DOI: 10.11883/bzycj-2016-0235
文章编号:1001-1455(2018)02-0324-07

超细二氧化硅粉体对淀粉火焰抑制的实验研究*

黄楚原[1,2],陈先锋[1],张洪铭[1],唐文文[1],陈 曦[1],张文博[1],刘晅亚[2]
(1.武汉理工大学资源与环境工程学院,湖北 武汉 430070;
2.建筑消防工程技术公安部重点实验室,天津 300381)

摘要:为了探究不同粒径二氧化硅粉体抑制效果上的差异,采用小尺寸竖直燃烧管道系统,研究添加 10 μm 和30 nm 二氧化硅粉体时,不同粒径小麦淀粉燃烧的火焰传播、温度、速度等参数特性的变化。实验结果表明:超细二氧化硅粉体能减弱小麦淀粉燃烧反应强度;30 nm 二氧化硅粉体抑制效果优于 10 μm 二氧化硅,当小麦淀粉粒径小于 25 μm 时,质量浓度为0.43 kg/m^3、粒径 30 nm 的超细二氧化硅粉体可使小麦淀粉火焰亮度明显下降,最高温度下降 38.07%,最大速度和平均速度分别下降 42.25%、65.59%;超细二氧化硅粉体主要起物理抑制作用,抑制效果与小麦粒径成反比关系,小麦粒径越小,二氧化硅抑制效果越好。

关键词:超细粉体;粉尘燃烧;火焰传播;惰化抑制
中图分类号:O389 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**:A

粮食粉尘爆燃是高发性事故,具有较强破坏性[1]。对粮食粉尘的燃爆机理和抑燃抑爆已进行了一系列的基础研究。徐文庆等[2]利用 20 L 爆炸球测试了甘薯粉的爆炸下限,结果表明甘薯粉粒径较小时爆炸较猛烈。李刚等[3]对 8 种取自工业现场的粮食伴生粉尘进行了粉尘云和粉尘层最低着火温度测试实验,结果表明粉尘粒径越大、水分含量越高,发生着火爆炸的危险性越小。高伟等[4]采用高速摄影及带通滤波片相结合的方法,研究火焰在 2 种不同粒径的硬脂酸粉尘云开放空间中的传播特性,结果表明火焰具有连续和离散 2 种明显不同的火焰前锋结构特征。Proust 等[5]利用 3 m 长的垂直管道模拟淀粉与空气的预混燃烧过程,结果表明预混燃烧主要是通过热传导分解淀粉形成气体进行的。范宝春等[6]利用水平长管道对碳酸钙粉体的抑制作用进行了研究,结果表明仅当碳酸钙粉体的颗粒浓度大于某一值时,才可能有效抑制爆炸。宫婕等[7]在柱形爆炸容器内对爆炸产生的冲击波荷载分布进行了研究,总结了爆炸冲击波的传播规律。Gieras[8]利用 1.25 m^3 爆炸室模拟了玉米淀粉与空气混合的爆炸过程,结果表明水雾技术的抑爆比常用的干粉灭火更有效。郭晶等[9]对比了碳酸钙和氢氧化铝对煤粉抑爆效果的差异,结果表明氢氧化铝的物理-化学抑爆效果更佳。以上研究一定程度上对粮食粉尘工业安全起到了指导作用。但以超细粉体为抑制剂,对粮食粉尘进行抑燃抑爆的研究还相对较少。

小麦作为全球主要粮食作物之一,其淀粉类制品用途广、用量大,在其生产、加工、储运过程等环节中均存在燃爆危险性。本文中,通过竖直燃烧管道系统向小麦淀粉中添加不同粒径超细二氧化硅粉体,研究不同工况下小麦淀粉粉尘云火焰燃烧特性,并初步对比不同粒径超细二氧化硅粉体对小麦淀粉粉尘火焰传播的抑制程度,分析抑制机理。

