

DOI:10.16356/j.1005-2615.2025.04.005

涡喷动力烟雾发生器的烟雾扩散特性研究

曹广州¹, 任锐², 孙洪亮¹

(1. 南京航空航天大学无人机研究院, 南京 210016; 2. 南京航空航天大学能源与动力学院, 南京 210016)

摘要: 针对以涡喷发动机为动力源的烟雾发生器, 基于仿真软件 FLUENT 中的离散相模型计算了发动机高速喷流作用下的烟雾扩散特性, 获得了烟雾在高速流场中质量浓度的空间分布, 进一步分析了烟雾剂流量、发动机尾喷流速度和环境风速对烟雾浓度分布的影响。结果表明, 在发动机尾喷流的作用范围内, 烟雾呈锥状扩散, 在尾喷流作用范围下游, 烟雾因回流涡团而向上扩散; 三级以下的环境风可以抑制烟雾向上扩散, 在更远的作用距离内对近地面进行烟雾覆盖; 烟雾剂喷射流量和发动机喷流流量的增大都可以提高烟雾浓度, 扩大有效防护范围。研究成果可为以航空发动机为动力源的新型烟雾发生器的开发提供参考。

关键词: 涡喷发动机; 烟雾发生器; 烟雾扩散; 空间分布; 离散相模型

中图分类号: E951.4

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2025)04-0630-10

Smoke Diffusion Characteristics for Smoke Generator Based on Turbojet

CAO Guangzhou¹, REN Rui², SUN Hongliang¹

(1. Research Institute of Unmanned Aircraft, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Based on the discrete phase model in the simulation software FLUENT, the smoke diffusion characteristics under high-speed jet action of a smoke generator powered by a turbojet engine are calculated. Spatial distribution of smoke mass concentration in high-speed engine exhaust flow field is studied. The effects of smoke flow rate, engine exhaust flow rate and wind speed on the distribution of smoke concentration are also studied. The results indicate that within the range of action of the engine exhaust flow, smoke spreads in a conical shape, and in the downstream, smoke easily spreads upward due to the reverse flow effect. Environmental winds below grade three can suppress the upward diffusion of smoke and cover the ground with smoke at a greater distance. The increase of smoke flow rate and engine exhaust flow rate both can increase the smoke concentration and provide a larger effective protection range. The research can provide reference for the design of smoke generators powered by turbojet.

Key words: turbojet engine; smoke generator; smoke diffusion; space distribution; discrete phase model

随着现代战争的不断发展, 人工烟雾作为一种能屏蔽高精度制导武器末端信号的措施, 在局部战争中发挥着越来越重要的作用。人工烟雾主要是由提前燃烧或者预先布撒的颗粒形成的一定面积的烟幕带。早在 1973 年的第 4 次中东战争中, 由于反坦克火箭弹以及反坦克导弹的威胁, 以色列就使

用烟雾炮弹大幅度减少了坦克以及装甲车的损失率^[1]。因此, 研究人工烟雾的释放、扩散规律以及分布特性对于提高针对精确制导武器的末端防护具有重要意义^[2-3]。

现阶段烟雾器材多以烟雾弹、发烟罐以及具有热动力源的烟雾发生器为主, 前两者以局部小目标

收稿日期: 2024-10-21; 修订日期: 2024-12-31

通信作者: 曹广州, 男, 副研究员, E-mail: cgzae@nuaa.edu.cn。

引用格式: 曹广州, 任锐, 孙洪亮. 涡喷动力烟雾发生器的烟雾扩散特性研究[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2025, 57(4): 630-639. CAO Guangzhou, REN Rui, SUN Hongliang. Smoke diffusion characteristics for smoke generator based on turbojet[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition), 2025, 57(4): 630-639.

防护为主,后者以较大目标防护为主。从20世纪90年代开始,军事发达国家的发烟车几乎全部使用小型航空发动机作为动力源。以航空发动机为动力源的烟雾发生器是发烟车的核心,其作用原理是利用高温高速的发动机尾喷流将喷射进入的液态或微颗粒固态烟雾剂冲击打散成为微小的颗粒($\sim 10\ \mu\text{m}$ 量级)悬浮在空气中形成烟雾,并进一步向下游环境空间中进行流动扩散,图1为其原理示意图。国内自20世纪末也针对以航空发动机为动力源的烟雾发生器开展了研究,潘宁民等^[4]证明WZ8A型发动机作为烟雾发生器动力装置使用是可行的,并且进一步证明用小型航空发动机研制烟雾发生器的可行性^[5];张良等^[6]论述了对于烟雾器,作为动力源的航空发动机需要提供稳定的空气流量、燃气温度以及湍流度,并且要求发动机产生的燃气具有较强的掺混能力和携带能力。

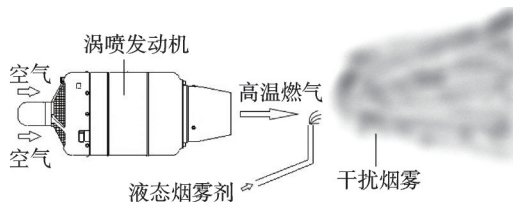


图1 涡喷发动机烟雾发生器原理简图

Fig.1 Principle diagram of smoke generator based on turbo-jet engine

针对人工烟雾的扩散规律以及烟雾分布特性,近年来国内外学者做了大量研究。Gamito等^[7]采用“涡旋粒子”的方法可视化了二维气态粒子的运动,模拟计算了不同速度粒子掺混引起的湍流问题;张帅等^[8]以赤磷烟幕为研究对象,采用含化学反应和组分输运控制模型表现了烟雾生成过程,研究了烟幕微粒的粒度分布;何园源等^[9]采用耦合的多相流模型和离散相模型,利用动态网格捕捉技术研究了煤油雾化过程中油滴的索泰尔平均直径(Santer mean diameter, SMD)空间分布特性;曹力子等^[10]通过引入自适应时间步长(Adaptive time step, ATSTEP)模型和对传统高斯烟团叠加的方式构建了烟幕动态扩散模型,以Lambert-Beer定律为依据构建了对地和对空两个维度的动态遮蔽效能仿真模型;王凤杰等^[11]基于拉格朗日随机游走模式,建立了自由空间烟雾扩散模型,同时针对连续烟源,通过数值模拟分析了烟雾粒径的时空分布;马尚权等^[12]利用Fluent软件中的湍流模型对六氟化硫烟幕在不同野外风速、不同释放流量的条件下,进行野外扩散规律的数值模拟;文献[13-16]均利用高斯烟团模式进行建模仿真,通过研究瞬时点源模拟爆炸烟雾,得到水平方向上烟雾浓度的分布规律;文献[17-18]利用高斯烟羽模型研究了烟雾的垂直特性分布。

