

亚快速凝固制备 Al-6La-Fe/Co/Ni 合金的组织 and 性能

卓润杰, 罗 焯, 范慧敏, 邱媛媛, 杜 军

(华南理工大学 材料科学与工程学院, 广东广州 510640)

摘要: 本研究旨在探讨添加微量Fe、Co、Ni对亚快速凝固成形Al-6La合金组织形貌和性能的影响。采用光学显微镜、扫描电镜、能谱分析、X射线衍射、冷却凝固热分析、导电性能及拉伸性能测试等方法, 研究添加0.1 wt.%的Fe、Co、Ni对Al-6La合金微观组织和性能的影响。结果表明, 添加0.1 wt.%的Fe、Co、Ni元素可以显著提高Al-6La合金的屈服强度, 其中Fe和Co元素微合金化还可以使基体晶粒得到细化。Al-6La-0.1Co合金表现出优异的综合性能, 其屈服强度为85.5 MPa, 较Al-6La提高了102.9%; 电导率为31.3 MS/m, 较Al-6La提高4.1%。

关键词: 亚快速凝固; Al-6La合金; 微合金化; 凝固特性; 组织形貌; 性能

高性能铝散热器因轻量化优势在新能源汽车中逐渐取代铜散热器, 其材料需具备良好的高温稳定性、力学性能、导电和导热性[$>180 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]。目前市面上常见的铝散热器商用Al-Si合金体系, 因为铝散热器在高温运作时合金元素Si在基体 α -Al中的高固溶度以及较大的扩散系数(480 °C下为 $0.64 \times 10^{-13} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$), 所以其高温力学性能差以及耐热暴露能力差^[1]。除此之外, Al-Si合金的共晶温度较低(577 °C), 而常见的铝散热器钎焊处理过程工作环境往往达到500 °C以上, 易导致共晶团簇的熔融, 恶化合金的力学性能^[2]。Cho等^[3]学者研发了Al-2Si-3Ni合金, 该合金成分点接近Al-Si-Ni三元共晶点, 该合金热导率为183 W/(m·K), 虽然相对于传统Al-Si系合金有较大提升, 但其热导率仍无法突破200 W/(m·K), 无法有效提高散热器的散热性能。从现有研究来看^[4-6], Al-Si铸造合金高强高导热已接近理论极限, 开发新体系的合金, 使之实现比Al-Si铸造系合金更优异的性能具有重要意义。

RE元素在基体 α -Al中的固溶度极低, 高温时($T \approx 500 \text{ °C}$)的扩散系数仅为 $1 \times 10^{-15} \sim 1 \times 10^{-14} \text{ cm}^2/\text{s}$ ^[7], 其形成的 Al_nRE_3 第二相在接近共晶温度($T > 620 \text{ °C}$)前均能稳定存在^[8], 表明Al-RE二元合金具有较Al-Si系合金更优异的高温力学性能、耐热暴露能力和可钎焊性能。而且, RE元素化学性质活泼, 对铝合金中固溶的O、S、N、H等具有较强的亲合力, 可以净化合金, 并且通过变质作用细化晶粒, 从而降低铸件缺陷, 提高导电导热能力^[8-9]。此外, 近共晶的Al-RE二元合金的液固区间($\approx 640 \sim 650 \text{ °C}$)较窄^[10], 表明其铸造性能与Al-Si系相当甚至更好。

然而, 较低的室温屈服强度阻碍了Al-RE体系合金作为高性能耐热高导热铝合金的应用, 裴珂等对Al-La压铸合金进行了研究, 发现当La含量为6 wt.%时, 展现出较好的综合性能, 热导率超过180 W/(m·K), 但屈服强度约为60 MPa, 未能达到高性能散热器材料所需的标准^[11]。大量研究指出, 通过进一步合金化可提升其室温力学性能^[12-13]。其中, Fe、Co、Ni等过渡族金属元素凭借其在基体 α -Al中较低的固溶度以及所形成的第二相具有较高的热稳定性, 且其第二相可以提高其力学性能^[14-15]得到了更多的关注。Moodispaw等^[16]指出在Al-Ce-Fe体系中, 合金熔体在凝固过程中优先形成 Al_8CeFe_2 相以及 $\text{Al}_{10}\text{CeFe}_2$ 相, 降低合金熔体中的Ce元素浓度, 抑制铸态合金中形成粗大的 $\text{Al}_{11}\text{Ce}_3$ 相以提高合金的力学性能。Yoo等^[17]指出在挤压

作者简介:

卓润杰(2003-), 男, 本科, 主要研究方向为可钎焊高导热铸造铝合金材料的设计和制备。E-mail: 202130273358@scut.edu.cn
通信作者:
杜军, 教授, 博士。电话: 13005146669, E-mail: tandujun@sina.com

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)02-0150-08

基金项目: 国家级大学生创新创业研究项目(No. 202310561007)。

收稿日期:

