

环境参数与空调行为对住宅空调能耗影响调查分析^{*}

清华大学 李兆坚[☆] 江 亿 魏庆芑

摘要 通过对北京市一栋住宅楼夏季空调能耗的调查测试,分析了室外气候环境、空调行为模式与住宅空调能耗的关系,以及住宅空调行为节能的效果,得到室外环境参数与全楼耗电量的关系。测试结果表明,室内空调温度对空调能耗的影响较大,空调室温从 25℃ 提高到 26℃,空调能耗减少约 23%,空调运行期间开启内门可使空调能耗增加 1.4 倍,因此住宅空调行为节能的潜力很大。

关键词 住宅建筑 空调能耗 环境参数 行为节能 调查分析

Survey and analysis on influence of environment parameters and residents' behaviours on air conditioning energy consumption in a residential building

By Li Zhaojian[★], Jiang Yi and Wei Qingpeng

Abstract Analyses the relationships between outdoor environment parameters, residents' behaviours and air conditioning energy consumption through a survey and test on air conditioning energy consumption in a residential building in Beijing in summer. Studies the effects of energy saving behaviours of residents. Obtains the relationship between outdoor environment parameters and power consumption of the whole building. The results show that indoor air conditioning temperature significantly influences the air conditioning energy consumption. The energy consumption for cooling reduces by 23 percent if indoor temperature is raised from 25℃ to 26℃. Meanwhile, the energy consumption for cooling will increase by 1.4 times when the interior door to neighbored non-conditioned rooms kept open during air conditioner operating. The energy saving behaviour of residents is an effective approach to reduce energy use for cooling in residential buildings.

Keywords residential building, air conditioning energy consumption, environment parameter, behaviour energy saving, survey and analysis

★ Tsinghua University, Beijing, China

①

住宅空调能耗相关调查研究结果^[1]表明,居民空调行为模式是影响住宅空调能耗的一个至关重要的因素,行为节能是我国住宅空调节能的一个重要方向。室外气候环境是影响居民空调行为的重要因素之一,以往对室外气候环境与建

筑空调冷负荷的传热关系研究较多,而对室外气

①☆ 李兆坚,男,1962 年 8 月生,在读博士研究生,研究员(总装备部工程设计研究总院)

100028 北京市 4702 信箱 4 室

(010) 62777140 66358595

Email:li-zj03@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期:2006-10-26

修回日期:2006-12-22

* 国家自然科学基金资助项目(编号:50578079)

候环境、居民空调行为和住宅空调能耗三者之间关系的研究很少,而后者对住宅空调节能和城市夏季电力供应调度等均有重要意义。在住宅空调节能方面,以往对建筑围护结构保温、改变窗墙比、内外遮阳、自然通风等技术节能措施的研究较多,而对居民空调行为节能研究很少,目前各方对一些相关问题的看法存在较大争议,例如,空调器设定温度对住宅空调能耗有多大影响?空调器运行期间内门开启是否合理?因此有必要对住宅室内外热环境、居民的空调行为、住宅空调能耗之间的关系进行研究。由于居民的空调行为具有较强的主观性和随机性,目前还难以用模拟计算的方法进行准确分析,因此相关研究只能采用实际调查统计分析的方法来进行,为此,笔者于 2006 年夏季对北京市 1 栋普通住宅楼的耗电量进行逐周抄表调查分析,并对提高空调设定温度和内门关闭的行为节能效果进行实测,根据调查测试的结果对相关问题进行讨论。本文调查对象的情况和空调能耗调查数据处理方法与文献[1]相同,由于篇幅所限,在此不作重复介绍。

