

文章编号:0253-4339(XXXX)XX-0001-08
doi: 10.12465/issn.0253-4339.20250516001

采用非共沸工质的联箱-小孔型气液分离单元实验研究

陈广浩 和芸芸 陈健勇 陈颖 罗向龙 梁颖宗 何嘉诚

(广东工业大学材料与能源学院 广州 510006)

摘要 气液分离技术能在实现强化传热的同时降低压降,气液分离单元是实现高效气液分离的关键。本文基于联箱-小孔型气液分离单元的可视化实验台,采用非共沸工质 R1234ze(E)/R32(质量分数比为 80/20),研究了不同条件下的气液分离特性,获得了有效分液范围。结果表明,提高入口干度、降低入口质量流量、增大下出口支管流通截面积或扩大分液孔径,均可提升分液效率,其中入口质量流量对分液效率影响最大。在有效分液区,当流量从 18 g/s 变成 12 g/s 时,分液效率提升 14.0%。入口质量流量、阀门开度和分液孔径对有效分液干度范围影响较小;但对于有效分液区干度范围偏移、入口质量流量影响最大,分液孔径次之,阀门开度最小。

关键词 联箱-小孔型气液分离单元;气液分离;非共沸工质;分液效率

中图分类号: TB61*1;TB61*2

文献标识码: A

Experimental Study on Header-Orifice Vapor-Liquid Separation Unit Using Zeotropic Mixture

Chen Guanghao He Yunyun Chen Jianyong Chen Ying Luo Xianglong
Liang Yingzong He Jiacheng

(Guangdong University of Technology, School of Materials and Energy, Guangzhou, 510006, China)

Abstract Vapor-liquid separation technology can enhance heat transfer while reducing pressure drop. The vapor-liquid separation unit is key to achieving efficient vapor-liquid separation. A visualization experiment of the header-orifice separator is conducted in this study using the zeotropic mixture R1234ze(E)/R32 (mass fraction ratio, 80/20) to investigate the vapor-liquid separation characteristics under different conditions and obtain the effective separation range. The results show that increasing the inlet dryness vapor quality, reducing the inlet mass-flow rate, increasing the flow cross-sectional area of the lower outlet branch, and expanding the separation aperture can improve the separation efficiency, among which the inlet mass-flow rate contributes the most significantly to the separation efficiency. In the effective separation area, when the flow rate increases from 18 to 12 g/s, the separation efficiency increases by 14.0%. The inlet mass-flow rate, valve opening, and separation aperture minimally affects the size of the effective separation dryness range; however, for the deviation of the effective separation area dryness range, the inlet mass-flow rate exerts the greatest impact, followed by the separation aperture, whereas the valve opening exerts the least impact.

Keywords header-orifice vapor-liquid separation unit; vapor-liquid separation; zeotropic mixture; separation efficiency

制冷行业消耗的电力约占全球总用电量的 20%^[1],国家发展改革委等部门印发《推动热泵行业高质量发展行动方案》提出,到 2030 年,重点热泵产品能效水平提升 20% 以上^[2],制冷热泵系统的节能提效成为关注重点。作为关键部件的换热器,其焓损可占整个系统总焓损的 40%~50%^[3],显著影响制冷热泵系统的能效。因此,改善蒸发器和冷凝器性能成为提升系统性能的关键手段。

气液调配技术是一种强化换热手段,通过气液

分离单元实现换热过程中工质流量与干度的合理分配,使换热过程始终维持在较高效换热区,从而提升换热器性能。在冷凝器中,冷凝液通过气液分离单元及时排出不再参与换热,减小液膜增厚导致的热阻增加,实现传热系数的提升^[4]。钟天明等^[5]将气液分离单元耦合到冷凝器中,在风量为 427~764 m³/h 下,比传统蛇形冷凝器总换热量提高 4.3%~15.1%、管内压降降低 25.4%~48.5%、焓损减少 8.7%~29.7%。Chen Jianyong 等^[6]在空调系统中搭配分液

基金项目:国家自然科学基金(52476003)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52476003).)

收稿日期:2025-05-16;修回日期:2025-06-17;录用日期:2025-07-10

冷凝器,在冷却模式下,EER(能效比,energy efficiency ratio)提高了9.8%。在蒸发器中,通过气液分离单元将低干度区的部分液体分离,并调配至高干度区,重新分配管内干度,并维持整个过程为高效传热对应的干度,实现换热性能的提升。Li Junjie等^[7]将气液调配应用于蒸发器中,在气液分离效率为40%时,蒸发器传热系数增大的同时减少了压差。Chen Jianyong等^[8]在热泵热水器系统中采用气液调配蒸发器,与采用传统蒸发器的热泵热水器相比,换热器换热能力提升了3.09%,热泵热水器功耗降低3.07%,COP(性能系数,coefficient of performance)提升了6.35%。