从上述文献分析可以看出,目前大部分文献只

是针对简易烟雾器的烟雾扩散分布进行了研究,一般基于经验公式构建烟雾扩散模型,适用于离散相的自由扩散,目前针对以航空发动机为动力源的烟雾扩散特性鲜有研究。本文针对以小型涡喷发动机为动力源的烟雾发生器,以计算流体力学为基础,采用商业软件Fluent仿真模拟其烟雾在高速喷流环境中的扩散,研究烟雾剂喷流流量、发动机喷流速度和环境风速3个典型参数对烟雾空间分布和浓度的影响,为新型烟雾发生器的制备和烟雾伪装防护方案制定提供参考。

1 计算模型

本文将发动机尾喷流和环境大气视为连续相,并将其视为理想空气,将烟雾颗粒视为离散相,采用拉格朗日方法,利用Fluent中的离散相模型对该两相流进行数值仿真。

1.1 数学模型

发动机尾喷流属于典型湍流流动,其速度为 u ,温度为 T ,压力为 p ,通过求解雷诺平均N-S方程^[19]获得连续相流场分布,相关数学模型如下。

质量守恒方程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S_m \quad (1)$$

式中: ρ 为空气密度; t 为时间; u_i 为流体速度 u 在3个方向的分量; S_m 为流入连续相的质量源项。

能量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i c_p T) = S_T + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (2)$$

式中: c_p 为空气的定压比热容; λ 为气体的导热系数; S_T 为热源。

动量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right] + \rho g_i + F_i \quad (3)$$

式中: u_j 为流体速度在3个方向的分量; p 为静压; ρg_i 和 F_i 为 i 方向上的重力和由其他因素引起的外部体积力; μ 为层流黏度系数; μ_t 为湍流黏度系数,有

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4)$$

本文采用Fluent中的 $k-\epsilon$ 两方程模型处理湍流流动,即有

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} G_k \frac{\epsilon}{k} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

式中: G_k 是由层流速度梯度引起的湍流动能; $\sigma_k = 1.0$, $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.9$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

烟雾颗粒在连续相拖曳力的作用下进行运动, 其速度为

$$\frac{du_{ip}}{dt} = F_D(u_i - u_{ip}) + \frac{g_i(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_i \quad (7)$$

式中: $F_D(u_i - u_{ip})$ 为烟雾颗粒与连续相之间的曳力; u_{ip} 烟雾颗粒速度 u_p 在 3 个方向的分量; ρ 、 ρ_p 分别为连续相密度和烟雾颗粒密度; g_i 为重力加速度; F_i 为单位质量的其他作用力。其中

$$F_D = \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} \frac{C_D Re}{24} \quad (8)$$

式中: C_D 为拖曳力系数; d_p 为烟雾颗粒直径, 雷诺数定义为

$$Re = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (9)$$

烟雾颗粒的运动轨迹可以通过以下方程积分获得

$$\frac{dx}{dt} = u_p \quad (10)$$

1.2 物理模型和计算域网格划分

为简化仿真计算, 从尾喷管进口(涡轮出口)平面开始计算燃气流动, 因此以涡喷发动机为动力源的烟雾发生器物理模型被简化为射流喷针和尾喷管两大部分。烟雾剂以一定流量从射流喷针中喷出, 被冲击打散后与发动机尾喷流掺混, 并在喷流裹挟作用下向下游扩散。建立如图 2 所示物理模型和计算域, 计算域选取范围为 $100 \text{ m} \times 20 \text{ m} \times 21 \text{ m}$, 喷管轴线离地面 1 m , 以喷管出口中心为坐标原点, 以喷管轴向为 X 向, 以垂直向上 Y 向, 图中所示各尺寸均为验证试验设备的实际尺寸。

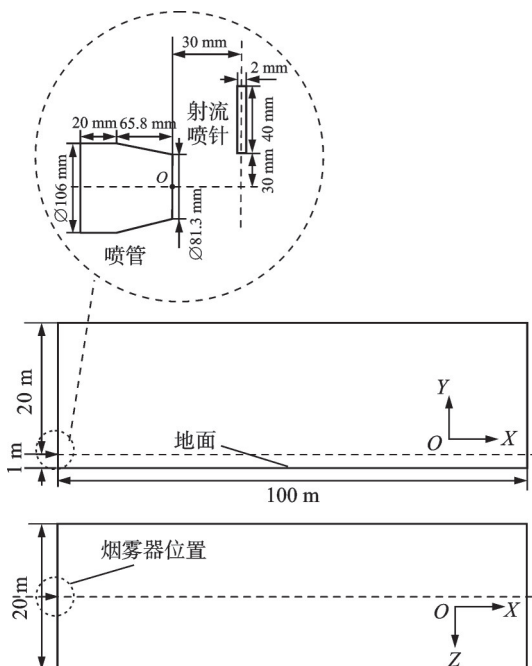


图 2 烟雾器物理模型和计算域

Fig.2 Physical model and computational domain of smoke generator

利用 ICEM 软件对上述模型进行三维网格划分, 并对喷管壁面以及尾锥附近进行网格加密, 如图 3 和图 4 所示。本节以总压 1.5 bar ($1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$)、总温 950 K 作为喷管入口的边界条件, 以 0.08 kg/s 的柴油流量作为射流喷针入口的边界条件验证网格独立性, 如图 5 所示是采用 350 万个(Grid 1)、500 万个(Grid 2)、600 万个(Grid 3)和 700 万个(Grid 4)网格计算所得喷管轴线上 ($X \geq 0$, $Y = 0$, $Z = 0$) 的烟雾浓度计算结果。从图中可以看出, 烟雾在距离喷管出口约 1 m 位置处扩散至发动机轴线, 很快在距离喷管出口约 2 m 位置处达到最大值, 之后随着扩散距离的增加, 其浓度因烟雾不断向外围扩散而逐步下降。从图中可以看出, 当网格量大于 500 万个后总体变化不大, 综合考虑计算精度与计算效率, 本文最终选取 600 万量级网格开展研究。