1 居民空调行为模式与主要影响因素

采用分体空调或户式空调方式的住宅,夏季空调设备都是在住户的控制下进行短期间歇运行的,不同住户其空调行为模式通常不同。居民的空调行为模式主要包括空调开机时间段、空调开机时间长短、空调开机室温和空调设定温度,另外还包括空调器运行期间是否开窗、开门等。由于不同住户的空调需求差异很大,因此住户空调行为模式存在很大差异,这是造成不同住户空调能耗差异最大的最重要原因,可见行为节能在住宅空调节能中具有重要的地位,而从住户空调行为模式的影响因素入手,可以找到住宅空调节能的一些重要途径。影响居民空调行为模式的因素很多、也很复杂。居民空调行为模式与室外气象环境条件有关,与所处房间的功能有关,还与住户的消费观念、收入水平、身体状况、耐热能力、节能知识水平等因素有关;另外也与电费的高低等政策因素有关。对于一定的住宅建筑和住户,气候环境条件是影响住户空调行为模式的最重要的一个因素。室外气候环境不仅通过影响住宅建筑的空调冷负荷对建筑物的空调能耗产生影响,还通过影响室内热环境对人体热感觉起

作用,从而影响居民的空调行为模式,对住宅空调能耗产生重要影响,而后者的影响更为显著。因此如果不考虑住户的空调行为模式,仅仅从建筑本身来研究住宅空调能耗问题,其研究结果就可能产生较大的偏差,因此本文针对气候环境、居民空调行为模式与住宅空调能耗的相互关系,进行一些测试调查分析。

2 室内外温度关系的测试分析

温度是影响人体热感觉的一个最重要因素,因此有必要对室外气温与室内自然室温的关系进行测试分析。自然室温是指在没有空调的情况下室内的自然温度。图 1 为 2006 年 5 月 16 日该住宅楼一住户客厅的自然室温实测数据与室外气温的观测数据,图中的室温数据来自于温湿度自记仪的记录数据,室外气温来自于北京市南郊观象台自动观测站的观测数据[2]。由该图可

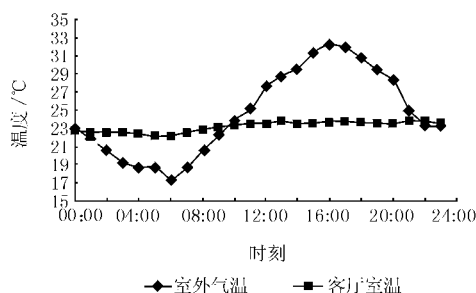


图 1 室内外逐时温度实测数据对比

见,一天内室外逐时气温变化很大,该日气温的峰谷差约为 15 °C,但由于建筑围护结构热惰性很大,室内温度变化很小,该日室温峰谷差仅为 1.5 °C,室内外温度变化的波形也不同,可见室内外逐时温度通常会有很大的差异,它们的相关性很差。那么室内外日平均温度是否具有较好的相关性呢?2006 年 5 月该客厅室内外日平均温度的变化情况见图 2,图中室外周平均温度是回溯一周的平均温度。由该图可以看出,室外日平均温度的随机波动依然很大,而建筑围护结构对这种波长较长的波动仍然具有较强的衰减作用,它们之间的相关性依然较差,但室外周平均温度与室内日平均温度具有较好的相关性。由图 1 和图 2 可以看出,尽管 5 月 16 日的室外最高气温达到 32.2 °C,但这一天客厅的日平均室温为 23.2 °C,最高室温只有 23.7 °C,室外周平均温度为 21.5 °C,这一周全楼的平均耗电量并没有明

