

# 大连地区特隆布墙 夏季不同降温方式的实验研究

大连理工大学 陈 星<sup>☆</sup> 陈 滨 丁颖慧

**摘要** 对比分析了五种方案下墙体的温度场和得热量,确定了较为合理的特隆布墙夏季运行方案,即卷帘白天放下、夜间开启,外通风口全天开启,内通风口自动启闭。与对比房的比较结果表明采用该方案不仅有效解决了特隆布墙夏季过热问题,而且还可以对室内进行一定程度的被动式降温。针对实际应用,提出了进一步强化特隆布墙降温效果的措施。

**关键词** 特隆布墙 夏季过热 降温 控制方案 卷帘 通风口

## Experimental study of different operation strategies of Trombe wall for summer cooling in Dalian

By Chen Xing<sup>★</sup>, Chen Bin and Ding Yinghui

**Abstract** Analyses the temperature field and heat gain of advanced Trombe wall separately with five different operation strategies, and determines the better one in which the rolling curtain is pulled down in daytime and rolled up in nighttime, outer vents open for full day, and inner vents open and close automatically. The comparison results with the reference room show that applying this strategy can not only solve over-heating problems in summer for Trombe wall, but also passively cool the room. For applications, puts forward some measures for improving cooling effect.

**Keywords** Trombe wall, over-heating in summer, cooling, operation strategy, rolling curtain, vent

★ Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning Province, China

①

### 0 引言

夏季过热是被动式太阳能技术应用中普遍存在的问题,也是被动式太阳能建筑大规模推广应用的难点之一。常采用的自然降温手段有遮阳、夜间通风、被动蒸发降温等。利用特隆布墙自身特殊结构对室内环境进行降温的研究很少有报道。目前国内外学者大多将研究的重点放在利用特隆布墙结构诱导室内自然通风方面, Gan Guohui 等人首次采用(RNG)K- $\epsilon$  湍流模型对未使用夏季遮阳的特隆布墙的降温效果进行了理论分析,预测了空气夹层内气流的浮动及空气流量与特隆布墙设计尺寸之间的关系<sup>[1]</sup>; J. Hirunlabh 等人对一种应用于热带地区的无蓄热作用的类似特隆布墙结构的金属墙的诱导自然通风效果进行了实验研究,建立了

热性能稳态预测模型<sup>[2]</sup>; I. Blasco Lucas 应用等比例缩小的实验模型对被动式结构特隆布墙全年运行热效果进行了讨论,提出在夏季使用外遮阳有助于提高其热工性能<sup>[3]</sup>。

研究表明,被动式太阳房的冬季供暖效果越好,夏季过热的问题也就越严峻。所以在保证其良好的冬季供暖效果的前提下,解决夏季过热问题,并尽可能地应用已有的结构进行被动式降温,是推广被动式太阳能建筑的关键。笔者于 2004 年 6 月

①☆ 陈星,女,1980 年 7 月生,硕士研究生  
200135 上海市浦东民生路 1518#B 楼 3 层浙江城建设计集团上海分院  
(0411) 84706371  
E-mail: canny\_cx@yahoo.com.cn  
收稿日期:2005-03-04  
修回日期:2006-04-16

对改进的同实体大小的被动式太阳能实验房的特隆布墙夏季不同降温运行方法进行了实验研究。实验内容包括对空气夹层内卷帘的启闭控制、特隆布墙外通风口的不同开启状态控制以及两者不同

结合方式(见表 1)的控制的研究。通过对室外气象参数以及特隆布墙温度场分布的实时测量,结合传热机理分析了特隆布墙系统在不同运行方案下的降温效果。

表 1 特隆布墙不同控制方案

| 编号 | 控制状态       |      |            |      |      |            |      |      |       |    |       |    |
|----|------------|------|------------|------|------|------------|------|------|-------|----|-------|----|
|    | 卷 帘        |      | 上外通风口      |      |      | 下外通风口      |      |      | 上内通风口 |    | 下内通风口 |    |
|    | 白天放下, 夜间开启 | 全天开启 | 白天关闭, 夜间开启 | 全天开启 | 全天关闭 | 白天关闭, 夜间开启 | 全天开启 | 全天关闭 | 自动    | 关闭 | 自动    | 关闭 |
| A  | ★          |      |            | ★    |      |            | ★    |      | ★     |    | ★     |    |
| B  | ★          |      | ★          |      |      |            |      | ★    | ★     |    | ★     |    |
| C  | ★          |      |            |      | ★    |            | ★    |      |       |    |       |    |
| D  | ★          |      | ★          |      |      |            | ★    |      | ★     |    | ★     |    |
| E  |            | ★    |            | ★    |      |            | ★    |      | ★     |    | ★     |    |

