

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2024.3291

Y/Al-5Ti-1B 复合变质对 Al-7Si 合金微观组织和力学性能的影响

张杰, 张子琦, 胡鹏涛, 刘玉康, 李庆林
(兰州理工大学材料科学与工程学院, 甘肃兰州 730050)

摘要: 在传统铸造 Al-Si 合金中存在的粗大树枝晶 α -Al 相以及针状共晶 Si 严重割裂基体, 显著降低合金的力学性能。为细化 Al-Si 合金的组织, 提升其力学性能, 本文使用扫描电镜(SEM)、电子探针(EPMA)、X 射线衍射仪(XRD)以及万能材料试验机, 研究了不同添加量 Y/Al-5Ti-1B 变质剂 (Al-5Ti-1B 均为 2%, 稀土 Y 分别为 0.05%、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%, 质量分数)对 Al-7Si 合金微观组织和力学性能的影响, 并探究了其对 Al-7Si 合金的变质机理。实验结果表明, 当 Al-5Ti-1B 含量为 2%、稀土 Y 含量为 0.4%时, 变质效果最佳, 共晶 Si 由粗大针状变为细小颗粒状, 长和宽分别减小至 2.7 和 0.8 μm , 相较于未经变质处理的 Al-7Si 合金, 减小了 90.6%和 4.7%。合金抗拉强度由原来的 168.1 MPa 提升至 209.1 MPa, 增加了 24.4%。同时伸长率从 6.23%提升至 9.62%, 增长了 54.4%。此外, 合金的断裂方式也从脆性断裂转变为韧-脆混合断裂。

关键词: Al-7Si 合金; Y/Al-5Ti-1B 复合变质剂; 共晶 Si; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG146.2+1; TG113.25

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2024)05-0446-06

Effect of a Y/Al-5Ti-1B Composite Modifier on the Microstructure and Mechanical Properties of Al-7Si Alloy

ZHANG Jie, ZHANG Ziqi, HU Pengtao, LIU Yukang, LI Qinglin

(School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In traditional casting of Al-Si alloys, the coarse dendritic α -Al phase and acicular eutectic Si strongly split the matrix, significantly compromising the mechanical properties. To refine the microstructure of Al-Si alloys and enhance their mechanical performance, the investigation focused on the influence of different additions of Y/Al-5Ti-1B modifiers (with Al-5Ti-1B held constant at 2 wt. %, and rare earth element Y varied at 0.05 wt. %, 0.1 wt. %, 0.2 wt. %, 0.3 wt. %, 0.4 wt. %, 0.5 wt. %) on the microstructure and mechanical properties of Al-7Si alloy was conducted by scanning electron microscopy (SEM), electron probe microanalysis (EPMA), X-ray diffraction (XRD), and a universal materials testing machine. Furthermore, the modification mechanisms of Y/Al-5Ti-1B on an Al-7Si alloy were also explored. The results demonstrate that the optimal modification effect is achieved with 2 wt. % Al-5Ti-1B and 0.4 wt. % rare earth Y. The coarse needle-like eutectic Si transforms into fine granular structures, with lengths and widths reduced to 2.7 and 0.8 μm , respectively. This represents significant decreases of 90.6% and 4.7%, respectively, compared to those of the unmodified alloy. The ultimate tensile strength (UTS) increases by 24.4% from 168.1 MPa to 209.1 MPa, while the elongation (EL) increases by 54.4% from 6.23% to 9.62%. The fracture mode of the alloy transforms from a typical brittle fracture to a ductile-brittle mixed fracture.

Key words: Al-7Si alloy; Y/Al-5Ti-1B composite modifier; eutectic Si; microstructure; mechanical properties

Al-Si 合金具有低密度、较低的热膨胀系数、高在汽车制造、航空航天等领域得到了广泛应用^[1-4]。然而, 在传统铸造 Al-Si 合金中 α -Al 以粗大的树枝

收稿日期: 2023-12-04

基金项目: 国家自然科学基金(51561021); 甘肃省重点研发计划(21YF5GA075); 甘肃省自然科学基金重点项目(23JRRA752)

作者简介: 张杰, 2000 年生, 硕士研究生. 研究方向为铝合金变质. E-mail: z953167655@163.com

通讯作者: 李庆林, 1978 年生, 博士, 教授. 研究方向为铝合金变质. Email: 24792651@qq.com

引用格式: 张杰, 张子琦, 胡鹏涛, 等. Y/Al-5Ti-1B 复合变质对 Al-7Si 合金微观组织和力学性能的影响[J]. 铸造技术, 2024, 45(5): 446-451.

ZHANG J, ZHANG Z Q, HU P T, et al. Effect of a Y/Al-5Ti-1B composite modifier on the microstructure and mechanical properties of Al-7Si alloy[J]. Foundry Technology, 2024, 45(5): 446-451.

