

文章编号: 1671-6612 (2025) 01-074-08

实验箱内采用涡流管降温的研究

张宇 文力 靳贵铭 李剑桥 李浩

(西安工程大学 西安 710600)

【摘要】 涡流管作为一种无运动部件的制冷制热装置,结构简单、制冷较快且无污染。采用多个涡流管(编号为 1、2、3、4 号),通过调节其热端调节阀来改变其冷热端出气量,测定其两端各自的温度及流量,计算出其冷量。并采用冷量较大的涡流管(2 号和 4 号)来进行降温实验,得出涡流管的具体降温数据。以此为基础,在实验箱内采用 2 号和 4 号涡流管送冷风方式,来测得不同情况下的实验箱内不同位置的温度,从而得出双涡流管在同向近距离吹风为较好的降温方式,可将实验箱内温度将至 27℃ 左右;且降温效果跟压缩气体压力存在一定关系,在压缩气源 0.5MPa 时效果较好;实验箱内在靠近气源处温度较低,为 26℃ 左右。

【关键词】 涡流管;热端调节阀;出气量;降温实验;实验箱

中图分类号 TB6 文献标志码 A

Research on Using Vortex Tube for Cooling inside the Experimental Chamber

Zhang Yu Wen Li Jin Guiming Li Jianqiao Li Hao

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

【Abstract】 As a refrigeration and heating device without moving parts, vortex tube has simple structure, rapid refrigeration and no pollution. In this paper, a number of vortex tubes (No.1, No.2, No.3 and No.4) will be used, and the air output at the cold and hot ends will be changed by adjusting the regulating valves at their hot ends, and the respective temperatures and flow rates at both ends will be measured to calculate their cooling capacity. The vortex tubes (No.2 and No.4) with large cooling capacity are used to carry out the cooling experiment, and the specific cooling data of the vortex tubes are obtained. On this basis, the temperature of different positions in the experimental box was measured by using the methods of No.2 and No.4 vortex tubes to send cold air in the experimental box, and it was concluded that the double vortex tubes blowing air in the same direction at short distance was a better cooling method, which could bring the temperature in the experimental box to about 27°C. And the cooling effect has a certain relationship with the pressure of compressed gas, and the effect is better when the compressed gas source is 0.5MPa; The temperature in the experimental box near the air source is low, about 26°C.

【Keywords】 Vortex tube; Hot end regulating valve; Gas output; Cooling experiment; Experimental box

0 引言

涡流管具有无运动部件、无制冷剂、结构简单、维护量小等优点。这些优点使涡流管用于广泛的工业成为可能。目前利用涡流管的冷流多用于冷却、

蒸发、混合物分离甚至海水淡化。

近年来,国内外学者对能量分离过程、加热和冷却效应进行了不同程度的数值模拟和实验研究。Xue 和 Arjomandi^[1]对涡流管中的能量分离进行了

作者简介:张宇(1999.05-),男,在读硕士研究生,E-mail: 221421016@stu.xpu.edu.cn

通讯作者:文力(1972.12-),女,硕士,副教授,E-mail: 1995071@xpu.edu.cn

收稿日期:2024-07-05

全面的综述,研究了用于分析涡流管性能的重要参数,例如压力和温度梯度、粘度和流动结构。RM^[2]等人通过实验得出,关于不同工质进口压力下喷嘴数目对涡流管能量分离能力的影响。Saidi^[3]和Valipour^[4]基于喷嘴型面类型和喷嘴数量对热分离进行的实验研究证实,长径比在 20-55.5 范围内可实现最高的热分离。Valipour^[4]和 Niazi^[4]、Bovand^[5]等人进行的实验和数值研究表明涡流速度和涡流管中的扩散随着曲率的增大而减慢。对曲率角的研究得出,直涡流管和 150°弯曲涡流管的制冷性能优于其它曲率角的涡流管。

