

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2017.06.019



建筑外窗形式对窗户气密性能的影响

曹胜民, 潘武轩, 刘素梅, 成雄蕾, 张浩, 龙正伟

(天津大学环境科学与工程学院; 室内空气环境质量控制天津市重点实验室, 天津 300072)

摘要:采用压差法测量了天津大学校园内 5 种典型的常用建筑外窗的气密性, 这 5 种窗户分别是 PVC 单层窗、PVC 双层窗、铝合金平开窗、铝合金推拉窗以及铝合金上悬上悬窗, 每类窗户测量 3 组, 测量压差控制在 0~60 Pa 之间。通过测量结果分析了窗框材料、开关窗形式、使用时间以及窗户所处环境对窗户气密性的影响。最终, 当压差为 5 Pa 时, 前 4 种窗户的漏风量分布在 10~20 m³/h 之间, 而铝合金上悬上悬窗的漏风量则在 35~40 m³/h 之间, 漏风量比较大。窗户的渗漏系数 C 与窗户气密性存在较大关系, 压力指数 n 基本分布与 0.5~0.6 之间, 受气密性影响小。再根据标准 GB/T 7106—2008 计算了所测外窗的气密性, 通过计算, PVC 双层窗的气密性最好, 平均为 5.17 m³/h·m²; 铝合金上悬上悬窗的气密性最差, 平均为 17.9 m³/h·m²。通过对实验的可重复性进行测量, 发现经过测量得出低压段(≤ 10 Pa)的漏风量受环境影响较大, 高压段(≥ 15 Pa)较小; 每两次重复性测试的时间间隔为 1 周, 每两组重复测量之间的误差都小于 15%, 实验可重复。

关键词:建筑外窗; 气密性; 漏风量; 渗漏系数; 压力指数

中图分类号: TU111.19+5.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2017)06-0135-08

Influence of window type on air tightness performance

Cao Shengmin, Pan Wuxuan, Liu Sumei, Cheng Xionglei, Zhang Hao, Long Zhengwei

(Tianjin Key Lab. of Indoor Air Environmental Quality Control; School of Environmental Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, P. R. China)

Abstract: The air tightness of 5 different types of common used windows in Tianjin University were measured by blower window method; the measured windows including PVC single, PVC double, aluminum alloy casement, aluminum alloy sash and aluminum alloy slanting sash windows. We totally measured 15 windows with every type 3 windows. The pressure difference between window and outdoor air was controlled in 0~60 Pa during every test. According to the measured results, we compared the influence of window frame material, opening form, function time and outdoor environment on the performance of air tightness. With 5 Pa pressure differences, the infiltration rate of aluminum alloy slanting sash windows was 35~40 m³/h, others were 10~20 m³/h. The window air tightness had a great effect on window leakage coefficient C but less effect on pressure coefficient n , and the coefficient n of all the 15 windows was 0.5~0.6. The air tightness of the 15 windows was calculated through GB/T 7106-2008, the PVC double

收稿日期: 2017-03-13

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0700500)

作者简介: 曹胜民(1991-), 男, 主要从事通风净化研究, (E-mail) csmin@tju.edu.cn.

Received: 2017-03-13

Foundation item: National Key Research and Development Plan (No. 2016YFC0700500)

Author brief: Cao Shengmin (1991-), main research interests: Building Ventilation and purification, (E-mail) csmin@tju.edu.cn.

windows were the tightest with an infiltration rate of $5.17 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$, while the aluminum alloy slanting sash windows were worst and its infiltration rate was $17.9 \text{ m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^2$. Based on the results of 3 repeatability tests, we found the outdoor climate influence was negligible on the test results when the pressure difference was larger than 15 Pa. The time interval was one week for every repeatability test, most of the test error was less than 15% between every two tests.

Keywords: building windows; air tightness; air infiltration rate; leakage coefficient; pressure coefficient

