

微量元素 Cr 对 ZL101 合金微观组织和力学性能的影响

崔晓明, 崔昊, 白朴存, 刘飞, 杜赵新, 赵学平

(内蒙古工业大学 材料科学与工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要: 采用真空电磁感应熔炼炉制备了 ZL101-xCr(x=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.8, 质量分数, %) 铝合金。利用 OM、XRD、SEM、EDS 及 TEM 等测试方法, 表征了不同 Cr 含量实验合金微观组织, 并测试其力学性能。结果表明: 实验合金主要物相包括初晶 α -Al、(α -Al+Si)共晶、 $\text{Al}_3\text{Cr}_4\text{Si}_4$ 、 β - $\text{Al}_{12}(\text{Cr,Fe})_3\text{Si}_2$ 、富 Fe 相(β - Al_5FeSi 和 π - AlSiMgFe)。添加微量元素 Cr 后的实验合金组织均得到细化, 随着 Cr 含量的增加, α -Al 树枝晶趋于等轴晶转变, 共晶组织区域变窄, 富 Fe 相和共晶 Si 尺寸变小, 在合金共晶组织中形成了 $\text{Al}_3\text{Cr}_4\text{Si}_4$ 、 β - $\text{Al}_{12}(\text{Cr,Fe})_3\text{Si}_2$ 相。添加 Cr 元素能够提高合金的过冷度, 对细化合金组织具有积极作用。当 Cr 质量分数为 0.3% 时, 铸造合金组织细化变质效果及其力学性能最好, 抗拉强度、伸长率分别为 182.88 MPa、3.38%。

关键词: ZL101 合金; 微量元素 Cr; 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: 1002-185X(2023)08-2811-08

随着材料轻量化发展, 铝合金作为目前可大规模工业化生产的轻质金属材料, 受到人们越来越多的关注。ZL101 合金具有密度小、比强度、比刚度高, 以及优良的铸造性能、气密性、力学性能等, 已经成为汽车、高铁等制造行业中应用广泛的铸造铝硅合金材料^[1-4]。然而, 使用 ZL101 材料生产的零部件, 在服役过程中, 合金中粗大的树枝晶组织、富 Fe 相及共晶 Si 等, 能够作为裂纹源优先萌生微裂纹, 减少了零部件的使用寿命, 甚至进而使材料发生断裂导致失效, 这限制了铝合金进一步的发展与应用^[5-6]。通常, 采用添加微量合金化元素(如 Sr、Na、RE、Cr 等)作为变质剂的方法, 能够改善 ZL101 铝合金的微观组织和力学性能^[7-10]。

众所周知, Cr 元素在钢铁材料中的应用较为常见, 添加适量 Cr 元素后钢材的硬度、耐磨性、耐腐蚀性均得到提高。近年来, 科研人员在使用 Cr 元素改性铝合金方面做了许多研究工作, 取得了一些令人满意的研究成果及宝贵经验^[11-13]。相类似地, 研究发现在铝合金中添加微量 Cr 元素, 也能改善合金韧性和降低应力腐蚀开裂敏感性, 并且形成的含 Cr 化合物对铝合金还有一定的强化作用。例如, 房洪杰^[14]等研究了微量元素 Cr 对 7136 铝合金组织和性能的影响, 结果显示微量过渡族元素 Cr 能细化 7136 铸造合金组织, 产生的弥散相使得

合金的综合力学性能增加。张新明^[15]等研究了 Cr 元素对 Al-Mg-Si-Cu 铝合金组织与性能的影响, 结果发现 Cr 元素可以细化铸造合金的组织, 使合金的强度与塑性得到显著的提高。Tuncay^[16]等研究了 Cr、Zr 添加剂对 A356 合金组织和性能的影响, 确定了在 A356 合金中添加 Cr 元素合金化时, 形成了 Fe-Si-Cr 金属间化合物。Strobel^[17]等研究了 6xxx 系铝合金中的弥散相, 发现在高强度 Al-Mg-Si 合金中添加 Mn 和 Cr 会导致弥散相的形成, 弥散相的主要作用是提高断裂韧性和控制晶粒结构。综上所述, 目前采用微量元素 Cr 作变质剂改性的铝合金材料体系, 多集中在可热处理强化的 6000 系、7000 系铝合金, 在上述这些合金体系中添加适量 Cr 元素后, 弥散强化作用对改善合金力学性能具有重要作用。然而, 针对铝硅合金体系, 添加 Cr 元素对其微观组织及力学性能影响的研究鲜有报道。因此, 需要开展不同 Cr 元素含量对铝硅合金微观组织演变的影响规律, 弄清 Cr 元素的存在形式及作用机理, 建立含 Cr 铝合金组织与力学性能的联系, 筛选与优化 Cr 添加量。本实验以 ZL101 合金为研究对象, 采用单独添加微量元素 Cr 作为变质剂的方法, 系统研究 Cr 元素对 ZL101 合金微观组织及力学性能影响, 为开发新型铝合金提供实验原型和理论依据。

收稿日期: 2022-09-28

基金项目: 内蒙古科技计划项目(201802029); 内蒙古自治区科技重大专项(zdxx2018031); 内蒙古自治区研究生科研创新项目(S20210180Z)

作者简介: 崔晓明, 男, 1981 年生, 博士, 副教授, 内蒙古工业大学材料科学与工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051, 电话: 0471-6575752, E-mail: xmcui@imut.edu.cn