1 实验研究

1.1 实验材料及预处理

实验选用的二氧化硅粉体粒径分别为 10 μm(微米级二氧化硅)、30 nm(纳米级二氧化硅)。选取食

* **收稿日期**:2016-08-16;**修回日期**:2017-02-14
基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0802801);国家自然科学基金项目(51374164);
建筑消防工程技术公安部重点实验室开放课题(KFKT2014ZD03);
中央高校基本科研业务费专项(2017IVA040)
第一作者:黄楚原(1991—),男,硕士研究生;**通信作者**:陈先锋,cxf618@whut.edu.cn。

用级优质小麦淀粉为样品，实验前分别选取 200、300、400、500 目的标准分析筛对小麦淀粉进行筛分，如表 1 所示。预先将二氧化硅粉体和筛分过的小麦淀粉放置于常压、50 ℃的干燥箱内干燥 24 h 以上。

表 1 小麦样品筛出粒径

Table 1 Particle size of the wheat sample screened

序号	筛分规格/目	粒径范围/μm	序号	筛分规格/目	粒径范围/μm
1	200～300	48～75	3	400～500	25～38
2	300～400	38～48	4	500 以上	0～25

1.2 实验装置

实验装置(见图 1)从功能上可分为粉尘燃烧管道系统、高压点火系统、配气系统、同步控制系统、高速摄影系统和数据采集系统。竖直燃烧管道系统主体为一底部封闭、上部带泄压口的长方体管道，管道横截面为 80 mm × 80 mm 的正方形，高度为 1 000 mm，由两段长 500 mm 的短管道连接而成，左右两侧为 20 mm 厚的不锈钢板，前后两侧为观察窗，选用透光性好、耐高温、可拆卸清洗的石英玻璃。喷粉装置位于管道底部，由反射器和盛粉槽组成。反射器为圆锥状，气体通过 8 个均匀分布在其底部、直径为 2 mm 的圆孔将盛粉槽内的试样扬起，在管道内形成粉尘云。盛粉槽为半球形，高度为 100 mm，最低点距反射器底部 18 mm。点火电极为直径0.4 mm 的2 支钨丝，尖端间隔 5 mm，对称安装在距管道底端 80 mm 处，用高压放电产生的能量点燃粉尘云。热电偶选用直径 100 μm 的自制铂/铂铑合金 R 型热电偶，安装在距管道底端 650 mm 处，用于采集记录粉尘云燃烧过程中的火焰温度变化情况。

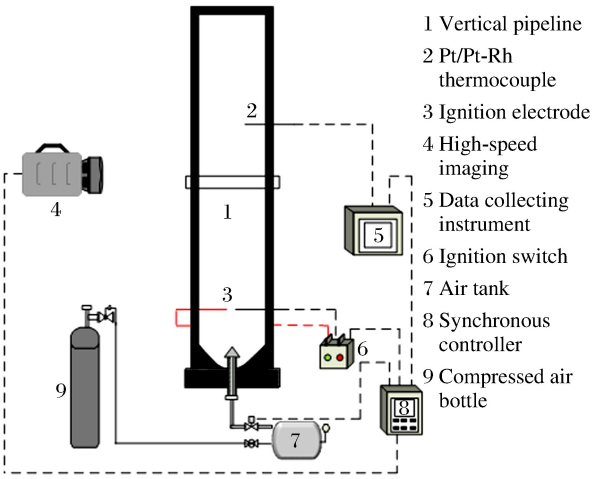


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device

1.3 实验过程

将实验各系统装置按图 1 所示连接，保证各系统处在正常工作状态。将预先称量好的小麦淀粉和二氧化硅粉体混合均匀后加入盛粉槽，对喷粉系统配气后启动电源，通过点火电极在尖端产生电火花点燃已吹起的粉尘云，利用高速摄影和热电偶分别对火焰传播过程中的图像、温度进行采集。数据采集仪、高速摄影仪、高压点火器的触发时间均由可编程同步控制器按要求设定。

