

开孔式 SK 型直接接触换热器混合与换热特性研究

赵爽,张霞,耿健,黄峻伟

(云南农业大学机电工程学院,云南昆明 650051)

摘要:为了进一步强化流体在 SK 型静态混合器中换热效率,对 SK 型静态混合器进行 3,6 和 9 孔的开孔设计,并将开孔式 SK 型静态混合器应用于直接接触蒸发器中,以高沸点导热油作为直接接触换热器中的连续相,以低沸点的有机工质作为直接接触换热器的分散相,运用 ANSYS 软件进行数值模拟,研究 30,50 和 70 °C 3 种低温差情况下,不同开孔数量对流动和换热特性的影响。结果表明:3 孔式 SK 型静态混合器的混合特性最稳定,在 3 种温差下混合效果分别是传统式 SK 型静态混合器的 1.5,3.3 和 1.6 倍;湍流强度分别为传统式 SK 型静态混合器的 3.3,3.8 和 1.3 倍。在 SK 型静态混合器上合理的开孔可以提高气态工质在直接接触换热器内的停留时间,从而使传热得到强化,达到了节约能源的目的。

关键词:开孔;SK 型静态混合器;直接接触换热;数值模拟;强化换热;多相流

中图分类号:TK124 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.03.016

[引用本文格式]赵爽,张霞,耿健,等.开孔式 SK 型直接接触换热器混合与换热特性研究[J].热能动力工程,2023,38(3):119-125. ZHAO Shuang,ZHANG Xia,GENG Jian,et al. Research on mixing and heat transfer characteristics of open-hole SK type direct contact heat exchanger[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2023,38(3):119-125.

Research on Mixing and Heat Transfer Characteristics of Open-hole SK Type Direct Contact Heat Exchanger

ZHAO Shuang,ZHANG Xia,GENG Jian,HUANG Jun-wei

(Faculty of Mechanical and Electrical Engineering,Yunnan Agricultural University,Kunming,China,Post Code:650051)

Abstract: In order to further strengthen the heat transfer efficiency of the fluid in the SK type static mixer,the SK type static mixer is designed with 3,6,and 9 holes,and the open-hole SK type static mixer is used in the direct contact evaporator. Using high boiling point heat transfer oil as the continuous phase in the direct contact heat exchanger,and using the low boiling point organic working medium as the disperse phase in the direct contact heat exchanger,numerical simulation is carried out by ANSYS software to study the effect of different numbers of openings on the flow and heat transfer characteristics under three low temperature differences of 30 °C,50 °C and 70 °C. The results show that the 3-hole SK type static mixer has the most stable mixing characteristics. Under three temperature differences,its mixing effect is 1.5,3.3 and 1.6 times that of the traditional SK type static mixer,and the turbulence intensity is 3.3,3.8 and 1.3 times that of the traditional SK type static mixer,respectively; reasonable openings on the SK type static mixer can increase the residence time of the gaseous working medium in the direct contact heat exchanger,thereby enhancing the heat transfer and achieving the purpose of saving energy.

Key words: open hole,SK type static mixer,direct contact heat transfer,numerical simulation,enhanced heat transfer,multiphase flow

收稿日期:2022-01-26; 修订日期:2022-03-09

基金项目:国家自然科学基金(52166010,51706195);云南省基础研究计划面上项目(202101AT070202)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (52166010,51706195); Fundamental Research Program of Yunnan Province (202101AT070202)

作者简介:赵爽(1997-),女,云南农业大学硕士研究生。

通讯作者:黄峻伟(1983-),男,云南农业大学副教授。

引言

经济迅速发展带来的后果之一便是能源的快速消耗,减少能源利用过程中的损耗有利于实现能源的高效利用^[1-2]。强化换热技术作为提高能源利用率的有效途径,通常通过增加传热面积、增大温差来提高传热推动力、增大传热系数来达到强化换热的目的^[3-4]。直接接触换热器作为高效换热设备,与间壁式换热器相比,增大了流体的换热面积,具有更好的换热系数。它可以应用于不同的工业领域,如海水淡化、太阳能应用和低品位能源回收等^[5-8]。