晶存在,同时,组织中粗大的针状共晶 Si 严重割裂基体,往往是裂纹萌生、扩展,并导致材料失效的主要原因。因此,调控 Al-Si 合金中 Si 相的尺寸和形貌对满足汽车和航空航天应用的需求非常重要。20 世纪 30 年代发现,在铝合金凝固过程中,向熔体中添加少量的 Ti 元素,可以改变 α -Al 晶粒的生长方式,促使合金的凝固组织由粗大的胞状树枝晶转变为细小而均匀的等轴晶^[5]。到了 50 年代,Cibula 发现少量的 B 元素可以加强 Ti 对铝合金的细化作用^[6]。为了解释 Al-Ti-B 细化剂的细化机理,科研工作者们先后提出了很多种解释,如包晶反应理论^[7],超形核理论^[8],相图理论^[9],异质形核理论^[10-11]等。一般而言,Al-Ti-B 中间合金能够有效细化纯铝和变形铝合金的 α -Al 组织^[12],并且在 Ti:B=5:1 时细化效果最佳^[3]。然而,根据文献报道,当 Al-Si 合金的 Si 含量(质量分数)大于 3.5% 时,会发生 Si 中毒,Al-5Ti-1B 晶粒细化剂的细化效果变差^[14-15],并且 Al-5Ti-1B 对 Si 相的变质效果并不理想,于是很多学者开始研究新型的 Al-5Ti-1B 变质剂,期望在 Al-Si 合金中也能获得良好的变质效果,其中复合 Al-5Ti-1B 与常用变质元素是一种很好的思路。根据现有的资料显示,将 Al-5Ti-1B 和 Sm^[16]、Ce^[17]、Sr^[18] 等元素复合添加到 Al-Si 合金中,可以获得比较理想的细化效果。

本文通过将稀土元素 Y 和 Al-5Ti-1B 制作成复合变质剂,研究 Y/Al-5Ti-1B 复合变质剂对 Al-7Si 合金微观组织和力学性能的影响,并探究复合变质对 Al-7Si 合金的变质机理。

1 实验材料与方法

所使用 Y/Al-5Ti-1B 复合变质剂由 Al-20Y 和

Al-5Ti-1B 中间合金制备而成,其中 Al-5Ti-1B 含量(质量分数,下同)均为 2%,稀土 Y 的含量分别为 0.05%、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%。将定量的 Al-5Ti-1B 置于坩埚中,使用 Si-C 棒电阻炉在 800 °C 熔化,然后将计算好的 Al-20Y 中间合金完全浸没在 Al-5Ti-1B 熔体中,等到 Al-20Y 熔化后,继续在 800 °C 保温 30 min,每 5 min 搅拌 1 次。随后,将金属液浇注到预热至 200 °C 的钢模具中,冷却脱模后,即完成了 Y/Al-5Ti-1B 复合变质剂的制备。将制备好的 Y/Al-5Ti-1B 复合变质剂按 Y 含量由低到高的顺序分别命名为 Y1~Y6 变质剂。此外,再做 1 组单独添加 0.4% 稀土 Y 的对照实验(通过计算 Al-20Y 合金的量来引入)。然后,分别把 Y1~Y6 变质剂和计算好的 Al-20Y 中间合金加入到 Al-7Si 合金中,在电阻炉中加热至熔化,保温 30 min 并 5 min 搅拌一次。随后,加入熔体质量 1.5% 的 C_2Cl_6 进行精炼。最后,当熔体温度下降至 700 °C 时,将其浇入预热至 200 °C 的钢模具中,所得合金试样的尺寸为:上端直径 13 mm,下端直径 18 mm,高度 140 mm,实验流程如图 1 所示。

实验对添加 Y/Al-5Ti-1B 复合变质剂及单独添加 0.4% Y 变质后的 Al-7Si 合金,取试样底部同一高度的金相样品进行粗磨、细磨和抛光处理,再用 Keller 试剂腐蚀 120 s。采用 JSM-6700F 扫描电子显微镜对样品进行微观形貌分析,并使用图像处理软件计算共晶 Si 的平均长度。采用配备能谱仪的 FEG-450 扫描电镜、EPMA-1600 电子探针以及 D/max-2400 型 X 射线衍射仪,对试样的相组成和元素分布进行详细分析。按照 GB/T 228-2002 标准加工圆柱形拉伸试样(试样直径 5 mm,标距 25 mm),