注:所有实验均在晴好天气状况下完成;卷帘和外通风口的启用时间均为 8:00~18:00。

### 1 实验概述

实验房建于 2003 年 9 月,由被动式太阳能实验房(简称太阳房)和对比房组成。两间房子的建筑面积均为 15.2 m<sup>2</sup>(3.9 m×3.9 m),屋顶都采用 80 mm 厚混凝土板外加 100 mm 厚聚苯板保温,其他围护结构采用 300 mm 厚煤渣混凝土空心砌块外加 100 mm 厚的聚苯板保温。太阳房南侧带内置卷帘的特隆布墙的实体部分采用 300 mm 厚混凝土,其结构及温度测点位置如图 1 所示。实验中需要测试的数据包括室外太阳辐照度、室外空气温度、玻璃幕墙内壁面温度、夹层内空气温度、墙体温度等。实验房的温度数据通过计算机多点自动巡回检测系统每隔 10 min 自动记录 1 次,室外气象数据及太阳辐照度分别采用美国微型室外气象站和 PC-2 型太阳辐射记录仪自动记录,室外气象数据每 10 min 记录 1 次。实验测试阶段将内通风口设为自动状态,当夹层内空气与室内空气温差大于 4℃ 时关闭,小于 2℃ 时开启。

卷帘作用示意图如图 2 所示。由于玻璃对红外辐射具有阻挡作用<sup>[4]</sup>,使得特隆布墙白天吸收过多的太阳辐射热并储存在墙体内,夜间通过导热将这部分热量传入室内,致使室温升高,出现夏季过热现象。即使开启外通风口,利用室外空气冷却墙体,也不能有效地缓解其夏季过热问题(见图 2a)。所以解决特隆布墙夏季过热问题首先要节源,即通过使用合理的遮阳设施减少墙体对太阳辐射量的吸收(见图 2b)。

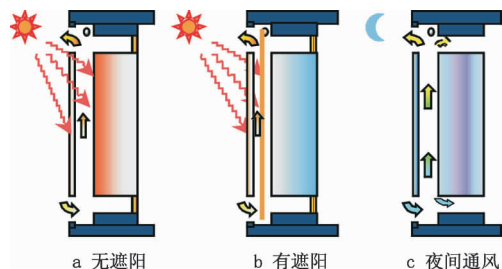


图 2 卷帘作用示意图

#### 2.1.1 墙体得热量

如图 3 所示,在太阳辐照度相近的情况下,未采用任何遮阳措施时,白天墙体吸收的太阳辐射热为 11 392 kJ;使用不透光的卷帘后,墙体与遮阳卷帘的辐射得热量仅为 1 448 kJ,比前者减少了近 90%。说明采取遮阳措施能大大降低出现过热问题的可能性。

同辐射换热量相比,对流换热量和导热换热量所占的份额很小。在使用卷帘的情况下,全天墙体对流得热量为 -20 kJ 左右,导热得热量为 33 kJ 左右。在未使用卷帘的 E 工况下,全天对流得热量为 -439 kJ 左右,导热得热量为 -67 kJ 左右。这主要是由于墙体白天吸收了过多太阳辐射热温