申江^[6]等人研究发现当进口压力为 0.3~0.5MPa 时,最佳冷热端管径比为 0.5。何曙^[7]等研究了喷嘴数量为 3~8 的涡流管性能,喷嘴个数为 4 时有最佳的制冷、制热效应。何丽娟^[8]等发现,相比直线型喷嘴和阿基米德型喷嘴,渐缩型喷嘴能量分离效果最佳。王远鹏^[9]等人研究发现,进口压力越高,喷嘴个数为 6 的涡流管制冷、制热效应越好。

可见,虽然涡流管结构简单无制冷制,但其使用受外界条件以及自身构造等因素影响,所以本文基于众多学者对涡流管影响因素的实验结果,将选取理论上最佳分离效果的涡流管进行实验,通过改变热端控制阀来改变两端出气量,测量不同温度下的流量,计算出不同温度下的涡流管制冷量。

1 涡流管的结构及工作原理

逆流式涡流管由涡流室、喷嘴、冷热端管、冷端孔板、热端控制阀 6 个部分构成。其结构和过程如图 1 所示。

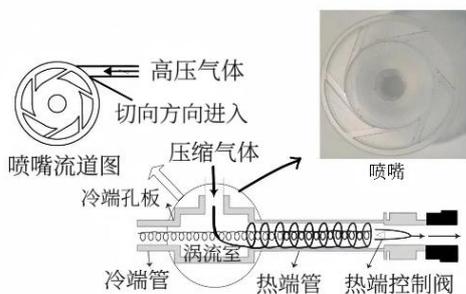


图 1 逆流式涡流管结构图

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。

2 实验装置与实验过程

2.1 实验所用涡流管

本次涡流管实验将采用渐缩式六喷嘴、热端管长径比为 16 的涡流管进行实验,使用稳压阀将实验入口压力稳定为 0.5MPa,外界温度在 27°C 情况下进行实验。

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 为实验用涡流管的主要结构参数。此尺寸涡流管可以应用于一种井下矿用空调服^[10],涡流管空调服的应用能够有效改善高温对于生产作业人员造成的影响,提高煤矿生产作业的效率。表 2 为实验设备与仪器参数罗列说明。



图 2 实验用逆流式涡流管

Fig.2 Experimental counterflow vortex tube

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 | 6 | mm |
| 热端长度 | 96 | mm |
| 冷出口直径 | 6 | mm |
| 喷嘴数量 | 6 | — |
| 进气口直径 | 10 | mm |

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 | 数字温控仪 | XH-W1209 | 测温范围: -50℃~110℃ | ±0.3% |
| 6 | 流量计 | 气体流量计 | 测量范围: 10~100L/min | 5% |

2.2 实验流程

涡流管性能实验系统如图 3 所示。显示了用于测量压力、温度和流速的重要仪器的位置。压缩空气由压缩机通过压力调节表提供。空气过滤器安装在压力调节表的上游，以过滤空气并将下游压力保持在 5bar (0.5MPa)。在测量热空气温度的同时，在冷端处测量冷空气温度。测定温度后将涡流管冷端出口和热端出口分别接到流量计上测得其各自流量，然后调节热端控制阀改变冷端出口温度进一步测定其不同温度下的冷端流量和热端流量。所有的测量数据都是通过与涡流管系统相结合的数据采集器来采集的。由于冷热出口小、气流速度快，在出口形成射流，当流体进入静止环境中时，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，会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。

