

# 有再循环系统的超音速两相流升压性能的研究

郭迎利, 李 盛, 严俊杰, 刘继平

(西安交通大学 能源与动力工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:**介绍了具有再循环系统的超音速汽液两相流升压装置, 并对该装置的各种性能进行了理论计算及实验研究。结果表明, 在进口蒸汽参数一定的情况下, 升压性能随给水温度的升高而降低, 随出口流量的增加而提高; 出口水温随出口流量的增加而降低, 随给水温度的提高而升高。该装置不仅保留了原有的出口压力自适应特性, 而且具有出口流量自适应特性。

**关键词:**超音速; 汽液两相流; 激波; 定流量特性

中图分类号: TK21 文献标识码: A

## 1 引言

超音速汽液两相流升压装置是一种特殊的升压换热装置, 它以蒸汽作为动力源, 利用蒸汽与冷水直接接触换热所释放热量中的部分可用能, 以达到提高给水压力和温度的目的。该装置具有高效、节能、启动迅速、维修简单、安全性和可靠性高的特点, 因而被广泛应用于电力、化工以及核反应堆的堆芯紧急冷却。目前, 国内外学者对超音速汽液两相流升压技术做了大量的研究。据文献[1~3]的报道, Cattadori 在实验中能实现的最高进汽压力为 8.7 MPa 时, 出口热水压力可以达到 9.8 MPa; 国内实验研究中, 获得的出口水压最大可达蒸汽压力的三倍左右。文献[4~6]分别对于汽液两相流升压装置变截面混合腔通道内的压力分布规律、升压机理进行了实验和理论研究。根据文献[4~6]的研究结果, 该装置具有出口压力的自适应特点, 但在进口参数一定的条件下, 也具有定流量特征, 即出口流量不随出口压力的变化而变化, 这样就不能象传统的水泵一样, 通过调节出口压力改变出口流量, 限制了其应用范围, 特别是在现有热网系统的改造中, 需要改变原有控制系统, 而目前尚无解决超音速汽液两相流升压装置定流量特性问题的报道。对此, 本文提出

具有再循环系统的超音速汽液两相流升压装置, 不仅保留了压力自适应特性, 而且具有流量自适应特性。通过实验研究与理论计算, 找出具有再循环系统的超音速汽液两相流升压装置的升压性能和升温性能随进出口参数变化的规律。

## 2 数学模型

超音速汽液两相流升压装置如图 1 所示, 主要由蒸汽喷嘴、水喷嘴、混合腔及扩压管组成。

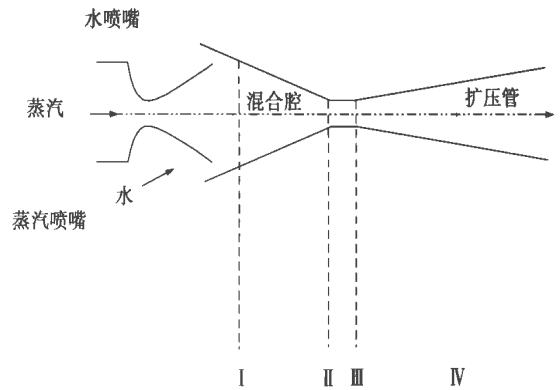


图 1 分析模型示意图

在进口参数一定的情况下, 超音速汽液两相流升压装置具有定流量特性。在热水供应系统中采用该装置时, 其出口流量不随外界所需流量的变化而变化。当外界需要的流量低于装置的出口流量时, 由于水的不可压缩性, 装置的出口压力会急剧升高, 最终导致系统无法正常运行。要使装置出口水流量能够随外界所需流量而变化, 可通过以下途径: (1) 调节进口蒸汽参数; (2) 调节进口给水参数; (3) 在装置出水管道上装再循环管。方法(1)和(2)的调节范围非常有限, 容易造成混合腔水力工况破坏, 而方法

收稿日期: 2002-12-09; 修订日期: 2003-01-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50106010)

