

Y 与 Sr 协同作用对 Al-Mg-Si 合金微观组织和力学性能的影响

陈志强^{1,2}, 贾锦玉^{1,2}, 胡文鑫^{1,2}, 王小青^{1,2}

(1. 白云鄂博稀土资源研究与综合利用国家重点实验室, 内蒙古包头 014030;

2. 包头稀土研究院, 内蒙古包头 014030)

摘要: 利用金相显微镜和扫描电子显微镜等设备研究了稀土Y和Sr共同添加对Al-Mg-Si铝合金 α -Al枝晶和共晶Si相显微组织的影响及作用机理。研究表明, Al-Y中间合金对Al-Mg-Si铝合金 α -Al晶粒有明显细化作用, 而且对共晶硅也具有变质效果。Y与Sr协同作用对Al-Mg-Si合金细化和变质的效果更佳。Al-Mg-Si铝合金经Y和Sr协同作用后, α -Al晶粒尺寸从62.1 μm 减小到48.48 μm , 共晶硅颗粒平均尺寸减小到4 μm , 宽径比减小到1.7, 铸态抗拉强度提高了27.2%, 达到213.3 MPa。稀土Y和Sr共同添加到Al-Mg-Si合金后, 稀土Y主要以化合物AlSiYMg存在, 并未与Sr生成化合物而降低Sr对Si的变质作用。文中还对稀土Y和Sr协同作用机理进行了分析和讨论。

关键词: Al-Mg-Si铝合金; 稀土Y-Sr; 晶粒细化; 变质; 显微组织

作者简介:

陈志强(1989-), 男, 硕士, 中级工程师, 研究方向为稀土轻合金的制备工艺研究与新材料应用研究。E-mail:632330923@qq.com

通讯作者:

胡文鑫, 男, 博士, 高级工程师。E-mail:brirehuwxin@126.com。

中图分类号: TG146.4⁺5

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)04-0367-07

基金项目:

国家重点研发计划项目(2016YFB0101205)。

收稿日期:

2019-11-28 收到初稿,
2020-01-15 收到修订稿。

Al-Mg-Si系列铝合金是美国于20世纪70年代研制的铝合金, 为常用的铸造铝-硅-镁系合金, 具有铸造流动性好、气密性好、收缩率小和热裂倾向小, 经过变质和热处理后, 具有良好的力学性能、物理性能、耐腐蚀性能和较好的机械加工性能^[1-2], 用途广泛。但由于Al-Mg-Si合金铸态微观组织由粗大的 α -Al枝晶和共晶Si相构成, 共晶Si相呈粗大的块状或板条状沿枝晶间随机分布, 严重地割裂了基体, 其力学性能和铸造性能较差^[3]。因此如何改善 α -Al晶粒和共晶硅的形态和尺寸就成为改善合金力学性能的关键所在。

为了改善铸态Al-Si合金的组织 and 结构, 许多晶粒细化剂被研究和开发出来, 如Al-Ti-B系^[4-6]、Al-Ti-C系^[7-8]、Al-B-Sr^[9]等。金属Sr作为一种商用变质剂, 可将Al-Si合金中的共晶硅形貌由粗大的针状变成细小的纤维状。但是Sr的加入会促进初生 α -Al相的柱状生长, 降低力学性能^[10-11]。AlTiB中间合金对高Si铝合金的细化效果会随着高温保温时间的延长, 出现明显的“衰退”现象。而稀土(RE)具有细化和变质的综合效果^[12], 能有效减缓变质剂的“衰退”现象^[4-6]。同时, 稀土还具有提高合金高温性能^[13], 降低共晶温度^[14], 改善抗腐蚀性能^[15]等优点。但单一稀土元素合金化作用存在一定的局限性, 只有当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以更好地发挥微合金化元素的作用, 并可以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。Qiu Chuanrong等人^[16]研究发现Sr和La共同添加不仅可以减小A356.2合金初生 α -Al相的枝晶间距, 还可细化共晶硅组织, 提高综合力学性能。Wang Tongmin等人^[17]研究发现TiB₂和La共同作用能增加A356合金沉淀相的密度, 减小沉淀相的尺寸, 从而显著提高时效硬度。Liu Jing等^[18]研究发现Sc和Zr共同添加到Al-Zn-Mg-(Cu)合金中, 显示出能更好地阻碍再结晶能力, 获得更加细小的纤维状组织。从目前发表的文献来看, 少数研究者对轻稀土La与其他元素协同作用对铝合金组织和性能的影响进行了研究, 而且有关作用机理说法不一, 鲜有中重稀土Y与其他元素协同作用对铝合金影

