

# 低工作压力的混合物节流 制冷机的实验研究

罗二仓<sup>\*</sup> Yakuba V V<sup>\*\*</sup> Lobko M P<sup>\*\*</sup> 周远<sup>\*</sup>

(<sup>\*</sup> 中国科学院低温技术实验中心,北京 100080)

(<sup>\*\*</sup> 乌克兰科学院低温物理与技术研究所,哈尔科夫 310204,乌克兰)

(收稿日期 1995—09—27)

## MIXED—REFRIGERANT JOULE—THOMSON COOLER WORKING AT LOW PRESSURES

Luo Ercang Yakuba V V Lobko M P Zhou Yuan

(Cryogenic Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, P. R. China)

(B. Verkin Institute of Low Temperature Physics & Engineering, Ukraine  
Academy of Sciences, Kharkov 310204, Ukraine)

**Abstract:** A miniature mixed—refrigerant Joule—Thomson cooler working at low pressures from 2.5 MPa to 3.5 MPa at liquid nitrogen temperature is experimentally investigated. The experimental results show that using gas mixture is an efficient way to improve the thermal efficiency of Joule—Thomson cooler.

**Keywords:** Mixed—refrigerant, Joule—Thomson cooler.

**摘 要:** 报告了液氮温区采用气体混合物作工质的微型节流制冷机的实验研究结果。实验表明,采用混合物工质是提高节流制冷机效率的有效途径。

**关键词:** 混合制冷、J—T 制冷机。

在液氮温度水平,与斯特林制冷机、透平膨胀机相比,采用纯氮气作工质的节流制冷机是效率最低的一种制冷机。如不考虑压缩机的效率,氮气节流制冷机的实际热效率在5%至10%之间,而斯特林制冷机的热效率可达30%至50%左右,二者的差距是明显的。热力分析表明,纯氮工质节流制冷机的低效率是由于工质的热物性及节流循环固有的热力过程所决定的。70年代初,前苏联学者认为采用气体混合物作工质,有可能形成适合于节流制冷机工作所需要的高热物性的高效制冷工质,其后的实验验证了这一设想。采用混合物作工质大幅度提高了制冷机的效率,但其内部的热力过程(流动的、传热的、相平衡的)甚为复杂。要从理论上优化出真正的最佳的工质组元和浓度、最佳的工作条件还面临着许多待研究的课题。目前,这一领域的理论和实验工作仍在进行之中。实验研究仍然是研究节流制冷机内部工作过程最为直接和有效的手段。

根据研究目标和现有的实验条件,研究了在相对低的工作压力条件下(2.5 MPa~3.5 MPa),为了获得液氮温度水平的高效的混合物节流制冷机的热力特性。给定的一些工作条件为:

压缩机的排气压力:2.5 MPa~3.5 MPa;压缩机的吸气压力:0.07 MPa~0.4 MPa;制冷

温度:77 K;环境温度:300 K。

为了今后采用低排气压力的空调压缩机工作,初步选定六种组元:Ne、N<sub>2</sub>、R50、R170、R290、R600a,作为混合物的组元。在排气压力为2.5 MPa,吸气压力为0.1 MPa,环境温度为300 K的条件下优化混合工质各组元的浓度。根据一系列的最终从理论上优化出一种混合物 No. 1[Ne-N<sub>2</sub>-R50-R170-R290-R600a]。对这一种混合物,实验研究了其能量特性。

