

文章编号: 1671-6612 (2024) 05-672-07

手术室滑动门开启条件下流场测试分析

史赫扬

(四川省医学科学院·四川省人民医院 成都 610072)

【摘要】 通常情况下,手术室内部的气压往往高于室外大约 20Pa,这是为了避免室外受污染空气侵入室内,以减少伤口感染的风险。然而当手术室门打开时,手术室和外部走廊的压差将消失,这会导致手术室的密封性失效。如果在门开启期间有人员进出手术室,这会在门口引起额外的干扰。采用超声波三维风速计测量了人员进出期间门口瞬时的气流变化。结果显示当采用类似使用滑动门,保持初始正压为 20Pa,在开门期间排风量降至初始值的 50%等措施,即使没有人进出,开关门的过程中仍会有少量走廊受污染的空气进入手术室。此外当有人进入或者离开手术室的瞬间,走廊的受污染空气仍然会侵入手术室。相对于无人员进出的工况,有人员进出会使得进入手术室的空气量增加 83.8%,大约 0.269m³,离开手术室的空气增加 13.6%,大约 0.424m³。本研究为手术室通风的设计提供了指导。

【关键词】 手术室; 门开启; 室内外空气交换; 活塞流

中图分类号 TU5 文献标志码 A

Analysis of the Flow Field Testing under Operating Room's Sliding Door Opening Conditions

Shi Heyang

(Sichuan Academy of Medical Science and Sichuan Provincial People's Hospital, Chengdu, 610072)

【Abstract】 In general, the air pressure between indoors and outdoors is typically about 20Pa, aiming to prevent the infiltration of contaminated air and reduce the risk of wound infection. However, the pressure difference between indoors and outdoors disappears during human movement, compromising the sealing of the operating room. The processes of door opening and human entering can cause additional disturbance to the air exchange at the doorway. This study employed ultrasonic three-dimensional anemometry to measure the instantaneous airflow at the doorway during human movement. The results indicate that the process of door opening can cause the ambient air to enter the operating room, even with the measures that keep the initial positive pressure of 20Pa with a sliding door and reduce the exhaust air volume by 50%. Furthermore, the ambient contaminated air can still intrude into the operating room when humans enter or leave. Compared with the condition without humans entering or leaving the operating room, the air volume entering the operating room increased by 83.8% (about 0.269m³), and the air leaving the operating room increased by 13.6% (about 0.424m³). This study provides guidance for the design of the ventilation system in the operating room.

【Keywords】 Operating rooms; Door opening and closing process; Indoor-to-outdoor air exchange rate; Piston airflow

0 引言

手术部位被感染可能会导致严重的术后并发症,这种并发症不光会对患者的健康产生重大的威

胁,还会大大增加医疗系统的负担。虽然在手术过程中的感染风险是无法避免的,但是我们可以在手术的过程中采取很多预防措施来降低患者伤口感

染的概率,其中手术室的空调系统在降低伤口感染风险方面起着重要的作用。对于手术室的通风系统而言,它的任务是尽量减少通过空气传播的病原体进入手术伤口的概率。这就使得手术室的通风系统相对于普通房间的通风系统有所不同。一方面病房通风系统需要使得手术室保持正压状态,另一方面需要选择合适的通风方式使得患者伤口感染的概率尽可能的低。

大多数的国际标准规定了手术室需要保持正压状态^[1]。而国家规定^[2],手术室相对于相邻空间需要保持 20Pa 的正压。为了实现这种手术室正压状态,手术室的送风与回风之间应保持一定差值。而室内与室外的压差取决于手术空间的密闭性。针对手术室密闭性的问题, Hayden 开发了一个经验模型^[3],用于描述室内外压差、室内漏风面积、室内漏风量三者之间的关系。

