

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.2017.02.018

人行为模式对外墙内外保温节能效果的影响

阮 方,钱晓倩,钱匡亮,傅 新

(浙江大学 建筑工程学院,杭州 310058)

摘 要:针对现行夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准中规定的连续用能方式与该地区实际用能情况存在严重偏离的问题,在该气候区典型城市杭州开展居民空调用能行为的问卷调研,发现本地区居住建筑普遍具有间歇用能的特点,空调开启行为受人体热感受影响,室内气温偏离人体舒适度范围越大空调开启率越高.然后,采用 DeST 建筑能耗模拟软件分析不同类别用能方式下居住建筑外墙内外保温的全年节能效果.结果表明,在连续用能方式下,外保温的全年节能效果优于内保温;在不考虑容忍温度的间歇用能方式下,内保温的全年节能效果优于外保温.容忍温度可变的情况下,内外保温节能效果相同的容忍温度临界点为夏季 31.8 ℃、冬季 13.4 ℃.当容忍温度低于临界点时,内保温节能效果更优;当容忍温度高于临界点时,外保温节能效果更优.合理规定节能设计标准中的空调运行工况是准确评价外墙保温措施节能效果的重要前提.

关键词:夏热冬冷;居住建筑;外保温;内保温;间歇用能;容忍温度

中图分类号: TU111 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2017)02-0109-07

Influence on energy saving effects of internal and external wall insulations for different occupant behaviors

RUAN Fang, QIAN Xiaoqian, QIAN Kuangliang, FU Xin

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Aiming at the problem of serious deviation from the actual energy consumption for the calculated energy consumption with the continuous operation mode prescribed in current design standard for residential building energy efficiency in hot summer and cold winter zone, a questionnaire survey for the use mode of air conditioner has been conducted in Hangzhou, a typical city in this climate zone. It was found that there widely exists intermittent energy consuming method in the residential buildings of this area. The air conditioning using behavior was affected by thermal feeling of human body. The greater the indoor air temperature deviates from the the human body comfort scope, the higher the air conditioning opening rate is. DeST was employed to calculate the annual energy consumption of the residential building with internal and external wall insulations under different occupant behaviors, and then the annual energy saving effects were analyzed. The results show that in continuous energy consuming method, the annual energy saving effect for external insulation is better than that for internal insulation; in intermittent energy consuming method without considering tolerate temperature, the annual energy saving effect for internal insulation is better than that for external insulation. Under the condition of variable tolerate temperature, the critical tolerate temperature point for internal and external insulation with the same energy saving effect is 31.8 ℃ in summer and 13.4 ℃ in winter. When tolerate temperature is lower than the critical point, the internal insulation has better energy saving effect; when tolerate temperature is higher than the critical point, the external insulation has better energy saving effect. The choice of reasonable insulation means in this region was greatly affected by the air-conditioning behaviors and occupants' thermal tolerance. The critical tolerate temperature for the same energy saving of the internal and external insulations is 31.8 ℃ in summer and 13.4 ℃ in winter. Therefore, setting reasonable air-conditioning behavior in the design standard for energy efficiency is an important premise for accurately evaluating the energy saving effect of exterior wall insulation measures.

Keywords: hot summer and cold winter zone; residential building; external insulation; internal insulation; intermittent energy consuming; tolerate temperature

目前国内外大量研究表明,建筑的实际运行能耗不仅与围护结构和空调系统的性能有关,很大程度上还与使用者的行为密切相关^[1-3].根据日常经验,居住者开关空调的行为受室内气温与人体耐受度的综合影响.只有当室内温度环境偏离人体舒适

收稿日期: 2016-03-07
基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2012BAJ12B02)
作者简介: 阮 方(1990—),男,博士研究生;
钱晓倩(1962—),男,教授,博士生导师
通信作者: 钱晓倩, qianxq1@zju.edu.cn

区域(高于或低于某一水平)时,形成了对人体的有效刺激,居住者才会产生开启空调的动作.以夏季制冷为例,当室内环境温度达到 26~30℃时,高耐受度的人员可能不会选择开启空调,当环境温度高于 30℃后,人员才开启空调,室内温度便从 30℃降至 26℃.而按照目前中国各地区建筑节能设计的规范计算工况,人员在室时段内,当室内环境温度高于空调设定值 26℃后空调便开启,没有考虑居住者对温度具有一定耐受性的客观情况.因此,实际人行为下建筑采暖及制冷负荷可能远低于按规范规定公开计算出的软件模拟值.

