doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.049

日光温室带竖向空气通道的太阳能相变蓄热墙体体系*

凌浩恕[1]　陈　超[1]　陈紫光[1]　马彩雯[2]　管　勇[1]　李　娜[1]

(1.北京工业大学建筑工程学院,北京 100124;2.新疆农业科学院农业机械化研究所,乌鲁木齐 830091)

摘要:基于已有日光温室专用多曲面槽式空气集热器,提出一种带竖向空气通道的太阳能相变蓄热墙体构筑体系,通过主动与被动相结合的蓄热方式,提高日光温室后墙体的太阳能热利用率。为了验证构筑体系的科学性和可行性,分别搭建了日光温室专用多曲面槽式空气集热器试验系统和带竖向空气通道的相变蓄热墙体试验系统,分析了太阳辐射强度、集热器内空气流速、日光温室中间显热蓄热墙体层内空气流动参数(空气流速、空气通道间距、空气流动方向)等对空气集热器太阳能热利用率以及墙体主动蓄热能力的影响规律。研究结果表明:当集热器内空气速度为 1.4 ~ 1.8 m/s 时,集热器的综合集热性能最佳,集热量随着太阳辐射强度的增加而升高;当墙体内竖向空气通道间距为 400 mm、空气通道内空气速度为 0.26 m/s、空气流动方向为上进下出时,相变蓄热墙体换热效率为 66.2%,主动蓄热量约为 9.43 MJ/m^3,其中中间砌块层的蓄热量约占 82.3%,墙体日蓄放热效率为 98.4%。

关键词:日光温室　太阳能集热器　竖向空气通道　相变蓄热墙体　主-被动式蓄热

中图分类号:S625.1;TU111.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2015)03-0336-08

Performance of Phase Change Material Wall with Vertical Air Channels Integrating Solar Concentrators

Ling Haoshu[1]　Chen Chao[1]　Chen Ziguang[1]　Ma Caiwen[2]　Guan Yong[1]　Li Na[1]

(1. *College of Architecture and Civil Engineering*, *Beijing University of Technology*, *Beijing* 100124, *China*

2. *Institute of Agricultural Mechanization*, *Xinjiang Academy of Agricultural Science*, *Urumqi* 830091, *China*)

Abstract: Due to the limit of heat transfer performance of building materials, the depth of the north wall affected by solar radiation was shallow in the passive solar greenhouse, which weakened the heat storage capacity of the wall interior. In this study, a phase change material wall with vertical air channels integrating solar concentrators was developed to fully strengthen the temperature and heat storage capacity of the wall interior by the active method and improve the temperature and heat storage capacity of PCM wallboards by the passive method. In order to prove the scientificity and feasibility of the identity, the experimental setup of multiple surfaces trough solar air collector and the experimental setup of phase change material wall with vertical air channels were built. And influencing characteristics of the air velocity in the collector and solar radiation on solar concentrators and influencing characteristics of the gap between air channels, the flow direction of heated air, and the velocity of the supply air on phase change material wall with vertical air channels were experimentally investigated, respectively. The results showed that the suitable air velocity in the collector was 1.4 ~ 1.8 m/s, and the heat collection rose with the increase of solar radiation. The optimum conditions of phase change material wall were experimentally recommended: the gap was 400 mm, the flow direction was downward, and the supply air velocity was 0.26 m/s. While the experiment was carried out on the optimum conditions, the heat exchange effectiveness was 66.2%, and the active heat storage density was 9.43 MJ/m^3, 82.3% of which were stored in the block

收稿日期:2014-05-04　修回日期:2014-06-11

*国家自然科学基金资助项目(51368060、50978002)和北京工业大学博士创新基金资助项目

作者简介:凌浩恕,博士生,主要从事相变蓄热技术与可再生能源技术在建筑节能技术中的应用研究,E-mail:linghaoshu@163.com

通讯作者:陈超,教授,博士生导师,主要从事相变蓄热技术与可再生能源技术研究,E-mail:chenchao@bjut.edu.cn

layer. Moreover, the discrepancy of the active heat storage and the heat release was 1.6%.

Key words: Solar greenhouse　Solar concentrator　Vertical air channels　Phase change material wall　Active – passive heat storage

引言

日光温室因其可在反季节为蔬菜生长提供良好的小气候,受到了广大农业生产者的亲睐[1-3]。温室小气候主要受室外气象条件[4]、围护结构热工性能[5]和土壤热湿特性[6]等因素的影响,其中尤以集吸热、蓄热和保温于一体的后墙体更为重要[7],它是维持日光温室特别是夜间必要环境温度的重要热源[8]。

一些学者通过在墙体内添加相变蓄热材料的方法,达到提高墙体蓄热能力的目的[8-12]。然而近期研究发现[10],受墙体材料导热性能所限,透过日光温室前坡屋面照射在后墙内表面的太阳能影响墙体的深度不足墙体厚度的 1/3,致使墙体内部的显热蓄热能力得不到充分发挥。张志录等[13]对下沉式日光温室 3 m 厚的土质后墙温度变化规律进行了 2 年实测,发现太阳能影响的墙体深度不足墙体厚度的 1/7。Chen 等[14]模拟分析了不同结构形式日光温室墙体温度场,结果表明:对于 600 mm 厚的混凝土墙,太阳能影响深度约为 300 mm;对于由 400 mm厚混凝土与 200 mm 厚羊毛毡组成的复合墙体,太阳能影响深度约为 200 mm。