手术室中的通风方式主要以混合通风(湍流通风)与活塞通风为主,对于存在高感染风险的手术(例如骨科手术和器官移植),建议手术室采用活塞通风,采用垂直活塞送风的手术室中,干净的空气可以直接送至手术台及其周围区域,活塞送风直接覆盖灯具,医护人员和医疗设备。但是由于手术灯下方的尾流和热源上方的热羽流存在周期性震荡,手术台周围的层流气流会受到尾流和热羽流的影响^[4,5]。手术室中人员移动对污染物的传播起着重要作用。当医护人员进入受活塞通风保护的手术区域时,他们会将污染区域的空气带入受保护区域^[6]。而手术期间,医生手臂的周期性弯曲也会扰动室内活塞通风^[7]。

当手术室门打开时,手术室内的正压会消失,室内的流场也会发生改变,如果门打开时医护人员通过手术室门进出,医护人员的运动会引起额外的干扰。医护人员进入手术室时引起的干扰与离开手术室时引起的干扰是不同的。但是当有人进出时,室内可能存在来自相邻空间的空气污染手术室内空气的风险。而这一瞬时的现象是本文的重点研究对象。研究表明,手术过程中门打开次数的增加会增加术后感染的风险^[8]。在采用垂直活塞送风的手术室中,内部行走人员的数量会对手术室环境产生强烈的负面影响^[9]。研究表明,在手术的过程中每分钟门开启次数超过 0.6 次^[10]。其中 30% 的门开启和正在进行的手术无关^[11]。而研究也发现,手术过

程中 47% 的医护人员进出手术室是没有必要的^[10]。尽管手术过程中,门的开启是不可避免的,但是我们必须采取措施来最小化手术室内被污染物侵入的风险。

通过滑动门渗入房间的气流可能由不同因素引起的,例如室内外压差,温度差以及人员的进出。对于手术室铰链门,可能还会存在另一种由门的摆动引起的室内外空气交换^[12]。这个现象已经被之前的文献进行了详细的研究^[12-14],研究发现,铰链门在开启时会引起相对滑动门更多的空气交换。但是可能是由于空间的限制,在医院手术室中仍然广泛应用铰链门。但是对于空间更大的手术室而言更多的采用滑动门。

定量获得门开启后医护人员穿过隔离门引起的空气交换是非常困难的,尽管已经有一些研究探索了门的类型和人员流量对室内流场的影响^[14,15],但是很少有研究涉及到门打开人员进出这个瞬态过程。Hang 使用示踪气体和数值模拟研究了铰链门打开的过程对相邻房间空气交换量的影响^[16]。研究发现如果门只打开 30s,很难通过实验捕捉到相邻房间内空气交换的证据,而使用示踪气体技术时存在测试仪器响应频率不足的问题。而 CFD 软件可以较好地捕捉到这一过程。但是使用 CFD 进行模拟时存在边界条件不清晰的问题,在本研究中,我们使用超声波风速计测量了手术室门开启时门口瞬时的气流大小和方向,为数值研究门开启的过程提供了边界条件。

1 实验设置

1.1 送风和排风

这项研究在某医院的手术室中进行,手术室的平面图如图 1 所示。每个手术室都有独立的通风系统,而手术准备室的通风系统由另一套通风系统供给,手术室的走廊有独立的送排风系统。手术室和走廊室内空气温度都为 22℃。送风温度和室内空气温度相同,手术室的正压通过送排风风机进行调节,手术室相对走廊保持 20Pa 的正压。当手术室门关闭时,送风流量保持恒定。

手术室内采用垂直单向活塞送风。通风系统通过天花板中央的长方形区域(1.76m×1.74m)送风,房间送风量为 2700m³/h,相当于换气次数 18h⁻¹。排风口通过八个回风格栅进行,排风格栅分

布手术室入口墙上和对面墙上。其中,四个排风口位于天花板附近,单个尺寸 $38\text{cm} \times 10.5\text{cm}$,另外四个排风口位于天花板附近,单个尺寸 $18\text{cm} \times 10.5\text{cm}$ 。

