

· 升温型吸收式热泵 ·

升温型吸收式热泵在 纸机干燥部的应用探讨



作者简介：汤伟先生，教授，博士生导师；研究方向：制浆造纸全过程自动化、工业过程高级控制、大时滞过程控制及应用。

汤伟 易兆祥*

(陕西科技大学电气与控制工程学院, 陕西西安, 710021)

摘要：为解决纸机干燥部冷凝水系统末段存在冷凝水排出温度较高、吨纸蒸汽消耗大等问题，本课题提出应用升温型吸收式热泵（adsorption heat transformer, AHT）作为冷凝水系统余热回收设备。该设备可利用中间品位的余热与低温热源的热势差作为驱动，制取品位高于中间余热的热量，从而提高余热的利用率。本文在分析纸机干燥部蒸汽冷凝水系统热力系统现状及升温型吸收式热泵工作原理的基础上，给出了一种基于升温型吸收式热泵的多段供汽热力系统流程。通过LabVIEW仿真计算结果表明，应用升温型吸收式热泵的纸机干燥部蒸汽冷凝水系统具有更好的节能效果。

关键词：纸机干燥部；升温型吸收式热泵；余热回收；仿真计算

中图分类号：TS737 文献标识码：A DOI: 10.11980/j.issn.0254-508X.2019.10.008

Application of Absorption Heat Transformer in Paper Machine Drying Section

TANG Wei YI Zhaoxiang*

(School of Electrical and Control Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an, Shaanxi Province, 710021)

(* E-mail: 2806681107@qq.com)

Abstract: In order to solve the problems of high condensate discharge temperature and high specific steam consumption in the final stage of the condensate system of the paper machine drying section, this paper proposed to use the adsorption heat transformer (AHT) as the waste heat recovery equipment of the condensate system. The device could use the heat potential difference between the intermediate grade residual heat and the low-temperature heat source as drives to produce the heat with the higher grade than the intermediate grade waste heat, thereby improving the utilization rate of the waste heat. Based on the analysis of the current situation of the thermal system of the steam condensate system in the dryer section of the paper machine and the working principle of the absorption heat transformer, a multi-stage steam supply system based on the temperature-increasing absorption heat transformer was presented. The results of LabVIEW simulation showed that the steam condensate system of the paper machine drying section using the absorption heat transformer had higher energy saving efficiency.

Key words: paper machine drying section; adsorption heat transformer; waste heat recovery; simulation calculation

造纸工业中，超过 65% 的能量在干燥部被消耗^[1]，因此干燥部余热回收、节能降耗是降低造纸生产成本的重要手段。当前，在纸机的低温、中温段烘缸供汽中，多用蒸汽热泵（蒸汽喷射式热泵，以下简称传统热泵）来提高二次蒸汽品位，提高能源利用率。由于传统热泵利用高压蒸汽（一般 1 MPa 以上）为动力源来引射二次蒸汽^[2-3]，从而达到能量二次利用的目的。因此传统热泵要求蒸汽源的压力品位较高，对于热电联产的功能园区，这一点难以满足（一般进造纸车间的蒸汽压力都在 1 MPa 以下），致使二次蒸汽的余热、余能不能充分利用。

吸收式热泵是一种以热能为动力，利用溶液的吸

收特性来实现将能量从低温热源向高温热源泵送的热泵机组^[4]。工业生产中，该设备作为回收利用低品位热能的有效装置，可用于余热热能总量较大、热能需求品位较高的场合^[5]，具有节约能源、保护环境的双重作用。本文分析纸机干燥部目前能耗形式和升温型吸收式热泵工作原理，设计了一种用升温型吸收式热泵回收纸机干燥部较高温冷凝水热量的节能系统。

收稿日期：2019-06-04(修改稿)

