

基于3D打印砂型铸造制浆转子的工艺研究

王璨¹, 张跃¹, 于清翔¹, 赵东海¹, 张城铭²

1. 中国机械总院集团沈阳铸造研究所有限公司 辽宁沈阳 110022

2. 中北大学 山西太原 030051

摘要: 制浆转子传统的铸造工艺一般采用木模,但制浆转子复杂的结构增加木模的制作难度。木模制作周期最少20天,而3D打印砂型直接导入数模进行打印,制作周期仅需1天;木模制作成本高达几万元,而3D打印砂型省去了开模成本。3D打印砂型不用考虑起模斜度,造型、合箱生产效率高,尤其适用于结构复杂的制浆转子铸件。采用3D打印砂型重力铸造进行制浆转子的生产,并通过Procast软件进行模拟仿真,优化冒口尺寸等参数,提高制浆转子铸件工艺出品率。对优化后的制浆转子铸件进行化学成分分析、力学性能试验、超声波检测,以及三维扫描尺寸检测,结果证明:3D打印砂型生产的制浆转子铸件质量满足要求。

关键词: 制浆转子; 3D打印砂型; 模拟仿真; 铸造工艺

Optimization of the casting process of the pulping rotor

WANG Can¹, ZHANG Yue¹, YU Qingxiang¹, ZHAO Donghai¹, ZHANG Chengming²

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

2.North University Of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China

Abstract: The traditional casting process for pulp rotors generally uses wooden molds, but the complex structure of pulp rotors increases the difficulty of making wooden molds. The minimum production cycle for wooden molds is 20 days, while 3D printed sand molds can be directly imported into digital molds for printing, with a production cycle of only 1 day; The production cost of wooden molds can reach tens of thousands of yuan, while 3D printing sand molds eliminate the cost of mold making. 3D printing sand molds do not need to consider the starting angle of the mold, and have high efficiency in molding and box production, especially suitable for complex structured pulp rotor castings. Therefore, this article adopts 3D printed sand mold gravity casting for the production of pulp rotor, and simulates it through Procast software to optimize parameters such as riser size and improve the process yield of pulp rotor castings. Finally, chemical composition and mechanical properties, ultrasonic internal inspection, and 3D scanning dimension inspection were conducted on the optimized pulp rotor castings. The results showed that the quality of the pulp rotor castings produced by 3D printed sand molds met the requirements.

Keywords: pulp rotors; 3D printed sand molds; analog simulation; casting technology

1 序言

随着造纸技术的快速发展,对造纸设备铸件的需求及性能要求更高。制浆转子是造纸过程中常见零部件之一,其制造工艺和性能影响了传动效率

甚至使用寿命。制浆转子通过高速旋转产生强大的离心力,将纸浆甩向撞击板、刀片和齿盘等装置,使其破碎成更小的纤维和碎片。同时,在破碎过程中,转子还能够产生水流冲刷的作用,使纸浆在撞

击和摩擦中进一步细化,达到更好的碎解效果^[1]。

ZG06Cr13Ni4Mo是一种工程结构用中高强度马氏体不锈钢,具有优异的耐蚀性、耐磨性,同时抗拉强度高,广泛应用在水利发电、石油化工和航空航天等领域中,也逐渐适用于制浆造纸的应用^[2]。

铸造是制备造纸制浆转子的基础方法,其工艺的设计对铸件的性能和寿命有重要影响。造纸制浆转子通常采用砂型重力铸造工艺木模生产,铸造时易产生缩松、缩孔和夹渣等缺陷,从而降低产品的力学性能。制浆转子木模制作复杂,且造型组芯过程复杂,造成铸件尺寸精度偏差大,甚至报废^[3]。3D打印砂型是经过处理的砂子通过逐层堆积打印形成所需的砂型。该技术无需传统的模具设计与制造,而是直接通过三维模型打印出复杂的内部与外部腔体结构。作为先进制造技术的典范,它不仅极大地缩短了产品开发周期,还显著降低了生产成本^[4]。