响的研究。然而稀土Y的化学活性、在Al中的溶解度、对铝合金细化效果等均高于轻稀土La,那么稀土Y与Sr共同作用对铝合金的细化效果、加入方式、作用机理等问题亟待研究。因此研究稀土Y与Sr共同添加对铝合金的协同作用很有必要。本文通过制备被AlTiB细化后的稀土中间合金,利用中间合金的组织遗传效应,研究细化后的Al-Y中间合金与Al-Sr组合添加对Al-Mg-Si铝合金显微组织的影响,期望能够获得最佳的变质和细化效果,并探讨添加稀土与Sr协同作用的影响机理。

1 试验方法及材料

1.1 原材料

试验材料采用由包头稀土研究院提供的金属钇(纯度99.5%),金属铝(纯度99.7%)、AlTiB合金、Al-Mg-Si铝合金,Al-10%Sr合金,材料化学成分如表1所示。为了更接近铝合金实际生产,节约成本,试验所用稀土中间合金按稀土含量10%进行配制,中间合金和AlTiB、Al-Sr加入量均按0.2%的量进行添加。

1.2 稀土铝中间合金的制备

将工业纯铝放置于坩埚电阻炉(GR2-15)中,纯铝熔化后升温至700~800℃,以块状形式依次加入金属钇,采用人工搅拌,搅拌结束后进行精炼,然后扒渣并加入0.2%AlTiB,搅拌并静置15 min,浇注成锭。这样就制备出了经AlTiB细化后的Al-10%Y中间合金。

1.3 试样制备与检测

将Al-Mg-Si铝合金放置于坩埚电阻炉(GR2-15)中,铝合金熔化后升温至730~740℃,按表2中各组试样的成分和金属元素收得率进行配料、加料。加料后采用人工搅拌,搅拌结束后进行精炼,然后扒渣并静置15 min后用金属型浇注成锭,冷却方式为水冷却。

利用金相切割机从所获铸锭中部截取试块,然后用线切割机在试块中心部位截取12 mm×12 mm金相试样。金相试样经打磨、抛光后,在自配溶液(2 ml HF+3 ml HCl+5 ml HNO₃+190 ml H₂O)中进行侵蚀,时间为10~20 s。采用蔡司YX2-22金相显微镜和扫描电子显微镜观察合金的显微组织,用Pro Image金相测量软件对光学金相图片进行分析测量,每个成分选取三张具有代表性位置的金相图片,统计分析初始 α -Al的晶粒尺寸和共晶硅尺寸。利用线切割设备在铸锭上按国标GB/T228-2010规定进行加工拉伸试样,拉伸试样标距10 mm,厚度2 mm。拉伸测试在SANS万能实验机上进行的,拉伸速率为0.5 mm/min,每个铸锭取三个拉伸试样,测试结果取平均值。

表1 试验材料的化学成分
Table 1 Chemical composition of experimental materials

合金	Ti	B	Fe	Si	Mg	Cu	Mn	Zn	Al	w _B /%
AlTiB	5.02	0.80	0.17	0.12						余量
Al-Mg-Si	0.013		0.16	7.49	0.46	0.0076	0.020	0.041		余量