2024-09-17 收到初稿,

2024-10-21 收到修订稿。

Al-1.0Re合金中,添加0.75 wt.% Fe可通过细晶强化和固溶强化提高合金的强度,但应变则从44.4%减少到39.5%。Inoue等^[18]通过单辊熔体旋压技术制备的Al-La-M ($M=Fe, Co, Ni$)非晶合金具有良好的弯曲延展性,可以无断裂地弯曲180°且Al-La-M合金较Al-La合金热稳定性更高。Emin Çadırlı等^[19]通过石墨坩埚真空熔炼的方法制备的Al-8.8La-1.2Ni,在室温(308 K)下热导率为185 W/(m·K),773 K时热扩散系数 α 为 $110.51 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。Hawksworth等^[20]研究了Bridgman生长过程中形成的Al-11.3La-5.4Ni合金,Al/Al₁₁La₃/Al₃Ni共晶组织在500 °C下会发生粗化现象,但经过500 °C下3 024 h后Al₁₁La₃和Al₃Ni仍然保持关联,且Al/Al₁₁La₃/Al₃Ni共晶组织的初始硬度比Al/Al₁₁Ce₃共晶组织高30%,并且这种高硬度即使在500 °C下经过3 024 h后仍然保持(>50 HV_{0.5})。但目前第三组元元素对Al-RE合金的影响研究甚少,因此,进一步研究Al-RE-TM合金中第三组元微合金化的影响,对于开发高性能耐热高导热铝合金具有重要意义。

本研究以Al-6La合金为基础,通过亚快速凝固成形方式,研究进一步添加微量的Fe、Co、Ni元素对Al-6La合金微观组织以及性能的影响,有助于优化Al-La-TM合金成分,促进其在高导热、高导电铸造铝合金散热器领域的进一步应用与推广。

1 试验材料与方法

本文采用纯度为99.95% (质量分数, wt.%,下同)的工业纯铝及Al-10La中间合金制备Al-6La基础合金,通过添加Al-20Fe、Al-10Co、Al-10Ni中间合金对Al-6La合金进行微合金化,采用亚快速凝固成形Al-6La-X ($X=Fe/Co/Ni$)合金。采用Sente Software公司的JMatPro软件计算Al-6La-X ($X=Fe/Co/Ni$)合金的凝固区间,由此确定Al-6La-X ($X=Fe/Co/Ni$)合金的液相线温度均为650 °C,实际熔炼温度选为730 °C。待原材料完全熔化后将熔体浇注至水冷铜模具(100 mm × 60 mm × 5 mm)中得到铸件。

采用苏州仁光智能科技有限公司的DK7725电火花线切割机从铸件中取样(10 mm × 10 mm × 5 mm),经研磨、抛光(1.5 μm金刚石抛光膏)、并用氢氟酸溶液(99 vol% H₂O+1 vol% HF)腐蚀后得到组织观测试样。采用DMI3000-M型光学显微镜观察金相;采用Merlin Compact型高分辨场发射扫描电镜进行显微组织观察及能谱分析。采用X'pert Powder型X射线衍射仪分析物相组成,采用Cu-K_α辐射,步长设置为0.05°,每步停留时间0.1 s,扫描角度范围为5°~90°;采用National Instruments公司生产的热分析设备,通过温度NI 9212传感器和NI cDAQ-9171温度采集器收集信号输入电

脑,使用计算机辅助热分析法(Computer-aided cooling curve thermal analysis, CA-CCTA)获得凝固冷却曲线。采用First FD-101型涡流导电仪测量电导率。在室温下(25 °C),采用岛津SHIMADZU AG-X100KN型拉伸试验机对根据ASTM E8M-04标准设计的拉伸试样进行拉伸试验,拉伸速度为5 mm/min。

2 试验结果与讨论

2.1 显微组织

图1显示了亚快速凝固Al-6La-X合金的光学显微组织。通过亚快速凝固制备的Al-6La合金具有粗大且分布不均匀的微观组织,由枝晶 α -Al以及(Al₁₁La₃+Al)共晶组织组成,如图1(a)所示。添加0.1%的Fe和Co后,如图1(b)和图1(c)所示, α -Al相晶粒明显减小,其中Co的添加对晶粒细化效果最为显著。而添加0.1%的Ni后,如图1(d)所示, α -Al相晶粒略微粗化,但整体上粗大的 α -Al晶粒基本消失。

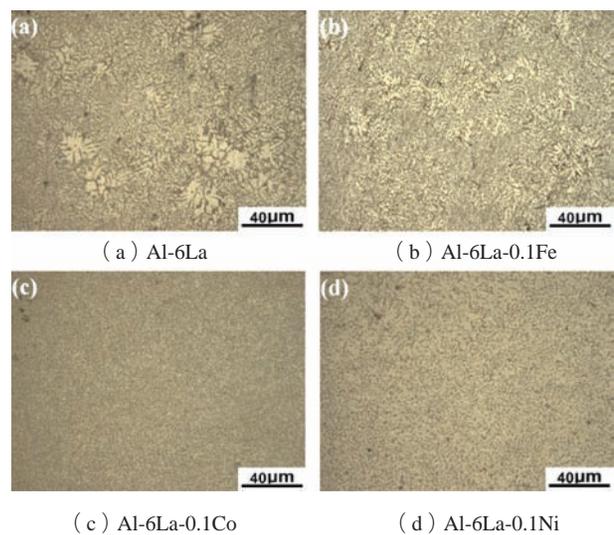


图1 亚快速凝固合金的光学显微组织

Fig. 1 Optical microstructures of sub-rapidly solidified alloys

图2为亚快速凝固制备的Al-6La和Al-6La-X合金的SEM图像。表1为图2中所示各点的EDS分析结果。合金基体中存在薄片状或粒状的灰色相(B、D、F、H点),根据EDS及相图分析可以确认该相为Al₁₁La₃相,可见,Co元素的微合金化将Al-6La共晶组织中的Al₁₁La₃相由薄片状转变为粒状,Fe、Ni元素的微合金化后的Al₁₁La₃相仍然保持薄片状。(Al₁₁La₃+Al)共晶组织(D、F、H)中都检测到Al、La、X($X=Fe/Co/Ni$)三种元素存在,而在 α -Al基体中固溶有较高含量的La元素及少量Co元素,无法检测到Fe、Ni元素的存在。

