

文章编号: 1671-6612 (2021) 04-467-07

# 基于可再生能源的 相变蓄能新风预处理系统的实验研究

罗怡琳 许鸿翔 王 勇

(重庆大学土木工程学院 重庆 400045)

**【摘要】** 新风能耗为环控系统的主要能耗之一。为提高系统能效,提出了一种新风预处理系统,利用低辐射太阳能、夜空冷辐射与相变材料相结合的一种相变蓄能单元,其结构由空气换热器、水换热器和低温相变材料石蜡组成。通过该装置储存太阳和夜空冷辐射的能量,耦合空气、水换热器实现对空气的预热和预冷处理,并搭建实验台进行了相变过程、空气处理过程的冬季工况实验测试研究。通过装置的蓄热和释热实验得到在预热工况下,新风进口温度为8℃时,经该装置预处理后空气平均温升为6℃,系统有效运行时间为10h。利用能效指标对该装置进行节能评价,结果表明基于该装置的新风预处理系统与传统空调新风处理相比,节能率约69.9%,处理1m<sup>3</sup>/h的新风年节电量可达4kWh左右。

**【关键词】** 新风能耗;低辐射太阳能;夜空冷辐射;低温相变材料  
中图分类号 TK02 文献标识码 A

## Experimental Investigation of Phase-change Energy Storage Fresh Air Pretreatment System Based on Renewable Energy

Luo Yilin Xu Hongxiang Wang Yong

(School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing, 400045)

**【Abstract】** The energy consumption of fresh air is one of the major energy consumption of the environmental control system. In order to improve the energy efficiency of the system, a fresh air pretreatment system is proposed, which is a thermal energy storage unit (TESU) combining low radiation solar energy, night sky cold radiation and phase change material (PCM). The structure is composed of air heat exchanger, water heat exchanger and low temperature PCM paraffin. The device is used to store the energy from the sun and night sky, and the air and water heat exchangers are coupled to preheat and precool the air. An experimental platform is built to test and study the phase change process and the air pretreatment process in winter. Through the heat storage and release experiments of the device, the results show that when the inlet temperature of fresh air is 8℃, the average temperature of air rises by 6℃ in the preheating condition, and the effective operation time of the system is 10 hours. The energy saving evaluation of the device is carried out by energy efficiency indexes. The results show that compared with the traditional air conditioning system, the energy saving rate of the fresh air pretreatment system based on the device is about 69.9%, and the annual electricity saving can reach about 4KWh with the pretreatment of 1m<sup>3</sup> fresh air.

**【Keywords】** fresh air energy consumption; low radiation solar energy; night sky cold radiation; low temperature PCM

作者简介: 罗怡琳 (1995.10-), 女, 在读研究生, E-mail: 3028143097@qq.com

通讯作者: 王 勇 (1971.8-), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: cqwangyong@cqu.edu.cn

收稿日期: 2021-06-17

## 0 引言

随着人们生活水平的提高和空调的广泛应用,能源消耗也随之增加。高能耗带来的环境污染与传统能源的消耗殆尽已经成为全球密切关注的话题。一直以来人们对室内的空气品质有着较高的要求,增大新风量是消除室内空气污染、保持室内空气品质最直接有效的方法<sup>[1]</sup>。在建筑空调总能耗中,新风能耗约占 30%以上,增大新风量的同时也会导致新风能耗的增加,而目前大多使用高品位的空调冷热水处理新风负荷,新风处理能耗很高<sup>[2,3]</sup>。

