药剂半径对红外诱饵弹辐射特性影响

杨春玲,张振东,刘国成

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘　要:红外诱饵弹是一种常见的红外干扰武器,能够对红外制导武器产生很强的干扰效果。在众多类型的红外诱饵弹中,通过投放药剂形成喷射火焰来得到干扰辐射源的方法仍在实战中广泛应用。在这类诱饵弹的研发制造过程中,投放药剂的半径对诱饵弹辐射特性具有很大的影响。针对药剂颗粒半径对诱饵弹辐射特性的影响,分析了典型的投放药剂类红外诱饵弹的结构及工作原理,借助了离散相模型(DPM 模型)对红外诱饵弹红外特性建模,总结了典型诱饵弹模型下的红外诱饵药剂颗粒直径与辐射特性间的关系,最后通过最小二乘法对仿真数据进行拟合后确定该典型红外诱饵弹辐射强度最大时的药剂颗粒半径为 3.72 mm。该方法对诱饵弹投射颗粒半径的研究工作提出了依据,在诱饵弹研发与仿真中具有重要的指导价值。

关键词:红外诱饵弹建模; DPM 模型; 红外诱饵药剂; 辐射特征建模

中图分类号:TN219　　**文献标志码**:A　　**DOI**:10.3788/IRLA201645.S104005

Influence of particle radius of composition on radiation characteristics of infrared decoy

Yang Chunling, Zhang Zhendong, Liu Guocheng

(School of Electrical Engineering & Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Infrared decoy is a common infrared countermeasures weapon, which has a significant jamming effect on infrared-guided weapons. Among many kinds of infrared decoys, the method of releasing some composition to generate a jamming radiation source is still widely used in practice. In the development and manufacturing process of this kind of decoy, the particle radius of composition has a great influence on decoy´s radiation characteristics. To study the influence of the particle radius of composition, in this paper, the structure and working principle of infrared decoy were analyzed, the infrared characteristic model of decoy based on discrete phase model (DPM model) was built, the relationship between particle radius of infrared decoy and radiation characteristics was summarized. Finally, through fitting simulation data base on the least square method, the optimal particle radius of 3.72 mm was found while infrared decoy had maximum radiation intensity. This method lays a research foundation for the particle radius of composition of infrared decoy, and also has great guiding value in the field of decoy´s research and simulation.

Key words: modeling of infrared decoy; DPM model; infrared decoy composition; modeling of radiation characteristics

收稿日期:2016-02-12; **修订日期**:2016-03-20

基金项目:国家自然科学基金(61378046)

作者简介:杨春玲(1965-),女,教授,博士生导师,博士,主要从事红外目标建模与目标辨识方面的研究。Email:yangcl1@hit.edu.cn

0 引 言

红外诱饵弹是一种常用的红外干扰武器。针对红外制导武器的工作特性，诱饵弹在工作过程中可以通过释放大量正在燃烧的红外诱饵药剂，形成明显的红外干扰带,实现干扰红外制导武器的目的。根据统计数据，在现代战争中由于红外诱饵弹的广泛应用，红外制导武器的命中率曾在一段时间内从原来的 83%降为 21%。

由于诱饵弹对红外制导武器的强干扰效果,近年来如何分辨诱饵弹与目标的制导算法研究[1]以及诱饵弹干扰策略[2]比比皆是,因此对诱饵弹精确建模[3],分析在各种因素下诱饵弹的辐射特性变化就显得更为重要。目前,各国的多家公司和研究机构正在诱饵弹的仿真建模领域展开积极的研究工作。

英国的 Chemring 国防公司研发了一套用于红外虚拟仿真的软件系统,并且逐年对其维护更新[4] 。该系统能够较全面地反应诱饵弹的运动特性、辐射特性、以及干扰策略等多方面条件。同时,国内如空军工程大学、东北电子技术研究所等多个科研机构也从多个角度分别分析影响诱饵弹干扰效果的因素。

