

高温合金薄壁件精密铸造技术研究进展

江海涛^{1,2}, 金磊^{1,2}, 马岚波¹, 关洋^{1,2}, 李澳奇^{1,2}, 荆高扬¹, 李毅鹏^{1,2}, 税国彦¹, 孙逊^{1,2}

(1. 中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司, 辽宁省沈阳市, 110022

2. 高端装备铸造技术全国重点实验室, 辽宁省沈阳市, 110022)

*通讯作者: 金磊, 男, 正高级工程师, 博士。E-mail: 13842017963@163.com

摘要: 高温合金薄壁铸件作为航空发动机热端部件的关键构件, 其成形工艺直接影响产品的精度、性能及服役寿命。本文主要从真空重力熔模铸造、低压铸造、真空吸铸、调压铸造系统综述高温合金薄壁件精密铸造技术的工艺特点、工艺原理、发展历史与应用现状, 并对未来航空发动机高温合金薄壁件精密铸造技术进行了展望。

关键词: 高温合金, 薄壁件, 关键构件, 精密铸造技术, 航空发动机

A concise and informative title of article

Jiang Haitao^{1,2}, Jin Lei^{1,2}, Ma Lanbo¹, Guan Yang^{1,2}, Li Aoqi^{1,2}, Jing Gaoyang¹, Li Yipeng^{1,2}, Shui Guoyan¹, and Sun Xun^{1,2}

(1.China Academy of Machinery Shenyang Research Institute of Foundry Co.,Ltd, Shenyang ,China, 110022

2.National Key Laboratory of Advanced Casting Technologies, Shenyang ,China, 110022)

Abstract: Superalloy thin-walled castings are the key components of aero engine hot-end components, and their forming process directly affects the accuracy, performance and service life of the products. This paper mainly reviews the process characteristics, principles, development history, and current application status of precision casting technology for high-temperature alloy thin-walled components, focusing on vacuum gravity lost foam casting, low pressure casting, vacuum suction casting, and adjusted pressure casting systems, and looks forward to the precision casting technology of high-temperature alloy thin-walled components for future aerospace engines.

Keywords: Superalloy, Thin-walled casting, Key building blocks, Precision casting technology, Aero engines

1 前言

高温合金优异的高温力学性能与抗氧化、耐腐蚀性能, 使其成为航空发动机核心热端承力组件的关键基础材料, 目前已被广泛应用于航空发动机的燃烧室、涡轮叶片、涡轮盘、压气机叶片、机匣等, 其成形过程的物理机制与工艺控制策略直接关联航空关键构件的综合性性能指标^[1]。

随着航空发动机轻量化、高效化的需求不断提高, 高温合金精密铸件不断向复杂化、薄壁化发展。钢铁研究总院研制出的密封片薄壁复杂铸件, 长度约 500mm, 厚度 0.8~1mm, 并有多处加强筋和变截面^[2]。

当前我国高温合金薄壁构件精密铸造技术主要依赖传统重力铸造工艺, 其更高的精度控制以及结构完整性已经成功制备出涡轮盘、导向叶

片等复杂薄壁内腔铸件。反重力铸造技术因其特有的充型动力学特性, 包括平稳的熔体传输过程、优异的缺陷抑制能力以及细晶组织调控优势, 也在薄壁铸造领域展现出显著的技术价值。

本文主要针对高温合金薄壁件重力与反重力铸造当前研究成果与应用进行相关总结和展望。

2 精密铸造技术

2.1 重力铸造工艺

重力铸造工艺本质上是利用液态金属自重势能实现铸型充型的物理成形方法, 其基本工艺原理如图 2-1 所示。根据工艺实现形式的差异, 重力铸造可涵盖砂型铸造、金属型铸造、熔模铸造及消失模铸造等工艺, 其共性特征在于充型动力学过程均以重力场作为主导驱动力。

