

文章编号: 0253-4339(2012)03-0049-05

doi: 10.3969/j.issn.0253-4339.2012.03.049

四通换向阀中采用新型材料的节能效果

柴 婷 胡海涛 丁国良

(上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200240)

摘 要 为了降低四通换向阀传热损失导致的热泵空调系统的性能损失, 提出采用低导热系数的阀座材料替代原阀座材料的方案, 并结合实验和系统仿真分析了该方案的实际节能效果。研究结果表明: 现有典型四通换向阀的传热损失不可忽略; 考虑到结构设计和加工工艺等影响因素, 采用低导热系数阀座材料是降低四通阀传热损失较为可行的方案; 阀座材料导热系数由常见的110 W/(m·K)降为60 W/(m·K)后, 四通阀传热损失减小21%, 热泵系统COP提高0.4%。

关键词 热工学; 热泵空调系统; 四通换向阀; 阀座; 节能

中图分类号: TK124; TQ051.5

文献标识码: A

Energy-saving Effect of Using New Material in Reversing Valve

Chai Ting Hu Haitao Ding Guoliang

(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China)

Abstract In order to reduce the performance degradation caused by the heat loss of reversing valve in heat pump air conditioning system, a method of substituting lower thermal conductivity valve seat for present commonly used ones was proposed. The energy saving effect of lower thermal conductivity valve seat was analyzed through experiments and simulations. Research results show that, the heat loss of the present commonly used reversing valve can not be ignored; considering the effect factors of structure design and processing technology, it is a feasible method to reduce heat loss by using reversing valve seat with lower thermal conductivity; when thermal conductivity of reversing valve seat decreases from 110 W/(m·K) to 60 W/(m·K), the heat loss of reversing valve decreases by 21%, and the COP of heat pump system increases by 0.4%.

Keywords Pyrology; Heat pump air conditioning system; Reversing valve; Valve seat; Energy saving

当今世界能源供应形势日益紧张, 节约能源势在必行。中国作为能源生产和消费大国, 更是以“节能减排”为基本国策。空调能耗占我国能耗的比重很大, 如在我国的城市夏季能耗中空调能耗占40%以上^[1]。因此, 提高空调产品性能、降低空调能耗对中国和世界的节能减排显得尤为重要。

在整个空调市场份额中, 90%的空调器为热泵型。热泵型空调中均需安装四通换向阀, 以实现空调制冷工况和制热工况的转换。四通换向阀的存在会导致热泵系统的性能损失。这个损失不仅存在于四通换向过程中, 而且存在于系统整个运行过程的始终, 从而导致四通换向阀损失对于热泵型空调器的损失不可忽略。W E Murphy使用空气测试装置进行实验, 得出四通阀使系统性能下降3%^[2]。Krishnan假定四通阀各种损失可加, 得出由于四通阀的存在, 系统性能下降4%~6%^[3]。G D S Damasceno用实测的方法得到了不同工况下四通换向阀的压降、传热及泄漏损失特性系数, 在此基础

上计算得出四通阀使系统性能下降9%^[4]。因此减小四通换向阀的损失, 对于降低空调的能耗具有重要的作用。

四通换向阀的损失包括高压侧制冷剂向低压侧的内部泄漏损失、不规则流道产生的流动阻力压降损失、高压高温侧向低压低温侧及环境的传热损失三部分。泄漏损失占四通换向阀总损失的比重小于15%^[5-6], 对系统性能影响最小^[7]。压降损失占四通换向阀总损失的25%左右^[6], 合理设计四通换向阀流道结构能减小压降损失^[7]。传热损失占四通换向阀总损失的60%左右^[6,9], 导致热泵系统性能下降1%~5%^[4,6,10]。由于四通阀的传热损失大于其它两项, 减小四通换向阀的传热损失成为减小四通换向阀损失的关键。

综上所述, 已有的研究一致表明, 四通换向阀的存在会导致热泵系统性能不可忽略的损失, 且其中的传热损失占的比重最大, 成为降低四通阀损失中需要考虑的重点。但是已有的研究对于四通阀

导致的损失在定量上有明显的偏差,且相关文献研究距今都为十年以上,造成这些定量的结论难以直接应用于现有的四通阀及应用四通阀的热泵系统。因此,需要定量分析现有四通阀的传热损失,并提出有效的节能措施。

