

Sc 和 AlTiB 在 A356.2 铝合金中的作用对比研究

闫 洪^{1, 2}, 李和平^{1, 2}, 曹瑞珂^{1, 2}

(1. 昆明冶金研究院有限公司, 云南昆明 650031; 2. 中铝集团中央研究院昆明分院, 云南昆明 650031)

摘要: 在A356.2铝合金中分别添加Sc和AlTiB, 通过显微组织和力学性能的测试, 研究它们在A356.2铝合金中的作用差别。试验结果表明: 0.30%Sc+A356.2铝合金的共晶硅已转变成颗粒状, 平均尺寸是2.85 μm , 合金的抗拉强度、伸长率、硬度分别是194.54 MPa、5.6%、HBW67。而1.0%AlTiB+A356.2铝合金的共晶硅是长针状和块状, 平均尺寸为6.76 μm , 合金的抗拉强度、伸长率、硬度分别为158.73 MPa、3.6%、HBW58。通过0.30%Sc+A356.2铝合金和1.0%AlTiB+A356.2铝合金的对比试验得到, Sc在对共晶硅晶粒细化效果和提高铝合金的力学性能方面都超过AlTiB, 而铝合金的力学性能与共晶硅的大小密切相关。

关键词: Sc; AlTiB; A356.2铝合金; 共晶硅; 力学性能

晶粒细化是铝合金熔铸过程中的重要工艺, 它能进一步提高铝合金的力学性能和加工性能, 常用的细化剂是AlTiB中间合金, 但存在制备工艺复杂和细化效果局限性等问题, 所以采用新型晶粒细化技术至关重要。钪是铝合金最有效的合金化元素, 它对合金的细化作用非常显著, 只要加入千分之几的钪就能对铝合金起到很强的变质作用, 并使铝合金的性能发生变化^[1]。目前国内已有含Sc和含AlTiB铝合金的报道, 当加入0.3%Sc后, 能明显细化合金晶粒, 使共晶Si更加细小和均匀^[2-3], 而钪加入合金后, 通过细晶强化, 提高铝合金的力学性能^[4]; 当AlTiB细化剂加入量在1.0%时, 细化效果最好, 硬度也较高^[5], Al-5Ti-B对6061合金具有较好的细化效果^[6]。但对Sc和AlTiB在铸造A356.2铝合金中的作用缺乏系统的对比研究, 尤其是细化效果较好的两种合金对比还未见到。因此, 本试验采用稀土Sc和Al-5.22Ti-1.65B中间合金, 对比它们的细化效果和铝合金力学性能中的作用差别, 为提升铝合金的性能打下基础。

1 试样制备与方法

1.1 试验材料

当铝合金中含有0.30%Sc或者含有1.0%的AlTiB时, 显微组织的细化效果较好^[3, 5]。本研究以纯度为99.9%的纯铝锭、99.9%的纯镁锭和Al-12%Si合金为原料, Al-2.01%Sc、Al-5.22Ti-1.65B中间合金为细化变质剂, 分别配制含有0.30%Sc的A356.2铝合金试样和含有1.0%的Al-5.22Ti-1.65B的A356.2铝合金试样进行对比试验。

1.2 工艺方法

Sc+A356.2铝合金的合金化过程: 用坩埚电阻炉将纯铝锭缓慢加热至740 $^{\circ}\text{C}$, 完全熔化后依次加入Al-12%Si合金、纯镁锭。待充分熔化后, 除净熔体表面熔渣, 保温15 min, 加入Al-2.01%Sc中间合金进行变质处理, 搅拌后静置15 min, 随炉冷却到600 $^{\circ}\text{C}$, 保温10 min, 浇注在200 $^{\circ}\text{C}$ 的模具中, 取出试样, 水淬, 制得0.30%Sc+A356.2铝合金试棒。

AlTiB+A356.2铝合金的合金化过程: 用坩埚电阻炉将纯铝锭、Al-12%Si合金

作者简介:

闫 洪(1961-), 男, 正高级工程师, 研究方向为金属材料的性能。电话: 18687910600, E-mail: yan6230196@sina.com

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2021)11-1286-04

基金项目:

云南省社会发展科技计划-科研院所技术开发研究专项(2011CF009)。

收稿日期:

2021-05-05 收到初稿,

2021-06-10 收到修订稿。

和纯镁锭在770 ℃的温度条件下熔化,保温15 min后除渣,加入Al-5.22Ti-1.65B中间合金,搅拌1 min,保温5 min,搅拌1 min,静置8 min,随炉冷却到600 ℃,浇注在200 ℃的模具中。取出,水淬,制得1.0%AlTiB+A356.2铝合金试棒。

合金中的Sc、Mg、Ti和B元素含量采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP法)测定,Si采用比色法进行测试。各试样的成分见表1。

1.3 组织观察和性能测试

在试棒的相同位置截取金相试样,对金相试样进行粗磨、精磨、抛光后,用0.8%HF溶液进行浸蚀,浸蚀时间为8 s左右。用自来水和无水乙醇清洗后,吹风机吹干,制成金相试样。在AxioimagerA2m型研究级智能数字材料显微镜上进行金相组织分析,并用分析软件测量共晶Si相的尺寸。拉力试验在CMT5105型微机控制电子万能试验机上完成,拉伸速率是16 mm/min。在Q3000MS型硬度计上测定试样的布氏硬度,压头直径为10 mm,载荷1 000 kg。采用帕纳科锐影Empyrean型X射线衍射仪(XRD)分析合金的物相组成。用STA449F3型热分析仪测试合金的DSC曲线,升温速率是10 ℃/min。

2 试验结果与分析

2.1 Al-2.01%Sc中间合金的组织结构

Al-2.01%Sc中间合金的金相组织见图1。从图中可以看出,其显微组织主要由基体 α -Al相和 Al_3Sc 相组成,有许多块状的 Al_3Sc 相从基体中析出, Al_3Sc 相较为粗大,平均尺寸是29 μm 。与之对应的是,在Al-

表1 合金试样的成分 Table 1 Compositions of alloy samples							$w_{\text{B}}/\%$
合金	Si	Mg	Ti	Sc	B	Al	
0.30%Sc+A356.2铝合金	6.59	0.31	0.13	0.29	0	余量	
1.0%AlTiB+A356.2铝合金	6.61	0.33	0.18	0	0.004 3	余量	
A356.2铝合金	6.68	0.38	0.16	0	0	余量	

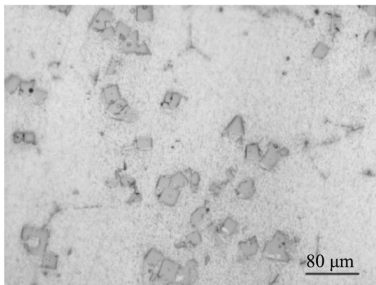


图1 Al-2.01%Sc中间合金的金相组织
Fig. 1 Microstructure of Al-2.01%Sc master alloy

2.01%Sc中间合金的X射线衍射图上出现了强度较高的Al相衍射峰和 Al_3Sc 相衍射峰,如图2所示。

2.2 0.30%Sc+A356.2 铝合金的物相分析

图3是0.30%Sc+A356.2铝合金的X射线衍射图,图中除了较强的 α -Al相和Si相的衍射峰外,还有许多细小的 Al_3Sc 相衍射峰。与图2的Al-2.01%Sc中间合金的X射线衍射图相比, Al_3Sc 相衍射峰的强度要低得多,说明经过Sc变质处理之后, Al_3Sc 相由粗大的块状转变细小的质点, Al_3Sc 属于面心立方结构,其晶体结构和点阵常数都与Al基体相似,符合作为非均质形核核心的条件^[7]。因此,在合金的凝固过程中所形成的细小 Al_3Sc 质点可作为 α -Al的异质形核核心增加熔体中初生 α 相的晶核数量,从而使初生 α 相细化。当Sc含量为0.3%时,熔体中的异质核心 Al_3Sc 的数量较多^[8],图3中细小的 Al_3Sc 相衍射峰也较多,异质核心 Al_3Sc 的数量增加和晶粒细化,导致了 α -Al相晶粒呈现等轴晶组织,几乎没有树枝晶,见图4。

