

## 开放式二氧化碳制冷性能

蔡玉飞<sup>1</sup> 蒋彦龙<sup>1</sup> 周年勇<sup>1</sup> 郑小漪<sup>1</sup> 徐克选<sup>2</sup> 陈国民<sup>2</sup>

(1. 南京航空航天大学航空宇航学院, 南京, 210016; 2. 南京韩威南冷制冷集团有限公司, 南京, 211151)

**摘要:**二氧化碳属于对环境友好的自然制冷工质,使用时直接排放对环境影响很小。本文提出一种开放式二氧化碳制冷系统,研究了高压二氧化碳在25,30和35℃三种典型储存环境下的制冷特性,同时考察了影响开放式二氧化碳制冷性能的各种因素。研究表明:二氧化碳储存状态对其制冷性能影响较大,在超临界条件下制冷量损失较大,同时,纯气体节流时储罐中的制冷量损失要远大于气液两相节流,为二氧化碳开放式制冷的应用提供了实验依据。

**关键词:**密闭舱;二氧化碳;开放式制冷;实验研究

**中图分类号:**TK12 **文献标识码:**A **文章编号:**1005-2615(2011)04-0551-05

### Performance of Open Carbon Dioxide Refrigeration

Cai Yufei<sup>1</sup>, Jiang Yanlong<sup>1</sup>, Zhou Nianrong<sup>1</sup>, Zheng Xiaoyi<sup>1</sup>, Xu Kexuan<sup>2</sup>, Chen Guomin<sup>2</sup>

(1. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. Nanjing Hanwei Nanleng Refrigeration Group Co., Ltd, Nanjing, 211151, China)

**Abstract:** Carbon dioxide is environment friendly natural refrigerants so that it hardly affect the environment. An open carbon dioxide refrigeration system is developed in this paper, and refrigeration features are investigated under three typical storage environments with the temperature of 25, 30 and 35 °C. Moreover, factors that influence the open carbon dioxide refrigeration are studied. The results show that the storage condition has a large influence on the refrigeration performance and the loss of refrigeration capacity is larger under supercritical conditions. At the same time, the loss of refrigeration capacity is much larger under the condition of gas throttling than gas-liquid two-phase throttling. Hence, it provides important reference to the use of open carbon dioxide refrigeration.

**Key words:** closed cabin; carbon dioxide; open refrigeration; experiment research

二氧化碳作为制冷剂曾经被广泛运用,现在由于氟利昂对大气层的破坏以及温室效应,二氧化碳制冷再次受到重视<sup>[1]</sup>。但是现在对于二氧化碳制冷的研究主要集中在跨临界循环和复叠式制冷<sup>[2-7]</sup>,对二氧化碳开放式系统研究较少,严嘉等<sup>[8-9]</sup>研究了一种开放式二氧化碳制冷系统用于冷藏车的制冷。随着国内矿用可移动式救生舱的发展,小型密闭空间的无源制冷越来越受到人们关注。目前适用于救生舱的制冷方式主要有蓄冰制冷、蓄电制冷和高压气源制冷等,高压气源主要有氟利昂、二氧化

碳和氨等。不同制冷方式的优缺点如表1所示。

表1 小型密闭空间的无源制冷方式优缺点对比

制冷方式	优点	缺点
蓄冰制冷	制冷性能稳定且无活动部件;占用舱体空间较小;能够为舱内提供水源补给;初期投资较低。	制冰装置故障率较高;长期使用维护成本高。
蓄电制冷	舱内温湿度可控性较高;制冷装置较为成熟;运行故障率低且维护成本低。	防爆蓄电池成本较高;制冷性能受外界环境影响较大。