表2 各组试样的成分
Table 2 Composition of each group of sample

试样编号	成分
L1	Al-Mg-Si
L2	Al-Mg-Si+0.2%Al-Y
L3	Al-Mg-Si+0.2%Al-Y+0.2%Al-Sr

2 试验结果与分析

2.1 中间合金显微组织

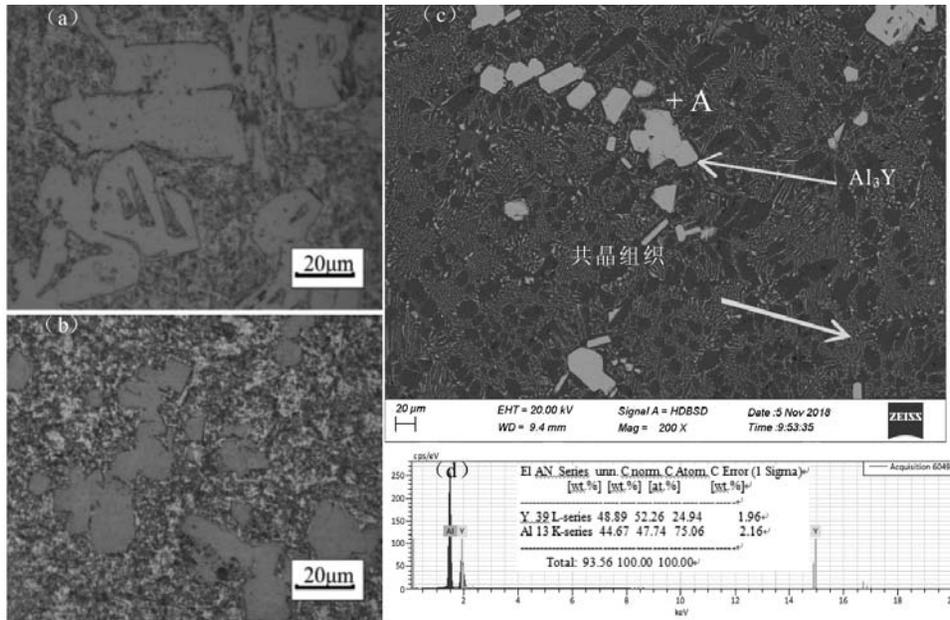
Al-Y中间合金显微组织如图1所示。从图1a和1b可以看出,Al-Y中间合金主要由灰色大块状组织、黑色小颗粒以及白色基体组成。经过AlTiB细化的Al-Y合金块状组织尺寸明显变小。图1c由白亮色块状组织和细小的片层组织及灰色基体相组成。根据图1d中A点的EDS结果可知,白亮色块状组织是由Al和Y两种元素组成,其原子比约为3:1。结合相图,可知该白亮色块状组织应该是Al₃Y相,细小的片层组织是 α -Al+Al₃Y共晶组织,灰色基体为铝基体。因此可知,经过AlTiB细化的Al-Y合金块状组织是Al₃Y相,细化后的Al₃Y相尺寸基本在12 μ m左右。

2.2 α -Al枝晶细化效果

图2是Al-Mg-Si铝合金铸态组织金相图,图中白色组织是 α -Al相,白色组织之间的灰色组织是Al-Si共晶组织。图2a是未添加任何物质的Al-Mg-Si铝合金,从图中可以看到 α -Al相呈粗大的枝晶状。添加被细化的中间合金Al-Y后, α -Al相尺寸明显得到细化,枝晶熔断成长条状,如图2b所示。从图2c可看到,Al-Y和Al-Sr共同添加到Al-Mg-Si铝合金熔体中, α -Al相尺寸得到进一步细化。图3是利用软件Image pro对图2中 α -Al相晶粒尺寸测量结果图。从图中可以明显看到,添加经AlTiB细化的稀土中间合金后,Al-Mg-Si铝合金 α -Al相尺寸由62.1 μ m减小到57.8 μ m。随着Al-Y中间合金和Al-Sr的添加,Al-Mg-Si铝合金 α -Al相尺寸得到进一步的细化,达到48.48 μ m。由此可见,Al-Y中间合金和Al-Sr组合细化效果较Al-Y单独细化效果好。