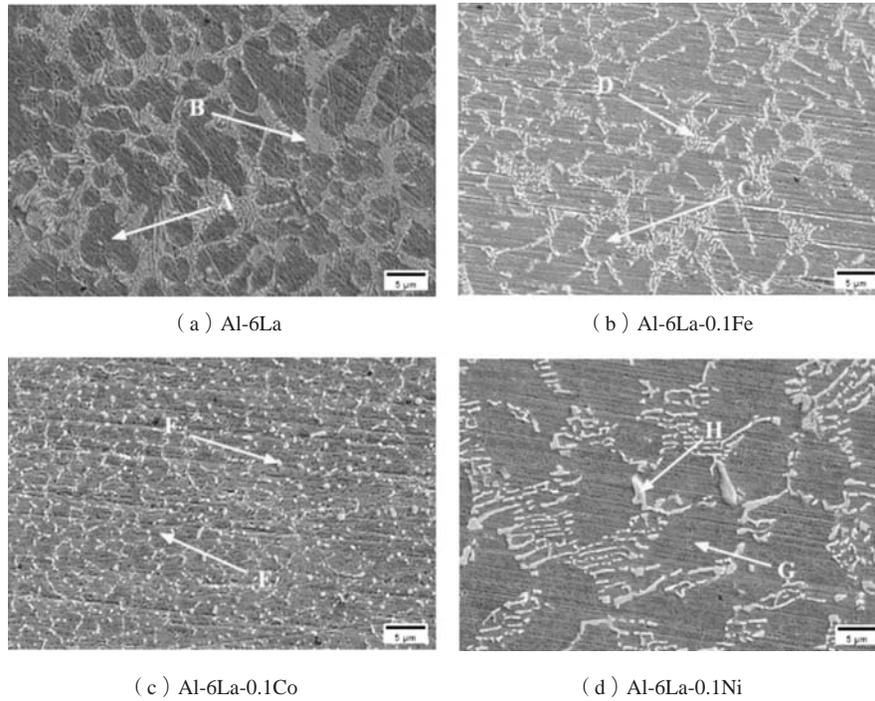


图2 亚快速凝固合金的SEM图像

Fig. 2 SEM images of sub-rapid solidified alloys

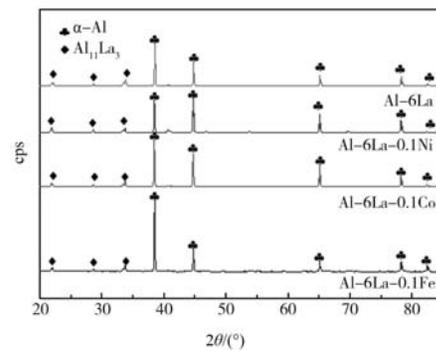
表1 亚快速凝固Al-6La和Al-6La-X合金铸态组织中物相EDS能谱结果 (图2中所示各点)

Tab. 1 EDS point analysis results of the phases denoted by point A to point H (Fig.2) in sub-rapid solidified Al-6La-X alloys

点位	成分 (at.%)				
	Al	La	Fe	Co	Ni
A点	99.40	0.60	-	-	-
B点	97.54	2.46	-	-	-
C点	99.32	0.68	-	-	-
D点	96.19	3.62	0.19	-	-
E点	99.07	0.87	-	0.07	-
F点	97.25	2.55	-	0.20	-
G点	99.63	0.37	-	-	-
H点	96.76	3.09	-	-	0.16

2.2 物相组成

图3 (a) 为亚快速凝固Al-6La-X合金的XRD衍射图谱。为了避免由于某一相的含量太少导致衍射峰强度不够而无法检测出来的问题,对纵坐标进行对数化处理,如图3 (b) 所示。如图3所示,亚快速凝固Al-6La合金的相组成为 α -Al、 $\text{Al}_{11}\text{La}_3$ 和微量的 Al_4La 相,当分别添加0.1%的Fe、Co、Ni元素后,没有出现新的衍射峰,表明微量Fe、Co、Ni元素的微合金化并不会形成新的相或形成新相的含量太低,以至无法成功检测。



(a) 亚快速凝固Al-6La-X合金的XRD衍射图谱

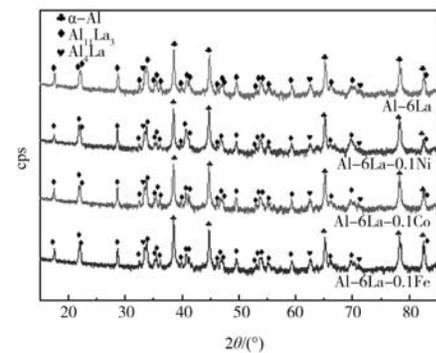
(b) 纵坐标对数化后亚快速凝固Al-6La-X合金的XRD衍射图谱
图3 亚快速凝固Al-6La-X合金的XRD衍射图谱和纵坐标对数化后亚快速凝固Al-6La-X合金的XRD衍射图谱

Fig. 3 XRD diffraction patterns of the sub-rapid solidified Al-6La-X alloys and the logarithmically transformed XRD diffraction patterns along the ordinate of the sub-rapid solidified Al-6La-X alloys

