

超疏水点阵强化多孔介质池沸腾传热性能研究

于莹¹, 郎中敏^{2*}, 孙丽娅², 吴刚强², 康英杰³, 欧阳明超¹

(1. 内蒙古科技大学化学与化工学院, 内蒙古 包头 014010;

2. 鄂尔多斯应用技术学院化学工程学院, 内蒙古 鄂尔多斯 017000;

3. 内蒙古科技大学机械工程学院, 内蒙古 包头 014010)

摘要:为解决多孔介质在池沸腾过程中初始过热度高、临界热流密度小所造成的散热问题,使用涂层法制备出超疏水/亲水性的点阵结构表面;对该复合结构进行池沸腾传热性能测试并分析其传热机理。结果表明,亲疏水面积比 5:1 的超疏水点阵结构(WCF-5)的临界热流密度和最大传热系数分别为 826.5 kW/m² 和 40.6 kW/(m²·K);与光滑的铜表面相比,分别提高了 4.52 倍和 3.62 倍;与泡沫铜表面相比,分别提高了 1.59 倍和 1.65 倍。分析认为,泡沫铜多孔结构(CF)具有增强液体回流的能力,超疏水点阵涂层增加汽化核心密度,从而强化了池沸腾传热性能。

关键词:池沸腾;多孔介质;超疏水涂层;布置形式

中图分类号:TQ013.1

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2025)S1-0338-05

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2025.S1.061

Study on boiling heat transfer performance of superhydrophobic lattice enhanced porous media pool

YU Ying¹, LANG Zhong-min^{2*}, SUN Li-ya², WU Gang-qiang²,

KANG Ying-jie³, OUYANG Ming-chao¹

(1.School of Chemistry and Chemical Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China; 2.College of Chemical Engineering, Ordos Institute of Technology, Ordos 017000, China; 3.School of Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Science & Technology, Baotou 014010, China)

Abstract:In order to solve the heat dissipation problem caused by high initial superheat and small critical heat flow density of porous media during pool boiling, a superhydrophobic/hydrophilic surface with lattice structure is prepared by using the coating method. This composite structure is tested for pool boiling heat transfer performance, and its heat transfer mechanism is analyzed. It is shown that the critical heat flow density and the maximum heat transfer coefficient of the superhydrophobic lattice structure (WCF-5) with a hydrophilic/hydrophobic area ratio of 5:1 are 826.5 kW·m⁻² and 40.6 kW·m⁻²·K⁻¹, respectively, 4.52 and 3.62 times that of the smooth Cu surface, and 1.59 and 1.65 times that of the foam Cu surface, respectively. It is suggested by the analysis that the porous structure of foam Cu has the ability to enhance liquid reflux, and the superhydrophobic lattice-coating increases the vaporization core density, thus strengthening the pool boiling heat transfer performance.

Key words:pool boiling; porous medium; superhydrophobic coating; layout form

池沸腾是一种有效的传热方式,广泛用于电子处理器和各类组件的散热^[1-2]。传热表面的润湿性是影响传热效率的关键因素,通过改变传热表面亲疏水区域的面积占比可改变接触角,从而影响其起始沸腾过热度(ONB)、临界热流密度(CHF)和传热系数(HTC)^[3-4]。

以多孔介质为基体来制备亲疏水传热表面,在强化池沸腾传热性能方面具有良好效果^[5-7]。Lim等^[8]对光滑铜表面、疏水涂层、超亲水涂层以及超疏水涂层的沸腾性能进行了对比研究,结果显示,疏

水涂层在促进气泡成核与脱离方面表现出优势,相较于光滑铜表面,HTC提高了230%。Shen等^[9]研究了通过化学沉积制造的毫米级微柱混合润湿表面,结果表明,在较低热流密度下,相较于均匀润湿表面,混合润湿表面在传热系数方面展现出更优越的性能。分析认为,通过表面改性技术在微/纳结构表面形成了复杂的混合润湿性结构,这种结构能增加汽化核心密度、减小池沸腾传热的ONB,从而有效提升在低热流密度条件下的传热性能^[10-11]。基于此,本文研究了超疏水全氟癸基三甲氧基硅烷

