

大尺寸轴对称铸件铸造变形预测及控制研究

刘闪光^{1,2} 陈军洲^{1,2} 潘俊杰^{1,2} 何维维^{1,2} 李大奎^{1,2} 王卫凯^{1,2} 王海龙^{1,2} 张景亮^{1,2} 黄粒^{1,2}

(1. 中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095; 2. 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 以大尺寸轴对称铸件为研究对象,通过模拟仿真和试验验证相结合的方式,研究了浇注系统对铸件冶金质量、铸造应力和变形的影响。结果表明,大尺寸铸件充型流程长,合金液前沿温度降幅大,造成充型后温度场沿周向分布不均匀,不同区域凝固和冷却速度差异大。冷却速度快的区域,铸造应力大、铸件变形量大。冷却速度慢的区域,铸造应力相对较小、铸件变形量小。通过优化浇注系统,确保铸件温度场沿圆周方向均匀分布,不同区域冷却速度和铸造应力趋于一致,可显著降低铸件变形,从而获得尺寸合格的铸件。

关键词 铝合金;大尺寸铸件;铸造应力;铸造变形;数值模拟

中图分类号 TG245;TP311

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.T20250436

Prediction and Control of Casting Deformation in Large-sized Axisymmetric Castings

LIU Shanguang^{1,2}, CHEN Junzhou^{1,2}, PAN Junjie^{1,2}, HE Weiwei^{1,2}, LI Dakui^{1,2}, WANG Weikai^{1,2},
WANG Hailong^{1,2}, ZHANG Jingliang^{1,2}, HUANG Li^{1,2}

(1. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095; 2. Beijing Advanced Engineering Technology and Application Research Center of Aluminum Materials, Beijing 100095)

Abstract: The influence of pouring system on metallurgical quality, casting stress and deformation of large-sized axisymmetric castings was investigated by combining simulation and experimental verification. The results show that with the long filling process of large-sized castings, the temperature at the front of the alloy liquid is decreased significantly, resulting in uneven temperature distribution along the circumference after filling, and significant differences in solidification and cooling rates in different regions. The areas with fast cooling rate have high casting stress and large deformation of castings, while the areas with slow cooling rate has relatively low casting stress and small deformation. By optimizing the pouring system, it is ensured that the temperature field of the casting is evenly distributed along the circumferential direction, and the cooling rate and casting stress in different areas tend to be consistent, which can significantly reduce the deformation of the casting and obtain castings with qualified dimensions.

Key Words: Aluminum Alloy, Large-sized Castings, Casting Stress, Casting Deformation, Numerical Simulation

ZL205A 合金是铸造 Al-Cu 系合金,室温抗拉强度大于 520 MPa,伸长率大于 5%^[1],被广泛应用于承受大载荷的铸件,如飞机挂梁、框、肋、支臂及导弹上联接框、火箭发动机上的前裙、后裙等重要承力件。作为 Al-Cu 系合金,ZL205A 合金的凝固结晶温度范围较宽,流动性不及 Al-Si 系合金,易形成分散性疏松,偏析以及热裂倾向大^[2]。因此,针对 ZL205A 合金的成分、工艺一直是研究者关注的热点^[3-13]。

然而,针对 ZL205A 合金大尺寸铸件铸造应力和变

形控制方面的研究报道较少。我国高端装备制造业的发展对大尺寸、轻量化、复杂结构件的综合性能和尺寸精度要求不断提高。结构件也逐步向大型化发展,很多原来采用锻件加工后以焊接或者螺栓连接的结构件均开始改用铸件整体成形^[14-17]。因此,高强韧、大型复杂结构件低应力制造和尺寸控制技术受到广泛关注。铸造过程涉及液态收缩、液固转变、固态收缩、固态相变、铸型约束等诸多因素,导致铸件变形不可避免^[18]。常用的消除或减小铸件变形的的方法包括,模具反变形

收稿日期:2025-11-25;修订日期:2026-01-29

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2023YFB3711905)

第一作者:刘闪光,男,1983 年出生,高级工程师,E-mail: liusg621@126.com

通信作者:黄粒,男,1986 年出生,高级工程师,E-mail: hl_biam@163.com

引用格式:刘闪光,陈军洲,潘俊杰,等. 大尺寸轴对称铸件铸造变形预测及控制研究[J]. 特种铸造及有色合金,2026,46(10):1 531-1 536.

