

# 新型冰箱压缩 喷射混合制冷循环的研究

刘益才, 曹立宏, 杨智辉, 刘振利, 黄谦, 辛天龙

(中南大学能源科学与工程学院, 长沙 410083)

摘要: 提出一种新型冰箱压缩 喷射混合制冷循环, 该循环相对冰箱传统的简单制冷循环改动较小, 只引入了一个冰箱用喷射器, 易于实现。针对此循环进行了理论分析和计算, 结果表明, 混合循环与简单循环相比: 制冷系数增加 6%—12%, 容积制冷量增加 10%—18%, 尤其对于大冷藏室的双温和多温冰箱节能效果更好。进而论述了喷射器喷嘴的临界截面直径和出口截面直径的设计与制冷量和制冷设计工况之间的对应关系。

关键词: 冰箱; 压缩 喷射混合制冷循环; 喷射器; 喷射系数

Study on a new typed compression/injection hybrid refrigeration cycle for household refrigerator

Liu Yicai Cao Lihong Yang Zhihui Liu Zhenli Huang Qian Xin Tianlong

(School of Energy Science and Engineering Central South University Changsha 410083 China)

Abstract: A new kind of compression/injection hybrid refrigeration cycle has been presented. This new cycle has little change compared with simple refrigeration cycle. It is just to bring in a refrigerator-used ejector and is easy to realize. The theoretic analysis and calculations has been carried out for this cycle. Comparison between the new cycle and the simple ones, the former system has the advantage of bigger COP and capacity quantity. Adopt this cycle for big cooling chamber, the energy saving is greatly more obvious. The design of critical crosssection diameter and outlet diameter for nozzle has something to do with the quantity and the design working condition for the system.

Keywords: Refrigerator; Compression/injection hybrid refrigeration cycle; Ejector; Entrainment ratio

## 1 引言

随着双温双控冰箱双蒸发器的广泛应用, 该系统固有的蒸发压力调节阀所带来的压力损失及能量损失显得日益突出, 使得这种制冷系统的制冷系数不能满足需要。因此探寻具有更高效率的双温制冷系统成为亟待解决的问题。

近年来, 一些研究者<sup>[1-9]</sup>将喷射器引入蒸汽压缩制冷循环, 构成压缩 喷射混合制冷循环, 并已初步证实有较显著的节能效果。另外, 范晓伟等<sup>[3,4]</sup>在家用双温冰箱中应用了喷射器, 组成效率更高的喷射 压缩循环。西安交通大学试验了一种蒸发温度不同的冷藏室蒸发器和冷冻室蒸发器串联的压缩 喷射式混合制冷循环冰箱, 收到了一定的节能效果; 郭健翔等人<sup>[5]</sup>在 Kornhauser<sup>[7]</sup>循环基础上作了改进, 他们对各自循环所作的理

论计算结果证明, 混合循环性能系数相对简单蒸气压缩循环有不同程度提高。

本文结合喷射器的基本方程, 提出这种双温冰箱新型压缩 喷射混合制冷循环的热力学分析方法, 着重从理论上验证了这种新型冰箱压缩 喷射混合制冷循环的节能优势, 并对喷射器的喷嘴设计方法进行了初步探讨。

## 2 新型冰箱压缩 喷射混合制冷循环

在这种新型的冰箱压缩 喷射混合制冷循环中, 从冷凝器出来的高温高压液态制冷剂直接进入喷射器的喷嘴, 在喷嘴内加速降压, 将压能转变为速度能, 从喷嘴喷出时通常超过声速, 压力降到低于蒸发压力。从喷嘴喷出的低压高速制冷剂引射从蒸发器来的低压低温气态制冷剂并使之与其

收稿日期: 2007-09-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50676110)和 2007年中南大学研究生创新选题项目。

作者简介: 刘益才(1968-)男, 博士, 副教授, 所长, 主要进行热声热机、热声斯特林制冷机以及小型制冷系统的节能和降噪研究。

混合, 再在喷射器的扩压室内减速升压, 使得速度能转变为压能, 从而使得从蒸发器出来的制冷剂压力升高, 在气液分离器内进行气液分离后, 气态制冷剂进入压缩机, 液态制冷剂再进入蒸发器, 如图 1 所示。

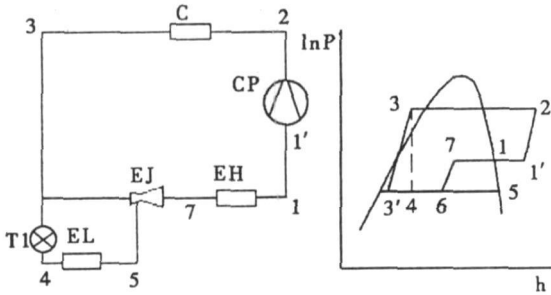


图 1 新型的压缩/喷射混合制冷循环系统图及压焓图  
Fig 1 Schematic view and pressure-enthalpy diagram of new-typed compression/injection hybrid refrigeration cycle

