

封闭圆柱形粉尘爆炸罐内扬尘 诱导湍流特性的确定

严楠, 浦以康

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要: 采用热线风速仪和系综平均法测定和研究了封闭圆柱形粉尘爆炸罐内扬尘湍流的瞬态特性, 并与球形爆炸容器内已测定的扬尘湍流瞬态特性进行了比较, 对系综平均法用于扬尘湍流的测量误差与测量次数的关系进行了探讨。

关键词: 湍流测量; 瞬态湍流; 粉尘爆炸; 误差分析

中图分类号: O 357.54 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-3124(1999)03-0059-06

Determination of dispersion induced turbulent feature in a closed cylindrical explosion bomb

YAN Nan, PU Yi-kang

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

Abstract The hot wire anemometer and the ensemble average method are used to measure and study the dispersion turbulent transient feature in a closed cylindrical explosion bomb. The comparison of the dispersion turbulent parameters from different shapes of closed explosion bombs is presented. The relation between errors and numbers in dispersion turbulent measurement with the ensemble average method is discussed.

Key words: turbulent measurement; transient turbulence; dust explosion; error analysis

0 引 言

大多数粉尘等容燃烧实验均采用空气射流式扬尘装置产生瞬态湍流的方法, 在燃烧室内形成实验所需的粉尘云^[1-3]。贮气室高压空气通过扬尘装置在封闭爆炸容器内产生的湍流, 被称为扬尘诱导湍流(简称扬尘湍流)。具有适当强度的扬尘湍流既是粉尘稳定悬浮必不可少的条件, 同时又加剧粉尘等容燃烧过程。扬尘湍流具有瞬态性, 它的初始强度及随时间的衰减特性取决于扬尘装置的设计、高压贮气室的容积和初始压力、燃烧室的容积和几何形状等。对于给定的扬尘装置, 粉尘点火时刻的扬尘湍流残存强度与点火延迟时

收稿日期: 1999-01-12

基金项目: 国家自然科学基金(19482009)

作者简介: 严楠(1960-), 男, 广西桂林市人, 中科院力学所博士后。

间(即扬尘电磁阀开启时刻和点火时刻之间的延迟时间)有关。点火延迟时间常被用来定性地表征点火时刻所对应的扬尘湍流残存强度^[1-3],但却无法用来定量地解释不同实验装置和扬尘条件下的实验结果之间的差异。为此,直接测定粉尘燃烧室内的初始湍流强度与尺度及其随时间衰减特性变得十分必要。目前仅有为数不多的实验研究^[4,5]对封闭球形容器内的扬尘湍流瞬态特性进行过测量。

笔者参照文献[4]的技术方案,用热线风速仪和系综平均法,对封闭圆柱形爆炸罐内的纯空气扬尘湍流特性进行了测定,并再一次验证了使用系综平均法确定湍流速度的测量误差与测量次数之间的关系。

1 扬尘湍流的测量方法与实验装置

1.1 实验装置

测量扬尘湍流所用的实验装置为一个 7dm³ 封闭圆柱形爆炸罐,内径 0.16m、长 0.36m,长径比 2.25。扬尘装置有两套对称的扬尘组件,每套组件由扬尘管、挡棒、粉尘室、电磁阀、高压贮气室等组成,两个扬尘管紧靠罐壁平行安装,见图 1。每根扬尘管上有 20 个直径 0.8~ 1.5mm 的小孔,朝中心沿直线分布,孔径的分布为上小下大、上稀下密。距小孔 8mm 处设有挡棒,可显著降低小孔射流的平均速度。