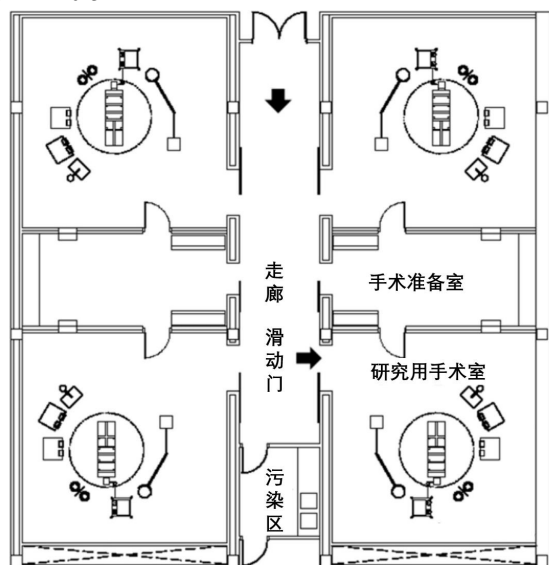


图1 手术室布置图

Fig.1 The layout of the operating room

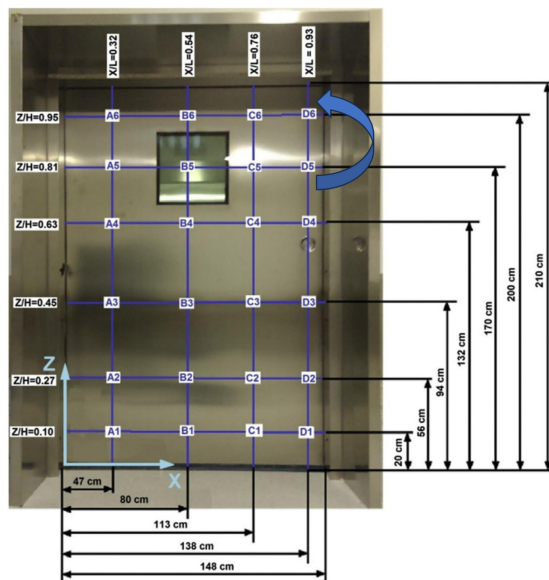


图2 手术室上测点布置图

Fig.2 The measuring points of the sliding door

1.2 门开启过程

手术室安装的是一扇滑动门,门在手术室外侧滑动。手术室门朝着 X 轴负方向打开,如图2所示。其中标注的箭头为门开的方向,手术室尺寸为 $1.48\text{m} \times 2.10\text{m}$ 。其中 X/L 为坐标点横向位置, Z/H 为坐标点纵向位置, L 与 H 分别为门的宽度与高度。在实际使用中,手术室门从打开到关闭需要 14s,

其中从关闭到完全打开需要 6s,完全打开保持 2s,然后从完全打开到完全关闭要 6s,如图3所示。门的运动速度为 0.27m/s 。在实验时,我们将门打开的时间点设置为 $t=0\text{s}$ 。

1.3 室内正压

手术室内正压的控制过程如下。在门关闭并达到稳定状态时,控制系统会维持手术室内的压力,使其比走廊高出 $20\text{Pa} \pm 1\text{Pa}$ 的正压状态。当门打开时,回风量减少至一半,而送风量不变。根据测试回风速度,排风流量在 6s 到 8s 内稳定。这个与门打开的时间段相符。当门再次完全关闭时,手术室内压力会增加至超过 20Pa 。此时,排风量会加大并恢复至初始状态。

2 测试

在研究手术室与走廊之间的门开关期间,手术室内其它门保持关闭状态。为了测量手术室与走廊的换气量,我们在走廊通往手术室的门上进行了开启和关闭过程中的瞬时速度场测试。本研究采用了超声波风速计同时测量三个方向上的速度分量(型号: Windmaster, 由英国 Gill 公司制造),风速测量范围 $0\text{--}10\text{m/s}$,测试误差 2%,风速分辨率为 0.005m/s ,采样频率为 10Hz。在本研究中,我们共进行了三个类型的测试,第一种为门开启和关闭过程;第二种为门开启,有一个人进入手术室后关门;第三种,门开启,一个人离开手术室后关门。

2.1 测试流程

三维超声波风速计布置在距离门 10cm 且与门平行的一个平面上,在这个平面上共布置了 24 个测点。图3展示了这些测点的位置与名称。在风速与压差计开始记录数据的 20s 后,手术室的门开始打开。在门开启和关闭的周期结束后,测试继续持续两分钟。在单次测试结束后,静置室内空气 2 分钟,再进行下一轮测试。

