

DOI: 10.11883/bzycj-2021-0016

纳米疏水性 SiO₂ 协同作用抑制丁烷 爆炸速度与压力的耦合分析*

谢继标, 张嘉琪, 丁 策, 王晓丽

(天津理工大学环境科学与安全工程学院, 天津 300384)

摘要: 为研究纳米疏水性 SiO₂ 粉末作为阻燃剂和流动增强剂作用下丁烷爆炸速度与压力的耦合规律, 在自行设计并搭建的基于 LabVIEW 控制系统的爆炸测试平台上开展了实验, 通过休止角测试、SEM(scanning electron microscope) 和 EDS(energy dispersive spectrometer) 分析了粉末团聚情况, 分析了混合粉末抑制爆炸的机理, 同时, 实验了不同比例和不同浓度下纳米疏水性 SiO₂ 改善 CaCO₃ 粉末流动性并协同其抑制丁烷爆炸的效果, 对爆炸火焰速度和压力的耦合关系进行了分析。结果表明, 添加疏水性 SiO₂ 可以使混合粉末的休止角降低, 流动性增强, 改善粉末的扩散效果和贮存能力, 改变混合粉末的比例和浓度对燃烧反应有着显著的影响, 在一定浓度范围内, 粉末通过较大的比表面积和热解结合燃烧区域的自由基, 使火焰传播速度和爆炸超压显著下降, 但过大的粉末浓度会促进初期的爆炸, 并且两种粉末协同对爆炸的抑制效果优于单一粉末。在混合粉末的抑制作用下, 爆炸压力达到最大值时速度几乎降至最低, 压力波形由持续上升变为单峰曲线。此外, 在 SiO₂ 和 CaCO₃ 两种粉末质量比为 1 : 1 混合、粉末质量浓度为 106 g/m³ 时, 对丁烷体积分数为 4.20% 的丁烷-空气混合气体爆炸的抑制效果最佳, 火焰传播平均速度和最大爆炸超压的衰减率分别为 85.5% 和 59.6%。

关键词: 疏水性; 纳米粉末; 爆炸; 协同抑制; 传播速度; 超压

中图分类号: O389; X932

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Coupling relationship between flame velocity and overpressure of butane explosion inhibited by synergistic effect of nanohydrophobic SiO₂

XIE Jibiao, ZHANG Jiaqi, DING Ce, WANG Xiaoli

(College of Environmental Science and Safety Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: In order to explore the coupling of flame propagation velocity and pressure in butane gas explosion under the action of hydrophobic SiO₂ powder as flame retardant and flow-enhancing additive, experiments were carried out on a self-designed and constructed $\varnothing 100 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$ explosion test platform based on LabVIEW system. The agglomeration of powder and the mechanism of powder explosion suppression were analyzed through energy dispersive spectrometer (EDS) and thermogravimetric (TG). The effects of different proportion and concentration of hydrophobic nano SiO₂ powder on improving the flowability of CaCO₃ powder and synergistically inhibiting butane explosion, and the coupling relationship between flame propagation velocity and pressure change were studied. The results show that the addition of hydrophobic SiO₂ can reduce the angle of repose of the mixed powder and enhance the flowability. The residual amount of the powder decreases after spraying the powder, which proves that the diffusion effect and storability of the powder have been improved. Meanwhile, changing the proportion and concentration of the mixed powder has a significant effect on the combustion reaction. Within a certain concentration range, the powder is combined with the free radicals in the combustion area through larger specific surface area

* 收稿日期: 2021-01-13; 修回日期: 2021-03-22

基金项目: 科技部国家重点研发计划(2018YFE0106400); 国家自然科学基金青年科学基金(41907329)

第一作者: 谢继标(1996—), 男, 硕士研究生, xjb603017@163.com

通信作者: 王晓丽(1972—), 女, 教授, tjutwxi@163.com

and pyrolysis, which significantly reduces the flame propagation velocity and explosion overpressure. However, excessive powder concentration promotes the explosion at the early stage, and the inhibition effect of the two powders on explosion is better than that of the single powder. Under the inhibition of the mixed powder, the flame velocity almost drops to the minimum when the explosion pressure reaches the maximum, and the pressure waveform changes from continuous rise to a single-peak curve. In addition, when the concentration is 106 g/m³ and the two powders are mixed in a mass ratio of 1 : 1, the explosion suppression effect on 4.20% volume fraction butane-air mixture is the best, and the attenuation rates of average flame propagation velocity and maximum explosion overpressure are 85.5% and 59.6%, respectively, which effectively suppress the flame propagation velocity and explosion pressure.

