

钛合金薄壁支板离心铸造工艺参数对孔松缺陷与组织的影响

郅喜望^{1,2} 李文¹ 殷亚军¹ 徐倩³ 南海² 周建新¹

(1. 华中科技大学材料成形与模具技术全国重点实验室, 武汉 430074; 2. 北京航空材料研究院股份有限公司, 北京 100094; 3. 武汉轻工大学机械工程学院, 武汉 430023)

摘要 为实现支板铸件低缺陷率与高组织均匀性的双重目标, 采用华铸CAE软件对支板铸件的熔模精铸过程进行了数值模拟分析, 系统研究了型壳预热温度(25~300℃)与离心转速(60~180 r/min)对缩孔缩松缺陷演化规律的影响, 进一步利用X射线探伤技术对数值模拟结果的准确性进行了验证。此外, 通过金相统计方法探究了工艺参数对微观组织影响的规律。结果表明, 当型壳预热温度为200℃、离心转速为150 r/min时, 支板铸件内部孔隙松散缺陷显著减少, 且微观组织分布均匀, 此工艺参数组合为支板铸造过程中的理想选择。

关键词 钛合金; 支板; 离心铸造; 精密铸造; 微观组织

中图分类号 TG146.23; TG249.4

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20250213

Effects of Centrifugal Casting Parameters on Shrinkage Porosity and Microstructure of Titanium Alloy Thin-walled Struts

QIE Xiwang^{1,2}, LI Wen¹, YIN Yajun¹, XU Qian³, NAN Hai², ZHOU Jianxin¹

(1. State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074; 2. Beijing Institute of Aeronautical Materials Co., Ltd., Beijing 100094; 3. School of Mechanical Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023)

Abstract: To achieve the synergistic control of low defects and high microstructural homogeneity in strut castings, numerical simulations were conducted on titanium alloy struts during investment casting process using InteCAST software. The evolution patterns of shrinkage porosity defects under varying shell preheating temperatures (25~300℃) and centrifugal rotation speeds (60~180 r/min) were systematically analyzed, and reliability of simulation results was further verified through X-ray inspection. Furthermore, metallographic statistical characterization was employed to investigate the influence of process parameters on microstructural evolution. The results indicate that with shell preheating temperature of 200℃ and the centrifugal speed of 150 r/min, the strut castings exhibit minimized internal shrinkage porosity defects and optimized microstructural uniformity, representing the optimal process parameters for strut casting.

Key Words: Titanium Alloy, Strut, Centrifugal Casting, Investment Casting, Microstructure

钛合金因低密度、高比强度及优异的高温力学性能, 在航空航天领域得到广泛应用^[1-3]。在航空装备中, 中介机匣、压气机匣等核心部件因具有高度复杂的几何构型, 通常采用铸造工艺进行整体成形。然而, 由于钛合金的高体积收缩率和低流动性易引发缩孔、缩松等内部缺陷, 易降低合金力学性能。此外, 对于壁厚差异显著的薄壁构件, 钛合金凝固过程中易产生组织不均匀现象^[4], 而微观组织的分布特征直接决定其力学性

能的稳定性。因此, 系统研究铸造工艺参数对复杂薄壁钛合金构件缺陷形成机制及组织演化规律的影响, 对提高航空铸件可靠性具有积极意义。

铸造工艺调控是改善钛合金铸件内部缩孔缩松缺陷的重要手段。伞晶超等^[5]针对1 800 mm×1 000 mm×100 mm钛合金底板铸件开展离心铸造工艺研究, 通过将离心转速从常规150 r/min提升至220 r/min, 突破了传统工艺的临界离心转速阈值, 成功

收稿日期: 2025-05-23; 修订日期: 2025-06-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(52201042, 52401164)

第一作者: 郅喜望, 男, 1982年出生, 研究员, E-mail: xyw_963@163.com

通信作者: 殷亚军, 男, 1985年出生, 教授, E-mail: yinyajun_436@hust.edu.cn

引用格式: 郅喜望, 李文, 殷亚军, 等. 钛合金薄壁支板离心铸造工艺参数对孔松缺陷与组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(6): 899-903.