2.3 共晶硅变质作用

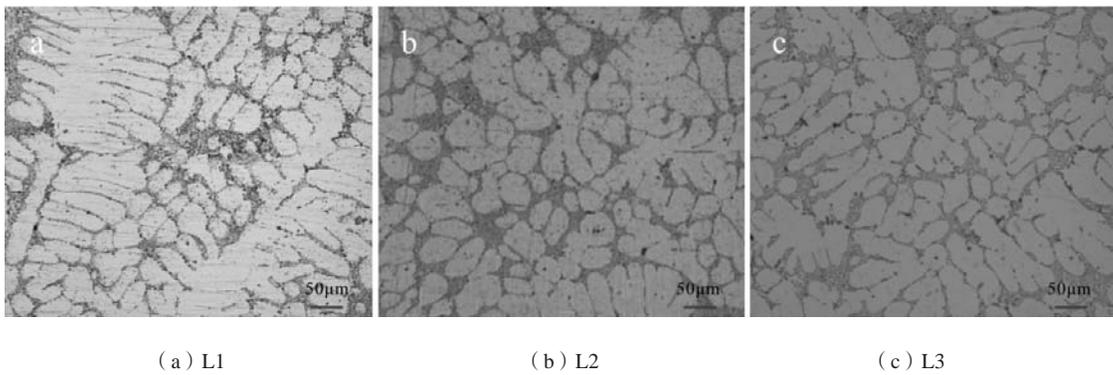
图4是Al-Mg-Si铝合金添加不同添加剂后的共晶硅



(a) 未细化Al-Y中间合金；(b) 细化后的Al-Y中间合金；(c) 细化后Al-Y合金SEM图；(d) A点的EDS结果

图1 Al-Y中间合金显微组织和EDS结果

Fig. 1 Microstructure and EDS results of Al-Y master alloys



(a) L1

(b) L2

(c) L3

图2 初生晶 α -Al 形貌图

Fig. 2 Morphologies of α -Al phase in as-cast experimental alloys

形貌图。图4a是原始的Al-Mg-Si铝合金，未添加任何物质，从图中可明显看到深灰色粗大的初生硅相、浅灰色AlFeSi相和细小的共晶硅相的存在。添加经AlTiB细化的Al-Y中间合金后，粗大的初生硅相和AlFeSi相减少，共晶硅尺寸变得更加细小，如图4b所示。从图4c可看到，Al-Y中间合金和Al-Sr共同添加后，粗大的初生硅相基本消失，AlFeSi相和共晶硅尺寸显著减小，共晶硅相尺寸减小到3~4 μm 。从图5可看到，共晶硅平均尺寸随着稀土Y的加入，从8.5 μm 减小到6.2 μm 。共晶硅宽径比变大，这是由于稀土Y变质作用，将共晶硅变成细小的条状或棒状引起的。随着Y和Sr共同加入，共晶硅尺寸进一步减小，形貌趋近于球状颗粒，因此宽径比下降。共晶硅尺寸测量结果与趋势和图4显微组织观察结果一致。

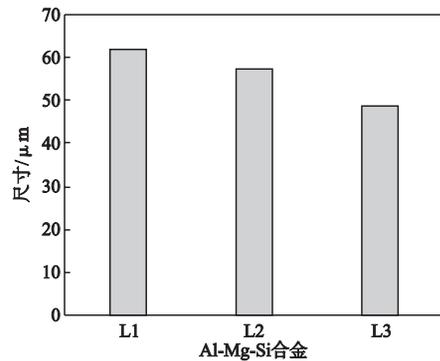


图3 Al-Mg-Si铝合金 α -Al相尺寸

Fig. 3 Size of α -Al phase in Al-Mg-Si alloys

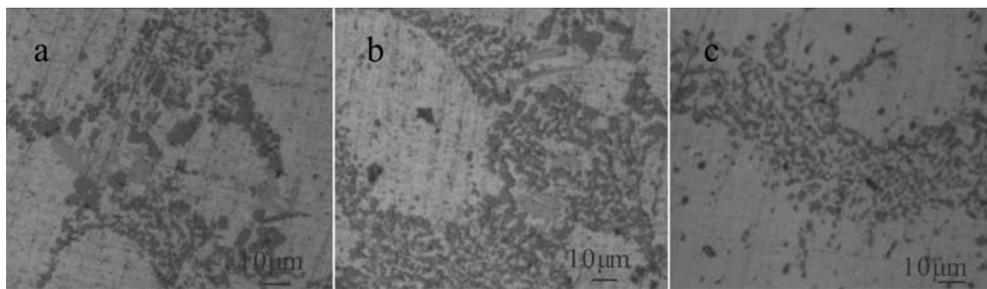
2.4 力学性能

Al-Mg-Si铝合金中加入Al-Y中间合金后, 抗拉强度显著提高, 如图6所示。当Al-Y和Al-Sr共同加入时, Al-Mg-Si合金的强度和塑性均有明显的改善。拉伸测试的结果与显微组织观察结果一致, 均反映出Y和Sr共同作用对Al-Mg-Si组织和性能提高最显著。主要因为在稀土Y和Sr共同作用下, Al-Mg-Si铝合金中的 α -Al晶粒得到有效的细化, SDAS减小, 同时共晶硅相也得到充分的变质作用, 减少了粗大块状或片状共晶硅组织, 使得合金强度得到提高。从表3可以看出, 与其他微合金

