

低压脉冲磁场对 Al-Mg-Si 合金中 Mg₂Si 相的影响

曾麟添¹ 吴 晗² 周 全¹ 陈乐平¹
(1.南昌航空大学航空制造工程学院;2.上海飞机制造有限公司)

摘 要 以 Al-13Mg-7Si 合金为对象,研究了低压脉冲磁场对合金中初生 Mg₂Si 相大小、形态、分布及合金硬度、耐磨性的影响。结果表明,低压脉冲磁场能够调控初生 Mg₂Si 相的平均分布宽度,通过控制初生 Mg₂Si 相在边缘的偏聚程度来提高合金表面硬度及耐磨性。在 0~175 V 电压范围内或 1~10 Hz 放电频率范围内的脉冲磁场作用下,合金中初生 Mg₂Si 相的等效圆直径随着电压或放电频率的增加,均表现为持续上升趋势;当电压持续增加时,初生 Mg₂Si 相的平均分布宽度先减小后增大,转折点为 105 V;当放电频率持续增加时,初生 Mg₂Si 相的平均分布宽度逐渐减小。合金边部区域的硬度和耐磨性均优于中心区的硬度和耐磨性;各区域初生 Mg₂Si 相的体积分数对该区域合金的硬度值起主导作用。

关键词 脉冲磁场;Mg₂Si 相;分布;表面增强复合材料

中图分类号 TG146.21;TG156.97 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.10.013 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Effects of Low-voltage Pulsed Magnetic Field on Mg₂Si Phase in Al-Mg-Si Alloy
Zeng Lintian¹, Wu Han², Zhou Quan¹, Chen Leping¹
(1.School of Aeronautical Manufacturing Engineering,Nanchang Hangkong University;
2.Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd.)

Abstract: Effects of low-voltage pulsed magnetic field on size, morphology, distribution of primary Mg₂Si phase and hardness, wear resistance of the alloy in Al-Mg-Si alloy were investigated. The results indicate that low voltage pulsed magnetic field can adjust the average distribution width of primary Mg₂Si phase, and the surface hardness and wear resistance of the alloy can be improved by controlling the segregation degree of primary Mg₂Si phase at the edge. In the voltage range of 0~175 V or discharge frequency range of 1~10 Hz, the equivalent circle diameter of primary Mg₂Si phase in the alloy presents a continuous increase trend with the enhance of voltage or discharge frequency. When the voltage is increased continuously, the average distribution width of primary Mg₂Si phase is decreased at first and then improved with turning point of 105 V. When the discharge frequency is increased continuously, the average distribution width of primary Mg₂Si phase is decreased gradually. The hardness and wear resistance of the alloy at edge region are superior to those of the ones at the center region. The hardness of the alloy in each region is dominated by the volume fraction of primary Mg₂Si phase.

Key Words: Pulsed Magnetic Field, Mg₂Si Phase, Distribution, Surface Reinforced Composite

Al-Mg-Si 合金可以形成 Mg₂Si/Al 复合材料,具有轻质、高强、耐磨及成本低等特点,可应用于汽车、电子、船舶及航天领域的轻量化部件,具有较好的市场价值和一定的发展前景^[1]。

初生 Mg₂Si 相的形态和分布会直接影响 Mg₂Si/Al 复合材料的力学性能。当初生 Mg₂Si 相细小均匀地分布在合金中,复合材料的综合力学性能显著提升,而呈偏聚分布的初生 Mg₂Si 相对制备 Mg₂Si/Al 梯度材料

起着关键作用。Mg₂Si 相的细化方法主要包括化学和物理两大类。化学上可加入微量的 Sr、B、K、La、P 等元素^[2],物理上包括机械搅拌、电磁场处理、超声波处理及控制冷却速度等方法。邓鹏等^[3]研究发现,在 0~300 V 范围内的脉冲磁场作用下,随着电压增大,Mg-Al-Si 复合材料中的 Mg₂Si 相逐渐由等轴枝晶转变为颗粒状,Mg₂Si 相平均尺寸由 78 μm 减小到 16 μm。姜文勇等^[4]研究发现,在 0~10 Hz 范围内的脉冲磁场作用下,