工质也是影响制冷热泵系统的另一关键因素。非共沸工质具有温度滑移特性,可实现冷热流体间的温度匹配,从而降低换热过程中的不可逆损失^[9-10]。但因其温焓非线性,导致额外焓损最高可达85.1%^[11]。为了降低这部分额外的焓损,Li Junjie等^[12]提出采用气液调配重新分配非共沸工质换热过程的干度、组分和流量,进一步改善换热,结果表明换热性能提高了9.72%,额外焓损减少了22.4%。Huang Yisheng等^[13]在热泵系统中通过分液冷凝器和喷射器调整工质组分,对比传统热泵COP提高了21.8%。无论是纯工质还是非共沸工质,要实现换热器性能和系统能效的提升,气液分离单元是关键。

常见的气液分离单元有T型管和联箱-小孔型气液分离单元,它们结构简单,可集成于冷凝器和蒸发器,形成一体化结构。T型管的气液分离源于两相流体的密度不同、流速不均引起的惯性力差别,在流道结构突变的情况下导致两相运动轨迹各异从而达到气液分离的目的^[14]。对T型管的主要研究集中在结构和工况对分离效率的影响,气液分离效率为22%~83%,但分离过程伴随着漏气^[15]。Su Wen等^[16]研究发现在R134a/R600a(0.303/0.697)时有最高的组分分离效率,为9.49%。以上研究证明了T型管分离性能普遍较差。

联箱-小孔型气液分离单元由入口支管、上下出口支管、联箱以及分液隔板组成,如图1所示。在联箱中,高密度液相在分液隔板上方堆积形成液柱,从而避免气相流出,液相在重力、毛细力和隔板压差共同驱动下从分液隔板排出,而气相从上出口支管排出,从而实现两相分离。陈雪清等^[17]利用空气-水为工质,发现在联箱-小孔型气液分离单元中当空气流速大于5.9 m/s、水流速小于0.015 m/s时,气液分离效率大于99%。王大维^[18]在单孔联箱中采用R245fa作为工质,分离效率随着入口干度的增加先增大后

减小,入口干度为0.11时分离效率最大为97.0%。李逸帆等^[19]采用数值模拟方法研究了联箱-小孔型气液分离单元中不同工质的物性对于气液分离的影响。黄锬腾等^[20]基于VOF(流体体积法, volume of fluid)多相流模型,研究了工质R134a在流量为3 g/s、入口干度为0.5条件下的分液特性。结果表明,当分液孔径为1.6 mm、位置居中时,分液效率达到最佳,为70.23%。因此,联箱-小孔型气液分离单元具有较高的气液分离效率,但是研究大多集中于纯工质和数值模型,采用非共沸工质的实验研究未见报道。

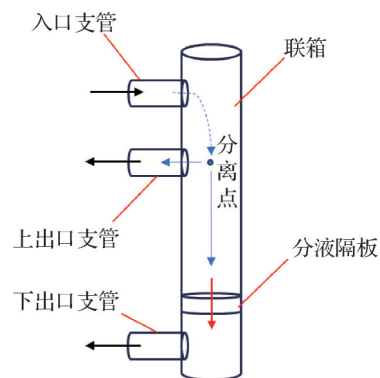


图1 联箱-小孔型气液分离单元

Fig.1 Header-orifice vapor-liquid separation unit

本文对采用非共沸工质R1234ze(E)/R32的联箱-小孔型气液分离单元开展实验研究,分析不同入口质量流量、液相出口流通面积及隔板开孔直径等变量对其分离参数的影响;结合可视化,总结出了有效分液的干度区间,为气液调配换热器的设计提供了依据。

1 实验介绍

1.1 联箱-小孔型气液分离单元及参数

联箱-小孔型气液分离单元如图2所示,从后往前分别是开有工质流通槽道的紫铜底板(流通槽道结构基于管翅式换热器联箱)、分液隔板、密封垫圈、钢化硼硅玻璃、铝合金夹板以及紧固螺栓,其中,紫铜底板与铝合金夹板用紧固螺栓进行固定,钢化硼硅玻璃在二者之间,为紫铜底板形成一个密封的流通区域,并用密封垫圈进行密封处理,分液隔板设置在工质通道内。具体结构参数如表1所示。