QIE X W, LI W, YIN Y J, et al. Effects of centrifugal casting parameters on shrinkage porosity and microstructure of titanium alloy thin-walled struts[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(6): 899-903.

消除底板关键区域的缩孔缺陷。李重阳等^[6]在研究大尺寸钛合金阀体铸造时,揭示了铸型预热温度对缺陷形成的非单调影响规律,当石墨型预热温度从 25℃升至 150℃时,缩孔缩松缺陷体积由 400 cm³降至 375.9 cm³,但继续升温至 250℃时缺陷体积反弹至 404.6 cm³,最终确定 150℃为最优预热温度。刘铁军^[7]以钛合金叶轮为研究对象,分析过热度、型壳预热温度、离心转速等对叶轮铸件质量的影响,发现浇注温度为 1 700~1 730℃,型壳预热温度为(650±50)℃,离心转速为 200~300 r/min 时,能获得质量较好的钛合金叶轮铸件。TAO P 等^[8]对某大型钛合金薄壁机匣的熔模铸造过程进行数值模拟,发现因壁厚过薄,离心铸造的补缩效果有限。综合评估表明,重力铸造是该铸件更优的工艺选择。

铸造工艺参数对铸件组织也存在较大影响。ZHANG S Y 等^[9]研究了不同型壳预热温度(350℃和 650℃)对钛合金铸件组织的影响,发现型壳预热温度提高,晶粒尺寸也整体呈增大趋势。王志刚^[10]基于多物理场耦合模型,系统解析了离心转速对组织形态的调控机制。在重力铸造条件下,凝固组织呈现显著的形态分层,即铸型界面处形成柱状晶区,而心部区域则生成粗大等轴晶;当离心转速为 160 r/min,晶粒细化效果显著,心部区域晶粒尺寸减小,同时铸型界面仍保留柱状晶特征;进一步提高转速至 280 r/min 时,柱状晶区域面积分数进一步降低,相较于离心转速 160 r/min,全域晶粒尺寸轻微细化,证实离心力场可有效抑制枝晶粗化。FENG X 等^[11]发现在 673 K 的型壳预热温度下,铸件由魏氏组织和集束组织混合组成。随预热温度升高至 773 K,铸件主要由 α 集束组织组成。对比发现,随着模具预热温度升高,组织单元尺寸增大。WU S P 等^[12]发现随着模具转速增加、熔体过热度降低和模具热扩散系数降低,等轴晶区域比例增大,且转速的作用远大于过热度与模具材质的作用。

针对具有复杂几何构型与大壁厚梯度(最小壁厚约 3 mm)的钛合金支板铸件精密成形难题,本研究通过多尺度数值模拟与试验表征相结合的方法,系统探究了离心铸造工艺参数(转速为 60~180 r/min,型壳预热温度为 25~300℃)对铸件内部缩孔缩松缺陷及显微组织(晶粒形貌/尺寸分布)的影响,并对支板不同壁厚处的微观组织进行表征,分析壁厚对微观组织的影响,以期对钛合金支板件铸造提供参考。

1 支板铸件结构分析及试验表征

中介机匣支板铸件是中介机匣内部的关键承力部件,兼具结构支撑、载荷传递、气动优化和附件安装等功能,其制造质量直接影响中介机匣的结构完整性与服役寿

命。铸件材质为 TC4 钛合金,其化学成分见表 1,铸件整体轮廓尺寸为 258.924 mm×95.004 mm×333.616 mm,质量为 5.08 kg,属中型精密铸件。三维结构特征见图 1。铸件盲腔最大宽度为 24.46 mm,盲腔深度达 333.616 mm,盲腔外侧大面积壁厚为 4.67 mm,内腔 2 根加强筋壁厚为 3.45 mm,为支板最薄壁厚处,盲腔另一侧与基座连接,呈半封闭状态,基座厚度为 22.87 mm。深宽比为 13.6:1 的盲腔结构与 6.63:1 的壁厚梯度,导致熔体充型过程中流动前沿温度梯度剧烈变化,易产生缩孔、缩松缺陷,显著降低成品率。

