

含 R290 混合物用于家用空调冷媒的性能研究

杨 昭, 金国民, 张世钢

(天津大学 热能研究所, 天津 300072)

摘要: 对含 R290 的共沸混合工质用于替代 R22 的可行性进行了研究。理论计算结果表明, 共沸混合物除了具有优良的热物理性能之外, 容积制冷量亦有所提高, 有可能成为 R22 的替代物; 对这几种工质的可燃性进行了评估, 认为其用于家用空调器是安全的。

关键词: 丙烷(R290); 共沸; 替代工质; 可燃性

中图分类号: TU831, TB61

文献标识码: A

文章编号: 1006-8449 (2005) 01-0001-04

1 引言

目前, R22 仍然是最主要的制冷剂之一, 特别是在空调装置中的使用更为普遍。由于对 HCFCs 限用日期的日趋临近, R22 的替代工作已刻不容缓。

R290(即丙烷)是石油、天然气工业的产品, 属自然工质。它不仅价格便宜, 方便易得, 且 ODP 值为零, GWP 值接近于零, 具有优良的环境适应性。另外, 丙烷是非极性物质, 与各种金属、密封材料、干燥剂及软管材料相容, 并且与目前广泛使用的矿物油互溶良好。国内外已有许多研究者对 R290 替代 R22 进行了广泛深入地研究^[1-5]。文献[4]对三种家用空调器用 R290 替代 R22 的实验表明, 在简单改造毛细管后, COP 可分别提高 12.81%, 19.03%, 14.61%。文献[5]对一种家用分体式空调器的研究结果亦证明, 在恰当的充灌量下, R290 的能效比为 R22 的 1.16 倍。R290 的容积制冷量较低, 用于替代 R22 时, 一般需要对装置结构做相应调整。另外, R290 是易燃气体, 用作制冷剂时, 对其安全性需慎重对待, 这也是约束其推广使用的主要原因。

一般认为, 几种工质组成的混合物可以实现优势互补, 通过选择合适的配比, 有可能在不改变系统结构的前提下替代 R22。非共沸混合物在蒸发器和冷凝器中存在相变温差(温度滑移), 理论上可以利用此相变温差与热源温度的匹配, 减少传热的不可逆损失, 提高循环的热力完善度。非共沸制冷剂的缺点是存在分馏现象, 当系统发生泄漏时, 会引起剩余混合物成分的改变, 从而影响系统性能和运行特性。共沸制冷剂不会因系统泄漏而改变浓度, 同时共沸制冷剂性能可以尽可能的接近被替代工质, 因而在近年来倍受重视。本文对

含 R290 的几种共沸混合物替代 R22 的可行性进行了初步探讨, 以期对进一步研究提供依据。

2 共沸混合物确定及其替代性能

为了方便快捷的筛选替代混合工质, 作者在多年工质替代研究的基础上, 结合最新的计算机编程技术, 研制开发了制冷热泵系统替代混合工质优选工具软件包。该软件包采用图形化用户界面设计, 可视化数据输出, 界面友好, 方便实用。主要由饱和压力—饱和温度图绘制工具、泡露点温差—浓度图绘制工具、二元混合工质循环性能—浓度图绘制工具、三元混合工质循环性能—浓度图绘制工具、循环热力计算工具、多元混合工质浓度配比数值寻优工具等几部分组成。这些工具的配合使用, 为各种制冷热泵系统工质替代研究提供了极大帮助。本软件包采用了精度较高的 CSD 方程用

