

文章编号:0253-4339(2025)05-0069-08

doi:10.12465/j.issn.0253-4339.2025.05.069

# 热泵热水器中自然替代工质 R1270 和 R290 的充注量优选及性能研究

巨福军 侯力豪 刘清磊 王浩然 肖成杰 范晓伟

(中原工学院智慧能源与环境学院 郑州 450007)

**摘要** R1270 和 R290 均是氟利昂等传统工质的潜在替代工质。实验研究了名义工况下工质充注量对分别使用 R1270 和 R290 的热泵热水器系统性能和冷凝器中换热流体温度分布的影响以及自然工质替代 R22 的可行性。结果表明:充注量对两系统的循环性能和换热流体的温度分布均有显著影响;R1270 系统和 R290 系统均在相同的最佳充注量(0.90 kg)下分别获得最大 COP 为 4.443 和 4.317;不同充注量下两系统的冷凝器中均出现 2 个传热窄点和 2 个最大传热温差,且其第一传热窄点和第二最大传热温差的出现位置均随充注量的变化而出现相似的迁移;相比于 R22 系统,R1270 系统和 R290 系统在最佳充注量下均获得明显占优的 COP 和排气温度以及基本相当的排气压力,且其制热量分别提升了 7.05% 和降低了 10.65%,因此 R1270 比 R290 在热泵热水器中替代 R22 时优势更显著。

**关键词** 工质替代;R1270;R290;充注量;温度分布

**中图分类号**:TB64;TM925.32;TU822.2

**文献标识码**:A

## Research to Optimize the Refrigerant Charge of the Natural Refrigerants R1270 and R290 in Heat-Pump Water Heaters and Their Performance

Ju Fujun Hou Lihao Liu Qinglei Wang Haoran Xiao Chengjie Fan Xiaowei

(School of Smart Energy and Environment, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou, 450007, China)

**Abstract** R1270 and R290 are alternative refrigerants with great potential. In this study, the influence of the refrigerant charge on the performance of the heat-pump water heater with R1270 and R290, the temperature distribution of the heat transfer fluids in the condenser, and the feasibility of replacing R22 with natural refrigerants were investigated. The results indicate that the refrigerant charge has a considerable influence on the cycle performance and the temperature distribution of the heat-transfer fluids in both systems. At the same optimal charge (0.90 kg), the R1270 and R290 systems achieved a maximum coefficient of performance (COP) of 4.443 and 4.317, respectively. At different refrigerant charges, two heat transfer pinch points and two maximum heat transfer temperature differences occurred in the condensers of both systems, and the locations of the first pinch point and the second maximum temperature difference point showed similar migrations with changes in refrigerant charge. Compared with the R22 system, both the R1270 and R290 systems, at optimal charge, achieved significantly better COP and discharge temperatures, exhibited relatively equivalent discharge pressures, and their heating capacities increased by 7.05% and decreased by 10.65%, respectively. Hence, R1270 can be preferred over R290 for replacing R22 in a heat-pump water heater.

**Keywords** refrigerant replacement; R1270; R290; refrigerant charge; temperature distribution

生活热水能耗在建筑能耗中占比相对较大,其中在民用建筑能耗中占比约为 20%,而在商业建筑能耗中占比最高则可达 40%<sup>[1]</sup>。与电热水装置、燃煤锅炉、燃气锅炉等相比,热泵热水器具有能源效率高、安全可靠等显著优势,已成为降低生活热水能耗和实现建筑领域“双碳”目标的主要技术选项<sup>[1-3]</sup>。然而,热泵热水器使用的 R22、R134a 等传统工质均具有较高的 GWP (Global Warming Potential, 全球变暖潜

值),属于《基加利修正案》中明确规定的将要被限制使用或淘汰的工质。因此,寻找一种绿色高效的热泵热水器用替代工质是现阶段热泵领域的研究热点和刻不容缓的任务<sup>[4]</sup>。碳氢类工质 (hydrocarbons, HCs) 的 GWP 较低、热力学性能优异、价格低廉、易于获取,与矿物润滑油有极好的互溶性,其中 R1270 和 R290 具有较高的冷凝、沸腾传热系数和优异的系统循环特性,是替代 HFCs 的可靠方案<sup>[5-6]</sup>

国内外学者对HCs类工质作为替代工质在热泵和空调的可行性进行了大量研究。张耘等<sup>[7]</sup>实验评估了R290在低温热泵中替代R22的潜力,结果发现相同制热量下R290系统具有更高的COP(coefficient of performance,性能系数)。Shen Bo等<sup>[8]</sup>模拟研究发现在直热式热泵热水器中,R290较R134a所需的压缩机排量更小,且其充注量减少了50%。Fang Xing等<sup>[9]</sup>模拟研究发现以R1270和R290为工质的空调系统COP均大于R22。Chen Jianbo等<sup>[10]</sup>实验检验了空气源热泵系统中R1270和R290替代R22的可行性,发现R1270和R290具有更高的COP和制冷量,且R1270替代R22优势较为显著。

