

文章编号: 1671-6612 (2021) 03-305-07

# 送风形式对咳嗽液滴在隔离病房传播影响的数值模拟

吴 鑫 郭晓亮 谢军龙 侯佳鑫 段梅子

(华中科技大学能源与动力工程学院 武汉 430074)

**【摘 要】** 为了降低传染性疾病在隔离病房传播感染的风险,给医护人员创造安全舒适的工作环境,以单条缝贴附送风、对侧条缝贴附送风、百叶风口送风以及置换送风 4 种送风形式为例对隔离病房的人体热舒适性、咳嗽液滴的排除效果及医护人员的感染风险进行了模拟研究。结果表明:在满足病人和医护人员热舒适性要求下,与其他 3 种送风形式相比,在置换送风的送风形式下,隔离病房的小粒径咳嗽液滴(5 $\mu\text{m}$ ~50 $\mu\text{m}$ )排除效果最好,医护人员的感染风险最低,建议隔离病房采用置换送风的送风形式。

**【关键词】** 咳嗽液滴;送风形式;热舒适性;扩散;感染风险  
中图分类号 TU834 文献标识码 A

## Numerical Simulation on Effect of Air Supply from on Spread of Cough Drops in Isolation Ward

Wu Xin Guo Xiaoliang Xie Junlong Hou Jiabin Duan Meizi

(School of Energy and Power Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, 430074)

**【Abstract】** In order to reduce the risk of infectious diseases in the isolation ward transmitted infections, and create a safe and comfortable working environment for medical staff, with a single seam tape attached to the wind, the contralateral to sew sticker attached to the wind, shutter tuyere air supply and replacement air distribution form of four kinds of air supply as an example to the isolation ward of the human body thermal comfort, cough drops out effect and medical personnel simulation research was conducted on the risk of infection. Results show that the meet the requirements of thermal comfort of patients and medical workers, compared with other forms of three kinds of air supply, in replacement of air supply air distribution form, the small particle size of the isolation ward cough drops (5 $\mu\text{m}$ ~50 $\mu\text{m}$ ) ruled out the best effect, medical staff the lowest risk of infection, suggested that the isolation ward in the form of displacement air supply.

**【Keywords】** Cough Drops; Ventilation Form; Thermal Comfort; Diffusion; Risk of Infect

作者简介: 吴 鑫 (1995.08-), 女, 在读硕士研究生, E-mail: 851914723@qq.com  
通讯作者: 谢军龙 (1970.02-), 男, 博士, 研究员, E-mail: hustxjl@163.com  
收稿日期: 2020-11-19

## 0 引言

自 SARS 疫情后,医院为控制病原体的传播以及减少呼吸道传染性疾病的交叉感染,其患者均安排在隔离病房内进行医治,医护人员存在着很大的交叉感染风险<sup>[1]</sup>。合理的隔离病房气流组织有助于加快咳嗽液滴在隔离病房的排除,消除交叉感染的

隐患,为医护人员提供更安全的工作环境<sup>[2]</sup>。

国内外学者对隔离病房的气流组织设计进行了一系列研究<sup>[3]</sup>。Li 等人<sup>[4]</sup>采用实验测量和数值模拟的方法对比分析了置换通风、混合通风和下送风三种不同通风方式下病房污染物的去除效果,其中置换通风效果最好。虽然置换通风是一种较好的控

制下部污染的气流组织方式,但鉴于传染病房医疗设备等实际条件,有学者提出了贴附通风气流组织方式<sup>[5]</sup>。李安桂等人<sup>[6]</sup>模拟了不同贴附通风方式下的病房室内病原微生物的排除效果,其中采用单风口竖壁贴附加导流板送风的气流组织形式污染物排除效果更好。Aganovic 等人<sup>[7]</sup>针对工作区环境分隔与控制提出了可用于控制综合医院病房污染空气传播的工作区保护通风方式。一些国外指南建议在隔离病房中使用气流向下通风系统<sup>[8]</sup>。我国 GB/T 35428—2017《医院负压隔离病房环境控制要求》规定负压隔离病房的送风口应设置在房间上部,排风口应设置在患者头部附近,以利于污染空气就近尽快排除<sup>[9]</sup>。

