

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.07.16

基于增材制造的蒸汽发生器沸腾传热特征流道热工水力试验与模型研究

姚磊^{1,2}, 杨柯^{2,3}, 何戈宁^{2,3}, 付国忠^{1,2}, 程月^{2,3}, 胡或^{2,3}, 汤臣杭^{2,3},
王宇阳^{2,3}, 冯元^{2,3}, 雷有杰^{2,3}

1. 核反应堆技术全国重点实验室, 四川 成都 610213
2. 中国核动力研究设计院, 四川 成都 610213
3. 核能增材制造四川省重点实验室, 四川 成都 610213

摘要: 为研究增材制造蒸汽发生器特征流道的热工水力性能, 本文开展了单管传热与阻力试验, 并建立了分段预测模型。试验设计了六种不同内构件及外管几何结构的流道样件, 在开式回路上系统考察了质量流速、热流密度对单相及两相换热特性的影响。基于试验数据, 采用“经典机理框架+半经验修正”的分段策略, 分别建立了液相段、两相段和气相段的传热与阻力关联模型, 并进一步整合得到带肋片管道的通用关联式。结果表明: 单相液体段, Dittus-Boelter 关联式预测精度良好; 饱和沸腾段, Chen 关联式具有工程可用性; 过热蒸汽段, DB 关联式存在系统性低估。传热模型显示带肋片结构具有更明显的强化换热能力; 阻力模型表明点阵管道阻力最大, 带肋片次之, 无填充最小。本研究为蒸汽发生器设计优化提供了试验数据支撑与工程预测工具。

关键词: 蒸汽发生器; 增材制造; 特征流道; 热工水力; 传热系数; 沸腾传热; 预测模型

中图分类号: TL334 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)07-0119-08

Experimental and Modeling Study of Boiling Heat Transfer Characteristics in Additively Manufactured Flow Channels for Steam Generators

YAO Lei^{1,2}, YANG Ke^{2,3}, HE Gening^{2,3}, FU Guozhong^{1,2}, CHENG Yue^{2,3}, HU Yu^{2,3}, TANG Chenhang^{2,3},
WANG Yuyang^{2,3}, FENG Yuan^{2,3}, LEI Youjie^{2,3}

1. National Key Laboratory of Nuclear Reactor Technology, Chengdu 610213, China
2. Nuclear Power Institute of China, Chengdu 610213, China
3. Nuclear Power Additive Manufacturing Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 6102131, China

Abstract: To investigate the thermal-hydraulic performance of characteristic flow channels in additively manufactured steam generators, single-tube heat transfer and flow resistance experiments are carried out, and a segmented prediction model is established in this paper. Six channel specimens with different internal components and outer tube geometric structures are designed for the tests. On an open-loop test facility, the effects of mass velocity and heat flux on single-phase and two-phase heat transfer characteristics are systematically investigated. Based on the experimental data, a segmented strategy of "classical mechanism framework + semi-empirical correction" is adopted to develop heat transfer and pressure drop correlation models for liquid region, two-phase region and superheated vapor region respectively. These sub-models are further integrated to form a general correlation for finned tubes. The results indicate that the Dittus-Boelter correlation presents satisfactory prediction accuracy for single-phase liquid flow; the Chen correlation is applicable for engineering calculations in saturated boiling regions; the Dittus-Boelter correlation systematically underestimates heat transfer coefficients in superheated steam regions. The heat transfer model demonstrates that finned structures deliver prominent heat transfer enhancement. According to the resistance model, lattice-structured tubes produce the largest flow resistance, followed by finned

收稿日期: 2026-06-20 修回日期: 2026-07-01

作者简介: 姚磊(1992—), 硕士, 工程师, 主要从事反应堆工程、增材制造技术研究。E-mail: 497512794@qq.com。

tubes, while plain tubes without inserts yield the minimum resistance. This study provides experimental data support and an engineering prediction tool for the design optimization of steam generators.

Keywords: steam generator; additive manufacturing; characteristic flow channel; thermal hydraulics; heat transfer coefficient; boiling heat transfer; prediction model

引用格式:姚磊,杨柯,何戈宁,等. 基于增材制造的蒸汽发生器沸腾传热特征流道热工水力试验与模型研究[J]. 电焊机, 2026, 56(7): 119–126.

Citation: YAO Lei, YANG Ke, HE Gening, et al. Experimental and Modeling Study of Boiling Heat Transfer Characteristics in Additively Manufactured Flow Channels for Steam Generators[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(7): 119–126.