工质充注量是影响热泵系统性能的重要参数之一。M. Mehrabi等<sup>[11]</sup>理论评估了工质充注量对空气源热泵性能的影响,结果表明相比于工质过充,在欠充状态下工质对热泵的制热量(制冷量)和COP影响较大。R. Ghouali等<sup>[12]</sup>通过R290蓄热式热泵热水器实验研究了工质充注量对过热度的影响,发现随着充注量的增加过热度先降低后趋于平稳。石含等<sup>[13]</sup>实验研究发现,R410A空气源热泵系统COP随工质充注量的增加呈先增后减的趋势。王栋等<sup>[14]</sup>实验研究发现存在最佳充注量使CO<sub>2</sub>水源热泵热水器COP达到最佳值,且在欠充状态下工质充注量对系统COP影响更显著。施永康等<sup>[15]</sup>实验研究发现R22静态加热式热泵热水器存在最佳制冷剂充注量,且过量充注导致COP变化显著。

综上所述,R1270和R290在空调和热泵系统中

具有较好的替代性能,且充注量是影响其系统性能的重要因素,但针对R1270和R290在直热式热泵热水器中替代性能的评估工作尚有待开展。因此,本文基于搭建的直热式热泵热水器实验装置,实验研究了名义工况下充注量对R1270系统和R290系统的循环性能和冷凝器中换热流体温度分布的影响规律,并评估了R1270和R290在直热式热泵热水器中替代R22的潜力,以期热泵热水器用绿色高效工质的优选和自然工质的推广应用提供一定参考。

## 1 实验系统

### 1.1 实验装置

如图1所示,用于评估R1270和R290替代潜力的实验系统由热泵热水器和数据测量采集系统组成。热泵热水器主要包括旋转式热泵专用压缩机、冷凝器、蒸发器、节流装置、加热水箱和冷却水箱等。压缩机为排气量为63.3 L/min的R22转子式压缩机。冷凝器和蒸发器均为自制逆流套管式蛇形紫铜换热器,其结构参数如表1所示。冷凝器和蒸发器内换热流体的流道如图1所示。节流装置为耐压型手动节流阀;加热水箱和冷却水箱分别提供实验要求进口温度的热源和热汇。数据测试采集系统包括T型热电偶、Pt100、压力变送器、流量计、功率变送器,其详细测点分布见图1;T型热电偶被均匀布置在冷凝器和蒸发器的沿程以便获取换热流体的沿程温度变化。工质、热汇和热源的温度由T型热电偶( $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ )和Pt100( $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ )测量。工质压力由压力变送器

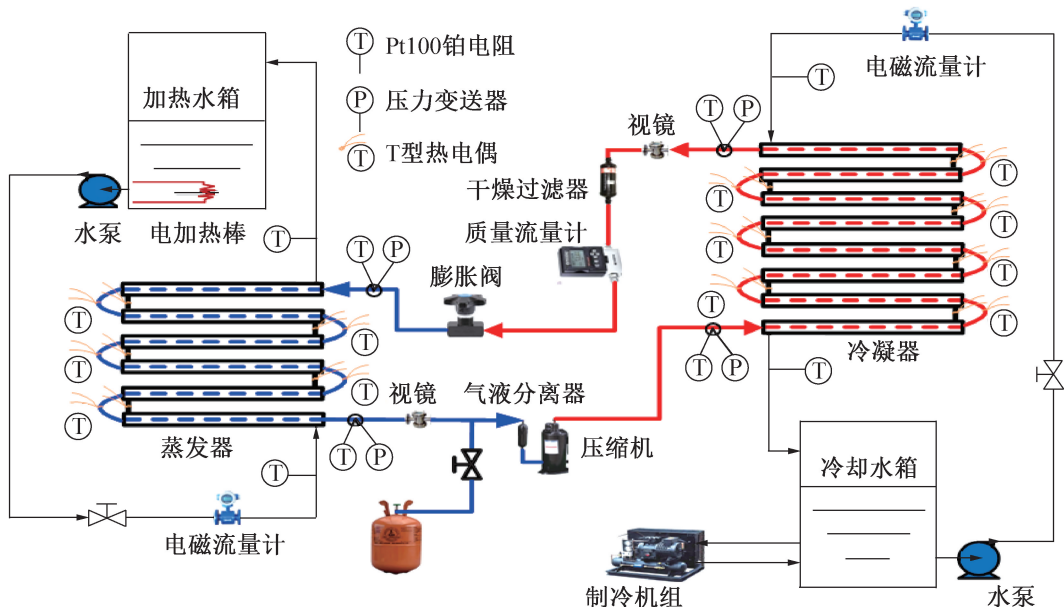


图1 直热式热泵热水器实验系统

Fig.1 Experimental system of direct heat pump water heater

(±0.04%)进行测量;工质流量、热汇流量和热源流量分别由质量流量计(±0.1%)、电磁流量计(±0.2%)和电磁流量计(±0.25%)测量。压缩机功耗由功率变送器(±0.5%)测量。

