

基于膜结构的智能化实验动物屏障装置创新实践*

张金玉¹ 董拥华² 陈 铄² 陈 健¹

(1. 吉林大学动物科学学院, 长春 130062) (2. 青岛德尔诺生物医药科技有限公司, 青岛 266114)

摘要:目的 基于膜结构材料, 研制可移动、可快速拆卸的智能化应急性实验动物屏障装置, 并对装置的性能指标进行测试评价。方法 依据 GB 14925—2023《实验动物环境及设施》^[1]、RB/T 010—2019《实验动物屏障和隔离装置评价通用要求》^[2], 对膜结构实验动物屏障装置的气密性、洁净度、静压差、高效滤器检测、沉降菌、照度和噪声等指标进行测试。结果 经多次测试检测, 膜结构实验动物屏障装置内部有效空间符合动物福利的基本要求, 静压差、气密性等各项指标均满足标准要求。结论 智能化应急性实验动物屏障装置可实现快速安装, 在满足气密性和相关指标的情况下长时间稳定运行, 可用于实验动物的生产与实验使用。

关键词: 膜结构; 应急屏障; 实验动物设施; 环境参数; 智能化控制

中图分类号: Q95-3 文献标志码: A 文章编号: 1006-6179(2026)02-0007-05

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6179.2026.02.002

Innovative Practice of Intelligent Laboratory Animal Barrier Device Based on Membrane Structure

Zhang Jinyu¹, Dong Yonghua², Chen Shuo², Chen Jian¹

(1. College of Animal Science, Jilin University, Changchun 130062, China)

(2. Qingdao Deernuo Bio-Pharmaceutical Technology Co., Ltd., Qingdao 266114, China)

Abstract: Objective Based on membrane structure materials, a movable and quickly disassembleable intelligent emergency laboratory animal barrier device was developed, and evaluated on its performance parameters. **Methods** According to GB 14925 - 2023 "Environment and Facilities for Laboratory Animals"^[1] and RB/T 010-2019 "General Requirements for Evaluating Laboratory Animal Barriers and Isolation Devices"^[2], the membrane structure laboratory animal barrier device was tested for air tightness, cleanliness, static pressure difference, HEPA filter efficiency, settling bacteria, illumination, and noise levels. **Results** Repeated testing confirmed that the internal environment of the membrane structure laboratory animal barrier device meets the basic requirements for animal welfare. All parameters, including static pressure difference and air tightness, complied with the standard requirements. **Conclusion** The developed intelligent emergency laboratory animal barrier device can be quickly installed and operate stably for a long time while meeting air tightness and related parameters. It can be used for the production and research applications of laboratory animal.

Key words: membrane structure; emergency barrier; laboratory animal facility; environmental parameters; intelligent control

收稿日期: 2025-04-11

* 基金项目: 国家重点研发计划(2022YFF0711203)。

作者简介: 张金玉(1982—), 女, 高级实验师, 研究方向为实验动物学。E-mail: 0805zjy@163.com。

通信作者: 陈 健(1975—), 男, 正高级工程师, 研究方向为实验动物学。E-mail: chen_jian@jlu.edu.cn。

近年来,移动实验室凭借其快速响应、精准可靠的实时检测能力成为保障公共健康的重要技术支撑。据世界卫生组织统计,2020年以来全球移动实验室部署数量激增40%^[3]。移动实验室在食品、环境与生物安全等方面的现场即时检测中发挥了重要作用,大大提升了突发公共安全事件的应急处理能力。

传统实验室通常指固定场所的分析检测平台,工作人员将现场采集的样品送至实验室后可进行检测分析实验。然而,这种固定实验室在面对需要现场进行即时处理的样品时就存在一定的局限性,如运输时间过长可能导致的样品性质变化而影响实验结果的准确性,或运输过程中样品不可避免的污染等问题。因而移动实验室的出现突破了传统的地域限制,实现了检测能力的可移动化^[4]。相对于传统实验室,可移动实验室具有空间灵活性、即时应急响应能力、高时效性、应急保障以及低成本等优点^[4-5]。

膜结构材料是近年来建筑行业快速发展及广泛应用的新型建筑材料^[6]。与传统建筑材料相比,该材料具有以下突出优势:1. 结构轻巧:在保持结构稳定的前提下显著降低建筑物的自重;2. 可塑性强:依托膜结构自身的高延展性,可满足多样化的建筑设计需求;3. 便于施工:膜结构材料可实现快速安装与拆卸,大大提高了施工效率;4. 显著的经济价值:在材料成本及施工环节方面,膜结构材料可以使建筑成本降低40%~50%;5. 透光性:膜结构材料在保证气密性的同时,实现自然采光节能。这些独特特性使膜结构材料更多地用于快速部署、临时性或可移动性的建筑场景中,为现代建筑创新提供了新的技术方法。

