

及自调节特性等复杂因素的影响,但实验仍确凿地观察到了温度振荡的明显特征,这一发现更新了传统上将生物活体组织温度振荡效应本质归结于血液受热而发生振荡变化继而导致温度振荡<sup>[4]</sup>以及温度振荡由内部节律性和微血管的周期缩张引起<sup>[5]</sup>的认识.它也首次揭示出,自然界中凡具有类似结构(热物性应相当)的系统在受到热作用时都会体现出温度振荡和滞后的效应,热波理论在解释该类现象上具有普遍的指导意义.

进一步的详细试验结果将另文介绍.

### 参 考 文 献

- 1 刘静,任泽霁,王存诚.生物活体温升振荡效应的热波解释.科学通报,1995;40:1247~1248
- 2 Baish J W, Foster K R, Ayyaswamy P S. Perfused Phantom Models of Microwave Irradiated Tissue. ASME J of Biomechanical Eng,1986;108:239~245
- 3 Kaminski W. Hyperbolic Heat Conduction Equation for Material with a Non-homogeneous Inner Structure. ASME J Heat Transfer,1990;112:555~560
- 4 Roemer R B, Oleson J R, Cetas T C. Oscillatory temperature response to constant power applied to canine muscle. Amer J Physiol,1985;249:153~158
- 5 王艳民.肿瘤热疗中的热物理基础研究:[清华大学博士论文],1994

刘静 任泽霁 王存诚

(清华大学热能工程系 北京 100084)

## 两有限热源制冷循环的优化性能

自有限时间热力学提出以来,对两无限热源内可逆制冷循环已有较多的研究<sup>[1~6]</sup>,但对两有限热源制冷循环还研究不多,尚未有普遍的理论.本文应用有限时间热力学理论,证明了牛顿定律两有限热源内可逆制冷循环在给定的循环制冷量  $Q_2$  和循环周期  $\tau$  的情况下,制冷系数最大的循环(最优循环)是由两个绝热过程和两个温度随时间分别作指数衰减和指数增加的热交换过程所构成,并求出循环的最佳制冷系数  $\epsilon$  与制冷率  $R$  间的关系,即循环的基本优化关系

$$R = -KQ_2 \left\{ \frac{1}{C_2 \ln[1 - Q_2/(C_2 T_L)]} + \frac{1}{C_1 \ln[1 + Q_2(1 + \epsilon^{-1})/(C_1 T_H)]} \right\} \quad (1)$$

其中  $C_1$ 、 $C_2$  和  $T_H$ 、 $T_L$  分别为高、低温热源的热容和初始温度,  $K = \alpha\beta/(\sqrt{\alpha} + \sqrt{\beta})^2$ , 而  $\alpha$ 、 $\beta$  分别为工质与高、低温热源间的传热系数.应用式(1),可讨论循环的各种优化性能.

1. 由式(1)可知,  $\epsilon$  是  $R$  的单减函数.当  $R$  达到最高界限

$$R_{\max} = -KQ_2 / \{C_2 \ln[1 - Q_2/(C_2 T_L)]\} \quad (2)$$

时,  $\epsilon = 0$ ; 而当  $\epsilon$  达到最高界限

$$\epsilon_{\max} = \left\{ \frac{C_1 T_H}{Q_2} \left[ \left( 1 - \frac{Q_2}{C_2 T_L} \right)^{-C_2/C_1} - 1 \right] - 1 \right\}^{-1} \quad (3)$$

时,  $R = 0$ . 所以实际制冷机的  $\epsilon$  和  $R$  都不可能达到  $\epsilon_{\max}$  和  $R_{\max}$ , 而需两者兼顾和协调.

2.  $\epsilon_{\max}$ 是两有限热源可逆制冷循环的制冷系数. 当  $C_1=C_2=-C_p$  ( $C_p$  为气体工质的定压热容)时,式(3)可简化为

$$\epsilon = \left( \frac{T_H}{T_L + Q_2/C_p} - 1 \right)^{-1} \quad (4)$$

式(4)正是给定制冷量  $Q_2$  下,可逆气体布雷顿制冷循环的制冷系数<sup>[9]</sup>. 并可将它表为

$$\epsilon = [r_p^{(k-1)/k} - 1]^{-1} \quad (5)$$

其中  $r_p$  为压力比,  $k$  为比热比.

3. 当两热源均为无限,即  $C_1 \rightarrow \infty, C_2 \rightarrow \infty$ 时,式(1)~(3)转化为内可逆卡诺制冷循环的结果<sup>[1~3,6]</sup>;当低温热源有限,即  $C_1 \rightarrow \infty, C_2$  有限时,式(1)~(3)转化为文献[4]的结果;当高温热源有限,即  $C_2 \rightarrow \infty, C_1$  有限时,式(1)转化为

$$R = K \left\{ T_L - \frac{Q_2}{C_1 \ln[1 + Q_2(1 + \epsilon^{-1})/(C_1 T_H)]} \right\} \quad (6)$$

式(6)可用来讨论高温热源有限的内可逆制冷循环的优化性能.

4. 由式(1)尚可导出制冷循环的其它优化性能,诸如最小熵产率,最小附加功率,工质与热源最佳温度变化的匹配条件,等等.

总之,式(1)是制冷循环的一个很普遍的重要基本优化关系式,它包括了已有文献中许多重要结果,同时又可推出许多有用的新结论.

## 参 考 文 献

- 1 严子浚. 物理,1984;13(12):768~770
- 2 严子浚. 低温与超导,1985;13(2):19~25
- 3 陈天择. 厦门大学学报(自然科学版),1985;24(4):442~447
- 4 陈金灿,严子浚. 低温工程,1987;(4):27~36
- 5 Chen J, Yan Z. J Appl Phys, 1989;63(10):4795~4798
- 6 Yan Z, Chen J. J Phys D: Appl Phys, 1990;23(2):136~141
- 7 Agrawal D C, Menon V J. J Appl Phys, 1993;74(4):2153~2158
- 8 Grazzini G. Int J Refrig, 1993;16(2):101~106
- 9 沃克 K. 马元等译. 热力学(下册). 北京:高等教育出版社,1982:276~279

严子浚  
(厦门大学物理系 361005)

黄慧广  
(齐齐哈尔市第一机床总公司)