DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.02.013

Sr、B 和 RE 复合变质对 Al-30Si 合金组织和性能的影响

万　辉,李小松,李铁林,蔡安辉,罗　云
(湖南理工学院 机械工程学院,湖南 岳阳 414000)

摘　要:研究 Sr、B 和 RE 复合变质对 Al-30Si 合金组织与性能的影响。结果表明,细化变质处理后的合金组织形貌发生了显著变化,α(Al)相枝晶群消失,转变为等轴晶或柱状晶;初晶硅颗粒细化,棱角钝化;针状的共晶硅变成短杆状或颗粒状,分布均匀。合金抗拉强度提高 55%,伸长率增加约 66%,硬度略有增加。当 RE 含量为 0.5%~0.8%时,合金表现出较好的综合力学性能。

关键词:锶硼稀土复合变质;Al-30Si;显微组织;力学性能

中图分类号:TG146.2;TG113　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)02-0186-04

Effect of Compound Modification of Sr, B and RE on Microstructure and Properties of Al-30Si Alloy

WAN Hui, LI Xiaosong, LI Tielin, CAI Anhui, LUO Yun
(College of Mechanical Engineering, Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414000, China)

Abstract: The effect of compound modification of Sr, B and RE on microstructure and properties of Al-30Si alloy was studied. The results show that the microstructure and morphology of the alloy change significantly after refinement and modification, and the dendritic groups of α (Al) phase disappeared and are transformed into equiaxed or columnar crystals. Primary silicon granules are refined and edges and corners are passivated. Acicular eutectic silicon becomes short rod-shaped or granular and evenly distributed. The tensile strength, elongation and hardness of the alloy increase by 55% and 66%, respectively. When RE content is 0.5~0.8%, the alloy exhibits better comprehensive mechanical properties.

Key words: Sr-B-RE compound modification; Al-30Si; microstructure; mechanical properties

高硅铝合金具有密度小、高温强度高、耐磨、耐蚀、热膨胀系数低、导热性高、铸造性能和焊接性能优良等诸多优点,在航空航天、汽车、机械、电子等工业领域中具有巨大的应用前景[1,2]。高硅铝合金的使用性能直接取决于硅相的形态、尺寸与分布,与基体的结合方式,硅相本身的断裂特性等。在未经处理的合金组织中,所存在的呈粗大的板片状、多角形块状或五瓣星状的初晶硅以及呈粗大针状的共晶硅,严重割裂了基体,降低了力学性能,恶化了切削加工性能,制约了高硅铝合金的广泛应用。这一问题随着硅含量的提高而更加突出。目前,主要通过变质剂处理、半固态搅拌、快速凝固、喷射沉积等方法来改善和控制硅相形态,以提高高硅铝合金的使用性能[3-5]。高硅铝合金的变质处理主要集中在细化变质初晶硅和共晶硅,已有人成功变质处理了 Si 质量分数在 30%以内的高硅铝合金[6-8],但研究还不够完善。本文通过添加 Sr、B、RE 3 种变质元素,研究 Sr、B 和 RE 复合变质对 Al-30Si 合金组织和性能的影响。

1　试验材料与方法

试验主要材料:99.9%纯铝,99.9%结晶硅 (质量分数,下同),细化变质剂包括 Al-10Sr、Al-4B 和 A1-10RE 中间合金。合金成分如表 1 所示。合金专用覆盖剂、精炼剂、99.99%的氩气、专用搅拌器、SG2-7.5-12 型电阻炉。

先把约 1/2 的铝放入坩锅中,以慢速(3.5 ℃/min)加热至 720 ℃使其熔化,当铝料成浆糊状时,升温至 880 ℃,将结晶硅压入铝液中,同时把余下的铝加入坩锅中。当硅完全溶化后,均匀搅拌合金液,然后降

收稿日期:2018-10-08
基金项目:湖南省科技计划资助项目(12FJ4335)
作者简介:万　辉(1995-),江西宜春人,硕士生.研究方向:铸造合金制备与加工研究.电话:18473013644,E-mail:1359157673@qq.com
通讯作者:李小松(1965-),湖南临湘人,教授.研究方向:铸造合金制备与加工研究.电话:13807304385,E-mail:songxli89@163.com

表1 Al-30Si合金的化学组成 w(%)
Tab.1 Chemical components of Al-30Si alloy

Si	Sr	B	RE	Al
30.0	0	0	0	Bal.
30.0	0.044	0.036	0.5	Bal.
30.0	0.044	0.036	0.8	Bal.
30.0	0.044	0.036	1.0	Bal.
30.0	0.044	0.036	1.2	Bal.
30.0	0.044	0.036	1.5	Bal.

