

文章编号: 2096-1618(2018)05-0579-06

箔条云高空爆炸成形特性数值计算及气象分析

唐巧珍¹, 冯玉姣², 秦懂雷³, 帅超², 郭盛雨²

(1. 宜昌市气象局, 湖北 宜昌 443000; 2. 中船重工集团公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443000; 3. 秭归县气象局, 湖北 宜昌 443600)

摘要:针对高空下箔条云成形特性问题,根据箔条爆炸过程中分散特征和运动特征,分别建立了箔条散开模型和运动模型;计算了地面和10 km高空空气的密度、温度和黏度,分析了箔条云在高空与气象因素之间的关系,表明箔条云高空爆炸的速度、距离方向和效果等均受高空雷电、大风、强降水等影响,作业前及时掌握地面及高空气象资料、天气预报、雷达图等尤为重要;基于此,采用了计算流体力学方法,计算了地面静爆条件下箔条云的爆炸成形特性,并与试验数据进行比较,验证了模型的合理性;随后计算了10 km高空下箔条云的散开特性,研究表明10 km下箔条散开时间变化不大、布放半径大幅增加;最后研究了不同箔条布放初速的影响,结果表明初速对箔条布放半径影响不大。

关键词:气象分析;箔条云;高空爆炸;布放半径;信息技术;数值计算

中图分类号:P426.5

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcui.2018.05.016

0 引言

箔条是重要的雷达无源干扰材料,具有成本低廉、使用方便、效果明显、应用范围广等特点,广泛用于装甲车辆、舰船、导弹突防以及飞机的自卫防御等场景^[1]。在实际应用中,为满足作战要求,需要布放大量箔条形成箔条云。箔条云的布放成形特性对作战使用具有非常重要的影响。李志辉等^[2]基于均匀随机动力学理论与统计散布取样技术,建立了飞机抛撒箔条的整体运动特性。杨学斌等^[3]假定箔条所处位置大气运动速度是一个维纳随机过程并忽略箔条质量,箔条运动完全反应当地大地的运动,在此基础上建立了箔条云的扩散模型及数值仿真模型。童继进等^[4]提出了高速旋转飞行器为箔条投放器,建立了箔条快速散开阶段的运动模型。采用箔条弹的装填方式、通过爆炸方式布放箔条是应用最广的箔条布放方式,对于该种方式箔条云的成形特性鲜有文献进行研究。

研究对象为一种飞机投放箔条拦截弹,该箔条拦截弹具有高空高速环境、爆炸布放快速成形、布放面积大、作用时间短等特点,用于摆脱导引头锁定,保护载机安全。箔条弹在爆炸前由于飞机速度和火箭发动机助推,具有很高的初速,此外箔条爆炸过程中火药产生的高温高压气体推动箔条高速运动,随后箔条的运动速度由于空气阻力作用逐渐降低。该布放过程可以用

计算流体力学(CFD)进行数值计算,具有成本低、效率高的特点,能够反映空气动力学的影响,得到箔条云的散开速度、布放半径的动态变化。采用CFD方法研究了高空场景下箔条云爆炸布放成形特性,建立了箔条束散开模型和箔条运动模型,首先通过地面仿真和静爆试验验证了模型的合理性,随后计算了高空不同初速下箔条云爆炸布放的散开速度和散开半径随时间的变化规律。

高空气象条件复杂,势必影响箔条云高空爆炸、速度、方向和效果,就雷电、大风、强降水等危险天气对箔条云高空爆炸影响进行分析。

1 数值模型

1.1 流动控制方程

模拟流动的基本方程组包括了质量守恒方程、动量守恒方程及能量守恒方程。其微分形式的守恒性可压缩流场控制方程无量纲化统一形式为^[5]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} U d\Omega + \int_{\Omega} n \cdot R ds = \frac{1}{Re} \int_{\Omega} n \cdot R_v ds$$

