

# 微型焦汤制冷器的研究进展及展望

沈智峰, 崔晓钰, 王 军

(上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093)

**摘要:**介绍了典型的微型焦汤制冷器,分别从微型焦汤制冷器的结构、制冷系统及混合工质的运用三个方面概括分析了近年来国内外对于微型焦汤制冷器的研究进展,并在分析有关文献的基础上为进一步的研究做了展望。

**关键词:**微型焦汤制冷器;结构;制冷系统;混合工质;研究进展;展望

**中图分类号:**TN216 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2014.04.001

## Progress and prospect of micro Joule-Thomson cryocooler

SHEN Zhi-feng, CUI Xiao-yu, WANG Jun

(College of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:**The typical micro Joule-Thomson crycoolers are introduced. The current research development of micro Joule-Thomson cryocooler at home and abroad is summarized and analyzed in terms of its structure, cooling system and mixed refrigerant. At last, an outlook for the further research is made based on the analysis and review.

**Key words:**micro Joule-Thomson cryocooler; structure; refrigeration system; mixed refrigerant; current research development; outlook

### 1 前言

大多数红外探测器组件的运行往往要求较低的工作温度以及较短的制冷时间,而到达这种要求的技术手段有很多种,利用焦耳-汤姆逊节流致冷效应(以下简称J-T效应)的微型焦汤制冷器具备体积小、制冷温度低、降温速度快、低温端无运动部件、可靠性高等优点,将其应用于红外探测和成像设备中会是一种非常有效的制冷手段。

在气体液化和低温制冷技术中,利用实际气体的焦耳-汤姆逊节流致冷效应是一种最常用的方法,而且早在1895年,一次J-T效应节流制冷循环就用于工业上的气体液化<sup>[1]</sup>。微型J-T效应制冷器的研制始于20世纪50年代,它通常由逆流回热换热器、节流元件和蒸发器组成。一般采用管径细小(为 $\phi 0.5 \sim 1 \text{ mm}$ )的不锈钢管,管外绕肋片后再在芯轴上绕成螺旋管,不锈钢管的一端装有节流元件(固定或可调小孔、毛细管或多孔材料),然后插入杜瓦管。节流后的气液混合物在

杜瓦管底部(称为头部蒸发腔)蒸发制冷,杜瓦管内壁与芯轴间的环形缝隙是返流气体的通道,用返流的低压气体来预冷节流前的高压热气流<sup>[1]</sup>,如图1所示。

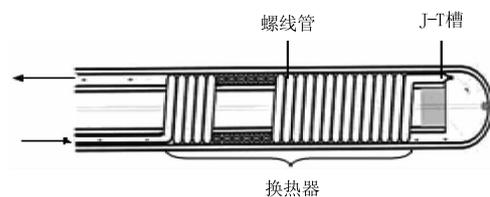


图1 具有逆流回热换热器的单级J-T效应制冷器

Fig. 1 One stage J-T cryocooler

近年来,研究人员对微型J-T效应制冷器的结构、制冷系统及混合工质的运用三个方面都做了大量研究,这些研究都有力地推动了微型J-T效应制冷器的发展。

**作者简介:**沈智峰(1988-),男,硕士研究生,研究方向为热能与动力工程。E-mail:840452868@qq.com

**收稿日期:**2013-08-14

## 2 国内外研究现状及发展动态分析

### 2.1 J-T 效应制冷器结构研究进展

节流元件作用是降压获取低温,主要结构形式有:微孔、多孔粉末冶金片、毛细管等。回热换热器以返流预冷来流,以螺旋管翅式居多。J-T 效应制冷器按蒸发腔外形可划分为柱形、塔形和平板式等。按气流控制分为开放式和自调式,其中自调式从最初的波纹管、双金属材料、压电陶瓷到近期的记忆合金等。按与被冷却器件连接方式分类,则有整体式、模块式和喷射式。关于近年来 J-T 效应制冷器结构的研究文献综述如下:

1998 年, H. J. Holland<sup>[2]</sup> 等人研发了两种微型焦汤制冷器并对其做了实验研究。两者换热段拥有相同的内外管径(内管内径 0.1 mm,壁厚 0.13 mm,外观内径 0.53 mm,壁厚 0.07 mm),区别在于一种换热器换热段长度为 270 mm,而另一种为 105 mm。两者的最低冷端温度均能达到 82 K。图 2 为其中一种的结构示意图。

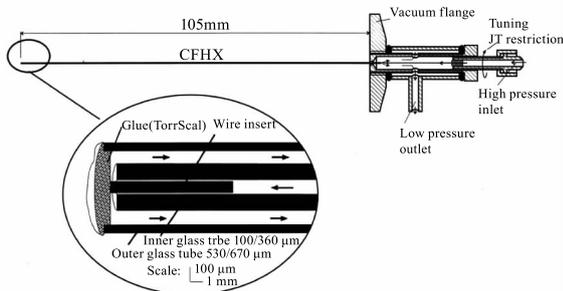


图 2 微型焦汤制冷器结构示意图

Fig. 2 The structure diagram of the micro J-T cryocooler

1999 年, S. Pradeep Narayanan 和 G. Venkatarathnam<sup>[3]</sup> 对一种微型 J-T 制冷器(图 3)进行了数值模拟,用以理解其内部复杂的对流及导热问题并同时提出了对这种换热器的一些设计准则。这种 J-T 制冷器的所有元器件均被刻在了薄玻璃或者不锈钢薄板上,厚度为 1~2 mm,制作宽度一般为 10~20 mm,长度为 50~100 mm,通道为矩形通道,大小为 200 μm × 30 μm。

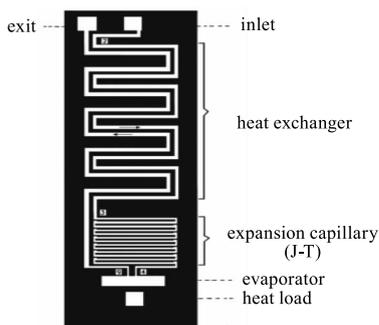


图 3 微型制冷器结构图

Fig. 3 The structure diagram of the micro J-T cryocooler

2007 年, Lerou<sup>[4]</sup> 在玻璃圆片上运用刻蚀加工技术制作了微 J-T 效应制冷器,由三层玻璃薄片组成,层间刻蚀有矩形槽道,做成的换热器共有 8 种不同设计 14 个样品,槽深从 2~4 mm,长度从 15~35 mm,采用氮气为工质。目标制冷量 10 mW,顶端温度 96 K。测量最大可达到制冷量 20 mW,顶端温度 100 K。

2010 年, Adhika Widyaparaga<sup>[5]</sup> 实验了 50 mm 长软线型同心逆流回热器(如图 4 和图 5 所示)(外层材料为聚醚醚酮,外径 0.6 mm,壁厚 0.1 mm,内层是同心不锈钢,外径 0.3 mm,内径 0.1 mm)微小 J-T 效应制冷器。工质分别 C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>、CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub> 纯工质,实验显示乙烯节流制冷效果最好。同时采用换热和流动经验关联式分布计算了此微小 J-T 效应制冷器流量和顶部温度,并且与实验进行了对比。研究表明在此装置中焦汤效应相比回热换热对制冷的影响更为重要。同时评估了入口效应、粗糙度和轴向导热的作用。

