

文章编号:1006-2467(2024)08-1264-07

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.014

机载批量灭火袋高空抛洒落地分布特性的模拟与实验验证

吴 洋^{1,2}, 林 东³, 孙浩然², 吴成云²

屈元元², 李 旋³, 胡海涛³, 陈迎春²

(1. 中国航空研究院研究生院, 北京 100012; 2. 中国商飞上海飞机设计研究院, 上海 201210;
3. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘 要: 为了对灭火飞机高空抛洒系统进行优化设计, 必须建立反映飞行过程机载批量灭火袋高空抛洒落地机理的模型. 基于离散元方法和计算流体力学方法, 建立了机载批量灭火袋高空抛洒落地特性机理模型, 获得不同飞行速度和高度下的灭火袋抛洒特性及落地分布, 通过实验对模型进行了验证. 抛洒落地分布的模拟结果与实验数据偏差在 20.0% 以内. 研究成果为飞机高空灭火系统研制提供理论模型, 以显著提升灭火飞机喷洒系统的灭火效果.

关键词: 灭火袋; 飞行; 灭火飞机; 落地分布

中图分类号: TP202+.2 **文献标志码:** A

Simulation and Experimental Validation of Landing Distribution Characteristics of Aircraft Mass Fire Extinguishing Bags Sprayed at High Altitude

WU Yang^{1,2}, LIN Dong³, SUN Haoran², WU Chengyun²

QU Yuanyuan², LI Xuan³, HU Haitao³, CHEN Yingchun²

(1. The Postgraduate Education of Chinese Aeronautical Establishment, Beijing 100012, China;
2. COMAC Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China;
3. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to optimize the design of high-altitude sprinkling system of fire-fighting aircraft, it is necessary to establish a model reflecting the high-altitude spraying and distribution mechanism of mass fire extinguishing bags during the flight. Based on the discrete element method and the computational fluid dynamics method, a high-altitude spraying and distributing model of aircraft mass fire extinguishing bags is established, and the spraying characteristics and landing area distribution at different flight speeds and altitudes are obtained. The model is verified by experiments. The deviations between simulated landing distribution and experimental data are less than 20.0%. The research results provide a theoretical model for the development of aircraft high altitude fire extinguishing system, so as to significantly improve the fire extinguishing performance of aircraft spraying system.

收稿日期: 2023-01-11 修回日期: 2023-04-03 录用日期: 2023-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(51976115), 上海市启明星项目扬帆专项(22YF1459700), 上海市自然科学基金(23ZR1478900)

作者简介: 吴 洋(1982-), 研究员, 从事飞行器设计研究.

通信作者: 胡海涛, 副教授, 博士生导师, 电话(Tel.): 021-34207062; E-mail: huhaitao2001@sjtu.edu.cn.

Keywords: fire extinguishing bag; flight; fire-fighting aircraft; landing distribution characteristics

针对大面积火灾,灭火飞机投放阻燃剂(一般情况下为水)能够迅速构建防火带、减少直接进入火场消防员的数量、降低人员风险,与地面灭火系统相比具有显著优势。但是,对于山区、森林火灾,灭火飞机需要将飞行高度提高到 300 m 以上,直接投放的阻燃剂/灭火剂受到高速气流及空气阻力影响,在空中被吹散/蒸发或卷离,导致灭火效能显著降低。针对上述问题,国际上已有采用灭火袋将阻燃剂包覆^[1-2],从高空抛洒能够避免下落过程中被吹散的可能性,能够有效提升灭火效能。为了对灭火飞机高空抛洒系统进行优化设计,必须建立反映灭火袋(体)的下落过程具有和无伞空投体下落类似的特性,在不同风攻角、风速下气动力系数^[3]和风偏响应^[4]对空投特性有显著影响,采用流固耦合方法计算空投落地时受力与形变^[5],可以得出飞行下落过程各因素的敏感性等特性^[6]。灭火袋(体)的空投高度为 150~300 m,属于低空空投的常用高度^[7],国内外低空无伞空投的相关研究表明:空投落点除受飞机飞行状态影响外,还受投放状态、气动力特性与外部状态^[8]等相关因素的影响;此外,部分学者也针对投放点落点及其影响因素进行了相关的研究^[7-9]。在实际过程中,灭火袋(体)的初始运动状态并非完全静止,存在一定的旋转或平移速度,然而,非零初始运动状态对下落状态和落地分布的影响尚不清晰,亟需相关的研究,以获得最佳的灭火效果。

