DOI: 10.11883/bzycj-2017-0436

爆炸压力积聚工况下石松子粉尘爆炸火焰传播特性*

喻健良,纪文涛,闫兴清,于小哲,侯玉洁
(大连理工大学化工机械与安全学院,辽宁 大连 116024)

摘要: 搭建了一套兼具承压和可视性能粉尘爆炸实验平台,在压力积聚工况下实验研究了石松子粉尘爆炸火焰传播特性。实验结果表明:压力积聚工况下的石松子粉尘爆炸火焰呈现空间离散的束状结构,火焰锋面呈齿状。随着粉尘浓度的提升,火焰连续性增强,锋面趋于平滑,亮度增加,并在 750 g/m^3 达到最佳。不同浓度条件下的石松子粉尘爆炸火焰在传播过程中均呈现明显的速度脉动特征,但脉动频率随粉尘浓度的增大而减小。爆炸火焰平均传播速度随粉尘浓度的增大先增大后减小,并在 750 g/m^3 达到最高。不同浓度条件下的石松子粉尘爆炸火焰前期传播速度均高于后期传播速度。

关键词: 压力积聚;粉尘爆炸;火焰结构;火焰传播速度
中图分类号: O381;X392 **国标学科代码:** 13035;6203020 **文献标志码:** A

可燃粉尘广泛存在于石油、化工等行业[1],一旦发生爆炸将引起重大的人员伤亡和财产损失。研究粉尘爆炸火焰传播特性对于理解和掌握粉尘爆炸机理,制定粉尘爆炸防护措施均有重要意义。Chen 等[2]、Ju 等[3]较早研究了开放空间内硬脂酸、硬脂醇粉尘火焰结构及燃烧机理,发现小粒径粉尘爆炸类似预混燃烧,而大粒径粉尘爆炸则类似扩散燃烧。Han 等[4-5]实验发现在一端开口、透明的管道内石松子粉存在两种火焰结构:半径为 0.5～1.0 mm 的离散点火焰以及半径为 2～4 mm 的球形连续火焰。Proust[6]采用高速摄像获得了长 1.5 m 的可视矩形装置内多种粉尘火焰传播形态,并在低湍流条件下测定了粉尘层流燃烧速率。Sun 等[7]对一端开口、可视容器内粉尘火焰结构、反应特性以及火焰传播开展了较多研究,发现 PMMA 粉尘火焰结构分为未燃区、主反应区和黄色发光区。Cao 等[8]实验发现在顶部开口的可视容器内煤粉燃烧涵盖表面吸热、热解气化、混合、点燃、火焰传播、熄灭等一系列过程。Gao 等[9-10]对开放空间内粉尘火焰传播精细结构开展了研究,认为粉尘爆炸存在由热解气化控制的异相燃烧和由化学反应控制的均相燃烧两种机理,并提出用 Damlohler 数作为两种机理的判定准则。基于上述研究可知,受限于可视化需求与实验装置强度的矛盾,目前研究人员普遍对压力无法积聚的开敞或半受限空间内粉尘爆炸的火焰传播机理进行研究。然而,许多真实的粉尘爆炸通常是爆炸压力与火焰传播的耦合过程,而现有的研究对压力积聚条件下粉尘爆炸火焰传播特性的关注不够,导致无法精准、全面地描述真实粉尘爆炸过程中火焰的传播机理。基于此,本文中搭建一套兼具可视化和承压性能的实验装置,采用高速摄影技术,在压力积聚工况下对不同浓度的石松子粉尘爆炸火焰传播特性进行实验研究,探讨压力积聚工况下石松子粉尘爆炸火焰结构和传播规律。

1 实验装置

为了实现压力积聚工况下粉尘爆炸火焰传播特性研究,搭建了如图 1 所示的实验装置。爆炸容器为垂直放置的圆柱形石英玻璃管道,壁厚为 9 mm,内径为 65 mm,高为 300 mm,总容积约为 1 L。经水压测试,该容器最高承压可达 2 MPa。管道两端由法兰密封,顶部法兰上方安装有 1 MPa 爆破片,防止爆炸超

* **收稿日期:** 2017-12-04; **修回日期:** 2018-02-06
基金项目: 国家自然科学基金项目(51574056,51604057)
第一作者: 喻健良(1963—),男,博士,教授,博士生导师,yujianliang@dlut.edu.cn。