2.3 共晶硅的观察和分析

通过观察表明,Sc对A356.2铝合金有很强作用效果,可使共晶硅形态发生明显变化。从图5a可以看

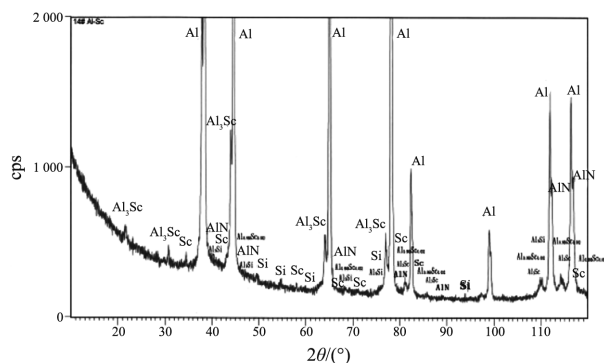


图2 Al-2.01%Sc中间合金的X射线衍射图
Fig. 2 XRD pattern of Al-2.01%Sc master alloy

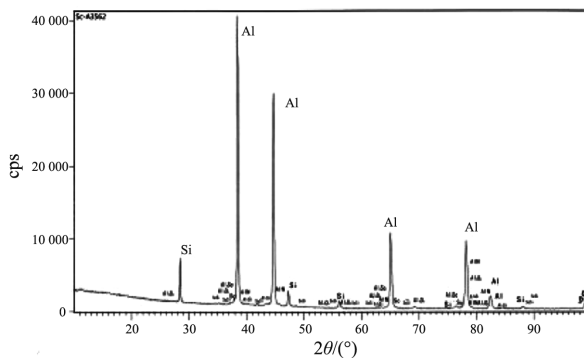


图3 0.30%Sc+A356.2铝合金的X射线衍射图
Fig. 3 XRD pattern of 0.30%Sc+A356.2 aluminum alloy

出,对于0.30%Sc+A356.2铝合金,大部分共晶硅已转变为细小的颗粒状,平均尺寸仅为2.85 μm ;而在图5b的1.0%AlTiB+A356.2铝合金中,出现了长针状和块状共晶硅,平均尺寸是6.76 μm ,晶粒出现粗化;A356.2铝合金的共晶硅呈现粗大的板片状、层片状和粗针状形态,平均尺寸为7.74 μm ,其边缘有尖角,能割裂基体,如图5c所示。比较图5a、b可知,在A356.2铝合金中,Sc对共晶硅的细化效果优于AlTiB,形貌的改善也好于AlTiB,其结果列于表2中。

2.4 差热扫描量热法 (DSC) 分析

对0.30%Sc+A356.2铝合金和A356.2铝合金分别进行差示扫描量热法DSC曲线测试,结果如图6所示。对比分析可见,共晶硅的形核温度(第一个峰值)从A356.2铝合金的589.1 $^{\circ}\text{C}$ 降低至0.30%Sc+A356.2铝合金的584.4 $^{\circ}\text{C}$,说明添加0.30%Sc有助于降低共晶硅的形核温度,达到抑制共晶硅粗化的效果^[9]。在图6a中,0.30%Sc+A356.2铝合金的固液区间较窄,起始点为560.1 $^{\circ}\text{C}$,终止点是635.0 $^{\circ}\text{C}$,二者相差75 $^{\circ}\text{C}$;而图6b中,A356.2铝合金的固液区间较宽,起始点为553.7 $^{\circ}\text{C}$,终止点是646.9 $^{\circ}\text{C}$,相差93.2 $^{\circ}\text{C}$ 。因此,Sc的加入减少了固液区间的凝固时间和共晶Si的析出区域,降低共晶Si的形核和生长时间,实现细化共晶Si的效果。

2.5 力学性能分析

经过测试,试验合金的力学性能见表3。由表3可见,未加细化剂时,A356.2铝合金的力学性能较低,抗拉强度只有148.35 MPa,伸长率是2.3%,硬度为

表2 试验合金的共晶硅形貌和尺寸
Table 2 Morphologies and sizes of eutectic silicon in tested alloys

合金	共晶硅形貌	平均尺寸/ μm
0.30%Sc+A356.2铝合金	细小的颗粒状	2.85
1.0%AlTiB+A356.2铝合金	长针状和块状	6.76
A356.2铝合金	粗大的板片状、层片状和粗针状	7.74

