Ni-Cr 高温合金薄壁件消失模铸造研究进展

王　维，赵英杰

（重庆科创职业学院 智能汽车与交通学院，重庆 402160）

摘要：Ni-Cr高温合金薄壁铸件常用作高温承载结构，其成形质量受充型完整性、凝固补缩和尺寸稳定性等因素共同限制。消失模铸造（LFC）无需砂芯和分型面，具有近净成形等特点，适合制造复杂结构铸件。本文围绕LFC薄壁高温合金铸件质量、泡沫模样及热解行为、消失模涂层体系、浇注参数、负压与振实、数值模拟及参数优化方法进行总结。研究发现，泡沫模样和涂层体系是影响LFC成形质量的关键。泡沫分解、气体释放会引起金属液前沿变化，增大薄壁区质量控制难度。未来应加强泡沫热解参数、涂层性能、界面换热和典型薄壁件验证数据的积累，采用模拟与试验相结合的研究路线，推动铸造工艺向数字化和精确成形方向发展。

关键词：Ni-Cr高温合金；薄壁件；消失模铸造；涂层；数值模拟

中图分类号：TG249.6；TG146.1　**文献标识码：**A　**文章编号：**1001-4977（2026）10-1083-06

DOI：10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0138

Research Progress on Lost Foam Casting of Ni-Cr Superalloy Thin-Walled Components

WANG Wei, ZHAO Ying-jie

(College of Intelligent Vehicles and Transportation, Chongqing College of Science and Creation, Chongqing 402160, China)

Abstract: Ni-Cr superalloy thin-walled castings are commonly used in high-temperature load-bearing structures, and their forming quality is jointly limited by the integrity of mold filling, solidification feeding, and dimensional stability. Lost foam casting (LFC) has the characteristics of near net shape without sand cores or parting surfaces, which is suitable for the manufacture of complex structural castings. This paper summarizes the quality issues of LFC thin-walled high-temperature alloy castings, the foam patterns and their pyrolysis behavior, the lost foam coating systems, the pouring parameters, the negative pressure and the vibration compaction, the numerical simulation, and the parameter optimization methods. The research shows that the foam patterns and the coating systems are key factors affecting the LFC forming quality. Foam decomposition and gas release can cause changes in the front of the molten metal, increasing the difficulty of quality control in thin-walled areas. Future research should strengthen the accumulation of foam pyrolysis parameters, coating properties, interfacial heat transfer and verification data for typical thin-walled parts, and adopt the route of combining simulation and experiment to promote the development of casting process in the direction of digitization and precision forming.

Key words: Ni-Cr superalloy; thin-walled casting; lost foam casting; coating; numerical simulation

Ni-Cr高温合金是以镍、铬为核心元素的合金化材料，具有较高的高温强度、优良的抗氧化性和耐蚀性，在航空航天、能源装备和高温承载部件中应用较多[1-5]。近年来，复杂高温合金铸件逐渐向大型化、整体化和轻量化发展，薄壁区、转角、凸台和厚薄过渡区增多，这对铸件内部缺陷和尺寸偏差的要求更为严格。薄壁区散热快，金属液流到远端后温度下降明显，因此，冷隔、浇不足、缩孔缩松、气孔夹杂和局部变形往往同时出现[6-10]。

消失模铸造（lost foam casting，LFC）以泡沫模样代替传统型腔，模样涂覆耐火涂层后埋入干砂，浇注时金属液使泡沫逐步热解并占据其原有空间。该工艺无需砂芯和分型面，对复杂结构有一定适应性[11-17]。与普通砂型铸造技术相比，LFC的型腔边界在金属液推进过程中呈现连续变化，金属液前沿、泡沫模样、热解产物、涂层和干砂之间相互影响。若气体和液态热解

