

Mg 元素对 Al-Cu-Ce 共晶合金导热和力学性能的影响

李乘波^{1,2,3}, 侯慧兵³, 刘磊磊³, 黄程毅^{1,2}, 任月路², 杜 军¹

(1. 华南理工大学 材料科学与工程学院, 广东 广州 510641)

(2. 广西南南铝加工有限公司 广西铝合金材料与加工重点实验室, 广西 南宁 530031)

(3. 广西民族大学 材料与环境学院 广西先进结构材料与碳中和重点实验室, 广西 南宁 530105)

摘 要: 以共晶型 Al-14Cu-7Ce 合金作为研究对象, 通过调整 Mg 元素的添加量, 探究其微观组织演变与导热和力学性能的变化规律。结果表明, 铸态 Al-14Cu-7Ce 合金主要由 α -Al 和 Al_8CeCu_4 两相组成, 其微观组织由粗大的共晶组织 (α -Al+ Al_8CeCu_4) 构成。添加少量 Mg 元素可细化该共晶组织, 提高其力学性能。当 Mg 元素的添加量为 1.0% (质量分数) 时, 合金的屈服强度和抗拉强度分别提升至 164 MPa 和 263 MPa, 提升幅度为 29% 和 19%, 断后延伸率提升至 4.5%, 提升幅度为约 41%, 导热率为 130.2 W/(m·K), 下降幅度约为 12%。随着 Mg 元素进一步添加至 2.0%, 合金的力学性能有所下降, 其屈服强度和抗拉强度分别降至 151 MPa 和 249 MPa, 其断后延伸率降为 3.9%, 导热率降至 108.3 W/(m·K)。合金导热率下降主要原因是固溶的 Mg 原子形成散射源, 阻碍电子在晶格内的运动, 减小了电子和声子的平均自由程。当 Mg 添加量达到 2.0% 时, Mg 与 Al 和 Cu 元素发生冶金反应生成 Al_2MgCu 相, 以鱼骨状共晶组织 (α -Al+ Al_2MgCu) 形式分布于晶界处, 增加合金中第二相的体积分数, 进一步恶化合金的导电导热性能。而合金的力学性能下降主要由于存在 (α -Al+ Al_8CeCu_4) 和 (α -Al+ Al_2MgCu) 两种共晶组织, 增加相界面处微裂纹萌生的位点。综上所述, 添加 1.0% Mg 元素可获得兼具高强度和高导热的 Al-Cu-Ce 共晶合金。

关键词: Al-Cu-Ce 合金; Mg 元素; 导电导热性能; 力学性能

中图法分类号: TG146.21

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2024)05-1385-06

随着 3C 电子产品、通信基站等电子设备的集成度、运行功率不断提高, 由于过热而导致电子设备失效已成为制约行业发展的主要问题。Al 合金因其导热性能高、密度小、成本低、可回收和压铸成型性能好等优点, 已被广泛运用在复杂薄壁散热件的生产^[1]。目前商用高导热 Al 合金大多采用 Al-Si 系压铸合金, 如 ADC12, 其抗拉强度可达 230 MPa, 但导热率仅为 100 W/(m·K), 难以满足当前电子设备对材料散热的需求^[2]。Si 元素在 Al-Si 合金中可以提高合金的强度和流动性, 但随着 Si 含量的增加, 合金的导热率会下降。这是由于大量 Si 元素固溶在 α -Al 基体中, 加剧了晶格的畸变程度, 导致自由电子的散射增加, 从而降低导热率^[3-5]。此外, 随着 Si 含量的进一步增加, 组织中的共晶 Si 数量增加、尺寸变得粗大, 也会降低合金的导热性能^[6]。降低 Si 的含量可以有效提升合金的导热

