

节能技术

精锻余热回收系统蓄热水池温度场仿真研究

齐永恒¹, 陈辉¹, 史朝旭¹, 李国军¹, 张佳琦¹, 聂国清²

(1. 沈阳建筑大学机械工程学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 白城中一精锻股份有限公司, 吉林 白城 137000)

摘要: 锻造工艺中, 工艺冷却水将中频感应炉感应线圈所受辐射热带入蓄热水池, 蓄热水池作为能量储存场所, 其一直处于“黑箱”状态, 水池内水的温度分布和流动状态不明。以现场得到的真实工艺参数为基础, 利用 Comsol 软件对不同工况下蓄热水池内水的温度分布及流动状态进行建模和仿真, 得到了在 0:00~8:00 无余热的时间段水池内水的温度分布和流动状态, 为实现实时控制水池工艺冷却水温度打下了良好基础。同时, 针对热泵获取不到热水的问题, 提出将热泵取水口延伸至水池中部的假设, 结果表明, 该假设可行, 解决了热泵获取不到热水的难题, 提升了整个余热回收系统的效率。

关键词: 余热回收; 蓄热水池; 温度分布梯度; 精锻; 热泵; Comsol 软件

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.02.030

中图分类号: TK11

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 02-0186-06

Simulation research on temperature field for thermal storage tank in precision forging waste heat recovery system

Qi Yongheng¹, Chen Hui¹, Shi Zhaoxu¹, Li Guojun¹, Zhang Jiaqi¹, Nie Guoqing²

(1. School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China;

2. Baicheng ZhongYi Precision Forging Co., Ltd., Baicheng 137000, China)

Abstract: In the forging process, the process cooling water transfers radiant heat received by induction coil of intermediate frequency induction furnace into thermal storage tank, and as an energy storage place, the thermal storage tank has always in a “black box” state that it is unclear about temperature distribution and flow state of water in the tank. Therefore, based on the real process parameters obtained on-site, the model and simulation of the temperature distribution and flow state of water in the thermal storage tank under different working conditions were conducted by software Comsol, and the temperature distribution and flow state of water in the tank during the period of 0:00~8:00 without residual heat were obtained, which laid a good foundation for realizing real-time control of the temperature of process cooling water in the tank. At the same time, aiming at the problem that the heat pump could not obtain hot water, the assumption of extending the water intake of the heat pump to the middle of the tank was proposed. The results show that the assumption is feasible, which solves the problem that the heat pump can not obtain hot water and improves the efficiency of the whole waste heat recovery system.

Key words: waste heat recovery; thermal storage tank; temperature distribution gradient; precision forging; heat pump; software Comsol

目前, 国家对环境保护越来越重视, 发布了系列节能相关政策和法规, 并推动热泵的应用。同时, 很多学者研究总结了多种形式热泵的优点及目前存在的问题, 热泵应用越来越广泛, 并朝着区域化、规模化、热源多元化发展, 在多个领域中凭借其环保优势得以迅速发展, 在未来有更大的应用空

间^[1-3]。基于循环冷却水热泵技术的原理及特点, 利用循环水余热回收技术能够有效地节约能源, 循环水余热回收技术绿色环保、安全可靠, 因此, 值得被广泛推广^[4-8]。利用超声波流量计和温度、湿度测量仪等设备对洗浴废水进行实测, 发现有大量的余热流失, 以污水源热泵为基础进行换热, 利用低品位余热加热自来水重新利用, 为可再生能源拓展了新的利用空间^[9]。基于热泵原理为了降低二氧化碳的排放量、提高热能转换率及利用率, 在冶金等具有高余热领域将烟气余热回收技术应用在轮毂制造中, 将吸取的余热应用于预热等工艺方面, 取得了显著的效果^[10-12]。以热泵机组为基础进行改

收稿日期: 2021-01-02; 修订日期: 2021-04-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61973224)