为了降低新风处理的能耗,通常采用排风热回收、土壤新风换热系统以及太阳能新风预热系统。排风热回收是通过回收排风的能量来对新风进行预热和预冷,根据热回收方式的不同,分为显热热回收和全热热回收,前者仅能回收排风中的显热,后者能够回收排风的显热和潜热。郭佳佳等<sup>[4]</sup>针对上海地区采用热回收装置进行了节能量的分析,并对显热回收和全热回收的节能量进行了比较,结果表明,使用热回收装置回收的能量很可观,而相比显热回收装置来看,采用全热回收装置的节能效果更加明显,但是许多建筑受空间限制无法设置排风系统,而对于密闭性较差的建筑来说,排风难以收集,所以,排风热回收的方法会受到排风量和位置的限制,在许多建筑中难以应用。土壤新风换热系统是利用浅层地表土壤中所蕴藏的能量来对新风进行预热或预冷的系统<sup>[5]</sup>。吕伟华等<sup>[6]</sup>提出了一种利用浅表层地热能的新风预处理系统,并对其节能潜力进行了研究,结果表明,与传统的采用高品位的空调冷热水对新风进行处理的方式相比,处理相同的新风负荷,节能率为 59.8%~72.9%,但这种方式所需的初投资较高。太阳能新风预热系统目前多用于太阳能丰富的严寒高原地区。马文生等<sup>[7]</sup>验证了太阳能与新风预热耦合供热系统在严寒地区近零能耗建筑中的应用效果,测试结果表明,在严寒地区近零能耗建筑中,通过采用补充热源加热,太阳能与新风预热耦合供热系统可有效维持室内热环境稳定性,太阳能保证率至少可达 31%以上,但对于太阳能贫乏地区,例如四川、重庆,1、2、10~12 月份太阳月总辐射为 80~200MJ/m<sup>2</sup>,冬季太阳辐射强度低,不利于太阳能技术的应用<sup>[8]</sup>。因此,如何实现低辐射太阳能的利用是目前最大化利用可再生资源的有效方向。

太阳能因受到多种因素的综合影响,存在保证率较低、能量密度较低等缺点,难以保证对其利用的稳定性和持续性<sup>[9]</sup>。既有的研究表明,大量学者集中在利用高辐射太阳能满足末端需求的基础上进行相变材料的蓄能研究,保证太阳能利用的稳定性,实现冬季太阳能热利用的时空转移<sup>[10-13]</sup>,同时夏季晴朗的夜间利用夜空辐射装置与太空进行辐射换热的高效清洁被动式制冷方式的研究也得到了大量成果<sup>[14-17]</sup>,而如何有效地将低辐射太阳能与夜空自然冷源结合来实现蓄能的研究则相对较少。

基于以上研究现状和最大化利用可再生资源的思路,提出了一种将低辐射太阳能、夜空冷辐射以及相变蓄能三者联合用于新风预处理的装置,通过合理设计装置结构,选择合适熔点、凝固点的相变材料,完成了新风的预处理过程,并且有效利用了天然冷热源,降低了利用高品位空调冷热水处理的新风负荷,实现新风负荷的分级处理,从而实现环控系统的节能。

## 1 新风预处理系统介绍

### 1.1 系统原理

如图 1 所示,与传统空调系统相比,该系统在原有的新风机组前放置相变蓄能器,该装置使用低温相变材料作为储存和释放能量的媒介,在夏季晴朗的夜晚利用夜空冷辐射将冷量储存在相变材料中,在白天将这部分冷量释放出来预冷新风;在冬季白天利用低辐射太阳能并将热量储存在相变材料中,在夜晚将热量释放出来预热新风。室外空气先经过相变蓄能器进行预处理,若经过预处理之后新风已达到送风温度,可以通过旁通管直接送入室内,若没有达到,需送入新风机进一步处理再送入室内。

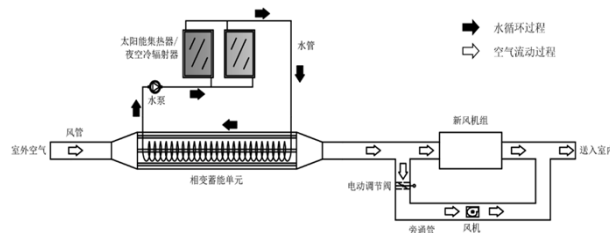


图 1 新风预处理系统的原理图

Fig.1 Schematic diagram of fresh air pretreatment system

### 1.2 相变蓄能器结构参数

如图 2 所示,相变蓄能装置主要包括水换热器、

空气换热器、外壳以及单元里填充的相变材料, 具体尺寸如表 1 所示。水换热器由一根螺旋铜管组成, 空气换热器由 9 根铝管构成, 外壳由聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 材料制成, 壳体顶部设有一个灌装口, 用于相变材料的填充, 底部设有一个排泄口, 用于排出杂物或液态相变材料, 避免相态变化时出现溢流, 壳体外部包裹聚苯乙烯泡沫保温层, 以减少热量的损失。



