DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2024.4162

稀土 Er 对 ZL114A 合金微观组织和性能的影响

舒有为[1],卢雅琳[1,2],王　健[1],张　憬[2],李兴成[2]

(1. 江苏理工学院 材料工程学院,江苏 常州 213001; 2. 江苏省高性能材料绿色成形技术与装备重点建设实验室,江苏 常州 213001)

摘　要:以铸造 ZL114A 铝合金为研究对象,通过加入稀土元素 Er 来改善合金的微观组织,提高其力学性能。借助 SEM、XRD、DSC 等材料分析手段,研究了不同 Er 含量对 ZL114A 铝合金微观组织与力学性能的影响。结果表明,添加合适的 Er 元素可以达到细化晶粒的目的,合金中粗大的枝晶组织逐渐趋于球化,初生 α-Al 相和共晶 Si 结晶温度下降,析出相 Al_3Er 富集在共晶 Si 上,起到异质形核的作用。随着 Er 含量的增加,共晶 Si 由板条状演化为棒状或近球状,合金的力学性能也随之提高。当 Er 含量超过某一临界值(0.5%,质量分数),则细化效果不明显,力学性能也有所降低。添加 0.5%Er 时,合金的性能最佳,抗拉强度和延伸率分别提高了 11.43%和 52.8%。

关键词:ZL114A 合金;Er 元素;微观组织;力学性能

中图分类号:TG294　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2024)11-1075-07

Effect of Rare Earth Er on the Microstructure and Properties of the ZL114A Alloy

SHU Youwei[1], LU Yalin[1,2], WANG Jian[1], ZHANG Jing[2], LI Xingcheng[2]

(1. School of Materials Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China; 2. Key Construction Laboratory of Green Forming and Equipment from Jiangsu Province, Changzhou 213001, China)

Abstract: The microstructure of a ZL114A alloy and its mechanical properties were improved by the addition of the rare earth element Er. SEM, XRD, DSC and other material analysis methods were used to study the effects of different Er contents on the microstructure and mechanical properties of the ZL114A aluminium alloy. The results show that grain refinement can be achieved by adding suitable Er, the coarse dendrite structure in the alloy gradually tends to be spheroidized, the crystallization temperature of the primary α-Al phase and eutectic Si decreases, and the precipitated phase Al_3Er is enriched on eutectic Si, which plays a role in heterogeneous nucleation. With increasing Er content, eutectic Si evolves from slats to rods or near-spherical particles, and the mechanical properties of the alloy also improve. However, when the Er content exceeds a critical value (0.5 wt.%), the refining effect is not significant, and the mechanical properties decrease. The alloy exhibits optimal performance when 0.5 wt.% Er is added, with the tensile strength and elongation rate increasing by 11.43% and 52.8%, respectively.

Key words: ZL114A alloy; Er; microstructure; mechanical properties

铸造铝合金具有较高的比强度及优良的耐腐蚀性能,在航空航天、汽车、机械制造等领域中应用广泛[1-3]。研究表明,在铸造铝硅合金领域,添加稀土元素可以细化合金 α-Al 晶粒,改善共晶 Si 的形貌,从而提高合金的力学性能[4-7]。方文倩等[8]研究发现,在 ZL201A 铝合金加入 Er 元素,α-Al 基体相从柱状晶粒转化为细小的等轴晶粒。当 Er 含量达到 0.4%(质量分数,下同)时,晶粒细化效果最佳,合金的抗拉伸强度和伸长率分别达到 298.14 MPa 和 6.56%。刘怀冰等[9]在 Al-3Si-0.45Mg-0.45Cu 合金中添加 0.6%Er 元素,时效 8 h 后,合金硬度与拉伸强度达到峰值,较原来的铸态合金分别提高了 57 HV

收稿日期:2024-08-29

基金项目:江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究项目(23KJB430018);常州市科技计划(CJ20220061)

作者简介:舒有为,1999 年生,硕士生. 研究方向为轻质高强合金研究. Email: 1195774524@qq.com

通讯作者:卢雅琳,1967 年生,教授,博士. 研究方向为材料制备及成形技术. Email: luyalin@163.com

引用格式:舒有为,卢雅琳,王健,张憬,李兴成. 稀土 Er 对 ZL114A 合金微观组织和性能的影响[J]. 铸造技术,2024,45(11): 1075-1081.
SHU Y W, LU Y L, WANG J, ZHANG J, LI X H. Effect of rare earth Er on the microstructure and properties of the ZL114A alloy[J]. Foundry Technology, 2024, 45(11): 1075-1081.

中国知网　https://www.cnki.net

和 138 MPa。研究发现,基体 α-Al 中析出了强化相 Al_3Er,阻碍了位错运动,铸态下细长的棒状共晶硅发生球化,使得合金性能得到提升。唐鹏等[10]研究了元素 Er 对 Al-Si-Fe-Co 合金组织与性能的影响。结果发现,当添加 0.5%Er 时,α-Al 晶粒细化效果最佳,其抗拉强度和伸长率分别提高了 5.0%和 19.6%。闫洪[11]研究了不同稀土元素对 ZL101A 铸造铝合金的影响。结果表明,Er 元素对 α-Al 和共晶 Si 的细化效果明显优于 Ce 元素,加入 Er 可在 ZL101A 铝合金中形成更加细小和弥散分布的稀土化合物相,使合金的力学性能有显著的提高。ZL114A 铝合金作为高强度铸造 Al-Si-Mg 合金,相比 ZL101A 铝合金具有更高的 Mg 含量,因此其力学性能、铸造性能、抗热裂性、焊接性能更好,适用于制造大型薄壁结构件[12]。