压造成容器破裂;爆破片另一侧连接真空泵,用于将容器抽至一定真空度,从而实验喷粉后容器内部保持常压环境。底部法兰中间位置安装蘑菇形喷头,电磁阀动作后,储气罐内一定压力的空气进入爆炸容器,并在蘑菇形喷头作用下形成向四周均匀分散的气流,将均匀铺设在容器底部的粉尘分散到容器内部,形成均匀分布的粉尘云。实验采用型号为 HY-12A 的脉冲点火器进行点火,输入电压为 AC220 V,电流为 0.36 A,输出电压为 12 kV,脉冲频率为 50 Hz,点火间隙为 4 mm。为了保持爆炸容器的完整性,点火电极安装在底部法兰的喷头两侧,距离管道底部约 50 mm。通过综合分析不同喷粉压力和点火延迟时间条件下喷粉后的粉尘云形态和爆炸压力等参数,获得该实验装置的最佳喷粉压力为 0.15 MPa,最佳点火延迟时间为 100 ms。火焰动态传播过程由 FASTCAM SA4 高速摄影以 1 000 帧/秒的速度进行拍摄,以捕捉粉尘爆炸过程中火焰结构的瞬态演变过程。

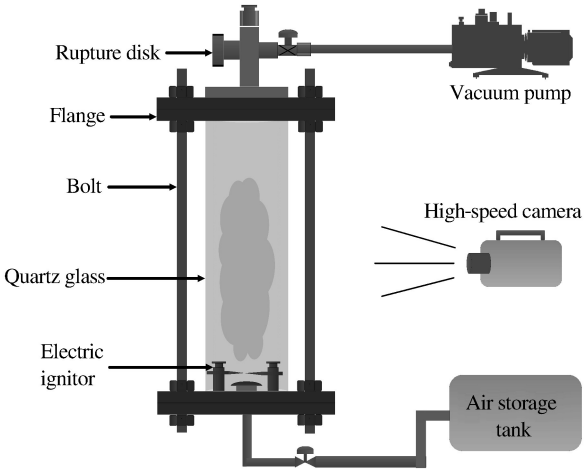


图 1　实验装置示意图

Fig. 1　Schematic diagram of experimental setup

实验选用石松子粉尘作为爆炸介质,这是因为石松子粉尘具有较好的流动性和分散性,是相关规范中常用的标定粉尘,其爆炸特性及燃烧特性常见于文献[11-16],便于实验结果的分析和参考。图 2 和图 3 分别为石松子粉尘的粒径分布图和微观扫描电镜图。由图 2 可知,实验用石松子粉尘粒径呈正态分布,分布范围为 20～80 μm,中位直径为 38.7 μm。由图 3 可知,实验用石松子粉尘颗粒整体形状不规则,呈现明显的褶皱和塌陷结构,该结构有利于提升粉尘比表面积,增大粉尘在燃烧过程中与氧气的接触面积,提高燃烧和爆炸稳定性。为了实现实验结果的科学性和合理性,实验前均对粉尘进行干燥处理,每个工况的实验均至少重复 3 次,并选择其中一组相对较好的结果进行分析。