温至 840 ℃，静置 3～5 min 后，对合金液进行精炼除气 10 min 左右，扒渣，加入 A1-10RE 中间合金进行变质，搅拌使其充分熔化；静置 10 min 后，炉子空冷降温至 760 ℃时加入 Al-4B、Al-10Sr 中间合金，保温 30 min，炉子空冷至 740 ℃，压入六氯乙烷(加入量为合金总量的 0.5%)对合金液进行精炼除气 10 min，扒渣。降温至 720 ℃，浇铸到已预热至 200 ℃左右的金属模中，试样尺寸 ϕ20 mm×100 mm。在 RGM-4200 型电子万能材料实验机上进行拉伸实验(拉伸速率为 5 mm/min，准确度等级为 05 级)。从试棒断裂处取金相试样，经打磨抛光后，用 5%HF 腐蚀，用金相显微镜观察其组织。取金相组织观测面，用 HB-3000 布氏硬度计测量其硬度，载荷为 3 000 kg，每个试样测 5 点，取其平均值。

2 试验结果与分析

2.1 Sr、B 和 RE 复合变质对 α(Al)相的影响

图 1 为 Sr、B 和 RE 细化变质后合金显微组织。图 1(a)为未细化变质的合金显微组织，可见，α(Al)相分枝高度发达，呈树枝状分布。

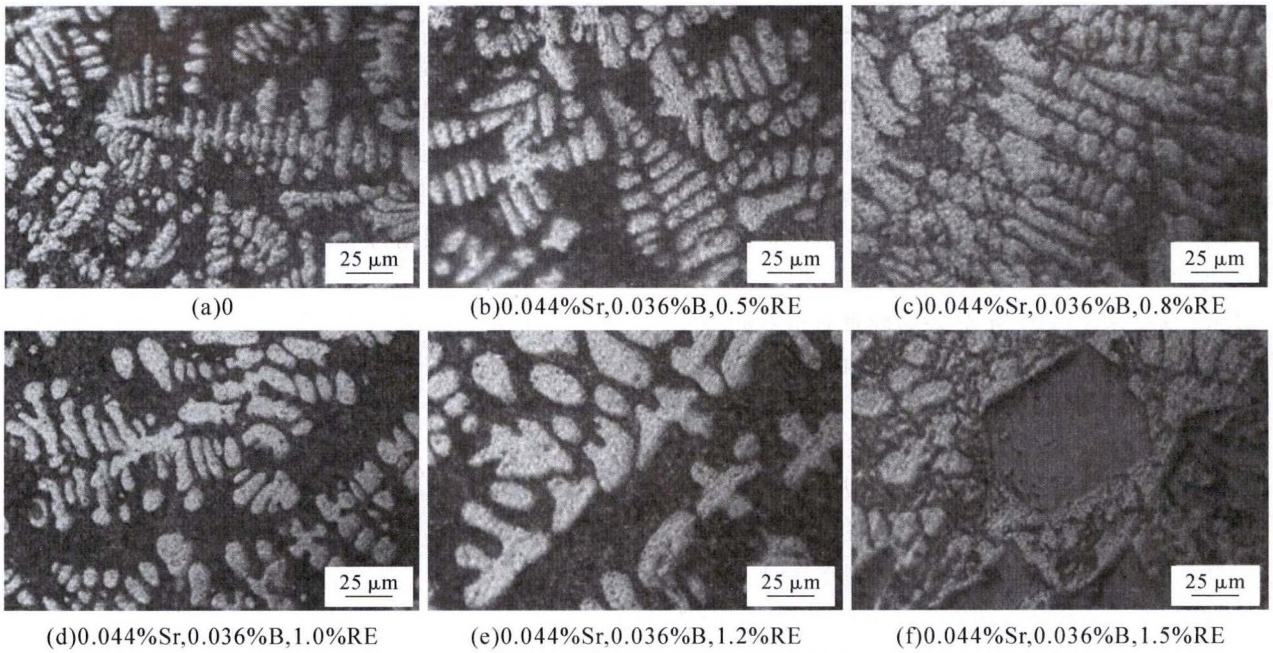
当 B 和 Sr 的含量分别保持 0.036%和 0.044%不变时，随着 RE 的含量的不同，同未细化变质相比，从图 1(b-f)可见，枝晶形态与大小发生显著变化，细长的、分枝高度发达的柱状枝晶群消失，转变为生长位向任意的等轴晶和少量尺寸已大大细化的柱状晶。尽管此时的等轴晶的分枝仍较发达，但等轴化倾向相当明显，而且枝晶尺寸大幅度减小。当合金中 RE 含量在 0~0.8%时，枝晶组织随着 RE 含量的逐渐增加细化效果越来越好，分布也均匀。当合金中 RE 含量继续增加，细化效果有所下降。当 RE 含量为 0.8%时最为理想，形态密实、尺寸细小而均匀，充分显示出 Sr、B、RE 对合金的枝晶细化效应。

