

文章编号: 1000-8055(2006)01-088-06

涡流管结构参数对其性能的影响

计玉帮, 吴玉庭, 丁雨, 何曙, 姜曙, 马重芳

(北京工业大学 环境与能源工程学院,

传热强化与过程节能教育部重点实验室,

传热与能源利用北京市重点实验室, 北京 100022)

摘要: 用实验方法研究了热端管管长、分离室直径、冷孔板孔径等主要结构参数对涡流管的制冷制热性能的影响。实验中以空气为介质分别对不同结构参数涡流管的性能进行了研究, 得出了热端管管长、分离室直径以及冷孔板孔径等参数对涡流管制冷制热性能的影响规律。研究结果表明: 在一定范围内增加热端管长度有利于涡流管的能量分离; 在大冷流率下, 大直径涡流管的制冷性能优于小直径涡流管; 冷孔板孔径愈小, 涡流管的制冷制热效应都愈好, 在冷孔板孔径与热端管内径之比为50%时, 取得最佳的制冷制热效应。

关键词: 航空、航天推进系统; 涡流管; 结构参数; 制冷效应; 制热效应; 制冷效率

中图分类号: TB619

文献标识码: A

Study of the Influence of Structural Parameters on the Vortex Tube Performance

J I Yu-bang, W U Yu-ting, D N G Yu, H E Shu,

J I A N G Shu, M A Chong-fang

(Key Laboratory of Beijing Municipality on "Heat Transfer and Energy Conversion",

Key Laboratory of the Ministry of Education on

"Enhanced Heat Transfer and Energy Conversion",

College of Environmental and Energy Engineering,

Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: The influence of different configurations, such as vortex tube length, separation chamber diameter and cold plate diameter on the vortex tube performance was investigated by experiment with air as medium. The main influence of length and diameter on the vortex tube performance was obtained in this paper. The result indicates that the performance can be improved by the increase of hot tube length in a certain range. The cooling effect of vortex tube with larger separation chamber diameter is better than that with smaller diameter in the condition of higher cold mass flow fraction. The less the diameter of cold plate is, the better performance will be. The best cooling effect and heating effect occur at the diameter ratio of hot section inner diameter to cold plate hole diameter being 50%.

Key words: aerospace propulsion system; vortex tube; structural parameter; cooling

收稿日期: 2005-04-11; **修订日期:** 2005-06-06

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助(TG2000026304)

作者简介: 计玉帮(1979-), 男, 宁夏吴忠人, 北京工业大学环境与能源工程学院, 传热强化与过程节能教育部重点实验室, 传热与能源利用北京市重点实验室硕士生, 主要从事能源方面的研究

effect; heating effect

涡流管是一种简单的能量分离装置。涡流管的制冷效应是 1933 年法国人兰克(Rauque)发现的^[1], 它由一根两端开口的管子以及喷嘴、孔板和调节阀构成, 当高压气流加速进入涡流管后, 气流经喷嘴沿切线方向进入涡流管, 沿涡流管内壁旋转, 气流沿内壁旋转的同时, 趋向阀侧, 部分气流通过调节阀排出, 其温度高于进口气流温度; 其余气流被迫回流, 通过孔口自涡流管的另一端离去, 其温度低于进口气流的温度^[2]。

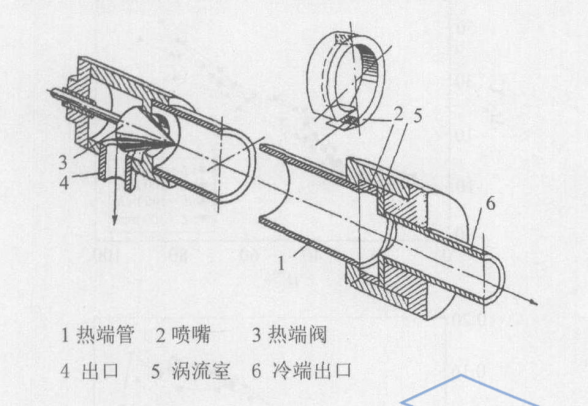


图1 涡流管的结构示意图
Fig 1 Configuration of vortex tube

涡流管冷热分离效应的发现吸引了世界上众多科研工作者的极大兴趣, 他们在涡流管制冷性能及分离机理方面进行了大量的实验研究。但是, 在涡流管能量分离机理方面至今没有一致的解

