

# 蒸汽喷射式热泵变工况性能分析

徐海涛, 桑芝富

(南京工业大学机械与动力工程学院, 江苏 南京 210009)

**摘 要:** 采用数值模拟的方法对低压蒸汽增压利用系统中的蒸汽喷射式热泵在非设计工况下的操作性能进行研究, 计算并分析了工作蒸汽压力和温度、引射流体压力及混合流体压力等热力参数对热泵操作性能的影响。数值结果表明: 当混合流体的压力低于一定的数值时, 喷射系数维持一定值; 而热泵对引射流体压力的变化极为敏感, 引射压力的微小变化可能导致热泵操作性能的急剧下降; 提高工作蒸汽的压力并不一定能改善喷射泵的工作性能, 这是因为提高工作蒸汽压力会增加额外的蒸汽量所致; 喷射系数随工作蒸汽温度的升高而略有增大, 并近似呈线性率。

**关 键 词:** 蒸汽喷射式热泵; 数值模拟; 喷射器; 变工况性能; 热力参数

中图分类号: TK262 文献标识码: A

## 1 前 言

尽管喷射器在实际生产中广为应用, 但迄今为止, 对蒸汽喷射泵的理论研究和喷射过程的深入探索还不够。现有的设计理论大都沿用 Keenan 等人提出的一维设计方法<sup>[1~4]</sup>, 尽管后来有不少学者对它进行修正<sup>[5~10]</sup>, 但其出发点都是一样的, 即在等压混合或定常面积混合理论的基础上, 假设工作流体和引射流体具有相同的分子量和比热容, 工作流体和引射流体以及混合后的流体在任意截面上具有均匀的物性分布, 喷嘴和扩散段内都是等熵过程, 不计壁面摩擦, 也不考虑热量损失, 在理想气体的基础上, 运用质量、动量及能量守恒方程计算工作过程, 推导出了具有最大喷射系数或最大压缩压力的喷射泵结构参数的计算公式。然而超音速混合过程很少会如假设的那样均一, 激波、粘性干扰、分离涡、真实气体效应等物理现象的相互作用使得喷射器内部流场极其复杂, 因此一维分析方法有较大的缺陷。计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)的兴起带给研究者们一种全新的思路, Hedges 和 Hill 率先发展了一种计算渐缩渐扩管流场的有限差分算法<sup>[11~12]</sup>, 随后 Gilbert 对它进行了改进<sup>[13]</sup>, 但他们以

及后来的 Beithou、Aybar 等人没能对所有超音速喷射器都有可能出现的雍塞现象进行阐述<sup>[9~10]</sup>, 也未对操作条件变化时喷射泵内的激波运动情况进行模拟。

本文采用二阶精度的有限体积法(FVM)离散控制方程, 标准  $k-\epsilon$  二方程湍流模型, 近壁面处使用壁面函数修正的方法对整个喷射泵的内部流场进行数值模拟。探讨蒸汽喷射式热泵在非设计工况下的工作性能, 分析工作蒸汽、引射流体和混合流体的压力及工作蒸汽的温度对喷射系数的影响, 揭示在不同热力参数下喷射系数的变化规律, 为蒸汽喷射式热泵的变工况设计和调节建立理论基础。

## 2 蒸汽喷射式热泵的数值模拟方法

### 2.1 数值计算方法

采用二阶精度的有限体积法(FVM)对控制方程进行空间离散, 时间离散则采用多重 Runge-Kutta 显式格式迭代, 并使用标准  $k-\epsilon$  二方程湍流模型闭合时均雷诺方程, 近壁面处则采用壁面函数修正。收敛准则为: 各变量(速度、压力、湍流动能等)的残差达到  $10^{-6}$ , 并且引射流体的质量流量基本保持不变, 总的总质量不平衡率小于总的质量流量的 0.3%。

