



文章栏目：环境监测技术

DOI 10.12030/j.cjee.202004142

中图分类号 TU834.8+63

文献标识码 A

李永振, 郭瑞华, 王涛, 等. 用于建材污染物检测的环境舱内舱设计及低本底特性验证[J]. 环境工程学报, 2021, 15(5): 1645-1651.

LI Yongzhen, GUO Ruihua, WANG Tao, et al. Structural design and verification of low background adsorption characteristics of the inner chamber for the detection of building materials pollutants[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2021, 15(5): 1645-1651.

用于建材污染物检测的环境舱内舱设计及低本底特性验证

李永振¹, 郭瑞华¹, 王涛¹, 丁建军², 赵文燕², 朱小锋^{1,*}

1. 北京市劳动保护科学研究所, 北京 100054

2. 中国建材检验认证集团股份有限公司, 北京 100024

第一作者: 李永振(1988—), 男, 博士, 助理研究员。研究方向: 环境检测系统。E-mail: yongzhen_l@sina.com

*通信作者: 朱小锋(1981—), 男, 博士研究生, 副研究员。研究方向: 大气颗粒物监测。E-mail: zxf_402@163.com

摘要 环境舱检测建材污染物释放量前, 应尽可能降低内舱的本底浓度, 以实现对其释放量的准确检测。从结构设计、选材、接口及配件设计等多方面考虑, 设计了低本底环境舱(体积为 1 m³)的内舱结构; 对内舱内部的惰性材料进行了性能测试, 并对 60 L 内舱污染物释放量进行了测试。检测结果表明, 内舱所涂敷的惰性涂层能够满足环境舱的使用要求, 舱壁的惰性处理不会对其本底值造成不利影响。本实验结果验证了内舱结构设计的合理性, 可为环境舱的研制提供参考。

关键词 环境舱; 内舱; 建筑材料污染; 低本底; 惰性涂层

室内家具、装饰装修材料释放出的甲醛、VOCs 等污染物会威胁人群健康^[1-3]。因此, 对家具/建材释放污染物等级的检测十分重要。业界普遍采用环境舱对家具/建材进行 VOCs 释放特征及机理的研究^[4-6]。动态环境舱可营造一个真实的室内环境, 为家具/建材释放污染物的准确测量提供可靠平台。根据体积大小不同, 环境舱可分为微型、小型和全尺寸环境舱, 实际常用的主要是小型和全尺寸环境舱^[7-8]。

通过调节环境舱中内舱温度、湿度、空气流速等参数, 可实现对真实室内环境的有效模拟。家具/建材释放污染物的释放速率、释放浓度等参数显著受到内舱本底、温湿度、空气流速等测试条件的影响^[9-10]。在实际应用过程中, 内舱本底浓度越小, 测得的污染物释放量结果就越精确。目前, 关于环境舱的研究多集中于设备的设计、舱内温湿度精确控制和实验测试^[11-17], 而关于环境舱设计以降低内舱本底浓度的研究鲜有报道。

本研究通过对内舱设计过程中的结构设计、材料选取、接口及配件设计等多方面考虑, 实现对内舱的低本底设计, 并通过内舱惰性材料涂覆性能测试(涂层厚度测定、附着力评价、耐磨性评

收稿日期: 2020-04-28; 录用日期: 2020-10-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0700602); 国家自然科学基金资助项目(61874012); 北京市科学技术研究院改革发展培育项目(PY2020HJ35); 北京市科学技术研究院北科青年学者人才项目(PXM2019_178304_000001)

价及表面惰性评价), 验证环境舱的低本底特性, 以为室内材料的性能评价提供可靠的测试平台。

1 环境舱的结构、功能及设计要点

1.1 环境舱的结构及功能

本研究设计的环境舱内舱容积为 1 m^3 , 主要由空气供气装置、空气洁净装置、气体流量控制装置、空气湿度调节装置、内舱低温控制系统、内舱高温清洁系统、SDECUI(Software Defined Environment Chamber User Interface) 系统及低本底内舱等部分组成(见图1)。环境舱利用高温吹扫完成自清洁, 采用内壁硅烷化镀膜技术实现内舱零吸附特性, 并通过互联网实现对环境舱的远程操作和监控。