其中 $U = (\rho, \rho V, \rho e)^T$ 为未知变量的一般形式, $R = [\rho V, (\rho V V + pI), \rho V H]^T$ 为对流通量矢量, $R_v = [0, (V \cdot \tau + \lambda \nabla T)]^T$ 为粘性通量矢量。标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型是最常用的湍流粘性系数模型,该模型比较简单,且具有较好的通用性,在实际流体动力学问题中应用非常广泛,因此计算采用该湍流模型^[6]。

1.2 箔条散开模型

箔条云中箔条丝通常数以亿计,在现有条件下对每一根箔条进行仿真是难以实现的。并且箔条爆炸过程中运动特性异常复杂,例如:箔条在空中运动时姿态各异,导致运动速度和布放距离不相同;箔条初始紧密装填在箔条盘内,在运动过程中逐渐散开,散开规律非常复杂;外界环境等的影响,如环境风。因此,要精确模拟箔条布放过程难度非常大,需要关注重点,将箔条布放过程进行合理简化。

箔条束散开模型。爆炸中,箔条束边运动边散开,逐渐从大束的箔条散开为小束的箔条,直至散开为单丝,但是散开的规律复杂,无法进行直接模拟。因此将上述过程简化为初始大小不同的箔条束在空中运动的过程,箔条束的大小设置为高斯随机分布。该简化过程示意图如图1所示。

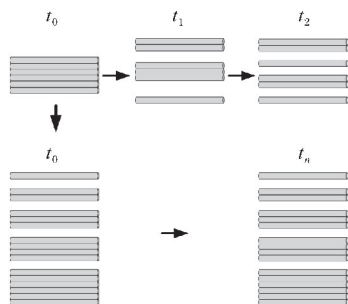


图1 箔条散开过程简化示意图

箔条运动模型。大量试验表明,箔条云成形初期水平极化与垂直极化的雷达散射面积基本相等,可以认为箔条丝分布姿态随机。因此将箔条的运动做如下简化:箔条云只做平动,忽略其转动,箔条轴与运动方向夹角为 θ ,如图2所示,假设夹角 θ 在 $0 \sim 90^\circ$ 均匀分布(取10组数据)。当 θ 为 90° 时,迎风面积最大,此时箔条运动距离最近;当 θ 为 0° 时,迎风面积最小,此时箔条运动距离最远;当 θ 为其他角度时,箔条运动距离在两者之间。

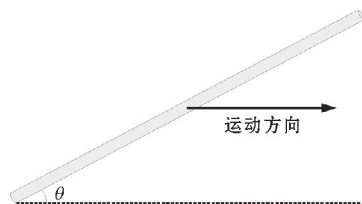


图2 箔条丝轴向与运动方向夹角示意图

箔条丝呈长条圆柱状,而气固两相流动中,通常是将颗粒处理为球形颗粒,其他类型颗粒需要等效为球形颗粒,等效原则为迎风面积和质量保持一致,其计算式为

$$\begin{cases} S_e = 2r_e l_e \\ V_e = \pi r_e^2 l_e \\ m_e = \rho_e V_e \\ S_e = S_e \cos \theta + \pi r_e^2 \sin \theta \\ r_e = \sqrt{S_e / \pi} \\ V_e = \frac{4}{3} \pi r_e^3 \\ \rho_e = m_e / V_e \end{cases}$$

式中, r_e 、 l_e 、 ρ_e 、 S_e 、 V_e 和 m_e 分别为原始箔条丝的半径、长度、密度、最大迎风面积、体积和质量, S_e 、 r_e 、 V_e 和 ρ_e 分别为等效圆球颗粒的迎风面积、半径、体积和密度。

