

文章编号: 1674-8190(2024)04-189-10

考虑通风效应的飞机货舱烟雾探测器布局

钟德超, 杨军, 谢萌

(成都富凯飞机工程服务有限公司, 成都 610093)

摘要: 目前较多机型的飞机货舱都带有通风功能, 探究通风效应对飞机货舱烟雾扩散的影响并确定通风工况下货舱内的烟雾探测器布局对飞行安全具有重要意义。采用计算流体力学方法建立DC-10飞机货舱火灾烟雾扩散数值模型, 仿真分析火灾烟雾的流场特征; 采用流场本征正交分解(POD)理论揭示通风对火灾烟雾流场的影响机理; 采用仿真与实验相结合的方法研究通风工况下货舱内的烟雾探测器布局, 并通过实验对比3种不同探测器布局的响应性能。结果表明: 通风会抑制火灾烟雾的向上扩散, 并延缓烟雾到达货舱顶棚的时间; 随着通风量的增加, 流场中小尺度无序流动模态所占能量的比例增加而烟雾贴近货舱顶棚进行贴壁运动的大尺度流动模态能量占比减小, 导致烟雾到达顶棚的时间延长; 在通风的飞机货舱内, 最佳的探测器布局是将探测器安装在靠近货舱角落远离通风口的位置。

关键词: 飞机货舱; 通风; 火灾烟雾; 探测器布局; CFD

中图分类号: V244.1⁺2

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.04.21

Layout of smoke detector for aircraft cargo compartment considering ventilation effect

ZHONG Dechao, YANG Jun, XIE Meng

(Chengdu Falcon Aircraft Engineering Services Co., Ltd., Chengdu 610093, China)

Abstract: The cargo compartments of most current aircraft types are equipped with ventilation function. It is of great significance for flight safety to explore the influence of ventilation effect on smoke diffusion in the cargo compartment and determine the layout of smoke detectors in the cargo compartment under ventilation conditions. A numerical model of fire smoke in DC-10 aircraft cargo compartment is established by using computational fluid dynamics method, and the flow field characteristics of fire smoke are analyzed by simulation. POD flow field orthogonal decomposition theory is used to reveal the influence mechanism of ventilation on fire smoke flow field, the layout of smoke detector in smoke cargo compartment under ventilation condition is studied by simulation and experiment. The results show that ventilation can inhibit the upward diffusion of fire smoke and delay the time for smoke to reach the cargo compartment ceiling. With the increase of ventilation volume, the energy proportion of small and medium-sized disordered flow modes in flow field increased, while the energy proportion of large-scale flow modes of smoke moving close to the cargo ceiling decreased, which resulted in a longer time for smoke to reach the ceiling. By comparing the response performance of the three different detector layouts experimentally, it is concluded that the optimal detector layout is to install the detector near the corner of the cargo hold and away from the vent.

Key words: aircraft cargo compartment; ventilation; fire smoke; detector layout; CFD

收稿日期: 2023-06-11; 修回日期: 2023-09-18

通信作者: 谢萌(1982-), 男, 学士, 工程师。E-mail: xiemeng@cd-falcon.com

引用格式: 钟德超, 杨军, 谢萌. 考虑通风效应的飞机货舱烟雾探测器布局[J]. 航空工程进展, 2024, 15(4): 189-198.

ZHONG Dechao, YANG Jun, XIE Meng. Layout of smoke detector for aircraft cargo compartment considering ventilation effect [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(4): 189-198. (in Chinese)

0 引言

飞机货舱火灾是危害飞行安全的重大安全隐患,为实现火灾的早期精准探测,目前民航飞机货舱内均装有烟雾探测系统对火灾进行探测。根据适航规章 CCAR25.858 条款的要求,飞机货舱的火灾烟雾探测系统需要在火情开始的一分钟之内完成对火灾的探测并告警^[1]。由于火灾烟雾的探测时间受飞机货舱几何尺寸、火源位置、通风条件等众多因素的影响,研究飞机货舱内烟雾探测器的布置位置对飞行安全具有重要意义。

在进行飞机货舱火灾烟雾探测系统设计时,由于飞机货舱火灾烟雾的扩散与传播规律对探测器的布局设计至关重要,国内外开展了大量关于飞机货舱火灾烟雾流场的研究^[2-4]。Blake 和 Suo-Anttila 等^[5-8]依据 B707 飞机货舱几何尺寸开发了飞机货舱真实火灾烟雾扩散数值模型,并通过与美国联邦航空局(Federal Aviation Administration, 简称 FAA)进行的 B707 全尺寸货舱火灾实验中温度场、光透率场、气体浓度场数据进行对比,验证了模型的正确性;Oztekin^[9]利用美国 NIST(National Institute of Standards and Technology)开发的专用火灾模拟软件 FDS(Fire Dynamics Simulator),采用大涡模拟(Large Eddy Simulation, 简称 LES)湍流模型模拟了 B707 飞机货舱内真实火灾烟雾的扩散,并与实验结果获得了更好的吻合度,表明由于受火源的热浮力驱动效应,烟雾的扩散呈现出明显的“顶棚效应”,即烟雾首先由火源竖直扩散至顶棚,随后保持在一定距离内贴近顶棚向四处扩散;Wang J 等^[10]通过全尺寸模拟货舱实验研究了燃烧初期火源抬升情况下货舱顶棚区域温度场、气体浓度以及火源热释放速率(HRR)等参数的变化情况,结果表明,火源高度的抬升会对烟雾探测器响应特性产生影响;张沛等^[11]在对飞机货舱烟雾扩散规律研究的基础上,提出了一种基于 CFD 数值模拟的烟雾探测系统优化布置方法,为飞机货舱内探测器的设计奠定了良好的理论基础。

