

机械振动对 AlSi7Mg 合金组织和力学性能的影响

郁雯霞¹, 雷玉成²

(1. 无锡工艺职业技术学院, 江苏宜兴 214206; 2. 江苏大学, 江苏镇江 212013)

摘要: 研究了不同机械振动强度下制备出 AlSi7Mg 合金的凝固组织, 随着机械振动的加强, 合金的初生相平均尺寸和晶粒改性产生明显变化, 初生相平均尺寸呈减小的趋势, 相对应的晶粒细化程度逐渐增加。当机械振动强度分别为 0、1.5、3.0、4.5 和 6 mm·Hz 时, 合金的初生相平均尺寸分别为 48.99、47.06、43.75、39.12、28.67 μm ; 合金的抗拉强度分别为 158.03、165.25、170.12、176.37、186.29 MPa; 屈服强度分别为 127.74、132.42、140.57、143.61、147.86 MPa; 伸长率分别为 2.20%、2.48%、2.71%、3.56%、4.80%。合金的力学性能随机械振动的加强逐渐升高。

关键词: AlSi7Mg 合金; 铸造; 机械振动; 显微组织; 力学性能

作者简介:

郁雯霞(1980-), 女, 硕士, 副教授, 主要研究方向为材料加工及机电控制。电话: 13921383619, E-mail: 55495101@qq.com

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2023)

08-1015-05

基金项目:

先进焊接与连接国家重点实验室资助项目(AWJ-Z13-01)。

收稿日期:

2022-05-25 收到初稿,

2022-10-18 收到修订稿。

AlSi7Mg 铸造铝合金广泛应用于航天器材、航空器具、船舶、汽车等行业^[1]。各种先进的加工技术(如激光加工、电火花加工等), 用于制造 AlSi7Mg 合金所需的形状和尺寸以满足其特定应用^[2]。在凝固过程中使用超声波或机械振动, 可以使 AlSi7Mg 铝合金铸件微观组织碎片化进而控制熔体的结晶和凝固组织^[3]。随着改进铝合金的化学和冶金性能需求的增加, 研究人员对在铸造过程中加入机械振动的方式进行了广泛研究并观察了铸件特性的变化^[4]。如果在凝固过程中加入强度足够的机械振动, 铸造铝合金可以得到显著的脱气和精炼^[5]。铝合金铸造过程中凝固是影响铸件最终性能与质量的关键, 通过使用机械振动可使合金显微组织有效细化, 铸造铝合金的最终性能可以得到明显改善^[6]。机械振动有助于控制铸铝的结构和特性, 机械振动可以导致合金固-液界面前沿的成分过冷的分布状态, 从而改变凝固区域, 同时, 机械振动能促进成核的发生^[7]。在凝固过程中, 通过机械振动实现的铸件的晶粒改性和性能的提升, 有助于得到更细小的微观组织。机械振动能有效地将树枝状 α -Al 变化成细小棒状或等轴晶结构^[8], 同时, 机械振动使针状硅碎裂成片状并均匀分布在凝固组织中, 可以实现合金性能的增强^[9]。通过机械振动粉碎得到等轴晶的手段可以改善合金的力学性能, 并使第二相分布更加均匀^[10]。目前鲜有研究在 AlSi7Mg 系铸造铝合金的凝固过程中引入机械振动, 一般情况下均采用搅拌熔融金属, 并将其保持在一定温度下以使其进行细化及除气等操作^[11]。在本研究工作中, 对 AlSi7Mg 系铸造铝合金的铸造过程加入了不同的振动测试条件, 选择了静止态和振动态进行对比, 考虑的参数包括振动频率、振动强度、初生相平均尺寸和晶粒细化程度, 选择屈服强度和断后伸长率作为力学性能的对比指标, 以此来评估机械振动对 AlSi7Mg 合金微观组织和力学性能的影响。

1 试验材料与方法

使用的机械振动装置由底座、振动控制器、上下夹紧模具、功率控制器和浇口及排气道组成, 装置示意图如图 1 所示。其中底座规格为 60 cm \times 60 cm \times 15 cm, 模具规格为 45 cm \times 45 cm \times 15 cm, 铸锭为底部 Φ 10 cm、顶部 Φ 8 cm 的锥形结构。

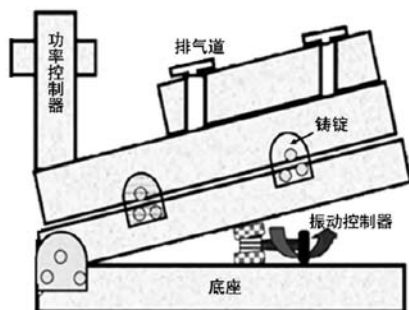


图1 机械振动装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of mechanical vibration device

