

文章编号:1008-1542(2020)05-0462-06

振动对 ZL205A 合金偏析组织及硬度的影响

贾丽敏^{1,2,3}, 张雅晴^{1,2,3}, 谭建波^{1,2,3}, 刘小丽^{1,2,3}, 张双杰^{1,2,3}

(1.河北省材料近净成形技术重点实验室,河北石家庄 050018;2.河北科技大学材料科学与工程学院,河北石家庄 050018;3.河北省高温合金熔模铸造技术创新中心,河北石家庄 050018)

摘要:为了解决 ZL205A 合金铸件产生偏析缺陷等问题,进一步明确振动对偏析组织及硬度的影响规律,采用电磁式振动台作为振动源,探究了振动频率、振幅、振动时间对合金偏析组织占比及硬度的影响情况。结果表明,振动频率在 25~55 Hz 内变化时,随着振动频率的增加,偏析组织占比呈现先减小、后增加的趋势,硬度呈现先增大、后减小的趋势;振幅由 1 mm 增加到 4 mm 的过程中,偏析组织占比逐渐减少并趋于稳定,硬度呈现先减小、后增大的趋势;振动时间由 30 s 增加至 75 s 时,偏析组织占比呈现增加趋势并最终趋于稳定,硬度呈现先减小、后增大的趋势。振动频率对合金偏析组织和硬度的影响最为显著,振动时间和振幅的影响次之,此外,偏析组织的析出也会影响合金硬度。研究结果为明确 ZL205A 合金在振动条件下凝固组织的变化规律、提高铸件质量提供了理论参考。

关键词:有色金属及其合金;振动;ZL205A 合金;偏析组织;硬度

中图分类号:TG292 文献标识码:A doi:10.7535/hbkd.2020yx05010

Effect of vibration on segregation structure and hardness of ZL205A alloy

JIA Limin^{1,2,3}, ZHANG Yaqing^{1,2,3}, TAN Jianbo^{1,2,3}, LIU Xiaoli^{1,2,3}, ZHANG Shuangjie^{1,2,3}

(1. Hebei Key Laboratory of Material Near-Net Forming Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China; 3. Hebei Innovation Center for Superalloy Investment Casting Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

Abstract: In order to solve the problems of segregation defects in ZL205A alloy castings and clarify the influence of vibration on segregation structure and hardness, the electromagnetic vibration table was adopted as the vibration source to study the effects of vibration frequency, amplitude and time on segregation structure proportion and hardness of the alloy. The results show that the proportion of segregation structures decreases first and then increases, and the hardness increases first and then

收稿日期:2020-07-14;修回日期:2020-09-06;责任编辑:张士莹

基金项目:河北省重点研发计划项目(18211021D)

第一作者简介:贾丽敏(1981—),女,河北鸡泽人,讲师,博士,主要从事有色金属铸造及模拟仿真方面的研究。

E-mail:jialimin1025@163.com

贾丽敏,张雅晴,谭建波,等.振动对 ZL205A 合金偏析组织及硬度的影响[J].河北科技大学学报,2020,41(5):462-467.

JIA Limin,ZHANG Yaqing,TAN Jianbo,et al.Effect of vibration on segregation structure and hardness of ZL205A alloy[J].Journal of Hebei University of Science and Technology,2020,41(5):462-467.

decreases with the increase of vibration frequency from 25 Hz to 55 Hz. When the vibration amplitude increases from 1 mm to 4 mm, the proportion of segregation structures decreases gradually and tends to be stable, and the hardness decreases first and then increases. With the increase of vibration time from 30 s to 75 s, the proportion of segregation structures increases and finally tends to be stable, and the hardness decreases first and then increases. Therefore, the vibration frequency has the most significant effect on segregation structure and hardness of the alloy, followed by time and amplitude. In addition, the precipitation of segregation structures also affects the hardness of the alloy. The results provide a theoretical reference for studying the change rule of solidification structure of ZL205A alloy under vibration condition and for improving casting quality.

