

机械振动对消失模壳型铸造 A357 合金显微组织和力学性能的影响

杨琪琳¹, 王月雷², 陈隆波^{1, 3}, 曾效舒⁴

(1. 共青科技职业学院, 江西共青城 332020; 2. 海南科技职业大学, 海南海口 570100;

3. 博仁大学, 泰国大曼谷府10700; 4. 南昌大学, 江西南昌 330000)

摘要: 对A357铝合金消失模壳型铸造铸件凝固过程中的机械振动频率如何影响合金的显微组织、力学性能和断裂行为进行了研究。试验结果表明: 不同频率下的机械振动显著改善了A357合金 α -Al初生相和共晶硅颗粒的尺寸和形貌, 提高了A357合金的力学性能和密度。随着振动频率的逐渐增加, A357合金的晶粒尺寸和二次枝晶臂间距逐渐减小, 力学性能和密度逐渐提高。 α -Al相和共晶硅颗粒的形貌分别由粗枝晶向等轴晶和粗片状结构向纤维状结构演变, 振幅越强, 平均晶粒尺寸越大, 合金的力学性能随着振幅的增加而不断下降。此外, 机械振动使A357合金的断口形貌由无振动时的脆性断裂转变为明显的塑性断裂, 且随着振动频率的增加, 韧窝加深且分布更加均匀。

关键词: A357铝合金; 消失模壳型铸造; 机械振动; 显微组织; 力学性能

复杂薄壁铝合金精密铸件因其优异的铸造性、焊接性、耐腐蚀性和高比强度而广泛应用于汽车工业之中^[1]。Al-Si-Mg系铝合金尤其是A357合金在生产汽车零部件, 如活塞、发动机缸体和其他零件, 以及减少车辆重量和提高燃油经济性等方面表现尤为突出^[2]。A357铝合金的显微组织成分包括 α -Al、Al-Si共晶、 Mg_2Si 中间相等, 其中初生 α -Al及共晶Si的晶粒尺寸和形貌是影响A357铝合金显微组织的关键参数^[3]。消失模铸造工艺是一种精密铸造技术, 将铸件的泡沫芯制备和薄壳型腔精密制造相结合, 适用于生产复杂精密的薄壁A357铝合金铸件^[4]。消失模壳型铸造工艺具有泡沫模设计灵活、成本低、铸造精度高、成形能力好等优点^[5]。由于在浇注前已去除泡沫模, 可完全避免铸造过程中由于泡沫模分解而产生的气孔和夹渣缺陷^[6-7]。但通常采用消失模壳型铸造工艺获得的铝合金精密铸件组织为粗大枝晶组织且分布不均匀, 其共晶组织中硅颗粒通常为粗大的板状组织, 导致力学性能急剧下降^[8]。一般来说, A357铝合金显微结构的细化主要有以下几种方法, 如化学元素改性、电磁振动、超声波振动、机械振动等; 机械振动是最简单、最经济、最有效的细化A357合金显微组织和改善消失模壳型铸造A357合金力学性能的方法^[9-10]。机械振动是A357合金凝固过程中显微组织得到细化的关键因素, 为了改善A357铝合金的显微组织和力学性能, 本文将机械振动引入到消失模壳型铸造A357合金的凝固过程中, 主要研究机械振动对消失模壳型铸造A357合金显微组织、力学性能和断裂行为的影响, 为A357合金消失模壳型铸造生产提供借鉴。

1 试验材料与方法

A357合金消失模壳型铸造过程为: 首先制备泡沫芯样品, 然后将陶瓷浆料涂覆在泡沫芯上, 用耐火材料涂覆上形成灰泥, 制备陶瓷外壳。泡沫芯在250 °C的熔炉中加热30 min, 并从陶瓷外壳中熔化。将陶瓷模具在500 °C温度下加热30 min, 以去除残留的泡沫, 随后在800 °C温度下烘烤60 min, 以提高陶瓷模具的强度。将制备

作者简介:

杨琪琳(1993-), 女, 讲师/工程师, 从事建筑材料研究工作。E-mail: 1070350980@qq.com

中图分类号: TG113;
TG292

文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2023)
12-1607-07

收稿日期:

2023-03-06 收到初稿,
2023-09-28 收到修订稿。

好的陶瓷模具放入砂模中。在砂瓶中填充未粘结的疏松砂，并使用三维振动台将砂震实。本试验使用的是A357铝合金，其化学成分分析结果如表1所示。熔炼前将H13不锈钢坩埚先在电阻炉中300℃预热，然后将预热好的A357铝锭放入坩埚内熔化。当熔融A357合金温度达到750℃时，通入氩气进行精炼，随后撇渣去除氧化物与杂质，之后进行铸造，A357合金熔体的铸造温度为710℃。