由于实际箔条数量过多,无法直接进行模拟,因此只选择少量的箔条丝模拟其布放规律(包括散开速率、散开路径和散开最大距离等)。

1.3 箔条受力分析

箔条爆炸过程是气固两相流动,采用拉格朗日法描述的随机颗粒轨道模型来模拟箔条的运动过程。在拉格朗日颗粒运动模型中,利用欧拉坐标系计算气相,拉格朗日坐标系计算颗粒相,认为颗粒是沿轨道运动,颗粒之间不存在湍流扩散,但与气流有滑移的分散群。随机速度按高斯 PDF 统计规律分布,从拉格朗日坐标系中的颗粒瞬时动量方程触发,考虑气相的脉动随机速度对颗粒运动的作用,用蒙特卡洛法计算颗粒的随机及沿轨道的变化过程。

颗粒受力分析:箔条爆炸过程中受到多种力的作用,主要有气相阻力、重力和压力梯度力等。

气相阻力

$$F_D = \frac{\pi D_p^2}{8} C_D \rho_g |u_g - u_p| (u_g - u_p)$$

式中, ρ_g 为气相密度, D_p 为颗粒直径, u_g 、 u_p 分别为气体和颗粒的速度, C_D 为阻力系数。

重力

$$F_g = m_p g$$

式中, m_p 为颗粒质量。

压力梯度力

$$F_p = \frac{1}{6} \pi D_p^3 \frac{dp}{dx}$$

式中, $\frac{dp}{dx}$ 为压力梯度。

箔条的运动方程可表示为:

$$m_p \frac{du_{ip}}{dt} = F_D + F_g + F_p$$

式中, u_{ip} 是颗粒在某方向上的速度分量。

2 模型建立与求解

2.1 计算模型与网格划分

2.1.1 高空布放

高空箔条布放坐标系选择弹道为坐标系,计算区域为半径30 m,长度320 m的柱状区域。由于高空箔条爆炸过程是轴对称的,因此可以建立二维轴对称计算区域。二维模型计算区域半径为30 m,长度为320 m。其中,箔条战斗部离左侧边界20 m,离右侧边界250 m,长度580 mm,箔条盘装填内半径为10 mm,外内径为35 mm,战斗部中心爆管装填火药。计算区域和网格划分如图3所示,在箔条战斗部区域,由于流场变化剧烈,需要针对该区域对网格进行加密,使计算结果更精确。

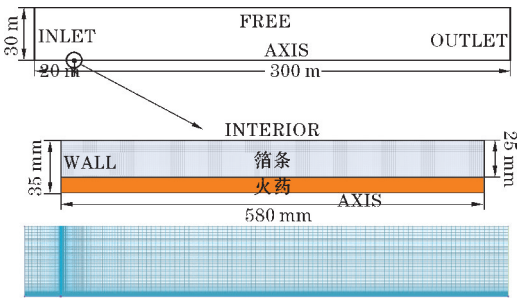


图3 二维模型计算区域及网格划分(高空布放)

2.1.2 地面静爆

对于地面静爆过程,以地面为坐标系,建立半径30 m,长度16 m的计算区域,通过二维轴对称模型进行计算。二维模型半径30 m,高度16 m,其中箔条战斗部离地面1 m。箔条盘结构与边界条件与上文中保持一致。计算区域和网格划分如图4所示。

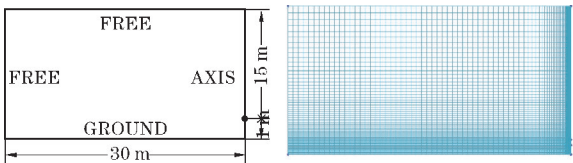


图4 二维模型计算区域与网格划分(地面静爆)

2.2 边界条件

2.2.1 高空布放

如图3所示,左侧 INLET 为来流方向。右侧 OUTLET 为压力出口边界;上侧 FREE 为自由边界,速度与 INLET 保持一致;AXIS 为轴对称边界,表面计算区域是代表三维计算区域。