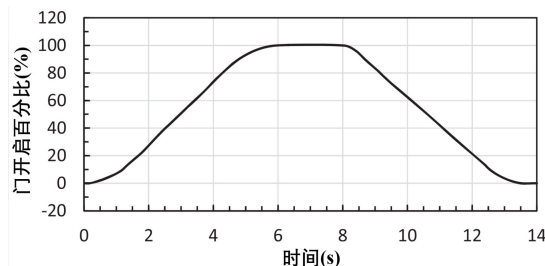


图3 门随时间开启过程

Fig.3 The process of door opening

2.2 测试结果重复性

为了评估测试结果的可重复性,本研究在门上取了D4测点测试了十次没有人员进出时门开启和关闭期间门上的速度变化,如图4所示。 v_y 的平均值用黑色轨迹表示,而灰色轨迹表示测试值的上下限。其它测点的结果经测试与该点类似。测试结果显示,测试值与平均值相比的平均标准偏差都低于0.025m/s。因此,在每个测量位置,我们重复测试三次取均值。

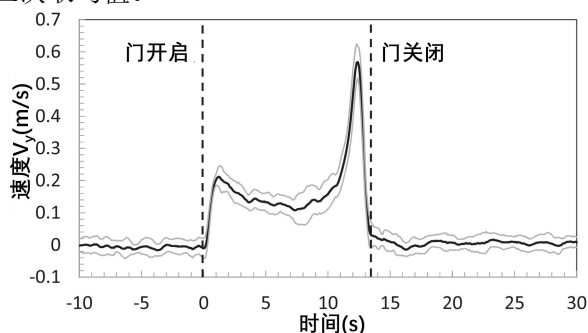


图4 没有人员进出时门开启和关闭期间门上的速度变化

Fig.4 The variation of the air velocity during the process of door opening and closing without foot traffic

2.3 门打开无人员进出的工况

图5显示了无人员进出时门开启和关闭过程中门上D6位置的风速变化。在 $t=0$ s前,三个方向的速度分量都可以忽略不计。由于D6位置的特殊性,当门一打开,D6位置的风速就会受到影响。D6位置Y方向的速度分量(v_y)垂直于门平面,当 $v_y>0$ 时,空气从手术室流向走廊。随着门的打开,速度增加到0.2m/s左右,然后逐渐减小。手术室门再次关闭时,D6的 v_y 迅速增加到0.5m/s。但是门关闭后,D6风速又逐渐减小。在这段时间内,气流一直保持从手术室流向走廊。D6位置的X方向的速度分量(v_x)变化趋势与 v_y 相似。D6位置的Z方向的速度分量(v_z)在整个过程中接近于0。这说明D6位置的气流运动可能是水平的。

值得注意的是 $t=0$ s时,室内外压差为20Pa,但是开门后,由于 v_y 的增加,室内空气流出。室内外压力差立即消失,为了保持室内负压,此时排风系统将手术室的排风减小到初始值的50%。当门的开口面积变大,通过门流出的总气流量为送排风之差,此时 v_y 的速度降低。当门关闭时,室内空气流出面积减少,而 v_y 的速度趋于增加。

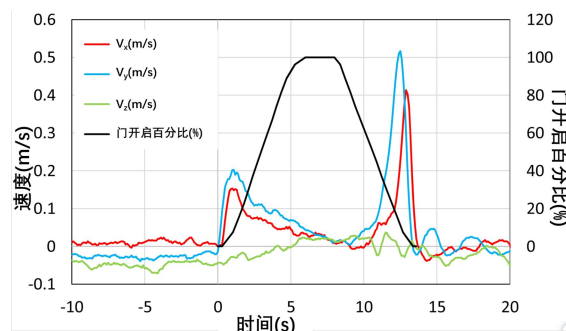


图5 无人员进出时门开启和关闭过程中门上D6位置的风速变化

Fig.5 The variation of air velocity during the process of door opening and closing without foot traffic

