

Mg 含量对 AlSiMg 合金组织演变及性能的影响

贲能军¹, 孙 瑜², 周鹏飞^{1,2,3}

(1. 盐城工业职业技术学院智能制造学院, 江苏盐城 224005; 2. 盐城工学院材料工程学院, 江苏盐城 224051;
3. 苏州大学沙钢钢铁学院, 江苏苏州 215137)

摘要: 采用水冷铜模浇注不同Mg含量的Al-Si合金试样, 通过室温拉伸、激光散射法测试合金试样力学性能和热传导性能, 结合OM/SEM结果分析Mg元素含量对Al-Si合金铸态组织结构和性能的影响规律。结果表明: Al-8.5Si-xMg合金铸态组织由初生 α -Al和共晶Si组成, 当Mg元素含量提高至0.4wt%~0.71wt%范围时, 共晶硅的平均长度从68 μm 左右降低到61 μm 左右; 共晶Si相组织均匀性得到提升, 这种Si相的组织结构有利于自由电子在初生 α -Al和共晶Si之间自由运动, 合金热导率下降幅度趋于平缓。在较快冷却速率条件下, Mg元素在Al基体中固溶度比平衡凝固高, 提高了初生 α -Al的强度。

关键词: Al-Si合金; 组织结构; 热传导性能; 力学性能

作者简介:

贲能军(1984-), 男, 讲师, 主要从事高强高韧铝合金开发工作。E-mail: 276749091@qq.com

通讯作者:

周鹏飞, 男, 博士。电话: 18861991861, E-mail: zpfjsyc@126.com

中图分类号: TG290

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)09-0929-05

基金项目:

2019 校级创新团队项目 (YGYKT-04); 2019 校级自然科学基金项目 (ygy2019-04)。

收稿日期:

2020-05-03 收到初稿,
2020-05-26 收到修订稿。

铸造Al-Si合金具有良好的工艺性能和使用性能, 广泛应用于汽车、航空航天和电子工业等领域^[1]。铸造Al-Si合金中Si主要提高合金的流动性并强化合金力学性能, 然而随着Si元素含量的增加, Al-Si合金热传导性能显著下降^[2]。目前, 某些承受热冲击的Al-Si合金零部件, 除了要求力学性能之外, 还要有良好的热传导性能^[2-3]。在保证热传导性能的前提下, 提升Al-Si合金的力学性能, 成为高强高导热铝合金材料研发的关键。

Mg元素是铸造Al-Si合金主要强化元素之一, 微量Mg元素添加能显著提高铸造Al-Si合金的强度^[4], 然而Mg元素含量对铸造Al-Si合金的热传导性能的影响相对较少。为开发高强高导压铸用铝合金材料, 本试验制备Al-8.5Si-xMg合金试样, 根据OM/SEM分析结果, 结合力学性能和热传导性能, 分析Mg元素含量对Al-Si合金的力学性能和热导热性能的影响规律。

1 试验材料及方法

试验原材料为Al(99.9%)、纯Si(99.6%)和纯Mg锭(99.9%)。首先根据设计成分配置熔炼用金属Al、Mg锭和Si锭; 将纯Al锭放置在SG2-15-8型电阻坩埚熔铝炉中熔化, 熔化温度780 $^{\circ}\text{C}$, 保温40 min直至完全熔化; 然后加入Si并搅拌均匀, 降温至730 $^{\circ}\text{C}$, 投入Mg锭, 加入六氯乙烷除气后扒渣, 静置30 min。将模具预热至250 $^{\circ}\text{C}$, 浇注制备Mg量为0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.7% (质量分数)的Al-Si-Mg合金试样。凝固过程中采用温度记录仪记录温度, 每0.01 s记录一个温度。试样M1的冷却曲线如图1所示。

