

文章编号: 1003-1480 (2006) 01-0001-05

真空环境中烟幕云团形成阶段的膨胀模型

陈宁, 潘功配, 陈厚和, 关华

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京, 210094)

摘 要: 真空条件下, 常压下已有的烟幕云团的膨胀模型不再适用。本文分析了真空下烟幕形成机理, 基于外界对烟幕云团没有扰动的特点, 针对燃烧型和爆炸型烟幕在形成阶段的膨胀特性进行数学建模, 得到了烟幕云团膨胀过程中体积及质量浓度与烟幕粒子运动速度、运动时间的关系模型, 为进一步研究烟幕粒子在大气层外的运动规律提供了理论基础。

关键词: 烟幕; 膨胀; 模型; 真空

中图分类号: TQ567.5 文献标识码: A

Expansive Model of Smoke Cloud Forming Course in Vacuum

CHEN Ning, PAN Gong-pei, CHEN Hou-he, GUAN Hua

(School of Chemical Engineering, NJUST, Nanjing, 210094)

Abstract : The expansive model of smoke cloud in normal pressure is not applicable in vacuum. The smoke cloud forming mechanism in vacuum is analyzed. Based on the characteristic of noninterference in smoke of environment, the expansive models of the pyrotechnic and explosive smoke in forming course are established according to the expansive characteristic in vacuum, the relation models between the smoke volume, the smoke mass concentration and the smoke particles velocity and move time during the course of smoke cloud expanding are obtained, which provide the theory base for the study of dynamics law of smoke particles in outer space.

Key words : Smoke cloud; Expansive; Model; Vacuum

将大气层内广泛使用的烟幕应用于未来太空战场, 能够为我国航天器(如弹道导弹、拦截器、卫星、载人飞船等)提供廉价而有效的软防御无源干扰技术^[1-2]。在外层空间使用烟幕, 要考虑烟幕悬浮体系的稳定性, 稳定性好则烟幕质量浓度就高, 烟幕质量浓度愈高烟幕的遮蔽、隐身性能愈好。有关烟幕粒子在常压环境中的运动规律已进行过许多研究^[3-6], 针对太空高真空这一环境特殊性, 必须

研究烟幕粒子在真空环境中的运动规律。真空环境中, 烟幕粒子的运动特性包括烟幕形成阶段的运动特性及烟幕形成后烟幕粒子的扩散和沉降特性。烟幕形成阶段内烟幕的形成方式(即烟幕的类型)对烟幕粒子的运动特性有重要影响, 本文针对燃烧型及爆炸分散型烟幕在真空中形成阶段进行模型建立, 来研究真空中烟幕形成阶段烟幕粒子的运动特性, 为烟幕应用于太空战场奠定技术基础。

收稿日期: 2005-12-30

作者简介: 陈宁(1980-), 男, 在读博士研究生, 主要从事烟火无源干扰技术研究。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90305008)

1 真空条件下燃烧型烟幕云团的形成

1.1 真空条件下发烟剂的燃烧成烟机理

真空环境中，由于氧的含量极低，发烟剂在燃烧时不能从外界借助氧，为了使发烟剂能够顺利燃烧，必须将发烟剂的氧平衡设计为零氧或正氧平衡^[7]。真空条件下烟幕的形成机理与常压下不同，在常压条件下，燃烧型烟幕是发烟剂燃烧时产生大量的液体或固体颗粒分散于空气之中形成的悬浮体系；而在真空环境中气体密度、水蒸气含量极低，烟幕的形成不再是发烟剂燃烧产物分散于空气之中形成气溶胶悬浮体系，而是燃烧产物混在一起形成的烟幕粒子悬浮体系，不再是真正意义上的“气溶胶”。

1.2 真空条件下燃烧型烟幕云团形成阶段的膨胀模型

1.2.1 模型假设

发烟剂在稳定燃烧的过程中，产生大量的气体及固体颗粒形成烟云，在真空环境中，外界对烟云没有扰动，这样烟云的外缘可近似视为直线，外形近似为一个球锥体，其示意图如图1所示。