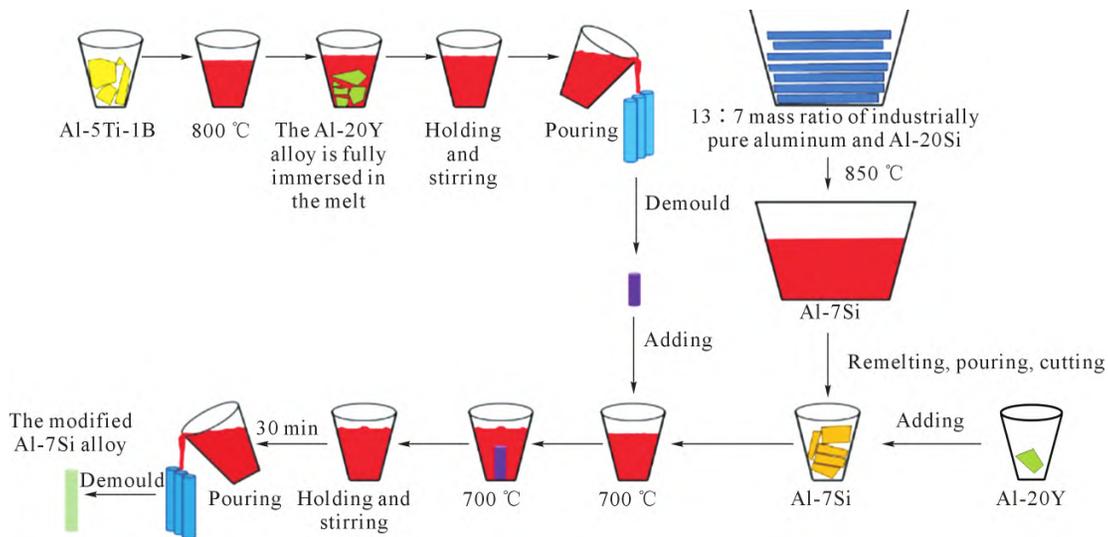


图 1 实验流程示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental process

在 SANS-CMT5205 型电子万能试验机上进行室温拉伸性能测试,每组合金试样测试 3 个,取其平均值。最后,用 SEM 对试样的断口进行观察,以探究其断裂方式和机理。

2 实验结果及讨论

2.1 Y/Al-5Ti-1B 变质 Al-7Si 合金的微观组织

从图 2a 中可看出,在 α -Al 基体上分布着粗大针状的共晶 Si,平均长度为 $28.8 \mu\text{m}$ 。图 2b 中添加了 0.05% 的稀土 Y 后,由于 Y 的含量比较低,对 Al-7Si 合金的细化作用并不明显,使共晶 Si 的长度降低到 $23.8 \mu\text{m}$ 。添加了 0.1% 稀土 Y 后,共晶 Si 明显变短且粗化,平均长度为 $18.1 \mu\text{m}$,并且开始出现块状的共晶 Si,如图 2c 所示。当稀土元素 Y 的添加量增加到 0.2% 时,共晶 Si 的长度进一步降低到 $14.8 \mu\text{m}$,大量长针状的共晶 Si 变质成块状(图 2d)。当添加了 0.3% 稀土 Y 后,如图 2e 所示,针状和块状的共晶 Si 消失,取而代之的是细小的颗粒状共晶 Si,此外还有少量的纤维状共晶 Si,呈现出一定的分枝生长趋势。随着 Y 的添加量进一步增加到 0.4% 时,出现了最佳的细化效果,共晶 Si 的长度减小到 $2.7 \mu\text{m}$,如

图 2f 所示。然而,从图 2g 可看出,当 Y 的添加量增加到 0.5% 时,Al-7Si 合金中的共晶 Si 未能继续细化,反而出现了粗化现象。

图 2h 是仅添加了 0.4% 稀土后,Al-7Si 合金中共晶 Si 的微观形貌。从图中看出,0.4% 的稀土 Y 可以将共晶 Si 的长度减小到 $12.8 \mu\text{m}$,变质效果和 Y3 变质剂较接近,却远不如 Y5 变质剂,此结果说明 Y5 变质剂对 Al-7Si 合金优良的变质效果来自于 Al-5Ti-1B 和稀土 Y 复合作用。通过上述分析,可知在 Al-7Si 合金中添加 Y5 变质剂的细化效果最佳。

图 3 是 Y5 变质剂的 XRD 图谱,可以看出,Y5 变质剂主要由 α -Al 基体, β - Al_3Y 相和 $\text{Al}_{43}\text{Ti}_4\text{Y}_6$ 稀土相组成,除此之外,还发现有 TiB_2 和 α - Al_3Y 化合物析出。

根据图 3 可知,Y5 变质剂中主要的相有 $\text{Al}_{43}\text{Ti}_4\text{Y}_6$ 、 α - Al_3Y 相和 TiB_2 相,当 Y5 变质剂在 Al-7Si 熔体中熔化后,会形成大量的 Ti-Y、Al-Y、B-Ti 等原子团簇,这些原子团簇在共晶 Si 生长过程中,堆积在固液界面前沿,对 Si 原子的堆积造成了阻碍,从而将被少量 Y 元素变质的大块颗粒共晶 Si 细化为小块颗粒状。另外,原子团簇的富集使得固液界面上产生成分