对于箔条中心爆管,爆炸引信布置在左侧,则箔条

左侧 WALL 为壁面边界;下侧 AXIS 为轴对称边界条件; INTERIOR 为内部边界条件,该边界条件无任何约束。

2.2.2 地面静爆

如图4所示,下侧 GROUND 为地面,设置为壁面边界条件;左侧和上侧 FREE 为远场边界条件;AXIS 为轴对称边界。箔条中心爆管边界条件与高空布放一致。

2.3 初始条件

火药在爆炸过程中逐渐升温升压,在达到爆破压力后高温高压的火药产气向外高速流动,推动箔条向外运动。在数值模拟中,将高温高压的火药产气作为初始条件,随着时间步长的增加,逐渐向周围流动。

爆炸管中火药产气的温度和压力为

$$T_b = Q_b / c_v$$
$$p_b = p_0 (m_0 V_g / V_0 + 1) \times T_b / T_0$$

式中, Q_b 为火药热量, c_v 为定容比热, T_b 为爆炸温度, p_b 为爆炸压力, p_0 为爆炸管初始压力, m_0 为火药质量, V_g 为单位质量火药产气量, V_0 为爆炸管初始容积, T_0 为爆炸管内初始温度。

2.4 求解方法

计算采用可压缩理想气体模型, SIMPLE 求解算法,二阶迎风差分格式,标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型。

3 计算结果与分析

3.1 地面静爆数值模拟

地面静爆情况下,不同时刻箔条云随时间分布如图5所示。从图5可以看出,在100 ms前,箔条分布受重力影响较小;在500 ms左右,开始有箔条丝飘落至地面;在1000 ms左右,大量箔条丝已经落至地面。

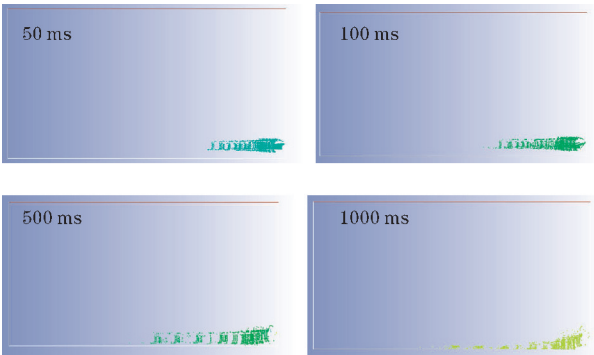


图5 不同时刻箔条分布

不同时刻箔条云最大径向距离与径向速度如图6

所示。从图 6 可以看出,箔条速度衰减非常剧烈,50 ms箔条最大速度衰减到53.3 m/s,500 ms箔条最大速度为3.95 m/s,半径为13.4 m。由于500 ms时箔条速度很低,时间再增加对箔条云最大半径影响不大。

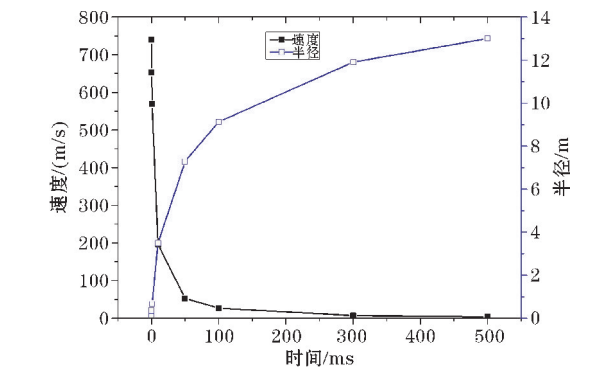


图 6 不同时刻箔条云最大径向距离与径向速度

为了验证模型的合理性,进行了地面静爆试验,试验条件与仿真条件一致。布放半径是通过爆炸完成后地面箔条丝分布稠密的区域来计算布放半径平均值;散开时间通过高速摄像仪观察箔条基本停止运动的时刻进行评估。

