

进气温度与压力对涡流管性能影响的实验

龚迪澜¹, 毛军逵^{1,2}, 邓明¹, 闫奔³, 王鹏飞⁴, 曾军⁴

- (1. 南京航空航天大学 能源与动力学院 江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016;
2. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191;
3. 东南大学 能源与环境学院, 南京 210096;
4. 中国航空发动机集团有限公司 四川燃气涡轮研究院, 成都 610500)

摘 要: 实验研究了涡流管进出口膨胀比(2~5)、节流阀开度(1~11)和进气温度(313~373 K)对涡流管性能的影响,重点分析了制冷和制热温度效应随上述参数的变化规律。研究中发现:随着进口膨胀比增加,管内涡流强度增强,不同半径处气流的角速度梯度增大,涡流制冷温度效应增强 10.9%,制热温度效应增强 46.5%。随着节流阀开度增加,冷/热气流之间能量交换的程度提升,涡流效应增强,冷流率增大 47.3%。随着进气温度增加,涡流管性能逐步提升。实验结果表明:进气温度每增加 20 K,制冷温度效应平均增幅约为 12%,制热温度效应平均增幅约为 5%。

关键词: 航空发动机; 涡流管; 进气温度; 膨胀比; 节流阀开度; 制冷温度效应

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Experiment on influences of inlet temperature and pressure on vortex tube's performance

GONG Di-lan¹, MAO Jun-kui^{1,2}, DENG Ming¹,
YAN Ben³, WANG Peng-fei⁴, ZENG Jun⁴

- (1. Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System,
College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China;
3. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China;
4. Sichuan Gas Turbine Establishment,
Aero Engine (Group) Corporation of China, Chengdu 610500, China)

Abstract: Experiments were carried out to study the influences of the inlet/outlet expansion ratio (2~5), the throttle setting value (1~11) and the inlet temperature (313~373 K) on vortex tube's performance. The variation of refrigeration and heating effects was obtained along with above parameters. It was found in experiments that the performance of vortex tube was enhanced with the increasing inlet expansion ratio, promoting the in-tube vortex intensity and increasing inlet the angular velocity gradient at different radiuses. The refrigeration effect increased by 10.9% and heating effect increased by 46.5% separately. With the rise of

收稿日期: 2015-07-11

基金项目: 先进航空推进验证计划

作者简介: 龚迪澜(1992—),男,硕士生,主要从事航空发动机热端部件冷却技术研究。

引用格式: 龚迪澜,毛军逵,邓明,等. 进气温度与压力对涡流管性能影响的实验[J]. 航空动力学报, 2017, 32(3): 599-606. GONG Dilan, MAO Junkui, DENG Ming, et al. Experiment on influences of inlet temperature and pressure on vortex tube's performance[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(3): 599-606.

throttle setting value, the degree of energy exchange between the cold/heating flow increased, the eddy effect strengthened and cold flow rate increased by 47.3%. The performance of the vortex tube was improved with the increase of the inlet temperature. All the results show that as the inlet temperature increases by every 20 K, the refrigeration effect at the cold side is enhanced by about 12%, while the heating effect at hot side is improved by about 5%.

Key words: aero-engine; vortex tube; inlet temperature; expansion ratio; throttle setting value; refrigeration effect

涡流管是一种即时能量分离装置.工作时,压缩气体通过喷嘴膨胀后沿切向进入涡流室,在涡流室内产生高速旋转的涡流,并在中心区形成低温气流,在外围区产生高温气流.涡流管具有占用空间小,结构简单,无运动部件等优点,已经广泛应用在制冷领域^[1]、制热领域^[2-3]、混合物分离领域^[4]、空气调节领域^[5]等工业和科学研究中.

尽管涡流管结构和操作非常简单,但管内的能量交换过程却极其复杂.作为“涡流效应”的发现人,Ranque^[6]认为产生涡流效应的根本原因是内部气流存在绝热膨胀和绝热压缩过程.Hilsch^[7],Fulton^[8]提出自由涡-强制涡理论,认为涡流的转化使其产生能量分离.Deissler等^[9]指出径向压力梯度下的旋涡膨胀和压缩效应导致了能量分离.Kurosaka^[10]发现在涡流管中产生的Rankine's vortex被一种纯音诱发的声流转变为强迫涡,从而产生径向温度分离.而Gutsol和Bakken^[11],Aljuwayhel等^[12],XUE Yuepeng等^[13-15],吕正林^[16]分别从不同流层之间的摩擦、微元体的径向分离、能量逆转等角度来揭示涡流管能量分离效应.