AlSi7Mg合金（成分见表1）在石墨坩埚中熔化，熔化过程中向熔体加入六氯乙烷进行脱气直到金属完全熔化，使金属熔液排出氢气、含氧化合物等杂质。然后将液态金属转移到保温炉中，当熔体的温度为700℃时，将其注入到预热至180℃的H13模具钢模中，该模具由平台上的夹具固定。在凝固过程中，借助图1所示的振动装置，模具在0~4 000 Hz的频率范围以固定振幅0.015 mm以及固定的振动时长30 s进行振动。振动参数（如频率和振幅）可由振动控制器中的传感器进行记录。最后对静止态和不同振动条件下制作的铸件进行拉伸试验和微观组织的观察。AlSi7Mg合金金相试样取样大小为10 mm×10 mm×5 mm，采用Keller试剂（HNO₃：HCl：HF：酒精=2.5 mL：1.5 mL：1 mL：95 mL）进行腐蚀。将准备好的金相样品浸泡在腐蚀试剂中10 s，然后使用酒精对金相试样进行清洁，并在暖风下吹干。采用ZEISS公司的金相显微镜对试样进行金相微观组织照片的拍摄。每组合金试样取20个初生相晶粒，采用Image-pro软件对晶粒大小进行测量，之后利用公式（1）计算其初生相平均尺寸，最终评价晶粒

表1 AlSi7Mg合金的化学成分分析结果
Table 1 Chemical composition of AlSi7Mg alloy

							$w_B/\%$	
Si	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn	Ti	Al	余量
7.08	0.43	0.067	0.15	0.032	0.021	0.066	余量	

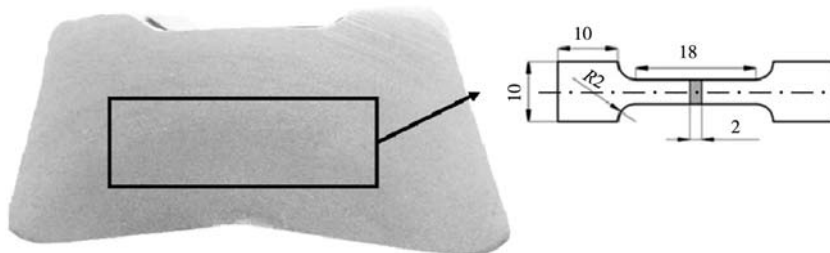


图2 试样外观形貌及拉伸试样取样位置

Fig. 2 Appearance of the sample and sampling position and specification of tensile testing

的细化效果。

$$D = (4A/\pi)^{1/2} \quad (1)$$

式中：A为晶粒面积。

采用Zwick公司的电子万能试验机对AlSi7Mg合金进行拉伸试验。AlSi7Mg合金铸件取样的位置及拉伸试样加工参数如图2所示，每种机械振动频率下制备的铸锭取3个拉伸试样进行拉伸测试，取平均值作为最终试验结果。

2 试验结果及讨论

2.1 微观组织

在其他铸造条件相同的情况下，以不同机械振动强度制备出的AlSi7Mg合金金相照片如图3所示。可以看出，AlSi7Mg合金在静止和机械振动状态下的微观组织中初生相出现了明显的变化，图3a所示为静止状态的AlSi7Mg合金凝固组织，此时合金中存在着明显的枝晶分布的初生 α -Al组织，初生相周围共晶组织的分布也并不均匀，零散地分布在 α -Al枝晶的周围。由图3b、c可以看出，随着机械振动的加入，当机械振动强度为1.5 mm·Hz时，初生 α -Al逐渐破碎为细小的枝晶结构，当机械振动强度增至3.0 mm·Hz时，初生 α -Al枝晶变得更加细小，且分布更加均匀，共晶组织也逐渐均匀地分布在初生 α -Al相的周围。随着机械振动频率的进一步增加，如图3d、e所示，当机械振动强度增加至4.5 mm·Hz时，初生 α -Al相完全演化为等轴晶结构，金相中也观测不到枝晶的存在，合金初生相晶粒的大小有一定程度的降低。当机械振动强度增加至6.0 mm·Hz时，初生 α -Al相已经完全呈现为细小的等轴晶结构，晶粒大小相比机械振动强度为4.5 mm·Hz时也呈明显降低的趋势。随着机械振动的加入与频率的逐渐增强，AlSi7Mg合金从静止到振动状态下发生了初生相平均尺寸和晶粒改性的明显变化。