基金项目：重庆市教育委员会科学技术研究项目（KJQN202405414）。

收稿日期：2026–05–26 收到初稿，2026–06–05 收到修订稿。

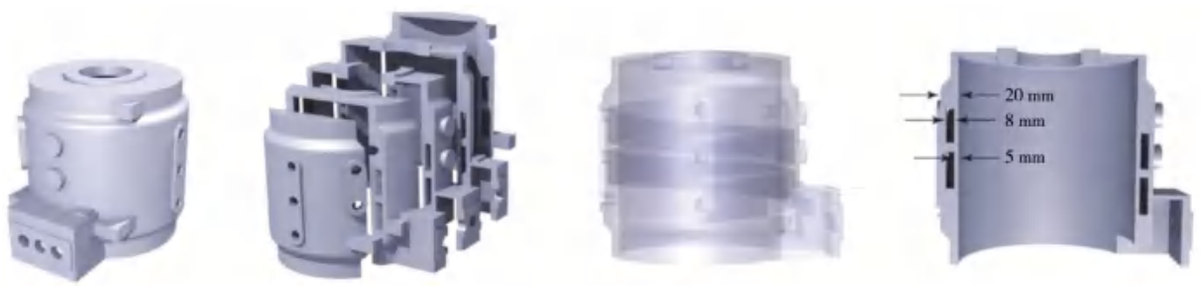
作者简介：王维（1992–），女，讲师，硕士，研究方向为材料加工与先进制造。E-mail：18883713401@163.com

引用格式：王维，赵英杰 . Ni-Cr 高温合金薄壁件消失模铸造研究进展 [J]. 铸造，2026，75（10）：1083–1088.

Wang Wei，Zhao Yingjie. Research progress on lost foam casting of Ni-Cr superalloy thin-walled components [J]. Foundry，2026，75（10）：1083–1088.

残留物无法及时通过涂层和砂层排出，则会导致金属液前沿背压升高，薄壁末端温降加剧，成形缺陷便会集中出现。

目前，LFC研究主要集中在铝合金、铸铁、镁合金和铸钢件中，内容涉及泡沫热解、涂层透气性、负压充型和数值模拟等方面[18-24]。与这些材料相比，Ni-Cr高温合金浇注温度高、熔体密度大、补缩要求高，薄壁结构又会放大前沿压力和局部温降带来的影响。图1[24]为复杂薄壁消失模铸件三维模型，展示了薄壁区、厚薄过渡区、局部凸台、孔洞及内腔结构等典型几何特征，可直观体现复杂薄壁结构在消失模铸造中的成形难点区域。对于Ni-Cr高温合金，上述薄壁区和厚薄过渡区易受到金属液前沿背压、局部温降和热解产物排出状态的共同影响，是冷隔、浇不足、缩孔缩松和尺寸偏差的敏感区域。因此，本文围绕LFC成形高温合金薄壁件的结构和材料特点，重点讨论泡沫模样、涂层体系、浇注与砂箱参数和数值模拟的研究现状，旨在为优化高温合金薄壁件消失模铸造提供理论依据。



（a）总视角　（b）剖面　（c）透视　（d）横截面

图1　复杂薄壁消失模铸件三维模型及典型薄壁结构特征示意

Fig. 1 Three-dimensional model and typical thin-walled structural features of a complex lost foam casting part

1　薄壁高温合金铸件成形质量现状

薄壁高温合金铸件的质量问题主要集中在充型完整性、凝固补缩和尺寸稳定性三个方面。薄壁末端、厚薄过渡区、凸台区和远端汇合区散热条件差异较大，往往是冷隔、浇不足、缩孔缩松和局部变形的集中位置。对LFC而言，泡沫热解产物排出直接影响金属液前沿压力和局部温降。图2展示了金属液推进、泡沫模样消失和流动形态全过程，直观地显示了LFC与普通型腔充型的差别[24]。