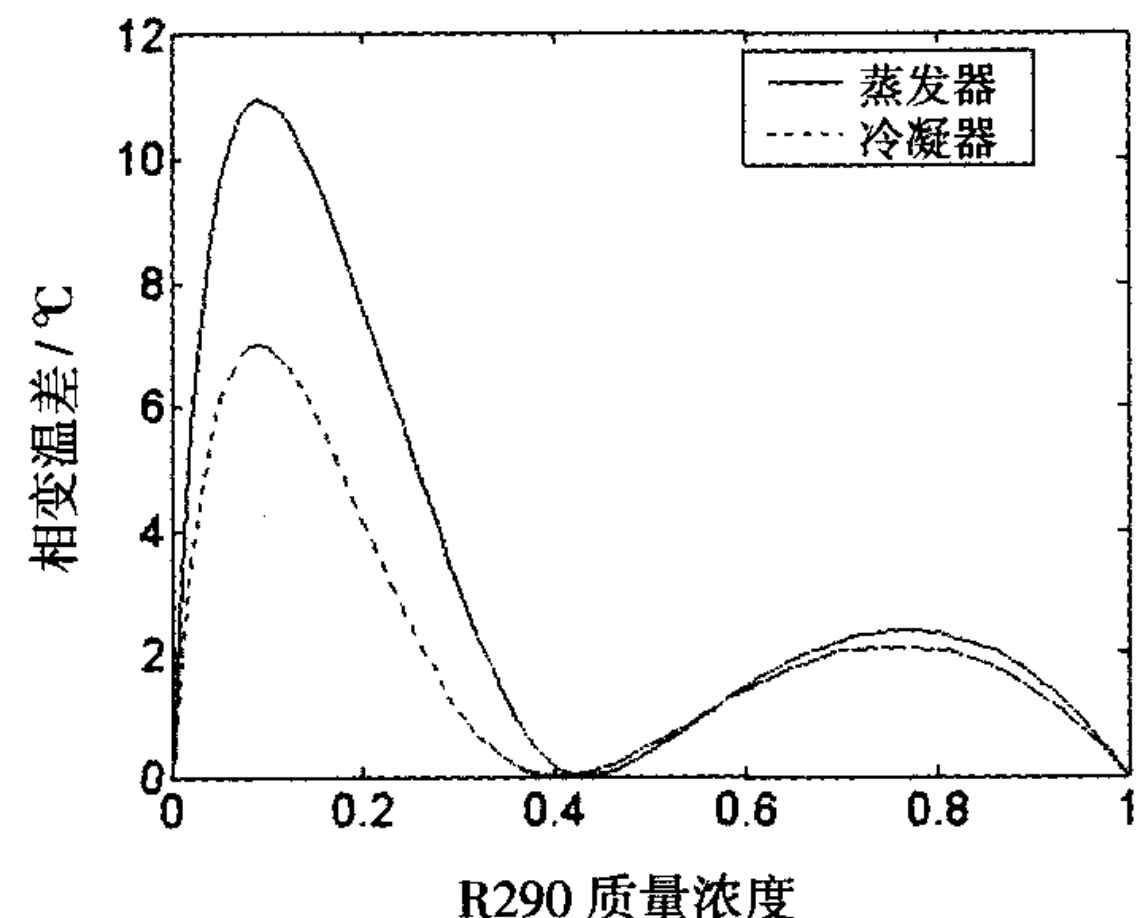


图 1 混合物 1 相变温差与浓度的关系

于工质的热物性计算。

如前所述, 除可燃性外, R290 的性能优良, 但用于

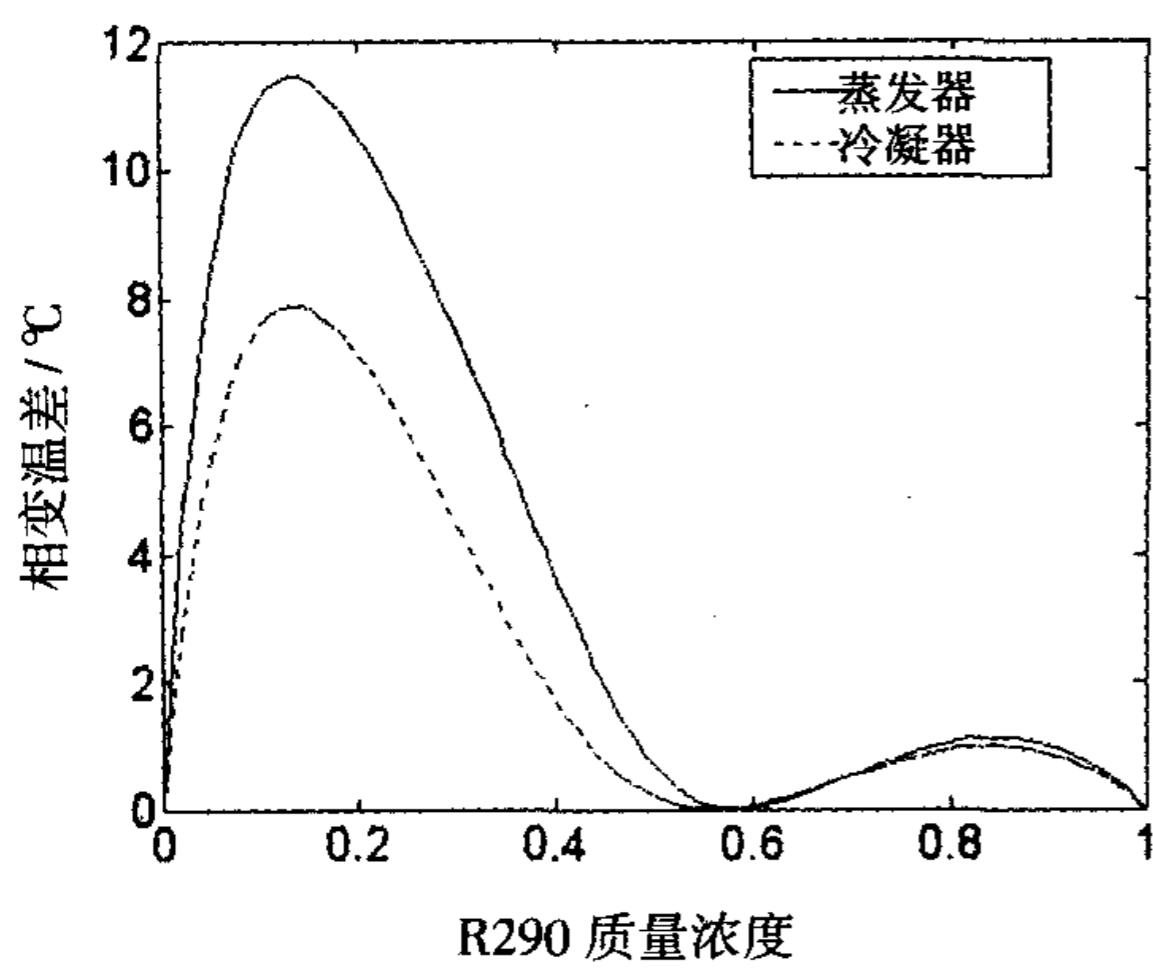


图2 混合物2相变温差与浓度的关系

