

文章编号: 0253-4339(2026)02-0085-10  
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20240920003

## 微通道分液冷凝器小流量下的传热性能与压降实验研究

钱蒲驰<sup>1</sup> 王德昌<sup>1</sup> 宋庆路<sup>1</sup> 周赛<sup>1</sup> 阎志建<sup>2</sup>

(1 青岛大学机电工程学院 青岛 266071; 2 海信冰箱有限公司 青岛 266071)

**摘要** 制冷剂质量流量为 1 g/s 以下的低质量流量下分液孔的大小和位置对分液冷凝器的性能有重要影响。对 R600a 在 5 种不同微通道分液冷凝器内的传热性能和压降进行了实验研究, 对不同制冷剂质量流量、入口空气温度和风量、冷凝压力下 5 种分液冷凝器的传热性能和压降特性进行分析。根据实验结果, 第二隔板开孔分液冷凝器传热性能优于第三隔板开孔分液冷凝器。制冷剂质量流量越大, 分液冷凝器制冷剂侧压降减小越明显。制冷剂质量流量为 0.60、0.40 g/s 时, 第二隔板开孔分液冷凝器制冷剂侧压降较未分液冷凝器分别降低 21.28%、17.29%。利用综合评价因子  $P_{EF}$  对比了不同开孔直径分液冷凝器的性能, 分液孔径为 1.2 mm 的分液冷凝器平均  $P_{EF}$  值为 1.58, 在所有分液冷凝器中最高, 综合性能最好。

**关键词** 分液冷凝器; 分液孔径; 分液隔板位置; 传热性能; 压降

中图分类号: TB657.5; TK124

文献标识码: A

## Experimental Study on Heat Transfer Performance and Pressure Drop of Microchannel Condenser with Liquid Separation

Qian Puchi<sup>1</sup> Wang Dechang<sup>1</sup> Song Qinglu<sup>1</sup> Zhou Sai<sup>1</sup> Yan Zhijian<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao University, Qingdao, 266071, China; 2. Hisense Refrigerator Co., Ltd., Qingdao, 266071, China)

**Abstract** The size and location of the separating holes at low mass flow rates ( $<1$  g/s) have a significant impact on the performance of condensers with liquid separation. The heat transfer performance and pressure drop of R600a in five microchannel condensers with liquid separation were studied experimentally. Additionally, the heat transfer performance and pressure drop characteristics of the five liquid separation condensers under different refrigerant mass flows, inlet air temperatures and velocities, and condensing pressures were analyzed. According to the experimental results, the heat-exchange performance of the condenser with liquid separation orifice at the second baffle was better than that at the third baffle. As the mass flow rate of the refrigerant increased, the refrigerant-side pressure drop in the liquid separation condenser decreased significantly. When the refrigerant mass flow rate was 0.60 g/s and 0.40 g/s, the refrigerant-side pressure drop of the condenser with liquid separation orifice on the second baffle was 21.28% and 17.29% lower, respectively, than that of the baseline condenser without liquid separation. The performances of the liquid separation condensers with different orifice diameters were compared using the comprehensive evaluation factor PEF. The average PEF value of the liquid separation condenser with an orifice size of 1.2 mm was 1.58. This was the highest among all the liquid separation condensers and yielded the best comprehensive performance.

**Keywords** liquid separation condenser; separating orifice size; separating orifice position; heat transfer performance; pressure drop

高效换热器可以提高制冷系统的能效, 对制冷行业的节能减排具有重要意义。在常规换热器的冷凝过程中, 液膜变厚会导致换热热阻增大, 从而降低传热系数。分液冷凝器作为近年来备受关注的高效换热器, 具有“短管冷凝, 中间排液, 全程等速”的特点<sup>[1]</sup>, 在冷凝过程中能够将冷凝液体排出, 提高下一流程工质的入口干度, 实现冷凝器的强化传热, 提高

制冷系统的能效, 减少冷凝器的传热面积<sup>[2-3]</sup>, 因此, 分液冷凝器在制冷系统中具有极大的应用潜力。

当前分液冷凝器按照分离方式的不同主要分为 T 型结构分液冷凝器<sup>[4]</sup>、U 形管分液冷凝器、多孔隔板分液冷凝器等。T 型结构分液冷凝器基于气液两相高速撞击壁面后分离的特点<sup>[5-6]</sup>, 其分离效率对制冷剂流速有一定要求, 且只能实现一次分离, 分离效率

基金项目: 国家自然科学基金(52106016)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52106016).)

收稿日期: 2024-09-20; 修回日期: 2024-12-03; 录用日期: 2024-12-06

较低。U型管具有良好的气液分离能力,对管口实现液封的同时可以有效阻隔气体流出。刘策等<sup>[7]</sup>在三管程风冷换热器中加入一级和二级分液器,对3 mm和6 mm管径的分液管分液量进行了实验研究。实验结果表明,6 mm管径的分液管比3 mm管径的分液管分液量提高了20%~50%,提升了下一流程的入口干度,从而使换热器的整体传热系数提升。大量实验证明U型管分液冷凝器具有优异的传热性能<sup>[8-9]</sup>,但U型管如何在全铝换热器内进行装配以及U型管与隔板的固定问题在工艺中仍然具有较大的挑战性。多孔隔板分液冷凝器具有结构简单、制作成本低、制作工艺简单的优点,是研究最为广泛的分液冷凝器类型。Chen Ying等<sup>[10-11]</sup>提出在联箱隔板上开大小不同的孔,将部分冷凝液体从通孔中排出,可以提高下一流程的入口干度,从而强化换热器的换热能力。Zhong Tianming等<sup>[12-15]</sup>对分液冷凝器进行流程优化,在同样工况下对比分液冷凝器与平行流冷凝器的性能,用惩罚因子和最小熵增数作为不同冷凝器的性能评价指标,发现分液冷凝器综合性能最优,且分液冷凝器能提高空调系统的性能。Huang Kunteng等<sup>[16]</sup>采用VOF模型通过数值仿真揭示了制冷剂在联箱内的气液分离特性,选用 $k-\varepsilon$ 湍流模型,分别在不同操作工况下对不同工质经过小孔分离的过程进行了分析<sup>[17-18]</sup>。结果表明分液孔直径决定了分液效率,开孔直径为1.5 mm时,得到了最好的气液分离效率。