图 2 相变蓄能单元的原型

Fig.2 Image of the TESU prototype

表 1 相变蓄能器尺寸参数

Table 1 Geometrical parameters of the TESU

组成	参数	尺寸
外壳	外径	210mm
	内径	200mm
	长度	1000mm
空气换热器	保温层厚度	70mm
	风管数量	9 根
	风管外径	20mm
	风管内径	18mm
	长度	1000mm
水换热器	螺旋管螺距	40mm
	螺旋外径	90mm
	螺旋内径	70mm
	长度	1000mm
	螺旋管外径	10mm
	螺旋管内径	8mm

该装置共布置了 41 个测点, 分别测试石蜡、水、空气的温度变化情况, 本文主要研究蓄热过程中石蜡的温度变化和释热过程中空气的温度变化,

因此选择如图 3 所示的 10 个测点, 其中圆形测点用来测定空气的温度, 放置于装置中心的风管之中, 方形测点用来测定石蜡的温度, 放置于中心风管上方 10mm 的位置。

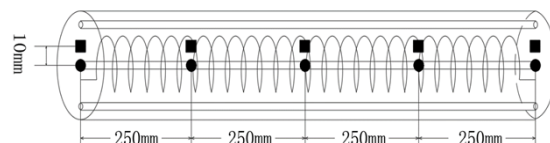
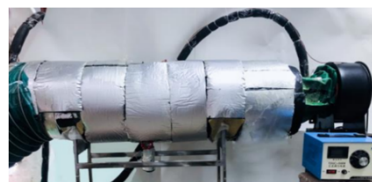


图 3 T 型热电偶测点布置图

Fig.3 T-thermocouple layout of measuring points

### 1.3 实验台介绍

该实验台由电热水箱、循环水泵、离心风机、相变蓄能单元、流量计、热电偶、变压器、巡检仪组成, 在实验台的搭建中, 用电热水箱来代替太阳能集热器, 实物装置如图 4 所示, 各实验设备的参数和功能如表 2 所总结。



(a) 相变蓄能单元、风机和变压器



(b) 空气入口风管



(c) 流量计



(d) 电热水箱

图 4 实验台装置实物图

Fig.4 Photographs of the experimental apparatus

表 2 各实验设备的参数和功能

Table 2 Parameters and functions of the experimental equipment

名称	类型	主要参数	主要功能
循环水泵	离心式	额定扬程 8m 额定流量 1.5m <sup>3</sup> /h 额定功率 0.2kW	为传热流体提供流速和压头
电加热器	电阻式	加热功率 0~6kW 加热范围 30~75°C 加热精度 ±0.5°C	恒温或恒功率加热水箱中的水， 加热蓄热单元
水箱	间接式	容积 0.5m×0.5m×1.0m	
流量计	涡轮式	准确度 7 级 测量范围 0~0.4m <sup>3</sup> /h	测量传热流体的流量
数据采集仪	34972A	测量范围 -40~+85°C	测定蓄热实验和释热实验时蓄能单元
热电偶	T 型	测量精度 ±0.5°C	内部相变材料、水管、风管的温度
风机	离心式	额定功率 240W 风量 630m <sup>3</sup> /h	为室外空气进入蓄能单元提供流速和动力
变压器	单相接触式	额定功率 500W 输出电压 0~300V	调节水泵的电压，从而改变 水泵的转速以改变水流量

1.4 相变材料选取

不同的相变材料具有不同的性质，相变材料的特性是影响蓄能系统蓄热/释热效果的重要参数。因此相变蓄能系统中的相变材料必须根据不同的应用情况进行选择。通常相变材料应具有以下特性：高导热系数、高相变潜热、无腐蚀性、体积变化小、无毒性、不易燃、无过冷、成本低等<sup>[14]</sup>。

现有相变材料很难满足所有指标特性，因此选择相变材料应该考虑应用对象的主要影响指标。由于此装置主要针对太阳能贫乏地区的低辐射太阳能以及夜空冷辐射能的利用问题，根据文献<sup>[15]</sup>中太阳能集热器的出口温度的计算公式，以重庆市为例，通过计算可得冬季太阳能集热器的平均出水温度为 34°C，由文献<sup>[13]</sup>可知，重庆地区夏季夜空冷辐射器的平均出水温度为 19°C，因此选取低温相

