

文章编号: 1006-9941(2005)06-0412-04

对烟幕微粒的终端沉降速度研究

朱晨光, 潘功配

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 传统烟幕理论认为, 在烟幕形成后, 烟幕微粒受到重力的作用开始沉降, 同时受到空气阻力和浮力的作用, 最后使烟幕微粒达到终端沉降速度, 这个速度方程可以通过 Stokes 圆球阻力理论求得, 并被用来分析烟幕的性能。本文通过外场实验研究和理论分析认为, 终端沉降速度公式并不适合分析烟幕性能。

关键词: 军事化学; 烟幕; 动力学; 沉降速度; Stokes 理论; 微粒

中图分类号: TJ55; TQ567

文献标识码: A

1 引言

在外场环境条件下研究烟幕云团的运动规律是有一定困难的, 首先它具有湍流运动性质的不可预见性, 其次是烟幕云团的运动受到环境影响大。然而, 烟幕是一种黏性流体, 利用流体力学的研究成果与建立的数学模型来研究烟幕是可行的, 例如烟幕的扩散规律和烟幕微粒的运动规律等。

所有流体都有黏性, 黏性引起摩擦, 流体的黏性是流体质点运动发生相对滑移时产生切向阻力的性质, 利用摩擦阻力, Stokes 建立了球形粒子在空气中沉降的理论。

传统烟幕理论认为^[1,2], 烟幕微粒的沉降过程也满足 Stokes 终端沉降速度公式, 本文通过大量的外场实验研究和理论分析认为, 用 Stokes 终端沉降速度描述烟幕微粒的沉降规律没有实际应用价值。

2 烟幕微粒的 Stokes 终端沉降公式

Navier-Stokes 方程是黏性牛顿流体完整的运动方程组^[4], 是一个二阶非线性偏微分方程, 二阶非线性偏微分方程的求解在数学上是困难的。一般而言, 通过积分得到的是微分方程的通解, 只有在此基础上, 结合基本微分方程组的定解条件, 即初始条件和边界条件, 确定积分常数, 才能得到具体流动问题的特解。

Stokes 认为, 在雷诺数很小, 即惯性力远小于黏性力时, 可以忽略惯性项; 又因为粒子的质量很小, 故作用在微团上流体的质量力也可以忽略。而使 Navier-Stokes 方程得到简化, 并得解析解, 而且结果与实验在

一定雷诺数下吻合得很好, 从而使 Navier-Stokes 方程得以求解, 解决了绕小圆球的蠕流这类流动问题。若将这些微粒视为形状规则的小圆球, 并将坐标系固定在小圆球上, 将粒子在静止黏性流体中的运动转换成来流速度为 U_∞ 的黏性流体绕静止小圆球的缓慢运动, 且流动成为定常的, 这样解得该圆球在来流方向所受到的阻力为^[4]:

$$F_D = 3\pi\mu d U_\infty \quad (1)$$

式中, d 为小圆球直径, μ 为介质粘滞系数。该式就是著名的 Stokes 圆球阻力公式。

烟幕微粒在空气中的沉降速度与空气对它的阻力有关, 首先假定这些烟幕微粒是直径为 d 的圆球, 在降落过程中, 由于重力的作用, 下降速度不断增大, 使圆球受到的空气阻力也不断增大, 当圆球的重量 W 与作用在圆球上的空气的浮力 F_B 、空气的阻力 F_D 之和相等时, 圆球将在空气中以等速 U_f 自由沉降, U_f 就称为圆球的终端沉降速度。对直径为 d 的圆球, 其重力 $W = \frac{4}{3}\pi\left(\frac{d}{2}\right)^3\rho_p g = \frac{1}{6}\pi d^3\rho_p g$, 空气的浮力 $F_B = \frac{1}{6}\pi d^3\rho_g g$, 空气的阻力 $F_D = C_D \frac{1}{4}\pi d^2 \cdot \frac{1}{2}\rho U_f^2$, 当重力的作用和浮力、空气阻力的作用相平衡时, 有

$$\frac{1}{6}\pi d^3\rho_p g = \frac{1}{6}\pi d^3\rho_g g + C_D \frac{1}{4}\pi d^2 \cdot \frac{1}{2}\rho U_f^2 \quad (2)$$