作者简介: 郭迎利(1973-)女, 陕西西安人, 西安交通大学硕士研究生。

(3)流量调节范围大,系统不仅保留原有的压力自适应特性,而且具有流量自适应特性,容易实现系统自动化调节,是比较理想的调节方法。

具有再循环系统的超音速汽液两相流升压装置系统结构如图 2 所示,在原装置出水管道上,加设一条再循环管,与进水管相连接。当外界需要的水流量小于扩压管的出口流量时,装置出口压力升高,多余的热热水自动流入再循环管,与给水混合,再次进入升压装置,从而使该装置具有了流量自适应特性,装置的性能得到改善,使用范围扩大,实用性提高。

文中所采用的计算模型,是在文献[5]对汽液两相流升压装置实现升压机理的研究基础上,利用质量、动量和能量守恒方程,结合实验结果得出的升压性能的半经验公式。汽液两相流的换热升压过程从混合腔开始,升压性能是指在扩压管出口可以得到水的最高压力值,在运用数学模型进行计算的时候,取混合腔及扩压管组成的工作段。如图 1 所示,工作段划分为四个典型截面,混合腔入口截面 I、喉部入口截面 II、喉部出口截面 III 及扩压管出口截面 IV。在截面 IV 上可以得到的最高出水压力值  $P_4$  为:

$$P_4 = [P_{0S} \times R_p \times A_{1S} + P_{1W} \times A_{1W} + G_{1S} \times U_{1S} + (G_R + G_{GS}) \times U_{1W} - F - (G_{1S} + G_R + G_{GS}) \times U_3] / A_3 + \beta \times \rho_{1W} \times U_3^2 / 2 \quad (1)$$

- 式中:  $P_{0S}$ —蒸汽喷嘴的入口滞止压力, Pa;
- $A_{1S}$ —蒸汽喷嘴的出口截面积,  $m^2$ ;
- $G_{1S}$ —通过蒸汽喷嘴的质量流量, kg/s;
- $U_{1S}$ —截面 I 蒸汽喷嘴出口处蒸汽速度, m/s;
- $P_{1W}$ —水喷嘴出口处给水压力, Pa;
- $A_{1W}$ —水喷嘴出口截面积,  $m^2$ ;
- $G_R$ —进入再循环管中水的质量流量, kg/s;
- $G_{GS}$ —给水管中给水质量流量, kg/s;
- $U_{1W}$ —截面 I 水喷嘴出口处水的速度, m/s;
- $R_p$ —蒸汽喷嘴压比,  $R_p = P_{1S} / P_{0S}$ ;
- $F$ —混合腔阻力,  $kg \cdot m / s^2$ ;
- $U_3$ —截面 III 处流体的流速, m/s;
- $\beta$ —升压特性系数, 本文计算取 0.45。

利用上式进行装置升压能力计算时,根据超音速蒸汽喷嘴的设计参数、蒸汽滞止参数和水喷嘴的设计参数,可计算出上面计算公式中蒸汽和水的参数。其中水喷嘴出口处水的压力  $P_{1W}$  可根据实验数据进行拟合得到:

$$P_{1W} = \alpha \times t_{0W} + b \quad (2)$$

式中:  $t_{0W}$  是进水管中进水温度,根据实验结果,当蒸汽喷嘴的入口滞止压力  $P_{0S} = 0.5 \text{ MPa}$  时,

$$\alpha = 0.024729, b = 0.602708$$

通过蒸汽喷嘴的质量流量:

$$G_{1S} = 0.638 \times A_{cr} \times \sqrt{P_{0S} + \rho_{0S}} \quad (3)$$

- 式中:  $A_{cr}$ —蒸汽喷嘴的喉部截面积,  $m^2$ ;
- $P_{0S}$ —蒸汽喷嘴的入口滞止压力, Pa;
- $\rho_{0S}$ —蒸汽喷嘴的入口滞止参数对应的蒸汽密度,  $kg/m^3$ 。

截面 I 处蒸汽速度:

$$U_{1S} = \sqrt{2 \times (h_{0S} - h_{1S}) \times \eta_S} \quad (4)$$

- 式中:  $h_{0S}$ —蒸汽喷嘴入口的滞止焓, J/kg;
- $h_{1S}$ —蒸汽喷嘴的绝热膨胀出口焓, J/kg;
- $\eta_S$ —蒸汽喷嘴的效率, 计算中取 0.95。