作者简介: 齐永恒 (1993-), 男, 硕士

E-mail: 1441482285@qq.com

通信作者: 陈辉 (1963-), 男, 博士, 教授

E-mail: Chenhui@sjzu.edu.cn

善，通过优化换热器等方法提取低品位余热，可节省大部分资源^[13-18]。

众多领域在余热回收技术的应用中，对余热的降温大部分采用热泵与冷却塔等方式，将大量的余热排放到空气中，造成了能源浪费。本文在锻造领域采用热泵与蓄热水池作为整个余热回收系统的储能和供能场所，将锻造车间产生的余热储存到蓄热水池，并通过 Comsol 软件仿真出蓄热水池内水的温度分布及流速场分布，为实时控制水池内水的温度提供时间节点依据。

1 精锻连杆余热回收系统构成

1.1 精锻工艺条件

连杆材料为德国生产的高碳微合金非调制钢 C70S6、质量为 1 kg。锻造生产采用两班制，每班

时间为 8 h。工件实物如图 1 所示，其连杆锻件工艺流程如图 2 所示。工件生产过程中，中频感应炉将工件加热至 1200~1240℃，而感应线圈为纯铜，其熔点为 1083℃，因此，需要循环冷却水对感应线圈进行降温保护。工艺冷却循环水流经感应线圈最后回到水池，水池的供水口又将适宜的水循环到感应线圈以保护线圈。

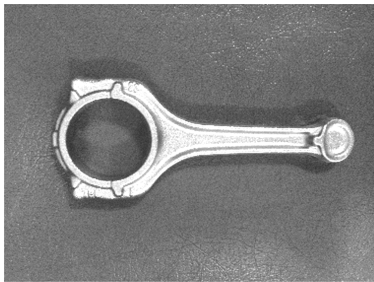


图 1 精锻连杆件
Fig. 1 Connecting rod part of precision forging

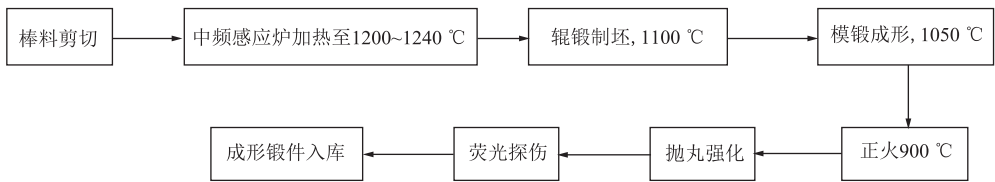


图 2 连杆生产工艺流程
Fig. 2 Process flow of production for connecting rod

1.2 蓄热水池结构

蓄热水池在整个工艺水循环系统中起着不可替代的中枢作用，建造水池的场地长度为 15 m、宽度为 8 m，水池深度为 3.7 m，即蓄热水池的最大容积为 450 m³。蓄热水池的结构如图 3 所示。

顶部留有 0.8 m 的空隙，其结构如图 4 所示。该墙体采用单层墙体设计，可以有效地提高水池内部冷、热水的混合程度，增加冷、热水的混合时间，使其池内水的温度分布更均匀；再通过地下水补充到水池中，使工艺水温度保持在正常使用的温度范围内。