LIU S G, CHEN J Z, PAN J J, et al. Prediction and control of casting deformation in large-sized axisymmetric castings[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(10): 1 531-1 536.

设计、增加加强肋、优化浇注工艺以及在热处理过程校正等^[19-23]。受到铸件需求量的限制,科研生产单位更多依赖热处理过程校正^[24]。然而,当铸件毛坯变形量较大时,热处理淬火会进一步加剧铸件的变形程度,造成校正困难,甚至出现开裂,导致铸件报废。此外,校正的变形量过大时,在时效处理后的3~6个月内会出现缓慢回弹现象,造成铸件尺寸不合格。因此,消除或减小铸态构件的变形量,避免在热处理淬火过程累积变形具有积极意义。

铸件在凝固过程中由于温度的不均匀分布会产生热应力,而且凝固后的铸件内部会有残余的热应力,这些应力对铸件的质量和寿命会产生重大影响^[25-26]。本研究以一种高强韧ZL205A合金大尺寸轴对称铸件为研究对象,借助ProCAST仿真软件,观察流场、温度场及应力场的变化,预测冶金缺陷和尺寸精度,并分析其形成原因,进而优化设计工艺,实现大尺寸轴对称铸件冶金质量和尺寸精度控制的目的,旨在为相关研究提供参考。

1 铸造工艺设计

1.1 铸件结构特点及技术要求

大尺寸轴对称铸件的结构见图1。该铸件结构特点:①铸件外廓尺寸大($\phi 1\ 950\text{ mm}$)。②铸件壁厚大(40 mm),且存在厚大肋结构。铸件主要技术指标要求为:①冶金质量满足HB963-2005Ⅱ类铸件要求。②本体切取力学性能(随机取样)满足 $\sigma_b \geq 410\text{ MPa}$, $\delta_5 \geq 6\%$ 。③尺寸精度满足HB6103-2004的CT9级要求,平面度小于1.5 mm。④合金材质为ZL205A合金。

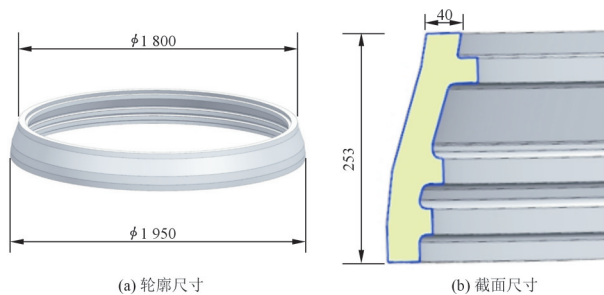


图1 大尺寸轴对称铸件结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of large-sized axisymmetric casting structure

1.2 铸造工艺分析

1.2.1 浇注方法

对于大型结构件,重力自由浇注具有设备投入小、生产成本低、工艺简单以及操作灵活等特点。本研究设计的铸件直径和壁厚较大,适合采用重力自由浇注成形。

1.2.2 浇注系统设计

(1)工艺设计要点 通过在直浇道底部设置浇口窝、横浇道上设置陶瓷过滤网等措施,避免合金液自上而下充填直浇道产生的飞溅、夹杂、卷气等缺陷。在铸件底部,沿铸件周向设置环形横浇道,在环形横浇道上,按一定间距设置立筒和缝隙浇道。合金液通过立筒和缝隙浇道充填铸件型腔。缝隙浇道一直延伸至铸件顶部的冒口。冒口为连续式冒口,确保铸件整体收缩均匀。

在铸件内、外侧及底面的砂型上布置冷铁,内、外侧面冷铁厚度为铸件壁厚的80%,底面冷铁厚20 mm,确保铸件的冷却速度足够快,以获得致密的细晶组织。

(2)浇注方案 由于铸件轮廓尺寸大,为避免合金液前沿充型流程过长、降温幅度过大,引起未熔合等冶金缺陷,采用多个直浇道同时浇注的方式,以保证型腔内合金液温度的均匀性。为此,设计了两种浇注系统,见图2。方案1设计了两个对称布置的直浇道。方案2有两级直浇道,第1级和第2级直浇道高度分别为型腔高度的1/2。在第1级直浇道下方向两侧沿圆周方向分别各引出一条水平浇道,长度为圆周长的1/8,在水平浇道端部下方再设置第2级直浇道,见图2b。与方案1相比,方案2的合金液前沿在浇道中流程长度比方案1缩短了一半。