1 实验

实验原材料选择商用 ZL101 合金，合金化元素 Cr 以 Al-5%Cr 中间合金的形式加入。熔炼前，对金属型模具进行内腔去油污、刷涂料（水玻璃:ZnO₂=3:1）并烘干模具后，再对模具进行 300 °C 预热处理。采用真空电磁感应熔炼炉（型号 ZG-0.01）熔炼，熔炼过程中炉体抽真空（0.08~0.09 MPa）并通高纯氩气（99.95%）进行保护。合金熔液加热至 700 °C，在炉膛中保温 10 min 进行浇注，锭模浇满后随炉冷却 30 min 开炉，最终获得 Φ100 mm×100 mm 的实验合金铸锭。利用 OPTIMA 700DV 电感耦合等离子体发射光谱仪（ICP-OES）测试合金中主要元素的含量，结果见表 1，其中编号为理论 Cr 元素添加量。从铸锭下部中间部位线切割截取 10 mm×10 mm×10 mm 试样，分别进行打磨、抛光后进行组织观察。

利用光学显微镜（型号 Olympus-GX51F）观察合金金相组织，每个试样选取 10 张照片，利用 Image J 统计 α-Al 晶粒大小。采用 X 射线衍射仪（型号 D/MAX-2500/PC）分析合金主要物相，使用扫描电子显微镜（型号 FEI QUANTA 650 FEG）及其配置的能谱仪对合金微观组织形貌及第二相能谱进行测试。使用差热-热重同步热分析仪（型号 STA 409 PC Luxx）测试合金升温、降温过程中的差热（DSC）曲线。选用拉伸台（型号 Gatan DEBEN/MT10204 2KN）进行室温拉伸试验，拉伸试样尺寸见图 1 所示。采用 FEI Talos 200X 高分

表 1 实验合金化学成分

Table 1 Chemical composition of test alloys (wt%)

| Alloy | Si | Mg | Fe | Cr | Al |
|-----------|-------|-------|-------|------|------|
| ZL101-0Cr | 7.175 | 0.295 | 0.183 | 0 | Bal. |
| ZL101-1Cr | 7.125 | 0.311 | 0.170 | 0.10 | |
| ZL101-2Cr | 7.093 | 0.289 | 0.169 | 0.19 | |
| ZL101-3Cr | 7.110 | 0.315 | 0.167 | 0.28 | |
| ZL101-5Cr | 7.105 | 0.305 | 0.186 | 0.48 | |
| ZL101-8Cr | 7.201 | 0.299 | 0.173 | 0.79 | |

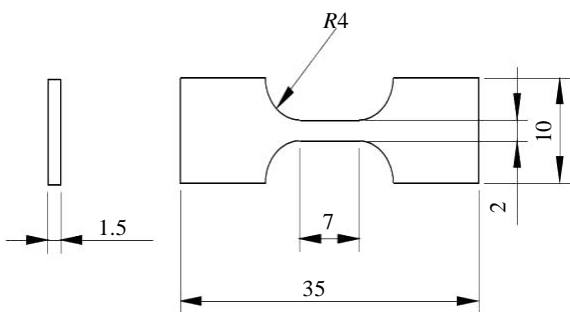


图 1 拉伸试样尺寸

Fig.1 Dimensions of tensile test sample

辨透射电子显微镜及其配置的能谱仪，进行合金组织、选区电子衍射（SAED）及能谱（EDS）分析。

2 结果与分析

2.1 XRD 物相分析

图 2 为不同 Cr 添加量 ZL101 合金 XRD 图谱。由图可知，合金加入 Cr 元素后主要物相包括 α-Al，β-Al₅FeSi，Al₁₃Cr₄Si₄ 和共晶 Si。当 Cr 含量大于 0.28% 时，XRD 图谱中出现了新的衍射峰（图 2 中 20°~60° 之间黑色实心圆标记的峰），通过比对 PDF 卡片，确定该衍射峰强度来自 Al₁₃Cr₄Si₄ 贡献。随着合金中 Cr 元素添加量的增加，Al₁₃Cr₄Si₄ 对应的衍射峰强度明显增加，表明 Al₁₃Cr₄Si₄ 含量增多。并且，α-Al、Al₅FeSi 衍射峰的位置均向右发生偏移，说明基体 α-Al 固溶了部分合金化元素 Cr，使其晶格常数发生变化，导致衍射峰的位置发生偏移。

2.2 合金组织分析

图 3 为不同 Cr 含量铸造 ZL101 合金中 α-Al（图 3a~3f）和共晶 Si（图 3a'~3f'）金相组织。从图 3a、3a' 中可以看出，ZL101 铸造合金组织主要包括：典型树枝状的初生 α-Al 基体，区域相对较宽且沿晶界呈连续网状结构分布的 α-Al+Si 共晶组织，以及尺寸较大的灰色针状富铁相。相对于未添加 Cr 元素而言（图 3a、3a'），添加 Cr 元素后的 ZL101 合金组织均得到细化。初生 α-Al 树枝晶趋于等轴晶转变，α-Al+Si 共晶组织的区域变窄（见图 3b~3f），ZL101 合金中条状或块状的共晶硅趋于纤维状转变（见图 3b'~3f'）。随着 Cr 含量增加，α-Al 晶粒尺寸及晶界处共晶组织区域呈先减小后增大的趋势。

为了评估 Cr 含量对 ZL101 合金的细化效果，对合金中初生 α-Al 的晶粒大小分布及平均晶粒尺寸进行了统计，结果见图 4 所示。从图 4 中可以看出，相比于未添加 Cr 元素合金而言，添加 Cr 元素的合金 α-Al