尽管目前国内外对于涡流管内部能量分离机理还没有形成完全统一的定论,但这并不影响对其工作特性开展研究.Aydin等^[17]、Khazaei等^[18]、Pourmahmoud等^[19]、Avci^[20]以及Raut等^[21]针对涡流管结构尺寸、进口压力等参数展开性能分析研究.在进气温度方面,Dutta等^[22]通过CFD数值计算研究了95~135 K的低温气流和300 K的室温气流对管内能量分离的影响.研究结果表明由于低温气流造成进口流速低、焓值低,不利于管内能量分离.Pourmahmoud等^[23]同样采用CFD方法,模拟不同的进气温度(从294.2~470 K)对涡流管性能的影响,结果发现温度升高将促进管内温度分离作用.曹勇^[24]从低温(240 K)和常温(288 K)进口两方面对涡流管特性展开了数值和实验分析,表明在其他条件相同的情况下,常温下的制冷温度效应低于低温下的制冷温

度效应.

在工业技术集中、设计制造难度相当大的航空领域,涡流管这种具有优良制冷制热特性的装置,也有很广阔的利用前景.随着航空发动机设计性能不断提高,涡轮前燃气温度已经接近2 000 K,高温部件的冷却要求也在日益提高.目前航空燃气涡轮发动机中,大多是通过从压气机/风扇等位置引入温度相对较低的空气来冷却涡轮叶片等高温部件.但是由于航空发动机增压比逐步提升,风扇流道中的空气温度也在逐步变大,甚至超过373 K,导致冷却空气冷却潜力的降低.

考虑到涡流管可以较为容易地实现能量分离,降低空气温度,因此为航空发动机冷却空气冷却潜力提升提供了一个新的解决思路.然而正如前文中所展示的,现有关于涡流管的研究大多集中在常温和低温条件下能量分离效果和工作特性的研究.鲜有针对航空发动机风扇引气(313~373 K)进口参数下,就涡流管的工作特性开展深入研究,而这是涡流管在航空发动机高温部件冷却、叶尖间隙主动控制系统中应用时,必须首先论证和研究的关键技术点.

因此本文对中温条件(313~373 K)范围内,不同进气条件下,涡流管能量分离效果和工作特性的变化规律进行了研究.对于探究其在航空发动机中的应用可能性,拓展涡流管的应用领域,发展高温进气下的涡流管制冷技术,具有较突出的科学研究意义和工程应用价值.

1 实验系统和实验件

1.1 实验系统

本实验系统主要由供气系统、加热系统、实验段以及测试系统组成,实验系统示意图如图1所示,其中 p 、 T 分别为测点测得的压力和温度.供气系统由体积流量为1.25 m³/min的空气压缩机供气提供,经稳压桶保证实验段气流的稳定性.加热系统由功率为3 kW的小型加热器提供,用以

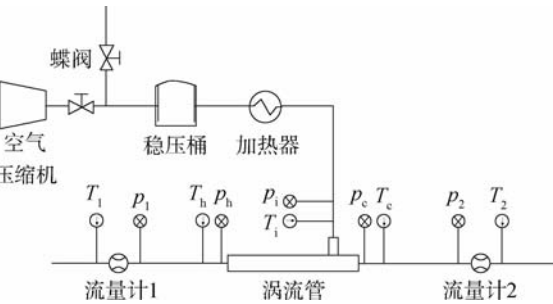


图1 实验系统图

Fig. 1 Diagram of experiment system

加热空气来产生不同温度的进气条件. 测试系统主要包括流量测量、压力测量和温度测量.

1.2 测试仪器及精度

实验中在涡流管冷端出口和热端出口, 分别采用量程为 9~60 m³/h 和 3~22 m³/h 的涡街流量计测量冷、热端出口流量, 其精度为 1 级. 温度测试采用了 T 型铠装热电偶和 48 路温度巡检仪, 其中热电偶测温量程为 173~663 K, 精度为 ±0.75%, 温度巡检仪量程为 223~573 K, 精度为 ±(0.1%FS(full scale)+0.7 K). 压力测量采用了精密压力表和多点压力测试系统, 其中压力表量程为 0~1.0 MPa, 精度为 0.25 级, 压力测试系统量程 0~0.3 MPa, 精度为 1.5 级.

1.3 实验件

图 2 为涡流管整体结构示意图, 组成部件主要包括喷嘴、涡流室、分离孔板、冷端管、热端管以及热端节流阀. 管身为不锈钢材质, 涡流室材料为铜, 能承受实验气流可能达到的较高温度, 同时具有外置节流阀(热端管管端).

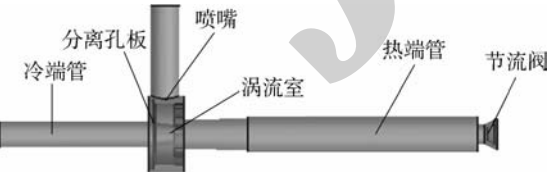


图2 涡流管整体结构示意图

Fig. 2 Structure schemes of vortex tube

实验中冷端管、热端管典型尺寸如图 3 和图 4 所示. 取涡流管管径为特征尺寸, 图中尺寸均为无量纲参数, 即该尺寸与特征尺寸之比.

