

夏热冬冷地区遮阳与集热耦合装置研究

罗松钦^{1,2}, 杨昌智¹, 李洪强¹, 毛颖杰³

(1. 湖南大学土木工程学院, 长沙 410082; 2. 长沙理工大学建筑学院, 长沙 410076; 3. 湖南大学设计研究院有限公司, 长沙 410082)

摘 要: 为探索研究建筑遮阳的复合化应用,设计一种同步实现遮阳与集热的耦合装置,并在湖南长沙地区搭建实验平台评估该装置的遮阳集热效果及影响因素。结果表明:遮阳反射板断面尺寸、板间距与当地纬度存在线性关系,太阳辐射强度和循环水流量对装置集热量存在一定比例关系。与相同面积的传统真空管集热器相比,该装置能提高2.5~2.8倍的集热量,与纯电热方式相比,制备同量热水该装置全年可节电30%以上。在降低热水能耗的同时,该装置又能将全年空调负荷降低约2.7%。

关键词: 主动式太阳能建筑; 太阳能; 太阳能集热器; 建筑遮阳; 耦合

中图分类号: TU111

文献标志码: A

0 引 言

建筑遮阳是夏季隔热成本最低、最直接的节能措施之一,但其在夏热冬冷地区可能会增加冬季能耗,对建筑全年节能不利。为此提出一种遮阳集热复合化应用理念,对太阳辐射既“挡”又“用”。夏季“挡”和“用”均对建筑节能有利,冬季做到“挡而不费”,将遮挡的能量换种途径作用于建筑,从而实现全年建筑能耗的降低。国内外建筑遮阳研究重点主要集中在遮阳构件尺寸、遮阳性能以及遮阳构件对建筑形象的影响等方面^[1-3],而建筑遮阳复合化应用研究较少,如刘力军^[4]指出在对现代建筑进行立面设计时,应将美感与实际功能融合。黄海静等^[5]指出当前建筑遮阳存在的问题中“与能源利用结合较少”就是其中之一。将建筑遮阳与太阳能应用系统一体化的文献报道及工程应用极少,杨晚生等^[6]提出采用相变集热器做遮阳构件,实现了建筑遮阳与太阳能利用一体化,重点研究了遮阳板式相变集热器的性能,但因采用相变材料且目前尚未量产,其应用有所受限。

本文提出一种遮阳集热一体化装置设计理念,将建筑遮阳与太阳能集热生产生活热水有机集合,既能降低室内空调负荷,又能制备热水以满足室内卫生热水需求。以长沙区域为案例进行研究,采用理论与实验相结

合的研究手段,对所提出的遮阳集热一体化装置展开研究。

1 遮阳集热耦合元件设计

1.1 水平遮阳构件遮阳性能理论计算模型

因建筑南立面能接收直接太阳辐射的时段远大于东西立面,且在夏热冬冷地区建筑多为南北朝向,所以首先考虑在建筑南立面设置遮阳集热装置。水平遮阳适用于南向,因此建立水平遮阳构件性能计算模型,如图1所示, L 为水平板挑出宽度, D 为端翼挑出长度, H 为窗台至水平板下表面距离; h_{gs} 为太阳高度角。

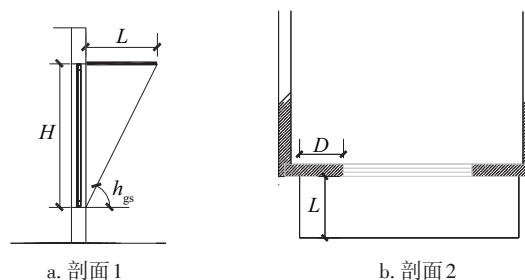


图1 水平遮阳示意图

Fig. 1 Horizontal shading plane diagrams

遮阳构件承担双重功能,即遮阳与汇集太阳辐射。就遮阳而言,遮阳构件应满足夏季最大限度遮阳,北半

收稿日期: 2017-09-25

基金项目: 湖南省教育厅科学研究重点项目(19A019); 国家自然科学基金(51541603); 湖南省自然科学基金(2016JJ2021)