（a）0.7 s　（b）1.8 s　（c）2.9 s　（d）4.0 s　（e）5.1 s　（f）6.2 s　（g）7.3 s

图2　消失模铸造充型过程数值模拟

Fig. 2 Numerical simulation of the mold filling process in lost foam casting

值得注意的是，针对Ni-Cr高温合金的消失模铸造研究较少。Arinova等[25]以Fe-Ni-Cr-Co多元耐热合金为对象，采用消失模铸造制备炉用辊类铸件，研究了浇注温度对合金流动性和铸件孔隙率的影响，可为高Ni-Cr含量耐热合金的浇注温度选择、充型稳定性和孔隙控制提供工艺参考。在高温合金常规精密铸造研究中，孙宝德等[3]围绕高温合金超限构件精密铸造技术研究发现，大型复杂高温合金铸件需要同时解决充型、凝固组织、内部缺陷和尺寸控制问题。汪东红等[4]探究了数据驱动镍基铸造高温合金设计和复杂铸件的精确成形，指出材料数据、工艺数据和质量数据的关联是复杂铸件精确制造的重要基础。崔加裕等[6]研究了航空发动机高温合金复杂薄壁精密铸件尺寸精度控制技术，结果表明，薄壁结构、蜡模/型壳变形、凝固收缩和热处理变形都会影响尺寸精度。在具体合金和铸件方面，岑孟江等[7]研究了K403高温合金复杂薄壁件铸造工艺，结果表明，薄壁区和厚薄过渡区对充型与补缩条件较敏感。薛松海等[8]指出K4169合金叶轮离心铸造

工艺参数会影响叶轮内部质量和成形完整性。郑博远等[10]针对K439B高温合金薄壁机匣试验件进行了缺陷预测与工艺优化，结果表明，数值模拟可用于识别缺陷敏感区并改进浇注和补缩方案。

综合可知，高温合金薄壁件的质量问题不是单一缺陷问题。充型不完整会改变后续凝固条件，凝固顺序不合理又会加重缩孔缩松和应力变形。在LFC技术中，泡沫替代、涂层排气和干砂支撑会进一步影响金属液前沿状态。因此，后续部分将分别从泡沫模样、涂层、浇注负压振实和数值模拟四个方面展开。

2 消失模铸造泡沫模样及热解行为现状

泡沫模样是LFC区别于普通砂型铸造的核心工艺要素。已有研究主要从两条线索展开：其一是模样密度、发泡均匀性、表面质量和粘接质量对几何复制的影响；其二是泡沫受热分解后生成的气体、液态残留物和固态残渣对金属液充型前沿的影响。图3给出了消失模铸件实物[24]，外观完整性和表面状态的差异也表明泡沫模样、涂层和浇注条件均会在铸件上留下痕迹。

图3 消失模铸件实物示例

Fig. 3 Examples of the castings produced by LFC

Sands等[19]考察了涂层厚度和砂粒细度对消失模铸件充型行为的影响，结果表明，涂层与砂型条件会改变金属液充型速度和前沿状态。Pacyniak等[20]建立了用于分析消失模铸造过程的试验平台，发现泡沫分解产物、涂层过滤能力和气隙压力之间存在直接联系。针对泡沫模样，普遍认为泡沫密度升高会增加单位体积内聚合物含量，热解产物释放量随之增多；当涂层和砂层排气能力不足时，金属液前沿压力升高，充型速度下降，冷隔、皱皮和浇不足风险增加[18-21]。同时，金属液温度、前沿速度、涂层厚度和涂层透气性也会影响热解区压力，因此泡沫密度的影响通常不是单独表现，而是与排气条件和浇注条件一起出现。

泡沫热解研究主要以铝合金、铸铁和一般 LFC 体系为对象。这些研究为理解泡沫分解、气体释放和金属液前沿变化提供了基础，但与 Ni-Cr 高温合金薄壁件仍有差别。二者的相同点在于泡沫热解产物均需依靠涂层和砂层排出，金属液前沿压力都会影响充型稳定性；不同点在于Ni-Cr高温合金浇注温度更高、薄壁区热容量更小，前沿背压和局部温降更容易转化为冷隔、浇不足及表面夹杂。高温合金浇注温度较高，泡沫分解可能更集中；薄壁结构散热快，前沿受阻后更容易转化为局部温降和充型缺陷。总体而言，泡沫模样研究为LFC质量控制提供了重要基础，但针对高温合金薄壁件的热解参数和缺陷转化数据仍然不足。