为了提高日光温室墙体内部蓄热性能,本文基于已有日光温室专用多曲面槽式空气集热器[15],提出一种带竖向空气通道的太阳能相变蓄热墙体的构筑体系,通过空气集热器-竖向空气通道以主动蓄热的方式提高墙体内部层的温度及蓄热能力;并结合墙体内表面复合相变蓄热墙体层的被动蓄热方式,达到综合提高日光温室墙体的太阳能利用率的目的。分别搭建日光温室专用多曲面槽式空气集热器试验系统和带竖向空气通道的相变蓄热墙体试验系统,通过考察太阳辐射强度、集热器内空气流速等因素对集热器集热量的影响规律,研究集热器的热性能;通过考察带竖向空气通道三重结构墙体中间显热蓄热墙体层内的空气流动状况(空气流速、空气通道间距、空气流动方向)对墙体蓄放热特性的影响规律,研究所提出的带竖向空气通道的相变蓄热墙体体系构筑理念的科学性与可行性,为日光温室墙体的优化设计提供参考。

1　墙体体系

1.1　设计基础

日光温室墙体传热属于较为复杂的瞬态传热,如图 1 所示。墙体内表面受温室内小气候和太阳辐射周期性作用;位于背阴面的后墙体外表面受室外气象条件周期性影响。冬季白天太阳辐射透过前坡屋面薄膜投射到温室后墙体内表面层,一部分被后墙内表面材料层吸收、蓄积并传导到墙体内部层,提高整个墙体的温度;另一部分则通过墙体内表面,以辐射换热的方式反射到作物表面、土壤表面、前(后)坡屋面和其他壁面。

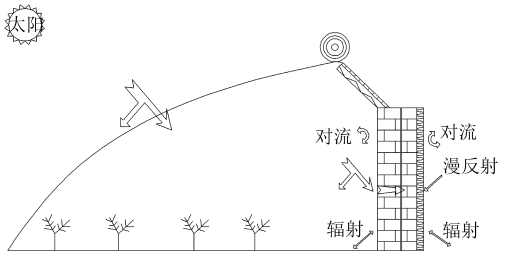

图 1　冬季日光温室白天墙体传热过程示意图

Fig. 1　Heat transfer of north wall in solar greenhouse during daytime

显然,欲提高日光温室后墙体内部层的蓄热量,关键是:尽可能向墙体内部层提供足够的热量;尽可能提高温室墙体内侧表面材料层吸收太阳辐射热的能力;尽可能增大温室墙体外表面材料层的热阻,减小流失至室外的太阳热能损失。

1.2　体系构成及基本原理

为解决目前普遍存在的太阳能影响后墙体深度有限、后墙体内部层温度偏低的问题,本文提出带竖向空气通道的太阳能相变蓄热墙体体系[16](图 2)。该体系主要由项目组研制的日光温室专用多曲面槽

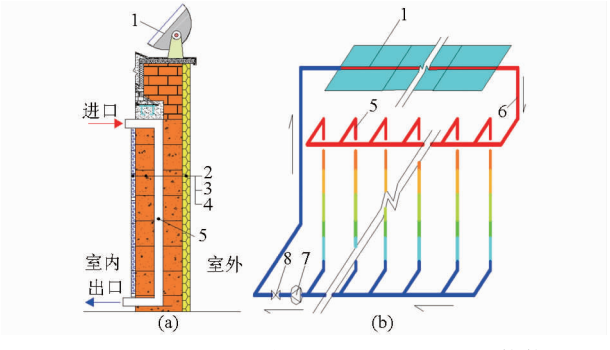

图 2　带竖向空气通道的太阳能相变蓄热墙体体系

Fig. 2　Phase change material wall with vertical air channels integrating solar concentrators

(a) 剖视图　(b) 空气系统原理图

1. 日光温室专用多曲面槽式空气集热器　2. 相变材料层　3. 砌块层　4. 保温层　5. 墙内竖向空气通道　6. PVC 风管道　7. 小型管道风机　8. 调节阀

式空气集热器和带竖向空气通道的三重结构相变蓄热墙体构成。

其中,带竖向通道的三重结构相变蓄热墙体的内侧表面采用项目组研制的 GH－20 型复合相变蓄热墙体板[17],将照射在该墙体层的太阳能以被动潜热蓄热的方式蓄积,提高潜热蓄热能力;背阳的墙体外表面侧采用热阻大的保温材料;中间墙体层采用蓄热性能和传热性能较好的空心砌块砖,并利用空心气孔自然形成竖向空气通道;安装在后墙体上方的日光温室专用多曲面槽式空气集热器与小型管道风机、PVC 风管道以及中间墙体层内的竖向空气通道构成太阳能-墙体主动显热蓄热体系,达到提高日光温室墙体内部层显热蓄热能力的目的。

