文章编号: 1001 - 2060(2011)04 - 0402 - 04

# 渐缩型混合室引射式低压加热器加热性能实验研究

陈艳容, 吴伟弟, 刘志华, 冉景煜
(重庆大学 低品位能源利用技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030)

摘　要: 提出了一种渐缩型混合室结构的引射式低压加热器, 用实验方法研究该加热器低进汽压力下的加热性能, 分析了加热器入口参数对引射系数、出口温度和加热效率的影响。结果表明: 在一定蒸汽压力下入水压力越高, 引射系数越小; 进水温度 20 ℃下加热器出口温升达到或超过 60 ℃; 加热效率达到 90%; 加热器对入口参数的变化有良好的适应性, 基本消除运行中高压入水进入低压蒸汽管道的危险, 该装置可望在热力发电厂低压加热系统中得到应用。

关　键　词: 引射式低压加热器; 渐缩型混合室; 加热性能; 变工况; 加热效率

中图分类号: TK17　　文献标识码: A

## 引　言

具有结构简单、无运动部件、工作可靠和密封性好等优点, 多用以替代火电厂目前常用的管壳式低压加热器。利用高压凝结水抽吸低压闪蒸汽、加热用蒸汽轮机抽汽, 充分利用低品位能。国内外很多学者对引射器进行了深入的理论和实验研究, 对引射器结构组成、工作特性和效率以及降低震动等研究在很大程度上拓展了其工程适用范围[2~7], 诸多文献中进汽压力值一般都在 0.4 MPa 以上, 而不少需要蒸汽加热的应用中, 蒸汽压力较低或者压力波动比较大, 因此对低压蒸汽、闪蒸汽引射利用是现在研究引射式加热器的主攻方向。

目前, 对替代火电厂回热系统低压加热器的研究多数局限在理论探讨和实验验证阶段[8~13], 而可行性研究多以加热效率和出口参数的满足为依据, 但是传统引射式加热器由于受结构尺寸的限制, 圆柱型混合室不能很长, 使得汽液混合不理想, 在频繁变工况运行中可能导致加热性能恶化。前人对可调式引射器进行了研究[11], 但由于增加了运动部件使得引射式加热器工作可靠性和密封性差, 同时增大了流动中的能量损失, 不适于工程应用。为提高对变工况的适应, 本研究提出一种带有渐缩型混合室的射水式引射加热器, 并对所提出的渐缩型混合室引射式加热器进行实验研究, 确定该类型引射式加热器的加热性能。

## 1　实验系统及设备

### 1.1　实验装置

渐缩型混合室引射式加热器采用高压水作为工作介质, 蒸汽为引射介质, 由水喷嘴、蒸汽通道、渐缩型混合室和扩压段四个部分组成。依据 200 MW 机组低压加热器实际运行工况, 应用一维索科洛夫分析法[14], 对引射器进行结构设计, 其中喷嘴出口直径为 3 mm, 混合室喉部直径为 7 mm, 结构示意如图 1 所示。

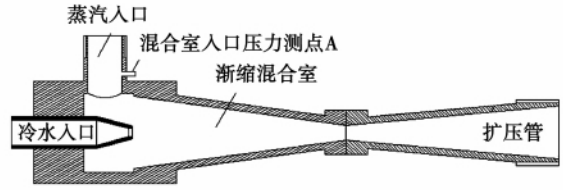


图 1　渐缩型混合室引射式加热器结构

### 1.2　实验系统

为使实验结果对火电厂回热系统低加实际运行有实际意义, 取蒸汽参数为 0.2 MPa, 以接近 200 MW 机组汽轮机 6 号、7 号低压加热器抽汽压力 (0.15 ~ 0.24 MPa), 对引射加热器入水压力在 0.25 ~ 0.62 MPa 条件下进行加热器的加热和变工况匹配性能实验。实验系统如图 2 所示, 实验使用的仪器型号规格和精度如表 1 所示。

实验系统中引射器出口背压接近大气压并略高于大气压。实验参数采集点紧靠引射器的进口和出

收稿日期: 2011 - 01 - 20;　修订日期: 2011 - 03 - 28
基金项目: 重庆市科委重点攻关基金资助项目(2009AB3084)
作者简介: 冉景煜(1968 - ), 男, 重庆人, 重庆大学教授、博士生导师.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