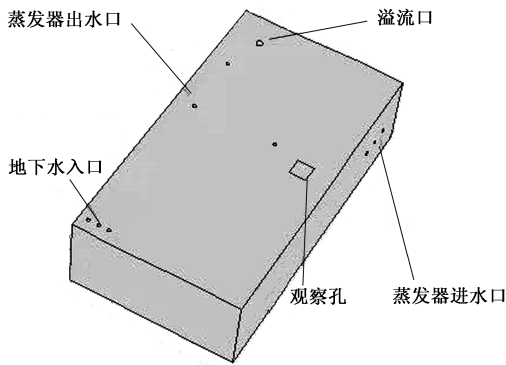


图 3 蓄热水池外部结构
Fig. 3 External structure of thermal storage tank

蓄热水池内部采用 L 形墙作为缓冲墙，其长度为 10 m，宽度为 4 m，高度为 2.9 m，距离水池

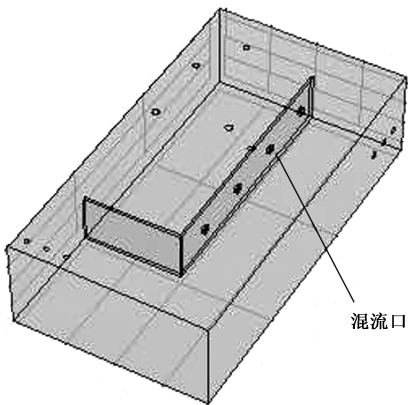


图 4 蓄热水池内部结构
Fig. 4 Internal structure of thermal storage tank

2 基于 Comsol 的相关理论

2.1 Comsol Multiphysics 的 CFD 模块理论概述

CFD 模块的常用功能包括二维空间和三维空间中的稳态和瞬态流体流动。模块中预置的物理场接口包含多种不同形式的流体方程，可以用来建立和求解各种流体流动问题。这些物理场接口使用速度、压力等物理变量，以及粘度等物理属性来定义流体模型。在模块中包含的流体流动接口涵盖广泛的流体问题，例如单相层流和湍流、多相流、非等温流和反应流等。

热模块用于计算一个系统或部件的温度分布及其他热物理参数，热分析符号意义见表 1。

表 1 热分析符号一览表
Table 1 List of thermal analysis symbols

符号	意义	符号	意义	符号	意义
t	时间	h_f	表面传热系数	Q	热流率
T	温度	ε	吸收率	q^*	热流密度
ρ	密度	σ	斯忒藩-波尔兹曼常数	\dot{q}	内部热生成
c	比热容	λ	热导率	E	能量

表 2 管径、流速、流量对照表

Table 2 Comparison form of pipe diameters, velocities and flows

管径/mm	流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
$\Phi 150$	流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	25.4	38.2	50.9	63.6	76.3	89.1	101.8	114.5	127.2
$\Phi 200$		45.2	67.9	90.5	113.1	135.7	158.3	181.0	203.6	226.2
$\Phi 250$		70.7	106.0	141.4	176.7	212.1	247.4	282.7	318.1	353.4
$\Phi 300$		101.8	152.7	203.6	254.5	305.4	356.3	407.1	458.0	508.9

表 3 水池参数表
Table 3 Parameters of tank

参数	数值
水池长度 A/m	15.00
水池宽度 B/m	8.00
水池高度 H/m	3.70
混流墙长度 a/m	10.00
混流墙宽度 b/m	4.00
混流墙高度 h/m	2.90
地下水入口直径 D_1/m	$\Phi 0.15$
地下水入口流速 $U_1/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	1.60
溢流口直径 D_2/m	$\Phi 0.30$
溢流口流速 $U_2/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	1.20
蒸发器进水口直径 D_3/m	$\Phi 0.15$
蒸发器进水口流速 $U_3/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	3.00
观察孔边长 L/m	0.80

2.2 Comsol 对水池结构的构建

余热回收系统中以水为介质进行循环，要求当热泵开启时以 $200 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 的体积流量灌入水池。输入管道的入口流速计算式如下：

$$\text{流速}(\text{m} \cdot \text{s}^{-1}) = \frac{\text{体积流量}(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})}{3600 \times \text{管道截面积}(\text{m}^2)} \quad (1)$$

该研究中采用管径 DN 为 $\Phi 150 \text{ mm}$ 的管道作为输入管道，即输入管道半径 R 为 0.075 m ，则：

$$\begin{aligned} \text{管道截面积} &= \pi R^2 = \\ 3.14 \times 0.075 \times 0.075 &\approx 0.018 \text{ m}^2 \end{aligned} \quad (2)$$

将以上数据代入式 (1) 可得：入口流速 = $\frac{200}{3600 \times 0.018} \approx 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

通过式 (1) 计算及查询管径、流速、流量对照表 (表 2^[19])，可获得：地下深水井入口管径 DN 为 $\Phi 150 \text{ mm}$ 、流量约为 $100 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时，流速为 $1.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ；地下深水井入口管径 DN 为 $\Phi 300 \text{ mm}$ 、流量约为 $300 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ 时，流速为 $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2.3 基于 Comsol 创建水池的网格划分

