

Mg 含量对轨道车辆 Al-7Si-xMg 铝合金 显微组织与力学性能的影响

吴奇^{1, 2}

(1. 辽宁铁道职业技术学院 铁道车辆学院, 辽宁锦州 121000; 2. 大连交通大学 机车车辆工程学院, 辽宁大连 116028)

摘要: 为改善轨道车辆用Al-7Si-xMg铝合金的显微组织和力学性能, 以Al-Si铝合金为基体, 通过在凝固过程中进行超声振动制备不同Mg含量的Al-7Si-xMg铝合金, 利用光学显微镜(OM)、扫描电镜(SEM)、万能试验拉伸机研究了Mg含量对显微组织和力学性能的影响。Mg元素在Al-7Si-xMg铝合金中主要以Mg₂Si相的形式均匀分布在晶界处。随着Mg含量的增大, α -Al相尺寸、长宽比和二次枝晶臂间距先减小后增大, 硬度和抗拉强度先增大后减小, 伸长率不断减小, 当Mg含量达到1.5%时, α -Al晶粒尺寸最小, 呈现为椭球状, 硬度和抗拉强度最大。Al-7Si-xMg铝合金力学性能的提升是因为细晶强化和Mg₂Si颗粒强化的共同作用, 过量的Mg导致Mg₂Si相粗化, 使得力学性能降低。适量的Mg含量可适当改善Al-7Si-xMg铝合金的显微组织和力学性能。

关键词: 轨道车辆; Al-Si-Mg; Mg含量; 显微组织; 力学性能

作者简介:

吴奇(1988-), 女, 讲师, 硕士, 研究方向为铁道车辆空调、铁道车辆制动技术。
E-mail: Qiwu198802@163.com

中图分类号: TG146.22

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)02-0160-07

基金项目:

国家自然科学基金资助项目(11202043); 辽宁省自然科学基金资助项目(201602112); 牵引动力国家重点实验室资助项目(TPL0906)。

收稿日期:

2022-03-30 收到初稿,
2022-06-11 收到修订稿。

铸造Al-Si系列合金由于其优良的使用性能和热加工性能, 被广泛运用于轨道车辆^[1-2]、电子器件^[3]、航空航天^[4]等行业, 特别是在轨道交通领域, 铝合金的使用量更多, 铝合金的密度较低, 比强度较高, 可促进轨道车辆的轻量化, 可减重约50%, 但轨道车辆用铝合金对力学性能的要求较高。铸造Al-Si铝合金的缺陷较多, 显微组织粗大, 不利于力学性能的提升^[5], 仅靠目前的铸造Al-Si铝合金难以满足生产使用需要。为细化铸造Al-Si铝合金的显微组织、提升其力学性能, 国内外很多学者专注于高性能铝合金的开发^[6-7], 主要方向包括高性能铝合金成分优化和制备方法探索。

为细化铝合金显微组织, 较多学者使用机械搅拌法^[8]、电磁搅拌法^[9]、超声振动法^[10]来打碎粗大的枝晶, 本文主要通过超声振动法打碎粗大的二次枝晶。Mg元素是Al-Si铝合金的主要强化元素, 在铝合金中可与Si反应, 生成Mg₂Si固溶于铝合金中形成强化相, 进而提高铝合金的性能。Mg₂Si密度低、强度高的优点^[11]有利于轨道车辆用铝合金的轻量化和强度提升。林雪冬等人^[12]通过离心铸造法制备了自生颗粒增强Al-Si-Mg复合材料, 发现铸件内层有大量初晶Si/Mg₂Si颗粒偏聚, 其体积分数达到27.6%, 极大提升了发动机铝合金缸套铸件内层的硬度和耐磨性, 达到了设计使用要求。张瑞忠等人^[13]在不同热处理条件下挤压铸造制备A356.2铝合金, 研究了析出相和组织缺陷对力学性能的影响, 结果表明气孔率越低, 共晶Si球化系数越高, 伸长率越大, Mg₂Si强化相尺寸越大, 抗拉强度和屈服强度越小。但目前Mg含量对轨道车辆用铸造Al-Si铝合金显微组织和力学性能的影响方面的研究还有待进一步探索, 本文选取不同Mg含量Al-7Si-xMg铝合金为对象, 在熔体凝固过程中进行超声振动处理, 研究了Mg元素对 α -Al尺寸、二次枝晶臂间距、硬度及力学性能的影响, 并研究了Mg₂Si相的变化规律, 从而为实际生产制造时优化铝合金成分提供试验依据。

