

文章编号: 1000 8055(2008)01 0134-04

不同气体对涡流管能量分离效果的影响

张国庆, 吴玉庭, 丁雨, 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, 北京 100022)

摘 要: 通过实验的方法, 分别对以空气、氮气、氩气和二氧化碳等气体为工质的涡流管的能量分离效应进行了研究, 得出了涡流管的冷热效应、制冷量、单位制冷量和 COP (性能系数, Coefficient of Performance) 随冷流率变化的特性曲线. 研究表明: 涡流管的冷热效应与工质的摩尔质量有着重要的关系, 摩尔质量越大, 其制冷和制热性能就越好; 另外, 在一定程度上还受气体本身的焦耳-汤姆逊系数的影响. 对于制冷量和 COP , 除了跟工质的制冷效应和比热容有关外, 跟摩尔质量也存在着相应的正比关系.

关 键 词: 涡流管; 性能系数 (COP); 摩尔质量; 焦耳-汤姆逊系数

中图分类号: TB619

文献标识码: A

Effect of various gases on the energy separation performance of vortex tube

ZHANG Guoqing, WU Yuting, DING Yu, MA Chongfang

(Key Laboratory of Ministry of Education on Enhanced Heat Transfer and Energy

Conservation, College of Environmental and Energy Engineering,

Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: The energy separation performance of the vortex tube with various gases, such as air, nitrogen, argon and carbon dioxide, was studied in the experiment, whereby cold and hot characteristic curves, refrigeration output, unit refrigeration output and coefficient of performance (COP) versus cold flow rate were obtained. The results indicate that cold and hot effects are closely related to mol mass: the bigger the mol mass, the better the cold and hot performance will be; additionally, these effects are subjected to the coefficient of Joule-Thomson to some extent. Refrigeration output and COP also have a corresponding direct correlation with mol mass, in addition to refrigeration effect and specific heat at constant pressure.

Key words: vortex tube; coefficient of performance (COP); mol mass; coefficient of Joule-Thomson

涡流管, 也叫兰克-赫尔胥管, 它是一种没有任何运动部件的简单的能量分离装置, 能够在其两端将高压气流同时分离成冷热两部分气体. 主要结构由切向喷嘴、涡流室、冷端隔板、热端阀和冷热端管等组成. 对于常见的逆流涡流管, 高压气体通过一个或几个喷嘴进入涡流室, 同时伴随着

强烈的旋转和涡流运动, 随后以螺旋线的形式沿着管壁行进到喷嘴的右端. 此时, 管右端的锥形阀限定了只有一部分气体出现在管壁附近, 并且阻止热端管中心的气体直接流出. 由于热端阀同冷端孔板之间存在正压力梯度, 从而中心气流朝着反向流动并最终以一个较大的温降通过冷端隔板

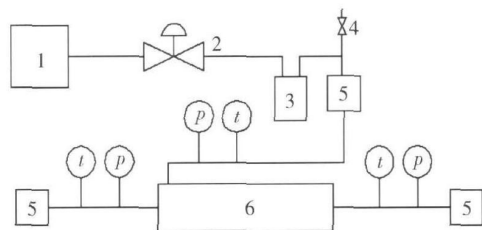
收稿日期: 2006 10 24; 修订日期: 2007-01-31

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)资助

作者简介: 张国庆(1981-), 男, 山东菏泽人, 硕士生, 主要从事热能方面的研究.

流出, 这就是冷流部分; 而外层气体以较高的温度从右端流出, 右端的锥形阀用来控制冷热气流的相对比例。另外, 设在喷嘴左端的隔板可能会允许处于轴线附近一定量的进口气体直接从冷端管流出, 而不参与能量的分离过程^[1-2]。

涡流管具有结构简单、操作方便、运行安全可靠、造价低廉等优点; 又具有制冷、制热、抽真空、汽液分离等功能, 因此涡流管被广泛应用在制冷、制热、分离等科学研究和工业领域。在涡流管的工业应用中, 涡流管内的介质不一定是空气, 还有瓦斯气^[3] (天然气)、有机废气、氮气、二氧化碳等气体。尤其值得一提的是, 涡流管在国外已被广泛应用于天然气的轻烃回收、天然气脱水和天然气防冻堵等方面, 在这些系统中涡流管内的工质均为天然气。国内外学者已对涡流管进行了大量的研究, 但大都集中在以空气为介质的范围内, 由它得到的结论和规律能否直接用于其它工质涡流管的设计、实验及实际应用中, 还有待进一步的验证。本文对不同工质的涡流管性能进行了研究, 以寻找不同工质对涡流管性能的影响规律, 为涡流管在其他工质方面的应用提供设计依据和指导。