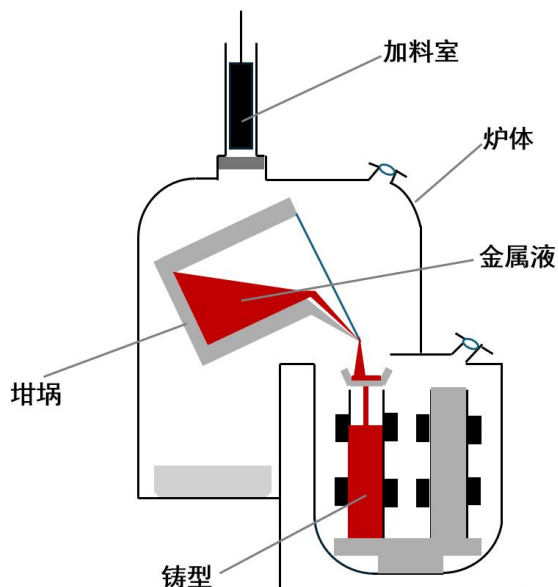


图 2-1 重力铸造原理图
Fig.2-1 Gravity casting schematic

砂型重力铸造在成形精度方面存在技术瓶颈，难以满足高复杂度构件的尺寸公差要求；金属型重力铸造虽具有较高的工艺稳定性，但其工艺适应性局限在几何特征简单的轴对称部件的批量生产；消失模铸造浇注时塑料模样气化会有异味，污染环境，而且铸件容易出现与泡沫热解有关的缺陷；通过构建多维度工艺评价体系，对凝固成形技术进行系统对比发现：熔模精密铸造在技术经济性指标、制造周期效率、环境友好性及成形精度控制等方面展现出综合优势。其技术先进性更体现在可实现材料本征减重与结构效能提升的双重轻量化目标^[3,4]。由于高温合金在真空环境可以避免被氧化和污染，合金的组织性能也更好控制，能满足特定的应用需求，因此真空重力熔模铸造是目前高温合金薄壁件最常用的重力铸造方法。

2.2 反重力铸造工艺

1937 年，Wetherill 研究团队通过其奠基性工作^[5]实现了铸造技术的全新突破：开发出首套压力介入成形系统，采用逆向充型机制在铸铁模具中成功制备出高强度灰铸铁构件。该技术通过构建压力梯度场实现了熔体逆向传输控制，这项开创性研究标志着反重力铸造技术理论体系的初步建立，如图 2-2 所示的技术原理图。

从工艺学视角定义，反重力铸造是通过构建逆向充型动力学条件，使合金熔体沿重力反方向完成铸型填充与压力凝固的特种铸造技术^[6-9]。其多种技

术优势使得反重力铸造构件具有更优的力学性能、更高的致密度及更少的铸造缺陷^[10-13]。根据其施加压力的形式，可分为低压铸造、差压铸造、真空吸铸以及调压铸造。其中差压铸造虽然对厚壁件提高性能有利，但对于薄壁或超薄壁铸件的充型不利。目前差压铸造主要用于铝镁合金等薄壁复杂压铸铸件中，在高温合金方面有待进一步研究，因此本文不再过多论述。

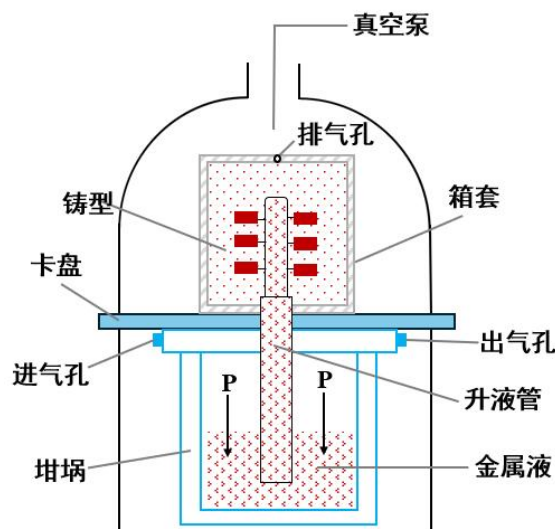


图 2-2 反重力铸造原理图
Fig.2-2 Counter-gravity casting schematic

3 精密铸造技术特点及发展应用

3.1 真空重力熔模铸造

从工艺过程来看，真空重力熔模铸造主要包括以下几个步骤：

(1) 制造蜡模：蜡模是用来形成耐火型壳中型腔的模型，因此要获得尺寸精度高和表面粗糙度小的铸件，蜡模本身就应该具有高的尺寸精度和较小的表面粗糙度。

(2) 制造型壳：在蜡模表面涂覆多层耐火材料，如泥浆、石英砂等，或者预先将陶瓷型芯嵌入蜡膜内部，形成铸件所需的复杂内腔结构再进行耐火材料涂覆，经过干燥和硬化后形成型壳。