表 1 ZTC4 合金主要化学成分

Tab.1 Main chemical composition of ZTC4 alloy									%
w_B									
Al	V	Si	C	O	N	H	Fe	Ti	
6.40	3.98	0.02	0.014	0.17	0.006	0.002	0.06	余量	

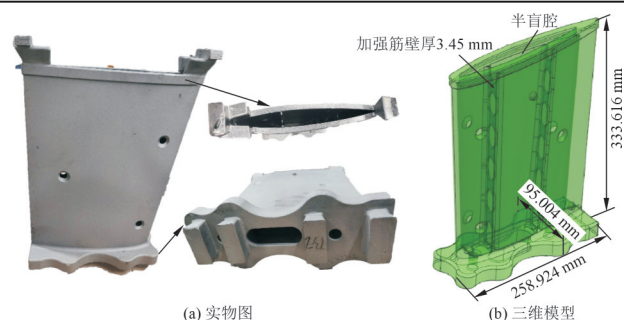


图 1 支板铸件实物图和三维模型

Fig.1 Product and 3D model of strut casting

1.1 支板铸件铸造工艺方案

支板铸件的铸造工艺采用底注式离心浇注,以实现顺序凝固与冒口补缩,支板厚大支座被置于离心远端,利用离心力与半径平方正相关的物理规律,显著增强该区域金属液动态压力,强制驱动补缩金属液向热节区流动。在离心近端设置冒口,弥补低离心压力区的补缩能力。浇注系统配置多股横浇道盘使金属液分流进入型腔,浇注系统设计见图 2。基于华铸 CAE 软件进行数值模拟,具体流程包括:几何模型导入、网格剖分(网格尺寸为 1.9 mm,铸件共剖分了 628 577 个六面体网格)、型壳参数设定(型壳厚度为 10 mm)、材料属性配置及界面传热系数[型壳与铸件传热系数为 500 W/(m²·K),型壳与空气传热系数为 16.8 W/(m²·K)]设置。工艺参数设置:浇注温度为 1 720℃,浇注时长为 5.5 s。型壳预热温度设定为 25、100、200 和 300℃,离心转速设定为 60、90、120、150 和 180 r/min,共形成 20 组模拟方案,见表 2。采用离心铸造旨在利用离心力减少铸件缺陷,同时避免型壳损坏。针对支板铸件,多次试验表明转速超过 150 r/min 时跑火风险增加,故 180 r/min 点仅用于研究离心转速对缩孔缩松体积的影响,不用于最终铸造工艺;而在实际生产中,型壳预热

温度为 25 和 100 ℃ 时,铸件内部气孔缺陷多,且工厂安全装炉温度上限为 200 ℃。

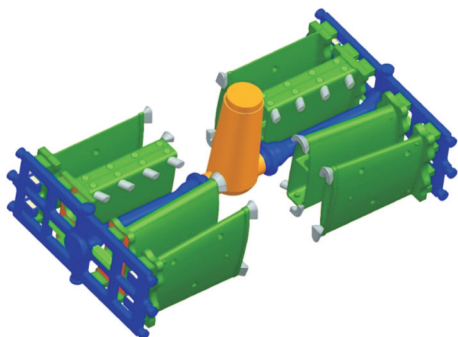


图2 支板铸件浇注系统的设计图

Fig.2 Designed diagram of gating system for strut casting

表2 支板铸件不同铸造工艺方案设计

Tab.2 Casting process scheme design for strut castings

组别	离心转速 $v_c/(r \cdot \min^{-1})$	型壳预热温度 $T_{\text{mold}}/^\circ\text{C}$
1	180	25
2	150	25
3	120	25
4	90	25
5	60	25
6	180	100
7	150	100
8	120	100
9	90	100
10	60	100
11	180	200
12	150	200
13	120	200
14	90	200
15	60	200
16	180	300
17	150	300
18	120	300
19	90	300
20	60	300