2.4 门打开有人员进出的工况

为了研究门打开后有人经过时门口的流速变化,我们让测试对象站在距离门口0.25L的位置静止,当门开启并达到 $X/L=0.32$ 的位置($t=3.7$ s)时开始行走,然后以稳定速度1m/s一直走,直到尽可能远离门口。图6为开始行走时的初始位置。为了不遮挡人员进出,有人进出时风速的测量仅在测试对象行走区域的两侧垂直区域($X/L=0.93$ 和 $X/L=0.54$)进行。对于每个测量点,我们分别进行了三次人员进出的测试,并在分析中使用了三次结果的平均值。

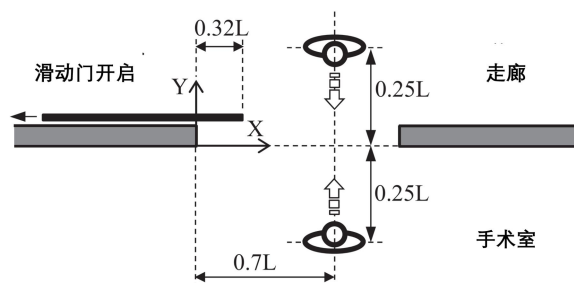


图6 人开始运动的位置

Fig.6 The position before human movement

3 结果分析

3.1 门的开关过程

图7展示了 $X/L=0.93$ 和 $X/L=0.33$ 两个位置的 v_y 随时间分布。在门的打开过程中, $X/L=0.33$ 所在位置受到门开的影响时间比 $X/L=0.93$ 的位置更小。根据图5可以看出气流流出量最大的位置发生在门的下部。在门的上部,流出量较小,甚至部分时间为流入状态。

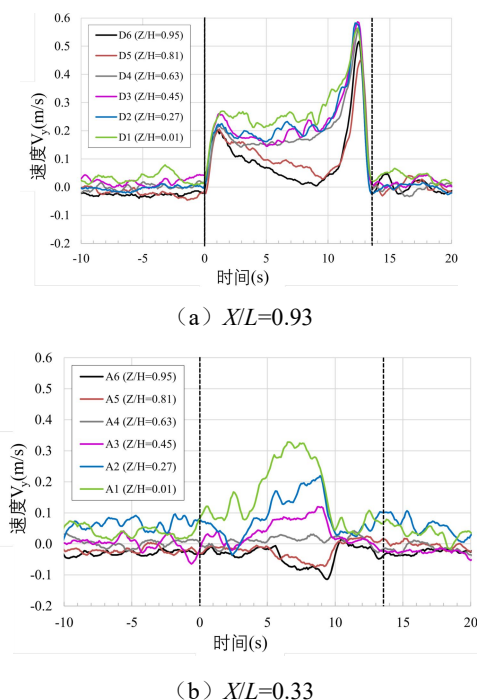
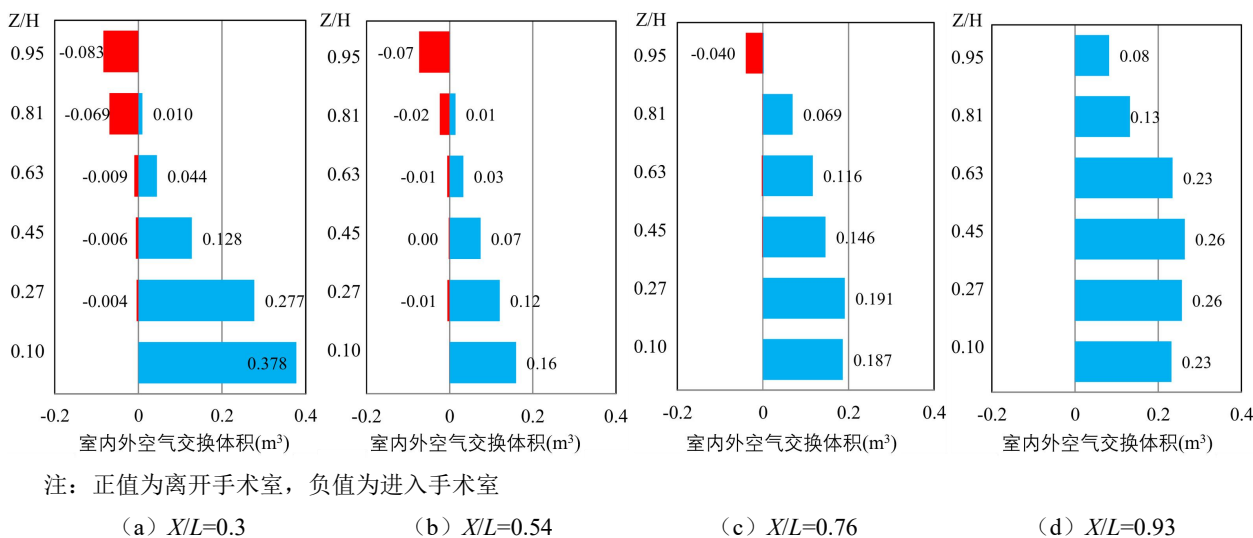
图7 不同位置的 v_y 在无人员进出的情况下随时间分布Fig.7 The variation of v_y without foot traffic