铸造模拟仿真是工业制造领域进行工艺设计中经常采用的一种技术,在材料科学的研究过程中可以帮助设计者提前预测浇注过程中可能出现的缺陷,从而进一步完善和改进工艺,保证产品品质、降低生产成本,从而获得良好的经济效益^[5]。

本文采用3D打印砂型重力铸造进行制浆转子的生产,利用Procast软件对转子进行数值模拟,通过分析温度场和凝固场,预测缩松、缩孔缺陷的位置,对浇冒系统进行改进,以消除铸造缺陷,提高铸件质量,为同类制浆转子铸件生产提供工艺参考。

2 制浆转子的技术要求及结构特点

2.1 制浆转子技术要求

制浆转子铸件材质为ZG06Cr13Ni4Mo马氏体不锈钢,应满足GB/T 6967—2009《工程结构中、高强度不锈钢铸件》的要求,铸件的化学成分要求见表1,力学性能要求见表2,制浆转子铸件内部检查满足超声波ASTM A609-12:2018《碳钢、低合金钢和马氏体不锈钢铸件超声波检测标准》规定的2级要求。

2.2 制浆转子结构特点

本文工艺试制的制浆转子三维结构如图1所示,外径945mm,高度158mm,质量为156kg,中间为圆盘结构,外圈由8个叶片构成,叶片的形状属于流线形结构,每个叶片在使用时起到关键的作用,直

表1 制浆转子的化学成分(质量分数)(%)

C	Si	Mn	S	P	Cr	Ni	Mo
0.06	0.8	1.0	0.035	0.025	11.5~13.5	3.5~5.0	0.4~1.0

表2 制浆转子的力学性能

屈服强度 $R_{p0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 R_m/MPa	伸长率 $A_5(\%)$	断面 收缩率 $Z(\%)$	冲击吸收 能量 KJ/J	硬度 HBW
≥ 550	≥ 750	≥ 15	≥ 35	≥ 50	221~294

接影响转子动平衡结果,因此对叶片尺寸要求非常严格。制浆转子设计成内腔空心结构,目的是减轻转子重量,如图2所示。



图1 制浆转子三维结构

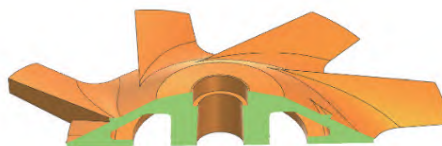


图2 制浆转子剖视图

3 铸造工艺设计

3.1 铸造缩尺

制浆转子铸件采用的是重力铸造方式,材质为ZG06Cr13Ni4Mo马氏体不锈钢,故铸造缩尺采用2.0%。

3.2 浇注系统设计

采用底注式浇注系统,内浇道尺寸为 $\phi 60\text{mm}$,钢液从底部进入型腔内,平稳上升至冒口,充型过程中,气体和夹渣物上浮至冒口,从而可提高铸件内部质量。

3.3 加工余量设计

制浆转子上平面加工余量设计为8mm,外圆加工余量为10mm,下端面加工余量为6mm,中轴孔不铸出,毛坯重量为187kg。

3.4 冒口设计

制浆转子中间位置采用 $\phi 200\text{mm} \times 280\text{mm}$ 的圆柱形冒口，冒口模数为4.5cm，在转子齿根部采用8个 $\phi 70\text{mm} \times 100\text{mm}$ 的保温冒口，典型有效模数为1.8cm，每个叶片外端设置 $\phi 20\text{mm}$ 排气冒口，钢液液量为312kg，如图3所示。

