

蒸汽喷射式热泵力能效益分析与评价准则

王 权 丁旭昌 刘聿拯

(华东工业大学热能工程教研室)

【摘要】 本文全面分析蒸汽喷射式热泵的热力特性,并与电动和汽动式热泵的热力过程进行比较,给出蒸汽喷射式热泵与电动和汽动式热泵力能效益的评价准则,为完善和合理选择热压缩式热泵做了有益的探讨。

关键词 蒸汽喷射式热泵 热力分析 焓效率 效益评价

分类号 TK172

1 引言

热泵是一种能使热能从低温物体转移到高温物体的能量利用装置。它通常分为两大类,即机械式热泵和吸收式热泵。在机械式热泵中,又有电动和热机直接驱动之分。我们可以进一步推广热泵的概念,将供热系统中的热压缩设备也列入热泵之列。这种形式的热泵可分为三种,即电动、汽动和蒸汽喷射式热泵。由于蒸汽喷射式热泵结构简单,造价便宜,运行费用低,近些年来关注蒸汽喷射式热泵的研究已成为热泵研究领域中的热点之一。本文重点研究蒸汽喷射式热泵的热力特性,探讨它与电动、汽动热压缩热泵的能效比较和评价方法,为进一步完善蒸汽喷射式热泵和合理选择热压缩式热泵指明途径。

2 喷射式热泵的特点、损失和效率

蒸汽喷射式热泵,即蒸汽喷射压缩器。它由喷嘴、接受室、混合室和扩压器四部分组成。其结构和流体压力变化情况如图1所示。进入压缩器前压力高的蒸汽叫工作蒸汽。工作蒸汽以很高的速度从喷嘴喷出,进入接受室,并把在喷射器前压力较低的蒸汽吸走,被吸走的蒸汽叫引射蒸汽。在喷射器里,工作蒸汽的动能一部分传给引射蒸汽,工作蒸汽和

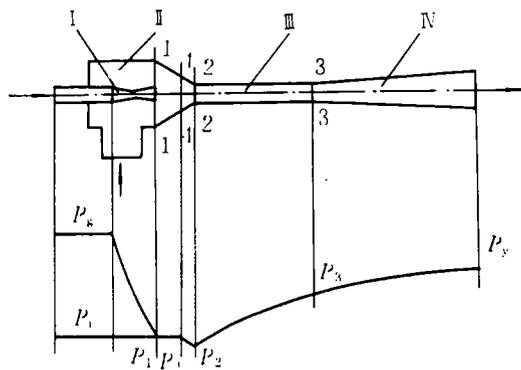


图1 喷射式热泵简图

I 喷嘴 II 接受室 III 混合室 IV 扩压器

收稿日期 1994 09 09

本文联系人 王 权 男 56 高工 200093 上海军工路 516 号 * 本文中的“佣”代替“焓”,“无”代替“焓”。

引射蒸汽进入混合室中进行速度均衡,伴随着压力升高,混合流体进入扩压器,压力将继续升高。在扩压器出口处混合流体已形成一股居中压力的蒸汽,叫压缩蒸汽,此时蒸汽压力已达到热用户要求而进入供热系统中。提高引射蒸汽的压力而不直接消耗机械能,这是喷射式热泵最根本的特性。

2.1 喷射热泵的主要损失

在喷射热泵中,两股初速不同而同轴的流体因为混合而发生的撞击损失是热泵工作能力的主要损失。

为简化起见,假定在混合室的长度上压力保持不变而只发生速度均衡,根据动量定理,可以导出混合时的撞击损失为

$$\Delta E = \frac{1}{2} \cdot \frac{D_s D_i}{D_s + D_i} (W_{s1} - W_{i1})^2$$

式中 D_s 、 D_i 分别为工作蒸汽和引射蒸汽流量; W_{s1} 、 W_{i1} 分别为工作蒸汽和引射蒸汽在喷嘴出口截面上的流速。从上式可以看出,撞击损失与流体开始混合时速度之差的平方成正比,增加引射蒸汽进入混合室时的速度 W_{i1} 可以有效地减少撞击损失。

根据稳态稳流熵平衡方程,并假设喷嘴节流过程具有如下特点:(1)、视为绝热过程;(2)、过程前后焓值不变;(3)、机械能变化忽略不计;(4)、无外功加入。于是节流熵损失为

$$dE = T_0(S_2 - S_1)$$

随着压力的突然降低,熵损失增加率为

$$-\left(\frac{\partial E}{\partial P}\right)_h = -T_0 \left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_h = \frac{T_0 V}{T}$$