性能, 但是其强度和流动性也随之下降。如何通过合金的成分设计和组织调控保证合金具有较高导热率的同时仍具有较好的强度和流动性是高导热铝合金研发的核心问题^[7]。为了减少晶格畸变导致的导热性能下降, 无 Si 系铝合金是当前高导热铸造铝合金研究与发展的重要方向之一, 然而力学性能不足仍是无 Si 系 Al 合金亟待解决的关键问题^[8-11]。Al-Cu 合金因其较低的密度和优异的机械性能被广泛应用于多个领域, 纯金属 Cu 的导热性能比纯 Al 优异, 且室温下 Cu 原子在 Al 基体中固溶度很小, 对导热性能影响小, 是发展无 Si 系高导热铝合金的理想元素^[12-13]。Yu^[14]等人在 Al-Cu-La 合金中添加了微量的 Ce, 发现 Ce 的加入改变了中间相的析出序列和凝固行为, 先析出的 $\text{Al}_8\text{Cu}_4\text{Ce}$ 相, 不但能够促进晶粒形核, 还能够阻止晶粒进一步长大, 使铸态合金晶粒得到细化。共晶型

收稿日期: 2023-08-22

基金项目: 广西科技基地与人才专项 (桂科 AD22035222); 南宁市科学研究与技术开发计划项目 (20221017); 南宁市创新创业领军人才“邕江计划”资助项目 (2021006); 广西民族大学校级引进人才科研项目 (2020KJQD04)

作者简介: 李乘波, 男, 1987 年生, 博士, 广西民族大学材料与环境学院, 广西 南宁 530105, 电话: 0771-3263606, E-mail: owenlcb@126.com

Al-Cu-Ce 合金具备高强度的特性, 且由于 Ce 元素的加入, 使其流动性能得到很大改善, 可满足复杂散热薄壁件的一体化压铸生产, 有望取代传统的 Al-Si 基合金制备高强高导散热器件^[15-17]。Belov 等^[18]学者报道了 Al-Cu-Ce 合金的硬度高达 150 HB。Li^[19]等人研究了高温退火 Al-14Cu-7Ce 合金中片状 Al_8CeCu_4 相的球化行为, Ce 为球化过程的主要控制元素, 随着退火温度的升高, 加快 Al_8CeCu_4 相的球化。国内学者黄玲等^[20]研究了共晶型 Al-14Cu-7Ce 合金的室温强度可高达 360 MPa。陈大辉等系统性探究了 Ce 和 Cu 含量以及热处理对 Al-Cu-Ce 合金组织与性能的影响, 经过 T6 热处理后, Al-14Cu-5Ce 的室温抗拉强度和延伸率可达 368 MPa 和 3.0%^[21]。Mg 元素对 Al 合金具有显著的强化作用, 研究表明, 每 1% 的 Mg 大约可以使 Al 合金的抗拉强度提升 34 MPa。Al-Cu 合金中加入一定量 Mg 元素, 再经 T5 热处理, 其抗拉强度可达 380 MPa^[22]。

Al-Cu-Ce 合金由于其高强度的特点, 在散热领域具有应用潜力, 然而, 针对该合金体系的导热性能研究鲜有报道。本实验以 Al-14Cu-7Ce 作为研究对象, 探究不同 Mg 添加量对其微观组织演变与导热和力学性能的影响规律, 揭示其内在机理, 以期获得兼具高强度和高导热 Al-Cu-Ce 基合金。

1 实 验

以工业纯铝、Al-50Mg、Al-50Cu 和 Al-20Ce 中间合金为原材料, 按成分要求制备 Al-14Cu-7Ce-xMg ($x=0, 0.5, 1.0, 2.0$, 质量分数)合金, 利用石墨坩埚在井式电阻炉中熔炼, 合金总质量控制约为 300 g, 熔化温度 720 °C 精炼除气后, 采用已预热至约 200 °C 的铁模进行浇铸, 获得 100 mm×60 mm×20 mm 的板状铸锭。

利用电火花线切割截取铸锭中部(距底部 15 mm 处)的试样用于微观组织分析, 该观测样品经过打磨、抛光后采用 0.5vol%HF 酸溶液腐蚀。采用 Zeiss Gemini 300 型扫描电镜观察不同 Mg 添加量的 Al-14Cu-7Ce 共晶合金微观组织, 使用 Brucker D8 型 X 射线衍射仪分析 Mg 元素对 Al-14Cu-7Ce 合金物相的影响, 在铸锭中部相同位置截取哑铃状拉伸试样, 并在 AG-X100kN 型电子万能材料试验机上进行力学性能测试, 分别使用 FD-101 型涡流电导仪和 LFA-457 型激光导热仪测试上述合金的导电率和热扩散系数, 采用密度天平(DH-300)测试 Al-14Cu-7Ce-xMg 合金的密度数值, 依据 Neumann-Kopp 定律^[23-24]计算合金的比热, 最后根据下述公式计算获得合金的导热率:

$$\lambda = \alpha \rho C_p \quad (1)$$

式中, λ 为热扩散系数, 单位为 cm^2/s ; ρ 为材料的密度, 单位为 g/cm^3 ; C_p 为比热容, 单位为 $\text{J}/(\text{g}\cdot\text{K})$ 。

