

〈制冷技术〉

## 节流孔孔径对记忆合金自调式制冷器流量稳定性的影响

郭祥祥, 韩蓬磊

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

**摘要:** 本文通过理论计算和实验研究对不同节流孔孔径的记忆合金自调式制冷器流量稳定性进行了分析。理论计算表明: 当制冷器受到相同扰动因素影响时, 节流孔孔径越小的制冷器, 流量越稳定; 流量变化量随节流孔孔径增大呈线性增长趋势。实验研究中, 制作了孔径分别为 0.15 mm 和 0.25 mm 的记忆合金自调式制冷器, 将疲劳测试和振动测试作为扰动因素, 对制冷器在 29 MPa 和 22 MPa 的流量进行测试, 结果显示, 孔径为 0.15 mm 的制冷器流量方差明显小于 0.25 mm 的制冷器。理论和实验研究均表明, 缩小节流孔孔径的设计有助于提高记忆合金自调式制冷器的流量稳定性。

**关键词:** 制冷器; 记忆合金; 节流孔; 流量; 稳定性

中图分类号: TB65 文献标识码: A 文章编号: 1001-8891(2021)06-607-07

### Effect of Orifice Size on Flow Stability of Shape Memory Alloy Self-Regulated Cryocoolers

GUO Xiangxiang, HAN Penglei

(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

**Abstract:** The flow stability of shape memory alloy (SMA) self-regulated cryocoolers with different orifice sizes is analyzed via theoretical calculation and experimental study. The theoretical calculation demonstrates that the smaller the orifice diameter, the more stable is the flow rate when the cryocoolers are influenced by the same disturbance factors. The change in flow rate increases linearly with the increase in orifice diameter. In the experimental investigation, two types of SMA self-regulated cryocoolers, equipped with 0.15 mm and 0.25 mm orifices, respectively, were developed. Fatigue and vibration tests were introduced as disturbance factors. The flow rates of cryocoolers were evaluated at 29 and 22 MPa. The results show that the cryocoolers with a 0.15 mm orifice have smaller flow rate variance than those with a 0.25 mm orifice. Both the theoretical and experimental results verified that narrowing the diameter of the orifice is conducive to the flow stability of SMA self-regulated cryocoolers.

**Key words:** cryocoolers, shape memory alloy (SMA), orifice, flow rate, stability

## 0 引言

区别于传统的波纹管自调形式, 记忆合金型自调式制冷器采用了另外一条自调技术路线, 即利用记忆材料随温度变化产生的形状记忆效应来实现制冷器流量的调节, 具有结构简单、装调方便、寿命长等优点<sup>[1]</sup>。记忆合金制冷器自调后, 流量会趋于稳定, 但在一些因素如振动、温度变化、制冷器记忆合金的不稳定等的影响下, 稳定流量可能会发生较大变化, 造成制冷器不到温或工作时间缩短。关于记忆合金自调

式制冷器流量稳定性的研究, 学者多从提升记忆合金弹簧的疲劳稳定性和设计预紧力来维持制冷器流量的稳定<sup>[2-5]</sup>, 很少有学者研究节流孔大小对制冷器流量稳定性的影响。

由于焦耳汤姆逊效应存在, 高压气体流经节流孔, 压力明显降低, 相应地温度大幅下降直至相变为液体, 液态制冷工质蒸发后吸热来实现被冷却对象的制冷。

节流孔直径的设计对制冷器性能有着重要的影响: 直径偏小, 制冷流量也偏小, 制冷量不足; 直径

收稿日期: 2020-09-03; 修订日期: 2020-10-07.

作者简介: 郭祥祥 (1992-), 男, 河南洛阳人, 工程师, 硕士, 主要从事焦耳汤姆逊制冷器研究。E-mail: gxgxx1234@126.com.