综上所述,目前对于隔离病房气流组织设计规定还在探索阶段,虽然国内外学者对隔离病房气流组织进行了一些研究,但在其气流组织设计上并未有统一结论。为了能够更好地解决医护人员交叉感染风险的问题,还需对隔离病房不同气流组织方式进行更全面的分析讨论,为病房气流组织设计提供有效建议,从而优化病房气流组织形式,达到在减少呼吸道传染性疾交叉感染的基础上,同时兼顾医护人员和病患的热舒适度的效果。

笔者对隔离病房在 4 种送风形式下病人咳嗽液滴的传播扩散进行了模拟,并分析了人体热舒适性、咳嗽液滴的扩散及排除效果和医护人员感染风险,为隔离病房气流组织的设计提供意见。

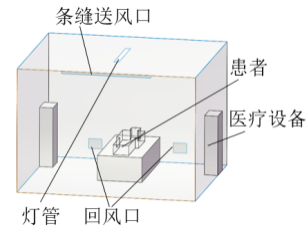
## 1 模型与算例设置

### 1.1 物理模型

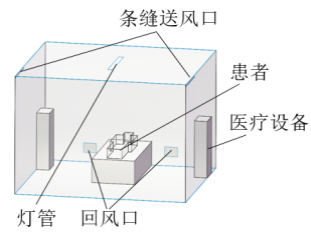
笔者采用单人隔离病房为研究对象,在隔离病房中心设有一个病床,病床两侧各有一台医疗设备,病人简化为“十”字架模型。4 种送风形式分别为单条缝贴附送风、对侧条缝贴附送风、百叶风口送风以及置换送风,送、回风口的布置如图 1 所示。隔离病房以及风口的具体尺寸如表 1 所示。

表 1 隔离病房及各风口尺寸

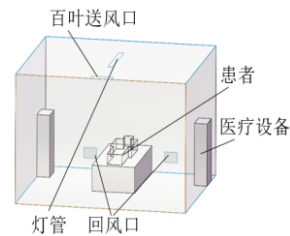
项目	参数/mm
房间尺寸	3500×4000×2500
病床尺寸	1000×2000×500
条缝送风口	50×2000/50×1000
百叶风口	200×500
置换送风口	200×1200
回风口	200×300



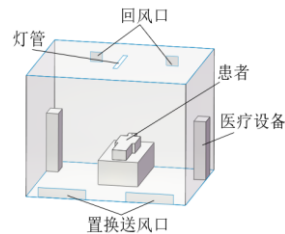
(a) 单条缝贴附送风



(b) 对侧条缝贴附送风



(c) 百叶风口送风



(d) 置换送风

图 1 送风形式方案设计

Fig.1 Air supply form scheme design

### 1.2 算例设置

将各送风口设置为速度进口,回风口为自由出流;将患者(咳嗽液滴)嘴巴模型设置为速度进口;咳嗽动作持续时间设置为 0.4s,咳嗽气流的最大速度为 9m/s,咳嗽液滴速度曲线如图 2 所示<sup>[10]</sup>;喷出的咳嗽液滴温度为 309.65K<sup>[11]</sup>;咳嗽液滴的蒸发组分(水)的体积分数为 87.5%<sup>[12]</sup>;其他边界条件及送风参数如表 2 所示。

表 2 边界条件及送风参数

项目	参数
人体散热/W	108
灯管散热/W	40
医院设备散热/W	2×70
送风量/(m <sup>3</sup> /h)	420
换气次数/(次/h)	12
送风温度/°C	22
送风温差/°C	2
送风相对湿度/%	50