2 试验与评价方法

2.1 多曲面槽式空气集热器试验系统

2.1.1 试验台概况

试验系统主要由日光温室专用多曲面槽式空气集热器、PVC 风管道、小型管道风机、温度传感器和数据采集系统等构成(图 3)。其中,空气集热器长 4 m、高 0.5 m,上开口有效宽度 0.45 m 并覆盖超白玻璃板,集热器内空气加热玻璃管管径为 100 mm。

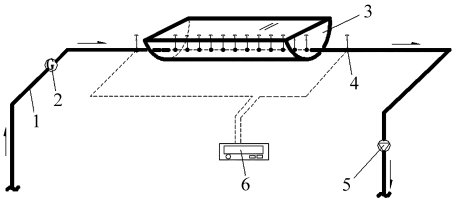

图 3 多曲面槽式空气集热器试验系统

Fig. 3 Experimental setup of multiple surfaces trough solar air collector

1. PVC 风管道 2. 风速仪 3. 多曲面槽式空气集热器 4. 温度传感器 5. 小型管道风机 6. 数据采集系统

2.1.2 测点布置与数据采集

如图 3 所示,试验系统共布置 16 个 T 型热电偶温度测点(精度 ±0.5℃),并采用 Agilent 巡检仪以 1 次/min 频率采集并记录数据。其中,2 个测点分别测量集热器进、出口处的空气温度;12 个温度测点沿集热器内空气加热玻璃管长度方向均匀布置,用于测量玻璃管沿程空气温度的变化;余下的 2 个温度测点用于测量试验台周围环境温度。

太阳辐照度由 PC－3 气象站测得,精度为测量值的 5%,通过 TRM－ZS1 型检测仪以 6 次/h 频率进行采集和记录。

2.1.3 评价方法

评价多曲面槽式空气集热器的集热性能,可通过计算空气集热器的集热量,并考察太阳辐射强度、集热器内空气流速等因素的影响规律,计算式为

$$Q_c = Gc(T_o - T_i) \tag{1}$$

式中 Q_c——集热量,W

G——空气质量流量,kg/s

c——比热容,kJ/(kg·K)

T_i——进口温度,℃

T_o——出口温度,℃

2.2 带竖向空气通道的相变蓄热墙体试验系统

2.2.1 试验台

图 4 为带竖向空气通道的相变蓄热墙体试验系统原理图,主要由带竖向空气通道的相变蓄热墙体、空气加热器、小型管道风机、PVC 风管道、风速仪、温度监测系统等构成。

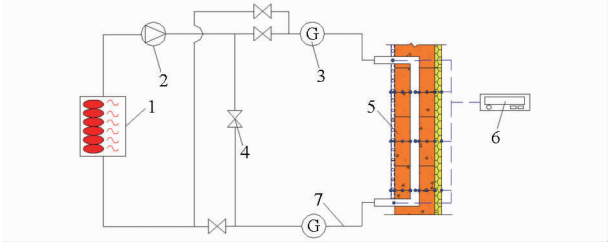

图 4 带竖向空气通道的相变蓄热墙体试验系统

Fig. 4 Experimental setup of phase change material wall with vertical air channels

1. 空气加热器 2. 小型管道风机 3. 风速仪 4. 阀门 5. 三重结构相变墙体 6. 温度监测系统 7. PVC 风管道

试验墙体长 1.76 m、高 1.14 m、厚 0.28 m。墙体外侧为 0.05 m 厚保温层,中间层为 0.19 m 厚空心砌块砖,空心砌块砖空气孔尺寸 0.13 m×0.12 m,内侧为 0.04 m 厚 GH－20 型复合相变蓄热墙体板。沿墙体长度方向共有 9 个竖向空气通道(下文以 A～I表示),其上、下两端均可外接 PVC 通风管道,试验中未连接通风管道的空气通道用砂子填实,作为显热蓄热墙体的一部分。试验材料主要物性参数如表 1 和图 5 所示。

表 1 墙体各层材料物性参数

Tab. 1 Physical parameters of wall

材料	导热系数 λ/(W·m^{-1}·K^{-1})	比热容 c/(kJ·kg^{-1}·K^{-1})	密度 ρ/(kg·m^{-3})
相变材料墙板	0.40	图 5	900
砌块	0.81	1.05	1 800
砂子	0.47	1.01	1 200
保温板	0.042	1.38	30