采用SPECTROLAB M12直读光谱仪测定浇注合金的实际成分, 结果如表1所示。采用DDL-200电子万能试验机进行室温拉伸试验, 采用Phenom XL台式扫描电镜拍摄拉伸断口, 通过LFA461激光热导仪测试试样的热传导系数。截取金相试样经过磨抛处理后, 在1%HF中腐蚀20 s, 使用OLYMPUS GX53倒置金相显微镜、Phenom XL台式扫描电镜分析观察试样铸态组织、形貌和微区成分, 研究Mg元素含量对Al-Si合金组织和性能的影响规律。利用BUEHLER Wilson VH 102显微硬度仪测试合

金的显微硬度, 加载200 g, 加载时间10 s, 每个试样测试10个点并求平均值。

2 试验结果及分析

2.1 Al-8.5Si-xMg 合金微观组织

图2为不同Mg元素含量试样铸态下的微观组织。从图中可以看出, Mg含量在0.71%以内的试样均呈现典型的亚共晶Al-Si合金的微观组织, 由初生 α -Al和共晶Si组成, 其中薄片状或针状共晶Si分布在初生 α -Al周围。由于采用水冷铜模制备合金试样, 凝固过程中冷却速率较高, 起始冷却速率可达20 $^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 以上, 初生 α -Al晶粒尺寸细小, 由部分等轴晶和不发达的树枝晶组成。

从图2的微观组织形貌对比可以定性得出, 无论Mg含量如何变化, 共晶Si仍呈长针状。但随着Mg含量的提高, 共晶Si的长度和宽度均有所减小。 α -Al形貌由明显的枝晶状(图2a)向等轴状转变。当Mg含量达到0.71%时, 合金中的第二相明显增多。

使用Image Pro Plus软件对图2中不同含量Mg试样的共晶Si相尺寸进行了统计, 结果见表2。可知, 当Mg含量提高至0.4%~0.71%范围时, 共晶硅的平均长度从

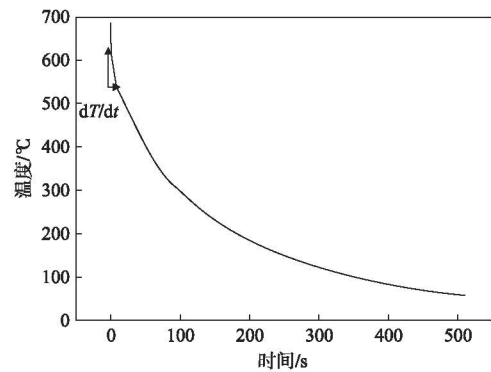


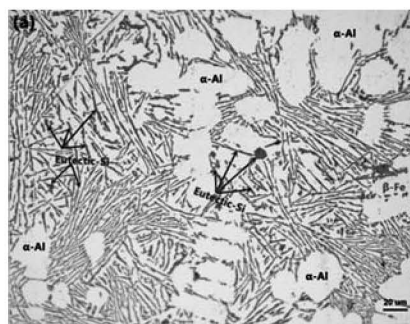
图1 试样M1的冷却曲线

Fig. 1 Cooling curve of sample M1

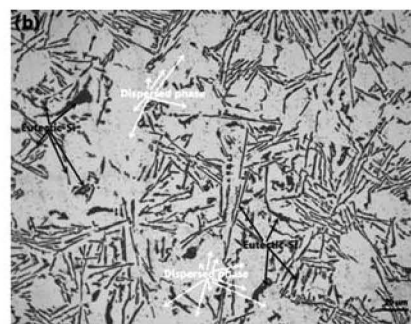
表1 合金试样的化学成分

Table 1 Chemical composition of alloy samples $w_B/\%$

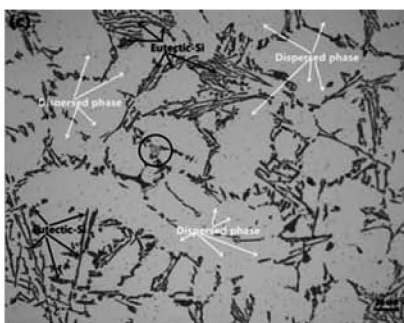
试样	Si	Fe	Mg	其他杂质	Al
M1	8.390	0.183	0.094	<0.01	余量
M2	8.510	0.182	0.173	<0.01	余量
M3	8.590	0.152	0.280	<0.01	余量
M4	8.620	0.177	0.394	<0.01	余量
M5	8.660	0.137	0.714	<0.01	余量



