

文章编号:0253-4339(2025)01-0016-08

doi:10.12465/j.issn.0253-4339.2025.01.016

热泵技术专栏

新型环保工质 HP-1 物性和高温热泵应用特性研究

欧阳洪生^{1,2} 张董鑫² 岑淑婷² 燕鸿飞² 严丽霞² 胡斌³ 郭智恺² 韩晓红¹

(1 浙江大学制冷与低温研究所 杭州 310007; 2 浙江省化工研究院有限公司 含氟温室气体替代及控制处理国家重点实验室 杭州 310023; 3 上海交通大学制冷与低温工程研究所 上海 200240)

摘要 HP-1 是新一代环保 HFOs 制冷剂, 由于具有良好的热力学性能和环保性能, 且其临界参数和饱和蒸气压均与 R245fa 性质接近, 具有替代高 GWP 的 R245fa 用于高温热泵等领域的潜力。通过理论与实验的方法, 对 HP-1 的可燃性、溶油性和材料相容性等关键物性展开研究。研究表明: HP-1 可燃极限为 9.75%~16.10%, 与 MK220 润滑油高温下互溶性良好, 与高温热泵系统材料相容性良好。HP-1 应用高温热泵机组, 在蒸发温度为 50~70 °C 时, 机组冷凝温度均可达 125 °C, 制热量为 99.27~153.14 kW, COP 为 2.25~4.85。

关键词 高温热泵; 制冷剂替代; HFOs 制冷剂; 物性

中图分类号: TB61⁺2; TK123; TU83

文献标识码: A

Physical Properties and High-Temperature Heat Pump Application Characteristics of the New Environmentally Friendly Refrigerant HP-1

Ouyang Hongsheng^{1,2} Zhang Dongxin² Cen Shuting² Yan Hongfei² Yan Lixia²
Hu Bin³ Guo Zhikai² Han Xiaohong¹

(1. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Zhejiang University, Hangzhou, 310027, China; 2. State Key Laboratory of Fluorinated Greenhouse Gases Replacement and Control Treatment, Zhejiang Research Institute of Chemical Industry Co., Ltd., Hangzhou, 310023, China; 3. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China)

Abstract HP-1 is an eco-friendly hydrofluoroolefin (HFO) refrigerant with favorable thermodynamic and environmental properties. The critical parameters and saturated vapor pressure of HP-1 are similar to those of R245fa, with HP-1 serving as a potential replacement for R245fa, which has a high global warming potential (GWP) in high-temperature heat pumps. The flammability, solubility, and material compatibility of HP-1 were mainly determined experimentally, with the results demonstrating that HP-1 has a flammability range of 9.75%~16.1%, exhibiting excellent solubility with MK220 lubricating oil at elevated temperatures, and good compatibility with materials used in high-temperature heat pump systems. When HP-1 is applied to high-temperature heat pump units, the condensing temperature of the unit can reach up to 125 °C when the evaporating temperature ranges between 50 °C and 70 °C, with a heating capacity of 99.27~153.14 kW and a coefficient of performance (COP) of 2.25~4.85.

Keywords high-temperature heat pump; refrigerant replacement; HFO refrigerant; physical property

随着我国“双碳”目标的提出, 推动能源结构转型、推进产业优化升级成为我国高质量发展的必经之路^[1]。我国工业领域的能源消耗量约占全国能源消耗总量的 70%, 能源利用效率为 33%, 与发达国家存在较大差距^[2]。以工业余热为例, 我国工业能耗约 50% 未得到利用, 而是通过各种形式的余热直接排放^[3]。高温热泵是一种将低位热源提升至高位热源

的节能装置, 可以有效回收工业余热制取高温热源, 从而提高工业能源利用率, 减少碳排放。高温热泵应用领域广泛, 如印染、屠宰、造纸、化工和电厂等^[4-5], 近年来国内多家企业推出高温热泵机组, 工质的选择是该领域研究重点^[6]。

选择合适的高温热泵工质可以提高系统的效率、稳定性和可靠性, 同时也可以满足环保和经济性的要

求,并推动高温热泵技术的发展^[7]。《蒙特利尔议定书基加利修正案》约定削减高 GWP(全球变暖潜值, Global Warming Potential)氢氟碳化物(HFCs)。2023 年 11 月生态环境部印发的《2024 年度氢氟碳化物配额总量设定与分配方案》^[8]指出,中国在 2024 年的氢氟碳化物(HFCs)配额总量为 18.53 亿 t CO₂,其中内用生产配额总量为 8.95 亿 t CO₂,进口配额总量为 0.1 亿 t CO₂。替代高 GWP 的 HFCs 制冷剂主要包括天然工质、HCs、HCFOs、HFOs 以及混合工质等^[9]。而高温热泵领域常用 HFCs 物质 R245fa 由于具有较高的 GWP,将面临严格的削减和使用限制。基于此,浙江省化工研究院有限公司研发了 HFOs 类环保工质 HP-1^[10],这是一种单工质,用于替代 R245fa。为推