Keywords: hydrophobic; nanometer powder; explosion; synergistic inhibition; propagation velocity; overpressure

主动灭火和防爆系统是避免气体粉尘爆炸从而确保安全工作的最有效方法,如 BVS 和 ASVP-LV 的主动阻燃抑爆系统已经在俄罗斯、南非、中国等的矿山安全中得到广泛应用并取得了积极的效果^[1-4]。在阻燃和抑制爆炸的工作中,水雾、惰性气体、多孔介质和超细粉末都已被广泛使用并且取得了较好的表现,惰性气体和超细水雾可以通过吸热、稀释气体浓度、中断反应链等抑制爆炸,多孔介质可以直接导致火焰的淬熄。而在实际使用的主动防火防爆系统中,主要使用的抑制火焰传播的成分多为干粉类物质^[5-6],如 ABC 粉、CaCO₃、Na₂CO₃、SiO₂ 等惰性颗粒已经被用于抑制瓦斯爆炸,起到了直接降低爆炸压力的作用。研究表明,磷酸二氢铵可以很好地抑制气体爆炸,显著降低火焰传播速度^[7-8]。Chen 等^[9]、Luo 等^[10]的实验证明了 SiO₂ 和 CaCO₃ 的粉末可以极大地抑制甲烷/煤尘/空气混合物爆炸波的超压和传播速度,超细粉末在燃烧反应区附近更容易接触和吸收自由基,起到阻燃的效果。粉末的粒径和浓度对抑爆效果起重要作用,通常情况下,粉末粒径越小,抑爆效果越好。此外,各种协同抑制爆炸的手段也被不断提出,如对不同种类粉末的混合或是配合惰性气体来抑制爆炸,已有实验表明 ABC 粉和 CO₂ 对甲烷爆炸可以起到很好的协同抑制作用^[11]。研究如何高效地抑制爆炸可以减少爆炸事故,具有重要的实际意义。

生活中常见的抑制火焰传播的设备为干粉灭火器,灭火器中粉末的流动性极大地影响了灭火的效果。近些年,人们不断意识到高流动性对具有保护性质的颗粒的影响,粉末在贮存过程中十分容易吸收水分受潮,影响粉末的使用。具有阻燃或抑爆特征的粉末的流动性受包括颗粒大小、比表面积、含水量、疏水性和颗粒间作用力等因素的影响,这些参数对防火防爆起到积极或是消极的影响。粉末流动性的增大对粉末的扩散和防火防爆的实现有重要作用,通常情况下,粒径越大,粉体的流动性更好,但是大量研究表明,扩散在爆炸环境中的粉末的粒径越小,抑爆效果越好^[12-15]。为了解决这一矛盾,可以选择适当的添加剂用于灭火和抑爆,因此,在抑爆粉末中使用流动性增强添加剂来提升其稳定性并改善粉末扩散效果的研究十分重要^[4]。

近年来,通过水热法等对纳米 SiO₂ 进行改性研究已较为成熟,改性后的 SiO₂ 是低表面能的超疏水材料,其静态接触角可达到 158.0°±5.4°,具有良好的疏水性^[16]。上述的研究表明惰性粉末可以对气体爆炸起到显著的抑制效果,然而目前对于疏水性纳米粉末添加剂在抑制爆炸中的应用和研究较少。SiO₂ 作为惰性粉末可以抑制爆炸,气相法改性后的纳米 SiO₂ 具有更大的比表面积和疏水性,但是有关疏水性 SiO₂ 在抑制爆炸作用方面的研究较少。因此,本文中通过设计长管气体-粉末爆炸的测试平台,分析纳米 SiO₂ 自身的阻燃性和对 CaCO₃ 的流动性增强效果在丁烷气体爆炸中的影响,分析爆炸过程中火焰传播速度和压力的耦合关系,以期对粉体抑爆技术提供一定的理论支持。

1 实验设计

1.1 测试平台

爆炸测试容器使用可承受 2.5 MPa 压力的高硼硅钢化玻璃长管,总长度 1 000 mm、内径 100 mm。长管两端使用快接法兰加固并安装传感器,管外壁使用不锈钢加固并安装光敏传感器,长管共设置了 15 个光敏传感器来记录火焰传播的过程。光敏传感器使用型号为 SGPN88MQ 的硅光电池,其光谱响应

