

文章编号: 1671-6612 (2024) 03-416-10

定向送风对隔离病房 开门时段空气泄漏的抑制效果研究

李 鹏

(四川省医学科学院·四川省人民医院 成都 610000)

【摘要】 患有高传染性疾病的患者一般被安置在医院的负压隔离病房中来限制这些疾病在医院内部的传播。然而隔离病人员进出时房门开启可能会导致大量携带有病菌的空气通过房门传递到隔离病房外部走廊, 从而引起走廊中的人员被感染。为了减少和预防门开启带来的室内空气泄露问题, 有必要使得门开启时室内外交换的气流最小化。为了解决这个问题, 我们在隔离病房门口安装有定向气流送风口, 通过将定向气流引向隔离病房门口, 以减少由门的开启过程, 人员移动通过过程和室内外温差引起的室内外空气气流交换量。使用烟雾对流场可视化后发现在门开启或者关闭的过程中使用朝向隔离病房的定向气流能够明显减小室内外的空气交换量。示踪气体测试结果显示, 定向气流 90L/s 时室内外等温条件下可将隔离病房内的空气泄漏量减少 38%, 而室内外温差 3°C 时, 使用定向气流可减小泄漏量 31%。若将定向气流风量调节到 190L/s 时, 等温条件下可减小室内外 60% 的空气交换量。在室内外存在 3°C 的温差时, 空气交换量可减少 39%。尽管测试的定向气流并未能够完全防止空气泄漏, 但是它们是可以有效的减少由门的开启, 人员通过和室内外温差引起的室内外空气交换量。

【关键词】 隔离病房; 门开启; 室内外空气交换; 定向气流

中图分类号 TU5 文献标志码 A

Effectiveness Analysis of Reducing Air Leakage in Hospital Isolation Room by Directional Airflow during the Door Opening Process

Li Peng

(Sichuan Academy of Medical Science and Sichuan Provincial People's Hospital, Chengdu, 610000)

【Abstract】 Patients with highly contagious diseases are typically placed in negative-pressure isolation rooms within hospitals to restrict the spread of these diseases within the healthcare facility. However, opening the door can potentially lead to a significant exchange of air carrying pathogens through the doorway into the corridor when the doctor enter or exit the room, putting individuals in the corridor at risk of infection. To mitigate and prevent indoor air leakage caused by door openings, it is necessary to minimize the air exchange between the interior and exterior when the door is opened. To address this issue, we have installed directional airflow supply outlets at the entrance of the isolation room, redirecting airflow toward the isolation room's doorway to reduce the indoor-to-outdoor air exchange resulting from the door opening process, personnel movement through the doorway, and indoor-outdoor temperature differences. Visualizations using smoke for airflow patterns have revealed that using directional airflow directed towards the isolation room during door opening or closing processes can significantly reduce the indoor-to-outdoor airflow exchange. Tracer gas test results show that with 90 L/s of directional airflow under isothermal conditions, the air leakage from the

isolation room can be reduced by 38%, while with a 3°C indoor-outdoor temperature difference, the use of directional airflow can reduce leakage by 31%. When the directional airflow rate is adjusted to 190 L/s, the indoor-to-outdoor airflow can be reduced by 60% under isothermal conditions. With a 3°C temperature difference between the interior and exterior, airflow exchange can be reduced by 39%. Although the tested directional airflows may not completely eliminate air leakage, they are effective in reducing the indoor-to-outdoor airflow exchange resulting from door openings, personnel passage, and temperature differences.

【Keywords】 Negative-pressure isolation rooms; Door opening process; Indoor-to-outdoor air exchange rate; Directional airflow

0 引言

医院中患有传染病的患者通常被安置在负压隔离病房中。负压的目的是将室外气流引向隔离病房,从而防止隔离病房中的污染空气泄漏至周围空间。通过封闭隔离病房内的空气污染物,可以减少隔离病房外部人员的感染风险。尽管负压隔离病房内的负压会使得气流流向隔离病房,但泄漏仍然会发生。特别是在打开门时,隔离病房内部的负压会消失,甚至在门开启瞬间室内的污染物由于门的运动会往门外移动。从而使携带病原体的空气自由流出隔离病房^[1]。人员在门口的通行也会增加室内外空气的交换,因为移动的人员的尾迹会卷吸室内空气带至室外。据估计门的开启与人的通行是导致医院隔离病房污染物泄漏的主要原因之一^[2,3]。

迄今为止,研究已经表明门的开启(特别是对于铰链门)会引起明显的室内外空气的交换和室内外污染物传递^[4-14]。研究还表明人员的通行^[4,6,12,15]、门的开启时间^[14,16]和室内外的温差^[4,5,16-20]都会进一步增加室内外的空气交换。减少室内外空气交换的有效方法之一是使用滑动门而不是铰链门。然而,滑动门与人员通行产生的综合效应对室内外换气量的影响也是显著的^[6,12,21]。

通风系统在隔离病房的使用对限制空气污染物扩散起着重要作用。当门关闭时,通常通过增大排风流量来产生负压,以形成通过裂缝渗透的定向气流引向隔离病房。若能够具有足够大的排风流量,可以在门打开的情况下仍然维持向室内流动的定向气流。尽管门的开启、人的通行、室内外温差、湍流等扰乱了定向气流,但它仍然可以显著减少室内外空气量的交换^[4,6,12]。此外,气幕可以提供一种减少室内空气污染物向外扩散的有效方法。然而,它们更常见于具有大开口的工业环境^[22,23]、具有高室内外温差的冷库^[24-27]和进出流量大的建筑入口^[28-30],但在医院隔离病房环境中通常较少使用。

