

# 基于 ProCAST 的 TiAl 合金双环薄壁支板结构件的精密铸造工艺研究

左家斌<sup>1,2,3</sup> 赵春玲<sup>4</sup> 胡海涛<sup>1,2,3</sup> 罗倩<sup>1,2,3</sup> 李亚峰<sup>2</sup> 丁贤飞<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国航发北京航空材料研究院铸钛中心, 北京 100095; 2. 北京航空材料研究院股份有限公司, 北京 100094; 3. 北京市先进钛合金精密成型工程技术研究中心, 北京 100094; 4. 中国航发湖南动力机械研究所, 株洲 412002)

**摘要** 基于 ProCAST 软件研究了不同浇注方式、底浇口位置对 TiAl 合金双环薄壁支板结构件精密铸造成形过程及冶金质量的影响, 并进行了实际验证。结果表明, 重力铸造下底浇口位于支板间时存在浇不足风险, 而底浇口位于支板下方时可以完整成形。两种浇注系统下 TiAl 合金双环薄壁支板结构件的支板中间以及内、外环上均弥散分布着尺寸较小的缺陷, 而底浇口分别与内环和外环安装边相接处的缺陷以及支板根部的缺陷均尺寸较大。相比浇口位于支板下方的浇注系统, 浇口位于两支板中间的浇注系统, 铸件内环和外环弥散分布的缺陷数量较少, 但支板根部的缺陷尺寸较大。离心浇注时, 两种浇注系统方案均能实现支板完整成形, 缺陷分布规律与重力铸造基本一致, 但缺陷尺寸明显减小。对底浇口位于支板下方的浇注系统进行试生产发现, 缩孔缩松缺陷分布规律与模拟结果基本一致, 离心铸造 TiAl 合金双环薄壁支板结构件的缺陷水平显著低于重力铸造。

**关键词** TiAl 合金; 离心铸造; 数值模拟; 精密铸造

中图分类号 TG146.23; TG249.5

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20250080

## Investment Casting Processing of Double-ring and Thin-walled Support Component in TiAl Alloy Based on ProCAST

ZUO Jiabin<sup>1,2,3</sup>, ZHAO Chunling<sup>4</sup>, HU Haitao<sup>1,2,3</sup>, LUO Qian<sup>1,2,3</sup>, LI Yafeng<sup>2</sup>, DING Xianfei<sup>1,2,3</sup>

(1. Cast Titanium Alloy Research and Development Center, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095; 2. Beijing Institute of Aeronautical Materials Co., Ltd., Beijing 100094; 3. Beijing Engineering Research Center of Advanced Titanium Alloy Precision Forming Technology, Beijing 100094; 4. AECC HuNan Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002)

**Abstract:** The effects of different pouring methods and bottom gate positions on investment casting forming and metallurgical quality of double-ring and thin-walled support plate component of TiAl alloy were investigated by ProCAST software, and actual verification was carried out. The results indicate that there exists a risk of casting misrun with bottom gate between the plates by gravity casting, while complete formation is achieved with bottom gate below the plates. Under both types of gating systems, small-sized defects are dispersively distributed in the middle and inner and outer rings of double-ring and thin-walled support component of TiAl alloy, while large-sized defects are located at the junction of gate and mounting edge of inner and outer ring as well as the root of plate. Compared to the gating system with gate below the plate, the number of defects diffused in the inner and outer rings of the casting is less in the gating system with gate between the plates, while the defect size at the root of plate is larger. During the centrifugal casting, both pouring systems enable complete formation of plate, and distribution law is basically consistent with that by gravity casting with reduced size of defects. Finally, trial production of gating system with gate below the plates was conducted, and the results reveal that the distribution law of shrinkage and porosity is basically identical with the simulation ones, and the defect level of double-ring and thin-walled support plate component of TiAl alloy by centrifugal casting is significantly lower than that of those by gravity casting.

**Key Words:** TiAl Alloy, Centrifugal Casting, Numerical Simulation, Investment Casting

收稿日期: 2025-02-24; 修订日期: 2025-06-06

第一作者: 左家斌, 男, 1993 年出生, 工程师, E-mail: 1004577933@qq.com

通信作者: 丁贤飞, 男, 1980 年出生, 高级工程师, E-mail: xianfei.ding@biam.ac.cn

引用格式: 左家斌, 赵春玲, 胡海涛, 等. 基于 ProCAST 的 TiAl 合金双环薄壁支板结构件的精密铸造工艺研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(4): 627-632.