1 高压罐; 2 减压阀; 3 恒温水槽; 4 旁通阀;
5 浮子流量计; 6 涡流管

图2 涡流管实验台

Fig. 2 Test bench of the vortex tube

降低到一定的要求, 然后通过恒温水槽 3 以保持涡流管进口气体的温度恒定, 最后通过涡流管 6 分离为冷热两股气流, 同时利用压力表、热电偶和流量计分别测得冷热气流的出口压力、温度和流量后排入大气中。5 为浮子流量计, 用来测量涡流管进出口流量, 4 为旁路阀门, 用来维持系统气流的稳定。压力测量采用高精度压力表 (0.4 级), 温度测量采用与具有 0.1 °C 精度的二级标准水银温度计进行对比标定过的铠装热电偶。

该实验系统的气源除了空气仍由压缩机提供外, 其余所需气体均由高压气瓶提供, 气瓶内的压力为 15 MPa, 具体的实验方法如下:

(1) 把氮气瓶连接到实验系统中, 打开气瓶阀门, 调节减压阀使涡流管进口压力到 0.4 MPa (绝对压力), 进口温度通过恒温水槽控制在 22 °C;

(2) 调节热端阀开度, 使冷流率为 10% 左右, 待温度稳定后记录下数据: 包括冷端出口温度、热端出口温度, 背压及冷端出口流量等;

(3) 改变冷流率, 依次记录冷流率为 20%, 30% 直至 90% 下的实验数据;

(4) 结束氮气实验, 换下氮气瓶, 依次换上二氧化碳、氩气瓶, 重复步骤 (2) ~ (4)。

实验中, 设涡流管进口气流的温度为 t_i , 压力为 p_i , 流量为 G_i , 冷、热端出口气流的温度分别为 t_c , t_h , 冷端气流的流量为 G_c 。

定义涡流管的制冷温度效应为 Δt_c , 制热温度效应为 Δt_h , 冷流率为 η_c , 则

$$\text{涡流管制冷温度效应: } \Delta t_c = t_i - t_c$$

$$\text{涡流管制热温度效应: } \Delta t_h = t_h - t_i$$

$$\text{涡流管的冷流率: } \eta_c = G_c / G_i \times 100\%$$

定义涡流管的总制冷量 Q_c 为将冷气流从 t_c 加热到 t_i 所吸取的热量

$$Q_c = G_c c_p (t_i - t_c) = \eta_c G_i c_p \Delta t_c$$

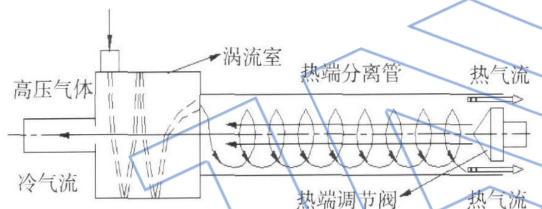


图1 涡流管能量分离示意图

Fig. 1 Energy separation schematic diagram of the vortex tube

1 实验装置及实验方法

1.1 实验气体的选择

由于实验条件的限制和要求, 实验气体的选择除了具有代表性, 还要安全。具体的, 对实验所得的数据, 为了尽可能的便于直观的分析, 要求采用的 4 种气体之间, 两对的摩尔质量既要分别相近, 又要彼此有所差距, 根据这个原则, 实验所选择的气体为空气、氮气、氩气和二氧化碳等。

1.2 实验系统、流程及方法

本实验系统包括涡流管以及与涡流管相搭配的管路系统、降压系统、调温系统和仪表测量系统^[4], 具体的实验系统如图 2 所示。

高压气罐 1 中的气体经过减压阀 2, 将压力

定义单位制冷量为

$$q = \frac{Q_c}{G_i} = \eta_c c_p \Delta t_c$$

定义涡流管制冷效率 COP 为

$$COP = \frac{q}{Rt_i \ln(p_i/p_c)} = \frac{\eta_c c_p \Delta t_c}{Rt_i \ln(p_i/p_c)}$$

2 实验结果及分析

2.1 不同工质对涡流管冷热效应的影响

图3、图4 分别是对于不同的工质,在涡流管进口压力为 0.4 MPa,进口温度为 22 °C 的工况下得到的制冷效应 Δt_c 和制热效应 Δt_h 随冷流率 η_c 变化的曲线。