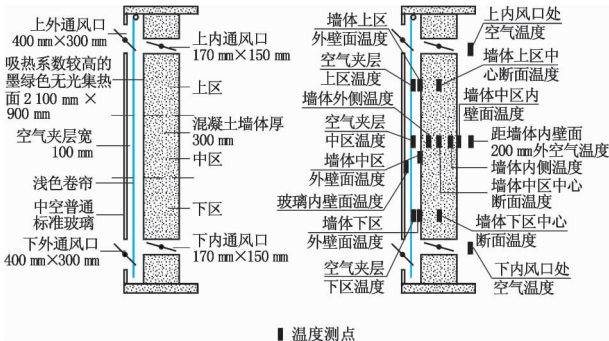


图 1 特隆布墙构造及测点布置

### 2 实验结果讨论

#### 2.1 卷帘作用效果

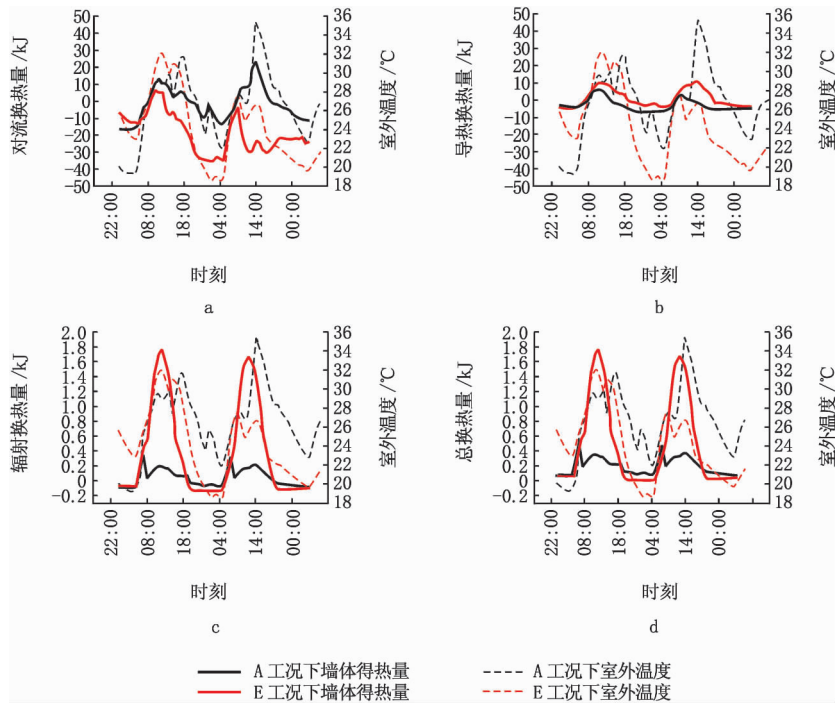


图3 采取遮阳措施对墙体得热量的影响

度升高,始终向外界环境放热。综合三种基本传热方式的得热量,使用卷帘以后墙体全天得热量约为 1 306 kJ,不使用卷帘的情况则高达 10 792 kJ。虽然 E 工况已经比传统的特隆布墙运行模式有所改进,但是仅依靠开启外通风口利用室外空气对墙体进行冷却根本无法抵消墙体白天吸收的过多太阳辐射热。因此,要想有效地解决特隆布墙夏季过热问题,必须使用合理的遮阳手段避免墙体吸收过多的太阳辐射热。

### 2.1.2 温度场分布

图 4 为 A, E 两种工况下的特隆布墙不同时刻的温度场分布图。由图 4 可知,两种工况下墙体内温度由外至内变化的趋势基本相同。距实体墙外壁面 75 mm 处之后,梯度变化不明显,温差变化在

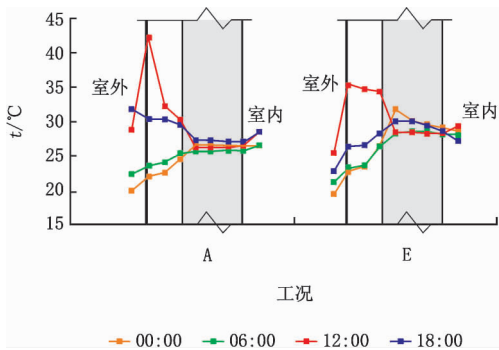


图4 使用内置卷帘对墙体温度分布的影响

0.5 °C 范围内;夜晚,墙体中心温度高,两侧低,呈双向传热过程。墙体各测点温度昼夜波幅不超过 1.5 °C。但对于 A 工况,由于遮阳措施的使用避免了墙体吸收大量的太阳辐射热,使得即使在室外温度很高的情况下(最高室外气温达到 30 °C 以上)墙体内温度仍然可以维持在 28 °C 左右,墙体内壁面温度始终低于室内空气温度,从室内吸热,起到了冷源的作用。对于 E 工况,白天墙体吸收了大量的太阳辐射热使得墙体温度升高,即使在室外温度较适中的情况下(最高气温在 26 °C 左右),墙体内温度仍可达到 30 °C 左右,夜间向室内放热。这也反映了特隆布墙结构导致夏季室内过热的根本原因。由