化方式相比, 通过细化中间合金的方式添加稀土中间合金, 获得的强化效果明显。而细化稀土中间合金与Sr共同作用提升效果更加显著。

2.5 稀土元素变质作用机制分析

稀土Y和Sr加入Al-Mg-Si合金中后, 形成高熔点、稳定的 Al_4Sr 和 Al_3Y 化合物。其中 Al_4Sr 的熔点为 $1\ 025\ ^\circ C$, Al_3Y 熔点为 $1\ 355\ ^\circ C$ 。由于 Al_4Sr 和 Al_3Y 的点阵常数与 α -Al的点阵常数相近, 因此这些化合物在铝液中凝固而形成固态质点能作为 α -Al晶体的形核基



(a) L1

(b) L2

(c) L3

图4 共晶硅形貌图

Fig. 4 Morphologies of eutectic silicon particles in as-cast experimental alloys

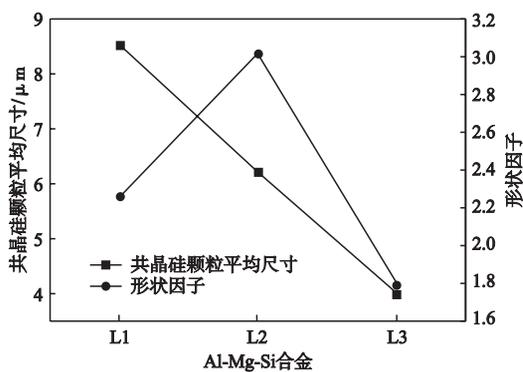


图5 共晶硅尺寸与宽径比

Fig. 5 Size and aspect ratio of eutectic silicon particles

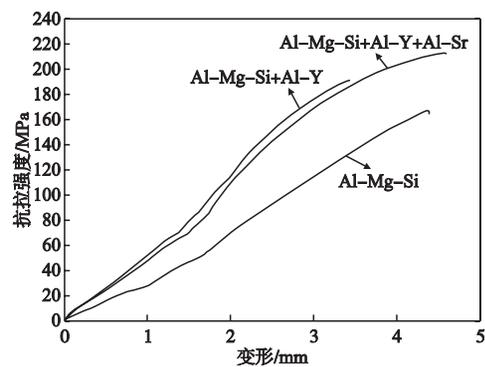


图6 Al-Mg-Si铝合金铸态拉伸曲线

Fig. 6 Mechanical properties of Al-Mg-Si alloys with Al-Y and Al-Y+Al-Sr additions

表3 不同处理条件下的铸态Al-Mg-Si合金抗拉强度

Table 3 Tensile strength of as-cast Al-Mg-Si aluminum alloys with addition of different refining alloys

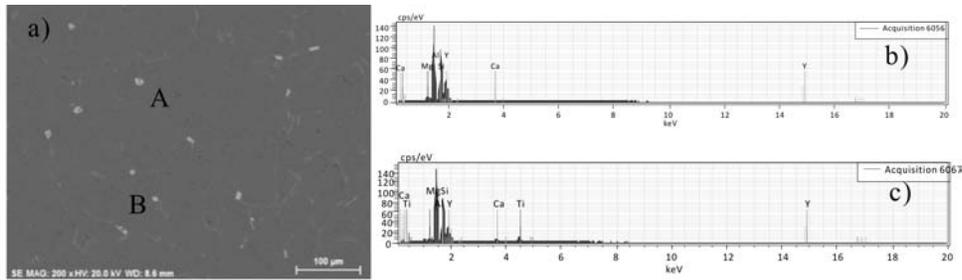
合金	处理方式	抗拉强度/MPa	抗拉强度提高幅度/%
Al-Mg-Si	0.2% Al-Y (细化) +0.2% Al-Sr	213.3	27.2
Al-Mg-Si	0.2% Al-Y (细化)	191.4	12.5
A356.2 ^[16]	0.2% Al5Ti1B+0.2% Al-10Sr	200.4	7.9
A356 ^[19]	2.5% TiB ₂ +0.1% La	187.6	10.2
A356 ^[19]	2.5% TiB ₂	180.1	5.8
A356 ^[20]	0.3% Er	195.3	5.6
A356 ^[21]	0.6% Al-2.5Ti-0.5B-5Sr	194	7.8