范围为 230~1050 nm, 响应时间小于 2 ns。为避免外界光源和火焰光反射引起的光电信号干扰测试, 每个光敏传感器使用 PCB 板接入引脚并使用黑色 PLA 材料的遮光槽固定, 使其只接收到当前位置管内的光电信号, 不受到管道中反射光的影响, 通过不同位置光敏传感器获得的火焰信号时间差计算火焰传播的速度。压力传感器采集范围为 0~1 MPa, 精度为 0.5%FS, 两只压力传感器一只放置于点火器位置, 一只放置于长管后段。点火设备是由 12 V 电源通过高压包升压供电电极进行尖端放电, 放电能量 15 kV, 尖端放电距离为 2 mm, 点火能量满足可燃气体的最小点火能。长管两端的进气口和出气口各留有一个接口用来连接循环泵, 使仓体内气体均匀混合, 循环泵流量为 5 L/min。喷粉装置采用预混气体携带粉体, 预先将测试粉体布置于槽内, 使用高压预混气体对粉尘进行垂直喷扬, 喷射压力为 0.8 MPa, 喷扬高度达到 1.7 m, 喷射后粉末可以较好地在爆炸环境中扩散。装置外壳使用黑色 PLA 材料, 一方面可以防止外界光对光敏传感器的干扰, 另一方面材料质量小、强度大, 表面使用铜箔覆盖后具有良好的屏蔽效果, 装置结构和实物图如图 1 所示; 所有的传感器和控制元器件通过 NI 公司的数据采集卡控制和采集数据, 通过 LabVIEW 编程实现同计算机的交互^[17], NI 数据采集卡采集工作频率为 250 kHz, 其中每个通道的光敏传感器采集频率为 15.6 kHz, 每个光电传感器距离约 70 mm, 在良好的屏蔽措施下, 可以捕捉到传播速度 200 m/s 以上物体的光电信号, 详细描述出爆炸火焰动态。测试平台流程图如图 2 所示。

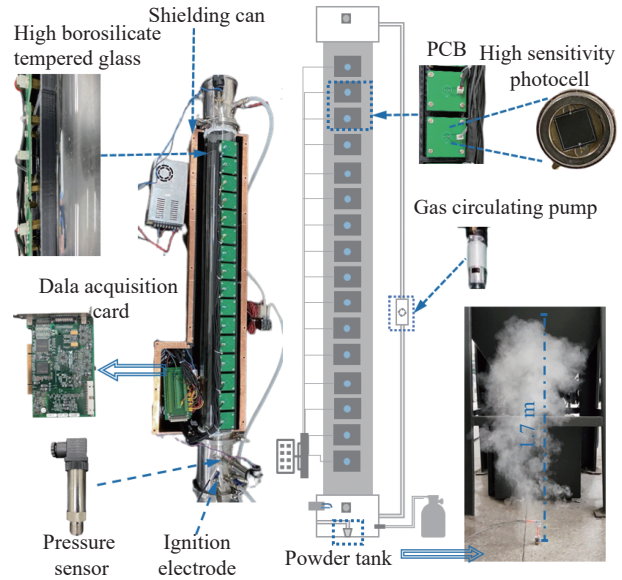


图 1 装置结构和局部实物图

Fig. 1 Structure of the device and photographs of physical parts

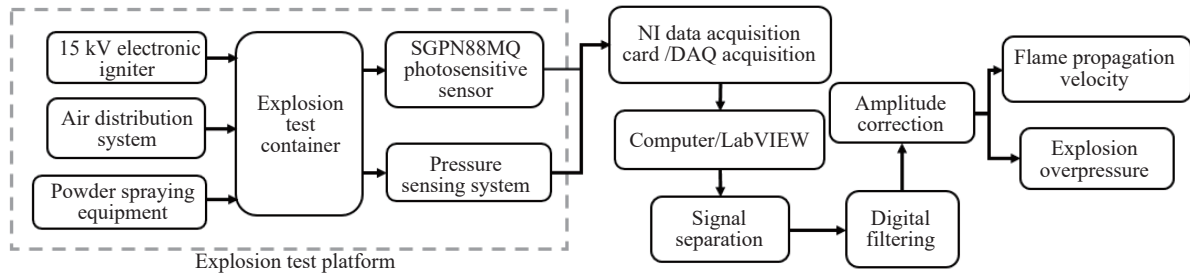


图 2 测试系统结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the structure of test system