偏大, 制冷工质液化率低, 制冷效率不高, 且探测器工作时长会受到影响。为满足制冷量和探测器工作时长要求, 节流孔直径将被限制在一个范围内。对于对流量稳定性要求较高的自调式制冷器, 考虑节流孔直径对流量稳定性的影响, 可以进一步寻找到一个更佳的节流孔直径。本文对一款典型的记忆合金自调式制冷器, 自调机构见图1, 对其节流孔孔径在0.10~0.25 mm之间变化时的流量稳定性进行了理论和实验研究, 探讨了节流孔孔径对制冷器流量稳定性的影响<sup>[6]</sup>。

### 1 理论计算

图1是一款典型的记忆合金自调式制冷器结构, 主要包括主动弹簧、形状记忆合金调节器、补偿块、平衡弹簧和阀针。制冷器通气后, 高压气体先大流量流经节流孔, 经节流后温度骤降, 形状记忆合金弹簧被冷却收缩, 主动弹簧和平衡弹簧相应地伸长, 带动阀针运动关小节流孔实现流量的自动调节。

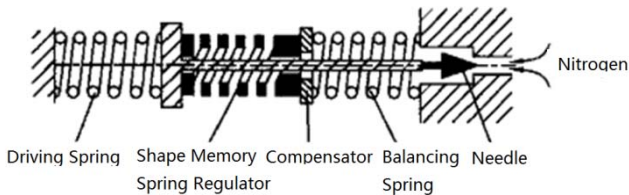


图1 记忆合金自调式制冷器结构图

Fig.1 The sketch of a SMA self-regulated cryocooler

现从理论层面分析, 改变节流孔孔径大小是否有助于提高自调制冷器流量稳定性。图2为节流孔和阀针结构示意图, 气流由1断面流向2断面。

为简化计算, 现作两点假设:

- 1) 气流由1断面流到2断面的沿程阻力损失忽略不计;
- 2) 气流相变发生在2断面之后, 1-2断面制冷工质保持气体状态。

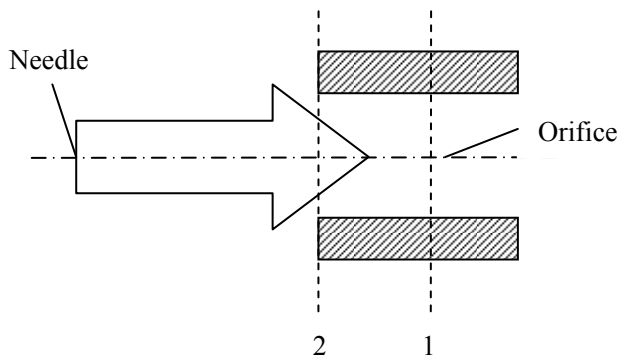


图2 节流孔和阀针结构示意图

Fig.2 The sketch of the orifice and needle

现通过能量守恒来计算制冷工质流量。由于阀针阻碍导致的局部阻力损失系数为<sup>[7]</sup>:

$$\zeta = 0.5 \left( 1 - \frac{A_2}{A_1} \right) \quad (1)$$

式中:  $A_1$ 、 $A_2$  分别为1、2断面的过流面积。

由能量守恒知:

$$P_1 = 0.5 \left( 1 - \frac{A_2}{A_1} \right) \frac{\rho v_2^2}{2} + P_{s2} + P_{d2} \quad (2)$$

式中:  $P_1$  为断面1的全压; 等式右侧第一项为断面1~2之间的局部压力损失,  $\rho$  为气流的密度;  $v_2$  为断面2处的流速;  $P_{s2}$  为断面2的静压, 与外界大气相通, 接近于大气压, 取值为0;  $P_{d2}$  为断面2处的动压, 其表达式为:

$$P_{d2} = \frac{\rho v_2^2}{2} \quad (3)$$

流过断面2的流量为:

$$Q = A_2 v_2 \quad (4)$$

式(2)、(3)、(4)联立:

$$P_1 = 0.5 \left( 1 - \frac{A_2}{A_1} \right) \frac{\rho Q^2}{2A_2^2} + \frac{\rho Q^2}{2A_2^2} \quad (5)$$

$$Q = \sqrt{\frac{A_2^2 P_1}{\frac{\rho}{2} + \frac{\rho}{4} \left( 1 - \frac{A_2}{A_1} \right)}} \quad (6)$$

