

文章编号: 1671-6612 (2021) 06-919-05

# 印染废水余热回收分析

靳 行<sup>1</sup> 狄育慧<sup>1</sup> 郝振东<sup>2</sup>

(1. 西安工程大学城市规划与市政工程学院 西安 710600;  
2. 西安工程大学柯桥纺织产业创新研究院 绍兴 312030)

**【摘 要】** 印染废水水量大、温度高, 直接排放会造成环境的污染, 介绍了废水余热回收方式, 分析了印染废水的来源及水质, 介绍了污水源热泵技术。针对印染企业进行了调研测试, 对废水进行了回收潜力分析, 设计了一套余热回收系统回收印染废水, 通过计算可以看出节能效果显著。

**【关键词】** 污水源热泵; 余热; 换热器; 节能减排

中图分类号 TK11+5 文献标识码 A

## Waste Heat Recovery of Waste Water from the Printing and Dyeing Industry

Jin Xing<sup>1</sup> Di Yuhui<sup>1</sup> Hao Zhendong<sup>2</sup>

(1.School of Urban Planning and Municipal Engineering, Xi'an Polytechnic University, Xi'an, 710600;

2.Keqiao Textile Industry Innovation Research Institute, Xi'an University of Technology, Shaoxing, 312030)

**【Abstract】** Printing and dyeing waste water is large in volume and high in temperature, and direct discharge will cause environmental pollution. This paper introduces waste water waste heat recovery methods, analyzes the source and water quality of printing and dyeing waste water, and introduces waste water source heat pump technology. Research tests were conducted for the printing and dyeing enterprises, the recovery potential of waste water was analyzed, and a set of waste heat recovery system was designed to recover the printing and dyeing waste water, and the energy-saving effect can be seen significantly through calculation.

**【Keywords】** Sewage source heat pump; waste heat; heat exchanger; energy saving and emission reduction

基金项目: 西安工程大学(柯桥)研究生学院产学研协同创新项目(编号: 19KQZD05)

作者简介: 靳 行(1995.10-), 男, 硕士研究生, E-mail: 837838134@qq.com

通讯作者: 狄育慧(1964.02-), 女, 教授, E-mail: 470836165@qq.com

收稿日期: 2021-04-20

## 0 引言

印染行业作为消耗能源大户, 在生产过程中, 需要消耗大量的能源, 同时会排放出大量的废水和废气, 这些废水和废气中存在大量的热能。印染行业是用水量较大的工业行业, 水参与到印染工艺的大部分过程中, 而水再纺织印染产品中所占价值又很低, 生产中不太注意节约用水和回用, 造成了大量的浪费。我国纺织工业用水量排在各行业第六位, 而纺织工业中染整行业用水占 80%, 纺织行业每年的废水排放量达 20.29 亿吨, 其中印染废水占总排

放量的 80%, 印染厂水回用率仅 7%, 整个纺织行业回用率不足 10%, 是全国所有行业中水回用率最低的行业。同时, 印染行业也是耗能大户<sup>[1]</sup>, 根据统计 2018 年纺织行业能源消费总量为 7372 万吨标准煤, 其中煤炭消耗量为 951 万吨。我国的纺织行业能源消耗主要包括织造行业能耗、服装行业能耗和印染行业能耗, 其中印染行业能耗最大, 约占整个行业的 58.7%。

印染废水是指各个工序排出来的混合废水, 排放温度很高且不同, 碱减量水洗废水的温度可以达

到 45℃，高温废水的温度为 80℃，一般的废水排放温度为 40℃，一吨印染废水所含的热量估算为 1.05×10<sup>5</sup>kJ，折合标准煤当量为 3.6kg 标准煤，由此可以看出印染废水具有很大的利用价值，回收潜力巨大。