涡流管工作性能的调节是通过旋转节流阀, 改变图 4 中的堵锥轴向位置, 利用其带锥度的侧面来实现不同尺寸的出流通道, 进而改变热端管的出流阻力. 节流阀开度 k 的具体定义如下:

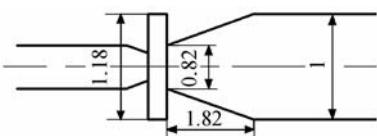


图3 冷端尺寸示意图

Fig. 3 Schemes of cold end

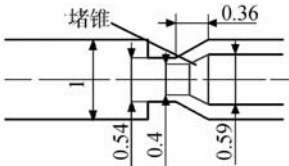


图4 热端尺寸及堵锥示意图

Fig. 4 Schemes of the hot end and plug cone

热端旋转节流阀完全关闭, 此时节流阀开度 $k=0$; 旋转节流阀每转动 180°(即半圈), 节流阀开度 k 增加 1, 此时堵锥沿轴向移动 0.376 mm, 约为热端直径的 8.35%. 旋转 5.5 圈后, 堵塞完全脱离, 此时对应的节流阀开度 $k=11$.

1.4 测试参数及工况

实验中, 在涡流管实验件进口设置了温度和静压测点, 如图 1 所示的 T_1 与 p_1 用来监控进口空气的温度和压力. 同时在实验件的冷、热两端也分别设置了对应的压力测点(p_h, p_c)和温度测点(T_h, T_c)来获得不同工况下冷热端出口的空气状态. 实验中通过涡街流量计测量得到冷、热端的空气体积流量, 再结合流量计管路上设置的压力测点(p_1, p_2)和温度测点(T_1, T_2), 就能得到对应的质量流量.

实验中根据进出口压力读数来判定膨胀比

$$\pi = p_1/p_o. \tag{1}$$

其中 p_1 为进气流静压, p_o 为出气流静压.

具体的实验工况如表 1 所示.

表1 实验工况表

Table 1 Operating conditions of experiment

参数	数值
膨胀比 π	2,3,4,5
节流阀开度 k	1,3,5,7,9,11(即节流阀外旋 0.5 圈,1.5~5.5 圈)
进气温度 T_1 /K	313,333,353,373

2 参数定义和数据处理方法

涡流管制冷温度效应的定义是

$$\Delta T_c = T_i - T_c \tag{2}$$

其中 T_i 为进气温度, T_c 为涡流管冷端的出气温度.

定义涡流管制热温度效应为

$$\Delta T_h = T_h - T_i \tag{3}$$

其中 T_h 为涡流管热端出口的气流温度.

定义涡流管冷流率为

$$\eta = \frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_i} \times 100\% \tag{4}$$

其中 $\dot{m}_c$ 为冷端出口气体质量流量, $\dot{m}_i$ 为进口气体的总质量流量.

定义涡流管总制冷量

$$Q_c = \eta \dot{m}_i c_p \Delta T_c \tag{5}$$

其中 c_p 为流经涡流管气体的比定压热容.

3 实验结果与分析

3.1 膨胀比的影响

图 5 和图 6 给出了进气温度 $T_i=313\text{ K}$, 节流阀开度 $k=1, 3, 7$ 工况下的制冷、制热温度效应随膨胀比的变化曲线. 从图中可以看到, 涡流管冷、热端出口出现明显的温降和温升. 如当进气温度 $T_i=313\text{ K}$, 节流阀开度 $k=3$, 膨胀比 $\pi=3$ 时, 制冷和制热温度效应 $\Delta T_c, \Delta T_h$ 分别为 $25.4, 37.9\text{ K}$.

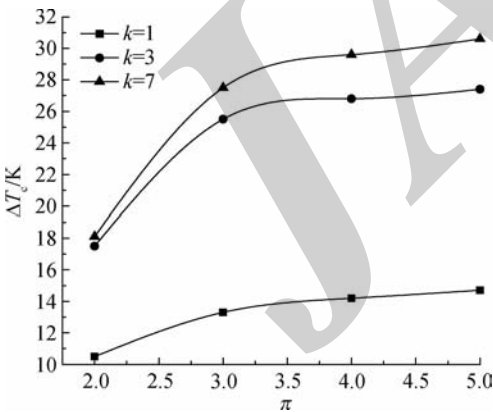


图 5 膨胀比对制冷温度效应的影响 ($T_i=313\text{ K}$)

Fig. 5 Influence of expansion ratio on refrigeration effect ($T_i=313\text{ K}$)

同时从图 5、图 6 中发现随着涡流管膨胀比 π 不断升高, 在同样的进气温度下, 涡流管的制冷和制热温度效应 $\Delta T_c, \Delta T_h$ 逐渐增强并趋于稳定. 如图 5 中, 当节流阀开度 $k=7$ 时, 随着膨胀比 π 从 2 增大到 5, 在进气温度为 313 K 下涡流管的制冷温度效应从 18.1 K 逐渐升高到 30.6 K , 上升幅度越来越小. 当膨胀比 π 为 2 时, 由于涡流管的能量