变材料——石蜡作为蓄热材料，装置共填充石蜡 22.5kg。使用差式扫描量热仪测定了石蜡的相变温度、潜热和比热容等参数，相变材料的融化凝固 DSC 曲线如图 5 所示，主要物性参数如表 3 所示。

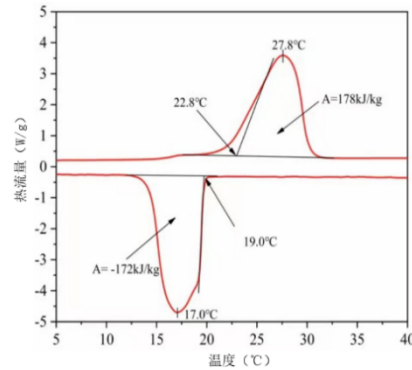


图 5 相变材料融化凝固的 DSC 曲线

Fig.5 DSC melting and solidification curve of the PCM

表 3 相变材料热物理特性参数

Table 3 Thermophysical properties of the PCM

名称	熔点 °C	凝固点 °C	融化潜热 kJ/kg	凝固潜热 kJ/kg	导热系数 W/(m·K)	密度 kg/m <sup>3</sup>	比热容 kJ/(kg·K)
参数	22.8	19	178	172	0.2	800	2.0

2 实验设计及数据分析

2.1 实验运行设计

蓄热实验在冬季白天室温为 10°C 的情况下进

行，通过电热水箱将水加热至 34°C 后通过水泵进行循环将热量储存于石蜡中，水流量为 0.15m<sup>3</sup>/h，采用 34°C 的进水温度来匹配重庆地区太阳能集热

器的平均出口温度。释热实验在冬季夜晚室外空气温度为 8℃ 的情况下进行, 通过风机将室外冷空气送入蓄能装置中进行预热, 空气流量为 60m<sup>3</sup>/h。蓄热和释热实验分别在相同的工况下进行了两组。

## 2.2 实验数据分析

通过巡检仪记录数据, 将数据进行汇总处理可以得到相变蓄能单元中石蜡的温度变化和室外空气通过相变蓄能器前后的温度变化。

### 2.2.1 石蜡相态变化分析

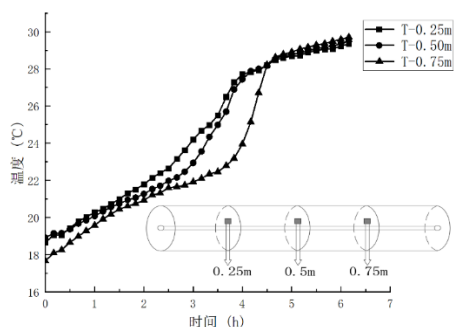


图 6 相变蓄能单元中部石蜡轴向温度变化图

Fig.6 Axial temperature variation diagram of paraffin in the middle of the TESU

装置进出口的测点靠近门窗, 受环境的影响波动较大, 因此在 5 个测点中选择了装置中间的 3 个。从图 6 可以看出: 在进水温度为 34℃ 的情况下, 石蜡温度由 18℃ 升至 30℃, 相态由固态变为液态, 在 6 个小时内完成蓄热过程。在实验开始时装置进口处石蜡温度最高, 出口处石蜡温度最低, 但温度相差很小, 在实验过程中依旧保持这种趋势, 在实验最后蓄热完成趋于稳定一致。由图 6 还可以看出: 在前 2h, 温度曲线的斜率较小, 在 2~5h, 斜率增大, 5h 后斜率逐渐趋于零, 这是由于实验开始时装置中为固态石蜡, 换热过程只有导热换热, 随着石蜡的融化, 导热换热和对流换热同时进行加快了蓄热过程, 最后蓄热完成时装置内部石蜡换热均匀, 温度趋于一致。