基金项目：陕西省重点科技创新团队计划项目(2014KCT-15);陕西省科技统筹创新工程计划项目(2016KTCQ01-35)。

*通信作者：易兆祥，在读硕士研究生；研究方向：吸收式热泵的应用。

1 传统纸机干燥部蒸汽冷凝水系统

当前的中高速纸机一般采用热泵供汽和多段供汽相结合的混合供汽系统^[6]。该系统在低温段采用1台传统热泵，在中温和高温段采用多段供汽方式。原因是传统热泵对二次蒸汽品位的提升是一个不可逆过程，该过程造成不必要的焓损失^[7]，故在中温段和高温段仍采用传统的多段式供汽，热力流程示意图如图1所示。

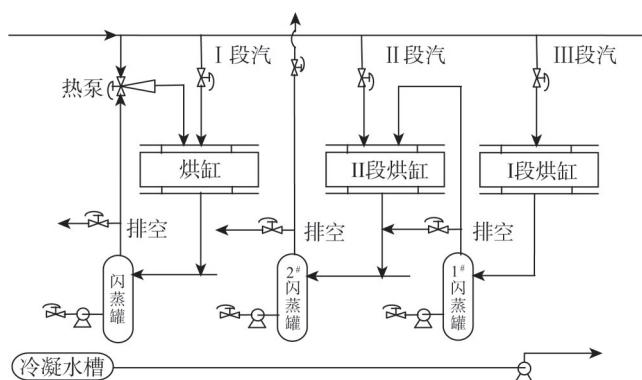


图1 多段供汽与热泵混合供汽系统示意图

采用传统热泵的纸机干燥部改变以往被动式蒸汽串联供热的方式，能较大程度上克服多段供汽系统带来的能耗大、烘缸内积水等问题^[5]。原因是在供汽系统中增加了传统热泵之后，不仅能提高二次蒸汽的品位，以满足下一段烘缸使用的工艺要求，而且降低了闪蒸罐内的蒸汽压力，为烘缸排水提供足够的压差。

通过传统热泵与闪蒸罐的共同作用实现现有的干燥部冷凝水余热回收，通过闪蒸罐对高温冷凝水梯级降压闪蒸，通过传统热泵对二次蒸汽提高品位再利用。在闪蒸罐的工作效率满足工作条件的情况下，最后一个闪蒸罐（低温段闪蒸罐）的闪蒸压力也决定了流出烘缸冷凝水系统的饱和冷凝水温度。如果低温段闪蒸罐有较低的闪蒸压力，那么就有较高的能源利用率。但是，低温段闪蒸罐的闪蒸压力并不能任意下降，原因有两点：一是为了符合适合纸张的干燥曲线，低温段烘缸内蒸汽压力是一定的。通常设计其对应的饱和蒸汽温度比烘缸温度高约10℃，烘缸温度比纸幅温度高约20℃，而且纸机车速提高，低温段烘缸内蒸汽压力也相应提高；二是低温段闪蒸罐的闪蒸压力提供给低温段烘缸排水压差，为提高蒸汽利用率，低温段进出口压差一般设计较小（10~40 kPa）。因为低温段烘缸内蒸汽压力一定、低温段烘缸进出口压差设计较小，所以低温段闪蒸罐的闪蒸压力无法任意下

降，排出冷凝水的温度也无法任意下降。在实际生产中，中高速纸机流出低温段闪蒸罐的冷凝水温度甚至达100℃以上。

随着纸机车速的不断提高，冷凝水流量较大，因此其携带的能量较多^[8]。为提高能源利用率，多数造纸厂将较高温的冷凝水送去制浆段和熬胶加以利用。但是，由于造纸工段与制浆工段距离较远、冷凝水温度较高，热冷凝水运输过程中热能损失较大。假若加入保温手段，同样由于距离过长，保温管道成本太高。此外前述里现有应用传统热泵的烘缸蒸汽冷凝水系统中，整个系统多余的能源通过较大流量的冷凝水流出、多余的二次蒸汽送去加热新风、甚至排空多余二次蒸汽以达到系统稳定。