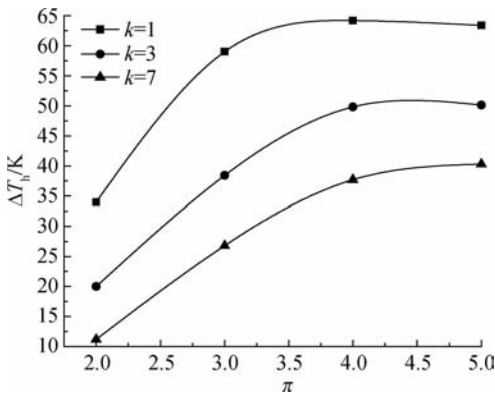


图 6 膨胀比对制热温度效应的影响 ($T_i=313\text{ K}$)

Fig. 6 Influence of expansion ratio on heating effect ($T_i=313\text{ K}$)

分离效果比较差, 因此制冷、制热温度效应不太明显.

正如前文中所介绍的, 目前关于涡流管内部能量分离尚没有一个理论可以完美的解释. 本文参考文献[25]中自由涡-强制涡能量分离模型(见图 7)可知: 高压空气经渐缩型喷嘴后速度升高, 进入涡流室, 形成了自由涡, 大部分高速气流沿管壁流向热端管, 通常称为第 1 种流动, 而内层中心气流流向节流阀遇阻返回, 称为第 2 种流动. 气流向热端运动过程中, 内部流体利用摩擦效应强迫外部流体达到与之一致的角速度, 形成强制涡.

内层气流将动能传递给外层气流, 外层气流获得的能量远大于其内能的损耗, 因而温度升高, 而内层气流损失了大部分动能, 温度下降.

实验中随着进口压力升高, 涡流管工作膨胀比增大, 压缩空气进入涡流室的速度增大, 涡流室内涡流强度增强, 热端管中不同半径处气流的速度梯度变大, 进而提高了中心气流向外层气流的能量传递, 最终导致涡流管制冷和制热温度效应 $\Delta T_c, \Delta T_h$ 的提高.

仔细观察还发现当进口压力 p_i 进一步提高时, 涡流管制冷温度效应 ΔT_c 和制热温度效应 ΔT_h 逐渐趋于稳定, 这是由于当涡流管膨胀比 π

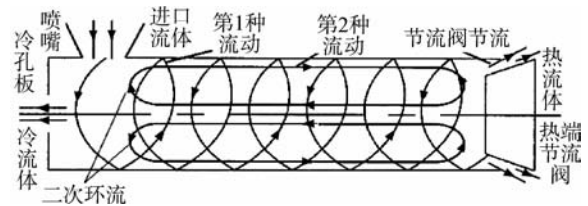


图 7 涡流管内气体流动模型[25]

Fig. 7 Model of gas flow in vortex tube[25]

接近临界压比 π_{cr} 时,进口压力 p_i 的提高将不能有效地提高气流经喷嘴膨胀后进入涡流室的速度,涡流室内的涡流强度也不能进一步增强. 尽管此时涡流管的进口压力 p_i 还在不断提高,但是涡流管的制冷和制热温度效应 $\Delta T_c, \Delta T_h$ 却开始逐渐趋于一个定值.

图 8 给出了进气温度 $T_i=313\text{K}$, 节流阀开度 $k=1, 3, 7$ 时的冷流率 η 随膨胀比 π 的变化规律. 图中显示,随着涡流管膨胀比 π 的不断升高,涡流管的冷流率 η 逐渐增大并渐趋稳定的.

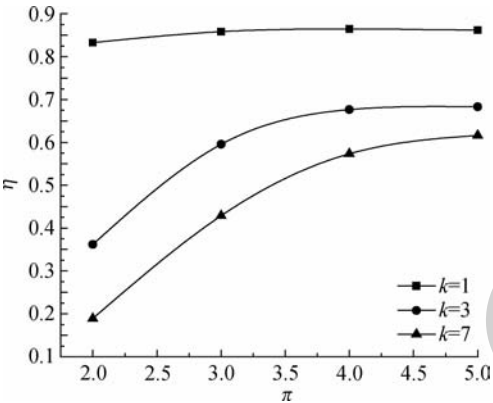


图 8 膨胀比对冷流率的影响 ($T_i=313\text{K}$)
Fig. 8 Influence of expansion ratio on the cold flow rate ($T_i=313\text{K}$)

在进气温度 $T_i=313\text{K}$, 节流阀开度 $k=3$ 时, 随着膨胀比 π 从 2 增长到 5, 涡流管冷流率 η 从 0.362 逐渐增长到 0.596, 0.677 和 0.683. 这是因为随着涡流管膨胀比 π 的增加, 涡流室内喷嘴出口处与冷端出口间的压差逐渐增大, 高压气体经喷嘴膨胀后直接经冷端出口离开的气流比例会随之增大, 在一定程度上促进涡流管冷流率 η 的增加.

