

文章编号:1006-9941(2019)02-0113-06

# 基于高斯扩散模型的催泪弹气溶胶烟雾非致命效能仿真

王志刚,郭三学

(武警工程大学 装备管理与保障学院, 陕西 西安 710086)

**摘要:** 催泪弹是一种非致命防暴弹。为研究其非致命效能大小,以武警RS97-2型催泪弹为研究对象,应用高斯扩散模型研究了催泪弹气溶胶烟雾的扩散过程。分析了烟雾扩散时西埃斯(CS)催泪剂浓度和烟雾半径的变化规律。用Matlab软件编制的程序进行了仿真计算,得出以催泪弹气溶胶烟雾扩散的有效作用区域作为其非致命效能大小的衡量指标。结果表明,在风速为 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,一枚催泪剂装药为20 g催泪弹的气溶胶烟雾有效作用区域可达 $453.7\text{ m}^2$ 。

**关键词:** 高斯扩散模型;催泪弹气溶胶烟雾;非致命效能;仿真

**中图分类号:** TJ45

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2018007

## 1 引言

催泪弹是武警部队在处置突发事件中常用的一种非致命防暴弹,它以燃烧或爆炸的方式,将装填在弹体内的催泪剂释放出来形成气溶胶烟雾,烟雾中所含催泪剂在有效浓度范围内会对有生目标产生刺激作用,使目标暂时产生严重反应或者失去抵抗能力。在实际战术应用中,催泪弹非致命效能的大小取决于气溶胶烟雾扩散后所含催泪剂在最低有效浓度时烟雾覆盖区域的大小,覆盖区域越大,作用效果越好,因此研究催泪弹气溶胶烟雾的扩散规律十分必要。目前在催泪弹气溶胶烟雾扩散非致命效能方面的研究,尚未查到国外相关文献报道。国内方面:欧阳的华等<sup>[1]</sup>对自然通风条件下催泪剂室内扩散特性进行了模拟研究;张振中<sup>[2]</sup>以粒子的光散射理论为基础,研究了催泪弹烟幕粒子粒径浓度的测量方法;朱文坤等<sup>[3]</sup>对爆炸式催泪弹的安全性和可靠性设计进行了研究,对弹体零件强度、爆炸冲击波、破片及残骸杀伤性进行了理论分析和计算。

以上文献均未对催泪弹气溶胶烟雾扩散过程进行分析,没有给出催泪弹非致命效能的有效衡量方法和评价指标,这导致在实际战术应用中催泪弹的使用数量没有科学指导依据,如果使用数量少,达不到驱散目标的效果;如果使用数量过多,则可能对目标过度作用。

为了研究催泪弹气溶胶烟雾的非致命效能大小,本研究以武警RS97-2型催泪弹为研究对象,应用高斯扩散模型,对催泪弹的气溶胶烟雾扩散过程进行了分析,得出了气溶胶烟雾扩散半径和催泪剂浓度变化规律,并用Matlab软件编制的程序进行了仿真计算,最终得出一枚催泪弹气溶胶烟雾扩散的有效作用区域,并以此作为催泪弹非致命效能大小的衡量指标,这为处置突发事件中催泪弹的科学使用提供了重要的依据。

## 2 高斯扩散模型原理

在气体扩散研究方面,国内外学者开发了大量的各类气体的扩散模型,如唯像模型、箱模型、三维模型、高斯扩散模型等<sup>[4]</sup>。其中,高斯扩散模型是一种基于高斯分布的数学模型,近年来被广泛应用于大气扩散研究中。对模型引入某些气象参数条件后,可模拟气体沿风向扩散浓度和半径变化,适用于点源的扩散。高斯扩散模型有两种形式:高斯烟团和高斯烟羽模型,分别可模拟瞬时泄露扩散和持续泄露扩散<sup>[5]</sup>。

本研究以RS97-2型催泪弹为研究对象,该催泪弹为燃烧型,主要由发火机构、保险装置、弹体和主装药

收稿日期:2018-01-08;修回日期:2018-05-08

网络出版日期:2018-07-16

基金项目:国家社科基金军事学项目(GBJ003-242)

作者简介:王志刚(1977-),男,博士研究生,主要从事军事装备学研究。e-mail:wjwzg7736@sina.com

通信联系人:郭三学(1962-),男,教授,博士生导师,主要从事军事装备学研究。e-mail:guosanxue@tom.com

引用本文:王志刚,郭三学. 基于高斯扩散模型的催泪弹气溶胶烟雾非致命效能仿真[J]. 含能材料, 2019, 27(2): 113-118.