为降低烘缸冷凝水系统中冷凝水排出温度、提高能源利用率，通过应用新的设备与技术，对蒸汽冷凝水系统末端热力流程进行改造，实现蒸汽冷凝水更深度余热回收，是解决上述当前纸机干燥部能源利用存在问题的思路之一。

2 吸收式热泵

吸收式热泵是热泵的重要分支之一，它是一种利用两种不同沸点的溶液（通常称为工质对）的气液平衡特性来实现将热量从低温热源泵送到高温热源的装置或组合机组^[9]。吸收式热泵根据其功能可划分为两类，第一类吸收式热泵也称为增热型吸收式热泵（absorption heat pump, AHP），该类热泵可通过高品位的驱动热，把低温热源品位提升到驱动热以下的中间品位；第二类吸收式热泵也称为升温型吸收式热泵（absorption heat transformer, AHT），该类热泵可通过工业产生的余热与低温热源的热势差，把中间品位的热源提升到自身品位以上的高品位状态^[10]。

升温型吸收式热泵工作原理如图2(a)所示。发生器中，因为溴化锂的沸点远高于水，溴化锂-水溶液（常用工质对）在中温热源的加热作用下，溶液中沸点较低的水被部分汽化出来，稀溶液成为浓溶液。汽化出的制冷剂水蒸气分别进入冷凝器与蒸发器中进行冷凝与蒸发，最后两次相变为蒸汽进入吸收器。在吸收器中，加压泵送来的浓溶液吸收水蒸气变成稀溶液，吸收过程温度升高，与外界热交换放出热量。产生的稀溶液经换热后回到发生器再次进行循环^[11]。

由于蒸发器和冷凝器的压力低于发生器和吸收器的压力，且蒸发器与吸收器的压力差较大，导致在低压蒸发器中蒸发温度较低，在吸收器吸收作用过程中温度较高。中间余热的部分能量通过工质对的物态、

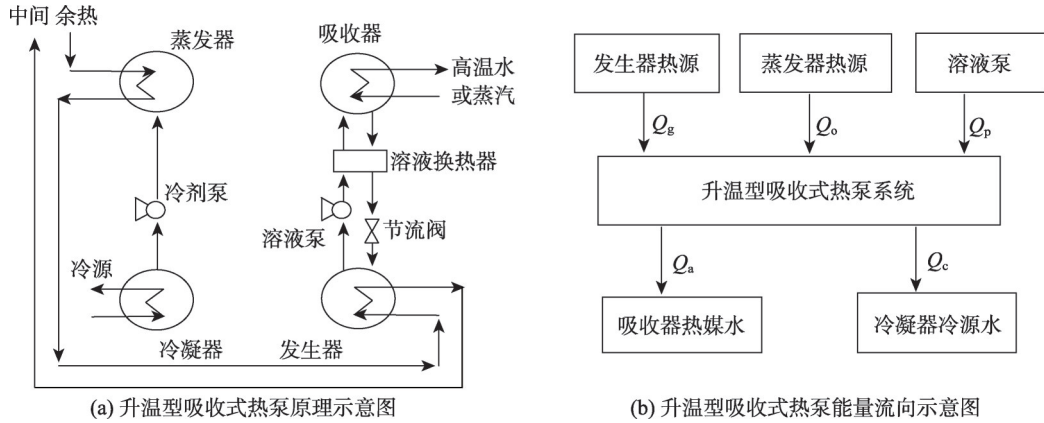


图2 升温型吸收式热泵示意图

浓度变化传递至高温水中，从而达到余热回收的目的^[12]。

吸收式热泵的性能系数（coefficient of performance, COP）定义为吸收式热泵系统有用输出热量与系统输入能量的比值，该参数能一定程度上定量表示节能程度^[13]。如图2(b)所示，系统的输入能量包括吸收式热泵发生器热源热能输入 Q_g 、吸收式热泵蒸发器热源热能输入 Q_o 与溶液泵电能输入 Q_p ；系统的输出能量包括吸收式热泵吸收器热媒水吸收热能 Q_a 和冷凝器冷源水带走热量 Q_c 。输出能量有用部分是吸收式热泵中热媒水吸收带走的热能 Q_a ，这部分能量用作提升能源品位。根据能量守恒定律，稳定系统输入能量大小等于系统输出能量大小，见公式(1)。

$$Q_g + Q_o + Q_p = Q_a + Q_c \quad (1)$$

根据公式(1)，可得COP的表达式见公式(2)。

$$COP = \frac{Q_a}{Q_g + Q_o + Q_p} \times 100\% = \frac{Q_a}{Q_a + Q_c} \times 100\% \quad (2)$$