0 引言

蒸汽发生器是核动力装置中的关键部件,其传热性能直接影响整个系统的热效率和安全可靠性能^[1-2]。传统机加工仅能制造简单圆管、直通道等规则结构,难以实现复杂内肋、点阵等一体化强化结构的加工。增材制造技术能够实现复杂流道结构的一体化成形与快速制造,为突破传统加工方法在几何构型自由度、内部通道精细化设计及多功能集成方面的限制提供了重要途径^[3-5]。因此,针对增材制造特征流道开展热工水力性能试验具有重要的工程意义。

现有研究多针对单一简单增材流道开展单相换热测试^[6-7],缺少六边形异形通道、扭转肋、点阵填充等多构型全相态(过冷-两相沸腾-过热)条件下的系统性试验,且缺少适配增材制造粗糙内表面和复杂扰流结构的专用热工水力预测模型^[8-9]。

本文开展多构型流道热工水力试验与数据拟合建模,揭示几何结构、运行参数对传热与压降的影响规律,建立分段预测关联式,将离散工况下获得的试验数据转化为具备连续预测能力的工程关联模型,为增材制造蒸汽发生器流道优化设计提供试验数据与工程计算模型。通过构建系统、统一的拟合框架,可实现对给定质量流速、热流密度和干度条件下传热系数与压降的快速预测,为无填充、直肋片、点阵等不同构型的强化传热效果及阻力代价提供定量比较依据。

1 试验系统与方法

1.1 试验件设计

本研究设计了6种试验件进行单管热工水力试

验(见图1),包括:无填充六边形管、直肋片六边形管、旋转肋片六边形管(扭曲 360°)、旋转肋片圆管(扭曲 360°)、旋转肋片六边形管(扭曲 720°)及六边形点阵六边形管。各流道的几何参数为:六边形通道——对边距 4.40 mm ,内六边形对顶点距 5.08 mm ,水力直径 4.40 mm ,肋片宽度 0.70 mm ,六边形外壳厚度 2.60 mm ,肋条填充率 18.51% ,肋条与外壳面积

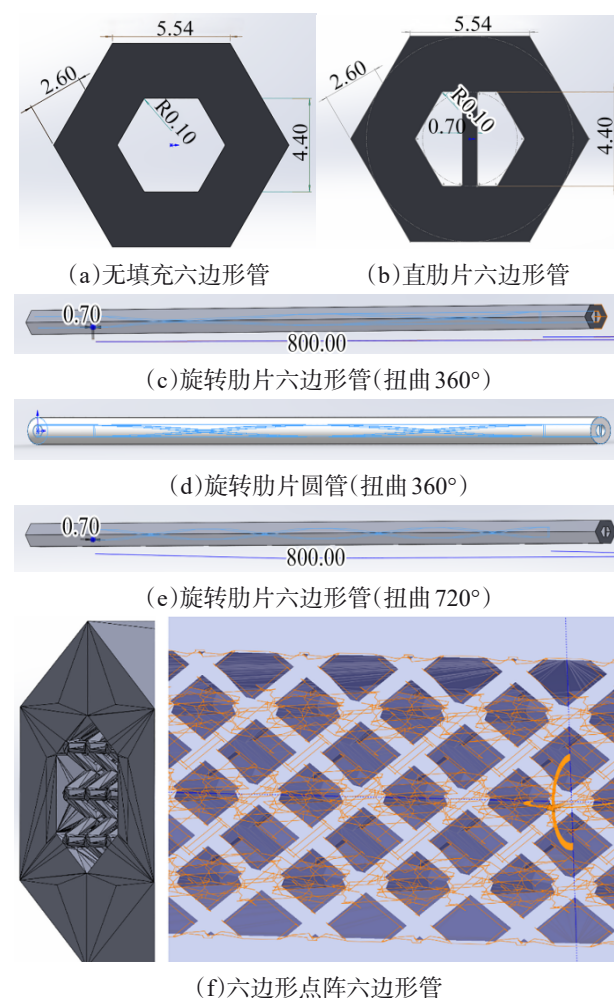


图1 特征流道试验件设计

Fig. 1 Design of characteristic flow channel specimens

比 4.90%,通道长度 900 mm。圆形通道——内直径 4.40 mm,外直径 9.61 mm,肋宽 0.64 mm。

1.2 试验系统

试验在上海交通大学热工水力实验室的开式回路上开展,如图 2 所示。系统由去离子水水箱、柱塞泵、调节阀、螺旋管预热器、试验段及螺旋管冷凝器组成。流体经预热器加热至指定温度后进入试验段,随后冷却并返回水箱。