实验中先持续 0.1 s 喷出气压为 0.13 MPa 的压缩空气，然后延迟 0.1 s，点火电极处产生 14 kV 的高压，高速摄影记录频率设置为 1 000 s^{-1}。表 2 中给出了各工况的实验条件。

表 2 实验工况

Table 2 Experimental condition

工况	小麦淀粉粒径/μm	二氧化硅粒径/μm	工况	小麦淀粉粒径/μm	二氧化硅粒径/μm
1	48～75		7	25～38	
2	48～75	10	8	25～38	10
3	48～75	0.03	9	25～38	0.03
4	38～48		10	0～25	
5	38～48	10	11	0～25	10
6	38～48	0.03	12	0～25	0.03

2 结果分析

2.1 二氧化硅对小麦淀粉粉尘火焰传播过程的影响

图 2 为通过高速摄影仪记录的浓度为 0.43 kg/m^3 的小麦淀粉粉尘云的火焰传播过程，图像中间部分的小块矩形黑影为管道连接处遮挡所致。从图 2 可以看出，粉尘云火焰传播趋势整体上较一致：电火花点火后，在点火电极周围形成球团状的黄色火焰；随后，火焰不断扩大并向四周传播，在接触到管道壁面，由于受到壁面冷却和摩擦作用，火焰有所变形；之后火焰开始加速向上传播。对比图 2(b)与图 2(a)后发现，加入微米级二氧化硅后，火焰亮度有所下降、粉尘云的点燃开始时间出现滞后，总燃烧时间变长，这主要是由于微米级二氧化硅起到了物理抑制作用，降低了燃烧反应的强度和速度。对比图 2(c)与图 2(a)、(b)可发现，加入纳米级二氧化硅后火焰亮度明显下降，粉尘云点燃的开始时间大幅滞后，总燃烧时间显著变长粉尘云管道下方火焰分布不均匀。这说明纳米级二氧化硅较微米级二氧化硅有更强的物理抑制作用，还因纳米二氧化硅自身的高孔隙率、小尺寸效应而拥有更好的消光作用[10]，同时由于纳米粉体容易相互吸附团聚，使粒子聚集成大颗粒[11-12]，相对不易被扬起，从而使管道下方的纳米级二氧化硅含量较高对粉尘云火焰抑制效应更强。

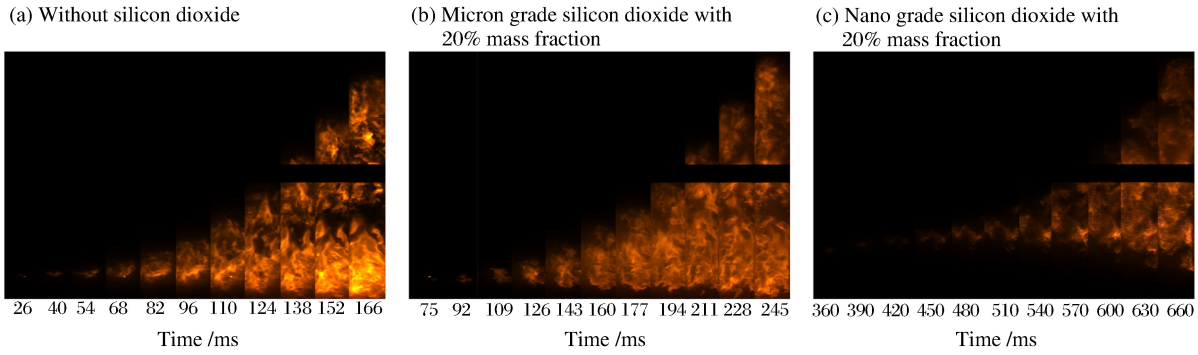


图 2 粉尘云火焰高速摄影图像

Fig. 2 High speed photographic images of dust cloud flame

2.2 二氧化硅对小麦粉尘火焰温度的影响

实验中，采用的自制铂/铂铑合金 R 型热电偶，温度采集范围为 0～1 300 ℃。由于热电偶在实际工况中参比端温度不恒定，影响温度采集的准确性，为提高实验可靠度，需要通过温度补偿公式[13]对结果进行校正：