在 Comsol 软件主屏幕界面选择设置参数栏，对参数进行编辑，其水池参数如表 3 所示。

水池上方设有 4 个热泵蒸发器回水口，工程上采用三用一备原则，此次仿真研究为了减少计算时间省略了备选热泵蒸发器，同时在水池的右下方设有 3 个热泵蒸发器的进水口，相同地，也省略了备用热泵蒸发器的进水口，在水池的左上方设有 3 个地下水源深井泵，通过旋流除砂器进入到水池的入口。

一般来说，稳态分析中，网格上的节点温度比实际温度要低^[20]。如果加密网格，节点温度将上升，但加密到一定程度后，节点温度不再显著上升，如图 5 所示。因此，划分网格单元越小，单元区间或空间内所容纳的单元数量越多，计算精度越高，但随着单元数量的增加会导致运算速度下降。网格参数详情如表 4 所示，网格划分结果如图 6 所示。

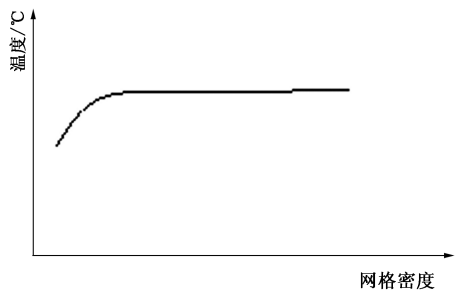


图 5 计算温度与网格密度变化示意图
Fig. 5 Schematic diagram of calculating temperature changing with mesh density

表 4 网格参数表

参数	数值
最大单元/m	7.50
最小单元/m	1.05
最大单元增长率/%	200.00
曲率因子	1.00
狭窄区域分辨率	0.10

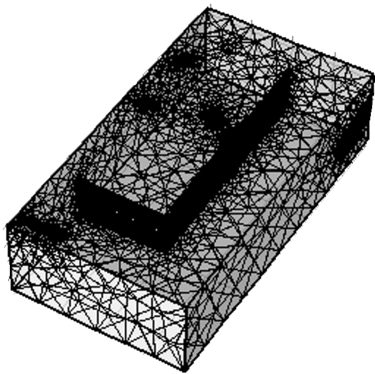


图 6 蓄热水池网格划分
Fig. 6 Meshing of thermal storage tank

2.4 通过 Comsol 对水池仿真工况进行分析

吉林省白城市当地冬季极寒、温度极低，为提升工作环境温度，采用热泵与蓄热水池结合的方式进行供暖。因热泵的工作机制，要求入口温度不低于 8℃方可正常工作，结合吉林白城车间在 0：00～8：00 时间段内无余热的实际情况，经记录 0：00 时池内水温度为 19℃，温降速度为 5℃·h⁻¹，故 2：00 时池内水温度低于 10℃，热泵的工作效率下降。此时深井泵开启，将地下水（9～11℃）注入水池中，将低温池水通过溢流口回灌到地下，提升水池内温度，使热泵可以正常运行。

2.5 通过 Comsol 对水池的温度场分布情况进行分析

2.5.1 仿真前对环境参数的设置

本次仿真将周围环境温度设置为 10℃，即较低的温度环境，并选择标准大气压，水池内流动介质属性参数如表 5 所示，墙体属性参数设置如表 6 所示。

表 5 水介质属性参数表

参数	数值
动力粘度/(Pa·s)	1.010×10 ⁻³
比热率	1.000
电导率/(S·m ⁻¹)	5.500×10 ⁻⁶
恒压热容/(J·(kg·K) ⁻¹)	4.191
密度/(kg·m ⁻³)	1.000×10 ³
导热系数/(W·(m·K) ⁻¹)	0.590

表 6 墙体属性参数表

参数	数值
密度/(kg·m ⁻³)	1.20×10 ³
导热系数/(W·(m·K) ⁻¹)	1.02
恒压热容/(J·(kg·K) ⁻¹)	388.40

2.5.2 工艺水温度变化及水池温度分布

本次仿真采用瞬态研究，步长设为 1 s，时间设为 7000 s，相对容差设为 0.1。对水池温度场变化情况进行 7000 s 的仿真，其温升随时间的变化曲线如图 7 所示。由图 7 可以清晰地看到水池内的水温的变化情况，从温度变化的情况可以看出，水池内的水温在 3000 s 时达到 8.258℃，温度升高 3.258℃，保证了热泵的正常开启。