文中旨在研究药剂型诱饵弹的药剂颗粒对诱饵弹辐射的影响。目前对药剂型诱饵弹的建模方法,普遍假设工况为一个单向流或者连续多相流。采用这种方法所建立的红外特征模型，虽然可以比较准确地描述稳态情况下航空诱饵弹的辐射特性，但是无法结合诱饵弹自身的结构特点，研究诱饵弹的结构参数与辐射特性关系，也无法精确提出为获得最大干扰效果的最优结构参数。因此,根据红外诱饵弹的实际结构特点，建立一种可以准确描述其辐射特征的离散相多相流模型对探索如何提升诱饵弹的工作效率具有重大意义。

文中将研究离散相模型(DPM 模型)的原理,分析药剂颗粒运动特性,建立基于 DPM 模型的红外诱饵弹流场模型和简单孔式喷口模型,并对基于 DPM 模型的红外诱饵弹的辐射模型进行仿真，对不同条件下诱饵弹的辐射特性进行研究，通过最小二乘法确定颗粒半径与红外辐射强度之间的关系，寻找最优颗粒半径，得到药剂颗粒大小与诱饵弹辐射关系的具体变化规律。

1 诱饵弹药剂颗粒运动特性分析

针对药剂颗粒与诱饵弹辐射特性之间关系的研究，以典型的俄罗斯∏P∏-50 式红外诱饵弹为例，图 1 为其结构示意图。该诱饵弹内共有 10 个药仓。发射后，红外诱饵弹会以 20 ms 的间隔依次将每个药仓内的药剂喷射入空气流场中。由于这些诱饵药剂颗粒自身质量很小,所以在重力、升力等力的合力作用下,这些颗粒将迅速降低速度并悬浮在空中。这种悬浮在空中的药剂大量燃烧后便形成了诱饵弹拖尾。

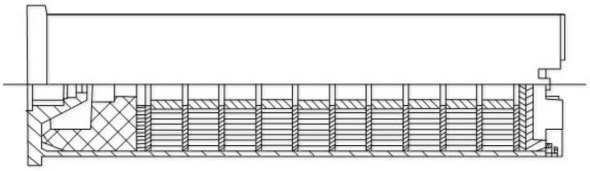

图 1 ∏P∏-50 式红外诱饵弹的结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of ∏P∏-50 infrared decoy

由该典型诱饵弹结构可以看出：在诱饵弹投放过程中喷射出的大量高温燃烧的颗粒是其产生红外干扰作用的重要因素。因此,研究这些燃烧中的高温颗粒可以更准确地对诱饵弹的红外辐射特性进行仿真分析。文中将借助 DPM 模型[5],结合温度定常参数,分析药剂颗粒的运动特性,建立红外诱饵弹尾焰红外辐射特性的仿真模型，进而分析药剂颗粒半径对诱饵弹辐射特性的影响。

1.1 颗粒运动方程

DPM 模型通过对 Lagrangian 参考系下的分散相颗粒运动方程积分来计算运动轨迹。由颗粒的惯性与受力平衡,分散相粒子运动方程为(以直角坐标系内 x 方向为例)：

$$\frac{\mathrm{d}u_p}{\mathrm{d}t}=f_D(u-u_p)+\frac{g_x(\rho_p-\rho)}{\rho_p} \tag{1}$$

式中：f_x 为附加加速度项(单位颗粒质量的力)；等号右边第二项为单位颗粒质量的重力与浮力的合力；$f_D(u-u_p)$为单位颗粒质量受到的阻力；u 为连续梁速度；u_p 为颗粒速度；ρ 为连续相密度；ρ_p 为颗粒密度。

1.2 颗粒的受力分析

除了重力、浮力和阻力的合力外,公式(1)中的附加项 f_x 包括于分散相颗粒在旋转参考坐标系内产生的附加力、压力梯度产生的附加项、Basset 力、

Magnus 升力、热泳力、光电泳力、声泳力、静电力和布朗力等。下面将分别对每种力进行研究。

1.2.1 阻 力

在实际的两相流动中，颗粒的阻力大小受到许多因素的影响，它不仅与颗粒的相对颗粒雷诺数 Rep 有关，而且还和流体中的湍流运动、流体的可压缩性、流体温度与颗粒温度、颗粒的形状壁面的存在以及颗粒群的浓度等因素有关。颗粒的阻力很难用统一的形式表达，因此为研究方便，引入阻力系数的概念，将阻力定义为：

