

夏热冬冷地区围护结构热工性能节能分析

王厚华^{1,2}, 庄燕燕^{1,3}, 吴伟伟¹

(1. 重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400044;
3. 西安西电开关电气有限公司, 陕西 西安 710077)

摘要: 选取夏热冬冷地区7个典型城市住宅为研究对象, 建立了一个6层居住建筑模型, 利用能耗模拟软件 VisualDOE 4.0, 分析了屋面、窗户、遮阳及外墙围护结构各部件热工性能对建筑能耗的影响. 通过正交试验进行综合节能措施方案设计, 分析不同围护结构组合方案的建筑能耗及节能率变化, 最终确定优化组合方案, 超过建筑节能25%的目标. 模拟计算结果与实测结果吻合得很好, 充分验证了模拟计算的正确性.

关键词: 建筑能耗; 热工性能; 节能潜力

中图分类号: TU 111

文献标识码: A

Energy Saving Analyses on Envelope Thermal Properties in Hot Summer and Cold Winter Region

WANG Houhua^{1,2}, ZHUANG Yanyan^{1,3}, WU Weiwei¹

(1. Faculty of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment of the Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. Xi'an XD Switchgear Electric Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: Residential buildings were selected as the research object in the seven typical cities of hot-summer and cold-winter region. The model of six-storey residential building was set up. Firstly, the effect of thermal properties of enclosure each component on energy consumption of residential buildings was analyzed by energy consumption software VisualDOE 4.0. Enclosures include roof, window, sunshade and exterior wall, et. al. Secondly, comprehensive measures schemes of energy saving were designed by the orthogonal experiment. Then, the building energy consumption and energy efficiency rates of different enclosures combination schemes were compared and analyzed. Finally, the optimize

combination scheme is determined, exceeding the goal of enclosures saving 25% of energy. Simulation results are accordant with the experimental results. It is fully verified the correctness of the simulation calculations.

Key words: energy consumption; thermal properties; energy conservation potential

我国夏热冬冷地区夏季炎热, 冬季阴冷潮湿. 从宜居角度考虑, 必须采取一定的措施才能保证住宅舒适的室内环境. 其中主要措施之一是通过提高建筑围护结构保温隔热能力来实现的^[1-4]. 《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》(JGJ134—2001)提出了节能50%的目标^[5], 其中围护结构承担其中的25%^[6]. 2010年准备实施第三步节能设计标准目标, 即要求达到节能65%^[7], 这需要对建筑围护结构的热工性能提出更高要求.

该地区围护结构各部件热工性能优化组合方案节能贡献率的研究却很少, 相关文献^[8-9]中大多侧重研究围护结构单一部件对建筑能耗的影响, 使节能重点具有一定的盲目性. 本文为提出夏热冬冷地区住宅围护结构热工性能要求提供一定的参考, 着重分析该地区住宅屋面、窗户、遮阳及外墙围护结构各部件热工性能对建筑能耗的影响. 通过正交试验进行综合节能措施方案设计, 分析不同围护结构组合方案的节能潜力, 确定优化组合方案.

1 模拟条件

1.1 建筑模型

建筑模型为6层1梯2户夏热冬冷地区典型居住建筑^[6,10], 建筑物总面积1 099 m², 2室2厅户型,

收稿日期: 2009-07-14

基金项目: “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAJ01A05)

作者简介: 王厚华(1952—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为强化传热及建筑节能. E-mail: whhxinxiang@yahoo.com

每层分东西 2 户,层高 3 m,窗墙比为 0.21,朝向正南,如图 1 所示.



图 1 基础建筑模型平面图

Fig. 1 Plan view of basic building model

1.2 基础能耗

能耗模拟基本参数设定按文献[6]要求确定:室外气象计算参数采用典型气象年(TMY2)数据,换气次数取 $1.5 \text{次} \cdot \text{h}^{-1}$. 冬季室内设计温度取 $18 \text{ }^\circ\text{C}$,夏季室内设计温度取 $26 \text{ }^\circ\text{C}$. 照明负荷取 $5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$,夏季空调额定能效比取 2.2,冬季采用电暖器供热,采暖额定能效比取 1.0. 基础建筑围护结构的热工性能

参数见表 1. 采用 VisualDOE 4.0 进行模拟计算,计算结果见表 2.

