

Ti、B、Sr、RE 联合细化及变质对 A356 铝合金微观组织的影响

左秀荣 李立祥 仲志国

(郑州大学物理工程学院材料物理教育部重点实验室 河南 郑州 450052)

摘要 采用金相显微镜、SEM、EDAX 等试验方法,研究添加 Ti、B、Sr、RE 元素细化及变质对 A356 铝合金显微组织的影响,得出 RE 的添加并未与合金中的 Mg 形成高 Mg 含量化合物,Mg 的分布仍很均匀,同时含铁相得到细化,对于 0.10% Ti 细化的 A356 铝合金,RE 的添加使二次枝晶间距明显减小,0.01% Ti 与 0.03% B 联合细化对 A356 铝合金的细化作用明显优于 0.10% Ti 的细化作用,晶粒为细小等轴晶,且 Al-Fe-Si-Mg、Al-Si-RE 相得到明显的细化,Ti、B、Sr、RE 联合细化及变质的合金获得了最佳的硅颗粒变质效果。

关键词 :A356 铝合金;细晶铝锭;变质处理;微观组织

中图分类号: TG146.2⁺1 文献标识码: A 文章编号: 1000-8365(2007)01-0057-03

Effect of Combined Refining and Modification of Ti, B, Sr and RE on Microstructure of A356 Aluminium Alloy

ZUO Xiu-rong, LI Li-xiang, ZHONG Zhi-guo

(School of Physical Science & Technology, Key Laboratory of Material Physics Ministry of Education, Zhengzhou University, Zhengzhou 450052, China)

Abstract :The combined refining and modification effect of Ti, B, Sr and RE (cerium-rich mixtures of rare earth) on microstructure of A356 aluminum alloy has been studied using OM, SEM, EDAX etc. It has been found that RE does not react with Mg and form Mg-rich phases, the Mg distribution is uniform in the alloy and the Fe-rich phase is refined with addition of RE. The RE addition significantly reduces secondary dendrite arm spacing in A356 aluminum alloys refined with 0.1% Ti. The Combined refining of 0.01% Ti and 0.03% B has better grain refinement than that with 0.1% Ti and results in equiaxed α (Al) grain structure, and Al-Fe-Si-Mg and Al-Si-RE phases are also refined obviously. Combined refining and modification of Ti, B, Sr and RE obtain the best modification effect for the eutectic silicon.

Key words :A356 aluminium alloy; Grain-refining aluminium ingot (GRAI); Modification; Microstructure

未变质及细化的 A356 铝合金的铸态组织为粗大片状共晶硅和 α (Al) 枝晶组织,力学性能及铸造性能较低。因此必须添加变质元素及晶粒细化元素,使共晶 Si 由粗大的片状转变为细小的纤维状,同时使 α (Al) 枝晶得到细化。Sr 为 A356 铝合金常用的变质剂,具有变质效果好、不易衰退等特点^[1,2]。Al-Ti 中间合金为 A356 铝合金常用细化剂,加入量为 0.08% ~ 0.20% Ti。目前的研究表明,添加高 B/Ti 比的铝钛

硼中间合金或 Al-B 中间合金具有更佳的细化效果^[3]。RE 元素的添加使 A356 铝合金硅相变质细化的同时,也细化先共晶 α (Al),同时减少了孔隙率^[4]。因此,本文研究 Ti(通过细晶铝锭添加)、B、Sr、RE 元素联合细化变质对 A356 铝合金微观组织的影响。

1 试验过程及试验方法

采用 Al99.70 A 的纯铝及 XAl99.70 A-4 的细晶铝锭为原料,在 7.5 kW 电阻炉中制备 A356 铝合金。熔体温度达 750 °C 时添加 Al-10Sr 及 Al-10RE 中间合金,720 °C 时添加 Al-4.43B 中间合金。熔炼过程中喷吹氩气进行精炼,熔体温度为 715 °C 时,浇注于已预热 200 °C 的金属型中。凝固后从距试样底部 4 cm 处取样,研磨抛光后用 keller 试剂腐蚀制得金相试样。

收稿日期 2006-02-14; 修订日期 2006-11-06

基金项目 河南省重大科技攻关项目(0322020600)

作者简介 左秀荣(1967-) 黑龙江齐齐哈尔人,博士,副教授,研究方向:金属材料冶金及强化研究。

Email: zuoxiurong@sohu.com

金相样品在配有 VideoTEST 金相采集测量软件的 OLYMPUS BX51 型金相显微镜上进行显微组织图像采集和二次枝晶间距的测量。采用带有能谱的 JSM6700F 冷场发射扫描电镜对 A356 铝合金进行扫描电镜观察及分析。