当建筑物围护结构或者外窗存在缝隙时,空气会通过这些缝隙流入或者流出室内,建筑抵挡这部分空气流动的能力就叫做建筑气密性;建筑物的气密性通常以特定压差下通过建筑围护结构缝隙的空气量来表示,平时称为漏风量,冬季称为冷风渗透量。建筑气密性对建筑的供暖能耗以及室内空气品质都有影响,Jokisalo 等^[1]通过模拟发现建筑物的气密性对建筑物冬季的采暖能耗有较大的影响,Binamu^[2]指出通过建筑缝隙的漏风使建筑物的通风能耗增加了 53%,Chen 等^[3]通过测量华北地区两栋建于 20 世纪八九十年代建筑的气密性,估算了建筑的采暖能耗,指出适当提高建筑物的气密性可以使区域供暖能耗降低 12.6%。另外,有一部分研究指出建筑物的气密性不仅影响建筑能耗,还会影响室内空气品质,因为从室外进入室内的空气会携带室外颗粒物,这部分颗粒物会恶化室内环境,降低室内空气品质^[4]。Thatcher 等^[5]对美国加州的一个两层楼的建筑的测量结果也证实了这个结论,他们在一段时间内同时测量了室内外颗粒物浓度和冷风渗透量,结果发现建筑的围护结构并没有对室外颗粒物起到任何过滤作用,这表明冷风渗透引起的室外进入室内的颗粒物不可忽略。除此之外,一部分研究指出颗粒物通过冷风渗透进入室内的穿透率随粒径的变化而变化,穿透率介于 0.4~0.9 之间^[6-9];而另一部分研究^[10-11]则认为在很大的粒径范围内颗粒物在冷风渗透作用下的穿透率都为 1。

从前面的研究可以看出,建筑物的漏风量对定量评估空气渗透引起的建筑能耗以及室内人员对室外颗粒物的暴露非常关键。为了获得漏风量,需要测量建筑物的气密性,目前,测量建筑物气密性的常规方法是压差法。压差法的原理是在待测房间与室外环境之间人为制造一个压差,然后测量对应压差下的送风量或者排风量作为房间的漏风量。国外关于这方面的测量数据比较丰富,早在 1975 年,SHAW 等^[12]测量了加拿大 56 所学校的 11 幢建筑物的气密性,获得了对应压差下这些建筑的漏风数

据,并且指出这些建筑的渗漏位置主要位于屋顶与外墙交接处。LITVAK^[13]通过对法国的 73 户新建住宅气密性的测量,指出 82%的住宅中渗漏来自室内百叶窗的阀箱处;77%的住宅渗漏位置位于窗框与强的结合部;另外 73%和 56%的住宅渗漏源于电线的预留孔洞和地板与墙的接缝处。另外还有研究人员测量了爱莎尼亚、希腊雅典、西班牙加泰罗尼亚地区、爱尔兰部分建筑的气密性,获得了这些地区建筑对应压差下的漏风量以及建筑缝隙的压差指数 n 值^[14-17]。美国学者 Wanyu^[18]还用统计学的方法对美国超过 134 000 栋房子的气密性测量数据进行分析,总结出了适用于美国建筑特点的冷风渗透缝隙模型。虽然国外的研究已经获得了大量的建筑气密性数据,但是由于不同国家不同地区的气候,建筑特点以及建筑材料的不同,不同国家的研究成果各不相同。为了建立中国建筑冷风渗透的数据库,中国学者也进行了一些尝试。其中,Chen 等^[3]在 2012 年测试了石家庄两栋建于 20 世纪 80 和 90 年代典型的公寓式住宅房间的气密性,同欧美国家相比,中国建筑的气密性较差。汪静^[19]和季永明等^[20]分别测量了浙江长兴、上海、秦皇岛、大连地区新建建筑的气密性,获得了中国部分建筑的气密性数据。

虽然,对整个房间加压能够测出房间的气密性,但是,由于中国的建筑多为高层复式建筑,直接测量房间的气密性并不能真正反映室外空气进入室内的量,因为房间中存在大量的电气、供暖、给排水预留孔洞,前面的研究已经指出这些孔洞在渗漏中占有很大的比重,然而,他们并非直接与室外相通,在公寓式住宅中只有建筑外窗与室外大气相通。所以,只有测量出建筑外窗的气密性,才能更加真实的分析冷风渗透引起的能耗以及室外颗粒物向室内的传播。关于建筑外窗气密性的测量有实验室测量和现场测量两种,实验室测量有专门的规范及操作手册,由于实验室条件与窗户的真正安装条件不同,实验室测量的数据并不适用。

目前,关于现场测量的数据比较少,从文献检索结果来看, Daoud^[21] 在 1991 年测量了科威特地区的已安装在墙上的建筑外窗的气密性,中国学者也进行了部分地区的测量,其中于洪爽测量了长沙某小区 3 组外窗的气密性^[22], Litvak^[13] 测量了贵州地区 3 种不同开关窗方法的窗户的气密性,得到了这些窗户的压力指数 n 。但目前的测试数据量还较小,而且窗框材料和开关形式有限。因此,为了研究不同窗框材料、开关窗形式以及窗户所处环境对窗户气密性的影响,准确获取这些窗户的气密性数据,本文在天津大学校内建筑中选取了 5 种有代表性的常用外窗,对其气密性进行了详细测量与分析。最后再根据测试结果以及室外 PM_{2.5} 浓度分布数据,估算了不同建筑外窗在常规压差(4~10 Pa)条件下,1 h 的时间内室外 PM_{2.5} 进入室内的量。