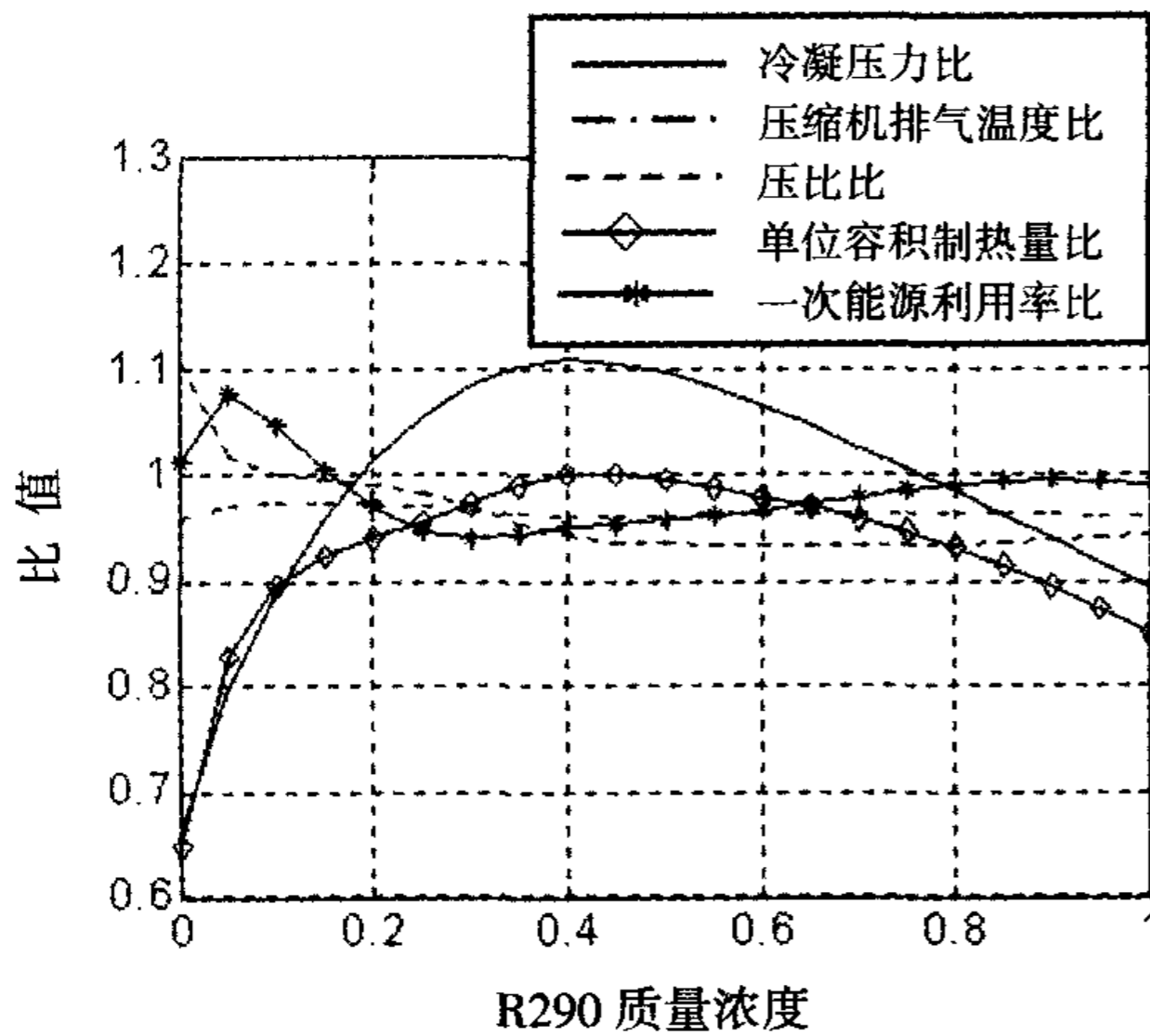


图3 混合物1综合性能

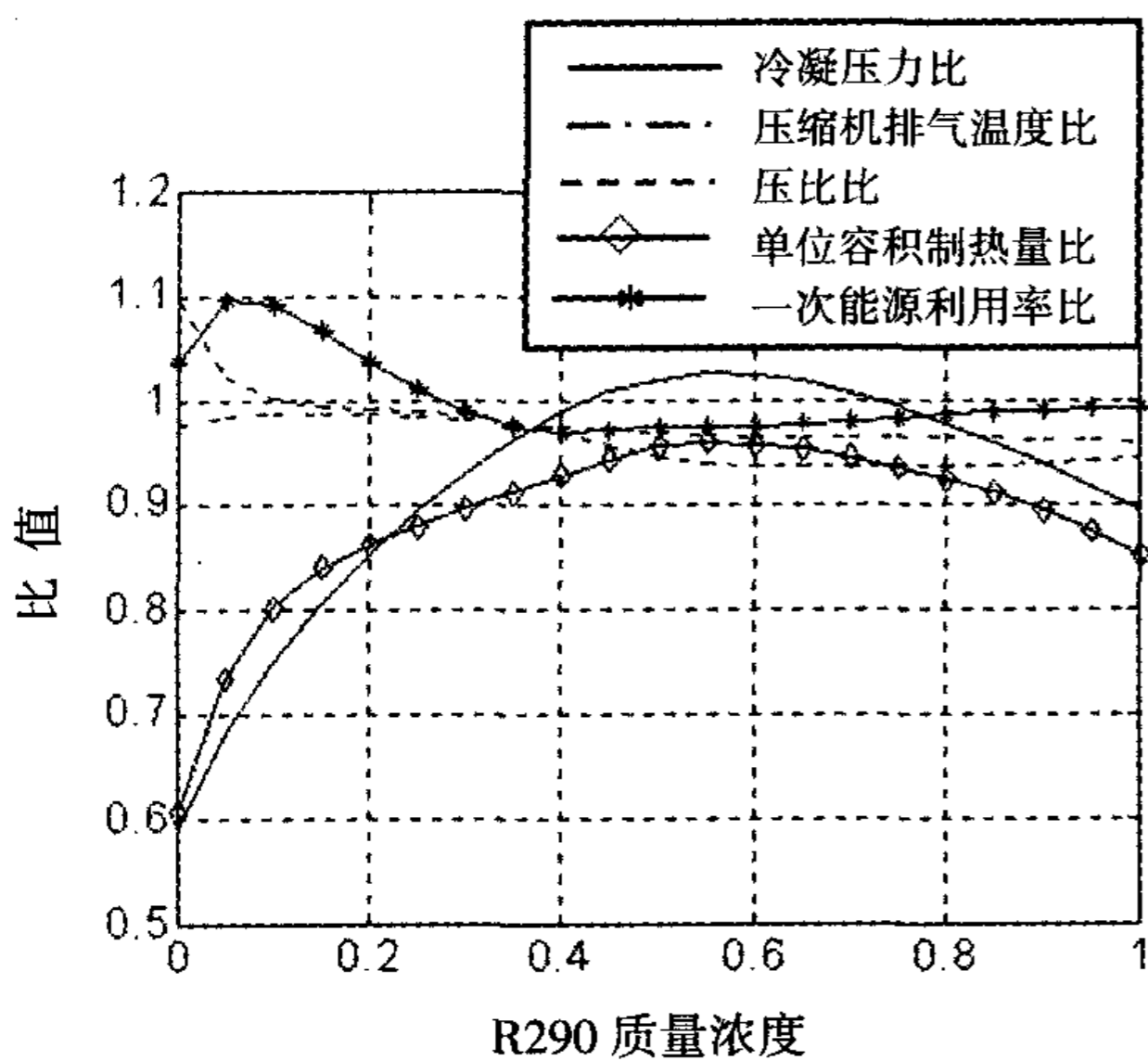


图4 混合物2的综合性能

替代 R22 时,单位容积制冷量稍低。一般来说,在一定的蒸发温度和吸气温度下,共沸制冷剂比其任一组元的蒸发压力高,比容小,因而单位容积制冷量会有相应提高。根据这一指导思想,作者利用所开发的替代混合工质优选工具软件包做了大量计算分析,以寻求一种能够替代 R22 的含 R290 共沸混合物。经理论计算发现,R290 可以与多种工质组成共沸或近共沸混合物。图 1~图 4 分别表示其中两种性能较好的含 R290 的二

