

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2020027

单板干燥蒸汽回收系统的应用研究

胡滨铠, 林明山

(漳州职业技术学院机械工程学院, 福建漳州 363000)



摘要: 针对胶合板生产过程中单板干燥后二次蒸汽难以回收利用的问题, 基于文丘里原理, 设计了一种单板干燥蒸汽回收系统。通过对工作流体流量、引射蒸汽流量、喷嘴直径及混合室直径之间的关系等关键技术的研究, 同时借助数字化设计技术, 设计出回收系统中的关键部件—引射器, 实现了在低背压状况下将冷凝水畅通地引回到冷凝水回收罐, 再回送到锅炉, 完成二次蒸汽的回收再利用。应用结果显示, 该回收系统具有操作简单、运行稳定的特点, 可达到节能降耗、减排增效的目的。

关键词: 单板干燥; 蒸汽回收; 喷管; 文丘里

中图分类号: TS653.2; S210.4

文献标识码: B

文章编号: 2096-9694 (2021) 01-0067-04

Development of a Steam Recycling System for Veneer Drying

HU Bin-kai, LIN Ming-shan

(Zhangzhou Institute of Technology Department of Mechanical and Automation Engineering, Zhangzhou 363000, Fujian, China)

Abstract: In order to recover the secondary steam after veneer drying, based on the Venturi principle, a veneer drying steam recycling system was developed. Through research on the working fluid flow, the ejector steam flow rate, the nozzle diameter, and the relationship between the diameter of mixing chamber, by applying the digital design technology, a key component – the ejector of the steam recycling system was designed and constructed. The system successfully completes the secondary steam recycling by condensing steam, returning the condensed water to the recycling tank, and then back to the boiler at a low back pressure condition. The pilot operation demonstrated that the recycling system is easy and stable to conduct, while it efficiently achieves the targets of energy saving and emission reduction.

Key words: veneer drying; steam recycling; nozzle; Venturi

随着工业技术的不断发展, 节能减排已成为当今主题^[1-2]。在胶合板生产过程中, 单板干燥是重要的工序之一, 经过旋切后的单板含水率很高, 须将单板干燥到符合胶合工艺的要求, 而胶合板生产过程中干燥单板时, 会产生大量二次蒸汽^[3-4]。这些二次蒸汽约占蒸汽总热量的20%~30%^[3-5], 含有大量的热量, 且无杂质, 若能将其回收作为锅炉补给水循

环利用, 可节省约30%的燃料、用水及水处理成本, 不仅能提升材料附加值^[6-7], 同时还减少锅炉烟气排放^[8]。

锅炉房供应的是高压蒸汽, 而供热方面需要的是中压蒸汽, 通过节流降压将高压蒸汽变为中压蒸汽是不经济的, 而从蒸汽设备所排出的蒸汽压力又太低, 也不适用^[9]。解决二次蒸汽不能直接使用问题的关键是增压射流技术^[10], 但目前该技术的射流效率有待提高, 成本有待降低。以往常利用喷射压缩机将新蒸汽与低压蒸汽混合加压后再加以利用。喷射器最根本的性质是提高引射流体的压力而不直接

收稿日期: 2020-02-27; 修改日期: 2020-06-05

基金项目: 福建省教育厅科技计划项目“‘人’字刀板结构的多层胶合板精密自动冲裁机”(JAT160871)。

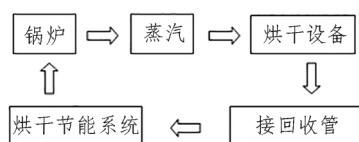
作者简介: 胡滨铠 (1983—), 男, 讲师。Email: 576161286@qq.com