式中, ρ_p 为粒子的密度; ρ_g 为空气的密度; C_D 为阻力系数。由式(2)得粒子终端沉降速度:

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

又阻力系数 C_D 随雷诺数 Re 的变化而变化^[3,4], 即:

$$C_D = f(Re) \quad (4)$$

因此传统烟幕微粒沉降公式可表达为:

收稿日期: 2005-03-30; 修回日期: 2005-05-26

作者简介: 朱晨光(1967-), 男, 副研究员, 从事光电应用技术研究。
e-mail: zhuchenguang_67@sina.com 或 zhuchenguang_67@yahoo.com

$$U_f = \frac{1}{18} \frac{g}{\nu} \frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_g} d^2 \quad (5)$$

或

$$U_f = \frac{2}{9} \frac{g}{\nu} \frac{\rho_p - \rho_g}{\rho_g} r_p^2$$

式中, r_p 为粒子半径。

式(5)的适用条件为雷诺数 $Re \leq 1$ 。

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, 则烟幕微粒的绝对速度 $U_a = U - U_f$, 烟幕微粒悬浮在气体中静止不动。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。

3 实验与讨论

3.1 烟幕扩散速度与烟幕微粒的沉降速度

宏观上, 烟幕云团在空气中运动主要有两种形式, 一是随风(或气流)飘动, 二是自然扩散, 自然扩散的结果是烟幕云团不断地膨胀。通过烟幕面积测试仪可以测试烟幕面积随时间膨胀的变化规律, 如图 1 所示。

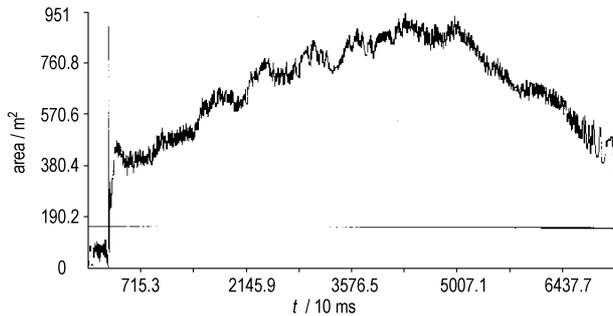


图 1 烟幕面积测试曲线

Fig. 1 Testing curves of smoke area

根据图 1, 烟幕的有效遮蔽时间不到 70 s。取烟幕弹在空中爆炸成烟的两组实验数据:

$$t_1 = 9.97 \text{ s}, \overline{S_1} = 423 \text{ m}^2;$$

$$t_2 = 20.11 \text{ s}, \overline{S_2} = 524.6 \text{ m}^2;$$

由上述两组实验数据得烟幕云团的膨胀半径 $\Delta R = 1.5 \text{ m}, \Delta t = 10.14 \text{ s}$ 。

又由烟幕的平均膨胀速度 $\frac{\Delta R}{\Delta t} = \overline{U_c}$, 得实验的平均膨胀速度 $\overline{U_c} \geq 0.15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

理想烟幕的微粒直径在可见光波段内为 $2 \times 10^{-7} \sim 8 \times 10^{-7} \text{ m}$; 在红外波段为 $1 \times 10^{-6} \sim 10 \times 10^{-6} \text{ m}$ ^[2]。按照 Stokes 理论, 烟幕微粒的平均密度为 $\rho_p = 2000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 在 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 下^[4], 空气的黏度值为 $\nu = 15.7 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 空气密度为 $\rho_g = 1.20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 由式(5), 直径在 $1 \times 10^{-7} \sim 8 \times 10^{-7} \text{ m}$ 范围内的粒子终端沉降速度为 $2.3 \times 10^{-6} \sim$

$3.7 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 直径在 $1 \times 10^{-6} \sim 10 \times 10^{-6} \text{ m}$ 范围内的粒子终端沉降速度为 $5.6 \times 10^{-5} \sim 5.8 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。即按照理想直径的烟幕微粒的最大沉降速度计算, 每沉降 1 m 需要超过 180 s, 而根据图 1, 在 180 s 时刻具有有效遮蔽能力的烟幕云团已不存在。