### 2.2 计算域及网格

以某厂低压蒸汽增压利用系统中的一台蒸汽喷射式热泵为例进行分析计算, 其结构尺寸参见表 1。图 1 为计算模型网格(为便于显示, 只取实际计算网格密度的 20%)及边界层网格的局部放大图。由于在混合段入口截面处引射流体的速度与工作蒸汽速度相比甚小, 故可将引射流体的侧入口简化成环向入口, 因而可按二维轴对称模型计算, 数值结果表明, 这种简化的二维模型和三维模型并无明显差异。网格采用分块结构化网格, 为捕捉激波和边界层, 在喷嘴出口及工作流体与引射流体混合面上适当加密。

表 1 计算模型结构及尺寸

几何尺寸 / mm																		
$D$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$	$L_0$	$L_1$	$L_2$	$L_3$	$d$	$d_1$	$d_2$	$l$	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$L$	$L_c$	$\Psi = (D/d)^2$
90	136.5	186	150	52.2	432	669.2	960.8	363.8	45.2	135.6	58.8	5	247.8	36	70	2 425.8	5	3.965

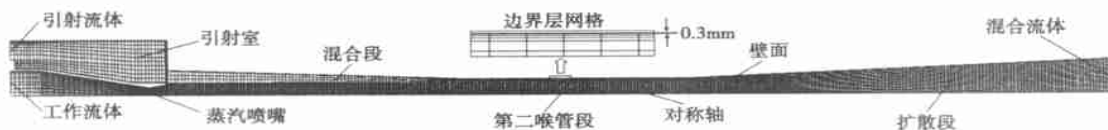


图 1 蒸汽喷射式热泵网格模型

2.3 流体物性及边界条件

工作蒸汽及引射流体入口均采用压力入口边界, 给定滞止压力、滞止温度及适当的湍流条件; 混合流体出口采用压力出口边界, 给定静压及适当的回流条件; 固体壁面采用无滑移、无渗流、绝热边界; 中心边界为对称轴, 各变量在对称轴法线方向的梯度及垂直于对称轴的速度为零。流体介质的密度按理想气体计算, 粘度则由温度的指数函数形式给出。设备原始操作参数见表 2。

表 2 蒸汽喷射式热泵的原始操作参数

名称	压力/MPa	温度/°C
工作蒸汽/ 高压蒸汽(HS)	1.568	211
引射流体/ 低压蒸汽(LS)	0.354	144
混合流体/ 稀释蒸汽(DS)	0.548 8	162

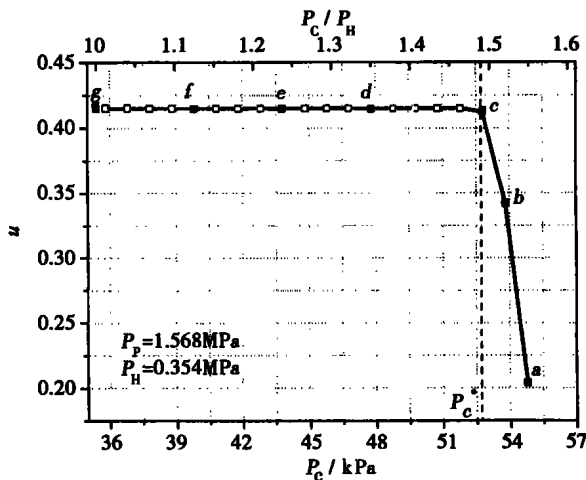


图 2 混合物体压力对喷射系数的影响

3 结果与讨论

3.1 混合流体压力的影响

蒸汽喷射式热泵工作能力用喷射系数  $u$  来表示, 它表示在一定工况下, 单位质量工作流体通过泵所能抽吸的引射流体(被抽气体)的量, 在数值上等于引射流体的质量流量与工作流体的质量流量之比, 即  $u = G_H / G_P$ 。

工作蒸汽和引射流体的压力保持不变, 而将混合流体的压力逐渐减小, 喷射系数的变化规律如图 2 所示。可见, 当  $p_c \geq p_c^*$  时, 随着混合流体压力的降低, 喷射系数迅速增大, 而当压力越过  $p_c^*$  进一步降低时, 喷射系数几乎保持一定值。这也说明喷射泵只

