

文章编号: 1001-4888(2000)03-0341-08

粉尘等容燃烧容器内扬尘系统 诱导湍流特性的实验研究

胡 俊, 浦以康, 万士昕

(中国科学院力学研究所, 北京 100080)

摘要: 采用热线风速仪与系综平均法测定和研究了三种圆柱形封闭容器内的扬尘诱导湍流衰减特性, 并与球形爆炸容器内已测定的扬尘诱导湍流衰减特性进行了比较。探讨了扬尘装置、容器体积、形状对扬尘诱导湍流瞬态特性的影响。实验结果显示, 在粉尘等容燃烧容器内扬尘诱导湍流强度随时间的衰减特性具有一定相似性, 它们均呈负指数关系。

关键词: 扬尘诱导湍流; 湍流测量; 粉尘爆炸

中图分类号: O 357. 5 **文献标识码:** A

1 引言

粉尘等容燃烧实验研究中, 通常采用空气射流式扬尘装置在燃烧室内形成实验所需的粉尘云^[1,2]。高压空气通过扬尘装置在封闭容器内产生的湍流, 被称为扬尘诱导湍流(简称扬尘湍流)^[2], 适当强度的扬尘湍流是粉尘稳定悬浮必不可少的条件, 同时又可考察湍流对粉尘燃烧过程的影响。容器中扬尘湍流及其对粉尘燃烧特性的影响, 已成为粉尘等容燃烧研究中固有的一部分。以往实验中一般采用点火延迟时间(扬尘电磁阀开启时刻与点火时刻之间的延迟时间)来定性表征点火时刻对应的扬尘湍流残存强度, 但无法用来解释不同实验装置和扬尘条件下实验结果的差异。只有直接定量测量了给定实验容器及其扬尘系统的初始扬尘湍流随时间的衰减特性后, 才能建立粉尘点火延迟时间与扬尘湍流初始强度之间的定量关系, 近而为分析与比较不同等容实验条件下获得的粉尘爆炸数据提供湍流影响的依据。

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

收稿日期: 2000-01-24; 修订日期: 2000-08-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 19772060)

作者简介: 胡俊(1972-), 男, 现为中科院力学研究所博士研究生。主要研究方向为气体及粉尘爆炸特性、工业爆炸灾害的预防与减灾措施的研究。

实施上有较大困难。一种可行的解决途径是对粉尘等容燃烧实验装置内的纯空气扬尘诱导产生的湍流参数进行测量,用于近似给出粉尘空气混合物的扬尘湍流特性。Pu^[3]曾将甲烷-空气、甲烷-空气-惰性粉尘(粉尘浓度为500g/m³)预混气通过相同的扬尘机构扬至等容燃烧器中燃烧,获得了气相和两相(固相不参加反应,但影响扬尘湍流强度与尺度)的湍流燃烧结果,实验结果表明,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小于10%,证明粉尘的存在对初始扬尘湍流强度及尺度的影响可视为小量,气相扬尘湍流参数可作为零级近似给出粉尘空气混合物的扬尘湍流特性。Tai^[4]的进一步研究也表明,有无粉尘对初始扬尘湍流强度影响很小。采用纯空气的扬尘湍流参数评估粉尘空气混合物的扬尘湍流特性,已成为研究粉尘空气混合物初始扬尘湍流特性对粉尘燃烧爆炸特性影响的一种有效手段而广为应用^[5,6,7]。

本文针对粉尘等容燃烧实验研究中使用的0.007m³, 0.022m³, 0.026m³三种圆柱形实验容器及其扬尘系统,采用热线风速仪测定了三种容器中心扬尘诱导瞬态速度随时间的变化规律,然后由系综平均法计算给出扬尘诱导平均速度与扬尘湍流强度随时间的变化规律。并将三种容器测量结果与已知的0.020m³国际标准球形爆炸容器的扬尘湍流衰减特性^[5]进行了比较,给出了不同容积、形状、扬尘装置等条件对扬尘湍流特性的影响及扬尘湍流衰减规律。在此基础上,文献[8]就扬尘湍流强度对煤粉的燃烧爆炸特性进行了综合分析,得到了较好的结果。

