

DOI: 10.11949/0438-1157.20251481

水平微细通道内 R32/R1234ze(E) 流动沸腾特性的实验研究

宋祥威¹, 秦利军², 王恩卫², 嵇晓³, 刘纳¹¹ 青岛理工大学环境与市政工程学院, 山东 青岛 266520; ² 中国石油新疆油田公司, 新疆 克拉玛依 834000;³ 中国石化胜利油田技术检测中心, 山东 东营 257000)

摘要: 开展了 R32、R1234ze(E) 及其混合物在内径 1.54 mm 水平微细通道内的流动沸腾换热特性的实验研究, 分析质量流速和干度、热通量、饱和温度和组分浓度对沸腾传热系数的影响。实验质量流速为 200、300 和 400 kg/(m²·s), 热通量为 20 kW/m² 和 30 kW/m², 饱和温度为 22、24 和 26℃, 干度为 0~1, R32/R1234ze(E) 的质量比为 30/70、50/50 和 70/30。结果表明, 纯工质与混合工质的传热系数随干度的变化规律存在显著差异。纯工质表现为“降—升—降”的非单调变化特征, 而混合工质则表现为先升高后降低的单峰变化趋势; 提高质量流速有助于强化强制对流, 进而提升换热性能; 热通量是强化换热但导致临界干度提前的关键因素; 饱和温度的变化对沸腾传热系数的影响较弱; 混合工质的沸腾换热因传质阻力性能降低, 但随 R32 组分的增加而提高。在对比关联式中, Lim-Kim 关联式预测结果相对较好, 平均相对误差为 38.43%。

关键词: 微通道; 换热; 两相流; 流动沸腾; R32/R1234ze(E)

中图分类号: TK 124

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (2026) 08-4765-12

Experimental study on flow boiling characteristics of R32/R1234ze(E) in horizontal minichannel

SONG Xiangwei¹, QIN Lijun², WANG Enwei², ZHUO Xiao³, LIU Na¹

¹ School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266520, Shandong, China; ² Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay 834000, Xinjiang, China; ³ Shengli Oilfield Technical Inspection Center, Sinopec, Dongying 257000, Shandong, China)

Abstract: An experimental investigation was conducted on the flow boiling heat transfer characteristics of R32, R1234ze(E) and their mixtures in a horizontal microchannel with an inner diameter of 1.54 mm. The effects of mass flux, vapor quality, heat flux, saturation temperature and mixture concentration on the boiling heat transfer coefficient were systematically analyzed. The experimental mass flow rates were 200, 300, and 400 kg/(m²·s); the heat fluxes were 20 kW/m² and 30 kW/m²; the saturation temperatures were 22, 24, and 26℃; the dryness fraction was 0—1; and the mass ratios of R32/R1234ze(E) were 30/70, 50/50, and 70/30. The results show that the pure working fluid exhibits a non-monotonic variation in heat transfer coefficient with increasing vapor quality, characterized by an initial decrease, followed by an increase and then a further decrease. In contrast, the mixture shows a single-peak trend, first increasing and then decreasing. Increasing mass flux is beneficial to enhancing

收稿日期: 2025-12-30 修回日期: 2026-01-24

通信作者: 刘纳(1985—), 女, 博士, 副教授, liuna@qut.edu.cn

第一作者: 宋祥威(2004—), 男, 本科生, 695160745@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(51904325); 青岛市自然科学基金项目(25-1-1-198-zyyd-jch)

引用本文: 宋祥威, 秦利军, 王恩卫, 嵇晓, 刘纳. 水平微细通道内 R32/R1234ze(E) 流动沸腾特性的实验研究[J]. 化工学报, 2026, 77(8): 4765–4776

Citation: SONG Xiangwei, QIN Lijun, WANG Enwei, ZHUO Xiao, LIU Na. Experimental study on flow boiling characteristics of R32/R1234ze(E) in horizontal minichannel[J]. CIESC Journal, 2026, 77(8): 4765–4776

forced convection, thereby improving the heat transfer performance. Heat flux is a crucial factor that not only intensifies heat transfer but also causes the earlier occurrence of critical vapor quality. The variation of saturation temperature exerts a weak effect on the boiling heat transfer coefficient. Owing to mass transfer resistance, the boiling heat transfer performance of the mixtures is generally lower than that of pure refrigerants, while it improves with the increase of R32 mass fraction. Moreover, the predictive capability of existing correlations was evaluated against the experimental data. Among the evaluated correlations, the Lim–Kim correlation yields a mean relative error of 38.43%.

Keywords: microchannels; heat transfer; two-phase flow; flow boiling; R32/R1234ze(E)

引 言

为实现我国“双碳”目标以及应对全球气候变化,亟须研发零臭氧消耗潜能值(ODP)和低全球变暖潜能值(GWP)的新型环保制冷剂^[1-2]。R1234ze(E)是氢氟烯烃 HFO 制冷剂,具有低 GWP 值,但其热力性能不足,常需与 R32 等混合使用以弥补缺陷^[3-6]。与此同时,随着电子设备小型化对散热技术要求的提高,微细通道换热技术因换热高效、结构紧凑而备受关注^[7-10],但其内部两相流动与换热机制尚待深入研究。

在单工质研究方面,Zhuang 等^[11]观察到 HFE-7100 在微通道内传热系数随质量流速与热通量增大而升高;干度增大时,传热系数先升后降。Wu 等^[12]研究发现,低质量流速下微通道内 R245fa 的传热系数随热通量先升后降,高热通量易导致局部干涸、换热恶化;中高质量流速无干涸,换热性能随热通量和质量流速增大而提升。Fang 等^[13]通过控制蒸汽干度差,发现了在平行微通道中 R1233zd(E)流动沸腾过程中的流型演变规律:低干度下,热通量对传热系数影响显著;高干度下,质量流速影响显著。张浩等^[14]对 R32 的研究表明,质量流速、干度与热通量对传热系数影响显著,而饱和温度影响较弱。Gao 等^[15]比较了 R1234ze(E)与 R134a,发现二者换热特性相似,在实验范围内传热系数随干度与质量流速增加而上升,但热通量影响有限。Diani 等^[16]的研究表明,R1234ze(E)与 R1234yf 在特定条件下与 R134a 性能接近,具备替代潜力。

在混合工质研究方面,冯彪等^[17]提出了多种可替代 R245fa 的环保混合工质配方,在基础物性、循环性能和安全性等方面展现出潜力。Azzolin 等^[18]在相同工况下,将 R1234ze(E)/R32 混合工质的传热系数与 Del Col 等^[19]的实验数据进行对比后发现,该混合工质的传热系数表现出更低的数值。李广等^[20]观

察含油 R32 传热系数随质流密度增大而升高;中低干度下,传热系数随润滑油浓度增大而增大,高干度下传热系数随润滑油浓度增大先增后减。周航等^[21]发现 R134a/R245fa 在低质量流速时,传热系数随质量流速增大显著提升;高质量流速时传热系数因液膜变薄、局部干涸加剧而下降。Marchetto 等^[22]研究表明,高温饱和工况下,R245fa/R1233zd(E)在水平小直径圆管内流动沸腾以核态沸腾为主,干度增大仅小幅削弱核态沸腾的主导作用,传热系数随饱和温度与热通量升高而增大。周昉等^[23]研究发现,CO₂/R600a/R1234ze(Z)的质量比为 10/10/80 时综合性能最优,温度滑移适配变温热源,且工作压力与可燃性满足安全要求。Dang 等^[24]研究发现,非共沸混合工质相对于纯工质流型转变会滞后,混合工质的传热系数小于纯工质的传热系数,并且混合工质的温度滑移越大,传热系数下降越快。

