

喷射式汽水混合加热器的研究进展

张俊辉¹, 张兴芳¹, 武升², 刘建¹, 马秀峰²

(1. 太原理工大学化学化工学院, 山西太原 030024; 2. 太原锅炉集团有限公司, 山西太原 030021)

摘要:综述了喷射式汽水混合加热器的理论研究进展,指出喷射式汽水混合加热器的设计已经逐步由过去的经验式设计过渡为理论指导式设计。分别介绍了传统喷射式汽水混合加热器、环周进汽喷射式混合加热器、QSH型汽水混合加热器的结构、工作原理及优缺点,并介绍了喷射式汽水混合加热器的升压特性、减震降噪的研究情况。

关键词:喷射式;汽水混合;加热器;理论;设计

中图分类号:X773

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2011)06-0032-03

Research development of ejecting steam-water mixing heater

ZHANG Jun-hui¹, ZHANG Xing-fang¹, WU Sheng², LIU Jian¹, MA Xiu-feng²

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Taiyuan Boiler Group Co., Ltd., Taiyuan 030021, China)

Abstract: Progress in theoretical study of ejecting steam-water mixing heater is reviewed. It is pointed out that the design of ejecting steam-water mixing heater has made the transition from experience to theoretical guidance. The structure, working principle and specific features of traditional ejecting steam-water mixing heater, ejecting steam-water mixing heater with peripheral steam entrance and QSH type of ejecting steam-water mixing heater are introduced respectively. The research progress of ejecting steam-water mixing heater in lifting pressure characteristics, vibration damping and reducing noise, is introduced as well.

Key words: ejecting; steam-water mixing; heater; theory; design

喷射式汽水混合加热器是近年发展起来的一种新的节能技术,是直接接触式的汽水混合加热器,蒸汽作为热源加热冷水,它的部分焓转化为机械能,使出口的热水平压力高于进口的冷水或蒸汽的压力,起到节能作用。其设计思想是将快速运动的液体流以较高的速度喷射到缓慢流动或者静止的引射流体中,在射流边界,由于射流流体和引射流体之间的速度差,形成了一个混合层,该混合层沿着射流流动方向扩展,通过夹带和混合,使射流流体不断进入引射流体中。射流流体的方向可以与引射流体方向一致(中心射流或同轴射流),也可以与引射流体成一定的角度(错流射流)^[1]。这种装置结构简单,无运动部件,体积小,启动迅速,安全可靠,高效节能,与其他的换热器相比具有较大优势,在供热、电力、化工、石油、制药等行业得到了广泛应用。

喷射式汽水混合加热器按工作方式可分为射汽式和射水式。在加热蒸汽压力大于0.2 MPa且流量稳定,热负荷变化较小的情况下,可以采用射汽式。一般情况下推荐使用射水式加热器,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^[2]。

1 理论研究进展

喷射式汽水混合加热器实质上就是一种特殊的喷射器,其设计采用的是喷射器的理论。由于缺乏足够的理论支持,早期的喷射器设计往往只能通过试验结果的分析来实现。随着科学的发展和理论的进步,国内外学者开始尝试用理论方法对喷射器的设计进行指导。Coff等^[3]利用自由平面射流理论分析工作流体和引射流体的混合过程,并对二维流动模型进行了求解。Keenan等^[4]建立了一维的能量、质量和动量守恒方程来预测喷射器的性能,从此开创了喷射器理论分析的先河。Huang等^[5]对喷射器的性能及喷射制冷系统进行了较深入的理论研究。

随着工业技术的快速发展,传统的一维模型已经不能满足对喷射器内部流动情况做出较准确研究的需求。近年来,计算机技术的飞速发展和流体动力学(computational fluid dynamic, CFD)分析软件的出现,带来了喷射器理论研究方法的重大进展,利用CFD分析软件数值模拟研究,可以对喷射器内的流动过程及影响因素有更清晰的了解,并能揭示一些一维理论无法解决、实验难以测量到的现象,从而弥

收稿日期:2011-02-19;修回日期:2011-04-12

作者简介:张俊辉(1985-),男,硕士生,从事水处理系统设备结构优化的研究;张兴芳(1965-),女,博士,副教授,主要从事节能设备结构优化的研究,通讯联系人,13613457676, zxfut@163.com。