释。涡流管在一些特殊场所的冷却方面有着独到的优点, 目前涡流管在许多工业部门已得到应用, 并有一些从事生产涡流管的专门厂家, 但总的来说, 国内对涡流管技术的研究相对落后, 目前还仅限于实验研究涡流管整体性能的水平, 没有自己完整的理论体系, 实用化更是空白。Hilsch^[3]是最早以几何尺寸为基础来研究涡流管性能的人, 后来的许多研究者所采用的涡流管大都基于Hilsch所推荐的几何比例关系。热端管长度、分离室直径、冷孔板孔径等主要结构参数对涡流管的能量分离性能有非常重要的影响, 因此合理得结构参数设计有利于涡流管能量分离效率的提高^[4, 5]。涡流管效应在工业各个领域中具有广泛的应用前景, 使涡流管的性能更好, 结构更加优化, 加速涡流管制冷的开发和应用, 从而可获得极大经济效益。为此, 我们进行了大量的结构参数对涡流管性能影响方面的实验研究, 希望能得到这些主要结构参数对涡流管性能的影响规律, 从而设计出更

1 实验台介绍

实验装置系统如图 2 所示。高压气源经孔板流量计测定入口空气流量后, 再经减压阀调整其入口气流的压力, 在减压阀和涡流管的进口之间安装有高精度压力表和标准铠装热电偶以测定涡流管进口气流的压力和温度。空气经涡流变换后被分成冷热两股流体, 在冷端出口并联两路进行切换, 分别装有量程不同的流量计以便在高冷流率下和低冷流率下都能在仪表有效量程范围内读数, 在冷热端出口装有压力变送器和标准铠装热

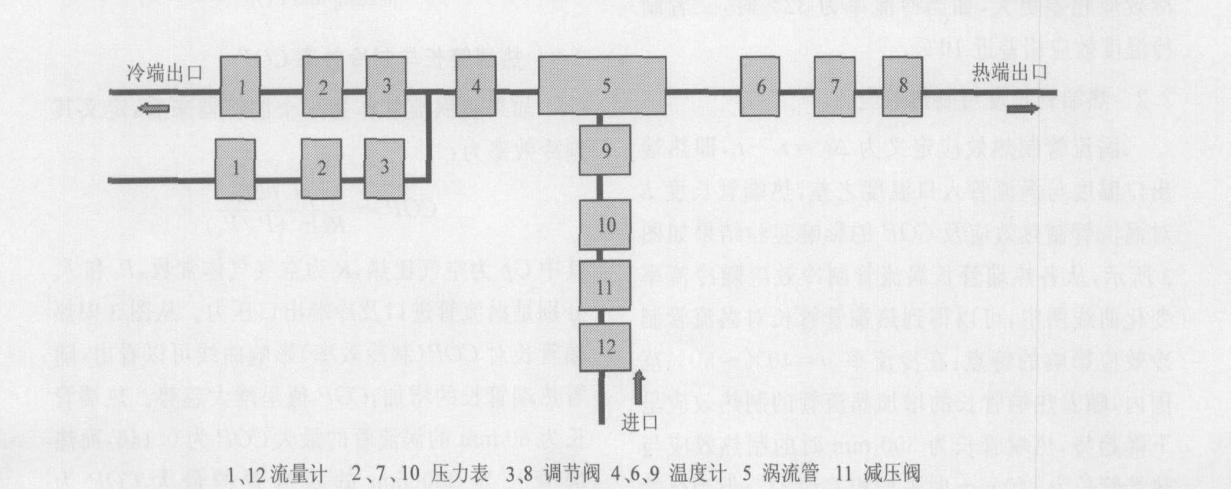


图2 涡流管性能测试实验系统图
Fig 2 Test system of vortex tube

电偶以测定出口气流的压力和温度。在冷热端出口均装有手动调节阀,通过调节阀的开度来调整涡流管的出口压力,实验系统的流量计和压力变送器可以直接读数,所有的热电偶都通过数据采集仪读出各点的温度值。