$$F_r=\frac{\pi d_p^2}{4}C_D\frac{1}{2}\rho|u-u_p|(u-u_p) \tag{2}$$

式中：d_p 为颗粒直径；C_D 为阻力系数。

$$C_D=\frac{F_r}{\frac{\pi d_p^2}{4}\frac{1}{2}\rho(u-u_p)^2} \tag{3}$$

式中：$f_D(u-u_p)$为单位颗粒质量受到的阻力，且

$$f_D=\frac{18\mu}{\rho_p d_p^2}\cdot\frac{C_D\mathrm{Re}_p}{24} \tag{4}$$

Re_p 为相对颗粒 Re 数

$$\mathrm{Re}_p=\frac{\rho dp|u-u_p|}{\mu} \tag{5}$$

式中：μ 为连续相粘性系数。

1.2.2 旋转参考坐标系内产生的附加力

以旋转轴为 z 轴情况为例，作用于单位颗粒上的在 x 方向和 y 方向的附加力分别为：

$$f_{xz}=\left(1-\frac{\rho}{\rho_p}\right)\Omega^2x+2\Omega\left(u_{y,p}-\frac{\rho}{\rho_p}u_y\right) \tag{6}$$

$$f_{yz}=\left(1-\frac{\rho}{\rho_p}\right)\Omega^2y+2\Omega\left(u_{x,p}-\frac{\rho}{\rho_p}u_x\right) \tag{7}$$

式中：Ω 为参考系旋转角速度；$u_{y,p}$ 和 u_y 以及 $u_{x,p}$ 和 u_x 分别为在 y 方向和 x 方向上的颗粒和流体的速度。

1.2.3 Magnus 升力

根据升力定理，由于颗粒的旋转产生升力，其表达式为 $F_t=\rho u\Gamma$，其中 Γ 为沿颗粒表面的速度环量。若颗粒流体中的固定位置旋转，则旋转升力为：

$$F_t=\frac{1}{8}\pi d_p^3\rho\vec{u}\times\vec{\omega} \tag{8}$$

当颗粒在流体中边运动边转动，则旋转升力为：

$$F_t=\frac{1}{8}\pi d_p^3\rho(\vec{u}-\vec{u}_p)\times\vec{\omega} \tag{9}$$

式中：$\vec{\omega}$为颗粒的旋转角速度。

1.2.4 Saffman 升力

颗粒在有速度梯度的流场中运动，若颗粒上部的速度比下部的速度高，则上部的压力就比下部低，此时，颗粒将受到一个升力的作用，这个力称为 Saffman 升力：

$$f_s=\frac{2Kv^{\frac{1}{2}}\rho d_{pij}}{\rho_p d_p(d_{lk}d_{kl})^{\frac{1}{4}}}(\vec{u}-\vec{u}_p) \tag{10}$$

式中：K=2.594；v 为运动粘性系数；d_{pij} 为变形张量。

1.2.5 热泳力

颗粒处在有温度梯度的流场中，将受到来自高温区的热压力而向低温区迁移，这种现象称为热泳。以 x 方向为例，热泳力表达式为：

$$f_{T,x}=-D_{T,p}\frac{1}{m_pT}\frac{\partial T}{\partial x} \tag{11}$$

式中：$D_{T,p}$ 为热泳系数。热泳系数为常数，在文中，将喷射的颗粒假设为球形颗粒，采用 Talbot 的公式计算：

$$D_{T,p}=\frac{6\pi d_p\mu^2C_s(K+C_tKn)}{\rho(1+3C_mKn)(1+2K+2C_tKn)} \tag{12}$$

式中：Kn 为 Knudsen 数，$Kn=2\lambda/d_p$；λ 为流体的平均自由程；$K=k/Kn$，k 为仅基于平动能量的流体导热系数，$k=(15/4)\mu R_M$；d_p 为颗粒导热系数；m_p 为颗粒质量；T 为当地流体温度；μ 为流体粘性系数；C_s=1.17，C_t=2.18，C_m=1.14。

