DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2023.3112

基于冷冻复合铸型的铝合金铸造工艺研究

梁昊天[1,2],刘　丰[1,2],刘丽敏[2],张国磊[1,2]
(1. 先进成形技术与装备国家重点实验室,北京 100083; 2. 北京机科国创轻量化科学研究院有限公司,北京 100083)

摘　要:随着人们环境保护理念的发展,传统砂型铸造的绿色化已经成为重要的研究方向之一,其中冷冻复合砂型铸造是典型的绿色铸造工艺。本文采用冷冻复合铸型铸造工艺进行了铝合金支架典型件的实验研究。采用铸造工艺数值模拟分析铸造工艺方案,并进行了冷冻复合铸型和传统树脂砂型铸造实验对比。铸件性能分析结果表明,冷冻复合砂型铝合金样件屈服强度提高了 12.4%,抗拉强度提高了 8.8%,伸长率提高了 11.1%,验证了冷冻复合铸型工艺的优越性。

关键词:冷冻复合铸型;数值模拟;金相组织;力学性能

中图分类号: TG292　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2023)11-1056-06

Research on Aluminum Alloy Casting Process Based on Frozen Composite Casting

LIANG Haotian[1,2], LIU Feng[1,2], LIU Limin[2], ZHANG Guolei[1,2]
(1. State Key Laboratory of Advanced Forming Technology and Equipment, Beijing 100083, China; 2. Beijing National Innovation Institute of Lightweight Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: With the development of people's environmental protection concept, the greening of traditional sand casting has become an important research direction, among which frozen composite sand casting is a typical green casting process. In this paper, an experimental study of a typical aluminum alloy bracket was carried out by using the frozen composite casting process. The casting process was analysed by numerical simulation, and an experimental comparison between frozen composite casting and traditional resin sand casting was carried out. The results of casting performance analysis show that the yield strength, tensile strength and elongation of the frozen composite sand mold aluminum alloy sample are increased by 12.4%, 8.8% and 11.1%, respectively, which proves the superiority of the frozen composite casting process.

Key words: frozen composite casting; numerical simulation; metallographic structure; mechanical property

砂型铸造应用范围广,在铸造领域占有较大比重。但其对能源和资源的消耗极大,且易对环境产生污染。目前,绿色铸造、清洁生产已成为铸造行业的重要任务。为实现铸造过程绿色化,中国机械科学研究总院无模铸造团队[1-2]提出了一种数字化无模冷冻铸造成形方法,该技术用水作为砂型黏结剂,在低温环境下直接铣削成形冷冻砂型,组合成冷冻铸型后浇注成形金属件。杨浩秦等[3-4]基于数字化无模冷冻铸造精密成形技术研究了冷冻砂型的高效制备方法,并对 A356 高温铝合金进行浇注实验,确认其铸造性能优于树脂砂型。

然而,冷冻砂型属于单一材质铸型,在传统铸造工艺条件下,铸造工艺中单一材质铸型往往会因结构设计不合理或形状复杂而导致铸造过程中凝固速度不均,使铸件出现缺陷或废品。针对此问题,多材质复合铸型代替传统单一铸型工艺方法可获得高性能、高质量以及结构优良的铸件[5]。刘丽敏等[6-7]系统研究了复杂铸铁件多材质复合铸型工艺机理,获得了多材质复合铸型的调控方法。基于多材质复合铸型的优势,为减少树脂用量,避免水直接与金属接触,中国机械科学研究总院刘丰等[8]提出了一种基于冷冻复合铸型的快速铸造方法,将薄壳树脂砂型外包覆冷冻砂型以提高铸型性能,实现绿色铸造。

铸造仿真技术的应用能有效地对复杂铸件铸造

收稿日期:2023-05-15
基金项目:国家重点研发计划(2021YFB3401200)
作者简介:梁昊天,1997 年生,硕士生.研究方向为机械制造及其自动化.Email:15632579886@163.com
通讯作者:刘　丰,1979 年生,博士,研究员.研究方向为先进成形技术及装备.Email:liufengcam@126.com
引用格式:梁昊天,刘丰,刘丽敏,等.基于冷冻复合铸型的铝合金铸造工艺研究[J].铸造技术,2023,44(11):1056-1061
LIANG H T, LIU F, LIU L M, et al. Research on aluminum alloy casting process based on frozen composite casting[J]. Foundry Technology, 2023, 44(11): 1056-1061

