

# 丙烷和丙烯用于低温冷柜的性能和充灌量研究

钱文波<sup>1</sup>, 晏刚<sup>1</sup>, 冯永斌<sup>1</sup>, 李景艳<sup>1,2</sup>

(1. 西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安; 2. 大连三洋冷链有限公司营业推进部, 116600, 辽宁大连)

**摘要:** 为了解决目前应用于低温冷柜的制冷剂 R22、R404A 等的环保问题, 将天然工质 HCs(碳氢化合物)应用于低温冷柜以替代上述传统的低温制冷剂. 编写了制冷剂循环性能程序, 比较了 HCs 和 R22 等在低温工况下的热力学循环性能. 根据欧盟标准 EN-378 中对 HCs 充灌量的要求, 建立了相应的冷柜充灌量计算模型, 计算比较了 R1270(丙烯)、R290(丙烷)和 R22 的理论充灌量. 结果表明: R1270 和 R290 的压力比、排气温度等比 R22 要低, 系统的性能系数比 R502、R507A、R404A 要高, 综合性能要好于 R22、R502、R507A、R404A; R1270 和 R290 在某冷柜中的最优充灌量分别为 130 g 和 110 g, 远小于 R22 的 220 g, 符合欧盟标准的安全要求.

**关键词:** 碳氢化合物; 低温工况; 循环性能; 充灌量

**中图分类号:** TB657.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)09-0104-05

## Performance and Charge Analysis of Propane and Propylene Used in Low Temperature Cabinet Freezers

QIAN Wenbo<sup>1</sup>, YAN Gang<sup>1</sup>, FENG Yongbin<sup>1</sup>, LI Jingyan<sup>1,2</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Business Promotion Department, Dalian Sanyo Cold-Chain Co. Ltd., Dalian, Liaoning 116600, China)

**Abstract:** The study was performed on the replacement of the refrigerants such as R22 and R404A with hydrocarbons (HCs) in low temperature cabinet freezers. The refrigerant cycle performances of HCs and R22, etc. under low-temperature conditions were compared via our computing program. According to the charge requirement of HCs in the EU standard EN-378, a theoretical charge model was established and the charge was calculated for R1270(propylene), R290(propane) and R22 in a cabinet freezer, respectively. The results show that the pressure ratio and discharge temperature of R1270 or R290 are lower than those of R22, and the coefficient of performance is higher than that of R502, R507A or R404A. Moreover, the comprehensive performance of R1270 or R290 is better than that of R22, R502, R507A or R404A. In addition, the optimum charge of R1270 and R290 in a certain cabinet freezer is about 130 g and 110 g, respectively, far less than 220 g of R22.

**Keywords:** hydrocarbon; low temperature condition; cycle performance; refrigerant charge

目前, 用在低温冷柜的制冷剂主要有 R22、R502、R507A、R404A 等. R22 作为一种过渡阶段的制冷剂使用得最为广泛, 但 R22 的排气温度太高, 经常出现压缩机故障, 影响到机组的寿命; R502 中的 R115 成分是《蒙特利尔协定书》规定的首批被淘汰的 CFCs 物质; R507A 和 R404A 由于其在替代过

程中要换润滑油和相应设备, 投入成本太高, 且其温室效应潜能值比较高. 考虑到这些制冷剂的不足之处, 在低温冷柜中寻找一种合适的替代制冷剂是十分必要的.

