

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.03.11

基于增材制造的稳压器喷雾头研制

李焕鸣^{1,2}, 邓 丰^{1,2}, 张立玉^{1,2}, 郑光耀^{1,2}, 杨 柯^{1,2}, 袁 宏^{1,2}

1. 中国核动力研究设计院, 四川 成都 610213
2. 核能增材制造四川省重点实验室, 四川 成都 610213

摘要: 为探索增材制造技术在核电稳压器喷雾头中的应用潜力, 针对传统制造在复杂结构成型上的局限, 结合结构优化设计与先进制造工艺, 开发了新型一体化制造方案。通过计算流体力学(CFD)优化喷雾头内部流道, 采用选区激光熔融技术(SLM)制备样品, 经工艺参数优化确定最佳激光功率、扫描速度及层厚组合。性能测试表明, 增材制造喷雾头的喷雾角度控制、流量分布均匀性等指标均满足设计要求, 且材料力学性能与微观组织优良。与传统机加工相比, 该技术在制造效率、材料利用率上优势显著, 同时消除了传统分体式结构的紧固件异物风险。本研究验证了增材制造在核电关键部件制造中的可行性, 为相关产品智能制造提供了新路径, 也为其他核电设备的增材制造应用提供了参考。

关键词: 增材制造; 稳压器喷雾头; 工艺优化; 性能测试

中图分类号: TL353 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)03-0082-06

Application of Additive Manufacturing in Pressurizer Spray Head Products

LI Huanming^{1,2}, DENG Feng^{1,2}, ZHANG Liyu^{1,2}, ZHENG Guangyao^{1,2}, YANG Ke^{1,2}, YUAN Hong^{1,2}

1. Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China
2. Nuclear Power Additive Manufacturing Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610213, China

Abstract: This study explores the application potential of additive manufacturing (AM) in nuclear power plant pressurizer spray heads. To address the limitations of traditional manufacturing in forming complex structures, a novel integrated manufacturing scheme is developed by combining structural optimization design with advanced AM processes. Computational Fluid Dynamics (CFD) is used to optimize the internal flow channel of the spray head, and samples are fabricated via Selective Laser Melting (SLM). The optimal combination of laser power, scanning speed, and layer thickness is determined through process parameter optimization. Performance tests show that the AM-manufactured spray head meets design requirements in terms of spray angle control and flow distribution uniformity, with excellent material mechanical properties and microstructural characteristics. Compared with traditional machining, AM offers significant advantages in manufacturing efficiency and material utilization, while eliminating the foreign object risk from fasteners in traditional split structures. This research validates the feasibility of AM for manufacturing key nuclear power components, provides a new path for the intelligent manufacturing of related products, and offers a reference for the application of AM in other nuclear power equipment.

Keywords: Additive manufacturing; Pressurizer spray head; Process optimization; Performance testing

引用格式: 李焕鸣, 邓丰, 张立玉, 等. 基于增材制造的稳压器喷雾头研制[J]. 电焊机, 2026, 56(3): 82-87.

Citation: LI Huanming, DENG Feng, ZHANG Liyu, et al. Application of Additive Manufacturing in Pressurizer Spray Head Products[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(3): 82-87.

0 引言

稳压器是压水堆核电厂一回路关键设备, 其喷

雾头承担着为反应堆一回路系统降压的重要作用, 其性能直接影响核电站的安全稳定运行^[1]。稳压器喷雾头流量大, 要求流阻小、雾化颗粒小且弥散均

收稿日期: 2026-01-11 修回日期: 2026-02-20

作者简介: 李焕鸣(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事核电设备制造技术研究。E-mail: 15828388240@139.com。

匀,且需长期稳定可靠运行。目前,国内在役及在建核电厂中的喷雾头采用分体式结构,由于流道结构复杂,通常壳体和旋水芯均采用精铸+数控机加成型后通过紧固件连接。精铸件需单独开模,表面加工需五轴加工,导致喷雾头制造周期长,且在服役过程中出现过紧固件未点焊、结构损坏的情况^[2],给一回路防异物带来风险。

增材制造(Additive Manufacturing, AM)是一种通过逐层堆积材料来构建三维物体的先进制造技术。与传统减材或成形工艺相比,增材制造在复杂结构零件制造中具有显著优势:(1)设计自由度高,可实现传统工艺难以加工的拓扑优化结构、内部空腔或一体化成型(如随形冷却通道);(2)材料利用率高,仅使用所需材料,减少浪费;(3)缩短周期,无需模具开发,快速实现从设计到成品^[3]。

