

研究论文

DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20170091

R32 与新型 PVE 油的互溶性及其对空调性能的影响

金梧凤, 于斌, 高攀, 徐磊

(天津商业大学机械工程学院, 天津 300134)

摘要: 首先自主设计搭建溶油性测试系统, 测试获得新型 PVE 油与 R32 的两相分离温度曲线, 分析其互溶性, 接着将 R32 与 POE, R32 与 PVE 两种组合使用至某型号热泵分体式空调, 对比研究了 R32 与新型 PVE 油配合使用对空调性能的影响。结果表明, 在测试含油率范围内, R32 与 R410A 专用 POE 油的互溶性不理想, 分离温度高于 R410A 与 POE 组合, 而 PVE 油与 R32 的互溶性有较大改善, 最低分离温度可比 R410A 与 POE 低 8.4℃; 空调性能影响方面, R32 配合 PVE 的使用可降低配合 POE 使用时排气温度约 2.6℃, 在制冷量和 COP 方面也具优势。

关键词: 溶解性; 实验验证; PVE 油; 两相分离温度; COP

中图分类号: TB 61+2

文献标志码: A

文章编号: 0438—1157 (2018) 04—1631—07

Effect of solubility between R32 and new PVE oil on performance of air conditioning system

JIN Wufeng, YU Bin, GAO Pan, XU Lei

(College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

Abstract: The oil soluble test system was built to get the two phase separation temperature curve of new PVE oil and R32. The mutual solubility of new PVE oil and R32 was analyzed. Then the air conditioning performance of a heat pump split air conditioner was tested at two conditions, one is charging R32 combined with POE oil and the other is charging R32 combined with PVE oil. The results showed that the mutual solubility of R32 and POE oil was not ideal in the test range of oil content. The two phase separation temperature at condition of charging R32 combined with POE oil was higher than that of R410A and POE. The mutual solubility of PVE oil and R32 was better. The minimum separation temperature was 8.4℃ which is lower than that of R410A and POE. In the aspect of the effect on air conditioner performance, the exhaust temperature in case of using PVE oil was 2.6℃ which is lower than that of using POE oil. It also had improvement on cooling capacity and COP by using PVE oil.

Key words: solubility; experiment validation; PVE oil; two phase separation temperature; COP

引 言

制冷剂 and 冷冻机油的互溶性对制冷系统十分重要, 影响着系统的使用性能^[1]。在没有油分离器的小型空调系统中, 制冷剂与油良好的互溶性有利

于系统回油, 能够避免换热器表面形成油膜, 减小热阻, 提升换热效果, 同时避免压缩机缺油, 改善润滑效果。故专用冷冻机油的开发一直是新型制冷剂实用化的必要条件。

目前国际上主要采用氢氟烃类冷剂 R410A

2017-01-19 收到初稿, 2017-11-25 收到修改稿。

联系人: 于斌。第一作者: 金梧凤 (1963—), 男, 副教授。

基金项目: 天津市创新团队项目 (TD12-5048)。

Received date: 2017-01-19.

Corresponding author: YU Bin, yubinxi6696@163.com

Foundation item: supported by the Tianjin Innovative Research Groups (TD12-5048).

替代 R22, 但因其具有很高的全球变暖潜能值 (GWP), 已被《京都议定书》列为限排物质, 同样面临淘汰。制冷剂 R32 (二氟甲烷) 破坏臭氧潜能值(ODP)为 0, 全球变暖潜能值(GWP)为 675, 工作压力与 R410A 基本相当。相同制冷量下, R32 充注量仅为 R22 的 2/3 左右^[2]。相比于 R290, R32 只具有低度可燃性, 相比于 R410A, R32 的全球变暖系数只有前者的 1/3 左右, 这些优势使其成为当前最具潜力的 R22 替代制冷剂。

虽然 R410A 中 50%组分为 R32, 但通过二者理论制冷循环比较, 使用 R32 时压缩机的排气温度较使用 R410A 时高出不少, 且 R32 制冷剂与很多 R410A 冷冻机油不相溶^[2-3]。通过开发 R32 专用润滑油来降低排气温度提升空调性能已成为优化新工质制冷系统换热器和控制压缩机出油率等环节的重要技术课题^[4-5]。

当前节能减排的背景下, 制冷剂替代形势日趋严峻, 与制冷剂相匹配的冷冻润滑油课题研究也越来越受关注^[6]。同时, 合理的相溶性实验方案, 也是的必要的考虑因素^[7]。