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

工艺进行仿真分析及优化，发现产品缺陷，优化产品设计及生产工艺，缩短开发周期[9-19]。本文通过数值模拟方法，对冷冻复合铸型铸造工艺进行仿真，确认浇注方案合理性。根据实验需求加工冷冻复合铸型以及普通树脂砂铸型进行对比浇注试验，对最终的铸件进行成形质量检测、力学性能分析。

1　冷冻复合砂型铸造工艺设计

选取的典型件为某铝合金支架，铸件尺寸为400 mm×300 mm×130 mm，铸件所有壁厚均为15 mm，材料为ZL114A。浇注系统包含直浇道、横浇道及补缩冒口，冷冻复合铸型的设计及装配如图1a所示，冷冻复合砂型上模采用树脂砂，下模由树脂砂薄壳和冷冻砂型组合而成，树脂砂薄壳壁厚均为15 mm。普通树脂铸型的设计及装配如图1b所示。

2　冷冻复合铸型铸造工艺仿真

2.1　材料参数及边界条件

在模拟之前需要得到砂型的导热系数及比热容随温度变化的曲线。型砂采用承德北雁新材料科技有限公司生产的目数为70/140的硅砂，孔隙率为41.6%，密度1 547.6 kg/m^3；圣泉酚脲烷自硬树脂NP-101HB及NP-102HB，自硬树脂NP-101HB、NP-102HB的加入量均为硅砂质量的1%，催化剂采用圣泉自硬催化剂NP-103E，NP-103E的加入量为自硬树脂NP-101HB质量的0.3%，用于加快树脂砂型固化速度；采用纯净水，冷冻砂型含水量为15%，冷冻温度为-40 ℃。其中树脂砂型的导热系数和比热容随温度变化曲线采用湘潭湘仪股份有限公司的DRX-Ⅲ型热线法导热系数测试仪进行测量，结果如图2所示。冷冻砂型的导热系数通过热探针法测量获得，冷冻砂型的比热容则是通过比热容体积混合方法计算获得，计算方法如式(1)所示，结果如图3所示。由于冷冻砂型在加热过程中出现冰晶粘结桥融化蒸发的现象，因此其导热系数与比热容变化较大。

$$c=c_{\mathrm{dry}}+\varepsilon_0(c_{\mathrm{ice/water}}-c_{\mathrm{air}})\frac{w(1-\varepsilon_0)\rho_{\mathrm{dry}}}{(1-w)\varepsilon_0\rho_{\mathrm{ice}}} \tag{1}$$

式中，ε_0为干砂的孔隙率；w为纯冰质量分数；ρ_{dry}为干砂的密度，kg/m^3；ρ_{ice}为冰的密度，kg/m^3。c为估算冷冻砂型比热容，J/(kg·K)；c_{dry}为含孔隙干砂的比热容，J/(kg·K)；$c_{\mathrm{ice/water}}$为纯冰/水比热容，J/(kg·K)；c_{air}为空气比热容，J/(kg·K)。

对冷冻复合铸型的铸造过程进行模拟仿真，其边界条件如表1所示。计算截至条件为整个铸件所有区域最高温度降至400 ℃时。冷冻复合铸型的初始温度为-40 ℃。金属液浇注温度为710 ℃。在5 s内完成充型，充型率为99%。铸型的外部条件为常规的空气冷却，室温约为24 ℃。