断面2面积  $A_2$  可用节流孔孔径  $R_1$ 、阀针进入节流孔的深度  $l$ 、阀针的角度  $\alpha$  表示:

$$Q = \sqrt{\frac{\left[ \pi R_1^2 - \pi \left( l \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \right)^2 \right]^2 P_1}{\frac{\rho}{2} + \frac{\rho \left( l \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \right)^2}{4R_1^2}}} \quad (7)$$

由流量公式可知, 影响流量的主要因素是节流孔孔径、阀针进入节流孔的距离、阀针的角度、进气压力、气流密度。

本研究通过计算制冷器流量变化量来评估不同节流孔孔径制冷器的流量稳定性。对于一种特定的自调式制冷器, 其调试流量一般都会设定在某一区间, 计算中控制不同直径的制冷器调试流量均相同, 为14.61 g/min; 设扰动因素会导致阀针进入节流孔中的距离减少0.01 mm; 制冷工质为氮气, 节流前密度为506.25 kg/m<sup>3</sup>; 1断面处的压力为27 MPa, 阀针角度为30°, 计算结果如表1和图3所示。

表 1 节流孔孔径对流量稳定性影响算例

Table 1 Example of the influence of orifice diameter on flow stability

Orifice diameter/mm	Setup flow rate/(g/min)	Distance of needle into orifice at setup flow rate/mm	Distance of needle into orifice after disturbance/mm	Flow rate after disturbance/(g/min)	Flow rate variation/(g/min)
0.10	14.61	0.1634	0.1534	21.07	6.46
0.11	14.61	0.1840	0.1740	21.80	7.19
0.12	14.61	0.2042	0.1942	22.52	7.91
0.13	14.61	0.2242	0.2142	23.23	8.62
0.14	14.61	0.2439	0.2339	23.94	9.33
0.15	14.61	0.2635	0.2535	24.65	10.04
0.16	14.61	0.2829	0.2729	25.35	10.74
0.17	14.61	0.3022	0.2922	26.05	11.44
0.18	14.61	0.3214	0.3114	26.74	12.13
0.19	14.61	0.3406	0.3306	27.44	12.83
0.20	14.61	0.3597	0.3497	28.14	13.53
0.21	14.61	0.3787	0.3687	28.83	14.22
0.22	14.61	0.3977	0.3877	29.52	14.91
0.23	14.61	0.4166	0.4066	30.22	15.61
0.24	14.61	0.4356	0.4256	30.91	16.30
0.25	14.61	0.4544	0.4444	31.60	16.99

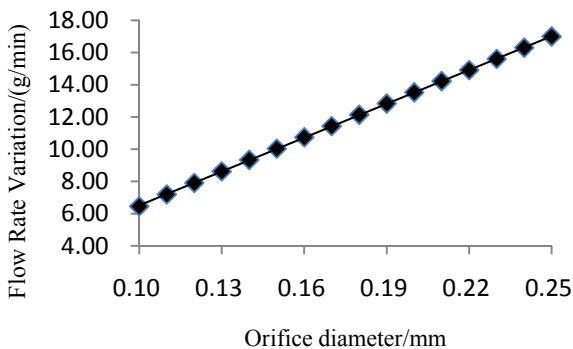


图 3 流量变化量和节流孔孔径的关系

Fig.3 The correlation between flow rate variation and orifice diameter

表 1 数据显示, 在 14.61 g/min 的调试流量下, 扰动因素导致阀针进入节流孔的距离减少 0.01 mm 时, 节流孔孔径为 0.25 mm 的制冷器流量增加了 16.99 g/min, 而节流孔孔径为 0.10 mm 的制冷器流量增加了 6.46 g/min, 小于 0.25 mm 孔径制冷器 10.53 g/min; 图 3 显示制冷器流量变化量随节流孔孔径增大呈线性增大趋势; 说明节流孔孔径越小, 制冷器流量越不容易发生变化, 流量稳定性越好。

制冷器调试流量既要满足制冷量要求, 又不能超差, 要处于一个合理的范围内。现分析调试流量大小对流量稳定性的影响。节流孔孔径设定为 0.15 mm; 调试流量在 14.61~23.65 g/min 之间变化; 干扰因素相同, 均使得阀针在节流孔中的距离减少 0.01 mm; 计算结果见表 2 和图 4。

