

文章编号:0253-4339(2015)02-0008-06

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2015.02.008

## 碳氢制冷剂在小型商用冷柜上应用分析

钟志锋<sup>1</sup> 胡杰浩<sup>2</sup> 冯卉<sup>1</sup> 李丽<sup>1</sup> 吴建华<sup>2</sup>

(1 环境保护部环境保护对外合作中心 北京 100035; 2 西安交通大学能源与动力工程学院 西安 710049)

**摘要** 碳氢制冷剂作为天然制冷剂的一种,因其热物理性质与环保性能(ODP 为 0, GWP 极低)俱佳而受到国内外学者的广泛关注。本文从碳氢制冷剂的循环热力学性能出发,对碳氢制冷剂应用于小型商用冷柜的理论和实验进展进行论述,并介绍了压缩机、润滑油以及其他相关方面的研究进展。研究表明,相比于小型商用冷柜中使用的传统制冷剂,碳氢制冷剂的单位制冷量和性能系数较高,排气温度较低,实际运行时冷却速度和噪声水平都有较大改善。然而,碳氢类物质具有可燃性。虽然小型商用冷柜中碳氢制冷剂充注量较小,但要使得碳氢制冷剂在小型商用冷柜中大规模应用,需要做相应的泄漏燃爆实验。

**关键词** 制冷剂替代;小型商用冷柜;碳氢制冷剂;综述

**中图分类号**:TB61<sup>+</sup>2; TB657.4

**文献标识码**: A

## The Application Analysis of Hydrocarbons as Refrigerants on Small Commercial Freezers

Zhong Zhifeng<sup>1</sup> Hu Jiehao<sup>2</sup> Feng Hui<sup>1</sup> Li Li<sup>1</sup> Wu Jianhua<sup>2</sup>

(1. Foreign Economic Cooperation Office, Ministry of Environmental Protection of PRC, Beijing, 100035, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China)

**Abstract** Hydrocarbons as one of the natural refrigerants have drawn much attention for their excellent thermophysical properties and environmental performance(ODP=0, GWP is extremely low). This paper compares the operational performances of HCs with several conventional refrigerants, discusses the research progress of the application of HCs on small commercial freezers from the point of theory and tests, and expounds the progress on compressor, lubricating oil and other relevant aspects. Compared to the traditional refrigerant used in small commercial freezers, hydrocarbons have much higher unit mass refrigerating capacity and COP, lower exhaust temperature. Moreover, in actual operation, their cooling rate is faster and noise level is lower. However, hydrocarbons are flammable. Although the refrigerant charge of small commercial freezers is small, relevant fire or explosion experiments should be done when hydrocarbons leak from a small commercial freezer.

**Keywords** refrigerant substitution; small commercial freezers; HCs; review

自从 1974 年美国加利福尼亚州立大学的 M. J. Molina 和 F. S. Rowland 提出 CFCs 制冷剂中的氯原子会破坏臭氧层后,制冷系统中所用的制冷剂的环保性能开始受到人们的普遍关注。国际社会组织相关会议并进行多边磋商加速淘汰消耗臭氧物质,相继签订了《保护臭氧层维也纳公约》、《蒙特利尔议定书》、《京都议定书》,给出了淘汰 CFCs、HCFCs 的时间表。与此同时,国内外学者及相关企业也都积极寻找各方面性质优良的制冷剂来代替 CFCs 和 HCFCs。

目前主要有三种替代方案,一种是氢氟烃(以下简称 HFCs),主要代表有 R32、R134a、R410A 以及 R404A 等,它们都属于人造制冷剂,具有优良的热物理性质,无毒、不可燃,ODP(消耗臭氧潜能值)为零,

但 GWP(全球变暖潜能值)值较高,所以只能作为过渡制冷剂。第二种为氢氟烯烃(以下简称 HFOs),如 HFO-1234yf,严格意义上讲也是属于 HFCs,最早由美国杜邦公司制备出来,其 ODP 为零, GWP 极低,热物性质优良,但价格昂贵,且制备原材料为 HCFCs<sup>[1]</sup>,此外,制备过程中产生的副产品仍未知,而且 HFO-1234yf 可燃,燃烧后会产生 HF 等有毒物质<sup>[2]</sup>。第三种替代方案为天然制冷剂,主要有 R744、R717 以及碳氢(Hydrocarbons,以下简称 HCs)。其中 HCs 制冷剂热物理性质与环保性能(ODP=0, GWP 极低,如 R290 的 GWP 值为 3, R600a 的 GWP 值小于 10)均优良,与矿物油也有很好的互溶性,并且价格低廉,唯一需要注意的是其可燃性。