制冷工质由 1 状态经压缩机增压升焓至状态点 2 然后经冷凝器冷却至状态 3 并分成两部分: 一部分经由节流件节流至 4 再由冷冻室蒸发器 EL 吸热蒸发至状态 5 作为引射流体进入喷射器, 另一部分则直接作为工作流体进入喷射器喷嘴膨胀至 3 将其压能转化成动能与引射流体混合、扩压至状态 7 接着进入冷藏室蒸发器 EH 吸热蒸发至状态 1, 最后以状态 1 进入压缩机完成一个整循环。它与简单蒸汽压缩循环相比实际上只增加 1 个喷射器, 这样可以使进入压缩机的吸气压力高于蒸发压力, 从而提高制冷系统的效率。

### 3 新型冰箱压缩/喷射混合制冷循环的热力学分析

#### 3.1 模型假设

为了方便计算和分析, 我们对新型冰箱压缩/喷射混合制冷循环的某些环节进行了假设, 主要包括以下几个方面:

- (1) 忽略管路、冷凝器、蒸发器等阻力损失;
- (2) 离开蒸发器的制冷剂为饱和汽相, 离开冷凝器的制冷剂为饱和液相;
- (3) 制冷剂从喷嘴喷出后, 压力降为蒸发压力, 制冷剂在喷射器内混合为在蒸发压力下的等压混合;
- (4) 除喷射器混合过程外, 制冷工质物性及

速度在横截面上是不变的, 即是一维的;

(5) 制冷剂时时处于准平衡状态, 制冷剂在喷嘴加速过程和扩压室的压缩过程均为等熵过程, 不计摩擦损失;

(6) 忽略喷嘴出口、蒸发器出口和喷射器出口的动能。

#### 3.2 热力参数计算

计算工况采用冰箱设计中的标准工况:

蒸发温度  $t_{\text{val}} = -23.3^\circ\text{C}$ ; 冷凝温度  $t_{\text{con}} = 54.4^\circ\text{C}$ ; 过冷温度  $t_c = 32.2^\circ\text{C}$ ; 压缩机吸气温度  $t_s = 32.2^\circ\text{C}$ 。

采用 R134a 作为制冷工质。

新型混合循环和简单循环的压焓图比较如图 2 所示。

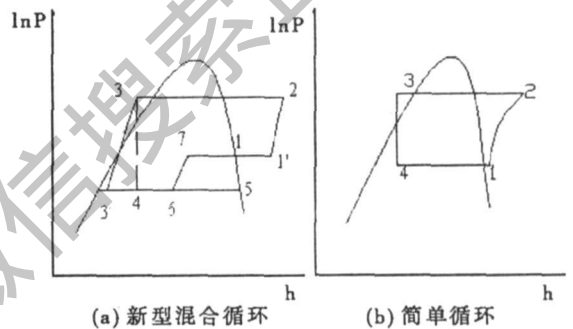


图 2 新型混合循环与简单循环压焓图

Fig 2 The pressure-enthalpy diagram of new-typed hybrid cycle (a) and the simple cycle (b)

#### 3.2.1 传统简单制冷循环热力计算

单位制冷剂质量流量的制冷量为:

$$q_p = h_1 - h_4 = h_1 - h_5 \quad (1)$$

单位制冷剂质量流量的压缩机耗功为:

$$w = h_2 - h_1 \quad (2)$$

制冷循环的制冷系数为:

$$\text{COP} = \frac{q_p}{w} = \frac{h_1 - h_5}{h_2 - h_1} \quad (3)$$

#### 3.2.2 新型混合制冷循环热力计算

冷藏室蒸发器单位制冷量

$$Q_1 = \frac{u(h_3 - h_5)}{1 + u} \quad (4)$$

冷冻室蒸发器单位制冷量:

$$Q_2 = h_1 - h_7 \quad (5)$$

总制冷量:  $Q = Q_1 + Q_2$  (6)

压缩机功耗:  $w = h_2 - h_1$  (7)

性能系数:

$$COP_h = \frac{Q}{W} = \frac{Q_1 + Q_2}{W} \quad (8)$$

$$\text{容积制冷量: } Q_v = \frac{Q}{V_1} = \frac{Q_1 + Q_2}{V_1} \quad (9)$$

对于喷射器内各部分的效率选取<sup>[1]</sup>如下: 喷嘴效率  $\eta_n = 0.9$ , 混合效率  $\eta_m = 0.80$  扩散效率  $\eta_d = 0.85$ .

