· 实验研究 ·

病床局部负压隔离防护装置设计及效果评价

王心淼[1,2]，商怡然[1,2]，房艳华[1,2]，张宗兴[1,2]，衣颖[1,2]，吴金辉[1,2]

1. 中国人民解放军军事科学院系统工程研究院，北京 100166；
2. 国家生物防护装备工程技术研究中心检测检验部，天津 300161
通信作者：吴金辉，E-mail：wujh@npec.org.cn

【摘　要】目的　设计一种供传染病患者使用的病床局部负压隔离防护装置，并对其性能进行实验测试，评价其隔离防护的可靠性和安全性。**方法**　从结构型式与材料方面设计病床局部负压隔离防护装置，对该病床局部负压隔离防护装置进行人员使用感受评估以及静、动态压差和噪声测试；重点实验分析其在生物气溶胶环境下的隔离防护性能。**结果**　设计的病床局部负压隔离防护装置能够在 1 min 内快速建立准确稳定的局部负压差，最大波动误差为 4.6%；最大风量下平均噪声为 64.2 dB（A）；在隔离罩内雾化发生最大浓度为 1.4×10^{11} CFU/mL 的粘质沙雷气溶胶，罩外气溶胶泄漏率为 0，可有效切断病原微生物在空气中的传播，且受试者主观体验良好。**结论**　设计的病床局部负压隔离防护装置体感舒适、轻质便携，能有效降低呼吸道病员微生物扩散风险。

【关键词】传染病患者；病床局部负压隔离；生物防护；性能评价

Design and effect evaluation on a local negative pressure isolation protection system on sickbed

WANG Xinmiao[1,2], SHANG Yiran[1,2], FANG Yanhua[1,2], ZHANG Zongxing[1,2], YI Ying[1,2], WU Jinhui[1,2]
(*1. Systems Engineering Institute*, *Academy of Military Science*, *Chinese People's Liberation Army*, *Beijing* 100166, *China*; *2. National Bio-Protection Engineering Center*, *Tianjin* 300161, *China*)
Corresponding author: WU Jinhui, E-mail: wujh@npec.org.cn

【Abstract】Objective　To design a local negative pressure isolation protection system on sickbed for infectious patients and conduct experimental research on its performance to analyze and evaluate the reliability and safety of its isolation protection against biological aerosol. **Methods**　A local negative pressure isolation protection system on sickbed was designed with consideration to the structural type and materials. Then, the system was tested in terms of subjects′ experience, static and dynamic pressure difference, and noise. Particularly, the isolation protection performance of this system against biological aerosol in micro-circumstance airtight cabin was tested. **Results**　The local negative pressure isolation protection system on sickbed quickly established a stable local negative pressure difference within 1 min, with a maximum fluctuation error of 4.6%. The average noise under the maximum air volume was 64.2 dB(A). When *Serratia marcescens* aerosol with a maximum concentration of 1.4×10^{11} CFU/mL was atomized inside the isolation hood, the aerosol leakage rate outside the hood was 0, which showed that the local negative pressure isolation protection system on sickbed could effectively cut off the transmission of pathogenic microorganisms in the air. Moreover, the subjects had a good subjective experience. **Conclusions**　The designed local negative pressure isolation protection system on sickbed is comfortable, lightweight, and portable, which can be used to reduce the risk of microbial spread among respiratory patients.

【Keywords】 infectious patient; local isolation on sickbed; biological protection; performance evaluation

近年来，世界各国面临着各类传染性强、传播速度快、传播范围广、防控难度大的突发传染病疫情带来的重大生物安全威胁[1–2]。自 COVID-19 疫情暴发以来，世界各国在重大新发突发传染病防控、实验室生物安全方面高度重视，投入大量精力和经费，相继研发出多类适用于医疗救治人员穿戴使用的正压生物防护头罩、正压生物防护服等高等级人员防护装备；以及供呼吸道疾病传染病患者使用的负压生物隔离头罩、负压隔离转运舱、负压隔离救治装备等传染病患者隔离装备，并在抗击 COVID-19 疫情中得到广泛应用[2–3]。其中，负压隔离罩是供呼吸道疾

开放获取：CC BY-NC-ND 4.0　DOI：10.11847/zgggws1146353
基金项目：国家重点研发计划（2021YFC2600302）
第一作者：王心淼（1989—），工程师，博士，研究方向：生物防护材料与技术。
收稿日期：2024-11-02　修回日期：2024-12-30　录用日期：2025-11-17
利益冲突：不存在　伦理审查：免除审查　出版授权：全体作者已与编辑部签署作者贡献声明及版权转让协议

