

低温乏汽回收利用装置的结构参数研究

严俊杰, 杨建军, 张朋飞, 李小龙, 李波

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 通过实验研究了收缩角、喉嘴面积比和汽、水喷嘴面积比 3 个结构参数变化对低温乏汽回收利用装置性能的影响规律. 研究发现存在最佳汽、水喷嘴面积比使装置的性能最好, 但不同进口工质参数下的最佳汽、水喷嘴面积比值不同; 随着收缩角($14^{\circ} \sim 22.7^{\circ}$)的增大, 引射系数逐渐降低, 而阻力系数呈现出升高的趋势, 并且不同收缩角对应的最佳汽、水喷嘴面积比值随着收缩角的增大逐渐减小; 引射系数随着喉嘴面积比($1 \sim 5.44$)的增加而升高, 阻力系数却先降低后升高. 这些研究结果为低温乏汽回收利用装置的优化设计和工业应用奠定了基础.

关键词: 乏汽回收; 结构参数; 引射系数; 阻力系数

中图分类号: TK11 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)01-0001-04

Influence of Structure Parameters on Performance of Low-Temperature Exhaust Steam Recovery Device

YAN Junjie, YANG Jianjun, ZHANG Pengfei, LI Xiaolong, LI Bo

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: An experiment was conducted to investigate the influence of structure parameters on the performance of a low-temperature waste steam recovery device (WSRD), such as the contract angle, the area ratio of the throat to the water spout, and the area ratio of steam nozzle to water nozzle. The experimental result shows that there is an optimum area ratio of steam nozzle to water nozzle, leading to the optimal performance of WSRD, but the optimum area ratio is different when the inlet fluid parameters are not the same. Moreover, the entrainment ratio increases with the increase in the area ratio of the throat to the water spout ($1 \sim 5.44$) while the resistance coefficient decreases at first and then increases. The entrainment ratio decreases while the resistance coefficient increases with the increase in the contract angle ($14^{\circ} \sim 22.7^{\circ}$).

Keywords: waste steam recovery; structure parameter; entrainment ratio; resistance coefficient

低温乏汽回收利用装置是基于汽液两相流升压加热技术的一种直接接触式换热装置, 它通过冷水高速射流在喷嘴出口周围形成低压区, 将外部低温乏汽吸入, 汽液两相流体在混合腔内直接混合换热并最终形成较高温度的热水流出, 进而实现利用冷水回收低温乏汽之目的. 该装置与传统的换热器相比具有换热系数高、占地面积小、结构简单、无运动部件、不受不凝结气体和固体小颗粒影响以及便于综合利用等优点, 可广泛应用于电力、冶金、石油化

工等诸多行业的低温乏汽余热回收, 在回收乏汽工质和热量的同时, 还能改善工作环境.

现有文献关于射流乏汽回收的理论和实验研究比较缺乏, 但对与其具有相似结构和相同理论基础的汽液两相流升压装置的研究比较多. 国外学者 Cattadori 和 Deberne 等人分别对中心进汽、环周进水和中心进水、环周进汽两种结构形式的超音速汽液两相流升压装置进行了理论和实验研究^[1-2]. 在国内, 西安交通大学和重庆大学等对汽液两相流升压

加热装置均展开了研究^[3-8]. 文献[8]研究得到了低温乏汽回收利用装置性能随着运行参数的变化规律, 目前还基本没有对装置结构参数的系统性研究. 为此, 本文将通过实验研究各种主要结构参数对低温乏汽回收利用装置性能的影响规律, 旨在为该装置在工业领域低温乏汽的回收应用、优化设计提供依据.

1 实验系统与方法

低温乏汽回收利用装置的实验系统如图1所示, 该实验系统主要由低温乏汽回收利用装置测试段、蒸汽锅炉、水泵、水箱、冷水塔、测量装置、阀门和管路系统等组成. 实验过程中通过调节布置在装置进出口的调节阀来改变进出口工质参数, 通过开关阀门1和阀门2以装置出口热水是否经过冷水塔进行散热将实验系统分为开式或闭式循环系统, 开式循环可以使进口水温保持在某一特定温度, 闭式循环可以使进口水温连续升高到70℃. 该实验系统的测量装置包括布置在进出口位置的3个温度测点、3个压力测点以及进水管路的流量测点.