表 2 调试流量对流量稳定性影响算例

Table 2 Example of the influence of adjusting flow rate on flow stability

Orifice diameter/mm	Setup flow rate/(g/min)	Distance of needle into orifice at setup flow rate/mm	Distance of needle into orifice after disturbance/mm	Flow rate after disturbance/(g/min)	Flow rate variation/(g/min)
0.15	14.61	0.2635	0.2535	24.65	10.04
0.15	15.62	0.2625	0.2525	25.64	10.02
0.15	16.63	0.2615	0.2515	26.63	10.00
0.15	17.64	0.2605	0.2505	27.63	9.99
0.15	18.64	0.2595	0.2495	28.62	9.97
0.15	19.65	0.2585	0.2485	29.60	9.96
0.15	20.65	0.2575	0.2475	30.59	9.94
0.15	21.65	0.2565	0.2465	31.58	9.93
0.15	22.65	0.2555	0.2455	32.56	9.91
0.15	23.65	0.2545	0.2445	33.54	9.89

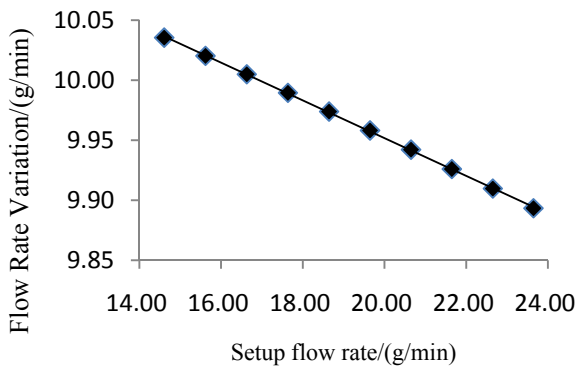


图4 流量变化量和调试流量的关系

Fig.4 The correlation between flow rate variation and adjusting flow rate

表2数据显示,在14.61 g/min的调试流量下,受扰动因素影响,制冷器流量变化量为10.04 g/min,当调试流量增大至23.65 g/min时,制冷器流量变化量为9.89 g/min,流量变化量减少了0.15 g/min;图4中显示流量变化量随调试流量的增大呈线性减少趋势。整体来看,调试流量增加,制冷器的流量变化量会减小,但减小幅度不大,而调试流量调的过大,很容易造成制冷器流量超差,增大调试流量对提高制冷器的流量稳定性的作用较为有限。

理论分析表明:减小节流孔直径有助于提高制冷器的流量稳定性,改变调试流量对制冷器流量稳定性的影响较小。

## 2 实验研究

制冷器在受到自身或外界因素变化的影响下,流量会发生变化。为引入扰动因素,实验中对制冷器进行了疲劳测试和振动测试。记忆合金弹簧由于其自身材料的特点存在疲劳稳定性的问题,其低温下收缩量不稳定会影响阀针进入节流孔的距离,导致制冷器流量的变化,疲劳测试可以反映记忆合金弹簧不稳定对制冷器流量稳定性的影响;振动测试是为了模拟制冷器机动过程中受到的加速度冲击,制冷器受加速度冲击

后,自调机构之间的相对位置会发生一定的变化,从而导致制冷器流量发生变化。

疲劳测试台如图5所示,疲劳测试设备一端与气源连接,另一端连有10个接口,可同时供10只制冷器测试。用户在控制台的可视化界面中输入工作时间、停机时间及运行次数,程序根据输入参数控制气源的输送和切断。测试在恒温、恒湿的洁净间中进行,温度为22℃、湿度为46%、净化等级为10万级。测试中,通过调节减压阀,将供气压力调节至29 MPa,工作时间设为5 min,停机时间设为15 min,运行次数设为100次。在工作时间内,程序打开气源开关,向制冷器输送高压气体,气体节流制冷,记忆合金弹簧被冷却后收缩;在停机时间内,程序关闭气源开关,停止向制冷器输送高压气体,制冷器无冷量输出,记忆合金弹簧逐渐恢复至原长,在100次的运行次数下,记忆合金弹簧经历100次的疲劳变形。

