

# 人员进门过程中污染气体侵入数值模拟

常 乐, 涂书阳, 张 旭

(同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

**摘要:** 研究了人员进门过程中污染气体从走廊侵入到隔离室的动态过程和侵入量。数值计算采用了雷诺时均 N-S 模型, 通过动网格技术实现门和人员的运动, 并利用示踪气体监测外界空气的侵入过程。结果表明: 侵入过程可以分为 4 个阶段, 进门时间增加会显著增加内侵入空气体积。

**关键词:** 数值模拟; 动网格; 通风安全; 主控制室; 核电厂  
**中图分类号:** TU834.5 **文献标志码:** A

## Dynamic Simulation of Contaminated Air Intrusion by Person Entering

CHANG Le, TU Shuyang, ZHANG Xu

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** In this paper, the dynamic process of contaminated air intruding from the corridor into the isolation room was studied and the air intrusion volume was determined. The Reynolds average Navier-Stokes (RANS) model was applied for the numerical simulation, and the movement of a door and a person in the simulation was achieved through the dynamic mesh techniques. The results show that the air intrusion process induced by the movement of the door and the person can be divided into four stages, and with longer entrance time the air intrusion volume would increase significantly.

**Key words:** numerical simulation; dynamic meshes; ventilation safety; main control room; nuclear power plant

某些特定场所需要保证隔离状态, 其内部环境与外界环境的气体交换量应尽可能少, 从而保证室内人员的健康安全。例如, 核电厂主控制室在事故状况下, 将会切断外部送风口, 使控制室进入隔离状态, 防止外界受污染的气体进入, 从而为室内人员提供安全的工作环境。然而, 在人员进入过程中, 外界

未经过滤的空气, 伴随着门和人员的运动, 从门洞中侵入到室内环境。这部分空气有可能携带污染物(辐射粒子、有毒气体或致病菌等), 从而危害室内人员的安全, 因此需要重视人员进入过程中内侵入气体<sup>[1-3]</sup>。

内侵入量专指从外界进入到室内的气体体积。虽然在人员进入动态过程中, 室内气体和外界气体会相互交换, 但是计算中仅考虑从外界进入并留在室内的气体体积量, 并以  $\text{m}^3$  为单位。如在美国核电标准<sup>[4]</sup>中就限定, 核电厂事故状态时, 每小时的开关门内侵入气体总量不能超过  $17 \text{ m}^3$ 。李冰等<sup>[5]</sup>对室内的辐射水平进行计算时发现, 当考虑开关门内侵入时, 有效照射剂量提高了 1.6 倍, 甲状腺照射剂量提高了 10.1 倍。这说明人员进入的内侵入量对控制室内工作人员的安全极其重要, 但是国内外目前尚未有实验和相关计算得到该准确值。

不仅人员进门会对室内环境造成影响, 物体移动或人员活动也会对空间内的气流运动有一定影响。目前已有一些研究者们使用计算流体力学 (CFD) 方法来研究人员移动对室内气流和污染物扩散的影响。如 Kalliomäki 等<sup>[6]</sup>比较了推拉门和平开门在开门过程中对门洞空气交换量的影响, 并认为推拉门可以有效减少空气交换量。Villafruela 等<sup>[7]</sup>研究了在手术室内人员活动对室内气流的影响, 并利用超声波风速仪验证了室内速度场。Lee 等<sup>[8]</sup>发现了开门过程中气体交换量主要取决于室内外温差和门开关的运动时间。Choi 等<sup>[9]</sup>使用了大涡模型 (LES) 计算了人员跨房间行走时的气体交换量。Poussou 等<sup>[10]</sup>使用了数值计算的方法研究了飞机客舱中人员行走对污染物传播扩散的影响。

本文研究了人员进门过程中污染气体从走廊侵入到隔离室的动态过程和侵入量。数值计算采用了雷诺时均 N-S 模型, 通过动网格技术实现门和人员

收稿日期: 2017-02-27

第一作者: 常 乐(1990—), 男, 博士生, 主要研究方向为控制室应急通风。E-mail: changlecom@foxmail.com

通讯作者: 张 旭(1955—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为空调热湿交换理论及复杂通风技术等。

E-mail: xuzhang@tongji.edu.cn

的运动,利用示踪气体监测气体的侵入过程.