收稿日期:2022-11-21;修改稿收到日期:2022-12-14
基金项目:江西省科技重点研发计划资助项目(2021BBE53018)
第一作者简介:曾麟添,男,1998 年出生,硕士研究生,南昌(330063),E-mail:164791967@qq.com
通信作者:吴晗,男,1992 年出生,工程师,上海(201324),E-mail:852323223@qq.com
引用格式:曾麟添,吴晗,周全,等. 低压脉冲磁场对 Al-Mg-Si 合金中 Mg₂Si 相的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(10):1 400-1 404.
ZENG L T, WU H, ZHOU Q, et al. Effects of low-voltage pulsed magnetic field on Mg₂Si phase in Al-Mg-Si alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(10):1 400-1 404.

随着脉冲频率增加,Al-12.5Mg-6.7Si 合金中的 Mg_2Si 相逐渐细化,在脉冲频率为 1 Hz 时其晶粒尺寸最细,达到 32.5 μm ,并且合金的硬度得到显著提高。李英民等^[5]研究发现,电磁搅拌能够细化 Mg_2Si /Al 复合材料中初生 Mg_2Si 相,且初生 Mg_2Si 相形态由块状转变为球状或粒状,其力学性能明显提高,抗拉强度在 0.012 T 的磁场搅拌后达到 207 MPa。刘飞等^[6]研究发现,脉冲磁场能显著细化 Mg_2Si /Mg-Al 基复合材料中的 Mg_2Si 相,其长条状枝晶逐渐转化为细小的块状晶粒,并在脉冲频率为 20 Hz 时完全转化。WANG D 等^[7]通过控制冷却速率,抑制了初生 Mg_2Si 相的团簇和偏聚,获得了八面体形态的初生 Mg_2Si 相。电磁场和离心力场除了具有细化 Mg_2Si 相作用外, Mg_2Si 相在特定条件下还会产生偏聚和梯度分布效果。曹志强等^[8]研究发现,Al-20Mg₂Si-5Si 合金经高频磁场处理后,初生 Mg_2Si 相主要在合金边部呈梯度分布,边部的平均硬度与未处理合金相比提高了 60% 左右。吴晗等^[9]研究发现,在 0~300 V 脉冲磁场作用下, Mg_2Si /Al 复合材料中的初生 Mg_2Si 相在试样边部偏聚,体积分数逐渐增加;当脉冲电压为 300 V 时,初生 Mg_2Si 相的体积分数增加到 65%。李光玉等^[10]采用离心铸造制备出了性能优异的 Mg_2Si 相增强铝基梯度复合材料,其磨损率降低到了 HT200 在相同干滑动摩擦磨损条件下的 1/30~1/40。

低压脉冲磁场可以显著改善 Mg、Al、Cu 及 Fe 等材料的凝固组织,提高其力学性能,并且具有操作简单、无污染、耗能低等特点^[11-15]。目前对于低压脉冲磁场下 Mg_2Si 增强相形态和分布的研究报道较少,因此本研究考察了不同电压和放电频率的低压脉冲磁场对 Al-Mg-Si 合金中初生 Mg_2Si 相大小、形态和分布的影响,以期为其应用提供参考。

1 试验方法与过程

采用自主研发的脉冲磁场装置,主要由脉冲电源、线圈、铸型、金属熔体及耐火砖底座组成,见图 1。线圈

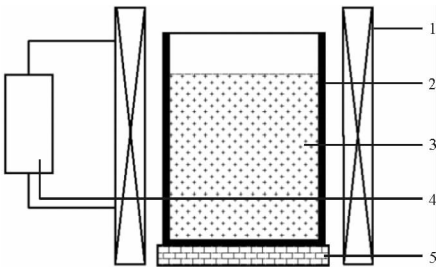


图 1 低压脉冲磁场装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of low-voltage pulsed magnetic field device