(3) 熔化和排出蜡模：将型壳加热至一定温度，使蜡熔化并排出型壳。

(4) 真空条件下熔铸金属：在真空条件下重熔和精炼母合金，从浇口杯处让金属液在重力的作用下注入型壳中，待其冷却凝固后形成铸件。

(5) 清理和后续处理：将铸件从型壳中取

出,进行清理和后续处理,如去除毛刺和浇冒口、打磨、热处理、喷砂、质量检验等。

真空重力熔模铸造是第三代航空发动机与重型燃气轮机涡轮叶片制造的核心工艺,其中导向叶片与工作叶片作为典型薄壁气冷结构件,制造过程需满足三大技术挑战:①超复杂内腔气膜

孔结构精确成形;②定向凝固/单晶组织的跨尺度控制;③服役环境适配的表面完整性要求^[14]。近年来,我国在精密铸造领域取得多项技术突破,通过应用真空重力熔模铸造工艺,已成功研制出叶片等具有复杂内腔薄壁结构的高性能高温合金构件,如图 3-1 所示。



图 3-1 高温合金真空重力熔模铸件^[14]

Fig.3-1 Superalloy vacuum gravity investment castings^[14]

但采用真空重力熔模铸造工艺生产薄壁铸件时可能会出现薄壁部位散热过快导致冷隔、凝固补缩距离过短或铸件热节分散导致缩松、铸件结构形状复杂导致变形或裂纹等问题,如图 3-2 所示,因此相关学者对其进行了大量研究。

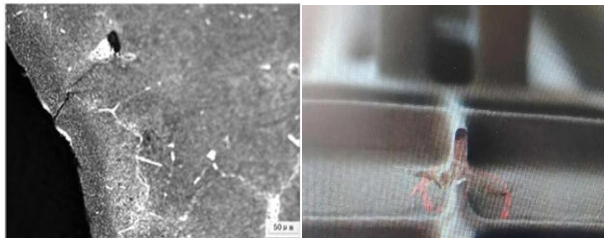


图 3-2 熔模铸造 K424 薄壁铸件裂纹缺陷^[15]

Fig.3-2 Crack defects of K424 thin-walled castings formed by investment casting process^[15]

穆岩团队^[16]通过系统评述航空发动机涡轮叶片用陶瓷型芯的演进路径,为复杂内腔成形研

究提供了理论支撑。吴晓娟等学者^[15]针对 K424 镍基高温合金复杂薄壁板件的铸造缺陷控制问题,系统探讨了浇注系统设计与工艺参数对缩松缺陷的关联机制。通过开展蜡模参数优化、型壳制备工艺改进及熔铸参数试验验证,最终确立了适用于该构件的真空重力熔模精密铸造工艺方案,成功制备出符合质量标准的薄壁板件。张敬凯团队^[17]通过系统实验优化出适配的真空重力熔模铸造工艺参数组合,成功实现了从铸造成形到机械加工装配的全流程验证,初步构建了 K4169 复杂薄壁环形构件精密铸造的工艺技术体系。

3.2 反重力铸造

在反重力开发的早期阶段,E.F. Lake^[18,19]引入了低压铸造并获得了专利。低压铸造在第二次世界

大战开始时正式用于工业生产^[20]，由于低压铸造中的低压（20-60 kPa），其复杂薄壁铸件可能会出现缩孔、冷隔和气孔。随着低压铸造的不断发展，在 20 世纪 60 年代，在保加利亚首次出现了差压铸造^[21]。然而，差压铸造铸模中存在气体会降低合金熔体填充能力，并导致铸件中出现夹杂物^[20]。后来，在 20 世纪 70 年代初期，真空被引入反重力铸造工艺^[22]。尽管真空吸铸的加工阶段是稳定的，但在凝固阶段没有进料压力，不利于顺序凝固补缩，成形高度受限。并且充型时间较短，短时间内铸型特别是型壳内残留气体不能全部逃逸，易造成铸件气孔缺陷，尤其是在铸件的顶部。于是随着真空吸铸的引入，后续有人便将其与低压铸造和差压铸造结合起来，出现了真空低压、真空差压等新型反重力铸造方式。1987 年，曾建民和周尧和^[23]又发明了调压铸造，调压铸造结合了低压铸造、差压铸造和真空吸铸的优点，近几十年来，反重力铸造技术也逐步应用到高温合金上。

