

文章编号:1000-582X(2011)06-060-04

## 多喷嘴射水式喷射器加热性能分析

童明伟,蔡琴,白秀娟

(重庆大学动力工程学院,重庆400044)

**摘要:**为研究多喷嘴射水式喷射器的加热性能,提出了分析喷射器加热系数的计算模型,对喷射器加热性能的影响因素进行了分析,并根据理论分析和实验数据得出了不同运行参数对其加热性能的影响规律。研究表明,多喷嘴射水式喷射器具有很好的加热性能,喷射器的加热系数随入口水温的升高而减小,随蒸汽压力和引射系数的升高而增大,并且计算和实验得到的各运行参数对喷射器加热性能的影响规律是基本一致的。

**关键词:**喷射器;多喷嘴;加热系数;引射系数

**中图分类号:**TK11

**文献标志码:**A

### Heating performance analysis of multi-nozzle water-jet steam ejector

TONG Ming-wei, CAI Qin, BAI Xiu-juan

(College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

**Abstract:** This paper develops a heating coefficient model to study the heating performance of multi-nozzle water-jet steam ejector. It analyzes the factors of heating performance, and explores the relationships between the heating performance and different operating parameters theoretically and experimentally. The results show that the heating performance of multi-nozzle water-jet steam ejector is very good. The heating coefficient decreases with the increase of the inlet water temperature, and increases with the increase of the steam pressure and ejecting coefficient. The relationships between heating performance of ejector and different operating parameters by calculation and experiment are in good agreement.

**Key words:** ejector; multi-nozzle; heating coefficient; ejecting coefficient

喷射器是一种应用非常广泛的流体机械,它利用工作流体的射流作用来传递能量和质量<sup>[1]</sup>。具有结构简单、没有运动部件、运转费用低廉、操作维修方便等优点,并且对被抽介质无严格要求,对于有毒性、易燃易爆、腐蚀性强乃至可燃性气体等几乎都适用,加之抽吸量较大,工作压力范围宽,因此在国内外的能源动力、石油化工、冶金、制冷、热工以及农业等技术领域中得到了广泛的应用,如锅炉蒸汽给水、农林供水及井灌、污水及废气处理等<sup>[2]</sup>。为此国内外许多学者对喷射器的理论和实验进行了深入研究,对喷射器结构设计<sup>[3-4]</sup>、升压特性<sup>[5-7]</sup>、两相特

性<sup>[8]</sup>、减震降噪和提高效率<sup>[9]</sup>等方面进行的大量研究,极大地拓展了喷射器的工程运用。

传统的单喷嘴喷射器由于结构尺寸的限制,喉管部分不能很长,使汽液混合不充分,导致喷射器加热性能不理想。前人对多喷嘴引射的研究也有涉及,吴继平等<sup>[10]</sup>对多种多喷嘴构型喷射器的启动性能进行了试验研究,廖达雄等人<sup>[11]</sup>将多喷嘴引射方式应用于等压混合喷射器。但总的来说,这些研究多采用的是射气式,对射水式的多喷嘴引射研究很少在文献中见到,笔者将采用理论计算和实验的方法对四喷嘴射水式喷射器的加热性能进行较深入

收稿日期:2010-12-04

基金项目:重庆市科委重点攻关项目(CSTC. 2009AB3084)

作者简介:童明伟(1945-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事工程热物理研究,(E-mail)tmw1016@163.com。

的研究。

## 1 计算数学模型

### 1.1 多喷嘴射水式喷射器的结构

喷射加热器是一种直接接触式的汽水换热器,蒸汽作为热源加热冷水,使出口水温提高。它的工作方式分为射汽式和射水式2种<sup>[12]</sup>,在一般的情况下推荐使用射水式喷射器,因为该方式应用范围宽而且运行稳定性好,不受蒸汽压力的限制,蒸汽压力高于或低于水的压力均可正常工作,因此该装置采用射水式,并参照喷管推荐参数对喷射器进行结构设计<sup>[13-14]</sup>。

传统的单喷嘴喷射器由于结构尺寸的限制,喉管部分不能很长,使汽液混合不充分,导致喷射器加热性能不理想,因此笔者设计了一种新型的多喷嘴喷射器,其基本结构如图1所示,该加热装置由4个水喷嘴、蒸汽吸入室、4个混合喷管和扩散喷管组成。当过冷水通过水喷嘴时,流速增加,压力降低,在喷嘴的出口处形成低压区,蒸汽在此区域进入喷射器内,与过冷水进行混合,汽、水之间进行能量、动量和质量的交换,最后进入扩散喷管使水的压力升高,由此完成过冷水的加热过程。

