

# 两级脉冲管制冷机穿梭和泵气热损失计算分析

牛 强, 巨永林, 梁惊涛

(中国科学院 理化技术研究所低温中心, 北京 100080)

**摘 要:** 脉冲管制冷机以空管取代了 G-M 和斯特林型制冷机中的冷端活塞, 分析了由这种特点和交变流动引起的两级脉冲管制冷机的穿梭热损失和泵气热损失, 以及损失的来源, 并进行了详细的定量计算。

**关键词:** 脉冲管制冷机; 两级; 穿梭热损失; 泵气热损失

**中图分类号:** TB61<sup>+</sup>.1; TB651

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-7086(2003)02-0109-04

## SHUTTLE LOSS AND PUMPING GAS LOSS OF TWO-STAGE PULSE TUBE REFRIGERATOR

NIU Qiang, JU Yong-lin, LIANG Jing-tao

(Cryogenic Laboratory, Technical Institute of Physics and Chemistry  
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** The unique feature of the pulse tube refrigerator is of using a blank thin-wall tube replacing the cold piston inside the G-M and Stirling refrigerators. The shuttle loss and pumping gas loss of two-stage pulse tube refrigerators originating from the empty tube under oscillating flow conditions are analyzed. The origin of the two losses is explained and the quantitative values for both losses are calculated in detail.

**Key words:** pulse tube refrigerators; two-stage; shuttle loss; pumping gas loss

## 1 引 言

在低温制冷机的工作中, 各种形式的热损失占去了理论制冷量的很大一部分。例如, 对于斯特林型制冷机, 这一比例可达 80%~90%<sup>[1]</sup>。从 1984 年至今, 脉冲管制冷机的理论和实验研究都取得了很大的进展。目前, 单级脉冲管制冷机的性能已经达到了斯特林和 GM 型制冷机的平均水平; 两级脉冲管制冷机在 4.2 K 可以提供 1 W 左右的制冷量; 各种计算模型也部分解决了脉冲管的制冷机理问题。

但是, 由于脉冲管制冷机的独特结构, 目前其制冷量的理论计算仍存在许多需要解决的问题, 关于脉冲管, 特别是两级脉冲管中的热损失计算还没有在国内的文献中发现。

本文对两级小孔型脉冲管中的穿梭热损失和泵气热损失进行了分析和计算。

## 2 穿梭热损失

在对脉冲管制冷机理的分析中, 通常将脉冲管中气体假设成三部分, 一部分在热端进出气库, 一部分在冷端进出蓄冷器, 中间的部分始终处于脉冲管中, 称为气体活塞。气体活塞在由冷端至热端的往复运动过程中, 由于其与脉冲管壁存在温差, 造成部分热量由热端传向冷端, 形成热损失, 即穿梭热损失。在斯特林型制冷机中, 穿梭热损失占有很大的比重。

收稿日期: 2003-01-14.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50176052)。

作者简介: 牛强(1977-), 男, 辽宁省鞍山市人, 硕士, 从事脉冲管制冷机的研究。

参考斯特林型制冷机中的计算, 穿梭热损失可以按下式计算

$$Q_{sh} = QXf / L_0 \quad (1)$$

式中  $Q$  为一个周期中的传热量;  $X$  为气体活塞的行程;  $f$  为频率;  $L_0$  为气体活塞长度。在一个周期中

$$Q = \lambda A \frac{\Delta T}{\delta} \Delta t \quad (2)$$

式中  $\lambda$  为导热系数;  $A$  为导热面积;  $\Delta T$  为温度差;  $\delta$  为气体活塞与脉冲管壁间缝隙宽度, 即边界层厚度;  $\Delta t$  为导热时间。