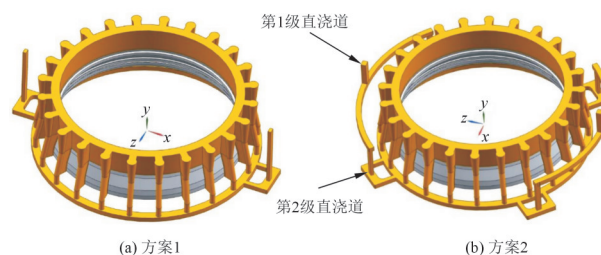


图2 浇注系统设计方案

Fig.2 Scheme of the pouring system

直浇道采用预制陶瓷浇道,单组陶瓷浇道的有效过流面积为 $30\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 。方案1的每个直浇道由2组陶瓷浇道组成,有效过流面积为 $2 \times 30\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 。方案2的第1级直浇道有4组陶瓷浇道,有效过流面积为 $4 \times 30\text{ mm} \times 10\text{ mm}$,第2级直浇道由2组陶瓷浇道组成,有效过流面积为 $2 \times 30\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 。横浇道截面为 $40\text{ mm} \times 45\text{ mm}$ 。

根据有关研究^[27],缝隙浇道的数量为:

$$n=0.024P/\delta \quad (1)$$

$$D=(4\sim 6)a \quad (2)$$

$$a=(0.8\sim 1.5)\delta \quad (3)$$

$$b=15\sim 35\text{ mm} \quad (4)$$

式中, n 为立筒数量; P 为铸件外形周长; a 为缝隙厚度; b 为缝隙宽度; D 为立筒直径; δ 为铸件壁厚。

两个方案均为开放式浇注系统,阻流截面均为 $2\times 30\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 的直浇道,可以避免在型腔内形成射流或喷溅,浇注温度为 $720\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(3)造型、制芯工艺 采用酚醛脲烷树脂砂造型工艺。该树脂砂粘结剂由派普树脂[组分I CPI5 140(苯甲基醚酚醛)+组分II CPII5 235(聚异氰酸酯)]组成。树脂用量为0.7%,擦洗砂粒度为70/140目。砂芯上为随形冷铁,冷铁之间留出 $5\sim 10\text{ mm}$ 间隙填充树脂砂,以提高砂芯的退让性,见图3。



