

真空增压铸造工艺对 ZL114A 合金充型能力和力学性能的影响

陶健全, 向林, 李晓松, 邢志辉, 李明

(中国兵器工业第五九研究所, 重庆 400039)

摘要: **目的** 研究不同真空增压铸造工艺参数下 ZL114A 合金的充型距离、组织性能的变化规律。**方法** 设计了不同厚度的充型距离测试片, 采用游标卡尺测试了不同真空度和石膏铸型温度条件下合金的流动性。采用万能拉伸机测试了不同凝固压力条件下单铸试棒的力学性能, 采用金相显微镜观察合金的显微组织, 采用扫描电子显微镜观察拉伸断口的形貌。**结果** 当真空度从重力状态 (0 MPa) 提高至 -0.08 MPa 时, 3.0 mm 薄片的充型距离从 42 mm 提升至 210 mm。当铸型温度从 260 °C 提高至 340 °C, 3.0 mm 薄片的充型距离从 95 mm 提升至 175 mm。凝固压力从重力条件下提升至 0.8 MPa, 抗拉强度从 293 MPa 提升至 338 MPa, 屈服强度从 240 MPa 提升至 278 MPa, 断后伸长率从 2.0% 提升至 4.0%。**结论** 提高真空度、铸型温度, 可显著提升 ZL114A 合金的充型能力。提高凝固压力、凝固组织致密, 第二相分布均匀, 疏松缺陷明显减少, 力学性能提高。

关键词: 真空增压; ZL114A; 流动性; 显微组织; 力学性能

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2020.04.021

中图分类号: TG249.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2020)04-0166-05

Effect of Vacuum Pressurized Casting Process on Filling Ability and Mechanical Properties of ZL114A Alloy

TAO Jian-quan, XIANG Lin, LI Xiao-song, XING Zhi-hui, LI Ming

(No. 59 Research Institute of China Ordnance Industry, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: The paper aims to study the variation law of filling distance and microstructure and properties of ZL114A alloy under different vacuum pressurized casting process parameters. The filling distance test pieces of different thickness were designed. The fluidity of the alloy under different vacuum and gypsum mold temperature conditions were tested by vernier caliper. The universal tensile machine was used to test the mechanical properties of single-cast test bars under different solidification pressures. The metallographic microscope was used to observe the microstructure of the alloy, and the scanning electron microscope was used to observe the morphology of the tensile fracture. The results showed that when the vacuum degree was increased from the gravity state (0 MPa) to -0.08 MPa, the filling distance of the 3.0 mm sheet was increased from 42 mm to 210 mm. When the mold temperature was increased from 260 °C to 340 °C, the filling distance of the 3.0 mm wafer was increased from 95 mm to 175 mm. The coagulation pressure was increased from gravity to 0.8 MPa; the tensile strength was increased from 293 MPa to 338 MPa; the yield strength was increased from 240 MPa to 278 MPa; and the elongation after fracture was increased from 2.0% to 4.0%. Increasing the vacuum and mold temperature can significantly improve the filling ability of ZL114A alloy, and increase the solidification pressure. The solidification structure is dense. The second phase is evenly distributed. The loose defects are significantly reduced, and the mechanical property is high.

收稿日期: 2020-05-12

作者简介: 陶健全 (1983—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为轻合金材料与成形工艺。

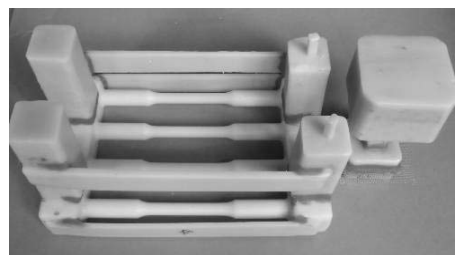
KEY WORDS: vacuum pressurized; ZL114A; fluidity; microstructure; mechanical properties