ZUO J B, ZHAO C L, HU H T, et al. Investment casting processing of double-ring and thin-walled support component in TiAl alloy based on ProCAST[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(4): 627-632.

TiAl 合金因其高比强度,优异的高温力学性能、抗氧化性和阻燃性能,在航空航天领域应用广泛,是先进航空发动机热端部件理想的减重候选材料<sup>[1-4]</sup>。精密铸造可实现 TiAl 合金复杂结构件的整体近净成形,如先进航空发动机扩压器、预旋喷嘴、排气机匣等,但目前选用 TiAl 合金制备仍存在一定的工艺难度。一方面, TiAl 合金的熔体流动性较差,其复杂环状结构件在精密铸造充型过程中易产生紊流窝气而导致浇不足、冷隔等缺陷;另一方面, TiAl 合金线收缩率大、铸态组织室温接近零塑性,精密铸造冷却过程产生明显的受阻收缩而导致铸件裂纹或较大内应力,这些特性给 TiAl 合金复杂结构件精密铸造成形带来了巨大挑战<sup>[6-10]</sup>。环状薄壁支板结构件作为航空发动机的关键部件,其质量直接影响发动机性能和可靠性<sup>[11-15]</sup>。

本研究以双环薄壁支板结构件为对象,基于 ProCAST 软件并结合工艺验证,探究工艺参数对 TiAl 合金精密铸造成形过程的影响及对铸件内部冶金质量的作用机制。通过对比不同铸造方式,揭示不同浇注方案下 TiAl 合金熔体的充型、应力及缺陷分布规律,为航空发动机关键部件铸造工艺优化设计提供参考。

1 试验方案

双环薄壁支板结构机匣件作为航空发动机的关键零部件,其尺寸为  $\phi 460\text{ mm}\times 70\text{ mm}$ ,整体壁厚介

于 1~3 mm 之间,是由薄壁支板连接而成的双环结构,铸造过程中面临较大的技术挑战,且易产生缺陷。针对该特定结构的机匣件,采取底注式浇注系统设计方案,将其优化为 8 支板连接的双环结构。在机匣件的内环和外环下端面分别设置 8 个浇口,浇口位置分别位于支板下方及两支板之间,机匣浇注系统方案见图 1。将浇注系统的三维模型导入 ProCAST 软件进行网格划分及前处理, TiAl 合金及  $\text{Y}_2\text{O}_3$  型壳的主要热物性参数见表 1。为了探究重力场与离心力场对 TiAl 合金机匣件熔体充型特性及缺陷分布规律的影响,分别对两种浇注系统方案进行重力铸造和离心铸造的模拟试验。浇注温度和型壳预热温度分别设为 1 600 和 800  $^{\circ}\text{C}$ ,离心转速设为 300 r/min。针对底浇口的不同位置,采用 ProCAST 软件对型壳及铸件内部应力分布进行模拟。

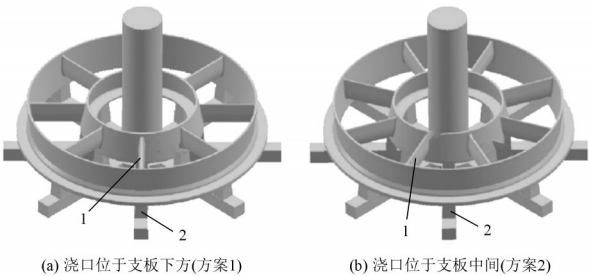


图 1 不同浇注系统方案  
Fig.1 Different schemes for gating system  
1. 支板 2. 浇口

表 1 TiAl 合金和  $\text{Y}_2\text{O}_3$  型壳的主要热物性参数

Tab.1 Thermophysical parameters of TiAl alloy and  $\text{Y}_2\text{O}_3$  shell

| 材料                        | 密度/<br>( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | 热导率/<br>( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) | 比热容/<br>( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) | 潜热/<br>( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) | 凝固区间/ $^{\circ}\text{C}$ | 黏度/( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ) | 界面传热系数/<br>( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ ) |
|---------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| TiAl 合金                   | 3 872                                    | 15~28                                                      | 0.6~0.8                                                      | 400                                       | 1 468~1 523              | $(4.2\sim 5.4)\times 10^{-3}$   | 1 500                                                         |
| $\text{Y}_2\text{O}_3$ 型壳 | 4 200                                    | 2.1~2.4                                                    | 0.7~1.0                                                      | —                                         | —                        | —                               | —                                                             |