Keywords: non-ferrous metal and its alloy; vibration; ZL205A alloy; segregation structure; hardness

ZL205A 合金是目前世界上抗拉强度最高的一种铸造铝合金,延展性好,具有良好的综合力学性能,广泛应用于航空航天、船舶和武器装备等重要领域^[1]。但由于合金元素较多,ZL205A 合金存在铸造性能差、铸件易产生偏析等缺陷,这些已成为影响铸件质量的关键因素。ZL205A 合金凝固过程中的偏析问题一直是铸造行业比较关注的^[2-3]。已有研究发现,凝固条件不同时,ZL205A 合金偏析类型呈现多样性,包括由 Al₂Cu 相组成的树枝状偏析,由 Al₃Ti, Al₃V 和 Al₃Zr 混合组织形成的块状偏析,由 α-Al 基体中存在的片状偏析,灰白 Al₃Ti 物质形成的流线偏析,以及由 Ti 和 Zr 等原子团簇聚集而形成的点状偏析等^[4-6],这些偏析组织的存在不同程度地影响了铸件的力学性能。一些研究者对 ZL205A 铸件中各种偏析的形成机理进行了研究,并在铸造工艺方面采取各种措施,尽量避免在铸件中产生偏析缺陷。但目前来看,ZL205A 合金铸件偏析缺陷仍然是影响铸件质量的主要因素之一^[7]。

振动可使合金凝固过程发生改变,从而改变铸件凝固组织,提高铸件质量^[8-10]。目前,国内外针对振动凝固技术的研究多偏向于铸造过程中振动对晶粒组织尺寸及形态的影响,而对合金凝固过程,尤其是对宽结晶合金(如 ZL205A 合金)元素偏析的研究甚少^[11-12]。因此,本文通过研究振动对 ZL205A 合金铸件偏析组织及硬度的影响规律,分析振动频率、振动幅度、振动时间对砂型铸造 ZL205A 合金偏析组织占比及合金硬度的影响机理,为 ZL205A 合金在振动条件下凝固组织的研究提供理论参考。

1 材料与方法

实验采用 ZL205A 合金锭,重熔后进行浇注。图 1 为 ZL205A 合金浇注系统及取样位置示意图,试样取自直径为 25 mm、长度为 80 mm 的圆柱形铸件中间。为了保证数据的有效性,同时浇注 2 个形状、尺寸及在浇注系统中位置一样的铸件,组织观察及硬度分析试样分别在 2 个铸件相同的位置处截取。为了增大砂型的透气性以及提高造型效率,将横浇道设计成开放状态。采用砂型铸造,将合金铸锭在 SG-5-12 型坩埚电阻炉中进行熔炼,熔化温度为 720 °C。合金全部融化后,向坩埚内加入铝液质量分数为 0.15% 的 ZnCl₂ 精炼剂,精炼 5 min,进行精炼除气和打渣。将砂铸型固定在振动台上,金属液凝固过程中采用调频调幅扫频电磁式振动台进行振动处理,浇注过程中通过控制振动台的振动参数改变合金的凝固组织。取样后,经粗磨、细磨、机械抛光和化学腐蚀后制得组织观察和硬度分析所用试样,并在每个试样上随机选取 3 个位置进行组织观察和硬度分析,取 3 组数据的平均值作为实验结果。在蔡司金相显微镜上进行组织观察,在维氏硬度计上测量试样硬度。

本实验方案设计时,主要考虑了振动频率、振幅以及振动时间等振动参数对铸件偏析组织及硬度的影响,因此设计了三因素四水平的正交试验,因素水平表如表 1 所示,共进行了 16 组铝合金浇注实验。