2.2　模拟结果分析

按以上条件对冷冻复合铸型进行浇注模拟，模拟结果如图4所示。对比金属液在浇注后1~4 s时的流速图，可以看到金属液在充型过程中，铸件造型

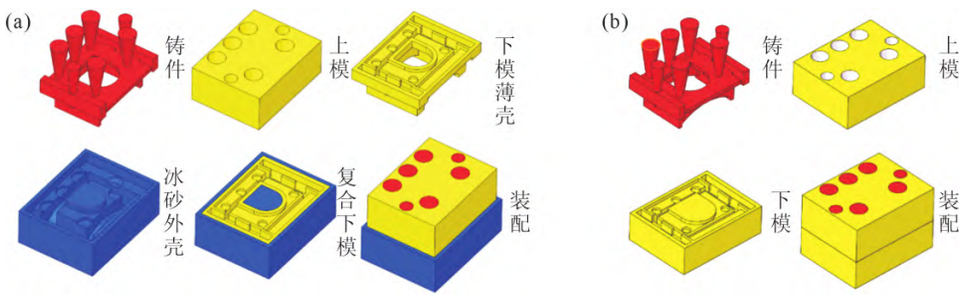

图1　铸件铸型装配图：(a) 冷冻复合铸型，(b) 树脂砂铸型

Fig.1　Assembly drawing of the casting mold: (a) frozen composite mold, (b) resin sand mold

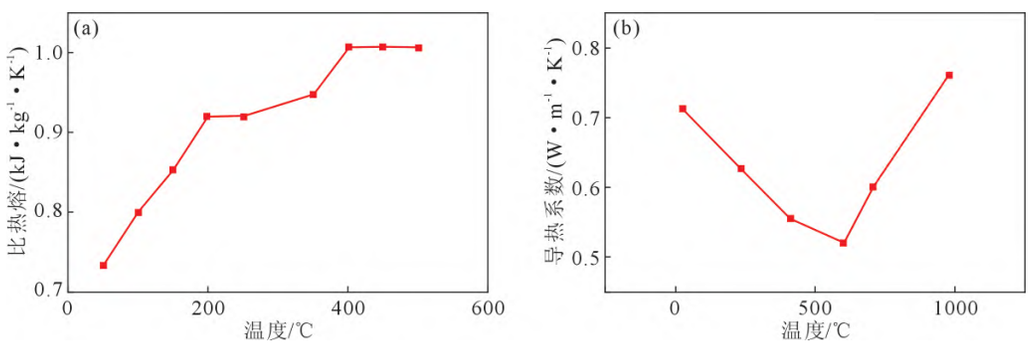

图2　树脂砂热物性参数随温度变化规律：(a) 导热系数，(b) 比热容

Fig.2　Variation in thermal property parameters of resin sand with temperature: (a) thermal conductivity, (b) specific heat capacity

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

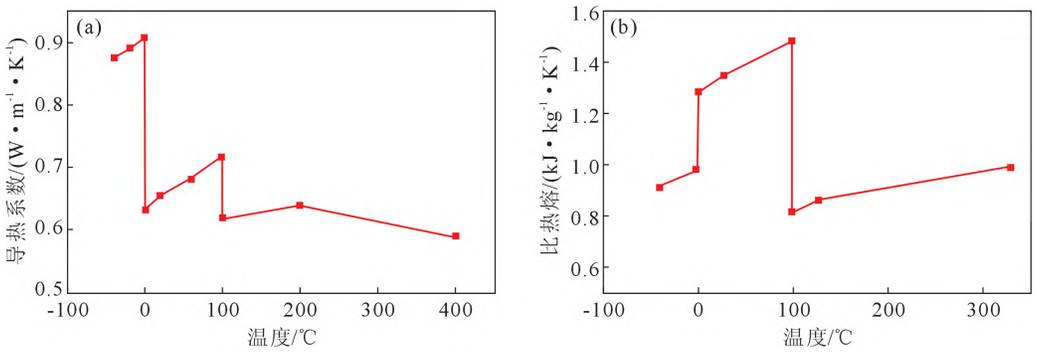

图 3 冷冻砂热物性参数随温度变化规律:(a) 导热系数,(b) 比热容

Fig.3 Variation of thermal physical property parameters of the frozen sand with temperature: (a) thermal conductivity, (b) specific heat capacity

