

基于数值模拟的 ZL205A 泵壳铸件金属型 加压凝固工艺研究

樊建勋¹, 陈明伟^{2, 3}

(1. 海装西安局驻西安地区第六军事代表室, 陕西西安 710089; 2. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095;
3. 北京市先进铝合金材料及应用工程技术研究中心, 北京 100095)

摘要: ZL205A泵壳铸件油腔管路多、壁厚截面结构复杂, 采用传统铸造工艺生产周期长、批产合格率低。本文结合ProCAST仿真软件与材料组织性能测试设备对其3D打印砂芯和金属型加压凝固铸造工艺进行了分析研究。ZL205A泵壳铸件在传统重力充型条件下, 2.5 s内完成了整个充型过程, 流动平稳未见明显的卷气、紊流, 冒口区域凝固至19.48 s时呈糊状, 补缩效果受限, 凝固结束时在铸件内部可见明显的缩孔、疏松缺陷。选用3D打印砂芯与金属型浇注模具, 模具预热温度与熔体浇注温度分别调整为220~250 °C和725~730 °C, 充型加载压力和保压时间分别选择为0.4~0.8 MPa和2~3.5 min, 明显减少了ZL205A泵壳铸件内部的疏松及缩孔缺陷; 经T5热处理后铸件本体剖切试样的平均抗拉强度、屈服强度与伸长率分别达到了480 MPa、419 MPa与8%, 主强化相Al₂Cu呈圆盘状形貌, 平均直径约为120 nm, 平均厚度约为20 nm, 在初生 α -Al基体内部弥散析出, Ag元素添加后在初生 α -Al基体内部均匀分布, Zr、Sc元素沿Al₂Cu强化相分散分布。

关键词: 泵壳铸件; 金属型铸造; 加压凝固; ZL205A合金; 力学性能

作者简介:

樊建勋(1981-), 男, 高级工程师, 研究方向为飞机零件设计加工与装配制造。E-mail: 12062768@qq.com

通讯作者:

陈明伟, 男, 高级技师。电话: 010-62497161, E-mail: chenmingwei1972@163.com

中图分类号: TG249.3

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2021)09-1093-08

收稿日期:

2021-06-01 收到初稿,
2021-07-21 收到修订稿。

作为承重结构最常用的金属材料之一, 铝合金密度低、比强度高、比刚度高、耐腐蚀性佳, 且具有优异的加工性能、导热、导电性能, 在军工装备中得到了广泛的应用^[1-6]。金属材料的成形制造工艺主要分为热加工成形与冷加工成形, 作为热加工成形制造工艺之一的铸造工艺, 由于材料利用率高、可成形制造各种形状复杂的构件, 在舰船、火炮、导弹等武器型号中应用广泛^[7-10]。铸造铝合金主要分为铝硅、铝铜、铝镁与铝锌系, 其中铝硅系铸造合金因其优异的工艺流动性和适中的承载结构强度, 应用最为广泛^[11-12]。作为主承结构设计选材时, 一般多选用铝铜系铸造合金, 由于添加了适量的Cu元素及其他稀土元素, 经T5/T6热处理后可获得较高的力学性能。ZL205A铝铜铸造合金作为目前国内成熟铝铜系铸造合金牌号中强度最高的金属材料, 在舰船领域应用广泛。

随着国家“十四五”政策的逐步实施及“军民融合”政策的不断深化, 目前舰船用配套结构制件的需求迎来了爆发式的增长, 采用传统的铸造工艺, 难以满足其研制周期与交付进度需求^[13-15]。本文以ZL205A泵壳铸件为研究对象, 借助数值仿真计算方法完成了其传统重力充型铸造工艺的数值模拟, 结合传统重力充型铸造工艺的仿真计算结果, 开展了3D打印砂芯金属型加压凝固铸造工艺研究, 完成了ZL205A泵壳铸件的浇注试验, 采用OM、CTM8000型万能试验机与TEM完成了ZL205A泵壳铸件的微观组织与力学性能测试分析, 可为铝铜系合金铸件的工艺设计与批量生产提供工艺参考及数据支撑。

1 重力充型铸造工艺设计

表1所示为本试验中所用ZL205A合金材料的化学成分, 为了通过细化晶粒来提

高合金材料的机械强度与塑韧性，在ZL205A合金中添加了0.12%的Sc元素，考虑到ZL205A泵壳铸件需要在海洋环境中长期服役，服役环境温度较高，为了避免ZL205A合金材料在长期服役时产生“过时效”效应，在合金材料中添加了0.04%的Ag元素，可延缓ZL205A合金材料“过时效”效应的发生。表2所示为本试验所用ZL205A合金材料的T5热处理制度。ZL205A泵壳铸件选用重力充型铸造工艺，砂芯采用PEP-SET自硬树脂砂，芯砂粒度为70/140目，吃砂量设计为80 mm，合金熔体采用六氯乙烷进行精炼，六氯乙烷添加量占炉料总重的0.24%~0.3%，采用氩气旋转喷吹进行除气，氩气旋转喷吹时间选择为15~18 min，氩气旋转喷吹流量设计为0.24~0.32 L/min。为了避免砂芯表面依附的水汽在浇注时与熔体反应产生皮下气孔缺陷，浇注前将