目前,大多数企业生产的 ZL114A 铝合金的抗拉强度和伸长率只能达到 300 MPa 和 3%左右,随着科技的发展,ZL114A 铝合金的强度和塑性逐渐不能满足航空航天、机械制造等领域的使用要求。研究发现[13],ZL114A 铝合金在凝固过程中,会形成 α-Al 相与共晶 Si 相,α-Al 相和共晶 Si 相的形貌及尺寸对合金的力学性能有着重要的作用。上述研究分析表明,铸造铝合金中添加稀土 Er,可以对合金中的 α-Al 相和共晶 Si 形貌有一定的细化效果,进而对其力学性能也会产生影响。本文以铸造ZL114A 铝合金为研究对象,探究不同 Er 添加量对 ZL114A 铝合金微观组织和力学性能的影响,以期获得较优的 Er 含量,为实际生产提供技术支持。

1 实验材料及方法

实验采用商用 ZL114A 铝合金作为材料,该合金的化学成分为 7.32%Si、0.52%Mg、0.11%Fe、0.13%Ti、0.01%Mn 和 0.01%Cu,其余成分为 Al。制备 Er/ZL114A 合金时,先将 ZL114A 铝合金置于石墨坩埚中,采用电阻炉加热至 700 ℃,当炉料完全熔化,使用钟罩将 Al-10Er 中间合金压入熔体中并静置保温 30 min,然后将熔体温度调整至 750 ℃,进行精炼和除渣处理。最后将熔体浇注到预热至 200 ℃的金属型模具中,从而得到不同 Er 含量(0%、0.1%、0.3%、0.5%、0.7%)的 ZL114A 铝合金。对合金进行 T6 热处理,热处理工艺为540 ℃×10 h+170 ℃×10 h。

使用线切割机切割金相试样和拉伸试样,进行微观组织观察和力学性能测试。金相试样经过打磨、抛光和腐蚀处理,在 Nikon-MR5000 金相显微镜和 Sigma500 扫描电镜下进行组织观察。拉伸试样去除表面氧化层后,在 WDW 电子万能试验机上进行力学性能测试。使用 NETZSCH DSC 404F3 仪器对合金进行 DSC 相变温度分析,试样质量为 1~2 mg,温度范围 100~800 ℃。X 射线衍射(XRD)分析在 D8 ADVANCE 型 X 射线衍射仪上完成,采用 Cu 靶 Kα 辐射,工作电流为 40 mA,扫描速度为 4 (°)/mm,衍射角范围为 20°~90°。

2 实验结果及讨论

2.1 Er 对 ZL114A 铝合金相及相变温度的影响

图 1 为添加 Er 前后 ZL114A 铸态合金的 X 射线衍射图谱。从图中可以观察到,ZL114A 铝合金除了 α-Al 相、共晶 Si 相和 Mg_2Si 相,还出现了 Al_3Er 和 Al_2Er 衍射峰。这是由于 Er 的化学性质活泼,易与 Al 发生反应,生成 Al_3Er、Al_2Er 等相。

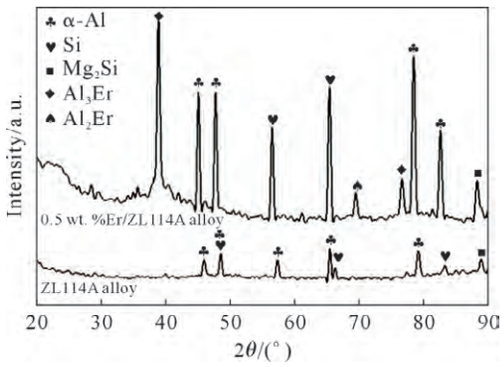


图 1 ZL114A 和 0.5%Er/ZL114A 合金的 XRD 图谱
Fig.1 XRD patterns of the ZL114A and 0.5 wt.%Er/ZL114A alloys

图 2 为 0.5%Er/ZL114A 铝合金的组织形貌和能谱分析。图 2a 和 b 显示了不同放大倍数下,0.5%Er/ZL114A 合金的 SEM 照片。从图 2a 中可以看出,添加 Er 后的 ZL114A 合金 α-Al 相呈现为近球状形态,且晶界分布不连续。晶界 A 的区域出现破碎的不规则灰色圆粒,结合 EDS 能谱和 XRD 分析可以确定该组织为共晶 Si 相。进一步放大 B 处,发现 0.5%Er/ZL114A 合金中出现了针状的白色析出物(如图 2b 中标记为 C 的区域所示),通过能谱扫描和 XRD 图谱分析,可以确认这些白色析出物为 Al_3Er 相,从扫描电镜图中可以推测出 Al_3Er 析出相倾向于富集在晶界和共晶 Si 组织上。

图 3 为 ZL114A 和 0.5%Er/ZL114A 合金的差示扫描量热(DSC)分析曲线。由图可以看出,对于 ZL114A 合金,当温度超过 614 ℃时,合金处于液相状态,没有相变析出,热分析曲线相对平缓。0.5%Er/ZL114A 曲线中在温度降至 A 点时出现了一个

