

文章编号: 1006-9941(2007)05-0540-04

## 烟幕云团形成初期的流动规律研究

朱晨光, 潘功配, 关华, 陈昕  
(南京理工大学化工学院, 江苏南京 210094)

**摘要:** 利用普朗特边界层微分方程, 根据爆炸成烟烟幕云团的自身运动特点, 通过在不同条件下的假设, 建立了贴地面的烟幕云团的边界层流动数学模型, 以及快速成烟膨胀模型, 并用实验分析模型。研究认为, 在爆炸成烟烟幕云团形成初期, 其流动特征为湍流, 空气阻力是烟幕云团膨胀运动速度迅速衰减的主要原因。

**关键词:** 动力学; 烟幕云团; 边界层; 湍流; 性质

**中图分类号:** TJ55; TQ567

**文献标识码:** A

### 1 引言

烟幕云团湍流运动及扩散规律研究已经开展了七十多年, 研究目的是建立烟幕在战场环境下的仿真模型, 根据各种弹药的特点建立各自仿真模型, 达到烟幕的有效应用, 典型的有高斯(Gaussian)理论模型<sup>[1]</sup>。扩散模型<sup>[1-5]</sup>的共同特点是利用烟幕浓度的变化规律, 结合环境条件描述烟幕的扩散趋势。根据烟幕浓度变化, 将外场测试的烟幕质量浓度同实验室的结果进行比较, 分析、判断模型的取值范围和适用范围, 使模型得到合理的应用。

模型考虑了地形条件、风速、湿度、气流等重要因素对烟幕扩散过程的影响, 将这些条件列为变量, 借助于 F. Pasquill、F. A. Gifford、F. B. Smith、D. B. Turner 和 R. P. Hosker 对气象条件的判别和分类方法<sup>[1-5]</sup>, 根据烟幕弹药的特点, 建立各种烟幕弹药在各种环境条件下的扩散模型。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、温度等物理量都在不断地变化, 研究起来有很多困难, 在实际应用中, 主要研究湍流物理量的平均值, 最常用的是对时间取平均的方法, 叫做时均法。因此这些扩散模型还有一个共同特点是符合宏观的统计规律。

烟幕云团的湍流扩散过程能够直接影响烟幕的遮蔽性能。湍流扩散是烟幕云团在大气中主要的运动状态, 湍流对烟幕云团与大气间的动量输送、热量输送、水汽交换以及物质输送起着主要作用。烟幕云团的湍流运动对雾滴、聚集体的增长与破碎, 对光波的传输有

着重要的影响。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, 造成了机械运动做功和浮力做功。烟幕云团的剧烈膨胀, 使其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, 也使湍流运动增强。

本文从普朗特边界层理论出发, 以烟幕云团内在变化规律为基础, 分析烟幕云团形成初期湍流运动转变过程, 研究烟幕云团从高速膨胀迅速衰减为自由湍流扩散的原因。

### 2 贴地面的烟幕云团的运动

对于在地面上爆炸成烟的烟幕云团, 可以认为是一种绕平板流动, 通过该方法可以研究烟幕云团在贴地面运动时的运动规律。在爆炸中心, 边界层厚度为零, 随着沿地面向外扩散距离的增大, 边界层逐渐增厚, 边界层初始部分是层流, 但随后是一个从层流向湍流的转捩区<sup>[6]</sup>。

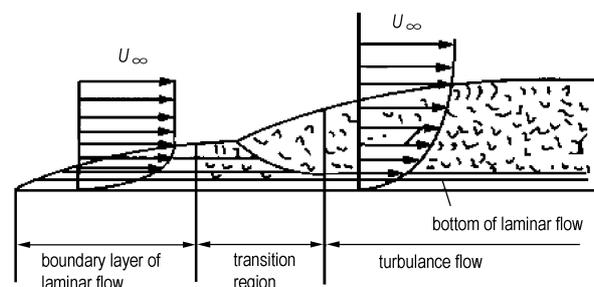


图1 层流向湍流转捩的混合边界层

Fig. 1 Sketch of mixed boundary layer of transition point from laminar flow to turbulence