续表

制冷方式	优点	缺点
氟利昂	制冷性能稳定且可控;设备维护成本低;系统运行压力低;制冷剂充装密度较高,舱体空间占用相对较小。	制冷剂成本较高;巷道温度较高时直接排放的制冷剂高温易分解;R22等制冷剂会造成臭氧层破坏;温室效应极高。
二氧化碳	制冷性能稳定且可控;设备维护成本低;制冷剂价格低廉且绿色环保;利用其高压势能,为舱内提供动力保障;直接排放的CO <sub>2</sub> 可以扑灭明火。	系统运行压力高;充装密度较低,舱体空间占用大。
氨气	制冷性能稳定且可控;设备维护成本低;单位体积制冷量极大;舱体空间占用小;系统运行压力低。	氨气有毒且气味刺激性大;氨气可燃,直接排放危险性高。

综合表1各种制冷方式的优缺点,高压二氧化碳开放式制冷优点更为突出,为此本文在分析二氧化碳特性的基础上,搭建了开放式高压二氧化碳实验平台,对高压二氧化碳在3种储存条件下的制冷特性进行了实验研究,并考察了影响二氧化碳制冷性能的各种因素。

## 1 实验装置与原理

实验装置主要由设备舱、人员舱、开放式制冷系统及数据采集系统组成。设备舱用于存放高压二氧化碳储罐,在设备舱内设有加热器,控制舱内温度维持在某一恒定温度,以模拟二氧化碳的各种存储工况。人员舱安装一定数量的灯泡,用来模拟人

员热负荷及舱体结构热负荷。开放式制冷系统用来对高压二氧化碳进行制冷特性研究,数据采集系统主要用来记录和收集实验结果。

### 1.1 制冷原理

二氧化碳制冷系统可分为闭式系统和开式系统两大类。闭式系统是指二氧化碳依次流经压缩机、冷凝器、节流机构及蒸发器这4大部件,再回到压缩机的循环系统;开式系统直接通过节流机构将二氧化碳节流成中压低温的液体,再进入蒸发器蒸发制冷,最终排放于环境的制冷系统。开式系统主要应用在无电力供应的制冷环境中。

### 1.2 制冷系统

制冷系统由高压二氧化碳储罐、减压阀、蒸发盘管、温度压力传感器及管道阀门配件组成。为了增强节流效果,减少节流前的闪发,在节流阀前增加预冷器。蒸发盘管通过辐射换热及对流换热的方式与舱内空气进行热量交换,为了充分利用二氧化碳的冷量同时减少流阻,在一级蒸发盘管之后并联两个等面积的二级蒸发盘管。高压储罐的净体积为40 L,标准充装质量为18 kg,6个罐体并联。系统布置及温度压力测点的位置如图1所示。温度传感器采用pt100,通过ADAM4015采集。压力变送器根据布置的位置不同,量程分别为 $5 \times 10^5 \sim 100 \times 10^5$  Pa不等,压力信号通过ADAM4017采集。

