

花瓣喷嘴引射器引射系数的数值分析

张 奕 陈丹丹 石 嵩

(南京师范大学 能源与机械工程学院,江苏 南京 210042)

[摘要] 花瓣喷嘴引射器可以为火炬气燃烧器提供燃烧所需要的空气,引射系数是这种引射器最重要的运行性能参数.使用可压缩流体模型,建立了引射器中蒸汽、空气及混合气体的运动方程、能量方程和组元方程.通过对这些方程的数值计算,分析了引射系数与蒸汽流量、喷嘴出口轴向位置(NXP)及混合室结构的关系.引射器运行时存在最佳蒸汽流量工况,在此流量下引射系数最大.管内蒸汽流量太大时,喷嘴出口产生激波,造成引射系数降低.喷嘴出口位于混合室内的引射系数比位于混合室外的大,出口离混合室越远,引射系数越小.混合室后接缩放管的引射系数比接直管时大 50%.研究结果可对花瓣喷嘴引射器运行参数选择和结构设计提供依据.

[关键词] 引射器,引射系数,花瓣喷嘴,数值计算

[中图分类号] TK413.2 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-4292(2012)01-0029-04

Numerical Simulation of Entrainment Ratio of Steam Ejector with Petaliform Nozzle

Zhang Yi, Chen Dandan, Shi Song

(School of Energy and Mechanical Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: Steam ejector with petaliform nozzle can provide flare gas burner with air. Entrainment ratio is the most important operating parameter of the ejector. Compressible fluid conservation equations of momentum, energy and species are used to compute flow process in the ejector. It is found that the ejector achieves a maximum entrainment ratio when it operates at an optimal primary steam flow. Shock wave appears at exit of petaliform nozzle when steam flow is too large, which leads to the decrease of the entrainment ratio. When the nozzle exit position (NXP) is located in mixture room, the ejector gains a greater entrainment ratio than out of mixture room. The farther NXP from mixture room is, the less the entrainment ratio is. When a converging-diverging tube is connected to the mixture room, the entrainment ratio is as 1.5 times large as that connected to a straight tube. The results can be useful for the choice of the operating parameters and design of steam ejector with petaliform nozzle.

Key words: steam ejector, entrainment ratio, petaliform nozzle, numerical simulation

引射器利用工作流体从喷嘴高速流出后形成的低压,将引射流体卷吸进混合室.引射器具有结构简单、工作可靠等优点,在化学反应器、流体输送、制冷等领域,尤其是燃烧器中得到普遍应用.

引射系数为引射流体质量流量与工作流体质量流量之比,是衡量引射器工作性能的重要指标之一,对引射系数的研究受到广泛重视.季建刚等^[1]通过对蒸汽——蒸汽引射器的分析,建立了计算引射器特殊位置处蒸汽压力、速度的数学模型,对变工况下的引射过程进行了数值计算.工作蒸汽存在最佳压力,在此压力下引射系数最大;引射系数随引射蒸汽压力的增加而增加,但是引射蒸汽压力较低时,引射系数增加的速率较快;当引射器出口压力小于某一压力时,引射系数与出口压力无关,出口压力大于该压力时,引射系数随出口压力升高而降低.文献[2-5]也用相关理论模型分析了各种因素对引射系数的作用规律.

引射器用途广泛,在不同的应用场合其结构、工作参数、性能都会发生变化.数值模拟方法可以对引射器工作过程进行全面、快速的计算分析. Szabolcs Varga 等^[6]使用 FLUENT 软件计算了结构参数对引射系数的影响,计算表明增加混合管/喷嘴面积之比可以提高引射系数.为解决引射器在变工况时可能出现的

收稿日期: 2011-04-04.

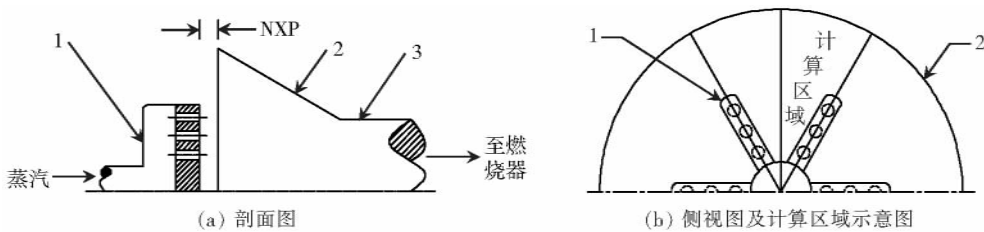
通讯联系人: 张 奕,博士,副教授,研究方向: 能源高效利用. E-mail: zhangyi@njnu.edu.cn

出口临界压力过低问题,提出使用针阀对喷嘴面积进行调节的方法.喷嘴存在一个最佳轴向位置,此时引射器具有最高的引射系数和出口临界压力.混合管长度对引射系数没有影响,但增加混合管长度可以提高出口临界压力.文献[7-10]用各种数值方法计算了引射器结构、工作参数等对引射系数的影响.

