

37 mm高炮人影作业的安全性评估

刘伟¹ 秦文² 陈农³ 丁瑞津⁴ 卢怡¹

(1 中国气象局上海物资管理处, 上海 200050; 2 湖南湘科科技研究院有限公司, 长沙, 410100;
3 黑龙江省人工影响天气办公室, 哈尔滨 150030; 4 甘肃省人工影响天气办公室, 兰州730020)

摘要: 37 mm高炮人工影响天气作业缺乏系统和可量化的安全性评估模型和评估方法, 在对作业过程中相关危险源及其动力学过程进行分析的基础上, 应用统计学的方法, 基于静态试验数据, 本文提出了弹丸的大破片、半爆、瞎火和落地炸等事件导致发生安全事故概率的计算方法。以黑龙江省黑河市的一次作业为例, 对符合《增雨防雹高炮系统技术要求》标准的三类产品的安全性事故发生概率做了相应计算和对比。分析表明, 符合标准要求的产品安全性事故发生概率较小, 但应对其进行进一步分析, 人影弹药应分级管理, 因地制宜选择相应级别的弹药, 生产商应着力于提高产品性能, 作业人员应有针对性的加强作业安全管控。

关键词: 人工影响天气, 37 mm高炮, 安全性评估, 概率计算, 弹药分级

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.04.010

Safety Evaluation of 37mm Antiaircraft Gun System for Weather Modification Operations

Liu Wei¹, Qin Wen², Chen Nong³, Ding Ruijin⁴, Lu Yi¹

(1 CMA Supply and Delivery Service in Shanghai, Shanghai 200050 2 Hunan XiangKe Science and Technology Research Institute Co.,Ltd, Changsha, 410100 3 Weather Modification Office of Heilongjiang Province, Harbin 150030 4 Weather Modification Office of Gansu Province, Lanzhou 730020)

Abstract: There lacks a systematic and quantifiable safety evaluation model or method for weather modification operation of 37mm antiaircraft guns. This paper puts forward a method of calculating the probability of safety accidents caused by large fragments of projectiles, half explosion, misfire and ground explosion, etc. The calculation method, which is based on the statistical method and the static test data, is proposed on the analysis of the relevant hazard sources and their dynamic processes during operations. And an operation in Heihe city, Heilongjiang province is taken as an example. The probability of safety accidents of three types of products in accordance with the “technical requirements for antiaircraft artillery systems of weather modification” is calculated and compared. The results show that the probability of safety accidents is small for the products meeting the technical requirements. However, further analysis is still necessary. Weather modification ammunition should be managed according to different levels, and the corresponding grade of ammunition should be selected based on local conditions. Manufacturers should focus on improving product performance, and operators should strengthen operation safety control.

Keywords: weather modification, 37mm Antiaircraft Gun System, safety evaluation, probability calculation, ammunition classification

0 引言

近年来, 我国人工影响天气事业迅速发展, 其中37 mm高炮人工影响天气作业(以下简称37高炮人影作业)是其重要组成部分。每年全国范围内37 mm高炮人影炮弹使用量为40~110万发, 为各地减灾工作做出了重要贡献。

37高炮人影作业属于高危作业, 目前应用较为成熟的安全性评估方法有失效模式、影响及危害性分析

法(FMECA)、故障树分析法(FTA)和“施工作业安全分析法”(CJSA)等^[1]。近年来为了克服统计数据的缺乏和主观因素的影响, 也探索了基于故障树的模糊推理系统等先进的数学计算工具^[2], 在人工影响天气领域, 前人提出用危险系数的方法进行安全性评估并开发了相应的评估系统^[3], 设计开发了基于DEM数据人工标识技术的人影安全射界绘制系统^[4]。但是从目前的研究情况来看, 37高炮人影作业依然缺乏系统和可量化的安全性评估模型和评估方法, 危险系数的评估缺乏具体而可用的量化手段, 可能会夸大或缩小作业的危险系数^[3]。由于安全射界的确定缺乏安全性事故发生概率等关键数据支持^[4], 事前无法准确预估