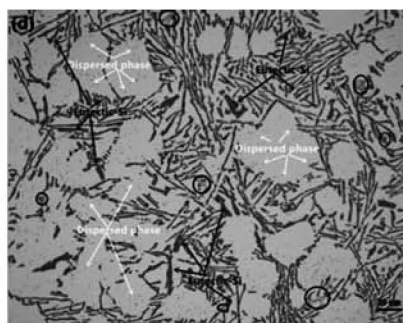
(a) 0.09%Mg



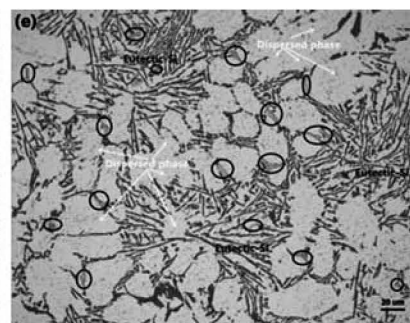
(b) 0.17% Mg



(c) 0.28%Mg



(d) 0.39%Mg



(e) 0.71%Mg

图2 微观组织图

Fig. 2 Microstructure evolution of Al-8.5Si-xMg alloys

68 μm 左右降低到61 μm 左右,同时共晶Si的平均宽度也略微增大,这些变化与图2中不同Mg元素含量下试样的微观组织变化趋势一致。分析认为,Mg加入Al-8.5Si合金中时,会降低合金发生共晶反应的温度^[5]。在同样铸造条件下,共晶反应温度降低会提高共晶Si相凝固过冷度,促进其形核,从而导致共晶Si相尺寸均匀性。此外,共晶反应温度的降低会增大初生 α -Al的凝固区间,延长初生相凝固时间导致SDAS尺寸增加。

2.2 Al-8.5Si-xMg合金的力学性能

在室温条件下,对制备的Al-8.5Si-xMg合金进行拉伸测试,结果见表3。可以看出,随着Mg元素含量的上升,合金的抗拉强度和屈服强度以及显微硬度都呈现明显上升,而合金的伸长率却呈现相反趋势,随Mg元素含量增加而下降。

有研究表明,室温下Mg元素在平衡凝固Al-8.5Si合金中固溶度大约在0.5%~0.6%^[6]。当凝固过程中冷却速度较快时,Mg含量的Al-Si合金很可能形成过饱和固溶体,Mg元素在Al基体的固溶度提高。为判断本研究合金中Mg元素的存在状态,利用扫描电镜对M5铸态试样(Mg含量最高)进行SEM/EDS分析,结果如图3和表4所示。可以看出,M5铸态试样由初生 α -Al和共晶硅相组成,微区成分中仅有Al和Si两种元素组成(Se元素为测试偏差),并没有检测到Mg元素。进一步分析认为,制备的合金试样采用水冷铜模浇注,凝固过程中的冷却速率较高,试样中Mg元素在凝固过程中已固溶进入Al基体中形成过饱和固溶体,提高初生 α -Al的强度。随着Mg含量的增加,初生 α -Al强化效果越明显,试样强度也呈现出随Mg元素含量增加而上升的趋势。

M1-M5试样的拉伸断口形貌如图4所示。在Mg元素含量较低的Al-Si合金中,初生 α -Al的强度较低^[7],与共晶Si相强度差异明显,通过图4断口形貌看出,图中均有平滑的解理平面和大小不一的韧窝,因此该合金的断裂类型为韧脆混合断裂。当合金中Mg元素含量增加后,固溶强化导致初生 α -Al与共晶Si相之间的强度差距缩小,在室温拉伸过程中,裂纹更多从脆性共晶Si相处形成与发展,呈现脆性断裂特征,降低伸长率。

2.3 Al-8.5Si-xMg合金的热传导性能

图5试样室温热导率测试结果表明,随着Mg元素含量的增加,热导率逐步降低。根据金属热传导物理机制,合金热传导过程包括自由电子的热传导和晶格振动声子导热两种方式^[8]。电子导热是以自由电子为载体,在电子自由运动、电子与电子之间的碰撞过程中传递能量;声子导热是依靠晶格热运动而产生的热传递过程。在室温或较低温度范围下,电子导热对合金热传