振动测试台如图6所示,功能振动功率谱密度如图7所示。试验中,制冷器固定于制冷器装卡夹具中,振动过程中制冷器全程通气,气源压力29 MPa。振动频率为20~2000 Hz,最大功率谱密度为0.04 g<sup>2</sup>/Hz,总加速度均方根值为7.68 g,振动方向为振动台轴向,振动时间为10 min。

记忆合金自调式制冷器节流孔直径通常在0.10~0.25 mm之间。为使对比明显,应选择直径跨度较大的节流孔。考虑到0.10 mm附近的节流孔加工难度大,精度较难保证,因此选择直径为0.15 mm和0.25 mm两种节流孔用实验研究。实验中,0.15 mm和0.25 mm两种节流孔规格的制冷器各制作9只,由于将制冷器的流量调至完全相同是非常困难的,实验中将制冷器在29 MPa进行调试,调试流量保持在15~18 g/min的小区间变化。对制冷器调试后、疲劳测试后、振动后的流量进行测试,测试压力为29 MPa和22 MPa,共有6种不同的工况。所用流量计为质量流量计,如图8所示。测得的流量数据如表3和表4所示。

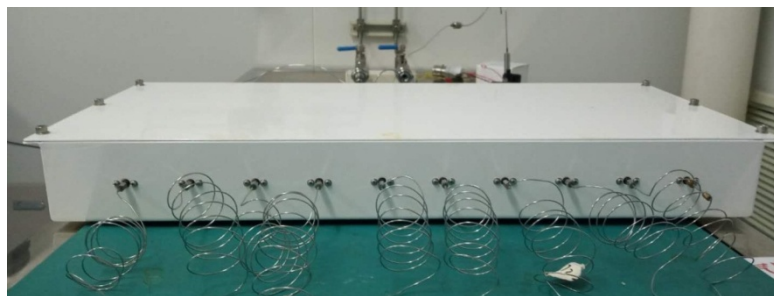


图5 疲劳测试实验台

Fig.5 Experimental platform for fatigue test

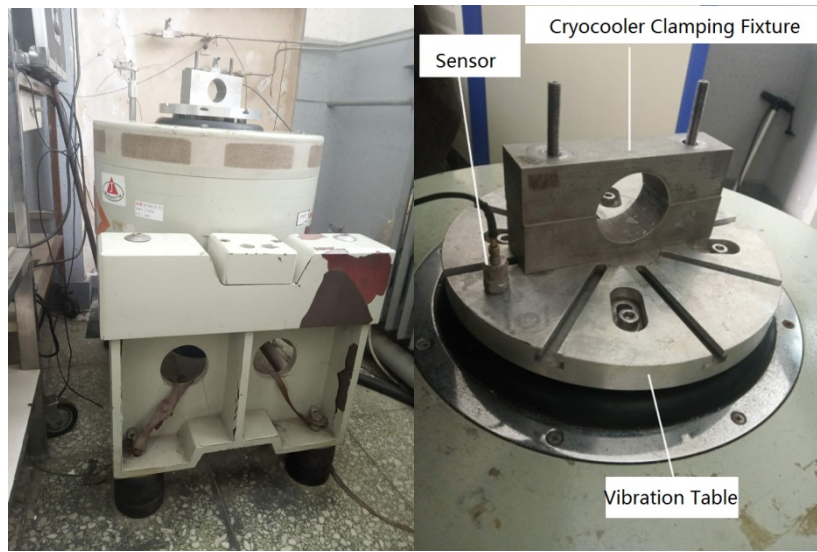


图 6 振动测试实验台

Fig.6 Experimental platform for vibration test

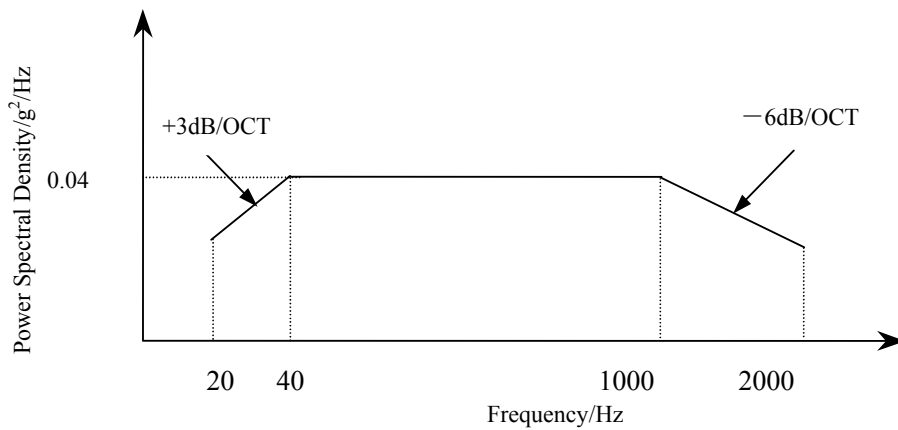


图 7 功能振动功率谱密度

Fig.7 Functional vibration power spectral density

为比较两种不同规格制冷器的流量稳定性, 现将调试后流量作为基准流量, 记为  $Q_0$ , 疲劳测试后流量和振动测试后流量记为  $Q_1$  和  $Q_2$ , 计算制冷器的流量方差  $\sigma$  和方差均值  $\bar{\sigma}$ , 如式(8)和式(9)所示。计算制冷器在 29 MPa 和 22 MPa 下的流量方差, 结果如表 5 所示。

$$\sigma = \frac{(Q_1 - Q_0)^2 + (Q_2 - Q_0)^2}{2} \quad (8)$$

$$\bar{\sigma} = \frac{\sum_{i=1}^9 \sigma_i}{9} \quad (9)$$



图 8 质量流量计

Fig.8 Mass flow meter

表3 0.15 mm 节流孔制冷器流量数据