然而,随着飞机货舱设计的发展,B787、A350、A380 等先进机型的货舱中开始使用通风功能。为

考虑通风货舱内混合对流效应对飞机货舱内烟雾扩散的影响,Lu K H 等^[12]在 FDS 中建立了 DC-10 飞机货舱烟雾扩散数值模型,模拟了不同通风量下飞机货舱真实火灾烟雾的扩散规律,结果表明,在货舱通风工况下,混合对流效应显著影响了舱内烟雾的流动规律,相比于无通风工况,货舱顶棚的温度场、光透率、气体浓度都出现明显变化,飞机货舱的通风效应将显著改变飞机货舱火灾烟雾的流场。然而,在带有通风的飞机货舱中,如何设计探测器布局从而实现火灾烟雾的最佳性能探测仍缺少定量的研究。

本文采用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, 简称 CFD)方法对通风效应下飞机货舱火灾烟雾的探测器布局进行研究,在深入揭示通风效应对火灾烟雾流场影响的基础上,通过对比不同探测器布局的探测性能,分析得出飞机通风货舱内的最优探测器布局,以期为飞机货舱火灾烟雾探测系统的设计提供技术支持。

1 CFD 数值模型

1.1 CFD 模型建立

参照 FAA 在 DC-10 飞机货舱内的火灾烟雾实验^[6],在 FDS 仿真软件中建立对应的 CFD 数值模型,如图 1 所示。

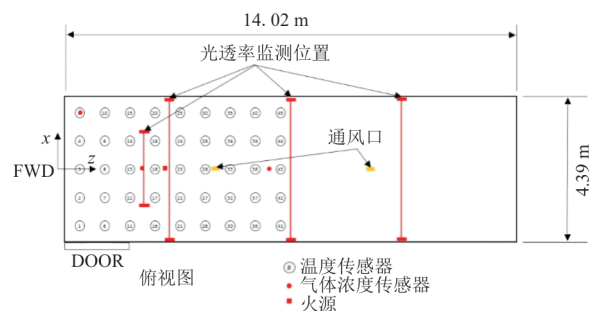


图 1 FAA DC-10 飞机货舱火灾烟雾实验中传感器位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of location of sensors in DC-10 aircraft cargo compartment fire experiment conducted by the FAA

DC-10 飞机货舱的几何尺寸为 $14.02\text{ m} \times 4.39\text{ m} \times 1.67\text{ m}$ 。在飞机货舱的天花板处,设有两个通风口,通风口尺寸为 $0.24\text{ m} \times 0.08\text{ m}$,在

FDS软件中,将通风口的表面类型设置为“supply”。在FAA的实验中,每个通风口的通风量为4.6 m/s,因此,在CFD数值模型中将通风量设为相同值。根据文献[8],DC-10飞机货舱的出风口位于货舱侧壁舱门的门缝,该缝隙的长度为4 m,宽度为10 cm。在FDS软件中将DC-10飞机货舱的壁面类型设置为“Layered”,材料为镀锌钢,比热容为1.0 kJ/(kg·K),密度为1 694.0 kg/m³,导热率为0.25 W/(m·K),仿真时设置初始温度20℃,设置初始环境压力为1.01 kPa^[13]。

在FDS软件中建立CFD数值模型(如图2所示)时,采用LES大涡模拟湍流模型对流场进行计算。采用“Burner”模型模拟火源,根据FAA开发的标准火源实验数据设置火源模型参数^[7],仿真火源的边界条件设置如图3所示,其中图3(a)为火源热释放速率曲线,可以看出:火源的热释放峰值为5 kW;图3(b)为火源释放的烟雾固态颗粒、一氧化碳气体、二氧化碳气体释放率曲线,根据参考文献[7],以上燃烧产物释放速率与火源热释放速率呈比例关系,相应的系数分别设为0.065、1.25和0.125。

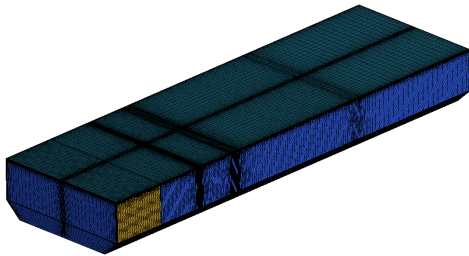
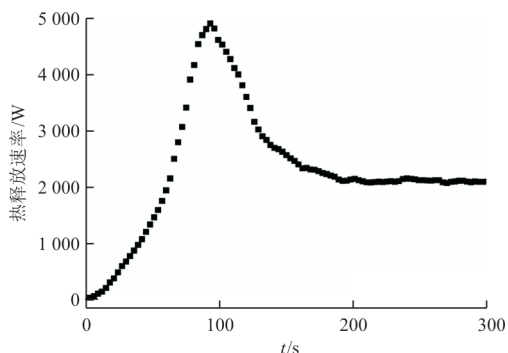
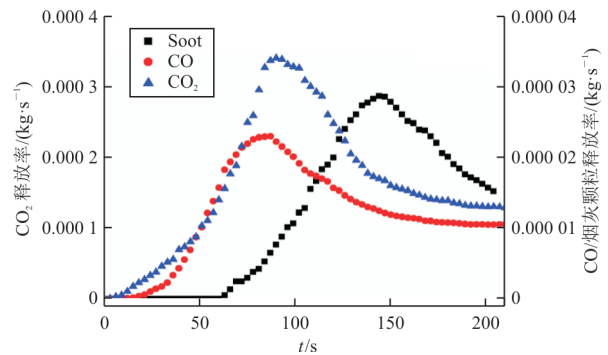


图2 DC-10飞机货舱火灾烟雾CFD网格
Fig. 2 Mesh of DC-10 aircraft cargo compartment fire smoke



(a) 火源热释放速率曲线



(b) CO、CO₂和烟灰颗粒释放率曲线

图3 火源参数,包括热释放速率、一氧化碳、二氧化碳、烟灰颗粒释放速率

Fig. 3 Parameters of actual fire source including heat release rate (HRR) and release rates of carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO₂), and soot

根据火源特征直径确定网格尺寸大小,火源特征直径的计算公式^[14]为

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_\infty C_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (1)$$

