

一种低湍流扬尘方法的实验研究

王双峰 浦以康 贾复 万士昕

(中国科学院力学研究所国家微重力实验室, 北京 100080)

摘要 对一种新型扬尘方法在垂直管道中形成的扬尘湍流特性进行了测量, 在此基础上, 观察和测量了玉米粉尘火焰向上传播的过程, 讨论了湍流对火焰特性的影响。新方法产生的扬尘湍流强度相当低, 随时间衰减缓慢, 扬尘湍流的积分尺度随着时间增大, 约为 2 cm 到 3 cm。实验中观察到两种粉尘火焰: 湍流火焰和层流火焰, 火焰形态转变对应的点火延迟时间约等于 1.1 s, 即粉尘云湍流运动强度为 10 cm/s, 湍流火焰传播速度明显大于层流火焰。

关键词 扬尘方法; 扬尘湍流; 粉尘火焰; 火焰传播; 玉米粉

中图分类号: TK16 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2006)02-0347-04

EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON A LOW TURBULENCE DUST DISPERSION METHOD

WANG Shuang-Feng PU Yi-Kang JIA Fu WAN Shi-Xin

(National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract An improved dust dispersion mechanism was designed, and the features of dispersion-induced turbulence were measured in a vertical duct. Based on this quantitative assessment, the upward flame propagation through cornstarch dust clouds was investigated with particular attention to the effect of turbulence on flame characteristics. The results show that the turbulence level induced by the dispersion process is much lower than those obtained with previous dispersion system. The decay of turbulence is slow. The integral scale of turbulence increases with time, and has a value of about 2 cm to 3 cm. With the increase of ignition delay time, two different kinds of dust flame were observed: turbulent and laminar flames. The transition occurs when the ignition delay time is about 1.1 s, corresponding to a turbulence level of 10 cm/s. The propagation velocity of turbulent flames is much higher than that of laminar flames.

Key words dust dispersion process; dispersion-induced turbulence; dust flame; flame propagation; cornstarch

1 前言

粉尘层流燃烧特性和火焰传播机理, 是深入理解和定量分析粉尘燃烧、爆炸现象的基础。与均匀气相的燃烧相比, 目前人们对气固两相混合物中火焰传播机理的认识还很不充分。这主要是由于固体颗粒的重力沉降和在气体中的复杂运动, 很难在实验中规范地形成“标准”的粉尘-空气悬浮系统^[1,2], 即粉尘云, 同时也由于粉尘的种类、颗粒大小和粒度分布等因素都直接影响燃烧的机理。

在粉尘燃烧实验中, 需要通过一定的扬尘方法将固体粉尘颗粒分散到连续相的气体中形成粉尘

云。各种扬尘方式, 包括不同的气流扬尘^[1,3,4]和散落式扬尘^[5], 都会在粉尘云中诱导产生湍流运动(称为扬尘湍流), 适当强度的扬尘湍流是克服粉尘颗粒的重力沉降、维持其悬浮状态必不可少的条件。因此, 在地面常重力条件下, 扬尘湍流与粉尘浓度耦合在一起, 无法形成层流的或者静止状态的粉尘云, 在点火时刻, 粉尘云中总存在着湍流运动, 强度和结构与扬尘方式密切相关。

这说明, 开展粉尘燃烧实验的理想条件也许只能在微重力环境中实现^[1,2,6], 另一方面, 在常重力条件下进行粉尘层流火焰特性研究, 需要设计合理

收稿日期: 2005-11-28; 修订日期: 2006-01-06

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向资助项目 (No.KJJCX2-SW-L05)

作者简介: 王双峰 (1972-), 男, 河南郑州人, 博士, 从事微重力燃烧研究。

的扬尘方案,以获得湍流运动强度尽可能低的粉尘云,同时也需要定量地掌握扬尘湍流的强度和随时间的衰减特性,建立火焰特性与扬尘湍流参数之间的定量关系。

本文作者设计了一种以多微孔金属板为核心的新型气流扬尘方案,对开口燃烧管道内扬尘湍流的强度和尺度以及它们随时间的变化特性进行了测定,对玉米粉尘火焰向上传播的过程进行观察和测量,分析了湍流对于火焰特性的影响。