表 1 换热器结构参数

Tab.1 Structural parameters of heat exchangers

换热器类型	管长/ m	外管 外径/ mm	外管 壁厚/ mm	内管 外径/ mm	内管 壁厚/ mm
套管蒸发器	9.6	22	1.0	12.70	0.75
套管冷凝器	21.6	16	1.5	9.52	0.80

## 1.2 数据处理及不确定度分析

间接测量参数的计算如下:

$$COP = Q_h / W_{cm} \quad (1)$$

$$Q_h = c_p m_{hs} (t_{hso} - t_{hsi}) \quad (2)$$

$$R = p_{dis} / p_{suc} \quad (3)$$

式中: COP 为系统制热性能系数;  $W_{cm}$  为压缩机功耗, kW;  $Q_h$  为制热量, kW;  $c_p$  为水的比定压热容, kJ/(kg·K);  $m_{hs}$  为热汇质量流量, kg/s;  $t_{hso}$  为热汇出口温度, °C;  $t_{hsi}$  为热汇进口温度, °C;  $R$  为压比;  $p_{dis}$  为排气压力, MPa;  $p_{suc}$  为吸气压力, MPa。

由二次幂法计算可知,最佳充注量下, R1270 系统的  $Q_h$ 、COP 和压比的不确定度分别为 0.71%、1.52% 和 0.14%, 而 R290 系统相应参数的不确定度分别为 0.71%、1.70% 和 0.16%。

## 2 实验结果与分析

根据 GB/T 19409—2020<sup>[16]</sup> 设定了名义工况下热泵热水器实验工况参数:热汇的进口和出口温度分别为 15 °C 和 55 °C;热源进口温度和流量分别为 20 °C 和 0.178 kg/s。在充注量为 0.6~1.1 kg 范围内,实验研究了充注量对 R1270 系统和 R290 系统循环性能和冷凝器中沿程温度分布的影响,并综合评价了 R1270 和 R290 替代 R22 的可行性。

### 2.1 充注量对系统性能的影响

#### 2.1.1 COP 和功耗

图 2 所示为充注量对 COP 和功耗的影响。由图 2 可知,两热泵系统的 COP 均随充注量的增加先迅速升高后缓慢下降,主要由于制热量和功耗的综合作用(图 2 和图 3),且在充注量不足时,随着充注量的增加,制热量的增加速度明显快于功耗,此时制热量对 COP 的影响占主导地位,而在过量充注时,制热量随着充注量增加的提升速度明显放缓,此时功耗成为

影响 COP 变化的主导因素。R1270 系统和 R290 系统均在最佳充注量 0.90 kg 下分别获得最大 COP 为 4.443 和 4.317,且前者较后者提升了 2.92%,因此 R1270 系统在系统能效方面具有一定优势。随着充注量的增多,R1270 系统和 R290 系统的压缩机功耗均持续上升,主要归因于压缩机内可压缩工质量的增多;在相同充注量下,R1270 系统的功耗均明显高于 R290 系统,主要由于 R1270 的临界温度(91.06 °C)明显低于 R290(96.74 °C),导致在相同工况下 R1270 系统获得较高的吸气工质密度和工质流量。

