

孙婉纯, 梁国浩, 吴治将. 基于无机水合盐相变材料的新风蓄冷实验研究[J]. 广东化工, 2024, 51(5): 1-4
DOI:10.3969/j.issn.1007-1865.2024.05.001.

试验与研究

基于无机水合盐相变材料的新风蓄冷实验研究

孙婉纯^{1,2*}, 梁国浩², 吴治将²

(1. 华南理工大学, 广东 广州 510640; 2. 顺德职业技术学院, 广东 佛山 528300)

[摘 要]新风系统提高了空气质量,但其温度波动增加了空调系统的负担。相变材料能够利用低品位冷源进行蓄冷,控制新风温度波动。本研究将性能优异的无机复合相变材料与新风机耦合以搭建新风蓄冷系统,探究了 18、20、22℃ 的冷水工况下新风机的蓄冷性能,发现夜间高温冷源能够满足蓄冷要求,利用相变储热的方式转移用电高峰;此外,相变蓄冷模块能够将 28℃ 的新风温度降低 2.4~3℃;基于峰谷电价政策,该装置充分利用电价差可节约 54.8% 的电力成本。

[关键词]相变材料;无机水合盐;新风系统;复合材料;建筑节能
[中图分类号]TK02

[文献标识码]A

[文章编号]1007-1865(2024)05-0001-04

Experimental Research on Phase Change Fresh Air Ventilator Based on Inorganic Hydrated Salt Phase Change Materials

Sun Wanchun^{1,2*}, Liang Guohao², Wu Zhijiang²

(1. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Shunde Polytechnic, Foshan 528300, China)

Abstract: The fresh air system can improve the air quality, but its temperature fluctuations increase the burden on the air conditioning system. Phase change materials can use low-grade cold sources for cold storage and control fresh air temperature fluctuations. In this study, an inorganic composite phase change material with excellent performance is coupled with a fresh air ventilator to construct a phase change fresh air ventilator. And its cold storage performances under the cold water of 18, 20, and 22℃ are explored. It is found that the high temperature cold source at night can meet the cold storage requirements. Based on the phase change heat storage, the peak of electricity consumption can be shifted. In addition, the phase change cold storage module can reduce the fresh air with inlet temperature of 28℃ by 2.4~3℃. According to the peak-valley electricity price policy, the device can save 54.8% power cost by making full use of the electricity price difference.

Keywords: phase change material; inorganic hydrated salt; fresh air system; composite; building energy conversion

建筑、交通和工业是我国三大耗能部门,其中建筑能耗已经占到社会总能耗的 33%,并呈现逐年增长的趋势^[1]。伴随着工业的快速发展,全球二氧化碳排放总量一直居高不下,由此造成的温室效应直接地影响着人们的生活和工作^[2]。由于环境温度升高,室内热舒适度下降,人们对制冷和供暖的需求增大,由此导致建筑能耗逐步提高。另一方面,经济水平的提升促使了人们对空气质量的高要求,新风系统及设备越来越受消费者的欢迎。然而,由于环境污染,从室外引入的新风通常需要经过粉尘细菌过滤、温度、湿度调节等预处理过程才能送入室内,处理新风将进一步增加了建筑部门的总能耗^[3]。目前新风的温湿度预处理方式以空调冷水进行加热、冷却及除湿^[4-5],使用高品位能源也造成了较高的新风处理能耗。如何采用更加节能的方式处理新风,提高室内空气质量和舒适性,已经成为了学者们的研究热点。

降低新风能耗常用的方法有排风热回收和绿色能源新风预处理系统两种^[6-7]。排风热回收是通过回收从室内排出空气中的热量来对新风进行处理。根据回收方式的不同,排风热回收可分为显热型和全热型,全热型的效果由室内外温差和空气的含湿量差共同决定,显热型的效果则由室内外的温度差值来决定^[6]。王新华等^[8]对我国 5 个不同气候区域的典型城市进行了显热、全热回收分析,结果表明,在夏热冬暖地区的广州市,全热回收效果明显,最大值可达到 35.8596 kW,同时全热回收的效果比显热回收的效果好,两者最大差值可达 37.6713 kW。在暖地区的昆明市则显热回收量和全热回收量都不理想。然