### 2.1 气体活塞长度及行程

对于小孔到脉冲管制冷机, 由于相对于脉冲管气库体积很大, 其中压力波动很小, 有

$$L_0 = L_{pt} - \frac{x_h + x_c}{2} \quad (3)$$

$$X = \frac{x_h + x_c}{2} \quad (4)$$

式中  $x_h$ 、 $x_c$  分别为进出气库和蓄冷器的气柱长度。参考文献[2]中气库系数  $\Phi$  的概念

$$x_h = \Phi L_{pt} \quad (5)$$

$$\Phi = \frac{\Delta p_r V_r}{k p_r V_{pt}} \quad (6)$$

由此可以看出, 通过改变气库体积就可以改变  $x_h$  的值。实际上, 一般  $x_h$  对应着小孔阀的开度, 并随小孔的开度增大而增大。对于基本型脉冲管制冷机

$$x_{cb} = L_{pt} [1 - (p_h / p_l)^{1/k}] \quad (7)$$

对于小孔型脉冲管制冷机, 参考文献[3]有

$$X_c = \sqrt{x_{cb}^2 + x_h^2} \quad (8)$$

### 2.2 边界层厚度

由于流动情况十分复杂, 这是较难计算的一个参数。先考虑稳定流动中的大平板表面边界层厚度

$$\delta = 5.8 \sqrt{\frac{\mu_x}{\rho U}} \quad (9)$$

作为类比并参考文献[3], 取

$$x = X / 2 \quad (10)$$

$$U = 2Xf \quad (11)$$

## 3 泵气热损失

当脉冲管中气体压力周期性变化时, 气体活塞与管壁间(即边界层)的气体质量也周期性的变化, 随压力的升高, 有一部分气体从冷端进入这一间隙, 并吸收热量, 当压力降低时, 一部分气体从这一间隙中流出, 并放出热量。由于换热不充分, 这一部分气体返回冷端时, 温度尚高于冷端温度, 造成了冷端的附加热负荷, 即泵气热损失。

为定量计算泵气热损失, 将边界层中气体看作为一个换热器, 其换热面积为

$$A = 2\pi D L_0 \quad (12)$$

换热效率为  $\eta$  换热系数为  $\alpha$  当量直径

$$D_h = \frac{4\pi \bar{Q}_0}{2\pi D L_0} = 2\delta \quad (13)$$

边界层中, 气体为层流, 按换热准则方程

$$\frac{\alpha}{\lambda} = 1.5 \left[ \frac{M c_p}{\lambda_0} \right]^{0.4} \quad (14)$$

式中  $M$  是进出边界层的质量流量

$$M = 2f(m_{\max} - m_{\min}) = 2f \pi D L_0 \delta (\rho_h - \rho) \quad (15)$$

式中  $\rho_h$  和  $\rho$  分别为高低压时的气体密度。

该换热器的传热单元数  $NTU \gg 1$ , 其换热损失率为

$$1 - \eta = \frac{1}{1 + NTU} \approx \frac{1}{NTU} = \frac{2M c_p}{\alpha} \quad (16)$$

所以, 其不完全换热量, 即泵气热损失

$$Q_p = (1 - \eta) M c_p (T_h - T_l) \quad (17)$$

#### 4 两级脉冲管制冷机的计算

按照以上给出的公式, 可以比较方便的计算一级脉冲管制冷机的穿梭和泵气热损失。对于两级脉冲管制冷机, 前文的大部分公式都同样适用, 只需要重新计算分析一、二级脉冲管进出气库的气体比例。

假设气库压力波动为  $\Delta p$

$$p_r V_r = m R T \quad (18)$$

$$\Delta p = \Delta n R T + m R \Delta T \quad (19)$$

假设气库内气体为绝热压缩和膨胀

$$\frac{T}{p^{\frac{k-1}{k}}} = \frac{T + \Delta T}{(p + \Delta p)^{\frac{k-1}{k}}} \quad (20)$$

$$\Delta T = \frac{k-1}{k} \cdot \frac{T \Delta p}{p} \quad (21)$$

$$\Delta n = \Delta n_1 + \Delta n_2 \quad (22)$$

$$\Delta p V_r = V_r \cdot \frac{k-1}{k} \Delta p + (\Delta n_1 + \Delta n_2) R T \quad (23)$$

