

· 研究报告 ·

全尺度室内环境模拟箱研制及性能测评

陈晓丹¹, 秦华鹏^{1,2}, 于广河², 栾胜基^{1,2}

(1. 北京大学深圳研究生院, 城市人居环境科学与技术重点实验室, 广东 深圳 518055)

(2. 深港产学研基地, 深圳环境模拟与污染控制重点实验室, 广东 深圳 518057)

摘要: 介绍了全尺度室内环境模拟箱, 以及研究开发的与室内实际空间尺寸相仿的大容量环境模拟箱具备的对试验条件的调节功能。在标准试验条件(箱内温度 23℃, 相对湿度 45%, 换气量 30 m³/h)下, 箱内温度、相对湿度和换气量的波动误差分别为 0.21℃、0.35%、0.15 m³/h。实验结果表明, 环境模拟箱的气密性和混合性良好, 本底浓度较低, 能为室内空气污染研究提供环境条件稳定、背景干扰小的室内仿真环境。对大芯板甲醛释放测定的结果表明, 环境模拟箱能够较准确地模拟室内污染物的释放过程和规律。

关键词: 全尺度; 室内; 环境模拟箱; 性能试验

中图分类号: X830 文献标识码: A 文章编号: 1006-2009(2007)03-0012-04

Design and Assessment of a Full-scale Indoor Environmental Cabin

CHEN Xiaodan¹, QIN Huapeng^{1,2}, YU Guanghe², LUAN Shengji^{1,2}

(1. The Key Laboratory for Environmental and Urban Sciences, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen, Guangdong 518055, China; 2. Shenzhen Key Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, PKU-HKUST Shenzhen-Hong Kong Institution, Shenzhen, Guangdong 518057, China)

Abstract Full-scale indoor environmental simulation cabin was introduced. The cabin of research and development has a capacity of actual room size and adjustment function for change of test condition. In the standard test condition (chamber temperature 23℃, relative humidity 45%, air change volume 30 m³/h) the error of chamber temperature is 0.21℃, the relative humidity 0.35% and air change volume 0.15 m³/h. The experimental result indicated the cabin has a good gas tightness and mixture function, lower background, and can provide a stable environmental condition for simulation indoor environment in which the process of formaldehyde release from artificial wood-based boards can be accurately obtained.

Key words Full-scale; Indoor Environment simulation cabin; Performance test

目前, 室内空气污染研究已成为环境科学学科一个重要领域。在国际上, 基于室内环境模拟箱的模拟试验是该领域广泛采用的方法, 该方法利用环境模拟箱模拟室内温度、相对湿度(RH)、通风量和流速等环境条件, 通过测试环境模拟箱内目标试件的污染物释放过程, 掌握室内污染物释放特征和规律, 以开展室内空气污染控制和风险评价等研究。

环境模拟箱可分为小尺度(<5 m³)和全尺度(或大尺度), 小尺度环境模拟箱用来测试各种室内材料和产品样本, 全尺度室内环境模拟箱, 为大型试件或完整家具、装修组合(家具、地毯、涂料

等)、人为活动过程等研究提供了条件^[1-3]。国外比较重视全尺度环境的开发与应用^[4-5], 美国材料实验协会(American Society of Testing Materials, 简称 ASIM)还开发了全尺度环境模拟箱的制作指南^[6]。

相比较而言, 由于全尺度环境模拟箱制作成本高、环境条件不易控制, 我国关于室内污染物释放规律及控制技术的研究, 还主要采用小型环境模拟

收稿日期: 2006-12-30 修订日期: 2007-03-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50308003)

作者简介: 陈晓丹(1982-), 女, 河南洛阳人, 在读硕士, 从事室内空气质量研究。

箱进行^[7-8],国内也有个别使用大型环境模拟箱,但多是出于行业需要,只能在特定的环境条件下测试。现介绍一种夹套式全尺度环境模拟箱系统,具备可调节的温度、湿度、换气量等环境条件,以模拟研究对象在不同环境条件下的室内空气污染情况,并对环境箱试验条件、密封与混合,以及本底污染物浓度等主要性能进行了测试。