ZL114A 合金作为典型的 Al-Si 系铸造铝合金, 广泛应用于航空航天、兵器、汽车、通信、电子等领域^[1-6]。随着装备轻量化发展, 铝合金铸件设计日趋呈现大型化、复杂化和薄壁化等特点, 复杂薄壁铸件的充型和凝固是精密成形的核心, 对铸件的性能和质量起着决定性作用^[7-9]。传统铸造工艺易出现薄壁浇不足、冷隔缺陷多、疏松、针孔缺陷超标等问题, 已不能满足高品质铸件的设计要求。程运超等^[10]研究了真空增压凝固条件下 ZL105A 合金组织及其力学性能, 结果表明, 外加凝固压力能够细化 $\alpha(\text{Al})$ 晶粒, 减少缩松缺陷, 增加组织致密度, 同时加压凝固可以提高抗拉强度和屈服强度。王元庆等^[11]认为真空增压铸造技术可提高合金的充型能力, 改善铸件的内在质量。文中采用真空增压铸造工艺, 研究了不同真空度、石膏铸型温度、凝固压力对 ZL114A 合金充型能力、力学性能和显微组织的影响, 为复杂薄壁铸件的结构设计、铸造工艺设计提供理论依据。

1 实验

在熔模石膏型单铸试棒蜡样上粘结厚度分别为 1.5, 3.0, 5.0 mm 的蜡片, 用于测试充型距离, 测试片的高度为 20 mm, 长度为 210 mm, 如图 1a 所示。将测试蜡样置于砂箱中, 浇灌石膏浆料, 硬化后进行脱蜡焙烧, 最高焙烧温度为 700 °C, 降温至铸型温度。将 ZL114A 锭在坩埚盖上预热至 250 °C 以上, 加入坩埚炉中, 熔化至 680~700 °C 加入 AlBe₅ 中间合金和纯镁锭, 升温至 (735±5) °C 喷粉 (精炼剂 ZS-AJ203) 精炼, 精炼 20 min 后变质, 变质后继续精炼 10 min, 加入覆盖剂 (ZS-AF1), 静置并降温至浇注温度 720 °C, 实验合金的化学成分为质量分数为 7.16% 的 Si, 0.53% 的 Mg, 0.16% 的 Ti, 0.12% 的 Fe (杂质元素), 其余为 Al。石膏铸型和浇包置于真空增压铸造机内, 锁紧密封, 抽真空至所需真空度 (-0.08~0 MPa), 倾转浇包将铝液浇铸型中, 立即加压 (加压压力为 0~0.8 MPa), 保持压力 10 min, 卸压, 取出铸型, 去除石膏, 获得浇注试样, 如图 1b 所示。

采用游标卡尺测量不同工艺条件下 ZL114A 合金的充型距离, 型号为 OLYMPUS-GX71 的金相显微镜观察金相显微组织, Philip-xl30 型扫描电子显微镜观察拉伸断口的形貌。拉伸试样经 T5 热处理后, 按 GB/T 228.1 金属材料室温拉伸试验方法的规定进行拉伸测试, 试验设备为 CSS-44100 型电子万能试验机, 拉伸速度为 1 mm/min。在同一状态下测试 3 根试样, 取平均值。



a 蜡样



b 浇注试样

图 1 充型距离测试片与力学性能试棒

Fig.1 Filling distance test piece and mechanical property test rod

2 结果与分析

2.1 真空度与铸型温度对 ZL114A 合金充型距离的影响

在铸型温度为 300 °C, 浇注温度为 720 °C 条件下, 不同真空度对 ZL114A 合金充型距离的影响如图 2 所示。提高充型真空度, 可显著提升 ZL114A 合金的充型距离。当真空度从重力状态 (0 MPa) 提高至 -0.08 MPa 时, 1.5 mm 薄片的充型距离从 30 mm 提升至 100 mm, 3.0 mm 薄片的充型距离从 42 mm 提升至 210 mm, 薄片厚度为 5.0 mm 时, 当真空度为 -0.06 MPa 时, 充型距离即可达到 210 mm。