表 1 地面静爆试验与数值计算结果对比

	数值仿真	试验结果
散开半径/m	13.4	14.8
散开时间/s	0.5	约 0.5

3.2 10 km 高空布放数值模拟

3.2.1 高空不同时刻箔条图

不同时刻箔条云位置分布如图 7 所示。从图 7 可以看出,10 km高空布放的箔条云分布与地面静爆结果相差很大:一方面表现在分布形状,10 km高空布放的箔条云主大致呈伞状,这是由于高空布放时箔条战斗部具有很高的轴向速度(500 m/s),由于不同分散程度的箔条速度衰减情况不同,受高空大气密度、温度和黏度特性影响,质量越大的箔条束存速能力越强,因此与战斗部爆炸点的径向相对距离更近,而单丝箔条初速衰减更快,与爆炸点的径向相对距离更远;另一方面,箔条云的径向半径更大,这是由于高空中空气的黏度更低,箔条运动的阻力越小,因此飞行距离显著增大。

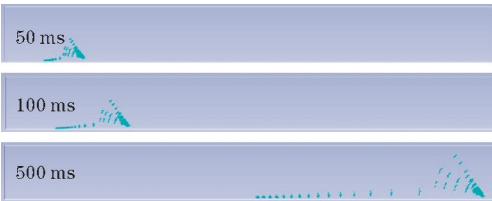


图 7 不同时刻箔条分布

图 8 是不同时刻箔条云最大径向距离与径向速度。从图 8 可以看出,50 ms箔条最大速度为106 m/s,500 ms箔条最大速度为8.65 m/s,高于地面静爆对应时刻箔条的最大速度,500 ms时箔条云半径为25.6 m。

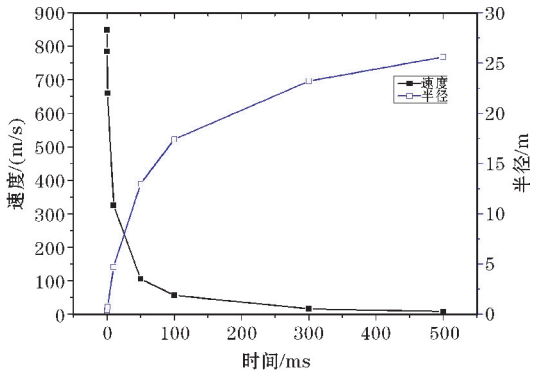


图 8 不同时刻箔条云最大径向距离与径向速度

3.2.2 高空不同初始速度对箔条云形状影响

不同初始速度对箔条云形状影响如图 9 所示,从图 9 可以看出,在500 ms时刻,初始速度为400 m/s时,箔条云形状与500 m/s时箔条云形状类似,“伞盖”部分形状差别不大,这是由于这部分箔条丝较分散,质量轻,阻力大,速度衰减快,初速400 m/s与500 m/s对其影响不大;“伞柄”部分形状差别较大,400 m/s时“伞柄”长度比500 m/s时明显要短,主要时因为“伞柄”部分主要为还未充分散开的箔条束,质量较大,存速能力较强,因此初始速度越大,其运动距离越长,导致“伞柄”部分更长。

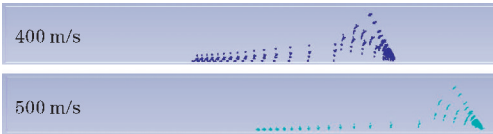


图 9 不同初始速度对箔条云形状的影响(500 ms)

图 10 为不同初始速度对箔条云最大径向距离与速度影响。从图 10 可以看出,不同初始速度时,箔条云的最大径向距离和径向速度基本重合,表明初始速度对箔条云“伞盖”的半径几乎没有影响。这是因为箔条云最大半径是由火药的爆炸力决定的,初始速度与径向速度无关,也就对“伞盖”半径无影响。

