

文章编号:1673-9981(2017)03-0153-04

Sc, Zr 复合微合金化对 6082 铝合金组织和力学性能的影响

李 灿, 雷 远

合肥工业大学材料科学与工程学院, 安徽 合肥 230009

摘 要:采用铸锭冶金法制备了 6082 铝合金, 并且研究了复合加入 0.1% 的 Sc 和 0.1% 的 Zr 元素对 6082 合金组织及性能的影响. 结果表明: 添加微量的 Sc 和 Zr 元素可显著细化铸态 6082 合金的组织, 使粗大的枝晶网胞的尺寸减小, 且晶粒细小、均匀; 合金力学性能有很大程度的提高, 铸态抗拉强度可达到 213.14 MPa, 与未添加 Sc 和 Zr 元素合金的强度相比提高了 17%; 合金的拉伸断口形貌也得到有效改善, 韧窝数量增多, 合金塑性明显提高.

关键词:6082 铝合金; 晶粒细化; 力学性能; 断口形貌

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

Al-Mg-Si 系铝合金作为挤压、轧制和锻造用变形铝合金具有中等强度、优异的成型性能、耐腐蚀等特点, 与其它系铝合金相比 (如 Al-Cu-Mg 系和 Al-Zn-Mg 系铝合金), 强度虽然略低, 但它是可热处理强化型铝合金中唯一没有发现应力腐蚀现象的合金, 在建筑、结构工程、运输领域中得到广泛应用, 其性能的改进和提高一直是冶金界、材料界关注的问题之一^[1].

6082 铝合金作为 Al-Mg-Si 系的中强铝合金, 具有良好的耐蚀性能和加工性能, 广泛应用于大型焊接结构件、航海用零件及模具加工用坯料等方面, 可以用来生产形状较为复杂的挤压型材^[2-3]. 在实际生产中, 在非平衡凝固过程中 6082 铝合金内部会产生各种缺陷, 例如偏析、粗晶等, 这些缺陷对材料的性能有显著的影响. 微合金化是改善铝合金性能及开发新型铝合金最为重要的手段之一. 文献[4]的研究表明, 通过向 Al-Mg-Si 合金中加入质量分数为 0.15% 的 Zr, 就能使得该合金的时效硬度值及力学性能有一定程度的提高. 文献[5]在 6082 铝合金中添加 Er 和 Y 元素, 并对合金微观组织及力学性能的影响进行了研究, 得出在 6082 铝合金中复合添加

Er 和 Y 元素, 可以明显细化晶粒、提高合金力学性能. 到目前为止, Sc 元素是人们所发现的对铝合金最为有效的合金化元素, 它既是一种过渡元素也是一种稀土元素, 能使合金的结构和性能发生明显的变化, 与 Al 反应形成的 Al_3Sc 相有很强的热稳定性, 在高温下仍能与基体保持共格关系. 但是单一元素微合金化存在一定的局限性, 只有当元素含量大于共晶浓度时才能发挥其有益作用. 研究发现, 复合添加两种或两种以上的微合金化元素可更好地发挥微合金化元素的作用, 同时可减少贵重金属元素的使用量, 从而降低成本, 更具有商业开发价值^[6]. 因此, 研究工作者在合金中添加微量 Sc 元素的同时还添加一些其它的过渡族元素, 如 Zr, Ti, V 和 Mn 等, 结果发现强化效果更加显著, 尤其是 Zr 元素的加入, 可以置换 Al_3Sc 中近 50% 的 Sc 元素^[7].

本研究通过在 6082 合金中添加微量 Sc 和 Zr 元素, 研究 Sc 和 Zr 复合微合金化对合金组织及性能的影响, 为 Al-Mg-Si 系铝合金通过复合微合金化手段提高性能的研究提供参考.

收稿日期: 2017-08-06

作者简介: 李灿 (1994-), 女, 安徽合肥人, 硕士研究生.