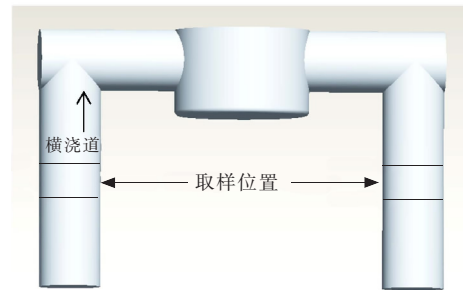


图 1 浇注系统及取样位置示意图

Fig.1 Schematic of gating system and sampling position

表 1 3 因素 4 水平表

Tab.1 Table of three factors and four levels

水平	振动频率/Hz	振幅/mm	振动时间/s
1	25	1	30
2	35	2	45
3	45	3	60
4	55	4	75

2 结果及分析

2.1 ZL205A 合金组织形态及分布

图 2 所示为不同振动条件(时间 t , 频率 f , 振幅 h)下 ZL205A 合金典型的金相组织图。通过与已有研究得到的 ZL205A 金相组织图进行对比^[13-15]可知,本研究中铸态 ZL205A 合金的基体相为浅灰色的 α (Al) 固溶体,深灰色部位为偏析组织。枝晶间和晶界上有 α (Al)相、 θ (Al₂Cu)相和 Cd 相的共晶组织,以及少量的灰色块状 ZrAl₃ 相,条状 Al₃Ti(B)相分布在 α 固溶体上^[16]。在该研究中,大多数偏析组织为带状、树枝状偏析,少数为块状偏析。

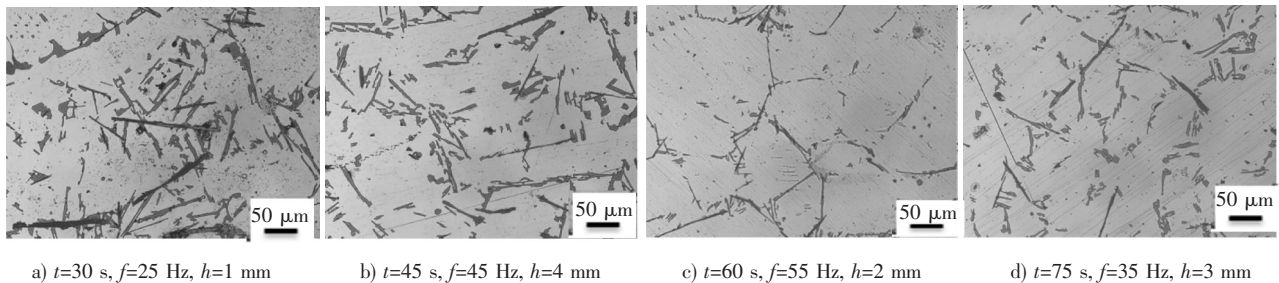


图 2 振动条件下 ZL205A 合金典型的金相组织图

Fig.2 Typical metallographic structure diagram of ZL205A alloy under vibration condition

运用图像分析软件 Image-ProPlus 对各试样金相图中的偏析组织进行提取,并对其含量进行统计计算,偏析组织统计图如图 3 所示。在金相照片中,将所有偏析组织面积之和与图片总面积的比值作为本研究中偏析组织占比,对每个试样的 3 张金相图进行分析,并对 3 组数据求平均值(偏析组织占比统计时,其相对误差约为 3.83%)。运用正交试验数据分析软件对所得偏析组织占比进行分析,结果如表 2 所示。

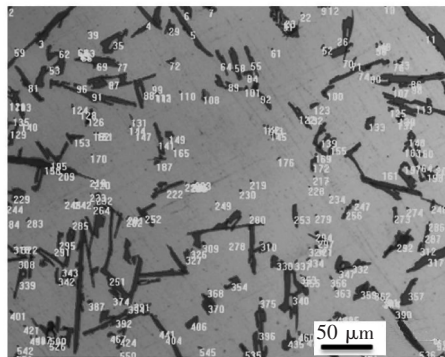


图 3 Image-ProPlus 软件偏析组织统计图

Fig.3 Segregation structures statistics with Image-ProPlus software

表 2 正交试验偏析组织占比数据分析结果

Tab.2 Analytical results of orthogonal experimental for segregation structures

项目	因素		
	振动频率	振幅	振动时间
均值 1	19.00	17.03	12.88
均值 2	16.33	15.78	15.75
均值 3	12.85	16.13	18.28
均值 4	16.08	15.33	17.35
极差	6.15	1.70	5.40

单位: %

2.2 振动参数对 ZL205A 合金偏析组织形成的影响

由表 2 数据分析结果可以看出,在振动频率、振动时间、振幅 3 个因素中,振动频率因素下偏析组织所占比例的极差数值最大,由此推断,振动频率对偏析组织形成的影响最大,其次为振动时间和振幅。图 4 更为直观地给出了偏析组织占比与振动频率、振幅和振动时间的关系。