式中: \dot{Q} 为热释放量; ρ_∞ 为环境密度; C_p 为空气比热容; T_∞ 为环境温度; g 为重力加速度; D^* 为特征直径。

由于火源的热释放率峰值为5 kW,代入式(1)可得 D^* 为0.11 m,根据参考文献[15], $D^*/\Delta=5$,可以得出网格的尺寸为0.022 m。在完成CFD模型集合建模后,对模型进行网格划分和网格独立性检验,根据网格独立性检验结果,最终选取130万计算网格。

为验证模型的正确性,在CFD数值模型中设置各类传感器监测火灾烟雾流场中的各类参数。参照FAA DC-10飞机货舱火灾实验,CFD模型中设置40个温度传感器、4个光透率传感器、3个CO/CO₂传感器,传感器的具体位置参见文献[6]。其中光透率参数的计算方法如式(2)所示。

$$L_T = \exp\left(-K_m \sum_{i=1}^n \rho_{\text{soot},i} \Delta x_i / L\right) \times 100(\%) \quad (2)$$

式中: L_T 为光透率; $\rho_{\text{soot},i}$ 为CFD计算中每个网格单元内的烟雾颗粒浓度; Δx_i 为网格尺度; L 为特征尺寸; K_m 为消光系数,根据FAA实验^[6],将消光系数设为7 400 m²/kg。

1.2 CFD 模型验证

将 CFD 模型计算结果与 FAA 实验结果进行对比,如图 4~图 6 所示(图 5 中,1 ppm=0.000 1%,TC5 为前货舱角落位置),可以看出:DC-10 飞机货舱火灾烟雾 CFD 计算中的温度场、气体浓度场、光透率场的计算结果与 FAA 实验结果吻合程度良好,证明了 CFD 模型的正确性。

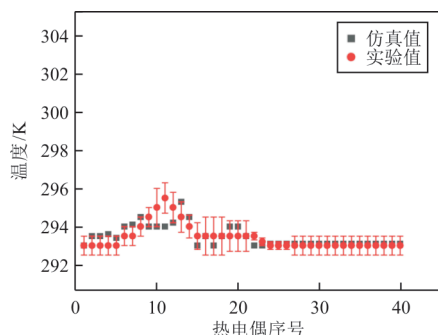


图 4 温度仿真结果与实验结果对比

Fig. 4 Comparison of temperature simulation results and experimental results

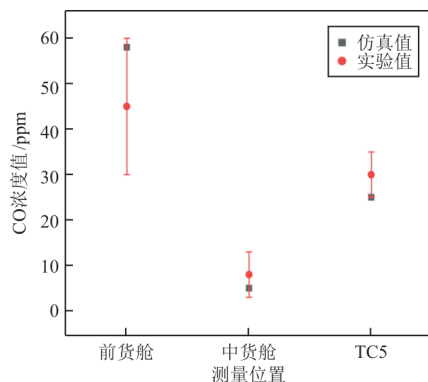


图 5 CO 浓度仿真计算结果与实验结果对比

Fig. 5 Comparison of CO concentration simulation results and experimental results

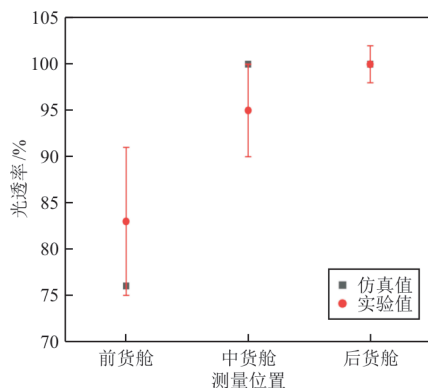


图 6 烟雾光透率的仿真结果与实验结果对比

Fig. 6 Comparison of smoke light transmittance simulation results and experimental results

从图 4 可以看出:通风会显著降低货舱顶棚区域的温度,在整个仿真周期内,飞机货舱顶棚区域各监测位置的温度波动范围很小,温度值大约在 294 K。从图 5~图 6 可以看出:位于前货舱、中货舱、后货舱三个位置的烟雾浓度计算值均落在误差棒内,表明 CFD 模型计算结果的正确性。由于火源距离前货舱的光透率传感器位置最近,因此位于前货舱的烟雾浓度最高,而后货舱位置的光透率传感器由于距离火源位置最远,因此该位置的烟雾浓度接近 0,表明扩散至该位置处的烟雾量极小,这可能是由于货舱内的通风效应对烟雾的扩散起到了阻碍作用,为验证猜想,需进一步对通风效应下飞机货舱的烟雾流场开展分析。

2 火灾烟雾流场特征分析

2.1 烟雾流场 POD 分析

为揭示飞机货舱通风效应对烟雾扩散流场特征的影响,选用流场本征正交分解(Proper Orthogonal Decomposition,简称 POD)方法作为流场特征提取的方法。POD 分解可以将烟雾的复杂湍流流场分解为若干个包含不同能量且相互正交的 POD 模态加和的形式,按照 POD 模态包含能量从大到小的顺序,其中靠前的模态即为流场主导结构,靠后的模态可视为流场中的随机脉动^[16-21]。

在进行分析时,选取 CFD 模型中飞机货舱通风的强制对流与火源的自然对流相互作用区域作为 POD 分析的区域,火源位于通风口正下方的位置,如图 7 所示。

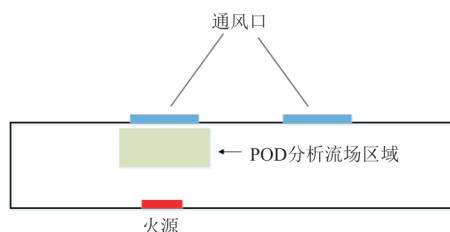


图 7 POD 分析流场区域位置示意图

Fig. 7 POD analysis flow field area location diagram

在进行 POD 分解时,采用“快照法(Snapshot)”进行数据处理,选取 100 s 内 CFD 模型的计算结果进行 POD 分析,CFD 模型每一个时刻的速度场计算结果可视为一个独立的快照,对 100 s 内所有 CFD 计算产生的流场快照求均值,求均值之后的结果即为 POD 分析的零阶模态,随后将每一