通常通过动力搅拌的方式来增强流体的混合,提高换热系数,达到强化换热目的^[9-11]。而静态混合器作为一种无需附加动力就能实现流体分散与混合的设备,比动力搅拌更节能,受到越来越多的关注^[12]。SK 型是最为典型的静态混合器之一,其不易堵塞的特点,对高粘性介质尤为适用。叶楚宝等人^[13]将黏度高达 300 Pa·S 的熔融聚苯乙烯从 143 °C 加热至 230.8 °C,研究得到静态混合器的混合单元使热边界层不断更新,其换热性能优于空管,适用于高黏度介质的强化换热,其换热效果约为普通管的 2 倍。龚斌等人^[14]运用激光多普勒测速仪对混合器内流场进行测量分析,研究表明,流体在 SK 型静态混合器中湍动能被强化这一过程主要发生在前 3 个混合元件,且湍动能逐渐增加。聂欣等人^[15]对开缝式 SK 型静态混合器的结构参数进行数值模拟优化,并与传统 SK 型静态混合器进行比较,发现开缝式 SK 型静态混合器的混合效果均优于传统式 SK 型静态混合器。Fu^[16]通过戊烷-水直接接触蒸发换热实验,研究了 SK 型直接接触蒸发器对换热性能的影响,结果表明,SK 元件降低了换热器的蒸发高度,其体积换热系数是无 SK 元件换热器的两倍以上。

为进一步提高传统式 SK 型静态混合器在直接接触换热器内的换热性能,本文在 SK 型静态混合器上进行开孔设计,研究以高沸点导热油 THERMINOL62 作为直接接触换热器中的连续相,以低沸点的有机工质 R141b 作为直接接触换热器的分散相,

两种流体在 SK 型直接接触换热器中混合换热。在 3 种不同低温差情况下,进行数值模拟,分析 3 种不同开孔数量的模型对流体的混合均匀度、湍流强度的影响,并分析了出口气态工质随时间的演化特点,与无孔的传统式 SK 型直接接触换热器进行对比。通过研究开孔式 SK 型静态混合器对液-液-气三相的影响,进一步提高直接接触换热器的换热性能。

1 几何模型与数值模拟

1.1 SK 型静态混合器模型结构设计

为了提高传统式 SK 型静态混合器的混合效果,提出在 SK 型静态混合器上进行开孔设计,研究 3, 6 和 9 孔对直接接触换热的影响(为了更好地生成网格,采用 1.5 mm 直径的圆柱垂直穿透 SK 型静态混合器的开孔方法),不同开孔数量下 SK 型静态混合元件如图 1 所示。

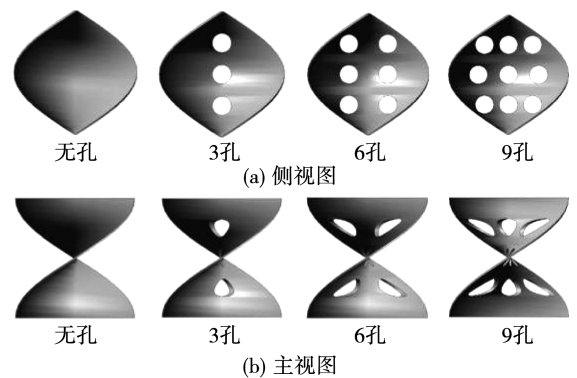


图 1 多孔 SK 型混合元件

Fig. 1 Porous SK type mixing element

1.2 几何模型的建立与网格划分

基于型号为 SK-5/10 的 SK 型静态混合器,对其进行几何建模,如图 2 所示。换热器直径为 10 mm,高 50 mm,进口直径为 5 mm,静态混合器的连续相流体采用高沸点导热油 THERMINOL62,分散相流体采用低沸点的有机工质 R141b,分别由换热器下面的两个入口进入后进行混合与换热。在直接接触换热器内设置 4 个长径比为 1 的 SK 型静态混合元件,如图 2 所示,每个 SK 静态混合元件在直接接触换热器内的起始高度为 7, 17, 27, 37 mm。相邻两个