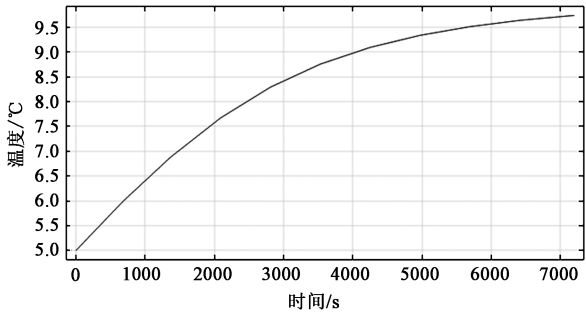


图 7 水池温度随时间的变化曲线
Fig. 7 Change curve of water temperature in tank with time

水池在 3000 s 时，温度分布梯度如图 8 所示。通过图 8 可以清楚地看出水池内任意位置的水温情况及冷、热水在水池内的混合情况。

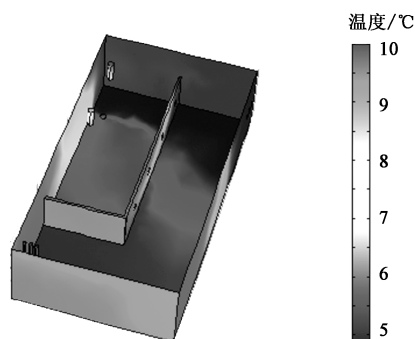


图 8 蓄热水池的温度分布梯度图

Fig. 8 Temperature distribution gradient map of thermal storage tank

根据图 8 看出,虽然通过地下水可以提升池水温度,但是提升热泵进水口处水温以保证热泵正常运行的目的仍未达到。因此,提出一种假设:将热泵取水口延伸至水池中间部位,热泵取水口接近高温水源能否解决热泵因获取不到热水而无法保证正常运行的问题,对此进行仿真研究。改进后的水池在 600 s 时的温度分布状态如图 9 所示,在 3000 s 时的温度分布状态如图 10 所示。通过对比发现,改进后

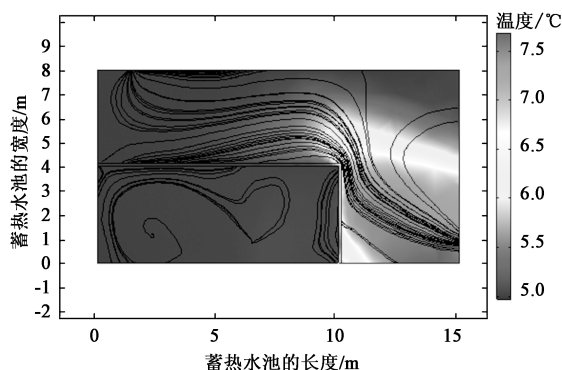


图 9 600 s 时蓄热水池的温度分布梯度图

Fig. 9 Temperature distribution gradient map of thermal storage tank at 600 s

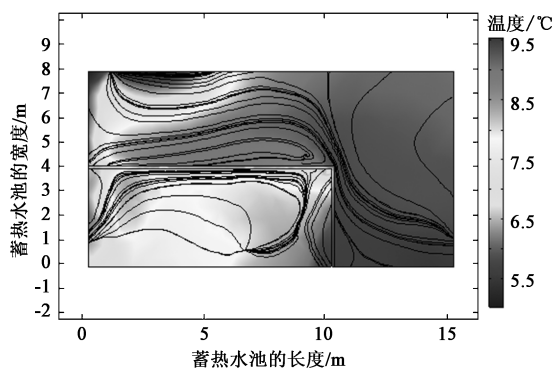


图 10 3000 s 时蓄热水池的温度分布梯度图

Fig. 10 Temperature distribution gradient map of thermal storage tank at 3000 s

的水池大大地提高了热泵的工作效率,池内水温提升问题得到了解决。

3 蓄热水池的工艺分析及改进

3.1 蓄热水池的工艺分析

对现有工艺系统分析发现,为了满足系统工艺的要求,需对水池的进、出口温度进行控制。而控制的方法仅能通过热成像仪等物理方法对进、出口温度进行测量得出数据,对于蓄热水池内水介质的流动情况及水池内水介质的温度分布梯度并不知晓,什么原因导致热泵取水口处获取不到热水难以回答,整个水池呈“黑箱”状态,控制方面也存在一定的误差。