收稿日期: 2021年5月31日; 修回日期: 2021年8月3日

第一作者: 刘伟(1981—), Email: 40051977@qq.com

通信作者: 秦文(1976—), Email: besthill@163.com

作业的安全性,出于保守原则,不得不避开某些区域和某些作业方向,有时会错过宝贵的作业时机,也存在不能在合适的区域作业等现象,影响了人工影响天气作业的有效性、经济性。同时应该指出的是,目前的作业安全性分析,存在片面强调瞎火弹(落点)的安全性,忽视弹丸半爆或偶尔出现的大破片等炸点区域的安全性等问题,作业安全规范的针对性和管控措施的效率因此而有所欠缺。因此,如何量化评估37高炮人影作业安全性事故的发生概率,以便采取必要的安全措施,实现作业的有效性、经济性和安全性的统一,是37高炮人影作业时各级部门关注的焦点。

本文针对37高炮人影作业,对作业过程中的危险源进行了分析。鉴于弹丸半爆或偶尔出现的大破片等事故中的危险源,具有复杂动力学过程,其分布和危害性,具有一定的随机性即不可预测性,分析所需要的数据也存在不完备问题。本文基于静态试验数据,应用统计学的方法,分析了人影弹丸爆炸时大破片和半爆事故的计算途径,提出了炸点和落点区域可能发生安全性事故的概率分析方法,并对各类安全性事件的发生概率建立了量化评估模型。

1 作业过程中的危险源辨识

按照事故的发生时段和地点,37高炮人影作业可能发生的安全性事故分类如下。

- 1) 作业点区域:发射药不发火、自动击发机构失效、膛炸、炮口炸、弹丸解体;
- 2) 炸点区域:半爆、大破片;
- 3) 落点区域:引信瞎火、落地炸。

随着人影装备技术的不断进步,作业安全措施不断完善,作业点区域发生事故的概率低且影响可控。但是弹丸爆炸后在炸点区域坠落的破片、弹丸半爆出现的巨片以及坠落在落点区域的瞎火弹丸,是作业中应着重关注的危险源,这些危险源因为其所具有的动能或其他能量对地面人员形成了杀伤能力,是造成安全事故发生的隐患。

2 安全性事故发生概率的计算方法

2.1 炸点区域安全性事故发生概率的计算方法

2.1.1 作业时弹丸破片伤人安全性事故发生概率的计算方法

一次作业过程中出现破片伤人安全性事故的概率 P_1 可以用下式表示:

$$P_1 = \sum_{i=1}^N (\Gamma_i \cdot \gamma_i),$$

式中: N 为作业中发射炮弹总数, Γ_i 是第 i 发弹丸的所有破片砸中人的概率, γ_i 为该弹丸正常爆炸后的单发

破片砸中人后致人死伤的概率。

设作业时落点区域的统计人口密度为 Z ,第 i 发弹丸破片坠落区域面积为 S_i ,则第 i 发弹丸爆炸后其所有破片坠落区域内的总人数 $M_i = Z \cdot S_i$ 。给定作业区域内单人所占区域面积为 s_0 ,同时设第 i 发弹丸爆炸后的破片总数目为 n_i ,则第 i 发弹丸破片落点区域内平均每人被坠落的破片砸中的概率 $K_i = \frac{n_i}{S_i} s_0$ 。

因此第 i 发弹丸所有破片砸中人的概率 Γ_i 可以用下式计算:

$$\Gamma_i = M_i \cdot K_i = Z \cdot n_i \cdot s_0,$$

得到:

$$P_1 = \sum_{i=1}^N (Z \cdot n_i \cdot s_0 \cdot \gamma_i). \quad (1)$$

在式(1)中,作业弹丸在空中正常爆炸后的单发破片砸中人后致人死伤的概率 γ_i 不是一个确定的数值,但是在统计学意义上,可以根据实际的静爆试验结果,得出弹丸的空炸破片在某个变量上的概率分布规律,结合对单个破片的动力学过程分析,从而进行推导和计算。