中国的夏热冬冷地区居住建筑中,夏季制冷及冬季采暖时空调运行普遍具有间歇启停的特点^[4-5].目前,夏热冬冷地区居住建筑围护结构热工设计中,基本沿用严寒及寒冷地区外墙外保温的形式,其实际节能效果并不理想,节能率远低于预期^[6].这一现象可能是由本地区居住建筑现行节能设计标准中规定的用能方式与该地区实际情况存在偏离导致的.外墙外保温在标准工况下节能效果显著,但在实际工况下可能效果甚微.燕达等^[7]模拟分析了一栋上海地区居住建筑后发现,外墙外保温在连续采暖方式下节能效果显著,而在间歇用能方式下节能量很少.目前,国内外对于实际人行为模式下,夏热冬冷地区居住建筑外墙内外保温的全年节能效果罕有文献报导.对此,本文在夏热冬冷地区的典型城市杭州开展了大规模的居民空调用能行为问卷调研,理清本地区的实际采暖及制冷的空调用能行为模式.采用 DeST 建筑能耗模拟分析软件^[8],对夏热冬冷地区一栋实际建筑进行了全年动态模拟分析,研究不同人行为方式对本地区居住建筑外墙内外保温全年节能效果的影响.

1 问卷调查

此次问卷调查时间为 2014 年 10 月,调研对象为杭州市居民,主要调查住户在采暖及制冷时空调设备的使用情况.调研共发放 500 份问卷,回收有效问卷 422 份.

卧室空调使用方式情况如表 1 所示,大部分住户选择看情况开空调(夏季制冷时为 98.3%,冬季采暖为 82.7%).在选择开情况的住户中,夏季制冷空调行为及其概率如表 2 所示,最符合实际情况的居民使用方式是觉得热时开空调,觉得冷时或者起床之后关空调.冬季采暖时的空调行为及其概率如表 3 所示,最符合实际情况的是觉得冷时开空调,觉得热时关.综合表 1~3 可知,夏热冬冷地区居住建筑卧室空调采暖及制冷具有间歇用能的特点,且空调开

启行为受人体热感受影响.

表 1 卧室空调使用方式

Tab.1 A/C operation pattern for bedroom %			
方式	从不开	看情况开	一直开
制冷	0	98.3	1.7
采暖	17.3	82.7	0

表 2 卧室夏季制冷空调行为

Tab.2 Bedroom occupant behavior for summer cooling %			
开空调方式	概率	关空调方式	概率
一进卧室开	6.8	离开卧室时关	10.1
觉得热时开	58.7	晚上睡前关	22.7
晚上睡前开	34.5	觉得冷时关	32.9
		早上起床后关	34.3

表 3 卧室冬季采暖空调行为

Tab.3 Bedroom occupant behavior for winter heating %			
开空调方式	概率	关空调方式	概率
一进卧室开	3.0	离开卧室时关	10.4
觉得冷时开	76.1	晚上睡前关	22.4
晚上睡前开	20.9	觉得热时关	49.3
		早上起床后关	17.9

2 计算模型

2.1 建筑信息

模拟建筑所在地为杭州,建筑共 4 层,层高 3 m,窗墙比 0.3.建筑标准层如图 1 所示,图中房间 A~D 为用能房间.夏热冬冷地区居住建筑大多采用分室用能方式(以房间为单位进行制冷或采暖),因此,可以按户为单位进行能耗分析.本文只将第 3 层的计算结果用于讨论分析,便于除去顶层和底层的影响,使结论更具代表性.建筑围护结构热工参数如表 4 所示.

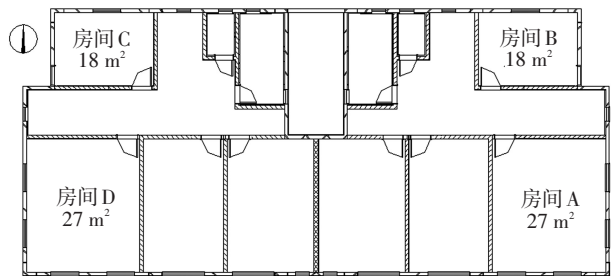


图 1 模型中建筑中间层布置

Fig.1 Layout of typical floor in the building model

2.2 空调参数及作息设定

本模型中用能房间采用分体空调进行温度调节.空调参数设定参照本地区节能设计标准^[9]的规定:室内控制温度分别为 18℃(采暖)和 26℃(制冷).空调运行时段空气渗透换气次数为 1.0 次/h,空调关闭时段自然通风换气次数范围取 1.0~5.0 次/h.室内平均得热强度取 4.3 W/m².采暖期为当年 12 月 1 日至次年 2 月 28 日;空调期为 6 月 15 日至 8 月 31 日.根据调研结果,将人行为典型工况抽象为表 5 所示的 3 种模式,其中考虑容忍温度

的间歇运行模式又分为 3 档容忍温度等级.间歇用能方式的人员在室时段为 22:00 至次日 6:00.