## 1 数值模拟方法

### 1.1 几何模型

CFD方法中使用的几何模型由两部分组成:隔离室和安全走廊.隔离室作为重点保护对象,需要防范内侵入的污染气体,而安全走廊是唯一可以进入隔离室的通道.如图1所示,隔离室尺寸为长2.55 m、宽2.11 m、高2.55 m,安全通道尺寸为长5.40 m、宽2.00 m、高2.55 m.

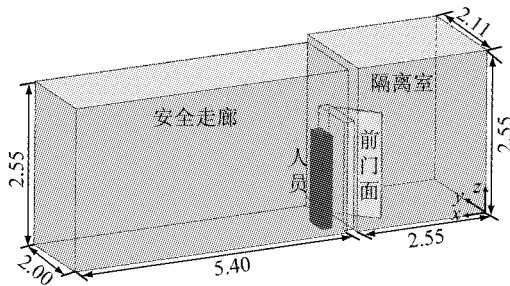


图1 几何模型示意图(单位:m)  
Fig.1 Simulation model(unit: m)

安全通道和隔离室之间有一道平开门,高2.00 m,宽1.00 m.初始时,人员站在安全走廊内,与门保持一定距离.为了模拟计算方便,将人体几何模型简化为长方体,尺寸为长0.50 m、宽0.20 m、高1.75 m.

### 1.2 动网格计算理论

动网格模型可以用来模拟流场形状由于边界运动而随时间改变的问题.边界运动形式可以是预先定义的运动,即可以在计算前指定其速度或角速度.该模型可建立刚性物体的位置变化与流场形态变化之间的关联性,根据当前时刻的边界位置,确定下一时刻的边界位置,然后在移动边界附近的局部区域对网格进行调整或重新划分网格,以消除畸变的单元<sup>[11-12]</sup>.在移动边界上任意一个控制体 $V$ 中,广义标量 $\phi$ 的积分守恒方程为

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV + \int_{\partial V} \rho \phi (\mathbf{u} - \mathbf{u}_g) \cdot d\mathbf{A} = \int_{\partial V} D \nabla \phi \cdot d\mathbf{A} + \int_V S_\phi dV \quad (1)$$

式中: $\rho$ 为流体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $\mathbf{u}$ 为流体速度矢量, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\mathbf{u}_g$ 为移动网格边界的运动速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $D$ 为扩散系数;  $S_\phi$ 为标量 $\phi$ 的源项;  $\partial V$ 为控制体 $V$ 的边界;  $\mathbf{A}$ 为移动网格运动方向上的截面, $\text{m}^2$ .

方程(1)中的时间导数项可以用一阶向后差分格式写成

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \phi dV = \frac{(\rho \phi V)_{n+1} - (\rho \phi V)_n}{\Delta t} \quad (2)$$

式中: $n$ 和 $(n+1)$ 表示当前和紧接着的下一时间步的数值.第 $(n+1)$ 步的体积

$$V_{n+1} = V_n + \frac{dV}{dt} \Delta t \quad (3)$$

对于复杂的多体相对运动,只能采用非结构化网格来进行模拟,非结构化的动网格技术一般采用网格弹性变形和网格再生技术来实现计算域的变形<sup>[13]</sup>.网格弹性变形根据弹性近似原理实现网格变形来适应边界运动,网格拓扑始终不变,无需插值,保证了计算精度,但不能模拟有较大变形的计算域<sup>[14]</sup>.因此,对于弹性变形过大或过小的网格,必须采用网格再生技术,采用插值方法在计算区域内重新生成网格,以适应计算区域的变化<sup>[15]</sup>.对于开关门这种绕轴旋转运动,因计算过程中门旋转运动区域较大,采用网格弹性变形和网格再生技术相结合的动网格技术,对在指定范围内的网格采用弹性变形以适应计算域的变化,当网格大小超出指定范围时采用网格再生技术来适应计算<sup>[16-17]</sup>.

