

室内物品和家具 VOC 散发 环境舱设计思考和实践^{*}

清华大学 刘巍巍[☆] 杜世元 张寅平[△]

摘要 欧美发达国家普遍采用环境舱对室内物品及家具 VOC 散发进行测试。介绍了环境舱法的测试原理,包括通风舱和密闭舱的测试原理。国外均采用通风舱进行测试,测试时间通常为 7~28 d,而清华大学提出的密闭舱 C-history 方法可将测试时间缩短到 3 d 以内。基于环境舱测试原理介绍了一种环境舱设计方案,并据此制作了 30 m³ 全尺寸环境舱,所建环境舱既能开展通风舱测试又能开展密闭舱测试。采用 LIFE 标准散发样品对环境舱的综合性能进行了测试,测试结果显示通风舱回收率为 86.7%,密闭舱回收率为 90.6%,满足 ISO 16000-9 和 ASTM D6670 的要求。

关键词 环境舱 家具 建材 室内空气质量 挥发性有机化合物 通风舱 密闭舱

Chamber for determination of volatile organic compound emissions from indoor products and furniture: Design consideration and practice

By Liu Weiwei[★], Du Shiyuan and Zhang Yinping

Abstract The chamber is generally used to test VOC emissions from indoor products and furniture in European countries and the US. Presents the fundamentals of chamber methods, including ventilated chamber method and closed chamber method. Testing time of the ventilated chamber method adopted aboard is 7 to 28 days in general. The C-history method, developed by Tsinghua University, using closed chamber can shorten the testing time to 3 days or even less. Based on the fundamentals of chamber methods, presents a design scheme of the chamber according to which a 30 m³ full scale chamber was built. This chamber can be used as both ventilated and closed chamber. Evaluates its performance by LIFE standard reference and the testing results show that the recovery rate of ventilated chamber is 86.7% and closed chamber is 90.6%, satisfying the demand of standard ISO 16000-9 and ASTM D6670.

Keywords chamber, furniture, building material, indoor air quality, volatile organic compound, ventilated chamber, closed chamber

[★] Tsinghua University, Beijing, China

①

0 引言

室内物品及家具能散发挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOC),从而造成室内空气污染,引发各种疾病,如病态建筑综合征(SBS)、建筑相关疾病(BRI)及多种化学污染物过敏症(MCS)等^[1]。为了从源头控制室内物品及家具 VOC 污染,欧美一些发达国家纷纷建立了室内物品及家具 VOC 散发标识体系^[2],并取得了显著成效。我国可借鉴和学习国外建立标识体系的经验,但不能照搬,须充分考虑我国国情特点,构建符合我国国情的室内物品及家具 VOC 散发标识体系。目前国外标识体系普

遍采用环境舱法对室内物品及家具 VOC 散发进行测试,并形成了一系列测试标准^[2]。环境舱法的优点是能模拟物品及家具的使用工况,从而测得物品及家具真实的 VOC 散发水平。因此本文对环境舱法测试原理及环境舱设计与制作工艺进行研究,目的是为构建我国建材及家具 VOC

①[☆] 刘巍巍,男,1985年4月生,在读博士研究生

△ 张寅平(通信作者)

100084 北京市清华大学建筑技术科学系

(010) 62772518

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

收稿日期:2013-09-06

修回日期:2013-09-17

散发标识体系提供环境舱测试及建造技术。

1 环境舱测试原理

1.1 通风舱

通风舱测试基本原理如下:将被测样品放入温湿度恒定的环境舱内,关闭舱门,以额定流量向环境舱内输送洁净空气,洁净空气与舱内样品散发的 VOC 混合后由排风口排出,如图 1 所示,可在环境舱排风口或舱内某点测定

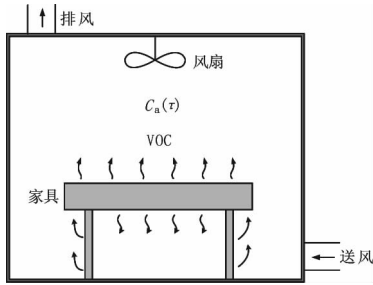


图 1 通风舱测试原理示意图

VOC 浓度。当环境舱内 VOC 均匀分布,舱内无化学反应,送风不含污染物,环境舱壁面无 VOC 吸附及脱附,环境舱除额定送风外无其他空气交换时,环境舱内 VOC 质量平衡方程为

$$V \frac{dC_a}{dt} = EA - QC_a \quad (1)$$

式中 V 为环境舱体积, m^3 ; C_a 为舱内 VOC 质量浓度, mg/m^3 ; τ 为测试进行的时间, h ; E 为样品单位散发面积散发速率, $mg/(m^2 \cdot h)$; A 为样品散发面积, m^2 ; Q 为洁净空气流量, m^3/h 。