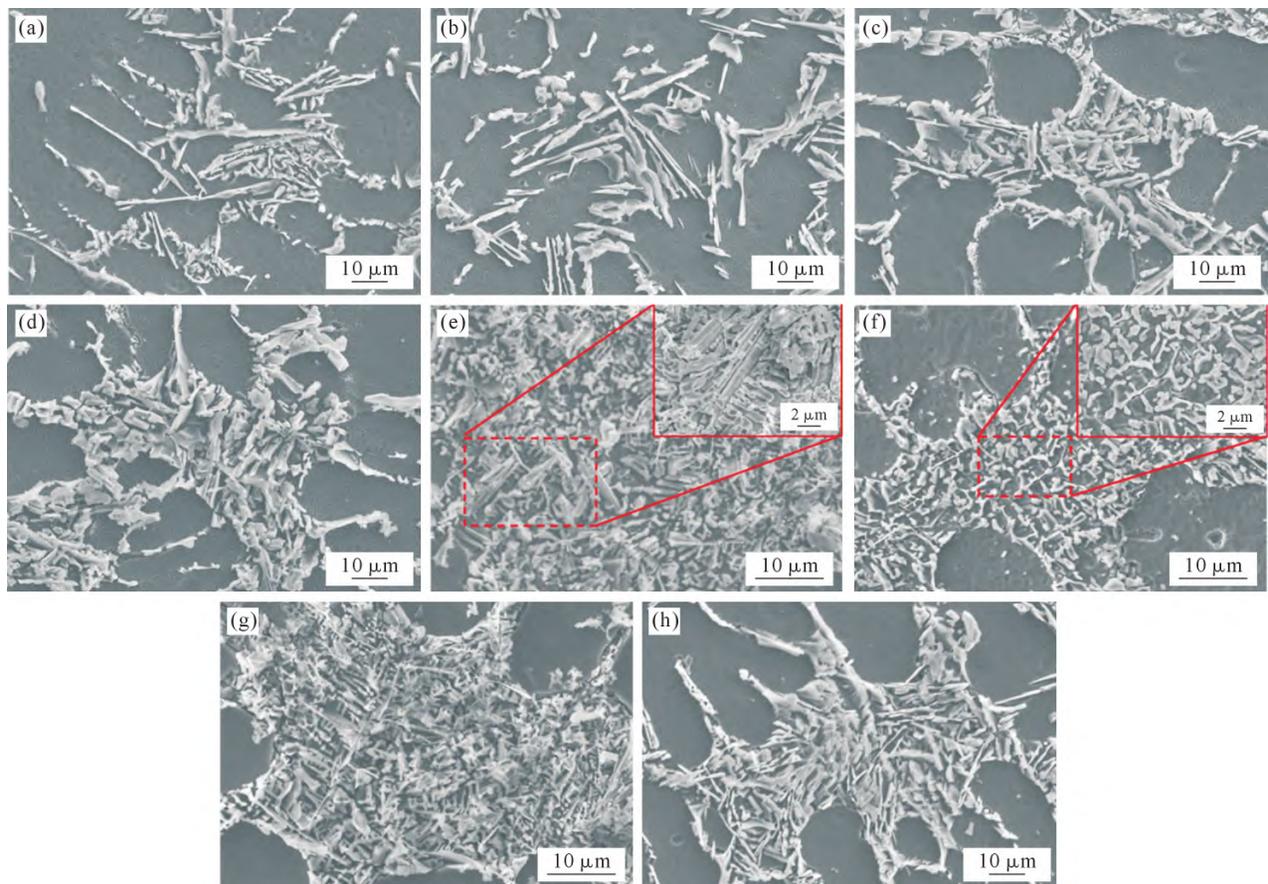


图 2 添加不同含量的 Y/Al-5Ti-1B 复合变质剂及单独添加 0.4% Y 对 Al-7Si 合金中共晶 Si 微观形貌的影响:(a) 未变质;(b) Y1;(c) Y2;(d) Y3;(e) Y4;(f) Y5;(g) Y6;(h) 0.4%Y

Fig.2 Effect of adding different Y/Al-5Ti-1B composite densifiers or 0.4 wt. % Y alone on the micromorphology of eutectic Si in Al-7Si alloys: (a) unmodified; (b) Y1; (c) Y2; (d) Y3; (e) Y4; (f) Y5; (g) Y6; (h) 0.4 wt. %Y

