

低温乏汽回收利用装置性能的实验研究

严俊杰, 武心壮, 种道彤, 周晓丽

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对不同的喉嘴距、面积比, 实验研究了不同的进水压力、进水温度和出水压力对低温乏汽回收利用装置性能的影响规律. 发现在进水压力为 0.14~0.50 MPa、进水温度为 23~60 °C、出水压力为 0.096~0.110 MPa, 以及 4 种喉嘴距、3 种面积比的实验条件范围内, 随着喉嘴距和面积比的增加, 加热温升和流量比先增大后减小, 得到最佳归一化喉嘴距 $L=4.50$, 以及最佳面积比 $m=6.25$, 使得加热温升和流量比最大. 同时, 加热温升和流量比均随着进水压力和进水温度的增加而减小, 当出水压力升高时, 装置性能变差, 加热温升和流量比均减小.

关键词: 乏汽回收; 喉嘴距; 面积比; 加热温升; 流量比

中图分类号: TK11 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)05-0008-05

Experiment on Performance of Low-Temperature Exhaust Steam Reclamation

YAN Junjie, WU Xin Zhuang, CHONG Daotong, ZHOU Xiaoli

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: An experiment on the performance of water-driven jet steam ejectors with three area ratios and four distances between the throat and the spout was conducted at the inlet water pressure of 0.14-0.50 MPa, the temperature of 23-60 °C, and the outlet water pressure of 0.096-0.110 MPa. The results show that the temperature rise and the flux ratio increased first and then decreased with the increase of the area ratio and the distance between the throat and the spout. The values of the temperature rise and the flux ratio would be maximum when the area ratio equaled 6.25 and the dimensionless distance between the throat and the spout was 4.50. In addition, the temperature rise and the flux ratio decreased with the increase of the inlet water pressure, the inlet water temperature, and the outlet pressure, respectively.

Keywords: exhaust steam reclamation; distance between throat and spout; area ratio; temperature rise; flux ratio

工业生产中产生的余热按其热量品位可划分为高温余热、中温余热和低温余热, 其中高温余热和中温余热经过处理可以得到合理利用, 而低温余热对应的低压乏汽, 热量品位低, 用于发电时热功转换效率低, 若用热泵提升其品位则需要耗费大量的高品位能量, 但这部分乏汽直接排入大气, 又将造成大量的能源、水资源浪费以及环境污染. 工艺生产中需要加热的流体温度往往低于乏汽温度, 用低温乏汽来

加热这些流体是余热利用的一种可行方案. 但是, 低温乏汽中一般含有不凝结气体, 而所需加热的流体中一般含有可溶固体或者不可溶颗粒, 不宜采用常规的面式换热方式进行回收. 针对传统的换热方式进行低温乏汽回收利用的缺点, 本文研究的低温乏汽回收利用装置是基于超音速汽液两相流流动特性的一种新型换热方式, 利用高速冷水在喷嘴出口周围形成低压区, 将外部低压蒸汽吸入, 使两者直接接

触混合并换热最终形成较高温度的热水,从而实现利用低压蒸汽加热冷水之目的. 本文装置与传统的换热器相比具有结构简单、工作可靠、无泄漏、无运动部件和便于综合利用等优点,可广泛应用于电力、冶金、石油化工、纺织、印染等诸多行业的废汽余热回收,在提高能源利用率的同时,改善工作环境.

目前仍然缺乏有关液汽射流的理论和实验研究,但对与其具有相似结构和相同基础理论的汽液两相流升压装置的研究比较多. Cattatdori 等人^[1]对汽液两相流升压装置进行了实验研究;Deberne 等人^[2]对具有中心进水、环周进汽结构的超音速汽液两相流升压装置进行了理论和实验研究;西安交通大学从 1999 年开始,展开了对汽液两相流激波升压装置的研究^[3-7]. 鉴于低温乏汽回收利用装置在废汽利用方面的独特优势,本文借鉴汽液两相流升压装置的研究经验,针对低温乏汽加热技术的性能进行了实验研究,找出了汽水参数和结构参数对其性能的影响规律,为该技术工业领域的废汽回收应用、优化设计和合理运行提供了参考.

1 实验系统与方法

低温乏汽回收利用装置的实验系统和实验段结构如图 1 所示. 该装置包括三通状的吸入室壳体、喷嘴、混合腔腔体和进出口法兰. 喷嘴和混合腔腔体由吸入室壳体与进出口法兰的配合来定位. 实验过程中工作水从喷嘴高速射流进入吸入室,使喷嘴出口处的压力低于大气压. 在这个压差的作用下,引射蒸汽通过蒸汽管道被吸入吸入室与水混合,汽水直接接触换热,并混合成为两相流动,汽水不断发生质量、动量和能量交换,最终蒸汽完全凝结,形成单相流体流出. 水喷嘴、混合段的主要尺寸如表 1 所示.

