

# 隔离病房隔离效果的研究(3)

中国建筑科学研究院 许钟麟<sup>☆</sup> 张益昭 王清勤 刘华  
温风 冯昕 张彦国 赵力  
王荣 牛维乐 姚丹

中国人民解放军第 302 医院 于玺华

广东申菱空调设备有限公司 易新文 欧燕川 卢伟明

**摘要** 基于大气尘实验,研究了隔离病房开门时温差对污染物外泄的作用。结果显示,温差作用是一般压差作用抵消不了的;2℃温差时污染物交换量比 0℃温差时增加 50%左右;缓冲室可对温差作用引起的污染物交换起到 15~30 倍的动态隔离作用。

**关键词** 隔离病房 隔离效果 温差 大气尘 缓冲室

## Study on isolation effects of isolation wards (3)

By Xu Zhonglin<sup>★</sup>, Zhang Yizhao, Wang Qingqin, Liu Hua, Wen Feng,  
Feng Xin, Zhang Yanguo, Zhao Li, Wang Rong, Niu Weile, Yao Dan,  
Yu Xihua, Yi Xinwen, Ou Yanchuan and Lu Weiming

**Abstract** Based on the atmospheric dust experiment, researches the contaminant air exchange caused by the temperature difference while opening the door of isolation wards. Concludes that the undesired effect of temperature difference could not be eliminated just by the negative pressure difference between adjacent rooms, that the contaminant air exchange would increase about 50% in the temperature difference of 2℃ than that in the temperature difference of 0℃, and that such contamination could be reduced to about 1/31~1/16 with the help of buffer rooms.

**Keywords** isolation ward, isolation effect, temperature difference, atmospheric dust, buffer room

★ Institute of Air conditioning, China Academy of Building Research, Beijing, China

①

在本课题组已经发表的分论文<sup>[1-3]</sup>和总论文(1),(2)<sup>[4-5]</sup>中,论述了对隔离病房隔离原理、室内气流组织和室内送风口位置匹配、缓冲室的作用以及压差的影响的理论研究和实验结果,二者有很好的吻合性。在本文中,将讨论温差作用的实验研究情况。

### 1 对温差作用的认识

在本课题的分论文<sup>[2]</sup>和总论文(1)<sup>[4]</sup>中已从理论上对温差促进污染物外泄的作用作了详细讨论,得出以下 3 个结论。

1) 温差(无论大小)的作用是不可被抵消的,因为它是正、反双向对流性质。

2) 开门以后,温差对流的作用要比开门后正、

负压的压出或吸入作用大得多。

3) 削弱这种作用靠封、堵(如用高压差产生反向气流)是难以收效的,应该合理地引导,使外泄的污染物得到稀释和处理。

在国外标准中,阐述温差作用的极少,远比不上对于压差作用的重视。在美国疾病预防和控制中心(CDC)1994 年发布的《卫生保健设施中防止结核分支杆菌传播指南》中仅指出病房内气流组织方式会受到大气温差的影响<sup>[6]</sup>,而未提及温差对

①<sup>☆</sup> 许钟麟,男,1935 年 3 月生,研究生,研究员  
100013 北京市北三环东路 30 号空调所  
(010) 84272233-2663  
收稿日期:2006-03-03

病房内外污染物传播的作用。ASHRAE 手册中提到了这个问题,但仅说明当门开启后,“两个区域之间的温差会导致对流,就会发生自然的空气交换”<sup>[7]</sup>,而未作深入、定量的剖析。