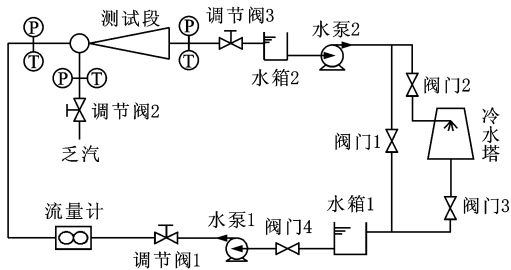


图1 实验系统图

图2为低温乏汽回收利用装置测试段的结构图. 该测试段由三通壳体、水喷嘴、蒸汽喷嘴、混合腔腔体以及进出口法兰组成, 其中水喷嘴和混合腔腔体通过三通壳体与进出口法兰的配合来实现定位, 通过增减垫片的厚度可以调节水喷嘴出口截面到混合腔喉管进口截面之间的距离, 进而改变蒸汽流通截面积. 蒸汽喷嘴指的是水喷嘴外壁与渐缩形混合腔之间的部分. 实验过程中工作水通过水喷嘴高速进入系统, 水喷嘴出口射流形成的低压区使蒸汽被引射进入混合腔, 汽、水直接接触换热并混合成为两相流动, 同时在这个过程中汽、水之间不断发生质量、动量和能量交换, 最终蒸汽完全凝结后以高温水的形式流出.

低温乏汽回收利用装置的性能主要从引射系数和阻力系数两方面进行分析.

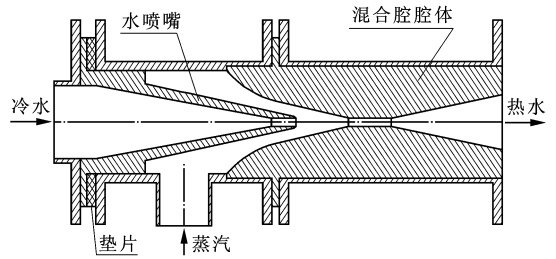


图2 测试段结构图

引射系数 ϕ 为引射蒸汽的质量流量与进水的流量之比. 根据热平衡方程可得

$$\phi = \frac{c_p(t_d - t_{0w})}{c_p(t_s - t_d) + r} \quad (1)$$

式中: c_p 为水的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; t_{0w} 为进口水温, $^\circ\text{C}$; t_d 为出口水温, $^\circ\text{C}$; t_s 为蒸汽温度, $^\circ\text{C}$; r 为水的汽化潜热, kJ/kg .

阻力系数 f 为装置出口水压力达到最大值时, 装置进出口水的压力差与水喷嘴出口动能之比, 即

$$f = \frac{P_{0w} - P_{d\max}}{\rho u^2 / 2} \quad (2)$$

式中: P_{0w} 为进水压力, MPa ; $P_{d\max}$ 为最大出水压力, MPa ; ρ 为水喷嘴出口水密度, kg/m^3 ; u 为水喷嘴出口水速度, m/s .

为了分析不同结构对装置性能的影响, 本文引入了3个结构参数: 收缩角 θ (混合腔收缩部分锥形壁面之间的夹角), 喉嘴面积比 M (混合腔喉管截面积 A_t 与水喷嘴出口截面积 A_{wn} 的比值) 和汽、水喷嘴面积比 N (蒸汽喷嘴出口截面积 A_{sn} 与水喷嘴出口截面积 A_{wn} 之比).

本文研究的测试段主要几何尺寸和结构参数如表1所示.

表1 测试段主要几何尺寸和结构参数

d/mm	M	N	$\theta/(^\circ)$
9	1.0, 1.5, 5.44	8~53	14, 16, 18, 22.7

注: d 为水喷嘴出口直径.