2 扬尘湍流的平均速度与扬尘湍流强度

确定瞬态扬尘过程中扬尘湍流强度随时间的衰减特性,只能采用系综平均法^[5,9]。系综平均法是指对于相同初始条件和边界条件下大量重复进行的实验结果作统计平均。在本研究中,采用热线风速仪测量相同条件下的 N 次扬尘过程,其中第 i 次测量获得的瞬态流速随时间的变化为 $u_i(t)$,在扬尘过程中任意 t^* 时刻,其系综平均量与均方根可由以下公式给出:

$$\bar{u}(t^*) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i(t^*) \quad (1)$$

$$u(t^*) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [u_i(t^*) - \bar{u}(t^*)]^2} \quad (2)$$

$\bar{u}(t^*)$ 与 $u(t^*)$ 分别表征了所测瞬态速度在 t^* 时刻的扬尘诱导平均速度与均方根速度(即RMS速度)。在粉尘等容燃烧研究中,湍流在点火时刻($t=t_0$)的RMS速度 $u(t_0)$ 通常用来表示初始扬尘湍流的强度。

3 实验装置与测量方法

3.1 实验装置

(1) 0.007m³圆柱形封闭容器(长径比 $L/D=2.12$,简称YK7L)

该容器内径为0.165m,长0.35m,扬尘系统由两套对称的扬尘管、挡棒、电磁阀、粉尘室和高压贮气室(单个容积为0.0001m³)组成,示于图1。当电磁阀打开时,高压气室内压缩气体将粉尘经扬尘管壁的小孔吹至容器内。扬尘管内径为10mm,沿扬尘管壁分布数十个孔径为0.8mm至2.0mm的小孔。小孔孔径的大小和沿轴向的分布由实验确定以保证粉尘浓度的均匀分布。扬尘管小孔前5mm各平行地放置一根直径为8mm的挡棒,将从小孔喷出的射流转化

为一绕流,一方面减小射流的平均速度,另一方面在燃烧室截面上获得较均匀的粉尘浓度分布

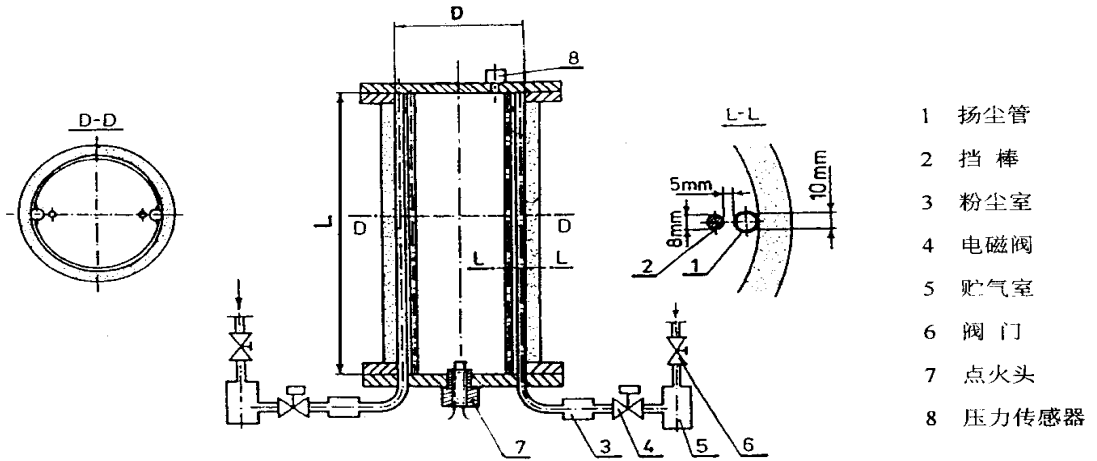


图1 粉尘等容燃烧实验装置

(2) 0.022m^3 圆柱形封闭容器 ($L/D = 6.5$, 简称 YK2L)