而由于空间限制,许多建筑安装排风系统较为困难,且许多建筑密闭性较差,排风不易收集,部分排风热回收系统还存在新风、排风交叉感染的风险。

关于绿色能源新风预处理系统的研究方面,吕伟华等^[9]提出了一种利用地热能对新风预处理的空调系统,研究发现在相同的新风负荷下,节能率约为 59.8%~72.9%,但该方案的前期投入高,回收周期较长。杨慧敏^[10]提出了一种太阳能新风系统,通过集成太阳能技术和热回收技术,对该系统的节能潜力进行了研究,发现该系统降低新风热负荷 16.03%、降低冷负荷 48.11%,年累计耗电量降低了 3.92%,年累计综合节能量提高了 293.14%。但太阳能常因保证率低、供应不稳定、能量密度低等原因,而难以保证对该系统的使用稳定性和持续性^[11]。值得注意的是,相变储能技术能够解决热量供需在时间和空间上的不匹配问题,其应用研究已覆盖建筑墙体、地板辐射系统、空调系统等多个领域。相变储能技术以相变材料为工质,具有储能密度高、相容性好、成本低廉等优点。赵雷^[12]设计了太阳能相变储能新风高效换热系统,发现在太阳辐射量充足时段该装置可将室外空气最高加热到 35℃,在提高室内空气质量和舒适度的同时节约新风处理能耗。金磊^[13]等将相变蓄能装置与新风系统进行耦合,提高太阳能和夜空冷辐射能的利用率,并通过数值模拟对其性能进行研究,发现该系统在寒冷和严寒地区节能率高达 80%,在夏热冬冷地区最大节能率可达 75.9%。

为了进一步优化相变储能材料与新风系统的耦合应用,本

[收稿日期] 2023-06-30

[基金项目] 中国博士后科学基金面上项目“高性能有机-无机复合相变材料的研发及其强化传热研究”(2022M710846);广东省自然科学基金“相变主-被动建筑耦合系统的多层次协同调控机制研究”(2021A1515110317);广东省普通高校特色创新类项目“相变蓄冷材料的研制及其主-被动耦合系统的建筑节能应用研究”(2021KTSCX337)

[作者简介] 孙婉纯(1993-),女,广东揭阳人,讲师,博士,主要研究方向为高性能相变储能复合材料的研发及利用技术优化,包括新型相变材料和多功能耦合材料的研发、相变余热回收系统、相变换热器系统以及相变建筑热湿调控系统的应用研究。*为通讯作者。

研究基于前期研究基础,将相变温度适宜、相变焓值较高、循环性能优异的无机复合相变材料加工成储能模块,集成到新风系统的管道中,搭建相变新风系统;以低品位能源-高温冷却水为冷源,对其蓄冷和放冷性能进行实验探究;结合峰谷电价,对该相变新风系统的节能率 and 经济效益进行分析。

1 实验

1.1 实验原料

本研究采用的相变储能材料以六水氯化钙($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)为主要成分,具体比例参考自本团队前期研究工作^[14-15],制备相变储能材料需要用到的试剂如表 1 所示。

表 1 相变储能材料所用试剂
Tab.1 Reagents used for phase change materials

试剂	化学式	纯度/规格	生产厂家
无水氯化钙	CaCl_2	分析纯(AR)	西陇科学股份有限公司
氯化铵	NH_4Cl	分析纯(AR)	广州化学试剂厂
六水氯化锶	$\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	分析纯(AR)	天津市科密欧化学试剂有限公司
膨胀石墨	-	50 目	青岛东凯石墨有限公司