上面的分析可知,温度波达到墙体一定厚度后(在本实验中为距外壁面 75 mm 处),梯度变化就不明显了,所以对仅在夏季应用特隆布墙结构进行诱导自然通风降温的设计来说,如果不考虑夜间墙体的蓄冷,墙体厚度可以设计得很小。根据我国北方的气候特点,既要利用特隆布墙冬季供暖,又要考虑夏季降温,所以特隆布墙均采用具有一定厚度的重质墙。在夏季可结合北方昼夜温差大的特点,利用墙体在夜间的蓄冷作用。

### 2.2 外风口作用效果

使用卷帘可以有效地缓解特隆布墙夏季过热问题,但如果想要利用特隆布墙结构进行夏季降温,承担室内冷负荷,那么仅使用卷帘是不够的,需要结合内外通风口的协同作用。从理论上讲,我国北方地区,夏季室外最高气温约在 30 °C 左右,通过在玻璃幕墙上开通风口,白天利用室外空气冷却卷帘,降低卷帘温度,减少卷帘与墙体的对流换热量和辐射换热量;夜间,利用室外冷空气在夹层内循环对墙体进行蓄冷,承担白天的部分冷负荷。但是从另一方面说,如果夜间墙体外壁面温度不够高,冷空气循环驱动力可能不足,必将导致墙体的蓄冷能力下降。但如果仅靠墙体白天吸热来提升夜间壁面温度以增强空气循环的驱动力,又可能会导致墙体过度蓄热,同样削弱夜间的蓄冷效果。因此,

如何控制白天外通风口的启闭状态, 直接关系到墙体夜间蓄冷量的多少。下面针对外通风口的不同启闭方式进行讨论。

### 2.2.1 墙体温度分布

图 5 给出了 A, B, C, D 四种工况下的墙体温度分布。由图 5 可以看出, D 工况的墙体壁面与室外空气的温差比 A 工况的大, 说明在 D 工况下夜

间冷空气循环具有更大的循环驱动力。但是从整体效果来说, A 工况的综合降温效果更好, 即使在室外温度很高的情况下, 墙体外壁面温度始终低于室内空气温度, 墙体一直起着冷源的作用。而对于 D 工况, 夜间墙体有向室内传热的现象。B, C 工况的效果介于 A, D 工况之间。所以下面仅对 A, D 工况进行详细讨论。