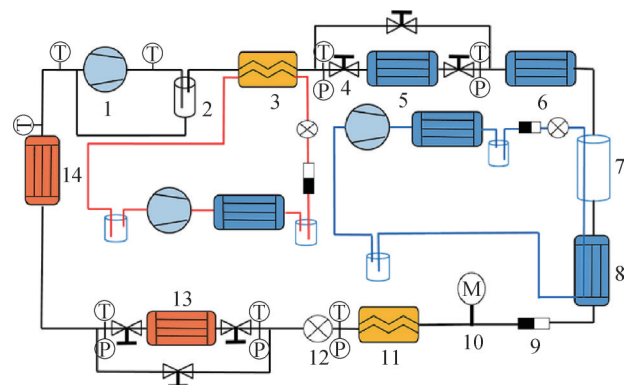
目前,多孔隔板分液冷凝器的研究大多集中在入口干度、凹槽深度、流程优化等对分液冷凝器的影响,很少开展开孔直径和开孔位置对分液冷凝器性能影响的研究,缺乏合理分液孔大小和位置的设计指导,且当前主要对高制冷剂质量流量10~40 g/s下分液冷凝器性能的研究较多,对1 g/s以下的低制冷剂质量流量时分液孔的分液能力尚不清楚。本研究利用小微型换热器性能测试实验台,在低质量流速下对不同开孔位置、开孔直径的分液冷凝器进行换热和流动特性实验研究,以期为多孔隔板分液冷凝器的合理设计提供指导。

## 1 实验装置和方法

### 1.1 实验系统及设备

小微型换热器性能测试实验台由环境模拟室和制冷剂循环机组组成,实验系统如图1所示。本实验系统的可靠性和准确性在之前的研究工作中得到了验证<sup>[19]</sup>。实验测量的参数包括温度、压力、制冷剂质

量流量及压差。



1 压缩机; 2 油分离器; 3 预热器1; 4 截止阀; 5 测试冷凝器; 6 辅助冷凝器; 7 储液器; 8 过冷器; 9 干燥过滤器; 10 质量流量计; 11 预热器2; 12 膨胀阀; 13 测试蒸发器; 14 电加热器。

图1 制冷剂循环系统

Fig.1 Refrigerant circulation system

### 1.2 测试方法

将测试冷凝器接入实验系统并抽真空保压30 min后,打开测试段前后球阀,使测试换热器与制冷剂系统连接在一起,循环制冷剂为R600a。实验所用传感器的精度如表1所示。测试冷凝器为微通道平行流冷凝器,如图2所示。实验测试对象为6个微通道平行流冷凝器,其分液结构及参数如表2所示,其中#1为未分液平行流冷凝器,#2和#3用来对比不同分液隔板位置对分液冷凝器的影响,#3、#4、#5、#6用来对比第二隔板上不同分液孔径对分液冷凝器的影响。实验段4个管程的管数为5-5-4-3,在每个管程进出口布置共10个热电偶测量壁面温度。为防止空气侧对温度测量的影响,每根热电偶测点先用铝箔胶带粘在换热器表面对应位置,再用10 mm×10 mm厚度为10 mm的海绵条覆盖测温传感器,传感器布置如图3所示。分液隔板结构如图4所示,经过打孔打磨后送入钎焊炉焊接。在实验结束后割开样品,以便测量分液孔尺寸。

表1 测量仪器的参数

Tab.1 Specification of the measuring instruments

名称	量程	精度
质量流量计	0~0.6 kg/min	±0.10%
制冷剂压力传感器	0~1.5 MPa	±0.04%
红外热成像仪	-40~650 °C	±2%
制冷剂温度传感器	-270~400 °C	±(0.075 °C+0.001 5t)
大气压力传感器	80~120 kPa	±0.2%
控温温度传感器	-60~260 °C	±(0.15 °C+0.002t)

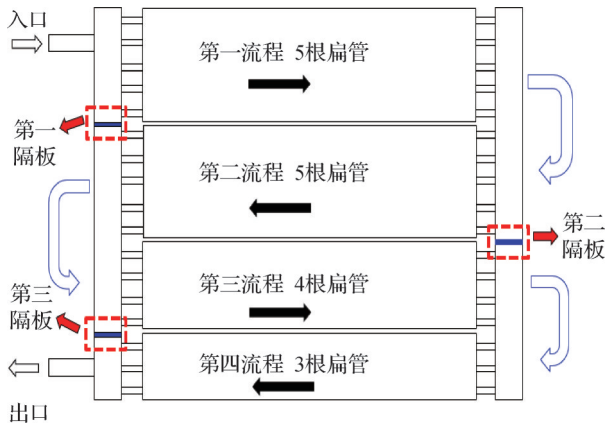


图 2 微通道平行流冷凝器

Fig.2 Microchannel parallel-flow condenser

表 2 测试冷凝器分液结构及参数

Tab.2 Structural parameters of the condenser

冷凝器	开孔分液隔板	分液孔径/mm
#1	未分液	
#2	第三隔板	2
#3	第二隔板	2
#4	第二隔板	1.6
#5	第二隔板	1.2
#6	第二隔板	0.8

### 1.3 数据处理

制冷剂换热量:

$$Q = m_r(h_{e1} - h_{e2}) \quad (1)$$

式中:  $Q$  为冷凝器所释放的总的换热量,  $W$ ;  $m_r$  为系统稳定运行工况下的制冷剂质量流量,  $g/s$ ;  $h_{e1}$ 、 $h_{e2}$  分别

为冷凝器进口的制冷剂焓值和冷凝器出口的制冷剂焓值,  $J/kg$ 。

制冷剂侧传热系数:

$$\alpha = \frac{Q}{A(T_b - T_w)} \quad (2)$$

式中:  $A$  为冷凝器内表面积,  $m^2$ ;  $T_b$  为制冷剂进出口平均温度,  $^{\circ}C$ ;  $T_w$  为冷凝器壁面平均温度,  $^{\circ}C$ 。

制冷剂侧压降:

$$\Delta p = p_4 - p_5 \quad (3)$$

式中:  $p_4$ 、 $p_5$  分别为冷凝器进、出口制冷剂压力,  $kPa$ 。

综合评价因子  $P_{EF}^{[20]}$ :

$$P_{EF} = \left( \frac{\alpha_1}{\alpha_r} \right) / \left( \frac{\Delta p_1}{\Delta p_r} \right) \quad (4)$$