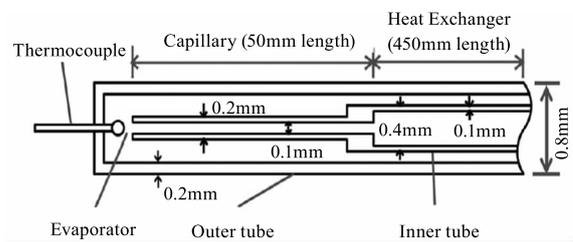


图 4 线形焦汤制冷器尺寸图

Fig. 4 The dimension figure of the wire-type J-T cryocooler

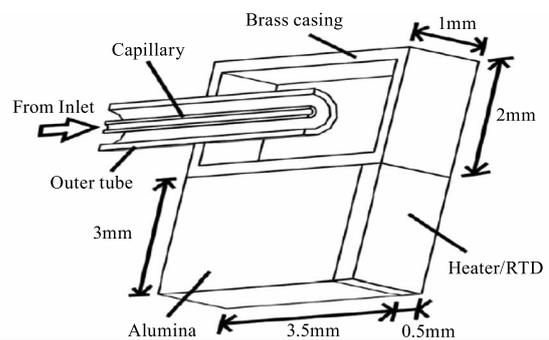


图 5 线形焦汤制冷器蒸发器尺寸图

Fig. 5 The dimension figure of the wire-type J-T cryocooler's evaporator

2010 年,美国科罗拉多大学 M H Lin<sup>[6-7]</sup> 等实验研究的微型焦汤制冷器采用毛细玻璃管中内置六个中空玻璃纤维管,玻璃纤维管内为高压来流,小管与大管间为低压返流,顶端为平板型,节流元件为 J-T 膨胀阀,结构示意图如图 6 所示。采用 5 种成分组成的混合工质,实验极端制冷温度可以达到 77K。

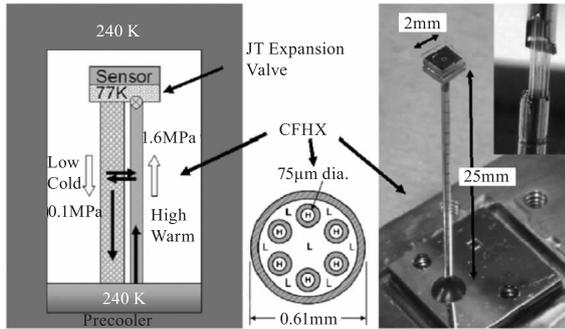


图6 J-T效应制冷器结构示意图

Fig. 6 The structure diagram of the micro J-T cryocooler

2012年,江庆<sup>[8]</sup>等人介绍了节流制冷器的工作原理和设计过程,辅以惩罚函数法的优化方法设计了闭式节流制冷器的两种结构形式,其换热器的结构均为螺旋肋片管盘管,区别在于一种绕制了两层肋片管,而另一种绕制了三层。其制冷性能对比如表1所示。

表1 微型焦汤制冷器制冷性能对比

Tab. 1 The refrigeration performance comparison of two micro J-T cryocoolers

测试项目	两层节流制冷器	三层节流制冷器
制冷温度/K	84	81
降温时间/s	108	120

从表格可发现,两层的节流制冷器要比三层的降温快,但制冷温度相对三层来说要高,应根据实际情况选择两层或三层节流制冷器,从而达到满足不同使用要求的目的。

2012年,Yuanyuan Zhou<sup>[9]</sup>等人对一种螺旋套管换热器做了热力优化分析,这种换热器运用于焦汤制冷系统中。他们引入了“运作损失”这么一个概念,其综合考虑了换热器运行过程中热力性能和水力性能的损失,并以此作为一种优化螺旋套管换热器结构参数的判定参数。

2012年,姚青华<sup>[10]</sup>研发了一种锥形自调式节流制冷器,与传统波纹管型自调式节流制冷器相比,有制冷速度快、结构简单、成本低廉等特点。其制冷时间在6s左右,制冷温度可达到88K左右。

2.2 J-T效应制冷器制冷系统研究进展

J-T效应制冷器制冷系统通常包括压缩机、换热器、节流元件及蒸发器。按制冷级数可分为单级和多级。对制冷系统进行改进往往能使J-T效应制冷器的冷端达到更低的温度,达到更好的能效比,获得更大的制冷量,近年来文献综述如下:

2004年,M. Q. Gong<sup>[11]</sup>等人研究了运行混合工质的三种焦汤制冷系统。研究表明,不同的制冷系

统拥有不同的最优混合物配比;对于拥有分相器的制冷系统,混合工质中含有较多高沸点的成分将提升其热力性能;当三种制冷系统同时运用最优混合物运行时,三者表现出相近的热力性能。

2008年,Jianlin YU<sup>[12]</sup>在蒸发腔后加入抽吸喷射装置构成新的焦汤闭式制冷循环(如图7所示),实验结果显示制冷效率和制冷量都得到显著提升。

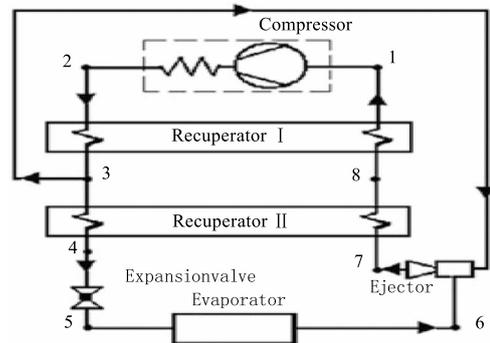


图7 制冷循环系统图

Fig. 7 The system diagram of the refrigeration cycle

2008年,刘刚<sup>[13]</sup>介绍了多种运用于红外探测和成像设备的焦汤制冷系统,并表明在实际应用过程中,为了研发制冷性能更好的节流制冷器,往往会综合运用多种制冷系统中的优点。

2011年,H. S. Cao<sup>[14]</sup>等人设计了一种二级制冷的焦汤制冷器,系统及结构图如图8和图9所示,该制冷器由三层玻璃薄片组成,外层有一层镀金层以减少制冷器的热辐射损失。预冷循环蚀刻在中层,制冷循环蚀刻在底层。通过所建立的动态有限元模型分析了该焦汤制冷器的制冷性能并计算得到了能满足制冷要求的该种制冷器所能达到的最小尺寸,大小为20.4 mm × 85.8 mm × 0.72 mm,其一阶段制冷所能达到的制冷量为50 mW,顶端温度为97 K,二阶段制冷所能达到的制冷量为20 mW,顶端温度为28 K。

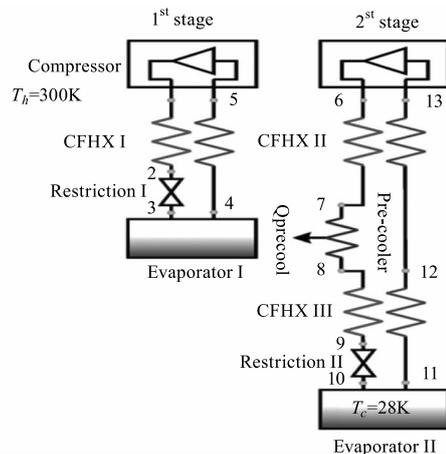


图8 制冷循环系统图

Fig. 8 The system diagram of the refrigeration cycle

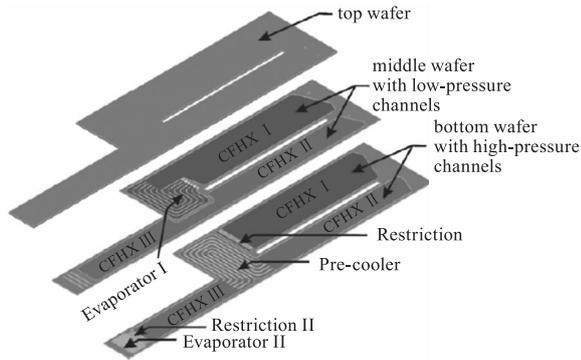


图9 微型焦汤制冷器结构示意图

Fig. 9 The structure diagram of the micro J-T cryocooler

2012年, Maoqiong Gong<sup>[15]</sup>等人设计, 制造并测试了一种二级制冷的运行混合工质的焦汤制冷器, 主路循环及预冷循环中所运用的换热器均为套管式换热器, J-T膨胀阀均运用的是毛细管。在没有热负荷的情况下, 冷端温度可以达到75.5K。在达到99K的时候可以获得110W的制冷量。