由公式(2)得出升温型吸收式热泵的性能系数 < 1 ，表示中间品位的余热只有部分能够转移到更高的品位，在实际工业现场应用中，根据升温型吸收式热泵系统结构、热源品质和升温需求的不同，COP的值一般在31%~64%之间^[14-16]。

3 基于升温型吸收式热泵的蒸汽冷凝水热力流程设计

3.1 热力流程设计

为提高纸机干燥部新鲜蒸汽利用效率，引进升温型吸收式热泵替代传统热泵是一个有效的方法。传统热泵的热量回收，从本质上来说是一种质量的回收，回收的代价是需要加入更多的高品位能源（新鲜蒸汽），于是也容易导致整个烘缸冷凝水系统能量的过

剩，需要其他系统的辅助利用。而升温型吸收式热泵的热量回收只是能量的转移，把中间品位的部分热量转移到更高品位上去。这个过程不需要高品位的驱动，也就不会增大高品位能源（新鲜蒸汽）的输入，只需要牺牲掉部分中间品位的热量，而且升温型吸收式热泵能够把冷凝水温度降低至60℃以下。

应用升温型吸收式热泵的供汽系统热力流程图如图3所示。中、低温段的冷凝水混合之后作为中品位余热，高温段闪蒸罐抽出适量冷凝水作为吸收器热媒水，中品位余热与散热槽冷源水的热势差作为驱动能。利用该升温型吸收式热泵把中品位余热部分热量转移到吸收器热媒水中，制得0.15~0.3 MPa的高压

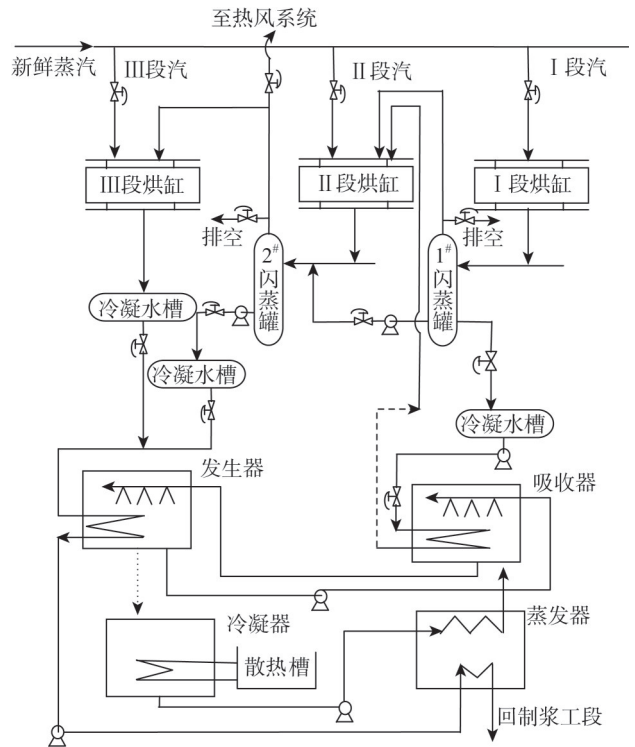


图3 升温型吸收式热泵与多段供汽混合供汽系统示意图

蒸汽。余热放热之后, 冷凝水温度可降至 60℃ 以下, 并排出烘缸冷凝水系统进行回收。升温型吸收式热泵系统产生的高压蒸汽流向中温段的烘缸使用, 中温段烘缸蒸汽量不够再补充新鲜蒸汽。低温段的蒸汽基本全部来源于中温段闪蒸罐, 取消了低温段闪蒸罐与可调热泵。

