

研究论文

# 大型螺杆式冷水机组使用绿色环保工质的实验研究

张永梨 童明伟 童庆明

(重庆大学热能工程学院 重庆 400044)

**摘 要** 在绿色环保替代工质的研究方面,由于其优越的热物性和无可比拟的环保优势,各类 HC<sub>s</sub> 物质正引起越来越多学者的注意。本文在充分论证的基础上,首次将 HC<sub>s</sub> 类工质 R290 应用于大型螺杆机组进行试验。试验结果表明,采用 R290 时的能效比(EER)与 R22 时的相当,可见 R290 完全能够作为 R22 的直接替代工质。如果针对 R290 的可燃性对机组做少许的改动,则采用 R290 的大型制冷系统可望推向市场,带来巨大的经济效益和社会效益。

**关键词** 替代工质 制冷剂 HC<sub>s</sub> R290

## Experimental research on the application of environmental protection refrigerants in the large-scale screw-refrigerator

**Abstract** On the research of alternative refrigerants, because of their advantageous thermal characters and unparalleled preponderance of environmental protection, kinds of HC<sub>s</sub> substance have taken more and more scholars attention. At the base of full demonstration, we apply the HC<sub>s</sub> on large-scale screw-refrigerator for the first time. The result indicate that, although we do not make any better about the system, the energy-efficiency-ratio(EER) of R290 system is equally matched R22 system. So we can say that R290 can alternate R22 in the refrigeration system and can work well. If we make some improvement on the system against the flammability of HC<sub>s</sub>, then the large-scale refrigeration system with HC<sub>s</sub> as the refrigerant could march to the markets, and make immense social and economic benefits.

**Keywords** Alternative, Refrigerant, HC<sub>s</sub>, R290

### 1 前言

HC<sub>s</sub> 是天然存在的物质,用它们作为制冷剂已经有几十年的历史。一些国家与地区对在小型的家用与商用制冷系统中采用 HC<sub>s</sub> 总是踌躇不前,其中最主要的原因是考虑到 HC<sub>s</sub> 的可燃性和爆炸性,有可能造成的危害以及遵守本国、本地区内现行的标准中关于禁用此类制冷剂的严格规定。通常,HC<sub>s</sub> 制冷剂在系统内的工作压力要高于大气压力,因此周围的空气是不能够进入系统与制冷剂发生混合的,再加上在系统内部的工作温度一般不可能达到 HC<sub>s</sub> 的点火温度(约 430 °C),所以可以肯定系统内部不会产生燃烧和爆炸。

文献[1]中以采用 R290 为制冷剂的冰箱作为对象进行了点火燃烧试验以及明火燃烧试验,结果表明在遇到明火时 R290 不会加剧燃烧引起严重后果;文献[2]指出,试验研究与理论分析均表明 R290 是一种非常优良的制冷剂,可以在现有家用空调器中不作任何改动的情况下用 R290 替代 R22;文献[3]采用当量温度分析法,比较分析了 R22 与其替代工质的性能,在相同的工况下,R290 与 R22 的制冷系数相差无几,并且在有回热循环的系统中,随着蒸汽

过热度的增大,R290 的制冷系数和容积制冷量的增幅均比 R22 大,因此,在系统中采用回热循环将更有利于发挥 R290 的优势;James 和 Missenden 对家用冰箱采用 R290 作替代制冷剂也开展了详细的研究<sup>[4]</sup>,他们对 R12、R22、R290 和 R134a 进行了分析,得出了在两相区,R290 的换热系数高得多的结论。

迄今为止,对自然工质的应用研究很大程度上还局限于小型装置如家用空调冰箱系统。为了进一步推动替代工质的研究,本文以丙烷(R290)为对象,在对其爆炸性和与材料的相容性进行研究的基础上,首次将 R290 应用于大型螺杆机组进行试验,并根据其特性对膨胀阀进行优化改造,对比优化前后的结果。

### 2 爆炸性能试验

试验装置如图 1 所示。采用 Pt 电阻丝加热,达到着火点发生爆炸时,高压气体将冲破泄压口处的薄膜。记录爆炸时通过 Pt 电阻丝的电流和其两端的电压即可计算得出此时的 Pt 丝电阻,查表可得对应温度(即着火点)。