式中:  $\alpha_1$  为分液冷凝器制冷剂侧传热系数,  $W/(m^2 \cdot K)$ ;  $\Delta p_1$  为分液冷凝器制冷剂侧压降,  $kPa$ ;  $\alpha_r$  和  $\Delta p_r$  分别为未分液冷凝器的制冷剂侧传热系数 ( $W/(m^2 \cdot K)$ ) 和压降 ( $kPa$ )。

### 1.4 实验不确定度

对实验中的直接测量参数和计算参数进行不确定度分析, 计算参数的不确定度由不确定度传递公式<sup>[11]</sup>进行分析。实验中各测量参数的不确定度如表 3 所示。

## 2 分液孔位置对分液冷凝器的影响

### 2.1 分液孔位置对冷凝器外表面温度的影响

分液孔位置对冷凝器外表面温度的影响如图 5 所示。由图 5 可知, 未分液冷凝器表面温度随着流动

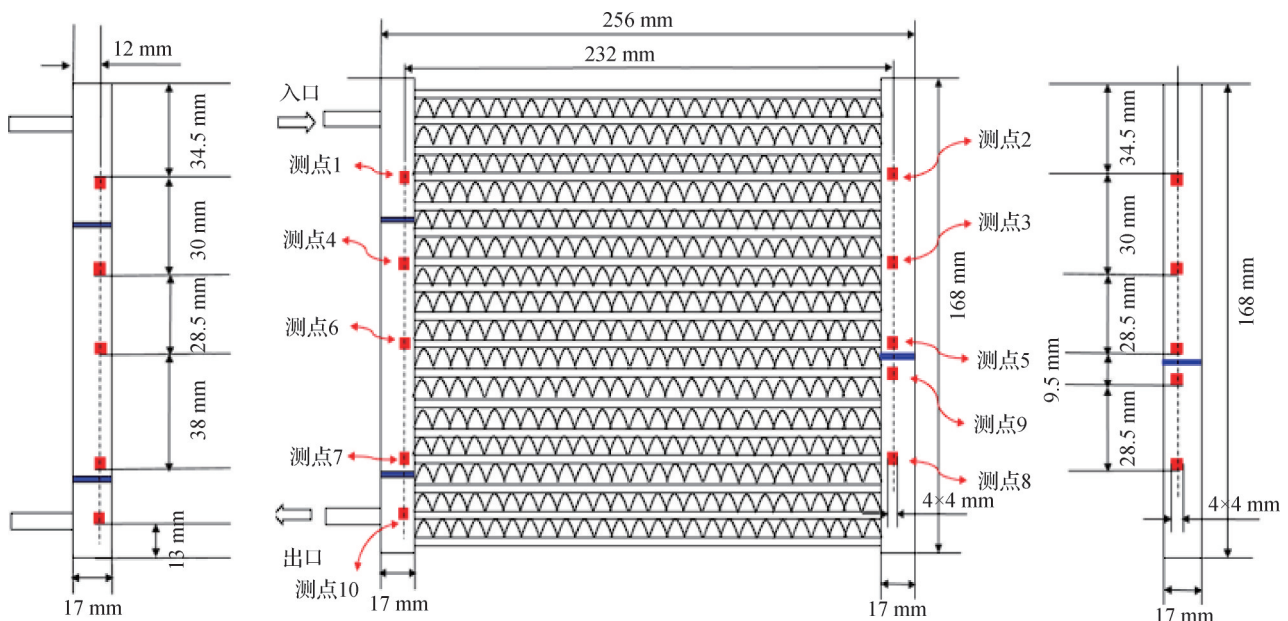


图 3 温度传感器测点布置

Fig.3 Arrangement of temperature sensor measurement points



图 4 分液隔板结构

Fig.4 Structure of the separator

表 3 不确定度分析表

Tab.3 Uncertainty analysis

参数	不确定度
温度	$\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$
压力	$\pm 0.04\%$
制冷剂质量流量	$\pm 0.1\%$
换热量	$\pm 2.63\%$
制冷剂侧压降	$\pm 1.3\%$
制冷剂侧传热系数	$\pm 3.3\%$

长度的增加逐渐降低。由图 5(a)可知,第三隔板开孔分液冷凝器第三流程入口温度较未分液冷凝器高  $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,较第二隔板开孔分液冷凝器高  $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。原因是第三隔板开孔的分液冷凝器在第三流程入口进行气液分离,导致第三流程入口温度升高。第二隔板开孔的分液冷凝器在第二流程入口进行了气液分离导致第二流程入口干度提高,出现了换热强化区,换热器表面温度变得均匀。第二隔板开孔分液将饱和液体分入第三流程出口,导致第三流程出口温度升高,由图 5(b)可知,第二隔板开孔分液冷凝器第三流程出口温度较未分液冷凝器高  $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,较第三隔板开孔分液冷凝器高  $2.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

### 2.2 分液孔位置对传热性能的影响

不同风量和制冷剂质量流量下分液孔位置对换热量的影响如图 6 所示,分液冷凝器的换热量随着风量  $v_a$  和制冷剂质量流量  $m_r$  的增加而增加。第三隔板开孔分液冷凝器的换热量始终低于其他冷凝器,这是由于第三隔板位于第三流程和第四流程之间,第三隔板上沉积的冷凝饱和液体和部分蒸气通过分液孔直接流到冷凝器出口,提高了冷凝器的出口制冷剂温度,从而降低了冷凝器的出口制冷剂过冷度。