2.2.2 测点布置与数据采集

试验台共布置了 197 个 T 型热电偶温度测点(精度 ±0.5℃)。其中,192 个测点布置在墙体内(外)侧表面及中间层内(图 6),采集不同位置的墙

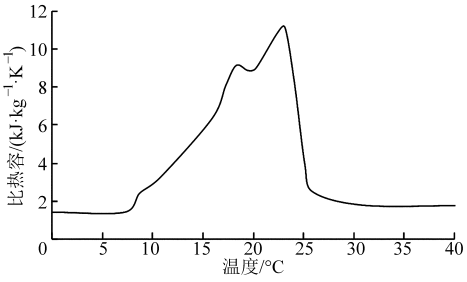

图 5　相变蓄热墙板比热容曲线

Fig. 5　Specific heat of phase change material wallboards

体温度和竖向空气通道内空气温度;1 个测点布置在进风口处,采集进入墙体内空气通道的热空气温度;1 个测点布置在墙体出风口出处,采集流出竖向空气通道的空气温度;余下 3 个测点布置在墙体周围环境,采集墙体周围环境温度。此外,1 台红外成像仪(ISI IR525 型,精度为读数的 2%)被用来测试墙体外表面的温度;2 台 Testo 牌热线风速仪(精度 ±0.01 m/s)分别测量送风速度和回风速度;所有数据均是 30 s 记录一次。

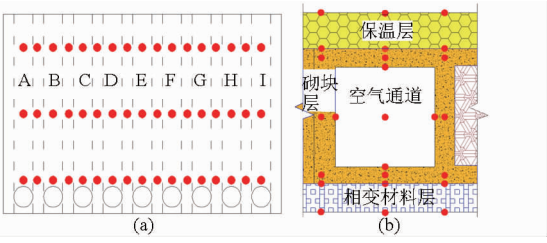

图 6　墙体温度测点布置示意图

Fig. 6　Temperature measuring points of investigated wall with vertical air channels

(a) 竖直方向　(b) 水平面

2.2.3　评价指标

(1)墙体主动蓄热量

为了计算相变蓄热墙体的主动蓄热量,将试验墙体沿长度方向简化为 290 mm(长)×280 mm(厚)×1 140 mm(高)的传热单元体(图 7),并将该传热单元体按 5 mm 的空间步长进行节点网格划分处理。因此,该传热单元体 τ 时刻单位体积蓄热量计算式为

$$q(\tau)=\frac{\sum_{i=0}^{56}\sum_{j=0}^{58}\sum_{k=0}^{228}\rho_{i,j,k}V_{i,j,k}\int_{T_{i,j,k}(0)}^{T_{i,j,k}(\tau)}c_{i,j,k}(T)\,\mathrm{d}T}{\sum_{i=0}^{56}\sum_{j=0}^{58}\sum_{k=0}^{228}V_{i,j,k}} \tag{2}$$

式中　q——墙体蓄热量,kJ/m³

τ——时间,s　　ρ——材料密度,kg/m³

V——墙体节点体积,m³

i——墙体厚度节点

j——墙体长度节点　　T——墙体温度,℃

k——墙体高度节点

其中,$0\leqslant i\leqslant 8$ 为相变层,令 $c=c_P$、$\rho=\rho_P$、$\lambda=\lambda_P$;$46<i\leqslant 56$ 为保温层,令 $c=c_I$、$\rho=\rho_I$、$\lambda=\lambda_I$;$15<i\leqslant 39$ 且 $0\leqslant j\leqslant 13$ 为空气通道,令 $c=0$、$\rho=0$、$\lambda=0$;$15<i\leqslant 39$ 且 $23\leqslant j\leqslant 49$ 为空气孔内填充砂子,令 $c=c_{sa}$、$\rho=\rho_{sa}$、$\lambda=\lambda_{sa}$;余下区域为砌块砖实体部分,令 $c=c_B$、$\rho=\rho_B$、$\lambda=\lambda_B$。

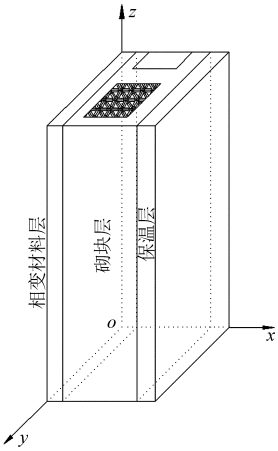

图 7　墙体物理模型简图

Fig. 7　Physics model of investigated wall with vertical air channels

(2)换热效率

为了反映送入竖向空气通道内热空气的热利用率以及墙体传热能力,可用竖向空气通道的进、出口空气温度之差与其进口空气温度和壁表面平均温度之差的比值来表征,即换热效率。

$$\varepsilon(\tau)=\frac{T_n(\tau)-T_u(\tau)}{T_n(\tau)-\overline{T}_s(\tau)}\times 100\% \tag{3}$$

式中　ε——热空气-墙体的换热效率,%

T_n——热空气进口温度,℃

T_u——热空气出口温度,℃

$\overline{T}_s$——竖向空气通道表面平均温度,℃

3　试验结果分析与讨论

3.1　多曲面槽式空气集热器

3.1.1　试验条件

空气集热器的集热性能主要受集热器空气进口温度、空气流速、太阳辐射强度等因素影响。实际上,如图 2 所示,空气是在由集热器-墙体竖向空气通道-小型管道风机- PVC 风管道组成的闭式环路中不断循环流动。项目组的试验结果表明,冬季循环条件下,集热器空气进口温度大概为 27 ~ 28℃。为此,本文选取进口温度为(27.5 ± 0.5)℃。试验期间太阳辐射强度如图 8 所示,该期间太阳辐射强度最大值约为 750 W/m²,日有效太阳辐射强度(9:00—15:00)平均值约为 440 W/m²。