消耗机械能, 由于具备这种性质, 在很多技术部门中, 喷射器比机械的增压设备(压缩机、泵、鼓风机、引风机等)应用更广泛。但是由于喷射压缩机是以气压机与泵相结合的加压喷射装置为主, 是一种开放式结构, 这种方式不仅使水质受污染, 且存在大部分的热量因排放而流失; 另外, 由于疏水阀是否正确安装, 蒸汽供热系统跑冒滴漏等问题, 导致不管是在软水回收率、漏气回收和热量回收等方面的效果并不理想, 因此, 急需采用新技术和新工艺攻克二次蒸汽的回收利用问题, 为企业节能降耗、减排增效提供技术支撑。

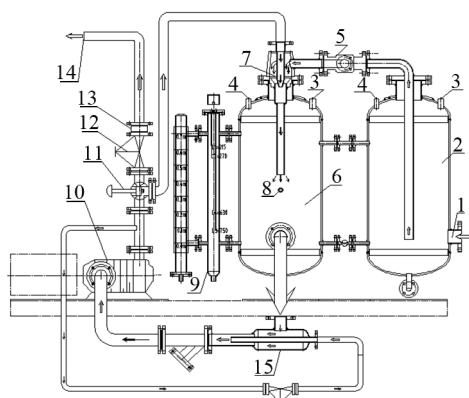
1 回收系统的构成及关键技术

1.1 回收系统的构成及工作原理

经过多年的生产实践, 提出图1a所示的回收流程。锅炉生产的蒸汽输送到单板干燥设备, 将待烘干木材放置管网上, 蒸汽连续不间断输出, 在与管道连接的疏水阀的作用下, 将已用过的冷凝蒸汽连接到回收管, 引回到图1b所示的回收系统, 进行二次蒸汽或冷凝水的回收, 然后重新回送到锅炉中继续使用。



a 蒸汽回收流程示意图



b 蒸汽节能回收系统示意图

1. 二次蒸汽进口; 2. 收集罐; 3. 安全阀; 4. 压力表; 5. 可视镜;
6. 混合罐; 7. 引射器; 8. 温度计; 9. 液位计; 10. 水泵; 11. 换向阀;
12. 截止阀; 13. 止回阀; 14. 冷凝水出口; 15. 近路增压器

图1 蒸汽节能回收系统示意图

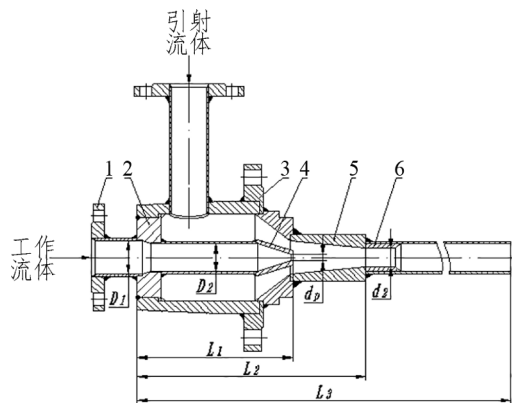
Fig.1 Schematic diagram of the steam energy saving recycling system

该单板干燥蒸汽节能回收系统主要由二次蒸汽收集罐, 回收混合罐, 引射器、水泵、电机及若干液压阀等组成。该机组通过专用水泵驱动, 打开换向阀, 将引射器的气体抽出, 利用虹吸原理产生负压, 把收集罐的二次蒸汽带入回收混合罐, 从而将汽水分离。冷凝水引射器正常工作后, 换向阀切换方向接通冷凝水出水管, 将冷凝水回送到锅炉中, 完成二次蒸汽的回收利用。

实现这一过程的关键部件在于运用文丘里原理(亦称文氏效应)设计的引射器。具体原理是压缩空气从文丘里管的入口进入, 随着截面逐渐减小, 压缩空气的压强增大, 流速也随之变大, 这时在吸附腔的进口内产生一个真空度, 致使周围空气被吸入文丘里管内, 随着压缩空气一起流进扩散腔内增加气体的流速; 在高速流动的流体附近会产生低压, 从而产生吸附作用。