由图 5 可知,制冷剂质量流量为  $0.44\text{ g/s}$  时第二隔板开孔分液冷凝器出口过冷度较第三隔板开孔分

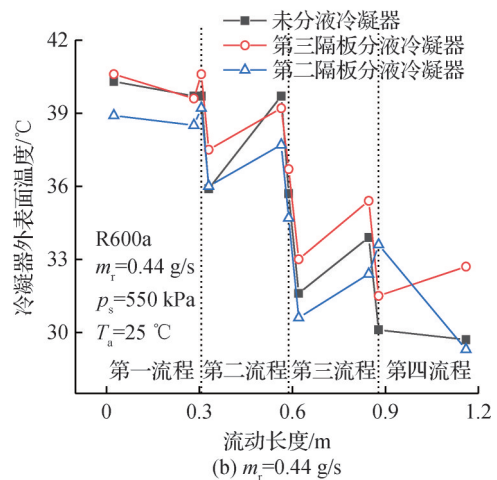
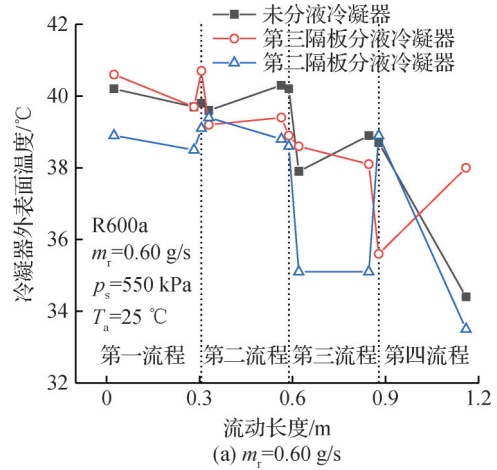


图 5 分液孔位置对冷凝器外表面温度的影响

Fig.5 Effect of separator hole position on condenser surface temperature

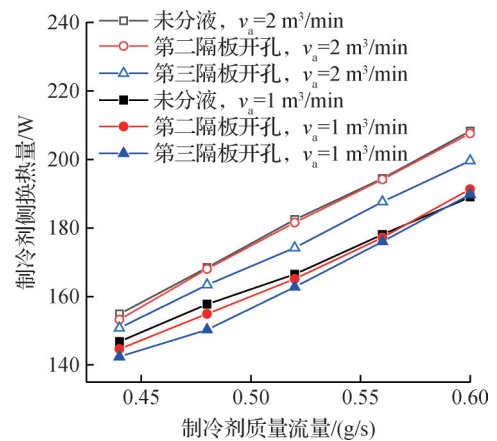


图 6 不同风量和制冷剂质量流量下分液孔位置对换热量的影响

Fig.6 Effect of separator hole position on heat transfer under different air volumes and refrigerant mass flow rates

液冷凝器高  $4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;制冷剂质量流量为  $0.60\text{ g/s}$  时第二隔板开孔分液冷凝器出口温度较第三隔板开孔分液冷凝器低  $3.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,因此,第二隔板开孔分液冷凝器的换热量始终高于第三隔板开孔分液冷凝器。

不同冷凝压力下分液孔位置对换热量的影响如图 7 所示,分液冷凝器换热量随着冷凝压力的升高而增大。由图 7 可知,当冷凝压力为 510 kPa 时,第二隔板开孔分液冷凝器的换热量较第三隔板开孔分液冷凝器高约 3 W,而随着冷凝压力的升高,第二隔板开孔分液冷凝器的换热量接近未分液冷凝器。原因是随着冷凝压力的升高,制冷剂气相密度增大,流速降低,且冷凝压力的升高导致冷凝温度升高,换热器内外换热温差增加,使得第二隔板上的冷凝液体量增多,第二隔板分液孔排液速度减慢,气液分离效果变差,因此,在冷凝压力为 570 kPa 时第二隔板开孔分液冷凝器的换热量较未分液冷凝器提升不明显。

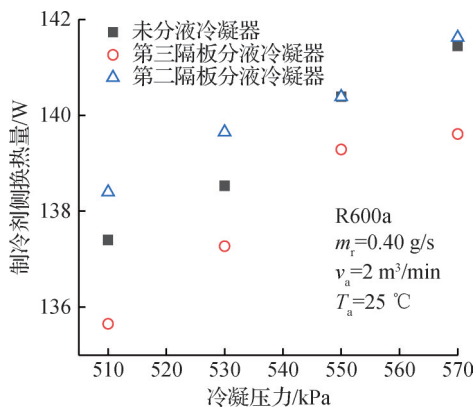


图 7 不同冷凝压力下分液孔位置对换热量的影响

Fig.7 Effect of separator hole position on heat exchange capacity under different condensation pressures

不同环境温度下分液孔位置对换热量的影响如图 8 所示,分液冷凝器的换热量随着环境温度的升高而降低。由图 8 可知,环境温度越低,分液冷凝器的换热能力越强。当制冷剂质量流量为 0.60 g/s,环境温度为 16 °C,第二隔板开孔分液冷凝器的换热量较第三隔板开孔分液冷凝器提高 3.27%;制冷剂质量流量为 0.60 g/s,环境温度为 32 °C 时,第二隔板开孔分液冷凝器的换热量较第三隔板开孔分液冷凝器提高 1.16%。在环境温度为 25 °C 条件下,制冷剂质量流量为 0.40 g/s 时,第二隔板开孔分液冷凝器的换热量高于另外 2 种冷凝器;而当制冷剂质量流量为 0.60 g/s 时,第二隔板开孔分液冷凝器的换热量低于未分液冷凝器。这是由于随着环境温度的降低,冷凝器与空气的传热温差减小,冷凝速度减慢,沉积在第二隔板上的冷凝液体减少。平行流冷凝器隔板上下压差如图 9 所示,隔板上下压差随着制冷剂质量流量增大而增大,通过分液孔流入第三流程的制冷剂增多,冷凝器内制冷剂流速迅速降低,导致制冷剂质量流量

为 0.60 g/s 时第二隔板开孔分液冷凝器换热量低于未分液冷凝器。而制冷剂质量流量为 0.44 g/s 时,隔板上下几乎没有压差,此时在压差作用下通过分液孔流入第三流程的制冷剂减少,且第二流程强化换热的作用导致第二隔板开孔分液冷凝器的换热量高于未分液冷凝器。