表1 A357合金的化学成分分析结果
Table 1 The chemical composition of A357 alloy $w_B/\%$

Si	Mg	Fe	Mn	Sr	Ti	Be	Al
7.35	0.55	0.19	0.04	0.03	0.16	0.05	余量

铸造前，同时打开机械振动和真空设备，分别在0、5、35、50、100、120 Hz的不同振动频率与5、15、25、35 mm的不同振动幅度下进行试验，真空度为0.05 MPa。当研究振幅影响时，振动频率固定为100 Hz；当研究振动频率影响时，振幅固定为25 mm。图1展示了消失模壳型铸造过程中机械振动的试验装置

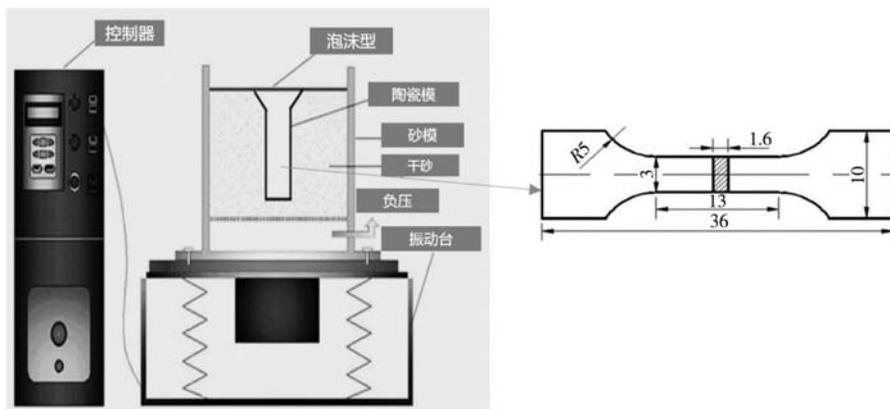


图1 机械振动装置及拉伸试样规格示意图

Fig. 1 Schematic diagram of vibration device

2 试验结果及讨论

2.1 显微组织

图2为不同振动频率下A357铝合金的金相显微组织。可以看出，在无振动试样的显微组织中， α -Al初生相为典型的粗枝晶，如图2a所示。随着机械振动的加入，低频振动试样的显微组织中 α -Al初生相晶粒尺寸开始减小，但仍然可在金相照片中观察到一定量的枝晶存在，如图2b所示。随着机械振动频率的增加，消失模壳型铸造A357合金显微组织中 α -Al初生相晶粒尺寸呈现逐渐减小的趋势，当振动频率达到100 Hz时，可以明显看到 α -Al初生相的晶粒尺寸比未振动时细得多，粗枝晶消失，微观组织主要由细小的等轴晶粒组成，分布均匀，如图2e所示。当振动频率进一步提高到120 Hz时， α -Al初生相的晶粒尺寸略有增大，

示意图。A357合金金相试样抛光后采用0.5% HF的溶液进行腐蚀。使用电子金相显微镜观察拍摄消失模壳型铸造A357合金样品的金相显微组织；利用Image Pro金相分析软件测量了消失模壳型铸造A357合金的二次枝晶臂间距、硅颗粒平均长度和硅颗粒平均宽度及 α -Al初生相的平均晶粒尺寸。共晶硅颗粒的长径比取硅颗粒的平均长度与硅颗粒的平均宽度之比。 α -Al初生相的晶粒尺寸由以下公式定义 $D=\sqrt{(4A/\pi)}$ ； $F=4\pi A/P$ ；其中A和P为晶粒平均面积和平均周长。F值在0~1之间变化，当F值接近1时，晶粒的截面形状趋于圆形。采用阿基米德法测定了A357铝合金消失模壳型铸件的密度。采用电子万能拉伸试验机对消失模壳型铸造A357合金试样进行室温拉伸试验，拉伸速率为0.1 mm/min，拉伸测试在每个参数下进行3次重复试验并取平均值。图1描述了A357合金室温拉伸试样的形状尺寸。采用布式硬度试验机测定了消失模壳型铸造A357合金试样的硬度，硬度测试载荷设置为300 kg，保持时间为30 s。最后，采用了扫描电子显微镜SEM对消失模壳型铸造A357铝合金拉伸试样的断口形貌进行观察并进行分析。

α -Al初生相的形貌发生变质。在定量金相表征方面，对 α -Al初生相的平均晶粒尺寸和形貌以及二次枝晶臂间距进行了测量和总结，如图3所示。无振动时， α -Al初生相的平均晶粒尺寸、形状因子和二次枝晶臂间距分别为326.29 μm ，0.21 μm ，77.36 μm 。随着不同频率机械振动的加入，消失模壳型铸造A357合金显微组织中 α -Al初生相和二次枝晶臂间距的晶粒尺寸均显著减小，形状因子显著增加。当加入的机械振动频率为100 Hz时，A357合金显微组织中 α -Al初生相的晶粒尺寸最小，二次枝晶臂值同样最小，分别比未加入振动时降低32%和19%。同时，其形状因子最大，比无振动时增大了262%。当加入的机械振动频率大于100 Hz以后，A357合金显微组织中 α -Al初生相晶粒尺寸和二次枝晶臂间距均略有增大，形状因子开始减小。