补了理论方法与实验方法的不足。对此国内外诸多学者做了很多研究。Namiki 等^[6]用数值方法模拟了环形射流泵的性能,表明 RSM 模型比标准 $k-\varepsilon$ 模型更加准确;Zughbi 等^[7]对两股不同温度的流体在喷射混合器内的混合情况进行了研究,考察了混合器内的宏观混合情况;文吉运等^[8]分别计算了具有不同喉管长度的喷射泵内部流场,并经过分析确定了喷射泵的最优喉管尺寸,计算数据和试验数据对比非常接近;龙新平等^[9]对具有不同喉管长度的射流泵内部流场进行了数值模拟,以效率最高为原则,确定了射流泵的最优喉管长度及其范围;姚云等^[10]用 CFD 分析软件 Fluent 对喷射器内气液两相在不同进料方式下的流体力学和混合特征进行了模拟;林柯利等^[11]利用 Fluent 对不同结构的喷射器进行了模拟研究,从微观尺度考察喷射器的混合特性,得到了不同条件下喷射器完成湍流微观混合所需要的距离。

2 结构设计

与现有的加热设备相比,喷射式汽水混合加热器使用寿命长,安全性和可靠性高,体积小,热效率达 99% 以上,自调节性能好。这些独特的性能使得喷射式汽水混合加热器在电力、化工、制冷、供热、军工等领域具有广泛的用途,尤其是在安全性要求高的核工业领域中具有独特的优势。但也存在振动噪音大等许多不足之处,许多学者为了提高喷射式加热器的性能,在结构改进方面做了大量的研究。

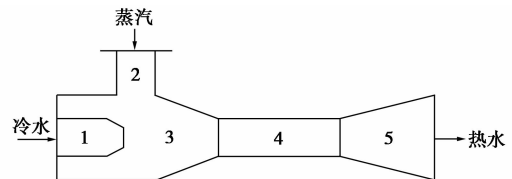
2.1 进汽方式

在工业生产中,经常需用喷射式加热器来加热冷水。各种喷射式汽水混合加热器的原理都差不多,但具体使用及效果有所不同。人们期望它生产能力大、调节幅度大,同时必须在使用时振动小、噪音低。进汽方式的不同直接影响到加热器的工作性能,为了满足使用的要求,对汽水混合加热器做了多次改进,设计出了传统喷射式汽水混合加热器、环周进汽喷射式混合加热器、QSH 型汽水混合加热器等 3 类喷射式汽水混合加热器。

2.1.1 传统喷射式汽水混合加热器

传统喷射式汽水混合加热器是按照喷射器的结构设计的,基本构造如图 1 所示,主要由水喷嘴、蒸汽喷嘴、接受室、混合室和扩散喷管 5 部分组成。它的工作原理是以射流技术为基础,当被加热水通过喷射式汽水混合加热器的喷嘴时,压力降低,流速增加,在喷嘴的出口处形成低压区,蒸汽在此区域进入

加热器内,与被加热水进行混合,蒸汽在水中凝结放热,然后汽水混合物进入混合室进一步均匀混合,最后进入扩压室使水的流速降低、压力升高,完成加热水的过程。为了能使这种设备更高效地工作,许多学者做了很多研究。如郭建等^[12]提出了等马赫数梯度设计的方法,这种方法是利用改变喷射器的壁面结构,使流体在喷射器内较均匀地通过,使喷射器的效率得到提高。



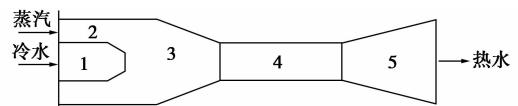
1—水喷嘴;2—蒸汽喷嘴;3—接受室;4—混合室;5—扩散喷管

图 1 传统喷射式混合加热器结构图

由于蒸汽喷嘴在接受室的侧面,射流流体与引射流体成一定的角度,形成错流射流,提高了混合效果;且具有较好的升压特性。但由于蒸汽只能从一面进入,使蒸汽与被加热水的混合不均匀,噪声大,震动严重。

2.1.2 环周进汽喷射式混合加热器

环周进汽喷射式混合加热器最早是由陆宏圻等提出的,其结构如图 2 所示。环周进汽喷射式混合加热器的工作原理和传统喷射式汽水混合加热器相同,不同之处在于蒸汽喷嘴的位置做了改变。周兰欣等^[13]应用气体动力学理论,对环周进汽喷射式混合加热器结构设计计算进行了研究,进一步分析了主要结构参数对其工作性能的影响。蔡琴等^[14]采用热力学第二定律,从可用能角度,采用焓效率来分析喷射器的运行经济性,为环周进汽喷射式混合加热器的设计和应用提供了理论基础。