1 试验材料与方法

1.1 材料与过程

原材料选用Al-Si铝合金和Mg含量为30%的棒状Al-Mg中间合金，用于制备轨道车辆用Al-7Si-xMg ($x=0.5, 1.0, 1.5, 2.0$, 质量分数, %) 铝合金，化学成分如表1所示。预先将Al-Si铝合金表面打磨去除氧化杂质，Al-Mg中间合金剪切成碎块状，然后将Al-Si-Mg铝合金放入到石墨坩埚中，再在中频感应炉中升温到750℃进行熔炼，静置20 min后，按比例一边向坩埚中加入碎块状Al-Mg中间合金，一边进行机械搅拌，保温30 min进行扒渣除气，并浇注到预热250℃的金属模具内，待熔体慢慢冷却凝固，并在凝固过程中进行超声振动，超声功率为800 W、超声频率为20 kHz、超声时间为1 min。待自然冷却后，将铸锭切割成小块，用镶嵌机制成金相试样，在磨抛机上进行打磨、抛光，最后用0.5% HF溶液腐蚀5 s，吹干。

表1 Al-7Si-xMg铝合金化学成分
Table 1 Chemical compositions of the Al-7Si-xMg aluminum alloy

元素	Al	Si	Mg	Ti	Mn	Fe
Al-7Si-0.5Mg	余量	7.11	0.52	0.65	0.34	0.42
Al-7Si-1.0Mg	余量	7.04	0.98	0.52	0.31	0.49
Al-7Si-1.5Mg	余量	7.08	1.47	0.41	0.36	0.53
Al-7Si-2.0Mg	余量	6.97	2.03	0.24	0.29	0.61

1.2 性能测试

用Olympus-DSX500光学显微镜观察Al-7Si-xMg显微组织，用Image-Pro Plus6.0图像分析软件对显微组织进行量化分析，用自带能谱分析仪的Tescan-Vega3扫描电镜对Mg₂Si相进行形貌分析。将金相试样在HV-10B维氏硬度计上进行硬度测试，每个试样取5个测试点，计算平均值作为试样的维氏硬度。按照国标GB/T 228—2002，将拉伸样品加工制成长45 mm、直径9 mm的拉

伸试样棒，室温下在UTM5105拉伸试验机上测试试样的抗拉强度和伸长率，拉伸速率为2.5 mm/min，最后在扫描电镜下分析拉伸断口形貌。

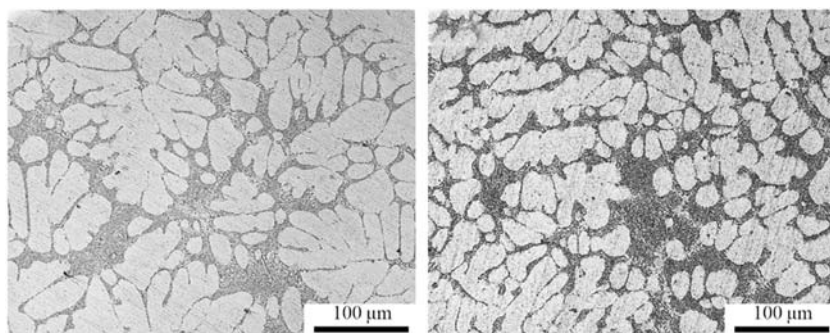
2 结果与讨论

2.1 Al-7Si-xMg 铝合金显微组织变化

图1显示了超声振动前后Al-7Si-1.5Mg铝合金显微组织，从图1a中可以看出，未进行超声振动处理的Al-7Si-1.5Mg铝合金 α -Al相粗大，呈现为粗大的树枝晶结构，枝晶数量较多。当施加超声振动处理后，显微组织如图1b所示，粗大的树枝晶几乎消失， α -Al相呈现为椭球状，超声振动在熔体内引起空化效应和声流效应，在瞬时产生高温冲击波，可以打碎枝晶，使得 α -Al相尺寸得到减小，形貌得到改善，达到细化晶粒的作用。