收稿日期:2025-01-13;修回日期:2025-04-01

基金项目:内蒙古自然科学基金(2022LHMS02002)

作者简介:于莹(2000-),女,硕士生,研究方向为池沸腾传热,ay01023344@163.com;郎中敏(1980-),女,硕士,教授,研究方向为相变传热,通讯联系人,langzhongmin226@163.com。

点阵涂层在多孔表面的应用,该涂层能够扩大换热面积,促进气泡的成核与脱离过程,相较于光滑表面的池沸腾,其传热系数有了明显提升。

该涂层由于其多孔结构和疏水剂的使用而表现出较高的疏水性^[12-15]。全氟癸基三甲基氧基硅烷经过适度的水解处理,可生成超疏水涂层^[16-18]。本文选择超疏水涂层作为该复合结构的研究重点,利用点涂法在泡沫铜上构建了超疏水/亲水图案,设计出结合超疏水性和亲水性优点的功能性超疏水点阵表面,表面具体参数如表1所示。该结构具有大量微孔,微孔之间相互连通,可以限制气泡的生长半径,缩短气泡停留时间,提高液体回流能力。超疏水涂层的引入能够优化泡沫铜骨架的表面粗糙程度,同时提供丰富的汽化核心,进而增大CHF,由此构建出具备卓越传热性能的功能化超疏水点阵结构。本研究进一步分析了该结构在池沸腾过程中的传热机制,结果表明,与光滑表面相比,该复合结构的CHF与HTC分别提升了4.52倍和3.62倍,在改善池沸腾传热方面起到了良好的效果。

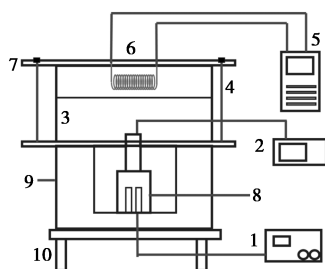
表1 超疏水点阵(WCF)传热表面参数

命名	亲水基底材料	超疏水点半径/mm	亲疏水面积比
P	光滑铜	—	—
CF	泡沫铜	—	5:0
WCF-1	泡沫铜	1	1:1
WCF-2	泡沫铜	1	2:1
WCF-3	泡沫铜	1	3:1
WCF-4	泡沫铜	1	4:1
WCF-5	泡沫铜	1	5:1

1 实验与数据处理

1.1 实验装置

实验装置如图1所示,由主体支架、加热系统、沸腾测试室、数据采集系统和冷凝回流系统组成。



1—直流电源;2—数据采集器;3—池沸腾测试室;4—固定螺丝;
5—冷凝循环器;6—螺旋冷凝管;7—聚四氟乙烯垫片;
8—导热铜柱;9—聚四氟乙烯保温层;10—不锈钢支架

图1 实验装置图

主体支架由不锈钢焊接制成,导热铜柱底部的加热系统由插入底部的四根加热棒和导热铜柱组成,在导热铜柱的侧面布置3个小孔,作为测温T型热电偶的数据采集点。沸腾测试室由盖板、石英方缸和底板组成,通过上方盖板开孔的方式设置热电偶直接测量沸腾池中工质的温度。顶部焊接有冷凝管,为容器内部提供冷却能力。数据采集系统由热电偶和数据采集仪器构成,用于测量工作流体的温度和导热铜柱的温度。

1.2 样品制备和表征

测试样品选用孔隙率为90%、厚度为1 mm、直径为20 mm的泡沫铜圆片。利用真空烧结工艺,在高温氢气氛下对其进行还原,以去除金属表面附着的氧化层及杂质,获得洁净的泡沫铜。制备流程图见图2。

