志,等.时效时间对变形铝硅合金组织与性能的影响[J].东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(1): 34-38.
- [14] 刘云,任子清,姚衡.微量钎对 ZAlSi7Cu2Mg 合金铸态组织与性能的影响[J].热加工工艺, 2012, 41(19): 70-72.

- [15] 朱翔鹰,李宏宝,涂浩,等. Al-3P 和 Al-5Ti 复合变质共晶铝硅合金的组织与性能[J].材料热处理学报, 2021, 42(6): 52-58.
- [16] HU R Z, GUO C, MA M L, A study on high strength, high plasticity, non-heat treated die-cast aluminum alloy [J]. Materials, 2022, 15(1): 295-299.
- [17] 王慧.高性能导热铸造 Al-Si 合金的制备及性能研究[D].兰州:兰州理工大学, 2020.
- [18] 吴孟武,华林,周建新,等.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.
- [19] HUANG Y Y, HU Z L, WANG J J. Research progress on the aluminum alloy with high thermal conductivity[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 574: 396-400.
- [20] LUO G, ZHOU X, LI C, et al. A quantitative study on the interaction between silicon content and heat treatment on thermal conductivity of Al-Si binary alloys[J]. International Journal of Metalcasting, 2022, 16: 1 585-1 594.
- [21] 杨伏良,甘卫平,陈招科.硅含量对高硅铝合金材料组织及性能的影响[J].材料导报, 2005(2): 98-100.

(编辑:彭瑾)

建立镁合金建筑模板国家标准体系 引领建筑业高质量发展

据中国模板脚手架协会统计,目前,在我国建筑模板中,木模板依旧占有 60% 以上的市场份额。而《北京市禁止使用建筑材料目录(2018 年版)》,明确将竹、木胶合板模板列入 77 种被禁止使用的建筑材料中,贵州、河北、江西、宁夏、浙江、重庆等地区也陆续发布了禁止、限制使用竹、木胶合板模板等相关政策。

合金模板作为高周转、可循环利用的建筑材料,在行业发展中符合产业政策引领方向。国家发改委等七部委联合印发的《绿色产业指导目录》将绿色建筑材料制造列入。住建部《关于推进建筑垃圾减量化的指导意见》提出优先选用绿色建材,鼓励采用新型模板支撑体系,推广应用高周转建筑材料。国务院近日印发的《质量强国建设纲要》提出,要加快高强度高耐久、可循环利用、绿色环保等新型建材研发与应用,提升建材性能和品质;大力发展绿色建材,完善绿色建材产品标准和认证评价体系,倡导选用绿色建材。

镁合金在我国具有绝对资源优势,是常用金属材料中唯一 100% 自给且具有较强国际竞争力的品种,是国家重点鼓励的绿色新材料。《战略性新兴产业分类》将镁合金纳入战略性新兴产业;《产业结构调整指导目录》将高性能镁合金及其制品列为鼓励类项目,鼓励多样化镁合金材料开发及其铸造、挤压、轧制、锻造等加工制造,培育新材料产业链;《重点新材料首批次应用示范指导目录》(2021 年版)将高性能镁合金挤压材列为先进基础材料。

镁合金建筑模板的力学性能接近铝合金,优势更加明显:一是高周转,建筑垃圾少,占用空间小;二是施工质量优,板面平整;三是成本更低,相同质量的镁与铝,镁可以多生产 33% 的建筑模板;三是施工效率更高,镁合金模板质量轻,提高了工人和机械的工作效率;四是散热性更好,满足了抵消水凝在浇灌振捣中产生热量的施工需求;五是安全风险更低,工人施工更安全,职业病发病率低,是一种理想的新型绿色建材。

(摘自中国有色网)