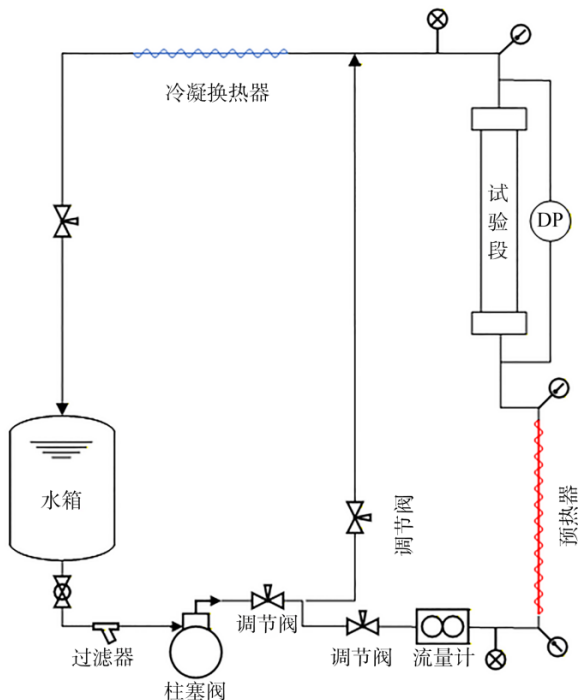


图 2 试验系统示意
Fig. 2 Schematic diagram of test facility

1.3 测量仪器仪表

试验中各参数的测量仪器如表 1 所示。

表 1 测量仪器仪表

Table 1 Measurement instruments

序号	测点名称	仪表选型
1	试验段流量	文丘里流量计
2	试验段进出口温度	Ø3 mm、K 型铠装热电偶
3	试验段壁温	Ø0.5 mm、N 型热电偶
4	试验段及进出口压力	压力变送器
5	试验段各压力测点间压差	压差变送器
6	铜排	电压变送器
7	直流电源	霍尔直流大电流仪

1.4 试验工况

试验系统压力设定为 4.9 MPa。质量流量通量选取 100、200 和 400 kg/(h·m²),热流密度选取 100、

200 和 300 kW/m²,各试验件均采用一致的工况设置以保证试验结果的可比性。

2 数据处理与模型构建方法

2.1 试验数据处理

为满足传热与阻力模型拟合的需求,需将原始测量数据换算为可用于回归分析的目标物理量。传热性能以无量纲努塞尔数(Nu)表征;阻力特性方面,需对总压降进行分解,通过扣除重位项与加速项后得到纯摩擦压降。

考虑到试验段沿程可能发生相态变化,本研究以相态为依据对数据进行分段处理,将数据集划分为液相段、汽液两相段与气相段分别进行拟合,以避免不同传热与阻力机理混杂所导致的系统性偏差。

2.2 参数拟合方法

本研究选用 1stOpt 作为核心计算平台^[10],采用准牛顿法中的 BFGS 算法进行参数优化^[11]。在优化策略上,采用“全局搜索与局部精化”的两级架构:首先通过通用全局优化算法进行广度搜索(重复数设为 30),随后启动 BFGS 局部算法完成精细求解。收敛阈值设为 1.00E-10,最大迭代次数 1000^[12]。

2.3 分段拟合模型形式、参数与物理约束

2.3.1 单相传热模型

以 Dittus-Boelter 关联式^[13]为基准,采用简化形式:

$$Nu = A \cdot Re^B \cdot Pr^C \tag{1}$$

基于传热机理与参数可辨识性,对回归参数施加如下物理约束: $A > 0$,以确保传热系数的正定性;指数 B 与 C 则依据经典传热理论及试验数据特征固定为典型值($B=0.8, C=0.4$)。该策略的核心在于模型简化与拟合稳健性之间的合理平衡——将 B 和 C 固定为物理意义明确且经大量实验验证的典型值,能够有效降低多参数非线性回归中可能出现的过拟合风险,同时保留模型对增材制造复杂结构传热特性的核心表征能力。此时仅需对系数 A 进行回归,从而在降低参数耦合影响的同时,保持模型对试验数据的较好表征能力,并提高参数识别的可重复性及模型在跨工况比较中的一致性。

2.3.2 两段传热模型

以Chen关联式^[14]为基础,构建适用于本研究的修正形式:

$$Nu = A \cdot Re_{(lo)}^B Pr_f^C F_o + D \cdot Co \Delta T_{(sup)}^E \Delta p_{(sup)}^F S (D_h/k_f) \quad (2)$$

模型采用努塞尔数表达的加和结构,用于综合表征强制对流蒸发与核态沸腾两种传热机制对总传热性能的共同贡献。模型中涉及的关键变量包括 Re_{lo} 、 Pr_f 、 F_o 、 Co 、 ΔT_{sup} 、 Δp_{sup} 、 S 、 D_h/k_f 等因子,对应待拟合参数为A至F共6个。

为保证模型形式与传热机理相一致,并兼顾参数辨识的稳定性,在回归过程中对所有可调参数施加非负约束,即各拟合系数均大于零。该约束的物理依据在于:无论是强制对流蒸发还是核态沸腾,其对总传热系数的贡献均应表现为正向增强作用;若某一项系数出现负值,则将与基本传热机理相矛盾。具体而言,模型中各加和项前的比例系数,以及对流项和沸腾项中的指数参数,均应满足大于零的约束条件。在实际拟合过程中,若出现参数趋近于零,或优化算法存在向负值区域搜索的趋势,则需结合试验数据分布特征与模型结构进行审慎分析,并在必要时通过调整初始值设定、参数边界条件或模型表达形式等方式,确保拟合结果具有良好的物理合理性与工程可解释性。