1.2.6 静电力

气体是不良导体，但颗粒在气体介质中仍常常带有电荷。带有电荷的颗粒在运动中将受到静电力的作用，静电力的大小可通过库伦定律计算得到：

$$F_e=\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1q_2}{S^2} \tag{13}$$

式中：q_1、q_2 为颗粒所带的电荷；S 为颗粒之间的距离；ε_0 为真空介电常数。

综合上述公式，可以求出药剂颗粒的运动轨迹，结合药剂粒子分布规律，可借助软件求解由颗粒燃烧产生的尾焰辐射[6]。

2 参数设置及仿真过程

在进行仿真的过程中，喷口的外形将会影响仿真的准确性。所以，建模过程中首先需要确定红外诱饵弹的喷口类型。文中采用简单孔式喷嘴模型。喷嘴的液滴直径分布与喷孔内状态密切相关。文中的喷嘴模型采用 Rosin-Rammler 分布函数作为液滴直径分

布,其特征参数为最可几液滴直径和分布指数。最可几液滴直径 d_0 根据 Sauter 平均直径 d_{32} 计算，采用 Lefebvre 给出的关系式：

$$d_0=1.2726d_{32}\left(1-\frac{1}{s}\right)^{1/s} \tag{14}$$

对于单相状态喷嘴流动,d_{32} 采用结合初始液滴尺寸与液体射流的湍流量的近似关系式计算：

$$d_{32}=133.0\lambda We^{-0.74} \tag{15}$$

式中：$\lambda=d/8$ 为射流出口处基于充分发展湍流管流的径向积分长度标尺;Weber 数 的定义为：

$$\mathrm{We}=-\frac{\rho_l u^2\lambda}{\sigma} \tag{16}$$

对于空穴状态喷嘴流动，采用公式(15)的修改关系式计算，式中的初始射流直径采用根据空穴喷嘴的有效面积计算的有效直径 d_{eff},即长度标尺为 $\lambda=d_{\mathrm{eff}}/8$,且

$$d_{\mathrm{eff}}=\sqrt{\frac{4m_{\mathrm{eff}}}{\pi\rho_l u}} \tag{17}$$

对于反流性喷嘴流动，初始液滴直径为液体射流直径：

$$d_0=d\sqrt{c_{ct}} \tag{18}$$

文中，分布指数 n=3.5。确定好喷嘴模型后,根据以下参数建立弹体模型：模型弹长为 467 mm,弹径为 130.2 mm,弹重 3.8 kg,燃烧速度为 1 300 K,粒子直径为 2~5 mm。流场长度为 5 604 mm,半圆形远场直径为 1 432 mm,共有 954 625 个网络节点。建立如图 2 所示流场模型。

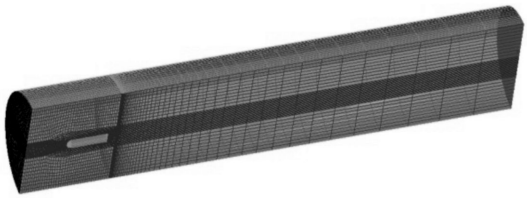

图 2 红外诱饵弹流场模型

Fig.2 Flow field model of infrared decoy

该模型是为考虑低雷诺数、可压缩性而改进的,对于尾流有较好的建模效果。同时在诱饵弹工作时,尾流边界常与周围冷空气发生对流换热，故在尾焰流场中启用 energy 能量模型。定义流场工作边界为压力远场,环境温度为其所在高度大气温度,在求解区域左边界远端定义一个风力入口，边界条件设为速度进场,弹尾为质量入口,并将求解区域右边界设为压力出场,静压为 0。对高度为 12 km,风力流场入口速度为0.8 Ma。

3 药剂对辐射特性的影响

首先对粒子半径为 1 mm 情况下的红外诱饵弹拖尾辐射特性进行仿真，并对仿真结果进行剖面分析。得到的结果如图 3 所示。

图 3 红外诱饵弹尾焰辐射特性仿真结果

Fig.3 Simulation results of infrared decoy tail radiation characteristics

从图 3 中可以发现：由于红外诱饵弹喷射的高温颗粒与周围空气之间发生换热，总体上导致 x 轴方向诱饵弹尾焰的红外辐射强度随着与喷口距离的增加而逐渐减小。同时,在距离喷口较近时红外诱饵弹的辐射强度会呈现上升趋势，这是因为当大量颗粒被喷射瞬间并未完全燃烧因此辐射强度未达到峰值，随着可燃颗粒与大量空气相接触,燃烧程度变得更加剧烈,因此温度会在一个较小的范围内呈现上升的趋势。