HCs 诸如 R290、R1270、R600a 等,在小型商用制冷的应用场合有瓶装冷藏柜、冰激凌柜、啤酒冷藏柜、饮料自动售货机、生鲜柜、岛柜等,它们的制冷量一般低于 1.0 kW。大型跨国集团如联合利华、百事可乐、红牛、喜力啤酒已经在自家生产的瓶装冷藏柜、啤酒冷藏柜、冰激凌柜中使用 HCs 制冷剂 R290、R600a,相比于传统的 HFCs 系统能效一般提高 20% 以上<sup>[3-5]</sup>。以下从 HCs 制冷剂循环热力学性能出发,对目前国内外学者的研究现状进行详细介绍。

## 1 热力学循环性能及替代比较

国内外学者主要从理论和实验两个角度对 HCs 制冷剂的循环性能进行研究,并与小型商用制冷冷柜中传统制冷剂进行了性能比较。

西安交通大学的钱文波等<sup>[6]</sup>从理论上对低温冷柜上常用的制冷剂与 HCs 制冷剂的性能表现进行比较。分别在低温工况 I (蒸发温度为 -23 °C,冷凝温度为 43 °C,吸气温度为 5 °C,液体温度为 38 °C)以及变工况下(冷凝温度为 43 °C,蒸发温度分别为 -10 °C、-20 °C、-0 °C、-40 °C)对 HCs 工质和 R22 热力学循环性能进行了模拟计算,结果如表 1 所示(变工况结果由于篇幅原因略去)。计算表明 R1270 和 R290 的压力比、排气温度比 R22 低,系统的性能系数比 R502、R507A、R404A 高。此外,作者建立某型号冷柜充灌量模型,计算得出 R290 和 R1270 充注量均小于 150 g,满足 EN-378 标准。所以,钱文波等<sup>[6]</sup>认

为 R290 和 R1270 可以在小型低温冷柜中替代 R22、R404A 等现有的低温制冷剂。然而,该研究只是对能效、排气温度等进行比较,实际运行中还需要考虑冷却速度、储藏温度及噪声水平等因素,而这些因素的测试需要进行相关的实验。

表 1 低温工况下的性能参数

Tab. 1 The performance parameters under low-temperature conditions

制冷剂	$C_{COP}$	$q_0/(kJ/kg)$	$q_v/(kJ/m^3)$	$t_d/°C$	$\varepsilon$
R22	2.017	149.0	1265.4	115.8	7.574
R502	1.788	90.5	1200.0	86.3	6.908
R507A	1.680	94.7	1222.0	80.0	7.082
R404A	1.667	96.4	1169.9	81.2	7.223
R1270	1.937	256.2	1353.4	93.7	6.409
R290	1.927	246.6	1081.1	82.7	6.647

注: $C_{COP}$ 表示性能系数; $q_0$ 表示单位质量制冷量; $q_v$ 表示单位容积制冷量; $t_d$ 表示排气温度; $\varepsilon$ 表示压力比。

另外,宋新洲<sup>[7]</sup>也从理论的角度,分别在标准工况、实际工况和变工况下,计算比较了 R22、R404A、R290、R600a、R134a、HCM1 (50% R290,50% R600)、HCM2 (80% R290,20% R600)制冷剂应用于冷柜上的循环性能,结果如表 2 和表 3 所示(变工况结果由于篇幅原因略去)。

表 2 标准工况下制冷剂的主要制冷性能

Tab. 2 Main performance parameters of refrigerants under standard condition

参数	R22	R404A	R134a	R290	R600a	HCM1	HCM2
冷凝压力/kPa	2146.97	2543.97	1470.58	1882.62	762.32	1100.452	1152.04
蒸发压力/kPa	216.61	267.40	115.80	217.60	62.43	92.34	150.63
排气温度/°C	173.44	126.93	134.21	129.64	115.88	128.33	130.48
压比	9.9	9.51	12.70	8.65	12.21	11.92	10.10
单位容积制冷量/(kJ/m <sup>3</sup> )	1187.69	1144.28	664.97	1025.20	358.43	505.48	755.60
单位质量制冷量/(kJ/kg)	156.29	106.72	139.81	262.37	247.11	272.13	270.00
耗电/W	94.17	74.54	84.57	162.39	145.12	167.93	167.97
COP	1.66	1.43	1.65	1.62	1.70	1.62	1.59