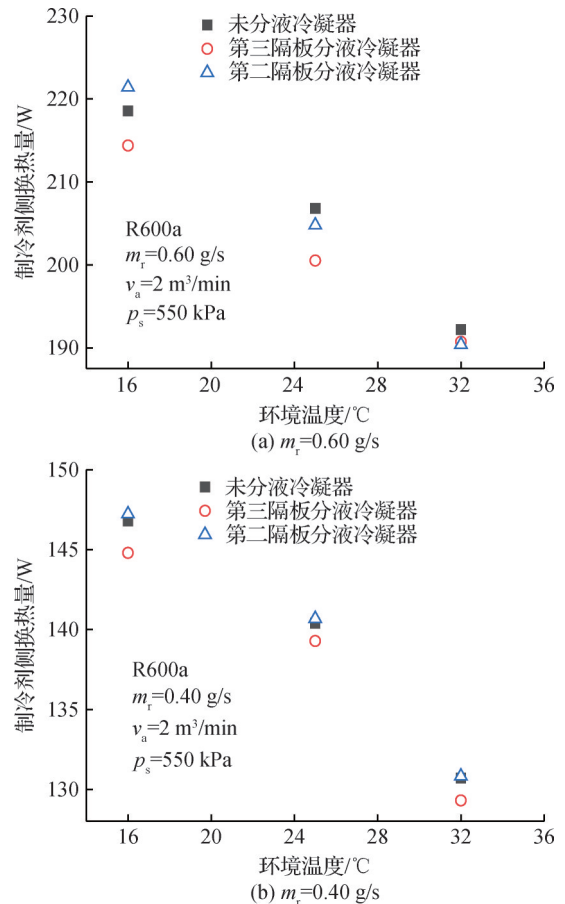


图 8 不同环境温度下分液孔位置对换热量的影响

Fig.8 Effect of separator hole position on heat exchange capacity at different ambient temperatures

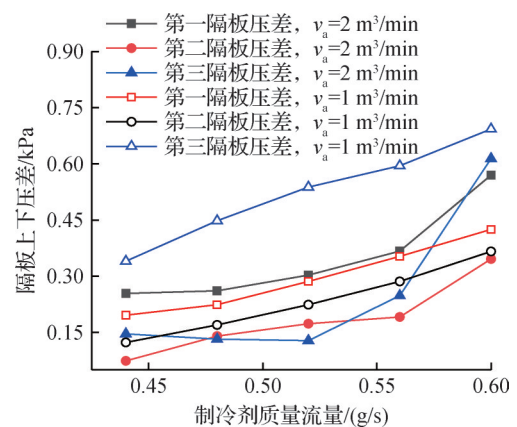


图 9 平行流冷凝器隔板上下压差

Fig.9 Differential pressure between the upper and lower parts of the parallel flow condenser separator

### 2.3 分液孔位置对换热器内制冷剂流动特性的影响

不同制冷剂质量流量下分液孔位置对制冷剂侧压降的影响如图 10 所示。由图 10 可知,分液冷凝器制冷剂侧压降随着质量流量的增大而增大,随着风量的增加而减小。在所有工况下,分液冷凝器的制冷剂侧压降均低于未分液冷凝器。原因是分液孔的存在导致部分制冷剂流入下一流程,降低了当前流程制冷剂的流速,进而气液两相速度差减小,降低了冷凝过程中的两相摩擦压降。不同环境温度下分液孔位置对制冷剂侧压降影响如图 11 所示,分液冷凝器隔板上下压差如图 12 所示。由图 11 可知,环境温度为 25 °C,风量为 2 m<sup>3</sup>/min,制冷剂质量流量为 0.60 g/s 时,第二隔板开孔分液冷凝器制冷剂侧压降较未分液冷凝器降低 21.28%;制冷剂质量流量为 0.40 g/s 时,第二隔板开孔分液冷凝器制冷剂侧压降较未分液冷凝器降低 17.29%。在不同环境温度下,第二隔板开孔分液冷凝器制冷剂侧压降较未分液冷凝器制冷剂侧压降降低 10.32%~34.42%(图 11),且随着制冷剂质量流量的增大,制冷剂侧压降降低越明显。这是由于冷凝器隔板上下压差随制冷剂质量流量的增大而增大(图 12),当制冷剂质量流量为 0.60 g/s 时,隔板上下压差增大,此时在压差作用下通过分液孔的制冷剂流速加快,第二流程和第三流程流速减慢,气液相之间的剪切力减小,两相之间的摩擦压降降低。

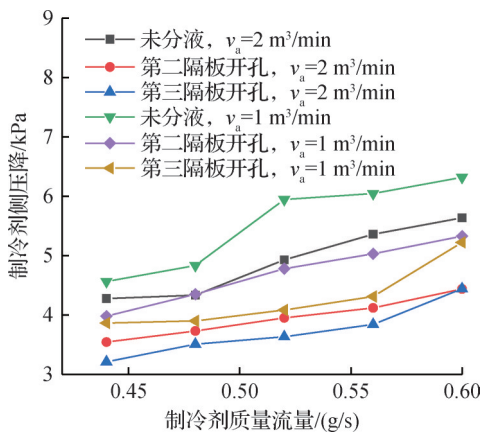


图 10 不同制冷剂质量流量下分液孔位置对制冷剂侧压降的影响

Fig.10 Effect of separating hole position on refrigerant side pressure drop under different refrigerant mass flow rates

根据实验结果,第二隔板开孔分液冷凝器在环境温度为 16 °C 和低制冷剂质量流量下传热性能始终高于未分液冷凝器和第三隔板开孔分液冷凝器,且制冷剂侧压降较未分液冷凝器降低 10.32%~

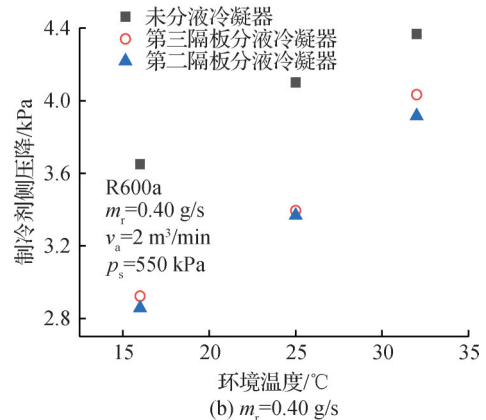
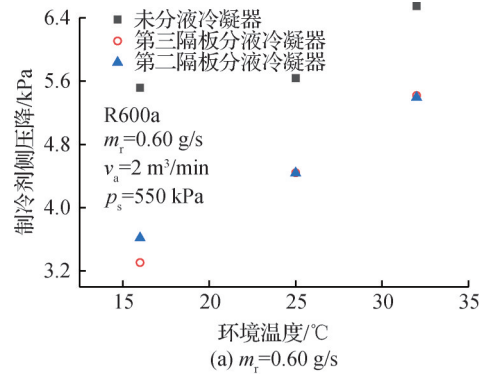