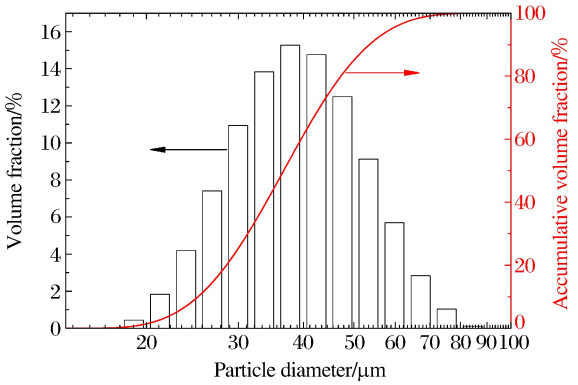


图 2　石松子粉尘粒径分布

Fig. 2　Diameter distribution of lycopodium dust

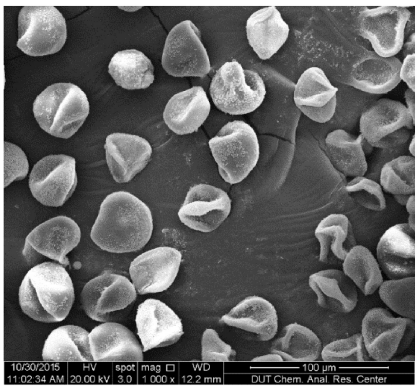


图 3　石松子粉尘扫描电镜

Fig. 3　Scanning electron microscope of lycopodium dust

2　结果与分析

实验首先在标准 20 L 球形爆炸装置内开展,测量了实验用石松子粉尘爆炸特性参数,测得其最大爆炸压力 p_{max} 为 0.63 MPa,最大爆炸压力上升速率为 $(dp/dt)_{max}$ 为 38.12 MPa/s,爆炸的最佳浓度为 750 g/m^3[17-18]。基于此,实验选取了 250、500、750、1000 g/m^3 等 4 种不同浓度的石松子粉尘进行实验,以便全面分析压力积聚工况下石松子粉尘爆炸火焰传播特性。

2.1　火焰结构变化规律

图 4 为压力积聚工况下浓度为 250 g/m^3 的石松子粉尘爆炸火焰结构随时间的变化。由图 4 可知,t

=0～30 ms 时容器内未形成稳定传播的可见火焰。这是因为粉尘爆炸需要经过热解、混合、引燃等过程，点火初期容器内的强湍流致使点火电极附近热交换速率较快，热量无法快速积累，粉尘无法被充分引燃并稳定传播。t=40 ms 时火焰开始稳定向上传播，但由于管道内强湍流环境以及粉尘云的局部分布不均，导致管道内火焰结构不规则，呈现空间离散的束状结构，火焰锋面尖锐或呈锯齿状。随着火焰进一步传播，参与燃烧的粉尘颗粒数量增加，火焰结构逐渐趋于饱满，亮度增强。

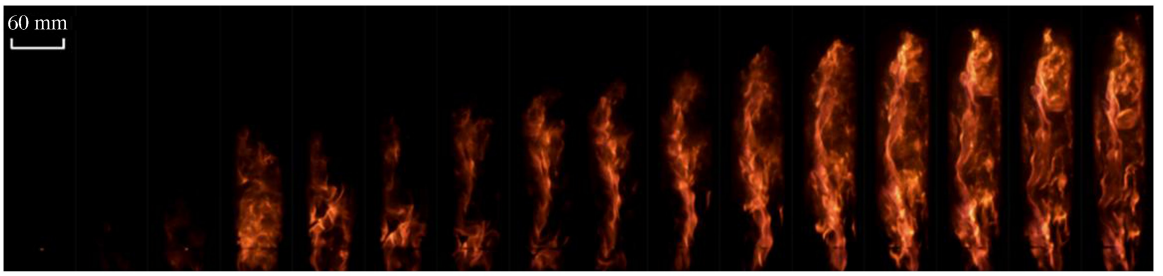


图 4　浓度为 250 g/m^3 的石松子粉尘爆炸火焰结构随时间的变化规律

Fig. 4　Flame structure of lycopodium varying with time at dust concentration of 250 g/m^3

当粉尘浓度提升至 500 g/m^3 时，如图 5 所示，点火初期的爆炸火焰与粉尘浓度为 250 g/m^3 时的相似，未形成稳定传播的可见火焰，随后火焰开始稳定传播并同样呈现空间离散的束状结构；但随着火焰的进一步传播，500 g/m^3 浓度下的石松子粉尘爆炸火焰明显呈现更强的连续性，亮度更高，空间结构也更饱满。这是因为随着粉尘浓度的提升，容器内粉尘颗粒间距减小，使得火焰传播更连续，燃烧更剧烈。