1.2 实验介绍

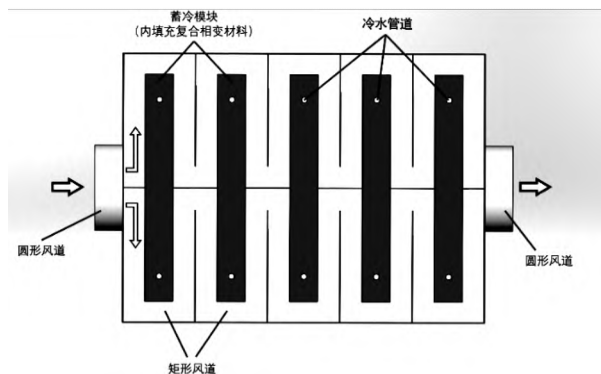


图 1 相变新风机示意图

Fig.1 Schematic diagram of phase change fresh air ventilator

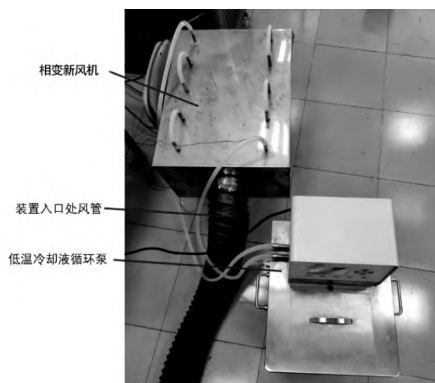


图 2 新风机测试装置

Fig.2 Testing device for fresh air ventilator

无机复合相变材料的制备:基于本团队前期研究, $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}:\text{NH}_4\text{Cl}:\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 为 91:8:1,其中 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 由无水氯化钙和纯净水制备而成, CaCl_2 与纯净水的质量比为 111:108。在磁力搅拌器的作用下,将以上三种原料按照一定比例混合均匀,再将液态下的混合物与膨胀石墨进行复合,获得无机复合相变材料。

相变新风机的搭建:相变新风机由冷水管路、新风通道和填充有复合相变材料的蓄冷模块组成,如图 1 所示。冷水管路为 5 个不锈钢弯管及用于连接弯管的透明硅胶软管组成,嵌入

安装在蓄冷模块中,实现冷水与复合相变材料的热交换;新风通道为蓄冷模组和不锈钢隔板所围成的通道,在填充完复合相变材料后通过安装顶盖来保证风道的密封性;其中,与蓄冷模块换热部分的风道截面形状为矩形,在风道的入口处及出口处的风道截面形状为圆形,设置为圆形的目的是方便连接外部风管;蓄冷模块由不锈钢板制成,通过安装顶盖保证其密封性,复合相变材料的填充密度为 353.51 kg/m^3 。

相变新风机性能测试装置的搭建:该测试装置由轴流风扇(浙江正泰,NTF2-8025/AC220S)、低温冷却液循环泵(南京先欧,XODC-2015)、相变蓄冷装置、K 型热电偶、分体式风速仪(希玛仪表,AS8336)、数据采集系统(是德科技,DAQ970A)组成。实验过程中,用低温冷却液循环泵为相变新风机冷水管道提供冷却水。测试装置如图 2 所示。

2 结果与讨论

2.1 复合相变材料的热物性表征

采用差示扫描量热仪(DSC)对相变材料和复合相变材料进行相变温度和相变潜热的测试,其 DSC 测量曲线如图 3 所示。

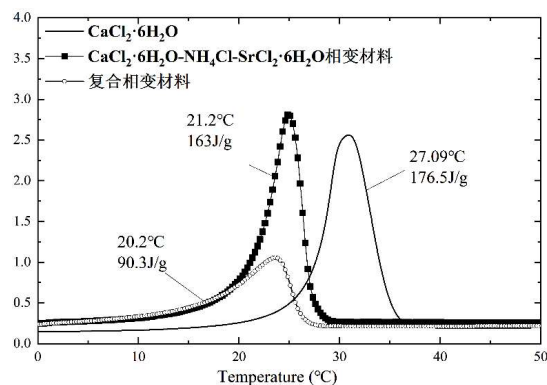


图 3 相变材料的 DSC 曲线

Fig.3 DSC curves of phase change materials

由图 3 中 DSC 曲线可知,与 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (无标记符号曲线)相比,实验中所制备的由 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 、 NH_4Cl 、 $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 组成的相变材料(带方形符号曲线)表现出 21.2°C 的相变温度和 163 kJ/kg 的高焓值。如前期研究所述,无机盐 NH_4Cl 能够有效降低 $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 的相变温度,使其适用于更低温度的蓄冷应用,同时保留较高焓值。为了克服相变材料液化后的流动性,实验中采用 50 目膨胀石墨与相变材料进行复合,其 DSC 曲线如图 3 中带圆形符号曲线所示,复合后相变材料焓值为 90.3 kJ/kg 。