### 1.3 示踪气体方法

在本模拟中,将六氟化硫( $\text{SF}_6$ )作为示踪气体来标记内侵入气体<sup>[18]</sup>.安全走廊将保持有一定浓度的 $\text{SF}_6$ ,而隔离室中则为纯净的空气.由于隔离室除了开关门之外,没有其他途径与安全走廊接触,所以一旦隔离室中出现了 $\text{SF}_6$ ,则一定是在开关门过程中伴随着气流而侵入的.假如安全走廊始终保持稳定浓度的 $\text{SF}_6$ ,内侵入体积流量则可以通过侵入的 $\text{SF}_6$ 质量流量计算得到,如下所示:

$$\frac{q_{\text{ig}}}{c_{\text{out}}} = q_{\text{in}} \quad (4)$$

式中: $q_{\text{ig}}$ 为通过门框的 $\text{SF}_6$ 质量流量, $\text{mg} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $c_{\text{out}}$ 为安全走廊的 $\text{SF}_6$ 质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $q_{\text{in}}$ 为通过门框的外界气体侵入体积流量, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

关门之后,可以通过隔离室的 $\text{SF}_6$ 的总量,求得内侵入量.内侵入量计算如下所示:

$$V_{\text{in}} = \frac{\iiint_{\text{隔离室}} c_{\text{in}}(x, y, z) dx dy dz}{c_{\text{out}}} \quad (5)$$

式中: $V_{\text{in}}$ 为内侵入体积, $\text{m}^3$ ;  $c_{\text{in}}$ 为安全走廊的 $\text{SF}_6$ 质量浓度, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

空气与 $\text{SF}_6$ 混合气体使用的是组分输运模型,其描述如下所示:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} Y_i) = -\nabla \cdot \mathbf{J}_i + R_i + S_i \quad (6)$$

式中: $\rho$ 为流体密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $Y_i$ 为  $i$  组分的质量浓度分数; $v$ 为流体速度矢量, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $R_i$  和  $S_i$  分别为组分  $i$  的化学反应生成率和源项的散发率,由于在模拟过程中,不再产生新的  $\text{SF}_6$ ,也不涉及化学反应,因此这 2 项为零; $J_i$  是组分  $i$  扩散通量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ .  $J_i$  可以表示如下:

$$J_i = -(\rho D_{i,m} + \rho D_{i,t}) \nabla Y_i \quad (7)$$

式中: $D_{i,m}$ 为  $i$  组分的分子扩散系数,对于  $\text{SF}_6$  取值为  $2.88 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $D_{i,t}$ 为  $i$  组分的湍流扩散系数, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ,其计算方式为  $D_{i,t} = \mu_t / \rho Sc_t$ ,其中  $\mu_t$  为湍流黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ,  $Sc_t$ 为施密特数,对于各类气体的湍流扩散运动,  $Sc_t$  可以作为经验常数,取值  $0.7^{[19-20]}$ .

### 1.4 人员和门的运动过程描述

人员通过平开门进入的过程非常复杂.人员直行向前,而门旋转打开并关闭,并且人员和门的运动配合得非常紧密.多次观察后,对进门过程进行了适当简化,并作了如下假设:

(1) 人员以恒定速度向前移动,在行走过程中不停顿,达到人停位置后停止移动.

(2) 门以恒定角速度旋转打开,当门全开时,马上以相同角速度反向旋转关闭,不作等待.

(3) 在运动过程中,可以通过 4 个关键位置来描述人和门的相对位置,如图 2 所示.

初始位置:在门转动之前,人站在安全走廊中,距门  $0.55 \text{ m}$ . 当人开始向前移动,同时门开始转动.

全开位置:此时门全部打开,与门框成  $90^\circ$ . 人已步行至门侧,人侧面与门面平行.

人停位置:在门全开之后,人继续向前,并停止在门后  $1.20 \text{ m}$ . 此时门仍然在关闭旋转过程中.

结束位置:此时门完全关闭,而人仍然在门后  $1.20 \text{ m}$ .

(4) 从初始位置到结束位置,所用的时间称作进门用时  $T$ ,作为描述运动最重要的变量.

根据以上简化和假设,在表 1 中,选择  $T = 2.0 \sim 8.0 \text{ s}$  7 个案例进行模拟计算后,门角速度、人员行走速度和行走用时均可根据选定的进门用时  $T$  而确定. 小于  $2.0 \text{ s}$  和大于  $8.0 \text{ s}$  的案例,由于现实状况中难以出现,故不予考虑.