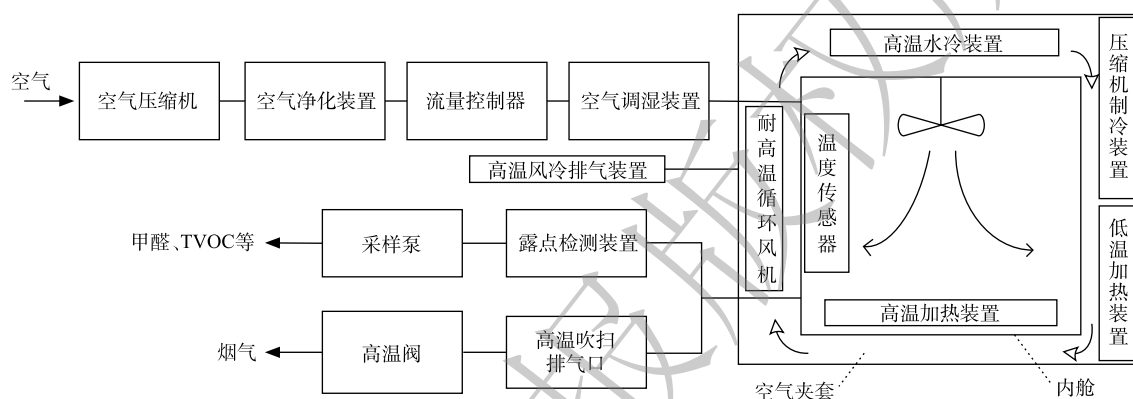


图1 环境舱系统总体结构图

Fig. 1 Overall structure of the environmental chamber

环境舱的核心功能是利用内舱(用于存放测试样品的空间区域)提供特定温度、湿度、流量和压力的大气环境。环境舱内舱大气环境的营造是通过对环境舱外的空气处理后获得, 处理流程包括5个阶段, 即: 1) 气体干燥阶段, 对空压机产生的压缩大气进行除油、除水和干燥处理; 2) 气体洁净阶段, 对干燥后的大气进行VOC、微小颗粒物及各类杂质的去除和过滤; 3) 气体控湿度控流量阶段, 对洁净后的大气进行湿度和流量调节, 调节后气体进入内舱, 再根据测试的湿度需求进行补水调节; 4) 气体控温阶段, 对进入内舱的大气进行加热或冷却, 实现精确控温; 5) 采气排气阶段, 在对内舱内的气体进行采样和排气过程中实现对内舱气压的调节。

1.2 内舱结构设计要点

为满足实际应用的便利, 将容积 1 m^3 的内舱外形设计为长方体卧式结构(见图2(a))。考虑到内舱对低本底的严苛要求, 从舱体选材、死角去除、相关接口及配件设计等多个方面进行内舱设计。

1) 舱体选材。内舱的舱体选用304镜面不锈钢材料。为使内舱保持较小质量, 同时满足结构强度要求, 设计舱体壁较薄, 并在外部设计加强筋。内舱内壁采用惰性涂层高温涂覆, 以减少内壁对污染物的吸附。在内舱周边, 选用四氟包覆橡胶进行密封。密封材料须具有无污染、耐高温、弹性好、密封性能优越等特点, 可避免舱体本身污染物的释放。

2) 死角的处理。内舱采用无死角焊接制造而成, 所有焊缝为钝角, 便于打磨, 使其不利于污染物的吸附。

3) 接口及配件设计。为使舱内气流、温度较均匀, 在舱内进气口前端设计一体化成型的风扇, 使之无死角, 在其表面进行钝化处理, 并进行了惰性涂层喷涂处理。风扇设计如图2(b)所示。风扇轴承采用磁流体轴承, 具有无污染、耐高温、密封性能好等优点。内舱门采用10 mm厚的钢化玻璃门, 以解决可视化问题, 并降低舱门对污染物的吸附。另外, 采用简单实用、利于操