制冷剂和冷冻机油互溶性好坏以两相分离温度为评价标准, 我国颁布的石油化工业标准在参考日本溶油性实验方法的基础上作出改进, 绘制出 R22 等制冷剂的溶油性曲线^[8-9]; 郭智恺^[10]考虑实验工况下的安全情况, 采用不锈钢管和玻璃视镜的组合, 研究出耐压度 6.0 MPa 的系统; 西安交通大学学者^[11-13]设计了一套以高压试管及其配件为核心环节的溶油性测试系统, 不仅得出了 R134a/R290、R134a/R600a 组分改变时与特定润滑油相溶性的变化趋势, 还探讨了润滑油加工工艺对相溶性的影响; 杨瑞杰等^[14]采用平衡釜为主体的测试装置研究了冷冻机油类型、压力、温度等因素对自然工质 R290 溶油性的影响; 王汝金等^[15]基于实验装置研制过程, 对我国相溶性实验方法行业标准提出了修订意见, 并获取了 R32 与某油品的两相分离曲线, 为 R32 压缩机的油品选型和换热器设计提供了基础数据; 杨昭等^[16]测试了 RE170、RE170/R227ea 与矿物油的互溶性, 并结合经验公式和溶解度参数法提出了新的评价方法来评价纯制冷剂及二元混合制冷剂和矿物油的互溶性。

国外方面, Matsumoto 等^[17]针对一种 R410A 用 PVE 润滑油的物理性质和热稳定性及润滑性进行了实验研究, 发现这种润滑油较符合 R32 的使用特性; Saitor 等^[18]比较了矿物油、POE、PAG 润滑油

和几种低 GWP 制冷剂的使用特性, 得出各自适用的制冷剂; Joseph^[19]除了传统润滑油外, 还研究了 MO, AB 润滑油配合绿色制冷剂使用的可能性; 由于 R32 制冷剂与 R410A 制冷剂用润滑油并不能完全匹配使用, Takeshi 等^[20]对一种最新 R32 制冷剂专用润滑油进行测试, 结果证明其有良好的相溶性。

冷冻机油影响系统性能研究方面, 何国庚等^[21]通过实验证明, 在保证合理的活塞与气缸间隙前提下, 采用更低黏度的冷冻机油, 不仅提高了性能指标, 而且满足了可靠性的要求。姜莎等^[22]通过 40 d 的性能实验发现, 新型极化冷冻油添加剂对于系统的影响基本稳定。娄江峰等^[23]研究了新型纳米石墨冷冻机油对系统的影响, 发现该机油对系统耗电量、制冷能力有一定提升。

可以看出, 目前国内外针对 R32 的实用性及对能够良好配合 R32 使用的冷冻机油的研究仍备受关注。本文研究对象是一种新开发的 PVE 型合成油, 在其实用化之前有必要进一步测试, 以评价其对系统性能的改善效果。首先自主设计搭建溶油性实验台, 通过实验获得 R32 与新型 PVE 油的两相分离温度曲线, 对比分析了 R32 与新型 PVE 油互溶性的改善程度。在此基础上对一台充注新型 PVE 油的分体热泵型空调进行测试, 获得了压缩机排气温度、制冷量、压缩机输入功率及制冷系数等参数。本文探讨了新型 PVE 冷冻机油与 R32 互溶性的改善以及其对于空调系统性能的影响, 为新型 PVE 油的使用提供参考数据。

1 冷冻机油简介

传统矿物油与 R32 极性相差较大, 互溶性不理想, 近年来开发重点主要集中在 POE (聚酯油) 和 PVE (聚醚油) 两类合成油上^[24]。本实验空调使用转子压缩机, 出厂充注的 R410A 专用 POE 油与 R32 互溶性不理想。本次实验对象为一种 R32 专用的新型 PVE 油。两种油的具体参数如表 1 所示。

影响制冷剂与冷冻机油的互溶性的因素主要有制冷剂类型、混合物含油率及黏度、温度、压力等, 视互溶程度, 互溶性常分为 3 种情形: ① 制冷

表 1 冷冻机油参数

Table 1 Parameters of refrigeration oil

Type	Model	Brand	Density@15°C/g·ml ⁻¹	Viscosity grade
POE	RB68	JX Nippon Oil	0.935	VG68
PVE	FW68D	Idemitsu	0.983	VG68