### 2.2.2 空气温度变化分析

从图 7 可以看出: 在释热实验中, 当新风入口温度为 8℃ 时, 经过装置预处理后, 空气进出口最大温差为 11℃, 平均出口温度为 14℃, 平均升温 6℃。由图 7 还可以看出: 在实验开始时, 曲线斜率最大, 不同截面的温差最大, 之后斜率和温差都逐渐减小, 最后趋于稳定, 这是由于最开始装置内液态石蜡与空气的温差最大, 随着石蜡开始凝固, 温

度逐渐降低, 换热速率随之下降, 热量释放完后换热过程结束。

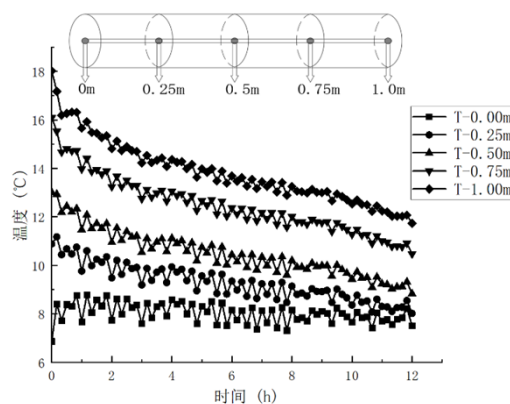


图 7 中心风管内部轴向温度变化图

Fig.7 Axial temperature variation diagram of the central duct

由上可知, 用 34℃ 低温热水即可完成蓄热过程, 利用石蜡的相变储存这部分热量, 在释热过程中可使室外新风平均升温 6℃, 若此时的新风温度已达到送风温度, 则可以直接送入室内, 若没有达到, 则需送入新风机进一步处理, 而且整个释热过程持续时间约为 10h, 能充分保证整个夜晚的热量需求。

## 3 相变蓄能器经济性分析

### 3.1 评价指标

冬季在预热过程中, 已知空气进出口温度以及空气流速可得出空气在某一时刻的得热量, 计算见式 (1)。

$$q_1 = c_{air} \dot{m}_{air} (T_{air2} - T_{air1}) \quad (1)$$

式中:  $q_1$  为某一时刻空气的得热量, kJ;  $\dot{m}_{air}$  为空气的质量流量, kg/h;  $c_{air}$  为空气的比热容, kJ/(kg·K);  $T_{air2}$  为空气出口温度, °C;  $T_{air1}$  为空气进口温度, °C。

则空气的总得热量为  $Q_1$ , 计算见式 (2)。

$$Q_1 = c_{air} \dot{m}_{air} \int_0^t (T_{air2} - T_{air1}) dt \quad (2)$$

式中:  $Q_1$  为预热过程空气的得热量, kJ; 其他参数含义同上。

在夏季预冷过程中, 空气的总失热量为  $Q_2$ , 计算见式 (3)。

$$Q_2 = c_{air} \dot{m}_{air} \int_0^t (T_{air1} - T_{air2}) dt \quad (3)$$

式中:  $Q_2$  为预冷过程空气的失热量, kJ; 其他参数含义同上。

在该新风预处理系统中, 水换热器循环水泵的功率计算见式 (4)。

$$W_p = \frac{\rho \cdot G_w \cdot H_p}{102 \cdot \eta_w} \quad (4)$$

式中:  $W_p$  为循环水泵的功率, kW;  $\rho$  为水的密度, 取值  $1000\text{kg/m}^3$ ;  $G_w$  为水的流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $H_p$  为辐射板到水换热器的循环阻力, 取值  $15\text{kPa}$ ;  $\eta_w$  表示水泵的效率, 取值  $0.65$ 。

该新风系统由于增加了预处理装置使得风机能耗增大, 由此造成的送风机附加功率计算见式 (5)。

$$W_F = \frac{V_F \cdot P_F}{3600 \cdot \eta_F} \quad (5)$$

式中:  $W_F$  为送风机的功率, W;  $V_F$  为风机所输送的风量,  $\text{m}^3/\text{h}$ ;  $P_F$  为相变蓄能单元以及送风管路的风阻, 取值  $7\text{kPa}$ ;  $\eta_F$  表示风机的效率, 取值  $0.65$ 。