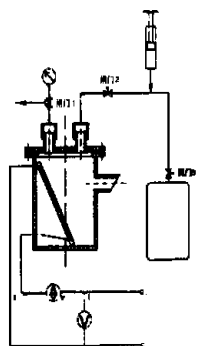


图 1 爆炸性试验装置简图

试验时从丙烷体积浓度约为 5% 时开始,然后向两侧延伸,以大致相同的步长对不同浓度下的混合气体进行加热爆炸试验。在接近两端的爆炸极限时,通过反复多次的试验,不断调整试验工质浓度进行逼近。结果如图 2 所示,横坐标为丙烷在混合气体中的体积百分比,纵坐标为发生爆炸时的温度。

在丙烷 2% ~ 10% 的浓度范围内,我们对其进行了烟头点火试验,具体操作步骤为:气体的充灌与采用加热丝进行试验一样,然后将点燃的烟头靠近泄爆口的薄膜并烧破薄膜,观察现象。

试验中我们发现,在此浓度范围内的混合气体,烟头均不能致其发生爆炸。但若用天然气打火枪的明火进行点火,则可致其发生爆炸或燃烧。

此外我们设计了电子打火试验。试验中发现,在约 4.0% ~ 7.0% 浓度范围内,电子点火试验能致其发生爆炸,在此范围之外则不能。我们认为其原因主要是由于该打火器的火花能量所限,也就是说若采用类似汽车用的打火器,则有可能使混合气体在理论爆炸极限内均能发生爆炸。

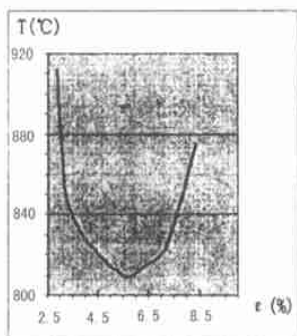


图 2 丙烷爆炸浓度与爆炸温度的关系图

爆炸性能试验结果表明,爆炸温度与浓度的关系曲线大概呈抛物线形,且在约 5.90% 浓度处其爆炸温度最低,约为 810,在此浓度点两侧(在爆炸极限范围内),离此点越远则其爆炸温度越高。另外,从烟头点火试验及电火花打火试验的情况,我们可以看出,丙烷并非象我们想象的那么容易发生爆炸,除要满足浓度条件之外,还需要明火或较高能量

的火花。即便如此,在使用过程中其安全性仍然是需要认真解决的重要问题。

### 3 相容性能试验

试验装置如图 3 所示。图中,1 为高压釜,由  $\Phi 200 \times 10$  的无缝钢管制成,底部与一圆盘底板焊死,上部以法兰盘联结,便于试验材料的装、取;2 为盛装试验材料的烧杯,放在高压釜内,不用承受压力。同时,由于试验材料各自分开,能清楚地区分其与制冷剂的相容情况。感温装置 3 为 Pt100 感温头,与温控器 6 配合,使容器内温度保持在 130。

对于相容程度,我们主要从质量变化、尺寸变化、外观变化等几个方面去衡量,参照美国 ASHRAE 标准,我们拟定的试验条件为:试验温度  $130 \pm 1$ ,试验压力 1.0 ~ 1.1MPa,试验时间 15 天。

试验结果数据列于表 1。观察试验前后的金相照片,发现黄铜、紫铜试件的端面除操作过程中的划伤之外,没有发现腐蚀现象。而从表中各试件的质量及尺寸变化可以看出,各金属试件质量及尺寸变化率均很小,属于误差范围之内;紫铜两端面有部分区域发青,估计是高温作用的结果,其他试件均无肉眼可见的外观变化。对于润滑油,试验后仍清澈透明,无沉淀物,刚取出来时有大量气体析出,应是丙烷气体在试验压力下溶于润滑油中,表明二者相容性良好。