剂与油很难相溶,会出现明显分层或浑浊;② 制冷剂与油部分互溶,温度较高互溶,低温时发生两相分离;③ 制冷剂与油完全互溶,几乎不出现分层^[25]。

为了评价制冷剂和油的互溶性,采用两相分离温度作为标准。先将混合物升温至澄清状态,再逐渐降温,直到出现整体浑浊或分层的状态,记录现象发生时刻的温度,即为此含油率下的两相分离温度。相同含油率下,分离温度越低,互溶性越好。

2 溶油性测试实验

2.1 测试系统简介

本测试系统在行业标准 SH/T 0699—2000 基础上进行完善和改进,由主体试管、恒温水槽、恒温室和配气系统组成,如图 1 所示。该实验装置已获得国家实用新型专利。

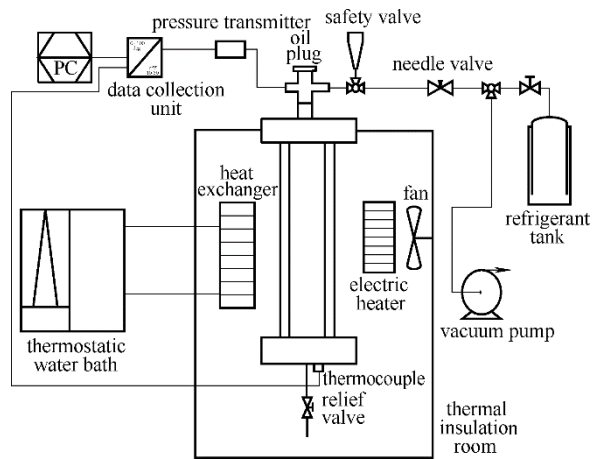


图 1 测试系统示意图
Fig.1 Schematic diagram of test system

主体试管包括石英玻璃管、压紧盖、不锈钢套筒、压力传感器、热电偶和安全阀等,恒温水槽温度波动为±0.01℃,热电偶采用从主体试管下部插入混合物的安装方式,既满足了使用要求,又避免了容积修正,配气系统主要由真空泵和制冷剂罐组成。各部件具体参数如表 2 所示。实验系统的质量不确定度为 0.4 g。

2.2 系统精度校验

为了校验系统的精度,选取 R22 和 SUNISO

表 2 系统部件参数

Table 2 Parameters of system components			
Parameter	Model	Range	Accuracy
thermostatic water bath	ZYHW-60	-60—95℃	±0.01℃
pressure transmitter	STA700	0—3.5 MPa	±0.065%P
thermocouple	K-Type	-40—200℃	±0.75%t

3GS 油进行测试,与文献[26]比较,结果如表 3 所示。

由图 2 可知,实验值与文献值吻合较好,最大温差不超过 5℃,满足可再现性要求。分析结果相差的原因因为实验中观测判定溶液整体浑浊的误差以及每次调整温度后溶液稳定的时间不同造成。

表 3 实验结果与文献对比

Table 3 Low phase separation temperature of experiment and literature

Oil rate(mass fraction)/%	Experimental result/℃	Literature result ^[26] /℃
10	-2.5	-1.5
15	3.5	6.5
20	3.0	7.1
25	2.0	4.5
30	-1.5	1.2
40	-7.0	-6
50	-16.0	-13.1
60	-30.0	-27.2

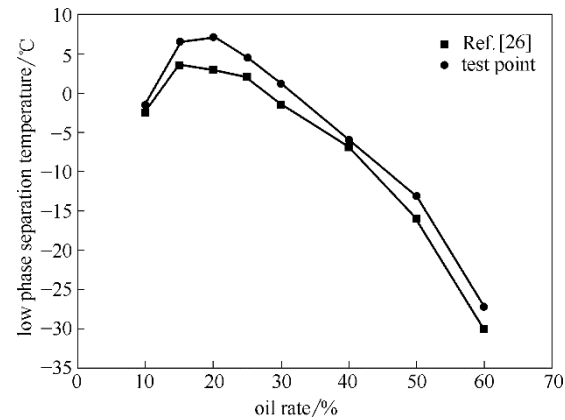


图 2 R22 和 3GS 油实验值与文献值对比
Fig.2 Difference between experimental and literature values