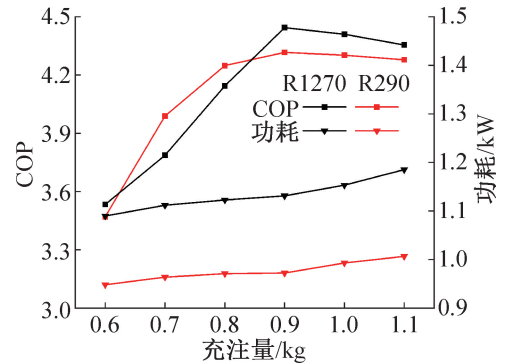


图 2 COP 和功耗随充注量的变化

Fig.2 Variations of COP and compressor power with charging amount

#### 2.1.2 制热量和过冷度

图 3 所示为充注量对制热量和冷凝器出口工质过冷度的影响。由图 3 可知,R1270 系统和 R290 系统的制热量均随充注量的增加先迅速后缓慢上升,主要原因是在充注量不足时,冷凝器未充分发挥其换热能力,工质的不断充入导致冷凝器的换热能力迅速升高和制热量的快速攀升,而当过量充注时,随着工质的不断充入,大量工质的不断积存导致换热器的有效传热面积减少和排气压力不断提升,二者综合作用下冷凝器的换热能力出现平缓提升,此时制热量呈缓慢升高趋势;最佳充注量下,R1270 系统和 R290 系统的制热量分别为 5.026 kW 和 4.197 kW,且前者较后者提升了 19.75%,因此 R1270 系统在制热能力方面优势显著。在相同充注量下,R1270 系统的制热量均明显高于 R290 系统,主要因为较低的临界温度导致在相同工况下 R1270 系统具有较高的吸气压力(见图 4)和吸气工质密度,进而获得较大的工质流量;随着充注量的增加,两系统的过冷度均先快速后平缓升高,主要原因是充注量的增加会导致大量工质堆积在冷凝器出口附近,相应造成排气压力的升高和冷凝器出口工质温度的降低,同时冷凝器的换热能力出现先快速后缓慢增强的变化导致冷凝器出口工质温度先

快速后缓慢降低;R1270系统和R290系统在最佳充注量下的过冷度分别为31.37℃和33.54℃。

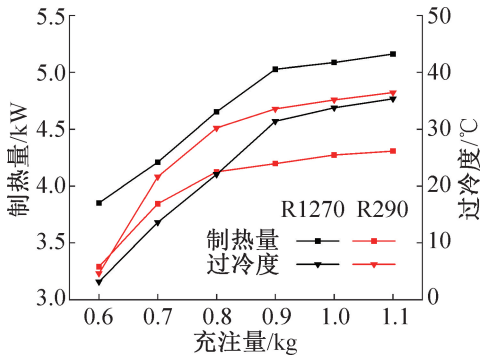


图3 制热量和过冷度随充注量的变化

Fig.3 Variations of heat capacity and subcooling with charging amount

### 2.1.3 运行压力

图4所示为排气压力和吸气压力随充注量的变化。两系统的排气压力均随充注量的增加而平缓升高,主要原因为充注量的增加导致冷凝器中的工质不断积聚增多<sup>[12]</sup>;在最佳充注量下,R1270系统和R290系统的排气压力分别为2.0545MPa和1.7612MPa,且前者较后者升高了0.2933MPa;在充注量为0.60~1.10kg时,R1270系统的排气压力较R290系统升高了0.2832~0.3104MPa,主要由于R1270具有较低的标准沸点(-47.62℃);充注量对R1270系统和R290系统吸气压力的影响均较小,主要归因于相近的蒸发温度和蒸发器中相似的工质压降;在最佳充注量下,R1270系统和R290系统的吸气压力分别为0.7178MPa和0.5907MPa,且前者较后者升高了0.1271MPa。

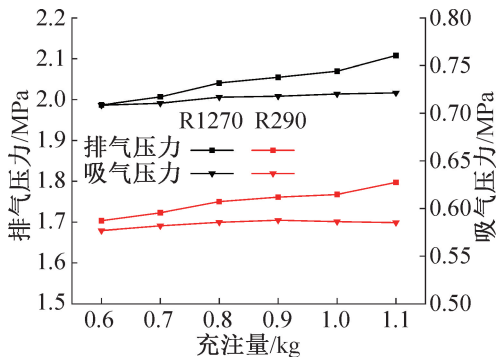


图4 运行压力随充注量的变化

Fig.4 Variation of operating pressures with charging amount

### 2.1.4 压比和排气温度

图5所示为压比和排气温度随充注量的变化。由图5可知,随着充注量的升高,两系统的压比均呈缓慢上升趋势,主要归因于平缓升高的排气压力和变

化较小的吸气压力(见图4);R1270系统和R290系统在最佳充注量下的压比分别为2.86和2.98;两系统的排气温度均随充注量的升高而明显升高,其与压比的变化趋势一致,表明压比是影响排气温度变化的主要因素<sup>[17]</sup>;在最佳充注量下,R1270系统和R290系统排气温度分别为83.51℃和79.45℃,且前者较后者升高了4.06℃,意味着后者在生产高温热水方面稍具优势;在充注量为0.60~1.10kg时,R1270系统的排气温度较R290系统升高了3.72~4.79℃。