某型37高炮人影弹丸通过大量静爆试验,根据试验结果(图1为某次静爆试验收集的所有的5发静爆弹丸破片照片),每发可回收的破片在100~160片,平均每发弹丸回收破片数 $\bar{n} = 122$ 片,其平均粒度 $\bar{L} = 7$ mm,95%的破片粒度 L 在2~12 mm范围内(质量在0.6~9.2 g),该型弹丸爆炸后所有破片在粒度上的分布近似于正态分布,其概率分布密度函数 $\phi(L)$ 可近似表示为:

$$\phi(L) = \frac{1}{2.5\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(L-7)^2}{12.2}}, \quad (2)$$



图1 某型37高炮人影弹丸在一次静爆试验中的破片(试验用弹数:5发)

Fig. 1 Fragments of 37 anti-aircraft artillery used for weather modification in a static explosion test (number of projectiles used in the test: five)

经计算,式(2)符合《增雨防雹高炮系统技术要求》^[5]中破片质量 ≤ 10 g的B级产品技术指标要求。

符合《增雨防雹高炮系统技术要求》^[5]中A级产品破片质量 $\leq 5\text{ g}$ 要求的产品未见公开报道,但是本文为了对比因破片指标的不同而导致的安全性事故发生概率的不同,将其破片的分布作了推算,根据推算结果,弹丸破片平均粒度 $\bar{L}=4.9\text{ mm}$,95%的破片粒度 L 在1~8.8 mm范围内,其平均回收破片数 $\bar{n}_a=162$ 片,即可达到A级产品要求。其破片粒度概率分布密度函数可表示为:

$$\varphi(L)=\frac{1}{1.85\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(L-4.9)^2}{6.845}} \quad (3)$$

同理,假若某弹药破片的平均粒度控制在 $\bar{L}=8.2\text{ mm}$,95%的破片粒度 L 在3.2~13.2 mm范围内,平均回收破片数 $\bar{n}_c=102$ 片,则其满足C级产品的破片质量 $\leq 14\text{ g}$ 要求,其概率分布密度函数为:

$$\varphi(L)=\frac{1}{2.5\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(L-8.2)^2}{12.2}} \quad (4)$$

人影弹丸在预定时间作用时,根据经典外弹道学的弹丸质点运动微分方程^[3,6]进行弹道解算可以得到弹丸爆炸前(通常是发射后13~17 s)的速度 V_T-t 曲线(图2)。弹丸爆炸后,破片将获得一定的初速度。静态试验得到了静态条件下破片初速 v_0 随飞散角 ψ 的变化曲线 $v_0=v(\psi)$ ^[7](图3),空炸后破片按飞散角 ψ 的速度分布规律计算得到的实际初速度 V_p 应为 V_T 与 v_0 的向量和。

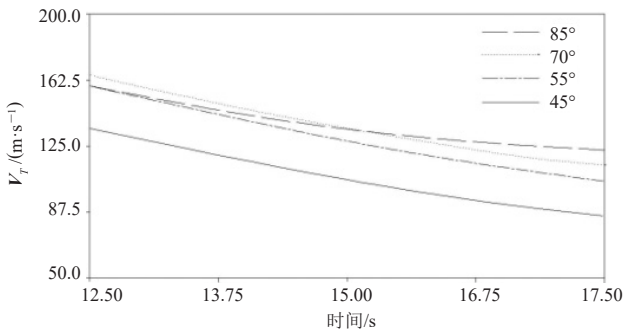


图2 弹丸爆炸前的速度 V_T

Fig. 2 The speed V_T before the explosion of projectiles

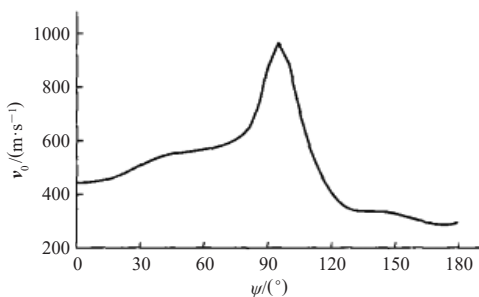


图3 静态试验得到的破片初速 v_0 分布^[7]