1.2 实验台

实验台如图3所示,由分体空调器改建而成,工质经由变频压缩机压缩后先后进入冷凝器和过冷段调节过冷度,过冷段采用低温恒温槽通过板式换热

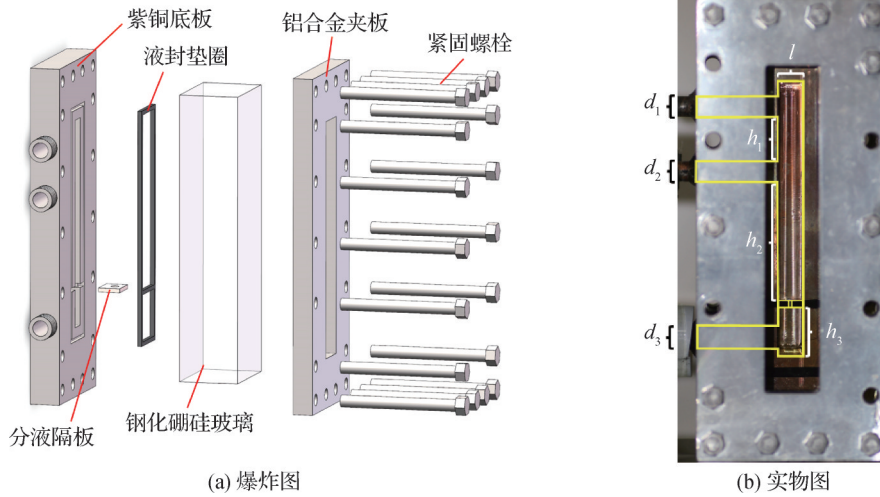


图2 联箱-小孔型气液分离单元结构

Fig.2 Structure of the header-orifice vapor-liquid separation unit

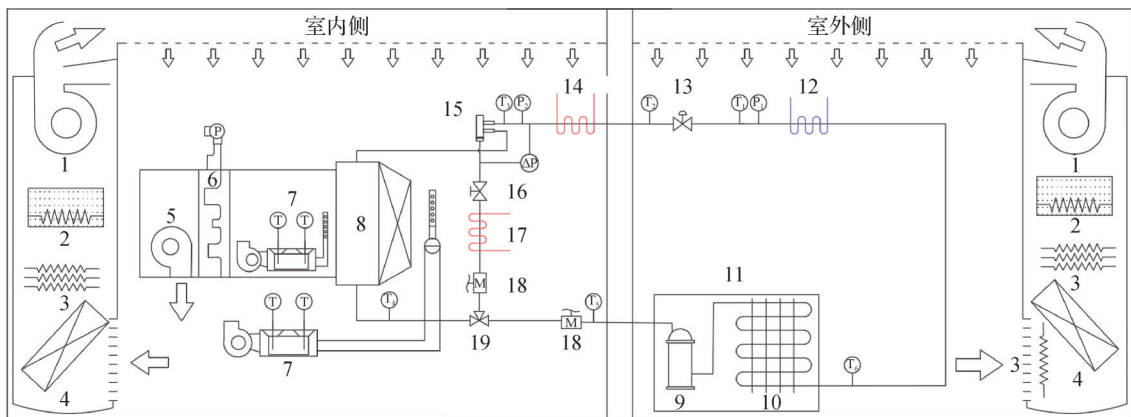
表1 联箱-小孔型气液分离单元参数
Tab.1 Parameter of header-orifice liquid-vapor separation unit

结构参数	数值/mm
进口支管距上出口支管距离 h_1	21
上出口支管距隔板高度 h_2	48
分液隔板距联箱底部高度 h_3	18
联箱宽度 l	10
管径 d_1, d_2, d_3	8

器与工质进行换热使工质过冷,过冷液相工质流经电子膨胀阀节流后进入预热段(工质经过盘管与恒温水浴换热)进行干度调节,干度通过水浴加热调

节。随后工质进入联箱-小孔型气液分离单元进行气液分离,其中从分离单元底部流出的液相工质经过微调阀门,进入过热段(同样经过盘管与恒温水浴换热)加热成过热蒸气,从上出口支管流出的气液相工质进入蒸发器加热成过热蒸气。两股过热蒸气汇合进入压缩机完成整个循环。

其中,在节流阀前布置压力传感器测量压力、T型热电偶测量温度;在预热器后布置压力传感器测量压力;用压差传感器测量出通过分离单元的压差为入口支管到微调阀门前的压差;在过热器后以及两股流体汇合后布置科式流量计,分别测量通过下出口支管和整个循环的质量流量。测量设备具体参数如表2所示。



1 循环风机; 2 加湿器; 3 电加热丝; 4 蒸发器; 5 风机; 6 喷嘴; 7 空气采样装置; 8 蒸发器; 9 压缩机; 10 冷凝器; 11 空调外机; 12 过冷器; 13 电子节流阀; 14 预热器; 15 联箱-小孔型气液分离单元; 16 微调阀门; 17 过热器; 18 质量流量计; 19 三通阀。

图3 联箱-小孔型气液分离单元可视化实验台

Fig.3 Visualization experiment of the header-orifice separator

1.3 工况设定

本文选用R1234ze(E)/R32作为工质,并在系统运行至稳定后对实验段的质量分数比进行了3次抽

样检测。其中,质量分数比为R1234ze(E)与R32的质量分数之比。抽样点分别设置在节流前和两股流体汇合之后,并且保留一定距离,待充分混合后进行

表2 测量设备参数

Tab.2 Measurement equipment and parameters

参数	设备(型号)	数量	测量范围	精度
m_1	科式流量计(sn13537639)	1	0~40 g/s	±0.2%
m_2	科式流量计(sn13538096)	1	0~30 g/s	±0.2%
p_1	压力变送器(EJA430E)	1	0~3.5 MPa	±0.075%
p_2	压力变送器(EJA430E)	1	0~3.5 MPa	±0.075%
Δp	压差变送器(EJA110E)	1	0~500 kPa	±0.075%
T	T型热电偶	6	-200~350 °C	±0.5 °C