由于碳氢化合物的无毒性、化学稳定性和其环保特性(臭氧消耗潜能值为 0, 温室效应潜能值较低),

国内外很多学者对于碳氢化合物都进行了相关的研究,主要侧重于在空调器和热泵中使用碳氢化合物. 吴植华等人<sup>[1]</sup>在 1996 年就做了碳氢制冷剂 R290 在空调中替换 R22 的实验研究. 张战等人<sup>[2]</sup>在 3 种品牌的空调器上对 R290 与 R22 进行了对比实验研究. 陈永强等人<sup>[3]</sup>研究了 3 种不同型号的空调器用碳氢制冷剂替代 R22 的性能变化. 肖洪海等人<sup>[4]</sup>在 2006 年比较全面地研究了 R290 在小型家用空调中应用的性能情况. 王怀信等人<sup>[5]</sup>在小型空调系统中进行了碳氢化合物替代 R22 的研究. Jung 等人<sup>[6]</sup>提到在家用空调器中用 R1270 替代 R22. Park 等人<sup>[7]</sup>考虑在家用空调中用 R290、R1270 和 7 组由 R1270、R290、R152a 和 RE170 所组成的混合物替代 R22. Ritter<sup>[8]</sup>提出在空调器中用 R290 和 R290/R170 对 R22 进行替代. Purkayastha 等人<sup>[9]</sup>考虑在制冷系统和热泵系统中用碳氢制冷剂 R290 和 LPG (液化石油气) 替代 R22. Park 等人<sup>[10]</sup>提到在家用空调和热泵中替代 R22,所用制冷剂为 R433A (质量分数为 30% 的 R1270 和 70% 的 R290) 等等.

以上研究都是在空调或者是热泵中使用碳氢制冷剂,但对于碳氢制冷剂用在冷柜中的研究报道几乎没有. 周彦红等人<sup>[11]</sup>提出在低温工况下用碳氢化合物替代 R22,但仅从理论上分析了几种碳氢化合物用在低温工况下的性能,并没涉及到冷柜充灌量的关键问题. 为此,本文在低温工况下对比研究 R1270、R290、R22、R502、R507A、R404A 循环性能的基础上,重点研究了冷量为 800 W 左右的小型低温冷柜中使用碳氢化合物 R290、R1270 的充灌量,从而满足欧盟标准对使用碳氢制冷剂充灌量的要求.

# 1 制冷剂的物性比较

本文考虑的是对 R22、R502 等进行替代,所以

在替代过程中有必要对碳氢工质 R290 和 R1270 与 R22、R502 等进行物性比较,其饱和蒸气压曲线的比较见图 1,物理性质比较见表 1.

由图 1 可以发现, R290、R1270 和 R22 三者的饱和蒸气压曲线十分接近,这就表明前两种工质可以从理论上直接对 R22 进行替代. 由表 1 可以发现, R290 和 R1270 的相对分子质量很小,潜热比很大,几乎是其他几种制冷剂的两倍多,所以在制冷系统中达到相同的制冷量时, R290 和 R1270 的充灌量要小得多,并且 R290 和 R1270 的温室效应潜能值很小,所以相对于其他几种制冷剂来说具有更好的环保特性.

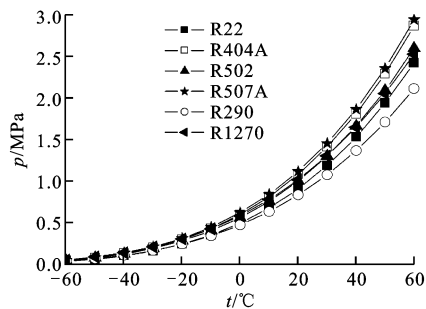


图 1 饱和蒸气压曲线

# 2 制冷剂的循环性能比较

## 2.1 计算工况

采用我国机械行业标准 JBf17666-1995《关于制冷空调设备名义工况的一般规定》中对 R22 等压缩机及机组名义工况的规定,表 2 列出了低温工况 I 下的具体循环参数. 本文在 NIST7.0 的基础上,编写了制冷剂的循环性能程序. 程序中考虑了实际情况中压缩机热损耗问题、管路的压降问题(由于不同制冷剂黏性系数不一样,管路压降也不一样)等等. 具体参数由大连三洋公司实验得到.