Fig. 3 The distribution of the initial speed v_0 of fragments from the static test

对一个质量为 m_p (下标P表示破片)的破片进行分析(图4)。

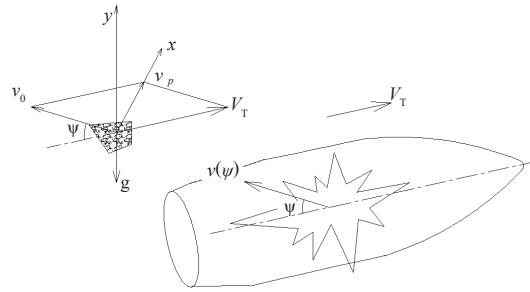


图4 爆炸破裂时弹丸破片

Fig. 4 Fragments of projectiles while exploding

只考虑空气阻力和重力作用,以破片获得最大速度 v_p 时刻为时间起始点,列出破片在 v_p 所在竖直平面上的运动方程:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dv_x}{dt} = -\frac{\rho \cdot v_x^2}{2m_p} \cdot s_p \cdot C_p(v) \\ \frac{dv_y}{dt} = -\frac{\rho \cdot v_y^2}{2m_p} \cdot s_p \cdot C_p(v) - g \\ \frac{dx}{dt} = v_x \\ \frac{dy}{dt} = v_y \\ x|_{t=0} = 0 \\ y|_{t=0} = 0 \\ v|_{t=0} = v_p \end{array} \right. \quad (5)$$

式中: ρ 为空气密度,取 $\rho=1.293\text{ kg/m}^3$; g 为重力加速度, $g=9.81\text{ m/s}^2$; s_p 为破片迎风面的面积,以其粒度 L 为自变量,破片的迎风面可以近似类比为一个边长为 L 的正方形。 $s_p \cong L^2$; 破片质量 $m_p \cong \rho_p L^3$, ρ_p 为破片材料密度,一般为钢材 $\rho_p = 7.83 \times 10^3\text{ kg/m}^3$; $C_p(v)$ 为破片在空中运动的气动阻力系数,在测试中,系数 $C_p(v)$ 与速度 v 决定的马赫数 Ma 存在对应关系,见表1。

表1 自然破片阻力系数在不同速度区间的测试值^[7]
Table 1 Test values of natural fragment drag coefficient in different velocity ranges

马赫数 Ma	阻力系数 C_p	马赫数 Ma	阻力系数 C_p
0.1~0.2	0.85	1.0~1.1	1.38
0.2~0.4	0.86	1.1~1.2	1.48
0.4~0.6	0.96	1.2~1.3	1.42
0.6~0.8	1.1	1.3~1.4	1.4
0.8~0.9	1.25	1.4~2.8	1.29
0.9~1.0	1.33	2.8~5.6	1.15

解算得到的破片落地时的动量与其粒度的关系如表2所示。

表2 破片粒度与破片动量关系表

Table 2 Relative contribution rate of climate change and human activities to winter wheat yield

粒度/mm	质量/g	落地动量/kg·m·s ⁻¹
2	0.6	0.03
4	1	0.19
6.5	2	0.43
8	4	0.72
8.7	5	0.94
10	7.8	1.25
11	10	1.85
12.4	14	2.64

这使得我们能够评估各种尺寸破片危险性，破片形状不规则，而且是垂直掉落，砸中人时的“破片初始动量越大，对肌体的损伤越重”^[8]，造成安全性事故的概率就越大。破片粒度 L 和发生安全性事故概率 $p(L)$ 可以用下列的关系表示：

$$p(L) = \begin{cases} 1 & L > A \\ \left(\frac{L-A}{A}\right)^q, & 2 \leq L \leq A, \\ 0, & L < 2 \end{cases} \quad (6)$$