2 热端管长度对涡流管性能的影响

热端管是涡流管发生能量分离的场所,涡流管的长径比定义为 L/D ,即热端管的长度与分离室直径之比,通常热端管长度 L 取 $20\sim 40D$ 。实验中,在入口压力为 0.6 MPa 的情况下对自行设计等马赫数流线型四流道喷嘴,同一分离室直径不同热端管长度的涡流管进行性能测试(分离室直径 $D=36\text{ mm}$,热端管长分别为 $L_1=60\text{ mm}$, $L_2=100\text{ mm}$, $L_3=140\text{ mm}$, $L_4=300\text{ mm}$),得到了不同热端管长度的涡流管的制冷制热效应随冷流率变化趋势结果。

2.1 热端管长度与制冷效应

涡流管制冷效应定义为 $\Delta t_c = t_i - t_c$,即涡流管入口温度与冷端出口温度之差,热端管长度 L 对涡流管制冷效应的影响曲线见图3,从各热端管长涡流管制冷效应随冷流率变化曲线图中可观察到:随着热端管长度增大,制冷效应呈增大趋势;不同热端管长涡流管的制冷温度效应在冷流率 $\mu=40\%\sim 50\%$ (冷流率 μ ,是冷端出口流量与进口流量之比)范围内出现极值点。热端管长为 60 mm 的涡流管的最大制冷效应为 39.7°C ,而热端管长为 300 mm 的涡流管的最大制冷效应为 39.3°C ,相差 0.5°C ;并且在其它冷流率范围内制冷效应相差更大,如当冷流率为 32% 时,二者制冷温度效应相差近 10°C 。

2.2 热端管长度与制热效应

涡流管制热效应定义为 $\Delta t_h = t_h - t_i$,即热端出口温度与涡流管入口温度之差,热端管长度 L 对涡流管制热效应及 COP 的影响实验结果如图3所示,从各热端管长涡流管制热效应随冷流率变化曲线图中,可以得到热端管管长对涡流管制热效应影响的特点:在冷流率 $\mu=40\%\sim 50\%$ 范围内,随着热端管长的增加涡流管的制热效应呈下降趋势,热端管长为 300 mm 时的制热效应与热端管长为 140 mm 时平均相差约 8°C ;但当热端管长增加到 300 mm 时,制热效应又有所回升,其制热效应明显优于热端管长度为 140 mm 的涡流管。除此冷流率范围之外,随着热端管长的增加,制热效

应没有明显的变化规律。

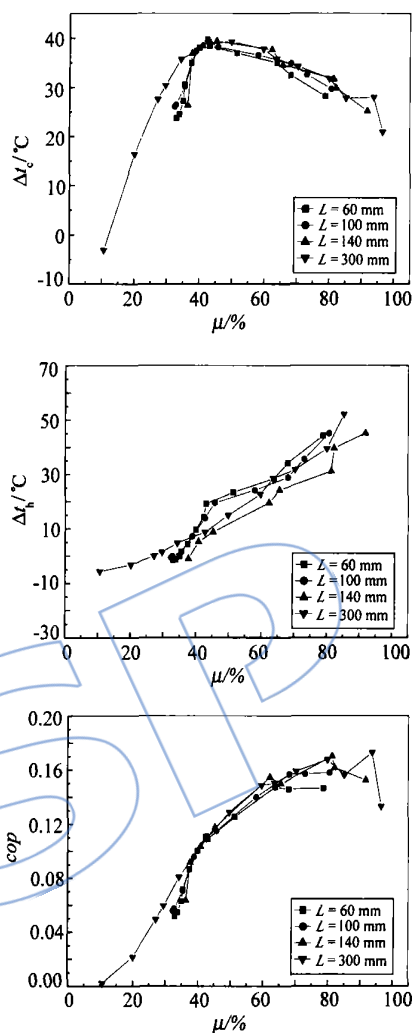


图3 不同热端管长度对制冷制热效应及 COP 的影响

Fig 3 Effect of various tube length on cooling, heating and COP

2.3 热端管长与制冷效率 COP

如果将涡流管作为一个制冷器来看,定义其制冷效率为:

$$COP = \frac{\mu C_p \Delta t_c}{R t_i \ln (P_i / P_c)}$$

其中 C_p 为空气比热, R 为空气气体常数, P_i 和 P_c 分别是涡流管进口及冷端出口压力。从图3中热端管长对 COP (制冷效率)影响曲线可以看出,随着热端管长的增加, COP 值呈增大趋势。热端管长为 60 mm 的涡流管的最大 COP 为 0.146 ,而热端管长为 300 mm 的涡流管的最大 COP 为 0.173 ,相差 0.027 。因此,热端管长 L 取得长些有利于气流的能量分离,因为如果热端管太短,气流在切向速度还较大时便从热端流出,使得能量分离没有

充分进行, 从而造成制冷效果就差; 而当热端管长度增大时, 从热端流出的气流切向速度就愈小, 能量分离就进行得愈充分, 从而使得制冷效果变得更好。但管子过长则会带来一系列的不足: 内表面加工困难, 在冷流率 $\mu > 0.8$ 时就会发生截止现象等, 同时当热端管长到一定程度, 涡流管内流动的涡流特性几乎全部消失, 因此这时继续增加热端管长度, 对能量分离效果的增强已经微乎其微。

3 分离室直径对涡流管制冷制热效应的影响

分离室就是从喷嘴平面到热端出口处的一段

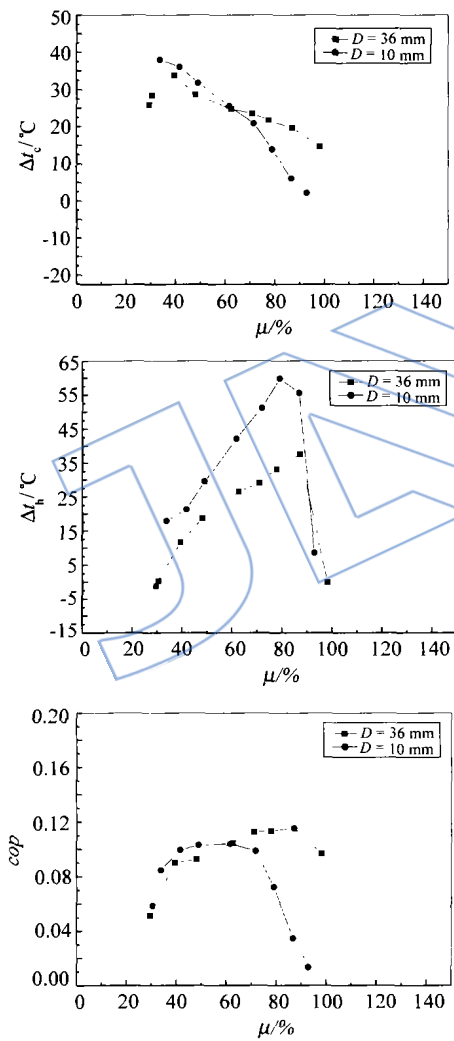


图4 不同分离室直径对制冷制热效应及COP的影响
(0.6 MPa, 三流道)

Fig. 4 Effect of various tube diameters on cooling, heating and COP (0.6 MPa, three channels)

长度, 它的作用是使高速气流滞止下来并实现气流的冷热分离。分离室直径也就是热端管内径, 分

离室直径也是涡流管的重要结构参数之一。它不仅对涡流管处理气流量有直接的影响, 而且对其制冷制热性能有一定的影响。实验中, 分别在入口压力为0.6 MPa、热端管长度为140 mm (加整流片)、自行设计等马赫数流线型三流道喷嘴^[6]、入口压力为0.4 MPa 热端管长度为140 mm (加整流片)、自行设计等马赫数流线型四流道喷嘴和入口压力为0.4 MPa 热端管长度为140 mm (加整流片)、自行设计等马赫数流线型四流道喷嘴3种情况下对不同分离室直径涡流管($D_1 = 10\text{ mm}$, $D_2 = 36\text{ mm}$)进行了性能对比测试。

