

# 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\*

苏跃红 葛新石

(中国科学技术大学热科学和能源工程系)

**摘要** 喷射器的性能、系统运行的稳定性是压缩喷射式混合制冷循环能否成功地应用于双温冰箱的关键。本文对小型喷射器的设计计算及加工方案和混合循环制冷系统的设计方案进行了细致的理论分析和实验研究。实验结果显示了喷射器的增压作用和混合循环的节能作用;同时,说明了小型喷射器的简化加工方案是可行的,两个蒸发器串联设计的混合循环制冷系统是一种变工况适应能力强、运行更稳定的设计方案。

**关键词** 冰箱,压缩喷射,喷射器,变工况

**中图分类号** TB611

## 1 前言

双温冰箱采用有两个蒸发温度的压缩喷射式混合制冷循环能明显地降低传统冰箱因冷藏室中过大的传热所带来的可用能损失,从而提高冰箱的性能系数<sup>[1]</sup>。然而,尽管这种混合循环系统结构简单,但在实际应用时,预计可能遇到下列问题<sup>[2]</sup>: 1)小型喷射器的设计及加工能否保证其增压作用? 2)喷射器能否与毛细管合理匹配以实现所设计的两个蒸发温度? 3)在给定冷藏室与冷冻室制冷量分配比例情况下所设计的系统,当工况变化时,系统是否具有自动调节的适应能力? 这些问题是决定着压缩喷射式混合制冷循环能否实用的关键,值得进一步研究。因此,在确定实验方案时,把研究重点放在喷射器的可靠性和系统的运行稳定性及变工况适应性。由于实验条件限制,混合循环的节能作用则是通过系统能保持两个蒸发温度和喷射器的增压作用来间接地证实。

喷射器是混合循环系统中的关键部件。目前,有关喷射器的设计和实验都是针对一般的喷射制冷系统,其喷射器的特点是大压比、大流量及大尺寸<sup>[3]</sup>;但在冰箱混合制冷循环中,情况恰恰相反,即小压比、小流量和小尺寸,因而,其设计特点需要了解。

## 2 喷射器的设计及实验

通常采用如图 1 所示的等压混合喷射器,图中数字代表各个进出口<sup>[4]</sup>。设计计算时,首

\* 1997年 3月 5日收到。

先给定喷射器两个入口处气流的温度、压力、流量和入口直径,以及喷射器出口处气流的流速,然后根据喷射器方程计算各主要截面处的未知气流参数,从而确定各部分尺寸,并进行设计优化<sup>[3-4]</sup>.

### 2.1 最佳混合压力的确定

文献 [5] 研究表明,对于喷射制冷系统,在给定工况下,当改变等面积混合室流通截面尺寸时,引射系数和制冷系数都存在一个最大值.因此,对于冰箱混合制冷循环,在给定主喷嘴与引射喷嘴的流量比例情况下,当改变等压混合室中的压力时,可能存在喷射器的一个最大出口压力,此时的混合压力即为最佳混合压力;而且,从热力学观点来看,此时通过喷射器的熵增应该最小.

图 1 等压混合喷射器

Fig. 1 An ejector with a constant pressure mixing chamber

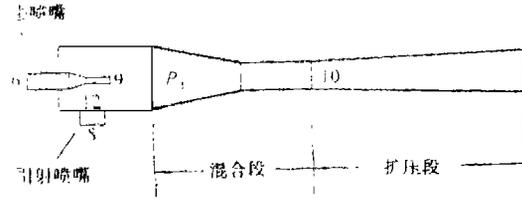


图 2 的计算结果定量地反映了上述分析.

图中,纵坐标分别是喷射器出口压力和气流通过

过喷射器的总熵增;为了直观起见,横坐标采用与等压混合室的压力  $P_{11}$  所对应的饱和温度  $T_{11}$  (参见图 1,计算条件见文献 [4]).

图 2 也说明在小压比 ( $P_6/P_8$ ) 情况下,最佳混合压力为略低于引射喷嘴进口压力 ( $P_8$ ) 的值,即大约是对应于  $-30^{\circ}\text{C}$  的饱和压力.此外,计算条件 (喷射器效率、流量比例、喷嘴进口蒸汽压力等) 在合理范围内改变时,对最佳混合压力的取值情况影响很小<sup>[4]</sup>.