注:标准工况,蒸发温度:-23.3 °C,冷凝温度:54.4 °C,吸气温度:32.2 °C,液体温度:32.2 °C。

可以看出 R290 表现出优良的性能,R290 的 COP 高于 R404A,略低于 R134a,然而单位容积制冷量和单位质量制冷量要比 R134a 大得多。另外,虽然 R290 冷凝、蒸发压力高于 R134a,但压比要远低于

R134a。此外,采用两台 BC/BD625 卧式冷柜为实验样机,分别充注 R134a(200 g)和 R290(85 g),进行高温储藏温度测试(38 °C)和耗电量测试(25 °C)后,发现 R290 系统相比于 R134a 系统,其冷冻能力约提高

10%, 并且其 COP 提高了 24.7%。所以, 宋新洲<sup>[7]</sup>认为大容积冷柜的应用场合下 R290 制冷剂的性能比 R134a 更优, 虽然 R290 可燃, 但考虑到 R600a 的

成功推广, 在满足相关标准的前提下, 是在大容积商用冷柜上推广应用的。

表 3 实际工况下制冷剂的主要制冷性能

Tab. 3 Main performance parameters of refrigerants under the actual conditions

参数	R22	R404A	R134a	R290	R600a	HCM1	HCM2
冷凝压力/kPa	1354.79	1612.70	886.85	1217.55	465.37	685.95	965.66
蒸发压力/kPa	170.92	212.72	89.44	175.39	49.34	74.41	120.93
排气温度/°C	123.52	84.16	91.00	88.21	76.62	87.02	89.01
压比	7.93	7.58	9.92	6.94	9.43	9.22	7.99
单位容积制冷量/(kJ/m <sup>3</sup> )	1141.33	1200.55	642.12	1042.36	357.70	507.21	759.99
单位质量制冷量/(kJ/kg)	171.51	126.48	157.63	298.11	281.67	305.75	302.73
耗电/W	76.19	60.16	68.81	131.60	117.76	135.94	136.27
COP	2.25	2.10	2.29	2.27	2.39	2.25	2.22

注: 实际工况, 冷凝温度 35 °C, 蒸发温度 -29 °C, 过热度 32 °C。

对于商用冷柜来说, 除了耗电量、能效, 其冷却速度及噪声水平也是极其重要的, 也应该进行测试。魏华锋等<sup>[8]</sup>通过实验对 R290 和 R134a 在商用大容积陈列柜上的性能进行了对比分析。以科龙牌 760 L 商用大容积陈列柜为实验样机, 从冷却速度、耗电量、噪声水平三个方面对 R290 和 R134a 进行比较后, 发现 R290 系统较 R134a 冷却速度更快, 耗电量降低 5%, 噪音降低 3 dB(A), 但充注量为 180 g, 大于欧盟 EN-378 标准。在使用小管径冷凝器并进行最佳充注量测试后得到最佳充注量为 135 g, 并采用了双毛细管对 R290 系统优化, 结果发现冷却速度达到 16 h (R134a 系统为 17 h), 耗电量较 R134a 降低 15%, 噪音也大幅降低。

刘全义等<sup>[9]</sup>也通过直接灌注原商用冷柜的方式对 R134a 和 R290 的性能进行了对比。该研究以市场上某款 388 L 使用 R134a 制冷剂的商用冷冻展示柜为实验样机, 不改变原系统而直接将 R134a 换为 R290, 对比前后二者性能。结果表明, 同等测试条件下, R290 系统能耗降低 30%, 并且可获得更低的储藏温度, 刘全义等<sup>[9]</sup>认为, 这分别是由于 R290 压缩机效率更高和标准沸点更低所造成的。此外, 由于 R290 系统内运行压力高于 R134a 系统, 需进行相关的耐压测试。

另外, V Beek M 等<sup>[10]</sup>则通过实验比较了 R744 和 R290 分别应用在小冷量冷柜(冷冻冰激凌或食物)的性能差异。以市场上出售的 R290 冷柜为实验平台, 对原系统做了必要的改进, 将原 R290 封闭式