Table 3 Flow rate data of cryocoolers with 0.15 mm orifice

Cryocooler number	Setup flow rate/(g/min)		Flow rate after fatigue test/(g/min)		Flow rate after vibration test/(g/min)	
	29 MPa	22 MPa	29 MPa	22 MPa	29 MPa	22 MPa
A1	17.35	14.16	15.61	11.4	16.75	15.07
A2	16.47	12.32	16.9	14.3	15.73	14.57
A3	16.5	13.25	16.18	14.6	15.89	13.87
A4	16.15	12.38	14.32	11.83	11.92	8.13
A5	16.45	13.66	17.17	15.7	18.04	15.1
A6	15.16	11.85	16.45	13.95	16.19	13.56
A7	15.84	13.35	15.04	13.11	16.07	12.9
A8	16.67	12.36	18.07	14.75	17.99	14.05
A9	15.44	13.68	15.19	13.01	16.06	15.34

表4 0.25 mm 节流孔制冷器流量数据

Table 4 Flow rate data of cryocoolers with 0.25 mm orifice

Cryocooler number	Setup flow rate/(g/min)		Flow rate after fatigue test/(g/min)		Flow rate after vibration test/(g/min)	
	29 MPa	22 MPa	29 MPa	22 MPa	29 MPa	22 MPa
B1	16.63	12.33	15.1	12.1	17.13	13.56
B2	15.28	12.97	15.9	10.54	15.84	9.89
B3	17.8	14.43	17.91	11.07	18.33	12.32
B4	15.35	11.67	16.4	13.34	16.17	13.57
B5	16.92	15.3	14.31	11.61	21.42	18.87
B6	16.32	14.6	17.2	13.41	21.13	17.23
B7	17.87	15.33	16.66	14.12	16.42	13.89
B8	15.19	13.3	19.4	17.4	12.41	5.77
B9	16.77	14.62	16.77	14.62	18.04	15.46