在样品散发状况接近稳态时,由式(2)即可计算出样品单位散发面积散发速率,为测得稳态散发速率,已有标识体系通常将测试时间规定为 7~28 d^[2]。

$$E \approx \frac{Q}{A} C_a \quad (2)$$

在测得样品单位散发面积散发速率后,可利用式(3)计算样品在房间中散发的 VOC 质量浓度。

$$C_r = \frac{A_r E}{Q_r} \quad (3)$$

式中 C_r 为房间中 VOC 质量浓度, mg/m^3 ; A_r 为房间中被测样品总的散发面积, m^2 ; Q_r 为房间通风量, m^3/h 。

1.2 密闭舱

现有的通风舱测试法最大的问题是测试时间太长,通常需要 7~28 d,由此带来高额测试成本,不利于该方法在我国的推广应用。为缩短测试时间,Xiong 等人提出了密闭舱 C-history 方法^[3-4]。密闭舱 C-history 方法采用密闭舱(无任何空气交换)进行测试,原理如下:将建材置于密闭舱内散发,舱内 VOC 浓度由初始浓度 0 逐渐上升至平衡浓度,将测得的逐时浓度和平衡浓度按式(4)进行拟合,可计算出 VOC 的扩散系数 D_m 和分配系数 K ,然后根据测得的平衡浓度及式(5)可计算出建材的 VOC 初始可散发浓

度 C_0 。通过以上过程测得控制建材中 VOC 散发的三个关键参数 C_0 , D_m 和 K ,由以上三个关键参数及建材的尺寸信息即可借助模型^[5]计算建材在任意环境中的散发速率。测试原理如图 2 所示。Yao 等人研究表明常见人造板家具存

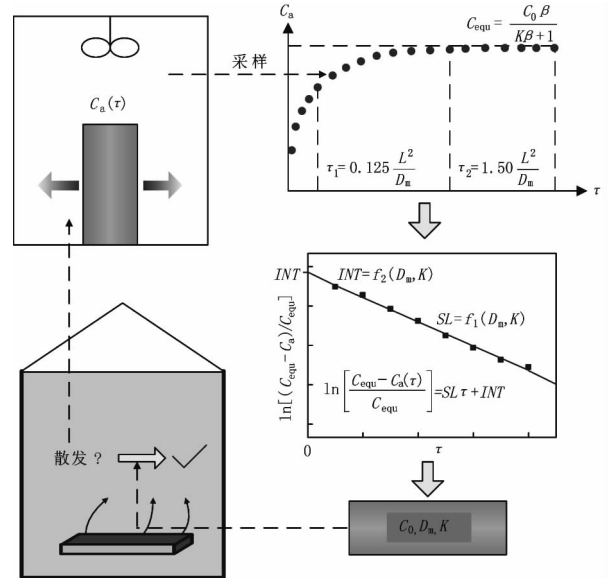


图 2 密闭舱 C-history 方法测试原理示意图

在表观特征参数^[6],因此密闭舱 C-history 方法可用于家具 VOC 散发测试。需要说明的是,密闭舱 C-history 方法需对环境舱内 VOC 进行多次采样,对于小型环境舱而言,多次采样对舱内 VOC 质量守恒影响较大,将会导致实验误差,因此该方法尤其适合于大型环境舱测试。

$$\ln \left[\frac{C_{\text{equ}} - C_a(\tau)}{C_{\text{equ}} - C_a(0)} \right] = -D_m L^{-2} q_1^2 \tau + \ln \left[-\frac{2(K\beta + 1) \sin q_1}{q_1 A_1} \right] \quad (4)$$

$$C_{\text{equ}} = \frac{C_0 \beta}{K\beta + 1} \quad (5)$$

式(4),(5)中 C_{equ} 为密闭舱内 VOC 平衡质量浓度, mg/m^3 ; $C_a(\tau)$ 为密闭舱内 VOC 在 τ 时刻的质量浓度, mg/m^3 ; L 为建材厚度, m ; $\beta = AL/V$; q_1 为式(6)的根; $A_1 = (K\beta - q_1^2 KBi_m^{-1} + 1) \cos q_1 - (1 + 2KBi_m^{-1}) q_1 \sin q_1$; 其中 $Bi_m = h_m L/D_m$, h_m 为建材表面对流质系数, m/s 。