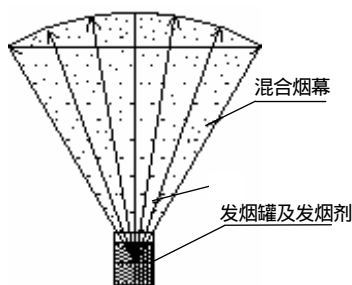


图1 真空条件下燃烧型烟幕形成阶段膨胀示意图

Fig.1 Expansive sketch of pyrotechnic smoke cloud forming course

根据烟幕粒子的初速度及受到的膨胀力作用，可以建立烟幕云团在形成阶段的膨胀模型。为便于建立模型，做出以下假设：（1）燃烧过程中烟幕云团的外形近似看作一个高度逐渐增大的球锥体；（2）发烟剂开始燃烧时，烟幕粒子的初始速度为零，即 $t=0$ 时， $u_{p0}=0$ ；（3）随着发烟剂的燃烧，假设燃烧产物喷射点位置保持不变；（4）烟幕粒

子所受重力忽略不计；（5）烟幕云团烟幕粒子视为孤立的球形颗粒。

1.2.2 模型建立

在烟云产生的初始阶段里，可将产物中固体颗粒即烟幕粒子视为释放入流速为 $u(t)$ 的气流中（燃烧产物中的气体流）的颗粒，由于气流的作用，烟幕粒子会逐渐地接近气流速度。不考虑重力的情况下，烟幕粒子的运动方程为^[8]：

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{u(t) - u_p}{\tau_V} \quad (1)$$

式（1）中： u_p ——烟幕粒子运动速度；

τ_V ——烟幕粒子运动的速度松弛时间，

$$\tau_V = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu}$$

其中 ρ_p 为烟幕粒子密度， d_p 为烟幕粒子直径， μ 为发烟剂燃烧气体产物的粘度系数。

令发烟剂燃烧气体产物的速度用 $u(t)=u_0+bt$ 描述，其中 u_0 是正的恒定速度， b 是某一常量，可以正也可以负，它由发烟剂本身特性决定。于是对于 $t=0$ ， $u_{p0}=0$ 的初始条件，式（1）的解为：

$$u_p = u_0 + bt - b\tau_V + u_0 \left(\frac{b\tau_V}{u_0} - 1 \right) \exp\left(-\frac{t}{\tau_V}\right) \quad (2)$$

为了求解烟幕粒子在气流中运动的位移，将式（1）应用于空间坐标系中可写成：

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{du_p}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = u_p \frac{du_p}{dx} = \frac{u(x) - u_p}{\tau_V} \quad (3)$$

对式（3）在 $x=0$ ， $u_{p0}=0$ 时求解，得到烟幕粒子从时间 0 到时间 t （其中 $t < t_0$ ， t_0 为发烟剂完全燃烧所用时间）移动的位移 x ：

$$x = \tau_V (u_0 + bt) \left[-\ln\left(1 - \frac{u_p}{u_0 + bt}\right) - \frac{u_p}{u_0} \right] \quad (4)$$

1.2.3 模型讨论

式（2）和（3）描述了真空环境中燃烧型烟幕

云团在形成阶段烟幕粒子的运动特性。对于式(2), 如果 b 值为零, 此时烟幕粒子的速度表示为:

$$u_p = u_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_v}\right) \right] \quad (5)$$

(5)式表明烟幕粒子逐渐地接近恒定的气体速度 u_0 。如果 b 值为正, 烟幕粒子速度接近气体速度, 并且渐进地达到某一恒定的滞后速度 $b\tau_v$; 如果 b 值为负, 烟幕粒子就可能超过气体的速度。

