

一种利用干冰释放 CO₂ 作为示踪气体测量换气次数的方法

清华大学 郑博伦[☆] 李晓锋[△] 薛斐

摘要 采用二氧化碳作为示踪气体测量建筑换气次数的方法近年来被广泛采用。换气次数是建筑室内环境的重要参数之一,对于室内人员的健康状况具有重要影响。但是,对于自然通风下的居住建筑的换气次数,缺乏简洁、高效、实时且低成本的测量方法。针对此问题提出了新的方法,通过将干冰置入隔热桶内来获得稳定释放的二氧化碳。理论上,只要桶中有足量的干冰,即只要桶中形成稳态导热,干冰升华速率就保持恒定。本方法适用于几乎所有测量情况,包括自然通风和机械通风,亦可在有人活动时使用。

关键词 示踪气体 换气次数 干冰 二氧化碳 恒定速率释放法

Approach for measuring air changes with dry ice releasing tracer gas

By Zheng Bolun[★], Li Xiaofeng and Xue Fei

Abstract Carbon dioxide (CO₂) as a tracer gas is widely applied to estimation of air exchanges in buildings. Air changes are often used as an important characteristic of the indoor environment, and have a significant impact on human health. However, measuring air changes in an easy, effective, real-time and low-cost way in natural ventilation residential buildings is still a huge challenge. Presents a new method to release a stable rate of the tracer gas CO₂, by using dry ice contained in an insulation barrel. In theory, the sublimating rate of the dry ice should remain constant, as long as there is sufficient quantity of dry ice in the barrel. In other words, the sublimating rate of dry ice should be the same at any time once a steady state heat transfer has been formed. This method can be used with people present if necessary, and can be used in almost all types of applications both natural and mechanical ventilation.

Keywords tracer gas, air exchanges, dry ice, carbon dioxide, constant rate release method

★ Tsinghua University, Beijing, China

①

0 引言

采用 CO₂ 作为示踪气体测量建筑换气次数的方法近年来在学术界被广泛采用。换气次数是建筑室内环境的重要参数之一,对于室内人员的健康状况具有重要影响^[1-3]。但是,对于自然通风下的住宅建筑的换气次数,仍然缺乏简洁、高效、实时且低成本的测量方法。

示踪气体上升法和下降法是广为采用的测量换气次数的方法。此方法是通过在房间内释放示踪气体并保证测量区域内示踪气体浓度均匀,然后分析一定时间段内气体浓度的变化,从而获得区域的换气次数。其他利用示踪气体测换气次数的方

法还有恒定速率释放法和定浓度法。Heidt 等人提出了一种比较下降法和恒定速率释放法效果的方法^[4],结论显示下降法更适合于密封性较好的房间,恒定速率释放法更适合于密封性差一些的房间。

另一种常用方法是全氟化碳示踪气体(PFT)

①[☆] 郑博伦,男,1989年11月生,在读硕士研究生

[△] 李晓锋(通信作者)

100084 北京市海淀区清华大学建筑技术科学系

(O) 13701330999

E-mail: xfli@mail. tsinghua. edu. cn

收稿日期:2013-09-06

修回日期:2013-10-10

的方法。Dietz 等人^[5]、Leaderer 等人^[6]、Dietz 等人^[7]和 Cheong 等人^[8]均研究了采用 PFT 测量换气次数的方法。此方法包括使用被动释放装置释放示踪气体,主动或被动收集空气样本来确定换气次数。Stavova 比较了 PFT 方法和另外两种方法(下降法与恒定速率释放法),发现 PFT 方法的结果比另外两种方法结果的均值高出 20%~50%^[9]。并且 PFT 方法仅可以给出某一时间段(几小时至几周)内的平均换气次数。尽管释放和取样装置的成本都不太高,但实验室分析空气样本花费较高,因此 PFT 方法总体并不经济。

而其他的示踪气体方法中,往往由于设备较笨重或昂贵,导致包括六氟化硫(SF₆)在内的很多示踪气体方法的成本太高,此缺点在 Mc Bride 等人^[10]和 Johnson 等人^[11]的研究中均被提及。此类示踪气体仅适合所需释放量较小的下降法,因此也仅可测量出一小段时间内的平均换气次数。