2 试验结果及分析

合金的化学成分及二次枝晶间距如表 1 所示。图 1 为合金的宏观组织形貌,图 2 为合金的微观组织形貌。由表 1、图 1、图 2 可见,B 的添加使合金获得细小的等轴晶。0.01% Ti 与 0.03% B 联合细化的 A356 铝合金中 Ti 与 B 反应生成了 TiB_2 ,硼过剩。含有硼的熔体在 659 ℃ 时发生共晶反应($L \rightarrow \alpha(Al) + AlB_2$)。由于 A356 铝合金的熔点为 614 ℃,共晶 $\alpha(Al)$ 可作为 A356 铝合金中 $\alpha(Al)$ 的形核核心,从而细化晶粒^[5]。共晶反应生成的 AlB_2 在 TiB_2 上择优生长,覆盖有 AlB_2 的 TiB_2 进一步促进了晶粒细化作用^[6]。在添加 0.10% Ti 细化的 A356 铝合金中, Si 溶入 $TiAl_3$ 形成 $(Al_{1-x}Si_x)_3Ti$ 充

当形核核心。A356 铝合金包晶反应($(Al_{1-x}Si_x)_3Ti + L \rightarrow \alpha(Al)$)开始温度低于合金的熔点, $\alpha(Al)$ 不能作为形核核心,导致细化能力的降低^[5],因此 0.10% Ti 细化的 A356 铝合金为树枝晶。在 0.10% Ti 细化的 A356 铝合金中添加稀土,使二次枝晶间距明显减小。这可能是由于稀土元素在铝中的固溶度很小,在凝固过程中被排斥到液相中,并在固液前沿产生成分过冷,引起界面不稳,促进二次枝晶的不断分化、细化所致^[7]。

表 1 合金的化学成分 $u(\%)$ 及二次枝晶间距

Tab. 1 Chemical compositions and secondary dendrite arm spacing of the samples with combined refining and modification (mass %)

合金	Si	Mg	Sr	Ti	B	Re	DAS/ μm
a	6.77	0.426	0.0244	0.106	0	0	24.9
b	6.58	0.425	0.02	0.0994	0	0.3	14.3
c	6.75	0.382	0.0181	0.0141	0.03	0	17.83
d	7.21	0.267	0.0202	0.0111	0.03	0.3	21.32