离散元方法是一种专门解决不连续介质问题的数值模拟方法^[10],并取得了良好的结果。因此,本文提出采用离散元方法模拟机载批量灭火袋(其中包覆的阻燃剂为水)无伞空投过程和灭火袋抛洒的落地分布,为灭火袋在灭火飞机的实际应用提供理论参考和实践指导。

1 数学模型

机载批量灭火袋高空抛洒和落地过程分为填充、投放和下落等阶段,如图 1 所示。灭火袋的填充是指水箱入口开启后,填充吸水材料的灭火袋释放至水箱后吸水的过程;灭火袋的投放指箱体出口开启后灭火袋从水箱中排出的过程;灭火袋下落则指灭火袋从水箱中排出后在空气中下落的过程。建立反映飞行过程机载批量灭火袋高空抛洒落地分布的模型,必须对工作过程不同阶段进行建模。

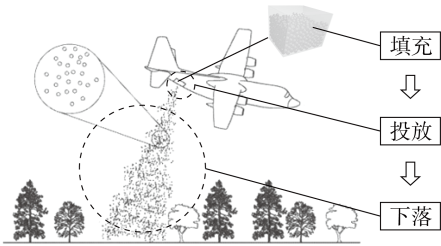


图 1 灭火袋工作过程
Fig. 1 Working process of fire extinguishing bags

1.1 填充与投放模型

灭火袋的数量庞大(以万计),考虑单个灭火袋的形变较为困难。为简化计算,使用离散元方法模拟灭火袋填充与投放过程:将灭火袋简化为球形颗粒或球形颗粒的组合物,通过颗粒间接触计算灭火袋之间的接触合力及扭矩,从而获得灭火袋的运动与形变。

仿真时,将整个过程分为填充和投放两个阶段。填充时,封闭箱体出口,持续从箱体入口处生成灭火袋直至箱体被完全填满,获得填充率以及灭火袋的位置等参数,作为投放过程的零时态;投放时,打开箱体出口,获取各个时刻箱体出口处灭火袋的数量及运动状态。

填充与投放过程中的控制方程主要为牛顿运动方程,包含灭火袋的平动与转动:

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = \sum_j \mathbf{F}_{ij}^c + \mathbf{F}_i^g \tag{1}$$

$$I_i \frac{d\boldsymbol{\omega}_i}{dt} = \sum_j \mathbf{M}_{ij} \tag{2}$$

式中: \mathbf{v}_i 和 $\boldsymbol{\omega}_i$ 分别表示第 i 个灭火袋的平移速度与转动速度; \mathbf{F}_{ij}^c 代表接触力,包括灭火袋之间的接触力以及灭火袋与墙体之间的接触力; \mathbf{F}_i^g 则表示灭火袋受到的体积力,本模型中即为重力; \mathbf{M}_{ij} 项表示灭火袋受到的力矩; m_i 和 I_i 分别表示第 i 个灭火袋的质量与转动惯量。

由于灭火袋单体之间的接触力不涉及岩土力学中复杂的粘连等机制,所以采用非线性的 Hertz-Mindlin 无滑移接触模型,其具有计算精度高、运行速度快的特点。Hertz-Mindlin 无滑移接触模型中的切向接触力采用 Mindlin 与 Deresiewicz 的研究结果^[11],其法向接触力则基于 Hertz 的理论^[12],接触力公式如下:

$$\boldsymbol{F}_n = K_n \boldsymbol{U}_n \tag{3}$$

$$\boldsymbol{F}_{s_t} = \boldsymbol{F}_{s_{t-\Delta t}} - K_s \boldsymbol{v}_{s_{t-\Delta t/2}} \Delta t \tag{4}$$