该容器内径同样为 0.165m , 长 1.05m , 除高压贮气室(单个容积为 0.00033m^3) 容积与扬尘管长度外, 扬尘装置结构与 YK7L 完全相同

(3) 0.026m^3 圆柱形封闭容器 ($L/D = 4.9$, 简称 YK2Q)

该容器内径为 0.19m , 长为 0.93m . 具体结构及描述见文献[3] 除扬尘组件只采用一套(即单根扬尘管), 高压贮气室容积为 0.00046m^3 外, 其余结构与上述两容器相同

3.2 测量系统

容器内瞬态流速的测量使用 D ISA 55M 01 热线风速仪及 $5\mu\text{m}$ 的铂金单丝探头 探头安装在容器一半长度的截面中心上, 支杆与扬尘管对称面垂直, 探头轴线与容器轴线平行

实验中电磁阀的启闭由计算机控制 计算机在给出开启信号的同时, 开始采集热线风速仪的测量信号 采样频率为 2kHz , 采样时间为 2s 贮气室的初始压力为 1.1MPa

系综平均法中重复测量的实验次数应在保证测量精度的前提下, 尽可能降低实验工作量 参照文献[5]中推荐的最佳测量次数大约为 $30\sim 50$, 作者在各容器中的测量均采用 50 次为最佳测量次数

3.3 实验步骤

- 1) 向高压贮气室中注入空气至指定初始压力 (1.1MPa), 关闭送气阀;
- 2) 计算机触发电磁阀开启, 同时开始采集热线风速仪测得的瞬态数据;
- 3) 高压气体经电磁阀、粉室、扬尘管小孔吹入封闭容器;
- 4) 扬尘过程完成, 同时数据采集完毕;
- 5) 打开放气阀, 释放封闭容器内压力至常压, 然后关闭放气阀;
- 6) 重复 1~4 步骤 N 次;
- 7) 采用系综平均法处理 N 次重复测量的实验数据, 得出扬尘湍流的平均速度与扬尘湍流强度随时间的变化曲线

3.4 实验条件

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 本文所涉及的各实验容器及扬尘系统的参数见表 1.

表 1 各实验容器扬尘装置参数及扬尘条件比较

容器名称	容积 V/m ³	燃烧室形状	长径比 L/D	扬尘装置	贮气室与燃烧室容积比	贮气室初压 P ₀ /MPa	u /m s ⁻¹		
							20m s	50m s	100m s
YK7L	0.007	圆柱形	2.12	对称双直管	0.029	1.1	7.1	6.5	1.2
YK22L	0.022	圆柱形	6.5	对称双直管	0.030	1.1	2	3.1	1
YK26L	0.026	圆柱形	4.9	单直管	0.018	1.1	6.3	3.2	3.2
IS20L	0.020	球形	1	对称双半环形管	0.033	1.1	3.2	3.2	1.1

4 实验结果

4.1 扬尘湍流瞬时速度的单次测量结果

以 YK7L 柱形容器中心处测量的某次瞬态流速随时间的变化曲线为例,给出其单次测量结果,见图 2 单次采集的瞬态速度随时间的变化曲线虽不能给出扬尘过程中某一时刻扬尘湍流强度的大小,但从图 2 中可以看出,气流进入容器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~ 120m s 的时间范围内具有强烈的脉动