通信作者: 罗松钦(1977—), 男, 博士研究生、讲师, 主要从事建筑节能方面的研究。308714221@qq.com

球自夏至(6月21日)起,太阳逐日自北回归线向南回归线移动,故理论上若实现南向太阳直接辐射全部遮挡,应取冬至日水平遮阳板挑出宽度值。但夏热冬冷地区夏季有遮阳要求,冬季则需考虑增加日照。结合夏热冬冷地区气候特征,将6月1日~9月15日作为夏季防热时段。由太阳运行规律可知,9月15日水平遮阳板挑出宽度即为能满足该时段兼顾夏季防热和冬季保温的最佳宽度。计算结果如表1所示。水平板挑出宽度 L 随时间变化不大,且正午时最大,其值约为 H 的一半,即挑出宽度为 L 的水平遮阳板能遮挡其下方 $2L$ 的区域。一天中端翼挑出长度 D 随时间变化较大,且随 D 值的增大遮挡量增加,若要遮挡完全, D 值取值较大,但 D 值随南向垂直面直接太阳辐射的增大而减小。需要说明的是,表1为以长沙为例计算的结果。但上述分析方法同样适用其他地区。

表1 9月15日不同时刻各参数值

Table 1 Parameters of different times on September 15				
太阳时	太阳高度角 h_{gs}	太阳方位角 A_1	遮阳板挑出尺寸 L	端翼挑出长度 D
09:30	45.80	61.76	$0.46H$	$0.86H$
10:00	51.35	54.14	$0.47H$	$0.65H$
11:00	60.33	32.34	$0.48H$	$0.30H$
12:00	64.02	0.00	$0.49H$	$0.00H$

1.2 遮阳集热耦合元件实验件设计

结合前述水平遮阳板挑出宽度 L 与遮挡范围的关系,提出弧形和渐开线形两种遮阳反射板的设计思路如图2、图3所示,并设定水平遮阳板挑出宽度 L 为200 mm。如图2a所示,弧形遮阳反射板截面为圆的一

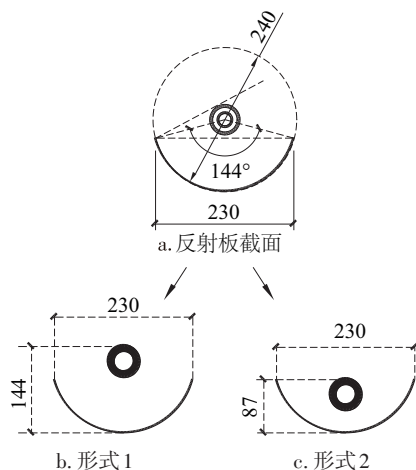


图2 弧形遮阳反射板设计图
Fig. 2 Design of arc shading reflector

部分,其尺寸与圆的直径大小及弧长有关,根据集热管安装位置不同,可有图2b、图2c这2种形式,图2b(形式1)集热管圆心与圆弧圆心重合,辐射反射易落在集热管上,但结构尺寸较大。图2c(形式2)结构紧凑,但集热管不在反射弧焦点上。

图3为渐开线形反射板设计思路,渐开线基圆大小决定渐开线尺寸,此处选取直径38 mm的圆作为基圆(图3a),做对称双渐开线,如图3b所示。根据渐开线的特性,安装集热管时其圆心与基圆圆心重合即可,如图3c所示,结构比较紧凑,集热也比较有利。根据以上设计思路,设计出圆弧Ⅰ型、圆弧Ⅱ型、渐开线形3种遮阳集热元件,其截面如图4所示。

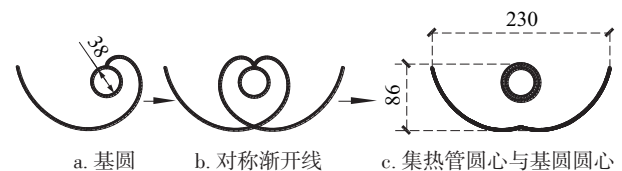


图3 渐开线遮阳反射板设计图(mm)

Fig. 3 Design of involute shading reflector (mm)