### 2.2 设计计算及分析

表 1 2 3 列出了喷射器各部分截面直径的一些典型计算结果.计算中取总流量为  $0.00117\text{kg/s}$ ,  $D_6=5.00\text{mm}$ ,  $D_8=5.00\text{mm}$ ,  $u_1=5.00\text{m/s}$ , 表 1 和表 2 中的流量比例取 0.5,混合压力取冷冻室的蒸发压力,  $D_6$ —主喷嘴的喉部直径.

表 1 不同的冷藏室蒸发温度下,喷射器的流通直径

Tab. 1 Cross-section diameters of ejector for various evaporation temperatures in the cooling chamber

冷藏室蒸发温度	$D_6$ (mm)	$D_9$ (mm)	$D_{10}$ (mm)	$D_1$ (mm)
$-5^{\circ}\text{C}$	0.808	0.843	1.792	6.652
$-3^{\circ}\text{C}$	0.781	0.828	1.762	6.628
$-1^{\circ}\text{C}$	0.756	0.814	1.735	6.605

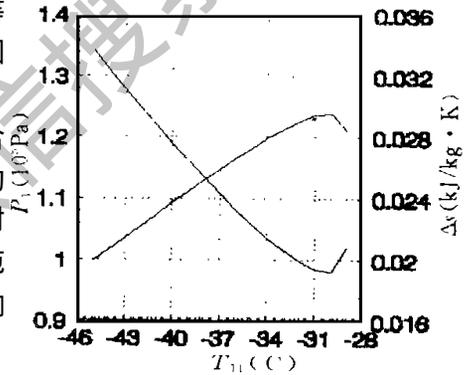


图 2 喷射器出口压力  $P_1$  和熵增  $\Delta S$  与  $T_{11}$  的关系

Fig. 2 Outlet pressure of the ejector  $P_1$  and entropy increase  $\Delta S$  versus  $T_{11}$

表 2 不同的冷冻室蒸发温度下,喷射器的流通直径

Tab. 2 Cross-section diameters of ejector for various evaporation temperatures in the freezing chamber

冷冻室蒸发温度	$D_e$ (mm)	$D_9$ (mm)	$D_{10}$ (mm)	$D_1$ (mm)
- 29°C	0. 808	0. 843	1. 792	6. 652
- 27°C	0. 808	0. 831	1. 763	6. 430
- 25°C	0. 808	0. 821	1. 737	6. 216

表 3 主喷嘴流量相对于总流量的比例在不同数值下,喷射器的流通直径

Tab. 3 Cross-section diameters of ejector for various ratios of primary stream flow rate relative to the total one

流量比例 $x$	$D_e$ (mm)	$D_9$ (mm)	$D_{10}$ (mm)	$D_1$ (mm)
0. 40	0. 722	0. 754	1. 979	6. 789
0. 50	0. 808	0. 843	1. 792	6. 652
0. 60	0. 885	0. 924	1. 647	6. 484

当计算条件在合理范围内改变时,对于各流通截面直径的影响都很小,有的甚至在加工公差范围内.但是,反过来说,这种情况给设计加工带来了很大困难,因为加工中的很小误差将引起蒸发温度、流量比例、混合压力等的较大变化.

根据对计算结果的分析,加工中将存在下述困难: 1)加工精度难以达到设计精度要求; 2)钻头的直径系列难以满足喷射器流通截面直径的要求; 3)小直径情况下,内表面 4 以上光洁度的加工要求; 4)小尺寸情况下,喷射器部件之间以及与管路之间的焊接困难; 5)主喷嘴的渐扩段要求在很小的长度内直径增加 0. 05 毫米左右,难以加工;主喷嘴出口处管壁厚度大于其内径,气流出口后将产生过度膨胀; 6)小压比、小流量时,喷射器各段长度的确定.

针对这些困难,设计时采用了以下做法: 1)在主喷嘴中不设渐扩段,依靠其出口处管壁厚度大于其内径,让气流出口后产生一定的自由膨胀而达到混合压力.这样做不会对引射喷嘴流量有太大影响,因为在这里喷射器的工作不同于喷射式制冷系统,现在有压缩机的吸气在起作用. 2)考虑到加工光洁度达不到要求,喷射器各段长度中主喷嘴的喉部长度、混合室的稳压段长度、扩压段的喉部长度均取尽可能小的值,以减小摩擦损失; 3)所采用的计算条件尽量使得喉部直径与钻头直径系列靠近; 4)喷射器的进出口直径与回气管的配套.

