

文章编号: 1000-8055(2009)06-1275-04

喷嘴马赫数对涡流管性能影响的实验

贾红书¹, 吴玉庭¹, 马重芳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 100124;
2 中国科学院 工程热物理研究所, 北京 100190)

摘 要: 设计加工了不同出口马赫数的喷嘴, 搭建了涡流管性能测试试验台, 对不同马赫数喷嘴涡流管的能量分离性能进行了实验测试, 实验结果表明: 出口马赫数为 0.5 到 0.8 的喷嘴的涡流管具有很好的能量分离效果, 但是当马赫数上升到 0.9 时效果明显变差. 当涡流管入口压力在 0.4~0.6 MPa 之间时, 喷嘴出口马赫数为 0.8 的涡流管具有最好的制冷效应, 但当涡流管入口压力继续增加时各喷嘴涡流管的制冷性能差距不大.

关 键 词: 喷嘴; 涡流管; 能量分离; 马赫数

中图分类号: TK 34

文献标识码: A

Experimental study on the vortex tubes with different Mach number nozzles

JIA Hong-shu¹, WU Yurting¹, MA Chong-fang¹, GE Man-chu²

- (1. College of Environmental and Energy Engineering, 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 University of Technology, Beijing 100124, China;
2. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In order to find out the vortex tube configuration with the best cooling temperature difference, nozzles with different Mach numbers were designed and manufactured, the experimental system was set up and the performances of these nozzles were measured. The result shows that the vortex tube has better energy separation effect with outlet Mach number between 0.5 and 0.8. But when the Mach number is up to 0.9, the effect would be worse. The refrigeration performance of the vortex tube with the outlet Mach number of 0.8 is best from 0.4 to 0.6 MPa in inlet pressure, but the performance difference varied little with input pressure over 0.6 MPa.

Key words: nozzle; vortex tube; energy separation; Mach number

涡流管是一种结构非常简单的能量分离装置, 它能将有压气体通过在其内部的膨胀过程, 涡旋运动, 分离成温度不同的两股流体, 其中处于中心部位的回流气流, 温度低于入口气流, 从冷端出口排出, 而处于外层部位的气流温度高于入口气

流, 从热端出口排出. 涡流管在结构上包括喷嘴、冷端出口、热端出口、混合室、以及安装在热端出口起流量调节作用的流量调节阀. 与常规制冷机械相比, 虽然涡流管的制冷效率很低, 但是它独特的优势, 比如无运动部件, 运行中不需要维护, 工

收稿日期: 2008-05-15; 修订日期: 2008-07-10

作者简介: 贾红书(1982-), 女, 河北保定人, 硕士, 主要从事热能工程的研究.

作稳定等使其在某些特殊场合的应用具有很大的吸引力. 为了提高应用中涡流管的能量分离效应以及做到尺寸合理, 关于其结构的研究一直是实验研究的重点内容.

国内外许多学者对涡流管进行了大量的理论和试验研究, 发表了大量的科研论文, 但喷嘴马赫数对涡流管性能影响的研究比较少见. 2006 年我们在胜利油田进行了涡流管的现场试验^[1], 实验结果与我们的预期效果有一定的差距, 经过分析我们认为可能是涡流管设计时选的喷嘴马赫数太高. 为了验证这一想法, 本论文进行了涡流管喷嘴马赫数影响的实验研究.

1 喷嘴影响涡流管能量分离的机理

喷嘴是涡流管能量转换的主要场所, 由于气体在喷嘴中迅速膨胀, 气流运动速度已接近声速, 对某些缩放型的喷嘴, 速度将超过声速, 能量来不及释放, 所以可以近似认为管内发生的是没有热量耗散的可逆的绝热过程——等熵过程.

根据热力学分析, 喷嘴出口处的热力学温度将大大低于入口处温度, 其值为

$$t = t_0 - (V_0^2 / 2c_p)$$

式中 t_0 为滞止温度, 可近似认为是喷嘴入口前的热力学温度, 为状态条件确定的定值; V_0 为喷嘴出口的流速; c_p 为气体的比定压热容. 从中可以看出流场中气体的温度随气流速度增大而下降. 由于涡流管的冷端管长度小, 喷嘴在位置上距冷气流出口很近, 所以它对出口截面的平均温度有重要影响, 最终对能量分离效应产生作用, 该式从理论上验证了喷嘴设计情况对能量分离效果具有决定性作用. 根据以往对喷嘴流道结构和数量的实验研究与数值模拟结果, 发现为了取得最高的速度能, 要尽量的减小流动阻力和流动的不均匀性, 以保证压力损失最小.

