

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2024.4086

Cu 元素和 RE 含量对耐热铝硅合金组织及力学性能的影响

严兆祥, 张耀华, 向渴望, 吕书林, 吴树森, 李建宇

(华中科技大学材料科学与工程学院, 材料成形与模具技术全国重点实验室, 湖北武汉 430074)

摘要: 过共晶铝硅合金因其优良的耐热性而受到汽车领域的广泛关注, 但随着材料服役环境的日益严苛, 进一步提升过共晶铝硅合金综合性能至关重要。针对过共晶 Al-14Si-xCu-1Ni-0.5Mg-0.5Mn-yRE 合金 (简称 Al-14Si-xCu-1Ni-yRE 合金, $x=2, 3, 4$, $y=0.1, 0.3, 0.5$, 质量分数, %), 通过 X 射线衍射仪 (XRD)、光学显微镜 (OM)、扫描电子显微镜 (SEM)、拉伸测试等表征手段研究了不同 Cu 含量和 RE (La+Ce 混合稀土) 含量对 T6 态合金微观组织及力学性能的影响规律。结果表明, 随着 Cu 含量的增加, Al-14Si-xCu-1Ni-0.5RE 合金中富 Cu 相 (如 Al_2Cu 、AlCuNi 相等) 数量不断增多, 特别是当 Cu 含量添加至 4% 时, 合金中甚至存在大量的长针状 AlSiCuNiRE 相, 从而割裂基体, 合金伸长率不断下降, 无法满足实际应用需求。当 Cu 含量为 3% 时, Al-14Si-3Cu-1Ni-0.5RE 合金表现出最佳力学性能, 合金的室温抗拉强度为 348.2 MPa、高温抗拉强度为 180.3 MPa、室温伸长率为 1.91%。此外, 随着 RE 含量的不断增加, Al-14Si-3Cu-1Ni-yRE 合金中共晶 Si 的变质效果有所优化, 但长针状富 RE 相也不断增多。当 RE 含量为 0.3% 时, Al-14Si-3Cu-1Ni-0.3RE 合金的室温抗拉强度、高温抗拉强度和室温伸长率分别达到 354.3 MPa、185.5 MPa 和 2.1%。

关键词: 耐热铝硅合金; Cu 元素; RE 含量; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2024)05-0425-07

Effects of the Cu and RE Contents on the Microstructure and Mechanical Properties of Heat-resistant Al-Si Alloys

YAN Zhaoxiang, ZHANG Yaohua, XIANG Kewang, LYU Shulin, WU Shusen, LI Jianyu

(National Key Laboratory of Forming and Mold Technology, School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Hypereutectic Al-Si alloys have received much attention in the automotive field due to their excellent heat resistance, but as the service environment of these materials becomes increasingly demanding, it is crucial to further improve the overall performance of hypereutectic Al-Si alloys. In this paper, the effects of different Cu contents and RE (La+Ce mixed rare earth) contents on the microstructures and mechanical properties of hypereutectic Al-14Si-xCu-1Ni-0.5Mg-0.5Mn-yRE alloys (referred to as Al-14Si-xCu-1Ni-yRE alloys; $x=2, 3, 4$ wt. %; $y=0.1, 0.3, 0.5$ wt. %) in the T6 state were investigated via analytical methods, including XRD, OM, SEM, and tensile tests. The results show that the number of Cu-rich phases (e.g., Al_2Cu and AlCuNi phases) in the Al-14Si-xCu-1Ni-0.5RE alloy increases with increasing Cu content. In particular, when the Cu content is increased to 4 wt. %, a large number of long needle-like AlSiCuNiRE precipitates even exist in the alloy, which split the matrix. The alloy elongation consequently decreases continuously, which cannot satisfy practical application requirements. When the Cu content is 3 wt. %, the Al-14Si-3Cu-1Ni-0.5RE alloy shows the best mechanical properties, the room temperature tensile strength of the alloy is 348.2 MPa, the high temperature tensile strength is 180.3 MPa, and the room temperature elongation is 1.91%. In addition, the metamorphic effect of eutectic Si in Al-14Si-3Cu-1Ni-yRE alloys is

收稿日期: 2024-04-27

基金项目: 国家自然科学基金(52205364)

作者简介: 严兆祥, 2001 年生, 硕士研究生. 研究方向为高性能铝合金制备及组织性能. Email: 2498038772@qq.com

通讯作者: 李建宇, 1993 年生, 博士, 助理研究员. 研究方向为新型铝(镁)合金及先进复合材料开发与制备成形新技术.

Email: jianyu@hust.edu.cn

引用格式: 严兆祥, 张耀华, 向渴望, 吕书林, 吴树森, 李建宇. Cu 元素和 RE 含量对耐热铝硅合金组织及力学性能的影响[J]. 铸造技术, 2024, 45(5): 425-431.

YAN Z X, ZHANG Y H, XIANG K W, LYU S L, WU S S, LI J Y. Effects of the Cu and RE contents on the microstructure and mechanical properties of heat-resistant Al-Si alloys[J]. Foundry Technology, 2024, 45(5): 425-431.

optimized with increasing RE content, but the amount of long needle-like RE-rich phase continues to increase. The room temperature tensile strength, high temperature tensile strength and room temperature elongation of the Al-14Si-3Cu-1Ni-0.3RE alloy reach 354.3 MPa, 185.5 MPa and 2.1%, respectively, when the RE content is 0.3 wt. %.