## 1 印染行业废水现状

### 1.1 印染废水来源

印染的工序是一个复杂的过程，分为很多道工序，退浆、煮练、漂白、丝光、染色、印花、整理等过程排出大量的高温废水。每道工序的排放废水温度也不尽相同，印染废水排放的温度区间为 40~150℃<sup>[2]</sup>，如果能将这些废水含有的热能利用起来，将产生很大的经济效益。漂染工艺过程中会产生退浆、煮练、漂白、丝光废水等，其中退浆废水约占印染废水的 45%左右，废水水量大且 COD 含量较高，漂白废水污染程度低，可以直接排放或循环利用；染色、印花工艺过程中会产生染色、皂洗、印花等废水；整理工艺过程会产生整理废水，这部分废水对水质水量有一定的影响。

表 1 废水主要来源<sup>[3,4]</sup>

Table 1 Main sources of wastewater<sup>[3,4]</sup>

行业	废水主要来源	主要污染物
棉、化纤布和混纺布厂	退浆、煮练、漂白	浆料，纤维
苧麻纺织厂	染色、整理	苧麻胶质
丝、绢纺织厂	制丝、精炼	丝胶
针织厂	碱缩，后处理	染料、助剂

### 1.2 废水水质分析

废水水质对废水回收利用有很大的影响，由于印染工序复杂且工序较多，造成了废水成分比较复杂，悬浮物会造成管道的堵塞，废水的酸碱度会对设备造成一定的腐蚀，印染污水处理厂需要对生产工序产生的废水进行处理，达标后才能进行废水的排放，限值如表 2 所示。目前环保的主要排放指标有：生化需氧量（BOD）、化学需氧量（COD）、悬浮物（SS）等，除此之外存在其他的物质。BOD 指水中有机物等需氧污染物质含量的综合指标，COD 指在一定的条件下，用一定的强氧化剂处理水样时所消耗的氧化剂的量，SS 指悬浮在水中的物体物质。

表 2 现有企业水污染物排放浓度限值

Table 2 Existing enterprises water pollutant emission concentration limits

污染物项目	直接排放	间接排放
pH 值 (mol/L)	6~9	6~9
化学需氧量 (mg/L)	100	200
生化需氧量 (mg/L)	25	50
悬浮物 (mg/L)	60	100
色度 (度)	70	80
氨氮 (mg/L)	12	20
总氮 (mg/L)	20	30

### 1.3 废水利用现状

废水余热回收就是用热交换技术把废热的热能提取出来，使常温的水温度提高的技术<sup>[5]</sup>。印染过程不仅需要大量的水，而且也会排放温度很高的废水，为了充分利用这些废水中的热能，采用换热技术将水中的热能提取出来，转移到干净的冷水中，使其温度升高，这些温度高的水可以为生产提供热水，经过换热后的废水，可以排至污水处理厂。国外对废水回收研究起步较早，已经有实际的工程应用，国外对废水回收的方式主要采用热交换技术和热泵技术。我国的印染废水余热回收虽然起步的晚，但经过最近几年的发展已经取得了很大的进步，目前在很多工程上都有实际应用。其中主要的技术有：换热器回收、热泵技术回收、多级串联换热器回收、筒染连续套染回收<sup>[6]</sup>。换热器回收废水中的余热是利用换热设备进行热交换，不改变余热能量的形式，是一种直接利用的方式。常见的换热设备有板式换热器、管壳式换热器、流道式换热器、热管式换热器。热泵是一种高效的能量转换装置，由蒸发器、冷凝器、压缩机、节流装置组成，依靠少量的高品位能量将能量从低温物体传递给高温物体。筒染连续套染技术，可以提高废水余热综合利用能力，最大的优点就是废水分质收集，只处理废水中的固体和醇类物质，在 COD 存在的前提下废水可直接回用，大大减少了染色用水的使用量。板式换热器和热管换热器的回收效率一般在 50%~80%，热泵技术的回收效率一般在 30%~70%。