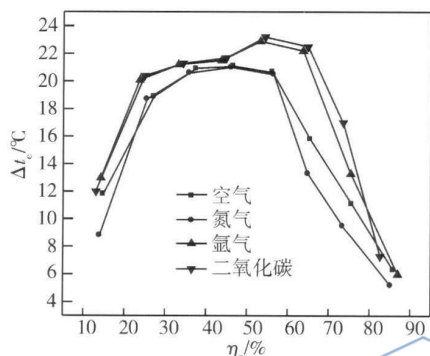


图3 不同工质对涡流管制冷温度效应的影响

Fig. 3 Effect of various of working media on cooling temperature differences of the vortex tube

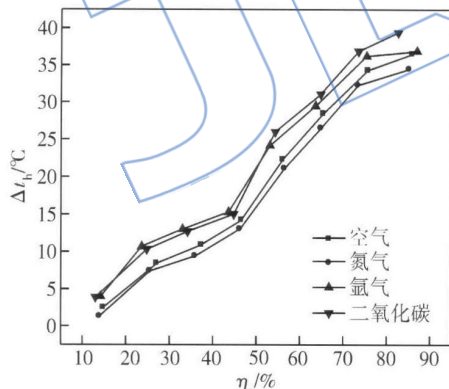


图4 不同工质对涡流管制热温度效应的影响

Fig. 4 Effect of various of working media on heating temperature differences of the vortex tube

从图3中可以看出,对于所有的气体工质,涡流管的制冷效应都是随着冷流率的增加先增大后减小,而且高冷流率($\eta_c > 55\%$)时的制冷效应比小冷流率时差别明显。图4说明了制热效应随着冷流率的增加而一直增大。对于图3中的空气、氮气、氩气和二氧化碳四种气体,制冷效应最大时所对应的冷流率分别为46%,43%,55%和58%,即

在冷流率为 25%~65% 的范围内,涡流管的制冷效应较好。上述效应曲线有一个共同点:摩尔质量分别相当的空气、氮气和氩气、二氧化碳的效应曲线分布比较接近,而后两组气体的冷热效应明显的较前两组好。在这几种气体中,最好的制冷和制热性能都是在以二氧化碳为工质的情况下发生的,其次是氩气、空气、氮气的制冷和制热性能最差。出现这种结果,可能同工质的摩尔质量有重要关系,摩尔质量越大,其制冷和制热性能就越好。而这种推测在理论上也是有一定道理的,气体微团之间的剪切力和摩擦力是造成涡流管内部能量分离的主要原因,在微团间的相对(角)速度相同的前提下,摩尔质量越大,相应的摩擦力也就越大,因而能量分离效应就越好。至于图4中20%~50%的冷流率范围内,CO₂和Ar图线之间出现的前者制热效应差于后者的反常情况,可能是由于它们的焦耳-汤姆逊系数的不同引起的。其中,在常温下,CO₂、N₂和空气的焦汤系数为正,而Ar的则为负;前者节流后温度降低,后者节流后温度反而会上升,由于气体在涡流管中的运动是一个节流过程,所以焦汤系数在能量的分离过程中必然会起到一定的影响。虽然CO₂的摩尔质量较Ar的大,但由于二者焦汤系数的符号相反,难免会在某一冷流率范围内出现这种反常情况。

2.2 不同工质对制冷量、单位制冷量和 COP 的影响

图5、图6和图7同样是在涡流管进口压力为 0.4 MPa,进口温度为 22 °C 的工况下,由实验得到的不同工质的制冷量、单位制冷量和 COP 随冷流率变化的特性曲线。