学者们进行过多个实地测试和实验室研究来研究无人工混合条件下人体产生的 CO₂ 可否作为示踪气体^[12-13]。所得结论显示只要室内空气流通良好,可保证气体浓度均一,人体就可以作为示踪气体源。

由于人睡眠时的代谢率较稳定,Stavova 等人采用睡眠中的人在夜晚释放 CO₂ 的方法测量换气次数^[14]。但是此方法依然无法保证恒定的 CO₂ 释放速率,因此无法应用于恒定速率释放法和上升法测换气次数;而且需要保护受试者的隐私,且需要尽可能地还原日常生活的条件,所以在获取数据过程中对日常生活的扰动应尽量小。同时此方法所需的人数不易满足,人数较少会导致示踪气体浓度不足,而不稳定的 CO₂ 释放速率也导致该方法的精确度不佳,所以亟需更好的方法。

Mc Williams 的研究表明,在不稳定的通风情况下,必须使用定浓度法和恒定速率释放法才能测量换气次数^[15]。相较于恒定速率释放法,定浓度法需要更加昂贵的器材来保证通过反馈控制房间内的示踪气体浓度保持不变。而恒定速率释放法仅需要恒定地释放示踪气体即可。通常 CO₂ 保存在高压气瓶中,存在诸如冷却、释放速率不稳定的问题,使得气瓶并不适合恒定速率释放法。同时高压气瓶的潜在危险性使其不适用于日常生活房间。

因此,亟需寻找一种更好的方法来稳定地释放 CO₂。

本文提出一种方法,可以用来长时间稳定安全地释放 CO₂,适用于测量各种房间的换气次数,包括自然通风和机械通风,且亦可在有人活动时使用。

1 干冰法介绍

1.1 干冰

固态的 CO₂ 又名干冰。市面常见的是质量 30 kg 的用于船舶运输的标准干冰块,或用于实验、商品贮藏的直径约 1 cm 的干冰柱,如图 1 所示。



图 1 干冰柱

在 101 325 Pa(标准大气压)条件下,CO₂ 的凝固点温度为 -78.5 °C。当温度高于 -56.4 °C 且压力小于 519 797.25 Pa(5.13 个标准大气压,图 2 中三相点)时,干冰会发生升华,即直接由固态的干冰变为气态的 CO₂,并吸收大量热量,由此干冰便可能作为室内的冷源和 CO₂ 源。

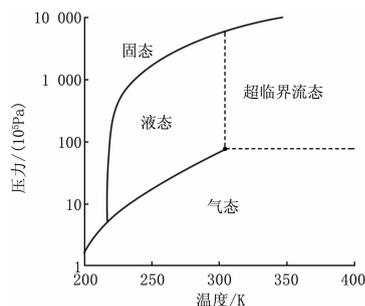


图 2 CO₂ 相图

干冰的制作方法十分简单,且原料来自其他工业过程的副产品,因此干冰成本较低,大约 10 元/kg,低于普通 CO₂ 价格。

如果将干冰置入一隔热桶中,则会达到稳态导热状态。此时只要桶中有足量的干冰,就可以保持桶中温度接近干冰的温度,理论上桶内将保持恒定的干冰升华速率。也就是说,只要达到了稳态导热

状态,干冰的升华速率就保持不变。

1.2 隔热桶介绍

隔热桶(干冰桶,见图3)由两种材料制成:泡沫聚氨酯与不锈钢。泡沫聚氨酯用作隔热材料,不锈钢用于制成桶的内外壳。内外壳均为圆柱体,外

壳高度与直径均为 0.45 m,内壳高度与直径均为 0.25 m。隔热桶的上盖可以打开,且上盖开有直径 5 cm 的小孔,用于释放 CO₂。隔热桶总质量为 9 kg,最多可以放置 10 kg 干冰。隔热桶下安装有 3 个可固定的万向轮,使桶易于移动。