1 实测概述

1.1 实测窗户

目前,建筑中使用的窗户种类繁多,为了选择测量窗户的类型,需要了解各种窗户的使用量,通过文献检索我们获取了不同年代建筑采用的外窗类型,各种窗户的具体使用情况已列入表 1,其中,20 世纪八九十年代中期主要采用钢制窗,而 90 年代中期以后塑钢窗,塑料窗框则得以大力推广^[24];通过查阅资料^[25],总结出了天津地区不同年代修建的建筑面积,不同年代的建筑修建量如图 1 所示,可以看出从 1996 年到 2010 年这十几年,天津地区的建筑修建量最多。通过汇总资料与实地调研,最终选择测试的窗户为 PVC 单层窗、PVC 双层窗、铝合金推拉窗、铝合金平开窗以及铝合金上悬上悬窗这 5 类窗户,分别代表了不同年代建筑使用的外窗类型,安装位置分布在天津大学的教学楼、宿舍以及实验楼上,这些建筑最老的建于 20 世纪 50 年代,最新的建于 21 世纪初。每种窗户测试 3 组,总共测量了 15 组外窗,表 2 详细列出了这些窗户的尺寸以及使用年限。为了保证测量的一致性,同种类型的外窗分别位于同一栋建筑的不同楼层。由于天津大学校内建筑层高普遍较低,这些测试建筑的层高最高为 6 层,最低为 4 层;外窗的朝向基本都为东西向或者南北向。测试时间为 2015 年 11 月和 12 月两个月,测试期间气温为 -4~11 ℃,各种窗户的具体形式如图 2 所示。

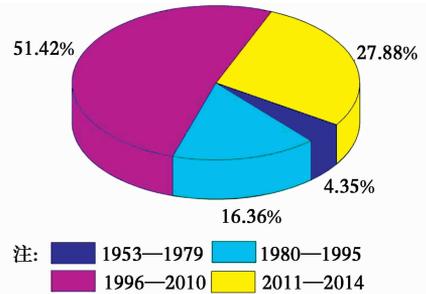


图 1 天津市不同时期新建建筑面积占比
Fig. 1 Proportion of new construction area in different periods of Tianjin

表 1 天津市不同年代建筑外窗统计
Table 1 Type of the external window in different periods of Tianjin

窗框类型	年代
木窗	80 年代以前
钢窗	80~90 年代中期
PVC 塑料窗	90 年代中期至今
断桥隔热铝合金	2010 年至今

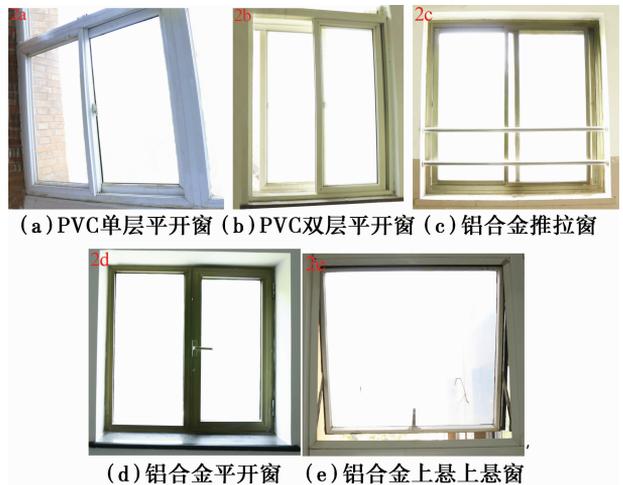


图 2 测试窗户实物图

Fig. 2 Photos of the measured windows

表 2 测试窗户详细信息

Table 2 Details of the measured windows

窗户类型	尺寸	测试数量	使用年限/a
铝合金推拉窗	1.23 m × 1.26 m	3	15
铝合金平开窗	0.53 m × 1.09 m	3	15
PVC 单层平开窗	1.38 m × 1.15 m	3	10
PVC 双层平开窗	1.09 m × 1.39 m	3	20
铝合金上悬上悬窗	1.31 m × 0.99 m	3	10