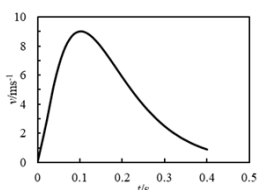


图 2 咳嗽液滴速度曲线<sup>[10]</sup>

Fig.2 Cough droplet velocity curve<sup>[10]</sup>

### 1.3 计算流程

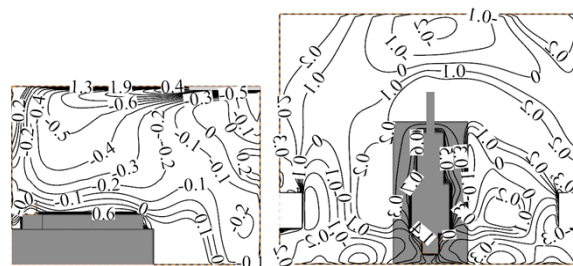
通过稳态计算得到各送风形式的初始稳定流场, 然后通过非稳态方法模拟咳嗽液滴在隔离病房的传播扩散过程。在咳嗽动作过程中 (0~0.4s), 患者嘴巴模型设置为速度进口, 并加载 UDF 实现图 2 所示的咳嗽液滴速度曲线。咳嗽动作结束后, 将患者嘴巴模型设置为壁面条件, 并保持此状态直至计算结束, 非稳态过程采用变步长求解。

## 2 人体热舒适性分析

将衡量人体舒适程度的 PMV 数值通过 UDF 在软件中进行模拟, 其结果如图 3 所示。

从图 3 可以看出病房内的 PMV 数值分布受送风形式的影响比较大。在 4 种送风形式中, 病房的 PMV 值基本在推荐范围之内。但是在单条缝贴附送风、对侧条缝贴附送风及百叶风口送风形式下, 射流区域及气流冲撞区域 PMV 数值接近甚至低于-1, 这说明此区域人的舒适度较低。但只有在百叶风口送风条件下, 医护人员才可能必须穿过射流区域, 此时新风会吹到医护人员, 引起医护人员的身体不舒服。因此, 不建议使用百叶风口送风形式。对于置换送风, 房间顶部虽然存在一层薄薄的热空气层, 但不是医护人员的活动区域。所以, 即使该

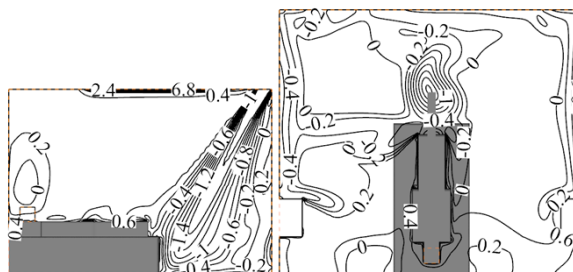
区域的 PMV 数值较高, 也基本不影响人体的热舒适度。



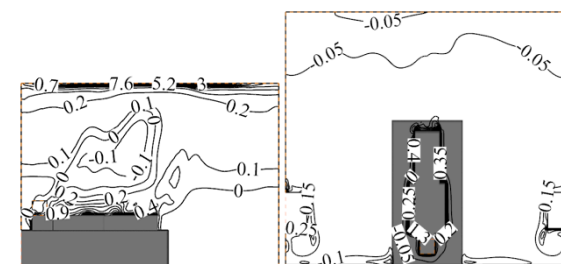
(a) 单条缝贴附送风



(b) 对侧条缝贴附送风



(c) 百叶风口送风



(d) 置换送风

图 3 PMV 等值线图

Fig.3 PMV contour map

## 3 咳嗽液滴扩散及排除效果分析

### 3.1 送风形式与咳嗽液滴扩散分析

由图 4 可见, 单条缝贴附送风的送风形式下: 在  $t=1s$  时, 咳嗽液滴在患者头部正上方呈团状分布, 随后受环形气流的影响分成 2 团分别向病床两

侧扩散：在  $t=50s$  时，咳嗽液滴与病房内空气充分混合，分布在整個隔离病房；在  $t=1000s$  时，病房内只零星分布着极少量的咳嗽液滴，只有送风口下方地面有一小团液滴群，这说明该送风形式在隔离病房这处的送风可及性较差。

