

6-2-2020

Numerical Simulation of Diffusion Regularity of CO in Fire Smoldering Phase in Aircraft Cabin

Jiaquan Lin

Institute of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

Ruiting Wang

Institute of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

Pi Jun

Institute of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

Ma Min

Institute of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Numerical Simulation of Diffusion Regularity of CO in Fire Smoldering Phase in Aircraft Cabin

Abstract

Abstract: In order to study the impact of the cabin air conditioning supply velocity on CO diffusing in the fire smoldering phase and the effect of the transportation of CO to human body, a simulation model of A320 aircraft cabin was established, and velocity field and CO concentration field under the different air supply velocity were simulated based on the fluid dynamics control equations. *The relationship between the air conditioning supply velocity and the value of CO concentration as well as the diffusion area was obtained by the analysis of the transportation of CO in different directions. The drainage efficiency on human respiratory position under different air supply velocity was calculated, and the relationship of the drainage efficiency and air supply velocity was obtained.* The results of numerical simulation provide a basis for CO diffusion regularity in aircraft cabin fire smoldering phase and the study of CO toxicity.

Keywords

CFD, A320 aircraft cabin, numerical simulation, CO diffusion

Authors

Jiaquan Lin, Ruiting Wang, Pi Jun, Ma Min, and Jianzhong Yang

Recommended Citation

Lin Jiaquan, Wang Ruiting, Pi Jun, Ma Min, Yang Jianzhong. Numerical Simulation of Diffusion Regularity of CO in Fire Smoldering Phase in Aircraft Cabin[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(3): 509-515.

飞机客舱火灾阴燃阶段 CO 扩散规律的数值模拟

林家泉, 王瑞婷, 皮骏, 马敏, 杨建忠

(中国民航大学电子信息与自动化学院, 天津 300300)

摘要: 为研究飞机客舱空调的送风速度对火灾阴燃阶段释放 CO 的影响以及不同送风速度下 CO 的扩散规律对人体的危害影响, 建立了 A320 飞机客舱的仿真模型, 基于流体动力学控制方程, 模拟了不同送风速度下飞机客舱内的风速场和 CO 浓度场。分析了在不同方向上 CO 的扩散规律, 得到了空调送风速度与客舱内 CO 浓度值及扩散范围之间的关系。计算了不同送风速度下人体呼吸位置的排污效率, 得到送风速度与排污效率之间的关系, 所得的数值模拟结果为飞机客舱火灾阴燃阶段 CO 扩散规律及毒性研究提供依据。

关键词: CFD; A320 飞机客舱; 数值模拟; CO 扩散

中图分类号: V245.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2017) 03-0509-07

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201703006

Numerical Simulation of Diffusion Regularity of CO in Fire Smoldering Phase in Aircraft Cabin

Lin Jiaquan, Wang Ruiting, Pi Jun, Ma Min, Yang Jianzhong

(Institute of Electronic Information and Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: In order to study the impact of the cabin air conditioning supply velocity on CO diffusing in the fire smoldering phase and the effect of the transportation of CO to human body, a simulation model of A320 aircraft cabin was established, and velocity field and CO concentration field under the different air supply velocity were simulated based on the fluid dynamics control equations. *The relationship between the air conditioning supply velocity and the value of CO concentration as well as the diffusion area was obtained by the analysis of the transportation of CO in different directions. The drainage efficiency on human respiratory position under different air supply velocity was calculated, and the relationship of the drainage efficiency and air supply velocity was obtained.* The results of numerical simulation provide a basis for CO diffusion regularity in aircraft cabin fire smoldering phase and the study of CO toxicity.