式中， A 为致人100%伤亡的破片粒度， A 和 q 可根据模拟人体的实物仿真试验得到，本文取 $A=16$ ， $q=4$ 。

可以推导出一发弹丸爆炸后的平均每个破片砸中人后致人死伤的概率 γ_i 计算公式为：

$$\gamma_i = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(L)p(L)dL}{n_i} \quad (7)$$

式中： $\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(L)p(L)dL$ 为一发弹丸爆炸后在粒度尺度上积分得到的所有破片致人伤亡事故总概率； \bar{n} 为平均每发弹丸爆炸后的破片数。

式(5)的数值积分结果表明，弹丸破片落地后，会散布在一个椭圆形区域内。区域内离椭圆中心点距离越近，破片分布越密。在本文中，为计算方便，将破片的空间分布简化为在安全上较为保守的平均分布。代入式(1)则可推导出该次作业出现破片伤人的概率 P_1 为：

$$P_1 = \sum_{i=1}^n (Z \cdot n_i \cdot s_0 \cdot \gamma_i) = \frac{\sum_{i=1}^n n_i}{n} \cdot \left(Z \cdot s_0 \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(L)p(L)dL \right)^\circ$$

当 N 足够大时(可取 $N \geq 50$)，近似取 $\sum_{i=1}^N n_i = N \cdot \bar{n}$ ，

可得到：

$$P_1 = N \cdot Z \cdot s_0 \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(L)p(L)dL \quad (8)$$

2.1.2 半爆造成安全性事故发生概率的计算方法

弹丸半爆属于小概率事件，试图在研发阶段通过大量试验数据得到某种弹药的半爆大破片的初速和破片质量数据的成本是不能承受的，但是可以在试验中积累数据，并追溯类似弹药试验数据以得到较为精确的结果。

某型37高炮弹在静爆破片实验中发生的7次半爆，试验数据如表3。

表3 某型37高炮弹半爆破片数目与质量数据

Table 3 Number and weight of fragments from half explosion of 37 anti-aircraft artillery

序号	半爆回收的破片质量/g
1	17.8、22.7、25.9、50.0、117.5、242.8
2	14.5、19.6、21.5、52.3、58.9、255.2
3	18.6、19.4、22.4、30.8、36.5、40.6、249.2
4	32.5、32.5、51.4、52.4、69.2、255.0
5	27.6、31.6、34.5、68.5、82.7、249.7
6	14.7、19.4、19.7、26.0、31.4、32.5、32.6、252.6
7	14.5、28.9、30.9、38.9、47.2、48.9、247.3

头部引信弹丸半爆形成的破片，弹尾质量最大，通常都大于200 g，引信头的破片质量也不小，大于15~60 g，弹丸中部的破片质量和引信其他部位的破片，数量在3~7片，质量通常在20~90 g。根据我国目前已有的37高炮弹影弹丸的结构和起爆机制类似性，该数据可以类比到目前其他型号的37高炮弹影弹丸。

与上节同理，设某型炮弹空中飞行时单发弹丸半爆后致人死伤的概率为 γ_B ，则：

$$\gamma_B = \sum_{i=1}^{N_1} (Z \cdot S_0 \cdot \gamma'_i)$$

式中： N_1 为该弹丸半爆时出现的总破片数，根据表3计算得到，高炮弹影弹药半爆时的每发弹丸平均破片数6.57片，由于半爆的概率很少，半爆破片的大小也只具有统计学上的意义，令 $N_1=6.57$ 。 γ'_i 为该半爆弹丸的第 i 个破片致人伤亡的概率，根据表3的半爆破片质量数据和式(6)，这些破片砸中人致人伤亡的概率都等于或接近于1，即 $\gamma'_i=1$ ，因此在统计学的意义上 γ_B 可以用下式计算：

