



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Public Health—Review

医疗机构中用于控制空气传播传染病的个体患者通风隔离罩

J. Patel ^{a,*}, F. McGain ^{b,c,d}, T. Bhatelia ^e, S. Wang ^f, B. Sun ^e, J. Monty ^g, V. Pareek ^e

^a CSIRO Energy, Melbourne, VIC 3169, Australia

^b Western Health, Melbourne, VIC 3021, Australia

^c School of Public Health, The University of Sydney, Sydney, NSW 2006, Australia

^d Centre for Integrated Critical Care, The University of Melbourne, Melbourne, VIC 3010, Australia

^e The Western Australian School of Mines: Minerals, Energy and Chemical Engineering, Curtin University, Perth, WA 6102, Australia

^f Department of Mechanical Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China

^g Department of Mechanical Engineering, The University of Melbourne, Melbourne, VIC 3010, Australia

ARTICLE INFO

Article history:

Received 24 September 2020

Revised 28 October 2020

Accepted 17 December 2020

Available online 15 June 2022

关键词

新冠病毒肺炎

个体患者通风隔离罩

空气传播

医护人员

传染病

摘要

作为一种局部排气通风(LEV)系统,个体患者通风(VIP)隔离罩用于将患者的空气排放物与医护人员(HCW)呼吸的空气进行分离,为减少医院获得性感染(HAI)提供了一种新的途径。最近的研究结果表明,对于典型的患者排放的气溶胶,VIP隔离罩提供的保护与N95口罩相当。与口罩不同的是,隔离罩的性能可以被很容易地监控,HCW可以通过警报收到故障提醒。适当使用这些相对简单的设备既可以减少感染控制对个人防护设备(PPE)的依赖,又可以为医院和诊所提供低成本、高效率的防护形式。尽管新冠肺炎(COVID-19)加速了VIP隔离罩的开发和部署,但这些设备目前仍是一项不成熟的技术。本文描述了VIP隔离罩的现状,并确定了需要进一步开发的方面,包括设备设计和相关使用规则。VIP隔离罩的概念可扩展为为个体患者提供清洁的条件和对其他环境因素如温度和湿度进行个性化控制。

© 2022 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

新冠病毒肺炎(COVID-19)于2019年12月首次暴发[1]。在接下来的几个月里,这种疾病迅速蔓延到全球。2020年3月11日,世界卫生组织(WHO)宣布COVID-19疫情为全球性疫情[2]。从最早的报道来看,很明显,受严重影响地区的医院挤满了需要呼吸支持的患者[3]。2002—2003年严重急性呼吸综合征(SARS)暴发后的应对经验和早期关于COVID-19的报道表明,在高流量鼻氧

治疗和无创通气(NIV)期间呼出的空气扩散给医护人员(HCW),给HCW带来了高感染风险。对于负压和隔离室容量不足的医院,在缺乏其他策略来确保这些干预措施安全的情况下,人们普遍建议避免使用这些疗法[4]。基于此,世界各地的研究团队着手开发个体患者通风(VIP)隔离罩,该隔离罩利用(建筑物)通风的措施来保护HCW免受与这些气溶胶产生过程相关的排放物的影响[5–10]。

这些隔离罩在减少COVID-19医院获得性感染(HAI)方面具有广泛潜力,因为导致COVID-19的严重急性呼吸

* Corresponding author.

E-mail address: Jim.Patel@csiro.au (J. Patel).

综合征-冠状病毒2型（SARS-CoV-2）的气溶胶传播的证据已经出现[11]。世界各地的医院都在努力预防HCW感染[12]，这凸显了针对经空气传播的传染性疾病的现有保护措施的限制性。在这种情况下，VIP隔离罩提供了一种新的强有力的工具来限制病毒从源头（患者）的传播，并减少HCW的暴露。

长期以来，（建筑物）通风措施作为稀释和转移污染物手段，被认为是控制经空气传播的传染性疾病的传播的有效策略[13-15]。在许多工业和研究设施中，使用局部排气通风（LEV）系统来确保工人不暴露于有毒气体和排放物。在医护环境中，使用LEV系统具有挑战性；因此，HCW的保护严重依赖于个人防护设备（PPE）的可用性、正确选择和使用，以及稀释通风[如供暖、通风和空调（HVAC）]。具有增强稀释通风的设施，如负压和隔离室，确实比普通房间能提供更高水平的通风[14,16-17]；然而，这些设施的可用性通常有限，并且它们不能完全将HCW与受感染患者的空气排放物进行隔离（图1）。这使得HCW容易受到经空气传播的传染性疾病的感染，这是现有医疗机构的一个弱点，COVID-19已经清楚地阐明了这一点。