$$T = T_{\mathrm{m}} + \tau \mathrm{d}T_{\mathrm{m}}/\mathrm{d}t \tag{1}$$

式中：T 为校正温度，T_{m} 为热电偶测试温度，τ 为关于热电偶的时间常数，可以通过下式计算得出：

$$\tau = \rho c_p d^2/(6Nu\lambda_{\mathrm{g}}) \tag{2}$$

式中：ρ、c_p 分别为铂铑合金的密度和定容比热，d 是热电偶直径，λ_{g} 为所处环境的空气导热系数，Nu 为 Nusselt 数。Nu 可由下式计算得出：

$$Nu = 2.0 + 0.60Re^{1/2} + Pr^{1/3} \tag{3}$$

式中：Re 是 Reynolds 数，Pr 是 Prandtl 数，在一般情况下，可以用 $Nu \approx 2.0$ 替代计算值。

如图 3 所示为相同浓度、不同粒径的小麦淀粉无抑制剂和分别加入微米级二氧化硅和纳米级二氧化硅抑制剂后粉尘云火焰温度的变化情况。由图 3 可以看出，3 种情况下，小麦淀粉粉尘云火焰最高温度随粒径的增大先增大后减小，都是在 38～48 μm 的粒径时达到最大值，分别为 957、632、594 ℃。小麦淀粉粒径小于 25 μm 时，加入微米级和纳米级二氧化硅的温度降幅分别达到 34.34%和 38.07%。

在加入二氧化硅抑制剂后，粉尘火焰温度呈现明显下降趋势，主要是因为：(1)加入二氧化硅粉体后对小麦淀粉粉尘云浓度起到了冲淡和稀释的作用，同时也降低了单位体积内氧气含量；(2)二氧化硅熔

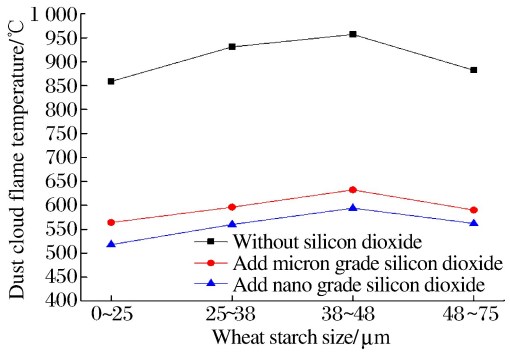


图 3　小麦淀粉粉尘云火焰温度

Fig. 3　Dust cloud flame temperature of wheat starch

点为(1 650±50) ℃，可以隔离小麦淀粉微粒间的热传导，降低热辐射率；(3)二氧化硅通过吸收部分燃烧反应放热，起到制冷效果，降低反应速率和强度；(4)小麦淀粉燃爆过程中产生的部分自由基与二氧化硅颗粒表面碰撞而消耗，降低了参与链式反应的自由基，中断部分链式反应。