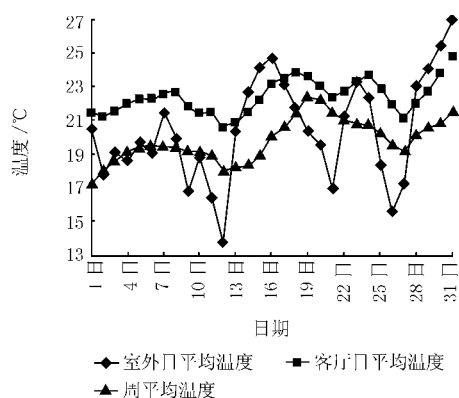


图2 室内外日平均温度和
室外周平均温度的对比

显增加(见图3),实际调查也没有发现住户开空调。可见室外逐时温度和室外日平均温度都不

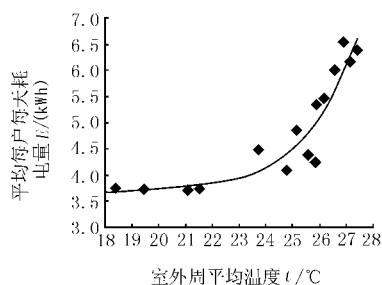


图3 室外周平均温度与全楼平均耗电量的关系

能作为当时和当日空调是否开启和空调能耗高低的评判参数,而将室外周平均温度作为住宅空调能耗的影响参数则比较合理。目前一些空调能耗简化算法和空调器季节能效比 SEER 的算法^[3]将室外逐时温度高于某一温度(如 23 °C)作为住户开启空调器的判据,这显然与实际情况不符,因此会造成一定的计算偏差,其空调能耗计算结果通常大于实际值。

3 室外热环境与住宅空调能耗的关系分析

根据全楼逐周耗电量数据和北京市南郊观象台的气象观测数据^[2],整理得到该楼夏季逐周平均耗电量与室外周平均温度的关系,见图3,图中的曲线为拟合线。由该图可以看出,室外周平均温度低于 23.5 °C 时(这时一住户南卧室的周平均自然室温为 25.3 °C),它对全楼平均耗电量的影响很小,当室外周平均温度 t 大于 23.5 °C 时,随着 t 增大,全楼平均耗电量开始显著增加,这说明住户开始使用电扇和空调器。总体来说,住宅夏季电耗与室外周平均温度具有较好的相关性,但它们之间并

不是线性关系。拟合得到室外周平均温度 t 与全楼周平均每户每天耗电量 E 的关系式见式(1),式中拟合曲线的相关系数 R^2 为 0.91。

$$E = 0.0006t^4 - 0.0472t^3 + 1.3327t^2 - 16.557t + 79.723 \quad (1)$$

由图3可以看出,在 24~26.5 °C 的区间内, t 与 E 的相关性不太好,当 t 大于 26.5 °C 时,两者具有较好的相关性。这一现象与湿度的影响有关。根据实测数据分析,室外周平均温度在 24~26.5 °C 时,未装空调的卧室的平均自然室温约为 26~28 °C。对于一定的住户,是否开空调与其热感觉有关,而住户的热感觉主要与室内温度和相对湿度有关。上述现象说明:室内温度低于 26 °C 时,相对湿度对人体热感觉的影响较小;室内温度在 26~28 °C 范围内时,相对湿度对人体热感觉的影响较大,相对湿度增加使人体的闷热感加重,居民开空调的行为增加,从而使空调能耗明显增加。室内温度高于 28 °C 以后,人体开始逐渐进入热饱和状态,相对湿度对人体热感觉的影响开始逐渐减弱。用室外周平均综合热感温度 t_{its} 来综合考虑干球温度和相对湿度对人体热感觉的影响,通过对调查数据的对比分析,确定用式(2)来计算 t_{its} ,得到 t_{its} 与该楼夏季周平均耗电量的关系,见图4。

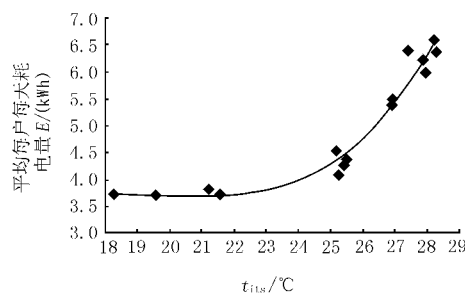


图4 t_{its} 与全楼夏季周平均耗电量关系

$$t_{its} = t_g + 0.05(\varphi - 50) \quad (2)$$

式中 t_g 为干球温度, °C; φ 为相对湿度, %。由图4可以看出, t_{its} 与全楼的夏季周平均耗电量(平均每户每天的耗电量) E 具有较好的相关性,拟合曲线为