3.2 蓄热水池的工艺改进结果

现场考察水池结构并记录数据及参考水池的工程图纸分析研究,根据余热回收系统的真实数据,基于 Comsol 软件对蓄热水池建模并对池内水介质的温度分布梯度及水介质的流速流向进行仿真,绘制出水池内水介质的温度分布梯度及流场分布,以及在任一时刻水池内任一位置水温分布情况及水介质的流动状态;了解了水池内存在冷热水难混合的“死水”区域;分析并解决了热泵获取不到热水的问题;解决了水池“黑箱”状态。更加准确地、精确地控制蓄热水池温度,对水池温度变化情况通过时间节点进行实时控制,整个余热回收系统控制方面获得很大突破。

4 结论

(1) 以实际数据为基础,通过 Comsol 软件对蓄热水池建模、仿真,可以清晰地模拟出水介质复杂的温度变化情况,为实时控制水温打下了基础。

(2) 利用 Comsol 软件仿真水池在 3000 s 时的水温为 9.5 °C,现场透过观察孔测量出的水温记录为 9.6 °C,说明仿真结果与实际结果相符,利用仿真技术实时控制水池温度变化可行。

(3) 热泵取水口延伸至水池中部的假设可行,解决了热泵获取不到热水的难点,达到了预期效果,提升了整个余热回收系统的效率。

参考文献:

- [1] 张朝晖,王若楠,高钰,等. 热泵技术的应用现状与发展前景[J]. 制冷与空调,2018,18(1):1-8.