3.2 可行性论证

为定量计算出升温型吸收式热泵应用于纸机干燥部的节能效果, 笔者利用 LabVIEW 软件对瓦楞纸机干燥部的冷凝水热力系统 (不加入施胶部) 进行仿真计算。仿真计算是在分别应用升温型吸收式热泵与传统热泵两种节能设备情况下, 根据纸机确定的运行参数、设备工作机理和干燥过程能量守恒计算出供汽系统中的能耗流量。

纸机运行参数提供了纸机干燥部热力流程计算的数据基础, 表 1 为瓦楞纸机主要运行参数。

表 1 瓦楞纸机主要运行参数

项目	参数
定量/ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$	110
设计车速/ $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$	600
产能/ $\text{万 t} \cdot \text{a}^{-1}$	12~15
成纸率/%	95
抄造率/%	98
幅宽/mm	6500
烘缸直径/mm	1800
压榨温度/℃	25
压榨干度/%	42
成纸干度/%	92

设备工作机理主要包括闪蒸罐闪蒸机理、传统热泵和升温型吸收式热泵热源品位提升机理^[7], 具体内容见表 2。

表 2 设备工作机理

项目	闪蒸罐	传统热泵	升温型吸收式热泵
品位提升对象	部分入口冷凝水	引射蒸汽	吸收器入口热媒水
品位提升方式	降压闪蒸	工作蒸汽减压前后的能量差驱动	中品位热源与低温热源的热势差驱动
计算公式	$F=V+L$ $H_F \cdot \eta = Vh_v + Lh_L$	$G_c = G_p + G_H$ $(1+u)h_c = h_p + uh_H$	$Q_s = \text{COP} \cdot (Q_g + Q_o)$
公式参数确定方式	经验法 (闪蒸效率 η)	参考经验图表 (喷射系数 u)	参考相仿应用案例 (性能系数 COP)

注 F 为闪蒸罐入口流体的总流量, kg/h ; V 为闪蒸罐出口蒸汽的流量, kg/h ; L 为闪蒸罐出口水的流量, kg/h ; H_F 为闪蒸罐入口流体的总焓, kJ ; h_v 为闪蒸罐出口蒸汽的比焓, kJ/kg ; h_L 为闪蒸罐出口水的比焓, kJ/kg ; G_c 为热泵混合流体的流量, kg/h ; G_p 为热泵工作流体的流量, kg/h ; G_H 为热泵引射流体的流量, kg/h ; h_c 为热泵混合流体的比焓, kJ/kg ; h_p 为热泵工作流体的比焓, kJ/kg ; h_H 为热泵引射流体的比焓, kJ/kg 。

烘缸内蒸汽的耗汽量一般通过纸张干燥过程能量守恒进行计算, 而纸张在干燥过程中吸收的能量主要有 3 个流向, 作用分别为使液态水汽化、使纸张温度升高和使未汽化水温度升高。因此, 纸机干燥部第 n 段烘缸理论耗热量 (kJ/kg 成纸) 计算见公式 (3)^[18]。

$$Q_n = \frac{(C'' - C')C_2}{C''C'} h_n + \frac{C_2}{100} C_c (t'' - t') + \frac{C_2}{100} C_w \left[\frac{(100 - C'')t''}{C''} - \frac{(100 - C')t'}{C'} \right] \quad (3)$$

式中, C' 、 C'' 为进、出第 n 段烘缸纸张的干度, %; t' 、 t'' 为进、出第 n 段烘缸纸张的温度, $^{\circ}\text{C}$; C_2 为出纸机干燥部纸张的干度, %; h_n 为第 n 段烘缸平均干燥压力下的饱和蒸汽热焓值, kJ/kg ; C_c 、 C_w 为纤维、水的比热容, $\text{kJ/(kg} \cdot ^{\circ}\text{C)}$ 。