图8 手术室门在开启和关闭过程中无人员进出时每个区域的进出空气体积

Fig.8 The air volume of each area on the sliding door during the process of door opening and closing without foot traffic

3.2 门开关并有人经过

图9为门打开后人员进出过程中 v_y 的速度变化。我们同时对比了没有人员进出的工况。我们研究了靠近门右侧的垂直区域 $X/L=0.93$ 上的测点。图9(a)为D5处($X/L=0.93, Z/H=0.81$)的 v_y 速度变化。这个高度对应头部高度。在无人进出时,该区域的空气一直是从手术室向走廊流动。当人员

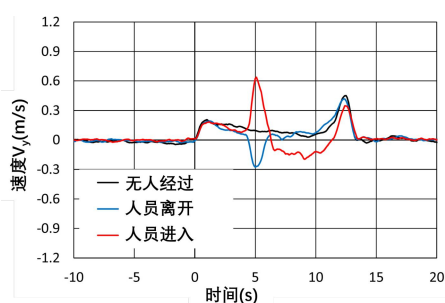
根据不同位置的速度分布,我们可以估算出穿过门的瞬时流量。将门划分成不同区域,假设每个区域风速相同,使用每个测点测得的速度与面积相乘,可以大致估算出穿过门的总流量。将所有区域的值相加,可计算出离开或进入手术室的总空气体积。例如,对于D6位置,气流始终是流出状态,将测得的速度与D6门上相应区域相乘并积分,可以得到从D6区域流出的空气体积为90L。

图8为手术室门在开启和关闭过程中无人员进出时每个区域的进出空气体积。根据图7可以看出,空气主要通过门的上部进入手术室,而大部分手术室中的空气通过门的下部流出,这是因为手术室中的气流为活塞通风,同时由于热羽流向上运动,手术室下部的空气压力比手术室上部来的大。根据研究发现当手术室门打开且无人员进出的14s区间内,室内气流向室外流出 3.13m^3 ,而此时室外向室内流入 0.32m^3 。

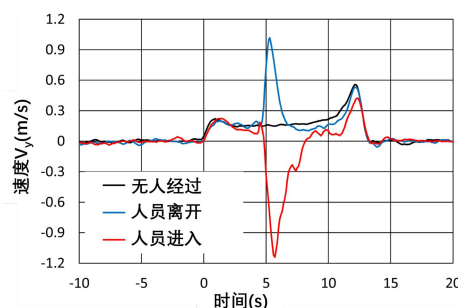
开始进入,开始速度场保持不变,当人通过门口时, v_y 突然增加至 0.6m/s ($t=5\text{s}$), 随后急剧下降到负值 ($6<t<11\text{s}$), 此时空气从走廊开始向手术室流入。当门快要完全关闭时 ($t>12\text{s}$), 速度场开始恢复正常。相反,当有人离开手术室时, v_y 突然下降至 -0.3m/s ($t=5\text{s}$), 随后急剧增加到正值。在 $4<t<6\text{s}$ 期间, 走廊中的空气开始进入手术室。