## 2 余热回收技术

### 2.1 污水源热泵原理

热泵机组是利用压缩机的作用将能量进行转

换, 通过消耗一定量的辅助能量, 在压缩机和制冷剂的作用下, 由环境热源中吸取低温热能, 然后转换为高温热能并将其输出, 从而可以达到回收低温热源制取高温热源的目的。污水源热泵是水源热泵的一种, 工作原理是通过污水源热泵系统中的压缩机做功, 消耗少量的电能, 使系统内循环介质压缩至高温高压的状态, 从而吸收低位热源中的热量, 即将污水中的低位热能“提取”出来。热泵技术起源于瑞士, 是由佐伊首次提出利用土壤源作为热泵的热源, 20 世纪 60 年代我国的热泵技术才开始起步。热泵技术是近年来发展最为成熟的、使用最广泛的余热回收技术, 而且随着技术的发展, 热源的不断降低, 使得可利用低温热源的区间变大, 缺点就是污垢引起的换热器堵塞问题, 未被处理的污水中含有高浓度的污染物。图 1 是废水余热回收热泵系统的简易示意图。废水作为低品位能源, 经过水泵进入热泵机组的蒸发器, 换热降温后返回废水池, 而经过热泵产生的高品位能源可以供生产使用。

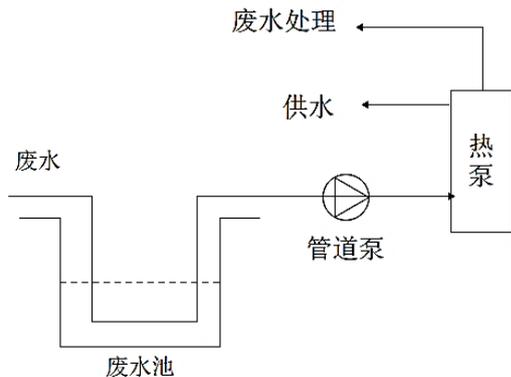


图 1 废水余热回收热泵系统简易示意图

Fig.1 Simple schematic diagram of waste water waste heat recovery heat pump system

## 2.2 热泵技术分类

污水源热泵按照热源是否被处理可以分为用原水作为热源和用污水处理厂处理过后的水或者二级出水作为热源两类。原水的成分比较复杂, 是指直接排放出来的废水, 没有经过任何处理, 水中的杂质和污染物较多, 这种原水作为热源会对管道和热泵机组造成很大的影响。经过污水处理厂处理的中水或者二级出水, 可以直接作为热泵系统的热源, 但是需要就近利用这部分中水, 因为距离远的时候还需要考虑管道损失和温度降低等问题。按照

污水是否经过换热器可以分为直接式系统和间接式系统, 直接式系统对水质的要求比较高, 因为污水直接与换热器接触, 间接式系统污水的中水进入热泵机组, 对水质的要求比较低, 但是中间换热器的传热温差损失比较大。两者相比较, 间接式热泵系统目前应用的较多, 技术较为成熟。按照换热器的类型来分可以分为浸泡式系统、管壳式系统和淋水式系统, 其中浸泡式系统的防堵塞和防腐蚀性能较好, 淋水式系统的防结垢性能较好, 而管壳式系统易于清洗。

## 2.3 污水源热泵关键性技术

污水水质会对污水源热泵系统中的换热器表面阻塞和腐蚀产生一定的影响, 污水在管道中长时间流动, 容易出现结垢的现象, 从而降低换热器的换热效果, 防止污水水质对管道和设备的影响是系统运行良好的关键性技术之一。目前解决管道阻塞常用的设备有: 过滤格栅、自动筛滤器、污水连续过滤再生装置等<sup>[7]</sup>。为了解决腐蚀问题, 目前应用的污水源热泵系统大部分都采用间接式系统, 针对腐蚀问题文献<sup>[8]</sup>提出了一种塑料管间接换热的回收方法, 用来解决管道的腐蚀。