表 1 实验段结构的主要尺寸

d_1/mm	d_2/mm	m	L
4	5	1.56	3.75, 4.50, 5.25, 6.00
4	10	6.25	3.75, 4.50, 5.25, 6.00
4	15	14.06	3.75, 4.50, 5.25, 6.00

注: d_1 为水喷嘴出口直径; d_2 为混合腔腔体的喉管直径; m 为面积比(喉管进口截面面积与喷嘴出口截面面积的比值); L 为归一化喉嘴距(水喷嘴出口到混合腔腔体喉管进口的距离与水喷嘴出口直径的比值).

实验中被引射蒸汽为 0.1 MPa 压力对应的饱和蒸汽. 实验步骤为:①保持进水温度不变(23 ℃),

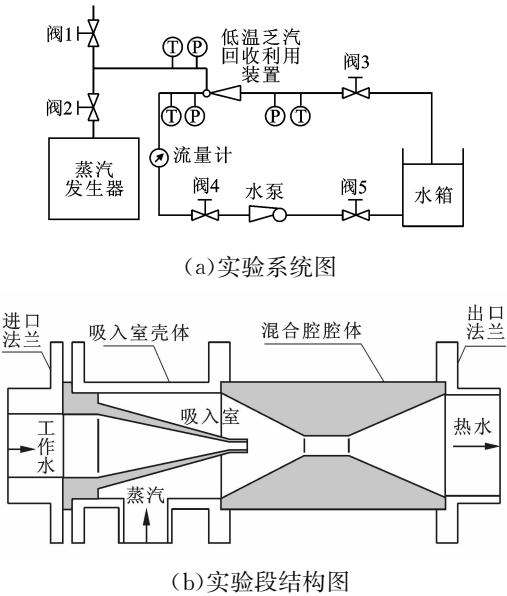


图 1 低温乏汽回收利用装置实验系统及实验段结构图

待蒸汽参数达到实验要求时,将进水阀门 4、出水阀门 3、蒸汽和水的连通阀门 2,以及蒸汽和空气的连通阀门 1 打开,观察引射蒸汽的温度,当温度保持稳定时,打开水泵及水阀门 5,通过调节阀门使进水压力达到某实验值,同时调节出水压力为设定值 0.096 MPa 或者 0.110 MPa,改变喉嘴距、面积比、进水压力,记录各工况下的压力、温度、流量;② 保持进水压力不变(0.2 MPa),让进水温度不断升高,重复以上步骤,记录不同工况下的压力、温度、流量.

对于乏汽回收利用装置,两个主要的性能参数为加热温升 Δt 和流量比 q ,加热温升为出水温度与进水温度之差

$$\Delta t = t_c - t_w \tag{1}$$

式中: t_c 为出水温度,℃; t_w 为进水温度,℃.

根据热平衡方程式

$$c_p G_w \Delta t = c_p G_s (t_s - t_c) + G_s r \tag{2}$$

可以得到流量比(引射蒸汽流量与进水流量之比)为

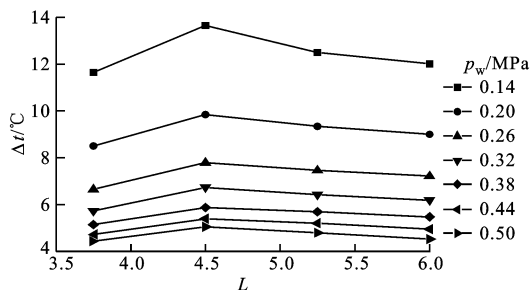
$$q = \frac{c_p \Delta t}{c_p (t_s - t_c) + r} \tag{3}$$

式中: c_p 为水的比热容,kJ/(kg·℃); G_w 和 G_s 分别是进水流量和蒸汽流量,kg/s; t_s 为蒸汽温度,℃; r 为汽化潜热,kJ/kg.