2 结果与分析

2.1 微观组织

图 1 和图 2 分别为不同 Mg 添加量的 Al-Cu-Ce 共晶合金微观组织和 XRD 图谱。由图 2 的 XRD 测试结果可知, 当 Mg 添加量低于 1.0% 时, 合金中仅含 α -Al 和 Al_8CeCu_4 相。当 Mg 添加量为 2.0% 时, 合金中析出 Al_2MgCu 相。图 1a 所示为 Al-14Cu-7Ce 共晶合金的微观组织, 其主要由枝晶状初生 α -Al 和粗大的共晶组织 (α -Al+ Al_8CeCu_4) 构成, 随着 Mg 添加量添加至 1.0%, 粗大的共晶组织被逐渐细化(如图 1b 和图 1c 所示), 当 Mg 添加量进一步添加至 2.0% 时, α -Al 基体上出现鱼骨状的共晶组织 (α -Al+ Al_2MgCu), 且粗大的共晶组织 (α -Al+ Al_8CeCu_4) 进一步被细化。

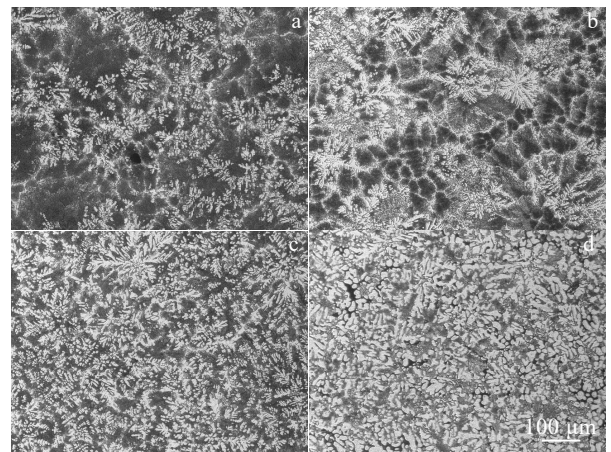


图 1 不同 Mg 添加量的 Al-Cu-Ce 共晶合金微观组织

Fig.1 Microstructures of Al-Cu-Ce eutectic alloys with different Mg additions: (a) 0, (b) 0.5%, (c) 1.0%, and (d) 2.0%

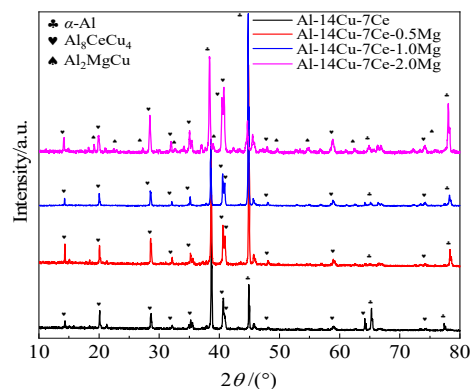


图 2 不同 Mg 添加量的 Al-Cu-Ce 共晶合金 XRD 图谱

Fig.2 XRD patterns of Al-Cu-Ce eutectic alloys with different Mg additions

Al-Cu-Ce-xMg合金的SEM观测结果及其EDS微区成分分析结果如图3和表1所示,共晶组织(α -Al+Al₈CeCu₄)呈现典型的层片状结构,共晶Al₈CeCu₄以片状的形式分布在 α -Al基体上,片状Al₈CeCu₄的片厚及其片间距极小,基本在0.5 μ m以内。EDS测试结果表明,部分Cu元素固溶于 α -Al中,而Ce元素主要与Al和Cu元素发生冶金反应,形成片状的Al₈CeCu₄相。