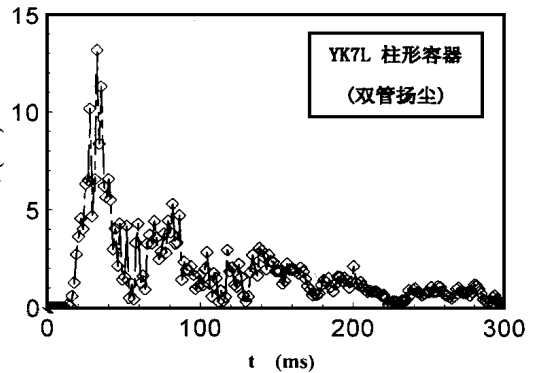


图 2 扬尘诱导瞬态速度随时间变化的单次测量结果

4.2 扬尘诱导平均速度与湍流强度

采用系综平均法,分别对 YK7L, YK22L, YK26L 三个实验容器中 50 次重复测量的瞬时速度数据按公式(1), (2)进行计算,可得到三个

不同实验容器中扬尘湍流的平均速度与 RMS 速度(表征扬尘湍流强度)随时间的变化关系,示于图 3, 4, 5

图 3 给出了 YK7L 柱形容器中的扬尘湍流衰减特性 从电磁阀开启时刻 $t = 0$ 至 20m s, 扬尘湍流诱导的平均速度与 RMS 速度从 0 急剧增大至第一个峰值 $\bar{u} = 8\text{m/s}$, $u = 7.1\text{m/s}$ 此后平均速度继续上升,约在 $t = 50\text{m s}$ 时,达到最大值 $\bar{u} = 15\text{m/s}$,然后迅速衰减,至 $t = 400\text{m s}$ 左右,已几乎衰减至零 而 RMS 速度在达到第一个峰值之后,随即下降至 $u = 2.5\text{m/s}$;在平均速度达到最大值之前,即 $t = 40\text{m s}$ 左右,RMS 速度又上升至第二个峰值 $u = 6.5\text{m/s}$;在随后 $t = 40 \sim 100\text{m s}$ 内,RMS 速度急剧衰减至 $u = 1.2\text{m/s}$; $t = 100\text{m s}$ 后衰减变缓 $t = 400\text{m s}$ 后,平均速度与 RMS 速度已衰减几乎至零

图 4 给出 YK22L 柱形容器中扬尘湍流衰减特性 从 $t = 0 \sim 30\text{m s}$,扬尘诱导的平均速度急剧增大至最大值 $\bar{u} = 6.5\text{m/s}$,随后迅速衰减,至 $t = 120\text{m s}$, $\bar{u} = 1.5\text{m/s}$; $t = 400\text{m s}$ 以后,平均速

度逐步衰减至零。扬尘诱导的 RMS 速度在 $t = 0 \sim 20\text{ms}$ 内同样急剧增大; 60ms 左右达到最大值 $u = 3\text{lm/s}$; 从 $t = 60 \sim 100\text{ms}$, RMS 速度迅速衰减至 1m/s ; $t = 100\text{ms}$ 以后衰减变慢。至 $t = 400\text{ms}$ 时, 平均速度与 RMS 速度均衰减几乎至零。