进 HP-1 在高温热泵实际应用进程,需要解决实用化之前的关键性技术问题。本文主要针对 HP-1 可燃性、溶油性和材料相容性等关键物性及高温热泵应用性能展开研究,为 HP-1 替代 R245fa 用于高温热泵等领域提供技术参考。

1 基础性质研究

HP-1 与 R245fa 基础物性对比如表 1 所示。HP-1 环境性能优异,ODP(臭氧损耗潜值, ozone depletion potential)为 0,GWP<1^[10],沸点为 9.73 °C,与 R245fa 临界温度和临界压力相近,具有替代 R245fa 应用于高温热泵、ORC(organic Rankine cycle,有机朗肯循环)系统等领域的潜力。

表 1 HP-1 与 R245fa 基础物性对比

Tab.1 Basic physical property comparison between HP-1 and R245fa

工质	沸点/°C	临界温度/°C	临界压力/MPa	蒸气压(25 °C)/MPa	ODP	GWP
HP-1	9.73	150.12	3.53	0.177	0	<1
R245fa	15.05	153.86	3.65	0.148	0	790

2 关键性质研究

本文主要对 HP-1 的可燃性、与润滑油的相溶性及与材料的相容性展开研究。实验中 HP-1 由浙江省化工研究院有限公司提供样品,样品纯度为 99.8%,实验前未进行任何处理。

2.1 可燃性研究

制冷剂可燃性研究主要包括可燃极限和燃烧速度研究,可燃浓度下限(LFL, lower flammability limit)和可燃浓度上限(UFL, upper flammability limit)共同确定了制冷剂的可燃极限^[11]。

2.1.1 实验设备和实验步骤

参考 GB/T 12474—2008^[12]和 ISO 817—2014^[13]标准开展可燃极限和燃烧速度实验研究,实验装置如图 1 所示,实验温度通过测量竖直玻璃管上下两端的温度获得。

可燃极限值研究方法:记录实验中制冷剂体积分数 L_1 和 L_2 的值, L_1 和 L_2 对应相邻的传播浓度和非传播浓度,制冷剂的 LFL 为 L_1 和 L_2 的中间值,同理确定制冷剂的 UFL。

燃烧速度计算式:

$$S_u = S_s \times \frac{a_f}{A_f} \quad (1)$$

式中: a_f 为火焰底部横截面积, m²; A_f 为火焰表面积, m²; S_s 为火焰传播速度, m/s; S_u 为火焰燃烧速度, m/s。

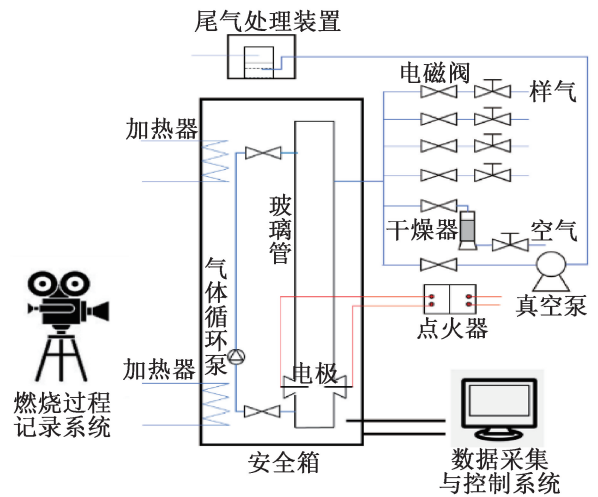


图 1 可燃性实验装置

Fig.1 Combustibility test equipment

实验步骤如下:

1) 先检查装置密封性,用真空泵将玻璃管抽真空至不大于 0.6 kPa,停止抽真空后,5 min 压力示数上升不大于 0.2 kPa,真空度符合要求。

2) 待测试制冷剂纯度要达到 99.5% 以上,用分压法配置制冷剂与空气,然后利用微型隔膜真空搅拌机搅拌 5 min,使玻璃管内制冷剂与空气均匀分布。

3) 停止搅拌后进行点火。可燃极限实验时将下泄压阀关闭,实验过程中观察点火极周围是否有火焰出现或传播;燃烧速度实验时将下泄压阀开启,实验

过程中使用高倍摄像机对火焰传播过程进行录像,用于燃烧速度计算。

4) 点火后将玻璃管内可燃产物气体用真空泵抽出,用空气清洗玻璃管腔体两遍以上。

2.1.2 实验结果与讨论

1) 可燃极限实验研究。

HP-1 可燃下限实验结果如表 2 所示。由实验编号 LE-11 和 LE-12 可知,HP-1 体积分数为 10.0% 时,两次实验均发生点燃;由实验编号 LE-13 和 LE-14 可知,HP-1 在体积分数为 9.5% 时,两次实验均未点燃。因此,HP-1 在干空气中的可燃下限为 9.75%。

表 2 HP-1 在干空气中的可燃下限实验
Tab.2 Lower flammability limit experiment of HP-1 in dry air

编号	HP-1/空气(体积分数/%)	实验温度/°C	肉眼观察燃烧结果
LE-09	9.0/91.0	23.4/24.1	未点燃,电极发光
LE-10	9.0/91.0	22.5/21.0	未点燃,电极发光
LE-11	10.0/90.0	23.7/24.3	点燃,蓝色火焰约 20~25 cm
LE-12	10.0/90.0	24.2/23.3	点燃,蓝色火焰约 20~25 cm
LE-13	9.5/95.0	23.1/22.5	未点燃,电极发光
LE-14	9.5/95.0	23.6/22.7	未点燃,电极发光
LE-15	11.0/99.0	24.2/22.3	点燃,蓝色火焰约 30~40 cm
LE-16	12.0/98.0	23.5/23.2	点燃,蓝色火焰约 30~40 cm

HP-1 可燃上限实验结果如表 3 所示。由实验编号 LE-30 和 LE-33 可知,HP-1 在体积分数为 16% 时,两次实验均点燃,出现微弱蓝色火焰;由实验

编号 LE-34 和 LE-35 可知,HP-1 在体积分数为 16.2% 时,均未点燃。因此,HP-1 在干空气中的可燃上限为 16.1%。

表 3 HP-1 在干空气中的可燃上限实验
Tab.3 Upper flammability limit experiment of HP-1 in dry air

编号	HP-1/空气(体积分数/%)	实验温度/°C	肉眼观察燃烧结果
LE-25	13.0/87.0	24.2/21.8	点燃
LE-27	14.0/86.0	23.1/22.7	点燃
LE-29	15.0/85.0	23.3/21.6	点燃
LE-30	16.0/84.0	24.1/21.4	点燃
LE-31	17.0/83.0	24.1/21.5	未点燃,电极发光
LE-32	18.0/82.0	23.9/22.1	未点燃,电极发光
LE-33	16.0/84.0	24.4/21.4	点燃,微弱蓝色火焰
LE-34	16.2/83.8	23.4/21.3	未点燃,电极发光
LE-35	16.2/83.8	23.8/21.4	未点燃,电极发光

2) 燃烧速度实验研究。

根据可燃极限实验结果开展燃烧速度实验研究,进行 5 组 HP-1 燃烧速度实验,HP-1 体积分数分别为 11.0%、12.0%、13.0%、14.0% 和 15.0%,火焰均未能传播至玻璃管顶端,无法计算其燃烧速度。燃烧火焰传播情况如图 2 和图 3 所示,当 HP-1 体积分数为 12.0% 时,火焰传播距离最大,为 198.3 mm。