元混合物在两器中的相变温差和浓度的关系以及循环中以 R22 为基准的各相对量与浓度的关系。循环热力计算是基于单级蒸气压缩式理论制冷循环,选用的基准工况为:蒸发温度 5°C,冷凝温度 40°C,过冷度 5°C,过热度 5°C。

可以看出,这两种混合物均存在共沸点,并且在共沸点处各相对性能参数均在 1 附近,证明这两种混合物均有较好的替代性能。

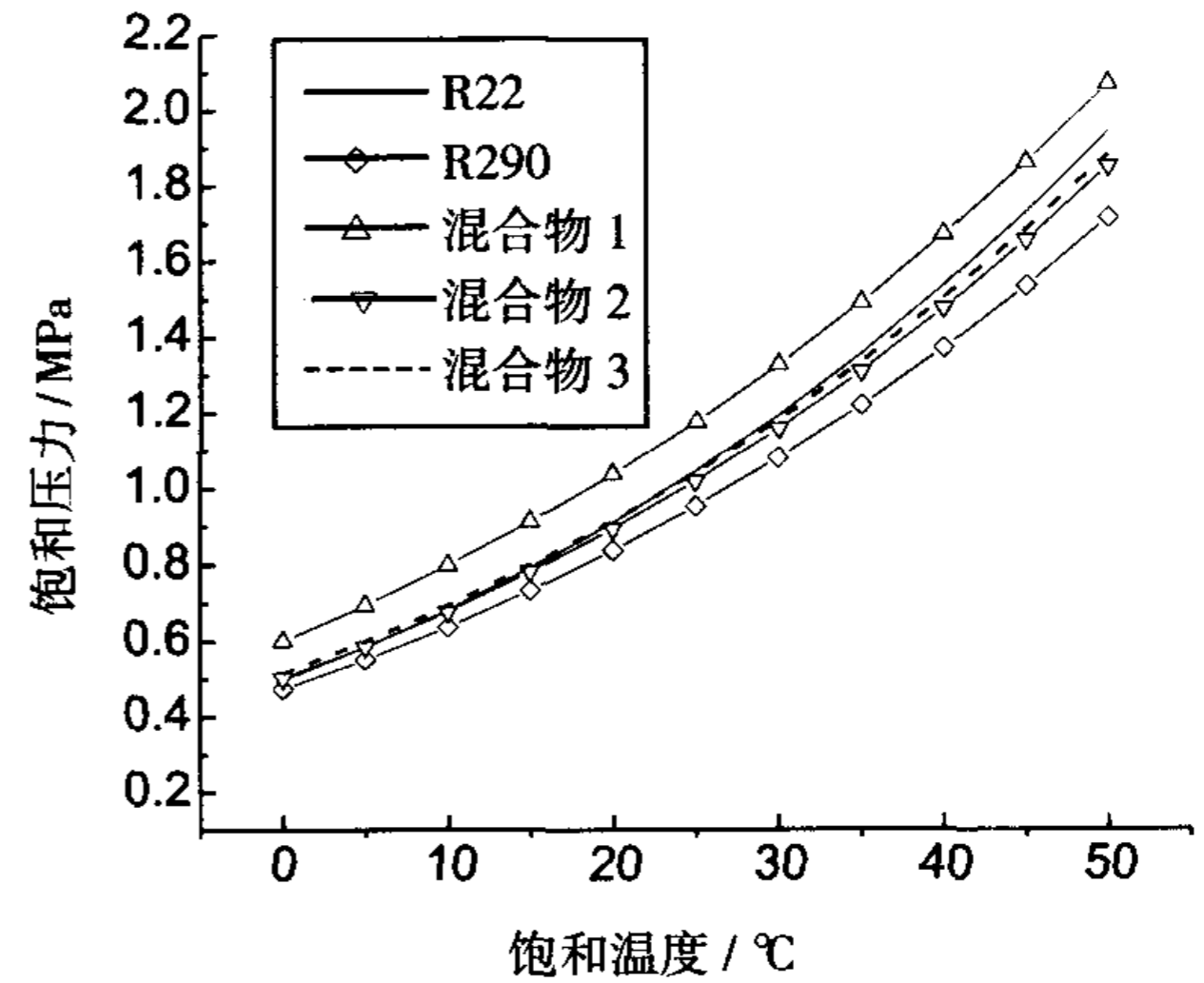


图5 饱和蒸气压力与饱和温度的关系

由图 5 所表示的饱和蒸气压力与饱和温度的关系曲线可以看出,两种二元共沸物的饱和蒸气压力曲线与 R22 比较接近。