表5 0.15 mm/0.25 mm 孔径制冷器流量方差

Table 5 Flow rate variance of cryocoolers with 0.15 mm and 0.25 mm orifice

Cryocooler number	Flow rate variance		Cryocooler number	Flow rate variance	
	under 29 MPa	under 22 MPa		under 29 MPa	under 22 MPa
A1	1.6938	4.2229	B1	1.29545	0.7829
A2	0.3662	4.4915	B2	0.349	7.69565
A3	0.2373	1.1035	B3	0.1465	7.87085
A4	10.6209	9.1825	B4	0.88745	3.19945
A5	1.5233	3.1176	B5	13.53105	13.1805
A6	1.3625	3.6671	B6	11.95525	4.1665
A7	0.3465	0.1301	B7	1.7833	1.76885
A8	1.8512	4.2841	B8	12.72625	36.75545
A9	0.2235	1.6023	B9	0.80645	0.3528
Average	2.6932	3.5335	Average	4.8311	8.4192

从方差均值来看：0.15 mm 节流孔的制冷器在 29 MPa 和 22 MPa 下的流量方差分别为 2.6932 和 3.5335，

而 0.25 mm 节流孔的制冷器在两种压力下的方差均值分别为 4.8311 和 8.4192，明显大于节流孔直径为 0.15

mm 的情况。实验结果表明: 0.15 mm 节流孔孔径的制冷器在 29 MPa 和 22 MPa 下的流量方差波动均较小, 不容易发生较大的流量变化。

### 3 结论

流量稳定性是评价自调型制冷器性能的一个重要指标。制冷器流量增大会导致工作时长缩短, 流量减小会导致制冷量不足。本文从理论分析和实验研究两种方法出发, 探究了节流孔孔径对记忆合金自调式制冷器的流量稳定性的影响。研究表明: 在满足其他使用要求的情况下, 节流孔孔径设计地越小, 制冷器的流量稳定性越好。本文研究内容有助于记忆合金型自调式制冷器设计优化。

#### 参考文献:

- [1] 王三煜. 记忆合金调节式制冷器研究[J]. 红外技术, 2007, 29(9): 528-535.  
WANG Sanyu. A self-regulated cryocooler made by SMA[J]. *Infrared Technology*, 2007, 29(9): 528-535.
- [2] 孙维国, 黄水安. 空导导弹光电探测器设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.  
SUN Weiguo, HUANG Shui'an. *Air-to-Air Missile Photo-Detectors Design*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2006.
- [3] 李崇剑, 郑玉红, 万发荣, 等. Cu-Al-Mn 系低温形状记忆合金的微结构研究[J]. 有色金属, 2007, 59(4): 5-7.  
LI Chongjian, ZHENG Yuhong, WAN Farong, et al. Microstructure of Cu-Al-Mn alloy with shape memory effect at low temperature[J]. *Nonferrous Metals*, 2007, 59(4): 5-7.
- [4] 莫露, 万发荣, 龙毅, 等. 低温形状记忆合金的相变温度变化[J]. 有色金属工程, 2012, 1: 58-62.  
MO Lu, WAN Farong, LONG Yi, et al. Phase-transition temperature variation of low temperature shape memory alloy[J]. *Engineering Improvement*, 2012, 1: 58-62.
- [5] 杨杰, 吴月华, 周榆生, 等. 记忆合金螺旋弹簧的性能测试及设计方法[J]. 中国科学技术大学学报, 1992, 22(1): 51-57.  
YANG Jie, WU Yuehua, ZHOU Yusheng, et al. Characteristic measurement and design for helical spring of shape memory alloy [J]. *Journal of China University of Science and Technology*, 1992, 22(1): 51-57.
- [6] 吴甲斌. 热力膨胀阀调节制冷剂流量的稳定性分析[J]. 交通部上海船舶运输科学研究所学报, 1995, 18(1): 55-61.  
WU Jiabin. Analysis of stability of refrigerating flow rate adjusted with thermostatic expansion valve[J]. *Journal of SSSRI*, 1995, 18(1): 55-61.
- [7] 龙天渝, 蔡增基. 流体力学[M]. 北京: 建筑工业出版社, 2004.  
LONG Tianyu, CAI Zengji. *Fluid Mechanics*[M]. Beijing: Beijing China Building Industry Press, 2004: 90-131.