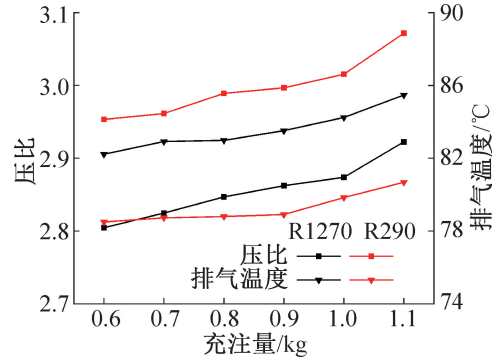


图5 压比和排气温度随充注量的变化

Fig.5 Variations pressure ratio and discharge temperature with charging amount

## 2.2 充注量对沿程温度的影响

图6所示为不同充注量下冷凝器中工质和热汇的沿程温度分布。充注量对两系统的工质和热汇的温度分布具有相似的影响规律;在不同充注量下,两系统的工质沿程温度曲线均包括过热段、冷凝段和过冷段;两系统的过冷段均随充注量的增加而明显增长,主要原因是工质在冷凝器中的不断堆积导致过冷度的升高(见图3);随着充注量的升高,R1270系统的工质和热汇温度曲线近似平行区域(简称:近似平行区域)对应的管长区间/区间长度分别为19.2~21.6m/2.4m、14.4~19.2m/4.8m和9.6~13.2m/3.6m,对应的传热温差区间分别为18.78~20.71℃、4.61~20.01℃和8.29~20.86℃;R290系统的相应区域对应的管长区间/区间长度分别为19.2~21.6m/3.6m、14.4~19.2m/4.8m、9.6~12.0m/2.4m,传热温差区间分别为12.21~21.67℃、0.81~19.35℃和9.01~21.64℃。在最佳充注量下,R1270系统和R290系统的近似平行区域中均获得最大的区间长度4.8m和最小的传热温差,有助于改善工质和热汇间的温度匹配。在充注量为0.70kg下,R1270系统和R290系统的热汇均仅在饱和蒸气点区域出现缓慢升温段,而在其他充注量下,其热汇均在饱和蒸气点区域和冷凝出口区域出现缓慢升温段。饱和蒸气点区

域出现热汇缓慢升温段的主要原因为较小的传热温差,但冷凝器出口区域出现该现象的主要原因是较小的传热系数和传热温差。

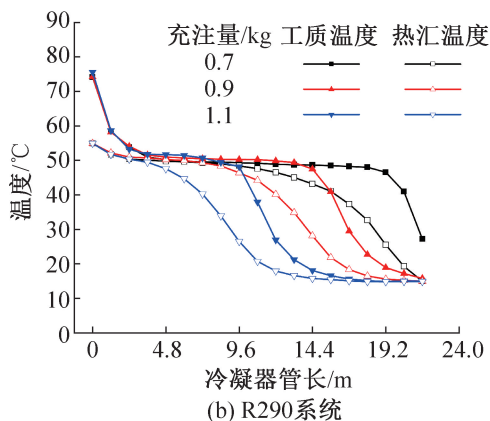
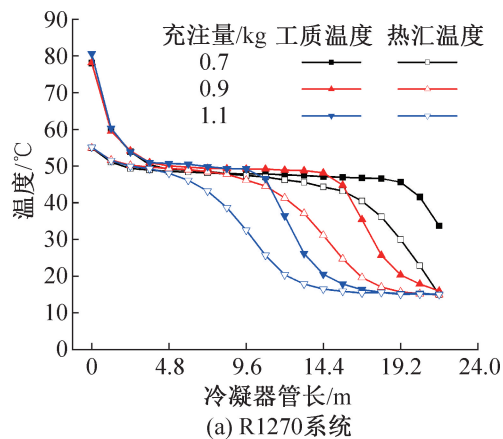


图 6 不同充注量下冷凝器中工质和热汇的沿程温度分布  
Fig.6 Temperature distribution of refrigerant and heat sink with tube length in the condenser under different charging amounts

沿着工质的流动方向,按照传热窄点/最大传热温差出现的先后顺序将其分别称为第一传热窄点/最大传热温差和第二传热窄点/最大传热温差。图 7 所示为不同充注量下工质和热汇间的传热温差随冷凝器管长的变化。3 种充注量下,两系统均在饱和蒸气点或向冷凝器出口偏移 1.2~2.4 m 附近出现第一传热窄点,并在冷凝器出口出现第二传热窄点,且第一传热窄点的出现位置均随充注量的增加向冷凝器进口迁移;3 种充注量下,两系统均在冷凝器进口出现第一最大传热温差,并在饱和液体点向冷凝器出口偏移 1.2~2.4 m 附近出现第二最大传热温差,且第二最大传热温差的出现位置均随充注量的增加向冷凝器进口迁移。