式中  $\Delta n_1$ 、 $\Delta n_2$  为一、二级进出气库的质量。

参考前文气库系数的概念

$$\frac{\Delta p}{p k} = \frac{\Delta V_1}{V_r} + \frac{\Delta V_2}{V_r} = \frac{\Phi V_{pt1} + \Phi V_{pt2}}{V_r} \quad (24)$$

$$x_{h1} = \Phi L_{pt1} \quad (25)$$

$$x_{h2} = \Phi L_{pt2} \quad (26)$$

式中  $\Phi$ 、 $\Phi$  为一、二级的的气库系数;  $x_{h1}$ 、 $x_{h2}$  为一、二级进出气库的气柱长度。由此, 通过试算可以确定  $x_{h1}$ 、 $x_{h2}$ , 实际上这对应着相应小孔阀的开度。

#### 5 理论制冷量的计算

目前关于脉冲管制冷机的理论模型给出的理论制冷量和实验值都有比较大的差距, 而且计算较为复杂, 为便于分析, 采用文献[2]中给出的公式进行计算。

$$Q_c = c \pi V_{pt} f p_r \cdot F(p_s/p_r) \quad (27)$$

式中  $c$  为修正系数, 本次计算中取 1.0。

#### 6 计算结果与分析

图 1 是对一单级脉冲管制冷机的热损失计算结果, 其脉冲管尺寸为  $\Phi 5 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$ , 计算中取热端温度为 300 K, 冷端温度为 50 K, 图 1 的纵坐标为热损失与理论制冷量的比值(下同)。

图 2 是两级脉冲管制冷机的热损失的计算结果, 其脉冲管尺寸为, 一级  $\Phi 5 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$ , (与单级脉冲管相同), 二级  $\Phi 7 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ 。计算中热端温度取值为 300 K, 一级冷端温度为 50 K (与单级脉冲管相同), 二级冷端温度为 15 K。

从以上计算结果可以看出, 由于二级温度较低, 尺寸较小, 所以损失明显大于一级和单级脉冲管, 而且其热损失  $x_h/L_{pt}$  变化的影响也更大。这说明, 为提高制冷机效率, 应更多地从二级着手。从计算公式中可以看

出,当边界层厚度较大时,即导热层厚度较大,穿梭热损失较小;而对于泵气热损失,这意味着有更多的质量流量,所以泵气热损失较大。从计算结果中可以清楚地看到这个结论,当泵气热损失增大时,穿梭热损失明显减小。当脉冲管中 30% 左右气体进出气库时,热损失较小。对于二级脉冲管制冷机,二级总损失的最小值占理论制冷量的 40% 左右,而随  $x_h/L_{pt}$  的变化,这个比例显著增大,在调相装置的设计和使用中,应充分考虑这一点,为减小热损失,应使  $x_h/L_{pt}$  达到最优值。