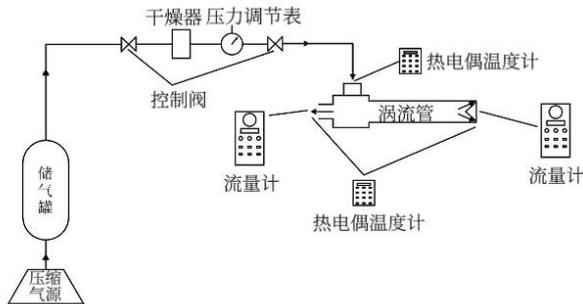


图 3 实验设备与实验流程示意图

Fig.3 Schematic diagram of experimental equipment and experimental flow

2.3 实验目标参数

本实验通过调节热端控制阀改变热端出气温度及出气量，从而控制冷端质量流量，实验目标参数如式 (1) 一式 (3) 所示^[11]。

涡流管制冷温度效应 ΔT_c ，定义为涡流管进口流体温度与冷端出口流体温度差。

$$\Delta T_c = T_{in} - T_c \tag{1}$$

式中: T_{in} 为涡流管进口流体温度, °C; T_c 为冷端出口气流温度, °C。

涡流管制冷量 Q_c :

$$Q_c = m_c c_p (T_{in} - T_c) \tag{2}$$

式中: m_c 为冷端出口气流质量流量, kg/s; c_p 为冷端气体比热容, kJ/(kg·K)。

涡流管单位制冷量 q :

$$q = \frac{Q_c}{m_{in}} \tag{3}$$

式中: m_{in} 为入口气流质量流量, kg/s。

2.4 实验数据及结果分析

表 3 显示了编号 1 号、2 号、3 号和 4 号共 4 个涡流管在室外温度为 27.2℃, 压力为 0.5MPa, 喷嘴数为 6, 长径比为 16 的条件下, 四个涡流管在不同冷端温度下的制冷效应从高到低依次排序。从表 3 中可以清楚的看出 2 号涡流管的制冷效应最佳为 42.3℃; 4 号涡流管的制冷效果仅次于 2 号涡流管, 最佳降温效益为 41.4℃。由于是自加工的涡流管共四个, 依次编号为 1、2、3、4 号。一般情况下, 制冷效应随着冷端温度降低而增大, 冷端温度可以通过调节热端调节阀来改变。

表 3 涡流管制冷效应汇总

Table 3 Summary of vortex tube cooling effects

| 涡流管 编号 | 冷端温度 /°C | 冷端气量 / (L/min) | 制冷效应 /°C |
|-----------|-------------|-------------------|-------------|
| 2 | -15.1 | 46.33 | 42.3 |
| 4 | -14.2 | 54.61 | 41.4 |
| 2 | -11.5 | 50.55 | 38.7 |
| 1 | -11.1 | 43.44 | 38.3 |
| 4 | -9.5 | 64.15 | 36.7 |
| 3 | -8.3 | 41.19 | 35.5 |
| 1 | -7.5 | 49.64 | 34.7 |
| 2 | -7.2 | 69.50 | 34.4 |
| 1 | -4.2 | 69.50 | 31.4 |
| 4 | -4.2 | 69.50 | 31.4 |
| 3 | -3.5 | 69.50 | 30.7 |
| 3 | 0 | 69.50 | 27.2 |

表 4 显示了 4 个涡流管 (1 号、2 号、3 号、4 号) 在室外温度为 27.2°C, 压力为 0.5MPa, 喷嘴数为 6, 长径比为 16 的条件下, 四个涡流管在不同冷端温度下的制冷量。在调节热端调节阀来改变冷端温度的同时, 冷端出气量也随之改变, 制冷效应越好冷端出气量就会越低。从表 4 可以看出 2 号涡流管的制冷量最佳为 185.43W; 4 号涡流管的最佳制冷量为 182.65W。