2 实验方法

2.1 实验装置

图1为实验装置组成的示意图。燃烧管道高780 mm,内截面尺寸160 mm×160 mm。为便于光学观察,管道材料选用玻璃。扬尘机构的组成包括与燃烧管道截面尺寸相同的气体缓冲室和多微孔金属板,气体缓冲室经过电磁阀与储气罐相连接,储气罐内存干燥的压缩空气。在扬尘过程中,压缩空气进入缓冲室,经多孔金属板形成大量的微细射流,将预先铺设在上面的粉尘颗粒分散至燃烧管道内形成悬浮状态。扬尘机构和燃烧管道底端之间的结合与分离通过特别设计的电磁装置控制,在接到电控指令时,电磁装置释放使扬尘机构脱离燃烧管道,形成等压燃烧所需要的底端开放实验条件。点火装置的原理类似气体打火机,微弱的电火花点燃少量的天然气,由气体火焰点燃粉尘云,点火源距离燃烧管道底端($y=0$)约100 mm。通过高速摄像机记录粉尘云图像和火焰传播过程。实验过程由编程控制器精确控制。

2.2 实验过程

每次实验前,将粉尘均匀铺设在多孔金属板上,然后由控制程序启动电磁阀,向顶端开放的燃烧管道中扬尘,当粉尘云充满管道时,控制程序关闭电磁阀(扬尘结束),同时关闭管道顶端附近的水平挡板、触发扬尘机构脱离管道底端、启动高速摄像机。经过0.5~3.5 s的延迟时间,启动点火装置点燃粉尘云,火焰从管道开口端(底端)向封闭端(顶端)传播。

粉尘选用商业纯净玉米粉,质量平均粒径为14 μm 。

2.3 扬尘湍流和粉尘浓度测量

扬尘湍流具有很强的非定常特性,确定其强度和尺度只能采用系综平均法^[7,8]。在本研究中,利用粒子图像测速仪(PIV)测定垂向平面内的二维瞬时速度场随时间的变化,共进行90次重复实验和测量,然后由系综平均法计算得到扬尘湍流强度和积分尺度的变化规律。PIV测量中,示踪粒子就是粉尘云中的玉米粉颗粒,粉尘云图像的采集速率为100帧/s,实际观测区域宽40 mm,高30 mm,中心距离燃烧管道底端约200 mm,激光片光源厚约1 mm,由功率为300 mW的激光器和光学镜片组提供。

为了测量粉尘浓度,在 $y=20$ mm和 $y=450$ mm(即火焰传播观测区域的上边界)的高度位置分别安装了水平挡板,它们可以在扬尘结束后的指定时刻同时插入燃烧管道。收集沉积在挡板上的粉尘并进行精确称重,即可计算出管道内的粉尘平均浓度。对于一定的延迟时间,进行5次重复测量,算

