

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-12
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20251108002

数据驱动下的变重力微通道内流动沸腾传热特性研究

应涛涛¹ 胡献竹¹ 苏张凡¹ 陈棋¹ 潘瓯瑜¹ 李根²

(1 温州市铁路与轨道交通投资集团有限公司 温州 325011; 2 重庆交通大学航空学院 重庆 400074)

摘要 针对轨道交通和航空航天设备在变重力环境下的高效散热需求,本文系统开展了微通道内水-乙二醇混合溶液流动沸腾传热特性的实验研究和数据驱动建模。通过搭建基于离心旋转台的变重力实验平台,实现了1.00g~3.16g的变重力环境模拟,获取了质量流速为50~500 kg/(m²·s)、热流密度为100~800 kW/m²工况下的传热系数和临界热流密度数据。实验结果表明:重力加速度对流动沸腾传热具有显著强化作用,当重力从1.0g增至3.16g时,传热系数提升60%~80%,临界热流密度提高20%~35%。在低干度区,重力增强通过减小气泡脱离直径、提高脱离频率强化传热;在中高干度区,重力增强使液膜变薄且分布均匀,并有效延缓干涸现象。其次,与10种经典传热关联式进行对比发现,传统模型在变重力条件下预测误差较大,其中Fang模型表现最优但平均绝对误差仍达9.6%。最后,采用随机森林、支持向量机和极端梯度提升3种机器学习算法建立了传热系数预测算法模型,其中XGBoost模型在全重力范围内的平均绝对误差仅为3.1%,显著优于传统经验关联式。研究成果可为轨道交通和航空航天机载设备冷却系统的优化设计提供理论依据。

关键词 变重力环境;微通道;沸腾传热;临界热流密度;机器学习

中图分类号: TB657.5;TK124

文献标识码: A

Data-Driven Investigation of Flow Boiling Heat Transfer Characteristics in Micro-Channels under Variable Gravity Environment

Ying Taotao¹ Hu Xianzhu¹ Su Zhangfan¹ Chen Qi¹ Pan Ouyu¹ Li Gen²

(1. Wenzhou Railway and Rail Transit Investment Group Co., Ltd., Wenzhou, 325011, China; 2. School of Aeronautics, Chongqing Jiaotong University, Chongqing, 400074, China)

Abstract

Objective To address the demand for high-efficiency heat dissipation in railway transportation and aerospace equipment under variable gravity environments, we systematically investigated the flow boiling heat transfer characteristics of water-glycol mixtures in microchannels and developed data-driven predictive models. Although microchannel flow boiling offers a compact cooling solution, its characteristics under variable gravity are not well understood, and traditional empirical correlations lack prediction accuracy. In this study, we aimed to fill this gap and provide a theoretical basis for optimizing cooling systems for both railway and aerospace applications.

Methods Both experimental and machine-learning approaches were employed to evaluate flow boiling heat transfer performance. A variable gravity experimental platform based on a centrifugal rotating table was established, capable of simulating gravity environments from 1.00g to 3.16g. The experimental system featured closed-loop circulation with a 200 mm-long, 2 mm-inner-diameter copper microchannel test section. Experiments were conducted across mass fluxes of 50–500 kg/(m²·s), heat fluxes of 100–800 kW/m², system pressures of 0.1–0.3 MPa, and inlet subcoolings of 10–30 °C. T-type thermocouples with ±0.1 °C accuracy were used for temperature measurements, while pressure transducers and differential pressure sensors monitored system pressures. Three machine learning algorithms—Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM), and Extreme Gradient Boosting (XGBoost)—were developed using 80% training and 20% testing data splits with 5-fold cross-validation for hyperparameter optimization.

Results and Discussions The results demonstrate significant gravity-induced enhancement of flow boiling heat transfer. As gravity increased from 1.00g to 3.16g, the heat transfer coefficient (HTC) improved by 60%–80%, while the critical heat flux (CHF) increased by 20%–35%. In the region of low vapor quality ($x < 0.3$), gravity enhancement reduced bubble departure diameter according to the relationship $D_b \propto g^{-0.5}$, leading to increased departure frequency and enhanced microlayer evaporation. In the medium quality

基金项目: 国家自然科学基金项目(52175257)。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52175257).) 收稿日期:2025-11-08;修回日期:2026-01-17;录用日期:2026-02-02

region ($0.3 < x < 0.7$), gravity intensification resulted in thinner and more uniform liquid films, with peak HTC values reaching 23 000 $W/(m^2 \cdot K)$ at 3.16g compared to 14 100 $W/(m^2 \cdot K)$ at 1.00g. In the high-quality region ($x > 0.7$), hypergravity delayed the onset from $x=0.75$ to $x=0.8$. A comparison with ten classical correlations showed that traditional models exhibit large prediction errors under variable gravity, with the best-performing Fang model achieving only a 9.6% mean absolute error (MAE). In contrast, the XGBoost model achieves an MAE of 3.1% across all gravity conditions, with particularly superior performance at 3.16g (MAE=3.35%) compared to the Fang model (MAE=18.61%).

Conclusions This study confirms that gravity is a critical factor in flow boiling heat transfer, significantly enhancing both HTC and CHF through mechanisms such as bubble dynamic optimization and liquid film redistribution. The XGBoost machine-learning model demonstrates superior accuracy in predicting heat transfer performance under variable gravity compared to traditional methods. These findings provide a crucial theoretical basis for the optimal design of cooling systems for railway-vehicle-mounted aerospace airborne equipment that operate in complex gravitational environments.

Keywords variable gravity environment; micro-channels; boiling heat transfer; critical heat flux; machine learning

随着轨道交通和航空航天技术的快速发展,高速铁路牵引变流器、制动电阻等大功率电气设备,以及航空航天飞行器机载电子系统、功率模块、发动机热端部件等在运行过程中持续产生大量热量,高效散热成为保障系统可靠运行的关键问题^[1-3]。

与地面设备相比,航空航天器所处的重力环境更具复合性与动态性:军用高机动飞行器在大机动转弯、俯仰机动过程中可经历数g级过载;民用飞机在湍流与紧急规避中也会出现明显的加速度波动;航天器在发射、入轨与再入等阶段则可能经历从微重力到数倍重力的宽范围变化。这种变重力环境会显著改变两相流动结构、气泡行为与液膜分布,导致冷却系统出现传热衰减、干涸提前或不稳定性增强等风险,对热管理系统提出更严苛的要求^[4-5]。

微通道沸腾传热技术凭借高效紧凑的优势,通过毫米或亚毫米尺度通道内的相变传热,能在较小温差下传递大量热量,在电子设备散热和航空航天热控领域得到广泛应用^[6-7]。然而,现有研究主要集中于常重力条件,对变重力环境下的流动沸腾机理认识尚不深入,传统传热关联式多基于常重力实验数据拟合,应用于变重力条件时存在较大偏差^[8-10]。

在变重力微通道沸腾传热研究方面,国内外学者开展了系列探索。Li Gen等^[11]研究了微通道内去离子水在1.0g~5.1g重力环境下的流动沸腾特性,发现高干度区受离心力与科氏力诱导的气液分层影响,传热系数显著降低,但临界热流密度有所提升。Yang Ruixue等^[12]针对战斗机高过载环境,对比了向心与离心2种径向流动模式的沸腾特性,揭示了不同流动模式下壁温随过载变化的差异规律。Li Chong等^[13]研究了R245fa工质在1.00g~1.53g条件下的临界热流密度特性,发现高重力有助于缓解干涸后的传热恶化并抑制热震荡不稳定性。Luo Zufen等^[14]和D. M. Iceri等^[15]分别研究了水平微管和垂直微管内

