

·光电器件与材料·

烟幕云团运动特性分析

保石, 张紫浩

(中国电子科技集团公司光电研究院, 天津 300000)

摘要:从烟幕湍流扩散的浓度方程出发,分析了烟幕云团湍流运动的基本特征,并通过试验分析烟幕弹静爆和发烟机喷射后,几种烟幕材料成烟在近地面的运动特性和扩散趋势,以便在以后对烟幕扩散模式研究中,通过确定一定试验条件下的扩散方差/扩散系数,建立起烟源特征参数(烟剂装填量等)、大气环境与效应参数(消光遮蔽性能等)的关系,最终评价烟幕的遮蔽面积、留空时间等实际使用性能。

关键词:烟幕粒子;运动特性;湍流扩散;中空材料

中图分类号:TN972.4

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2015)-04-0020-04

Analysis of Motion Characteristics of Smoke Cloud Particles

BAO Shi, ZHANG Zi-hao

(Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300000, China)

Abstract: Based on the concentration equation of smoke screen onflow diffusion, the basic characteristics of smoke cloud onflow motion are analyzed. And the motion characteristics and diffusion trends of several kinds of smoke material smoked at near-ground are analyzed through the experiments at the states of smoke grenade static explosion and smoke generator spraying in order to build the relationships among smoke source characteristic parameters, atmosphere environment and effect parameters through determining diffusion variance and coefficient at a certain experimental condition in the future and the practical application to evaluate the performances such as smoke screen shield and airborne endurance.

Key words: smoke particle; motion characteristic; onflow diffuse; hollow material

烟幕是由空气和悬浮其中的固态或液态微粒组成的准稳定体系,烟幕的遮蔽效果主要与发烟材料的消光特性和空间分布密切相关。烟幕云团的运动与风速、大气湍流、垂直温度梯度等有关^[1],发烟材料的密度、粒径等物性决定它们在大气中输运的流体力学特性,而直接影响烟幕输运扩散的气象要素主要是风和湍流,风场和湍流结构在很大程度上受垂直气温分布的制约,特别是50~100 m的近地层,大气结构主要依赖于垂直方向的湍流输送。

烟幕粒子扩散研究的方法分为试验研究和数学模型方法。常用的大气扩散模型有高斯模型和拉格朗日型随机游走模型^[2-5]。当粒径 $\leq 0.1 \mu\text{m}$ 时,主要考虑扩散作用;当粒径在 $0.1\sim 1 \mu\text{m}$ 范围内,沉降、扩散作用都发生;当粒径 $> 1 \mu\text{m}$ 时,主要考虑沉降作用。烟幕粒子的粒径分布非常广泛,既有小于 $0.1 \mu\text{m}$ 、也有大于 $1 \mu\text{m}$ 的粒子。因此,烟幕粒子在大气中的扩散,需要考虑流体阻力、重力等对粒子运动的影响。

1 烟幕云团扩散特性

当气体、液体和固体等构成混合物中存在局部质量浓度差时,各组分有从高质量浓度区将其质量传递至低质量浓度区的趋势,烟幕扩散也是这种质量传递过程。根据梯度-输运理论(K理论)可导出烟幕扩散方程^[6]为

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + w \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (1)$$

烟幕云团的湍流扩散过程比较复杂,若扩散过程中伴随着物理和化学变化,以及温湿度的分布不均匀,扩散系数都是变量。

由于烟幕云团中的每个流体微团剧烈的随机涨落,每个流体微团的速度、压强、温度等物理量不断变化,因此在实际应用中,主要分析湍流物理量的平均值。令 $u = \bar{u} + u'$, $v = \bar{v} + v'$, $w = \bar{w} + w'$, 和烟幕的质量浓度 $C = \bar{C} + C'$, 将它们代入对烟幕的质量扩散方程,并取时间平均值后,可得到烟幕在湍流作用的质量扩散方程为

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k_x \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} - \overline{u' \bar{C}} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} - \overline{v' \bar{C}} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_z \frac{\partial \bar{C}}{\partial z} - \overline{w' \bar{C}} \right] \quad (2)$$