表 1 制冷剂物理性质比较

| 制冷剂   | <i>M</i> | <i>t</i> <sub>b</sub> /°C | <i>t</i> <sub>cr</sub> /°C | <i>p</i> <sub>cr</sub> /MPa | <i>λ</i> /kJ·kg <sup>-1</sup> | <i>O</i> <sub>ODP</sub> | <i>G</i> <sub>GWP</sub> |
|-------|----------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|
| R22   | 86.48    | -40.84                    | 96.13                      | 4.986                       | 233.90                        | 0.055                   | 1 700                   |
| R404A | 97.60    | -46.56                    | 72.14                      | 3.735                       | 200.30                        | 0.000                   | 3 800                   |
| R502  | 111.63   | -45.40                    | 82.20                      | 4.080                       | 173.40                        | 0.221                   | 4 500                   |
| R507A | 98.86    | -47.10                    | 70.62                      | 3.705                       | 196.95                        | 0.000                   | 3 900                   |
| R290  | 44.10    | -42.09                    | 92.42                      | 4.250                       | 430.38                        | 0.000                   | <20                     |
| R1270 | 42.09    | -47.70                    | 92.40                      | 4.665                       | 439.49                        | 0.000                   | <20                     |

注: *M* 表示相对分子质量; *t*<sub>b</sub> 表示标准沸点; *t*<sub>cr</sub> 表示临界温度; *p*<sub>cr</sub> 表示临界压力; *λ* 表示在 0.1 MPa 时的潜热比; *O*<sub>ODP</sub> 表示臭氧消耗潜能值; *G*<sub>GWP</sub> 表示温室效应潜能值.

表 2 低温工况 I 下的循环参数

| $t_e$ | $t_c$ | $t_s$ | $t_l$ |
|-------|-------|-------|-------|
| -23   | 43    | 5     | 38    |

注： $t_e$  为蒸发温度； $t_c$  为冷凝温度； $t_s$  为吸气温度； $t_l$  为液体温度。

2.2 计算结果

从表 3 可以看出,R1270 和 R290 的单位质量制冷量比其余的工质都要高得多,压力比也比其余工质都低,性能系数( $C_{COP}$ )分别为 R22 的 96%和 91%,高于其他制冷剂,排气温度也比 R22 低了将近 20~30 ℃,R1270 的单位容积制冷量最高。

表 3 低温工况 I 下的性能参数

| 制冷剂   | $C_{COP}$ | $q_0/\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ | $q_v/\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$ | $t_d/\text{℃}$ | $\varepsilon$ |
|-------|-----------|------------------------------------|-----------------------------------|----------------|---------------|
| R22   | 2.017     | 149.0                              | 1 265.4                           | 115.8          | 7.574         |
| R502  | 1.788     | 90.5                               | 1 200.0                           | 86.3           | 6.908         |
| R507A | 1.680     | 94.7                               | 1 222.0                           | 80.0           | 7.082         |
| R404A | 1.667     | 96.4                               | 1 169.9                           | 81.2           | 7.223         |
| R1270 | 1.937     | 256.2                              | 1 353.4                           | 93.7           | 6.409         |
| R290  | 1.927     | 246.6                              | 1 081.1                           | 82.7           | 6.647         |

注： $q_0$  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。

为了更好地比较在不同环境下这几种制冷剂的性能特点,本文还计算了变工况下这几种制冷剂的性能参数。

在变工况条件,冷凝温度为 43 ℃,蒸发温度为 -10、-20、-30、-40 ℃的情况下,计算比较了各种制冷剂的循环性能,结果见图 2~图 6。

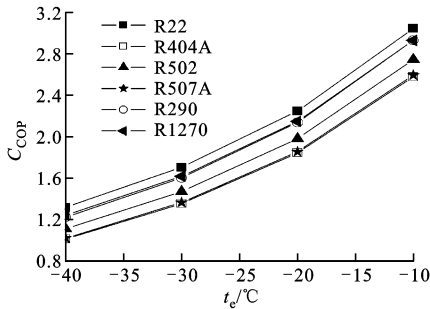


图 2 性能系数随蒸发温度变化的曲线

由图 2 可以看出,在变工况下,R1270 和 R290 的  $C_{COP}$  值仅比 R22 稍微小一点,而高于其他几种制冷剂.由图 3 可以看出,在变工况下,R1270 的单位容积制冷量最高,而 R290 的单位容积制冷量最低,但均和 R22 相差不大。