3 消失模铸造涂层体系现状

涂层体系是LFC研究中较早受到关注的内容。消失模涂层既要起到耐火隔离和改善表面质量的作用，也要为泡沫热解产物提供排出通道。研究人员通常从透气性、厚度、高温强度、涂料流变性、干燥质量和溃散性等方面评价涂层性能[14，16，18-23]。为了保证形貌和孔隙观察具有可比性，涂层研究通常需要标准化制样，图4即为涂层表面形貌样品制备过程[21]。

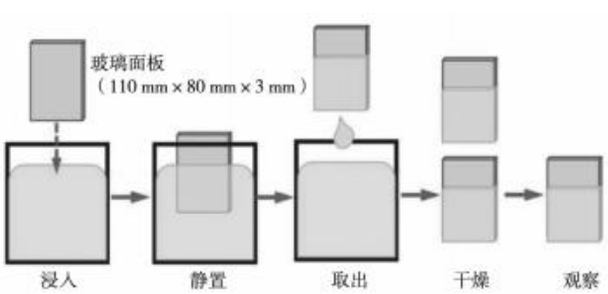
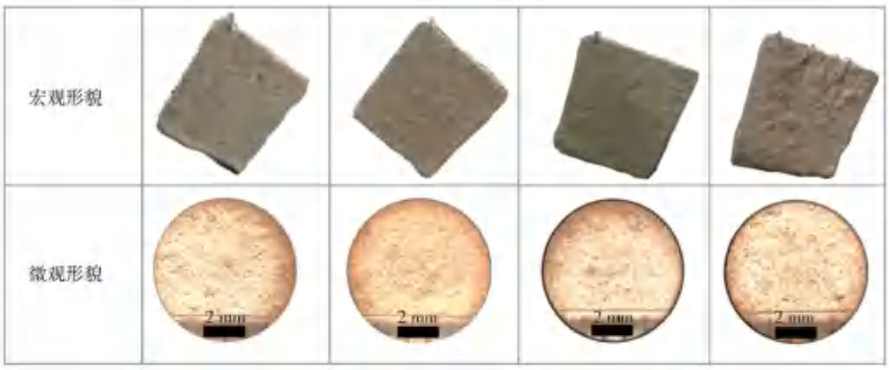


图4 涂层表面形貌样品制备过程

Fig. 4 Preparation process for coating surface morphology samples

祖广怡等[16]总结了消失模涂层透气性的研究进展，揭示了透气性是影响热解气体迁移和铸件表面质量的重要指标。Griffiths等[18]探究了铝合金消失模涂层透气性，发现涂层透气性会影响气体排出能力及铸件表面质量。张守军[14]分析了消失模空壳铸造用涂料的高温性能，指出涂层厚度和层数会影响高温透气性、抗弯强度和溃散性。近年涂层相关研究进一步关注粉液比、粘度、搅拌条件和干燥条件。Sun等[21]研究了粉液比对消失模涂层粘度、剪切变稀行为、涂覆量和表面形貌的影响，结果表明粉液比变化会改变涂层流变状态和宏观表面质量，图5展示了不同粉液比下涂层宏观形貌和显微结构差异。在此基础上该团队又探究了搅拌桨形状、搅拌速度和干燥温度对涂层性能的影响，发现干燥温度和搅拌条件会改变涂层质量、粘