表 1 基础建筑围护结构的热工性能参数

Tab. 1 Thermal parameter of the basic building enclosure

围护结构	构造材料	传热系数/ ($\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$)	遮阳系数 S_c
外墙	实心黏土砖	2	—
玻璃	单层玻璃钢窗	6.4	0.8
屋顶	钢筋混凝土板加保温	1.5	—

由于《夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准》中没有对基础建筑构造做出详细说明^[5],如体形系数、楼板的热工参数、灯光照明时间、生活居住模式等,导致夏热冬冷地区 7 个典型城市标准条文解释^[6]模拟能耗与本文模拟能耗之间存在一定的差异,其平均差异率为 7.3%左右,见表 2. 鉴于能耗差异率值较小,可以认为模拟能耗值是可信的. 在下文中的节能率分析中,如没有特别指出,基础能耗均指本文的模拟能耗.

表 2 基础建筑模拟能耗

Tab. 2 Simulation energy consumption of base-building

城市	空调冷耗/ ($\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$)	采暖热耗/ ($\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$)	全年能耗/ ($\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$)	标准中全年能耗/ ($\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$)	差异率/%
上海	33.4	47.1	80.5	91.9	12.4
重庆	41.8	35.1	76.9	79.5	3.2
武汉	34.4	42.6	77.0	100.3	23.2
南京	34.5	50.7	85.2	86.3	1.2
长沙	44.9	7.7	92.6	86.7	-6.8
南昌	33.4	47.1	80.5	88.2	8.7
成都	17.8	44.7	62.5	68.8	9.2

2 围护结构热工性能对建筑能耗的影响分析

由于夏热冬冷地区各大城市所在地域条件的限制,致使夏热冬冷地区各大城市居住建筑围护结构主材存在一定的差异性. 所以笔者通过研究围护结构各部件的热工性能对建筑能耗的影响,并比较分析获得围护结构各部件热工性能的节能贡献率.

2.1 围护结构各部件热工性能对建筑能耗的影响

2.1.1 屋面

为研究屋顶传热系数对全年节能率的影响,根据屋顶保温材料厚度的不同,构建 4 种传热系数不同的模拟屋顶,分析屋顶围护结构热工性能对顶层空调和采暖能耗的影响,研究其节能效果.

改善屋顶热工性能对顶层房间的采暖空调能耗和室内热环境的影响较大. 表 3 为重庆市 4 种类型屋顶的热工性能对顶层能耗及节能率影响的模拟结果,可见改善屋顶的热工性能要求是不容忽视的.

表 3 重庆不同屋顶类型对顶层能耗影响

Tab. 3 Effect of top-level energy consumption by different roof types in Chongqing

屋顶构造编号	传热系数/ ($\text{W} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$)	顶层空调能耗/ ($\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$)	顶层采暖能耗/ ($\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-2}$)	空调节能率/%	采暖节能率/%
1	3.0	56.1	86.3	-16.5	-37.9
2	1.0	44.0	49.6	8.5	20.1
3	0.7	42.8	43.6	11.0	30.3
4	0.5	41.8	37.5	13.2	40.0

图 2 为 7 个典型城市 4 种屋顶构造全年节能率的柱形图.从图中可见,对于夏热冬冷地区居住建筑节能 50%,屋顶的节能贡献率很小,大致为 3%~5%.说明屋顶在整个建筑外围护结构面积中所占的比例远小于外墙,其得热量占建筑围护结构总得热量的比例小,因此,提高屋顶热工性能对顶层房间是有利的,但对整个 6 层居住建筑而言,其对总能耗的降低量是有限的.