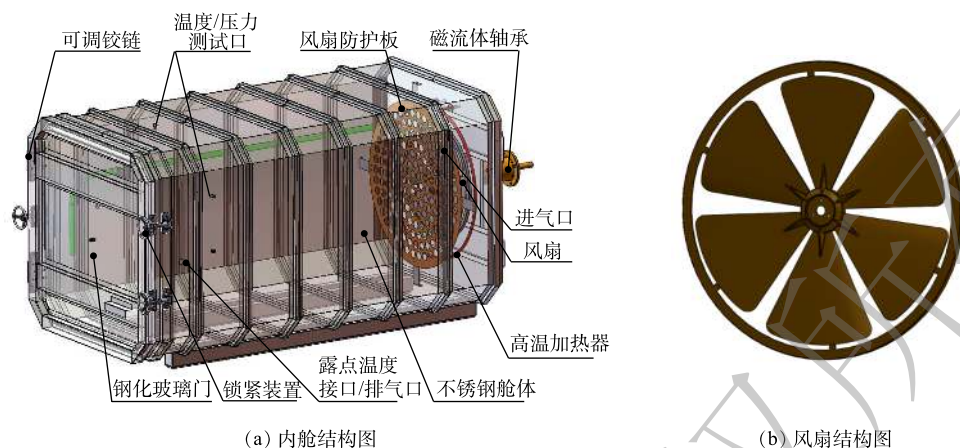


图 2 内舱和风扇结构

Fig. 2 Structure of the inner chamber and fan

作的舱门锁紧装置，并利用可调铰链设计以有效解决密封条软化的问题。

4) 高温吹扫。为进一步降低内舱中本底浓度，在检测前对内舱进行高温加热 (250 °C)，并进行吹扫，以实现内部污染残留物的有效清除。

2 内舱惰性材料涂覆性能测试

2.1 涂层厚度测定标准

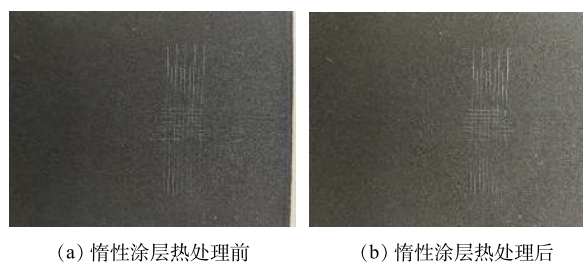
根据《色漆和清漆漆膜厚度的测定》(GB/T 13452.2-2008)，对内舱内壁所涂覆惰性涂层的厚度进行测定。测试结果为 58~60 μm，说明惰性涂层的厚度适宜。

2.2 涂层附着力评价

在实际使用过程中，受外力、高低温等因素的影响，表面惰性涂层可能会剥离脱落，因此，惰性涂层应具备较好的附着力。根据《色漆和清漆漆膜的划格试验》(GB/T 9286-1998)，采用划格法对惰性涂层在不锈钢表面的附着力进行评价。同时，考虑到内舱在使用过程中需经常进行高温清洁，以排出内壁的残留污染物，所以，惰性涂层应具有极好的耐热性，应分别对高温热处理前后惰性涂层的附着力进行评价。将惰性涂层在 250 °C 进行热处理，每次处理 3 h，共计处理 10 次，得到的测试结果如图 3 所示。照片显示涂层划格无明显变化。经测试，热处理前后惰性涂层的附着力均为 0 级，附着力非常好，完全符合环境舱内舱的使用要求。

2.3 涂层耐磨性评价

实际应用过程中，内舱表面受样品及支架的摩擦作用，因此内舱表面的惰性涂层应具备较好的耐磨性。根据《色漆和清漆耐磨性的测定旋转橡胶砂轮法》(GB/T 1768-1998)，对热处理前后的惰性涂层耐磨性进行了评价，结果如图 4 所示。由图 4 可见，热处理前后的惰性涂层的耐磨性非常好，称量发现热处理前后涂层质量均为 16 mg，大大优于木地板的耐磨性要求 (不超过 30 mg)，符合环境舱内舱的使用要求。