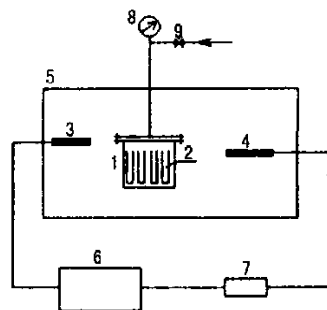


图 3 相容性能试验装置图

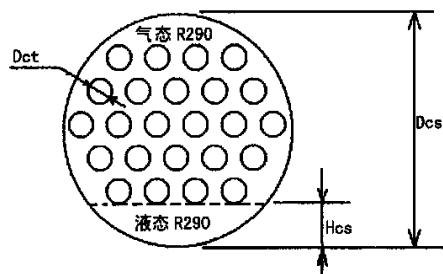


图 4 冷凝器内工质量计算示意图

表 1 丙烷相容性试验数据

材料样品		黄铜	紫铜	碳钢	锰钢	铸铁	漆包线	其它	
质量 (mg)	试验前	40350.20	38458.25	21669.98	19960.40	45948.85	2197.21	润滑油 从高压釜取出时有大量 气体析出， 无其他外观 变化。观察 不到密封圈 的任何变 化。	
	试验后	40376.70	38522.55	21696.23	19990.45	45965.70	2199.71		
质量变化率 (%)		0.07	0.17	0.12	0.15	0.04	0.11		
直径 (mm)	试验前	19.93	19.93	14.85	14.86	20.25	试验前 后无肉 眼可见 变化。		
	试验后	19.95	19.92	14.87	14.87	20.28			
直径变化率 (%)		0.10	- 0.05	0.13	0.07	0.15			
长度 (mm)	试验前	14.87	14.98	14.93	14.93	20.03			试验前 后无肉 眼可见 变化。
	试验后	14.85	14.98	14.91	14.92	20.04			
长度变化率 (%)		- 0.13	0.00	0.13	- 0.07	0.05			
试验后外观		紫铜两端面有部分颜色发青, 状似高温氧化; 其他均无肉眼可见的变化。							

4 大型冷水机组性能试验

试验平台为重庆市嘉陵制冷空调设备有限公司生产的 LSBLG247 型半封闭螺杆冷水机组。为了与采用 R22 时的系统性能相比较, 需要在相同或相近的工况下确定其名义制冷量等参数。

工况:

冷冻水进口温度	12
冷冻水出口温度	7
冷却水进口温度	32
冷却水出口温度	37

工作范围:

冷却水出口温度	22 ~ 37
冷却水进出温差	3.5 ~ 10
冷冻水出口温度	5 ~ 20
冷冻水进出温差	2.5 ~ 10

4.1 充灌量的确定

本试验采用理论计算的方法确定充灌量, 前提是假定系统工作于最佳状态。

试验机组采用的冷凝器为卧式壳管式冷凝器, 其端面如图 4 所示。

设冷凝器外壳内径为  $D_{cs}$ , 管板间距为  $L_{cs}$ , 其内管子数为  $N_c$ , 管外径为  $D_{ct}$ , 最低一排管束底部与外壳里面底部的距离为  $H_{cs}$ , 冷凝器内液态 R290 密度为  $\rho_{el}$ , 气态 R290 密度为  $\rho_{es}$ 。当液态 R290 刚好到达最下面管束的底部时, 冷凝器内 R290 的质量  $M_c$  (R290) 为:

$$M_c(R290) = L_{cs} \rho_{el} \left( \frac{4}{3} H_{cs} \sqrt{D_{cs} H_{cs} - H_{cs}^2} \right)$$

$$+ \rho_{es} \left[ (D_{cs} - N_c D_{ct}) - \frac{4}{3} H_{cs} \sqrt{D_{cs} H_{cs} - H_{cs}^2} \right]$$

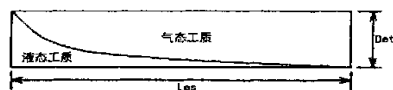


图 5 蒸发器内工质质量计算示意图

设蒸发器管板间距为  $L_{es}$ , 其内管子数为  $N_e$ , 管内径为  $D_{et}$ , 蒸发器内液态 R290 密度为  $\rho_{el}$ , 气态 R290 密度为  $\rho_{es}$ 。蒸发器内 R290 的质量  $M_e$  (R290) 为:

$$M_e(R290) = D_{et} L_{es} N_e (0.25 \rho_{el} + 0.75 \rho_{es})$$

设压缩机容积为  $V_p$ , R290 密度为  $\rho_{pg}$ , 压缩机内 R290 的质量  $M_p$  (R290) 为:

$$M_p(R290) = \rho_{pg} V_p$$

经计算得到系统内应该充灌的 R290 的大致的质量  $M$  (R290):

$$M(R290) = M_c(R290) + M_e(R290) + M_p(R290) + M_z(R290)$$

在本试验中计算得到的近似值约为 21kg。

4.2 膨胀阀的改造

试验机组中采用外平衡式热力膨胀阀, 当感温包内气体的热物理性质与制冷剂一致时, 其调节作用将比使用其它气体好。因此, 我们把感温包里面的工作气体改为 R290 进行试验。对于 LSBLG247 冷水机组来说, 其蒸发温度一般在 2, 再考虑 5 的蒸发器出口气体过热度, 也就是说当正常工作时, 感温包所处的温度约为 7, 以此点为感温包调节