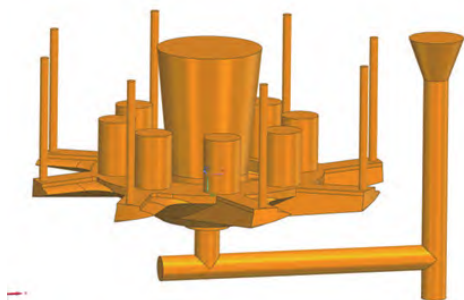


图3 制浆转子铸造工艺

3.5 3D打印砂型设计

制浆转子铸件采用3D打印砂型的生产方式，尺寸精度高、生产周期短、工艺验证快。砂型3D打印设备型号为VX2000，采用GS15型硅砂，黏结剂为3DP专用树脂，固化剂为3DP专用固化剂，清洗剂为3DP专用清洗剂，最大打印砂型尺寸为 $2000\text{mm} \times 1000\text{mm} \times 1000\text{mm}$ ，打印砂型尺寸精度 $\leq 0.3\text{mm}$ ，每层打印时间 $\leq 32\text{s}$ ，每层打印厚度为0.3mm。3D打印砂型树脂加入为1.2%，固化剂加入量为0.3%，3D打印砂型强度可以达到1.4MPa，3D打印制浆转子上下砂型分别如图4、图5所示。

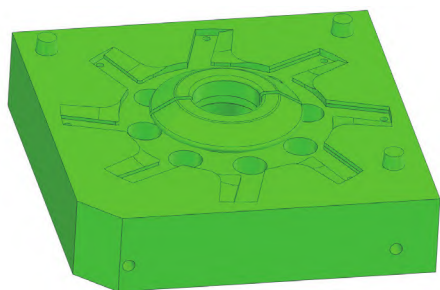


图4 3D打印转子上砂型

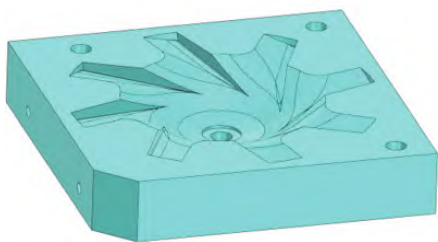


图5 3D打印转子下砂型

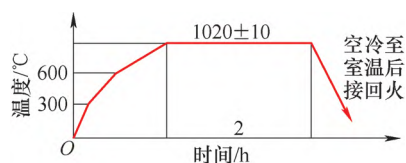
3.6 熔炼及浇注

采用碱性电弧炉和AOD氩氧精炼炉双联熔炼，为了保证制浆转子铸件的耐蚀性和耐磨性，钢液中的C含量要求控制到0.03%以下，同时严格控制杂质元素P、S含量。出炉钢液在钢包内镇静时间 $> 5\text{min}$ 后方可进行浇注。钢液在包内镇静可将氧化物、夹杂物上浮至钢液表面。

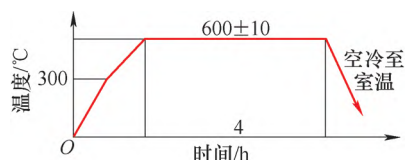
铸件浇注温度控制在 $1560 \sim 1580^\circ\text{C}$ ，使用底注式钢液包浇注，浇注包孔采用 $\phi 50\text{mm}$ 。

3.7 热处理

制浆转子铸件热处理状态为正火+回火处理。热处理工艺参数如图6所示。正火温度为 $(1020 \pm 10)^\circ\text{C}$ ，保温时间2h，回火温度 $(600 \pm 10)^\circ\text{C}$ ，保温时间4h。当炉内温度在 $300 \sim 600^\circ\text{C}$ 时，升温速率 $\leq 100^\circ\text{C/h}$ ；当炉内温度在 $600 \sim 1020^\circ\text{C}$ 时，升温速率 $\leq 80^\circ\text{C/h}$ 。



a) 正火工艺



b) 回火工艺

图6 制浆转子热处理工艺曲线

3.8 制浆转子铸造工艺凝固模拟

利用Procast软件模拟制浆转子充型及凝固过程。先进行网格划分，设置材质ZG06Cr13Ni4Mo，接触面换热系数 $500\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，浇注温度 1580°C ，初始环境温度 25°C ，浇注时间6s，浇注速度 50kg/s ，冷却方式为空冷。模拟结束时，凝固过程温度分布如图7所示，缩松和缩孔缺陷分布如图8所示。