Keywords: CFD; A320 aircraft cabin; numerical simulation; CO diffusion

引言

如今民航事业正在飞速发展, 人们也越来越关注乘坐飞机时的安全问题。飞机客舱内火灾事件时

有发生, 对人体有很大的危害。火灾会产生很多有害气体, 例如 CO, SO₂, 烟尘等。统计结果表明, 火灾中 85% 以上的死亡者是由于烟气的影 响, 其中大部分是因为吸入了烟尘及有毒气体昏迷后致死的^[1]。由于飞机客舱是一个相对密闭的小空间, 因此一旦发生火灾, 烟尘及有毒气体很难被排出, 对乘客的身体健康造成很大危害。

火灾阴燃阶段产生的有毒气体最多, 发展时间



收稿日期: 2016-03-03 修回日期: 2016-04-22;

基金项目: 国家自然科学基金委中国民航局联合基金项目(U1433107);

作者简介: 林家泉(1975-), 男, 黑龙江, 博士, 副教授, 研究方向为飞机客舱能耗预测控制。

<http://www.china-simulation.com>

最长, 如果火灾在早期阶段就能被发现, 就能够为乘客争取足够多的时间采取应急措施^[2]。本文在火灾模拟中选取火灾阴燃阶段为研究对象。

国内外关于大型建筑物内火灾烟气的传播规律已有很多研究, 但对飞机客舱内火灾烟气的研究较少。由于列车车厢、船舶客舱与飞机客舱均为受限空间, 有一定的相似性, 因此关于列车车厢与船舶客舱内火灾烟气的研究具有借鉴意义。文献[3]建立了飞机客舱模型, 分别模拟了着火点在主舱和上舱时, 主舱、上舱和 8 个出口处的 CO 浓度, 将 CO 浓度的变化规律与公式计算得到的安全曲线进行对比, 判断出客舱安全出口。文献[4]基于 FDS 软件对列车车厢火灾引发的烟气流动进行数值模拟, 模拟了车厢内部火灾烟气的扩散过程以及车厢空间各区域烟气浓度的分布情况, 并讨论分析了紧急状况下烟气和温度变化对列车人员疏散的影响。文献[5]运用区域模型和场模型模拟了一个房间在 3 种顶棚开口情况下的排烟效果与热烟气层特性, 结果表明在有顶棚排烟口的情况下, 热烟气层的厚度不仅与开口大小有关系, 也与火源功率和火源高度有关。

目前对于火灾的模拟有很多种方法, 文献[6]分析了火灾模拟中通常使用的 Fluent 及 FDS 的优缺点: Fluent 操作复杂但模拟结果精度较高, 但缺乏专门的火灾模块; 而 FDS 操作简便, 实用性强, 但其资料库中燃料种类少。本文为得到精度较高的模拟结果, 采用 Fluent 进行数值模拟。建立了 A320 飞机客舱模型, 模拟了不同送风速度下火灾阴燃阶段释放 CO 的过程。通过数值模拟, 得到客舱内各个采样截面上的风速场及 CO 浓度场, 由此分析不同送风速度下 CO 的扩散规律。根据采样点处 CO 的浓度值, 计算了不同送风速度下人体呼吸位置处的排污效率, 通过排污效率值的大小分析了不同送风速度下 CO 扩散规律对人体健康的影响。

1 数值模型

1.1 客舱模型的建立

本文基于 Rhinoceros 5.0 平台对飞机客舱进行

建模, 为准确模拟空调送风速度对飞机客舱内 CO 扩散规律的影响, 依据 A320 飞机经济舱的真实尺寸, 建立了 4 排座的飞机客舱模型, 客舱模型尺寸为 2.51 m×3.68 m×2.21 m(长×宽×高)。

飞机客舱模型中包含 4 排座位, 每排 6 个座位, 进风口有 24 个, 位于座椅上方的客舱壁上。出风口有 8 个, 在客舱侧壁底部。所建立的 A320 飞机客舱的模型如图 1 所示。

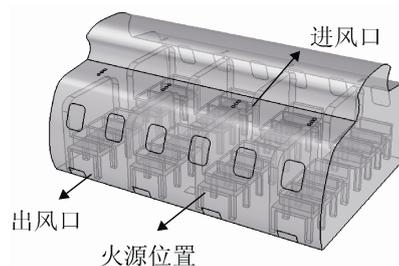


图 1 飞机客舱模型

Fig. 1 The model of the aircraft cabin

由于主要研究 CO 气体的扩散规律, 不考虑具体火灾阴燃燃烧的过程, 因此未建立燃烧模型, 仅设置了火灾阴燃释放 CO 的边界条件。火源位置为客舱左侧第二排与第三排座位之间, 面积为 0.2 m×0.2 m。不考虑烟雾颗粒的情况下, 阴燃产生的主要气体为 CO₂, CO, 本文选取 CO 来进行研究。设置火源处 CO 释放速度为 0.8 m/s, 温度为 393 K。