抽样,确保实验段总循环质量分数比为所测质量分数比。经气相色谱仪检测,节流前的平均质量分数比为 78.9/21.1,汇合后的平均质量分数比分别为 79.6/20.4,质量分数比变化较小,取循环总质量分数比为二者平均质量分数比 79.25/20.75。混合工质 R1234ze (E)/R32 的臭氧消耗潜值 (ozone depletion potential, ODP)、全球变暖潜值 (global warming potential, GWP) 及大气寿命均显著低于传统工质 R22,且具备更高的汽化潜热,在 25 °C 饱和温度下的饱和蒸气压低于 R22,体现出良好的潜力^[21]。实验在室内侧和室外侧分别为 25 °C/21 °C, 18 °C/14.8 °C 条件下进行。运行工况如表 3 所示,实验设置了 3 个变量:入口质量流量、下出口支管管路阀门开度和分液隔板开孔面积,考察分液效率、压差及漏液量的变化规律。

表3 实验运行工况

Tab.3 Experimental operating conditions

实验组别	流量 $m/\text{(kg/s)}$	入口干度范围 x	分液隔板开孔直径 d/mm	压差 $\Delta p/\text{kPa}$	阀门开度/%
1	12、15、18	0.13~0.45	4	11.2	—
2	15	0.13~0.40	4	—	12、41、100
3	15	0.13~0.40	2、3、4	—	100

1.4 数据处理

基于安捷伦数据采集仪收集得到的实验数据包括压力、温度、压差以及质量流量,对实验数据进行处理。

基于组分、压力和温度通过 Refprop10.0^[22]获取节流前的焓值 h_1 ,工质经过电子膨胀阀过程视为等焓节流过程,通过预热器后焓值:

$$h_2 = h_1 + \frac{Q}{m_{in}} \quad (1)$$

式中: h_2 为预热器后工质焓值, kJ/kg; h_1 为节流前工质焓值, kJ/kg; Q 为水浴加热的输入功率, W; m_{in} 为分离单元进口质量流量, kg/s。

基于组分、焓值 h_2 和分离单元入口压力 p_2 , 由

Refprop10.0 获得分离单元入口干度 x_{in} 。

气液分离效率表示为^[23]:

$$\eta = \frac{m_{out}}{(1 - x_{in})m_{in}} \quad (2)$$

式中: η 为分离单元的气液分离效率; m_{out} 为通过分液隔板的质量流量,即漏液量, kg/s。

对实验进行不确定度分析^[24]:

$$\partial Y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial Y}{\partial X_i} Y_i \right)^2} \quad (3)$$

式中: ∂Y 为计算的不确定度; Y 为关于 X_n 的函数:

$$Y = Y(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (4)$$

相对不确定度:

$$\gamma = \frac{\partial Y}{Y} \times 100\% \quad (5)$$

η 的最大相对不确定度为 1.01%。

2 结果分析

2.1 分液情形分析

图 4 所示为所观察到的 3 种情形:液相溢出、有效分液、气相击穿。如图 4(a)所示, 机箱内液柱高度较高,超过上出口支管,出现液相从上出口支管溢出现象,此时气液两相分离效果较差;图 4(b)的液柱高度逐渐稳定,维持在分液孔板和上出口支管之间,形成良好的液封状态,气液两相分离效果较好;图 4(c)中气相已经贯穿液柱通过分液隔板,分离单元失效,分离效果变差。

在实验过程中,在液相溢出状态下,部分液相由上出口支管排出并进入蒸发器相变换热,伴随较大的换热量;一旦转变为有效分液状态,液相不再溢出,进入蒸发器的液相质量减少,导致换热器换热量明显降低;进入气相击穿状态后,工质通过下出口支管流入过热水箱并加热成过热蒸气,此阶段由于漏液量减少且夹带一定气相,使得加热至过热蒸气所需的功率相应降低。利用液相溢出状态的换热量变化及气相击穿状态下的功耗变化特征,可用于判定有效分液的范围。

2.2 不同入口流量下气液分离性能

图 5 所示为在不同流量工况和干度下,漏液量和分液效率的变化。漏液量在干度增加过程中呈先增大后略微下降的趋势,漏液量的上升与入口干度增加密切相关,这是由于入口干度的增大提高了入口流速,进入机箱后对液柱的冲击增强,提高了液相通过分液隔板的驱动力,导致漏液量增加。当系统进入气相击穿状态后,液封结构失效,部分气相夹带液