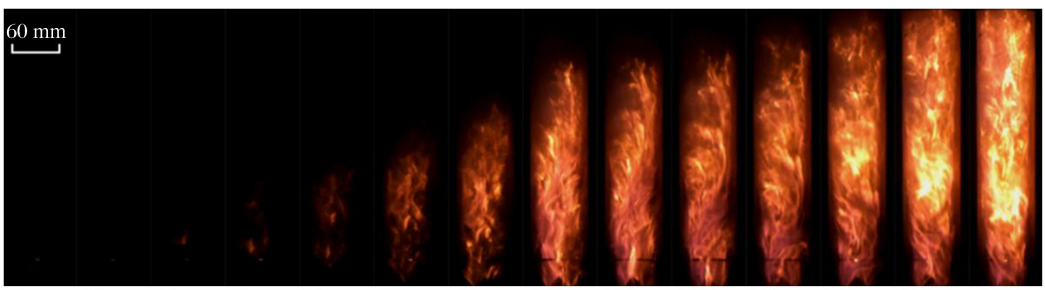


图 5　浓度为 500 g/m^3 的石松子粉尘爆炸火焰结构随时间的变化规律

Fig. 5　Flame structure of lycopodium varying with time at dust concentration of 500 g/m^3

随着粉尘浓度进一步提升至 750 g/m^3，爆炸火焰连续性进一步增强，火焰空间结构更饱满，锋面相对光滑，呈拇指状，火焰亮度也进一步增强，如图 6 所示。这是因为随着粉尘浓度的进一步提高，爆炸容器内粉尘分布更浓密，颗粒间的距离进一步缩小，火焰传播更快、更稳定，燃烧更剧烈。但与粉尘浓度为 500 和 250 g/m^3 时的相比，750 g/m^3 浓度下火焰结构的清晰度有所降低，这因为较高浓度的粉尘云降低了容器内部的透光性。

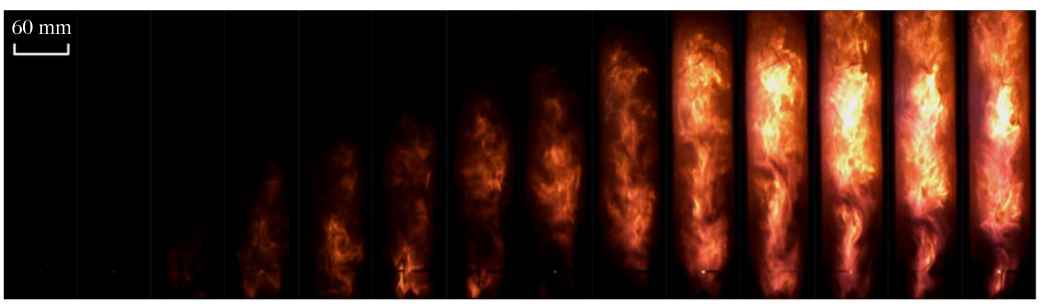


图 6　750 g/m^3 浓度下石松子粉尘爆炸火焰结构随时间的变化规律

Fig. 6　Flame structure of lycopodium varying with time at dust concentration of 750 g/m^3

当粉尘浓度提升至 1 000 g/m^{3}时，可以观察到该浓度条件下的石松子粉尘爆炸可见火焰结构的连续性和亮度均有所降低，如图 7 所示。这是因为 1 000 g/m^{3}超过了该粉尘爆炸的最佳浓度，该浓度下的爆炸过程属于不完全燃烧过程，燃烧强度减弱，而且不完全燃烧诱导生成的大量炭黑也将吸收火焰光。此外，高浓度的粉尘云也将在一定程度上降低容器的透光性。燃烧强度的减弱、炭黑对光线的吸收以及容器透光性的降低都将导致火焰亮度的降低。而较低亮度的火焰以及管道内粉尘云的局部分布不均又将造成管道内火焰局部变暗、变黑，形成非连续火焰结构。

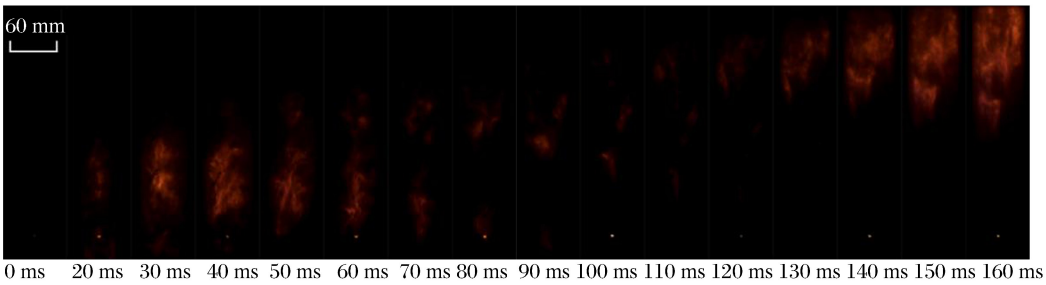


图 7　1 000 g/m^{3}浓度下石松子粉尘爆炸火焰结构随时间变化规律

Fig. 7　Flame structure of lycopodium varying with time at dust concentration of 1 000 g/m^3