病传染病患者使用的，起到阻隔呼吸道病原微生物在空气中传播的一种重要医疗隔离或医疗救治用品，对于促进患者的康复与保障医护人员的健康以及保护外界环境免受污染起到至关重要的作用[4–5]。然而，现在投入使用的负压隔离罩，通常是在病床上方固定一个形状恒定的硬质隔离罩体，或者在固定框架上覆盖柔性隔离布，一般只适用于普通病床，无法适应当前广泛应用的折叠式病床的角度变化，通用性较差。针对上述问题，本研究针对呼吸道传染病患者救治现场防止病原微生物扩散、降低医护人员暴露风险的现实需求，设计一种适用于折叠式病床的传染病患者使用的病床局部负压隔离防护装置，并对其静态压差、动态压差、噪声和防护性能进行实验测试与评价，为当前负压隔离救治装备的研发与改进，以及未来灵活多样、体感舒适、轻质便携负压隔离救治装备的创新研发提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料选择 考虑到病床局部负压隔离防护装置需耐乙醇消毒或汽化过氧化氢（vaporized hydrogen peroxide, VHP）消毒，设计罩体的材质可为耐化学物质洗消的聚氯乙烯（polyvinyl chloride, PVC）或热塑性聚氨酯弹性体（hermoplastic polyurethanes, TPU），垫板组件材质为 ABS 塑料（丙烯腈–丁二烯–苯乙烯塑料，Acrylonitrile Butadiene Styrene plastic）。设计支撑杆材质为薄壁 316 不锈钢，贴合组件材质为耐洗消硅橡胶磁条。其中，罩体既可作为一次性消耗品，也可重复使用，视实际条件而定。

1.2 结构型式设计（图 1、2） 设计病床局部负压隔离防护装置的结构主要由罩体、垫板组件、支撑骨架、贴合组件和高效排风过滤装置 5 部分组成。为便于医护人员对患者进行医学观察，并保证患者拥有开阔的视野，减少患者的隔离不适感，将罩体设计为柔性透明膜，由固定于垫板组件上的支撑骨架进行支撑，罩体的边缘与垫板组件之间由呈 U 型分布的贴合组件进行贴合。设计罩体的开口方向朝向病床的床尾，至少可将患者的上半身罩设在内。气体循环系统用于抽出罩体内部空气并进行过滤，患者头部位置设置有内含一级过滤器的排气组件，患者呼出的气体通过排气组件、排气管进入内含排风过滤箱的高效排风过滤装置，在箱内过滤后排出。高效排风过滤装置中还包含了排风风机，可选择风量定量和压差定量两种使用模式，前者风量可在 0～420 m^3/h 范围内进行选择设定，后者压差可在−35～0 Pa 范围内行选择设定。垫板组件由基板和位于基板靠近床尾一侧的加长板组成，两者以铰接相连，以适应病床上相邻床板相对转动时的角度变化，并实现带动罩体形状随折叠病床进行变化。

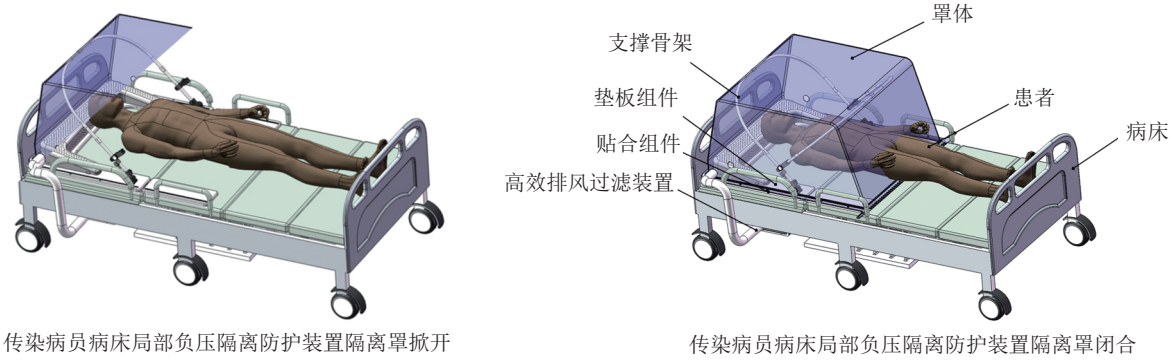
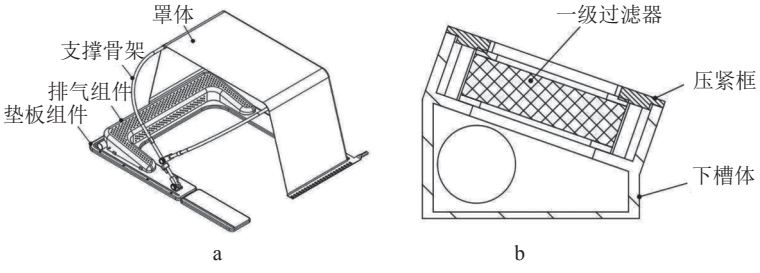
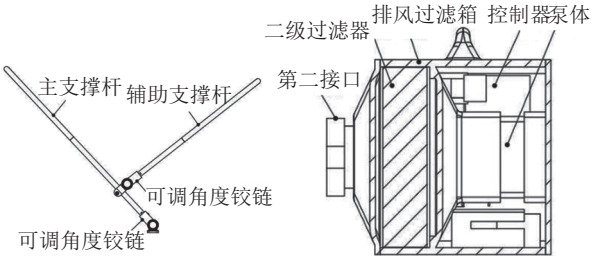


图 1 病床局部负压隔离防护装置使用示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of the local negative pressure isolation protection system on sickbed





注：a：罩体结构；b：一级过滤器；c：支撑骨架；d：排风过滤箱。

图 2　病床局部负压隔离防护装置各部件结构示意图

Fig. 2　Schematic diagram of the components of the local negative pressure isolation protection system on sickbed: (a) hood structure, (b) primary filter, (c) support skeleton, and (d) exhaust filter box