Mg元素的添加显著改善合金的微观组织结构,当Mg元素的含量低于1.0%时,EDS测试结果说明Mg主要以固溶的形式存在(如表1所示),此外,共晶组织(α -Al+Al₈CeCu₄)内部的Al₈CeCu₄仍为片状结构,Mg元素的添加促使共晶组织外部形成块状的Al₈CeCu₄相。Al-14Cu-7Ce-1.0Mg合金的线扫描结果如图4所示,在块状Al₈CeCu₄相周围存在Mg和Cu元素的富集区,

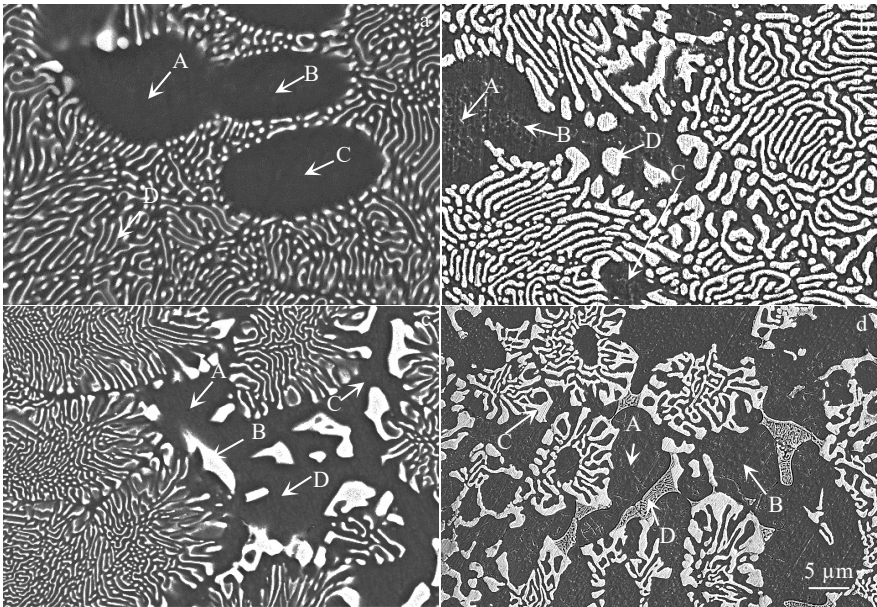


图3 不同Mg添加量的Al-Cu-Ce共晶合金SEM照片

Fig.3 SEM images of Al-Cu-Ce eutectic alloys with different Mg additions: (a) 0, (b) 0.5%, (c) 1.0%, and (d) 2.0%

表1 图3中标记点的EDS结果

Table 1 EDS results of points marked in Fig.3 (ω/%)								
Point	Al	Cu	Ce	Mg	Fe	Si	Ti	
Fig.3a	A	93.15	6.43	0.33	0.00	0.00	0.00	0.65
	B	93.04	6.36	0.30	0.00	0.30	0.00	0.00
	C	92.28	7.29	0.43	0.00	0.00	0.00	0.00
	D	66.52	21.27	12.11	0.00	0.02	0.08	0.00
Fig.3b	A	92.91	5.68	0.93	0.42	0.06	0.00	0.00
	B	92.14	5.97	1.39	0.48	0.02	0.00	0.00
	C	92.60	6.64	0.15	0.52	0.09	0.00	0.00
	D	67.54	21.20	11.07	0.17	0.02	0.00	0.00
Fig.3c	A	95.51	3.22	0.47	0.76	0.04	0.00	0.00
	B	94.26	4.24	0.60	0.89	0.00	0.00	0.01
	C	93.32	4.83	0.84	0.97	0.04	0.00	0.00
	D	62.25	24.33	12.95	0.12	0.23	0.12	0.00
Fig.3d	A	94.02	3.46	0.78	1.74	0.00	0.00	0.00
	B	93.8	3.99	0.03	1.82	0.00	0.00	0.36
	C	64.33	21.39	13.77	0.09	0.26	0.16	0.00
	D	64.72	24.78	0.14	10.08	0.20	0.08	0.00