导过程起主导作用,而声子导热是次要因素^[9-10]。当合金基体中固溶溶质元素含量越多,将在合金基体中形成晶格畸变,导致合金中自由电子散射几率越大,热传导性能也越低。

进一步分析图5所示结果,试样热导率变化趋势随Mg元素含量的不同分为两个阶段,当Mg元素含量

表2 试样的二次枝晶臂间距及共晶Si尺寸
Table 2 SDAS and size of eutectic silicon in microstructure of alloy samples μm

试样	SDAS	共晶Si尺寸	
		长	宽
M1	17.259	69.741	1.038
M2	19.729	67.652	1.117
M3	18.184	65.219	1.405
M4	20.012	61.922	1.586
M5	18.935	62.169	1.534

表3 铸态试样室温拉伸性能测试结果
Table 3 Tensile properties of as-cast alloy samples at room temperature

试样	Mg含量/%	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
M1	0.09	122.47	121.69	4.72
M2	0.17	153.76	129.28	4.23
M3	0.28	166.31	132.84	3.08
M4	0.40	178.86	156.56	2.68
M5	0.71	201.35	155.68	2.00

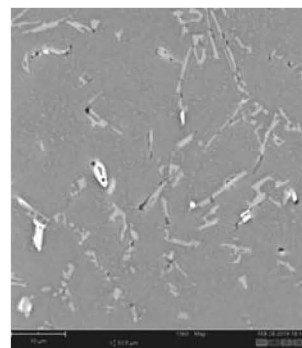


图3 M5试样SEM结果

Fig. 3 SEM results of M5 sample

表4 M5试样EDS结果
Table 4 EDS results of M5 sample

序号	元素	原子分数/%	质量分数/%
1	Al	88.03	86.11
2	Si	11.04	11.24
3	Se	0.92	2.65

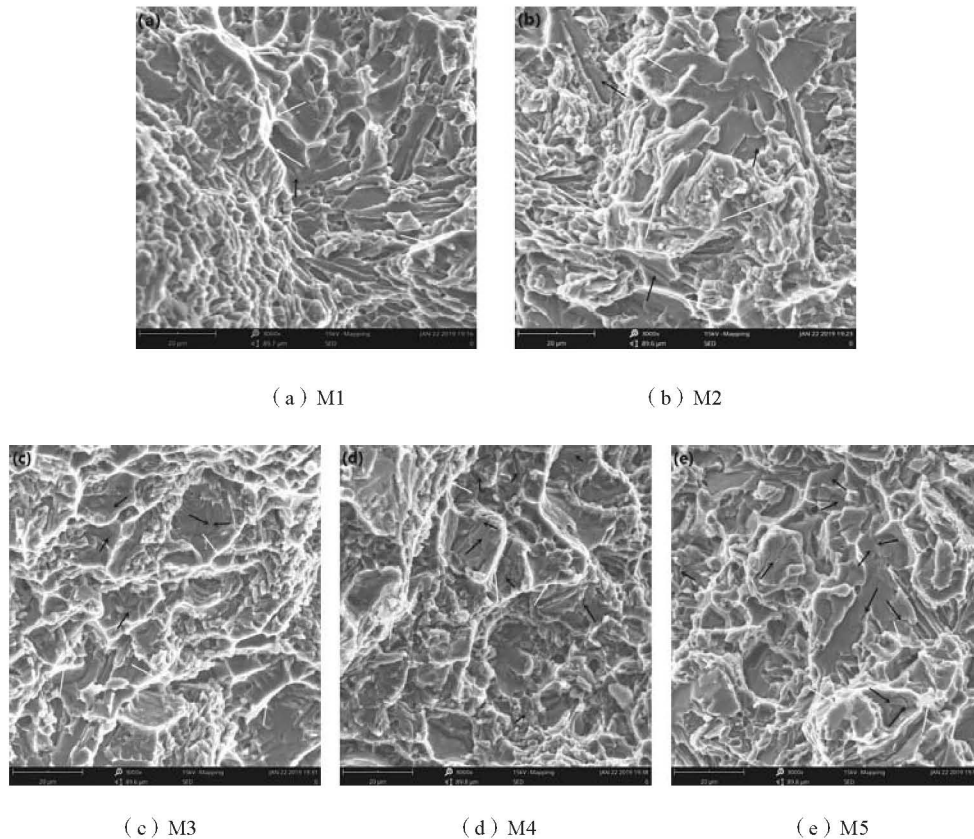


图4 M1-M5试样拉伸断口SEM分析结果

Fig. 4 Tensile fracture morphologies of samples