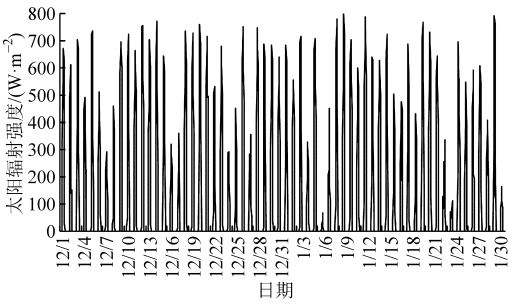

图 8 太阳辐射强度(2013.12.1—2014.1.30)

Fig. 8 Solar radiation

3.1.2 太阳辐射与集热器内空气流速变化的影响

图 9 反映了集热器进口温度一定条件下,太阳辐射强度 E 与集热器内空气流速对集热器空气出口温度与集热量变化的影响规律。由图可知,太阳辐射强度、空气流速对集热器的集热量和出口温度有较大的影响。在相同风速下,集热量和出口温度均随着太阳辐射强度的升高而升高。当太阳辐射强度为最大值 750 W/m² 时,对应的最大集热量约为 660 W,此时空气出口温度为 71℃;当太阳辐射强度为日平均值 440 W/m² 时,对应的最大集热量约为 412 W,此时空气出口温度约为 55℃。

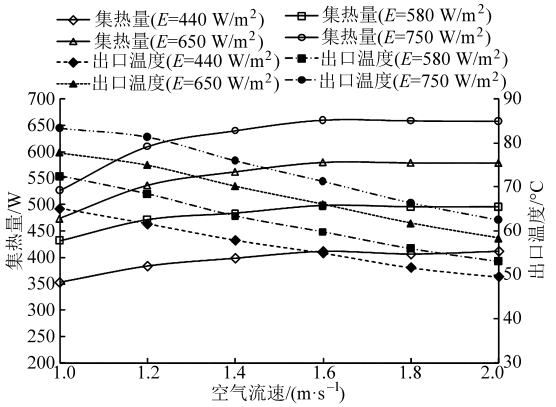

图 9 太阳辐射及空气流速对出口温度及集热量的影响

Fig. 9 Effect of air velocity and solar radiation on export temperature and solar concentrators

然而在同一太阳辐射强度下,空气流速对集热量和出口温度的影响规律却不同。即随着空气流速的增加,出口温度不断下降,这是因为当太阳辐射强度一定时,集热器的总热量基本确定,由式(1)可知,增大空气流速,也即增大空气流量 G,必然会导致空气出口温度的下降;另外,集热量随着空气流速的增加呈近似指数的规律增加,当空气流速小于 1.4 m/s 时,集热量随着流速的增加而快速增大,但随着空气流速的继续增大,集热量增加的趋势趋缓。这是因为,空气流速增加有利于集热器内空气对流换热系数及其对流换热能力的增强,但随着空气流速继续增强,这种增强对流换热系数的能力趋缓。因此集热器内空气流速可考虑为 1.4 ~ 1.8 m/s,对应的出口温度为 52 ~ 76℃,集热量为 399 ~ 660 W。

3.2 带竖向空气通道的相变蓄热墙体

3.2.1 试验条件

结合 3.1 节的研究结果,本文重点考察竖向空气通道间距、竖向空气通道内空气流动方向、空气流速等因素对墙体蓄(放)热特性的影响规律,并确定相应的优化设计参数。试验方案如表 2 所示,其中,工况 1 重点考察竖向空气通道间距对相变墙体主动蓄热特性以及蓄热能力的影响,工况 2 重点考察竖向空气通道内空气流动方向(上进下出或下进上出)的影响,工况 3 重点考察竖向空气通道内空气流动速度的影响。试验过程中,墙体周围环境温度稳定在(23 ± 1)℃;每个工况的连续供热风时间均为 8 h。

表 2 相变墙体试验系统试验方案

Tab. 2 Experimental conditions of investigated wall with vertical air channels

试验工况	通入热空气的竖向空气通道	填充砂子的竖向空气通道	送风温度 t_n/℃	送风速度 v/(m·s⁻¹)	流动方向
1	E	A,B,C,D,F,G,H,I	60	0.26	上进下出
2	B,E,H	A,C,D,F,G,I	60	0.26	下进上出,上进下出
3	B,E,H	A,C,D,F,G,I	60	0.20,0.26,0.31,0.41	上进下出

