文章编号：1000-5773(2013)02-0305-07

爆炸烟团扩散的实验与仿真研究*

段中山[1,2]，罗永锋[2]，袁　伟[2]，尚爱国[3]

(1.后勤工程学院，重庆　401331；
2.第二炮兵装备研究院二所，北京　100085；
3.第二炮兵工程大学，陕西西安　710025)

摘要：对烟团扩散的时空分布实验进行了研究与分析；结合程序计算与实验方案，优化了烟团初始条件；运用流体动力学软件，对烟云气团在大气中的扩散进行了数值仿真计算。通过计算，得到了烟云气团在流场中涡旋上升的运动过程及其密度、速度、压力和温度等参数，并对爆炸“蘑菇状”烟团的产生机理和重力条件下因浮力差造成的涡旋运动进行了探讨与分析。

关键词：爆炸；烟团扩散；初始条件；仿真

中图分类号：O354.7　　**文献标识码**：A

1　引　言

爆炸瞬间，高温、高压的爆轰产物随着时间的延续，迅速向周围膨胀，使得爆轰瞬间所达到的温度和压力不断下降[1]。对于普通炸药，当压力下降到空气的初始压力 p_0 时，膨胀半径 r 达到炸药初始半径 r_0 的几倍到十几倍，由于惯性效应将继续膨胀，直到惯性效应消失为止。此时爆炸产物的平均压力和密度都低于空气的初始压力[2]，这是第一阶段——爆炸热力学与化学阶段。第二阶段是爆炸烟团扩散上升的过程[3]。根据国外研究报告中对源表征模型(SCM)的概述，在爆炸绝热膨胀后，产物被看作具有一定初始大小、密度很小、温度较高、有较小翻滚上升速度但不再明显向周围膨胀的烟云气团。烟团在浮力的作用下，克服重力与上升阻力，相对于大气进行热抬升运动。由于周围空气的进入和水平方向的对流作用，使气团的质量发生变化[4]。第二阶段的初始条件为第一阶段完成后的各项参数。

研究浮力烟团扩散的流场结构非常重要，有助于研究爆炸烟云现象、预测爆炸产物的走向、总结爆炸气溶胶运动沉降的规律、建立化学爆炸事故模型的源项。国内外关于爆后短时间内爆炸烟团扩散的研究和报道较少，没有多少实验可以提供这方面的资料，目前主要依靠国外 SCM 建模方法，通过数值求解流体动力学方程(CFD 技术)而得到流场信息，即探讨运用仿真计算的方法解决烟团流场问题的可行性。

2　实验原理及其结果

本工作属于大型外场烟云扩散实验，设计了 TNT 炸药化学爆炸装置。通过测量装置爆炸后短时间内烟团形态随时间的变化，以获取烟云的源项参数。实验中，尽可能将作为示踪烟云的发烟剂均匀地布置在爆炸装置里。在离爆心位置适当距离处，采用高清晰度照相机对炸药引爆后的烟团初始形态及演变过程进行拍摄记录(间隔 3 s 拍摄一次)。具体实验流程见图 1，实验仪器见图 2，示踪烟云形态如图 3 所示。

实验前，根据经验公式对烟云的扩散范围进行估算[5]，调整摄像机的视场并确定焦距，使烟团在短

* **收稿日期**：2011-02-20；**修回日期**：2011-05-26

作者简介：段中山(1987—)，男，硕士研究生，主要从事爆炸烟云扩散流场研究. E-mail：zsn_312@163.com

时间内的飘散范围全部包含在视场范围之内。在爆心位置释放高空探测气球进行视场标定，并在爆炸点附近布置风场测试装备，利用激光测距仪和角度测量仪测量气球的高度和角度，同时进行拍摄。气球高度分别为 80、127、165、206 和 229 m，最后换算出相片中的气球所在位置的像素点位与实际位置的关系，为烟云分布的测量提供依据。62 kg TNT 模拟装置烟云高度实验数据列于表 1。