的流动沸腾特性,进一步揭示了科氏力、流速及过冷度等因素与重力效应的耦合影响。上述研究为理解变重力沸腾传热机制奠定了基础,但系统性实验数据仍相对匮乏。

近年来,数据驱动方法在传热领域得到广泛关注。相较于传统经验关联式依赖特定假设与有限维度的无量纲拟合,机器学习方法能够同时处理几何参数、热边界、物性、工况参数等多种影响因素,并可通过特征重要性分析提升对关键控制量的识别能力^[16-17]。张军权^[18]采用机器学习算法预测淬冷沸腾传热特性,结果表明模型性能远超传统经验式。吴经淋^[19]基于实验与数值模拟数据构建了S-CO₂传热机器学习模型,预测精度显著优于传统关联式。刘学祥^[20]采用神经网络和支持向量回归方法预测环路热管传热性能,发现支持向量回归在小样本上表现更优。Yang Huan等^[21]和B. Markal等^[22]分别针对液氢流动沸腾和微针肋散热器开展机器学习建模研究,验证了数据驱动方法在复杂传热问题中的优越性。然而,现有数据驱动研究多建立在常重力条件或有限重力点的数据库之上,针对变重力微通道流动沸腾的模型训练与泛化验证仍显不足。

综上所述,数据驱动模型凭借卓越的泛化能力和预测精度,在处理多参数耦合的传热问题时展现出显著优势,将其引入变重力微通道沸腾传热研究,能够突破传统模型在复杂工况下的预测局限。鉴于此,本研究针对铁路及航空航天机载设备在变重力环境下的散热需求,构建可调节重力加速度的实验平台,系统获取水-乙二醇混合工质在1.00g~3.16g连续变重力环境下的管内流动沸腾传热数据,从低、中、高干度区出发揭示重力增强对传热特性的作用机制,评估经典关联式在变重力条件下的适用性,并构建RF(随机森林, random forest)、SVM(支持向量机, support vector machine)与XGboost(极端梯度提

升, extreme gradient boosting)3种机器学习预测模型。研究成果将推动微通道沸腾技术在变重力传热领域的工程应用,并为复杂力场环境下的两相流动传热研究提供数据驱动新路径。

1 实验系统与方法

1.1 实验装置

本研究所采用的实验装置主要由离心旋转台、微通道流体循环系统和数据采集控制系统3部分组成,如图1所示。其中,离心旋转台半径为1 m,旋转轴下部与电机相连,可通过调节电机变频器输出功率调节转速,进而模拟不同的重力环境。转台下部配有2对电刷,可在转台旋转时为安装在转台上的实验设备持续供电。采用离心旋转平台实现1.00g~3.16g重力设定,综合考虑了旋转系统安全裕度、结构强度、旋转密封与测量链路在高转速下的可靠性等工程约束等因素。

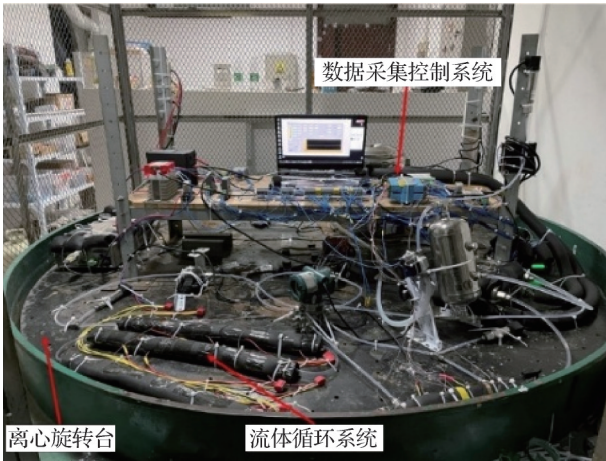
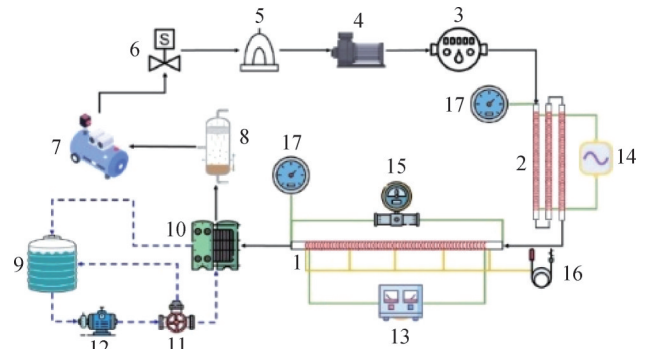


图1 变重力实验台

Fig.1 Variable gravity experimental platform

微通道流体循环系统如图2所示,采用闭式强制循环设计,核心组件包括储液罐、齿轮泵、椭圆齿轮流量计、预热段、实验段和板式冷凝器等。储液罐顶部设置充液阀门,便于系统排气和工质补充。齿轮泵提供稳定的驱动压头,确保工质在设定流量下连续循环。流量计安装于旋转平台中心轴线位置,最大程度降低离心效应对测量精度的干扰。预热段采用内径为2 mm、长度为1 000 mm的紫铜直管,通过交流调压模块精确控制加热功率,使工质达到预设的入口参数。实验段与预热段之间设置100 mm长的绝热发展段,确保进入实验段的两相流充分发展,避免入口效应对传热特性的影响。板式冷凝器采用冷却水作为冷源,保证工质完全冷凝为过冷液体后返

回储液罐。



1 实验段; 2 预热段; 3 体积流量计; 4 齿轮泵; 5 过滤器; 6 电磁阀; 7 储液罐; 8 气液分离器; 9 过冷水储存器; 10 热交换器; 11 三通阀; 12 潜水泵; 13 直流电源; 14 交流电源; 15 差压传感器; 16 热电偶; 17 压力变送器。

图2 微通道流体循环系统

Fig.2 Fluid circulation system of the micro-channels

实验段选用高纯度紫铜管制作,如图3所示,全长为200 mm,内径为2 mm,壁厚为1 mm。实验段水平安装在距旋转中心0.95 m的径向位置,其轴线与半径方向垂直布置。工质流动方向与离心加速度方向正交,确保重力效应的单一性。实验段外壁均匀缠绕镍铬合金电阻丝,通过大功率直流稳压电源供电,实现0~1 000 W的精确加热控制。为减少热损失,预热段、发展段和实验段外部均包覆多层隔热材料,有效降低与环境的对流和辐射换热。

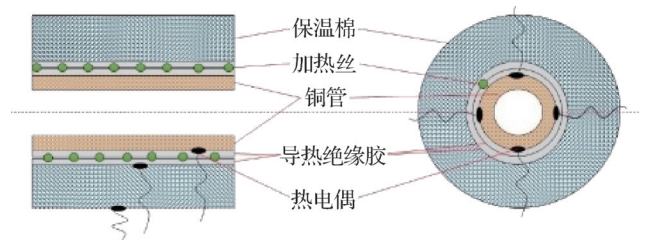


图3 实验段内部结构

Fig.3 Internal structure of the test section

温度测量采用标定后的T型热电偶,沿实验段轴向等间距布置5组壁温测点,每组测温点布置4个热电偶,每个测点间隔40 mm。同时,在实验段进出口、预热段入口处分别布置有热电偶用于监测流体温度变化。压力测量系统由3个压阻式压力变送器和1台3051型差压传感器组成。压力变送器分别安装在预热段入口、实验段出口和储液罐顶部,量程为0~0.6 MPa,精度等级为0.25级。差压传感器连接实验段两端,量程为0~100 kPa,用于精确测量两相流动压降。

