

热端管长度对涡流管性能影响的实验研究

何曙¹, 吴玉庭¹, 马重芳¹, 郭建¹, 丁雨¹, 葛满初²

(1.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; 2.中国科学院工程热物理研究所,北京 100084)

摘要:研制了不同热端管长度的涡流管,并以空气作为工作介质,通过实验研究了热端管长度对涡流管能量分离性能的影响。实验结果表明:对于常温涡流管,在入口压力为0.5MPa的情况下,相同冷流率时,随着热端管长度的增加,涡流管的制冷温度效应、单位制冷量和制冷系数增加,而其制热温度效应无显著的规律;对同一热端管长的涡流管,随着冷流率的增加,涡流管的制冷温度效应、单位制冷量和制冷系数增加,且在冷流率为40%~50%时出现峰值,而制热温度效应随冷流率的增加而增加,在冷流率范围内未出现峰值。

关键词: 涡流管; 热端管; 冷流率; 温度效应; 制冷系数

中图分类号:TB61·91

文献标识码:A

文章编号:1006-8449(2005)04-0004-04

1 引言

涡流管,又称兰克—赫尔胥(Ranque—Hilsch)管。它是一种结构非常简单的能量分离装置,由一根两端开口的管子以及喷嘴、孔板和调节阀构成(见图1),工作时高压气体由进气管进入喷嘴,经喷嘴内膨胀加速,然后以很高的速度沿切线方向进入涡流室,气流在涡流室内形成高速涡旋,由于热阀与冷端孔板之间的压差,在涡流管内的中心区域形成回流气体,经过涡流变换后分离成总温不相等的两部分气流。其中,处于中心部位的回流气流温度较低,由冷端孔板流出,形成冷气流,而处于外层部位的气流温度较高,从热端经热阀流出,形成热气流,这一现象即被称为涡流管的温度分离效应,又称为“涡流效应”或“兰克效应”。位于热端的调节阀,可调节两端流率的比例,从而改变冷、热两端出口气流的温度。

涡流管具有结构简单、操作方便、运行安全可靠、造价低廉等一系列优点,又具有制冷、制热、抽真空、汽液分离等多方面的功能,因此在科学的研究和工业的很多部门具有广阔的实际应用前景。但目前涡流管的制冷效率比较低,从而制约了涡流管的推广应用。作者以空气作为工作介质,对具有不同热端管长度的涡流管的能量分离效应分别进行了实验研究,并对涡流管的热端管长度的影响进行了分析。

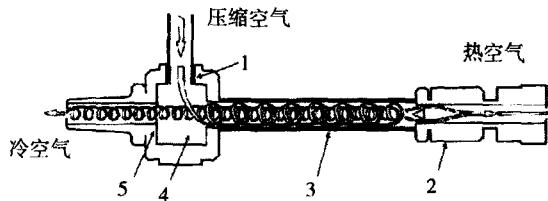


图1 涡流管工作原理图

1—喷嘴 2—热端阀 3—热端管 4—涡流室 5—冷断孔板

2 热端管影响涡流管制冷温度效应的机理

热端管是涡流管发生能量分离的场所,它也是涡流管研究中的一项重要内容。涡流管的长径比定义为 $L/D=3\sim 50$,即热端管的长度与涡流室直径之比。通常热端管长度 L 取 $20\sim 40D$, L 取得长些对气流的能量分离有利。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。但管子过长则内表面加工困难,特别是对涡流室直径 D 较大的管子, L 不宜取得过长,否则占据较大的空间。

另外,它也会带来一系列的不足:动力学效率太低,在冷流率 $\eta_c>0.8$ 时就会发生截止现象等。因为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

效果的增强已微乎其微。Ranque 最初设计的涡流管装置的涡流管长径比为 50^[1], Takahama 和 Yokosawa^[2]指出, 为获得显著的能量分离效果, 涡流管的长度要大于或等于涡流室直径的 100 倍, Soni 和 Thomson^[3]指出, 涡流管的最短长度应是 $L/D > 45$, 在文献[4]中提出涡流管的长度 $L \approx 55D$ 。

影响涡流管性能的设计变量很多, 且这些变量之间的关系未知。要解决这些变量的优化问题, 仅仅靠理论计算是达不到的, 为此, Soni 和 Thomson^[3]在减少设计变量的情况下, 固定进气压力, 用调优计算方法改变设计参数, 得到了因变量的最佳值。计算结果表明, 为获得最大温降和最高绝热效率, 涡流管的长径比应为 $L/D > 45$ 。