图 3 计算域网格

Fig.3 Domain grid

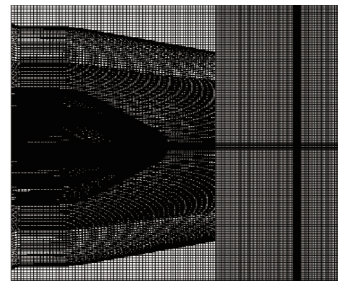


图 4 喷管附近网格

Fig.4 Grid near nozzle

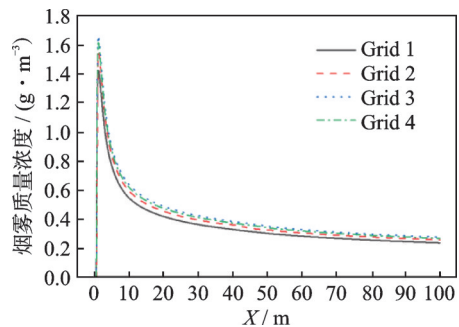


图 5 网格独立性验证

Fig.5 Grid independence verification

1.3 流体参数及边界条件

将环境大气和发动机喷流均视为理想空气, 发动机喷流的流量、温度和压力由发动机厂家提供。将烟雾设为理想球体液滴, 其分布采用罗辛-拉姆勒(R-R)分布^[20-21], 其平均粒径为 $25 \mu\text{m}$, 最大和最小粒径分别为 50 和 $5 \mu\text{m}$, 其密度为 1.3 kg/m^3 。表 1 所示为流场边界条件设置。

表 1 边界条件设置	
Table 1 Boundary condition settings	
边界	设置
发动机喷管入口	Mass-flow-inlet
烟雾剂喷针入口	Mass-flow-inlet
发动机喷管壁面	Wall
烟雾剂喷针壁面	Wall
地面	Wall
其余大气边界	Pressure-outlet

2 数值计算模型验证

2.1 人工造雾验证试验

验证试验采用 ZW40 烟雾发生器进行,该烟雾发生器以 40 kgf(1 kgf=9.8 N)微型涡喷发动机为动力源,其相关部分的尺寸和位置与上节计算模型中图 2 所示一致。

选择无风(风速小于 1 m/s)、无雨雪晴朗的理想天气进行试验。在试验过程中,发动机喷管入口总压 1.5 bar,所用烟雾剂流量为 0.1 kg/s。试验过程中采用无人机空中拍摄烟雾器工作 1、2、3、4、5 s 五个时间节点的烟雾扩散现场图像,通过 ImageJ 软件计算发动机轴对称面上的扩散长度、宽度和面积,并与计算结果进行对比。

2.2 结果对比分析

针对所用烟雾剂,项目组研究发现烟雾浓度大于 0.5 g/m³时具有良好的伪装防护效果,因此本文定义烟雾浓度大于 0.5 g/m³的区域为有效遮蔽区域,以此为边界对比计算和试验结果。

图 6 所示为烟雾发生器工作 5 s 时不同时间节点下发烟试验与仿真对比图。从图中可以看出,数值计算烟雾形状大小与验证试验值吻合良好,烟幕外形整体呈锥状,随着烟幕的持续扩散,其长度、宽度和覆盖面积逐渐增大,在烟雾器工作 5 s 后便可形成面积约为 150 m²的干扰烟幕。分析其原因,在上述无风理想条件下,发动机的高速喷流是烟雾扩散的主要动力源,相比之下,由烟雾浓度梯度造成的横向(Z向)扩散作用较小,因此产生的烟雾长度约为烟幕宽度的 3 倍。

从图中还可以看出,计算所得烟雾长度略大于试验值,而相应的宽度和面积略小于试验值。这是由于在试验过程中,无法确保完全无风(实测局域风速小于 1 m/s),这种小型局域风会促进喷流携带烟雾的横向扩散,同时也影响喷流携带烟雾在轴向(X向)的作用距离。