其中, $\overline{u' \bar{C}}$, $\overline{v' \bar{C}}$ 和 $\overline{w' \bar{C}}$ 为单位面积的湍流流量。如果平均风速为 v_w , 并忽略重力对扩散的影响和地面边界层效应,时均速度等于风速 v_w , $\bar{v} + \bar{w} = 0$; 地面假设为完全反射体,即 $k_y \frac{\partial \bar{C}}{\partial y} \Big|_{y=0} = 0$, 且 x 方向的湍流

扩散远远小于风速,即 $v_w \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \gg \frac{\partial}{\partial x} \left[k_x \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \right]$, 则式(2)简化为式(3),其解如式(4)所示。

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) \quad (3)$$

$$C(x, y, z, t) = \frac{Q_i}{2\pi v_w \sigma_y \sigma_z} e^{-\left(\frac{y^2}{2\sigma_y^2} + \frac{z^2}{2\sigma_z^2} \right)} \quad (4)$$

其中, Q_i 为烟源强度, $\sigma_y^2 = 2k_y t$, $\sigma_z^2 = 2k_z t$ 分别为烟源质量浓度在 y 与 z 方向的扩散标准方差。此解为烟幕源在地面处的解,如果烟幕源置于 $z=H$ 处,则上

式用 $z=H$ 替换,可求得问题的解为

$$\bar{C}(x, y, z) = \frac{Q_i}{2\pi v_w \sigma_y \sigma_z} \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \left\{ \exp\left(\frac{-(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(\frac{-(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right\} \quad (5)$$

该式表明在 y 与 z 方向,质量浓度按正态分布。扩散标准方差 σ_y 与 σ_z 不仅依赖于距离 x ,而且还依赖于大气稳定度、湍流结构等许多因素。在实际应用中,可根据风速与气象条件查表得到大气稳定度,进而求出 σ_y 与 σ_z ,最后利用式(5)可算出 \bar{C} 。

2 烟幕云团湍流运动特性

流体运动状态有层流和湍流两种形式,雷诺数 (Re) 是层流向湍流转换的判据, $Re = UL/\nu$, 其中 U 为速度尺度; L 为与流动有关的特征长度; ν 为运动学黏度。湍流扩散是烟幕云团在大气中的主要运动状态,湍流对烟幕云团与大气间的动量和热量输送、水汽交换以及物质输送起着主要作用。湍流混合和交换的结果,造成烟幕从高浓度向低浓度去输送。

造成烟幕云团湍流运动的原因,一是大气湍流的运动以及风速影响;二是烟幕云团的迅速膨胀,三是温度差等因素。湍流运动的能量来源于烟幕弹爆炸时高压膨胀,或是由于燃烧压力的喷射作用,造成了机械运动做功和浮力做功。烟幕云团的剧烈膨胀,使烟幕云团与空气微团之间产生切变,湍流切应力对空气微团做功,另外,由于烟幕剧烈膨胀造成局部密度的不均匀,以及气流的影响,浮力对烟幕云团做功,将增强湍流运动。

图1为干扰粉剂材料在压缩空气喷射后形成烟幕后的扩散图像。烟幕云团随风飘动,同时由于气流造成烟幕云团的上升或下降,混乱而且无规则。在烟幕云团中有无数大小不同的涡团,它们经历分裂、合并、拉长、旋转等变化,不同的涡团相互叠加,构成湍流的涡旋结构。湍流引起动量、热量及流动中的其他物质快速扩散。湍流的能量是由大涡团向小涡团传递,随着云团的扩大,涡团旋转速度逐渐减慢,能量逐渐耗散。