WANG Zhi-gang, GUO San-xue. Simulation of Non-lethal Efficiency of Tear Bomb Aerosol Smoke Based on Gaussian Diffusion Model[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2019, 27(2): 113-118.

四大部分组成,主装药成分为西埃斯(CS)催泪剂、氧化剂、可燃剂等,单枚催泪弹含CS催泪剂20 g。催泪弹发射后,通过点火管引信引燃弹体内药柱,高温高压气体从弹壳上预制的排气孔中高速喷出,形成流状烟雾,持续喷烟时间一般为20 s,属于持续源扩散,其燃烧效果如图1所示。



图1 RS97-2型催泪弹发烟效果图

Fig.1 The smoke effect of RS97-2 type tear bomb

燃烧型催泪弹持续喷放形成的流状烟雾,符合烟羽的特征,而且烟雾抬升高度较低,在扩散过程中可以忽略沉降效应,属于地面点源持续扩散模式,对此种扩散过程采用高斯烟羽模型进行研究是可行的。因此,本研究应用高斯烟羽模型对催泪弹气溶胶烟雾扩散进行分析。

对于持续点源扩散,扩散过程中可基于如下假设:

- (1) 扩散源的源强连续且均匀;
- (2) 烟雾扩散的浓度在 $y$ 、 $z$ 轴上呈正态分布;
- (3) 在水平方向上,大气扩散系数呈各向同性;
- (4) 扩散过程中风速的大小、方向保持不变;
- (5) 地面对烟雾扩散不发生吸收或吸附;
- (6) 扩散过程不考虑沉降因素。

根据高斯烟羽模型,沿下风向任意一点处的烟雾浓度 $C(x, y, z)$ 可表示如下<sup>[6]</sup>:

$$C(x, y, z) = A(x)e^{-ay^2}e^{-bz^2} \quad (1)$$

由概率统计理论得方差的表达式为:

$$\begin{cases} \sigma_y^2 = \frac{\int_0^\infty y^2 C dy}{\int_0^\infty C dy} \\ \sigma_z^2 = \frac{\int_0^\infty z^2 C dz}{\int_0^\infty C dz} \end{cases} \quad (2)$$

由假设可以写出源强的积分公式:

$$Q = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} uC dy dz \quad (3)$$

将(1)式代入(2)式积分可得:

$$\begin{cases} a = \frac{1}{2\sigma_y^2} \\ b = \frac{1}{2\sigma_z^2} \end{cases} \quad (4)$$

将(1)式和(4)式代入(3)式积分可得:

$$A(x) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \quad (5)$$

再将(4)式和(5)式代入(1)得:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} e^{-\left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right)} \quad (6)$$

式(1)~(6)中, $C(x, y, z)$ 为下风向 $x$ 米、横风方向 $y$ 米、垂直地面方向 $z$ 米高处的烟雾浓度, $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;  $A(x)$ 为待定函数; $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$ 为扩散参数; $u$ 为风速, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $Q$ 为源强(催泪剂喷放速率), $\text{mg}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

### 3 催泪弹气溶胶烟雾非致命效能准则

催泪弹气溶胶烟雾的非致命效能是指烟雾中所含的催泪剂在一定浓度范围内对有生目标的刺激作用,使目标暂时失去抵抗能力或者产生严重反应。烟雾中所含催泪剂的浓度不同,刺激作用程度也不同。以西埃斯(CS)催泪剂为例:在浓度为 $1\sim 5\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,有生目标1 min内则不可忍耐;暴露于 $10\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的浓度中,大部分有生目标立即不可忍耐;使有生目标半数以上失能的浓度为 $20\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ;使有生目标半数死亡的浓度为 $62000\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。通常在对催泪弹非致命效能进行评估时,催泪剂浓度不低于 $1\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 时,其效能认为是有效的<sup>[7]</sup>。