压缩机(ACC NL80FB)改为 R744 压缩机(Danfoss TN 1410), 并增加一些必要原件。实验及模拟发现, 在小冷量冷柜中使用 R744 作为的制冷剂相对于 R290, 其运行压力过高、能效低、设备成本高。虽然 R290 具有可燃性, 但小型冷柜此类小型商用系统的充注量一般小于 150 g, 符合相关的 ISO 及 EN 标准, 可以生产销售。

## 2 压缩机及润滑油

小型商用冷柜中主要采用全封闭往复式压缩机和滚动活塞式压缩机, HCs 的排气温度、排气压力较低, 有利于压缩机的长期安全运行。然而, 由于 HCs 制冷剂具有可燃性, 故压缩机需要额外设计相应的安全防护措施。国内外有部分压缩机制造商目前可以批量供应 R600a、R290 压缩机, 但种类较少, 而且国内外 HCs 专用压缩机相应的研究也很少。

黄石东贝公司的彭惠兰等<sup>[11]</sup>分别对 R290 工质大规模节能型冷柜压缩机进行了性能实验、可靠性实验及材料相容性实验。研究表明, 压缩机在使用 R290 制冷剂后, 压缩机制冷量及 COP 均比使用 R22 有较大提升。在一定条件下, 分别对 R290 压缩机做 500 h 的寿命实验和 20 万次开停机实验, 表明使用 R290 工质, 压缩机可以安全平稳运行。此外, R290 与冷冻油及电机漆包线进行相容性也符合要求。然而, 作者并没有做相关的噪声实验, 在设计制造压缩机时, 其噪声水平也是应该重点考量的参数。冯键等<sup>[12]</sup>也对冷冻箱用 R290 压缩机进行了开发, 相比于

原 R12 压缩机,性能均有较大提升,虽 R290 冷凝压力高,但噪声与原 R12 机相当。

Navarro E 等<sup>[13-14]</sup>提出了一种新的全封闭往复压缩机模型,该模型可预测压缩机效率及容积效率,并根据自己开发的压缩机模型分析了不同制冷量及尺寸的全封闭 R290 压缩机。实验得出的容积比要比预测数值大,这可能是因为模型中少考虑了一个会造成压缩机质量流量减小的额外损失,而这个损失可能是由于在活塞里面的冷凝效应引起的。根据模型,机械损失和电损失在所有测试情形下占比最大,占压缩机总效率损失 75%,容积效率损失的 55%。在低压比(1.5~2.5)时,压力损失显著(占压缩机效率损失的 15%以上,容积效率损失的 25%以上),高压比(5~7)时,泄漏损失影响显著(占压缩机效率和容积效率损失的 10%以上)。此外,作者还根据模型比较了使用 R290 和 R407C 压缩机的性能差异。

管志俊<sup>[15]</sup>虽然对 R600a 家用冰箱用全封闭式往复压缩机噪声进行研究,但其研究方法及减小噪声的措施同样可应用在同类型的小型商用冷柜的压缩机上。R600a 压缩机与相同冷量的 R134a 压缩机相比,噪声和振动均小,作者认为这是因为 R600a 压缩机排气温度低且压比小,而且由于其汽化潜热大,同样制冷量时功耗小,所以摩擦噪声也小。此外,R600a 压缩机噪声主要是机械噪声、电磁噪声以及气流噪声,针对各种噪声,管志俊分别提出了降低噪声的相应措施。

随着使用 R600a 制冷剂的广泛应用,越来越多压缩机厂商寻找性能优良、价格低廉的矿物型全封闭冷冻机油代替昂贵的进口冷冻机油或合成型冷冻机油。中国石油克拉玛依石化分公司炼油化工研究院的刘燕等<sup>[16]</sup>对 R600a 用 Kr10 全封闭冷冻机油进行了研制。根据 Kr10 全封闭冷冻机油的研制指标看,作者认为该冷冻机油具有高苯胺点的特点,需选择合适基础油来提高苯胺点。此外,从节能角度出发,要求冷冻油的运动粘度低,需加入相应添加剂保证其抗磨、抗氧化和抗泡性能。由于冷冻机油不同于其他润滑油,需要随制冷剂从高温区的压缩机到低温区的蒸发器之间连续循环,因此,对其在大的温度范围内与制冷剂的溶解性及适应性也有要求。