1 环境模拟箱系统设计

全尺度室内环境模拟箱工作室的尺寸为 $4\,000\text{ mm} \times 3\,000\text{ mm} \times 2\,500\text{ mm} = 30\text{ m}^3$ (长 \times 宽 \times 高),可模拟普通房间的大小,为大型的试件提供足够大的空间。环境模拟箱内壁由电抛光不锈钢制成,箱门和箱内所有接头都采用非吸附的密封材料密封,可以避免环境模拟箱本身释放或吸附污染物对测试结果的干扰。

环境模拟箱的温度控制系统采用双层箱体夹套式构造,分内外两层,外层为空调箱,对日常空调改进之后,温度可在 $15\text{ }^\circ\text{C} \sim 40\text{ }^\circ\text{C}$ 内调节;内层为工作室,内层工作室的目标温度通过调节外层空调间温度获得。外层箱体一方面对内层工作室起到调节温度的作用,另一方面也可以保证工作室温度均匀稳定。

环境模拟箱的湿度控制通过干湿气流比例控制阀达到,干湿气体通过不同气路进入环境模拟箱工作室,通过比例控制阀调节干湿气体比例,获得不同湿度的混合气体进入箱体。箱体内安装了混合风扇等设备,以促进进入环境模拟箱的“新风”与箱内空气充分混合。

环境模拟箱配套设施有清洁空气供应系统,包括无油压缩机、冷冻式干燥机、高效微粒过滤器、活性炭过滤器、气流控制器和循环风机部件,该系统可以为环境模拟箱提供无污染的空气,可以避免环境模拟箱输入空气中污染物背景浓度过高对测试结果的干扰。

以上设计可以控制环境模拟箱的温度、湿度和通风率,因而可以提供测试所需的条件(如指定的温度、相对湿度、空气置换率和气流速度)或模拟真实的室内环境。除箱体和清洁空气供应系统外,环境模拟系统和数据采集分析系统为相关研究提供了数据支持。室内环境模拟箱的气路结构见图 1。

2 性能测试

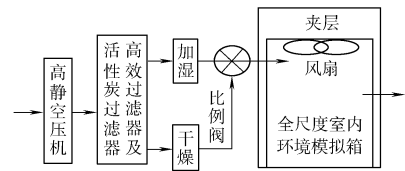


图 1 室内环境模拟箱的气路结构

2.1 环境条件控制

环境模拟箱具备提供一定的温度、湿度和换气率等环境条件的模拟功能,模拟污染源的释放过程;可设定不同的条件组合定点测试,以测定环境模拟箱能否达到所需的环境条件,以及环境模拟箱在设定环境条件 48 h 时的运转能否稳定保持,以保证环境模拟箱正常功能。

启动环境模拟箱,设定测试所需的温度、湿度和气流等环境条件(该环境模拟箱设计温度调节为 $15\text{ }^\circ\text{C} \sim 40\text{ }^\circ\text{C}$,相对湿度调节为 $20\% \sim 90\%$,换气量调节为 $15\text{ m}^3/\text{h} \sim 90\text{ m}^3/\text{h}$),待系统运行稳定后,与随后的 48 h 内,在环境模拟箱靠近出口处,监测箱体温度、相对湿度、换气量。

在测试中,由于温、湿度控制器配备了输出接口和配套的软硬件,可将环境模拟箱的温室信号输出、转换,并记录在箱外的计算机中。监测仪器的读数频率 $\geq 1\text{ Hz}$ 可以记录 1 min 的平均值,温度和相对湿度的测量精度分别为: $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $\pm 1\%$ 。环境条件控制测试采用的条件组合见表 1。

表 1 定点测试环境条件及误差

编号	温度 $t/^\circ\text{C}$	温度平均绝对误差 $t/^\circ\text{C}$	相对湿度 /%	相对湿度平均绝对误差 /%	换气量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$	换气量平均相对误差 /%
1	23	0.21	45	0.35	30	0.49
2	15	0.73	30	1.55	30	1.44
3	15	0.82	90	3.05	30	1.84
4	40	0.29	20	1.15	30	1.89
5	40	1.44	90	4.30	30	1.11
6	23	0.29	45	0.78	15	7.10