2.3.3 单相阻力模型

采用Darcy-Weisbach^[15]形式并回归摩擦因子:

$$f = A_f Re^{B_f} \quad (3)$$

式中 摩擦压降与流速/质量流速、密度、长度和水力直径相关;基于传热机理与参数可辨识性要求,在回归过程中施加以下物理约束:系数 $A_f > 0$, 确保

摩擦因子计算值为正;指数 B_f 依据经典理论取值范围界定为负值区间($B_f < 0$)。

2.3.4 两相阻力模型

两相阻力采用Chisholm-LM两相乘子^[15]

$$\phi_{lo}^2 = 1 + \frac{C}{X_{tt}} + \frac{1}{X_{tt}^2} \quad (4)$$

在本试验拟合中令 $C = A_c Re_{lo}^{B_c}$ 随雷诺数变化,从而表征不同结构下两相摩擦压降差异。基于物理机理与参数可辨识性要求,在回归过程中施加以下约束:系数 $A_c > 0$, 确保Chisholm参数为正值,从而保证两相乘子 ϕ_{lo}^2 始终大于1,符合两相流动摩擦压降大于单相摩擦压降的基本物理预期;指数 B_c 依据数据特征与经验范围进行合理估计,可正可负,分别对应Chisholm参数随雷诺数增大而增大或减小的不同流动行为。

3 试验结果与分析

3.1 壁面温度与对流换热系数

根据6类试验段结构在不同质量流速与热流密度条件下的壁面温度原始记录、内壁面温度与流体主流温度的计算结果,给出了由温度场反算得到的对流换热系数(HTC)及其与经典经验关联式的对比散点分布,如图3~图8所示。

整体来看,各工况下壁面温度测量的一致性较好。在单相液体区,试验点与Dittus-Boelter(DB)关联式的预测结果整体吻合较好,多数数据落入 $\pm 40\%$ 误差带,表明DB公式在本试验参数范围内对单相强制对流换热具有较好的适用性。进入饱和

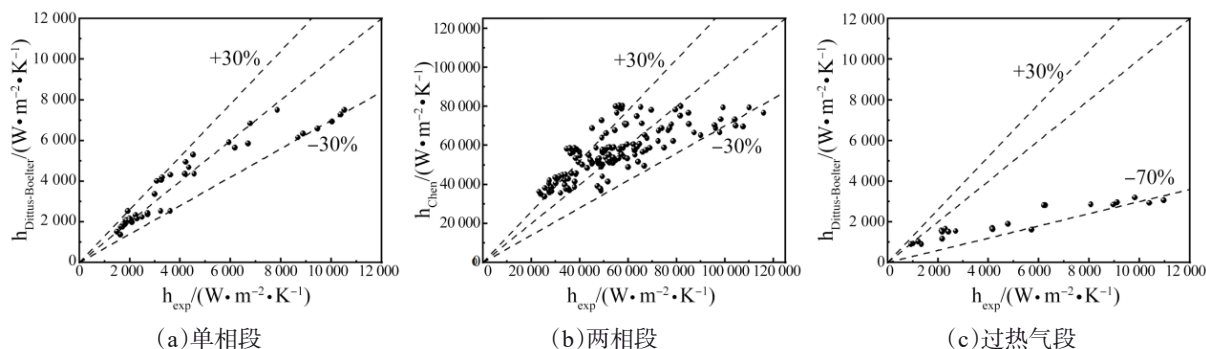


图3 单相液、两相段、过热汽 HTC 试验值与经验公式对比(720 肋片六边形管)

Fig. 3 Comparison of HTC experimental values and empirical correlations for single-phase liquid, two-phase liquid and superheated vapor (720° finned hexagonal tube)

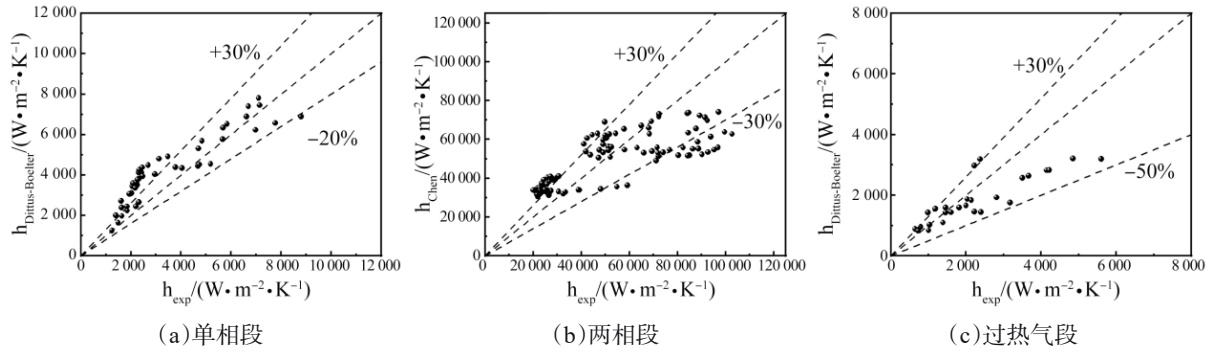


图 4 单相液、双相段、过热气 HTC 试验值与经验公式对比 (360 肋片六边形管)