现有的针对定向气流对室内外空气污染物传

递的影响几乎只集中在稳态条件下,即研究大多集中在持续开启的门和没有人员通行的情况下。Booth 和 Arribas^[31]发现门口的定向气流在移动人员通过门口时不能完全消除前厅和隔离病房之间的空气交换量(稳态条件下,门口始终打开)。美国的卫生技术备忘录^[32]建议在稳态条件下从无菌区域到污染区域的开放门口通入 470L/s (0.29m/s) 的定向气流,以确保不会发生逆向流动。Shaw^[4]估计,在没有温差的情况下完全隔离两个相邻区域,需要大约 200L/s (0.11m/s) 的气流,此时两个区域之间的门始终保持打开状态。

只有少数几项研究在不稳定条件下(包括门口的开启过程和人员通行阶段)全面实验研究了定向气流对门口空气污染物传递的影响。Hayden 等人^[6]进行了一项实验发现如果将朝向门口的定向气流的流量从大约 30L/s (0.01m/s) 增加到 100L/s (0.05m/s),可以室内外空气交换量从平均 1.55m³减少到 1.20m³。他们进一步估计如果流量的增加与室内外空气交换量的减少是线性关系,需要大约每秒 360L/s (0.17m/s) 的气流,才能将室内外空气交换量减少到接近零。但是仍然需要更多的数据来研究门开启与人员通行门口与室内外换气量之间的影响。

本研究旨在研究由于铰链门的开启运动、人员通行和室内外温差引起的隔离病房门口的室内外空气传递,以及由于前厅瞬时送风过剩和隔离病房排风过剩时所产生的定向气流对室内外换气量的影响。本文主要测试了不同的定向气流流量(0、90和 190L/s)时室内外换气量。所有实验都在一个建造在通风实验室的全尺寸隔离病房模型中进行。

1 研究方法

1.1 负压隔离病房模型

本研究的实验在通风实验室中建造的全尺寸隔离病房模型中进行。隔离病房模型包括两个相邻的房间:隔离病房(4.0m×4.7m×2.6m)和前厅

(2.4m×2.4m×2.45m)。这两个房间通过隔断墙中间的铰链门相连。铰链门的高度为 2.06m，宽度为 1.10m。有一个 1.7m 高的假人模型在门打开时通过铰链门。假人模型安装在轨道上的平台上（如图 1 右侧所示）。前厅和隔离病房中均采用了顶部混合通风。在隔离病房中，送风通过两个多孔喷嘴扩散器端子（每个端子 0.60 米×0.60 米，每个端子有 81 个圆形喷嘴）分布在房间中央的天花板上（并排）。喷嘴的方向是避免送风绕过排风格栅并在门操作期间引发额外的空气交换的。隔离病房中有两个排风格栅，一个（0.27 米×0.17 米的矩形格栅）位于病床上方的天花板上，另一个（0.27 米×0.07 米的矩形格栅）位于离地面较近的位置。



图 1 隔离病房外部（左侧）和内部（右侧）的全尺寸模型

Fig.1 A full-scale model of the outside (left) and inside (right) of the isolation room

在前厅中，送风通过天花板上安装的多孔喷嘴送风散流器（0.45m×0.45m 的方形端子，每个端子有 36 个圆形喷嘴）来进行，排风通过安装在靠近隔离病房门口的天花板上的排风格栅（0.27m×0.07m 的矩形格栅）来进行。前厅的送风流量平均为 50L/s，排风流量为 50L/s。隔离病房的送风流量平均为 170L/s，排风流量为 200L/s。送风流量对应于 ASHRAE 标准^[3]规定的 12h⁻¹的换气次数。与前厅相比，隔离病房的送排风会引起 20Pa 的负压。气流流量是通过测量具有已知 *k* 值的孔板上的压差来计算的。压差是通过 Swema 3000（±0.3Pa，10s 采样间隔）测量的。隔离病房内的总热负荷为 460W，包括照明（110W）、仿真病人（90W）和通过散热器模拟的太阳辐射（260W）。前厅没有热负荷，但送风温度较高，室内空气被周围环境通过墙壁热传导进行略微加热。隔离病房中的送风温度为 19.4℃，排风温度为 21.5℃，前厅的送风温度为 20.0℃，排风温度为 21.6℃。此外，隔离病房门口的地板附近分别安装了三个温度传感器，距地板 0.1 米、1.0 米和 2.0 米。在前厅靠近墙壁处的 1.0 米和 2.0 米处安装有两个温度传感器，以监测可能的温度分层。温度是通过 Craftemp 的热敏电阻（±0.2℃，1min 采样间隔）进行采集的。有关房间和送风散流器的详细信息，请参见图 2 和图 3。