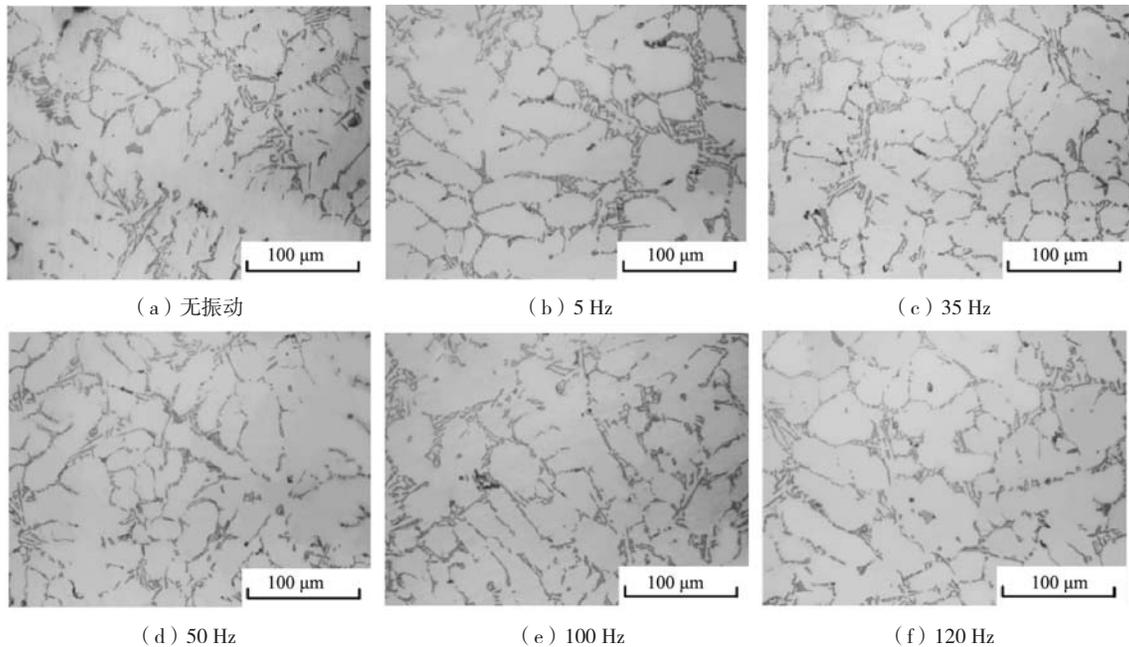


图2 不同振动频率下A357铝合金的金相显微组织

Fig. 2 Microstructure of A357 aluminum alloy at different vibration frequencies

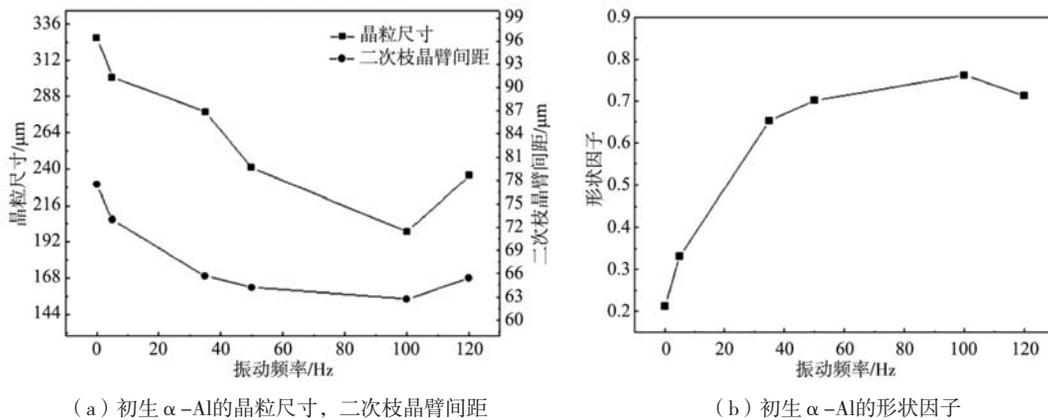
(a) 初生 α -Al的晶粒尺寸, 二次枝晶臂间距(b) 初生 α -Al的形状因子图3 不同振动频率下A357铝合金的初生 α -Al的晶粒尺寸, 二次枝晶臂间距及形状因子Fig. 3 Grain size, secondary dendrite arm spacing and shape factor of primary α -Al of A357 aluminum alloy at different vibration frequencies

