

# 高温吸收式热泵的生态学准则优化

陈天择 严子浚

(厦门大学)

**摘要** 本文以可使循环的供热率与供热率耗散达到最佳折衷的生态学准则为目标,研究高温吸收式热泵的优化问题。导出热泵的一些新性能参数,并作些有意义的讨论。所得结论可为高温三热源热泵和热机的优化设计和最佳工况的选择提供些新的理论指导。

**关键词** 有限时间热力学 高温吸收式热泵 生态学准则 优化性能

**分类号** TK123 O414

## 0 引言

高温吸收式热泵也叫第二类吸收式热泵(简称 AHHI)。其致热空间的温度  $T_P$  高于驱动热源的温度  $T_H$ ,故又称为升温机(Temperature Booster)。它是一种有效节能装置,可直接利用中、低温余热作为驱动热源,节能效果显著。这已引起许多先进工业国家的重视。近年来,这类热泵技术有了较大的发展,各种构思新颖的装置不断问世。理论上也有相应的进展。尤其有些学者应用有限时间热力学新理论对其进行优化分析,取得一些由经典热力学理论所不可能得到的新结论<sup>[1-4]</sup>,发现在热泵的合理工作区域中,供热率越大时,消耗的耗散率也越大。所以应用热泵时,应使这两者得到合理的兼顾和最佳的折衷,以便使能量得到更有效的利用,符合生态学的长期目标。于是,有些学者提出以“生态学准则”研究热力循环的优化性能<sup>[5-8]</sup>,使热力循环的功能率(如热机的功率、热泵的供热率等)与功能率耗散达到最佳的折衷。本文进一步应用此准则对高温吸收式热泵进行优化分析,获得一些对热泵的优化设计和最佳工况的选择均有指导意义的新结论。

## 2 热泵的生态学目标函数

考虑一个工作于驱动热源温度  $T_H$ ,致热空间温度  $T_P$ 和环境温度  $T_0$ 间的高温吸收式热泵,工质与热源间存在热阻,传热遵从牛顿定律,传热系数为  $\Gamma$ 。对此类三热源热泵,与二热源循环相类似,可引进生态学目标函数<sup>[6-8]</sup>

$$E = C - \lambda T_0 e = C - \lambda \Delta A \quad (1)$$

来建立生态学优化准则,其中  $C$ 、 $e$ 和 $\Delta A$ 分别为热泵的供热率、熵产率和焓耗散率,而 $\lambda$ 称为供热率耗散系数,即热泵的供热率耗散 $\lambda \Delta A$ 与焓耗散率 $\Delta A$ 之比。由它可将热泵的焓耗散率转化为供热率耗散。 $\lambda$ 的意义是很明确的,即可逆的条件下,不存在焓耗散,从而可用 $\Delta A$ 产生 $\lambda \Delta A$ 的供热率。由此可见,对此类热泵

$$\lambda = T_P / (T_P - T_0) \quad (2)$$

因为在所设的致热空间温度  $T_P$ 和环境温度  $T_0$ 的条件下,单位时间向热泵输入量值为 $\Delta A$ 的功时,在可逆情况下可产生量值为 $\Delta A \cdot T_P / (T_P - T_0)$ 的供热量。式(2)也不难由热泵的熵产率

$$e = C \left[ j^{-1} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_H} \right) - \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_P} \right) \right] \quad (3)$$

(其中  $j$  为热泵的供热系数)及可逆供热系数

$$j_r = (T_0^{-1} - T_H^{-1}) / (T_0^{-1} - T_P^{-1}) \quad (4)$$

得到证明。因为由式(3)和(4),可得

$$C(j^{-1} j_r - 1) = \frac{T_P}{T_P - T_0} T_0 e = \frac{T_P}{T_P - T_0} \Delta A \quad (5)$$

其中  $C_{j-1}$  是可逆热泵的供热率  $C_r$ 。于是可将式 (5) 写成

$$\Delta A \cdot T_P / (T_P - T_0) = C_r - C \quad (6)$$

而  $C_r - C$  即为不可逆热泵供热率的耗散。这样就证明了式 (2)。

将式 (5) 代入式 (1), 可得热泵的生态学目标函数

$$E = C(2 - j_r j) \quad (7)$$

再根据内可逆高温吸收式热泵的供热率  $C$  与供热系数  $j$  间的优化关系<sup>[1,2]</sup>

$$C = \frac{T}{4} (T_H - T_0) \frac{1 - j_r j}{j - 1 + T_0 / T_P} \quad (8)$$

可将热泵的生态学目标函数写成

$$E = \frac{T}{4} (T_H - T_0) \frac{(2j - j_r j)(j_r - j)}{j_r - (1 - T_0 / T_H) j} \quad (9)$$