2 不同马赫数喷嘴的设计

假设在涡流管内流动过程中气体为理想气体和不考虑喷嘴内部流动磨擦损失, 为等熵过程, 总压没有损失; 总温没有变化, 根据喷管内气体流动的能量方程, 连续性方程, 状态方程及过程方程, 得到流量计算公式^[1]为

$$G = \frac{Ma}{\left\{ 1 + [(\kappa - 1) / 2] Ma^2 \right\}^{\frac{\kappa + 1}{2(\kappa - 1)}}} \rho_0 \sqrt{\kappa RT_0} A$$

其中 ρ_0 和 T_0 为进口状态参数, Ma 为马赫数, κ 为气体绝热指数, R 为气体常数.

北京工业大学对涡流管进行了大量的研究^[1-4]并取得了关于涡流管喷嘴设计和整流器设计的专利两项. 关于涡流管喷嘴的设计, 试验表明对于小流量涡流管当喷嘴为三流道时具有最佳的能量分离效应^[2], 因此设计流道为三流道. 每一个流道又可以分为进口段, 主体段和出口段, 进气段和出口段的设计都要使气体的流动方向过渡平缓, 以尽量减少流动过程中的阻力和流动不均匀性, 出口段沿切向方向. 主体段采用实验室自行研发的等马赫梯度设计方法, 确定主体段进出口处面积为 3: 1, 截面为矩形, 喷嘴直径 20 mm, 涡流室内径 13 mm, 冷端孔口为 5 mm. 为了得到不同出口马赫数喷嘴对涡流管能量分离性能的影响, 设计加工了 6 组喷嘴, 出口马赫数分别为 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, 最终的装配图如图 1 所示.

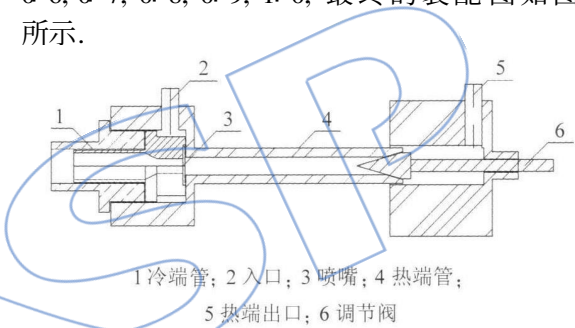
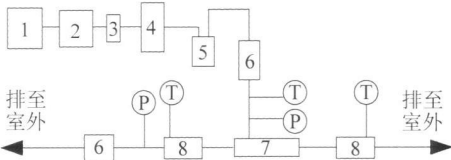


图 1 涡流管装配图

Fig. 1 Assembled chart of vortex tube

3 实验台介绍

实验系统如图 2, 压缩机 1 中的高压空气经过一整套的过滤干燥系统, 包括干燥式冷冻机 2, 过滤器 3, 储气罐 4, 进入恒温水槽 5, 保持涡流管进口气体温度恒定, 然后通过涡流管 7 进行能量分离, 出口气流直接通入室外排入大气. 流量计 6 为金属浮子流量计, 布置在涡流管进口和冷端出口. 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压力和温度的测点, 在本实验中压力用 0.4 级精度压力表测量, 温度用 T 型热电



1 压缩机; 2 冷冻式干燥机; 3 过滤器; 4 储气罐;
5 恒温水槽; 6 流量计; 7 涡流管 8 混合管

图 2 涡流管实验流程图

Fig 2 Experimental flow chart of vortex tube

偶测量.

4 实验结果及数据处理

实验采用自制的喷嘴和热端管长为 140 mm 的涡流管, 气体进口压力 p_i 为 0.4, 0.6 MPa (绝压), 进气温度 t_i 为 24 °C 的情况下, 对不同出口马赫数涡流管进行实验研究, 通过测量涡流管的入口气体温度 t_i 和流量 G_i , 冷气流出口温度 t_c 和流量 G_c , 热气出口温度 t_h , 判断涡流管能量分离的标准采用温差评价方法, 即冷端温差 $\Delta t_c = t_i - t_c$; 热端温差 $\Delta t_h = t_h - t_i$; 变化趋势为冷气流占入口气流总质量的百分比, 即为冷流率 $\eta_c = (G_c / G_i) \times 100\%$.

图 3 和图 4 示出涡流管进口压力为 0.4 MPa 和 0.6 MPa (绝压), 不同的出口马赫数下涡流管的

制冷温度效应和制热温度效应随冷流率的变化曲线. 图 5 为出口马赫数为 0.9 的喷嘴在实验压力分别为 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8 MPa 下的温度效应.