自硬树脂砂放置于烘烤炉内进行烘烤处理，烘烤温度为100~120℃，烘烤保温时间为25~30 min，ZL205A泵壳铸件的浇注温度选择为700~710℃。

图1所示为ZL205A泵壳铸件的结构示意图，泵壳铸件主要用于某型舰船润滑密封油路系统，内部存在复杂的油腔管路。ZL205A泵壳铸件长度为342 mm、宽度为186 mm、高度为124 mm，内腔壁厚差异较大，最大壁厚为24 mm，最小壁厚为3.5 mm，油腔管路连接位置，截面结构复杂，在凝固时易受热不均产生疏松类铸造缺陷。

2 重力充型数值仿真结果分析

图2所示为ZL205A泵壳铸件的网格剖分示意图，

表1 ZL205A合金材料的化学成分
Table 1 Chemical composition of ZL205A casting alloy

元素	Cu	Mn	Cd	Ti	Zr	V	B	Ag	Sc	Al
含量	5.0	0.45	0.22	0.18	0.12	0.15	0.02	0.04	0.12	余量

表2 ZL205A合金材料T5热处理制度
Table 2 The T5 heat treatment parameters of ZL205A aluminum alloy

热处理状态	加热温度/℃	保温时间/h	冷却介质	介质温度/℃	加热温度/℃	保温时间/h	冷却介质
T5	540	16	水	45	155	9	空气

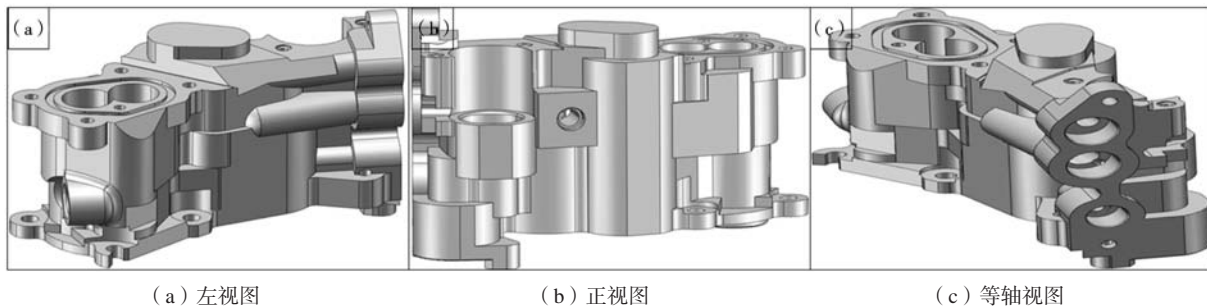


图1 ZL205A泵壳铸件结构示意图

Fig. 1 The structure schematic of ZL205A pump casting

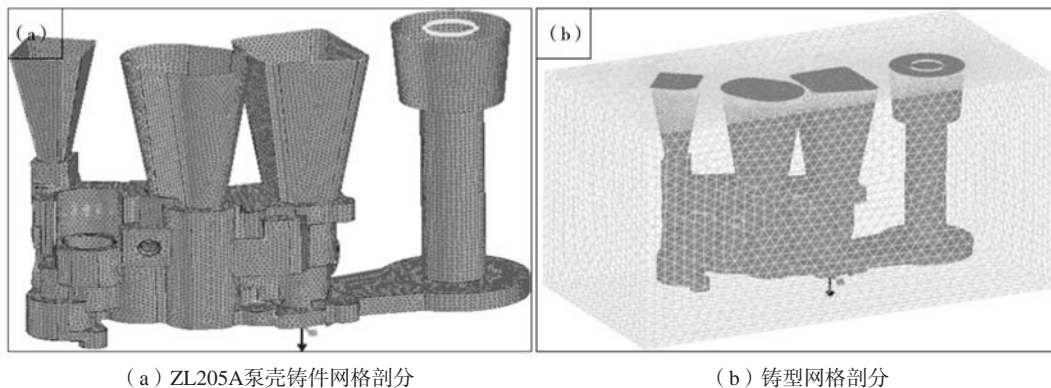


图2 网格剖分示意图

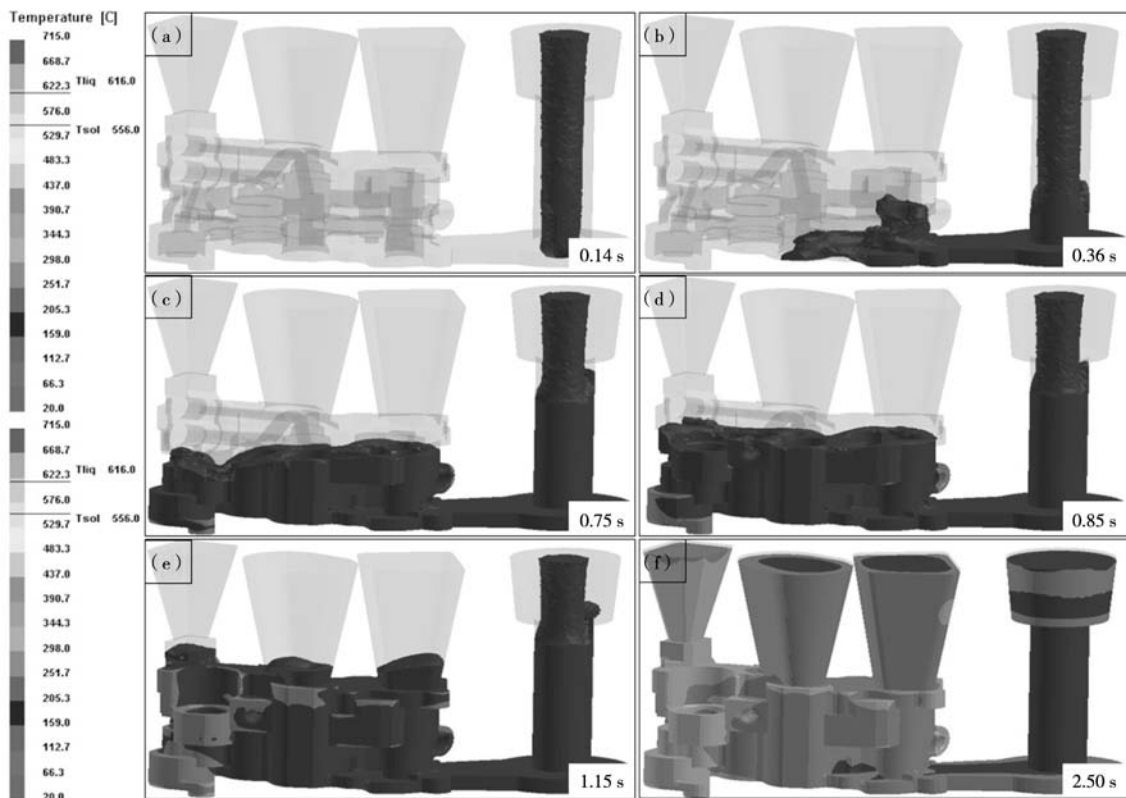
Fig. 2 The schematic of grid division