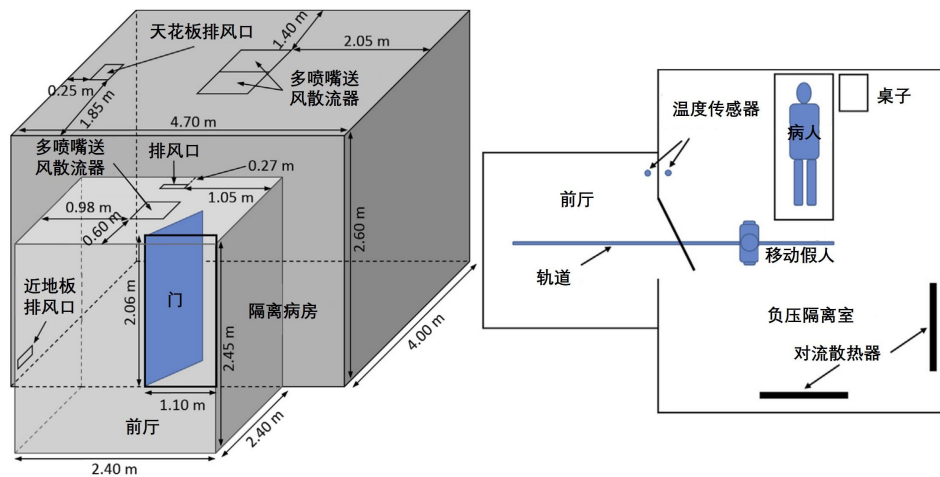


图 2 隔离病房模型的示意图（左侧送排风的位置，右侧房间的俯视图）

Fig.2 Schematic diagram of the isolation room model (The left side shows the location of the air supply and exhaust, and the right side shows the top view of the room)

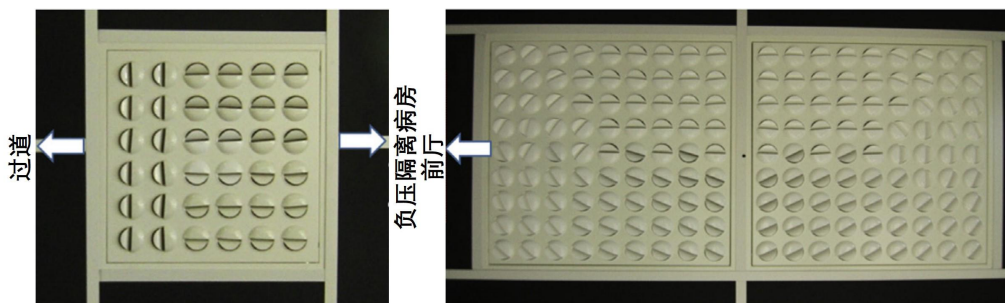


图 3 前厅（左）和隔离病房（右）为多喷嘴扩散器。

Fig.3 The air diffusers in the anteroom (left) and isolation room (right)

1.2 假人进出房间的过程

假人进出房间的过程包括门的开启、假人的移动和门的关闭。在每个实验工况之前（实验工况将在第 1.5 节中更详细地描述），假人被放置在隔离病房的中央。当假人向室外移动时，假人首先向铰链门移动。在假人停在铰链门门前之后，门被打开到 90°，这个过程需要 3 秒的时间。在门完全打开约 1 秒后，假人穿过门口到前厅。在前厅，假人停留在房间中央，经过短暂等待后，门开始关闭。门关闭大约需要 6 秒时间。门关闭后，整个假人移动过程结束。门的开启和假人运动整个过程如图 4 所示。大约一个小时后，假人进出房间过程会重复进行，假人朝相反方向移动。门的开启和假人的移动将重复进行六次，每个实验工况都包括三次从隔离病房离开和三次进入隔离病房。假人通过铰链门的速度为 1m/s。门和假人的运动都是由计算机控制，这使得运动的同步性准确，可重复性容易。

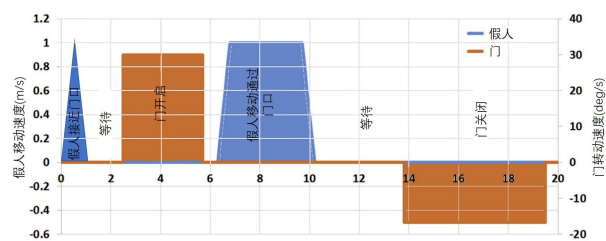


图 4 假人进出房间的过程

Fig.4 The process of the manikin entering the room

1.3 烟雾可视化

为了定性地展示门的开启、人员通行、室内外温差和定向气流引起的流场，本文进行了烟雾可视化实验。烟雾是由舞台上使用的烟雾机生成的。烟雾平均产生的颗粒物大小为 1.0-1.5 μm ，因此烟雾能够跟随气流运动。在实验中，我们将烟雾定量喷入隔离病房。为了最小化隔离病房室内的热负荷和

灯光与房间气流的相互作用，我们将照明用的灯光放置在室外。光线通过用于流动可视化目的的窗户进入前厅。在门开关期间，使用佳能 7D 数码相机记录了烟雾的运动过程。本研究中仅展示了已记录视频的静止图像。

1.4 示踪气体测量

我们对示踪气体进行测量来定量测量隔离病房与前厅的空气交换量。在测量中，我们使用 SF₆ 示踪气体与空气稀释后加入到隔离病房的送风管道中。因此，示踪气体被有效均匀地混合到房间中。示踪气体浓度是通过便携式气相色谱分析仪（Thermo Fisher 5800-GOB，约 40 秒采样间隔）测量的。SF₆ 的浓度是在排风管道测量的。在进行分析之前，会从浓度数据中去除背景值。示踪气体浓度在隔离病房达到稳定状态后，我们进行了第一次门的开启实验。由于只有一台气相色谱分析仪，每次在门打开之前，我们都需要使用气相色谱分析仪监测来自前厅排风的 SF₆ 浓度。在每次开门之前，我们会检查隔离病房的浓度，以确保示踪浓度保持在稳态水平（即在第一次开启之前的水平）。