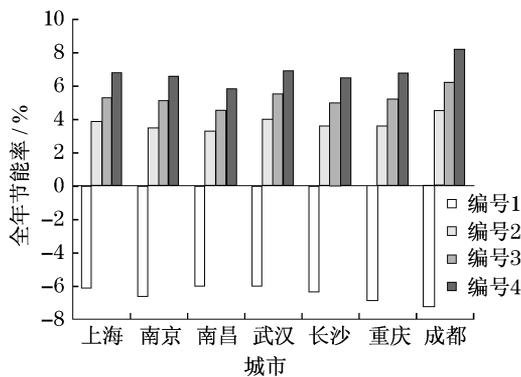


图 2 4 种屋顶的全年节能率

Fig.2 Annual energy efficiency ratios for four types of roof construction

2.1.2 外窗

窗户是建筑围护结构中保温隔热最薄弱的部位,外窗得热量占建筑围护结构总得热量 23%~27%^[11].因此外窗的保温隔热不容忽视.

表 4 为不同玻璃类型的热工性能参数,其中玻璃窗类型 1 为基础建筑所采用的单层玻璃,以类型 1 普通单层玻璃为基准,模拟比较类型 2—4 低辐射贴膜节能中空玻璃不同热工性能的全年节能率.

玻璃窗类型	传热系数/ ($W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$)	遮阳系数 S_c	透光率 V_{lt}
1	6.4	0.8	0.9
2	3.2	0.5	0.7
3	2.0	0.4	0.5
4	1.1	0.7	0.7

图 3 为不同玻璃类型的全年节能率的柱形图,对于夏热冬冷地区居住建筑节能 50%,外窗的节能贡献率大致是 7%~15%.从图中可见,同时减小外窗的传热系数 K 值和遮阳系数 S_c 值将有效地减少全年居住建筑能耗,提高全年节能率.对比类型 3 和类型 4 的节能效果,可知降低外窗的传热系数 K 值

所减小的居住建筑全年能耗小于增大外窗遮阳系数 S_c 值所增加的居住建筑全年能耗时,其全年节能率减小,如长沙、南昌和重庆.反之,其全年节能率增大,如上海、南京和成都.而武汉市降低外窗的传热系数 K 值所减小的居住建筑全年能耗基本相同于增大外窗遮阳系数 S_c 值所增加的居住建筑全年能耗,所以武汉市全年节能率不变.

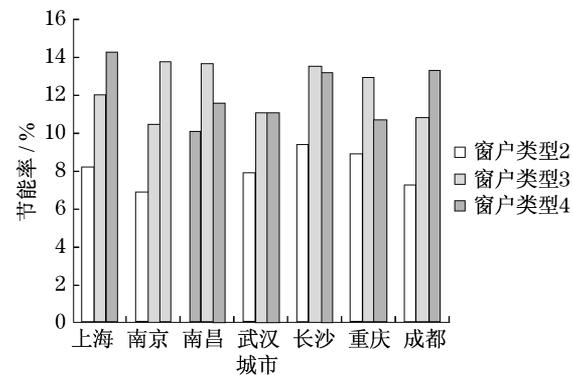


图 3 不同玻璃类型的全年节能率

Fig.3 Energy efficiency ratios for different glass types

2.1.3 遮阳

夏季透过窗户进入室内的太阳辐射是构成空调负荷的主要部分.外遮阳是减少太阳辐射进入室内的有效措施之一.笔者以无遮阳外窗作为比较基准,模拟计算窗上方水平遮阳和窗上方及左右两方均有遮阳板的综合式遮阳的节能效果,其节能率如图 4 所示.