B 对合金中 α(Al)相具有很好的细化效果，Sr 的存在改变了液态合金的性质，导致枝晶前沿生长过冷度增加，降低了枝晶 α 固液界面能，抑制液相中等轴晶的形核，从而促进枝晶 α 柱状化生长并导致枝晶数量的增加[9]。同时，RE 与铝及铝硅合金中的 Fe、Si 等可形成高熔点的细小化合物，这些细小化合物又能起到非自发形核的作用，使晶粒得到细化[10]。

2.2 Sr、B 和 RE 复合变质对初生硅相和共晶硅相的影响

图 2 为 Sr、B 和 RE 复合变质对初生硅相和共晶硅相的影响。可见，未变质的铸态合金中有大量呈粗大尖角板块状的初晶硅和长针状的共晶硅存在，并且分布不均匀(图 2a)。

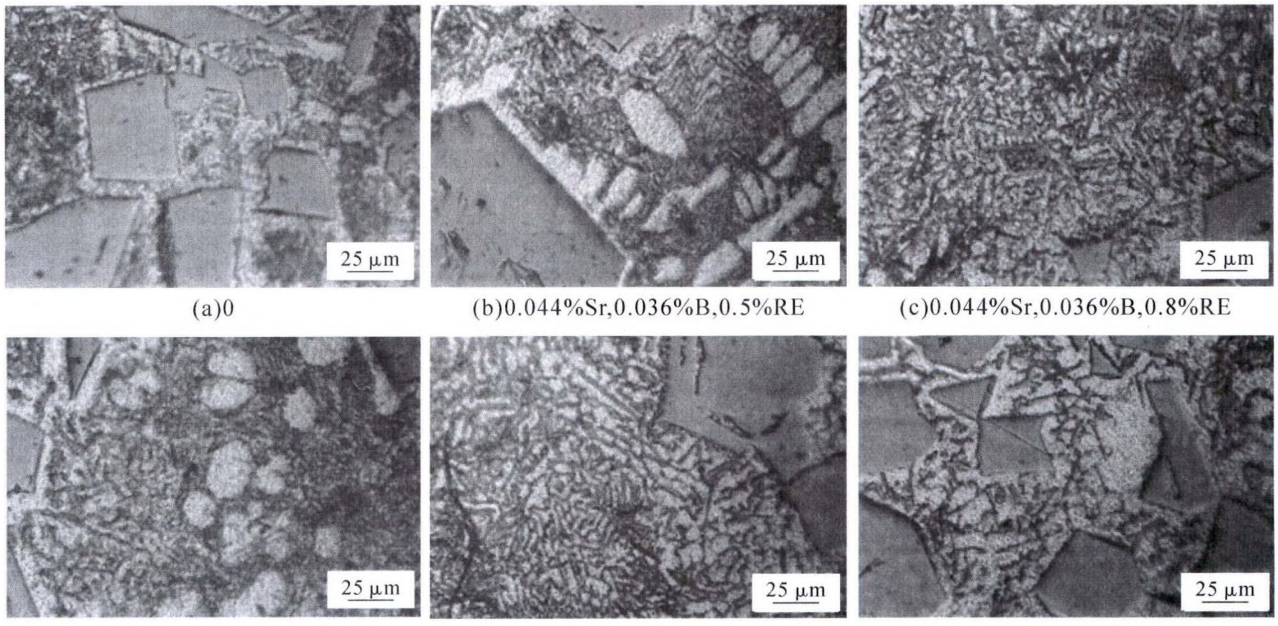
当 B 和 Sr 的含量分别保持 0.036%和 0.044%不变时，随着 RE 的含量的不同，同未细化变质相比，从图 2(b-f)可见，硅相形态都发生了较大的变