每次开门后，室内外的空气交换是基于示踪气体的变化来进行计算^[16]：

$$m_{SF_6 I \rightarrow A} = V_{I \rightarrow A} \cdot c_{SF_6 I} \Leftrightarrow V_{I \rightarrow A} = \frac{m_{SF_6 I \rightarrow A}}{c_{SF_6 I}} \quad (1)$$

其中， $m_{SF_6 I \rightarrow A}$ 是由于门的开启而从隔离病房泄漏到前厅的示踪气体（SF₆）的总质量， $c_{SF_6 I}$ 是门打开之前隔离病房内示踪气体的稳态浓度， $V_{I \rightarrow A}$ 是隔离病房与前厅之间的空气交换量。门关闭后，示踪气体停止从隔离病房向外移动，此时前厅中的示踪气体浓度开始恢复回到门开启前的初始状态。由于示踪气体只会通过排风口离开前厅，因此前厅

中的示踪气体质量按以下方式衰减^[16]:

$$m_{SF_{6,i} \rightarrow A}(t) = Q_{EA} \cdot c_{SF_{6,i}}(t) \quad (2)$$

其中, Q_{EA} 是前厅的排风流量, $c_{SF_{6,i}}(t)$ 是前厅排风气体中测量得到的示踪气体浓度。通过在一个时间段 T 内(在此期间前厅示踪气体浓度减少到初始值)积分示踪质量流速, 可以得到示踪气体从隔离病房到前厅的总质量^[16]:

$$m_{SF_{6,i} \rightarrow A} = Q_{EA} \cdot \int_0^T c_{SF_{6,i}}(t) dt \quad (3)$$

将方程 (3) 代入方程 (1) 得到了由门的开启引起的从隔离病房到前厅的总空气交换量^[16]:

$$V_{I \rightarrow A} = \frac{Q_{EA} \cdot \int_0^T c_{SF_{6,i}}(t) dt}{c_{SF_{6,i}}} \approx \frac{Q_{EA}}{c_{SF_{6,i}}} \cdot \sum_{i=0}^T c_{SF_{6,i}} \Delta t_i \quad (4)$$

其中, $c_{SF_{6,i}}$ 是门开启后前厅中第 i 次测量的示踪气体浓度, Δt_i 是第 i 次测量的采样周期。图 5 为示踪气体测量曲线。每个实验工况中, 门的开启总共被重复进行了六次。

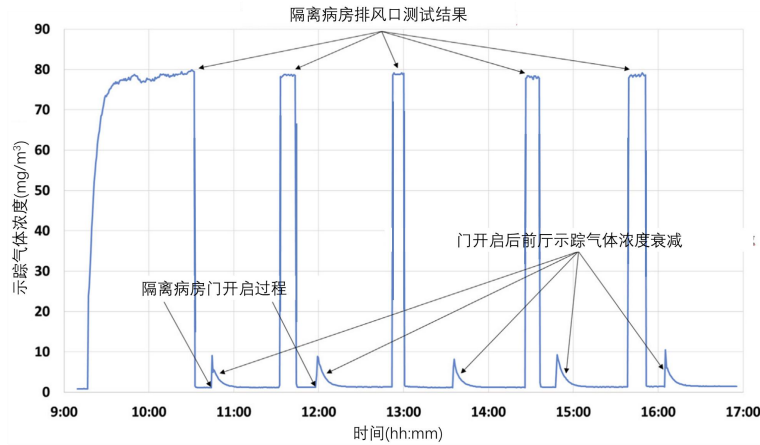


图 5 隔离病房排风管道测量的示踪气体浓度

Fig.5 The tracer gas concentration measured in the exhaust duct of isolation room.

1.5 实验设置

1.5.1 基准工况

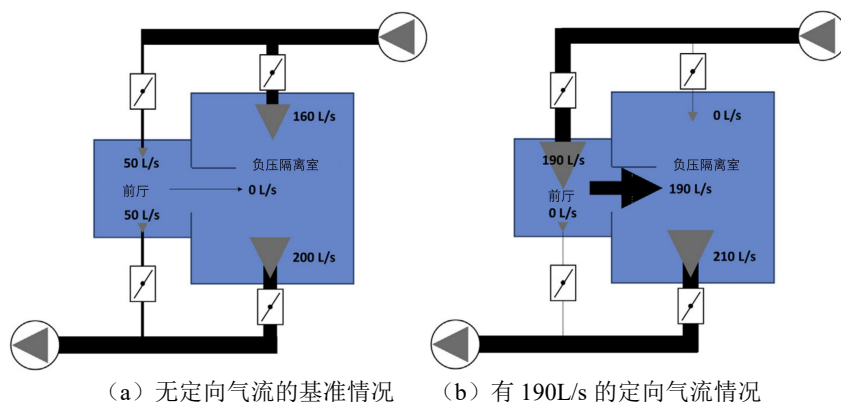
在基准实验中, 烟雾可视化和示踪气体测量分别在有人进出的情况下和没人进出的情况下进行。同时本文还测试了室内外温差 3°C 时门打开人员经过时室内外换气量。在这种情况下, 隔离病房温度比前厅温度高了 3°C 。隔离病房的基准热负荷提高到 550W , 以隔离病房内部实现 3°C 的温升。在室内外没有温差的情况下, 送排风气流速度与基准工况相同。

1.5.2 定向气流工况

在之前的工况中研究了门的开启、人员通过以及室内外温差引起的室内外空气交换量的影响。通常情况下, 当铰链门打开时, 前厅和隔离病房之间的压力差消失。然而, 通过提高送排风流量差(向前厅提供超额气流, 从隔离病房排出超额气流), 可以迫使门口的净流量增加(朝向隔离病房), 从而减少门开启时的空气污染物逃逸。在实验中, 通过调整门口开启时的送排风风速来实现这一点。通过将部分或全部隔离病房的送风气流导向前厅, 可