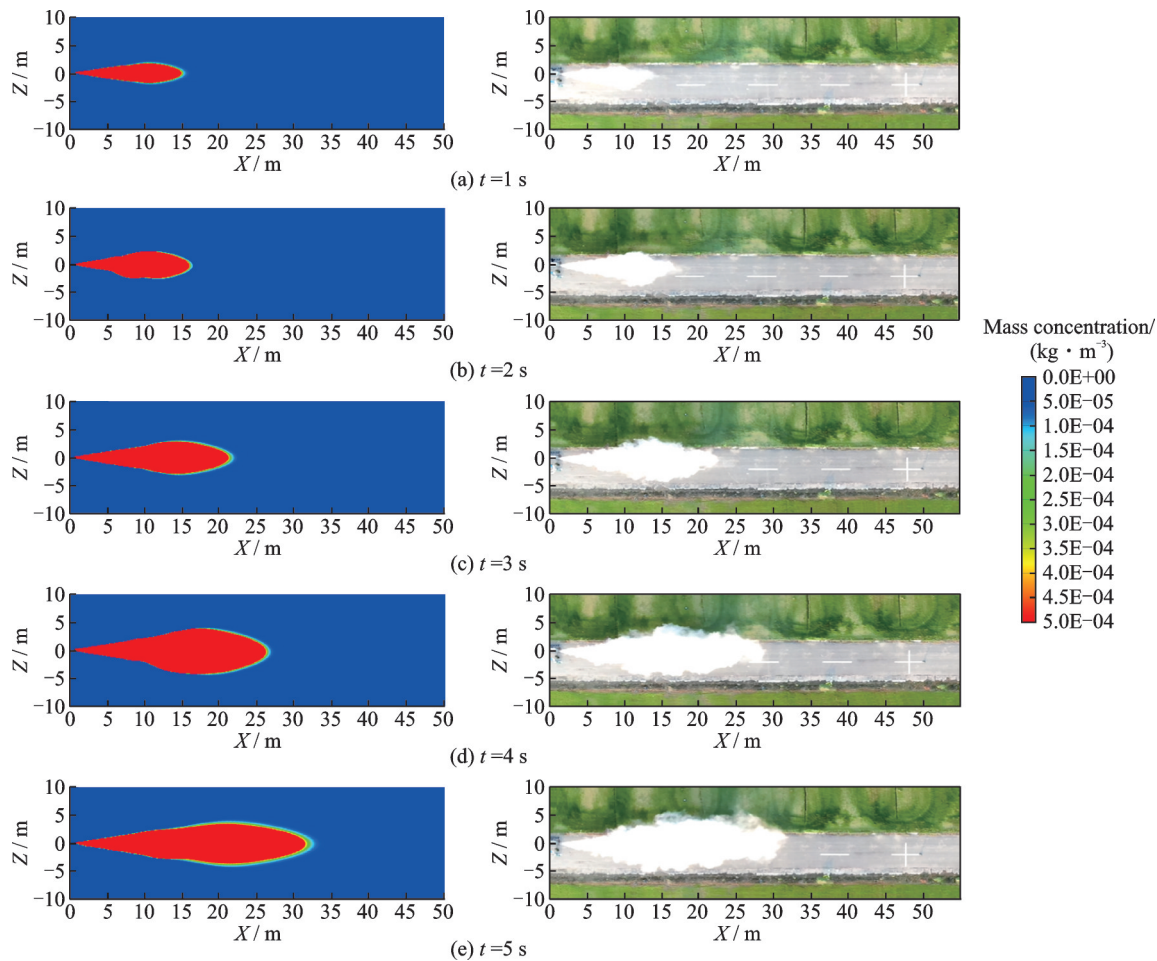


图 6 计算结果与试验对比图

Fig.6 Comparison between simulation results and experimental results

图 7 所示为烟雾长度、宽度和面积的计算与试验结果对比。可以看出,计算结果与试验结果基本吻合,最大误差均不超过 10%,这说明本文计算模型合理、计算结果可信。

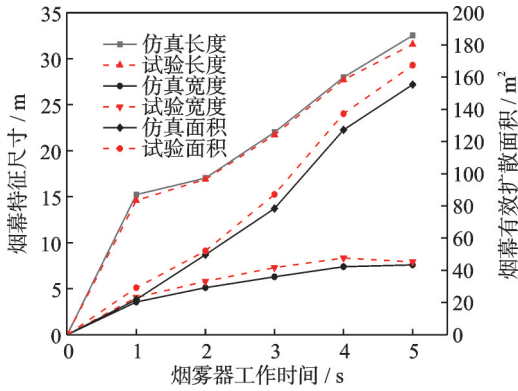


图 7 烟雾特征参数对比

Fig.7 Comparison of smoke feature parameters

3 烟雾扩散特性

利用上述计算方法对涡喷动力烟雾发生器的烟雾扩散进行数值仿真,研究烟雾剂喷射流量、发动机尾喷流流量/速度和环境风速对烟雾扩散特性的影响,表 2 所示是各算例的参数设置。

表 2 算例参数设置

Table 2 Parameter settings for computational cases

算例	烟雾剂流量 $q/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	喷流流量 $W/(\text{kg}\cdot\text{s}^{-1})$	喷流总温 T/K	风速 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
A1	0.02	0.68	950	0
A2	0.04	0.68	950	0
A3	0.06	0.68	950	0
A4	0.08	0.68	950	0
A5	0.1	0.68	950	0
B1	0.1	0.48	750	0
B2	0.1	0.58	870	0
B3	0.1	0.78	1 050	0
B4	0.1	0.88	1 150	0
C1	0.1	0.48	1 050	1
C2	0.1	0.48	1 050	2
C3	0.1	0.48	1 050	3
C4	0.1	0.48	1 050	4
C5	0.1	0.48	1 050	5

3.1 烟雾剂流量对烟雾扩散特性的影响

保持涡喷发动机喷管流量 $W=0.68\text{ kg/s}$,此时喷管燃气出口速度 $c=350\text{ m/s}$,分析无风条件下烟雾剂流量对烟雾扩散特性的影响。图 8 所示为稳定状态下 $Z=0$ 截面与 $Y=0$ 截面上的烟雾质量浓度分布(色标与图 6 相同)。可见,对于以微

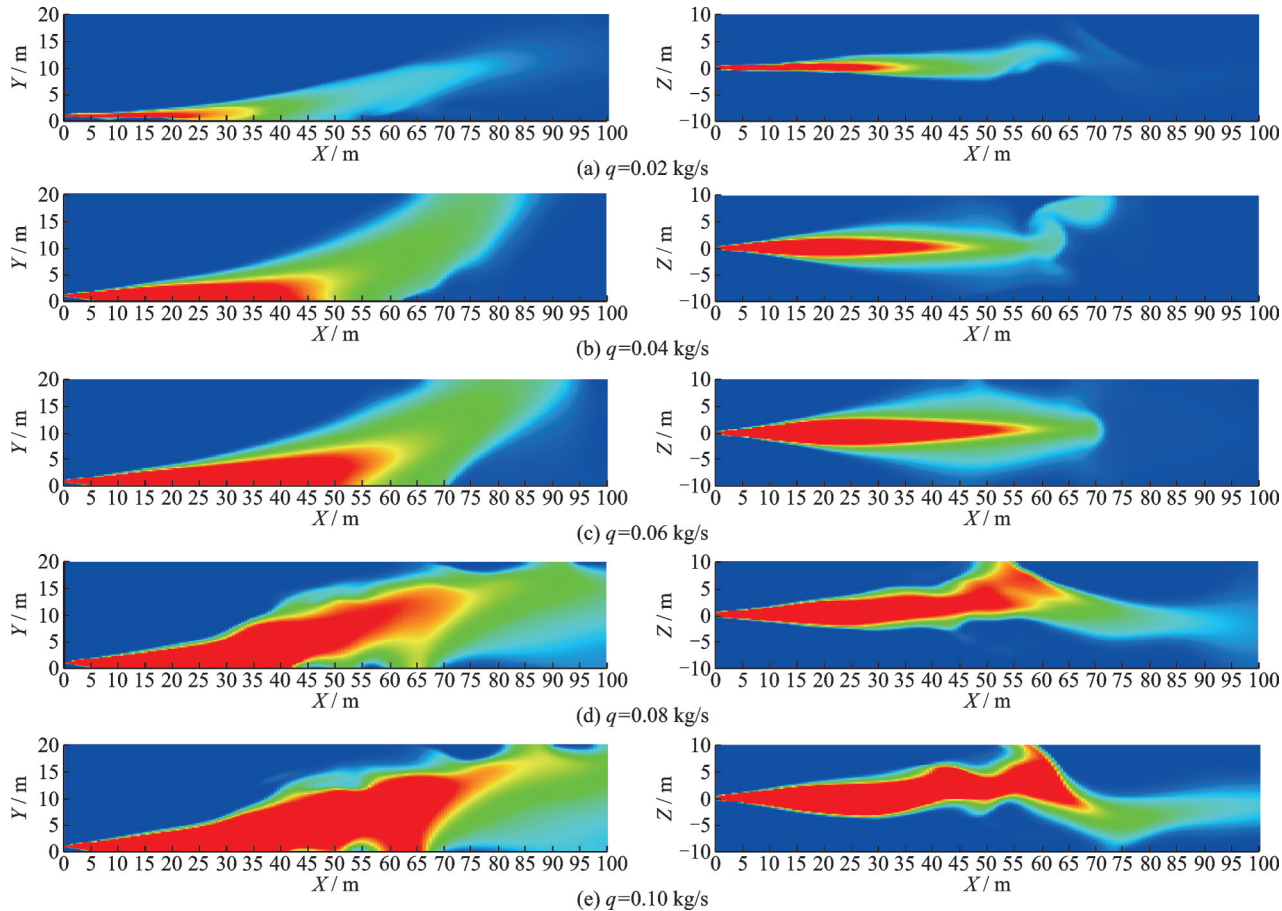


图 8 烟雾剂流量对烟雾扩散的影响

Fig.8 Effect of smoke flow rate on smoke diffusion

型涡喷发动机为动力源的烟雾发生器,其干扰烟雾整体上均先以一定的扩散角在横向上呈锥形扩散,在远离发动机的下游距离位置处开始向上扩散。

为分析其原因,本文提取发动机尾喷流速度场如图9所示。可见,随着尾喷流喷射距离的增加,气流速度逐渐衰减,在距离喷管出口50 m位置,速度衰减到2 m/s。随着距离的进一步推移,由于地面摩擦力的作用,在70~100 m的近地面逐渐形成了一个回流涡团,该涡团把喷流向上托起,导致烟雾也随之向上扩散。