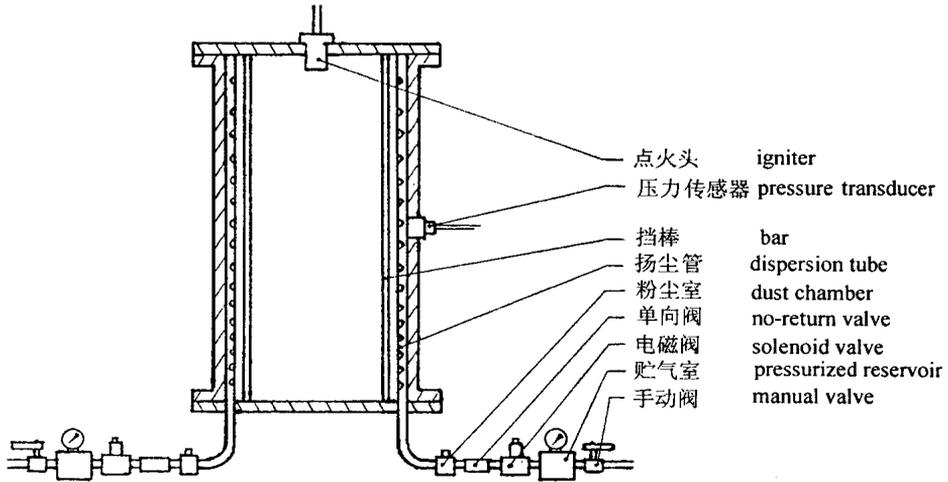


图 1 粉尘爆炸实验装置

Fig 1 Dust explosion test apparatus

粉尘爆炸实验的扬尘过程为,开启电磁阀,贮气室(单个容积 0.1dm³)开始泄放高压空气,空气流经单向阀、粉尘室,携带粉尘样品通过小孔吹入燃烧室。通过变更电磁阀启动与点火之间的延迟时间,可实现与点火时刻对应的扬尘湍流残余强度的控制。

1.2 系综平均法简述

如何定义扬尘湍流的平均速度是确定扬尘湍流参数的关键。因扬尘过程的瞬态特性令时间平均法已无法使用,只能采用系综平均法^[4-6]。系综平均法是指对于具有相同的初始条件和边界条件的大量重复实验作统计平均。扬尘湍流测量中的初始条件为贮气室的

容积和初始压力、扬尘过程的起始条件; 边界条件为扬尘装置的设计、爆炸罐的形状和尺寸。

根据湍流定义^[6], 某一瞬态流动在流场给定位置第 i 次所测得的 t_0 时刻的瞬时速度为 $U_i(t_0)$, 它可以分解为两部分:

$$U_i(t_0) = \bar{U}(t_0) + u_i(t_0) \quad (1)$$

式中: $\bar{U}(t_0)$ 是平均速度; $u_i(t_0)$ 是脉动速度。

根据系综平均法定义^[6], 在 t_0 时刻由 N 次相同测量而获得的该时刻的系综平均速度与均方根速度为

$$\bar{U}(t_0) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i(t_0) \quad (2)$$

$$u(t_0) = \sqrt{u(t_0)^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [U_i(t_0) - \bar{U}(t_0)]^2} \quad (3)$$

$u(t_0)$ 表示了湍流脉动速度的大小, 笔者采用 u 表示湍流强度。根据湍流定义^[6], 对于流场空间距离为 x 的两点 A 、 B 处流体, 在同一时刻 t_0 、沿垂直于 AB 的横向速度相关系数为

$$R_{AB}(t_0, x) = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [U_{A,i}(t_0) - \bar{U}_A(t_0)][U_{B,i}(t_0, x) - \bar{U}_B(t_0, x)]}{u_A(t_0)u_B(t_0, x)} \quad (4)$$

式中: $U_{A,i}(t_0)$ 、 $U_{B,i}(t_0, x)$ 分别为 A 、 B 两点沿相同方向的瞬时速度;

$u_A(t_0)$ 、 $u_B(t_0, x)$ 分别为 A 、 B 两点沿相同方向的均方根速度。

当 $x = 0$ 时, 即 A 、 B 两点重合, 此时 $R_{AB}(t_0, x) = 1$;

当 x 时, $u_A(t_0)$ 和 $u_B(t_0)$ 彼此独立, 相关程度消失, $R_{AB}(t_0, x) = 0$ 。

$R_{AB}(t_0, x)$ 对 x 的积分表征湍流旋涡的平均直径, 称为湍流积分尺度。根据湍流定义^[6], t_0 时刻的积分尺度为

$$L(t_0) = \int_0 R_{AB}(t_0, x) dx \quad (5)$$

笔者将采用 $u(t_0)$ 和 $L(t_0)$ 两参量随时间 t 的变化关系来描述扬尘过程的扬尘湍流特征, 在扬尘湍流强度测量中, 固定贮气室初始压力为 1M Pa, 进行 200 次相同测量, 以电磁阀开启时刻作为起始时间, 求系综平均速度 \bar{U} 和均方根速度 u 。