图 9 给出了进气温度 $T_i=313\text{K}$, 节流阀开度 $k=1, 3, 7$ 下总制冷量 Q_c 随膨胀比 π 的变化规律. 从图中可以发现, 涡流管总制冷量随着涡流管膨胀比 π 的增大基本呈现线性增长. 这是由于膨胀比 π 增大后, 气体经喷嘴膨胀后离开喷嘴的速度提升, 形成的自由涡强度增大, 因此随后涡流气体在向热端管运动过程中形成的强制涡也越强, 导致涡旋气流的能量分离效应增强, 并最终表现为涡流管的总制冷量提高.

3.2 节流阀开度的影响

图 10 与图 11 给出了进气温度 $T_i=333\text{K}$ 时, 涡流管制冷和制热温度效应随节流阀开度 k

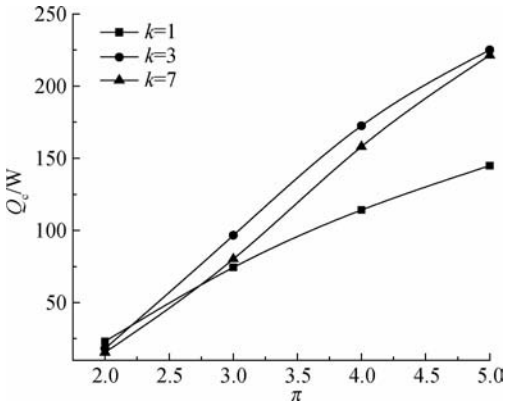


图 9 膨胀比对总制冷量的影响 ($T_i=313\text{K}$)
Fig. 9 Influence of expansion ratio on the total refrigerating capacity ($T_i=313\text{K}$)

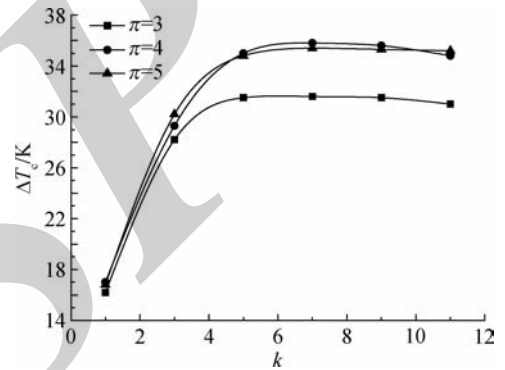


图 10 节流阀开度对制冷温度效应的影响 ($T_i=333\text{K}$)
Fig. 10 Influence of throttle setting value on the refrigeration effect ($T_i=333\text{K}$)

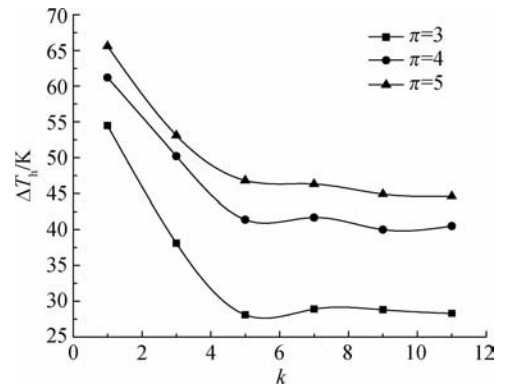


图 11 节流阀开度对制热温度效应的影响 ($T_i=333\text{K}$)
Fig. 11 Influence of throttle setting value on the heating effect ($T_i=333\text{K}$)

的变化规律. 从图中可以明显看出制冷温度效应随着节流阀开度 k 的加大而变大并逐渐趋于稳定, 而制热温度效应与其相反, 它随着节流阀开度 k 的加大而变小并慢慢趋于稳定.

这是因为在节流阀开度 k 较小的工况下, 随

着节流阀开度 k 的增大,从涡流管节流阀流出的流体增多,第 1 种流动逐渐增强.中心流体可以对外层流体传递较多的能量.而回流气流在这个过程中失去更多的能量,温度降低,最终导致涡流管的制冷温度效应 ΔT_c 增大.

对于制热温度效应 ΔT_h 来说,类似地,随着节流阀开度 k 的增大,尽管能量分离效果存在一定程度的增强,但热端流体出流量也在增大,因此整体上体现出涡流管的制热温度效应在逐步降低.

随着节流阀开度 k 进一步增加(如 $k > 6$), k 值的增大对第 2 种流动的影响逐渐变小,不能进一步加强涡流管内冷、热流体的能量交换过程,因此涡流管的制冷温度效应 ΔT_c 和制热温度效应 ΔT_h 逐渐趋于稳定.

图 12 给出了进气温度 $T_i=333\text{K}$ 时,冷流率 η 随节流阀开度 k 的变化规律.随着涡流管节流阀开度 k 的增加,涡流管的冷流率 η 不断减小并逐渐趋于稳定.如在进气温度为 333K ,膨胀比 π 为 3 时,随着节流阀开度 k 从 1 变化到 11,冷流率 η 依次变化为 0.95,0.61,0.60,0.54,0.49 和 0.50.