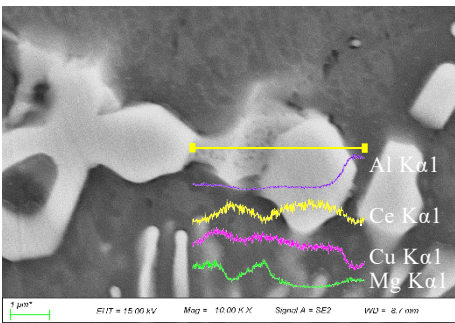


图4 Al-14Cu-7Ce-1.0Mg合金元素线扫描结果

Fig.4 Element line scanning results of Al-14Cu-7Ce-1.0Mg alloy

相关研究表明,Ce在铝合金中的扩散速率较低,且降低Mg、Cu等合金化元素的扩散速率^[25]。因此,在实际凝固过程中,易于形成Mg、Cu等元素偏聚区域,使得在共晶Al₈CeCu₄的析出后期,Mg、Cu元素偏聚于Al₈CeCu₄相表面,造成成分过冷,进而抑制Al₈CeCu₄相的取向生长,使得Al₈CeCu₄相由片状转变为块状结构。

当 Mg 添加量为 2.0% 时, 合金中出现 2 种不同形貌的共晶组织(如图 3d 所示), 层片状的共晶组织(α -Al+Al₈CeCu₄)转变为汉字状, 晶界处析出鱼骨状(α -Al+Al₂MgCu)共晶组织。EDS 测试结果表明, Mg 元素除了以固溶形式存在之外, 还以 Al₂MgCu 共晶相的形式分布于晶界处。

2.2 导热性能

Mg 添加量对 Al-Cu-Ce 共晶合金导电和导热性能的影响如图 5 所示, 对于 Al-14Cu-7Ce 共晶合金而言, 其导电率和导热率分别为 21.16 MS/m 和 148.5 W/(m·K), 随着 Mg 添加量增加至 1.0%, 导电率和导热率出现小幅度的下降, 此时, 合金的导电率和导热率分别为 18.45 MS/m 和 130.2 W/(m·K)。当 Mg 元素含量进一步增加至 2.0%, 合金的导电导热性能出现显著的下降, 其导电率和导热率分别下降至 15.54 MS/m 和 108.3 W/(m·K), 较 Al-14Cu-7Ce 共晶合金, 下降幅度分别为 16% 和 27%。

对于金属材料, 在室温热传导过程中, 自由电子的运动对导热起主导作用。相关研究表明, 当合金化元素以固溶形式存在时其对导热系数的影响比以析出相存在大 1~2 个数量级^[8,26], 当 Mg 元素的加入量较低($\leq 1.0\%$)时, Mg 主要以固溶的形式存在, 破坏铝基体原有的周期性势场, 形成一种散射源, 阻碍电子在晶格内的运动, 减小了电子和声子的平均自由程, 进而降低铝合金的导热率。由图 5 中 EDS 微区成分分析结果表明(表 1), 随着 Mg 添加量增加至 1.0%, 固溶于铝基体的 Mg 元素平均值逐渐增加至 0.87%, 这说明合金导电导热性能的下降是由于固溶 Mg 原子导致的。

当 Mg 添加量达到 2.0% 时, 固溶于铝基体的 Mg 元素平均值进一步增加至 1.78%; 此外, Mg 与 Al 和

Cu 元素发生冶金反应生成 Al₂MgCu 相, 以鱼骨状共晶组织(α -Al+Al₂MgCu)形式分布于晶界处, 增加合金中第二相的体积分数, 依据 Maxwell 定律, 第二相体积分数的增加将提升电子和声子在界面处受到散射的概率, 减小了电子和声子的平均自由程, 进而降低合金的导热率; 此外, 其与共晶组织(α -Al+Al₈CeCu₄)形成连续网状结构, 进一步恶化合金的导电导热性能。因此, 高 Mg 添加量的 Al-Cu-Ce 共晶合金导电导热性能大幅度下降归因于固溶 Mg 元素量的提高和连续网状结构的共晶相体积分数的增加。