### 1.5 网格划分、计算参数和边界条件

计算域网格数为 250 万,并经过网格独立性验证,若继续加密该网格,对计算结果影响很小. 由于几何模型较为复杂,且动网格技术要求高,模型中使用四面体网格. 边界层最小网格长度为  $0.008 \text{ m}$ ,核

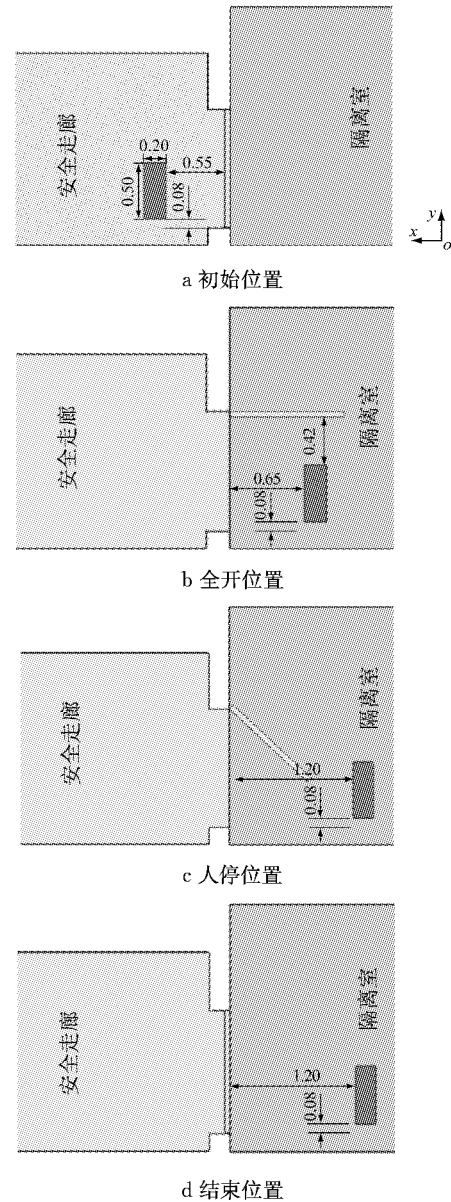


图 2 人员和门运动过程中的 4 个关键位置(单位: m)  
Fig. 2 Four positions during the movements of the door and the person(unit: m)

表 1 不同进门用时算例设置

序号	进门用时(开门/关门)/s	门角速度/ $(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	人员行走速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	行走用时/s
1	2.0(1.0/1.0)	1.570	1.20	1.46
2	3.0(1.5/1.5)	1.046	0.80	2.19
3	4.0(2.0/2.0)	0.785	0.60	2.92
4	5.0(2.5/2.5)	0.628	0.48	3.65
5	6.0(3.0/3.0)	0.523	0.40	4.38
6	7.0(3.5/3.5)	0.449	0.34	5.15
7	8.0(4.0/4.0)	0.393	0.30	5.83

心区域最大网格长度取  $0.05 \text{ m}$ . 计算步长设置为  $0.005 \text{ s}$ ,记录数据间隔为  $0.05 \text{ s}$ .

采用 ANSYS Fluent 16.0 进行计算,使用雷诺

时均 N-S 模型. 湍流模型使用了 RNG  $k-\epsilon$  方法. 为提高精度, 所有变量均采用二阶离散格式. 流体介质采用不可压缩空气. 压力速度耦合采用 SIMPLE 算法. 为保证计算结果收敛, 质量、能量和示踪气体浓度的残差应该分别小于  $1.0 \times 10^{-3}$ 、 $1.0 \times 10^{-6}$ 、 $1.0 \times 10^{-6}$ .

初始条件:  $t=0$  时, 安全走廊内  $\text{SF}_6$  质量浓度是  $705 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 隔离室内质量浓度为零. 隔离室与安全走廊压力相等, 为 1 个大气压.

边界条件: 围护结构、门和人体等各个表面均为绝热面. 隔离室与安全走廊不设置进风口和出风口.

## 2 结果与分析

### 2.1 内侵入过程分析

经过模拟计算后, 以案例 7 ( $T=8.0 \text{ s}$ ) 为例, 分析其内侵入过程. 监测通过门框处的内侵入气体体积流量, 如图 3 所示. 虽然在门框界面上, 两侧气体都在相互交换, 但是模拟中只监测带有  $\text{SF}_6$  的内侵入气体. 当流量为正时, 表明带有  $\text{SF}_6$  的气体从安全走廊侵入隔离室内. 同时计算内侵入流量对时间积分后的内侵入累积量, 如图 4 所示.