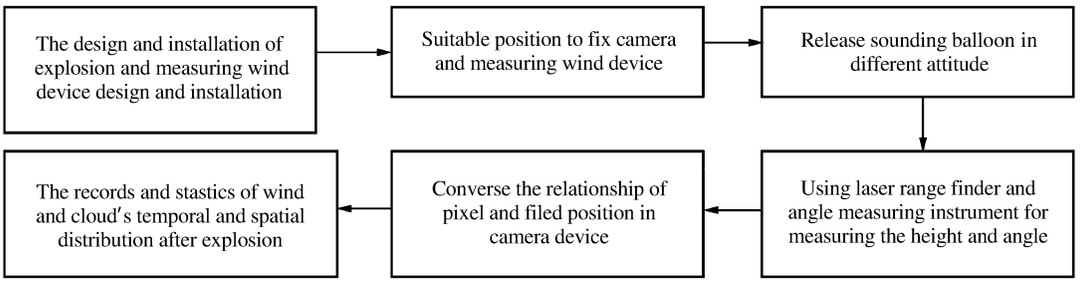


图 1 实验流程图

Fig. 1 Flow chart of the experiment



图 2 实验仪器

Fig. 2 Experimental instruments



图 3 示踪烟云形态

Fig. 3 Tracer cloud

表 1 62 kg TNT 模拟装置烟云高度的实验数据

Table 1 Experimental data of cloud height of 62 kg TNT simulator

Time /(s)	Toppest pixel bits		Height /(m)	Time /(s)	Toppest pixel bits		Height /(m)
	x	y			x	y	
3	826	2 485	53.1	6	837	2 374	72.5
9	1 034	2 265	90.4	12	1 250	2 172	104.9
15	1 393	2 083	118.0	18	1 539	2 003	129.2
21	1 671	1 933	138.7	24	1 800	1 882	145.3
27	2 021	1 821	153.0	30	2 164	1 769	159.3
33	2 021	1 703	167.1	36	2 196	1 647	173.5
39	2 338	1 576	181.3	42	2 551	1 503	189.1
45	2 801	1 423	197.1	48	2 893	1 351	204.1

3 数值模拟原理及结果分析

3.1 CFD 技术理论

选择 CFD 技术中具有强大功能的 Fluent 软件进行数值模拟。对于包括热传导或可压性的流动，Fluent 在求解质量和动量守恒方程的同时，还需要求解能量守恒的附加能量方程[6]。

本工作研究的是爆炸烟云气团的扩散情况,所以需要指定质量、动量和能量守恒方程,以及选择相应的物质混合物。用 Fluent 软件中的 Patch 功能定义一个爆炸烟团,作为流场源项,并在定义流体的物理性质时设置密度、温度、扩散系数等参数。

质量守恒方程又称连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i}=S_{\mathrm{m}} \tag{1}$$

式中:ρ 是密度;u_i 是 i 方向上速度;x_i 是 i 方向的坐标;S_{m} 可以是其它的自定义源项,本研究定义的流场源项为爆炸后的烟团。该方程是质量守恒方程的一般形式,它适用于可压流动和不可压流动。

在惯性(非加速)坐标系中,i 方向上的动量守恒方程为

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j}=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial(\tau_{ij})}{\partial x_j}+\rho g_i+F_i \tag{2}$$

式中:p 是静压;τ_{ij} 是应力张量分量;g_i 和 F_i 分别为 i 方向上的重力体积力和外部体积力。F_i 包含了其它模型的相关源项,如多孔介质和自定义源项。

所求解的能量方程为

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t}+\frac{\partial[u_i(\rho E+p)]}{\partial x_i}=\frac{\partial}{\partial x_i}(k_{\mathrm{eff}}\frac{\partial T}{\partial x_i})-\sum_j h_{j'}J_{j'}+u_j\tau_{ij,\mathrm{eff}}+S_{\mathrm{h}} \tag{3}$$