3.2.2 竖向空气通道间距的影响

为了考察竖向空气通道间距对相变墙体主动蓄热能力的影响,试验按表 2 中工况 1 实施。图 10 为对应图 7 中 $x = 0.135$ m 处砌块层中心面沿墙体长度方向(y 方向)的温度变化。由图可见,随着供热时间的增加,墙体内各点温度呈不断上升趋势,但上升速率渐缓;并且距离竖向空气通道中心点越远,其温升速率呈下降趋势,这种下降趋势在距空气通道中心点大于 180 mm 时迅速趋于平缓,当距空气通道中心点为 490 mm 时,墙体温升近似为 0℃。可以认为,试验条件下,竖向空气通道沿墙体长度方向的有效影响距离为 180 ~ 200 mm。即较为有效的竖向空气通道间距为 360 ~ 400 mm。

3.2.3 空气流动方向的影响

为了考察竖向空气通道内空气流动方向对墙体主动蓄热能力的影响,试验按照表 2 的工况 2 实施,试验结果如图 11 所示。从图中可以看出,热空气在竖向空气通道内的流动方向不同,会直接影响墙体的主动蓄热量和换热效率,即随着加热时间的延长,上进下出流动方向墙体单位时间蓄热量明显优于下进上出方式,8 h 墙体主动蓄热量较后者高出约

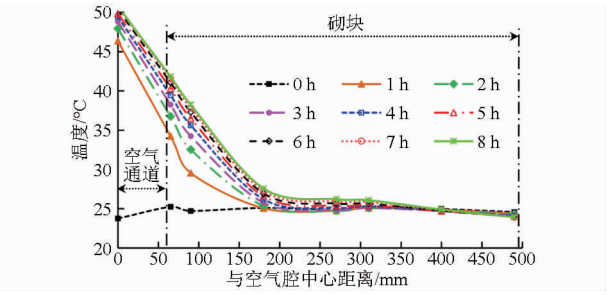

图 10　沿试验墙体长度方向温度分布(x = 0.135 m)

Fig. 10　Average temperature in middle section of block layer (x = 0.135 m)

21%,为 9.43 MJ/m^3;空气-墙体换热效率随时间的变化不明显,但上进下出的换热效率较下进上出方式高出约 14.9%,为 66.2%。这是由于热空气进入竖向空气通道与冷壁面进行热交换,一方面由于空气流动将产生强迫对流换热;另一方面,由于热空气与冷壁面之间存在温差,此时的 Gr/Re^2(Gr 为格拉晓夫数,Re 为雷诺数)约为 0.6,自然对流对传热影响明显[18],自然对流流动方向为自上而下。当热空气的流动方向为上进下出时,竖向空气通道壁面处强迫流动与自然流动的方向同向,强化了空气与壁体之间的传热,而下进上出方式则反之。因此,热空气流入竖向空气通道的方向应考虑为上进下出。

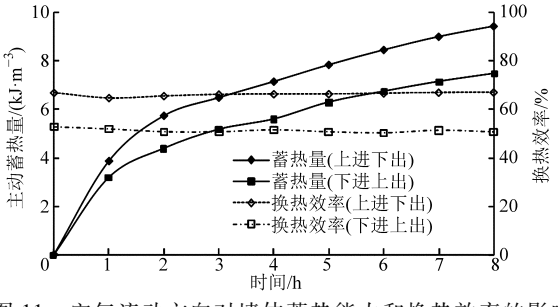

图 11　空气流动方向对墙体蓄热能力和换热效率的影响

Fig. 11　Active heat storage density and heat exchange effectiveness of different flow directions

3.2.4　空气流速的影响

根据表 2 的工况 3 试验结果同时可得到竖向空气通道内热空气流动速度变化对墙体主动蓄热量以及空气-墙体换热效率的影响规律(图 12)。由图可见,随着空气流速的增大,空气-墙体换热效率呈下降趋势,这是因为随着空气流速的增加,式(3)中分子(竖向空气通道内进、出口空气温差)将随之减小所致;另外,墙体主动蓄热量将随着空气流速的增大而增加,但当流速大于 0.26 m/s 以后,这种增大趋势开始趋缓,这是因为当进风温度一定时,增大空气流速提高了竖向空气通道内强迫对流换热的能力,但继续增大空气流速,竖向通道内空气的进、出口温差将随之减小,进而抑制了对流换热能力的进一步增大。因此,竖向空气通道内空气流速可考虑为 0.26 ~ 0.31 m/s。

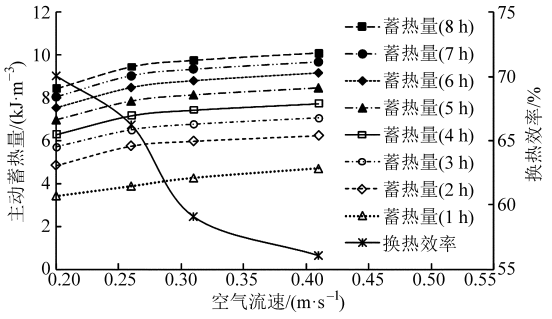

图 12　空气流速对墙体流速蓄热能力和换热效率的影响

Fig. 12　Active heat storage density and heat exchange effectiveness of different supply air velocities