1.2 测试方法

测量窗户气密性的方法为压差法,根据文献,检测系统如图 3 所示,该方法的检测装置由风机、热式风速传感器、压力传感器、压差控制箱和便携式工业控制机组成,检测过程自动化^[22]。在内径为 80 mm 的风管中心位置布置一个热球风速传感器,以该传感器测得的风速来确定风量的大小,传感器的量程为 0~15 m/s,分辨率为 0.05 m/s,精度为 0.2 % fs。受检窗内外压差采用 ELECALL 公司生产的 ELM110 压差传感器检测,压差传感器量程为 0~100 Pa,分辨率为 1 Pa,精度为 ±1.0% fs。环境压力和温度采用空盒压力表及附属温度计检测,室外风速采用 BJ57-QDF-3 型热球风速仪测量。图 4 展示了测试现场的布置,测试前先用密封布密封待测外窗窗口,构成一个类似静压箱的密封体;然后按照图 3 安装检测设备,安装完成在风机的吸入口发烟,向密封体内送入含烟气流,通过视觉的方法来充气检漏。受检外窗的内外压差控制在 0~60 Pa 的范围^[27],每隔 5 Pa 为一个测量工况。在进行建筑气密性测试时,一般以 50 Pa 压差下的漏风量来表示建筑的气密性,所以试验也将测试工况下压差为 50 Pa 时的漏风量换算成标准状况下压差为 10 Pa 时的值,使用该值来表示窗户的气密性。

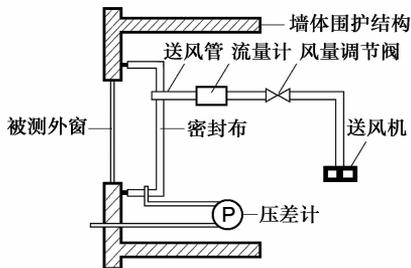


图 3 检测系统图

Fig. 3 Description of the measured system

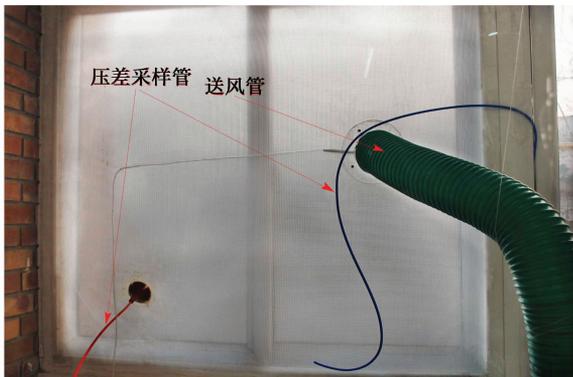


图 4 实验现场图

Fig. 4 Photo of the experimental site

2 结果与讨论

2.1 测试外窗空气渗透量

空气渗透量与窗户内外压差的关系可以通过式(1)来描述

$$Q = a\Delta p^n \quad (1)$$

式中: Q 为空气渗透量, m^3/h ; a 为空气渗透参数; Δp 为窗户内外压差; n 为压差指数, 与窗户气密性有关。对式(1)两边取对数, 得

$$\lg Q = n \lg \Delta p + \lg a \quad (2)$$

这样就将式(1)线性化了, 其中 $\lg a$ 为截距, n 为斜率。根据测得的每个窗户的压差-风量数据, 以各个数值点为原始数据, 按照式(2)进行拟合, 可以得到参数 a 和 n 的值。有了这两个参数的值, 即可计算任意压差下窗户的漏风量。表 3 列出了测试过程中环境参数, a 值, n 值以及相关系数的值。表中每两组数据之间的室内室外温度变化较大是因为每次测试时室外气象参数不同, 并且有的时间段室内开始供暖, 有的测试时段室内还没有供暖; 另外, 同种类型的窗户 1~3 位于同一栋建筑的不同楼层。从表 3 中可以看出, 除了铝合金上悬窗以外, 其它几种窗户的渗透系数 a 相差不大, 这说明他们在低压时的漏风量差别不大; 尽管几种窗户类型不同, 但是窗户的压力指数 n 基本都介于 0.5~0.6 之间, 这表明窗户的压力指数与窗户的气密性没有明显的关联。在 50 Pa 压差下, 铝合金上悬窗的漏风量最大, 其它几种窗户差别不大。