2 铸造模拟结果

2.1 内应力分布

两种底浇口位置方案的应力分布模拟结果分别见图 2 和图 3。可以看出,当底浇口位于支板中间时,支板

中心区域及底浇口根部的等效应力值较高,分别为 337.3 MPa 和 343.6 MPa。支板两侧的应力值较小,分别为 228.0 MPa 和 269.6 MPa,而当底浇口位于支板下方时,支板连接的外环根部及浇口根部的等效应力值较高,分别为 332.9 MPa 和 334.3 MPa。对双环薄壁结构铸件的热裂倾向进行了数值模拟分析,结果见图 4。

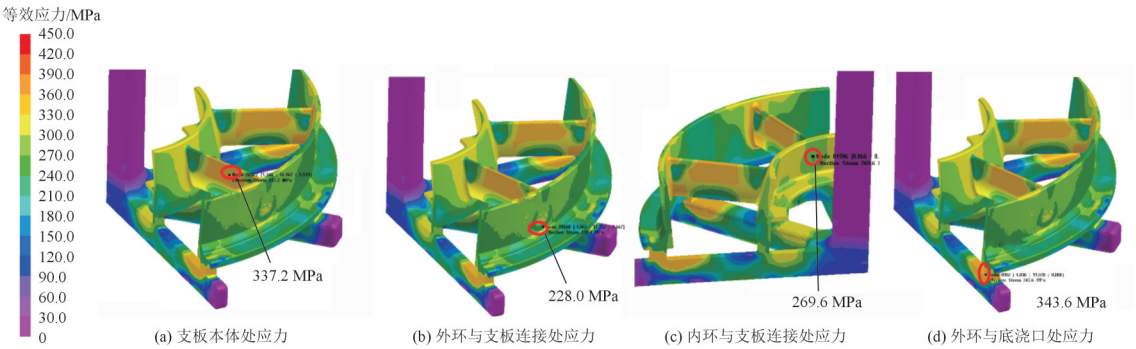


图 2 底浇口位于两支板之间时的型壳应力分布  
Fig.2 Stress distribution of mold shell with bottom gate between support plates

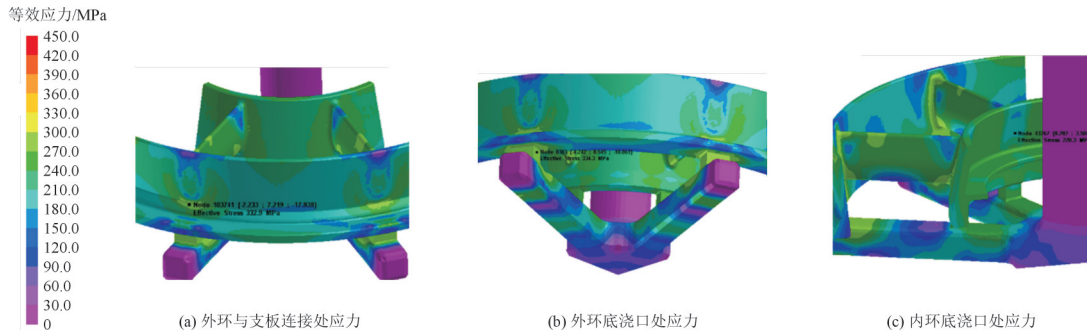


图3 底浇口位于支板下方时的型壳应力分布

Fig.3 Stress distribution of mold shell with bottom gate below support plate

可以看出,当浇注系统设计为底浇口位于支板中间时,底浇口连接的外环安装边圆角附件的热裂倾向相对较大,而当底浇口位于支板下方时,其底浇口连接的安装边根部附近的热裂倾向较大。针对不同浇注系统的铸件清壳后其铸件应力集中程度进行数值模拟,结果分别见图5和图6。可以看出,浇注系统设计为底浇口位于支板中间时,其清壳后铸件应力较大区域为外环连接的支板根部,同时底浇口连接的外环根部应力较为集中,模拟结果显示两处的应力分别为 332 MPa 和 334 MPa。当浇注系统设计为底浇口位于支板下方时,支板连接的支板根部及底浇口连接的外环根部应力仅为 55 MPa 和 79.5 MPa。综上,当底浇口位于支板下方时,其应力相对底浇口位于支板中间时相对数值较小,且应力集中区域位于底浇口根部区域而非底浇口圆角附件,大幅降低了因应力集中可能导致的开裂风险。