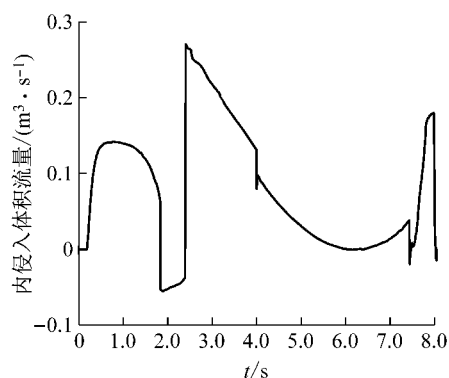


图 3 案例 7 ( $T=8.0 \text{ s}$ ) 的内侵入体积流量

Fig. 3 Air intruding flowrate for case 7 ( $T=8.0 \text{ s}$ )

同时将案例 7 ( $T=8.0 \text{ s}$ ) 中各个时刻的  $\text{SF}_6$  浓度场结果可视化(见图 5), 并将高  $1.0 \text{ m}$  平面的速度矢量场结果可视化(见图 6).

通过内侵入流量的变化, 可以将整个内侵入过程分为如下 4 个阶段:

阶段一( $t=0 \sim T/4$ ): 门刚刚开始转动, 将走廊内气体吸引进室内. 如图 5a 和 6a 所示, 内侵入气流是由门向内转动所致, 同时人也在向前运动, 推动了内侵入气体运动. 气流速度方向也是指向门面, 门洞处流速为  $0.32 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

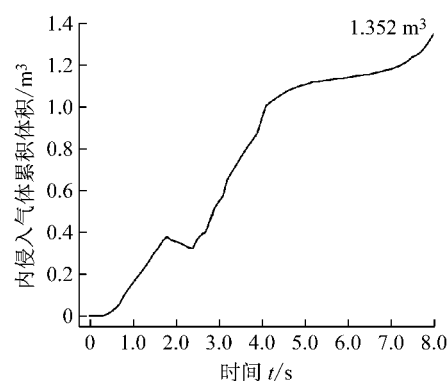


图 4 案例 7 ( $T=8.0 \text{ s}$ ) 的内侵入气体累积体积

Fig. 4 Air intruding cumulative volume for case 7 ( $T=8.0 \text{ s}$ )

阶段二( $t=T/4 \sim T/2$ ): 人员牵引气体进入. 如图 5b 所示, 人员开始经过门框, 此时门框被人员阻挡, 内侵入体积流量突然下降到零附近. 当人员经过了门框(见图 5c), 身后气体被大量牵引至室内, 流量马上又恢复到极大值. 当人员离门框原来越远, 体积流量也逐渐减小. 从图 6c 可以发现, 人身后跟随了较多速度矢量箭头通过门洞, 最大值为  $0.45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

阶段三( $t=T/2 \sim 7T/8$ ): 门在关闭过程中, 阻挡内侵入气流. 如图 5d 所示, 门不仅挡住了人员身后牵引产生的内侵入气流, 而且由于门关闭产生的向外速度, 也阻碍了内侵入气流. 从图 3 可以看出, 体积流量逐渐减少, 甚至在  $t=6.0 \text{ s}$  时, 体积流量变为零. 图 6e 中, 人已停止行走, 门洞处的内侵入气流更加微弱.

阶段四( $t=7T/8 \sim T$ ): 在最后一刻, 将门和门框周围气体挤压入隔离室内. 图 3 中  $t=7.5 \text{ s}$  时, 门与门框之间有示踪气体气流侵入, 造成了高侵入体积流量. 从图 6f 可以发现, 门和门框之间有大量速度箭头指向室内, 其速度达到  $0.70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

### 2.2 内侵入气体体积结果

7 个案例的内侵入气体体积结果见图 7. 可以发现, 随着进门用时增加, 内侵入气体体积显著增加. 当  $T=8.0 \text{ s}$  时, 内侵入气体体积为  $1.352 \text{ m}^3$ ; 当  $T=2.0 \text{ s}$  时, 内侵入气体体积仅为  $0.479 \text{ m}^3$ .