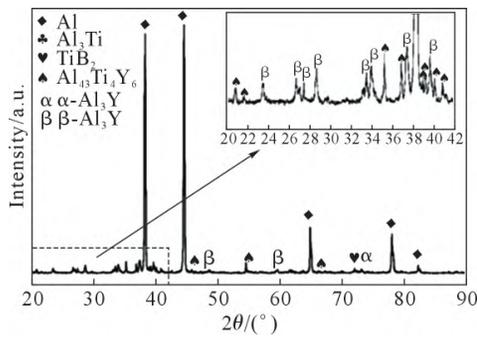


图3 Y5 变质剂的 XRD 分析结果
Fig.3 XRD patterns of the Y5 modifier

过冷,从而使少量的共晶 Si 分枝生长成为纤维状。随着共晶 Si 的析出,液相的体积越来越小,其中 Y、Ti 和 B 的浓度也就越来越高,逐渐以多元化合物的形式从液相中析出,并存在于 Al/Si 界面处,如图 4 所示。

杂质诱导孪晶理论提出^[9],合金熔体中加入的变质元素(主要包括碱金属、碱土金属和稀土)可以

吸附在 Si 表面的生长台阶上,引起堆垛层错,诱发孪晶,增加 Si 相的择优生长取向,这类变质原子半径与 Si 原子半径存在一个理想的比值,即 $r_{\text{modifier}}:r_{\text{Si}}=1.65$,Y 的原子半径为 1.82 Å,为 Si 原子半径的 1.54 倍,接近于 1.65 的理论值。稀土 Y 是一种化学活性元素,具有较强的吸附性,在共晶 Si 长大过程中,合金熔体中的 Y 原子容易吸附到 Si 生长的固-液界面的台阶处,阻碍 Si 以台阶生长机制长成片状,使共晶 Si 的生长方式由小平面非连续长大向非小平面连续生长转变,从而改变了 Si 相的尺寸和形貌。Si 属于小平面相,其界面台阶处为 {111} 密排面, Y 原子吸附至 Si 相 {111} 晶面的界面台阶后,诱发的孪晶会提高 Si 相在平行于 {111} 面的生长速度,而且 Y 原子的吸附改变了 Si 原子的堆垛次序,从而在 Si 晶体中造成大量孪晶的产生。随着孪晶密度增加,不断交替变化的孪晶促进 Si 分枝化,长成纤维状和颗粒状,这与 Li^[20]的研究结果一致。

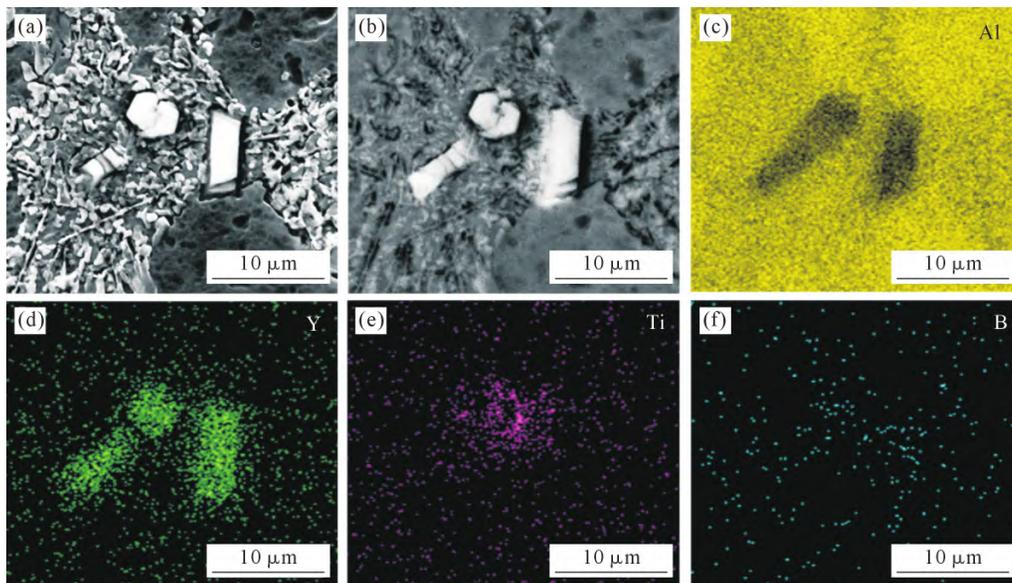


图 4 添加 Y5 变质剂后 Al-7Si 合金的面扫描分析:(a) SEM 照片;(b) BSE 照片;(c) Al 元素;(d) Y 元素;(e) Ti 元素;(f) B 元素
Fig.4 EDS map scanning analysis of the Al-7Si alloys after the addition of the Y5 modifier: (a) SEM image; (b) BSE image; (c) Al; (d) Y; (e) Ti; (f) B