1.2 实验工况与步骤

本研究质量流速为 50~500 kg/(m²·s),涵盖了从低流速层流到高流速湍流的完整区间。热流密度为 100~800 kW/m²,对应于机载大功率电气电子设备的实际散热需求。系统压力控制在 0.1~0.3 MPa,入口过冷度维持在 10~30 °C。重力环境以常重力条件(1.00g)作为基准工况,通过施加不同离心加速度(1.00g、2.00g、3.00g),获得合成重力加速度分别为 1.41g、2.24g 和 3.16g 的变重力环境。

实验选用体积比为 50:50 的水-乙二醇溶液,旨在兼顾航空航天热管理的防冻与传热需求,并通过闭式回路及严格的抽真空排气流程消除浓度波动与不凝性气体干扰。实验过程严格控制参数稳定性,通过 PID 调节预热与加热功率,确立了基于温度(<±0.5 °C)、压力(<±0.5 kPa)及流量(<±1%)的严格热力平衡判据。为保证数据可靠性,每组工况重复测量 3 次并取平均值。变重力测试依托旋转平台,严格遵循 1.00g 至 3.16g 的递增序列,在每一重力级稳定后采集传热与压降数据,从而系统严究了变重力环境下该复杂工质的微通道流动沸腾特性。

1.3 可靠性分析

为验证实验系统的准确性,开展了单相流动传热实验,其实验值与 Gnielinski 关联式对比结果如图 4 所示。由图 4 可知,实验测得的努塞尔数 Nu 与经典 Gnielinski 关联式^[23]预测值吻合良好,相对偏差控制在 5% 以内,证实了本实验系统及测量数据的可靠性。

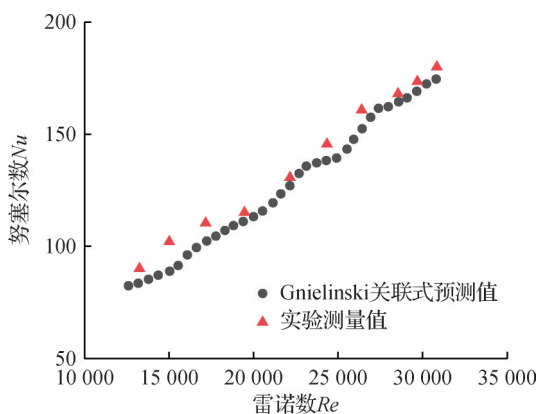


图 4 单相流动传热实验值与 Gnielinski 关联式对比结果

Fig.4 Comparison of experimental values of single-phase flow heat transfer with Gnielinski correlation results

2 数据处理与不确定度分析

2.1 超重力加速度

实验台旋转产生的离心加速度 a_c 为:

$$a_c = (2\pi n)^2 L_a \quad (1)$$

式中: n 为转台的转速,m/s; L_a 为实验段中心到转台圆心的距离,m。由于实验段长度 L (0.2 m)远小于 L_a (0.95 m),因此可用实验段中心点的离心力来代表整个实验段所受的离心力。

过载加速度 a_h 是转台离心加速度 a_c 和实验段所受重力加速度 g 的合成加速度,即:

$$a_h = \sqrt{a_c^2 + g^2} = g \sqrt{(a_c/g)^2 + 1} \quad (2)$$

从式(2)可知,当 $a_c=0$ 时, $a_h=1g$,此时处于常重力条件;当 $a_c>0$ 时, $a_h>1g$,则实验处于超重力环境。

2.2 热流密度

实验段有效热流密度 q 定义如下:

$$q = \frac{Q_{\text{test}}}{\pi D L_{\text{eff}}} \quad (3)$$

式中: D 为实验段内径,m; L_{eff} 为实验段有效加热长度,m; Q_{test} 为考虑热量损失后的实验段净加热功率,W。可利用式(4)计算:

$$Q_{\text{test}} = Q - \frac{t_{i,\text{ins}} - t_a}{\frac{\ln(D_{o,\text{ins}}/D_{i,\text{ins}})}{2\pi L_{\text{eff}} \lambda_{\text{ins}}} + \frac{1}{h_0 \pi L_{\text{eff}} D_{o,\text{ins}}}} \quad (4)$$

式中: Q 为实验段总加热功率,W; $t_{i,\text{ins}}$ 为保温层内壁面温度,°C; t_a 为环境温度,°C; λ_{ins} 为保温层的导热系数,W/(m·°C); $D_{o,\text{ins}}$ 和 $D_{i,\text{ins}}$ 分别为保温层的外径和内径,m; h_0 为保温层外表面的传热系数,W/(m²·°C)。

2.3 热力学干度

根据能量守恒方程可得:

$$x_{\text{in}} = \frac{1}{h_{\text{lg},\text{in}}} \left(\frac{Q_{\text{pre}}}{GA} - \Delta h_{1,\text{in},\text{pre}} \right) \quad (5)$$

式中: x_{in} 为实验段的入口干度; $h_{\text{lg},\text{in}}$ 为实验段进口压力条件下的汽化潜热,kJ/kg; Q_{pre} 为预热段的净加热功率,W; A 为实验段截面积,m²; $\Delta h_{1,\text{in},\text{pre}}$ 为实验段进口压力条件下的饱和液体焓值与预热段进口焓值之差,J; G 为质量流速,kg/(m²·s),可由式(6)计算。

$$G = q_v \rho / A \quad (6)$$

式中: q_v 为流量计测得的体积流量,m³/h; ρ 为工质的密度,kg/m³。同样可得实验段出口干度为:

$$x_{\text{out}} = x_{\text{in}} + \frac{Q_{\text{test}}}{GA h_{\text{lg},\text{out}}} \quad (7)$$

式中: $h_{\text{lg},\text{out}}$ 为实验段出口压力条件下的汽化潜热,kJ/kg。因此,实验段的平均干度 x 可用进口干度和出口干度的算术平均值计算:

$$x = (x_{\text{in}} + x_{\text{out}}) / 2 \quad (8)$$

2.4 传热系数

传热系数 h 根据牛顿冷却定律定义为:

$$h = \frac{q}{t_{w,i} - t_{sat}} \quad (9)$$

式中: q 为热流密度, W/m^2 ; t_{sat} 为去离子水的饱和温度, $^{\circ}C$; $t_{w,i}$ 为实验段内壁面温度, $^{\circ}C$ 。内壁面温度可通过外壁面温度 $t_{w,o}$ 根据一维稳态导热方程推算:

$$t_{w,i} = t_{w,o} - \frac{qD}{2\lambda} \ln\left(\frac{D_o}{D}\right) \quad (10)$$

式中: $t_{w,o}$ 为实验段外壁面温度, $^{\circ}C$; λ 为实验段管壁的导热系数, $W/(m \cdot ^{\circ}C)$; D 为内径, m ; D_o 为外径, m 。

2.5 不确定度分析

基于S. Kline和F. McClintock^[24]误差传递理论,本研究对实验参数进行了系统的不确定度分析,各主要参数的不确定度如表1所示。其中,重力加速度、质量流速、热流密度、干度和传热系数的不确定度分别根据式(11)~式(15)计算得出。