图3 型芯及冷铁照片

Fig.3 Images of core and chill iron

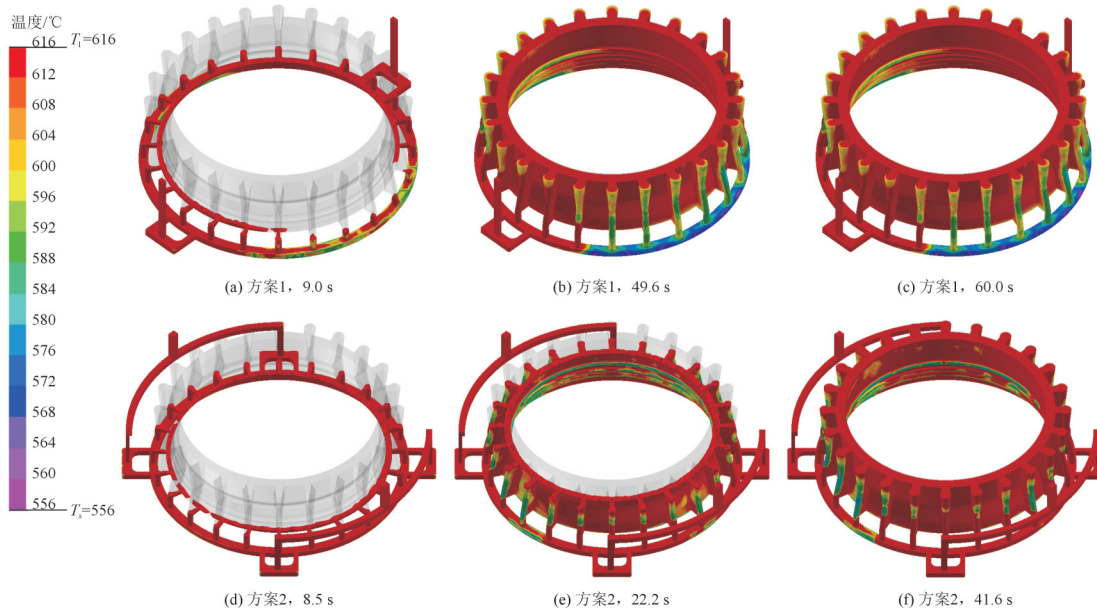


图4 充型过程温度场仿真结果

Fig.4 Simulation results of filling process

从充型结束时的温度场可知,方案1在近直浇道区域的合金液温度明显高于远直浇道区域,温度场呈现明显的区域分布不均匀,见图4c。方案2虽然存在局部的温度分布不均匀,但是区域明显减小,且更加分散,这说明方案2比方案1的合金液温度分布更加

(4)仿真工艺参数 合金液与冷铁之间的传热系数为 $1\,000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$,合金液与砂型之间的传热系数为 $600\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$,冷铁与砂型之间的传热系数为 $500\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$,合金或砂型与空气的传热系数为 $20\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ 。浇注温度为 $720\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。因实际浇注时,浇口箱中合金液的液面高度保持在 $7\sim 9\text{ cm}$ (仿真时选择 8 cm),考虑到陶瓷过滤网的阻流系数(0.8),设置的仿真充型速度为 $v\approx 1\text{ m/s}$ 。

2 仿真结果及分析

2.1 充型过程仿真结果

图4为方案1和方案2的充型过程温度场仿真结果。可以看出,方案1合金液充型过程平稳。在第 9.0 s 时开始充填铸件型腔, 49.6 s 完成铸件型腔充填,随后开始充填顶冒口, 60.0 s 完成充型。同样地,方案2合金液充型过程平稳。在 8.5 s 时开始充填铸件型腔, 22.2 s 完成铸件型腔充填,随后开始充填顶冒口, 41.6 s 完成充型。由上述结果可知,在充型平稳的前提下,方案2的总充型时间比方案1缩短了 18.4 s (30.7%)。充型时间缩短意味着缝隙浇道的根部以及铸件底部遭受高温合金液冲刷时间缩短,其过热倾向降低,即缩松、偏析、热裂倾向大幅降低。

均匀,更容易实现顺序凝固,有助于获得高冶金质量铸件。

2.2 凝固过程仿真结果

图5是方案1和方案2铸件凝固过程仿真结果。

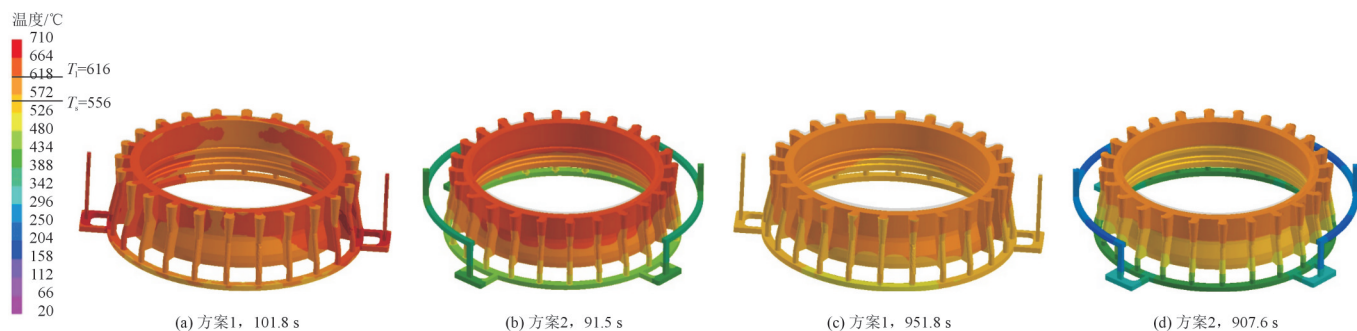


图5 凝固过程仿真结果

Fig.5 Simulation results of solidification

可以看出,方案1在远离直浇道处区域合金液温度低,冷却速度快,先凝固。在近直浇道区域合金液温度高,冷却速度慢,相对后凝固。方案2由于增加了两处直浇道,型腔中合金液温度分布更加均匀。由于充型时间缩短了1/3,型腔底部砂型或冷铁的激冷能力得到改善,因此实现了铸件自下而上顺序凝固。