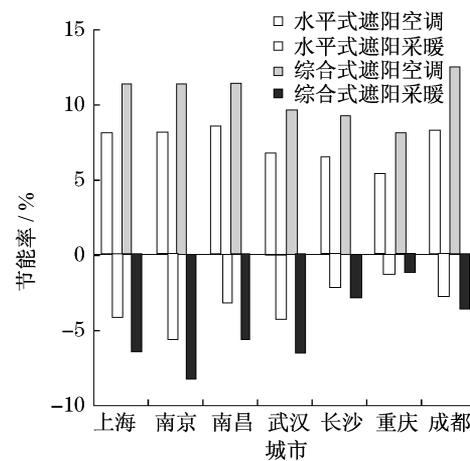


图 4 水平遮阳及综合遮阳的节能效果

Fig.4 Energy efficiency result with horizontal and comprehensive shading

从图 4 可见,在夏热冬冷地区夏季空调固定遮阳节能效果明显,其中水平式遮阳空调节能率为 5%~9%,综合式遮阳空调节能率为 10%左右,然而

由于固定遮阳阻挡冬季太阳辐射的进入,使得固定遮阳对冬季采暖均为负效果,因此,夏热冬冷地区宜采用活动式外遮阳。

2.1.4 外墙

为研究外墙传热系数对全年节能率的影响,外墙保温形式采用外保温,保温材料采用可发性聚苯乙烯板(EPS),基础墙体采用 240 mm 多孔砖(KP型),砂浆采用 20 mm. 根据墙体保温材料 EPS 厚度的不同,构建了 10 种传热系数不同的模拟墙体,以便分析比较不同热工性能的外墙对建筑能耗的影响. 墙体构造热工性能见表 5.

表 5 10 种模拟墙体构造
Tab.5 Ten types of simulation wall

墙构造 编号	EPS 厚度/ mm	传热系数/ ($W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$)	墙构造 编号	EPS 厚度/ mm	传热系数/ ($W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$)
1	0	1.63	6	40	0.63
2	5	1.36	7	50	0.55
3	10	1.17	8	60	0.48
4	20	0.91	9	80	0.39
5	30	0.74	10	100	0.33

通过变化墙体保温材料厚度以改变墙体热工性能,采用 VisualDOE 4.0 能耗软件模拟,分别得出夏热冬冷地区 7 个典型城市的全年节能率、采暖节能率和空调节能率。

图 5 为 10 种墙体的全年节能率随传热系数 K 值变化的曲线. 从图中可见,改善外墙热工性能对该地区节能效果非常明显. 夏热冬冷地区 7 个典型城市的全年节能率曲线具有随 K 值减小而增大的一致趋向性. 当外墙 $K < 0.91 W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$, 除南昌和重庆全年节能率接近 20% 以外,其他各城市的全年节能率均超过 20%.

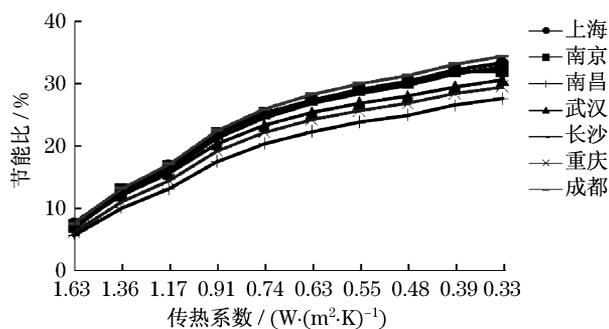


图 5 10 种墙体的全年节能率

Fig.5 Annual energy efficiency ratios for ten types of wall construction

图 6 为 10 种墙体的采暖节能率随 K 值变化的曲线. 从图中可见,改善外墙热工性能对该地区采暖

节能效果显著,当 $K < 0.74 W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$ 时(EPS 厚度为 30 mm), 7 个典型城市采暖节能率均高达 40% 以上.

图 7 为 10 种墙体的空调节能率随 K 值变化的曲线. 从图中可见,因模拟条件换气次数取 $1.5 \text{次} \cdot \text{h}^{-1}$, 没有充分利用夏季温度较低时段自然通风这一自然资源,使得加强墙体保温对空调能耗的影响因各城市的气候特征而异,其中长沙、南昌和重庆为正效果,但空调节能率仅为 5% 左右. 夏季个别城市在保温材料 EPS 超过一定厚度后出现负效果,如上海、武汉和南京,其中成都夏季保温空调节能率为负值,说明保温后夏季反而不利于散热. 因此加强夏季温度较低时段的房间自然通风是节能的重要措施之一.