1 研究思路

整个工作按照三个步骤进行。

步骤1:确定现有四通阀传热损失的大小。

如果现有四通阀的传热损失极小,则没有必要进行降低四通阀传热损失的工作;如果现有四通阀的传热损失大到不可忽略,则需要进行第二步的工作。

步骤2:提出降低四通阀传热损失的方案。

找出影响四通阀传热损失的因素,分析各个因素对于传热损失的定量影响关系,针对对传热损失影响较大的因素,提出减小四通阀传热损失并且具有生产可行性的方案。

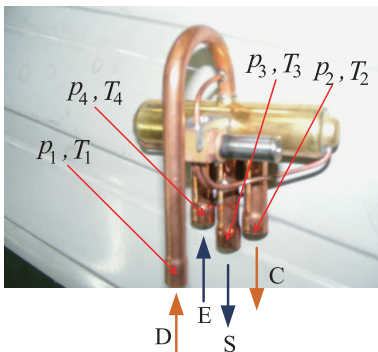
步骤3:检验降低四通阀传热损失方案的实际节能效果。

应用第二步中提出的方案制作四通阀,对该四通阀的性能进行检验,确定实际节能效果。

2 现有四通换向阀的传热损失分析

2.1 传热损失测试的实验方法

为了在国家标准测试工况下,得到现有四通换向阀的传热损失,采用如下的测量方法:1)在四通换向阀的四个进出口处布置温度和压力测点;2)将布置测点后的四通换向阀安装到热泵空调器中,放至标准焓差法实验台进行性能测试。



D高温进气 C高温出气 E低温进气 S低温出气

图1 四通换向阀实验测点布置示意图

Fig.1 The arrangement of measuring points on reversing valve

图1所示为安装温度和压力测点的四通阀。 p 、 T 分别为压力和温度测点,下标1、2、3、4分别表示高温进气、高温出气、低温出气和低温进

气。所有测点布置在连接管距阀体10倍管径处。

四通换向阀传热损失的计算公式如下。

$$Q = m(h_3 - h_4) \quad (1)$$

$$h_3 = f(p_3, T_3) \quad (2)$$

$$h_4 = f(p_4, T_4) \quad (3)$$

$$m = Q' / dH \quad (4)$$

$$Q' = m' \times dH' \quad (5)$$

式中: Q —四通换向阀低温端传热损失; m —热泵系统制冷剂流量; h_3 、 h_4 —四通阀低温出气、低温进气的焓; p_3 、 p_4 —四通阀低温出气、低温进气的压力; T_3 、 T_4 —四通阀低温出气、低温进气的温度; Q' —热泵系统制冷量; dH —蒸发器进出口制冷剂焓差; m' 为流过蒸发器的风量; dH' —流过蒸发器的空气进出口焓差。

实验测试得到四通阀低温进出口的温度 T_3 、 T_4 和压力 p_3 、 p_4 后,通过物性计算公式得到低温进出口焓 h_3 和 h_4 。流过蒸发器的风量 m' 通过风速仪测量,流过蒸发器的空气进出口焓差 dH' 通过热电偶和湿度传感器测得空气干湿球温度后计算得出,蒸发器进出口制冷剂焓差 dH 通过焓差实验台测试蒸发器进出口温度和压力后计算得出。

2.2 误差分析

测量仪表精度见表1。基于仪表精度与误差分析方法^[11],得到传热损失的误差为10.1%。由公式(1)~(5),传热损失的误差计算公式如下。

$$\frac{\delta Q}{Q} = \frac{\delta m'}{m'} + \frac{\delta dH'}{dH'} + \frac{\delta dH}{dH} + \frac{\delta h_3}{h_3} + \frac{\delta h_4}{h_4} \quad (6)$$

根据表1中的仪表精度,按照误差分析方法计算得出质量流量和各焓值误差,代入上式计算可得传热损失的误差。

表1 实验参数及其测量精度

Tab. 1 Uncertainties of test instruments

实验参数	测量方式	最大误差
温度	K型热电偶	$\pm 0.1^\circ\text{C}$
压力	绝对压力传感器	$\pm 0.12\%$
湿度	湿度传感器	$\pm 1.4\%$
风速	风速仪	$\pm 0.05\%$
压差	计算值	$\pm 0.24\%$
传热损失	计算值	$\pm 10.1\%$

2.3 典型四通阀传热损失量

为了确定四通换向阀传热损失量的范围,拟选用代表性的产品进行实验。1.5匹空调属于使用量较大的空调器,而现有四通换向阀的阀座材料基本采用黄铜,因此实验对象选用1.5匹热泵空调