将该技术应用于复杂机械零件的制造,对于提高产品性能、缩短交货周期、降低制造成本具有重要意义^[4]。但喷雾头属于稳压器流体喷洒功能部件,喷雾头研发应围绕功能实现和一回路环境耐受展开,增材制造方案如何应用于喷雾头结构设计方案、增材制造喷雾头产品水力性能验证、增材产品打印质量评价是需要明确的问题^[5]。

1 基于增材制造的喷雾头设计研究

1.1 喷雾头结构及工作

根据喷雾头的功能和技术参数,结合工程经验,喷雾头采用实心圆锥雾化离心式喷嘴(压力涡流喷嘴)^[6],由壳体和旋水芯组成,如图1所示。该型喷雾头的工作原理是:液体在压力的作用下进入喷雾头内,喷雾头的旋水芯使液体旋转,在涡流室内产生切向速度及轴向速度,且在喷口(收敛通道)内加速喷出空心扩散锥状液膜,利用液体与外界空气的高速差而破碎、雾化。由于利用了旋流的离心力,因此壳体的喷口直径、旋流室的锥度;旋水芯的槽宽、槽深及导程尺寸影响喷雾头的性能指标。

1.2 喷雾头设计技术路线

稳压器喷雾头设计的技术路线如图2所示。

1.3 喷雾头设计计算

对于喷雾头的设计分析,国内外都进行了大量

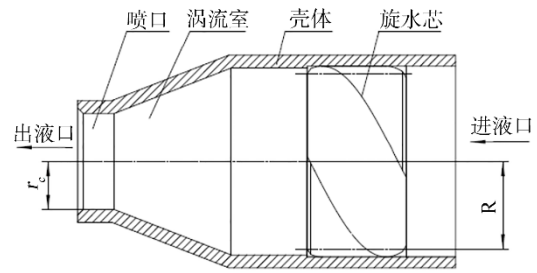


图1 喷雾头结构

Fig. 1 Structure of the spray head

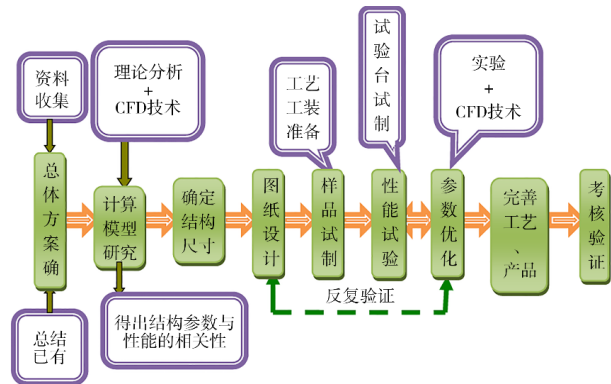


图2 喷雾头设计技术路线

Fig. 2 Technical roadmap for spray head design

的研究,目前主流的设计方法主要有最大流量原理法和动量方程法。不论采用哪种设计方法计算都存在误差,必须通过试验调整,只是调整的工作量大小有差异,经试验调整后的参数才可定型结构尺寸。其主要计算公式如下:

(1)喷雾角

$$\operatorname{tg} \frac{a_c}{2} = \frac{\sqrt{2}(1-\phi)}{\sqrt{\phi(3-2\phi)}} \quad (1)$$

$$\operatorname{tg} \frac{a_k}{2} = \sqrt{\frac{\sqrt{2}(1-\phi)}{\phi}} \quad (2)$$

$$\operatorname{tg} \frac{a}{2} = \frac{\sqrt{8}(1-\phi)}{\sqrt{(2-\phi)\left(1+\sqrt{(1-\phi)}\right)^2-8(1-\phi)^2}} \quad (3)$$

式中 ϕ 为充满系数

$$\phi = \frac{(r_c^2 - r_k^2)}{r_c^2} \quad (4)$$

(2)最大流量系数

$$\mu_{max} = \sqrt{\frac{\phi^3}{2-\phi}} \quad (5)$$

(3)喷淋喷头流量

$$Q = \mu A_c \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} \quad (6)$$

式中 A_c 为喷孔面积(单位: m^2); Q 为喷淋喷头流量(单位: m^3/s); ΔP 为压降(单位: Pa); μ 为流量系数; ρ 为流体密度(单位: kg/m^3)。