4 结果验证

制浆转子通过3D打印砂型、组芯、浇注、打箱、切割浇冒口、热处理及抛丸等工序后，对转子进行质量检测。通过划线平台对制浆转子8个叶片进

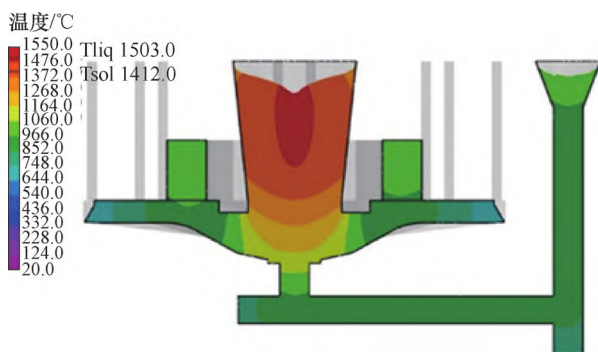


图7 凝固过程温度分布

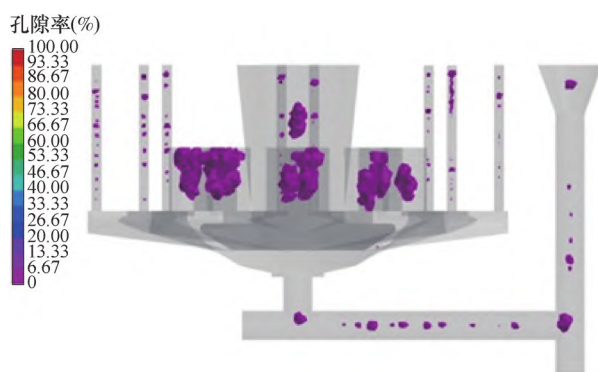


图8 缩松和缩孔缺陷分布

行划线，8个叶片高度一致，尺寸合格；经超声波检测，内部无超标缺陷；检测化学成分分析及力学性能试验等，结果满足技术要求。制浆转子采用3D打印砂型进行生产，可快速提高铸件的生产周期，铸件质量合格（见图9）。

在成本方面，制浆转子3D打印砂型体积为 0.48m^3 ，原材料成本 $0.35\text{万元}/\text{m}^3$ ，3D打印砂型费用为 0.168万元 ，而制浆转子木模费用预估 3万元 ，单件成本3D打印砂型的费用远低于木模制作费用，适合单件小批量制浆转子铸件生产。



图9 制浆转子铸件毛坯

5 结束语

本文采用3D打印砂型重力铸造进行制浆转子的生产，利用Procast软件进行模拟仿真，生产过程执行工艺标准，经检测制浆转子各项要求合格，现得出如下结论。

1) 通过使用Procast模拟仿真技术，验证了制浆转子铸造工艺合理可行，优化了冒口尺寸，工艺出品率达到60%。

2) 采用3D打印砂型生产制浆转子铸件，可以提高生产效率。单件小批量生产复杂制浆转子铸件，使用3D打印砂型比传统制作木模更节约成本。

3) 采用3D打印砂型生产制浆转子铸件，分型更方便，尺寸精度高。3D打印砂型的紧实度比木模造型的紧实度更均匀，提高了转子铸件叶片的尺寸精度。

参考文献：

- [1] 程金兰，梁辰，李薇，等. 制浆造纸国产装备的最新进展[J]. 中国造纸，2024，43（11）：173-180.
- [2] 熊云龙，杨宁，张跃. ZG06Cr13Ni4Mo不锈钢的净化冶炼过程研究[J]. 金属加工（热加工），2020（7）：99-102.
- [3] 黄宏军，曹阳，王好强，等. 马氏体不锈钢叶轮铸造工艺设计与优化[J]. 铸造，2015，64（4）：317-320.
- [4] 王君衡，张全艺，周荣光. 铸造砂型3D打印技术应用及选型分析[J]. 铸造技术，2020，41（7）：660-663.
- [5] 樊超，王光明，张挨元，等. Procast模拟仿真技术在铸件缺陷预测中的应用[J]. 铸造技术，2019，40（7）：705-707，711.

（收稿日期：20250522）