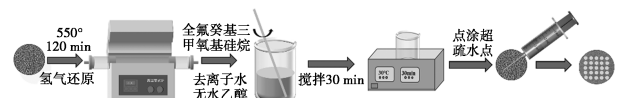


图2 制备流程图

实验分3步制备复合传热结构表面。第1步为泡沫铜在高温氢气氛下的还原。第2步是将水与乙醇按照50:49的体积比例混合,加入部分全氟癸基三甲基氧基硅烷溶液,得到疏水溶液。第3步,将疏水溶液均匀的点涂在泡沫铜的表面上,得到了待测样品,按照上述方法制备不同超疏水面积比例的WCF复合传热表面。

图3为WCF结构的扫描电镜图像,由图3可知,泡沫铜孔径小于220 μm,孔隙率高,孔结构连贯。

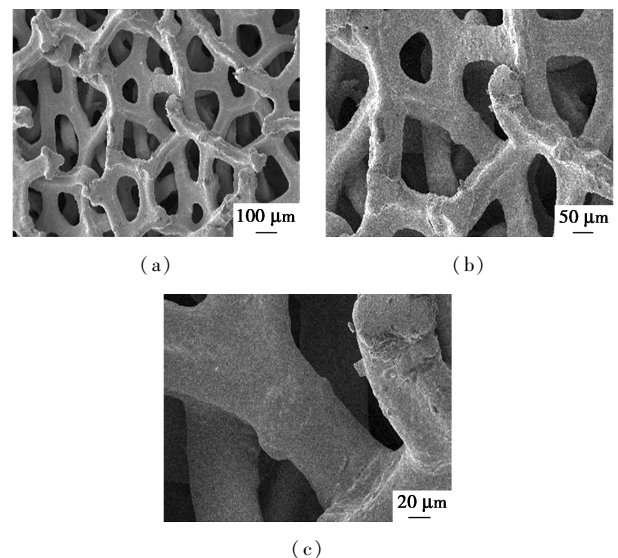


图3 WCF结构SEM图像

采用接触角测量仪对 CF 结构的渗透性能及疏水点涂层的润湿性进行了测试。图 4(a)—4(c) 为 CF 的动态接触角,结果表明,CF 多孔泡沫铜结构的润湿性良好,可以使 0.05 mL 的水滴在 30 ms 内浸透完成。图 4(d) 为 WCF 上的疏水点涂层的接触角,测试结果显示接触角大于 150°,确证明该涂层为超疏水涂层。

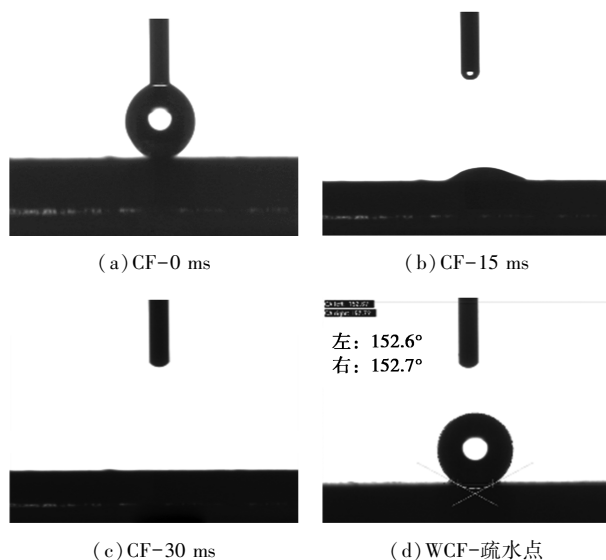


图 4 CF 和超疏水点的渗透性能图

1.3 数据处理

根据傅里叶-稳态导热方程,导热铜柱的热流密度(q)可由直流电源输出功率计算得出,如式(1):

$$q = (U \cdot I) / A \quad (1)$$

式中, U 为输出电压, V; I 为输出电流, A; A 为有效传热的面积, m^2 。

传热表面的温度(T_w)由 T 型热电偶实测得到的温度值来进行计算:

$$T_w = T_{ave} - q(l_1/k_s + l_2/k_c) \quad (2)$$

式中, T_{ave} 为导热柱的表面温度, K; l_1 和 l_2 分别为锡膏和测试样品的厚度, m; k_s 和 k_c 分别为锡膏和测试样品的导热系数, $W/(m \cdot K)$ 。导热柱的样品表面温度依据公式(3)进行计算:

$$T_{ave} = T_1 - (\delta/3)[(T_2 - T_1)/l + (T_3 - T_2)/l + (T_3 - T_1)/2l] \quad (3)$$