1.2 引射器的设计

基于文丘里原理, 结合两相流及激波使汽相凝结、压力升高等特点, 拟定图2所示的一种汽—水直接接触式增压引射器的结构图。该结构以蒸汽为引射流体, 流体以一定压力和速度进入引射器工作。设计上要满足蒸汽在蒸汽喷嘴内达到文丘里流动进入混合室的要求, 以便能高效地引射蒸汽, 在两种流体混合后, 要求蒸汽与水充分接触并进行热交换, 同时在缩放流道的渐缩部分加速, 在喉管处快速流动, 使汽相凝结加快, 也使流体的压力迅速升高, 最后在缩放流道内汽相完全凝结, 从而达到高效换热和增压的目的。



1. 接口法兰; 2. 引射器腔体; 3. 固定法兰; 4. 引射口;
5. 混合室; 6. 导出管

图2 引射器结构示意图

Fig.2 Structure diagram of the ejector

根据图2的结构进行相应参数设计，其中引射器喷嘴出口直径 d_p 和混合室出口直径 d_2 是实现引射的关键参数。根据动量平衡定理，蒸汽总输入与总输出和过程损耗平衡，基于公式1^[3,11]，可以推导出 d_p 和 d_2 的计算公式。

$$G_p \omega_{p1} + G_H \omega_{H1} - (G_p + G_H) \omega_3 = P_3 f_3 + \int_{f_3}^{f_1} p df - (P_{p1} f_{p1} + P_{H1} f_{H1}) \quad (1)$$

式中： G_p 工作流体质量流量，kg/s； G_H 引射流体质量流量，kg/s； ω_{p1} 混合室入口截面工作流体的速度，m/s； ω_{H1} 混合室入口截面引射流体的速度，m/s； ω_3 混合室出口截面混合流体的速度，m/s； P_{p1} 混合室入口截面工作流体的静压力，MPa； $P_{H1} \approx P_H$ 混合室入口截面引射流体前的静压力，MPa； P_3 混合室出口截面混合体的静压力，MPa； f_{p1} 进入混合室时工作流体的截面积，m²； f_{H1} 进入混合室时引射流体的截面积，m²； f_3 在混合室出口混合流体的截面积，m²； $\int_{f_3}^{f_1} p df$ 作用于混合室壁上的力的冲量积分。

以0.75 MPa低压锅炉为例，查阅资料得知，在初始条件下，工作流体 P_p 为0.75 MPa饱和蒸汽，流体比容 V_p 为0.2555 m³/kg，蒸汽比焓为2 766.26 kJ/kg；引射流体 P_H 为0.15 MPa，蒸汽比焓 i_p 为2 693.4 kJ/kg；混合后流体喷射出 P_c 为0.2 MPa，喷射初力 G_0 为0.139 kg/s时，将这些参数应用到后续计算中。

1.2.1 喷嘴出口直径 d_p

基于公式1可推导出喷嘴出口截面积 f_p ^[9]。

$$f_p = \frac{G_p v_{p2}}{\phi_1 \sqrt{(h_p + h_k)}} \quad (2)$$

$$f = \frac{\pi d^2}{4} \quad (3)$$

式中： $G_p = \frac{G_0}{1 + \mu}$ 为工作蒸汽消耗量，喷射系数 μ 取

0.95，求得 $G_p = 0.071$ kg/s；

V_{p2} —工作流体喷嘴出口的比容，查饱和流体特性表，取1.3 m³/kg； ϕ_1 —速度系数取0.95； h_p —引射流体膨胀绝热焓降，取323.6 kJ/kg； h_k —引射流体压缩绝热焓降，取25.2 kJ/kg。

$$\begin{aligned} f_p &= \frac{G_p v_{p2}}{\phi_1 \sqrt{2000(h_p + h_k)}} \\ &= \frac{0.071 \times 1.3}{0.95 \sqrt{2000 \times (323.6 + 25.2)}} \approx 0.000116 \text{ m}^2 = 116 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