幅流场快照与零阶模态相减,得到如式(3)所示的矩阵^[21]。

$$U = [u_1 \ u_2 \ u_3 \ \dots \ u_n] = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ u_{M1} & u_{M2} & \dots & u_{MN} \\ v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{M1} & v_{M2} & \dots & v_{MN} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:下标 N 代表POD分解中流场快照的数量(所有时间); M 代表开展流场POD分析区域包含的测量点数量(所有位置);矩阵中的每一行元素代表流场中某一测量点在所有时刻的快照与零阶模态的差值;每一列元素代表在某一固定的快照中所有测量点的速度值与零阶模态的差值^[21]。

通过式(3),构造协方差矩阵 R ,如式(4)所示。

$$R = U^T U \quad (4)$$

求解式(4)中 R 矩阵的特征值与特征向量,如式(5)所示。

$$R\Phi_i = \lambda_i \Phi_i \quad (5)$$

式中: λ_i 为 R 矩阵的特征值, λ_i 的大小与POD模态包含的能量大小相关^[21],因此,将特征值按照从大到小的顺序排列,即 $\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_N = 0$; Φ_i 为 R 矩阵的特征向量。

在式(5)的基础上可以进一步求解流场POD模态 φ_i :

$$\varphi_i = \frac{\sum_{n=1}^N \Phi_i^n u_n}{\left\| \sum_{n=1}^N \Phi_i^n u_n \right\|} \quad (i=1, \dots, N) \quad (6)$$

式中: Φ_i^n 为式(5)中第 i 个特征值 λ_i 对应特征向量的第 n 个元素^[21]。

基于式(6),即可得到对CFD计算流场的线性重构,其中,最大特征值 λ_1 对应的POD模态为火灾烟雾流场的主导结构。

为探究飞机货舱内通风效应对流场特征的影响,在2.3、4.6、6.4 m/s三种不同通风量下进行流场的POD分解,在对以上三种工况进行POD分解时,选取的流场快照区域相同,均为如图7所示区域。

三种不同通风量下飞机货舱顶棚区域的流场

POD分解结果如图8所示。

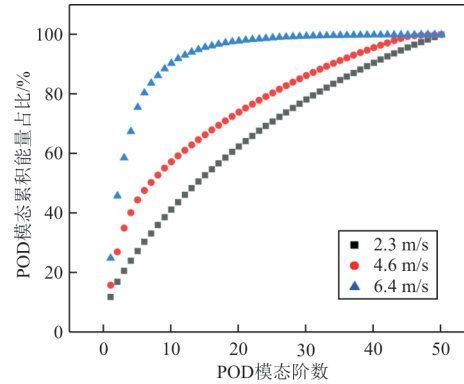


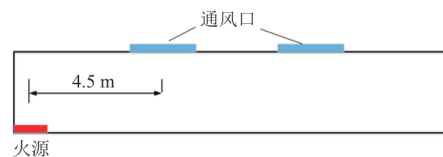
图8 不同通风量下飞机货舱流场POD分解结果
Fig. 8 POD decomposition results of aircraft cargo hold flow field under different ventilation rates

从图8可以看出:2.3 m/s通风量下流场模态包含的累积能量随模态阶数的增加较快,意味着流场中以烟雾沿货舱顶棚剪切流动的大尺度主导结构能量占比较大,而6.4 m/s通风量下流场主导结构能量占比最小,这是因为此时火源的热浮力无法克服通风的强制对流效应,在与货舱内空气掺混的过程中产生了小尺度无序流动,从而导致贴近货舱顶棚区域的大尺度剪切流动能量占比降低。

该结果预示着,随着通风量的增大,火灾烟雾流场中的小尺度无序流动模态所占能量的比例增加,从而延缓了火灾烟雾向上扩散至货舱顶棚的时间。

2.2 仿真工况设置

飞机货舱火灾烟雾探测时间受火源位置与通风量因素的共同影响,在设计飞机货舱烟雾探测器布局时,需考虑火源位置、通风量等因素影响下火灾烟雾的扩散情况。按照火源位置与通风口由远及近的距离、通风量由小到大的顺序,设置不同的仿真工况。不同工况下火源与通风口相对位置示意图如图9所示。



(a) 位置一

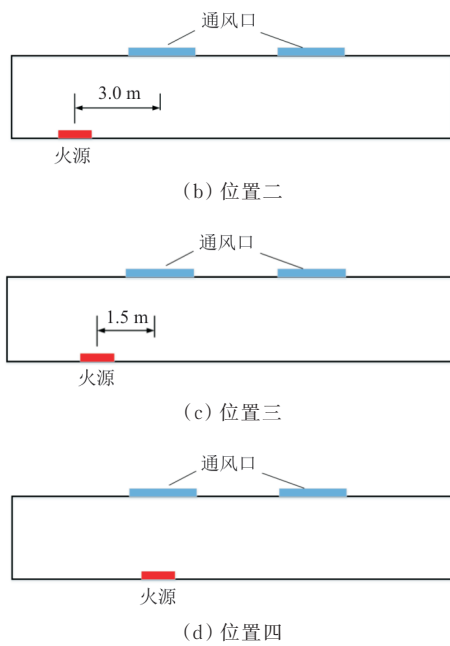


图9 不同工况下火源与通风口相对位置示意图
Fig. 9 Schematic diagram of relative positions of fire source and vent under different working conditions