2.3 传导与力学性能

图4为亚快速凝固Al-6La-X合金的电导率和热导率（理论推算）柱状图。从图4可知，亚快速凝固成形的Al-6La合金电导率为30.0 MS/m，由于存在试验测量误差，添加0.1%的Fe、Ni对亚快速凝固Al-6La合金的电导率并未明显提升。但经Co元素的微合金化后则明显提升了合金的电导率，达到了31.3 MS/m，较未添加前提高了4.1%。

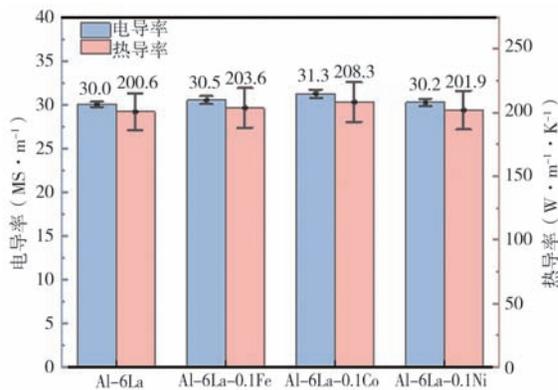


图4 亚快速凝固Al-6La-X合金的电导率和热导率（理论推算）柱状图

Fig. 4 Histogram of the electrical conductivity and thermal conductivity (theoretical estimate) of the sub-rapid solidified Al-6La-X alloys

由金属导热和导电的物理本质可知，自由电子是金属导热和导电过程的主要载体。魏德曼（Wiedemann）和弗兰兹（Franz）发现，在温度高于德拜温度 θ_D 下，金属导热导电主要由自由电子贡献时，金属的热导率与电导率之比（ $\frac{\lambda}{\sigma}$ ）正比于温度，其中

比例常数的值不依赖于具体的金属^[21]。数学表达式如下：

$$\lambda/\sigma = LT \quad (1)$$

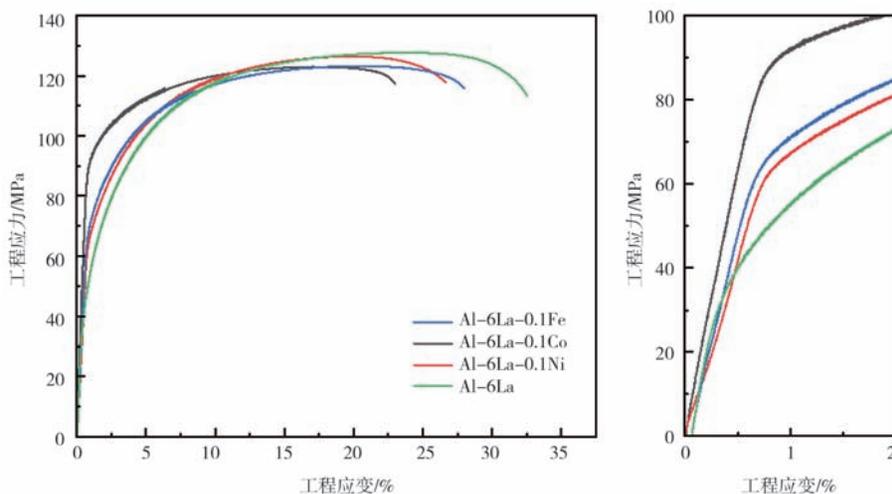
式中： λ 为金属的热导率，W/(m·K)； σ 为金属的电导率，MS/m； T 为绝对温度，K； L 为洛伦兹数（Lorentz number）， $L=2.45 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \Omega \cdot \text{K}^{-2}$ 。

在高温下，魏德曼-弗兰兹定律（Wiedemann-Franz Law）可能不再适用。魏德曼-弗兰兹定律基于经典电子理论，它假设自由电子是金属中热传导和电传导的主要载体，并且这些电子与声子（晶格振动的量子）之间的相互作用可以忽略不计，但在高温下，声子导热和光子导热不可忽略^[22]。Olafsson等人^[23]针对铝合金对上述公式进行了修正，得出了如下公式：

$$\lambda = \sigma L_0 T + C \quad (2)$$

式中： L_0 为洛伦兹数， $L_0=2.1 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \Omega \cdot \text{K}^{-2}$ ； C 为常数， $C=12.6 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。将测得的电导率代入上述公式，可估测最高的室温热导率为Al-6La-0.1Co的208.3 W/(m·K)，其次是Al-6La-0.1Fe[203.6 W/(m·K)]，Al-6La-0.1Ni [201.9 W/(m·K)]，Al-6La [200.6 W/(m·K)]。

图5为亚快速凝固Al-6La-X合金的工程应力-应变曲线，表2为亚快速凝固Al-6La-X合金的屈服强度、拉伸强度和颈缩点的数据。从图5可知，亚快速凝固成形Al-6La的屈服强度是42.1 MPa。添加0.1 wt.%的Fe、Co、Ni后，亚快速凝固Al-6La合金的屈服强度都有了不同程度的提高，其中，Al-6La-0.1Co的屈服强度最高为85.5 MPa，其次是Al-6La-0.1Ni（61.8 MPa）、Al-6La-0.1Fe（60.5 MPa）。但添加0.1 wt.%的Fe、Co、Ni后，亚快速凝固Al-6La合金的拉伸强度和颈缩点都有不同程度的下降，其中添加0.1 wt.%的Co下降最为明显，拉伸