口,确保记录数据接近引射器运行的实际进、出口参数。过程中温度、压力和流量参数均采用人工记录和模块化采集相结合的方式。实验开始时,启动水泵,关闭主蒸汽阀,开启蒸汽旁路加热水箱中的水,使之均匀升温达到实验要求后,关闭蒸汽旁路。调节水旁路,使入口水压达到实验要求,开启蒸汽阀,待加热器出口水温达到稳定后,记录实验数据: 工作流体的压力、流量和温度,引射流体的压力、流量和温度。由于实验中蒸汽压力和流量的波动,对每组数据采用多次重复测量。

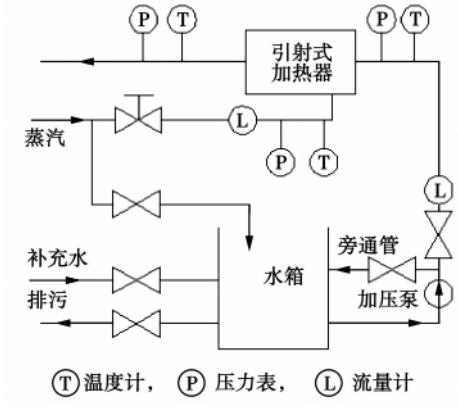


图 2　实验系统图

表 1　实验系统设备

| 测量项目 | 设备名称 | 规格 |
|---|---|---|
| 流量/$m^3 \cdot h^{-1}$ | 浮子流量计 | 0.25 ~ 2,1.5 级 |
| 流量/$m^3 \cdot h^{-1}$ | 涡街流量计 | LUGB-2302,1 级 |
| 压力/MPa | 真空压力表 | -0.1 ~ 0.5,0.2 级 |
| 压力/MPa | 压力表 | 0 ~ 1,0.4 级 |
| 温度/℃ | 热电偶 | E 型热电偶,0.5 级 |

## 2　实验结果与分析

### 2.1　引射性能实验

从图 3 中可以看出,渐缩型混合室引射式加热器具有普通引射器的特性,在关闭蒸汽管道阀门后,渐缩型混合室入口(测点 A)在实验中基本保持真空状态,入水压力 $P_w$ 大于 0.35 MPa 时,即能产生小于 200 MW 机组末级抽汽压力(0.06 MPa)的真空。射流流束速度和直径对混合室真空度有决定影响,流速越大,流束边界紊流卷吸能力越大,混合室内真空度也越大。在有限空间内流束的流速增大,造成射流流束基本段直径增大,射流流束影响范围和作用能力增强,卷吸能力相应增强。在入水压力达到 0.35 MPa(流量 600 kg/h)后测点 A 压力下降趋缓,根据管道阻力特性,管道的阻力损失与流速的平方成正比,压力增大则管道阻力损失对管内流体流速的增加的影响越显著。采用渐缩管构造,与常规的圆柱型混合室相比,增大了工作流体与引射流体的接触面积,强化换热且降低引射流体在混合室内因加热器尺寸突变产生的流动阻力,保证两相充分混合的同时对引射流体的参数剧烈变化有一定的调节适应能力。在喷嘴直径相同面积比接近的情况下,与文献[9]中圆柱型混合室引射器相比,渐缩型混合室引射器有较好的抽吸能力。