式中:k_{eff} 是有效热传导系数;$J_{j'}$ 是组分 j' 的扩散通量,$h_{j'}$ 是组分 j' 的局部能量损失。(3)式右边前 3 项分别描述热传导、组分扩散和粘性耗散带来的能量输运。S_{h} 包括了化学反应热以及其它体积热源项[6]。

3.2 仿真思路与物理模型设计

根据物理过程设计仿真思路:定义爆炸后的烟团为流场源项。流场初始条件为爆炸后气团的大小形态、物质组成、密度分布、温度和初始速度分布等。在重力和大气环境下,采用混合物耦合计算模型、湍流模式、可压缩流动、随时间变化的非定常流进行计算[7]。

初始条件:运用有限元软件 Autodyn 设计化学爆炸模型进行爆炸模拟计算,以获取爆炸热力学与化学阶段的各项参数。在十几毫秒后,62 kg TNT 装置达到过度膨胀体积,此时能得到烟团初始大小、速度、密度和温度的分布,这个分布是不均匀的。结合实验的具体条件,对流场的初始条件进行优化[8]。

初始大小及位置分布:上部 $r=4.8$ m 球状气团,离地约 2 m 高位置,设置下垫面热气团宽度为 12 m,高度 4 m。密度和速度分布:下垫面是密度较大(0.5~0.8 kg/m^3)的近地面烟云气团,上部密度约为 0.12 kg/m^3;气团具有约 5 m/s 的初始翻滚上升速度。爆温高达上千摄氏度,但迅速下降,气团均值温度设为 450 K,重力加速度为 9.8 m/s^2。气团的组成为 TNT 爆炸气体产物,按照化学爆炸式的体积分数设定。结合实验条件,设定风速为典型风场,风速为 3 m/s。所有设定尽可能使初始条件接近爆炸后流场的真实状态。

网格和边界条件:网格用 Gambit 软件完成。除研究时空分布时采取的是长、宽均为 300 m 的二维空间计算外,其余规律研究都在长、宽均为 200 m 的空间计算,因为在较小的空间里能更好地观察烟团的扩散情况。为更好地关注烟云扩散,边界线从中间到两边、从下到上,采取 1.02 倍递增的步进划分方式,这样生成的网格其中部和下部较密集。为了加入风场,设置左边为 Inflow,右边为 Outflow,底部边界选取为 Wall。

计算时对 x 方向和 y 方向上的速度、能量、各物相体积分数及 k 值等均进行收敛设定和残差监视。计算时发现,残差监视线下行,收敛比较容易,计算步长设定为 0.2 s,迭代几百次即能达到计算所要求的精度。

3.3 仿真结果与分析

3.3.1 烟云时空分布计算结果

计算得到的不同时刻烟云顶部高度的数据列于表 2。

表 2 仿真烟团高度的分布

Table 2 Distribution of cloud height (Simulation)

Time/(s)	Height/(m)	Time/(s)	Height/(m)	Time/(s)	Height/(m)	Time/(s)	Height/(m)
3	36.1	6	56.3	9	74.0	12	92.1
15	105.8	18	117.0	21	131.2	24	138.6
27	148.4	30	156.1	33	166.7	36	173.1
39	178.5	42	184.2	45	189.2	48	193.5

图 4 表明,模拟的烟团高度比实际值要低,这是因为本实验是通过发烟剂在爆炸驱动下的烟进行示踪,一开始存在高速抛撒,然后才是浮力气团的上升,因此前几秒示踪烟云高于实际爆炸气团;爆炸后的流场非常复杂,还可能存在较小的垂直风场,而简化后模型初始条件的设置也可进一步优化,所以存在一定误差。在 10 s 过后差距变得很小,比如在 30 s 的时候高度差距不到 2%,仿真结果与实验的数据和规律相一致。计算显示,48 s 后上升幅度变得小而平缓;大约 70 s 左右,烟云基本与空气混合,温度、密度、速度和压力参数与大气相近,认为烟云到达最高点,此时高度约为 230 m。