1.2 实验工况

本实验主要研究纳米疏水性粉末作为阻燃剂和流动性增强剂协同纳米 CaCO₃ 粉末对丁烷爆炸的抑制效果。因此, 实验考虑了以下情况:

- (1) 丁烷体积分数为 2.10%、3.15%、4.20%、5.15% 的丁烷-空气混合气体;
- (2) 丁烷体积分数为 4.20% 的丁烷-空气混合气体, 喷洒粉末质量浓度为 106 g/m³ 的混合粉末 (SiO₂ 和 CaCO₃ 的质量比分别为 1 : 0.5、1 : 1、1 : 1.5、1 : 2);
- (3) 丁烷体积分数为 4.20% 的丁烷-空气混合气体, 喷洒粉末为质量浓度 53、106、159、212 g/m³ 的混合粉末 (SiO₂ 和 CaCO₃ 的质量比为 1 : 1)。

利用流量计控制通入预设体积分数的丁烷气体, 在输气完成后使用循环泵进行 5 min 循环, 循环泵

的流量为 5 L/min。为确保实验数据的准确性, 每种工况重复 3~5 次, 取重复性较好的 3 组数据的平均值计算衰减率。通过定落差法测得不同工况下粉末的休止角, 在每次实验后使用大流量气泵对爆炸管道的燃烧产物和多余的粉尘进行吹除, 并对爆炸管道进行干燥处理。表 1 为不同工况下混合粉末的参数。可以看出, 添加疏水性粉末可以显著降低粉末休止角, 改善粉末流动性和储存效果, 降低喷洒后粉末的残余量, 提高喷洒效率。

2 实验结果与分析

2.1 抑制机理分析

图 3 为不同体积分数丁烷爆炸火焰传播速度的变化, 处于爆炸下限 2.10% 体积分数的丁烷由于丁烷含量过少, 火焰传播速度较慢, 长管内的火焰传播无法形成有效爆炸; 5.25% 体积分数的丁烷由于反应物过多, 长管内氧气不足, 也导致火焰传播速度较低; 相较而言, 4.20% 体积分数的丁烷爆炸更加剧烈, 火焰传播变化更加明显, 预混气体被点燃后, 在压力的作用下火焰传播速度成震荡式上升, 在长管出口处达到最大值(97.2 m/s)。因此选择丁烷体积分数为 4.20% 的丁烷-空气混合气体进行后续实验。

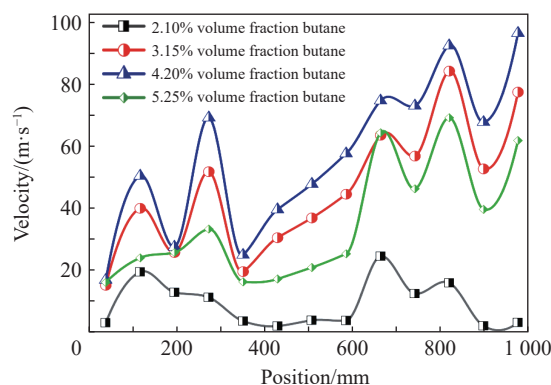


图 3 不同体积分数丁烷爆炸火焰传播速度

Fig. 3 Flame propagation velocity of butane explosion with different volume fractions

研究表明, 超细粉末与分散介质有巨大的界面能, 这种高度分散的多相体系很可能表现出强烈的团聚特征, 同时粉末的吸湿受潮特性也容易在气相中产生粒径较大的二次粉末, 导致实际爆炸环境中的粉末浓度下降^[18-20]。表 1 结果表明, 疏水性 SiO₂ 可以降低混合粉末休止角, 但扫描电镜和 EDS 分层图像表明(见图 4), CaCO₃ 粉末依然存在团聚, 细小的 SiO₂ 粉末附着在团聚的 CaCO₃ 表面, 防止其进一步团聚结块, 由于疏水性粉末的作用, 混合粉末团聚结块现象减少, 提高了爆炸环境中实际扩散粉末的浓度。混合粉末抑爆机理分析如图 4 所示, 丁烷燃烧反应会产生大量自由基, SiO₂ 作为惰性粉体本身性质较稳定, 不易受热分解, 对燃烧的抑制作用主要在于对自由基的吸收^[9], 热重分析表明, 改性的 SiO₂ 粉体在升温过程中会持续损失质量, 更容易吸收热量, 并且气相法制备的改性纳米 SiO₂ 粒径极小, 且表面改性, 使其拥有较大的比表面积, 能吸收热量和吸附较多的自由基并使其失去活性。同时, CaCO₃ 在高温下会发生热解反应, 热解释放出 CO₂ 稀释反应物浓度, 并且粒径对 CaCO₃ 的热解有较大影响, 其分解速率随粒径的减小而加快, 在纳米粒度分布下存在一些粒径更小的粉体, 这些小颗粒更容易在燃烧区域发生热解, 且分解温度更低, 分解速率更快^[7]。两种粉体都提供了与自由基反应的机会, 吸收了热量, 减少