凝固充型仿真计算分析选用ProCAST软件, ZL205A泵壳铸件的网格剖分尺寸为2.0 mm, 网格剖分数量为213 426; 树脂砂铸型网格剖分尺寸为5.0 mm, 网格剖分数量为84 328; 铸件/铸型界面换热系数设为 $500 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。图3所示为ZL205A泵壳铸件重力充型流动场数值仿真计算结果。如图3a所示, 充型开始时, 合金熔体自直浇道自上而下开始进行充填; 当充型至0.36 s时合金熔体在直浇道内已填充完毕, 沿横浇道开始对泵壳铸件进行充型, 未见明显的卷气、涡流等现象, 见图3b。当浇注至0.75 s时, 泵壳铸件已完成约45%体积的有效填充, 铸件最远端已实现了合金熔体的充填, 见图3c; 随着充型过程的持续进行, 当充型至0.85 s时, 泵壳铸件约80%的体积已实现充填, 见图3d。当充型至1.15 s时, 泵壳铸件本体区域已填充完毕, 见图3e; 当充型至2.50 s时整个重力充型流动过程结束, 合金熔体在重力充型时, 流动有序且平缓, 未见明显的卷气、紊流, 充型过程在2.5 s内完成。

图4所示为ZL205A泵壳铸件重力充型时固相场分布仿真计算结果。泵壳铸件在2.5 s时结束了整个充型流动过程, 开始逐序进行凝固冷却, 在2.54 s时泵壳铸件整体仍呈高温液态, 见图4a; 当凝固至6.43 s时, 泵壳铸件远端区域受铸件/铸型界面换热影响, 开始凝固形

核出现了一定含量的固相分布, 见图4b。由于该泵壳铸件整体浇注系统设计为在铸件上端放置冒口, 因此泵壳铸件的凝固形核从底端区域开始, 沿高度方向自下而上依序凝固, 当凝固至9.54 s时, 泵壳铸件底端区域已出现大量的凝固固相, 此时铸件冒口区域仍呈高温状态, 见图4c; 当凝固至14.66 s时, 泵壳铸件本体区域已基本凝固完毕, 此时凝固补缩完全由冒口区域完成, 见图4d。随着凝固冷却过程的持续进行, 泵壳铸件固相区域不断扩大, 当凝固至19.48 s时, 冒口区域也已开始冷却凝固, 呈糊状区域分布, 此时补缩效果有限, 难以对泵壳铸件进行有效的补缩, 见图4e; 当冷却至49.34 s时, 泵壳铸件整体凝固完毕, 见图4f。由图4重力充型固相场分布仿真计算结果可知: ZL205A泵壳铸件在50 s内完成了自下而上的整体冷却凝固, 凝固速度较快, 在凝固末期时冒口区域呈糊状, 难以对内部的油腔管路进行合理有效的补缩, 导致泵壳铸件内部易产生疏松类缺陷。