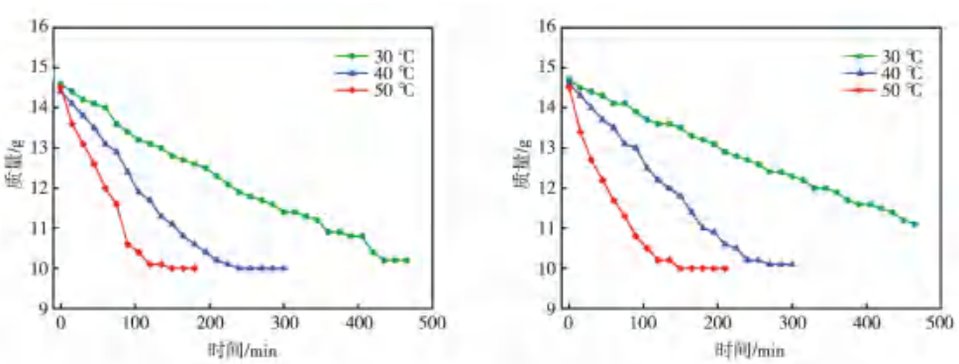
（a）粉液比1.8　（b）粉液比2.0　（c）粉液比2.2　（d）粉液比2.5

图5　不同粉液比下消失模涂层的宏观与微观形貌

Fig. 5 Macro- and micro-morphologies of lost foam coatings with different powder-to-liquid ratios

度、表面粗糙度和裂纹倾向[22]，图6所示的质量变化曲线反映了不同干燥温度下样品失水和稳定过程。

以上研究显示涂层质量受多种因素影响：透气性影响热解产物排出，厚度和高温强度关系到抗冲刷与隔离能力，粉液比、粘度和干燥制度决定涂层均匀性和裂纹形貌。对于Ni-Cr高温合金薄壁件，涂层评判应同时考虑高温耐火性、抗金属液冲刷能力、界面反应倾向和薄壁末端排气能力。金属液温度高、密度大，对涂层耐火性和抗冲刷能力要求更高；薄壁区充型时间短，对排气状态也更敏感。目前涂层研究内容多来自铝合金和一般LFC体系，高温合金条件下的涂层透气性、高温强度和界面反应仍需补充。



（a）直刀片　（b）三叶刀片

图6　不同干燥温度下涂层样品质量变化曲线

Fig. 6 Weight variation curves of coating samples at different drying temperatures

4　浇注参数、负压与振实条件的影响

浇注温度、浇注速度、真空度和振实条件是LFC工艺研究中经常被讨论的过程参数，它们会影响金属液流动性、泡沫热解速率、气体迁移、砂型支撑和尺寸复制。与泡沫和涂层不同，这些参数更接近生产现场调控条件，因此相关文献报道中多采用试验、数值模拟或二者结合的方法进行分析。

李秀青等[26]归纳了真空低压消失模铸造、型腔压力控制和消失模壳型铸造等内容。结果显示，气体流量、浇注温度、气体压力和真空度会改变铝合金液的充型能力；型腔压力控制有助于减少气孔并提高铸件质量。蒋文明等[15]研究了镁合金消失模铸造新技术，指出真空低压、壳型和反重力等方法可改善充型与组织性能。在振实和振动方面，李秀青团队同样探究了机械振动、超声振动和振动频率对消失模铸件组织性能的影响[26]。结果表明振动可促进形核、细化组织并改善部分力学性能，但振幅和频率存在适宜范围，参数偏离合理区间时，改善效果会减弱，甚至可能带来负面影响。这些结果虽不直接针对Ni-Cr高温合金，但说明振实和振动参数不宜只按砂型紧实度评价，还应结合组织、缺陷和尺寸稳定性判断。

综合来看，浇注和负压参数主要改变充型与排气过程，振实和振动参数则同时影响砂型支撑、模样变形和凝固组织。对于Ni-Cr高温合金薄壁件，相关参数不宜照搬低熔点合金制备经验，而应把薄壁末端温度、充型完整性、气孔夹杂、缩松体积分数和尺寸偏差作为同一组评价指标，通过数值模拟与试验共同确

定工艺范围，以更好地满足工业制造中的多样化需求。

5 数值模拟与工艺优化进展

数值模拟是近年来LFC工艺研究中的重要手段。与传统试错相比，ProCAST、华铸CAE等软件能够在试制前分析金属液充型过程、温度场分布、孤立液相区、缩孔缩松位置和热应力集中区域，为浇注系统设计和缺陷预判提供依据[11-13，17，24，27-35]。模拟结果的可靠性不仅取决于网格划分和求解模型，还与材料热物性、泡沫热解参数、涂层性能和界面换热条件密切相关。图7给出了面向Ni-Cr高温合金薄壁件的后续研究框架，将工艺参数、仿真计算、缺陷评价和试验验证连接起来。