混合元件之间呈 90° 交错分布,换热效果通过 SK 型静态混合器得到强化。开孔式 SK 型直接接触换热器采用与下图传统式 SK 型直接接触换热器相同的布置。

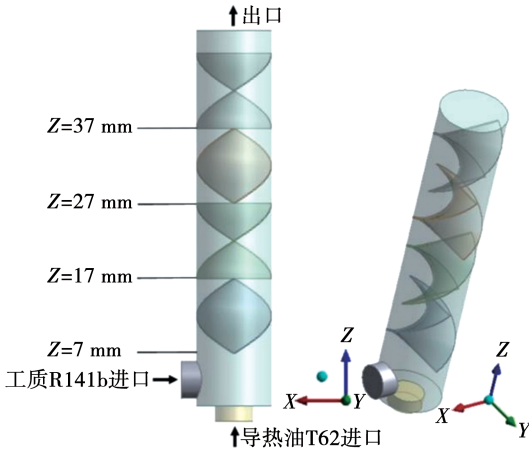


图2 传统式 SK 型直接接触换热器主视图(左)与透视图(右)

Fig.2 Front view (left) and perspective view (right) of traditional SK type direct contact heat exchanger

采用 ANSYS 软件进行建模,并生成网格。为了减少网格带来的计算误差,选用 3 种不同网格单元尺寸对无孔的传统式 SK 型直接接触换热器进行网格无关性分析,结果如表 1 所示。当尺寸从 0.5 mm 减小到 0.3 mm 时,压降变化与出口面平均温度变化均在 0.2% 以内,可认为计算结果与网格无关。考虑到计算成本,最终选用尺寸为 0.5 mm 的网格,并选用相同的网格单元尺寸生成其他模型的网格^[17],最终无孔、3 孔、6 孔和 9 孔的网格数量分别为 214 808,566 622,1 033 361 和 1 218 399。其中,3 孔式 SK 型静态混合器生成的局部计算网格如图 3 所示。

表 1 网格无关性检验结果

Tab.1 Grid independence verification results

尺寸/mm	压降/Pa	出口面平均温度/K
0.3	12 523	307.33
0.5	12 536	306.79
0.7	3 955	305.56

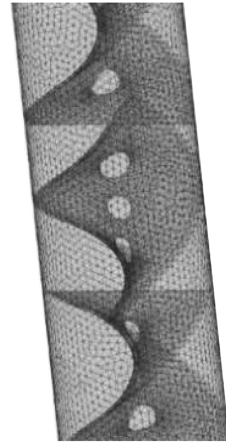


图3 SK 型直接接触换热器局部计算网格图

Fig.3 Local calculation grid diagram of SK type direct contact heat exchanger

1.3 数值模拟

体积分数 (VOF) 模型能够很好地捕捉气液界面的位置,更好地观察气态工质的变化情况,因此本文选用 VOF 模型。

连续性方程为:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q v_q) \right] = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (1)$$

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (2)$$

式中: v_q —第 q 相的速度张量, m/s, α_q —第 q 相的体积分数; \dot{m}_{pq} —从 q 相到 p 相的质量传递, kg/s; \dot{m}_{qp} —从 p 相到 q 相的质量传递, kg/s; S_{α_q} —质量源项, $\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{s}$ 。

动量方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho v) + \nabla \cdot (\rho v v) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla v + \nabla v^T)] + \rho g + F \quad (3)$$

式中: ρ —密度, kg/m^3 ; μ —动力粘度, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$; v —速度张量, m/s; F —动量源项, N/m^3 。

湍流模型选用 RNG $k-\varepsilon$ 模型。压力和速度耦合项采用 SIMPLE 算法,体积分数方程采用 QUICK 格式,其余皆采用二阶迎风格式。采用速度进口,出口边界选用 OUTFLOW。使得模拟结果更接近实际情况。

1.4 数据处理

不均匀系数 ψ 为:

$$\psi = \sigma / \bar{\varphi} \tag{4}$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\varphi_i - \bar{\varphi})^2} \tag{5}$$

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varphi_i \tag{6}$$

式中: σ —截面上气态 R141b 分率的分布方差; N —截面上的节点数, i —每个节点上气态 R141b 相体积分数, $\bar{\varphi}$ —截面上气态 R141b 分率的算术平方根。

根据混合不均匀度系数定义, ψ 越小表示混合程度越好^[18-19]。

2 模拟结果与分析

2.1 模拟结果验证

如图 4 所示,在 3 种温差工况下流体的湍流强度在 SK 型静态混合器的作用下得到强化。这一过程主要是在前 3 个 SK 型混合元件的作用下实现的,且湍流强度随着混合元件数量的增加呈现逐渐增强的趋势。流体进入第 4 个混合元件后,湍流强度逐渐趋于平稳。这与文献[14]通过实验研究 SK 型混合元件数对混合器内速度分布和湍动性能影响所得到的结论相吻合。将模拟结果所得的摩擦因子与 Blasius 公式计算结果进行对比,如表 2 所示。

