

文章编号: 1671-6612 (2025) 02-274-07

# 某玻纤厂余热回收利用设计研究

任贵阳<sup>1</sup> 鲍玲玲<sup>1,2</sup> 吕向阳<sup>3</sup> 黄昀铎<sup>1</sup> 赵力<sup>1</sup>

(1. 河北工程大学 能源与环境工程学院 邯郸 056038;

2. 河北省暖通空调工程技术创新中心 邯郸 056038;

3. 北京中矿赛力贝特节能科技有限公司 北京 100083)

**【摘要】** 为充分利用余热资源,降低能源消耗和企业运行成本,实现节能减排。以邢台市某玻纤厂余热回收为例,在其工艺流程中加设管式换热器,以回收厂区余热并用于满足职工生活的热水用水需求,同时,为废气烟气排放订制了一套高效净化设备,以确保环保排放标准的达成。通过详细的工程实例计算和分析,验证了该改造方案的可行性与有效性。研究结果表明:该项目每年可节约39.87万元的成本,同时替代了相当于42吨标准煤的燃烧,显著降低了企业的运行成本和能源消耗。此外,该改造项目还有效减少了温室气体和其他污染物的排放,对环境保护具有积极意义。

**【关键词】** 余热利用;管式换热器;经济分析;环境分析

中图分类号 TK018 文献标志码 A

## Design of Waste Heat Recovery and Utilization in a Glass Fiber Factory

Ren Guiyang<sup>1</sup> Bao Lingling<sup>1,2</sup> Lv Xiangyang<sup>2</sup> Huang Yunxin<sup>1</sup> Zhao Li<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, 056038;

2. Hebei HVAC engineering technology innovation center, Handan, 056038;

3. Beijing Zhongkuang Sailibete Energy Saving Technology Co., Ltd, Beijing, 100083)

**【Abstract】** In order to make full use of waste heat resources, reduce energy consumption and enterprise operating costs, to achieve energy conservation and emission reduction. In this paper, the waste heat recovery of a glass fiber factory in Xingtai City was taken as an example, and a tube heat exchanger was added in its process to recover the waste heat of the factory and meet the hot water needs of the workers. Additionally, a customized exhaust gas purification system has been installed to ensure compliance with emission standards. The feasibility and effectiveness of the transformation scheme was verified through detailed engineering example calculation and analysis. The research results show that the project can save 398,700 yuan per year, while replacing the equivalent of 42 tons of standard coal combustion, significantly reducing the enterprise's operating costs and energy consumption. In addition, the renovation project has effectively reduced the emission of greenhouse gases and other pollutants, which has positive significance for environmental protection.

**【Keywords】** Waste heat utilization; Tubular heat exchanger; Economic analysis; Environmental analysis

## 0 引言

在当今全球能源资源日益枯竭的背景下,寻找

可再生能源和高效能源利用途径成为了全球能源

行业的重要课题。如何有效利用余热资源,尤其是

基金项目:中深层热储温度衰减机制及可再生能源耦合系统研究(E2023402072)

作者简介:任贵阳(2000.09-),男,在读硕士研究生,E-mail:2436121726@qq.com

通讯作者:鲍玲玲(1982.02-),女,博士,教授,E-mail:lingling5934@163.com

收稿日期:2024-08-30

玻璃纤维生产过程中的余热, 成为了当前研究的热点之一。玻璃纤维作为重要的功能材料和结构材料, 具有质量轻、强度高、耐高低温、等优异性能, 同时具备一定程度的功能可设计性, 在国内生产总量稳居全球首位, 显示出巨大的产业潜力和发展空间<sup>[1]</sup>。但是玻纤企业普遍存在大量余热资源没有得到利用的情况, 包括炉体散热、高温产品余热、冷却介质余热、废气和废料余热等<sup>[2]</sup>, 其中废气余热几乎占燃料消耗量的 1/3 以上, 占余热资源的一半以上, 是主要的余热资源<sup>[3]</sup>。