在人员胸口高度位置的 D4 ($X/L=0.93$, $Z/H=0.63$) 出现的情况完全不同, 如图 9 (b) 所示。在人进入时 v_y 下降至 -1.1m/s , 在 $4<t<8\text{s}$ 期间, 走廊的空气进入手术室。然而当人离开时, v_y 突然增

至 1.0m/s ($t=4\text{s}$), 此时从手术室流出的气流量开始增加。与 D5 处相比, 胸部高度 (D4) 速度最大值与最小值发生了颠倒, 这可能是因为与头部高度相比, 胸部高度与门框之间的间隙更小。



(a) D5 ($X/L=0.93$, $Z/H=0.81$)



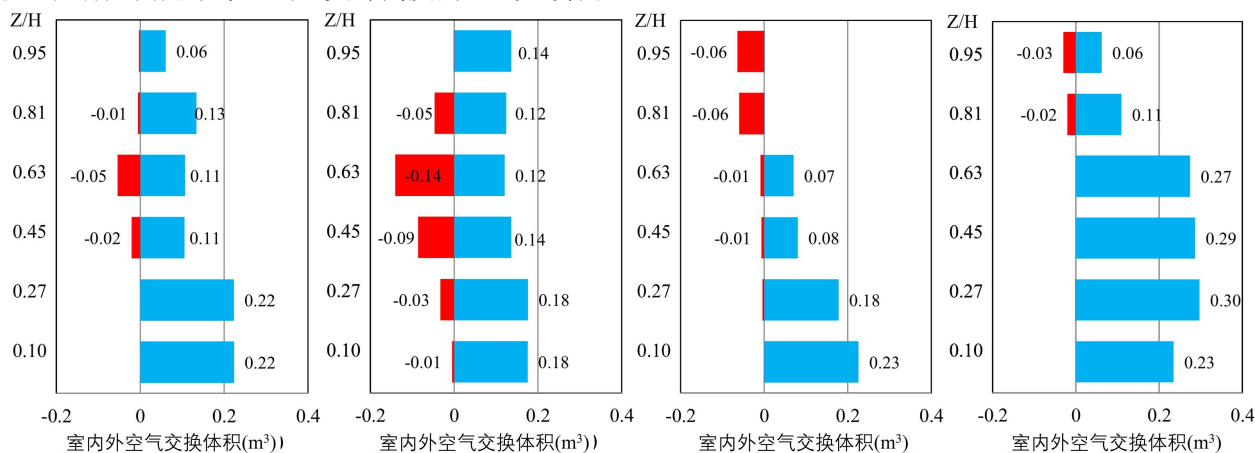
(b) D4 ($X/L=0.93$, $Z/H=0.63$)

图9 门打开后人员进出过程中 v_y 的速度变化

Fig.9 Comparison between velocity v_y with and without foot traffic

图 10 (a) 和 (b) 展示了门开后人员进入手术室时穿过门每个区域的体积。来自走廊的受污染的气体主要从人员和门框右侧的缝隙中流入手术室。同时在走廊中移动人员头部附近的气流也会受到人员影响, 向手术室内移动。而图 10 (c) 和 (d) 为门开后人员离开手术室时穿过门每个区域的体积。在有人离开手术室时, 头部高度的空气也会向

手术室中移动。根据研究发现当手术室门打开且有人进出的 14s 区间内, 室内气流向外流出 3.55m^3 , 而此时室外向室内流入 0.59m^3 。相对于无人员进出的工况, 有人进出会使得进入手术室的空气量增加 83.8%, 大约 0.269m^3 , 离开手术室的空气增加 13.6%, 大约 0.424m^3 。



注: 正值为离开手术室, 负值为进入手术室

(a) 人员进入, $X/L=0.54$

(b) 人员进入, $X/L=0.93$

(c) 人员离开, $X/L=0.54$

(d) 人员离开, $X/L=0.93$

图10 人员进入和离开手术室时门上各个区域的风量

Fig.10 Volume of air crossing the door in each region when a person enters and leaves