图5所示为ZL205A泵壳铸件重力充型凝固时间仿真计算结果, 由图5可知, ZL205A泵壳铸件底部远端区域首先进行凝固冷却, 冒口区域最后完成凝固冷却, 泵壳铸件本体在24 s内基本完成冷却凝固。该泵壳铸件重力充型凝固的Niyama疏松分布计算结果见图6,



(a) 0.14 s; (b) 0.36 s; (c) 0.75 s; (d) 0.85 s; (e) 1.15 s; (f) 2.50 s

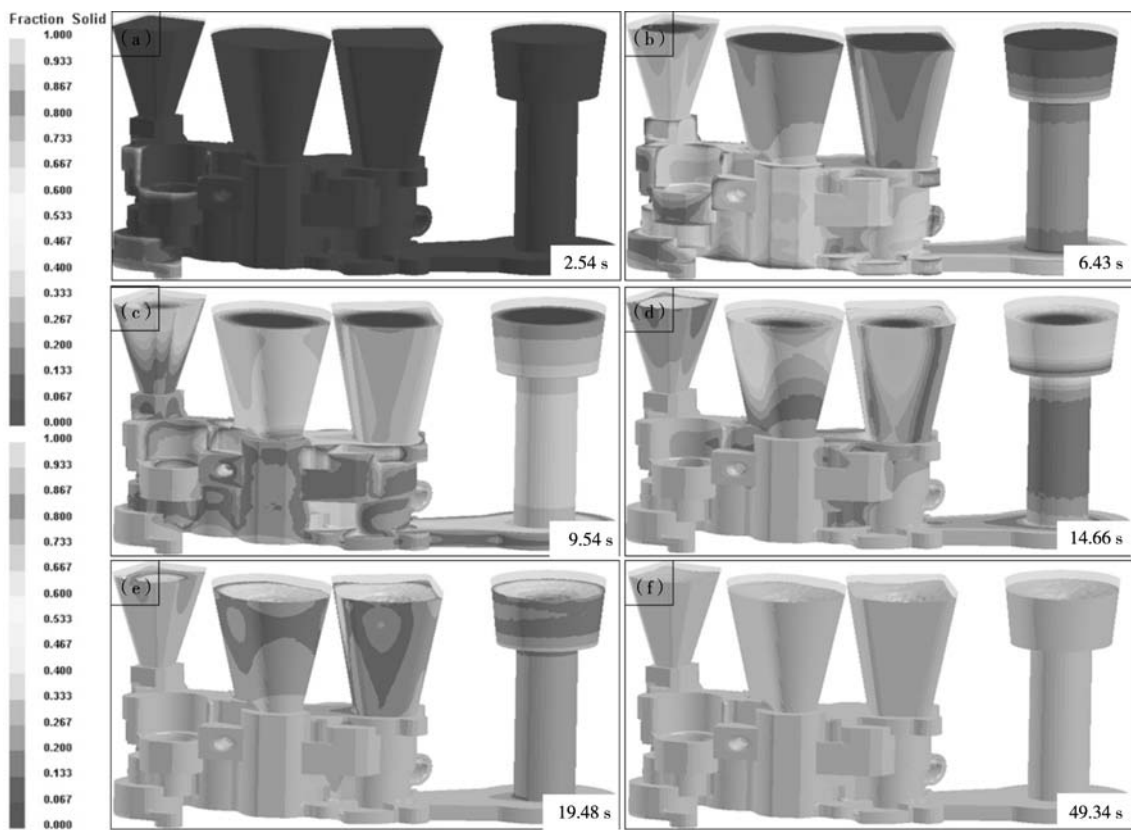
图3 重力充型流动场数值仿真计算结果

Fig. 3 The numerical simulation results of gravity filling flow field

由于泵壳铸件整体凝固时间较短（50 s），且内部油腔管路比较复杂，壁厚差异截面区域面积较大，在凝固末期时冒口区域呈糊状区，难以进行有效的补缩，使泵壳铸件油腔管路连接区域出现了大量缩孔、疏松缺陷，见图6中圆形线框位置所示；冒口区域由于为最后凝固区域，出现了多处较大尺寸的缩孔，见图6中矩形线框位置所示。

3 3D打印砂芯与金属型加压凝固铸造工艺设计

根据图6中常规重力充型凝固的Niyama疏松分布仿真计算结果，本试验设计了3D打印砂芯与金属型加压凝固铸造工艺。考虑到ZL205A泵壳铸件内部的油腔管路比较复杂且整体尺寸较小，开制模具时需要进行



(a) 2.54 s; (b) 6.43 s; (c) 9.54 s; (d) 14.66 s; (e) 19.48 s; (f) 49.34 s

图4 重力充型固相场数值仿真计算结果

Fig. 4 The numerical simulation results of solid phase field for gravity filling casting