中国知网 https://www.cnki.net

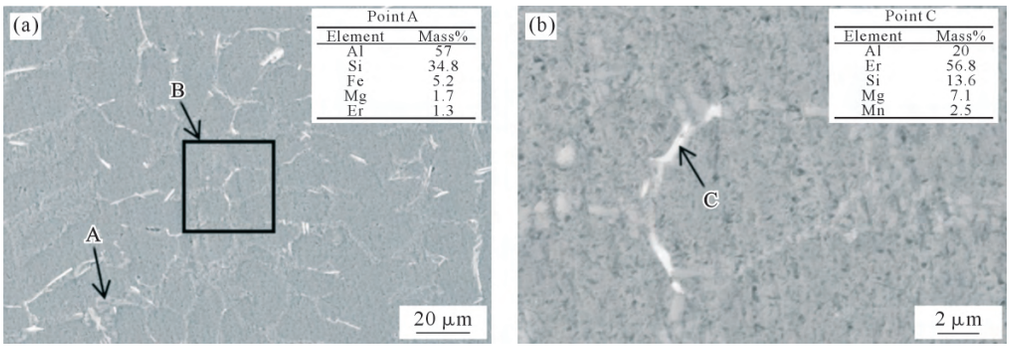


图 2 0.5%Er/ZL114A 合金 SEM 照片和 EDS 分析结果：(a) SEM 照片；(b) 图(a)晶界 B 放大图

Fig.2 SEM images and EDS analysis results of 0.5 wt.%Er/ZL114A: (a) SEM image; (b) enlarged image of grain boundary B in (a)

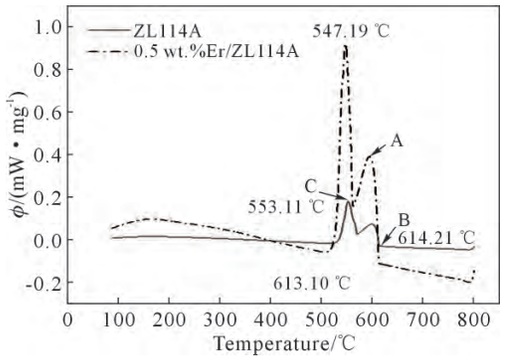


图 3 ZL114A 和 0.5%Er/ZL114A 铝合金热分析曲线

Fig.3 DSC curves of the ZL114A alloy and 0.5 wt.%Er/ZL114A alloy

明显的峰值，合金发生了共晶反应，此时 Er 会吸附在 Si 相的固液界面上，并在 Si 相的生长孪晶上富集，且合金中逐渐开始析出 Al_3Er 相，反应式为 L→α-Al+Al_3Er，α-Al 相作为初生的形核核心。由于 ZL114A 合金的凝固温度范围为 565~640 ℃，因此在发生这一反应时，合金仍处于液相状态。

在 ZL114A 曲线中，B 点代表了 α-Al 相开始形核，合金经历了一个吸热反应，与 0.5%Er/ZL114A 合金相比，形核温度从 614.21 ℃降低到了 613.1 ℃。根据凝固驱动热力学公式[14]：

$$\Delta G_v=-\frac{\Delta H\Delta T}{T_m} \quad (1)$$

式中，ΔG_v 为相变驱动能；ΔH 为凝固潜热；T_m 为平衡凝固温度；ΔT 为过冷度，其计算公式如式(2)。ΔH 和 T_m 对一特定金属或者合金为定值。

$$\Delta T=T_m-T \quad (2)$$

因此，随着 ΔT 的增大，其凝固驱动力越大，从而增加了形核数量和速率，使得 α-Al 晶粒细化，分布更加均匀。当温度进一步降至 C 点，合金再次发生共晶反应，反应式为 L→α-Al+Si，此时共晶 Si 相开始析出。添加 Er 后，共晶反应的温度由 553.11 ℃降低到了 549.19 ℃。Er 的富集阻碍了共晶 Si 在铝熔体中的扩散。共晶 Si 形核温度降低，使其生长速率减小，共晶团的数量减少，从而改变共晶 Si 相形貌。

2.2 Er 对 ZL114A 铝合金微观组织的影响

2.2.1 Er 对 α-Al 相的细化作用

图 4 和 5 分别为 ZL114A 铝合金在不同 Er 含量下的微观组织及 α-Al 相晶粒尺寸、二次枝晶臂间距变化曲线。如图 4 所示，合金中除了枝晶状 α-Al 相，晶界处还分布着不同形貌的共晶 Si 相。ZL114A 铝合金组织中二次枝晶臂的间距较大，α-Al 相的平均晶粒尺寸为 112 μm(图 5a)，整体分布不规则(图 4a)。当合金中添加不同 Er 含量后，α-Al 相逐渐细化，二次枝晶臂的间距减小。当加入 0.1%Er 时，合金 α-Al 相的尺寸明显变得更加细小，为 78 μm。Er 增加到 0.3%，α-Al 相平均晶粒尺寸为 51 μm，分布变得更加均匀，且尺寸进一步细化。继续增加 Er 至 0.5%，α-Al 相平均晶粒尺寸为 45 μm。当 Er 超过 0.5%，α-Al 相的平均晶粒尺寸变化不明显。