在2002—2003年早期SARS暴发期间和之后，一些研究人员将VIP隔离罩确定为降低HAI程度的潜在控制策

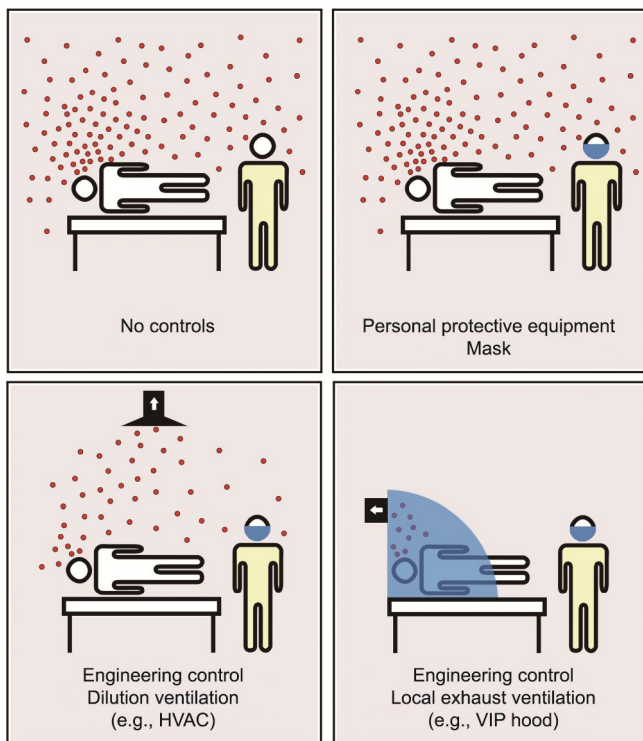


图1. 个人防护设备、稀释通风和LEV作为预防HCW感染经空气传播的传染性疾病的方法的比较。

略。在香港大学2003年发表的一份内部报告中，Li等描述了一种婴儿车式VIP隔离罩，该隔离罩可延伸到患者的床头[†]。后来，在2009年发表的一项关于控制经空气传播的传染性疾病的通风策略调查中，Nielsen [14]发现了这类隔离罩的潜力，使雾化器能够用于感染患者。在2015年，Dungi等[18]提出了一项计算流体动力学（CFD）研究，研究了床头板抽取式VIP隔离罩在防止HCW暴露于躺在隔离罩内床上的患者咳嗽产生的气溶胶的效率。这些模型证明了这一策略的有效性，即气溶胶没有从封闭空间逃逸到HCW的呼吸空间。

根据危险控制的等级，工程控制措施不及消除和替代措施，但高于行政控制措施和个人防护设备[19]。在患者被感染的情况下，清除和替代措施显然是不可行的选择；因此，工程控制措施应该是主要的保护形式。作为一种工程控制策略，VIP隔离罩提供了一种比负压室和隔离室更有效的保护HCW的方法。VIP隔离罩具有以下优点：

- 可以提供物理屏障，保护HCW免受空气传播（如气溶胶）和喷射（如咳嗽或打喷嚏的飞沫）排放物的影响，并减少病毒在病床外的传播；

- 保护HCW不仅依赖于HCW和患者正确选择和使用个人防护设备，与口罩相比，VIP隔离罩的性能可以被监控和警告；

- HCW可以靠近患者，只要他们在隔离罩外壳之外，他们具有最小的感染或暴露于雾化药物的风险；

- 封闭空间的体积明显小于一个房间的体积，因此，可以以更高的效率实现高通风率（即更小的风扇，更少的能量）。

虽然VIP隔离罩在COVID-19疫情期间有潜在的应用价值，但对于麻疹和结核病等其他经空气传播的疾病，VIP隔离罩仍然是一项不成熟的技术，并且需要进一步发展，才能在非危机情况下得到广泛应用。本文探讨了迄今为止所描述的各种隔离罩的设计和性能，并确定了关键的设计挑战和性能指标，预计这些将有助于指导VIP隔离罩进一步的开发，并为其标准和实施规范的制定提供参考。

2. 讨论

2020年3—5月，学术期刊和网站报道了几起有关VIP隔离罩的事件。这些设备都是为应对COVID-19而开发的，包含几个关键特征：

- 隔离个别患者的能力。虽然之前已经描述过类似的

[†] This report is not published. Li Y, Chan ATY, Leung YC, Lee JHW. Dispersion and control of SARS virus aerosols in indoor environment-transmission routes and ward ventilation. Hong Kong: University of Hong Kong; 2003.

多床隔离罩，如在2014—2015年埃博拉病毒暴发期间使用的多床隔离罩[20]，但它们不能为HCW提供相同水平的空气传播保护。

- 使用风扇从封闭空间抽取空气，并在排放前处理排出的空气。这一特征提供了传统窗帘式方法和无通风的隔离罩不能提供的防止空气传播的保护。

- 罩式、部分覆盖患者和床的设计主要是为了覆盖患者的上身和头部。与Trexler隔离帐篷等全床式封闭空间相比，这种隔离罩可被轻松安装和拆除，而且还减少了需要通风的隔离罩的体积。

本文不包括专门为保护进行特定气溶胶生成程序（如插管、拔管和支气管镜检查）的HCW而开发的小型通风和非通风隔离罩，因为它们是为不同目的而设计的[21–23]。

2.1. VIP隔离罩的类型

尽管每种隔离罩都包含上述三个特征，但不同设计的性质各不相同。

2.1.1. 部分封闭的VIP隔离罩

将“部分封闭”定义为在位于隔离罩内的患者的上半身与外面的人之间提供物理屏障。这种隔离罩不是密闭的，并且被设计成允许空气通过位于隔离罩周边的通风口或缝隙进入。这种隔离罩的一个主要优点是，为HCW提供了保护，使其免遭由打喷嚏和咳嗽患者身上产生的呼吸颗粒的喷射。