能在一定的背压范围内工作, 超出这个范围以后, 喷射泵的性能可能急剧下降。图 3 和图 4 给出了混合流体压力变化时马赫数的变化情况, 图 3 中的  $a, c, e, g$  对应于图 2 中的  $a, c, e, g$  点, 图 4 中的 7 条曲线与图 2 中的  $a \sim g$  点相对应。当混合流体压力降到临界混合压力  $p_c^*$  (本例大约为 0.528 MPa) 时, 扩散段喉部出口处马赫数达到 1, 如图 3(c) 及图 4 所示, 进一步降低混合流体的压力, 流体在扩散管的某一截面处突然收缩, 出现激波, 并伴有射流分离现象。经激波调整后, 管内流体由超音速变为亚音速, 同时压力升高, 最后达到混合流体的压力。随着  $p_c$  的降低, 波前马赫数逐渐增大, 激波向扩散管出口处移动。由于低的背压扰动不能逆超音速流上传, 所以  $p_c$  的降

低并不改变激波波阵面之前的流动状况。也即当混合流体压力小于  $p_c^*$  时, 在激波出现截面之前的喷射泵的元件中, 流体的流动状况并不随混合流体压力的进一步降低而变化, 该过程是稳定的。

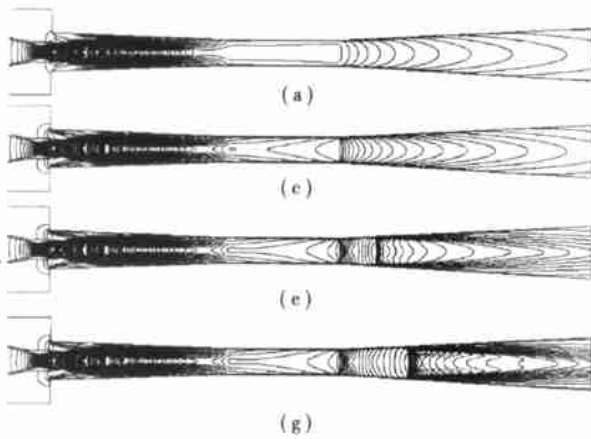


图 3 不同混合流体压力下马赫数分布图

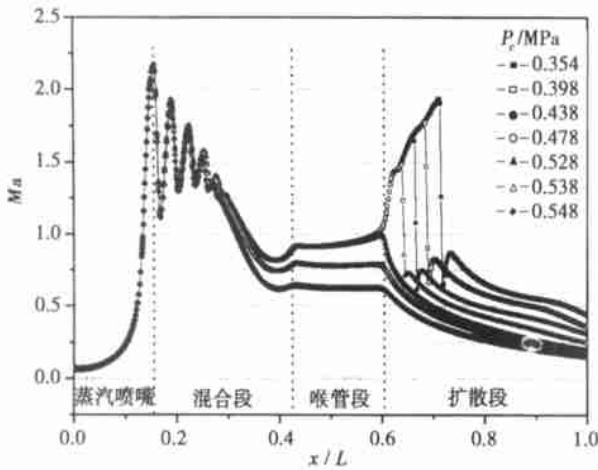


图 4 不同混合流体压力时轴线上马赫数分布

### 3.2 引射流体压力的影响

当其它热力参数保持不变时, 喷射系数与引射流体压力的关系如图 5 所示。可以看出, 当引射压力较低时, 喷射系数为负值, 热泵不能正常工作, 这一状况随着  $P_H$  的增大得到改善; 当  $P_H \leq P_H^*$  时, 喷射系数随引射压力的增大而迅速增大; 而当  $P_H$  继续增大并越过  $P_H^*$  时, 喷射系数虽仍与引射压力呈线性增长趋势, 但速度明显变缓。

