

文章编号: 1671-6612 (2023) 05-699-06

涡流管冷热分离效果影响因素的探究

文 力 李剑桥 靳贵铭 李 浩 张 宇

(西安工程大学 西安 710600)

【摘 要】 涡流管作为一种体积小、结构简单的能量分离装置,可用于制冷和制热。为了探究涡流管冷热分离效果的影响因素以及分离效果最佳的涡流管参数,通过大量实验对相关问题进行了研究,研究结果表明涡流管冷端出口为 3mm-7mm 时,5mm 冷端出口分离效果最好;数量为 6 的收敛型喷嘴比普通型喷嘴分离效果更好;涡流管长径比在 12.5-50 时,长径比为 25 时分离效果最好;不同冷端出口直径情况下,进气压力与分离效果成正比。

【关键词】 涡流管; 分离效果; 最优尺寸

中图分类号 TB6 文献标识码 A

Exploration of Factors Influencing the Effect of Cold and Heat Separation in Vortex Tube

Wen Li Li Jianqiao Jin Guiming Li Hao Zhang Yu

(Xi'an Polytechnic University, Xi'an, 710600)

【Abstract】 The vortex tube is used as a compact and simple energy separation device for cooling and heating. In order to investigate the influencing factors of vortex tube cold and heat separation effect and the vortex tube parameters with the best separation effect, this paper has studied the related problems through a large number of experiments, the research results show that the vortex tube cold end outlet is 3mm-7mm, 5mm cold end outlet separation effect is the best; the number of 6 convergence type nozzle than the ordinary type nozzle separation effect is better; vortex tube length-diameter ratio in 12.5-50, the length-diameter ratio of 25 when the separation effect is the best; different cold end outlet diameter, the inlet pressure and the separation effect are positive. Inlet pressure is proportional to the separation effect.

【Keywords】 vortex tube; separation effect; optimal size

0 引言

随着工业化的不断发展,越来越多的场所对制冷制热需求的提高,造成的污染也越来越高,传统的相变制冷对制冷剂的大量使用造成了臭氧层破坏和全球变暖等环境问题。本文中探讨的涡流管是一种结构简单的制冷装置,与传统相变制冷不同,使用压缩空气作为“制冷剂”。通入压缩空气,就会瞬间分离出一冷一热两股气流。涡流管工作时无需制冷剂,体积小,结构简单,无运动部件,安装方便,维护费用低,没有任何污染,符合双碳目

标。通常应用于小型空间,尤其适用于自带压缩气源的场所。由于其独特的工作特性与优点,国内外研究者对其进行了深入的研究。

国内外研究者对影响涡流管分离效果的因素探究,主要从改变涡流管自身的结构参数与进气参数两大方面对影响涡流管分离效果的因素进行研究。在冷端出口直径对涡流管分离效果的影响探究中,S Eiamsa-ard^[1]进行实验得到冷端直径与热端直径比值 d/D 为 0.5 时分离温差最大。Mohammad A^[2]进行模拟得到 d/D 为 0.58 时具有最佳分离效果;

作者简介:文 力 (1972.12-),女,硕士,副教授,E-mail: 14195507@qq.com

通讯作者:李剑桥 (1998.01-),男,在读硕士研究生,E-mail: 1833566609@qq.com

收稿日期:2023-03-04

在喷嘴数量对涡流管分离效果的影响探究中, Hüseyin K^[3]通过实验得出相同材料喷嘴数量为 6 时比 2 和 4 喷嘴数量分离效果更好。Volkan K^[4]采用 2-6 个喷嘴, 得到喷嘴数等于 2 时得到最佳分离效果; 在热端长度与内径比值 L/D 对涡流管分离效果的影响探究中, Upendra B^[5]得到长径比 L/D 在 10 的情况下制热效果最好, 长径比 L/D 在 30 的情况下制冷效果最好。Mohammad O Hamdan^[6]通过实验表明在直径为 16mm 即长径比为 7 时涡流管具有最佳分离效果。在进气压力对涡流管分离效果的影响探究中, Ismail C^[7]通过实验得到进气压力对其分离效果是成正比的。