3.2.5　墙体厚度方向温度分布

图 13 为当空气进风方向为上进下出、其他条件同表 2 的工况 2 的墙体厚度方向(y = 0.09 m)的温度分布。从图中可以看出,中间砌块层的温度得到了明显的提高,最高升高 14.4℃,即所提出的墙体体系可有效提高墙体内部层温度,充分发挥其显热蓄热的作用;不仅如此,该设计墙体还可以提高相变材料层的温度,平均提高 5.2℃,有利于提高相变材料的相变率和蓄热量;在试验期间,保温层外表面温度升高为 2.3℃,仅为砌块层温升的 16%,即该设计墙体可有效地减小墙体蓄热量的损失。

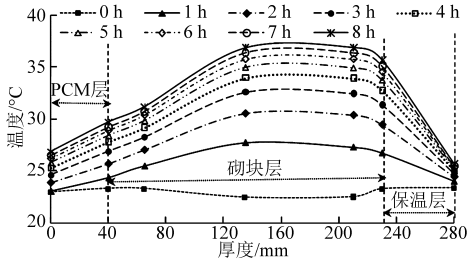

图 13　墙体厚度方向温度分布(y = 0.09 m)

Fig. 13　Temperature distribution along thickness direction (y = 0.09 m)

3.2.6　墙体蓄放热能力分析

图 14 为当空气进风方向为上进下出、其他条件同表 2 的工况 2 的 0 ~ 8 h 主动蓄热工况和 9 ~ 24 h 被动放热工况的试验结果。由图可见,随着蓄热时

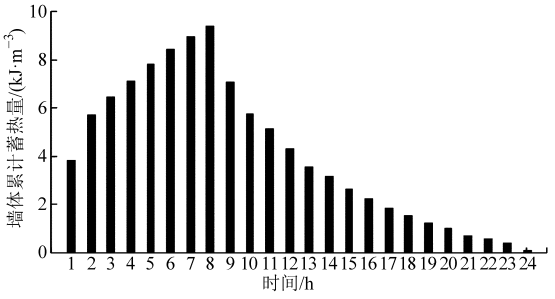

图 14　墙体累计蓄热量随时间的变化

Fig. 14　Heat storage of investigated wall with vertical air channels

间延长,墙体的累计蓄热量随之增大、但蓄热速率减缓,墙体主动蓄热连续 8 h 后,墙体总蓄热量约为 9.43 MJ/m^3,其中 82.3% 热量储存在中间砌块层,中间砌块层的显热蓄热量得到了大幅度提高。同样,随着放热时间的推移,墙体内储存的热量不断减少、放热量逐渐增加,但是放热速率逐渐减小,并至 24 h 热量基本释放完毕,蓄放热效率为 98.4% 。

4 工程应用指导

实际工程应用可根据 1.2 节提出的带竖向空气通道的太阳能相变蓄热墙体体系构造原理并参照图 2b进行工程设计与建设,流程图如图 15 所示。其中,日光温室所需热量可以采用美国能耗软件 Energyplus 建模及计算;日光温室专用多曲面槽式空气集热器的内空气流速可按 1.4 ~ 1.8 m/s 考虑;墙体内竖向空气通道间距可按 360 ~ 400 mm、空气通道内空气流动方向按上进下出、空气流速按 0.26 ~ 0.31 m/s 考虑;墙体外通风管道可采用 PVC 管道;小型管道风机风量一般不大于 300 m^3/h,功率一般不大于 50 W;工程建造成本非常低,维护管理也非常方便。

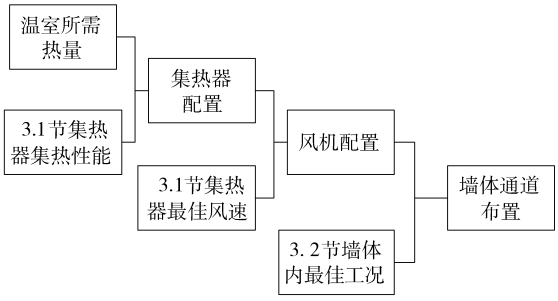

图 15 应用设计流程图

Fig. 15 Design flow chart of solar greenhouse

本项目组正开展实际工程应用的试验研究,相关研究结果见后续报道。

5 结论

(1)为了提高日光温室厚重墙体内部的蓄热能力,本文提出了一种带竖向空气通道的太阳能相变蓄热墙体构筑体系。

(2)太阳辐射强度、集热器内空气流速均是影响日光温室专用多曲面槽式集热器集热性能的重要参数,当集热器内空气速度为 1.4 ~ 1.8 m/s 时,集热器的综合集热性能最佳,且集热量随着太阳辐射强度的增加升高。

(3)竖向空气通道间距、空气通道内空气流动方向和空气流速是影响带竖向空气通道的相变蓄热墙体、特别是中间砌块墙体层太阳能主动蓄热及传热能力的重要因素。

(4)当竖向空气通道间距为 400 mm,竖向空气通道内空气流动方向为上进下出、空气流速为 0.26 m/s时,墙体的综合传热与蓄热能力最佳。此时,热空气-墙体平均换热效率为 66.2% ,主动蓄热量约为 9.43 MJ/m^3,且中间砌块墙体层的蓄热量所占比例高达 82.3% ,墙体日蓄放热效率为 98.4% 。

参 考 文 献

1 Sethi V P, Dubey R K. Development of dual purpose greenhouse coupled with north wall utilization for higher economic gains [J]. Solar Energy, 2011, 85(5):734 - 745.