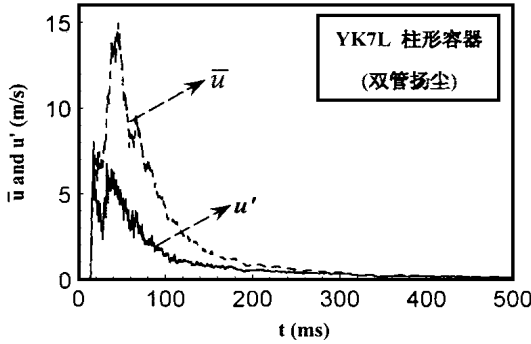


图 3 7L 柱形容器扬尘诱导的平均速度(\bar{u})与 RMS 速度(u')随时间变化规律

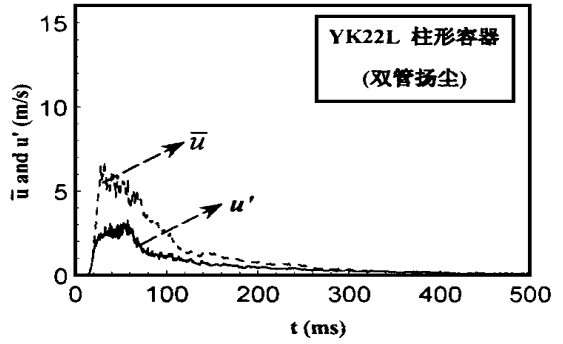


图 4 22L 柱形容器扬尘诱导的平均速度(\bar{u})与 RMS 速度(u')随时间变化规律

图 5 给出 YK26L 柱形容器的扬尘湍流衰减特性。由于是单管扬尘, 所以其流动特性与 YK7L, YK22L 两种容器有较大差异。从 $t = 0 \sim 20\text{ms}$ 左右时, 扬尘湍流平均速度与 RMS 速度均从 0 增至最大值, $\bar{u} = 13\text{m/s}$, $u' = 6.3\text{m/s}$ 。随后平均速度稍有下降; 在 $t = 80\text{ms}$ 时, 重新增大至最大值 $\bar{u} = 14.3\text{m/s}$; 此后平均速度迅速衰减, 至 $t = 240\text{ms}$ 时, $\bar{u} = 2.5\text{m/s}$ 。 $t = 400\text{ms}$ 以后, 平均速度保持在 1m/s 左右缓慢衰减; RMS 速度在达到最大值后, 随即急剧衰减至 3m/s 左右; 并保持这一相对较高的值至 $t = 150\text{ms}$; 在 $t = 150 \sim 240\text{ms}$, RMS 速度缓慢地衰减 1m/s ; $t = 400\text{ms}$ 后 RMS 速度衰减几乎至零。

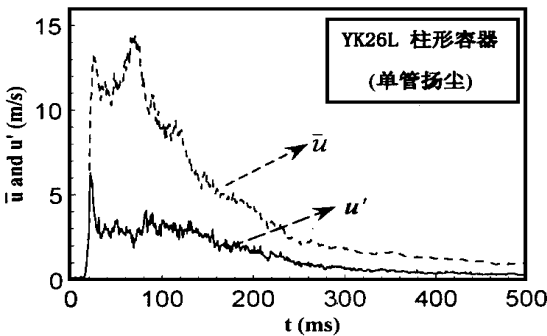


图 5 26L 柱形容器扬尘诱导的平均速度(\bar{u})与 RMS 速度(u')随时间变化规律

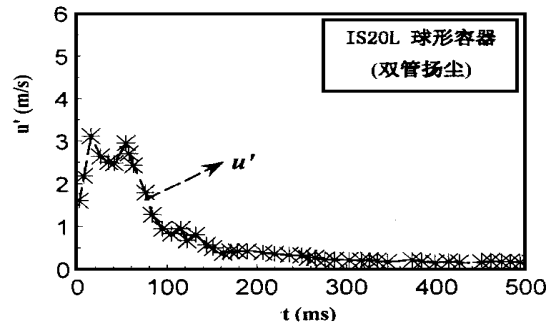


图 6 20L 球形容器扬尘诱导 RMS 速度(u')随时间变化规律

为比较不同形状容器及扬尘系统对扬尘湍流衰减特性的影响, 图 6^[5]给出 0.002m^3 国际标准爆炸球形容器(简称 IS20L)的扬尘湍流强度随时间的衰减曲线。从 $t = 0 \sim 20\text{ms}$, 扬尘诱导的 RMS 速度急剧上升至 3m/s ; 稍有下降后, $t = 60\text{ms}$ 左右又上升至 3m/s ; 此后迅速衰减, 至 $t = 100\text{ms}$ 时, 约为 1m/s ; $t = 100\text{ms}$ 以后衰减变慢; 至 $t = 400\text{ms}$ 时, RMS 速度几乎衰减至零。