为研究不同通风量下火灾烟雾流场的特征，按照通风量由小到大的顺序，设置 2.3、4.6、6.4 m/s 三种通风量。

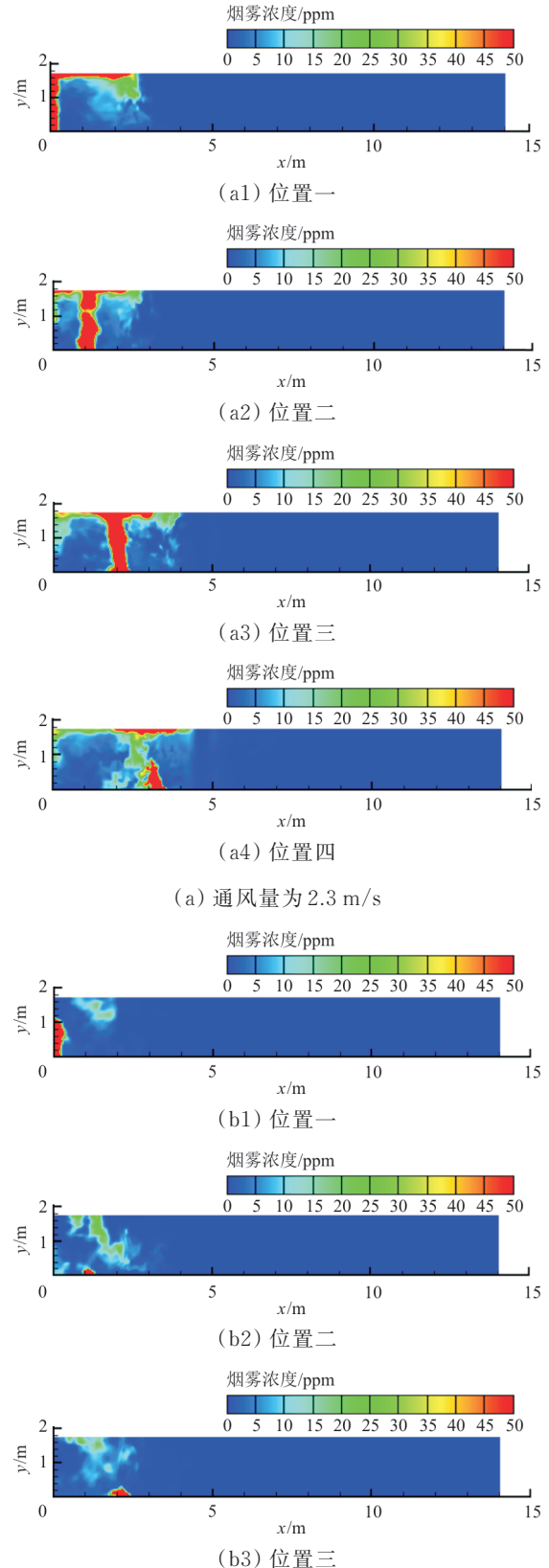
在设置仿真工况时，以通风量和火源位置两个参数为变量，共设置 12 组仿真工况，如表 1 所示。

表1 火灾烟雾流场特征研究仿真工况设置
Table 1 Setting of simulation conditions of fire smoke flow field characteristics

通风量/(m·s ⁻¹)	火源位置
2.3	位置一
	位置二
	位置三
	位置四
4.6	位置一
	位置二
	位置三
	位置四
6.4	位置一
	位置二
	位置三
	位置四

2.3 流场 CFD 仿真结果

不同通风量及火源位置下火灾烟雾流场仿真结果如图 10 所示。



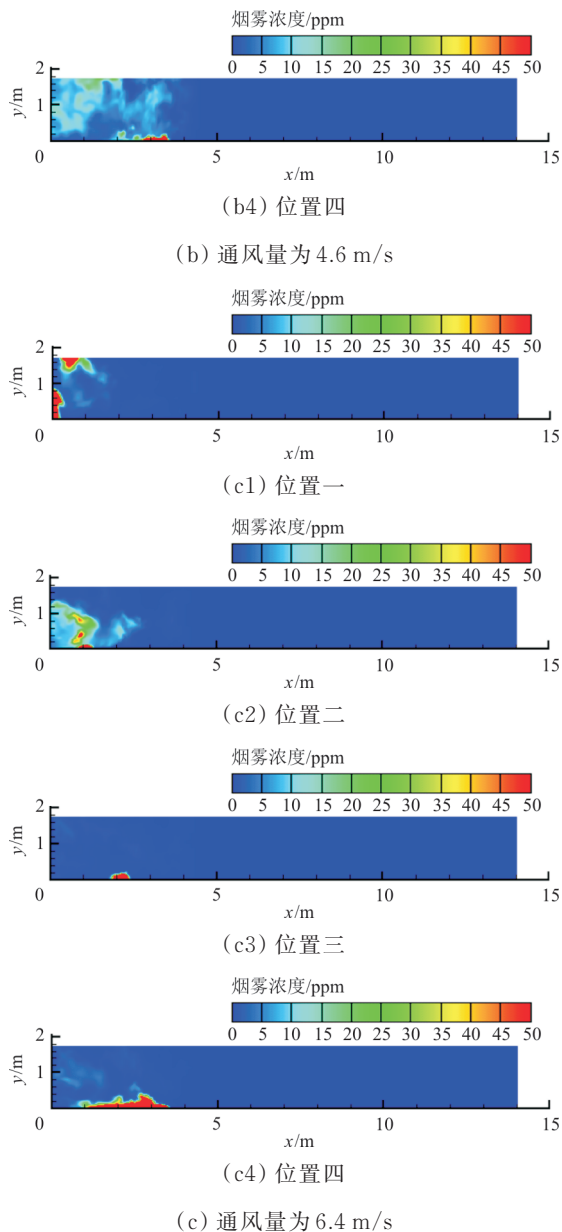


图 10 不同通风量及火源位置下火灾烟雾流场仿真结果
Fig.10 Simulation results of fire smoke flow field under different ventilation volume and fire source location