第 n 段烘缸理论耗汽量 (kg/h) 计算见公式 (4)。

$$D_n = \frac{Q_n Y}{(h'' - h') \eta} \times (1 + k) \quad (4)$$

式中, h'' 、 h' 为进、出烘缸饱和蒸汽和水的焓值, kJ/kg ; Y 为纸机抄造量, kg/h ; η 为干燥部效率, 90%; k 为不凝气体量, 10%。

3.3 计算结果对比分析

参照干燥曲线^[19], 确定各段纸幅的干度和温度、各段烘缸内蒸汽平均压力和各段烘缸耗汽量见表 3。

在分别应用升温型吸收式热泵与传统热泵两种节能设备情况下, 计算出供汽系统中主要管道的能耗流量见图 4、图 5。图 4、图 5 结果表明, 应用升温型吸收式热泵回收低温段烘缸余热之后, 系统遵循蒸汽量不够再补充新鲜蒸汽的原则, 降低了新鲜蒸汽的输入。多段供汽与传统热泵混合供汽系统的热力流程中新鲜蒸汽总输入流量为 44229.85 kg/h , 而多段供汽与升温型吸收式热泵混合供汽系统的热力流程中新鲜蒸汽输入流量为 41709.91 kg/h , 节约 5.7% 的新鲜蒸汽。冷凝水排出温度降至 60℃, 整个烘缸冷凝水系统剩余能量相对传统热泵烘缸冷凝水系统较少。