## 2.4 热泵技术优势

采用热泵技术回收工业废水, 可以减少一次能源使用带来的环境污染等问题。由于取消了冷却塔, 可以减少占地面积。印染废水的利用, 可以减轻空气污染, 同时还可以减轻污水排放对水源水质和生态环境的污染, 同时利用印染废水中的热能, 可以为企业带来经济效益。因此, 有效的回收废水, 对减轻环境污染和保护环境具有重大意义。

## 3 余热回收系统设计

### 3.1 工程概况

本文主要针对浙江某印染企业进行废水余热回收的设计, 该印染厂的污水处理站只是对污水进行水质的处理, 没有对水中的热能进行利用, 处理的方法是污水直接排放至污水池中, 经过冷却塔的降温后排入调节池, 在调节池进行 pH 的调节, 经过一系列的处理后, 达到污水的排放要求后, 排放至污水管道, 该企业的用水流程简图如图 2 所示。这样的处理方式有如下弊端: 首先大量的高温污水中所含有的低品位热能没有得到回收再利用; 其次, 冷却塔将污水降温需要消耗一定量的高品位电能,

造成了企业运行成本的增加。经过调研测试企业排放的废水，废水中的热量巨大，温度适中且相对稳定，测试了污水水质不同的成分，主要包括 pH、COD、TOC、总氮、氨氮，数据如图 3 所示，通过测量该企业排放的污水量，知流量大且稳定，约为 2400t/天。

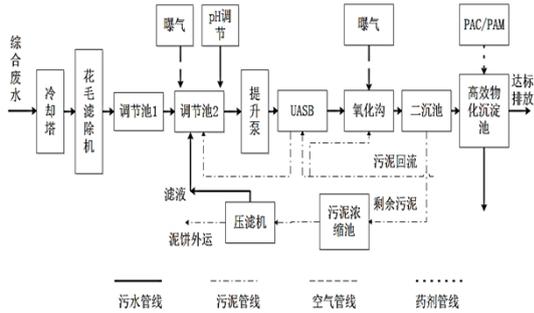


图 2 用水流程简图

Fig.2 Sketch of water consumption flow

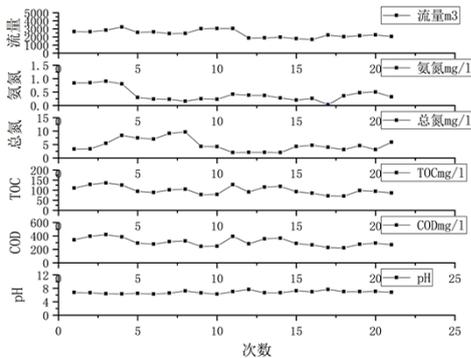


图 3 污水水质

Fig.3 Wastewater quality

### 3.2 回收潜力分析

由测试数据得，企业排放的染色废水温度最高为 50℃，最低为 40℃，废水的排放温度会随着企业每天的生产情况的不同变化，波动在 10℃之间，废水的平均温度为 45℃。如果应用换热设备和热泵机组将废水的温度降至 20℃排出，则废水可利用的温度差为 25℃，并可保证系统的正常运行。

废水的余热回收量可按照公式 (1) 计算得到：

$$Q = C_p \cdot m \cdot \Delta T \quad (1)$$

式中： $Q$  为废水的余热回收量，t/天； $C_p$  为 20℃ 时水的比热容，取  $4.2 \times 10^3 \text{J/kg} \cdot \text{C}$ ； $m$  为企业每天的废水排放量； $\Delta T$  为废水经过换热后的温差。

因此，可以计算废水余热的可回收量为  $Q = 2400 \times 4.2 \times 10^3 \times 25 = 2.52 \times 10^8 \text{kJ}$ 。