本文主要通过实验, 采用自行设计加工的普通矩形三流程喷嘴, 对热端管长分别为 80mm, 100mm, 140mm, $D=6\text{mm}$ ($L/D=13.3, 16.7, 23.3$) 的涡流管进行研究。实验采用的进气压力为 0.5MPa(绝压), 进气温度为 24°C, 排气压力为常压, 研究热端管的长度对涡流管能量分离效应的影响。

3 实验台介绍

实验装置系统如图 2, 压缩机 1 中的高压空气经过储气过滤器 2, 以减轻压缩气体的振荡同时也去除其中的油滴、水滴和其它微粒, 然后再通过恒温水槽 3 以保持涡流管进口压缩气体的温度恒定, 最后通过涡流管 6 分离为冷热两股不同的气流。5 为金属浮子流量计, 分别用来测量涡流管进口流量和冷端流量; 4 为旁路阀门, 用来维持系统气流的稳定。在涡流管进口处、冷端出口处以及热端出口处分别布置合适的测点以便进行压力和温度的测量, 在本实验中压力用高精度压力表测量, 温度用标准铠装热电偶测量。

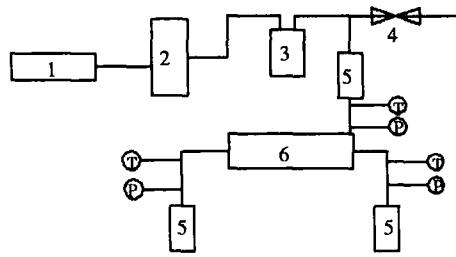


图 2 实验系统图

1- 压缩机 2- 过滤器 3- 恒温水槽
4- 旁路阀 5- 流量计 6- 涡流管

4 实验结果及数据处理

在本实验中, 采用自制的涡流管, 在气体进口压

力 $P_i=0.5\text{MPa}$ (绝对压), 进气温度 $T_i=24^\circ\text{C}$ 的情况下, 对热端管长度与涡流管能量分离效应的关系进行实验研究, 测量了涡流管的人口气体温度和流量、冷气流出口温度和流量、热气流出口温度, 依据这些数据定义了如下表征涡流管能量分离特性的参数:

涡流管制冷温度效应:

$$\Delta T_c = T_i - T_c \quad (1)$$

式中 T_i ——涡流管入口气体温度, K;

T_c ——冷气流出口温度, K。

涡流管制热温度效应:

$$\Delta T_h = T_h - T_i \quad (2)$$

式中 T_h ——热气流出口温度, K。

涡流管的冷流率:

$$\eta_c = G_c / G_i \times 100\% \quad (3)$$

式中 G_c ——冷气流出口流量, kg/s;

G_i ——涡流管入口气体流量, kg/s。

涡流管的总制冷量:

$$Q_c = G_c C_p (T_i - T_c) = \eta_c G_i C_p \Delta T_c \quad (4)$$

式中 C_p ——定压比热, kJ/(kg·K)。

单位入口气体流量的制冷量:

$$q = \frac{Q_c}{G_i} = \eta_c C_p \Delta T_c \quad (5)$$

涡流管制冷效率:

$$COP = \frac{q}{RT_i \ln(P_i/P_c)} = \frac{\eta_c C_p \Delta T_c}{RT_i \ln(P_i/P_c)} \quad (6)$$

式中 R ——气体常数, J/(kmol·K), 对于空气, $R=287$ J/(kmol·K);

P_i ——涡流管入口气体压力, MPa;

P_c ——冷气流出口压力, MPa。

下标: i—进气 c—冷端气体 h—热端气体

4.1 热端管长度对涡流管制冷温度效应的影响

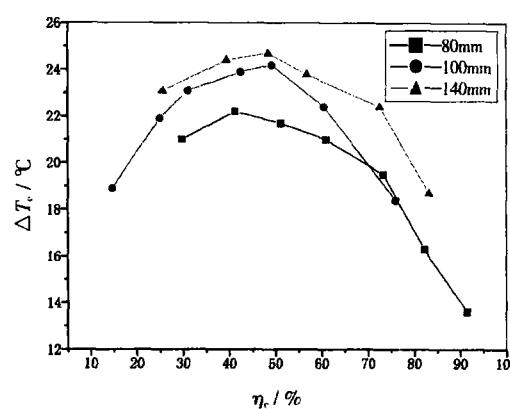


图 3 热端管长度对涡流管制冷温度效应的影响

图 3 是热端管长度对涡流管制冷温度效应 ΔT_c 的

影响,从图中可以看出:

(1)热端管长度对涡流管的制冷温度效应有显著的影响。随着热端管长度的增大,涡流管的制冷温度效应 ΔT_c 呈增大趋势。当冷流率 $\eta_c=48\%$ 左右时, $L=140\text{mm}$ 涡流管可得到最大制冷温度效应 $\Delta T_c=24^\circ\text{C}$,而当 $L=80\text{mm}$ 时在相同的冷流率下其制冷温度效应仅为 $\Delta T_c=21^\circ\text{C}$,它们之间相差 3°C 。

(2)不同热端管长涡流管的制冷温度效应在 $\eta_c=40\% \sim 50\%$ 范围内均出现极值点。且随着热端管长度的增加,其峰值点向冷流率大的方向移动。

4.2 热端管长度对涡流管制热温度效应的影响

从图4可以分析出热端管长对涡流管制热温度效应 $\Delta T_h=T_h-T_c$ 影响的特点:

(1)随着冷流率 η_c 增加,热端管长度一定时,涡流管的制热温度效应 ΔT_h 也增大。

(2)在相同的冷流率下,随着热端管长度的增加,涡流管的制热温度效应没有明显的规律性。

(3)对相同的热端管长度,在冷流率范围内,涡流管的制热温度效应未出现峰值。

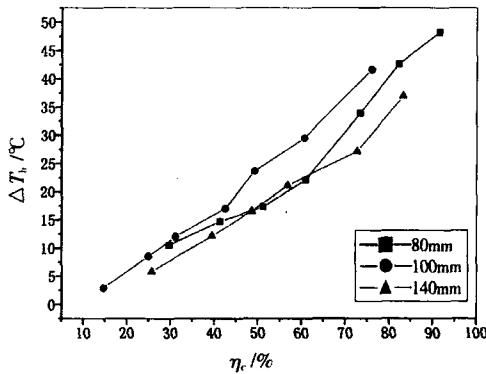


图4 热端管长度对涡流管制热温度效应的影响

4.3 热端管长度对涡流管单位制冷量 q 和制冷系数 COP 的影响

图5、图6分别为不同热端管长度下涡流管的单位制冷量 q 和制冷系数 COP 随冷流率的变化曲线。从图中可以得出如下结论:

(1)在相同热端管长度下,随着冷流率增加,涡流管的单位制冷量 q 和制冷系数 COP 均增加,且在冷流率为 $70\% \sim 80\%$ 时,涡流管的单位制冷量 q 和制冷系数 COP 达到最大值。

(2)在相同的冷流率下,随着热端管长度增加,涡流管的单位制冷量 q 和制冷系数 COP 增加,但当热端管长度较大时,长度的增加使涡流管的单位制冷量 q 和制冷系数 COP 的增加不显著。如在热端管长为

100mm 和 140mm 时,当冷流率小于 55% 时涡流管的单位制冷量 q 和制冷系数 COP 基本相同,随着冷流率的增加,不同热端管长使涡流管的单位制冷量 q 和制冷系数 COP 的差距开始变大。