为了研究不同振动强度下AlSi7Mg合金微观组织的变化，继续对AlSi7Mg合金的初生相平均尺寸进行测量，结果如表2和图4所示。从测量结果可以看出，当AlSi7Mg合金的凝固过程处于静止未添加机械振动

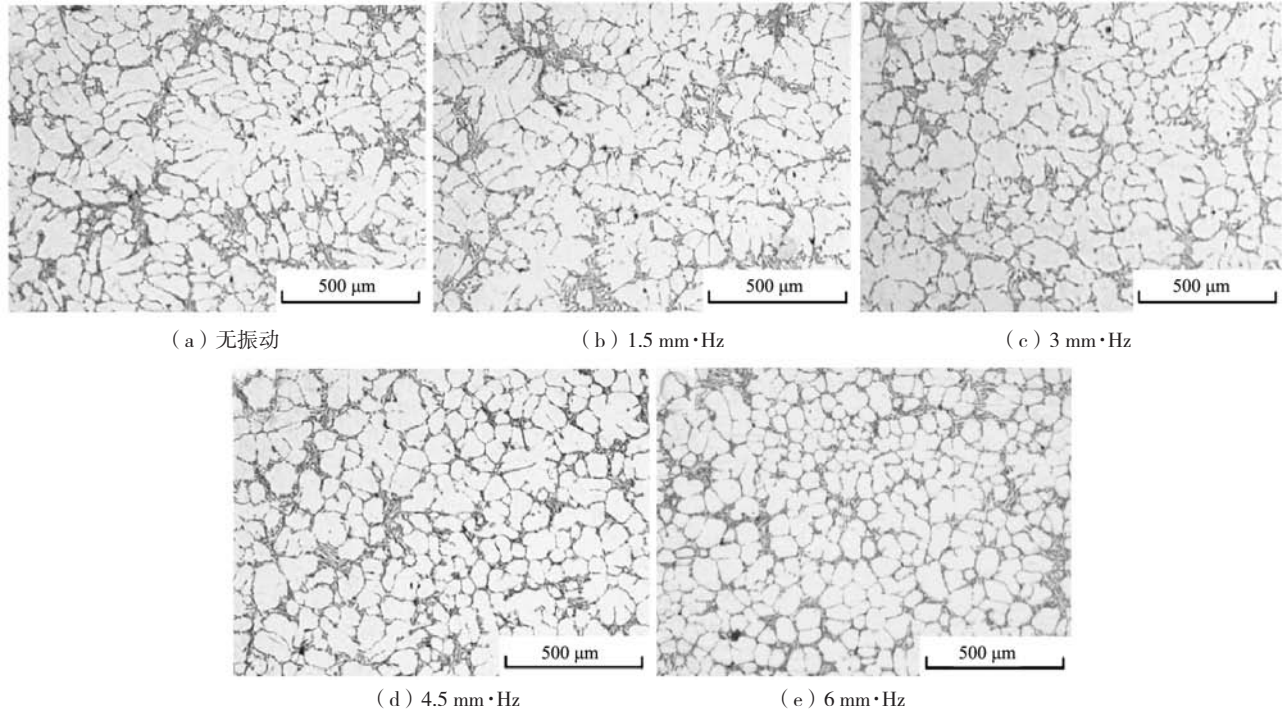


图3 AlSi7Mg合金在不同振动频率下的金相显微照片
Fig. 3 Microstructures of AlSi7Mg alloys at different vibrational frequencies

表2 AlSi7Mg合金在不同振动频率下的初生相平均尺寸及晶粒细化程度

Table 2 Primary phase sizes and grain refinements of AlSi7Mg alloys at different vibration frequencies

振动幅度/mm	振动频率/Hz	振动强度/(mm·Hz)	初生相平均尺寸/ μm	细化程度/%
0	0	0	48.99	0
0.015	1 000	1.5	47.06	3.94
0.015	2 000	2.0	43.75	10.70
0.015	3 000	4.5	39.12	20.15
0.015	4 000	6.0	28.67	41.48

的状态时, AlSi7Mg合金的初生相平均尺寸为48.99 μm ; 随着机械振动的加入, 当振动强度为1.5 mm·Hz时, AlSi7Mg合金的初生相平均尺寸降低为47.06 μm , 晶粒细化程度为3.94%; 当机械振动强度为3.0 mm·Hz时, AlSi7Mg合金的初生相平均尺寸继续降低, 达到43.75 μm , 晶粒细化程度为10.70%, 相较于振动强度为1.5 mm·Hz, 晶粒细化程度呈升高趋势; 当机械振动强度增加至4.5 mm·Hz时, AlSi7Mg合金的晶粒进一步得到细化, 初生相平均尺寸减小至39.12 μm , 晶粒细化程度达到20.15%, 相较于机械振动强度从1.5 mm·Hz增加至3.0 mm·Hz, 机械振动强度增加为4.5 mm·Hz时晶粒细化程度有着明显的增加; 随着机械振动频率进一步增加, 当机械振动强度达到6.0 mm·Hz时,