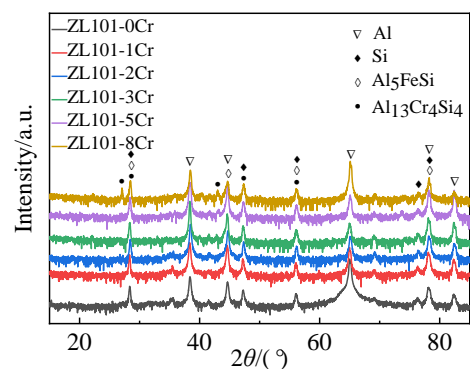


图 2 不同 Cr 含量 ZL101 合金 XRD 图谱

Fig.2 XRD patterns of the ZL101 alloys with different Cr contents

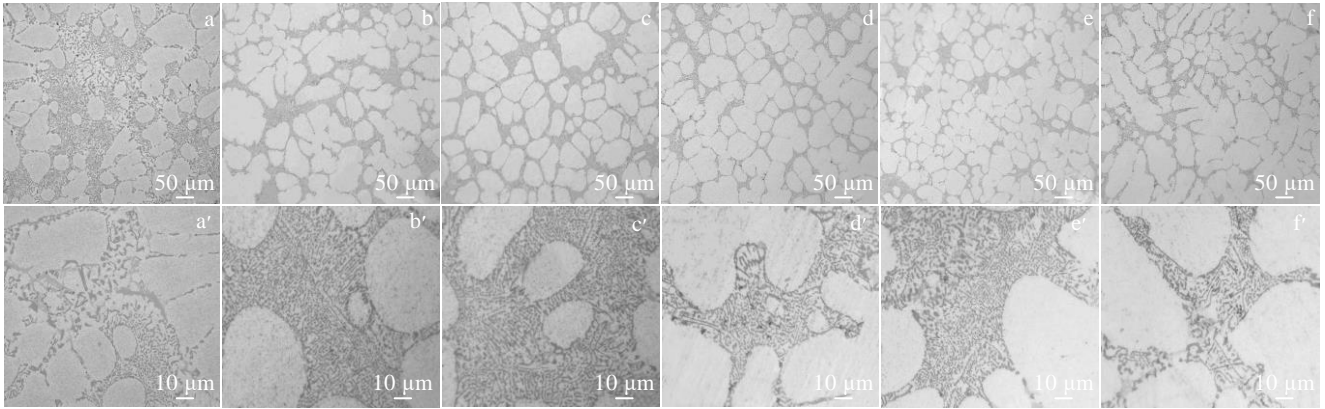


图 3 不同 Cr 含量 ZL101 合金中 α -Al 和共晶 Si 金相组织

Fig.3 OM images of α -Al and eutectic Si in ZL101 alloys with different Cr contents: (a, a') ZL101-0Cr, (b, b') ZL101-1Cr, (c, c') ZL101-2Cr, (d, d') ZL101-3Cr, (e, e') ZL101-5Cr, and (f, f') ZL101-8Cr

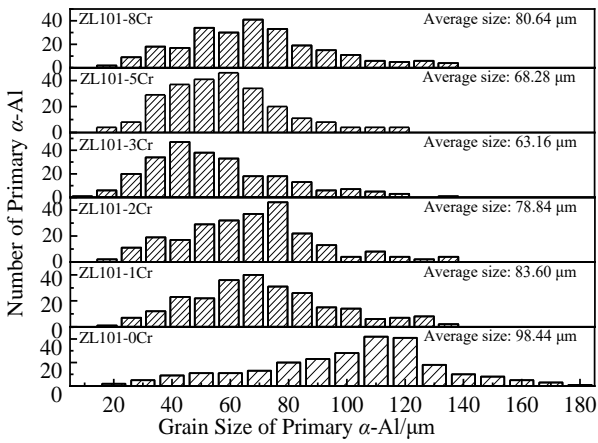


图 4 不同 Cr 含量 ZL101 合金中初晶 α -Al 晶粒尺寸分布

Fig.4 Grain size distribution of primary α -Al in ZL101 alloys with different Cr contents

晶粒更细小、均匀度更好。随着 Cr 含量的增加，ZL101 合金中初生 α -Al 晶粒的平均尺寸呈先减小后增大的趋势，当 Cr 含量为 0.28% 时，合金中 α -Al 基体平均晶粒尺寸最小，约为 63.16 μm ，比未添加 Cr 元素的基体 α -Al 平均晶粒尺寸减小了约 35.8%。这说明在 ZL101 合金中添加适量 Cr 元素能较好的细化基体 α -Al 粒晶。

图 5 为不同 Cr 含量 ZL101 合金 SEM 组织。观察未添加 Cr 元素的合金（图 5a）组织发现，在主要沿晶界分布的共晶组织中，存在尺寸较大的亮白色棒状相及其近邻灰白色岛状相。添加 Cr 元素后，实验合金共晶区域组织中的亮白色棒状相及灰白色岛状相尺寸（长径比）减小，数量有所减少。当 Cr 含量为 0.28% 时，可以明显的观察到合金共晶组织中形成了新的细小白色颗粒相，并且这些颗粒相随着 Cr 含