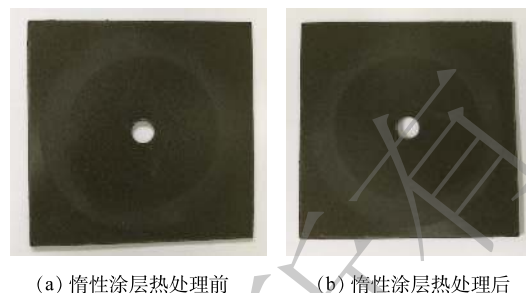
(a) 惰性涂层热处理前 (b) 惰性涂层热处理后

图 3 惰性涂层的附着力评价结果 (比例 1:1)

Fig. 3 Adhesion evaluation results of the inert coating (1:1 ratio)

2.4 内舱表面惰性评价

根据《家具中挥发性有机化合物检测用气候舱通用技术条件》(GB/T 31107-2014), 利用甲苯、正十二烷进行内舱壁吸附率实验。为充分表征内舱壁惰性化处理的实际效果, 参照《塑料薄膜与水接触角的测量》(GB/T 30693-2014), 分别测定了甲苯、正十二烷、水在普通镜面不锈钢及惰性涂层表面的接触角, 结果如图5所示。接触角测试结果见表1。从图表的数据可知, 不同极性的液体在惰性涂层表面的



(a) 惰性涂层热处理前 (b) 惰性涂层热处理后

图4 惰性涂层耐磨性评价结果(比例1:1)

Fig. 4 Evaluation results of wear resistance of inert coating (1:1 ratio)

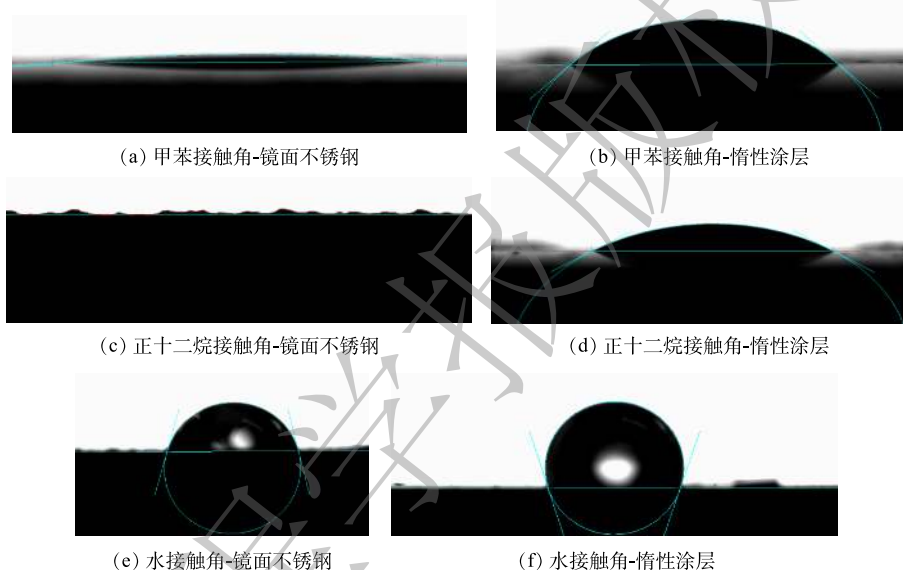


图5 甲苯、正十二烷、水在普通镜面不锈钢及惰性涂层表面的接触角

Fig. 5 Contact angle of methylbenzene, n-dodecane and water on ordinary mirror stainless steel and inert coating surfaces

表1 惰性涂层性能评价结果

Table 1 Evaluation results of inert coating properties

项目	测试方法	镜面不锈钢	惰性涂层	结论
厚度	《色漆和清漆漆膜厚度的测定》(GB/T 13452.2-2008)	—	58~60 μm	厚度适宜
附着力(划格法)	《色漆和清漆漆膜的划格试验》(GB/T 9286-1998)	—	0级	附着力非常好, 符合使用要求
耐磨性	《色漆和清漆耐磨性的测定旋转橡胶砂轮法》(GB/T 1768-1998)	—	16 mg	耐磨性大大优于地板的耐磨要求, 符合使用要求
甲苯接触角	《塑料薄膜与水接触角的测量》(GB/T 30693-2014)	4°	40°	表面惰性比普通镜面不锈钢大幅增加
正十二烷接触角		0°	28°	
水接触角		75°	108°	