1.2 客舱流体动力学控制方程

将客舱内空气看作不可压粘性流体, 因此客舱内空气流动遵循以下控制方程^[7]:

连续方程:

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_i U_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right) + \rho \beta g_i (T_{ref} - T) \quad (2)$$

能量方程:

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + \frac{\partial \rho h U_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\lambda}{c_p} \frac{\partial h}{\partial x_j} \right) + S_H \quad (3)$$

组分方程:

$$\frac{\partial \rho C}{\partial t} + \frac{\partial \rho C U_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu}{\sigma c} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) + S_C \quad (4)$$

式中: U_i 为 x_i 方向的速度(m/s), x_i 代表 3 个垂直坐标轴的坐标, 其中 $i=1, 2, 3$; U_j 为 x_j 方向的速度(m/s); ρ 为空气密度(kg/m³); p 为空气压力(Pa); μ 为空气层流动力粘度[kg/(m·s)]; β 为空气热膨胀系数(1/K); T_{ref} 为参考温度(K); T 为空气温度(K); g_i 为 i 方向的重力加速度(m/s²); h 为空气定压比焓(J/kg); S_H 为热源(W); λ 为空气热导率[W/(m·K)]; C_p 为空气比定压热容[J/(kg·K)]; C 为组分浓度(kg/kg); σc 为传质 Schmidt 数; S_C 为组分浓度源(kg/s)。

对于飞机客舱内的湍流流动, 本文采用 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型。

RNG $k-\varepsilon$ 控制方程如下^[8]:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\bar{u}_i\phi - \Gamma_{\phi,eff}\text{grad}\phi) = S_{\phi} \quad (5)$$

式中: ϕ 为变量; \bar{u}_i 为时均速度 ($i=1, 2, 3$); $\Gamma_{\phi,eff}$ 为有效扩散系数; ρ 为密度; S_{ϕ} 为源项。当 ϕ 的值不同时, 式(5)可表示连续性方程、动量方程、能量方程、湍动能方程等。当 $\phi = k$ 时(这里 k 为湍动能) 时, 式(5)为湍动能方程。

1.3 边界条件的设定

(1) 进风口边界条件: 为分析不同送风速度对客舱内 CO 传播规律的影响, 进风口风速分别设置为 0.4 m/s, 0.6 m/s, 0.8 m/s, ..., 1.8 m/s。送风温度均设置为 289.3 K。

(2) 壁面边界条件: 不考虑客舱壁面、座椅等传热的影响。客舱壁面、座椅等均设置为绝热, 表面热通量为 0。

(3) 火源边界条件: 火源位置为客舱左侧第二排与第三排座位之间, 面积为 0.04 m², 火源处 CO 的浓度为 3 000 ppm, CO 释放速度为 0.8 m/s, 温度为 393 K^[2]。

2 采样截面与采样点的选取

由于飞机客舱内气流流动是三维的, 因此为分析客舱内 CO 的传播规律, 选取了 3 个互相垂直的采样截面, 这样可以分析出在各个方向上 CO 的扩散规律。截面 1 为高度为 100 cm 的水平截面, 截面 2 是火源中心处的垂直截面, 截面 3 为位于客舱中心轴线上且与截面 1, 2 互相垂直的截面。通过分析 3 个截面上的速度场、CO 浓度场, 能够更好的分析客舱内 CO 的扩散规律。

为具体得到客舱内各个位置 CO 的浓度值, 在 10 cm, 100 cm, 180 cm 高度处共设置 24 个采样点, 每个高度面上 8 个采样点。10 cm 高度处的采样点在各个出风口处, 编号为 1~8, 100 cm 高度处的采样点为人体呼吸位置附近, 编号为 9~16, 180 cm 高度处的采样点在客舱顶部下方, 编号为 17~24。采样点的密度约为 1.36 个/m³, 使得客舱每个单位体积内至少有一个采样点, 这样分布的采样点能够全方面的得到客舱内各个位置的 CO 浓度值。采样截面与部分采样点如图 2 所示。