5 结果分析与讨论

5.1 对称与非对称扬尘装置对扬尘湍流特性的影响

图7给出四种封闭容器内的扬尘湍流强度随时间衰减曲线的比较。比较结果表明,使用单扬尘管的YK26L柱形容器的扬尘湍流衰减特性与其余三条曲线有较大不同。它的扬尘湍流强度在扬尘后20~150ms时间内,保持了相对较强($u = 3.2\text{ m/s}$)湍流状态,平均速度的衰减也相对缓慢。这种差异是由于其非对称的扬尘结构造成的。当单根扬尘管的小孔空气射流高速射入封闭容器,由于没有相反方向射流的作用,容器内的强湍流状态得以持续较长时间;而具有对称扬尘装置的YK22L柱形与YK20L球形容器,虽然它们初始的湍流状态也较强烈($u = 3.2\text{ m/s}$),7L柱形容器的 u 更达到 7.1 m/s ,但在对称射流的作用下,至 $t = 100\text{ ms}$ 左右,三个容器中湍流强度均迅速衰减至一个相对较低($u = 1\text{ m/s}$ 左右)的水平。

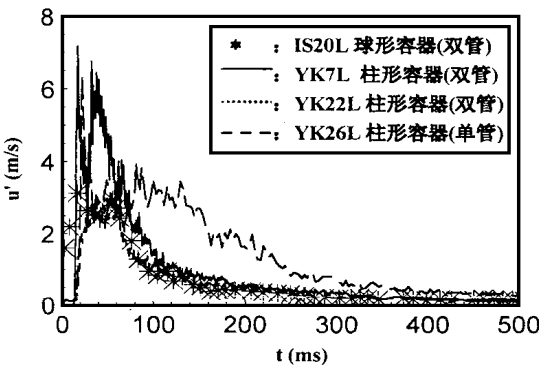


图7 对称与非对称扬尘装置扬尘湍流衰减特性比较

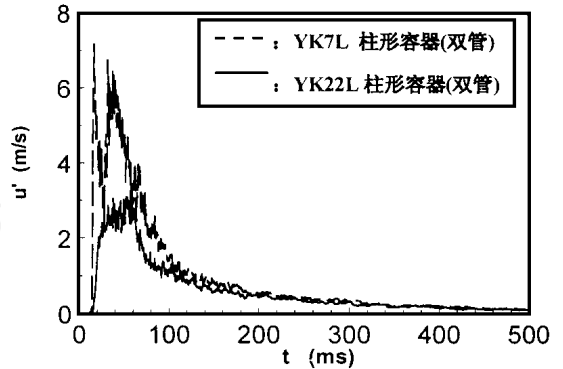


图8 不同容积容器扬尘湍流衰减特性比较

封闭容器内粉尘云的形成,需要具有适当强度的扬尘湍流强度,但粉尘云一旦形成后,则希望获得较低的湍流环境,以减少外部湍流条件对粉尘固有燃烧特性的影响。为此扬尘系统的设计应尽量采用对称结构的扬尘装置;反之,如果希望研究在较强湍流状态下的粉尘的燃烧爆炸特性,则不妨采用非对称结构的扬尘装置,以保证强湍流状态可维持较长时间。

5.2 容器体积大小对扬尘湍流特性的影响

图8比较了YK7L与YK22L容器中的扬尘湍流衰减特性。它们的扬尘装置在结构上完全相同,贮气室与燃烧室的容积比也大致相近,两者的扬尘诱导平均速度与湍流强度在衰减特性上也极为相似,只是在峰值大小上有较大的差异。在YK7L容器中,平均速度与RMS湍流速度最大值分别为 $\bar{u} = 1.5\text{ m/s}$, $u = 7.1\text{ m/s}$;22L容器中,则分别为 $\bar{u} = 6.5\text{ m/s}$, $u = 3.1\text{ m/s}$ 。以上差异是由于封闭容器的体积效应造成的。初始的高压空气射流在小容积内引起了更强的湍流,但在对称扬尘管的作用下,100ms后,两容器中的扬尘湍流强度均迅速衰减至同一水平($u = 1\text{ m/s}$ 左右)。