假设烟雾在扩散点所含催泪剂初始浓度为 $C_b$ ,烟雾沿风向方向扩散,随着扩散时间和扩散距离的变化,可将整个扩散过程中分为失能区域、严重反应区域和无效区域,这3个区域烟雾中所含催泪剂浓度分别假定为 $C_d$ 、 $C_s$ 、 $C_i$ 。依据刺激程度,催泪弹气溶胶烟雾非致命效能准则如下<sup>[8]</sup>:

失能区域( $20\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3} \leq C_d < C_b$ ):该区域属于烟雾初始扩散阶段,烟雾中所含催泪剂浓度很高,目标反应剧烈,大多数目标甚至失去抵抗能力,脱离后经清洗数小时内可恢复正常。

严重反应区域( $1\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3} \leq C_s < 20\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ):烟雾经过一段时间扩散后,该区域内烟雾中所含催泪剂浓度依然较高,对有生目标具有严重刺激作用,目标一

分钟内不可忍耐,脱离后经清洗 0.5 h 内可恢复正常。

无效区域 ( $C_i < 1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ):随着烟雾的继续扩散,该区域内烟雾中所含催泪剂浓度相对已较小,对有生目标刺激程度较轻,反应可忽略不计。催泪弹气溶胶烟雾非致命效能准则如图 2 所示。

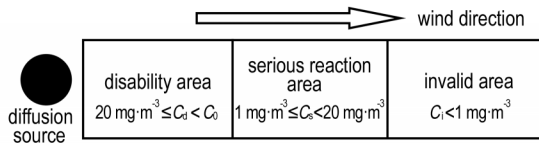


图 2 催泪弹气溶胶烟雾非致命效能准则  
Fig. 2 The non lethal efficiency criterion of tear bomb aerosol smoke

依据上述准则,其非致命效能大小定义如下:烟雾中所含催泪剂浓度不小于最低有效浓度时烟雾扩散过程中所覆盖过的区域面积称之为有效作用区域。本研究中,将最低有效浓度阈值为  $1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。因此,催泪弹气溶胶烟雾的非致命效能大小即为扩散过程中烟雾中所含催泪剂浓度不小于  $1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$  时所覆盖的区域面积。

#### 4 催泪弹气溶胶烟雾非致命效能仿真计算

##### 4.1 高斯烟羽模型参数的确定

目前,在应用高斯烟羽模型研究气体扩散时,对扩散参数的计算方法有两种。一种是帕斯奎尔大气稳定度分类法,该方法是英国科学家帕斯奎尔(Pasquill)在 1961 年提出,通过泄漏物质扩散现场的太阳辐射等级、云量和云高等一些气象参数进行计算,得到不同大气稳定度条件下的扩散参数<sup>[9]</sup>,另一种是经验公式法。帕斯奎尔对大气稳定度进行了分类,依次分别为 A、B、C、D、E 和 F,A 类是极不稳定,B 类是不稳定,C 类是弱不稳定,D 类是中性,E 类是弱稳定,F 类是稳定。帕斯奎尔大气稳定度分类法直接给出了扩散参数,便于计算,因此,本文在研究中采用帕斯奎尔大气稳定度分类法的扩散参数。帕斯奎尔大气稳定度分类和不同大气稳定度下的扩散参数如表 1 和表 2 所示。

##### 4.2 模型仿真与计算

如第 2 节所述,一枚 RS97-2 燃烧型催泪弹催泪剂装药为 20 g,根据其喷烟时间折算得源强  $Q=1000 \text{ mg} \cdot \text{s}^{-1}$ ,环境风速  $u=2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,烟雾高度  $z=1.7 \text{ m}$ 。高斯烟羽扩散模型参数采用帕斯奎尔大气稳定度分类下的扩散参数值。由表 1、表 2 可看出,在风速  $0 < u \leq 2$ 、白天气象条件良好时,扩散模型参数  $\sigma_y, \sigma_z$  的取值分别为,  
 $\sigma_y = 0.32x\sqrt{1 + 0.0004x}, \sigma_z = 0.24x\sqrt{1 + 0.001x}$ 。