Fig. 4 Comparison of HTC experimental values and empirical correlations (360° finned hexagonal tube)

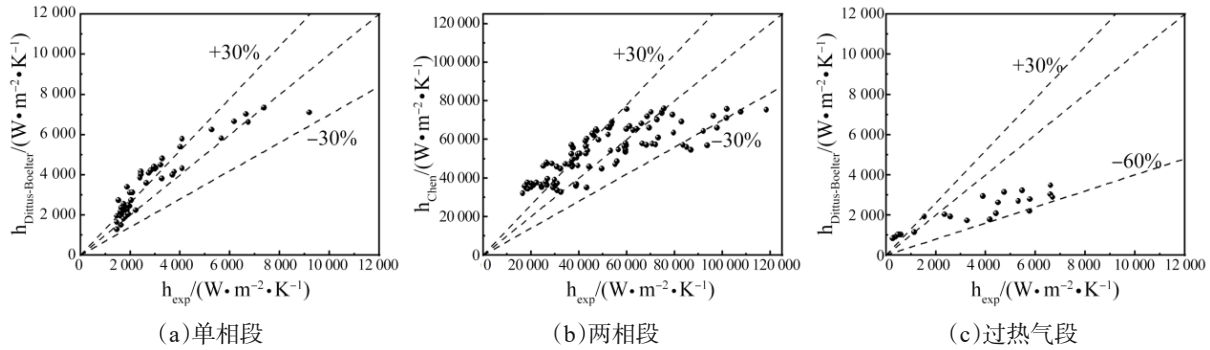


图 5 单相液、双相段、过热气 HTC 试验值与经验公式对比 (直肋片六边形管)

Fig. 5 Comparison of HTC experimental values and empirical correlations (straight finned hexagonal tube)

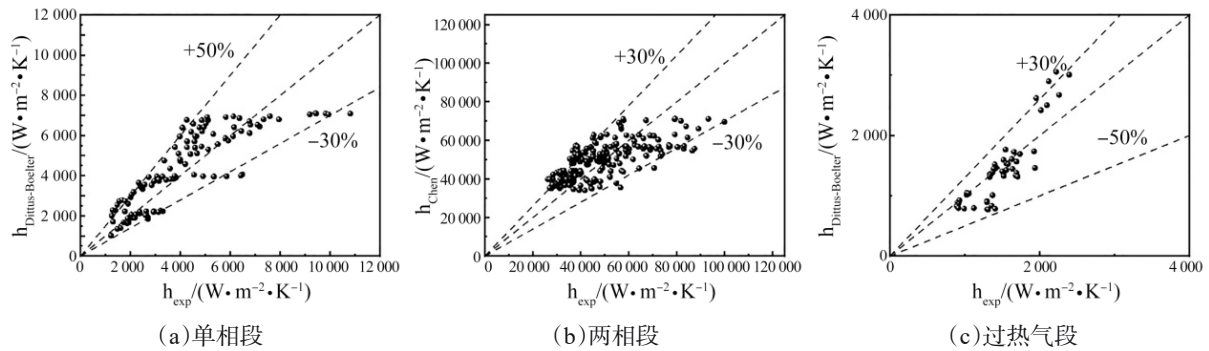


图 6 单相液、双相段、过热气 HTC 试验值与经验公式对比 (无填充六边形管)

Fig. 6 Comparison of HTC experimental values and empirical correlations (unfilled hexagonal tube)

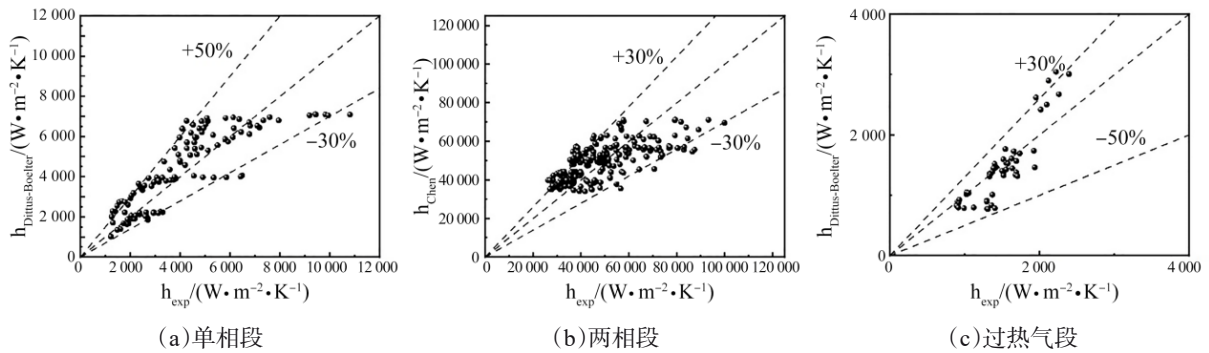


图 7 单相液、双相段、过热气 HTC 试验值与经验公式对比 (直肋片圆管)