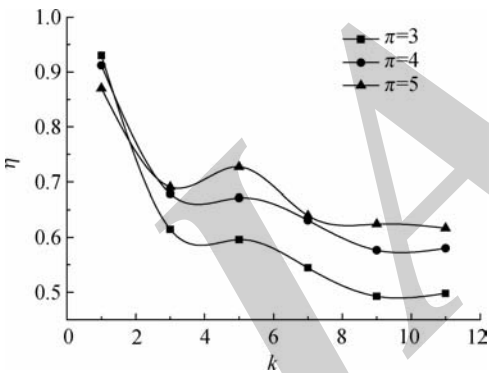


图 12 节流阀开度对冷流率的影响($T_i=333\text{K}$)
Fig. 12 Influence of throttle setting value on the cold flow rate ($T_i=333\text{K}$)

结合涡流管管内气体流动规律,分析认为随着节流阀开度 k 增大,节流阀有效出口面积增大.第 1 种流动的气流比例增大,第 2 种流动的气流比例减少,最终从冷端出口离开的气流比例减少,因此涡流管的冷流率 η 逐渐降低.但当节流阀开度 k 大于一定值时,随着节流阀开度 k 的增大,节流阀的有效出口面积由于逐渐接近最大值而逐渐趋于不变,此时节流阀开度的增大使第 2 种流动的增强和使冷流率 η 降低的效果逐渐减弱并消失.

图 12 中还显示,当节流阀开度 k 从 1 变大到 3 时,冷流率 η 的变化幅度较大.这可能是因为相比于节流阀开度 k 较大的工况,节流阀开度 k 较

小时,节流阀和热端管件每增加一定的轴向间距,节流阀的有效出口面积便会有大幅增长.比如节流阀开度从 1 增大到 3 时,节流阀的有效出口面积从 16.02mm^2 增大到 28.32mm^2 ,增加幅度达到了 76.7%.

3.3 进气温度的影响

图 13 与图 14 分别为节流阀开度 $k=3,7$ 时制冷温度效应 ΔT_c 和随进气温度变化规律.图 15 与图 16 分别为节流阀开度 $k=3,7$ 时制热温度效应 ΔT_h 随进气温度变化规律.

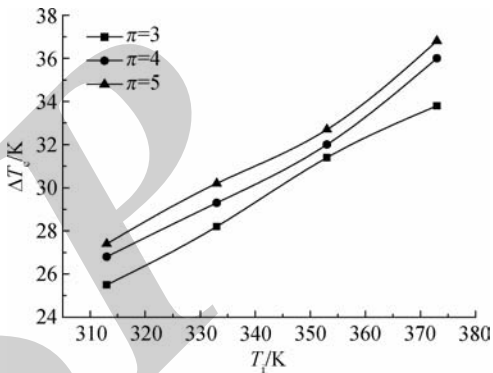


图 13 进气温度对制冷温度效应的影响($k=3$)
Fig. 13 Influence of inlet temperature on the refrigeration effect ($k=3$)

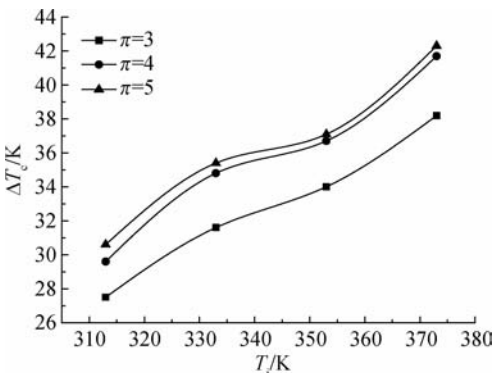


图 14 进气温度对制冷温度效应的影响($k=7$)
Fig. 14 Influence of inlet temperature on the refrigeration effect ($k=7$)

从图 13~图 16 中可以看到,随着进气温度的提高涡流管的制冷、制热温度效应均逐渐提高.如节流阀开度 $k=7$,膨胀比 $\pi=4$ 时,随着进口气流温度 T_i 由 313K 增大到 373K ,制冷温度效应 ΔT_c 从 29.6K 依次增加到 $34.8, 36.7, 41.7\text{K}$,进气温度每增加 20K ,制冷温度效应平均增幅约为 12%,制热温度效应 ΔT_h 从 37.7K 逐渐增加到 $41.7, 44.4, 46.7\text{K}$,进气温度每增加 20K ,制热温

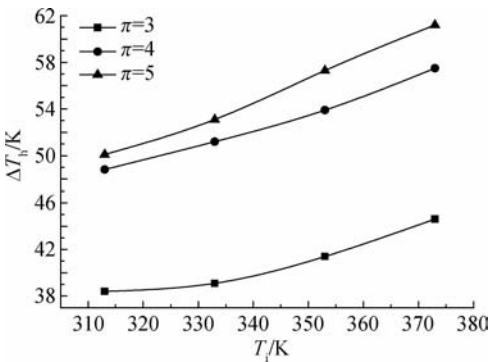


图 15 进气温度对制热温度效应的影响($k=3$)
Fig. 15 Influence of inlet temperature on the heating effect ($k=3$)