了专注于燃烧反应的自由基, 释放 CO₂ 稀释反应物浓度, 从而降低了燃烧反应速率, 对爆炸起到抑制作用。另一方面, 改善后粉末的团聚结块现象减少, 休止角减小, 流动性提高, 扩散在爆炸环境中的粉末的实际浓度增加, 这也是抑制爆炸效果提高的一个原因。

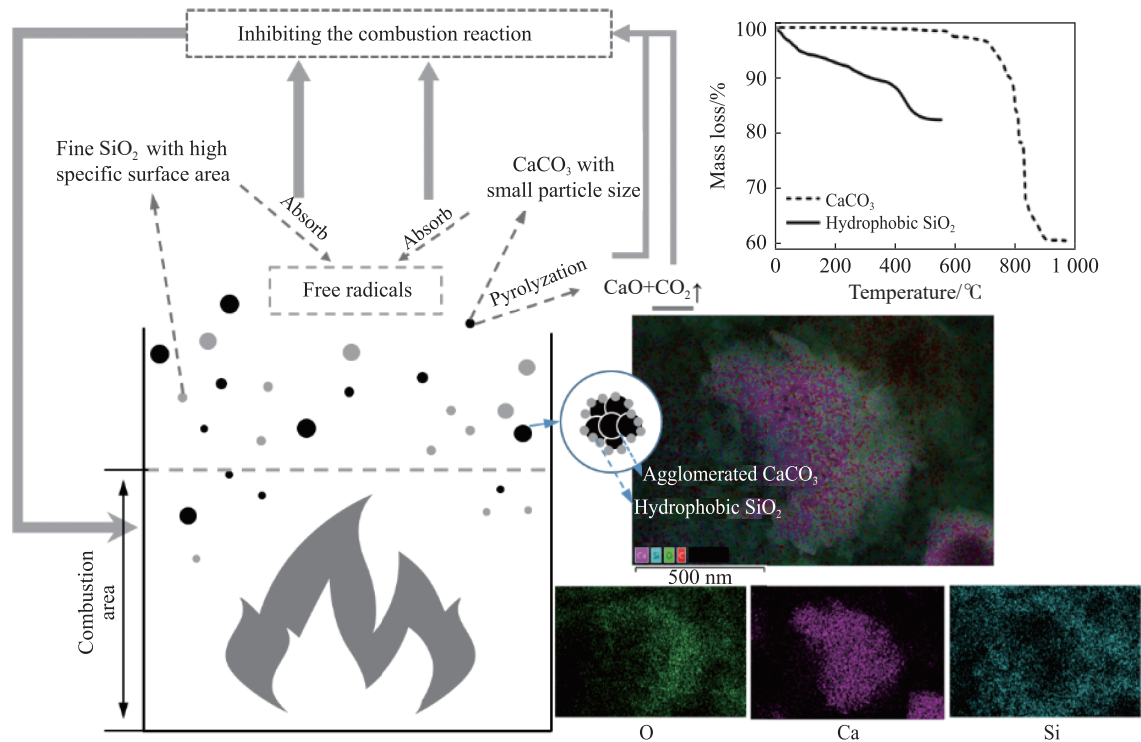


图 4 混合粉末抑制爆炸分析(热重分析(TG), 图右上; 能谱分析(EDS 分层图像), 图右下)

Fig. 4 Explosion suppression analysis of mixed powder (Thermogravimetric analysis (TG) image, upper right; and energy dispersive spectrometer analysis (EDS layered image) image, lower right)

