

喷射式低温乏汽回收利用装置焓分析

严俊杰, 李波, 杨建军, 张朋飞, 李小龙, 李文军

(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: 建立了喷射式低温乏汽回收利用装置的焓分析模型. 对比研究了无旋流、水旋流、蒸汽旋流、水汽旋流 4 种结构形式下装置焓效率的变化规律, 分析了喉嘴距、混合腔收缩角、喉嘴面积比等结构参数对装置焓效率的影响, 研究了水旋流形式下装置焓效率随汽水参数变化的规律. 发现最佳的结构形式为水旋流结构, 最佳的结构参数为: 喉嘴距 $L=145\text{ mm}$ 、收缩角 $\theta=18^\circ$ 、面积比 $M=5.44$, 得出装置焓效率随进水温度和进汽压力的增加而增加, 随进水压力的增加而降低. 研究结果可为装置结构的优化和运行参数的选择提供依据.

关键词: 乏汽回收; 焓分析; 旋流; 结构参数; 汽水参数

中图分类号: TK11 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)05-0001-04

Exergy Analysis of Exhaust Steam Reclaim Device with Injector

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

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

Abstract: An exergy analysis model of an exhaust steam reclaim device with injector was established. The variation of exergy efficiency was compared under four different structures (without-swirling, water-swirling, steam-swirling and steam-water-swirling) on the basis of the experiment. The influences of the different structure parameters (spout-throat distance, contract angle and area ratio) of the injector and different steam-water parameters on the exergy efficiency of the device were analyzed. The results show that the adoption of the water-swirling structure can obtain the optimum exergy efficiency. Moreover, the exergy efficiency reaches the highest value at the spout-throat distance of 145 mm, the contract angle of 18° , and the area ratio of 5.44. In addition, the exergy efficiency of the injector increases with the increase in the inlet water temperature and the inlet steam pressure and decreases with the increase in the inlet water pressure.

Keywords: exhaust steam reclaim; exergy analysis; swirling flow; structure parameter; steam-water parameter

工业生产中存在着大量的余热资源, 其中低于 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 的低温乏汽占了不小的比例. 由于低温乏汽的品位很低, 很难直接进行工业应用且不易回收, 因此很多企业都采用直接排放的方法, 这不仅造成了资源和能源的浪费, 而且会对环境造成热污染. 本文研究的喷射式低温乏汽回收利用装置基于超音速汽液两相流升压加热原理, 依靠高压过冷水通过渐缩喷嘴加速降压在喷嘴出口制造出一个低压区, 利用

压差将乏汽吸入装置, 然后在混合腔中与过冷水直接接触凝结, 最终实现乏汽的工质回收和热量回收. 该装置与其他乏汽回收利用装置相比, 换热系数高达 $1\text{ MW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, 蒸汽侧不需布置转动部件, 启停方便, 运行可靠, 成本低廉, 可广泛应用于石化、电力、核能、纺织、食品等行业的乏汽回收利用. 国内外对喷射器的研究主要集中在喷射升压^[1-3]和喷射制冷^[4-5]两个方面. 西安交通大学对汽液两相流升压加

热装置进行了长期而有效的科学研究,得出了该装置的升压特性、加热特性、阻力特性、极限升压能力、混合腔内部压力及温度分布等实验和理论研究成果.在乏汽回收方面,通过实验得出了各种结构形式下喷射器的引射性能和阻力特性随进出口参数的变化规律^[6-8],研究了混合腔及其喉部的尺寸和汽、水喷嘴出口面积比等结构参数对装置性能的影响^[9],发现加入水旋流部件可以大大提高装置的性能.

为了深入研究喷射装置的性能随各种参数的变化,有必要从能量转化的角度衡量它的能量转化效率.喷射装置的散热面积很小,热效率趋近于100%,但能量平衡的分析方法却没有揭示装置能量转换和利用过程中的不可逆损失.焓分析方法以热力学第一定律的平衡思想和热力学第二定律的焓概念为基础,从“量”和“质”两个方面评价能量的价值.这种分析方法全面衡量了装置的热力学完善程度,指出了引起不可逆损失的主要因素,为装置的节能改造指明了方向.