## 2 二氧化碳制冷性能分析

### 2.1 二氧化碳制冷系统分析

实验首先对设备舱进行保温运行,使得舱内的二氧化碳达到实验所需温度,同时人员舱开启一定数量的灯泡,使人员舱温度达到30℃,通过观察二

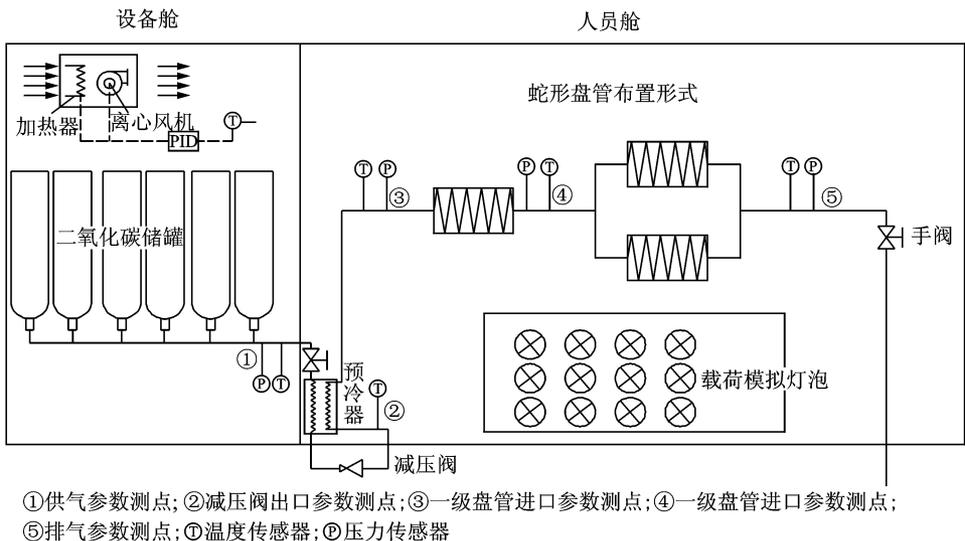


图1 制冷系统原理及测点布置图

氧化碳储罐的压力来判断罐内二氧化碳的温度。图2~4为设备舱温度为30℃时的实验曲线图。图2为制冷管路中的温度传感器所测温度变化图,图3为管路中压力传感器所测压力变化图,图4为人员舱温度变化图。

由图2,3可以看出二氧化碳的排气温度和压力基本保持稳定,排气温度在27℃左右,排气压力接近大气压力,节流后的二氧化碳制冷利用率较高,冷量基本用完。为了控制二氧化碳流量,保持人员舱内温度不超过35℃,减压阀同时起到流量调节的作用。由图4可知,在实验前20 min由于减压阀出口压力较高,二氧化碳流量较大,能够给舱内提供较多的冷量,因此人员舱温度呈下降趋势;在20至60 min减压阀出口压力略有下降,二氧化碳流量有所下降,人员舱温度上升;在60至100 min内二氧化碳制冷量和热负荷基本平衡,人员舱温度基本保持32℃不变;在100 min以后由于二氧化碳储罐里面已经没有液态二氧化碳,供气压力迅速降低,通过调节减压阀,增加其出口压力,气态二氧化碳所能提供的制冷量远小于人员舱热负荷,因此舱内温度迅速上升,达到35℃后失效,至此实验结束。