以创建出瞬时的前厅送风量过剩。同样, 通过将部分或全部前厅的排风导向隔离病房, 可以创建从隔离病房排出过量的气流。这会导致门口产生较强的朝向隔离病房的定向气流。当门关闭时, 阀门被恢复到正常位置(与基准情况相同)。这被认为是在铰链门打开期间增加定向气流的最和最简单的方法。调整送风风机速度可能是增加定向气流的另一种方法, 但通常需要更多的时间, 因此系统可能无法对通常持续 5-20 秒的开门过程做出反应。

在本研究中测试了两种不同的定向气流情况, 即门口的气流分别为 90L/s 和 190L/s 。也就是说, 在 90L/s 的定向气流情况下, 门开启时, 前厅的送风流速为 90L/s , 排风流速为 0L/s , 隔离病房的送风流量为 110L/s , 排风流量为 230L/s 。在 190L/s 的定向气流情况下, 前厅的送风流量为 190L/s , 前厅排风流量为 0L/s , 隔离病房的送风流量为 0L/s , 隔离病房排风流量为 210L/s 。有关该概念的示意图, 请参见图 6。在等温条件和室内外 3°C 温差下, 我们对两种定向气流情况进行了烟雾可视化和示踪气体测量。



(a) 无定向气流的基准情况 (b) 有 190L/s 的定向气流情况

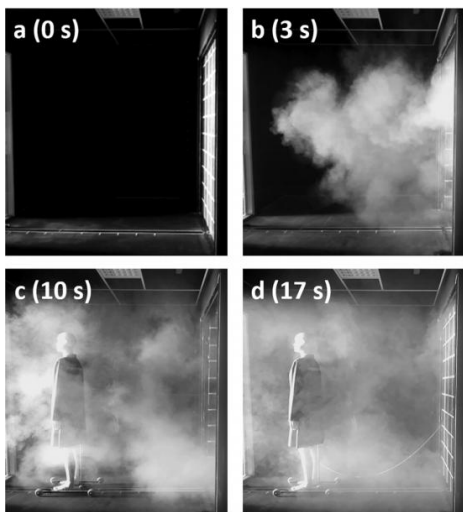
图 6 当门打开时在不同设置下的定向气流情况

Fig.6 Directional flow at different scenarios when the door is open

2 实验结果分析

2.1 流场可视化

流场烟雾可视化结果如图 7-10 所示。每个图包含四个子图 (a-d)，展示了门开启的不同阶段空气流动的情况。在每种情况中，图 a 展示了门打开之前的初始状态 (没有烟雾)。图 b 显示了门开始打开后 3 秒的空气流动情况。图 c 显示了假人停止移动后 2 秒的空气流动情况 (即门开始打开后 10 秒)。图 d 展示了门在假人身后关闭后的空气流动情况 (即门开始打开后 17 秒)。



注：括号中的时间表示门开始打开后经过的时间

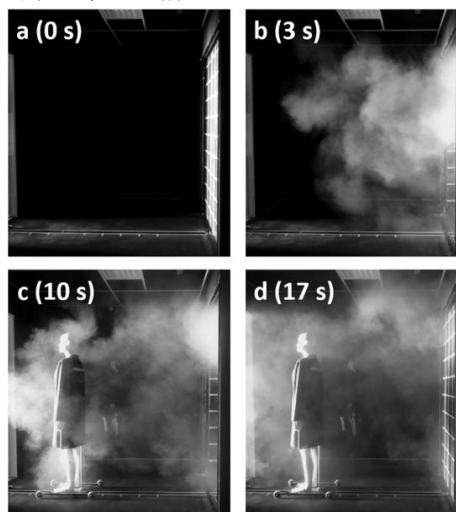
图 7 基准工况下的烟雾可视化 (室内外没有温差)

Fig.7 Smoke visualization under baseline conditions (no temperature difference between indoor and outdoor)

2.1.1 基准工况下人员移动经过铰链门产生的流场

基准工况下的空气流动情况如图 7 所示 (前厅侧视图)。从图 7a 至 7d 可以看出，门的打开引发

了隔离病房中的大量气流泄漏到前厅中。移动人员对气流的影响似乎被门的打开所引发的烟雾遮蔽了。图 8 为室内外 3℃ 温差的基准工况下室内的流场，门的打开和假人的通过似乎同样的引发了大量空气从隔离病房泄漏。图片中浮力效应不容易被识别。似乎门的打开和假人的通行引发的效应混合延迟了浮力驱动效应的出现。在图 8c 中，可以看到受温度驱动的气流缓慢形成，其中一些热的烟雾通过门口的上部流入前厅。



注：括号中的时间表示门开始打开后经过的时间

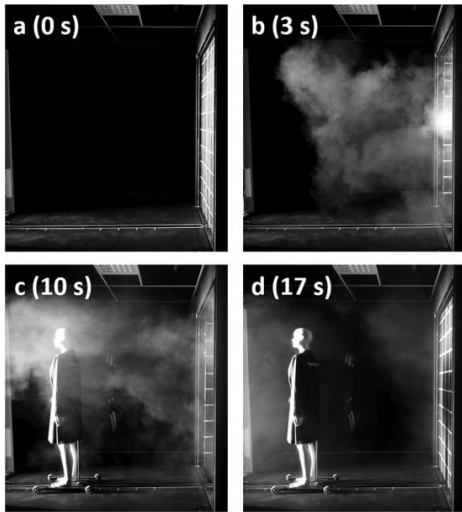
图 8 室内外 3℃ 温差的基准工况下的烟雾可视化

Fig.8 Smoke visualization at a reference condition with a 3°C temperature difference between indoor and outdoor