图 4 为加入抑制剂后小麦淀粉粉尘云温度变化。从图 4(a)可以看出，加入微米级二氧化硅温度下降走势与不加抑制剂时基本一致，这是因为微米级二氧化硅粉体起物理抑制作用，本身并不参与燃爆反应。而小麦淀粉粉尘云燃烧温度下降百分比随小麦淀粉粒径的增大而减小，一方面是由于本次实验所使用的微米级二氧化硅粒径为 10 μm，当小麦淀粉粒径越小时，越易被抑制剂包围，抑制剂对其包围作用就越强，隔绝了颗粒与氧气的接触，增加燃烧发生和火焰传播的难度。另一方面随着淀粉自身粒径的增大，其有效传热系数会降低[14]，不利于将热量传导至抑制剂。从图 4(a)可以看出：加入纳米级二氧化硅后，淀粉粉尘云火焰温度的下降绝对值和幅度较微米二氧化硅时又有了进一步的降低。这是因为纳米二氧化硅除具备大粒径二氧化硅的抑燃性外，还有以下抑制特性：(1)纳米二氧化硅在小尺寸作用下比表面积大、吸附性强、孔隙率高，吸热能力较一般材料有所增强；(2)纳米二氧化硅具有表面效应，使得其微观上粒子表面原子数增多、表面能增加，宏观上体现在纳米材料的熔点和烧结温度都大大降低[15]：在 25～38 μm、38～48 μm 小麦淀粉燃烧时，纳米级二氧化硅的降温百分比斜率远小于微米级二氧化硅，有可能因为这两个粒径的小麦淀粉粉尘云燃烧温度较高，使部分纳米级二氧化硅开始受热分解；(3)纳米二氧化硅的界面效应使得其晶界有“类气体”的结构[16]，具有很高的活性和可移动性，直接表现为纳米二氧化硅粉体分散性、悬浮性较好，在管道内容易充分、均匀扩散，抑制效果更好。

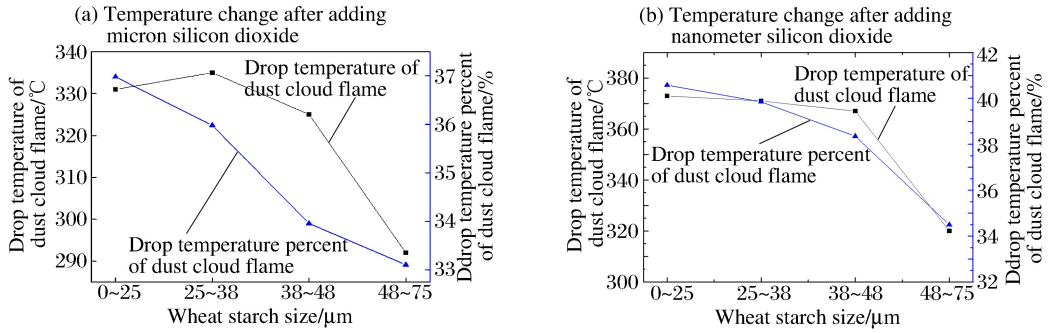


图 4　加入抑制剂后小麦淀粉粉尘云温度变化

Fig. 4　Temperature change of wheat starch dust cloud after adding inhibitors

2.3　二氧化硅对小麦粉尘火焰速度的影响

通过在高速摄影所拍摄的火焰场景里引入标尺，并根据不同时刻火焰锋面在标尺上的位置计算火蔓延速率[17]。利用绘图软件对实验数据处理，图 5 为小麦淀粉粒径在 25～38 μm 范围时的火焰前锋速度变化曲线。从图 5 中可以看出，粉尘云火焰传播速度是不恒定的，整体上呈现加速趋势[18-19]。这是因为粉尘云燃烧与预混气体燃烧不同，粉尘云可以依靠惯性力产生具有一定浓度梯度的可燃粉尘，使其反应区逐步增大从而加速粉尘颗粒之间的传热；另一方面，燃烧区的热辐射可以将热量显著向未燃烧区的粒子转移，随着发光火焰接近气相燃烧区，火焰传播速度进一步加快[20]。