## 3 结语

本文模拟将平开门的旋转开关门运动与人员行走运动相结合, 利用动网格重现了复杂的人员进门活动. 利用示踪气体, 重点监视由外到内的气体内侵入过程并计算内侵入体积. 对于不同进门用时对内

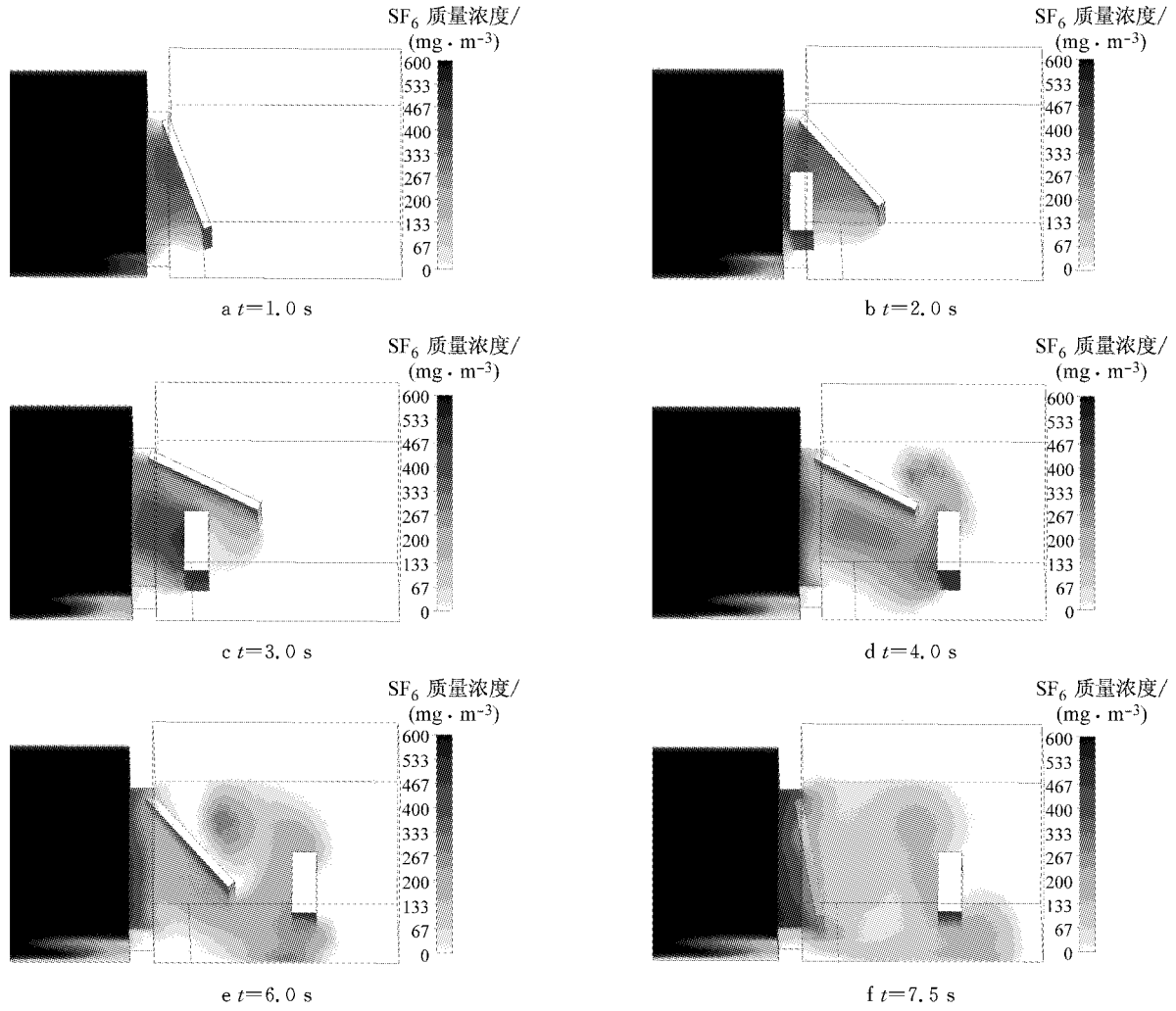


图 5 案例 7( $T=8.0\text{ s}$ )各个时刻的 SF<sub>6</sub> 浓度场

Fig.5 SF<sub>6</sub> concentration distribution at different times for case 7( $T=8.0\text{ s}$ )