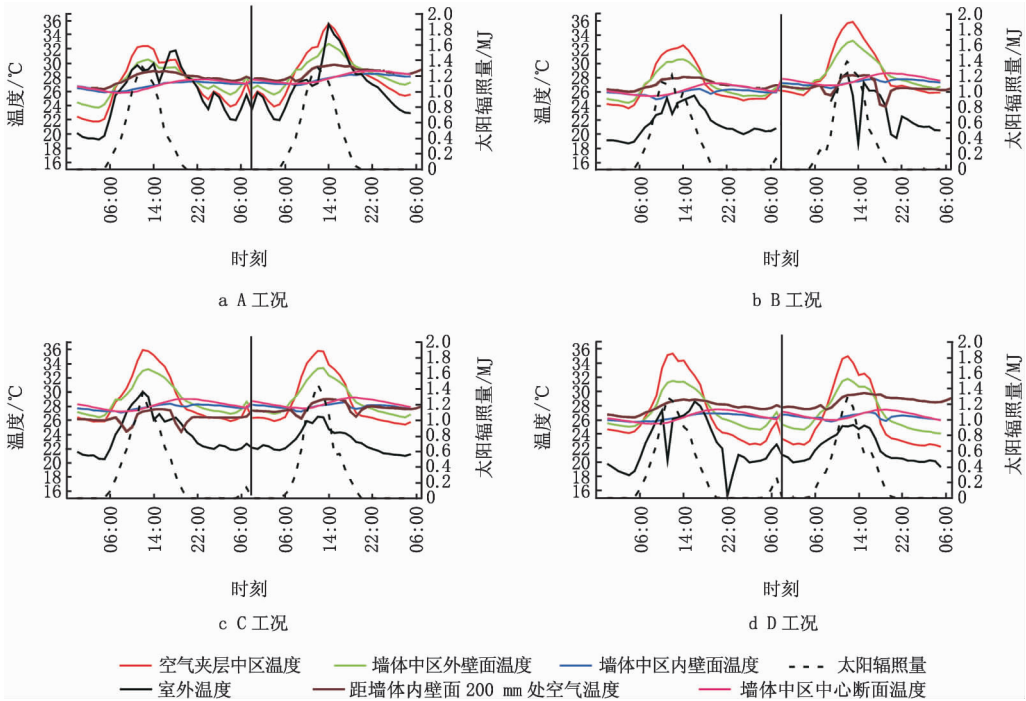


图 5 四种工况下墙体温度分布

### 2.2.2 夹层内空气流态分析

根据文献[5], 当空气夹层的尺寸满足  $\delta/l > Ra_l^{-1/4}$  或  $\delta/l > Ra_\delta^{-1/5}$  ( $\delta$  为空气夹层宽度,  $l$  为空气夹层高度,  $Ra_l$  和  $Ra_\delta$  分别为以  $l$  和  $\delta$  为特征尺寸的瑞利数) 时, 两垂直平板间的自然对流换热可看作两个独立的大平板分别与空气的自然对流换热, 进行简化计算。实验期间空气夹层内以不同特征尺寸 ( $\delta$  或  $l$ ) 计算出的  $Ra$  都能满足上述关系式, 故将空气夹层内的对流换热过程看成两个大平板(玻璃和墙)各自与空气的自然对流换热进行分析<sup>[6]</sup>。为使计算结果更为准确, 将墙体外壁面从上到下分成上、中、下三个区进行计算, 如图 2 所示<sup>[7]</sup>。由计算所得的  $Ra$  (见图 6) 可知, 墙体外壁面附近空气流态基本上为层流, 仅在 D 工况下, 夜间在上区出现  $Ra$  超过  $1 \times 10^9$  的情况。这说明在本实验中, 即使白天不设遮阳, 墙体吸收大量太阳辐射热温度升

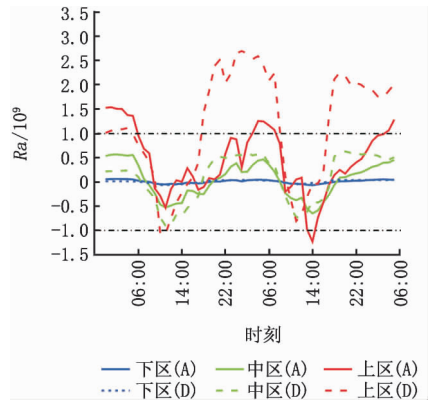


图 6 A, D 工况下空气夹层内  $Ra$

高, 到了夜间, 空气循环流动的驱动力不足, 蓄冷效果不显著。而在 A 工况下, 白天玻璃外壁面与卷帘形成的夹层内空气流态为湍流, 增加玻璃与卷帘间的距离可以进一步强化空气的冷却作用, 降低卷帘的温度。