1. 工作线圈 2. 铸型 3. 金属熔体 4. 脉冲线圈 5. 耐火砖底座

绕在内径为 60 mm,高为 90 mm 的不锈钢筒上,工作线圈中通入脉冲电流形成了脉冲磁场。

试验材料为 Al-Mg-Si 合金,Al、Mg、Si 分别以(质量分数,下同)80%、13%、7%进行熔炼,其中 Al、Mg 分别以(纯度>99.9%)纯金属锭的形式加入,Si 以 Al-25Si 中间合金的形式加入。

将 Al-25Si 中间合金和纯 Al 放入坩埚炉内,待其熔化后再加入纯 Mg。合金完全熔化并搅拌均匀后,待熔体温度达到 730 $^{\circ}C$ 时,先将预热至 600 $^{\circ}C$ 的铸型放入工作线圈中,然后将金属熔体浇入铸型中,同时启动低压脉冲磁场装置,直至试样完全凝固成形。研究了电压和放电频率对 Al-Mg-Si 合金中初生 Mg_2Si 相和合金硬度、耐磨性的影响,具体试验参数见表 1。

表 1 试验工艺参数

Tab.1 Parameters of experimental process		
编号	脉冲电压/V	脉冲频率/Hz
1	0	0
2	35	10
3	70	10
4	105	10
5	140	10
6	175	10
7	105	1.0
8	105	2.5
9	105	5.0

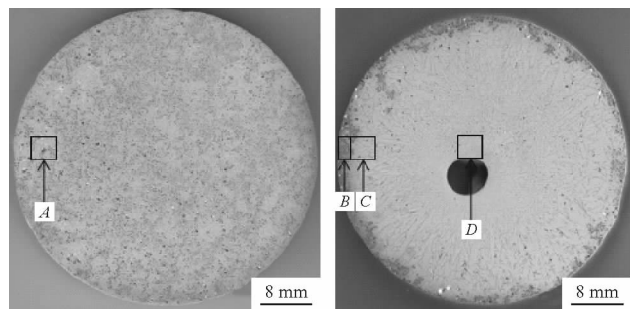
将试验所得铸锭沿中部切开后制取金相试样,经研磨、抛光后,用体积分数为 0.5% 的 HF 水溶液进行腐蚀。采用扫描仪和 XJP-6A 型光学显微镜分别拍摄试样的宏观及微观组织。采用等效圆半径法测量初生 Mg_2Si 相的尺寸,并通过测量试样中心无初生 Mg_2Si 相区域的面积,计算得出初生 Mg_2Si 相的平均分布宽度。采用 HR-150A 型洛氏硬度计测量合金的硬度变化。在室温下采用 M-2000 摩擦磨损试验机对 Al-Mg-Si 合金进行摩擦磨损测试,采用精度为 0.1 mg 的电子天平称量试样,通过计算测试前后的质量差得出试样磨损量,并采用 SU1510 钨灯丝扫描电镜拍摄磨损表面的宏观形貌。

2 试验结果与分析

2.1 凝固组织

图 2 为 Al-Mg-Si 合金典型的宏观组织。可以看出,未处理时,初生 Mg_2Si 相均匀分布在试样的各个区域上;经脉冲磁场处理后,试样出现了中心缩孔,其心部基本没有初生 Mg_2Si 相,大部分初生 Mg_2Si 相偏聚在试样边部,形成了具有一定分布宽度的边部偏聚区。