表1 测量及计算参数的不确定度

Tab.1 Uncertainties of measured and calculated parameters

参数	仪器/方法	不确定度值
内径	显微镜	$\pm 10 \mu m$
长度	千分尺	$\pm 1 mm$
温度	T型热电偶	$\pm 0.5 ^{\circ}C$
质量流速	式(12)	$\pm 1.2\%$
压力	PCM压力变送器	$\pm 0.25\%$
环境压力	DYM3型空压表	$\pm 100 Pa$
压差	3051型压差传感器	$\pm 2 kPa$
电流	直流电源	$\pm 0.1\%$
电阻	电阻仪	$\pm 0.1 \Omega$
加热功率	式(4)	$\pm 0.5\%$
热流密度	式(13)	$\pm 3.5\%$
干度	式(14)	$\pm 5.4\%$
转速	实验台编码器	$\pm 0.5 r/min$
重力加速度	式(11)	$\pm 0.5\%$
传热系数	式(15)	$\pm 7.8\%$

$$\frac{\delta a_h}{a_h} = \sqrt{2\left(\frac{\delta \omega}{\omega}\right)^2 + \left(\frac{\delta r}{r}\right)^2 + \left(\frac{\delta g}{g}\right)^2} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\delta G}{G} &= \sqrt{\left(\frac{\delta G_v}{G_v}\right)^2 + \left(\frac{\delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\delta T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\delta P}{P}\right)^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{\delta G_v}{G_v}\right)^2 + \left(2\frac{\delta D}{D}\right)^2 + \left(\frac{\delta T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\delta P}{P}\right)^2} \quad (12) \end{aligned}$$

$$\frac{\delta q}{q} = \sqrt{\left(\frac{2\delta I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\delta R}{R}\right)^2 + \left(\frac{\delta D}{D}\right)^2 + \left(\frac{\delta L}{L}\right)^2} \quad (13)$$

$$\frac{\delta x}{x} = \sqrt{\left(\frac{\delta G}{G}\right)^2 + \left(\frac{\delta D}{D}\right)^2 + \left(\frac{\delta Q_{pre}}{Q_{pre}}\right)^2 + \left(\frac{\delta Q_{test}}{Q_{test}}\right)^2 + \left(\frac{\delta T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\delta P}{P}\right)^2} \quad (14)$$

$$\frac{\delta h}{h} = \sqrt{\left(\frac{\delta q}{q}\right)^2 + \left(\frac{\delta \Delta T}{\Delta T}\right)^2} \quad (15)$$

3 实验结果与分析

3.1 重力加速度对传热系数的影响

图5所示为水-乙二醇溶液在不同重力环境下的沸腾传热系数随干度的变化趋势。可以看出,随重力加速度从 $1.00g$ 增至 $3.16g$,水-乙二醇溶液的沸腾传热系数在全干度范围内显著提升。并随干度呈现“低干度区间缓慢上升($x < 0.3$)—中干度区间相对平稳($x \approx 0.3 \sim 0.7$)—高干度区间骤降($x > 0.7$)”的非单调特征。特别是在核态沸腾主导的低干度区,重力强化效应近似呈线性,以图5(a)所示的第一组工况($G = 50 kg/(m^2 \cdot s)$, $q = 100 kW/m^2$)为例,当干度 $x = 0.1$ 时,重力加速度从 $1.00g$ 增至 $3.16g$,传热系数从约 $3800 W/(m^2 \cdot K)$ 提升至 $7000 W/(m^2 \cdot K)$,增幅达到80%。

这种强化作用主要归因于汽泡核化密度的增加和汽液两相间扰动的增强。根据Fritz气泡脱离直径理论,气泡脱离直径可表示为:

$$d_b = 0.0208 \cdot \theta \cdot \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho_l - \rho_v)}} \quad (16)$$

式中: θ 为接触角, $(^{\circ})$; σ 为表面张力, N/m ; ρ_l 和 ρ_v 分别为液相和气相密度, kg/m^3 。重力加速度的增大直接导致气泡脱离直径减小,气泡脱离频率相应提高。气泡脱离频率可通过下式估算:

$$f = \sqrt{\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\rho_l d_b}} \quad (17)$$

较小的气泡尺寸和较高的脱离频率共同促进了壁面附近的微对流强度,增强了热边界层的扰动,从而提高了传热系数。同时,在核态沸腾主导的低干度区,重力增强还通过改善液体回流和壁面润湿特性,延缓了局部干涸的发生,维持了高效的沸腾传热模式。

图6所示为基于Fritz和Zuber理论模型计算得到的不同重力条件下气泡动力学参数的变化规律。可以看出,气泡脱离直径与重力加速度呈显著的负相关关系,而脱离频率则随重力增加而单调上升。即当重力从 $1.00g$ 增至 $3.16g$ 时,受增强的浮升力牵引,气泡在更小的尺寸下即可克服表面张力束缚脱

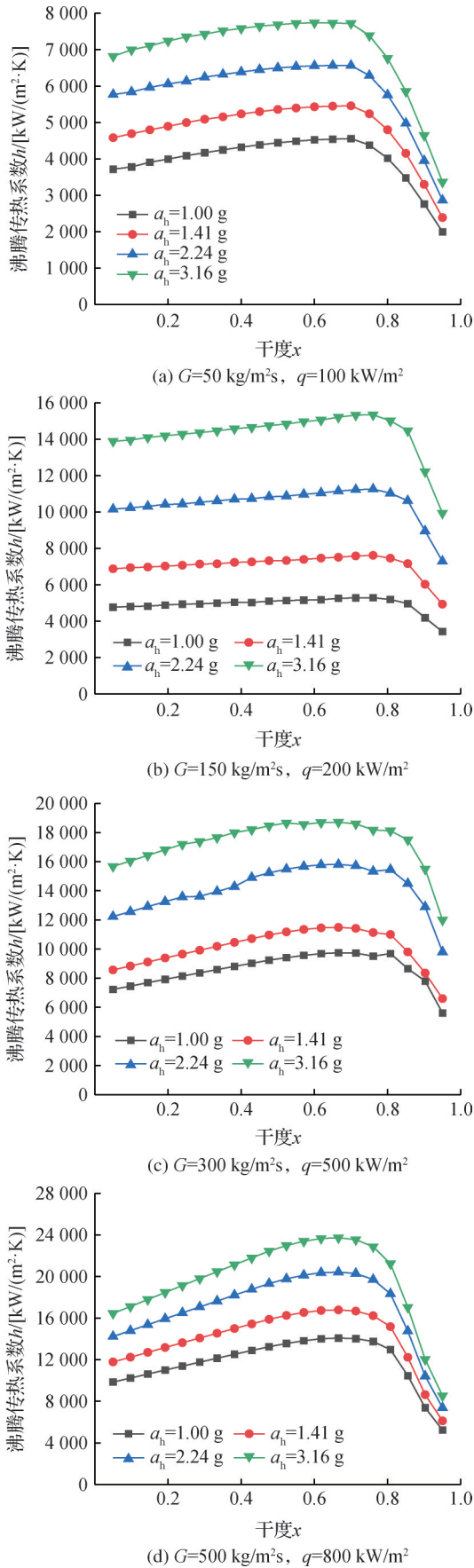


图5 不同重力环境下的沸腾传热系数随干度的变化
Fig.5 Variation of boiling heat transfer coefficient with vapor quality under different gravity environments

离壁面,其直径从 1.2 mm 减至 0.66 mm (减小约 45%)。尺寸的减小缩短了气泡生长周期,导致脱离频率从 18.6 Hz 激增至 31.4 Hz。这种“小尺寸、高频率”的气泡运动模式显著增强了近壁区的微对流扰动与气液交换效率,是低干度区传热强化的核心微观机制。

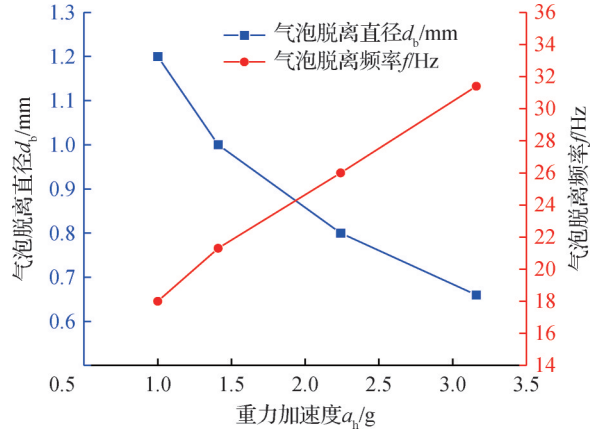


图6 气泡脱离直径和频率随重力加速度的变化
Fig.6 Effect of gravitational acceleration on bubble departure diameter and frequency