如图 5b 所示，ZL114A 铝合金二次枝晶臂间距随 Er 含量变化曲线中，ZL114A 合金的二次枝晶臂间距为 47.13 μm。当加入 0.1%Er 时，二次枝晶臂间距为 35.88 μm，降低了 31.35%。随着 Er 含量的逐步增加，二次枝晶臂间距呈现出逐渐减小的趋势。Er 含量为 0.3%时，二次枝晶臂间距降低至 24.43 μm。此时，继续增加 Er，二次枝晶臂间距的减小速率开始放缓。当 Er 含量为 0.5%时，二次枝晶臂间距降至最低点 19.97 μm，降低了 49.14%。进一步增加 Er 至 0.7%时，二次枝晶臂的平均间距为 21.66 μm，出现了变大的趋势。由此可见，加入 0.5%Er 时，对ZL114A 铝合金的细化效果最佳。

2.2.2 Er 含量对共晶 Si 形貌的影响

图 6 和 7 分别为 ZL114A 铝合金在不同 Er 含量下共晶 Si 相微观组织形貌及长径比变化示意图。如图 6a 所示，ZL114A 铝合金中的共晶 Si 相为碎片状和板块状，平均尺寸为 27.82 μm(图 7a)，且分布不均匀。如图 6b~e 所示，当加入 0.1%的 Er 后，合金共晶 Si 相变为短棒状和针叶状，少数为圆粒状，平均

中国知网 https://www.cnki.net

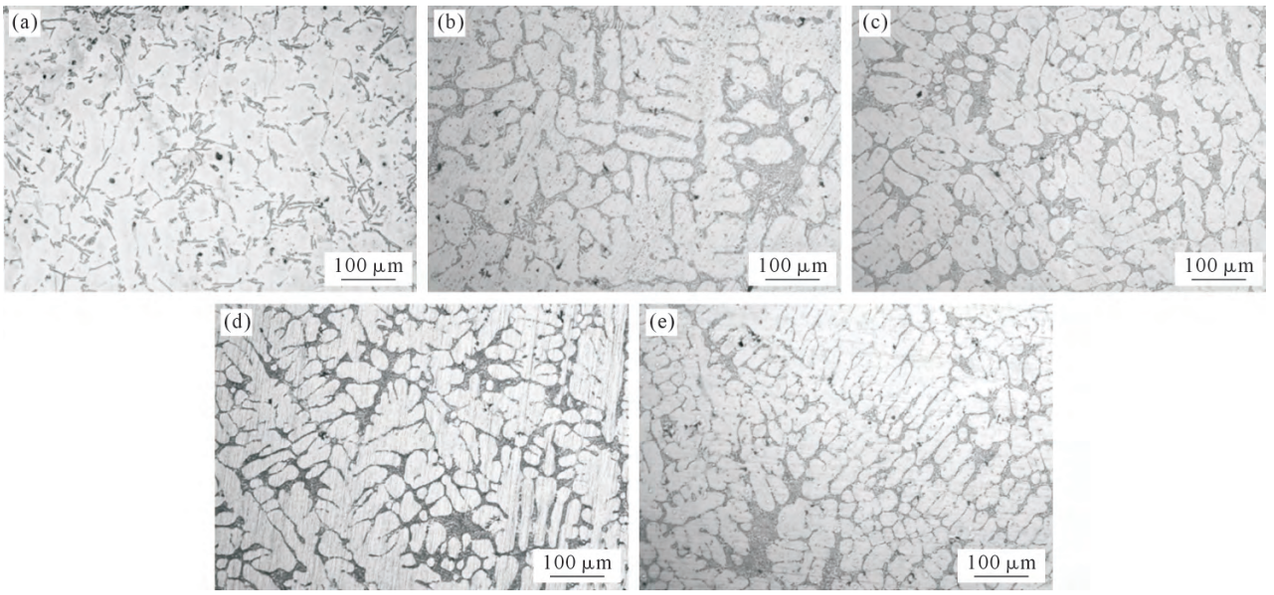


图 4 不同 Er 含量对 ZL114A 铝合金微观组织的影响：(a) 0%; (b) 0.1%; (c) 0.3%; (d) 0.5%; (e) 0.7%

Fig.4 Effects of different Er contents on the microstructure of the ZL114A aluminium alloy: (a) 0 wt.%; (b) 0.1 wt.% ; (c) 0.3 wt.%; (d) 0.5 wt.%; (e) 0.7 wt.%

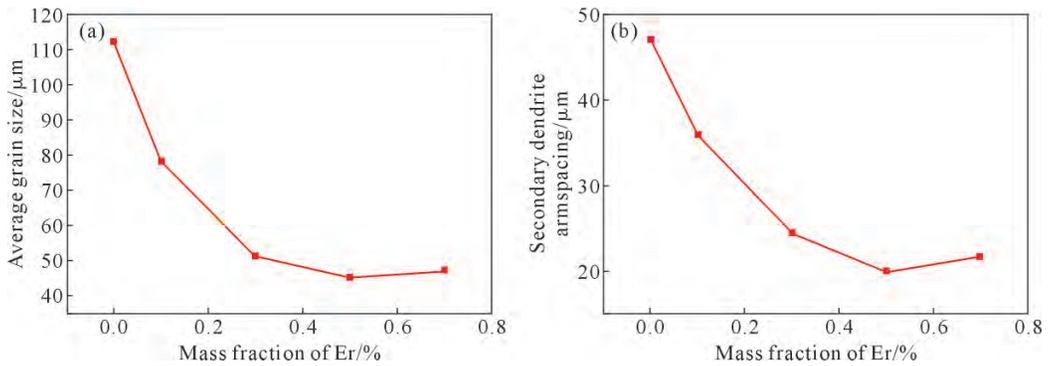


图 5 不同 Er 含量下 ZL114A 铝合金 α-Al 相晶粒尺寸和二次枝晶臂间距的变化曲线：(a) 晶粒尺寸；(b) 二次枝晶臂间距

Fig.5 Variation curves of the grain size and secondary dendrite arm spacing of the α-Al phase of the ZL114A aluminium alloy at different Er contents: (a) grain size; (b) secondary dendrite arm spacing