### 2.2.3 墙体得热量

图7给出了A、D工况下墙体得热量。从图7

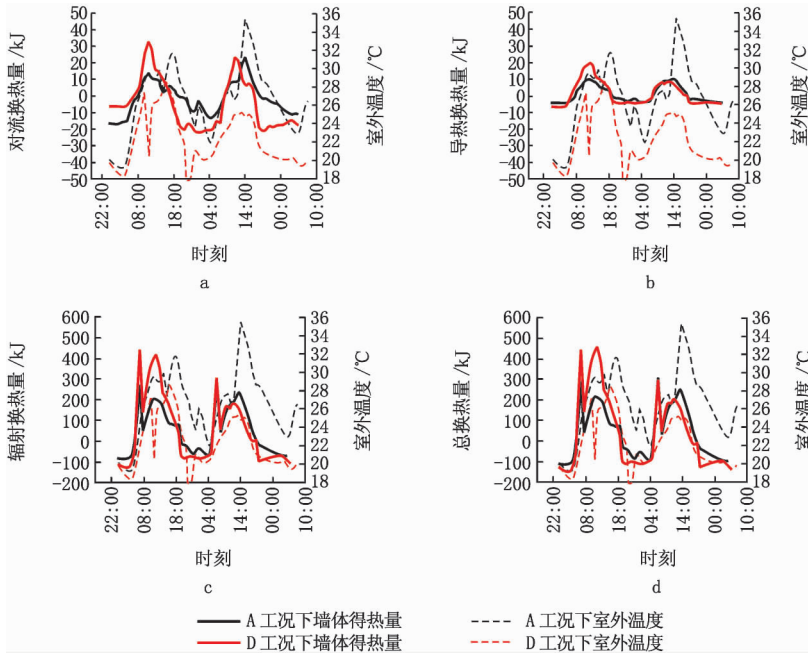


图7 A、D工况下墙体得热量的比较

可以看出,即便使用遮阳卷帘避免了墙体白天吸收过多的太阳辐射热,墙体与卷帘之间的辐射换热量仍是墙体白天得热的主要部分。在室外温度相近的情况下,通过开启外通风口(A工况),白天墙体的辐射得热量大约为1400 kJ,对流得热量为70 kJ,导热得热量为68 kJ;未开启外通风口(D工况下)的白天墙体辐射得热量达2700 kJ左右,对流得热量为140 kJ左右,导热得热量为130 kJ左右,比A工况增加了近一倍。虽然夜间D工况下的墙体热损失(对流换热量为-87.25 kJ,导热换热量为-28.17 kJ)比A工况大(对流换热量为-256 kJ,导热换热量为-40 kJ),但这部分冷量根本无法消除其在白天多得的热量,所以D工况效果比A工况差。通过实验发现,即使在D工况下,夜间夹层内的对流作用也不明显。

本实验A、D工况夜间通风均没有达到被动式墙体蓄冷的预期效果。分析其主要原因还是由于循环驱动力不够造成的,所以如果夏季的夜晚在夹层内使用强制通风手段(例如加一台小型风机),可能会达到更佳的效果。

## 3 太阳房最佳控制方案下与对比房的比较

### 3.1 从室内得到的热量的比较

图8为最佳实验工况下(A工况)太阳房与对

比房南向墙体全天从室内得热量的比较(图中负值表示得热)。从图中可以看出,在测试期间,由于墙体的蓄热作用(无论空心砖还是混凝土),得热量与室外温度波变化趋势正好相反,相位差为12 h左右。

特隆布墙墙体始终从室内吸热,说明特隆布墙在一定程度上起到了被动式降温的作用。特隆布墙全天从室内得热300 kJ左右。对比房墙体全天从室内得热27 kJ左右。因此可以看出,采用合理的运行方式不仅可以有效地解决特隆布墙夏季过热的问题,还可以利用特隆布墙对室内进行一定程度的被动式降温。

### 3.2 室内热舒适性比较

很多学者对评价非空调房间热舒适性的热中性温度值的确定进行了研究。J. F. Busch和Richard de Dear等人分别通过实验得出非空调

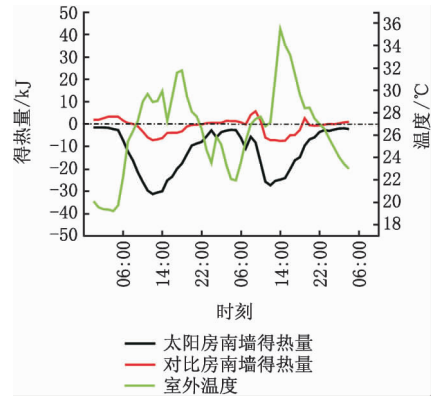


图8 太阳房与对比房墙体从室内得热量比较

房间内热舒适的中性温度在28.5℃左右<sup>[8-9]</sup>;T. H. Karyono在雅加达的实验中则表明该值为26.4℃,与空调房间内的热舒适中性温度(24~27℃)无太大区别<sup>[10]</sup>;A. G. Kwok于1997,1998年在夏威夷所做的两次实验中分别得出27.4℃和27.5℃的舒适性温度值<sup>[11]</sup>;2001年N. H. Wong在新加坡所做的一次实验得出29.3℃的热舒适性温度值,同时提出人们对于舒适性普遍选择的温度为25.1℃,远远低于中性温度值<sup>[12]</sup>。但到目前为止,热舒适性温度还只是一个模糊值,结合北方地区的气候特点,本实验采用非空调房间的热中性温度范围在26~29℃之间,如图9所示。由于被动

式太阳房内还有其他调节手段,比如开窗换气等,所以仅取距壁面 200 mm 工作区高度(1.2 m)处空气温度进行分析。可以看出,虽然太阳房较对比房温度波动大,但在室外最高温度达 35℃左右时,使用合理的特隆布墙控制方案,可以使近壁面处空气温度基本上都在热中性范围内,只有少数时段超出了这一范围。