1.3　性能实验

1.3.1　实验仪器和材料（表 1、2）

表 1　仪器与设备
Table 1　Instruments and equipment

名称	型号	生产厂家	产地
Collision雾化生物气溶胶发生器	CN31I	BGI公司	美国
六级安德森空气微生物采样器	—	北京慧荣和科技有限公司	中国
六级安德森空气微生物采样器	FA-1	潍坊艾沃环保设备有限公司	中国
恒温摇床	HNY-2102C	天津欧诺仪器股份有限公司	中国
生化培养箱	BSP-150	上海博迅生物仪器股份有限公司	中国
无菌操作台	SW-CJ-1FD	AIRTECH公司	日本
旋涡式振动器	VORTEX 1	艾卡仪器设备有限公司	中国
声级计	AWA5636	杭州爱华仪器有限公司	中国
电子天平	AUW-220D	岛津公司	日本
过氧化氢消毒机	自制	自制	中国
正压生物防护服	自制	自制	中国
高压蒸汽灭菌锅	MVS-83	冰山松洋生物科技（大连）有限公司	中国
气密实验室	定制	天津昌特净化科技有限公司	中国

表 2　试剂与材料
Table 2　Reagents and materials

试剂与材料名称	生产厂家	产地
黏质沙雷（ATCC.8039）菌株	中国工业微生物菌种保藏管理中心	中国
营养琼脂	北京奥博星生物技术有限公司	中国
营养肉汤	北京奥博星生物技术有限公司	中国
营养琼脂培养基	常德比克曼生物科技有限公司	中国
生理盐水	青岛海氏海诺医疗用品有限公司	中国
无水乙醇	天津市风船化学试剂科技有限公司	中国
超纯水	自制	中国

1.3.2　受试者使用感受评估　防护装置选取 30 名自愿受试者，通过问卷收集受试者使用病床局部负压隔离防护装置时的主观感受。受试者年龄范围为 24～58 岁，平均年龄为 36 岁，测试时长为 60 min（含 30 min 仰卧姿势和 30 min 半卧姿势）。采用自制《病床局部负压隔离防护装置受试者感受评价量表》，将受试者的视野情况、呼吸情况、耳鸣情况、头晕情况、与外界交流情况共 5 种主观感受作为评定指标，受试者根据主观感受填写量表以评估实际主观感受情况。该量表中，每一主观感受判定为 0～3 分的评分，其中 0 分为严重受到影响，存在非常不舒服的感受；1 分为一般受到影响，存在可以短时间忍受的异常感受；2 分为轻微受到影响，存在轻微异常感受，3 分为很舒适，无任何异常感受。各评分累加得到“使用感受总评分”，对总评分进行定量记录与分析。本实验仅涉及受试者的年龄数据和使用感受，不对人体造成伤害、不涉及敏感个人信息或者商业利益，符合免除伦理审查的条件，免除伦理审查。

1.3.3　压差测试　选取 100、200 和 400 m^3/h 等 3 种不同排风量，分别对病床局部负压隔离防护装置隔离罩内部的静态压差进行测试，测试 3 次取平均值。设定压差为−15 Pa，测试 3 名受试人员使用病床局部负压隔离防护装置进行正常呼吸和咳嗽实验时隔离罩内的动态压差变化。

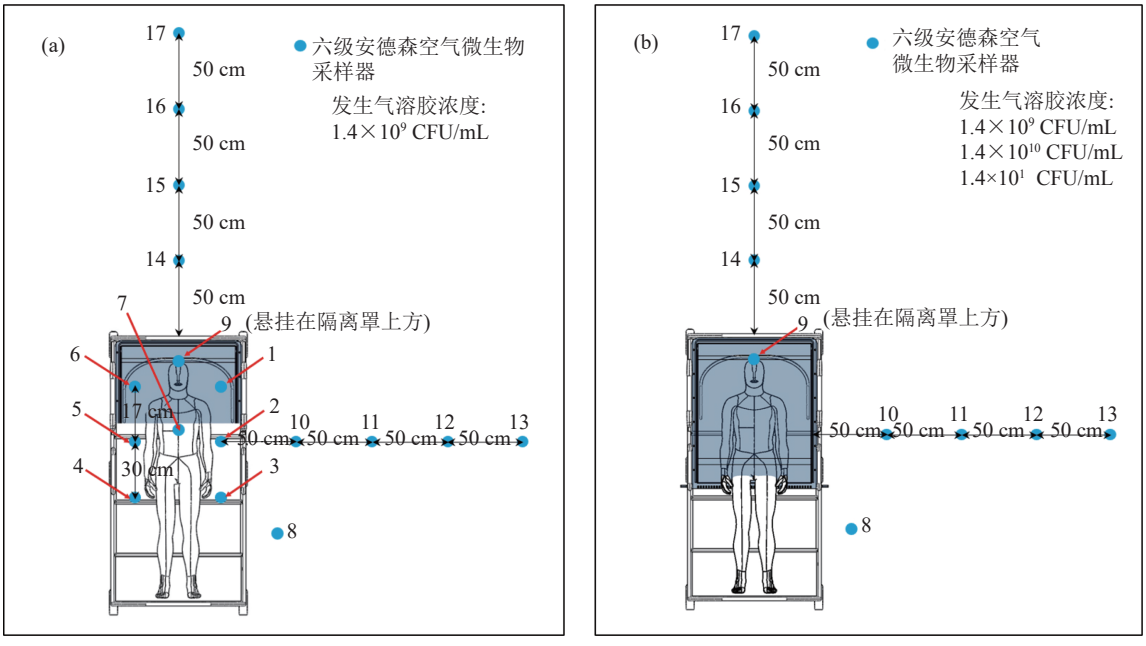
1.3.4　噪声测试　将噪声计分别固定在模拟人的左、右耳边，启动电动排气系统，风量调至最大 420 m^3/h，静置 10 min 待发动机稳定后，对噪声进行测试，左、右两侧均测试 3 次，取平均值。