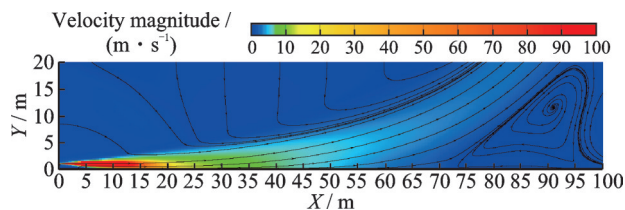


图9 发动机尾喷流速度云图和迹线图($Z=0$)

Fig.9 Engine exhaust velocity and trajectory($Z=0$)

图10所示是不同烟雾剂流量下有效作用距离(烟雾长度)、有效作用高度以及有效作用面积的对比。随着烟雾剂喷射流量的增大,烟雾的扩散范围也随之扩大。分析其原因,随着烟雾剂流量的增大,不仅高浓度烟雾遮蔽区增大,其扩散前锋的浓度梯度的增大也增强了自然对流,促进了烟雾快速向外扩散。

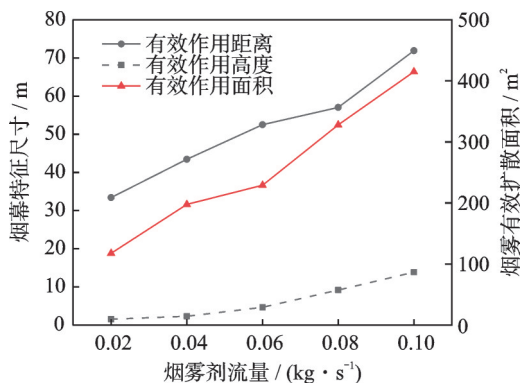


图10 烟雾剂流量对烟雾作用范围的影响

Fig.10 Effect of smoke flow rate on smoke diffusion area

进一步提取喷管轴线上的烟雾浓度如图11所示。从图中可以看出,在扩散距离达到50 m之前,轴线上的烟雾质量浓度随着烟雾剂流量增大而增大;在扩散距离达到50 m以后,由于烟雾被回流涡团向上卷起,轴线上的浓度开始出现波动,说明烟雾在特定位置上的防护有效性出现了随机性。

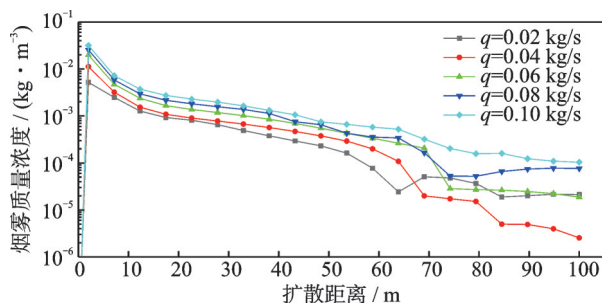


图11 烟雾剂流量对轴线上有效扩散距离的影响

Fig.11 Effect of smoke flow rate on effective diffusion distance along the axis

3.2 发动机喷流对烟雾扩散特性的影响

保持烟雾剂流量 q 为0.1 kg/s,通过调整发动机喷管流量 W 以及进口温度 T ,获得喷管出口燃气速度 c ,分析发动机喷流不同燃气速度 c 对烟雾扩散的影响。图12所示为发动机流量对烟雾扩散的影响(色标与图6相同),从 $Z=0$ 截面上看,当发动机流量较小时,烟雾很快就出现向上扩散现象,随着喷管出口气流速度的增加,烟雾会在 X 方向更长距离内一直贴近地面向下游扩散;从 $Y=0$ 截面上同样可以看出,随着发动机流量的逐渐增加,烟雾的直接作用距离逐渐增加,其整体有效覆盖范围也随之增大。分析其原因是喷流速度越小,近地区域就越早出现回流,喷流速度的增加会使气流冲击得更远,同时出现回流的位置也不断后移。

图13所示是不同发动机喷流流量下,喷管轴线上的烟雾质量浓度随距离的变化,从图中可以看出,以扩散距离50 m左右为分界点,在50 m内烟雾质量浓度随发动机喷流的增大而减小,当扩散距离超过50 m后,烟雾浓度反而随发动机喷流的增大而增大。分析其原因,对于以发动机为动力源的烟雾发生器,其烟雾扩散主要受发动机喷流的影响,较大的喷流速度和流量可以把烟雾吹到更远的距离,从而导致近距离烟雾浓度低,远距离处反而因“堆积”形成更浓厚的烟雾。总体上看,发动机喷流越大,烟雾分布范围越大。从图中还可以看出,在小喷流流量($W=0.48$ kg/s)状态时,因为回流涡团的影响出现了一段烟雾浓度很低的区域。

图14为不同喷管流量下的烟雾扩散情况对比,可以看出,随着喷管流量增大,烟雾有效作用距离和有效作用面积逐渐增大,但有效作用高度变化不明显。这说明对于以涡喷发动机为动力源的烟雾发生器,在烟雾剂流量一定的条件下,动力源提供的尾喷流输运作用是烟雾扩散的主要原因,该作用力主要是促进烟雾 X 方向上的扩散(作用距离),并直接导致烟雾有效范围扩大。