### 2.3 自然工质的替代性能评价

R1270 和 R290 具有零 ODP (ozone depletion potential, 臭氧损耗潜值)、低 GWP 和优良的热力学性

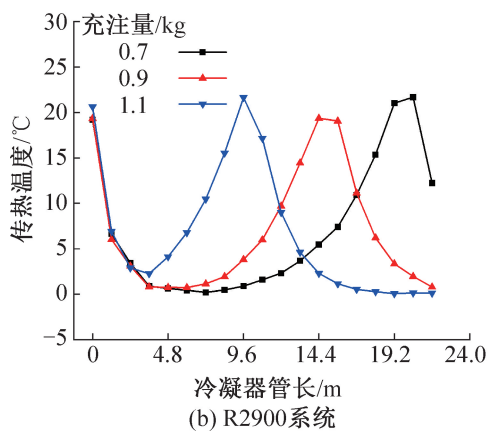
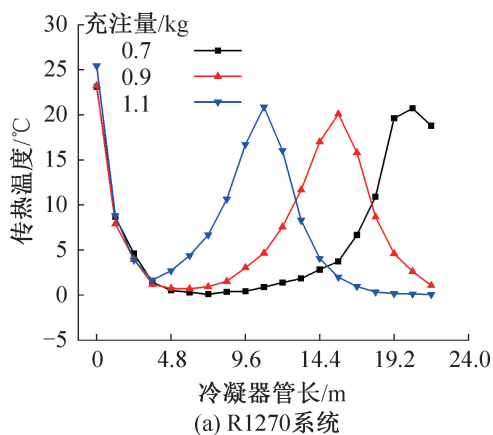


图 7 不同充注量下工质和热汇间的传热温差随冷凝器管长的变化

Fig.7 Variations of heat transfer temperature difference between refrigerant and heat sink with condenser tube length under different charging amounts

质<sup>[18-19]</sup>,因此被认为是 R22 的理性替代工质。本文将对 R1270 和 R290 在直热式热泵热水器中的替代性能进行综合评价。鉴于 R1270 和 R290 系统的最佳充注量均为 R22 系统(1.90 kg)的 47.37%,R1270 和 R290 的使用可实现减量充注,相应地降低工质生产、运输和回收等环节的间接温室效应。需要指出的是,R22 系统的最佳充注量是由之前的实验研究<sup>[20]</sup>获得的。

#### 2.3.1 COP 和制热量

图 8 所示为最佳充注量下 3 种系统的 COP 和制热量。在最佳充注量下,R1270 系统和 R290 系统的 COP 分别较 R22 系统升高了 5.04% 和 2.72%,因此 R1270 和 R290 在系统能效方面均表现出明显的替代优势,尤其是 R1270 相较于 R22 系统,R1270 系统的制热量提升了 7.05%,而 R290 系统的制热量则降低了 10.65%,意味着 R1270 的替代使用有助于提升热泵系统的制热能力,而 R290 替代使用时需要更换较大排气量的压缩机以便获得相同的制热能力。

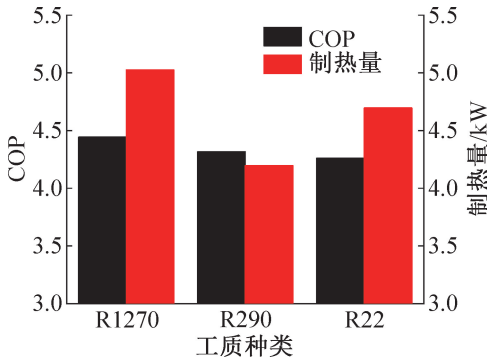


图 8 最佳充注量下 3 种系统 COP 和制热量的对比  
Fig.8 Comparison of COP and heating capacity of three systems under optimal charging volume

### 2.3.2 运行压力

图 9 所示为最佳充注量下 3 种系统的排气压力和吸气压力。与 R22 系统相比,R1270 系统的排气压力和吸气压力均略有升高,分别提升了 0.112 5 MPa 和 0.114 7 MPa,而 R290 系统的排气压力和吸气压力则均略有下降,分别降低了 0.180 8 MPa 和 0.012 4 MPa。由此可知,R1270 和 R290 在 R22 系统中替代使用时不存在由运行压力带来的安全隐患。

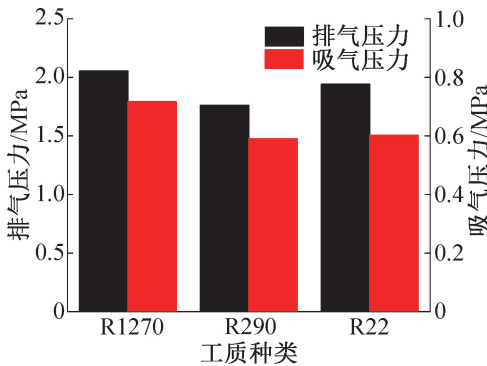


图 9 最佳充注量下 3 种系统运行压力的对比  
Fig.9 Comparison of operating pressures of three systems under optimal charging volume