1.4　生物气溶胶隔离能力测试

1.4.1　气溶胶发生（图 3）　在微生物环境实验舱内进行生物气溶胶的发生与扩散，实验过程见图 3。舱室内的相对湿度保持在（50±5）%，温度保持在（24±1）℃。为研究生物气溶胶浓度变化对病床局部负压隔离防护装置防护性能的影响规律，配制了由高到低 3 种不同浓度（1.4×10^{11}、1.4×10^{10} 和 1.4×10^{9} CFU/mL）的粘质沙雷菌悬液，以构建不同

浓度的生物气溶胶环境。具体发生步骤如下：在微环境实验舱室中，将制备好的菌悬液放于 Collision 雾化生物气溶胶发生器中，将 Collision 雾化生物气溶胶发生器固定于人体模型的额头位置，保持发生器的喷嘴在人体模型鼻腔正上方，用于模拟患者呼吸发出的气溶胶。发生气溶胶的气体流量为 11 L/min，发生 5 min 后开始采样。

1.4.2　生物气溶胶采样（图 3、4）　采样前将六级安德森采样器的采样流量校正为标准采样流量 28.3 L/min。采样时，首先在发生气溶胶浓度为 1.4×10^9 CFU/mL 条件下，保持病床局部负压隔离防护装置的隔离罩半开状态，将采样器布置在病床四周、在隔离罩边缘、隔离罩正上方、距离横侧罩边缘 50、100、150 和 200 cm 处以及排风装置排风口处，进行采样。然后，将隔离罩闭合，将采样器布置在病床四周、在隔离罩边缘、隔离罩正上方、距离横侧罩边缘 50、100、150 和 200 cm 处以及排风装置排风口处，进行 3 种不同浓度下的微生物采样。采样时间均为 1 min。实验设计具体如图 3 所示，其中，图 3(a)为隔离罩半开状态，图 3(b)为隔离罩闭合状态。



注：(a) 隔离罩半开，(b) 隔离罩闭合。

图 3　气溶胶隔离能力测试实验设计

Fig. 3　Test design of bioaerosol isolation capability: (a) the isolation hood remains half opening and (b) the isolation hood remains closed

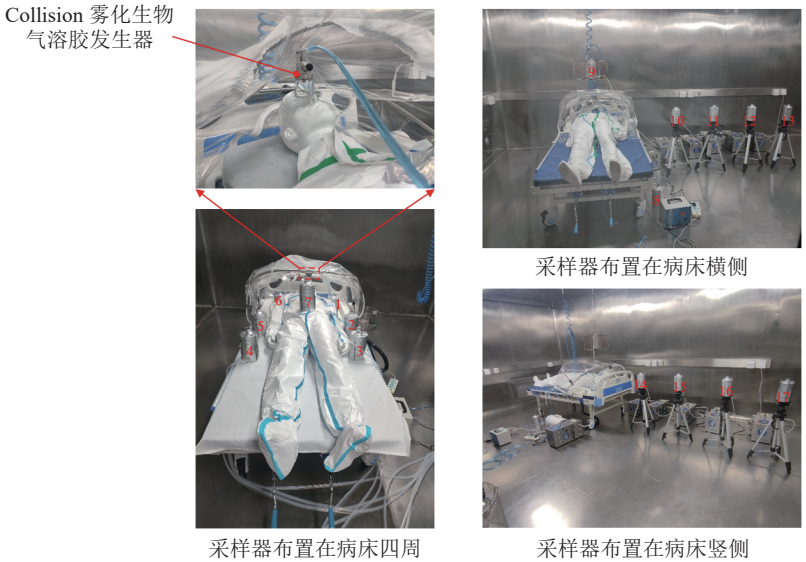


图 4　生物气溶胶隔离能力测试实验

Fig. 4　Test of bioaerosol isolation capability

1.4.3 微生物培养　采样结束后，将采样器中的培养基平板取出，倒置放于 37 ℃ 生化培养箱，培养 24 h 形成肉眼可见的菌落。记录平板的菌落数，然后根据阳性孔对照表校正得到实际的菌落数，最后根据采样体积计算出空气中实际的生物气溶胶浓度[6]。六级安德森采样器每一级代表不同粒径范围的生物气溶胶，每一级生物气溶胶浓度计算公式为：

$$C_i = \frac{N_i}{t \times 28.3} \times 1\,000 \qquad (1)$$

式中：C_i 为第 i 级生物气溶胶浓度，CFU/m³；Ni 为根据阳性孔对照表校正后的安德森采样器第 i 级平皿的菌落数，CFU（Colony-Forming Unit）；t 为采样时间（min）。