表 4 建筑模型围护结构热工参数

Tab.4 Thermal parameters of building envelop for the building model

围护结构	构造	$\lambda/(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1})$
外墙	13 厚水泥砂浆抹面/240 厚实心粘土砖/30 厚 XPS 保温板/13 厚水泥砂浆抹面	0.703
	13 厚水泥砂浆抹面/30 厚 XPS 保温板/240 厚实心粘土砖/13 厚水泥砂浆抹面	0.703
不保温	13 厚水泥砂浆抹面/240 厚实心粘土砖/13 厚水泥砂浆抹面	1.854
内墙	20 厚水泥砂浆/180 厚陶粒混凝土/20 厚水泥砂浆	1.515
楼板	30 厚木地板/70 厚砂浆找平/100 厚钢筋混凝土/130 厚泡沫塑料	0.250
窗户	3/13a/3 双层中空 (遮阳系数:0.794)	1.960
门	100 厚松木门	1.160

表 5 不同空调运行模式

Tab.5 Different A/C operation modes

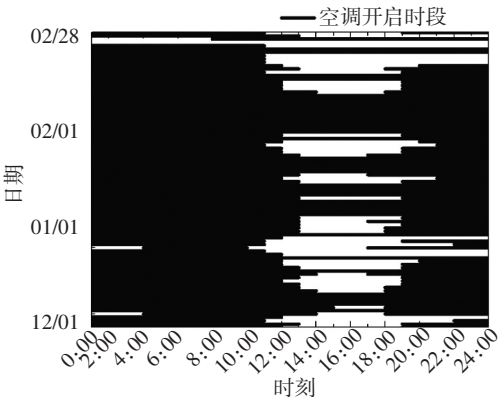
模式	类型	说明
1	连续运行	24 h 连续运行
2	间歇运行	有人在就开启空调
3	考虑容忍温度的间歇运行模式	模式 3a: 低容忍度等级, 容忍温度夏季取为 28 ℃, 冬季为 16 ℃
		模式 3b: 中容忍度等级, 容忍温度夏季取为 30 ℃, 冬季为 14 ℃
		模式 3c: 高容忍度等级, 容忍温度夏季取为 32 ℃, 冬季为 12 ℃

3 结果分析

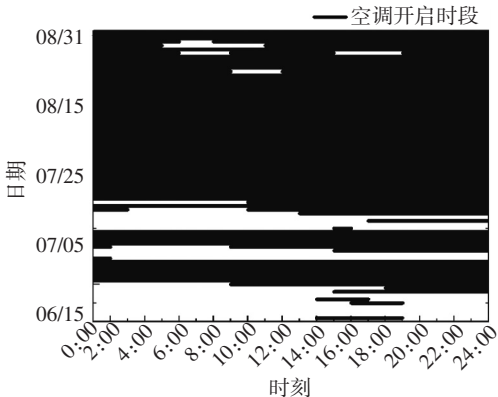
3.1 不同用能模式下的空调作息

不保温方式下房间 A 在不同空调运行模式下,卧室空调全年开启情况如图 2 (a) ~ (j) 所示.横坐标表示空调开启时刻,纵坐标表示采暖及空调期的具体日期,黑色部分为空调开启时段.图 2(a)、(b) 为连续用能方式下卧室空调启停情况,实际上夏热冬冷地区卧室空调在整个采暖及空调期内连续开启的情况不多

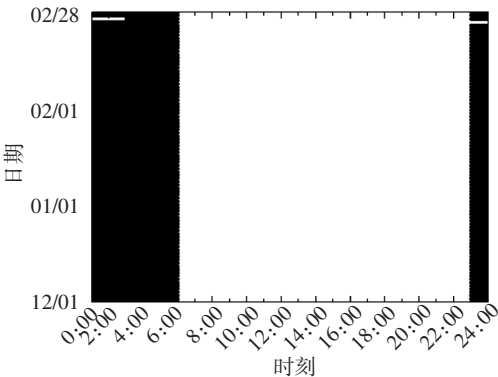
见.图 2(c)、(d) 为不考虑容忍温度的间歇用能方式卧室空调开启情况,采暖及空调期内空调基本上在 22:00—次日 6:00 全部开启,此用能模式下空调开启情况与连续用能模式相比,离实际情况更近,但是与夏热冬冷地区卧室空调实际的开启情况仍然有一定距离.图 2(e) ~ (j) 为考虑不同容忍温度等级的间歇用能方式卧室空调开启情况,可以看出,在考虑容忍温度的间歇用能方式下,采暖及空调期的空调设备开启频率更贴近本地区的用能实际.