图 6 为利用图像法计算得到的火焰在管道中传播的最大速度和平均速度，从图 6 可以看出：(1)火

焰在管道中传播的最大速度和平均速度都随着小麦淀粉的粒径增大而下降，且差距较大。在无抑制剂时，粒径小于 25 μm 的小麦淀粉粉尘云燃爆的最大速度和平均速度分别为 16.17、9.05 m/s，粒径为 48～75 μm 的小麦淀粉粉尘云则为 11.55、5.67 m/s，分别下降了 28.57%、37.32%。这是因为小麦淀粉燃烧属于气相燃烧，主要分为粉尘热解、气化和燃烧阶段。当粉尘粒径较小时，其比表面积大，吸热多、传热快，在相同热量条件下，热解速率快，所以其火焰传播速度也快；(2)在加入二氧化硅抑制剂后，各个粒径的小麦淀粉粉尘云火焰最大速度和平均速度都有所下降，整个下降趋势也与无抑制剂时基本一致；下降幅度上纳米级二氧化硅抑制剂要优于级微米级二氧化硅，小麦淀粉粒径小于 25 μm 时最为明显，加入微米级二氧化硅后火焰最大速度和平均速度分别为 12.012 和 5.078 m/s，较无抑制剂时分别下降了 25.71%、37.22%；加入纳米级二氧化硅后火焰最大速度和平均速度分别为 9.34 和3.11 m/s，较无抑制剂时分别下降了 42.25%、65.59%。最高速度的下降原因与温度下降的原因基本一致，而平均速度的大幅下降是由加入二氧化硅粉体后燃烧持续时间的明显增长所致。

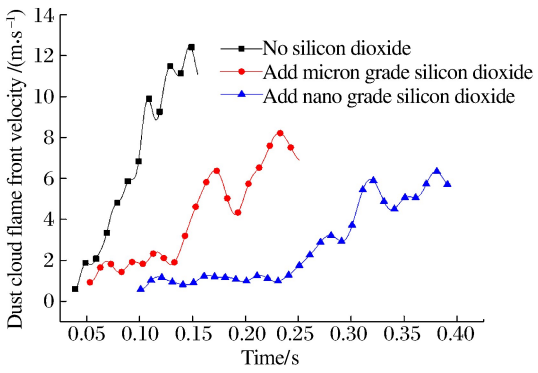


图 5 小麦淀粉粉尘云火焰前锋速度

Fig. 5 Dust cloud flame front velocity of wheat starch

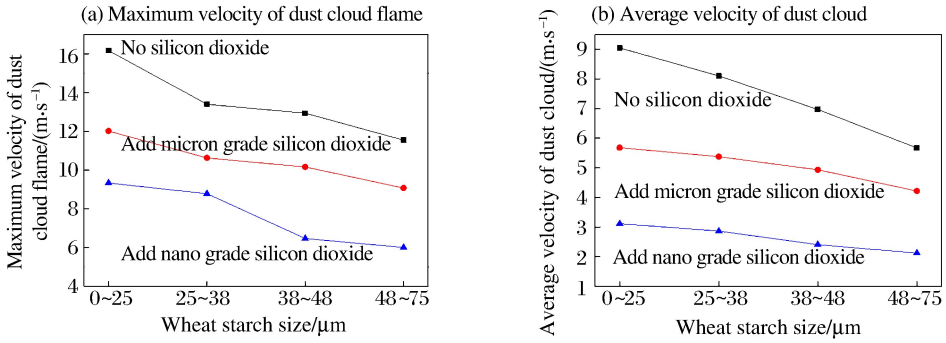


图 6 小麦淀粉粉尘云火焰速度

Fig. 6 Dust cloud flame speed of wheat starch

3 结 论

实验在竖直管道平台上，利用超细二氧化硅粉体对小麦淀粉粉尘云燃爆火焰进行抑制实验研究。通过对实验所得图像、数据的整理和分析，得出以下结论：

(1)超细二氧化硅粉体对小麦淀粉的燃烧有明显的抑制作用：降低小麦淀粉燃烧的反应强度、火焰亮度，迟滞粉尘云燃烧开始时间，增长燃烧反应总时间；

(2)从抑制效果上看，纳米二氧化硅粉体优于微米二氧化硅粉体，在质量浓度同为 0.43 kg/m^3 时，微米级二氧化硅和纳米级二氧化硅分别使粒径小于 25 nm 的小麦淀粉粉尘云燃烧火焰温度下降 34.34%、38.07%，最大速度分别下降 25.71%、42.25%，平均速度分别下降 37.22%、65.59%；