2000年国外学者给出过如图1,2所示的观测结果<sup>[8]</sup>,但也没有再深入研究下去,未将温差作用提到应有的高度。

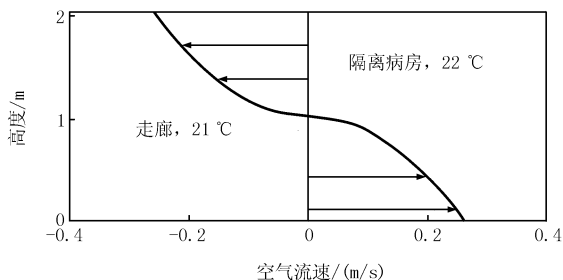


图1  $\Delta t=1^\circ\text{C}$ 时门口的对流

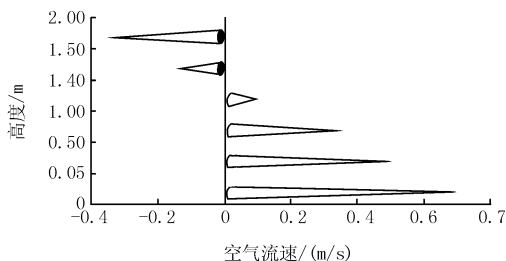


图2  $\Delta t=3.6^\circ\text{C}$ 时门口的对流

图1,2显示,温差作用可引起 $0.3\sim 0.6\text{ m/s}$ 速度的气流,互为反向流动,该文献指出这相当于 $600\text{ m}^3/\text{h}$ 的风量,并认为除非有 $10\text{ h}^{-1}$ 的换气次数(相当于 $1\ 200\text{ m}^3/\text{h}$ 换气量),否则污染物会从房间泄漏至走廊。但是该文献作者并未考虑到在病房这样的房间,很少有可能达到这样大的排风量,即在正常情况下,压差无能力抵消温差形成的对流,就如本课题分论文<sup>[2]</sup>中所讨论过的。

图2显示由于 $\Delta t$ 变大,对流速度也提高了。

为了对本课题提出的温差作用进行验证,进行了大气尘实验。

## 2 大气尘实验

### 2.1 实验装置

实验是在实验用隔离病房<sup>[4]</sup>中进行的。

1) 病房内排风量保持不变(排风机频率为 $50\text{ Hz}$ )。

2) 通过变频器调整送风量,保持要求的压差,病房最小送风量为 $243.5\text{ m}^3/\text{h}$ ,相应换气次数为

$8.8\text{ h}^{-1}$ ;缓冲室送风量为 $379\text{ m}^3/\text{h}$ ,相应换气次数为 $60.64\text{ h}^{-1}$ 。

3) 病房内的送风为经过过滤器处理的全新风,为增加含尘浓度进行适当的发烟,然后监测含尘浓度至基本稳定。

4) 缓冲室充分自净,达到 $1\ 000$ 级洁净度水平。

5) 调整加热装置,保持要求的温差。

6) 从病房至缓冲室,1人出,开关门历时约 $2\text{ s}$ 。

7) 病房至缓冲室的门关闭后,立即同时启动两台同型号粒子计数器(通过在病房浓度下进行对比,两台计数器计数偏差在 $\pm 5\%$ 以内),记录3次读数,每次 $1\text{ min}$ 。

实验仪器:热球式风速仪,测风速,计算风量;MARKII微压计,测压差;温湿度计,测温度;BCJ-1激光粒子计数器,测含尘浓度。

## 2.2 实验工况

实验工况如表1所示。

表1 实验工况

| 工况 | 病房相对缓冲室的压差/Pa |         | 缓冲室相对外间的压差/Pa |         | 病房温度/ $^\circ\text{C}$ | 缓冲室温度/ $^\circ\text{C}$ | 病房相对缓冲室的温差/ $^\circ\text{C}$ |
|----|---------------|---------|---------------|---------|------------------------|-------------------------|------------------------------|
|    | 病房开门前         | 病房开门过程中 | 病房开门前         | 病房开门过程中 |                        |                         |                              |
| 1* | -14           | 0       | -2~-1         | 未记      | 17.0                   | 16.9                    | 0.1                          |
| 1  | -10           | 0       | 1~2           | 0       | 17.0                   | 16.8                    | 0.2                          |
| 2  | -10           | 0       | 1~2           | 1       | 20.8                   | 17.8                    | 3.0                          |
| 3  | -10           | 0       | 1~2           | 1       | 22.7                   | 17.7                    | 5.0                          |