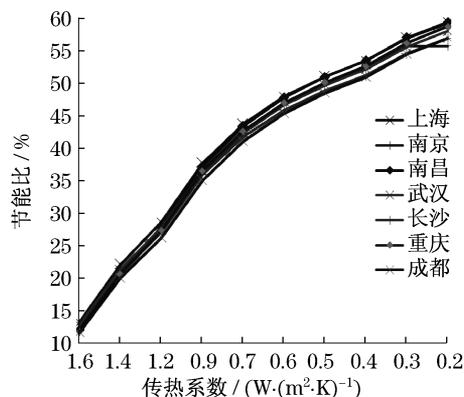


图 6 10 种墙体的采暖节能率

Fig.6 Heating energy efficiency ratio for ten types of wall construction

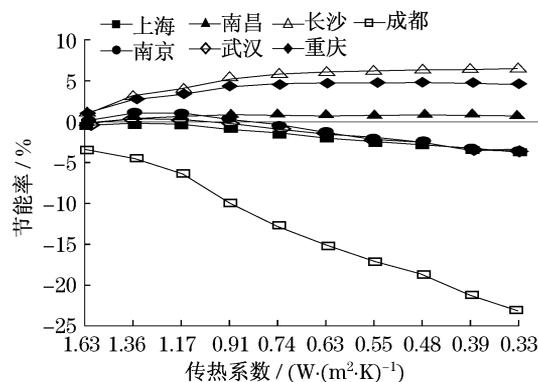


图 7 10 种墙体的空调节能率

Fig.7 Air-conditioning energy efficiency ratio for ten types of wall construction

2.2 围护结构热工性能对能耗水平的影响

对比以上屋顶、窗玻璃、遮阳、墙体围护结构各部件热工性能的节能效果,其中屋顶传热系数为 $0.8 \sim 1.0 W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$ 时,其全年节能率为 3%~5%;玻璃窗传热系数为 $2.0 \sim 3.2 W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$ 、

S_c 为 0.4~0.5 时,其全年节能率为 7%~15%;夏热冬冷地区外墙传热系数为 $0.9\sim 1.4\text{ W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ 时,其全年节能率为 10%~20%。由以上数据分析,夏热冬冷地区围护结构各部件节能贡献的显著性依次为墙体、玻璃、遮阳、屋顶。

2.3 围护结构各部件的组合方案

研究分析围护结构各部件热工性能对建筑能耗的影响,为从各种节能构件的节能技术方案中找出较优组合方案,同时避免大量的模拟计算,笔者采用正交试验方法^[12]组合设计节能方案,进行模拟研究。

遵循均衡搭配和整齐可比性,并结合工程实施可行性的原则,考虑节能标准规定等,确定屋顶、玻璃、遮阳、外墙等 4 个因素,除外墙选取 4 个水平以外,其余因素均选取 3 个水平。采用 $L_8(4^1\times 2^4)$ 混合水平正交表设计模拟试验方案,见表 6。其中基层墙体为多孔砖(KP 型),屋顶采用倒置式保温,基层屋面为钢筋混凝土板。

表 6 正交设计方案
Tab.6 Orthogonal design scheme

方案	因素			
	屋面	玻璃	遮阳	外墙
1	1($K=1.0$)	2($K=2.0, S_c=0.4$)	2(综合式)	1($K=1.63$)
2	2($K=0.73$)	2($K=2.0, S_c=0.4$)	1(水平式)	3($K=0.91$)
3	2($K=0.73$)	2($K=2.0, S_c=0.4$)	2(综合式)	2($K=1.17$)
4	1($K=1.0$)	2($K=2.0, S_c=0.4$)	1(水平式)	4($K=0.74$)
5	2($K=0.73$)	1($K=3.2, S_c=0.5$)	1(水平式)	1($K=1.63$)
6	1($K=1.0$)	1($K=3.2, S_c=0.5$)	2(综合式)	3($K=0.91$)
7	1($K=1.0$)	1($K=3.2, S_c=0.5$)	1(水平式)	2($K=1.17$)
8	2($K=0.73$)	1($K=3.2, S_c=0.5$)	2(综合式)	4($K=0.74$)

注:K 的数值单位为 $\text{W}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{K})^{-1}$ 。