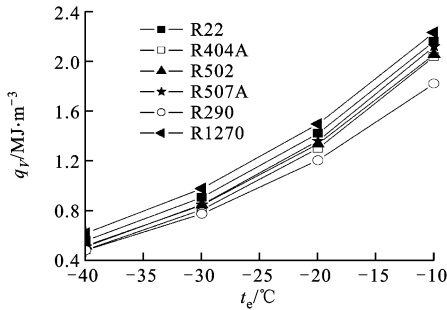


图 3 单位容积制冷量随蒸发温度变化的曲线

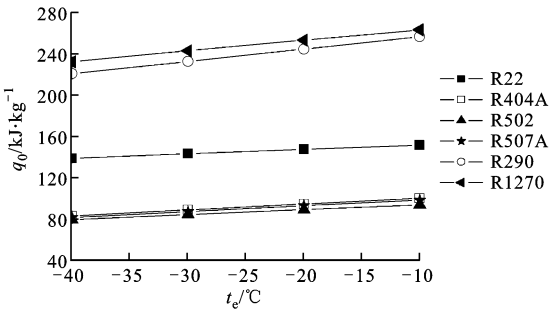


图 4 单位质量制冷量随蒸发温度变化的曲线

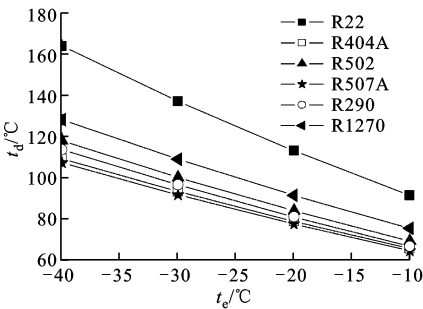


图 5 排气温度随蒸发温度变化的曲线

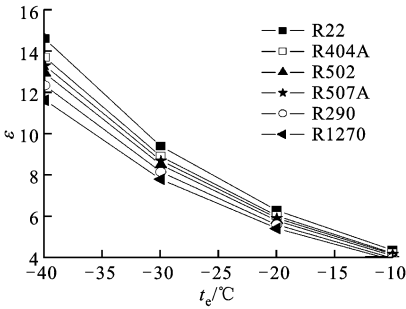


图 6 压力比随蒸发温度变化的曲线

由图 4 可以看出,在变工况下,R1270 和 R290 的单位质量制冷量最大,远大于其他制冷剂,这表明 R1270 和 R290 的充灌量是最小的.由图 5 可以看出,除了 R22,其余几种制冷剂的排气温度都比较低,R1270 和 R290 的排气温度均比 R22 低 20℃左右,这有利于在恶劣环境下运行.由图 6 可以看出,R22 的压力比最大,R1270 和 R290 的压力比最小,这有利于压缩机的安全稳定运行。

由理论循环可以看出,在低温工况下,碳氢制冷剂 R1270 和 R290 单纯在性能上来说完全能够替代以 R22 为代表的低温工质,并且 R1270 的性能要优于 R290.

### 3 充灌量的计算

碳氢制冷剂有很明显的缺点,即可燃性,所以国际上对于碳氢制冷剂使用时,充灌量的限定是比较严格的. 本文通过建立大连三洋公司某种冷柜模型并编写程序计算出低温工况下 R1270、R22 在此冷柜中的充灌量变化情况. 其中,冷凝器和蒸发器采用的是稳态集中参数模型,充灌量计算采用了 Zivi 模型<sup>[12]</sup>.

#### 3.1 约束条件

取工况为低温工况 I,冷柜的冷量约为 800 W,采用逆流换热,换热的第 2 制冷剂为空气,其中蒸发器和冷凝器的流路采用 U 型布置,流路数为 1. 所选冷柜模型的几何结构参数见表 4.