1.2 支板微观组织表征

选取 4 组典型工艺参数(2、12、14 和 15 组)制备的支板铸件进行剖切。在每个支板的 3 个不同壁厚区域(厚度关系为区域 1>区域 2>区域 3)进行金相取样,试样尺寸均为 10 mm×10 mm,取样位置见图 3。其中,区域 3 用于对比铸造工艺参数差异,3 组区域共同用于探究壁厚变化对显微组织的影响。试样依次经 400~4 000



图3 支板铸件组织表征剖切位置

Fig.3 Sectioning position for microstructure characterization of strut casting

目 SiC 砂纸逐级研磨后,采用 SiO₂ 悬浊液进行镜面抛光,并用 Kroll 腐蚀剂(3 mL 的 HF+5 mL 的 HNO₃+92 mL 的 H₂O)进行表面腐蚀,最后使用 MR600 金相显微镜观察显微组织。

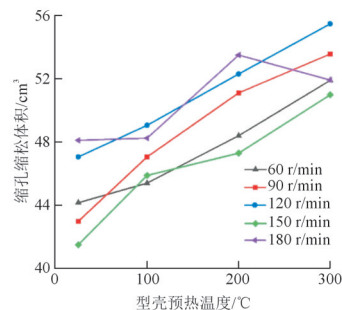
2 模拟结果与分析

2.1 离心转速与型壳预热温度对孔松缺陷的影响

对不同离心转速与型壳预热温度下的支板铸件进行缩孔缩松缺陷分析。由于不同工艺下缩孔缩松缺陷的位置基本一致,仅展示离心转速为 150 r/min,型壳预热温度为 25 ℃ 时的缺陷分布结果,见图 4。图中红色区域代表缩松,黑色区域代表缩孔。可以发现,缩松主要分布在支板侧壁区域,缩孔则集中分布于铸件底座。这是由于底座几何厚度较大形成热节,导致缩孔产生。而支板侧壁壁厚较薄,冷却速率快,引发枝晶间补缩不足,从而形成弥散性缩松。由图 4b 可以看出,当型壳预热温度恒定时,随着离心转速从 60 r/min 增至 180 r/min,缩孔缩松体积未呈现显著单调变化趋势。这是因为一方面,离心转速提高产生的强离心压力可提升补缩效率^[13-14],有利于抑制缩孔缩松的形成;另一方面,转速提高加剧了金属液的紊流效应^[15],导致温度场分布不合理、热收缩不均匀,进而影响金属液的凝固过程,反而增加缩孔缩松缺陷。这两种机制的共同作用导致缩孔缩松缺陷体积的波动。值得注意的是,当转速为 150 r/min 时(除型壳预热温度为 100 ℃ 以外),缩孔缩松缺陷总体积达到最小值。在固定离心转速条件下,型壳预热温度由 25 ℃ 升至 300 ℃ 时,缩孔缩松体积整体呈现随温度升高而增加的趋势(180 r/min 下 200~300 ℃ 的下降除外)。孔松体积与温度升高成正相关性,这符合 SONG Y Q 等^[3]的研究结论,其根本原因是,型壳预热温度升高显著减缓了冷却速率,延长了金属液在糊状区的停留时间,导致枝晶骨架过早形成并阻塞补缩通道,从而加剧了缩松的聚集。



(a) 150 r/min, 25 ℃ 下缩孔缩松缺陷分布图



(b) 缩孔缩松缺陷体积统计

图4 不同铸造工艺对支板铸件内部缩孔缩松缺陷的影响

Fig.4 Influence of different casting processes on internal porosity defects of strut castings