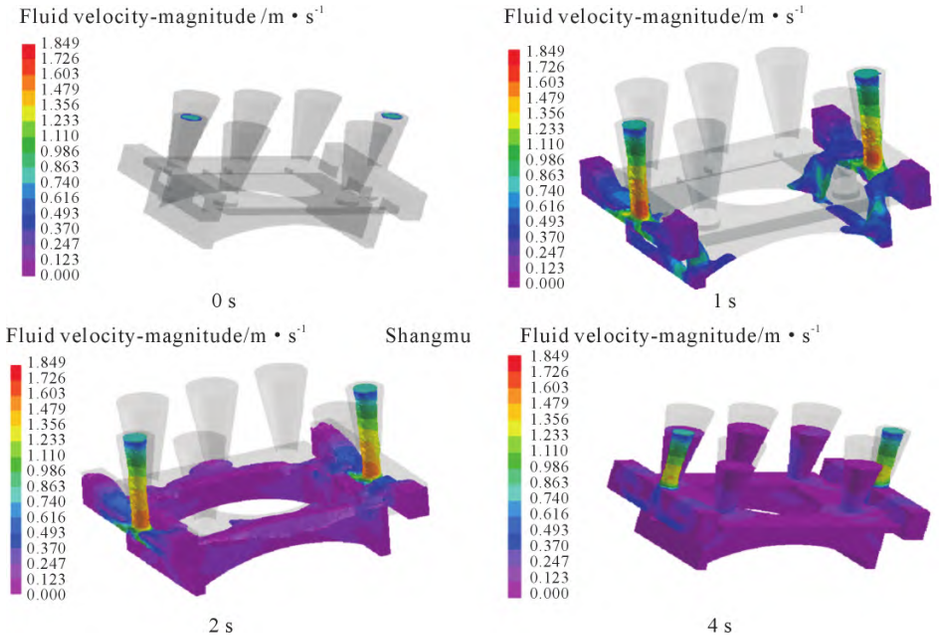

图 4 浇注速度场

Fig.4 Pouring velocity field

表1 数值模拟边界条件

Tab.1 Boundary conditions of the numerical simulation

边界条件类型	数值
铸型初始温度	-40 ℃
计算截至条件	铸件冷却至 400 ℃
初始浇注温度	710 ℃
充型时间	5 s
铸型外部环境	空气冷却
充型率	99%
树脂砂型与铸件界面换热系数	300 W/(m²·k)
冷冻砂型与空气界面换热系数	300 W/(m²·k)
冷冻砂型与树脂砂型界面换热系数	500 W/(m²·k)

部分流动较为缓慢,能够避免浇注过程中金属液流速过快造成夹砂等问题,浇道部分金属液则流速较快,浇注时间的设定及浇道大小设计较为合理。

缩松及缩孔是铸件的主要缺陷,其数量和分布主要取决于浇注系统是否合理。因此以铸件主要区域是否出现缩松为衡量浇注系统性能的指标。图 5 为凝固结束后的缩松分布图,可以看出,缩松主要

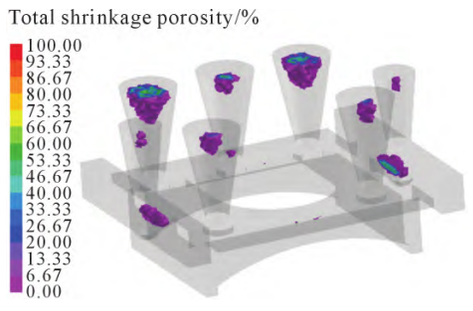

图 5 铸件缩松分布

Fig.5 Shrinkage distribution of casting

分布于补缩冒口内,少量分布于直浇道内,铸件内部无明显缩松缩孔,满足使用要求。

由图 6 所示的铸件凝固时间分布进一步分析可知,冒口处金属液体的凝固时间最长,代表此部位金属液是最后凝固的, 弥补铸件凝固过程中产生的缺陷,可以很好地对铸件区域进行补缩,因此铸造工艺设计较为合理。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

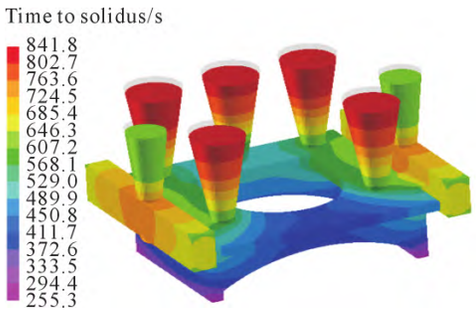

图 6 铸件凝固时间
Fig.6 Solidification time of the casting

3 冷冻复合铸型铸造及铝合金件性能测试

3.1 铸型制造及浇注试验

为了研究冷冻复合铸型是否能提高铸件性能，对冷冻复合铸型及普通树脂砂铸型进行浇注对比实验。铸型共 2 套，一套为冷冻复合铸型，上模与下模薄壳采用普通树脂砂切削加工而成，在下模薄壳外包裹含水量 15%(质量分数)的湿砂型送入冷库-40 ℃冷冻 12 h，如图 7a 所示。另一套为普通树脂砂铸型，采用普通树脂砂型切削加工，如图 7b 所示。