2.1.2 有定向气流工况下人员移动经过铰链门产生的流场

图 9 为室内外无温差且有 190L/s 的定向气流时的烟雾可视化情况。图 9a 和 b 显示，门的打开

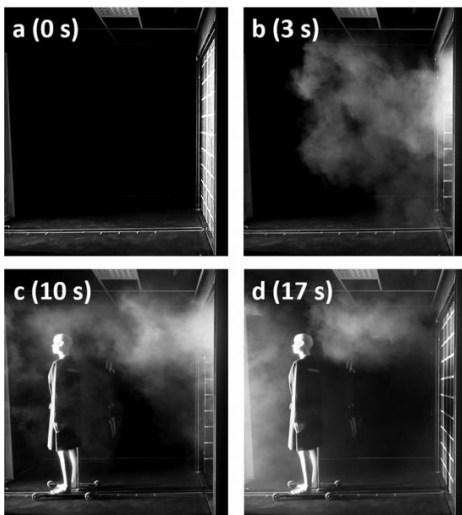
和假人的通过仍然引发了大量空气从隔离病房进入前厅。然而，正如图 9c 和 d 所示，与基准工况相比（见图 7），强制的室内外流量差似乎减少了从隔离病房流入前厅的空气量（照片中的烟雾明显减少）。



注：括号中的时间表示门开始打开后经过的时间

图 9 室内外无温差且有 190L/s 的定向气流时的烟雾可视化

Fig.9 Smoke visualization when there is no temperature difference between indoor and outdoor and directional air flow of 190L/s



注：括号中的时间表示门开始打开后经过的时间

图 10 室内外 3°C 温差且有 190L/s 的定向气流时的烟雾可视化

Fig.10 Smoke visualization at 3°C temperature difference between indoor and outdoor and directional air flow of 190L/s

图 10 为室内外有 3°C 温差且有 190L/s 的定向气流时的烟雾可视化情况。图 10b 和 10c 显示尽管净流向隔离病房的流量为 190L/s，但仍有大量空气进入前厅。浮力驱动的气流可以在门口的上部看到（见图 10c）。然而，与没有室外定向气流的工况相比（见图 8d），前厅似乎有更少的烟雾（见图 10d）。然而，应注意的是这里显示的所有烟雾可视化仅具有定性性质，因为难以估计烟雾密度，因此很难估计流经门口的烟雾数量。

2.2 示踪气体测量

图 11-13 中显示了每种情况的示踪气体测量结果的箱形图。平均结果的不确定性由标准误差和每个实验情况的最小值和最大值的变化来估算。在修改后的箱线图中，方框上下的黑线表示测量得到的最大和最小值，方框内的线表示平均值，方框的顶部和底部表示与平均值的标准误差的偏差。

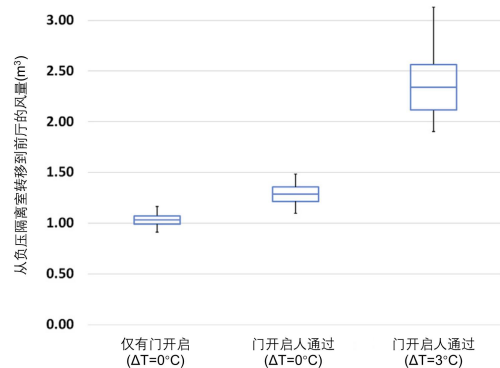


图 11 基准工况下示踪气体的测试结果 (ΔT 表示隔离病房与前厅之间的温差)

Fig.11 Tracer gas test results under baseline conditions

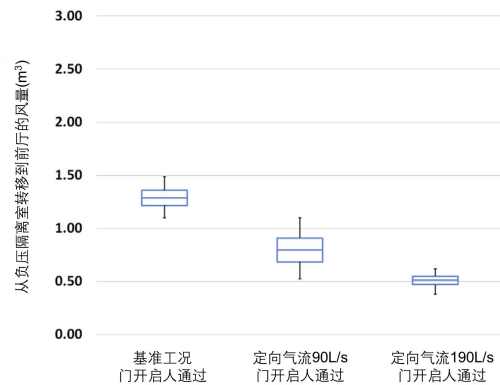


图 12 基准工况与定向气流下示踪气体的测试结果 (隔离病房与前厅无温差)

Fig.12 Tracer gas test results under baseline conditions and directional airflow (no temperature difference between indoor and outdoor)

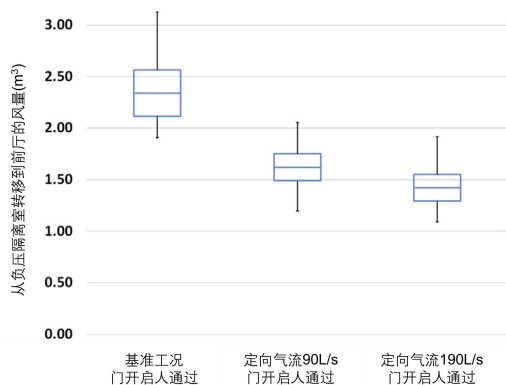


图 13 室内外温差 3℃ 时基准工况与定向气流下示踪气体的测试结果

Fig.13 Tracer gas test results under baseline condition and directional flow when the temperature difference between indoor and outdoor is 3℃