对离心转速为 150 r/min、型壳预热温度为 25 ℃ 铸造的支板铸件进行 X 射线检测,并结合数值模拟结果进行对比分析,见图 5。可以看出,铸件侧壁区域密集分布缩松缺陷,底座部位存在明显缩孔,其空间分布规律与模拟预测一致。

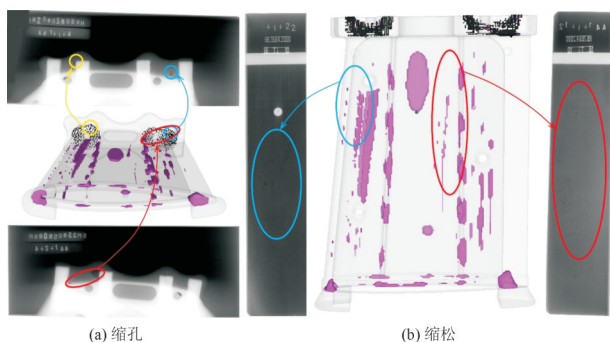


图 5 支板铸件不同位置数值模拟与 X 射线检测的孔松缺陷分布对比

Fig.5 Comparison between numerical simulation and X-ray detection results for porosity defect distribution of strut casting at different positions

2.2 不同离心转速与型壳预热温度对微观组织的影响

典型铸造工艺参数下的支板铸件位置 3 处晶粒形貌见图 6。可以看出,位置 3 为尺寸较为细小的等轴晶。对晶粒尺寸进行统计分析,见图 7。可以看出,当离心转速从 60 r/min 增至 150 r/min 时,晶粒平均半径由 0.355 3 mm 减小至 0.334 4 mm,降幅为 5.9%,同时晶粒尺寸标准差降低约 10.6%,表明晶粒粗化与分布均匀性增大。这是由于转速提高增强了熔体流动与对流传热,加速了冷却过程,促使熔体过冷度快速升高,从而促进形核并细化晶粒组织。相比之下,型壳预热温度从 25 ℃ 升至 200 ℃ 时,晶粒平均半径由 0.311 3 mm 增至 0.334 4 mm,增长约 7.4%,但标准差降低约 5.3%,说明晶粒尺寸分布趋于均匀。这归因于提升型壳预热温度减缓了冷却速率,延缓了凝固过程,使得 β 相晶粒在相对稳定的热环境中充分生长,从而在缓慢冷却条件下形成平均尺寸更大且分布更均匀的显微组织。

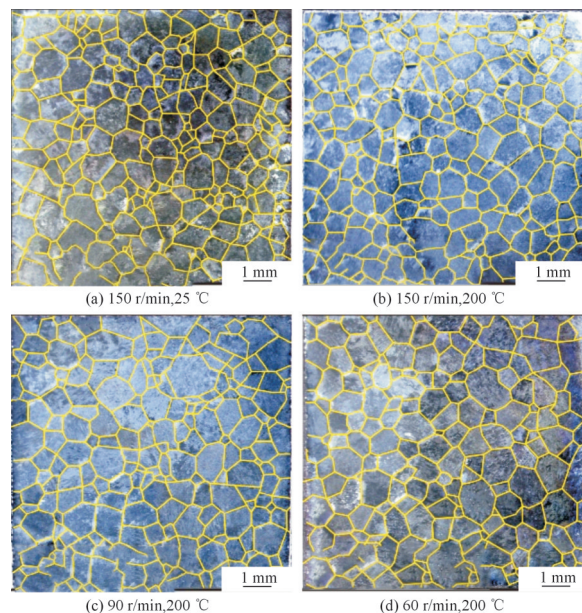


图 6 不同铸造工艺下支板铸件位置 3 处晶粒形貌图

Fig.6 Grain morphologies of strut castings at position 3 under different casting processes