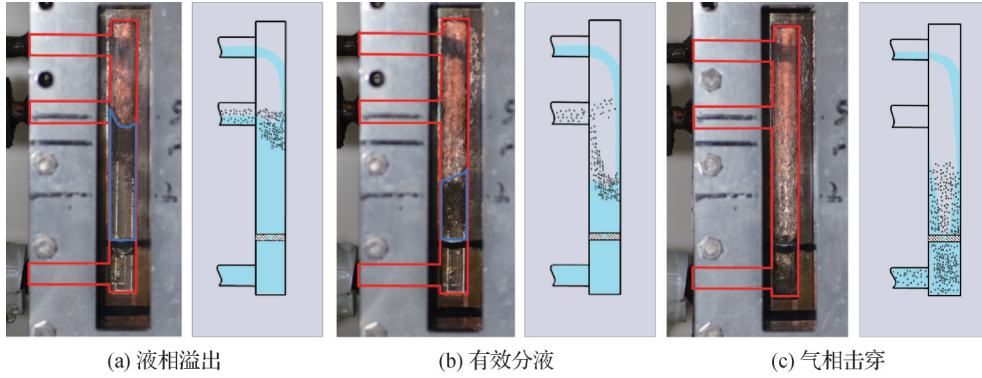


图4 联箱气液分离状态

Fig.4 Liquid column height in header

相共同经分液隔板排出,气相体积分数显著上升,在下出口支管流通截面积保持不变的条件下,漏液量出现轻微下降。漏液量的变化幅度随着入口质量流量的提升而更加显著,入口质量流量由 12 g/s 增至 15、18 g/s 时,平均漏液量分别增加 0.65、1.35 g/s,原因在于流量的增大同样加强了对液柱的冲击。分液效率随干度的增加而线性增加,整体大于 40%,且干度每增加 0.1,分液效率增加约 11.5%。这是因为干度的提升使入口工质液相减少,而漏液量逐渐增大或略微降低,分液效率逐渐提升。

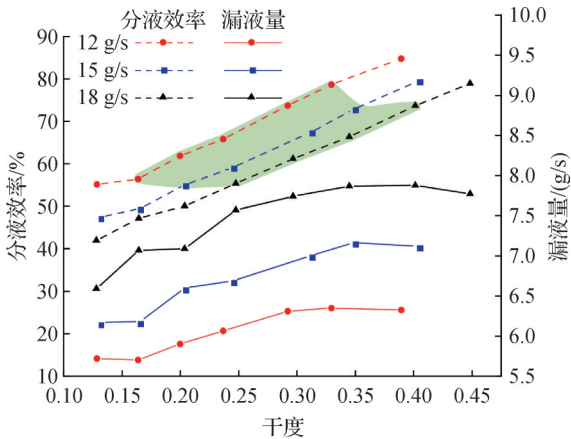


图5 不同流量下分离单元的分液参数

Fig.5 Separation parameters of the separation unit under different flow rates

通过实验台蒸发器加热量和水浴加热量的变化,可判定有效分液的干度变化范围。入口流量为 12、15、18 g/s 时,有效分液对应的干度区间分别为 0.164~0.330、0.204~0.349、0.248~0.401,如图 5 中绿色区域所示。随着入口质量流量的增加,有效分液干度区向高干度方向偏移。相较于 12 g/s,18 g/s 的有效分液区最小干度提高了 51.1%,最大干度提高了 21.8%。主要原因是:分液孔的排液能力有限,较高的入口质量流量意味着进入联箱的液相质量增加,

因此,达到形成液封所需的液相体积分数相对较低,有效分液区对应的最大干度值相应提高。另外,由于隔板与出口支管的高度(h_2)有限,有效分液区的最小干度也随入口质量流量而增加。在有效分液区内,气液分离效率随入口质量流量的增加而下降,入口质量流量由 18 g/s 降至 12 g/s 时,分液效率最大提升 14.0%。该现象主要源于较低流量时工质流速较小,流体冲击壁面后液滴夹带至上出口支管现象减弱,从而提升了分离效果。

图 6 所示为不同入口质量流量下工质通过联箱-小孔型气液分离单元的压差变化。由图 6 可知,压差随干度的增加而单调递增,且压差随入口质量流量的增加而增加,入口质量流量为 18 g/s 较 12 g/s 时压差提升 2.74 kPa,增幅为 23.4%。这一现象的主要原因在于,干度和流量的增加均导致工质流速上升,加剧了流体与入口管壁的摩擦和进入联箱后的撞击,进而引起分离单元内压差增大。在较高质量流量下,压差随干度的增加增幅更加显著。这是由于相同干度但较大流量条件下,气相的量更大,导致流动速度加快,压差的变化更加明显。

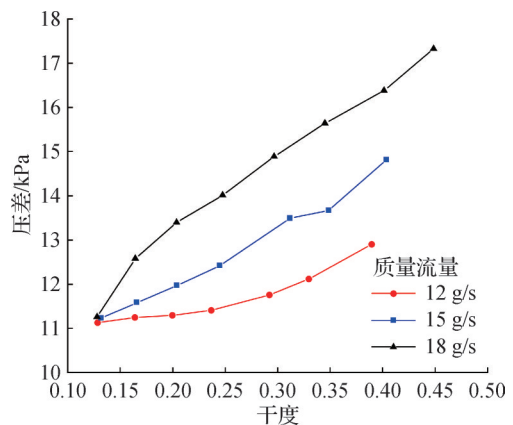


图6 不同流量下通过分离单元的压差

Fig.6 Pressure drop across the separation unit under different flow rates

2.3 不同下出口支管管路阀门开度下气液分离性能

图7所示为在不同阀门开度和干度下,分液效率和漏液量的变化。阀门开度控制下出口支管流通截面积,因此阀门开度逐渐减小,漏液量也随之减少,阀门开度由100%减小至41%和12%时,平均漏液量分别减少0.62 g/s和1.28 g/s。