石化生产中使用燃烧器进行火炬气燃烧,引射器提供燃烧所需空气.为提供火炬气燃烧所需要的大量空气,可以采用一种具有花瓣喷嘴的引射器.本文使用数值计算方法,对这种引射器在不同的工作参数和几何参数下,引射系数的变化规律进行分析,为这种引射器的运行和设计提供依据.

1 引射器描述及基本方程

图 1 为具有花瓣喷嘴的引射器结构示意图.该引射器采用的花瓣喷嘴共有 18 个蒸汽喷出口,因此喷嘴蒸汽流量大,从而可引射大量空气,以满足火炬气燃烧器对助燃空气量的需求.



1. 花瓣喷嘴; 2. 混合室; 3. 输送管
图 1 花瓣喷嘴引射器结构示意图

Fig.1 Diagram of steam ejector with petaliform nozzle

在建立引射器内流动计算模型时,假设引射器内是稳定流动,蒸汽在流动过程中具有理想气体的性质,不发生凝结,并且蒸汽在引射流动过程中只和空气间进行热量传递,整个系统和外界是绝热的.

基于以上假设,喷嘴及引射器内可压缩流动的连续性方程为:

$$\nabla(\rho \mathbf{u}) = 0. \quad (1)$$

引射过程中,蒸汽与空气混合,混合流体的温度及粘性系数等物性参数发生显著变化,变物性流动的动量方程为:

$$(\mathbf{u} \nabla)(\rho \mathbf{u}) = \rho \mathbf{f} - \nabla p + \nabla(\mu(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) - \frac{2}{3} \nabla \mathbf{u} \mathbf{I}), \quad (2)$$

式中: $\nabla \mathbf{u}^T$ 表示二阶对称张量; \mathbf{I} 为单位向量.

引射流动中,能量方程需要反映热对流、导热、粘性耗散等效应对控制体能量平衡的作用,因此能量方程为:

$$\nabla \left[\rho \left(c_p T + \frac{\mathbf{u}^2}{2} \right) \mathbf{u} \right] = \nabla(\lambda_e \nabla T) + \nabla \left(\mu(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) - \frac{2}{3} \nabla \mathbf{u} \mathbf{I} \right) \mathbf{u}, \quad (3)$$

式中: λ_e 为有效热导率, $\lambda_e = \lambda + \lambda_1$, λ_1 为紊流热导率,由紊流模型计算获得.

在引射造成的强烈对流流动情况下,可以忽略扩散对控制体组元平衡的影响,因此组元输运方程为:

$$\nabla(\rho \mathbf{u} Y_i) = 0, \quad (4)$$

式中: Y_i 为蒸汽或空气的质量浓度.

2 计算方法

引射器在混合室后有一段较长的输送管,将气体送至高空.由于输送管较长,并且在花瓣喷嘴的条件下必需进行三维空间计算.为减小计算工作量,考虑到花瓣喷嘴的几何对称特点,计算区域取为如图 1 所示的区域,即圆周角为 $\pi/6$ 的区域,为全部流动区域的 1/12,计算区域圆周方向的两个边界设置为对称边界条件.

为了保证计算既具有足够的精度和稳定性,同时计算量又不致太大,计算网格采用梯度适应分区网格.整个流动区域被分成 3 个计算区域,即具有较细网格的喷嘴附近的蒸汽流动区域以及引射流动区域,具有较粗网格的混合室内的流动区域,以及具有边界梯度适应网格的输送管内的流动区域.图 2 为花瓣喷嘴对称中心计算网格划分示意图.