图 11 不同环境温度下分液孔位置对制冷剂侧压降影响

Fig.11 Effect of separating hole position on refrigerant side pressure drop at different ambient temperatures

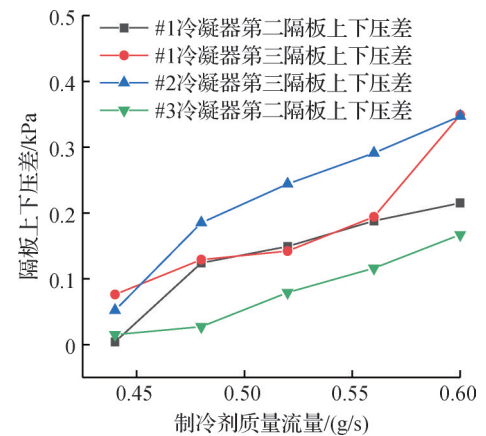


图 12 分液冷凝器隔板上下压差

Fig.12 Pressure difference between the upper and lower parts of the parallel flow condenser separator

34.42%,第二隔板开孔分液冷凝器对冷凝器性能的提升效果最好。

### 3 分液孔直径对分液冷凝器的影响

#### 3.1 分液孔直径对冷凝器表面温度的影响

分液孔直径对冷凝器表面沿程温度的影响如图 13 所示。由图 13 可知,未分液冷凝器第二流程出口温度始终高于分液冷凝器,这是由于第二隔板进行

气液分离后,进入第二流程制冷剂干度提高,流速降低,冷凝液膜变薄,从而使得冷凝换热得到强化,出口温度降低。而未分液冷凝器在冷凝过程中具有较厚的液膜,这导致了较大的传热阻力,因此,未分液冷凝器第二流程出口温度始终高于其他分液冷凝器。随着制冷剂质量流量的降低,不同分液孔径的分液冷凝器出口温度差开始减小。这是因为分液冷凝器虽然强化了冷凝器的换热能力,但随着出口过冷度增大,制冷剂与环境温度的温差减小,换热的驱动力减弱,出口温度变化幅度变小。制冷剂质量流量为 0.60 g/s 时,分液孔径为 1.6 mm 的分液冷凝器制冷剂出口温度最低降低了 3.3 °C;制冷剂质量流量为 0.44 g/s 时,分液孔径为 0.8 mm 的冷凝器制冷剂出口温度最低降低了 2.8 °C。在不同制冷剂质量流量下,分液孔径为 1.2 mm 的分液冷凝器制冷剂平均出口温度最低。

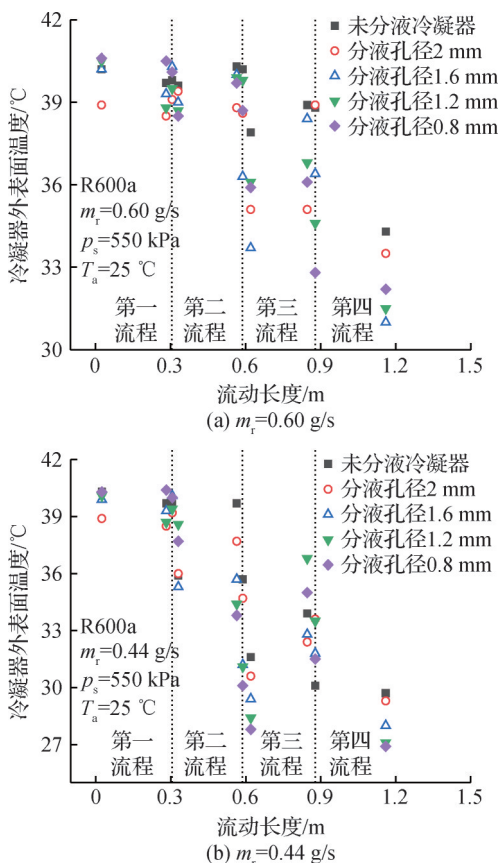


图 13 分液孔直径对冷凝器表面沿程温度的影响  
Fig.13 Effect of separating hole diameter on the temperature along the surface of the condenser

### 3.2 分液孔直径对冷凝器换热性能的影响

不同风量下换热量随分液孔直径的变化如图 14 所示,分液冷凝器的换热量随着风量的增加而增加。由图 14 可知,当分液孔为 2 mm 时,随着质量流量的

增大,冷凝器内隔板上沉积的冷凝液体变少,液体无法有效形成液封,部分气体流入第四流程,分流出的制冷剂增加。这会导致分液冷凝器内的流速减慢,强制对流减弱,虽然第二流程的入口干度增加,但管内强制对流减弱对换热的影响仍大于入口干度对冷凝换热的影响,所以开孔直径为 2 mm 时冷凝器换热量较未分液时低。

随着孔径的降低,分流的制冷剂量开始减少,隔板上的液体液位逐渐升高,冷凝器内制冷剂流速逐渐增加,同时第三流程入口由于气液分离,干度提高,提升了第三流程的换热能力,因此,换热量随着孔径的减小逐渐增加。风量  $v_a$  为 1.5 m<sup>3</sup>/min,分液孔径为 0.8 mm 时的换热量较分液孔径为 2 mm 时增加 4.51%,较未分液冷凝器增加 2.13%。

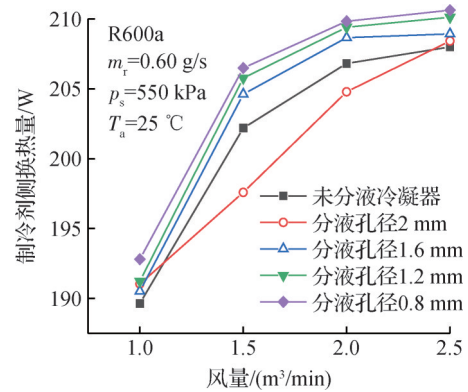


图 14 不同风量下换热量随分液孔直径变化  
Fig.14 Heat exchange capacity varies with the diameter of the separating hole under different air volumes