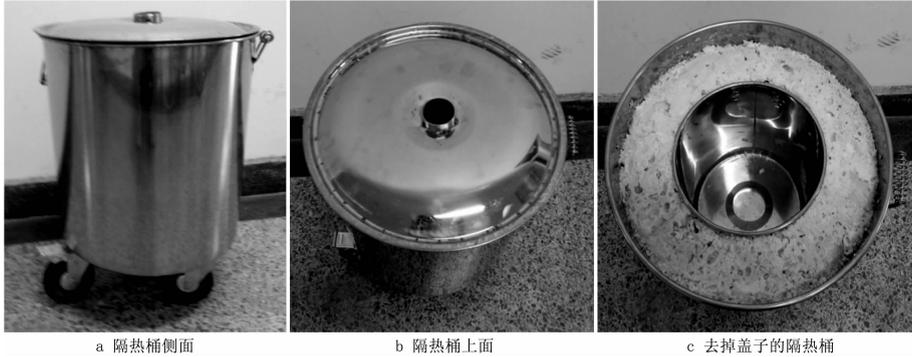


图3 干冰桶

1.3 应用条件

应用此干冰法需要满足如下条件:CO₂ 的释放速率不过高,必须可以持续稳定释放一定时间,操作不困难且危险性低。干冰尤其适用于作为长时间段换气次数测量的示踪气体源。同时此方法可以在无人时使用,使得长时间段的测量更加方便简洁。

2 测量方法

2.1 干冰的理论升华速率

隔热桶中干冰的升华速率可由稳态下隔热桶的总得热量计算而得。通过隔热桶的稳态传热过程可以由如下方程描述:

$$Q = \frac{\Delta T}{R_t + R_b + R_s} \quad (1)$$

式中 Q 为总传热量, W; ΔT 为桶内外的温差, K; R_t, R_b 和 R_s 分别为桶顶、桶底和桶侧壁的热阻, K/W。热阻的计算方法可由下式描述:

$$R_s = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi H k_1} + \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{2\pi H k_2} + \frac{\ln \frac{r_4}{r_3}}{2\pi H k_3} + \frac{1}{h_1 A_s} \quad (2)$$

$$R_t = R_b = \frac{1}{h_1 A} + \frac{L_1}{k_1 A} + \frac{L_2}{k_2 A} + \frac{L_3}{k_3 A} \quad (3)$$

式(2),(3)中 r_1, r_2, r_3, r_4 分别为各层的半径, m; H 为隔热桶的高度, m; k_1, k_2, k_3 分别为 3 层的导热系数, W/(m·K); h_1 为对流换热表面传热系数, W/(m²·K); A_s 为外表面侧壁的传热面积, m², $A_s = 2\pi r_4 L$; A 为外表面顶面和底面的面积,

m²; L_1, L_2 和 L_3 分别为 3 层材料的厚度, m。由于隔热桶的导热热阻远远大于桶表面的对流换热热阻,即隔热桶的表面温度可认为与室内温度相等。计算输入参数见表 1。

当 Q 的值确定后,可由下式得到桶中干冰的升华速率^[16]:

$$\dot{m} = \frac{Q}{\Delta H_s} \quad (4)$$

式中 \dot{m} 是干冰的升华速率, kg/s; ΔH_s 为干冰升华潜热, J/kg。

2.2 隔热桶的 CO₂ 释放速率

CO₂ 的体积释放速率可以由干冰的升华速率计算得出。由实验可测量出质量流量,从而 CO₂ 的释放速率可以由下式求得:

$$F_{CO_2} = \dot{m} \frac{V_m}{M_m} \quad (5)$$

式中 F_{CO_2} 为 CO₂ 的体积释放速率, m³/s; V_m 为 CO₂ 的摩尔体积, m³/mol; M_m 为 CO₂ 的摩尔质量, kg/mol。