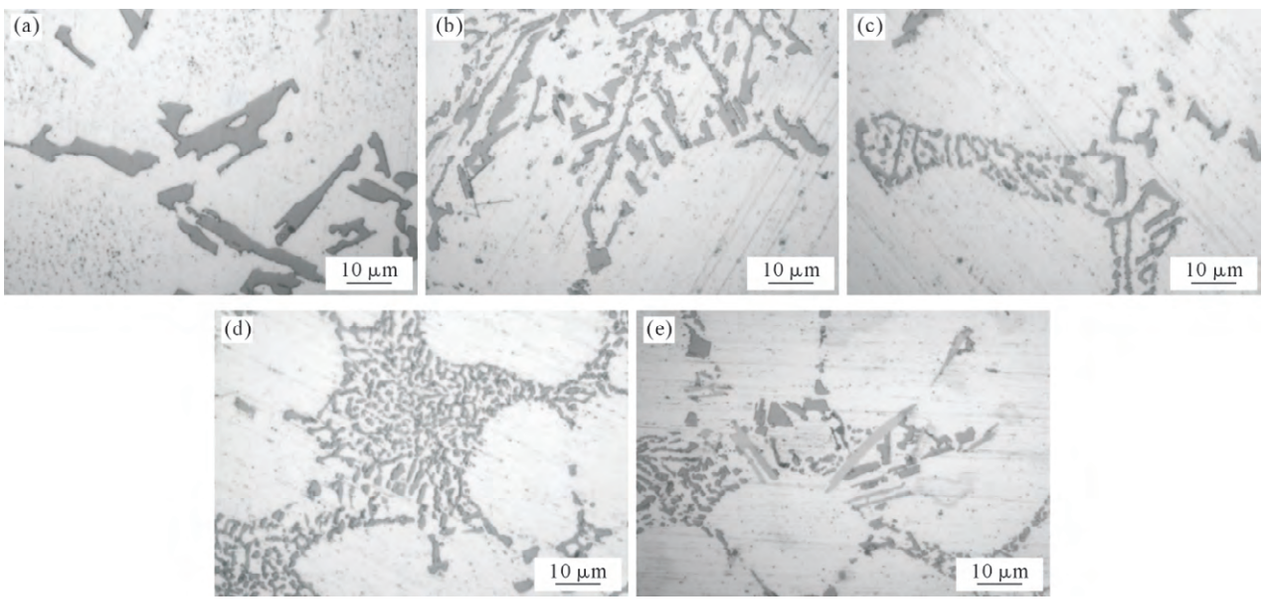


图 6 不同 Er 含量对 ZL114A 铝合金共晶 Si 相的影响：(a) 0%; (b) 0.1%; (c) 0.3%; (d) 0.5%; (e) 0.7%

Fig.6 Effects of different Er contents on the eutectic Si phase of the ZL114A aluminium alloy: (a) 0 wt.%; (b) 0.1 wt.%; (c) 0.3 wt.%; (d) 0.5 wt.%; (e) 0.7 wt.%

中国知网 https://www.cnki.net

尺寸减小到 14.21 μm。加入 0.3%Er 的 ZL114A 铝合金共晶 Si 相的形貌变得更细小，大部分转变为圆粒状，少部分为短棒状，平均尺寸减小到 5.87 μm。当 Er 含量为 0.5%，共晶 Si 相平均尺寸为 5.49 μm，且形貌完全转变为圆粒状，且分布均匀。随着 Er 含量的进一步增加，当 Er 含量达到 0.7%时，共晶 Si 相平均尺寸为 8.072 μm，开始出现增大的趋势。

如图 7b 所示，在 ZL114A 铝合金共晶 Si 相长径比变化曲线中，共晶 Si 长径比越接近 1，则其形貌越接近圆球状。由图 7 可知，随着 Er 含量的变化，合金共晶 Si 相长径比呈现出先减小后增大的趋势。ZL114A 铝合金共晶 Si 长径比为 8.11，结合图 6a 可知，其形貌为粗大板条状。当 Er 含量为 0.5%时，共晶 Si 相长径比达到最小值 1.78，减小了 78.05%，由图 6d 所示，共晶 Si 相呈现细小圆粒状。继续增加 Er 含量，共晶 Si 相长径比开始变大，当 Er 含量超过 0.5%时，如图 6e 所示，结合图 1 中 XRD 分析可知，ZL114A 铝合金的共晶 Si 相周围存在 Al_3Er 相。此时 Al_3Er 相变为粗大的白色针叶状，会割裂晶界，降低合金性能。