1 实验装置与焓分析数学模型

喷射式低温乏汽回收利用装置的结构如图1所示.该装置包括水喷嘴、环形蒸汽喷嘴、吸入室、混合腔腔体、喉管、扩压段等几个组成部分.水喷嘴为整个装置的动力部件,它把水流的压能转换为动能,并利用高速射流的卷吸和紊动扩散作用,在喷嘴出口形成低压环境,将低温乏汽吸入混合腔.蒸汽喷嘴是水喷嘴的外部轮廓线与混合腔的入口渐缩段形成的环形喷嘴,目的是使蒸汽加速与高速水流进行快速混合,强化蒸汽对水流的渗透作用,使两相流间能量和质量交换更加剧烈.本文探索性地研究了加入水旋流部件和蒸汽旋流部件后装置性能的变化.

根据焓平衡分析理论,进入系统的总焓为

$$E_{in} = m_0 E_0 + m_s E_s \tag{1}$$

式中: m_0 为过冷水流量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$; E_0 为进入乏汽回收装置的过冷水焓, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; m_s 为引射蒸汽流量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$; E_s 为被引射蒸汽的焓, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

乏汽回收装置的出口热水焓为

$$E_{out} = m_h E_h \tag{2}$$

式中: m_h 为出口热水流量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$; E_h 为出口热水焓, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.

乏汽回收装置的焓效率为

$$\eta = \frac{E_{out}}{E_{in}} = \frac{m_h E_h}{m_0 E_0 + m_s E_s} = \frac{(1 + \phi) E_h}{E_0 + \phi E_s} \tag{3}$$

式中: $\phi = m_s / m_0$ 为引射系数.

利用以上公式通过对原始数据的计算分析,可以得出不同结构参数和不同汽水参数条件下装置的焓效率.实验中的结构尺寸和汽水参数范围见表1.

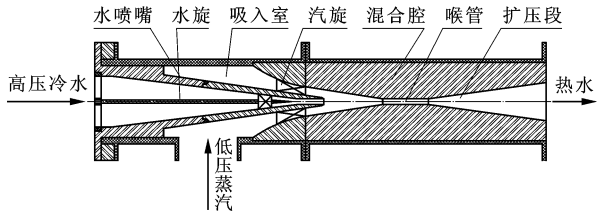


图1 喷射式乏汽回收利用装置结构图

2 实验结果和讨论

2.1 结构形式和结构参数对装置焓效率的影响

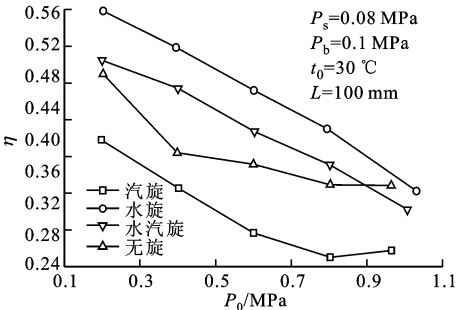
喷射器的结构形式对装置的性能及稳定运行有很大影响.本文研究了旋流技术对装置性能的影响,对加入水旋流部件和蒸汽旋流部件后的4种结构进行了对比,得到了最佳的结构形式为水旋流结构.另一方面,结构参数对装置正常、高效的运行起着至关重要的作用,本文主要从喉嘴距、收缩角、面积比3个方面分析了结构参数对装置焓效率的影响.

喷射装置焓效率在各种结构形式下随进水压力 P_0 、进汽压力 P_s 的变化规律如图2所示.从图中可以看出,水旋流效率最高、水汽旋流次之、无旋流再次之、汽旋流最差.出现这种现象的原因是,两相流在吸入室的凝结换热强度取决于高速过冷水的紊流运动强度,加入水旋流部件使水喷嘴出口水流呈发散状,且增强了射流紊动扩散,强化了两相流之间的换热,从而使装置焓效率提高.另一方面,蒸汽流通面积较大、流速较低,加入蒸汽旋流部件没能有效地增加扰动,反而增加了蒸汽流动的阻力,使蒸汽进入吸入室的速度降低,两相流的混合换热强度减弱,因此汽旋流的焓效率最低.