2 实验结果

2.1 汽、水喷嘴面积比变化对装置性能的影响

图3是汽、水喷嘴面积比变化对装置引射性能的影响规律. 从图3中可以看出, 随着 N 的增加, 引射系数升高到一定值后开始下降或基本保持不变. 汽、水喷嘴面积比对引射系数的影响可从以下两个方面进行分析: 蒸汽进入混合腔的流动面积随着 N 的增加而增大, 流动阻力随之减小, 并且水喷嘴到混

合腔喉部的距离随着 N 的增加而增大,混合腔内汽、水间的接触面积随之增大,这有利于汽、水间的换热,但是汽液两相流在混合腔内的沿程损失也随着 N 的增加而增大,减弱了射流对蒸汽的抽吸作用,在这两方面因素的作用下装置的引射系数升高到一定值后开始下降或基本保持不变。

两相混合流在混合腔内所受阻阻力因流动距离的增加而增大较多,从而使阻力系数随 N 的增加而逐渐增大;当 $N \geq 33.3$ 时,通过前面分析,蒸汽动量的增大程度和混合腔内阻力的增大程度基本相等,阻力系数基本不变。

综合引射系数和阻力系数随 N 的变化规律,发现存在最佳汽、水喷嘴面积比 N_{opt} 使装置的性能最好,但不同进口工质参数下的 N_{opt} 不同。图 3a 为进汽压力 $P_{0s}=0.1\text{ MPa}$ 时在不同进水压力下引射系数随 N 变化的规律。由该图可知:当 $P_{0w}=0.4, 0.6\text{ MPa}$ 时, $N_{opt}=26.58$;当 P_{0w} 增加到 $0.8、1.0\text{ MPa}$ 时, $N_{opt}=44.20$,即 N_{opt} 随着进水压力的增加而增大。图 3b 是当 $P_{0w}=0.6\text{ MPa}$ 时,不同进汽压力下 N 的变化对引射系数的影响。由此图可知,当进水压力恒定时, N_{opt} 随着进汽压力的增加而减小。

2.2 收缩角变化对装置性能的影响

图 5、6 给出了 $M=1.5$ 时收缩角变化对装置性能的影响规律。从图 5 中可以看出,当 N 相同时引射系数随着 θ 的增大而降低,并且 N_{opt} 随着 θ 的增加而减小。收缩角对阻力系数的影响规律如图 6 所示。从图 6 中可以看出,阻力系数随着收缩角的变化规律比较复杂,但当 N 相同时基本呈现出随 θ 的增大而升高的趋势。出现以上现象是因为汽液两相流体接触碰撞时的动量损失随着 θ 的增大而增加,同时混合腔壁面对两相混合流的反作用力增大,因此

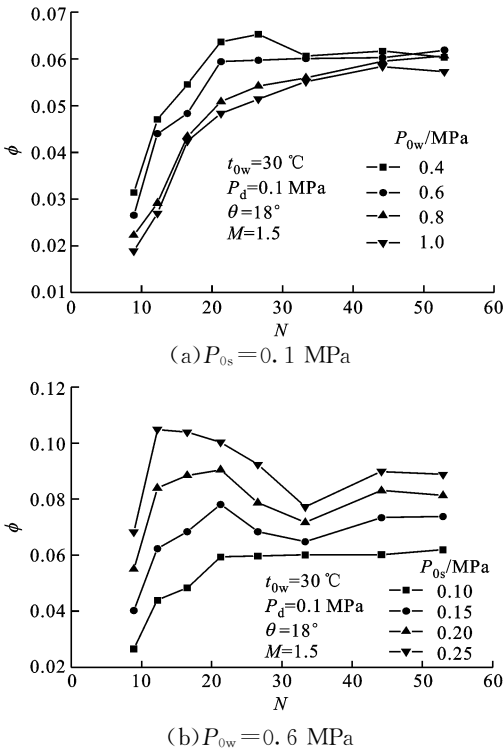


图 3 汽、水喷嘴面积比变化对引射系数的影响规律

汽、水喷嘴面积比变化对阻力系数的影响规律如图 4 所示。从图 4 中可以看出,当 $M=1.5、\theta=18^\circ$ 时,阻力系数随着汽、水喷嘴面积比的增加逐渐升高,但升高的速率越来越小。随着 N 的增加,进入混合腔的蒸汽动量大小和汽液两相混合流在混合腔内所受阻阻力大小的相对变化关系是影响阻力系数的重要因素。通过对实验数据分析可知:当 N 从 8.92 增大至 33.3 时,虽然引射蒸汽动量有所增加,但汽液