我国是目前碳排放量最大的国家之一, 玻纤企业作为引发的其因素之一, 主要因为在产业链中低温烟气余热回收利用率较低, 而当这部分热量排入空气时, 不但造成了能源的巨大浪费, 而且造成了环境的热污染<sup>[4,5]</sup>, 为顺应时代, 解决当前环境和气候问题, 我国明确提出“力争在 2030 年前达到碳达峰, 力争在 2060 年前实现碳中和”的战略目标<sup>[6]</sup>。据此全社会对节能减排的提倡和企业对节能降耗越来越重视, 如何合理利用玻纤烟气余热, 减少能源的浪费和碳排放, 提高能源利用效率, 提升经济效益等成为行业内一种关注和研究的问题<sup>[7,8]</sup>。通过深入研究和详细分析, 本文旨在为玻纤行业的可持续发展和能源利用效率提升提供理论支持和实际应用的指导, 为相关领域的学术研究和工程实践提供新的思路和方法。

## 1 项目概况

本项目的改造对象是邢台市某玻纤厂, 项目宿舍楼建筑面积 3620.1m<sup>2</sup>, 共四层, 有房间 92 间; 食堂、澡堂建筑面积 2186.53m<sup>2</sup>, 共三层。玻纤厂工艺流程中, 大部分低温余热没有得到有效利用, 直接排放到室外, 存在能源利用效率低以及热污染等问题, 其中烘干物料产生的废气(90℃)以及燃气热风炉排放的烟气(95℃)占主要部分, 废气烟气回收装置如图 1 所示。现利用这些余热资源对厂区宿舍楼和食堂及澡堂供暖, 单位面积采暖热指标为 55W/m<sup>2</sup>, 室内设计温度参数宿舍楼、食堂和澡堂分别为 18℃、18℃和 25℃, 邢台新玻纤厂位于沙河市南和区, 气象参数如表 1 所示, 经过计算可得冬季建筑采暖热负荷共需 320kW。项目结合玻

纤厂供暖实际情况, 制定技术方案, 通过回收烘干物料产生的废气以及燃气热风炉烟气等余热资源, 用于宿舍楼及食堂和澡堂建筑房间采暖, 达到节能减排, 降低运行成本的目的。



图 1 废气烟气回收设备

Fig.1 Exhaust gas recovery equipment

表 1 玻纤厂气象参数

Table 1 Meteorological parameters of glass fiber plant

序号	名称	单位	系数
1	冬季采暖室外计算温度	℃	-8.0
2	冬季通风室外计算温度	℃	-1.6
3	冬季空气调节室外计算温度	℃	-12.0
4	冬季空气调节室外计算湿度	%	57%
5	日平均温度≤+5℃的天数	d	105
6	日平均温度≤+5℃的平均温度	℃	0.5
7	冬季极端最低温度	℃	-20.2

## 2 系统改造方案设计

针对玻纤厂现有系统进行优化改造, 包括余热回收系统和废气烟气净化系统。余热回收系统旨在高效回收生产过程中排放的余热; 废气烟气净化系统则通过多级处理设备, 确保排放烟气符合环保标准, 解决污染物排放。

### 2.1 烘干物料余热回收系统

玻纤厂烟气余热利用通过在原来的工艺流程之上加设两台管式换热器, 从而利用低温余热供厂区使用。系统的工艺流程图如图 2 所示。烘干室配有 3 台燃气热风炉, 冬季最多开 2 台热风炉, 在排烟处加设管式换热器, 排烟温度约为 95℃, 通过利用介质换热吸收烟气中的余热量, 输送到供水干管, 供给厂区使用。