Key words: heat-resistant Al-Si alloys; Cu; RE content; microstructure; mechanical properties

汽车发动机缸盖和活塞等关键零部件长期工作在高温和高压的环境中,对材料的热稳定性和高温力学性能提出了严苛的要求^[1-2]。过共晶铝硅合金以其低热膨胀系数、优良的耐磨性和耐热性、高强度、良好的耐腐蚀性能及显著的减重效果,被认为是制造高性能汽车发动机缸盖、活塞等关键部件的理想材料^[3-5]。

随着发动机不断向薄壁化和高功率密度的方向发展,传统发动机用 A380、A390 等铝合金材料的综合性能已不能满足高功率发动机关键零部件的使用需求^[1,6]。通过添加合金化元素调控合金微观组织,达到细化晶粒及析出强化的效果,是提高铝硅合金力学性能的重要手段之一。Cu 元素作为铝硅合金中一种重要合金元素,由于其在铝基体中固溶度大, T6 处理后大量富 Cu 相弥散析出,对铝硅合金有明显的强化效果,并且这些富 Cu 相在 200 °C 下稳定存在,有利于合金的高温力学性能^[7-9]。Jia 等^[10]研究了 Cu 元素对 Al-Si-Mg-Mn-xCu 铸造合金微观组织及力学性能的影响,发现 Cu 元素的增加促进了凝固过程中含 Cu 初生相(Q-Al₅Cu₂Mg₈Si₆ 和 θ-Al₂Cu)的形成,从而改善了合金的性能。宾泽云等^[11]研究了合金化元素对 Al-7.5Si-0.35Mg 铝合金性能的影响,发现 Cu 元素对合金高温抗拉强度影响最大。Taghiabadi 等^[12]通过在 A356 合金中添加不同含量的 Cu 元素,发现随着 Cu 含量不断增加,合金伸长率不断下降,这归因于脆性含 Cu 金属间化合物含量的增加以及微孔体积分数的提高,并且当 Cu 含量增加到 3%时, A356 合金热裂敏感性提高了约 33%。随着 Cu 含量的不断增加,合金热膨胀系数增加,热裂倾向增大,导致合金塑性降低,并且合金流动性下降,不利于铝硅合金的铸造性能。因此,研究 Cu 元素含量对过共晶铝硅合金微观组织及力学性能的影响具有重要意义。

同时,由于过共晶 Al-Si 合金中 Si 含量高,这就导致合金微观组织中存在大量粗大板片状初晶硅及长针状共晶硅,割裂基体,严重损害合金的力学性能,在一定程度上限制了过共晶 Al-Si 合金的应用^[13-15]。目前,国内外对过共晶 Al-Si 合金中硅相的变质处理研究已有很多,其中主要集中于添加 P、Sr 及稀土元素(RE)等。石为喜等^[5]发现添加 RE 能够有效细化过共晶 A390 合金微观组织,经变质处理后

硅相尺寸及形貌都得到改善,提高了合金的力学性能。同时,合金中的 Si、Mg、Cu、Mn 等元素可与 RE 生成金属间化合物,这些复杂的金属间化合物在高温下具有较好的尺寸稳定性,有利于过共晶 Al-Si 合金高温力学性能的提升^[16-17]。但随着 RE 含量的不断增加,富 RE 相呈长针状结构,不仅弱化变质效果,而且割裂铝基体,恶化合金性能。因此,研究 RE 元素含量对过共晶铝硅合金中硅相的变质作用及合金高温力学性能的提升具有重要意义。

本文针对 Al-14Si-xCu-0.5Mg-1Ni-0.5Mn-0.5RE (x=2, 3, 4, 质量分数,%) 过共晶铝硅合金,经过 T6 热处理后,研究了不同 Cu 含量对合金微观组织及力学性能的影响规律,并优化出最优 Cu 添加量;随后,针对 Al-14Si-xCu-0.5Mg-1Ni-0.5Mn-yRE(其中 x 为最优 Cu 添加量, y=0.1, 0.3, 0.5, 质量分数,%)合金,研究了不同 RE(La+Ce 混合稀土)含量对 T6 态合金微观组织及力学性能的影响规律,并对其强化机理进行了深入讨论。

1 实验材料与方法

实验用过共晶 Al-Si 合金的 Si 含量为 14%,各合金元素的名义含量如表 1 所示。将纯 Al、Cu、Ni 及 Mg 块和 Al-25Si、Al-10Mn、Al-10RE 中间合金(其中 La/Ce 元素含量比值为 1:3)等原材料放入坩埚中,并置于电阻炉中进行熔炼。待合金完全熔化后,向熔体中通入高纯氩气进行除气精炼 10~15 min。将熔炼好的合金熔体浇入重力金属型模具,浇铸温度在 720 °C 左右,得到不同合金成分的合金铸坯。对其进行 T6 热处理,工艺参数为 510 °C 下固溶 7 h 后水冷,200 °C 下时效 10 h 后空冷。

表1 Al-Si-Cu-Ni-Mg-Mn-RE合金的名义成分
Tab.1 Nominal composition of the Al-Si-Cu-Ni-Mg-Mn-RE alloys

(mass fraction/%)							
Alloy	Si	Cu	Mg	Ni	RE	Mn	Al
A	14	2	0.5	1	0.5	0.5	Bal.
B	14	3	0.5	1	0.5	0.5	Bal.
C	14	4	0.5	1	0.5	0.5	Bal.
D	14	3	0.5	1	0.5	0.5	Bal.
E	14	3	0.5	1	0.3	0.5	Bal.
F	14	3	0.5	1	0.1	0.5	Bal.