式中： \boldsymbol{F}_n 表示法向接触力； \boldsymbol{F}_{s_t} 表示 t 时刻的切向接触力； $\boldsymbol{v}_{s_{t-\Delta t/2}}$ 表示 $t - \Delta t/2$ 时刻接触点处相对速度； Δt 表示一个时间步长； \boldsymbol{U}_n 为颗粒间法向叠合量； K_n 与 K_s 分别表示法向与切向的接触刚度，

$$K_s = \left(\frac{2 \langle G \rangle^2 3 (1 - \langle \nu \rangle) \tilde{r}^{1/3}}{2 - \langle \nu \rangle} \right) |\boldsymbol{F}_n|^{1/3} \tag{5}$$

$$K_n = \left(\frac{2 \langle G \rangle \sqrt{2 \tilde{r}}}{3 (1 - \langle \nu \rangle)} \right) \sqrt{\boldsymbol{U}_n} \tag{6}$$

$$\tilde{r} = \frac{2 r_1 r_2}{r_1 + r_2} \tag{7}$$

$$\langle G \rangle = \frac{1}{2} (G_1 + G_2) \tag{8}$$

$$\langle \nu \rangle = \frac{1}{2} (\nu_1 + \nu_2) \tag{9}$$

式中： r, G, ν 分别代表颗粒半径、切变模量与泊松比；下标表示相互接触的相邻颗粒。

1.2 气动力模型

气动力特性是空投物体在下落过程中受到的各项气动力随气动力参数变化的特性^[6]，控制方程主要包含流体连续性方程与动量守恒方程，其微分形式为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{v}) = 0 \tag{10}$$

$$\frac{\partial \rho \boldsymbol{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{v} \boldsymbol{v}) = - \nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \boldsymbol{g} \tag{11}$$

式中： ρ 表示流体密度； $\boldsymbol{\tau}$ 为切应力张量； \boldsymbol{v} 为速度向量； p 为压强； \boldsymbol{g} 为重力加速度。

在标准 κ - ϵ 湍流模型中，湍动能 κ 与耗散率 ϵ 的控制方程^[13] 如下：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \kappa) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \kappa v_i) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \tag{12}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon v_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] +$$

$$C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{\kappa} (G_k + C_{\epsilon 2} G_b) - C_{\epsilon 3} \rho \frac{\epsilon^2}{\kappa} \tag{13}$$

式中： μ 表示运动流体的黏度； μ_t 表示涡黏性； G_k 为层流速度梯度产生的湍动能； x_i, x_j 表示 X 方向和 Y 方向； v_i, v_j 表示 X 方向和 Y 方向的速度； $C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}, C_{\epsilon 3}$ 为常数，取值分别为 1.45, 1.92 和 1.00； G_b 是浮力产生的湍动能； Y_M 是由于在可压缩湍流中过渡产生的波动； σ_k 与 σ_ϵ 分别为两方程的湍流 Prandtl 数。

根据下式可推导出灭火袋的阻力系数：

$$\boldsymbol{F} = \frac{1}{2} C_\rho A \boldsymbol{v}_r^2 \tag{14}$$

式中： \boldsymbol{F} 代表空气阻力； A 是迎风面积； \boldsymbol{v}_r 是相对速度； C 是空气阻力系数，由数值模拟结合风洞试验得出 $C=0.000\ 2$ 。空气阻力系数的不确定度由水箱内不同位置的袋体质量差异导致，实验测试袋体质量为 $300\text{ g} \pm 20\text{ g}$ ，经计算空气阻力系数不确定度为 10.36 %。

1.3 运动模型

灭火袋的运动符合基本运动控制方程：

$$\frac{d(X, Y, Z)}{dt} = \boldsymbol{v}, \quad \frac{d\boldsymbol{v}}{dt} = \boldsymbol{a}, \quad \boldsymbol{F}_t = m\boldsymbol{a} \tag{15}$$