由此可以看出在设备舱温度维持在30℃时,

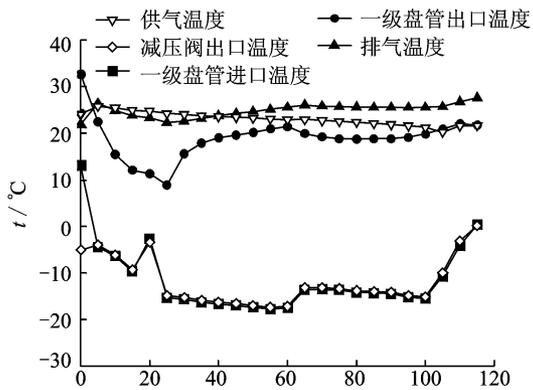


图2 制冷管路温度随时间变化曲线

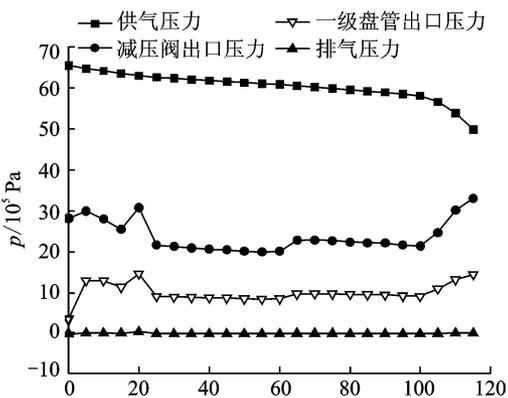


图3 制冷管路压力随时间变化曲线

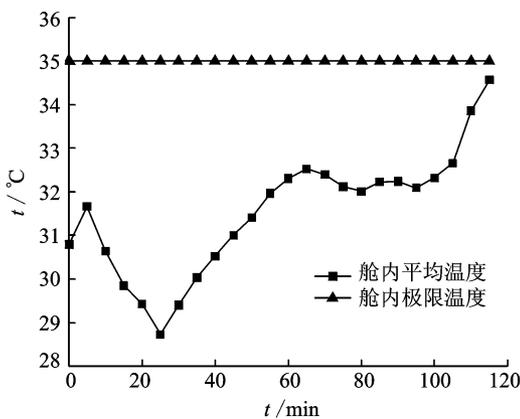


图4 设备舱温度为30℃时人员舱温度变化

蒸发压力控制在 $22 \times 10^5$  Pa左右较为合适。同时在此蒸发压力下,一级蒸发盘管出口温度约为18.5℃,此时的液体二氧化碳已经全部蒸发,一级蒸发器效率较高;并联的二级蒸发盘管出口温度约为27℃,二氧化碳的冷量得到进一步利用。

### 2.2 二氧化碳实验用量

二氧化碳的临界温度为31.1℃,二氧化碳的初始状态对其制冷性能有较大的影响,因此选择25,30和35℃这3个典型的工况来研究二氧化碳临界点附近、亚临界和超临界的制冷性能。为了确保二氧化碳储罐里面的二氧化碳达到环境温度,在实验前对设备舱进行6 h左右的保温运行,以储罐内的压力值作为判断储罐内二氧化碳温度的标准。人员舱的制冷量为1 150 W且控制温度在30~35℃之间,超过35℃则认为制冷失效。二氧化碳储罐温度控制在25和35℃时,人员舱温度随时间变化曲线如图5,6所示。二氧化碳的实验用量如表2所示。

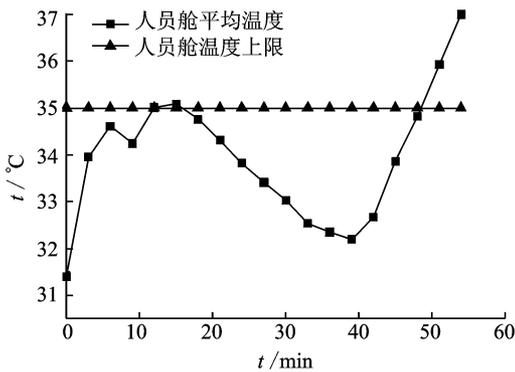


图5 设备舱温度为25℃时人员舱温度变化

### 2.3 二氧化碳理论用气量

二氧化碳的初始值和排气值见表3,二氧化碳单位时间理论用气量的计算如式(1)所示

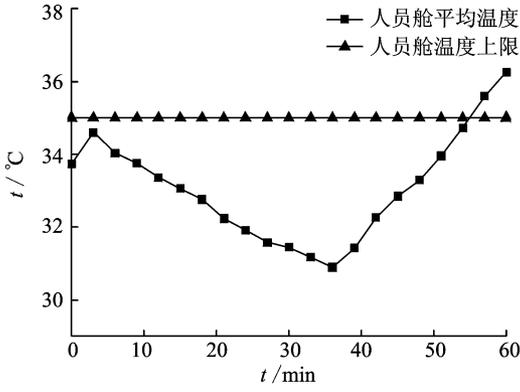


图6 设备舱温度为35℃时人员舱温度变化

表2 二氧化碳在不同存储温度下的实验用量

设备舱温度/℃	二氧化碳用量/kg	有效使用时间/min	单位时间用气量/(kg·h <sup>-1</sup> )
25	18	50	21.6
30	54	118	27.46
35	36	55	39.27

$$m = \frac{Q - Q_c}{h_1 - h_2} \quad (1)$$

式中:  $Q$  为人员舱总的热负荷;  $Q_c$  为结构散热量;  $h_1$  为高压储罐中二氧化碳的焓值;  $h_2$  为排气二氧化碳的焓值。

表3 二氧化碳不同存储温度下的热物性参数

储存温度/℃	储存压力/10 <sup>5</sup> Pa	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	初始焓值/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	理论排气温度/℃	理论排气压力/Pa	理论排气焓值/(kJ·kg <sup>-1</sup> )
25	64.2	450	314.32	30	0	506
30	72.1	450	334.7	30	0	506
35	80.2	450	345.69	30	0	506