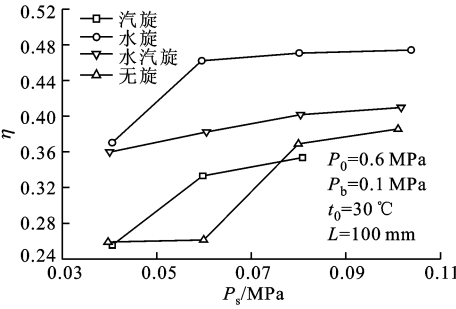
图3所示为在水旋流喷射形式、面积比 $M = 1.5$ 、混合腔收缩角 $\theta = 14^\circ$ 的条件下,通过加装垫片来调整喉嘴距得到的装置焓效率变化规律.从图中可以看出,焓效率随喉嘴距的增加逐渐增加,在喉嘴

表1 喷射式乏汽回收利用装置参数

水喷嘴出口直径/mm	喉嘴面积比	喉嘴距/mm	混合腔收缩角/(°)	蒸汽压力/MPa	进水压力/MPa	进水温度/℃
9	1.5,5.44,6.76	70~155	14,18,22.7	0.05~0.25	0.4~1.0	20~70



(a) 随进水压力的变化



(b) 随进汽压力的变化

图 2 各种结构形式下装置焓效率的变化规律

距 $L=145\text{ mm}$ 时出现峰值. 这是因为随着喉嘴距的增加,吸入室空间随之增加,蒸汽和冷水的接触面积增加,两相换热强化,装置焓效率随之增加. 另一方面,当喉嘴距增加到一定程度后,环形蒸汽喷嘴长度变短,逐渐失去渐缩的形式,蒸汽在喷嘴中得不到有效加速,在喷嘴外发生膨胀不足,产生了不可逆的能量损失,从而使装置焓效率降低.

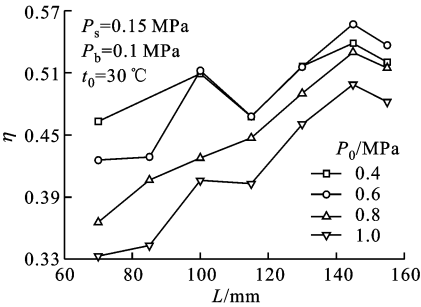


图 3 喉嘴距对装置焓效率的影响

图 4 给出了在 $L=115\text{ mm}$ 、 $M=1.5$ 的条件下,水旋流喷射装置焓效率随收缩角的变化规律. 从图中可以看出,随着收缩角的变化,装置焓效率在 $\theta=18^\circ$ 时出现最佳值. 这是因为收缩角太小时,两相流与壁面的摩擦损失增大,能量转换效率低,随着收缩角的增加装置性能随之改善. 另一方面,收缩角增加到一定程度后吸入室空间过大,蒸汽在这里膨胀减速,两相流混合条件变差,装置焓效率随之降低. 在以上两种影响的共同作用下,装置焓效率出现先增加后降低的变化趋势.

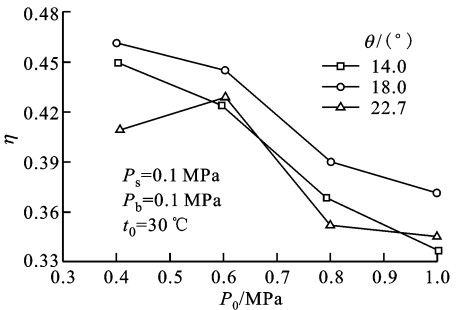


图 4 收缩角对装置焓效率的影响

$L=130\text{ mm}$ 、 $\theta=14^\circ$ 时,面积比对水旋流装置焓效率的影响如图 5 所示. 从图中可以看出,随着面积比的增加,装置焓效率呈现出先增加后降低的变化趋势,且在 $M=5.44$ 时装置焓效率最高. 这是因为随着面积比的增加,汽液混合流进入混合腔的阻力减小,动能损失减小,装置焓效率增加,但当面积比增加到一定程度时,混合腔内汽液两相流的流通面积过大,两相流在混合腔内膨胀,流速下降、压力升高,混合腔内紊动混合作用减弱,两相间的传热传质变差,装置焓效率随之下降.