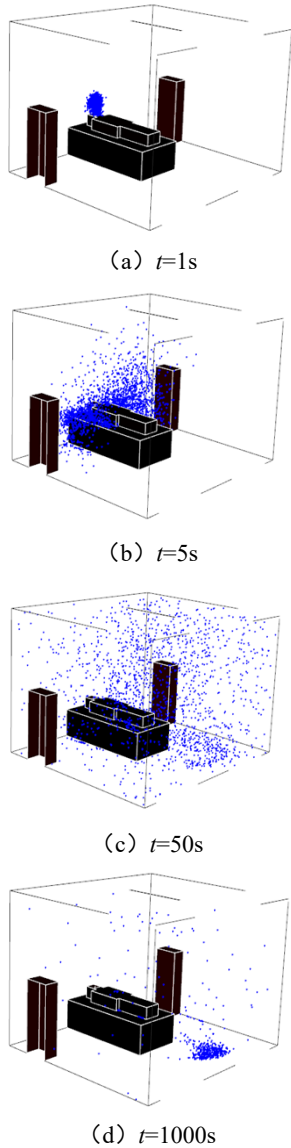


图 4 单条缝贴附送风液滴扩散图

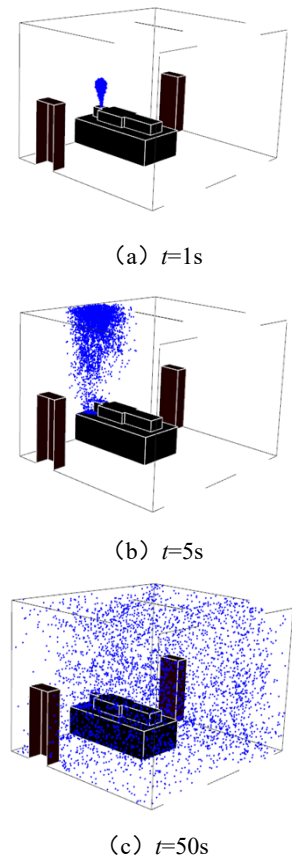
Fig.4 Air droplet diffusion diagram attached to single seam

由图 5 可见，对侧条缝贴附送风的送风形式下：在  $t=1s$  时，咳嗽液滴在患者头部上方受上升气流的影响呈水滴状分布；在  $t=5s$  时，咳嗽液滴随气流撞击到房顶后开始向两侧扩散，接着被向后流动的气流裹挟着与混乱涡流汇合后，咳嗽液滴向病房后下方扩散；在  $t=50s$  时，咳嗽液滴均匀分布在整

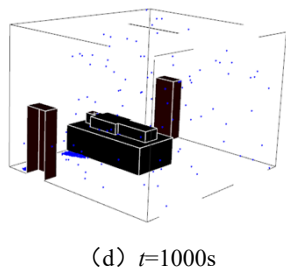
个病房内；在  $t=1000s$  时，只有医疗设备靠近回风口一侧的角落、患者头部周围和回风口旁的地面存在一小团液滴群，这说明该送风形式在隔离病房这几处的送风可及性较差。

由图 6 可见，百叶风口送风的送风形式下：在  $t=1s$  时，咳嗽液滴在患者头部上方呈矮小椭球形分布；在  $t=5s$  时，受向下气流影响，咳嗽液滴向病床两侧下方扩散，随后受新风撞击地面反弹向上流动的气流影响，咳嗽液滴开始向病房上部扩散；在  $t=1000s$  时，只有送风口一侧的病房拐角地面存在 2 小团液滴群，这说明该送风形式在隔离病房这 2 处的送风可及性较差。

由图 7 可见，置换送风的送风形式下：在  $t=1s$  时，咳嗽液滴在患者头部上方呈棒状分布，并随气流向斜上方扩散；在  $t=5s$  时，咳嗽液滴随气流向病房回风口一侧扩散；在  $t=50s$  时，咳嗽液滴基本分布在病床一侧，扩散范围不大；在  $t=1000s$  时，只有患者周围和置换送风口中间及病床两侧的地面存在液滴群，这说明该送风形式在隔离病房这几处的空气可及性较差。



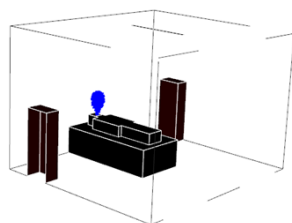
(c)  $t=50s$



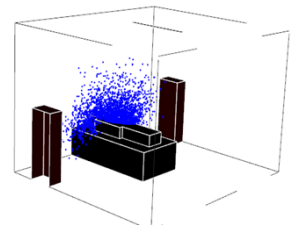
(d)  $t=1000s$

图 5 对侧条缝贴附送风液滴扩散图

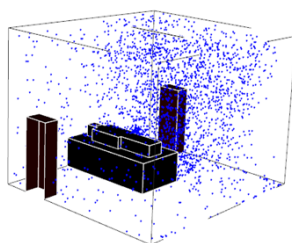
Fig.5 The air droplet diffusion diagram is attached to the opposite side slit