(a)0　(b)0.044%Sr,0.036%B,0.5%RE　(c)0.044%Sr,0.036%B,0.8%RE

(d)0.044%Sr,0.036%B,1.0%RE　(e)0.044%Sr,0.036%B,1.2%RE　(f)0.044%Sr,0.036%B,1.5%RE

图 1 Sr、B 和 RE 复合变质对 α(Al)相的影响
Fig.1 Effect of compound modification of Sr、B and RE on α(Al) phase



(a)0 (b)0.044%Sr,0.036%B,0.5%RE (c)0.044%Sr,0.036%B,0.8%RE

(d)0.044%Sr,0.036%B,1.0%RE (e)0.044%Sr,0.036%B,1.2%RE (f)0.044%Sr,0.036%B,1.5%RE

图 2 Sr、B 和 RE 复合变质对初晶硅和共晶硅的影响

Fig.2 Effect of compound modification of Sr、B and RE on primary silicon and eutectic silicon

化。初晶硅形状由尖角粗大板块状变成五星瓣状或分隔成细小的颗粒状，且棱角钝化。长针状的共晶硅变成短棒状或颗粒状。当 RE 含量为 0.5%时，如图 2(b)所示，初晶硅只从尖角粗大板块状变成了多边形，共晶硅形貌变化不大。当 RE 含量增加到 0.8%时，如图 2(c)所示，初晶硅明显均匀细化，尖角粗大板块状几乎不见。共晶硅大部分由针状变成短杆状，甚至颗粒状，均匀弥散的分布在基体中。随着 RE 含量的进一步增加，当 RE 含量为 1.0%时，如图 2(d)所示，初晶硅已细化，解体为小块状，但分布不均匀。共晶硅大部分已变成短杆状或粒状，小部分呈针状。当 RE 含量为 1.2%时，如图 2(e)，初晶硅部分又变成具有尖角的板块状。共晶硅变质效果较好，分布较均匀。当 RE 含量为 1.5%时，如图 2(f)所示，初晶硅变质效果较好，都变成小板块状，部分已圆角钝化。共晶硅呈针状，分布呈稀疏状。

同时从图 2 的分析可以看到，硅相形态都发生了变化，但共晶硅的变质效果比初晶硅的变质效果更显著一些。这是因为 Sr 对共晶硅具有很好的细化变质效果[6]，同时 RE 对共晶硅也具有变质作用。Sr 变质共晶硅的机理主要是游离态的 Sr 吸附在先导相硅相表面，阻止了硅相按片状方式生长并使其产生孪晶，按 TPRE 机制生长，从而长成分叉较多的纤维状。稀土变质初晶硅和共晶硅的机理比较复杂，人们对其变质机理存在分歧。一种观点[9]：认为稀土的加入减弱了 Si-Si、Si-Al 原子团之间的结合，加强了 Al-Al 原子团的结合，导致 α(Al)相首先形核而硅相过冷，共晶结晶时 α(Al)相作为领先相析出并长大，从而限制了共晶硅的生长。但这一观点认为稀土对初晶硅的影响很小。另一种观点[10]：认为稀土变质的主要作用是由于稀土元素 La、Ce 等在凝固的富集作用而导致结晶前沿形成成分过冷，从而使硅相生长易于分枝，初晶硅和共晶硅得以细化。对于稀土在变质过程中究竟起何作用以及如何起作用，许多学者提出了不同的观点，目前尚未形成统一的认识，还有待于进一步深入研究。