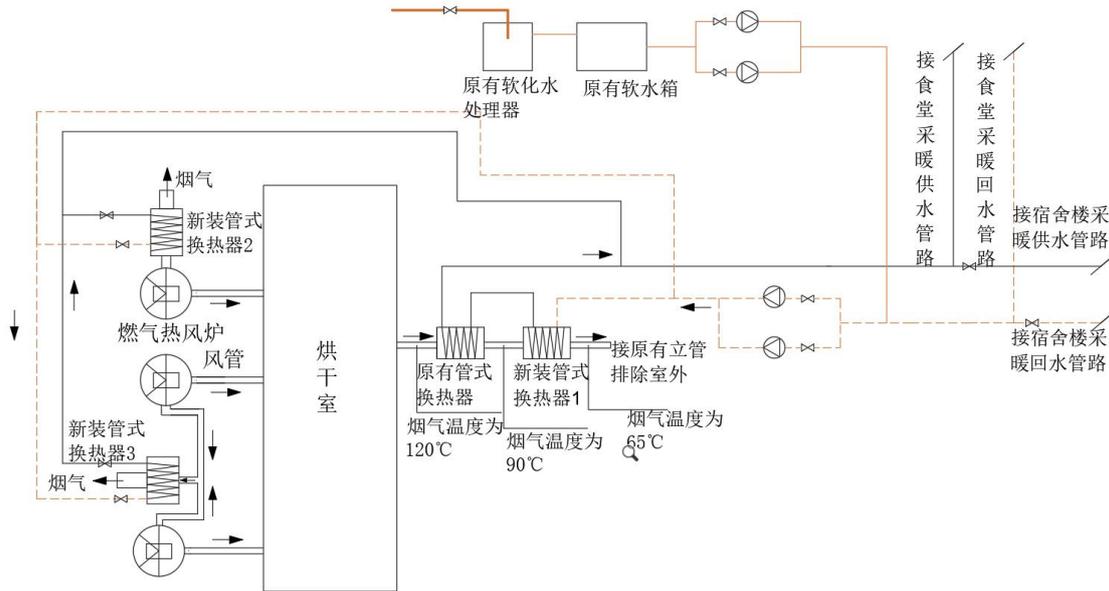


图 2 烘干物料的废气余热系统工艺流程图

Fig.2 Process flow chart of waste gas waste heat system for drying materials

烘干物料的废气余热回收系统分成两个部分，第一部分是烘干室余热回收：燃气热风炉向烘干室鼓吹高温空气，用以烘干物料，高温空气经过烘干室烘干物料后，排潮风量温度约为 120℃，经原有管式换热器吸收一部分余热后的排潮风温度约为 90℃，进入新装的管式换热器 1。系统采暖回水与流进新装管式换热器 1 的排潮风（90℃）进行换热，回水吸收一部分热量后，再流进原有管式换热器与 120℃的废气进行二级换热并送至采暖供水管供暖。第二部分是燃气热风炉烟气的余热回收：原有燃气进入热风炉中燃烧后直接排到大气中，现将该部分高温废气通入新装的管式换热器 2 和 3 中，与采暖回水进行换热进行充分换热，回水吸收热量后经采暖供水管路供给厂区使用，管式换热器如图 3 所示。



图 3 管式换热器

Fig.3 Tube heat exchangers

### 2.1.1 热平衡计算

热负荷计算公式如式（1）：

$$Q = C_p \rho V (t_2 - t_1) \quad (1)$$

式中： $Q$ 为可提取的热负荷，kW； $C_p$ 为定压比热容，kJ/(kg·℃)； $\rho$ 为排潮气平均密度，kg/m<sup>3</sup>； $V$ 为烘干炉排潮量，m<sup>3</sup>/h； $t_2$ 、 $t_1$ 为换热器排潮风进出口温度，℃。

### 2.1.2 余热资源回收热力计算

烘干物料废气余热分析：

二线用于烘干物料经原有管式换热器后废气温度约 90℃左右，烘干炉总排潮量 36000~40000m<sup>3</sup>/h，回收热量后温度降至为 65℃。

$$Q_1 = C_p \rho V (t_2 - t_1) = 1.05 \times 1.00 \times (36000 \sim 40000) / 3600 \times (90 - 65) = 262.5 \sim 291.5 \text{ kW}$$