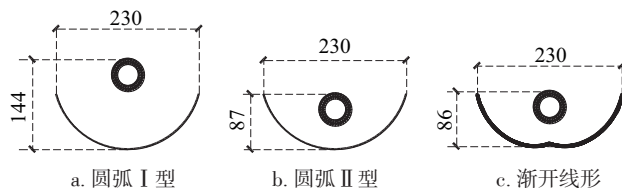


图4 3种遮阳集热元件截面图(mm)

Fig. 4 Cross-sections of three kinds of shading and (mm)
collector element

为对比3种遮阳集热元件的集热效果,进行对比测试,在3种遮阳集热元件的集热管内充满水并封闭,同时放置在太阳光下,实时记录集热管内水温变化,结果如表2所示。由表2可看出圆弧Ⅰ型和渐开线形遮阳集热元件集热效果相差不大,且均优于圆弧Ⅱ型。考虑到结构紧凑,选取渐开线形遮阳集热元件进行后续测试。

表2 不同形式遮阳集热元件内水温变化(°C)

Table 2 Varieties of water temperature in three kinds of shading collector elements(°C)			
日照时长/min	圆弧Ⅰ型	圆弧Ⅱ型	渐开线形
0	14.0	14.0	14.0
20	21.8	19.0	21.8
40	29.0	24.0	29.1
60	35.8	28.8	36.0

2 实验台架构与测试过程

该测试平台如图5所示,选择长沙市某建筑中间楼层无遮挡南向房间2间(房间尺寸6.0 m×3.9 m×3.6 m,窗户尺寸2.4 m×2.1 m),其中一间安装该遮阳与集热耦合装置,另一间作为对比参照房间。

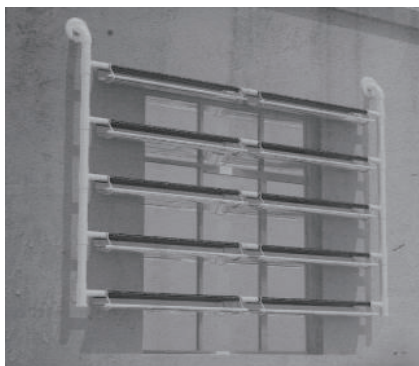


图5 测试平台

Fig. 5 Full scale experimental test platform

平台所采用遮阳集热耦合元件具体设计参数如表3所示,图6为测试系统流程图。测试工况:实验测试按照6种典型天气情况进行,即选择夏季晴天、夏季阴天、过渡季晴天、过渡季阴天、冬季晴天、冬季阴天共6种情况作为测量日,测量日测量时段从09:00~16:00。测量内容:典型测量日测量时段(09:00~16:00)内单位面积太阳总辐射 I_z 、蓄热水箱内水初始温度 t_1 及最终温度 t_2 、被加热水体积 V 、测试房间室内温度、室外环境温度。

表3 遮阳集热耦合元件指标参数表

Table 3 Parameters of shading and collector coupling element

指标	参数	指标	参数
安装行间距 $2L/\text{mm}$	0.345	挑出距离 L/mm	200
反射板开口面积/ m^2	400	集热器	真空管
渐开线基圆直径/ mm	38	集热器管长/ m	1.5
反射板弧端开口距离/ mm	230	—	—

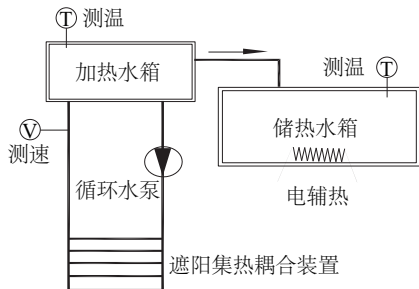


图6 测试系统流程图

Fig. 6 Experimental test system flow chart

3 遮阳与集热耦合装置实验测试结果与讨论

3.1 水流量

为研究水流量的影响,实验测试流量工况分别为100、200、400、600、800 L/h共5种水流量下进行,循环水根据水箱内水的温升可由式(1)计算遮阳集热系统集热量 Q_1 ,定义集热管所围合的区域为集热面,集热面面积 S 由式(2)求得。测量日测量时段内单位面积太阳总辐射 I_z 直接测得,定义集热效率 η 为遮阳集热系统单位面积集热量与测量日测量时段内单位面积太阳总辐射 I_z 的比值,如式(3)所示。