2.2 力学性能

由图 6 可知,未经变质处理的 Al-7Si 合金的抗拉强度为 168.1 MPa,伸长率为 6.32%。添加 Y1 变质剂后,Al-7Si 合金的抗拉强度和伸长率基本没有变化。在加入 Y2 变质剂后,合金的抗拉强度和伸长率均有所增强,分别达到了 172.2 MPa 和 6.58%。使用 Y3 变质剂变质 Al-7Si 合金后,合金的抗拉强度增加到 179.4 MPa,同时伸长率也增加到 7.03%。Y4 变质剂使得 Al-7Si 合金的抗拉强度提高到 202.5 MPa,伸长率提高到 9.62%,分别增加了 20.4%和 54.4%。当稀土的添加量为 0.4%时(即 Y5 变质剂),Al-7Si 合金的抗拉强度进一步增加到 209.1 MPa,提高了

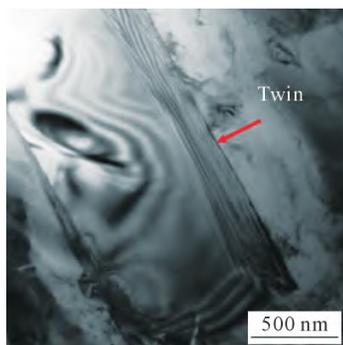


图 5 添加 Y5 变质剂后 Al-7Si 合金中的孪晶
Fig.5 TEM image showing twins in Al-7Si alloys after the addition of the Y5 modifier

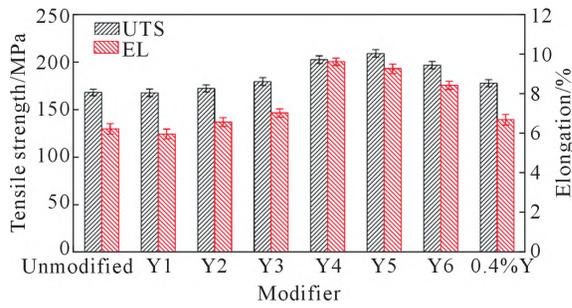


图 6 添加 Y/Al-5Ti-1B 复合变质剂及单独添加 0.4%Y 后 Al-7Si 合金的抗拉强度和伸长率

Fig.6 UTS and EL of the Al-7Si alloy after the adding of Y/Al-5Ti-1B composite modifiers and 0.4 wt. %Y alone

24.4%，而伸长率却比 Y4 变质的合金出现了下降，为 9.27%。经过 Y6 变质剂处理后的 Al-7Si 合金的抗拉强度和伸长率持续降低，分别减少至 196.91 MPa 和 8.43%。相比之下，仅添加 0.4%的稀土元素 Y 进行变质处理的 Al-7Si 合金，其抗拉强度为 177.7 MPa，伸长率为 6.69%。相比未变质的 Al-7Si 合金的力学性能稍有提高，远不如 Y5 变质后 Al-7Si 合金的力学性能，由此可见，Y5 变质剂优异的变质效果是 Y 和 Al-5Ti-1B 共同作用的结果。综上所述，Y/Al-5Ti-1B 复合变质剂可以改善 Al-7Si 合金的力学性能，并且在 Y 的添加量分别为 0.4%和 0.3%时，抗拉强度和伸长率达到最大值。

在拉伸时，当拉伸应力超过共晶 Si 的本征断裂应力时，共晶 Si 发生断裂。此外，裂纹主要沿 Si 相与铝基体之间的界面萌生和扩展，然后相邻裂纹连接并导致材料的断裂。Griffith 方程^[21]给出了 Si 相的本征断裂应力(σ_f)与内部缺陷长度(C)之间的关系。

$$\sigma_f = \left(\frac{2E\gamma}{\pi C} \right)^{1/2} \quad (1)$$

式中， γ 为断裂表面能； E 为弹性模量。根据 Griffith 方程可知，粗大的 Si 相内部缺陷比细晶 Si 的内部缺陷长得多，从而导致本征断裂应力(σ_f)降低，材料的强度也就越低。另一方面，针状共晶 Si 尖锐的边缘或末端会产生应力集中，从而萌生裂纹。经过 Y5 变质剂细化后，Al-7Si 合金中的共晶 Si 演变为尺寸较小的颗粒状和纤维状，裂纹沿着共晶 Si 扩展的路径较短，所形成的裂纹就比较短，材料表现出良好的力学性能。

图 7 是添加了不同 Y/Al-5Ti-1B 变质剂后，试样的拉伸断口图。由图 7a 可知，未变质 Al-7Si 合金的断裂面由大尺寸的准解理面和撕裂棱构成，呈现出典型的脆性断裂特征。随着 Y 含量的增加，共晶 Si 相的尺寸有所减小，故而断裂面上的准解理面和撕裂棱的尺寸略有缩小，如图 7b~c 所示。图 7d 是添加 Y4 变质剂后 Al-7Si 合金的拉伸断面，断口表面由细小解离台阶以及少量均匀的细小韧窝组成，断裂模式由脆性断裂转变为韧-脆混合断裂。随着 Y 含量的继续增加，如图 7e~f，合金的断口中除了更多的细小韧窝以外，又出现了大尺寸的解离台阶，合金的韧性再次降低。过量的稀土元素 Y 添加到合金中，除了将 Si 相变质的更加细小外，还形成了许多硬而脆的第二相，虽然对合金的强度有增强作用，却降低了合金的塑性，这也与合金的力学性能实验相吻合。