从0.09%增加到0.28%时,合金热导率随Mg元素增加从168.786 W/(m·K)下降到163.382 W/(m·K),降幅为3.2%;当Mg元素含量进一步从0.4%增加到0.71%时,热导率从162.192 W/(m·K)下降到161.949 W/(m·K),降幅仅为0.1%,下降的幅度趋于平缓。已有研究表明^[3, 11-12],Al-Si合金中自由电子主要通过初生 α -Al和共晶Si两者之间形成的通道之间发生自由运动,粗大片状共晶Si相会提高自由电子散射几率,从而降低其平均自由程,对合金热传导性能有不利影响。在Mg元素含量对Al-8.5Si-xMg合金微观组织影响结果中发现,当Mg元素含量提高至0.4%~0.71%范围时,片状共晶Si相平均长度从68 μm 左右降低到61 μm 左右,共晶Si相组织均匀性得到提升,这种Si相的组织结构降低自由电子散射几率,有利于自由电子在初生 α -Al和共晶Si之间自由运动。这种共晶Si相组织结构上的有利转变,在一定程度上减缓Al-8.5Si-xMg合金室温热导率随溶质Mg元素增加而迅速下降的趋势。

3 结论

(1) Al-8.5Si-xMg合金铸态组织由初生 α -Al和共晶Si组成,薄片状共晶Si分布在初生 α -Al周围。Mg元素加入Al-8.5Si合金后,会降低合金发生共晶反应的温

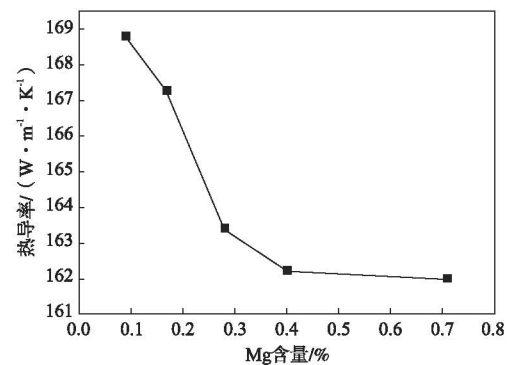


图5 不同Mg含量下Al-8.5Si合金的热导率

Fig. 5 Thermal conductivity of Al-8.5Si-xMg alloy

度并改善共晶Si相微观组织均匀性。当Mg元素含量提高至0.4%~0.71%范围时,共晶硅的平均长度从68 μm 左右降低到61 μm 左右,同时共晶Si的平均宽度也略微增大。

(2) 在较快冷却速率条件下,Mg元素在Al基体中的固溶度比平衡凝固高,提高了基体的强度。随着Mg元素含量的增加,初生 α -Al强化效果越明显,试样强度也呈现出随Mg元素含量增加而上升,而伸长率出现相反变化趋势。

(3) Al-8.5Si-xMg合金室温热导率随Mg元素含量的不同分为两个阶段,当Mg元素含量从0.09%增加到0.28%时,热导率都迅速下降;当Mg元素含量进一步从0.4%增加到0.71%时,共晶Si相组织均匀性得到提升,细小均匀的Si相结构降低自由电子运动过程中的散射几率,有利于自由电子在初生 α -Al和共晶Si之间自由运动传输热量,合金热导率下降趋于平缓。

参考文献:

- [1] HAGHAYEGHI R, PAULA L C D, ZOQUI E J. Comparison of Si refinement efficiency of electromagnetic stirring and ultrasonic treatment for a hypereutectic Al-Si alloy [J]. Journal of Materials Engineering & Performance, 2017, 26 (4): 1900-1907.
- [2] 张瑞忠, 张保存, 邹纯, 等. 高导热AlSi12Fe铸造铝合金的组织 and 性能 [J]. 轻合金加工技术, 2018, 46 (8): 22-27.
- [3] 牛艳萍, 赵禹凯, 王顺成, 等. Si含量对Al-Si-Mg合金铸造流动性、热导率和力学性能的影响 [J]. 铸造, 2016, 65 (4): 366-370.
- [4] İjlalŞimşek, DursunÖzyürek. Investigation of the effects of Mg amount on microstructure and wear behavior of Al-Si-Mg alloys [J]. Engineering Science and Technology, 2019, 22 (1): 370-375.
- [5] LI H C, SUN Y, SUN G X. Restraining effect of strontium on the crystallization of Mg₂Si phase during solidification in Al-Si-Mg casting alloys and mechanisms [J]. Materials Science & Engineering A (Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing), 2003, 358 (1-2): 164-170.
- [6] 何志, 张瑞杰, 介万奇. 冷却速率对Al-Si-Mg三元合金凝固过程的影响 [J]. 铸造, 2005 (2): 187-189.
- [7] 毛文龙, 周海涛. Sr变质对Al-Si-Mg合金的流动性、力学性能和导热系数的影响 [J]. 铸造, 2017 (2): 122-126.
- [8] OLAFSSON P, SANDSTROM R, KARLSSONÅ. Comparison of experimental, calculated and observed values for electrical and thermal conductivity of aluminium alloys [J]. Journal of Materials Science, 1997, 32 (16): 4383-4390.
- [9] 周敏, 姚曼, 陈序良, 等. 掺杂原子质量对硅声子散射的影响 [J]. 材料科学与工程学报, 2009 (6): 876-879.
- [10] RANA R S, PUROHIT R, DAS S. Reviews on the influences of alloying elements on the microstructure and mechanical properties of aluminum alloys and aluminum alloy composites [J]. International Journal of Scientific and Research Publications, 2012, 2 (6): 1-7.
- [11] 王剑, 曹东, 许德英. 高导热共晶Al-Si合金的制备及其性能 [J]. 特种铸造及有色合金, 2018 (4): 441-445.
- [12] 张建新, 高爱华. 改善铝合金导热性能途径的初探与分析 [J]. 稀有金属, 2004, 29 (9): 719-721.

Effect of Mg Content on Microstructure Evolution and Properties of AlSiMg Alloy

BEN Neng-jun¹, SUN Yu², ZHOU Peng-fei^{1,2,3}

(1. Yancheng Vocational Institute of Industry Technology, Intelligent Manufacturing Institute, Yancheng 224005, Jiangsu, China; 2. Yancheng Institute of Technology, Material science and Engineering School, Yancheng 224051, Jiangsu, China; 3. Soochow University, School of Iron and Steel, Suzhou 215137, Jiangsu, China)

Abstract:

Al-Si alloy specimens with different amounts of Mg were achieved by water-cooled copper mould casting. The mechanical properties and thermal conductivity of the alloy specimens were tested respectively by room temperature tensile test and LAF laser thermal diffusivity measurement. Effect of Mg content on the as-cast structure and properties of Al-Si alloy was analyzed according to OM/SEM results. The results show that as-cast microstructures of Al-8.5Si-xMg alloy were composed of primary Al and eutectic Si. When the content of Mg increased to 0.4wt.%-0.71wt.%, the average length of eutectic silicon decreased from 68 μm to 61 μm which enhanced the movement ability of free electrons between primary Al and eutectic Si and inhibited the rapid decrease of thermal conductivity in Al-Si alloy. Super saturated solid solution was formed by solid solution of Mg element into Al matrix under the rapid-cooling solidification and the strength of Al-Si alloys increased with solid solution of Mg element.

Key words:

Al-Si alloy; microstructure; thermal conductivity; mechanical properties