另外,在图 5 中对比了通过实验和仿真计算得到的烟团直径大小,实验和仿真曲线呈现的线性规律比较一致;但由于实验中存在的抛撒问题,因此实验获得的直径较大。仿真结果与德国联邦空军基地训练场 Munster 试验的烟云高宽比例比较吻合[9]。以上结果充分说明,用 CFD 流体动力学技术能很好地实现爆炸烟团扩散的数值模拟。

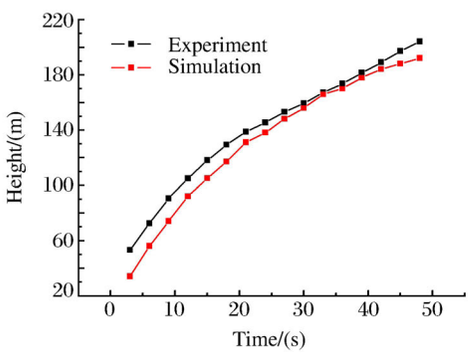


图 4 烟团顶部高度的对比

Fig. 4 Comparison of cloud height

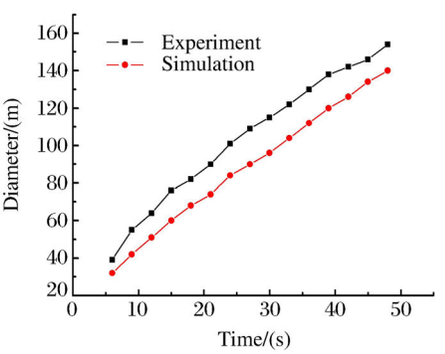
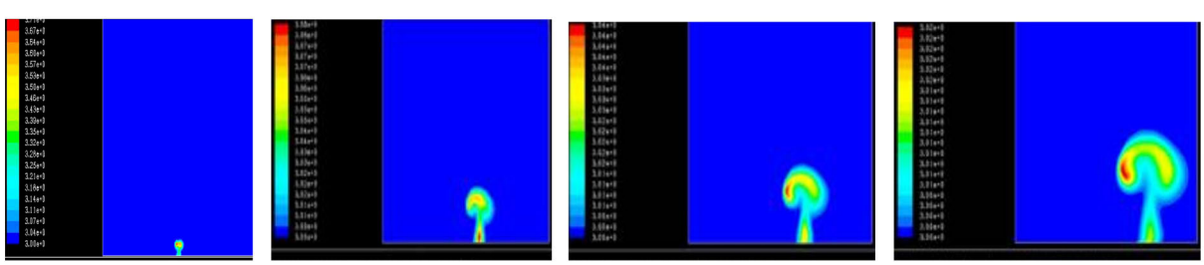


图 5 烟团直径的对比

Fig. 5 Comparison of cloud diameter

3.3.2 典型风场爆炸烟云形态及参数的变化

计算得到的典型风场条件下爆炸气团形态如图 6 所示。



(a) 1 s (b) 9 s (c) 21 s (d) 27 s

图 6 爆后烟云分布

Fig. 6 Cloud distribution after blast

通过水平风条件下的温度场分布来表征烟云形态和方位,可得到不同时刻烟云大致的时空变化。从图 6 可见,烟云在形态上遵循蘑菇云的形态,与实验观察相吻合。烟云上升时的形状是一个涡环,涡环围绕其涡核由内向外翻卷,涡环直径逐渐变大,非常稳定地上升。由于爆炸产物密度的不一致性,扩散上升速度不一样,所以在气团下部形成烟柱;在水平风的作用下,烟团顶部的形态发生了不对称变化。