$$E = 0.0053t_{its}^3 - 0.3187t_{its}^2 + 6.3098t_{its} - 37.725 \quad (3)$$

拟合曲线的相关系数 R^2 为 0.96。这一结果表明, t_{its} 也可以反映出夏季温湿度热环境对人体热感觉的影响。以往通常采用在实验室内对受试者进

行问卷调查的主观调查方法对热环境与热感觉之间的关系进行研究,但这种方法受主观不确定因素的影响和干扰较大,而且受试者通常与实际居民不同、测试环境与实际居住环境也有一定的差别,这些都可能导致研究结果产生偏差。通过对室内热环境与住宅空调能耗关系进行调查分析,也可以对热环境与人体热感觉的关系进行研究,在此称之为客观调查法,该方法的优点是可以比较客观地对大量居民在实际建筑室内热环境条件下的热感觉的统计规律进行研究,但这方面还有许多问题需要深入研究。

4 室内初始热环境对空调能耗的影响测试分析

为了了解初始室温与空调能耗的关系,笔者于 2006 年 8 月中旬进行了相关测试。测试在该楼中一住户的客厅中进行,采用电度表直接测量空调器的耗电量,空调器型号为 KFR-26GW,电度表型号为 DD862-4,准确度为 2 级,误差不大于 2.5%。空调器按客厅模式运行,每天 18:00 开机,开机 4 h,测试过程中内外门和窗户均关闭。测试结果见图 5。测试表明,对于短期间歇空调,在空调运行

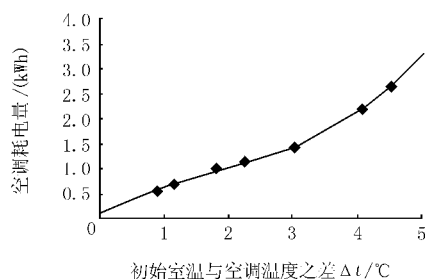


图 5 初始室温对空调耗电量的影响测试结果

模式相同的情况下,空调能耗取决于初始室温与空调温度之差 Δt 。这里的空调温度是指空调器运行期间实测室温的平均值。图 5 中曲线为拟合曲线,拟合公式为

$$E_1 = 0.0347\Delta t^3 - 0.178\Delta t^2 + 0.652\Delta t + 0.1077 \quad (4)$$

该式的相关系数 R^2 为 0.9986,式中 E_1 为客厅空调器耗电量的实测值。

可见 E_1 与 Δt 的相关性较好,室内初始温度对空调能耗的影响较大。另外,不同测试点的室内初始相对湿度变化较大,从 47% 到 75%,但却没有出现图 3 中的离散现象,这说明在相同的空调运行模式、内外门和窗户均关闭的情况下,室内初始相对湿度对空调能耗的影响不大。

5 室内空调温度对空调能耗的影响测试

关于提高空调设定温度这一行为节能措施的节能效果,一直存在争议,绝大多数文献^[4-9]通过对办公楼和住宅建筑空调能耗的理论计算分析认为,空调设定温度对空调能耗有影响,但影响并不大,空调温度升高 1°C ,节能率仅为 6%~8%。一些研究者甚至建议“在确定室内设计参数时,设计温度可以低一点”^[4],但文献^[10]对北京市住宅空调能耗的模拟计算结果显示,室温从 25°C 提高到 26°C ,住宅平均空调能耗减少约 21%,这与其他文献的差别较大。为了搞清这一重要问题,笔者于 2006 年 8 月中旬进行了相关测试。测试在该楼中一住户的客厅进行,测试方法与第 4 章相同。空调器按客厅模式进行,每天 18:00 开机,开机 4 h,每次测试选择一个设定值不变,一天测试一个设定值,每个设定值通常测试 2~3 次,测试过程中内外门和窗户均关闭,采用温湿度自记录仪记录室内外温湿度的变化。测试期间室外条件基本相同,室外平均温度为 $27.3\sim 29.0^\circ\text{C}$,室内的初始温度为 $28.0\sim 28.4^\circ\text{C}$,测试结果见图 6。测试发现室内空调实