2 李惟毅, 李兆力, 雷海燕,等. 农业温室微气候研究综述与理论模型分析[J]. 农业机械学报, 2005, 36(5):137 - 140.
Li Weiyi, Li Zhaoli, Lei Haiyan, et al. Research on agricultural greenhouse microclimate and analysis of theoretical model [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(5):137 - 140. (in Chinese)

3 Tong G, Christopher DM, Li B. Numerical modelling of temperature variations in a Chinese solar greenhouse [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2009, 68(1):129 - 139.

4 白义奎, 刘文合, 王铁良, 等. 日光温室朝向对进光量的影响分析[J]. 农业机械学报, 2005, 36(2):73 - 75.
Bai Yikui, Liu Wenhe, Wang Tieliang, et al. Analysis of orientation influenced sunlight in solar greenhouse [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36 (2):73 - 75. (in Chinese)

5 马承伟, 韩静静, 李睿. 日光温室热环境模拟预测软件研究开发[J]. 北方园艺, 2010(15):69 - 75.
Ma Chengwei, Han Jingjing, Li Rui. Research and development of software for thermal environmental simulation and prediction in solar greenhouse [J]. Northern Horticulture, 2010(15):69 - 75. (in Chinese)

6 何芬, 马承伟, 周长吉, 等. 基于有限差分法的日光温室地温二维模拟[J]. 农业机械学报,2013, 44(4):228 - 232.
He Fen, Ma Chengwei, Zhou Changji, et al. 2-D simulation of soil temperature in solar greenhouse based on finite difference method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(4):228 - 232. (in Chinese)

7 马承伟, 陆海, 李睿, 等. 日光温室墙体传热的一维差分模型与数值模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6):231 - 237.
Ma Chengwei, Lu Hai, Li Rui, et al. One-dimensional finite difference model and numerical simulation for heat transfer of wallin Chinese solar greenhouse [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(6): 231 - 237. (in Chinese)

8 管勇, 陈超, 李琢, 等. 相变蓄热墙体对日光温室热环境的改善[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10):194 - 201.
Guan Yong, Chen Chao, Li Zhuo, et al. Improving thermal environment in solar greenhouse with phase-change thermal storage wall

[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(10): 194 – 201. (in Chinese)

9 Berroug F, Lakhal E K, El Omari M, et al. Thermal performance of a greenhouse with a phase change material north wall [J]. Energy and Buildings, 2011, 43(11):3027 – 3035.

10 管勇, 陈超, 凌浩恕, 等. 日光温室三重结构相变蓄热墙体传热特性分析[J]. 农业工程学报, 2013,29(21):166 – 173.
Guan Yong, Chen Chao, Ling Haoshu, et al. Analysis of heat transfer properties of three-layer wall with phase-change heat storage in solar greenhouse [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(21): 166 – 173. (in Chinese)

11 王宏丽, 李晓野, 邹志荣. 相变蓄热砌块墙体在日光温室中的应用效果[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5):253 – 257.
Wang Hongli, Li Xiaoye, Zou Zhirong. Application of brick wall with phase change rice husk in solar greenhouses [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5): 253 – 257. (in Chinese)

12 Najjar A, Hasan A. Modeling of greenhouse with PCM energy storage [J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(11): 3338 – 3342.

13 张志录,王思倩,刘中华,等. 下沉式日光温室土质墙体热特性的试验与分析[J]. 农业工程学报,2012,28(12):208 – 215.
Zhang Zhilu, Wang Siqian, Liu Zhonghua, et al. Experiment and analysis on thermal characteristics of cob wall in sunken solar greenhouse [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(12): 208 – 215. (in Chinese)

14 Chen W, Liu W. Numerical simulation of the airflow and temperature distribution in a lean-to greenhouse [J]. Renewable Energy, 2006, 31(4):517 – 535.

15 陈紫光,陈超,凌浩恕,等. 日光温室专用多曲面槽式太阳能空气集热器热工性能试验研究[J]. 建筑科学, 2014, 30(8): 58 – 63.
Chen Ziguang, Chen Chao, Ling Haoshu, et al. Experimental study on thermal performance for the specialized multiple curved surfaces trough solar air collector dedicated to solar greenhouse [J]. Building Science, 2014, 30(8): 58 – 63. (in Chinese)

16 北京工业大学. 日光温室太阳能主-被动式“三重”结构蓄热墙体体系:中国, 201310328662.7[P]. 2013 – 07 – 31.

17 Chen Chao, Guo Haifeng, Liu Yuning, et al. A new kind of phase change material (PCM) for energy-storing wallboard [J]. Energy and Buildings, 2008, 40(5):882 – 890.

18 Hieber C A. Laminar mixed convection in an isothermal horizontal tube: correlation of heat transfer data [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1982, 25(11): 1737 – 1746.