通过式(2)和(3)整理得出：

$$d_p = 1.13 \sqrt{f_p} = 1.13 \sqrt{116} = 12.2 \text{ mm}$$

1.2.2 混合室出口直径 d_2

基于公式1可推导出混合室入口处引射流体的截面积 f_H ^[9]：

$$f_H = 0.764 \frac{G_H v_H}{\sqrt{h_k}}$$

式中： $G_H = \mu G_p$ —引射流体消耗量，计算得0.067 kg/s； v_H —引射流体的比容，与 P_H 对应查饱和流体特性表，取1.7 m³/kg；

$$\begin{aligned} f_H &= 0.764 \frac{G_H v_H}{\sqrt{h_k}} \\ &= 0.764 \frac{0.067 \times 1.7}{\sqrt{25.2 \times 1000}} \approx 0.000548 \text{ m}^2 = 548 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

混合室出口直径：

$$d_2 = 1.13 \sqrt{f_p + f_H} = 1.13 \sqrt{116 + 548} = 29.1 \text{ mm}$$

基于上述推算得出，0.75 MPa低压锅炉匹配的喷管直径为12.2 mm，混合室出口直径为29.1 mm，其余关联尺寸引射流体入口室直径 D_1 可确定为57 mm，引射流体增压室直径 D_2 可确定为48 mm。

2 回收系统的应用效益分析

根据上述结构和参数，运用CAD数字化设计技术进行优化设计并制造出的样机，如图3所示。



图3 蒸汽回收系统样机实物图

Fig.3 A prototype of the steam energy saving recycling system

经试验测试后喷管直径基本尺寸修正为12 mm，混合室出口直径基本尺寸为28 mm。对样机进一步修改完善后在某木业公司进行单板干燥试用，设备投资及改造费用总投入约15万元。为考核节能效果，以该企业4 t锅炉供热为例进行效益对比，理论分析计算（表1）结果表明，每年回收利用产生的

经济效益约 27 万元；此外，还有因节能及减少排放产生的社会效益。

表 1 蒸汽节能回收系统改造前后效益对比
Tab.1 Comparison of steam energy saving before and after the recycling system transformation

效益指标	改造前(开放式)	改造后(密闭式)
锅炉/吨	4	4
二次蒸汽损失/%	11	0
回收节水量/(kg·a ⁻¹)	25 375 680	28 512 000
回收节水量节约费用/万元	5.1	5.7
每公斤水进入锅炉热量/(K·kg ⁻¹)	80.16~19.98	127.13~19.98
回收热量/(kg a ⁻¹)	1 627 291 607	3 262 257 504
实际利用燃煤热量 (完全燃烧率 90%)/(K·kg ⁻¹)	4 500	4 500
节约燃煤量/t	361.62	724.95
节约燃煤量费用/万元	25.31	50.75
节约软水处理费用/万元	3.8	4.3
一年节约费用/万元	34.21	60.75
产生效益/万元		26.54

1. 每年运行时间按 24 h/天,27 天/月,11 个月/年,一共运行 7 128 h;水价格时价 2 元/t;2. 每吨燃煤时价 700 元/t;3. 每公斤水进入锅炉热量均取最大值;4. 改造前回收热量效率 80%,改造后回收热量效率可达 90%左右;5. 每公斤煤供热量 5 000 大卡;6. 软水处理费用 1.5 元/t。

实际应用结果表明，该节能系统具有操作简单、运行稳定。目前已实现年产 300 台，已应用到胶合板生产过程中单板干燥以及干燥窑等蒸汽烘干的加热设备，具有广阔的应用前景。

另外，值得注意的是，该系统的储罐使用中水循环压力是 0.4~0.7 MPa，单个罐容积为 0.2 m³，属于低压容器^[2]，在制造中按压力容器的设计和制造标准要求，制造及使用按国家有关规定向相关部门报备。设计可靠的蒸汽冷凝水回收系统并与相关设备匹配，形成锅炉—用汽设备—疏水阀及回收管网—回收装置组成的密闭系统是合理利用冷凝水热能的关键，在改造前应详细了解现有设备参数及生产工艺情况，如锅炉规格、用汽设备、冷凝水质量、供热管网的额定参数、运行情况及生产工艺流程等。设备改造费用因企业的实际情况会有所不同，该系统部分部件属于压力容器，这些要素短期内会略有增加企业生产成本和管理成本，但从长远看，其经济效益和社会效益显而易见。