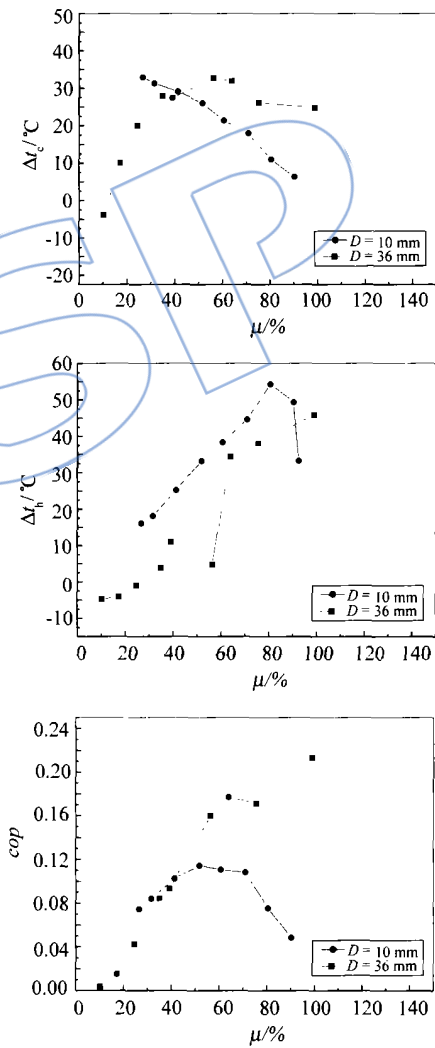


图5 不同分离室直径对制冷制热效应及COP的影响
(0.4 MPa, 四流道)

Fig. 5 Effect of various tube diameters on cooling, heating and COP (0.4 MPa, four channels)

实验结果发现: 在冷流率小于一定值的情况下分离室直径小的涡流管的制冷制热性能要优于分离室直径大的涡流管; 但当冷流率超过这一值

后,结果正好相反,分离室直径小的涡流管的制冷制热性能要比分离室直径大的涡流管差。如图4所示,在入口压力为 0.6 MPa 、热端管长度为 140 mm 、三流道喷嘴的条件下,当冷流率小于 63% 时,分离室直径为 10 mm 的制冷效应明显好于分离室直径为 36 mm 的涡流管,分离室直径为 10 mm 的COP值也大于分离室直径为 36 mm 的涡

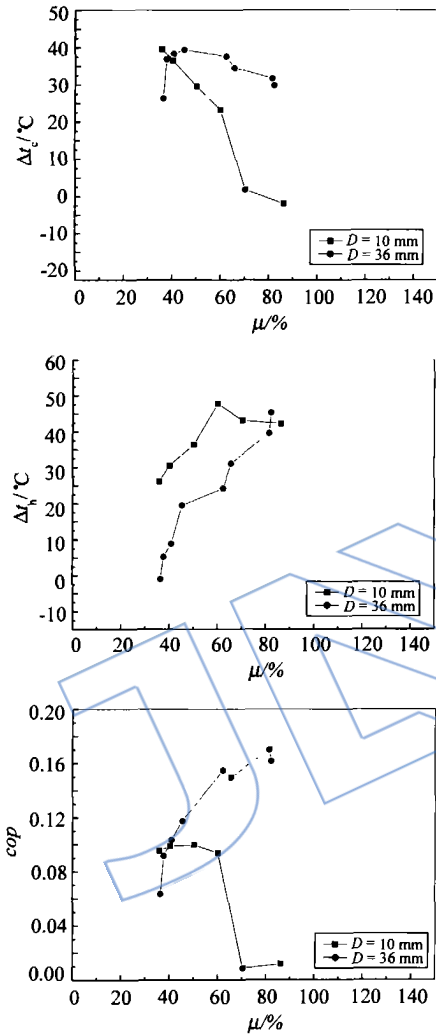


图6 不同分离室直径对制冷制热效应及COP的影响
(0.6 MPa , 四流道)