由图 4 可以看出,振动参数对偏析组织的影响规律如下:频率在 25~55 Hz 范围内变化时,随着振动频率的增加,偏析组织占比先减小后增加,在 45 Hz 时偏析组织所占比例减至最小;随着振幅的增加,偏析组织占比呈现减小趋势并逐渐趋于稳定;随着振动时间的延长,偏析组织所占比例逐渐增加并最终趋于稳定。

振动参数对偏析组织的影响之所以会出现如图 4 所示的结果,主要原因分析如下。ZL205A 合金晶粒细化可有效减少铸件的凝固偏析缺陷^[17],振动频率较小时,随着振动频率的增加,合金熔体振动剧烈,树枝晶会发生破碎产生大量晶核,合金组织得到细化。但过大的振动频率会使得晶粒间的相互作用增加,且枝晶破碎更为容易,给形核提供了较长时间,晶粒尺寸有所增加^[18-19]。因此,本研究中,随着振动频率的增加,偏

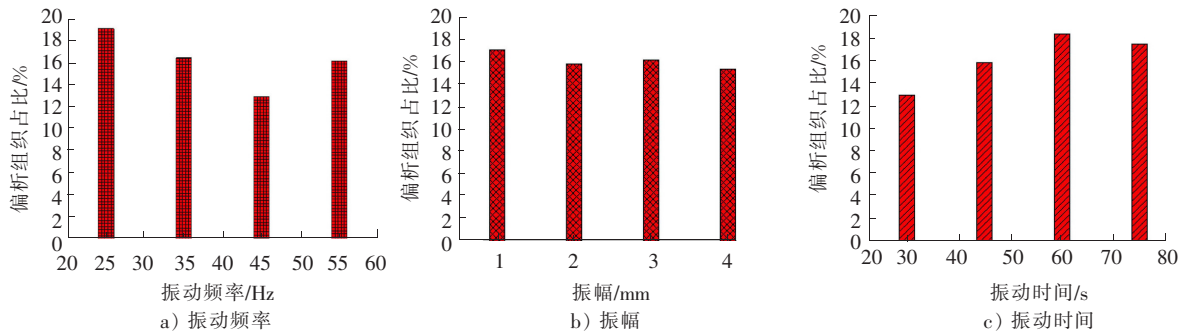


图 4 ZL205A 合金偏析组织占比与振动参数的关系

Fig.4 Relationship between proportions of segregation microstructure and vibration parameters of ZL205A alloy

析组织所占比例呈现先减小、后增加的趋势。当振幅增加时,振击力加强,液体搅拌作用加强,金属液内对流加剧,为 ZL205A 合金凝固时枝晶折断、破碎、增殖及游离提供了有利条件,从而使晶粒细化^[20]。因此,随着振幅的增加,偏析组织占比呈现减小的趋势。在振动作用下,金属液表面及铸型壁产生的晶核脱落,会游离到未凝固的金属液中。随着振动时间的延长,晶核脱落越来越多。与不施加振动时相比,金属液的温度和浓度会变得更加均匀,同时金属液中固相率的提高使晶粒之间的碰撞更加频繁,此条件下各个晶粒会进行融合,更大量的晶粒聚集在一起,在某个振动频率参数条件下,晶粒尺寸会随着振动时间的增加而增大^[21],因而偏析组织占比也会呈现逐渐增加的趋势直至稳定。

图 5 所示为与图 2 相对应试样的晶粒组织照片。对比图 5 与图 2 可以看出,当晶粒尺寸较小时,偏析组织析出明显减少。由此可以推断,本实验条件下晶粒尺寸仍是影响偏析组织析出的重要因素。