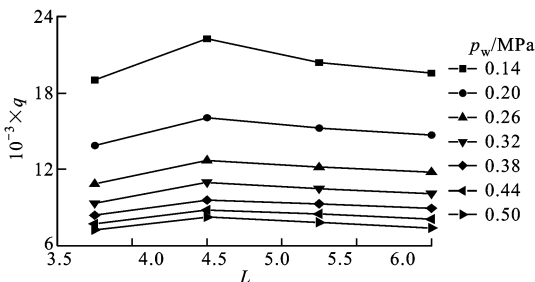
2 实验结果

通过实验,找出了结构参数喉嘴距和面积比对装置性能的影响规律. 图 2~图 4 给出了进水温度为 23 ℃时,在不同面积比和进水压力 p_w 下,加热

温升和流量比随着喉嘴距的变化规律. 由图中可见, 在 3 个面积比以及 6 个进水压力下, 温升和流量比均随着喉嘴距的增加先增大后减小, 在 $L=4.50$ 时出现峰值. 在实验过程中, 喉嘴距的变化其实是喷嘴出口截面处蒸汽流过面积的变化, 对其的影响可从水射流对蒸汽的卷吸作用及吸入室的流动阻力两方面来分析: 当喉嘴距过小时, 蒸汽进入吸入室的流动

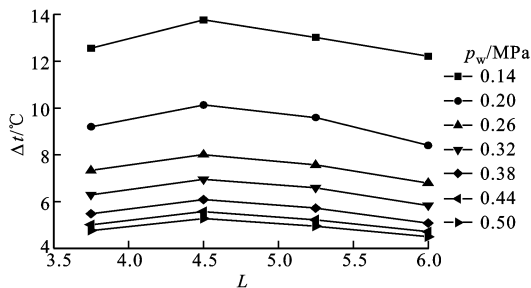


(a) 温升随 L 的变化

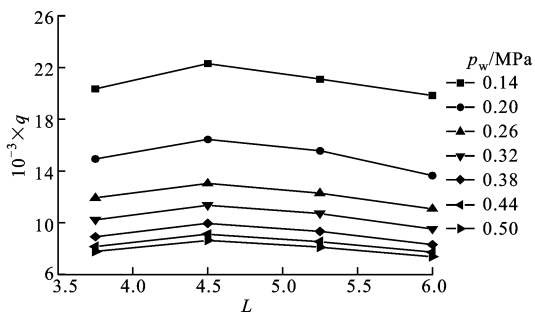


(b) 流量比随 L 的变化

图 2 $m=1.56$ 时不同 p_w 下温升和流量比随 L 的变化

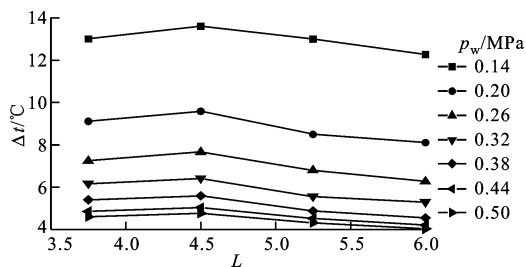


(a) 温升随 L 的变化

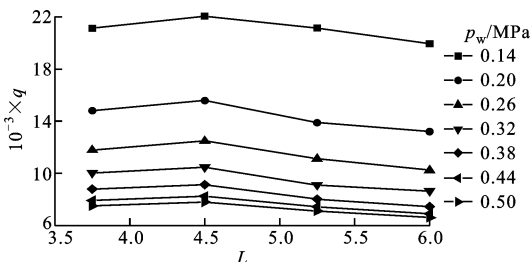


(b) 流量比随 L 的变化

图 3 $m=6.25$ 时不同 p_w 下温升和流量比随 L 的变化



(a) 温升随 L 的变化



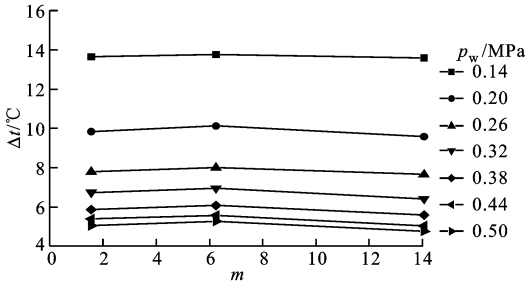
(b) 流量比随 L 的变化

图 4 $m=14.06$ 时不同 p_w 下温升和流量比随 L 的变化

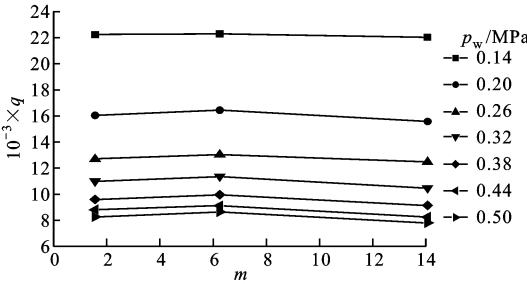
面积比较小, 通过阻力大, 引射蒸汽能力减弱, 装置性能降低; 当喉嘴距过大时, 射流到达吸入室时速度有所降低, 因此引射汽体能力效果不佳, 装置达不到比较好的性能. 因此, 必然存在一个最佳喉嘴距, 使得装置性能最好.