$$\gamma_B = 6.57 \cdot Z \cdot s_0 \quad (9)$$

如某次作业发射该型号弹药 N 发，该型号弹丸爆炸时出现半爆的概率为 Γ_B ，则该次作业出现半爆安全性事故的概率 P_2 为：

$$P_2 = N \cdot \gamma_B \cdot \Gamma_B$$

将式(9)代入，则：

$$P_2 = 6.57 \cdot N \cdot Z \cdot s_0 \cdot \Gamma_B \quad (10)$$

2.2 落点区域发生安全性事故发生概率的计算方法

弹丸瞎火后沿弹道曲线继续飞行，落地后直接砸伤人员或落地炸均可能造成的安全性事故。

2.2.1 瞎火弹丸直接砸伤行人事故发生概率的计算方法

在《增雨防雹高炮系统技术要求》^[5]中，规定了C、B、A三级引信的瞎火率分别要达到3%、1%、0.1%。

设定一发瞎火弹在落地前飞过或发生跳弹时经过可能会砸中人的区域内属于危险区域，该区域内只要有人，则其发生安全性事故的概率为1，该区域面积 S_r 计算公式为：

$$S_r = \frac{V_{xt}}{V_{yt}} H \times D, \quad (11)$$

式中： V_{xt} 和 V_{yt} 为根据经典外弹道学^[3,6]计算得到的瞎火弹丸落地水平速度和垂直速度； H 为安全高度，通常 H 取当地人的极限身高的1.5倍， D 为弹丸轨迹两侧的安全宽度。

与半爆破片伤人事故同理，作业中发生瞎火弹直接砸中致人受伤的安全事故的概率 P_3 可用下式计算：

$$P_3 = N \cdot Z \cdot S_r \cdot \xi, \quad (12)$$

式中， ξ 为作业使用弹丸的瞎火率。

2.2.2 弹丸落地炸造成安全性事故发生概率的计算方法

由于37高炮人影弹药不具备碰炸功能，弹丸落地炸实际上是瞎火弹丸以高速落地时，与坚硬介质相互撞击、摩擦，从而导致主装药燃爆，爆炸威力较正常爆炸时小，弹丸落地炸致人伤亡的安全性事故的发生概率 P_4 可以用下式计算：

$$P_4 = \frac{S_L}{S_r} \cdot P_3 \cdot \Gamma_L, \quad (13)$$

式中： Γ_L 为弹丸落地后发生爆炸事件的发生概率，与落点区域的坚硬介质的密度、硬度等因素有关，其值在0.02%~2%，可根据经验判断； S_L 为弹丸落地炸的危险区域面积， $S_L = \frac{1}{2} \delta R_L^2$ ， R_L 为弹丸发生落地炸后的危险区域半径。

3 计算案例与结果分析

3.1 一次高炮作业的计算案例

本节以黑龙江省黑河市爱辉区作业为例，评估不同指标的弹种作业的安全性，该区人口密度为 $Z=1.28 \times 10^4$ 人/ m^2 ，人的平均身高为1.8 m^[9]。假设在该区的一次作业共发射高炮人影弹药 $N=100$ 发，使用的弹丸质量 $m=0.688$ kg，弹截面积 $s=1.075 \times 10^{-3}$ m^2 ；弹丸初速为920 m/s，对应的 $Ma=2.7$ ，弹形系数 $i=1.08$ 。作业时空气密度 $\rho=1.293$ kg/ m^3 ，发射点和落点的海拔

高度相同，作业角度是72°。

根据弹道解算^[3,6]和式(11)计算得到的 S_r 很小，但是瞎火落地的弹丸往往会存在反跳，为提高安全余量，可取 $S_r=1$ m^2 。

为了对比，在其他参数不变的情况下，同时通过计算得出了C、B、A三级指标、半爆的概率为 $\Gamma_B=1\%$ 的37高炮人影炮弹在射角为72°时，引信瞎火、弹丸落地炸、大破片和半爆事故可能造成的安全性事故发生概率的计算结果(表4)。

表4 A、B、C三级弹药事故发生概率计算结果
Table 4 Calculation results of the accident probability of class A, B and C of ammunition