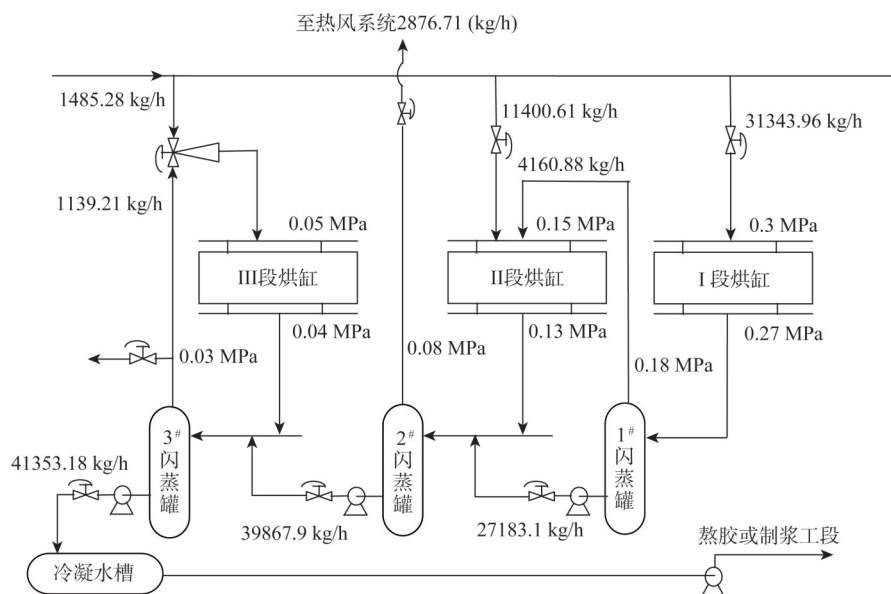


图4 多段供汽与传统热泵混合供汽系统热力流程流量图

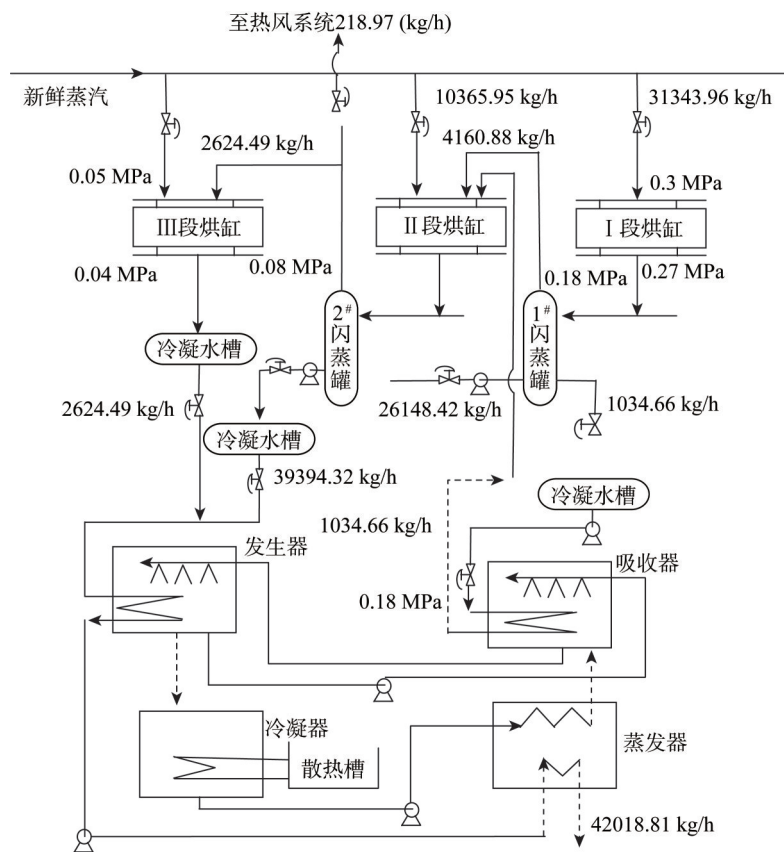


图5 多段供汽与升温型吸收式热泵混合供汽系统热力流程流量图

表3 各段烘缸参数表

烘缸	纸幅干度/%	纸幅温度/℃	蒸汽平均压力/MPa	耗汽量/kg·h ⁻¹
III(低温)段烘缸	42	25 ~ 51	0.05	2624.49
II(中温)段烘缸	42 ~ 50	51 ~ 88	0.15	15561.49
I(高温)段烘缸	50 ~ 92	88 ~ 103	0.30	31343.96

4 结 语

本课题设计出一种基于升温型吸收式热泵的多段供汽系统,并通过仿真计算可以得出如下结论:降低了现有烘缸冷凝水系统冷凝水排出温度(降至60℃以下),并节省5.7%的热能输入,达到纸机干燥部节能的目的;热力流程中将升温型吸收式热泵代替传统热泵进行余热回收,摆脱了传统热泵对驱动能品位要求过高的依赖。