在云图结果中提取了烟团中心处温度、速度和密度随时间变化的一组数据。根据图 7 中温度的数值变化规律可以发现,在 5～10 s 时间内,烟云温度下降到比周围大气温度高十几度,由此得出的热抬升时间为 5～10 s,与文献[5]中脏弹爆炸烟云源项记载和红外热成像实验的结果相吻合。除了温度分布外,模拟计算还能得到不同时刻速度和密度的变化规律等流场信息。图 8 为相对密度变化图,在前 10 s 时间内,空气快速进入气团,导致气团密度迅速增加,随后密度变化比较缓慢。

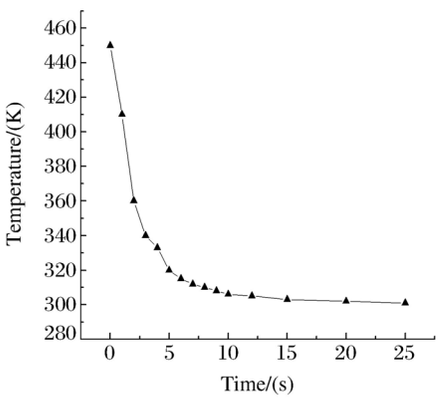


图 7　温度随时间变化曲线

Fig. 7　Relation of temperature with time

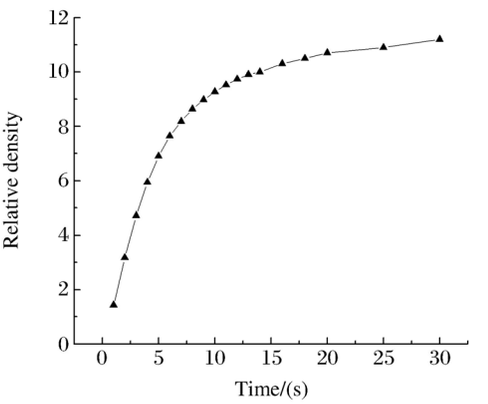


图 8　相对密度变化曲线

Fig. 8　Relation of relative density with time

图 9 为 5 s 时刻速度分布图,清晰地显示出中间位置的速度比较大,两侧空气的进入对应着较小的卷入速度,在两侧涡旋的中心位置速度相对比较小。图 10 为速度随时间变化曲线。从图 9 中可以很容易地看出速度随着烟云抬升的变化过程。气团浮力一开始大于重力和空气阻力,气团在浮力作用下快速上升,5 s 左右达到最大速度,然后由于空气的进入,气团浮力变小,在重力和空气阻力的作用下,气团速度慢慢下降。

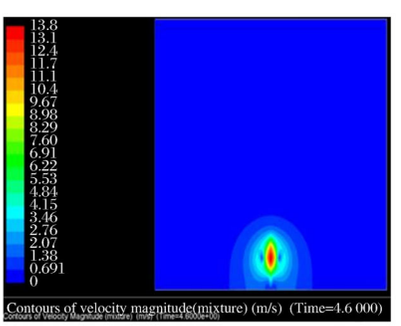


图 9　某时刻速度分布

Fig. 9　Velocity distribution at a certain time

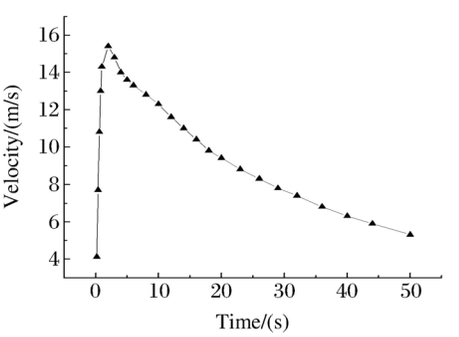


图 10　速度随时间变化曲线

Fig. 10　Velocity variation with time

3.3.3　爆炸烟云流场的分析

为了观察烟团上部主体的流场,模拟了无风条件下烟云中心的流场。图 11 是顶部浓度分布图。国外研究者在多次实验观察中发现,在烟云流场上气团横截面展现出一个肾形状模式,图 11 的模拟结果证实了这一点。这个模式是由两个反漩涡环流组成的,涡流结构造成了一个使气团向上运动的速度场,气团表面被拉伸和扭曲,产生了如图 12 所示的正、反两种环流。