### 3 E 最大时的供热系数、供热率和 耗散率

由式 (9) 和极值条件  $dE/dj = 0$ , 不难求得  $E$  最大时的供热系数

$$j_E = \left(1 - \frac{T_0}{T_H} \frac{T_0 + T_H}{2T_H}\right) \frac{T_P}{T_P - T_0} \quad (10)$$

再将式 (10) 代入式 (8), 可得  $E$  最大时的供热率

$$C_E = \frac{T T_H}{4} \left(1 - \frac{2T_0}{T_0 + T_H}\right) \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_H} \frac{T_0 + T_H}{2T_H}\right) \frac{T_P}{T_P - T_0} \quad (11)$$

而由式 (5)、(10) 和 (11), 可得  $E$  最大时的 耗散率和熵产率分别为

$$\Delta A_E = \frac{T T_0}{4} \left(1 - \frac{2T_0}{T_0 + T_H}\right) \left(\frac{T_0 + T_H}{2T_0} - 1\right) \quad (12)$$

$$e_E = \frac{T}{4} \left(1 - \frac{2T_0}{T_0 + T_H}\right) \left(\frac{T_0 + T_H}{2T_0} - 1\right) \quad (13)$$

另一方面, 由式 (8) 和极值条件  $dC/dj = 0$ , 可得最大供热率

$$C_{max} = \frac{T T_H}{4} \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right)^2 \frac{T_P}{T_P - T_0} \quad (14)$$

而这时相应的供热系数、熵产率和 耗散率分别为

$$j_m = \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right) T_P / (T_P - T_0) \quad (15)$$

$$e_m = \frac{T}{4} \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right) \left(\frac{T_H}{T_0} - 1\right) \quad (16)$$

$$\Delta A_m = \frac{T T_0}{4} \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right) \left(\frac{T_H}{T_0} - 1\right) \quad (17)$$

将式 (10)、(11) 和 (12) 分别与式 (15)、(14) 和 (17) 相

比可得

$$\frac{j_E}{j_m} = \left(1 - \frac{T_0}{T_H} \frac{T_0 + T_H}{2T_H}\right) / \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right) \quad (18)$$

$$\frac{C_E}{C_{max}} = \left(1 - \frac{2T_0}{T_0 + T_H}\right) \left(1 - \frac{T_0}{T_H} \frac{T_0 + T_H}{2T_H}\right) / \left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right)^2 \quad (19)$$

$$\frac{\Delta A_E}{\Delta A_m} = \left(1 - \frac{2T_0}{T_0 + T_H}\right) \left(\frac{T_0 + T_H}{2T_0} - 1\right) / \left[\left(1 - \frac{T_0}{T_H}\right) \left(\frac{T_H}{T_0} - 1\right)\right] \quad (20)$$

而式 (18)、(19)、(20) 在  $T_0/T_H \rightarrow 0$  和  $T_0/T_H \rightarrow 1$  两种情况下的极限分别为

$$\lim_{T_0/T_H \rightarrow 0} \frac{j_E}{j_m} = 1; \quad \lim_{T_0/T_H \rightarrow 1} \frac{j_E}{j_m} = \frac{3}{2} \quad (21)$$

$$\lim_{T_0/T_H \rightarrow 0} \frac{C_E}{C_{max}} = 1; \quad \lim_{T_0/T_H \rightarrow 1} \frac{C_E}{C_{max}} = \frac{1}{2} \quad (22)$$

$$\lim_{T_0/T_H \rightarrow 0} \frac{\Delta A_E}{\Delta A_m} = \frac{2}{4}; \quad \lim_{T_0/T_H \rightarrow 1} \frac{\Delta A_E}{\Delta A_m} = \frac{1}{4} \quad (23)$$

这些结果表明了高温吸收式热泵工作在最大  $E$  工况比工作在最大供热率工况总的说来较为优越, 后者的 耗散率一般还不止前者的 3 倍, 而前者的供热率至少也有  $C_{max}/2$ , 而且一般情况下可超过  $2C_{max}/3$ , 下面举个实例来说明。

设一高温吸收式热泵,  $T_H = 400 \text{ K}$ ,  $T_0 = 300 \text{ K}$ ,  $T_P = 500 \text{ K}$  则有  $j_E/j_m = 1.42$ ,  $C_E/C_{max} = 0.783 > 2/3$ ,  $\Delta A_E/\Delta A_m = 0.287 < 1/3$  这进一步表明了热泵工作在最大  $E$  工况一般说来比工作在最大供热率工况优越, 供热率约可达到最大供热率的 80%, 而 耗散率还不到最大供热率时的 30%。这时供热率耗散约  $C_E$  的三分之一, 从而可使热泵的供热率与供热率耗散达到最佳的折衷。