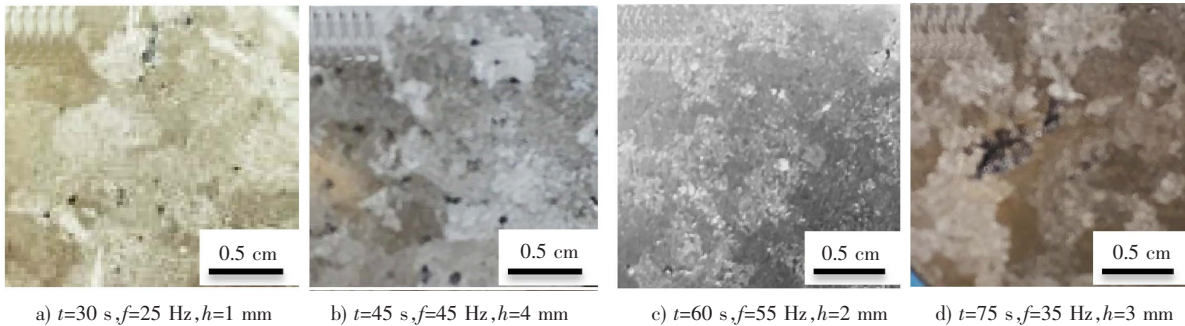


图 5 振动条件下 ZL205A 合金典型的晶粒组织图

Fig.5 Typical grain structures of ZL205A alloy under vibration condition

2.3 振动对 ZL205A 合金硬度的影响

用相同的取样方法测量每个试样的维氏硬度(硬度值测定时,其相对误差约为 2.52%),正交试验数据分析结果如表 3 所示。图 6 给出了合金硬度与振动频率、振幅和振动时间的关系。

由表 3 正交试验硬度数据分析结果可知,在影响 ZL205A 合金硬度的 3 个因素中,振动频率的影响最为显著,其次为振动时间和振幅。由图 6 可以看出,在本研究范围内,随着振幅和振动时间的增加,合金的硬度值呈现先减小、后增大的趋势;而随着振动频率的增加,合金的硬度值呈现先增大、后减小的变化趋势。

表 3 正交试验硬度数据分析结果

Tab.3 Analytical results of orthogonal experimental for hardness

项目	因素		
	振动频率	振幅	振动时间
均值 1	59.71	59.35	57.42
均值 2	60.21	58.45	61.75
均值 3	51.49	55.43	56.78
均值 4	58.77	56.96	54.23
极差	8.72	3.92	7.52

单位:HV

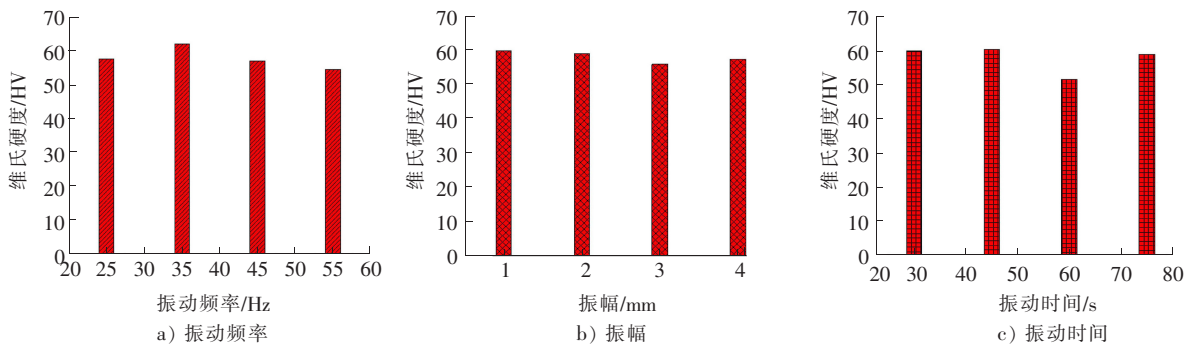


图6 ZL205A合金硬度与振动参数关系

Fig.6 Relationship between hardness and vibration parameters of ZL205A alloy

振动对铸件硬度的影响分析如下:振动会影响铸件的晶粒尺寸,一般情况下,晶粒越细小,偏析组织占比越少,试样的硬度就越大。图7所示为本实验中不同振动时间所对应的合金偏析组织占比与硬度的关系,可以看出,随着偏析组织占比增大,硬度基本上呈现减小的趋势。但同时,偏析组织的析出也会影响合金的表面硬度,在ZL205A合金凝固组织中,某些偏析组织具有较高的硬度,如块状偏析组织中的 Al_3Ti 、 Al_3V 和 Al_3Zr 等金属间化合物具有十分高的硬度,此类偏析组织表面硬度要显著高于基体组织 α 固溶体^[4]。本研究中,晶粒尺寸与偏析组织的共同作用,使得振动参数发生变化时,合金硬度呈现如图6所示的变化趋势,硬度并未完全随偏析组织占比的改变而发生变化。由此可以推断,偏析组织的析出也会影响合金硬度。