编号	事故类型	发生概率
P_{1a}	破片伤人安全性事故	A级破片： $\sim 4.35 \times 10^{-5}$
P_{1b}		B级破片： $\sim 1.35 \times 10^{-4}$
P_{1c}		C级破片： $\sim 2.5 \times 10^{-4}$
P_2	半爆安全性事故	$\sim 2.1 \times 10^{-5}$
P_{3a}	弹丸瞎火安全性事故	A级引信： $\sim 1.25 \times 10^{-6}$
P_{3b}		B级引信： $\sim 1.25 \times 10^{-5}$
P_{3c}		C级引信： $\sim 3.75 \times 10^{-5}$
P_{4a}	落地炸安全性事故	A级引信： $\sim 0.5 \times 10^{-7}$
P_{4b}		B级引信： $\sim 5 \times 10^{-7}$
P_{4c}		C级引信： $\sim 1.5 \times 10^{-6}$

可以采取进一步降低人口密度，可以用式 $Z = \psi(1 - \eta)Z_0$ 预判措施的效果， Z_0 为该区域统计人口密度， η 为作业前发布通告的效率， $\eta = \frac{\text{知晓通告总人口}}{\text{该区域总人口}}$ ，可取 $\eta=0.65 \sim 0.98$ ， ψ 为作业落点区域与作业时间相关的修正系数，一般落点为偏僻区且发射时间为中午时，可取 $\psi=0.1 \sim 0.5$ 。

3.2 计算结果分析和建议

人们通常关心的是单发弹丸出现安全性事故的概率，例如在一次作业中人们常说这发弹打出去后瞎火的概率是指引信的瞎火率。在本文中，为了体现作业的总体安全性，计算分析的是一次作业中安全性事故的发生概率，后者是前者在一次作业中的统计意义上的累积值。因此从统计意义上来说，本文的计算结果是某次作业中出现某项事故的概率。

计算结果表明，安全事故发生率随着作业区域人口密度的降低而减小，而在人口密度中等的地区，使用符合标准^[8]要求的37人影高炮产品作业安全性事故发生概率的数量级是 $10^{-4} \sim 10^{-7}$ ，其中破片伤人的事故概率数量级为 $10^{-4} \sim 10^{-5}$ ，瞎火弹伤人的事故概率数量级为 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ ，事故发生概率较低。

以往报道的37高炮人影作业瞎火弹安全性事故多于破片伤人事故，从本文的计算结果来看，随着引信可靠性的提高，出现引信瞎火安全性事故的概率已经有较大的降低，需要关注的是破片和半爆弹伤人事故

概率存在, 虽然其危害性和瞎火弹伤人事故相比而言较为轻微, 但仍不容忽视。

对如何降低37高炮人影作业中安全性事故的发生概率, 本文提出如下建议:

1) 人影弹药的性能对安全性事故的发生率具有决定性影响, 生产厂家除确保其生产的人影弹药满足标准外, 还应采取各种措施严格每一批产品的质量, 提高产品的实际指标, 从源头上保证作业的安全性。

2) 通过控制弹药质量可以减小事故发生率, 但生产厂家应了解破片的空气动力特性对破片落地动量的影响, 通过控制弹体材料和结构, 避免较重的具有良好气动外形的破片出现。

3) 作业时精确确定落点和炸点区域。缩小危险区域的范围, 对加强炸点和落点区域的安全性控制措施的有效性和针对性具有重要意义。因此生产厂家应在确保人影弹丸的作用时间精度指标的前提下, 通过试验和计算明确各作业条件下的弹丸的炸点和落点区域, 为作业人员根据标准^[10]确定安全射界提供更准确的参考。

4) 当人口密度变化时, 安全性事故发生率随之成正比变化。如果在指定地区要进一步降低事故发生率, 应采取提高作业通告的广播效率、作业时避开人员生产生活活动时间等措施。