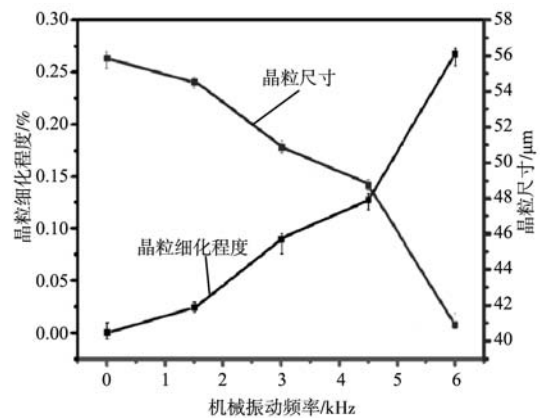


图4 AlSi7Mg合金在不同机械振动频率下的初生相平均尺寸及晶粒细化程度

Fig. 4 Average primary phase sizes and grain refinements of AlSi7Mg alloys under different mechanical vibration frequencies

AlSi7Mg合金的初生相平均尺寸明显降低, 初生相平均尺寸为28.67 μm , 晶粒细化程度达到了41.48%, 相较于机械振动强度为4.5 mm·Hz, AlSi7Mg合金的晶粒细化程度增加至2倍左右。这是因为随着机械振动强度的增加, AlSi7Mg合金的凝固过程中, 有效地将初生树枝晶 α -Al进行破碎, 得到更多细小的晶核, 进而使得熔融合金可以从更多细小初生 α -Al相进行凝固, 同时, 机械振动在凝固过程中对共晶硅起到了破碎的作用, 使针状硅相碎裂成为片状并均匀分布在凝固组织中, 形

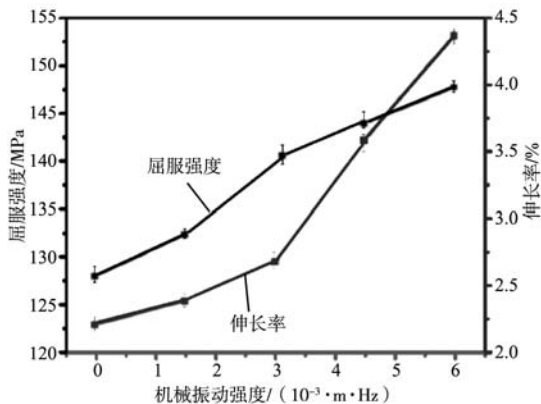


图5 AlSi7Mg合金在不同振动频率下的力学性能示意图

Fig. 5 Diagram of mechanical properties of AlSi7Mg alloys at different vibration frequencies

表3 AlSi7Mg合金在不同振动频率下的力学性能
Table 3 Mechanical properties of AlSi7Mg alloys at different vibration frequencies

振动强度/mm·Hz	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%
0	127.74	158.03	2.20
1.5	132.42	165.25	2.48
2.0	140.57	170.12	2.71
4.5	143.61	176.37	3.56
6.0	147.86	186.29	4.80

成更加细小致密的共晶组织。结果表明,随着机械振动强度的增强,AlSi7Mg合金的初生相平均尺寸逐渐减小,晶粒改性程度逐渐增强。

2.2 力学性能

同样,为了评估在不同机械振动强度下制备的AlSi7Mg合金的拉伸性能,将制备成图2所示尺寸的AlSi7Mg合金拉伸试样在电子万能拉伸机下进行测试,结果如表3和图5所示。从拉伸试验结果可以看出,当AlSi7Mg合金处于静止状态下凝固时,合金的抗拉强度

为158.03 MPa,屈服强度为127.74 MPa,断后伸长率为2.20%;随着机械振动的加入,合金的抗拉强度在机械振动强度为1.5 mm·Hz时增加至165.25 MPa,屈服强度增加至132.42 MPa,断后伸长率增加至2.48%;随着机械振动强度的进一步增加,AlSi7Mg合金的抗拉强度在振动强度为3.0 mm·Hz时增加至170.12 MPa,屈服强度增加至140.57 MPa,断后伸长率增加至2.71%;机械振动强度增大至4.5 mm·Hz时,AlSi7Mg合金的抗拉强度为176.37 MPa,屈服强度为143.61 MPa,断后伸长率为3.56%;当机械振动强度增加到最大值,强度达到6.0 mm·Hz时,AlSi7Mg合金的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率均分别提升至最大值,分别为186.29 MPa、147.86 MPa和4.80%。从图4与表2可以看出,随着机械振动频率的增加,AlSi7Mg合金的初生相平均尺寸随之减小,这也影响着AlSi7Mg合金的力学性能,初生相尺寸越小、越倾向于等轴晶,合金的强度和韧性会随之升高。同时,初生相晶粒细化程度随着机械振动频率的增加而提高,对应的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率也随之得到了相应程度的提升。