生物气溶胶总浓度 C 为：

$$C = \frac{\sum N_i}{t \times 28.3} \times 1\,000 \qquad (2)$$

式中：C 为生物气溶胶总浓度，CFU/m³。

2 结　果

2.1 受试者使用感受（表 3、图 5）　共获得受试者有效问卷 30 份，装置综合评分平均值为 13.23 分，占满分 15 分的 88.2%。受试者视野情况、呼吸情况、耳鸣情况和头晕情况这 4 项指标的评分均在 2.6 分以上。与外界交流情况指标的平均评分仅为 2.43 分，为 5 项指标中最低评分。

表 3 受试者使用感受评分表
Table 3 Subjects' feeling scores

受试者序号	年龄/岁	视野情况评分	呼吸情况评分	耳鸣情况评分	头晕情况评分	与外界交流情况评分	使用感受总评分
1	34	3	2	3	3	2	13
2	42	3	3	3	3	3	15
3	45	2	2	3	2	3	12
4	53	3	3	2	3	2	13
5	24	2	3	3	2	2	12
6	27	3	3	3	2	3	14
7	28	3	3	3	3	2	14
8	29	3	3	3	3	3	15
9	32	2	2	2	3	3	12
10	31	3	2	2	3	2	12
11	36	2	2	3	3	3	13
12	37	3	2	2	2	2	11
13	38	3	3	3	3	1	13
14	45	3	3	3	2	3	14
15	46	3	2	3	2	2	12
16	42	3	3	3	3	2	14
17	58	2	3	2	3	3	13
18	27	3	3	2	3	3	14
19	29	3	2	3	3	2	13
20	30	3	2	3	3	2	13
21	35	3	3	2	3	2	13
22	36	3	2	3	3	2	13
23	47	2	2	3	3	3	13
24	43	3	3	3	3	2	14
25	38	2	3	3	3	3	14
26	42	2	3	2	3	3	13
27	27	1	3	3	3	2	12
28	25	3	3	3	3	2	14
29	29	3	3	3	3	3	15
30	27	3	3	3	2	3	14
平均值	36	2.67	2.63	2.73	2.77	2.43	13.23



受试者保持仰卧姿势　　受试者保持半卧姿势

图 5　受试者使用感受评估实验

Fig. 5　Evaluation test of the subjects' feelings of using the local negative pressure isolation protection system on sickbed

2.2　压差稳定性(表 4、图 6、7)　静态压差测试结果表明，当设定一定风量值时，静态压差的 3 次测量数值之间偏差较小；动态压差曲线见图 6、7。其中，图 6 为 3 名受试者正常呼吸状态下的动态压差曲线。由图 6 可见，病床局部负压隔离防护装置隔离罩内部的压差在设定值−15 Pa 上下平稳波动，波动范围为−15.69～−14.38 Pa，最大波动误差为 4.6%。图 7 为一名受试者在病床局部负压隔离防护装置内进行 3 次咳嗽实验时的动态压差曲线。由图 7 可见，当受试者咳嗽时罩内的压力波动明显比均匀呼吸时的压力波动要大。每次咳嗽后，由于受试者肺内空气喷射而出，导致罩内气压值出现迅速降低至−10 Pa 左右，随后排风装置自动增大风量，在 1 min 内将气压逐渐恢复至设定值−15 Pa 左右，直至下一次咳嗽时压差再次出现明显波动。

表 4　静态压差(Pa)

Table 4　Static pressure difference (Pa)

测试次数	风量100 /(m³/h)	风量200/ (m³/h)	风量400/ (m³/h)
1	−16.2	−20.7	−32.8
2	−16.9	−20.4	−33.5
3	−16.4	−20.1	−33.3
平均值	−16.5	−20.4	−33.2

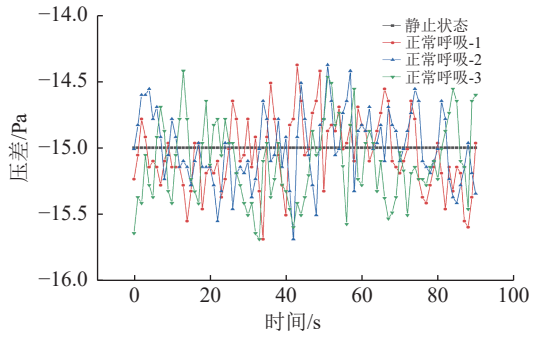


图 6　正常呼吸状态下动态压差曲线

Fig. 6　Dynamic pressure difference curve of the system during uniform respiration

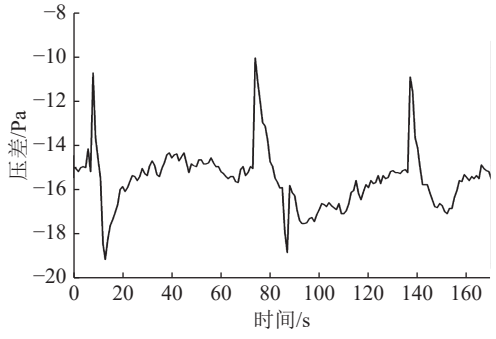


图 7　咳嗽时动态压差曲线

Fig. 7　Dynamic pressure difference curve of the system during coughing

2.3　噪声(表 5)　病床局部负压隔离防护装置隔离罩内测试的噪声数据表明，装置隔离罩内人体左耳处平均噪声为 64.5 dB(A)，右耳处平均噪声为 63.9 dB(A)，平均噪声为 64.2 dB(A)。

表 5　噪声数据 dB(A)