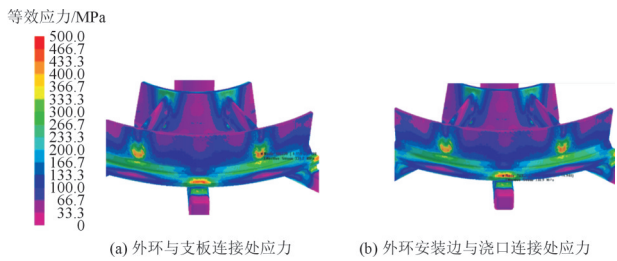


图5 底浇口位于两支板之间清壳后的铸件的应力分布

Fig.5 Stress distribution of casting with gate between plates after shell cleaning

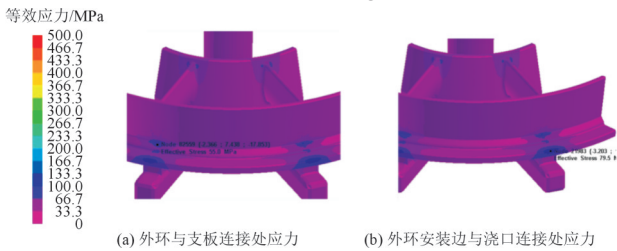


图6 底浇口位于支板下方清壳后铸件应力分布

Fig.6 Stress distribution of casting with gate below plates after shell cleaning

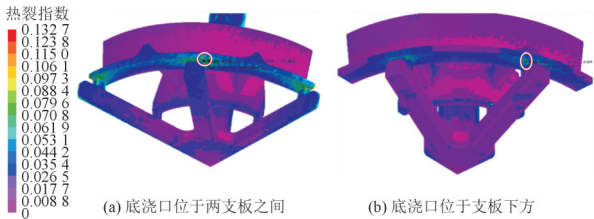


图4 两种浇注系统热裂指示器

Fig.4 Hot crack indicators for both gating systems

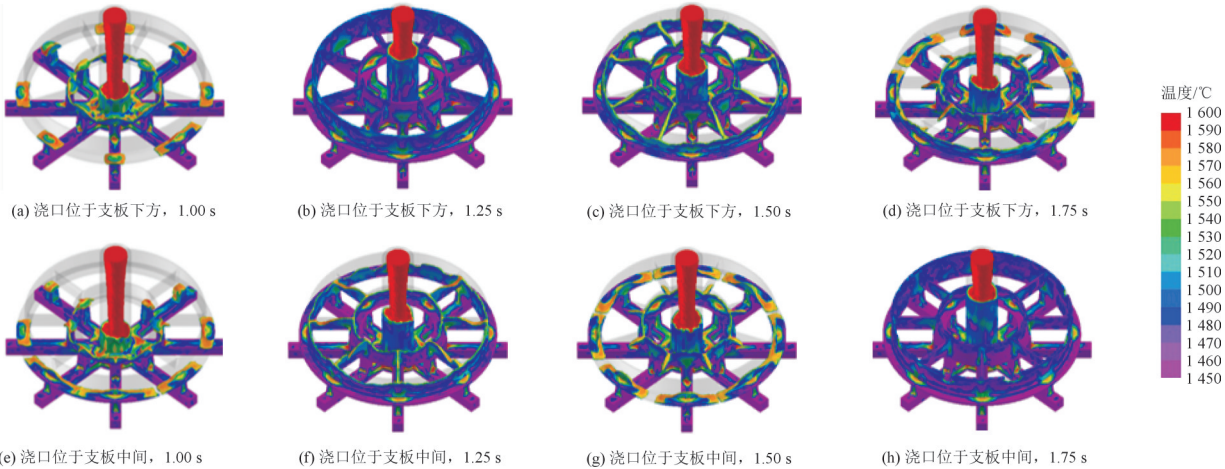


图7 重力铸造熔体充型过程模拟

Fig.7 Filling simulation of melt by gravity casting

充填距离均小于外环,熔体很快充满内环安装边,通过支板向外环方向进行充填。随充型过程进行,外环安装边也完成充填,外环处的熔体通过支板向内环方向充填。最终熔体通过内环和外环浇口自下而上逐渐充满整体机匣。对比两种浇注系统方案发现,二者在熔体充型特征上存在显著差异。首先,熔体在充型支板时的温度分布不同。当浇口位于支板下方时,熔体通过内环浇口到达支板的路径较短,导致热量散失较少,因此温度较高;而当浇口位于支板中间时,情况则相反。其次,在熔体充型外环的过程中,外环熔体液面高度的一致性也有所不同。当浇口位于支板中间时,外环熔体向两个浇口中间的支板处充填,液面高度较为一致;而当浇口位于支板下方时,外环熔体倾向于优先向支板处充填,导致液面高低不平,存在浇不足风险。此外,浇口位于支板下方时,熔体从外环向内环充填速度较快,支板处汇流程度较大,增加了窝气和冷隔风险。