### 3.3 分液孔直径对制冷剂侧压降的影响

在冷凝传热过程中制冷剂侧压降的主要来源是两相摩擦压降,不同风量下分液孔直径对制冷剂侧压降的影响如图 15 所示,在分液冷凝器内两相摩擦压降随着质量流速的增加而增加。由图 15 可知,制冷剂侧压降随着风量的增大而减小,随着孔径的减小而增大。这是由于分液孔径大小决定了毛细力的大小,分液孔径越大,毛细力越小,通过分液孔流入隔板下部的制冷剂流速加快,冷凝过程制冷剂流速减慢,气液相之间的速度差减小,摩擦压降降低。

当制冷剂质量流量为 0.60 g/s 时,分液孔径为 1.2 mm 时制冷剂侧压降较分液孔径为 2 mm 时增大 0.4%~5.72%,较未分液冷凝器降低 18.02%~21.2%。制冷剂质量流量为 0.40 g/s 时,分液孔径为 1.2 mm 时制冷剂侧压降较分液孔径为 2 mm 时增大 8.7%~10.14%,较未分液冷凝器降低 6.4%~13.09%。

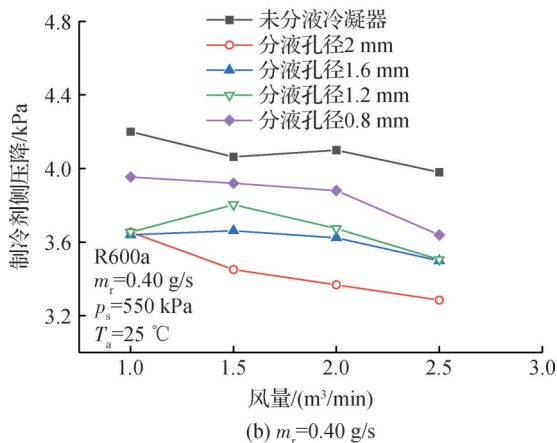
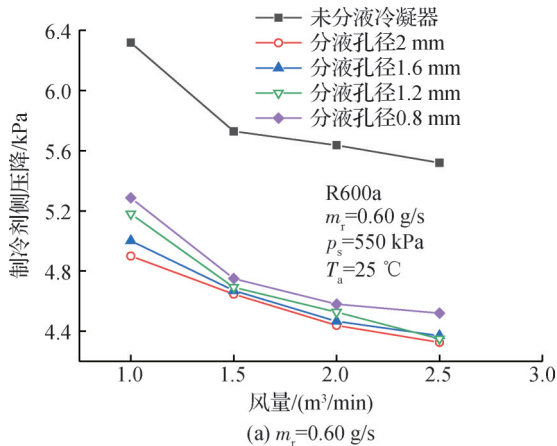


图 15 不同风量下分液孔直径对制冷剂侧压降的影响  
Fig.15 Effect of separating hole diameter on refrigerant side pressure drop under different air volumes

### 3.4 分液冷凝器综合评价因子分析

为对比不同分液冷凝器的综合性能,采用性能评价参数  $P_{EF}$  来评价不同分液冷凝器热力性能,  $P_{EF}$  越大,说明冷凝器的综合性能越好。

不同流量下冷凝器综合评价因子如图 16 所示。由图 16 可知,在制冷剂质量流量为 0.44 g/s 时,1.2 mm 分液孔径的分液冷凝器的  $P_{EF}$  达到最大值 1.59,这是由于  $P_{EF}$  表示单位压降比值下的传热系数之比,在不同制冷剂质量流量下分液孔径为 1.2 mm 时分液冷凝器出口温度较未分液冷凝器低 2.6~2.8 °C,提高了冷凝传热系数,且制冷剂侧压降较未分液冷凝器低 6.4%~21.37%,所以其  $P_{EF}$  增大。1.2 mm 分液孔径的分液冷凝器平均  $P_{EF}$  为 1.58,在所有分液冷凝器中最高,因此,分液孔径为 1.2 mm 的分液冷凝器综合性能最好。

## 4 结论

本文在现有冰箱用平行流冷凝器结构基础上进行分液设计,对不同制冷剂质量流量、环境温度、风量和冷凝压力下,制冷剂 R600a 在 5 个不同微通道分

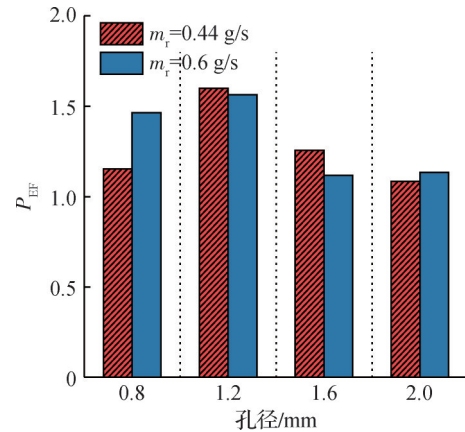


图 16 不同流量下冷凝器综合评价因子

Fig.16 Comprehensive evaluation factors of condenser under different flow rates

液冷凝器的传热性能和制冷剂侧压降进行了实验研究,通过实验数据对比分析,得到如下结论:

1)第二隔板开孔分液冷凝器在环境温度为 16 °C 和低质量流量下,传热性能始终高于未分液冷凝器和第三隔板开孔分液冷凝器,第二隔板开孔分液冷凝器对冷凝器性能提升效果最好。

2)随着制冷剂质量流量的增加,分液冷凝器制冷剂侧压降相比未分液冷凝器,减小得越明显。在不同环境温度下,第二隔板开孔分液冷凝器的制冷剂侧压降较未分液冷凝器制冷剂侧压降低 10.32%~34.42%。

3)分液冷凝器的制冷剂出口温度始终低于未分液冷凝器的出口温度。制冷剂质量流量为 0.60 g/s 时,分液孔径为 1.6 mm 的分液冷凝器制冷剂出口温度最低降低了 3.3 °C;制冷剂质量流量为 0.44 g/s 时,分液孔径为 0.8 mm 的冷凝器制冷剂出口温度最低降低了 2.8 °C。在不同制冷剂质量流量下,分液孔径为 1.2 mm 的分液冷凝器制冷剂平均出口温度最低。

4)分液冷凝器的制冷剂侧压降随着风量的增大而减小,随着分液孔径的减小而增大。在不同制冷剂质量流量下第二隔板分液孔径为 1.2 mm 的分液冷凝器出口温度较未分液冷凝器低 2.6~2.8 °C,制冷剂侧压降较未分液冷凝器低 6.4%~21.2%,且平均  $P_{EF}$  为 1.58,在所有分液冷凝器中最高,综合性能最好。

本文受山东省青年科技人才托举工程项目(SDAST2024QTA048)资助。(The project was supported by Young Talent of Lifting Engineering for Science and Technology in Shandong, China (No. SDAST2024QTA048).)