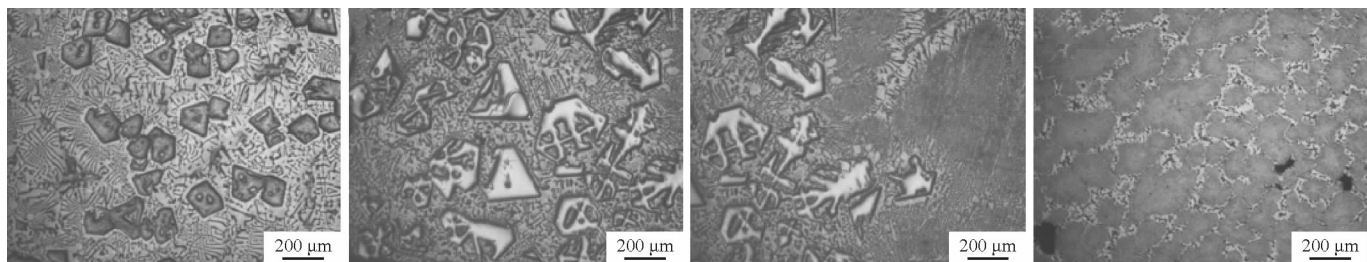
图 3 为 Al-Mg-Si 合金在图 2 位置上所对应的微观



(a) 未处理(1号试样) (b) 磁场处理(4号试样)

图2 合金典型的宏观凝固组织

Fig.2 Typical macrostructure of the alloy



(a) A 区域

(b) B 区域

(c) C 区域

(d) D 区域

图3 Al-Mg-Si 合金不同区域的微观组织

Fig.3 Microstructure of Al-Mg-Si alloy at different regions

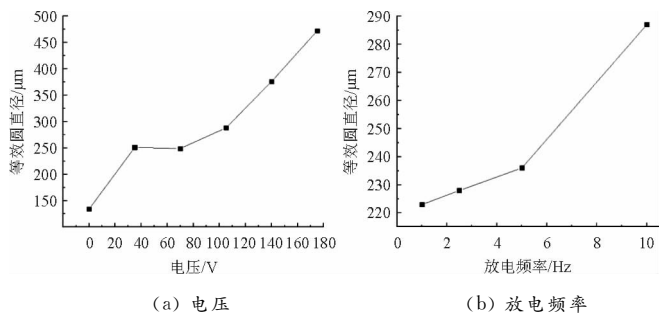


图4 电压和放电频率对合金偏聚区初生 Mg_2Si 相等效圆直径的影响

Fig.4 Influence of voltage and discharge frequency on equivalent effective circle diameter of primary Mg_2Si phase in segregation region

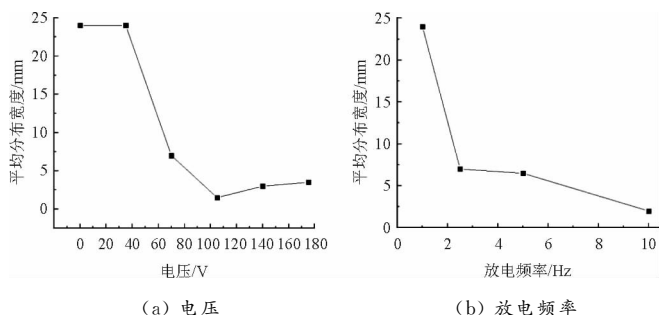


图5 电压和放电频率对初生 Mg_2Si 相平均分布宽度的影响

Fig.5 Influence of voltage and discharge frequency on average distribution width of primary Mg_2Si phase

对初生 Mg_2Si 相的影响规律与电压一致。但随着放电频率的增加,初生 Mg_2Si 相的平均分布宽度逐渐减小。

组织。可以看出,1 号试样的边缘部分初生 Mg_2Si 相呈棱角分明的块状;4 号试样的边缘部分(B 区域)初生 Mg_2Si 相仍为块状,但尺寸有所增加,过渡区域(C 区域)只有部分区域含有初生 Mg_2Si 相,中心区域(D 区域)组织主要由 $\alpha\text{-Al}$ 和 $\alpha\text{-Al}+\text{Mg}_2\text{Si}$ 共晶组织组成。