尽管微细通道流动沸腾已有研究,但 R32/R1234ze(E)这一具有大温度滑移特性的低 GWP 混合工质,在微尺度受限空间内的气液相交互作用尚不明确。本文旨在通过实验揭示传质阻力与微通道尺度效应的作用机制,完善了该工质在微细通道内的基础换热数据。

针对 R32/R1234ze(E)这一具有大温度滑移特性的低 GWP 混合工质在微细通道内流动沸腾机理研究的不足,本文通过内径 1.54 mm 水平微细通道内的系统实验,揭示并定量阐明了纯工质与混合工质传热系数随干度演变的差异化规律及其竞争机制——纯工质呈现“降—升—降”非单调变化,混合工质则表现为“单峰”趋势,并明确了传质阻力是导致混合工质换热恶化的主导因素,阐明了温度滑移与换热性能的负相关关系。通过评估 4 种代表性关联式,指出 Lim–Kim 关联式^[25]对 R32/R1234ze(E)混合工质具有最佳预测精度,为环保型微细通道换热器的精准设计与性能优化提供了关键理论依据。

1 实验材料和方法

1.1 实验系统

实验系统如图1所示,由制冷剂循环系统、冷却水循环系统和数据采集系统组成。过冷制冷剂从储液罐流经过滤器去除杂质,通过预冷器进行冷却,过冷液态的制冷剂在磁力驱动齿轮泵的驱动下进入质量流量计测量流量,然后在预热段内被加热到实验段所需要的干度,流出预热段的汽液两相制冷剂进入实验段,在实验段内被加热发生流动沸腾换热。实验段出口的汽液两相制冷剂经冷凝器返回储液罐完成循环。通过协同调控预热器与实验段的热负荷,实现对测试段进、出口干度的精确控制;同时,利用实验系统的原始加热量调节系统压力,以确保实验工质处于预设压力对应的饱和温度状态。数据采集系统由T型热电偶、Pt100铂电阻温度传感器、压力传感器、差压变送器、质量流量计、数据采集仪和计算机组成。

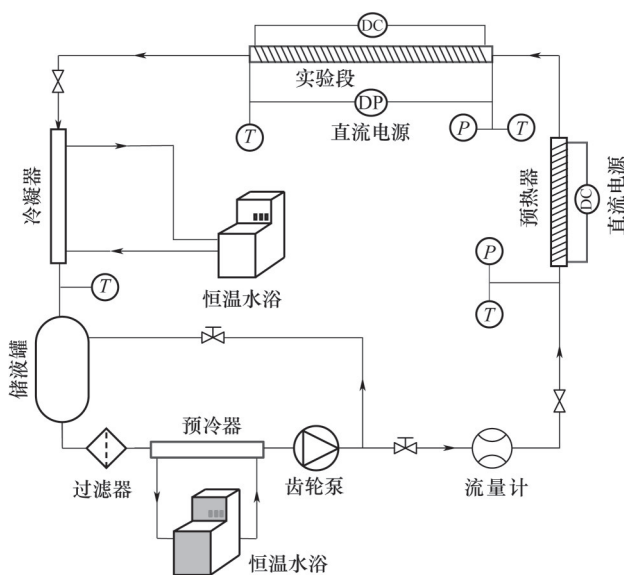


图1 实验系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental system

待实验工况参数调节完毕后,对系统的热力学状态进行持续监测。系统达到热稳态的判断标准为:在连续20 min内,测试段进出口流体温度的波动幅度控制在 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 以内,且压力的波动幅度不超过 $\pm 0.5\text{ kPa}$ 。确认系统稳定后,采用数据采集系统得到实验数据,设定采样频率为1 Hz,连续记录60 s。最终,取该采样时段内所有数据点的算术平均值作为该工况下的实验结果,以最大程度减小随机误差的影响。

本文实验严格控制两个热通量水平(20 kW/m^2 和 30 kW/m^2)以分析其对换热的影响;此外,为考察热力学状态点的作用,实验涵盖了3个饱和温度梯度(22°C 、 24°C 和 26°C)。工质的热物理性质均采用NIST Refprop 9.1软件计算获取。对于R32/R1234ze(E)非共沸混合工质,其饱和压力、密度及焓值等参数遵循亥姆霍兹自由能状态方程及范德华混合规则进行关联计算,计算过程中充分考虑了组分滑移及相平衡特征,确保了传热系数评估的准确性。

1.2 实验测试段

实验管为一水平光滑的紫铜圆管,内径为1.54 mm,外径为3.04 mm,总长度为330 mm,加热段长度为285 mm,如图2所示。实验管外均匀缠绕铬镍合金电阻丝、玻璃纤维布和保温棉,通过程控直流稳压电源提供恒定加热功率。采用Pt100铂电阻温度传感器和压力传感器分别测量实验段进出口制冷剂的温度和压力。在实验管外均匀设置3个测温截面,每个截面沿周向分别布置3个T型热电偶测外壁温度。热电偶安装采用嵌入式固定法:在紫铜管外壁预切浅槽,将热电偶端头植入后使用高导热硅胶填充密封,确保其与管壁的物理接触紧密且稳定。为消除接触热阻及对流散热导致的测温偏差,实验段外侧包覆有高性能玻璃纤维保温层,使热电偶处于稳定的热环境中。在计算内壁温度时,认为导热胶层的接触热阻可忽略,直接利用圆筒壁一维稳态导热方程进行推导。

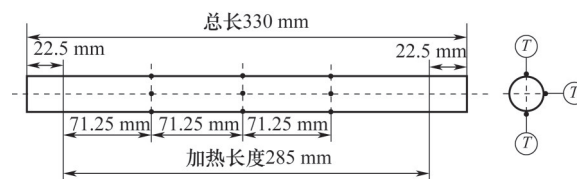


图2 实验段示意图

Fig.2 Schematic diagram of the test section

1.3 数据处理

通过圆筒壁一维稳态导热方程利用实验管外壁温度计算出内壁温度,计算公式如下:

$$t_{wi} = t_{wo} - \frac{Q}{2\pi\lambda L} \ln \frac{r_o}{r_i} \quad (1)$$

式中, t_{wo} 、 t_{wi} 分别为实验段圆管的内、外壁温度, $^\circ\text{C}$; Q 为实验段的加热功率,W; λ 为实验管的热导率, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; L 为实验管加热长度,m; r_o 、 r_i 分别为实验管的内、外径,m。