收稿日期: 2006-11-03; 修回日期: 2007-03-12

作者简介: 朱晨光(1967-), 男, 副研究员, 主要从事光电应用技术研究。e-mail: zhuchenguang\_67@sohu.com

转换区是由湍斑组成,这些湍斑没有固定位置,而是不断地脉动。所以在层流区可以认为是定常二维流动,在转换区和完全湍流区是非定常三维流动。流动问题的解不可能以封闭形式表达,但是在雷诺数  $Re$  下,黏性的影响仅限于贴物面的薄层中,薄层之外黏性可以不考虑。普朗特把这一层称为边界层。而对于边界层和尾流层以外的流动,由于速度梯度很小,即使是黏度很大的流体,其黏性力的影响也很小的,可以忽略,这部分流动称为外部势流。在对边界层作了仔细的分析研究后,通过数量级比较,可对纳维-斯托克斯方程做了重大简化,普朗特提出了著名的边界层微分方程<sup>[6]</sup>。

$$\left. \begin{aligned} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \\ \frac{\partial p}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

边界条件为  $y = 0, u = v = 0$ ;  $y = \delta, u = U_e$ 。其中,  $\nu$  为运动黏度,  $U_e$  为势流速度<sup>[6]</sup>。

根据式(1),冯卡曼等人发展了边界层动量积分方程,根据冯卡曼作的假设:在不可压缩层流中  $u$  可以用多项式表示。可以假定为一任意多次的多项式,用边界条件:  $y = 0$  和  $\delta$  处的  $u$ ,求多项式中的各个系数。最后解得在层流条件下解得边界层厚度( $\delta$ )为<sup>[7]</sup>

$$\delta = 5.48x\sqrt{Re_x} = 2.17 \times 10^{-2} \sqrt{\frac{x}{U}} \quad (2)$$

$x$  为距离起爆点的距离,相应的壁面切应力为

$$\tau_0 = 0.0014\rho U^2 \sqrt{Ux} \quad (3)$$

相应的速度分布为

$$u(y) = U[92.2y\sqrt{U/x} - (2123y^2U/x)] \quad (4)$$

### 3 贴地面的烟幕云团的边界层流动数学模型

这类计算主要问题有:反应生成的烟幕温度较高,温度也是不确定因素,温度对黏度影响较大;烟幕成份的不确定性,烟幕中含有固体微粒、液珠、单分子物质,甚至离子,生成烟幕的过程受到环境影响大,例如湿度较大时,赤磷基烟幕成份中的  $P_2O_5$  与水汽结合生成磷酸或偏磷酸,以烟为主的烟幕和以雾为主的烟幕的黏度相差较大,另外,各反应时段烟幕中的成份比例都有所区别。

模型假设:

(1) 流动过程中烟幕的黏度不变;

(2) 常温常压,不考虑风速的影响;大气相对稳定,无上升或下降气流;

(3) 爆炸点为坐标原点,膨胀方向为轴方向,垂直地平面方向为  $y$  轴方向,下边点与地面重合,烟幕厚度为  $h$ ;

(4) 地面平整光滑;烟幕流出质量速度为  $U$ ,浓度均匀。

基于地平面  $x$  的轴方向的雷诺数为

$$Re_x = Ux/\nu \quad (5)$$

由式(2)可以得到边界层厚度随着不同的膨胀速度( $0 \sim 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )和运动距离( $0 \sim 10 \text{ m}$ )的变化曲线关系(见图2)。

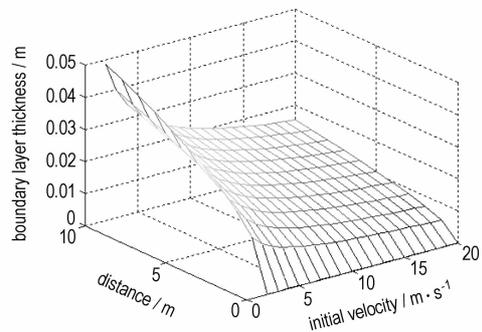


图2 边界层厚度和膨胀速度、距起始点距离的关系

Fig. 2 Relationship between the boundary thickness, expanding rate and the distance

如果假定从膨胀开始就假设边界层内流动为湍流,根据冯卡曼边界层动量积分关系式<sup>[6]</sup>解得边界层厚度为

$$\delta = 0.37xRe_x^{-1/5} = 0.04x/\sqrt[5]{Ux} \quad (6)$$

式中,  $\delta$  为边界层厚度。

相应的壁面切应力为

$$\tau_0 = 0.032\rho U^2/\sqrt[5]{Ux} \quad (7)$$

相应的速度分布为

$$u(y) = 1.6U\left(\frac{y\sqrt[5]{Ux}}{x}\right)^{1/7} \quad (8)$$

通过层流和湍流边界层的厚度比较可以看出,它们都表现出在较低初速时,随着距离爆炸点的距离加大,边界层厚度逐渐增加的幅度,要比较高初速时的幅度大,它们的区别是,在湍流状态下的边界层的厚度明显比层流下的边界层厚度大。无论如何,上述计算都不准确,因为在整个平板长度范围边界层内既不是完全层流,也不是完全湍流。每一种流体都有从层流向湍流转捩所需长度,从层流向湍流转化的雷诺数都有