下面以密度较大的实心铜粉为例来分析烟幕扩散和沉降的差别, 粒子的密度为 $\rho_p = 8900 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, 对于直径为 $10 \text{ } \mu\text{m}$ 的实心铜粉, 终端沉降速度不会超过 $0.026 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 且由^[4]:

$$Re = \frac{Ud}{\nu} \quad (6)$$

$$\text{故雷诺数 } Re = \frac{0.026 \times 10 \times 10^{-6}}{15.7 \times 10^{-6}} = 0.02。$$

因为 $Re < 1$, 铜粉沉降满足 Stokes 阻力公式的条件。当铜粉抛撒高度为 3 m 时, 降落到地面至少需要 100 s。

图 2 是这种铜粉的粒度分布范围测试结果。

图 3 是以 $10 \text{ } \mu\text{m}$ 直径为基础的铜粉抛洒实验结果。该实验从烟幕的形成到消散不足 10 s(烟幕中心距离地面高度为 2 m)。由图 3 可知在烟幕所遮蔽的背景露出时, 大部分烟幕微粒还在空气中, 并没有沉降, 即从烟幕的形成到背景露出, 时间不超过 10 s。

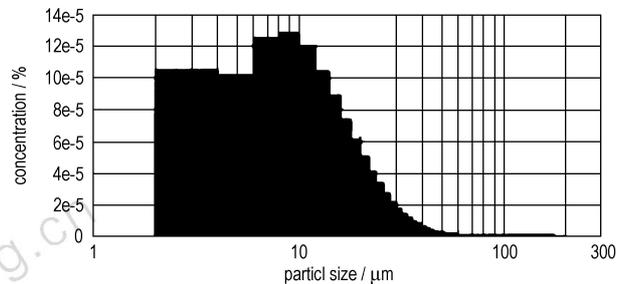


图 2 铜粉粒度测试结果

Fig. 2 Testing results of copper powder particles



图 3 $10 \text{ } \mu\text{m}$ 直径的铜粉扩散实验

Fig. 3 Spreading test of copper powder with diameter of $10 \text{ } \mu\text{m}$

在外场条件下, 以粉剂型烟幕云团为例, 具有遮蔽能力的烟幕云团通常不超过 10 s, 虽然烟幕微粒还仍

然在空中,但是已经不具备遮蔽能力了。

3.2 烟幕云团的湍流运动

在外场条件下,烟幕云团的运动是典型的湍流运动。图4是烟幕云团运动变化系列图。图4系列图片分别是烟幕形成后于5 s、6 s、7 s和8 s四个时刻采集的烟幕录像。从图中可以看出,烟幕云团是由无数大小不同的湍涡组成,且在不断扩散。它们通过分裂、合并、拉长、旋转,相互叠加在一起,构成湍流的涡旋结构;随着云团的进一步扩大,湍涡旋转速度逐渐减慢,能量逐渐耗散。

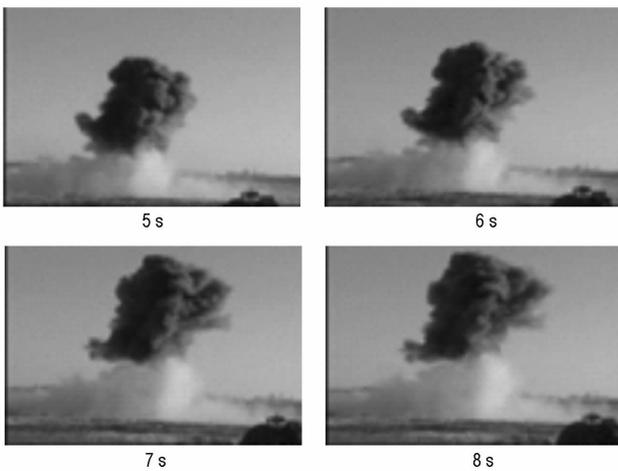


图4 烟幕实验系列图片

Fig. 4 A series of photos from smoke experiment

由图1,当烟幕云团面积值发生剧烈跳动时,云团扩散过程属于典型的湍流运动^[5]。造成烟幕云团湍流运动的原因:一是在烟幕形成初期,烟幕弹爆炸或喷射给予了烟幕云团较高的运动动能;二是大气湍流的运动以及风速影响,由于烟幕形成的地点是接近地面或贴近地面,地面边界起着阻滞空气运动的不光滑底壁作用,造成风速切变,产生大气湍流,对于地球大气,当水平风速取 $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,离地面1 m处的雷诺数尚且超过6000^[5],边界层内的大气运动具有完全湍流运动的性质,烟幕在这种环境下形成更加提高了烟幕云团周围的湍流运动程度;三是由于烟幕形成时燃烧反应放出的热量使烟幕云团具有较高的温度,造成与环境的热力对流。湍流运动的能量来源于烟幕弹爆炸时高压膨胀,或者是由于燃烧压力的喷射作用,造成了烟幕微粒团机械运动做功和浮力做功。