由于水蒸气是可压缩流体,压力降低,比容增大,随着压力降低,节流熵损失增加率大大增加。因此,对蒸汽喷射式热泵而言,虽然提高工作蒸汽的膨胀比可以在一定程度上增加供热系数,但热泵内的熵损失却增加了。

2.2 喷射热泵的熵效率

工作蒸汽引射低品位蒸汽的能力用引射系数 μ 表示,它等于引射蒸汽流量 D_i 与工作蒸汽流量 D_s 之比,

$$\mu = D_i/D_s$$

喷射热泵能量转换的完善性用熵效率来衡量,根据分析的目标和具体条件,熵效率有不同的表达式。本文熵效率用引射蒸汽获得的熵与工作蒸汽所丧失的熵之比表示

$$\eta = \frac{\mu(e_y - e_i)}{e_s - e_y}$$

式中 e_s 、 e_i 、 e_y 分别为单位工作、引射和压缩蒸汽的熵值。

以高品位工作蒸汽减压前后的能量差为动力,通过热泵循环供给用户的热量与所消耗的工作蒸汽热量之比,称为供热系数,用 COP 表示,

$$COP = (h_s + \mu h_i)/h_s$$

式中 h_s 、 h_i 分别为工作蒸汽和引射蒸汽的焓值。

3 热压缩式热泵功效的比较

为了便于选择最佳热泵系统,分析比较蒸汽喷射式热泵与电动、气动式热压缩热泵的力能效益是非常必要的。

3.1 喷射热泵与电动热泵比较

电动式热压缩热泵供热系统如图 2 所示。

用系统中被压缩蒸汽获得的熵与系统消耗的电量之比表示熵效率,则电动式热压缩热泵的熵效率为

$$\eta_e = \frac{D_s[h_y - h_i - T_0(S_y - S_i)]}{W}$$

电动式热压缩热泵的供热系数

$$COP_e = Q/W$$

式中 W 为热泵所消耗的电量; Q 为供给用户的热量。

电动式热压缩热泵所消耗的是电能,它

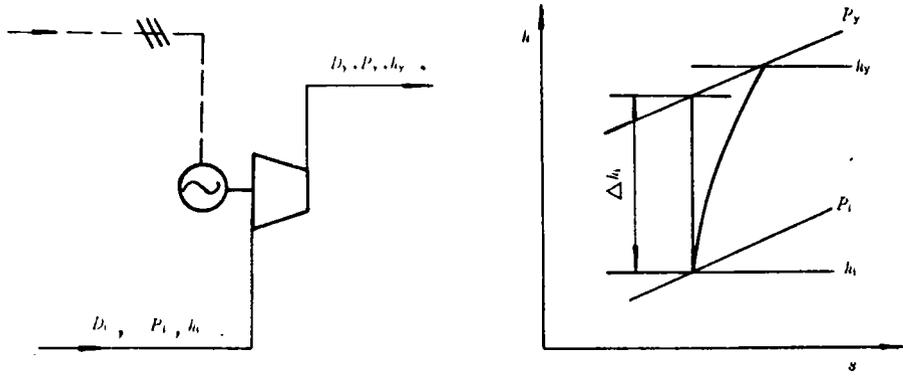


图2 电动式热压缩热泵系统

是高级能,只包含佣,而佣等于零。热能是中级能,它由佣和无组成。蒸汽喷射式和电动式热压缩热泵消耗的能量品位不同,但是热泵供出的都是热能。因此,这两种热泵不能简单的用佣效率和供热系数数值的大小来说明热泵用能的经济性,一定要在可比条件下才能进行比较。

蒸汽喷射式热泵消耗的动力是蒸汽热能,应考虑生产蒸汽的锅炉效率 η_b 和输送蒸汽的热网效率 η_r 。电动式热泵消耗的动力是电能,应考虑电厂效率 η_a 、输电效率 η_e 和压缩机的机械效率 η_m 。因此,蒸汽喷射式与电动式热压缩热泵功效的可比条件是:

$$\xi = \frac{COP \cdot \eta_b \cdot \eta_r}{COP_e \cdot \eta_a \cdot \eta_e \cdot \eta_m} = \frac{COP}{COP_e} \epsilon$$

当 $\xi > 1$ 时,蒸汽喷射式热泵更有效;