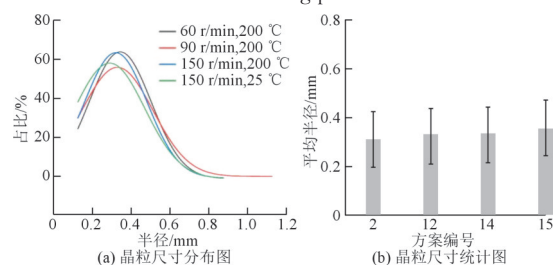


图 7 不同铸造工艺对支板铸件微观组织的影响

Fig.7 Influence of different casting processes on microstructure of strut castings

2.3 支板不同区域微观组织分析

通过系统分析离心转速与型壳预热温度对钛合金支板铸件孔松缺陷及显微组织的协同影响可知,采用离心转速为 150 r/min、型壳预热温度为 200 ℃ 的铸造工艺时,铸件表现出双重优化特性,缩孔缩松缺陷总体积降至低值,且晶粒尺寸分布均匀性最佳。基于此优选参数制备的支板铸件晶粒形貌及尺寸分析,分别见图 8 和图 9。可以看出,随壁厚减小,晶粒平均半径逐渐

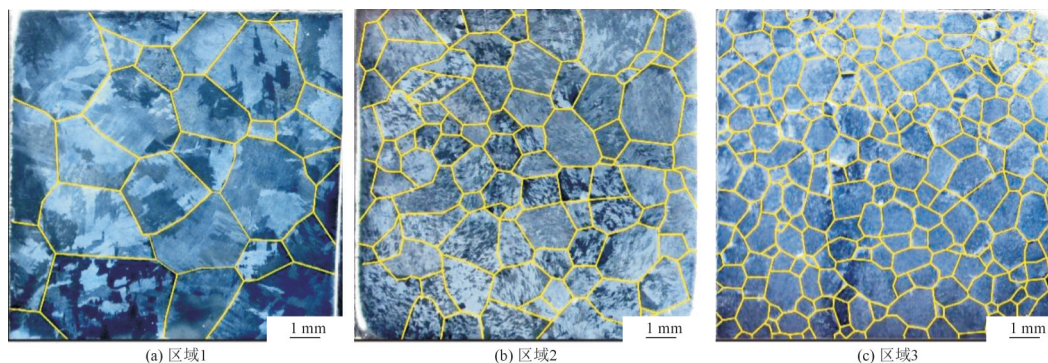


图 8 150 r/min、200 ℃ 条件下支板不同壁厚区域晶粒形貌

Fig.8 Grain morphologies of strut casting at different wall thickness areas under 150 r/min and 200 ℃

减小,依次为0.401、0.195和0.121 mm,且分布均匀性持续提升。这是由于薄壁区局部冷却速率大,通过增大过冷度促进形核密度指数级增长,同时高温梯度加速枝晶择优生长,最终实现晶粒尺寸缩减与分布均匀性同步优化。

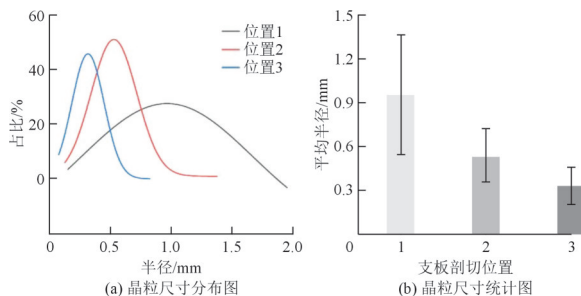


图9 150 r/min, 200 °C条件下支板壁厚对微观组织的影响
Fig.9 Influence of wall thickness on microstructure of strut casting under 150 r/min and 200 °C