2.3 铸态和 T6 态下 Er 含量对 ZL114A 铝合金力学性能的影响

图 8 是不同 Er 添加量的 ZL114A 合金铸态和 T6 态拉伸性能。从图中可以看出，随着 Er 的加入，ZL114A 铝合金的抗拉强度和伸长率逐步提升，当加入 0.5%Er 时，合金抗拉强度和伸长率达到最大值。在加入 Er 前，ZL114A 铝合金在铸态下抗拉强度和伸长率分别为 145.3 MPa 和 4.73%，T6 态下抗拉强度和伸长率分别为 279 MPa 和 7.23%。加入 0.5%Er 后，铸态下合金抗拉强度和伸长率为 199 MPa、10.33%，分别提高了 26.98%和 54.21%。铸态下合金抗拉强度和伸长率为 315 MPa、14.34%，分别提高了 11.42%和 49.58%。当 Er 的含量大于 0.5%时，抗拉强度和伸长率开始下降。根据张丽凤等[15]研究发现，当 Er元素的添加超过一定程度时，铸态组织中 Al_3Er 初生相在晶内和晶界发生偏聚，造成晶界弱化从而降低合金的力学性能。结合上文图 4 和 5a 可知，此时合金 α-Al 晶粒尺寸开始增大，共晶 Si 的长径比变大使其形貌发生变化，同时，Al_3Er 相在晶界处不断长大，破坏晶界强度，导致 ZL114A 铝合金力学性能下降。

在 ZL114A 铝合金中，共晶硅属于脆性相，当外力过载时，共晶硅处形成微裂纹，然后裂纹扩展直至断裂从而与基体分离。刘斌等[16]假设硅相为球形，在平面应变条件下，球状共晶硅颗粒发生断裂的临界应力与共晶硅的直径存在以下关系：

$$\sigma_s=\sqrt{\frac{\pi E\gamma}{2(1-\nu^2)r}} \tag{3}$$

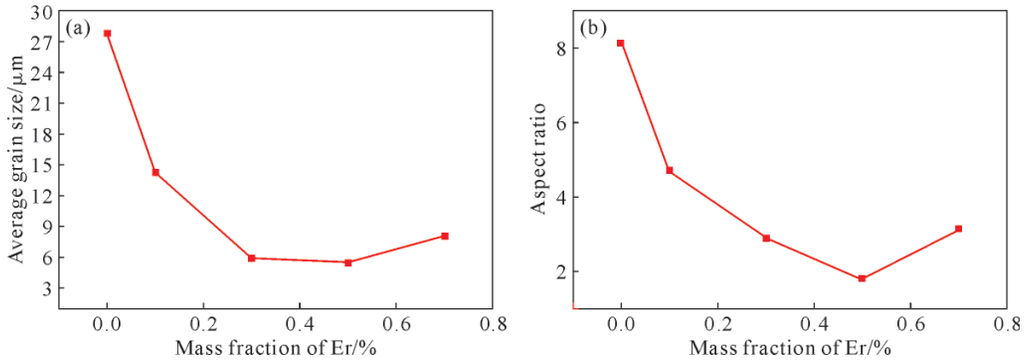


图 7 不同 Er 含量对 ZL114A 铝合金共晶 Si 平均晶粒尺寸和长径比的影响：(a) 平均晶粒尺寸；(b) 长径比

Fig.7 Effects of different Er contents on the average grain size and aspect ratio of eutectic Si in the ZL114A aluminium alloy: (a) average grain size; (b) length-diameter ratio

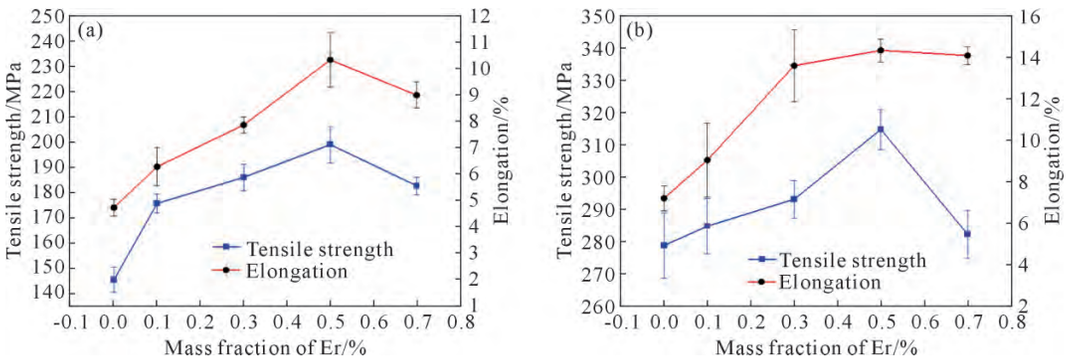


图 8 不同 Er 含量对 ZL114A 铝合金力学性能的影响：(a) 铸态；(b) T6 态

Fig.8 Effects of different Er contents on the mechanical properties of the ZL114A aluminium alloy: (a) as-cast state; (b) T6 state

中国知网 https://www.cnki.net

式中，E 为弹性模量；γ 为单位面积的表面自由能；ν 为泊松比；r 为硅颗粒半径。通过式(3)可以看出，硅颗粒半径越小，所需的断裂应力就越大。由图 6b~e 可知，当 ZL114A 铝合金加入 Er 后，Si 颗粒半径明显减小，从而其断裂应力增加，更不容易发生断裂。因此加入 Er 后，ZL114A 的抗拉强度提高，伸长率也增加。经过 T6 热处理后，ZL114A 铝合金的强度通过 Mg_2Si 颗粒沉淀析出得到增强。在合金中添加稀土 Er 可以改善共晶 Si 形貌，加速固溶处理过程中硅颗粒的细化，促进其与 Mg 的反应，减少固溶态 Mg 的含量，形成弥散强化相 Mg_2Si，并在合金凝固过程中融入 α-Al 固溶体中，从而增强 ZL114A 铝合金的力学性能[17]。