$$\frac{\tan q_1}{q_1} = \frac{1}{q_1^2 KBi_m^{-1} - K\beta} \quad (6)$$

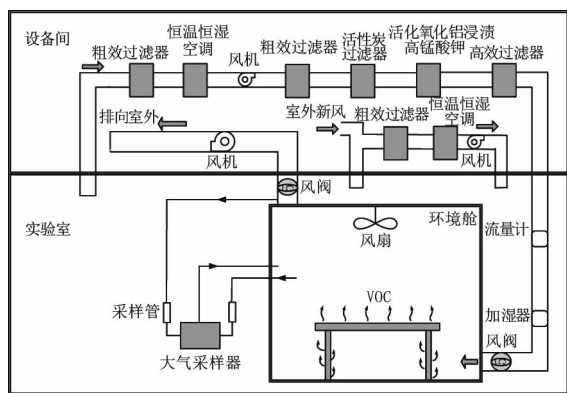
2 环境舱设计与制作

2.1 环境舱标准

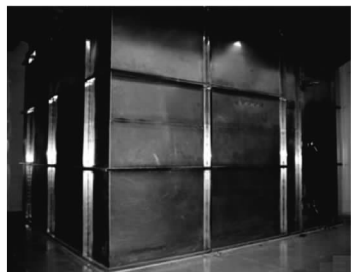
目前,国内尚无全尺寸环境舱设计标准,国外关于环境舱测试 VOC 散发的标准较多^[2],其中详细指导全尺寸环境舱设计的标准为 ASTM D6670^[7]。ASTM D6670 中一些设计方案对于我国来说并不合适,比如:设计环境舱回风系统可导致制作成本增加,并且回风中的污染物可能污染空调除湿冷凝水从而成为污染源;环境舱外壁面包覆绝热层,不利于密闭舱测试时舱内温度的控制。

2.2 系统设计

国内对全尺寸环境舱的研究起步较晚,近年来,随着我国建材及家具 VOC 污染问题的日益突出,逐渐有学者对全尺寸环境舱进行了研制。如陈晓丹等人研制了 30 m^3 环境舱^[8],然而该环境舱以压缩机为送风动力源,使得空气处理装置建造不便;丁萌萌等人研制了用于空气净化器检测的 30 m^3 环境舱^[9],整个系统按密闭舱测试工况设计,不能开展通风舱测试。本文介绍一种建造方便、经济的环境舱设计方案,并据此制作了 30 m^3 环境舱,该环境舱既能开展通风舱测试,又能开展密闭舱测试,环境舱如图 3 所示。下面分别从环境舱舱体系统、温湿度控制系统和送风系统三个方面来介绍^[10-11]。



a 环境舱系统图



b 环境舱实物图

图 3 30 m^3 全尺寸环境舱

2.2.1 环境舱舱体系统

环境舱舱体及其零部件要求采用不吸附污染气体的材料制作,目前常用的材料为不锈钢、玻璃、铝、聚四氟乙烯等,舱体的主体部分一般采用不锈钢制作(比如不锈钢 304 或 316),为了进一步提高舱体性能,舱体内壁面可采用镜面不锈钢制作,制作过程可采用无缝焊接技术。环境舱的新风系统管道及部件与气流接触的地方,均应采用不锈钢材料制作。

为增加舱内空气均匀性,应在舱内加装不锈钢搅拌风扇,风扇电动机应安装在环境舱外部,风扇轴和环境舱之间应保证充分密封且没有润滑剂的散发。风扇可采用变频控制,从而可调节被测样品表面风速,这适用于对表面风速要求非常严格的场合,如油漆、涂料散发量测试。

环境舱门等开口活动部位结合处应加装硅胶密封胶垫料,并通过压紧部件加压进行密封,舱体密封效果对于密闭舱测试尤为重要。

当环境舱可能用来测试电器设备时,如空气净化器等,环境舱内需设置电源插头,普通电源插头难以达到环境舱密封要求,因此应选用密封效果良好的航空插头。

一般情况下,为尽量减少零部件散发污染物及提高舱体密封效果,不推荐环境舱内安装内部照明,若必须安装,可将 LED 灯具安装在环境舱的顶部外侧,通过密封玻璃将灯具与环境舱隔开。