利用相变蓄能单元的新风预处理系统的总能耗  $E_1$  计算见式 (6)。

$$E_1 = W_p + W_F \quad (6)$$

采用传统空调系统处理同样的换热量时, 系统的能耗  $E_0$  计算见式 (7)。

$$E_0 = \frac{Q}{EER} \quad (7)$$

式中:  $Q$  为新风负荷, kJ;  $EER$  为传统空调系统的平均能效, 制热时取值为  $3.0$ , 制冷时取值为  $3.6^{[16]}$ ; 其他参数含义同前。

利用相变蓄能单元进行新风预处理系统的能耗相对于采用传统空调系统进行新风处理的能耗, 其节能率  $\eta$  计算见式 (8)。

$$\eta = \frac{E_0 - E_1}{E_0} \times 100\% \quad (8)$$

### 3.2 节能潜力预测

以重庆市一个风量为  $1200\text{m}^3/\text{h}$  的新风系统为例进行研究, 计算采用重庆地区供热时间从 11 月 15 日~次年 2 月 15 日, 供冷时间从 6 月 1 日~9

月 31 日, 即冬季空调使用天数为 90 天, 每天使用时间为 8 小时, 根据文献[17], 从 11 月至次年 2 月, 只有 11 月和 2 月的太阳辐射在  $150\sim 200\text{MJ}/\text{m}^2$ , 装置可投入使用, 12 月和 1 月的太阳辐射均低于  $100\text{MJ}/\text{m}^2$ , 因此冬季取 35% 的保证率。夏季空调使用天数为 120 天, 每天使用时间为 8h, 根据文献[13], 从 6 月至 9 月, 只有 6 月和 9 月的夜空辐射器出水温度约为  $19^\circ\text{C}$ , 满足装置的使用条件, 7 月和 8 月的出水温度为  $23^\circ\text{C}$ , 因此夏季取 50% 的保证率。一个相变蓄能单元所处理的风量为  $60\text{m}^3/\text{h}$ , 则共需 20 个相变蓄能单元。

利用该装置的新风预处理系统节电量计算见式 (9)。

$$D = \frac{Q \times d \times t}{EER} \times \varphi \quad (9)$$

式中:  $D$  为节电量, 其中  $D_1$  为冬季节电量,  $D_2$  为夏季节电量, kWh;  $Q$  为新风预处理节能量,  $Q_1$  为冬季新风预热节能量,  $Q_2$  为夏季新风预冷节能量, MJ/h;  $d$  为空调运行天数,  $d_1$  为冬季运行天数,  $d_2$  为夏季运行天数;  $t$  为每天空调使用时间, h;  $EER$  为空调系统平均能效,  $EER_1$  为冬季空调系统能效,  $EER_2$  夏季空调系统能效;  $\varphi$  为保证率, 其

中  $\varphi_1$  为冬季的保证率, 取 35%,  $\varphi_2$  为夏季的保证率, 取 50%。

通过计算可得, 针对一个蓄能单元, 在预热过程中, 节能量为  $4.2\text{MJ}/\text{h}$ , 在预冷过程中, 节能量为  $3.8\text{MJ}/\text{h}$ , 冬季运行节电量为  $100\text{kWh}$ , 夏季运行节电量为  $140\text{kWh}$ 。因此针对整个新风量为  $1200\text{m}^3/\text{h}$  的系统, 全年运行节能量为  $160\text{MJ}/\text{h}$ , 节电量为  $4800\text{kWh}$ , 节能率为 69.9%。

### 3.3 回收周期

重庆市电价表如表 4 所示。

表 4 重庆市电价表

每户每月用电量 $P/\text{kWh}$	电费/(元/kWh)
$P \leq 200$	0.52
$200 < P \leq 400$	0.57
$P > 400$	0.826

该建筑用电属于商业用电, 故按电费  $0.826$  元/度计算, 按照每年节电量为  $4800\text{kWh}$  计算, 则该系统每年节能收益为  $4000$  元。一个相变蓄能单元

的生产成本如表 5 所示, 该系统共有 20 个。

表 5 装置的生产成本

Table 5 The production cost of the TESU

装置	石蜡	水换热器	风换热器	冷/热辐射板	蓄能装置加工费	合计
价格(元)	300	400	100	700	500	2000

计算得回收周期为 10 年, 随着工业化标准的批量生产, 成本将进一步降低, 并且在冬夏季冷热辐射丰富的地区会有较高的太阳能和夜空辐射保证率, 因此回收期会相应降低, 将少于 10 年。