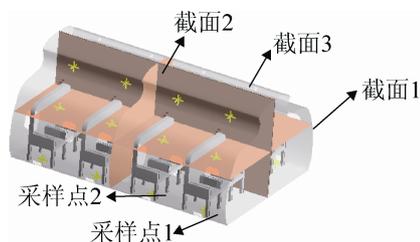


图 2 采样截面及采样点的分布图
Fig. 2 The distribution of sampling points and cross sections

3 仿真结果及讨论

3.1 飞机客舱内风速场的模拟

飞机客舱内空调的送风会使客舱内的空气有规律的运动。当客舱内火灾阴燃产生 CO 时, CO 会随着客舱内气流的流动而扩散。因此为分析客舱内 CO 的扩散规律, 首先需要得到客舱内气流的流动规律。因此通过对客舱内风速场的模拟, 得到客舱各个位置风速的大小及方向, 由此来分析客舱内气流的流动规律。

因此对送风速度为 0.4 m/s, 0.6 m/s, 0.8 m/s, ..., 1.8 m/s 时, 客舱内的风速场进行模拟。图 3 为送风速度为 1 m/s 时 3 个采样截面上的风速场, 图中箭头代表风速的方向。

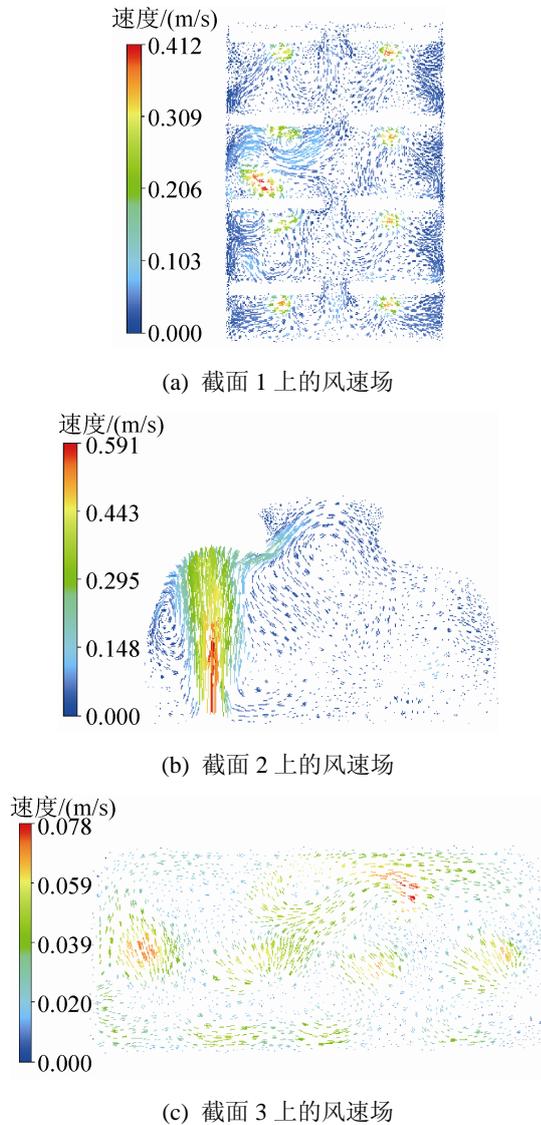


图 3 送风速度为 1 m/s 时各个截面上的风速场

Fig. 3 Velocity field in different cross sections with the air supply velocity of 1m/s

由图 3(a)可以看出, 图中每个进风口处及火源处的风速较大。而且由于飞机客舱壁的阻挡作用, 气流遇到客舱壁之后风速度减小, 在客舱壁处聚集, 因此客舱壁处的速度矢量较为密集。由于客舱壁及座椅的阻挡, 在每两排座椅之间形成环流, 部分气流由中间过道互相流通。

由图 3(b)可以看出, 由于截面 2 为火源中心位置处的垂直截面, 因此在该截面上可以看到火源释放 CO 的气流大小及方向。图中左侧气流以较大的速度向上扩散到客舱壁, 由于客舱壁的阻拦, 一部分气流向客舱顶部扩散, 并沿着客舱壁继续向客舱右侧扩散, 与右侧的气流一起形成环流。另一部分向左沿着客舱壁向下扩散, 形成较小的环流, 逐渐从出风口排出。