3 结语

基于文丘里原理，结合两相流及激波使汽相凝结、压力升高等特点提出的汽—水直接接触式增压

引射器的结构合理可行，根据 4 t 锅炉供热的工作流体、引射流体的初始条件设计出的引射器的喷管直径基本尺寸为 12 mm，混合室出口直径基本尺寸为 28 mm，设计出的单板干燥蒸汽回收系统能满足企业对单板干燥后产生的大量二次蒸汽进行回收的要求，达到提高利用率，节能降耗的目的。

参考文献：

[1] 李文婷. 循环经济时代下木材工业的节能减排发展体系构建[J]. 林产工业, 2019, 56(12):84-86.
LI W T. Construction of energy saving and emission reduction development system for wood industry in the era of circular economy[J]. China Forest Products Industry, 2019, 56(12):84-86.

[2] 王善武. 我国工业锅炉节能潜力分析与建议[J]. 工业锅炉, 2005(1): 1-16.
WANG S W. Potential analysis of china ib industry's energy-saving and some suggestions[J]. Industrial Boiler, 2005(1):1-16.

[3] 王宁侠. 闭式冷凝水回收技术在企业中的应用[J]. 纺织导报, 2007(3): 76-77.
WANG N X. Closed condensed water recycling technology and its application in enterprise[J]. China Textile Leader, 2007(3):76-77.

[4] 叶凯, 叶腾, 黄文峰, 等. 密闭式蒸汽冷凝水回收技术在燃煤供热系统中的应用[J]. 煤矿机械, 2014, 35(9):208-210.
YE K, YE T, HUANG W F, et al. Application of closed steam condensate recovery technology in coal-fired heating system[J]. Coal Mine Machinery, 2014, 35(9):208-210.

[5] 朱俭峰. 闭式蒸汽冷凝水回收系统在某工业厂房中的应用[J]. 建筑热能通风空调, 2015,34(4):71-73.
ZHU J F. Closed steam condense water recovery system used in an industrial plant[J]. Building Energy &Environment, 2015,34(4):71-73.

[6] 余仁杰, 王文海, 黎宇章, 等. 降低乙烯装置能耗措施分析[J]. 石油石化绿色低碳, 2019,4(2):42-48.
YU R J, WANG W H, LI Y Z, et al. Measures for reducing energy consumption of ethylene plant [J]. Green Petroleum & Petrochemicals, 2019,4(2):42-48.

[7] 李艳秋. 降低乙烯装置能耗的技术措施[J]. 现代化工, 2015,35(5): 137-141.
LI Y Q. Technical measures to reduce energy consumption of ethylene plant [J]. Modern Chemical Industry, 2015,35(5):137-141.

[8] 郭琼, 云虹, 符路特, 等. 以废弃木质材料为基材的家具设计要素分析[J]. 木材工业, 2013, 27(4):38-52.
GUO Q, YUN H, FU L T, et al. Key elements in designing furniture manufactured with recycled wood[J]. China Wood Industry, 2013, 27(4):38-52.

[9] 程代京, 刘银河. 蒸汽凝结水的回收及利用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.

[10] 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, 17(4):332-336.
ZHAO L J, ZENG D Q. A study of two-phase flow supersonic flows, shock waves and their applications[J]. Engineering for Thermal Energy and Power, 2002, 17(4):332-336.

[11] 汉光机械厂水暖组. 蒸汽喷射器计算[M]. 北京: 国防工业出版社, 1974.

[12] 张鸿晨. 压力容器分类的图形表示[J]. 化工装备技术, 1998(6):46.
ZHANG H C. Graphical representation of pressure vessel classification [J]. Chemical Equipment Technology, 1998(6):46.

(本文编校 孟凡丹、向 琴)