实验段干度变化的计算公式为:

$$\Delta x = \frac{Q}{mh_{lv}} \quad (2)$$

式中, m 为制冷剂的质量流量, kg/s; h_{lv} 为制冷剂的汽化热值, kJ/kg。

实验段进口干度的计算公式为:

$$x_{in} = \frac{Q_{pre} - m(h_l - h_{in})}{mh_{lv}} \quad (3)$$

式中, Q_{pre} 为预热段的加热功率, W; h_l 为制冷剂饱和液相比焓, kJ/kg; h_{in} 为预热段进口制冷剂的比焓, kJ/kg。

实验段热通量的计算公式为:

$$q = \frac{UI}{2\pi r_o L} \quad (4)$$

局部沸腾传热系数的计算公式为:

$$h_i = \frac{q}{t_{wo} - t_{sat}} \quad (5)$$

式中, t_{sat} 为制冷剂的饱和温度, °C。

沸腾传热系数的计算公式为:

$$h = \frac{\sum_{i=1}^3 h_i}{3} \quad (6)$$

混合工质温度的计算公式为:

$$t_f = t_b(1 - x) + t_d x \quad (7)$$

式中, t_f 是流体温度, °C; t_b 是饱和压力下的泡点温度, °C; x 为两相流的干度; t_d 是饱和压力下的露点温度, °C。

本研究涉及的混合工质浓度采用质量分数 w 表示, 定义为:

$$w_i = \frac{m_i}{\sum m_i} \quad (8)$$

式中, m_i 为组分 i 的质量。

1.4 不确定度分析

采用由 Moffat^[26] 提出的误差传递分析方法计算实验参数的不确定度, 计算公式如下:

$$U_R = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial R}{\partial x_i} U_{x_i} \right)^2} \quad (9)$$

式中, U_R 为计算参数的不确定度; U_{x_i} 为各直接测量参数的不确定度。本文所有参数的不确定度均基于 95% 的置信水平, 结果汇总于表 1。

1.5 实验验证

为验证系统在两相流动沸腾实验中的准确性, 将纯工质 R32 的流动沸腾传热系数与经典关联式 Gungor-Winterton^[27] 进行了对比。如图 3 所示, 在实验工况下, Gungor-Winterton^[27] 关联式对 R32 的预测平均绝对误差 (MAD) 为 10.16%。同时, 本实验测得

表 1 参数不确定度 (置信水平为 95%)

Table 1 Uncertainty of parameters (95% confidence level)

计算参数	不确定度
管长	±0.1 mm
管径	±0.02 mm
温度	
T 型热电偶	±0.5 °C
Pt100 铂电阻	±0.03 °C
压力	±0.5%
电压	±0.1%
电流	±0.1%
热通量	±1.24%
质量流速	±0.41%
干度	±6.81%
传热系数	±9.53%

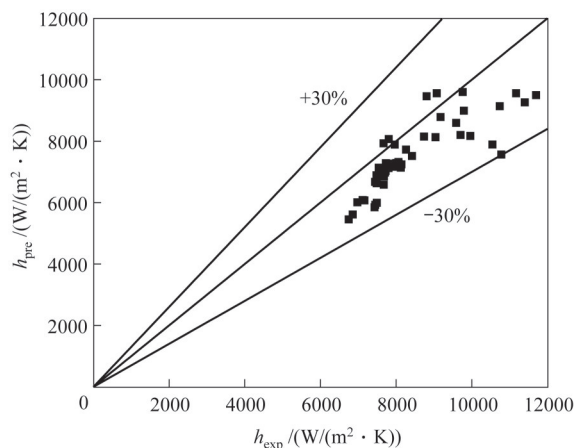


图 3 Gungor-Winterton^[27] 关联式对 R32 沸腾传热系数的预测

Fig. 3 Prediction of flow boiling heat transfer coefficients for R32 using the Gungor-Winterton^[27] correlation

的 R32 传热系数随干度的变化规律与张浩等^[14] 的研究结果具有良好的一致性。以上单相与两相验证结果共同表明, 本实验装置及测量方法在流动沸腾研究中具有较高的可靠性。

2 实验结果与讨论

2.1 质量流速和干度的影响

图 4 示出了不同质量流速和干度下 R32、R1234ze(E) 及其混合物传热系数的实验结果。本实验中传热系数随干度的变化规律与 Ong 等^[28] 针对微细通道 (1.0 mm < D < 3.0 mm) 提出的流型演化规律相符。结合 Ong-Thome 流型图对图 4(a) 进行分析可知: R32 在不同质量流速下传热系数的演变特征, 本质上是流型转变导致的核态沸腾抑制与强制对流

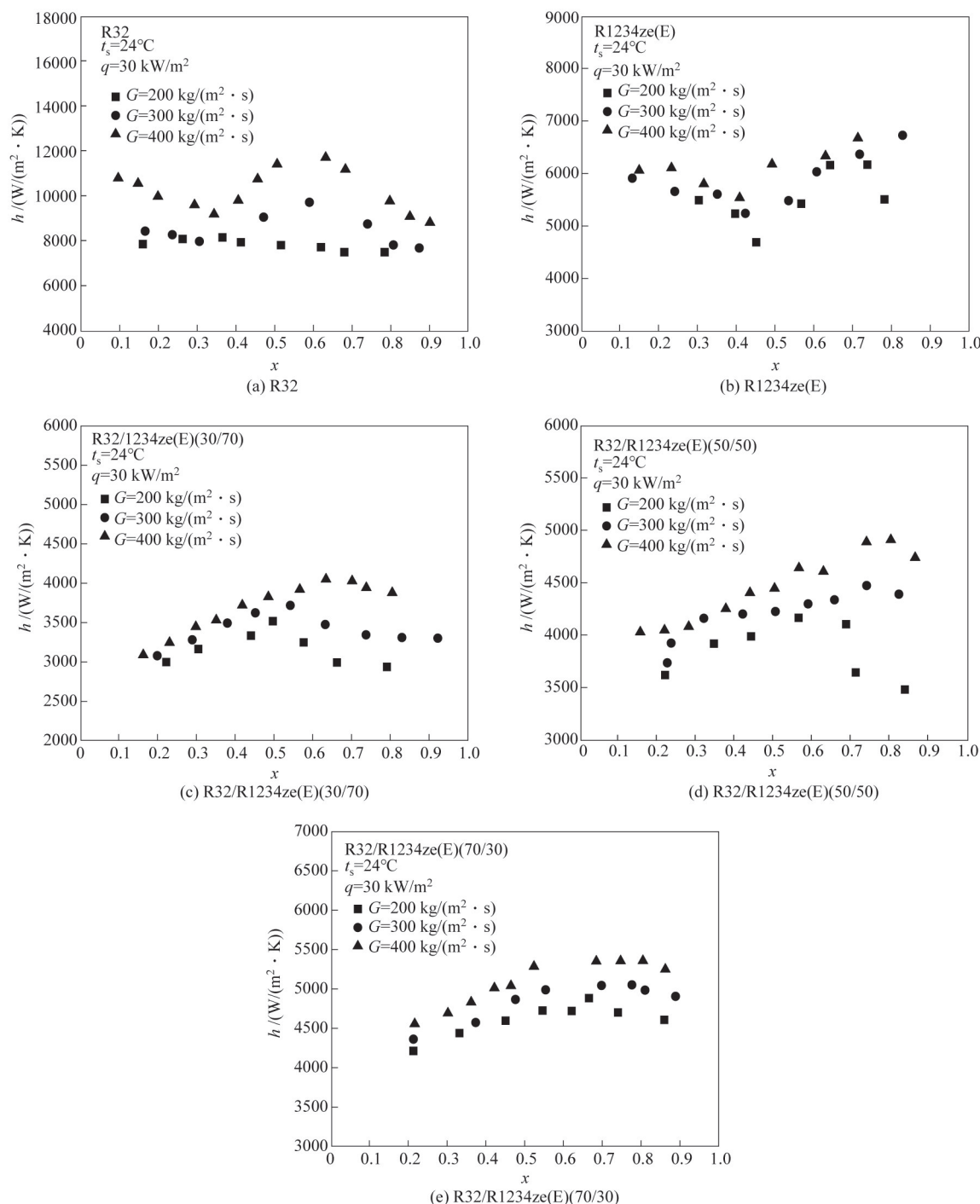


图4 质量流速和干度对R32、R1234ze(E)及其混合物传热系数的影响

Fig.4 Effects of mass flux and vapor quality on the heat transfer coefficients of R32, R1234ze(E) and their mixtures