为定量阐述该强化机理,引入无量纲邦德数 Bo 表征浮力与表面张力的相对作用:

$$Bo = \frac{g(\rho_l - \rho_v)L^2}{\sigma} \quad (18)$$

随着重力加速度 g 的增加, Bo 数线性增大,表明浮升力克服表面张力束缚的能力显著增强。通过经典的 Fritz 气泡脱离直径理论模型进行定量估算可知:当重力从 1.00g 增至 3.16g 时,气泡脱离直径减小了约 44%。此外,高频脱离的气泡群在近壁区诱导了强烈的微对流扰动,显著提高了流体的局部韦伯数 We :

$$We = \rho_l v^2 D_b / \sigma \quad (19)$$

虽然单个气泡尺寸减小,但由浮力驱动的气泡上升速度 v 随重力增加而增大,导致局部流体惯性效应增强。这种高频、高流速的气泡运动有效破坏了加热壁面的热边界层,强化了微层蒸发与主流液体的再润湿过程,从而使得该干度区间的传热系数实现了 60%~80% 的显著提升。

中等干度区域 ($0.3 < x < 0.7$) 展现出最为显著的重力强化效应。在该区间,传热系数达到峰值,且重力加速度的影响最为明显。观察图 5 的 4 组实验数据可以发现,传热系数峰值均出现在干度为 0.65~0.70 区间内。此时,管壁被连续的液膜覆盖,汽核在中心高速流动,形成了高效的传热模式。传热系数在此区域保持相对稳定,主要通过液膜的导热和汽

液界面的剧烈扰动实现热量传递。如图5(d)所示,在最高工况条件($G=500 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, $q=800 \text{ kW}/\text{m}^2$)下, $3.16g$ 重力加速度下的峰值传热系数达到 $23\,000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 相比 $1.00g$ 条件下的 $14\,100 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 提升了 68% 。

在中高干度区域,流型逐渐转变为环状流,液膜热阻成为影响传热性能的关键因素。受限于离心旋转台的安装空间与动平衡限制,本实验未进行可视化拍摄,但基于 Hewitt 和 Hall-Taylor 提出的环状流液膜厚度理论模型进行了定量分析:

$$\frac{\delta}{D} = 0.067 \left[\frac{Re_l^{0.2}}{1 + 1400X_{tt}} \right] \quad (20)$$

式中: δ 为液膜厚度, μm ; Re_l 为液相雷诺数; X_{tt} 为 Martinelli 参数。重力加速度的增大通过改变流动阻力和界面剪切应力分布,使液膜变薄且分布更加均匀。图7所示为基于 Hewitt 和 Hall-Taylor 理论模型计算得到的不同质量流速下液膜厚度 δ 随重力加速度 a_h 的变化趋势。可以看出,液膜厚度与重力加速度呈显著的负相关关系,随着重力从 $1.00g$ 增至 $3.16g$,在离心力与重力合成的强体积力拉伸作用下,所有工况点的液膜均发生显著减薄,计算表明其厚度较常重力工况平均减小约 27.5% 。这种物理尺度的减小直接降低了环状流区域的液膜导热热阻,配合高流速下气液界面剪切力的增强,合理解释了实验中观测到的传热系数在中高干度区随重力增加而大幅提升的物理机制。

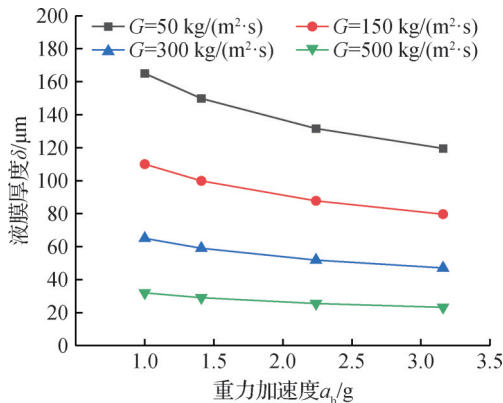


图7 不同质量流速下液膜厚度随重力加速度的变化

Fig.7 Variation of liquid film thickness with gravitational acceleration under different mass fluxes

在高干度区域,随着干度继续增加,所有重力条件下的传热系数均开始下降,但下降的起始点和速率存在明显差异。在 $1.00g$ 条件下,传热系数在 $x=0.75$ 左右开始快速下降,而在 $3.16g$ 条件下,该转折点延迟至 $x=0.8$ 附近。更重要的是,高重力条件下的

传热系数下降更为缓和,表明重力增强能够有效延缓干涸的发生和发展。干涸现象的延缓可以通过临界热流密度理论进行解释。根据 Kutateladze 提出的 CHF(临界热流密度, critical heat flux) 关联式:

$$q_{CHF} = 0.16 \cdot h_{fg} \cdot \sqrt{\rho_v} \cdot \sqrt[4]{\sigma g (\rho_l - \rho_v)} \quad (21)$$

重力加速度的增大直接提高了临界热流密度,使系统能够在更高的干度下维持稳定的液膜流动。此外,重力增强改善了液体的横向分配,减少了局部干斑的形成概率。即使在发生部分干涸后,较强的重力场也能促进液体的再润湿过程,通过液滴撞击和液膜爬升机制恢复壁面的润湿状态。

3.2 临界热流密度特性

CHF 决定了系统的传热极限与安全裕度。不同重力环境下的临界热流密度变化如图8所示,随着重力加速度从 $1.00g$ 增至 $3.16g$, CHF 呈显著单调递增趋势,平均提升幅度达 $20\% \sim 35\%$ 。这种强化效应在低重力区 ($1.00g \sim 1.41g$) 尤为显著,而高重力区增长趋缓。机制分析表明,超重力增强了浮升力,且气泡直径随重力增加而减小 ($\propto g^{-0.5}$); 更小的气泡尺寸配合更高的脱离频率,显著加速了加热面的界面更新与液体回补,从而有效推迟了 CHF 的发生。

CHF 的出现往往源于液膜局部破裂和干斑扩展。当重力增强时,液体在加热面附近的再分布能力显著提高,浮升力不仅加速蒸汽上升,还促进周围液体的回流补充,从而维持较高的液体体积分数,抑制干涸核的形成。对于流动沸腾系统,液膜厚度可由动量方程估算:

$$\delta_l \propto \left(\frac{\mu_l q''}{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) h_{fg}} \right)^{1/3} \quad (22)$$

可见,增大重力将使液膜厚度减小,有利于快速热交换和相变过程,但同时也增强了液体的动能回补能力,使得局部过热更难积聚。因此,系统可在更高的热流密度下维持稳定的沸腾状态,导致 CHF 提高。