Fig. 6 Effect of various tube diameters on cooling, heating and COP (0.6 MPa , four channels)

流管,当冷流率超过 63% 时,结果相反;如果保持其它条件不变,将三流道喷嘴换为四流道喷嘴,从图6可以看出:流道数的增加,使大小涡流管制冷效应曲线的交点及COP曲线的交点均向左移,交点冷流率由原来的 63% 变为 38% ,也就是说,随着流道数的增加,分离室直径大的涡流管的制冷效应强于分离室直径小的涡流管的冷流率范围随着

增大。

如果保持其他条件不变,只是提高涡流管入口压力,对比图5和图6的结果可以发现:当入口压力由 0.4 MPa 变为 0.6 MPa 时,大小涡流管制冷效应曲线的交点和COP曲线的交点也都向左移,交点冷流率由原来的 43% 变为 38% ,大直径涡流管好于小直径涡流管的冷流率范围也随入口压力的增大而增大。

4 冷孔板孔径对涡流管能量分离性能的影响

冷端是将冷气流从分离室中引出的装置,最

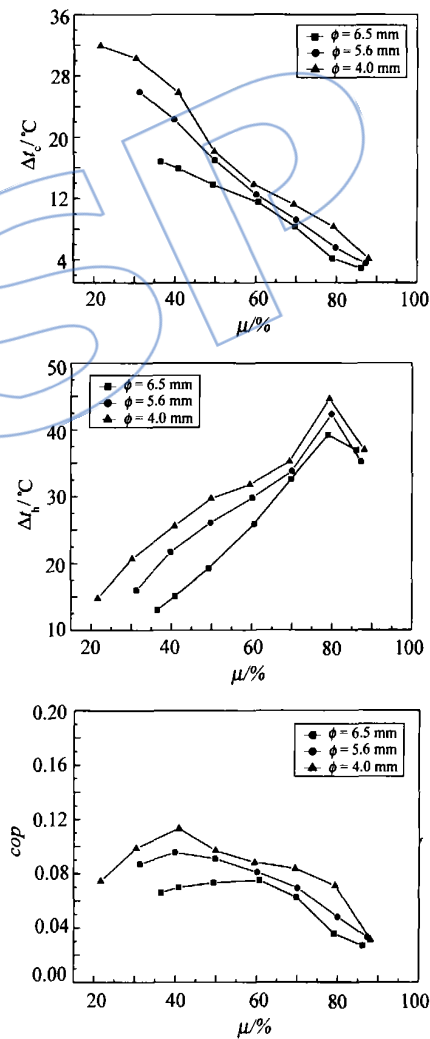


图7 不同冷孔板孔径对制冷制热效应及COP的影响
(0.3 MPa)

Fig. 7 Effect of various cold plate diameters on cooling, heating and COP (0.3 MPa)

好带有扩压接管,扩张管的锥角一般不超过 15° 。其作用是回收一部分动能以增加进口和分离室的

压降并获取更高的分离效率。冷端中心孔径对涡流管的特性影响很大,也是非常重要的结构参数之一。由于实验中所使用的涡流管为逆流式涡流管,且使喷嘴中心小圆孔作为冷孔板孔径,所以在研究冷孔板孔径对涡流管能量分离性能的影响时,就是研究喷嘴中心小圆孔内径对涡流管能量分离性能的影响。