在湍流积分尺度测量中, 使用两套 D ISA 55M 01/55D 26 热线风速仪和两个 $5\mu\text{m}$ 镀铂钨丝的单丝探头。两个探头分别设在爆炸罐一半长度的同一截面上, 热线轴线与爆炸罐轴线平行, 一个探头固定在截面中心, 另一个探头固定在不同的半径上, 每次实验同时测量空间两点的速度。

1.3 两相流测量中采用的近似

在粉尘爆炸实验的粉尘浓度范围内直接测量粉尘空气混合物中的扬尘湍流参数在技术实施上有较大困难。一种可行的解决途径是对实验装置内的纯空气扬尘湍流进行测量, 用于近似粉尘空气混合物的扬尘湍流^[3~5]。Pu^[3]曾用甲烷空气混合物和甲烷空气惰性粉尘混合物的两种湍流燃烧进行对比实验, 结果证明粉尘颗粒的存在对甲烷空气混合物中的湍流燃烧结果影响不大 ($< 10\%$), 从而间接证明了在纯气相与用两相混合物中测得的

扬尘湍流参数之间的差别为小量,可予以忽略。

2 扬尘湍流特性的测量结果

2.1 扬尘湍流瞬时速度的单次测量结果

图2是爆炸罐中心处200次测量中某一次瞬时速度的曲线,测量采样频率为1kHz,

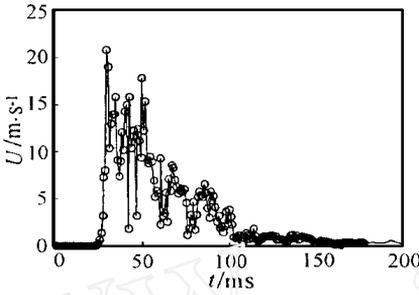


图2 扬尘湍流瞬时速度的单次测量结果

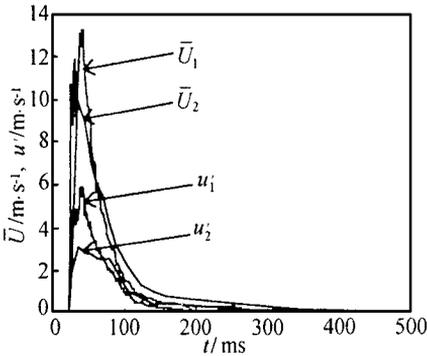
Fig.2 One of instantaneous velocity measurements of dispersion turbulence

图2中“°”表示实测值。由图2可见,气流进入爆炸罐后流速先是迅速达到最大值,然后随时间衰减,瞬时速度在30~120ms的时间范围内具有强烈的脉动。

2.2 平均速度和湍流强度

经过用系综平均法对200次测量的瞬时速度数据进行计算,可以得出所用爆炸罐中心处的扬尘湍流平均速度和均方根速度随时间的变化关系,如图3中的 \bar{U}_1 和 u_1 曲线(粗实线)所示,其特征如下:以开启电磁阀触发时刻作为扬尘湍流的时间起点 $t=0$,气体到达爆炸罐的时间约为25ms;在 $t=50$ ms左右扬尘湍流速度达到最大值,此时 $\bar{U}=13$ m/s, $u=6$ m/s;随后湍流迅速衰减, $t=100$ ms时, $\bar{U}=3$ m/s, $u=1.5$ m/s;

$t=200$ ms时, $\bar{U}=0.6$ m/s, $u=0.2$ m/s; $t=400$ ms时, $\bar{U}=0.2$ m/s, $u=0.15$ m/s,此时可以认为湍流强度衰减几乎至零。