表 4 换热器的几何结构参数

| 参数                  | 冷凝器        | 蒸发器        |
|---------------------|------------|------------|
| $W、H、D/mm$          | 221、176、60 | 705、193、95 |
| 最大截面积/ $m^2$        | 0.04       | 0.15       |
| 空气进口温度/ $^{\circ}C$ | 26.69      | -21.52     |
| 空气出口温度/ $^{\circ}C$ | 35.97      | -23.65     |
| 翅片形状                | 波纹状        | 波纹状        |
| 翅片间距/mm             | 1.5        | 1.5        |
| 翅片厚度/mm             | 0.1        | 0.1        |
| 管材料                 | 铜          | 铜          |
| 管排数                 | 4          | 4          |
| 每排的管数               | 8          | 7          |
| 管径/mm               | 9.52       | 9.52       |
| 管厚/mm               | 0.41       | 0.41       |

#### 3.2 计算结果

由图 7、图 8 可看出:R1270 的耗功在 120~130 g 充灌量附近取得最低值, $C_{COP}$  在 130 g 附近取得最大值;R290 的耗功在 110~120 g 充灌量附近取得最低值, $C_{COP}$  在 110 g 附近取得最大值;R22 的耗功在 220 g 充灌量附近取得最低值,而  $C_{COP}$  在 210~220 g 左右取得最大值. 因此, R1270 理论计算的最优充灌量在 130 g 左右, R290 的最优充灌量为 110 g 左右, R22 的最优充灌量在 220 g 左右. R290

和 R1270 的充灌量大约为 R22 的 50% 和 59%. 这主要是由于 R290 和 R1270 的潜热比要比 R22 大得多, R290 的潜热比大概是 R22 的 1.84 倍, R1270 的潜热比大概是 R22 的 1.88 倍.

此种品牌的冷柜在大连三洋冷链公司以 R22 作为充灌制冷剂时,实验测得的最优充灌量为 230 g 左右,理论测得 220 g,实验误差在 5% 以内,所以软件模拟结果基本上是正确的. 由模拟结果可以看出,当用 R1270 和 R290 作为低温工质时,冷柜模型的最佳充灌量分别为 130 g 和 110 g. 欧洲标准 EN-378 提到,当碳氢制冷剂的充灌量小于 150 g 时,它用于任何制冷设备中都是安全的,所以 R1270 和 R290 用于低温冷柜中是完全可行的.

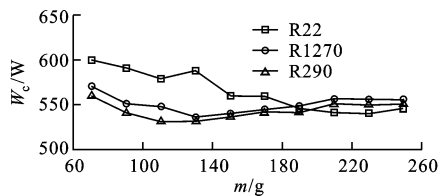


图 7 耗功随充灌量变化的曲线

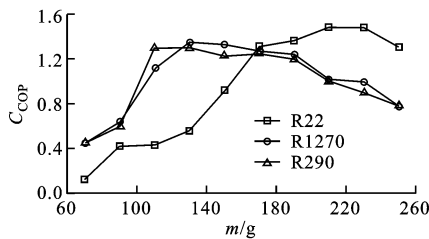


图 8 性能系数随充灌量变化的曲线

## 4 结 论

(1) 相比于其他的几种制冷剂, R290 和 R1270 的温室效应潜能值要低得多, 是一种对环境无害的天然制冷剂.

(2) 在低温工况 I 下, R290 和 R1270 在单位质量制冷量、压力比方面具有优势,  $C_{COP}$  值仅比 R22 低, 排气温度也比 R22 低.

(3) 变工况条件下, 理论计算得出在冷凝温度为  $43^{\circ}C$ , 蒸发温度为  $-10、-20、-30、-40^{\circ}C$  的情况下, R1270 和 R290 的  $C_{COP}$  比 R22 要稍低, 但 R1270 和 R22 的排气温度、压力比比 R22 要低, 更适合于压缩机在恶劣的条件下安全稳定的运行. R1270 和 R290 的单位质量制冷量要比其余几种制冷剂高得多, 其中 R1270 在低温工况下的性能要优于 R290.