而在喷射器中, 效率公式由下两式求得<sup>[4]</sup>:

$$\eta_n = \frac{h_b - h_{bs}}{h_b - h_s} \quad (10)$$

$$\eta_d = \frac{h_{bs} - h_b}{h_r - h_b} \quad (11)$$

式 (10) 和 (11) 中: 3s 和 6s 下标分别表示由 3 点按等熵膨胀至冷冻室蒸发器压力时所得的状态点和由 6 点沿等熵压缩至冷藏室蒸发器压力时的状态点。

$$\text{速度公式: } v_s = [2000(h_b - h_{bs})]^{1/2} \quad (12)$$

$$v_6 = [2000(h_r - h_b)]^{1/2} \quad (13)$$

$$\text{能量守恒方程: } \frac{h_b}{1+u} + \frac{u \cdot h_s}{1+u} = h_r \quad (14)$$

$$\text{动量守恒方程: } \frac{v_s}{1+u} = v_6 \quad (15)$$

由已知的工况条件, 可以得出冷凝压力  $p_k = 1.4696 \text{ MPa}$   $p_0 = 0.115 \text{ MPa}$  因此对于简单的循环系统, 在上述工况下, 对新型混合循环和简单循环进行热力计算得, 结果列于下表 1。

表 1 混合循环与传统简单循环的性能比较

Tab 1 The performance comparison between the hybrid cycle and the traditional cycle

| 循环类型   | COP   | $Q_v / (\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3})$ |
|--------|-------|---|
| 新型混合循环 | 1.603 | 795                                     |
| 传统简单循环 | 1.461 | 664                                     |

由此可知, 新型混合制冷循环比简单制冷循环具有更高的制冷系数和容积制冷量。

以上所得的结果只是在系统喷射系数  $u=1$  的情况下得出的结论, 为更进一步地分析新型混合制冷循环的优越性, 采用变喷射系数  $u$  的方法, 对系统进行了研究。图 3 表示的是新型混合制冷循环在不同的喷射系数  $u$  下, 系统的性能系数 COP 的变化曲线。

图 3 说明了对于这种新型冰箱压缩混合制冷循环系统而言, 只有在喷射系数比较小的情况下, 其才具有较高的性能系数。由喷射系数的定

义可知:

$$u = \frac{\text{引射流体的质量流量}}{\text{工作流体的质量流量}}$$

喷射系数越小, 意味着冷冻室的制冷量越小, 也即是冷藏室的制冷量越大, 这对于大冷藏室的双温冰箱来说, 采用这种新型混合制冷循环系统是比较有利的。

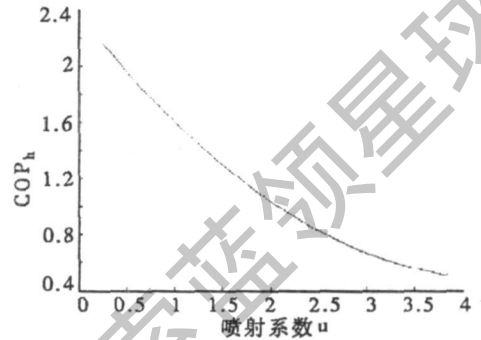


图 3 新型混合制冷循环性能系数 COP 随喷射系数  $u$  的变化曲线图

Fig 3 The diagram of COP versus  $u$  in the new-typed hybrid cycle

### 3.3 冷凝温度和蒸发温度对喷嘴临界截面和出口截面直径的影响

喷嘴临界截面和出口截面直径的最大影响因素应为制冷量和制冷设计工况。在常用制冷工况下, 压缩喷射混合制冷循环喷射器的喷嘴一般为先缩后扩型喷嘴, 在制冷量一定的情况下, 结合新型冰箱混合制冷循环系统的理论分析, 给出了冷凝温度和蒸发温度对喷嘴临界截面和出口截面直径的影响关系图, 如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 随着冷凝温度的升高, 喷嘴临界截面直径先是稍有减小, 而后又稍有增加, 但变化的范围非常小, 可以认为是没有变化的; 但由于冷凝温度的升高, 制冷剂要想降到蒸发压力以下, 则喷嘴出口的速度则需更大, 出口截面直径也就需更大, 喷嘴出口截面直径随冷凝温度的升高而增大。而在冷凝温度一定的情况下, 喷嘴临界截面直径和出口截面直径都随着蒸发温度的升高而减小。这是因为随着蒸发温度的升高, 对于一定制冷量的制冷系数的制冷剂流量将减小, 所需的主流制冷剂流量也应减小, 因此喷嘴临界截面直径减小; 喷嘴出口的制冷剂的膨胀量也减小, 出口处制冷剂流速也应减小, 因此出口截面直径减小。