图 4 和图 5 分别为不同电压和放电频率下初生 Mg_2Si 相的尺寸和平均分布宽度。可以看出,在 0~175 V 电压范围内,随着电压增加,偏聚区初生 Mg_2Si 相的平均等效圆直径逐渐增加,平均分布宽度先减小后增大,转折点为 105 V;在 1~10 Hz 范围内,放电频率

2.2 力学性能

图 6 为磁场处理前后试样不同区域的磨损量。可以看出,未处理时,试样的边部和心部磨损量无明显区别;磁场处理后(4 号),试样边部的磨损量小于其心部的,且整体磨损量有所减小。

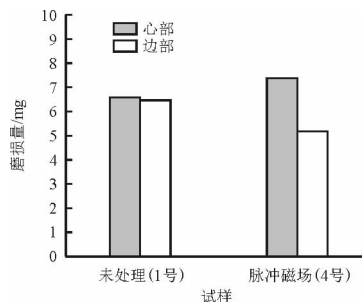


图6 磁场处理前后合金不同区域的磨损量

Fig.6 Wear rate of alloy at different regions before and after magnetic field treatment

图 7 为 1 号和 4 号合金各区域室温磨损的表面形貌。可以看出,未处理时,合金表面磨损得十分粗糙,不同程度的剥落坑、裂纹及犁沟覆盖整个表面;合金中心区域和边缘区域磨损部位的形貌无明显区别。经脉冲磁场处理后,与中心部位相比,合金边缘区域的剥落坑明显减少,犁沟明显变浅。

图 8 为不同电压和放电频率对 Al-Mg-Si 合金硬度的影响。可以看出,合金偏聚区的硬度要高于中心区的硬度;当电压在 0~175 V 范围内持续增加时,合金偏聚区的硬度(HRB)整体上先增加后降低,转折点为 105