式中, δ 为导热铜柱的最上方测量点与导热柱顶端的距离, m; l 为相邻两个热电偶插入点的间距, m。

壁面过热度(ΔT)可由表面工作流体温度与传热表面温度之差来计算:

$$\Delta T = T_w - T_{sat} \quad (4)$$

式中, T_{sat} 为工作流体的温度, K。

沸腾传热系数 h 为:

$$h = q/\Delta T \quad (5)$$

1.4 误差分析

在实验过程中,误差主要为来源于系统误差与测量误差两方面。系统误差具体包括实际传热面的有效面积偏差、导热铜柱制造中的尺寸误差以及热电偶孔位精度不足;测量误差为直流电源与数据采集设备的精确度限制、热电偶的准确度问题,以及加热棒的精度误差。

实验中,导热铜柱的尺寸精度控制在 ± 0.01 mm 范围内,同时样品模具的制造误差也保持在 ± 0.01 mm 以内。为了有效降低热量散失,实验采用了双层结构的聚四氟乙烯和石英棉作为保温隔热材料。经傅里叶导热方程计算,本实验装置的热损失估算在 $\pm 2.3\%$ 的范围内。

在测量误差方面,直流电源的输出功率误差为 $\pm 1.2\%$,热电偶的测量精度误差保持在 ± 0.15 K 以内,导热系数的误差范围是 $\pm 1.3\%$,而传热面的有效散热面积则存在 $\pm 2.4\%$ 的误差。

根据 Kline^[19] 提出的方法,以 δ 为标准误差,假设间接检测量 f 和直接检测量 x_1, x_2, \dots, x_m 满足条件 $f=f(x_1, x_2, \dots, x_m)$, 其中 x_1, x_2, \dots, x_m 是不相关的量。此时, f 的标准误差满足传递方程:

$$\delta_f^2 = \sum_{i=1}^m (\partial f / \partial x_i)^2 \delta_i^2 \quad (6)$$

其中, δ_i 为 ∂x_i 的测量误差。将公式(1)和(5)代入(6)得到:

$$\delta_q = \sqrt{\{[\partial q / \partial (UI)]\delta(UI)\}^2 + [(\partial q / \partial A)\delta A]^2} \quad (7)$$

$$\delta_h = \sqrt{\frac{[(\partial h / \partial q)\delta q]^2 + [(\partial h / \partial T_w)\delta T_w]^2 + [(\partial h / \partial T_{sat})\delta T_{sat}]^2}{}} \quad (8)$$

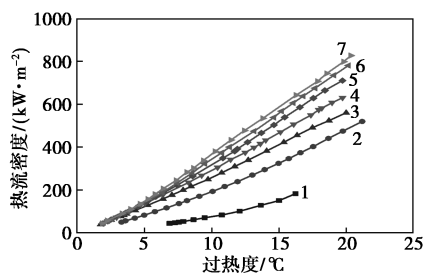
根据以上公式推断出不确定度与实验条件所设定的具体范围之间存在着紧密的关联性。因此,在此条件下,热流密度的不确定度为 $\pm 4.3\% \sim 7.8\%$,池沸腾传热系数的不确定度为 $\pm 5.4\% \sim 9.3\%$ 。