对于这些隔离罩，通常通过患者头部后面和（或）上面的一个或多个端口抽取空气。这就产生了吸力，来自外部的空气通过通风口或缝隙被吸入患者体内。隔离罩内的空气流动可能很复杂，对不同隔离罩设计所需的通风速率有影响。

将部分封闭的VIP隔离罩分为三类：婴儿车式、篷式和箱式隔离罩。

(1) 婴儿车式VIP隔离罩。Adir等[5]报道了婴儿车式隔离罩的研制成果，以确保NIV和高流量鼻插管（HF-NC）的安全使用。当隔离罩展开时，连接床背的透明塑料顶罩覆盖患者的上半身，见图2（a）。

顶罩可伸缩，以允许接近患者，并使患者能够容易地离开床。单个抽取口位于隔离罩后部的患者头部上方。抽出的空气经过预过滤器和高效颗粒吸收（HEPA）过滤器，然后被释放回房间。McGain等[7]描述了一种用于相同目的类似隔离罩。这种隔离罩与Adir等报道的略有不同，该隔离罩被安装在一个可移动的框架上，可以用轮

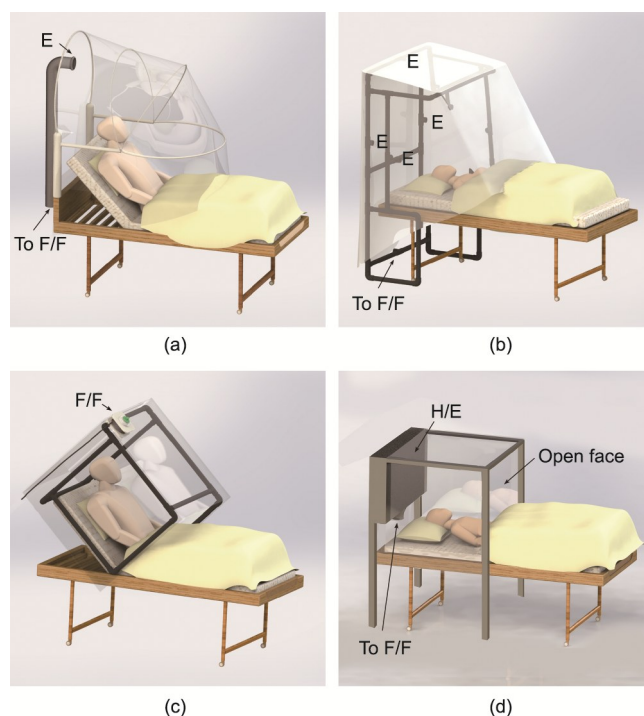


图2. VIP隔离罩。(a) 婴儿车式；(b) 篷式；(c) 箱式；(d) 床头板抽取式。E: 抽取口；F/F: 过滤器/风扇系统；H/E: 床头板抽取器。

子将其推离床。顶罩在固定框架的内部，减少了隔离罩框架的净化需求。

(2) 篷式VIP隔离罩。据报道，在一些VIP隔离罩中，透明塑料隔离罩由聚氯乙烯（PVC）框架组成，覆盖在病床上，将患者上半身隔离起来[图2（b）][8,10,24]。Convissar等[10]和Patel等[8]描述的隔离罩使用PVC框架作为抽气管道。在Convissar等[10]的案例中，入口被引入顶罩的后部，以允许患者从后部进入。

(3) 箱式VIP隔离罩。为巴西医院开发的箱式VIP隔离罩似乎是被报道的设备中部署最广泛的[9]。这种VIP隔离罩以第一位接受治疗的患者命名，为“Cápsula Vanessa”。该隔离罩由Instituto Transire公司和Samel Health Tech公司开发，并免费提供设计。这种箱式隔离罩是基于一个简单的PVC管框架、风扇和过滤系统连接到其外部的。该隔离罩被放置在床上（其顶部是轻质透明塑料顶罩），覆盖患者的上半身[图2（c）]。与独立的篷式隔离罩不同，箱式隔离罩的框架被搁置在床上，并且必须从床上提起，以便患者离开隔离罩。

由于箱式隔离罩容易获得，而且成本较低，因此非常适合用于COVID-19这样的危机情况。然而，医务工作者（在接近患者时）和患者（在没有帮助的情况下离开隔离罩时）的手动操作问题可能会限制这种类型的隔离罩在非危机情况下的使用。

2.1.2. 开放式VIP隔离罩

此处的“开放式”是指在隔离罩内患者的上半身和外部人员之间没有提供完全的物理屏障（图2）。迄今为止所描述的开放式隔离罩类似于篷式隔离罩，但是没有覆盖隔离罩正面的顶罩。这些隔离罩的主要优点是HCW容易接近患者，并且患者可以在没有帮助的情况下离开隔离罩。一个关键的限制是这些开放式隔离罩不能实现患者与HCW之间的物理隔离；因此，患者打喷嚏或咳嗽时有可能使HCW暴露于这些携带病毒的飞沫中。

床头板抽取式VIP隔离罩。迄今为止，仅有的开放式VIP隔离罩是床头板抽取式VIP隔离罩。这些床头板位于隔离罩的后部，并在整个背面进行均匀抽气[图2(d)]。这种方法旨在实现类似于层流罩的均匀流动状态。这种方法有可能使患者呼出的任何空气污染物的稀释时间最小化，并确保空气传播的排放物从隔离罩的入口流出。