图 5 给出了进水温度为 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $L=4.50$ 时, 不同进水压力下加热温升和流量比随着面积比的变化规律. 从图中可以看出, 加热温升随着面积比的增加先增大后减小, 在 $m=6.25$ 时出现了最佳值. 从实验结果可知, 面积比对装置的性能有较大影响. 面积比太小时, 摩擦损失和突然压缩损失增大, 蒸汽对水流的渗透能力弱, 汽水混合不好. 面积比太大时, 管内射流外侧汽体活动空间相对比较大, 体积相对膨胀, 工作水对蒸汽吸附能力以及蒸汽向水的渗透、汽水混合能力减弱, 影响装置性能. 因此, 存在一个最佳的面积比, 使得装置性能最好.

从图 5 还可以看出, 随着进水压力的增加, 加热温升和流量比逐渐减小. 为了直观地反映进水压力对装置性能的影响, 图 6 给出了 $t_w=23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $m=6.25$ 时, 不同喉嘴距下加热温升和流量比随进水压力的变化规律. 在 4 个喉嘴距下, 随着进水压力的升高, 加热温升和流量比均减小, 而且其减小率随着进水压力的升高而减小. 根据实验记录, 随着进水压力的升高, 进水流量和引射蒸汽流量都是增大的. 分析其原因只能是进水流量的增大程度大于引射蒸汽流量增大的程度, 从而导致混合后的加热温升减小.

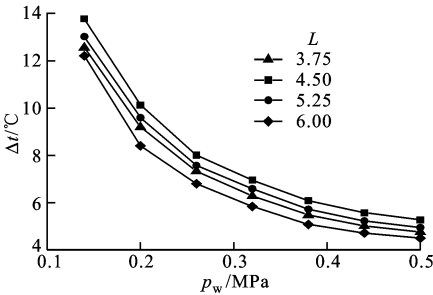


(a)温升随 m 的变化

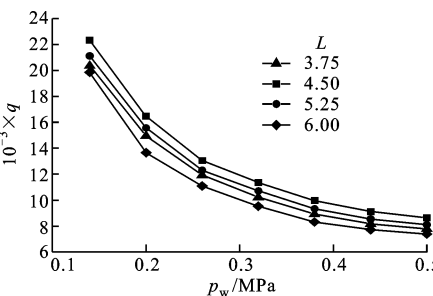


(b)流量比随 m 的变化

图 5 不同 p_w 下温升和流量比随 m 的变化



(a)温升随 p_w 的变化

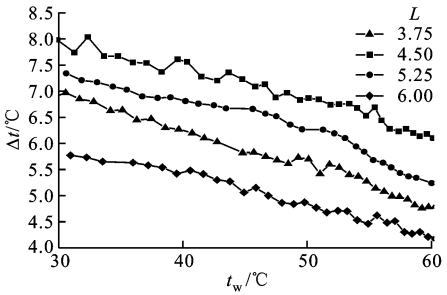


(b)流量比随 p_w 的变化

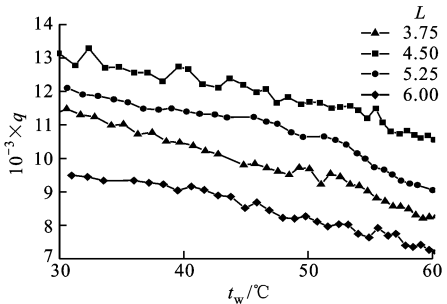
图 6 不同 L 下温升和流量比随 p_w 的变化

图 7 给出了进水压力为 0.2 MPa 时,不同喉嘴距下加热温升和流量比随进水温度的变化规律. 由图 7 可见,在 4 个喉嘴距下,加热温升随着进水温度的升高而成线性减小,减小的速率基本相同. 根据实验记录,当进水温度增大时,引射蒸汽流量减少,当进水流量一定时,为了能够引射相同的蒸汽量,则必

然会使吸入室内压力提高,以补偿因温度升高所增大的容积,所以进水温度升高使装置性能变差.