两者的比较结果表明,在柱形容器中,若采用相同结构的扬尘装置,其扬尘诱导湍流具有相似的衰减特性。但小容器中对应该较强的RMS速度,因此所获得的粉尘燃烧特性参数将会偏高。

5.3 容器形状对扬尘湍流特性的影响

IS20L 球形与 YK22L 柱形是两个形状不同但体积相近的容器, 它们的扬尘装置同为对称结构 两者的扬尘湍流衰减特性也有较大相似之处, 见图 9 扬尘初始, $t = 20\text{ms}$ 时 IS20L 球形容器的扬尘湍流强度便达到第一个峰值(3.2m/s), 随后略有下降; 而此时 YK22L 内扬尘湍流强度还处于上升阶段 但在 $t = 55\text{ms}$ 左右, 两者均达到相近的峰值(3.1m/s 左右), 此后无论在扬尘湍流强度的幅值大小与衰减速度上, 两者都变得极为相似

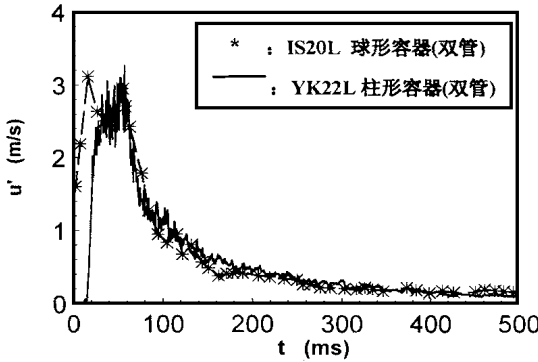


图 9 不同形状容器扬尘湍流衰减特性比较

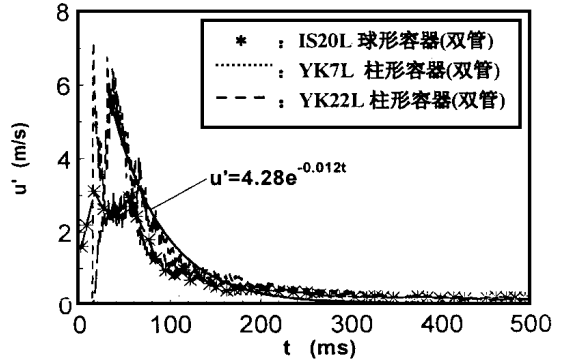


图 10 对称管式扬尘装置湍流衰减特性

图 9 的实验结果表明, 对于球形与柱形容器, 如其体积相当又采用类似的扬尘装置和参数, 则所获得的扬尘湍流特性基本上也是相似的

5.4 对称管式扬尘装置诱导的扬尘湍流强度衰减特性

YK7L, IS20L, YK22L 三种容器均具有对称管式结构的扬尘装置 图 10 对它们的扬尘衰减特性曲线进行了比较 比较结果显示: 它们的扬尘湍流强度在峰值大小上虽有差异, 但在达到峰值后, 其扬尘湍流强度随时间的衰减均与时间呈指数关系 图 10 中以粗实线来表征三容器中扬尘湍流强度随时间衰减的共同规律, 则可按指数关系拟合出一条曲线 拟合公式为:

$$u = 4.28e^{-0.012t}$$

对于采用对称管式扬尘装置的实验容器, 如果还未测定过其扬尘湍流衰减特性, 可以利用这一指数关系, 结合点火延迟时间, 预计其点火时刻的扬尘湍流强度

5.5 扬尘湍流强度衰减规律对粉尘等容燃烧实验实施的影响

对于粉尘等容燃烧的实验研究, 在粉尘燃烧的点火延迟时间设置上, 应避免扬尘湍流强度由零达到最大值的这段时间, 以减少由于湍流强度在急剧上升过程中的大幅度脉动给点火过程带来的不稳定性, 从而提高实验数据的重复性 从图 10 中三种容器对应的湍流强度衰减特性来看, 扬尘湍流强度的最大值通常出现在扬尘后 50ms 左右, 所以在一般实验研究中, 点火延迟时间大都取为大于 50ms