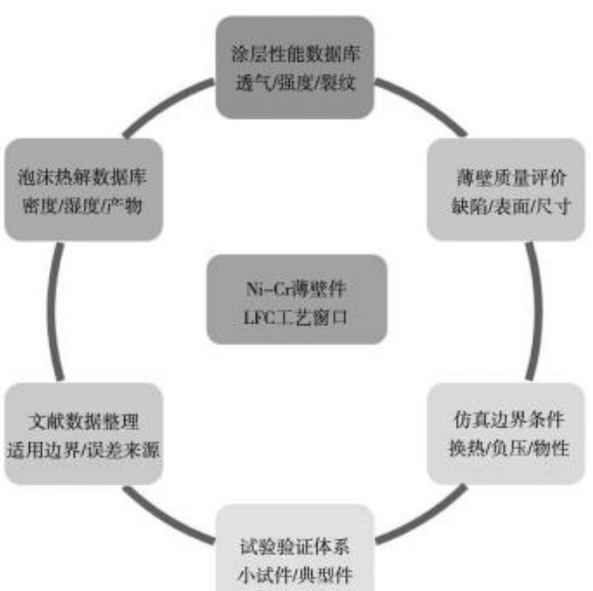


图7 Ni-Cr高温合金薄壁件LFC的未来研究路线

Fig. 7 Future research roadmap for LFC of Ni-Cr superalloy thin-walled castings

在LFC研究中，数值模拟主要用于充型方案比较和凝固缺陷预测。李欣然等[17]采用数值模拟研究铸钢凸圈消失模铸造工艺方案，结果表明，改变浇注方案后可减少缩孔缩松并改善表面质量。邓超等[13]基于ProCAST对履带板消失模铸造凝固过程进行模拟，分析了浇注温度和浇注速度对缺陷及应力分布的影响。Sun等[24]对A356铝合金LFC过程进行了数值模拟，并通过实际铸造进行验证，结果表明模拟方法能够用于预测缺陷位置和优化浇注参数。

在高温合金铸造领域，数值模拟更多用于缩孔缩松、显微缩松和热应力分析。Kang等[28]利用无量纲Niyama判据预测复杂薄壁铸件显微缩松，结果表明该判据可用于识别显微缩松敏感区域。Guo等[29]对Ni基高温合金铸件显微缩松进行了预测与验证，发现模拟结果与试验检测结合后，可提高缺陷判断的可靠性。Hao等[30]通过模拟与试验优化了K477高温合金航空发动机涡轮导向器熔模铸造工艺，研究表明仿真结果需要与实际检测闭环验证。Sui等[36]建立了K439B高温合金本构方程并开展热应力模拟，为薄壁高温合金件的应力和变形分析提供了参考。上述研究结果对Ni-Cr高温合金薄壁件的缺陷预测、补缩评价和变形控制具有借鉴意义。

在获得可靠仿真数据后，响应面法和多目标优化可进一步用于工艺参数筛选。Huang等[31]验证发现，在铝合金大型筒类铸件工艺优化中，可应用响应面法分析因素主效应和因素间相互作用。对于Ni-Cr高温合金LFC，可将泡沫密度、涂层厚度、涂层透气性、浇注温度、浇注速度、真空度和振实时间作为设计因素；将充型完整性、缩松体积分数、尺寸偏差、表面缺陷等级和内部缺陷等级作为响应指标。通过这种方式把单个工艺参数的影响转化为多因素条件下的质量评价模型。总体来看，铸造数值模拟与试验验证相结合的研究路线，有助于缩短工艺开发周期、降低成本、提高质量控制水平，对铸造行业可持续发展具有重要意义。

6 结论

近年来，消失模铸造在复杂薄壁铸件成形中的应用不断拓展，泡沫模样、涂层体系、负压充型以及数值模拟等方面的研究也逐渐深入。本文围绕Ni-Cr高温合金薄壁件LFC成形质量，对相关工艺参数及研究进展进行了总结，主要结论如下。