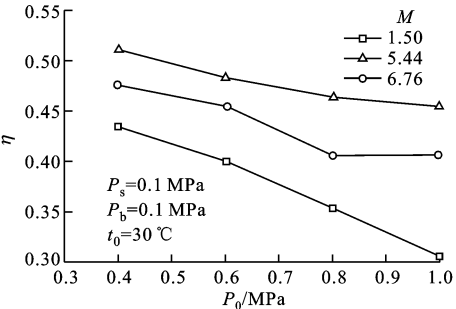


图 5 面积比对装置焓效率的影响

2.2 汽水参数对装置焓效率的影响

研究装置焓效率随汽水参数的变化规律,对装置运行参数的选择和运行工况的判断具有重要意义. 已有的研究表明,影响喷射器性能的主要汽水参数为进水温度、进水压力和进汽压力. 本文分别从这 3 个方面考察了在旋流喷射形式下, $M=5.44$ 、 $\theta=18^\circ$ 时装置焓效率的变化规律.

图 6 为不同进水温度 t_0 对装置焓效率的影响. 从图中可以看出,装置焓效率随进水温度的增加而增加,且呈现出线性增长规律. 在进水温度为 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 时,装置焓效率达到了 90%. 这是因为随着进水温度的增加,汽水两相间的换热温差逐渐减小,由此产生的不可逆换热损失减小,装置焓效率相应增加. 另一方面,由于进水温度的升高,进口水的焓值增加,同时出口水温也增加,提高了出口热水的焓值,由式 (3) 可知,装置焓效率也相应增加.

进水压力对装置焓效率的影响如图 7 所示,在其他条件不变的情况下,装置焓效率随进水压力的增加呈现出逐渐降低的趋势.文献[6-7]通过实验研究表明,随着进水压力的增加,装置引射系数逐渐降低,引射蒸汽量相对减少,混合流体的温升减小,单位过冷水获得的能量减小,装置焓效率变差.本文给出了水喷嘴出口直径为 9 mm 时喷嘴出口真空度随进水压力的变化,由表 2 可知喷嘴出口真空度总体上呈上升的趋势,蒸汽进入混合腔后的混合动力增加,两相流的质能交换随之增强,因此装置焓效率的下降幅度较为平缓.

表 2 喷嘴出口真空度

进水压力/MPa	0.4	0.6	0.8	1.0
喷嘴出口真空度/MPa	0.063 1	0.082 8	0.087 3	0.083 1

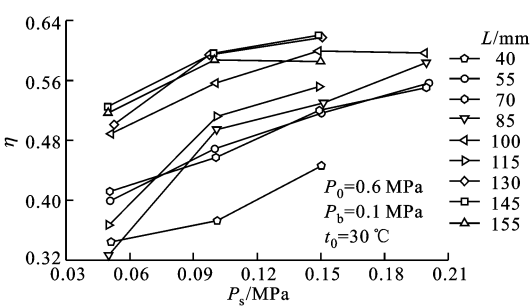


图 8 进汽压力对装置焓效率的影响

3 结 论

- (1)对无旋流、水旋流、蒸汽旋流、水汽旋流 4 种结构形式进行了对比,得出水旋流形式能量转换效率最高,水汽旋流次之,无旋流再次之,汽旋流最差.
- (2)分析了喉嘴距、收缩角、面积比等 3 个主要结构参数对装置焓效率的影响,得出随喉嘴距的增加装置焓效率逐渐增加,在 $L=145\text{ mm}$ 时达到峰值.随着收缩角的增加,装置焓效率出现先增加后降低的特点,在 $\theta=18^\circ$ 时出现最佳值.随着面积比增加装置焓效率也存在一个最佳值,实验得到这个最佳值为 5.44.
- (3)得出了水旋流喷射装置焓效率随汽水参数的变化规律.装置焓效率随进水温度增加而增加,呈现出线性增长规律,且在进水温度为 $70\text{ }^\circ\text{C}$ 时达到了 90%.随进水压力升高,装置焓效率逐渐降低,但降低的程度趋于平缓.随进汽压力升高,装置焓效率增加,但增加的幅度逐渐减小.