图2是不同Mg含量Al-7Si-xMg铝合金的显微组织。从图2a中可以看出，Al-7Si-0.5Mg铝合金中显微组织较为粗大， α -Al相形貌呈现为粗大的不规则树枝晶，且枝晶数量较多，共晶Si相呈现为细小的点球状，分布在 α -Al晶界。如图2b所示，Al-7Si-1.0Mg铝合金显微组织得到细化， α -Al相尺寸变小，树枝晶减少，且枝晶臂数量变少。Al-7Si-1.5Mg铝合金显微组织细化程度更明显， α -Al相尺寸更小，大部分呈现为短棒状或椭球状，如图2c所示，只有少量树枝晶存在。图2d显示了Al-7Si-2.0Mg铝合金显微组织， α -Al相尺寸变大，树枝晶增多，但尺寸较小。

图3是利用Image-Pro Plus6.0图像分析软件对不同Mg含量Al-7Si-xMg铝合金显微组织的量化分析结果，包括 α -Al相的尺寸和长宽比以及SDAS。发现随着Mg含量的增加， α -Al相的尺寸和其长宽比均是先减小后增大，当Mg含量为1.5%时， α -Al相的尺寸约为48.6 μm ，长宽比为2.1， α -Al相尺寸最小，形貌最佳。随着Mg含量的增加，SDAS先减小后略有增大，但增大幅度较小，当Mg含量为1.5%时，SDAS达到最



(a) 未超声振动处理

(b) 超声振动处理

图1 超声振动对Al-7Si-1.5Mg铝合金显微组织的影响

Fig. 1 The effect of ultrasonic vibration on the microstructures of the Al-7Si-1.5Mg aluminum alloy

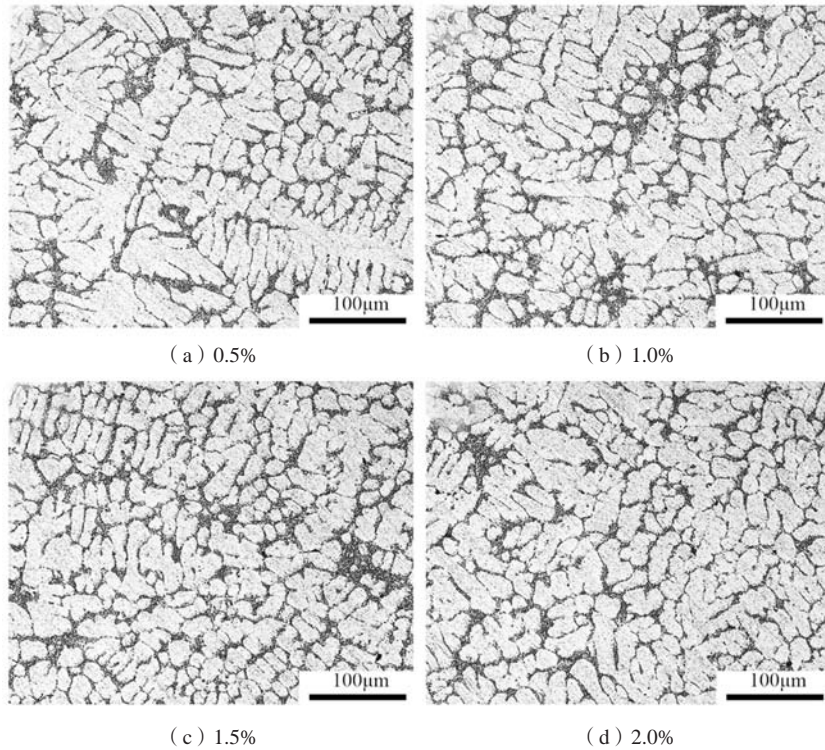


图2 不同Mg含量Al-7Si-xMg铝合金的显微组织

Fig. 2 Microstructures of the Al-7Si-xMg aluminum alloy with different Mg contents

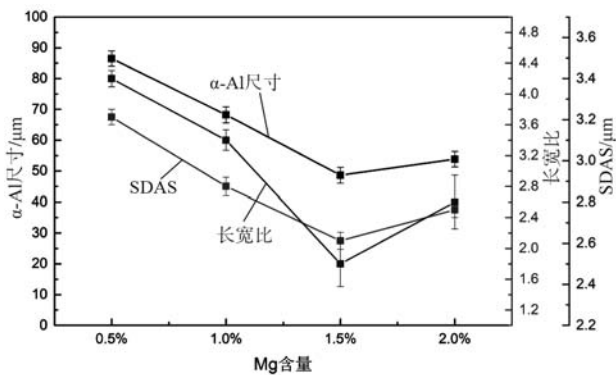


图3 Mg含量对Al-7Si-xMg铝合金显微组织的影响

Fig. 3 Effect of Mg content on the microstructure of the Al-7Si-xMg aluminum alloy