强化两者竞争的结果。在低质量流速下,根据流型图判别,工质主要处于间歇流区域,受限空间内气泡合并产生的“屏蔽效应”显著抑制了核态沸腾,导致传热系数随干度增加而减小;而在高质量流速下,流型向环状流转变的临界干度显著降低,系统更早进入环状流区域。此时增强的气相剪切力促使液膜减薄,显著的对流强化作用补偿了核态沸腾

的衰减,从而使传热系数在较宽的干度范围内呈现上升趋势。这一基于流型图的理论判别结果,很好地解释了实验观测到的传热系数“降—升”变化特征。

图 4(b) 表明:质量流速为 $200 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时, R1234ze(E) 的传热系数随干度的变化趋势与 R32 一致;质量流速为 $300 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 和 $400 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,传

热系数随干度的增大先降后增,未出现蒸干引起的下降段,主要归结为R1234ze(E)独特的物性特征及流场动力学特性的综合影响。在相同饱和温度下,R1234ze(E)的气相密度显著低于R32。由连续性方程可知,在相同质量流速与干度下,R1234ze(E)具有更高的气相流速。由此产生的强界面剪切应力一方面促进了液膜沿通道周向的均匀铺展,另一方面提高了气芯液滴向壁面的沉积速率,有效补偿了因蒸发造成的液膜消耗。这一剪切驱动的液膜维持机制显著延缓了干涸的发生,使R1234ze(E)在极高干度下仍能维持较高的换热水平。

图4(c)~(e)表明:R32/R1234ze(E)混合工质的传热系数随干度的增加先升后降。干度较低时,随着液膜内工质逐步汽化,气液两相扰动增强,传热系数随干度增加而快速上升;当干度达到临界值后,液膜厚度持续减小,壁面逐渐被气相覆盖,气液相间热阻增大,导致传热系数随干度的进一步升高而下降。这是由于低干度时以核态沸腾为主,干度较高时受膜态沸腾的抑制作用增强。相同干度下,传热系数随质量流速的增大显著提升,是由于质量流速的增大强化了气液两相的湍流扰动,同时抑制了气泡在壁面的聚集与长大,强化了换热过程。高干度区传热系数受质量流速的影响更为显著,是由于该区域以对流换热机制为主导。

2.2 热通量的影响

图5示出了R32、R1234ze(E)及其混合物的传热系数随热通量的变化规律,结果表明热通量对传热系数具有显著的强化作用。其物理机制可归因于核态沸腾的控制特性:热通量的提升直接增加了壁面过热度,促进了壁面气泡的形核、长大与脱离频率,强化了气液两相的扰动与界面更新,从而显著提升了换热速率。在低干度区,热通量对传热系数的强化效果更突出,此区域液膜较厚、核化点充足,热通量的提升可充分激发核态沸腾;在高干度区,液膜逐渐变薄、气相占比增大,热通量的强化作用略有减弱,但仍保持传热系数随热通量上升的趋势。对比纯工质与混合工质的结果,R32占比更高的混合工质(70/30)其传热系数提升幅度更显著,这与R32的低汽化热、高饱和蒸汽压特性有关,R32占比增加使混合工质更易汽化,热通量对核态沸腾的激发效果更强。

因此,热通量是本实验工况下影响传热系数的关键因素,其主要通过提高壁面过热度来强化核态

沸腾。然而,这种强化效应并非独立存在,而是受到工质配比与干度的双重制约:(1)工质配比方面,随着混合工质中R1234ze(E)组分增加,较大的温度滑移导致气液界面建立了显著的浓度梯度,由此产生的传质阻力增加了气泡核化所需的活化能,从而部分抵消了提高热通量带来的核态沸腾强化效果;(2)干度方面,在高干度区域,随着液膜减薄,核态沸腾受到抑制,换热机制逐渐转为对流主导,导致热通量对传热系数的提升幅度较低,干度区有所减弱。综上所述,热通量的强化效果在低干度、高R32浓度的工况下最为显著。

2.3 饱和温度的影响

图6示出了R32、R1234ze(E)及其混合物的传热系数随饱和温度的变化规律。结果表明,在测试的蒸发区间内,由于物性变化幅度有限,饱和温度对传热系数的影响不显著。饱和温度主要通过影响工质物性参数进而作用于换热过程:一方面,温度升高使表面张力和液相动力黏度降低,促进气泡生成与脱离;另一方面,液相热导率下降及气液相间密度差减小,抑制了换热强度,综合作用下传热系数未随饱和温度呈现明显的变化趋势。该特征在R32、R1234ze(E)及不同配比的混合工质中均一致。因此,本实验工况下,饱和温度并非影响传热系数的主导因素,质量流速、干度以及热通量的作用更显著。

2.4 混合工质组分质量分数的影响

图7示出了组分质量分数对R32/R1234ze(E)混合物传热系数的影响。结果表明,混合工质的传热系数显著低于按纯组分线性插值的理想值,表现出明显的“换热恶化”现象。这种恶化程度与混合工质的温度滑移值密切相关。在24℃饱和温度下,R32/R1234ze(E)质量比为30/70、50/50和70/30时,对应的温度滑移分别为10.48、6.78和3.44℃。

定量分析发现,质量比为30/70的混合物由于具有最大的温度滑移,其传热系数与纯工质相比下降幅度最为显著。这是由于在沸腾过程中,低沸点组分R32优先蒸发,使得气液界面处高沸点组分R1234ze(E)的浓度梯度增大,由此产生的传质阻力抑制了气泡的核化与生长。同时,高达10.48℃的温度滑移使得液膜需吸收额外的显热才能达到局部的饱和状态,进一步削弱了核态沸腾强度。随着R32质量分数的增加(由30%增至70%),温度滑移值由10.48℃降至3.44℃,传质阻力的减弱使得混合