对于具有再循环系统的超音速汽液两相流升压装置,进入水喷嘴的水流量:

$$G_{1W} = G_R + G_{GS}$$

混合腔总流量  $G_T = G_{1S} + G_{1W}$ ,

$$G_T = G_{1S} + G_R + G_{GS}, G_T = G_U + G_R$$

$G_U$ —出水管热水流量, kg/s

根据文献[2],混合腔阻力:

$$F = k \times \frac{P_{sat}(t_{1W}) + P_{sat}(t_3)}{2} \times (A_1 - A_2) \quad (5)$$

式中:

- $A_1$ —截面 I 汽水流通面积之和,  $A_{1S} + A_{1W}, m^2$ ;
- $A_2$ —截面 II 处混合腔喉部入口面积,  $m^2$ ;
- $t_{1W}$ —截面 I 水喷嘴出口水的温度,  $^\circ C$ ;
- $t_3$ —截面 III 处工质的温度,  $^\circ C$ ;
- $P_{sat}(t_{1W})$ —温度  $t_{1W}$  下的饱和压力, Pa;
- $P_{sat}(t_3)$ —温度  $t_3$  下的饱和压力, Pa;

$k$ —经验系数, 主要与混合腔的设计结构、制造工艺以及混合腔内壁表面粗糙度有关。根据文献[1]及本文实验研究,  $k$  的取值范围为 0 ~ 4.5, 一般工业应用取 2.0 左右;

$U_3$ —截面 III 处流体的流速, m/s。

在扩压管出口截面 IV 上可以得到的热水温度  $t_4$ , 单位为  $^\circ C$ 。

利用能量守恒方程,就可以计算出  $t_4$  的大小:

$$t_4 = \frac{G_{1S} \times h_{0S} + c_p \times G_{1W} \times t_{0W}}{c_p \times G_T} \quad (6)$$

式中:  $c_p$ —水的定压比热, 4186.18 J/( $kg \cdot ^\circ C$ )

通过以上各个参数,就可以计算出装置出口可以达到的最大压力和热水温度,定量描述系统的升

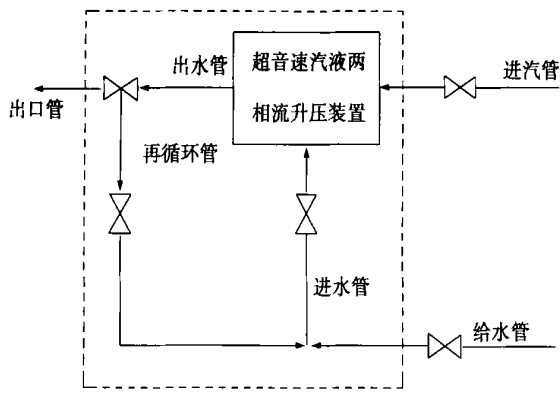


图 2 具有再循环管的超音速汽液两相流升压系统图  
压升温性能。

### 3 计算结果与讨论

实验与计算所采用的主要结构参数如表 1 所示。计算取水喷嘴进水流量  $G_{1W} = 2.5 \text{ kg/s}$  为一个定值; 图 3 和图 4 给水温度取  $t_{gs} = 17 \text{ }^\circ\text{C}$ , 图 5 和图 6 蒸汽喷嘴的入口滞止压力取  $P_{0s} = 0.5 \text{ MPa}$ 。通过计算不同的蒸汽压力、出口流量以及给水温度对升压升温性能的影响, 研究具有再循环系统的超音速汽液两相流升压装置的升压升温性能。图 3 ~ 图 6 分别给出了装置的升压升温特性曲线, 并将计算结果与实验结果进行比较(其中, 连续曲线为理论计算结果, 散点为实验点)。

表 1 主要设计结构参数

	数值
蒸汽喷嘴喉部直径/mm	22
蒸汽喷嘴出口直径/mm	30
混合腔喉部直径/mm	16

从图中可以看出:

图 3 表明, 出口热水温度随出口流量的增加而降低。因为在相同的进水流量下, 随着出口流量的增加, 再循环管中的热水流量减少, 装置的进水温度降低, 则出口水温度降低。

在进水温度及进水流量一定的情况下, 蒸汽进口压力提高, 蒸汽流量增加, 装置的出口水温度就升高。

图 4 表明, 升压能力随着出口流量的增加而提高。主要因为当出口流量减少时, 再循环管中流量增加, 水喷嘴进口的水温提高, 导致混合腔中汽液两相流波前空泡率过高, 或混合腔中是单相蒸汽, 当超

音速高, 波前马赫数低, 根据文献[7], 两相流体最高升压比随波前马赫数的降低而降低, 装置的升压能力降低。同时, 实验及计算又表明, 混合腔阻力随着水喷嘴进水温度的升高而增加, 这也是随进水温度升高, 升压能力降低的另外一方面原因。

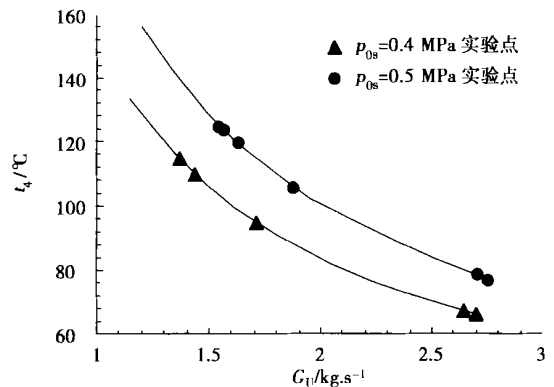


图 3 出口温度  $t_4$  与出口热水流量  $G_U$  的关系曲线

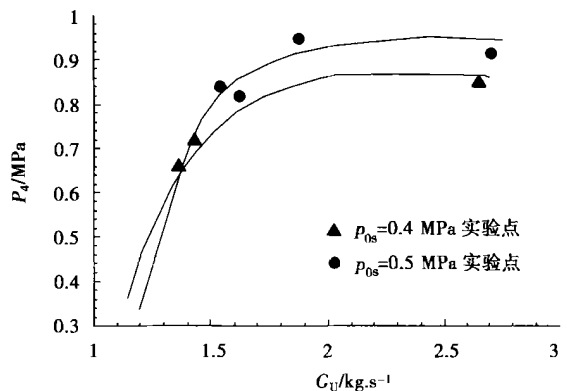


图 4 升压能力  $P_4$  与出口热水流量  $G_U$  的关系曲线

计算和实验还表明, 出口流量较低时, 升压能力随着流量的变化剧烈, 随着出口流量的提高, 升压能力的变化趋缓。如果采用该装置供热时, 外界所需流量越高, 得到的出口热水压力越高, 而且在外界所需流量较高的情况下, 可以确保水力工况的稳定。而采用普通升压泵时, 情况恰恰相反, 外界所需热水流量越高, 出口压力就越低, 以至于在高出口流量下, 出口水压达不到要求。这也是具有再循环系统的超音速汽液两相流升压装置用于供热工程中, 优于普通升压泵的一个显著特点。

图 5 表明, 在进口蒸汽参数一定的情况下, 出口

热水温度与给水温度呈近似线性关系, 给水温度提高, 出口水温升高。

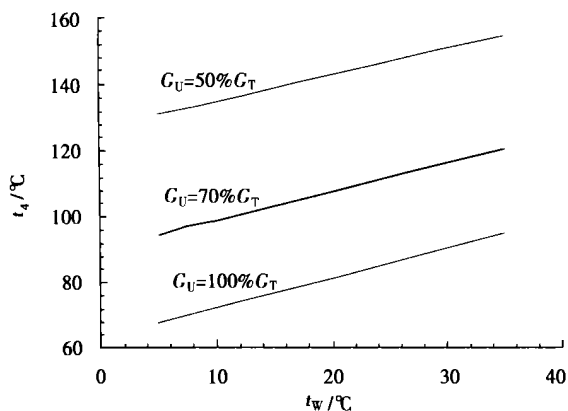


图 5 出口水温  $t_4$  与给水温度  $t_w$  的关系曲线 ( $P_{0S}=0.5 \text{ MPa}$ )