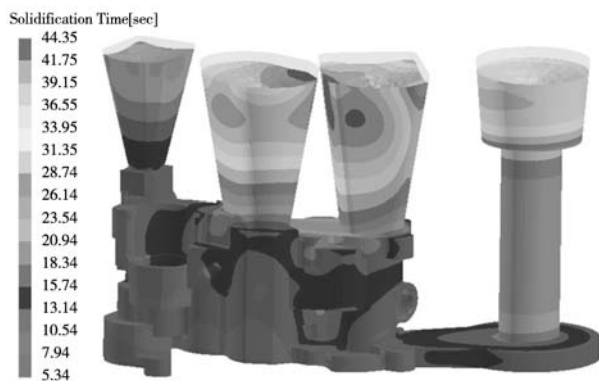


图5 重力充型凝固时间仿真计算结果

Fig. 5 The numerical simulation results of solidification time for gravity filling casting

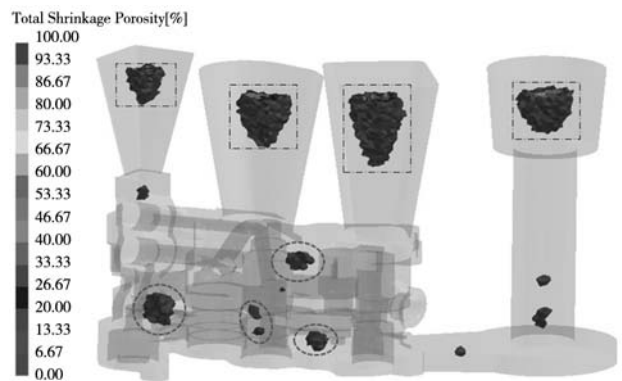
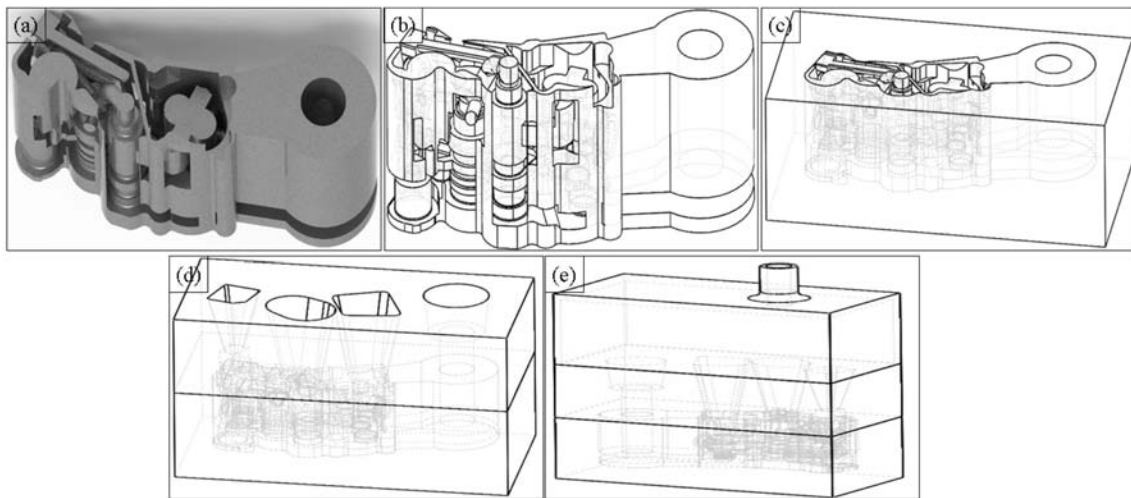


图6 重力充型凝固Niyama疏松分布计算结果

Fig. 6 The calculation results of Niyama shrinkage and porosity for gravity filling casting

多个砂块的组装定位, 工艺复杂且操作性较差, 因此本试验设计了整体3D打印砂芯与金属型加压凝固铸造工艺。图7所示为本试验设计的铸造工艺方案, 图7a所示为采用3D打印制造的整体砂芯, 其三维结构示意图见图7b。将3D打印制造的整体砂芯放置在金属型外模中组合成泵壳铸件的浇注空腔, 见图7c; 通过金属型定位将金属型冒口箱与组合好的金属型浇注空腔装配在一起, 见图7d。在金属型模具型腔表面喷涂耐热涂

料, 涂料的成分配比为: 20%碳酸钙(质量分数, 下同)、15%水玻璃、10%二氧化钛与5%氧化镁, 余量为水。预热金属型模具温度至220~250℃后开始进行浇注, 浇注温度调整为725~730℃, 合金熔体浇注后在3~5 s内将压力注射口金属型模具放置在金属型铸型之上, 随后开始进行加压, 加载压力范围为0.4~0.8 MPa, 保压时间为2~3.5 min, 之后卸压完成ZL205A泵壳铸件的金属型加压凝固成形, 见图7e。