2.3 缩松倾向仿真结果

图6是铸件缩松倾向仿真结果。可以看出两种方案的缩松区域均出现在浇道和冒口中。但方案2与方

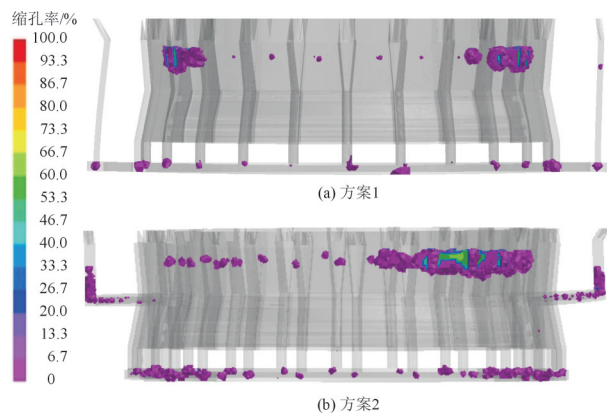


图6 缩松倾向仿真结果

Fig.6 Simulation results of shrinkage porosity prediction

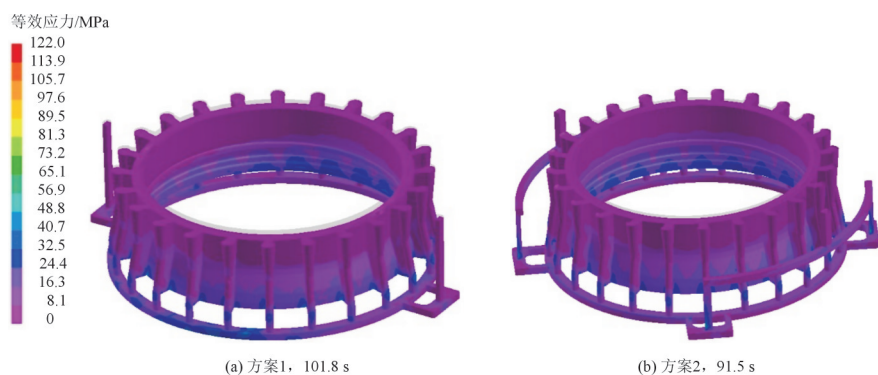


图7 凝固过程铸造应力仿真结果

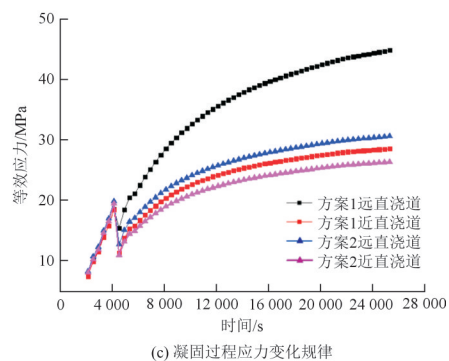
Fig.7 Simulation results of casting stress during the initial stage of solidification

案1相比,冒口中缩松倾向更大,说明铸件补缩效果更好。

2.4 铸造应力和变形仿真结果

图7为凝固过程的应力场。由图7可知,方案1在远离直浇道区域铸造应力明显高于近直浇道区域,其应力方向指向铸件中心。在凝固初期,后凝固区域对先凝固区域约束小,因此先凝固区域先开始收缩变形。从图7b可知,由于增加了两处直浇道,其应力分布明显更加均匀。从图7c可以看出,随铸件温度不断降低,铸造应力逐渐增大。当铸件温度冷却到室温附近时,方案1中近直浇道区域和远直浇道区域的应力差约17 MPa,而方案2的近直浇道区域和远直浇道区域的应力差约为5 MPa,明显小于方案1。