表 1 帕斯奎尔大气稳定度分类的气象条件

Table 1 The meteorological conditions for the classification of Pasquill's atmospheric stability

wind speed, $u / \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	day sun			night cloud		
	sunshine	middle light	weak light	thin cloud	little cloud	heavy cloud
$0 < u \leq 2$	A	A	B	E	F	D
$2 < u \leq 4$	B	B	C	E	F	D
$4 < u \leq 6$	C	C	C	D	F	D
$6 < u$	C	D	D	D	D	D

Note: A is the most unstable or most turbulent class, B is unstable, C is weakly unstable, D is neutral, E is more stable and F is the most stable or least turbulent class.

表 2 不同气象条件下的扩散模型参数

Table 2 The parameters of diffusion model under different meteorological conditions

atmosphere stability	$\sigma_x = \sigma_y$	$\sigma_z$
A	$0.32x\sqrt{1 + 0.0004x}$	$0.24x\sqrt{1 + 0.001x}$
B	$0.32x\sqrt{1 + 0.0004x}$	$0.24x\sqrt{1 + 0.001x}$
C	$0.22x\sqrt{1 + 0.0004x}$	$0.2x$
D	$0.16x\sqrt{1 + 0.0004x}$	$0.14x\sqrt{1 + 0.003x}$
E	$0.11x\sqrt{1 + 0.0004x}$	$0.18x\sqrt{1 + 0.0015x}$

Note:  $\sigma_x, \sigma_y$  and  $\sigma_z$  is the parameters of smoke diffusion model.

根据高斯烟羽扩散模型,将各参数值带入(6)式,用 Matlab 进行计算仿真,气溶胶烟雾沿  $x, y$  方向扩散时,烟雾中催泪剂浓度分布及烟雾扩散半径仿真结果如图 3 所示。

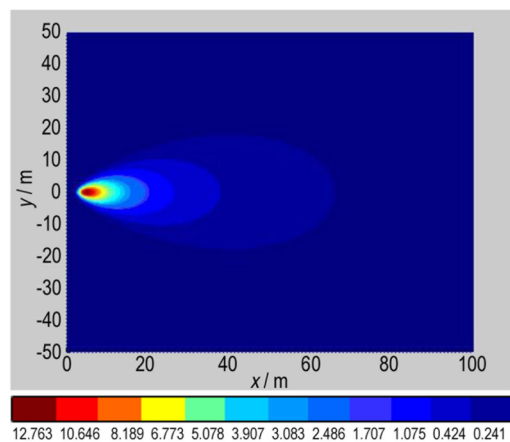


图 3 烟雾中催泪剂浓度分布及烟雾扩散半径仿真

Fig. 3 The simulation of concentration distribution of tear agent in smoke and smoke diffusion radius

应用高斯烟羽模型计算气溶胶烟雾扩散面积之前,首先要分析确定它的扩散图形形状,根据高斯烟羽

模型扩散的一般规律,可以近似地把它看成为椭圆(由图3也可以看出),因此求解高斯烟羽模型扩散面积之前先要求出烟雾沿下风方向( $x$ 轴)和横风方向( $y$ 轴)扩散距离,即就是计算出椭圆的长半轴 $x$ 和短半轴 $y$ ,由椭圆面积计算公式 $S = \pi xy$ 就可得出气溶胶烟雾扩散区域面积。本研究中所要求的烟雾扩散区域是指有效扩散区域,即气溶胶烟雾扩散时烟雾中所含催泪剂浓度不小于 $1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时的扩散区域。