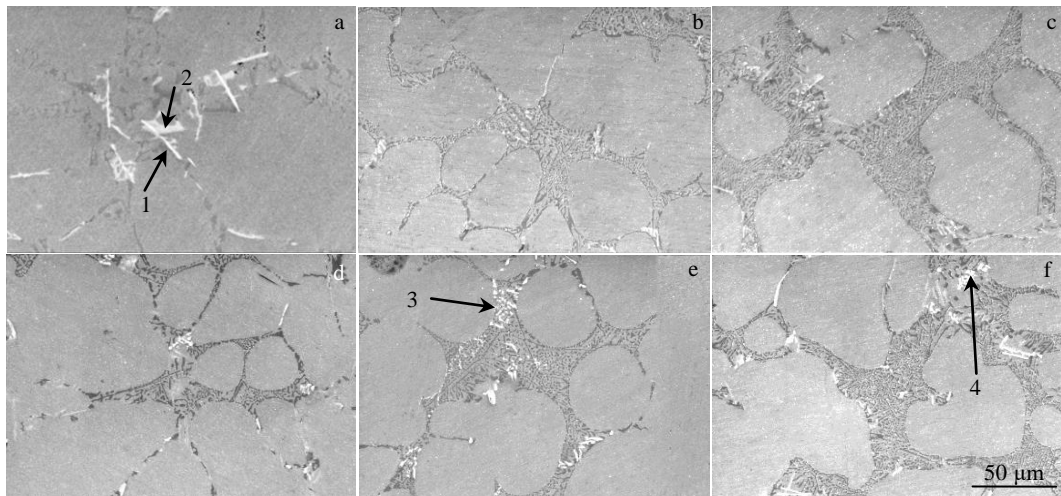


图 5 不同 Cr 含量 ZL101 合金 SEM 组织

Fig.5 SEM images of ZL101 alloys with different Cr contents: (a) ZL101-1Cr, (b) ZL101-2Cr, (c) ZL101-3Cr, (d) ZL101-5Cr, and (e) ZL101-8Cr

量的增加，其数量增多，且有聚集长大的趋势。通过上述 XRD 测试结果初步推测这些颗粒相，可能是含 Cr 化合物。

为了确定图 5 中白色棒状相、灰白色岛状相以及白色颗粒相的化学组成，选定了图 5 中 4 个共晶组织点进行 EDS 分析，结果见表 2 所示。从表中可以看出，白色棒状相（图 5a 中选定点“1”）由 Al、Si、Fe 元素构成，除去基体 α -Al 的影响，初步推断其为 β -Al₅FeSi 相。灰白色岛状相（图 5a 中选定点“2”）主要由 Al、Si、Mg、Fe 元素构成，为 π -AlSiMgFe 相。从表 2 中选定点“3”和“4”的结果可以看出，二者 Cr 元素含量较高，说明这 2 个选定点对应的白色颗粒相均为含 Cr 化合物。进一步分析发现，选定点“3”主要由 Al、Cr、Fe、Si 元素组成，其中 Fe 元素的含量比选定点“4”的高，Al:(Cr,Fe):Si 原子比约为 12:3:2，推断该化合物为 β -Al₁₂(Cr,Fe)₃Si₂，其与文献[18,19]报道相符。

然而，选定点“4”主要由 Al、Cr、Si 元素组成，含有少量的 Fe 元素。通过 Cr:Si 元素原子比约为 1:1，初步推断该富 Cr 化合物为 β -Al₁₃Cr₄Si₄。

为了解 ZL101 合金中 Cr 元素的存在形式及分布情况，对 ZL101-3Cr 合金中包含不同形态第二相的共晶组织进行了 EDS 面扫描分析，结果见图 6 所示。可以看出，基体主要为 Al 元素，Cr 元素在基体中有少量的固溶。连续网状结构的共晶组织，主要由 Al 和 Si 元素富集。对共晶组织中不同形态的第二相（图 6a~6c 中箭头标记的位置）进一步观察发现，图 6a 中箭头标记的颗粒相以 Al、Si、Cr 元素分布为主，根据上述 EDS 点扫描定量分析可知，该含 Cr 化合物应为 β -Al₁₃Cr₄Si₄。图 6b 中尺寸较小的颗粒相或短棒状相均以 Al、Si、Cr、Fe 元素分布为主，其中 Cr 元素分布情况与 Fe 元素基本一致且含量较高，说明 Cr 元素于 Fe 相之中形成 β -Al₁₂(Cr,Fe)₃Si₂ 相。相较于 Si 而言，

表 2 图 5 中箭头标记点的 EDS 结果

Table 2 EDS results of the points arrow marked in Fig.5

| Point | Second phases | Element content, $\omega/\%$ | | | | | Element content/at% | | | | |
|-------|--|------------------------------|-------|-------|-------|-------|---------------------|-------|-------|-------|-------|
| | | Al | Si | Fe | Cr | Mg | Al | Si | Fe | Cr | Mg |
| 1 | β -Al ₅ FeSi | 58.16 | 24.55 | 17.29 | - | - | 64.59 | 26.15 | 9.26 | - | - |
| 2 | π -AlSiMgFe | 50.37 | 26.06 | 8.48 | - | 15.09 | 52.33 | 26.01 | 4.26 | - | 17.40 |
| 3 | β -Al ₁₂ (Cr,Fe) ₃ Si ₂ | 59.69 | 12.77 | 14.36 | 13.18 | - | 69.59 | 9.31 | 10.38 | 10.72 | - |
| 4 | β -Al ₁₃ Cr ₄ Si ₄ | 50.02 | 19.78 | 1.42 | 28.78 | - | 59.09 | 22.46 | 0.81 | 17.64 | - |