6 结论

1) 在粉尘等容燃烧实验研究中, 若要减少扬尘湍流强度对粉尘固有燃烧特性的影响, 则扬尘系统的设计应尽量采用对称结构的扬尘装置, 且点火延迟时间应设置在 100ms 以后; 反之, 如果希望在有一定持续时间的较强湍流状态中研究粉尘燃烧爆炸的湍流特性, 则不妨采用非对称结构的扬尘装置



2) 对于不同容积、相同形状而又采用相似扬尘装置的容器, 则在小容器中扬尘诱导湍流强度要比大容器的强很多; 对于不同形状但体积相同的球形与柱形容器, 若采用相似的扬尘装置和参数, 则扬尘诱导湍流强度的衰减特性相近

3) 对于采用对称管式扬尘装置的球形与柱形容器, 其扬尘湍流强度(u)随点火延迟时刻(t)的衰减近似呈 $u = 4.28e^{-0.012t}$ 的指数关系

4) 在粉尘等容燃烧实验研究中, 为获得较好的重复性, 点火时刻应避免扬尘湍流强度由 0 升至最大值的时段, 实验结果给出最小点火延迟时间通常要大于 50ms

参考文献

- [1] Nagy J, Verakis C H. Development and Control of Dust Explosion [M]. UK: Marcel Dekker Inc., 1983. 31- 42.
- [2] Eckhoff R K. Dust Explosions in the Process Industries [M]. US: Butterworth-Heinemann Ltd., 1991. 244- 251, 343- 347.
- [3] Pu Y K. Fundamental characteristics of laminar and turbulent flames in Cornstarch dust-air mixtures [D]. Montreal: McGill University, 1988. 50- 54.
- [4] Tai C S, Kauffmann C W, Sichel M, *et al*. Turbulent Dust Combustion in a Jet-Stirred Reactor [J]. Progress in Astronautics and Aeronautics, 1988, 113: 62- 68.
- [5] Pu Y K, Li Y C, Kauffman C W, *et al*. Determination of turbulence parameters in closed explosion Vessels [J]. Progress in Astronautics and Aeronautics, 1989, 132: 107- 123.
- [6] Amyotte P R, Pegg M J. Lycopodium Dust Explosions in a Hartmann Bomb: Effects of Turbulence [J]. J. Loss Prev. Process Ind., 1989, 2: 87- 94.
- [7] Kauffman C W, Srinath S R, Tezok F I, *et c*. Turbulent and Accelerating Dust Flames [J]. Proc. of 20th Symp. (internat.) Combustion, 1984, 1701- 1708.
- [8] 浦以康, 胡俊, 贾复. 高炉喷吹用烟煤煤粉爆炸特性的实验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(4).
- [9] Hinze J. Turbulence [M]. US: McGraw-Hill Inc., 1975.

Experimental Investigation on Dispersion-Induced Turbulence in Closed Explosion Vessels

HU Jun, PU Yi-kang, WAN Shi-xin

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

Abstract: The hot-wire anemometer measurement and ensemble average method were employed to determine the feature of dispersion-induced turbulence during the transient dispersion process in three closed cylindrical explosion vessels. The comparison between the turbulent parameters from different vessels is presented. The influence of the dispersion system, volume and shape of vessels on the turbulent decaying feature is discussed. The results of measurement show that among the decaying features of turbulence in three vessels, a similar pattern of negative exponent law exists.

Key words: dispersion-induced turbulence; turbulent measurement; dust explosion