器，且安装采用黄铜为阀座材料的四通换向阀。

为了减少产品本身不一致性带来的不利影响，同时对于三个样本进行测试。实验结果见表2。

表2 常用典型四通换向阀实验结果
Tab.2 Experimental results of commonly used reversing valves testing

阀号	A1阀	A2阀	A3阀
排气/°C	77.0	78.0	78.0
回气/°C	17.4	17.8	17.7
$T_1/°C$	74.3	74.6	74.8
$T_2/°C$	70.8	71.8	71.6
$T_3/°C$	16.4	17.0	17.0
$T_4/°C$	14.3	14.7	14.7
p_1/kPa	1669.0	1656.4	1684.3
p_2/kPa	1676.4	1668.6	1689.6
p_3/kPa	561.8	557.1	561.4
p_4/kPa	557.5	554.9	558.6
低温制冷剂温升/°C	2.1	2.3	2.3
低温制冷剂传热损失/W	24	25.8	25.5
传热损失占系统制冷量的比例	0.7%	0.8%	0.8%

由表2可以看出，对于所有被测试的四通阀，传热损失导致的低温侧制冷剂温升都大于2°C，对应的传热损失均大于24W；传热损失占系统制冷量的比例也均大于0.7%。

鉴于现有四通换向阀中存在明显的传热损失，如何降低四通换向阀中传热损失成为有价值的研究工作。

3 采用新材料降低四通换向阀传热损失的方案

为了降低四通换向阀的传热损失，需要分析影响四通阀传热损失的各因素，并找出最可行的降低传热损失的方案。

四通阀的传热损失 Q 是由四通阀内部流动的低温制冷剂的传热引起的，主要由三部分组成，包括高温流体通过阀座和阀体向低温流体的传热 Q_1 、环境通过铜管壁向低温流体的传热 Q_2 、高温流体通过滑块向低温流体的传热 Q_3 。这三部分传热示意图图2。计算公式如下。

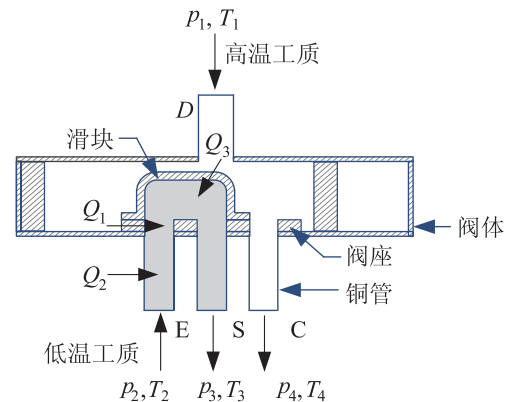
$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (7)$$

$$Q_1 = Q_{\text{阀座}} + Q_{\text{阀体}} = \frac{A_{\text{阀座}}(T_D - T_S)}{\frac{1}{h_1} + \frac{\delta_{\text{阀座}}}{\lambda_{\text{阀座}}} + \frac{1}{h_2}} + \frac{A_{\text{阀体}}(T_D - T_S)}{\frac{1}{h_3} + \frac{\delta_{\text{阀体}}}{\lambda_{\text{阀体}}} + \frac{1}{h_4}} \quad (8)$$

$$Q_2 = \frac{A_{\text{铜管}}(T_{\text{air}} - T_S)}{\frac{1}{h_5} + \frac{\delta_{\text{铜管}}}{\lambda_{\text{铜管}}} + \frac{1}{h_6}} \quad (9)$$

$$Q_3 = \frac{A_{\text{滑盖}}(T_D - T_S)}{\frac{1}{h_7} + \frac{\delta_{\text{滑盖}}}{\lambda_{\text{滑盖}}} + \frac{1}{h_8}} \quad (10)$$