从图 10 可以看出:飞机货舱的通风显著抑制了火灾烟雾的向上扩散,通风量越大,这种抑制效应越显著。当通风量为 2.3 m/s 时,火灾烟雾尚能够扩散至货舱顶棚,但当通风量达到 6.4 m/s 时,火灾烟雾已很难达到货舱顶棚,这意味着随着通风量的增加,火灾烟雾达到货舱顶棚的时间将会延长。飞机货舱烟雾探测器一般安装于货舱顶棚,因此,通风会延缓火灾烟雾探测的时间,这与 2.1 节流场 POD 分析的结果是相符的。

从火源位置来看,当火源位置距离通风口越近,通风对火灾烟雾向上扩散的抑制效应越显著。

通风量为 6.4 m/s 时,当火源处于位置一时,由于火源距离通风口较远,火灾烟雾尚能够克服通风的强制对流效应而达到货舱顶棚,但当火源位于通风口正下方的位置四时,火灾烟雾的向上扩散被通风显著抑制,货舱顶棚的烟雾浓度极低,只有在远离通风口的货舱顶棚角落区域存在少量烟雾。

综上,通风会在一定程度上延缓烟雾到达货舱顶棚的时间,并且烟雾探测器响应时间受通风量、火源位置因素的共同影响,因此,需在考虑多种因素的作用下进一步探索飞机通风货舱内的烟雾探测器布局。

3 探测器布局研究

3.1 实验工况设置

根据 GB 50116—2013《火灾自动报警系统设计规范》^[22]的规定,探测器至空调送风口边的水平距离不应小于 1.5 m,其主要原因是气流会阻碍极小的燃烧粒子扩散到探测器中去,使探测器探测不到烟雾,此外,该标准中规定探测器至墙壁、梁边的水平距离不应小于 0.5 m。为最终确定通风货舱内烟雾探测器的最佳布局,以 GB 50116—2013 标准中对烟雾探测器的位置要求为约束条件,在某机型的货舱内设置三种探测器布局工况进行实验,三种探测器布局下探测器与通风口的相对位置如图 11 所示。

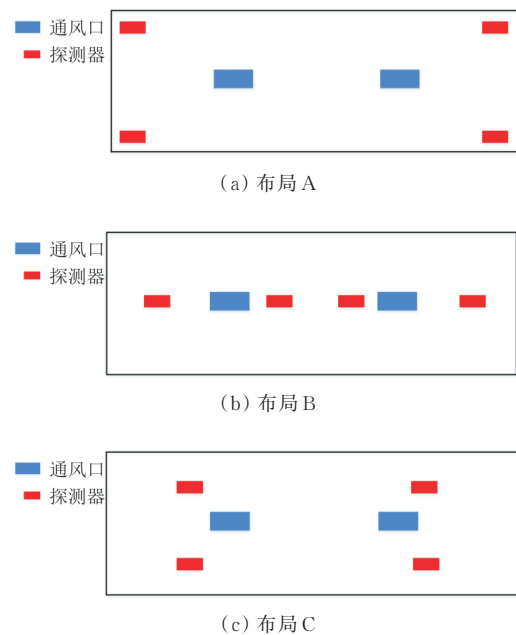


图 11 三种探测器布局示意图
Fig. 11 Schematic diagram of three detector layouts

根据烟雾探测器数量估算方法^[11],可以初步估算出飞机货舱内需要的探测器数量为 4 个。因此,在图 11 所示的 A、B、C 三种探测器布局中,探测器的数量均为 4 个,其中探测器布局 A 中将四个探测器分别置于靠近货舱顶棚的四个角落并远离通风口,布局 B 将四个探测器沿货舱顶棚中线均匀布置,布局 C 将四个探测器均匀布置在货舱顶棚的左右两侧靠近通风口区域。此外,参照文献[8]中的描述,将飞机货舱内典型的火源位置设置为三种工况:角落火(火源靠近货舱的角落)、壁面火(火源贴近货舱侧壁面)和中央火(火源位于货舱正中央),在三种不同火源位置工况下分别对比 A、B、C 三种烟雾探测器布局的探测性能,三种火源位置示意图如图 12 所示。实验过程中,每种火源工况进行五次独立重复实验,取平均值作为最终结果。

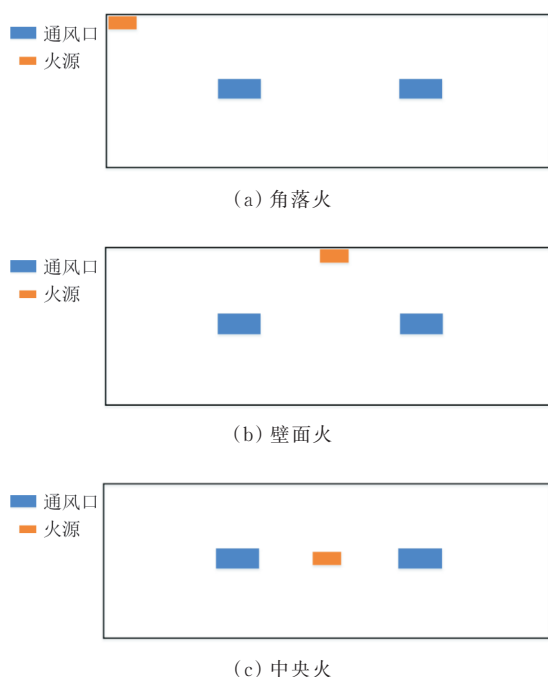


图 12 三种火源位置示意图

Fig. 12 Schematic diagram of three fire source positions

3.2 探测器布局实验结果

60 s 时刻时三种探测器布局下烟雾浓度响应值对比如图 13 所示,实验工况中通风量为 2.3 m/s。图 13 中采用归一化浓度进行对比,如式(7)所示。

$$C^* = \frac{C_{\text{local}}}{C_{\text{max}}} \quad (7)$$

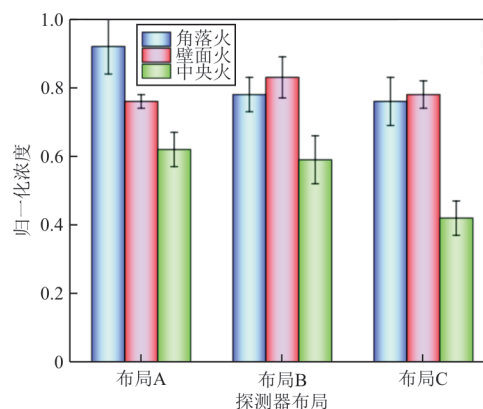


图 13 三种探测器布局下的烟雾浓度响应值对比

Fig. 13 Comparison of smoke concentration response values under three detector layouts