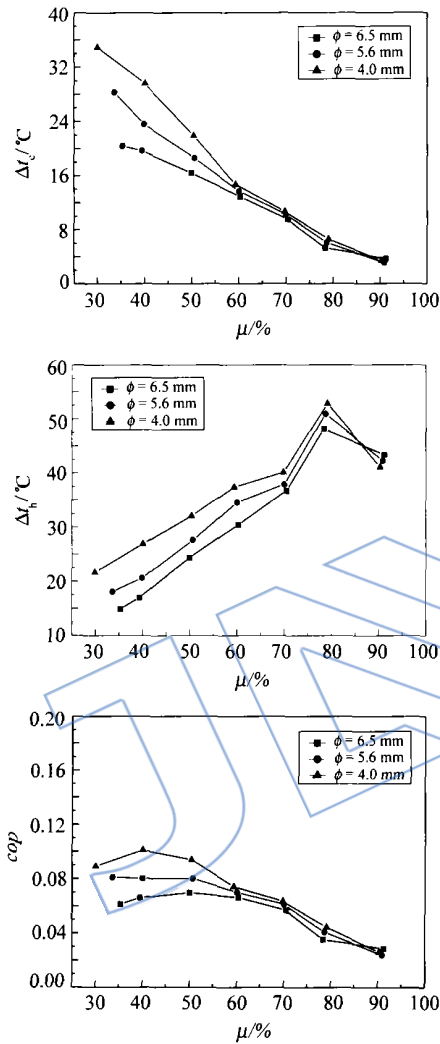


图8 不同冷孔板孔径对制冷制热效应及COP的影响 (0.4MPa)

Fig. 8 Effect of various cold plate diameters on cooling, heating and COP (0.4MPa)

实验中,设计喷嘴中心小圆孔内径(即冷孔板孔径)分别为4.0mm,5.6mm,6.5mm,它们与热端管内径之比分别为50%,70%,81.25%。分别在进口压力为0.3MPa和0.4MPa下进行详细的实验,实验结果曲线见图7和图8,通过实验研究我们发现:不管进口压力为多大,冷孔板孔径愈小,

涡流管的制冷效应愈好,COP值愈大。尽管进口压力不同,分别为0.3MPa和0.4MPa,它们的最佳制冷制热及COP曲线都是在冷孔板孔径为4.0mm,即最小冷孔板孔径的情况下取得的,此时冷孔板孔径与热端管内径之比为50%。

5 结论

通过实验研究,得到了热端管管长、分离室直径以及冷孔板孔径对涡流管制冷制热性能的影响规律:(1)随着热端管管长的增加,涡流管的制冷效应及COP呈上升趋势,制热效应呈下降趋势,并且当热端管长增加到一定程度,其制热效应有回升趋势。(2)在一定冷流率范围内分离室直径小的涡流管的制冷制热性能要优于分离室直径大的涡流管,当冷流率超过这一值时,结果相反。(3)流道数的增加和入口压力的增大时,分离室直径大的涡流管的制冷效应及COP强于分离室直径小的涡流管的冷流率范围也增大;分离室直径小的涡流管的制热效应强于分离室直径大的涡流管的冷流率范围变化不大。(4)冷孔板孔径愈小,涡流管的制冷效应和制热效应都相应的愈好,在冷孔板孔径与热端管内径之比为50%时,取得最佳的制冷效应、制热效应及COP值。

参考文献

[1] Ranque G J. Method and Apparatus for Obtaining from a Fluid under Pressure Two Currents of Fluid at Different Temperatures [Z]. United States Patent 1952281. March 27, 1934

[2] Hartnett J P. Experimental Study of the Velocity and Temperature Distribution in a High-Velocity Vortex-Type Flow [J]. Transactions of the ASME Journal of Heat Transfer, 1957, (5): 751~758

[3] Hilsch R. The Use of the Expansion of Gases in a Centrifugal Field as a Cooling Process [J]. Review Sciences Instruments, 1947, (18): 108~113

[4] Soni Y, Thomson W. Optimal Design of the Ranque-Hilsch Vortex Tube [J]. Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer, 1975, (5): 316~317.

[5] Saidi M H, Allaf Yazdi M R. Energy Model of a Vortex Tube System with Experimental Results [J]. Energy, 1999, 24: 625~632

[6] 姜曙, 叶芳, 俞坚, 等. 三流道喷嘴涡流管能量分离特性的研究 [J]. 工程热物理学报, 2004, 25(3): 499~501

Jiang Shu, Ye Fang, Yu Jian. The Performance Study on Energy Separation in Vortex Tube of Tri-Channels [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(3): 499~501