## 2.3 实验结果(见表2~5)

表2 工况1\*实验结果

|                         | 采样时间  | 缓冲室粒子( $\geq 0.5\ \mu\text{m}$ )浓度/(粒/L)                 | 病房粒子( $\geq 0.5\ \mu\text{m}$ )浓度/(粒/L)      |
|-------------------------|---|--|--|
|                         |   | 开门前  | 第1 min: 21.2<br>第2 min: 11.7<br>第3 min: 18.4 |
| 1人出, 开关门历时 $2\text{ s}$ | 第1 min: 1 223.0<br>第2 min: 27 273.9<br>第3 min: 52 579.9<br>第4 min: 67 668.6<br>第5 min: 75 851.9 | 57 167.1<br>56 951.9<br>58 292.9<br>61 213.8<br>65 801.8 |  |

表3 工况1实验结果

|                         | 采样时间  | 缓冲室粒子( $\geq 0.5\ \mu\text{m}$ )浓度/(粒/L) | 病房粒子( $\geq 0.5\ \mu\text{m}$ )浓度/(粒/L)      |
|-------------------------|---|--|--|
|                         |   | 开门前                                      | 第1 min: 11.3<br>第2 min: 14.5<br>第3 min: 11.0 |
| 1人出, 开关门历时 $2\text{ s}$ | 第1 min: 1 390.5<br>第2 min: 1 100.7<br>第3 min: 718.4 | 35 347.3<br>34 338.5<br>33 899.6         |  |

表4 工况2实验结果

| 采样时间          | 缓冲室粒子( $\geq 0.5 \mu\text{m}$ )浓度/(粒/L) | 病房粒子( $\geq 0.5 \mu\text{m}$ )浓度/(粒/L) |          |
|---------------|---|--|----------|
| 开门前           | 第1 min                                  | 6.4                                    | 60 786.9 |
|               | 第2 min                                  | 2.8                                    | 53 939.9 |
|               | 第3 min                                  | 9.9                                    | 47 120.5 |
| 1人出, 开关门历时2 s | 第1 min                                  | 1 629.3                                | 36 156.9 |
|               | 第2 min                                  | 1 487.6                                | 33 017.7 |
|               | 第3 min                                  | 935.0                                  | 30 708.5 |

表5 工况3实验结果

| 采样时间          | 缓冲室粒子( $\geq 0.5 \mu\text{m}$ )浓度/(粒/L) | 病房粒子( $\geq 0.5 \mu\text{m}$ )浓度/(粒/L) |          |
|---------------|---|--|----------|
| 开门前           | 第1 min                                  | 9.5                                    | 60 527.6 |
|               | 第2 min                                  | 7.8                                    | 57 895.4 |
|               | 第3 min                                  | 12.4                                   | 49 262.9 |
| 1人出, 开关门历时2 s | 第1 min                                  | 2 438.9                                | 37 917.0 |
|               | 第2 min                                  | 2 576.3                                | 34 108.1 |
|               | 第3 min                                  | 1 762.5                                | 31 561.8 |

### 3 分析

3.1 表2记录的是一次并不成功的实验。实验人员在进行实验前的工况调整中,仅注意到了缓冲室对病房的相对压差,并没有注意到此时缓冲室对净化通风系统的外间也呈很小的负压( $-2 \sim -1 \text{ Pa}$ )。由于此时缓冲室的自净系统处于运行状态,所以微小负压在很长时间自净作用下并未形成高的室内浓度(见表2开门前缓冲室浓度)。但病房门打开后,温差对流所引起的污染物泄漏,完全被“湮没”在开门后由于缓冲室与外间之间的相对负压所引起的泄漏中,所以使得实验结果完全无效。但这一结果也从另一角度验证了笔者在总论文(2)<sup>[5]</sup>中所作的分析,即在隔离病房中一味追求过大的相对负压的意义虽然并不大,但负压绝对是必要的,即使非常小。一旦成为正压(如本工况中外间(可比作病房)相对于缓冲室的微小正压),外间对于缓冲室的污染物泄漏量将是非常大的。