相比之下,浇口位于支板中间时,熔体从外环向内环的充填过程相对滞后,支板主要由内环熔体充填,因此支板处汇流程度较低,窝气和冷隔的风险显著降低。

图8为离心铸造熔体充型过程模拟。可以看出,当金属液进入型腔后,沿横浇道向远离中心浇道的方向进行充填,直至抵达横浇道的最远端,随后以反向压力充填的方式继续进行。当金属液充填至外环下端浇口时,转而采用正向充填方式,通过浇口充填机匣外环。完成机匣外环充填后,金属液再次以反向压力充填的方式充填支板部位。当金属液沿靠近中心浇道的方向充填至机匣内环时,位于机匣下方的横浇道中的金属液也反向充填至内环浇口处,此时横浇道中的金属液以正向充填方式通过浇口充填机匣内环,并与支板部位反向充填的金属液交汇。此后,金属液继续充填内环,并以反向压力充填方式完成内环安装边的填充,最终实现机匣的完整充填。

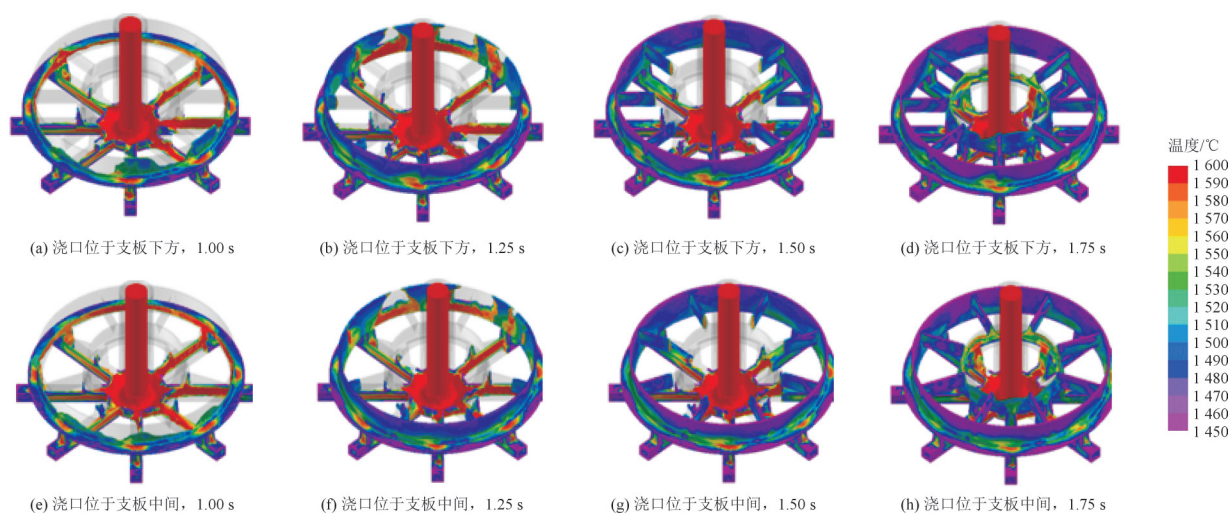


图8 离心铸造熔体充型过程模拟

Fig.8 Filling simulation of melt by centrifugal casting

通过对比两种浇注系统方案,可观察到金属液充型的差异。一方面,金属液充填外环时液面高度的一致性存在差异,浇口位于支板下方的浇注系统中,金属液在外环部位的液面高低差异显著大于浇口位于支板中间的浇注系统。另一方面,金属液通过外环浇口充填外环时,会从位于浇口正上方的外环部位向两侧进行充填,导致金属液在两浇口中间的外环部位产生汇合。对于浇口位于支板下方的浇注系统,金属液在两浇口中间的外环部位交汇时,容易出现窝气现象,从而增大冷隔产生的风险。而对于浇口位于支板中间的浇注系统,由于支板处于两浇口中间位置,金属液在外环中交汇的部位恰好是支板的位置,金属液汇合后随即通过反向压力充填方式充填支板部位,型腔中的气体通过支板部位排离外环,显著减少冷隔风险。