2.2 不同工况实验结果分析

2.2.1 不同比例混合粉末对丁烷爆炸影响

如表 1 所示, 添加疏水性粉末项目的休止角均有较大程度的减小, 混合粉末的喷洒残余量下降, 证明混合粉末的喷洒效率得到了提高, 混合粉末的流动性和扩散效果已经得到改善。图 5 为不同配比条件下, 混合粉末对火焰传播速度的影响, 可以看出, 在同为 106 g/m³ 的粉尘质量浓度下, 使用单一纳米 CaCO₃ 粉末能使火焰传播速度明显下降, 在初期爆炸的燃烧区域内, CaCO₃ 对长管的前段 150 mm 处对火焰传播的抑制能力较弱, 此时火焰传播速度迅速上升达到最大(28.22 m/s)。随着热解的发生管内的自由基被大量结合, 削弱了爆炸链式反应并且阻碍了热量向可燃物的传递, 导致火焰速度下降, 在压力的作用下到达长管出口前火焰速度再次攀升。图 5 的结果表明, 添加疏水性纳米 SiO₂ 的几组工况中爆炸均被抑制, 得益于比表面积较大的 SiO₂ 粉末和改性后较低的热解温度, 混合粉末可以在爆炸初期吸收较多的前驱冲击波和结合较多的自由基, 使爆炸没有出现使用单一 CaCO₃ 时初期速度迅速攀升的现象; 在 106 g/m³ 浓度下, 质量比为 1 : 1 的混合粉末的火焰传播速度在长管 400~500 mm 处由 40.39 m/s 降至 2.88 m/s, 管内火焰传播的平均速度衰减率达到 85.5%, 最大爆炸压力衰减率达到 59.6%(见图 6), 衰减率为四组工况中的最大值。通过实验结果可以看出, 提高混合粉末中纳米 CaCO₃ 的比例并不能继续降低火焰传播速度, 相反在接近出口处火焰传播速度出现了更大的回升, 这可能是由于出口处 PVC 膜被冲破后, 管内压力和热量被瞬间释放, 火焰前锋对 CaCO₃ 的热解能力下降, 此时起主要抑制作用的是比表面积较大的 SiO₂ 粉末。

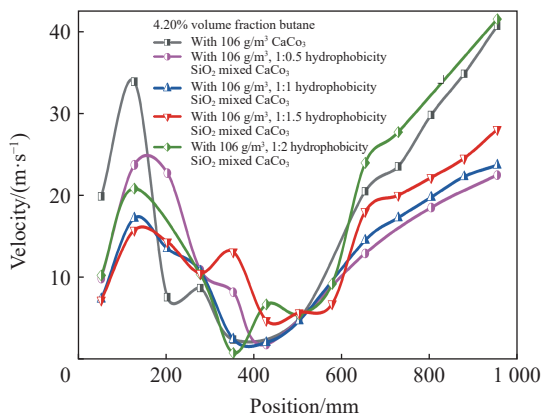


图 5 不同实验工况下的混合粉末对火焰传播速度的影响
Fig. 5 Flame propagation velocity under different experimental conditions

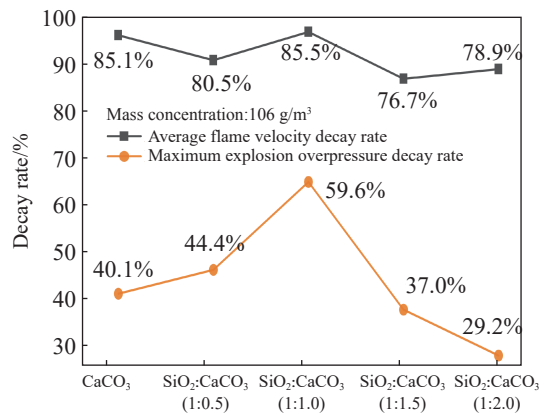


图 6 不同实验工况下的衰减率
Fig. 6 Decay rates under different experimental conditions

2.2.2 不同浓度混合粉末对丁烷爆炸影响

图 7 为不同质量浓度的混合粉末对火焰传播速度的影响, 在粉尘质量浓度较小(53 g/m³)时, 粉末含量不足, 在长管前段火焰速度达到 32.1 m/s, 同时压力衰减率也较小, 对爆炸的抑制能力明显弱于质量浓度为 106 g/m³ 的混合粉末; 当粉末质量浓度过大(159、212 g/m³)时, 虽然火焰传播速度有所下降, 爆炸被抑制, 但在长管前段(爆炸初期)对火焰传播形成了促进作用。这可能是由于具有较大比表面积的粉末吸附了大量的氧分子, 这为氧化燃烧过程提供了充足的氧气并对燃烧起到了促进作用。随着氧气被消耗, 粉末的抑制作用再次体现出来^[21-23]。图 8 的衰减率结果表明, 粉末质量浓度对爆炸压力的影响大于对火焰传播速度的影响, 106 g/m³ 质量浓度下, 质量比为 1 : 1 的混合粉末对丁烷爆炸的火焰传播速度和爆炸超压可以起到最大程度的抑制效果。