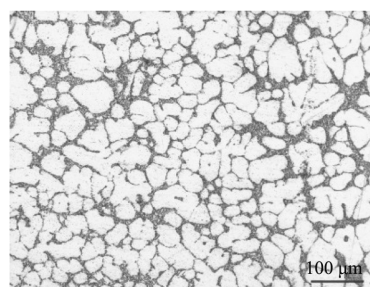


图4 0.30%Sc+A356.2铝合金中 α -Al相形态

Fig. 4 Morphology of α -Al phase in 0.30%Sc+A356.2 aluminum alloy

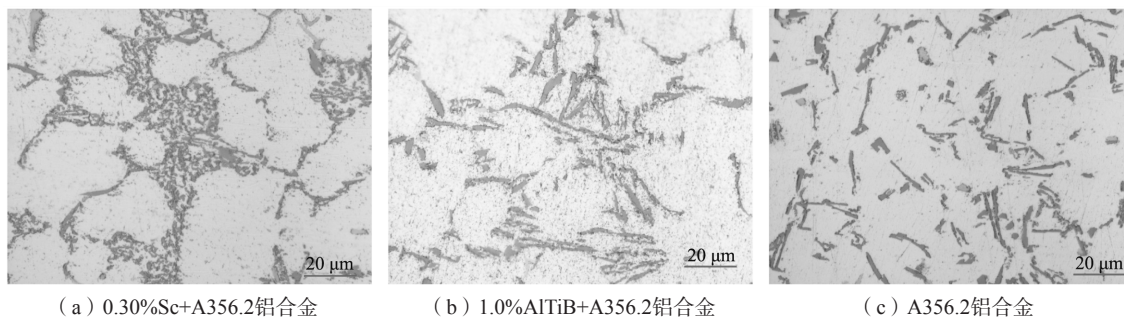


图5 铝合金的共晶硅相形貌

Fig. 5 Morphologies of eutectic silicon phase in aluminum alloys

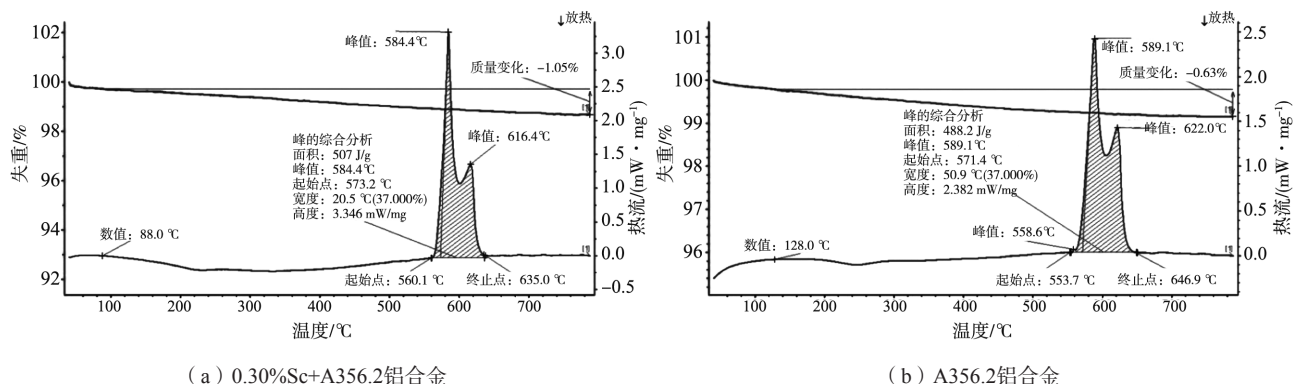


图6 铝合金的DSC曲线

Fig. 6 DSC curves of aluminum alloys

HBW54; 而0.30%Sc+A356.2铝合金的力学性能得到大幅度提高, 抗拉强度达到194.54 MPa, 伸长率是5.6%, 硬度为HBW67; 1.0%AlTiB+A356.2铝合金的抗拉强度是158.73 MPa, 伸长率是3.6%, 硬度是HBW58。结合表2和表3可以看出, 铝合金的力学性能与共晶硅的大小密切相关, 0.30%Sc+A356.2铝合金的力学性能高于1.0%AlTiB+A356.2铝合金, 其主要原因在于Sc对共晶硅晶粒细化作用超过AlTiB, 这有利于满足铝合金高强