对比发现,在重力铸造过程中,熔体以自下而上的方式填充,机匣内环和外环的安装边是首先被充填的区域,而外环的上端面则是最后被充填的区域,其中支板上沿是最容易出现窝气现象的部位。而在离心铸造过程中,熔体的填充方式为自外而内,机匣外环的安装边首先被充填,内环的安装边最后被充填,两浇口中间的外环部位是窝气现象最易发生的区域。然而,无论采用重力铸造还是离心铸造工艺,浇口位于支板中间的浇注系统相较于浇口位于支板下方的系统,在支板上沿或两浇口中间的外环部位出现窝气现象的倾向显著降低,同时机匣产生冷隔的风险也明显降低。

### 2.3 缺陷分布规律

图9为重力铸造过程中缺陷模拟结果。可以看出,缺陷主要分布在浇口与内环和外环安装边的连接区

域、支板的中部及根部,以及内环和外环的其他部位。分析表明,支板中部及内环和外环其他部位的缺陷尺寸较小,呈弥散分布。相对地,浇口与内环和外环安装边的连接区域以及支板根部的缺陷尺寸较大,位置相对固定,这与这些区域作为热节部位有关。进一步对浇口与内环和外环安装边连接区域的缺陷位置进行分析,发现缺陷部分侵入铸件本体,表面底浇口处熔体对机匣铸件补缩不足。

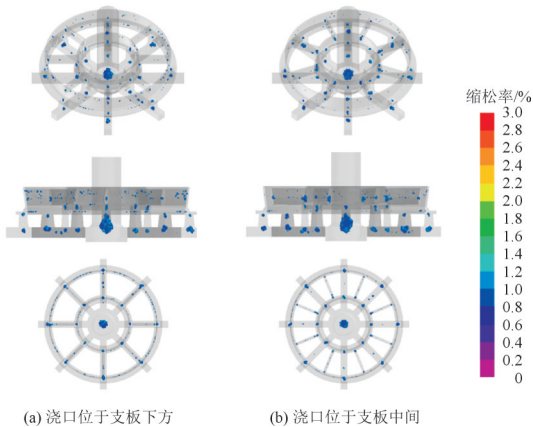


图9 重力铸造缩孔缺陷预测

Fig.9 Prediction of shrinkage defects in gravity casting

浇口位于支板下方和浇口位于支板中间的浇注方案的缺陷分布规律存在显著差异。当浇口设置于支板中间时,机匣内环与外环区域的缺陷数量较浇口位于支板下方的方案要少。这归因于浇口与支板交错布局后,内环与外环区域更易于获得熔体的补缩作用。然而,浇口位于支板中间的方案在支板根部区域产生的缺陷尺寸却大于浇口位于支板下方的方案。其原因在于,后者支板根部能够得到位于其正下方的底浇口处熔体的补缩,从而使得支板根部热节尺寸相对较小。

图10为离心铸造缩孔缺陷预测。可以看出,在离心铸造方式下,缺陷分布规律的模拟结果与重力铸造基本一致,两种浇注系统方案的缺陷分布差异也保持

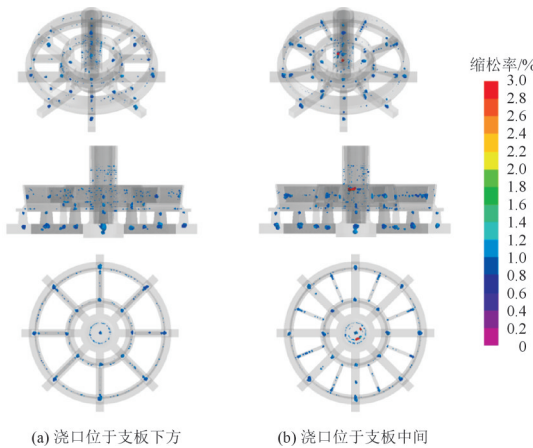


图10 离心铸造缩孔缺陷预测

Fig.10 Prediction of shrinkage defects in centrifugal casting

一致。但是,与重力铸造相比,离心铸造的熔体补缩能力更强,导致内环与外环区域的缺陷数量更少,且浇口与内环和外环安装边相接处的缺陷未进入机匣铸件本体。然而,离心铸造在支板根部区域产生的缺陷尺寸较重力铸造有所增大,尤其是浇口位于支板中间的方案,支板根部缺陷尺寸的增大尤为显著。这与离心铸造中熔体补缩方向改变为沿离心力方向,导致底浇口处熔体无法对支板根部进行有效补缩有关。

### 3 实际生产验证

#### 3.1 机匣成形情况

重力铸造 TiAl 合金机匣铸件见图11。可以看出,在机匣外环存在尺寸为 20 mm×15 mm 的浇不足,这与模拟结果基本一致,表明重力铸造的 TiAl 合金熔体流动能力较差,无法实现薄壁机匣的完整成形。