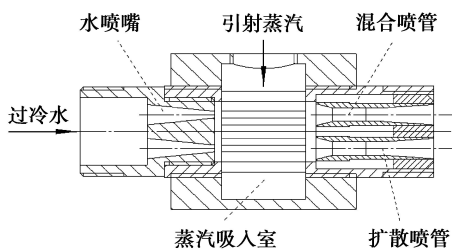


图1 多喷嘴射水式喷射器结构示意图

### 1.2 计算数学模型

为了清楚的表述喷射器的加热性能,文中引入一个无量纲参数——加热系数 $\theta$ ,其物理意义是指通过喷射器后获得的出口水温度(或焓)与进口水温度(或焓)相比,其温度(或焓)升高的相对值,表达式为

$$\theta = \frac{T_c - T_w}{T_w} \approx \frac{h_c - h_w}{h_w}, \quad (1)$$

式中: $T_w$ 为入口冷水温度,K; $T_c$ 为出口热水温度,K; $h_w$ 为入口冷水焓,kJ/kg; $h_c$ 为出口热水焓,kJ/kg。

定义引射蒸汽与入口冷水的质量流量之比为引射系数<sup>[15]</sup>,它表示在一定工况下,单位质量的工作流体通过喷射器所能抽吸的引射流体的量,即

$$u = \frac{G_s}{G_w}, \quad (2)$$

式中: $G_w$ 为入口水流量,kg/s; $G_s$ 为蒸汽流量,kg/s。

一旦选定装置的结构尺寸确定后,系统的出口参数完全由入口参数决定

1)根据流动的连续性,有

$$G_c = G_w + G_s, \quad (3)$$

2)根据能量守恒,有:

$$G_w \cdot h_w + G_s \cdot h_s = G_c \cdot h_c, \quad (4)$$

$$\text{即 } h_c = \frac{G_w \cdot h_w + G_s \cdot h_s}{G_c}, \quad (5)$$

式中: $G_c$ 为出口热水流量,kg/s; $h_c$ 为出口热水焓,kJ/kg; $h_s$ 为蒸汽焓, $h_s = h(P_s, T_s)$ ,kJ/kg。

由上面各式得到加热系数的计算模型为

$$\theta = \frac{G_s}{G_w + G_s} \cdot \frac{h_s - h_w}{h_w} = \frac{u}{1 + u} \cdot \frac{h_s - h_w}{h_w}. \quad (6)$$

通过对上面各式的分析,可以发现影响喷射器加热系数的主要因素有进口冷水温度 $T_w$ 、蒸汽压力 $P_s$ 和引射系数 $u$ 。

## 2 实验方法

以水作为工作流体,蒸汽作为引射流体,对多喷嘴射水式喷射器进行加热性能的实验。实验系统如图2所示,温度、压力采集点紧邻喷射器进口和出口,确保采集的参数接近喷射器进、出口的实际参数,实验过程中温度、压力采用人工记录与模块化数据采集2种方式相结合。

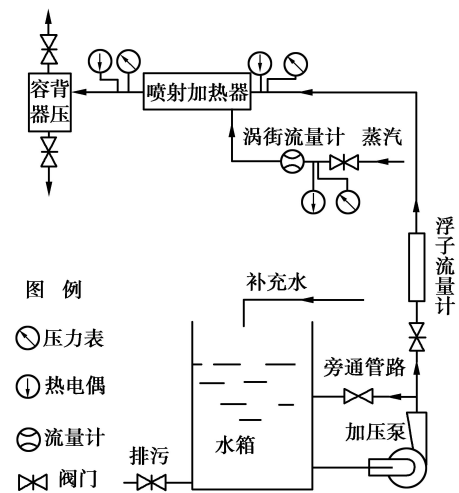


图2 实验系统图

实验过程如下:启动水泵,开启水泵给水管道阀门,同时保证进汽阀关闭;喷射加热器进水流量稳定后,打开进汽阀,并使蒸汽压力保持稳定;然后调节给水流量,待喷射加热器工作稳定后开始记录不同给水流量下的实验数据:喷射器入口水的压力、流量、温度,引射蒸汽的流量、温度,以及出口水温、压力。在不改变喷射器试件的条件下,分别改变蒸汽

压力和入口水温,并重复以上实验过程。考虑到工作流体压力和流量的波动情况,对每组数据采用间断测量的方式。

### 3 影响加热性能的因素

为了研究各影响因素与多喷嘴射水式喷射器加热系数的关系,利用以上喷射器的加热系数计算模型,计算得出了喷射器的加热系数  $\theta$  随进口冷水温度  $T_w$ 、蒸汽压力  $P_s$  和引射系数  $u$  的变化规律,并与实验结果进行了对比。