2.3 实验过程及结果分析

2.3.1 配制一定含油率的混合物 本实验采用体积读取法,即借助标尺读取管内有效高度以得到特定质量的制冷剂,一定含油率的混合物配制过程如下。

利用电子秤称取质量 M_0 的润滑油充注进试管内,要获得含油率为 X 的混合物,需要制冷剂量为 $M_r=M_0X^{-1}-M_0$ 。

而制冷剂则可通过读取有效高度 h 获得

$$M_r = \frac{\pi D^2}{4} \rho h \tag{1}$$

式中, M_r 为封入的制冷剂质量,g; D 为玻璃管内径,cm; ρ 为充注温度下制冷剂的液态密度,g·ml⁻¹, h 为试管内有效高度,cm。

通过恒温水槽的低温载冷剂对恒温室进行降

温,注入的制冷剂在主体试管内液化,通过读取不同的有效高度,得到不同含油率的混合物。

实验中使用制冷剂品牌为飞源冷剂,其 R32 和 R410A 的纯度分别为 99.5%和 99.8%。

2.3.2 实验过程 一定含油率的混合物配制完成后,通常呈分层状态[图 3(a)];关闭恒温水槽并打开电加热器对混合物逐渐升温,直至变为澄清、均一的溶液[图 3(b)]。出于安全考虑,安装整定压力为 1.8 MPa 的安全阀,混合物压力超过 1.6 MPa 时关闭电加热器。然后打开恒温水槽,再次对混合物降温,直至整体浑浊[图 3(c)]。记录此时的温度,即为该含油率下的两相分离温度。

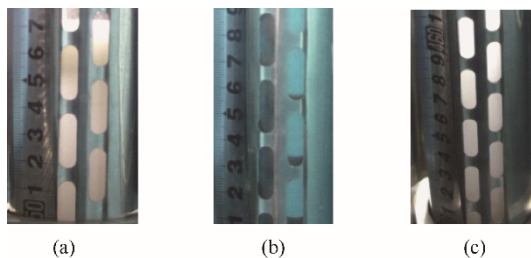


图 3 混合物配制后分层 (a)、呈现澄清 (b) 和整体浑浊 (c) 状态的照片

Fig.3 Photograph of layered (a), clarify (b) and muddy (c) of mixed refrigerants

2.3.3 结果和分析 实验测定了 R410A/POE, R32/POE 和 R32/PVE 混合物的两相分离温度,含油率范围 10%~60%,间隔 10%测定,测温范围为 -25~50℃。结果如表 4 和图 4 所示。

表 4 互溶性测试结果

Table 4 Test results of mutual solubility

Oil rate/%	Low phase separation temperature/℃		
	R410A/POE	R32/POE	R32/PVE
10	6.2	7.6	-4.8
20	16.7	25.1	-0.8
30	11.3	15.3	-10
40	2.1	5.2	-14.2
50	-7.8	-1.1	<-25.0
60	<-25.0	-7.9	<-25.0

实验结果表明, R32 与 R410A 专用 POE 油的互溶性并不理想,测量含油率范围内两相分离温度都高于 R410A/POE 组合,最高差值出现在含油率 20%,约为 8.4℃。而新开发 PVE 油与 R32 的互溶性得到了明显改善,各含油率下两相分离温度都低于 R410A/POE 组合,最大温差为含油率 20%时的 25.9℃。

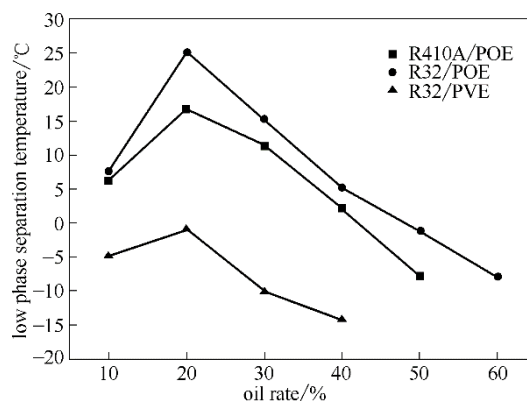


图 4 互溶性结果对比

Fig.4 Comparison of results of mutual solubility

通过互溶性实验可以推断,同样工作条件下,相比 POE 油, R32 循环时更易将互溶性更佳 PVE 油带回压缩机,使用时系统性能应更优^[27]。但在实际空调系统中使用 R32 配合 PVE 油会产生怎样的影响,需要进行空调性能测试实验进行研究。

