

异构复合砂型热物性与薄壁铸件充型凝固行为研究

宋照伟^{1,2*}, 高云保^{1,2}, 李景明^{1,2}, 赵岭^{1,2}, 王增睿^{1,2}, 王阳^{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: 宋照伟, 男, 研究员, 工学硕士学位。E-mail: 13998261547@126.com

摘要: 针对燃气轮机大尺寸复杂薄壁特种钢机匣在铸造过程中面临的充型与组织均匀性难题, 本研究提出并系统开展了基于 3D 打印技术的空间网格化非密实异构砂型研究。实验采用 $\Phi 3\text{mm}$ 球体网格单元与 1mm 间隙构建背砂层, 通过调节改性呋喃树脂加入量 (1.5%~2.0%) 与热输入条件, 深入表征了非密实结构对砂型导热系数、透气性及发气量的影响规律。数值模拟与实验结果共同证实, 通过差异化配置热物性参数, 可显著延长薄壁结构的有效充型距离, 并能有效降低关键部位的残余应力。

关键词: 3D 打印砂型; 异构复合结构; 热物性; 薄壁铸件

Research on Thermal-Physical Properties of Heterogeneous Composite

Sand Molds and Filling and Solidification Behavior of Thin-walled Castings

*SONG Zaowei^{1,2}, GAO Yun-bao^{1,2}, LI Jingming^{1,2}, ZHAO Ling^{1,2}, WANG Zengrui^{1,2}, and
WANG Yang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Casting Technologies, Shenyang 110022, Liaoning, P. R. China;

2. Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd. CAM)

Abstract: Aiming at the challenges of filling and microstructural uniformity in large-scale complex thin-walled special steel casings for gas turbines, this study proposes and systematically investigates spatial-gridded, non-dense heterogeneous sand molds based on 3D printing technology. The experiment utilized $\Phi 3\text{mm}$ spherical grid units with 1mm gaps to construct back-sand layers. By adjusting the addition of modified furan resin (1.5%–2.0%) and heat input conditions, the regulatory patterns of non-dense structures on thermal conductivity, permeability, and gas evolution were characterized in depth. Both numerical simulations and experimental results confirm that differentiated configurations of thermophysical properties can significantly extend the effective filling distance of thin-walled structures and effectively reduce residual stress in critical areas.

Keywords: 3D Printed Sand Mold; Heterogeneous Composite Structure; Thermal-Physical Properties; Thin-walled Casting

文章版权由第 17 届亚洲铸造会议及中国机械工程学会铸造分会所有

1 前言

燃气轮机大尺寸复杂薄壁特种钢机匣对铸型结构的热物性及充型凝固控制提出了极高要求。传统密实砂型在导热系数调控、发气量控制及透气性等方面存在明显局限，难以满足薄壁铸件长距离充型与组织均匀性的双重需求。随着 3D 打印技术的快速发展，空间网格化非密实铸型结构的设计与应用成为突破上述瓶颈的重要途径。

本研究系统探究了非密实铸型结构对砂型热物性的影响规律，以及异构砂型在薄壁铸件充型与凝固过程中的作用机制，旨在为优化铸型设计、提升薄壁铸件质量提供科学理论依据。

2 试验过程

(1) 非密实铸型结构设计与热物性表征：采用空间网格结构进行 3D 打印砂型设计，以 $\Phi 3\text{mm}$ 球体结构网格单元、1mm 网格间隙在砂型表层 10mm 范围内进行非均质排列，构建背砂层。制备标准实心及非密实砂型试样，系统考察网格结构形状、尺寸、梯度设计，树脂固化剂（改性呋喃树脂，加入量 1.5%~2.0%）及热输入条件（温度、受热时间）对砂型力学性能、发气量、透气性、成型精度及热物性（比热、导热系数）的影响。

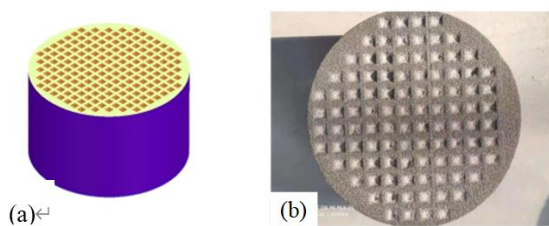


图 1 空间网格结构
(a) 模型；(b) 实物

Figure 1 Spatial grid structure
(a) Model; (b) Physical object

(2) 薄壁充型及凝固行为实验：设计多种结构砂型薄壁充型实验装置，通过布置热电偶实时表征充型过程的温度场分布及动态变化；系统开展不同铸型结构、型腔壁厚、浇注温度及浇注速度条件下的浇注实验，记录成型距离与最终凝固形态；利用金相、SEM、TEM 等手段表征凝固前沿微观组织及成分，分析枝晶生长方式；采用 XRD 测量薄壁与浇道结合部位

的残余应力，并表征其宏观及微观组织形貌。

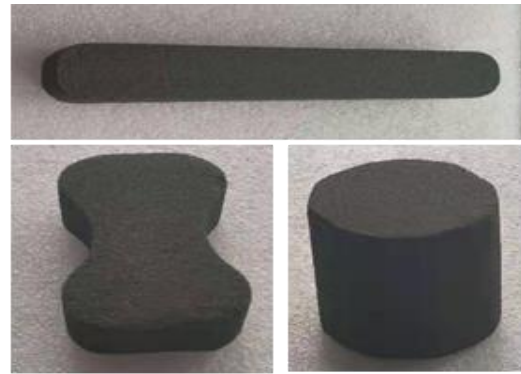


图 2 砂型试样

Figure 2 Sand mold specimen

(3) 铸造工艺过程模拟：基于实验获取的热物性参数，建立多种结构砂型充型凝固过程的温度场及应力场数学模型，以实验结果优化边界条件；进一步细化铸型材质、结构、壁厚、浇注参数等变量，研究不同工艺条件下温度场与应力场的分布规律及动态演变，探索缺陷形成机制并实现工艺参数优化。