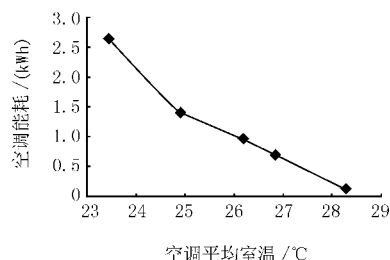


图 6 室内空调温度对空调能耗的影响测试结果

际平均温度约比空调器设定值低 1°C 。由图 6 可以看出,空调室温对空调能耗的影响较大,二者近似为线性关系,尤其在室温高于 25°C 时,二者的线性关系较好;室内温度为 26°C 时的空调能耗比 25°C 时的空调能耗减少约 23%。尽管测试工作只进行了十多天,但测试是在 8 月中旬室外气温较高的气象条件下进行的,通过在 8 月底较低气温下的对比测试分析发现,当气温较低时,由于空调能耗总体水平减少,提高空调室温所产生的节能率还会提高,可见适当提高夏季空调设定温度是住宅空调的重要节能措施之一。由于各地区气候条件不同,因此各地区提高空调温度的节能率也会有所不同。另外由图 6 可以看出,空调室温提高 1°C 的节能率与比较基点关系较大,因此关于“室温提高 1°C ,节

能率为……”的提法并不严密,应说明比较的具体温度范围等条件。

6 内门开启对空调能耗的影响测试

“空调运行期间开外窗和外门会使空调能耗大幅度增加,空调期间应关闭外门和外窗”是一项众所周知的空调行为节能措施,对此的关注、研究和宣传也较多。尽管办公建筑空调期间开窗的情况并不少见(因为节能与使用者的利益无关),但根据抽样调查结果,对于住宅建筑,目前居民很少在空调器运行期间开启外窗和外门,但绝大多数都开启内门,有些住户甚至采用开启内门的方法,利用客厅空调器对相邻卧室实施“一拖多”空调,以实现卧室夜间无吹风感的舒适空调,但这种空调运行方式对空调能耗有多大影响?以往这方面的研究很少,为此,笔者在 2006 年 8 月中旬对此进行了测试,测试在该楼一住户的客厅中进行,测试方法与第 4 章相同,这两种状态的空调设定值相同,气象条件也基本相同,测试过程中外门和外窗关闭。内门开启状态是指客厅与过道连通的一个内门开启,测试结果见表 1。由表 1 可以看出,内门全开使空调能耗增加 1.4 倍,可见空调运行期间开内门会使空调能耗成倍增加。这是因为内门开启相当于空调面积大大增加,因此空调器运行期间关闭内门,实施户内分区空调,这也是减少住宅空调能耗的重要措施,而且不增加任何成本。当然长期外窗和内门紧闭会使室内空气质量下降,因此对于空调器长时间运行的情况,外窗适当开启小缝隙,保持室内一定的新风量也是必要的,如何改进外窗、实现新风量的方便可控,这是需要深入研究的问题。

表 1 内门开启和关闭状态的空调能耗测试结果

内门 状态	空调设定 温度/℃	实际空调平 均室温/℃	初始室 温/℃	初始相对 湿度/%	空调能耗/ (kWh)
关闭	27	26.2	28.0	69	0.97
全开	27	26.0	28.0	64	2.30

7 结论

7.1 由于建筑围护结构对室外气温变化的衰减和延时作用,室内和室外的逐时温度及日平均温度均有较大差异,这两个参数都不能作为评判当时和当日住宅空调能耗高低的参数,室外周平均温度与室内日平均温度的相关性较好,它可以作为评判住宅空调能耗高低的一个指标参数。