阀门开度为100%、41%、12%时,有效分液对应的干度区间分别为0.187~0.330、0.185~0.339、0.199~0.349,如图7中绿色区域所示。随着阀门开度的减小,有效分液区整体向高干度方向略有偏移。相较于100%开度,12%开度的有效分液区最小干度提高了6.4%,最大干度提高了5.8%。阀门开度对有效分液区的偏移幅度影响较小,这主要由于工质排出需先通过分液隔板后进入下出口支管,阀门开度虽显著影响漏液量,但液柱的形成主要受分液隔板开孔面积影响,因此阀门开度对有效分液区的影响相对较小。

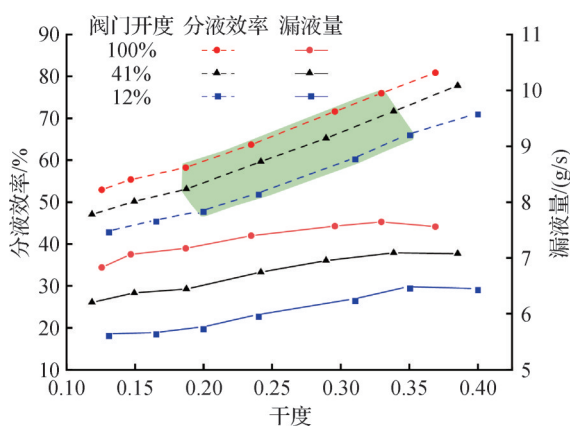


图7 不同阀门开度下分离单元的分液参数

Fig.7 Separation parameters of the separation unit under different valve openings

在有效分液区内,分液效率随阀门开度的增加而增加,阀门开度100%较12%的分液效率最大提升12.6%。漏液量随着阀门开度的减小而减少,在相同干度下,更多液相通过上出口支管流出,导致分液效率下降。

图8所示为为不同阀门开度下工质通过联箱-小孔型气液分离单元的压差变化。由图8可知,图中各曲线的差异较小,处于压差传感器的测量误差范围内,可认为阀门开度对压差的影响较小。

2.4 不同分液孔径下气液分离性能

图9所示为不同分液孔径和干度下分液效率和漏液量的变化规律。随着分液孔径的减小,工质通

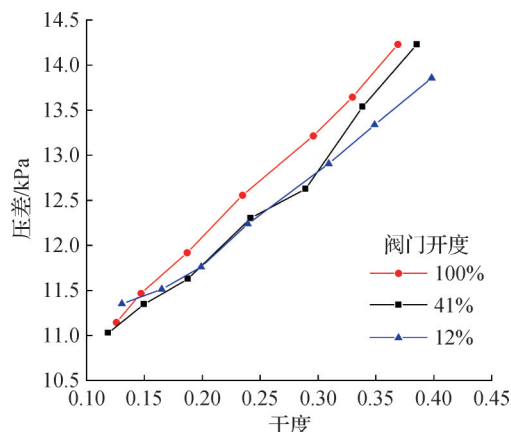


图8 不同阀门开度下通过分离单元的压差

Fig.8 Pressure drop across the separation unit under different valve openings

过分液隔板阻力增大,漏液量逐渐减小,分液孔径由4 mm降至3 mm和2 mm时,平均漏液量减少0.31 g/s和0.67 g/s。

分液孔径为4、3、2 mm时,有效分液对应的干度区间分别为0.182~0.328、0.192~0.345、0.241~0.360,如图9中绿色区域所示。随着分液孔径的减小,有效分液区向高干度方向偏移。相较于孔径4 mm,孔径2 mm的有效分液区最小干度提高了32.4%,最大干度提高了9.8%。该现象源于分液孔径减小使隔板流通能力下降,排液受限,有效分液区对应的干度范围相应提高。

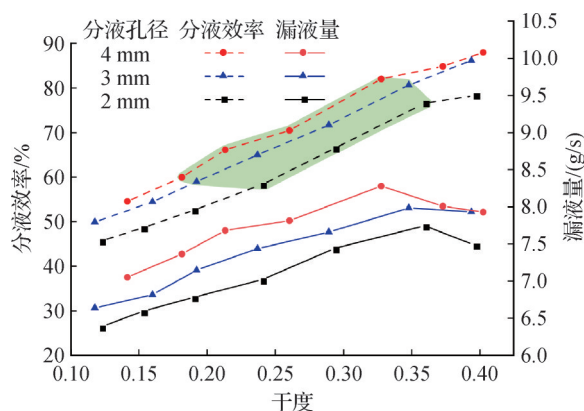


图9 不同分液隔板开孔面积下分离单元的分液参数

Fig.9 Separation parameters of the separation unit with different flow distribution baffle orifice areas