床头板抽取式VIP隔离罩由美国卫生及公众服务部（US Department of Health and Human Services）疾病控制与预防中心（CDC）开发，并免费提供[6]。这种设计的一个主要挑战是，为了在床头板上进行均匀抽气，一个大的复杂表面将暴露于污染物，这可能导致清洁和感染控制的问题（见下文）。这种设计的另一个限制是阻止从后面接近患者。

2.2. VIP隔离罩的有效性

一些关于VIP隔离罩的报道包括它们在保护HCW免受空气污染物影响方面的有效性的演示。Adir等[5]应用光度测定法表明，婴儿车式隔离罩内释放的烟雾颗粒（ $0.3\sim 0.5\ \mu\text{m}$ ）只有0.0006%通过过滤系统。Lang等[24]将加湿器放置在一个隔离罩内，并将粒子计数器（ $0.3\sim 10.0\ \mu\text{m}$ ）放置在罩内和罩外接近临床医生头部高度的位置。测量是在隔离罩关闭和风扇开启（抽取率为 $230\ \text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ ）以及没有隔离罩和风扇的情况下进行的。结果发现颗粒数分别为 $18\ \text{m}^{-3}$ 和 $700\ \text{m}^{-3}$ 。为了评估风扇的效果，在打开和不打开风扇的情况下，测量了隔离罩内的颗粒数，发现风扇减少了63%的颗粒数。为了模拟气溶胶生成过程的结束，在加湿器关闭后监测颗粒数。在风扇打开的情况下，颗粒数在5 min内减少了98%，而在风扇关闭的情况下，需要183 min才能实现相同的减少。

McGain等[7]报道了迄今为止描述最全面的研究，他们调查了VIP隔离罩减少HCW接触气溶胶生成过程患者的可能性。使用空气动力学粒度分析仪（APS）和扫描迁移率粒度分析仪（SMPS）分别对大于 $0.5\ \mu\text{m}$ 和小于 $0.5\ \mu\text{m}$ 的颗粒进行气溶胶计数，确定了两种高气溶胶产

生过程：NIV和雾化治疗。研究发现，使用通风气流为 $40\ \text{L}\cdot\text{s}^{-1}$ 的婴儿车式隔离罩（ $1.3\ \text{m}^3$ 的容积），可将接触NIV治疗患者的HCW附近的气溶胶计数减少。对于小于 $0.5\ \mu\text{m}$ 的颗粒，从每毫升630个颗粒减少到12个颗粒；对于大于 $0.5\ \mu\text{m}$ 的颗粒，从每毫升30个颗粒减少到0.5个颗粒。对于接受喷雾器治疗的患者，研究发现对于小于 $0.5\ \mu\text{m}$ 的颗粒，气溶胶计数从每毫升51 000个颗粒下降到570个颗粒；对于大于 $0.5\ \mu\text{m}$ 的颗粒，从每毫升1080个颗粒下降到9个颗粒。通过连续测量罩内外的气溶胶计数，隔离效率（罩外测量的颗粒数/罩内引入的颗粒总数）确定为不同颗粒尺寸的百分比（图3）。在测量的颗粒尺寸范围内的平均效率大于98.1%。因此，测试的VIP隔离罩至少为HCW提供了与佩戴N95口罩相同的保护。

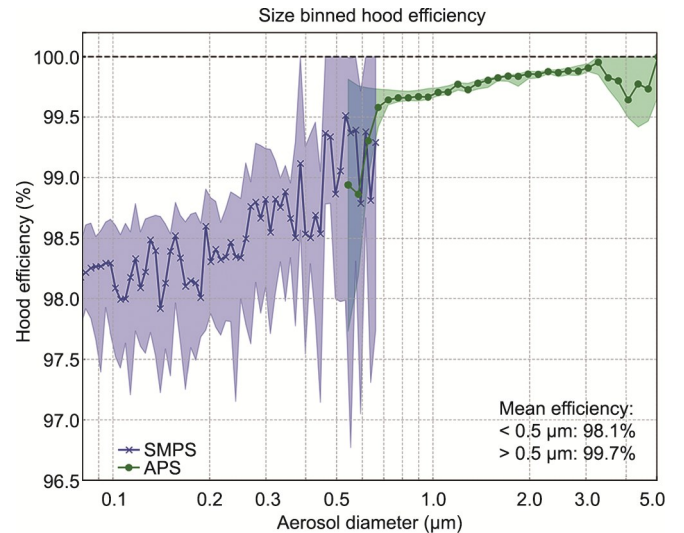


图3. VIP隔离罩防止喷雾器气溶胶反复产生的效果。经允许转载自参考文献[7]。

2.3. VIP隔离罩的通风

由于VIP隔离罩尚未实现在医院中的常规使用，因此没有关于适当通风设计的指南。虽然现有的医院设施被设计成将HCW暴露于由患者散发的空气污染物的程度最小化，但是这些设施没有提供完全隔离。因此，制定通风率标准主要是为了提供足够的稀释以防止空气传播。对于不同的医院环境，通常推荐合适的通风率，即每小时换气次数（ACHR）或每人每秒升数。