### 2. 3 实验情况

根据上述设计方案所设计的等压混合喷射器,实验结果证实了喷射器的增压作用,说明了设计方案是可行的.不过,喷射器出口压力 0. 11M Pa 略小于 0. 115M Pa 的计算值;原因是: 1)喷射器内表面光洁度低,摩擦损失大,特别是在喉部; 2)喷嘴出口处气流膨胀过度; 3)

喷射器出口由于受到压缩机回气管尺寸的限制,扩压不充分;4)压缩机吸气的影响.

### 3 双温冰箱蒸发器并联的混合循环系统运行实验的结果及分析

#### 3.1 系统设计

双温冰箱蒸发器并联的混合循环系统如图 3所示.

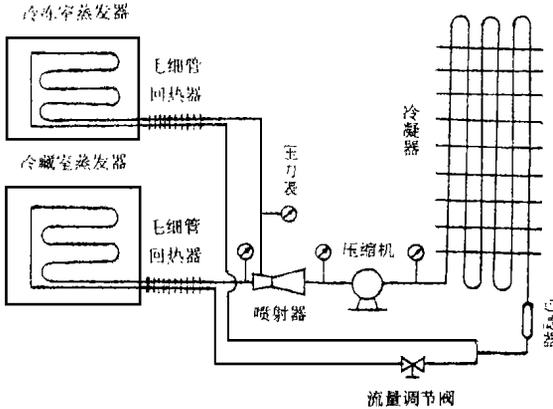


图 3 蒸发器并联的混合循环实验系统

Fig. 3 Experimental system of the hybrid cycle with two evaporators in parallel

在回热方案的设计方面,为了防止在喷射器中产生两相流动,将毛细管回热器布置在喷射器进口前的回气管上,这样做又可以在同样流量情况下增大喷射器的流通截面直径;同时,让冷冻室回路的回热程度大于冷藏室回路,因为按照文献 [6]的分析,在相同制冷量分配比例  $\alpha$  情况下,这将有助于提高主喷嘴中的流量,从而提高喷射器的出口压力.

为了了解喷射器的增压作用和系统运行的稳定性,在喷射器的主喷嘴进口、引射喷嘴进口、喷射器出口和压缩机的排气管上各装了一个压力表.

毛细管尺寸经初步计算确定后,通过

实验来调整;同时,为了便于调节,在冷藏室回路的毛细管入口处加接了一个流量调节阀.

实验所用冰箱由一台 150升旧松下双门冰箱壳体改装而成,冷藏室与冷冻室容积比例约为 4: 1,压缩机功率为 128W.

#### 3.2 实验结果及分析

实验过程中,由冰箱压缩机起动时刻开始记录各个压力表的读数及冷冻室和冷藏室的温度随时间的变化,同时测定耗电量.

图 4 5是在环境温度  $23^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度 75% 条件下的一组实验结果.压缩机起动一个多小时后,冷冻室和冷藏室温度均可降至冰箱设计所要求的值,即冷冻室  $-18^{\circ}\text{C}$ 、冷藏室  $5^{\circ}\text{C}$ ,达到了冰箱设计标准的要求.由图 5可看出压缩机起动后,冷冻室蒸发压力很快达到相对稳定值,而冷藏室蒸发压力则由 0.26MPa 慢慢降至 0.20MPa(相当于蒸发温度由  $-5^{\circ}\text{C}$  慢慢降至  $-12^{\circ}\text{C}$ ),喷射器出口压力也随之降低,冷凝压力也相应受到影响.冷藏室蒸发压力不稳定的原因可能是冷藏室温度容易较快降至所要求的值,然后,蒸发压力必然降低.实验曾在冬季  $0^{\circ}\text{C}$  左右的条件进行,结果是冷藏室蒸发压力的降低幅度更大,而且较快,与上面的分析是吻合的.因此,这一方案中,与常规冰箱一样,冷藏室在冬季时的热补偿仍然是必要的.也可在冷藏室