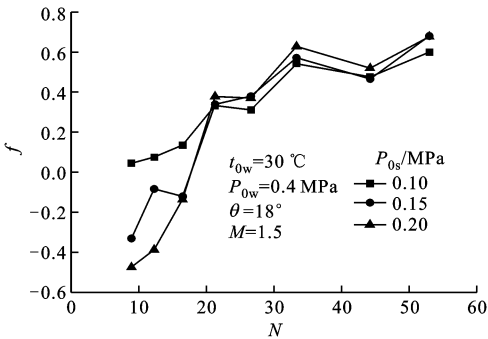


图 4 汽、水喷嘴面积比变化对阻力系数的影响规律

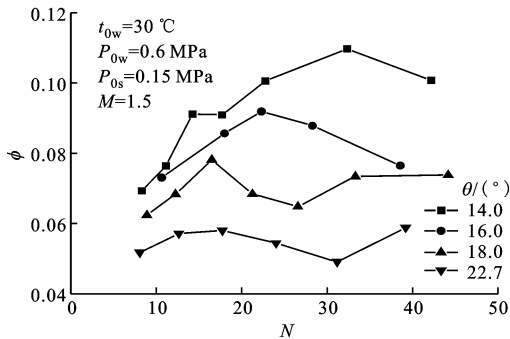


图 5 收缩角变化对引射系数的影响规律

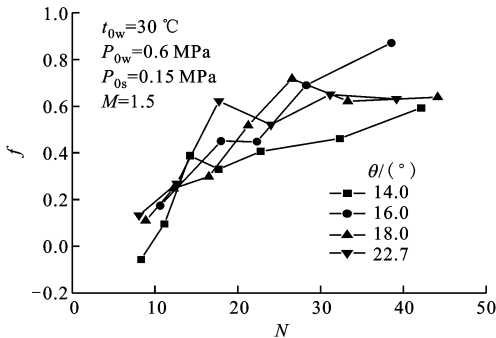


图 6 收缩角变化对阻力系数的影响规律

引射系数随着 θ 的增大而降低,阻力系数升高。

另外,通过整理实验数据可知, $\theta=14^\circ, 16^\circ, 18^\circ, 22.7^\circ$ 所对应的 N_{opt} 分别为 32.34、28.29、16.50 及 12.64,即最佳汽、水喷嘴面积比随着收缩角的增大而减小。这是因为即使当 N 相同时,收缩角的增加也会使混合腔内的空间增大,因此装置在 N 较小时就能达到最大引射系数。需要强调的是,当 θ 较小且 $P_{0s} < 0.1 \text{ MPa}$ 时装置运行不稳定,容易出现堵塞现象,因此当乏汽压力较低时应选择较大的收缩角。

2.3 喉嘴面积比变化对装置性能的影响

图 7、8 给出了喉嘴面积比变化对装置性能的影响规律。从图 7 中可以看出,引射系数随着 M 的增加而升高。这是由于当 M 较大时,较大的喉部截面积能够使更多的蒸汽通过,因此引射系数升高。需要指出的是,当 M 较小时,由于混合腔喉部阻力较大,混合腔内的汽液两相流动易发生堵塞现象,装置在此结构下不易稳定运行。