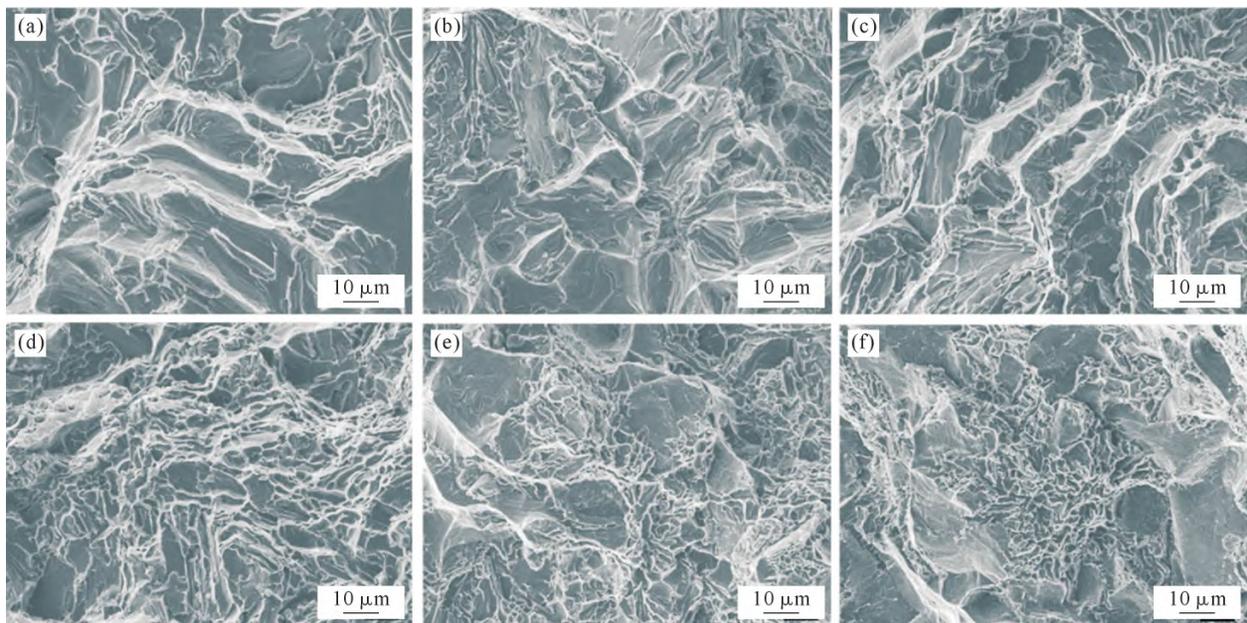


图 7 添加不同的 Y/Al-5Ti-1B 复合变质剂对 Al-7Si 合金断口形貌的影响：(a) 未变质；(b) Y2；(c) Y3；(d) Y4；(e) Y5；(f) Y6
Fig.7 Effect of adding different Y/Al-5Ti-1B composite modifiers on the fracture morphology of the Al-7Si alloy: (a) unmodified; (b) Y2; (c) Y3; (d) Y4; (e) Y5; (f) Y6

3 结论

(1)添加 Y/Al-5Ti-1B 复合变质剂可以有效变质共晶 Si。当 Al-5Ti-1B 和 Y 的含量分别为 2%和 0.4% 时,变质效果最佳,共晶 Si 被变质为均匀细小的颗粒状,长度和宽度分别减小到 2.7 μm 和 0.8 μm ,相比 Al-7Si 合金的原始组织,分别减小了 90.6%和 4.7%。

(2)Y/Al-5Ti-1B 复合变质剂的加入可以明显提升 Al-7Si 合金的力学性能。在添加 Y5 变质剂后,合金的抗拉强度从未经变质处理的 168.1 MPa 提升至 209.1 MPa,增幅达到了 24.4%。

(3)随着变质后 Al-7Si 合金中 Si 相尺寸、形貌以及分布状态的变化,合金的断裂方式也从脆性断裂转变为韧-脆混合断裂。

参考文献:

- [1] ZHU X Z, WANG S H, DONG X X, LIU X F, JI S X. Morphologically templated nucleation of primary Si on AlP in hypereutectic Al-Si alloys[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2020, 100: 36-45.
- [2] ZOU Q C, HAN N, ZHANG Z X, JIE J C, X F ANX Z. Metals enhancing segregation behavior of impurity by electromagnetic stirring in the solidification process of Al-30Si alloy[J]. Metals, 2020, 10(1): 155.
- [3] PEREIRA C L, GOMES L F, GARCIA A, SPINELLI J E. Comparing the roles of Sb and Bi on microstructures and application properties of the Al-15% Si alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 878: 160343.
- [4] ELSEBAIE O, SAMUEL A M, SAMUEL F H. Effects of Sr-modification, iron-based intermetallics and aging treatment on the impact toughness of 356 Al-Si-Mg alloy[J]. Journal of Materials Science, 2011, 46(9): 3027-3045.
- [5] LIU Y L, WU C J, TU H, LLU X W, WANG JH, SU X P. Microstructure and mechanical properties of Al-10Si alloy modified with Al-5Ti[J]. China Foundry, 2018, 15(6): 405-410.
- [6] CIBULA A. The grain refinement of aluminium alloy castings by additions of titanium and boron[J]. The Journal of the Institute of Metals, 1951, 80: 1-16.
- [7] LI J G, HUANG M, MA M, YE W, LIU D Y, SONG D M, BAI B Z, FANG H S. Performance comparison of AlTiC and AlTiB master alloys in grain refinement of commercial and high purity aluminum[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16(2): 242-253.
- [8] JONES G P, PEARSON J. Factors affecting the grain-refinement of aluminum using titanium and boron additives[J]. Metallurgical Transactions B, 1976, 7(2): 223-234.
- [9] CORNISH A. J. The influence of boron on the mechanism of grain refinement in dilute aluminum-titanium alloys[J]. Metal Science, 1975, 9(1): 477-484.
- [10] ZHU M, Yang G C, YAO L J, CHENG S L, ZHOU Y H. Influence of Al-Ti-B addition on the microstructure and mechanical properties of A356 alloys[J]. Rare Metals, 2009, 28(2): 181-186.
- [11] CHEN Z N, KANG H J, FAN G H, LI J H, LU Y P, JIE J C, ZHANG Y B, LI T J, JIAN X G, WANG T M. Grain refinement of hypoeutectic Al-Si alloys with B[J]. Acta Materialia, 2016, 120: 168-178.
- [12] WANG J, HE S X, SUN B D, GUO Q X, NISHIOMI. Grain refinement of Al-Si alloy (A356) by melt thermal treatment[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 141(1): 29-34.
- [13] GUZOWSKI M M, SIGWORTH G K, SENTNER D A. The role of boron in the grain refinement of aluminum with titanium[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1987, 18(5): 603-619.
- [14] LEE Y C, DAHLE A K, STJOHN D H, HUTT J E C. The effect of grain refinement and silicon content on grain formation in hypoeutectic Al-Si alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 1999, 259(1): 43-52.
- [15] BIROL Y. Effect of silicon content in grain refining hypoeutectic Al-Si foundry alloys with boron and titanium additions[J]. Materials Science and Technology, 2012, 28(4): 385-389.
- [16] 郑方超, 马宝霞, 冯义成, 王丽萍, 郭二军. Al-5Ti-1B 和 Sm 复合变质对 ZL114 合金组织及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(7): 758-761.
ZHENG F C, MA B X, FENG Y C, WANG L P, GUO R J. Effect of Al-5Ti-1B and Sm compound modification on the microstructure and properties of ZL114 alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2016, 36(7): 758-761.
- [17] 张强. Al-5Ti-1B-Ce 细化剂制备及细化性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014.
ZHANG Q. Preparation of Al-5Ti-1B-Ce refiner and refining performance research [D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2014.
- [18] 王宝山, 冯义成, 郭育阳, 王丽萍, 郭二军, 姜文勇. Al-5Ti-1B-4Sr 中间合金对 Al-8Si 合金同时细化和变质效果[J]. 稀有金属, 2017, 41(10): 1082-1086.
WANG B S, FENG Y C, GUO Y Y, WANG L P, GUO R J, JIANG W Y. Simultaneous Refinement and modification of Al-8Si alloy with Al-5Ti-1B-4Sr master alloy[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2017, 41(10): 1082-1086.
- [19] LU S Z, HELLAWELL A. The mechanism of silicon modification in aluminum-silicon alloys: Impurity induced twinning[J]. Metallurgical Transactions A, 1987, 18(10): 1721-1733.
- [20] LI Q L, LI B Q, LI J B, ZHU Y Q, XIA T D. Effect of yttrium addition on the microstructures and mechanical properties of hypereutectic Al-20Si alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 722: 47-57.
- [21] LI Q L, XIA T D, LAN Y F, LI P F, LU F. Effects of rare earth Er addition on microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al-20% Si alloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 588: 97-102.