3.3 与现有理论模型对比分析

为评估本实验结果的可靠性与适用性,将不同重力条件下测得的流动沸腾传热系数与常见的10个经典预测模型进行了系统对比,如表2所示,这些模型涵盖了从早期的宏观经验关联式到微通道修正模型的多个层级。其中平均绝对误差 (mean absolute error, MAE) 和均方根误差 (root mean square error, RMSE) 计算式分别如式(23)和式(24)所示。

$$E_{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (23)$$

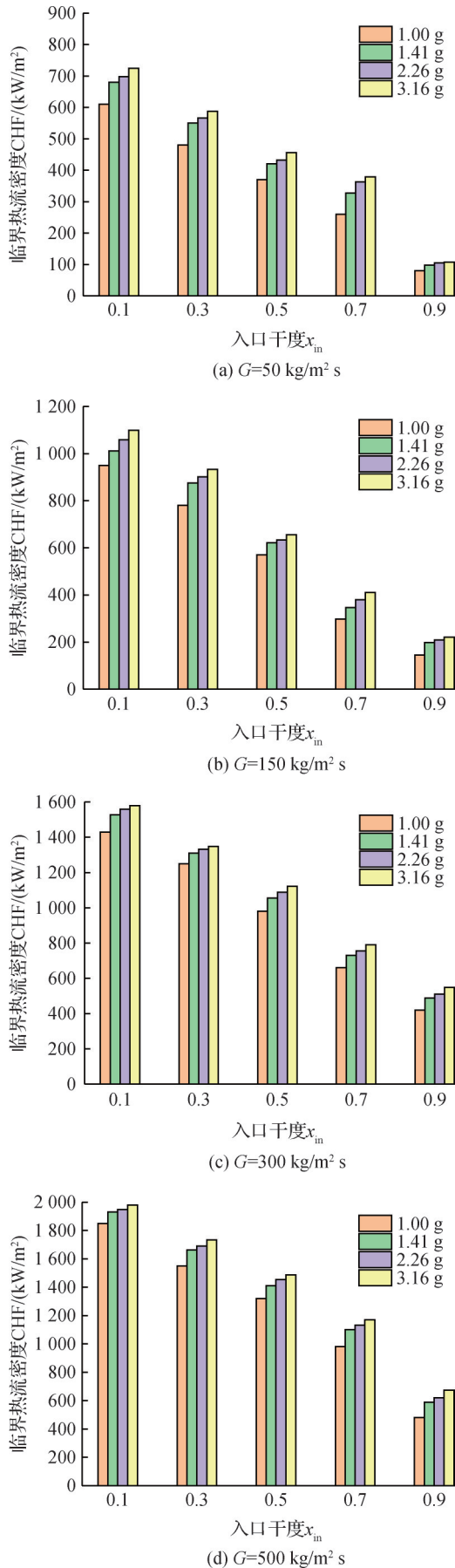


图8 不同重力环境下的临界热流密度变化

Fig.8 Trend of CHF under different gravity environments

表2 本实验结果与经典沸腾传热预测模型的误差分析
Tab.2 Error analysis between present experimental results and classical boiling heat transfer correlations

模型	适用范围	MAE/%	RMSE/%
Rohsenow ^[25]	低流速	27.4	33.2
Forster-Zuber ^[26]	低压力	22.6	29.8
Schrock-Grossman ^[27]	中压力	20.3	25.5
Chen ^[28]	宏观沸腾	15.7	19.1
Shah ^[29]	制冷剂	17.8	21.3
Gungor-Winterton ^[30]	小通道	13.2	16.8
Kandlikar ^[31]	小通道	11.5	14.9
Liu-Winterton ^[32]	微通道	10.2	13.6
Sun-Mishima ^[33]	变重力/非水平	11.9	11.8
Fang ^[34]	变重力	9.6	10.4

$$E_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (24)$$

式中： E_{MAE} 为平均绝对误差， E_{RMSE} 为均方根误差， n 为数据样本总数， y_i 为实验测量值， \hat{y}_i 为模型预测值。

由表2可知，Rohsenow等传统宏观经验模型因忽略重力对相界及液膜的影响，在超重力与微通道环境下预测偏差显著(MAE>20%)。Chen系列改进关联式(如Liu-Winterton)虽在常重力下表现较优(MAE降至10%~15%)，但受限于常重力拟合系数，在大于1.5g工况下仍存在系统性低估。相比之下，引入Froude数和Weber数的Sun-Mishima及Fang模型能有效表征变重力下的惯性与气泡动力学特征；特别是结合了微通道尺度效应与重力修正的Fang模型，在本研究高重力工况下精度最优(MAE仅9.6%)。

3.4 机器学习算法预测结果

为验证数据驱动方法在变重力传热预测中的优势，本研究构建了随机森林、支持向量机及极端梯度提升3种模型。模型选取质量流速、热流密度、管径、重力加速度及工质热物性等12个参数作为输入特征，输出目标为传热系数。为确保泛化能力，数据集按8:2比例划分为训练集与测试集，并采用5折交叉验证进行超参数寻优。

输入特征的Pearson相关系数热力图如图9所示。可以看出，大多数变量间的相关系数绝对值小于0.5，表明特征间独立性良好。特别是重力加速度与其他参数的相关性极低，证实实验设计成功实现了重力场与热工水力参数的解耦。这种低相关性使模型能精准捕捉重力对传热的独立影响，克服了传统经验关联式的局限。

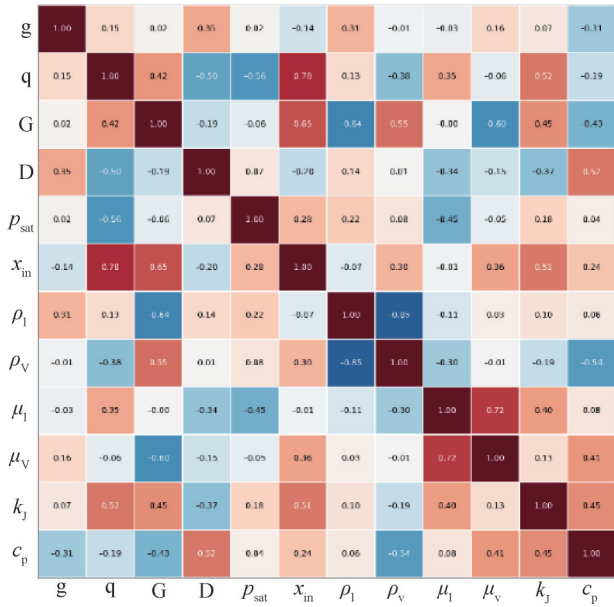


图9 输入参数变量相关性热力图

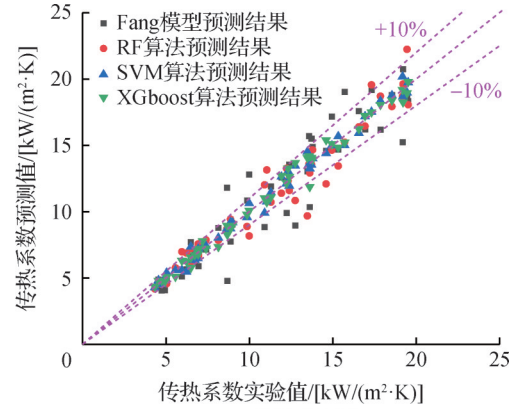
Fig.9 Correlation heatmap of input parameters

此外,部分强相关性(如气液密度负相关-0.85、热流与干度正相关0.78)严格遵循饱和物性变化与能量平衡规律。这种物理一致性不仅验证了数据的可靠性,更为模型在多维参数空间内学习复杂的非线性映射关系提供了内在的物理约束,从而保证了预测结果的物理合理性。