5) 为控制安全事故发生率, 人口密度越高的区域, 宜选用高可靠性指标的弹药, 并加强对危险区域的安全控制措施, 以便将事故发生率控制在较低的水平。本着对人民生命财产负责的理念, 作业中恶性安全性事故(半爆破片和瞎火弹伤人等)的发生率应控制在 10^{-4} 以下, 并在此基础上, 增强作业的有效性, 提高作业的经济性。

应当指出, 安全性事故的发生仍然是当前的防范重点, 特别是破片质量超标和弹丸瞎火等事件的发生在一定程度上仍然是不可避免的, 各级人影管理机构应加强作业公告和安全知识教育, 减小因人们误闯作业区域干扰作业、误拾瞎火弹等事件引起的二次伤害。

4 结论

本文对37高炮人影作业中危险源进行了分析, 对

当前作业过程中重要的安全性事件建立了量化评估模型, 并以黑龙江省黑河市爱辉区的一次作业为例进行了相关计算。分析表明:

1) 使用符合标准^[8]要求的产品安全性事故发生概率较低。

2) 有必要进一步研究破片伤人等各种安全事故的发生概率。为控制安全事故发生率, 应对弹药进行分级管理, 人口密度高的区域, 宜选用高指标的弹药, 并加强安全控制措施, 以便将事故发生率控制在较低的水平, 实现作业经济性和安全性的统一。

3) A、B、C三级指标是标准^[8]中各级弹药的最低指标, 生产厂家应采取各种措施提高产品的实际指标, 通过试验和计算精确定弹丸炸点和落点, 缩小危险区域的范围。

因本文的部分参数不能用试验方法获得, 为提高安全系数, 部分参数的取值偏于保守, 因此本文的部分计算结果可能放大了安全性事故的发生概率。作为一项方法性研究, 本文提出的安全性评估方法的有效性、实施方法和具体效果有待后续进一步的深入研究, 如作业区域人口密度对安全性事故的发生率具有决定性影响, 可通过构建基于GIS的区域人口密度模型^[11], 将人口密度进一步细化至作业的落点和炸点区域, 从而得到更为精确的结果。

参考文献

- [1] Rozenfeld O, Sacks R, Rosenfeld Y, et al. Construction job safety analysis. *Safety Science*, 2010, 48(4): 491-498.
- [2] 余建星, 刘天, 余杨. 基于模糊推理的海底管道泄漏爆炸概率分析. *安全与环境学报*, 2019, 19(5): 34-42.
- [3] 黎祖贤, 刘红武, 廖俊, 等. 基于外弹道计算的人影高炮作业安全评估方法. *气象科技*, 2016, 44(1): 152-156.
- [4] 罗俊颖, 贺文彬, 李延成, 等. 安全射界技术在人工影响天气对空作业中的应用. *气象科技*, 2019, 47(2): 355-360.
- [5] 中国气象局. 增雨防雹高炮系统技术要求 (QX/T358—2016). 北京: 中国气象局, 2016.
- [6] 韩子鹏. 火箭外弹道学. 北京: 北京理工大学出版社, 2014.
- [7] 马永忠, 赵田安, 汪勇. 弹丸破片速度衰减规律研究. *弹道学报*, 2006, 18(4): 54-55.
- [8] 陈菁, 李兵仓, 王建民, 等. 超高速破片对生物杀伤能力的评价标准初探. *第三军医大学学报*, 2003, 24(4): 381-383.
- [9] 黑龙江省统计局. 黑河市人口发展调研报告. 哈尔滨: 黑龙江省统计局, 2019. http://www.hlj.stats.gov.cn/tjsj/tjfx/dstjfx/201906/t20190603_73543.html.
- [10] 山东省人民政府人工影响天气办公室. 37 mm高炮人工影响天气作业点安全射界图绘制规范 (QX/T 256-2015). 济南: 山东省人民政府人工影响天气办公室, 2015.
- [11] 吕安民, 李成名, 林宗坚, 等. 基于GIS的人口信息提取. *清华大学学报 (自然科学版)*, 2005, 45(9): 1189-1192.