根据(6)式,高斯烟羽扩散模型浓度 $C$ 表达式里只有2个未知数,下风向距离 $x$ 和横风向距离 $y$ 。烟雾最低有效浓度 $C$ 为已知,只要令 $y=0$ ,此时,浓度 $C$ 表达式中只有直接或间接与 $x$ 有关的未知数,这样就可以求出烟雾下风向最大扩散距离。现在问题是怎样求解云团横风向扩散距离 $y$ ,如果取 $x/2$ 的值代入式中求烟雾横风向距离 $y$ ,则存在两点不足:①要写出以烟雾横风向距离 $y$ 为函数浓度 $C$ 为自变量的表达式很困难;②即使求解出来了,这样的横风向距也不够精确。综合以上分析,依据文献[10]给出如下求解算法:

(1) 求解烟雾沿下风向( $x$ 轴)最大扩散距离:

① 给 $x$ 赋较大的一个初值(为了保证开始浓度充分小),并令 $y$ 为零;

② 将 $x$ 值减一个定值 $1 \text{ m}$ (步长),再计算此点烟雾中催泪剂的浓度,记为 $C$ ;

③ 将 $C$ 与最低有效浓度阈值(记为 $C_0$ ,  $C_0$ 为 $1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )比较,如果前者比后者小则重复步骤②,否则执行步骤④;

④ 当 $C \geq C_0$ 时,将此时的 $x$ 值保存,因为这烟雾中催泪剂的浓度已经达到了最低有效浓度,程序运行结束。

(2) 已知 $x$ (烟雾沿下风向扩散距离),求 $y$ (烟雾横风向扩散距离):

① 令 $y$ 为零,令 $x$ 为步骤(1)中求出的下风向距离;

② 设置循环计数标志变量 $j$ (用来控制 $x$ 值步长的变化), $k$ (用来控制 $y$ 值步长的变化),程序开始循环;

③  $x$ 不变,将横风向距离 $y$ 加一个定值 $0.5 \text{ m}$ (步长),计算出这点的浓度,记为 $C$ ,将 $k$ 加1;

④ 将浓度 $C$ 和最低有效浓度 $C_0$ 进行比较,如果前者大于后者则执行步骤③,否则执行步骤⑤;

⑤ 将 $x$ 减一个定值 $1 \text{ m}$ (步长), $y$ 取当前值并执行步骤③,将 $k$ 加1;

⑥ 当 $x \leq x/2$ 时,程序循环结束。将此时的 $y$ 值输出;

根据求解算法(1),令 $x=70$ , $y=0$ , $x$ 步长变化取值

为 $1 \text{ m}$ ,沿下风向方向扩散时,烟雾扩散距离和烟雾中催泪剂浓度的计算结果如表3所示。

表3 烟雾扩散距离和烟雾中催泪剂浓度计算结果

Table 3 The calculated results of smoke diffusion distance and concentration of tear agent in smoke

$x / \text{m}$	$C / \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	$x / \text{m}$	$C / \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$
70	0.2104	50	0.4103
69	0.2165	49	0.4271
68	0.2229	48	0.4486
67	0.2295	47	0.4638
66	0.2365	46	0.4839
65	0.2438	45	0.5054
64	0.2514	44	0.5283
63	0.2594	43	0.5528
62	0.2678	42	0.5791
61	0.2766	41	0.6073
60	0.2858	40	0.6375
59	0.2955	39	0.6701
58	0.3057	38	0.7052
57	0.3165	37	0.7431
56	0.3278	36	0.7842
55	0.3397	35	0.8287
54	0.3523	34	0.8771
53	0.3656	33	0.9298
52	0.3796	32	1.0057
51	0.3945		

Note:  $x$  is lower wind direct distance.  $C$  is concentration of tear gas in smoke.