(a) 3D打印砂芯; (b) 整体砂芯结构示意图; (c) 金属型外模与砂芯组装示意图;
(d) 金属型冒口箱组装示意图; (e) 压力注射口与铸型组装示意图

图7 3D打印砂芯与金属型加压凝固工艺设计示意图

Fig. 7 The process design schematic of pressurized permanent mold casting combined with 3D printing sand core

4 金属型加压凝固数值仿真结果分析

图8所示为ZL205A泵壳铸件金属型加压凝固的Niyama疏松分布仿真计算结果。由图8可知: 与砂型重力充型铸造相比, 采用金属型可有效提高铸件的整体冷却凝固速度, 使晶粒细化, 提高ZL205A泵壳铸件的机械强度与伸长率。采用金属型铸造时, 3D打印整体砂芯内部同样存在截面壁厚复杂的油腔管路, 大气环境下凝固同样容易产生疏松缺陷, 而采用加压凝固可在合金熔体呈糊状区时, 通过加载压力提高合金熔体的补缩效果, 增加泵壳铸件内部“非致密”区域的弥合, 从而减少和消除泵壳铸件内部的疏松缺陷, 进而提高铸件的合格率与力学性能。

5 微观组织分析与力学性能测试

本试验对ZL205A泵壳铸件进行了本体剖切, 并进行了力学性能测试, 测试结果见图9。由图可知: ZL205A泵壳铸件经T5热处理后, 本体剖切试样的平均

抗拉强度、屈服强度与伸长率分别为480 MPa、419 MPa和8%。与传统的砂型铸造相比, 采用金属型铸造可有效提高合金熔体的凝固冷却速度; 采用加压凝固, 可在凝固过程中有效消除和减少铸件内部的微观疏松, 提高铸造组织的致密性; 同时3D打印的砂芯也可有效

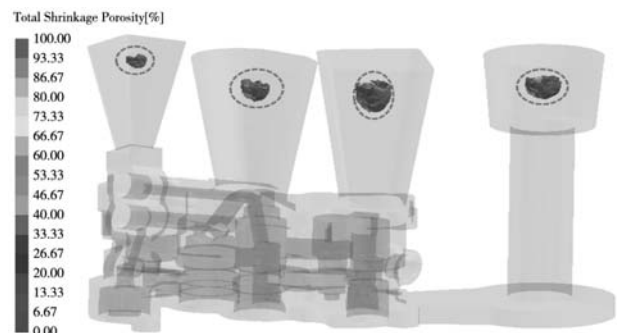


图8 金属型加压凝固的Niyama疏松分布计算结果
Fig. 8 The calculation results of Niyama shrinkage porosity for pressurized permanent mold casting

改善复杂型腔的造型工艺与操作可便性, 综合而言, 采用3D打印砂芯金属型加压凝固铸造工艺可以获得较佳的综合力学性能。本试验采用线切割在ZL205A泵壳铸件本体试样上切取了厚度为0.15~0.20 mm, 长宽均为5.0 mm的薄片, 经机械减薄至100 μm , 在ST624WT型精密凹坑减薄仪上将薄片再减薄至30 μm , 然后用Gatan601型超声波钻从30 μm 薄片上切取直径为3 mm的圆形薄片, 并在Gatan691精密离子减薄仪上减薄成合格的可供观察的电镜样品, 最后由Philips CM12/STEM

电镜完成TEM组织测试, 其中加速电压为120 kV。TEM组织测试结果见图10。由图10可知: ZL205A泵壳铸件金属型加压凝固T5热处理态中的主强化相为 Al_2Cu 相, 其形貌为圆盘状, 平均直径约为120 nm, 平均厚度约为20 nm, 在初生 α -Al基体内部弥散析出, 显著增加了合金材料的强度, 而且ZL205A合金中添加的Ag元素在初生 α -Al基体内部均匀分布, Zr、Sc元素沿 Al_2Cu 强化相表面分布, 起到了良好的晶粒细化效果。