3.2.1 低压铸造

低压铸造（Low Pressure Casting 简称 LPC）工艺^[24]的核心原理（如图 3-3 所示^[25]）是通过向密封压力室通入压缩气体，使坩埚内的金属液在可控压力驱动下沿升液管充型，并在保压环境下完成凝固结晶。该工艺通过压力场与凝固动力学的协同控制，有效提升金属液的补缩能力。因此，与重力铸造取得的铸件相比，低压铸造铸件可以具备更细的晶粒尺寸和更好的力学性能^[26]，如下图 3-4 所示。

低压铸造充填效果优异，金属液可在压力作用下平稳填充型腔，减少气孔与杂质缺陷；凝固阶段通过持续施加压力补充材料收缩，使铸件内部组织致密，显著提升力学性能和密封性。马岚波等^[26]利用真空低压铸造（VLC）制备 K446 合金燃气轮机的精流框架，发现与重力铸造相比，800 °C 时的抗拉强度提高了约 10%。

3.2.2 真空吸铸

真空吸铸（Vacuum Suction Casting 简称 VSC/CLA，CLA 源于发明者 Chandley、Lamb 与空气铸造的英文缩写^[20]）的工艺原理如图 3-6 所示^[25]。其核心设备由上下密封腔室构成，铸型安装于上室且浇口朝下，通过升液管与下室熔炼坩埚形成密闭连通。工艺过程包含以下步骤：对上室实施真空负压，使下室金属液在压差驱动下沿升液管逆向充填铸型，并在保压阶段维持压力场

稳定直至铸件完全凝固^[28]。

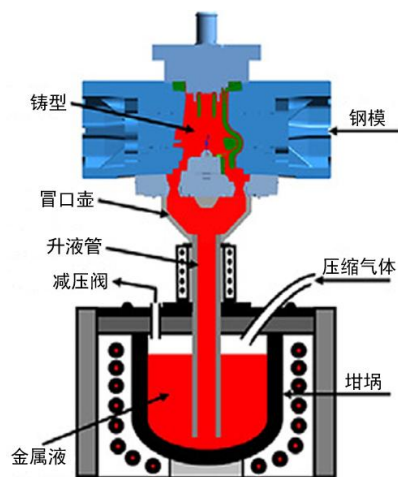


图 3-3 低压铸造原理图^[25]

Fig.3-3 Schematic diagram of low pressure casting^[25]



图 3-4 低压铸造和重力铸造的试棒宏观晶粒度^[26]

Fig.3-4 Macroscopic grain size of test rods for low pressure casting and gravity casting^[26]

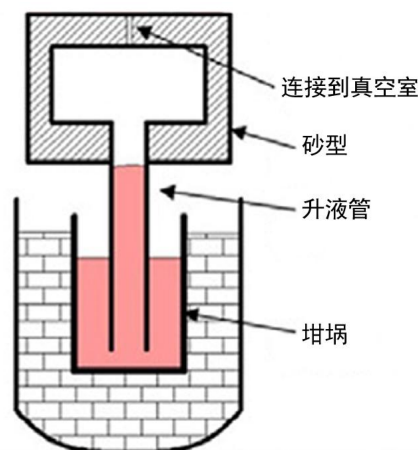


图 3-5 真空吸铸原理图^[25]

Fig.3-5 Schematic diagram of Vacuum Suction Casting ^[25]

在技术方面，美国 Hitchiner 公司开发的 CLA 法、CPV 法、CV 法、C3 法等反重力真空吸铸工艺及其设备，在国际上处于领先地位。并且 Hitchiner 公司结合三种反重力铸造工艺在 NASA 资助的复杂网格状 In718 合金铸件研究中，成功

实现了直径 1.58mm 高温合金细丝的高精度铸造^[29]。

3.2.3 调压铸造

调压铸造 (Adjusted Pressure Casing 简称 APC) 的工艺原理^[30]为: 通过对上下腔室同步抽真空形成型腔真空环境, 利用两室压差驱动金属

液逆重力充填型腔; 充型后动态调节压力差, 使凝固过程从负压切换至高压, 在可控压力下完成铸件致密凝固, 如图 3-7 所示^[25]。高精度复杂的薄壁铸件可以通过调压铸造轻松铸造。调压铸造的铸件很少甚至没有铸造缺陷。改善了薄壁铸件的充型能力及铸件性能。