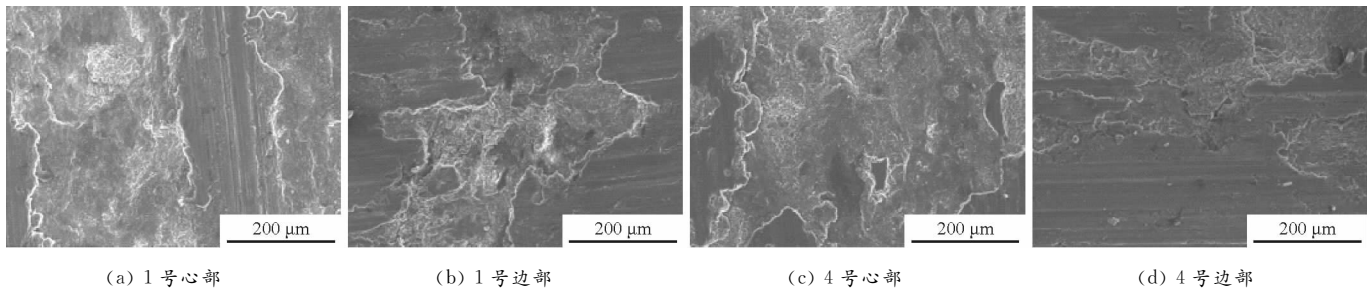


图 7 磁场处理前后合金各部位室温磨损的表面形貌

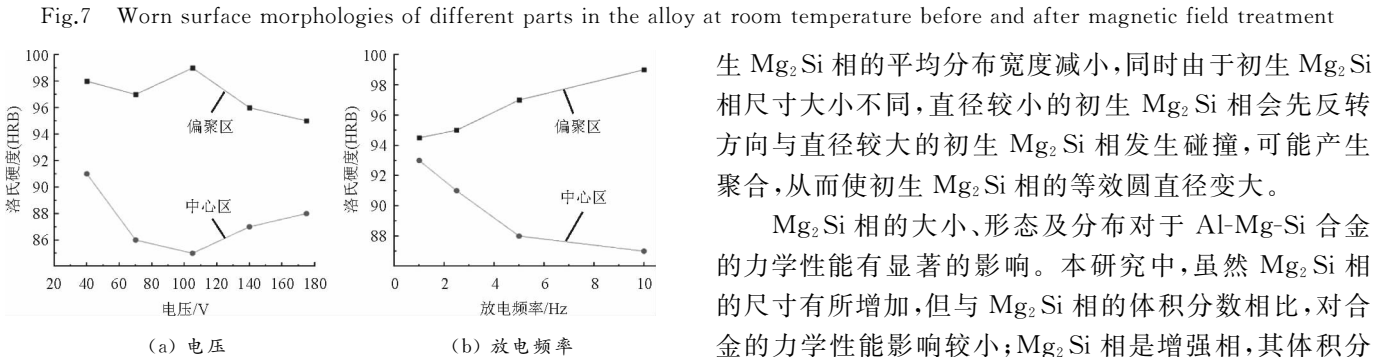


图 8 电压和放电频率对 Al-Mg-Si 合金硬度的影响
 Fig.8 Effects of voltage and discharge frequency on hardness of Al-Mg-Si alloy

V;当放电频率在 1~10 Hz 范围内持续增加时,合金偏聚区的硬度逐渐增加;合金中心区硬度的变化规律与偏聚区相反。

2.3 分析与讨论

脉冲磁场对含增强相的合金熔体有细化和促进增强相迁移两个相反的作用^[16]。一方面脉冲磁场中磁感应强度变化产生的电磁搅拌和振荡效应对初生 Mg_2Si 相起细化和均匀化作用;另一方面脉冲磁场在合金熔体内产生的电磁斥力会对初生 Mg_2Si 相产生迁移作用。

当电压低于 105 V 时,由于磁感应强度较小,脉冲磁场在熔体中形成的电磁搅拌和振荡效应较弱,此时影响初生 Mg_2Si 相的主要是由电磁斥力产生的迁移作用。因此,在电磁斥力作用下,初生 Mg_2Si 相持续向试样的边缘方向迁移,在试样表面聚集;由于电磁斥力推动不同直径初生 Mg_2Si 相进行迁移的速度不同,初生 Mg_2Si 颗粒在过共晶组织区容易发生团聚而形成较大的颗粒簇,导致初生 Mg_2Si 相的粗化。当电压高于 105 V 时,磁感应强度和电磁斥力均进一步增加,但脉冲磁场产生的电磁搅拌和振荡效应更强,其细化和均匀化作用大于迁移作用,抑制了初生 Mg_2Si 相向边缘移动,因此,当电压进一步增大时,试样的初生 Mg_2Si 相边缘偏聚区开始减小,初生 Mg_2Si 相分布宽度增加。

在 1~10 Hz 范围内,随着放电频率增加,在同一时间内脉冲磁场对初生 Mg_2Si 相的作用次数显著增加,延长了初生 Mg_2Si 相向试样边缘迁移的时间,因此,初

生 Mg_2Si 相的平均分布宽度减小,同时由于初生 Mg_2Si 相尺寸大小不同,直径较小的初生 Mg_2Si 相会先反转方向与直径较大的初生 Mg_2Si 相发生碰撞,可能产生聚合,从而使初生 Mg_2Si 相的等效圆直径变大。