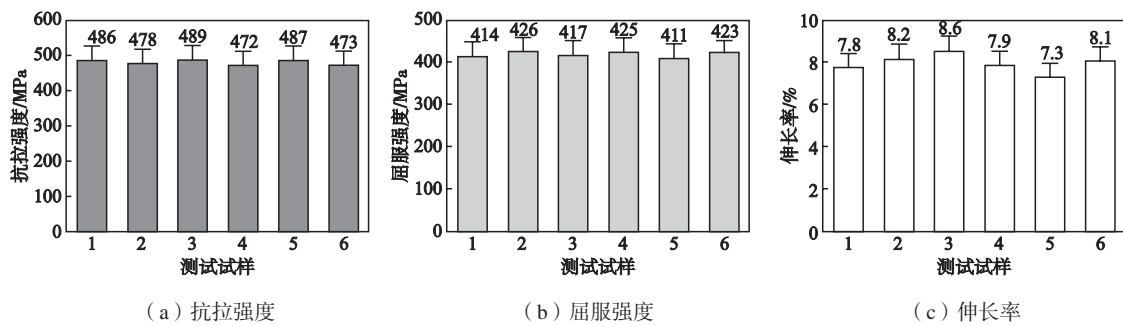


图9 ZL205A泵壳铸件力学性能测试结果

Fig. 9 The test results of mechanical properties of ZL205A pump casing casting

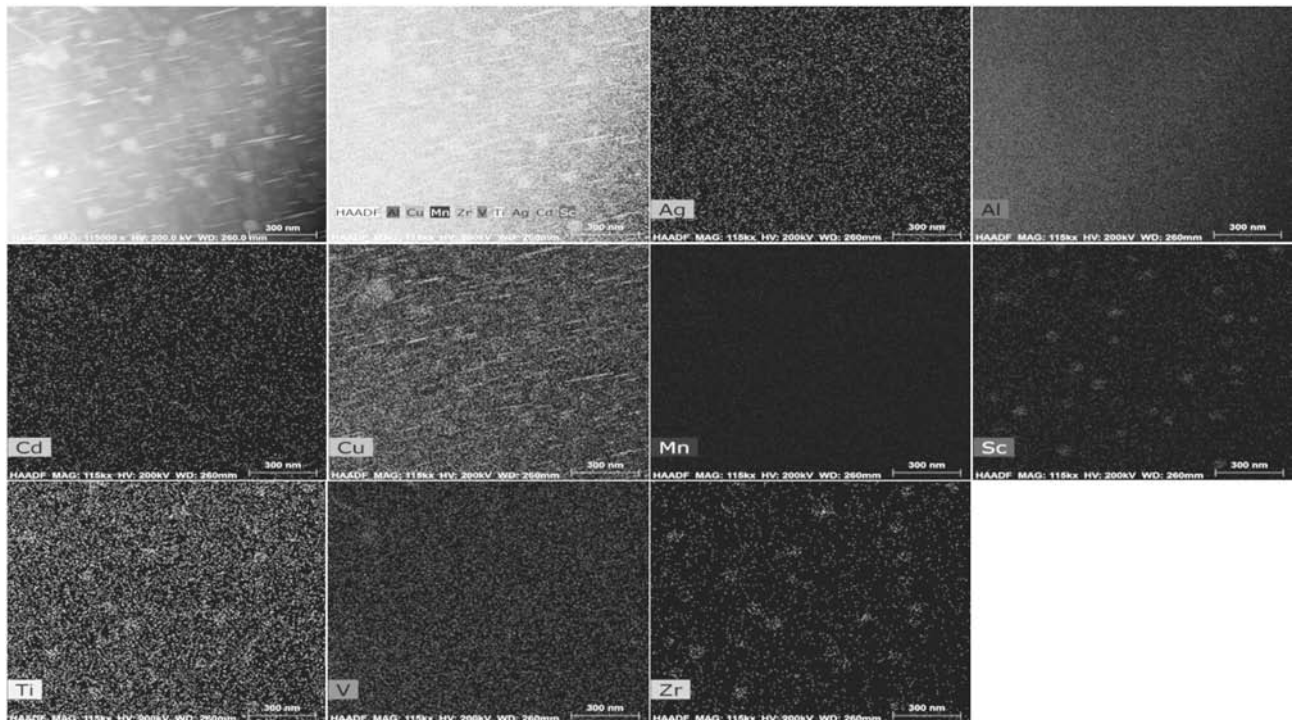


图10 ZL205A泵壳铸件T5态组织的TEM测试分析

Fig. 10 The TEM analysis of microstructure of ZL205A pump casing casting after T5 heat treatment

6 结论

(1) 借助ProCAST软件对ZL205A泵壳铸件重力充型流动场与凝固固相分布场进行了仿真计算分析,合金熔体在2.50 s内完成了整个重力充型过程,流动平稳有序,未见明显的卷气、紊流;当凝固至6.43 s时凝固固相自铸件远端区域受铸件/铸型界面换热影响逐序析出,当凝固至19.48 s时冒口区域凝固冷却呈糊状,补缩效果受限,ZL205A泵壳铸件在50 s内实现了自下而上的顺序凝固,但受冒口补缩效果影响,铸件内部产生了明显的缩孔缺陷。

(2) 结合重力充型凝固仿真计算结果,优化设计了3D打印砂芯与金属型加压凝固铸造工艺,通过金属型外模、金属型冒口箱与金属型浇注空腔的定位组合,实现了ZL205A泵壳铸件的金属型铸造;金属型模

具预热温度为220~250℃,铸件浇注温度为725~730℃,合金熔体浇注完毕3~5 s后加载0.4~0.8 MPa压力,加载压力保压时间为2~3.5 min,实现了ZL205A泵壳铸件的金属型加压凝固,减少了泵壳铸件内部的疏松及缩孔缺陷,产品合格率明显提升。

(3) 采用3D打印砂芯与金属型加压凝固铸造工艺后,ZL205A泵壳铸件经T5热处理本体剖切试样的平均抗拉强度、屈服强度与伸长率分别达到了480 MPa、419 MPa和8%;铸件组织中的主强化相 Al_2Cu 的TEM形貌为圆盘状,平均直径约为120 nm,平均厚度约为20 nm,在初生 $\alpha-Al$ 基体内部弥散析出,添加的Ag元素在初生 $\alpha-Al$ 基体内部均匀分布,Zr、Sc元素沿 Al_2Cu 强化相表面分散分布。