长径比是脉冲管制冷机设计中的一个重要参数,图 3 和图 4 分别是一单级脉冲管和一两级脉冲管的二

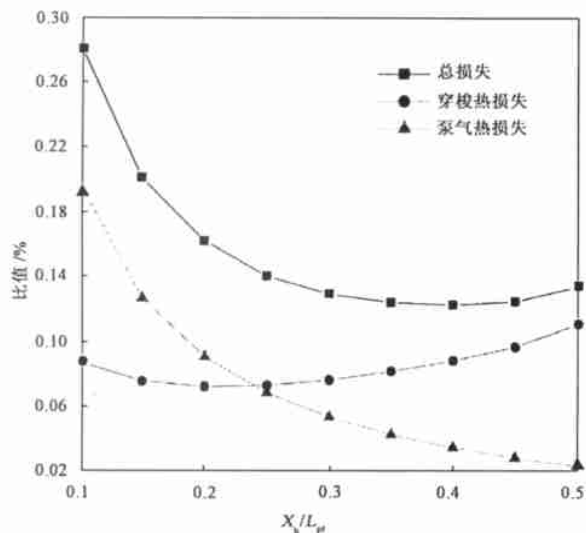


图 1 单级脉冲管制冷机的热损失计算结果

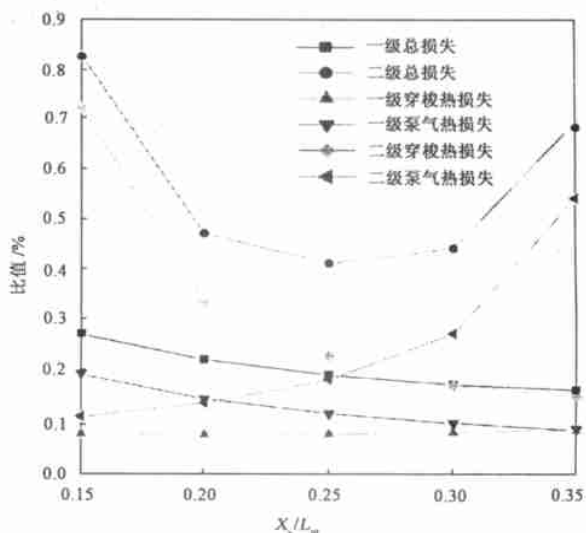


图 2 两级脉冲管制冷机的热损失计算结果

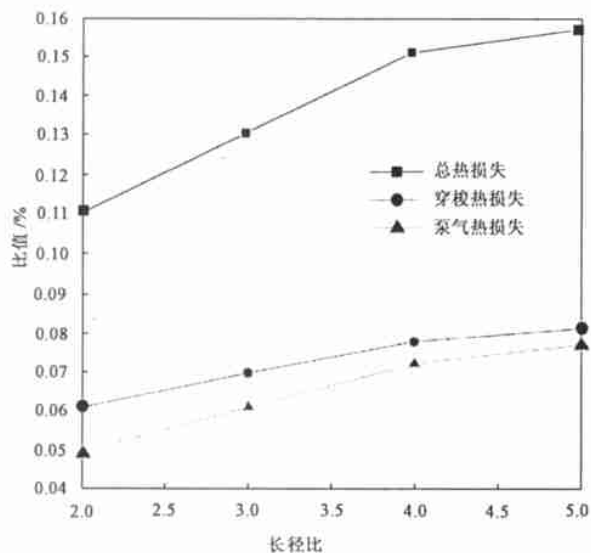


图 3 单级脉冲管热损失随长径比变化的计算结果

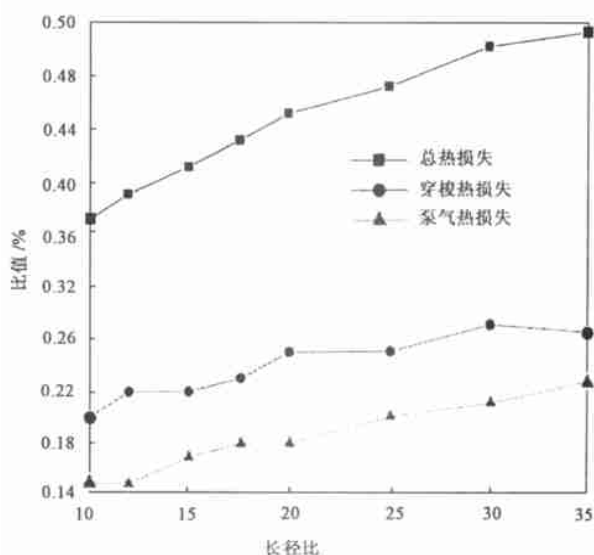


图 4 两级脉冲管的二级部分热损失随长径比变化计算结果

级部分热损失随长径比变化的计算结果。计算中,脉冲管体积和  $x_h/L_{pt}$  保持不变。图的纵坐标为热损失与理论制冷量的比值。

一般认为,脉冲管的长径比应在 5~9 之间,对于尺寸较大的脉冲管可以小一些。过小的长径比,将导致脉冲管内气流紊乱,制冷温度升高,制冷机性能恶化。从计算结果可以看出,穿梭和泵气热损失随长径比的减