ZL114 浇注温度为 710 ℃，在浇注过程中，使用热电偶分别对铸件温度进行监控，以研究两种模具是否对铸件冷却过程有影响。热电偶均安装在铸件中心位置。对冷冻复合铸型以及普通树脂砂铸型温度曲线进行采集，采集结果如图 8 所示。在冷却初始阶段有一个快速降温的过程，拟合后冷冻复合铸型浇注铸件的激冷速率为 0.538 ℃/s，普通树脂砂铸型浇注铸件的激冷速率为 0.386 ℃/s，冷冻复合铸型在凝固过程初始阶段温度下降速度明显高于普通树脂砂铸型，说明相较于普通树脂砂铸型，冷冻复合铸型激冷效果要明显优于树脂砂铸型，有利于铸件成形过程中晶粒组织的细化。而在铸件快速降温之后，由于冷冻复合砂型中靠近树脂砂型部分砂型水分蒸发变为干砂，其蓄热能力远小于树脂砂型，因此冷冻复合铸型的温度下降速率低于树脂砂铸型，起到了良好的保温效果，防止铸件冷却速度过快导致应力集中产生铸件缺陷。铸件成品如图 9 所示，铸件形状完好，表面光滑，无明显缺陷。

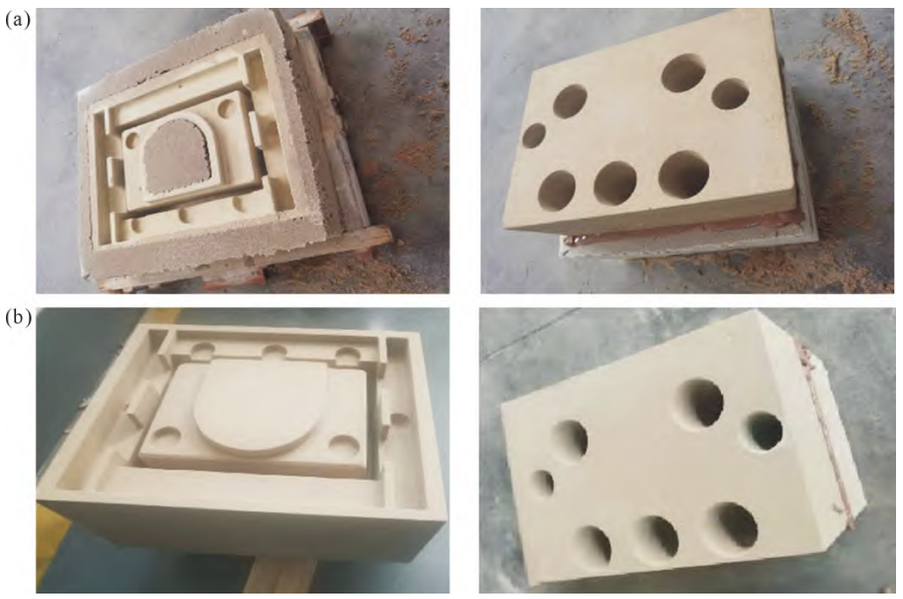

图 7 铸型装配：(a) 冷冻复合铸型，(b) 树脂砂铸型
Fig.7 Mold assembly: (a) frozen composite mold, (b) resin sand mold