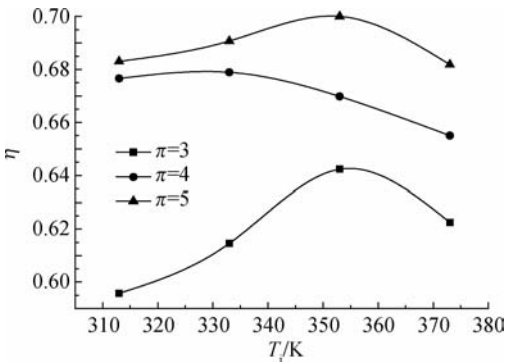


图 17 进气温度对冷流率的影响($k=3$)
Fig. 17 Influence of inlet temperature on the cold flow rate ($k=3$)

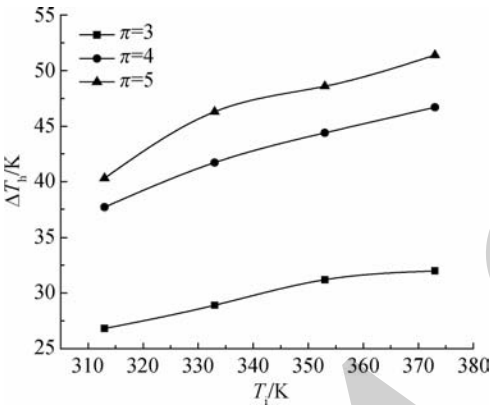


图 16 进气温度对制热温度效应的影响($k=7$)
Fig. 16 Influence of inlet temperature on the heating effect ($k=7$)

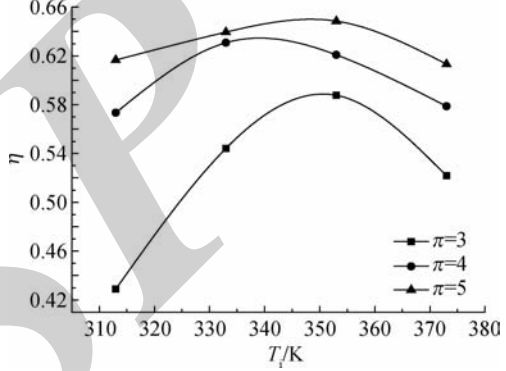


图 18 进气温度对冷流率的影响($k=7$)
Fig. 18 Influence of inlet temperature on the cold flow rate ($k=7$)

度效应平均增幅约为 5%。

依据涡流管能量分离的原理,分析认为制冷温度效应 ΔT_c 随温度升高而增大的现象可能是由于空气焓值、导热系数、运动黏度共同变化而引起的。

当涡流管进气温度升高时,涡流气体焓值增加,流速增大,促进了管内气流能量分离。同时根据自由涡-强制涡理论,气流温度升高、运动黏度增大后,相同速度梯度下内外层气流间的摩擦增强,流层间的动量传递更加剧烈,第 2 种流动中的冷气流也因此失去更多能量。另外温度升高带来的导热系数的变大也将进一步加强内层气流与外层气流的能量传递,在三者的综合作用下,最终表现为涡流管的制冷温度效应 ΔT_c 和制热温度效应 ΔT_h 均随着进气温度的升高而增强。

图 17、图 18 给出了节流阀开度 $k=3,7$ 时冷流率 η 随进气温度 T_i 变化规律。如图所示,冷流率 η 随着进气温度 T_i 的增大先增大后减小。如节流阀开度 $k=7$,膨胀比 $\pi=4$ 时,进口气流温度由

313 K 增大到 373 K,冷流率 η 由 0.57 增大到 0.63 后下降至 0.62,0.58。

这可能是因为随着进气温度的增加,在相同的压力条件下气流密度减小,焓值、导热系数、运动黏度增加,对管内流动特性产生一定影响,其流量分配表现出一种较复杂的变化规律,冷端出口流量变化不大,热端出口流量先减小后增大,最终呈现出冷流率先增大后减小的趋势。

4 结 论

本文针对典型涡流管在不同工况下的制冷情况,通过实验分析的方法研究了涡流管在不同膨胀比 π 、不同节流阀开度 k 和不同进气温度 T_i 下的制冷温度效应、制热温度效应、冷流率变化规律,重点考察了进气温度变化带来的影响。研究结果表明

1) 膨胀比对涡流管性能的影响主要表现在涡流管的制冷温度效应、制热温度效应及冷流率随着膨胀比的变大先增强后趋于稳定,总制冷量 Q_c 随膨胀比 π 增大基本呈线性增长。

2) 节流阀开度 k 对涡流管性能的影响主要表现为涡流管的制冷温度效应 ΔT_c 和总制冷量 Q_c 随着节流阀开度 k 的增大而增大; 制热温度效应 ΔT_h 和冷流率 η 随着节流阀开度 k 增大而减小。