本研究首次考虑将膜结构材料应用于可移动的实验动物屏障装置的构建中,进而获得可灵活移动、快速拆装、低成本的新型实验动物屏障装置。旨在解决实验动物不同品种、品系的生产或科研实验等方面的需求,满足实验动物设施对环境控制的严格要求,同时提高了科研设备的应急能力。

1 材料和方法

1.1 材料

装置主体采用轻质铝合金方管作为膜结构的框架,选择的PVC膜材料应具有无毒无害、耐酸碱、耐

消毒药液等特性,具体理化性能见表1。膜包选用5 kW的高频机,电流(2±0.5) A进行热合,热合时间为(3±0.2) s。

采用落地式空调净化系统,通过软质(或硬质)风管与膜结构实验动物屏障装置主体部分的送风口、排风口相连接。采用回风式主动送风结构,高效过滤器送风,30%新风。过滤采用初中高效过滤形式。加热和制冷共用一组换热盘管,接室外风冷式机。换气次数大于20/h,保持为万级净化环境,压差为+20 Pa,+10 Pa。

表1 柔性薄膜材料的理化性能
Table 1 Physicochemical properties of membrane structure material

项目	单位	指标	
厚度	mm	≥6 mm	
适应度	℃	10~40	
浊度	%	< 5	
抗张强度	MPa	纵向	>25
		横向	
撕裂强度	N/mm	纵向	>55
		横向	
伸长率	%	>260	
硬度	洛氏	≥58	
透明度	目观	透明	
气密性		均匀性好,无隐性气孔	
耐磨损性能	R	200 r	

1.2 检测设备

装置所用检测设备包括 testo 625 便携式温湿度计(±3% RH,±0.5℃)、testo 425 风速仪(精确度:±0.2 m/s)、testo 512 微压计(±0.5% FS)、BMJ250 型电热恒温培养箱(温度:±0.5℃)、AWA5680 声级计(精准度:±1.4 dB)、testo 540 便携式照度计(照度:±5%)、3887D 尘埃粒子计数器(粒子计数:±10%)、可扫描气溶胶光度计(检测限:0.001~100 μg/L)。

1.3 主要参数检测

1.3.1 气密性检测:采用烟雾测试法,将发烟管放置于焊接处、密封处、传递窗、操作口、封口处等关键密封点处,检测膜结构实验动物屏障装置工作区内箱体结构的气密性。

1.3.2 静压差:用微压计检测膜结构实验动物屏障装置工作区与相邻区域的静压差,确保压差梯度符合要求。

1.3.3 换气次数:利用风速仪对膜结构装置的气流速度和换气次数进行测试,通过测量送风口风速和

送风口散流板横截面积,计算换气次数。

1.3.4 洁净度:利用尘埃粒子计数器检测膜结构实验动物屏障装置的操作区和缓冲区的空气洁净度,确保粒子浓度符合标准要求。

1.3.5 高效滤器检测:使用可扫描气溶胶光度计在高效过滤器的四角及中心点进行检测,确定各个点的粒子数与漏过率。

1.3.6 沉降菌:在膜结构实验动物屏障装置工作区和缓冲间放置沉降菌培养皿,静置 30 min,37 ℃ 培养 48 h 后计数。

1.3.7 照度和噪声:分别用照度计和声级计检测膜结构实验动物屏障装置操作区的工作照度及噪声值。

2 结果

2.1 膜结构实验动物屏障装置的组装

按照膜结构实验动物屏障装置的设计要求及标准化操作流程(图 1),对膜结构实验动物屏障装置的主体结构进行搭建,与地面接触部分采用不锈钢槽钢固定框架。主体结构安装完成后,其承重及拉力强度均满足 GB 50017—2017《钢结构设计规范》^[7]及国家相关标准的要求。膜包按照框架的标准尺寸进行裁剪,高频热合保障密闭性,满足 GB 14925—2023《实验动物环境及设施》对屏障装置的强制性要求。

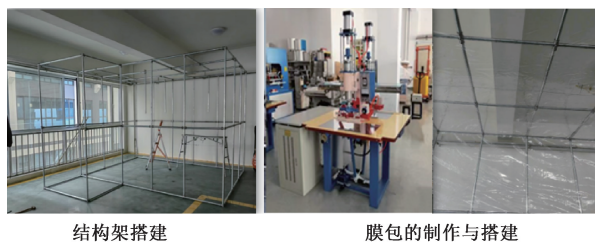


图 1 膜结构实验动物屏障装置的构建过程

Fig. 1 Construction process of the membrane structure material laboratory animal barrier device