区别,如果将转捩点设为 2300<sup>[6]</sup>,则得到

$$U_{x_T} = 3.6 \times 10^{-2} \quad (9)$$

膨胀速度与层流向湍流转捩距离的关系如图 3 所示。

从图 3 可以看出,在膨胀速度较低条件下,甚至小于  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,烟幕云团在距离爆炸点 0.036 m 处就已经从层流流动变成湍流流动,所以,在(0~10 m)范围内按照湍流计算更接近正确值。

结果说明,如果按照湍流进行计算,对于烟幕厚度为  $h=0.3 \text{ m}$  时,即使膨胀速度为  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,在距离爆炸点 10 m 附近,边界层外的势流流动就已不存在,此时的速度分布如图 4 所示,虽然主流速开始减缓,但从图中可以看出,仍有大于 90% 的烟幕云团流速分布在  $15 \sim 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  之间。

这也预示着以厚度为 0.3 m、膨胀速度为  $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的烟幕云团运动在附近 10 m 开始减缓。结果说明:爆炸成烟幕云团形成初期的运动形式以湍流为主。

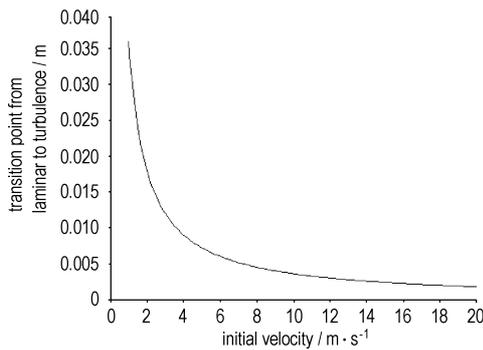


图 3 膨胀速度与层流向湍流转捩距离的关系示意图  
Fig. 3 Relationship between expanding rate and transition point from laminar flow to turbulence

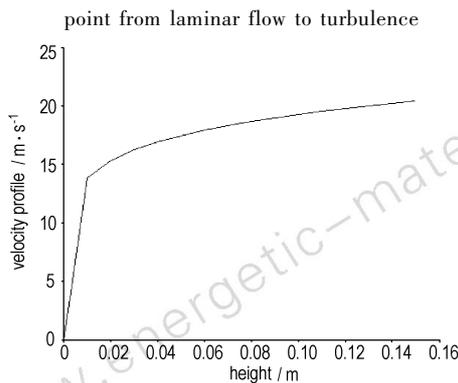


图 4 在距离爆炸点处速度分布图  
Fig. 4 Gradient velocity sketch in 10 m site from initial point

#### 4 烟幕云团的膨胀模型

烟幕弹沿地面爆炸后,烟幕云团在高压强作用下迅速膨胀,形状近似为一个半球体,根据烟幕云团的压强变化,以及烟幕云团所受到的空气阻力,可以建立烟

幕云团的膨胀模型,其数学模型的假设如下:

(a) 烟幕云团的膨胀过程等效为一个不断扩大的半球体;

(b) 有一个微元体始终处在这个球体边缘,质量为  $dm$  (kg),受球体膨胀力的作用面积为  $dS$  ( $\text{m}^2$ ),如图 5 所示。其体积与烟幕云团的体积相比足够小,但是与分子的平均自由程相比有足够大,它包含极多的气体分子,也可以说它是质点,但是指的并不是个别分子的运动,相对分子的运动来说是个较大的物体;

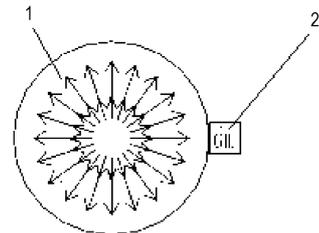


图 5 膨胀的烟幕云团与微元体关系示意图

1—爆炸烟幕云团, 2—微元体

Fig. 5 Relationship between expanding smokescreen and micro-unit

1—expanding smokescreen, 2—micro-unit

(c) 烟幕云团球体变化半径为  $R$ , m;

(d) 不考虑重力和浮力;