小, 约为 $2.5\ \mu\text{m}$ 。

2.2 Mg_2Si 相形貌演变

图4是不同Mg含量Al-7Si-xMg铝合金的SEM显微组织图。从图4中可以看出, Al-7Si-xMg铝合金中主要分布着灰白色的针状 TiAl_3 相^[14]和黑色的颗粒状 Mg_2Si 相^[15], 对图中的灰白色针状相和黑色的颗粒状相进行EDS能谱分析, 如图5所示, 其分析结果如表2所示, 这进一步证明了灰白色针状物质为 TiAl_3 相, 黑色的颗粒状物质为 Mg_2Si 相。当Mg含量为0.5%时, 如图4a所示, 此时的灰白色针状 TiAl_3 相偏多, 黑色颗粒状 Mg_2Si

表2 灰白色相和黑色相能谱分析结果
Table 2 EDS results of the grayish white phase and black phase

相组织	Al	Si	Mg	Ti	$w_B / \%$
灰白色相	58.54	13.41	2.56	19.89	
黑色相	35.74	19.75	36.83	0.25	

相比较少, 且 Mg_2Si 相尺寸较小。继续增大Mg含量, 灰白色针状 TiAl_3 相减少, 黑色颗粒状 Mg_2Si 相开始增多, 且尺寸增大。当Mg含量达到2.0%时, 黑色颗粒状 Mg_2Si 相发生粗化, 呈现为长条状或大块状, 不利于Al-7Si-xMg铝合金性能的提升。

2.3 Mg含量对Al-7Si-xMg铝合金力学性能的影响

图6所示为Al-7Si-xMg铝合金硬度随Mg含量的变化曲线图, 随着Mg含量的增加, Al-7Si-xMg铝合金硬度先增大后减小, 当Mg含量为1.5%时, Al-7Si-1.5Mg铝合金硬度最大, 达到HV126.4, 相比于Al-7Si-0.5Mg铝合金硬度 (HV92.6) 提升了36.5%。均匀分布的 Mg_2Si 相作为强化相, 可以提升Al-7Si-xMg铝合金的硬度^[6], 过量的Mg使得 Mg_2Si 相发生粗化, 降低了Al-7Si-xMg铝合金的硬度。图7是Al-7Si-xMg铝合金拉伸棒力学性能随Mg含量的变化曲线图。从图7中可以看出, 随着Mg含量的增大, Al-7Si-xMg铝合金的抗拉强度先增大后减