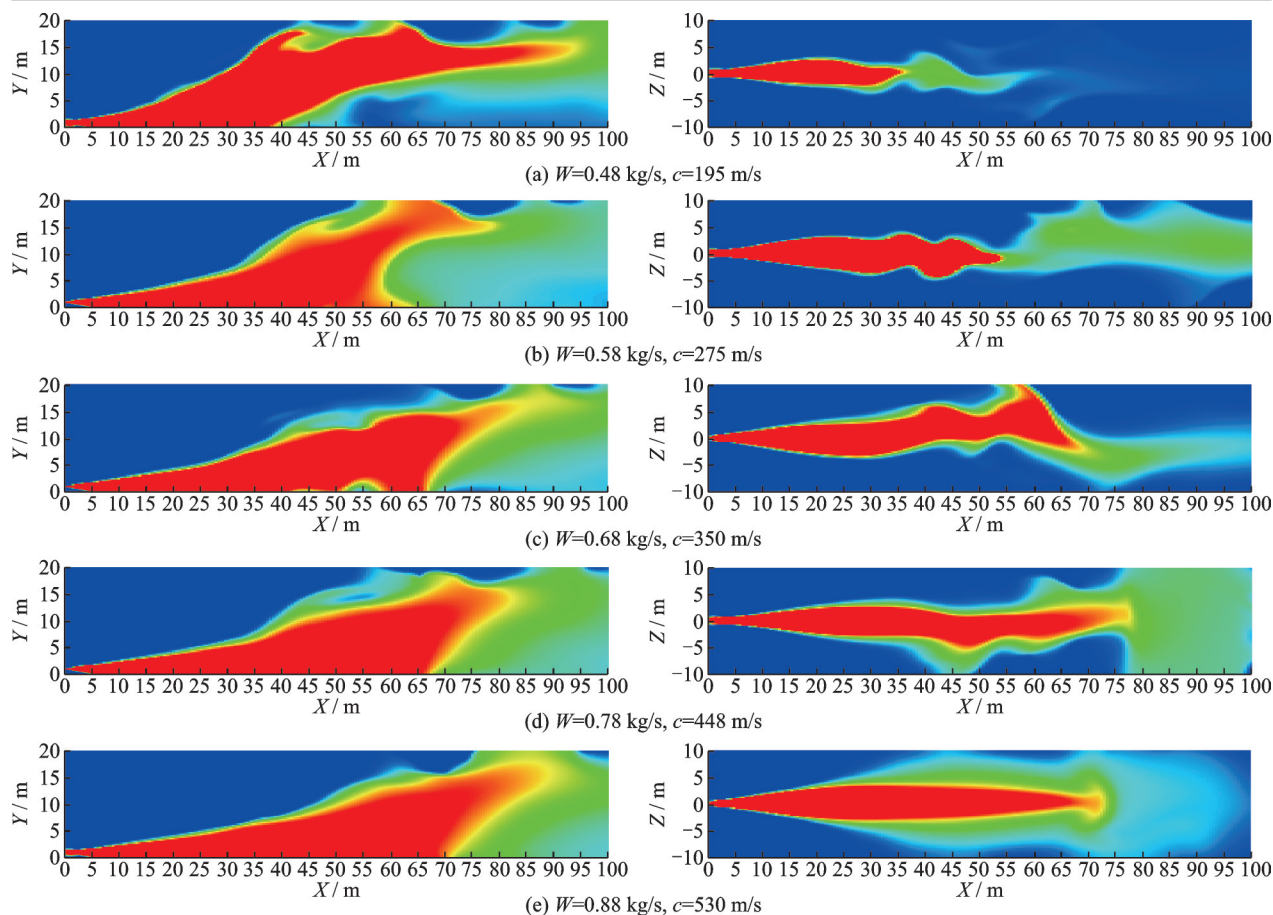


图 12 发动机流量对烟雾扩散的影响

Fig.12 Effect of engine flow rate on smoke diffusion

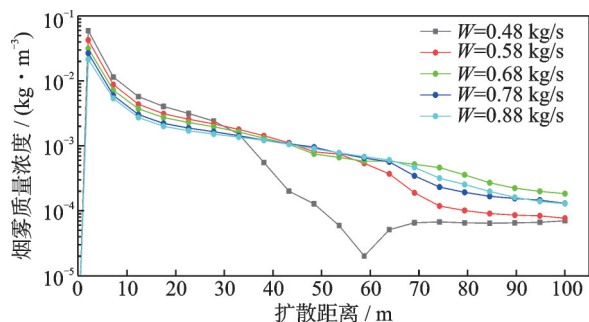


图 13 不同发动机流量下烟雾浓度与扩散距离的关系

Fig.13 Relationship between smoke concentration and diffusion distance under different engine flow rates

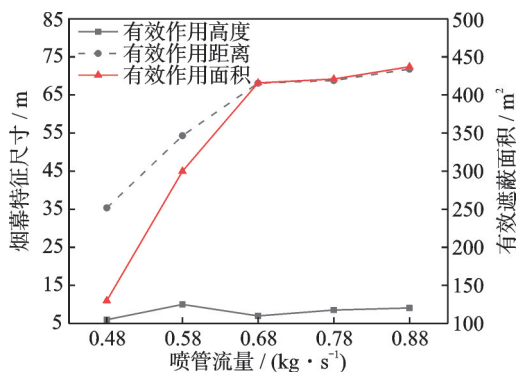


图 14 发动机流量对烟雾作用范围的影响

Fig.14 Effect of engine flow rate on smoke diffusion area

3.3 环境风速对烟雾扩散特性的影响

烟雾伪装防护容易受自然风的影响,一般在三级风以下具有良好的效果,过大的环境风速往往导致烟雾快速被吹走,难以稳定在目标区域形成有效防护烟幕。在执行防护任务时,一般要求烟雾器材置于目标区域的上风侧。本节分析不同环境风速下的烟雾扩散特性,设定环境风向沿喷流(X)方向,保持烟雾剂流量 $q=0.1\text{ kg/s}$ 、发动机喷管流量 $W=0.68\text{ kg/s}$,此时喷管出口的燃气速度 $c=350\text{ m/s}$ 。

图 15 所示为不同风速下烟雾质量浓度分布(色标与图 6 相同)。由图中可以看出,在三级风以下,顺风可以压制烟雾向上扩散,使得烟雾更为集中在地面附近,同时烟雾在水平方向也相对集中,风速越大这种压约束作用越明显,这说明环境顺风抑制了由回流涡团的形成,强化了烟雾的轴向扩散抑制了横向扩散提取喷管轴线上的烟雾质量浓度数据如图 16 所示。从图中可以看出,在有风情况下,50 m 以内的烟雾浓度基本相同,说明环境风并不能改变其防护效果,在 100 m 的观察范围内,整体烟雾浓度均处于有效防护范围内,这说明以涡喷发动机为动力源的烟雾发生器具有良好的抗风