(4) 当 R1270、R290 作为低温工质用在冷柜中时, 在制冷量为 800 W 的冷柜中充灌量小于 150 g,

满足欧洲标准 EN-378 关于碳氢工质充灌量的要求,解决了安全性问题。

可见,R290 和 R1270 完全可以用在小型低温冷柜中替代 R22、R404A 等现有的低温制冷剂,但由于碳氢制冷剂的可燃性,要求维修人员经过专门特殊的培训,这也间接增加了售后维修的成本,在一定程度上增加了各个企业推广碳氢制冷剂的难度。

## 参考文献:

- [1] 吴植华,阎琳. 在家用空调中用丙烷(R290)替代 R22 的研究(一)[J]. 制冷技术,1996,3(6):37-40.  
WU Zhihua, YAN Lin. The research of using propane (R290) to replace R22 in residential air-conditioners (1) [J]. Refrigeration Technology, 1996,3(6):37-40.
- [2] 张战,张舸,王建栓,等. R22 与 R290 热物性对比分析与实验研究[J]. 天津城市建设学院学报,2002,8(4):258-264.  
ZHANG Zhan, ZHANG Ke, WANG Jianshuan, et al. Comparative analysis and experimental study of thermodynamic properties of R22 and R290 [J]. Journal of Tianjin Urban Construction Institute, 2002,8(4):258-264.
- [3] 陈永强,刘金平,张波. 新型制冷剂 R290 热物性分析及试验研究[J]. 环境技术,2004,1(6):19-23.  
CHENG Yongqiang, LIU Jinping, ZHANG Bo. The thermodynamic physics analysis and experimental research to the new refrigerant of R290 [J]. Environmental Technology, 2004,1(6):19-23.
- [4] 肖洪海,张桃,胡艳. R290 小型家用空调器的性能匹配研究[J]. 制冷学报,2006,27(1):26-30.  
XIAO Honghai, ZHANG Tao, HU Yan. Experimental research on performance of small room air conditioner with R290 [J]. Journal of Refrigeration, 2006,27(1):26-30.
- [5] 王怀信,李丽,王康迪,等. 小型空调系统中碳氢化合物替代 HCHC22 的研究[J]. 太阳能学报,2002,23(1):11-16.  
WANG Huaixin, LI Li, WANG Kangdi, et al. Substituting HCFC22 in air-conditioning systems with hydrocarbons [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2002,23(1):11-16.
- [6] JUNG D, SONG Y, PARK B. Performance des mélanges de frigorigènes utilisés pour R22 [J]. Int J of Refrig, 2000,23(1):466-474.
- [7] PARK K J, JUNG D. Thermodynamic performance of HCFC22 alternative refrigerants for residential air-conditioning applications [J]. Energy and Buildings, 2007,39(6):675-680.
- [8] RITTER T J. Experiences with hydrocarbon blends in the UK market: applications for natural refrigerants [J]. Int J of Refrig, 1996,18(1):231-240.
- [9] PURKAYASTHA B, BANASAL P K. An experimental study on HC290 and a commercial liquefied petroleum gas (LPG) mix as suitable replace for HCHC22 [J]. Int J of Refrig, 1998,21(1):3-17.
- [10] PARK K J, SHIM Y B, JUNG D. Performance of R433A for replacing HCFC22 used in residential air-conditioners and heat pumps [J]. Applied Energy, 2008,85(1):896-900.
- [11] 周彦红,郁中杰,何绍书. 低温工况下碳氢化合物替代 R22 的制冷循环分析[J]. 制冷与空调,2001,1(6):26-29.  
ZHOU Yanhong, YU Zhongjie, HE Shaoshu. Refrigeration performance analysis on substituting R22 with hydrocarbons [J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2001,1(6):26-29.
- [12] 丁国良,张春路. 制冷空调装置仿真与优化[M]. 北京:科学出版社,2001:110-131.

(编辑 王焕雪)

## [本刊相关文献链接]

立式冷藏陈列柜内部结构对冷风幕流动的影响. 西安交通大学学报,2009,43(1):62-66.

应用纳米添加剂的冰箱性能实验研究. 西安交通大学学报,2008,42(7):852-854.

自复叠制冷循环双温冰箱设计的理论研究. 西安交通大学学报,2008,42(5):551-555.

自复叠双温冰箱的流程改进和性能分析. 西安交通大学学报,2007,41(5):549-552.

船舶多温冷库新型自复叠制冷循环的研究. 西安交通大学学报,2006,40(5):536-538.

双蒸发器冷藏车制冷系统应用 R404A 的模拟研究. 西安交通大学学报,2006,40(1):67-71.