从图 13 可以看出:在 60 s 时刻,中央火工况下三种探测器布局的响应浓度最低,这意味着在角落火、壁面火、中央火三种工况中,中央火最不利于探测。在中央火工况下,探测器布局 C 的响应值显著低于布局 A 和布局 B。这与第 2 节的分析相符,由于在三种火源位置工况中,火源位于中央时距离通风口距离最近,飞机货舱内通风对火灾烟雾向上扩散的抑制效应最为显著,火灾烟雾流场中的小尺度无序流动模式所占能量的比例增加,从而延缓了火灾烟雾向上扩散至货舱顶棚的时间。

当火源位于角落时,探测器布局 A 的探测性能最优,当火源位于侧壁时,探测器布局 B 的探测性能最优。这是因为当火源位于角落和侧壁时,由于通风距离通风口距离较远,烟雾向上扩散时受通风的抑制效应并不明显,从而使得距离火源位置较近的探测器布局占有相对优势。

为了进一步对比三种探测器布局的探测性能,在通风量为 2.3、4.6、6.4 m/s 三种通风量下进行实验,以角落火、壁面火、中央火三种火源位置下探测器的归一化响应值作为三个坐标轴做雷达图,则雷达图中围成的三角形面积可表示探测器布局在考虑多种火源位置时探测能力的综合体现。

三种探测器布局对不同位置火源的响应性能雷达图如图 14 所示,可以看出:随着通风量的增加,A、B、C 三种探测器布局雷达图围成的面积均有所减小,意味着探测性能随着通风量的增加而下降。这与第 2.1 节流场 POD 分析的结果相符,随着通风量的增加,流场中小尺度无序流动模式

所占能量的比例增加而烟雾贴近货舱顶棚进行贴壁运动的大尺度流动模态能量占比减小,从而导致烟雾到达顶棚的时间延长。

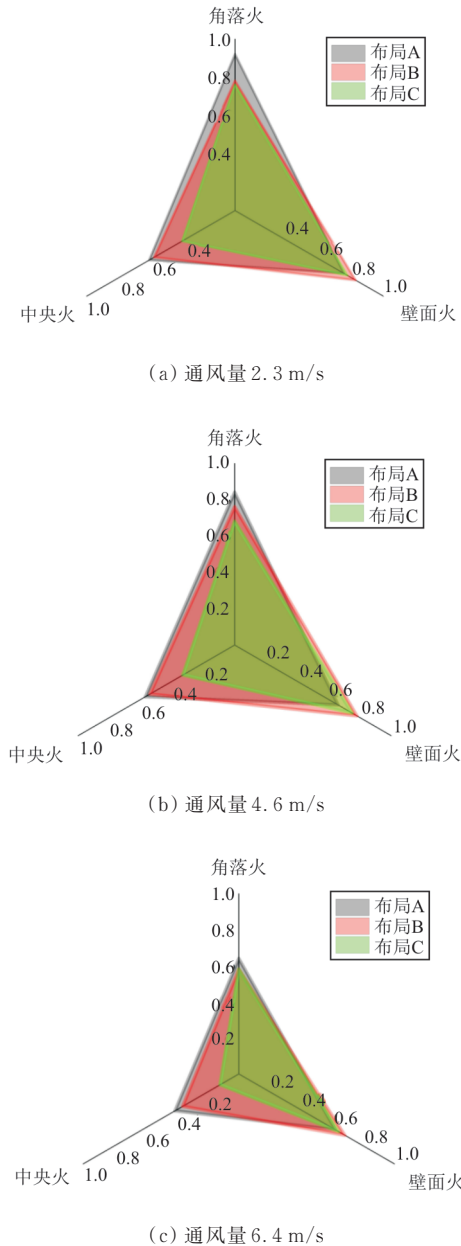


图 14 三种探测器布局对不同位置火源的响应性能雷达图

Fig. 14 Radar map of response performance of three detector layouts to fire sources at different locations

为进一步清晰地对比 A、B、C 三种探测器布局的性能,求解图 14 中不同通风量下不同探测器布局与三个坐标轴围成的面积,该面积可以表示探测器布局在考虑多种火源位置时的综合探测性能,如图 15 所示,可以看出:在 A、B、C 三种探测器

布局中,布局 C 与三个坐标轴围成的三角形面积最小,表明布局 C 的综合探测性能最弱,这是因为布局 C 中的烟雾探测器距离通风口距离最近,烟雾受到通风的抑制效应最为明显,从而延缓烟雾到达顶棚的时间。反之,在三种探测器布局中,布局 A 与三个坐标轴围成的三角形面积最大,表明布局 A 的综合探测性能最强,这也是由于通风增加了流场中小尺度无序流动模态所占的能量,并抑制了烟雾的向上扩散,使得烟雾扩散至货舱的角落和边缘处才能到达顶棚,因此,当探测器位于远离通风口的角落和边缘时,响应值更高。