2.4 分析与讨论

在亚共晶成分的 ZL114A 铝合金的结晶过程中，α-Al 相不断地形核并生长，形成具有明显轮廓的枝晶结构。在此过程中，Si 原子被推向固液界面的前沿，导致 Si 原子的不断富集以及液相中 Si 原子浓度的持续增加，最终促进了共晶 Si 相的形成[18]。共晶硅的生长具有{111}晶面作为惯习面和 <211> 方向作为择优生长方向，表现出强烈的晶体生长各向异性，因此倾向于形成片状或棒状晶体[19]。

当向合金中添加 Er(0.1%~0.5%)时，随着 Er 原子的增多，逐渐与硅晶体{111}晶面上的台阶发生相互作用，使得被吸附的稀土 Er 在 Si 晶体中引入晶格缺陷，最终导致孪晶的形成[20-21]。随着孪晶密度的增加，共晶硅的生长方式发生改变，抑制了碎片状或棒状硅的生长，减缓了硅原子沿孪晶凹谷的生长速度[22]。共晶硅生长的各向异性因此降低，形态从针状或棒状转变为颗粒状，硅相的形貌也随之改变，从板片状转变为分支密集且相互交叉连接的纤维状和圆粒状共晶硅。

在稀土 Er 加入 ZL114A 铝合金的过程中，由于 Er 的高反应活性，它会与 Al 形成如 Al_3Er 的稀土化合物。这些化合物促进异质形核，细化枝晶结构，其中一部分 Al_3Er 析出相融入 α-Al 固溶体中，发挥固溶强化作用，而大部分 Al_3Er 则分布在晶界处，发生偏聚，起到钉扎作用，阻碍位错运动，增加合金的变形阻力，从而在不同程度上提高 ZL114A 铝合金的抗拉强度和伸长率[23]。然而，当 Er 超过 0.5%后，α-Al 固溶体达到饱和状态，析出相 Al_3Er 随着 Er 的继续添加而增大，并在晶粒和晶界上析出。过大的 Al_3Er 析出相可能导致晶界强度下降，进而降低合金的强度。因此，当 Er 添加量为 0.5%时，ZL114A 铝合金的综合力学性能达到最佳状态。

3 结论

(1)稀土 Er 对 ZL114A 铝合金初生相 α-Al 有细化作用。随着 Er 含量的添加，初生相 α-Al 结晶温度下降了 1.11 ℃，二次枝晶臂间距逐渐降低，当加入 0.5%Er 时，细化效果最佳。

(2)稀土 Er 可以有效改善 ZL114A 铝合金共晶 Si 相形貌。加入(0.1~0.5%)Er 后，共晶 Si 相逐渐由粗大的板条状转变为近球状，长径比从 8.11 减小到1.78。但当 Er 含量超过 0.5%，会引起共晶硅的粗化。

(3)添加适量稀土 Er 能提升 ZL114A 铝合金的力学性能。当合金中添加 0.5%Er 并经过 T6 热处理后，其抗拉强度提高了 11.43%，伸长率提高了52.8%，此时合金的综合力学性能最优。

参考文献：

[1] XU Y T, GUAN T Y, ZHANG Z F, BAI Y L, MAO W M. Semi-solid rheological squeeze casting process of ZL114A aluminum alloy thin-Wall complex casting[J]. Materials Science Forum, 2020, 993: 248-253.

[2] LI J H, SPÁĆIL I, WINKLHOFER J, HOFSTÄTTER F, GRIESEBNER S. A comparison of microstructure and casting defects of rheocasting and thixocasting Al-Si-Mg alloys[J]. Solid State Phenomena, 2023, 347: 61-66.

[3] LI J M, WANG Z Q, BAI J Y, XUE H, TIAN N, ZHAO Z H, QIN G W. Research progress on microstructure tuning of heat-resistant cast aluminum alloys[J]. Journal of Materials Science, 2024, 59: 10035-10057.

[4] XU Y W, ZHANG Y X, LI J P, WANG P, WANG J F, CHEN H W, SUN H Q, ZHAN H Y. Effects of Cr-addition on ageing response of an Al-Si-Mg die cast alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2024, 892: 146058.

[5] WANG B, XUE S B, WANG J X, LIN Z Q. Effect of combinative addition of mischmetal and titanium on the microstructure and mechanical properties of hypoeutectic Al-Si alloys used for brazing and/or welding consumables[J]. Journal of Rare Earths, 2017, 35 (2): 193-202.

[6] MOUSAVI G S, EMAMY M, RASSIZADEHGHANI J. The effect of mischmetal and heat treatment on the microstructure and tensile properties of A357 Al-Si casting alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 556: 573-581.

[7] 周慧慧，杨宁源，张志豪. 稀土 La 及 Sn 对铸造铝合金组织、力学和阻尼性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程，2021, 50(3): 932-938.
ZHOU H H, YANG N Y, ZHANG Z H. The influence of rare earth La and Sn on the microstructure, mechanical properties, and damping performance of cast aluminum alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2021, 50(3): 932-938.

[8] 方文倩，沈见冉，严继康，冷崇燕，甘国友. Er 含量对 ZL201A 铝合金组织和力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程，2023, 52 (7): 2326-2334.

中国知网 https://www.cnki.net

FANG W Q, SHEN J R, YAN J K, LENG S Y, GAN G Y. Effect of Er content on microstructure and mechanical properties of ZL201A aluminum alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2023, 52(7): 2326-2334.