图 6 表明, 在进口蒸汽参数一定的情况下, 升压能力随给水温度的升高而降低, 在低给水温度下, 升压能力随出口流量的变化较小, 高给水温度下, 升压能力随出口流量的变化较大。出口流量越大, 给水温度变化对升压能力的影响越小。

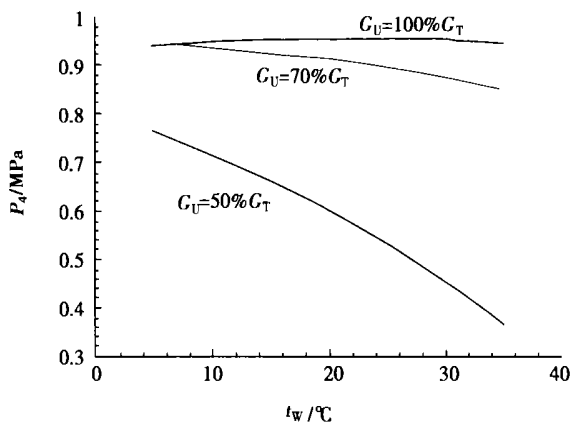


图 6 升压能力  $P_4$  与给水温度  $t_w$  的关系曲线 ( $P_{0S}=0.5 \text{ MPa}$ )

从图 6 还可以得出升压能力随出口流量变化的特点: 在低出口流量下, 升压能力随出水流量变化而剧烈变化, 在高出口流量下, 升压能力的变化比较缓慢。在入口汽水总流量  $G_T=2.753 \text{ kg/s}$ 、入口蒸汽

压力  $P_{0S}=0.5 \text{ MPa}$  以及给水温度  $t_{gs}=20^\circ\text{C}$  的情况下, 当出水管中流量从总流量的 100% 变化到 70% 时, 升压能力相对变化仅为 4.6%; 而出水管中流量从总流量的 70% 变化到 50% 时, 升压能力相对变化为 33.92%。

#### 4 结 语

对于具有再循环系统的超音速汽液两相流升压装置, 在结构设计参数一定的情况下, 其升压能力与进口蒸汽参数、给水参数、出口热水流量、再循环管内热水流量和混合腔阻力等因素有关。升压能力随出口热水流量的增加而提高, 即随再循环管中再循环流量的增加而降低。出口热水温度随出水管热水流量的增加而降低, 随给水温度的提高近似线性升高。在升压能力范围内, 超音速汽液两相流升压装置的出口压力随背压的变化自动变化, 对外界负荷具有压力自调节特性; 加装再循环系统后, 出水管热水流量随着外界所需流量的变化而自动变化, 系统具有流量自调节特性, 对外界负荷的适应能力得到进一步提高。而且, 在出水流量增大时, 升压能力也随之提高, 这个特征优于普通升压泵。

#### 参考文献:

- [1] AYBARH S, BEITHOU N. High-pressure steam-driven jet pump-part I: mathematical modeling [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2001, 123(3): 693-700.
- [2] AYBARH S, BEITHOU N. High-pressure steam-driven jet pump-part II: parametric analysis [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2001, 123(3): 701-706.
- [3] CATTADORI G, MAZZOCCHI L, VANINI P. A single-stage high pressure steam injector for next generation reactors: test results and analysis [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1995, 21: 591-606.
- [4] 严俊杰, 刘继平, 邢泰安, 等. 变截面超音速汽液两相流升压过程的实验研究 [A]. 中国工程热物理学会 2002 年学术会议 [C]. 中山: 中国工程热物理学会, 2002. 134-139.
- [5] 严俊杰, 刘继平, 林万超, 等. 汽液两相流喷射升压装置的机理研究 [J]. *核动力工程*, 2001, 22(6): 490-493.
- [6] 刘继平, 严俊杰, 林万超, 等. 汽液两相流激波升压过程的实验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2002, 36(1): 1-3.
- [7] 赵良举, 曾丹苓. 两相流超音速流动、激波及其应用研究 [J]. *热能动力工程*, 2002, 17(4): 332-335.