(a) 应力-应变曲线

(b) (a) 中屈服阶段的放大图

图5 亚快速凝固Al-6La-X合金应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of the sub-rapid solidification Al-6La-X alloys

表2 亚快速凝固Al-6La-X合金的屈服强度、拉伸强度和颈缩点数据
Tab. 2 Yield strength, tensile strength and necking point data of the sub-rapid solidification Al-6La-X alloys

项目	Al-6La	Al-6La-0.1Fe	Al-6La-0.1Co	Al-6La-0.1Ni
屈服强度/MPa	42.1	60.5	85.5	61.8
拉伸强度/MPa	127.7	123.2	123.0	126.5
颈缩点/%	23.7	20.6	17.1	19.8

强度从127.7 MPa下降到123.0 MPa, 颈缩点从23.7 MPa下降到17.1%。

3 分析和讨论

3.1 组织转变分析

表3是Al-6La-X合金的凝固温度区间。向Al-6La合金中加入微量Fe、Co、Ni时, 凝固温度区间都略微增大, 其中Al-6La-0.1Co的增幅最小。现普遍研究认为^[24], 凝固区间对于铝合金的铸造性能具有重要影响, 窄凝

固区间有利于获得细小的晶粒组织, 减少缩孔和缩松, 提高铸造性能和降低热裂倾向。可见, 添加0.1 wt.%的Fe、Co和Ni至Al-6La合金中, 会导致凝固温度区间的扩大。这一现象源于Fe、Co和Ni微量元素的加入降低了Al-6La合金的固相线温度, 从而增大了凝固温度区间^[25-26]。尽管这种变化导致Al-6La-X合金的铸造性能有所下降, 但合金仍保持较好的铸造性能。

图6为Al-6La-X合金冷却凝固热分析曲线, 表4为Al-6La-X合金凝固热分析曲线的特征温度, 其中, T_N 为

表3 亚快速凝固Al-6La-X合金凝固温度区间
Tab. 3 Temperature range of the sub-rapid solidification of the Al-6La-X alloys

合金	Al-6La	Al-6La-0.1Fe	Al-6La-0.1Co	Al-6La-0.1Ni
凝固温度区间范围/°C	631.26~650	628.93~650	630.17~650	623.06~650

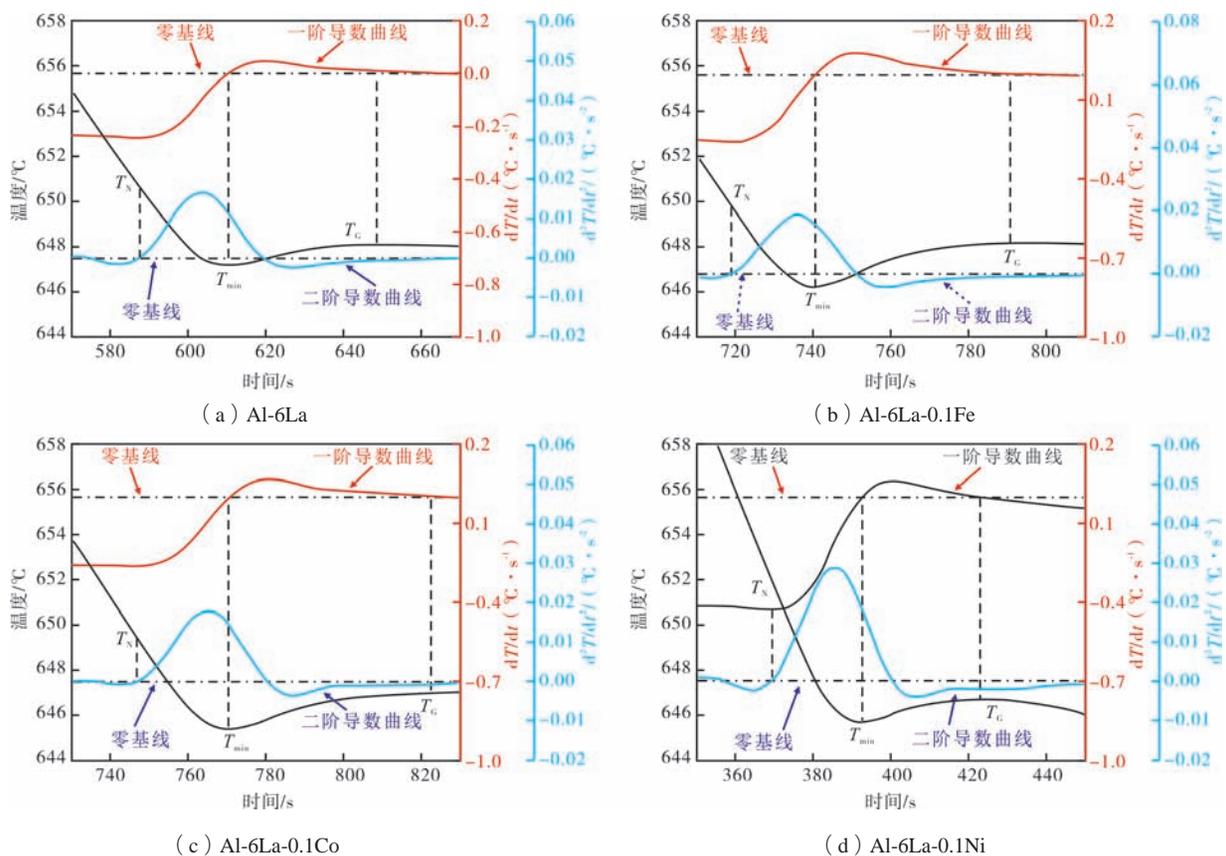


图6 Al-6La-X合金冷却凝固热分析曲线

Fig. 6 Cooling curves thermal analysis of the sub-rapid solidification Al-6La-X alloys