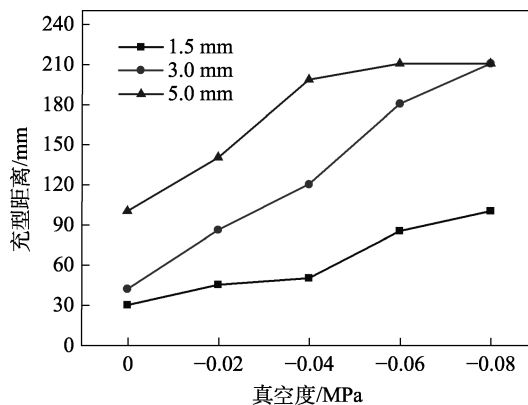


图 2 真空度对 ZL114A 合金充型距离的影响

Fig.2 Effect of vacuum on the filling distance of ZL114A alloy

在真空度为 -0.04 MPa, 浇注温度为 720°C 条件下, 石膏铸型的温度对 ZL114A 合金充型距离的影响如图 3 所示。提高铸型温度, 可提高 ZL114A 合金的充型距离。当铸型温度从 260°C 提高至 340°C , 1.5 mm 薄片的充型距离从 40 mm 提升至 80 mm, 3.0 mm 薄片的充型距离从 95 mm 提升至 175 mm, 5.0 mm 薄片的充型距离从 165 mm 提升至 210 mm。

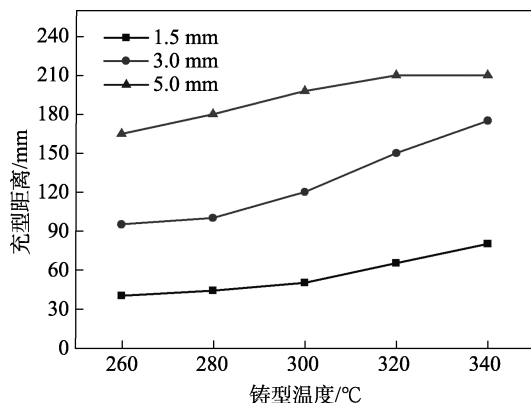


图 3 铸型温度对 ZL114A 合金充型距离的影响

Fig.3 Effect of mold temperature on the filling distance of ZL114A alloy

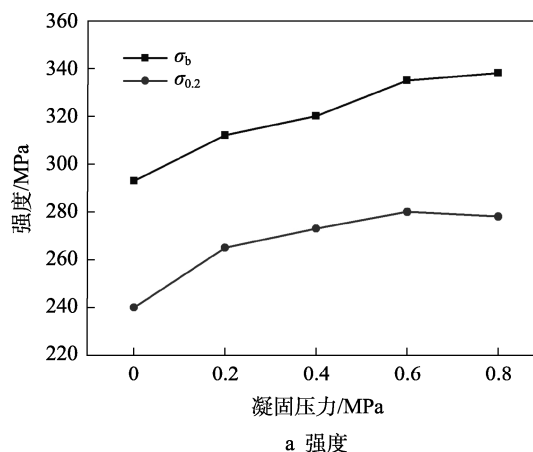
石膏铸型保温性能好, 适用于浇注薄壁构件, 但石膏铸型透气性较差, 在重力条件下, 型腔气体反压力较大, 薄壁部位充型困难, 浇不足缺陷严重。在高真空条件下, 一方面石膏铸型型腔气体大幅减少, 可显著降低合金熔体充型过程中遇到的反压力, 另一方面可减少充型前端熔体的氧化, 在较高的铸型温度条件下, 大幅降低固相分数, 延长合金液的保持时间, 增强合金熔体的充型能力^[12-13]。

2.2 凝固压力对 ZL114A 合金显微组织和力学性能的影响

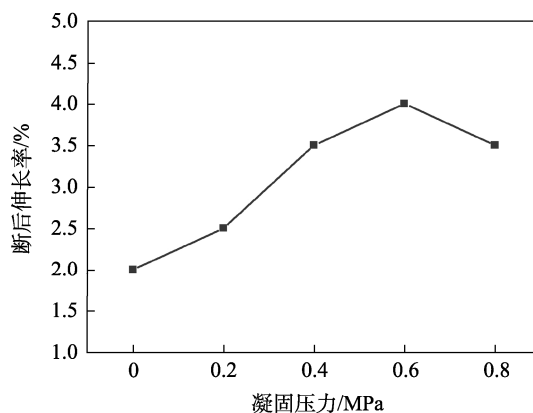
在铸型温度为 300°C 、浇注温度为 720°C , 充型真空度为 -0.06 MPa 条件下, 不同凝固压力对 ZL114A 合金的力学性能的影响如图 4 所示, 在重力条件下, ZL114A 试棒经 T5 热处理后的抗拉强度、屈服强度和断后伸长率分别为 293 MPa, 240 MPa 和 2.0% 。提