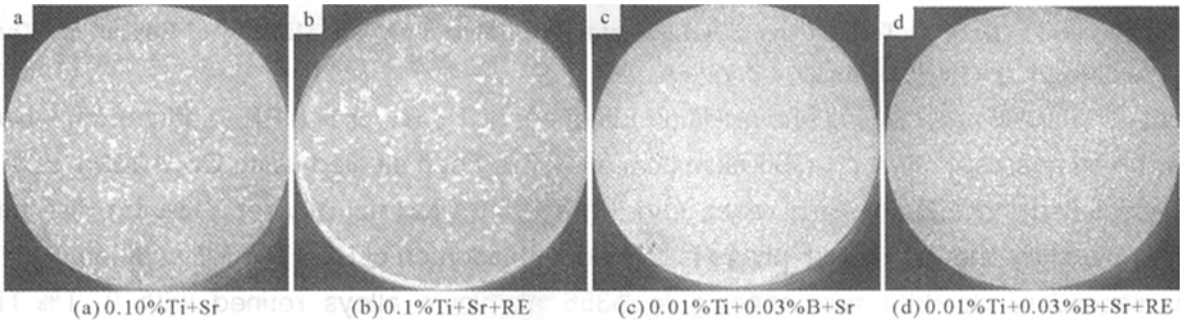


图 1 合金的宏观组织形貌

Fig. 1 Macrograph of A356 alloys with combined modification and refinement

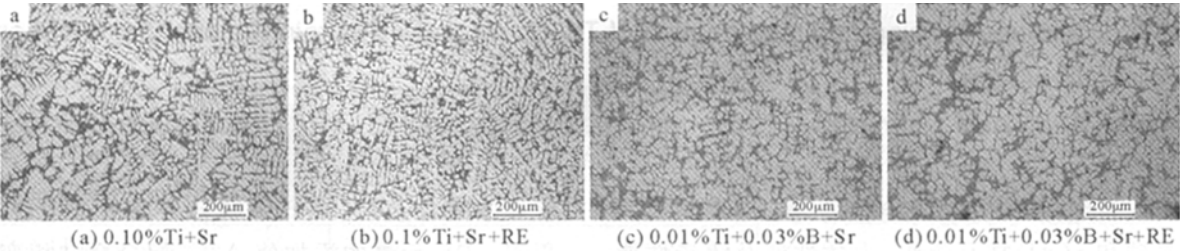


图 2 合金的微观组织形貌

Fig. 2 Micrograph of A356 alloys with combined modification and refinement

图 3 为合金的硅颗粒形貌。可看出 Ti、B、Sr 细化变质的合金与 Ti、B、Sr、RE 细化变质的合金硅颗粒细小,尤以 Ti、B、Sr、RE 变质效果最好。通过组织观察还可发现共晶团分布均匀。因此,Ti、B、Sr 细化变质及 Ti、B、Sr、RE 细化变质可得到较好的力学性能,这已在我们的其他研究中得到证实。通常,当变质元素的原子半径与硅原子的原子半径比大于 1.65 时,才会产生变质作用^[8],而 Sr、Ce、La 与 Si 的原子半径比大于 1.65,均具有变质作用。稀土的原子半径大于铝,凝固过程中在凝固前沿富集产生成分过

冷;同时含稀土、硅的相,含铁、镁和硅的相和初生 $\alpha(Al)$ 同时成为共晶体的异质形核核心,使共晶团分散、体积变小。据文献[9,10]介绍,锆对 A356 铝合金的变质效果还与晶粒细化有关,晶粒越细小,共晶硅的生长空间变小,则变质效果越好,达到最佳变质效果的时间缩短。所以 Ti、B、Sr、RE 联合细化具有最佳的变质效果。

图 4 为合金析出相,表 2 为其能谱分析结果。稀土的添加使合金内部出现白色的块状相,能谱分析为富含稀土及 Si 的相,不含铁及不含或含有少量的镁;

不含稀土或含稀土较少的相呈灰色,含有较高的 Mg、Fe、Si。稀土的添加并未使 Mg 聚集,从而使 Mg₂Si 的强化作用降低,这主要是因为 RE 与 Mg 的作用较弱,而与 Si 的交互作用较强,形成了 Al-Si-RE 化合物^[11]。含稀土的合金,长针状铁相也减少,主要是由于 La、Ce

在铝中固溶度都很小,与 Fe 的交互作用较强。La、Ce 与针状的含 Fe 相相互作用形成 CeFe₂Al₁₀ 和 LaFe₂Al₁₀ 比较圆润的三元化合物^[12]。0.01% Ti 与 0.03% B 细化的合金晶粒极其细小,Al-Fe-Si-Mg、Al-Si-RE 明显细化(见图 4)。

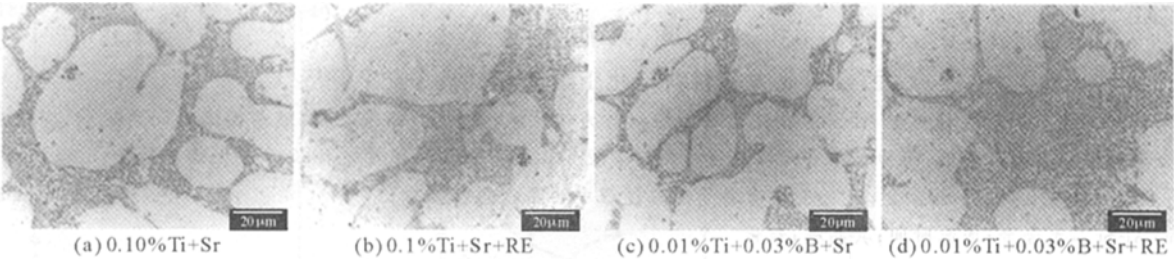


图 3 合金的硅颗粒形貌

Fig. 3 Silicon morphology of A356 alloys with combined modification and refinement