由表 1 可见,在标准测试条件下,环境条件控制情况非常好,温度、相对湿度和换气量的误差分别是 $0.21\text{ }^\circ\text{C}$ (0.91%), 0.35% (0.78%), 0.49% 。但是,当换气量低时,换气量控制的平均相对误差为 7.10% ,在高温高湿极端情况下,温度及湿度的控制也略差。

2.2 气密性

环境模拟箱作为一个室内空气模拟系统, 必须具备良好的密封性能, 气密性不达标会阻碍环境模拟箱与实验室内空气交换, 也就无法准确模拟目标物的状况。环境模拟箱密封测试采用示踪气体衰减法, 以 CO_2 作为失踪气体, 用 CO_2 分析仪 (TSI - TRAK Plus AQ Monitor) 测定。具体方法如下:

将环境模拟箱密封后, 环境模拟箱的环境温度可调节至 $23\text{ }^\circ\text{C}$, 相对湿度 45% , 换气率 0 h^{-1} 。在静态模式下, 向环境模拟箱内注入一定量的 CO_2 , 并根据箱内 CO_2 浓度的衰减, 绘制 CO_2 浓度对数 - 时间关系曲线, 曲线的斜率即为泄漏量^[6]。经测试, 大箱静态泄漏量为 $0.1368\text{ m}^3/\text{h}$ 小于环境模拟箱容积的 3% 。

2.3 混合性

设计环境模拟箱时, 可以通过安装混合风扇和多进/出气口的工艺提高环境模拟箱的混合性能。环境模拟箱的混合性可以通过示踪气体衰减法定量评估, 采用 CO_2 作为失踪气体, 用 CO_2 分析仪进行测定。

调节环境模拟箱的环境条件, 温度为 $23\text{ }^\circ\text{C}$, 相对湿度为 45% , 换气率为 1 h^{-1} (加风扇, 回风量 0 h^{-1}), 环境模拟箱内压力为 5 Pa 左右。待仪器运行稳定, 在出气口测试 CO_2 浓度, 作为背景值 (C_0); 在环境模拟箱进口释放一定量 CO_2 , 期望达到 10 倍 C_0 左右, 此时在环境模拟箱出口连续监测 CO_2 浓度, 设置 CO_2 分析仪测定周期为 1 min , 并依据混合率计算公式, 计算环境模拟箱的混合性能 η 。

$$\eta = \left\{ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [|C_m(t_i) - C(t_i)| (t_i - t_{i-1})]}{\sum_{i=1}^n [C(t_i) (t_i - t_{i-1})]} \right\} \times 100\%$$

式中: η ——混合率;

$C_m(t_i)$ ——示踪气体 t_i 时刻的实测值;

$C(t_i)$ ——示踪气体理论值, g/m^3 , $C(t_i) = C_0 e^{-Nt}$;

C_0 ——示踪气体初始测定值;

N ——换气率, h^{-1} ;

t ——换气周期, h ;

t_i ——第 i 个测定值的测定时刻, h ;

n ——总的测试点数。

在环境模拟箱测试中, $C_0 = 1.763\text{ g}/\text{m}^3$, $N = 1\text{ h}^{-1}$, $n = 196$, 经计算, $\eta = 84.4\%$ 。一般而言, 混合率 $> 80\%$ 表明环境模拟箱混合性能良好^[7],