在得到的热处理态铸锭相同中心位置制备不同

成分的试样进行显微组织观察。金相组织观察(OM)首先按标准程序进行机械打磨和抛光,再使用浓度为0.5%HF溶液对试样进行腐蚀,最后使用DMM-490C金相显微镜观察显微组织。使用SHIMADZU XRD-7000S衍射仪测定试样相组成,进行相分析。采用GeminiSEM300场发射扫描电子显微镜进行SEM观察进一步分析合金的显微组织形貌。按照GB/T 228.1-2010国标(ASTM A370-206),用于力学性能测试的试样从铸坯中加工所得,尺寸如图1所示。在Shimadzu AG-100KN万能材料试验机上以1 mm/s的速率进行拉伸性能测试,每个铸坯选择3个试样进行力学性能测试,测试结果取平均值以保证实验准确性。

2 实验结果及讨论

2.1 Cu含量对过共晶铝硅合金显微组织及性能的影响

图2a是不同Cu含量下Al-14Si-xCu-1Ni-0.5RE合金的XRD图谱。从图中可知,Al-14Si-xCu-1Ni-0.5RE合金主要由 α -Al、Si、Mg₂Si、Al₂Cu、AlCuNi、Al₄Ce、Fe₂MnSi相组成。且随着过共晶铝硅合金中Cu含量的变化,合金中各种析出相的衍射峰的强度和角度没有明显的变化。图2b~d为不同Cu含量下

T6态Al-14Si-xCu-1Ni-0.5RE合金的金相组织。随着合金中Cu含量的不断增加,过共晶铝硅合金组织中的初晶Si和共晶Si并没有发生明显的变化,但合金组织中的黑色针状相不断增多。当Cu含量达到4%时,过共晶铝硅合金中出现了大量的黑色针状相,这种长针状结构会割裂合金基体,严重损害合金的伸长率。

进一步观察不同Cu含量下T6态Al-14Si-xCu-1Ni-0.5RE合金的显微组织,合金的SEM图像和EDS分析如图3所示。合金中存在的灰白色Al-SiMnFe相是由于在熔炼过程中由铁制熔炼工具带入的Fe元素和其他元素相结合而形成。根据SEM图像并结合Cu元素扫描分布图可以发现,随着合金中Cu含量从2%逐渐增加到4%时,合金组织中白色富Cu相的数量明显增多,Cu元素出现富集,富Cu相主要为灰白色块状或粒状AlCuNi相、白色针状AlSiCuNiRE相。但在SEM图像中并未发现Al₂Cu相的存在,可能是由于其数量较少且尺寸较小。AlCuNi相和AlSiCuNiRE相都具有较高的熔点和较好的热稳定性,是合金组织中的高温强化相。虽然这种富RE相具有较高的热稳定性,有利于合金高温力学性能的提升,但长针状形貌也导致割裂铝基体,恶化合金力学性能,降低合金的塑性^[18]。