1—水喷嘴;2—蒸汽喷嘴;3—接受室;4—混合室;5—扩散喷管

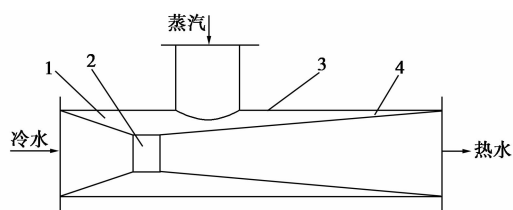
图 2 环周进汽型喷射式加热器结构图

由于蒸汽喷嘴是在冷水喷嘴外面的圆周上,这样可以使蒸汽能更均匀地与加热水混合,扩大了蒸汽与被加热水的混合面积。但是这种混合加热器噪声大,震动严重。

2.1.3 QSH 型汽水混合加热器

QSH 型汽水混合加热器的结构如图 3 所示。被加热水在喷管内流动,蒸汽在喷管外侧,当水高速

流经拉伐尔喷管喉部进入扩散段时,蒸汽从喷管外壁面上的斜向小孔均匀地高速喷入水中,与水在高速流动中相互均匀混合。



1—加热室;2—喉管;3—外壳;4—加热小孔

图3 QSH型汽水混合换热器结构图

日本是最先研究和生产QSH型汽水混合加热器的国家,其样机模型于1975年在北京举办的“日本工业展览会”上进行了展览,并在出口我国的某些成套设备中也有配置。黄志杰等^[15-16]对此类混合加热器做了改进,分别发明了锥形芯和三角形芯的汽水混合加热器。张润良^[17]通过实验研究及对实验结果的分析,指出了它的应用范围和经济性。

QSH型汽水混合加热器将蒸汽通过均匀分布的小孔呈错流式喷射进入冷水中,实现两股流体的快速、均匀混合,使其噪声低、振动小。

2.2 喉管

喉管长度是影响喷射式汽水混合加热器效率的主要几何参数之一。一般人们期望在一定的几何和动力条件下,被加热水和蒸汽正好在喉管出口处完成混合(QSH型汽水混合加热器中被加热水和蒸汽在扩散段混合)。若喉管过短,则工作流体和被吸流体在喉管出口处没有完全混合均匀;反之,则会产生较大的流动损失。因此,喉管最优长度的确定具有很重要的意义。

郑及锋等^[18]提出了混合加热器“局部混合”热力参数计算方法,优化分析了喉部直径等结构参数。梁爱国等^[19]对喷射器内部流动进行了数值模拟,分别计算了不同喉管长度时的喷射器内部流场,确定出喷射器的最优喉管尺寸。

3 升压特性及减震降噪的研究

出口压力是衡量喷射式汽水混合加热器性能的一个重要指标。升压的原理是利用冷水在缩放型喷嘴形成的高速水流引射蒸汽,蒸汽凝结在冷水中释放出潜热,将水升温;蒸汽的动能转为汽水混合物的动能,使混合物升速。蒸汽与水充分混合相变后呈高速泡沫流,高速泡沫流离开混合室刚进入扩散管升压时,在很短的时间及距离内凝结,并伴随着压力

急剧上升,流体在扩散管中继续升压,从而实现压力提升。国内外对汽液喷射器的升压特性进行了相当广泛的研究。Tadashi Narabayashi等^[20]在进汽压力7 MPa和进水压力0.4 MPa的条件下,获得8 MPa的输出压力;刘继平等^[21]用实验方法研究了环周进汽喷射式混合加热器的升压机理;李刚等^[22]利用基于直接接触凝结的汽水喷射器一维理论模型对其升压特性进行了研究。

在减震降噪方面,冯骥等^[23]结合现场噪声测试结果,分析了蒸汽喷射器噪声的特点,对蒸汽喷射器高噪声产生的原因作了理论上的分析,并采用FLUENT对蒸汽喷射器流场进行模拟。张润良、李云峰^[17,24]分别分析了工程使用中产生振动和噪声的原因及解决问题的方法。

4 结语

随着实验手段以及理论方法的不断发展,为了了解喷射式汽水混合加热器的性能,优化喷射式汽水混合加热器的结构,对其进行了研究。对喷射式汽水混合加热器的设计已经逐步由过去的经验式设计过渡为理论指导式设计。随着计算机技术的飞速发展和湍流数值模拟理论的不断改进,数值模拟为实验提供了依据。