在入口压力为 0.4 MPa 下, 出口马赫数为 0.8 的喷嘴取得最好的制冷温度效应, 当冷流率为 40% 时要比其余各个喷嘴低 5~6 °C; 在冷流率小于 70% 时出口马赫数为 0.7 的喷嘴取得最好的制热温度效应, 大约高出 3 °C.

在入口压力为 0.6 MPa 下, 出口马赫数为 0.8 的涡流管制冷温度效应较出口马赫数为 0.5 和 0.6 的涡流管大 2~3 °C, 制热温度效应在大的冷流率下最好, 马赫数为 0.7 的喷嘴在大冷流率下的制冷温度效应变差, 但是在很大的冷流率范围内有最大的制热温度效应和制热温度效应.

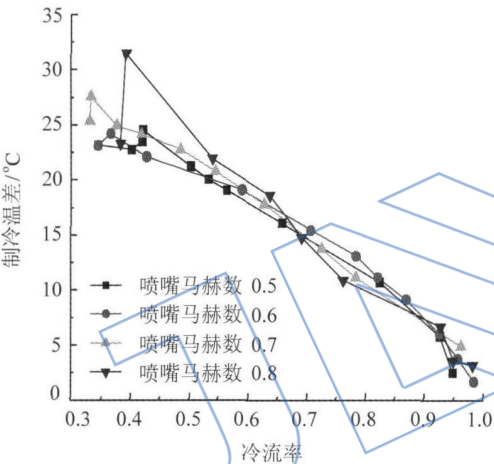


图 3 入口压力为 0.4 MPa 的不同喷嘴的温度效应

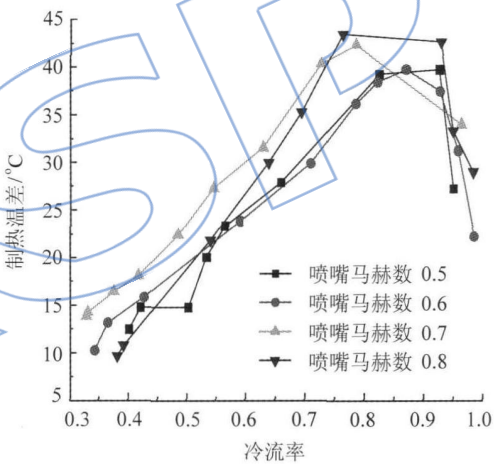


Fig. 3 Temperature difference at inlet pressure is 0.4 MPa of each nozzle

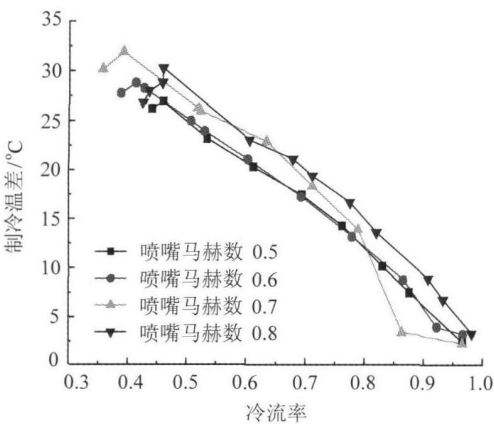


图 4 入口压力为 0.6 MPa 的不同喷嘴的温度效应

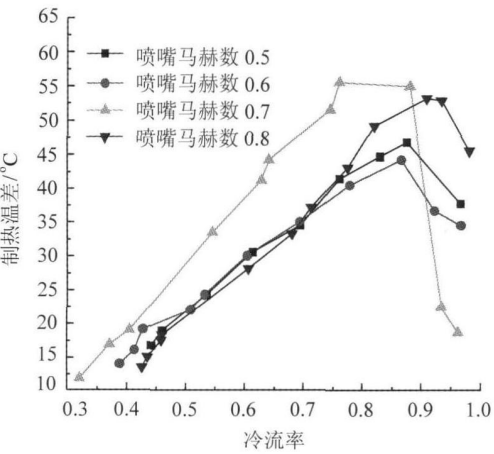


Fig. 4 Temperature difference at inlet pressure is 0.6 MPa of each nozzle

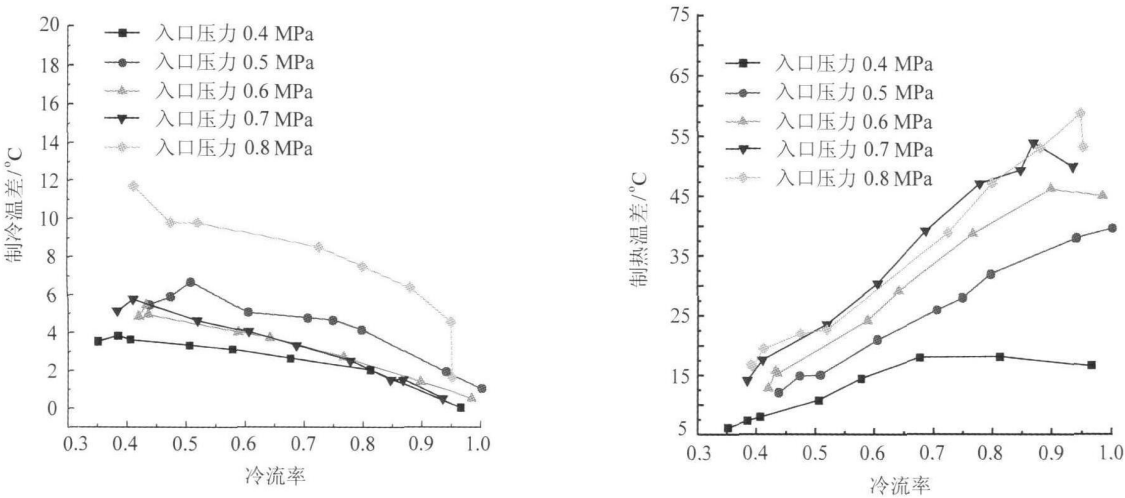


图 5 喷嘴出口马赫数为 0.9 的涡流管的温度效应
Fig 5 Temperature difference for vortex tube of outlet Mach number is 0.9

出口马赫数为 0.9 的喷嘴, 整体制冷效果不佳, 在调节冷流率的过程中, 发现制冷温差不会有很大的变化. 分析原因可能是因为气体在高马赫数下膨胀造成气体的堵塞现象. 在较高的入口压力下, 如 0.8 MPa 时, 制冷温度效应有较大的提高, 但是也只有 12 °C, 其制热温度效应依然较好. 只有当入口压力低到 0.4 MPa 时, 才会出现极度恶化的情况.

5 结 论

通过本论文的实验研究, 得到如下结论:

- 1) 喷嘴马赫数在 0.5~0.8 的范围内, 涡流管都能起到较好的制冷温度效应, 但是当喷嘴出口马赫数到达 0.9 的时候, 制冷效果整体变差, 所以在工程应用中, 应尽量避免出现这种情况. 这证实了喷嘴出口在亚声速下能起到很好的能量分离效果, 本试验找到了精确的分界线, 认为在精确控制出口速度的条件下, 马赫数 0.8 是制冷效果好坏的分界线.
- 2) 出口马赫数为 0.9 的喷嘴, 制冷温差随冷流率调节变化不大.