当 $\xi < 1$ 时,电动式热压缩热泵更有效。

一般情况下,取工业锅炉效率 $\eta_b = 0.$

65,热网效率 $\eta_r = 0.95$;火力发电厂效率 $\eta_a = 0.35$,水力发电厂效率 $\eta_a = 0.85$,输电效率 $\eta_e = 0.95$,机械效率 $\eta_m = 0.55$ 。将上述数据代入上式可得蒸汽喷射式热泵供热系数修正系数 ϵ 值为

$$(\text{火力发电}) \epsilon = 3.4$$

$$(\text{水力发电}) \epsilon = 1.4$$

通过以上分析可知,表面上看,蒸汽喷

射式热泵供热系数比电动式热压缩热泵低很多,但实质上效益不一定低,而且蒸汽喷射式热泵还可以灵活地按照工业余热的数量、品位来补充余热回收汽量的不足,使整个供热和余热回收系统达到平衡。从节约国家一次能源的角度出发,由水力发电厂供电的企业,用电动式热压缩热泵比由火力发电厂供电的企业有更大的经济性。

3.2 喷射热泵与汽动热泵比较

这两种热泵都以高压蒸汽为动力来提高低压蒸汽的品位,且一并供给热用户,所以对比它们的引射系数数值就能证明其相对有效性。

汽动热压缩热泵系统如图3所示。

汽动热压缩热泵的热效率为

$$\eta_a = \frac{\Delta h'_y D'_i}{\Delta h'_p D'_s} = \mu' \frac{\Delta h'_y}{\Delta h'_p}$$

式中 $\Delta h'_y, \Delta h'_p$ 分别为压气机中蒸汽的等熵焓增和汽轮机中蒸汽的等熵焓降; D'_i, D'_s 分别为被压缩蒸汽量和汽轮机进汽量; $\mu' = D'_i/D'_s$ 为汽动热泵的相当引射系数。

蒸汽喷射式热泵的热效率

$$\eta = \frac{\Delta h_y D_i}{\Delta h_p D_s} = \mu \frac{\Delta h_y}{\Delta h_p}$$

式中 $\Delta h_y, \Delta h_p$ 分别为喷射热泵中引射蒸汽的等熵焓增和工作蒸汽的等熵焓降; D_i, D_s 分别为引射和工作蒸汽流量。

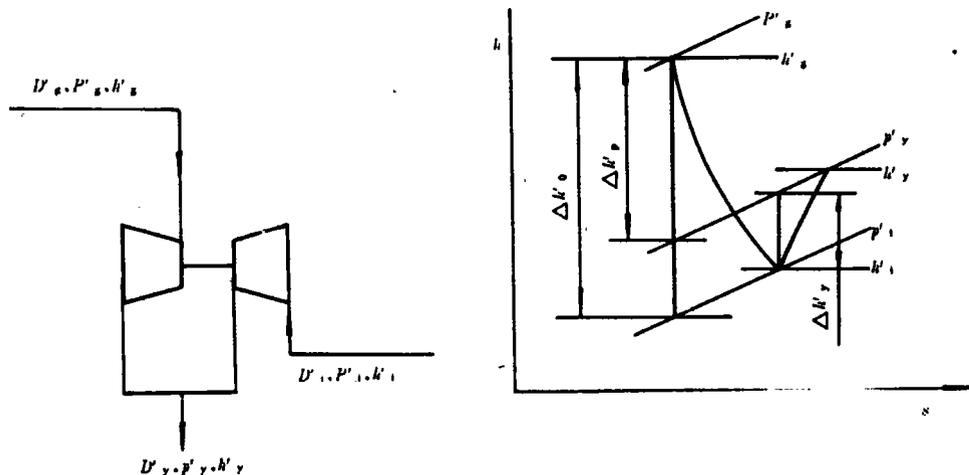


图 3 汽动热压缩热泵系统图

根据运行经验,蒸汽喷射式热泵的热效率 $\eta \approx (35 \sim 40)\%$;汽动热压缩热泵的热效率 $\eta_h \approx 45\%$ 。可见在 $\Delta h_y = \Delta h'_y, \Delta h_s = \Delta h'_s$ 的情况下, $\mu \approx \mu'$, 即蒸汽喷射式热泵与汽动热压缩热泵的功效差别不大。蒸汽喷射式热泵的结构简单,造价仅为汽动热压缩热泵的五分之一左右,运行费用约为后者的三分之一。虽然蒸汽喷射式热泵在非设计工况下运行时功率下降,但可以采用质调和量调的方法来缓解。质调是降低压缩器前工作蒸汽的压力;量调是减少工作喷嘴的临界截面积。这种量调方法可以通过伸入到喷嘴里的一根锥形针棒来实现。目前用针形阀对蒸汽喷射式热泵工况的调节技术已成熟,运行效果良好。鉴于上述原因,用蒸汽喷射式热泵来取代汽动热压缩热泵实属必然,特别是有充分废气可利用的场合更是如此。