HP-1 可燃极限为 9.75%~16.10%,燃烧速度测

试过程中,HP-1 无法形成稳定传播的火焰。



(a) 体积分数 12% (b) 体积分数 13%

图 2 HP-1 燃烧火焰

Fig.2 HP-1 combustion flame

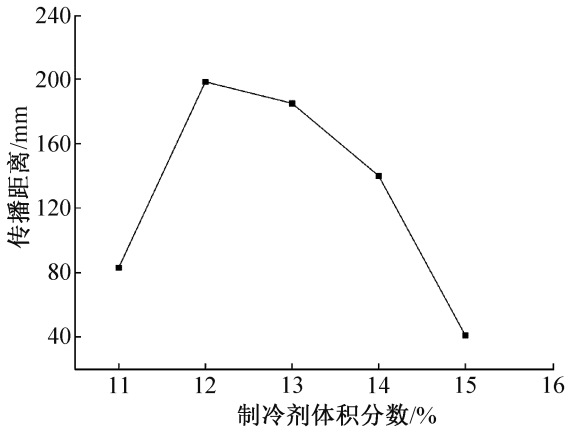


图3 HP-1在干空气中的传播距离

Fig.3 Propagation distance of HP-1 in dry air

2.2 HP-1与润滑油互溶性研究

参考 SH/T 0699-2000《冷冻机油与制冷剂相溶性实验法》^[14]开展 HP-1 与 POE 润滑油 MK220(上海明可途新材料科技有限公司)互溶性测试。将不同含油率的 HP-1 与 MK220 润滑油密封于玻璃管内,实验研究了 HP-1/MK220 混合液在含油率为 5%~60%,温度为-60~150℃时的相溶性,其中低温相溶性实验测温为-60~50℃,高温相溶性实验测温为 50~150℃。实验结果如表 4 和图 4 所示。由表 4 可知,在 5%~60%含油率和 50~150℃温度内,HP-1 与 MK220 冷冻油混合溶液始终为均一透明的溶液状态,未出现絮状沉淀物或两相分离的现象,两者具有良好的互溶性。

表4 相溶性测试结果

Tab.4 Solubility test results

项目	MK220/HP-1 (质量分数/%)	两相分离温度/℃
低温相溶性 (-60~50℃)	5	-3
	10	-8
	19	-40
	29	-48
	41	-41
高温相溶性 (50~150℃)	61	-38
	5	未分离
	14	未分离
	29	未分离
	39	未分离
	47	未分离
62	未分离	

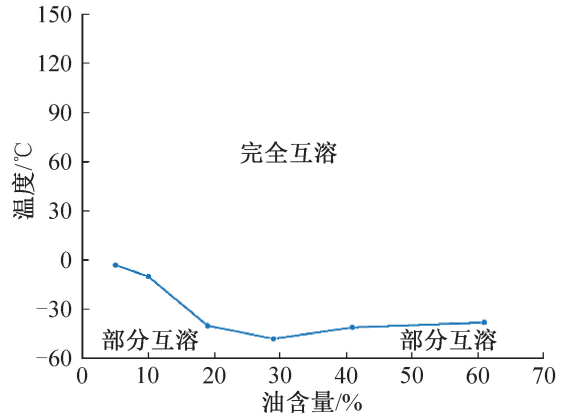


图4 HP-1与MK220的两相分离曲线

Fig.4 Two phase separation curve of HP-1 and MK220

由图 4 可知,当温度在-3℃以上,HP-1 制冷剂与 MK220 能以任意比例互溶,当温度逐渐降低,HP-1 制冷剂与 MK220 冷冻油能以一定比例互溶。

2.3 HP-1与材料相容性

参考 ASHRAE 97-2007^[15]标准开展 HP-1 与材料共存体系的加速老化实验研究,考察 HP-1 与高温热泵系统常见金属材料和非金属材料以及润滑油在高温下的稳定性和材料相容性。实验设备使用 1 L 高压反应釜,如图 5 所示。

材料相容性实验材料与实验条件如表 5 所示。

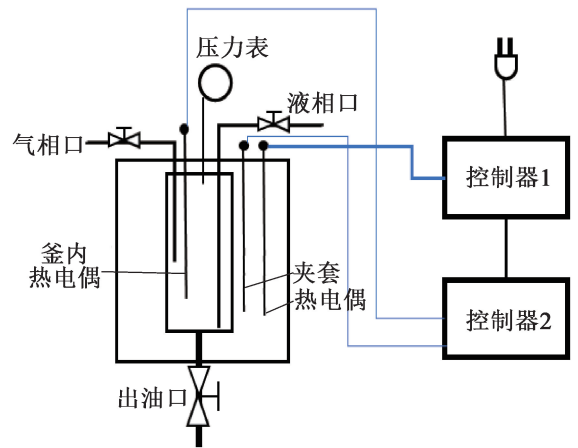


图5 高压反应釜

Fig.5 High-pressure reactor

表5 实验材料与实验条件

Tab.5 Experimental materials and conditions

材料	温度/℃	时间/h
硅钢片A/硅钢片B/316L 不锈钢/ 紫铜/玻璃棒/铝棒	175	1 000
亚胺薄膜/绝缘纸/聚酯纤维带/氟 塑料管/电磁线/玻璃丝纤维带/聚 四氟乙烯引线/漆块/定纹管	110	500