接触角有较大提高, 说明惰性处理后表面极性、与不同极性污染物的相容性, 以及对不同极性污染物的吸附能力均明显下降。

3 内舱中污染物释放量的测试

为避免给环境舱本底带来不利影响，对惰性处理后的内舱的污染物释放量进行了测评。选用 60 L 内舱作为测试舱，利用 1 m³ 环境舱对其进行污染物释放量测试(实物见图 6)。具体测试方法如下，测试结果如表 2 和图 7 所示。

1) 制作 60 L 镜面不锈钢内舱，内表面经惰性处理。

2) 开启现有 1 m³ 环境舱，设定好舱内条件(温度：23 ℃；相对湿度：45 %RH；空气交换率：1 h⁻¹；风速：0.1~0.3 m·s⁻¹)，运行正常后，监测舱内甲醛、苯、甲苯、乙苯、二甲苯和 TVOC 的空白值。

3) 确认 1 m³ 环境舱空白值符合要求(甲醛浓度 ≤0.006 mg·m⁻³，单一 VOC 浓度 ≤0.005 mg·m⁻³，TVOC 浓度 ≤0.05 mg·m⁻³)，将 60 L 镜面不锈钢(惰性涂层)内舱放入 1 m³ 环境舱内，并关闭舱门。

4) 分别在 24 h、72 h、168 h 共 3 个时刻采集 1 m³ 环境舱内的空气，并测定各污染物的浓度。甲醛测定按照 GB/T 31106-2014 中 4.1 酚试剂分光光度法，苯、甲苯、乙苯、二甲苯、TVOC 测定按照 GB/T 31106-2014 中 5 二级热解吸-气相色谱-质谱法。

由表 2 和图 7 中数据及峰值可知，经惰性处理后的 60 L 内舱中甲醛、苯、甲苯、乙苯、二甲苯、TVOC 等污染物在不同时间段的释放量与本底值相近，表明惰性处理未引入其他污染物，不会影响环境舱的本底值。对比文献 [14-15] 的研究结果，本研究内舱中甲醛、苯、甲苯和二甲苯等污染物的释放情况有明显改善，这也证明了内舱结构设计的有效性。

4 结论

1) 对惰性材料涂覆性能测试表明，其厚度、耐磨性及附着力均满足环境舱使用要求。

通过测量甲苯、正十二烷、水在普通镜面不锈钢及惰性涂层表面接触角发现，不同极性的液体在惰性涂层表面的接触角均有较大提高，说明惰性处理后表面对污染物的吸附能力明显下降。

2) 对内舱污染物的释放量进行测试发现，甲醛、苯、甲苯、乙苯、二甲苯、TVOC 的释放量均与测试舱本底值接近，证明惰性处理未引入污染物，不会对环境舱本底值带来不利影响。该环境舱的设计研制可为室内材料的性能评价提供可靠的测试平台。



图 6 1 m³ 环境舱外观

Fig. 6 1 m³ sized environmental chamber

表 2 环境舱污染物释放测评结果

Table 2 Assessment results of pollutant release in environmental chamber

污染物种类	环境舱本底质量浓度/(mg·m ⁻³)	不同时刻环境舱污染物质量浓度/(mg·m ⁻³)		
		24 h	72 h	168 h
甲醛	0.004	0.005	0.004	0.005
苯	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
甲苯	<0.002	0.002	<0.002	<0.002
乙苯	<0.002	<0.002	<0.002	<0.002
二甲苯	<0.002	0.003	<0.002	<0.002
TVOC	0.045	0.049	0.040	0.050