底, 因而增加枝晶 α -Al 的数量。同时稀土金属 Y 凭借其原子半径 0.181 nm, 比铝原子半径 (0.143 nm) 大, 可以通过填补 α -Al 枝晶生长过程中形成的表面缺陷的方式阻碍 α -Al 枝晶的生长^[14, 22-23]。

图7是 Al-Mg-Si 合金同时添加稀土 Y 和 Sr 后的铸态微观组织 SEM 图。从图7a 可以看到, 除了纤维状的共晶硅相, 图中还有白色颗粒状组织。通过对图中 A 和 B 两点白色颗粒状组织进行 EDS 能谱分析 (如图7b, c), 结合表4 中该两点的 EDS 结果可知, 白色颗粒主要由 Al、Si、Y、Mg 四种元素组成, 可推断该白色相为 AlSiYMg 或 AlSiYTi 相。少量的 Ti 元素应该是细化 Al-Y 中间合金时引入的, 但并未发现文献[24-25]中提到的

含 Sr 化合物的生成, 如 TiSrSiAl 等, 如图7 所示。说明稀土 Y 的加入并未降低 Sr 对 Si 的变质作用。

从图8 元素面扫描结果可知, Sr 与 Si 的分布一致, Sr 和 Si 主要偏聚在晶界附近, 说明 Sr 变质 Si 的机理是因为 Sr 在固液界面累积, 被吸入 Si 的点阵中, 引起晶格畸变^[26]。这种畸变会使硅颗粒在更多的方向上产生孪晶, 同时由于分支不断的增多, 共晶硅颗粒的生长受到周围铝液中初生 α -Al 晶粒的限制, 生长速度下降。最终导致共晶硅被弯曲、分割成更细小的共晶硅相^[20]。稀土 Y 变质共晶硅的机理与 Sr 不一样, Y 主要分布在共晶硅周围和晶界的凹谷中。Y 的分布与 Sr、Si 的分布完全不一致, 少量的 Y 与 Al、Si、Mg 等形成了化合物, 但化合



(a) L3合金微观组织SEM图; (b) A点EDS能谱; (c) B点EDS能谱

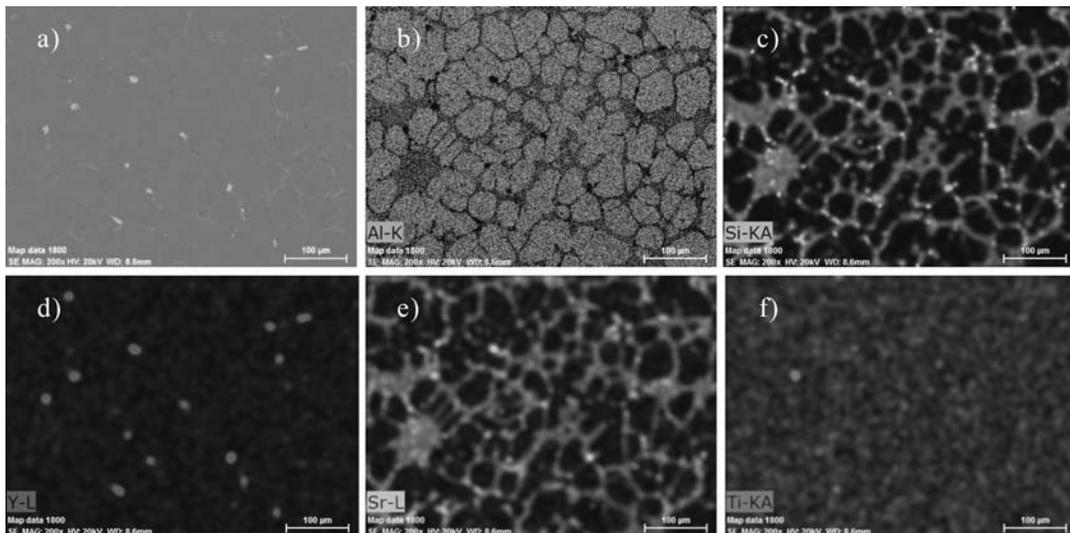
图7 合金L3微观组织SEM图和相应点的EDS结果

Fig. 7 SEM image of experimental alloy L3 and energy spectrum of point A-B

表4 图7标记点位置EDS能谱分析结果

Table 4 Energy spectrum analysis results of point A-B in Fig.7

位置	原子分数/%						
	Al	Si	Mg	Y	Sr	Ti	Ca
A	43.17	35.25	2.61	17.56	—	—	1.41
B	45.14	32.46	1.76	11.76	—	5.70	3.18