(3)超细二氧化硅对小麦淀粉燃爆的抑制机理主要是物理抑制，加入超细二氧化硅粉体后粉尘云火焰温度、速度与小麦粉尘粒径的关系趋势与无抑制剂时基本一致，但对小粒径的小麦粉尘在温度和速度上的抑制效果更显著，本次实验中当小麦淀粉粒径小于 25 μm 时，加入超细二氧化硅后的小麦淀粉粉尘云的燃烧最高温度、最大速度和平均速度下降幅度较为明显。

参考文献：

[1] YAN X, YU J. Dust explosion incidents in China[J]. Process Safety Progress, 2012,31(2):187-189.

[2] 徐文庆,陈志,黄莹,等.密闭空间中甘薯粉爆炸特性的试验研究[J].安全与环境学报,2011,11(5):158-161.
XU Wenqing, CHEN Zhi, HUANG Ying, et al. On the explosive characteristic of the sweet potato starch in a confined vessel[J]. Journal of Safety and Environment, 2011,11(5):158-161.

[3] 李刚,刘晓燕,钟圣俊,等.粮食伴生粉尘最低着火温度的实验研究[J].东北大学学报(自然科学版),2005,26(2):145-147.
LI Gang, LIU Xiaoyan, ZHONG Shengjun, et al. Experimental investigation on minimum ignition temperature (MIT) of dust concomitant with grain[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2005,26(2):145-147.

[4] 高伟,圆井道也,荣建忠,等.粒径分布对有机粉尘爆炸中火焰结构的影响[J].燃烧科学与技术,2013,19(2):157-162.
GAO Wei, MARUI Michiya, RONG Jianzhong, et al. Effects of particle size distribution on flame structure during organic dust explosion[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2013,19(2):157-162.

[5] PROUST C, VEYSSIERE B. Fundamental properties of flames propagating in starch dust-air mixtures[J]. Combustion Science & Technology, 2007,62(4/5/6):149-172.

[6] 王健,李新光, RADANDT S, 等.管道相连泄爆容器中粉尘爆炸的实验研究[J].实验流体力学,2010,24(4):39-43.
WANG Jian, LI Xinguang, RADANDT S, et al. Experimental research on dusts explosion in interconnected vented vessels[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2010,24(4):39-43.

[7] 宫婕,汪泉,李志敏,等.柱形爆炸容器内爆炸冲击波的传播规律研究[J].爆破,2017,34(4):17-21.
GONG Jie, WANG Quan, LI Zhimin, et al. Research on propagation law of explosive shock wave in cylindrical explosion containment vessel[J]. Blasting, 2017,34(4):17-21.

[8] GIERAS M. Studies on process of dust explosion suppression by water spray[J]. Archivum Combustionis, 2011, 31.

[9] 郭晶,王庆.密闭空间煤粉爆炸特性的实验研究[J].爆破,2017,34(3):31-36.
GUO Jing, WANG Qing. Experimental studies on explosion characteristics of coal dust in confined space[J]. Blasting, 2017,34(3):31-36.

[10] 徐峰.二氧化硅消光剂及应用[J].现代涂料与涂装,2001,1(2):39-40.
XU Feng. Silica matting agent and its application[J]. Modern Paint & Finishing, 2001,1(2):39-40.

[11] 王相田,胡黎明,顾达.超细颗粒分散过程分析[J].化学通报,1995(5):13-17.
WANG Xiangtian, HU Liming, GU Da. Analysis of dispersion process of ultrafine particles[J]. Chemistry, 1995 (5):13-17.

[12] 张世伟,杨乃恒.纳米粒子在气体流动中的团聚过程研究[J].真空科学与技术学报,2001,21(2):87-90.
ZHANG Shiwei, YANG Naiheng. Nanometer particles agglomeration in gas flows[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2001,21(2):87-90.