如果用这些能量加热生产用水，生产用水的温度由 15℃加热到 60℃，可产生的热水量为：

$$G_s = \frac{Q}{C_s (t_2 - t_1)} \quad (2)$$

式中： $G_s$  为产生的热水量，t/天； $C_s$  为水的比热容，取  $4.183 \times 10^3 \text{J/kg} \cdot \text{C}$ ； $Q$  为废水的余热回收量，kJ； $t_1, t_2$  为换热前后自来水的进出口温度差。

因此，可得热水量为  $G_s = 1338.8 \text{t/天}$ 。

制备热水需要的蒸汽量可以用公式计算得：

$$G_z = \frac{kQ}{I_1 - I_2} \quad (3)$$

式中： $G_z$  为蒸汽消耗量，t/天； $k$  为热媒管道热损失附加系数， $k$  取 1.1； $I_1, I_2$  为蒸汽换热时进出口焓值， $I_1$  为  $2960 \text{kJ/kg}$ ， $I_2$  为  $252 \text{kJ/kg}$ 。

所以需要消耗蒸汽量为  $G_z = 1.1 \times 2.52 \times 10^8 / (2960 - 252) = 102.4 \text{t}$ ，可以得出节省蒸汽量为 102.4t。

### 3.3 余热回收方案设计

在印染企业中，将废水收集到废水池，采用污水源热泵加预热的方式进行余热回收；余热废水到蒸发器中释放热量，释放的热量被制冷剂吸收，制冷剂通过压缩机做功，在冷凝器中把热量传给冷水，冷水被加热到一定温度即可用于生产。整个余热回收系统是由热泵机组装置、热回收换热器、废水池和蓄水池等部件组成的。热泵装置主要是由蒸发器、压缩机、冷凝器和膨胀阀四个主要部分组成，但它又不同于一般的水源热泵，整个热泵机组是专门设计的，具有更好的效率。

文献[9]通过对热泵提升温度的方案进行比较，得到了不同情况下热泵提升温度的经济结果，即采用热泵收集 45~60℃的废水的方案，经济效益最大；如果采用多级热泵来为企业生产高温的工艺用水，即用热泵将水提升至高温，在经济效益上并没有优势。因此对一些印染的行业采用热泵回收废水余热进行水升温时，采用高温型热泵是没有必要的。企业的一般工艺用水一般在 60℃以上，因此本次设计考虑采用换热器与热泵结合的方式将温度升高的方案，结合上文的余热潜力分析得热水的出水温度为 60℃，如果需要更高温度的工艺用水，可以将 60℃的热水与蒸汽进行换热，提高热水的温度。该系统如图 4 所示，废水首先经过防腐热交换器，将自来水从 15℃加热至 30℃左右，加热后的自来

水作为热泵的热源, 热量被传递给蒸发器中的制冷剂。然后, 制冷剂蒸发并被压缩机压缩, 进入冷凝器并释放热量。同时, 冷凝测的水先经过换热器余热后, 将水的温度提升至 30°C, 然后冷凝器中的水从 30°C 增加到 60°C, 加热的水可用于染色工序中。染色工序排放的高温废水进入废水池, 通过水泵将废水池中的高温废水引入余热回收系统中, 经过换热, 废水温度降低至 20°C 左右排放入污水处理厂。

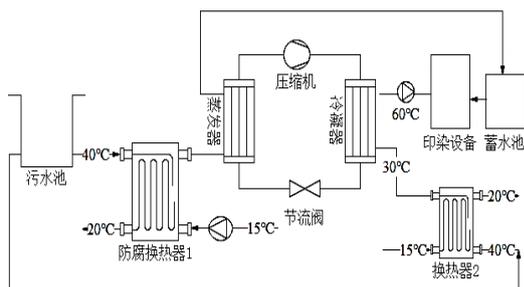


图 4 热泵回收余热系统

Fig.4 Heat pump recovery waste heat system

### 3.4 节能及环保分析

如果用本文设计的系统, 利用换热器和热泵结合的方式回收废水中的热量, 取  $COP$  为 5, 则每天的制热量为  $Q=3.15 \times 10^8 \text{kJ}$ , 制热功率为  $P=3.65 \times 10^3$ 。污水源热泵回收系统每天工作 24h, 年运行 300d, 可以从废水提取的热量为  $Q=3.15 \times 10^8 \times 24 \times 300 = 2.27 \times 10^{12} \text{kJ}$ 。标准煤的发热量为 29271kJ, 则该系统每年可以节省标煤量为 77551t。原煤的低位发热量为 18828kJ, 则系统每年可以节约原煤量为 120565t。