高效过滤器送风箱体固定在框架上,与膜结构采用子母扣式粘贴密封和固定,实现气密性连接。在送风口末端配置散流板,确保送风气流均匀分布。空调机依次设置回风段,初效过滤段,加热段,表冷段,风机段,中效过滤段,高效过滤段。

智能化控制系统,采用触摸屏+PLC 控制结构。主要监控功能有:温度、湿度显示、压差显示、换气次数显示报警,照度控制,实验设备温度监控,信号及

图像实现远程监控,数据可实现存储及回放功能,见图 2。



注:A.膜结构实验装置的整体外观;B.送风口;
C.排风口;D.压差表;E.控制系统。

Note. A. Overall appearance of the membrane structure experimental apparatus. B. Air supply outlet. C. Air exhaust outlet.

D. Differential pressure gauge. E. Automatic control system.

图 2 膜结构实验动物屏障装置内部结构优化

Fig. 2 Optimization of the internal structure of the membrane structure material laboratory animal barrier device

2.2 膜结构实验动物屏障装置的性能测试结果

屏障装置组装完成后于 2024 年 10 月 18 日,针对操作间及缓冲间环境进行检测。各取 5 个采样点进行检测,操作间被检测面积 12.00 m²,缓冲间被检测面积 1.80 m²。将膜结构装置检测指标对照相关标准进行对比,该装置的各项性能指标均符合国家标准要求,具体测试结果如下(表 2)。

2.2.1 气密性:经烟雾测试检测,装置工作区内所有缝隙未观察到可见泄漏现象,表明装置气密性良好,无泄漏风险。

2.2.2 静压差:监测数据显示,该装置操作区对缓冲间静压差检测结果为 34 Pa,缓冲间对非洁净区静压差检测结果为 19 Pa,均符合国家标准要求。

2.2.3 换气次数:通过测试及计算,缓冲区的换气次数为 48.38/h,操作区的换气次数为 22.03/h,均符合国家标准要求。

2.2.4 洁净度:经检测,装置操作区和缓冲区的洁净度均为 7 级,满足洁净环境使用需要,符合国家标准要求。

2.2.5 沉降菌:对装置工作区和缓冲间的沉降菌检测,所有检测点均无检出,检测结果符合国家标准要求。

表 2 膜结构实验动物屏障装置的参数测试结果

Table 2 Test results of parameters for the membrane structure laboratory animal barrier device

检测项目	操作间		缓冲间	
	国家标准数据	检测数据	国家标准数据	检测数据
温度/℃	20~26	22.60	18~28	22.60
相对湿度/%	30~70	33.30	—	—
最小换气次数/h	15	22.03	15	48.38
动物笼具处气流速度(m/s)≤	0.20	0.08	—	—
与室外方向上相通区域的最小压差/Pa	10	34.00	10	19.00
空气洁净度/级	7	7	7	7
落下菌/(个/皿)≤	3	0	3	0
噪声/dB≤	60	60.80	60	59.70
最低照度/lx≥	150	194.40	150	165.40

注：“—”按照 GB 14925—2023 的要求缓冲间相对湿度不做要求,故没有进行检测;动物笼具处气流速度(m/s);缓冲间不做要求。

Note. “—” According to the requirements of GB 14925—2023, there are no requirements for the relative humidity of the buffer room, so no testing. The air velocity at the animal cages (m/s). No requirements are set for the buffer room.

2.2.6 照度和噪声:膜结构装置操作区工作照度最低值为 188.6 lx,最高值为 199.4 lx,平均照度为 192.5 lx,检测结果符合国家标准要求。膜结构装置操作区的噪声值最低为 58.6 dB,最高为 61.2 dB,平均噪声为 59.84 dB;缓冲区的噪声值最低为 59.2 dB,最高为 60.4 dB,平均值为 59.96 dB,均低于 60 dB,符合国家标准要求。

3 讨论

传统固定实验室向可移动实验室的发展,给与人类密切相关的食品健康、生物安全防护、疫病检验检疫等领域都带来了显著的技术进步。这一技术的发展为现场快速诊断和突发公共卫生事件应急响应提供了可靠的技术支撑。膜结构实验室作为新型可移动实验室的代表,突破了传统移动实验室在空间利用效率和环境适应性的技术问题。为突发公共安全事件的现场检测、自然灾害和野外科研等场景提供了更为优化的解决方案。目前,随着人工智能、自动化控制系统等新技术的深度融合发展,可移动实验室正朝着智能化的方向继续发展,这种技术的融合将推动移动实验室在检测效率、应急响应速度及结果精准度等关键性指标实现更进一步的提升。