Mg_2Si 相的大小、形态及分布对于 Al-Mg-Si 合金的力学性能有显著的影响。本研究中,虽然 Mg_2Si 相的尺寸有所增加,但与 Mg_2Si 相的体积分数相比,对合金的力学性能影响较小; Mg_2Si 相是增强相,其体积分数越高,对合金力学性能影响越大。脉冲磁场处理后,合金边部偏聚区的初生 Mg_2Si 相的体积分数明显要高于中心区,所以合金边部偏聚区的硬度和耐磨性较高。当脉冲电压持续增加时,合金偏聚区的宽度先减小后增加,偏聚区内 Mg_2Si 相的体积分数先升高后下降,因此偏聚区的硬度先升高后降低;当脉冲频率增加时,合金偏聚区的宽度逐渐减小,偏聚区内 Mg_2Si 相的体积分数逐渐增加,因此偏聚区的硬度逐渐升高,而合金中心区与偏聚区 Mg_2Si 相体积分数的变化规律相反,因此其硬度变化规律也与偏聚区相反。

3 结 论

- (1) 低压脉冲磁场能有效调控 Al-Mg-Si 合金中 Mg_2Si 相的尺寸及平均分布宽度,制备出 Mg_2Si /Al 表面增强复合材料。
- (2) 当电压在 0~175 V 范围内或放电频率在 1~10 Hz 范围内,合金偏聚区内初生 Mg_2Si 相的等效圆直径随着电压或放电频率的增加,均呈上升趋势。
- (3) 当电压持续增加时,初生 Mg_2Si 相的平均分布宽度先减小后增大,转折点为 105 V;当放电频率持续增加时,初生 Mg_2Si 相的平均分布宽度持续减小。
- (4) 合金边部偏聚区的硬度与耐磨性均优于中心区;各区域初生 Mg_2Si 相的体积分数对该区域合金的硬度起主导作用。

参 考 文 献

[1] 秦庆东. Mg_2Si /Al 复合材料组织与性能的研究[D]. 长春:吉林大学, 2008.
 [2] 王东涛,张海涛,崔建忠. Al- Mg_2Si 原位复合材料的变质及添加合金元素[J]. 材料导报, 2016, 30(7): 138-142.

La 对再生 A356 合金凝固组织及力学性能的影响

张全庆 李 振 王复栋 郭丽莉 蔡 佳 张 森 魏新颖
(营口理工学院材料科学与工程学院)

摘 要 采用直读光谱仪、金相显微镜、扫描电镜、X 射线衍射仪、电子万能拉伸试验机和 JMatPro12.4 软件研究了 La 含量对 A356 铝合金凝固组织的影响。结果表明,A356 合金的平衡组织主要由 α -Al、共晶 Si、 Mg_2Si 、 $\beta-Al_9Fe_2Si_2$ 、 $Al_{11}La_3$ 和 $Al_8FeMgSi_6$ 相组成。随 La 含量由 0 增加至 0.5%,A356 合金中的 α -Al 组织几乎全部由粗大枝晶转变为等轴晶和类等轴晶,抗拉强度由 149 MPa 增加至 182 MPa,伸长率由 4.8%增加至 7.7%。

关键词 A356 合金;La;凝固组织;抗拉强度;伸长率
中图分类号 TG146.21;TF805.2 **文献标志码** A
DOI:10.15980/j.tzzz.2023.010.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of La on Solidification Structure and Mechanical Properties of Regenerated A356 Alloy

Zhang Quanning, Li Zhen, Wang Fudong, Guo Lili, Cai Jia, Zhang Miao, Wei Xinying
(Yingkou Institute of Technology, College of Materials Science and Engineering)

Abstract: The effect of La addition on the solidification structure of A356 aluminum alloy was investigated by direct reading spectrometer, metallographic microscope, scanning electron microscope, X-ray diffractometer, electronic universal tensile tester and JMatPro12.4 software. The results indicate that the equilibrium structure of A356 alloy is mainly composed of α -Al, eutectic Si, Mg_2Si , $\beta-Al_9Fe_2Si_2$, $Al_{11}La_3$ and $Al_8FeMgSi_6$ phases. With the increase of La content from 0 to 0.5%, the structure of α -Al in A356 alloy is almost completely transformed from coarse dendrite to equiaxed and equiaxed-like grain, where the tensile strength is increased from 149 MPa to 182 MPa, and the elongation is increased from 4.8% to 7.7%.