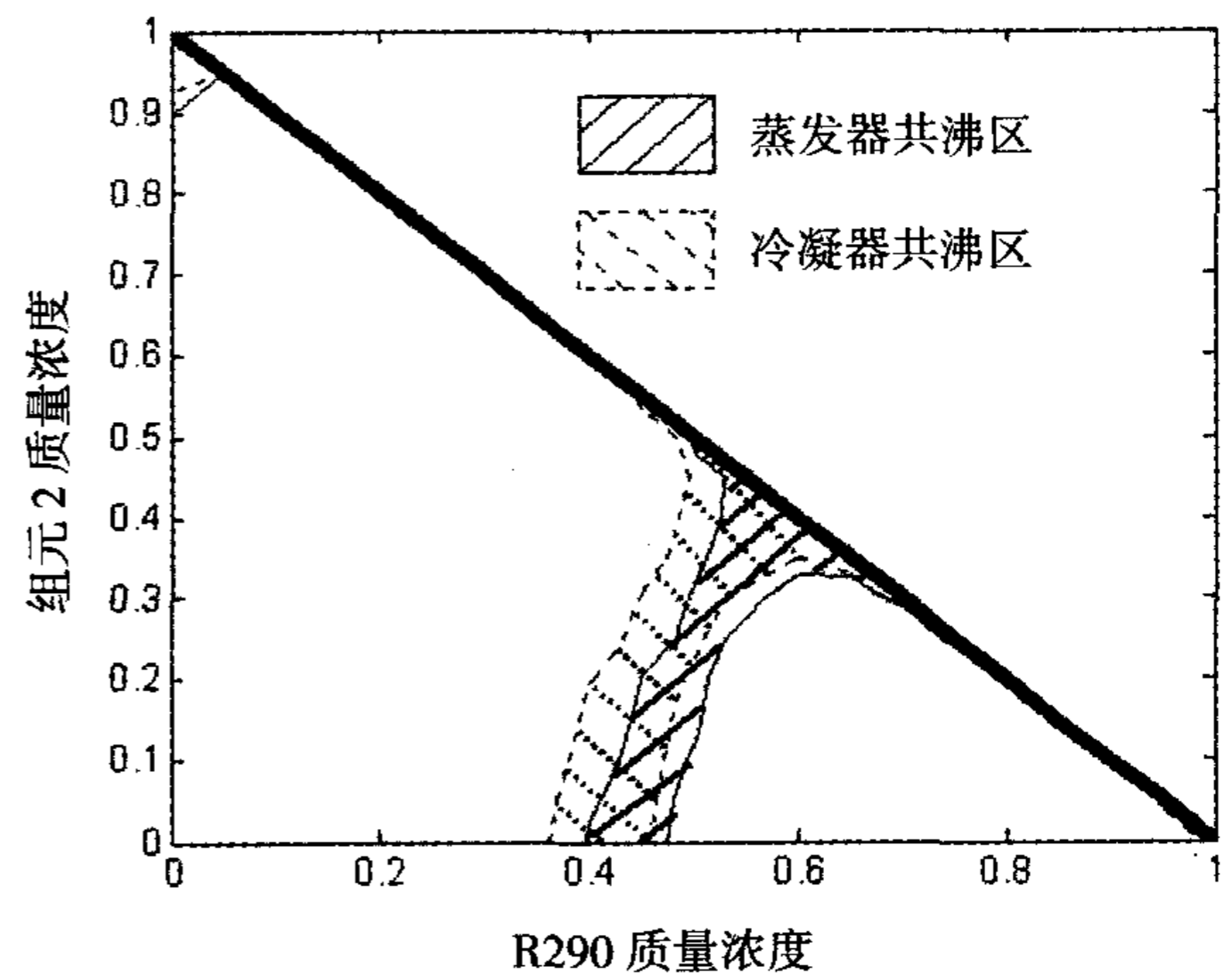


图6 含 R290 三元混合物共沸区域图

(共沸区相变温差不超过 0.2°C)

在实际应用中,由于影响因素较多,二元混合物可能仍会存在不尽如人意之处,而三元混合物由于增加了第三组元,可以实现优势互补,使满足要求的配比范围更宽广,增加了根据装置的实际工况进行配比选择的自由度。图 6 是根据三元混合物泡露点温差等位线图绘制的某三元混合物共沸区域图。其中在某一配比下的三元共沸物饱和蒸气压力曲线已表示在图 5 中(混合物 3),可以看出此三元共沸物的饱和蒸气压力曲线更