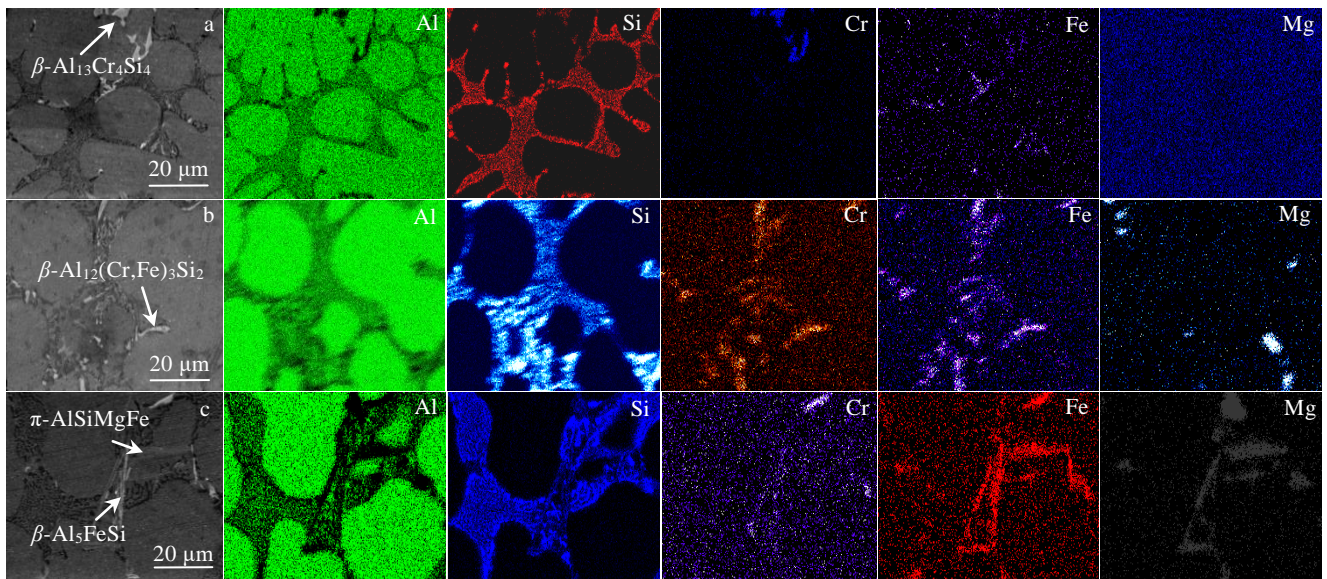


图 6 ZL101-3Cr 合金中包含不同形态第二相的共晶组织及 EDS 元素面扫描

Fig.6 SEM images and EDS element mappings of eutectic structure containing second phases with different morphologies in ZL101-3Cr alloy

Cr 元素和 Fe 元素原子半径大小更为接近, 所以 ZL101 合金中 Cr 元素在铁相中的固溶度最大, 易与 Fe 相结合形成富 Cr 相, 抑制 Fe 相生长。然而, 在图 6c 中箭头所标记的富铁相 β -Al₃FeSi、 π -AlSiMgFe 中, Cr 元素的分布较少, 相应的这些棒状相富铁相的尺寸相对较大。这表明 Cr 元素主要以化合物的形式存在, 如 β -Al₁₃Cr₄Si₄ 和 β -Al₁₂(Cr,Fe)₃Si₂, 同时少量 Cr 固溶于基体中, 适量 Cr 元素进入富铁相中, 能够抑制富铁相的尺寸。

2.3 合金差热分析

图 7 为不同 Cr 含量 ZL101 合金的 DSC 曲线, 其中图 7a 为升温曲线, 图 7b 为降温曲线, 二者温度变化速率均为 10 °C/min。从 ZL101 铝合金 DSC 升温曲线 (图 7a) 可以看出, 合金升温过程存在 2 个明显的吸热峰 Peak 1 和 Peak 2。靠近左侧存在的尖锐吸热峰 Peak 1 对应温度约为 573 °C, 由 Al-Si 二元相图可知, 铝硅合金在 577 °C 时发生共晶转变: 升温过程的反应为 Al+Si—L(液), 这表明此处形成的尖锐吸热峰是由共晶 Si 发生相变造成的。靠近右侧的吸热峰 Peak 2 应该是铝合金熔化发生液相转变造成的。

采用外推法对 DSC 曲线进行处理^[20], 即 (图 7a) 升温曲线中熔化吸热曲线开始时的切线与基线的交点为 T_M , 降温曲线 (图 7b) 共晶反应的初始形核温度为 T_N , 过冷度 $\Delta T = T_M - T_N$ 。由图 7a、7b 分别得到 5 组 ZL101 合金的 T_M 和 T_N 值并计算其各自的 ΔT 值, 结果如表 3 所示。由表 3 可知, 随着微量元素 Cr 加入量

表 3 不同 Cr 含量的 ZL101 合金过冷度结果

Table 3 Undercooling results of ZL101 alloys with different Cr contents

| Alloy | $T_M/^\circ\text{C}$ | $T_N/^\circ\text{C}$ | $\Delta T/^\circ\text{C}$ |
|-----------|----------------------|----------------------|---------------------------|
| ZL101-0Cr | 572.04 | 571.01 | 1.03 |
| ZL101-1Cr | 573.44 | 572.09 | 1.35 |
| ZL101-2Cr | 573.97 | 572.56 | 1.41 |
| ZL101-3Cr | 573.19 | 571.08 | 2.11 |
| ZL101-5Cr | 573.28 | 571.25 | 2.03 |
| ZL101-8Cr | 568.41 | 566.93 | 1.48 |

的增加, ZL101 合金过冷度的值呈先增大后减小的趋势。当 Cr 元素加入量为 0.28% 时, 合金过冷度的值达到最大, 为 2.11 °C, 继续增大 Cr 含量, ZL101 合金过冷度逐渐减小。这表明添加适量 Cr 元素后能够增大合金共晶反应的过冷度, 导致共晶组织区域变窄, 共晶 Si 变得细小, 这对提升合金的室温力学性能具有积极作用。