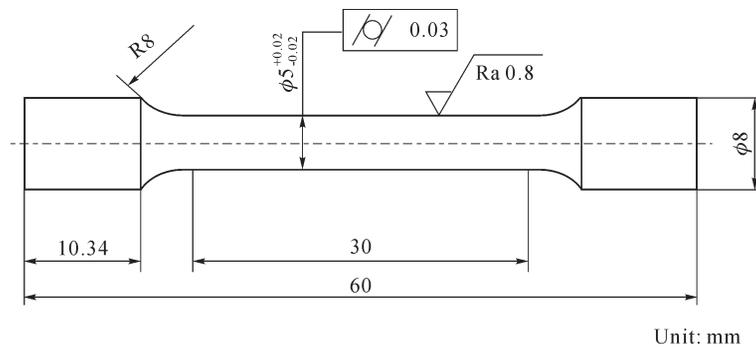


图1 拉伸试样尺寸示意图

Fig.1 Schematic diagram of the dimensions of the tensile specimen

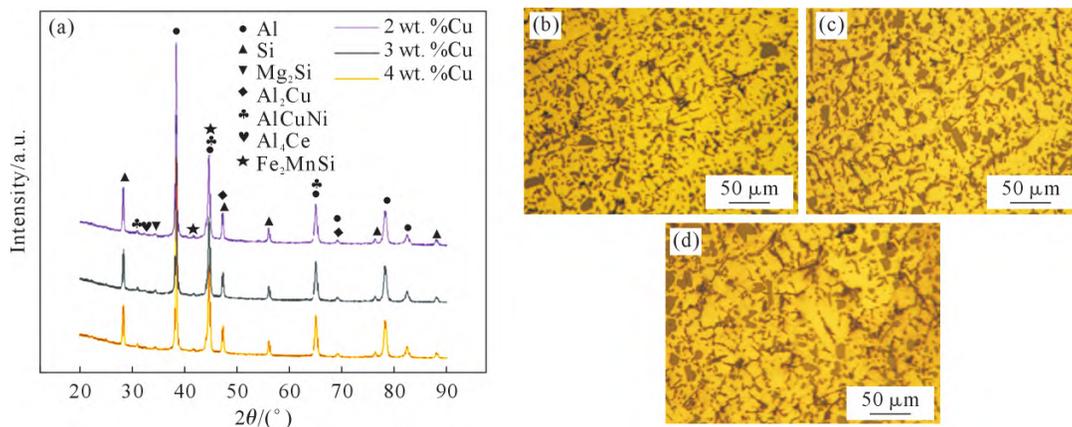


图2 Al-14Si-xCu-1Ni-0.5RE合金的铸态XRD图谱和T6态金相组织:(a) XRD图谱;(b) 2%Cu;(c) 3%Cu;(d) 4%Cu
Fig.2 The as-cast XRD patterns and microstructure in the T6 state of the Al-14Si-xCu-1Ni-0.5RE alloy: (a) XRD patterns; (b) 2 wt. %Cu; (c) 3 wt. %Cu; (d) 4 wt. %Cu

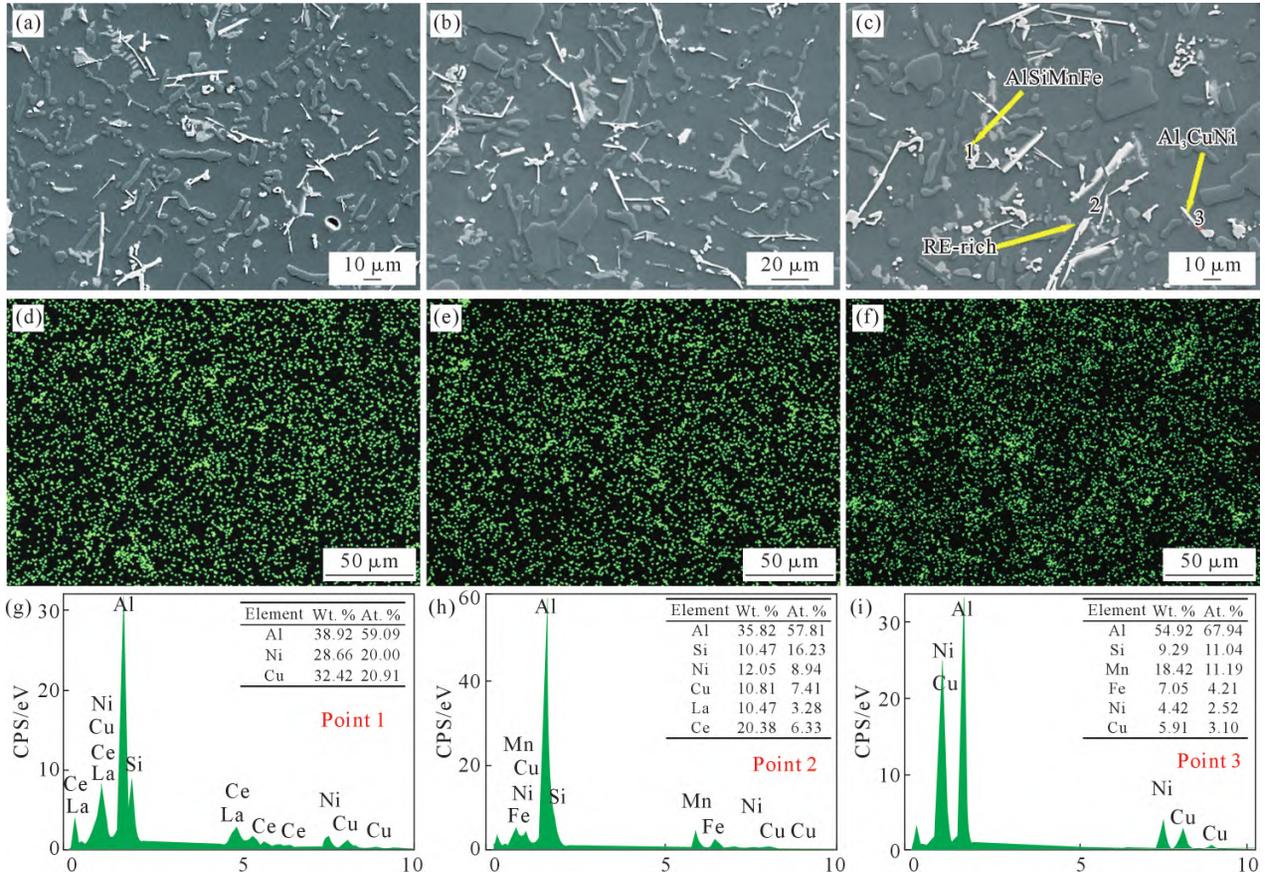


图3 不同Cu含量下T6态Al-14Si-xCu-1Ni-0.5RE合金的SEM图像和EDS分析:(a, d) 2%Cu; (b, e) 3%Cu; (c, f) 4%Cu; (g-i) 图(c)中第二相的EDS点分析