根据Stokes终端沉降速度,当上升的气流速度超过烟幕微粒的终端沉降速度时,烟幕微粒随气流上升,所以在这种烟幕云团湍流运动的作用下,烟幕微粒是

随具有较高流速的烟幕云团一起运动的。

3.3 在外场条件下烟幕微粒运动趋势

Stokes理论描述的是一个孤立的颗粒以某一终端沉降速度在流体中沉降时,其终端沉降速度和适用的条件。从以上实验结果可以清晰地看到,烟幕微粒在脱离了烟幕云团后,在相对静止的空气中悬浮或沉降,当空气流上升的速度达到粒子的终端沉降速度时,这个粒子在空中悬浮,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。显然,对于烟幕云团主体来说,由于形成时的高密度和较高的流速,以及大气湍流的作用,造成烟幕云团以较高的流量在空气中流动,云团中存在大量的尺寸不一的涡团,在这种流量下,能够保证大量的固体或液体粒子在空气中悬浮,因为流速和烟幕云团的湍流尺度足够大,使粒子克服重力保持悬浮状态,能量由湍流提供,以图3为例,根据图片可以估算烟幕涡团翻卷边缘速度是在 $0.1 \sim 0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,而直径在 $1 \times 10^{-6} \sim 10 \times 10^{-6} \text{ m}$ 范围内的粒子终端沉降速度为 $5.6 \times 10^{-5} \sim 5.8 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,因此重力的影响几乎可以忽略。在烟幕云团内,烟幕微粒无规则地运动。当任何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,粒子可能进入空气中形成孤粒子沉降,而烟幕云团只有达到一定的浓度才能够有效遮蔽,这部分粒子已经不能够起到烟幕的功能,所以讨论它是没有意义的。

3.4 在外场条件下烟幕微粒的受力分析

实际上,烟幕云团的流动分为两部分,一部分是烟幕云团这个混合物的绝对运动,另一部分为烟幕云团内部质点相对于自身在云团中的位置的相对运动。其中,烟幕云团的绝对运动是主要的。即Stokes描述的烟幕微粒的沉降趋势在烟幕云团的运动中是存在的,但烟幕云团在大气中运动存在很高的湍流度,这不仅包括烟幕云团内部的涡团切变,还包括烟幕云团与大气的切变,在这种切变过程中,类如虚拟质量力、压力梯度力、旋转升力、Saffman力等,不可以忽略不计,直径在 $0.4 \sim 10 \mu\text{m}$ 范围内的粒子,这些力甚至比重力还高几个数量级^[3]。这种现象在室内或较大烟箱内也存在,其原因:一是烟幕形成过程中由于受到喷洒或燃烧压力的影响,会在烟箱内形成不规则流动;二是由于烟幕微粒是以较高的浓度存在,相互之间有着明显的影响,由于烟幕微粒的尺寸不同,各自的运动轨迹不同,以及烟幕云团内部湍流运动,将发生碰撞,而且烟幕微粒运动产生的尾迹的体积比烟幕微粒本身的体积大2~3个数量级^[3],即使颗粒本身所占的容积很小,相互之间不发生

碰撞,但是颗粒尾迹的相互干扰作用也可能相当大。

4 结 论

本文对利用 Stokes 终端沉降速度公式描述烟幕微粒沉降过程的应用价值提出了质疑,研究认为:

(1) 烟幕微粒达到一定的浓度时,才具有烟幕的性质,在这个前提下,需要对烟幕微粒的沉降速度和扩散速度进行比较,由上面的比较知道,烟幕的有效遮蔽时间是由烟幕云团的湍流扩散决定的。