图8为铸件变形仿真结果。 x 方向为近直浇道区域的变形量, z 方向为远直浇道区域的变形量。可以看出,方案1在 z 方向最大变形量为15 mm,而方案2在 z 方向最大变形量为7 mm。方案1在 x 方向最大变形量为8 mm,而方案2在 z 方向最大变形量为7 mm。方案1在 z 方向和 x 方向圆度偏差为8 mm,而方案2在 z 方向和 x 方向圆度偏差为1 mm。可见方案2在 z 方向的变形量明显降低,铸件的圆度得到显著改善。



(c) 凝固过程应力变化规律

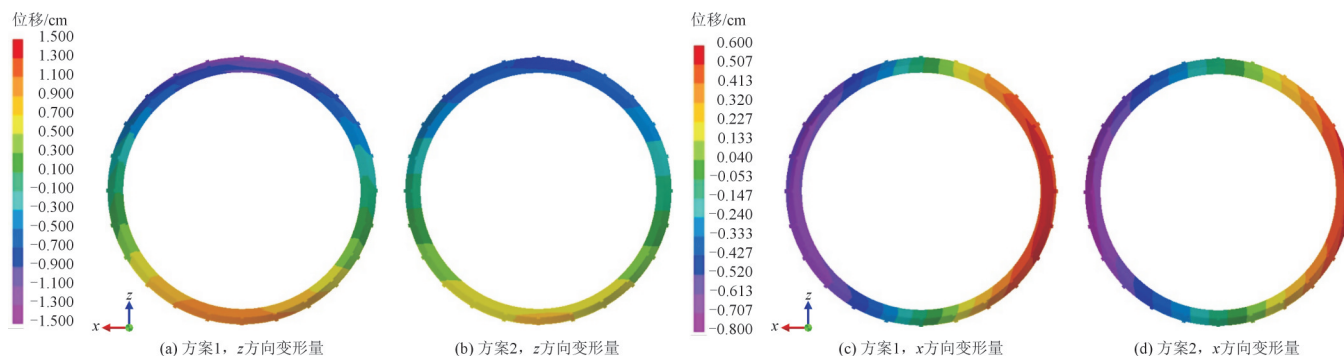


图8 铸件变形仿真结果

Fig.8 Simulation results of casting deformation

3 生产试制

3.1 冶金质量

图9为铸件实物和X射线检验结果照片。按照方案1和方案2的工艺连续试制2件,从浇注的铸件表面质量情况来看,未发现铸件有明显的外部缺陷。X射线检验结果表明,铸件内部质量达到HB 963-2005中的Ⅱ类件水平。

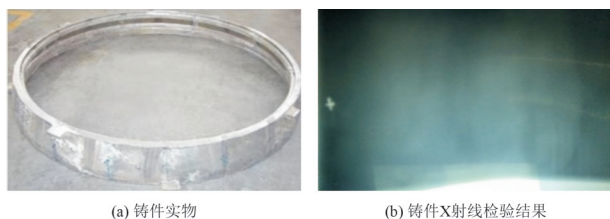


图9 铸件实物和X射线检验结果照片

Fig.9 Photos of the casting and X-ray inspection results

3.2 显微组织与力学性能

用1000、2000和5000目的砂纸依次打磨试样,去除表面氧化皮、杂质及机械加工等造成的残余应力层;用粒度为W1.5的金刚石研磨膏抛光,去除试样表面的划痕。用Keller试剂(95 mL的蒸馏水+2.5 mL的硝酸+1.5 mL的盐酸+1.0 mL的氢氟酸)侵蚀20 s。将制备好的试样放在BX53MRF-S的金相显微镜下观察。图10为不同方案铸件近直浇道区域的铸态金相组织,由于铸件壁厚较大,冷却速度慢,铸态晶粒形貌呈现为退火状态。方案1中存在少量晶粒的尺寸约为200 μm ,明显大于周围晶粒,晶粒尺寸差异较大。而方案2中未发现晶粒尺寸显著大于周围晶粒的情况,晶粒尺寸均匀程度高于方案1。

铸件经T5热处理后,在近直浇道区域本体取样加工成 $\phi 10\text{ mm}$ 的标准拉伸试样,在WDW-100 KN试验机上完成拉伸试验,夹头的移动速度为2 mm/min。测试其力学性能,结果见表1。可见方案2的强度和伸长