4 结论

1. 工作蒸汽和引射蒸汽在喷嘴出口截面处的撞击损失是蒸汽喷射式热泵工作能力的

主要损失。增加引射蒸汽进入混合室时的速度 W_{11} 可以有效地减少这种损失。

2. 本文给出的蒸汽喷射式热泵与电动热压缩热泵功效可比条件,为合理选择压缩式热泵提供了依据。

3. 从节约国家一次能源的角度出发,由水力发电厂供电的企业使用电动式热压缩热泵比由火力发电厂供电的企业有更大的经济性。

4. 蒸汽喷射式热泵与汽动热压缩式热泵相比,功效相近,结构极其简单,投资少,运行费用低,前者取代后者已成为必然趋势。

参 考 文 献

- 1 索科洛夫 Е Я,津格尔 Н М 著.喷射器,黄秋云译,科学出版社,1977
- 2 王权,韩根宝,刘幸拯.制浆蒸煮过程熵分析及其节能途径.上海机械学院学报,1993.(4)
- 3 阎尔平.蒸汽喷射式热泵供热的研究及其节能的评价.制冷学报,1988.(3)
- 4 庞树声,张炳然.热泵蒸发的热力分析及节能计算.节能,1991.(7)
- 5 董树峰,李天泽.热能转换及利用.机械工业出版社,1985

由实测响应曲线值求解传递函数=The Solution of a Transfer Function Through the Use of Measured Response Curve Values [刊,中] / Chen Jin'e(Shanghai Electrical Power Engineering Institute)

//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995,10(4). -193~196

Based on the measured input signal curves and output response curves of a system the author has through the combination of theoretical analysis and numerical computations solved the system transfer function. The calculation results of a specific example show that the proposed method features a relatively high precision. Key words: transfer function, response curve, automatic control, numerical computation

大功率汽轮机快速冷却时汽缸壁温度的计算方法=A Method for Calculating the Casing wall Temperature of a High-capacity Steam Turbine During its Intensified Cooling [刊,中]/Tong Enchao (Northern China Electrical Power Engineering Institute//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995,10(4). -197~200

This paper describes a method for the calculation of casing wall temperature of a steam turbine in the course of its fast cooling. With the casing being viewed as a cylinder and its equivalent thickness calculated a heat transfer differential equation is given based on the different heat transfer conditions of the inner and outer cylinder of the two-layer casing. The results of the solution have been found to be in relatively good agreement with the measured results. The proposed method can be used to calculate the variation of casing temperature during an intensified cooling following a turbine shut-down. Key words: steam turbine, casing, cooling, wall temperature calculation method

喇二热电站两台燃气轮发电机组两起事故分析=The Analysis of Two Failure Cases of Two Gas Turbine Generating Sets for Laer Thermal Power Station [刊,中]/Zhang Jiongwei, Jiang Xiao, Ma Lishan(Laer Gas Turbine Power Plant of Daqing Electric Power Supply Co)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(4). -201~205. Key words: gas turbine, failure analysis

蒸汽喷射式热泵力能效益分析与评价准则=The Power/energy Cost Effectiveness Analysis and Evaluation Criteria for Steam Jet Heat Pumps [刊,中]/Wang Quan, Ding Xuchang, Liu Lizheng (Northern China Polytechnical University)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(4). -206~209

A comprehensive analysis is made of the thermotechnical characteristics of a steam jet heat pump, which are compared with the thermal process of motor-driven and steam-driven heat pumps. Presented in this paper are the evaluation criteria of power/energy cost effectiveness analysis for steam jet heat pumps, motor-driven and steam-driven heat pumps. All this constitutes a beneficial exploratory study aimed at achieving a better and more rational selection of thermal compression heat pumps. Key words: steam jet heat pump, thermal analysis, exergy efficiency, cost effectiveness evaluation

新型钝体稳燃器的空气动力场的试验研究=An Experimental Study of the Aerodynamic Field of a Novel Bluff Body Combustion Stabilization Device [刊,中]/Yang Liyu, et al. (Xi'an Jiaotong University)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1995, 10(4). -210~215

It is well-known that the return-flow region at the rear of a bluff body plays a beneficial role in stabilizing combustion. With respect to the new type saw-toothed bluff body proposed in this paper a detailed experimental study has been undertaken of its aerodynamic field with the study results being analysed. The results of experiments show that the novel saw-toothed bluff body is more effective in achieving combustion stabilization than a conventional saw-toothed bluff body and thereby provides a