有害气体主要包括二氧化碳 ( $\text{CO}_2$ )、二氧化硫 ( $\text{SO}_2$ )、氮氧化物 ( $\text{NO}_x$ )、烟尘、煤渣等。据统计, 煤炭的燃烧会产生大量的污染物, 其中二氧化碳占 71%, 二氧化硫占 87%, 氮氧化物占 67%, 烟尘占 60%, 而且煤燃烧还会造成酸雨等问题。充分利用污水源热泵系统可以为企业带来经济效益, 一定程度上减少一次能源的使用, 减少污染物的排放, 对保护环境具有重要意义。根据查阅相关的资料显示<sup>[10]</sup>, 每千克标煤  $\text{CO}_2$  的排放系数为 2620g/kg, 每千克标煤  $\text{SO}_2$  的排放系数取 8.5g/kg, 每千克标煤  $\text{NO}_x$  的排放系数取 7.4g/kg, 每千克标煤烟尘的排放系数取 2.5g/kg, 每千克标煤煤渣的排放系数取 328g/kg。根据此数据并结合该系统每年节省的标准煤数量, 可以计算出每年减少的污染

物的排放量, 具体数值见表 3, 从中可以看出, 污水源热泵系统节能减排的效果显著。

表 3 每年减少的污染物排放量

Table 3 Annual reduction of pollutant emissions

污染物种类	$\text{CO}_2$	$\text{SO}_2$	$\text{NO}_x$	烟尘	煤渣
排放系数 (g/kg)	2620	8.5	7.4	2.5	328
节省的标煤量 (t)	77551				
减排量 (t)	203183.6	659.2	573.9	193.9	25436.7

## 4 结语

在传统的印染行业中, 印染过程消耗了大量的热能, 造成了严重的热污染和能源的浪费。本文针对具体的印染厂分析了污水的水质和热能, 通过测试和计算得出, 污水中存在大量的热能, 污水源热泵的使用可以回收这部分热能。由以上数据可以看出, 不仅可以减少能源的使用, 也能减少有害气体排放, 具有明显的节能减排效益, 而且热泵的应用对于印染废水余热回收利用领域具有很好的应用前景。

## 参考文献:

- [1] 顾晓乐. 印染企业节能减排案例分析[J]. 印染, 2014, (21):30-34.
- [2] 王福强. 印染废水余热回用热泵系统研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- [3] 武江津, 王凯军. 三废处理工程技术手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2000.
- [4] 贾洪斌, 王力民. 印染废水治理及回用技术[J]. 印染, 2003, (4):23-25.
- [5] 韩阳. 印染厂废水余热的回收利用[J]. 染整技术, 2013, 35(12):36-37.
- [6] 郭二民, 李海生, 李明. 传统过滤器改造连续动态过滤器的研究[J]. 环境科学研究, 2005, (5):56-58, 62.
- [7] 孙德兴, 吴荣华. 设置有旋转反冲洗格栅滤网的城市污水冷热源的应用装置[P]. 中国: 200420018341.3, 2005-01-05.
- [8] 白莉, 尹军, 廖资生. 基于塑铝管改进的城市污水热能供热系统[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2006, 36(2):269-273.
- [9] 史琳, 王福强, 吴静, 等. 基于典型印染废水余热热泵回收的热力学分析[J]. 热科学与技术, 2014, (4):4.
- [10] 杨小鹏. 造纸废水余热应用研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.