由表3计算结果看出,随着距离的减小,烟雾中催泪剂浓度逐渐增大,当扩散距离 $x$ 为 $32 \text{ m}$ 时,烟雾中催泪剂浓度为 $1.0057 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,此时沿风向方向( $x$ 轴)上,烟雾中催泪剂浓度已经略大于最低有效浓度阈值了,即当烟雾中催泪剂浓度不小于 $1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,沿风向方向最大扩散距离 $x$ 为 $32 \text{ m}$ 。

根据求解算法(2), $x$ 初值取表3中最大扩散距离, $x$ 步长变化取值为 $1 \text{ m}$ , $y$ 步长变化取值为 $0.5 \text{ m}$ ,烟雾中催泪剂浓度不小于 $1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时横风向方向的扩散距离 $y$ 的计算结果如表4。

由表4结果可看出,当烟雾中催泪剂浓度不小于 $1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时,烟雾在横风向( $y$ 轴)扩散最大距离为 $8.5 \text{ m}$ ,此时,沿风向扩散距离 $x$ 为 $17 \text{ m}$ 。即椭圆长半轴 $x$ 为 $17 \text{ m}$ ,短半轴 $y$ 为 $8.5 \text{ m}$ 。因此,一枚燃烧型催泪弹气溶胶烟雾扩散的有效作用区域为 $S = \pi \times 17 \times 8.5 = 453.7 \text{ m}^2$ ,即一枚燃烧型催泪弹气溶胶烟雾非致命效能大小为 $453.7 \text{ m}^2$ 。

表 4 烟雾中催泪剂浓度不小于  $1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  时扩散距离  $y$  的计算结果

Table 4 The calculated diffusion distance when the tear agent concentration in smoke is not less than  $1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$

$x / \text{m}$	$y / \text{m}$	$C / \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$
32	0	1.0057
	0.5	0.9862
31	0.5	1.0491
	1.0	1.0385
	1.5	1.1061
	2.0	1.0293
	2.5	1.0176
30	3.0	1.0035
	3.5	0.9870
	4.0	1.0266
	4.5	1.0032
29	5.0	0.9776
	5.5	1.0343
	6.0	1.0031
28	6.0	0.9703
	6.5	1.0229
27	6.5	0.9839
	7.0	1.0348
26	7.0	0.9891
	7.5	1.0367
25	7.5	0.9838
	8.0	1.0263
24	8.0	0.9660
	8.5	1.0011
23	8.5	0.9335
	8.0	0.9589
22	8.0	1.0347
	8.5	0.9807
21	8.0	1.0658
	8.5	0.9974
20	8.0	1.0928
	8.5	1.0072
19	9.0	0.9051
	8.5	0.8952
18	9.0	1.0067
	8.5	0.8732
17	9.0	1.0058
	8.5	0.8365
16	9.0	1.0024
	8.5	0.7828
16	9.0	0.9250
	8.0	1.0826

Note:  $y$  is horizontal wind distance.

## 5 结论

(1) 根据催泪弹气溶胶烟雾非致命效能准则,给出了催泪弹气溶胶烟雾非致命效能大小的定义:即烟雾中所含催泪剂浓度不小于最低有效浓度时烟雾扩散过程中所覆盖过的区域面积,并以此催泪弹气溶胶烟雾非致命效能大小的定量衡量指标,这为催泪弹的非致命效能评估提供了一种技术手段。

(2) 应用高斯烟羽扩散模型对燃烧型催泪弹气溶胶烟雾扩散过程进行了研究,用 Matlab 软件编制的程序仿真计算了装药 20 g 的一枚燃烧型催泪弹在风速为  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时所形成的气溶胶烟雾有效扩散面积,结果为  $453.7 \text{ m}^2$ ,这为催泪弹在实际战术运用中提供了参考。