2.4 ZL101 合金 TEM 分析

图 8 为 ZL101-3Cr 合金中 Al₁₃Cr₄Si₄ 相的 TEM-HRTEM-SAED 及 EDS 分析结果。图 8a 中箭头所指为黑色颗粒状化合物 Al₁₃Cr₄Si₄ 相, 尺寸约 6 μm 。该颗粒状化合物选定区域的 HRTEM 像见图 8b。图 8c 为图 8b 白方框区的 HRTEM 像, 图 8d 是图 8c 经傅里叶变换 (FFT) 后得到的 SAED 花样, 对应 8a 的 EDS 元素面分布 (Mapping) 见图 8e~8h。由元素分布可知, 块状化合物为富 Cr 相, 图 8c 的晶格条纹测得晶面间距 0.549 nm, 对图 8c 进行傅里叶变换 (FFT) 后, 发现衍射斑点清晰明锐, 对其进行 SAED 分析确定为 Al₁₃Cr₄Si₄, 晶带轴为 [110]。Al₁₃Cr₄Si₄ 的晶体结构为面心立方结构 (fcc), 空间群为 F-43m。

图 9 为 β -Al(Cr,Fe)Si 相 TEM-SAED 及 HAADF-STEM 和 EDS 分析结果。从图 9a 可以看出, 合金中存多个形状的化合物, 化合物含 Al、Si、Cr、Fe 4 种元素, 其中 Cr、Fe 元素分布位置一致。由图 9d、9e、9f 元素分布可知, Cr 元素进入合金内部后, 在共晶区域富集, 与 Si 和 Fe 元素发生化合反应, 生成 β -Al(Cr,Fe)Si 四元化合物, 析出的富 Cr 相边角圆润, 与共晶互相依附; 这些共晶 Si 为 β -Al(Cr,Fe)Si 相异质形核提供了充足的 Si 元素, 形核长大后的 β -Al(Cr,Fe)Si 相阻碍了共晶 Si 向各个方向继续长大, Si 元素含量变化也使得合金的过冷度发生变化; 而三角状形貌改善了针状 Fe 相对体的割裂作用, 减小了共晶区域面积。合金的变质处理, 即合金中因添加某些元素或凝固过程中改变某些环境因素, 导致某些相生长机理发生改变, 进而发生形貌尺寸的变化。Cr 元素通过在共晶区域富集,

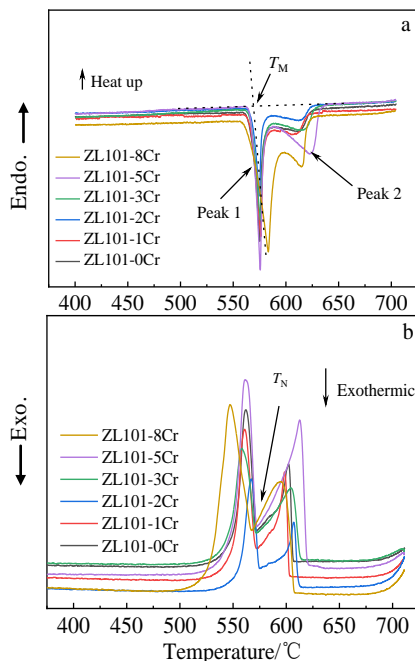


图 7 不同 Cr 含量 ZL101 合金的 DSC 曲线

Fig.7 DSC curves of ZL101 alloys with different Cr contents: (a) warming curves and (b) cooling curves

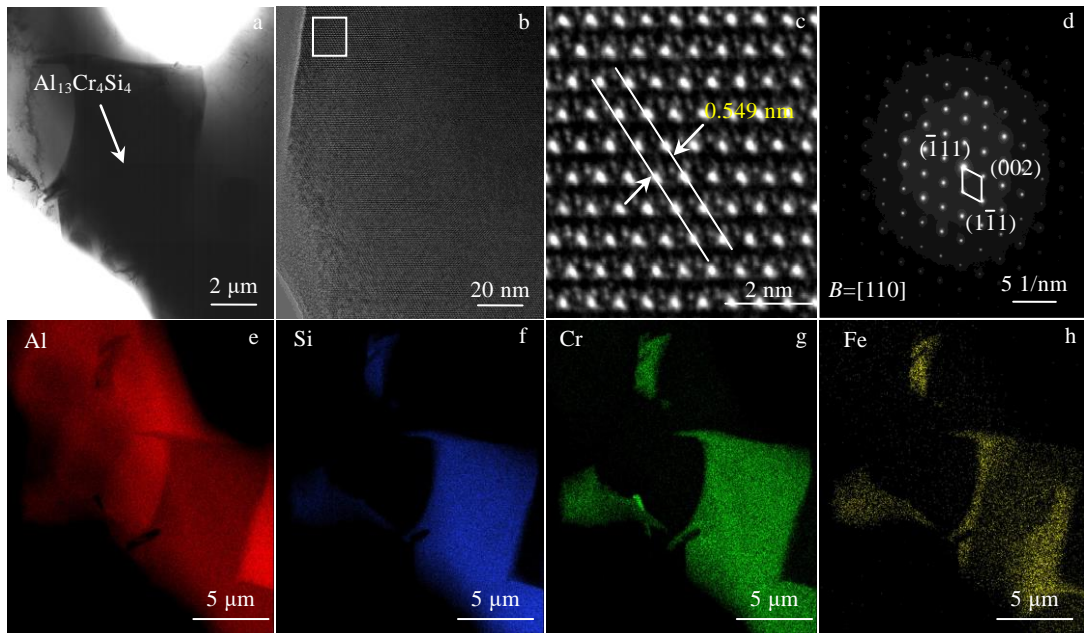


图 8 ZL101-3Cr 合金中 $Al_{13}Cr_4Si_4$ 相的 TEM-HRTEM-SAED 及 EDS 分析结果

Fig.8 TEM (a) and HRTEM images (b) of $Al_{13}Cr_4Si_4$ phase for ZL101-3Cr alloy; HRTEM image of white box area in Fig.8b (c); and SAED pattern of Fig.8c by FFT transform (d); corresponding EDS mappings of element Al (e), Si (f), Cr (g), and Fe (h) of Fig.8a