但这些只是基础性的初步研究,如何进一步提高喷射式汽水混合加热器的性能,使冷水与蒸汽在最短的流程达到比较均匀的混合温度,有待于今后进行深入探索研究。另外,喷射式汽水混合加热器内部汽液两相流激波升压及减震降噪技术的完善仍有很大的研究空间。

参考文献

- [1] 骆培成,程易,汪展文.液-液快速混合设备研究进展[J].化工进展,2005,24(12):1319-1325.
- [2] 高阳,沙泳洪.喷射式混合加热器及其运用[J].节能与环保,2001,(5):42-43.
- [3] Coff J A,Coogan C H. Some two dimensional aspects of the ejector problem[J]. Journal of Applied Mechanicas,1942,9(4):151-154.
- [4] Keenan J H,Neumann E P,Lustwerk F. An investigation of ejector design by analysis and experiment[J]. Journal of Applied Mechanicas,1950,17(3):299-309.
- [5] Huang B J,Chang J M,Wang C P,et al. A 1-D analysis of ejector performance[J]. International Journal of Refrigeration,1999,22(5):354-364.

(下转第41页)

简单的过滤即可进行回收。以 $\text{Co}_2(\text{Cpyr})_4\text{P}_2\text{Mo}_{16}\text{V}_2\text{O}_{62}$ 为催化剂,考察重复使用次数对 $\text{Co}_2(\text{Cpyr})_4\text{P}_2\text{Mo}_{16}\text{V}_2\text{O}_{62}$ 催化活性的影响。结果见表3。由表3可知,随着重复使用次数的增加,乙苯的转化率、苯乙酮的收率几乎没有变化,催化剂的催化活性没有降低。

3 结语

杂多化合物 $\text{Co}_{(8-n)/2}(\text{Cpyr})_n\text{PMo}_{16}\text{V}_2\text{O}_{62}$ ($n = 1 \sim 8$) 具有 Dawson 结构,在 TBHP 氧化乙苯制苯乙酮的反应中表现良好催化活性和稳定性,达到高收率高选择性的目的。反应前后催化剂活性未发生明显变化,简单过滤,即可回收利用。引入过渡金属钴,提高了催化剂催化氧化乙苯的催化活性,钴与钒之间的协同作用,共同促进了苯乙酮的生成。