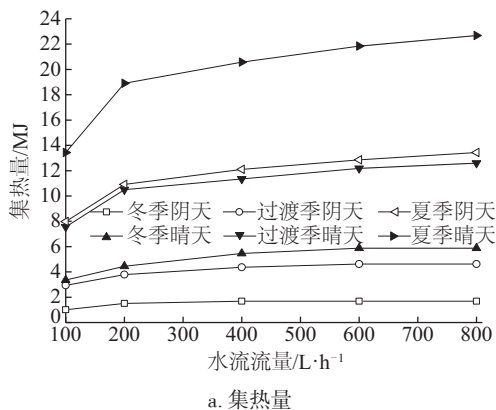
$$Q_1 = c_p(t_2 - t_1)\rho_w V \quad (1)$$

$$S = A \times B \quad (2)$$

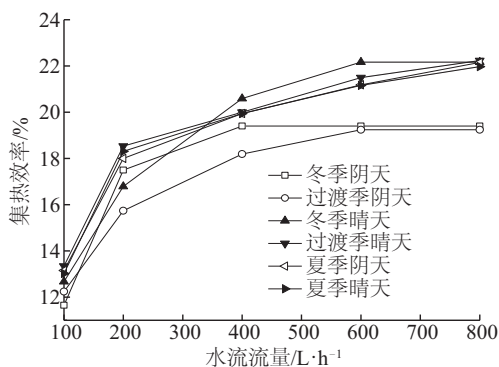
$$\eta = (Q_1/S)/I_z \quad (3)$$

式中, c_p ——水的比热容, $c_p=4200 \text{ J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$; ρ_w ——水密度,取 $\rho_w=1000 \text{ kg}/\text{m}^3$; V ——水体积, $V=0.02 \text{ m}^3$; A ——集热面宽度, $A=1.60 \text{ m}$; B ——集热面长度, $B=3.20 \text{ m}$ 。

对测试数据分析后得出结果如图7所示,由图7可知:1)随着遮阳集热系统水流流量的增加,系统的集热量增加,集热效率提高,但随着流量的加大,集热量增幅变小。集热效率增幅变小对应特定的遮阳集热系统有最佳水流流量,最佳流量与系统水力状况,循环水泵性能等因素有关,此处不做详细分析。就本系统而言,水流流量在200~400 L/h之间较为适宜;2)在流量一定的情况下,随着太阳日辐射量的增加,遮阳集热系统的集热量增加,两者呈近线性关系;3)系统水流流量相同情况下,除过渡季阴天集热效率稍低外,其他天气情况下,系统集热效率相差不大,即系统集热效率随天气状况不同变化不大;4)太阳日辐射量越大,增大流量对增加集热量越有利。若天气状况



a. 集热量



b. 集热效率

图7 不同天气流量与集热量/集热效率关系

Fig. 7 Relationship between heat collection/heat collection efficiency and flow in different weather

不佳,比如在冬季阴天,太阳辐射量较小,即使加大系统流量,集热量增幅也有限。

3.2 遮阳反射板内表面材料反射率

遮阳反射板作为汇集太阳辐射的构件,其内表面材料的辐射反射率必然影响遮阳与集热耦合装置的性能,为研究其影响,首先对比2种极端情况,即遮阳反射板内表面反射材料为铝箔(反射率为0.9)及不安装遮阳反射板(即反射率为零)2种情况下系统的集热特性。然后再增加辐射反射率为0.2(棕色涂料)及0.5(浅黄色涂料)2种情况,对比分析遮阳反射板内表面材料反射率对系统集热性能的影响特性。结果如图8、图9所示。由图8、图9可看出:1)无论天气状况如何,安装遮阳反射板后系统集热量均增加,且增加倍数与天气状况关系不大;2)随着系统水流流量的增大,有遮阳反射板的集热效率增幅明显优于无遮阳反射板的集热效率增幅;3)不同流量不同天气时增加遮阳反射板后系统集热量均有所增加,其平均增加倍数为2.5~2.8倍,流量较大时集热量增加倍数也略大。分析其原因,集热器获得的太阳辐射能与循环水从集热器获得的能量应处于平衡状态,安装遮阳反射板后,反射板有汇集太阳辐射的能力,集热器获得的太阳辐射能增加,适当增加水流流量能更高效的转化太阳辐射能,至某一水流流量时再增大水流流量系统集热量不变。即水流传递的热量与遮阳反射板汇集的能量在某一流量达到平衡。故水流流量并非越大越好,最佳流量与系统水力状况,循环水泵性能等因素有关。