3 结 论

(1) 随着离心转速的升高(60 r/min增至180 r/min),缩孔缩松体积均未呈现显著单调变化趋势,但当转速为150 r/min时(除型壳预热温度为100 °C以外),缩孔缩松缺陷总体积达到最小值。在固定离心转速条件下,随着型壳预热温度从25 °C升高至300 °C,缩孔缩松体积与温度升高表现出高度正相关性。

(2) 随着离心转速的升高(60 r/min增至150 r/min),晶粒尺寸逐渐变小,尺寸分布逐渐均匀;型壳预热温度从25 °C升至200 °C时,晶粒平均半径增加,晶粒尺寸分布趋于均匀。

(3) 在离心转速为150 r/min、型壳预热温度为200 °C的条件下,钛合金支板铸件内部缩孔缩松缺陷少且微观组织均匀,是较为理想的钛合金支板铸造工艺参数。

参 考 文 献

- [1] CHONG Y, GHOLIZADEH R, YAMAMOTO K, et al. New insights into the colony refinement mechanism by solute boron atoms in Ti-6Al-4V alloy[J]. Scripta Materialia, 2023, 230: 115 397.
- [2] LIU T Y, SHI K, ZHAO J, et al. Effect of hot isostatic pressing processing parameters on microstructure and properties of Ti60 high temperature titanium alloy[J]. China Foundry, 2023, 20(1): 49-56.
- [3] SONG Y Q, WANG G D, ZHANG Y, et al. Mechanism of trace oxygen promoting ductility in as-cast Ti-6Al-4V alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2025, A930: 148 176.
- [4] YU W H, WU G Q, QIE X W, et al. Effect of structural features on microstructure and properties homogeneity based on quantification and statistical analysis for large-scaled complex titanium alloy castings[J]. International Journal of Metalcasting, 2024, 18(2): 1 535-1 546.
- [5] 伞晶超, 姬彦巧, 顾园. 钛合金底板石墨型离心铸造工艺优化[J].

特种铸造及有色合金, 2015, 35(8): 879-881.

- [6] 李重阳, 刘时兵, 徐凯, 等. 大尺寸钛合金阀体石墨型铸造工艺研究[J]. 铸造, 2023, 72(2): 188-192.
- [7] 刘铁军. 钛合金叶轮离心铸造数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [8] TAO P, SHAO H, JI Z J, et al. Numerical simulation for the investment casting process of a large-size titanium alloy thin-wall casing[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2018, 28(4): 520-528.
- [9] ZHANG S Y, LI J S, KOU H C, et al. Effect of mold temperature and casting dimension on microstructure and tensile properties of counter-gravity casting Ti-6Al-4V alloys[J]. China Foundry, 2016, 13(1): 9-14.
- [10] 王志刚. 钛合金立式离心精密铸造凝固组织数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [11] FENG X, QIU J K, MA Y J, et al. Influence of processing conditions on microstructure and mechanical properties of large thin-wall centrifugal Ti-6Al-4V casting[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 32(4): 362-371.
- [12] WU S P, LIU D R, GUO J J, et al. Numerical simulation of microstructure evolution of Ti-6Al-4V alloy in vertical centrifugal casting[J]. Materials Science and Engineering, 2006, A426(1): 240-249.
- [13] 孙向阳. 真空自耗凝壳炉熔炼坦克轮轮毂离心铸造数值模拟研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2024.
- [14] 杨宇杰. TC4合金轮毂离心铸造过程数值模拟及性能研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2024.
- [15] SEN S, REDDY S, MURALIDHARA B K, et al. Study of flow behaviour in vertical centrifugal casting[J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 24: 1 392-1 399.

(编辑: 刘晨辉)

欢迎关注《特种铸造及有色合金》微信公众号矩阵, 文章信息、行业研究动态与资讯信息早知道!



特种铸造
(关注铸造及有色合金领域重要研究成果)



压铸界
(压铸领域最新动态及研究)



青稞讲堂
(金属领域青年科学家最新研究成果)



特种铸造及有色合金杂志
(文章动态时刻关注)