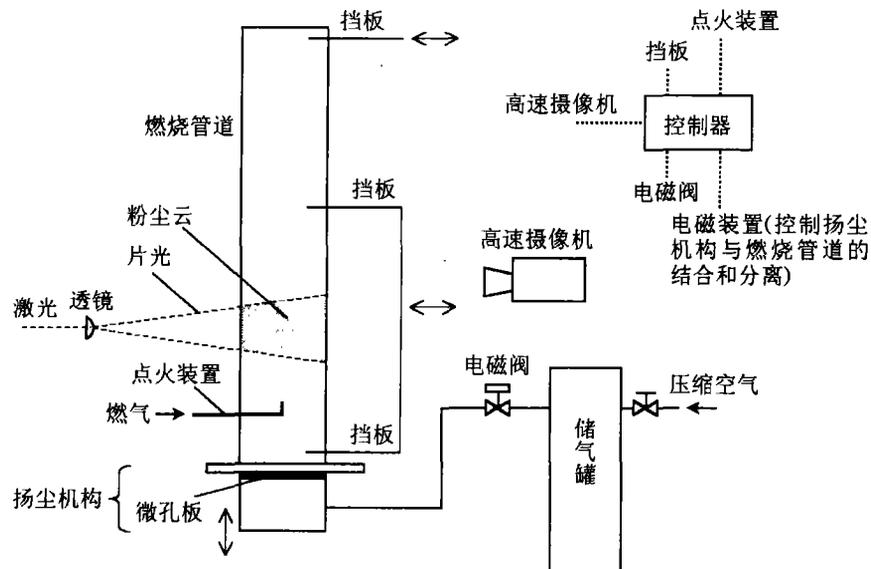


图1 实验装置示意图

术平均后给出粉尘浓度的平均值。

3 实验结果与讨论

3.1 扬尘湍流的强度

采用系综平均法, 对 90 次扬尘实验中测量的二维瞬时速度场数据进行统计平均, 可得到水平速度和垂向速度均方根 (RMS) 值 u' 和 v' 随时间的变化关系。在图 2 中, 给出了观测区域内三个代表性位置点 (中心点、左下方点和右上方点) 上的统计结果。根据 PIV 测量数据, 可以确定多个空间位置点上的湍流强度, 它们的数值大小和随时间衰减的趋势都与图 2 中所示非常接近。 u' 和 v' (以 cm/s 为单位) 与时间的关系可用拟合公式表示为

$$u' = 14.17(1+t)^{-0.794} \quad (1)$$

$$v' = 18.87(1+t)^{-0.715} \quad (2)$$

从测量结果可以看出, 扬尘湍流的速度均方根值小于 20 cm/s, 与常用的射流式扬尘方法 [8,9] 产生的湍流 (湍流脉动速度均方根值达到数米每秒) 相比, 湍流强度小很多。此外, 扬尘湍流强度随时间的衰减比较缓慢, 意味着粉尘悬浮状态可维持较长时间。这些特点对于开展粉尘层流燃烧研究是非常重要的。

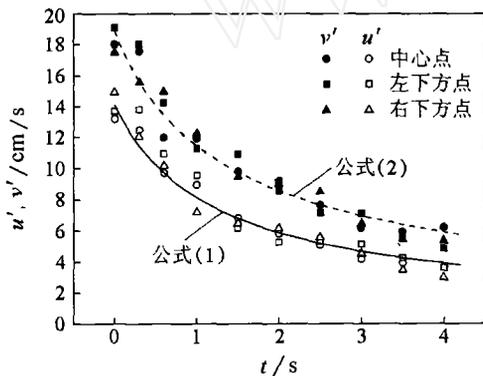


图 2 扬尘湍流瞬时速度 RMS 随时间的变化

3.2 扬尘湍流的积分尺度

利用 PIV 测量的速度场数据, 可方便地计算出扬尘湍流水平速度和垂向速度的相关系数 $R_u(r, t)$ 和 $R_v(r, t)$, r 是两点之间的距离。对相关系数进行积分, 即得到湍流积分尺度

$$L(t) = \int_0^{\infty} R(r, t) dr \quad (3)$$

它是最大涡尺度的代表, 结果如图 3 所示。用 R_u 和 R_v 分别得到的湍流积分尺度数值相近, 前者略大于

后者, $t=0$ 时, $L \approx 2$ cm, 随着时间的增加积分尺度增大, 至 $t=3$ s, $L \approx 3$ cm。

Tamanini 和 Chaffee^[10] 将湍流积分尺度作为湍动能 κ 及其耗散率 ϵ 的函数, 使用下面的公式计算

$$L = c_{\mu}^{3/4} \frac{\kappa^{3/2}}{\epsilon} \quad (4)$$

式中常数 c_{μ} 如同 $\kappa-\epsilon$ 湍流模型中一样取 0.09, $\epsilon (= -d\kappa/dt)$ 根据其定义得到。在本文扬尘实验中, 可以合理地认为, 水平方向上的两个速度分量的 RMS 值相同, 则有 $\kappa = u'^2 + \frac{1}{2}v'^2$ 。利用公式 (1)、(2) 和 (4) 即可对积分尺度进行预测, 所得曲线也给出在图 3 中, 与上述数据点符合得很好。