- Zhang Z H, Wang R N, Gao Y, et al. Application status and development prospect of heat pump [J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2018, 18 (1): 1-8
- [2] 杜克磊, 赵俊兰, 刘谏, 等. 我国地源热泵应用研究现状与展望 [J]. 北方工业大学学报, 2018, 30 (2): 96-104, 95.
- Du K L, Zhao J L, Liu J, et al. Review of application of ground source heat pump in china [J]. Journal of North China University of Technology, 2018, 30 (2): 96-104, 95
- [3] 单士宾. 热泵技术在我国钢铁冶金行业的应用与发展 [J]. 设备管理与维修, 2019, (14): 168-169.
- Shan S B. Application and development of heat pump in china's iron and steel metallurgy industry [J]. Plant Maintenance Engineering, 2019, (14): 168-169.
- [4] 郭东东. 循环冷却水余热回收供热节能分析 [J]. 低碳世界, 2018, (3): 49-50.
- Guo D D. Energy-saving analysis of heat recovery from circulating cooling water [J]. Low Carbon World, 2018, (3): 49-50.
- [5] 刘峰. 某工厂工业冷却水余热回收利用的探讨 [J]. 有色冶金设计与研究, 2017, 38 (6): 122-123, 127.
- Liu F. On waste heat recovery and utilization from industrial cooling water in one plant [J]. Nonferrous Metals Engineering & Research, 2017, 38 (6): 122-123, 127
- [6] 白守忠, 井广宇. 铜冶炼厂冷却循环水余热利用问题的探讨 [J]. 有色冶金节能, 2018, 34 (5): 51-54.
- Bai S Z, Jing G N. Discussion on the waste heat utilization of cooling circulating water in copper smelter [J]. Energy Saving of Non-ferrous Metallurgy, 2018, 34 (5): 51-54.
- [7] 庄乾伟. 循环冷却水采用闭式和开式冷却塔方式分析 [J]. 能源科技, 2020, 18 (10): 58-59, 63.
- Zhuang Q W. Analysis on application of closed cooling tower and atmospheric cooling tower to circulating cooling water [J]. Energy Science and Technology, 2020, 18 (10): 58-59, 63.
- [8] 王中本, 符亚丽, 陈春涛. 工业设备冷却循环水系统改造的技术分析 [J]. 化工管理, 2020, (25): 69-70.
- Wang Z B, Fu Y L, Chen C T. Technical analysis of industrial equipment cooling and circulating water system transformation [J]. Chemical Enterprise Management, 2020, (25): 69-70.
- [9] 李慧星, 杨云龙, 郑纤芳, 等. 严寒地区公共浴池废水余热回收利用研究 [J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2019, 35 (2): 373-378.
- Li H X, Yang Y L, Zheng X F, et al. Study on waste water recovery and utilization of public bath pool wastewater in severe cold area [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University: Natural Science, 2019, 35 (2): 373-378.
- [10] 何梦渊, 李永生, 潘涛, 等. 基于吸收式热泵的锅炉烟气余热回收工艺系统性能研究 [J]. 石油与天然气化工, 2019, 48 (1): 115-120.
- He M Y, Li Y S, Pan T, et al. Investigation on the system performance of waste heat recovery for boiler flue gas based on absorption heat pump [J]. Chemical Engineering of Oil & Gas, 2019, 48 (1): 115-120.
- [11] Singh S, Dasgupta M S. CO₂ heat pump for waste heat recovery and utilization in dairy industry with ammonia based refrigeration [J]. International Journal of Refrigeration, 2017, 78: 108-120.
- [12] 赵志强, 张爱涛, 樊劲辉, 等. 烟气余热回收再利用技术在轮毂制造工艺中的应用 [J]. 机械工程与自动化, 2020, (4): 199-200.
- Zhao Z Q, Zhang A T, Fan J H, et al. Application of flue gas waste heat recovery and reuse technology in hub manufacturing process [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2020, (4): 199-200.
- [13] 吴晓龙, 乔玲敏, 口妍君, 等. 一种新型换热器在工业废水余热回收中的应用 [J]. 暖通空调, 2020, 50 (5): 91-94.
- Wu X L, Qiao L M, Kou Y J, et al. Application of a novel heat exchanger to industrial wastewater heat recovery [J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2020, 50 (5): 91-94.
- [14] 余荣学. 某电子厂余热回收与热泵节能改造方案 [J]. 制冷, 2018, 37 (3): 90-94.
- Yu R X. The energy-saving retrofit proposal of heat recovery and heat pump for electronic factory [J]. Refrigeration, 2018, 37 (3): 90-94.
- [15] 李硕, 董志永, 蒋大明, 等. 余热回收再利用系统 [J]. 设备管理与维修, 2020, (16): 161-162.
- Li S, Dong Z Y, Jiang D M, et al. Waste heat recovery and reuse system [J]. Plant Maintenance Engineering, 2020, (16): 161-162.
- [16] Sathiyamoorthy M, Biglari D M. A case study: The waste heat recovery and utilization for power generation in a cement plant (Phase-1) [J]. International Journal of Advanced Research in IT and Engineering, 2016, 5 (4): 1-26.
- [17] 郭江峰, 张海燕, 崔欣莹, 等. 低品位烟气余热回收换热器热力学分析 [J]. 工程热物理学报, 2020, 41 (1): 39-45.
- Guo J F, Zhang H Y, Cui X Y, et al. The thermal analysis of low grade flue gas heat recovery heat exchanger [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41 (1): 39-45.
- [18] 王哲, 何亚东. 波面板换热器在某厂余热回收技术中的适用性分析 [J]. 建材与装饰, 2019, (14): 217-218.
- Wang Z, He Y D. Applicability analysis of corrugated plate heat exchanger in waste heat recovery technology of a plant [J]. Construction Materials & Decoration, 2019, (14): 217-218.
- [19] 谷峡, 边喜龙, 韩洪军. 新编建筑给排水工程师手册 [M]. 黑龙江: 黑龙江科学技术出版社, 2005.
- Gu X, Bian X L, Han H J. New Manual of Water Supply and Drainage Engineer for Building [M]. Heilongjiang: Heilongjiang Science and Technology press, 2005.
- [20] Haneyoshi T, Kawamura A, Hoft R G. Waveform compensation of PWM inverter cyclic fluctuating loads [J]. IEEE Transactions on Industry Application, 2008, 24 (4): 582-589.