Fig. 7 Comparison of HTC experimental values and empirical correlations (straight finned circular tube)

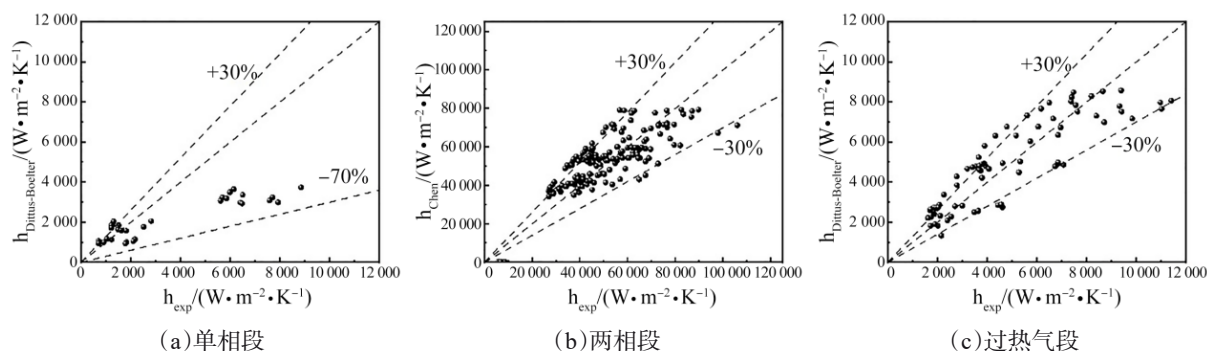


图8 单相液、两相段、过热汽 HTC 试验值与经验公式对比(点阵六边形管)

Fig. 8 Comparison of HTC experimental values and empirical correlations (lattice hexagonal tube)

沸腾区后,Chen关联式对 HTC 的预测与试验数据的对比显示,多数点仍分布在 $\pm 40\%$ 误差带内,能够较合理地反映强制对流沸腾换热特征。而在过热蒸汽区,DB关联式与试验值出现系统性偏差,部分工况下预测值显著低于试验值(偏低可达约80%),表明该公式对高干度/过热工况下可能发生的传热恶化行为描述不足。

3.2 质量流速对传热特性的影响

在保持热流密度不变时,增大质量流速 G 会使换热系数 h 整体提高。在单相液体对流区,质量流速 G 的增大提高雷诺数与湍流强度;进入两相沸腾区后,较高质量流速 G 增强了界面剪切与液膜再润湿能力,提升了气泡脱离频率并强化了对流-核态沸腾耦合,表现为换热峰值抬升、高效传热平台扩展;在高干度段及过热段,较高质量流速 G 通过增强蒸汽侧对流,减小了峰后回落幅度,维持了较高水平。上述趋势在不同结构中均具有一致性。

3.3 热流密度对传热特性的影响

在质量流速 G 固定时,热流密度 q 对换热系数 h 的影响呈现分区特征。在单相液体对流区,换热系数 h 对热流密度 q 的敏感性较弱。进入沸腾两相区后,随热流密度 q 增大,壁面过热度提高,气泡成核与界面扰动增强,核态沸腾贡献上升,使换热系数 h 显著升高,峰值增大;但在高干度端,较高热流密度 q 更易诱发局部干涸与膜态沸腾,导致干涸点前移、换热系数 h 回落更快。进入过热区后,传热回到单相蒸汽对流主导,换热系数 h 水平趋于稳定,不同热流密度 q 下差异相对减弱。6类结构均有此规律。

3.4 管内结构对传热特性的影响

直肋片结构、360°和720°旋转肋片结构的通道

在单相液体区传热系数无明显差异。在过热段,720°旋转肋片结构传热系数略高于其他结构,但仅在部分工况下明显。点阵结构在单相液体对流传热区域的对流换热系数明显优于无填充和直肋工况。综合对比,6种通道的传热系数在单相液体对流传热、沸腾传热、干涸后传热阶段均未有明显的差异,也未出现某一构型在所有传热区间明显优于其他构型的情况。

4 模型拟合结果

4.1 传热拟合结果

在单相区域,对Dittus-Boelter公式进行修正;在两相区域,对Chen公式进行修正。为获得具有工程通用性的、可用于表征带肋片结构管道传热/阻力特性的关联式,本文不再对每一种肋片结构分别给出独立拟合式,而是将所有带肋片管道试验数据进行汇总,构建统一的数据集进行整体拟合。整体拟合的基本思想是:在保持经典关联式机理框架不变的前提下,将不同肋片形式、尺寸差异对流动与换热的影响“等效”吸收到模型的修正系数与指数项中,使所得公式能够在一定参数覆盖范围内反映带肋片管道的平均规律与总体趋势。拟合时仍按相态将数据划分为液相段/两相段/气相段分别回归,以避免不同传热机理混合导致的系统偏差。