Key Words: A356 Alloy, La, Solidification Structure, Tensile Strength, Elongation

收稿日期:2022-09-18;**修改稿收到日期:**2023-01-29
基金项目:营口理工学院引进人才科研启动经费资助项目(YJRC202017)
第一作者简介:张全庆,男,1986 年出生,硕士研究生,辽宁营口(115100),E-mail:18810471953@163.com
通信作者:李振,男,1988 年出生,讲师,辽宁营口(115100),E-mail:451794353@qq.com
引用格式:张全庆,李振,王复栋,等. La 对再生 A356 合金凝固组织及力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(10):1 404-1 408.
ZHANG Q Q, LI Z, WANG F D, et al. Effects of La on solidification structure and mechanical properties of regenerated A356 alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(10):1 404-1 408.

[3] 邓鹏,郑旺旺,邓铭瑶,等. 脉冲磁场下原位 Mg_2Si / $Mg-7Al$ 复合材料的组织与性能[J].特种铸造及有色合金, 2017, 37(1): 94-96.

[4] 姜文勇,苏宁,杨晓宇,等.脉冲磁场对 $Al-12.5Mg-6.7Si$ 合金中 Mg_2Si 相的影响[J].特种铸造及有色合金, 2014, 34(5): 449-452.

[5] 李英民,艾秀兰. 电磁搅拌对 Al/Mg_2Si 复合材料宏观偏析的影响[J]. 铸造, 2002, 51(12): 756-758.

[6] 刘飞,尹健,邵琦,等.脉冲磁场对高含量自生 Mg_2Si / $Mg-Al$ 基复合材料凝固组织的影响[J].材料导报, 2019, 33(2): 293-297.

[7] WANG D, ZHANG H, GUO C, et al. Effect of cooling rate on growth and transformation of primary Mg_2Si in $Al-Mg_2Si$ in situ composites[J]. Journal of Materials Research, 2018, 33: 3 458-3 465.

[8] 曹志强,陈飞,王同敏,等. 高频磁场下制备颗粒增强铝基梯度复合材料[J]. 铸造, 2011, 60(6): 549-553.

[9] 吴晗,周全,王俊,等. 磁场和铸造工艺对 Mg_2Si/Al 复合材料中 Mg_2Si 相的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(6): 656-660.

[10] 李光玉,苏颖超,付宇,等.离心铸造条件对 Mg_2Si/Al 梯度复合材料组织与性能的影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2011, 41(5): 1 295-1 299.

[11] 谢东原,刘峰,周全,等. 脉冲磁场对石墨型铸造 $Mg-Y-Cu-Zr-Sr$ 合金凝固组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(9): 1 109-1 114.

[12] MANUWONG T, ZHANG W, KAZINCZI P L, et al. Solidification of Al alloys under electromagnetic pulses and characterization of the 3D microstructures using synchrotron X-ray tomography[J]. Metallurgical & Materials Transactions, 2015, A46(7): 2 908-2 915.

[13] 宝磊,贾永辉,王翊,等. 谐波和脉冲磁场在结晶器内的分布和对高纯铜凝固组织的影响[J].铸造, 2020, 69(12): 1 284-1 292.

[14] 梅国宏,张庆军,朱立光,等. 脉冲磁场细化钢材凝固组织的研究进展[J].铸造技术, 2018, 39(11): 2 628-2 631.

[15] 张黎,陈乐平,周全,等. 脉冲磁场对 ZA27 合金凝固组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(7): 801-805.

[16] 王俊,周全,吴晗,等. 脉冲磁场对 $Al-20Si$ 合金中初生 Si 的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37(10): 1 130-1 133.

(编辑:栗万仲)