2.3.1 金属材料 and 玻璃材料相容性

金属/玻璃材料相容性实验前后 HP-1 气相色谱分析结果如表 6 所示,出峰时间和峰面积均基本无变化,表明 HP-1 保持稳定。

表 6 金属/玻璃材料相容性实验前后 HP-1 气相色谱分析结果

Tab.6 Results of HP-1 gas chromatography analysis before and after solubility experiments with metal/glass materials

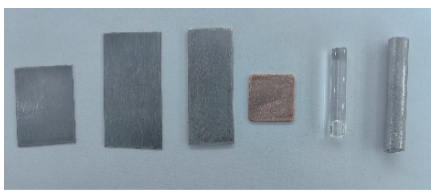
样品	谱图编号	出峰时间/min	峰面积
0 h-sample	20180224-04	8.057	99.764
384 h-sample	20180312-03	8.111	99.790
624 h-sample	20180322-03	8.103	99.703
1 000 h-sample	20180408-01	8.107	99.723

实验前后金属/玻璃材料的质量变化与外观变化分别如表 7 和图 6 所示,可以看到,实验前后金属的质量未发生明显质量变化,金属材料外观无变化。

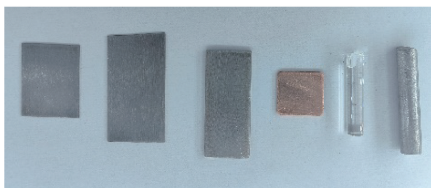
表 7 实验前后金属/玻璃材料质量变化

Tab.7 Weight change of metal/glass materials before and after the experiment

实验材料	实验前质量/g	实验后质量/g	质量变化率/%
硅钢片A	3.078	3.079	0.02
硅钢片B	4.701	4.701	0
316L 不锈钢	13.705	13.706	0
紫铜	3.464	3.463	0.03
玻璃棒	2.623	2.623	0
铝棒	8.394	8.395	0.01



(a) 实验前



(b) 实验后

图 6 稳定性实验前后金属/玻璃材料的照片

Fig.6 Photographs of the metal/glass materials before and after the stability test

此外,实验后收集尾气进行酸度检测,未测得酸度(以 HCl 计)。即研究表明 HP-1 与金属材料相容性良好。

2.3.2 非金属材料相容性

非金属材料相容性实验前后 HP-1 气相色谱分析结果如表 8 所示,出峰时间和峰面积稳定,HP-1 含量无明显变化。

表 8 非金属材料相容性实验前后 HP-1 气相色谱分析结果

Tab.8 Results of HP-1 gas chromatographic analysis before and after solubility experiments with nonmetallic materials

样品	出峰用时/min	峰面积
0 h-sample	8.140	99.844
240 h-sample	8.012	99.836
500 h-sample	8.008	99.836

实验前后非金属材料质量对比情况如表 9 所示,大部分材料质量有所增加,其中玻璃丝纤维带和定纹管增加显著,质量变化率分别达 20.90%和 22.23%,由于两者容易吸附润滑油导致。实验结束后对 HP-1 气体进行酸度测试,未检出酸度(以 HCl 计)。

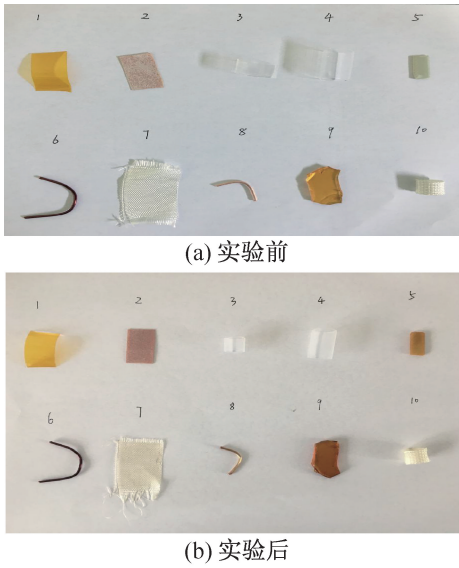
表 9 实验前后非金属材料质量变化

Tab.9 Weight change of non-metallic materials before and after the experiment

实验材料	实验前质量/g	实验后质量/g	质量变化率/%
亚胺薄膜	0.031	0.032	2.27
绝缘纸	0.133	0.140	5.73
氟塑料管	0.324	0.324	0.25
聚酯纤维带	0.603	0.605	0.25
PTFE	0.459	0.461	0.46
电磁线	0.652	0.652	0
玻璃丝纤维带	0.126	0.152	20.9
聚四氟乙烯引线	0.284	0.290	2.22
漆块	1.089	1.110	1.96
定纹管	0.185	0.227	22.23