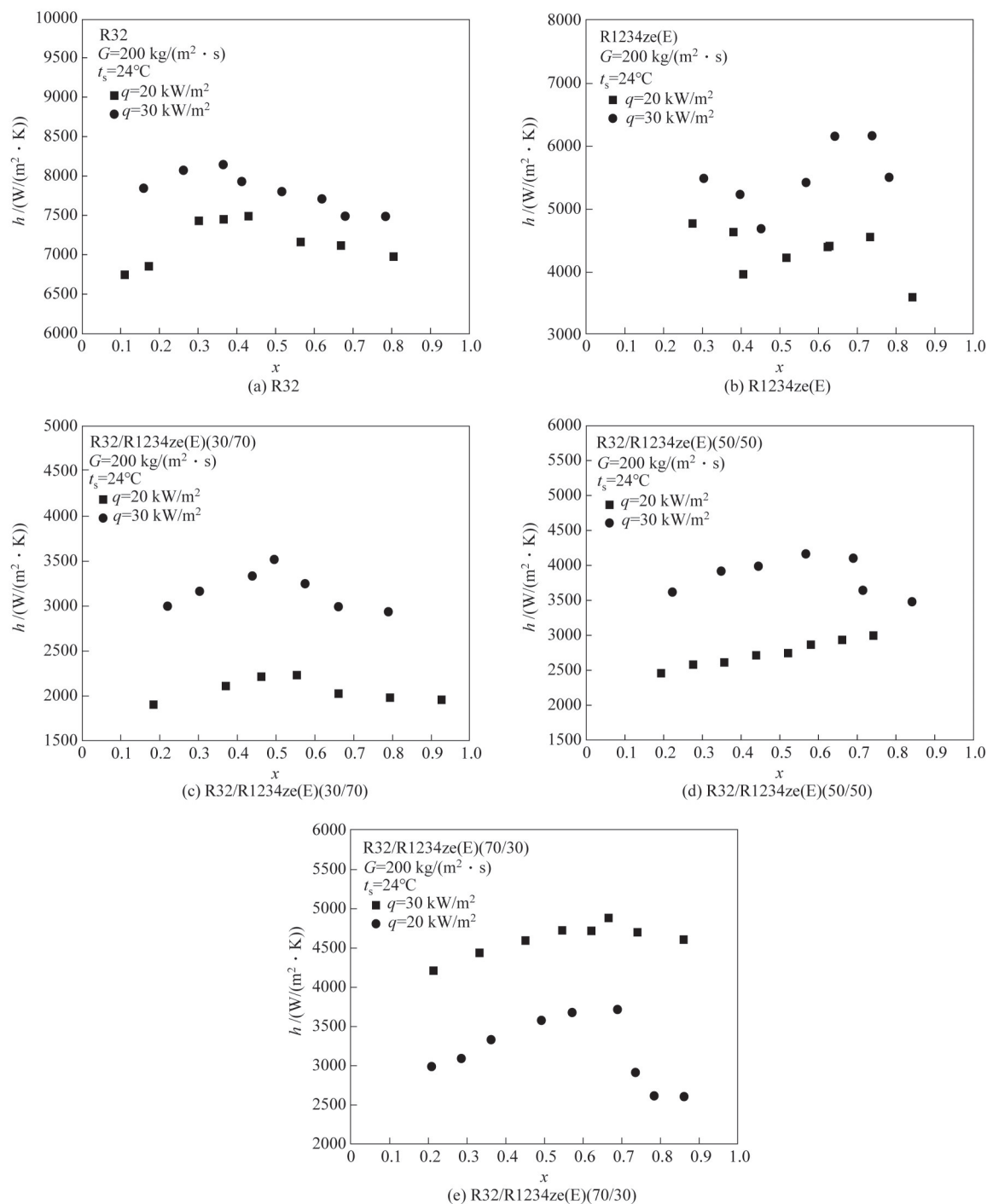


图5 热通量对 R32、R1234ze(E)及其混合物传热系数的影响

Fig.5 Effect of heat flux on the heat transfer coefficients of R32, R1234ze(E) and their mixtures

工质的物性逐渐向纯 R32 趋近,因此传热系数随之增大。

2.5 准则关联式的预测分析

本研究选取 Gungor-Winterton^[27]、Liu-Winterton^[29]、Choi 等^[30]和 Lim-Kim^[25]4 种关联式来预测实验结果,各关联式的运行条件列于表 2。上述关联式的选取综合考量了其在流动沸腾领域的经典地位以及对

本研究工质的适用性。其中,Gungor-Winterton^[27]和 Liu-Winterton^[29]模型作为微细通道领域的经典通用关联式,常被用作评价预测性能的对比基准;而 Choi 等^[30]及 Lim-Kim^[25]关联式则因涵盖了 R32 等工质或针对混合工质的传质非线性特征进行了专门修正,与本研究对象具有高度的契合性。

Gungor-Winterton^[27]关联式的表达式为:

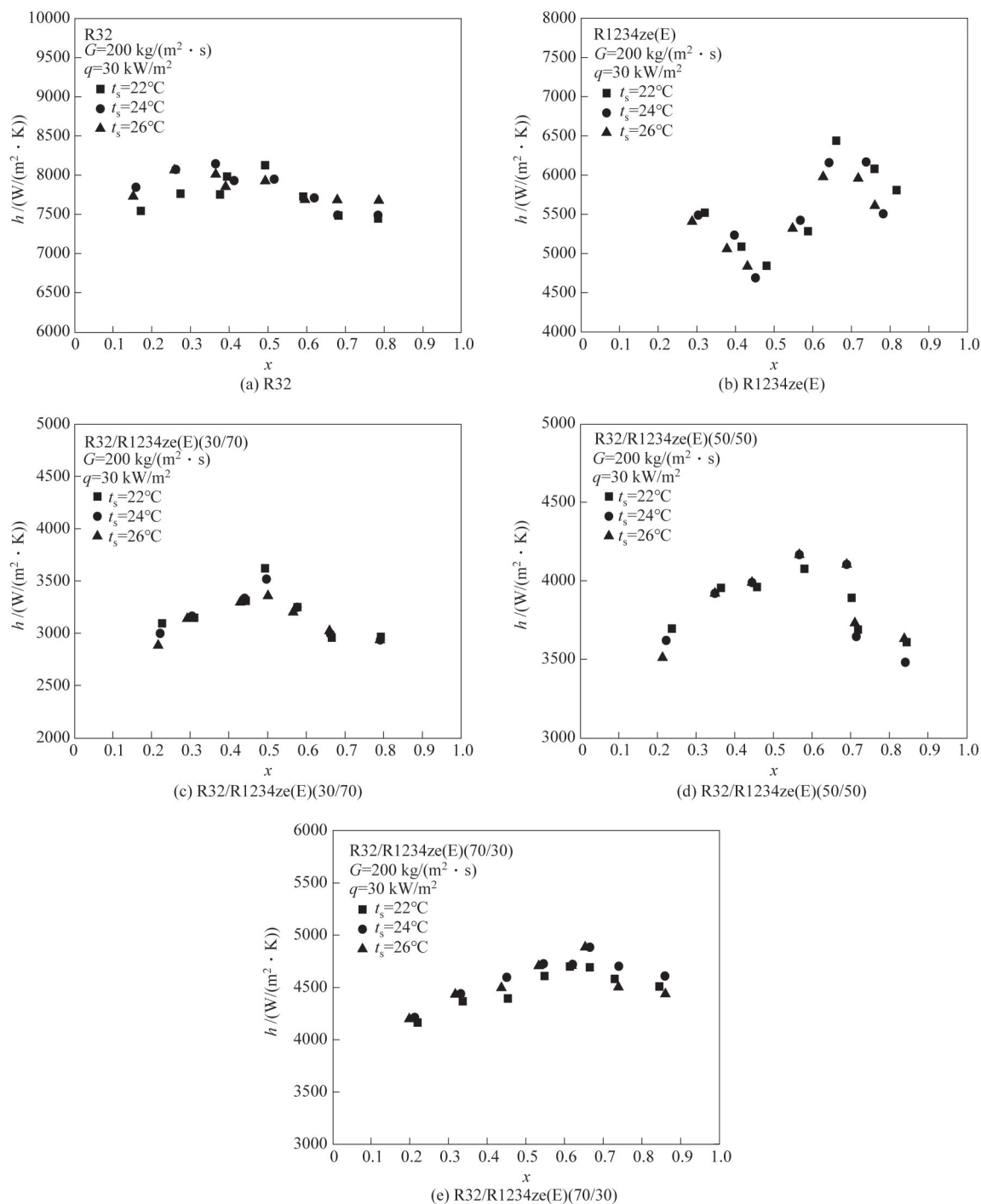


图6 饱和温度对R32、R1234ze(E)及其混合物传热系数的影响

Fig.6 Effect of saturation temperature on the heat transfer coefficients of R32, R1234ze(E) and their mixtures

表2 制冷剂关联式的运行条件

Table 2 Operating conditions for refrigerant correlations

关联式	管内径/mm	制冷剂	质量流速/(kg/(m ² ·s))	热通量/(kW/m ²)
Gungor-Winterton ^[27]	2.95~32	R114、R113、R22、R12、R11、水、乙二醇	12.4~8179.3	0.348~2620
Liu-Winterton ^[29]	2.95~32	R114、R113、R22、R12、R11、水、乙二醇	12.4~8179.3	0.348~2620
Choi等 ^[30]	7.55	R32/R134a、R407C	240~600	4.1~28.6
Lim-Kim ^[25]	10	R134a/R123	150~600	5~50

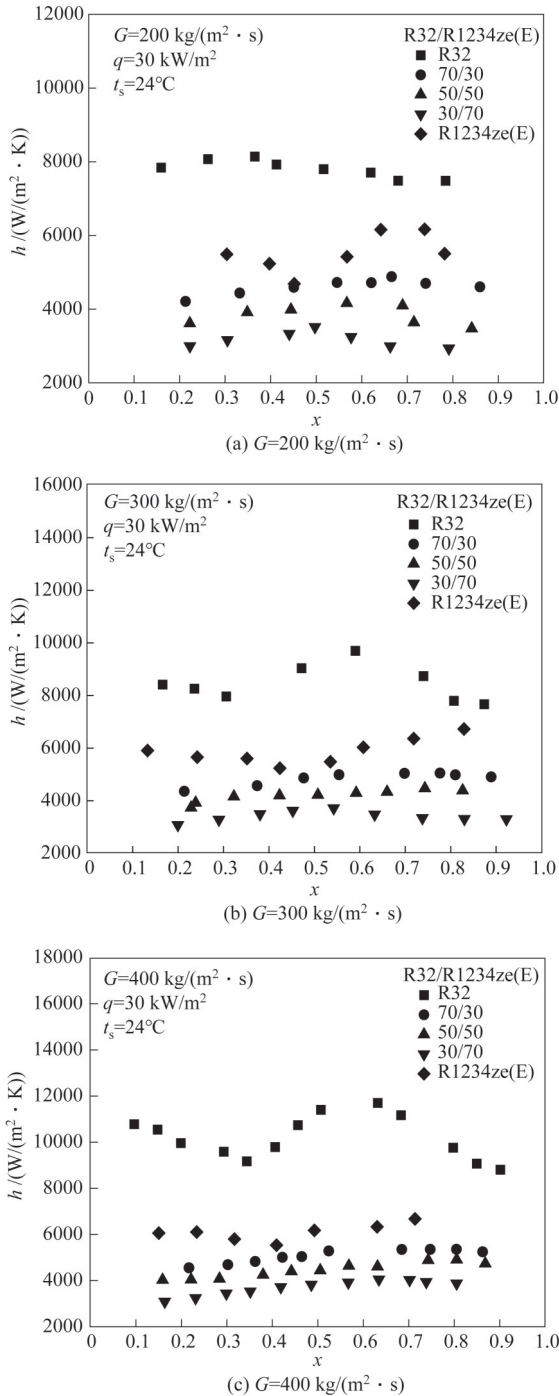


图7 质量分数对R32/R1234ze(E)混合物传热系数的影响
Fig.7 Effect of mass fraction on the heat transfer coefficients of R32/R1234ze(E) mixtures

$$h_{\text{tp}} = Eh_l + Sh_{\text{nb}} \quad (10)$$

式中, E 为增强因子; h_l 为对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; S 为抑制因子; h_{nb} 是核态沸腾传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

Liu-Winterton^[29]关联式的表达式为:

$$h_{\text{tp}} = \left[(Eh_l)^2 + (Sh_{\text{nb}})^2 \right]^{0.5} \quad (11)$$

Choi等^[30]关联式的表达式为:

$$h_{\text{tp}} = Eh_{\text{DB}} + F_M Sh_{\text{SA}} \quad (12)$$

式中, h_{DB} 为 Dittus-Boelter 关联式计算的传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; F_M 为混合物修正系数; h_{SA} 为 Stephan-Abdelsalam 关联式计算的传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

Lim-Kim^[25]关联式的表达式为:

$$h_{\text{tp}} = Sh_{\text{nb}} + F_C h_l \quad (13)$$

式中, F 为两相流对流强化因子; C_F 为对流换热修正因子。

4种关联式对沸腾传热系数的预测结果如图8所示, 预测精度汇总于表3, 其中平均绝对误差 MAD 的计算式如下:

$$\text{MAD} = \frac{1}{N} \sum \left| \frac{h_{\text{pre}} - h_{\text{exp}}}{h_{\text{exp}}} \right| \times 100\% \quad (14)$$

式中, N 为实验的样本数量; h_{pre} 为关联式预测的传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; h_{exp} 为实验测得的传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

由图8和表3可知, 不同关联式对沸腾传热系数的预测表现存在显著差异: Gungor-Winterton^[27]、Liu-Winterton^[29]关联式呈现一致的特征, 二者对单工质的预测偏差均低于11%, 但对混合工质的偏差超过69%, 更适用于单工质的预测; Choi等^[30]关联式的总体MAD为44.65%, 对单工质和混合工质的预测偏差分别为30.48%和53.93%, 虽无明显偏向性, 但总体精度不高; Lim-Kim^[25]关联式的预测MAD为38.43%, 是预测精度相对更优的关联式, 但对单工质与混合工质的预测效果呈现明显分化, 对单工质的预测偏差高达61.43%, 而对混合工质的预测偏差仅23.35%, 更适于预测混合工质。

表3 关联式对沸腾传热系数的预测精度

Table 3 Predictive accuracy of the correlation for boiling heat transfer coefficient