混合度性能测试见图 2。

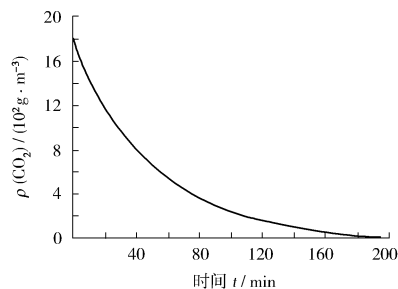


图 2 混合度性能测试

2.4 本底浓度

本底浓度要求环境模拟箱内无试件, 空箱运行稳定后, 箱内一些可能与目标物有关的气体浓度足够低时, 才能保证不干扰正常实验的进行。测定时, 环境模拟箱先用大流量泵清洗 (处理最大风量为 $90\text{ m}^3/\text{h}$) 一个晚上, 换气量调至 $30\text{ m}^3/\text{h}$, 然后在中间采样点和出气口采样点监测本底浓度, 定量检测甲醛和 VOCs 。

甲醛测定采用《酚试剂 (MBTH) 分光光度法》(GB/T 16057-1995), VOCs 采用《热解析/气相色谱-质谱法》(EPA TO-17)。甲醛本底浓度测定结果分别为: 中间采样点 $0.018\text{ mg}/\text{m}^3$, 靠近出气口的采样点 $0.020\text{ mg}/\text{m}^3$, 均 $\leq 0.02\text{ mg}/\text{m}^3$ 。采样 7 h 的 VOCs 本底浓度见表 2。

由表 2 可见, 在被检测的 27 种 VOCs 中, 有 85.2% 的 VOCs 测定结果 $< 0.5\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$, 测定结果相对较高的有甲苯, 对、间二甲苯, 三氯乙烯和 1,2,4-三氯苯。

2.5 大芯板甲醛释放

使用全尺度环境模拟箱对大芯板中甲醛短期 (96 h) 释放过程进行测试。被测试件为 4 块环保胶合板 (大芯板), 规格 $1.22\text{ m} \times 2.44\text{ m}$, 铝箔封边, 双面暴露, 承载量为每立方米 0.77 m^2 。实验条件分别为箱内温度 $23\text{ }^\circ\text{C}$ 、相对湿度 45% 、换气率 $30\text{ m}^3/\text{h}$, 甲醛的测定方法为《酚试剂分光光度法》(GB/T 18204.26-2000), 检测仪器为岛津紫外 UV 1700 分光光度计。

采样点标识为进气口 A、中心点 B、出气口 C, 靠近环境模拟箱底面角、顶面角、侧面中心点为 D~G, 采样点 A、B、C 的采样时间为 $0\text{ h} \sim 96\text{ h}$, 采样点 D、E、F、G 的采样时间为 $48\text{ h} \sim 96\text{ h}$, 甲醛释放测试结果见图 3, 甲醛释放模型见图 4。

表 2 VOCs 本底浓度

采样点	氯仿	苯	庚烷	壬烷	甲苯	辛烷	乙苯	丙苯	苯乙烯
A	—	—	—	—	1.42	0.016	0.247	—	0.084
B	—	0.010	—	—	1.77	—	0.348	—	0.060

采样点	三氯乙烯	对、间二甲苯	四氯乙烯	异丙苯	邻二甲苯	间甲乙苯	对甲乙苯	1,3,5-三甲苯	邻甲乙苯
A	0.593	0.791	—	—	0.110	0.040	—	0.015	—
B	0.822	0.918	—	—	0.147	0.027	—	0.017	—

采样点	1,2,4-三甲苯	癸烷	间二氯苯	邻二氯苯	对二氯苯	丁苯	十一烷	1,2,4-三氯苯	十二烷
A	0.072	—	0.042	0.004	0.063	0.060	—	0.818	0.009
B	0.043	—	0.039	0.001	0.063	0.060	—	0.809	0.010

A 靠近中间采样点, B 靠近出气口采样点。

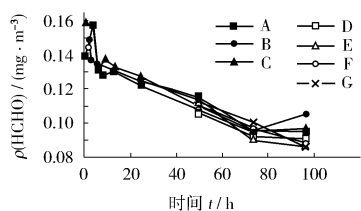


图 3 甲醛释放测试结果

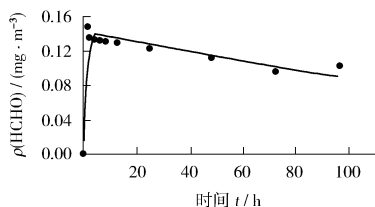


图 4 甲醛释放实测数据衰减模型

由测试结果可以看出,从中心点 B 到出气口 C 和进气口 D, 甲醛释放有略微的延迟, 但是甲醛浓度变化趋势基本相同, 90% 以上的采样点浓度差异在 15% 以内; 采样点 D、E、F、G 与中心点 B 甲醛质量浓度的差异在 10% 之内, 可见全尺度环境模拟箱内气体混合比较均匀。