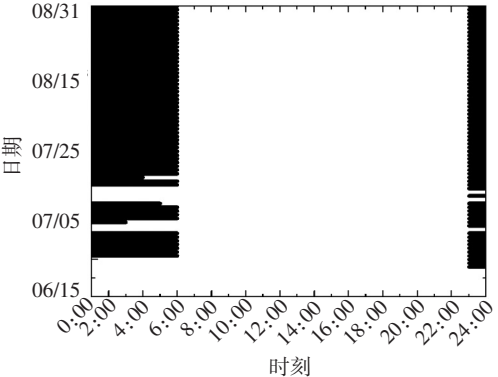
(a) 冬季连续用能



(b) 夏季连续用能



(c) 冬季间歇用能



(d) 夏季间歇用能

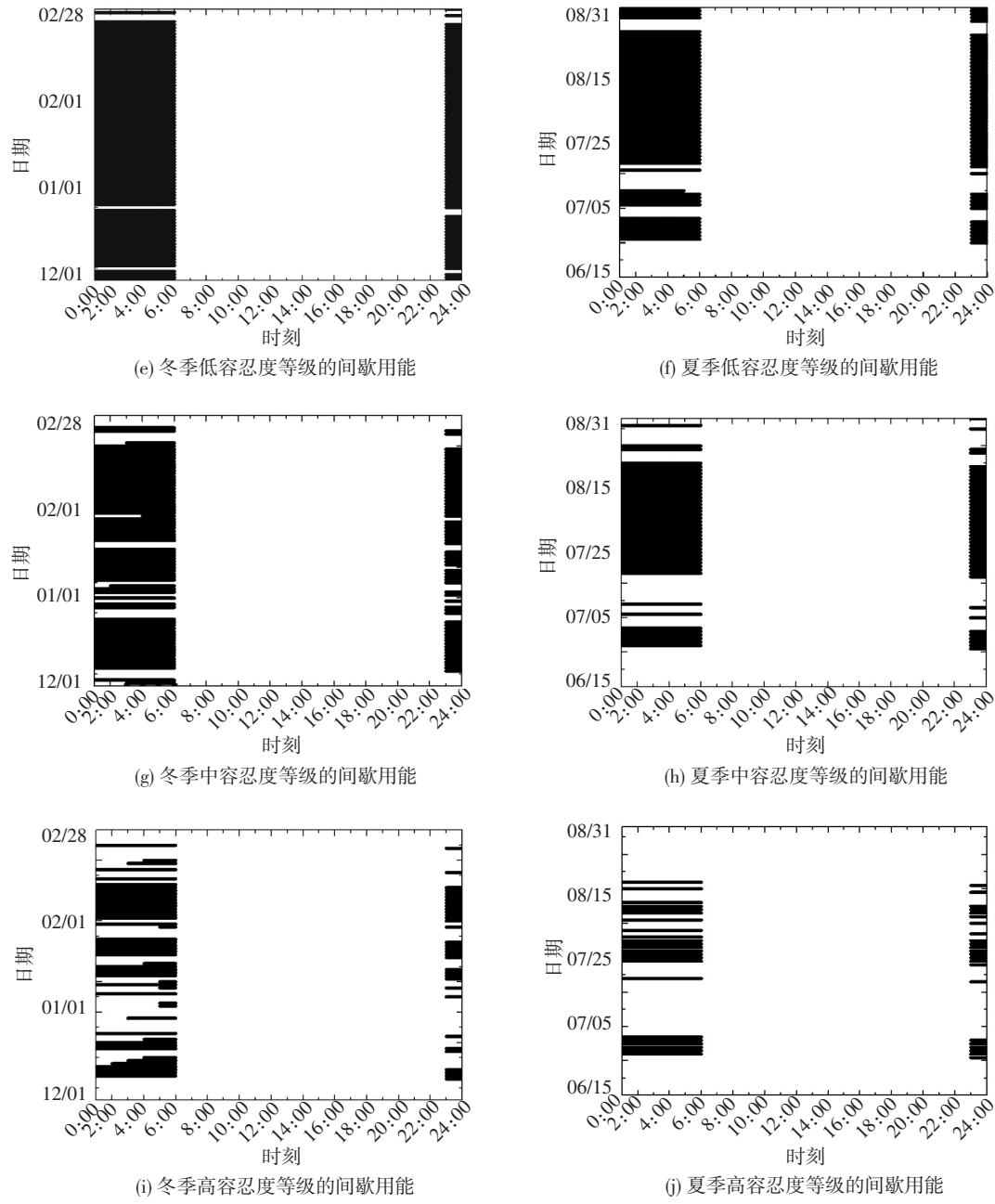


图 2 不同运行模式下的卧室空调开启情况

Fig.2 Bedroom air conditioning operating situation under different operation modes