冬季最大开燃气热风炉 2 台，每台燃气热风炉风量为 5200m<sup>3</sup>/h，排烟温度 95℃，经换热器后温度降为 65℃。燃气热风炉排烟余热资源可按式计算：

$$Q_2 = C_p \rho V (t_2' - t_1') = 1.06 \times 1.00 \times 5200 / 3600 \times (95 - 65) = 45.9 \text{ kW}$$

2 台热风炉可提取的总热量为 91.8kW。

### 2.1.3 建筑热负荷汇总

回收余热的目的是为解决厂区宿舍楼及食堂冬季采暖，热负荷详细如表 2 所示。

表 2 热负荷统计表

Table 2 Statistical table of heat load

序号	热负荷种类	单位	数值	备注
1	宿舍	kW	200	
2	食堂	kW	120	含澡堂
3	合计	kW	320	

#### 2.1.4 热平衡分析

通过上述综合分析, 本项目中可利用余热资源, 按照本方案设计参数, 烘干物料的废气回收热量为 262.5~291.5kW, 燃气热风炉烟气回收的热量为 91.8kW, 则提取余热后可实现的最大供热能力为 383.3kW。宿舍楼及食堂和澡堂所需供暖负荷为 320kW, 考虑室外管网损失 10%热负荷, 本项目废气回收热量较富裕, 可以满足宿舍楼及食堂和澡堂的冬季热负荷。

#### 2.1.5 余热系统设备选型

##### (1) 余热回收换热器

系统增设 1 台排潮风管式换热器和 2 台热风炉排烟管式换热器。

烘干室排放的废气按供热能力 290kW 进行换热器选型。用于物料烘干后废气温度为 90℃左右, 烘干炉排潮量为 36000~40000m<sup>3</sup>/h, 废气热量被回收后温度降至为 65℃。废气被新增换热器吸收热量后经排潮风机排至室外。

燃气热风炉排放的废气按供热能力 50kW 进行管式换热器选型。热风炉排放的废气温度为 95℃左右, 风量为 5200m<sup>3</sup>/h, 烟气热量被回收后温度降至为 65℃。烟气被管式换热器吸收热量后排放。管式换热器的技术参数如表 3 所示。

表 3 管式换热器技术参数

Table 3 Technical parameters of tubular heat exchanger

名称	型号参数	参数
排潮风管式换热器	额定换热量	290kW
	废气侧进出口温度	90/65℃
	水侧进出口温度	55/40℃
热风炉管式换热器	额定换热量	50kW
	废气侧进出口温度	95/65℃
	水侧进出口温度	55/40℃

##### (2) 热水循环水泵

冬季采暖时, 排潮风及热风炉排放的废气回收的热能还包括澡堂洗浴热负荷共计约 450kW, 进

入排潮风及燃气热风炉排放的烟气管式换热器的供水温度按照 40/55℃设计。

$$q = \frac{0.86 \times Q}{\Delta t} \quad (2)$$

式中:  $q$  为循环水泵水流量 m<sup>3</sup>/h;  $Q$  为所需热负荷, kW;  $\Delta t$  为供水温差, 为 15℃。

则循环水泵的水流量为 0.86×450/15=25.8m<sup>3</sup>/h。考虑到水泵运行过程中各种因素影响, 流量富裕系数取值为 1.10, 故水泵流量为 25.8×1.1=28.38m<sup>3</sup>/h。根据现场调研, 水泵输送扬程可按 40m 考虑。在机房内安装热水循环泵 (1 用 1 备), 其参数如表 4 所示。

表 4 热水循环泵

Table 4 Hot water circulation pump

名称	型号参数	参数
热水循环泵	流量/(m <sup>3</sup> /h)	29
	扬程/m	40
	功率/kW	7.5

##### (3) 末端设备

经换热器换热后 55/40℃热水送至宿舍和食堂建筑末端, 对现有末端进行改造, 改造末端为风机盘管, 其型号如表 5 所示。

表 5 风机盘管型号

Table 5 Fan coil models

	宿舍楼风机盘管	食堂风机盘管
设备型号	FP-340	FP-340/FP-510
数量	101	28/22
供热量	3.12kW	3.12/4.85kW
风量	高档风量 340m <sup>3</sup> /h	高档风量 340/510m <sup>3</sup> /h
初口静压	12Pa	12Pa
电量	30W	30W
进出口水温	55℃/40℃	55℃/40℃