2.2.2 温湿度控制系统

为简化设计、节约成本,并且尽量避免回风污染,环境舱空调系统采用送风直排系统,不设置回风。环境舱温湿度控制由两套空调系统实现。其中一套恒温恒湿空调系统用于控制舱外环境温度湿度,由于环境舱壁面不进行保温,因此舱外环境温度控制可协助舱内温度控制,使舱内温湿度更加稳定。另一套恒温恒湿空调系统通过控制舱内送风温湿度,使舱内温湿度得到快速、精确和稳定的控制。在密闭舱测试时,可通过控制舱外温湿度达到维持舱内温湿度稳定的目的。

为了实现环境舱内温湿度的快速、精确调节,空气温度和湿度的控制采用冷却除湿—加热—加湿的处理程序,从而保证送风温湿度在要求的范围内。加湿过程中,为避免不纯净的水带来污染,加湿水源采用去离子水或纯净水,加湿方式采用电热加湿。

当需要进行通风舱测试时,两套空调系统同时开启运行,达到测试工况即可开始测试;当需要进行密闭舱测试时,可先同时开启两套空调系统,待舱内温湿度达到测试要求时,关闭环境舱内空调系统,并且分别关闭环境舱送风口和排风口的风阀,然后开始测试。

2.2.3 送风系统

环境舱送风系统以风机作为动力源,送风净化系统实现的方法是:环境舱的送风系统安装粗效过滤器,经过温湿度控制后,再安装一个过滤净化段。过滤净化段主要由四部分组成,第一部分是粗效过滤器,过滤一些较大的颗粒物;第二部分是活性炭过滤器,过滤 VOC 气体等;第三部分是活化氧化铝浸渍高锰酸钾滤料,用于去除活性炭难以吸附的物质(如甲醛等);第四部分是对颗粒物进行过滤,采用不会散发污染物的高效过滤器控制送风的颗粒物浓度。这样就可以达到对送风的背景浓度及颗粒物的控制。

合理设计送风口和排风口的位置,有利于新风与舱内气体的充分混合。将送风口设计在环境舱一个侧面的下部区域,而排风口设置在另一个侧面的上部区域,两者距离相对较远,同时环境舱顶部中间安装搅拌风扇,这样可达到舱内空气充分混合的目的。

为了保证送入环境舱的空气流量的准确性,避免由于

漏风引起损失,流量测试装置应安装在送风管靠近环境舱的位置。流量调节通过高压头小流量的变频风机来实现。

3 环境舱性能评价

国外环境舱标准如 ISO 16000-9^[14] 及 ASTM D6670 对环境舱测试性能进行了详细规定,包括背景浓度、密闭性、吸附性、空气混合度、温湿度控制精度等,文献[10]按照 ASTM D6670 给定的方法对研制的 30 m³ 全尺寸环境舱性能进行了检测。然而,以上提及的测试方法测试程序烦琐,并且不便于开展环境舱实验室间比对测试。为更方便地评价环境舱性能,Wei 等人研制了一种液膜式甲苯标准散发样品(LIFE)^[12-13],该标准散发样品具有持久恒定的散发速率,可方便用于环境舱性能评价,已获批为国家二级标准物质(GBW(E) 081942)。

本文利用 LIFE 甲苯标准散发样品对研制的 30 m³ 环境舱进行性能评价,将 LIFE 样品置于环境舱中散发,通过测试环境舱内 VOC 浓度,可计算出标准散发样品散发速率。通风舱内标准散发样品散发速率 \dot{m}_t 计算公式为

$$\dot{m}_t = QC_a(\tau) \quad (7)$$

密闭舱内标准散发样品散发速率计算公式为

$$\dot{m}_t = \frac{C_a(\tau)V}{\tau} \quad (8)$$

定义回收率 R 作为评价依据:

$$R = \frac{\dot{m}_t}{\dot{m}_s} \quad (9)$$

式中 \dot{m}_s 为散发速率标准值(通过高精度天平进行标定),mg/h。

测试条件及测试结果如表 1 所示。ISO 16000-9 规定回收率应 $\geq 80\%$,ASTM D6670 规定回收率应为 $85\% \sim 115\%$,由表 1 中的回收率测试结果可知,通风舱和密闭舱的回收率均满足 ISO 16000-9 和 ASTM D6670 的要求。