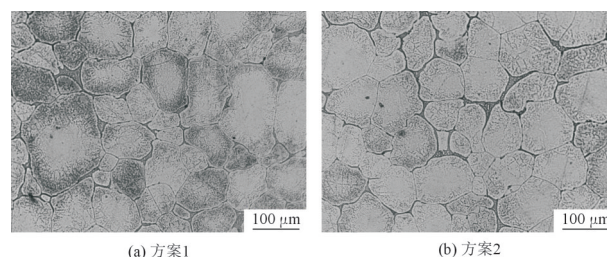


图10 不同方案铸件的金相组织

Fig.10 Metallographic structures of castings from different schemes

率均高于方案1。图11是两种不同方案铸件近直浇道区域的凝固曲线。可以看出,方案2凝固速度及冷却速度明显高于方案1。方案1由两个直浇道对称浇注,方案2相当于4个截面相等的直浇道对称浇注。与方案1相比,方案2的近直浇道区域的热量被分散,同时充型时间缩短,近直浇道区域冷铁的激冷效果更好,冷却速度更快。因此,采用方案2浇注的铸件组织均匀性更好,近直浇道区域本体切取试样力学性能更高。

表1 铸件本体切取力学性能测试结果

Tab.1 Test results of mechanical properties of the cast body		
方案	σ_b/MPa	$\delta/\%$
1	425	9.7
2	455	10.3
验收标准	360	5.0

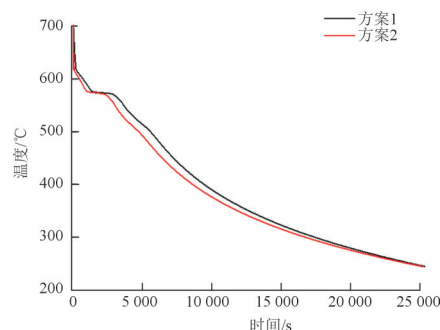


图11 不同方案近直浇道区域的凝固曲线

Fig.11 Solidification curves in the zone of the casting near the sprues from different schemes

3.3 尺寸精度

采用三维激光扫描获取铸件轮廓尺寸,与铸件设计模型比对结果见图12。图12a的上、下区域(对应远直浇道处)产生沿铸件中心方向的变形,变形量最大约为15 mm。左、右区域(对应近直浇道处),产生沿铸件中心方向的变形量为7~8 mm。由图12b可知,方案2整体变形在6 mm以内。实测结果与仿真结果一致。

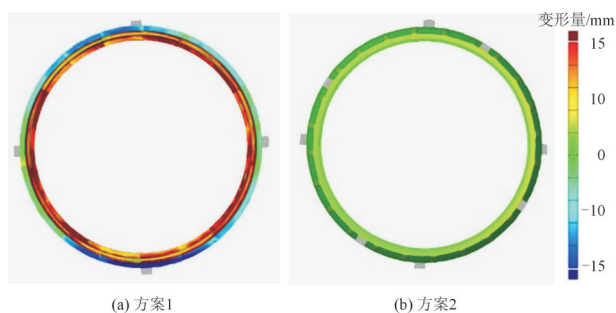


图12 不同方案铸件的尺寸三维扫描结果

Fig.12 3D scanning results of the dimensions of castings from different schemes

4 结 论

(1)大尺寸铸件直浇道数量少时,合金液充型流程长,远直浇道区域和近直浇道区域合金液温度差异大,造成大尺寸轴对称类铸件周向凝固和冷却速度不一致,导致铸件产生较大变形。

(2)直浇道数量由2根增加到4根时,充型时间缩短1/3,缝隙浇道根部被高温合金液冲刷时间大幅缩短,有利于获得冶金质量良好和组织均匀的铸件。

(3)在大尺寸铸件浇注时,适当增加直浇道数量,可提高充型速度、缩短充型时间、促进型腔内合金液的温度均匀性,更容易获得顺序凝固,减小铸件变形量。

参 考 文 献

- [1] 刘伯操,向启尧,钱景新.ZL-205高强铸造铝合金[J].航空材料.1978(5):11-17.
- [2] 《工程材料实用手册》编委会.工程材料实用手册(第二版)[M].北京:中国标准出版社,2001.
- [3] 刘建辉,杨琴,闻福林,等.冷铁组织演变对ZL205A合金铸件线性偏析的影响[J].铸造,2025,74(10):1344-1351.
- [4] 郝天,王军,刘永珍,等.稀土La和脉冲磁场对ZL205A铝合金铸态组织和力学性能的影响[J].稀有金属与硬质合金,2025,53(3):70-76.
- [5] 朱继虎.低压铸造筒形件组织性能及铸造缺陷消除机制研究[D].