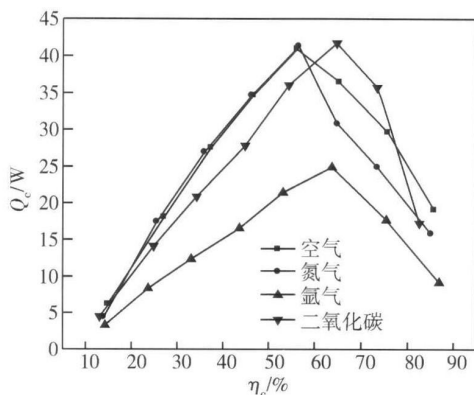


图5 不同工质对涡流管制冷量的影响

Fig. 5 Effect of various of working media on Q_c of the vortex tube

从以上图中,可以看到,无论是制冷量、单位

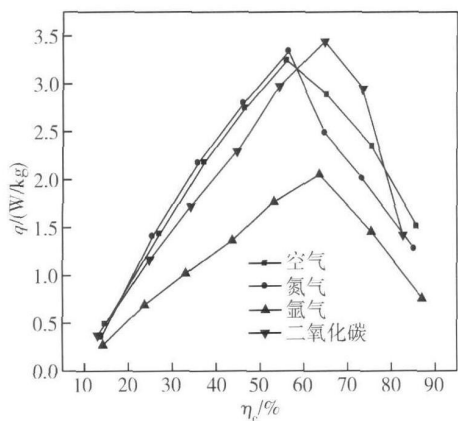


图 6 不同工质对涡流管单位制冷量的影响

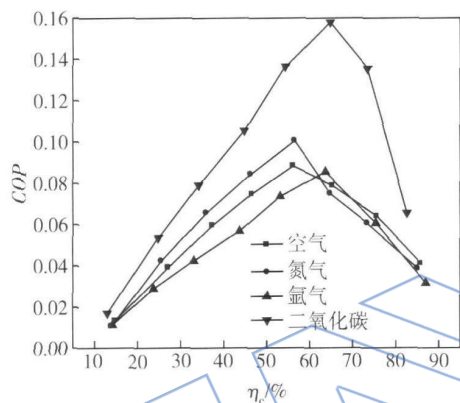
Fig. 6 Effect of various of working media on q of the vortex tube

图 7 不同工质对涡流管 COP 的影响

Fig. 7 Effect of various of working media on COP of the vortex tube

制冷量还是 COP , 都随着冷流率的增大而逐渐升高, 图 5 和图 6 中四种气体的效应曲线分布及走势比较接近, 而且当冷流率达到 60% 左右时, 相应的三个参数均达到最大, 继而随着冷流率的进一步增大而逐渐减小。另外, 尽管涡流管的制冷效应是随着工质摩尔质量的增加而增加的, 但制冷量和单位制冷量却没有体现出相同的规律, 这是因为从制冷量和单位制冷量的定义可以看出, 影响制冷量和单位制冷量的参数除了温度制冷效应 Δt_c 以外, 还有另外一个重要因素, 即定压比热容 c_p 。众所周知, 氩气为单原子结构, 其比热容非常小, 因而, 尽管它的制冷效应较好, 其制冷量和单位制冷量却很低。相反地, 空气和氮气的制冷效应虽然较低, 但是它们的比热容较氩气的高, 所以对应的制冷量和单位制冷量仍然较大。另外, 不同工质对 COP 的影响类似于单位制冷量, 由 COP 的定义式可以看出, COP 与单位制冷量成

正比, 同气体常数 R 成反比, 而 R 又跟气体的摩尔质量成反比 (R 为通用气体常数 R_0 同摩尔质量的比值), 所以 COP 就跟气体的摩尔质量成正比, 由于二氧化碳的摩尔质量较大, 所以它本身对应的 COP 也较大。

3 结 论

本文通过实验的方法, 分别对以空气、氮气、氩气和二氧化碳等气体为工质的涡流管的能量分离效应进行了研究, 得出了涡流管的冷热效应、制冷量、单位制冷量和 COP 随冷流率变化的特性曲线, 通过以上分析, 可得到下述结论:

(1) 涡流管的冷热效应与工质的摩尔质量有着重要的关系, 另外, 在一定程度上还受气体本身的焦耳-汤姆逊系数的影响。当冷流率在 25% ~ 65% 范围内时, 相应的制冷效应都是比较好的, 制冷效应则随着冷流率的增大而一直增大。但总的说来, 其他条件相同时, 工质的摩尔质量越大, 其制冷和制热性能越好。

(2) 工质的制冷量、单位制冷量和 COP 随着冷流率的升高先增大后减小, 达到最大值时的冷流率为 60% 左右。制冷量和单位制冷量同制冷效应 Δt_c 和比热容关系, 所以它们的特性曲线分布相似, 又跟相应的冷热效应曲线有所不同。

(3) COP 除了跟制冷效应 Δt_c 和比热容有关外, 也同气体的摩尔质量成相应的正比关系: 由于本身的摩尔质量较大, 尽管二氧化碳所对应的制冷量和单位制冷量不是最大, 但其对应的 COP 却是最大的。

参考文献:

- [1] Soni Y, Thomson W J. Optimal design of the Ranque Hilsch vortex tube [J]. J Heat Transfer, 1975, 97C: 316-317.
 - [2] Gao C M, Bosschaart K J. Experimental study on a simple Ranque Hilsch vortex tube [J]. Cryogenics, 2005, 45: 173-183.
 - [3] 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.
 - [4] 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.
- JING Shu, YE Fang, YU Jian, et al. The performance study on energy separation in vortex tube of tri channels [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(3): 499-501.