高韧的性能要求。

3 结论

(1) 0.30%Sc+A356.2铝合金的共晶硅已转变成颗粒状, 平均尺寸是2.85 μm , α -Al相呈现细小等轴晶组织, 其抗拉强度、伸长率、硬度分别为194.54 MPa、5.6%、HBW67。

(2) 1.0%AlTiB+A356.2铝合金的共晶硅为长针状和块状, 平均尺寸为6.76 μm , 其抗拉强度、伸长率、硬度分别为158.73 MPa、3.6%、HBW58。

(3) 通过0.30%Sc+A356.2铝合金和1.0%AlTiB+A356.2铝合金的对比试验得到, Sc在对共晶硅晶粒细化效果和提高铝合金力学性能方面都超过AlTiB, 而铝合金的力学性能与共晶硅的大小密切相关。

表3 试验合金的力学性能
Table 3 Mechanical properties of test alloys

合金	抗拉强度/MPa	伸长率/%	硬度HBW
0.30%Sc+A356.2铝合金	194.54	5.6	67
1.0%AlTiB+A356.2铝合金	158.73	3.6	58
A356.2铝合金	148.35	2.3	54

参考文献:

- [1] 张欣. 含钪铝合金及其应用 [J]. 稀有金属, 2007, 31 (6): 857-861.
- [2] 何兵, 覃铭, 梁柳青, 等. Sc含量对Al-Si铸造合金组织与力学性能的影响 [J]. 铸造技术, 2017, 38 (10): 2360-2364.
- [3] 赵宾, 李萍, 徐杰, 等. 含钪A356 铝合金半固态浆料的制备及组织分析 [J]. 材料热处理学报, 2015, 36: 23-28.
- [4] 郑亚虹, 李德成, 李建国. 含钪铸造铝合金组织和力学性能的研究 [J]. 铸造, 2004, 53 (4): 302-304.
- [5] 秦晓雄, 杨运宇, 冯绍凯, 等. Al-5Ti-B细化剂对A356合金微观组织的影响 [J]. 材料研究与应用, 2017, 11 (1): 9-12.
- [6] 程旭辉, 毛健. Al-5Ti-B对6061铝合金细化效果及其机理研究 [J]. 热加工工艺, 2004, 46 (13): 95-98.
- [7] 陶辉锦, 李绍唐, 刘记立, 等. Sc在铝合金中的微合金化作用机理 [J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2008, 13 (5): 249-259.
- [8] 程和法, 黄笑梅, 黄吉, 等. 钪变质处理对A356合金凝固组织和性能的影响 [J]. 中国稀土学报, 2016, 34 (3): 327-333.
- [9] 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.

Comparative Study on Effects of Sc and AlTiB in A356.2 Aluminum Alloy

YAN Hong^{1,2}, LI He-ping^{1,2}, CAO Rui-ke^{1,2}

(1. Material Research Institute of Kunming Metallurgical Research Institute Co., Ltd., Kunming 650031, Yunnan, China; 2. Kunming Branch of Central Research Institute of Aluminum Corporation of China, Kunming 650031, Yunnan, China)

Abstract:

The effects of Sc and AlTiB on A356.2 aluminum alloy were studied by testing microstructure and mechanical properties. The results show that the eutectic silicon of 0.30%Sc+A356.2 aluminum alloy has become granular, and the average size was 2.85 μm . The tensile strength, elongation and hardness were 194.54 MPa, 5.6% and HBW67, respectively. However, the eutectic silicon of 1.0%AlTiB+A356.2 aluminum alloy was long acicular and massive with an average size of 6.76 μm . The tensile strength, elongation and hardness were 158.73 MPa, 3.6% and HBW58, respectively. Through the comparative test of 0.30%Sc+A356.2 aluminum alloy and 1.0%AlTiB+A356.2 aluminum alloy, it is found that Sc is superior to AlTiB in refining eutectic silicon grains and improving mechanical properties of aluminum alloy, and the mechanical properties of aluminum alloy are closely related to the size of eutectic silicon.

Key words:

Sc; AlTiB; A356.2 aluminum alloy; eutectic silicon; mechanical properties