对疾病的安全空气污染物浓度进行循证评估需要考虑许多因素，包括疾病的传染性、排放的性质（速率、浓度、成分等），以及HCW和患者穿戴的个人防护设备的有效性。这些信息大多不可用，因此，推荐的通风率通常基于历史和共识，而不是证据[25]。

对于VIP隔离罩，通风的目的根据隔离罩是开放的还是封闭的而不同。当隔离罩关闭时，提供通风以确保HCW不会暴露于患者的空气排放物。在这种情况下，通风率应足以防止隔离罩泄漏。当隔离罩打开时，HCW可能会暴露于患者的空气排放物，因此，必须考虑与室内适当稀释相关的其他因素。

2.3.1. 通风率

在确定VIP隔离罩的适当通风率时，容积的影响很重要。尽管隔离罩可以将空气传播的污染物限制在很小的范围内，但也可能会聚集传染性污染物（这取决于通风率）。典型房间建议使用的ACHR或通风率会导致隔离罩内污染物的稳态浓度明显更高[25–26]。

当隔离罩关闭时，隔离罩内空气污染物的浓度不会对HCW产生影响。但是，如果浓度较高，在打开防护罩接触患者时可能会对HCW造成不可接受的暴露威胁。可以采用两种通用方法来解决这个问题：

(1) 通风率可以设置得足够高，以确保由连续来源[例如，在双水平气道正压通气(BiPAP)治疗期间的呼气或呼出气体扩散]产生的污染物的稳态浓度不超过对于HCW来说的安全浓度；

(2) 通风率可设定为足以确保在特定时间段内，因终止气溶胶生成的活动(如使用口罩或终止BiPAP治疗)而产生的污染物浓度降至安全浓度。

这些方法中的每一种都是可以接受的，但是每一种都需要采用不同的方案。虽然方案一可能是最方便的，因为隔离罩可以被随时安全地打开，但该方案需要比方案二采用更高的通风率。方案二要求在打开隔离罩之前，通过停止排放源并等待一段时间，使环境变得安全。对于方案二，当准备打开隔离罩时，可采用不同的抽气速率，以减少等待时间。

显然，确定VIP隔离罩的适当通风率需要考虑几个因素，包括疾病和排放的性质、隔离罩的使用方式、隔离罩外部的环境以及隔离罩的设计。重要的是要仔细考虑VIP隔离罩中使用的空气处理系统的设计。设计应该包括两个部分：一个排气扇和一个用于净化空气的装置。这种系统可以被直接连接到每个隔离罩，或者多个隔离罩可以连接单个风扇/净化系统(图4)。移动式风扇/过滤器系统也可以被直接安装在防护罩上[图2(c)]。

风扇的选择将取决于所需的通风率、效率和噪声等因素。净化系统的选择可能取决于废气排放的位置。尽管过滤器[27]和其他气体处理技术可以有效地将气流中的污染物浓度降低到安全水平，但理想情况下，排放空气的地点

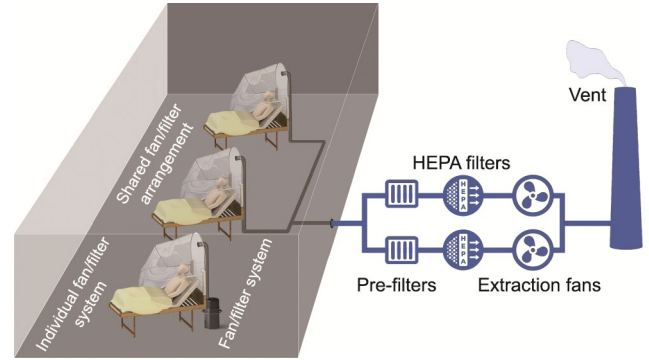


图4. VIP隔离罩的风扇/净化系统布置示意图。

和位置应尽可能远离建筑物居住者和社区居民[26]。对于设施外部的空气释放，该VIP隔离罩设计提供了一种利用更广泛的气体处理技术的方法，如热处理和化学洗涤。在某些情况下，从设施内抽取空气并将空气释放到外部可能会对现有的工程和空气管理系统造成影响。在这种情况下，设施内的空气释放是可能的，但应仔细注意气体净化策略的选择。

在VIP隔离罩设计中，应仔细考虑冗余、警报和维护规则的使用，以及使用规则的制定。指示风扇故障(或者最好是低流量或流量减少)的警报对于确保隔离罩的有效运行、HCW的保护以及患者的安全非常重要。使用警报来提醒HCW通风故障是隔离罩优于口罩的一个关键优势，口罩很难发出警报。风扇和净化系统的冗余将确保即使发生故障或在维护和清洁过程中也能保持安全条件。

2.3.2. 通风良好的隔离罩设计

对于不同的隔离罩设计，隔离罩内气流的性质会有很大的不同，这取决于诸如形状、尺寸、位置以及抽气和进气的配置等因素。图5显示了部分隔离罩的CFD分析[8]。空气从开口位置和抽气口位置进入隔离罩，在隔离罩内产生了复杂的流动，形成了再循环区域。