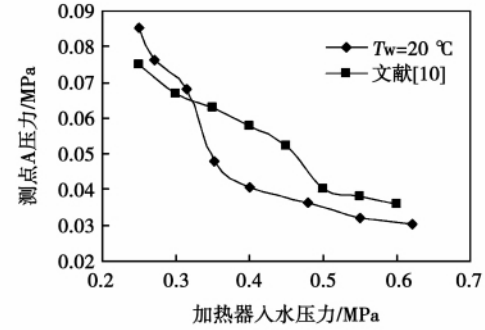


图 3　加热器入水压力与混合室静压的关系

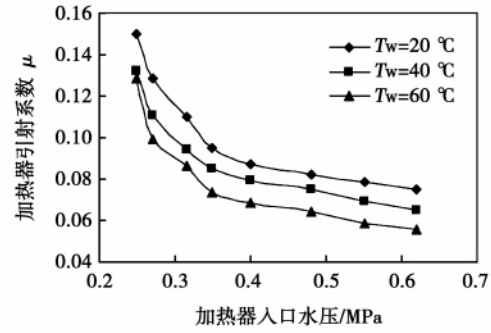


图 4　加热器入水压力和引射系数的关系

引射器的综合性能一般从引射系数、噪音震动、升压比和运行寿命等多方面衡量,本实验系统主要对照火电厂回热系统低加运行工况下引射器的加热性能,而引射系数直接影响加热器的加热能力。图 4 给出了加热器引射系数随入口水压的变化趋势,引射系数是表征单位质量工作流体抽吸的引射流体的质量的一个参数,在引射器结构尺寸和蒸汽压力一定下,提高入水压力则水流量增大而引射蒸汽量

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

变化不大，引射系数降低。入水从喷嘴进入混合室，相当于流经一个缩放喷嘴，其进、出口压力比为一定值，入口水压和喷嘴出口处压力升高而蒸汽在喷嘴出口截面处的压力不变则两相流压差降低，减小蒸汽进入混合室的驱动力，引射系数降低。入水温度 $T_w$ 的增加使得两相流体温差降低，混合室内凝结换热剧烈程度减弱，影响加热器引射和加热性能，因此 $T_w = 60$ ℃时引射系数相对较低。

2.2 加热性能实验

图 5 表明了出口水温随着入水压力变化的情况：入水压力升高，加热器出口温度是降低的。对比 $T_w = 40$ ℃时可以发现，入水压力较低时，实验值与计算值最大相差接近 25℃，这是由于入水压力较低则水流量较小，在引射的蒸汽量变化不大的情况下，加热较少量的凝结水也使用同量的蒸汽，且混合室内汽液两相混合不够充分，造成加热器出口出现未凝结蒸汽排出加热器，影响加热器的加热性能。入水压力升高则耗水量增大，而引射蒸汽的变化量不是太大，出口水温呈下降趋势，在 $T_w = 40$ ℃时实验值和计算值基本保持在由于实验中热量散失造成的 10 ℃左右的差值，汽液两相在混合室内混合充分。$T_w = 20$ ℃，入口水压在 0.25 ~ 0.55 MPa 之间时出口温升均超过 60 ℃，加热效果较好，由于 $T_w = 40$、60 ℃时引射系数降低，则温升降低。随着水流量的增大，出口水温和温升则随着入水压力的升高而降低，因此为获得理想的出口温度或温升，入水压力须控制在一定范围内。

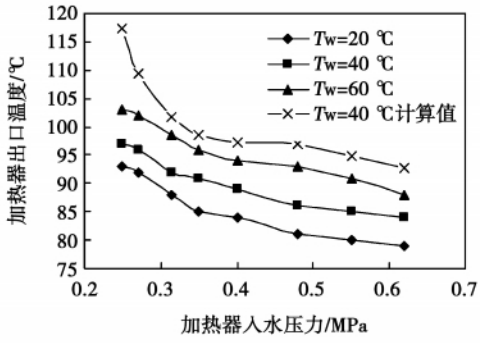


图 5 加热器入水压力与出口温度的关系

图 6 反映了蒸汽源压力对加热器出口温度的影响情况。可以看出蒸汽源压力对于加热器出口温度影响相对较小，除了由于蒸汽管道流阻特性和加热器引射极限的原因外，其主要原因是受引射性能的限制蒸汽源压力的提高只是使得进入实验系统的蒸汽品位提高，因此进入实验系统蒸汽焓值提高的部分中，大部分转化为进入引射器的蒸汽动能，加热器出口压力升高，而对加热器出口温度的贡献不大。