2 结果和讨论

实验装置保持在常温常压下,使用去除不凝汽的去离子水为工质对 P 表面、CF 表面和 WCF 样品表面的池沸腾传热性能进行了测试。通过调整直流电源的功率,在实验初期将输出功率设定在 $0.5 \sim 1.0$ kW/m^2 范围内,以获取沸腾的 ONB 点。随着热流密度升高,逐步增加功率至 $2.0 \sim 5.0$ kW/m^2 之间,直至观察到膜沸腾现象的发生,达到 CHF。

图 5 为热流密度随过热度的变化曲线,由图可

知,与P表面相比,所有WCF复合结构的池沸腾传热性能均有强化。当P表面达到表面初始沸腾状态时,所需的壁面过热度为 6.8°C 。相比之下,WCF-1复合结构展现出了最低的初始沸腾所需的壁面过热度,仅为 1.7°C ,比P表面降低了 5.1°C ,比CF表面减少了 1.6°C ,表明WCF-1结构对池沸腾气泡成核的促进效果最好。其原因是超疏水点阵结构使得微米泡沫铜孔径尺寸变小,孔隙密度变高,因而可充当成核位点的孔洞数量相对增多,且超疏水结构使得表面自由能变小,从而降低气泡成核所需的壁面过热度。随着WCF样品中超疏水比例的持续减小,沸腾表面的临界热流密度逐渐增大。P表面的临界热流密度为 182.7 kW/m^2 ,CF表面的临界热流密度为 519.2 kW/m^2 。WCF复合结构的初始过热度均优于CF表面,且随着超疏水点阵面积比例的减小,临界热流密度呈现增大的趋势,其中亲水与超疏水面积比为 $5:1$ 的WCF-5表面具有最优的临界热流密度,为 826.5 kW/m^2 。在低热流密度下超疏水点阵的存在对比亲水表面,具有更多的成核位点,这是WCF表面在低热流密度下传热性能增强的主要原因。亲水多孔介质用于防止气泡在高热流密度下合并聚集,同时保持表面的液体回流能力。然而,当超疏水和亲水面积比例 $1:1$ 时,WCF-1表面会出现液体回流困难、气泡难以脱离表面的问题,因此适宜的超疏水点阵面积比例对池沸腾传热性能有强化作用。

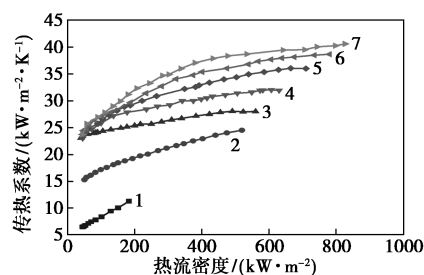


1—P;2—CF;3—WCF-1;4—WCF-2;5—WCF-3;
6—WCF-4;7—WCF-5

图5 热流密度随过热器和传热系数
随热流密度的变化曲线

图6为传热系数随热流密度的变化曲线,由图可知,P表面的最大传热系数为 $11.3\text{ kW}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,CF表面的最大传热系数为 $24.4\text{ kW}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。在WCF复合结构中,当亲水和超疏水点阵面积比例为 $5:1$ 时,传热系数达到最大值 $40.6\text{ kW}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,分别为P表面的 3.62 倍、CF表面的 1.65 倍。在润湿性较好的CF表面,液体充分润湿表面,气泡与表面

接触面积较小,有利于气泡的脱离,气泡脱离后液体可以通过孔隙快速补充到表面。在WCF-1结构的表面,超疏水点阵分布密集,使得气泡与加热界面之间的接触面积较大,气泡大部分在表面附着聚集,脱离阻力增大,气泡不能从沸腾表面上及时脱离,从而在加热表面上形成汽膜。而WCF-5表面是结合超疏水性和亲水性优点的功能性超疏水点阵表面,其CF多孔结构能够为池沸腾提供汽化核心,限制气泡生长体积,加快气泡的脱离,同时,超疏水点阵结构可以强化汽化核心密度,降低表面的自由能,在较低热量的条件下实现脱离,能够加强对边界层的扰动效果,进而提升对流传热的效率。随着热流密度的不断增大,表面粘度会相应下降,这一变化促使气泡的脱离频率加快,延迟膜沸腾的出现,使临界热流密度得到改善。这一系列效应共同增强了池沸腾的传热性能。