(渠 源 编 辑)

**Diffusion in a Gas-solid Two-phase Turbine** [刊, 汉] / LU Jia-hua, LING Zhi-guang (College of Aviation Transportation under the Shanghai University of Engineering & Technology, Shanghai, China, Post Code: 200336) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(5). — 454 ~ 458

In the totally three-dimensional viscous turbulent flow field of a dual-stage transonic gas turbine a Lagrangian numerical simulation was respectively conducted of the turbulent diffusion movement of coal particles of different particle sizes and mixed coal particles of 5—50  $\mu\text{m}$  distribution diameter (volume fraction =  $0.903 \times 10^{-4}\%$ ) in a blade flow path. This was accomplished with the use of a gas-solid two-way coupled model. As a result, the corresponding movement trajectories and slippage were obtained. As compared to the results of numerical simulation under the assumed condition of non-viscid, laminar flow and one-direction coupling, more realistic movement characteristics of particles were secured. It should be specially noted that at the blade pressure surface, blade root and tip the distribution of impact-point of particles with blades is in relatively good agreement with the distribution condition of actual blade impact/erosion points. This has confirmed the non-negligible effect of the turbulent diffusion characteristics of particles in the blade flow path. The results of the numerical simulation will provide a more reliable basis for furthering the optimization of the aerodynamic design of gas-solid two-phase turbine blades. **Key words:** gas-solid two-phase turbine, viscous turbulent flow field, turbulent diffusion, two-way coupling, Lagrangian method, numerical simulation

**修正的  $k-\varepsilon-k_p$  双流体模型用于模拟旋流突扩燃烧室内气固两相流动 = Numerical Simulation of Gas-solid Two-phase Flows in a Swirling-flow Combustor through the Use of a Modified  $k-\varepsilon-k_p$  Two-fluid Model** [刊, 汉] / LI Zhi-qiang, WEI Fei, LI Rong-xian, et al (Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(5). — 459 ~ 462

The source item of  $\varepsilon$  equation in a standard  $k-\varepsilon-k_p$  model after a modification is used to simulate swirling gas-solid two-phase turbulent flows. The simulation results were compared with experimental data. The resulting modified model can relatively well simulate the swirling flows and play a significant role in promoting an optimized engineering design. **Key words:** swirling flow, modified  $k-\varepsilon-k_p$ , two-fluid model, numerical simulation

**有再循环系统的超音速两相流升压性能的研究 = A Study on the Performance of a Supersonic Steam-liquid Two-phase Flow Pressure-boosting Unit Equipped with a Hot-water Recirculation System** [刊, 汉] / GUO Ying-li, LI sheng, YAN Jun-jie, et al (College of Energy and Power Engineering under the Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(5). — 463 ~ 466

A theoretical calculation and experimental study is conducted of a supersonic steam-liquid two-phase flow pressure-boosting unit, which incorporates a hot-water recirculation system. It has been found that under a condition of constant inlet steam parameters the pressure boosting performance will decrease with an increase in feed water temperature and increase with an increase in outlet water flow. The outlet water temperature will decrease with an increase in outlet water flow, and increase with a rise in feedwater temperature. The unit under discussion not only retains the self-adaptive characteristics of the original outlet pressure, but also features self-adaptive characteristics of outlet flow rate. **Key words:** supersonic, steam-liquid two-phase flow, shock wave, constant flow rate characteristics

**一种湿法烟气脱硫方式的试验研究 = Experimental Research of a Wet-process Flue-gas Desulfurization Method** [刊, 汉] / SAI Jin-Cong, WU Shao-hua, WANG Hong-tao (College of Energy Science & Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(5). — 467 ~ 470

A flue gas desulfurization method based on the use of a groove-shaped flow-guide core and flue-gas transverse sweep is proposed, which has been studied on a small-size test rig. A qualitative analysis was conducted of the impact of flue gas flow speed, temperature and gas-liquid contact area on flue-gas desulfurization efficiency. The slag formation problem of the test rig is also briefly analyzed and discussed. **Key words:** transverse sweep of gases, groove-type core, wet-process flue-gas desulfurization, slag formation