### 2.3.3 压比和排气温度

图 10 所示为最佳充注量下 3 种系统的压比和排气温度。R1270 系统获得了最小压比,R290 系统次之,而 R22 系统则获得了最大压比;R1270 系统和 R290 系统的排气温度较 R22 系统分别降低了 11.87 °C 和 16.93 °C,意味着 R1270 系统和 R290 系统在制取更高温度的生活热水和延长压缩机使用寿命方面优势显著<sup>[21]</sup>,尤其 R290 系统的优势更明显。

## 3 结论

本文基于热泵热水器系统测试和分析了名义工况下充注量对 R1270 系统和 R290 系统的循环性能

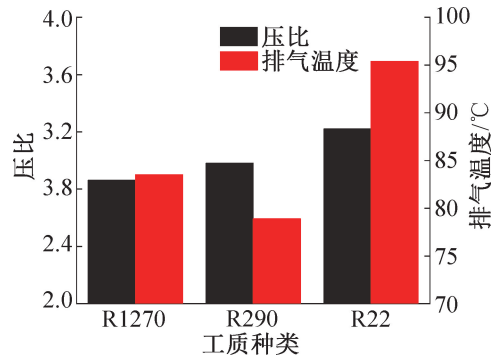


图 10 最佳充注量下 3 种系统压比和排气温度的对比  
Fig.10 Comparison of discharge temperature and pressure ratio of three systems under optimal charging volume

和冷凝器中换热流体温度分布的影响,并综合分析了 R1270 和 R290 替代 R22 的可行性,得到如下结论:

1) 充注量对 R1270 系统和 R290 系统的 COP、制热量和排气压力等循环性能均影响显著,且存在相同的最佳充注量 0.90 kg 使 R1270 系统和 R290 系统分别获得最大 COP 为 4.443 和 4.317,其相应的制热量分别为 5.026 kW 和 4.197 kW。

2) 偏离最佳充注量会降低 R1270 系统和 R290 系统冷凝器内换热流体间的温度匹配水平;不同充注量下两系统的冷凝器中均出现 2 个传热窄点和 2 个最大传热温差,其中前者分别出现在饱和蒸气点或向冷凝器出口偏移 1.2~2.4 m 附近和冷凝器出口,后者分别出现在冷凝器进口和饱和液体点向冷凝器出口偏移 1.2~2.4 m 附近;两系统的第一传热窄点和第二最大传热温差的出现位置均随充注量的增加向冷凝器进口迁移。

3) 最佳充注量下,相较于 R22 系统,R1270 系统和 R290 系统的 COP 分别提升了 5.04% 和 2.72%,制热量分别提升了 7.05% 和降低了 10.65%,排气温度分别降低了 11.87 °C 和 16.93 °C,并分别获得了基本相当的排气压力,因此 R1270 和 R290 在直热式热泵热水器中均具有明显的替代优势,尤其 R1270。

本文受河南省青年科学基金项目(212300410317);河南省科技攻关计划项目(222102320076);河南省重点研发专项项目(231111320900,221111320200);中原工学院青年人才创新能力基金项目(K2020QN013)资助。(The project was supported by Henan Provincial Youth Science Foundation Project (No. 212300410317), Henan Provincial Science and Technology Planning Project (No. 222102320076), Henan Province Key Research and Development Project (No. 231111320900 & No. 221111320200), and Zhongyuan University of Technology Young Talent Innovation Ability Fund Project (No. K2020QN013).)