表 2 模拟结果验证

Tab.2 Simulation results verification

温差 $\Delta t/^\circ\text{C}$	模拟结果	计算结果	偏差/%
30	0.021 0	0.025 6	22
50	0.023 4	0.021 8	7
70	0.026 0	0.020 0	23

2.2 混合均匀度及湍流强度分析

图 5 为 50 °C 温差下气态工质在 $Z = 0$ 截面的体积分数分布情况。由图可知,在相同换热时间内,4 种内嵌 SK 型静态混合器的直接接触换热器中,开孔式 SK 型直接接触换热器的混合效果均优于传统式,且气态工质的体积分数大于传统式。其中,3 孔式 SK 型直接接触换热器的体积分数最大、混合效果最优。

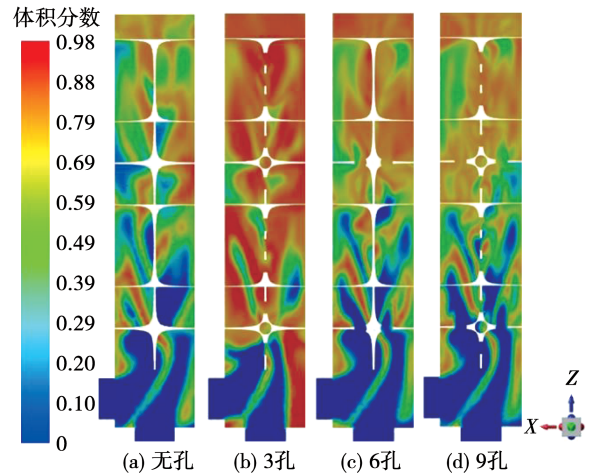


图 5 50 °C 温差下不同混合模型中气态工质在 $Z = 0$ 截面的体积分数

Fig. 5 Volume fraction of gaseous working medium at $Z = 0$ section in different mixing models under 50 °C temperature difference

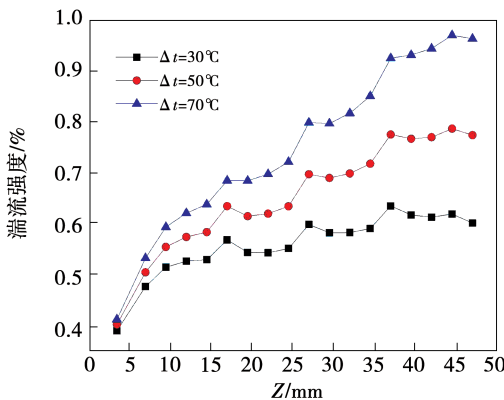


图 4 3 种温差下 SK 型直接接触换热器内湍流强度随 Z 轴的变化情况

Fig. 4 Variation of turbulent flow intensity in SK type direct contact heat exchanger with Z axis under three temperature differences

如图 6 所示,3 孔式 SK 型直接接触换热器内的不均匀系数均小于传统式。这是因为依据混合元件的个数 n ,流体在 SK 型静态混合器内的混合次数为 2^n ,部分流体在流经孔的时候,提前接触混合,增加了流体的混合概率。在温差为 30 °C 时,从 3 孔到 9 孔式 SK 型直接接触换热器中的不均匀系数逐渐上升,即混合效果逐渐变差,9 孔式 SK 型静态混合器中的不均匀系数大于传统式 SK 型静态混合器中的不均匀系数,说明 9 孔式 SK 型静态混合器的混合效果不及传统式 SK 型静态混合器的混合效果。这

是因为在直接接触换热中,较小的温差情况下,导热油无法提供足够的热量使液态有机工质气化,换热器有大量的液态有机工质存在,9孔式 SK 型静态混合器无法提供足够的混合特性。在导热油与有机工质温差为 70 °C 时的较大温差情况下,直接接触换热器内的换热效果增强,导致液态工质减少速度加快,开孔为 9 时,气态工质在换热器内的分布更加均匀,不均匀系数骤减。