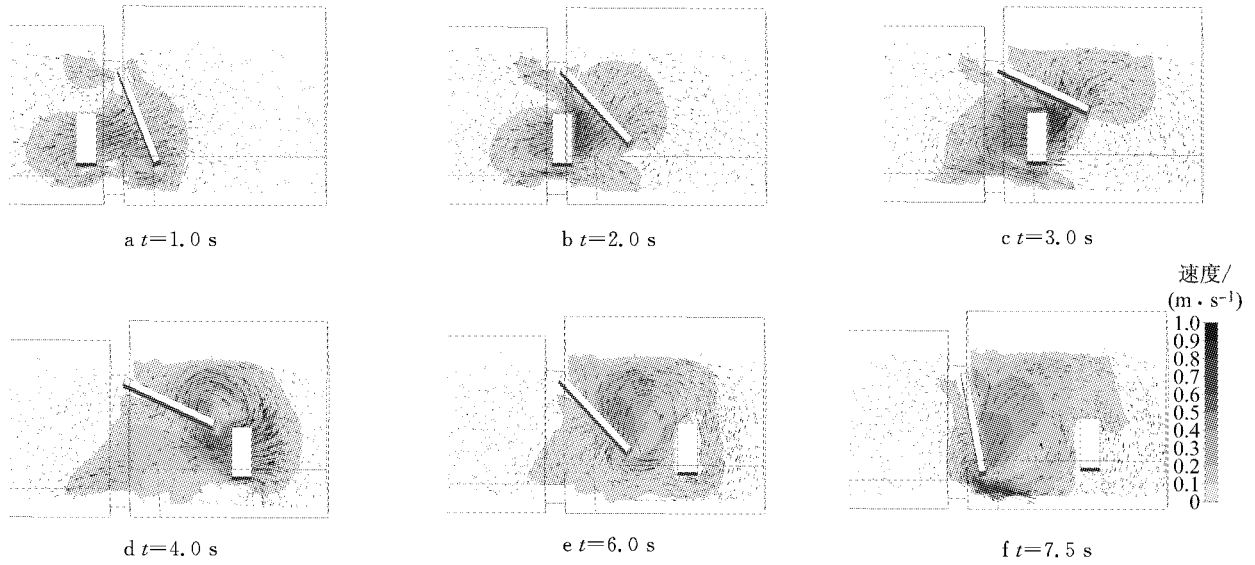


图 6 案例 7( $T=8.0\text{ s}$ )1.0 m 高处各个时刻的速度场

Fig.6 Velocity distribution with the height of 1.0 m at different times for case 7( $T=8.0\text{ s}$ )

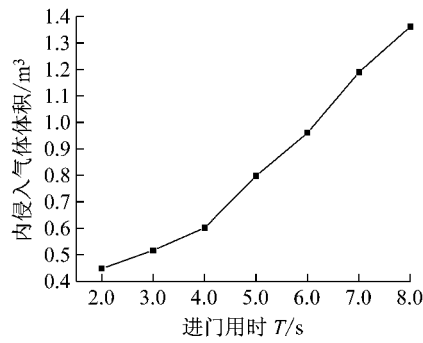


图 7  $T=2.0\sim 8.0$  s 时内侵入气体体积

Fig.7 Air intrusion volume at  $T=2.0\sim 8.0$  s

侵入气体体积的影响进行了研究。

受到人员和门运动的牵引,外界气体侵入隔离室的过程可以分为 4 个阶段:一是门旋转时气体被牵引至室内,二是人员进门时身后的气体被牵引至室内,三是关门运动阻碍了侵入过程,四是关门前挤压过程会形成最后一次的侵入。可以发现,随着进门用时增加,内侵入气体体积显著增加。当  $T=8.0$  s 时,内侵入气体体积最大为  $1.352\text{ m}^3$ 。因此,缩短进门时间是控制侵入气体体积的有效措施,严格控制进门时间,对隔离室的安全至关重要。