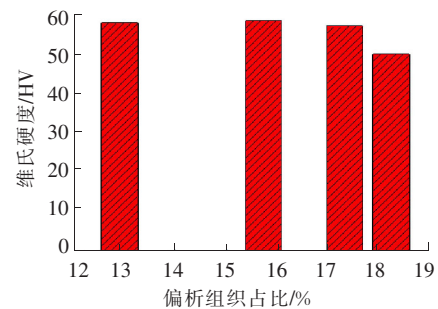


图7 合金偏析组织占比与硬度的关系

Fig.7 Relationship between segregation structure proportions and hardness of alloy

3 结 语

1)研究了振动对砂型铸造ZL205A合金偏析组织及硬度的影响,分析了振动频率、振幅、振动时间对合金偏析组织占比及硬度的影响规律。在3个振动参数中,振动频率对合金偏析组织和硬度的影响最为显著,其次为振动时间和振幅。

2)振动频率在25~55 Hz内变化时,随着振动频率的增加,偏析组织占比呈现先减小、后增加的趋势,硬度呈现先增大、后减小的趋势;振幅由1 mm增加到4 mm的过程中,偏析组织占比逐渐减少并趋于稳定,硬度呈现先减小、后增大的趋势;振动时间由30 s增加至75 s时,偏析组织占比呈现增加趋势并最终趋于稳定,硬度呈现先减小、后增大的趋势。

3)除了晶粒尺寸,偏析组织的析出也会影响合金的硬度,其影响机制还有待作进一步的研究。

参考文献/References:

- [1] 郭凡,贤福超,张海涛,等. ZL205A合金块状偏析相缺陷的研究[J].铸造技术,2020,41(4):309-312.
GUO Fan, XIAN Fuchao, ZHANG Haitao, et al. Study on blocky-shaped segregation phase of ZL205A alloy [J]. Foundry Technology, 2020, 41(4): 309-312.
- [2] 范学毅,张喆,洪润洲,等. 行波磁场对ZL205A合金元素分布的影响[J].特种铸造及有色合金,2017,31(11):1183-1186.
FAN Xueyi, ZHANG Zhe, HONG Runzhou, et al. Effects of traveling magnetic field on element distribution in ZL205A alloy [J]. Special Casting & Non-ferrous Alloys, 2017, 31(11): 1183-1186.
- [3] LI Bo, SHEN Yifu, HU Weiye. Casting defects induced fatigue damage in aircraft frames of ZL205A aluminum alloy: A failure analysis [J]. Materials & Design, 2011, 32:2570-2582.
- [4] 贤福超,郝启堂,范理. ZL205A合金块状偏析形成机理[J].稀有金属材料与工程,2014,43(4):941-945.
XIAN Fuchao, HAO Qitang, FAN Li. Formation mechanism of massive segregation of ZL205A alloy [J]. Rare Metal Materials and Engi-