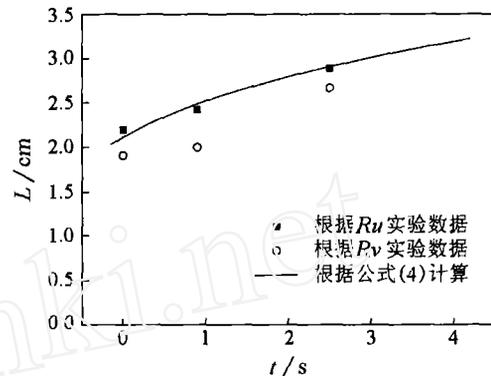
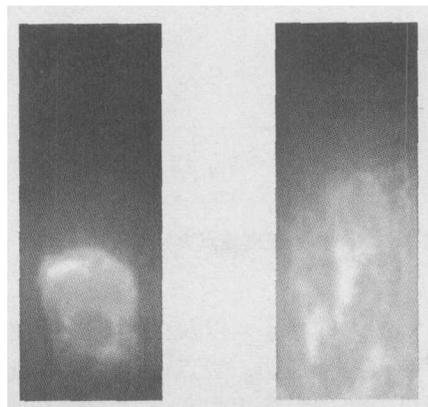


图 3 湍流积分尺度随时间的变化

3.3 玉米粉尘火焰的传播

利用同一实验装置, 对火焰在玉米粉尘云中的传播特性进行了研究。随着点火延迟时间 t_i 的增加, 实验中依次观察到两种粉尘火焰: 湍流火焰和层流火焰, 分别在点火延迟时间小于 1.1 s 和大于 1.4 s 时观察到典型情况。层流火焰 (示例如图 4(a)) 具有光滑、规则的抛物线形前锋面, 湍流火焰以不规则的火焰锋面 (图 4(b)) 和较高的传播速度为主要特征, 火焰面后方的燃烧区比层流火焰长。



(a) 层流火焰, $t_i = 1.4$ s (b) 湍流火焰, $t_i = 0.6$ s

图 4 玉米粉尘层流火焰和湍流火焰

根据火焰传播过程中的图像记录, 可以确定火焰锋面位置, 进而计算出火焰传播速度。图 5 给出了 $t_i = 0.6, 1.4, 1.8$ 和 3.2 s 时火焰面坐标和时间的关系, y_1 是离开点火源的距离, 时间 t 的零点为点火时刻。可以看到, 无论对湍流火焰还是层流火焰, y_1 和 t 之间有明显的线性关系, 即在所观测的高度范围内粉尘火焰稳定传播, 传播速度为常数。对上述测量数据进行线性拟合, 用拟合直线的斜率代表火焰传播速度, 图 6 给出了传播速度 S_f 随点火延迟时间的变化。图中一个引人注意的特征是, 大约以 $t_i = 1.1$ s 分界, S_f 与 t_i 的关系分成两个部分, 左侧的湍流火焰传播速度比较高 ($S_f \approx 0.9$ m/s), 而右侧的层流火焰传播速度显著降低, 并且随点火延迟时间的变化不大, $S_f = 0.45 \sim 0.56$ m/s。两种火焰的传播速度与 Proust 和 Veyssiere^[4] 的测量结果非常接近。