#### 4 总结

本文针对目前完全采用高品位的空调冷热水进行新风处理的方式存在耗能大, 系统能效低的问题, 提出基于可再生能源的相变蓄能新风预处理系统, 有效地利用了低辐射太阳能和夜空冷辐射, 并以重庆地区的气象条件为例, 在冬季通过蓄热和释热实验测得: 当通入 34℃ 低温热水时, 蓄能装置能在 6h 内完成蓄热过程; 当室外空气为 8℃ 时, 经过装置预热后平均温升为 6℃, 整个过程可持续约 10h。

最后分析了该新风预处理系统的节能效果: 在合理的设计和运行条件下, 该系统与传统的采用高品位的空调冷热水对新风进行处理的方式相比, 处理相同的新风负荷, 节能率约为 69.9%, 在重庆地区新风量为 1200m<sup>3</sup>/h 的新风系统中, 年节电量可达 4800kWh, 处理 1m<sup>3</sup>/h 的新风年节电量约 4kWh。

#### 参考文献:

- [1] 耿世彬, 李永, 韩旭. 室内空气品质与新风节能研究进展[J]. 建筑热能通风空调, 2009, 28(5): 32-38.
- [2] 刘纯青, 徐玉党. 夏热冬冷地区新风能耗分析[J]. 制冷与空调, 2005, 5(5): 54-57.
- [3] 徐伟, 吕燕捷, 孙德宇. 超低能耗建筑新风系统不同运行策略下新风热负荷计算[J]. 建筑科学, 2016, 32(4): 10-14.
- [4] 郭佳佳, 刘东. 上海市某商业建筑排风热回收系统节能性分析[J]. 建筑热能通风空调, 2021, 40(2): 78-81.
- [5] 杨艳芳. 土壤新风换热系统应用研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2013.
- [6] 吕伟华, 李先庭. 浅表层地热能用于新风预处理的节能潜力分析[J]. 建筑科学, 2019, 35(6): 116-121.
- [7] 马文生, 郭强, 黄霆鹤, 等. 严寒地区近零能耗建筑太阳能新风预热系统供暖效果实测研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(6): 370-374.
- [8] 丁勇, 连大旗, 李百战. 重庆地区太阳能资源的建筑应用潜力分析[J]. 太阳能学报, 2011, 32(2): 165-170.
- [9] 李安桂, 史丙金, 张婉卿, 等. 基于太阳能利用的相变蓄热水箱结构优化[J]. 太阳能学报, 2020, 41(2): 217-224.
- [10] 郑瑞澄, 路宾, 李忠, 等. 太阳能供热采暖工程应用技术手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [11] 刘殿贺. 太阳能相变蓄热供暖系统技术研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2020.
- [12] 韩玮, 王芳, 花王, 等. 相变蓄能太阳能热泵系统的蓄热特性研究[J]. 能源工程, 2019, (6): 54-60.
- [13] 董昌旭. 太阳能热利用中高温相变蓄热器特性研究及优化[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [14] 黄光勤, 杨小凤, 卢军. 夜空辐射器的换热特性及应用研究[J]. 建筑科学, 2016, 32(6): 123-128.
- [15] 黄光勤, 卢军, 杨小凤, 等. 水箱储冷夜空辐射制冷系统模型及其动态特性[J]. 暖通空调, 2017, 47(9): 143-147.
- [16] 王红梅. 夜空辐射致冷的数值模拟与应用分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
- [17] 刘兆辉, 马广兴. 夜空辐射换热器冷量采集性能的试验研究[J]. 可再生能源, 2012, 30(11): 50-54.
- [18] Panchal H. A comprehensive review of solar cooker with sensible and latent heat storage materials[J]. International journal of ambient energy, 2019, 40(3): 329-334.
- [19] 杨勋. 太阳能供暖系统相变蓄热装置匹配研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
- [20] GB 50189-2015, 公共建筑节能设计标准(附条文说明)[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- [21] 丁勇, 李百战, 罗庆, 等. 重庆市自然资源在改善室内热湿环境中的作用[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2007, 30(9): 127-133.