2.3 拉伸性能

图 6 为不同 Mg 添加量的 Al-Cu-Ce 共晶合金拉伸过程应力-应变曲线, 其相应力学性能指标的数值如表 2 所示。Al-14Cu-7Ce 共晶合金的屈服强度和抗拉强度分别为 127 MPa 和 221 MPa, 断后延伸率仅为 3.2%, 呈现高强低韧的特性。当 Mg 元素的添加量为 1.0% 时, 合金的屈服强度和抗拉强度分别提升至 164 MPa 和 263 MPa, 提升幅度为 29% 和 19%, 该合金的断后延伸率提升至 4.5%, 较共晶合金提升约 41%。但随着 Mg 元素进一步添加至 2.0%, 合金的力学性能指标有所下降, 其屈服强度和抗拉强度分别降至 151 MPa 和 249 MPa, 其断后延伸率降为 3.9%。

为了综合衡量合金材料的强韧性, Q 值可集成合金的抗拉强度和延伸率, 具体的数学表达式如下所示:

$$Q = UTS + a \lg(EI\%) \quad (2)$$

式中, UTS 为合金的抗拉强度, 单位为 MPa, EI% 为合金的断后延伸率, a 为常数, 对于铝合金而言 $a = 150 \text{ MPa}$ ^[27-28]。Al-Cu-Ce-xMg 合金的 Q 值计算结果如表 2 所示, Al-Cu-Ce 共晶合金的 Q 值仅为 297 MPa, Al-Cu-Ce-1.0Mg 合金的 Q 值最高, 其数值为 361 MPa, 较共晶合金提升约 22%。因此, 添加 1.0%Mg 元素可获得兼具高强度和高韧性的 Al-Cu-Ce 共晶合金。

合金力学性能的变化与微观组织的演变相关, 当 Mg 元素的加入量较低($\leq 1.0\%$)时, Mg 主要以固溶的形式存在, 造成晶格畸变, 增大位错运动的阻力, 使得滑移难以进行, 进而提升合金的强度。Mg 元素的添加显著细化共晶组织(α -Al+Al₈CeCu₄), 提高铝基体的连续性, 抑制微裂纹的萌生和扩展, 进而提升合金的韧性。因此, 添加 1.0%Mg 元素可实现 Al-Cu-Ce 共晶合金的强韧化。当 Mg 元素的添加量为 2.0% 时, 合金中存在(α -Al+Al₈CeCu₄)和(α -Al+Al₂MgCu) 2 种共晶组织, 试样承受拉伸载荷时, 相界面处微裂纹萌生的位点增加, 导致合金易于发生脆性断裂失效, 其塑性未能充分发挥出来就已断裂, 使得合金的断后延伸率和强度性能下降。

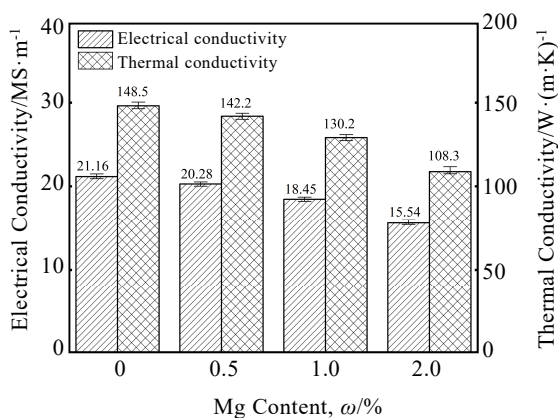


图 5 Mg 添加量对 Al-Cu-Ce 共晶合金导电和导热性能的影响
Fig.5 Effect of Mg addition on electrical and thermal conductivity of Al-Cu-Ce eutectic alloys

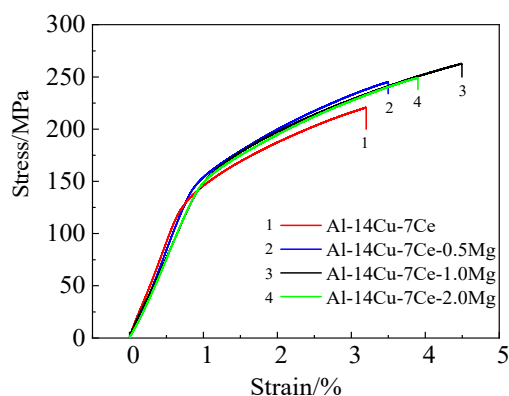


图6 Mg添加量对Al-Cu-Ce共晶合金拉伸性能的影响

Fig.6 Effect of Mg addition on tensile properties of Al-Cu-Ce eutectic alloys

表2 不同Mg添加量的Al-Cu-Ce共晶合金拉伸性能

Table 2 Tensile properties of Al-Cu-Ce eutectic alloys with different Mg additions