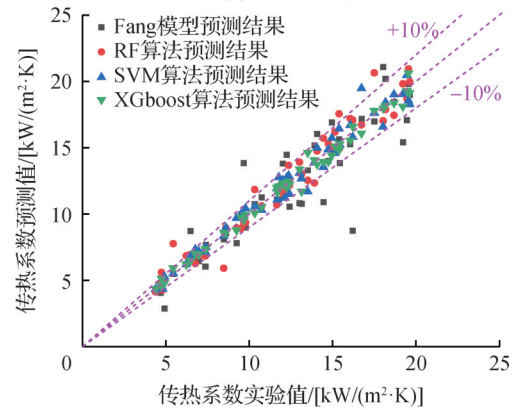
RF算法由多棵决策树组成,其核心思想是“集成平均”,即通过随机采样与特征扰动构建多模型后取加权平均值^[35]。SVM算法利用核函数映射高维特征空间,能够较好地描述非线性边界下的相变传热规律^[36]。XGBoost算法基于梯度提升的思想,通过迭代方式将多个弱学习器(树模型)组合成强学习器。同时逐步优化弱学习器的残差项实现高精度拟合,并内置正则化约束,有助于抑制过拟合问题^[37]。

3种机器学习算法均以实验测得的传热系数作为基准目标,分别在1.00g、1.41g、2.26g及3.16g环境下进行预测。为便于量化比较,同时选取传统经验模型中表现最优的Fang关联式作为对照,共形成4组预测结果,如图10所示。所有预测结果均以实验测量的HTC值为基准,通过45°对角线(理想预测线)和±10%误差带来评估预测精度。

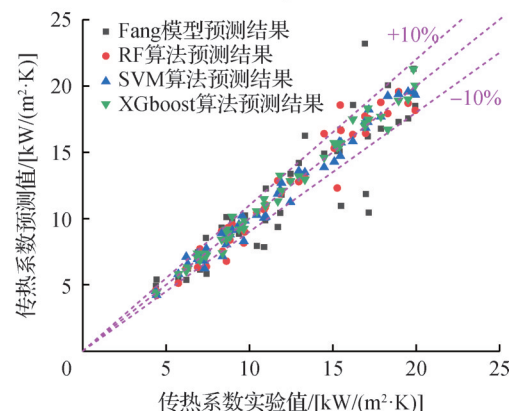
不同重力环境下各预测模型的MAE对比如图11所示。如图11所示,在常重力环境(1.00g)下,3种机器学习算法的预测误差均明显小于Fang关联式。其中,XGBoost算法的MAE为3.22%,优于随机森林的5.63%与SVM的3.91%,而Fang模型的MAE为8.96%。在1.41g重力环境下,XGBoost依然保持最小误差(MAE=2.69%),随机森林与SVM略有增加



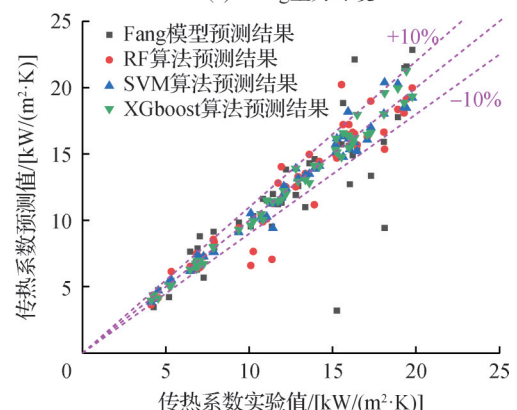
(a) 常重力环境



(b) 1.41 g重力环境



(c) 2.24 g重力环境



(d) 3.16 g重力环境

图10 4种重力环境下的机器学习与Fang公式预测结果

Fig.10 Prediction results of ML and Fang correlation under 4 gravity environments

(MAE分别为6.81%和4.47%),相比之下,Fang模型的误差增至约10.12%。当重力增强至2.26g时,传统关联式的适用性开始显著下降,由于其强化与抑制因子基于常重力经验拟合,导致Fang模型MAE升至15.14%。相比之下,3种机器学习算法仍能在较宽参数区间内保持良好的预测精度,表明基于数据驱动模型可以更准确地捕捉超重力下液膜厚度减薄、气泡脱离频率增大等非线性机理效应。在最高重力3.16g条件下,由于超重力导致气泡界面加速变形与流型转变,虽引入重力修正项,但Fang模型仍无法准确描述此类多尺度耦合过程,其MAE超过18%。相比之下,XGBoost模型在此条件下的MAE仅为3.35%,RF模型为7.76%,SVM模型为4.11%。

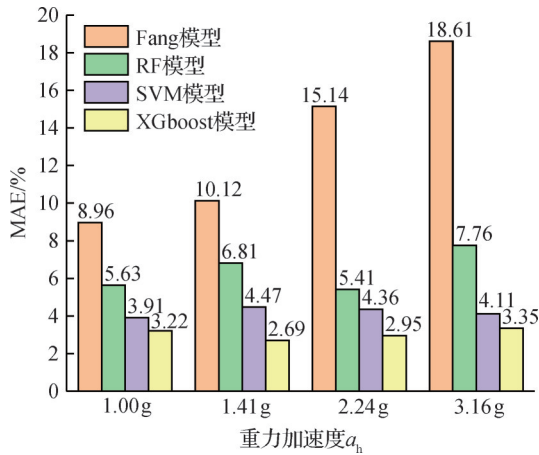


图11 不同重力环境下各预测模型的MAE对比

Fig.11 Comparison of MAE of prediction models under variable gravity environments

4 结论

本文面向轨道交通与航空航天装备在变重力环境下的高效散热需求,开展了水-乙二醇混合溶液在微通道内流动沸腾传热实验与数据驱动建模研究,得到如下结论:

1)变重力对HTC与CHF的总体影响显著。在1.00g~3.16g区间内,重力加速度升高对流动沸腾传热具有稳定的强化作用;当重力加速度由1.00g提升至3.16g时,传热系数提升约60%~80%,临界热流密度提高约20%~35%。

2)不同干度区间的强化机理存在差异。低干度区:重力增强通过减小气泡脱离直径、提高脱离频率与壁面更新速率,强化核态沸腾与近壁微对流。中等干度区:重力增强促使液膜变薄且分布更均匀,维持较高且相对稳定的传热水平。高干度区:重力增强可有效延缓干涸发展,使传热恶化干度点从0.75

延迟至0.8,体现出更高运行安全裕度。

3)传统关联式在变重力条件下外推误差较大。与10种经典传热关联式对比表明多数模型在本研究变重力/微工况下存在明显偏差;其中表现最佳的Fang模型MAE仍约为9.6%,说明仅依赖常规经验关联式难以满足变重力条件下的高精度预测需求。

4)数据驱动模型显著提升预测精度并形成可复用方法框架。建立RF、SVM与XGBoost这三类机器学习模型后,XGBoost在全重力范围内表现最优,MAE约为3.1%,显著优于传统关联式;该结果表明数据驱动方法能够有效学习变重力下多参数耦合的非线性映射关系,为工程设计提供更可靠的预测工具。

未来研究可将本文机器学习模型进一步推广至更广泛工况(不同乙二醇浓度、制冷剂、纳米流体等)与更丰富几何条件(不同通道直径/形状、并联多通道、不同加热边界)下,检验模型跨工况泛化能力并构建更大规模开放数据库。此外,在后续研究中将系统开展两相压降与传热-压降耦合分析,建立相关综合评价指标并同步开展机器学习预测与特征重要性分析。与此同时,探索将无量纲数、守恒约束或流型信息引入模型,提升模型可解释性与外推可靠性,服务于变重力热管理系统的快速设计与优化。

本文受浙江省重点研发计划项目(2021C01053)资助。(The project was supported by the Key Research and Development Program Project of Zhejiang Province (No. 2021C01053).)