1—P;2—CF;3—WCF-1;4—WCF-2;5—WCF-3;
6—WCF-4;7—WCF-5

图6 传热系数随热流密度的变化曲线

3 结论

本研究以泡沫铜为基质设计超疏水点阵结构,测试了该复合结构对池沸腾传热性能的影响,并得出以下结论:

(1)与CF表面相比,WCF表面在热流密度较低时,其过热度更低;在热流密度较高时,WCF表面展现出优异的传热性能。因此,混合表面更适用于高热流密度。随着超疏水点阵面积比的减小,沸腾传热系数呈现上升趋势。当亲水面积和超疏水点阵面积比例为 $5:1$ 时,WCF-5表面CHF最大,为 826.5 kW/m^2 ,分别是P表面的 4.52 倍、CF结构的 1.59 倍,其HTC最高达到 $40.6\text{ kW}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$,分别为光滑铜的 3.62 倍、CF的 1.65 倍。

(2)WCF-5结构中超疏水点阵的存在能够减小气泡直径,增加成核频率,为初始池沸腾过程提供充足的汽化核心,同时减小气泡脱离直径,限制气泡生长,增强了液体回流能力。随着热流密度的增加,

气泡脱离后液体通过多孔结构得到补充,缩短气泡生长时间,强化池沸腾传热性能。

(3)WCF 表面结合超疏水性和亲水性优点,独特的结构特性有效提升了传热效率,使得热量传递更为迅速和均匀,为复合材料在热管理方面的应用提供了新的思路,也为进一步优化池沸腾传热性能指明了方向。