2.2.1 基准工况

基准工况的测试结果如图 11 所示。如烟雾可视化所示,门的开启和移动人员的穿过显著增加了门口的空气传递。仅由门的开启引起的平均交换空气量为 1.03m³,而假人穿过铰链门引起的总的空气传递体积为 1.29m³。因此,假人的穿过铰链门传递的空气体积为 0.26m³。室内外 3℃ 的温差显著增加了门口的空气传递体积。在 3℃ 的室内外温差情况下,通过门的平均交换空气量为 2.34m³。因此,室内外温差增加了门口的平均交换空气量 1.05m³。

2.2.2 定向通风气流

开门时有定向气流和基准工况(无温差)的比较如图 12 所示。在 90L/s 的定向气流情况下,从隔离病房泄漏至前厅的空气量平均为 0.80m³。与基准工况相比,90L/s 的定向气流将室内外空气交换量平均减少了 0.49m³(减少了 38%)。较大的定向气流(190L/s)工况下的空气交换量平均为 0.51m³。与基准工况相比,190L/s 的定向气流将门口的空气交换量平均减少了 0.78m³(减少了 60%)。因此,定向气流似乎能够有效地减少从隔离病房中泄漏的空气量。

图 13 显示了具有 3℃ 室内外温差的定向气流和基准工况的比较。在 90L/s 的定向气流情况下,门口的空气交换量平均为 1.62m³。与基准工况相比,定向气流将门口的空气交换量平均减少了 0.72m³(减少了 31%)。在 190L/s 的定向气流情

况下,隔离病房中的空气体积逸出平均为 1.42m³。与基准工况相比,空气交换量减少了 0.92m³(减少了 39%),但与 90L/s 的定向气流情况相比只减少了 0.20m³。因此,门口的定向气流在两种气流流量下基本上限制了由 3℃ 室内外温差引起的空气流动。然而,90L/s 和 190L/s 的定向气流情况之间的空气传递减少似乎只有很小的差异。

3 讨论

除了定向气流之外,可能还有其他因素可能会减少由开门运动、人员通过和温差引起的室内外空气传递。例如,气流组织会显著影响室内外空气交换量。在这项研究中,我们只测试了基本的混合通风,但其他类型的送风模式可能会更有效地减少室内外的空气交换。例如,单向流动(如活塞式流动)穿过前厅流向隔离病房,可能可以更有效地减少通过门口的空气传递。此外,通过直接在门口上方向下供应空气(类似气幕的效果),人们可能能够有效地切断移动物体后面或由浮力驱动的气流产生的空气传递,从而大大减少空气逸出,即使定向气流速率比这里估计的要小。如前所述,其他几个因素也会影响由门打开和通过引起的风量交换,例如门保持打开时间(即门在操作过程中保持打开的时间),门的大小,门的类型(滑动或铰链)等。因此,需要更多的研究来寻找最佳解决方案,以限制空气从隔离室的门口逸出,并结合强制定向气流。

4 结论

本研究调查了隔离病房门口存在流向隔离病房的定向气流的有效性,以限制医院隔离病房中的空气污染物的逸出。我们通过实验测试了铰链门开启,人员穿越门口和室内外温差引发的室内外空气交换。为了定性和定量评估门口的气流流场和室内外的空气传递,我们进行了烟雾可视化和示踪气体测量。实验是在一个包括隔离病房和前厅的全尺寸模型中进行的,实验时模拟了人体穿越门口的全过程。

烟雾可视化结果显示,定向气流明显减少了等温条件下以及室内外存在 3℃ 温差的情况下由铰链门的开启引发的室内外空气交换。示踪气体测量也证实了这一点。

在没有定向气流和室内外温差的基准情况下,

门的开启和移动人员穿过铰链门引发了隔离病房和前厅之间的平均 1.29m^3 的空气交换量。在没有定向气流的基准情况下, 室内外 3°C 温差的工况会增加 81% 的室内外空气交换量, 从 1.29m^3 增加到 2.34m^3 。

总之, 室外流入隔离病房的定向气流限制了由铰接门的开启、移动人员穿越门口和室内外温差引发的空气从隔离病房泄漏。这种方法看起来很有前景, 但未来还需要更多的研究来确定更高的定向气流流量、滑动门等情况下的防止污染物泄漏的有效性, 以找到限制隔离病房室内污染空气泄漏的最佳参数。

参考文献:

- [1] JW-T Tang, I Eames, Y Li, et al. Door-opening motion can potentially lead to a transient breakdown in negative-pressure isolation conditions: the importance of vorticity and buoyancy airflows[J]. *Journal of Hospital Infection*, 2005,61:283-286.
- [2] N Pavelchak, R DePersis, M London, et al. Identification of factors that disrupt negative air pressurization of respiratory isolation rooms[J]. *Infection Control and Hospital Epidemiology*, 2000,21:191-195.
- [3] JW-T Tang, Y Li, I Eames, et al. Factors involved in the aerosol transmission of infection and control of ventilation healthcare premises[J]. *Journal of Hospital Infection*, 2006,64:100-114.
- [4] BH Shaw. Heat and Mass Transfer by Convection through Large Rectangular Openings in Vertical Partitions[D]. PhD Thesis, United Kingdom: University of Glasgow, 1976.
- [5] DE Kiel, DL Wilson. Combining door swing pumping with density driven flow[J]. *ASHRAE Transactins*, 1989,,:590-599.
- [6] CS Hayden II, OE Johnston, RT Hughes, et al. Air volume migration from negative pressure isolation rooms during entry/exit[J]. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 1998,13:518-527.
- [7] JP Rydock, PK Eian. Containment testing of isolation rooms[J]. *Journal of Hospital Infection*, 2004,57:228-232.
- [8] I Eames, D Shoaib, CA Klettner, et al. Movement of airborne contaminants in a hospital isolation room[J]. *Journal of The Royal Society Interface*, 2009,6:S757-S766.
- [9] NJ Adams, DL Johnson, RA Lynch. The effect of pressure differential and care provider movement on airborne infectious isolation room containment effectiveness[J]. *American Journal of Infection Control*, 2011,39:91-97.
- [10] JI Choi, JR Edwards. Large-eddy simulation of human-induced contaminant transport in room compartments[J]. *Indoor Air*, 2012,22:77-87.
- [11] A Kokkonen, M Hyttinen, R Holopainen, et al. Performance testing of engineering controls of airborne infection isolation rooms by tracer gas techniques[J]. *Indoor Built Environment*, 2014,23:994-1001.
- [12] P Kalliomäki, P Saarinen, JW-T Tang, et al. Airflow patterns through single hinged and sliding doors in hospital isolation rooms – effect of ventilation, flow differential and passage[J]. *Building and Environment*, 2016,107:154-168.
- [13] L Chang, X Zhang, S Wang, et al. Control room contaminant inleakage produced by the door opening and closing: dynamic simulation and experiments[J]. *Building and Environment*, 2016,98:11-20.
- [14] IG Papakonstantis, EA Hathway, W Brevis. An experimental study of the flow induced by the motion of a hinged door separating two rooms[J]. *Building and Environment*, 2018,131:220-230.
- [15] L Chang, S Tu, W Ye, et al. Dynamic simulation of containment inleakage produced by human walking into control room[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017,113:1179-1188.
- [16] P Kalliomäki, P Saarinen, JW-T Tang, et al. Airflow patterns through single hinged and sliding doors in hospital isolation rooms[J]. *International Journal of Ventilation*, 2015,14:111-126.
- [17] M Lidwell. Air exchange through doorway. The effect of temperature difference, turbulence and ventilation flow[J]. *The Journal of Hygiene*, 1977,79:141-154.
- [18] C Chen, B Zhao, X Yang, et al. Role of two-way airflow owing to temperature difference in severe acute respiratory syndrome transmission: revisiting the largest

- nosocomial severe acute respiratory syndrome outbreak in Hong Kong[J]. *Journal of The Royal Society Interface*, 2010,8:699-710.
- [19] J Hang, Y Li, WH Ching, et al. Potential airborne transmission between two isolation cubicles through a shared anteroom[J]. *Building and Environment*, 2015,89:264-278.
- [20] S Lee, B Park, T Kurabuchi. Numerical evaluation of influence of door opening on interzonal air exchange[J]. *Building and Environment*, 2016,102:230-242.
- [21] JW-T Tang, A Nicolle, J Pantelic, et al. Different types of door-opening motion as contributing factors to containment failures in hospital isolation rooms[J]. *PLoS One*, 2013,8.
- [22] K Siren. Technical dimensioning of a vertically upwards blowing air curtain—part I[J]. *Energy and Buildings*, 2003,35:681-695.
- [23] A Valkeapää, H Anttonen. Draught caused by large doorways in industrial premises[J]. *International Journal of Ventilation*, 2004,3(1):41-51.
- [24] P Chen, DJ Cleland, SJ Lovatt, et al. An empirical model for predicting air infiltration into refrigerated stores through doors[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2002,25:799-812.
- [25] AM Foster, MJ Swain, R Barrett, et al. Effectiveness and optimum jet velocity for a plane jet air curtain used to restrict cold room infiltration[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2006,29:692-699.
- [26] JE Jaramillo, CD Perez-Segarra, A Oliva, et al. Analysis of the dynamic behavior of refrigerated spaces using air curtains[J]. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2009,55:553-573.
- [27] M van Belleghem, G Verhaeghe, C T'Joens, et al. Heat transfer through vertically downward-blowing single-jet air curtains for cold rooms[J]. *Heat Transfer Engineering*, 2012,33:1196-1206.
- [28] L Wang, Z Zhong. An approach to determine infiltration characteristics of building entrance equipped with air curtains[J]. *Energy and Buildings*, 2014,75:312-320.
- [29] S Goubran, D Qi, WF Saleh, et al. Experimental study on the flow characteristics of air curtains at building entrances[J]. *Building and Environment*, 2016,105:225-235.
- [30] T Gil-Lopez, MA Galvez-Huerta, J Castejon-Navas, et al. Experimental analysis of energy savings and hygrothermal conditions improvement by means of air curtains in stores with intensive pedestrian traffic[J]. *Energy and Buildings*, 2013,67:608-615.
- [31] W Booth, B Beato-Arribas. Characterization of contaminant distribution in a neutral pressure isolation room[C]. *Proceedings of Clima, 9th Rehva HVAC World Congress*, Helsinki, Finland, 10–14 June 2007.
- [32] Health Technical Memorandum 03-01, Specialized Ventilation for Healthcare Premises. Part A – Design and Installation[S]. Department of Health, UK, 2007.
- [33] ANSI/ASHRAE/ASHE Standard 170, Ventilation of health care facilities[S]. ASHRAE, USA, 2013.