当前,有关实验动物生产与科研领域的移动实验室技术发展相对滞后。针对这一现象,本研究创新性地利用膜结构材料的建筑力学优势和材料特性,设计并搭建了一种可移动,可快速拆卸的实验动物屏障装置。该装置在保障动物福利和实验人员安全的要求下,通过精准的性能参数控制,为实验动物研究结果的可信性和数据的可重复性提供重要的科

学保障。该装置的设计与研发填补了可移动实验动物设施领域的空白。此外,智能化控制系统的融合实现了对实验室内环境参数、设备运行状态、异常情况预警等进行实时监控,提高了实验动物科学研究的准确性和安全性。

膜结构实验动物屏障装置与传统实验动物屏障装置相比,展现出多种优势。第一,经济优势:膜结构本身价格低廉,因此节省了动物实验室的建设成本,膜结构材料易于清洁和维护,降低了使用过程中的维护费用同时保持实验室的卫生标准;第二,时效性优势:膜结构装置支持快速搭建与拆卸,部署周期缩短;第三,能源效率优势:膜结构装置具有较好的隔热性能,有利于减少能源损耗;第四,性能优势:膜材料可以吸收噪音并减少振动,为实验室内的敏感设备和实验动物提供更稳定和安静的环境;第五,环境优势:膜材料通常是可回收的,对环境影响较小,符合可持续发展的理念;第六,用户优势:膜结构材料具有良好的透光率,减少了操作人员的隔离感,提升心理舒适度。但是对于膜结构材料的实验动物装置,照度是重点关注的问题,为了保证实验动物装置的照度符合 GB 14925 的指标要求,按照 GB 50447 的要求,我们在实验动物装置内部安装了工作照度灯和动物照度灯,并利用自动控制系统保证昼夜间断照明时间为 12 h/12 h。尽管膜结构实验动物屏障装置具有诸多优势,但受膜结构材料特性的影响,该装置在使用时限上具有一定的局限性。期待随着材料科学技术的发展,突破膜结构材料的特性弊端,进而提高膜结构实验动物屏障装置使用寿命。智能化应急性实验动物屏障装置的研究旨在解决实验动物生产或实验的应急性问题,满足不同品种、品系实

验动物资源的创制、生产和应用需求。按照设施的要求,研发的装置放置在温湿度相对稳定的室内,装置的空调系统采用回风式主动送风结构,高效过滤器送风。空调机设置回风段、初效过滤段、加热段、表冷段、风机段、中效过滤段、高效过滤段,对装置的温湿度进行控制,实现冬季加热、加湿和夏季制冷、除湿。同时采用项目合作单位研发的复合传感器及其系统,设置触摸屏+PLC 控制结构。实现装置的温度控制,湿度显示报警,压差显示报警,换气次数显示报警,照度控制,实验设备温度监控,信号远程监控,图像远程监控,数据存储回放等。

本研究依据 GB 14925—2023《实验动物环境及设施》、RB/T010—2019《实验动物屏障和隔离装置评价通用要求》以及 RB/T199—2015《实验室设备生物安全性能评价技术规范》^[8]等国家标准和行业规范的要求,完成了膜结构实验动物屏障装置的设计组建工作并有针对性的进行性能和环境参数测试。建立可移动实验动物屏障装置的设计搭建工艺流程,为可移动实验动物屏障装置的产业化应用奠定了技术基础。

参 考 文 献

- [1] GB 14925—2023 实验动物环境及设施[S].
- [2] RB/T 010—2019 实验动物屏障和隔离装置评价通用要求[S].
- [3] World Health Organization. Global Progress Report on Laboratory Capacity[R]. Geneva: WHO Press, 2021.
- [4] 丛东日, 崔 晗, 胡海松, 等. 移动实验室标准化现状分析及优化策略研究[J]. 大众标准化, 2022 (22): 4-6.
- [5] 张永臣 周 彤. 移动实验室的发展现状及对策分析[J]. 中国检验检测, 2022, 30 (1): 63-64; 67.
- [6] 王乐楠. 基于结构特性的充气膜大空间设计与应用研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
- [7] GB 50017—2017 钢结构设计标准[S].
- [8] RB/T199—2015 实验室设备生物安全性能评价技术规范[S].

[引用本文]

张金玉, 董拥华, 陈铄, 等. 基于膜结构的智能化实验动物屏障装置创新实践[J]. 实验动物科学, 2026, 43 (2): 7-11.

Zhang J Y, Dong Y H, Chen S, et al. Innovative practice of intelligent laboratory animal barrier device based on membrane structure[J]. Lab Anim Sci, 2026, 43 (2): 7-11.

DOI: 10. 3969/j. issn. 1006-6179. 2026. 02. 002.