图 8 为围护结构各部件组合设计方案的全年节能率效果图。从图中可见,上述 4 项围护结构组合方案的全年节能率为 18%~45%。同一节能措施下,由于气候条件等因素的不同,夏热冬冷地区 7 个典型城市节能效果不同,而方案 4 为夏热冬冷地区 7 个典型城市正交试验组合方案中最优组合方案,其全年节能率分别为:成都 42.7%,南昌 34%,南京 42.0%,上海 42.2%,武汉 39.7%,长沙 42.8%,重庆 40.6%。

综上所述,围护结构各部件的热工性能对能耗影响显著,注重这一地区围护结构热工性能的要求,可以达到明显的节能效果。从近年来国内建筑节能技术的发展来看,在初期投资增加不多的情况下^[13],方案 4 是完全可以实现的,因此围护结构承担

建筑节能 25% 的目标也是不难实现的,且大有潜力可挖。为提出夏热冬冷地区住宅围护结构热工性能要求提供一定的参考。

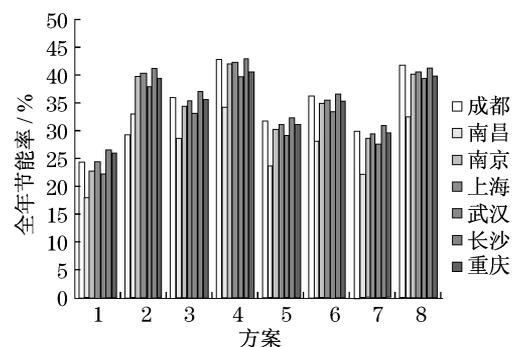


图 8 正交设计各方案的全年节能率

Fig.8 Annual energy efficiency rates of orthogonal design schemes

3 模拟结果的实验验证

2002 年底,由同济大学和威凯公司上海技术中心在上海同一地点建造了 2 间对比实验小室。2 间小室均采用空调维持相同的室温,比较耗电量。冬季 12 月、1 月、2 月份的实验结果表明^[13-14],与无保温的小室比较,保温小室的节能率已达到 40% 以上。笔者利用上海实验建筑的基础数据,对同一建筑进行了模拟计算。模拟结果与同济大学的冬季实测结果基本吻合,充分验证了模拟结果的正确性。

2009 年 8 月份,由重庆大学城市建设与环境工程学院在实验楼 3 楼屋顶搭建对比性实验小室。所搭建 2 个实验小室的屋顶、门及地面围护结构热工性能均相同,东、西、北面均开窗。建筑面积为 $3.6\text{ m}\times 3\text{ m}$ (10.8 m^2),房间高度 3 m,东、西、北面预留窗口面积为 $1.5\text{ m}\times 1.5\text{ m}$ (2.25 m^2),窗台高为 0.9 m,空调安装位置均为实验小室北面墙,分别在南、北墙上高 2.4 m 的位置开口,其大小为 $0.165\text{ m}\times 0.165\text{ m}$,在南面墙装换气扇,如图 9 所示。

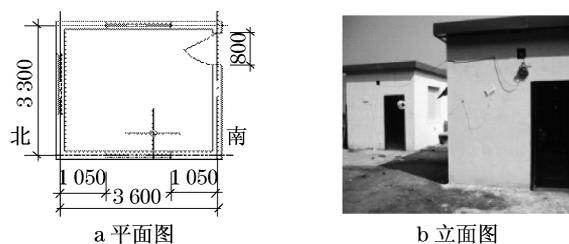


图 9 实验小室模型(单位:mm)

Fig.9 Plan view of the laboratory model(unit:mm)

基础小室的主墙体采用普通砖混结构住宅 240 mm 实心黏土砖墙;节能小室的主墙体采用陶粒混凝土空心砖,对比实验小室围护结构的热工参数见表 7.