然后从仿真结果中提取出辐射强度随波长的变化曲线,得到结果如图 4 所示,从图中可以看出:红外诱饵弹的红外尾焰分别在 3 μm、5 μm 和 8 μm 处出现 3 个高峰[7-8],其辐射强度值分别为 173.0 W/sr、197.3 W/sr 和 462.7 W/sr。

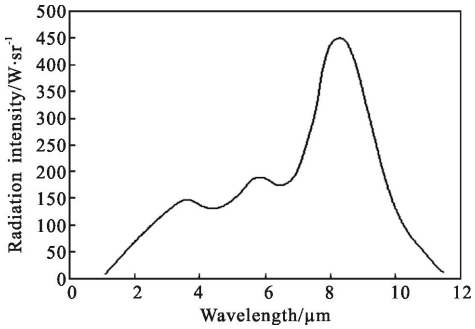

图 4 颗粒半径为 1 mm 时红外诱饵弹尾焰辐射强度与波长的关系

Fig.4 Relationship between the radiation intensity and wavelength of the infrared decoy tail when the particle radius is 1 mm

再提取不同颗粒半径情况下红外尾焰辐射强度,辐射强度随颗粒半径的变化规律如图 5 所示。从

图中可以看出:颗粒半径为 3.72 mm 时,红外诱饵弹红外尾焰的辐射强度最强。此时不同波长下的辐射强度变化曲线如图 6 所示，图中波长为3 μm、5 μm 和 8 μm 时的尾焰辐射强度分别为 183.9 W/sr、210.3 W/sr 和 507.3 W/sr,这 3 个峰值波长的数据均比颗粒直径为 1 mm 时的红外辐射强度大。

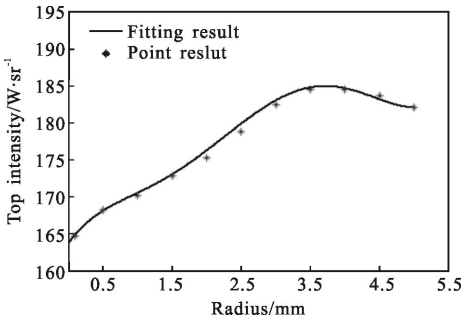

图 5 红外诱饵弹辐射强度与诱饵药剂颗粒半径之间的关系

Fig.5 Relationship between the radiation intensity of infrared decoy and the radius of the bait

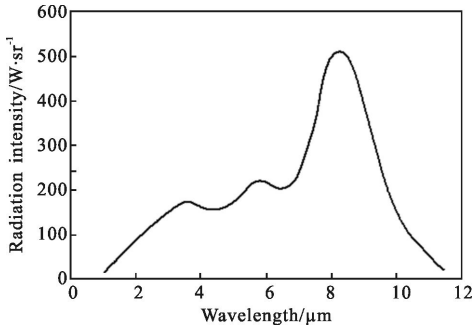

图 6 颗粒半径为 3.72 mm 时红外诱饵弹尾焰辐射强度与波长之间的关系

Fig.6 Relationship between the radiation intensity and wavelength of the infrared decoy tail when the particle radius is 3.72 mm

同时,因药剂燃烧需要一定的时间,根据仿真结果，红外尾焰辐射强度与反应时间之间的关系如图 7 所示。从曲线可以看出:在诱饵药剂释放 1 s 后,

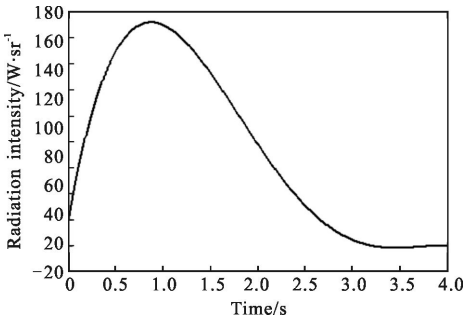

图 7 红外诱饵弹尾焰中 3 μm 波长红外辐射强度随时间变化曲线

Fig.7 Variation curve of decoy tail 3 μm infrared radiation intensity vs time change