2.3 Sr、B 和 RE 复合变质对力学性能的影响

图 3 为 Sr、B 和 RE 复合变质对 Al-30Si 合金抗拉强度的影响。由图可见，细化变质后合金抗拉强度显著提高，大约提高了 55%，当 RE 的含量在 0~0.8%时抗拉强度逐渐增加，当 RE 含量在 0.8%~1.0%时抗拉强度逐渐减少，当 RE 含量在 1.0%~1.2%时抗拉强度又逐渐增加，当 RE 含量为 0.8%是抗拉强度达到最高为 90.1MP。硅相细化，枝晶 α 强化，能增加强韧性，提高 Al-Si 合金力学

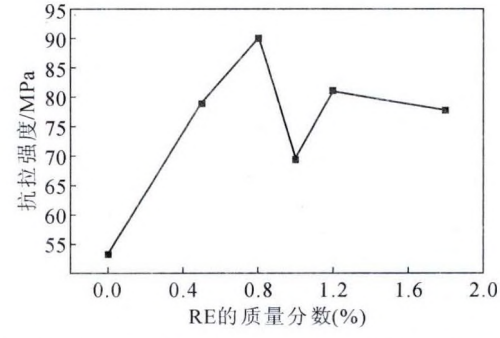


图 3 Sr、B 和 RE 复合变质对 Al-30Si 合金抗拉强度的影响

Fig.3 Effect of compound modification of Sr、B and RE on tensile strength of Al-30Si alloy

性能。由 2.1 和 2.2 的分析可知，当含 RE 含量为 0.8%时枝晶 α 强化效果最好，同时，初晶硅和共晶硅细化效果最好，故强度最高。

图 4 为 Sr、B 和 RE 复合变质对 Al-30Si 合金伸长率的影响。由图可见，当 RE 含量为 0.5% 时，合金伸长率最大，与未细化变质相比增加 66%，但随 RE 含量增加，伸长率有所下降，特别是当 RE 含量为 1.2%、1.5%时，伸长率比为细化变质的还略小。

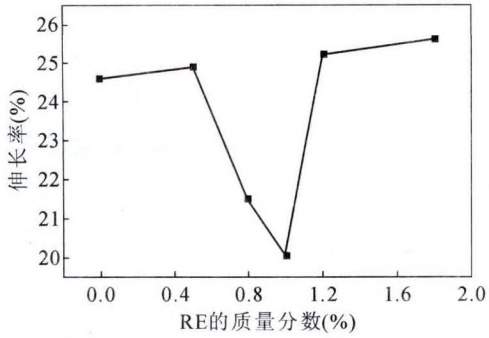


图 4 Sr、B 和 RE 复合变质对 Al-30Si 合金伸长率的影响
Fig.4 Effect of compound modification of Sr、B and RE on elongation of Al-30Si alloy

RE 的化学性质活泼，RE 的加入会促进与其交互作用弱小的元素固溶，反之促进化合物的生成。当合金中 RE 的加入量超过变质所需量时，RE 与 Al 和 Si 等生成针状 AlSiRE 化合物，而这些针状富 RE 相的存在会割裂基体，使合金的力学性能降低。对于 ZL104 合金，通常要求 RE 质量分数小于 0. 3%[7]，而对于高硅铝合金，由于共晶 Si 体积分数更高，只有合适的 RE 加入量才能获得有效的共晶 Si 变质且避免有害针状 RE 相的生成。

图 5 为 Sr、B 和 RE 复合变质对 Al-30Si 合金硬度的影响。由图可知，与未细化变质相比，合金硬度略有提高，但当 RE 含量从 0.5%增加到 1.0%时，合金硬度逐渐减少，当 RE 含量继续增加时，合金硬度又显著增加，当 RE 含量为 1.5%时，合金硬度值最