#### 3.1 入口水温对加热系数的影响

当采用喷射器进行供暖或供水时,为使喷射器出口水温达到供暖要求,热水存在回流,所以入口的水温往往高于环境温度,分析入口水温对喷射器加热系数的影响有助于确定装置的最佳入口参数。

图 3 是不同入口水温下喷射器的加热系数曲线,可以看出,多喷嘴射水式喷射器的加热系数随着入口水温的升高而减小,当入口水温为  $10\text{ }^\circ\text{C}$  时,喷射器的加热系数达到 6,几乎是  $49\text{ }^\circ\text{C}$  时的 3 倍。当蒸汽压力和引射系数一定时,随着入口水温的升高,入口水的焓值增加,在计算加热系数的表达式(6)中,分母增大而分子减小,喷射器的加热系数必然随着水温的升高而减小。同样可以从热力学的观点进行分析,当入口水温降低时,相当于低温热源的温度降低,同样压力蒸汽的可用能增加,故水温较低时加热系数较大。

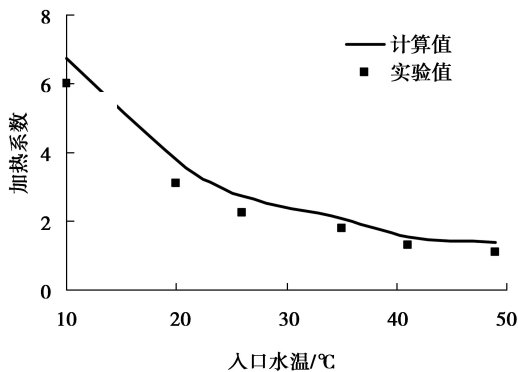


图 3 加热系数与入口水温的关系

( $P_s=0.28\text{ MPa}$ ,  $u=0.12$ )

在使用加热系数模型计算中,喷射器的出口焓为理想状态下的值,并未考虑到加热是否充分、是否有散热损失,导致喷射器出口焓的计算值高于实验值,使得喷射器加热系数的理论值偏高,因此在图 3 中的曲线可以看到,射水式喷射器加热系数的实验值要低于计算值。

#### 3.2 蒸汽压力对加热系数的影响

当蒸汽压力或入口水温改变时,喷射器的引射系数发生变化,为分析蒸汽压力对喷射器加热系数的影响规律,取同一入口水温和引射系数下的数据进行研究。图 4 为蒸汽压力与喷射器加热系数的关系曲线,从图中可以看出,射水式喷射器的加热系数随着蒸汽压力的升高而增大。在引射系数不变的情况下,蒸汽压力的升高意味着引射蒸汽温度的上升,进而对喷射器的加热量增加,使得喷射器出口水温升高,加热系数随之增加。同时从计算加热系数的数学模型中也可以看出,蒸汽压力的升高使得蒸汽的焓值增加,这样喷射器的加热系数必然增大。

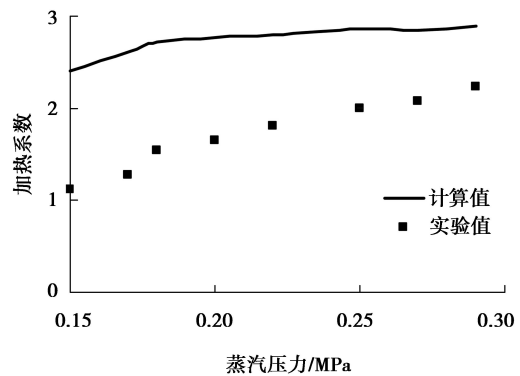


图 4 加热系数与蒸汽压力的关系

( $t_w=26\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $u=0.12$ )

#### 3.3 引射系数对加热系数的影响

图 5 为射水式喷射器的加热系数与引射系数的关系曲线,从图中可看出,加热系数与引射系数近似呈线性关系。当入口水温和蒸汽压力不变的情况下,给水流量的改变会影响引射系数的变化,随着引射系数的增大,意味着引射蒸汽量相对增加较多,由此喷射器内汽液换热量增加,使得喷射器出口水温升高,加热系数增大。

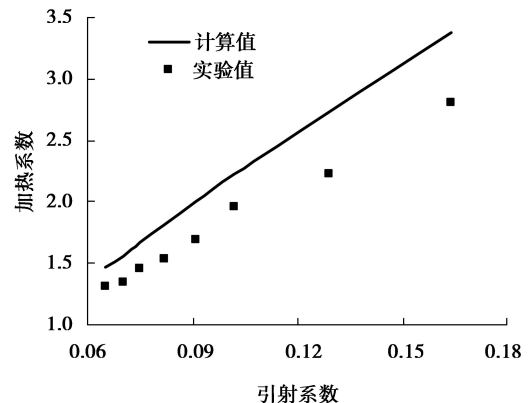


图 5 加热系数与引射系数的关系

( $t_w=26\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $P_s=0.29\text{ MPa}$ )