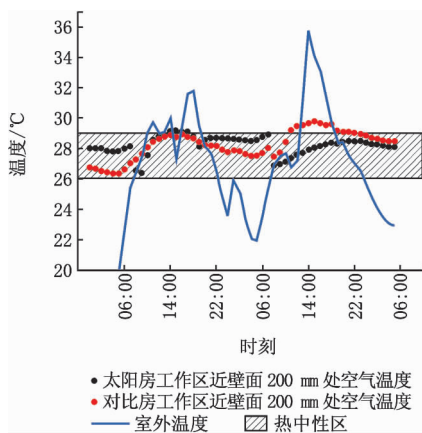


图9 太阳房与对比房近壁面处舒适性比较

#### 4 最佳运行方案讨论

通过实验分析可知,设计运行合理的特隆布墙不仅不会出现夏季过热的的问题,还可以在在一定程度上起到被动式降温的作用。但值得注意的是,在本实验中,实验房内没有任何内热源,也没有人员活动,如果考虑到实际使用的被动式太阳房,A工况下特隆布墙的被动式降温效果就微不足道了。因此为进一步强化其降温效果,应从以下两个方面进行改进。

##### 4.1 卷帘方案

根据太阳辐射仪记录的数据判断,夏季早上 6:00 时,太阳辐照量就可以达到 0.1 MJ/h 左右,所以如果将卷帘放下的时间提前 2 h,可进一步减少墙体得热量 0.5 MJ 左右。通过计算还可以知道,由于本实验所选用的卷帘热容量较小,虽然具有高反射比,但是由于太阳辐射长时间作用,卷帘温度也有所升高,增大了卷帘与墙体的辐射换热量,所以可以通过选用热惰性较大的卷帘材料或者选择合理的卷帘安装位置,降低卷帘的温升,以进一步减少白天墙体的得热量。

##### 4.2 通风方案

通过计算发现,夹层内空气流动可按两个独立大平板间的自然对流计算,所以在不改变其他部件

物性参数的情况下,即使增大夹层宽度,也无法有效地增加墙体夜间对流换热量。而且由  $Gr$  的计算公式可知,虽然增加夹层高度可强化对流换热。但是如果增加夹层的高度,也会增加墙体面积,从而增大墙体的辐射得热量,而且还要考虑到建筑层高的限制,所以想仅通过改变夹层尺寸来增强空气对流,强化墙体的夜间蓄冷效果并不十分可行。故为进一步加强对流作用,增加空气流量,建议在外风口处加一台小型风机,对夹层内进行强制通风。

通过实验知道,最有利于夏季降温的外风口控制方式为全天开启。考虑热带地区白天室外气温较高的情况,若外风口也为自动控制状态,白天可依据夹层内空气温度与环境温度之差进行控制,当夹层内温度低于室外温度的时候,将外通风口关闭。

#### 5 结论

5.1 采用合理的运行方案不仅可以有效解决特隆布墙夏季过热的的问题,还可以在在一定程度上起到被动式降温的作用。

5.2 外通风口全天开启,内通风口自动启闭,卷帘白天放下、夜间开启是较为有效的特隆布墙夏季降温运行方案,可以有效地解决特隆布墙系统夏季过热的的问题。加强夹层内空气流动,还可以达到较为理想的被动式降温效果。

5.3 由于夹层内对流作用相对较弱,墙体并不能实现预期的夜间蓄冷效果。针对北方昼夜温差较大的气候特点,通过采取一定的措施加强夹层内空气的对流,可以进一步强化特隆布墙夏季降温效果。而对于仅利用特隆布墙结构进行夏季诱导通风的南方地区,在设计时可使用薄墙,同样可以达到很好的降温效果。

5.4 通过改变夹层的高度和厚度对增强夹层内空气对流换热效果的作用不是很明显,建议使用主动方式,加小型风机等,这方面有待于进一步研究。

5.5 在夏季 6:00~18:00 使用卷帘,可进一步减少墙体得热量。如果选用具有较大热容量的卷帘,可降低白天卷帘与墙体的辐射换热量,强化使用卷帘的降温效果。

#### 参考文献

- [1] Gan Guohui. A parametric study of Trombe walls for passive cooling of buildings [J]. Energy and Buildings, 1998, 27(1):37-43