##### (4) 其他设备

余热综合利用系统需要附属设备包括定压补水装置 1 套、软化装置 1 套、软水箱 1 个等附属设备, 并在原有的基础上改造。并配备电控系统, 包括: 配电、PLC 和触摸屏等。可实现系统的自控, 保证系统正常运行的同时, 提高供热服务质量, 降低能源消耗。

## 2.2 废气烟气净化系统

在玻纤厂余热利用过程中, 排放的烟气中常含

有颗粒物、酸性气体、有机挥发物及其他有害成分。为了满足环保排放标准，同时保障设备和人员安全，烟气需经过一套完整的净化处理系统，如图 4 所示。整个处理流程包括以下步骤：

(1) 烟气首先进入喷淋塔，喷淋塔内安装有多层喷淋装置，通过喷射碱性溶液与烟气充分接触，去除烟气中的酸性污染物（如二氧化硫、氯化氢等）以及部分颗粒物，此过程不仅降低了烟气的温度，还减小了其腐蚀性。

(2) 从喷淋塔出来的烟气中含有大量水分，需经过除水过滤器进行分离。除水过滤器通过重力沉降方式，将水雾和液滴有效去除，避免后续处理设备受潮或结垢，确保系统运行稳定；除去水分后的烟气进入干式过滤器，这一阶段的主要目的是去除烟气中残留的微细颗粒物<sup>[7]</sup>。过滤器采用高效滤

材，可拦截极小的颗粒，进一步提高烟气的清洁度，确保后续设备的处理效果。

(3) 净化后的烟气进入催化燃烧炉，进行深度处理。催化燃烧炉通过提高温度和使用催化剂，促进烟气中的有机挥发物（如苯类、醛类等）与氧气反应，分解为无害的二氧化碳和水蒸气。这一过程去除了烟气中难以处理的有机污染物。

(4) 烟气进入吸附箱进行最终处理。吸附箱内填充有高效吸附材料，专门吸附烟气中残留的重金属、二恶英及其他微量有害物质，确保排放气体的质量达到甚至优于国家环保标准。

(5) 经过一系列净化处理后的洁净烟气，最终通过高烟囱排放到大气中。高烟囱的设计不仅有助于烟气的扩散，还能有效降低地面浓度，进一步减少对周边环境的影响。



(a) 喷淋塔



(b) 除水过滤器及催化燃烧炉



(c) 吸附箱



(d) 烟囱

图 4 烟气净化设备

Fig.4 Flue gas purification equipment

### 3 经济环保效益分析

本项目投资范围为河北冀中新材料有限公司宿舍楼、食堂、澡堂余热利用供暖工程总承包的设备购置、建安工程和设计费，项目总投资预计约为 148.5 万元。

#### 3.1 经济效益分析

改造前，若只采用燃气锅炉对宿舍楼和食堂及澡堂采暖，每年运行费用如下所示，采用燃气锅炉参数如表 6 所示。

表 6 燃气锅炉参数

Table 6 Parameters of gas boiler

项目	数值	备注
燃气锅炉容量	0.52t/h	同等供热负荷
燃气锅炉额定耗气量标定	75(m <sup>3</sup> /h)/t	
燃气锅炉耗电量标定	10kW/(t/h)	单位蒸吨耗电量
单台燃气锅炉额定耗气量	39m <sup>3</sup> /h	

供暖季燃气锅炉平均每小时耗气量 23.4m<sup>3</sup>/h, 运行 105 天, 且冬季燃气容易遭遇气荒以及供气不稳定, 冬季燃气费用按 4.5 元/m<sup>3</sup> 考虑, 改造前玻纤厂采用燃气锅炉用热, 设备全年运行费用为 27.43 万元, 工人费用预算为 6 万元, 设备每年维护费用为 3 万元, 全年运行费用为 36.43 万元<sup>[9]</sup>。