## 1 实验系统和实验结果

整个实验系统共由四个子系统组成:制冷系统、混合物准备系统、测量系统和真空系统组成。整个实验系统见图1所示。

制冷系统主要由压缩机、热端冷却器、逆流热交换器及可调节流阀组成。其中,压缩机是一个无油润滑的两级的干压缩机。它的排气压力可达6.0 MPa,低压进气压力可在0.07 MPa至0.4 MPa之间变化。压缩机排量可达3~4 Nm<sup>3</sup>/h。要说明的是,压缩机的排气量与工作的高低压比有关。压比也高,排气量越小;反之,压比越小,排气量越大。在高压进气管路上,有两个过滤器。第一个是机械式过滤器,其作用是过滤气体中较大的机械杂质。第二是吸附式过滤器,其作用是吸附混合气中不必要的水气、CO<sub>2</sub>等杂质气体。热端的冷却器由水冷器、气态氮蒸气冷却器及一个加热器所构成。它们的作用是保证逆流热交换器进口所需要的温度。逆流热交换器是林德型螺旋式的换热器,它由两层带肋的毛细管构成。节流阀是一个可调式的球阀,在实验中,可随时调节。另外,节流阀后还安装了一个模拟热负荷加热器,可以测量制冷量。

混合物准备系统主要由一组钢瓶、过滤器及控制阀门组成。本次实验中用了六个钢瓶,它们分别盛有 Ne、N<sub>2</sub>、R50、R170、R290、R600a 等气体。

测量系统由一组铜-康铜热偶、精密压力表、浮子流量计、模拟制冷量加热器、压缩机功率表及真空计等部件组成。

真空系统由两组扩散泵组成。一组用于维持真空室的真空,另一组用于维持制冷系统内部的真空。

在实验中,测量了下列热力参数:

$P_H$ :压缩机的排气压力(MPa); $P_L$ :压缩机的吸气压力(MPa); $P_L$ :节流阀后的压力(蒸发器内的压力)(MPa); $T_0$ :换热器热端高压流温度(K); $T_0$ :换热器热端低压流温度(K); $T_C$ 、 $T'_C$ :节流前的气流温度(K); $T_C$ :节流后的气流温度(K); $Q_V$ :压缩机的排气量(Nm<sup>3</sup>/h); $Q_C$ :制冷量(W); $W_m$ :压缩机消耗的电功(W)。在实验中,固定压缩机的吸气压力为0.1 MPa。换热器热端的高压气流温度为300 K。采用三种不同的排气压力进行了一系列的测量,实验的原始数据见表1、表2、表3(混合物 No. 1 Ne-N<sub>2</sub>-R50-R170-R290-R600a)。

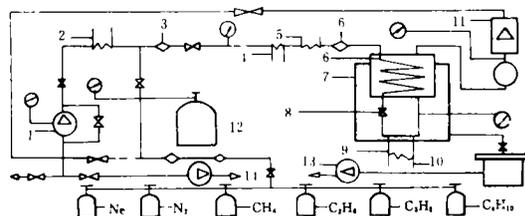


图1 实验系统

1—两级无油润滑压缩机;2—热端水冷却器;3—机械式过滤器;4—气态氮蒸气冷却器;5—热端加热器;6—吸附式过滤器;7—逆流热交换器;8—可调球形节流阀;9—蒸发器;10—模拟热负荷加热器;11—浮子流量计;12—混合物储气瓶;13—扩散泵1;14—扩散泵2

表 1 (1995-05-04)

$P_H$	$P_L$	$P'_L$	$T_0$	$T'_0$	$T'_C$	$T_C$	$T''_C$	$Q_C$	$W_{in}$	$Q_v$
2.5	0.1	0.118	300.0	290.0	73.7	69.1	71.3	0.0	1010	3.09
2.5	0.1	0.118	300.0	292.0	77.9	72.1	75.4	6.6	980	3.08
2.5	0.1	0.118	300.0	294.8	81.1	74.7	79.8	15.3	960	3.08
2.5	0.1	0.120	300.0	292.3	90.0	80.5	107.0	21.0	960	3.12
2.5	0.1	0.119	300.0	295.3	81.7	75.4	81.7	16.6	990	3.08
2.5	0.1	0.120	300.0	295.0	82.9	77.9	88.3	18.2	990	3.08

表 2 (1995-05-04)

$P_H$	$P_L$	$P'_L$	$T_0$	$T'_0$	$T'_C$	$T_C$	$T''_C$	$Q_C$	$W_{in}$	$Q_v$
3.0	0.1	0.111	300.0	289.2	75.1	69.7	71.8	0.0	1010	2.72
3.0	0.1	0.111	300.0	290.5	78.6	72.1	75.4	10.0	990	2.72
3.0	0.1	0.112	300.0	294.3	81.1	74.1	78.6	18.0	990	2.73
3.0	0.1	0.117	300.0	295.8	82.3	76.6	85.3	21.5	990	2.72