几何特征系数:

$$\bar{A}^2 = \frac{2(1-\phi)^2}{\phi^3} \quad (7)$$

$$\bar{A} = \frac{R A_c \sin \beta}{r_c F} \quad (8)$$

式中 R 为进液偏心距(单位: m); r_c 为喷孔半径(单位: m); F 为进液口面积(单位: m^2); β 为进液口角度。依据主要参数设计结合设计经验与工程实际(工艺与工况)要求,根据上述公式计算初步确定了喷雾头结构尺寸。

1.4 喷雾头性能模拟分析

针对喷雾头结构,采用CFD方法对喷雾头的雾化性能进行了分析计算。计算域及网格划分如图3所示,喷雾头内流场分析如图4所示。

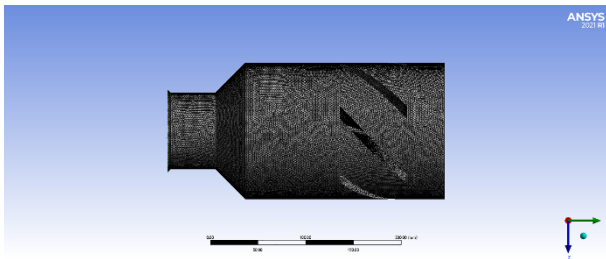
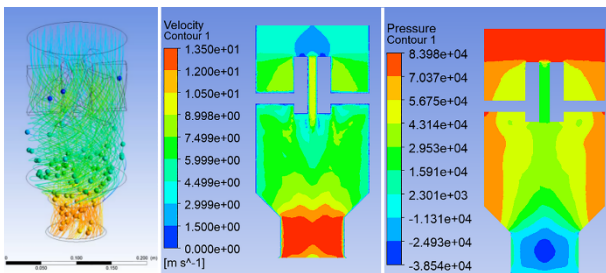


图3 计算域及网格

Fig. 3 Computational domain and mesh



(a)内部流线图 (b)速度云图 (c)压力云图

图4 喷雾头流场初步分析结果

Fig. 4 Preliminary analysis results of flow field in the spray head

1.5 喷雾头结构优化试验研究

根据对喷雾头的机构分析,影响喷雾头性能的参数主要包括:旋水芯中心孔尺寸、旋水芯槽深度、壳体喷孔尺寸和壳体锥度。针对上述四个参数不

同结构参数的组合,开展喷雾头性能试验研究,根据试验结果(喷雾头压降、喷雾角、喷雾不均匀度和雾量分布直径等性能指标),确定喷雾头的最佳参数组合。优化试验研究技术路线如图5所示。

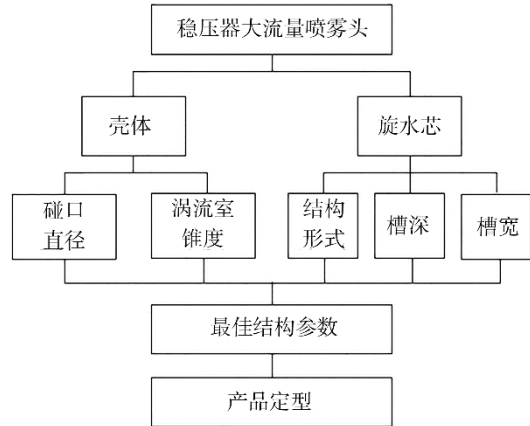


图5 喷雾头优化试验研究技术路线

Fig. 5 Technical roadmap for spray head optimization experimental research

根据试验结果,稳压器喷雾头主要结构尺寸对性能影响如下:

(1)当其他参数确定,改变旋水芯中心孔的尺寸,对流量、喷雾角和分布直径影响不大,对雾量分布(即不均匀度)有一定的影响。通过改变中心孔直径可调节雾量分布的均匀性。

(2)当其他参数确定,改变旋水芯槽深,喷雾流量随槽深的减少而减小,喷雾角和分布直径随槽深的减少而增加、雾量分布均匀性无规律且差异较大。

(3)当其他参数确定,改变壳体喷孔直径,流量、喷雾角和分布直径随喷孔直径增加而增加,雾量分布均匀性无规律且差异较大。

(4)当其他参数确定,改变壳体锥度,对喷雾角和分布直径影响不大,对流量与雾量分布影响较大。

2 喷雾头增材制造工艺研究

根据喷雾头结构,开展增材制造工艺研究,其工艺技术路线如图6所示,通过研究确定主要制造工艺参数。研究内容包括:

(1)基于喷雾头的结构设计,结合喷雾头增材打印特点,进行增材设计全流程前置规划,避免性能优化与可打印性冲突,并基于三角面片进行灵活

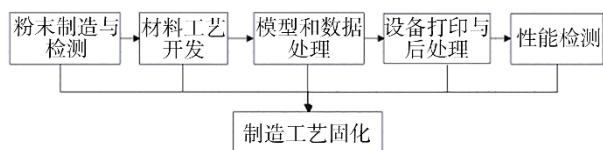


图6 增材制造工艺研究技术路线

Fig. 6 Technical roadmap for additive manufacturing process research

调整,同步以仿真修正;

(2)基于喷雾头的原型设计,结合选区激光熔融技术的特点,将制品划分为适合一体化增材制造的模块,完成增材制造用数字模型的构建;

(3)开展增材制造工艺设计研究,确定喷雾头的增材制造支撑方案;

(4)开展增材制造工艺参数研究,确定增材制造工艺参数,包括粉末参数、激光扫描参数和激光扫描策略等。

通过调整制造设备的工作状态(扫描间距、扫描功率、扫描速度)、控制原材料的质量和性能指标(化学成分、粒度分布、球形度、粉末流动性、氧含量、粉末制备工艺)、处理基板材料(打磨或喷砂、工业酒精清洗),基于打印试块的目视观察、显微镜观察、致密度测试、孔隙率及缺陷大小测量、力学性能检测(抗拉强度、屈服强度、断后伸长率)、各表面粗糙度测量等方法,筛选出能够满足技术要求的最优工艺参数。

根据工艺试验的结果,确定稳压器喷雾头增材制造的最优扫描间距为0.1 mm,最优扫描功率为300W,最优扫描速度为1000 mm/s,最佳热处理工艺参数为550 °C/0.5 h(升温1 h)、1100 °C/2 h(升温1 h)及氩气快冷。

3 喷雾头增材打印制造及检验

依据获得的增材制造打印工艺,选择与工艺开发相同批次的粉末及同款设备,进行喷雾头样件及随炉试样的增材制造。

整个制造过程包括:粉末的检测与处理、基板的材质选取与清洁、喷雾头模型的数据处理与切片以及设备的前期准备和打印,最终得到喷雾头样件及随炉试样。

为检验增材性能可靠性,使用相同状态下的粉末、打印机和工艺对喷雾头产品进行打印鉴定,喷雾头产品鉴定测试采用装有熔池监控系统单激光区进行。喷雾头鉴定模型如图7所示。

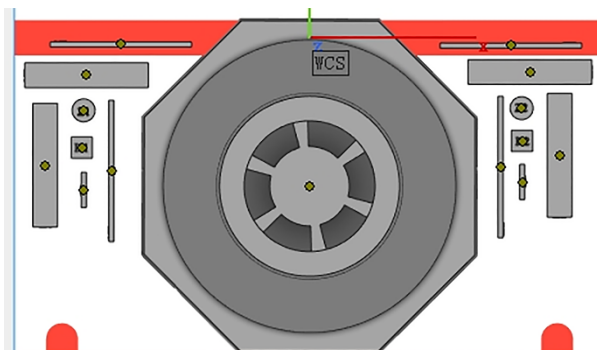


图7 喷雾头产品鉴定模型

Fig. 7 Model diagram for spray head product qualification

喷雾头样件制造过程主要包括喷雾头样件的支撑设计、打印的零件位置摆放(见图8)、模型和切片数据处理,打印过程的监控、粉末的清理、热处理以及后处理等,最终完成喷雾头样件和随炉试棒的制造。

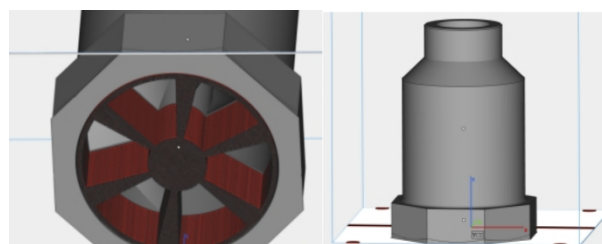


图8 支撑设计和位置摆放示意

Fig. 8 Schematic diagram of support design and positioning

对上述3D打印制造的喷雾头样机开展了性能试验。试验的目的是对喷雾头结构进行验证,并对喷雾头结构的优化提供依据。

3D打印后处理后,对打印产品和随炉试样进行了检测和检验,主要包括:尺寸和表面质量检测、渗透检测、工业CT检测、力学性能检测、金相检测等。经试验和检验,所有检验试验结果均满足要求。其中,X-Y-Z三方向金相检验结果如图9所示,产品的工业CT检测结果如图10所示。