- 3) 当涡流管入口压力在 0.4~0.6 MPa 之间时, 喷嘴出口马赫数为 0.8 的涡流管具有最好的制冷效应, 但当涡流管入口压力继续增加时各喷嘴涡流管的制冷性能差距不大.

4) 出口马赫数为 0.7 的喷嘴在冷流率很大的范围内都能取得最大的制热温差.

参考文献:

[1] 贾红书, 吴玉庭, 马重芳, 等. 氨制冷涡流管复合制冷轻烃回收系统的现场试验研究[R]. 广州: 中国工程热物理学会传热传质学学术会议, 2007: 1069-1072.
JIA Hongshu, WU Yuting, MA Chongfang, et al. Field experimental study of light hydrocarbon reclaiming system with ammonia and vortex tube compound refrigeration [R]. Guangzhou: Chinese Engineering Thermal Physics Convention, 2007: 1069-1072. (in Chinese)

[2] 何曙. 用于轻烃回收的涡流制冷实验研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2005.
HE Shu. Vortex tube refrigeration study application for light hydrocarbon reclaiming[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2005. (in Chinese)

[3] 丁雨. 涡流管在轻烃回收技术中的应用研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2006.
DING Yu. Application research of vortex tube in light hydrocarbon reclaiming technology[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2006. (in Chinese)

[4] 何曙, 吴玉庭, 郭建, 等. 进口压力对涡流管性能影响的实验研究[J]. 空气动力学学报, 2006, 24(4): 487-490.
HE Shu, WU Yuting, GUO Jian, et al. Effect of inlet pressure on the energy separation performance of the vortex tube[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2006, 24(4): 487-490. (in Chinese)