2.2　火焰锋面变化规律

结合图 7 获得不同浓度石松子粉尘爆炸火焰锋面位置随时间的变化规律，如图 8 所示。由于点火初期管道内火焰传播不稳定，火焰锋面起始位置均从点火电极上方（容器底部上方 50 mm）形成稳定火焰后开始记录（t=0 为点火开始时间）。由图 8 可知，不同浓度条件下石松子粉尘爆炸火焰锋面位置均随时间的发展而逐渐上升。当粉尘浓度分别为 250、500、750、1 000 g/m^{3}时，火焰锋面从点火电极上方到达管道顶端所用时间分别为 129、123、72、114 ms，即火焰锋面达到管道顶端所用的时间随粉尘浓度的增大呈现先减小后增大的趋势，并在 750 g/m^{3}时用时最短。

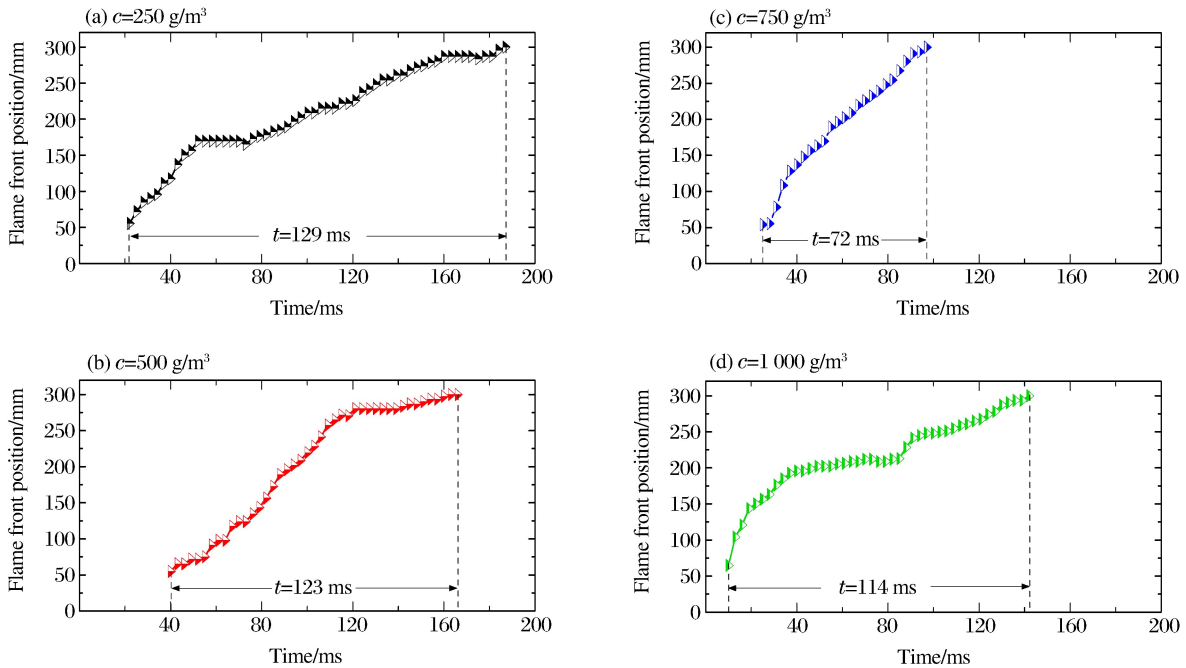


图 8　不同浓度的石松子粉尘爆炸火焰锋面位置随时间的变化

Fig. 8　Flame front position of lycopodium dust explosion along with time at different dust concentrations