### 参考文献:

- [1] 欧阳的华,张倩韬,赵雁.自然通风条件下催泪剂室内扩散特性的模拟研究[J].火工品,2015,4(4):9-12.  
OUYANG Di-hua, ZHANG Qian-tao, ZHAO Yan. Simulation study on interior lachrymator diffusion under the condition of natural ventilation [J]. *Initiators & Pyrotechnics*, 2015, 4 (4) : 9-12.
- [2] 张振中.催泪弹烟幕颗粒浓度全散射法测量研究[D].西安:西安电子科技大学,2012.  
ZHANG Zhen-zhong. Research on measurement for particle size and concentration of CS gas using light extinction [D]. Xi'an: Xidian University, 2012.
- [3] 朱文坤,郭三学.爆炸式催泪弹非致命效应评估[J].火力与指挥控制,2015,40(9):65-67.  
ZHU Wen-kun, GUO San-xue. Research of unascertained measurement model in comprehensive evaluation of non-lethal effect of explosive type tear gas grenade [J]. *Fire Control & Command Control*, 2015, 40(9) : 65-67.
- [4] 魏利军.重气扩散过程的数值模拟[D].北京:北京化工大学,2000.  
WEI Li-jun. Numerical simulation of heavy gas dispersion [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2000.
- [5] 叶冬芬,叶乔龙,罗玮琛.基于高斯扩散模型的化工危险品泄露区域计算及其实现[J].计算机与应用化学,2012,29(2):195-199.  
YE Dong-fen, YE Qiao-long, LUO Wei-chen. A calculation approach and implementation of hazard chemical substance based on gaussian diffusion model [J]. *Computes and Applied Chemistry*, 2012, 29(2) : 195-199.
- [6] 王娇娇,于诗琪,许诗辰.基于高斯烟羽扩散模型的空气污染研究[J].科技与创新,2017,10(21):21-24.  
WANG Jiao-jiao, YU Shi-qi, XU Shi-chen. Air pollution research based on gaussian plume diffusion model [J]. *Science and Technology & Innovation*, 2017, 10(21) : 21-24.
- [7] 郭三学.非致命武器技术[M].西安:西北工业大学出版社,2015:89-91.  
GUO San-xue. Non lethal weapon technology [M]. Xi'an:

- Northweasten Polytechnical University Press, 2015:89-91.
- [8] 康凯,马峰,王海燕,等. 子母式催泪防暴弹药毁伤效能分析[C]//2015全国毁伤评估技术学研讨会文集.北京:中国兵器科学研究院,2015:1151-1156.
- KANG Kai, MA Feng, WANG Hai-yan, et al. Damage effectiveness analysis of cluster tear riot bomb[C]//Symposium Papers of Damage Assessment Technology in China. Beijing: Ordnance Science and Research Academy of China, 2015:1151-1156.
- [9] Chitumalla P K, Harris D, Thuraisingharn B, et al. Emergency response applications: dynamic plume modeling and real-time routing[J]. *IEEE Internet Computing*, 2008, 12(1): 3844.
- [10] 肖建明,陈国华,张瑞华. 高斯烟羽模型扩散面积的算法研究[J]. *计算机与应用化学*, 2006, 23(6): 559-564.
- XIAO Jian-ming, CHEN Guo-hua, ZHANG Rui-hua. The algorithm study for the dispersion area of Gaussian plume model [J]. *Computers and Applied Chemistry*, 2006, 23(6): 559-564.

## Simulation of Non-lethal Efficiency of Tear Bomb Aerosol Smoke Based on Gaussian Diffusion Model

WANG Zhi-gang, GUO San-xue

(School of Equipment Management and Support, Engineering University of PAP, Xi'an 710086, China)

**Abstract:** The tear bomb is a kind of non-lethal anti riot bomb. To study its non-lethal efficiency size, the armed police RS97-2 type tear bomb was used as the research object. The diffusion process of aerosol smoke for the tear bomb was studied by using Gaussian diffusion model. The change rule in the concentration and smoke radius of CS tear agent at the time of smoke diffusion was analyzed. The simulation and calculation were carried out by written software using Matlab. The effective area of the aerosol smoke diffusion of tear bomb obtained was used as a measurement index of its non lethal efficiency. Results show that when the wind speed is  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , the effective action area range of aerosol smoke for a tear bomb with tear agent charge of 20 g can reach  $453.7 \text{ m}^2$ .

**Key words:** Gaussian diffusion model; tear bomb aerosol smoke; non-lethal efficiency; simulation and calculation

**CLC number:** TJ45

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2018007



## 《含能材料》“观点”征稿

为了丰富学术交流形式,及时传递含能材料领域同行们的学术观点和思想,《含能材料》开设了“观点”栏目。“观点”栏目的来稿应观点鲜明、内容新颖、形式上短小精悍。欢迎含能材料各领域的专家积极来稿。来稿时请附个人简介及主要研究工作介绍。

《含能材料》编辑部