图4表示了在不同振动频率下获得的共晶组织, 以展示共晶硅颗粒在尺寸和形貌上的显微组织差异。在无振动试样的显微组织中, 可以明显观察到片状硅颗粒, 共晶硅颗粒呈不均匀分布, 如图4a所示。而在机械振动作用下, 当振动频率提高到100 Hz时, 共晶硅颗粒明显呈现短棒状和粒状结构, 粗大的片状硅颗粒消失, 共晶硅颗粒的尺寸比未振动时要细小得多。此外, 共晶硅颗粒也均匀地分散在微观结构中, 如图4e所示。当振动频率持续增加到100 Hz以上时, 共晶硅颗粒的尺寸和形貌并没有得到进一步的改善。图5为不同振动频率下A357铝合金显微组织中共晶硅颗粒的定量金相评价。可以看出, 与未振动样品相比, 振动样品共晶硅颗粒的平均长度、平均宽度和长宽比明显减小。随着加入的机械振动频率增加, A357合金显微组

织中的共晶硅颗粒平均长度、平均宽度和长宽比逐渐减小。当加入的机械振动频率为100 Hz时, 合金的共晶硅颗粒平均长度、平均宽度和长宽比最小, 分别比无振动时低45%、6%和42%。当振动频率进一步增加到120 Hz时, 共晶硅颗粒的平均长度、宽度和长宽比略有增加。

图6为采用不同机械振动振幅的消失模壳型铸造A357铝合金铸态试样的金相显微组织, 显微组织主要由分布均匀的等轴晶粒组成。随着振幅的增加, α -Al相由细枝晶向粗枝晶转变, 等轴晶粒逐渐增大。当振幅为5 mm时, 能观察到一定量的细枝晶; 随着振幅增加至35 mm, 大量的等轴晶逐渐形成, 如图6d所示。与无振动铸造试样(图2a)相比, 机械振动试样的晶粒尺寸和枝晶臂间距明显减小; 随着机械振动振幅的增

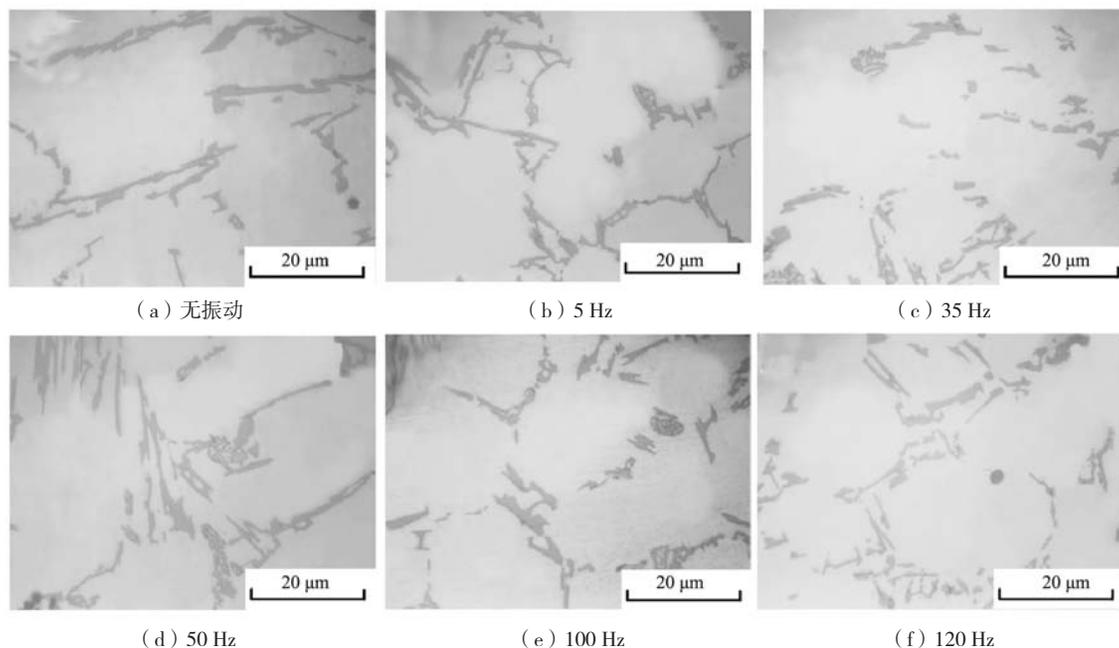


图4 不同振动频率下A357铝合金的共晶组织形貌

Fig. 4 Eutectic morphology of A357 aluminum alloy at different vibration frequencies