2.2 相变新风机的蓄冷/放冷实验

为了探究不同温度冷却水对新风机的蓄冷效果,实验中采用了 18°C 、 20°C 、 22°C 的冷水进行蓄冷实验测试,再采用 28°C 的新风温度进行放冷实验测试。蓄冷实验中,通过低温冷却液循环泵向蓄冷模组中的冷水管路输送冷水,该装置内置水泵,水流量为 $0.78 \text{ m}^3/\text{h}$ 。放冷实验中,通过轴流风机从室外引入新风,模拟相变新风机对新风的预处理过程。实际测试中,相变新风机出口的平均风速为 0.46 m/s ,新风流量为 $117.00 \text{ m}^3/\text{h}$ 。在每个相变蓄冷模块中安装有两个热电偶,所以使用平均温度来表征蓄冷模块的温度。同样地,新风出口温度由出口的两个热电偶的平均温度来表征。

图 4 为 18°C 工况下相变新风机的蓄冷和放冷曲线。在蓄冷实验中,冷水从低温冷却液循环泵出发,到达新风机冷水管路之前为软管连接,冷水在该部分管路中流动时与外界环境存在热交换,因此到达相变新风机冷水管道时,其温度有所上升。如图 4 所示,当循环泵冷水设定温度为 18°C 时,新风机冷水入口平均温度为 18.5°C 。该工况下蓄冷过程共耗时 47 min ,相变蓄冷装置从平均温度 27.5°C 降至平均温度 20.3°C 。观察相变材料温度曲线可知,随着冷却水的通入,不同位置相变材料蓄冷模块之间的温差开始增大,并一直保持到实验结束。靠近冷水进口的相变材料最先表现出温度下降的趋势,而冷水出口处相变材料则是最后表现出温度下降的趋势。这是因为冷水在按照顺序经过相变材料模块 1、2、3、4、5 的过程中,由于

相变材料凝固放热,冷水温度逐步提高,与相变材料之间的温差逐渐缩小,因此位于后面顺序的相变材料发生凝固的时间晚,温度下降速率也较慢。

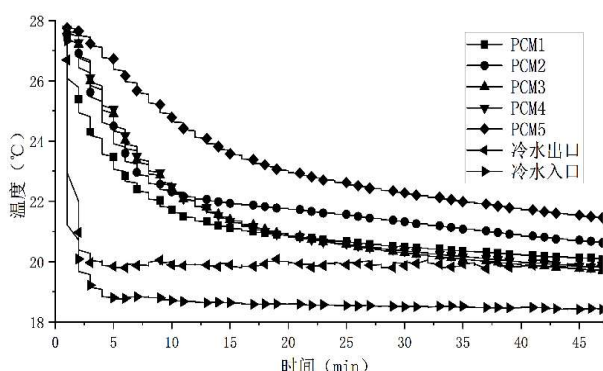


图 4 18 °C 冷水工况下新风机蓄冷实验温度曲线

Fig.4 Temperature curves of fresh air ventilator during cold storage experiment under 18 °C cold water working condition

图 5 为完成蓄冷实验后通入 28 °C 室外新风时相变新风机的放冷实验温度数据图。该工况下相变新风机的放冷实验共进行了 115 min, 当新风出口温度与相变新风机出口处相变蓄冷模块的温差小于 1 °C, 停止新风引入并结束放冷实验的测试。由图可以看出,随着室外高温新风的引入,相变蓄冷模块逐渐升温,释放冷量,对新风进行降温。观察曲线斜率可知,新风机刚引入时相变材料升温速度较快,此时相变材料与新风交换的热量为显热部分;当相变材料开始熔化吸热,温度上升的速率减缓,此时交换的热量为潜热部分;当相变材料熔化完成,温度上升速率再次增大,相变材料与新风交换的热量为显热部分。由图 5 可以看出,新风入口平均温度为 28.5 °C,在经过装置的预处理后,新风进出口温差最大值为 5 °C,平均出口温度为 25.5 °C,平均温差为 3 °C,相变蓄冷模块能够有效降低新风温度,减轻室内制冷负担,减少空调系统能耗。