(e) 爆炸时刻为时间起点为  $t_0 = 0$ , 云团半径为

$$R = R_0 ;$$

(f) 当微元体速度变为零时为  $t = t_1$ , 云团半径为

$$R = R_1 ;$$

(g) 假设烟幕云团作为一个整体,并且绝热等熵。

忽略重力和浮力,即微元体主要受到烟幕云团膨胀力和空气阻力两个力作用,得到:

$$dm \frac{d^2 R}{dt^2} = p dS - K \left( \frac{dR}{dt} \right)^2 \quad (10)$$

式中,  $p$  为烟幕云团压强, Pa;  $K$  为空气阻力系数。

解得通解为<sup>[8]</sup>:

$$u^2 = \frac{2B \left( \int_{R_0}^{R_1} \frac{e^{2AR}}{R^3} dR - \int_{R_0}^R \frac{e^{2AR}}{R^3} dR \right)}{e^{2AR}} \quad (11)$$

其中,  $A = K/dm$  和  $B = c_1 dS/dm$ ,  $c_1 = 3c/4\pi$ ,  $c$  为理想气体状态方程常数,即  $A$  和  $B$  为常数。

式(11)是微元体  $dm$  在爆炸时运动速度与爆炸烟幕云团半径的关系方程。

利用式(11)可以得到一曲线,与实验测试曲线比较(见图 6)。图中  $M$  线为利用高速摄影仪(每秒 500 幅)

测试得到结果,并绘制成曲线,图中  $N$  线为模型曲线。

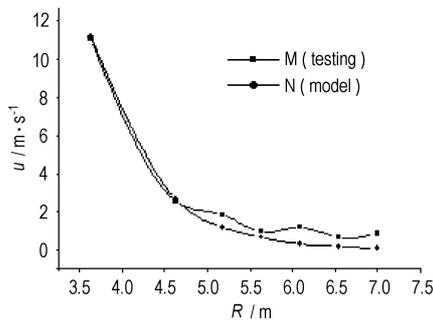


图6 实验曲线与模型曲线比较

Fig. 6 Comparison of testing curve and model curve

从图6可以看出,爆炸成烟的烟幕云团膨胀速度从  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  到  $0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,此时膨胀半径只有6 m,衰减时间只有3 s。

## 5 结论

在爆炸成烟烟幕云团形成的初期,其运动形式主要表现为湍流;而且在空气中运动时膨胀速度迅速衰减,湍流运动虽然在一定程度上对烟幕云团的运动能量起到耗散作用,空气阻力增加了湍流运动的强度,是烟幕云团膨胀速度衰减的主要原因,一旦膨胀压力减缓,烟幕云团迅速衰减为自由扩散。

## 参考文献:

- [1] Robert K Umstead, Ricardo Pena. KWIK: An algorithm for calculating munition expenditures for smoke screening obscuration in tactical situations[R]. New Mexico: U. S. Army Atmospheric sciences Laboratory of White Sands Missile Range, 1979.
- [2] Stephen M Batill. High speed smoke flow visualization[R]. Notre Dame: Department of aerospace and Mechanical Engineering of University Notre Dame, 1988.
- [3] Ralph Zirkind. An obscuring aerosol dispersion model, volume I [R]. Virginia: U. S. Army ERADCOM Night Vision and EO Laboratory, 1988.
- [4] Steven K Chai, Darko Koracin, Leif Enger. Modeling the dispersion of vapor and aerosol particulates in the atmospheric boundary layer[R]. Nevada: Desert Research Institute of University and Community College System of Nevada, 1999.
- [5] Brown D F, Dunn W E. Assessment and computerized modeling of the environmental deposition of military smokes[R]. Illinois: Department of Mechanical and Industrial Engineering of University of Illinois at Urbana-champaign, 1991.
- [6] Hughes W F, Brighton J A. Scham's Outline of Theory and Problems of Fluid Dynamics[M]. New York: McGaw-Hill, 1999.
- [7] 归柯庭. 工程流体力学[M]. 北京: 科学出版社, 2003. GUI Ke-ting. Engineering Fluid Dynamics [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [8] 朱晨光. 提高赤磷烟幕抗红外效能研究[D]. 南京: 南京理工大学化工学院, 2005. ZHU Chen-guang. Research on improving anti-infrared efficiency of red phosphorus smoke[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2005.

## Initial Flow Ability of Smoke Cloud Forming

ZHU Chen-guang, PAN Gong-pei, GUAN Hua, CHEN Xin

(School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** The obscuring performance of smoke cloud was influenced by different turbulent diffusion characters. The initial flow ability of exploding smoke cloud was studied in this paper. Based on the differential equations of the Plandtl boundary layer and performance of smoke cloud on the ground, flow model of the boundary layer and formation model of smoke cloud by blasting were established. According to experiments and the model hypothesis under different conditions, the initial flow ability of smoke cloud forming was analyzed. The results show that the flow of the smoke cloud is mainly turbulent, and its expanding velocity is attenuated rapidly by air drag.

**Key words:** dynamics; smoke cloud; boundary layer; turbulence