Table 5　Noise data dB(A)

测试次数	左耳噪声	右耳噪声	平均值
1	64.9	63.5	64.2
2	64.1	64.7	64.4
3	64.4	63.6	64.0
平均值	64.5	63.9	64.2

2.4　生物气溶胶隔离能力(图 8、9)　由采样结果计算得出的隔离罩半开时各采样点的微生物气溶胶浓度见图 8。由图 8 可见，当病床局部负压隔离防护装置的隔离罩半开时，采用较小的气溶胶浓度 1.4×10^9 CFU/m³ 进行气溶胶发生，在患者模型周围的病床上采集到大量微生物气溶胶，并在患者模型左、右两侧手肘处和胸口处的微生物气溶胶浓度最大，分别为 30 989.4，32 014.1 和 34 911.7 CFU/m³，而患者模型头部两侧微生物气溶胶浓度次之，分别为 13 957.6 和 16 996.5 CFU/m³；患者模型左、右手处微生物气溶胶浓度最低，分别为 4 876.3 和 4 134.3 CFU/m³。此外，距离病床横侧罩体边缘 50 cm 处微生物气溶胶浓度为 4 417 CFU/m³，比病床边缘的气溶胶浓度降低了 85.7 %；距离病床

横侧罩体边缘 100 和 150 cm 处微生物气溶胶浓度更低，分别为 353.4 和 176.7 CFU/m^3；距离病床横侧罩体边缘 200 cm 微生物气溶胶浓度为 0 CFU/m^3。罩体正上方微生物气溶胶浓度为 0，罩体竖侧边缘处以及距离病床竖侧罩体边缘 50、100、150 和 200 cm 处的微生物气溶胶浓度均为 0。

由采样结果计算得出的隔离罩闭合时各采样点的微生物气溶胶浓度见图 9。由图 9 可见，在传染病患者病床局部负压隔离防护装置的隔离罩闭合状态下，将发生的气溶胶浓度由 1.4×10^9 增大至 1.4×10^{10} 和 1.4×10^{11} 时，在罩体横侧和竖测边缘处、罩体正上方、距离病床罩体横侧和竖测边缘 50、100、150 和 200 cm 处，以及排风装置排风口处的位置微生物气溶胶均为 0。

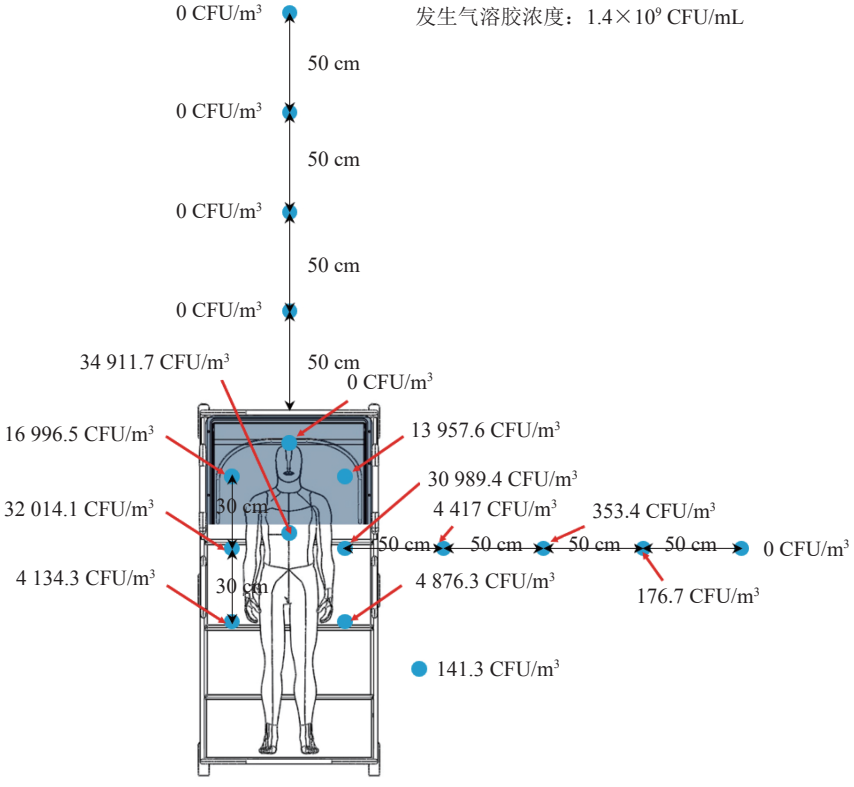


图 8　隔离罩半开时各采样点的微生物气溶胶浓度

Fig. 8　Number of CFUs detected in external environment with the isolation hood half-opening