VIP隔离罩通风性能的设计、开发和验证将受益于模拟和实验方法的结合。CFD是快速筛选和优化设计的强大工具，可为不同场景提供合适的气流。在过去的20年里，CFD建模和实验研究被广泛应用于检查医院I级房间的气流[28–29]。大多数研究都集中在隔离室的通风稀释和扩散过程上[30–32]。在这些研究中，采用一种迁移模型，以跟踪空气传播的污染物和追踪可能的感染途径。通常认为患者呼出的空气是空气传播的污染物的来源，并且这些污染物通过气流传播和扩散。基于雷诺平均纳维尔-斯托克斯(RANS)的湍流模型已经过实验验证，可用于评估其他情况。

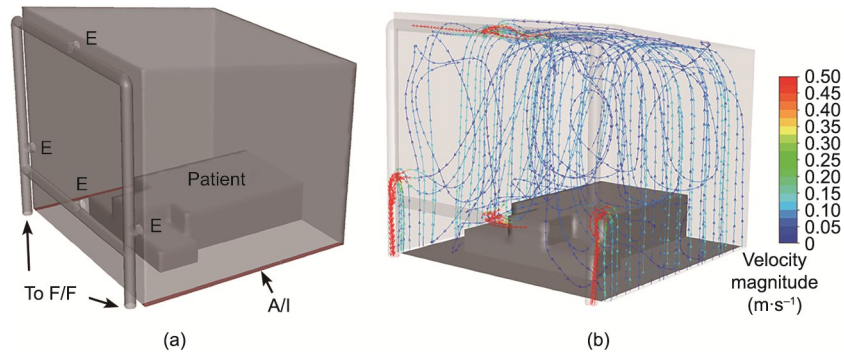


图5. (a) 计算流体动力学分析的计算域；(b) 用速度大小标记的篷式隔离罩的粒子轨迹（通风率： $760 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ ）[8]。A/I：进气口。

为了充分了解和优化VIP隔离罩内的气流，需要开发和验证各种CFD模型。这些CFD模型必须描述通风性能的变化：

- **VIP隔离罩的拓扑：**①隔离罩和床的形状和尺寸；②患者的体型；③医疗设备（管道、HCW等）的缝隙和堵塞物。

- **操作条件和场景：**①呼吸模式、打喷嚏、咳嗽、说话、呼吸支持和其他类似场景；②HCW提供护理的干预措施；③部分或完全开放的顶罩；④患者在隔离罩内的位置、运动和活动。

必须特别注意这些模型的数值技术和验证。为了充分理解稀释率，必须对使用单相和多相建模方法的流体动力学特性进行比较，并研究详细的颗粒停留时间分布。虽然全分辨率模拟可以提供关于液滴和气溶胶行为的详细信息，但在评估VIP隔离罩时，必须在实验和CFD模型之间做出合理选择。必须考虑使用侵入性和非侵入性高保真实验进行验证，如粒子图像测速仪、示踪剂浓度监测和高速成像。

这些模型的关键输出是可以提供充分通风的优化的流体流动分布。VIP隔离罩的进一步发展将受益于设计元素的深度优化，如形状和进气口、出气口的配置，以最大程度地减少实现可接受的稀释率所需的通风。评估在现有设施中引入VIP隔离罩对稀释通风效率的影响也很重要。必须考虑诸如在室内产生停滞区的可能性以及出口排气扇和入口气流的影响等方面。

2.4. 患者舒适度

VIP隔离罩的设计应考虑与患者舒适和健康相关的几个因素：

- **温度：**由于隔离罩内的气流较高，与患者在常规病房中所经历的气流相比，这种气流产生冷却效应的可能性应该得到重视。流经患者的气流需要限制在可接受的速度范围内，这可能取决于当地条件（室温、湿度等）[33]。

- **噪声：**风扇的使用以及空气通过端口和管道的流动将不可避免地产生噪声。为了患者的健康，设备选择和隔离罩设计应旨在最大程度地降低隔离罩内的噪声水平[34]。

- **交流：**隔离罩的设计应确保患者与HCW和来访者之间可以进行语言和视觉交流。在为顶罩选择建筑材料(MOC)时，必须考虑这一点。

- **无障碍使用空间：**隔离罩的设计应考虑展开的性质，如果需要，应该使患者能够在没有帮助的情况下进出隔离罩。同样，在某些情况下，患者能够坐起来并可能在没有帮助的情况下进食，这一点也很重要。

值得注意的是，患者的病情，如痴呆、谵妄或幽闭恐惧症，可能会妨碍某些患者使用VIP隔离罩。患者希望离开VIP隔离罩，以便活动、如厕或只是在隔离罩中休息一下。同样，这些设备是否适合儿童使用也需要考虑。

2.5. 医护人员的可用性

VIP隔离罩的使用将不可避免地改变HCW操作设施与患者互动的方式。隔离罩和相关规则的设计应旨在最大程度地减少HCW的任何额外负担，并确保患者护理的重要因素不受影响。工程师和临床医生、护理人员和其他医院工作人员之间的密切协商将有助于这些设备及相关规则和程序的开发。VIP隔离罩的设计和使用的优化很可能是一个反复的过程，其发展取决于实际经验。关于VIP隔离罩设计的以下关键方面需要进一步研究：