(2) 因烟幕微粒的尺寸不同,各自的运动轨迹不同,可能发生碰撞,且烟幕微粒运动产生的尾迹的体积比烟幕微粒本身的体积大 n 个数量级,即使微粒本身所占的容积很小,相互之间不发生碰撞,但是微粒尾迹的相互干扰作用也可能相当大。

(3) 在烟幕云团的湍流切变过程中,烟幕微粒可能受到很多力的作用,这些力甚至比重力还高几个数量级,认为烟幕微粒沉降只是在烟幕云团内的小滑移。

通过实验分析,得出用 Stokes 终端沉降速度分析烟幕性能是没有意义的,尤其是在外场环境条件下,研

究烟幕云团的扩散运动比研究烟幕微粒的沉降速度更具有实际意义。

参考文献:

- [1] 姚禄玖,高钧麟,肖凯涛,等. 烟幕理论与测试技术[M]. 北京:国防工业出版社,1997.
YAO Lu-jiu, GAO Jun-lin, XIAO Kai-tao, et al. Theory and Testing of Smoke Technology[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1997.
- [2] 潘功配,杨硕. 烟火学[M]. 北京:北京理工大学出版社,1997.
PAN Gong-pei, YANG Shuo. Pyrotechnics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1997.
- [3] 岑可法,樊树人. 工程气固多相流动的理论及计算[M]. 杭州:浙江大学出版社,1990.
QIN Ke-fa, FAN Shu-ren. Theory and Account for Engineering Gas-solid Multi-fluid[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1990.
- [4] 归柯庭,汪军,王秋颖. 工程流体力学[M]. 北京:科学出版社,2003.
GUI Ke-ting, WANG Jun, WANG Qiu-ying. Engineering Fluid Mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [5] 盛裴轩,毛节泰,李建国,等. 大气物理学[M]. 北京:北京大学出版社,2003.
SHENG Pei-xuan, MAO Jie-tai, LI Jian-guo, et al. Atmosphere Physics[M]. Beijing: Peking University Press, 2003.

Final Sedimentation Velocity of Smoke Particle

ZHU Chen-guang, PAN Gong-pei

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

Abstract: The traditional smoke theory considers that the smoke particles will sedimentate due to gravity after forming of smoke screen, and then the particles reach a final sedimentation velocity thanks to the effect of air-resistance and buoyancy, and the equation can be solved by the Stokes pellet resistance theory and often used to analyze the performance of smoke. In this paper, through outfield experimental research and theory analysis, the Stokes final sedimentation velocity formula is not demonstrated to adapt to analyzing performance of smoke.

Key words: military chemistry; smoke screen; dynamics; sedimentation velocity; Stokes theory; particle



《聚氨酯工业》期刊 2006 年征订启事

《聚氨酯工业》创刊于 1986 年,系中国聚氨酯工业协会和江苏省化工研究所有限公司主办的专业性科技刊物,国内外公开发行。刊号:ISSN1005-1902、CN32-1275/TQ。现已发展成为《中国科技论文统计源(中国科技核心期刊)》收录期刊、《中国化学化工文摘》、《中国学术期刊综合评价数据库》刊源期刊、《中国科技期刊数据库》、《万方数据-数字化期刊群》全文收录期刊。本刊获第五届全国石油和化工行业优秀期刊一等奖,同时还被评为第三届华东地区优秀期刊,并入围“江苏期刊”方阵,获“双十佳期刊”称号。主要报道各种聚氨酯及相关材料的研究成果、发展动态等,主要栏目有综述与论坛、研究报告、生产与应用、技术交流、分析与测试、信息等。本刊适合于涉及高分子材料特别是聚氨酯材料研究及应用的科技及管理人员阅读参考。欢迎各科研院所、企事业、高等院校及个人订阅。

本刊为双月刊,国内定价:12 元/期,全年 72 元。邮发代号:28-344,各地邮局均可订阅,读者也可直接汇款至本刊发行部订阅。

发行部电话:025-85664615,025-85664614(传真);联系人:王文学,E-mail:wangwx@jschemres.com。

编辑部电话:025-85664647,025-85664648(兼传真);投稿邮箱 E-mail:puinj@yahoo.com.cn。

编辑部地址:南京经济技术开发区恒竞路 1 号 邮编:210046

另编辑部有过刊的合订本和资料供应。欢迎订阅、赐稿及刊登广告!