### 3.3 工作蒸汽压力的影响

在其它热力参数保持定值的情况下, 工作蒸汽的压力由 1.368 MPa 逐渐提高到 2.368 MPa (总按过热 11 K 计算) 喷射系数的变化规律如图 6 所示。可

见, 当  $P_p$  较小时, 喷射系数接近于零, 喷射器的工作能力甚低。可以预料若将工作蒸汽压力的略微降低, 喷射系数甚至出现负值; 当  $P_p < P_p^*$  时, 喷射系数随着工作蒸汽压力的升高而增大, 且增幅明显; 而当  $P_p$  继续增大并越过临界点  $P_p^*$  时, 喷射系数反而随工作蒸汽压力的升高而下降。由此可见, 提高工作蒸汽的压力并不一定能改善喷射器的工作性能, 这是因为提高工作蒸汽压力会增加额外的蒸汽量所致。

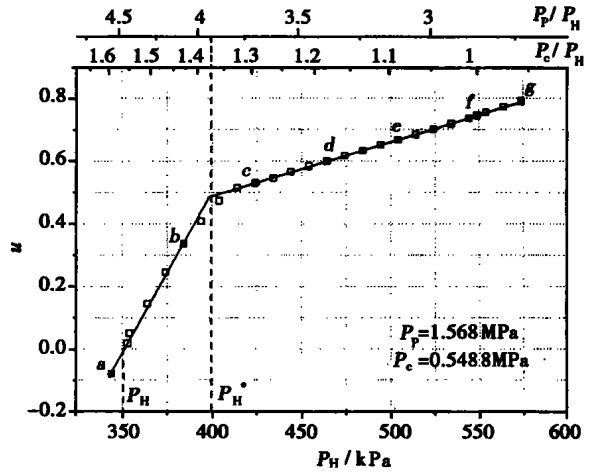


图 5 引射流体压力对喷射系数的影响

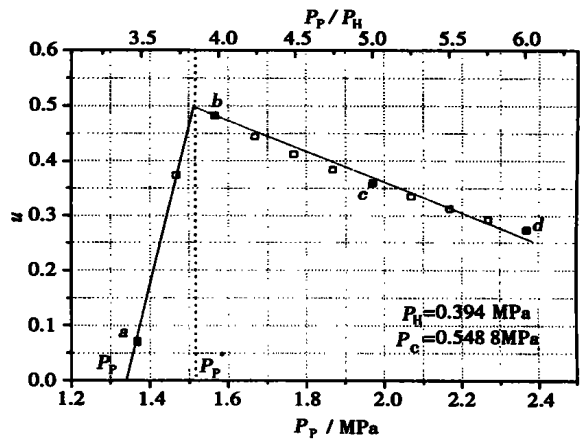


图 6 工作蒸汽压力对喷射系数的影响

### 3.4 工作蒸汽温度的影响

保持其它热力参数不变, 仅将工作蒸汽的温度从 473 K (饱和蒸汽) 逐渐增大到 504 K (过热 31 K) 喷射系数的变化规律如图 7 所示。可以看出, 喷射系数随工作蒸汽的温度的升高而略有增大, 并近似呈线性率。应当指出的是改变工作蒸汽的初始温度 (过热度), 只是影响到工作蒸汽的流量, 而不影响引

射流体的流量;而当仅改变引射流体的温度而不改变其它热力参数时,工作蒸汽的流量并不随之改变。简言之,改变某一种流体(引射流体或工作蒸汽)的初始温度只影响到改变初始温度的这种流体的流量,而不影响和这种流体相混合的另一种流体的流量。