图 5 进一步绘制了各个窗户的压力-风量图, 窗户的漏风量与窗户的开关窗形式以及窗框材料有关, 每个窗户在相同压差下的漏风量都不一样, 但是, 除铝合金上悬窗以外, 其他几种类型的窗户对应压差的漏风量基本一致, 尤其是在 5~10 Pa 时, 漏风量基本都在 10~20 m^3/h , 这也从另一个方面解释了表 3 中前 4 种窗户的渗透系数相差不大。在测试压差范围内, 前 4 种窗户的漏风量都处于 10~60 m^3/h 之间, 铝合金上悬窗的漏风最大, 与表 3 的结果相对应。但是, 由于每种窗户的尺寸都不相同, 并且测试条件也不一致, 所以, 这种方式不能直观的表示窗户的气密性。为了准确对比各个窗户的气密性, 需要把测试条转化为标准状况下的测量结果, 下面将详细分析转化过程以及最终结果。

表 3 参数汇总
Table 3 Parameters summary

窗户	(室内/室外温度)/℃	室外风速/(m·s ⁻¹)	渗透系数 <i>a</i>	压差指数 <i>n</i>	相关系数 <i>r</i>	空气流量 <i>Q</i> ₅₀ /(m ³ ·h ⁻¹)
PVC 单层窗 1	20.6/3.5	0.8~1.6	4.52	0.55	0.998	35.58
PVC 单层窗 2	18.9/2.6	1.6~3.0	4.71	0.60	0.971	38.50
PVC 单层窗 3	18.6/2.3	1.5~2.8	4.56	0.55	0.998	43.03
PVC 双层窗 1	17.1/6.6	0.8~2.3	4.08	0.51	0.996	33.76
PVC 双层窗 2	18.5/6.2	0.2~0.8	4.02	0.50	0.998	34.28
PVC 双层窗 3	18.6/5.5	1.2~3.0	4.08	0.52	0.998	34.66
铝合金平开 1	14.0/9.4	1.1~2.9	5.53	0.59	0.992	52.85
铝合金平开 2	13.2/8.7	0.8~2.6	3.76	0.68	0.998	53.88
铝合金平开 3	14.6/10.1	0.3~1.5	5.53	0.59	0.992	57.52
铝合金推拉 1	13.4/9.0	1.4~3.5	4.69	0.56	0.991	34.6
铝合金推拉 2	13.7/9.7	0.6~2.3	4.68	0.59	0.992	43.2
铝合金推拉 3	18.6/2.1	1.6~3.4	2.92	0.63	0.998	49.1
铝合金上悬 1	20.7/0.8	0.2~1.5	13.46	0.54	0.989	102.93
铝合金上悬 2	21.0/-1.3	0.5~2.3	11.95	0.55	0.996	104.68
铝合金上悬 3	21.5/-2.1	1.6~3.2	11.89	0.54	0.996	115.42

影响较小,可忽略不计^[27]; Q_b 为标准空气状态下测试外窗内外压差为 50 Pa 是,窗户的空气渗透量, m³/h; B 为检测现场大气压力; t 为测试装置附近的室内空气温度; rep 为检测的重复性。再将 50 Pa 压差时的渗透量换算成 10 Pa 时的值:

$$Q_{10} = \frac{Q_b}{4.65} \quad (4)$$

最后窗户单位面积的空气渗透量为

$$q_{10} = \frac{Q_{10}}{A} \quad (5)$$

式中: A 为窗户的面积, m²。经过计算,各窗户的气密性如图 6 所示。

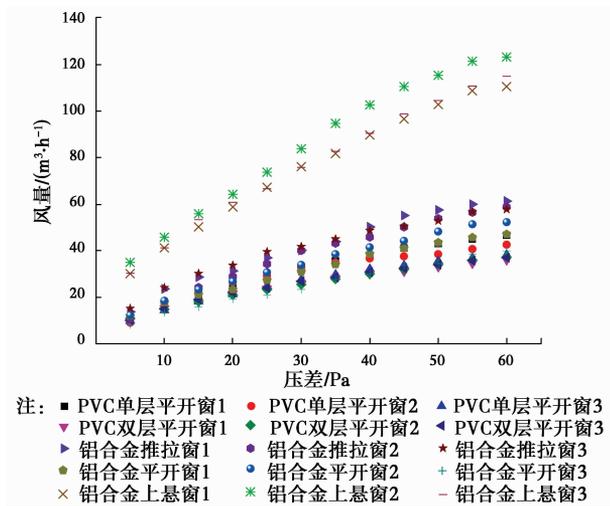


图 5 压力风量测试结果

Fig. 5 Measured data of the pressure drop and airflow rate

2.2 标准状况下测试外窗气密性

根据规范 GB/T 7106—2008,表示窗户气密性的参数为单位缝长空气渗透量,定义为在标准状态下,单位时间内通过单位缝长的空气量,单位为 m³/m·h^[28]。根据文献[22],标准状况下外窗的空气渗透量与实测情况下的渗透量有如下关系

$$Q_b = \frac{293}{101.3} \times \frac{B}{t + 273} \times Q \times rep \quad (3)$$