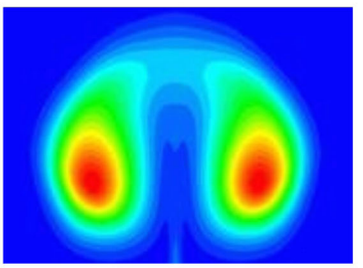


图 11 顶部呈肾形状

Fig. 11 Top appears as kidney shape

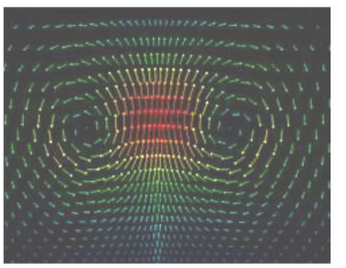


图 12 涡流速度矢量

Fig. 12 Eddy velocity vector

文献[10]对涡环结构进行了理论计算与探讨，文献[4]中对斜压产生的涡流进行了详细说明。所谓斜压就是压力梯度与密度梯度不共线，根据涡量输运公式可知，斜压将导致涡量的产生。图 13 为浮力斜压产生涡环的示意图。浮力涡环产生的机理是流体的斜压性，即在重力下浮力的水平差别造成的涡度生成它们的流动，如同斜压造成的漩涡在气团的一侧卷起[11]。流场结构主要由大型涡流控制，很容易看出涡旋结构。对于一个最初是椭圆或是圆形的气团，由于反向水平密度梯度的存在，产生了大尺度、反旋转、束状涡流，因而明显地改变了气团由传统的高斯型浓度分布所描述的形状。

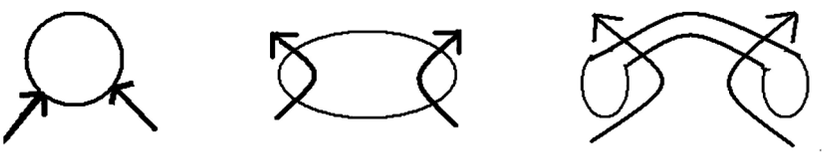


图 13 斜压产生涡流的机理

Fig. 13 Mechanism of eddy cloud

4 结 论

通过爆炸烟云扩散的时空分布实验和数值模拟计算得到以下结论。

(1) 根据国内外研究资料，分析了从爆炸到烟云扩散的物理过程，探讨了模拟计算的方法，初步验证了 CFD 技术仿真化学爆炸烟云扩散的可行性，对工程爆炸烟云上升问题提供了仿真思路。

(2) 利用 Autodyn 软件计算得到了爆炸热力学与化学阶段的参数，结合实验数据和经验，优化了烟云流场的初始条件；通过 Fluent 软件设计的物理模型，计算得到了爆炸烟团的时空分布和形态特征，与实验测量的数据和规律相一致，并通过计算最终判定烟云上升的高度约为 230 m。

(3) 验证了浮力涡环产生的机理是流体具有斜压性，即在有重力的条件下因浮力差造成的涡度使其流动，得到了气团横截面由于涡旋流而展现出的肾形模式，与实验观察和文献报道相一致。

(4) 计算得到了不同时刻烟团流场温度、密度、速度和压力的大小分布及其变化规律；烟云热抬升的时间约为 5～10 s，物质浓度分布由常见的高斯型分布改变为肾形状分布，速度由中心向两边涡旋分布，压力随气流不规则变化。

References:

[1] Zhang S Z. Explosion and Shock Dynamics [M]. Beijing: Arms Industry Publishment, 1993. (in Chinese)
张守中. 爆炸与冲击动力学 [M]. 北京：兵器工业出版社，1993.