表 1 回收率测试条件及测试结果

| | 通风舱 | 密闭舱 |
|--|--------|--------|
| 温度/℃ | 23±0.5 | 23±0.5 |
| 相对湿度/% | 50±5 | 50±5 |
| 通风量 Q/(m ³ /h) | 28.9 | 0 |
| 环境舱体积 V/m ³ | 29.493 | 29.493 |
| 测试时间 τ /h | 17 | 1 |
| 散发速率标准值 \dot{m}_s /(mg/h) | 28.350 | 28.350 |
| 甲苯质量浓度 $C_a(\tau)$ /(mg/m ³) | 0.849 | 0.870 |
| 散发速率测试值 \dot{m}_t /(mg/h) | 24.525 | 25.651 |
| 回收率/% | 86.7 | 90.6 |

4 密闭舱 C-history 方法应用

Yao 等人采用密闭舱 C-history 方法,在笔者研制的 30 m³ 环境舱中开展了家具测试,实验温度为(23±0.5)℃,相对湿度为(50±5)%。所测家具 VOC 散发表面积为 16.286 m²,板材厚度为 0.019 m^[6]。图 4 为所测家具甲醛及甲苯浓度拟合结果,据此可计算出关键参数 $C_{0, \text{equ}}$, D_{equ} 和 K_{equ} (见表 2)。表 2 中测试结果误差可通过线性拟合的斜率和截距标准偏差计算^[6]。图 5 给出了利用所测关键参

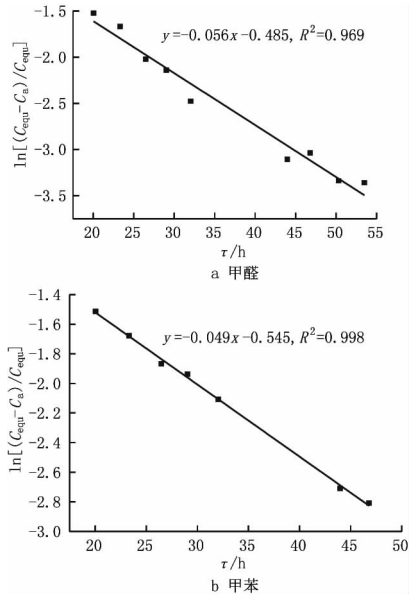


图 4 密闭舱中家具散发浓度线性拟合

表 2 C-history 方法测得的家具散发特征参数

| 污染物 | $C_{0, \text{equ}}/(10^5 \mu\text{g}/\text{m}^3)$ | $D_{\text{equ}}/(10^{-10} \text{m}^2/\text{s})$ | $K_{\text{equ}}/10^2$ |
|-----|---|---|-----------------------|
| 甲醛 | 5.10±0.49 | 3.13±0.22 | 4.82±0.47 |
| 甲苯 | 28.9±2.0 | 2.52±0.21 | 5.90±0.44 |

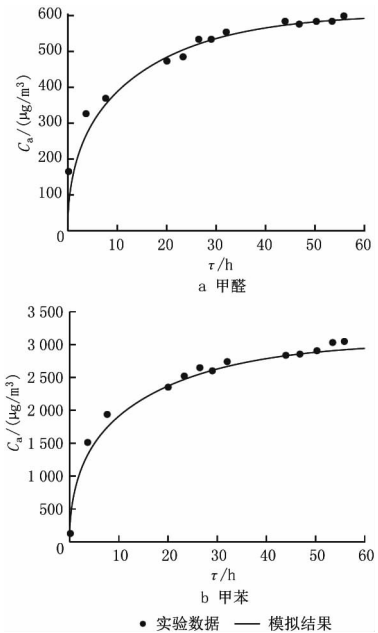


图 5 密闭舱中家具散发浓度实验数据及模拟结果

数计算出的密闭舱内浓度与实测浓度。为进一步验证所测关键参数,采用平行样进行通风舱测试,通风舱测试温湿度条件同密闭舱,通风舱换气次数为 1 h^{-1} 。通风舱测试结果与模拟结果如图 6 所示。图 5 和图 6 表明实验数据与模拟结果吻合较好。由于密闭舱 C-history 方法 3 d 内即可完成测试,从而大大节约了测试时间。因此,从节约测试时间角度来讲,密闭舱 C-history 方法具有明显优势,可考虑