(下转第 123 页)

## 参考文献:

- [1] 毕龙生. 低温容器应用进展及发展前景(一)[J]. 真空与低温, 1999, 5(3): 125~134.
- [2] 徐烈. 我国低温绝热与贮运技术的发展与应用[J]. 低温工程, 2001, (2): 1~8.
- [3] 蒋吉林, 陈海鹏. 关于在用低温液体贮运容器夹层真空度的探讨[J]. 深冷技术, 2002, (1): 10~12.
- [4] NAIXIN XU, LINGYUAN ZHAO, CUIHONG DING, *et al.* Laboratory observation of dew formation at an early stage of atmospheric corrosion of metal[J]. Corrosion Science, 2002 44: 163~170.
- [5] NO HEE CHEON, PARK HYUN SIK. Non-iterative condensation modeling for steam condensation with non-condensable gas in a vertical tube[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2002, 45(4): 845~854.

(上接第 92 页)

- [23] ISO/DIS 3570. Vacuum gauges-Standard methods for calibration-Part 1: Pressure reduction by continuous flow in the pressure range of  $10^{-1}$  to  $10^{-5}$  Pa [S]. United Kingdom, 1975.
- [24] 李得天. 热阴极与冷阴极电离规稳定性的比较研究[J]. 真空与低温, 2002, 4: 201.
- [25] TILFORD C R. Reliability of high vacuum measurements[J]. J. Vac. Sci. Technol. A, 1983, 1: 152.
- [26] BERMAN A. Total pressure measurement in vacuum technology[M]. New York: Academic, 1985. 338~354.
- [27] WATANABE F. Comparative effects of gauge-wall materials on the outgassing rate of a hot-cathode ionization gauge[J]. J. Vac. Sci. Technol. A, 1993, 11: 432.

(上接第 104 页)

- [2] DEKKER C. Carbon nanotubes as molecular quantum wires[J]. Physics Today, 1999, 52(5): 22~28.
- [3] SEVICK R F. Superstrong nanotubes show they are smart, too[J]. Science, 1998, 282(5391): 1105~1107.
- [4] REN Z F, HUANG Z P, XU J W, *et al.* Synthesis of large arrays of well-aligned carbon nanotubes on glass[J]. Science, 1998, 282(5391): 1105~1107.
- [5] 王升高, 汪建华, 满卫东, 等. 微波等离子体化学气相沉积法低温合成纳米碳管的生长机理研究[J]. 无机化学学报, 2002, 18(6): 611~615.
- [6] SINNOTT S B, ANDERWS R, QIAN D, *et al.* Model of carbon nanotubes growth through chemical vapor deposition[J]. Chem. Phys. Lett., 1999, 315(1,2): 25~30.
- [7] QIN L C, ZHOU D, KRAUSS A R, *et al.* Growing carbon nanotubes by microwave plasma-enhanced chemical vapor deposition[J]. Appl. Phys. Lett., 1998, 72(26): 3437~3439.
- [8] CHOI Y C, BAE D J, LEEY H, *et al.* Growth of carbon nanotubes by microwave plasma-enhanced chemical vapor deposition at low temperature[J]. J. Vac. Sci. Technol. A, 2000, 18(4): 1864~1868.

(上接第 112 页)

小而减小, 对于尺寸较大的两级脉冲管制冷机, 适当减小长径比可以减小以上 2 种热损失, 有助于制冷量的提高。在减小脉冲管长径比的同时, 必须加强脉冲管冷热两端的导流装置, 良好的导流器可以在很大程度上改善脉冲管内的气流, 防止制冷性能恶化。

## 参考文献:

- [1] 边绍雄. 小型低温制冷机[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994. 72~73.
- [2] 杨鲁伟. 脉冲管制冷机的深入研究与实用化[R]. 博士后研究报告. 北京: 中科院低温技术实验中心, 1998, 10.
- [3] YANG L W. Shuttle loss in pulse[J]. Cryocoolers, 2001, 11: 353~362.