[13] BALLANTYNE A, MOSS J B. Fine wire thermocouple measurements of fluctuating temperature[J]. Combustion Science & Technology, 1976,17(1/2):63-72.

[14] 武锦涛,陈纪忠,阳永荣.移动床中颗粒接触传热的数学模型[J].化工学报,2006,57(4):719-725.
WU Jintao, CHEN Jizhong, YANG Yongrong. Model of contact heat transfer in granular moving bed[J]. CIESC Journal, 2006,57(4):719-725.

[15] 卓磊,陈文革,张洋,等.成型方法对纳米二氧化硅陶瓷烧结行为及微观结构的影响[J].人工晶体学报,2014,43(9):2313-2318.
ZHUO Lei, CHEN Wenge, ZHANG Yang, et al. Influence of molding methods on the sintering behavior and microstructure of silica nanoceramics[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2014,43(9):2313-2318.

[16] 马登军.纳米材料的表面和界面效应[J].河北建筑工程学院学报,1996(4):37-42.

MA Dengjun. The effect of surface and interface of nanometer materials[J]. Journal of Hebei Institute of Architecture and Civil Engineering, 1996(4):37-42.

[17] 翟春婕,曹兆楼,郑怀兵. 基于图像的火焰锋面法向速度场测量研究[J]. 火灾科学,2016,25(1):28-33.
ZHAI Chunjie, CAO Zhaolou, ZHENG Huaibing. Measurement of normal velocity field at the fire front based on imaging analysis[J]. Fire Safety Science, 2016,25(1):28-33.

[18] PROUST C, VEYSSIERE B. Fundamental properties of flame propagating in starchdust-air mixtures[J]. Combustion Science & Technology, 2007,62(4/5/6):149-172.

[19] GOROSHIN S, BIDABADI M, LEE J H S. Quenching distance of laminar flame inaluminum dust clouds[J]. Combustion & Flame, 1996,105(1/2):147-160.

[20] ANEZAKI T, DOBASHI R. Effects of particle materials on flame propagation duringdust explosions [C]// Proceedings of the 5th International Seminar on Fire and Explosion Hazards. Edinburgh, UK, 2007.

Experimental investigation on suppression of starch flame by ultrafine silicon dioxide powders

HUANG Chuyuan[1,2], CHEN Xianfeng[1], ZHANG Hongming[1],
TANG Wenwen[1], CHEN Xi[1], ZHANG Wenbo[1], LIU Xuanya[2]

(1. *School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan* 430070, *Hubei, China*;
2. *Key Laboratory of Building Fire Protection Engineering and Technology of MPS, Tianjin* 300381, *China*)

Abstract: It is well known that the ultrafine silicon dioxide powder has a certain suppressing effect on the wheat starch flame. In this work, we explore the difference in this effect on the silicon dioxide powder due to different particle sizes, the changes of flame propagation, temperature, velocity and other parameters of the wheat starch combustion by adding 10 μm and 30 nm silicon dioxide powders. The experimental results show that the ultrafine silicon dioxide powder can reduce the wheat starch's burning reaction strength. The 30 nm powder produces a more effective suppression than the 10 μm powder. When the wheat starch powder's particle size is below 25 μm, The ultra fine powders with a mass concentration of 0.43 kg/m^3 and a grain size of 30 nm can significantly decrease the wheat starch's flame brightness, reducing its maximum temperature by 38.07%, its maximum and average velocities by 42.25% and 65.59%, respectively. The ultrafine silicon dioxide exerts mainly an effect of physical suppression, which is inversely proportional to the particle size of wheat starch grains. The smaller the wheat starch grain size, the better the effect of silicon dioxide suppression.

Keywords: ultrafine powder; dust combustion; flame propagation; inertia and suppression

(责任编辑 王小飞)