由于烟幕云团为烟幕粒子的均质等值体, 则孤立烟幕粒子在 x 轴向的运动规律具有普遍性, 将其应用到整个烟幕云团, 根据球锥体体积的计算公式, 即可求得真空中烟幕云团形成阶段烟幕云团的体积, 由假设(4)知发烟剂燃烧过程中烟幕云团的张角保持不变, 设该张角为 2θ , 则时间 t 后, 烟幕云团的体积 V 为:

$$V = \frac{1}{3} \pi (x \sin \theta)^2 \cdot l \cos \theta + \frac{1}{2} \cdot \frac{4}{3} \pi x^3 - \left[\frac{1}{3} \pi x^2 \cdot \frac{x \cos \theta}{1 - \sin \theta} - \frac{1}{3} \pi (x \sin \theta)^2 \cdot \left(\frac{x \cos \theta}{1 - \sin \theta} - x \cos \theta \right) \right] = \frac{1}{3} \pi x^3 (2 - \cos \theta - \cos \theta \cdot \sin^2 \theta) \quad (6)$$

(6)式中第1项为图1中圆锥的体积, 后面项为球冠的体积。将式(4)代入式(6)得:

$$V = \frac{\pi \tau_v^3 (u_0 + bt)^3}{3} \left[-\ln \left(1 - \frac{u_p}{u_0 + bt} \right) - \frac{u_p}{u_0} \right] \cdot (2 - \cos \theta - \cos \theta \cdot \sin^2 \theta) \quad (7)$$

(7)式描述了真空环境中发烟剂在燃烧形成烟幕阶段的烟幕云团的膨胀特性, (7)式中 τ_v 、 u_0 及 b 等参数可通过实验事先得出。

求出真空中烟幕云团形成阶段内烟幕云团的体积后, 即可根据烟幕云团的体积和发烟剂的初始质量及其成烟效率, 求出真空中发烟剂燃烧结束后形成的烟幕云团的质量浓度。

2 真空条件下爆炸型烟幕云团的形成

2.1 真空条件下爆炸成烟的机理

真空条件下, 烟幕弹内的点火药及扩爆药的氧平衡也必须设计为零氧或正氧平衡。烟幕弹被发射到指定空域后, 点火装置在弹丸内部将扩爆药点燃, 产生的燃气压力超过弹壳的极限强度时, 烟幕弹爆炸, 弹内固体或液体发烟物质受爆炸释放出的能量推动, 被分散到以炸点为中心的球面空间形成烟雾微粒, 烟雾微粒与爆炸产生的高压气体混在一起形成烟幕粒子悬浮云团, 并迅速向外膨胀。

2.2 真空条件下爆炸型烟幕云团形成阶段的膨胀模型

2.2.1 模型假设

真空环境中, 烟幕弹爆炸瞬间释放出能量, 烟幕粒子受爆轰产物作用以某一初始动能开始向四周运动, 可以根据爆炸产物的一维等熵不定型流动基本方程组的相关解来建立烟幕云团的膨胀模型。为便于建立模型, 作出以下假设: (1) 烟幕弹爆炸后, 弹壳碎片质量较大不参与成烟, 在重力作用下已发生沉降; (2) 烟幕云团的外形视为一个不断扩大的均质等值球体; (3) 相对于爆炸作用力, 烟幕粒子所受重力及空气阻力忽略不计; (4) 爆轰波对各个方向上的烟幕粒子的作用相互独立; (5) 烟幕云团的膨胀过程为等熵过程; (6) 以爆炸点为原点建立平面直角坐标系, 如图2所示。

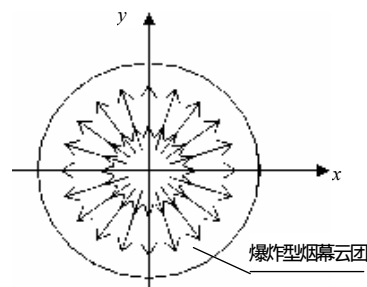


图2 爆炸型烟幕云团形成阶段膨胀示意图

Fig.2 Expansive sketch of explosive smoke cloud forming course

2.2.2 模型建立及讨论

当烟幕弹中炸药引爆后,紧跟爆轰波后有一传向 x 轴向的简单波跟随传播,它由一维等熵不定型流动基本方程组的第一组特殊解来描述,即^[9]:

$$\begin{cases} x = (v + c)t \\ v = c - \frac{D}{2} \end{cases} \quad (8)$$

(8) 式中 x 、 t 分别为空间与时间坐标; c 为音速; v 为爆轰产物速度; D 为爆轰速度。

以 x 轴向上直径为 d_p 的烟幕粒子为研究对象,爆轰波达到烟幕粒子表面,烟幕粒子开始向 x 轴向运动,忽略烟幕粒子所受的重力,周围空气阻力为零时,由牛顿第二定律知:

$$\rho_p \cdot \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d_p}{2} \right)^3 \frac{du_p}{dt} = \pi \left(\frac{d_p}{2} \right)^2 P'$$

整理即为:

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P'}{\rho_p d_p} \quad (9)$$

(9) 式中 u_p 为烟幕粒子的运动速度; P' 为烟幕粒子表面爆轰产物的压强; ρ_p 为烟幕粒子的密度。 P' 的值由 (10) 式给出^[10]:

$$P' = \frac{16}{27} \cdot \frac{\rho_0}{D} c^3 \quad (10)$$

(10) 式中 c' 为爆轰产物在烟幕粒子表面处的音速; ρ_0 为炸药的初始密度。

将式 (10) 代入式 (9) 可得:

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{8}{9} \cdot \frac{\rho_0}{\rho_p d_p} \cdot \frac{c^3}{D} \quad (11)$$

由于烟幕粒子表面上爆轰产物的速度 v 与烟幕粒子的运动速度 u_p 相等,即 $dx/dt = v$, 因此式 (8) 的第 1 式对 t 微分得:

$$-\frac{dv}{dt} = \frac{c}{t} + \frac{dc}{dt} \quad (12)$$

式 (12) 适用于烟幕粒子表面处的条件: $dv/dt = du_p/dt$, $c = c'$, 因此可得:

$$-\frac{du_p}{dt} = \frac{c'}{t} + \frac{dc'}{dt} \quad (13)$$

将式 (11) 与式 (13) 相比较可得:

$$\frac{dc'}{dt} + \frac{c'}{t} + \frac{8\rho_0 c'^3}{9\rho_p d_p D} = 0 \quad (14)$$

解此方程得:

$$c' = \sqrt{\frac{9\rho_p d_p D^2 t_0^2}{(9\rho_p d_p + 16\rho_0 D t_0)t^2 - 16\rho_0 D t_0^2 t}} \quad (15)$$

将 c' 值代入式 (11) 得:

$$\frac{du}{dt} = \frac{8\rho_0}{9\rho_p d_p D} \cdot \left(\frac{9\rho_p d_p D^2 t_0^2}{(9\rho_p d_p + 16\rho_0 D t_0)t^2 - 16\rho_0 D t_0^2 t} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (16)$$

对 (16) 式从进行积分得:

$$u = \frac{3\rho_p^{\frac{5}{2}} d_p^{\frac{5}{2}} D^2}{8\rho_0 t_0} \cdot \left[\frac{8\rho_0 D t_0^2 - (9\rho_p d_p + 16\rho_0 D t_0)t}{\sqrt{(9\rho_p d_p + 16\rho_0 D t_0)t^2 - 16\rho_0 D t_0^2 t}} + \frac{8\rho_0 D t_0^2 + 9\rho_p d_p t_0}{\sqrt{(9\rho_p d_p + 16\rho_0 D t_0)t^2 - 16\rho_0 D t_0^2 t}} \right] \quad (17)$$

(17) 式即为烟幕弹爆炸时烟幕粒子沿 x 轴向的运动规律, (17) 式中,除 u 值和 t 值外,其余参数均为常数或可事先通过实验得出。可以通过 (17) 式求解烟幕粒子在任一时刻的速度大小。