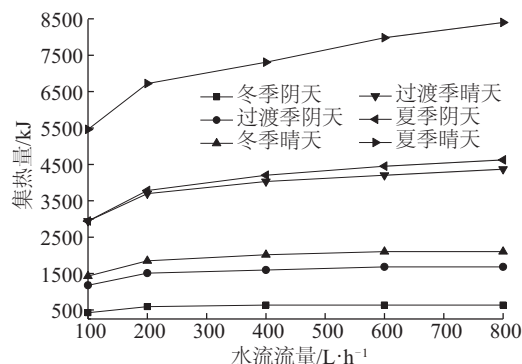


图8 无反射板时不同天气水流流量与集热量关系

Fig. 8 Relationship between heat collection and flow in different weather without shading reflector

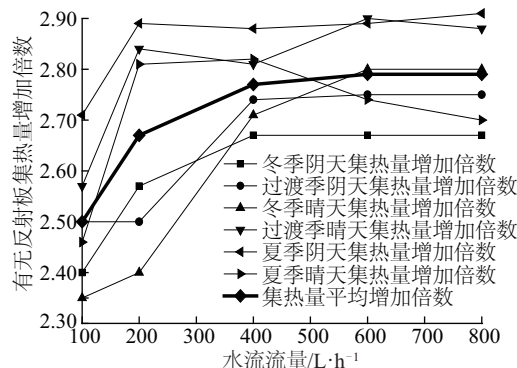


图9 不同流量下有无遮阳反射板集热量比值

Fig. 9 Heat collection ratio in different flow with or without shading reflector

图10为系统水流流量为200 L/h时在不同天气状况下,遮阳反射板反射率的变化与集热量之间的关系。可以看出:随反射率增加,集热量增加,两者呈线性关系。天气状况越好,太阳辐射强度越大,随反射率增加,集热量增幅越大。

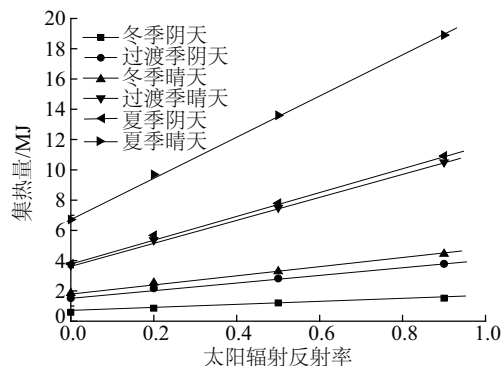


图10 不同反射率时系统集热量的变化

Fig. 10 Varieties of heat collection at different reflectivity

3.3 遮阳反射板的遮阳效果

为检验遮阳反射板的遮阳效果,对两相同相邻房间进行气温测试,一间装有遮阳与集热耦合装置,一间无遮阳。图 11 为夏季晴天测试日室内外气温变化图。图 12 为夏冬两季无遮阳房间室内气温与有遮阳房间室内气温差,过渡季因无空调需求,此处未列出其数据。可看出:1)夏季晴天无论有无遮阳设施室内气温均高于室外,有遮阳与集热耦合装置的房间室内温升小于无遮阳设施的房间;2)有遮阳与集热耦合装置的房间无论冬夏,其室内气温均低于无遮阳房间气温,且晴天温差大于阴天,夏季大于冬季。安装遮阳与集热耦合装置后,夏季对改善室内热环境及降低空调能耗有利,冬季则不利。为对比空调负荷变化,根据测试结果采用斯维尔能耗模拟软件对房间冷热负荷进行计算,计算结果如表 4 所示。结果表明夏季空调负荷降幅大于冬季空调负荷增幅,全年空调能耗约降低 2.7%。