2.3 实验介绍

2.3.1 不同温度下的干冰升华速率

为研究温度对干冰升华速率的影响,实验测试了 3 个温度下的干冰升华速率。房间温度分别设置为 25, 30, 35 °C, 误差为 ±1 °C。实验地点为一人工气候室, 体积为 125 m³, 可控温, 机械通风。每次实验历时 3 h, 干冰质量的测量间隔为 0.5 h。所有实验中的测量质量误差均为 ±1 g。

表 1 计算输入参数

		顶面 ¹⁾	底面 ¹⁾	侧面 ¹⁾
温差 $\Delta t/^\circ\text{C}$	108.5			
桶顶面积 A_t/m^2	0.05			
桶底面积 A_b/m^2	0.05			
第一层的导热系数 $k_1/(\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C}))$		15	15	15
第二层的导热系数 $k_2/(\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C}))$		0.03	0.03	0.03
第三层的导热系数 $k_3/(\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C}))$		15	15	15
第一层厚度 L_1/m		0.001	0.001	
第二层厚度 L_2/m		0.03	0.125	
第三层厚度 L_3/m		0.001	0.001	
第一层内壁半径 r_1/m				0.125
第二层内壁半径 r_2/m				0.126
第三层内壁半径 r_3/m				0.199
第三层外壁半径 r_4/m				0.22
桶高 H/m				0.255
CO ₂ 摩尔体积 $V_m/(\text{m}^3/\text{mol})$	0.024 5			
CO ₂ 摩尔质量 $M_m/(\text{kg}/\text{mol})$	0.044			

1) 传热过程对应的面。

2.3.2 干冰升华速率校核

为进一步证明同一隔热桶相同温度下多次实验中的干冰升华速率一致,使用同一个隔热桶进行了 2 个长时间实验。实验时长为 30 h,房间温度均为 $(20\pm 1)^\circ\text{C}$,除夜晚之外每 0.5 h 测量一次干冰质量。将 2 次实验的结果比对分析。

另一个实验用于对比不同隔热桶的干冰释放速率。实验采用 2 个结构相同的隔热桶,实验时间近 30 h,其余条件与上述实验相同。

2.4 3 种不同方法测量换气次数

采用 3 种不同的方法来计算换气次数,以此验证干冰法的可靠性。干冰法为恒定速率释放法,因此另外 2 种方法选择了下降法和直接测量通风量法。实验地点为一面积为 72.24 m^3 的人工气候室,机械通风,保持室温为 $(20\pm 1)^\circ\text{C}$ 。

在室内中心 1.2 m 高度处测量室内 CO₂ 的体积分数,在送风道处设置传感器记录室外 CO₂ 的体积分数。CO₂ 传感器型号为 Telaire7001,读数误差为 $\pm 5\%$ 和 $\pm 50\times 10^{-6}$ 中的大者(5%是相对误差,即在读数小于 $1\ 000\times 10^{-6}$ 时,误差为 50×10^{-6} ,大于 $1\ 000\times 10^{-6}$ 时,误差为读数的 5%),记录间隔为 30 s。房间内使用空调将空气混合均匀,并且在实验过程中保持温度恒定。

2.4.1 恒定速率释放法

恒定速率释放法需要以恒定的速率释放示踪气体,并且实时记录示踪气体的体积分数并加以分析。本实验中,采用隔热桶释放 CO₂。一旦房间内

的示踪气体体积分数达到稳定,即可根据下式计算得出房间换气次数:

$$N = \frac{F_{\text{CO}_2}}{(c_1 - c_e)V_z} \quad (6)$$

式中 N 为换气次数, h^{-1} ; F_{CO_2} 为 CO₂ 的释放率, m^3/h ; c_1 为室内 CO₂ 的体积分数, 10^{-6} ; c_e 为室外 CO₂ 的体积分数, 10^{-6} ; V_z 为测试区域的体积, m^3 。