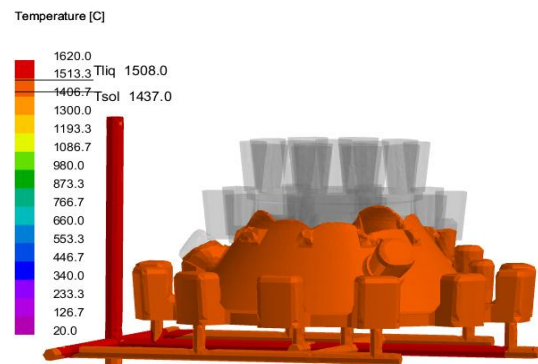


图 3 机匣充型过程模拟

Figure 3 Casing filling process simulation

3 试验结果及分析

研究表明，空间网格化非密实铸型结构能够显著改善砂型的透气性与退让性，有效降低发气量，同时通过网络参数的调控实现导热系数的差异化配置。热电偶温度场测量与数值模拟结果均证实，异构砂型可显著影响铸型冷却强度，进而调控合金凝固速率。

不同网格结构的砂型对薄壁充型距离、凝固前沿枝晶生长形态及微观组织均匀性具有明显的调控作用，型腔壁厚越小，充型难度越大，但异构砂型通过差异化热物性配置可有效延长充型距离。XRD 残余应力检测及固态收缩率计算结果表明，合理的铸型结构设计可显著降低薄壁铸件关键部位的残余应力水平。

温度场与应力场数值模拟结果与实验数据吻合良好，验证了所建立数学模型的可靠性，并实现了缺陷预测与工艺参数的有效优化。

4 结论

本研究系统掌握了非密实铸型结构对热物性的影响规律，揭示了薄壁结构长距离充型及凝固行为的调控机制。

基于空间网格化3D打印砂型设计，实现了铸型导热系数、透气性及溃散性的分区差异化调控，为消除薄壁铸件充型不足、缩孔缩松及裂纹等缺陷提供了理论支撑。

建立的温度场与应力场耦合数学模型为铸型结构优化设计和工艺参数精准控制提供了可靠工具，所形成的模块化温度场/应力场控制单元为一体化异构复合砂型铸造形性控制方法的构建奠定了重要基础。

参考文献:

- [1] Sivarupan, T., El Mansori, M., Coniglio, N. et al. Effect of process parameters on containerless binder jetting 3D printing of sand moulds. *Int J Adv Manuf Technol* 101, 441–451 (2019).
- [2] Upadhyay, M., Sivarupan, T., El Mansori, M. 3D printing for rapid sand casting—A review. *J Manuf Process* 29, 211–220 (2017).
- [3] Kang, J., Ma, R., Zhao, Z. et al. Numerical simulation and experimental study on the solidification process of thin-walled steel castings. *China Foundry* 15, 345–352 (2018).
- [4] Sama, S.R., Badamo, T., Lynch, P. et al. Characterization of Additively Manufactured Sand Grains and Their Effect on Casting Surface Roughness. *Metall Mater Trans B* 51, 2356–2369 (2020).
- [5] Snelling, D., Williams, C.B., Druschitz, A.P. Mechanical and material characterization of binder jet 3D printed sand parts with varying process parameters. *Addit Manuf* 15, 120–131 (2017).
- [6] Meisel, N.A., Williams, C.B. An investigation of key process dependencies in binder jetting. *Rapid Prototyp J* 21, 530–542 (2015).
- [7] Zhou, J., Shen, X., Ji, Z. et al. Thermal conductivities of sand molds with different binders and their effects on casting solidification. *J Mater Process Technol* 214, 2155–2162 (2014).
- [8] Deng, C., Kang, J. Investigation on the cooling rate control of thin-walled castings using heterogeneous 3D printed molds. *Mater Sci Technol* 36, 124–135 (2020).
- [9] Ravi, B. *Metal Casting: Computer-Aided Design and Analysis*. Prentice-Hall of India (2005).
- [10] Mitra, S., Pratihar, D.K. Effects of mold properties on the residual stress distribution in sand castings. *J Mater Eng Perform* 28, 452–463 (2019).
- [11] Czekaj, E., Zych, J., Kwapisiński, M. Simulation of heat transfer in the sand mold during solidification of the massive casting. *Arch Foundry Eng* 16, 19–24 (2016).
- [12] Yao, J., Li, Y., Zhao, S. et al. Microstructure and mechanical properties of thin-walled stainless steel castings. *J Alloys Compd* 725, 601–612 (2017).
- [13] Le, B., Kim, S., Lee, K. et al. Optimization of filling and solidification in thin-wall casting using numerical modeling. *Appl Sci* 11, 4122 (2021).
- [14] Wang, L., Kang, J. Computational Fluid Dynamics in Casting: OpenFOAM vs. Ansys ProCAST for complex geometries. *Int J Metalcast* 14, 88–101 (2020).