4 喷雾头性能试验及同类产品对比

为验证增材制造的喷雾头的性能,开展了喷雾

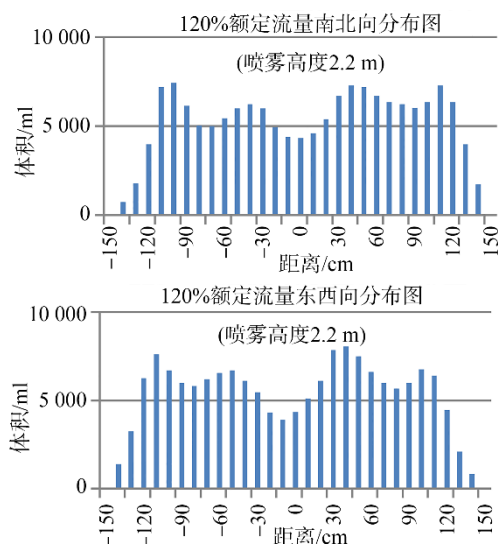


图14 额定流量的120%雾量分布

Fig. 14 Spray distribution at 120% of rated flow

于进口同类产品(0.122 MPa),喷雾分布不均匀度(17.2%)较进口同类产品(42%)提升59%。

5 喷雾头一体化增材制造优劣势分析

通过增材制造喷雾头的优势主要有以下两方面的有优势:

(1)喷雾头制造质量稳定。喷雾头叶片属于异型结构,传统制造方案外壳是锻件,旋水芯采用精铸+数控加工,原料为铸造件,易有气孔、尺寸偏差等缺陷,且有活动部件,装配过程易产生表面缺陷。采用增材制造,喷雾头成型方案全数字化封装,品质稳定,质量波动小。

(2)节约供货周期。传统喷雾头方案,铸造、加工周期长,产品供货周期一般为半年,采用增材方案,打印时间为20天,供货周期约1.5个月,制造流程少。故核电业主可减少备件数量,制造方可根据需要临时供货,实现快速响应。

但同时,需要注意的是,由于增材制造中复杂结构内部空腔等关键部位残留粉末,影响零部件表面精度,作为水力部件的喷雾头内部表面制造精度会影响喷雾头的性能。故增材制造的喷雾头在试验或使用前还需要对表面进行打磨处理,目前基本

只能通过人工方式完成,具有较大的不确定性,为保证批量产品的质量并提高生产效率,后续有必要对增材制造产品的表面后处理技术进行研究。

6 结论

(1)开展并完成了基于增材制造的喷雾头设计、制造和试验研究,完成了喷雾头样件的制造,检验和试验结果证明,设计制造的喷雾头质量、性能满足要求,且部分性能参数优于同类进口产品。

(2)采用增材制造一体化喷雾头可保证喷雾头质量的稳定、节约供货周期且无紧固件避免一回路异物的风险。

(3)后续可开展增材制造喷雾头表面后处理技术研究,以保证产品质量和提高生产效率。

参考文献:

- [1] 中国核能行业协会. 中国核电发展报告2023[R]. 北京:中国核能行业协会,2023.
- [2] Zhang L. Failure analysis of nuclear spray heads[J]. Nuclear Engineering and Design, 2022, 388: 111-123.
- [3] Gibson I, Rosen D, Stucker B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing[M]. Springer, 2015.
- [4] 刘得伟. 金属增材制造技术在复杂机械零件制造中的应用研究[J]. 中国机械, 2025(14): 42-45.
LIU D W. Research on the Application of Metal Additive Manufacturing Technology in the Manufacturing of Complex Mechanical Parts [J]. Machine China, 2025 (14): 42-45.
- [5] 彭先良,刘相东,王云峰. 航空航天陶瓷零部件增材制造专用精细碳化硅粉体关键工艺整形技术及设备的研究[J]. 科技与创新, 2025(14): 128-131.
PENG X L, LIU X D, WANG Y F. Research on key process shaping technology and equipment for fine silicon carbide powder dedicated to additive manufacturing of aerospace ceramic components [J]. Science and Technology & Innovation, 2025(14): 128-131.
- [6] 曹建明. 液体喷雾学[M]. 北京:北京大学出版社, 2013: 257-258.