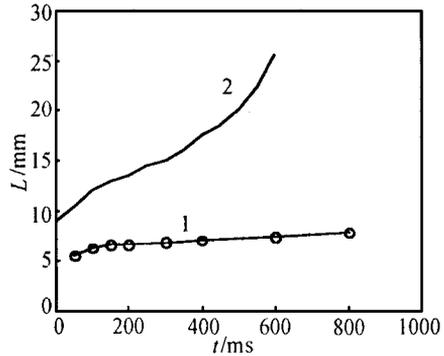
\bar{U}_1, u_1 7dm³圆柱形罐, Cylindrical Bomb, $P_r=1$ MPa

\bar{U}_2, u_2 20dm³球形罐, Spherical Bomb^[4], $P_r=$

1.1MPa

图3 扬尘湍流的平均速度和湍流强度

Fig.3 \bar{U} and u of dispersion turbulence



1 7dm³圆柱形罐, Cylindrical Bomb

2 20dm³球形罐, Spherical Bomb^[4]

图4 扬尘湍流的积分尺度

Fig.4 Integrated length scale of dispersion turbulence

2.3 积分尺度

扬尘湍流的积分尺度随时间的变化见图4中的曲线1。不同时刻的积分尺度随时间略为增大,为 $L=5\sim 8$ mm。

2.4 使用系综平均法的测量误差与测量次数的关系

为了获得高精度的湍流参数估值,采用系综平均法一般需要大量测量的统计结果。但

这既增大了损坏热线探头的可有性,又增大了实验工作量。因此人们希望了解测量误差与测量次数之间的关系。图 5 示出了不同 t 时的 u 随 N 波动的曲线,在 N 大于 50 以后湍流强度趋于稳定,湍流强度值越大曲线波动也越大。 $\bar{U} \sim N$ 曲线也有类似的结果。

可以用相对误差公式

$$\bar{e}_U = \frac{|\bar{U}(N) - \bar{U}(\infty)|}{\bar{U}(\infty)} \quad \text{和} \quad e_u = \frac{|u(N) - u(\infty)|}{u(\infty)} \quad (6)$$

表示 \bar{U} 和 u 的测量误差,其中 $\bar{U}(N)$ 和 $\bar{U}(\infty)$ 分别是 N 次和 ∞ 次测量取得的平均速度, $u(N)$ 、 $u(\infty)$ 为对应的均方根速度。实际情况可取较大测量次数的平均值来近似 ∞ 次测量的期望值,本文以 300 次测量的平均值代替期望值。图 6 是对应于 $t = 50\text{ms}$ 的 \bar{U} 和 u 估值的测量误差与测量次数的关系。

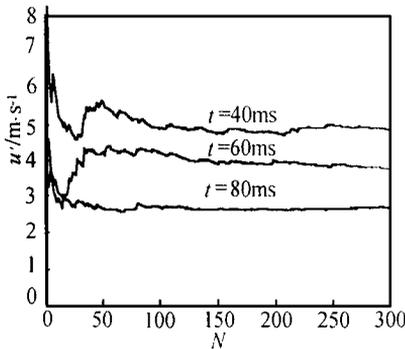


图 5 湍流强度估值随测量次数的变化
Fig 5 Variation of RMS velocity versus measurement numbers

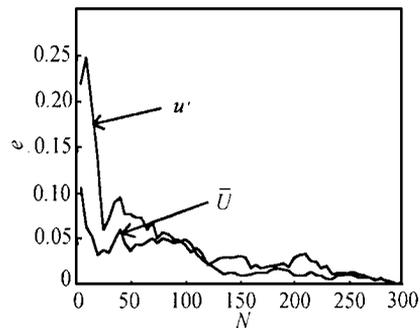


图 6 \bar{U} 、 u 的测量误差与测量次数的关系
Fig 6 Relation of errors of \bar{U} and u measurement versus measurement numbers