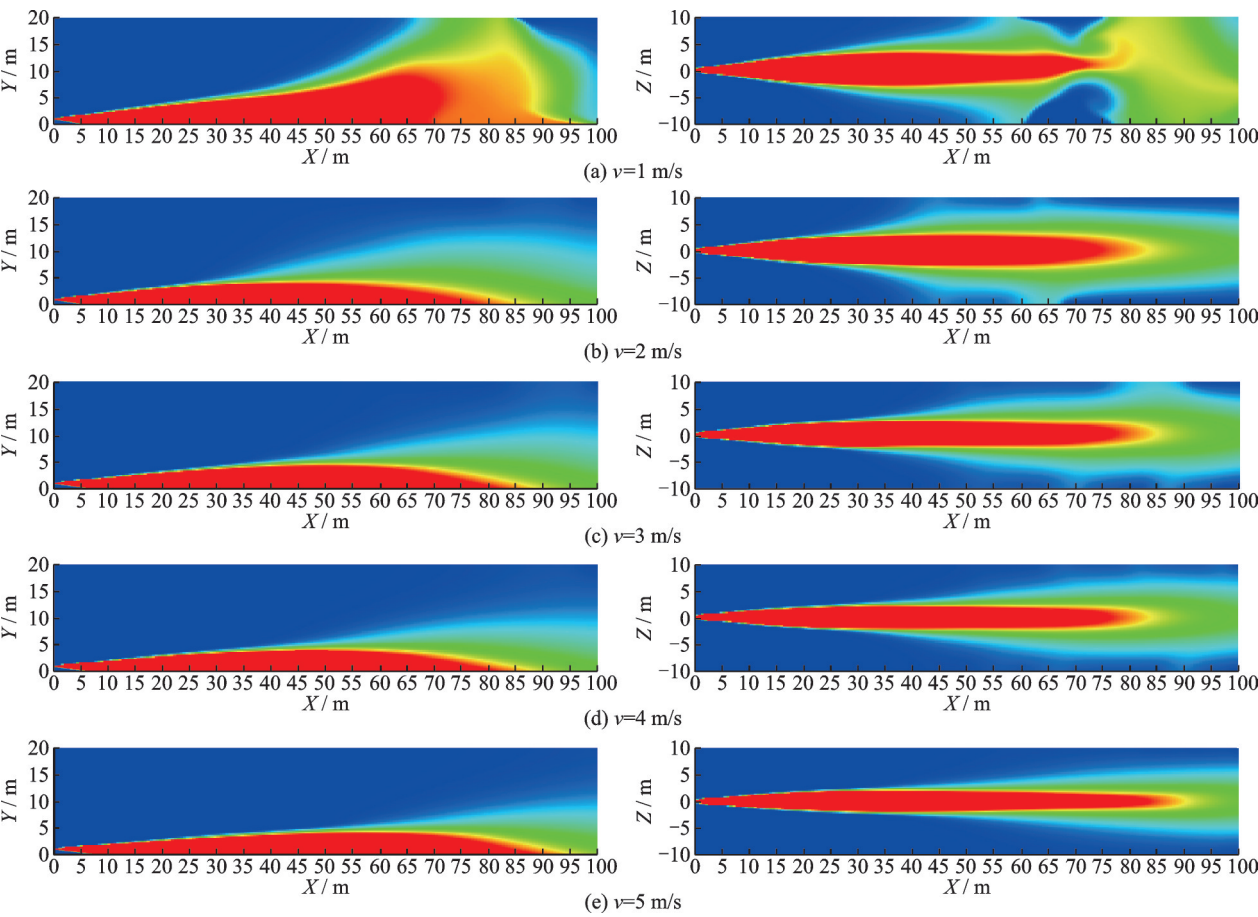


图 15 环境风速对烟雾扩散的影响
Fig.15 Effect of ambient wind speed on smoke diffusion

能力。扩散距离达到 50 m 以后,随着风速的不断增大,在烟雾浓度略有提高,这是因为上游被压制的烟雾扩散到下游堆积形成的,这说明顺风会使下游区域的防护效果更好。

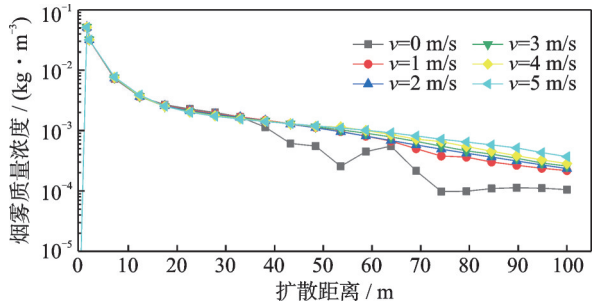


图 16 不同风速下烟雾浓度与扩散距离的关系
Fig.16 Relationship between smoke concentration and diffusion distance under different wind speeds

图 17 是不同风速下的烟雾扩散情况对比,从图中可以看出,在三级风范围内,风速增大会提高烟雾的有效作用距离,同时降低烟雾的有效作用高度和有效作用面积,这说明对于以涡喷发动机为动力源的烟雾器,环境风速会使烟雾分布更为集中,这有利于在上风侧较远距离对小型目标的防护实施。

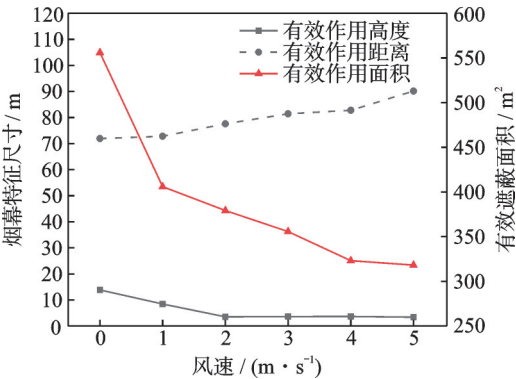


图 17 风速对烟雾有效作用范围的影响
Fig.17 Effect of wind speed on effective smoke diffusion area

4 结 论

本文针对以小型涡喷发动机为扩散动力的烟雾发生器,基于 FLUENT 软件的离散相模型,建立了发动机喷流作用下的烟雾扩散计算模型并通过试验进行了初步验证,数值模拟了不同烟雾剂流量、发动机喷流流量和环境风速条件下的烟雾扩散过程,分析了稳定状态下的烟雾空间分布特性,为相关烟雾发生器的研发和伪装防护实施提供了参考,得到以下结论:

(1)在无风和微风条件下,较小的发动机喷流

流量更容易在下游前方形成回流涡团,导致烟雾向上扩散;对于本文所用 40 kgf 级发动机,回流出现在喷管下游 50 m 之后,此后烟雾开始向上飘移。

(2)在三级风以下,风速的增大可以抑制回流涡团的出现,从而使得烟雾容易贴近地面向更远距离扩散,形成更大的防护范围;对于本文所用 ZW40 烟雾发生器,5 m/s 以内风速可以在 100 m 以内形成有效烟雾防护,说明以涡喷发动机为动力源的烟雾发生器具有良好的抗风性。