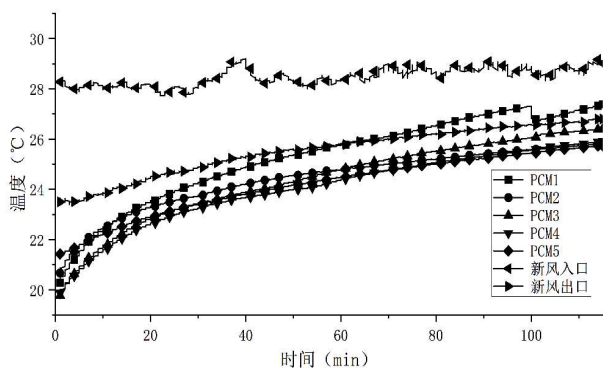


图 5 18 °C 冷水工况下新风机放冷实验温度曲线

Fig.5 Temperature curves of fresh air ventilator during cold discharging experiment under 18 °C cold water working condition

同样地,在冷水温度为 20 °C、22 °C 工况下对该相变新风机的热性能进行了测试,其测试结果列于表 2 中。对比三种工况的实验数据可知,随着循环泵所提供冷水的温度逐步升高,相变蓄冷模块所需蓄冷时间也在逐渐增加,这是因为冷水温度提高后,冷水与相变材料之间温差变小,导致热交换速率减缓,因而延长了相变材料的蓄冷时长。对比不同工况下的放冷时长,可以发现当冷水温度由 18 °C 提高到 20 °C,放冷时间几乎一致,相差 9 分钟;而当冷水温度进一步提高至 22 °C,放冷时间缩短至 77 分钟。基于前一节的分析可知,在放冷实验的过程中,相变材料根据时间顺序分别利用显热、潜热、显热将新风进行降温处理。因此,冷水温度越低,代表相变材料以显热形式储存的冷量越多,其降温能力更强。而当冷水温度提升至 20 °C 时,放冷时间理论上应该减少,实验中却延长了 9

分钟,这是因为室外新风温度存在不稳定性,由数据可知 20 °C 工况下,室外新风温度为 28.3 °C,相较于 18 °C 工况下新风 28.5 °C 下降了 0.2 °C。因此,在新风温度下降的前提下,20 °C 工况的新风预冷处理负担较小,其放冷时间延长了 9 分钟。类似地,在冷水温度提升至 22 °C 之后,加上新风进口温度高达 28.9 °C,其放冷时间缩短至 77 分钟。

上述结果表明,提高冷水温度将延长相变材料蓄冷所需时间,这意味着实际应用过程中应充分考虑蓄冷条件,以确定冷却水供水温度能够保证相变材料的充分蓄冷。在蓄冷时间充足的条件下,提高冷水温度无疑进一步拓宽了冷却水的选择范围,在部分地区,夜间的低温自来水就可以满足要求。在该实验测试中,冷水温度为 22 °C 的工况下该装置仍可将 28.9 °C 的新风降温至 26.2 °C,可以看到该装置对于高温冷源的利用有较好的效果,实际应用中可以采用品位较低的高温冷源来蓄冷。结合峰谷电价政策,充分利用昼夜温差,该装置将表现出较好的移峰填谷和节能减排效益。

表 2 不同工况下相变新风机热性能的实验数据

Tab.2 Experimental data on thermal performance of phase change fresh air ventilator under different working conditions

实验类型		18 ℃	20 ℃	22 ℃
蓄冷实验	实际入口冷水的平均温度/℃	18.5	20.9	22.7
	蓄冷时长/min	47	56	62
	初态相变材料的平均温度/℃	27.5	26.0	26.4
	终态相变材料的平均温度/℃	20.3	21.7	23.3
放冷实验	放冷时长/min	115	124	77
	新风入口平均温度/℃	28.5	28.3	28.9
	新风出口平均温度/℃	25.5	25.9	26.2
	进出口最大温差/℃	5.0	4.3	5.2
	新风进出口平均温差/℃	3.0	2.4	2.7

2.3 相变新风机的经济性分析

为了更加直观地分析相变新风机的经济效益,以工况 18 °C 的实验数据为例对空调制冷和相变新风机制冷的电力费用进行计算和对比。其中,根据所测量的进出口温差,新风在进行冷却预处理后的总失热量 Q_1 可根据公式(1)和(2)进行计算:

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

$$Q_1 = c_{air} q_{m,air} \int_0^{\tau} (T_{air1} - T_{air2}) d\tau \quad (2)$$

式中, q_1 为新风在某一时刻的失热量,单位为 kJ/h; $q_{m,air}$ 为新风的质量流量,单位 kg/h; c_{air} 为新风的比热容,单位为 kJ/(kg·K),取 1.005 kJ/(kg·K); T_{air1} 为新风入口温度, T_{air2} 为新风的出口温度,单位为 K。