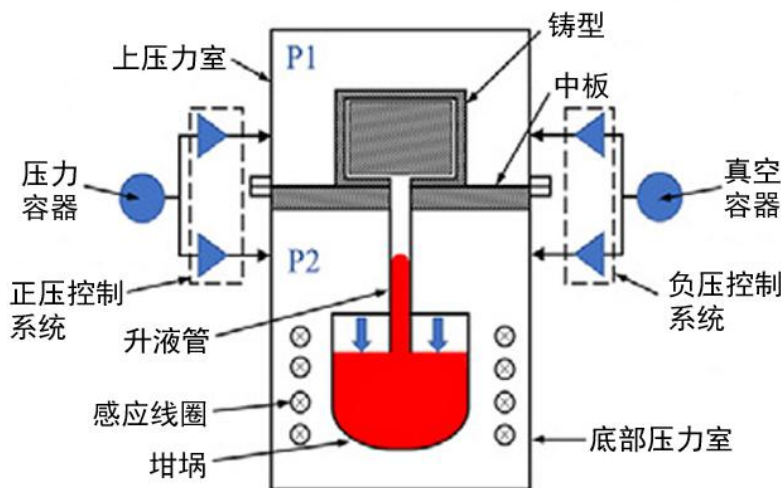


图 3-6 调压铸造原理图^[25]

Fig.3-6 Schematic diagram of adjusted pressure casing [25]

调压铸造特别适用于航空航天领域 1-5 mm 厚度的复杂薄壁构件高精度成形^[31]。董等^[32]通过调压铸造实验和数值模拟研究了复杂薄壁 IN718 铸件的填充能力和凝固微观组织。上海交通大学孙宝德研究组^[33]系统开展了高温合金调压铸造技术攻关, 并基于自主研发的调压铸造装备成功实现了航空发动机燃烧室浮动壁组件 (基板厚度 1.0mm、微孔直径 0.8mm 且呈多维角度分布) 的精密成形, 如图 2-8 所示^[33]。

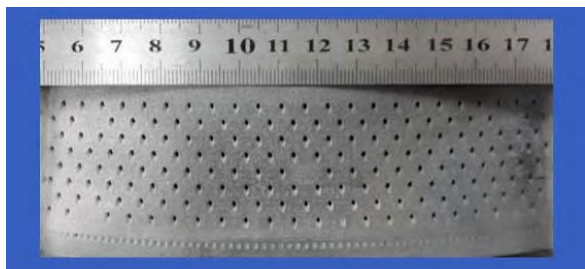


图 3-7 航空发动机燃烧室浮动壁瓦片^[33]

Fig.3-7 Floating wall tile of aeroengine combustion chamber^[33]

4 应用展望

针对高温合金熔点高、密度大、氧化敏感等特性, 需进一步研发耐高温抗热震的铸型材料 (如高纯度陶瓷基复合材料) 和密封技术。通过纳米涂层、梯度材料设计提升铸型和升液管的高温稳定性, 同

时开发高效惰性气体保护系统以抑制熔体氧化。此外, 结合多物理场耦合技术 (如超声振动辅助充型、电磁场调控凝固)、人工智能 (AI) 及大数据分析等, 可有效改善高温合金熔体流动性, 减少缩松和夹杂等缺陷。

未来高温合金精密铸造技术将向更大尺寸、更复杂结构的航空发动机部件 (如整体涡轮盘、大型复杂机匣) 延伸。通过开发超大型铸造装备, 有望实现各类高温合金薄壁件的高效生产, 满足超高温、高应力服役环境需求。

参考文献:

- [1] 熊艳才. 航空复杂构件精确成形技术基础研究[J]. 航空制造技术, 2010, 53(2): 54-57.
- [2] 姚雷, 王倩, 谢秋峰, 刘浩然, 李杨, 李培佳, 孔胜国, 李俊涛. 高温合金薄壁密封片的精铸工艺[J]. 铸造, 2016, 65: 333-335.
- [3] SINGH D, SINGH R, BOPARAI K S. Development and surface improvement of FDM pattern based investment casting of biomedical implants: A state of atr review[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 31: 80-95.
- [4] LUO A A. Magnesium casting technology for structural applications[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2013, 1: 2-22.