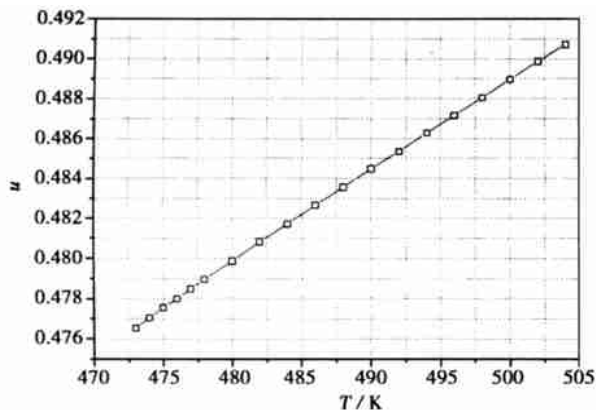


图 7 工作蒸汽温度对喷射系数的影响

## 4 结 论

(1) 蒸汽喷射式热泵的实际工作性能与热力参数密切相关,当喷射器设计不当或实际工况与设计不符时,就会造成一些不可逆损失,从而引起喷射器工作性能的下降,因而探讨蒸汽喷射式热泵在非设计工况下的运行情况是极为重要的。喷射泵喷射系数的变化是其设备内部激波运动规律的外在表现形式,因而采用 CFD 数值模拟的方法对其进行分析以预测工况变动时蒸汽喷射式热泵的操作规律是一种极为有效和可行的办法。

(2) 数值结果表明当混合流体的压力低于一定的数值时,喷射系数维持一定值;而热泵对引射流体压力的变化极为敏感,引射压力的微小变化可能导致热泵操作性能的急剧下降。因而在实际操作中应尽量使引射压力保持不变并将混合流体压力维持一定的范围是极为重要的。

(3) 提高工作蒸汽的压力并不一定能改善喷射泵的工作性能,这是因为提高工作蒸汽压力会增加额外的蒸汽量所致。

(4) 喷射系数随工作蒸汽的温度的升高而略有

增大,并近似呈线性率。改变某一种流体(引射流体或工作蒸汽)的初始温度只影响到改变初始温度的这种流体的流量,而不影响和这种流体相混合的另一种流体的流量。

## 参考文献:

- [1] KEENAN J H, NEUMANN E P. A simple air ejector [ J ] . *Journal of applied mechanics*. *Trans ASME*, 1942 **64**: 75—81.
- [2] KEENAN J H, NEUMANN E P, LUSTWERK F. An investigation of ejector design by analysis and experiment [ J ] . *Journal of applied mechanics*. *Trans ASME* 1950, **72**: 299—309.
- [3] ELROD H G. The theory of ejector [ J ] . *Journal of applied mechanics*. *Trans ASME* 1945 **67**: A170—174.
- [4] FABRI J, PAULON J. Theory and experiments on supersonic air-to-air ejectors [ R ] . NACA TM—1410, 1958.
- [5] CHOW W L, ADDY A L. Interaction between primary and secondary streams of supersonic ejector systems and their performance characteristics [ J ] . *AIAA Journal* 1964, **11**(4): 686—695.
- [6] DUTTON J C, MIKKEISEN C D, ADDY A L. A theoretical and experimental investigation of the constant area supersonic-supersonic ejector [ J ] . *AIAA Journal* 1982, **20**(10): 1392—1400.
- [7] DUTTON J C, CARROLL B F. Optimal supersonic ejector designs [ J ] . *Journal of Fluids Engineering*. *Trans ASME* 1986 **108**: 414—420.
- [8] ROGDAKIS E D, ALEXIS G. Investigation of ejector design at optimum operating condition [ J ] . *Energy Conversion and Management*, 2000, **41**: 1841—1849.
- [9] BEITHOU N, AYBAR H S. High pressure steam-driven jet pump-part I: Mathematical modeling [ J ] . *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, *Trans ASME*, 2001, **123**: 693—700.
- [10] BEITHOU N, AYBAR H S. High pressure steam-driven jet pump-part II: Parametric analysis [ J ] . *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, *Trans ASME*, 2001, **123**: 701—706.
- [11] HEDGES K R, HILL P G. Compressible flow ejectors: part I — Development of a finite-difference flow model [ J ] . *Journal of Fluids Engineering*, *Trans ASME*, 1974 **96**: 272—281.
- [12] HEDGES K R, HILL P G. Compressible flow ejectors: part II — Flow field measurements and analysis [ J ] . *Journal of Fluids Engineering*, *Trans ASME*, 1974, **96**: 282—288.
- [13] SUN D W, EAMES I W. Recent developments in the design theories and application of ejectors—a review [ J ] . *Journal of the Institute of Energy* 1995 **68**: 65—79.