表 3 (1995-05-10)

$P_H$	$P_L$	$P'_L$	$T_0$	$T'_0$	$T'_C$	$T_C$	$T''_C$	$Q_C$	$W_{in}$	$Q_v$
3.5	0.1	0.112	300.0	288.3	74.7	70.1	72.1	0.0	930	2.47
3.5	0.1	0.112	300.0	289.7	77.9	71.5	74.7	7.2	970	2.43
3.5	0.1	0.112	300.0	292.5	79.5	72.4	76.3	13.0	970	2.43
3.5	0.1	0.115	300.0	294.8	81.1	73.4	77.9	19.6	970	2.42
3.5	0.1	0.117	300.0	297.0	82.3	75.4	81.9	21.8	970	2.42

评价混合物本身的热力性能指标有两个。一个是单位制冷量  $q_v$ ，另一个是用效率  $\eta$  (不考虑压缩机)。最后，用  $\eta$  来评价整个制冷统(包括实际的压缩机)的热力性能。显然有下列关系式

$$q_v = Q_c / Q_v$$

$$\eta = \frac{Q_c(T_0 - T_c)}{L_m Q_v T_c}$$

$$\eta' = \frac{Q_c(T_0 - T_c)}{W_{in} T_c}$$

式中， $L_m$  是混合物单位体积的等温压缩功，也是理论上压缩机所需要的最小功耗。实际的单位功耗为  $L_m$ 。当吸气压力  $P_L = 0.1$  MPa，排气压力为 2.5 MPa、3.0 MPa、3.5 MPa 时，混合物单

位体积的等温压缩功分别为  $110 \text{ W} \cdot \text{h}/\text{Nm}^3$ 、 $127 \text{ W} \cdot \text{h}/\text{Nm}^3$ 。根据表1~表3中的数据,可以计算  $q_c$ 、 $\eta$ 、 $\eta'$  等热力参数。

## 2 结论

实验表明,即使工作在较低的压力条件下,所研究的混合工质仍有较高的热效率。在液氮温度,包括压缩机在内,该制冷系统总的热效率为  $5\% \sim 8\%$ ,制冷量达  $15 \sim 25 \text{ W}$ ,比功耗为  $40 \sim 60 \text{ W}$ 。比纯氮工质(工作在  $10.0 \text{ MPa}$ )的节流制冷机的热效率高  $3 \sim 6$  倍。因此,采用混合物作工质是一条提高节流制冷机效率的有效途径。

本文受国家自然科学基金资助。

**作者简介:** 罗二仓,28岁,1990年毕业于清华大学热能系空调专业,获工程学士。1990年到中国科学院低温中心攻读硕士,从事脉管制冷机的研究,1993年获硕士学位。现为中国科学院低温技术实验中心在职博士,从事混合物节流制冷机的研究。

---

## 《真空设计手册》购置须知

由兰州物理研究所编写的《真空设计手册》(修订版)已于1991年由国防工业出版社正式出版。全书约187万字。是真空科学与技术领域内最完全的一本工具书。现尚有部分余书,由本刊编辑部代为发行。需要者请与编辑部联系。每本书售价74元(连同邮费在内)。欲购者请将书款邮汇到编辑部。本书系原手册(1981年版)的修订本。修改并补充了许多新的内容。内容涉及真空的各个领域。其中包括真空物理、真空工业产品、真空系统设计、真空获得、真空测量、真空材料、真空元件、真空检漏、真空工艺、真空应用及工程设计实例。全书共15章。书末有我国部分真空单位简介。

附录中提供了不少与真空有关的数据和标准,进一步丰富了手册的内容。整个手册文字精练、内容充实。文中配有大量的图表。可以供从事真空工程设计及研究人员使用,也可以作为大专院校有关专业师生的教学参考书。