（1）薄壁Ni-Cr高温合金铸件易在薄壁末端、厚薄过渡区、转角、凸台和补缩距离较长的部位产生冷隔、浇不足、气孔夹杂和缩孔缩松等缺陷。LFC工艺中泡沫热解和排气过程会影响金属液前沿状态，使薄壁区质量控制更具难度。

（2）泡沫模样和涂层体系是影响LFC成形质量的主要环节。泡沫密度、模样表面质量和粘接缝状态关系到热解产物生成及尺寸复制；涂层的透气性、厚度、高温强度和干燥质量则影响排气、抗冲刷性和铸件表面质量。现有研究可为Ni-Cr高温合金薄壁件提供泡沫热解、涂层排气和充型模拟等共性机理参考，但由于材料浇注温度、补缩要求和薄壁结构敏感性不同，仍需补充面向Ni-Cr高温合金薄壁件的专用数据。

（3）数值模拟、响应面法和多目标优化可用于LFC工艺参数筛选。后续研究应加强泡沫热解参数、涂层性能、界面换热和典型薄壁件验证数据的积累，逐步建立适用于Ni-Cr高温合金薄壁件的质量预测模型。模拟与试验结合的研究路线，有助于减少试错、缩短开发周期，推动铸造工艺向数字化和精确成形方向发展。

参考文献：

[1] 张健，楼琅洪. 铸造高温合金研发中的应用基础研究 [J]. 金属学报，2018，54（11）：1637–1652.

[2] 张军，介子奇，黄太文，等. 镍基铸造高温合金等轴晶凝固成形技术的研究和进展 [J]. 金属学报，2019，55（9）：1145–1159.

[3] 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）：412–427.

[4] 汪东红，孙锋，疏达，等. 数据驱动镍基铸造高温合金设计及复杂铸件精确成形 [J]. 金属学报，2022，58（1）：89–102.

[5] Janez G. The superalloys fundamentals and applications [J]. International Journal of Microstructure and Materials Properties，2012，7（5）：464–465.

[6] 崔加裕，汪东红，肖程波，等. 航空发动机用高温合金复杂薄壁精密铸件尺寸精度控制技术研究进展 [J]. 航空材料学报，2024，44（2）：31–44.

[7] 岑孟江，陈晓强，陈超英，等. K403高温合金复杂薄壁件的铸造工艺研究 [J]. 铸造，2021，70（8）：964–967.

[8] 薛松海，龚燚，史昆，等. K4169合金叶轮真空自耗电极凝壳炉离心铸造工艺研究 [J]. 铸造，2022，71（4）：458–461.

[9] 姚雷，王倩，谢秋峰，等.高温合金薄壁密封片的精铸工艺 [J]. 铸造，2016，65（4）：333–335.

[10] 郑博远，吴一栋，陈晶阳，等. K439B高温合金薄壁机匣试验件熔模精铸缺陷预测与工艺优化研究 [J]. 铸造技术，2023，44（2）：147–152.

[11] 张家东，王安国，张峻槐，等. 高温合金机匣精密铸造工艺研究 [J]. 特种铸造及有色合金，2026，45（5）：795–800.

[12] 张浩正，司家勇，朱春雷，等. 基于ProCAST的Y型K4648高温合金结构件工艺研究 [J]. 特种铸造及有色合金，2025，45（7）：995–1001.

[13] 邓超，龙骏，郑志斌，等. 基于ProCAST的履带板消失模铸造凝固过程数值模拟 [J]. 特种铸造及有色合金，2021，41（3）：368–371.

[14] 张守军. 消失模空壳铸造用涂料高温性能分析 [J]. 金属加工（热加工），2022（1）：80–83.

[15] 蒋文明，樊自田. 镁合金消失模铸造新技术研究 [J]. 铸造，2021，70（1）：28–37.

[16] 祖广怡，林有希. 消失模涂层透气性的研究进展 [J]. 特种铸造及有色合金，2020，40（2）：192–196.