### 4 内可逆卡诺热机的生态学优化性能

由于  $T \rightarrow \infty$  的热源相当于一个热源, 因而一台  $T_P \rightarrow \infty$  的三热源热泵, 相当于一台热机, 而上文的结果可用于讨论内可逆卡诺热机的生态学优化性能。

当  $T_P \rightarrow \infty$  时, 热泵的供热率  $C$  相当于热机的输出功率  $P$ , 供热系数  $j$  相当于热机的效率  $Z$ ,  $j$  相当于卡诺效率  $Z_6$ 。这样, 式 (8) 和式 (9) 可分别写成

$$P = T/4 \cdot T_H Z \cdot (Z_6 - Z) / (1 - Z) \quad (24)$$

$$E = T/4 \cdot T_H \cdot [(2Z - Z_6)(Z_6 - Z)] / (1 - Z) \quad (25)$$

式 (24) 正是内可逆卡诺热机的输出功率与效率间的

优化关系<sup>[9]</sup>,而式(25)正是其相应的生态学准则函数。因此,由式(10)~(13)可直接得到内可逆卡诺热机的生态学优化性能,诸如最大 $E$ 时的效率 $Z_E$ ,输出功率 $P_E$ ,能耗散率 $\Delta A_E$ 和熵产率 $e_E$ 等,

$$Z_E = 1 - \frac{T_0}{T_H} \frac{T_0 + T_H}{2T_H} \quad (26)$$

$$P_E = \frac{T_T}{4} \left( 1 - \frac{2T_0}{T_0 + T_H} \right) \cdot \left( 1 - \frac{T_0}{T_H} \frac{T_0 + T_H}{2T_H} \right) \quad (27)$$

$$\Delta A_E = \frac{T_T}{4} \left( 1 - \frac{2T_0}{T_0 + T_H} \right) \left( \frac{T_0 + T_H}{2T_0} - 1 \right) \quad (28)$$

$$e_E = \frac{T}{4} \left( 1 - \frac{2T_0}{T_0 + T_H} \right) \left( \frac{T_0 + T_H}{2T_0} - 1 \right) \quad (29)$$

式(26)与文献[5,6]的结果一致,说明了本文的结果具有普遍意义,不仅适用于三热源热泵,而且适用于卡诺热机。而式(27)、(28)和(29)是本文导出的新结果,它与式(26)一起更完整地表示了内可逆卡诺热机的生态学优化性能。有趣的是,式(28)和(29)与式(12)和(13)完全一样。这表明内可逆卡诺热机的不可逆损失与内可逆高温吸收式热泵的完全一样。这不难理解,因为所考虑的高温吸收式热泵,可视为一个工作于 $T_H$ 和 $T_0$ 热源间的内可逆卡诺热机驱动一个工作于 $T_T$ 和 $T_0$ 热源间的可逆卡诺热泵的联合循环系统<sup>[2]</sup>。而可逆卡诺热泵中没有不可逆损失,因而这种联合系统的不可逆损失也就是内可逆卡诺热机中的不可逆损失。

## 5 讨论和结论

5.1 生态学准则的最主要特点是可使热力循环的功能率与功能率耗散达到最佳折衷。由它确定的内可逆高温吸收式热泵(包括内可逆卡诺热机)的最佳工况点具有生态学优化意义,既有利于节约能量和提高能源利用率,又可使供热量(或输出功率)得到

较合理的兼顾。因此生态学准则是一条很有用的准则,对热力循环的优化设计有参考价值,可为热力循环最佳工况点的选择提供一个具有生态学优化意义的备选方案。

5.2 通过对高温吸收式热泵生态学准则的研究,进一步揭示了三热源循环与二热源循环之间的内在联系。这有助于对三热源循环性能的深入了解,提供一些简便的理论分析方法<sup>[2,3]</sup>。