结合管道长度 L 和火焰锋面达到管道顶端所用时间 t，计算得到 250、500、750、1 000 g/m^3 等 4 种不同浓度下石松子粉尘爆炸火焰在管道内的平均传播速度 v_a 分别为 1.94、2.04、3.47、2.19 m/s，即石松子粉尘爆炸火焰平均传播速度随粉尘浓度提升先增大后减小，并在 750 g/m^3 条件下达到最大值。这是因为该粉尘爆炸的最佳浓度为 750 g/m^3，低于该浓度时，粉尘爆炸属于贫燃料燃烧过程，爆炸火焰传播速度主要受粉尘数量控制，粉尘浓度越高，火焰锋面与未燃粉尘接触的数量越多，燃烧速率越大，火焰传播速度越快；当粉尘浓度高于 750 g/m^3 时，粉尘爆炸过程由贫燃料燃烧向富燃料燃烧转变，火焰传播速度开始受容器内氧气含量控制，粉尘数量越多，燃烧越不完全，放热量越小，且多余的粉尘颗粒还将吸收燃烧放出的热量，使得火焰传播速度越小。

2.3　火焰传播速度变化规律

基于不同时刻下火焰锋面位置计算得到不同浓度石松子粉尘在压力积聚工况下的爆炸火焰传播速度随时间的变化曲线，如图 9 所示。

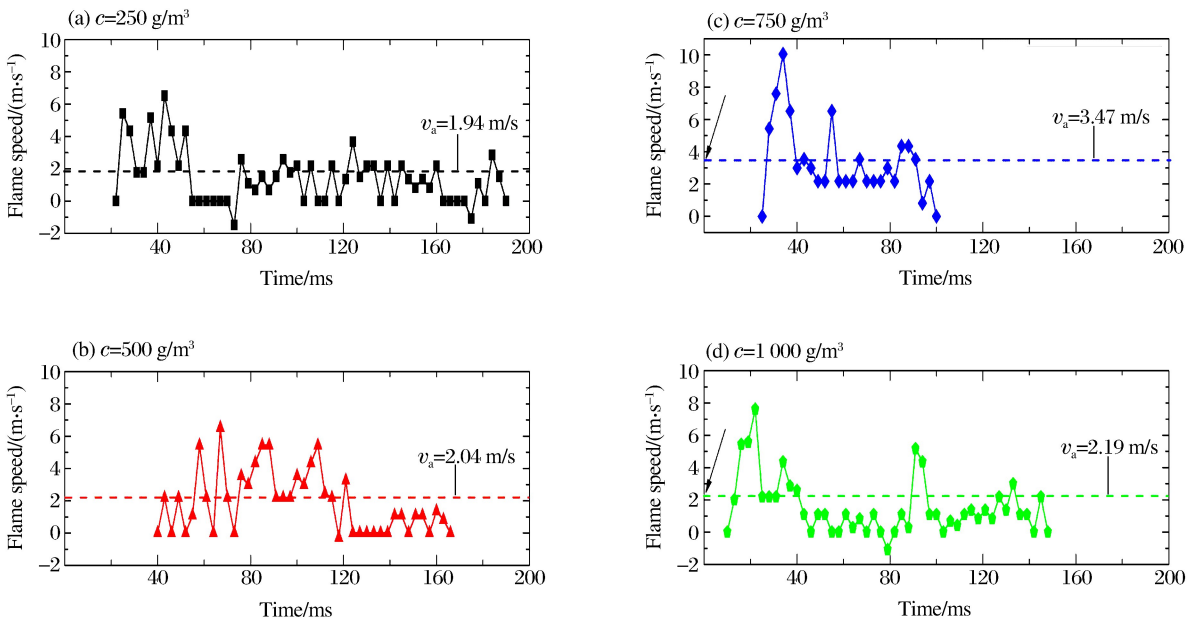


图 9　不同浓度的石松子粉尘爆炸火焰传播速度随时间变化

Fig. 9　Flame speed of lycopodium dust explosion along with time at different dust concentrations