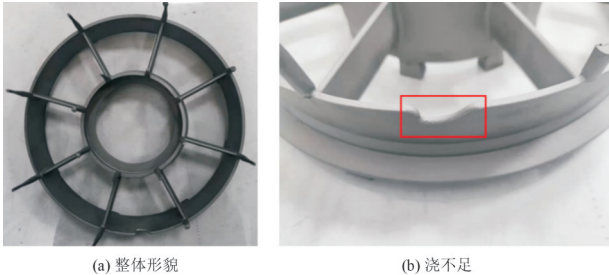


图11 重力铸造 TiAl 合金铸件形貌及浇不足缺陷

Fig.11 Overall morphologies and casting misrun of TiAl alloy by gravity casting

采用离心铸造得到的 TiAl 合金机匣见图12。可以看出,机匣无浇不足、冷隔等缺陷,这与模拟得到的结果一致。表明离心铸造的 TiAl 合金熔体流动能力大幅增加,能够实现薄壁机匣的完整成形。



图12 离心铸造 TiAl 合金机匣铸件

Fig.12 TiAl alloy case by centrifugal casting

#### 3.2 机匣缺陷分布情况

采用 X 射线探伤对 TiAl 合金机匣的内部缺陷进行检测。重力铸造和离心铸造 TiAl 合金机匣的内部缺陷分别见图13和图14。可以看出,重力铸造的 TiAl 合金机匣内部气孔数量显著高于离心铸造。这是因为 TiAl 合金熔体由中心浇道进入底浇盘时发生分流,容易将炉膛中的气体卷入至熔体中形成卷入型气泡。但由于

TiAl 合金熔体黏度高、密度小,在重力铸造方式下,卷入型气泡在熔体中的“析出”能力差,加之 TiAl 合金熔体在铸型中的凝固速度很快,导致气泡无法从合金中排出,从而在机匣铸件中造成较多的气孔缺陷。而在离心铸造方式下, TiAl 合金熔体在离心力作用下,相对密度增大,卷入型气泡在熔体中的“溢出”能力增强,因而机匣铸件中的气孔缺陷较少。

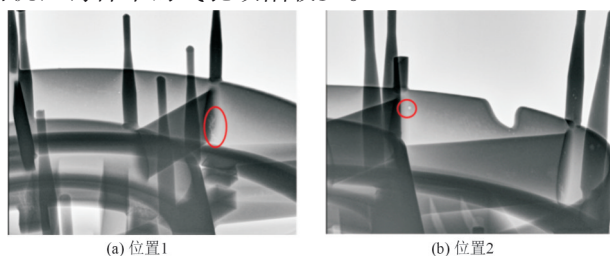


图 13 重力铸造 TiAl 合金铸件的内部缺陷情况

Fig.13 Internal defects of TiAl alloy by gravity casting

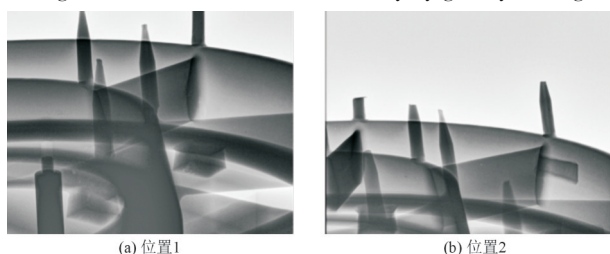


图 14 离心铸造 TiAl 合金机匣的内部缺陷情况

Fig.14 Internal defects of TiAl alloy by centrifugal casting

观察机匣铸件中的缩孔缩松缺陷可知,对于重力铸造机匣,机匣外环和支板均有明显的缩松缺陷,且在支板与外环相接的部位,以及底浇口与内环相接的部位均有明显的缩孔缺陷。主要因为 TiAl 合金凝固区间小、黏度高,且机匣为薄壁构件,从而导致机匣外环和支板处的金属液在凝固时未能得到有效补充而形成疏松缺陷。支板与外环相接处部位,以及底浇口与内环相接的部位截面差异较大,为铸造热节部位,金属液凝固速度慢,最终未能得到金属液补充而产生缩松缺陷。但对于离心铸造机匣,机匣外环和支板均未见疏松缺陷,且支板与外环相接的部位,以及底浇口与内环相接的部位的缩孔缺陷均显著减小。这主要是离心力驱动金属液定向流动与凝固,消除了重力铸造下金属液未能得到有效补充而形成的缩松缺陷。这表明,在相同的浇注系统方案下,离心铸造能够大幅提高熔体的补缩能力,从而显著减少铸件的缩孔缩松缺陷。