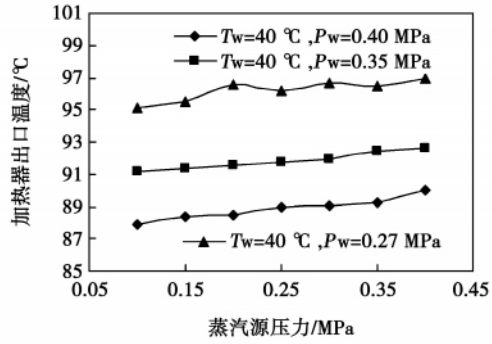


图 6 蒸汽源压力与加热器出口温度的关系

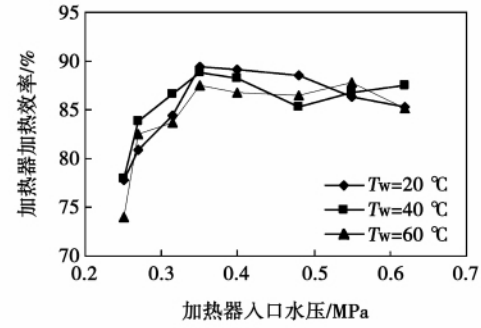


图 7 渐缩型混合室引射式加热器的加热效率

2.3 渐缩型混合室引射式加热器加热效率分析

加热效率是反映渐缩型混合室引射式加热器加热性能的重要指标，其值等于有效输出热量与输入热量之比。图 7 表现了渐缩型混合室引射式低压加热器加热效率随入水压力变化的情况。随着入水压力的升高，加热效率逐渐提高并趋于稳定，基本保持在 88% 左右。对比图 5，在入水压力较低时，加热器出口出现未凝结蒸汽，部分热量散失，加热效率低，因此渐缩型混合室引射加热器在运行中要选取合适的工作参数，综合考虑各参数对加热器性能的影响。渐缩型混合室引射加热器加热效率低于 100%，主要原因是实验过程中的热量损失，其中包括设备散热和未凝结蒸汽排出，当加热效率为 74% 时热损主要表现在未凝结蒸汽排出和散热方面，此时 $T_w = 60$ ℃，加热器与外界换热温差大。实验室用蒸汽和凝结水中掺有少量不凝结气体，不凝结气体在凝结换热过程中造成凝结换热系数降低，影响汽液两相质量、热量交换，造成加热效率降低。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

## 3 结　论

提出了一种新的渐缩型混合室引射加热器，并利用实验方法研究了入口参数变化对渐缩型混合室引射加热器加热性能的影响。实验结论如下：

（1）在定蒸汽压力下，入口水压升高，渐缩型混合室引射加热器引射系数减小，出口水温和温升降低，$T_w = 20$ ℃时出口温升超过 60 ℃，加热效果较好，蒸汽源压力对出口温度影响不显著。

（2）随着入水压力的提高引射系数逐渐下降，渐缩型混合室引射器有较好的抽吸能力，能够有效地引射闪蒸汽，低压蒸汽，充分利用低品位热能，因此具有很好的应用前景。

（3）加热器引射系数、出口温度与加热效率不能兼得，在实际运行中应该以加热效率这一综合指标考虑加热器的加热性能，该加热器最大加热效率能够达到 90%。

所设计的渐缩型混合室引射式加热器，对入口参数的变化具有较好的适应性，为引射式低压加热器的研究开辟了一条新的途径。

### 参考文献：


[1] ZHU YINHAI，CAI WENJIAN，WEN CHANGYUN，et al. Shock model for ejector performance evaution [J]. Energy Conversion and Management，2007，48(9)：2533 – 2541.

[2] OUZZANE M，AIDOUN Z. Model development and numerical procedure for detailed ejector analysis and design [J]，Applied Thermal Engineering，2003，23 (18)：2337 – 2351.

[3] TADASHI NARABAYASHI，MICHITSUGU MORI，MIKIHIDE NAKAMARU，et al. Study on two – phase flow dynamics in steam injecors[I]，Highpressure tests using scalemodels [J]. Nuclear Engineering and Design，2000，200(1/2)：261 – 271.

[4] 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(自然科学版)，2007，28(2)：174 – 176.

[5] YU JIANLIN，REN YUNFENG，CHEN HUA，et al. Applying mechanical subcooling to ejector refrigeration cycle for improving the coefficient of performance [J]. Energy Conversion and Management，2007，48(4)：1193 – 1199.

[6] YAPICI R，YETISEN C C. Experimental study on ejector refrigeration system powered by low grade heat [J]，Energy Conversion and Management，2007，48(5)：1560 – 1568.

[7] RAFET YAPICI. Experimental investigation of performance of vapor ejector refrigeration system using refrigerant R123 [J]，Energy Conversion and Management，2008，49(5)：953 – 961.