毛水林等<sup>[17]</sup>比较了 POE 油、PAG 油、AB 油以及 MO 油的特性,如表 4 所示,比较发现 AB 油为最适合 R290 的冷冻机油。作者对 AB 油在 R290 压缩机中的性质进行了实验研究,研究表明 R290 与 AB 油的互溶性、性能特性、对材料的兼容性以及耐磨性各项性能良好,是 R290 压缩机的理性的冷冻机油。然

而,实验都是在空调工况下所进行的,至于商用冷柜使用条件下还需再做相关实验来具体分析。

表 4 冷冻机油特性

Tab. 4 Characteristics of refrigerator oil

项目	POE	PAG	AB	MO
润滑性	○	○	○(○)	○
热稳定性	○	△	○	○
加水分解稳定性	△(○)	○	○	○
氧化稳定性	○	△	○	○
绝缘特性	○	△	○	○
抗吸湿性	△	×	○	○

注:○为好,△为一般,×为差,括号内为加入添加剂的结果。

### 3 其他相关研究

刘英志等<sup>[18]</sup>根据多年设计及实际应用经验,对 R290 商用冷柜在设计时应注意的事项进行介绍。作者给出了减少充注量的措施:1)减小冷凝管路内径;2)提高换热器换热效率。在材料的选择方面,R290 材料兼容性很好,虽与有些橡胶、塑料不太兼容,如表 5 所示,但这些材料通常不会出现在小型全封闭系统。根据 R290 特性,回气适当过热可以提高制冷效率,为此,刘英志等<sup>[18]</sup>建议将毛细管与回气管进行换热。特别应注意 R290 的可燃性及安全性问题,冷柜设计安装维修使用过程中应该采取相应安全措施。

表 5 R290 材料兼容性

Tab. 5 R290 material compatibility

材料	兼容性
丁基橡胶	否
自然橡胶	否
聚乙烯	视情况而定
PP	否
PVC	否
PVDF	否
EPDM	否
CSM	否

在使用混合工质作为冷柜的替代制冷剂时,由于换热器内的温度是逐步变化的,换热特性与纯组分制冷剂有很大的不同,需要对其在换热器内部的流动换热特性进行深入了解。天津商学院的毛力等<sup>[19]</sup>对

R290/R600a(1/1)混合工质在冷柜蒸发器的换热特性及对柜内温度分布的影响进行了实验研究。以 BD-150 型冷柜为实验对象,从蒸发器进口至出口布置了 1-15 号康-铜热电偶以研究其换热特性,在冷柜内部相应位置布置了铁丝网,网上布置一定数目的热电偶以研究柜内温度分布,维持环境温度(19℃)和湿度(28%),结果显示从蒸发器进口到出口温度滑移 6.6℃,而温度滑移越大,将对柜内温度分布影响越大,柜内温度分布测试结果也反映了这一点,高度方向上温度分布不均匀性较为严重。然而,作者只是在冷柜空载时进行实验,另外也没有与其他冷柜常用制冷剂做对比分析。

由于 HCs 制冷剂具有可燃性,所以要在小型商用冷柜中得到推广应用需要对其可燃性进行风险评估。Colbourne D 等<sup>[20]</sup>对卧式冰激凌柜使用 HCs 制冷剂的可燃性风险进行了量化分析,从泄漏制冷剂泄漏着火概率以及后果的严重性两个方面对压缩机室和房间内可燃性风险进行评估,建立了风险评估模型,对于事故的后果主要分析热辐射伤害和爆炸超压。依据相关数据,作者计算得出每年的着火概率  $2 \times 10^{-13} \sim 1 \times 10^{-8}$ ,相比于其他参照值是可以忽略的。另外,房间内的最大超压为 3 kPa,热强度为  $200 \text{ s} \cdot (\text{kW}/\text{m}^2)^{4/3}$ ,压缩机室的最大超压为 6.5 kPa,热强度为  $200 \text{ s} \cdot (\text{kW}/\text{m}^2)^{4/3}$ ,也不会造成太大伤害。需要指出的是,要想提高风险评估的质量需要对模型进行优化及获取更多相关的数据。