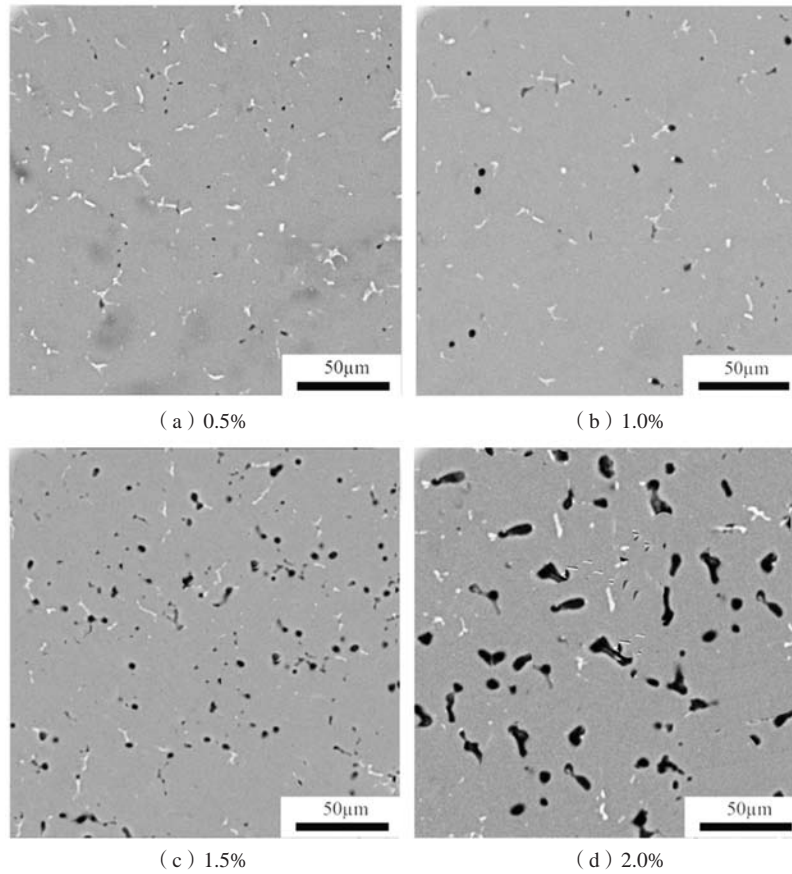


图4 不同Mg含量Al-7Si-xMg铝合金SEM图

Fig. 4 SEM images of the Al-7Si-xMg aluminum alloy with different Mg contents

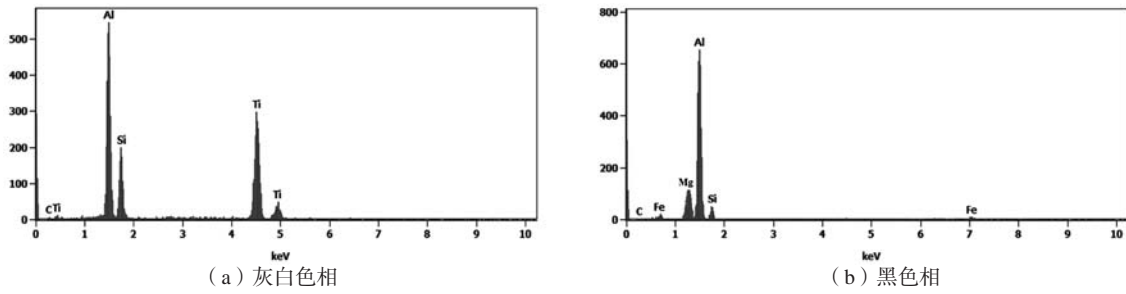


图5 EDS结果

Fig. 5 EDS results of the grayish white phase and black phase

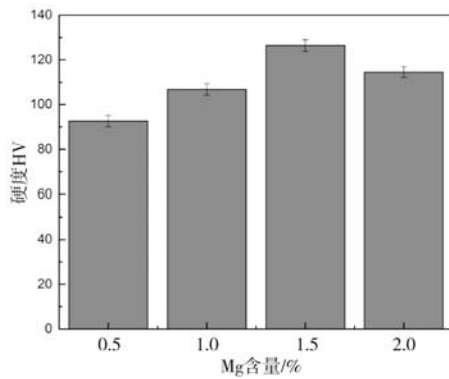


图6 不同Mg含量Al-7Si-xMg铝合金硬度变化

Fig. 6 Hardness changes of the Al-7Si-xMg aluminum alloy with different Mg contents

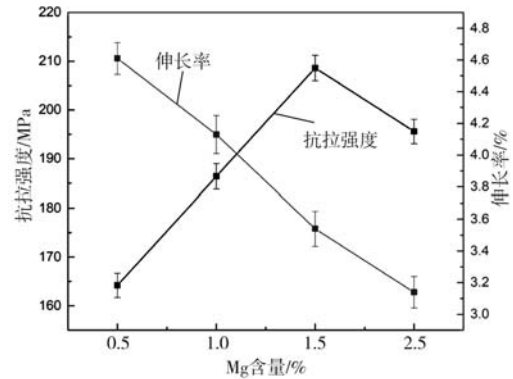


图7 不同Mg含量Al-7Si-xMg铝合金力学性能变化曲线

Fig. 7 Mechanical properties change curves of the Al-7Si-xMg aluminum alloy with different Mg contents

小, 伸长率逐渐减小, 当Mg含量为1.5%时, 抗拉强度最大达到208.6 MPa, 伸长率达到3.54%, Al-7Si-1.5Mg铝合金的力学性能达到最佳。Mg₂Si的弹性模量比铝高^[17], 当Mg含量增大时, Mg₂Si相增多, Al-7Si-xMg铝合金的抗拉强度增大, 但当Mg含量过大时, Mg₂Si相与基体的结合程度较弱, 导致Al-7Si-2.0Mg铝合金的抗拉强度降低, 而且Mg过量时导致粗化脆性Mg₂Si相形成, 破坏晶界, 降低了Al-7Si-2.0Mg铝合金伸长率^[18]。

图8是Al-7Si-xMg铝合金拉伸断口的形貌图, 从图8中可以看出, 可以明显观察到有大量的韧窝和一些大小不一的解理面, Al-7Si-xMg铝合金拉伸断口均呈现