2012年, Yoichi Sato<sup>[16]</sup>等人对一种运用于日本“Astro-H”卫星上的机械制冷器进行了热力性能及可靠性的优化。对此焦汤制冷器制冷系统的修正改进主要有两方面, 一方面是对压缩机性能的改进, 另一方面是在高压入流至换热器之间加入了吸气剂, 以清理工质中的杂质。焦汤制冷器冷端温度在达到4.5K的情况下可以获得40mW的制冷量, 并且经研究发现, 它还能做到更低的制冷温度及更大的制冷量。

2013年, Jisung Lee<sup>[17]</sup>等人设计了几种有预冷阶段的制冷系统用来提高以氦氮作为混合物的焦汤制冷器的制冷效率。一般的焦汤制冷器冷端温度在80K以上时才能表现出良好的热力性能, 而这里所提出的经过优化设计的具备预冷系统的焦汤制冷器, 可以做到更低的制冷温度及更高的能效比。

### 2.3 J-T效应制冷器混合工质研究进展

采用混合工质比运用纯工质的J-T效应制冷器制冷能力显著提高、运行压力降低、降温速度缩短, 这些优势在许多文献中一再被证实。近年来文献综述如下:

1994年, 美国W A Little教授在混合工质中加入小量灭火剂CF<sub>3</sub>Br解决了混合工质可燃<sup>[18]</sup>问题。

1995年, 罗二仓和周远<sup>[19]</sup>报告了国内外运用混合工质的焦汤制冷器的研究情况。从其报告文献表明, 相较于纯工质, 运用混合工质可使得焦汤制冷器获得更大的制冷量及更高的热效率。

1996年, 许名尧、何雅玲<sup>[20-21]</sup>等发表多篇文章

对氮气和氟利昂组成的混合工质进行了节流特性和相平衡分析, 认为可以取代氮气和烷烃或者烯烷混合工质。

1999年, 罗二仓<sup>[22]</sup>等人报道了他们研发的针对运用于不同场合的节流制冷系统的混合工质。

2001年, 浙江大学陈琪<sup>[23]</sup>对两元混合工质小型J-T效应制冷机进行了实验和热力学分析研究。

2006年, Maytal采用9种工质组成混合工质<sup>[24]</sup>(氮气、氩气、甲烷、R14、乙炔、乙烷、丙烷、异丁烷、异戊烷。)用智能优化法优选比例进行实验研究。经研究发现, 拥有更多成分的混合工质可以做到更大的制冷量, 但同时要求配备更大的回热换热器; 制冷器冷端温度达到90K和80K的最优化混合物所做到了制冷量差不多; 混合工质在制冷器冷端温度达到80K时, 其能使得换热器达到的紧凑度比纯氮气工质多出50%, 但在制冷器冷端温度达到90K时, 没有一种混合工质可以使得换热器的紧凑度比纯氩气做的高。

2007年, J M Pfothenauer, J F Pettitt等<sup>[25]</sup>对混合工质单级压缩多头J-T效应制冷器进行研究, 混合工质采用了氮气39%、乙烷55%、甲烷6%, 建立了一种综合考虑各种因素的模型来对混合工质J-T效应制冷器进行优化设计。

2010年, M H Lin等<sup>[6]</sup>发表五种组分组成(氮、乙烷、甲烷、丙烷、氦。)的混合工质微型焦汤制冷器的研究论文。经研究发现, 混合工质能在更小的质量流量及高低压比的情况下, 做到与纯工质相同的制冷量。

2010年, 浙江大学王勤<sup>[26]</sup>研究的两元混合工质小型J-T效应制冷器涉及6种混合工质搭配(R23/R134a、R23/R227ea、R23/R236ea、R170/R290、R170/R600a及R170/R600)。经研究表明, 混合物组份配比及运行压力的大小将决定J-T效应制冷器的制冷性能。同年浙江大学张绍志<sup>[27]</sup>研究采用复叠式制冷的J-T冷冻医疗设备设备的性能, 工质为R50、R23、R600A混合物, 组份经过优化配比, 使得这种J-T冷冻医疗设备达到更低的制冷温度及更大的制冷量。