3 讨论

通过对全尺度室内环境模拟箱的主要性能测试, 得知该箱密封性能和混合性能均良好, 能满足模拟的精度需要。在常规条件下, 环境条件控制能力优良, 性能稳定, 但在高温、高湿和换气量较低的控制测试中, 稳定性稍差。通过与其他国家的全尺度室内环境模拟箱比较, 原因可能是该箱环境条件设置的过高 (例如, 对于高湿的极限值, 通常都在 80% 或者以下, 而该实验的相对湿度为 90%), 另外, 与相关的控制设备运行状况也有关。中国和其

他国家环境模拟箱的指标设计范围见表 3。

表 3 中国和其他国家环境模拟箱的指标设计范围 [5]

国别	容积 V/m^3	温度 $t/^\circ C$	相对湿度 $\%$	换气量 $Q/(m^3 \cdot h^{-1})$	泄露量 $Q/(m^3 \cdot h^{-1})$
澳大利亚	33	(15~35) ± 5	(30~80) ± 5	9.9~268	< 0.5
加拿大	55	(15~35) ± 5	(20~80) ± 5	82.5~495	0.84
美国	29	(15~35) ± 5	(20~70) ± 5	7.54~754	0~1.7
中国	30	(15~40) ± 5	(20~90) ± 5	15~90	0.14

压力为 133 Pa 压力为 10 Pa

根据 2.5 中的测试结果, 标准采样点的设置可选取中心点, 如有条件可加采出气口, 其余可根据实验目的加采其他采样点。中心点 B 甲醛浓度时间序列的测试结果可以用指数衰减经验模型描述:

$$C(t) = C_0 e^{-kt}$$

式中: $C(t)$ —— 甲醛浓度随时间变化的函数, mg/m^3 ;

t —— 时间, h

C_0 —— 初始释放浓度, mg/m^3 ;

k —— 释放速率常数, h^{-1} [9]。

用 SPSS 软件拟合之后的模型 (见图 4):

$$C(t) = 0.1440 e^{-0.0048t}$$

在该状况下, 甲醛的初始释放质量浓度是 $0.1440 mg/m^3$, 速率常数为 $0.0048 h^{-1}$ 。

4 结论

经过测试, 该研究中的全尺度室内环境模拟箱温度调节为 [(15~40) ± 5] °C, 相对湿度 [(20~90) ± 5]%, 换气量 $15 m^3/h \sim 90 m^3/h$, 泄露量为 $0.136 \sim 8 m^3/h$, 小于要求的模拟箱容积的 3%, 混合度 84.43%, 大于要求的 80%, 甲醛本底质量浓度

(下转第 53 页)

对于未知盐度的水样, 可以用水中的电导率来快速估算氯化物含量的高低。若水样中氯离子质量浓度高, 要采用硝酸银滴定法来准确测定氯离子质量浓度, 将样品测定前充分稀释, 否则样品硫酸根的测定结果会偏高。

氯离子质量浓度高于 200 mg/L 时, 会对测定产生正干扰^[2]。表 2 为样品中氯离子质量浓度为 1.70×10^4 mg/L, 不同稀释倍数时硫酸根的测定值。从表 2 中可以看出, 只有氯离子质量浓度 < 200 mg/L^[1] 时, 测定值才准确可信。