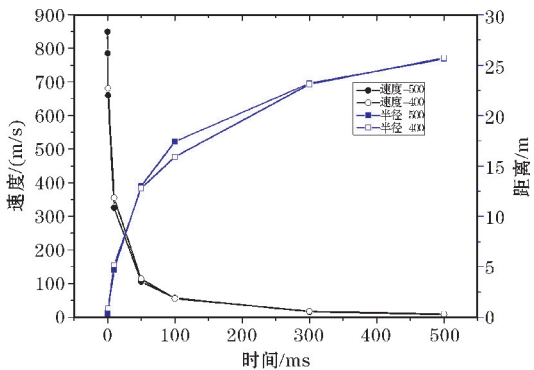


图 10 不同初始速度对箔条云最大径向距离与速度影响

3.3 气象因素分析

由于地面至高空10 km环境不同,气象要素也有明显差异,箔条云在高空爆炸要受气象因素的制约,雷电、大风、强降水等都会影响到箔条云高空爆炸的速度、距离方向和效果等。

3.3.1 风的影响

一般而言,自然风和弹道风均有利于箔条的快速散开,缩短有效干扰形成时间,但高空风速太大,箔条漂散快,可使箔条云的有效干扰持续时间缩短,且易使部分箔条漂出导引头跟踪雷达波束,从而使干扰过程中箔条云有效雷达截面积减小,影响箔条质心的干扰效果。风速太大也会直接影响到弹的发射参数,影响到多发齐射时箔条云的布放位置及空间分布,从而影响布放在高空中的箔条云的有效雷达截面积,降低箔条质心干扰作战效能,其箔条质心干扰作战成功。另外,高空中当箔条云飞行遇到大风时风向也会影响飞行距离,如遇顺风飞行距离将偏远,逆风则会使飞行距离偏近。斜风既影响速度又影响方向,因此,要提前掌握气象观测资料和天气预报地面至高空10 km不同高度上的风向风速的垂直分布和变化情况。

3.3.2 雷电的影响

雷电也会影响箔条云的高空爆炸,历史上火箭发射受到雷电影响而导致爆炸的例子很多,当箔条云在高空爆炸时遇到雷暴与雷暴云接触时会构成最理想的闪电通道招致雷击后果将不堪设想。须在发射前根据卫星云图和雷达回波图避开雷电天气。

3.3.3 降水的影响

空气的湿度对箔条云的高空爆炸影响颇大,当遇到强降水时,箔条云水分含量增大导致初速度减小,使得射程也减小,达不到预期效果,须提前根据短期预报、卫星云图、雷达回波图等合理避开强降水天气。

雨水对箔条的布放也有一定的影响,由于雨水的作用,一方面会使箔条丝结团,降低箔条空中的分散率,从而导致箔条云的有效雷达截面积减小,另一方面由于箔条丝的快速下沉缩短了箔条丝的留空时间,从而降低了箔条云的有效持续干扰作用时间,这些都将影响箔条质心干扰作战效能。

另外,高空大气压变化和高空温度也对箔条云高空爆炸有影响,当高空温度、大气压发生大的变化时,箔条云将在高空受到阻力影响其飞行速度、射程等。

大气密度、温度和黏度随高度增加而降低,根据大气密度、大气温度和大气黏度随高度变化模型^[7-10],可以得到不同高度下的空气属性,计算结果如表2所示。

表2 不同高度下空气属性

高度	气温/K	气压/atm	空气密度/ (kg/m ³)	空气黏度/ (kg·m ⁻¹ ·s ⁻¹)
地面	300	1	1.18	1.78×10 ⁻⁵
10 km	220	0.28	0.45	1.45×10 ⁻⁵

4 结论

建立了爆炸布放箔条散开及运动模型,通过计算流体力学计算了地面静爆和高空箔条散开的速度、布放半径随时间的变化关系,主要得到了以下结论:

- (1)通过地面静爆仿真与试验结果对比,验证了模型的合理性;
- (2)箔条布放初期,运动速度快速衰减,因此通过再提高爆炸初速的方式提高箔条布放半径效果有限;
- (3)地面静爆和高空布放箔条云时,箔条成形完成时间均约0.5 s,与布放高度关系不大;
- (4)0.5 s时,地面静爆的布放半径约13.4 m,10 km高空布放半径约25.6 m。
- (5)箔条云高空爆炸的速度、距离方向和效果等均受高空雷电、大风、强降水等影响,作业前及时掌握地面及高空气象资料、天气预报、雷达图等尤为重要。
- (6)箔条战斗部初速对于箔条布放半径影响不大。

参考文献:

[1] 丁新源,许波,熊坤,等.箔条云团雷达回波建模与仿真[J].系统工程与电子技术,2017,39(1):79-85.

[2] 李志辉,梁杰,李四新,等.箔条云跨流域整体气动特性计算研究[J].空气动力学学报,2011,29(1):59-67.

[3] 杨学斌,吕善伟.箔条云团的布朗运动扩散模型[J].北京航空航天大学学报,2000,26(6):650-652.

[4] 童继进,刘忠,毛超.基于高速旋转飞行器的箔条抛撒运动特性[J].海军工程大学学报,2013,25(5):83-87.

[5] 常见虎,李军,周长省,等.基于数值模拟的燃气舵轴向位置优化分析.航空计算技术,2008,38(1):29-35.

[6] 谢在永.气象条件对火箭发射的影响[J].辽宁气象,1998(4).

[7] 高学庆.气象条件对舰船无源干扰反导作战效能的影响[J].水雷战与舰船防护,2007,15(4):

39-42.

[8] 吴宏宇. 气象和环境对装备的影响及适应性对策[J]. 装备环境工程, 2005, 2(2): 86-89.

[9] 李建云. 气象条件对卫星发射试验的影响[J]. 四川气象, 1989(3): 58-60.

[10] 杜长宝, 李军. 固体火箭发动机燃气舵推力损失的数值分析与测试[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(2): 155-157.

[11] 蔡万勇, 李侠, 万山虎, 等. 大气环境下箔条运动轨迹及箔条幕扩散模型[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(3): 565-569.

[12] 薛大同. 对地球大气密度随高度分布规律的讨论[J]. 真空科学与技术学报, 2009, 29: 1-8.

[13] Berger C, Biancale R, Ill M, et al. Improvement of the empirical the atmospheric model DTM:DTM94-comparative review on various temporal variations and prospects in space geodesy applications[J]. Journal of Geodesy, 1998, 72(3): 161-178.

[14] 孙云, 宋凌云, 张毅. 大气密度分层计算时的再入弹道解析解[J]. 飞行力学, 1999, 17(4): 43-38.

Numerical Modeling of Chaff Cloud Explosive Trajectory
in the Upper Air Condition and Weather Analysis

TANG Qiao-zhen¹, FENG Yu-jiao², QIN Dong-lei³, SHUAI Chao², GUO Sheng-yu²

(1. Yichang Meteorological Bureau, Yichang 443000, China; 2. Yichang Testing Technique Research Institute, Yichang 443000, China; 3. Zigui Meteorological Bureau, Yichang 443600, China)

Abstract:To study the formation character of chaff cloud, the dispersion and motion models of chaff were established based on their characters, respectively; the density, temperature and viscosity of air in the ground and 10 km overhead are calculated, and the effects of meteorological elements on the chaff cloud explosion are analyzed. Based on these results, firstly, the formation characters of the chaff cloud on the ground were studied using the CFD method, and the results were compared with the experimental results, which verified the accuracy of the method; secondly, the formation characters at the altitude of 10 km was studied in detail, which showed that the distribution time changed little while the distribution radius greatly increased in the upper air; finally, the influence of initial speed was studied and found it has little effect on the distribution radius of chaff cloud.

Keywords: meteorological effects; chaff clouds; explosion; distribution radius; information technology; numerical modeling