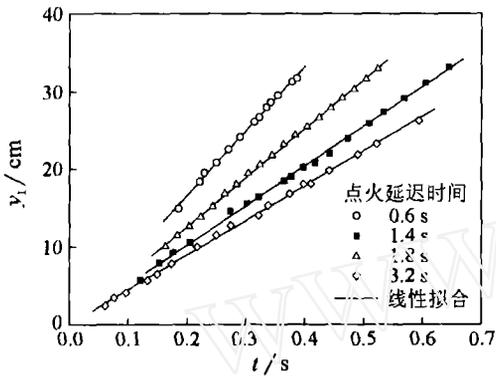


图 5 火焰面位置随时间的变化

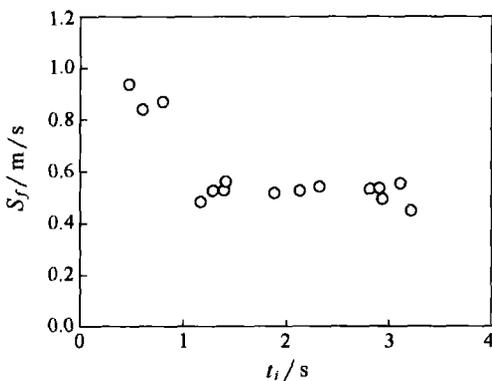


图 6 火焰传播速度随点火延迟时间的变化

对火焰形态的观察, 以及火焰传播速度和点火延迟时间的关系都说明, 当点火延迟时间较大时可以获得接近层流的粉尘火焰, 而点火延迟时间较小

时粉尘火焰是湍流性质的; 这种火焰形态的转变对应的点火延迟时间等于 1.1 s, 根据对粉尘云中湍流运动强度的测量, 相当于水平方向的湍流强度约为 8 cm/s, 垂向湍流强度为 11 cm/s。将扬尘湍流强度小于 10 cm/s 作为实现粉尘层流燃烧的实验条件, 还需要进一步验证。

4 结 论

(1) 新扬尘方法产生的扬尘湍流强度比较小, 随时间衰减缓慢。

(2) 扬尘湍流的积分尺度随着时间增大, 约为 2 cm 到 3 cm。

(3) 随着点火延迟时间的不同, 实验中观察到两种玉米粉尘火焰: 层流火焰和湍流火焰, 它们之间的分界点约为点火延迟时间等于 1.1 s, 对应的粉尘云湍流运动强度为 10 cm/s 左右, 湍流火焰传播速度明显大于层流火焰。

参 考 文 献

- [1] Goroshin S, Bidabadi M, Lee J H. Quenching Distance of Laminar Flame in Aluminum Dust Clouds. *Combustion and Flame*, 1996, 105(1/2): 147-160
- [2] Goroshin S, Lee J H. Laminar Dust Flames: a Program of Microgravity and Ground Based Studies at McGill. In: *Proceeding of Fifth International Microgravity Combustion Workshop*. Cleveland, Ohio, 1999. 123-126
- [3] Jarosinski J, Lee J H, Knystautas R, et al. Quenching Distance of Self-Propagation Dust-Air Flames. In: *Proceeding of 21st Symposium (International) on Combustion*. The Combustion Institute, 1986. 1917-1924
- [4] Proust C, Veyssiere B. Fundamental Properties of Flame Propagating in Starch Dust-Air Mixtures. *Combustion Science and Technology*, 1988, 62(4): 149-172
- [5] Van Wingerden K, Stavseng L. Measurements of the Laminar Burning Velocities in Dust-Air Mixtures. *VDI-Berichte*, 1996, 1272: 553-564
- [6] Pu Yi Kang, Podfilipski J, Jarosinski J. Constant Volume Combustion of Aluminum and Cornstarch Dust in Microgravity. *Combustion Science and Technology*, 1998, 135(5): 255-267
- [7] Hinze J O. *Turbulence*. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1975
- [8] Pu Yi Kang, Li Yu Chen, Kauffman C W, et al. The Determination of Turbulence Parameters in Closed Explosion Vessels. *AIAA Progress in Astronautics and Aeronautics*, 1989, 132: 107-123
- [9] 胡俊, 浦以康, 万士昕. 粉尘等容燃烧容器内扬尘系统诱导湍流特性的实验研究. *实验力学*, 2000, 15(3): 341-348
- [10] Tamanini F, Chaffee J L. Turbulent Unvented Gas Explosions under Dynamic Mixture Injection Conditions. In: *Proceeding of 23rd Symposium (International) on Combustion*. The Combustion Institute, 1990. 851-858