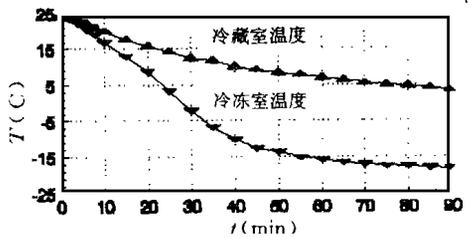


图 4 冷冻室和冷藏室温度随时间的变化

Fig. 4 Time-temperature histories for the cooling chamber and freezing chamber

回路毛细管入口加装电磁阀来控制,而且在电磁阀关闭时,冷冻室蒸发温度可达  $-35^{\circ}\text{C}$ ,能实现冷冻室中的速冻。

实验所用的毛细管内径为 0.66 毫米.因为通过每根毛细管的流量与普通冰箱相比降低了一半左右,所以毛细管出口压力均达不到临界压力;这样的话,当冷藏室已达到所需要的温度时,冷藏室蒸发压力降低,毛细管两端的压差增大,通过冷藏室回路的流量反而会增大,从而易导致冷藏室回路的回气管回霜.实验中发现极易出现这样的问题,而且,在冬季时情况更严重.克服这个缺点的办法是采用更小内径的毛细管,让两个回路的蒸发压力都低于毛细管出口临界压力;这样的话,当冷藏室蒸发压力降低时,由于毛细管出口临界压力高于冷藏室蒸发压力,毛细管两端的压差能保持基本不变,从而限制流量的增大和回霜的加重。

实验所显示的两个蒸发温度和喷射器出口压力相对于冷冻室蒸发压力的提高,肯定了混合循环的节能作用,推算 COP 的提高在 8% 左右.实际运行时,起动后运行一小时的耗电量为 0.120 度,而一台 135W 的美菱 BCD181 双门冰箱在同样条件下的耗电量为 0.140 度,折算的节能率在 8~10%。

### 3.3 一个改进方案——交叉回热

设计时总是按照给定冷藏室与冷冻室制冷量分配比例来进行计算,但是,当冷藏室和冷冻室的负荷分配发生较大变化时,例如环境气温较低,冷冻室中新放入较多物品等情况,此时,冷藏室中并不需要制冷;那么,负荷较小的冷藏室回路将会发生回霜.针对这一问题,将系统改用了一种交叉回热方式<sup>[4]</sup>,即冷藏室回气管与冷冻室毛细管进行热交换,而冷冻室回气管与冷藏室毛细管进行热交换.当一个回路中将要发生回霜时,由于其回气温度降低,被进一步冷却的将是另一回路的毛细管,其中的制冷剂过冷度加大,液体段延长,毛细管内的流动阻力将降低.由于毛细管工作的特点,该回路的制冷剂流量将要增加;而在将要发生回霜的回路中,由于两回路的并联结构,其流量将相应被减小,从而避免了回霜的发展.改用这一方案的实验显示出系统在工况变化时的自动调节能力明显加强,不过,在冷藏室蒸发压力的稳定性方面没有明显改善。

## 4 双温冰箱蒸发器串联的混合循环系统运行实验

蒸发器串联的压缩喷射式混合制冷循环的性能参数一般略高于蒸发器并联的循环<sup>[6]</sup>,但在实用性方面是否有其优点,则必须通过实验来了解.双温冰箱蒸发器串联的混合循环系统如图 6 所示。

在回热方式的设计方面,同样为了防止在喷射器中产生两相流动,将毛细管回热器的一

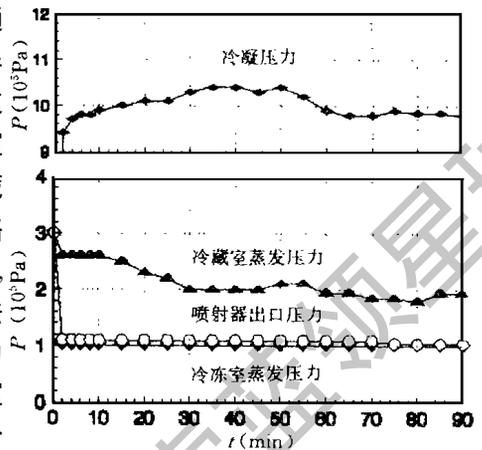


图 5 蒸发压力、喷射器出口压力、冷凝压力随时间的变化

Fig 5 Variation of the evaporation pressure, ejector outlet pressure and condensation pressure with time