表 4 涡流管不同温度下冷量数据

Table 4 Cooling capacity data of vortex tube at different temperatures

| 涡流管 编号 | 冷端温度 /°C | 冷端气量 / (L/min) | 制冷量 /W |
|-----------|-------------|-------------------|-----------|
| 2 | -7.2 | 69.50 | 185.43 |
| 4 | -9.5 | 64.15 | 182.65 |
| 4 | -14.2 | 54.61 | 175.43 |
| 1 | -4.2 | 69.50 | 169.21 |
| 4 | -4.2 | 69.50 | 169.21 |
| 3 | -3.5 | 69.50 | 165.43 |
| 2 | -15.1 | 46.33 | 152.09 |
| 2 | -11.5 | 50.55 | 151.77 |
| 3 | 0 | 69.50 | 146.51 |
| 1 | -7.5 | 49.64 | 133.61 |
| 1 | -11.1 | 43.44 | 129.07 |
| 3 | -8.3 | 41.19 | 113.41 |

表 5 显示了四个涡流管 (1 号、2 号、3 号、4 号) 在室外温度为 27.2°C, 压力为 0.5MPa, 喷嘴

数为 6, 长径比为 16 的条件下, 四个涡流管在不同冷端温度下的单位制冷量。如数据所示单位制冷量最佳的涡流管依旧是 2 号涡流管, 其次是 4 号涡流管。

表 5 涡流管单位制冷量汇总

Table 5 Summary of unit cooling capacity of vortex tube

| 涡流管 编号 | 冷端温 度/°C | 冷端气量 / (L/min) | 单位制冷量 / (W/kg) |
|-----------|-------------|-------------------|-------------------|
| 2 | -7.2 | 69.50 | 60.73 |
| 4 | -9.5 | 64.15 | 59.82 |
| 4 | -14.2 | 54.61 | 57.45 |
| 1 | -4.2 | 69.50 | 55.42 |
| 4 | -4.2 | 69.50 | 55.42 |
| 3 | -3.5 | 69.50 | 54.18 |
| 2 | -15.1 | 46.33 | 49.81 |
| 2 | -11.5 | 50.55 | 49.70 |
| 3 | 0 | 69.50 | 47.98 |
| 1 | -7.5 | 49.64 | 43.76 |
| 1 | -11.1 | 43.44 | 42.27 |
| 3 | -8.3 | 41.19 | 37.14 |

综合上述, 各涡流管降温效能不一, 考虑到是针对热源的降温实验, 所以仅考虑制冷量即可, 在此基础上我们选择制冷量较为优秀的 2 号和 4 号涡流管进行下一步实验。

3 实验箱内降温效果测试

本试验在 19°C 的恒定环境温度下进行, 探究涡流管在实际情况下的降温效果, 考虑到现实生活中存在类似于电脑机箱等中心热源散热需求, 探究在中心热源情况下的试验箱散热情况, 为采用近距离使用涡流管吹冷风的方式; 在四周面板的中心位置处布置探头测量温度, 由于中心热源为面热源, 所以选择从前后两个方向使用涡流管正对热源吹入冷风。

通过采用单/双涡流管在中心距热源较近/远位置直/侧吹热源; 在空间内存在等温面以及考虑类似于 CPU 等仅需考虑自身温度满足最佳运行状态等情况下, 选择在临近热源位处布置四周中心多个位置测点 (测温点 1、2、3、4), 前后两个温度测点 (测温点 1、2) 测量温度取平均值, 左右两个温度测点 (测温点 3、4) 测量取平均值。通过将温度探点深入实验箱内部测定在中心位置及侧

部较远位置等多温度测点（测温点 1、2、3、4）取均值，搭建实验平台如图 4、图 5 所示。

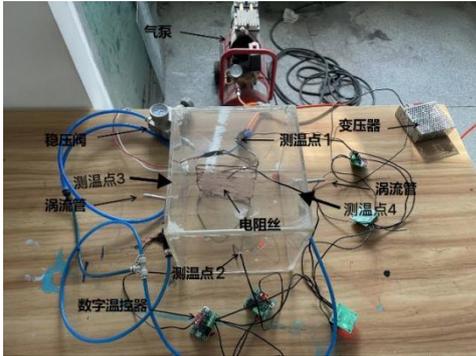
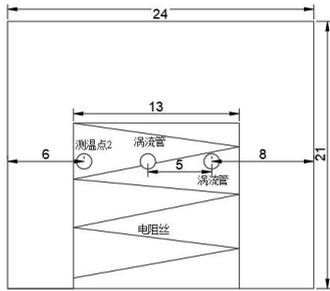
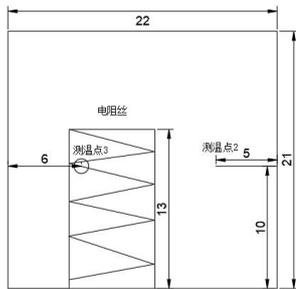