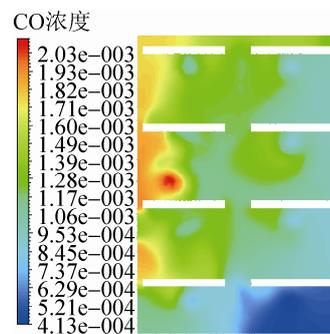
由图 3(c)可以看出, 空调送风吹向座椅时, 由于座椅的阻挡, 气流吹向座椅后以较大的速度反向上流动, 且流速较大。并且根据图中箭头方向可知, 整个客舱内存在由前向后的纵向气流。

根据对不同采样截面上风速场的分析, 得到了在不同方向上客舱内气流的流动规律。由于 CO 会随着气流的运动而扩散, 因此得到了气流的流动规律也就得到了 CO 大致的扩散规律。

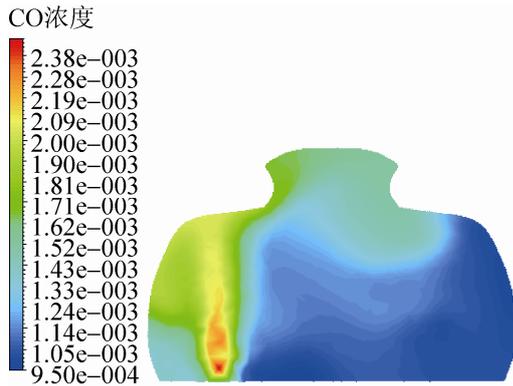
3.2 飞机客舱内 CO 浓度场的模拟

为分析空调送风速度对客舱内 CO 扩散规律的影响, 分别对送风速度为 0.4 m/s, 0.6 m/s, 0.8 m/s, ..., 1.8 m/s 时, 客舱内 CO 的浓度场进行模拟。为得到不同送风速度下 CO 随送风时长的变化规律, 采用瞬态模拟, 模拟的送风时长均为 40 s。

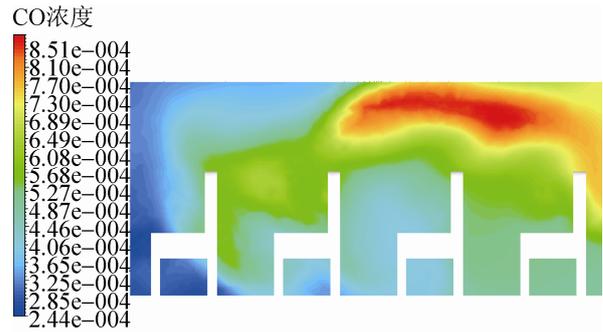
如图 4 所示为送风时间 20 s 时, 不同送风速度下 3 个截面上的 CO 浓度分布图。图(a) (b) (c) 为送风速度为 0.6 m/s 时 3 个截面上的 CO 浓度分布图, 图(d) (e) (f)为送风速度为 1.8 m/s 时 3 个截面上的 CO 浓度分布图。图(a) (d)中, 下方为机头方向, 图(c) (f)中, 左侧为机头方向。