涡流管不同结构参数与进气参数都对涡流管有着不同的影响。从众多学者的研究结果可以看出, 不同研究者在相同影响因素的研究往往会得到不同的结论。本文将从以上几个影响因素入手, 并进一步通过相应的实验得出结论, 为本实验配置分离效果最优的涡流管结构参数。

1 涡流管的结构及工作机理

涡流管按照基本结构分为两种: 顺流式和逆流式。研究表明, 顺流式涡流管的效率远远低于逆流式涡流管。因此绝大部分情况下都采用逆流式涡流管, 如图 1^[8]所示。

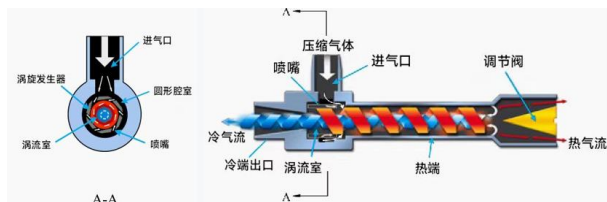


图1 逆流式涡流管结构图

Fig.1 Structure diagram of the countercurrent vortex tube

涡流管的结构主要由进气口、喷嘴、涡流室、冷端、热端、调节阀 6 部分组成。工作时压缩气体由进气口进入, 经过喷嘴膨胀加速后沿切线方向进入涡流室, 随即分离成内冷外热的两股涡旋气流, 冷气流从左端排出, 热气流从右端排出。通过热端调节阀可以调节冷热气流大小与温度。

尽管涡流管结构简单, 但是其工作机理十分复杂, 目前大多数人所认可的涡流管的工作机理是: 涡流管工作时, 压缩气体通过进气口进入涡流管, 经过喷嘴产生涡旋, 并沿切线方向进入涡流管, 形成高速

旋转的涡流, 涡流沿管壁向热端运动, 通过热端调节阀释放出涡流外层的气流, 内层涡流由于热端调节阀的阻碍向回运动。由于角动量守恒, 内层涡流的角速度会高于外侧涡流的角速度, 内外层涡流产生相互运动, 在摩擦力作用下内层减速外层加速, 其内层损失了部分动能, 温度下降, 外层吸收了内部能量, 温度上升^[9]。压缩气体经过涡流管分离后, 最终分离为冷热两股气流, 分别从冷热端排出。

2 实验装置与实验方法

2.1 实验所用涡流管

本文实验所用逆流式涡流管包括以下结构: 进气口、喷嘴、涡流室、冷端出口、热端管和热端调节阀, 如图 2 所示。表 1 总结了实验用涡流管的主要结构参数。为了研究不同参数对涡流管分离性能的影响, 本文选取冷出口直径、喷嘴、长径比、进气压力这四个影响因素进行相应的实验并为实验用涡流管配置最优参数。

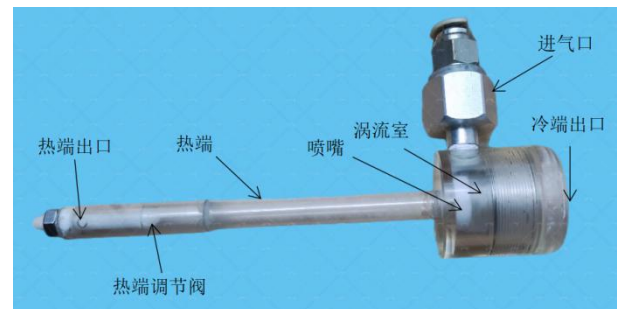


图2 实验用逆流式涡流管

Fig.2 Experimental countercurrent vortex tube

2.2 实验过程与实验装置

本实验过程如图 3 所示。实验在室温下进行, 实验采用的压缩气体来自于空压机的高压空气。气体首先进入蓄压罐, 以降低压力波动。然后通过干燥过滤器, 去除气体中的水分, 以保证干燥气体用于涡流管实验测试。经过压力调节表得到需要的压力, 高压气体进入涡流管。在涡流管内进行冷热分离后, 用测温仪测得冷热端出口气流温度。由于冷热出口小、气流速度快, 在出口形成射流, 当流入静止环境中时, 它与周围静止空气之间存在速度不等的间断面, 间断面一般受到不可避免的干扰, 失去稳定而产生涡旋, 卷吸周围流体进入射流, 从而使得冷端流体温度升高。为了测得较为准确的数据, 实验测点分别布置在冷热端出口处。