高凝固压力至 0.4 MPa, 抗拉强度、屈服强度和断后伸长率分别为 320 MPa, 237 MPa 和 3.5% , 继续提高凝固压力至 0.8 MPa, 抗拉强度、屈服强度提高至 338 MPa, 278 MPa, 断后伸长率无明显提高。可见, 提高凝固压力, 可显著提升 ZL114A 合金的力学性能。

不同凝固压力条件下 ZL114A 合金, 经 T6 处理后的金相显微组织如图 5 所示。在重力条件下凝固 (凝固压力 0 MPa), 晶粒粗大, 析出的第二相组织粗大。当凝固压力提高至 0.4 MPa, 晶粒明显细化, 第二相弥散分布。凝固压力增加至 0.8 MPa 时, 晶粒



a 强度



b 断后伸长率

图 4 凝固压力对 ZL114A 合金力学性能的影响

Fig.4 Effect of solidification pressure on the mechanical properties of ZL114A alloy

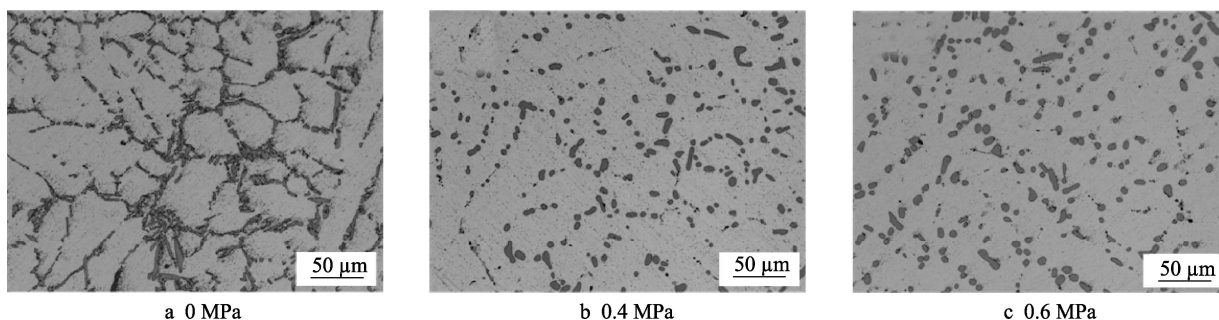


图 5 凝固压力对 ZL114A 合金金相组织的影响

Fig.5 Effect of solidification pressure on the metallographic structures of ZL114A

获得进一步细化,第二相弥散均匀分布,细晶强化和第二相强化效果明显。

不同凝固压力条件下 ZL114A 合金的断口 SEM 形貌如图 6 所示。在重力条件下凝固,熔体凝固时间

长,大气压条件下补缩能力不足,断口组织粗大,局部有明显的显微疏松缺陷。在压力条件下凝固,断口上存在大量韧窝,断裂方式为韧性断裂。根据疏松形成判据:

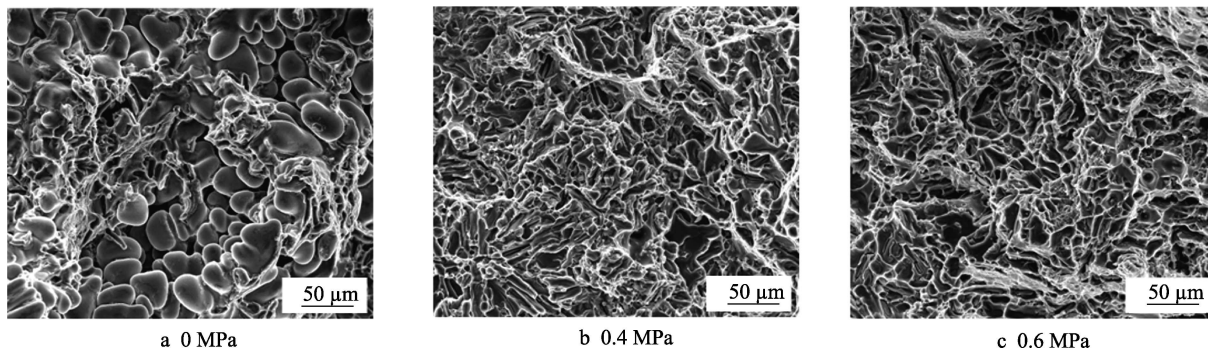


图 6 不同凝固压力下 ZL114A 合金拉伸断口 SEM 形貌

Fig.6 SEM morphology of ZL114A alloy tensile fracture under different solidification pressures

$$\frac{G_{sc}\sqrt{P_{sc}}}{R_{sc}} \leq K_c \quad (1)$$

式中: G_{sc} 为临界固相率的温度梯度; R_{sc} 为临界固相率的冷却速度; P_{sc} 为临界固相率的压力; K_c 为判据数。在较高压力下凝固,可驱使处于液固两相区中的金属液进入固相骨架间隙内进行补缩,可抑制针孔缺陷、阻止缩松缺陷。压力越高,凝固组织越致密,力学性能越高^[14-16]。

3 结论

1) 提高真空度和石膏铸型温度, ZL114A 合金的充型能力明显增强。真空度从重力状态 (0 MPa) 提高至 -0.08 MPa, 3.0 mm 的薄片的充型距离从 42 mm 提升至 210 mm。在真空条件下, 铸型温度从 260 °C 提高至 340 °C, 3.0 mm 薄片的充型距离从 95 mm 提升至 175 mm。

2) 提高凝固压力, 可显著提升 ZL114A 合金单铸试棒的力学性能。凝固压力从重力条件下提升至 0.8 MPa, 抗拉强度从 293 MPa 提升至 338 MPa, 断后伸长率从 2.0% 提升至 4.0%。

3) 压力条件下凝固, 可显著增强 ZL114A 熔体的补缩能力, 晶粒被明显细化, 疏松缺陷被抑制。

参考文献:

- [1] HUANG Hui-lan, JIA Zhi-hong, XING Yuan, et al. Microstructure of Al-Si-Mg Alloy with Zr/Hf Additions during Solidification and Solution Treatment[J]. Rare Metals, 2019, 38(11): 1033—1042.
- [2] JIANG Long-tao, WU Gao-hui, YANG Wen-shu, et al. Effect of Heat Treatment on Microstructure and Dimensional Stability of ZL114A Aluminum Alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(11): 2124—2128.
- [3] LIN Y C, LUO Shun-cun, HUANG Jian, et al. Effects of Solution Treatment on Microstructures and Microhardness of a Sr-modified Al-Si-Mg Alloy[J]. Materials Science & Engineering A, 2018, 725: 530—540.
- [4] MARCO Colombo, ELISABETTA Gariboldi, ALESSANDRO Morri. Er Addition to Al-Si-Mg-based Casting Alloy: Effects on Microstructure, Room and High Temperature Mechanical Properties[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 708: 1234—1244.
- [5] 康福伟, 李如一, 乔昕, 等. 热处理工艺对 ZL114A 铝合金组织及力学性能的影响[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2019, 24(1): 113—117.
- [6] KANG Fu-wei, LI Ru-yi, QIAO Xin, et al. Effects of Heat Treatment Processing on the Microstructure and Mechanical Properties of ZL114A Aluminum Alloy[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2019, 24(1): 113—117.
- [7] LIU Yong-qin, JIE Wan-qi, GAO Zhi-ming, et al. Rotary Bending Fatigue Behavior of A356-T6 Aluminum Alloys by Vacuum Pressurizing Casting[J]. China Foundry, 2015, 12(5): 326—332.
- [8] 王狂飞, 张锦志, 李早, 等. 显微缩松缺陷对 ZL114A 热处理合金力学性能的影响[J]. 铸造, 2018, 67(8): 719—723.
- [9] WANG Kuang-fei, ZHANG Jin-zhi, LI Zao, et al. Influence of Porosity Defect on Mechanical Properties of Heat Treated ZL114A Alloy[J]. Foundry, 2018, 67(8): 719—723.
- [10] 王涛, 陈超英, 张喜山, 等. 薄壁铝合金铸件石膏型真空浇注加压凝固铸造工艺[J]. 特种铸造及有色合金, 2012, 32(3): 264—266.
- [11] WANG Tao, CHEN Chao-ying, ZHANG Xi-shan, et al. Production of Thin-walled Aluminum Castings with Gypsum Mold Casting Combining with Vacuum Pouring and Solidification under Pressure[J]. Special Casting &