表 7 对比实验室围护结构热工参数

Tab.7 Thermal properties of comparison experimental room-enclosure

围护结构	传热系数/ ($W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$)	遮阳系数 S_c
节能墙体	0.57	
基础墙体	1.63	
节能窗玻璃	1.70	0.8
基础窗玻璃	6.40	0.9
地面	2.45	
屋面	0.15	

注:软件默认的内外表面对流换热热阻之和为 $0.15 m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$

两间小室均采用空调维持相同的室温,东面均开窗,换气次数为 $1 \text{次} \cdot \text{h}^{-1}$,遮阳角度分别选取 $90^\circ, 60^\circ, 45^\circ$,测量基础小室和节能小室的空调耗电量,周期为 1 d,比较耗电量,具体操作说明见表 8.笔者利用重庆实验小室的基础数据,对同一建筑进行了模拟计算.模拟结果与重庆大学的实测结果对比如图 10 所示.模拟能耗与实验能耗之间存在一定的差异,其平均差异率为 8.49%左右,鉴于差异率值较小,模拟结果与夏季实测结果基本吻合,充分验证了模拟结果的正确性.

表 8 正交设计各方案的全年节能率

Tab.8 Annual energy efficiency rates of orthogonal design schemes

测量日期	开窗朝向	遮阳角度/ $(^\circ)$
2009-08-24	东	90
2009-08-25	东	60
2009-08-31	西	60
2009-09-01	西	45

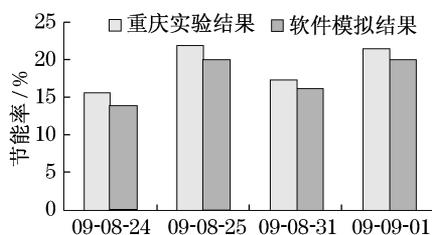


图 10 重庆实验小室实验值与模拟值节能率的对比

Fig.10 Comparison of energy efficiency ratios for experiment and simulation results in Chongqing

4 结论

(1) 改善夏热冬冷地区外墙热工性能全年节能效果明显,其节能贡献率范围为 $10\% \sim 20\%$.其中冬季采暖节能效果尤为显著,但对空调能耗影响因各城市的气候特征而异,部分城市夏季节能率出现负效果.因此加强夏季温度较低时段房间的自然通风是节能的重要措施之一.屋顶热工性能对整个建筑的节能率贡献很小,大致为 $3\% \sim 5\%$.提高屋顶热工性能对顶层房间是有利的,但对整个 6 层居住建筑而言,其对总能耗的降低量是有限的.然而在另一方面,屋顶热工性能对顶层房间的室内热环境和采暖空调能耗的影响相对较大.外窗的节能贡献率范围是 $7\% \sim 15\%$,改善窗户的热工性能,全年降低外窗传热系数 K ,夏季降低遮阳系数 S_c 值,冬季不遮阳,如此将有效地减少住宅能耗,提高全年节能率.此外,夏热冬冷地区宜采用活动式外遮阳节能.

(2) 夏热冬冷地区居住建筑围护结构各部件节能贡献的显著性依次为墙体大于玻璃大于遮阳大于屋顶.

(3) 采用正交试验设计模拟实验组合方案,可获得围护结构各部件的优化组合方案,即屋面、玻璃、遮阳、外墙分别取水平 1,2,1,4,夏热冬冷地区 7 个典型城市的全年节能率为 $34.0\% \sim 42.8\%$.这一方案建筑造价增加不会很大,完全可以实现.说明注重这一地区的围护结构热工性能的要求,完全可以实现围护结构节能 25% 的目标,且大有潜力可挖掘.

(4) 模拟计算结果与实测结果吻合得很好,充分验证了模拟计算的正确性.

参考文献:

- [1] 余晓平,付祥钊,廖小烽.浅析夏热冬冷地区低能耗住宅技术路线[J].重庆建筑大学学报,2008,30(6):116.
YU Xiaoping, FU Xiangzhao, LIAO Xiaofeng. Technical solutions for low energy consumption residences in subtropical regions[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2008, 30(6):116.
- [2] 于清华,杨昌智,田利伟,等.夏热冬冷地区围护结构热工性能系统评价方法的研究[J].湖南大学学报:自然科学版,2008,35(10):16.
YU Jinghua, YANG Changzhi, TIAN Liwei, et al. Systematic evaluation of the thermal performance of building enclosures in hot summer and cold winter zone [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2008, (10): 16.

(下转第 1700 页)