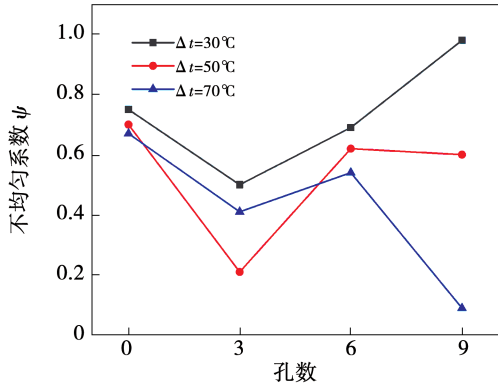


图 6 不同温差下不均匀系数随孔数的变化图

Fig. 6 Variation of non-uniformity coefficient with the number of holes under different temperature differences

如图 7 所示,在温差为 30 和 50 °C 时,6 孔和 9 孔式 SK 型直接接触换热器的湍流强度明显比 3 孔式 SK 型静态混合器的湍流强度小。在温差为 70 °C 时,9 孔式 SK 型直接接触换热器的湍流强度最大,这主要是由温差(即传热推动力)和扰流因素共同引起的结果。由于温差较大,使得传热推动力增加,湍流强度增大。由此可知,并非随着孔数的增加,湍流强度越高。

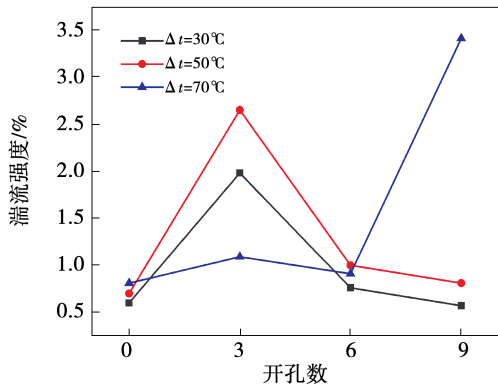


图 7 不同温差下湍流强度随开孔数的变化

Fig. 7 Variation of turbulence intensity with the number of open-holes under different temperature differences

综上所述,温差作为传热的推动力,较大的温差会促进换热的剧烈进行。而开孔的作用不仅会增加流体的混合次数,还会因为增加剪切力而提高流体的湍流强度,从而增强换热效果。但是开孔数量增多,还可能会削弱流体在开孔后 SK 型直接接触换热器的剪切力。因此,在温差为 30,50 和 70 °C 3 种不同工况下,3 孔式 SK 型静态混合器的特性较为稳定,混合效果分别是传统式 SK 型静态混合器的 1.5,3.3 和 1.6 倍,湍流强度分别为传统式 SK 型静态混合器的 3.3,3.8 和 1.3 倍。在温差 70 °C 的情况下,由于温差较大,9 孔式 SK 型直接接触蒸发器的混合效果和湍流强度分别是传统式的 6.3 和 3.2 倍。

2.3 气态体积分数演化分析

如图 8 ~ 图 10 所示,在 3 种不同温差情况下,在模拟实验 25 s 内,大约从第 5 s 开始,换热器的出口开始产生气态工质。在第一增长阶段,传统式 SK 型直接接触换热器中产生的气态工质体积分数均高于开孔式,这说明开孔式 SK 型静态混合器提高了流体在换热器内的停留时间,较短时间内,流体还不能流出换热器。随着时间的推移,传统式 SK 型直接接触换热器出口产生的气态工质体积分数在第一阶段结束后趋于平稳,开孔式 SK 型直接接触换热器会出现第二增长阶段,流体在开孔式 SK 型直接接触换热器内进行了较传统式更加充分的换热,在相同的进口流量下,开孔式中液态工质吸收了来自连续相导热油更多的热量而气化。

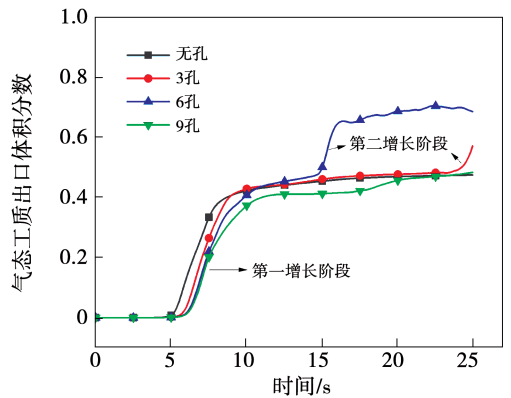


图 8 30 °C 温差下气态工质体积分数随时间的变化

Fig. 8 Variation of volume fraction of gaseous working medium with time under 30 °C temperature difference