3 空调性能测试实验

为研究 R32 和 PVE 油在真机内组合使用时空调的性能,在专用性能测试台进行空调性能测试实验,通过对使用 R32/PVE 时空调在排气温度、制冷量、制冷系数等方面与使用 R32/POE、R410A/POE 时的对比分析,研究新型 PVE 油作为 R32 润滑油的可行性及优势。

性能测试台包括室内、外两部分,分别安置分体式空调的室内机和室外机。实验中,室内侧温度由加热器配合温控仪维持在 $T_1=24^\circ\text{C}$,室外侧温度 $T_2=37^\circ\text{C}$,偏差控制为 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 。实验使用的热泵分体式空调额定参数为:制冷剂 R410 A,充注量 900 g,配合 POE 油使用,油充注量为 (300 ± 5) ml。

根据充注量与摩尔质量大约呈正比的关系^[28], R32 注量定为 630 g,测试冷冻机油依次为 POE、PVE 型,充注量同为 (300 ± 5) ml。空调压缩机排气口、蒸发器表面、冷凝器表面分别布置热电偶,并连接功率仪得到压缩机组的输入功率。为了避免过高的排气温度并有利于快速稳定室内侧温度,利用专用控制软件将压缩机频率定为 43 Hz,风扇转速 $0.28 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$ 。实验流程图如图 5 所示,测试设备具体参数如表 5 所示。

实验过程中为了避免残留油的影响,需要对管路用高压氮气进行冲洗。每组实验先进行温度场调试,待室内、外侧温度稳定后进行记录,每 3 min 记录一次,时间为 30 min,取平均值进行比较。

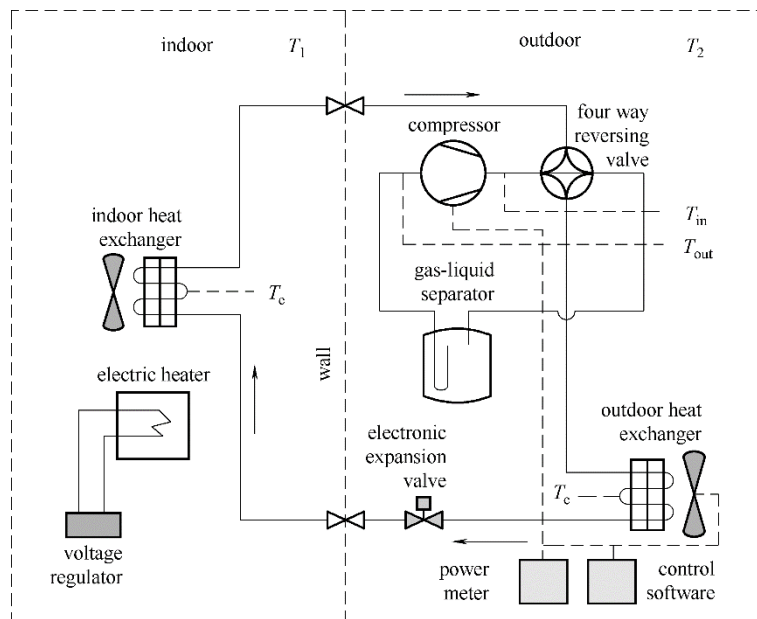


图5 测点布置图

Fig.5 Arrangement of measuring points

表5 测试设备参数

Table 5 Parameters of test equipment

Parameter	Model	Range	Accuracy
power meter	ZM192-P91	0—2000 W	± 0.1 W
thermocouple	K-Type	-40—200℃	$\pm 0.75\%$ ℃

3.1 压缩机排气温度对比

小型空调转子压缩机中, 主要依靠制冷剂裹挟油到摩擦部件表面形成润滑, 如果制冷剂和油不能良好互溶, 直接造成压缩机供油不足, 摩擦生热过多, 排气温度升高, 甚至发生冷冻机油分解碳化等危害。图6显示了不同搭配方案时压缩机的排气温度, 当压缩机频率、风扇转速一定情况下, 搭配 POE