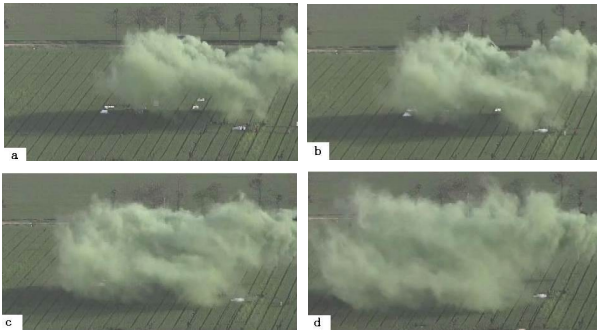


图1 烟幕扩散过程

图2分别为铜粉和中空材料装填发烟弹的扩爆试验图像。发烟剂在爆炸瞬间动能作用下迅速膨胀,当在空气阻力作用下达到平衡时形成初始云团,此后烟团即在风和湍流等作用下,在大气中扩散,烟幕的爆炸过程经历起爆、成烟、浓烟扩散和轻烟扩散等阶段^[7]。



图2 烟幕弹在地面爆炸后的扩散过程

爆炸成烟的烟幕云团,由于受到扩爆释放的热

量作用,烟幕云团温度较高,这样烟幕云团与周围空气达到压力平衡时,因烟幕云团的密度相比较小,烟幕云团整体表现出上升的运动,即使没有上升气流,在风速较低的环境条件下,也表现出这种上浮趋势。对于烟幕微团而言,较难确定其运动方向,但烟幕云团整体呈上浮趋势,并形成无数个大小不一的涡团。这些涡团进行着剧烈切变,竞相上浮,形成典型的浮湍流,这是烟幕云团扩散模式研究中不应该忽略的因素。

3 烟幕粒子留空特性

烟幕粒子在空间分布的非均匀性及微粒的随机热运动特性大致遵从麦克斯韦-玻耳兹曼分布,其平均速度为

$$\bar{v} = \left(\frac{8kT}{\pi m} \right)^{1/2} \quad (6)$$

式中, k 为玻耳兹曼常数($1.38 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$)。

平均自由程为

$$\bar{x} = \frac{1}{\sqrt{2\pi} d^2 n} \quad (7)$$

式中, d 为粒子有效直径; n 为粒子数密度^[4]。扩散系数为

$$D = \frac{1}{3} \bar{v} \cdot \bar{x} \quad (8)$$

对中值粒径 $4 \mu\text{m}$ 的石墨微粉、鳞片铜粉、中空材料的扩散系数计算结果见表1。可见中空材料微粒质量小,单位体积粒子数密度大,扩散系数最小,应最有利于形成烟幕干扰,并且具有较长留空时间。

表1 几种烟幕粒子的扩散系数

	石墨微粉	鳞片铜粉	中空材料
中值粒径/ μm	4		
微粒质量/g	5.2×10^{-11}	8.7×10^{-11}	1.2×10^{-12}
粒子数密度	1.92×10^{10}	1.1×10^{10}	8.3×10^{11}
烟幕密度/ $(\text{g} \times \text{m}^{-3})$	1		
平均速度 \bar{v}_s	1.42×10^5	1.1×10^5	2.97×10^5
平均自由程 \bar{x}_s	1.29	2.26	0.03
扩散系数/ $(\text{m}^2 \times \text{s}^{-1})$	6.11×10^{-6}	8.31×10^{-6}	8.92×10^{-7}

烟幕微粒受到的空气阻力,一是不可压缩黏性流体绕微粒流动时,微粒表面的切应力引起摩擦阻

力;另一是由于边界层分离产生能量损失,使得沿微粒表面流动时,前后总压强不平衡而引起压差阻力。在雷诺数 $Re \leq 1$ 时,流体不会产生边界层的分离,阻力主要是摩擦阻力。烟幕形成后,通常烟幕微粒能够满足斯托克斯条件。

在烟幕微粒沉降过程中,由于重力的作用,下降速度不断增大,使微粒受到的空气阻力也不断增大,当微粒质量与作用在圆球上的空气的浮力、空气的阻力之和相等时,微粒将以等速 U_f 自由沉降, U_f 称为微粒的终端沉降速度。假定烟幕微粒是直径为 d_p 的圆球,当重力和浮力、空气阻力相平衡时,可得到终端沉降速度为^[8]

$$U_f = \sqrt{\frac{4gd_p(\rho_p - \rho_g)}{3C_D\rho_g}} \quad (9)$$

式中, ρ_p 为烟幕微粒的密度; ρ_g 为空气的密度。阻力系数 C_D 将随着雷诺数 Re 的变化而变化。烟幕微粒在空气中沉降时,由于 ρ_g 比 ρ_p 小得多,故 $\rho_p - \rho_g \approx \rho_p$ 。