此方法仅适用于恒定速率释放的状况,在室内示踪气体体积分数恒定时可以计算出换气次数,当换气次数同时变动时也可以应用此方法计算。

2.4.2 下降法

下降法是最常用的测量换气次数的方法之一,被认为是最简单易行且精度最佳的示踪气体方法。此方法首先将一定量的示踪气体充入测试区域,在体积分数均一之后开始记录示踪气体体积分数的下降过程,采用记录的数据可计算得到换气次数。本实验中,仍采用 CO₂ 作为下降法的示踪气体,使用干冰将 CO₂ 释放到实验区域内。

求解过程采用参数迭代法^[14]。CO₂ 体积分数的变化量可由下式表示:

$$\Delta c = \frac{\Delta\tau}{V_z} [F_{\text{CO}_2} - NV_z(c_1 - c_e)] \quad (7)$$

式中 Δc 为 CO₂ 体积分数的变化量, 10^{-6} ; $\Delta\tau$ 为时间间隔, h 。

由于下降法中无示踪气体释放,所以 $F_{\text{CO}_2} = 0$ 。

2.4.3 测量通风量法

第 3 种测量房间换气次数的方法是直接测量

送风口的风量。采用速度计直接测量送风道内的风速,仪器误差为±0.01 m/s。送风道位于测试房

间的屋顶,风速测点位于一横截面0.14 m×0.14 m、长度1.2 m的长方形风道内,见图4。风速测



图4 测量通风量法

点分布于风道同一截面的9个点上,呈3×3分布^[17]。此方法的换气次数计算公式如下:

$$N = \frac{u_a A_c}{V_z} \quad (8)$$

式中 u_a 为风道内平均速度, m/h; A_c 为风道截面积, m²。

3 结果与分析

3.1 干冰升华速率实验

不同温度下干冰升华速率实验的结果如表2所示。所有试验均在同一个人工气候室内完成,试验时间为一天内的3个不同时间段。测量显示干冰升华速率的平均偏差小于2 g/0.5 h。

表2 不同温度下干冰升华速率

时间段/h	升华量/(g/0.5 h)		
	25 °C	30 °C	35 °C
0~0.5	67	71	73
0.5~1.0	66	69	72
1.0~1.5	65	70	72
1.5~2.0	69	70	70
2.0~2.5	69	68	73
2.5~3.0	69	71	70
平均值/(g/h)	135.0	139.6	143.4

由以上数据,可预测干冰升华速率与室内温度呈线性相关,如图5所示。由此可以计算得出不同温度下的干冰升华速率。由图5可知,室内温度每升高5 °C,CO₂的释放速率加快0.003 7 m³/h,约加快5%。由于室内温度一般为19~24 °C^[18],说明此方法在室内的释放率是非常稳定的,完全可以应用。

3.2 干冰升华速率校核

图6显示了30 h实验的结果,2组实验中的干冰释放速率均保持稳定,且两实验的释放速率相差在5%内。偏差可能来自2组实验的温度偏差,这是由于2组实验并非同时进行,而是在同一房间内的2个不同的时间段。