3 结论

(1) 在不同机械振动强度下制备出AlSi7Mg合金,随着机械振动的加入与频率的逐渐增强,合金初生相由枝晶演变为蔷薇状形貌。

(2) 随着机械振动强度的增加,AlSi7Mg合金初生相平均尺寸呈逐渐减小的趋势。当机械振动强度分别为0、1.5、3.0、4.5、6 mm·Hz时,合金的初生相平均尺寸逐渐减小,分别为48.99、47.06、43.75、39.12、28.67 μm。

(3) 随着机械振动强度的逐渐升高,AlSi7Mg合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率均逐渐增大,与合金平均初生相尺寸随机械振动频率增加而逐渐降低相对应。

参考文献:

- [1] 许志强,安仲健,雷振尧,等.机械振动对AlSi9Cu3亚快速凝固组织的影响[J].铸造,2015,64(12):1209-1213.
- [2] 谢小华,周全,陈乐平,等.脉冲磁场-机械振动复合处理对H62黄铜凝固组织和硬度的影响[J].铸造,2014,63(5):424-428.
- [3] 薛寒松,吴招兵,彭开建,等.机械振动对Mg-6Gd-3Y-0.4Zr-2Zn镁合金组织和性能的影响[J].铸造,2013,62(9):870-873.
- [4] 赵国荣,蒋文明,樊自田.浇注温度和机械振动对消失模壳铸造ZL101A合金组织性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2018,38(2):186-189.
- [5] 赵见知,胡芳友,杨琦楠,等.机械振动对消失模铸造铝合金组织与性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2017,37(2):166-169.
- [6] 杨志杰,苍大强,李宇.机械振动对纯Al凝固组织的影响[J].铸造,2011,60(1):77-79,82.

- [7] 赵君文, 吴树森. 机械振动制备ZL101铝合金半固态浆料的工艺优化 [J]. 铸造, 2010, 59 (5): 438-440.
- [8] 何龙, 陈晓龙. 基于机械振动的铝合金低压铸造工艺研究 [J]. 铸造技术, 2015, 36 (11): 2716-2718.
- [9] 武晓峰, 张广安, 周岐. 机械振动对倾斜冷却板法制备亚共晶铝合金半固态组织的影响 [J]. 铸造, 2009, 58 (10): 1002-1004, 1008.
- [10] 王元庆, 樊自田, 李继强, 等. 浇注温度和机械振动对消失模铸造镁合金组织和力学性能的影响 [J]. 铸造, 2007 (3): 266-269.
- [11] 张崢. 机械振动对A356合金消失模铸造充型及性能的影响 [J]. 铸造技术, 2015, 36 (2): 466-468.

Effect of Mechanical Vibration on Microstructure and Mechanical Properties of AlSi7Mg Alloy

YU Wen-xia¹, LEI Yu-cheng²

(1. Wuxi Vocational Institute of Arts&Technology, Yixing 214206, Jiangsu, China; 2. Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, China)

Abstract:

The solidification microstructure of AlSi7Mg alloy prepared under different mechanical vibration frequencies was gradually enhanced with the addition of mechanical vibration and frequency, which had obvious changes in primary phase size and grain modification. With the increase of mechanical vibration intensity, the primary phase size decreased, and the grain refinement increased gradually. When the mechanical vibration intensity was 0, 1.5, 3.0, 4.5 and 6 mm·Hz, the primary phase sizes of the alloy were 48.99, 47.06, 43.75, 39.12 and 28.67 μm . The tensile strengths of the alloy were respectively 158.03, 165.25, 170.12, 176.37 and 186.29 MPa. The yield strengths were 127.74, 132.42, 140.57, 143.61 and 147.86 MPa. The elongations were 2.20%, 2.48%, 2.71%, 3.56% and 4.80%, respectively. The mechanical properties of the alloys increased gradually with the addition of the mechanical vibration and the increase of the intensity.

Key words:

AlSi7Mg aluminum alloy; casting; mechanical vibration; microstructure; mechanical properties