式中： \boldsymbol{F}_t 表示灭火袋所受的外力和； \boldsymbol{a} 表示灭火袋的运动加速度； (X, Y, Z) 表示灭火袋空间位置。

灭火袋在下落过程中很快达到旋转平衡。为了简化计算，不考虑灭火袋的旋转运动。对运动方程进行一阶差分：

$$\Delta \boldsymbol{v} = \boldsymbol{a} \Delta t, \quad \Delta \boldsymbol{X} = \boldsymbol{v} \Delta t \tag{16}$$

式中： Δ 代表物理量在一个时间步长内的变化； \boldsymbol{X} 表示位移。

1.4 风速和碰撞模型

在灭火袋的实际投放过程中，气流冲击与灭火袋间碰撞作用会产生散开效应，影响灭火袋地落点分布。为了模拟灭火袋被吹散的情形，灭火袋初始速度服从正态分布：

$$\boldsymbol{v}_j' = \boldsymbol{v}_j + \Delta \boldsymbol{v}_j \tag{17}$$

$$|\Delta \boldsymbol{v}_j| \sim N(0, \sigma^2) \tag{18}$$

式中： \boldsymbol{v}_j' 代表修正后的初始速度，根据 EDEM 软件计算得到； $\Delta \boldsymbol{v}_j$ 代表修正项； σ 代表修正项服从正态分布的标准差。速度标准差由实验数据拟合得出为 1.5 m/s，不确定度为 $\pm 0.3\text{ m/s}$ 。图 2 表示平均出口速度下的灭火袋排放速度分布曲线，该曲线满足正态分布。

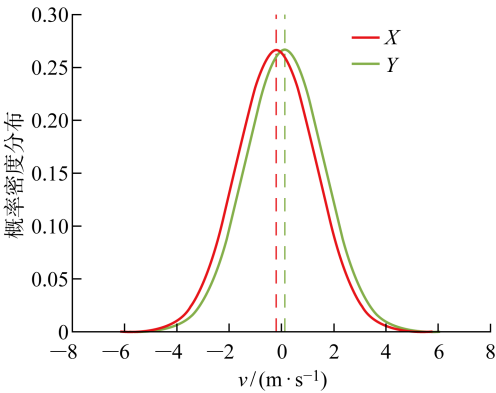


图 2 灭火袋排放速度分布

Fig. 2 Distribution of discharge velocities of fire extinguishing bags

2 模型求解算法及实验验证

2.1 模型求解算法

图 3 给出了灭火袋下落特性模型的求解流程示意图. 首先,将箱体与模型的几何模型作为输入,利用离散元素法 (EDEM 软件) 模拟灭火袋填充与投放方程,获得某一时刻下批量出舱的灭火袋运动速度、位置和相互作用力等^[14-15]. 进一步求解运动方程,获得灭火袋气动特性;将获得的灭火袋出口运动状态与气动力特性作为输入,求解灭火袋的下落过程. 下落过程的求解采用运动方程的一阶显式差分法,在时间维度上对运动过程进行离散,基于式(14)和(15)求解灭火袋的受力情况、运动加速度、运动速度和单位时间步长内的位移等参数,初始运动速度

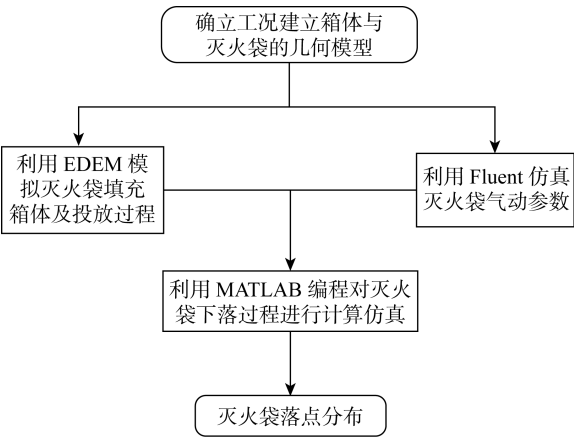


图 3 模型求解流程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of model solving process

服从正态分布;当灭火袋 Z 向运动距离等于下落初始高度时,记录当前时刻批量灭火袋的 X 和 Y 坐标,即为灭火袋的落地位置和落点分布.