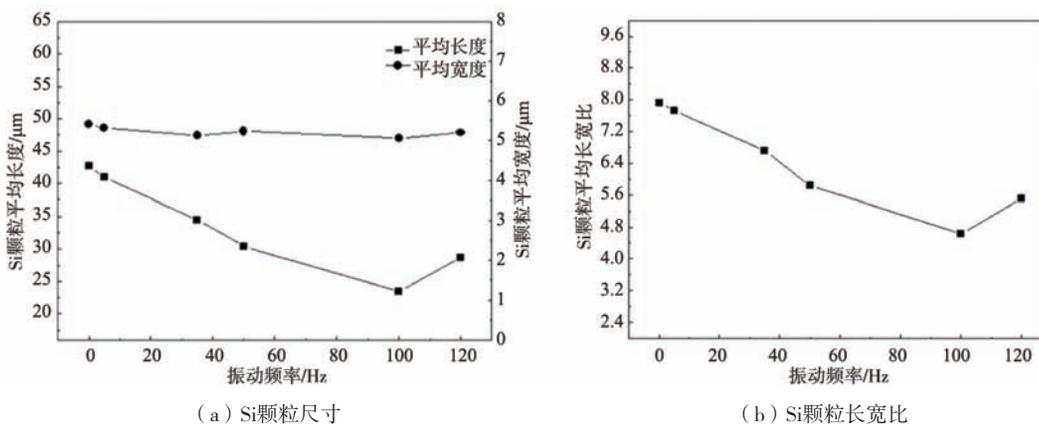


图5 不同振动频率下A357铝合金的Si颗粒尺寸及长宽比

Fig. 5 Si particle size and aspect ratio of A357 aluminum alloy at different vibration frequencies

加, 晶粒细化程度逐渐减小。从图6中可以看出, 机械振动极大地提高了 α -Al初相的球形度, 改善了 α -Al相的形貌, 此外, 随着振幅从5 mm增加到35 mm, 共晶硅颗粒表现为短棒状和粒状结构, 其尺寸比常规铸造得到的样品要细得多, 特别是振幅为5 mm下的样品, 粗大的板状共晶硅结构已经消失, 共晶硅颗粒也均匀分布在微观结构中, 随着振幅的增加, 合金的平均晶粒尺寸逐渐增大, 在振幅为5 mm时具有最为细小的显微组织。

在消失模壳型铸造过程中, 机械振动能够改变熔体的流动状态, 从而影响晶粒的形核和生长。机械振动可以增加熔体中的扰动, 打破晶粒生长的稳定性, 导致晶粒尺寸减小。同时, 机械振动也可以促进熔体中的热和质量传递, 使得晶粒分布更加均匀。当机械

振动的频率和振幅适中时, 可以得到细小且均匀的晶粒, 有效改善合金的显微组织。然而, 当振动频率或者振幅过大时, 会导致晶粒过度生长, 形成粗大的晶粒, 从而降低合金的力学性能。因此, 通过调控振动参数, 可以有效控制合金的微观组织, 进而优化其力学性能。

2.2 力学性能

表2给出了不同机械振动频率下制备的消失模壳型铸造A357合金的力学性能。力学性能测试结果表明, 机械振动处理过的消失模壳型铸造A357合金, 抗拉强度、屈服强度、伸长率和硬度等力学性能指标均较未振动处理合金明显提升。随施加的机械振动频率增加, 消失模壳型铸造A357合金的力学性能逐渐提高。

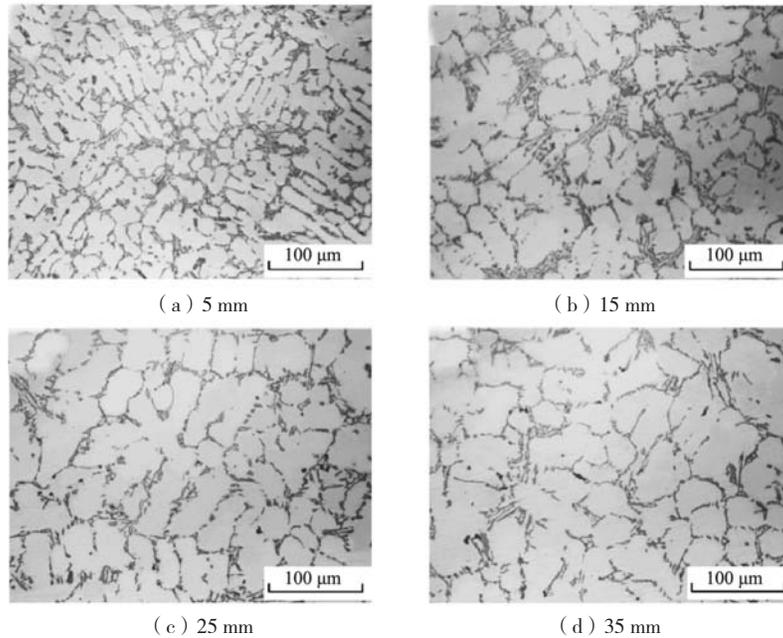


图6 不同振动幅度下A357铝合金的金相显微组织

Fig. 6 Microstructure of A357 aluminum alloy at different vibration amplitude

表2 A357合金在不同振动频率下的力学性能
Table 2 Mechanical properties of A357 alloy at different vibration frequencies