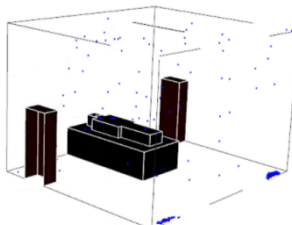
(a)  $t=1s$



(b)  $t=5s$



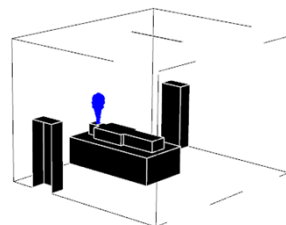
(c)  $t=50s$



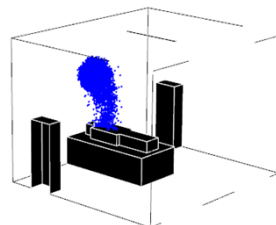
(d)  $t=1000s$

图 6 百叶风口送风液滴扩散图

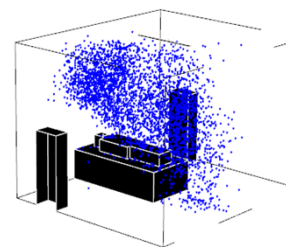
Fig.6 Diffusion diagram of droplet in louver air supply



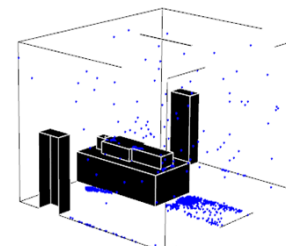
(a)  $t=1s$



(b)  $t=5s$



(c)  $t=50s$



(d)  $t=1000s$

图 7 置换送风液滴扩散图

Fig.7 Displacement air supply droplet diffusion diagram

### 3.2 咳嗽液滴排除效果分析

本文采用无量纲液滴数目来评价送风形式排除咳嗽液滴的效果。其公式为:

$$N_q = \frac{n}{n_{\max}} \quad (1)$$

式中,  $N_q$  为无量纲液滴数目;  $n$  为当前时间液滴数目;  $n_{\max}$  为最大液滴数目, 即进入房间内的液滴总数。



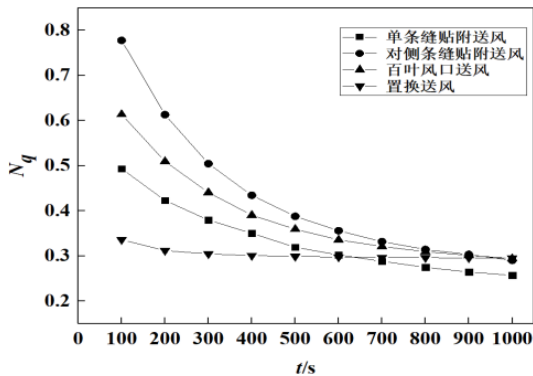


图 8 无量纲液滴数目统计图

Fig.8 Number of dimensionless droplets

图 8 为不同送风形式的无量纲液滴数目统计图。由图 8 可知，4 种送风形式下，无量纲液滴数目都随时间的增加在减少。1000s 时，4 种送风形式的无量纲液滴数目基本维持不变，且基本相同，相差很小。但是，置换送风一开始的无量纲液滴数目就比较小，所以下降幅度比较小，其曲线基本为一条水平线。而其余 3 种送风形式刚开始的无量纲液滴数目比较大，所以在 1000s 内减少趋势比较明显。总体来看，置换送风的无量纲数目在患者咳嗽后到 1000s 期间都维持在一个较低且稳定的无量纲液滴数目大小，即能较快地把患者咳嗽液滴排出隔离病房外。