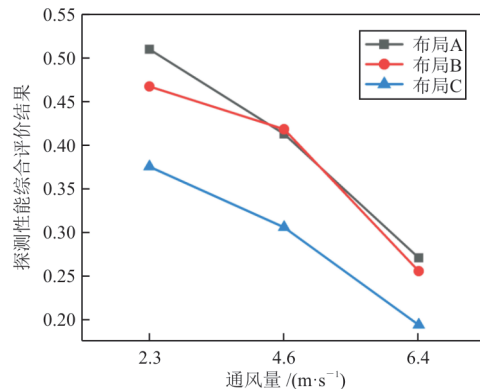


图 15 三种探测器布局性能综合评价结果

Fig. 15 Results of comprehensive evaluation of three different detector layouts

4 结 论

1) 通风的引入将抑制火灾烟雾的向上扩散,从而延缓火灾烟雾到达货舱顶棚的时间。

2) 从流场能量角度来说,随着通风量的增加,烟雾沿货舱顶棚区域剪切流动的大尺度流动能量占比降低,而火灾烟雾流场中的小尺度无序流动模态所占的能量比例增加,这是造成烟雾探测器探测时间延长的根本原因。

3) 在带有通风的飞机货舱内,考虑角落火、壁面火、中央火三种典型的火源位置时,最佳的探测器布局是将探测器安装于靠近货舱角落和边缘远离通风口的位置。

参 考 文 献

[1] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4 [S]. 北京: 中国民用航空局, 2001.
Civil Aviation Administration of China. Airworthiness standards for transport aircraft: CCAR-25-R4[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2001. (in Chinese)

- [2] BLAKE D. Aircraft cargo compartment smoke detector alarm incidents on US registered aircraft 1974—1999 [R]. Washington DC: FAA, 2000.
- [3] FAA. Airworthiness standards: transport category airplanes Part 25.858[S]. Washington DC: FAA, 2014.
- [4] FAA. Smoke detection, penetration, evacuation tests and related flight manual emergency procedures: advisory circular: AC 25-9A[S]. Washington DC: FAA, 1994.
- [5] BLAKE D, SUO-ANTTILA J. Aircraft cargo compartment fire detection and smoke transport modeling [J]. Fire Safety Journal, 2008, 43(8): 576-582.
- [6] SUO-ANTTILA J, GILL W, GALLEGOS C, et al. Computational fluid dynamics code for smoke transport during an aircraft cargo compartment fire, transport solver, graphical user interface, and preliminary baseline validation: DOT/FAA/AR-03/49[R]. Washington DC: FAA, 2003.
- [7] BLAKE D. Development of a standardized fire source for aircraft cargo compartment fire detection systems: DOT/FAA/AR-06/21[R]. Washington DC: FAA, 2006.
- [8] SUO-ANTTILA J, GILL W, GALLEGOS C, et al. Cargo compartment smoke transport computational fluid dynamics code validation: DOT/FAA/AR-07/27 [R]. Washington DC: FAA, 2007.
- [9] OZTEKIN E. Heat and mass transfer due to a small-fire in an aircraft cargo compartment [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 73(1): 562-573.
- [10] WANG J, LU S, HU Y, et al. Early stage of elevated fires in an aircraft cargo compartment: a full-scale experimental investigation [J]. Fire Technology, 2015, 51(1): 1129-1147.
- [11] 张沛, 孟曼利, 汪箭. 飞机货舱烟雾探测系统优化布置技术及平台研发 [J]. 火灾科学, 2016, 25(4): 228-233. ZHANG Pei, MENG Manli, WANG Jian. Placement optimization and platform development of aircraft cargo smoke detection system [J]. Fire Safety, 2016, 25(4): 228-233. (in Chinese)
- [12] LU K H, MAO S H, WANG J, et al. Numerical simulation of the ventilation effect on fire characteristics and detections in an aircraft cargo compartment [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 124(1): 1441-1446.
- [13] 邵资焱. 基于MIGA优化方法的飞机货舱烟雾模拟研究 [D]. 天津: 中国民航大学, 2020. SHAO Ziyang. Research on smoke simulation in aircraft cargo compartment based on MIGA optimization method [D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2020. (in Chinese)
- [14] OZTEKIN E, BLAKE D, LYON R. Flow induced by a small fire in an aircraft cargo compartment [C]// 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Nashville, Tennessee: AIAA, 2012: 1-13.
- [15] MCGRATTAN K B, MCDERNOTT R, HOSTIKKA S, et al. Fire dynamics simulator user's guide [M]. 5th ed. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2010.
- [16] 任峰, 高传强, 唐辉. 机器学习在流动控制领域的应用及发展趋势 [J]. 航空学报, 2021, 42(4): 152-166. REN Feng, GAO Chuanqiang, TANG Hui. Machine learning for flow control: applications and trends [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(4): 152-166. (in Chinese)
- [17] 张伟伟, 寇家庆, 刘溢浪. 智能赋能流体力学展望 [J]. 航空学报, 2021, 42(4): 26-31. ZHANG Weiwei, KOU Jiaqing, LIU Yilang. Prospect of artificial intelligence empowered fluid mechanics [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(4): 26-31. (in Chinese)
- [18] 王怡星, 韩仁坤, 刘子扬. 流体力学深度学习建模技术研究进展 [J]. 航空学报, 2021, 42(4): 231-250. WANG Yixing, HAN Renkun, LIU Ziyang. Progress of deep learning modeling technology for fluid mechanics [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(4): 231-250. (in Chinese)
- [19] TAIRA K, HEMATI M, BRUNTON S L, et al. Modal analysis of fluid flows: applications and outlook [J]. AIAA Journal, 2020, 58(3): 998-1022.
- [20] TAIRA K, BRUNTON S L, DAWSON S T M, et al. Modal analysis of fluid flows: an overview [J]. AIAA Journal, 2017, 55(12): 4013-4041.
- [21] MEYER K E, CAVAR D, PEDERSEN J M. POD as tool for comparison of PIV and LES data [D]. Rome: Faculty of Engineering La Sapienza University, 2007.
- [22] 中华人民共和国公安部. 火灾自动报警系统设计规范: GB 50116—2013 [S]. 北京: 中华人民共和国公安部, 2013. Ministry of Public Security of the People's Republic of China. Criterion for design of automatic fire alarm system: GB 50116—2013 [S]. Beijing: Ministry of Public Security of the People's Republic of China, 2013. (in Chinese)

(编辑: 马文静)