表 1 实验用涡流管几何参数

Table 1 Geometric parameters of the experimental vortex tube

参数	尺寸	单位
热端直径	8	mm
热端长度	100—400 (增量 50)	mm
冷出口直径	3、4、5、6、7	mm
喷嘴数量	6、10	/
进气口直径	11	mm

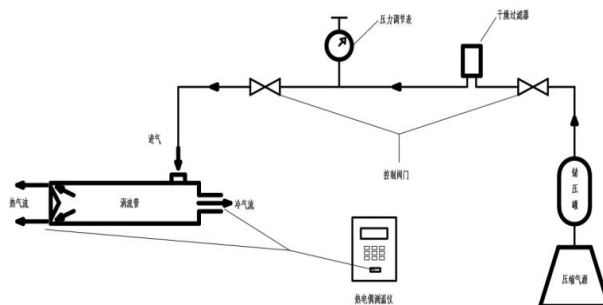


图 3 实验设备与实验流程示意图

Fig.3 Schematic diagram of experimental equipment and experimental flow

表 2 实验设备与仪器参数

Table 2 Experimental equipment and instrument parameters

编号	设备仪器	型号	参数	精度
1	空压机	FL600-9L	排气量: 600L/min 压力: max0.8MPa	/
2	储气罐	LD150611A1-0393	储气量: 300L 设计压力: 0.84MPa	/
3	干燥过滤器	BLCH-AL4000-4	压力: 0-1.0MPa	/
4	压力调节表	GPR40015H	压力可调: 0-0.8MPa	±0.5%
5	热电偶测温仪	Tes-1310	测温范围: -50℃-1000℃	±0.3%

2.3 冷端出口直径

冷端出口直径通常小于热端直径,在涡流管冷热分离过程中,用于排出涡流中心的低温气流。冷端出口直径对涡流管分离效果有着非常重要的影响。

为了对本实验涡流管匹配最优的冷端出口,原

冷端出口直径为 6mm, 本文采用了 3mm、4mm、5mm、6mm、7mm 的冷端出口, 如图 4 所示。实验中采用的涡流管热端内径为 8mm, 喷嘴数量为 10, 进气压力为 0.4MPa, 室温为 17.6℃, 分别对冷热端温度进行记录, 得到结果如图 5 所示。

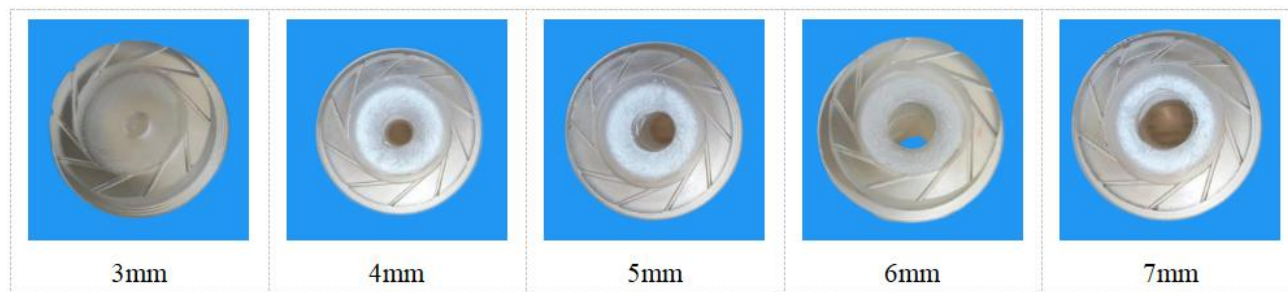


图 4 不同冷端出口的喷嘴 (从左到右依次 3mm-7mm)

Fig.4 Nozzle at the cold end outlet (3mm-7mm from left to right)

实验结果表明,采用 5mm 直径的冷端出口时,冷热端温差最大,此时涡流管分离效果最好,此时冷端内径与热端内径比值为 $d/D=0.625$,冷端直径由 3mm 减增加到 5mm 时,冷热端温差增大。冷端直径由 5mm 增加到 7mm 时,冷热端温差减小。将原 6mm 冷端出口换为 5mm 后冷热分离冷热温差提

