

文章编号:0253-4339(2013)04-0014-04

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2013.04.014

微型压缩机驱动的微型混合工质 J-T 制冷器实验研究

闫彪^{1,2} 公茂琼¹ 吴剑峰¹

(1 中国科学院理化技术研究所低温工程重点实验室 北京 100190; 2 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘 要 为研究微型混合工质节流制冷器的降温性能,搭建了微型压缩机驱动微型混合工质节流制冷器的制冷系统,并得到了初步实验研究结果。采用 Aspen 微型压缩机驱动微型 J-T 节流制冷器,应用混合制冷剂实现深度制冷。微型 J-T 节流制冷器采用微小通路的不锈钢毛细管制作,其通道特征尺寸为 0.3mm。初步实验表明,微型 J-T 节流制冷器达到了 180K 温区。由于采用微型压缩机驱动,系统结构紧凑,可在便携生物储存设备、低温医疗以及电子器件冷却等领域应用。

关键词 微型节流制冷器;混合工质;微型压缩机

中图分类号:TB66;TB65

文献标识码:A

Experimental Investigation on a Miniature Mixed Refrigerant J-T Refrigerator Driven by a Mini-compressor

Yan Biao^{1,2} Gong Maoqiong¹ Wu Jianfeng¹

(1. Key Laboratory of Cryogenics, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

Abstract The cool-down performance of a miniature mixed refrigerant J-T refrigerator was experimentally investigated. A miniature mixed refrigerant J-T refrigerator driven by an Aspen mini-compressor was developed, and preliminary test results were presented. The miniature J-T cryocooler was constructed with stainless steel capillary tubes with specific inner diameter of 0.3mm. By using multicomponent mixed refrigerant, the miniature J-T refrigerator can reach no-load temperature of 180K. Driven by the mini-compressor, such miniature J-T cryocoolers have good perspective in such applications as mobile biomaterials preservation, cryosurgery and electronic devices cooling, etc.

Keywords miniature J-T refrigerator; mixed refrigerant; mini-compressor

微型 J-T 节流制冷器是一种具有结构简单、使用方便、体积和质量小、无运动部件、无振动、易与电子器件集成化、易批量生产、易于微型化等诸多特点的制冷设备^[1]。作为一种方便可靠的冷源,可广泛应用于工业和实验研究中,例如:红外探测器的温度试验,冷却 CCD 阵列,红外光谱仪试件冷却,扫描式电子显微镜试件冷却,集成电路冷却和温度稳定性控制,微型冷泵,生物组织低温保存、冷冻干燥以及便携式低温治疗设备等方面^[2]。由于采用纯工质的微型 J-T 节流制冷器运行压力较高(20MPa 以上),热效率较低,因而它只是在对质量、尺寸、降温速度要求极高的快速制冷方面得到应用,而在要求长期工作的场合由于高压压缩机稳定性等问题,未见广泛应用,且在对质量、尺寸、功耗水平仍有较高要求的场合的应用没有明显优势,于是采用混合工质的微型 J-T 节流制

冷器成为了节流制冷研究的热点。闭式循环的混合物工质的微型 J-T 节流制冷器的研究经历了一个漫长的过程,对其工作机理的认识仍在逐步的深化之中。目前,对多元混合工质的微型 J-T 节流制冷器的研究主要是采用长寿命的空调压缩机来驱动微型 J-T 节流制冷器,在此前提之下,国内外学者都取得了一定的成就。国外的 APD 公司达到了 80K 到 70K 左右的温区,MMR 公司在 1996 年达到了 76K 的无负荷温度,国内的中科院低温技术实验中心获得了 70K 的低温^[3-5],而且 2003 年在普冷制冷压缩机驱动下获得了闭式循环最低 65.3 K 的制冷温度^[6]。

微型 J-T 节流制冷器的研究从 20 世纪 50 年代开始,最初采用螺旋肋片管盘管制作,它采用管径约为 0.5mm~1.0mm,壁厚为 0.1mm~0.2mm 的不锈钢毛细管,管外绕肋片后再在芯轴上绕成螺旋盘管,

基金项目:国家自然科学基金(50890183)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50890183).)