1 实验材料及方法

1.1 材 料

合金的冶炼原料为高纯铝和高纯镁(纯度均为99.99%),以及中间合金 Al-20% Si, Al-20% Mn, Al-50%Cu, Al-10%Sc 和 Al-10%Zr. 表 1 为实验用合金的主要化学成分.

表 1 实验用合金的主要化学成分
Table 1 Chemical composition of experimental alloys

合金	含量 $w/\%$						
	Mg	Si	Cu	Mn	Sc	Zr	Al
6082	0.89	0.99	0.06	0.47	—	—	余量
6082-0.1Sc-0.1Zr	0.88	1.01	0.05	0.5	0.1	0.1	余量

将铸态试样用金相砂纸预磨后进行机械抛光,再用 0.5% 的 HF 酸进行腐蚀,然后在 MR5000 型金相显微镜下对其进行显微组织观察和分析. 拉伸实验在 SANS-100KN 微型控制电子万能试验机上完成,拉伸速度为 1 mm/min,每个状态测定 3 个试样并取平均值. 利用 SU8020 场发射扫描电镜,观察分析合金的显微组织及断口形貌.

2 结果与分析

2.1 合金的显微组织

图 1 为两种合金的显微组织形貌. 从图 1 可以看出:6082 铝合金的枝晶网胞尺寸粗大(图 1(a)),呈现为枝晶和少量等轴晶的混合形态,晶粒大小不

1.2 方 法

首先将石墨坩埚预热至 400 ℃,然后将纯铝放在坩埚中,升温至 800 ℃,待熔化后加入中间合金 Al-Si 和 Al-Mn,待全部熔化后加精炼剂进行扒渣,之后再迅速加入纯镁及精炼剂进行扒渣,最后加入中间合金 Al-10%Sc 和 Al-10%Zr,待熔化后静置保温一段时间,再在水冷铜模中浇铸成 100 mm×50 mm×20 mm 的铸锭.

均;加入 Sc 和 Zr 元素后(图 1(b)),枝晶间距显著减小,晶粒相对细小、均匀,形态多为等轴晶. 这是因稀土元素能够细化晶粒,在铝及铝合金中的固溶度极小,能与杂质生成金属间化合物或非金属化合物,且偏聚在晶界上,加大了过冷度,起到细化晶粒的作用;同时还改变了铝合金组元 Si,Fe 和 Mg 的形态,减少了针状晶,使球状晶增加.

2.2 合金的力学性能

6082 和 6082-0.1Sc-0.1Zr 合金具体的力学性能列于表 2. 由表 2 可知,6082-0.1Sc-0.1Zr 合金的平均抗拉强度、屈服强度和延伸率分别比 6082 合金提高了 31 MPa,17 MPa 和 3.2%. 由此可见,在 6082 铝合金中分别加入 0.1% 的 Sc 和 0.1% 的 Zr 可以明显提高合金的综合性能.

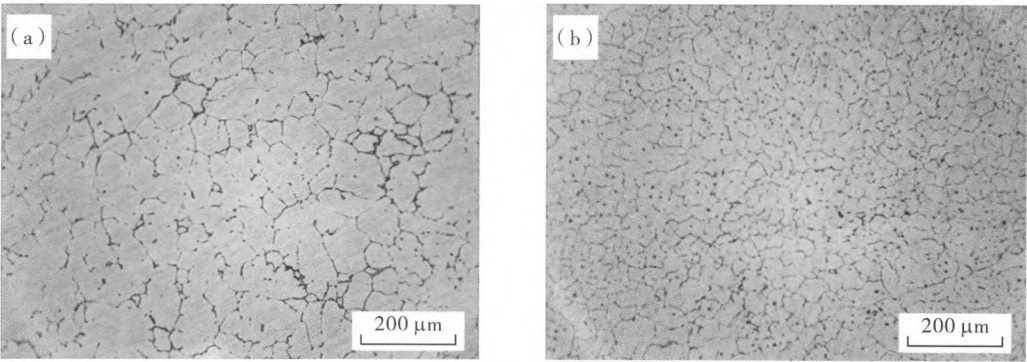


图 1 合金的显微组织形貌
(a) 6082 合金;(b) 6082-0.1Sc-0.1Zr 合金
Fig. 1 Microstructure of investigated alloys
(a)6082 alloy;(b)6082-0.1Sc-0.1Zr alloy