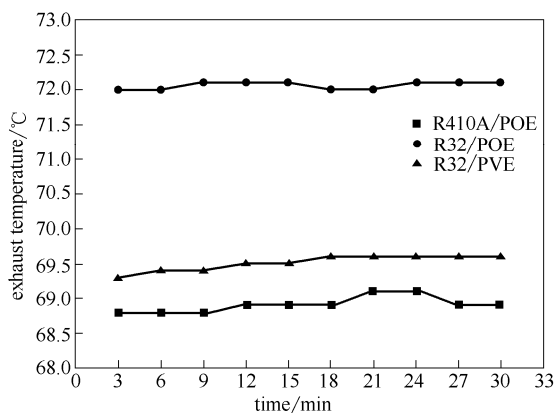


图6 压缩机排气温度

Fig.6 Exhaust temperature of compressor

油, R32 排气温度高于 R410A 约 3.2℃; 搭配新型 PVE 型油时, R32 裹挟更多的油到达压缩机内壁表面, 改善了润滑效果, 减少了摩擦热, 并由于部分 R32 溶于润滑油而造成压缩量的减少^[29], 排气温度下降了近 2.6℃, 互溶性的改善降低了排气温度, 对于压缩机和系统稳定运行有极大提升。

3.2 制冷性能对比

计算空调的制冷量和制冷系数, 需要计算室内侧的综合传热系数。首先, 只打开 U 形加热管, 热量透过库体缝隙向外散出, 当漏热量等于加热量时, 温度不再上升, 此时

$$Q_a - Q_b = 0 \quad (2)$$

$$Q_a = \sum_{i=1}^2 U_i I_i \quad (3)$$

$$Q_b = K S \Delta t \quad (4)$$

式中, Q_a 为加热量, W; U_i 为调压器输出压力, V, I_i 为加热管工作电流, A; Q_b 为漏热量, W; K 为综合传热系数, $W \cdot (m^2 \cdot ^\circ C)^{-1}$; S 为室内侧表面积, m^2 ; Δt 为室内外温差, $^\circ C$ 。

计算得出 K 值后, 打开空调, 调试室内外侧温度至设定工况时, 制冷量和制冷系数可由以下公式求得

$$Q_a - Q_b - Q_c = 0 \quad (5)$$

$$COP = \frac{Q_c}{P} \quad (6)$$

式中, Q_c 为空调机组制冷量, W; P 为压缩机

输入功率, W。

由表 6 可以看出, 搭配 POE 油, R32 制冷量相比 R410A 提高了约 330 W, 增长 18.03%; 当 R32 搭配 PVE 油时, 制冷量相比 R410A/POE 组合提高了约 450 W, 增长 24.59%。

表 6 制冷性能对比

Table 6 Cooling performance

Type	Capacity		COP	
	Value/W	Growth rate/%	Value	Growth rate/%
R410A/POE	1830	—	2.96	—
R32/POE	2160	18.03	3.21	8.45
R32/PVE	2280	24.59	3.34	12.84

而空调制冷系数的变化, 搭配 POE 油时, R32 相比于 R410A/POE 组合高出约 0.25, 提高了 8.45%; 搭配 PVE 油时, 比 R410A/POE 组合高出约 0.38, 提高了 12.84%。

可以看出, 新型 PVE 油的使用, 相比于传统 POE 油, 不仅降低了 R32 的排气温度, 功耗基本相同的基础上, 还提高了制冷量, 空调系统的制冷系数也得到提升, 具有良好的使用效果。

实验结果表明, 空调系统使用 R32 作制冷剂时制冷能力及制冷系数都优于使用 R410A, 而 PVE 油的使用又能明显缓解使用 R32 时压缩机排气温度过高的问题。因此, R32 配合新型润滑油 PVE 油的使用可以极大提升空调性能。随着 PVE 油充注量的增加, 由于制冷剂侧换热效果受到热阻影响, 系统 COP 值呈现先增加后降低的趋势。

另外, 考虑到耐磨性等问题同样是决定新型冷冻机油实用化的决定因素, 则 PVE 油在此方面的测试还有待进行。

4 结 论

实验测定了新型 PVE 油和 R32 的两相分离温度并与 R410A/POE 和 R32/POE 两相分离温度对比, 而后利用某型号热泵型空调分别测试了使用 R32/PVE、R32/POE 和 R410A/POE 时空调的制冷性能。实验结论如下。

(1) 相比于 R410A 专用 POE 油, 新开发的 PVE 油与 R32 互溶性改善效果明显, 20% 含油率下, R32 与 PVE 油的两相分离温度比与 POE 油低约 25.9℃。