辐射强度达到最大。在约 1.5 s 时,辐射强度减弱为峰值的 60%,在 3 s 时,辐射效果消失。整个有效辐射时间持续 2 s。

结合目标辐射模型与大气传输模型，建立不同颗粒半径的诱饵弹仿真图像,图 8 为 1 s 时颗粒半径分别为 1 mm 和 3.72 mm 的仿真图像。从图中可以看出，同时刻不同颗粒尺寸诱饵弹的辐射效果具有一定的差异，对药剂颗粒尺寸的研究有助于诱饵弹的后续研发。

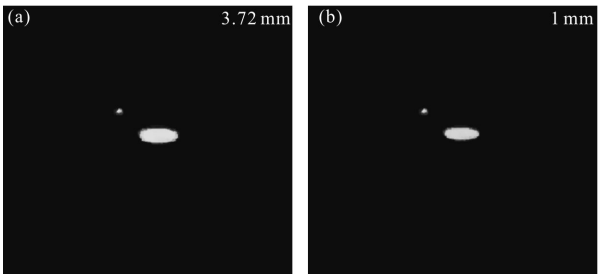

图 8 诱饵弹仿真图像

Fig.8 Simulation image of decoy

4 结 论

文中首先结合红外诱饵弹的结构特点，分析了诱饵弹药剂颗粒的运动特性，运用软件分析建立了基于 DPM 的红外诱饵弹尾焰辐射特性模型,对红外诱饵药剂颗粒不同半径的情况进行了仿真分析,得到诱饵弹药剂颗粒半径对诱饵弹辐射强度影响的变化曲线，并在红外仿真软件平台上验证了药剂颗粒尺寸对诱饵弹辐射的影响。根据仿真结果可以看出:因为燃烧现象和流场因素，不同药剂颗粒尺寸的诱饵弹辐射强度差异较大，因此在诱饵弹的研究过程中考虑药剂颗粒尺寸的影响具有重要意义。

参考文献:

[1] Bai K, Wang Y, Yan Y, et al. Infrared small target tracking based on target and interference behaviors model[J]. ***Infrared Physics & Technology***, 2014, 67:256-265.

[2] Liu S T, Liu Z X, Wang L T. Decision making for surface-type infrared decoy defending anti-ship missile using centroid jamming [J]. ***Laser & Infrared***, 2014 (12): 1354-1359. (in Chinese)

[3] Kong X L, Shengxian M A, Yuping D U, et al. Simulation research on surface-type infrared decoy for jamming infrared

imaging guided missile[J]. ***Command Control & Simulation***, 2011. (in Chinese)

[4] Butters B, Nicholls E, Walmsley R, et al. Infrared decoy and obscurant modelling and simulation for ship protection [C]// SPIE Security+ Defence. International Society for Optics and Photonics, 2011: 81870Q-81870Q-16.

[5] Tao Z, Li H. Simulation Optimization of DPM on gas-solid two-phase flow in complex pipeline flow field [J]. ***Tianjin Daxue Xuebao***, 2015, 48(1): 39-48. (in Chinese)

[6] Chunling Y, Yu C, Mengda Y. Research on infrared decoy movement characteristics and simulation [C]//Proceedings of the 2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2012: 1892-1895.

[7] Mahulikar S P, Sonawane H R, Rao G A. Infrared signature studies of aerospace vehicles [J]. ***Progress in Aerospace Sciences***, 2007, 43(7): 218-245.

[8] Qi Linlin. Analysis of influence of atmosphere on the infrared transmittance [J]. ***Command Control and Simulation***, 2014, 36(1): 61-65

[9] Tong Q, Li J, Tong Z, et al. Combat operational method of airborne infrared decoy [J]. ***Infrared & Laser Engineering***, 2015, 44(2): 419-427. (in Chinese)