符号说明

- $m_r$ ——制冷剂质量流量, g/s
- $p_s$ ——冷凝压力, kPa
- $v_a$ ——空气侧风量,  $m^3/min$
- $T_a$ ——空气进口温度,  $^{\circ}C$

参考文献

- [1] 彭晓峰, 吴迪, 张扬. 高性能冷凝器技术原理与实践 [J]. 化工进展, 2007, 26(1): 97-104. (PENG Xiaofeng, WU Di, ZHANG Yang. Applications and principle of high performance condensers [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2007, 26(1): 97-104.)
- [2] LI Jian, LIU Qiang, DUAN Yuanyuan, et al. Performance analysis of organic Rankine cycles using R600/R601a mixtures with liquid-separated condensation [J]. Applied Energy, 2017, 190: 376-389.
- [3] CHEN Jianyong, YANG Nuo, LI Junjie, et al. Evaluations of heat pump water heater with liquid-separation condensation from perspectives of performance enhancement and heat exchange area reduction [J]. International Journal of Refrigeration, 2024, 161: 21-30.
- [4] LI J, HRNJAK P. Separation in condensers as a way to improve efficiency [J]. International Journal of Refrigeration, 2017, 79: 1-9.
- [5] LI J, HRNJAK P. Visualization and quantification of separation of liquid-vapor two-phase flow in a vertical header at low inlet quality [J]. International Journal of Refrigeration, 2018, 85: 144-156.
- [6] LI Wanyong, TU Jian, LIU Yusheng, et al. Design and experimental validation of a new condenser of an automotive air conditioning unit to address non-uniform air velocity distributions [J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 131: 834-846.
- [7] 刘策, 贾力, 张旋. R134a在风冷分液式冷凝换热器中的换热性能研究 [J]. 工程热物理学报, 2019, 40(7): 1620-1626. (LIU Ce, JIA Li, ZHANG Xuan. Study on heat transfer performance of R134a in air-cooling liquid-vapor separation condenser [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2019, 40(7): 1620-1626.)
- [8] 孙鼎皓, 贾力, 党超. 风冷式翅片管分液冷凝器的实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2023, 44(9): 2572-2577. (SUN Dinghao, JIA Li, DANG Chao. Experimental study on air-cooled finned-tube condenser with liquid-vapor separators [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2023, 44(9): 2572-2577.)
- [9] LIU Ce, JIA Li, ZHANG Xuan, et al. Analysis of the heat transfer characteristics of the liquid-vapor separation condenser based on a condensate growth model in horizontal tube [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 163: 114307.
- [10] CHEN Ying, HUA Nan, DENG Lisheng. Performances of a split-type air conditioner employing a condenser with liquid-vapor separation baffles [J]. International Journal of Refrigeration, 2012, 35(2): 278-289.
- [11] CHEN Xueqing, CHEN Ying, DENG Lisheng, et al. Experimental verification of a condenser with liquid-vapor separation in an air conditioning system [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 51(1/2): 48-54.
- [12] ZHONG Tianming, CHEN Ying, HUA Nan, et al. In-tube performance evaluation of an air-cooled condenser with liquid-vapor separator [J]. Applied Energy, 2014, 136: 968-978.
- [13] ZHONG Tianming, CHEN Ying, ZHENG Wenxiong, et al. Experimental investigation on microchannel condensers with and without liquid-vapor separation headers [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 73(2): 1510-1518.
- [14] ZHONG Tianming, DING Lixing, CHEN Shu, et al. Effect of a double-row liquid-vapor separation condenser on an air-conditioning unit performance [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 142: 476-482.
- [15] ZHONG Tianming, YANG Junrong, DING Lixing, et al. Heat transfer enhancement of actively-adjusting liquid-vapor in a double-row microchannel condenser [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2023, 47: 103110.
- [16] HUANG Kunteng, LI Junjie, CHEN Jianyong, et al. Explorations of multi-pass-orifice header in the liquid-separation condenser by using CFD simulation [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2023, 200: 123482.
- [17] 黄鲲鹏, 陈健勇, 陈颖, 等. 联箱-小孔型气液分离器的CFD数值模拟 [J]. 制冷学报, 2022, 43(1): 158-166. (HUANG Kunteng, CHEN Jianyong, CHEN Ying, et al. Simulation of vapor-liquid separation in header-baffle with hole using computational fluid dynamics [J]. Journal of Refrigeration, 2022, 43(1): 158-166.)
- [18] HUANG Kunteng, CHEN Jianyong, CHEN Ying, et al. Simulation of vapor-liquid separation in the orifice-baffle header under various operating conditions [J]. Applied Sciences, 2022, 12(16): 7971.
- [19] CAO Xue, WANG Xiaohu, SONG Qinglu, et al. Experimental investigation on the heat transfer and pressure drop characteristics of R600a in a minichannel condenser with different inclined angles [J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 196: 117227.
- [20] 王栋, 陶银双, 鲁月红, 等. 超临界CO<sub>2</sub>在螺旋槽管式换热器中的冷却换热 [J]. 低温与超导, 2024, 52(1): 58-64. (WANG Dong, TAO Yinshuang, LU Yuehong, et al. Cooling heat transfer of supercritical CO<sub>2</sub> in spiral

grooved tube heat exchanger [J]. *Cryogenics & Superconductivity*, 2024, 52(1): 58-64.)

#### 通信作者简介

王德昌,男,教授,青岛大学机电工程学院,0532-85952229, E-mail: wdechang@163.com。研究方向:换热器性能,吸收式制冷系统,热泵与储能。

#### About the corresponding author

Wang Dechang, male, professor, School of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao University, 86-532-85952229, E-mail: wdechang@163.com. Research fields: heat exchanger performance, absorption refrigeration system, heat pump and energy storage.