参考文献

- [1] 周君洁. 城轨列车牵引变流器中IGBT模块及其散热系统的状态监测方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2023. (Zhou Junjie. Research on condition monitoring method of IGBT module and its cooling system in traction converter of urban rail trains [D]. Chongqing: Chongqing University, 2023.)
- [2] Zheng Shize, Ding Jingxian, Zuo Jianyong. Research on heat dissipation of brake disc in the semi-enclosed space under high-speed train based on fluid-solid-thermal coupling method[J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2024, 56: 104295.
- [3] 马江川, 杨明智, 钱博森. 地铁列车底部几何结构简化对车底流动及电机散热的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2024, 55(5): 1723-1733. (Ma Jiangchuan, Yang Mingzhi, Qian Bosen. Effect of simplifying metro train bottom geometric structure on flow and motor heat dissipation [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2024, 55(5): 1723-1733.)
- [4] 张乾坤, 李红艳, 吕碧纯, 等. 叶脉仿生微通道换热器

- 流动与传热特性的数值研究[J]. 制冷学报, 2025, 46(4): 52–60. (Zhang Qiankun, Li Hongyan, Lü Bichun, et al. Numerical study of thermal-hydraulic characteristics of vein biomimetic microchannel heat exchanger [J]. Journal of Refrigeration, 2025, 46(4): 52–60.)
- [5] Sajjad U, Raza W, Hussain I, et al. On the prediction and optimization of the flow boiling heat transfer in mini and micro channel heat sinks [J]. Progress in Nuclear Energy, 2024, 177: 105466.
- [6] Dong Wenlin, Zhang Xilong, Liu Bilong, et al. Research progress on passive enhanced heat transfer technology in microchannel heat sink [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, 220: 125001.
- [7] Wang Jiajing, Zhuang Yijie, Feng Jingchun. Coupling regulation of variable gravity and magnetic field on the heat transfer dynamics of nano-enhanced phase change material: an experimental study [J]. Applied Thermal Engineering, 2025, 279: 127614.
- [8] Lebon M T, Hammer C F, Kim J. Gravity effects on subcooled flow boiling heat transfer [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 128: 700–714.
- [9] 李根. 过载环境下不同浓度纳米流体的流动沸腾特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2022. (Li Gen. Research on the flow boiling characteristics of water and nanofluid under hypergravity conditions [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2022.)
- [10] 何志强, 方贤德, 方玉祥, 等. 混合制冷剂饱和流动沸腾传热关联式研究[J]. 流体机械, 2025, 53(2): 86–93. (He Zhiqiang, Fang Xiande, Fang Yuxiang, et al. A study of saturated flow boiling heat transfer correlations for mixed refrigerants [J]. Fluid Machinery, 2025, 53(2): 86–93.)
- [11] Li Gen, Zhao Yiling, Zhang Xiaojie, et al. An experimental study on the flow boiling heat transfer characteristics of deionized water under rotational hypergravity [J]. Aerospace, 2025, 12(2): 75.
- [12] Yang Ruixue, Fan Chengcheng, Li Bo, et al. Role of hypergravity in minichannel flow boiling [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2025, 237: 126429.
- [13] Li Chong, Fang Xiande, Yang Quanquan, et al. Experimental study on critical heat flux and thermal instability under hypergravity [J]. Physics of Fluids, 2024, 36(10): 104129.
- [14] Luo Zufen, Fang Xiande, Qin Yeqi, et al. Flow boiling heat transfer of R245fa under hypergravity realized by rotating machine [J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 216: 119081.
- [15] Iceri D M, Zummo G, Saraceno L, et al. Convective boiling heat transfer under microgravity and hypergravity conditions [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 153: 119614.
- [16] Chu Huaqiang, Ji Tianxiang, Yu Xinyu, et al. Advances in the application of machine learning to boiling heat transfer: a review [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2024, 108: 109477.
- [17] Sami M, Sierra F. Using Machine Learning (ML) for Heat Transfer Coefficient (HTC) measurement in buildings: a systematic review [J]. Building and Environment, 2025, 281: 113220.
- [18] 张军权. 基于机器学习的淬冷沸腾流动传热特性研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2025. (Zhang Junquan. Research on the flow and heat transfer characteristics of quenching boiling based on machine learning [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2025.)
- [19] 吴经淋. 基于机器学习的S-CO₂复杂流动传热特性预测研究[D]. 长沙: 中南大学, 2024. (Wu Jinglin. Prediction study on complex flow and heat transfer characteristics of S-CO₂ based on machine learning [D]. Changsha: Central South University, 2024.)
- [20] 刘学祥. 基于机器学习的环路热管传热性能预测研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2023. (Liu Xuexiang. Research on heat transfer performance prediction of loop heat pipe based on machine learning [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023.)
- [21] Yang Huan, Wang Jiarui, Wen Jian, et al. Assessment of machine learning models and conventional correlations for predicting heat transfer coefficient of liquid hydrogen during flow boiling [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 49: 753–770.
- [22] Markal B, Karabacak Y E, Evcimen A. Machine-learning-based modeling of saturated flow boiling in pin-fin micro heat sinks with expanding flow passages [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2024, 158: 107870.
- [23] Gnielinski V. On heat transfer in tubes [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 63: 134–140.
- [24] Kline S J. Describing uncertainties in single-sample experiments [J]. Mechanical Engineering, 1963, 75: 3–8.
- [25] Rohsenow W M. A method of correlating heat-transfer data for surface boiling of liquids [J]. Journal of Fluids Engineering, 1952, 74(6): 969–975.
- [26] Forster H K, Zuber N. Dynamics of vapor bubbles and boiling heat transfer [J]. AIChE Journal, 1955, 1(4): 531–535.
- [27] Schrock V E, Grossman L M. Forced convection boiling in tubes [J]. Nuclear Science and Engineering, 1962, 12(4): 474–481.

- [28] 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.
- [29] Shah M M. Chart correlation for saturated boiling heat transfer: equations and further study [J]. *ASHRAE Transactions*, 1982, 88: 185–196.
- [30] Gungor K, Winterton R. Simplified general correlation for saturated flow boiling and comparisons with data [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 1987, 65(2): 148–156.
- [31] Kandlikar S G. A general correlation for saturated two-phase flow boiling heat transfer inside horizontal and vertical tubes [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1990, 112(1): 219–228.
- [32] Liu Z, Winterton R H S. A general correlation for saturated and subcooled flow boiling in tubes and annuli, based on a nucleate pool boiling equation [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1991, 34(11): 2759–2766.
- [33] Sun Licheng, Mishima K. An evaluation of prediction methods for saturated flow boiling heat transfer in mini-channels [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(23/24): 5323–5329.
- [34] Fang Xiande, Wu Qi, Yuan Yuliang. A general correlation for saturated flow boiling heat transfer in channels of various sizes and flow directions [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 107: 972–981.
- [35] He Yichuan, Hu Chengzhi, Li Hongyang, et al. Reliable predictions of bubble departure frequency in subcooled flow boiling: a machine learning-based approach [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 195: 123217.
- [36] Markal B, Evcimen A, Karabacak Y E. Adaptation of machine learning models to saturated flow boiling in cross-collector/distributor heat sink with pin-fins under transient and variable thermal loads [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2026, 172: 110141.
- [37] He Wen, Han Jinyu, Zhao Chenru, et al. Generalizable prediction of bubble departure frequency in flow boiling under diverse conditions: From empirical correlations to machine learning [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2026, 77: 107575.

通信作者简介

胡献竹,男,高级工程师,温州市铁路与轨道交通投资集团有限公司,13857754466, E-mail: 00001608@wzmt.com。研究方向:轨道工程与热管理。

About the corresponding author

Hu Xianzhu, male, senior engineer, Wenzhou Railway and Rail Transit Investment Group Co., Ltd., 86-13857754466, E-mail: 00001608@wzmt.com. Research fields: airborne thermal management technology.

(责任编辑:田甜)