相变材料在新风机蓄冷实验中的总失热量 Q_2 分为显热段和潜热段,可根据以下公式计算:

$$Q_{2,显热} = c_{PCM} m_{PCM} (T_{PCM1} - T_{solid}) \quad (3)$$

$$Q_{2,潜热} = h_{PCM} m_{PCM} \quad (4)$$

$$Q_2 = Q_{2,显热} + Q_{2,潜热} \quad (5)$$

式中, Q_2 为相变材料在新风机蓄冷实验中的失热量,单位为 kJ; m_{PCM} 为复合相变材料的质量,单位为 kg; c_{PCM} 为复合 PCM 的比热容,单位为 kJ/(kg·K),其测试值为 2.407 kJ/(kg·K); T_{solid} 为 PCM 开始凝固温度,根据图 3 该值定为 25 °C, T_{PCM1} 为复合 PCM 的初态温度, T_{PCM2} 为 PCM 的终态温度,具体数据可从表 2 获得,单位为 °C。

采用传统空调系统处理相同换热量的新风时,所需要的空调能耗 E_1 可通过以下公式计算:

$$E_1 = \frac{Q_1}{EER} \quad (6)$$

式中, Q_1 为新风在预处理过程的总失热量,单位为 kJ; EER 为空调系统的能效比,制冷时取值 3.6^[16]。

使用冷水机组提供冷量时的能耗 E_2 可通过以下公式计算:

$$E_2 = \frac{Q_2}{EER} \quad (7)$$

式中, Q_2 为复合 PCM 在蓄冷过程中的总失热量,单位为 kJ; EER 为系统的能效比,制冷时取值 3.6^[16]。

根据上述公式,新风预处理的失热量 Q_1 、相变材料在蓄冷过程中总失热量 Q_2 、传统空调能耗 E_1 、冷水机提供冷量对应的能耗 E_2 计算的结果如表 3 所示。

表 3 18 °C 工况下相变新风机的经济性分析指标

Tab.3 Economic analysis index of phase change fresh air fan under 18 °C working condition

计算参数	计算值
新风在预处理过程的总失热量 Q_1/kJ	873.7
相变材料在新风机蓄冷实验中的失热量 Q_2/kJ	945.84
新风进出口平均温差/°C	3.0
采用传统空调系统处理所需能耗 E_1/kJ	242.69
冷水机组为相变蓄冷模块提供冷量所需能耗 E_2/kJ	262.73
夜间低谷电价(0:00~8:00)/(元/kW·h)	0.48
日间平均电价(8:00~24:00)/(元/kW·h)	1.1475
相变蓄冷新风机可节省电力成本/%	54.8

表 2 中电价信息以佛山市为参考,其中日间平均电价由平段电价(0.93 元/kW·h, 8:00~9:00、12:00~19:00、22:00~24:00)和高峰电价(1.51 元/kW·h, 9:00~12:00、19:00~22:00)计算得到的。在假设白天使用新风系统的前提下,传统空调系统即开即用,在日间电价平段和高峰段运行;而相变蓄冷新风机基于相变材料的热量储存功能,能够在夜间低价电时间完成冷量的储存,在白天供应给新风机使用,实现了移峰填谷,利用电价差节省用户的电力成本。根据该实验的温度数据,不考虑材料成本的前提下,该相变新风机相比于传统空调制冷能够节省 54.8 % 的电力成本,经济效益明显。

3 结论

本论文搭建了填充无机复合相变材料的相变新风机,采用相变温度范围为 20~25 °C 的相变材料作为蓄冷材料,在夏季环境下对其新风调控效果、蓄冷/放冷效果进行测试,并基于实验结果对相变蓄冷新风机的经济效益进行分析,主要结论如下:

(1)广东地区夏季室外的新风温度高达 26~29 °C,采用无机盐氯化铵将六水氯化钙相变温度调控至 20~25 °C 的范围内,该相变材料能够有效利用其吸热过程降低新风出口温度,可采用品位较低的高温冷源进行蓄冷,表现出较好的节能潜力。