液相段:

$$Nu = 0.021 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (5)$$

气相段:

$$Nu = 0.043 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (6)$$

两相段:

$$Nu = 0.023 Re_{(lo)}^{0.811} Pr_f^{0.001} F_o + 6.52 Co \Delta T_{(sup)}^{2.19} \Delta p_{(sup)}^{0.22} S(D_h/k_f) \quad (7)$$

带肋片管道传热拟合关系式与试验数据对比如图9所示。

4.2 压降拟合结果

在单相区域,对 Darcy-Weisbach 公式进行修正;在两相区域,对 Chisholm 公式进行修正,得到带肋片管道通用压降关联式:

液相段:

$$f = 0.23 Re^{-0.22} \quad (8)$$

气相段:

$$f = 0.27 Re^{-0.117} \quad (9)$$

两相段:

$$\Delta p_{f,exp} = \phi^2 \Delta p_{lo} \quad (10)$$

$$\phi^2 = 1 + \frac{C}{X_{LM}} + \frac{1}{X_{LM}^2} \quad (11)$$

$$C = 35.28 Re_{lo}^{0.078} \quad (12)$$

带肋片管道阻力拟合关系式与试验数据的对比如图10所示。

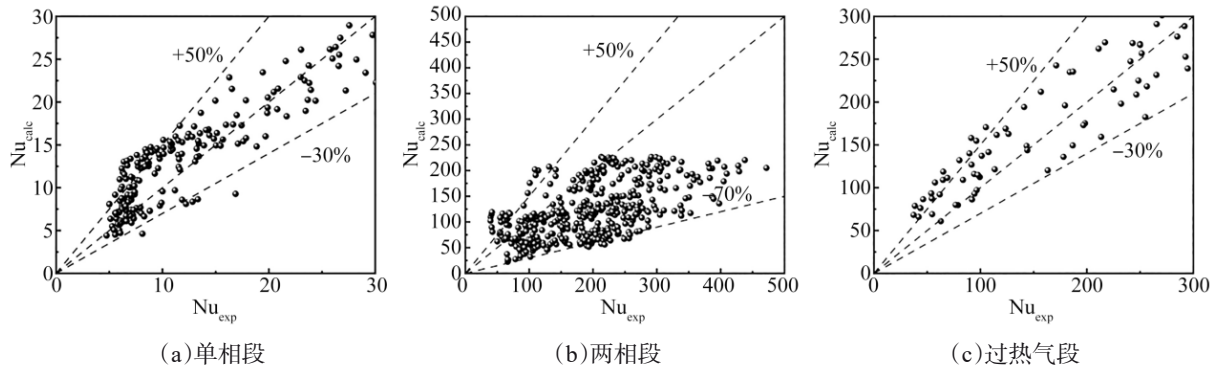


图9 带肋片管道传热拟合关系式与试验数据对比

Fig. 9 Comparison of heat transfer correlation with experimental data for finned tubes

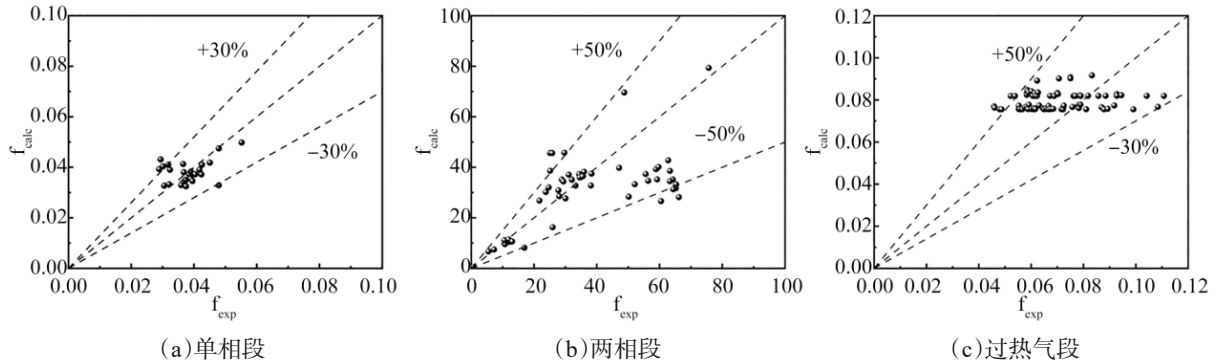


图10 带肋片管道阻力拟合关系式与实验数据对比

Fig. 10 Comparison of pressure drop correlation with experimental data for finned tubes