图 4 实验机箱实物图

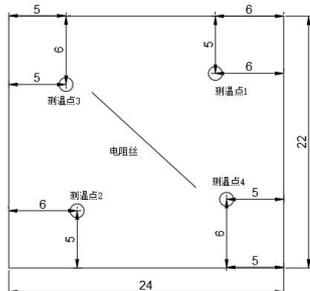
Fig.4 Physical diagram of the experimental chassis



(a) 前视图



(b) 侧视图



(c) 俯视图

图 5 实验箱尺寸布置图

Fig.5 Chassis size layout

3.1 涡流管对电阻丝降温实验

选择在空机箱内加装 50W 电阻丝，测得室温为 27.2℃。测定在自然情况下其每分钟升温情况记录数据如图 6 所示。

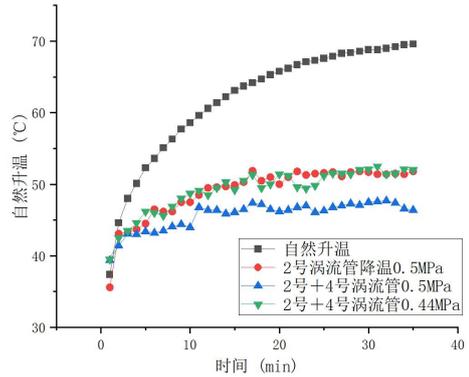


图 6 涡流管对电阻丝降温汇总图二

Fig.6 Summary of eddy current tube cooling of resistance wire Figure two

研究表明：50W 的电阻丝在通电的情况下，热量积累温度上升，由于空气对流导热以及热辐射等自然散热情况，最后机箱内部温度趋于稳定在 70℃左右。

在相同的外界情况下，选用 2 号涡流管调节其热端调节阀至其最佳冷量情况，涡流管接入 0.5MPa 的压缩气源，将冷端对实验箱内部吹入冷气，记录实验箱内温度数值，最后温度稳定在 52℃左右。

在使用一个涡流管对机箱内部进行散热实验后，进而使用 2 号涡流管和 4 号涡流管双涡流管同时对机箱进行内部吹入冷气散热，且调节两个涡流管热端调节阀至其各自最佳冷量，同时打开电阻丝开关并通入气源，稳定压缩气源压力在 0.5MPa，每分钟记录一次机箱内部温度数据。

为了探究压力对涡流管降温情况的影响，在不改变外界条件的情况下，调整压缩气源通入涡流管的压力值为 0.44MPa，重复前几次实验的步骤，数据如图 6 所示，从图中可以看出在改变压力后涡流管的降温效果出现了明显的下降，压力降低后的双涡流管降温效果与单个涡流管在 0.5MPa 压力下的降温效果相似，可见在一定程度上的压缩气源压力改变可以对涡流管的降温效果有着很大的影响。

3.2 涡流管对发热灯泡降温实验

为避免实验偶然性，进一步使用涡流管进行降

温实验, 将发热源改为发热量 40W 的电灯泡, 采取跟上述实验相同的实验步骤来进一步测试涡流管降温效果。

记录自然情况下的灯泡发热导致实验箱内温度数值如图 7 所示, 实验箱内最终温度稳定在 44℃ 附近。重复上述实验步骤, 接入 2 号涡流管, 在实验箱前部通入冷气, 记录实验期间实验箱内的温度数值。进一步使用 2 号和 4 号涡流管对实验箱进行散热, 记录数据如图 7 所示。由图所示, 双涡流管取得更好的降温效果, 实验箱内温度可降至 25℃。