的基准,我们决定充入此温度下的饱和 R290 气体。然后将此时的饱和压力值转换成实施充注时的环境温度下的对应压力,充注时即以此压力为准。

#### 4.3 试验结果

图 6 和图 7 分别为膨胀阀改造前后不同充灌量下 EER(能效比)随  $T_1$ (冷冻水进口温度)的变化趋势图。从图中可以看出,当充灌量为 22kg 时其能效比较大,在名义工况下(冷冻水进口温度 12 )约为 4.0 左右;而当充灌量分别为 17kg、19kg、24kg、26kg 时,其能效比均有不同程度的下降。其原因是当充灌量不足时,蒸发器内制冷剂供液不足,造成制冷量的下降,而当充灌制冷剂过量时,冷凝器内下部的换热管束被制冷剂液体淹没,减少换热面积,从而影响机组的运行效果。在每一个充灌量下,当冷冻水进口温度不同时,其能效比有较大的变化,总的趋势是冷冻水进口温度越高,能效比越大。

对照不同膨胀阀下的能效比,我们发现,当系统采用更改之后的膨胀阀时,其能效比比采用原膨胀阀有略微的提高。

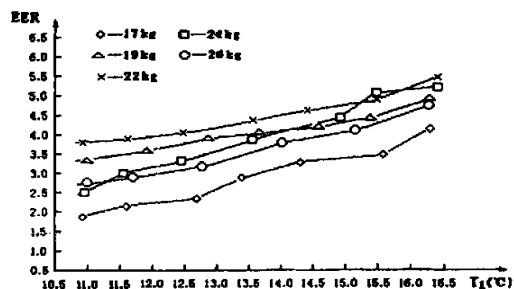


图 6 膨胀阀改造前,不同充灌量下 EER 随  $T_1$  的变化

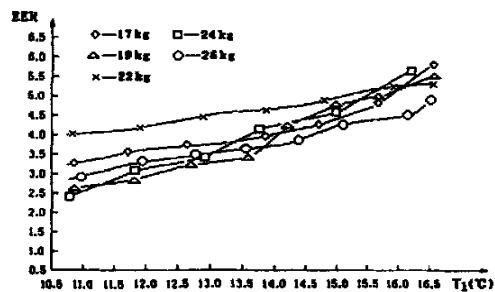


图 7 膨胀阀改造后,不同充灌量下 EER 随  $T_1$  的变化

机组采用 R22 做制冷剂时,在名义工况下其能效比约为 4.165。采用 R290 后,我们以充灌量为 22kg 时的测试结果为准进行比较,依然取名义工况下的参数进行计算,其能效比约为 4.094。

在测试过程中我们还发现,采用 R290 的系统其排气温度最高时只有 70 左右,最低时还不到 60,比采用 R22 时的排气温度有显著降低。从上面的对比可以看出,当在原系统中直接充入 R290 进行测试时,其性能与采用 R22 时不相上下,在某些方面还要优于 R22 系统。

## 5 结论

R290 是一种优秀的 R22 的替代制冷剂,与原有制冷系统不存在任何相容性方面的问题,并且其换热性能甚至优于 R22。同时,由于 R290 是自然界中大量存在的物质,不存在破坏环境的问题,且价廉易得,大量使用 R290 作为 R22 的替代制冷剂将带来巨大的经济效益和社会效益。因此,如果按照文献[5]的要求,设计系统时选用合适的电气器件,如防爆电机、密封或固态的压缩机继电器及过载保护器、具有浮动引线的电容器等,并且根据 R290 比空气重的特点,在机组底部加装排风扇以及 HCs 类物质的浓度报警器,制定严格的安全操作规程,则可解决 R290 的爆炸性问题,从而将 R290 的应用推向市场,创造效益。

#### 参考文献

- [1] 吴植华,董天禄等,“在家用空调中用丙烷(R290)替代 R22 的研究(二)”,《制冷》NO. 5.
- [2] R. N. Richardson and J. S. Butterworth, “The performance of propane/ isobutane mixture in a vapour - compression refrigeration system”, International Journal of Refrigeration, Vol. 18, No. 1, 1995, pp. 58 - 62.
- [3] 张嘉辉,马一太等,“R22 与其替代工质的性能比较与分析”,工程热物理学报, Vol. 20, No. 5 Sep. , 1999.
- [4] R. W. James and J. F. Missenden, “The use of propane in domestic refrigerator”, International Journal of Refrigeration, Vol. 15, No. 2, 1992, pp. 95 - 100.
- [5] Cool Concerns (Newbury, UK), IIT (New Delhi, India), INFRAS (Zurich, Switzerland), “采用 HCs 制冷剂家用与商用制冷装置安全设计、制造、维修与更换制冷剂手册”, 俞丙丰等译, 1997. 8.