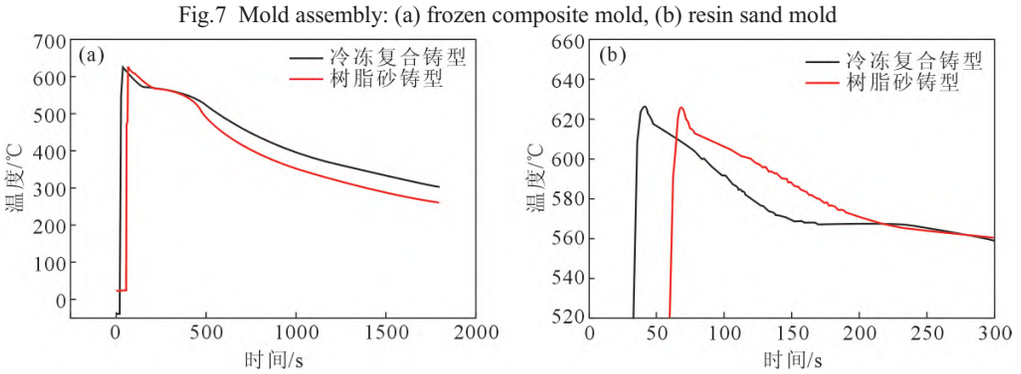

图 8 铸件凝固过程温度曲线：(a) 全程温度曲线，(b) 局部温度曲线
Fig.8 Temperature curve of the casting solidification process: (a) whole temperature curve, (b) local temperature curve

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

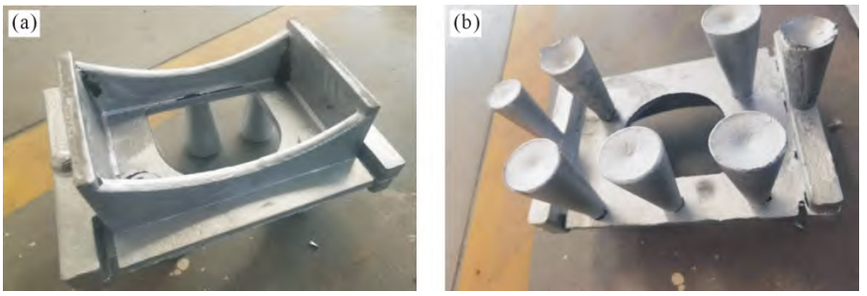

图 9 铸件成品:(a) 冷冻复合铸型铸件,(b) 树脂砂铸型铸件
Fig.9 Finished castings: (a) frozen composite castings, (b) resin sand castings

3.2 铸件性能检测

对浇注后的铸件进行 T6 热处理，提高铸件的力学性能,并对热处理后的典型件进行取样。每个典型件取出 8 个拉伸试样,直径为 10 mm,用来测量抗拉强度、屈服强度和伸长率。每个典型件中取出 4 个 10 mm×10 mm×10 mm 的方块,进行金相组织观察,取样方案如图 10 所示。

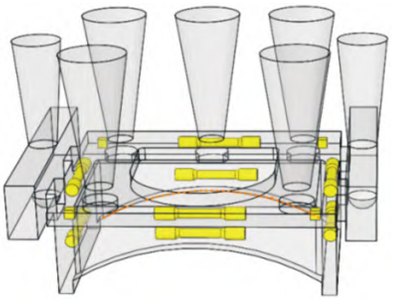

图 10 取样方案
Fig.10 Sampling scheme

首先研究冷冻复合铸型和普通树脂砂铸型对铸件屈服强度、伸长率、抗拉强度的影响。选用美国美特斯公司生产的 MTS Landmark 370.10 型通用实验机测试拉伸试样的抗拉强度、屈服强度及伸长率，按国家标准 GB/T 228.1-2021 金属材料室温拉伸方法对试样进行拉伸试验。测试结果如表 2 所示。由表 2 可知,冷冻复合铸型浇注出的样件相较于普通树脂砂型浇注出的样件屈服强度提高了 12.4%,抗拉强度提高了 8.8%,伸长率提高了 11.1%,铸件性能有了明显提高。

从典型件中取出的金相试样,经砂纸研磨和机械抛光后，利用奥林巴斯公司生产的 BX53M 金相显微镜进行观察,并拍摄金相图片,同时在 200 倍放大条件下,对试样部分微观区域进行拍摄。由图 11 可知,ZL114A 铸造铝合金的组织主要由 α-Al、片层状的共晶硅、Mg_2Si 及杂质铁组成。对比冷冻复合铸型浇注出的铸件和树脂砂铸型浇注出的铸件金相图可以明显看出,冷冻复合铸型浇注出的铸件 α-Al 晶粒明显要细于树脂砂铸型浇注出的铸件，并且其晶粒分布更加均匀。由图 8 温度曲线图可知,冷冻复合铸型在浇注过程中激冷速率要明显大于树脂砂铸型,快速的激冷效果使得铸件在快速凝固过程中,晶粒组织更加细化,可以有效提高铸件的力学性能。