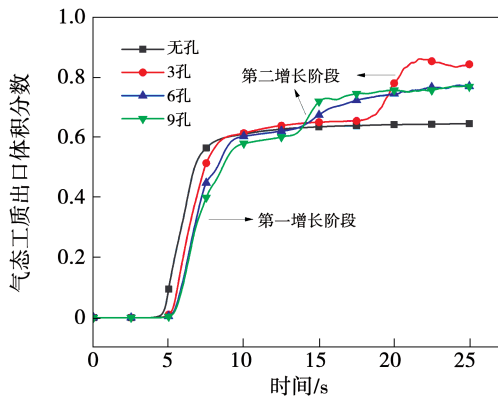


图9 50 °C温差下气态工质体积分数随时间的变化

Fig.9 Variation of volume fraction of gaseous working medium with time under 50 °C temperature difference

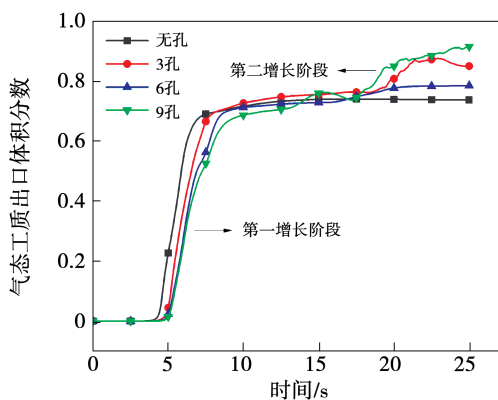


图10 70 °C温差下气态工质体积分数随时间的变化

Fig.10 Variation of volume fraction of gaseous working medium with time under 70 °C temperature difference

3 结论

(1) 在直接接触换热中,对SK型静态混合器合理的开孔可以有效地提高液-液-气三相的混合均匀度和湍流强度,达到强化换热的目的。在温差为30,50和70 °C 3种不同工况下,3孔式SK型静态混合器在直接接触换热中,混合效果分别是传统式SK型静态混合器的1.5,3.3和1.6倍,湍流强度分别为传统式SK型静态混合器的3.3,3.8和1.3倍。

(2) 在连续相与分散相较小的初始温差下,9孔式SK型静态混合器中液-液-气三相的混合效果没有传统式SK型静态混合器好,而在较大的初始温差下,9孔式SK型静态混合器的换热性能能达到最优。

(3) 在SK型静态混合器上合理的开孔能提高气态工质在直接接触蒸发器内的停留时间,从而强化换热。

(4) 在SK型静态混合器上合理的开孔增强了流体在直接接触换热器内的混合均匀度和湍流强度,进而达到强化换热的目的。

参考文献:

- [1] HUANG B, JIAN Q, LUO L, et al. Experimental study of enhancing heating performance of the air-source heat pump by using a novel heat recovery device designed for reusing the energy of the compressor shell [J]. Energy Conversion and Management, 2017, 138(1):38-44.
- [2] MANGRULKAR C K, DHOBLE A S, DESHMUKH A R, et al. Numerical investigation of heat transfer and friction factor characteristics from in-line cam shaped tube bank in crossflow [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 110:521-538.
- [3] NGUYEN D H, AHN H S. A comprehensive review on micro/nanoscale surface modification techniques for heat transfer enhancement in heat exchanger [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 178:1-36.
- [4] 刘伟,肖辉.基于增强协同与减少耗散的对流传热强化理论研究 [J]. 中国科学:技术科学, 2021, 51(10):1166-1177. LIU Wei, XIAO Hui. Theoretical research on enhancement of convective heat transfer based on enhanced synergy and reduced dissipation [J]. SCIENTIA SINICA Technologica, 2021, 51(10):1166-1177.
- [5] PERIS B, NAVARRO-ESBRI J, MOLES F, et al. Experimental study of an ORC (organic Rankine cycle) for low grade waste heat recovery in a ceramic industry [J]. Energy, 2015, 85(1):534-542.
- [6] BAQIR A S, MAHOOD H B, CAMPBELL A N, et al. Measuring the average volumetric heat transfer coefficient of a liquid-liquid-vapour direct contact heat exchanger [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 103:47-55.
- [7] MAHOOD H B, CAMPBELL A N, THORPE R B, et al. Heat transfer efficiency and capital cost evaluation of a three-phase direct contact heat exchanger for the utilisation of low-grade energy sources [J]. Energy Conversion & Management, 2015, 106:101-109.
- [8] 黄峻伟,王辉涛,王华,等. ORC直接接触式蒸发器传热性能研究 [J]. 动力工程学报, 2013, 33(12):969-973. HUANG Jun-wei, WANG Hui-tao, WANG Hua, et al. Research on heat transfer performance of ORC direct contact evaporator [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2013, 33(12):