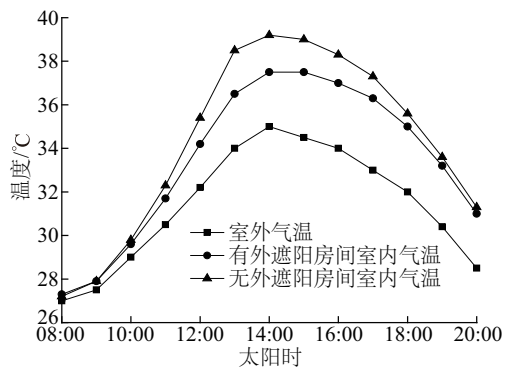


图 11 夏季晴天室外气温及有无遮阳反射板时室内气温

Fig. 11 Outdoor air temperature and indoor air temperature in summer sunny day with or without shading reflector

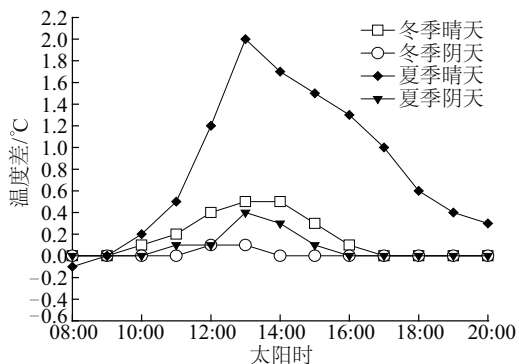


图 12 夏冬两季无有遮阳反射板室内温差

Fig. 12 Indoor temperature difference between reference room (without shading reflector) and test room (with shading reflector)

表 4 有无遮阳反射板空调负荷变化

Table 4 Air conditioning load change of room with or without shading reflector

天气状况	室内空气 计算温度/℃	房间计算空调负荷/W		空调负荷 变化率/%
		有遮阳	无遮阳	
夏季晴天	26.0	4060.0	4400.0	-8.4
夏季阴天	26.0	3620.0	3780.0	-4.4
冬季晴天	20.0	2950.0	2860.0	3.1
冬季阴天	20.0	3080.0	3050.0	1.0

3.4 遮阳与集热耦合装置的集热效果

以医院病房为例,根据热水用水定额^[7],取医院病房热水用水量每床每日需 60℃的热水 70 L,每个房间按 2 张病床计算,不同季节每个房间制备热水所需热量及本实验中的遮阳与集热耦合装置平均日集热量如表 5 所示。由表 5 可知本实验中的遮阳与集热耦合装置在夏季晴天完全能满足医院病房热水需求,在其他时段该装置集热量与实际需求热量有一定差距,但对冷水预热作用明显,由于实验测试时段为 09:00~16:00,此时段外,尤其是在夏季,遮阳与集热耦合装置仍有较长时间可集热,故表 5 中所列“集热装置作用下自来水可达温度”除连续阴雨天外均可达到,如此即可通过遮阳与集热耦合装置预热冷水,达到设定温度后送入蓄热水箱通过电辅热升温,该方法比采用纯电热方式全年可节电 30%以上。

4 结 论

本文旨在研究探索建筑遮阳、集热复合化应用,根据太阳辐射规律设计遮阳及集热耦合装置,并搭建实验测试平台检测该装置的遮阳集热效果,研究其影响因素及关键参数。通过测试研究发现,遮阳反射板断面尺寸、遮阳反射板间距与当地纬度存在线形关系,太阳辐射强度和循环水流量对装置集热量及集热效率存在一定比例关系。与传统同等面积真空管集热器相比,该装置能提高 2.5~2.8 倍集热量。该遮阳与集热耦合装置在制备热水方面比采用纯电热方式全年可节电 30%以上,在降低住院病房热水能耗的同时又能降低空调负荷,全年空调能耗约降低 2.7%。而且该装置设计思路为更加先进的遮阳与集热系统提出做铺垫,具有重要理论与实际应用意义。