不太远的话,可以直接供热风,但在进入终端用户前要通过回风混合等方式将供热温度调到合适的值;另一种在距离较远的情况下,由于取热空气温度较高(200℃左右)会导致漏热损失的加大或保温层厚度的增加,因此可增加一个水-气换热器,将热风转化成 75~95℃的热水提供给用户,在降低漏热损失的同时也减小了供热管路及保温材料的尺寸。

## 5 结论

5.1 根据装置热效率模拟值与实测值的对比可以看出,模拟值与实测值的误差很小,表明上述数学模型具有较高的精度,可以用来对装置特别是大型装置的设计进行热效率的预先评估,从而避免造成无谓的失误和浪费。

5.2 由图 2 可以看出,随着总供热量的增加,装置的热效率也不断增加,理论上可以接近于 100%;另外随总供热量的增加,装置热效率增加的速度越来越慢,同时由于受体积及质量等因素的限制,装置不宜太大,一般最大做到总供热量 6 000 kWh,其热效率在 97%以上。

5.3 从图 2 还可以得知,同一台装置,采取的蓄热方式不同,热效率也有所区别,具体来说半蓄热要

比全蓄热装置的热效率高一些,这是因为半蓄热装置直供热量所占比例较大,装置表面散热量有所减小的缘故。

5.4 由图 2 可知,在总供热量为 1 000 kWh 时,其热效率就已经超过 95%,因此对于工程应用中的大、中型装置来说(总供热量在 1 000 kWh 以上),其装置热效率在 95%以上是完全有保障的(暖通规范要求供热装置的热效率在 95%以上);对于总供热量在 200~1 000 kWh 的小型装置,热效率虽然低些,但也接近或超过 90%;而总供热量小于 200 kWh 的装置,由于其热效率基本上小于 90%,经济性下降较大,因此要尽量避免使用,尤其是供热量小于 100 kWh 的装置。

## 参考文献

- [1] 柯秀芳, 张仁元. 管壳式相变储能换热器的优化设计[J]. 能源工程, 2001(5): 43-45
- [2] 杨世铭. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1980
- [3] 张寅平, 胡汉平. 相变储能——理论和应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1996
- [4] Dessouky E, Bouhamra H T, Ettouney W S, et al. Heat transfer in vertically aligned phase change energy storage systems[J]. Journal of Solar Energy Engineering, 1999, 121(2): 98-109
- [5] Hirunlabh J, Kingduang W, Namprakai P, et al. Study of natural ventilation of houses by a metallic solar wall under topical climate [J]. Renewable Energy, 1999, 18 (1): 109-119
- [6] Lucas I B, Hoese L, Pontoriero D. Experimental study of passive systems thermal performance [J]. Renewable Energy, 2000, 19(1/2): 39-45
- [7] 卞伯绘. 辐射换热的分析与计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988
- [8] Kakac Sadik, Kshah Ramesh, Aung Win. Handbook of single-phase convective heat transfer [M]. New York: Wiley, 1987
- [9] Bejan A. Heat transfer [M]. New York: John Wiley & Sons Incorporation, 1993
- [10] Smolec W, Thomas A. Theoretical and experimental investigations of heat transfer in a Trombe wall [J]. Energy Convers Mgmt, 1993, 34(5): 385-400
- [11] Busch J F. Thermal responses to the Thai office environment [G] // ASHRAE Trans, 1990, 96 (1): 859-872
- [12] de Dear R, Leow K G, Foo S C. Thermal comfort in the humid tropics: field experiments in air-conditioned and naturally ventilated buildings in Singapore [J]. International Journal of Biometeorology, 1991, 34: 259-265
- [13] Karyono T H. Higher PMV causes higher energy consumption in air-conditioned buildings: a case study in Jakarta, Indonesia [G]. F-Nicol, et al. Standards for thermal comfort: indoor air temperature standards for the 21st century. London, 1995: 219-226
- [14] Kwok A G. Thermal comfort in tropical classrooms [G] // ASHRAE Trans, 1998, 104 (1): 1031-1047
- [15] Wong N H, Feriadi H, Lim P Y, et al. Thermal comfort evaluation of naturally ventilated public housing in Singapore [J]. Building and Environment, 2002, 37: 1267-1277

(上接第 12 页)