在充注制冷剂或者维修过程中,制冷系统会混入不凝性气体,通常为空气,由于 HCs 制冷剂易燃,因此一定量空气进入制冷系统中会对系统的安全运行带来威胁,此外还会影响制冷系统的制冷效果,所以宋传友<sup>[21]</sup>分析了空气作为不凝性气体对 R290 制冷系统的影响。研究发现,多数情况下空气混入制冷系统很难导致 R290 浓度进入爆炸极限范围内,但如泄漏点位于吸气侧,且 R290 已经在该点大量泄漏时,则会出现上述情况。此外,不凝性气体会影响制冷剂在换热器中的传热,增大混合气体的饱和蒸气压,进而导致冷凝压力升高,压比增大,功耗增加。空气混入后气体粘度降低,摩擦损失减小,这可能是其有利的一面。

## 4 结论

HCs 热物理性质与环保性能优良,兼容性良好,并且由以上国内外近期对于 HCs 工质在小型商用冷柜的研究可以得出,HCs 制冷剂在小型商用冷柜中替代 R134a、R22、R404A 技术上完全可行,替代成本较

低,替代后系统的总体性能要优于原制冷剂系统。对于 HCs 工质的可燃性问题,由于小型商用冷柜的制冷剂充注量较低,如 R290 的充注量一般不超过 150 g,符合欧洲标准的要求,可以生产销售,而且通过量化风险评估,其着火概率可忽略,也不会造成太大伤害,但在设计时应该注意采用相应的防火防爆元器件。虽然与使用 HCs 制冷剂的压缩机种类较少,但随着各国对 HFCs 管控的更为严厉,相信会有更多的压缩机生产厂商投入 HCs 压缩机的研发与生产中,对于相应压缩机使用的润滑油需要做相关的性能实验来对其互溶性、兼容性、耐磨性等性能做评估。

## 参考文献

- [1] Mukhopadhyay S, Nair H, Van Der Puy M. Direct conversion of HCFC 225ca/cb mixture to HFC 245cb and HFC 1234yf: USA, 7470828[P]. 2008-12-30.
- [2] Monforte R, Caretto L. Safety issues in the application of a flammable refrigerant gas in MAC systems: the OEM perspective [Revised July, 2009][R]. SAE Technical Paper, 2009.
- [3] Hydrocarbons 21. com. Hydrocarbon coolers debuted at US most popular sports event [EB/OL]. (2010-02) [2014-04]. <http://www.hydrocarbons21.com/news/view/2489>.
- [4] Refrigerantsnaturally. com. Red Bull-Statement [EB/OL]. (2014-02) [2014-04]. <http://www.refrigerantsnaturally.com/statements/red-bull.htm>.
- [5] Oz-Chill. Heineken successfully rolls out hydrocarbon coolers [EB/OL]. (2013-06) [2014-04]. <http://www.oz-chill.com/latestnews/heineken-successfully-rolls-out-hydrocarbon-coolers/>.
- [6] 钱文波, 晏刚, 冯永斌, 等. 丙烷和丙烯用于低温冷柜的性能和充灌量研究[J]. 西安交通大学学报, 2009, 43(9): 104-108. (Qian Wenbo, Yan Gang, Feng Yongbin, et al. Performance and charge analysis of propane and propylene used in low temperature cabinet freezers [J]. Academic Journal of Xi'an Jiaotong University, 2009, 43(9): 104-108.)
- [7] 宋新洲. R290 在大容量卧式冷柜的性能试验研究[J]. 制冷技术, 2011, 31(4): 10-15. (Song Xinzhou. The experimental study of R290 used in large capacity chest freezer [J]. Refrigeration Technology, 2011, 31(4): 10-15.)
- [8] 魏华锋, 杨波, 程凯. R290 应用于商用大容积陈列柜的性能研究[J]. 制冷与空调, 2013, 13(7): 48-51. (Wei Huafeng, Yang bo, Cheng Kai. Research on performance of large volume commercial display cabinet using R290 [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2013, 13(7): 48-51.)