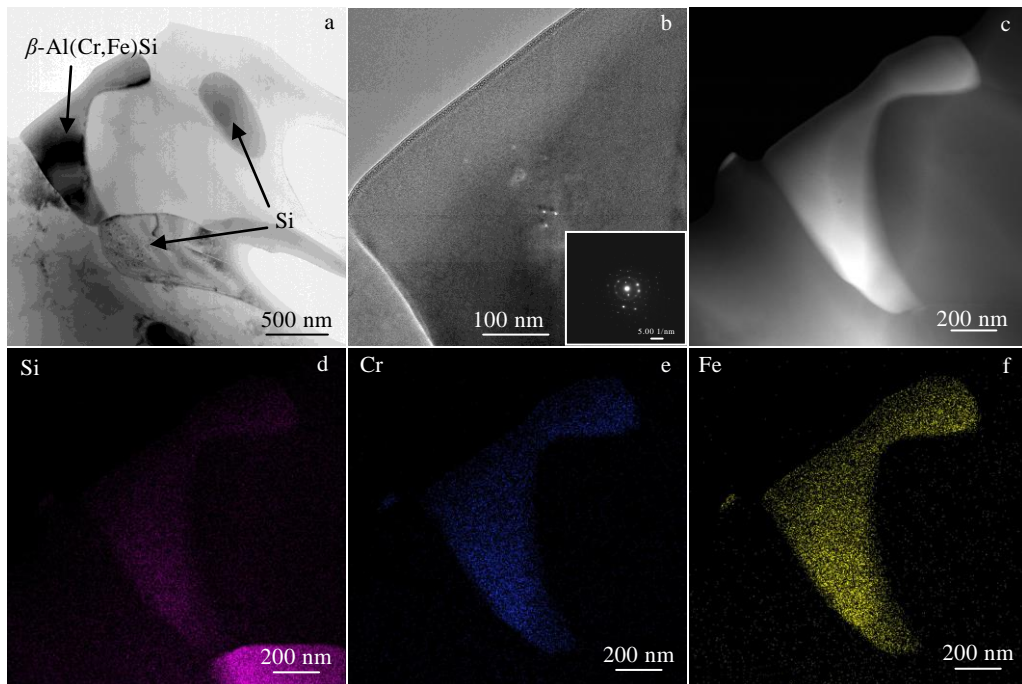


图 9 $\beta-Al(Cr,Fe)Si$ 相的 TEM-SAED 及 HAADF-STEM 和 EDS 分析结果

Fig.9 TEM (a) and HRTEM image with SAED pattern of $\beta-Al(Cr,Fe)Si$ phase (b); HAADF-STEM image (c) and EDS mappings of element Si (d), Cr (e), and Fe (f)

避免 Fe 相生长为细长的针状，改善了 Fe 相尖锐的形貌，减小了其对基体的割裂作用；阻碍了共晶 Si 继续生长为粗大的枝晶，消耗 Si 元素，提高了合金的过冷度，从而对 ZL101 合金起到一定的变质作用，提升了

合金的力学性能。

2.5 合金力学性能分析

图 10 为不同 Cr 含量 ZL101 合金室温力学性能测试结果。从图中可以看出，添加 Cr 元素后的 ZL101

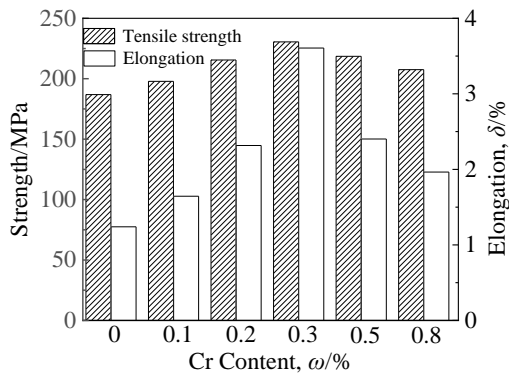


图 10 不同 Cr 含量的 ZL101 合金力学性能

Fig.10 Mechanical properties of ZL101 alloy with different Cr contents

铝合金较添加前力学性能和延伸率均有一定的提高,并且随着 Cr 元素含量的增加,实验合金的抗拉强度和延伸率均呈先上升后下降的趋势。这是由于在合金中加入 Cr 元素后, DSC 结果显示合金的过冷度增大, Cr 在固液界面富集引起的成分过冷,形成的含 Cr 化合物能够作为异质形核质点,合金中 α -Al、共晶 Si 晶粒细化,产生细晶强化,提升合金的力学性能。Cr 元素固溶于合金中,消耗了 Fe、Si 元素,形成了颗粒状或岛状的富 Cr 相,导致合金中的 Fe 相 Si 相尺寸减小,减弱了对基体的割裂危害。根据霍尔-配奇关系式: $\sigma_s = \sigma_0 + kd^{-1/2}$ 可知,晶粒越细晶粒的平均值(d)越小,材料的屈服强度就越高。Cr 元素对合金的变质作用使合金产生了细晶强化,提高了合金的抗拉强度和延伸率。当 $\omega(\text{Cr})=0.28\%$ 时,合金抗拉强度和延伸率达到最大,分别为 182.88 MPa、3.88%。室温力学性能结果与上述微观表征结果相符。

3 结论

1) ZL101 合金中添加微量元素 Cr 后的主要物相有 α -Al、共晶 Si、 β -Al₃FeSi 相、 π -AlSiMgFe 相、Al₁₃Cr₄Si₄ 和 β -Al₁₂(Cr,Fe)₃Si₂。