关联式	MAD/%		
	单工质	混合工质	总体
Gungor-Winterton ^[27]	10.16	69.24	45.85
Liu-Winterton ^[29]	9.36	82.13	53.32
Choi等 ^[30]	30.48	53.93	44.65
Lim-Kim ^[25]	61.43	23.35	38.43

Gungor-Winterton^[27]关联式的平均绝对误差较高, 在高质量流速下预测值显著偏大。该关联式基于宏观通道建立, 未考虑1.54 mm通道的微尺度效应。在微细尺度下, 表面张力对气泡动力学的主导作用显著增强, 抑制了核态沸腾的充分发展。此

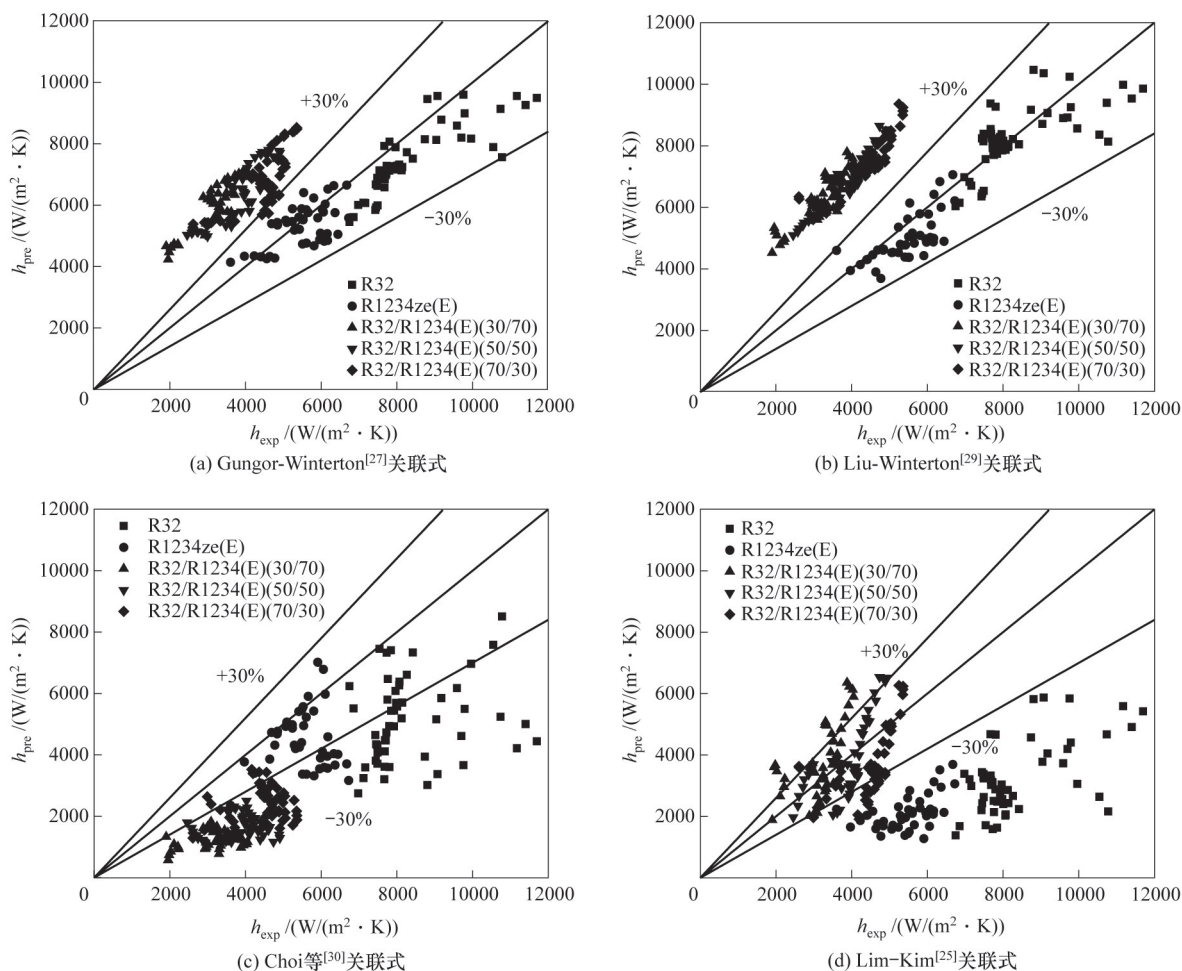


图8 4种关联式的预测结果

Fig.8 Prediction results of four correlations

外,对于R32/R1234ze(E)等非共沸混合工质,所有纯工质关联式的预测精度均出现系统性下降,根本原因在于相变过程中的传质阻力。

3 结 论

(1)干度对单工质与混合工质的影响机制不同:单工质传热系数呈“降—升—降”的非单调变化特征,分别受弹状流抑制和蒸干现象影响;混合工质则表现为先升后降的单峰特性;提高质量流速通过强化强制对流换热提升换热性能,对核态沸腾影响有限。

(2)热通量对传热系数具有显著强化作用,但在混合工质中,该强化作用受到传质阻力的非线性制约。特别是在低干度区,高热通量诱发的核态沸腾部分抵消了由温度滑移带来的换热恶化效应。

(3)饱和温度对传热系数的影响较弱,其作用主要通过改变工质的热物性参数间接实现,在实验

温区范围内未观察到显著的温度效应。

(4)由于非共沸特性的存在,R32/R1234ze(E)表现出显著的换热恶化现象。实验发现,在30/70配比下,传质阻力达到峰值,导致传热系数较线性插值显著降低;随着R32浓度提升,温度滑移减小,换热性能逐渐回升。

(5)所选4种关联式中Gungor-Winterton^[27]、Liu-Winterton^[29]关联式更适于单工质,偏差小于11%;Choi等^[30]关联式无工质偏向性但整体精度不高;Lim-Kim^[25]关联式的总体MAD为38.43%、相对更优,但对混合工质的预测偏差仅23.35%、对单工质偏差达61.43%。

符 号 说 明

- E ——增强因子
- G ——质量流速, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
- h ——传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
- h_l ——饱和液相比焓, kJ/kg

h_{lv} ——汽化热, kJ/kg
 h_{tp} ——两相传热系数, W/(m²·K)
 I ——电流, A
 L ——长度, m
MAD——平均绝对误差
 m ——质量流量, kg/s
 Nu ——Nusselt 数
 Pr ——Prandtl 数
 Q ——加热功率, W
 q ——热通量, kW/m²
 Re ——Reynolds 数
 r ——半径, m
 S ——抑制因子
 t ——温度, °C
 t_{wi} ——内壁温度, °C
 t_{wo} ——外壁温度, °C
 U ——电压, V
 x ——干度
 λ ——热导率, W/(m·K)