- 969 - 973.
- [9] MAHATO S K, RANA S C, BARMAN R N. Effect of Al_2O_3 /water and CuO/water nanofluids on heat transfer enhancement flows through twisted clockwise-counter-clockwise square duct[J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2022, 47(7): 8141 - 8159.
- [10] 王宗勇, 陈超. 多流道螺旋静态混合器混合性能的数值模拟研究[J]. *中国机械工程*, 2013, 24(2): 268 - 273, 279. WANG Zong-yong, CHEN Chao. Numerical simulation of mixing performance in a multi-channel spiral static mixer[J]. *China Mechanical Engineering*, 2013, 24(2): 268 - 273, 279.
- [11] 翁祥宇, 严生虎, 张跃, 等. 一种基于特斯拉阀结构的微混合器设计、模拟及其试验研究[J]. *化工进展*, 2021, 40(8): 4173 - 4178. WENG Xiang-yu, YAN Sheng-hu, ZHANG Yue, et al. Design, simulation and experimental study of a micromixer based on Tesla valve structure[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2021, 40(8): 4173 - 4178.
- [12] 涂善东, 王正东, 顾伯勤. 新世纪的化工机械技术展望[J]. *化工进展*, 2003(3): 258 - 266. TU Shan-dong, WANG Zheng-dong, GU Bo-qin. Prospects of chemical machinery technology in the new century[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2003(3): 258 - 266.
- [13] 叶楚宝, 施龙生, 蔡志清. SK型静态混合器用于高黏度介质的强化传热[J]. *石化技术与应用*, 2006, 24(2): 118 - 120. YE Chu-bao, SHI Long-sheng, CAI Zhi-qing. Application of SK type static mixer to heating high viscosity medium[J]. *Petrochemical Technology & Application*, 2006, 24(2): 118 - 120.
- [14] 龚斌, 包忠平, 张春梅, 等. 混合元件数对SK型静态混合器流场特性的影响[J]. *化工学报*, 2009, 60(8): 1974 - 1980. GONG Bin, BAO Zhong-ping, ZHANG Chun-mei, et al. Effect of number of mixing elements on flow field in Kenics static mixer[J]. *CIESC Journal*, 2009, 60(8): 1974 - 1980.
- [15] 聂欣, 甄忠元, 吕明. 开缝式SK型静态混合器与可调涡旋静态混合器的性能数值优化[J]. *热力发电*, 2014, 43(11): 51 - 57. NIE Xin, ZHEN Zhong-yuan, LYU Ming. Numerical optimization of performance of slotted SK static mixer and adjustable vortex static mixer[J]. *Thermal Power Generation*, 2014, 43(11): 51 - 57.
- [16] FU Hai-ling. Heat transfer and residence time distribution of liquid flow in direct contact evaporation heat exchanger[J]. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 2020, 149: 107829. 1-107829. 10.
- [17] 王修纲, 郭瓦力, 吴剑华. 静态混合器中液液分散的实验及CFD模拟[J]. *化工学报*, 2012, 63(3): 767 - 774. WANG Xiu-gang, GUO Wa-li, WU Jian-hua. Experiment and CFD simulation of liquid-liquid dispersion in a static mixer[J]. *CIESC Journal*, 2012, 63(3): 767 - 774.
- [18] STREIFF F A, MATHYS P, FISCHER T U. New fundamentals for liquid-liquid dispersion using static mixers[J]. *Récents Progrès en Génie des Procédés*, 1997, 11: 307 - 314.
- [19] THAKUR R K, VIAL C, NIGAM K, et al. Static mixers in the process industries - a review[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2003, 81(7): 787 - 826.

(姜雪梅 编辑)