部分布置在喷射器进口与汽液分离器出口之间的回气管上,主要部分则布置在喷射器出口与压缩机入口之间的回气管上;同时,让冷冻室回路的回气管去冷却汽液分离器下部出口的

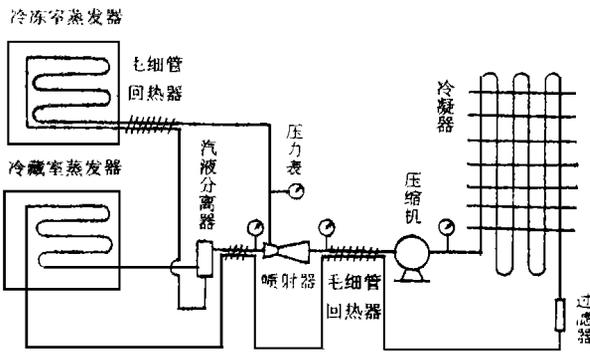


图 6 蒸发器串联的混合循环实验系统

Fig. 6 Experimental system of the hybrid cycle with two evaporators in series

饱和液体,使其获得一定的过冷度,防止在冷冻室回路毛细管入口处因局部阻力引起制冷剂的闪蒸而导致阻塞,而且在同样的  $T$  下也有助提高主喷嘴中的流量。

其它设计以及实验过程则与蒸发器并联时一样。

实验结果显示冷藏室蒸发压力的稳定性明显改善,实验过程中未发生回霜问题,说明蒸发器串联方案的变工况调节能力较强;不过,冷冻室降温略慢.这是由于在串联方案中制冷剂是依次通过冷藏室蒸发器和冷冻室蒸发器的。

## 5 结论

通过实验证明所采用的喷射器设计方案可以与毛细管匹配形成两个蒸发温度,能保证系统正常运行,并起到了增压作用;而且耗电量的测定也显示了混合循环的节能作用.但是,也发现蒸发器并联方案系统的变工况适应能力较差,虽然采用交叉回热方式改善了这一情况,冷藏室蒸发温度仍然不够相对稳定;不过,蒸发器串联方案则基本解决了这些问题,并且节能效果明显,是一种更易实用化的方案。

## 参 考 文 献

- [1] 苏跃红,葛新石.双温冰箱压缩喷射式混合制冷循环的分析.中国科学技术大学学报, 1995, 25(4): 431-435.
- [2] 苏跃红,葛新石.双温冰箱——一种节能循环的分析.流体机械, 1996, 3: 56-58, 49.
- [3] 茅以惠,余国和编.吸收式与喷射式制冷技术.北京:机械工业出版社, 1985: 196-200.
- [4] 苏跃红.冰箱和热泵系统中若干热力学问题的理论和实验研究.博士学位论文.中国科学技术大学, 1996.
- [5] Lu K T, Kou H S, Lan T H. Geometrically and thermally non-optimum ejector heat Pump analysis. Energy Convers. Mgmt., 1993, 34(12): 1287-1297.
- [6] 苏跃红,葛新石.两种压缩喷射式混合制冷循环的性能比较.中国科学技术大学学报, 1995, 26(1): 110-113.

# Design and Experimental Study of Compression/Injection Hybrid Refrigeration System for Domestic Double-Door Refrigerators

Su Yuehong Ge Xinshi

(Department of Thermal Science and Energy Engineering, USTC)

**Abstract** The performance of the ejector and the operational stability of a refrigeration system are the key problems for practical application of the compression/injector hybrid refrigeration system to domestic double-door refrigerators. This paper presents the theoretical design analysis of the ejector and refrigeration system. The description of the experimental systems are also given. The capability of energy saving of the experimental hybrid refrigeration system was proved, so the practicability of the suggested design method is validated. Moreover, it is shown that the hybrid cycle with two evaporators in series is a more suitable energy saving technique for domestic refrigerators because of its good adaptability to changing operational conditions.

**Key words** domestic refrigerator, compression/injection, ejector, hybrid cycle