式中： $Q_{\text{阀座}}$ —高温流体通过阀座传给低温流体的热量； $Q_{\text{阀体}}$ —高温流体通过阀体传给低温流体的热量； $\lambda_{\text{阀座}}$ 、 $\lambda_{\text{阀体}}$ 、 $\lambda_{\text{铜管}}$ 、 $\lambda_{\text{滑盖}}$ —阀座材料、阀体材料、铜管、滑盖的导热系数； $A_{\text{阀座}}$ 、 $A_{\text{阀体}}$ 、 $A_{\text{铜管}}$ 、 $A_{\text{滑盖}}$ —阀座、阀体、铜管和滑盖的面积； T_D 、 T_S 、 T_{air} —高温流体、低温流体和周围空气的温度； $\delta_{\text{阀座}}$ 、 $\delta_{\text{阀体}}$ 、 $\delta_{\text{铜管}}$ 、 $\delta_{\text{滑盖}}$ —阀座、阀体、铜管和滑盖的厚度； h_1 、 h_2 、 h_3 、 h_4 、 h_5 、 h_6 、 h_7 、 h_8 —阀座与高温流体间、阀座与低温流体间、阀体与高温流体间、阀体与低温流体间、铜管与周围环境间、铜管与低温流体间、滑盖与高温流体间、滑盖与低温流体间的对流换热系数。



Q_1 高温流体通过阀座和阀体向低温流体的传热
 Q_2 低温流体通过铜管壁向环境的传热
 Q_3 高温流体通过滑块向低温流体的传热

图2 四通换向阀流动及传热示意图

Fig. 2 Fluid flow and heat transfer in reversing valve

前面所列出的影响四通阀传热损失的因素有：高温流体和环境温度；各流动换热系数；阀座、阀体、铜管及滑块的厚度、面积、导热系数。其中，高温流体和环境温度、各流动换热系数都是随空调工况变化而变化的，不属于结构设计中可控制的参数；阀座、阀体、铜管及滑块的厚度和面积与四通阀的体积有关，在四通阀容量确定的情况下，这几个因素不易改变；因此需要重点关注通过减少阀座、阀体、铜管及滑块的导热系数来降低传热损失。在阀座、阀体、铜管及滑块的导热产生的传热损失中，则需重点关注通过降低阀座的导

热系数来降低其热损失，这是因为滑块一般为绝热材料，导热系数已经很低，不需要再考虑优化；而阀体与铜管不易加工更换；只有阀座易于加工与更换。

由公式(4)可知，当四通换向阀的阀座材料导热系数 $\lambda_{\text{阀座}}$ 减小时，四通换向阀传热损失减小。若阀座材料导热系数为零，则通过阀座的四通阀传热损失也为零。但使阀座导热系数为零在实际生产工艺上无法做到，而提高阀座材料的热阻可以降低四通阀的传热损失。

因此，提出降低四通阀传热损失的方案为：提高四通阀阀座材料热阻，采用导热系数较小的新材料代替原有阀座材料。

4 采用新材料的四通换向阀的实际节能效果分析

为了检验采用新材料降低四通换向阀的传热损失值，拟制作采用新材料的四通阀，进行实验测试。测定得到新材料四通换向阀传热损失的步骤为：测定新材料四通阀低温端进出口的温度和压力，由该温度和压力计算得到新材料四通阀的传热损失值。

为了检验新材料四通阀对热泵系统COP的影响，需要将实验数据代入系统仿真模型进行计算。四通阀材料的改变对系统COP的影响小于2%，而标准焓差实验台的测试误差为2%，因此，新材料四通阀对系统COP的影响难以直接通过实验测试得出，需要利用仿真模型进行计算。

4.1 采用低导热系数新材料的四通阀

根据第三节提出的降低四通阀传热损失的方案，制作新材料四通阀B。新材料四通阀的阀座采用导热系数为60W/(m·K)的新材料，代替常用的导热系数为110W/(m·K)的黄铜。新材料四通阀的阀体材料仍采用导热系数为110W/(m·K)的黄铜，滑盖材料为导热系数为0.043W/(m·K)的塑料，四根连接管材料为导热系数为398W/(m·K)的纯铜。新材料四通阀B与常用四通阀A各部件导热系数见表3。

表3 新旧材料四通阀各结构导热系数表
Tab. 3 Thermal conductivities of component material in original and new reversing valves

四通阀阀型号	阀A	阀B
导热系数/(W/(m·K))		
阀座材料	110	60

阀体材料	110	110
滑块材料	0.043	0.043
连接管材料	398	398

4.2 新材料四通阀传热损失实验

选取两家四通阀生产厂商X和Y厂制作新材料四通阀B，以对比不同生产工艺对材料导热系数改变后节能效果的影响。将不同尺寸大小的7型新材料四通阀B、9型新材料四通阀B、11型新材料四通阀B分别安装在1匹、1.5匹、3匹空调中进行实验测试，测试实验台和实验测试方法见第一章。下面列出具有代表性的1.5匹热泵系统中的9型X厂四通阀B的实验数据，如表4所示。