收稿日期:2012 年 8 月 30 日

然后插入杜瓦瓶,高压气体在毛细管内流动,低压气体在杜瓦瓶内壁与芯轴间的环形缝隙中流动。为满足超小型的要求,20 世纪 70 年代末,美国的 Little W A. 教授发明了 MMR (micro miniature J-T refrigerator)。它采用光刻技术,在玻璃基片上刻出几到几十微米的细微槽道构成气流的换热器、节流元件和蒸发器。一只制冷量为 25mW 的 MMR 尺寸仅为 15mm × 2mm × 0.5mm。荷兰的 Twente 大学采用三层玻璃薄片熔焊堆叠形成微型 J-T 节流制冷器,高、低压气体的矩形流道和节流孔采用蚀刻技术加工而成,优化后的制冷器最大尺寸为 28mm × 2.2mm × 0.8mm,在 96K 时可以产生 10mW 的制冷量^[7-8]。

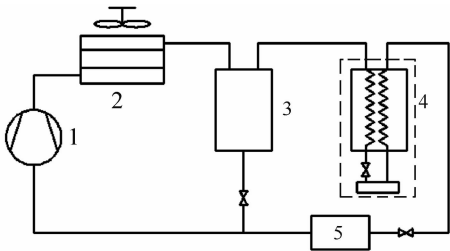
这里介绍了近期采取微型润滑油压缩机驱动的微型混合工质节流制冷器的研制工作及其初步实验结果。

1 实验系统和装置

基于已经成熟的微型压缩机技术,研制了一套微型压缩机驱动的微型 J-T 节流制冷器。

1.1 制冷机构成

微型压缩机驱动的微型 J-T 节流制冷器的实验系统主要由制冷系统、配气系统、测量系统和真空系统组成。制冷系统主要由微型压缩机、风冷冷凝器、油分离器、微型 J-T 节流制冷器等组成,如图 1 所示。其热力学过程是:处于气态的低压气体经压缩机绝热压缩成高温高压的气体,然后经冷凝器冷却为接近环境温度的高压气体。带油的高压气经油分离器后,分离出的油返回压缩机。经过纯化的高压气体在逆流热交换器中被冷却为低温的气液两相流体,节流后产生制冷效应。最后低温低压流体与高压流体进行热交换后进入压缩机。测量系统由温度测量元件(热电阻 PT100)、压力测量元件(压力传感器)、玻璃转子流量计、功率表和数据采集系统等组成。



1 微型压缩机 2 风冷冷凝器 3 油分离器
4 微型节流制冷器组件 5 流量计

图 1 实验系统示意图

Fig. 1 The diagram of experimental system

1.2 微型转子式压缩机

这里采用由美国 ASPEN 公司研发设计的微型转子式压缩机^[9],型号为 Aspen 14-24-000X,外形如图 2 所示。



图 2 微型压缩机外形图

Fig. 2 The outside view of mini-compressor

该压缩机是直流变频调速转子式微型压缩机,由 24V 直流电驱动,因此可以方便使用高能电池驱动,从而适于便携使用。压缩机由无刷电机驱动,通过微电子驱动板控制转速,驱动板获得 0 ~ 5V 电压信号后可以将压缩机转速控制在 1800r/min 到 6500r/min 之间。该压缩机的性能参数见表 1。

表 1 ASPEN 微型压缩机性能参数表
Tab. 1 The performance parameter for ASPEN mini-compressor

型号	14-24-000X
润滑油类型	POE RL68H
电机	直流无刷
额定电压	24VDC
电压范围	20 ~ 30VDC
最大电流	直流 9.5 A
压缩机排气容积	1.4cm ³ (0.085in ³)
转速范围	1800 ~ 6500r/min
蒸发温度范围	-18 ~ 24℃
冷凝温度范围	27 ~ 71℃
最大排气温度	130℃
最大压缩比	8:1
设备尺寸(直径 × 高度)	56mm × 78mm
重量	590g

1.3 润滑油分离器

实验中的微型压缩机所采用的润滑油是 POE RL68H,与氟利昂类制冷剂的互溶性很好,但是润滑

油的凝固点一般很高,在 200K 以上,为防止润滑油在低温端凝固堵塞节流制冷器,因此需要在进入节流制冷器之前增加润滑油分离器设备。实验中使用的分离器是根据离心分离原理制作的,含有润滑油雾的混合工质在分离器中绕螺旋通道进行离心旋转,分离出绝大部分油成分,之后再进入填满吸附材料的通道,进一步过滤干燥。经分离之后的制冷工质中的含油量已达到较低的水平,在实验过程中没有堵塞现象发生。另外,为防止润滑油在低温端凝固堵塞节流制冷器,采取的另一种措施是,在流程中增加分凝分离器,利用汽液分离原理,使部分高沸点组元与润滑油在较高温区分离,然后返回压缩机。上述措施确保润滑油能够返回压缩机,使压缩机正常工作,并且避免润滑油进入低温端堵塞流道。