(a) SEM图; (b) - (f) 分别是Al、Si、Y、Sr、Ti元素分布图

图8 L3合金局部面扫描结果

Fig. 8 Map scanning results of alloy L3

物尺寸均较小,只有十几个微米左右,能起到沉淀强化作用。大部分Y分布在Si和枝晶表面,同时在固液界面前沿能阻碍溶质的扩散和交换,导致Si表面溶解Y量稍有增加,同时降低了连续冷却的过冷度。最终使得共晶硅生长速度下降。同时改变了共晶硅原先的生长方式,生长择优方向转变为(111),促进了共晶硅生长分枝^[27]。Y和Sr的共同作用导致共晶硅由块状或针状细化为纤维状或颗粒状,起到了变质的作用。

3 结论

(1) Al-Y中间合金经AlTiB细化后,本身组织得到明显细化,同时对Al-Mg-Si合金微观组织改善效果明显。

(2) Y和Sr协同作用对Al-Mg-Si铝合金 α -Al晶粒细化和共晶硅变质效果更佳, α -Al晶粒尺寸减小到48.48 μm ,共晶硅颗粒平均尺寸减小到4 μm ,宽径比降为1.7,抗拉强度提高了27.2%。

(3) 稀土Y和Sr共同添加到Al-Mg-Si合金后,稀土Y主要以化合物AlSiYMg存在,并未与Sr生成化合物而降低Sr对Si的变质作用。

参考文献:

- [1] EJIOFOR J U, REDDY R G. Effects of porous carbon on sintered Al-Si-Mg matrix composites [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 1997, 6 (6): 785-791.
- [2] ATXAGA G, PELAYO A, IRISARRI A M. Effect of microstructure on fatigue behaviour of cast Al-7Si-Mg alloy [J]. Materials Science and Technology, 2001, 17 (44): 446-450.
- [3] 何兵,覃铭,杨途才,等.微量Y和Zr对A356合金微观组织和拉伸性能的影响[J].铸造技术,2017,38(4):792-796.
- [4] 张作贵,刘相法,边秀房. TiB₂分布形态对AlTi5B合金细化特性的影响[J].特种铸造及有色合金,1999(5):12-13.
- [5] 陈亚军,许庆彦,黄天佑.稀土铝钛硼中间合金的细化能力与长效性[J].中国有色金属学报,2007,17(8):1232-1239.
- [6] FU G S, CHEN W Z, QIAN K W. Refining effect of a new Al3Ti1B1RE master alloy on Al sheet used for can and behavior of rare earths in the master alloy [J]. Journal of Rare Earths, 2003, 21 (5): 572-577.
- [7] 胡宪正,梁超,于金,等.稀土对AlTiC细化剂组织及细化剂效果的影响[J].中国稀土学报,2004,22(2):247-250.
- [8] 张柏清,马洪涛,李建国,等. Al-Ti-C中间合金细化剂的组织及其细化性能[J].金属学报,2000,36(4):341-346.
- [9] CUI X L, WU Y Y. Preparation of a novel Al-3B-5Sr master alloy and its modification and refinement performance on A356 alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2014, 615: 906-911.
- [10] LIAO Hengcheng, SUN Yu, SUN Guoxiong. Effect of Al-5Ti-1B on the microstructure of near-eutectic Al-13%Si alloys modified with Sr [J]. Journal of Materials Science, 2002, 37: 3489-3495.
- [11] LIAO Hengcheng, SUN Guoxiong. Mutual poisoning effect between Sr and B in Al-Si casting alloys [J]. Scripta Materialia, 2003, 48: 1035-1039.
- [12] 段海丽,张恒华,邵光杰,等.镧对A356铝合金变质及其机制的研究[J].中国稀土学报,2005,23(2):94-98.
- [13] SUI Yudong, WANG Qudong, LIU Teng, et al. Influence of Gd content on microstructure and mechanical properties of cast Al-12Si-4Cu-2Ni-0.8Mg alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 644 (25): 228-235.
- [14] KNYTTINEN A, NOGITA K, MCDONALD S D, et al. Modification of Al-Si alloys with Ba, Ca, Y and Yb [J]. Journal of Light Metal, 2001 (1): 229-240.
- [15] AHMADI H, NOURI M. BENEFICIAL. Effects of yttrium on mechanical failure and chemical stability of the passive film in 6061 aluminum alloy [J]. Journal of Materials Science, 2010, 45 (13): 3426-3432.
- [16] QIU Chuanrong, MIAO Sainan, LI Xinrong, et al. Synergistic effect of Sr and La on the microstructure and mechanical properties of A356.2 alloy [J]. Materials and Design, 2017, 114: 563-571.
- [17] WANG T M, ZHAO Y F, CHEN Z N, et al. Combining effects of TiB₂ and La on the aging behavior of A356 alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2015, 644: 425-430.
- [18] LIU Jing, PAO Per. Effect of minor Sc and Zr on recrystallization behavior and mechanical properties of novel Al-Zn-Mg-Cu alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 657 (5): 717-725.
- [19] SHABANI M O, MAZAHERY A, BAHMANI A. Solidification of A356 Al alloy: experimental study and modeling [J]. Kovove Mater, 2011, 49: 253-258.
- [20] SHI Z M, WANG Q, ZHAO G, et al. Effects of erbium modification on the microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloys [J]. Materials Science and Engineering A, 2015, 626: 102-107.
- [21] ZHAO Houliang. Study on a high efficient refiner and modifier Al-Ti-B-Sr for A356 alloy [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2017.