3) 进气温度 T_i 对涡流管性能的影响主要表现为涡流管的制冷温度效应 ΔT_c 和制热温度效应 ΔT_h 和总制冷量 Q_c 均随着进气温度 T_i 的升高而增大, 而冷流率 η 随进气温度 T_i 升高表现出先升高后下降的复杂规律。

参考文献:

- [1] Choi H Z, Lee S W, Jeong H D. A comparison of the cooling effects of compressed cold air and coolant for cylindrical grinding with a CBN wheel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 111(1): 265-268.
- [2] 曹锋, 王凯, 邢子文, 等. 一种带有涡流管的高温热泵系统: 中国, CN101135503[P]. 2008-03-05.
- [3] 王天舒, 丁亮, 王玉军, 等. 一种逆流式多级冷凝热泵热水器: 中国, CN101922800A[P]. 2010-12-22.
- [4] 李清方, 张建. 高含硫化氢天然气涡流管节流阀压缩膨胀分离加热系统: 中国, CN103672408A[P]. 2014-03-26.
- [5] 马廷全. 涡流管能量分离过程的实验研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2002.
MA Tingquan. The experimental study of energy separation in the vortex tube[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2002. (in Chinese)
- [6] Ranque M G. Experiences sur la détente giratoire avec production simultanée d'un échappement d'air chaud et d'air froid[J]. Journal de Physique et Le Radium, 1933, 7(4): 112-114. (in French)
- [7] Hilsch R. The use of the expansion of gases in a centrifugal field as cooling process[J]. Review of Scientific Instruments, 1947, 18(2): 108-113.
- [8] Fulton C D. Ranque's tube[J]. Refrigeration Engineering, 1950, 58(5): 473-479.
- [9] Deissler R G, Perlmutter M. Analysis of the flow and energy separation in a turbulent vortex[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1960, 1(2/3): 173-191.
- [10] Kurosaka M. Acoustic streaming in swirling flow and the Ranque-Hilsch (vortex-tube) effect[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1982, 124: 139-172.
- [11] Gutsol A, Bakken J A. A new vortex method of plasma insulation and explanation of the Ranque effect[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1998, 31(6): 704-711.
- [12] Aljuwayhel N F, Nellis G F, Klein S A. Parametric and internal study of the vortex tube using a CFD model[J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(3): 442-450.
- [13] XUE Yuepeng, Arjomandi M, Kelso R. A critical review of temperature separation in a vortex tube[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2010, 34(8): 1367-1374.
- [14] XUE Yuepeng, Arjomandi M, Kelso R. Experimental study of the thermal separation in a vortex tube[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2013, 46(4): 175-182.
- [15] XUE Yuepeng, Arjomandi M, Kelso R. Experimental study of the flow structure in a counter flow Ranque-Hilsch vortex tube [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2012, 55(21/22): 5853-5860.
- [16] 吕正林. 关于能量逆转及 Ranque-Hilsch 效应的研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2000.
LÜ Zhenglin. The research on energy reverse and Ranque-Hilsch effect[D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2000. (in Chinese)
- [17] Aydin O, Markal B, Avci M. A new vortex generator geometry for a counter-flow Ranque-Hilsch vortex tube[J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30(16): 2505-2511.
- [18] Khazaei H, Teymourash A R. Effects of gas properties and geometrical parameters on performance of a vortex tube[J]. Scientia Iranica, 2012, 19(3): 454-462.
- [19] Pourmahmoud N, Hassanzadeh A, Moutaby O. Numerical analysis of the effect of helical nozzles gap on the cooling capacity of Ranque-Hilsch vortex tube [J]. International Journal of Refrigeration, 2012, 35(5): 1473-1483.
- [20] Avci M. The effects of nozzle aspect ratio and nozzle number on the performance of the Ranque-Hilsch vortex tube [J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 50(1): 302-308.
- [21] Raut S S, Gharge D N, Bhimate C D, et al. An experimental modeling and investigation of change in working parameters on the performance of vortex tube [J]. International Journal of Advanced Mechanical Engineering, 2014, 4(3): 343-348.
- [22] Dutta T, Sinhamahapatra K P, Bandyopadhyay S S. CFD analysis of energy separation in Ranque-Hilsch vortex tube at cryogenic temperature [J]. Journal of Fluids, 2013, 2013: 562027. 1-562027. 14.
- [23] Pourmahmoud N, Rahimi M, Rafiee E, et al. A numerical simulation of the effect of inlet gas temperature on the energy separation in a vortex tube [J]. Journal of Engineering Science and Technology, 2014, 28(1): 821-825.
- [24] 曹勇. 小流量涡流管特性的理论与实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2003.
CAO Yong. The academic and experimental research on features of small flow inlet for a vortex tube[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003. (in Chinese)
- [25] 王征. 涡流管性能及其与制冷系统的耦合特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
WANG Zheng. A study on the coupling performance between the functions of vortex tube and refrigerating system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)