振动频率/Hz	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	硬度HB
0	146.22	125.21	2.18	67.7
5	171.21	146.32	2.73	79.6
35	183.42	158.13	3.05	82.6
50	196.66	169.89	3.18	83.8
100	198.82	178.75	3.42	86.4
120	197.02	173.46	3.21	85.3

当施加的机械振动频率为100 Hz时，A357铝合金的抗拉强度、屈服强度、伸长率和硬度最高，分别达到198.82 MPa、178.75 MPa、3.42%和HB86.4，分别比无振动时提高了35%、42%、57%和28%。当振动频率超过100 Hz时，A357铝合金的力学性能略有下降。 α -Al初生相和共晶硅颗粒在尺寸、形貌、分布以及二次枝晶臂间距值等方面的优势是振动后A357铝合金的力学性能较无振动时有所提高的原因。

不同机械振动频率处理使A357合金的 α -Al初生相的晶粒尺寸减小，共晶硅颗粒的形貌改善，分布更均匀，这些都有助于提高强度和硬度。首先，晶粒细化可以增加晶界的数量，晶界可以阻挡滑移位错线的运动，从而提高硬度。其次，共晶硅颗粒的形貌改善和分布均匀也有助于提高硬度，因为硅颗粒比铝基体更硬，它们的存在可以阻止塑性变形的发生。当施加的机械振动频率为100 Hz时，A357铝合金的硬度达到最

高，为HB 86.4，比无振动时提高了28%。这可能是因为这个频率下，晶粒细化和共晶硅颗粒形貌改善的效果达到最佳。然而，当振动频率超过100 Hz时，硬度略有下降，这可能是由于过高的振动频率导致晶粒过度生长，形成粗大的晶粒，从而降低硬度。

图7给出了不同振动频率下A357铝合金的密度。可见，机械振动对A357铝合金的密度有较大的提高作用，尤其是较高频率的振动。这可以解释为机械振动促进了熔融金属的填充能力，从而提高了A357铝合金的密度。但是过高的振动频率大大增加了熔融金属的扰动，可能会因为熔融金属的气体滞留而产生气孔缺陷，导致A357铝合金的密度下降。振动得到的A357铝合金的力学性能由于密度的增加而得到进一步的改善。

图8显示了不同振动频率下A357铝合金拉伸试样的扫描电镜断口形貌。A357铝合金无振动拉伸试样的SEM断口形貌显示出典型的脆性断裂性质，可见明显

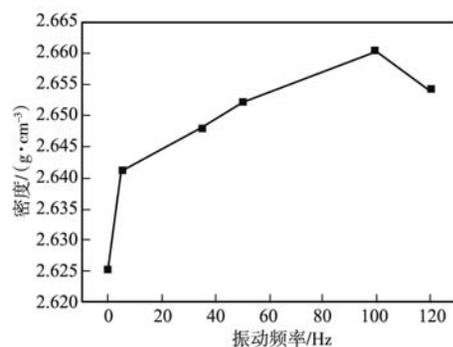


图7 不同振动频率下A357铝合金的密度

Fig. 7 Density of A357 aluminum alloy at different vibration frequencies

的解理面和二次裂纹,如图8a所示。对比A357铝合金拉伸试样在不同振动频率下的扫描电镜断口形貌,可见明显的韧窝断裂形貌,尤其是振动频率较大时,断口形貌更为明显,如图8d~f所示。当振动频率为100 Hz时,显微组织中二次枝晶臂间距值越小,共晶硅颗粒越细,晶界不连续程度越高,晶界滑移带与塑性流动之间的相互作用越强。结果表明,该断裂主要由裂纹共晶硅颗粒的韧窝断裂产生,并表现出韧窝断裂性质,具有较好的延展性。

机械振动振幅对A357铝合金力学性能的影响如表3所示。施加机械振动后,其力学性能较无振动铸造有明显改善,随着振幅的增加,A357合金的平均晶粒尺寸逐渐增大,力学性能逐渐降低,这与图6中的金相显微照片相对应。图9为不同振幅获得的A357铝合金拉伸试样的SEM断口形貌。断口形貌显示出明显的韧窝存在,得到的样品中枝晶臂间距越小,共晶硅颗粒越