2.2 模型实验验证

为验证模型的准确性,采用落点网格法开展实验,将计算模拟结果与实验结果进行对比,实验原理如图 4 所示. 图中: L_0 表示飞机投放点距离网格起始点的距离; L_1 和 W_1 分别表示每个网格的长度和宽度; L 和 W 分别表示实验中布置的网格总长度和总宽度. 将灭火袋投放到地面网格区域内,统计不同区域的灭火袋个数,从而得到灭火袋的落点分布. 实验误差主要由落点网络法的网格尺寸及尺寸的测量误差决定. 实验过程中,每个地面网格的尺寸为 $10\text{ m}\times 10\text{ m}$,总长度为 400 m ;尺寸的测量误差为 1 mm .

模型验证的实验工况如表 1 所示. 基于灭火袋运动计算模型,根据气动力计算模型与填充投放模型的计算结果,得到了不同工况下灭火袋的落点分布. 图 5 给出飞行高度 80 m 、飞行速度 100 km/h 、风速 3.6 m/s 、风向 160° 工况下的灭火袋落地分布模拟结果与实验结果对比. 灭火袋落点沿飞机飞行方向铺开,在垂直于飞机飞行方向上,灭火袋落点基本呈对称散开,灭火袋抛洒落地分布的模拟结果和实验结果吻合良好. 图中所示的前进距离差异主要由飞机飞行速度的控制偏差导致,灭火介质飞行前进距离的仿真偏差约 10% .

表 2 给出了不同飞行工况条件下的仿真结果与

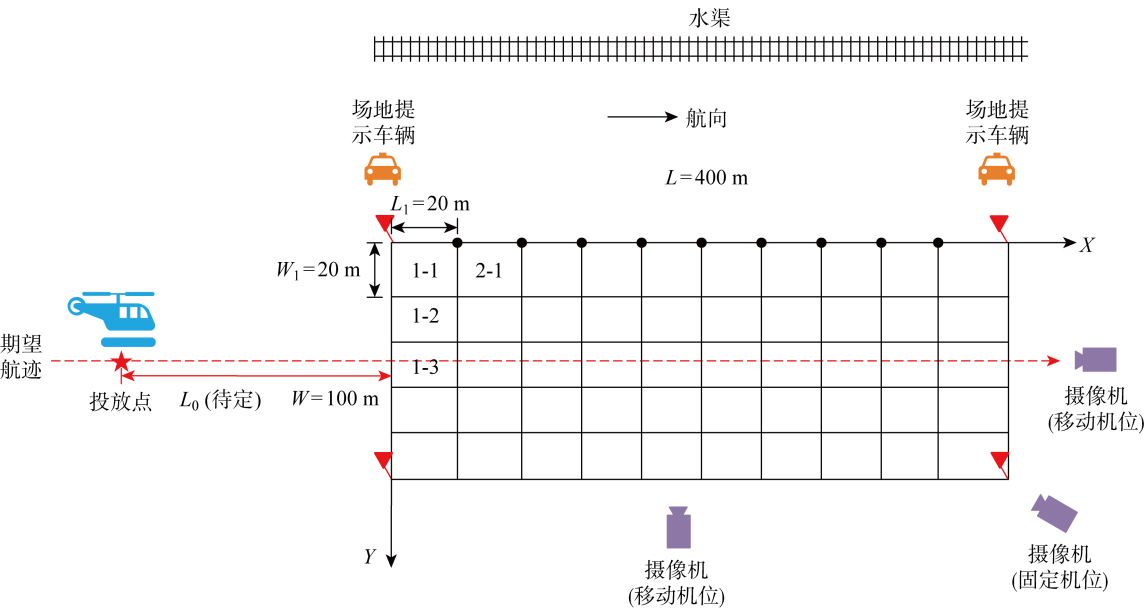


图 4 落点网格法实验原理图

Fig. 4 Schematic diagram of falling point grid method

表 1 实验工况
Tab. 1 Experimental conditions

工况	飞行高度/m	飞行速度/(km · h ⁻¹)	风速/(m · s ⁻¹)	风向/(°)
1	80	100	3.6	160
2	80	120	4.1	147
3	120	120	5.0	200