参考文献

- [1] 刘炜,陆存豪,徐晶,等.电池模组冷却用池沸腾传热技术研究进展[J].电池,2023,(53):338-341.
- [2] 吴裕,王宏,朱恂,等.肋片交错距离影响 HFE-7100 沸腾换热研究[J].工程热物理学报,2024,(45):2375-2381.
- [3] Kumar J, Negi S. Effect of additive manufacturing-based surface modification on pool boiling heat transfer: A review[J]. Progress in Additive Manufacturing, 2024, (9): 1-25.
- [4] Zhong G, Fang G, Rao L, et al. Augmentation of pool boiling heat transfer using a microstructured aluminum surface fabricated by ultrasonic cavitation modification [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2024, (158): 67-78.
- [5] Luo C, Tagawa T. Enhanced boiling heat transfer on structured surfaces with linear and staggered arrangements of hydrophilic and hydrophobic micro-pillars [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, (225): 125394-125409.
- [6] Feng Y, Chang F, Hu Z, et al. Investigation of pool boiling heat transfer on hydrophilic-hydrophobic mixed surface with micro-pillars using LBM [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2021, (163): 21-42.
- [7] 马清钊,陈康,葛艺,等.泡沫铜微孔表面池沸腾换热特性的实验研究[J].山东科学,2021,(34):73-79.
- [8] Lim C S, Sia G D, Hung Y M. Extraordinary enhancement of nucleate pool boiling on intrinsically biphilic graphene nanostructured surfaces [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, (218): 27-34.
- [9] Shen C, Zhang C, Bao Y, et al. Experimental investigation on enhancement of nucleate pool boiling heat transfer using hybrid wetting pillar surface at low heat fluxes [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2018, (130): 47-58.
- [10] 牟帅,胡冠西,徐治国,等.表面改性紫铜方柱阵列的池沸腾传热特性[J].中国科技论文,2018,(13):2141-2147.
- [11] 胡晨昱,赖展程,胡海涛,等.疏水改性对泡沫金属表面池沸腾换热特性的影响[J].制冷技术,2018,(38):8-11.
- [12] 林石泉,赵雅鑫,吕中原,等.亲疏水性对泡沫金属池沸腾换热特性的影响[J].化工学报,2021,(72):295-301.
- [13] 周儒鸿,纪献兵,孔庆盼,等.表面润湿性影响池沸腾传热的研究进展[J].热能动力工程,2019,(2):1-8.
- [14] 唐吴宇,周磊,张君毅,等.基于飞秒激光改性表面核化点密度研究[J].核动力工程,2022,43(5):95-99.
- [15] 王东民,董丽宁,全晓军.改性 SiO₂ 纳米颗粒沸腾沉积层的形成原理及其沸腾换热[J].化工学报,2018,(10):4200-4205.
- [16] 刘毅彬.基于含氟基元构筑的仿生疏水表面及其性能研究[D].西安:西北工业大学,2020.
- [17] 向阳阳,徐应锋,李谋吉,等.疏水改性的聚对二甲苯薄膜对聚氨酯泡沫阻湿性能的影响[J].中国表面工程,2023,(3):52-64.
- [18] 史斌,苏延辉,邢洪宪,等.基于疏水改性的超低密度控水支撑剂的制备及其性能[J].油田化学,2022,39(3):401-406,437.
- [19] Kline S J. The Purposes of Uncertainty Analysis [J]. Journal of Fluids Engineering, 1985, (107): 153-160. ■
- [18] Fu K, Liu C, Wang L, et al. Performance and mechanism of CO₂ absorption in 2-ethylhexan-1-amine+glyme non-aqueous solutions [J]. Energy, 2021, 220: 119735.
- [19] Meng F, Fu K, Wang X, et al. Performance of a new water lean absorbent composed of EHA and DEGDEE in CO₂ capture and regeneration [J]. Energy, 2024, 304: 132090.
- [20] Mumford K A, Wu Y, Smith K H, et al. Review of solvent based carbon-dioxide capture technologies [J]. Frontiers of Chemical Science and Engineering, 2015, 9: 125-141.
- [21] Li L, Voice A K, Li H, et al. Amine blends using concentrated piperazine [J]. Energy Procedia, 2013, 37: 353-369.
- [22] Muhammad A S, Shamsuddin A M, Mohammad S I. Viscosity and excess viscosity of dilute aqueous solutions of Ethylenediamine, Trimethylenediamine and N, N-Dimethyltrimethylenediamine [J]. Physics and Chemistry of Liquids, 2002, 40(4): 477-490.
- [23] 黄斌,许世森,郜时旺,等.华能北京热电厂 CO₂ 捕集工业试验研究[J].中国电机工程学报,2009,29(17):14-20.
- [24] Ouyang Y, Liu Q, Luo T, et al. Experimental and computational study of the thermal degradation of primary amines used in CO₂ capture [J]. Chemical Engineering Science, 2024, 288: 119786.
- [25] 陈思铭.基于乙基乙醇胺的非水溶液法捕集二氧化碳[D].大连:大连理工大学,2018.
- [26] 傅坤.CO₂ 在 EHA+diglyme 均相贫水系统中的吸收-解吸特性及机理研究[D].北京:华北电力大学,2022.
- [27] Barbarossa V, Barzagli F, Mani F, et al. Efficient CO₂ capture by non-aqueous 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP) and low temperature solvent regeneration [J]. RSC advances, 2013, 3(30): 12349-12355.
- [28] Heldebrant D J, Koeh P K, Glezakou V A, et al. Water-Lean solvents for Post-Combustion CO₂ capture: Fundamentals, uncertainties, opportunities, and outlook [J]. Chemical reviews, 2017, 117(14): 9594-9624.
- [29] 安山龙.相变溶剂吸收二氧化碳反应动力学研究[D].保定:华北电力大学(保定),2017.
- [30] Zhang P, Tian X, Fu D. CO₂ removal in tray tower by using AAILs activated MDEA aqueous solution [J]. Energy, 2018, 161: 1122-1132. ■

(上接第 337 页)