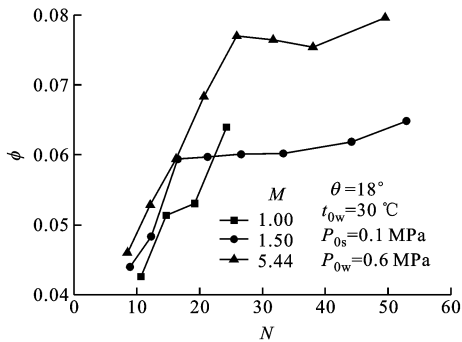


图 7 喉嘴面积比变化对引射系数的影响规律

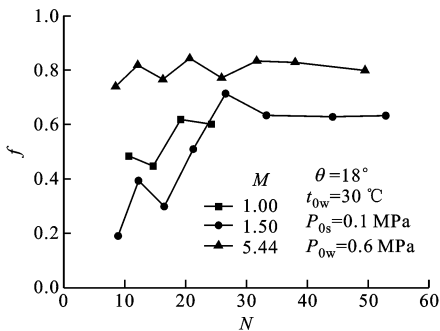


图 8 喉嘴面积比变化对阻力系数的影响规律

图 8 给出了喉嘴面积比变化对阻力系数的影响规律。从图 8 中可以看出,当 N 相同时,阻力系数随着 M 的增加先降低后升高, $M=1.5$ 时阻力系数最低,当 $M=5.44$ 时,装置的阻力系数随 N 增加而升高的趋势比较缓慢。出现以上现象的原因是:当 M

$=1$ 时,混合腔内摩擦阻力损失和喉管处的局部阻力损失都较大,从而使阻力系数随喉嘴面积比的增加而降低;当 $M=5.44$ 时,蒸汽的体积由于喉管截面积较大而发生相对膨胀,汽、水两相流体之间的动量交换作用减弱,阻力系数相对升高。

3 结 论

通过实验研究了结构参数变化对低温乏汽回收利用装置性能的影响规律。实验研究表明,喉嘴面积比,收缩角和汽、水喷嘴面积比这 3 个结构参数对装置的引射性能和阻力特性存在较大影响,具体结论如下。

(1)在不同的进口工质参数下,存在 N_{opt} 使装置的引射性能最好,且 N_{opt} 随进水压力的增加而增大,随进汽压力的增加而减小,阻力系数随 N 的增加呈现升高的趋势。

(2)引射系数随 θ 的增大而降低,并且 N_{opt} 随 θ 的增大而减小,阻力系数随 θ 的增大逐渐升高。

(3)引射系数随 M 的增加而升高,阻力系数随 M 的增加先降低后升高,当 $M=1.5$ 时阻力系数最小。

参考文献:

- [1] CATTADORI G, GALBIATI L, MAZZOCCHI L, et al. A single-stage high-pressure steam injector for next generation reactors-test results and analysis[J]. Int J Multiphase Flow, 1995, 21(4): 591-606.
- [2] DEBERNE N, LEONEA J F, DUQUEB A, et al. A model for calculation of steam injector performance [J]. Int J Multiphase Flow, 1999, 25(5): 841-855.
- [3] YAN Junjie, SHAO Shufeng, LIU Jiping, et al. Experiment and analysis on performance of steam-driven jet injector for district-heating system [J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25(8/9): 1153-1167.
- [4] 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(增刊): 63-66.
- LIU Jiping, YAN Junjie, CHEN Guoqiang, et al. Experimental research on the steam-water two-phase flow injector with peripheral steam entrance[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2004, 25(s0): 63-66.
- [5] 邵树峰, 严俊杰, 刘继平. 超音速两相流极限升压能力的理论与试验研究[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(2): 267-269.

SHAO Shufeng, YAN Junjie, LIU Jiping. Theoretical and experimental research on the maximum lifting-pressure

performance of steam injector[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005,26(2):267-269.

[6] 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,2002,100(17):332-335.
ZHAO Liangju, ZENG Danling. Research on the shock wave in the supersonic steam-water two-phase flow [J]. Thermal and Power Engineering, 2002, 100(17): 332-335.

[7] 赵良举,李德胜,李斌,等. 引射式增压装置的设计与试验研究[J]. 工程热物理学报,2008,29(8):1284-1286.
ZHAO Liangju,LI Desheng, LI Bin, et al. The design and experimental study of injector with pressure rise [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2008,29(8):1284-1286.

[8] 张鹏飞,李小龙,严俊杰,等. 低温乏汽回收利用装置性能的实验研究[J]. 工程热物理学报,2009,30(7):1152-1154.
ZHANG Pengfei, LI Xiaolong, YAN Junjie, et al. Experimental research on the performance of the low temperature exhaust steam reclamation device [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009, 30(7): 1152-1154.

(编辑 荆树蓉)