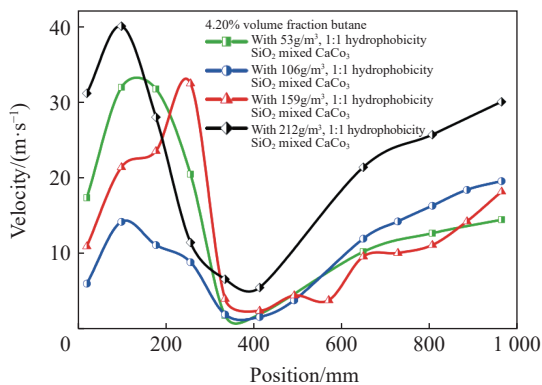


图 7 不同质量浓度的混合粉末对火焰传播速度的影响
Fig. 7 Flame propagation velocity at different powder concentrations

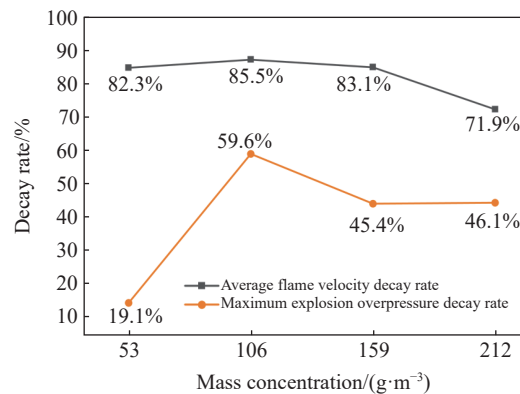


图 8 不同质量浓度下的衰减率
Fig. 8 Decay rates under different mass concentrations

2.3 爆炸速度和压力的耦合分析

丁烷爆炸过程中, 压力波与火焰相互作用, 形成一系列反馈机制, 影响燃烧反应的强度, 图 9(a) 为不添加任何粉末时丁烷爆炸火焰传播速度与压力的变化。预混气体在被点燃后, 火焰传播速度持续增加, 并于管道出口处达到最大值(97.2 m/s), 此时管内压力上升并稳定至最大超压(8.7 kPa), 整个过程中火焰速度和压力均处于上升趋势, 速度的变化存在小幅震荡。图 9(b)~(c) 为添加质量浓度为 106 g/m³ 的不同粉末时爆炸火焰传播速度与压力的变化, 两图结果均表现出, 在粉末抑制作用下爆炸压力达到最大值时速度几乎降至最低, 压力变化呈现单峰曲线。图 9(c) 为抑制效果最好的工况中火焰传播速度和压力

的变化, 结果表明, 20 ms 前火焰传播速度迅速上升, 但由于火焰发展初期, 燃烧区域较小, 此时管内压力并没有发生明显变化。20~50 ms 时, 火焰传播速度不断下降, 此时主要的抑制作用的是 SiO₂ 粉末。但燃烧反应仍在继续, 管内热量产生大于耗散, 管内压力逐渐攀升至 3.5 kPa。68 ms 时, 管内处于封闭状态, 此时火焰传播速度接近最低值而爆炸超压达到最大值, 两者之间存在明显的耦合关系, 由于管内封闭压力达到最大, 火焰速度受压力和粉末作用降至最小。随后泄爆口的 PVC 膜被破坏, 管内部分热量和气体被瞬间释放, 导致管内压力下降, 燃烧区的火焰锋面在失去了前方压力后, 速度再次上升。在管内压力回落至 2.1 kPa 后, 受泄爆口破坏的影响, 在 95~125 ms 内火焰传播速度和压力出现了相似的上升趋势。一方面, 泄爆口破坏的瞬间气体携带大量粉末喷出, 使得未燃气体密度和阻碍火焰前锋的粉末浓度降低, 另一方面, 管内的燃烧反应仍在继续, 火焰厚度和燃烧区域也不断增大, 但反应剧烈程度有所缓和, 可以明显看出, 在粉末的抑制作用下, 长管压力的变化具有一定的滞后。因此, 管内的爆炸虽然被粉末抑制, 但仍无法终止燃烧反应, 火焰速度和压力仍然以较小的速率上升。