参考文献

- [1] Carlos K, Toshiaki U, Koichi N. Stability of iron in the Keggin anion of heteropoly acid catalysts for selective oxidation of isobutene [J]. *Catalysis Today*, 2001, 71(1/2): 111 - 119.
- [2] 黄世煜, 丁云杰, 张连中, 等. 乙烯直接氧化制乙酸的研究 Pd-Ru/HPA/SiO₂ 双金属催化剂的催化性能 [J]. *催化学报*, 2001, 26(2): 579 - 581.
- [3] Arendt E, Gaigneaux E M. Structural rearrangement and catalytic properties of the Well-Dawson (NH₄)₆P₂Mo₁₈O₆₂ heteropoly compound in the 2-butanol reaction [J]. *Applied Catalysis A*, 2009, 357(2): 115 - 124.
- [4] 胡东成, 李贵贤, 王晓宁, 等. 金属取代 Dawson 型磷钼钨杂多化合物催化氧化苯甲醇合成苯甲醛反应研究 [J]. *分子催化*, 2007, 21(4): 324 - 328.
- [5] Wang Jianmin, Yan Liang, Qian Guang, et al. Pyridine-keggin heteropoly compounds as catalyst for hydroxylation of phenol using hydrogen peroxide as oxidant [J]. *React Kinet Catal Lett*, 2007, 91(1): 111 - 118.
- [6] Kuznetsova L I, Detusheva L G, Fedotov M A. Catalytic properties of heteropoly complexes containing Fe(III) ions in benzene oxidation by hydrogen peroxide [J]. *Journal of Molecular Catalysis A*, 1996, (111): 81 - 90.
- [7] Ge Hanqing, Leng Yan, Zhang Fumin, et al. Pyridine-H₅PMo₁₀-V₂O₄₀ hybrid catalysts for liquid-phase hydroxylation of benzene to phenol with molecular oxygen [J]. *Sci China Ser B: Chemistry*, 2009, 52(8): 1264 - 1269.
- [8] 于剑锋, 杨宇, 黄彦, 等. Dawson 结构钼钒磷杂多化合物催化乙苯选择氧化的活性研究 [J]. *分子催化*, 1997, 11(3): 167 - 172.
- [9] 徐静, 赵振波, 李正, 等. 过渡金属磷钼钒杂多化合物的表征及催化性能 [J]. *石油学报(石油加工)*, 2008, 24(5): 526 - 532.
- [10] 李贵贤, 余华, 马重华, 等. Keggin 型磷钼钒杂多化合物催化氧化乙苯制苯乙酮 [J]. *现代化工*, 2010, 30(1): 41 - 43.
- [11] 王恩波, 高丽华, 刘景福. 具有 Dawson 结构的钼钒磷杂多酸的制备和性质研究 [J]. *化学学报*, 1988, 46: 757 - 763.
- [12] Okuhara T, Mizuno N, Misono M. Catalysis by heteropoly compounds: Recent developments [J]. *Applied Catalysis A: General*, 2001, 222: 63 - 77.
- [13] 余雅琴, 李小晶, 林深. 钼钒磷杂多配合物催化乙苯选择性氧化制苯乙酮 [J]. *化学研究与应用*, 2000, 12(6): 654 - 657. ■
- [14] 蔡琴, 童明伟, 白秀娟, 等. 环周进汽型喷射器的焓效率分析 [J]. *化工学报*, 2010, 61(5): 1078 - 1082.
- [15] 黄志杰, 吴奇龙. 一种汽水混合器: 中国, 200820056767. 6 [P]. 2009 - 03 - 04.
- [16] 郭树文, 姜伟. 三角形芯汽水混合器: 中国, 201020209714. 0 [P]. 2011 - 02 - 16.
- [17] 张润良. 汽水混合加热器的应用研究 [J]. *建筑热能暖通空调*, 2001, 20(4): 15 - 18.
- [18] 郑及锋, 王泽生, 张志刚, 等. 轴向水-水混合式加热器结构设计及应用研究 [J]. *天津城市建设学院学报*, 1995, 1(1): 14 - 20.
- [19] 梁爱国, 刘景植, 龙新平, 等. 射流泵内流动的数值模拟及喉管优化 [J]. *水泵技术*, 2003, (1): 3 - 6.
- [20] Tadashi Narabayashi, Michisugu Mori, Mikihide Nakamaru, et al. Study on two-phase flow dynamics in steam injectors [J]. *Nuclear Engineering and Design*, 2000, 200(1): 261 - 271.
- [21] 刘继平, 严俊杰, 陈国强, 等. 环周进汽两相流喷射升压过程实验研究 [J]. *工程热物理学报*, 2004, 25(S1): 63 - 66.
- [22] 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.
- [23] 冯骥, 白英, 童淑敏, 等. 蒸汽喷射器噪声的产生与降噪优化设计 [J]. *内蒙古农业大学学报*, 2007, 28(2): 174 - 176.
- [24] 李云峰. 浅谈汽水混合加热器的应用 [J]. *黑龙江科技信息*, 2003, (11): 87. ■

(上接第 34 页)

- [6] Namiki N, Kitamura O, Yamamoto M. Numerical prediction of performance of annular-type jet pump [J]. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, B*, 1997, 63(607): 950 - 956.
- [7] Zughbi H D, Khokhar Z H, Sharma R N. Mixing in pipelines with side and opposed tees [J]. *Ind Eng Chem Res*, 2003, 42(21): 5333 - 5344.
- [8] 文吉运, 于波, 陆宏圻, 等. 基于大涡模拟数值仿真的喷射泵喉管长度优化 [J]. *中国农村水利水电*, 2007, (4): 60 - 65.
- [9] 龙新平, 鄢恒飞, 张松艳, 等. 喉管长度对环形射流泵性能影响的数值模拟 [J]. *排灌机械工程学报*, 2010, 28(3): 198 - 206.
- [10] 姚云, 郑世清, 毕荣山. 不同进料方式下气液喷射器内流体流动和混合特性 [J]. *青岛科技大学学报: 自然科学版*, 2008, 29(5): 426 - 431.
- [11] 林柯利, 毕荣山, 谭心舜. 喷射器湍流微混性能的计算流体力学模拟 [J]. *化工进展*, 2009, 28(5): 760 - 763.
- [12] 郭建, 沈恒根, 梁珍, 等. 喷射器结构改进方法及其 CFD 分析 [J]. *低温超导*, 2009, 37(1): 63 - 66.
- [13] 周兰欣, 邱春花. 环周进汽型喷射式加热器特性分析 [J]. *华北电力大学学报*, 2007, 34(3): 36 - 40.
- [14] 蔡琴, 童明伟, 白秀娟, 等. 环周进汽型喷射器的焓效率分析 [J]. *化工学报*, 2010, 61(5): 1078 - 1082.