哈尔滨:哈尔滨工业大学,2025.

- [6] 孟永强.大型长导程ZL205A柱体铸造成型工艺的数值模拟仿真及工艺优化[D].西安:西安工业大学,2025.
- [7] 曹喜娟,任广笑,刘永哲,等.某大型ZL205A异型壳体差压铸缺陷研究[J].特种铸造及有色合金,2024,44(11):1579-1584.
- [8] 綦育仕,任雁,杜兰君,等.Sc和Zr对挤压铸造ZL205A合金组织与性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2024,44(10):1375-1381.
- [9] 杜旭初,黄粒,厉沙沙,等.大型ZL205A铝合金舱体铸件铸造工艺研究[J].铸造,2024,73(6):859-864.
- [10] 张春成.ZL205A铝合金基座低压铸造工艺改进[J].特种铸造及有色合金,2021,41(2):258-261.
- [11] 王明杰.ZL205A铸件低压铸造热裂形成的微观机制及预测判据[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2021.
- [12] 徐超,张国伟,牛经纬.冷却速率对石膏型铸造铝合金组织及性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2020,40(12):1376-1379.
- [13] 毛军,王剑安,张蕾,等.某舰炮瞄准装置ZL205A底座断裂原因分析[J].火炮发射与控制学报,2020,41(4):74-79.
- [14] 陈汉,伍鹏程,张涛,等.耐热铝合金在航空领域中的研究进展与发展趋势[J].航空材料学报,2024,44(6):1-15.
- [15] 马宝民,宋国金,韩君保.大型薄壁铝合金铸件重力铸造工艺实例分析[J].铸造,2017,66(7):757-760.
- [16] 朱必武,刘筱.铝合金薄壁铸件研究现状及进展[J].特种铸造及有色合金,2016,36(9):931-934.
- [17] 林琳,陈西孟,薛祥义,等.大型薄壁镁合金格栅铸件熔模低压铸造数值模拟[J].特种铸造及有色合金,2024,44(9):1286-1290.
- [18] 高英,马敬仲.铸件变形与时效[M].北京:机械工业出版社,1985.
- [19] 马志莲,郑贤淑,姚山.铸件变形控制的研究[J].大连理工大学学报,1998,38(2):190-193.
- [20] 杨阳,杨晶,白培康,等.U形铸件应力应变数值模拟及反变形研究[J].铸造技术,2013,34(4):462-464.
- [21] 李祥准,于革刚.基于有限元分析的铝合金薄壁铸件变形研究[J].铸造技术,2017,38(7):1684-1687.
- [22] 樊富友,于娟,陈明,等.大型薄壁铝合金舱体铸件变形控制及机理研究[J].铸造技术,2013,34(10):1336-1339.
- [23] 秦守益,余国康,何凯,等.大型铝合金框架的热处理变形控制[J].特种铸造及有色合金,2019,39(2):210-212.
- [24] SASAHARA H. The effect on fatigue life of residual stress and surface hardness resulting from different cutting conditions of 0.45% C steel[J]. Int. J. Mach. Tools Manuf.,2005,45:131-146.
- [25] JAMES M N. Residual stress influences on structural reliability[J]. Engineering Failure Analysis,2011,18:1909-1920.
- [26] CAMARGO D M A J, CORNELIS J H, CIOFFI H O M V, et al. Coating residual stress effects on fatigue performance of 7050-T7451 aluminum alloy[J]. Surface & Coatings Technology,2007,201(24):9448-9455.
- [27] 中国机械工程学会铸造分会.铸造手册5-铸造工艺[M].北京:机械工业出版社,2011.

(编辑:陈志辉)