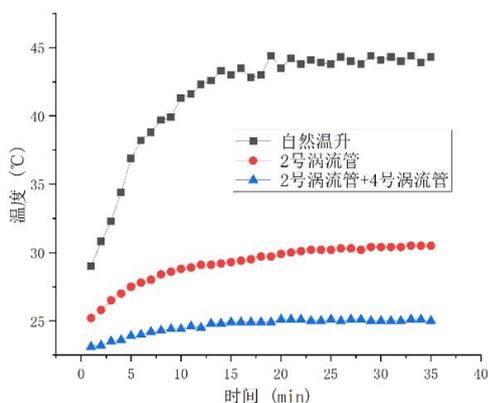


图 7 2 号涡流管+4 号涡流管正吹灯泡降温图

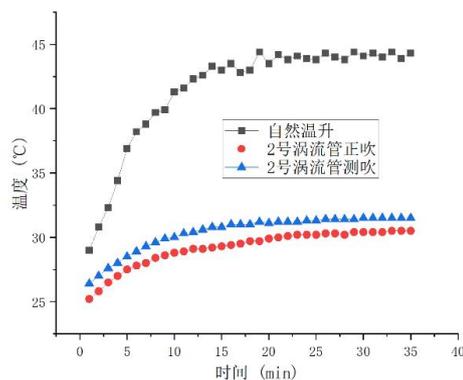
Fig.7 Cooling diagram of No.2 eddy current tube and No.4 eddy current positive blowing bulb

3.3 涡流管对实验箱变位置吹冷风实验

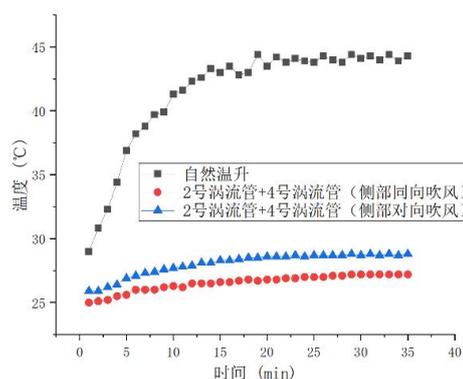
在结束上述实验后, 考虑到冷气吹入位置不同, 冷端出口到热端灯泡距离改变, 降温效果或许会发生改变。因此改变不同位置吹入冷风对实验箱内热源灯泡吹入冷气, 记录实验箱内部温度变化如图 8 所示。

图 8 (a) 为 2 号涡流管在前部正吹 (15cm) 和侧吹 (7cm) 热源灯泡温度图, 在进行测定不同位置的冷端出口对实验箱内热源灯泡降温参数变化, 保证测温点位置不变。由图所示在单个涡流管进行降温实验时, 侧吹的降温效果要优于正吹, 可见冷端出口与热源灯泡距离在 7cm 时具有更好的降温效果。

图 8 (b) 为 2 号涡流管和 4 号涡流管在侧部同向正吹 (7cm) 和侧部对向正吹 (7cm) 热源灯泡温度图, 考虑到实验箱内部气流组织因素, 降温效果变差。



(a) 2 号涡流管



(b) 2 号涡流管+4 号涡流管

图 8 涡流管吹入位置改变箱内部温度图

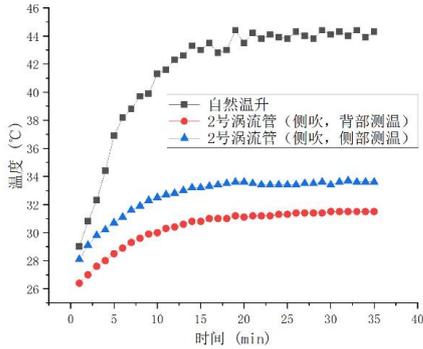
Fig.8 Temperature map inside the box after changing the blowing position of the vortex tube