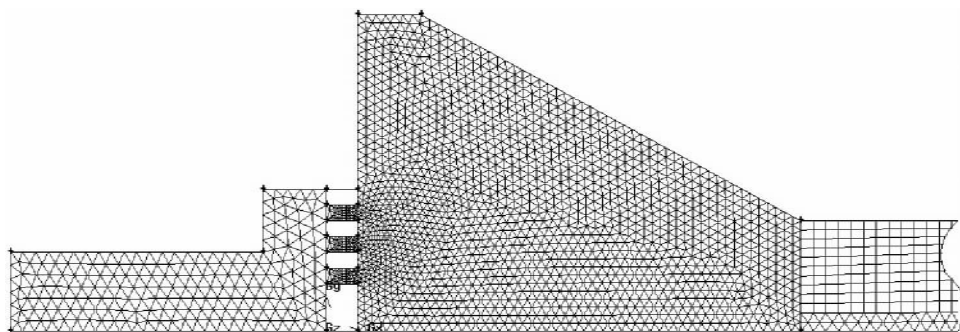


图2 花瓣喷嘴对称中心计算网格划分

Fig.2 Mesh of symmetric center of petaliform nozzle

在计算区域中有3个流体进出边界,这3个边界的边界条件设置如下:蒸汽进口使用流量进口条件、空气进口采用压力进口条件、混合气体在输送管的出口采用压力出口条件。

3 计算结果及讨论

图3是不同蒸汽流量导致引射系数的变化。图3表明,蒸汽流量较小时,引射系数随蒸汽流量的增加而变大,蒸汽流量较大时情况恰好相反。选择适当的蒸汽流量,引射系数可获得最大值。

蒸汽流量由较小值开始增加时,花瓣喷嘴出口蒸汽流速增加。由流体运动能量方程可知,蒸汽出口压力下降,可以卷吸更多的空气进入混合室,引射系数增大。当蒸汽流量增加至某值时,蒸汽在喷嘴出口达到超音速,此时的蒸汽出口压力最低,卷吸空气量和引射系数达到最大。蒸汽流量进一步增大,蒸汽在喷嘴出口达到超音速状态,在离开喷嘴后的自由膨胀中产生激波,蒸汽压力迅速增大,导致引射系数下降。此后随着蒸汽流量的增加,蒸汽的出口压力回升效应越显著,引射系数持续下降。

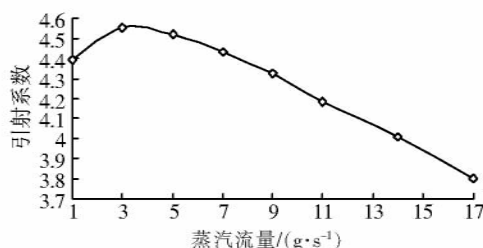


图3 引射系数与蒸汽流量的关系

Fig.3 Relationship between entrainment ratio and steam flow

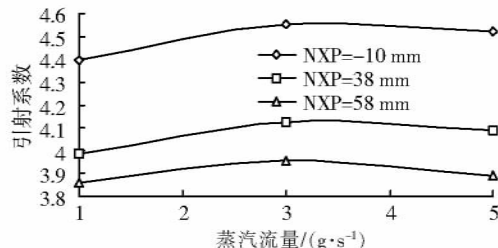


图4 引射系数与喷嘴出口轴向位置(NXP)的关系

Fig.4 Relationship between entrainment ratio and NXP

图4是喷嘴出口轴向位置(NXP)对引射系数的影响。图4中NXP为正数表明喷嘴出口位于混合室外,如图1所示,为负数则位于混合室内。

图4表明,喷嘴出口位于混合室外时,蒸汽对空气的引射效果比位于混合室内的差,并且喷嘴离开混合室越远,引射系数越小。蒸汽高速流出喷嘴,在喷嘴附近形成的低压是引射动力。这一低压区位于混合室内时,可以将空气直接吸入。低压区位于混合室外,蒸汽在混合室外就已经与空气混合,导致再流入混合室时压力增加,引射能力降低。

图5为混合室与输送管间用缩放管进行连接的结构示意图。

图6是其他条件都相同时,混合室后分别接等直径输送管和缩放管引射系数的变化情况。图6表明,混合室后接缩放管的引射系数比接等直径管提高约50%。混合室后接缩放管时,混合气体在缩放管内的收缩段加速,气体压力下降,该处的低压可以进一步对外界的大气进行卷吸。混合室后接直管道时不存在这种现象,因此混合室后接缩放管的引射系数比接直管道的明显增大。

4 结论

花瓣喷嘴引射器的工作蒸汽流量大,引射系数较高,是一种适合于对火炬气燃烧器进行空气供应的引射器。本文通过数值模拟计算了蒸汽流量、喷嘴出口轴向位置以及混合室后管道结构对引射系数的影响,