升约 46.1%。涡流管在较小的冷端出口下,其压力损失越大,分离效果变差;在较大的冷端出口下,又会使涡流外围的热气流混入冷端导致冷端温度升高,分离效果变差。

2.4 喷嘴 (涡旋发生器)

喷嘴是气流进入涡流室前使气流旋转切入涡

流室的结构,它的参数性能直接影响涡流的产生以及后续的分​​离效果。

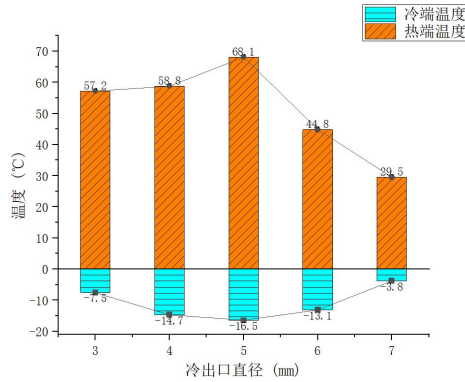


图 5 不同冷端出口直径对冷端温度的影响

Fig.5 Effect of different cold end outlet diameter on cold end temperature

Hüseyin Kaya 等人的实验的结论仅限于 2、4、6 个喷嘴的分离效果对比,本文进一步增加喷嘴数量对涡流管分离效果的影响,在喷嘴数量高于 6 时对涡流管分离效果的影响进行了进一步的实验。本实验分别选用了数量为 6 个和 10 个的喷嘴,材料为有机玻璃,冷端出口为 6mm,如图 6 所示。在压力为 0.4MPa 时,室内温度为 14.2°C、14.8°C、15.4°C 时测得不同喷嘴冷热端温度,结果如图 7 所示。



图 6 喷嘴数量 6 (左) 喷嘴数量 10 (右)

Fig.6 number of nozzle 6 (left) number of nozzle 10 (right)

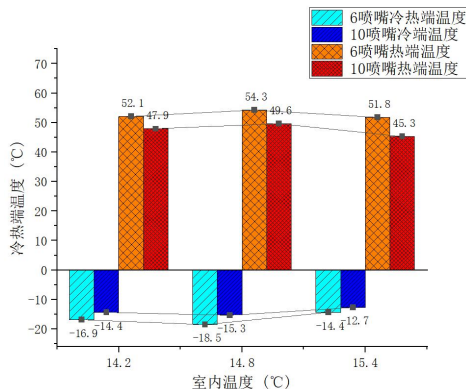


图 7 不同室温下 10 喷嘴与 6 喷嘴冷热端温度

Fig.7 10 nozzles and 6 nozzles at different room temperatures

结果表明在不同室温下,6 喷嘴冷热分离温差都高于 10 喷嘴,6 喷嘴分离效果更好,喷嘴数量由 6 增加到 10。涡流管的分离性能反而下降。6 喷嘴分离温差高于 10 喷嘴约 12.3%。

Mohammad Ameri 等人得出 1 个收敛型喷嘴分离效果最好的结论。本实验采用了 6 个数量的普通喷嘴与收敛型喷嘴,进一步得出其他数量的收敛型喷嘴分离效果是否优于普通型喷嘴,实验所用喷嘴如图 8 所示,冷端出口尺寸为 6mm,在进气压力为 0.4MPa,室内温度为 14.2°C、14.8°C、15.4°C 时测得不同喷嘴冷热端温度,结果如图 9 所示。



图 8 普通型喷嘴 (左) 收敛型喷嘴 (右)

Fig.8 General nozzle (left) Convergent nozzle (right)

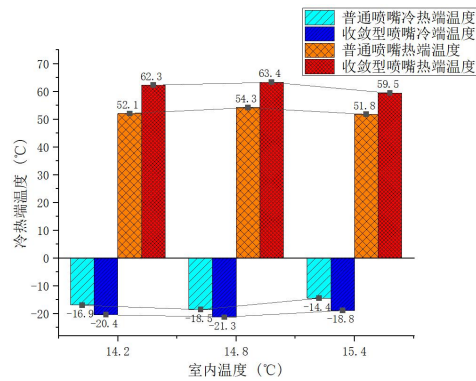


图 9 不同室温下 6 普通型喷嘴与 6 渐缩型喷嘴冷热端温度

Fig.9 Hot and cold end temperature of 6 ordinary nozzle and 6 shrinking nozzles at different room temperature