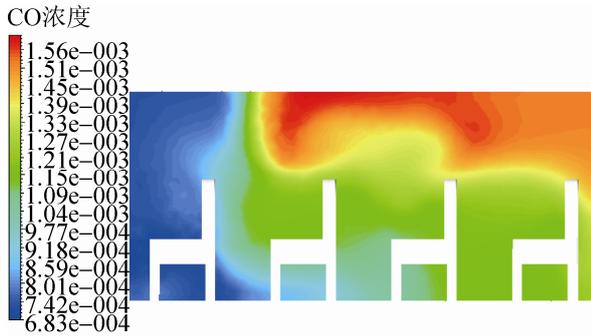
(a) 0.6m/s, 截面 1



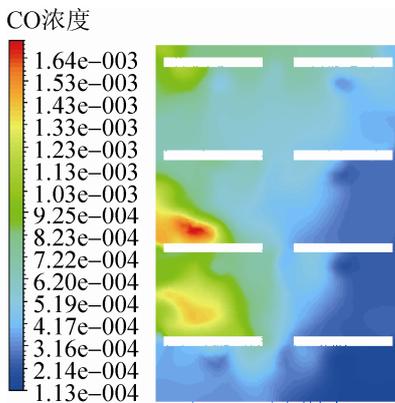
(b) 0.6 m/s, 截面 2



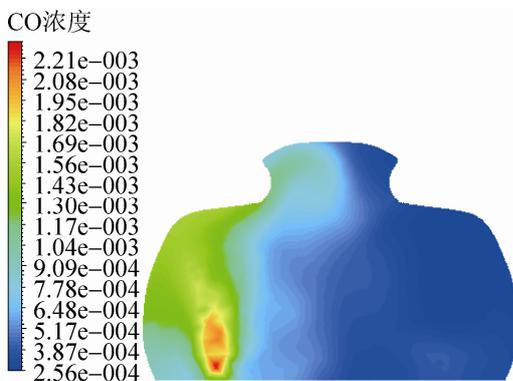
(f) 1.8 m/s, 截面 3



(c) 0.6 m/s, 截面 3



(d) 1.8 m/s, 截面 1



(e) 1.8 m/s, 截面 2

图 4 不同送风速度下不同采样截面 CO 浓度分布图
Fig. 4 CO concentration field in different cross sections with different air supply velocity

由图 4(a), (b)的 CO 浓度分布可以看出, 当送风速度为 0.6 m/s 时, CO 以较大的浓度值扩散到整个客舱, 而送风速度为 1.8 m/s 时, CO 浓度值较大的区域主要集中在火源附近, 其他位置的 CO 浓度值较低。这是由于随着送风速度的增大, 客舱内气流流速增大, 将更多的 CO 吹向客舱底部, CO 随着气流逐渐从出风口排出, 使截面 1 上的 CO 浓度值降低。

由图 4(c), (d)的 CO 浓度分布可以看出, 送风速度为 0.6 m/s 时, CO 向上扩散时浓度值较大, 且当扩散到客舱顶部后, 沿着客舱壁扩散到客舱的另一侧, 扩散面积较大。当送风速度为 1.8 m/s 时, CO 的浓度值减小, 向上扩散的范围也减小。这是由于火灾阴燃释放 CO 的气流与空调向客舱内送风会形成对流, 因此空调的送风速度越大, 对 CO 向上扩散的阻碍也越大^[9], 使 CO 浓度值降低, 扩散范围减小。

由图 4(e), (f)的 CO 浓度分布可以看出, 当送风速度为 0.6 m/s 时, CO 主要集中在客舱后 3 排座位, 且顶部的浓度值最大, 第一排座位处的浓度值较小。当送风速度为 1.8 m/s 时, CO 的浓度分布较送风速度为 0.6 m/s 时, 浓度最大值向客舱后方移动, 且客舱整体浓度值减小。这是由于客舱内存在由前向后的气流, 因此会使 CO 逐渐向客舱后方扩散, 且送风速度越大, 越有利于 CO 的排出。

4 数据处理及分析

为研究不同送风速度下的客舱内 CO 浓度值的变化,对各个位置处采样点的数据进行了分析。通过对采样点数据的处理,得到在送风时间 40 s 内,不同送风速度下各个采样点 CO 浓度值的变化图。图 5 为采样点 12 在不同送风速度下 CO 浓度值随时间的变化图。

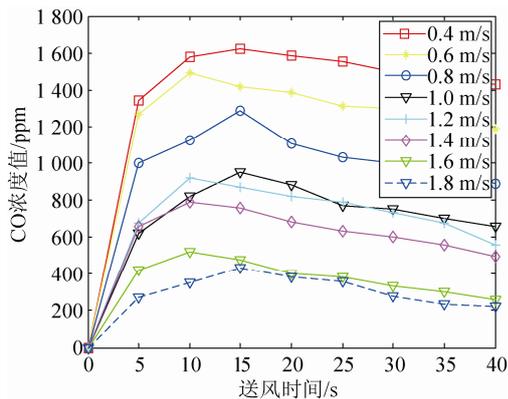


图 5 不同送风速度下采样点 12 的 CO 的浓度值
Fig. 5 The values of CO concentration in sample 12 with different air supply velocity