表 2 合金铸态力学性能
Table 2 The mechanical properties of cast ingots

合金	序号	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	延伸率/%
6082	1	192.40	138.28	4.08
	2	159.41	107.08	4.09
	3	196.06	137.54	4.24
	平均值	182.62	127.63	4.14
6082-0.1Sc-0.1Zr	1	203.10	144.34	7.62
	2	217.13	145.57	6.43
	3	219.18	144.18	7.98
	平均值	213.14	144.70	7.34

Al-Mg-Sc-Zr 系相图研究指出^[8-9],当铝合金中 Sc 和 Zr 含量分别大于 0.05%时,合金成分位于 $\alpha(\text{Al})+\text{Al}_3(\text{Sc,Zr})+\text{Al}_3(\text{Zr,Sc})$ 三相区. 根据非均匀形核理论,铸态晶粒的细化程度取决于添加剂的两种作用,即单位熔体中形核粒子数和粒子的有效形核作用. 而粒子的有效形核作用依赖于形核粒子与 $\alpha(\text{Al})$ 基体的晶格常数和晶格类型,晶体结构相似是引起晶粒细化的主要原因. Sc 和 Zr 同时添加则可在 Sc 含量较低的情况下析出三元共格的 $\text{Al}_3(\text{Sc,Zr})$ 粒子,其晶格点阵和晶体结构与 $\alpha(\text{Al})$ 相近,晶格常数差异为 1.5%,成为 $\alpha(\text{Al})$ 凝固结晶的晶核. 同时含 Sc 的铝合金熔体单位体积内形成大量 $\text{Al}_3(\text{Sc,Zr})$ 粒子,这些粒子具有高效形核作用,使合金晶粒细化,晶粒细化不但可提高材料的强度还可改善材料的塑性和韧性. $\text{Al}_3(\text{Sc,Zr})$ 粒子利用晶界对位错的阻碍作用,通过细化晶粒来增加晶界或改

善晶界性质,阻碍位错运动,从而提高合金的强度和塑性. 细晶强化对不能进行热处理强化或强化效果不大的铸造铝合金和变形铝合金具有特别重要的意义. 因此,在工业生产中通常总是设法获得细小而均匀的晶粒组织,使材料具有较好的综合力学性能.

2.3 合金的断口形貌

合金的断口形貌能很好的表征合金的塑性,一般合金断口呈现的韧窝越多,代表该合金的塑性越好;韧窝分布越均匀,代表合金塑性变形越协调,侧面反映了该合金塑性越好^[10]. 图 2 为铸态合金的断口形貌. 从图 2 可见:6082 铝合金的拉伸断口的韧窝数量较少,且大小分布不均,存在一些撕裂棱,由此可知其塑性不好;加入 Sc 和 Zr 元素后,合金拉伸断口的韧窝数量增加且变深,表明 6082-0.1Sc-0.1Zr 合金的塑性得到改善,这与表 2 中数据所表达的结论是一致的.