1.4 微型 J-T 节流制冷器

应用于混合工质节流制冷器中逆流换热器可以有多种形式,但是管套管式换热器由于其制作简单、纵向漏热小、换热器在制冷系统内布置方式灵活等特点,为此,研制设计了一种采用管套管逆流换热器的微型 J-T 节流制冷器,如图 3 所示。该微型 J-T 节流制冷器由紫铜管和不锈钢毛细管组成,其有效长度为 860mm,外套管是外径为 3mm 的紫铜管,内套管是外径为 0.5mm,内径为 0.3mm 的不锈钢毛细管,节流毛细管采用和内套管同等尺寸的不锈钢毛细管,外径 0.5mm,内径 0.3mm。

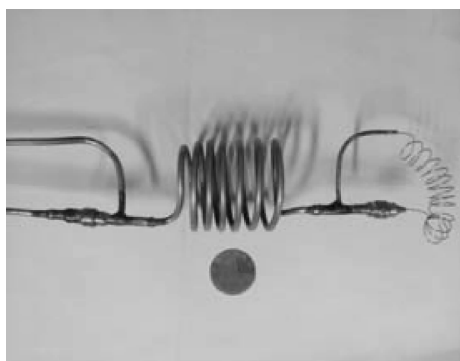


图 3 微型 J-T 节流制冷器
Fig. 3 Miniature J-T refrigerator

2 实验结果与分析

实验系统中首先采用 180K ~ 200K 温区的混合工质,其组份由 CF_4 (35% ~ 40%)、 C_2H_6 (20% ~ 25%)、 C_3H_8 (25% ~ 30%)、 iC_4H_{10} (5% ~ 10%) 和 iC_5H_{12} (1% ~ 5%) 组成,图 4 是该混合工质在某一特定配比下的焓温图。 p_H 和 p_L 分别为微型压缩机的排气压力和吸气压力。图 5 是采用该混合工质在微型

压缩机驱动的微型 J-T 节流制冷器上的实验结果。从图中可以看到,系统运行 16min,温度降到 190K 左右。在第 16min 时,温度还在以 2 ~ 3K/min 的速度降低,由于微型压缩机的发热量过大,导致系统运行时间不易过长。另外,针对实验中采用的微型 J-T 制冷器,其有效换热面积过小,回热不足,导致性能下降。总之,系统采用微型压缩机驱动的微型 J-T 制冷器在实验上达到了初步目标温度。图 6 是微型压缩机进排气压力随时间的变化情况。图 7 是微型 J-T 制冷器流量随时间的变化关系曲线。

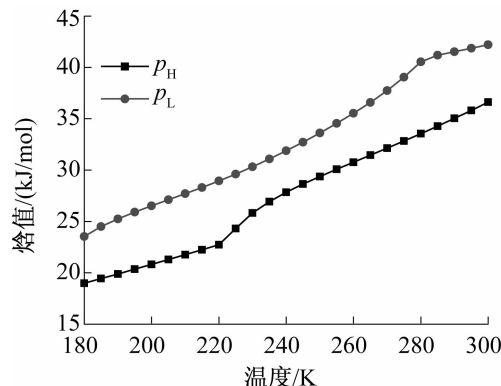


图 4 焓温图 ($p_H = 2.0\text{MPa}$, $p_L = 0.3\text{MPa}$)

Fig. 4 The enthalpy variation of mixed refrigerant vs. temperature ($p_H = 2.0\text{MPa}$, $p_L = 0.3\text{MPa}$)