初晶 α -Al相凝固阶段的形核温度； T_{Min} 为初晶 α -Al相凝固阶段的最低温度； T_G 为初晶 α -Al相凝固阶段的生长温度； $\Delta T_G: \Delta T_G = T_G - T_{\text{Min}}$ ，初晶 α -Al相凝固阶段的再辉温升。由其凝固热分析曲线可知，0.1 wt.% Fe、Co、Ni的加入能降低初晶 α -Al形核温度 T_N ，提高过冷度。其中，Al-6La-0.1Co合金凝固曲线变化最大，初晶 α -Al形核温度 T_N 从647.15 °C降到645.63 °C。在含有0.1 wt.% Fe和0.1 wt.% Co的Al-6La合金凝固过程中，由于Fe和Co在铝中的固溶度很小，凝固过程中在固液界面前沿聚集，形成富Fe、Co相，造成局部熔体成分过冷，阻碍了 α -Al枝晶的生长，导致 α -Al相晶粒尺寸的减小^[27-29]。其次，添加Co元素后，初晶 α -Al形核温度 T_N 最低，且特征温度 ΔT_G 较小，意味着相变过程在较窄的温度范围

内发生，两者综合因素作用下，导致Co元素的晶粒细化效果最为显著。相反，在含有0.1 wt.% Ni的Al-6La合金凝固过程中，再辉温度 T_G 和特征温度 ΔT_G 均较高，相变过程在较宽的温度范围内发生，有利于 α -Al相晶粒的长大，最终呈现出晶粒略微粗化的现象。至于为何添加0.1 wt.% Co后，共晶组织中 $\text{Al}_{11}\text{La}_3$ 相形态由薄片状转变为粒状的原因可能是由于晶体学取向关系的变化，但仍然需要后续的探讨。在亚快速凝固的Al-6La合金中，添加0.1 wt.%的Fe、Co和Ni元素后，由于冷却速度较高，这些元素没有充足的时间在凝固过程中析出形成第二相。在这种情况下，合金的相组成仍然主要由 α -Al、 $\text{Al}_{11}\text{La}_3$ 和微量的 Al_4La 相组成，而没有新的相形成^[30]，这与图3中XRD衍射结果一致。

表4 Al-6La-X合金凝固热分析曲线特征温度
Tab. 4 Characteristic temperatures of the cooling curves thermal analysis of the Al-6La-X alloys by sub-rapid solidification

项目	Al-6La	Al-6La-0.1Fe	Al-6La-0.1Co	Al-6La-0.1Ni
$T_N/^\circ\text{C}$	647.15	645.67	645.38	646.25
$T_G/^\circ\text{C}$	648.08	646.70	647.00	648.20
$\Delta T_G/^\circ\text{C} (T_G - T_{\text{Min}})$	0.93	1.03	1.62	1.95

3.2 性能影响机制

按照金属导电理论可知，晶体越完整，异类原子等引起的晶格畸变和晶界等缺陷越少，其电阻越小。根据量子自由电子理论，金属电子气服从费米-狄拉克统计分布，可推导出，金属中电导率为：

$$\sigma = \frac{n_{\text{eff}} e^2 l_F}{m^* v_F} \quad (3)$$

式中： m^* 为电子有效质量， v_F 为费米面附近电子平均运动速度， n_{eff} 为单位体积内实际参加传导电子数， e 为电子电量， l_F 为电子的平均自由程。

对于金属而言，电导率主要取决于费米面附近电子平均运动速度和平均自由程。而0.1 wt.%的Fe、Co、Ni添加后，晶粒尺寸分布均匀化，减少了因局部电导率差异而引起的电阻增加，且使共晶 $\text{Al}_{11}\text{La}_3$ 相形貌由薄片状转变为粒状，使得共晶组织中的 $\text{Al}_{11}\text{La}_3$ 相尺寸减小，对自由电子的散射作用变小，电子的平均自由程提高，从而提高合金的电导率^[31-32]。金属的电导率和热导率均与自由电子的流动密切相关，且根据魏德曼-弗兰兹定律，金属的电导率和热导率是成正比关系，因此添加0.1 wt.%的Fe、Co、Ni后，提高了金属的电导率，热导率也得到相应提高。

在亚快速凝固Al-6La合金中添加0.1 wt.%的Fe、Co和Ni元素后，晶粒显著均匀化，其中Fe和Co元素都能够细化晶粒。此外，微量La元素固溶于 α -Al基体中。