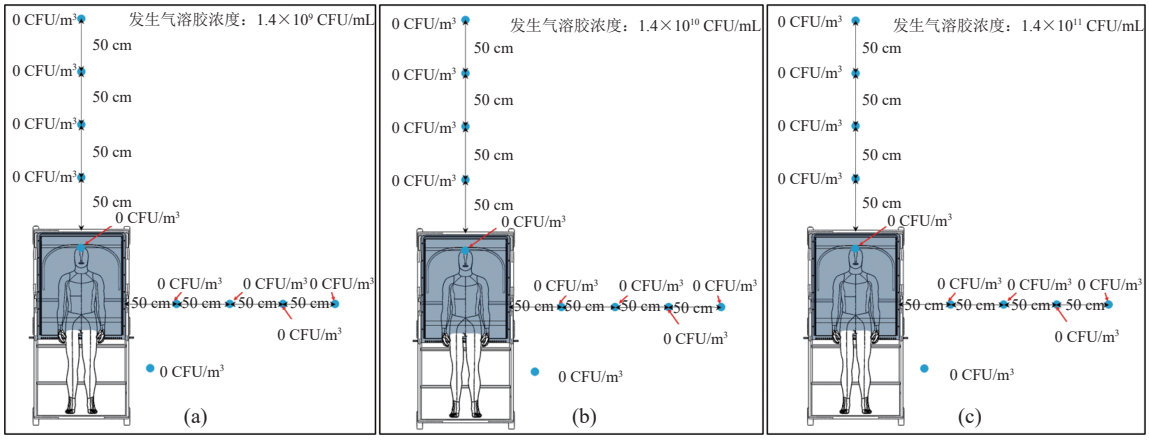


图 9　隔离罩闭合时各采样点的微生物气溶胶浓度

Fig. 9　Number of CFUs detected in external environment with the isolation hood closed

3　讨　论

本研究结果显示，受试者对病床局部负压隔离防护装置的使用感受综合评分较高，装置舒适性良好，装置对人员视野、呼吸、耳鸣、头晕情况影响轻微，但与外界交流情况指标的平均评分较低，表明装置与外界的交流受到一定程度的影响。后续研究应在降低噪声、增加辅助对讲模块等方面对病床局部负压隔离防护装置进行改进。

压差稳定性测试结果表明，在风量值不变的情况下，静态压差偏差很小，说明装置静态压差

稳定；随着风量增大，病床局部负压隔离防护装置隔离罩内部压差呈增大趋势。但因病床局部负压隔离防护装置与病床之间并非完全密闭，导致风量与压差之间并非线性关系。

动态呼吸的实验结果显示，在患者非正常呼吸的情况下，病床局部负压隔离防护装置内部压差依然维持在−15 Pa 左右，并具备在干扰消除后快速恢复稳定的能力。现阶段投入使用的同类负压隔离产品，如有关文献报道的折叠式负压隔离转运舱[7]、充气式负压隔离转运舱[8]、负压隔离舱[9]以及负压担架式隔离舱[10]，均为在 2 min 内方可形成稳定负压。而本研究病床局部负压隔离防护装置建立压差时间较短，仅需 1 min，优于现阶段投入使用的需 2 min 方可形成稳定负压的大部分负压隔离装置。

噪声实验结果表明，病床局部负压隔离防护装置隔离罩内的噪声，满足《传染病患者运送负压隔离舱：YY 1885—2023》[11] 对噪声的指标要求，正常工作时不超过 65 dB(A)。而左耳噪声略大于右耳噪声，是因为内含排风过滤箱的排风装置较为靠近床体左侧位置。现阶段投入使用的便携式防传染医用负压隔离舱[12−13]、负压隔离舱[9] 和负压隔离舱控制系统[14] 等行业内同类产品的噪声均超过了 65 dB(A)，接近 72 dB(A)。与现阶段投入使用的行业内其他同类产品相比，本研究中病床局部负压隔离防护装置进一步降低了噪声，实现平均噪声<65 dB(A)。

生物气溶胶隔离能力实验结果表明，在患者模型左、右两侧手肘处和患者模型胸口处的微生物气溶胶浓度最大，而患者模型头部两侧微生物气溶胶浓度次之，患者模型左、右手处微生物气溶胶浓度最低。分析原因为微生物气溶胶发生方向朝向患者模型胸口方向，且患者模型左、右两侧手肘均在半开的负压隔离罩外侧，受罩内气流组织影响较小。因此，导致患者模型左、右两侧手肘处和患者模型胸口处的微生物气溶胶浓度较大；而患者模型头部两侧位置虽距离气溶胶发生器较近，但该位置处在半开的负压隔离罩内部，罩体内部气流的流动带走了一定的气溶胶，导致头部两侧微生物气溶胶浓度降低；而患者模型左、右手距离气溶胶发生器位置最远。因此，该处微生物气溶胶浓度较低。此外，排风装置排风口位置也存在少量微生物气溶胶。因此，当病床局部负压隔离防护装置的隔离罩半开时，需增大风量，才可尽可能保证其生物气溶胶隔离能力。另外，距离病床横侧罩体边缘 50 cm 处微生物气溶胶浓度比病床边缘的气溶胶浓度降低了 85.7 %，距离病床横侧罩体边缘 100 和 150 cm 处微生物气溶胶浓度更加降低，而距离病床横侧罩体边缘 200 cm 处未采集到微生物气溶胶浓度。实验结果表明，当病床局部负压隔离防护装置的隔离罩半开时，气溶胶向病床横侧的两侧扩散，距离病床越远的位置，微生物气溶胶浓度越低。距离病床 200 cm 及更远的位置可认为是医护人员的安全位置。同时，罩体正上方、罩体竖侧边缘处以及距离病床竖侧罩体边缘 50、100、150 和 200 cm 处均未采集到微生物气溶胶，说明罩体半开状态气溶胶仅沿横向方向扩散至环境中，沿竖向方向及向上方向的扩散受到罩体阻挡。因此，当患者将病床局部负压隔离防护装置的隔离罩调至半开状态进行喝水、进食等行为时，医护人员可站立在病人头部方向的病床竖侧位置。在隔离罩闭合状态下，将发生的气溶胶浓度由 1.4×10^{9} CFU/mL 分别增大至 1.4×10^{10} CFU/mL 和 1.4×10^{11} CFU/mL，在罩体横侧和竖侧边缘处、罩体正上方、距离病床罩体横侧和竖测边缘 50、100、150 和 200 cm 处，以及排风装置排风口处的位置均未采集到微生物气溶胶的实验结果表明，病床局部负压隔离防护装置对罩内发生的微生物气溶胶进行了有效地隔离，微生物气溶胶未泄漏至罩体外部环境。证明了病床局部负压隔离防护装置具有优异的安全隔离能力，可有效防止病原微生物的扩散，并对床旁的医护人员及周围环境提供有效保护。现阶段投入使用的同类负压隔离产品，均具有一定的生物气溶胶隔离能力。Nishimura H 等[15] 报道的便携式负压隔离罩采用浓度为 10^{8-9} CFU/mL 的噬菌体病毒液在该便携式负压隔离罩内雾化发生，对罩内外的空气进行微生物采样，发现病毒未泄漏到罩外。Kumar N 等[16] 报道，负压隔离系统在使用 10 min 后，周围环境气溶胶浓度> 0 CFM/m^3 且<1 CFM/m^3。结果表明，与现阶段投入使用的同类产品相比，病床局部负压隔离防护装置的生物气溶胶隔离能力优于部分同类产品。