由图 5 可以看出,随着送风速度的增大,采样点 12 处 CO 浓度值的增速逐渐减小,并且送风速度越大,CO 的浓度值越小。这是由于随着送风速度的增大,CO 的扩散速度加快,使更多的 CO 扩散到客舱底部从出风口处排出,因此采样点 12 处 CO 的浓度值就越小。

由于 CO 对人体有很大的危害,需分析不同送风速度下 CO 对人体的影响。通过计算人体呼吸位置处的排污效率,能够得知在不同送风速度下,人体呼吸位置 CO 的排出效率。排污效率越大,人体呼吸处的 CO 浓度值减小的越快,对人体的危害就越小。

排污效率反映空间各点的污染程度以及在该点排污的有效性,排污效率 ε 定义如下^[7]:

$$\varepsilon = \frac{C_e}{C_p} \quad (6)$$

其中: C_e 为出风口的 CO 浓度; C_p 为某一呼吸位置处的 CO 浓度。 ε 的值越大表明排污效率越高。

由于采样点 9~16 均位于呼吸位置,对所有的呼吸位置计算出每 5 s 时的排污效率,得到不同送风速度下排污效率随时间的变化。图 6 为采样点 12 在不同送风速度下的排污效率随时间的变化图。

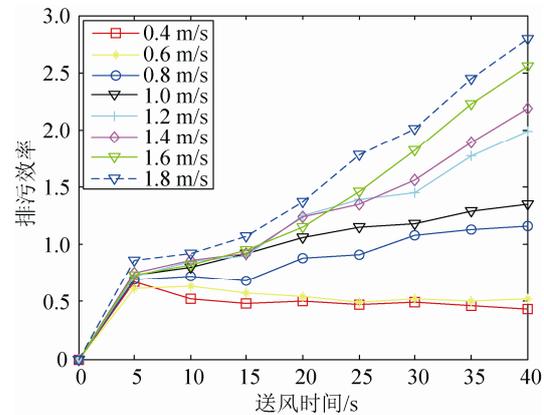


图 6 不同送风速度下采样点 12 的排污效率
Fig. 6 The drainage efficiency in sample 12 with different air supply velocity

由图 6 可以看出,不同送风速度下采样点 12 处的排污效率随着送风时间的增长变化规律不同。

送风速度为 0.4 m/s, 0.6 m/s 时,排污效率随着送风时间的增长没有很大的变化,且排污效率较低。这是由于送风速度小于 CO 的释放速度,随着 CO 的持续释放,人体呼吸位置的 CO 浓度值逐渐增大,而空调的送风速度较小,使客舱内的气流流速较小,不利于客舱内的 CO 的排出。

当送风速度为 0.8 ~1.8 m/s 时,随着送风时间的增长,排污效率的值也在逐渐增大。送风速度为 0.8 m/s, 1 m/s 时,排污效率的增长速度较慢,对 CO 的排污效果一般。当送风速度为 1.2~1.8 m/s 时,送风前 20 s 内,排污效率增长较慢,20 s 后排污效率大幅增长。这是由于当送风速度大于 CO 的释放速度时,加快了 CO 的扩散速度,使人呼吸位置处的 CO 浓度值降低,同时使更多的 CO 随着气流的流动从出风口排出。因此,在相同的送风时间下,送风速度越大,排污效率越高。

本文在模拟中选用的 RNG $k-\varepsilon$ 模型比标准 $k-\varepsilon$ 模型^[10]计算准确并且计算速度快,同时使用 Fluent 划分出的网格比 FDS 划分出的网格有更高

的精度^[6], 因此采用本文的方法使达到收敛所需的时间更短, 效率更高。

文献[2,8,10]等使用 Fluent 软件进行了数值模拟, 对于湍流模型也采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型, 均得到了较好的结果, 因此采用该方法进行数值模拟是合理可靠的。但是由于在数值模拟中, 未考虑其它一些对 CO 扩散影响较小的因素, 以及选取的湍流模型已经进行了假设简化等, 会使数值模拟的结果与真实值有一定的偏差, 但根据仿真结果的分析仍能够较为准确的得到客舱内 CO 的扩散规律, 因此本文的数值模拟是合理的。

5 结论

本文建立了 A320 飞机客舱的仿真模型, 模拟了飞机客舱空调在不同送风速度下, 火灾阴燃释放 CO 的过程, 得到了不同送风速度下的风速场和 CO 浓度场, 分析了不同送风速度下 CO 的扩散规律。