(2) 与 PVE 油较好的互溶性使得 R32 作为制冷剂时压缩机排气温度比 R32/POE 低约 2.6℃, 有效地改善了使用 R32 使压缩机排气温度过高的问题,

提升了 R32 的实用性。

(3) 尽管压缩机耗功接近, 但 R32 在与 PVE 油组合使用时比与 POE 油组合使用时制冷量提高 120 W, 使得相同工况下 COP 提高约 0.13, 这更加提升了 R32 作为 R22 替代制冷剂的潜力。

References

- [1] 经春华. 制冷压缩机的润滑油选用分析[J]. 制冷, 2012, 31(2): 83-86.
JING C H. Analysis of lubricating oil used in refrigeration compressor[J]. Refrigeration, 2012, 31(2): 83-86.
- [2] IL Y C, HYEONGJOON S, DONGWOO K, *et al.* Performance comparison between R410A and R32 multi-heat pumps with a sub-cooler vapor injection in the heating and cooling modes[J]. Energy, 2016, 112: 179-187.
- [3] 张利, 杨敏, 张蕾. 滚动转子式 R32 压缩机开发[J]. 制冷与空调, 2015, 15(2): 75-78.
ZHANG L, YANG M, ZHANG L. Rolling rotor type R32 compressor development[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2015, 15(2): 75-78.
- [4] 矢岛龙三郎, 吉见敦史, 朴春成. 降低 R32 压缩机排气温度的方法[J]. 制冷与空调, 2011, 11(2): 60-64.
YASUHARA S, ATSUSHI Y, PIAO C C. Reduce method of R32 compressor exhaust temperature[J]. Refrigeration and air conditioning, 2011, 11(2): 60-64.
- [5] 杨申音, 王勤, 唐黎明, 等. 常规空调热泵系统的 R32 替代研究述评[J]. 制冷学报, 2013, 34(6): 59-68.
YANG S Y, WANG Q, TANG L M, *et al.* A review of R32 alternatives to conventional air conditioning heat pump system[J]. Journal of Refrigeration, 2013, 34(6): 59-68.
- [6] 王汝金, 张秀平, 贾磊, 等. 替代制冷剂与润滑油的匹配相溶特性研究概述[C]//2011 中国制冷学会学术年会. 南京, 2011.
WANG R J, ZHANG X P, JIA L, *et al.* A review on the compatibility of alternative refrigerant and lubricating oil[C]//The Proceedings of the Academic Conference of China Refrigeration Society of 2011. Nanjing, 2011.
- [7] KATSUTA M, KOMATSU T. The influence of lubricant mixture into a refrigerant on condensation heat transfer in tubes[J]. Trans. JSREA, 1989, 15(4): 401-413.
- [8] Technical Committee on Chemical Products : Refrigerating machine oils: JIS K2211—2009 [S]. Japan: JP-JISC, 2009.
- [9] 中国石油天然气股份有限公司兰州炼化分公司. 冷冻机油和制冷剂相溶性试验法: SH/T 0699—2000[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
Lanzhou Branch of PetroChina Company Limited. Refrigerating oil and refrigerant compatibility test method: SH/T 0699—2000[S]. Beijing: Standards Press of China, 2010.
- [10] 郭智恺. HFC-161 溶油性试验研究[J]. 制冷与空调, 2008, 8(5): 69-71.
GUO Z K. Study on solubility of HFC-161 solvent[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2008, 8(5): 69-71.
- [11] 钱伟, 王维, 钱文波, 等. 替代制冷剂 R134a/R290 与润滑油的互溶性实验研究[J]. 制冷与空调, 2008, 8(3): 31-35.
QIAN W, WANG W, QIAN W B, *et al.* Experimental study on