2010年, N. S. Walimbe等<sup>[28]</sup>实验研究了三组运用于闭式J-T制冷系统的混合工质(①氦、氮气、甲烷、乙烷、丙烷、异丁烷; ②R134a、R404A、R23及氮气; ③R134a、R404A、R23、氮气及甲烷), 由实验研究发现非可燃混合物更适合运用于制冷温度相对较高的领域; 要提高运用于制冷温度相对较高领域的

制冷器的制冷性能,运用包含最少可燃工质的混合物(例如由 R134a、R404A、R23、氮气及甲烷组成的混合物)是一种方法。

2011年,N. Lakshmi Narasimhan 和 G. Venkatarathnam<sup>[29]</sup>研究了混合物成分变化对焦汤制冷器热力性能的影响,混合工质由氮气、甲烷、乙烷及丙烷组成。经研究表明:制冷量由系统运行压力决定,而系统运行压力将根据混合物成分的变化而变化;拥有最好的制冷效应的混合物组分不一定能获得最大的制冷量;在给定混合物组分的情况下,通过选择合适的换热器及节流管的长度,制冷器可以达到最好的热力性能。

2012年,H. M. Skye<sup>[30]</sup>等人通过对一种有预冷系统的,采用混合工质的冷冻探针建立了一种经验修正模型,并对其进行了试验和优化研究,混合工质由氩气、R14及R23组成。经研究发现,经验修正模型与等温焓差模型及夹点模型相比,在预测制冷量方面具备更好的准确性。同时,这三种模型又被用来预测二元混合工质(R14,R23)在冷冻探针中的最佳分配方案,经验修正模型所测得最佳混合物分配方案中,高沸点成分相对居多。

2013年,Ryan Lewis<sup>[31]</sup>等人设计了四组运用于焦汤制冷器的混合工质(①甲烷、乙烷、乙烯、异丁烷、异己烷;②甲烷、乙烷、乙烯、异丁烷、异戊烷;③甲烷、乙烯、丙烷、异戊烷、戊烷;④甲烷、乙烯、丙烷、丁烷、戊烷)。运行压力范围为0.1~0.4MPa,实验对比了其在有和没有预冷段的制冷系统中的热力性能表现,同时将两种纯工质也加入到了实验研究中。研究表明,没有预冷段制冷系统中的这四组混合工质所能做到的制冷量比设计值要低,原因在于有液相工质堆积在压缩机和制冷器之间;在有预冷系统的制冷系统中,这四组混合工质在系统运行一段时间后,由于液相工质在压缩机和制冷器间不断堆积,导致流量会产生波动,因而导致了制冷温度的波动;纯工质相对混合工质来说冷却的更快,但混合工质可以做到更低的制冷温度。

### 3 总结与展望

通过上述近年来对于微型焦汤制冷器在结构、制冷系统及混合工质运用三方面的研究,可以获得以下的一些结论与展望:

(1)从国内外学者对于微型焦汤制冷器结构的研究可看出,制冷器的换热及节流通道的不断往微细化的方向发展,制冷器的整体的结构往细长化的方向发展。换热通道可以考虑做成蜿蜒曲折型以加强

高低压流体间的换热,同时应注意制冷器设计长度,过短会导致制冷器高低温端过近,轴向导热增大。

(2)从微型焦汤制冷器制冷系统考虑,可以对制冷器加入一个或多个预冷级,设计合理可以减少制冷器制冷时间,达到更低的工作温度,获得更大的制冷量及能效比。同时,也可以考虑向制冷系统添加分相器、抽吸喷射装置、吸气剂等设备来提高制冷系统的热力性能。