7.2 室外热环境不仅通过影响建筑物的空调冷负荷对住宅空调能耗产生影响,它还通过影响室

内热环境对人体热感觉起作用,从而影响居民的空调行为,对住宅空调能耗产生重要影响。室外周平均温度高于 23.5℃时,住户开始使用电扇和空调器等防暑降温设备;平均室温低于 26℃时,相对湿度对人体热感觉的影响很小,平均室温在 26~28℃时,相对湿度对人体热感觉的影响较大;采用简化的室外周平均综合热感温度 t_{hs} 也可以较好地表达温湿度热环境参数对人体热感觉的影响,并找出了该楼室外周平均综合热感温度 t_{hs} 与全楼周平均用电量的关系,调查结果表明,室外温度和室外综合热感温度与住宅空调能耗均呈非线性关系。

7.3 对于短期间歇空调,在空调运行模式相同的情况下,空调能耗取决于初始室温与空调平均室温之差,并得出了两者之间的关系式。在空调运行模式相同、内外门和窗户均关闭的情况下,室内初始相对湿度对空调能耗的影响不大。

7.4 室内空调温度对空调能耗的影响较大,空调室温从 25℃提高到 26℃,空调能耗减少了 23%;空调运行期间,内门全开使空调能耗增加 1.4 倍。因此适当提高空调室温、空调运行期间关闭内门等行为节能的潜力很大,而且不需要增加投资成本。

7.5 住户的空调行为模式对住宅空调能耗有着重要影响,而消费观念和政策对居民的空调行为模式会产生重要的影响。在住宅空调方面的过度消费不仅会消耗大量的能源和资源,而且也不利于身体健康,因此在空调消费方面,不能过分强调“以人为本、鼓励消费”,无论是空调消费模式还是住宅空调系统形式都不能盲目“与国际接轨”,因为我们的国情不同,我们不具备美国等发达国家的资源和能源条件,因此应走出“舒适性空调就是要使人舒适”、“高参数就是高档次”等建筑空调的认识误区,遵循“天人合一、天人共荣”的思想,提倡适度、健康、环保的空调消费新观念。为此,应出台阶梯电价等相关政策对空调消费进行合理的引导,这样既可以促进住宅行为节能,又可以保护低收入、低能耗居民的利益,促进社会公平、和谐发展和节能技术的推广应用。

参考文献:

- [1] 李兆坚,江亿,魏庆苑. 北京市某栋住宅楼夏季空调能耗调查分析[J]. 暖通空调,2007,37(4):46-51

(下转第 45 页)

4 总结与讨论

在本次测试过程中,对该建筑内的工作人员进行了随机调查,室内工作人员普遍感觉在建筑围护结构改造后,室内夏季的温度较以前有所降低,但降低幅度不大;而另一方面,现在室内的气流不如以前通畅,无论在冬、夏季都经常会出现“闷”的感觉。

这种调查结果与前述的数据分析应该说是基本一致的,由于建筑增设了双层皮围护结构,因而使得该结构的内侧部分受外界的气候变化的直接影响减小,在一定程度上增加了建筑室内的舒适感,但在另一方面,由于间层通道空间较大,降低了由热压作用形成的气流流速,弱化了由于气流流动而产生的排热功能、换气功能,从而使建筑使用者产生了温度降低不明显、室内空气流通不畅等感觉。

根据本文的测试和分析可以看出,双层皮建筑围护结构对于冬季隔热保温,夏季降低建筑室内得热、减少太阳辐射、强化气流流动等具有较明显作用。但是,上述这些作用要充分得以利用,必须是基于对双层皮建筑围护结构的合理设计的基础之上,这些设计的要素包括建筑间层通道的宽度、进风口的尺寸、排风口的尺寸、建筑朝向、建筑热压风压分析等,并应对建筑通道内的温度场、速度场进行模拟分析,以最终确定双层皮建筑围护结构设计尺寸,使其充分发挥隔热、排热、通风的功能。