细,晶胞边界越不连续,因此,滑移带与塑性流动在晶界产生了更强的相互作用,共晶硅颗粒的断裂发生在晶界处,最终断裂路径倾向于沿 α -Al初生相的晶界穿过共晶相,断裂以发生于共晶硅颗粒的韧性断裂为主,且呈沿晶断裂模式,具有较好的延性。

表3 A357合金在不同振动幅度下的力学性能
Table 3 Mechanical properties of A357 alloy at different vibration frequencies amplitude

振动 幅度/mm	抗拉 强度/MPa	屈服 强度/MPa	伸长率 /%	硬度 HB
5	192.67	144.07	3.37	79.7
15	177.37	135.17	2.95	73.6
25	162.28	133.27	2.87	68.4
35	155.97	130.47	2.71	58.8

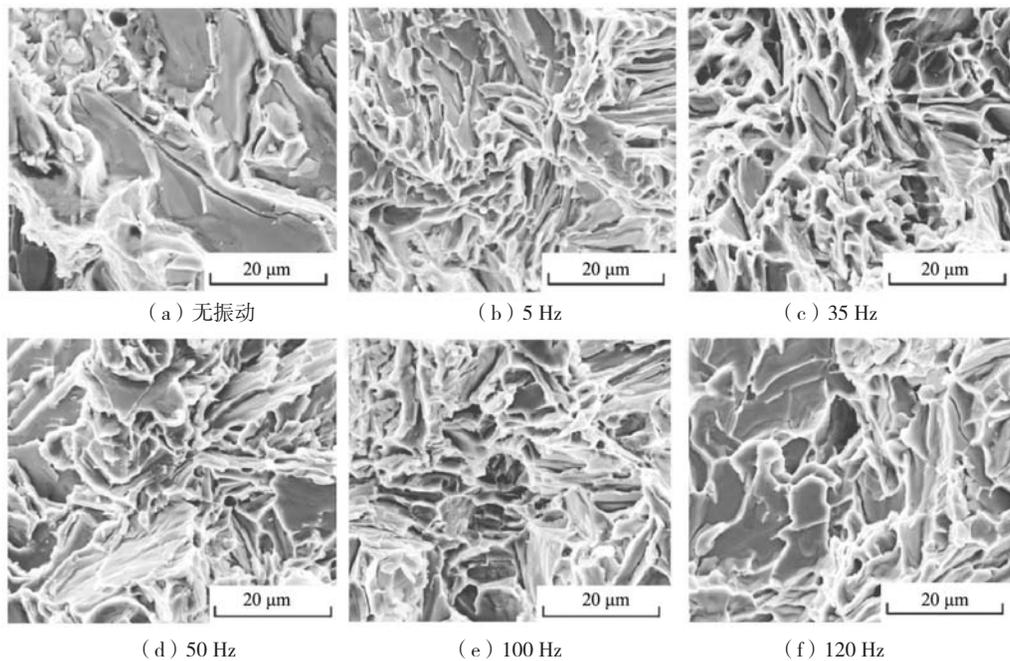


图8 不同振动频率下A357铝合金的断口形貌

Fig. 8 Fracture morphology of A357 aluminum alloy at different vibration frequencies

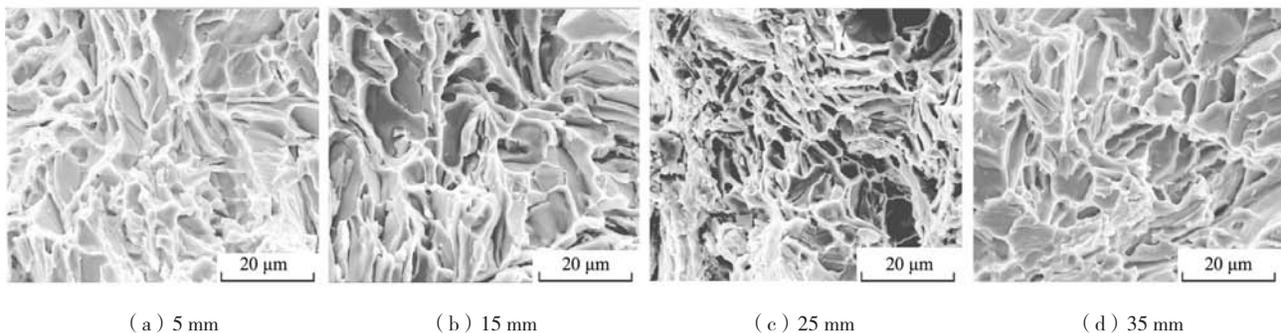


图9 不同振动幅度下A357铝合金的断口形貌

Fig. 9 Fracture morphology of A357 aluminum alloy at different vibration amplitude