[2] Sui S Y, Wang S S. Terminal Effects [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000. (in Chinese)
隋树元，王树山. 终点效应学 [M]. 北京：国防工业出版社，2000.

[3] Zhang W Y. Explosives Theory [M]. Xi′an: The Second Artillery Engineering College, 1999. (in Chinese)

张文尧. 炸药理论 [M]. 西安:第二炮兵工程学院,1999.

[4] Brown R C,Kolb C E,Conant J A,et al. Source characterization model (SCM) [R]. Washington:United States Department of Energy,2004.

[5] Wang S Q. Radiation monitoring technique and equipment used for α/β's "dirty bomb" attack [D]. Beijing:Antichemical Warfare Institute,2008. (in Chinese)
王善强. α/β 脏弹爆炸污染特性与监测技术研究 [D]. 北京:防化研究院,2008.

[6] Wang R J,Zhang K,Wang G. Technical Foundation and Fluent Examples [M]. Beijing:Tsinghua University Press,2007. (in Chinese)
王瑞金,张　凯,王　刚. Fluent 技术基础与应用实例 [M]. 北京:清华大学出版社,2007.

[7] Liu C X. Study on numerical simulation of heavy gas instantaneous discharging dispersion [D]. Shanghai:Huadong University of Technology,2003. (in Chinese)
刘春祥. 重气瞬时泄漏扩散的数值模拟研究 [D]. 上海:华东理工大学,2003.

[8] Fang B,Zhu X. Numerical simulation of underwater explosion bubble with different boundaries [J]. Journal of Naval University of Engineering,2008,20(2):85-91. (in Chinese)
方　斌,朱　锡. 不同边界条件下水下爆炸气泡的数值模拟 [J]. 海军工程大学学报,2008,20(2):85-91.

[9] Wang S Q,Mao Y Z. Analyzing the characteristics of the initial cloud caused by "dirty bombs" explode [J]. Antichemical Warfare Research,2007(4):21-24. (in Chinese)
王善强,毛用泽. "脏弹"爆炸初始烟云特征分析 [J]. 防化研究,2007(4):21-24.

[10] Zheng Y. Buoyant vortex rings reaserch of explosive cloud [D]. Bingjing:Tsinghua University,2008. (in Chinese)
郑　毅. 瞬时热源(爆炸烟云)浮力涡环研究 [D]. 北京:清华大学,2008.

[11] Zheng Y,Ying C T. Experimental and numerical study of combustion fireball buoyant vortex rings [J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology),2009,49(2):187-190. (in Chinese)
郑　毅,应纯同. 燃烧火球浮力涡环实验与数值模拟 [J]. 清华大学学报(自然科学版),2009,49(2):187-190.

Experiment and Simulation of Explosion Cloud Diffusion

DUAN Zhong-Shan[1,2],LUO Yong-Feng[2],YUAN Wei[2],SHANG Ai-Guo[3]

(1. *Logistical Engineering University*,*Chongqing* 401331,*China*;
2. *The Institute of The Secondary Artillery Equipment Academy*,*Beijing* 100085,*China*;
3. *The Second Artillery Engineering University*,*Xi'an* 710025,*China*)

Abstract: The temporal and spatial distribution of explosion cloud in diffused experiment is analyzed and studied. Cloud diffusion in the atmosphere is simulated by fluid dynamics software. Initial conditions of the cloud are optimized by calculation and experimental program. Cloud movement process rising in vortex flow and flow parameters such as density,velocity,temperature and pressure are obtained from the simulation. The formation mechanism of the explosive "mushrooms" cloud and the vortex movement in gravity caused by different buoyancy force are discussed and analyzed.

Key words: blast;cloud diffusion;initial conditions;simulation