参考文献:

- [1] 陈延伟,刘佳琳,赵亚鹏.铸造铝合金在舰船装备应用中存在的问题及发展趋势[J].铸造,2020,69(4):329-334.
- [2] 彭恒元.ZL205A合金复杂铸件收缩尺寸精确控制[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
- [3] SUMIT Bahl, HU Xiaohua, ERIC Hoar, et al. Effect of copper content on the tensile elongation of Al-Cu-Mn-Zr alloys: Experiments and finite element simulations [J]. Materials Science and Engineering A, 2020, 772: 322-338.
- [4] 樊振中,袁文全,王端志,等.压铸铝合金研究现状与未来发展趋势[J].铸造,2020,69(2):159-166.
- [5] 胡剑,徐烁,杨瑀,等.金属型铸造Mg-Zn-Sn合金的非平衡组织及力学性能[J].特种铸造及有色合金,2021,41(1):114-118.
- [6] 王赞,丁鹏.滤清器底座金属型铸造工艺及模具设计[J].铸造,2021,70(1):104-108.
- [7] MUHAMMAD Azhar, ALI Khan. Simulation based mold design optimization of a spring flap casting [J]. Solid State Phenomena, 2020, 6021: 178-184.
- [8] 王瑾,王帅,高文理.铸造方法对ZL205A-0.1%Sc合金组织和力学性能的影响[J].稀有金属与硬质合金,2019,47(6):37-41.
- [9] WANG Ying, XING Shu-ming, AO Xiao-hui, et al. Microstructure evolution of A380 aluminum alloy during rheological process under applied pressure [J]. China Foundry, 2019, 16: 371-379.
- [10] 何树先,刘雅辉,王俊,等.金属与合金加压凝固研究进展[J].铸造技术,2017,38(6):1253-1257.
- [11] 邵冲,尹法杰,朱小平,等.凝固压力对ZL205A铝合金补缩及组织性能的影响[J].铸造技术,2018,39(3):605-608.
- [12] 严青松,徐帅,芦刚,等.压力对真空差压铸造ZL205A合金致密度的影响[J].特种铸造及有色合金,2014,34(7):719-722.
- [13] 司金梅,吕三雷,李晶晶,等.基于工艺仿真和3DP砂型的大型薄壁电子机箱骨架制造[J].特种铸造及有色合金,2020,40(12):1384-1387.
- [14] 刘高峰,杨晨曦.基于3D打印技术的重卡自动变速器壳体铸件的快速开发[J].铸造技术,2020,41(7):656-659.
- [15] 徐伟业,陈维平,金枫,等.基于数值模拟和砂型3D打印的机匣整体重力铸造工艺研究[J].铸造,2019,68(8):905-910.

Research of Pressurized Permanent Mold Casting for ZL205A Pump Casing Based on Numerical Simulation

FAN Jian-xun¹, CHEN Ming-wei^{2,3}

(1. The Sixth Military Representative Office of Navy, Xi'an 710089, Shaanxi, China; 2. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 3. Beijing Advanced Engineering Technology and Application Research Center of Aluminum Materials, Beijing 100095, China)

Abstract:

Owing to its many oil chamber pipelines and complex wall-thickness cross-section structures, the ZL205A pump casing casting has a long production cycle and low qualification rate of mass production. This paper adopts the ProCAST simulation software and the testing equipment of material structure and performance to analyze and study the pressurized permanent mold casting process combined with the 3D printing sand core. Under the gravity filling conditions, the total filling process is completed in 2.5 s, which is stable and no obvious entrainment and turbulence are observed. When solidified to 19.48 s, the melt in the riser region is changed to the mushy state, leading to a weakened feeding effect, so some shrinkage holes and porosity defects can be seen in the casting when the solidification process is completed. When the pressurized permanent mold casting process is adopted, the internal porosity and shrinkage defects are reduced obviously and even eliminated by adjusting the preheating temperature of permanent mold and the pouring temperature of melt to 220–250 °C and 725–730 °C, respectively, and setting the filling pressure and holding time to 0.4–0.8 MPa and 2–3.5 min, respectively. The average tensile strength, yield strength and elongation of the nomenclature samples after the T5 heat treatment are 480 MPa, 419 MPa and 8%, respectively. In the microstructure of the pump casing, the main strengthening phase Al₂Cu presents a disc-like morphology with an average diameter and thickness of about 120nm and 20nm, respectively, which is evenly distributed in the primary α -Al matrix. In addition, the Ag element is distributed uniformly in the primary α -Al matrix, and the Zr and Sc elements are dispersed and distributed along the Al₂Cu strengthening phase.

Key words:

pump casing casting; permanent mold casting; pressurized solidification; ZL205A aluminum alloy; mechanical properties