2) 添加微量元素 Cr 的 ZL101 合金组织细化; α -Al 枝晶变窄、共晶区域减小,共晶区域中形成了新的富 Cr 化合物。随着 Cr 含量的增加,合金中第二相尺寸呈先减小后增大的趋势,在 Cr 添加量为 0.28% 时,合金中 α -Al 与第二相均较为细小。

3) ZL101 合金中添加 Cr 后, Cr 元素在 α -Al 与第二相相界面处偏聚,消耗 Al、Fe、Si 元素,阻碍了 α -Al、共晶 Si 枝晶长大,减小了脆性 Fe 相尺寸,减小了共晶区域,增加了合金的过冷度,改善了合金的室温力学性能。当 Cr 添加量为 0.28% 时,合金的室温力学性能最好,抗拉强度、延伸率分别为 182.88 MPa、3.38%。

参考文献 References

- [1] Yang Zhenxin(杨甄鑫), Liao Shuhua(廖抒华). *Automobile Parts* (汽车零部件)[J], 2021(1): 107
- [2] Zhang Zhenghao(张正昊). *Science & Technology Industry Parks*(中国高新区)[J], 2018(7): 155
- [3] LiuWenping(刘文平). *Metallurgy and Materials*(冶金与材料)[J], 2020, 40(6): 87
- [4] Zhang Chui(章 锤). *Marine Equipment/Materials & Marketing*(船舶物资与市场)[J], 2021(1): 49
- [5] Yao Lijuan(姚丽娟), Yang Gencang(杨根仓). *Foundry Technology*(铸造技术)[J], 2019, 30(2): 185
- [6] Rathod Nishith, Menghani Jyoti. *Materials Today: Proceedings*[J], 2020, 44(1): 1326
- [7] Hu Zhi, Yan Hong, Rao Yuansheng. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2013, 23(11): 3228
- [8] Fan Huachan(方华婵), Yang Hailing(杨海林), Zhu Jiaming(朱佳敏) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(3): 797
- [9] Liao Hengcheng, Xu Heting, Hu Yiyun. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2019, 29(6): 1117
- [10] Ivanov Y F, Klopotov A A, Potekaev A I et al. *Journal of Physics Conference Series*[J], 2019, 1393: 012 089
- [11] Fortini A, Merlin M, Fabbri E et al. *Procedia Structural Integrity*[J], 2016(2): 2238
- [12] Wang Zhengjun(王正军), Zhang Qiuyang(张秋阳), Zhang Man(张 满) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(8): 2665
- [13] Aguirre-Dela Torre E, Pérez-Bustamante R, Camarillo-Cisneros J et al. *Journal of Rare Earths*[J], 2013, 31(8): 811
- [14] Fang Hongjie(房洪杰), Liu Hui(刘 慧), Yi Honghuaxia(尹红霞) et al. *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2017, 46(8): 74
- [15] Zhang Xinming(张新明), Zhou Zhile(周志乐), Tang Jianguo(唐建国) et al. *Journal of Materials Engineering*(材料工程)[J], 2013(12): 49
- [16] Tansel Tunçay, Dursun Özyürek, Derya Dişpinar et al. *Transactions of the Indian Institute of Metals*[J], 2020, 73(4): 1273
- [17] Strobel K, Sweet E, Easton M et al. *Materials Science Forum*[J], 2010, 654: 926
- [18] Ma Bin(马 斌). *The influence of Cr and Sr on the Microstructure and Mechanical Properties of High-speed Iron A356 Alloy*(Cr, Sr 对高铁 A356 合金组织与力学性能的影响)[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2013
- [19] Dong Liang(董 亮). *The Influence of Cr, Mg, Cu Alloying on*

the Structure and Properties of Al-7%Si Cast Aluminum Alloy(Cr, Mg, Cu 合金化对于 Al-7%Si 铸造铝合金结构和性能的影响)[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2018

[20] Dong Yanheng(董衍衡), Jia Zhihong(贾志宏), Wen Boyang(温柏杨) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2020, 30(3): 479

Effect of Trace Element Chromium on Microstructure and Mechanical Properties in ZL101 Alloy

Cui Xiaoming, Cui Hao, Bai Pucun, Liu Fei, Du Zhaoxin, Zhao Xueping

(School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

Abstract: ZL101- x Cr($x=0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.8, \text{wt}\%$) aluminum alloys were prepared by vacuum electromagnetic induction melting furnace. Using OM, XRD, SEM, EDS and TEM, the microstructures of ZL101 alloys with different Cr contents were characterized, and their mechanical properties were tested. The results show that the main phases of ZL101 alloy include primary α -Al, (α -Al+Si) eutectic, $\text{Al}_{13}\text{Cr}_4\text{Si}_4$, β - $\text{Al}_{12}(\text{Cr,Fe})_3\text{Si}_2$, and Fe-rich phases (β - Al_5FeSi and π - AlSiMgFe). The microstructure of ZL101 alloys after adding trace element Cr is refined. With the increase in Cr content, the α -Al dendrites tend to be equiaxed, the eutectic structure area becomes narrow, and the Fe-rich phase and eutectic Si size become smaller. $\text{Al}_{13}\text{Cr}_4\text{Si}_4$ and β - $\text{Al}_{12}(\text{Cr,Fe})_3\text{Si}_2$ phases are formed in the alloy eutectic structure. Adding Cr element can improve the undercooling degree of the alloy, which has a positive effect on refining the alloy structure. When the Cr content is 0.3wt%, the microstructure refinement and modification effect and mechanical properties of the cast alloy are the best, and the tensile strength and elongation are 182.88 MPa and 3.38%, respectively

Key words: ZL101 alloy; trace element Cr; microstructure; mechanical properties

Corresponding author: Zhao Xueping, Senior Experimentalist, School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, P. R. China, Tel: 0086-471-6577161, E-mail: xpzhao@imut.edu.cn