总之,对三热源循环生态学优化性能的研究是很有意义的。它既可丰富有限时间热力学理论的内容,又可对三热源循环新技术的开发利用提供些新理论依据。

## 参 考 文 献

- 1 严子浚,陈苏煌.三热源热泵循环的最佳泵热率与供热系数间的关系.科学通报,1987,32(16):1280
- 2 严子浚,陈金灿.内可逆三热源热泵的联合循环分析.太阳能学报,1989,10(1):49-56
- 3 Chen J, Yan Z. Equivalent combined systems of three-heat-source heat pumps. J. Chem. Phys., 1989, 90(9): 4951-4955
- 4 Yan Z, Chen J. The maximum overall coefficient of performance of a solar-driven heat pump system. J. Appl. Phys., 1994, 76(12): 8129-8134
- 5 Angulo-Brown F. An ecological optimization criterion for finite-time heat engines. J. Appl. Phys., 1991, 69(11): 7465-7469
- 6 Yan Z. Comment on "An ecological optimization criterion for finite-time heat engines". J. Appl. Phys., 1993, 73(7): 3583
- 7 陈林根等.三热源制冷机的生态学最优性能.低温工程,1993(3):38-40
- 8 严子浚等.关于有限时间热力循环生态学准则的一点注记.科技通报,1995,11(1):15-17
- 9 严子浚等.卡诺热机的最佳效率与功率间的关系.工程热物理学报,1985,6(1):1-6

作者简介 陈天择,1938年生,1960年7月于厦门大学物理系物理学专业毕业。现任厦门大学物理系副教授,厦门大学学报(自然科学版)编委,厦门大学出版社社长。长期担任热学、热力学及统计物理等课程的教学和编辑工作,并从事有关课题研究,与人合作发表著作两本,科学论文数篇。曾获福建省高等院校科技成果三等奖,1989年度优秀教学成果二等奖,教书育人先进工作者等。(通讯处 361005 厦门大学海滨新村 29号楼 202室)

Thermal Power Station. Acoust analysis is performed in comparison with a cyclone-furnace. **Key words** low-  
 ver stepped cycle, circulating fluidized bed, cost analysis

煤的太阳能干馏的可行性及干馏炉的设计探讨 = **The Feasibility of Destructive Distillation by the Use of Solar Energy and the Design Study of a Furnace of Destructive distillation** [刊, 中] / Wang Zhuliang ( Jiangsu University of Science & Engineering) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1997, 12(1). -19-22

The author has proved that it is feasible to use solar energy as a high-temperature heat source for a destructive distillation furnace. Through a heat transfer analysis and comprehensive review the merits of a new type of solar energy-based destructive distillation furnace are demonstrated with some issues to be solved during practical applications also pinpointed. **Key words** solar energy, destruction distillation furnace, destructive distillation

高温吸收式热泵的生态学准则优化 = **The Optimization of Ecological Criteria for High-temperature Absorption Heat pumps** [刊, 中] / Chen Tianze, Yan Zijun (Shamen University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1997, 12(1). -23- 25

With an objective being the ecological criteria which enables the cycle heat supply rate and heat supply rate dissipation attain an optimum compromise the paper presents the study results of the optimization of a high-temperature absorption heat pump. Some new performance parameters of the heat pump are derived and several interesting aspects of the issue discussed. The conclusions obtained can serve as a new theoretical guide for the optimized design and the selection of optimum operating condition of the high-temperature triple heat source heat pumps and heat engines. **Key words** finite time thermodynamics, high-temperature absorption heat pump, ecological criteria, performance optimization

塔型飞灰浓缩器阻力特性的试验研究 = **An Experimental Study of the Resistance Characteristics of a Tower-type Fly ash Concentrator** [刊, 中] / Li Gongbo (Xi'an Thermotechnical Research Institute), Wen Long (Xi'an Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1997, 12(1). -26- 29

On the basis of the cold-state Model Test of a tower-type fly ash concentrator and an exploratory analysis of the resistance variation relationship under various operating regimes and geometric parameter test conditions as well as a multidimensional linear regression analytical calculation of a vast amount of test data, given in this paper is a multidimensional regression formula for calculating the resistance of the tower-type fly ash concentrator, thereby providing a technical basis for its design, evaluation and application in engineering practice. **Key words** tower-type fly ash concentrator, resistance, characteristics, regression analysis

130 t/h 锅炉结渣及稳燃问题的研究 = **The Study and solution of a Slagging and Stable Combustion Problem for a 130 t/h Boiler** [刊, 中] / Chen Gang, Qiu Jihua, Li Fojin, et al. (Central China University of Science & Engineering) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1997, 12(1). -30- 32

The underlying causes leading to slagging and poor combustion stability of a 130 t/h boiler are analysed. After a redesign and modification of its burners with the adoption of pulverized coal burners incorporating a combustion stabilization cavity very good results have been attained. The combustion efficiency is enhanced by 6% and the boiler can maintain a stable combustion when operating at 60% load without using oil. **Key words** boiler, slagging, combustion stability, pulverized coal combustion, burner with a combustion stabilization cavity

燃用固体燃料电厂环境负压吸尘系统的选择与设计 = **The Selection and Design of a Negative-Pressure Dust Collecting System for a Solid Fuel-Fired Power Plant Environment** [刊, 中] / Liu tai, Hao Chunhai (Northeast