3 结论

(1) 未添加机械振动消失模壳型铸造A357试样显微组织中 α -Al初生相和共晶硅颗粒分别为粗大的枝晶和粗大的板状结构。机械振动显著改善了 α -Al初生相、共晶硅颗粒的尺寸、形貌和分布情况。随着机械振动频率的增加,消失模壳型铸造A357合金的平均晶粒尺寸和二次枝晶臂间距减小,形状因子增大,最佳振动频率为100 Hz。

(2) 机械振动频率的增加极大地提高了消失模壳型铸造A357铝合金的力学性能和密度。当施加的机械振动频率为100 Hz时,消失模壳型铸造A357合金的抗

拉强度、屈服强度、伸长率和硬度分别比无振动时提高了35%、42%、57%和28%。

(3) 随着不同振幅机械振动的加入, α -Al相和共晶硅颗粒的形貌分别由粗枝晶向等轴晶和粗片状结构向纤维状结构演变,振幅越强平均晶粒尺寸越大,合金的力学性能随着振幅的增加而不断下降。

(4) A357铝合金无振动时断口组织粗糙,断口呈明显的脆性断裂性质,随着机械振动的加入,A357铝合金的断口形貌因其显微组织的显著改善而呈现明显的韧窝断口形貌,从而获得了较好的延展性,随着振动频率的增加,韧窝深度大,分布均匀,密度高。

参考文献:

- [1] 许庆彦. 熔模铸造过程数值模拟研究进展 [J]. 铸造, 2022, 71(7): 803-813.
- [2] 陈瑞, 许庆彦, 郭会廷, 等. Al-7Si-Mg 铝合金拉伸过程应变硬化行为及力学性能模拟研究 [J]. 金属学报, 2017, 53(9): 1110-1124.
- [3] 王录才, 陈新, 柴跃生, 等. 熔模铸造法通孔泡沫铝制备工艺研究 [J]. 铸造, 1999(1): 9-11.
- [4] JIANG W, FAN Z, LIU D, et al. Correlation of microstructure with mechanical properties and fracture behavior of A356-T6 aluminum alloy fabricated by expendable pattern shell casting with vacuum and low-pressure, gravity casting and lost foam casting [J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 560: 396-403.
- [5] 王浩, 吕璇, 汪鹏程, 等. 铝合金轮毂快速熔模铸造模拟与试制 [J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(11): 1262.
- [6] 谢圣贺. 消失模壳型铸造铝合金铸件常见铸造缺陷的探讨 [J]. 机械管理开发, 2020, 35(4): 229-231.
- [7] 王新节. 汽车发动机缸体缸盖消失模铸造技术的研究与应用 [J]. 铸造设备研究, 2007(1): 21-27.
- [8] 蒋文明, 樊自田. 铝/镁合金特种精密铸造技术的研究进展及发展趋势 [J]. 金属加工(热加工), 2023(2): 1-9.
- [9] 吴献明, 吴维冈. 干砂消失模壳型铸造铝硅合金凝固方式的研究 [J]. 铸造, 2007, 56(5): 488-490.
- [10] 吴献明, 吴维冈. 消失模壳型铸造铝硅合金组织及力学性能的研究 [J]. 铸造, 2007, 56(4): 369-371.

Effect of Mechanical Vibration on Microstructure and Mechanical Properties of A357 Alloy with Lost Foam Shell Casting

YANG Qi-lin¹, WANG Yue-lei², CHEN Long-bo^{1,3}, ZENG Xiao-shu⁴

(1. Gongqing Institute of Science and Technology, Gongqingcheng 332020, Jiangxi, China; 2. Hainan Vocational University of Science and Technology, Haikou 570100, Hainan, China; 3. Dhurakij Pundit University, Thailand, Krung Thep Maha Nakhon 10700, Thailand; 4. Nanchang University, Nanchang 330000, Jiangxi, China)

Abstract:

The effects of mechanical vibration frequency on microstructure, mechanical properties, and fracture behavior of A357 aluminum alloy during the solidification process of investment casting were investigated. The results showed that the mechanical vibration at different frequencies significantly improves the size and morphology of α -Al primary phase and eutectic silicon particles and improves the mechanical properties and density of A357 alloy. With the increasing of vibration frequency, the grain size and secondary dendrite arm spacing of A357 alloy decreased gradually, and the mechanical properties and density of A357 alloy increased gradually. The morphology of α -Al phase and eutectic silicon particles changed from coarse dendrite to equiaxed and from coarse flake to fibrous. The higher the amplitude, the larger the average grain size, and the mechanical properties of the alloys decreased with the increase of amplitude. In addition, the mechanical vibration changed the fracture morphology of A357 alloy from brittle fracture without vibration to obvious plastic fracture, and with the increase of vibration frequency, the dimples were deepened and distributed more evenly.

Key words:

A357 aluminum alloy; lost foam shell casting; mechanical vibration; microstructure; mechanical properties