(3)从制冷工质角度考虑,应当积极运用混合工质,其相对于纯工质,往往可以使得制冷器达到更低的制冷温度,对系统运行的压力要求降低,拥有更快的降温速度,获取更大的制冷量。同时应当针对所研究的焦汤制冷系统找到最佳混合物配比方案,使得制冷器达到最佳的热力性能。

### 参考文献:

- [1] YANG Haiming. The optimal design and experiment research of J-T cryocooler[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2002. (in Chinese)  
杨海明. 节流制冷器的优化设计及实验研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2002.
- [2] H J Holland, J F Burger, N Boersma, et al. Miniature 10 - 150 mW Linde-Hampson cooler with glass-tube heat exchanger operating with nitrogen[J]. Cryogenic, 1998, 38 (4): 407 - 410.
- [3] S Pradeep Narayanan, G Venkatarathnam. Analysis of performance of heat exchangers used in practical micro miniature refrigerators [J]. Cryogenics, 1999, 39 (6): 517 - 527.
- [4] P P P M Lerou, G C F Venhorst, T T Veenstra, et al. All-micromachined Joule-Thomson cold stage[J]. Cryocoolers 2007, 14: 437 - 441.
- [5] Adhika Widyaparaga, Masashi Kuwamoto, Atsushi Tanabe, et al. Study on a wire-type joule thomson microcooler with a concentric heat exchanger [J]. Applied Thermal Engineering, 2010, 30: 2563 - 2573.
- [6] M H Lin, P E Bradley, Marcia L Huber, et al. Mixed refrigerants for a glass capillary micro cryogenic cooler[J]. Cryogenics, 2010, 55(8): 439 - 442.
- [7] P E Bradley, R Radebaugh, M Huber, et al. Development of a mixed refrigerant Joule-Thomson microcryocooler[J]. Cryocooler, 2009, 15: 425 - 432.
- [8] JIANG Qing, XU Haifeng, YANG Haiming, et al. The reasearch of a type of a J-T cooler[J]. Cryogenics and Superconductivity, 2012, 40(12): 21 - 23. (in Chinese)  
江庆, 徐海峰, 杨海明, 等. 一种节流制冷器的研制[J]. 低温与超导, 2012, 40(12): 21 - 23.