- [9] 刘全义,李建周,刘佳. R290 制冷剂在商用制冷柜领域的应用与研究[J]. 电器, 2012(Suppl. 1):105-107. (Liu Quanyi, Li Jianzhou, Liu Jia. Research and application of R290 refrigerant in the commercial cabinet[J]. China Appliance, 2012(Suppl. 1):105-107.)
- [10] V Beek M, Janssem M. R744 compared to R290 in small freezer application[C]//International Institute of Refrigeration 8th Gustav Lorentzen Conference on Natural Working Fluids Copenhagen, 2008: 944-971.
- [11] 彭惠兰, 胡荣枝, 孙继勇, 等. R290 工质大规格节能型冷柜用制冷压缩机研究[J]. 家电科技, 2009(9): 59-60. (Peng Huilan, Hu Rongzhi, Sun Jiyong, et al. Research of R290 refrigeration compressor in large size energy-saving cabinet[J]. China Appliance Technology, 2009(9): 59-60.)
- [12] 冯键, 陈熙源, 成志方, 等. 丙烷压缩机的开发及其在冷冻箱上的应用[J]. 流体机械, 1996, 24(7):48-50. (Feng Jian, Chen Xiyuan, Cheng Zhifang, et al. The development and application of R290 compressor on cabinet[J]. Fluid Machinery, 1996, 24(7):48-50.)
- [13] Navarro E, Granryd E, Urchueguía J F, et al. A phenomenological model for analyzing reciprocating compressors[J]. International Journal of Refrigeration, 2007, 30(7): 1254-1265.
- [14] Navarro E, Urchueguía J F, Corberún J M, et al. Performance analysis of a series of hermetic reciprocating compressors working with R290 (propane) and R407C[J]. International Journal of Refrigeration, 2007, 30(7): 1244-1253.
- [15] 管志俊. R600a 冰箱压缩机噪声分析及解决方法[J]. 机械制造, 2011, 49(10):39-41. (Guan Zhijun. Noise analysis and solution of R600a refrigerator compressor[J]. Machinery, 2011, 49(10): 39-41.)
- [16] 刘燕, 张霞玲, 王凯明. 环保型 R600a 制冷剂用 Kr10 全封闭冷冻机油的研制[J]. 石油商技, 2009, 27(1): 50-54. (Liu Yan, Zhang Xialing, Wang Kaiming. Development of Kr10 refrigerator oil for refrigerant R600a[J]. Petroleum Products Application, 2009, 27(1): 50-54.)
- [17] 毛水林,王建敏,王秋菊,等. 烷基苯冷冻机油在 R290 压缩机中的试验研究[J]. 电器,2013(Suppl. 1):614-618. (Mao Shuilin, Wang Jianmin, Wang Qiuju, et al. Experimental studies of Alkyl Benzene as a R290 compressor lubricant [J]. China Appliance, 2013(Suppl. 1):614-618.)
- [18] 刘英志, 刘业凤, 卞伟, 等. R290 制冷剂在商用冷柜上的应用研究[J]. 制冷技术, 2012, 32(1): 58-60. (Liu Yingzhi, Liu Yefeng, Bian Wei, et al. Refrigerant performance study on R290 used in commercial refrigerators [J]. Refrigeration Technology, 2012, 32(1): 58-60.)
- [19] 毛力, 孙勇, 律宝莹, 等. R290/R600a 在冷柜蒸发器中的换热性质及对柜内温度分布影响的实验研究[J]. 冷饮与速冻食品工业, 2005, 11(2): 28-31. (Mao Li, Sun Yong, Lü Baoying, et al. Heat transfer characteristics of R290/R600a in domestic refrigerator evaporator and effects on temperature distribution [J]. Beverage & Fast Frozen Food Industry, 2005, 11(2): 28-31.)
- [20] Colbourne D, Espersen L. Quantitative risk assessment of R290 in ice cream cabinets [J]. International Journal of Refrigeration, 2013, 36(4): 1208-1219.
- [21] 宋传友. 不凝性气体对 R290 制冷系统的影响[J]. 制冷与空调, 2012, 12(6): 61-64. (Song Chuanyou. Effect of non-condensable gas on R290 refrigeration system[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2012, 12(6): 61-64.)

通信作者简介

吴建华,男,副教授,西安交通大学压缩机研究所,(029) 82663786,E-mail:jhwu@mail.xjtu.edu.cn。研究方向:小型制冷空调压缩机及其系统的环保、节能与可靠性。

About the corresponding author

Wu Jianhua, male, associate professor, Institute of compressor, Xi'an Jiaotong University, +86 29-82663786, E-mail:jhwu@mail.xjtu.edu.cn. Research fields: small refrigeration and air conditioning compressor; environmental protection, energy saving and reliability research for small refrigeration system.