## 4 结 论

(1)在重力铸造方式下,采用底浇口位于支板下方的浇注系统, TiAl 合金机匣外环位于两支板中间的部位存在浇不足风险,而采用底浇口位于支板中间的浇

注系统则可以实现机匣完整成形。采用离心铸造方式时两种浇注方案均能实现机匣完整成形。对底浇口位于支板下方的浇注系统进行了实际浇注试验,发现在重力铸造方式下,机匣外环位于两支板中间的部位出现浇不足,位置和尺寸均与模拟结果基本一致。而在离心铸造方式下,机匣完整成形,亦与模拟结果一致。

(2)在重力铸造方式下,两种浇注系统机匣支板中间以及内、外环上均弥散分布着尺寸较小的缺陷,而位于浇口与内、外环安装边相接处的缺陷以及支板根部的缺陷均尺寸较大。相比浇口位于支板下方的浇注系统,采用浇口位于支板中间的浇注系统,机匣内环和外环弥散分布的缺陷数量较少,但支板根部的缺陷尺寸较大。在离心铸造方式下,两种浇注系统机匣的缺陷分布规律与重力铸造基本一致,但缺陷尺寸明显减小。对底浇口位于支板下方的浇注系统进行了实际浇注试验,发现缩孔缩松缺陷分布与模拟结果基本一致,离心铸造机匣的缺陷水平显著低于重力铸造的。此外,离心铸造机匣卷入型气孔缺陷也显著少于重力铸造的。

## 参 考 文 献

- [1] KIM Y W, KIM S L. Advances in gammalloy materials-processes-application technology: Successes, dilemmas and future[J]. JOM, 2018, 70(4): 553-560.
- [2] 张天馨,岳颖,于继洋,等.航空航天用高温钛合金及钛基(Ti-Al)材料研究概况及应用[C]//第十四届中国钢铁年会,重庆,2023.
- [3] 朱小平.大质量高精度复杂钛合金机匣整体铸造技术研究[D].北京:北京科技大学,2023.
- [4] LIU Y X, ZHOU W B, HUA L, et al. Investigation of the microstructure evolution and mechanical properties of cast Ti-47Al-2Cr-2Nb alloy during ultra-high pressure heat treatment[J]. Materials Science & Engineering, 2024, A 912(10): 146 967.
- [5] 薛斌,许忠斌,张小岩,等.轻量化精密铸造成型技术在航空航天关键部件中的应用[J].铸造技术, 2022, 43(4): 290-294.
- [6] DING X F, LIN J P, ZHANG L Q, et al. Microstructural control of TiAl-Nb alloys directional solidification[J]. Acta Materialia, 2012, 60(2): 498-506.
- [7] 樊振中.熔模精密铸造在航空航天领域的应用现状与发展趋势[J].航空制造技术, 2019, 62(9): 38-52.
- [8] 贺同正,陈玉勇,吴敬玺,等.TC4合金变截面构件熔模铸造工艺优化及缺陷控制[J].钢铁钒钛, 2024, 45(3): 46-54.
- [9] 苏聪聪,黄刚,党乾,等.基于田口法的离心铸造 TiAl 合金环形件组织调控工艺参数优化[J].铸造, 2024, 73(10): 1 420-1 428.
- [10] 张扬晨,胡海涛,左家斌,等.TiAl 基合金铸件特征结构及型壳固液比对铸造缺陷影响[J].精密成形工程, 2022, 14(11): 170-183.
- [11] LIU R C, WANG X, CAO R X, et al. Effects of cooling rate on borides morphology and structure in cast  $\beta$ -solidifying  $\gamma$ -TiAl alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2024, 973: 172 872.
- [12] 樊洪智,董红瑞,赵天闻,等.TiAl 合金叶片类构件成形工艺研究进展[J].塑性工程学报, 2024, 31(8): 1-13.
- [13] 王子特,郑功,祁志祥,等.TiAl 合金结构,组织,性能与应用[J].科学通报, 2023, 68(25): 3 259-3 274.
- [14] 刘烨,王增全,程江华,等.TiAl 合金涡轮的设计及工程化应用研究进展[J].重型机械, 2022(5): 1-6.
- [15] LIN J P, ZHAO L L, LI G Y. Effect of Nb on oxidation behavior of high Nb containing TiAl alloys[J]. Intermetallics, 2011, 19(2): 131-136.

(编辑:刘晨辉)