通常,微粒的终端沉降速度 U_f 可分为三种情况考虑:

(1)当 $Re \leq 1$ 时,用斯托克斯阻力公式可得

$$U_f = \frac{1}{18} \frac{g \rho_p}{\nu \rho_g} d_p^2 \quad (10)$$

(2)当 $1 \leq Re \leq 1000$ 时,将 $C_D = \frac{24}{Re} + \frac{6}{\sqrt{Re}} + 0.4$

经验修正公式代入式(9)求解。

(3)当 $1000 \leq Re \leq 2 \times 10^5$ 时,烟幕微粒的 $C_D = 0.48$,

$$\text{可得: } U_f = \sqrt{2.8gd_p \frac{\rho_p}{\rho_g}}$$

若垂直上升的气体速度 U 与烟幕微粒的终端沉降速度 U_f 相等,则烟幕微粒悬浮在大气中。而当气体的上升速度大于烟幕微粒的终端沉降速度时,烟幕微粒将被气体卷走。所以烟幕形成与扩散过程中,烟幕云团遇到上升气流时降向上漂移,遇到下降气流时,将沿地面随风飘,并很快消散。计算标准大气环境下直径为 $2 \mu\text{m}$ 中空材料微粒终端沉降速度。空气的运动黏度为 $\nu = 15.7 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ 、空气密度为 $1.205 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,中空材料密度为 $0.48 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。当 $Re \leq 1$ 时,上升气流速度 U_f 大致为 0.001 ms^{-1} 时处于静止;当 $1 \leq Re \leq 1000$ 时,仍以这个速度匀速下降,但当 $1000 \leq Re \leq 2 \times 10^5$ 时,速度变为 $U_f = 0.142 \text{ ms}^{-1}$ 。

图3为地面发烟机喷洒中空材料在距喷口 10 m 处的扩散图像。可见中空粒子在脱离了云团后,在空气中悬浮或沉降,当空气流上升的速度达到终端沉降速度时,粒子在空中悬浮,当空气流相对于沉降方向是静止时,粒子以终端沉降速度沉降。由于在喷口附近形成时的高密度云团和一定的流速,再加上湍流作用,造成烟团以较高的流量在空气中流动,此流量可保证中空粒子在空气中悬浮,因为烟幕云团的流速和湍流尺度足够大,可使粒子克服重力保持悬浮状态。在云团内,中空材料微粒无规则地运动。当粒子被带到云团边界以外时,因为流速减小不足以支撑其悬浮时,粒子将离开云团自然沉降。



图3 地面喷洒中空材料局部沿地面扩散图像

4 结论

从烟幕湍流扩散的浓度方程着手,分析了烟幕云团湍流运动的基本特征,并通过试验分析烟幕近地面运动的特性,而实际中烟幕大气扩散受风向、风速、温度梯度及空气湿度等多种因素影响,以及考虑烟幕微粒在扩散过程中的发生碰并等,实际烟幕云团的扩散和流动更加复杂,并具有一定的随机性,在以后的工作中应根据大量试验测试的结果对烟幕扩散模式进行研究,确定在一定试验条件下的扩散方差/扩散系数,进而建立起烟源特征参数(烟剂装填量等)、大气环境与效应参数(消光遮蔽性能等)的关系,最终评价烟幕遮蔽面积、留空时间等实际使用性能。

参考文献

- [1] 姚禄玖,高均麟,肖凯涛,等. 烟幕理论与测试技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2004.
- [2] 张红雨,张志生,王乃岩,等. 发烟剂大气扩散高斯模式与随机游动模式比较[J]. 光电技术应用, 2004, 19(6).
- [3] 张志生,张红雨,王乃岩,等. 发烟剂的大气环境影响评

(下转第54页)