由图 9 可知，密闭空间内石松子粉尘爆炸火焰传播速度不稳定，具有明显的脉动特征，且脉动频率随粉尘浓度的增大而减小。火焰传播速度的脉动特征可以归因于两个方面：一是容器内粉尘分布不均；二是压力波反弹扰动。强湍流条件下的粉尘云具有明显的空间离散特征，即粉尘云在空间中的浓度分布局部不均。当火焰锋面传播至高浓度粉尘区间时，火焰锋面与更多的未燃粉尘接触，燃烧反应加剧，火焰传播速度增快；当火焰锋面位置传播至低浓度区间时，燃烧反应减弱，火焰传播速度减慢。在密闭空间内，爆炸产生的压力波不能及时扩散。压力波会在容器顶端及周围壁面的作用下反弹并与后续压力波交错耦合，进而导致容器内介质在流动过程中产生波动。火焰锋面在介质波动作用下形成不稳定传播，进而导致火焰传播速度的脉动。随着粉尘浓度增加，粉尘颗粒之间的间距减小，由湍流引起的粉尘云浓度分布不均效应减弱，粉尘在腔体内的分布更均匀，火焰传播更稳定，速度脉动频率减小。

由图 9 还可以发现，不同浓度条件下的石松子粉尘爆炸前期火焰传播速度较高，后期火焰传播速度较低。这是因为在火焰传播前期，管道内压力较低，火焰基本处于自由传播状态。在膨胀波的作用下，火焰前端颗粒整体向上流动，再加上重力影响下的管道底端粉尘浓度较高，湍流强度较高，燃烧速度较大，导致火焰传播初期速度较高。随着火焰的进一步传播，粉尘浓度减小，湍流强度降低，管道内压力升高，火焰燃烧速度和火焰前端颗粒流动速度均降低，导致火焰传播速度减小。

3 结　论

搭建了一套兼具承压和可视性能的粉尘爆炸实验平台，在压力积聚工况下研究不同浓度的石松子粉尘爆炸火焰传播特性。基于实验结果得到如下结论：

(1)低浓度石松子粉尘在压力积聚工况下的爆炸火焰呈现空间离散的束状结构，火焰锋面呈锯齿状。随着粉尘浓度的提升，火焰结构的连续性增强，亮度增加。当石松子粉尘浓度为 750 g/m^{3}时，火焰锋面较平滑，结构饱满，连续性和亮度均达到最优。随着粉尘浓度的进一步提高，容器内不完全燃烧加剧，火焰结构的连续性和亮度均减小。

(2)压力积聚工况下石松子粉尘爆炸火焰的平均传播速度随粉尘浓度的增大先增大后减小，并在 750 g/m^{3}达到最大值。

(3)压力积聚工况下石松子粉尘爆炸火焰的传播速度呈现明显的脉动特征，且脉动频率随粉尘浓度的增大而减小。爆炸火焰的前期传播速度均处于较高值，随着火焰进一步传播，火焰传播速度在粉尘浓度梯度等因素作用下降低。

参考文献：

[1] ABBASI T, ABBASI S A. Dust explosions: cases, causes, consequences, and control[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007,140(1):7-44. DOI:10.1016/j.jhazmat.2006.11.007.

[2] CHEN J L, DOBASHI R, HIRANO T. Mechanisms of flame propagation through combustible particle clouds[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1996,9(3):225-229. DOI:10.1016/0950-4230(96)00001-0.

[3] JU W J, DOBASHI R, HIRANO T. Reaction zone structures and propagation mechanisms of flames in stearic acid particle clouds[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1998,11(6):423-430. DOI:info:doi/10.1016/S0950-4230(98)00027-8.

[4] HAN O S, YASHIMA M, MATSUDA T, et al. Behavior of flames propagating through lycopodium dust clouds in a vertical duct[J]. Journal of Loss Prevention in the Process industries, 2000,13:449-457.

[5] HAN O S, YASHIMA M, MATSUDA T, et al. A study of flame propagation mechanisms in lycopodium dust clouds based on dust particles' behavior[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2001,14(3):153-160. DOI:10.1016/S0950-4230(00)00049-8.

[6] PROUST C. Flame propagation and combustion in some dust-air mixtures[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2006,19(1):89-100. DOI: 10.1016/j.jlp.2005.06.026.

[7] SUN J H, DOBASHI R, HIRANO T. Concentration profile of particles across a flame propagating through iron particle cloud[J]. Combustion and Flame, 2003,134(4):381-387.

[8] CAO W G, GAO W, PENG Y H, et al. Experimental study on the combustion sensitivity parameters and pre-combusted changes in functional groups of lignite coal dust[J]. Powder Technology, 2015,283:512-518. DOI:10.1016/j.powtec.2015.06.025 .