Fig.3 SEM images and EDS analysis of Al-14Si-xCu-1Ni-0.5RE alloys in the T6 state with different Cu contents: (a, d) 2 wt. %Cu; (b, e) 3 wt. %Cu; (c, f) 4 wt. %Cu; (g-i) EDS point analysis of the second phase shown in (c)

图4为不同Cu含量下T6态Al-14Si-xCu-1Ni-0.5RE合金的室温及高温力学性能。从图中可以发现合金的室温抗拉强度和高温抗拉强度随着合金中Cu含量的增加而逐渐增大。由于过共晶铝硅合金中Cu元素含量的增多,导致了合金中的Al₂Cu相和AlCuNi相等富Cu相增多。Al₂Cu相在固溶过程中会溶入合金基体中,在时效处理后,可以析出GP区和θ'、θ''等亚稳相,这些弥散析出的强化相在合金拉伸变形过程中可以有效地阻碍位错运动,起钉

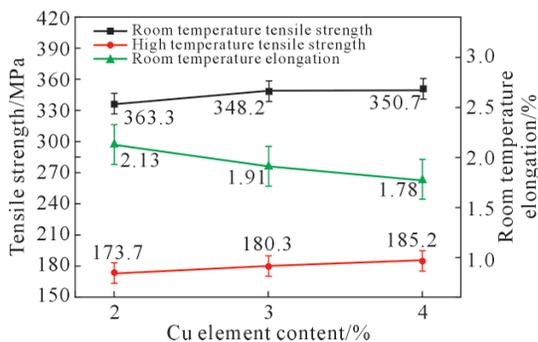


图4 不同Cu含量下T6态Al-14Si-xCu-1Ni-0.5RE合金的室温及高温力学性能

Fig.4 Room temperature and high temperature mechanical properties of Al-14Si-xCu-1Ni-0.5RE alloys in the T6 state with different contents

扎作用,有利于合金的室温抗拉强度的提升^[19]。同时由于Al₂Cu相也具有较好的热稳定性,在200℃稳定存在也有利于合金的高温力学性能。而AlCuNi相作为合金组织中的耐热强化相,具有良好的热稳定性、较高的硬度和弹性模量,能够阻碍合金试样在高温被拉伸变形时产生位错,对于合金的高温抗拉强度也有明显的提升效果^[20]。但随着Cu含量的不断增加,合金的室温伸长率逐渐下降。这是由于合金中的Cu含量增加,导致合金中富Cu相不断增多,Cu元素富集。尤其是出现大量长针状AlSiCuNiRE相,硬度较高,割裂铝合金基体,不利于合金的伸长率。当Cu含量达到4%,合金的伸长率仅为1.78%,无法满足实际应用需求。因此,当Cu含量为3%时,合金的综合力学性能最优,合金的室温抗拉强度为348.2MPa、高温抗拉强度为180.3MPa、室温伸长率为1.91%。

2.2 RE含量对过共晶铝硅合金微观组织及性能的影响

基于Cu含量对Al-14Si合金组织及性能影响的系统研究,结果发现,当合金中Cu含量为3%时,合金的力学性能最优。结合工业生产实际对合金性能的要求可知,合金的室温抗拉强度和伸长率还略

有不足,由图3可知,合金显微组织中出现的大量针状AlSiCuNiRE相,这种针状形貌会恶合金的力学性能,可能是因为合金中RE含量较高。因此,研究不同RE含量对过共晶铝硅合金微观组织及力学性能的影响也尤为重要。

图5a为不同RE含量下Al-14Si-3Cu-1Ni-yRE合金的XRD图谱。从中可以明显看出,随着过共晶铝硅合金中RE含量不断增加,合金中各种析出相的衍射峰的强度和角度没有明显的变化。这表明RE含量的改变对合金组织中各种相组成不会造成明显的影响。图5c和d为不同RE含量下T6态Al-14Si-3Cu-1Ni-yRE合金的金相组织图。当过共晶铝硅合金中RE含量为0.3%时,合金组织中的初晶Si和共晶Si都尺寸较小,且球化较均匀,大部分共晶Si呈现颗粒状,这说明达到了较为良好的变质细化效果。这是由于在铝硅合金熔体凝固过程中,

稀土元素富集使Al-Si界面前沿产生成分过冷现象,从而阻碍凝固界面共晶硅的快速生长,而且稀土元素还会削弱Si-Si和Al-Si原子团之间的结合,从而达到变质细化效果^[16,21-22]。同时,可以发现随着合金中RE含量的不断增多,黑色针状的第二相数量也在不断增多,这将不利于合金的力学性能。

进一步观察不同Cu含量下T6态Al-14Si-3Cu-1Ni-yRE合金的微观组织,合金的SEM图像和BSE图像如图6所示。通过SEM图像可以发现T6态过共晶铝硅合金微观组织主要由灰色片状共晶硅相和亮白色的第二相组成。随着过共晶铝硅合金中RE的不断增多,合金共晶硅尺寸不断细化,形貌更加圆整,并且合金组织中的针状AlSiCuNiRE相也不断增多。过多的长针状富RE相将会降低合金塑性,不利于合金的力学性能。