表5 医院病房热水参数
Table 5 Hot water parameters in hospital wards

项目	夏季晴天	夏季阴天	过渡季晴天	过渡季阴天	冬季晴天	冬季阴天
定额标准/升·床 ⁻¹	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0	70.0
床位数/个	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
热水需求总量/L	140.0	140.0	140.0	140.0	140.0	140.0
自来水平均温度/℃	28.5	28.5	17.3	17.3	5.0	5.0
生活热水温度/℃	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0	60.0
制备热水所需热量/kJ	18522.0	18522.0	25107.6	25107.6	32340.0	32340.0
集热装置平均日集热量/kJ	19900.0	11420.0	11340.0	4368.0	5460.0	1680.0
集热装置作用下自来水可达温度/℃	> 60.0	> 47.0	> 35.0	> 24.0	> 13.0	> 7.0
集热装置平均日集热量占比制备热水耗热量/%	107.4	61.6	45.2	17.4	16.9	5.2
纯电热计算耗电量/kWh	5.2	5.2	7.0	7.0	9.0	9.0
电辅热计算耗电量/kWh	0.0	2.2	4.2	6.0	7.8	8.8
节电率/%	100.0	57.7	40.0	14.3	13.3	2.2

本研究下一阶段的工作为对比不同尺寸遮阳反射板及集热管不同排列形式对遮阳与集热耦合装置集热性能的影响,以提高集热量,从而更大幅度满足用户热水需求,同时更大程度降低房间夏季冷负荷。

[参考文献]

[1] 张甫仁,胡启国.住宅建筑窗的水平遮阳方式优化设计及节能分析[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2007,39(5):695-700.
ZHANG F R, HU Q G. Optimal design and energy saving analysis of horizontal shading device in residential buildings [J]. Xi'an University of Arch & Tech(natural science edition), 2007, 39(5): 695-700.

[2] 曹国庆,涂光备,杨 斌.水平遮阳方式在住宅建筑南窗遮阳应用上的探讨[J].太阳能学报,2006,27(1):96-100.
CAO G Q, TU G B, YANG B. Study of optimum horizontal shading device dimensions for energy saying in residential buildings[J]. Acta energiae solaris sinica, 2006, 27(1): 96-100.

[3] 楚洪亮,孙诗兵,万成龙.建筑遮阳设施对建筑能耗的影响分析[J].山东建筑大学学报,2016,31(1):

33-37.
CHU H L, SUN S B, WAN C L. Study on the influence of solar shading facilities on building energy consumption [J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2016, 31(1): 33-37.

[4] 刘力军.新环境下建筑立面设计中的遮阳设计的分析[J].城市建筑,2014(33):28-28.
LIU L J. Analysis of the shading design of architectural facade design under the new environmen [J]. Urbanism and architecture, 2014(33): 28-28.

[5] 黄海静,王雅静.复合化的建筑遮阳设计策略[J].华中建筑,2014(12):32-36.
HUANG H J, WANG Y J. Composite architectural shading design strategy [J]. Huazhong architecture, 2014(12): 32-36.

[6] 杨晚生,李丽荣.遮阳板式太阳能相变集热器的实验研究[J].可再生能源,2015,33(7):965-970.
YANG W S, LI L R. Experimental study on plate solar phase-change heat collector with sun shade function [J]. Renewable energy resources, 2015, 33(7): 965-970.

[7] GB 50015—2003,建筑给水排水设计规范[S].
GB 50015—2003, Code for design of building water supply and drainage[S].

RESEARCH ON SUN SHADING AND COLLECTING COUPLING DEVICE IN HOT SUMMER AND COLD WINTER ZONE

Luo Songqin^{1,2}, Yang Changzhi¹, Li Hongqiang¹, Mao Yingjie³

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. College of Architecture, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China;

3. Hunan University Design & Research Institute Ltd., Changsha 410082, China)

Abstract: To explore the composite application of building shading, we designed a novel type of equipment that integrates shading and domestic heat generation. By using an experimental platform built in Changsha, Hunan Province, we evaluated the efficacies of this equipment and determined the factors that influence its efficiency. Our results demonstrate that there is a linear relationship between the cross section size of the shading reflector, the distance between shading reflectors and the local latitude; Heat collected quantity is also proportional to the intensity of solar radiation and the flow of circulating water. Compared to the traditional solar whole glass vacuum tube heater, the collecting heat of this new equipment with equivalent collecting area is higher 2.5-2.8 times. Compared to the pure electric heater, it can save over 30% of electric power annually for generating the same amount of hot water and reduce the annual load of air conditioning by 2.7%.

Keywords: active solar building; solar energy; solar collector; building shading; coupling