表2 ZL114A合金力学性能(T6热处理)
Tab.2 Mechanical properties of the ZL114A alloy (T6 heat treatment)

	屈服强度 /MPa	抗拉强度 /MPa	伸长率 /%
冷冻复合铸型	217	310	5.0
普通树脂砂铸型	193	285	4.5
提高率	12.4%	8.8%	11.1%

4 结论

(1)冷冻复合铸型使铸件性能优于传统砂型铸造,铸件屈服强度提高了 12.4%,抗拉强度提高了8.8%,伸长率提高了 11.1%。

(2)冷冻复合铸型浇注出的铸件 α-Al 晶粒明显细于树脂砂铸型浇注出的铸件，并且晶粒分布更加均匀。

(3)对比浇注试验表明了冷冻复合铸型工艺的

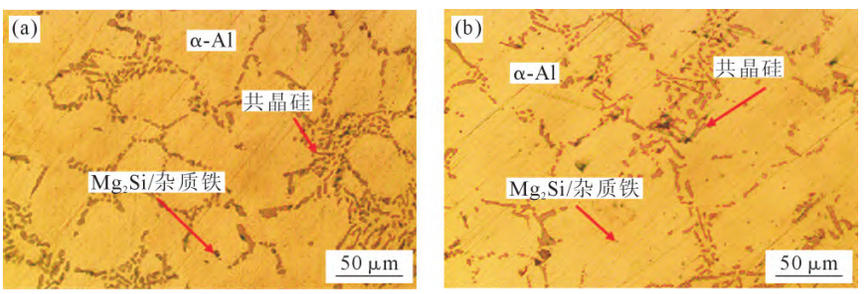

图 11 ZL114A 金相组织:(a) 冷冻复合铸型铸件,(b) 树脂砂铸型铸件
Fig.11 Metallographic structure of ZL114A: (a) frozen composite casting, (b) resin sand casting

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

可行性与优越性。

参考文献：

[1] 单忠德，杨浩秦，刘丰，等. 数字化无模冷冻铸造成形方法研究[J]. 稀有金属材料与工程，2020, 49(12): 4321-4328.
SHAN Z D, YANG H Q, LIU F, et al. Research on forming method of digital patternless freezing casting[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(12): 4321-4328.

[2] SHAN Z D, YANG H Q, LIU F, et al. Performance of digital patternless freeze-casting sand mould[J]. China Foundry, 2020,17: 308-313.

[3] 杨浩秦，单忠德，刘丰，等. 冷冻铸造 A356 铝合金微观组织分析[J]. 工程科学学报，2022, 44(8): 1331-1337.
YANG H Q, SHAN Z D, LIU F, et al. Microstructure analysis of freeze-cast A356 aluminum alloy[J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(8): 1331-1337.

[4] 杨浩秦，单忠德，刘丰，等. 冷冻砂型高精高效制备过程研究[J]. 中国机械工程，2021, 32(10): 1254-1259.
YANG H Q, SHAN Z D, LIU F, et al. Study on high precision and high efficiency preparation processes of frozen sand molds[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(10): 1254-1259.

[5] 单忠德，刘丰，李新亚，等. 一种铸件的自适应铸型制造方法：CN200910162301.3[P]. 2011-03-30.
SHAN Z D, LIU F, LI X Y, et al. A self-adaptive casting mold manufacturing method for castings: CN200910162301.3[P]. 2011-03-30.

[6] 刘丽敏，单忠德，杨颜绮，等. 优质高效砂型/芯复合成形工艺研究[J]. 铸造技术，2019, 40(12): 1281-1285.
LIU L M, SHAN Z D, YANG Y Q, et al. Study on the technology of high-quality and high-efficiency sand mold/core hybrid forming [J]. Foundry Technology, 2019, 40(12): 1281-1285.

[7] 刘丽敏，单忠德，刘丰，等. 基于多材质复合铸型的铸铁件铸造工艺数值模拟与试验研究[J]. 铸造，2018, 67(11): 955-960.
LIU L M, SHAN Z D, LIU F, et al. Numerical simulation and experimental research on multi-material hybrid sand-mold process of iron castings[J]. Foundry, 2018, 67(11): 955-960.