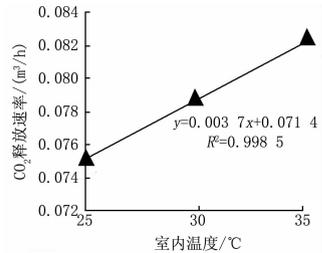


图5 不同温度下的CO₂释放速率

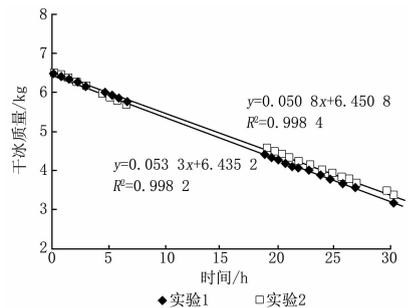


图6 相同隔热桶2次实验的干冰升华速率

不同隔热桶的干冰释放速率实验的结果如图7所示。从图中可以看出2个实验中干冰升华速率相差约2%,并且初始干冰质量相差1 kg对干冰升华速率无影响。

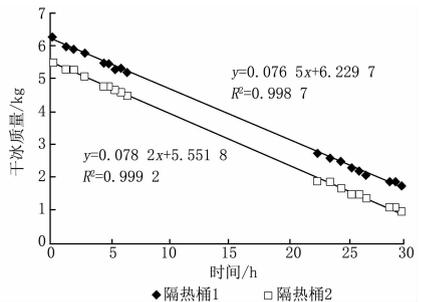


图7 相同结构的两不同隔热桶的干冰升华速率

3.3 3种不同方法测量换气次数的结果

3.3.1 恒定速率释放法

图8显示了室内和室外的CO₂体积分数的变化。

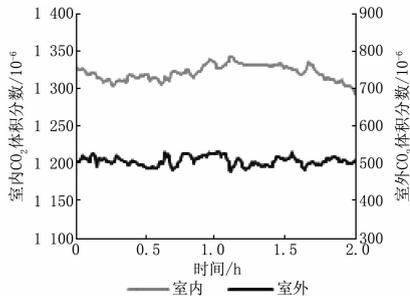


图8 室内外CO₂体积分数变化

化。图中,室外、室内平均体积分数分别为 1320×10^{-6} 和 505×10^{-6} , 即平均体积分数差为 815×10^{-6} 。通过每 0.5 h 测量一次隔热桶的质量, 得到隔热桶中 CO₂ 的释放速率为 $0.051 \text{ m}^3/\text{h}$ 。从而可以由式(5), (6) 得到换气次数为 0.837 h^{-1} 。由于 ASHRAE 推荐的室内外 CO₂ 体积分数差不应大于 700×10^{-6} [19], 所以此实验中采用的隔热桶稍作了改进。

3.3.2 下降法

图9显示了人工气候室内的CO₂体积分数下降曲线与拟合曲线。首先使用多个隔热桶放置干冰在室内同时释放CO₂直至体积分数达到 2000×10^{-6} , 然后停止释放, 开始记录体积分数下降过程。换气次数计算结果为 0.896 h^{-1} 。

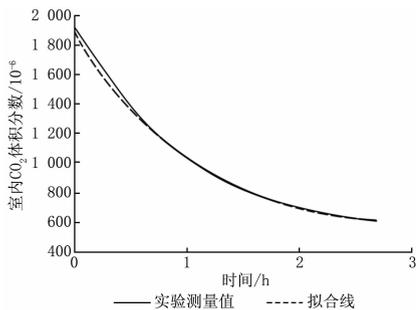


图9 CO₂体积分数下降曲线

3.3.3 测量通风量法

测量得到送风道内平均风速为 0.8 m/s , 从而得到送风量为 $56.7 \text{ m}^3/\text{h}$, 除以房间体积即可得到换气次数为 0.76 h^{-1} 。同时, 在前2种测量方法时也通过测量通风量来计算换气次数, 以保证不同实验的换气量相同。

3.4 比较分析

3.4.1 理论与实验比较分析

根据表1中的数据, 理论计算得到的 $30 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的干冰升华速率为 113.5 g/h , 实验测量得到的实际干冰升华速率为 139.6 g/h , 见表2。两者相差 18.67% , 超出了传热计算中可接受的 10% 误差范围。误差偏大的原因可能来自隔热的材料, 尤其是聚氨酯泡沫塑料。隔热材料在桶壁之间分布不均匀, 导致通过桶壁的传热量也不均匀。另外通过万向轮与地面的传热并未计入, 导致计算结果偏小。

但此误差对换气次数的测量不会造成任何影响, 因为每个隔热桶的释放率都是经过实测的。所以理论 CO₂ 释放速率可以用来估计桶的释放速率, 以指导桶的设计。

3.4.2 换气次数测量实验分析

与另外2种方法的结果比较可知, 本文提出的干冰法得到的换气次数结果真实可信。同时, 测量通风量法得到的结果最小, 而下降法得到的结果最大。

4 结论

本研究提供了一种新的利用 CO₂ 示踪气体测量换气次数的方法。此方法利用隔热桶盛放干冰来稳定释放 CO₂, 不仅可用于机械通风和自然通风的房间, 而且适用于无人值守的环境。