- [5] S.P. Wetherill, J. Franklin. I. 224 (1937) 153-162
- [6] 李新雷, 郝启堂, 介万奇. 反重力铸造对高强度铝合金凝固组织影响的研究[J]. 中国材料进展 2010, 29 (11) : 16-20.
- [7] 杨茂海. 反重力铸造工艺参数对构件成形过程的影响[J]. 科技信息, 2011 (33) : 76-109.
- [8] LI K, CHENG M C, CHANG E. Effect of pressure on the feeding behavior of A356 alloy in low pressure casting[J]. AFS Transactions, 2001, 26: 1-9.
- [9] 祝汉良, 贾均, 郭景杰, 等. 高强韧 A357 合金凝固组织及热处理工艺的研究[J]. 特种铸造及有色合金, 1997 (1) : 22-24.
- [10] YANG J R, WANG H, WU Y L, et al. A combined electromagnetic levitation melting, counter-gravity casting, and mold preheating furnace for producing TiAl alloy[J]. Advanced Engineering Materials, 2018, 20: 517-526.
- [11] LI X L, HAO Q T, JIE W Q, et al. Development of pressure control system in counter gravity casting for large thin-walled A357 aluminum alloy components[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2008 (4) : 847-851.
- [12] 余志文, 李发国, 张佼, 等. 高温合金大型薄壁铸件反重力铸造技术进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2012, 32 (12) : 1103-1107.
- [13] 周中波, 李金山. 工艺参数对低压铸造薄壁件充型能力的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2008, 28(1): 23-25.
- [14] 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.
- [15] 吴晓娟. K424 复杂薄壁件熔模铸造工艺研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2018.
- [16] 穆岩, 王树森, 白炜琛, 等. 高温合金熔模精密铸造陶瓷型芯研究进展[J]. 铸造技术, 2024, 45(06): 503-513.
- [17] 张敬凯. K4169 高温合金复杂环形件熔模精密铸造工艺的研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2018.
- [18] Z.J. Feng, Y.F. Li, W. Wang, F. Shi, J. Wu, M. Ruan, Foundry Equip. Technol. (2019)71-76. [1]
- [19] G.S. Luo, Low Pressure Casting (in Chinese), first ed, National Defence Industry Press, Beijing, 1989. [12]
- [20] Q.S. Yan, H. Yu, B.K. Wei, Z.F. Xu, C.C. Cai, H. Wan, Foundry 55 (2006) 550-554. [11]
- [21] J.Z. Bai, W.C. Qu, H.W. Wang, X.C. Wang, D.H. Sun, Foundry. Technol. 2 (2000) 16-18. [13]
- [22] G.D. Chandley, Mater. Res. Innov. 3 (1999) 14-23. [14]
- [23] J.M. Zeng, Y.H. Zhou, CN Patent, No. 88106919.1, 1989.[15]
- [24] 沙镇嵩, 韩建民, 李荣华, 等. 差压铸造及其液面加压控制系统[J]. 铸造技术, 2004, 25(8): 617-619.
- [25] Du D, An J, Dong A, et al. A review of the progress and challenges of counter-gravity casting[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2025, 216 : 1-26.
- [26] Ma L B, Cheng W J, Guo X L, et al. A new vacuum-assisted low-pressure investment casting process for K446 alloy[J]. China Foundry, 2024, 21(6):702-708.
- [27] Shendye S, King B, Mcquay P. Mechanical Properties of Counter-Gravity Cast IN718[C]//Superalloys.2005.
- [28] Hitchiner Manufacturing Co. I, Reactive alloy casting processes[R], 2008.
- [29] 董安平, 张佼, 王俊, 余志文, 疏达, 王国祥, 孙宝德. 高温合金复杂薄壁铸件精密铸造方法[P], 2012.
- [30] 余志文, 李发国, 张佼, 董安平, 孙宝德. 高温合金大型薄壁铸件反重力铸造技术进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2012, 32(12): 1103-1107.
- [31] 王猛, 曾建民, 黄卫东. 大型复杂薄壁铸件高品质高精度调压铸造技术[J]. 铸造技术, 2004, 25(5): 353-358.
- [32] Dong A, Yan N, Zhang J, et al. Investigation of Thin-Walled IN718 Castings by Counter-Gravity Investment Casting[J]. John Wiley & Sons, Inc. 2015
- [33] 孙宝德, 王俊, 康茂东, 等. 高温合金超限构件精密铸造技术及发展趋势[J]. 金属学报, 2022, 58(4): 16.