实验前后非金属材料外观变化如图 7 所示,可以发现实验后氟塑料管和漆块颜色加深明显,其他材料表面并未发生明显变化。

综上所述,HP-1 本身稳定性良好,非金属材料由于吸附润滑油导致质量增加,其中的玻璃丝纤维带和定纹管增加显著,氟塑料管和漆块实验后颜色加



(a) 实验前

(b) 实验后

图 7 稳定性实验前后非金属材料的照片

Fig.7 Photographs of the non-metallic materials before and after the stability test

深,其他非金属材料相容性良好。

3 HP-1 高温热泵循环性能研究

在对 HP-1 关键物性研究的基础上,进一步开展其在高温热泵系统中的循环性能研究。

实验系统如图 8 所示。压缩机选用上海汉钟精机股份有限公司的 RC2-200 T-P 螺杆压缩机,理论容积流量为 $193 \text{ m}^3/\text{h}$,额定输入功率为 55 kW 。冷凝器采用两管程壳管式换热器,工质在管外冷却凝结,总换热管为 78 根,传热面积为 25.42 m^2 ;蒸发器采用干式壳管式换热器,两管程为 140 根换热管,有效传热面积为 13.738 m^2 ;中间换热器采用板式换热器,传热面积为 2.40 m^2 ,油冷却器传热面积为 1.73 m^2 ;油分离器工作容积为 0.064 m^3 ,工作压力小于 2.8 MPa ,采用电子膨胀阀,通过 PLC 编制程序控制其运行开度,开度为 $0 \sim 100\%$ 。主要测量仪器如表 10 所示。

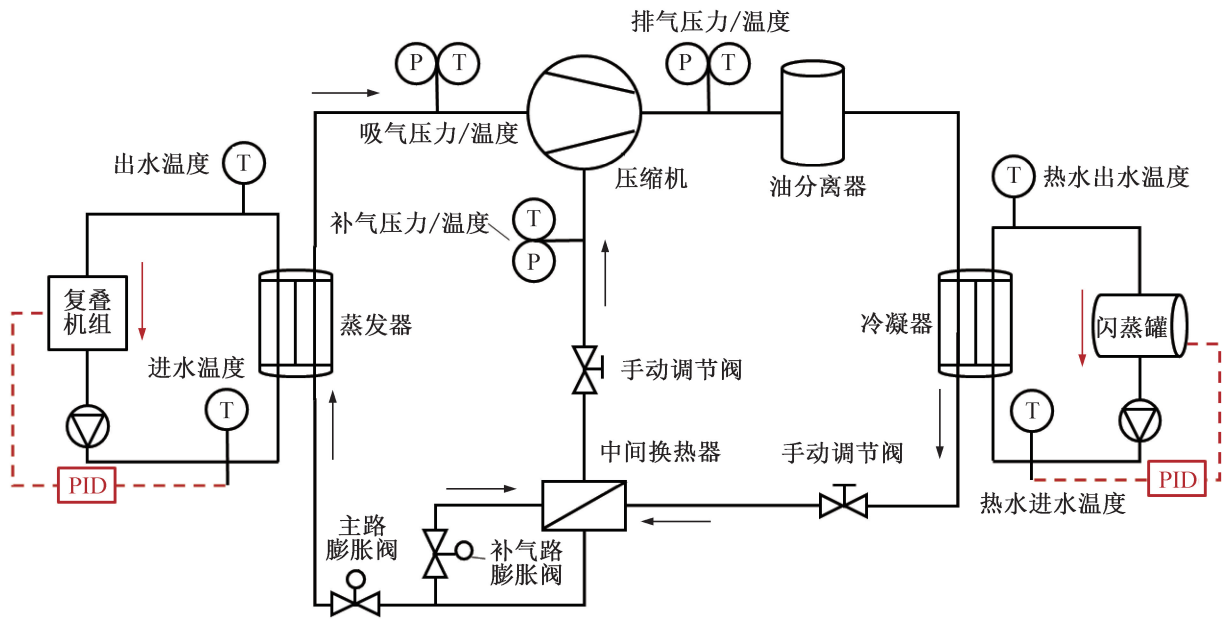


图 8 高温水源热泵实验系统

Fig.8 High temperature water-source heat pump experimental system

表 10 热泵系统相关测量仪器^[10]

Tab.10 Measuring instruments related to heat pump systems^[10]