采用余热利用系统采暖运行费用, 邢台新玻纤厂余热综合利用系统年运行费用理论计算如表 7 所示。

表 7 余热利用后运行费用

Table 7 Operating costs after waste heat utilization

项目	数值	备注
供热能力(包括排潮风第一级原有管式换热器)	554.3~583.3kW	实际负荷 450kW
采暖季供热耗电	1.32 万 kWh/a	调节系数取 0.70
运行电费		
电价	0.70 万 kWh/a	—
余热利用费用	0.93 万元/a	冬季
维修费	—	2.0 万元/a 冬季
余热综合利用系统运行费用		
合计	2.93 万元/a	—

从表 7 可以清晰看出, 加设管式换热器回收余热之后, 利用余热供玻纤厂区用热, 则余热综合利用系统年运行费用为 2.93 万元。经济效益对比分析, 邢台玻纤厂余热利用系统与采用燃气锅炉供暖系统运行维护费用对比计算如表 8 所示。

表 8 经济效益对比

Table 8 Comparison of economic benefits

供热期间	采用燃气锅炉采暖全年运行费用	36.43 万元/a
效益对比	余热综合利用系统供暖期间运行费用	2.93 万元/a
全年节约运行费	全年相比原系统节约运行费用	33.5 万元/a

本方案拟通过利用余热后, 可用于邢台新玻纤厂宿舍楼及食堂建筑采暖等, 实现节能减排, 降低运行成本的目的。通过理论测算, 在实现以上条件基础上每年可节约运行费用 33.5 万元, 项目回收期为 4.43 年。

### 3.2 环境效益分析

通过加设管式换热器, 实现余热资源的回收利用, 节约了能源, 减少了污染物排放。能源折算系数: 1m<sup>3</sup> 天然气折合标煤 0.714kg, 1kWh 电能折合标煤 0.32kg。

当只选用燃气锅炉采暖, 燃气锅炉每年冬季运行消耗的天然气量为 5.896 万 m<sup>3</sup>, 耗电量为 1.3104 万 kWh。根据能源折算系数, 采用燃气锅炉每年消耗燃气折算成标煤为 42097.44kg, 耗电量折算成标煤为 4193.28kg, 则总共消耗 46290.72kg 标煤。加设管式换热器利用余热后, 新玻纤厂改造后每年耗电量为 1.32 万 kWh, 水泵每年运行消耗的电量折算成标煤为 4224kg, 采用余热利用与燃气锅炉对比每年可节约 42 吨标煤<sup>[10-12]</sup>。如表 9 所示, 每燃烧 1 吨标准煤将排放一定量的污染物。

表 9 1 吨标准煤污染物排放定额

Table 9 Pollutant emission quota of 1 ton standard coal

污染物	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	烟尘
标煤/kg·kg <sup>-1</sup>	8.5	2600	7.4	11

根据表计算可得, 厂区余热在经过回收利用之后每年玻纤厂可减少的排放污染物量如表 10 所示。

表 10 每年减排污染物

Table 10 Annual emission reductions

污染物	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	烟尘
标煤/吨	0.357	109.2	0.311	0.462

综上所述, 余热利用改造系统节能效果明显, 环保效益显著。

## 4 结论

此次邢台玻纤余热利用项目的实施符合国家对碳达峰、碳中和工作及节能环保相关政策的要求, 通过回收玻纤厂低温余热, 提高了厂区能源利用率, 与传统燃气锅炉相比, 每年可节约运行费用 39.87 万元, 经济效益显著, 且经改造后的系统正常使用寿命周期达 20 年, 以此计算 20 年寿命期内

节约运行费达 797.4 万元,且改造后每年节约 42 吨标煤消耗量,相应可减排二氧化碳 109.2 吨,减排二氧化硫 0.357 吨,减排氮氧化物 0.311 吨,减排粉尘颗粒物 0.462 吨。