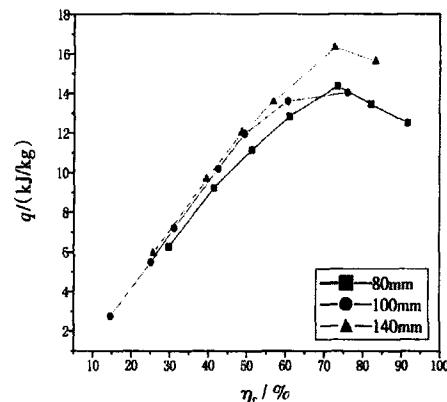


图5 热端管长度对 q 的影响曲线

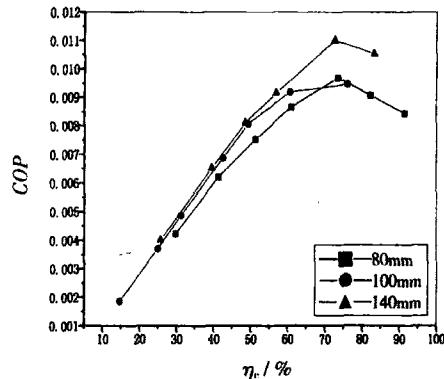


图6 热端管长度对涡流管 COP 的影响曲线

5 结语

(1)随着热端管长度的增加,涡流管的各种性能均有提高,从而验证了前面的观点。

(2)当热端管长度 L 增加到一定值时,增加热端管长度对提高涡流管性能的作用就逐渐减弱。这是因为,从理论上分析,只有当热端管为无限长时,涡流管制冷性能最好,但从以上的实验曲线看,当涡流管长度增加到一定程度,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加已微乎其微。所以,在实验中观察到热端管长 L 已达到一定程度(100mm),再增加至140mm时对性能提高没有太大的益处。因此可得出这样的结论:涡流管中能量分离主要发生在进气喷嘴附件的热管段。

(3)热端管长度对涡流管制冷量及 COP 的极值点的影响不大。

(4)通过本实验结果可以看出 L/D 值为25时即可达到最佳能量分离效应。

参考文献:

- [1] G J RANQUE. Method and apparatus for obtaining from a fluid under pressure two currents of fluid at different temperatures[P]. United States Patent 1952281, 1934-03-27.
- [2] HEISHICHIRO TAKAHAMA, HAJIME YOKOSAWA. Energy separation in vortex tube with a divergent chamber[J]. *Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer*, 1981, 103(5):196~203.
- [3] Y SONI , W THOMSON. Optimal design of the Ranque-Hilsch vortex tube

[J]. *Transactions of the ASME, Journal of Heat Transfer*, 1975, 81(5):316~317.

- [4] UEISHICHIRO TAKAHAMA, et al. Performance characteristics of energy separation in a steam-operation vortex tube[J]. *International Journal of Engineering Science*, 1979, 17: 735~744.

收稿日期:2005-01-05
修回日期:2005-03-11

Experimental Study on the Length of Vortex Hot Tube Effect on the Performance of Vortex Tube

HE Shu¹, WU Yu-ting¹, Ma Chong-fang¹, GUO Jian¹, DING Yu¹, GE Man-chu²

(1. College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, the key laboratory of ministry of education on "Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation", the key laboratory of Beijing Municipality on "Heat Transfer and Energy Conversion", Beijing 100022, China;
2. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Science, Beijing 100084, China)

Abstract: Vortex tubes of different length were developed and the effect of the length on the performance of vortex tube was investigated by experiment with air as medium. The experiment results show that the temperature difference between inlet and cold air outlet, the unit refrigeration and the coefficient of performance increases with the increase of the length of vortex tube under the same cold fraction with ambient temperature and inlet pressure of 0.5MPa, while the temperature difference between the hot air outlet and inlet didn't have remarkable rule. As to single vortex tube, the temperature difference between inlet and cold air outlet, the unit refrigeration and the coefficient of performance increased with the increase of the cold fraction, then reaches top when the cold fraction was 40%~50%. And the temperature difference between the hot air outlet and inlet is increasing in the cold fraction span range under the same experimental condition.

Key words: vortex tube; hot end tube; cold fraction; temperature difference; coefficient of performance

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

作者简介: 何 曙(1973-), 女, 湖南岳阳人, 国家注册质量工程师, 硕士研究生。

(上接第 14 页)

Frequency Inverter Air Conditioner in Household and Harmonic Pollution in Public Supply Network

FAN Zhong-yao, LUN Li-yong, WANG Song-ling, XIE Ying-bai

(College of Energy and Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Because of its advantages of energy saving and comfort, frequency inverter air conditioner sells better and better in the market. But the products are of great different in quality and techniques. The paper summarizes the state of the present frequency inverter air conditioner development and analyses the mechanism of harmonics pollution in public supply network caused by AC frequency inverter air conditioner in household and its harm to other appliances. This paper summarizes some solutions in technique and points out the urgency to make the related rule to manage the market.

Key words: frequency inverter air conditioner; harmonic pollution; active power filter

作者简介: 范忠瑶(1982-), 女, 河北唐山人, 热能工程专业硕士研究生;

论立勇(1979-), 男, 河北冀州人, 工程热物理专业硕士研究生。