结构散热量与舱体结构及舱内外温差有关。舱体的结构传热系数通过定加热量实验来获得。通过实验得出舱体的结构传热系数与面积的乘积为 49.124 W·℃<sup>-1</sup>。因此式(1)可以表示为

$$m = \frac{Q - KA(t_c - t_e)}{h_1 - h_2} \quad (2)$$

由此可以计算出理论用气量,理论用气量和实际用气量的比较如表4所示。

表4 二氧化碳在不同存储温度下理论用量与实验用量对比

温度/℃	理论用气量/(kg·h <sup>-1</sup> )	实验用气量/(kg·h <sup>-1</sup> )	实验用气量/理论用气量
25	21.41	21.6	1.01
30	23.95	27.46	1.15
35	25.6	39.27	1.53

由表4可以看出在25和30℃情况下理论用气

量和实验用气量较为接近,在35℃情况下实验用气量和理论用气量相差较大。由此可见在超临界条件下节流二氧化碳的冷量损失较大,因此应尽量将二氧化碳的储存环境温度保持在31℃以下,以提高二氧化碳的能量利用率。

## 2.4 制冷量损失分析

由图2可以看出二氧化碳的排气温度与人员舱温度较为接近且排气压力接近环境压力,管路中二氧化碳的制冷量利用率较高,所以制冷量的损失主要产生在储罐中。为了深入研究这部分制冷量损失,本文以储罐中的二氧化碳为研究对象进行理论分析。由于设备舱的温度保持不变,因此假设储罐中的二氧化碳为等温变化。本文对25,30和35℃这3种典型工况计算亚临界节流和超临界节流储罐中的制冷量损失。由于储罐倒放,亚临界节流在两相区时流出的是液态二氧化碳,在等温等容条件下,储罐内的二氧化碳压力维持不变,即罐内的液态二氧化碳会有部分蒸发为气态来维持等容过程,此时蒸发潜热即为罐内的冷量损失。在气相区时罐内液体为等温膨胀,膨胀吸热量为罐内的冷量损失。超临界节流由于罐内不存在相变,因此冷量损失与气相的制冷量损失计算相同。两相区制冷量损失的计算式如下

$$Q_2 = (h_g - h_l) \frac{\rho_g}{\rho_l} \quad (3)$$

式中:  $\rho_g, h_g$  分别为饱和气态二氧化碳的密度和焓;  $\rho_l, h_l$  分别为饱和液态二氧化碳的密度和焓。

由此可以计算出两相区的制冷量损失,如表5所示。

表5 二氧化碳在两相区的制冷量损失数值

饱和温度/℃	饱和液体密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	饱和气体密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	蒸发潜热/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	制冷量损失/(kJ·kg <sup>-1</sup> )
25	712.15	240.96	121.09	40.97
30	591.89	346.02	59.85	34.99

在气相区,焓值是密度的单值函数,可以表示为  $h=f(\rho)$ 。流出单位质量二氧化碳引起罐内的制冷量损失可由式(4)表示

$$Q_1 = \lim_{\Delta\rho \rightarrow 0} \frac{-L\rho\Delta h}{L\Delta\rho} = \lim_{\Delta\rho \rightarrow 0} \frac{-\rho\Delta f(\rho)}{\Delta\rho} \quad (4)$$