在有效分液区内,分液效率随分液孔径的增加而增加,分液孔径4 mm相对于2 mm分液效率最大提升10.0%。主要源于分液孔径增加使通过分液隔板的液相增多,经上出口支管溢出的液相减少。同时,隔板上方液相减少,减少了联箱内流动扰动导致的液滴夹带现象,从而进一步提升分液效率。

图10所示为不同分液隔板开孔面积下工质通过联箱-小孔型气液分离单元的压差变化。由图10可知,压差随分液孔径的减小呈上升趋势,这一现象归因于分液隔板开孔面积减小后,流体在进入联箱过程中对分液隔板的冲击效应增强,导致压差增大。对比不同孔径条件,分液孔径为2 mm时的平均压差较4 mm提升了1.33 kPa,增幅达9.9%。

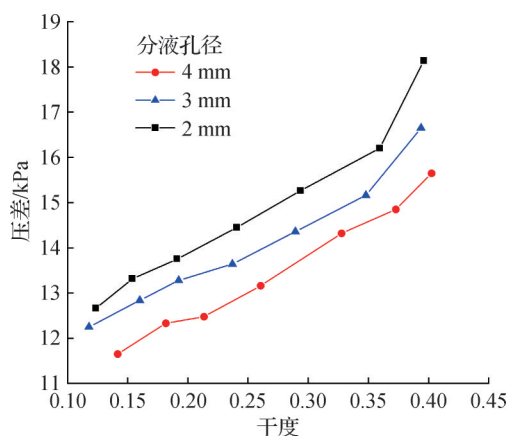


图10 不同分液隔板开孔面积下通过分离单元的压差
Fig.10 Pressure drop across the separation unit with different flow distribution baffle orifice areas

3 结论

本文基于可视化联箱-小孔型气液分离单元,研究了入口质量流量、下出口支管管路阀门开度和分液孔径大小对非共沸工质(R1234ze(E)/R32, 80/20)在该结构中的气液两相分离性能。结合可视化,分析了分液的3种情形(液相溢出、有效分液、气相击穿),得到如下结论:

1)入口质量流量、阀门开度及分液孔径均对分液效率产生显著影响,其中降低入口质量流量的提升幅度最大。有效分液区内,当流量从18 g/s降至12 g/s时,分液效率提升14.0%;当阀门开度从12%增至100%时,分液效率增加12.6%,分液孔径从2 mm增至4 mm时,分液效率提升10.0%。

2)不同入口质量下的有效分液区为:12 g/s(0.164~0.330)、15 g/s(0.204~0.349)、18 g/s(0.248~0.401);不同阀门开度下有效分液区为:12%开度(0.199~0.349)、41%开度(0.185~0.339)、100%开度(0.187~0.330);不同分液孔径下有效分液区为:4 mm(0.182~0.328)、3 mm(0.192~0.345)、2 mm(0.241~0.360)。其中,流量和分液孔径对有效分液区干度范围偏移影响较大。

3)分液效率与漏液量密切相关,漏液量主要取

决于分液孔径和下出口支管流通截面积。压差随着干度的提升而增加,入口质量流量对压差影响最大,分液孔径次之,下出口支管管路阀门影响最小。

本文受广东省基础与应用基础研究基金自然科学基金(2025A1515011466)项目资助。(The project was supported by Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (No. 2025A1515011466).)

参考文献

- [1] Dupont J L, Domanski P, Lebrun P, et al. The role of refrigeration in the global economy-38. informatory note on refrigeration technologies[R]. 2019.
- [2] 国家发展改革委,工业和信息化部,生态环境部,等.关于印发《推动热泵行业高质量发展行动方案》的通知:发改环资〔2025〕第313号[EB/OL]. (2025-04-02) [2025-05-14]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202504/t20250402_1396954.html. (National Development and Reform Commission, Ministry of Industry and Information Technology, Ministry of Ecology and Environment, et al. Notice on Issuing the Action Plan for Promoting High-Quality Development of Heat Pump Industry: NDRC [2025] No. 313 [EB/OL]. (2025-04-02) [2025-05-14]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202504/t20250402_1396954.html.)
- [3] Li Yunhai, Chen Jianyong, Lin Xu, et al. Quantification on the effects of liquid-vapor separation in air-conditioning system by using advanced exergy analysis[J]. Journal of Thermal Science, 2020, 29(3): 597-608.
- [4] 彭晓峰,吴迪,张杨.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.)
- [5] 钟天明,陈颖,邓立生,等.气液分离冷凝器综合性分析[J].热科学与技术,2013,12(3):200-205. (Zhong Tianming, Chen Ying, Deng Lisheng, et al. Comprehensive performance analysis of liquid-vapor separated condenser [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2013, 12(3): 200-205.)
- [6] Chen Jianyong, Ding Rong, Li Yunhai, et al. Application of a vapor-liquid separation heat exchanger to the air conditioning system at cooling and heating modes [J]. International Journal of Refrigeration, 2019, 100: 27-36.
- [7] Li Junjie, Chen Jianyong, Chen Ying, et al. Effectiveness of actively adjusting vapour-liquid in the evaporator for heat transfer enhancement[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 200: 117696.
- [8] Chen Jianyong, Wen Xuecheng, Li Junjie, et al. Effects