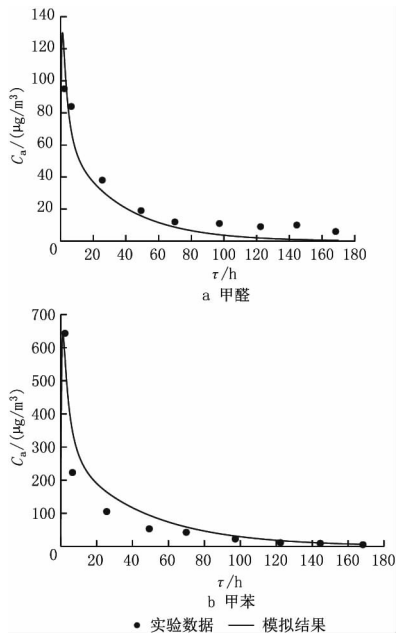


图6 通风舱中浓度测试实验数据与模拟结果

在今后建材及家具 VOC 散发测试中推广应用。

5 结论

5.1 对已有的通风舱和密闭舱测试方法进行了分析,认为密闭舱 C-history 方法可将测试时间由 7~28 d(通风舱)缩短到 3 d 以内,从而节约了测试时间,因此密闭舱 C-history 方法在建材及家具 VOC 散发测试领域具有较好的应用前景。

5.2 介绍了一种环境舱设计方案,该方案的送风系统为以风机为动力源的直排系统,不设置回风,送风经四级过滤而对送风的背景浓度及颗粒物进行控制,两套独立空调系统分别对舱内外温湿度进行控制,据此制作的环境舱既可用于通风舱测试又可用于密闭舱测试。

5.3 采用 LIFE 标准散发样品对环境舱性能进行了评价,结果表明笔者研制的 30 m³ 环境舱用于通风舱测试时回收率为 86.7%,用于密闭舱测试时回收率为 90.6%,回收率均满足 ISO 16000-9 和 ASTM D6670 的要求。

参考文献:

[1] 张寅平. 中国室内环境与健康研究进展报告 2012[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2011:2-3
 [2] Liu W W, Zhang Y P, Yao Y, et al. Indoor decorating and refurbishing materials and furniture volatile organic compounds emission labeling systems: a review[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(20): 2533-2543

[3] Xiong J Y, Zhang Y P, Huang S D. Characterisation of VOC and formaldehyde emission from building materials in a static environmental chamber: model development and application [J]. Indoor and Built Environment, 2011, 20(2): 217-225
 [4] Xiong J Y, Yao Y, Zhang Y P. C-history method: rapid measurement of the initial emittable concentration, diffusion and partition coefficients for formaldehyde and VOCs in building materials [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(8): 3584-3590
 [5] Xiong J Y, Liu C, Zhang Y P. A general analytical model for formaldehyde and VOC emission/sorption in single-layer building materials and its application in determining the characteristic parameters [J]. Atmospheric Environment, 2012, 47: 288-294
 [6] Yao Y, Xiong J Y, Liu W W, et al. Determination of the equivalent emission parameters of wood-based furniture by applying C-history method [J]. Atmospheric Environment, 2011, 45: 5602-5611
 [7] ASTM. ASTM D6670-01 Standard practice for full-scale chamber determination of volatile organic emissions from indoor materials/products[S]. ASTM International, 2007
 [8] 陈晓丹,秦华鹏,于广河,等. 全尺寸室内环境模拟箱研制及性能测评[J]. 环境监测管理与技术,2007,19(3):12-15
 [9] 丁萌萌,李增和,邓高峰,等. 室内净化器检测用环境试验舱研制及性能评价[J]. 环境工程学报,2010,4(6):1384-1388
 [10] 刘巍巍,张寅平,姚远,等. 室内材料物品化学污染物释放全尺寸环境舱的研制及性能评价[J]. 建筑科学,2010,26(12): 40-45
 [11] 清华大学. 一种用于室内物品及材料化学污染物释放测量的检测系统:中国,ZL200810104939.7[P]. 2011-09-14
 [12] Wei W J, Zhang Y P, Xiong J Y, et al. A standard reference for chamber testing of material VOC emissions: design principle and performance [J]. Atmospheric Environment, 2012, 47: 381-388
 [13] Wei W J, Greer S, Howard-Reed C, et al. VOC emissions from a LIFE reference: small chamber tests and factorial studies [J]. Building and Environment, 2012, 57: 282-289
 [14] ISO. BS EN ISO 16000-9: 2006 Indoor air—part 9: determination of the emission of volatile organic compounds from building products and furnishing-Emission test chamber method[S],2006