3.2 不同运行模式下的年采暖及空调能耗

对于夏热冬冷地区居住建筑,采暖及制冷基本上以用电为主,由于用电设备不同能效比也不同.因此,本文中的制冷能耗(采暖能耗)定义为考虑能效比之前的空调制冷(热)量,总能耗定义为制冷能耗加采暖能耗.不同保温方式建筑在不同空调运行模式下的全年能耗如图 3(a)~(c)所示,间歇运行方式下空调全年能耗显著低于连续运行方式.结合图 2(a)、(b)可知,在连续采暖时,白天室内温度大多超过空调设定温度,空调自动停止,而连续制冷时则大部分时间空调会全天连续开启.因此,图 3 显示,间歇用能相对连续用能而言全年采暖能耗的减少程度小于全年制冷能耗.

随着容忍度的逐渐增加,全年能耗逐渐减小.目前已有文献给出了本地区夏季空调用能行为下的容忍度水平,而本地区冬季容忍度水平还未见文献报道.文献[10~12]中的研究表明,模式 3b 更符合本地区夏季实际的用能工况.

表 6 为各容忍度等级间歇运行模式下空调设备全年运行小时数统计结果.容忍度越高,空调运行小时数会显著减小.进一步通过表 6 计算出在全年间歇用能时间段内,各保温方式建筑的房间 A 在不同温度区间的全年小时数分布,如图 4 所示.特定温度区间范围内小时数越多,此温度区间相关的两种容忍度等级的用能方式空调开启时长相差也越多.如图 4 显示,温度在(12,14]及(30,32]范围的小时数

分布最多,因此,高容忍度(模式 3c)空调运行模式下全年能耗减小最为明显.

及楼板等内围护结构在白天接收的太阳辐射热得以保存,这有利于冬季保温,却不利于夏季散热.

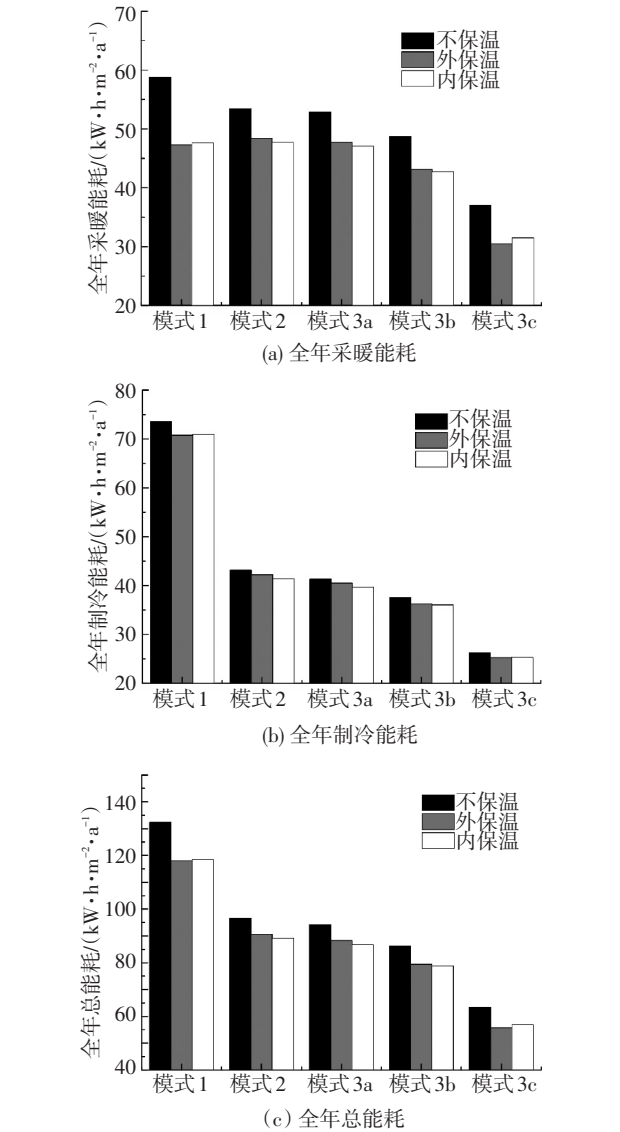


图 3 不同保温方式建筑在不同空调运行模式下的全年能耗
Fig.3 Annual total energy consuming amount of different buildings in different A/C operation mode

表 6 间歇运行模式下空调设备全年运行时间
Tab.6 Annual A/C operating time under the intermittent operation mode