出以典型的韧性断裂为主的断裂特性。当Mg含量增加时, Al-7Si-xMg铝合金的伸长率下降, 断口形貌呈现韧窝数量增多, 平坦的大解理面变少, 撕裂棱不断减少。当Mg含量达到1.5%时, 图8c所示拉伸断口出现数量较多的细小韧窝, 大解理面几乎消失, 仅包含少量的撕裂棱, 抗拉强度提高, 这主要是因为Mg₂Si相在拉伸过程中阻碍了位错的运动, 导致伸长率降低。而当Mg含量过多时, 如图8d所示细小的韧窝间夹杂着一些较大的解理面, 此时Al-7Si-2.0Mg铝合金的力学性能又出现下降。

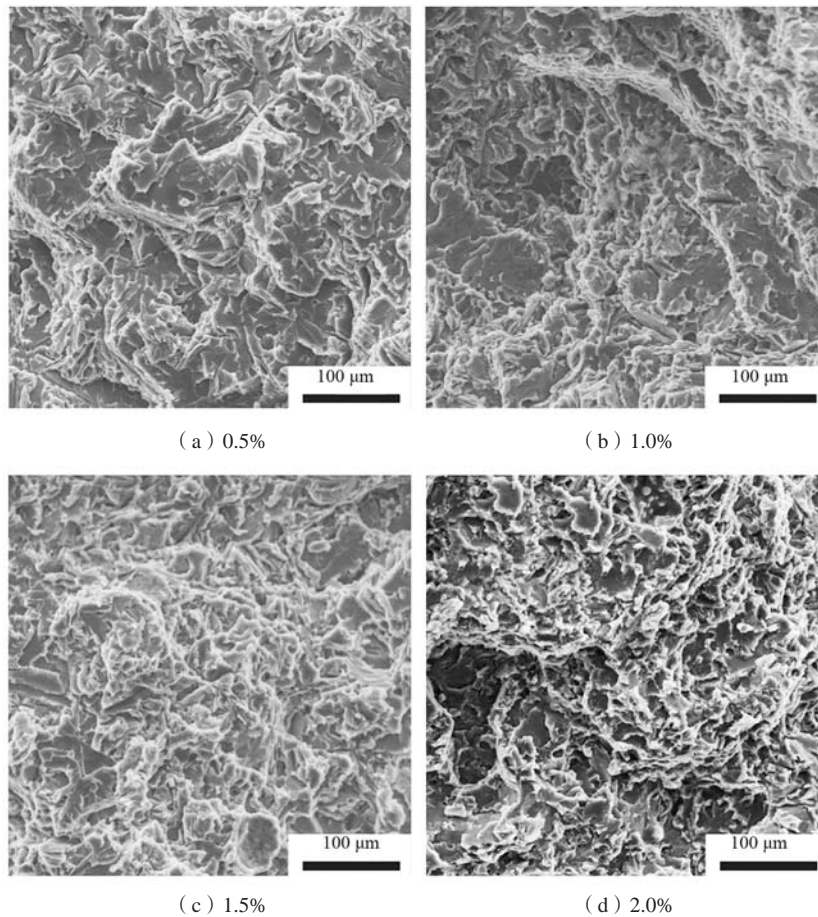


图8 不同Mg含量Al-7Si-xMg铝合金拉伸断口形貌,

Fig. 8 Tensile fracture morphologies of the Al-7Si-xMg aluminum alloy with different Mg contents

2.4 讨论

结合以上试验结果与分析, 适当的Mg含量对Al-7Si-xMg铝合金显微组织有一定的改善作用, 细化了晶粒, 降低了SDAS, 改善了形貌, Mg₂Si增强相尺寸细小、分布均匀, 细晶强化和颗粒强化作用使得其力学性能得到了提升。Al-7Si-xMg铝合金中Mg与Si发生反应生成Mg₂Si相, 与共晶Si相共同分布在 α -Al晶界处, 对Al-7Si-xMg铝合金起到了颗粒强化作用。Mg的加入

会降低Al-7Si-xMg铝合金的共晶反应温度, 提高过冷度进而促进形核^[19], 导致 α -Al相的细化和分布均匀, 并且较大的过冷度可以改善 α -Al相的形貌, 对Al-7Si-xMg铝合金起到了细晶强化作用。当Mg含量较低时, 过冷度较小, 铝合金凝固区间较窄, α -Al相形貌主要以树枝晶的形式存在。当Mg含量达到1.5%时, α -Al相的形貌大大改善, 长宽比变小, 由以树枝晶为主转变为以椭球状为主, 此时过冷度较大, 枝晶在生长过