[8] 王汝武. 电厂回热系统用混合式加热器替代高压加热器的研究 [J]. 热电技术，2001(2)：12 – 14.

[9] 童明伟，王志远，何大林. 引射混合式低压加热器加热性能试验 [J]. 重庆大学学报，2009，32 (1)：82 – 85.

[10] 刘继平，严俊杰，刑秦安，等. 超音速两相流加热技术用于电厂低温加热器理论研究 [J]. 中国电机工程学报，2003，23(12)：175 – 178.

[11] 浦　晖. 可调式引射器的流动特性研究 [D]. 福州：福州大学，2005.

[12] 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.

[13] 刘继平，严俊杰，陈国慧等. 进水温度对汽液两相流激波升压特性影响的试验研究 [J]. 热能动力工程，2001，16(6)：622 – 624.

[14] 科索洛夫. 喷射器 [M]. 北京：科学出版社，1977.


新技术、新工艺

# 轴径式叶片离心式压气机级流动结构和特性的研究

《Тяжёлое машиностроение》2010 年 3 月报道，利用气动力学校核计算方法，进行了工作轮叶片三维造型的轴径式离心压气机级内流动研究，得到了有关离心式压气机级流动型式和特性数据，计算结果与试验数据一致。

研究了抽气量对级流动结构和特性的影响。结果表明，在工作轮前机匣上抽气将明显降低大流量区域特性，增大机匣附近工作轮叶片的入射角，导致级的工作范围变窄，工作轮内可能出现气流分离，使流动损失增加。

该结果证明在完成多方案设计计算过程中应用该方法的合理性。

（吉桂明　摘译）

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Heat Transfer Intensification and Process Energy Conservation, College of Environment and Energy Source Engineering, Beijing University of Technology, Beijing, China, Post Code: 100124) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2011,26(4). -397 ~ 401

By using a thermo-economic analytic method, the cost-effectiveness of a compressed air energy storage system (CAES) and a supercritical one was analyzed. With the electric energy input to the system being the low valley 110 kV electric power for large-scale industries at a price of RMB 0.3099 yuan/(kW · h) and fuel gas price of RMB 2 yuan/$m^3$ serving as an example, a calculation was performed with a simulation being conducted by using the software EES. It has been found that compared with the compressed air energy storage system, the supercritical one is more economic and effective. It can achieve the aim of regulating the load of an electric grid and enhance the economic benefit of a renewable energy source (such as wind and solar energy) power generation system. **Key words:** compressed air energy storage system, thermo-economics, power generation, system evaluation

**渐缩型混合室引射式低压加热器加热性能实验研究 = Experimental Study of the Heating Performance of a Converging Mixing Chamber Ejection Type LP (Low Pressure) Heater [刊,汉]** CHEN Yan-rong, WU Wei-di, LIU Zhi-hua, RAN Jing-yu (Education Ministry Key Laboratory on Low-grade Energy Source Utilization Technologies and Systems, Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2011,26(4). -402 ~ 405

Presented was an ejection type LP heater with a converging type mixing chamber structure and experimentally studied was the heating performance of the heater in question at a low inlet steam pressure. On this basis, the influence of the inlet parameters of the heater on its ejection coefficient, outlet temperature and heating efficiency was analyzed. It has been found that at a constant steam pressure, the higher the inlet water pressure, the smaller the ejection coefficient. When the inlet water temperature $T_w = 20℃$, the outlet temperature rise of the heater can reach or exceed 60℃ and the heating efficiency can hit 90%. The heater enjoys a good adaptability to any change of inlet parameters, basically eliminating the risk that the HP water enters into the LP steam pipelines. Therefore, the mixing type LP heaters are expected to obtain a wide application in thermal power plants. **Key words:** ejection type LP (low pressure) heater, converging type mixing chamber, heating performance, off-design condition, heating efficiency

**氨水竖管降膜蒸发实验和理论研究 = Experimental and Theoretical Study of Ammonia Water Falling Film Evaporation in a Vertical Tube [刊,汉]** BU Xian-biao, MA Wei-bin, GONG Yu-lie (Chinese Academy of Sciences Key Laboratory on Renewable Energy Sources and Natural Gas Hydrates, Guangzhou Energy Source Research

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net