根据对客舱内速度场的仿真结果可得客舱内气流的流动规律。客舱内空调送风位置及 CO 释放位置的气流流速较大, 其余位置的气流流速较小。由于客舱壁及座椅的阻挡, 在每两排座椅之间会形成较小的环流, 并且客舱内存在由前向后的纵向气流。CO 随着气流的流动而扩散, 因此气流的流动规律可视为 CO 的扩散规律。

根据不同送风速度下 CO 浓度场的仿真结果可知, 送风速度越大, 火灾阴燃产生 CO 的扩散范围越小, 浓度值越低。并且通过对人体呼吸位置处排污效率的计算可知, 对于大部分乘客来说, 送风速度的增大能够在较短的时间内使 CO 排污效率增大, 对人体的危害减小。该研究结果可为飞机客舱火灾阴燃阶段 CO 扩散规律及毒性研究提供依据。

参考文献:

[1] 翁庙成. 建筑火灾烟气中 CO/CO₂ 的浓度分布及毒性研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2007. (Weng Miaocheng. Studies on the concentration distribution and the toxicity effect of carbon monoxide and carbon dioxide in building fire smoke [D]. Chongqing, China: Chongqing University, 2007.)

[2] 白杰, 黄士均, 杨建忠, 等. 飞机客舱烟气扩散数值仿真[J]. 航空计算技术, 2014, 44(5): 1-4. (Bai Jie, Huang Shijun, Yang Jianzhong, et al. Numerical simulation on smoke diffusion in aircraft cabin [J]. Aeronautical Computing Technique, 2014, 44(5): 1-4.)

[3] 张青松, 杨伟, 纪欢乐, 等. 基于 CO 变化的飞机客舱火灾数值模拟 [J]. 消防科学与技术, 2014, 33(1): 25-28. (Zhang Qingsong, Yang Wei, Ji Huanle, et al. Numerical simulation of the influence of CO concentration on escape exit in cabin [J]. Fire Science and Technology, 2014, 33(1): 25-28.)

[4] 张文海, 杨胜州. 基于 FDS 列车车厢火灾烟气危害分析研究 [J]. 工业安全与环保, 2013, 39(12): 57-60. (Zhang Wenhai, Yang Shengzho. Analysis of smoke hazard in train compartment fire accidents based on FDS [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2013, 39(12): 57-60.)

[5] Mercia Bart, Maele Karim Van. Numerical simulations of full-scale enclosure fires in a small compartment with natural roof ventilation [J]. Fire Safety Journal (S0379-7112), 2008, 43(7): 495-511.

[6] 曹彬, 张礼敬, 张村峰, 等. 比较 FDS 和 FLUENT 在池火灾模拟中的应用[J]. 中国安全生产科学技术, 2011, 31(9): 45-49. (Cao Bin, Zhang Lijing, Zhang Cunfeng, et al. Comparison of FDS and FLUENT applied in pool fire simulation [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2011, 31(9): 45-49.)

[7] 李先庭, 赵彬. 室内空气流动数值模拟 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009. (Li Xianting, Zhao Bin. Numerical analysis on indoor air flow [M]. Beijing, China: China Machine Press, 2009.)

[8] 孙贺江, 吴尘, 安璐. 大型客机座舱混合送风形式的数值模拟 [J]. 应用力学学报, 2013, 30(3): 439-444. (Sun Hejiang, Wu Chen, An Lu. Numerical study of mixing ventilation systems in commercial aircraft cabin [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2013, 30(3): 439-444.)

[9] 胡靖, 陆守香, 黎昌海, 等. 船舶封闭舱室火灾烟气温度特性研究 [J]. 火灾科学, 2010, 19(3): 109-115. (Hu Jing, Lu Shouxiang, Li Changhai, et al. A study on temperature characteristic in enclosed cabin fire [J]. Fire Safety Science, 2010, 19(3): 109-115.)

[10] 姚坚. 公路隧道内火灾温度场分布规律数值模拟分析 [D]. 上海: 同济大学, 2007. (Yao Jian. On numerical simulation of temperature distribution in road tunnel fires [D]. Shanghai, China: Tongji University, 2007.)