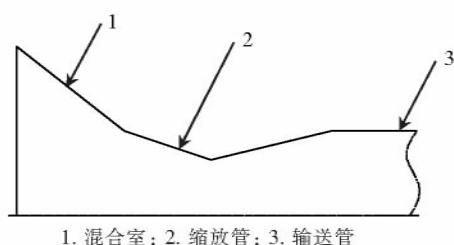


图5 后接缩放管的混合室结构示意图

Fig.5 Diagram of mixture room connected with a converging-diverging tube

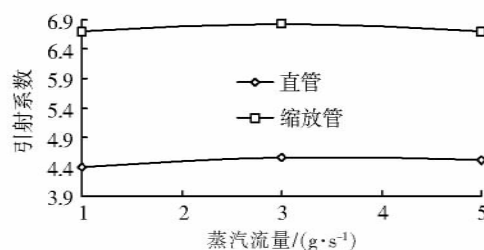


图6 引射系数与混合室后管道结构的关系

Fig.6 Relationship between entrainment ratio and tube type

主要结论为:

(1) 对引射系数而言,存在一个最佳蒸汽流量,在此流量下,引射系数最大.当蒸汽流量较大时,蒸汽表现出显著的可压缩性,并且在喷嘴出口出现蒸汽激波,这使得引射系数迅速减小.

(2) 喷嘴出口位于混合室内的引射系数比位于混合室外的大,喷嘴离开混合室越远,引射系数越小.

(3) 混合室后连接一段缩放管道,可以使混合气体在缩放管内加速减压,该缩放管也能起到引射空气的作用.此时的引射系数比混合室后连接直管道时大50%以上.

[参考文献] (References)

- [1] 季建刚,倪海,黎立新,等. 蒸汽喷射压缩器的变工况特性模拟与分析[J]. 化工学报, 2008, 59(3): 558-560.
Ji Jiangang, Ni Hai, Li Lixin, et al. Performance simulation and analysis of steam ejector under different operating condition [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2008, 59(3): 558-560. (in Chinese)
- [2] Yu Jianlin, Li Yanzhong. A theoretical study of a novel regenerative ejector refrigeration cycle [J]. International Journal of Refrigeration, 2007, 30(3): 464-470.
- [3] Zhu Yin Hai, Cai Wenjian, Wen Changyun, et al. Simplified ejector model for control and optimization [J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(6): 1424-1432.
- [4] 段永涛,文怀兴,张德翱. 基于热平衡分析法的喷射器引射系数计算与分析[J]. 机械工程学报, 2005, 41(3): 42-46.
Duan Yongtao, Wen Huaixing, Zhang Deao. Calculation and analysis on ejecting coefficient of the ejector based on analysis of heat balance [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41(3): 42-46. (in Chinese)
- [5] 祝银海,厉彦忠,鱼剑琳,等. 基于制冷剂 R141B 的喷射器混合模型及其实验验证[J]. 化工学报, 2008, 59(9): 2188-2193.
Zhu Yin Hai, Li Yanzhong, Yu Jianlin, et al. Experimental validation of a hybrid ejector model with refrigerant R141B [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2008, 59(9): 2188-2193. (in Chinese)
- [6] Szabolcs Varga, Armando C Oliveira, Bogdan Diaconu. Influence of geometrical factors on steam ejector performance—A numerical assessment [J]. International Journal of Refrigeration, 2009, 32(7): 1694-1701.
- [7] 张鲲鹏,薛飞,潘卫明,等. 高压气体引射器的试验研究和仿真[J]. 热科学与技术, 2004, 3(2): 133-138.
Zhang Kunpeng, Xue Fei, Pan Weiming, et al. Experimental investigation and numerical simulation of high-pressure gas ejector [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2004, 3(2): 133-138. (in Chinese)
- [8] 单勇,张靖周. 弯曲混合管引射系统引射-混合特性数值研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2008, 40(2): 137-141.
Shan Yong, Zhang Jingzhou. Numerical computation for pumping and mixing performance on mixer-ejector with curved mixing duct [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 40(2): 137-141. (in Chinese)
- [9] Piantong K, Seehanam W, Behnia M, et al. Investigation and improvement of ejector refrigeration system using computational fluid dynamics technique [J]. Energy Conversion and Management, 2007, 48(10): 2556-2564.
- [10] Zhu Yin Hai, Cai Wenjian, Wen Changyun, et al. Numerical investigation of geometry parameters for design of high performance ejectors [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29(5/6): 898-905.

[责任编辑: 刘 健]