表4 新旧材料四通换向阀实验结果对比
Tab. 4 Experimental results of original and new reversing valve testing

阀号	A阀	B阀
排气/°C	78.0	77.4
回气/°C	17.8	17.6
T_1 /°C	74.6	74.7
T_2 /°C	71.8	72.2
T_3 /°C	17.0	16.9
T_4 /°C	14.7	15.2
p_1 /kPa	1656.4	1660.1
p_2 /kPa	1668.6	1671.2
p_3 /kPa	557.1	560.2
p_4 /kPa	554.9	557.7
低温制冷剂温升/°C	2.3	1.7
低温制冷剂传热损失/W	24	18.9

由表4可以得出：对于新材料四通阀B，相比于原普通四通阀A，低温端进出口温差减小0.6°C，传热损失减小21%。

4.3 新材料四通阀的节能效果分析

为了分析四通换向阀对热泵系统性能的影响，将实验数据代入到热泵系统稳态仿真模型^[8]中进行计算，结果见表5。

表5 四通换向阀阀座材料对热泵系统性能影响
Tab. 5 The influence of reversing valve seat material on COP of heat pump system

四通阀型号	阀座材料导热系/(W/(m·K))	系统COP
阀A	110	3.610
阀B	60	3.624

由表5可以得出：四通换向阀阀座材料导热系数由110W/(m·K)降为60W/(m·K)后，热泵系统COP由3.61提高到3.624，提高了0.4%。

5 结论

1) 在现有热泵系统中,四通换向阀的传热损失大于24W,占系统制冷量比例超过0.7%。

2) 考虑结构设计和加工工艺等影响因素,采用低导热系数阀座材料是降低四通阀传热损失较为可行的方案。

3) 降低四通换向阀阀座材料的导热系数,可以减小四通阀的传热损失、提高热泵系统COP。四通阀阀座材料导热系数由 $110\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 降为 $60\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 后,四通阀传热损失减小21%,热泵系统COP提高0.4%。

参考文献

- [1] Ding G L. Recent development in simulation techniques for vapour-compression refrigeration systems[J]. International Journal of Refrigeration, 2007, 30(7): 1119-1133.
- [2] Murphy W W. Analysis of the performance improvements of central air conditioners for residences[D]. Purdue University, 1978.
- [3] Krishnan R R. Evaluating reversing valve performance in heat pump systems[J]. ASHRAE Transaction, 1986, 92(2B): 71-80.
- [4] Damasceno G D S, Lee W N T, Rooke S P. Performance of heat pump reversing valves and comparison through characterizing parameters[J]. ASHRAE Transaction, 1988, 94(1): 304-317.
- [5] Goldschmidt V M, Scharf R R R, White L. Measurement of refrigerant leakage in reversing valves[J]. ASHRAE Transaction, 1984, 90(1): 185-195.
- [6] 葛宏明, 宋徐辉, 于兵, 等. 四通换向阀传热、压降及制冷剂泄漏损失对家用热泵性能的影响[J]. 流体机械, 1998, 26(3): 48-51. (Ge Hongming, Song Xuhui, Yu Bing, et al. Influence of heat transfer, pressure drop and refrigerant leakage in reversing valve on the performance of heat pump system[J]. Fluid Machinery, 1998, 26(3): 48-51.)
- [7] Lee W N T, Damasceno G D S, Goldschmidt V M. Heat transfer in heat pump reversing valve bodies [J]. International Journal of Refrigeration, 1988(11): 159-163.
- [8] 葛宏明. 热泵系统四通换向阀特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 1998.
- [9] Young D J. Development of a northern climate residential air-source heat pump[J]. ASHREA Transaction, 1980, 86(1): 671-684.
- [10] Hargraves D P. A refrigerant enthalpy method for measuring reversing valve heat transfer[J]. ASHREA Transaction, 1986, 92(2B): 88-93.
- [11] Moffat R J. Describing the uncertainties in experimental results[J]. Experimental Fluid and Thermal Science, 1998(1): 3-17.

作者简介

丁国良, 男(1966—), 教授, 博导, 上海交通大学机械与动力工程学院制冷所, (021) 34206378, E-mail: glding@sjtu.edu.cn. 研究方向: 制冷空调装置的仿真、优化与新工质应用。

About the author

Ding Guoliang (1966—), male, Ph. D./Professor, School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, (021) 34203278, E-mail: glding@sjtu.edu.cn. Research fields: Simulation and optimization research for room air conditioner and utilization of new refrigerant.