墙体 类型	无容忍度		低容忍度		中容忍度		高容忍度	
	采暖	制冷	采暖	制冷	采暖	制冷	采暖	制冷
不保温	716	503	675	449	555	354	325	184
外保温	717	504	672	449	519	344	271	184
内保温	716	500	671	448	532	354	288	192

3.3 不同运行模式下内外保温的节能效果

外墙内外保温在不同空调运行模式下的全年节能量如图 5(a)~(c)所示.由图 5(a)、(b)可以看出,外墙内外保温的全年采暖节能量均高于制冷,一方面是因为冬季室内外温差大于夏季,更好地发挥了材料的保温效果;另一方面是因为保温层令内墙

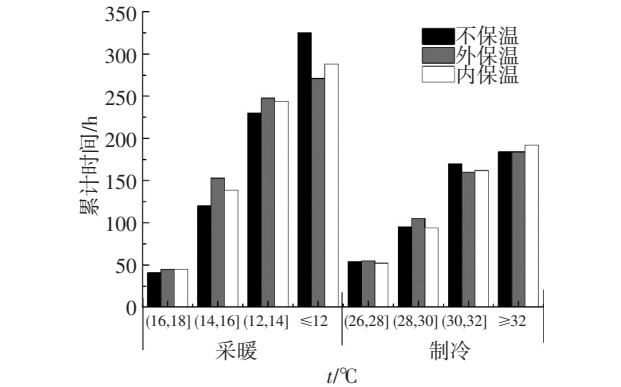


图 4 不同温度区间的全年小时数分布
Fig.4 Distribution of hours in different temperature range throughout the year

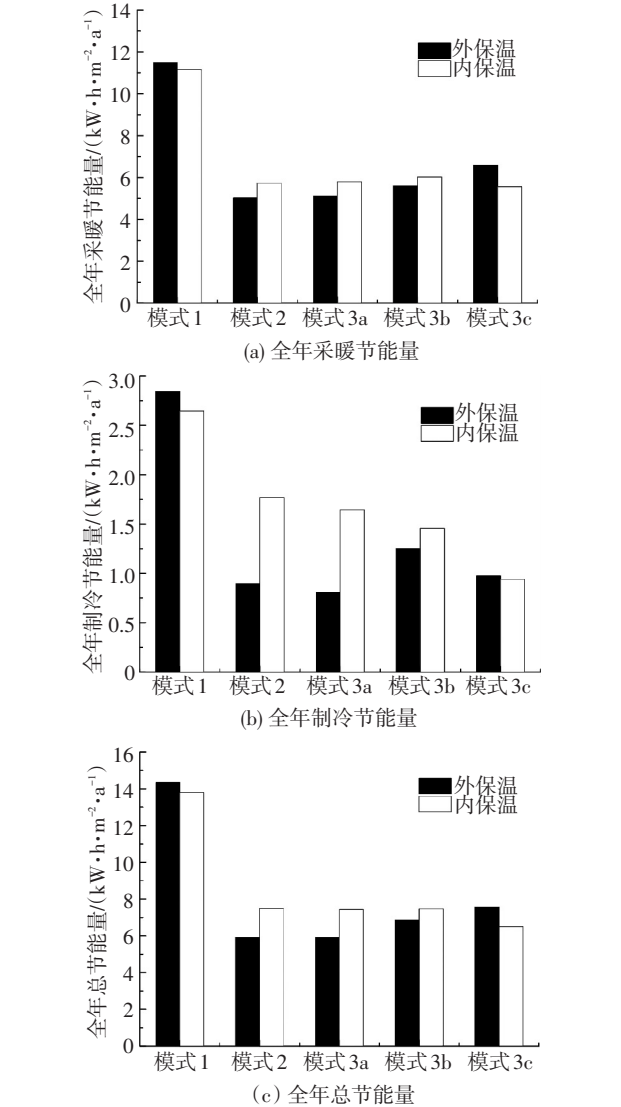


图 5 外墙内外保温在不同空调运行模式下的全年节能量
Fig.5 Annual energy saving amount of external and internal insulation in different A/C operation mode

在连续用能(模式 1)方式下,外墙外保温的全年采暖及制冷效果均好于内保温.在空调连续开启的情况下,墙体能够凭借较高的热容储存空调的制

冷和制热量,进而维持室内空气温度稳定,若保温层置于外墙外侧能有效减少墙体和室外环境之间的热交换,从而降低建筑冷热负荷;若保温层置于外墙内侧,则室内空气温度稳定性较差,空调反复启停,节能效果较差。