图7为不同RE含量下T6态Al-14Si-3Cu-1Ni-

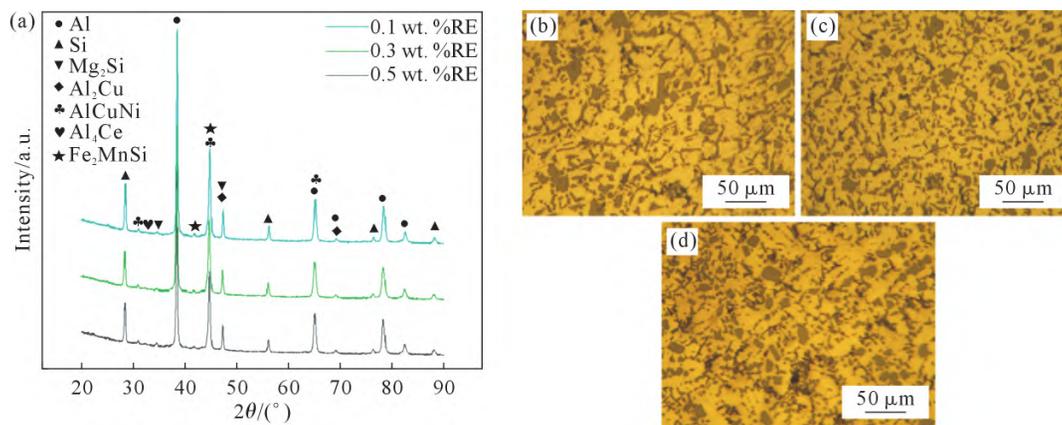


图5 Al-14Si-3Cu-1Ni-yRE合金的铸态XRD图谱和T6态金相组织:(a) XRD图谱;(b) 0.1%RE;(c) 0.3%RE;(d) 0.5%RE
Fig.5 The as-cast XRD patterns and microstructure in the T6 state of the Al-14Si-3Cu-1Ni-yRE alloy: (a) XRD patterns; (b) 0.1 wt. %RE; (c) 0.3 wt. %RE; (d) 0.5 wt. %RE

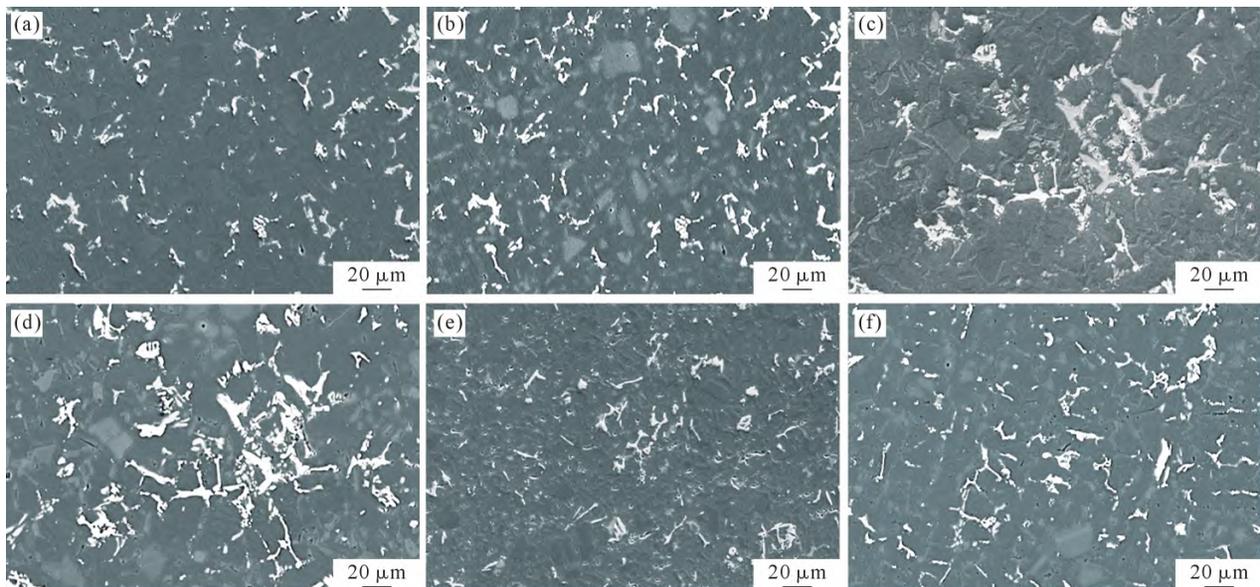


图6 不同RE含量下T6态Al-14Si-3Cu-1Ni-yRE合金的SEM图像和BSE图像:(a, b) 0.1%RE;(c, d) 0.3%RE;(e, f) 0.5%RE
Fig.6 SEM and BSE images of Al-14Si-3Cu-1Ni-yRE alloys in the T6 state with different RE contents: (a, b) 0.1 wt. %RE; (c, d) 0.3 wt. %RE; (e, f) 0.5 wt. %RE