- **患者可及性。**使用VIP隔离罩的一个主要挑战是HCW接触患者的能力。HCW执行简单但完整的任务（如测量患者的生命体征或给患者喂食的能力）是使用VIP隔离罩时的重要考虑因素。在隔离罩上简单地引入端口或孔可以允许在不打开隔离罩的情况下执行一些任务，从而进一步降低HCW的感染风险。

- **患者可见度。**清晰地观察患者对于护理工作的重要

性不言而喻[35], 从这个角度来看, VIP隔离罩的使用将带来挑战。这将对隔离罩的设计、在设施内的位置以及HCW随后采用的常规程序产生影响。

• **净化和维护。** VIP隔离罩和相关规则的设计必须确保净化、清洁和维护程序能够以安全的方式进行。这些程序的成功开发需要感染控制专家的指导, 包括考虑不同材料(包括抗病毒材料的潜在用途)对隔离罩的适用性。

2.6. 可持续性思考

从可持续发展的角度来看, VIP隔离罩既带来了机遇, 也带来了挑战。减少对负压室和隔离室的依赖的潜力可能会减少医疗设施特别是空气处理系统对能源的使用。然而, 隔离罩的使用将带来新的可持续性挑战, 特别是对于一次性材料的消费。因此, 隔离罩和相关规则的设计应包含可持续性概念, 旨在避免对一次性材料的需求。

3. 结论

VIP隔离罩通过将患者的空气排放物与HCW呼吸的空气分开, 提供了一种减少HAI的方法。这些设备的进一步发展应集中在改进隔离罩的几何形状、通风系统以及传感器和报警器的结合上。另外还需要为隔离罩的使用制定适当的规则。

早期报道表明, VIP隔离罩可以为HCW提供一定程度的保护, 使其免受典型患者排放的气溶胶的影响(至少与N95口罩提供的保护相当)。防护水平在很大程度上取决于与所治疗疾病相关的传染性空气传播物质的性质。因此, VIP隔离罩的合理设计将受益于对潜在致病性生物气溶胶排放的性质及其在空气传播中的作用的进一步了解。

VIP隔离罩不应该仅限于通风, 应通过气流的反向流动, 为个体患者提供清洁的条件以及对其他环境因素(如温度和湿度)进行个性化控制。

Compliance with ethics guidelines

A patent has been filed for a personal ventilation hood by the University of Melbourne/Western Health. Two authors (F. McGain and J. Monty) were the leads in this patent application. All other authors declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Chen N, Zhou M, Dong X, Qu J, Gong F, Han Y, et al. Epidemiological and clinical characteristics of 99 cases of 2019 novel coronavirus pneumonia in Wuhan, China: a descriptive study. *Lancet* 2020;395(10223):507–13.
- [2] Cucinotta D, Vanelli M. WHO declares COVID-19 a pandemic. *Acta Biomed* 2020;91(1):157–60.
- [3] Cummings MJ, Baldwin MR, Abrams D, Jacobson SD, Meyer BJ, Balough EM, et al. Epidemiology, clinical course, and outcomes of critically ill adults with COVID-19 in New York City: a prospective cohort study. *Lancet* 2020; 395(10239):1763–70.
- [4] Namendys-Silva SA. Respiratory support for patients with COVID-19 infection. *Lancet Respir Med* 2020;8(4):e18.
- [5] Adir Y, Segol O, Kompaniets D, Ziso H, Yaffe Y, Bergman I, et al. COVID-19: minimising risk to healthcare workers during aerosol-producing respiratory therapy using an innovative constant flow canopy. *Eur Respir J* 2020; 55(5): 2001017.
- [6] Ventilated headboards [Internet]. Atlanta: Centers for Disease Control and Prevention; 2020 [cited 2020 May 23]. Available from: <https://www.cdc.gov/niosh/topics/healthcare/engcontrolsolutions/ventilated-headboard.html>.
- [7] McGain F, Humphries RS, Lee JH, Schofield F, French C, Keywood MD, et al. Aerosol generation related to respiratory interventions and the effectiveness of a personal ventilation hood. *Crit Care Resusc* 2020;22(3):212–20.
- [8] Patel J. A design for individual vented enclosures for infection control in hospitals with SARS-CoV-2 infected patients [Internet]. 2020 [cited 2020 Jun 7]. Available from: <http://ventilatedhood.maifield.net/index.html>.
- [9] Cápsula Vanessa [Internet]. Samel Assistência Médica; 2020 [cited 2020 May 27]. Available from: <https://capsulavanessa.samel.com.br/>. Portuguese.
- [10] Convissar D, Chang CY, Choi WE, Chang MG, Bittner EA. The vacuum assisted negative pressure isolation hood (VANISH) system: novel application of the Stryker Neptune™ suction machine to create COVID-19 negative pressure isolation environments. *Cureus* 2020;12(5):e8126.
- [11] Tang S, Mao Y, Jones RM, Tan Q, Ji JS, Li N, et al. Aerosol transmission of SARS-CoV-2? Evidence, prevention and control. *Environ Int* 2020;144:106039.
- [12] Sommerstein R, Fux CA, Vuichard-Gysin D, Abbas M, Marschall J, Balmelli C, et al. Risk of SARS-CoV-2 transmission by aerosols, the rational use of masks, and protection of healthcare workers from COVID-19. *Antimicrob Resist Infect Control* 2020;9(1):100.
- [13] Stockwell RE, Ballard EL, O'Rourke P, Knibbs LD, Morawska L, Bell SC. Indoor hospital air and the impact of ventilation on bioaerosols: a systematic review. *J Hosp Infect* 2019;103(2):175–84.
- [14] Nielsen PV. Control of airborne infectious diseases in ventilated spaces. *J R Soc Interface* 2009;6(Suppl 6):S747–55.
- [15] Gamage B, Moore D, Copes R, Yassi A, Bryce E; BC Interdisciplinary Respiratory Protection Study Group. Protecting health care workers from SARS and other respiratory pathogens: a review of the infection control literature. *Am J Infect Control* 2005;33(2):114–21.
- [16] Bhagat RK, Linden PF. Displacement ventilation: a viable ventilation strategy for makeshift hospitals and public buildings to contain COVID-19 and other airborne diseases. *Roy Soc Open Sci* 2020;7(9):200680.
- [17] Yuen PL, Yam R, Yung R, Choy KL. Fast-track ventilation strategy to cater for pandemic patient isolation surges. *J Hosp Infect* 2012;81(4):246–50.
- [18] Dungi SR, Mead KR, Ghia U, Gressel M. Effectiveness of a local ventilation/filtration intervention for health-care worker exposure reduction to airborne infection in a hospital room. In: 2015 ASHRAE Winter Conference; 2015 Jan 24–28; Chicago, IL, USA; 2015.
- [19] Hierarchy of controls [Internet]. Atlanta: Centers for Disease Control and Prevention; 2020 [cited 2020 Jun 6]. Available from: <https://www.cdc.gov/niosh/topics/hierarchy>.
- [20] Devi S. FRONTLINE: a new treatment facility for Ebola virus disease. *Lancet* 2018;392(10163):2428.
- [21] ArchitectsRaskin L., engineers, and physicians develop COVID-19 patient isolation hood [Internet]. Brooklyn: BNP Media; 2020 Apr 14 [cited 2020 May 23]. Available from: <https://www.architecturalrecord.com/articles/14570-architects-engineers-and-physicians-develop-covid-19-patient-isolation-hood>.
- [22] AirVENT: a personal negative pressure hood for containment, treatment, and removal of aerosolized viral contamination [Internet]. New York City: New York University Tandon; 2020 [cited 2020 May 23]. Available from: <http://engineering.nyu.edu/mechatronics/covid-19/airvent.php>.
- [23] Creating a biohazard space for COVID-19 intubation: a COVID intubation tent/box [Internet]. Your Design Medical; 2020 [cited 2020 May 31]. Available