式中: Q 为现场检测条件下待测外窗内外压差为 50 Pa 时,外窗的空气渗透量, m³/h; 此处选择 50 Pa 压差,是因为当压差为 50 Pa 测试受室外风速变化的

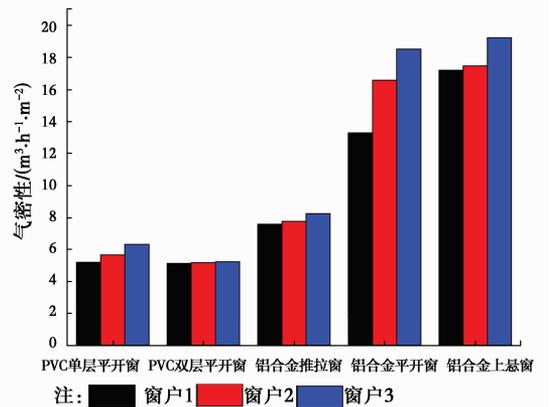


图 6 不同类型窗户气密性对比

Fig. 6 Comparison of the airtightness of different types of windows

从图中可以看出,PVC 双层窗的气密性最好,铝合金上悬上悬窗的气密性最差;同种类型的窗户随着所在楼层层高的增加,气密性基本都变差;另外,通过对比 PVC 单层窗与双层窗可以看出,对 PVC 窗框而言,即使使用了两层窗框,其气密性并不是单层窗框的两倍;主要是因为双层窗框的安装时间比单层窗框要早,随着使用时间的增加,窗框变形严重,所以导致双层窗框气密性与单层窗框相差不大;随着窗户所在层高的增加,窗户的气密性变差,这主要是因为处于高层的窗户受日照时间要比低层的长,所以窗框变形、密封材料的老化要比低层的快,这样气密性就会变差。

2.3 实验重复性分析

为了验证实验的准确性,在实验过程中不定时的对 PVC 单层窗的重复性进行测量。实验期间总共测量了 3 次重复性,每两次重复性测试的时间间隔都为 1 周,每次测试时室外气象条件风向和风速都与前面测试的条件不同。重复性测试结果如图 7 所示,在不同天气气象条件下,3 次测量结果相互之间的差别最大为 17.5%,最小为 1.7%;95% 的测试数据的不重复性都小于 15%,实验的重复性有保证。当压差小于 10 Pa 时,测试结果受室外气象条件的影响较大,没有任何规律;当压差大于 15 Pa 以后,窗户的漏风趋于稳定,即各次测量的漏风规律趋势一致,高压情况下的数据受室外气象条件的影响小,所以一般都取高压段的数据来分析窗户的气密性。