(2)18 °C、20 °C、22 °C 的低温冷水均能较好地完成相变蓄冷模块的冷量储存过程(即热量释放),但随着冷水温度的提高,相变材料的凝固率下降,储存冷量减少,放冷时间也随之缩短。在实际应用中,应根据日间气候条件和冷量供应需求选择相应的蓄冷条件。

(3)相变蓄冷新风机能够利用相变材料的吸热/放热过程将蓄冷过程从白天转移到夜间,利用昼夜电价差为用户节约电力成本高达 54.8 %。

参考文献

- [1]吴玉富. 中国建筑节能现状与趋势调研分析[J]. 低碳世界, 2017, 155(17): 151-152.
- [2]赖明东, 雍熙, 史文静. 全球变暖的解释模式: 温室效应理论与气候的自然波动假说[J]. 自然辩证法研究, 2022, 38(05): 69-74+95.
- [3]王晓飞. 新风机组的 PM2.5 过滤性能综合评价研究[D]. 重庆大学, 2016.
- [4]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(05): 54-57.
- [5]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(04): 10-14.
- [6]张文, 聂金哲. 新风热回收系统在我国不同气候区典型建筑中的适用性研究[J]. 建筑科学, 2022, 38(08): 194-200.
- [7]刘忠宝, 韦自妍, 刘梓宸. 基于太阳能的新风双级处理模块化节能墙[J]. 北京工业大学学报, 2023, 07): 1-10.
- [8]王新华, 刘泽华, 金雷, 等. 空调排风热回收在我国应用节能潜力分析[J]. 节能, 2011, 30(09): 17-20+2.
- [9]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.
- [10]杨慧敏. 住宅建筑中的太阳能新风系统性能研究[D]. 燕山大学, 2022.
- [11]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(02): 217-224.
- [12]赵雷. 基于太阳能的相变储能新风高效换热系统研究[D]. 沈阳建筑大学, 2014.
- [13]金磊, 王勇, 吴蔚兰, 等. 不同气候区相变蓄能新风预处理系统节能性分析[J]. 重庆大学学报, 2022, 45(S1): 156-162.
- [14]孙婉纯, 方晓明, 张正国. 新型三元混合盐 $CaCl_2 \cdot 6H_2O-NH_4Cl-SrCl_2 \cdot 6H_2O$ 及其膨胀珍珠岩复合相变材料的性能研究[A]. [C]. 1.
- [15]孙婉纯. 基于水合无机盐复合相变材料的主动与被动耦合型建筑节能研究[D]. 华南理工大学, 2020.
- [16]王红梅. 夜空辐射致冷的数值模拟与应用分析[D]. 湖南大学, 2014.

(上接第 20 页)

- [18]Jiang X, Ren J, Kong Y, et al. Shape-tailorable amine grafted silica aerogel microsphere for CO₂ capture[J]. Green Chemical Engineering, 2020, 1(2): 140-146.
- [19]Robinson K, McCluskey A, Attalla M I. An FTIR spectroscopic study on the effect of molecular structural variations on the CO₂ absorption characteristics of heterocyclic amines[J]. ChemPhysChem, 2011, 12(6): 1088-1099.

(上接第 35 页)

- [36]Safarzadeh-Amiri A, Bolton J R, Cater S R. Ferrioxalate-mediated solar degradation of organic contaminants in water - ScienceDirect[J]. Solar Energy, 1996, 56(5): 439-443.
- [37]Banwart S, Davies S, Stumm W. The role of oxalate in accelerating the reductive dissolution of hematite (α -Fe₂O₃) by ascorbate[J]. Colloids & Surfaces, 1989, 39(2): 303-309.

- [20]Raganati F, Alfe M, Gargiulo V, et al. Kinetic study and breakthrough analysis of the hybrid physical/chemical CO₂ adsorption/desorption behavior of a magnetite-based sorbent[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 372: 526-535.
- [21]Kamarudin K S N, Alias N. Adsorption performance of MCM-41 impregnated with amine for CO₂ removal[J]. Fuel Processing Technology, 2013, 106: 332-337.

- [38]Siffert C, Sulzberger B. Light-induced dissolution of hematite in the presence of oxalate. A case study[J]. Langmuir, 1991, 7(8).
- [39]Sulzberger B, Laubscher H. Reactivity of various types of iron(III) (hydr)oxides towards light-induced dissolution[J]. Marine Chemistry, 1995, 50(1-4): 103-115.