接近于 R22。

几种工质的理论计算性能列于表 1 中。由表 1 可以看出,理论上 R290 及含 R290 的三种共沸混合物的能效比均低于 R22,但在实际应用中,由于这几种工质的压比小,排气温度低,改善了润滑条件,提高了压缩机的输气系数和效率,同时流动和传热特性亦有改善,使实际运行时的能效比可能会比预测值高。

理论计算结果表明,与 R22 相比,R290 的容积制冷量低 15%,混合物 1 的容积制冷量基本相当,混合物 2 的容积制冷量低 4%,混合物 3 的容积制冷量低 3%。可见共沸混合物的容积制冷量有所提高,比 R290 更接近于 R22,同时由于新工质优良的热物理性能,实际应用时容积制冷量还会有所提高。

表 1 几种工质的理论计算性能

项 目	R22	R290	混合物 1	混合物 2	混合物 3	
ODP	0.05	0.0	0.0	0.0	0.0	
GWP	0.34	0.01	0.15	0.02	0.04	
导热系数, W/(m·℃)	5℃饱和液	0.093	0.103	0.086	0.098	0.096
	5℃饱和气	0.0098	0.016	0.015	0.015	0.015
动力粘度, 10 ⁻⁷ Pa·s	5℃饱和液	2067	1198	1203	1274	1268
	5℃饱和气	117.3	79.7	95.3	83.5	86.4
20℃饱和液密度, kg/m ³	1210	500.3	685.3	594.5	615.9	
可燃性	无	有	有	有	有	
蒸发压力, MPa	0.58	0.55	0.69	0.64	0.65	
冷凝压力, MPa	1.54	1.37	1.70	1.58	1.60	
压缩机排气温度, ℃	62.3	49.4	49.5	50.8	50.8	
压比	2.63	2.49	2.47	2.47	2.47	
容积制冷量, kJ/m ³	4073	3465	4074	3906	3944	
能效比	6.83	6.77	6.51	6.67	6.62	

3 可燃性评估

本文所探讨的 R290 及含 R290 的几种共沸混合物均具有不同程度的可燃性,以下部分将进一步探讨当使用这些工质的系统发生泄漏时引起燃烧爆炸事故的可能性。

工质具有可燃性仅说明其具有燃烧的内部条件,在实际应用中欲发生燃烧反应还必须具有适当的外部条件,即可燃物与空气必须达到一定的百分比,并在一定的温度、压力下才有可能发生并持续下去。

目前欧洲已大量采用 R290、R600a 为工质的冰箱和小型制冷空调器,这些装置由于充灌量较少,尚未发现有因工质泄露而引起的燃烧爆炸事故。对于采用载冷剂的间接冷却系统,如果主机位于通风良好的开放环境中,或者机房中有严格的通风、燃气检测及消防安全措施,亦可以放宽对工质可燃性的限制。

表 2 列出了国内不同厂家生产的三种不同型号的家用空调器,对可燃工质应用于家用空调器的可燃性进行评估。这三种家用空调器在国内产品中具有一定的代表性,设计制冷剂均为 R22。

表 3 列出了可燃工质 R290 及本文提出的含 R290 的三种共沸混合工质的爆炸极限值。其中对混合物 1(含不可燃组元的二元混合物),本文采用作者在天津大学热能研究所的可燃制冷剂爆炸极限测试台(参照国标 GB/T12474-90 设计建造)上测试得到的实测数据。

对混合物 2(各组分均可燃)的爆炸极限值本文采用混合法则估算^[6]:

$$C_z = \frac{100}{\frac{V_A}{C_A} + \frac{V_B}{C_B} + \frac{V_C}{C_C} + \Lambda} \quad (1)$$

式中 C_z —混合工质的爆炸上(下)限;

V_A, V_B, V_C —各组分的容积成分;

C_A, C_B, C_C —各组分的爆炸上(下)限。

对混合物 3(二种可燃工质与一种不可燃工质组成的三元混合工质),因不可燃组元的体积成分与每种可燃组元的体积成分的比值都小于二者的临界可燃体积比,本文采用以下公式进行估算^[7]:

$$C_z = \frac{100}{\frac{V_A + V_C}{C_{AC}} + \frac{V_B}{C_B}} \quad (2)$$

式中 C_{AC} —A,C 两种工质混合后形成的可燃工质的爆炸极限(其中 C 为不可燃组元),可由试验测得。

在可燃制冷剂爆炸极限测试台上对大量可燃混合制冷工质爆炸极限的实测结果表明,公式(1)、(2)的计算结果与实验结果基本吻合,有较高的准确度,一般误差小于爆炸极限估算要求的 10%,可以用于估算混合工质的爆炸极限。