3.4 实验箱内变测温点

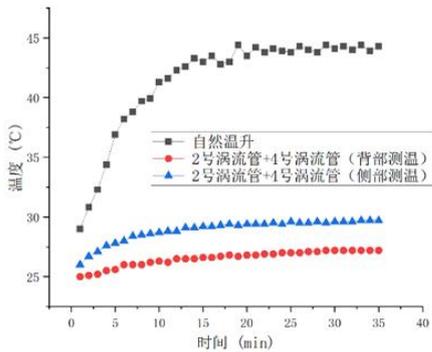
考虑实验箱气流扰动的存在, 空间内部不同位置温度不同, 所以固定的某一测点不能全面的展示整个实验箱内温度布局, 所以对测温点位置改变来进行更进一步的实验, 将不同位置的测温点数据记录如图 9 所示。

由图 9 (a) 和 (b) 所示, 为单涡流管 2 号涡流管和双涡流管 2 号和 4 号涡流管在侧吹时, 从原本的背部测温点 (测温点 1) 更换位置到侧部测温 (测温点 3), 可见相较于侧部测温点, 背部测温点温度更低。由图 9 (d) 所示, 为 2 号和 4 号涡流管在背吹时, 从原本的背部测温点更换位置到侧部测温, 可见, 相较于背部测温点, 侧部测温点温度更低。

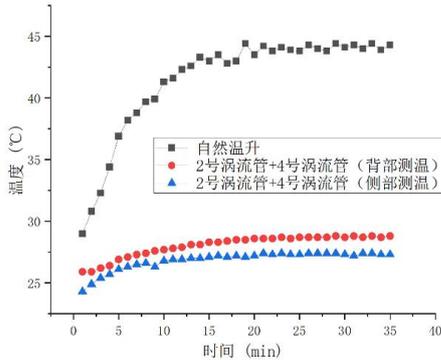
由图 9 (c) 所示, 为 2 号和 4 号涡流管在侧部对吹时, 从原本的背部测温点 (测温点 1) 更换位置到侧部测温 (测温点 3), 可见, 相较于背部测温点, 侧部测温点温度更低。



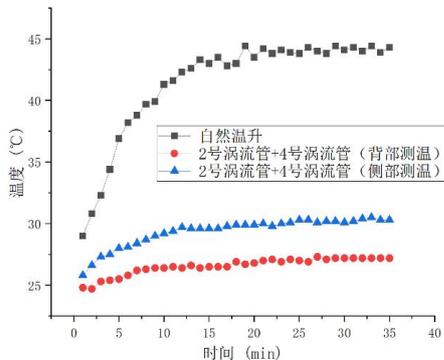
(a) 2号涡流管侧吹更换测温点



(b) 2号涡流管+4号涡流管侧吹更换测温点



(c) 2号涡流管+4号涡流管侧部对吹更换测温点



(d) 2号涡流管+4号涡流管背吹更换测温点

图9 测温点位置改变箱内部温度图

Fig.9 The position of the temperature measuring point changes the temperature map inside the box

4 结论

通过实验探索了不同涡流管在相同的进气压力和外界温湿度情况下的具体降温情况,在调节冷端出口温度后的冷端流量变化,进一步探索了在实际情况下的涡流管对电阻丝的降温效果:

(1) 由于加工精度存在误差,同一温度下的涡流管冷端流量存在差异,制冷效果也存在不同,冷量和流量存在着一定的关系,涡流管并非冷端温度越低气流越大,冷端的冷气也会存在温度过低结冰的情况。