则时间 t 内,烟幕粒子在 x 轴向的运动位移为:

$$x = \int_0^t u dt \quad (18)$$

式 (17) 和 (18) 描述了真空环境中爆炸型烟幕云团在形成阶段烟幕粒子的运动特性。

由于整个烟幕云团为均质等值且爆轰波对各个方向的作用相互独立,因此在任一方向上烟幕粒子的运动情况均遵循该规律。由于烟幕云团近似为球形,烟幕粒子在时间 t 内运动的距离即为烟幕云团的半径,则真空中烟幕云团形成阶段内烟幕云团的体积即可根据球的体积计算公式得到;烟幕云团的质量浓度

即可根据烟幕云团体积及烟幕弹中装填的发烟材料的质量求出。

3 结语

通过分析真空下烟幕形成机理,基于真空条件下外界环境对烟幕云团没有扰动影响,建立了真空条件下燃烧型和爆炸型烟幕形成阶段的膨胀模型,得到了烟幕云团在膨胀过程中体积及质量浓度与烟幕粒子运动速度、运动时间的关系。在真空环境中,当发烟剂燃烧结束及烟幕弹爆炸烟幕云团形成后,随着烟幕云团的持续膨胀,烟幕粒子在运动过程中受到的气动力作用以及爆轰波作用逐渐消失,烟幕粒子开始进入自由膨胀阶段。对于粒度较小的烟幕粒子,仍可以忽略重力的作用,烟幕云团在真空中自由膨胀,遵循理想气体状态方程,烟幕粒子自由运动,且在运动过程中会发生碰撞;而对于粒度较大的烟幕粒子,其重力作用不能再忽略,研究烟幕云团在膨胀过程中烟幕粒子的运动性质,必须考虑其重力沉降作用。烟幕粒子在这一阶段内的运动特征与烟幕形成阶段内截然不同。本文仅讨论了烟幕的形成阶段内烟幕粒子的运动性质,烟幕自由膨胀阶段内的运动性质将在后续工作中进一步研究。

参考文献:

- [1] 周遵宁, 赵鲁生, 任跃, 等. 外层空间红外成像制导对抗技术分析[J]. 红外技术, 2002, 24, (6): 14~16.
- [2] 孟庆刚, 曹虎, 周遵宁等. 信息化作战环境下太空飞行器的无源光电对抗技术分析[J]. 含能材料(增刊), 2004:659~662.
- [3] 乔小晶, 陆政, 韩晓利. 烟雾颗粒沉降速度研究[J]. 火工品, 1997, (1): 30~33.
- [4] Stephen M. Batill. High speed smoke flow visualization [R]. ADA100333, 1980.
- [5] Ralph Zirkind. An obscuring aerosol dispersion model (smoke & Dust)[R], ADA080459, 1979.
- [6] B. F. Apostol. On a non-linear diffusion equation describing clouds and wreaths of smoke[J]. Physics Letters, 1997, (235): 363~366.
- [7] 潘功配, 杨硕. 烟火学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1997.
- [8] G·鲁格丁著, 张君远译. 气体-颗粒流基础[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986.
- [9] 亨利奇著, 熊建国译. 爆炸动力学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [10] 孙锦山, 朱建士. 理论爆轰物理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995.

第 33 届国际烟火会议

第 33 届国际烟火会议将于 2006 年 7 月 16-21 日在美国科罗拉多州福特科林斯的玛丽奥特酒店举行。烟火学包括各种含能材料。本次会议关注烟火学的各个方面以及爆炸物与推进剂, 重点研究后两个方向。

会议的主题包括: (1) 烟火学的各个方面; (2) 临时爆炸装置; (3) 生产工艺, 双螺旋挤压机, 凝聚, 共沉淀等; (4) 燃烧剂/氧化剂配方; (5) 含能材料中的纳米颗粒; (6) 钝感烟火装置; (7) 爆炸物及其它含能混合物的合成与混合; (8) 不均匀的燃烧; (9) 热分解; (10) 点火器与点火, 爆燃与爆轰; (11) 敏感性与安全; (12) 试验方法及装置; (13) 环境保护方面; (14) 适用于含能材料的标准及规范, 如 STANAGs 等; (15) 应用于含能材料的计算方法; (16) 关于含能材料的特殊运用。

需要更进一步的消息, 请访问<http://www.ipsusa.org/ips33.htm>