#### 参考文献:

- [1] Nuclear Engineering Institute. Control room habitability guidance[M]. Washington DC: Nuclear Engineering Institute, 2003.
- [2] U.S. Nuclear Regulatory Commission. Demonstrating control room envelope integrity at nuclear power reactors [M]. Washington DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2003.
- [3] U.S. Nuclear Regulatory Commission. Standard review plan for the review of safety analysis reports for nuclear power plants: LWR edition [M]. Washington DC: U. S. Nuclear Regulatory Commission, 2014.
- [4] American Nuclear Society. Safety criteria for HVAC systems located outside primary containment[S]. Illinois: American Nuclear Society, 1985.
- [5] 李冰, 陈莹莹, 肖钧, 等. 关于控制室可居留性若干问题的讨论[J]. 核动力工程, 2014(4): 65.  
LI Bing, CHEN Yingying, XIAO Jun, *et al.* Discussion on control room habitability assessment [J]. Nuclear Power Engineering, 2014(4): 65.
- [6] KALLIOMÄKI P, SAARINEN P, TANG J W, *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(1): 154.
- [7] VILLAFRUELA J M, SAN JOSÉ J F, CASTRO F, *et al.* Airflow patterns through a sliding door during opening and foot traffic in operating rooms [J]. Building and Environment, 2016, 109(1): 190.
- [8] LEE S, PARK B, KURABUCHI T. Numerical evaluation of influence of door opening on interzonal air exchange [J]. Building and Environment, 2016, 102(1): 230.
- [9] CHOI J I, EDWARDS J R. Large eddy simulation and zonal modeling of human-induced contaminant transport[J]. Indoor Air, 2008, 18(3): 233.
- [10] POUSSOU S B, MAZUMDAR S, PLESNIAK M W, *et al.* Flow and contaminant transport in an airliner cabin induced by a moving body: model experiments and CFD predictions [J]. Atmospheric Environment, 2010, 44(24): 2830.
- [11] 甘甜, 王伟, 赵耀华, 等. 地铁活塞风 Fluent 动网格模型的建立与验证[J]. 建筑科学, 2011(8): 75.  
GAN Tian, WANG Wei, ZHAO Yaohua, *et al.* Establishment and validation of the subway piston wind model with dynamic mesh method[J]. Building Science, 2011(8): 75.
- [12] 张泉, 袁昊, 张国强, 等. 室内人体移动过程对热舒适的影响研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2007(8): 1.  
ZHANG Quan, YUAN Hao, ZHANG Guoqiang, *et al.* Study of the impact of human motion on indoor thermal comfort[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences Edition), 2007 (8): 1.
- [13] 史忠军, 徐敏, 陈士楷. 动网格生成技术[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2003, 4(1): 61.  
SHI Zhongjun, XU Min, CHEN Shikai. Analysis of moving mesh generation technology [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2003, 4(1): 61.
- [14] 张来平, 邓小刚, 张涵信. 动网格生成技术及非定常计算方法进展综述[J]. 力学进展, 2010, 40(4): 424.  
ZHANG Laiping, DENG Xiaogang, ZHANG Hanxin. Reviews of moving grid generation techniques and numerical methods for unsteady flow[J]. Advances in Mechanics, 2010, 40(4): 424.
- [15] 郭正, 刘君, 瞿章华. 非结构动网格在三维可动边界问题中的应用[J]. 力学学报, 2003, 35(2): 140.  
GUO Zheng, LIU Jun, QU Zhanghua. Dynamic unstructured grids method with applications to unsteady flows involving moving boundaries [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2003, 35(2): 140.
- [16] 李锐, 侯友夫. 基于 Fluent 动网格技术的乳化液泵分析[J]. 液压与气动, 2011(8): 35.  
LI Rui, HOU Youfu. Analysis of emulsion pump based on fluent dynamic mesh [J]. Chinese Hydraulics and Pneumatics, 2011 (8): 35.
- [17] 林辉. 人员活动对室内流场和污染物分布的影响研究[D]. 北京:清华大学, 2012.  
LIN Hui. Study on the effect of human activities on indoor air-flow and contaminants distribution [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [18] American Society for Testing and Materials. Standard test method for determining air change rate in a single zone by means of a tracer dilution[S]. Philadelphia: American Society for Testing and Materials, 2000.
- [19] LAUNDER B E. Heat and mass transport[M]. Heidelberg: Springer, 1976.
- [20] REYNOLDS A J. The prediction of turbulent Prandtl and Schmidt numbers[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1975, 18(9): 1055.