微合金化过程不仅实现了细晶强化，还起到了固溶强化的作用。这些微观结构的改变有助于提高亚快速凝固Al-6La合金的屈服强度^[33-35]。关于拉伸强度和塑性降低的原因，有可能合金化元素改变了共晶微观组织的形貌特征，影响了共晶组织中的 $\text{Al}_{11}\text{La}_3$ 相和 α -Al相晶体学取向关系，不同的晶体学取向关系的载荷转移机制不一致，在特定取向关系（ $[520]\text{Al}_{11}\text{Re}_3 // [121] \alpha\text{-Al}$ ， $(001) \text{Al}_{11}\text{Re}_3 // (111) \alpha\text{-Al}$ 或 $[113] \text{Al}_{11}\text{Re}_3 // [011] \alpha\text{-Al}$ ， $(110) \text{Al}_{11}\text{Re}_3 // (100) \alpha\text{-Al}$ ）下，共晶组织中的 $\text{Al}_{11}\text{La}_3$ 相和 α -Al相界面结合强度相对较低，可能导致界面更容易出现裂纹和脱粘，裂纹扩展所需的能量较小，因此裂纹更容易扩展。而且在这种取向向下， $\text{Al}_{11}\text{La}_3$ 相和 α -Al相之间的晶格匹配程度较差，位错在界面处的传递受到阻碍，可能导致材料更容易发生脆性断裂^[36]。综合作用下，在亚快速凝固Al-6La合金中添加0.1 wt.%的Fe、Co和Ni元素后，屈服强度上升，拉伸强度和塑性降低。然而，这一假设的确立尚需进一步的试验验证和深入分析。

4 结论

(1) 在亚快速凝固的Al-6La合金中，添加0.1 wt.%的Fe和Co能显著细化晶粒和均匀组织，其中Co效果最佳。而添加0.1 wt.% Ni虽同样促进组织的均匀化，但会使晶粒略微增大。这些元素的加入均降低了 α -Al相的形

核温度, 并且0.1 wt.% Co能使共晶组织中的 $Al_{11}La_3$ 相由薄片状变为粒状, 但合金的相组成保持不变, 仍由 α -Al、 $Al_{11}La_3$ 和微量的 Al_4La 相构成。

(2) Al-6La-0.1Co合金表现出优异的综合性能, Co元素的添加通过均匀化和细化晶粒、改善共晶组织形貌, 减少了自由电子的散射, 从而提高了电子的平均自由程, 提高了电导率和热导率; 同时, 通过细晶强化和固溶强化, 显著提高了Al-6La-0.1Co合金的屈服

强度。其室温电导率为31.3 MS/m, 相对于Al-6La合金提高4.1%; 其屈服强度达到85.5 MPa, 较Al-6La提高了103.0%。

(3) 在亚快速凝固的Al-6La合金中, 添加0.1 wt.%的Fe、Co和Ni, 拉伸强度和塑性都有不同程度的降低, 其中添加0.1 wt.%的Co下降最为明显, 拉伸强度从127.7 MPa下降到123.0 MPa, 较Al-6La下降了3.6%。颈缩点从23.7%下降到17.1%。较Al-6La下降了27.8%。

参考文献:

- [1] 张华炜, 刘悦, 范同祥. 铸造耐热铝合金的研究进展及展望 [J]. 材料导报, 2022, 36 (2): 153-161.
- [2] 冯毅. Al-Si合金的非平衡凝固机理研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- [3] WEN C, GAN J, LI C, et al. Comparative study on relationship between modification of Si phase and thermal conductivity of Al-7Si alloy modified by Sr/RE/B/Sb elements [J]. International Journal of Metalcasting, 2021, 15: 194-205.
- [4] CHEN J, HUNG H, WANG C, et al. Thermal and electrical conductivity in Al-Si/Cu/Fe/Mg binary and ternary Al alloys [J]. Journal of Materials Science, 2015, 50: 5630-5639.
- [5] SU C, LI D, LUO A A, et al. Quantitative study of microstructure-dependent thermal conductivity in Mg-4Ce-x Al-0.5 Mn alloys [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2019, 50: 1970-1984.
- [6] 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: 1585-1594.
- [7] MURARKA S, AGARWALA R. Diffusion of rare earth elements in aluminum [R]. Bhabha Atomic Research Centre, Bombay (India), 1968.
- [8] 张密林, 鲁化一, 唐定骧. 稀土在铝及其合金中的应用进展 [J]. 稀土, 1988 (5): 34-40.
- [9] 王伟祺. 8xxx系铸造铝合金固溶时效与变形的组织性能 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
- [10] GSCHNEIDNER K, CALDERWOOD F J J O P E. The Al-RE (Aluminum-Rare earth) systems [J]. Bulletin of Alloy Phase Diagrams, 1988, 9 (6): 658-668.
- [11] 裴珂可, 周其良, 郭潘狄, 等. 高导压铸Al-La合金组织及性能研究 [J]. 铸造, 2024, 73 (7): 947-954.
- [12] KIM Y-H, YOO H-S, LEE S-H, et al. Microstructure and mechanical properties of the Al-RE alloy with Ca addition [J]. Journal of Nanoscience, 2020, 20 (1): 535-539.
- [13] KIM Y-H, YOO H-S, LEE S-H, et al. Effects of Mg addition on microstructure, mechanical properties, and thermal conductivity of As-extruded Al-RE alloys [J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2020, 20 (1): 293-297.
- [14] 江民浩, 莫丽玲, 杜军. Al-7.5Ni-xFe合金的组织演变与热物性能 [J]. 中国有色金属学报, 2023, 33 (9): 2801-2812.
- [15] BOGDANOFF T, DAHLE A K, SEIFEDDINE S J I J O M. Effect of Co and Ni addition on the microstructure and mechanical properties at room and elevated temperature of an Al-7% Si alloy [J]. International Journal of Metalcasting, 2018, 12 (3): 434-440.
- [16] MOODISPAW M P, CINKILIC E, MIAO J, et al. The Beneficial effect of iron in aluminum-cerium-based cast alloys [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2024, 55 (5): 1351-1362.
- [17] YOO H-S, KIM Y-H, SON H-T J A O M, et al. Effect of Fe content on the mechanical properties and thermal conductivity of the Al-RE alloys [J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2020, 65 (3): 1029-1033.
- [18] INOUE A, OHTERA K, TSAI A-P, et al. New amorphous alloys with good ductility in Al-YM and Al-La-M (M=Fe, Co, Ni or Cu) systems [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 1988, 27 (3A): L280.
- [19] ÇADIRLI E, ÜSTÜN E J I J O E, SCIENCES M. Determination of thermal properties of ternary Al-La-Ni cast alloy [J]. Ndian Journal of Engineering and Materials Sciences (IJEMS), 2022, 29 (4): 493-501.
- [20] HAWKSWORTH A, RAINFORTH W, JONES H J M S, et al. Thermal stability of Al/Al₁₁Ce₃ and Al/Al₁₁La₃/Al₃Ni eutectics obtained by Bridgman growth [J]. Materials Science and Technology, 1999, 15 (6): 616-620.
- [21] POWELL R W J I J O H, TRANSFER M. Correlation of metallic thermal and electrical conductivities for both solid and liquid phases [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1965, 8 (7): 1033-1045.
- [22] 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, 2021.
- [23] OLAFSSON P, SANDSTROEM R, KARLSSON A. Electrical conductivity of aluminium alloys [J]. Mater Sci Forum (Switzerland),