参 考 文 献

- [1] TANG Wei, SUN Zhenyu, CHI Dongming, et al. Design and Optimization of Synergic Control System for Energy Consumption of High Strength Fluting Paper Machine Dryer Section[J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2017, 32(3): 58.
汤 伟, 孙振宇, 池东明, 等. 高强瓦楞纸机干燥部能耗协同控制系统的设计及优化研究[J]. 中国造纸学报, 2017, 32(3): 58.
- [2] CHEN Xiaobing, DONG Yunyuan, ZHENG Qifu, et al. Research Progress of Modeling and Intelligent Simulation of Paper Multi-cylinder Drying Process [J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2018, 33(4): 64.
陈晓彬, 董云渊, 郑启富, 等. 纸张多烘缸干燥过程建模与智能模拟技术研究进展[J]. 中国造纸学报, 2018, 33(4): 64.
- [3] SHEN Shengqiang, ZHANG Cheng, LI Sufen, et al. Analysis of Application of Steam-Driven Ejector Heat Pump in Dryer Section of Paper Machine [J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2004, 19(2): 110.
沈胜强, 张 程, 李素芬. 蒸汽喷射式热泵在纸机干燥部供热的应用分析[J]. 中国造纸学报, 2004, 19(2): 110.
- [4] KONG Lingkai, HE Zheng, WEI Maolin, et al. Review of Absorption Heat Transformer Technology [J]. Heating, Ventilating and Air Conditioning, 2017, 47(5): 58.
孔令凯, 何 正, 魏茂林, 等. 升温型吸收式热泵技术综述[J]. 暖通空调, 2017, 47(5): 58.
- [5] LIU Feng. Study on mechanism of energy level upgrading in absorption heat transformer [D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, 2017.
刘 锋. 第二类吸收式热泵品位提升机理与系统集成研究[D]. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2017.
- [6] Li Rui. Research on steam and condensate thermodynamic system based on adjustable thermal compressor [D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2012.
李 蕊. 基于可调热泵的蒸汽冷凝水热力系统研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2012.
- [7] Wei Xinyao. Cascade utilization and waste heat recovery of steam energy saving in drying section of paper making [J]. Ningbo Energy Saving, 2011(6): 32.
魏新尧. 蒸汽节能在造纸干燥部的梯级利用和余热回收[J]. 宁波节能, 2011(6): 32.
- [8] Zhang Cheng. Application and analysis of steam ejector heat pump in paper machine drying department [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004.
张 程. 蒸汽喷射式热泵在纸机干燥部的应用与分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2004.
- [9] Liu Changchun, Jiang Yingchun, Han Wei, et al. A high-temperature hybrid absorption-compression heat pump for waste heat recovery [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 172: 391.
- [10] TANG Wei, LV Dingyun, WANG Mengxiao. Review of Heat Energy Supply System of Steam-driven Jet Heat Pump Applied in Paper Machine [J]. China Pulp & Paper, 2007, 26(10): 49.
汤 伟, 吕定云, 王孟效. 造纸机热泵供汽系统的应用[J]. 中国造纸, 2007, 26(10): 49.
- [11] Farshi L G, Khalili S, Mosaffa A H. Thermodynamic analysis of a cascaded compression-absorption heat pump and comparison with three classes of conventional heat pumps for the waste heat recovery [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 128: 282.
- [12] Xu Zhenyuan, Wang Ruzhu. Absorption heat pump for waste heat reuse: current states and future development [J]. Frontiers in Energy, 2017, 11(4): 414.
- [13] Correa L A. Multistage quantum absorption heat pumps [J]. Physical Review, 2014, 89(4): 042128.
- [14] Lickrastina A, Talcis N, Dzelzitis E. Cogeneration unit with an absorption heat pump for the district heating system [J]. Heating, Ventilation, Air conditioning and Refrigerating, 2014, 20: 404.
- [15] Wei Juan, Xiao Yunhan, Zhang Shijie. Study on the performance of open cycle absorption heat transformer [J]. Acta Energetica Sinica, 2013, 34(3): 427.
魏 璠, 肖云汉, 张士杰. 第二类开式吸收式热泵系统设计和性能分析[J]. 太阳能学报, 2013, 34(3): 427.
- [16] Kong Lingkai, He Zheng, Wei Maolin, et al. Review of absorption heat transform technology [J]. Heating, Ventilating and Air Conditioning, 2017, 47(5): 58.
孔令凯, 何 正, 魏茂林, 等. 升温型吸收式热泵技术综述[J]. 暖通空调, 2017, 47(5): 58.
- [17] Fang Shuqi, Luo Pingmei. The research and application of the absorption heat transformer [J]. Applied Energy Technology, 2008(10): 36.
方书起, 骆萍梅. 第二类吸收式热泵的研究及应用[J]. 应用能源技术, 2008(10): 36.
- [18] ZHOU Qiang, HAN Jiuqiang. Optimization of Drying Curve of the Dryers Based on Genetic Algorithm [J]. Transactions of China Pulp and Paper, 2007, 22(1): 110.
周 强, 韩九强. 基于遗传算法的烘缸干燥曲线的参数优化[J]. 中国造纸学报, 2007, 22(1): 80.
- [19] Dang Rui. Analysis and research for thermodynamic system in dryer section of paper machine [D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2009.
党 睿. 纸机干燥部热力系统的分析与研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2009. [CPP]

(责任编辑: 黄 举)