Alloys	Yield strength/ MPa	Tensile strength/ MPa	Elongation/ %	σ_b / MPa
Al-14Cu-7Ce	127	221	3.2	297
Al-14Cu-7Ce-0.5Mg	149	245	3.5	327
Al-14Cu-7Ce-1.0Mg	164	263	4.5	361
Al-14Cu-7Ce-2.0Mg	151	249	3.9	338

3 结 论

1) Al-14Cu-7Ce 共晶合金主要由粗大的共晶组织(α -Al+ Al_8CeCu_4)构成。添加适量Mg元素可细化该共晶组织,当Mg元素的添加量达2.0%时,合金中出现汉字状(α -Al+ Al_8CeCu_4)和鱼骨状(α -Al+ Al_2MgCu)共晶组织。

2) 少量添加Mg元素(<1%)会导致Al-14Cu-7Ce共晶合金的导热率小幅降低,但有效提升其力学性能。当Mg元素的添加量为1.0%时,屈服和抗拉强度提升29%和19%,分别达到164 MPa和263 MPa,断裂延伸率提升至4.5%,较共晶合金提升约41%,合金的导热率为130.2 W/(m·K)。

3) Mg元素的添加可细化共晶组织和改善 Al_8CeCu_4 相的形貌,实现合金的强韧化,最终获得兼具高强度和高导热的Al-Cu-Ce共晶合金。但过量的Mg元素增加相界面处微裂纹萌生的位点,使得合金的各项力学性能指标均下降。

参考文献 References

[1] Guan Renguo(管仁国), Lou Huafen(娄花芬), Huang Hui(黄晖) *et al. Strategic Study of CAE*(中国工程科学)[J], 2020, 22: 68

[2] Wang Hui(王 慧), Li Yuandong(李元东), Luo Xiaomei(罗晓梅) *et al. Foundry*(铸造)[J], 2019, 68: 1104

[3] Li R X, Liu L J, Zhang L J *et al. Journal of Materials Science & Technology*[J], 2017, 33(4): 404

[4] Yang Dixin(杨涤心), Xia Qing(夏 青), Yang Liushuan(杨留栓) *et al. Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2002(4): 58

[5] Zheng Yi(郑 毅), Bian Liping(边丽萍), Ji Hongliang(冀宏亮) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 51: 4010

[6] Sheng M, Tao Z D, Jia P *et al. Journal of Materials*[J], 2015, 67(2): 330

[7] Wu Mengwu(吴孟武), Hua Lin(华 林), Zhou Jianxin(周建新) *et al. Materials Reports*(材料导报)[J], 2018, 32: 1486

[8] Luo G, Zhou X, Li C B *et al. Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2022, 32(6): 1781

[9] Wang K, Hu S D, Zhong Y L *et al. Journal of Rare Earths*[J], 2022, 40(8): 1305

[10] Xu Dazhao(徐大召), Meng Linggang(孟令刚), Yang Chunfeng(杨春峰) *et al. Materials China*(中国材料进展)[J], 2022, 41(11): 880

[11] Luo Gan(罗干). *Study on Microstructure Regulation and Performance of Al-Fe Based Alloys with High Thermal Conductivity*(高导热Al-Fe基合金组织调控与性能研究)[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021

[12] Wang X J, Yang L F, Tan H J *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2022, 51: 2033

[13] Zhao Xiao(赵 啸), Gao Enzhi(高恩志), Xu Rongzheng(徐荣正). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2022, 51: 1752

[14] Yu X X, Yin D F, Yu Z M *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2016, 45(6): 1423

[15] Du J D, Ding D Y, Zhang W L *et al. Materials Characterization*[J], 2018, 142: 252

[16] Wang Mingjie(王明杰), Dong Ying(董 莹), Zhang Guowei(张国伟). *Foundry Technology*(铸造技术)[J], 2019, 40: 179

[17] Xue Fei(薛 飞), Liu Jiangnan(刘江南), Yan Wen(严 文) *et al. Foundry Technology*(铸造技术)[J], 2001(20): 54