- from: <https://yourdesignmedical.com/blogs/making-a-safe-intubation-space-for-covid19/creating-a-biohazard-space>.
- [24] Lang AL, Shaw KM, Lozano R, Wang J. Effectiveness of a negative-pressure patient isolation hood shown using particle count. *Br J Anaesth* 2020;125(3):e295–6.
- [25] English TR. Engineers’ perspectives on hospital ventilation [Internet]. *HPAC Engineering*; 2014 May 2 [cited 2020 May 31]. Available from: <https://www.hpac.com/iaq-ventilation/article/20927589/engineers-perspectives-onhospital-ventilation>.
- [26] Victorian Advisory Committee on Infection Control. Guidelines for the classification and design of isolation rooms in health care facilities. Melbourne: State Government of Victoria; 2007.
- [27] Azimi P, Stephens B. HVAC filtration for controlling infectious airborne disease transmission in indoor environments: predicting risk reductions and operational costs. *Build Environ* 2013;70:150–60.
- [28] Lim T, Cho J, Kim BS. Predictions and measurements of the stack effect on indoor airborne virus transmission in a high-rise hospital building. *Build Environ* 2011;46(12):2413–24.
- [29] Mui KW, Wong LT, Wu CL, Lai ACK. Numerical modeling of exhaled droplet nuclei dispersion and mixing in indoor environments. *J Hazard Mater* 2009;167(1–3):736–44.
- [30] Cho J. Investigation on the contaminant distribution with improved ventilation system in hospital isolation rooms: effect of supply and exhaust air diffuser configurations. *Appl Therm Eng* 2019;148:208–18.
- [31] Hayashi T, Ishizu Y, Kato S, Murakami S. CFD analysis on characteristics of contaminated indoor air ventilation and its application in the evaluation of the effects of contaminant inhalation by a human occupant. *Build Environ* 2002;37(3):219–30.
- [32] Rui Z, Guangbei T, Jihong L. Study on biological contaminant control strategies under different ventilation models in hospital operating room. *Build Environ* 2008;43(5):793–803.
- [33] Berlanga FA, de Adana MR, Olmedo I, Villafruela JM, San José JF, Castro F. Experimental evaluation of thermal comfort, ventilation performance indices and exposure to airborne contaminant in an airborne infection isolation room equipped with a displacement air distribution system. *Energy Build* 2018;158:209–21.
- [34] Cunha M, Silva N. Hospital noise and patients’ wellbeing. *Procedia Soc Behav Sci* 2015;171:246–51.
- [35] Reiling J, Hughes RG, Murphy MR. The impact of facility design on patient safety. In: Hughes RG, editor. *Patient safety and quality: an evidence-based handbook for nurses*. Rockville: Agency for Healthcare Research and Quality; 2008.