[9] GAO W, TOSHIO M, YU J L, et al. Flame propagation mechanisms in dust explosions[J]. Jouranal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015,36:186-194. DOI:10.1016/j.jlp.2014.12.021.

[10] GAO W, TOSHIO M, RONG J H, et al. Motion behaviors of the unburned particles ahead of flame front in hexadecanol dust explosion[J]. Powder Technology, 2015,271:125-133. DOI:10.1016/j.powtec.2014.11.003.

[11] AMYOTTE P R, PEGG M J. Lycopodium dust explosions in a Hartmann bomb: effects of turbulence[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1989,2(2):87-94. DOI:10.1016/0950-4230(89)80004-X.

[12] HAN O S, YASHIMA M, MATSUDA T, et al. Behavior of flames propagating through lycopodium dust clouds in a vertical duct[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2000,13(6):449-457. DOI:10.1016/S0950-4230(99)00072-8.

[13] HAN O S, YASHIMA M, MATSUDA T, et al. A study of flame propagation mechanisms in lycopodium dust clouds based on dust particles' behavior[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2001,14(3):153-160. DOI:10.1016/S0950-4230(00)00049-8.

[14] KHALIL Y F. Experimental determination of dust cloud deflagration parameters of selected hydrogen storage materials: complex metal hydrides, chemical hydrides, and adsorbents[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013,26(1):96-103. DOI:10.1016/j.jlp.2012.09.010.

[15] SILVESTRINI M, GENOVA B, TRUJILLO F J L. Correlations for flame speed and explosion overpressure of dust clouds inside industrial enclosures[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2008,21(4):374-392. DOI:10.1016/j.jlp.2008.01.004.

[16] 高伟，阿部俊太郎，荣建忠，等.气流特征对水平长管内石松子粉尘爆炸火焰结构的影响[J].爆炸与冲击，2015，35(3):372-379. DOI:10.11883/1001-1455-(2015)03-0372-08.
GAO Wei, ABE S, RONG Jianzhong, et al. Effect of airflow characteristics on flame structure for following lycopodium dust-air mixtures in a long horizontal tube[J]. Explosion and Shock Waves, 2015,35(3):372-379. DOI:10.11883/1001-1455-(2015)03-0372-08.

[17] JI W T, YAN X Q, SUN H L, et al. Comparative analysis of the explosibility of several different hybrid mixtures [J]. Powder Technology, 2017,325:42-48. DOI:10.1016/j.powtec.2017.11.022.

[18] 喻健良，纪文涛，孙会利，等.甲烷/石松子粉尘混合体系爆炸下限的变化规律[J].爆炸与冲击，2017，37(6):924-930. DOI:10.11883/1001-1455(2017)06-0924-07.
YU Jianliang, JI Wentao, SUN Huili, et al. Experimental investigation of the lower explosion limit of hybrid mixtures of methane and lycopodium dust[J]. Explosion and Shock Waves, 2017,37(6):924-930. DOI:10.11883/1001-1455(2017)06-0924-07.

Flame propagation characteristics of lycopodium dust explosion under explosion pressure accumulation conditions

YU Jianliang, JI Wentao, YAN Xingqing, YU Xiaozhe, HOU Yujie

(*School of Chemical Machinery and Safety Engineering, Dalian University of Technology, Dalian* 116024, *Liaoning, China*)

Abstract: An experimental setup which can withstand high pressure with good visibility was built. Flame propagation characteristics of lycopodium dust explosion were investigated under explosion pressure accumulation conditions. The experimental results showed that a space-dispersed fascicle-like flame structure was formed after the explosion of lycopodium dust under explosion pressure accumulation conditions. The flame front with a serrate structure was observed. However, on further increasing the dust concentration the flame continuity as well as the luminance increased and reached the top at the concentration of 750 g/m^3. The velocity fluctuation during the flame propagation process of lycopodium dust explosion at different concentrations was found. But the fluctuation frequency decreased with the increase of dust concentration. The average flame propagation velocity increased and then decreased with the increase of dust concentration and reached the top at the dust concentration of 750 g/m^3. The value of flame velocity was higher in the early stage, but lower in the later stage.

Keywords: pressure accumulation; dust explosion; flame structure; flame propagation velocity

(责任编辑　张凌云)