[18] Belov N A, Khvan A V. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*[J]. 2007, 48(1): 45

[19] Li H, Xu W, Wang Z X *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2016, 45(10): 2480

[20] Huang Ling(黄 玲), Li Hai(李 海), Wang Zhixiu(王芝秀) *et al. Transactions of Materials and Heat Treatment*(材料热处理学报)[J], 2012, 33(9): 60

- [21] Chen Dahui(陈大辉), Chen Zheng(陈 铮), Zhu Xiurong(朱秀荣) *et al. Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2018, 38: 1280
- [22] Fan Boyang(樊博阳), Li Yuandong(李元东), Li Xiang(李想) *et al. Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2021, 41(2): 168
- [23] Pan H C, Pan F S, Yang R M *et al. Journal of Materials Science*[J], 2014, 49(8): 3107
- [24] Rudajevová A, von Buch F, Mordike B L. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 1999, 292(1): 27
- [25] Cai W P. *Journal of Materials Science Letters*[J], 1997, 16(22): 1824
- [26] Su C Y, Li D J, Luo A A *et al. Journal of Alloys and Compounds*[J], 2018, 747: 431
- [27] Alexopoulos N D, Pantelakis S G. *Materials & Design*[J], 2004, 25(5): 419
- [28] Wang T M, Zhao Y F, Chen Z N *et al. Materials & Design*[J], 2015, 85: 724

Effects of Mg Addition on Thermal Conductivities and Mechanical Properties of Al-Cu-Ce Eutectic Alloys

Li Chengbo^{1,2,3}, Hou Huibing³, Liu Leilei³, Huang Chengyi^{1,2}, Ren Yuelu², Du Jun¹

(1. School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

(2. Guangxi Key Laboratory of Materials and Processes of Aluminum Alloys, ALG Aluminium Inc., Nanning 530031, China)

(3. Guangxi Key Laboratory of Advanced Structural Materials and Carbon Neutralization, School of Materials and Environment, Guangxi Minzu University, Nanning 530105, China)

Abstract: This study focuses on the eutectic Al-14Cu-7Ce alloy to investigate the evolution of its microstructure and the changes in thermal conductivity and mechanical properties by adjusting the addition amount of Mg element. The results show that the as-cast Al-14Cu-7Ce alloy is mainly composed of α -Al and Al_8CeCu_4 phases, with a microstructure consisting of coarse eutectic structure (α -Al+ Al_8CeCu_4). The addition of a small amount of Mg element can refine the eutectic structure and improve its mechanical properties. With an addition of 1.0% Mg, the yield strength and tensile strength of the alloy increase to 164 MPa and 263 MPa, respectively, with an improvement of 29% and 19%, respectively. The elongation at break is enhanced to 4.5%, with an improvement of approximately 41%. The thermal conductivity is 130.2 W/(m·K), with a decrease of about 12%. As the Mg element content is further increased to 2.0%, the mechanical properties of the alloy decrease, with the yield strength and tensile strength decreasing to 151 MPa and 249 MPa, respectively. The elongation at break decreases to 3.9%, and the thermal conductivity decreases to 108.3 W/(m·K). The decrease in thermal conductivity is mainly due to the solid solution of Mg atoms acting as scattering centers, hindering the movement of electrons within the lattice, and reducing the average free path of electrons and phonons. When the Mg content reaches 2.0%, the Mg reacts with Al and Cu elements to form the Al_2MgCu phase, which is distributed in a fishbone-shaped eutectic structure (α -Al+ Al_2MgCu) at grain boundaries. This increases the volume fraction of the second phase in the alloy and further deteriorates its electrical and thermal conductivity. The decrease in mechanical properties of the alloy is mainly attributed to the presence of two eutectic structures, (α -Al+ Al_8CeCu_4) and (α -Al+ Al_2MgCu), which increase the initiation points of microcracks at the phase interfaces. In summary, the addition of 1.0% Mg can obtain an Al-Cu-Ce eutectic alloy with high strength and high thermal conductivity.

Key words: Al-Cu-Ce alloys; Mg content; electrical and thermal conductivities; mechanical properties

Corresponding author: Du Jun, Ph. D., Professor, School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, P. R. China, E-mail: jundu@scut.edu.cn