仪器	型号	测量范围	精度
温度传感器	Pt1000(补气温度)		
	Pt1000(压缩机吸气温度)	$0 \sim 150 \text{ }^\circ\text{C}$	$\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$
	Pt100(压缩机排气温度)		
压力传感器	XSK-AC10B-107(低压侧)	$0 \sim 5\,000 \text{ kPa}$	$\pm 0.2\%$
	XSK-AC10B-107(高压侧)		
功率计	WT230		0.4%

HP-1 高温热泵机组制热量与能效比如图 9 所示。由图 9(a)可知,固定蒸发温度,随着冷凝温度的上升,制热量下降,3 种蒸发温度下制热量的下降率分别为 8.27% 、 17.48% 和 24.81% ,并且随着蒸发温度的上升,制热量的降幅增加。冷凝温度为 $100 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,蒸发温度为 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 的制热量比蒸发温度为 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 分别高出 22.46% 和 41.51% ,当冷凝温度达到 $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,这两个数值分别为 11.59% 和 16.00% 。由图 9(b)可知,随着冷凝温度的升高,系统的性能系数 (coefficient of performance, COP) 下降。当冷凝温度

相同时,随着蒸发温度的升高,系统 COP 随之升高。HP-1 高温热泵系统,在蒸发温度为 50~70 °C 时,机组冷凝温度均可达 125 °C,制热量为 99.27~153.14 kW,COP 为 2.25~4.85。研究结果可为 HP-1 高温热泵系统应用提供技术支持与设计借鉴。

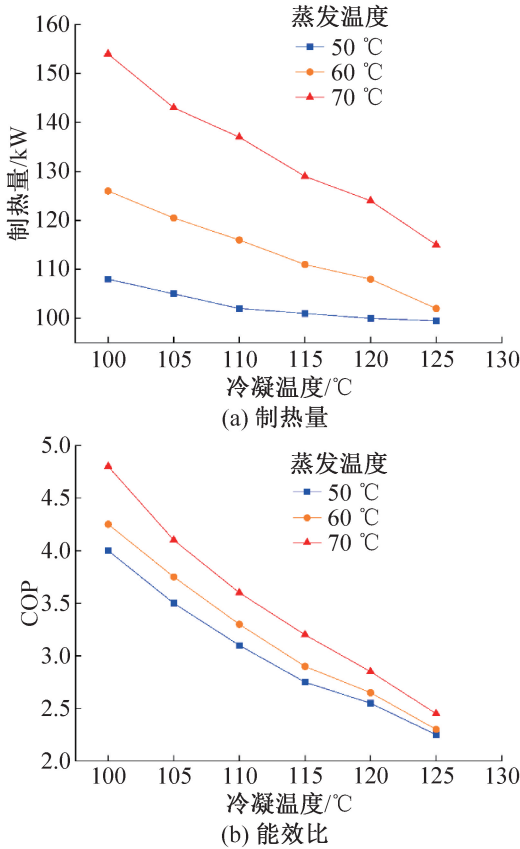


图9 HP-1 高温热泵机组制热量与能效比

Fig.9 Heating capacity and COP of the HP-1 high-temperature heat pump unit

4 结论

HP-1 的 ODP 为 0,GWP<1,基础物性与 R245fa 相似,适用于高温热泵等领域。本文对 HP-1 的关键物性和高温热泵应用性能进行实验研究,得到如下结论:

1)采用竖直玻璃管法测得 HP-1 可燃极限为 9.75%~16.10%,燃烧速度实验过程中,HP-1 最大火焰传播距离仅为 198.3 mm,无法到达实验容器顶部。

2)在含油率为 5%~60%时,HP-1 与 POE 润滑油 MK220 均表现出良好的互溶性,尤其适用于制热温度大于 100 °C 的高温热泵工况。

3)HP-1 与高温热泵系统常见材料相容性良好。

4)HP-1 高温热泵系统,在蒸发温度为 50~70 °C 时,机组冷凝温度均可达 125 °C,制热量为

99.27~153.14 kW,COP 为 2.25~4.85。研究结果可为 HP-1 高温热泵系统应用提供技术支持与设计借鉴。

参考文献

[1] 缪鹭江. “双碳”目标下中国能源转型对碳排放强度的影响研究[D]. 成都:西南财经大学,2023. (MIAO Lujiang. Research on the impact of China's energy transition on carbon emission intensity under the "Double Carbon" target[D]. Chengdu: Southwestern University of Finance and Economics, 2023.)

[2] 张进华,秦强,赵香龙,等. 低品位工业余热利用技术及研究进展[J]. 能源科技,2022,20(4):86-92. (ZHANG Jinhua, QIN Qiang, ZHAO Xianglong, et al. Technologies for low-grade industrial waste heat utilization and research progress [J]. Energy Science and Technology, 2022, 20(4): 86-92.)