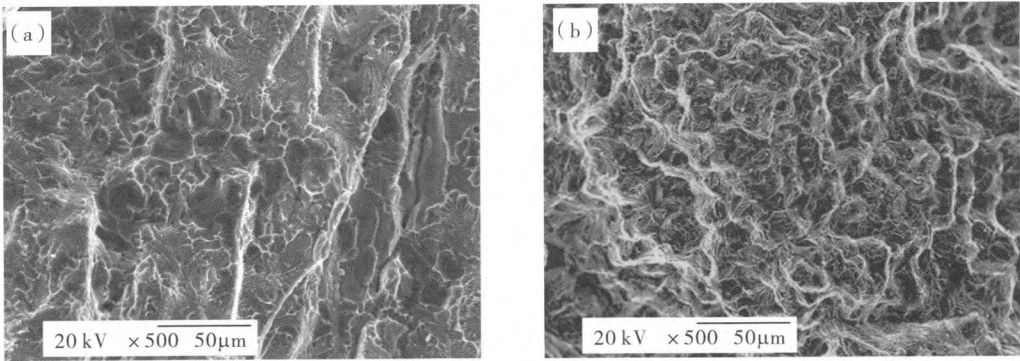


图 2 铸态合金断口扫描图
(a)6082 合金;(b)6082-0.1Sc-0.1Zr 合金
Fig. 2 The fracture morphology SEM images of cast ingots
(a)6082 alloy;(b)6082-0.1Sc-0.1Zr alloy

3 结 论

在 6082 铝合金中复合添加 Sc 和 Zr 元素,使合金的微观组织得到改善,能有效地细化铸态合金的晶粒,改善合金的力学性能.相较于未添加 Sc 和 Zr 元素的 6082 铝合金,6082-0.1Sc-0.1Zr 合金的拉伸断口呈现的韧窝数量显著增多,且分布较为均匀,合金的塑性得到提高.

参考文献:

- [1] 吕昌略. 微合金化及热轧工艺对铝硅镁基型材组织和性能的影响[D]. 南京:东南大学, 2015.
- [2] 沈宁,何建贤,李春流,等. 双级时效对 6082 型材性能的影响[J]. 热加工工艺, 2014(18):166-168.
- [3] 马英义,宛亚坤. 6082 铝合金热轧工艺研究[J]. 轻合金加工技术, 2000, 28(6):11-12.
- [4] 金曼,孙保良,邵光杰. 添加锆对 Al-Mg-Si 合金时效组织和性能的影响[J]. 机械工程材料, 2006, 30(4): 60-63.
- [5] 钱伟,张振亚,王晓璐,等. 钪、铪对 6082 铝合金性能及微观结构的影响[J]. 中国稀土学报, 2016, 34(5): 592-599.
- [6] 张福豹,许晓静,罗勇,等. $6\times\times\times$ 系铝合金微合金化的研究进展[J]. 材料导报, 2012(s1):384-388.
- [7] 张福豹. 6013 型铝合金的微合金化与性能初步研究[D]. 镇江:江苏大学, 2011.
- [8] ZENG Fanhao, XIA Changqing, GU Yi. The 430 °C isothermal section of the Al-4Mg-Sc-Zr quaternary system in the Al-rich range[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2004, 363(1/2): 175-181.
- [9] XIA Changqing, ZENG Fan-hao, GU Yi. Phase relations of Al-4Mg-Sc-Zr quaternary system in Al-rich range at 430 °C[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2003, 13(3): 546-552.
- [10] WU Yue, CHEN Wenlin. Effect of microalloying of Sc on microstructure and properties of Al-Mg-Si-Cu alloys [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2015, 22(3): 70-75.

Effect of Sc and Zr addition on microstructure and mechanical properties of 6082 alloys

LI Can, LEI Yuan

School of Material Science and Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

Abstract: The 6082 aluminum alloys were prepared by ingot-metallurgy method. The effects of 0.1% Sc and 0.1% Zr (mass fraction) additions on microstructure, mechanical properties in 6082 alloy were investigated. The results show that by adding Sc and Zr in the cast alloy, the grains can be refined to a certain degree. The tensile test results show that additions of Sc and Zr resulted in increasing tensile strength, which can reach 213.14 MPa, and compared with the alloy without Sc and Zr additions, the strength increases by 17% in the 6082-0.1Sc-0.1Zr alloy. Besides, the tensile fracture morphology of the alloy has been improved effectively and the plasticity has been improved obviously with increasing number of dimples.

Key words: 6082 alloy; grain refining; mechanical property; fracture morphology