[8] 刘丰，刘丽敏，梁昊天. 一种基于冷冻复合铸型的快速铸造方法：CN114850400A[P]. 2022-08-05.
LIU F, LIU L M, LIANG H T. A fast casting method based on frozen composite casting: CN114850400A[P]. 2022-08-05.

[9] 刘瑞杰，王成军，刘志魏. 基于 ProCAST 轴座砂型铸造数值模拟研究[J]. 铸造技术，2016, 37(1): 87-90.
LIU R J, WANG C J, LIU Z W. Numerical simulation of shaft seat in sand casting based on ProCAST[J]. Foundry Technology, 2016, 37(1): 87-90.

[10] 刘明泽，桑宝光，陈国鑫，等. 基于有限元的压铸模寿命预测和工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金，2023, 43(2): 169-173.
LIU M Z, SANG B G, CHEN G X, et al. Service life prediction and process optimization of die casting die based on finite element method[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(2): 169-173.

[11] 王孝国，刘挺，吴煜，等. 基于 ProCAST 的悬梁铸造模拟及工艺优化[J]. 农业技术与装备，2023(1): 12-15.
WANG X G, LIU T, WU Y, et al. Casting simulation and process optimization of suspension beams based on ProCAST[J]. Agricultural Technology & Equipment, 2023(1): 12-15.

[12] 张云平. 基于 ProCAST 的制动铸件精确成形数值模拟与工艺提升[J]. 精密成形工程，2022, 14(9): 97-103.
ZHANG Y P. Casting Numerical simulation of butterfly valve for exhaust brake based on ProCAST[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 14(9): 97-103.

[13] 党云鹏，曹岩. 基于 ProCAST 的 ZL205A 合金弹体传动件铸造工艺优化[J]. 特种铸造及有色合金，2022, 42(2): 162-166.
DANG Y P, Cao Y. Casting process optimization of ZL205A alloy projectile transmission parts based on ProCAST software[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(2): 162-166.

[14] 孙向阳，仇光宏，黄明，等. 基于 ProCAST 数值模拟技术降低离心复合铸铁轧辊底波衰减发生率[J]. 中国铸造装备与技术，2022, 57(1): 97-101.
SUN X Y, QIU G H, HUANG M, et al. Reducing occurrence rate of bottom wave attenuation of centrifugal composite cast iron roll based on ProCAST numerical simulation technology[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2022, 57(1): 97-101.

[15] 王晓磊，孙少纯，李燕杰. 低压铸造船用铝合金电气箱工艺研究[J]. 特种铸造及有色合金，2021, 41(7): 913-917.
WANG X L, SUN S C, LI Y J. Low pressure casting process of marine aluminum alloy electrical box based on ProCAST software [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(7): 913-917.

[16] 周涛. 基于 ProCAST 的铝合金凸轮轴盖压铸模具结构及工艺优化[D]. 重庆：重庆交通大学，2021.
ZHOU T. Structure and process optimization of high pressure die-casting for aluminum alloy camshaft cover based on ProCAST [D]. Chongqing: Chongqing jiaotong university, 2021.

[17] 卢阳光，赵磊，石静静，等. 基于 ProCAST 的铝合金回转支承内圈铸造工艺数值模拟及优化[J]. 热加工工艺，2023-07-19.
LU Y G, ZHAO L, SHI J J, et al. Numerical simulation and optimization of casting process for aluminum alloy slewing bearing inner ring based on ProCAST[J]. Hot Working Technology, 2023-07-19.

[18] 莫文锋. 基于 ProCAST 汽车铝合金轮毂铸造数值模拟及其优化[J]. 河南科技，2022, 41(4): 29-35.
MO W F. Numerical simulation and optimization of aluminum alloy wheel casting based on ProCAST[J]. Journal of Henan Science and Technology, 2022, 41(4): 29-35.

[19] 王成军，韩董董，陈蕾. 基于 ProCAST 的铝合金缸体压铸工艺数值模拟[J]. 特种铸造及有色合金，2015, 35(10): 1055-1058.
WANG C J, HAN D D, CHEN L. Numerical simulation of die casting al alloy cylinder based on the ProCAST software [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2015, 35(10): 1055-1058.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net