3 结果分析与讨论

(1) 不同容器内扬尘湍流强度和尺度特征的比较: 图 3 给出了 7dm^3 管的与 20dm^3 球^[4]的容器中心处的湍流强度的比较,其大小有明显差别,但它们的湍流强度随时间衰减的特性相似,均与时间呈指数关系。图 4 给出了两种容器的湍流积分尺度随时间变化的比较,积分尺度均随时间而增大,但其大小和曲线形状存在显著的差别,其中球形容器的积分尺度较大,分析两种实验装置的相同之处有 为封闭容器; 由高压贮气室提供瞬态湍度,贮气室初始压力相近; 贮气室容积与燃烧室容积的比值相近(管为 0.029,球为 0.033); 用小孔产生扬尘湍流。不同点有 容器的几何形状和尺寸; 扬尘管结构及小孔尺寸,球形容器有两根对称的半环形扬尘管,上有 12 个 $\Phi 3\text{mm}$ 的小孔。由此可见,扬尘湍流的衰减特性主要取决于扬尘装置,而湍流强度值大小及积分尺度则与容器形状和尺寸以及扬尘管小孔尺寸有关。

(2) 系综平均法的测量误差与测量次数的关系: 文献[4]建议测定扬尘湍流强度的测量次数不少于 30,测定积分尺度的次数不少于 50。本文研究表明,使用系综平均法的测量误差与测量次数、湍流强度大小均有关,当湍流强度越大时测量误差也越大,因此测量次数应依据湍流强度最大时的误差而定。根据图 6 的误差曲线,如取湍流强度的测量误差为 10%,则测量次数应不少于 50;如取误差为 5%,则次数应少于 100。由于积分尺度是依湍

流强度得出, 所以其测量次数可依湍流强度的测量而定。

参考文献:

- [1] NAGY J, VERA KIS C H. Development and control of dust explosion U K: Marcel Dekker, Inc., 1983
- [2] ECKHOFF R K. Dust explosions in the process industries U S: Butterworth-Heinemann Ltd, 1991.
- [3] PU Y K. Fundamental characteristics of laminar and turbulent flames in cornstarch dust-air mixtures McGill University, Canada: Ph. D. Dissertation, 1988
- [4] PU Yikang, LI Yuchen, KAUFFMAN C W, BERNAL L P. Determination of turbulence parameters in closed explosion vessels Michigan: The 12th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems, 1989
- [5] ZHEN G and LEUCKEL W. Determination of dust-dispersion-induced turbulence and its influence on dust explosion. Combustion of Science and Technology, 1996, 113~ 114: 629~ 639
- [6] HENZE J. Turbulence U S: McGraw-Hill, Inc., 1975

(上接第46页)

- (1) 试验段长达 2.50m, 驻室容积大, 能满足一些特殊试验要求和改善流场特性。
- (2) 试验段四壁可更换, 既可衔接原风洞试验条件, 又可减小洞壁干扰影响, 还能与 1.2m 风洞及 2.4m 风洞相协调开展相关性影响试验。
- (3) 观察窗面积大, 极大地改善了模型观察视野和扩大了流态观测空间。
- (4) 攻角变化范围扩大, 适合开展模型大攻角试验。
- (5) 设计了模型变滚转角 (γ) 机构, 提高了试验效率。
- (6) 模型天平投放装置彻底避免了模型天平超声速试验受到的冲击振动影响, 有利于提高天平设计精度和试验安全。
- (7) 上下独立的变攻角系统, 可进行模型双体分离试验。

上述的一些突出特点表明, 新试验段改善了试验条件, 提高了流场性能, 扩大了使用范围, 避免了模型天平受冲击波的影响, 有着广阔的应用前景和效益。

6 结束语

0.6m (FL-23) 风洞试验段技术改造, 实现了预期的目的, 达到了技术指标要求, 成功地扩大了风洞的应用范围, 提高了使用性能, 为新型号研制所需要的特种试验创造了良好条件。新试验段已投入正式使用, 并承担了多项型号试验任务。通过运转实践, 不断总结经验, 风洞性能必将会得到进一步完善与提高, 定会在型号研制中发挥重要作用。

参考文献:

- [1] 郑锦富, 樊开寿, 邢金锁. 0.6m 风洞技术改造可行性研究报告. CARDC-2, 1994. 3
- [2] HARTZLIKER J P. Wind tunnel design and testing techniques AGARD CP-174, 1975.
- [3] 别特洛夫·K·N. 火箭空气动力学. 国防工业出版社, 1979. 10
- [4] 恽起麟. 实验空气动力学. 国防工业出版社, 1991. 12