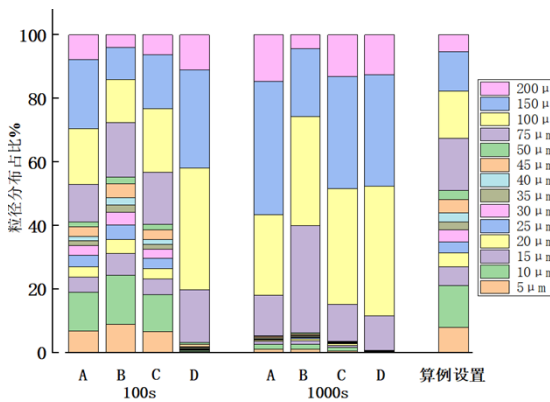


图 9 液滴粒径分布图

Fig.9 Droplet size distribution

图 9 为 4 种送风方式下在 100s 和 1000s 时隔离病房内液滴的粒径分布示意图 (A 为单条缝贴附送风, B 为对侧条缝贴附送风, C 为百叶风口送风, D 为置换送风)。由图 9 可知，100s 时，单条缝贴附送风形式和百叶风口送风形式的液滴粒径分布差不多，说明该时间段这两种送风形式对不同粒径的排除能力基本是相同的。但单条缝贴附送风形式无

量纲液滴数目较小，所以单条缝贴附送风形式液滴排除能力比百叶风口送风形式好。而置换送风形式下，无量纲液滴数目是最小的，且此时小粒径咳嗽液滴 (5μm~50μm) 大部分都被排出去了，所以置换送风形式咳嗽液滴排除最快。到了 1000s 时，4 种送风形式的无量纲液滴数目趋于相同，此时隔离病房基本都只存留大粒径咳嗽液滴 (>50μm)，但置换送风形式下小粒径咳嗽液滴基本排除。

在 4 种送风形式中，因为置换送风在隔离病房内形成稳定缓慢向上流动的气流，且小粒径咳嗽液滴 (5μm~50μm) 的重力作用可忽略不计，所以小粒径咳嗽液滴基本都可被上升气流裹挟至回风口并排出病房。而其余 3 种的送风形式都是上送下回的方式。而小粒径咳嗽液滴由于质量较小，所以易受气流影响扩散流动到病房内的各个位置，从而导致随主流扩散到回风口及排出病房外的小粒径咳嗽液滴数量较少。因此，置换送风排出小粒径咳嗽液滴的效果比其余 3 种送风形式好。

所以，置换送风相比于其余 3 种送风形式下的咳嗽液滴排除效果比较好。

#### 4 送风形式与医护人员感染风险评价分析

本文在前人优化的 Dose-response 模型<sup>[13]</sup>基础上，把暴露水平设定为医护人员的呼吸区域、咳嗽次数简化为一次、将观察时间离散为多个时间步进行积分以及引入蒸发因素这四个方面对 Dose-response 模型做了进一步改进，建立 Medical Staff Dose-response 模型 (简称 MSDR 模型)，对医护人员的感染风险进行评价。

MSDR 模型呼吸区域内的感染评价为：

$$P_l(z, t_l) = 1 - \exp \left( - \sum_{j=1}^m r_j \beta_j c p \sum_{i=1}^l \sum_{k=1}^n \frac{4\pi d_{0k}^3 f(t) \Delta t_i}{3HS} \right) \quad (2)$$

式中  $P_l(z, t_l)$  为  $l$  个时间步长内的感染风险值  $m$  为液滴粒径总数； $d_{0k}$  为第  $k$  个液滴的初始直径， $m$ ； $f(t)$  为病原体在空气中的存活能力； $\Delta t_i$  为第  $i$  个时间步长； $H$  为呼吸区域的竖直高度，0.2m<sup>[14]</sup>； $S$  为人体呼吸区域的水平面积，即为隔离病房的占地面积，m<sup>2</sup>； $p$  为医护人员轻微运动的短期呼吸量，8.6L/min<sup>[15]</sup>； $c$  为液滴初始病原体浓度， $6.3 \times 10^6$  TCID<sub>50</sub>/mL<sup>[16]</sup>； $\beta_j$  为携带病原体的液滴在肺泡区域

的沉积分数:  $r_j$  为病原体的传染性。  $r_j$  与  $\beta_j$  参数均与液滴的粒径大小有关。

其中, 液滴中病原体的存活能力、传染性及在肺泡区域的沉积情况参考公式 (3) - (5) [17,18]。

$$f(t) = 0.2 \cdot (0.975)^{\frac{t}{60}} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} r_j &= 0.387 & d_p \leq 3\mu\text{m} \\ r_j &= 0.0031 & d_p > 3\mu\text{m} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\beta_j = 2.5687e^{-0.819d_p} \quad (5)$$