表 2 高质量浓度氯离子样品不同稀释倍数时

硫酸根的测定结果

mg/L

稀释倍数	50倍	100倍	200倍
测定值	1 190	705	711

2.3 酸度的影响

根据《水质 硫酸盐的测定 重量法》(GB 11899-89), 样品的酸度过高会使硫酸钡沉淀的溶解度增大。在过滤时, 溶液中被除去的铬酸钡就会增多, 从而被硫酸根所取代出的铬酸离子减少。若此时参照分析步骤测定, 样品结果会偏低。通常在样品加入铬酸钡的操作过程中, 一旦发现溶液出

现亮黄色, 说明该样品的酸度较大, 需要调节 pH 值^[4]。若滴加氨水, 使样品 pH 值趋于中性, 就能保证样品测定值准确。

3 结语

测定环境水样品特别是工业废水样品中的硫酸盐, 会受样品浓度、盐度、酸度等多种因素的干扰。将样品充分稀释, 可以避免因样品硫酸盐含量过高造成的测定结果偏低和高盐度干扰造成的测定结果偏高。对于酸度过大的样品, 可以滴加氨水, 控制反应溶液的酸度, 让其呈弱酸性, 使样品硫酸根的测定结果准确可靠。

[参考文献]

(上接第 15 页)

低于 0.02 mg/m^3 。在检测的 27 种 VOCs 中, 有 85.2% 的本底质量浓度低于 $0.5 \text{ } \mu\text{g/m}^3$, 表明各采样点的本底浓度差异小, 能够较准确地模拟室内污染物的释放过程与规律。由于特定设计的原因, 该环境模拟箱具备良好的密封性、混合度, 在相当范围内, 具备控制环境条件(温度、湿度、换气量等)的能力; 配套的清洁气体供应系统能提供洁净气体, 基本上能为相关的科研提供特定室内条件下的模拟条件; 模拟实际情况时, 可以测试室内建筑装饰材料组合使用、实际用量下污染物释放规律, 还可以研究室内污染物的源汇相互作用。

[参考文献]

- [1] BROWN S K. Chamber assessment of formaldehyde and VOC emissions from wood-based panels [J]. Indoor air, 1999, 9: 209-215.
- [2] GODISH T. Measurement of indoor contaminants indoor environmental quality. Lewis publishers [M]. Michigan, USA, 2001, 293.

- [1] 陶钢, 牛星梅, 许立峰. 离子色谱法测定地表水中阴离子体系的研究 [J]. 环境监测管理与技术, 1999, 11(1): 24-26.
- [2] 孙智敏, 张德强, 孙汉文. 火焰原子吸收光度法测定水中硫酸盐 [J]. 理化检验-化学分册, 2005, 43(8): 39-40, 42.
- [3] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法 [M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 165-167.
- [4] 王云, 王海燕, 王新滨, 等. 饮用水中硫酸盐的铬酸钡测定法的改进 [J]. 职业与健康, 2005, 21(9): 55-56.

- [3] MYERS G E. The effects of temperature and humidity on formaldehyde emission from UF-bonded boards: a literature critique [J]. Forest Products Journal, 1985, 35: 20-31.
- [4] HOWARD E M, MASON M A, FORTMANN R, et al. Large indoor air test chamber characterization. proceedings of the engineering solutions to indoor air quality problems symposium [J/O]. V P-75, Air & Waste Management Association, July 1997, <http://www.epa.gov/appcdwww/iemb/publications.htm>.
- [5] HOWARD E M, MASON M A, ZHANG J S, et al. A comparison of design specifications for three environmental chambers. In engineering solutions to indoor air quality problems [J]. V P-51, Air & Waste Management Association, Pittsburgh, 1995: 61-70.
- [6] D5116-97. Standard Guide for Small-Scale Environmental Chamber Determinations of Organic Emissions From Indoor Materials/Products [S].
- [7] 封跃鹏, 张太生. 室内空气污染概述 [J]. 环境监测管理与技术, 2002, 14(3): 17-20.
- [8] 曾海东, 张寅平, 王庆苑, 等. 用密闭小室测定建材 VOC 散发特性 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(6): 778-781.
- [9] 秦华鹏, 刘阳生. 室内环境中挥发性有机物释放过程的数学模型 [J]. 环境污染与防治, 2006, 28(2): 96-99.