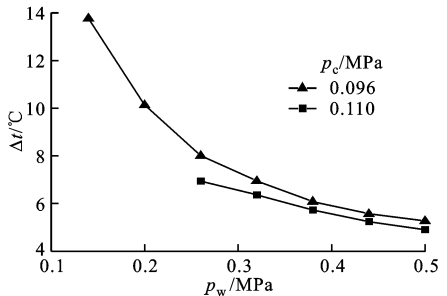
(a)温升随 t_w 的变化



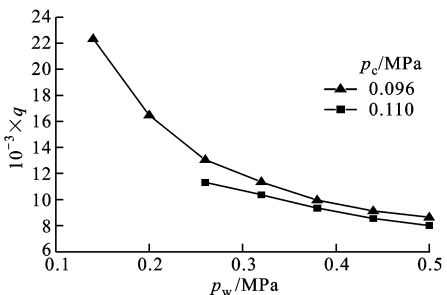
(b)流量比随 t_w 的变化

图 7 不同 L 下温升和流量比随 t_w 的变化

图 8 给出了在最佳喉嘴距 $L=4.50$ 和最佳面积比 $m=6.25$ 下,出水压力 p_c 对装置性能的影响规律. 从图中可看出,出水压力越高,装置性能越差. 这是因为随着出水压力的提高,吸入室的流动自动



(a)温升随 p_w 的变化



(b)流量比随 p_w 的变化

图 8 不同 p_c 下温升和流量比随 p_w 的变化

适应出口截面出水压力的变化,其自身压力也提高,降低了工作水引射蒸汽的压力驱动力,在其他参数不变的情况下,引射蒸汽量减少,因而加热温升和流量比随着出水压力的升高而降低。

由以上分析可得,结构参数喉嘴距和面积比,以及进水压力、进水温度和出水压力都是影响低温乏汽回收利用装置性能的重要因素。实验结果表明,存在一个最佳的喉嘴距和面积比,使得装置的性能最好。在最佳位置时,水对蒸汽的引射能力最强,蒸汽的流体阻力较小。因此,在设计低温乏汽回收利用装置时,应该保证喷嘴有轴向移动 3~5 倍直径的可能。根据本文所得结论,推荐最佳 L 为 4.50。另外,在同等条件下,进水压力、进水温度和出水压力越低,装置性能越好。本实验中,在 $L=4.50$ 、 $m=6.25$ 、进水压力为 0.14 MPa、进水温度为 23 °C、出水压力为 0.096 MPa 时,得到了最大加热温升和最大流量比,其值分别为 13.7 °C 和 0.022 3。

3 结 论

本文采用实验的方法研究了低温乏汽回收利用装置的性能,得到的主要结论如下:

(1)在一定的进水压力、进水温度和出水压力下,加热温升和流量比随着喉嘴距和面积比的增加先增大后减小,得到最佳归一化喉嘴距 $L=4.50$ 和最佳面积比 $m=6.25$,使得加热温升和流量比最大,分别为 13.7 °C 和 0.022 3;

(2)加热温升和流量比随着进水压力以及进水温度的增加而减小;

(3)随着出水压力的升高,装置的性能变差,加热温升和流量比均减小。

本文推荐最佳归一化喉嘴距为 4.50,最佳面积比为 6.25。在保证流量的前提下,降低进水压力、进水温度以及出水压力,有利于提高装置的性能。以上结论对低温乏汽回收利用装置的进一步研究,以及优化设计和合理运行具有重要指导意义。

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]. Inter-

national Journal of Multiphase Flow, 1995, 21(4): 591-606.

[2] DEBERNEA N, LEONEA J F, DUQUEB A, et al. Model for calculation of steam injector performance [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1999, 25(5): 841-855.

[3] 严俊杰,刘继平,林万超,等. 汽液两相流直接接触升压加热装置性能的研究[J]. 汽轮机技术, 2001, 43(6): 347-350.

YAN Junjie, LIU Jiping, LIN Wanchao, et al. The preference of steam-water two-phase flow direct contact pressure lifting heater[J]. Turbine Technology, 2001, 43(6): 347-350.

[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(S1): 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(S1): 63-66.

[5] 严俊杰,刘继平,邢泰安,等. 变截面超音速汽液两相流升压过程的研究[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(4): 599-602.

YAN Junjie, LIU Jiping, XING Qinan, et al. Research on lifting pressure process of supersonic steam-water two-phase flow in channel of variable section[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(4): 599-602.

[6] 严俊杰,邵树峰,刘继平,等. 超音速汽液两相流升压装置用于供暖系统的性能改进研究[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(11): 1101-1105.

YAN Junjie, SHAO Shufeng, LIU Jiping, et al. Research on performance improvement of steam injector used in heating system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(11): 1101-1105.

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

(编辑 荆树蓉)