因此,鉴于上述实验分析,对于这种围护结构体系的设计,首先要明确设计的目的——是以冬季得热为主,还是以夏季防热为主,或是二者兼顾;其次要确定间层通道内所需要达到的气流流速,用以确定间层通道的尺寸;再次要仔细计算建筑的热压和风压的作用,以保证结构间层内能形成所需的气流流动;接下来就要确定间层的进、出风口尺寸,这是要实现通风效果所必须仔细计算的关键点之一;

最后还要考虑一些防止眩光或过热的措施。

5 致谢

本文所涉及的测试工作得到了重庆大学建筑设计研究院的大力支持,在此表示衷心的感谢。此外,裴超、段胜辉、吴明华、沈艳等多名研究生同学参与了测试、数据整理工作,在此一道表示感谢!

参考文献:

- [1] Yilmaz Z, Cetintas F. Double skin facade's effects on heat losses of office buildings in Istanbul[J]. Energy and Buildings, 2005, 37(7):691-697
- [2] Gratia E, de Herde A. Is day nature ventilation still possible in office buildings with a double-skin facade? [J]. Energy and Buildings, 2004, 36(4): 399-409
- [3] Gratia E, de Herde A. Optimal operation of a south double-skin facade[J]. Energy and Buildings, 2004, 36(1):41-60
- [4] Gratia E, de Herde A. Nature cooling strategies efficiency in an office building with a double-skin facade [J]. Energy and Buildings, 2004,36(11):1139-1152
- [5] Manz H, Frank T. Thermal simulation of buildings with double-skin facades[J]. Energy and Buildings, 2005, 37(11):1114-1121
- [6] 汪铮,李保峰,白雪. 可呼吸的表皮——积极适应气候的“双层皮”幕墙解析[J]. 华中建筑,2002,20(1): 22-27
- [7] 刘晶晶,张志勤,李建玲,等. 双层皮玻璃幕墙节能研究综述及探讨[J]. 暖通空调,2006,36(2):25-29
- [8] 王强,黄义龙,曹芹. 夏热冬冷地区“双层”玻璃幕墙节能技术研究[J]. 节能技术,2006,24(1):46-49
- [9] 李保峰. “双层皮”幕墙类型分析及应用展望[J]. 建筑学报,2001,11(7): 28-31
- [10] 蔡继红,熊正洲,程佳. 双层呼吸式幕墙的特色[J]. 中华建设,2005(3):57-58
- [11] 威勒·朗,王振,杨波. 双层皮玻璃幕墙解析[J]. 城市建筑,2006(11):16-19
- [12] 北京天气网. 奥运气象在线[EB/OL]. http://www.bjweather.com/oly_aws.asp
- [13] 中国家用电器研究院. GB 7725—2004 房间空调器[S]. 北京:中国标准出版社,2004
- [14] 闫斌,郭春信,程宝义,等. 舒适性空调室内设计参数的优化[J]. 暖通空调,1999,29(1):44-45
- [15] 刘苑平. 舒适性空调室内计算参数的优化与节能[J]. 制冷,1999,18(1):63-64
- [16] 殷平. 室内空气计算参数对空调系统经济性的影响[J]. 暖通空调,2002,32(1): 21-25
- [17] 葛凤华. 室内空气品质与暖通空调[D]. 长春:吉林大学,2006
- [18] 张晓亮. 住宅能耗标识体系研究[D]. 北京:清华大学,2005
- [19] 刘斌,杨昭,朱能,等. 舒适性与空调系统能耗研究[J]. 天津大学学报,2003,36(4): 489-492
- [20] 李兆坚,江亿. 北京市住宅空调负荷和能耗特性研究[J]. 暖通空调,2006,36(8): 1-6,11

(上接第 71 页)