## 4 结 论

通过对多喷嘴射水式喷射器工作原理的分析,提出了分析喷射器加热性能的数学模型,计算得到了不同运行参数下喷射器的加热系数,详细探讨了入口水温、蒸汽压力和引射系数等因素对喷射器加热系数的影响,并与实验结果进行了对比。结果表明:当蒸汽压力和引射系数一定时,加热系数随入口水温的升高而减小,并且最高加热系数达到6;当入口水温和引射系数一定时,加热系数随着蒸汽压力的升高而增大;当入口水温和蒸汽压力一定时,加热系数与引射系数呈近似线性关系,并且计算和实验得到的各运行参数对喷射器加热系数的影响规律是基本一致的。

### 参考文献:

- [1] BALAMRUGAN S, LADAD M D, GAIKAR V G, et al. Hydrodynamics and mass transfer characteristics of gas-liquid ejectors[J]. Chemical Engineering Journal, 2007, 131(1/3):83-103.
- [2] DEBERNE N, LENOE J F, DUQUE A, et al. A model for calculation of steam injector performance [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1999, 25(1): 841-855.
- [3] OUZZANE M, AIDOUN Z. Model development and numerical procedure for detailed ejector analysis and design[J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(18): 2337-2351.
- [4] RANDHEER L Y, PATWARDAN A W. Design aspects of ejectors; effects of suction chamber geometry [J]. Chemical Engineering Science, 2008, 63(15): 3886-3897.
- [5] BUTTERWORTH M D, SHEER T J. High-pressure water as the driving fluid in an ejector refrigeration system [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(11/12): 2145-2152.
- [6] HEMIDI A, HENRY F, LECLAIRE S, et al. CFD analysis of a supersonic air ejector. part I: experimental validation of single-phase and two-phase operation [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(8/9): 1523-1531.
- [7] 李刚, 袁益超, 刘聿拯, 等. 汽水喷射器升压特性及输出量的调节方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(17): 39-42.
- [8] LI GANG, YUAN YI-CHAO, LIU YU-ZHENG, et al. Lifting pressure characteristics and output regulation method of steam-water injector [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(17): 39-42.
- [9] NARABAYASHI T, MORI M, NAKAMARU M, et al. Study on two-phase flow dynamics in steam injectors. high-pressure tests using scale-models [J]. Nuclear Engineering and Design, 2000, 200(2): 261-271.
- [10] 王菲, 沈胜强. 新型太阳能双喷射制冷系统的可用能效率分析[J]. 化工学报, 2009, 60(3): 553-559.
- [11] WANG FEI, SHEN SHENG-QIANG. Exergy analysis of novel solar bi-ejector refrigeration system [J]. CIESC Journal, 2009, 60(3): 553-559.
- [12] 吴继平, 陈建, 王振国. 多喷嘴超声速引射器启动性能试验 [J]. 推进技术, 2008, 29(2): 174-178.
- [13] WU JI-PING, CHEN JIAN, WANG ZHEN-GUO. Experiment on starting performance of multi-nozzle supersonic ejector [J]. Journal of Propulsion Technology, 2008, 29(2): 174-178.
- [14] 廖达雄, 任泽斌, 余永生, 等. 等压混合引射器设计与实验研究 [J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(5): 728-732.
- [15] LIAO DA-XIONG, REN ZE-BIN, YU YONG-SHENG, et al. Design and experiment of constant-pressure mixing ejector [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(5): 728-732.
- [16] 邱春花, 王蓉, 付文锋. 射水式喷射加热器结构设计计算与分析 [J]. 华北电力大学学报, 2007, 34(1): 63-66.
- [17] QIU CHUN-HUA, WANG RONG, FU WEN-FENG. Design and analysis of structure of steam jet heat exchanger [J]. Journal of North China Electric Power University, 2007, 34(1): 63-66.
- [18] 索科洛夫 E R, 津格尔 N M. 喷射器 [M]. 黄秋云, 译. 北京: 科学出版社, 1977.
- [19] 陆宏圻. 喷射技术理论及应用 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004.
- [20] 徐海涛, 桑芝富. 蒸汽喷射器喷射系数计算的热力学模型 [J]. 化工学报, 2004, 55(5): 704-710.
- [21] XU HAI-TAO, SANG ZHI-FU. Thermodynamic models for calculating entrainment ratio of steam-jet ejector [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2004, 55(5): 704-710.

(编辑 陈移峰)