[9] 刘怀冰，雷璇璇，赵旭，吕林虎，何奕宝，朱行行，杜晓东. 稀土 Er 改性 Al-Si-Mg-Cu 合金的组织性能[J]. 材料热处理学报，2020, 41(11): 22-29.
LIU H B, LEI X X, ZHAO X, LYU L H, HE Y B, ZHU X H, DU X D. Microstructure and properties of rare earth Er-modified Al-Si-Mg-Cu alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2020, 41(11): 22-29.

[10] 唐鹏，刘裔源，黄惠毅，胡治流，赵艳君. 稀有元素 Er 对Al-Si-Fe-Co 合金组织与性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程，2020, 49(10): 3528-3535.
TANG P, LIU Y Y, HUANG H Y, HU Z L, ZHAO Y J. The influence of rare element Er on the microstructure and properties of Al-Si-Fe-Co alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(10): 3528-3535.

[11] 闫洪. Er 和 Ce 对铸造 ZL101A 铝合金组织与力学性能的作用对比研究[J]. 铝加工，2023(6): 17-19.
YAN H. Contrast study on effects of Er and Ce on the microstructure and mechanical properties of cast ZL101A aluminum alloy[J]. Aluminium Fabrication, 2023(6): 17-19.

[12] SHI D Q, GAO G L, GAO Z W, WANG X D. Effect of solution treatment on microstructure and mechanical properties of ZL114A alloy[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 79: 117-122.

[13] 张利民，杨志怀，张蓉，陈亮. 熔体超温处理对 ZL114A 凝固组织的影响[J]. 铸造，2009, 58(4): 338-340.
ZHANG L M, YANG Z H, ZHANG R, CHEN L. Effect of superheat treatment on solidification structure of ZL114A alloy[J]. Foundry, 2009, 58(4): 338-340.

[14] 刘全坤，祖方遒，李萌盛. 材料成形基本原理[M]. 北京：机械工业出版社，2013.
LIU Q K, ZU F Q, LI M S. Fundamentals of materials forming processes[M]. Beijing: China Machine Press, 2013.

[15] 张丽凤，王社则，田博彤. 稀土 Er 对汽车轮毂用 A356 铝合金组织与性能的影响[J]. 上海金属，2019, 41(3): 67-72.
ZHANG L F, WANG S Z, TIAN B T. Effect of rare earth erbium on microstructure and properties of A356 aluminum alloy for automobile wheel[J]. Shanghai Metals, 2019, 41(3): 67-72.

[16] PAUTY E, LABOUDIGUE B, ETAY J. Numerical simulation of the flow and the solid transport when tilting a holding furnace[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2000, 31: 207-214.

[17] 樊振中，王端志，王鲲鹏，熊艳才，陆政，郑卫东. Te、Sb 对 ZL114A 合金 T6 态微观组织与力学性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程，2018, 47(12): 3880-3886.
FAN Z Z, WANG D Z, WANG K P, XIONG Y C, LU Z, ZHENG W D. Effect of Te, Sb addition on the microstructure and mechanical properties of ZL114A alloy in T6 state[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(12): 3880-3886.

[18] 江超华，李晶鑫，朱戴博，曹普立，张雅婷，李娟，张逸文，朱玉龙，刘吉荣. Er 含量对铸态 6061 铝合金组织和性能的影响[J]. 材料热处理学报，2023, 44(10): 102-113.
JIANG C H, LI J X, ZHU D B, CAO P L, ZHANG Y T, LI J, ZHANG Y W, ZHU Y L, LIU J R. The influence of Er content on the microstructure and properties of as-cast 6061 aluminum alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2023, 44(10): 102-113.

[19] 董光明，孙国雄，廖恒成，韩正铜. 铝硅合金中共晶硅的变质机理：杂质诱发共生成对孪晶[J]. 材料科学与工艺，2008, 16(1): 34-37.
DONG G M, SUN G X, LIAO H C, HAN Z T. Modification mechanism of eutectic silicon in Al-Si alloys: Impurity-induced coupled twinning[J]. Materials Science and Technology, 2008, 16(1): 34-37.

[20] 闫洪，张敬奇，张苏. 稀土对铝合金变质处理的研究进展[J]. 材料导报，2013, 27(22): 285-287.
YAN H, ZHANG J Q, ZHANG S. Research progress on rare earth aluminium alloy modification[J]. Materials Reports, 2013, 27(22): 285-287.

[21] 邢泽炳，聂祚仁，邹景霞，高旭东. Al-Er 合金铸锭中饵的存在形式及作用研究[J]. 中国稀土学报，2007(2): 234-238.
XING Z B, NIE Z R, ZOU J X, GAO X D. Existence form and effect of erbium in Al-Er alloy[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2007(2): 234-238.

[22] 隆丹宁，张修海，黄思娟，苏广才. 稀土 Er 对改良铸造铝硅合金组织和性能的影响[J]. 铸造技术，2015, 36(11): 2728-2731.
LONG D N, ZHANG X H, HUANG S J, SU G C. Effects of Er on microstructure and properties of aluminium-silicon alloy[J]. Foundry Technology, 2015, 36(11): 2728-2731.

[23] 刘博. 稀土 Er 对 Al-Mg 合金组织和性能的影响研究[J]. 功能材料，2022, 53(1): 1020-1024.
LIU B. The Effect of rare earth Er on microstructure and properties of Al-Mg alloy[J]. Journal of Functional Materials, 2022, 53(1): 1020-1024.

中国知网 https://www.cnki.net