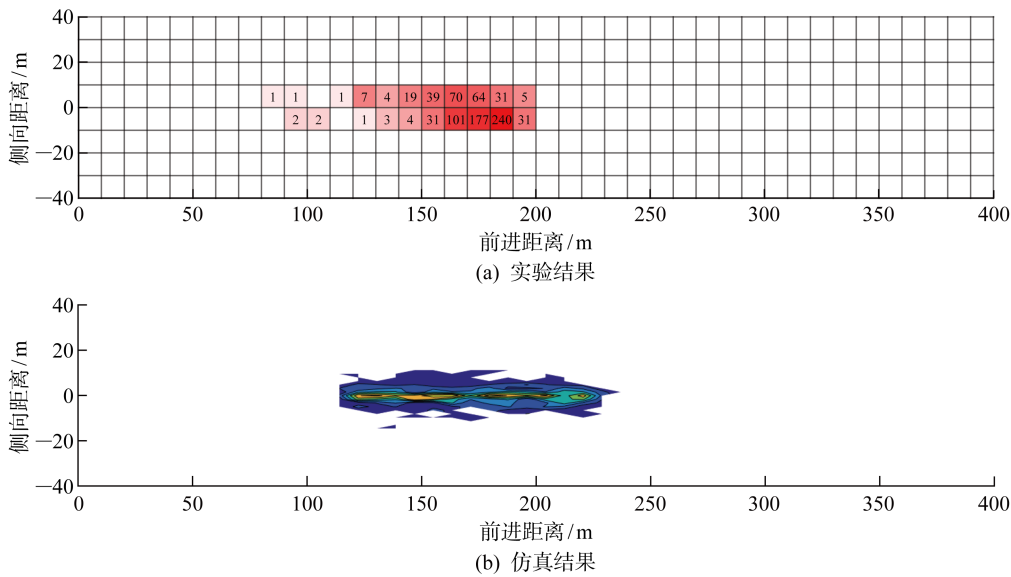


图 5 实验与仿真结果对比
Fig. 5 Comparison of experimental and simulation results

表 2 落地分布的仿真结果与实验结果对比
Tab. 2 Comparison of experimental and simulation results of landing distribution

工况	实验宽度/m	实验长度/m	模拟宽度/m	模拟长度/m	宽度偏差/%	长度偏差/%
1	20.0	120.0	24.0	111.0	20.0	7.5
2	20.0	140.0	23.0	146.0	15.0	4.3
3	30.0	150.0	29.6	157.0	1.3	4.7

实验结果的对比,落地宽度的模拟值最大偏差为 20.0%,落地长度模拟值的最大偏差为 7.5%,表明该模型能够有效反映真实灭火袋的投放落点分布,对于灭火袋的精准投放具有十分重要的指导意义。

仿真结果的不确定度主要受到阻力系数 C 和速度标准差 σ 不确定度的影响. C 的不确定度对落地宽度和长度的影响分别为 2.5% 和 0.03%; σ 的不确定度对落地宽度和长度的影响分别为 20.1% 和 0.03%. 因此,阻力系数 C 和初始速度标准差 σ 的不确定度对落地分布长度的影响较小,而对落地分布宽度的变化影响较大. 主要的原因在于,灭火袋下落时飞行方向的速度波动远小于飞机飞行速度,因而灭火袋落地分布长度主要是由飞机的飞行速度决

定;而灭火袋的初始侧向速度较小,导致阻力系数和速度波动值的影响显著.