- neering,2014, 43(4): 941-945.
- [5] 陈邦峰,贾洋江. ZL205A 铝合金铸件流线缺陷研究[J].特种铸造及有色合金,2010,30(11):984-988.
CHEN Bangfeng, JIA Panjiang. Streamline defects in ZL205A aluminum alloy castings[J]. Special Casting & Non-ferrous Alloys, 2010, 30(11): 984-988.
- [6] 杜旭初,洪润洲,陈邦峰,等. ZL205A 合金回转体铸件树枝状偏析缺陷研究[J].热加工工艺,2015,44(7):125-128.
DU Xuchu, HONG Runzhou, CHEN Bangfeng, et al. Study on dendritic segregation defects in ZL205A alloy rotator castings[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(7): 125-128.
- [7] 史晓平,李玉胜. ZL205A 合金偏析缺陷研究[J].铸造,2011,60(10):1022-1026.
SHI Xiaoping, LI Yusheng. Study on ZL205A alloy segregation[J]. Foundry, 2011, 60(10):1022-1026.
- [8] 张峥.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.
ZHANG Zheng. Effect of mechanical vibration on filling and properties of lost foam casting A356 alloy[J]. Foundry Technology, 2015, 36(2): 466-468.
- [9] 赵建华,马强,金通,等. 机械振动对 A356 合金充型能力影响的研究[J].功能材料,2014,45(15):15129-15133.
ZHAO Jianhua, MA Qiang, JIN Tong, et al. Experimental investigation of the on the filling ability of effect of mechanical vibration A356 aluminum alloy[J]. Functional Materials, 2014, 45(15):15129-15133.
- [10] 王成军,韩董董,陈蕾,等.振动技术在金属材料铸造成形中的应用与发展[J].河北科技大学学报,2014,35(3):229-232.
WANG Chengjun, HAN Dongdong, CHEN Lei, et al. Application and development of vibration technology in metal casting molding[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2014, 35(3):229-232.
- [11] WANG Rujia, WU Shiping, CHEN Wei. Mechanism of burst feeding in ZL205A casting under mechanical vibration and low pressure[J]. Transactions Nonferrous Metals Society China, 2018, 28: 1514-1520.
- [12] 罗泽碧.实验研究机械振动对 ZL205A 合金低压振动铸造的影响[J].科技创新与应用,2016(22):45-46.
- [13] 丁旭,孟令刚,姜立,等. Al-Ti-B 细化剂对 ZL205A 铝合金组织性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2018,38(7):772-775.
DING Xu, MENG Linggang, JIANG Li, et al. Effects of Al-Ti-B refiner on the microstructure and properties of ZL205A[J]. Special Casting & Non-ferrous Alloys, 2018, 38(7): 772-775.
- [14] 贤福超,郭凡,肖文丰. ZL205A 合金元素偏析行为[J].铸造,2014,63(10):995-998.
XIAN Fuchao, GUO Fan, XIAO Wenfeng. Study on elements segregation behavior of ZL205A alloy[J]. Foundry, 2014, 63(10): 995-998.
- [15] 陈邦峰,贾洋江,刘国利,等. ZL205A 铝合金铸件偏析缺陷分析和等级研究[J].特种铸造及有色合金,2009, 29(11):994-997.
CHEN Bangfeng, JIA Panjiang, LIU Guoli, et al. Properties and grades of segregation defect aluminum alloy castings in ZL205A[J]. Special Casting & Non-ferrous Alloys, 2009, 29(11): 994-997.
- [16] 舒群,陈玉勇,徐丽娟.砂型铸造 ZL205A 合金组织与力学性能的研究[J].特种铸造及有色合金,2005,25(2):75-78.
SHU Qun, CHEN Yuyong, XU Lijuan. Microstructure and mechanical properties of ZL205A alloy in sand casting[J]. Special Casting & Non-ferrous Alloys, 2005, 25(2): 75-78.
- [17] 郑卫东,厉磊,厉沙沙,等. 晶粒细化工艺对 ZL205A 合金偏析缺陷的影响[J].特种铸造及有色合金,2017,37(7):792-795.
ZHENG Weidong, RUAN Lei, LI Shasha, et al. Effects of improvement of grain refinement on segregation in the ZL205A alloy[J]. Special Casting & Non-ferrous Alloys, 2017, 37(7): 792-795.
- [18] 李金松,谢明芳. 机械振动对铸造铝合金组织与性能的影响[J].铸造技术,2016,12(37):2681-2684.
LI Jinsong, XIE Mingfang. Effect of mechanical vibration on structure and properties of casting aluminum alloy[J]. Foundry Technology, 2016, 12(37):2681-2684.
- [19] JIANG Wenming, FAN Zitian, CHEN Xu, et al. Combined effects of mechanical vibration and wall thickness on microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloy produced by expendable pattern shell casting[J]. Materials Science & Engineering A, 2014, 619(1):228-237.
- [20] 王红霞,张国平,许春香,等. 机械振动对纯 Al 晶粒细化及凝固收缩的影响[J].铸造设备研究,2016,12(37):2681-2684.
WANG Hongxia, ZHANG Guoping, XU Chunxiang, et al. Effect of mechanical vibration on grain refinement and solidification shrinkage of aluminum[J]. Research Studies on Foundry Equipment, 2016, 12(37):2681-2684.
- [21] 王娟. 机械振动频率和时间对 ZL101 铝合金组织和综合力学性能的影响[J].科技创新与应用,2018(35):102-103.
WANG Juan. Effect of mechanical vibration frequency and time on microstructure and comprehensive mechanical properties of ZL101 aluminum alloy[J]. Technology Innovation and Application, 2018(35): 102-103.