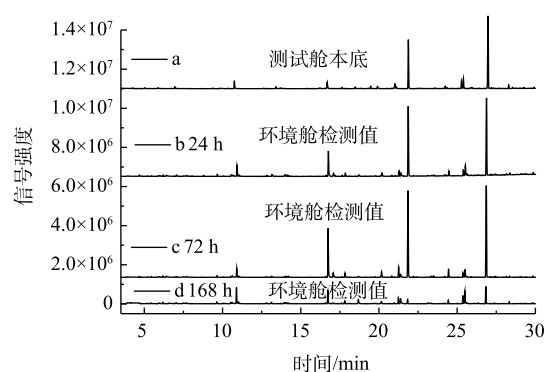


图 7 GC/MS 总离子流图

Fig. 7 GC/MS total ion flow diagram

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] XIONG J Y, CAO J P, ZHANG Y P. Early stage C-history method: Rapid and accurate determination of the key SVOC emission or sorption parameters of indoor materials[J]. *Building and Environment*, 2016, 95(1): 314-321.
- [3] AFSHARI A, LUNDGREN B, EKBERG L E. Comparison of three small chamber test methods for the measurement of VOC emission rates from paint[J]. *Indoor Air*, 2003, 13(2): 156-165.
- [4] American Society for Testing and Materials. Standard guide for small scale environmental chamber determination of organic emissions from indoor materials/products[S/OL]. [2020-09-30]. ASTM D5116-2010, 2010. [2020-09-30]. <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D5116-06.htm>.
- [5] Determination of the emission of volatile organic compounds (VOC) for building products: JIS A1903-2008[S/OL]. [2020-09-30]. <https://www.doczhi.com/p-419533.html>.
- [6] 国家质量监督检验检疫总局. 室内装饰装修材料-地毯、地毯衬垫及地毯胶粘剂有害物质释放限量, 附录A: 小型环境试验舱法: GB 18587-2001[S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [7] US-ANSI. Standard for formaldehyde and TVOC emissions of low-emitting office furniture and seating: ANSI/BIFMA X7.1-2011 [S/OL]. [2020-09-30]. <https://www.antpedia.com/standard/6220150-1.html>.
- [8] 任志伟, 刘杰, 夏金尉. 环境舱研究现状及发展趋势[J]. *广东化工*, 2018, 45(15): 171-172.
- [9] 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(2): 381-388.
- [10] 胡晓珍, 任彬彬, 谢义师. 环境舱研究综述[J]. *绿色建筑*, 2015(2): 21-23.
- [11] 王立鑫, 王雪松, 白郁华, 等. 新型环境测试舱研制、性能评价及释放模拟[J]. *环境工程学报*, 2008, 2(1): 70-77.
- [12] 丁萌萌. 空气净化器检测用环境试验舱研制及应用研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2010.
- [13] 李爽. 小型环境舱设计制作与人造板VOC释放特性研究[D]. 沈阳: 东北林业大学, 2013.
- [14] 李楠. 检测有毒有害气体的大容积环境舱研制及应用研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.
- [15] 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.
- [16] 周丽丽, 陈会明, 宋乃宁, 等. 有害物质环境测试组合舱的研制及性能评价[J]. *环境工程学报*, 2013, 7(9): 3525-3530.
- [17] 刘巍巍, 杜世元, 张寅平. 室内物品和家具VOC散发环境舱设计思考和实践[J]. *暖通空调*, 2013, 43(12): 14-18.

(责任编辑: 靳炜)

Structural design and verification of low background adsorption characteristics of the inner chamber for the detection of building materials pollutants

LI Yongzhen¹, GUO Ruihua¹, WANG Tao¹, DING Jianjun², ZHAO Wenyan², ZHU Xiaofeng^{1,*}

1. Beijing Municipal Institute of Labour Protection, Beijing 100054, China

2. China Building Material Test & Certification Group Co., Ltd., Beijing 100024, China

*Corresponding author, E-mail: zxf_402@163.com

Abstract Before the environmental chamber is utilized to detect the pollutant emission of building materials, the background concentration of the inner chamber needs to be as low as possible to enable accurate detection of pollutant emission. A 1 m³ environmental chamber with low background concentration was designed with careful considerations in structural design, material selection, interface and accessories design. The performance of inert materials inside the chamber was tested, and the pollutant release amount of 60 L inner chamber was tested. Test results showed that the inert coating applied in the inner bulkhead can meet the requirements of environmental chambers, and the inert treatment of the inner bulkhead will not adversely affect its background. The rationality of the design and development of the inner chamber structure is verified through experimental research, which can provide scientific basis and guidance for the development of environmental chambers.

Keywords environmental chamber; inner chamber; building materials pollutants; low background; inert coating