通过 UDF 将感染风险评价模型的相关公式以及参数加载到模拟过程中, 从而得到 4 种送风形式下医护人员的感染风险。

由图 10 可知, 4 种送风形式的感染风险都随着时间不断增大。咳嗽液滴暴露时间越长, 医护人员被感染的可能性越大。在置换送风下, 医护人员感染风险的增加趋势最为缓慢, 而其余 3 种送风形式的医护人员感染风险的增加幅度比较大。在 40s 后, 其余 3 种送风形式的感染风险都大于置换送风, 且随时间增加, 其与置换送风的感染风险差值不断增大。置换送风在预防医护人员感染方面的优势随时间增加越发突出。到了 1000s 时, 置换送风下医护人员的感染风险约是其余 3 种的 7.8%~15.2%。又置换送风的小粒径液滴 ( $5\mu\text{m}\sim 50\mu\text{m}$ ) 排除效果最好, 而小粒径液滴在肺泡区域有着较大的沉积分数与传染性, 所以, 置换送风可以有效消除医护人员交叉感染的隐患。

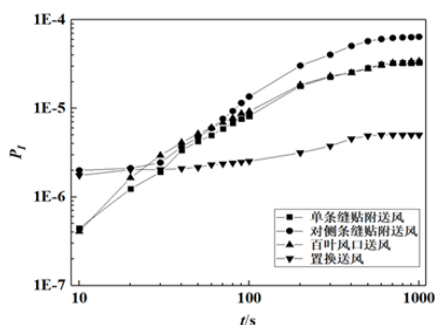


图 10 医护人员感染风险

Fig.10 Infection risk of health care workers

## 5 结论

笔者对隔离病房内患者咳嗽液滴的扩散进行了模拟, 同时对比分析了 4 种送风形式下的人体热

舒适性、咳嗽液滴扩散及排除效果和医护人员感染风险。结果表明, 置换送风在控制病原体的扩散, 减少医护人员的交叉感染风险方面有着较好的效果, 同时又满足隔离病房内的人体热舒适性要求。所以隔离病房建议采用置换送风的送风形式, 来为医护人员创造安全舒适的工作环境。

## 参考文献:

- [1] Jeong-Yeon Park, Min ki Sung. A Study on the Contaminant Dispersion from Isolation Ward under Abnormal Operation of Facilities[J]. Energy Procedia, 2015,78.
- [2] 龙洋波, 邢哲理, 温旭怡, 等. 可正负压切换隔离病房通风空调设计探析[J]. 制冷与空调, 2019,33(01):44-48,61.
- [3] 康智强, 樊宏博, 张亿先, 等. 隔离病房通风空调设计研究现状[J]. 节能, 2015,34(8):12-14,2.
- [4] H Q, Li Y, Nielsen P V. Dispersion of exhaled droplet nuclei in a two-bed hospital ward with three different ventilation systems[J]. Indoor Air, 2006,16(2):111-128.
- [5] 李安桂. 贴附通风理论及设计方法[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020:16-35.
- [6] 李安桂, 张莹, 韩欧, 等. 隔离病房的环境保障与气流组织有效性[J]. 暖通空调, 2020,50(6):26-34.
- [7] Amar Aganovic, Marie Steffensen, Guangyu Cao. CFD study of the air distribution and occupant draught sensation in a patient ward equipped with protected zone ventilation[J]. Building and Environment, 2019,162.
- [8] Jovan Pantelic. Designing for Airborne Infection Control[J]. ASHRAE JOURNAL, 2019,61(7):64-65.
- [9] GB/T 35428-2017, 医院负压隔离病房环境控制要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017:1-4.
- [10] Gupta J K, Lin C, Chen Q. Transport of expiratory droplets in an aircraft cabin[J]. Indoor Air, 2011,21(1):3-11.
- [11] Gao N, Niu J, Morawska L. Distribution of Respiratory Droplets in Enclosed Environments under Different Air Distribution Methods[J]. Building Simulation, 2008,1(4):326-335.
- [12] Xudong Yang, Jelena Srebric, Xianting Li, et al. Performance of three air distribution systems in VOC removal from an area source[J]. Building and Environment, 2004,39(11).

(下转第320页)