下角标

b ——泡点
 d ——露点
 i ——内部
 l ——液相
 o ——外部
pre——预热段
sat——饱和状态
 v ——气相

参考文献

- [1] Longo G A, Mancin S, Righetti G, et al. Hydrocarbon refrigerants boiling local heat transfer coefficients inside a brazed plate heat exchanger (BPHE)[J]. International Journal of Refrigeration, 2023, **156**: 113–122.
- [2] 陈林, 徐培渊, 张晓慧, 等. 液化天然气绕管式换热器壳侧混合工质流动及传热特性[J]. 化工进展, 2023, **42**(9): 4496–4503.
Chen L, Xu P Y, Zhang X H, et al. Investigation on the LNG mixed refrigerant flow and heat transfer characteristics in coil-wound heat exchanger(CWHE) system[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, **42**(9): 4496–4503.
- [3] 梁坤峰, 李琳琳, 高春艳, 等. 非共沸混合工质闭式热泵干燥旁通系统性能试验[J]. 农业工程学报, 2025, **41**(7): 259–268.
Liang K F, Li L L, Gao C Y, et al. Experiment on performance of the non-azeotropic refrigerant closed-cycle heat pump drying bypass system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, **41**(7): 259–268.
- [4] 王林, 李少强, 谈莹莹, 等. 混合工质喷射器变工况性能研究[J]. 工程热物理学报, 2024, **45**(5): 1300–1307.
Wang L, Li S Q, Tan Y Y, et al. Study on the performance of zeotropic mixture ejector under variable operating conditions[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2024, **45**(5): 1300–1307.
- [5] Fu H, Zhao R, Zheng L, et al. Experimental study on spray cooling heat transfer performance of R245fa/R142b mixture in boiling regime[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, **227**: 120450.
- [6] Dang C, Jia L, Peng Q, et al. Experimental and analytical study on nucleate pool boiling heat transfer of R134a/R245fa zeotropic mixtures[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, **119**: 508–522.
- [7] 银了飞, 张珂昕, 杨钟琳, 等. 微纳结构分级强化开放型微通道流动沸腾实验研究[J]. 工程热物理学报, 2025, **46**(4): 1278–1287.
Yin L F, Zhang K X, Yang Z L, et al. Multi-stage enhancement on flow boiling in open microchannels with micro/nano structures[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2025, **46**(4): 1278–1287.
- [8] 郑浩. 微通道流动沸腾冷却技术及应用[J]. 应用技术学报, 2023, **23**(3): 195–199.
Zheng H. Microchannel flow boiling cooling technology and application[J]. Journal of Technology, 2023, **23**(3): 195–199.
- [9] Consolini L, Thome J R. A heat transfer model for evaporation of coalescing bubbles in micro-channel flow[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2010, **31**(1): 115–125.
- [10] Rui Z L, Hao J J, Ma J, et al. Research on single-phase flow and two-phase flow boiling cooling performance of microchannel thermal management system with novel Tesla valve design[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, **229**: 125760.
- [11] Zhuang X R, Xie Y C, Li X, et al. Experimental investigation on flow boiling of HFE-7100 in a microchannel with pin fin array[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, **225**: 120180.
- [12] Wu X L, Li C Y, Yang J L, et al. Theoretical and experimental research on flow boiling heat transfer in microchannels for IGBT modules[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2023, **205**: 123900.
- [13] Fang Y D, Lu D, Yang W L, et al. Saturated flow boiling heat transfer of R1233zd(E) in parallel mini-channels: experimental study and flow-pattern-based prediction[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2023, **216**: 124608.
- [14] 张浩, 曹泽瀚, 梅洪汉, 等. R32 制冷剂在小管径水平管内的沸腾换热与阻力特性实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2023, **57**(3): 58–67.
Zhang H, Cao Z H, Mei H H, et al. Experimental study on the flow boiling heat transfer and pressure drop of refrigerant R32 in horizontally oriented small-diameter tubes[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, **57**(3): 58–67.
- [15] Gao Y P, Feng Y, Tang K, et al. Comparison of flow boiling pressure drop and heat transfer of R134a with low GWP alternative R1234ze(E) in a dimpled flat duct[J]. International Journal of Refrigeration, 2020, **119**: 165–174.
- [16] Diani A, Mancin S, Doretto L, et al. Low-GWP refrigerants flow boiling heat transfer in a 5 PPI copper foam[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2015, **76**: 111–121.
- [17] 冯彪, 张昭, 简琳睿, 等. 新型高温热泵混合工质替代 R245fa 的性能研究[J]. 太原理工大学学报, 2023, **54**(5): 941–949.
Feng B, Zhang Z, Jian L R, et al. Study on the performance of new high temperature heat pump mixtures as alternatives to R245fa[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2023, **54**(5): 941–949.
- [18] Azzolin M, Bortolin S, Del Col D. Flow boiling heat transfer of a

- zeotropic binary mixture of new refrigerants inside a single microchannel[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2016, **110**: 83–95.
- [19] Del Col D, Bortolin S, Rossetto L. Convective boiling inside a single circular microchannel[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, **67**: 1231–1245.
- [20] 李广, 庄大伟, 谢丽懿, 等. 含油 R32 管内流动沸腾换热特性测试及关联式开发[J]. *化工学报*, 2022, **73**(2): 612–621.
Li G, Zhuang D W, Xie L Y, et al. Experimental investigation and correlation development of flow boiling heat transfer characteristics of R32–oil mixture inside tube[J]. *CIESC Journal*, 2022, **73**(2): 612–621.
- [21] 周航, 张斯婧, 刘剑, 等. 小通道内非共沸工质流动沸腾换热数值分析[J]. *化工学报*, 2025, **76**(8): 3864–3872.
Zhou H, Zhang S J, Liu J, et al. Numerical analysis of flow boiling heat transfer of zeotropic mixtures in mini-channels[J]. *CIESC Journal*, 2025, **76**(8): 3864–3872.
- [22] Marchetto D B, Revellin R, Rullière R, et al. An experimental investigation on R245fa and R1233zd(E) flow boiling at high saturation temperatures in a horizontal small diameter channel[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, **220**: 124986.
- [23] 周昉, 刘剑, 张小松. 基于多参数评估原则筛选高温热泵用三元非共沸混合工质[J]. *化工学报*, 2023, **74**(11): 4487–4500.
Zhou F, Liu J, Zhang X S. Selection of ternary zeotropic mixtures for high-temperature heat pumps on multiparameter evaluation principles[J]. *CIESC Journal*, 2023, **74**(11): 4487–4500.
- [24] Dang C, Jia L, Zhang X, et al. Experimental investigation on flow boiling characteristics of zeotropic binary mixtures (R134a/R245fa) in a rectangular micro-channel[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, **115**: 782–794.
- [25] Lim T W, Kim J H. An experimental investigation of heat transfer in forced convective boiling of R134a, R123 and R134a/R123 in a horizontal tube[J]. *KSME International Journal*, 2004, **18**(3): 513–525.
- [26] Moffat R J. Describing the uncertainties in experimental results[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1988, **1**(1): 3–17.
- [27] Gungor K E, Winterton R H S. A general correlation for flow boiling in tubes and annuli[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1986, **29**(3): 351–358.
- [28] Ong C L, Thome J R. Macro-to-microchannel transition in two-phase flow(part 1): Two-phase flow patterns and film thickness measurements[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2011, **35**(1): 37–47.
- [29] 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.
- [30] Choi T Y, Kim Y J, Kim M S, et al. Evaporation heat transfer of R-32, R-134a, R-32/134a, and R-32/125/134a inside a horizontal smooth tube[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2000, **43**(19): 3651–3660.