- of applying vapor-liquid adjustment in evaporator on heat pump water heater: Experimental verification [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2024, 158: 431–439.
- [9] Mulroy W J, Domanski P A, Didion D A. Glide matching with binary and ternary zeotropic refrigerant mixtures Part 1. An experimental study [J]. *International Journal of Refrigeration*, 1994, 17(4): 220–225.
- [10] Guo Hao, Gong Maoqiong, Qin Xiaoyu. Performance analysis of a modified subcritical zeotropic mixture recuperative high-temperature heat pump [J]. *Applied Energy*, 2019, 237: 338–352.
- [11] Zhao Li, Gao Pan. Evaluation of zeotropic refrigerants based on nonlinear relationship between temperature and enthalpy [J]. *Science in China Series E*, 2006, 49(3): 322–331.
- [12] Li Junjie, Chen Jianyong, Chen Ying, et al. Liquid-adjustment evaporator with zeotropic mixtures: Principle, design and statistical analysis [J]. *Energy*, 2025, 316: 134476.
- [13] Huang Yisheng, Chen Jianyong, Chen Ying, et al. Performance explorations of a novel high temperature heat pump with multi-adjusted compositions of zeotropic mixture [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2023, 235: 121409.
- [14] 黄锬腾, 陈健勇, 陈颖, 等. 气液分离技术的研究现状 [J]. *化工学报*, 2021, 72(S1): 30–41. (Huang Kunteng, Chen Jianyong, Chen Ying, et al. Research status of vapor-liquid separation technology [J]. *CIESC Journal*, 2021, 72(S1): 30–41.)
- [15] Li Jun, 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.
- [16] Su Wen, Hwang Y, Zheng Nan, et al. Experimental study on the constituent separation performance of binary zeotropic mixtures in horizontal branch T-junctions [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 127: 76–87.
- [17] 陈雪清, 陈颖, 莫松平. 多孔隔板气液分离联箱的实验研究 [J]. *广东工业大学学报*, 2014, 31(1): 12–17. (Chen Xueqing, Chen Ying, Mo Songping. An experimental study of gas-liquid separation headers with porous baffle [J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2014, 31(1): 12–17.)
- [18] 王大维. 倾斜管内有机工质分液冷凝特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023. (Wang Dawei. Study on gas-liquid separation condensation characteristics of organic working medium in inclined tubes [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2023.)
- [19] 李逸帆, 黄锬腾, 罗向龙, 等. 分液联箱内有有机工质气液分离过程数值模拟及对比研究 [J]. *广东工业大学学报*, 2020, 37(5): 105–110. (Li Yifan, Huang Kunteng, Luo Xianglong, et al. Numerical simulation and comparative study of liquid-vapor separation of organic working fluid in liquid-separation headers [J]. *Journal of Guangdong University of Technology*, 2020, 37(5): 105–110.)
- [20] 黄锬腾, 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.)
- [21] 李国柱, 刘鸿涛, 巨福军, 等. R32/R1234ze(E)余热回收型供暖热泵循环性能的理论评估 [J]. *中原工学院学报*, 2022, 33(3): 41–48. (Li Guozhu, Liu Hongtao, Ju Fujun, et al. Theoretical evaluation of cycle performance of heating heat pump for waste heat recovery with R32/R1234ze (E) [J]. *Journal of Zhongyuan University of Technology*, 2022, 33(3): 41–48.)
- [22] Lemmon E W, Bell I H, Huber M L, et al. NIST standard reference database 23: reference fluid thermodynamic and transport properties-REFPROP, Version 10.0 [CP/OL]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2018[2025-05-01]. <https://www.nist.gov/srd/refprop>.
- [23] Tuo Hanfei, Hrnjak P. Vapor-liquid separation in a vertical impact T-junction for vapor compression systems with flash gas bypass [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2014, 40: 189–200.
- [24] Moffat R J. Describing the uncertainties in experimental results [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 1988, 1(1): 3–17.

通信作者简介

陈健勇, 男, 副教授, 广东工业大学材料与能源学院, 020-39322570, E-mail: jianyong@gdut.edu.cn. 研究方向: 空调热泵系统优化, 强化传热技术的研究。

About the corresponding author

Chen Jianyong, male, associate professor, School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, 86-20-39322570, E-mail: jianyong@gdut.edu.cn. Research fields: optimization of air conditioning heat pump system and enhancement of heat transfer technology.