本研究针对我国生物安全与重大传染病防控中个人防护装备舒适性差、集体防护装备机动灵活性不强等问题，设计研制了一种通用性强、患者使用舒适度高、可实现快速折叠、收纳、组装的病床局部负压隔离防护装置，并对其进行了性能研究与评价。结果表明，本研究设计研制的病床局部负压隔离防护装置受试者主观体验良好，内部负压差的建立快速稳定，噪声较小，操作方便，能够实现快速组装与收纳。实验结果表明，

病床局部负压隔离防护装置可有效切断病原微生物在空气中的传播，对于降低呼吸道感染病员救治时的感染扩散风险，提高我国传染病疫情防控的快速响应能力具有重要应用价值。但本研究病床局部负压隔离防护装置仍存在一定不足之处，如未配备无人化或智能化模块，装置信息化、网络化程度较低以及使用舒适性还需进一步提升等。未来发展应更趋于信息化和智能化，并在舒适性方面进行优化改进。

数据可用性声明　本研究中所有的原始数据均已在论文中得以全面展示。

参考文献

[1] 杨启凡, 王宇萍. 我国公共卫生领域面临的突出生物安全问题 [J]. 中国公共卫生, 2023, 39(5): 676-680.

[2] 王兰, 施培武, 沈群红, 等. 新冠疫情前后中国内地重大疫情防控服务能力变化分析 [J]. 中国公共卫生, 2024, 40(3): 280-284.

[3] 孙晓文, 张永忠, 赵超, 等. 公共场所生物恐怖事件卫生应急装备体系构建 [J]. 中国公共卫生, 2024, 40(10): 1212-1219.

[4] 王心淼, 吴金辉, 张宗兴, 等. 负压隔离救治装备的研究进展与发展趋势 [J]. 医疗卫生装备, 2024, 45(2): 97-104.

[5] Rajajee V, Williamson C A. Use of a novel negative-pressure tent during bedside tracheostomy in COVID-19 patients[J]. Neurocritical Care, 2020, 33(2): 597-603.

[6] 王心淼, 房艳华, 刘倩静, 等. 正压生物防护头罩防护性能实验研究 [J]. 中华医院感染学杂志, 2024, 34(13): 2075-2080.

[7] 胡名玺, 孙秋明, 刘圣军, 等. 折叠式传染病员负压隔离转运舱研究 [J]. 医疗卫生装备, 2014, 35(12): 97-100.

[8] 曹立. 一种充气式负压隔离转运舱: 中国, 111789728A[P]. 2020-10-20.

[9] 马秉辉. 负压隔离舱的人机工程仿真及优化设计研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.

[10] 孙明, 张威, 吴超, 等. 负压担架式隔离舱联合负压救护车转运新型冠状病毒肺炎患者 13 例分析 [J]. 中国急救复苏与灾害医学杂志, 2021, 16(5): 580-581,588.

[11] 国家药品监督管理局. 传染病患者运送负压隔离舱: YY 1885—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.

[12] 尚辉, 刘乃智, 李静. 便携式防传染医用负压隔离舱的设计 [J]. 中国医疗设备, 2018, 33(2): 60-62.

[13] 曹立. 一种便携防传染负压隔离舱: 中国, 111772989A[P]. 2020-10-16.

[14] 赵志超. 基于 STM32 的负压隔离舱控制系统研究与设计 [D]. 天津: 天津理工大学, 2017.

[15] Nishimura H, Fan Y X, Sakata S. New applications of a portable isolation hood for use in several settings and as a clean hood[J]. Journal of Thoracic Disease, 2020, 12(7): 3500-3506.

[16] Kumar N, Kumar A, Kumar A, et al. Negative airflow isolation bed provides an option for NIV ventilation during COVID-19 pandemic[J]. Trends in Anaesthesia and Critical Care, 2020, 34: 59-60.