- 1996, 217-222 (2): 981-986.
- [24] 赵军, 陈光昫. 铸造Al-Si合金凝固特点对热裂影响的研究 [J]. 大连: 大连工学院学报, 1985, 4: 31-36.
- [25] RAGHAVAN V J J O P E, DIFFUSION. Al-La-Ni (Aluminum-Lanthanum-Nickel) [J]. Journal of Phase Equilibria and Diffusion, 2006, 27 (4): 392.
- [26] VILLARS P J A I. Handbook of ternary alloy phase diagrams [J]. ASM international, 1995, 7: 8754-8755.
- [27] 牛艳萍, 詹浩, 杨勇, 等. La、Ce混合稀土对Al-Mg-Si合金组织性能的影响 [C]. 2016中国铝加工产业技术创新交流大会, 内蒙古霍林郭勒, 2016.
- [28] 牛艳萍, 叶志飞, 李沁, 等. La、Ce混合稀土对Al-0.75Mg-0.6Si合金组织性能的影响 [J]. 南方金属, 2016 (6): 26-29.
- [29] 朱博翔, 周涛, 周子为, 等. 高冷速下Fe对含Al-5Ti-1B细化剂纯铝晶粒细化的影响 [J]. 冶金与材料, 2023, 43 (11): 1-3.
- [30] 梁家玮. 微合金化对亚快速凝固Mg-Al-Sn-Ca合金组织演化与力学性能的影响 [D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- [31] XIAOLI C, YUYING W, GUOJUN Z, et al. Study on the improvement of electrical conductivity and mechanical properties of low alloying electrical aluminum alloys [J]. Compos. B, Eng (Netherlands), 2017, 110: 381-387.
- [32] 葛富彪, 胡振光, 谭海军, 等. La和Ce对Al-3Si-0.5Cu-0.7Fe合金组织及性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2022, 42 (4): 486-491.
- [33] MA K K, WEN H M, HU T, et al. Mechanical behavior and strengthening mechanisms in ultrafine grain precipitation-strengthened aluminum alloy [J]. Acta Materialia, 2014, 62: 141-155.
- [34] 曹雷刚, 朱琳, 张磊磊, 等. 快速凝固AlCoCrFeNi_{2.1}共晶高熵合金的微观组织演变和力学性能 [J]. 材料研究学报, 2019, 33 (9): 650-658.
- [35] HUANG T L, SHUAI L F, WAKEEL A, et al. Strengthening mechanisms and Hall-Petch stress of ultrafine grained Al-0.3%Cu [J]. Acta Materialia, 2018, 156: 369-378.
- [36] ZHANG C, PENG P, LV H, et al. Orientation relationships and interface structure between Al₁₁Ce₃ and Al in Al-Ce eutectic [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 18: 693-704.

Microstructure and Properties of Al-6La-Fe/Co/Ni Alloys Prepared by Sub-Rapid Solidification

ZHUO Run-jie, LUO Ye, FAN Hui-min, QIU Yuan-yuan, DU Jun

(School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

Abstract:

The purpose of this study is to investigate the effects of adding trace Fe, Co, Ni on the microstructure and properties of sub-rapid solidification casting Al-6La alloy. Using optical microscopy, scanning electron microscopy, energy dispersive X-ray spectroscopy, X-ray diffraction, cooling and solidification thermal analysis, conductivity and tensile strength tests, the effects of adding 0.1 wt.% of Fe, Co, and Ni on the microstructure and properties of the Al-6La alloy were studied. The results showed that the addition of 0.1 wt.% of Fe, Co, Ni significantly improved the yield strength of the Al-6La alloy, and the addition of 0.1 wt.% Fe and Co also made the grain refined. Especially, the Al-6La-0.1Co alloy exhibited excellent comprehensive properties, with a yield strength of 85.5 MPa, which was 102.9% higher than that of the Al-6La; and an electrical conductivity of 31.3 MS/m, which was 4.1% higher than that of the Al-6La.

Key words:

sub-rapid solidification; Al-6La alloy; microalloying; solidification characteristics; microstructure morphology; properties