5 结论

本文在开式热工水力回路上开展蒸汽发生器特征流道(增材制造)单管传热与阻力试验研究,系统考察了质量流速 G 、热流密度 q 以及不同内构件/外管几何对单相与两相换热特性的影响,形成壁面温度、换热系数(HTC)与压降等试验数据库,并对典型经验关联式的适用性进行了评估。在此基础

上,基于试验数据建立了面向增材制造蒸汽发生器特征流道的传热与阻力分段关联模型,形成了可用于工程快速预测与结构比较的关联式体系。主要结论如下:

(1)单相液体段:Dittus-Boelter(DB)关联式与实测结果整体一致,多数点分布于 $\pm 40\%$ 误差带内,可作为单相强制对流换热的基线模型。

(2)饱和沸腾段:Chen关联式对趋势与量级刻

画较好,大部分点位于 $\pm 40\%$ 误差带范围内,具有工程可用性。

(3)过热蒸汽段:DB关联式在高干度/过热工况下存在明显低估,部分点较实测值偏低可达约80%,提示需引入更适配的蒸汽侧关联式或进行针对性修正。

(4)肋片和填充效应。增大肋片螺旋角度有助于提高单相蒸汽的传热能力;部分工况下,可以观察到螺旋肋片通道的沸腾传热系数略高于直肋片通道,但规律性不明显。在单相液体对流传热区域,点阵结构的对流换热系数明显优于无填充和直肋工况;在过热蒸汽区域,这一趋势不明显,3种类型的通道传热系数相当。在沸腾传热区域,多数工况下点阵填充六边形通道的沸腾传热系数优于直肋片六边形通道,但其传热强化效果不明显。

(5)传热模型结果表明,带肋片结构相较无填充基准结构普遍具有更明显的强化换热能力,且不同构型对应的拟合参数存在显著差异,说明增材制造结构会改变两相换热过程中的主导机制及强化路径。

(6)阻力模型结果表明,不同结构在单相与两相流动中的摩擦压降特性存在明显分层:带点阵管道流动阻力最大,带肋片管道次之,无填充管道最小。该结果表明,复杂几何结构会显著影响流动阻力水平及流动形态演化规律,同时也说明传热强化效果的提升往往伴随着阻力代价的增加。

参考文献:

- [1] Hetsroni G. STEAM GENERATORS, NUCLEAR[M]. Thermopedia. Begel House Inc. 2011.
- [2] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY A. Design of the Reactor Coolant System and Associated Systems in Nuclear Power Plants [M]. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2004.
- [3] Niknam S A, Mortazavi M, Li D. Additively manufactured heat exchangers: a review on opportunities and challenges [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 112(3): 601–618.
- [4] Chliszcz K, Laskowska D, Kuczynski W, et al. Assessment of the Feasibility of Using Additive Manufacturing from Metal Powder to Produce Compact Heat Exchangers[J]. Energies, 2025, 18(13): 3035.
- [5] Yeganeh M, Shahryari Z, Shoushtari M T, et al. Discontinuities in the laser powder bed fusion alloys: A review [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 37: 3193–229.
- [6] Bulsiewicz T, Łapka P. Effects of additive manufacturing on convective heat transfer in 3D-printed micro/mini-channels and fluid passages with micro/mini structures – The review [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2024, 159: 108057.
- [7] Spickler B, Gray J, Nicolaisen D, et al. Surface roughness and dimensional evaluation of laser powder bed fusion additively manufactured shell and tube heat exchangers [J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2025, 65: 103858.
- [8] KAUR I, SINGH P. State-of-the-art in heat exchanger additive manufacturing [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 178: 121600.
- [9] Stimpson C K, Snyder J C, Thole K A, et al. Roughness effects on flow and heat transfer for additively manufactured channels [J]. Journal of Turbomachinery, 2016, 138(5): 051008.
- [10] WANG F, WEI H, LI Z. Viscoelastic parameter identification of asphalt mixture based on 1stOpt method [C]// 2017 3rd international forum on energy, environment science and materials (IFEESM 2017). Atlantis Press.
- [11] Battiti R, Masulli F. BFGS optimization for faster and automated supervised learning [C]// International Neural Network Conference: July 9–13, 1990 Palais Des Congress—Paris—France. Springer.
- [12] Li M, Zhang J, Meng G, et al. Testing and modelling creep compression of waste rocks for backfill with different lithologies [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 125: 104170.
- [13] Dittus F W, Boelter L M K. Heat transfer in automobile radiators of the tubular type [J]. International communications in heat and mass transfer, 1985, 12(1): 3–22.
- [14] CHEN J C. Correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow [J]. Industrial & engineering chemistry process design and development, 1966, 5(3): 322–329.
- [15] Valiantzas J D. Modified Hazen–Williams and Darcy – Weisbach equations for friction and local head losses along irrigation laterals [J]. Journal of irrigation and drainage engineering, 2005, 131(4): 342–50.