与连续用能相反,在间歇用能(模式 2)方式下,外墙内保温的全年采暖及制冷效果均好于外保温。在空调间歇开启的情况下,墙体蓄热的过程一直伴随在整个空调用能周期内,成为了空调负荷的主要部分^[13-15],若保温层置于内侧,则大部分空调的制冷及制热量可以用于改变空气温度,从而更有效地降低建筑空调负荷。图 6 为冬季典型日(01 月 01 日),不同保温方式的房间 A 能耗随时间逐时变化。在空调开启的第 1 个小时,空调的供热主要用于加热空气。不保温房间比内外保温房间室温更低,因此,第 1 个小时内外保温方式的房间能耗差异不大,且均小于不保温方式房间。在间歇用能接下来的几个小时,对不保温或者外保温而言,由于墙体较大的热容,使得墙体传热伴随在整个间歇用能时段。若保温层放置在外墙内侧,则可以有效减少墙体蓄热造成的热负荷。因此,在空调开启的第 2~8 小时,内保温房间逐时热负荷低于外保温房间。

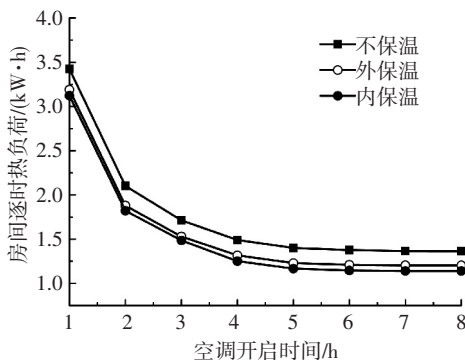


图 6 冬季典型日各保温方式房间热负荷逐时变化

Fig.6 Heating load change situation of rooms with different insulation methods on one typical day in winter

在不同容忍温度等级的间歇用能(模式 3a~3c)方式下,外墙内外保温相对全年的节能效果也不同。如图 5(a)、(b)所示,在低档及中档温度耐受等级的情况下,外墙内保温全年采暖及制冷节能效果好于外保温;而在高档的温度耐受等级情况下,外墙外保温全年采暖及制冷节能效果比内保温更好。这是因为中低档容忍温度的间歇用能方式下,内保温减少了空气与墙体之间的传热。而在高容忍度的间歇用能方式下,空调用能均发生在室内外温差较大的天气环境下,此时墙体蓄热的优势得以发挥。若保温层在内侧则空调反复启停,节能效果不大,而保温层在外侧则可以更好地利用墙体蓄热,稳定室内温度。进一步计算可得,在本文的建筑模型条件下,

外墙内外保温节能效果相同的容忍温度临界点为夏季 31.8℃、冬季 13.4℃。

容忍度越高,空调运行时间越少,外墙保温的全年节能理论上也会越小。但事实上图 5(a)、(b)显示,仅内保温在制冷时会出现容忍度越高节能量越少的情况。造成这一现象的原因是随着容忍度的升高,大多数情况下外墙保温相比不保温而言其空调运行小时数减小的更多,这一点从图 4 可以得到验证。图 4 中,对于采暖情况而言,从无容忍等级到高容忍等级,外墙内外保温空调设备全年运行小时数的减小程度均显著高于不保温方式,这与图 5(a)中外墙内外保温全年采暖总节能量随着容忍度的增加而增加的结果相符。对于制冷情况而言,仅外墙外保温在(28,30]的温度区间内的小时数显著高于不保温,这也与图 5(b)中仅外墙外保温的模式 3b 的全年制冷节能量高于模式 3a 的结果相符。外墙内外保温能不同程度地缓解外界环境温度波动对室内的影响,因此,出现了越高温耐受性行为方式下节能量越大的现象。

4 结 论

1) 夏热冬冷地区居住建筑普遍具有间歇用能的特点,空调开启行为受人体热感受影响,室内气温偏离人体舒适度范围越大空调开启率越高。

2) 在连续用能方式下,外墙外保温的全年采暖及制冷效果均好于内保温。在不考虑容忍温度等级的间歇用能方式下,外墙内保温的全年采暖及制冷效果均好于外保温。

3) 在不同容忍温度等级的间歇用能方式下,外墙内外保温的相对节能效果也不同。在低档及中档温度耐受等级的情况下,外墙内保温全年采暖及制冷节能效果好于外保温;而在高档的温度耐受等级情况下,外墙外保温全年采暖及制冷节能效果比内保温更好。外墙内外保温节能效果相同的容忍温度临界点为夏季 31.8℃、冬季 13.4℃。

在夏热冬冷地区居住建筑围护结构节能设计实践中,应该采用更符合本地区用能实际的计算工况,才能准确评价不同保温方式的节能效果。

参考文献

- [1] OUYANG J, HOKAO K. Energy-saving potential by improving occupants' behavior in urban residential sector in Hangzhou City, China[J]. Energy and Buildings, 2009, 41: 711-720.
- [2] HAERL J, SPARKS R, CLUP C. Exploring new techniques for displaying complex building energy consumption data[J]. Energy and Building, 1996, 24: 27-38.
- [3] 朱光俊,张晓亮,燕达. 空调运行模式对住宅建筑采暖空调能耗

的影响[J]. 重庆建筑大学学报, 2006,28(5):119-121.