- Nonferrous Alloys, 2012, 32(3): 264—266.
- [9] 刘栋, 严青松, 芦刚, 等. 交变磁场协同分级加压铸造对 ZL205A 合金致密度的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(10): 1077—1080.
- LIU Dong, YAN Qing-song, LU Gang, et al. Effects of Alternating Magnetic Field and Coordinated Graded Pressure Casting on the Density of ZL205A Alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2019, 39(10): 1077—1080.
- [10] 程运超, 杨光昱, 吕三雷, 等. 石膏型铸造铝合金真空增压凝固和真空自由凝固组织及力学性能[J]. 铸造, 2014, 63(1): 10—14.
- CHENG Yun-chao, YANG Guang-yu, LYU San-lei, et al. Study on Microstructures and Mechanical Properties of Plaster Mould Casting Aluminum Alloy under the Condition of Vacuum Pressurizing Solidification and Vacuum Solidification[J]. China Foundry, 2014, 63(1): 10—14.
- [11] 王元庆, 苏志权, 孙昌建. 熔模石膏型真空增压铸造技术[J]. 铸造技术, 2009, 30(6): 796—799.
- WANG Yuan-qing, SU Zhi-quan, SUN Chang-jian. Investment Plaster Mould Vacuum Pressurizing Casting Technique[J]. Foundry Technology, 2009, 30(6): 796—799.
- [12] 左强, 洪润洲, 周永江, 等. ZL114A 铝合金充型能力的试验与仿真研究[J]. 铸造, 2018, 67(5): 428—431.
- ZUO Qiang, HONG Run-zhou, ZHOU Yong-jiang, et al. Experiment and Simulation of Filling Capacity of ZL-114A Aluminum Alloy[J]. Foundry, 2018, 67(5): 428—431.
- [13] KUMAR, RANA, PUROHIT. Effect of Stirrer Design on Microstructure of MWCNT and Al Alloy by Stir Casting Process[J]. Advances in Materials and Processing Technologies, 2020, 6(2): 372—379.
- [14] 李润霞, 孙继鸿, 郝建飞, 等. 变质处理及挤压铸造对过共晶 Al-Si-Cu-Mg 合金组织与性能的影响[J]. 铸造, 2017, 66(12): 1273—1278.
- LI Run-xia, SUN Ji-hong, HAO Jian-fei, et al. Effect of Modification and Squeeze Casting on the Microstructure and Properties of Hypereutectic Al-Si-Cu-Mg Alloy[J]. Foundry, 2017, 66(12): 1273—1278.
- [15] YAN Qing-song, LU Gang, LUO Gui-ming, et al. Effect of Synergistic Action of Ultrasonic Vibration and Solidification Pressure on Tensile Properties of Vacuum Counter-pressure Casting Aluminum Alloy[J]. China Foundry, 2018, 15(6): 411—417.
- [16] 万里, 刘学强, 胡祖麒, 等. 高真空压铸 AlSi10MnMgFe 合金的组织与力学性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(5): 499—503.
- WAN Li, LIU Xue-qiang, HU Zu-qi, et al. Microstructure and Mechanical Properties of High Vacuum Die Casting AlSi10MnMgFe Alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2014, 34(5): 499—503.