3.2 根据分论文<sup>[2]</sup>的分析,开门后温差对流引起的污染物泄漏量应与其对流风量成正比,可以得出有温差与无温差时污染物泄漏量的关系,如图3所示。但是,实验中未研究无温差的工况,因此不便进行对比,但从图3可知,理论上: $\Delta t=3 \text{ }^\circ\text{C}$ 比 $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 应增加污染量39%; $\Delta t=5 \text{ }^\circ\text{C}$ 比 $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 应增加污染量55%。而实验结果是: $\Delta t=5 \text{ }^\circ\text{C}$ 时最大污染物浓度(减去本底浓度)为2 566.4粒/L; $\Delta t=3 \text{ }^\circ\text{C}$ 时最大污染物浓度(减去本底浓度)为1 622.9粒/L; $\Delta t=0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 时最大污染物浓度(减去本底浓度)为

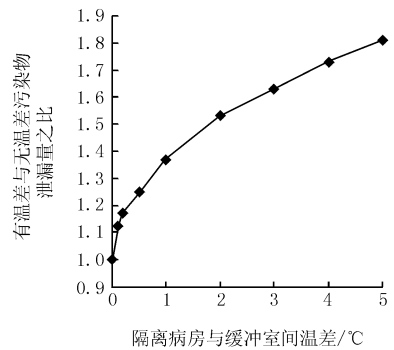


图3 开关门后温差对流引起的污染物泄漏量

1 378.2 粒/L; $\Delta t=3 \text{ }^\circ\text{C}$ 比 $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 实增18%, $\Delta t=5 \text{ }^\circ\text{C}$ 比 $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 实增86%。

实验结果与理论计算结果相比,在不同温差时各有高低,但随着温差的增大,污染物泄漏量增加的趋势是一致的。

3.3 在病房门关闭后的前1~2 min内,缓冲室内含尘浓度因开门、温差的影响而上升,第3 min上升趋势下降,各时间段内缓冲室浓度与病房浓度的比值见图4,从2%~6.8%。

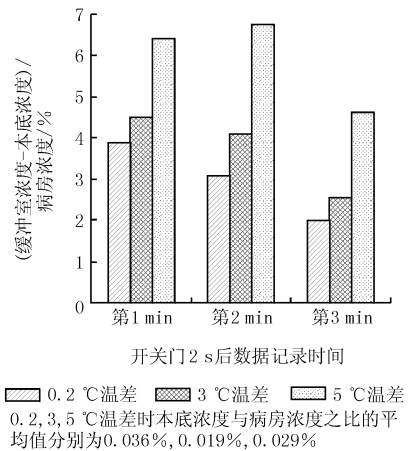


图4 开关门后3 min内缓冲室浓度变化

3.4 病房门开关后,前2 min缓冲室的平均浓度与病房浓度的比值见图5,约为3.5%~6.6%。

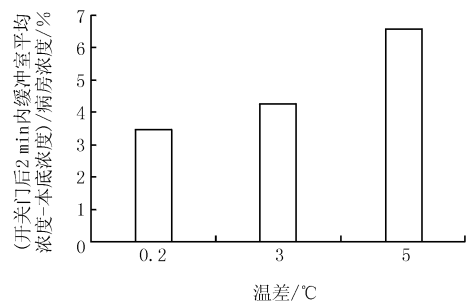
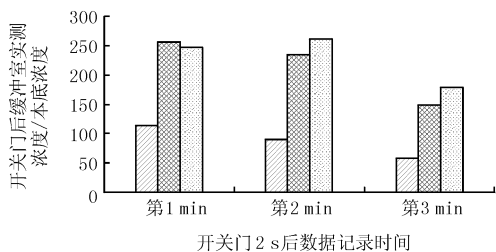


图5 开关门后2 min内缓冲室平均浓度

3.5 开关门后 3 min 内缓冲室的实测浓度与本底浓度的比值见图 6, 最大达到 250 以上。



图例同图 4

图 6 开关门后 3 min 内缓冲室的实测浓度与本底浓度的比较

3.6 根据分论文<sup>[2]</sup>的推导, 两室(病房、缓冲室)一缓(缓冲室)时, 缓冲室对病房的隔离系数  $\beta_{2,1}$  为

$$\beta_{2,1} = \frac{V_2 \alpha_2}{Qe^{\frac{nt}{60}}} \quad (1)$$

式中  $V_2$ ——缓冲室体积,  $6.25 \text{ m}^3$ ;