[3] 赵俊林,秦虹. 有机朗肯循环低温余热发电系统综述[J]. 现代商贸工业,2020,41(9):199-200. (ZHAO Junlin, QIN Hong. Summary of organic Rankine cycle low temperature waste heat power generation system [J]. Modern Business Trade Industry, 2020, 41(9): 199-200.)

[4] 胡斌,姜佳彤,吴迪,等. 工业高温热泵发展现状与展望[J]. 制冷学报,2023,44(6):1-12. (HU Bin, JIANG Jiatong, WU Di, et al. Development status and prospects of industrial high-temperature heat pumps [J]. Journal of Refrigeration, 2023, 44(6): 1-12.)

[5] ARPAGAU S, BLESS F, UHLMANN M, et al. High temperature heat pumps: market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials [J]. Energy, 2018, 152: 985-1010.

[6] JIANG Jiatong, HU Bin, WANG Ruzhu, et al. Theoretical performance assessment of low-GWP refrigerant R1233zd(E) applied in high temperature heat pump system [J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 131: 897-908.

[7] 董益秀,王如竹. 高温热泵的循环、工质研究及应用展望[J]. 化工学报,2023,74(1):133-144. (DONG Yixiu, WANG Ruzhu. High temperature heat pump: cycle configurations, working fluids and application potentials [J]. CIESC Journal, 2023, 74(1): 133-144.)

[8] 关于印发《2024年度氢氟碳化物配额总量设定与分配方案》的通知[EB/OL]. (2023-11-06)[2024-05-28]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk05/202311/t20231107_1055295.html. (Notification of the issuance of the program for setting and allocating total HFC quotas for 2024 [EB/OL]. (2023-11-06)[2024-05-28]. <https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk05/>)

- 202311/t20231107_1055295.html.)
- [9] 刘瑶瑶,张迪,卢朋,等. 高温热泵工质研究进展[J]. 浙江化工, 2020, 51(7): 6-9. (LIU Yaoyao, ZHANG Di, LU Peng, et al. Research progress of the working fluids for high temperature heat pump [J]. Zhejiang Chemical Industry, 2020, 51(7): 6-9.)
- [10] 王约翰,南晓红,欧阳洪生,等. 绿色工质 HP-1 高温热泵系统中膨胀阀开度与流量匹配特性[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(10): 1367-1377. (WANG Yuehan, NAN Xiaohong, OUYANG Hongsheng, et al. Matching characteristics of expansion valve opening and flow rate of high temperature heat pump with green refrigerant HP-1 [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2023, 57(10): 1367-1377.)
- [11] 石玉琦,杨昭,吕子建,等. R32 与 R1234yf 可燃性对比及燃烧抑制研究[J]. 制冷学报, 2021, 42(4): 12-19. (SHI Yuqi, YANG Zhao, LYU Zijian, et al. Flammability comparison and flame retardancy research on R32 and R1234yf[J]. Journal of Refrigeration, 2021, 42(4): 12-19.)
- [12] 空气中可燃气体爆炸极限测定方法:GB/T 12474—2008 [S]. 北京:中国标准出版社, 2008. (Method of test for explosion limits of combustible gases in air: GB/T 12474—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.)
- [13] Refrigerants - designation and safety classification: ISO 817- 2014 [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 2014.
- [14] 冷冻机油与制冷剂相容性试验法:SH/T 0699—2000 [S]. 北京:中国标准出版社, 2000. (Test method for miscibility of refrirator oils with refrigerants: SH/T 0699—2000[S]. Beijing: Standards Press of China, 2000.)
- [15] Sealed glass tube method to test the chemical stability of materials for use within refrigerant systems: ASHRAE 97-2007[S]. USA: ASHRAE, 2007.

通信作者简介

韩晓红,女,教授,浙江大学制冷与低温研究所,13758134870, E-mail: hanxh66@zju.edu.cn。研究方向:热管散热、微通道散热、浸没液体冷却技术、制冷剂替代技术、制冷剂泄漏与回收及再利用技术。

About the corresponding author

Han Xiaohong, female, professor, Institute of refrigeration and cryogenics, Zhejiang University, 86 - 13758134870, E-mail: hanxh66@zju.edu.cn. Research fields: thermal pipe cooling, microchannel cooling, immersion liquid cooling technology, refrigerant replacement technology, refrigerant leakage and recovery and reuse technology.