与可燃纯质类似,当可燃混合物与空气混合,其体积百分比超过混合物的燃烧低限 LFLM、又低于混合物的燃烧高限时,遇明火会发生燃烧反应。由于可燃物是在一定的系统制冷量以及空调或制冷空间内运行的,所以如果工质全部泄漏,对产生单位制冷量的充灌工质和在运行空间的温度压力下,存在一个维持燃烧低限的最小运行空间。而此最小运行空间实际上是

泄漏发生的最危险情况,参照文献[8]给出的最小运行空间的计算方法,本文计算了三种混合物在不同类型的家用空调中的最小运行空间,计算结果见表3。

实际上大多数情况下,工质泄漏后并非充满整个运行空间,由于大部分制冷剂(H_2 , CH_4 和 NH_3 除外)比重均大于空气,因而外漏后可燃体会沿地板扩散,寻找火源。而泄漏气体贴近地面的厚度主要与气体的比重有关。因此若按照泄漏气体充满整个运行空间进行计算,所得结果并不完全符合实际情况,而显得过于乐观。若取 h 作为可燃气体的最小积聚厚度,便可在最小运行空间的基础上除以 h 得到可燃混合物为工质的单位制冷量的最小运行面积。

表2 国内不同厂家生产的三种不同型号家用空调器参数

项目	形式	型号	制冷量, W	制冷剂	制冷剂充灌量, kg
空调器 1	窗机	KC-35/J	3500	R22	0.8
空调器 2	挂机	KF-22GW	2200	R22	1.06
空调器 3	柜机	KF-51LW	5100	R22	1.738

表3 可燃性评估结果

项目		R290	混合物 1	混合物 2	混合物 3
爆炸极限, % (常压, 20℃)	上限	9.5	12.5	11.0	11.6
	下限	2.1	3.2	2.5	2.6
最小运行空间 m^3	空调器 1	20.30	9.94	11.20	10.5
	空调器 2	12.76	6.25	7.04	6.60
	空调器 3	29.58	14.48	16.32	15.3

4 结语

R290 具有优良的环境适应性和热物理性能,

但用于替代 R22 时容积制冷量稍低。R290 可以与多种工质组成共沸混合物,除环境适应性和热物理性能优良外,容积制冷量均有所提高。三元共沸物可以使满足实际要求的配比选择范围更宽广,具有更大的实际意义。

可燃性评估说明,R290 在家用空调器中使用,有一定的可燃性,本文所探讨的及三种可燃共沸混合工质虽然有一定的可燃性,但一般不会发生燃爆事故。不可燃或低可燃性组元的加入可以削弱 R290 的可燃性。

参考文献:

- [1] YANG ZHAO *etc.* Research on non-flammable criteria on refrigerants applied thermal engineering[M]. 2000.
- [2] 张早校,郁永章.天然工质替代 HCFCs 的新趋势[J].流体机械,1995,23(11):50~62.
- [3] B PURKAYASTHA, P K BANSAL. An experimental study on HC290 and a commercial liquefied petroleum gas (LPG) mix as suitable replacements for HCFC22 [J]. *International Journal of Refrigeration*. 1998, 21: 3~17.
- [4] 张玉峰,吴挺,王建拴. R22 替代物 R290 的理论分析与计算[A].中国工程热物理学会工程热力学与能源利用学术会议论文集[C].广东中山,2002.469~474.
- [5] 吴植华,阎琳.在家用空调器中用丙烷(R290)替代 R22 的研究(二)[J].制冷技术,1996,(4):10~12.
- [6] 姜正侯.燃气工程技术手册[M].同济大学出版社,上海,1995.
- [7] 杨昭,李丽新.替代混合物燃爆特性的理论及实验研究[J].燃烧科学与技术,2002,8(2):150~154.
- [8] Research on non-flammable Criteria on refrigerants[J]. *Applied Thermal Engineering*. 2000, 20:1315~1320. (EI,SCI 收录).

收稿日期:2004-10-25

Theoretical Study on the Mixtures Containing R290 as Refrigerants for Domestic Air-conditioners

YANG Zhao, JIN Guo-min, ZHANG Shi-gang

(Thermal Energy Research Institute, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstracts: The paper analyzes the feasibility of the azeotropic mixtures containing R290 as alternatives to the traditional R22 refrigerant. Theoretical calculations show that these azeotropic mixtures may be used as possible alternative replacements to R22 because of their environmentally friendly nature, excellent thermodynamic properties and similar volumetric capacity with that of R22. The flammability of the alternatives is also discussed. It can be concluded that they should be safety even for domestic air-conditioners.

Key words: propane (R290); azeotropy; alternative refrigerant; flammability