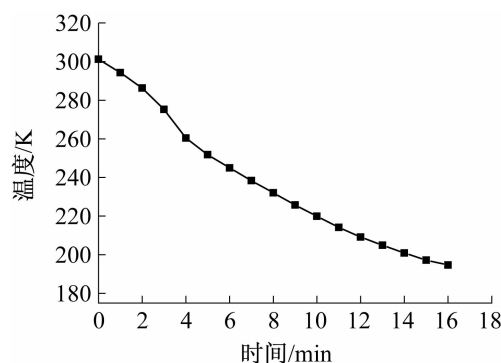


图 5 降温曲线

Fig. 5 The temperature variation of cold tip vs. time

3 结论和进一步工作

1) 采用有油润滑的微型压缩机驱动的微型混合工质节流制冷器在实验上初步获得了 180K 的低温,为微小空间的冷却提供了可能。

2) 由于微型压缩机的性能要求,采用微型压缩机驱动的微型混合工质节流制冷器需要配比更高效率的混合工质。

3) 采用其他型式的微型混合工质节流制冷器,并配合不同配比的混合工质,以期实现更低的温度。

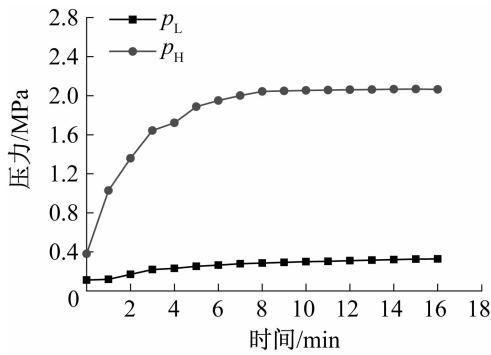


图 6 工作压力与时间的关系曲线

Fig. 6 The work pressure curve vs. time

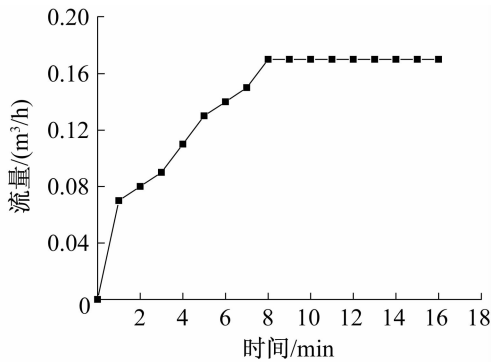


图 7 实验系统流量变化曲线

Fig. 7 The volume flow variation vs. time

参考文献

- [1] M Donabedian. Survey of Cryogenic Cooling Technique [R]. AD 报告 755980, 1983.
- [2] 陈国邦, 汤珂. 小型低温制冷机原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 328-333.
- [3] Longworth R C, Boiarski M J, Klusmier L A. 80 K closed cycle throttle refrigerator, cryocooler [M]. New York: Plenum Press, 1995: 89-93.
- [4] Littel W A, Sapozhnikov I. Low cost cryocoolers for cryoelectronics [R]. USA: the 9th cryocooler Conference, 1996.
- [5] 罗二仑. 液氮温区混合物工质节流制冷机的工作原理及

实验研究 [D]. 北京: 中国科学院低温技术实验中心, 1997 年 12 月.

- [6] Z X Wang, M Q Gong, J Y Liu, et al. Experimental Research on A New Type of Mixed-refrigerant Fractionation Refrigeration Cycle at 70K Range [C] // Hangzhou: the International Conference on Cryogenics & Refrigeration, 2003: 669-72.
- [7] W A Little. Design and Construction of Microminiature Cryogenic Refrigerators [C] // USA: AIP Conf. Proc., 1977: 421-424.
- [8] P P P M Lerou, G C F Venhorst, T T Veenstra. All-Micromachined Joule-Thomson Cold Stage [C] // International Cryocooler Conference, Inc., Boulder, CO, 2007.
- [9] Abhijit A Sathe, Eckhard A Groll, Suresh V Garimella. Experimental Evaluation of a Miniature Rotary Compressor for Application in Electronics Cooling [C] // Purdue: International Compressor Engineering Conference, 2008: 14-17.

通信作者简介

公茂琼, 男 (1971 -), 研究员/博士生导师, 中国科学院理化技术研究所, 010-82543728, E-mail: gongmq@mail.ipc.ac.cn。研究方向: 深冷多元混合工质节流制冷技术及其在液化天然气、煤层气等方面的应用, 多元多相物系在复杂条件下流动和传热传质特性研究, 普冷新型替代混合工质及相关应用技术研究, 混合工质热物理性质研究, 新型室温磁制冷机。

About the corresponding author

Gong Maoqiong (1971 -), male, Researcher/doctoral supervisor, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, 010-82543728, E-mail: gongmq@mail.ipc.ac.cn. Research fields: Cryogenic mixture refrigerants throttling refrigeration technology and its application in liquefied natural gas, coal gas and other aspects of the application; Multiple phase flow and heat and mass transfer characteristics research under complex conditions; New alternative refrigerant mixture and related application technology research; Mixed refrigerant thermophysical properties research; A new room-temperature magnetic refrigerator.