3 结果与讨论

图 6 所示为基于灭火袋填充与投放模型统计得到的排放时间. 可以看出,排放中期的剩余比例与排放时间几乎呈线性变化关系,排放初期和末期的排放曲线较排放中期略缓. 随着舱门的逐渐开启,初始阶段,灭火袋紧密堆积于出口,初始速度为 0,出口质量流量由 0 逐渐提升,出口质量流量逐渐趋于稳定;排放末期,箱体内灭火袋较少,出流占据的出口截面积逐渐减小,出流量逐渐降低,灭火袋落地长度主要排放时间相关.

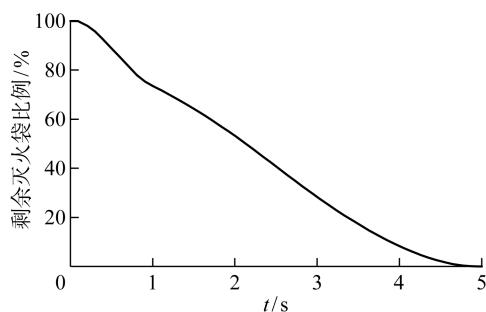


图6 灭火袋排放过程

Fig. 6 Discharging process of fire extinguishing bags

图7为不同排放时刻下灭火袋相对于飞机的平均出口速度,其中,飞机飞行方向为坐标系 X 方向,垂直于飞行方向的水平方向为 Y 方向,竖直向上为 Z 方向,图中给出了不用排放时刻下灭火袋相对于飞机的 X,Y,Z 方向平均出口速度.在排放初期,舱门处灭火袋距离舱门较近,下落加速距离短,因而其竖直方向速度和飞行反方向速度随排放时间增大而逐渐增大;排放中期,灭火袋组成的离散体在重力和摩擦力的作用下沿舱体壁面下滑,因而在沿飞机运动反方向和竖直方向产生较大的速度,但由于在出舱过程中受到了箱体侧壁的阻碍,灭火袋与箱体产生非弹性碰撞,其 X 方向的速度损耗为0, Z 方向速度基本保持不变;排放末期,碰撞后部分灭火袋堆积在离散体上方,造成排放速度放缓.整个排放过程中, Y 方向速度基本保持为0,微小的波动则是由灭火袋运动时的相互碰撞作用引起的.

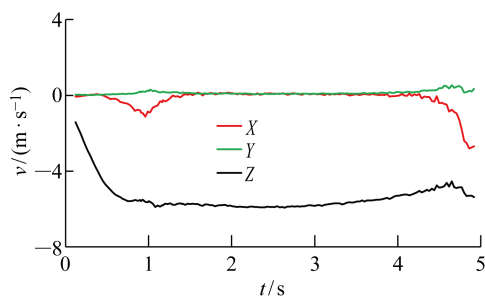


图7 灭火袋抛洒系统出口速度

Fig. 7 Velocities of fire extinguishing bags at outlet of discharge system

4 结语

采用离散元方法和计算流体力学方法,建立了针对机载批量灭火袋高空抛洒落地分布特性的计算模型;仿真结果与实验结果吻合良好,落地宽度与实验数据最大偏差为20.0%,落地长度与实验最大偏差为7.5%,验证了仿真模型和方法的可信度,为灭

火袋的高空抛洒落地分布特性的模拟提供了理论模型,可用于指导灭火袋的精准投放.

参考文献:

- [1] CLEARY W, SKORUPA J, BONNAR T. Aerial delivery system; US 9138604 [P]. 2016.04.13 [2023.01.10].
- [2] ALKAHER S, LEWITUS D, OPHIR A, *et al.* Method and system for delivering biodegradable shelled portions: WO 2019/003223 A1[P]. 2019.01.03[2023.01.10].
- [3] 刘浩,孙建红,孙智,等.波浪条件下地效翼型气动力的环量控制研究[J].上海交通大学学报,2022,56(8):1101-1110.
LIU Hao, SUN Jianhong, SUN Zhi, *et al.* Circulation control of airfoil aerodynamic force under ground effect of wavy wall[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2022, 56(8): 1101-1110.
- [4] 沈国辉,张帅光,楼文娟,等.考虑风攻角的硬跳线气动系数和风偏计算[J].振动与冲击,2021,40(13):1-8.
SHEN Guohui, ZHANG Shuaiguang, LOU Wenjuan, *et al.* Calculation of aerodynamic coefficient and windage of hard jumper considering wind attack angle[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(13): 1-8.
- [5] 张宇婷,耿小凯,任春华,等.无伞空投储液罐的高空跌落仿真分析[J].包装工程,2022,43(1):66-74.
ZHANG Yuting, GENG Xiaokai, REN Chunhua, *et al.* Simulation analysis of liquid storage tank for free drop[J]. *Packaging Engineering*, 2022, 43(1): 66-74.
- [6] 孙旺,南英,曾冠霖,等.无伞空投影响因素敏感性分析及载机安全性分析[J].计算机仿真,2022,38(4):35-40.
SUN Wang, NAN Ying, ZENG Guanlin, *et al.* Analysis of sensitivity of influencing factors for parachute-free airdrop and safety for aircraft[J]. *Computer Simulation*, 2022, 38(4): 35-40.
- [7] 赵正戴,南英,谢如恒.无伞空投体自身特性对落点精度的敏感性分析[J].指挥控制与仿真,2019,41(6):68-73.
ZHAO Zhengdai, NAN Ying, XIE Ruheng. Sensitivity analysis of landing accuracy of low altitude parachute-free airdrops[J]. *Command Control & Simulation*, 2019, 41(6): 68-73.
- [8] XU B, CHEN J. Review of modeling and control during transport airdrop process [J]. *International*

Journal of Advanced Robotic Systems, 2016(13): 13-18.

[9] 曾冠霖, 谢如恒, 南英, 等. 无伞空投最优投放点计算方法研究[J]. **机械制造与自动化**, 2020, 49(2): 188-190.

ZENG Guanlin, XIE Ruheng, NAN Ying, *et al.* Optimization of parachute-free airdrop [J]. **Machine Building & Automation**, 2020, 49(2): 188-190.

[10] 刘义伦, 刘思琪, 赵先琼, 等. 偏心楔形喂料斗卸料过程中颗粒流动特性[J]. **化工学报**, 2018, 69(4): 1469-1475.

LIU Yilun, LIU Siqi, ZHAO Xianqiong, *et al.* Flow characteristics of granule discharged from eccentric wedge-shaped feed hopper[J]. **CIESC Journal**, 2018, 69(4): 1469-1475.

[11] MINDLIN R, DERESIEWICZ H. Elastic spheres in contact under varying oblique force[J]. **Journal of Applied Mechanics**, 1953, 20: 327-344.

[12] HERTZ H. On the contact of elastic solids[J]. **Journal Fur Die Reine Und Angewandte Mathematik**, 1882, 92: 156-171.

[13] LAUNDER B, SPALDING D. Lectures in mathematical models of turbulence[M]. London, UK: Academic Press, 1972.

[14] 毛佳, 肖景文, 赵兰浩, 等. 基于浸入边界法的高解析度 CFD-DEM 流固耦合方法[J]. **上海交通大学学报**, 2023, 57(8): 988-995.

MAO Jia, XIAO Jingwen, ZHAO Lanhao, *et al.* A resolved CFD-DEM approach based on the immersed boundary method[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2023, 57(8): 988-995.

[15] 李铁男, 赵碧丹, 赵鹏, 等. 气固流化床启动阶段挡板内构件受力特性的 CFD-DEM 模拟[J]. **化工学报**, 2022, 73(6): 2649-2661.

LI Tienan, ZHAO Bidan, ZHAO Peng, *et al.* CFD-DEM simulation of the force acting on immersed baffles during the start-up stage of a gas-solid fluidized bed[J]. **CIESC Journal**, 2022, 73(6): 2649-2661.

(本文编辑:王一凡)