[17] 李欣然，苏彦庆，王亮，等. 基于数值模拟的铸钢凸圈消失模铸造工艺方案设计 [J]. 铸造，2023，72（3）：305–309.

[18] Griffiths W D，Davies P J. The permeability of lost foam pattern coatings for Al alloy castings [J]. Journal of Materials Science，2008，43：5441–5447.

[19] Sands M，Shivkumar S. Influence of coating thickness and sand fineness on mold filling in the lost foam casting process [J]. Journal of Materials Science，2003，38：667–673.

[20] Kaczorowski R，Just P，Pacyniak T. Test bench for analyzing the lost foam process [J]. Archives of Foundry Engineering，2013，13：57–62.

[21] Sun G J，Qian C R，Li Z G，et al. Optimizing powder-to-liquid ratios in lost foam casting coatings：impacts on viscosity，shear thinning behavior，coating weight，and surface morphology [J]. Coatings，2024，14（9）：1089.

[22] Sun G J，Li Z G，Wang Q. Optimization of lost foam coating performance：effects of blade shape，stirring speed，and drying temperature on viscosity，coating weight，and surface morphology [J]. Coatings，2024，14（9）：1106.

[23] Sun G J，Xu L Q，Wang Q. Impact of carbon fiber content and length on the rheological properties and coating performance for lost foam casting [J]. Coatings，2024，14（8）：1061.

[24] Sun C，Cao Z Y，Jin Y Z，et al. Numerical simulation of lost-foam casting for key components of A356 aluminum alloy in new energy vehicles [J]. Materials，2024，17（10）：2363.

[25] Arinova S K，Isagulov A Z，Kovalyova T V. Technological features of furnace equipment part casting by gasified models [J]. Proceedings of Irkutsk State Technical University，2019，23（5）：999–1006.

[26] 李秀青，杨晴霞，宁增业，等. 消失模铸造工艺研究现状及展望 [J]. 铸造技术，2025，46（1）：73–80.

[27] 杨武强，冀晓磊，王琳，等. 基于ProCAST本体件熔模铸造工艺优化设计 [J]. 铸造，2023，72（11）：1477–1481.

[28] Kang M D，Gao H Y，Wang J，et al. Prediction of microporosity in complex thin-wall castings with the dimensionless Niyama criterion [J]. Materials，2013，6（5）：1789–1802.

[29] Guo J，Beckermann C，Carlson K，et al. Microporosity prediction and validation for Ni-based superalloy castings [J]. IOP Conference Series：Materials Science and Engineering，2015，84：012003.

[30] Hao X，Liu G H，Wang Y，et al. Optimization of investment casting process for K477 superalloy aero-engine turbine nozzle by simulation and experiment [J]. China Foundry，2022，19：351–358.

[31] Huang L，Cao Y，Zhang M F，et al. Optimization design of casting process for large long lead cylinder of aluminum alloy [J]. Materials，2025，18（3）：531.

[32] Szeliga D. Manufacturing of thin-walled Ni-based superalloy castings using alternative thermal insulating module to control solidification [J]. Journal of Materials Processing Technology，2020，278：116503.

[33] 郑亮，肖程波，张国庆，等. 高Cr铸造镍基高温合金K4648与陶瓷型芯的界面反应研究 [J]. 航空材料学报，2012，32（3）：10–22.

[34] Dong Y W，Bu K，Dou Y Q，et al. Determination of interfacial heat-transfer coefficient during investment-casting process of single-crystal blades [J]. Journal of Materials Processing Technology，2011，211（12）：2123–2131.

[35] Carlson K D，Beckermann C. Prediction of shrinkage pore volume fraction using a dimensionless niyama criterion [J]. Metallurgical and Materials Transactions A，2009，40：163–175.

[36] Sui D S，Shan Y，Wang D X，et al. Elastic-viscoplastic constitutive equations of K439B superalloy and thermal stress simulation during casting process [J]. China Foundry，2023，20：403–413.

（编辑：王杰，wj@foundryworld.com）