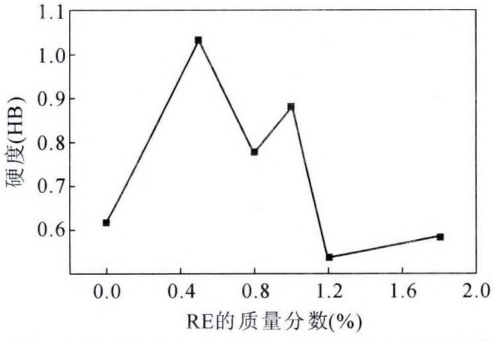


图 5 Sr、B 和 RE 复合变质对 Al-30Si 合金硬度的影响
Fig.5 Effect of compound modification of Sr、B and RE on hardness of Al-30Si alloy

大。这是因为随着 RE 的增加，α(Al)相析出量增加，所占面积扩大，使得测量区域位于 α(Al)相聚集区，硬度值降低，与图 1c、d 和图 2c、d 相符。

过共晶铝硅合金的综合性能在很大程度上取决于初生硅的尺寸和形态[11]。初生硅的晶粒越细，在单位体积内的晶粒数量越多，则在相同的变形条件下，变形分散在更多的晶粒内，每个晶粒的平均变形量大大减小，此时因应力集中引起微裂纹的概率减小，裂纹也不易萌生，因此能有效地提高合金的力学性能[12]。

3　结论

(1)Sr、B 和 RE 复合变质 Al-30Si 后，合金组织形貌发生了显著变化，α(Al) 相枝晶群消失，转变为等轴晶或柱状晶；初晶硅颗粒细化，棱角钝化；针状的共晶硅变成短杆状或颗粒状，分布均匀。

(2)Sr、B 和 RE 复合变质 Al-30Si 后，合金抗拉强度提高 55%，伸长率增加约 66%，硬度略有增加。当 RE 含量为 05%~0.8%时，合金表现出较好的综合力学性能。

参考文献：

[1] 郭良琦，颜银标，蒋良，等. 高硅铝合金中初晶硅形态控制研究进展[J]. 材料导报，2007，219(3): 70-73.

[2] Mohanty P S, Cruzleski J E. Grain refinement mechanisms of hypoeutectic Al-Si alloy[J]. Acta. Mater., 1996(32): 107-132.

[3] 朱兆军，王宏伟，魏尊杰. 2Al - 5Ti-1B 对 A357 合金晶粒细化作用的研究[J]. 材料科学与工艺，2006，14(2): 171-177.

[4] Liu X F. The nucleation sites of primary Si in Al-Si alloys after addition of boron and phosphorus [J]. Journal of Alloy and Compounds, 2005(391): 90-94.

[5] 孙瑜，陈晋，孙国雄. 铝硅合金硅相演变及其对力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金，2001，21(6):1-3.

[6] 王恩东，王磊. 稀土复合变质处理对 Al-Si 合金性能的影响[J].铸造技术，2016，37(8): 1690-1692.

[7] 李庆林，李斌强，李进宝，等. 混合稀土对过共晶 Al-20Si 合金显微组织与力学性能的影响 [J]. 中国有色金属学报，2017，27(12): 2443-2449.

[8] 钟鼓，吴树森，姜华文，等. 含稀土高硅铝合金的组织特征[J]. 华中科技大学学报(自然科学版)，2010，38(3): 29-32.

[9] Yi H K, Zhang D, Sakata T, et al. Microstructures and La-rich compounds in a Cu-containing hypereutectic Al-Si alloy [J]. J Alloys Comp., 2003, 354(122): 159-162.

[10] 刘扭参，刘栓江，刘忠侠. 变质和热处理对 Al-20%Si 合金组织和力学性能的影响[J]. 铸造技术，2009，31(8): 1022-1025.

[11] 唐超兰，温竟青，仲召军，等. 变质处理对 Al-10.5Si 合金组织及性能的影响[J]. 铸造，2017，66(6): 609-617.

[12] 刘晗珲，毛芯茹，王俊，等. P 和 Sr 对 Al-20Si 合金组织及力学性能的影响[J]. 热加工工艺，2018，47(7): 112-114.