- solubility of alternative refrigerant R134a / R290 and lubricating oil[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2008, **8**(3): 31-35.
- [12] 张兴群, 张小艳, 袁秀玲. 混合制冷剂 R134a/R600a 与矿物油互溶性的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2009, **43**(9): 5-8.
- ZHANG X Q, ZHANG X Y, YUAN X L. Experimental study on solubility of mixed refrigerant R134a / R600a and mineral oil[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, **43**(9): 5-8.
- [13] 毕胜山, 韦俊, 刘志刚, 等. DME、DME/R125 与润滑油互溶性实验研究[J]. 工程热物理学报, 2012, **33**(11): 1837-1838.
- BI S S, WEI J, LIU Z G, *et al.* Experimental study on miscibility of DME, DME / R125 and lubricating oil[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, **33**(11): 1837-1838.
- [14] 杨瑞杰, 杨忠学, 孙蓉, 等. 自然制冷剂 R290 与冷冻机油的相容性研究[J]. 制冷学报, 2013, **34**(5): 23-27.
- YANG R J, YANG Z X, SUN R, *et al.* Investigation on the miscibility of lubricants with natural refrigerant R290[J]. Journal of Refrigeration, 2013, **34**(5): 23-27.
- [15] 王汝金, 张秀平, 贾磊, 等. R32 制冷剂与冷冻机油的相容性测定[J]. 低温与超导, 2014, **42**(8): 59-62.
- WANG R J, ZHANG X P, JIA L, *et al.* Miscibility test for R32 refrigerant with refrigerator oil[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2014, **42**(8): 59-62.
- [16] 田田, 杨昭, 吴曦, 等. RE170、RE170/R227ea 与矿物油的互溶性评价[J]. 化工学报, 2015, **66**(6): 2005-2010.
- TIAN T, YANG Z, WU X. *et al.* Miscibility evaluation of RE170 and RE170/R227ea with a mineral oil[J]. CIESC Journal, 2015, **66**(6): 2005-2010.
- [17] MATSUMOTO T, KAWAGUCHI Y. Development of PVE refrigeration lubricants for R32[C]//Jraia International Symposium. America, 2012.
- [18] SAITOR, SUZUKI Y, FUKUHARA T, *et al.* The opportune refrigeration oil for various low GWP refrigerants[C]// Jraia International Symposium. America, 2012.
- [19] JOSEPH K. So many refrigerants-is one lubricant possible[C]//Jraia International Symposium. America, 2012.
- [20] TAKESHI O, KATSUYA T, MASANORI S. Development of refrigeration oil for use with R32[C]// Jraia International Symposium. America, 2012.
- [21] 何国庚, 方泽云, 邓承武. 润滑油对 R134a 冰箱压缩机性能的影响[J]. 压缩机技术, 2005, **2**: 9-12.
- HE G G, FANG Z Y, DENG C W. Influence of the lubricant on the performance of R134a refrigerator's compressor[J]. Compressor Technology, 2005, **2**: 9-12.
- [22] 姜莎, 刘颖, 姜昆, 等. 新型极化冷冻油添加剂持续改善空调系统性能实验研究[J]. 上海理工大学学报, 2012, **34**(3): 289-297.
- JIANG S, LIU Y, JIANG K, *et al.* Experimental study on performance improvement of heat pump type air conditioner charged with polarized refrigerant oil additive[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2012, **34**(3): 289-297.
- [23] 姜江峰, 张华, 王瑞祥, 等. 纳米石墨冷冻油对 R600a 冰箱的性能影响[J]. 化工学报, 2014, **65**(2): 517-521.
- LOU J F, ZHANG H, WANG R X, *et al.* Performance evaluation of graphite nanolubricant in domestic refrigerator employing R600a refrigerant[J]. CIESC Journal, 2014, **65**(2): 517-521.
- [24] 林俊江. 新冷媒压缩机用冷冻机油 POE 与 PVE 的分析和选用[J]. 制冷与空调, 2005, **5**(4): 92-95.
- LIN J J. Analysis and selection of lubricating oil PVE and POE for alternative refrigerant compressor[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2005, **5**(4): 92-95.
- [25] MARSH K N, KANDI M E. Review of thermodynamic properties of refrigerants lubricant oils[J]. Fluid Phase Equilibria, 2002, **199**(1): 319-334.
- [26] HUANG S B. Research on L-DRC series refrigerator oil[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2007.
- [27] 田田. 制冷剂与冷冻机油互溶性的理论及实验研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.
- TIAN T. Theoretical and experimental study on the miscibility of refrigerants with lubricants[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.
- [28] 梅奎, 李明, 梁路军. R32 和 R410A 循环特性对比研究[J]. 制冷与空调, 2011, **11**(2): 56-59.
- MEI K, LI M, LIANG L J. Comparative research on the cycle performance of R32&R410A[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2011, **11**(2): 56-59.
- [29] 吴正业, 李红旗, 张华. 制冷压缩机[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2012: 84.
- WU Y Z, LI H Q, ZHANG H. Refrigeration Compressor[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2012: 84.