实验证明, 相同温度条件下干冰的升华速率保持不变。校核实验也证明同样结构的隔热桶在 30 h 的时段内可以保持有相同的干冰升华速率。在不同温度下的3组实验研究证明了温度变化对干冰升华速率的影响不显著。

本研究将提出的新方法 with 下降法和直接测量通风量的方法作了比较试验, 证明了干冰法的实际应用性和准确性。干冰法可以作为一种可靠的测量换气次数的方法。

参考文献:

- [1] Dimitroulopoulou C. Ventilation in European dwellings; a review[J]. Building and Environment, 2012, 47(1): 109-125
- [2] Seppänen O A, Fisk W J, Mendell M J. Association of ventilation rates and CO₂ concentrations with health and other responses in commercial and institutional buildings[J]. Indoor Air, 1999, 9(4): 226-252
- [3] Wargocki P, Sundell J, Bischof W, et al. Ventilation and health in non-industrial indoor environments; report from a European Multidisciplinary Scientific Consensus Meeting (EUROVEN)[J]. Indoor Air, 2002, 12(2): 113-128
- [4] Heidt F D, Werner H. Microcomputer-aided measurement of air change rates[J]. Energy and

- Buildings, 1986, 9(4): 313-320
- [5] Dietz R N, Cote E A, Senum G I, et al. Inexpensive perfluorocarbon tracer technique for wide-scale infiltration measurements in homes[R]. Upton, NY (USA): Brookhaven National Lab., 1981
- [6] Leaderer B P, Schaap L, Dietz R N. Evaluation of the perfluorocarbon tracer technique for determining infiltration rates in residences [J]. Environmental Science & Technology, 1985, 19(12): 1225-1232
- [7] Dietz R N, Goodrich R W, Cote E A, et al. Detailed description and performance of a passive perfluorocarbon tracer system for building ventilation and air exchange measurements[M]// Measured Air Leakage of Buildings, ASTM STP, 1986; 203-264
- [8] Cheong K W, Riffat S B. New approach for measuring airflows in buildings using a perfluorocarbon tracer[J]. Applied Energy, 1995, 51(3): 223-232
- [9] Stavova P. Experimental evaluation of ventilation in dwellings by tracer gas CO₂ [D]. Prague: Czech Technical University, 2011
- [10] McBride S J, Switzer P, Ott W, et al. Preliminary results from an investigation of the differences between indoor air quality and personal exposures [J]. Journal of Air & Waste Management Association, 1997
- [11] Johnson T, Myers J, Kelly T, et al. A pilot study using scripted ventilation conditions to identify key factors affecting indoor pollutant concentration and air exchange rate in a residence [J]. Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology, 2004, 14(1): 1-22
- [12] Barankova P, Naydenov K, Melikov A, et al. Distribution of carbon dioxide produced by people in a room: part 1—laboratory study[C]// Proceedings of Roomvent 2004. Coimbra, Portugal, 2004
- [13] Naydenov K G, Barankova P, Melikov A, et al. Natural distribution of metabolic carbon dioxide; part 2—field study[C]// Proceedings of Roomvent 2004. Coimbra, Portugal, 2004
- [14] Stavova P, Melikov A K, Sundell J. A new approach for ventilation measurement in homes based on CO₂ produced by people[C]// Proc. 17th Air-conditioning and Ventilation Conference, 2006; 291-296
- [15] Mc Williams J. Review of airflow measurement techniques[EB/OL]. [2013-09-01]. <http://www.aivc.org>
- [16] Cengel Y A. Heat & mass transfer; a practical approach [M]. Columbus, Ohio, USA: Tata McGraw-Hill Education, 2007
- [17] Measuring air flow in ducts, pipes, hoods and stacks [EB/OL]. [2013-09-01]. http://www.omega.com/toc.asp/frameset.html?book=Green&file=AIRFLOW_MEAS_REF
- [18] Burroughs H E B, Hansen S J. Managing indoor air quality[M]. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2004
- [19] ASHRAE. ASHRAE Standard 62.1 - 2010 Ventilation for acceptable indoor air quality [S]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, 2010