4 结论

本研究通过对实际使用的手术室门口中气流组织进行测试来评估滑动门的开关和人员通行过程对手术室门口瞬时速度场和室内外空气交换量

的影响。我们使用了三维超声波风速仪来测试气流的速度和方向。通过研究, 我们得出以下结论:

(1) 手术室门打开后, 即使没有人员进出, 室内外仍有空气交换, 走廊空气主要在门的上部进

入手术室,而手术室内的空气主要在门的下部离开手术室。

(2) 当门打开有人通过时,门口的气流情况会发生变化,人员的行进方向会明显影响室内外的空气交换量,当人员进入手术室时,靠近门框一侧的进气量较多,远离门框一侧进气量较少。而在有人离开时,走廊空气还是会进入手术室,但是进气量会少于人员进入手术室时。相对于无人员进出的工况,有人员进出会使得进入手术室的空气量增加 83.8%, 大约 0.269m^3 , 离开手术室的空气增加 13.6%, 大约 0.424m^3 。

总之,尽管我们已经在实验之前采取了许多措施来预防手术室外空气进入室内,但是手术室门开时人员进出仍然会导致外部空气进入手术室,若仅仅是门开关,并没有人员进出手术室,但是仍有部分走廊空气渗入手术室中。

参考文献:

- [1] MDA Melhado, JLM Hensen, M Loomans. Review of operating room ventilation standards[C]. Proceedings of the 17th Int. Air-conditioning and Ventilation Conference, Prague, Czech 17th May 2006-19th May 2006.
- [2] GB 50333-2002,医院洁净手术部建筑技术规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [3] CS Hayden Ii, GS Earnest, PA Jensen. Development of an Empirical Model to Aid in Designing Airborne Infection Isolation Rooms[J]. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 2007,4(3):198-207.
- [4] TT Chow, XY Yang. Ventilation performance in the operating theatre against airborne infection: numerical study on an ultra-clean system[J]. Journal of Hospital Infection, 2005,59(2):138-147.
- [5] WAC Zoon, MGM van der Heijden, et al. On the applicability of the laminar flow index when selecting surgical lighting[J]. Building and Environment, 2010,45(9):1976-1983.
- [6] H Brohus, KD Balling, D Jeppesen. Influence of movements on contaminant transport in an operating room[J]. Indoor air, 2006,16(5).
- [7] T-T Chow, J Wang. Dynamic simulation on impact of surgeon bending movement on bacteria-carrying particles distribution in operating theatre[J]. Building and Environment, 2012,57:68-80.
- [8] RJ Lynch, MJ Englesbe, L Sturm, et al. Campbell. Measurement of Foot Traffic in the Operating Room: Implications for Infection Control[J]. American Journal of Medical Quality, 2008,24(1):45-52.
- [9] S Scaltriti, S Cencetti, S Rovesti, et al. Risk factors for particulate and microbial contamination of air in operating theatres[J]. Journal of Hospital Infection, 2007, 66(4):320-326.
- [10] EB Smith, IJ Raphael, MG Maltenfort, et al. The Effect of Laminar Air Flow and Door Openings on Operating Room Contamination[J]. The Journal of Arthroplasty, 2013,28(9):1482-1485.
- [11] AE Andersson, I Bergh, J Karlsson, et al. Traffic flow in the operating room: An explorative and descriptive study on air quality during orthopedic trauma implant surgery[J]. American Journal of Infection Control, 2012, 40(8):750-755.
- [12] L Chang, X Zhang, Y Cai. Experimental determination of air leakage to pressurized main control room caused by personnel entering[J]. Building and Environment, 2016,99:142-148.
- [13] L Fontana, A Quintino. Experimental analysis of the transport of airborne contaminants between adjacent rooms at different pressure due to the door opening[J]. Building and Environment, 2014,81:81-91.
- [14] 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.
- [15] JW Tang, A Nicolle, J Pantelic, et al. Different Types of Door-Opening Motions as Contributing Factors to Containment Failures in Hospital Isolation Rooms[J]. PLOS ONE, 2013,8(6):0066663.
- [16] 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.