玻纤厂余热综合利用项目是一项具有良好环境效益和社会效益的环保工程,不仅降低了玻纤厂能源消耗和运行成本,且在运行过程中,该系统没有附加污染物排放,完全满足环保要求。通过推广这种高效的余热回收技术,工业企业可以在提升经济效益的同时,积极践行绿色发展理念,助力可持续发展目标的实现,能够有效解决目前供热方式面临的能耗大、能源利用率低等问题,同时充分利用余热资源,具有良好的节能环保效益。

#### 参考文献:

- [1] 乔磊,王晓磊,陈聪.玻璃纤维窑炉烟气余热利用的探讨[J].节能,2021,40(2):69-70.
- [2] 邢文忠,章林,洪秀成,等.利用玻纤厂烟气脱氟副产物合成莫来石晶须[J].人工晶体学报,2018,47(3):664-668.
- [3] 王建生.日用玻璃窑炉烟气余热回收利用技术探讨[C].2018 年全国玻璃窑炉技术研讨交流会论文集汇编,2018:189-193.
- [4] 马建兴.我公司玻璃窑炉烟气余热回收利用及探讨[J].玻璃,2009,36(2):34-35.
- [5] 贾鹏程.气体燃料高温富氧燃烧特性的研究[D].北京:北京交通大学,2012.
- [6] 苗瑞灿,高小荣,孙彩霞,等.“双碳”目标下烟气余热回收技术的研究进展[J].化工管理,2023(24):65-68.
- [7] 黄昀铤,潘翠叶,桑敏敏,等.河北省某公共建筑节能改造方案分析研究[J].制冷与空调,2024,24(6):62-67.
- [8] 李现文.玻纤低温余热利用技术在冬季采暖中的应用研究[J].玻璃纤维,2020,(5):40-42.
- [9] 拓炳旭,狄育慧,张亚娟.印染废水余热回收利用及经济效益分析[J].制冷与空调,2017,31(1):102-106.
- [10] 张言军,何海龙,崔大梁.办公建筑内区余热回收利用研究[J].制冷与空调,2023,23(12):68-73.
- [11] 鲍玲玲,王子勇,赵阳.邢台煤矿空压机余热回收系统改造设计[J].煤炭工程,2019,51(7):26-29.
- [12] 熊楚超,罗景辉,魏莹,等.分体式矿井排风余热回收井口防冻系统应用探究[J].煤炭工程,2020,52(12):12-15.
- [8] Royne A, Dey C J, Mills D R. Cooling of photovoltaic cells under concentrated illumination: a critical review[J]. Solar energy materials and solar cells, 2005,86(4):451-483.
- [9] 朱丽,陈萨如拉,杨洋,等.太阳能光伏电池冷却散热技术研究进展[J].化工进展,2017,36(1):10-19.
- [10] Aneli S, Arena R, Gagliano A. Numerical Simulations of a PV Module with Phase Change Material (PV-PCM) under Variable Weather Conditions[J]. International Journal of Heat & Technology, 2021,39(2).
- [11] 王珍珍.建筑一体化光伏相变系统电热性能实验与模拟研究[D].天津:天津大学,2017.
- [12] SINGH R P, XU H, KAUSHIK S C, et al. Effective utilization of natural convection via novel fin design & influence of enhanced viscosity due to carbon nano-particles in a solar cooling thermal storage system [J]. Solar Energy, 2019,183.
- [13] KARTHICK A, MURUGAVEL K K, GHOSH A, et al. Investigation of a binary eutectic mixture of phase change material for building integrated photovoltaic (BIPV) system [J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2019,207(C).
- [14] POUYAN T, I M H, M M J, et al. Effect of airflow channel arrangement on the discharge of a composite metal foam-phase change material heat exchanger [J]. International Journal of Energy Research, 2020,45(2).
- [15] 赵松方.基于碳纳米管的三维结构构筑、复合材料制备与性能研究[D].北京:中国科学院大学,2015.
- [16] 陈正浩.石蜡/月桂酸-膨胀石墨复合相变材料的制备及性能研究[D].内蒙古:内蒙古科技大学,2020.

#### (上接第 223 页)