(渠 源 编 辑)

high-temperature corrosion reaction speed. Meanwhile, the protective structure of this dual porcelain tube can also lessen the “aberration” of temperature distribution at the tube inlet zone, resulting in a decrease in thermal stress-related failures of the tube material at the above-mentioned zone. **Key words:** heat recovery boiler, heat transfer numerical analysis, dual porcelain protective tube

蒸汽喷射式热泵变工况性能分析 = **Analysis of the Off-design Performance of Steam-jet Heat Pumps** [刊, 汉] / XU Hai-Tao, SANG Zhi-fu (School of Mechanical & Power Engineering under the Nanjing Polytechnic University, Nanjing, China, Post Code: 210009) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(4). — 395 ~ 398

By using a numerical simulation method the off-design operating performance of steam-jet pumps in a low-pressure steam utilization system was studied and calculated. In addition, an analysis was conducted of the impact of such parameters as the operating steam pressure and temperature, the pressure of jet flows and mixed fluids on the operating performance of the heat pumps. The results of the analysis indicate that when the pressure of the mixed fluids is lower than a certain value the ejection factor can be maintained at a definite value. The heat pumps are very sensitive to the change of ejection fluid pressure. A minor change in the ejection pressure can lead to a drastic reduction in the heat pump operating performance. An increase in the operating steam pressure will not necessarily improve the performance of the steam-jet pumps. This is because an increase in the operating steam pressure will lead to a greater steam flow. The ejection factor will slightly increase with a rise in steam temperature and this variation assumes an approximately linear character. **Key words:** steam-jet heat pump, numerical simulation, ejector, off-design performance, thermodynamic parameters

300 MW 火电机组自然循环锅炉模型的建立及动态特性分析 = **The Building of a Natural-circulation Boiler Model for a 300MW Thermal Power Plant and Analysis of the Boiler Dynamic Characteristics** [刊, 汉] / HE Rong, QUAN Zhao-yu, YANG Hui-chao (Zhanjiang Power Plant, Zhanjiang, Guangdong Province, China, Post Code: 524099) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(4). — 399 ~ 401

With the help of a STAR-90 modularized model-building simulation support system a natural-circulation boiler model was set up for a 300MW thermal power plant. The model was employed for a comprehensive simulation unit of 300MW thermal power plant installed at Zhanjiang Power Station. The results of the simulation indicate that the model under discussion can with a relatively high precision reflect the dynamic and static characteristics of a natural circulation boiler. The model can be used for the training of operating personnel, for the optimized design of boilers and the prediction of main performance parameters of a boiler during its operation under off-design conditions. **Key words:** natural circulation boiler, simulation machine, dynamic characteristics, static characteristics

等离子体发生器内高温空气化学反应流场分析 = **Flow Field Analysis of the Chemical Reaction of High-temperature Air in a Plasma Generator** [刊, 汉] / LI Zhen-yu, LI Zhi-ming (Institute of Power and Nuclear Engineering under the Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001), CHEN Xiao-hong (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(4). — 402 ~ 405

Under high temperatures air will undergo such chemical reactions as dissociation and ionization, etc, which can lead to changes in constituent elements, resulting in a change in flow field status. With a low-temperature plasma generator model being taken as an example a numerical simulation method was employed to solve for a flow field involving seven kinds of constituent elements and seven chemical reactions. The result was compared with that of a solution for a pure-air flow field. The specific features of the flow and heat transfer of a chemical reaction flow field were analyzed. From the perspective of flow field organization a cooling method of generator electrodes is investigated. During a numerical simulation