- [22] TSAI Y C, CHOU C Y, LEE S L, et al. Effect of trace La addition on the microstructures and mechanical properties of A356 (Al-7Si-0.35Mg) aluminum alloys [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 487: 157-162.
- [23] 李道韞, 杜维玺, 刘勇兵, 等. 微量稀土变质工艺对铝-硅共晶合金组织及性能的影响 [J]. 稀土, 1983, 17 (2): 18-18.
- [24] LIAO Hengcheng, SUN Yu, SUN Guoxiong. Correlation between mechanical properties and amount of dendritic α (Al) phase in as-cast near-eutectic Al-11.6% Si alloys modified with strontium [J]. Materials Science and Engineering A, 2002, 335 (1/2): 62-66.
- [25] LU L, DAHLE A K. Effects of combined additions of Sr and AlTiB grain refiners in hypoeutectic Al-Si foundry alloys [J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 435/436: 288-296.
- [26] 周鹏飞. Al-20Si 变质与等温处理组织演变关系研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2012.
- [27] 张瑜, 王宇鑫, 廖文俊. 稀土元素对过共晶铝硅合金的变质机理 [J]. 金属功能材料, 2010, 17 (3): 86-90.

Synergistic Effect of Sr and Y on Microstructure and Mechanical Properties of Al-Mg-Si Alloys

CHEN Zhi-qiang^{1,2}, JIA Jin-yu^{1,2}, HU Wen-xin^{1,2}, WANG Xiao-qing^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Baiyunobo Rare Earth Resource Researches and Comprehensive Utilization, Baotou 014030, Inner Mongolia, China; 2. Baotou Research Institute of Rare Earths, Baotou 014030, Inner Mongolia, China)

Abstract:

The effect and action mechanism of the combination addition of Y and Sr on the microstructures of the α -Al phases and eutectic silicon phases of the Al-Mg-Si alloys was investigated by optical microscopy and scanning electron microscopy. The results indicate that the Al-Y master alloys could not only refine the grain size of the α -Al phase, but also improve the morphology of the eutectic silicon. The synergistic effect of Y and Sr on the modification and refinement of the Al-Mg-Si alloys was better. Due to the synergistic effect of Y and Sr, the grain size of α -Al phase decreased from 62.1 μm to 48.48 μm . The size and the aspect ratio of the Si particles were reduced to 4 μm and 1.7, respectively. Moreover, the tensile strength was increased by 27.2%, reaching 213.3 MPa. After the addition of Y and Sr into the Al-Mg-Si alloy, the rare earth Y mainly existed in the form of AlSiYMg compounds. Therefore, the modification of Sr on the eutectic silicon phase was not attenuated for the formation of the compound of AlSiYSr. The synergistic effecting mechanism of Y and Sr was analyzed and discussed in this paper.

Key words:

Al-Mg-Si alloys; rare earth; grain refining; modification; microstructure