参考文献

- [1] FUENTES E, ARCE L, SALOM J. A review of domestic hot water consumption profiles for application in systems and buildings energy performance analysis[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 81: 1530–1547.
- [2] JU Fujun, MU Zhenzhen, LIU Hongtao, et al. Experimental investigation on system performance of an instant heat pump water heater with combined condenser [J]. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2024, 53: 103819.
- [3] 巨福军, 杨文欢, 周晓磊, 等. R32 热泵系统稳定性与变工况特性实验研究[J]. *制冷学报*, 2024, 45(2): 74–80. (JU Fujun, YANG Wenhuan, ZHOU Xiaolei, et al. Experimental study on the robustness and off-design performances of R32 heat pump system [J]. *Journal of Refrigeration*, 2024, 45(2): 74–80.)
- [4] WANG Lele, LI Huixiong, WU Jiahuan, et al. Feasibility of using near-azeotropic refrigerant mixture R290/R1234ze (E) as substitute for R22 [J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2021, 40(3): e13574.
- [5] ZHANG Zhihao, HE Guogeng, HOU Qinying, et al. Experimental and mechanism study on the flammability of the mixtures of propylene and ethane [J]. *Fuel*, 2024, 360: 130590.
- [6] LONGO G A, RIGHETTI G, ZILIO C. Heat-transfer assessment of the low GWP substitutes for traditional HFC refrigerants [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 139: 31–38.
- [7] 张耘, 柳慈翀, 陈晓宁, 等. 低温热泵系统中 R290 替代 R22 的性能研究及优化 [J]. *制冷学报*, 2019, 40(3): 72–78. (ZHANG Yun, LIU Cichong, CHEN Xiaoning, et al. Performance study and optimization on alternative refrigerant R290 in R22 low temperature heat pump system [J]. *Journal of Refrigeration*, 2019, 40(3): 72–78.)
- [8] SHEN Bo, NAWAZ K, ELATAR A. Parametric studies of heat pump water heater using low GWP refrigerants [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2021, 131: 407–415.
- [9] FANG Xing, LIN Jie, MA Xiaoming. Simulation study on compression characteristics of low GWP refrigerants in the cylinder of rotary compressors [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2021, 193: 117056.
- [10] CHEN Jianbo, LI He, JI Chaoyang, et al. Performance of a split-type air conditioner with natural refrigerant R1270 to replace R22 [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 243–249: 4979–4982.
- [11] MEHRABI M, YUILL D. Generalized effects of refrigerant charge on normalized performance variables of air conditioners and heat pumps [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2017, 76: 367–384.
- [12] GHOUBALI R, BYRNE P, BAZANTAY F. Refrigerant charge optimisation for propane heat pump water heaters [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2017, 76: 230–244.
- [13] 石含, 郑文科, 姜益强, 等. 制冷剂充注量对补气增焓热泵系统的影响 [J]. *制冷学报*, 2022, 43(6): 114–120. (SHI Han, ZHENG Wenke, JIANG Yiqiang, et al. Effect of refrigerant charge on air-source heat pump system with vapor injection [J]. *Journal of Refrigeration*, 2022, 43(6): 114–120.)
- [14] 王栋, 刘雅如, 陈卓, 等. 充注量对小型 CO<sub>2</sub> 水源热泵热水器性能的影响及其最佳值的确定 [J]. *化工学报*, 2020, 71(增刊1): 397–403. (WANG Dong, LIU Yaru, CHEN Zhuo, et al. Effects on performance of small water-source heat pump water heater with CO<sub>2</sub> by refrigerant charge and determination of optimal value [J]. *CIESC Journal*, 2020, 71(Suppl. 1): 397–403.)
- [15] 施永康, 杨庆成, 丁小江. 制冷剂充注量及毛细管长度对空气源热泵热水器性能的影响 [J]. *制冷与空调(北京)*, 2018, 18(10): 77–82. (SHI Yongkang, YANG Qingcheng, DING Xiaojiang. Impact of refrigerant charge amount and capillary length on performance of air source heat pump water heater [J]. *Refrigeration and Air-conditioning*, 2018, 18(10): 77–82.)
- [16] 家用和类似用途热泵热水器: GB/T 23137—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020. (Heat pump water heater for household and similar application: GB/T 23137—2020 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.)
- [17] 张忠斌, 杜垲, 黄虎, 等. 制冷剂充注量对微通道蒸发器房间空调器性能影响的试验研究 [J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2014, 44(3): 567–572. (ZHANG Zhongbin, DU Kai, HUANG Hu, et al. Experimental study on impact of refrigerant charge on performance of room air conditioner with micro-channel evaporator [J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2014, 44(3): 567–572.)
- [18] SHAIK S V, GORANTLA K, SHAIK S, et al. Experimental and theoretical examination of the energy performance and CO<sub>2</sub> emissions of room air conditioners utilizing natural refrigerant R290 as a substitute for R22 [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2023, 148(16): 8223–8241.
- [19] WU Di, HU Bin, WANG Ruzhu. Vapor compression heat pumps with pure low-GWP refrigerants [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 138: 110571.
- [20] JU Fujun, FAN Xiaowei, CHEN Yaping, et al.

Experimental investigation on a heat pump water heater using R744/R290 mixture for domestic hot water [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2018, 132: 1-13.

- [21] 申道明, 桂超, 夏锦红, 等. 并联压缩机组制冷系统性能试验分析[J]. 流体机械, 2020, 48(9): 77-82. (SHEN Daoming, GUI Chao, XIA Jinhong, et al. Experimental analysis on refrigerating system performance of a parallel unit with several compressors [J]. Fluid Machinery, 2020, 48(9): 77-82.)

#### 通信作者简介

巨福军,男,博士,讲师,中原工学院智慧能源与环境学院,0371-62506808,E-mail:jufujun2008@163.com。研究方向:热泵节能与智能化;可再生能源高效利用与储能技术。

#### About the corresponding author

Ju Fujun, male, Ph. D., lecturer, School of Smarts Energy and Environment, Zhongyuan University of Technology, 86 - 371 - 62506808, E-mail: jufujun2008@163.com. Research fields: energy saving and intelligent of heat pump, efficient use of renewable energy and energy storage technology.