$\alpha_2$ ——缓冲室混合因数, 在缓冲室送排风正常和换气次数达数十次的情况下, 取 1;

$Q$ ——由于开门、人进出、温差引起的门(面积  $1.5 \text{ m}^2$ , 不同于分论文<sup>[2]</sup>中的  $1 \text{ m}^2$ )口进(出)风量(2 s),  $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$  温差时为  $1.38 \text{ m}^3$ ,  $3 \text{ }^\circ\text{C}$  温差时为  $1.92 \text{ m}^3$ ,  $5 \text{ }^\circ\text{C}$  温差时为  $2.14 \text{ m}^3$ ;

$n$ ——换气次数,  $\text{h}^{-1}$ ;

$t$ ——自净时间, min。

因实测缓冲室送风量为  $379 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $n = 60.64 \text{ h}^{-1}$ , 对于污染物浓度最大的前 2 min,  $e^{-nt/60} = 0.134$ , 计算和实验结果见表 6。

表 6 缓冲室隔离系数的理论计算值和实测值

|    | $\Delta t / ^\circ\text{C}$ |      |      |
|----|-----------------------------|------|------|
|    | 0.2                         | 3    | 5    |
| 计算 | 33.9                        | 24.3 | 21.9 |
| 实验 | 28.6                        | 23.2 | 15.2 |

可见, 用计算值可以估计实际效果。关于温差和换气次数的关系, 将在后续分论文中进一步讨论。

## 4 结论

4.1 温差对流作用是客观存在的, 是一般压差作用所抵消不了的。

4.2  $2 \text{ }^\circ\text{C}$  温差时交换的污染量可比  $0 \text{ }^\circ\text{C}$  温差时增

加 50% 左右, 所以应引起足够重视, 温差应尽量不超过  $2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

4.3 缓冲室对温差对流作用下的污染交换可起到 15~30 倍的动态隔离作用, 是有效的手段。

## 参考文献

- [1] 许钟麟, 张益昭, 王清勤, 等. 关于负压隔离病房缓冲室的作用[J]. 建筑科学, 2005, 21(增刊): 52-56
- [2] 许钟麟, 张益昭, 王清勤, 等. 关于隔离病房隔离原理的探讨[J]. 暖通空调, 2006, 36(1)
- [3] 冯昕, 许钟麟, 张益昭, 等. 负压隔离病房气流组织效果的数值模拟及影响因素分析[J]. 建筑科学, 2006, 22(1): 35-41
- [4] 许钟麟, 张益昭, 王清勤, 等. 隔离病房隔离效果的研究(1)[J]. 暖通空调, 2006, 36(3)
- [5] 许钟麟, 张益昭, 王清勤, 等. 隔离病房隔离效果的研究(2)[J]. 暖通空调, 2006, 36(4)
- [6] CDC. Guidelines for Preventing the Transmission of Mycobacterium Tuberculosis in Health Care Facilities [G], 1994
- [7] ASHRAE. ASHRAE Handbook-HVAC Application [G], 1991
- [8] Ole Christian Ruge, Hilde B  nrud, Oddvar Bjordal. Ultraviolet Technology and Intelligent Pressure Control Solutions Jointly Provide True Isolation Rooms for Infectious Patients [C]//Klean ASA, 2002

· 征订 ·

## 《第 13 届全国暖通空调技术信息网大会文集》

第 13 届全国暖通空调技术信息网技术交流会于 2005 年 11 月 1~3 日在厦门召开, 大会文集集中反映各地方、各行业的广大设计、科研、教学和工程第一线的暖通空调专业工作者在各自工作岗位上所作出的新开拓和新成果。文集选登 100 多篇文章, 分为综合、空调制冷、供暖供热、通风除尘、洁净技术、计算机网络技术、节能及其他共 7 大部分。

文集作为《暖通空调》杂志 2005 年第 10 期增刊, 正式出版, 476 页, 定价 60 元(邮费 10 元)。订购者请与《暖通空调》编辑部联系, 电话: (010) 68362755, 金庆平; 或 88383814。地址: 100044 北京市西直门外车公庄大街 19 号。

(本 刊)