(2) 在对一相对封闭的环境中的热源制冷时,吹入冷气的位置不同有着不同的降温效果,并且在此相对封闭的环境中不同位置有着不同的温度;不同的吹入冷气的方式也有着不同的降温效果,在本实验中双涡流管在同向吹风时可取得较好的降温方式。

(3) 由于加工精度存在误差导致涡流管的降温效果不一,后续研究可针对对具体部件差别来探究涡流管结构最优化,进一步强化涡流管应用。

(4) 由于气源条件的限制性,在某些压缩气源充足特殊情况下,考虑到经济性问题,可考虑使用涡流管来对某些设备进行降温,并且无需使用制冷剂。

(5) 涡流管在实际应用中存在着一定的制冷能力,可以在短时间内快速降温来达到冷却目的,在小面积快速制冷应用中有着很好的应用前景,并且在提倡绿色制冷的大背景下,在未来加以利用改进提升制冷能力,综合应用其制冷与制热能力,在以后的研究中一定会有着光明的前景。

参考文献:

[1] Xue Y, 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.

[2] R M. Review of vortex tube: a sustainable and energy separation device for multi-purpose applications[J]. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 21(1):27-55.

[3] SAIDI M H, VALIPOUR M S. Experimental modeling of vortex tube refrigerator[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2003,23(15):1971-1980.

[4] Valipour S M, Niazi N. Experimental modeling of a

- curved Ranque-Hilsch vortex tube refrigerator[J]. International Journal of Refrigeration, 2011,34(4):1109-1116.
- [5] Bovand M, Valipour MS, Eiamsa-ard S, et al. Numerical analysis for curved vortex tube optimization[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2014,50:98-107.
- [6] 申江,边煜竣,郭欣炜.冷端管径对涡流管性能影响的实验研究[J].制冷学报,2017,38(6):87-93.
- [7] 何曙,吴玉庭,姜曙,等.喷嘴对涡流管能量分离效应影响[J].化工学报,2005,(11):41-44.
- [8] 何丽娟,王淑旭,吴心伟,等.喷嘴结构对涡流管性能的影响[J].热能动力工程,2020,35(6):123-128.
- [9] 王远鹏,聂荣华,林明峰.六流道喷嘴涡流管能量分离特性的研究[J].制冷学报,2007,(2):48-50.
- [10] 张智臣.涡流管制冷技术以及在矿井中的应用[J].内蒙古煤炭经济,2021,(6):128-129.
- [11] 何丽娟,赵辉通,李海燕,等.喷嘴流道数对涡流管性能影响的实验研究[J].流体机械,2021,49(12):6-11,18.

(上接第25页)

- [10] Zhao Dongfeng, Xue Jianliang, Li Shi, et al. Theoretical analyses of thermal and economical aspects of multi-effect distillation desalination dealing with high-salinity wastewater[J]. Desalination, 2011,273:292-298.
- [11] 郭红兵,李瑞基,李瑞杰,等.低温热法浓缩工艺(LTE)处理高盐废水工业化试验研究[J].有色冶金节能,2021,37(4):49-53.
- [12] 高宏太,金苏敏,陈亮.热泵型电镀废水处理系统性能的试验研究[J].流体机械,2015,43(10):7-10,36.
- [13] 鄢泉,杨雪峰,车建业,等.处理低水平放射性废液热泵蒸发技术的工程应用研究[C].中国核学会核化工分会放射性三废处理、处置专业委员会学术交流会议论文集,2011:266-271.
- [14] Hamieh B M, Beckman J R. Seawater desalination using Dewvaporation technique:Theoretical development and design evolution[J]. Desalination, 2006,195(1-3):1-13.
- [15] 张慧晨,柳建华,刘林川,等.热泵低温蒸发系统用于工业废水浓缩性能研究[J].热能动力工程,2020,35(1):204-209,253.
- [16] 戎铖,张锁龙,戴玮,等.空气为媒介的含盐废水处理系统实验研究[J].水处理技术,2018,44(2):51-55.