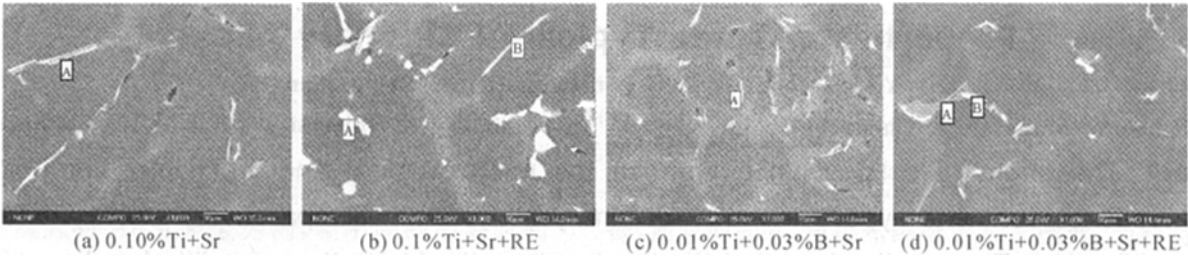


图 4 合金析出相的能谱分析

Fig. 4 EDAX analysis of precipitated phases of alloys

表 2 析出相的 EDAX 分析结果

Tab. 2 EDAX results of precipitated phases (mass %)

测试点	Al-K	Si-K	Mg-K	Fe-K	La-L	Ce-L	Pr-L
A(图 4a)	85.02	7.72	4.23	3.03	0	0	
A(图 4b)	54.55	15.71	0	0	7.95	16.97	4.15
B(图 4b)	78.83	12.64	4.95	3.58	0	0	0
A(图 4c)	76.31	14.81	5.17	3.71	0	0	0
A(图 4d)	81.86	8.12	4.97	3.81	0	1.24	0
B(图 4d)	66.35	14.26	2.66	0	6.30	8.37	2.06

3 结论

- (1) RE 并未与 A356 铝合金中的 Mg 形成高 Mg 含量化合物, Mg 的分布仍很均匀,同时含铁相得到细化,对于 0.1% Ti 细化的 A356 铝合金,由于稀土的添加使二次枝晶间距明显减小;
- (2) 0.01% Ti 与 0.03% B 联合细化对 A356 铝合金的细化作用明显优于 0.10% Ti 的细化作用,晶粒几乎完全为细小等轴晶,且 Al-Fe-Si-Mg、Al-Si-RE 相得到明显的细化;
- (3) Ti、B、Sr、RE 联合细化及变质的合金获得了最佳的硅颗粒变质效果。

参考文献

[1] Stavros A , Argyropoulos , Gordon L S Chow. An experimental investigation on the assimilation and recovery of strontium-magnesium alloys in A356 melts[J]. Journal of Light Metals , 2002 , (2) 253-262.
[2] Jung B I , Jung C H , Han T K , et al. Electromagnetic

stirring and Sr modification in A356 alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology , 2001 , 111 69-73.
[3] 王东辉,李建国,郑燕康,等. Al-3B 中间合金的加入量对亚共晶 Al-Si 合金晶粒细化的影响[J]. 稀有金属, 2001 25 (6) 411-415.
[4] 倪红军,孙宝德,蒋海燕,等. 稀土熔剂对 A356 铝合金的作用[J]. 中国有色金属学报, 2001 , 11 (4) :547-552.
[5] Mohanty P S , Gruzleski J E. Grain refinement mechanisms of hypoeutectic Al-Si alloys[J]. Acta mater , 1996 44 (9) 3749-3760.
[6] 王 丽,孙益民,边秀房,等. 亚共晶 Al-Si 合金的细化处理[J]. 特种铸造及有色合金, 1998 (5) 18-20.
[7] 钟 声,苗 忠,曹占义. 稀土在铝硅合金中细化和变质作用微观机制[J]. 长春大学学报, 2001 , 11 (4) 9-11.
[8] Knuutinen A , Nogita K , McDonald S D , et al. Modification of Al-Si alloys with Ba , Ca , Y and Yb[J]. Journal of Light Metals , 2001 (1) :229-240.
[9] 张静武,李 慧,孟显哲,等. ZL101 合金的变质[J]. 中国有色金属学报, 2001 , 11 (S2) 91-94.
[10] Geng Huiyuan , Li Yanxiang , Chen Xiang , et al. Effects of boron on eutectic solidification in hypoeutectic Al-Si alloys [J]. Scripta Materialia , 2005 53 69-73.
[11] 王经涛,王海波,许育中,等. 铸态稀土铝合金中元素分布与枝晶偏析[J]. 轻合金加工技术, 1995 23 (5) 35-38.
[12] 孙伟成,张淑荣,侯爱芹. 稀土在铝合金中行为[M]. 北京:兵器工业出版社, 1992.