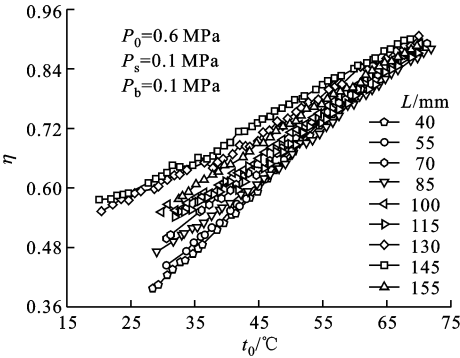


图 6 进水温度对装置焓效率的影响

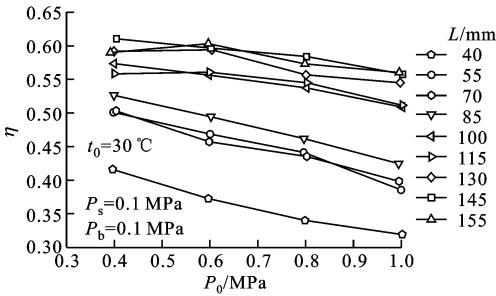


图 7 进水压力对装置焓效率的影响

进汽压力对装置焓效率的影响如图 8 所示,在其他条件不变的情况下,装置焓效率随着进汽压力的升高逐渐增加,但增加的幅度逐渐减小.出现这种现象是因为随着进汽压力的升高,引射系数逐渐增加,阻力系数逐渐减小,即单位冷水引射的蒸汽量增加,装置能量转换效率提高,且随着蒸汽压力的升高,出口热水焓值相对增加量小于蒸汽焓值相对增加量,从而使得装置焓效率增加的趋势减缓.

参考文献:

[1] 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, 25:1153-1167.

[2] DEBERNE N, LEONE J F, DUQUE A, et al. A model for calculation of steam injector performance [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1999, 25: 841-855.

[3] NARABAYASHI T, MIZUMACHI W, MORI M. Study on two-phase flow dynamics in steam injectors [J]. Nuclear Engineering and Design, 1997, 175:147-156.

[4] 祝银海, 厉彦忠, 鱼剑琳, 等. 一种新的喷射器模型及其实验验证[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(9): 1096-1101.

ZHU Yin Hai, LI Yan Zhong, YU Jian Lin, et al. Novel

ejector model with experimental validation[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(9):1096-1101.

[5] SUN Dawen. Variable geometry ejectors and their applications in ejector refrigeration systems[J]. Energy, 1996,10(21):919-929.

[6] 李小龙,张鹏飞,严俊杰,等. 旋流喷射乏汽回收装置性能的实验研究[J]. 工程热物理学报,2009,30(7):799-802.

LI Xiaolong, ZHANG Pengfei, YAN Junjie, et al. Experimental study on the performance of exhaust steam reclaim device by jetting vortically[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2009,30(7):799-802.

[7] 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.

[8] YAN Junjie, CHONG Daotong, WU Xinzhuang. Effect of swirling vanes on performance of steam-water jet injector[EB/OL]. [2009-11-07]. <http://www.sciencedirect.com/science>.

[9] 严俊杰,杨建军,张鹏飞,等. 低温乏汽回收利用装置的结构参数研究[J]. 西安交通大学学报,2010,44(1):1-4.

YAN Junjie, YANG Jianjun, ZHANG Pengfei, et al. Influence of structure parameters on performance of low temperature exhaust steam recovery device [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010,44(1):1-4.

(编辑 荆树蓉)