式中  $L$  为储罐的体积。

由式(4)可以看出罐内气相的制冷量损失与储罐的体积无关,通过式(3,4)可以得到25,30和35℃下的制冷量损失,如图7所示。

由图7可知,在制冷初期,超临界区和气相区的制冷量损失是两相区制冷量损失的3倍左右。图

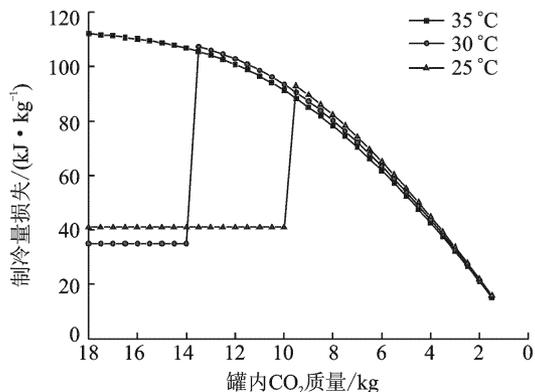


图7 不同存储温度下制冷量损失曲线

8为设备舱维持在30℃时钢瓶表面温度变化,由图可以看出,在制冷初期储罐表面温度变化较缓慢,当罐内为纯气体后表面温度迅速下降,可见制冷量损失较前期增大很多,这也是设备维持在35℃时理论制冷量和实验制冷量相差较大的原因,因此在超临界节流的情况下必须对储罐做好保温工作,阻止储罐中冷量的损失。

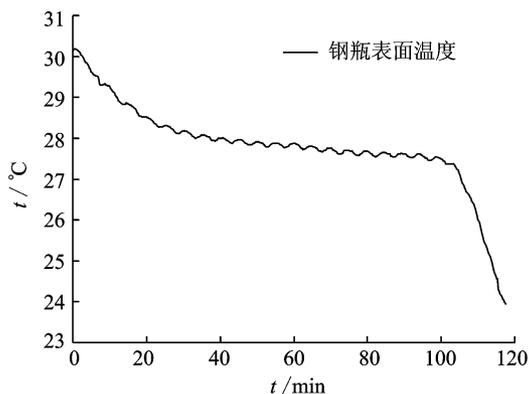


图8 设备舱30℃时储罐表面温度曲线

### 3 结 论

本文提出了一种密闭空间的开放式二氧化碳制冷系统,并搭建了实验平台,进行了实验研究和数据分析。同时考查了影响二氧化碳制冷特性的各种因素。研究结果表明:

(1)二氧化碳储存状态对其制冷性能影响较大,在超临界条件下制冷量损失较大。同时纯气体节流时储罐中的制冷量损失要远大于气液两相节流。

(2)在制冷过程中要对储罐进行绝热处理,防止储罐中的冷量损失。

(3)对于本制冷系统,节流压力为 $22 \times 10^5$  Pa左右较为合适。

### 参考文献:

- [1] 丁国良, 黄冬平. 二氧化碳制冷技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [2] Srinivasan K, Sheahan P, Sarathy C S P. Optimum thermodynamic conditions for upper pressure limits of transcritical carbon dioxide refrigeration cycle[J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(7): 1395-1401.
- [3] Chiarello M, Corradi M. Design and experimental analysis of a carbon dioxide transcritical chiller for commercial refrigeration[J]. Applied Energy, 2010, 87(6):95-101.
- [4] Kim M H, Pettersen J, Bullard C W. Fundamental process and system design issues in CO<sub>2</sub> vapor compression systems[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2004, 30(2): 119-174.
- [5] Andy P. Carbon dioxide—new uses for an old refrigerant [J]. International Journal of Refrigeration, 2005, 28(8): 1140-1148.
- [6] Subiantoro A, Ooi K T. Design analysis of the novel revolving vane expander in a transcritical carbon dioxide refrigeration system[J]. International Journal of Refrigeration, 2010, 33(4):75-85.
- [7] Kai W, Magnus E, Yunho H, et al. Review of secondary loop refrigeration systems [J]. International Journal of Refrigeration, 2010,33(2): 212-234.
- [8] 严嘉, 童明伟, 李夔宁. 浅析液体CO<sub>2</sub>冷藏车的运行经济性[J]. 制冷学报, 2004, 25(1): 31-35.
- [9] 严嘉, 童明伟, 苗胜田. 一种新型水产品冷藏运输车的可行性实验[J]. 制冷与空调, 2005(2): 53-55.