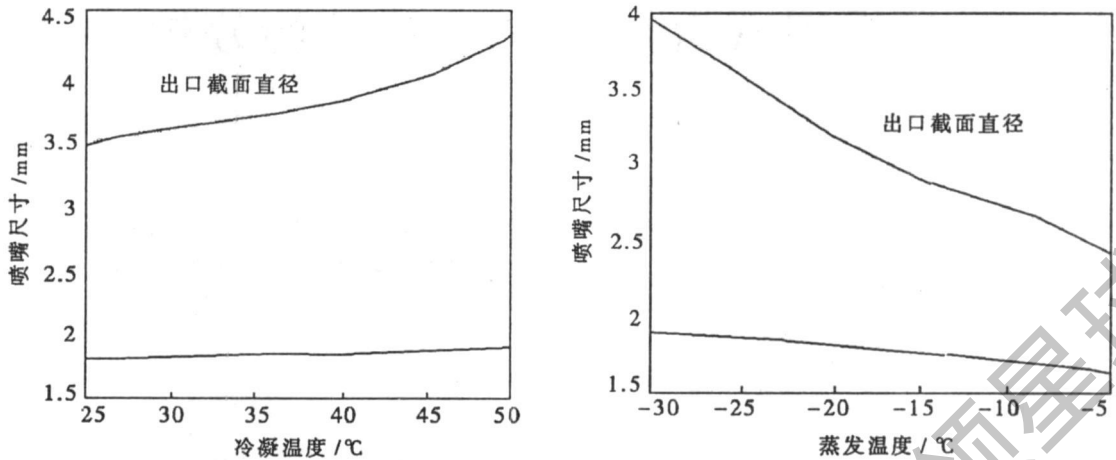


图 4 冷凝温度和蒸发温度对喷嘴临界截面和出口截面直径的影响关系图

Fig 4 The relation diagram of condensed temperature and evaporative temperature to the nozzle diameter of critical crossection and outlet crossection

## 4 结论

通过本文的理论研究,可以得出以下几个结论:

(1)当双温冰箱冷藏室制冷量占总冷量的 50%时,新型冰箱压缩喷射混合制冷循环的性能系数要比传统的简单循环提高(6—12)%,容积制冷量增加(10—18)%。由于喷射器有结构简单、成本低、没有转动部件、适应两相流工况较好、可靠性强和在运行时不需要维护等优点,其引入冰箱简单制冷循环系统中可以收到一定的节能效果。

(2)双温冰箱采用这种新型压缩喷射混合制冷循环后,系统设计不同的喷射系数  $u$  值的大小,新型混合循环的  $COP$ 、 $Q_v$  较传统简单的制冷循环有不同程度的提高,小  $u$  值能引起  $COP$ 、 $Q_v$  较大的改进,对于大冷藏室的双温冰箱采用这种新型混合循环节能效果比较明显。

(3)喷嘴的临界截面直径和出口截面直径的设计与制冷量和制冷设计工况有关。随着冷凝温度的增加,喷嘴的临界截面直径稍有减小,出口截面直径增加较多;随着蒸发温度的增加,喷嘴的临界截面直径和出口截面直径均会减小,但喷嘴的临界截面直径变化很小。

## 参考文献

- 1 苏跃红,葛新石. 双温冰箱——一种节能循环的分析. 流体机械, 1996 10(2): 56—58
- 2 苏跃红,葛新石. 双温冰箱压缩喷射式混合制冷循环系统的设计和实验研究. 中国科学技术大学学报, 1998 28(2): 115—120
- 3 范晓伟,阴建民,陈钟硕. 新型压缩喷射制冷循环系统的实验研究. 西安交通大学学报, 1997 31(5): 6—9
- 4 范晓伟,阴建民,陈钟硕,等. 一种新型蒸气压缩喷射混合制冷循环的探讨. 西安交通大学学报, 1996 30(4): 2—3
- 5 郭健翔,谭连城. 新型压缩喷射冰箱混合制冷循环及实验研究. 制冷学报, 1993 6(1): 10—14
- 6 苏跃红,葛新石. 双温冰箱两种压缩喷射式混合制冷循环系统的性能比较. 中国科学技术大学学报, 1996 26(1): 110—113
- 7 Kornhauser A. The use of an ejector as refrigerant expander. In: Proc of 1990 US-NC/IIR-Purdue Refrigeration Conference and ASHAE-Purdue CFC Conference West Lafayette USA 1990: 10—19
- 8 舒水明,欧阳伶俐,闫茂龙. 一种新型制冷机能量调节的控制算法. 华中科技大学学报, 2006 34(5): 102—104
- 9 舒水明,张云鹏,张林波. 一种新型太阳能制冷循环的控制策略研究. 华中科技大学学报, 2005 33(2): 7—9