程中发生断裂,改变了晶粒的生长方式,进而改变了 α -Al相的尺寸和形貌,细化了Al-7Si-1.5Mg铝合金的显微组织,使得SDAS大大减小,细晶强化作用更明显。Al-7Si- x Mg铝合金力学性能的提升除了 Mg_2Si 相强化作用之外,还与SDAS有关,甚至SDAS比晶粒尺寸对力学性能的影响更大^[20],Al-7Si- x Mg铝合金的硬度、抗拉强度随着SDAS的减小而增大^[21]。当Mg含量为2.0%时,Al-7Si-2.0Mg铝合金抗拉强度降低是由于 Mg_2Si 相数量变多且尺寸变大,形貌也由颗粒状变为长条状,对基体有割裂作用,造成晶界破坏,不利于抗拉强度的提升^[22]。综上所述,适量的Mg可使Al-7Si- x Mg铝合金显微组织得到细化,降低SDAS,改善其形貌, Mg_2Si 增强相尺寸细小且分布均匀, Mg_2Si 强化相的颗粒强化和Mg的细晶强化的共同作用使得Al-7Si- x Mg铝合金力学性能得到明显提升。

3 结论

(1) 轨道车辆用Al-7Si- x Mg铝合金经机械搅拌后

组织主要由 α -Al相、共晶Si相组成,共晶Si相分布在 α -Al晶界处。Mg的加入在一定程度上可以降低反应温度,细化Al-7Si- x Mg铝合金的显微组织。

(2) 随着Mg含量的增加, α -Al相的尺寸和其长宽比均是先减小后增大,SDAS先减小后略有增大。当Mg含量达到1.5%时,Al-7Si- x Mg铝合金显微组织细化程度最高,形貌最佳, α -Al由树枝晶转变为椭球状, α -Al相尺寸由86.5 μm 减小到48.6 μm 。当Mg含量过量时,黑色 Mg_2Si 相变粗大。

(3) 随着Mg含量的增加,Al-7Si- x Mg铝合金硬度先增大后减小,抗拉强度先增大后减小,伸长率逐渐减小。当Mg含量为1.5%时,硬度最大达到HV126.4,抗拉强度最大达到208.6 MPa,伸长率最小,达到3.54%。Al-7Si- x Mg铝合金力学性能的提升是由于细晶强化和 Mg_2Si 强化相的作用,当Mg含量过多时,粗化的 Mg_2Si 相不利于Al-7Si- x Mg铝合金力学性能的提升。

参考文献:

- [1] 何芳,庄林忠,何国元,等.汽车轮毂用A356铝合金合金化的研究进展[J].铸造,2021,70(4):431-437.
- [2] 刘洋,侯佳新,张志壮.A356铝合金低压铸造轮毂轮缘缺陷分析及改进[J].铸造,2017,491(10):1112-1114,1118.
- [3] 曹宇,钟山,陈金辉,等.热处理对电子产品用6013铝合金组织和性能的影响[J].热加工工艺,2020,49(20):135-138.
- [4] LIMA J O, BARBOSA C R, MAGNO I, et al. Microstructural evolution during unsteady-state horizontal solidification of Al-Si-Mg (356) alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2018, 28(6):1073-1083.
- [5] SONG L Y, LIU H X, NIE S N, et al. Microstructure and fracture behavior of Al-Si-Mg alloy prepared with recycled alloy[J]. Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik, 2019, 50(4):462-470.
- [6] WANG G D, TIAN N, HE C S, et al. Formation of second-phases in a direct-chill casting Al-12Si-0.65Mg- x Mn alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018, 54(7):1059-1067.
- [7] WANG D, ZHANG X, XU S, et al. Improvement of mechanical properties in micro-alloying Al-Si-Mg-Zn cast alloy[J]. Materials Letters, 2021, 283:128810.
- [8] KIM J H, LEE K M, LEE H D, et al. Effects of titanium and boron additions with mechanical stirring on mechanical properties in Al-Si alloys[J]. Materials Transactions, 2015, 56(3):450-453.
- [9] BAN B, LI Y, ZUO Q, et al. Refining of metallurgical grade Si by solidification of Al-Si melt under electromagnetic stirring[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 222:142-147.
- [10] SUN Y H, YAN H, XIONG J J. Al₃Ti/ADC12 composite synthesized by ultrasonic chemistry in situ reaction[J]. Science and Engineering of Composite Materials, 2020, 27(1):10-18.
- [11] JI S, YANG H, CUI X P. Macro-heterogeneities in microstructures, concentrations, defects and tensile properties of die cast Al-Si-Mg alloys[J]. Materials Science and Technology, 2017, 33:2223-2233.
- [12] 林雪冬,孙建,叶京川,等.汽缸套自生颗粒增强Al-Si-Mg复合材料的制备与台架实验研究[J].热加工工艺,2018,47(16):112-117.
- [13] 张瑞忠,钟鼓,邱楚,等.挤压铸造对A356.2合金微观组织和力学性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2018,38(6):604-608.
- [14] SUN Y H, YAN H, CHEN X H, et al. Microstructure evolution of semi-solid TiAl₃/A356 composite prepared by ultrasonic vibration[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(01):24-32.
- [15] 吴桃泉,杜军,关玉芹,等. Mg_2Si /富铁A356再生铝基复合材料的组织及耐磨性研究[J].铸造,2016,65(10):970-974.
- [16] 刘晓波,赵宇光.不同制备条件下原位 Mg_2Si /Al复合材料的组织演变和耐磨性[J].金属学报,2014,50(6):753-761.
- [17] 陈磊.变质Al-20wt.% Mg_2Si 合金中初生 Mg_2Si 生长形貌演化与调控机制[D].长春:吉林大学,2015.

- [18] ANDERSEN S J, ZANDBERGEN H W, TRAEHOLT C, et al. The crystal structure of the β phase in Al-Mg-Si alloys [J]. *Acta Materialia*, 1998, 46 (2) : 3283–3298.
- [19] LI H C, SUN Y, SUN G X. Restraining effect of strontium on the crystallization of Mg_2Si phase during solidification in Al-Si-Mg casting alloys and mechanisms [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2003, 358 (1-2) : 164–170.
- [20] 宋宪臣. 低热裂高流动性 (La+Yb) 混合稀土铝合金及压铸成型 [D]. 南昌: 南昌大学, 2019.
- [21] 沈月, 何国球, 田丹丹, 等. 二次枝晶臂间距对A319铝合金拉伸及疲劳性能的影响 [J]. *材料研究学报*, 2014, 28 (8) : 587–593.
- [22] RANA G, ZHOU J E, WANG Q G. Precipitates and tensile fracture mechanism in a sand cast A356 aluminum alloy [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 207 (1-3) : 46–52.

Effect of Mg Content on Microstructure and Mechanical Properties of Al-7Si- x Mg Aluminum Alloy for Rail Vehicle

WU Qi^{1,2}

(1. College of Railway Rolling Stock, Liaoning Railway Vocational and Technical College, Jinzhou 121000, Liaoning, China; 2. College of Locomotive and Rolling Stock Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, Liaoning, China)

Abstract:

In order to improve the microstructure and mechanical properties of Al-7Si- x Mg aluminum alloy for rail vehicles, the Al-7Si- x Mg aluminum alloy with different Mg contents was prepared by ultrasonic vibration during solidification period with Al-Si aluminum alloy as matrix. The effects of the Mg content on microstructure and mechanical properties were studied by OM, SEM, universal tensile testing machine. The Mg elements in Al-7Si- x Mg aluminum alloy were mainly evenly distributed at the grain boundary in the form of Mg_2Si phase. With the increase of the Mg content, the grain size of α -Al, aspect ratio and secondary dendrite arm spacing (SDAS) first decreased and then increased, and the hardness and tensile strength first increased and then decreased, the elongation gradually decreased. When the Mg content reached 1.5%, the α -Al phase with the smallest grain size presented ellipsoidal shape, and the hardness, elongation, and tensile strength were the largest. The improvement of mechanical properties of the Al-7Si- x Mg aluminum alloy was due to the combined effect of fine grain strengthening and Mg_2Si particle strengthening. Excessive Mg led to the coarsening of the Mg_2Si phase and the reduction of the mechanical properties. Proper Mg content can improve the microstructure and mechanical properties of the Al-7Si- x Mg aluminum alloy.

Key words:

rail vehicles; Al-Si-Mg; Mg content; microstructure; mechanical properties