结果表明在喷嘴数量为 6 时,不同室温下收敛型喷嘴冷热分离温差都高于普通型喷嘴,相较于普通型喷嘴收敛型喷嘴具有更好的分离效果。且收敛型喷嘴分离温差高于普通喷嘴约 18.1%。在相同进气压力下采用收敛型喷嘴会使得出口气流具有更高的速度,进而影响涡流的产生与涡流管的分离效果。

2.5 长径比

作为涡流管较长的热端也对涡流管的分离效果有相当大的影响,涡流管的长径比指涡流管热端长度与热端内径的比值,如图 10 所示。

为了对实验所使用涡流管匹配最优的长径比,

首先对涡流管热端长径比进行多组的分组实验, 探究长径比对涡流管冷热分离效果的影响, 本实验采用热端内径为 8mm, 如图 10 所示, 通过改变涡流管长度从而改变长径比, 并进行了多组的实验, 改变热端长度为 100mm-400mm(长径比为 12.5-50)。室温为 20.5℃, 进气压力 0.4MPa 时, 测得涡流管冷热端温度, 得到结果如图 11 所示。

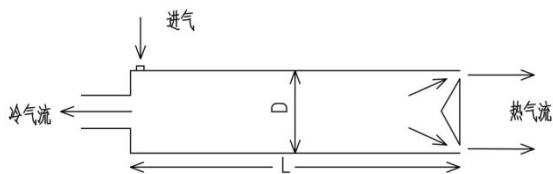


图 10 涡流管长径比示意图

Fig.10 Schematic diagram of the aspect ratio of the vortex pipe

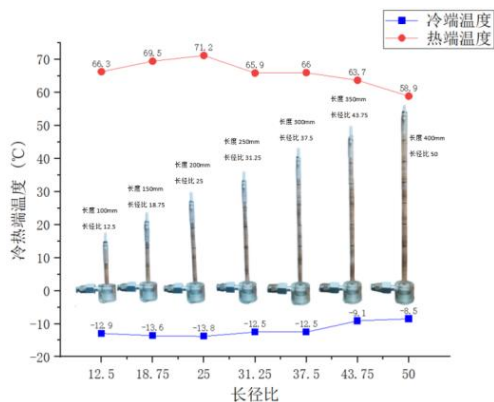


图 11 不同长径比的涡流管与冷热端温度

Fig.11 vortex tube with different L/D ratio and hot and cold end temperatur

结果表明在进气压力不变的情况下, 在管长为 200mm 时, 即长径比 L/D 为 25 时, 冷热端达到最大温差 85℃, 长度在 100-200mm (L/D 在 12.5-25) 之间随着管长增加冷端温差增大。长度在 200-400mm (L/D 在 25-50) 之间随着管长增加, 冷热端温差减小。过短的热端长度会使冷热分离不够充分, 导致分离效果变差; 过长的热端又会产生较大的阻力, 导致分离效果变差。长径比对涡流管分离性能的影响为先上升后下降的趋势。