ZHU Guangjun, ZHANG Xiaoliang, YAN Da. Effect of operation mode of air conditioning on energy consumption of heating and air conditioning in residential buildings [J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2006, 28(5): 119-121.

[4] 钱晓倩,朱耀台. 基于间歇式、分室用能特点下建筑耗能的基础研究[J]. 土木工程学报, 2010(增刊2):392-399.

QIAN Xiaoqian, ZHU Yaotai. Basic research on the building energy consumption based on the intermittent and loculose energy use characteristics [J]. China Civil Engineering Journal, 2010(S2): 392-399.

[5] 阮方,钱晓倩,钱匡亮,等. 实际用能方式下的夏热冬冷地区居住建筑围护结构节能设计研究[J]. 建筑科学, 2015, 31(10): 112-116.

RUAN Fang, QIAN Xiaoqian, QIAN Kuangliang, et al. Research on energy efficiency design for residential building envelope under the actual energy consuming method in hot summer and cold winter zone[J]. Building Science, 2015, 31(10): 112-116.

[6] 钱晓倩,朱耀台. 夏热冬冷地区建筑节能存在的问题与研究方向[J]. 施工技术, 2012, 358(41): 27-29.

QIAN Xiaoqian, ZHU Yaotai. Basic research direction and problems existed in building energy saving in hot summer and cold winter climate zones [J]. Construction Technology, 2012, 358(41): 27-29.

[7] GUO Siyue, YAN Da, CUI Yin. Analysis on the influence of occupant behavior patterns to building envelope's performance space heating in residential buildings in Shanghai [C]//Proceedings of 2nd Asia Conference of International Building Performance Simulation Association. Nagoya: International Building Performance Simulation Association, 2014: 610-616.

[8] 简毅文. 模拟软件 DeST 的可应用性分析[J]. 北京工业大学学报, 2007, 33(1):46-50.

JIAN Yiwen. Applicability analysis of the DeST simulation software [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2007, 33(1): 46-50.

[9] 夏热冬冷地区居住建筑节能设计标准:JGJ 134—2010 [S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2010.

Design standard for energy efficiency of residential buildings in hot summer and cold winter zone: JGJ 134—2010 [S]. Beijing: Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2010.

[10] 张晓亮,朱光俊,江亿. 建筑环境设计模拟分析软件 DeST 第 13 讲 住宅模拟优化实例[J]. 暖通空调,2005,8:65-72,109.

ZHANG Xiaoliang, ZHU Guangjun, JIANG Yi. Building environment design simulation software DeST(13): Examples of aided design for residential buildings[J]. HV&AC, 2005, 8:65-72,109.

[11] 李俊鸽,杨柳,刘加平. 夏热冬冷地区夏季住宅室内适应性热舒适调查研究[J]. 四川建筑科学研究,2008,4:200-205.

LI Junge, YANG Liu, LIU Jiaping. A thermal comfort field survey in residential buildings in hot summer and cold winter area[J]. Sichuan Building Science, 2008, 4:200-205.

[12] 高岩,安玉娇,于喜哲,等. 住宅使用模式对住宅建筑供暖空调能耗影响的模拟分析[J]. 建筑科学,2010,10:287-291.

GAO Yan, AN Yujiao, YU Xizhe, et al. Simulation analysis for the influence of energy use pattern on residential heating and cooling energy consumption[J]. Building Science, 2010,10:287-291.

[13] 李金. 夏热冬冷地区居住建筑保温墙体节能效果分析[D]. 杭州:浙江大学, 2013.

LI Jin. Energy saving effect of thermal insulation walls for residential buildings in hot summer and cold winter zone [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.

[14] 王索,孟曦,梁伟杰,等. 间歇采暖空调工况下建筑内墙蓄热特性数值研究[J]. 制冷与空调,2015,5:588-592.

WANG Suo, MENG Xi, LIANG Weijie, et al. Numerical study of the heat storage character of building interior wall under intermittent heating and air conditioning [J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2015,5:588-592.

[15] 阮方,钱晓倩,朱耀台,等. 分室间歇用能对墙体内外保温节能效果的影响[J]. 浙江大学学报(工学版),2016,1:1-7.

RUAN Fang, QIAN Xiaoqian, ZHU Yaotai, et al. Internal and external wall insulation effect on building energy efficiency with compartmental and intermittent energy consuming method [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2016, 1: 1-7.

(编辑 刘 彤)