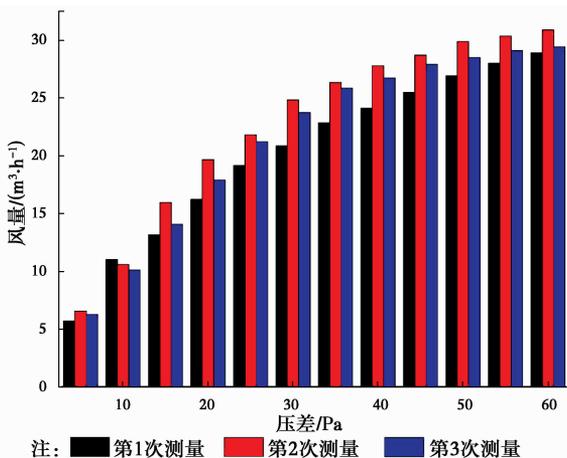


图 7 实验重复性测量

Fig. 7 Experimental repeatability

2.4 讨论

采用的测试方法同时包含了热压以及风压对窗户漏风的影响,并没有将二者的影响分开来单独讨论,因为在实际情况中这两者的影响总是同时存在

的;另外,不管是热压也好还是风压也好,这两种压差最终导致的结果就是室外空气通过外窗缝隙进入室内,或者室内空气流出室外,由于只是关注窗户的整体气密性,所以单独讨论热压、风压的影响并没有太大意义。由于所选择的测试窗户时间跨度在 10~20 之间,对于不同的材料而言,在使用过程中受气候的影响变形程度不一样,这也会导致不同材料的窗框气密性不一样,目前,在现场测量的过程中还没有有效的方法可以用于排除时间跨度对不同窗框气密性的影响。通过测试可以看出,不同的窗户气密性存在较大差别,即使是同一类窗户气密性也不一样。综合来看主要有以下几方面的原因导致了这些差别:1)由于窗户的使用年限不同,在使用过程中有的窗户密封胶垫老化或者被人为损坏,导致窗户气密性变差;2)由于窗户安装在不同的楼层上,这些建筑的局部气候各不相同,尤其是日照条件有较大差别,处于高层的窗户日照时间比低层窗户长,这样不同楼层的窗户在使用过程中窗框的变形程度以及密封材料的老化程度不一样,所以高层的气密性比低层的要差;3)由于铝合金上悬上悬窗在开启时窗扇朝向建筑外侧,一般窗扇都处于室外,室外的风、沙、雨、雪更容易对窗户的密封以及窗框产生破坏,这样会导致密封不严,所以,这种外窗的气密性最差。这种外窗常见于玻璃幕墙上,以后选择这种开启方式的外窗时需要考虑这种窗户的劣势,尽量减少建筑能耗。另外,对于同一个窗户而言,气流从室内流向室外与从室外流向室内两种工况下的流量未必相等,有研究者指出加压与减压实验两种工况的误差为 20.6%,相差不大^[29]。所以,只考虑了对窗户加压的工况。

3 结论

对天津大学校内 5 种常用建筑外窗的气密性进行了实测,并且分析了这几种窗户对室外 PM_{2.5} 渗透的影响,通过测量发现:

1) 窗户的渗漏系数 C 与窗户的气密性有关,所以,渗漏系数的值不稳定;压力指数 n 基本分布在 0.5~0.6 之间,但是压力指数 n 与窗户的气密性关系不大;所测试窗户除铝合金上悬上悬窗以外,其它几种窗户在压差为 5 Pa 时的漏风量都介于 10~20 m³/h 之间,在 0~60 Pa 压差范围内,窗户的漏风量在 10~60 m³/h 之间;铝合金上悬上悬窗漏风量最大。

2) 窗户的气密性与窗框的开关窗方式、窗框材

料以及窗户的使用年限、使用环境有关,其中铝合金上悬窗的气密性最差,PVC 双层窗的气密性最好;但是由于 PVC 材料在使用过程中容易老化、变形,所以后期其气密性会变差;受使用环境气象条件的影响,高层窗户的气密性比低层要差。

3) 在进行建筑或者建筑外窗气密性测量时,当内外压差小于 15 Pa 时,测试结果受室外气象条件的影响较大,这种条件下测得的数据不准确;为了保证数据的准确性,建议取高压段的数据作为分析依据。

参考文献:

- [1] JOKISALU J, KURNITSKI J. Simulation of energy consumption in typical Finnish detached house [R]. Helsinki University of Technology, HVAC-laboratory, Report B74, 2002.
- [2] BINAMU A. Integrating building design properties "air tightness" and ventilation heat recovery for minimum heating energy consumption in cold climates [D]. Tampere University of Technology, 2002.
- [3] CHEN S Q, LEVINE MARK D, LI H Y, et al. Measured air tightness performance of residential buildings in North China and its influence on district space heating energy use [J]. *Energy and Buildings*, 2012, 51: 157-164.
- [4] JONES N C, HORNTON C A, MARK D, et al. Indoor/outdoor relationships of particulate matter in domestic homes with roadside, urban and rural locations [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, 34: 2603-2612.
- [5] THATCHER T L, LAYTON W. Deposition, resuspension, and penetration of particles within a residence [J]. *Atmospheric Environment*, 1995, 29 (13): 1487-1497.
- [6] LONG C M, SUH H H, CATALANO P J, et al. Using time-and size-resolved particulate data to quantify indoor penetration and deposition behavior [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, 35(10): 2089-2099.
- [7] VETTE A F, REA A W, LAWLESS P A, et al. Characterization of indoor-outdoor aerosol concentration relationships during the Fresno PM exposure studies [J]. *Aerosol Science & Technology*, 2001, 34 (1): 118-126.
- [8] THORNBURG J, ENSOR D S, RODES C E, et al. Penetration of particles into buildings and associated physical factors. Part I: model development and computer simulations [J]. *Aerosol Science & Technology*, 2001, 34(3): 284-296.
- [9] MOSLEY R B, GREENWELL D J, SPARKS L E, et al. Penetration of ambient fine particles into the indoor environment [J]. *Aerosol Science & Technology*, 2001, 34(1): 127-136.
- [10] THATCHER T L, LAYTON D W. Deposition, resuspension, and penetration of particles within a residence [J]. *Atmospheric Environment*, 1995, 29 (13): 1487-1497.
- [11] OZKAYNAK H, XUE J, SPENGLER J, et al. Personal exposure to airborne particles and metals: Results from the particle team study in Riverside, California [J]. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 1995, 6(1): 57-78.
- [12] SHAW C Y, JONES L. Air tightness and air infiltration of school buildings [J]. *ASHRAE Transactions*, 1979, 85(1): 85-95.
- [13] LITVAK A. Airtightness of French dwellings Results from field measurement studies [C]// Karine GUILLOT, Marc KILBERGER, Didier BOZE. *Proceedings 21st AIVC Annual Conference*, 2000.
- [14] KALAMEES T. Air tightness and air leakages of new lightweight single-family detached houses in Estonia [J]. *Building and Environment*, 2007, 42: 2369-2377.
- [15] SFAKIANAKI A, PAVLOU K, SANTAMOURIS M, et al. Air tightness measurements of residential houses in Athens, Greece [J]. *Building and Environment*, 2008 (43): 398-405.
- [16] MONTOYA M I, PASTOR E, PLANAS E. Air infiltration in Catalan dwellings and sealed rooms: An experimental study [J]. *Building and Environment*, 2011, 46: 2003-2011.
- [17] SINNOTT D, DYER M. Air-tightness field data for dwellings in Ireland [J]. *Building and Environment*, 2012, 51: 269-275.
- [18] CHAN W R, JOH J, SHERMAN M H. Analysis of air leakage measurements of US houses [J]. *Energy and Buildings*, 2013, 66: 616-625.
- [19] 汪静. 关于房屋气密性检测的实践与经验分享 [J]. *建设科技*, 2014(18): 74-77.
WANG JING. Practice and experience sharing of housing airtightness testing [J]. *Construction Science and Technology*, 2014(18): 74-77. (in Chinese)
- [20] 季永明, 端木琳, 王宏彬, 等. 大连地区新建居住建筑气密性实测 [J]. *暖通空调*, 2015, 45(1): 13-18.
JI Y M, DUAN M L, WANG H B, et al. Field test of air tightness of new residential buildings in Dalian [J].

- HV & AC, 2015, 45(1): 13-18. (in Chinese)
- [21] DAUD O, MAHESHWARI G, AL-SHAMI H. Measured field performance of aluminium windows in Kuwait[J]. *Energy and Buildings*, 1991(17): 75-85.
- [22] 于洪爽, 李录平, 朱先锋. 居住建筑外窗气密性现场检测结果的不确定度分析[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2009, 4(6): 69-73.
- YU H S, LI L P, ZHU X F. Uncertainty analysis for the air permeability testing results of residential building exterior windows[J]. *Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science)*, 2009, 4(6): 69-73. (in Chinese)
- [23] 李位. 对门窗现场气密性数据采集方法改进的探讨[J]. *贵阳学院学报(自然科学版)*, 2012, 4(7): 54-58.
- LI W. Discussion on improvement of the data collection method of airtightness for windows [J]. *Journal of Guiyang College (Natural Science)*, 2012, 4(7): 54-58. (in Chinese)
- [24] 王立群. 北方寒冷地区居住建筑外窗节能设计研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- WANG L Q. Study on energy-saving design of residential buildings in cold area of north China[D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)
- [25] 天津统计局. 《天津统计年鉴》[G]. 北京: 中国统计出版社, 2015: 68-98.
- Tianjin Bureau of Statistics. Tianjin statistical yearbook [G]. China Statistics Press, Beijing, 2015: 68-98. (in Chinese)
- [26] 徐选才, 梁晶. 居住建筑外窗窗口气密性能现场检测方法探讨[J]. *暖通空调*, 2008, 4(38): 1-5.
- XU X C, LIANG J. Field test method of air leakage through installed exterior windows in residential buildings [J]. *HV & AC*, 2008, 48(3): 1-5. (in Chinese)
- [27] 2009 ASHRAE Handbook. Fundamentals [M]. 2009: 16.1-16.31.
- [28] 建筑外窗气密、水密、抗风压性能分级及检测方法: GB/T 7106-2008[S]. 2008.
- Graduations and test methods of air permeability, watertightness, wind load resistance performance for building external windows and doors; GB/T 7106-2008 [S]. 2008. (in Chinese)
- [29] 张玲, 顾平道. 建筑外窗气密性检测实验室的建立[J]. *工程与试验*. 2014, 54(2): 76-79.
- ZHANG L, GU P D. Laboratory establishment of air permeability test for building external windows [J]. *Engineering & Test*, 2014, 54(2): 76-79. (in Chinese)

(编辑 胡玲)