(3)烟雾剂喷射流量的增加可以增大烟雾扩散范围和烟雾浓度,形成更好的伪装防护效果;对于本文所用 ZW40 烟雾发生器,0.1 kg/s 的烟雾剂流量至少可以在 50 m 以内形成有效防护。

(4)发动机喷流流量和速度的增加可以将烟雾扩散到更远距离,并在远方形成更浓的烟雾;对于本文所用 40 kgf 级发动机,在 50 m 距离内烟雾浓度随喷流的增大而下降,在 50~100 m 距离内烟雾浓度随喷流的增大而增大,但都处于有效防护浓度范围内。

参考文献:

- [1] 吕绪良,李晓齐,徐国跃,等.伪装概论[M].北京:兵器工业出版社,2021.
LYU Xuliang, LI Xiaoqi, XU Guoyue, et al. Introduction to camouflage[M]. Beijing: Bingqi Industrial Press, 2021.
- [2] 冷锋,王甲寅.烟幕技术在光电对抗中的应用及发展趋势[J].光电技术应用,2004(2): 28-31.
LENG Feng, WANG Jiayin. Application and the developing trends of the technology in electro-optical countermeasure[J]. Electro-optic Technology Application, 2004(2): 28-31.
- [3] RICHWINE D M, CURRY R E, TRACY G V. A smoke generator system for aerodynamic flight research: NASA-TM-4137[R]. CA, USA: NASA, 1989.
- [4] 潘宁民,夏道儒.WZ8A 型发动机改装发烟机的试验与研究[J].航空发动机,1999,20(1): 16-19.
PAN Ningmin, XIA Daoru. Experimental and research on the modification of WZ8A engine with smoke generator[J]. Aeroengine, 1999, 20(1): 16-19.
- [5] 潘宁民,张良.发烟机动力装置的试验研究[J].推进技术,1998,19(2): 16-19.
PAN Ningmin, ZHANG Ling. Test and research of the power of the smoke generator[J]. Journal of Propulsion Technology, 1998, 19(2): 16-19.
- [6] 张良.发烟系统的设计原理及应用[J].火工品,1997(3): 22-25.
ZHANG Liang. Design principle and application of smoke-generating system[J]. Initiators Pyrotechnics, 1997(3): 22-25.
- [7] GAMITO M N, GOMES M R. Two-dimensional simulation of gaseous phenomena using vortex particles[J]. Computer Animation and Simulation, 1995, 22(8): 3-15.
- [8] 张帅,傅德彬,朱希娟.基于组合方法的烟幕弹烟雾颗粒生成与扩散状态模拟[J].兵器装备工程学报,2020,41(1): 33-37.
ZHANG Shuai, FU Debin, ZHU Xijuan. Simulation of smoke bomb particle generation and diffusion state based on combined method[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2020, 41(1): 33-37.
- [9] 何园源,于小兵,王智华,等.横向射流中煤油雾化特性的数值研究[J].推进技术,2023,44(3): 149-159.
HE Yuanyuan, YU Xiaobing, WANG Zhihua, et al. Numerical study on spray characteristics of kerosene jet in a crossflow[J]. Journal of Propulsion Technology, 2023, 44(3): 149-159.
- [10] 曹力子,张志刚,葛涛,等.烟幕扩散与遮蔽效能的动态仿真研究[J].兵器装备工程学报,2022,43(8): 223-229.
CAO Lizi, ZHANG Zhigang, GE Tao, et al. Study on dynamic simulation of smoke diffusion and obscuring efficiency[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43(8): 223-229.
- [11] 王凤杰,陈慧敏,冯星泰,等.石墨烟雾粒径时空分布特性仿真研究[J].制导与引信,2016,37(3): 23-28.
WANG Fengjie, CHEN Huimin, FENG Xingtai, et al. Research on simulation of the spatial and temporal distribution characteristics of graphite smoke particle size[J]. Guidance and Fuze, 2016, 37(3): 23-28.
- [12] 马尚权,吴姗姗,王科迪.基于 FLUENT 的 SF₆ 气体扩散数值模拟[J].内蒙古煤炭经济,2017(9): 6-9.
MA Shangquan, WU Shanshan, WANG Kedi. Numerical simulation of SF₆ gas diffusion based on FLUENT[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2017(9): 6-9.
- [13] 马超,陈慧敏,王凤杰,等.基于高斯烟团模式的爆炸烟雾浓度分布特性仿真[J].制导与引信,2017,38(3): 4-9.
MA Chao, CHEN Huimin, WANG Fengjie, et al. Simulation of explosive smoke concentration distribution characteristic based on Gaussian puff model[J]. Guidance and Fuze, 2017, 38(3): 4-9.
- [14] 王志刚,郭三学.催泪弹非致命效能分析计算[J].兵工学报,2017,38(1): 59-63.
WANG Zhigang, GUO Sanxue. Analysis and calculation of non-lethal efficiency of tear bomb[J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(1): 59-63.
- [15] HE N, WUZ Z, ZHENG W. Simulation of an im-

- proved Gaussian model for hazardous gas diffusion[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(4): 571-580.
- [16] CUI X. Study on the smoke particles distribution characteristics of a certain tear gas bomb[C]//Proceedings of ISMSEE 2022 the 2nd International Symposium on Mechanical Systems and Electronic Engineering. [S.l.]: VDE, 2022: 1-5.
- [17] 唐勇, 甄志华, 汪新宇, 等. 烟雾扩散与气体污染的动态仿真研究[J]. 燕山大学学报, 2021, 45(6): 523-528. TANG Yong, ZHEN Zhihua, WANG Xinyu, et al. Dynamic simulation of smoke diffusion and gas pollution[J]. Journal of Yanshan University, 2021, 45(6): 523-528.
- [18] 陈欣星, 黄剑. 基于粒子滤波的烟雾羽流路径追踪算法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 66-70. CHEN Xinxing, HUANG Jian. Particle filter-based algorithm for smoke plume path tracking[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2020, 48(1): 66-70.
- [19] LI X, LIU C, LEUNG Y D, et al. Recent progress in CFD modelling of wind field and pollutant transport in street canyonst[J]. Atmospheric Environment, 2006, 40(29): 5640-5658.
- [20] GONZALEZ-TELLO P, CAMACHO F, VICARIA J M, et al. A modified Nukiyama-Tanasawa distribution function and a Rosin-Rammler model for the particle-size-distribution analysis[J]. Powder Technology, 2008, 186(3): 278-281.
- [21] DELAGRAMMATIKAS G, TSIMAS S. Grinding process simulation based on Rosin-Rammler equation [J]. Chemical Engineering Communications, 2004, 191(10): 1362-1378.

(编辑:刘彦东)