- [9] Yuanyuan Zhou, Jianlin Yu, Xiaojuan Chen. Thermodynamic optimization analysis of a tube-in-tube helically coiled heat exchanger for Joule-thomson refrigerators[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2012, 58: 151 - 156.
- [10] YAO Qinghua. Application reearch of tapered self-regulated J-T cryocoolers[J]. Laser & Infrared, 2012, 42(9): 1004 - 1006. (in Chinese)  
姚清华. 锥形自调节流制冷器的应用研究[J]. 激光与红外, 2012, 42(9): 1004 - 1006.
- [11] M Q Gong, J F Wu, E G Luo. Performances of the mixed-gases Joule-thomson refrigeration cycles for cooling fixed-temperature heat loads [J]. Cryogenics, 2004, 44: 847 - 857.
- [12] Jianlin Yu. Improving the performance of small Joule-thomson cryocooler[J]. Cryogenics, 2008, 48: 426 - 431.
- [13] LIU Gang. Joule-thomson cryocooler technology[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(5): 413 - 416. (in Chinese)  
刘刚. 节流微制冷技术[J]. 激光与红外, 2008, 38(5): 413 - 416.
- [14] H S Cao, A V Mudaliar, J H Derking, et al. Design and optimization of a two-stage 28 K Joule-thomson microcooler[J]. Cryogenics, 2012, 52(1): 51 - 57.
- [15] Maoqiong Gong, Jianfeng Wu, Quiwei Cheng, et al. Development of a  $-186^{\circ}\text{C}$  cryogenic preservation chamber based on a dual mixed-gases Joule-Thomson refrigeration cycle [J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 36: 188 - 192.
- [16] Yoichi Sato, Keisuke Shinozaki, Hiroyuki Sugita, et al. Development of mechanical cryocoolers for the cooling system of the Soft X-ray Spectrometer onboard Astro-H[J]. Cryogenics, 2012, 52(4 - 6): 158 - 164.
- [17] Jisung Lee, Gyuwan Hwang, Sangkwon Jeong, et al. Design of high efficiency mixed refrigerant Joule-Thomson refrigerator for cooling HTS cable [J]. Cryogenics, 2011, 51(7): 408 - 414.
- [18] Little W A, Sapozhnikov L. Development of a low cost cryogenic refrigeration system for cooling of cryoelectronics [J]. Adv Cryog Eng, 1994, 39: 1467 - 1474.
- [19] LUO Ercang, ZHOU Yuan. Joule-Thomson cooler using gas mixture as working substance[J]. Vacuum and Cryogenics, 1995, 1(3): 163 - 166. (in Chinese)  
罗二仓, 周远. 采用混合物作工质的 J - T 节流制冷机[J]. 真空与低温, 1995, 1(3): 163 - 166.
- [20] XU Mingyao, HE Yalin, WU Peiyi. Analysis of optimum composition of binary mixtures containing nitrogen and freon[J]. Cryogenics, 1995, 87(5): 54 - 58. (in Chinese)  
许名尧, 何雅玲, 吴沛宜. 二元氮 - 氟利昂低温混合工质的最佳配比分析[J]. 低温工程, 1995, 87(5): 54 - 58.
- [21] Mingyao XU, Yalin HE, Zhongqi CHEN. Analysis of binary cryogenic mixtures containing nitrogen and freon in cryocoolers[J]. Cryogenics, 1996, 36: 243 - 247.
- [22] LUO Ercang, GONG Maoqing, SHI Lei, et al. Report on cryogenic mixture Joule-Thomson refrigerators for different applications[J]. Cryogenics, 1999 110(4): 43 - 49. (in Chinese)  
罗二仓, 公茂琼, 石磊, 等. 不同用途的低温混合工质节流制冷系统研究的综合报道[J]. 低温工程, 1999 110(4): 43 - 49.
- [23] CHEN Qi. The theoretical and experimental research of miniature mixed-coolants Joule-Thomson cryocooler[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001. (in Chinese)  
陈琪. 小型混合工质 J - T 节流制冷机理论和实验研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2001.
- [24] B Z Maytal, G F Nellis, S A Klein, et al. Elevated-pressure mixed-coolants Joule-Thomson cryocooling[J]. Cryogenics, 2006, 46: 55 - 67.
- [25] J M Pfothenauer, J F Pettitt, D W Hoch, et al. Progress towards a low power mixed-gas Joule-Thomson cryocooler for electronic current leads [J]. Cryocoolers, 2007, 14: 443 - 452.
- [26] Qin WANG, Kang CUI, Tengfei SUN, et al. Performance of a single-stage Linde-Hampson refrigerator operating with binary refrigerants at the temperature level of  $-60^{\circ}\text{C}$  [J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering), 2010, 11(2): 115 - 127.
- [27] Shaozhi Zhang, Donbo Wu, Ge Yang, et al. Experimental study on a cryosurgery apparatus[J]. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics and Engineering), 2010, 11(2): 128 - 131.
- [28] N S Walimbe, K G Narayankhedkar, M D Atrey. Exeperimental investigation on mixed refrigerant J - T cryocooler with flammable and non-flammable refrigerant mixture [J]. Cryogenics, 2010, (50): 653 - 659.
- [29] N Lakshmi Narasimhan, G Venkatarathnam. Effect of mixture composition and hardware on the performance of a single stage JT refrigerator[J]. Cryogenics, 2011, 51(8): 446 - 451.
- [30] H M Skye, K L Passow, G F Nellis, et al. Empirically tuned model for a precooled MGJT cryoprobe [J]. Cryogenics, 2012, 52(11): 590 - 603.
- [31] Ryan Lewis, Yunda Wang, Peter E. Bradley, et al. Experimental investigation of low-pressure refrigerant mixtures for micro cryogenic coolers [J]. Cryogenics, 2013, 54: 37 - 43.