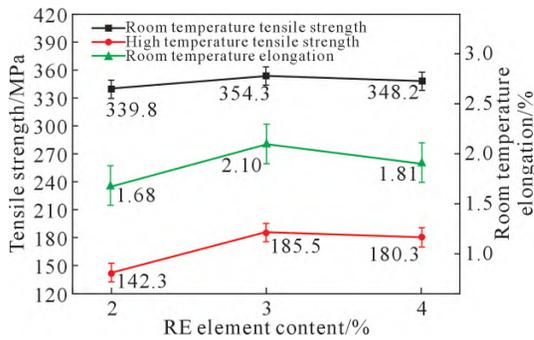


图7 不同 RE 含量下 T6 态 Al-14Si-3Cu-1Ni-yRE 合金的室温及高温力学性能

Fig.7 Room temperature and high temperature mechanical properties of Al-14Si-3Cu-1Ni-yRE alloys in the T6 state with different RE contents

yRE 合金的室温及高温力学性能。从图中可以发现随着合金中 RE 含量的增加,合金的室温抗拉强度、室温伸长率和高温抗拉强度都呈现出先上升后下降的趋势。合金中 RE 含量从 0.1% 增长到 0.5% 时,合金的力学性能都得到了提升,尤其是合金的高温抗拉强度提升了 40 MPa 左右,合金的室温伸长率的提升也非常明显。这是由于 RE 对共晶 Si 的变质作用明显增强,改善了合金中共晶 Si 的尺寸和形貌,经过热处理后的共晶 Si 大部分都为球状或颗粒状,大幅改善了合金的力学性能。而且随着合金中的富 RE 相不断增多,合金的室温力学性能并没有造成明显的下降,同时富 RE 相作为耐热相,对合金的高温抗拉强度具有增强作用。合金中 RE 含量从 0.3% 增长到 0.5% 时,合金的力学性能都有小幅度的下降,这归因于合金中 RE 含量过多导致组织中存在大量的针状 AlSiCuNiRE 相。因此,当 RE 含量为 0.3% 时,合金的综合力学性能最优,合金的室温抗拉强度为 354.3 MPa、高温抗拉强度为 185.5 MPa、室温伸长率为 2.1%。相比于 2.1 部分中的 Al-14Si-3Cu-0.5Mg-1Ni-0.5Mn-0.5RE 合金,分别提高了 1.8%、2.9% 和 9.9%。

3 结论

(1)随着 Cu 含量的不断增加,Al-14Si-xCu-1Ni-0.5RE 合金中 Al_2Cu 、AlCuNi 和 AlSiCuNiRE 等富 Cu 相明显增多,合金的室温抗拉强度和高温抗拉强度都逐渐升高,合金的室温伸长率逐渐降低。当 Cu 含量为 3% 时,合金的力学性能最符合零部件在工作中的性能要求,合金的室温抗拉强度为 348.2 MPa、高温抗拉强度为 180.3 MPa、室温伸长率为 1.91%。

(2)随着 RE 含量的不断增加,RE 元素对 Al-14Si-3Cu-1Ni-yRE 合金中共晶硅相的变质细化效果更加明显。同时合金组织中富 RE 相也不断增多,特别是

RE 含量达到 0.5% 后,组织中出现大量针状富 RE 相,反而割裂铝合金基体,恶化合金性能。

(3)当 RE 含量为 0.3% 时,合金的综合力学性能最优,合金的室温抗拉强度为 354.3 MPa、高温抗拉强度为 185.5 MPa、室温伸长率为 2.1%。根据上述的研究结果开发的新型高强耐热铝硅合金成分为 Al-14Si-3Cu-0.5Mg-1Ni-0.5Mn-0.3RE。

参考文献:

- [1] 隋育栋,王渠东. 铸造耐热铝合金在发动机上的应用研究与发展[J]. 材料导报,2015,29(3): 14-19.
SUI Y D, WANG Q D. Development of heat-resistant cast aluminum alloy for engine applications[J]. Materials Reports, 2015, 29(3): 14-19.
- [2] MANASIJEVIC S, RADISA R, MARKOVIC S, ACIMOVIC-PAVLOVIC Z, PAIC K. Thermal analysis and microscopic characterization of the piston alloy AlSi₁₃Cu₄Ni₂Mg [J]. Intermetallics, 2011, 19(4): 486-492.
- [3] WANG E R, HUI X D, CHEN G L. Eutectic Al-Si-Cu-Fe-Mn alloys with enhanced mechanical properties at room and elevated temperature[J]. Materials & Design, 2011, 32(8): 4333-4340.
- [4] 刘学,田源,李美玲,李洪林. 过共晶铝硅合金的研究进展[J]. 有色金属加工,2021,50(3): 12-13, 55.
LIU X, TIAN Y, LI M L, LI H L. Research progress of hypereutectic Al-Si alloy[J]. Nonferrous Metals Processing, 2021, 50(3): 12-13, 55.
- [5] 石为喜,杜成武,李贵茂,孟祥然,孙宏伟,任宇梅,王凯,鞠祺. LaCe 混合稀土对过共晶 A390 合金微观组织和力学性能的影响[J]. 铸造,2018,67(9): 828-830, 835.
SHI W X, DU C W, LI G M, MENG X R, SUN H W, REN Y M, WANG K, JU Q. Effect of LaCe mischmetal on microstructure and mechanical properties of hypereutectic A390 alloy [J]. Foundry, 2018, 67(9): 828-830, 835.
- [6] 石为喜,鲁毅,汤梦超,李佳露,李晓晨,李贵茂. P 对过共晶 A390 合金铸态组织和力学性能的影响[J]. 铸造,2022,71(3): 331-335.
SHI W X, LU Y, TANG M C, LI J L, LI X C, LI G M. Effect of P on cast microstructure and mechanical properties of hypereutectic A390 alloy[J]. Foundry, 2022, 71(3): 331-335.
- [7] TODA H, NISHIMURA T, UESUGI K, SUZUKI Y, KOBAYASHI M. Influence of high-temperature solution treatments on mechanical properties of an Al-Si-Cu aluminum alloy [J]. Acta Materialia, 2010, 58(6): 2014-2025.
- [8] YANG Y, YU K L, LI Y G, ZHAO D G, LIU X F. Evolution of nickel-rich phases in Al-Si-Cu-Ni-Mg piston alloys with different Cu additions[J]. Materials & Design, 2012, 33: 220-225.
- [9] LI Y J, BRUSETHAUG S, OLSEN A. Influence of Cu on the mechanical properties and precipitation behavior of AlSi₇Mg_{0.5} alloy during aging treatment[J]. Scripta Materialia, 2006, 54(1): 99-103.
- [10] JIA Z H, ZHOU G W, ZHOU H Y, LIU F, DING L P, WEN Y Y, XIANG K Y, ZHAO H D. Effects of Cu content and heat treatment process on microstructures and mechanical properties of

- Al-Si-Mg-Mn-xCu cast aluminum alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2024, 34(3): 737-754.
- [11] 宾泽云,张治龙,刘红星.合金化对Al-7.5Si-0.35Mg铝合金性能的影响[J].铸造技术,2017,38(5):1015-1016,1020.
BIN Z Y, ZHANG Z L, LIU H X. Effect of alloying on properties of Al-7.5Si-0.35Mg aluminum alloy[J]. Foundry Technology, 2017, 38(5): 1015-1016, 1020.
- [12] TAGHIABADI R, FAYEGH A, PAKBIN A, NAZARI M, GHONCHEN M H. Quality index and hot tearing susceptibility of Al-7Si-0.35Mg-xCu alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(7): 1275-1286.
- [13] PENG J F, WANG W L, YUAN S J, ZHAN Y, ZENG J, GAN P Y, JI J Y. Improved mechanical and frictional properties of hypereutectic Al-Si alloy by modifying Si phase with La addition[J]. Materials Today Communications, 2024, 38: 107857.
- [14] QIN Y S, YAN Z X, WU Q H, JIANG A L, LI Y J, MA S X, LYU S L, LI J Y. Development of a novel high strength Al-Si-Cu-Ni alloy by combining micro-alloying and squeeze casting[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2023, 967: 171780.
- [15] 王海生,张英,易丹青,刘会群,王斌.过共晶铝硅合金中初晶硅复合异质形核的研究[J].铸造,2018,67(4):344-348.
WANG H S, ZHANG Y, YI D Q, LIU H Q, WANG B. Study on complex heterogeneous nucleation of primary silicon in hypereutectic Al-Si alloy[J]. Foundry, 2018, 67(4): 344-348.
- [16] YI H K, ZHANG D, SAKATA T, MORI H. Microstructures and La-rich compounds in a Cu-containing hypereutectic Al-Si alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2003, 354(1-2): 159-164.
- [17] ALKAHTANI S A, ELGALLAD E M, TASH M M, SAMUEL A M, SAMUEL F H. Effect of rare earth metals on the microstructure of Al-Si based alloys[J]. Materials, 2016, 9(1): 45.
- [18] CENGIZ S, ABOULFADL H, THUVANDER M. Effect of Ce addition on microstructure, thermal and mechanical properties of Al-Si alloys [J]. Materials Today Communications, 2023, 34: 105518.
- [19] ZHU X Z, DONG X X, BLAKE P, JI S X. Improvement in as-cast strength of high pressure die-cast Al-Si-Cu-Mg alloys by synergistic effect of Q-Al₃Cu₂Mg₈Si₆ and θ -Al₂Cu phases[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 802: 140612.
- [20] CHEN C L, RICHTER A, THOMSON R C. Investigation of mechanical properties of intermetallic phases in multi-component Al-Si alloys using hot-stage nanoindentation [J]. Intermetallics, 2010, 18(4): 499-508.
- [21] 王鑫,李若冰,张乐.稀土复合变质铝硅铸造合金研究进展[J].中国有色冶金,2022,51(2):61-70,88.
WANG X, LI R B, ZHANG L. Progress of research on rare earth composite modified Al-Si cast alloys [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2022, 51(2): 61-70, 88.
- [22] 沈利群.稀土变质处理在金属材料中的应用[J].铸造技术,1994(6):28-31.
SHEN L Q. The Reviews the Application of RE Modification to The Metal Materiales[J]. Foundry Technology, 1994(6): 28-31.