2.6 进气压力

涡流管自身结构决定着其分离效果的好坏, 其进气的参数对分离效果也有一定的影响。

本文探究在不同冷端出口直径下进气压力对涡流管分离效果的影响, 实验选取冷端直径为

3mm-7mm, 喷嘴数量为 6 个, 室温为 14.5℃, 进气压力为 300kPa-800kPa 时测得冷热端温度, 如图 12、13 所示。

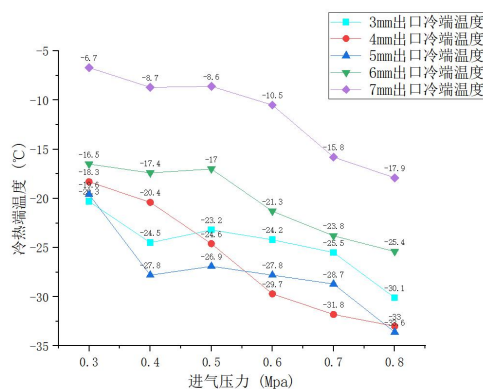


图 12 进气压力对冷端出口温度的影响

Fig.12 Effect of inlet pressure on outlet temperature of cold end

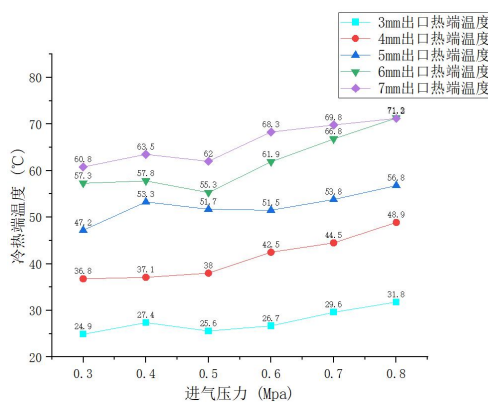


图 13 进气压力对热端出口温度的影响

Fig.13 Effect of inlet pressure on hot end outlet temperature

结果表明不同冷端出口尺寸下, 得到的冷热最低温度与热端最高温度压力均为 0.8MPa (800kPa), 由此可见进气压力对不同冷端出口直径的涡流管分离效果是成正比的, 随着压力增加冷热端温差越大, 分离效果越好。压力越大其通过喷嘴的气流速度就越快, 进而影响涡流的产生与涡流管的分离效果。

3 小结

在本文实验对涡流管分离效果影响因素的实验探究后, 为本实验涡流管优化结构参数得到以下结论:

- (1) 结构参数对涡流管分离效果的影响。冷

端出口直径为 3-7mm 时, 5mm 冷出口直径分离效果最好, 冷热端直径比值 (d/D) 为 0.625; 不同喷嘴数量的收敛型喷嘴相较于普通型喷嘴具有更好的分离效果。喷嘴数由 6 增加到 10, 涡流管的分离性能反而下降; 涡流管在热端管长为 200mm (长径比为 25) 时得到最大分离温差, 长径比对涡流管分离性能的影响是先上升后下降的趋势。

(2) 进气压力对涡流管分离效果的影响。不同冷端出尺寸下进气压力对分离效果的影响, 其分离效果与进气压力成正比。压力越大涡流管的分离效果越好。

本文只对涡流管影响涡流管分离效果的部分结构参数进行了实验探究, 得到相应的结论, 并为本实验所设计的涡流管配置最优的结构参数, 在下一步的研究中还应考虑更多的影响因素进行更加深入地研究。

参考文献:

- [1] S Eiamsa-ard. Experimental investigation of energy separation in a counter-flow Ranque-Hilsch vortex tube with multiple inlet snail entries[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2010, 37(6):637-643.
- [2] Mohammad A, Behrooz B. The study of key design parameters effects on the vortex tube performance[J]. Journal of Thermal Science, 2009,18(4):370-376.
- [3] Hüseyin K, Fahrettin G, Volkan K. Experimental investigation of thermal performance of parallel connected vortex tubes with various nozzle materials[J]. Applied Thermal Engineering, 2018,136:287-292.
- [4] Volkan K. Exergy analysis and performance of a counter flow Ranque-Hilsch vortex tube having various nozzle numbers at different inlet pressures of oxygen and air[J]. International Journal of Refrigeration, 2009,32(7):1626-1633.
- [5] Upendra B, PJ Paul, S Kasthuriangan, et al. CFD analysis and experimental investigations towards optimizing the parameters of Ranque-Hilsch vortex tube[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005,48(10):1961-1973.
- [6] Mohammad O Hamdan, Salah-AB Al-Omari, Ali S Oweimer. Experimental study of vortex tube energy separation under different tube design[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2018,91:306-311.
- [7] Ismail C, Volkan K, Umit T. The effects of orifice nozzle number and nozzle made of polyamide plastic and aluminum with different inlet pressures on heating and cooling performance of counter flow Ranque-Hilsch vortex tubes: An experimental investigation[J]. International Journal of Refrigeration, 2016,72:140-146.
- [8] Fachun L, Guoxiang T, Changyi Xu, et al. Experimental investigation on improving the energy separation efficiency of vortex tube by optimizing the structure of vortex generator[J]. Applied Thermal Engineering, 2021, 195:117222.
- [9] 沈杰,席旺.涡流管的原理及在天然气领域的应用[J].煤气与热力,2011,31(2):37-38,42.