参考文献

- [1] 刘宝廷,程树康. 步进电动机及其驱动控制系统[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1997.
- [2] 李贺然,王黎,高晓蓉,等. 基于FPGA的步进电机控制器设计[J]. 信息技术,2012(6):68-70,75.
- [3] 黄露,杨秀增. 基于FPGA的两相步进电机控制器设计[J]. 广西民族师范学院学报,2010,27(5):43-45.
- [4] 余燎原. Q2BYG403CM两相步进电机驱动器[J]. 企业技术开发,2007,26(6):32-35.
- [5] 李朝青. 单片机原理及接口技术[M]. 北京:航天航空大学出版社,2007.
- [6] 秦伟刚. 光电耦合隔离技术与应用[J]. 仪器仪表学报,2006,27(6):2603-2604.
- [7] 秦佳. 基于单片机的步进电机控制器制作[J]. 科教导刊,2013(4):168-169.
- [8] 曹彩萍,李钢. 基于单片机的键盘接口的设计与实现[J]. 电脑知识与技术,2006(32):105.
- [9] 张勇喜,金秀,蒋伯华,等. 基于单片机的可通信步进电机控制器设计[J]. 2014(2):35-37.
- [10] 徐金梧. Turbo c 使用大全[M]. 北京:机械工业出版社,1998.

(上接第15页)

参考文献

- [1] 魏红,徐红星. 表面等离子体光子学研究的新进展[J]. science in china press,2008,53.
- [2] 张天浩,尹美荣. 表面等离子体共振技术的一些新应用[J]. 物理学和高新技术,2005,34.
- [3] 赵凯华,陈熙谋. 电磁学(上册)[M].2版. 北京:高等教育出版社,2005.
- [4] SHU-Wei, CHANG Chi-Yu, Adrian Ni, et al. Theory for bow-tie plasmonic nanolasers[J]. Optics Express, 2008, 10580.
- [5] Corkum P B. Plasma perspective on strong-field multiphoton ionization[J]. Phys. Rev. Lett. 1993, 1994-1997.
- [6] Lewenstein M, Balcou P, Ivanov, et al. Theory of high-harmonic generation by low-frequency laser fields[J]. Phys. Rev. A., 1994: 2117-2132.
- [7] Chang Z, Rundquist A, Wang H, et al. Generation of coherent soft X rays at 2.7 nm using high harmonics[J]. Phys. Rev. Lett, 1997, 79: 2967-2970.
- [8] Seungchul Kim. High-harmonic generation by resonant plasmon field enhancement [J]. Nature Letters, 2008, 07012.
- [9] F F 陈. 等离子体物理学导论[M]. 林光海,译.北京:人民教育出版社,1980.
- [10] 黄昆原,韩汝琦. 固体物理学[M]. 北京:高等教育出版社,1988:522-528.
- [11] 赵晓君,陈焕文,宋大千,等. 表面等离子体共振传感器基本原理[J]. 分析仪器,2000,4.
- [12] Kunz, Luebbers. The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics[M]. US:CRC Press LLC.
- [13] 郭硕鸿. 电动力学[M].2版. 北京:高等教育出版社,1997.
- [14] 张国平. 原子、分子和纳米材料中非线性高次谐波的产生:一个潜在的极超快和高能量的新型光源[J]. 物理,2006,5(35).
- [15] Bandrauk A, Yu H. High-order harmonic generation by one- and two-electron molecular ions with intense laser pulses[J]. Phys. Rev. A., 1999, 59.

(上接第23页)

- 价预测程序(SmokeEIA)设计[J]. 华东船舶工业学院学报(自然科学版),2005,19(3).
- [4] 宋仔标. 重力作用下的粒子扩散模型及数值模拟[J]. 空气动力学学报,2010(4):209.
- [5] 陈兵,李澄俊. 一种基于诊断风场模式的烟幕浓度估算方法[J]. 南京理工大学学报,2004,28(4).
- [6] 李宗恺. 空气污染气象学原理与应用[M]. 北京:气象出版社,1985.
- [7] 陈兵,李澄俊. 发烟弹扩爆过程及其扩散影响因素分析[J]. 火工品,2005(3).
- [8] 朱晨光,潘功配. 对烟幕微粒的终端沉降速度研究[J]. 含能材料,2005,13(6).