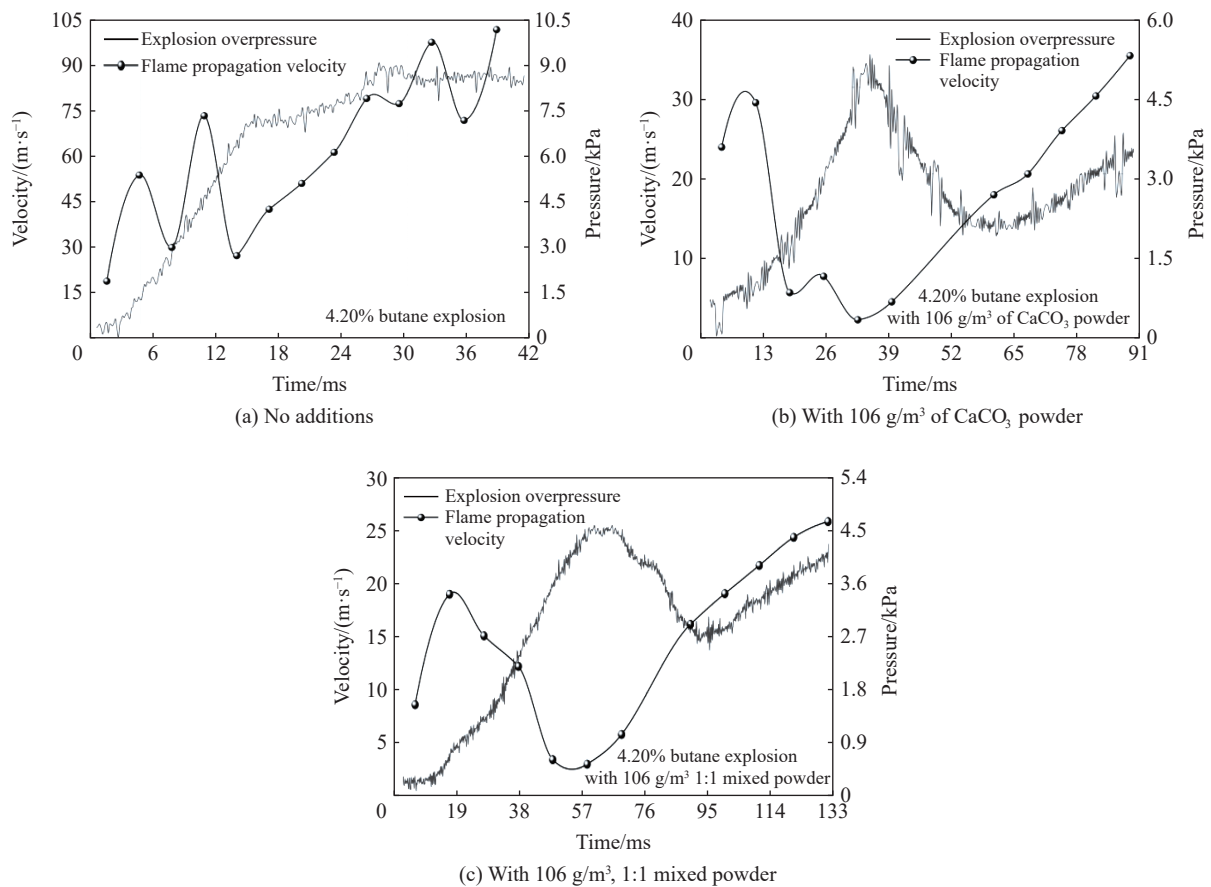


图 9 不同条件下 4.20% 的丁烷爆炸火焰传播速度与压力耦合关系

Fig. 9 Coupling relationship between flame propagation velocity and pressure of 4.20% butane explosion under different conditions

3 结论

通过设计搭建的爆炸测试平台对疏水性粉末协同抑爆效果进行了测试, 在纳米疏水性粉末的作用下, 混合粉末休止角最大减小了 11.64°, 喷洒后粉末的残余量有所下降, 混合粉末的贮存能力和扩散效果得到了改善, 具体结论如下。

(1) 纳米疏水性 SiO₂ 粉末和纳米 CaCO₃ 粉末均能吸收和消耗燃烧区域的自由基, 且改性 SiO₂ 粉末

比表面积较大, 容易结合自由基, 纳米 CaCO₃ 的热解也消耗了自由基, 两者均抑制了燃烧过程, 阻碍了爆炸前驱冲击波。此外, 纳米 SiO₂ 弥补了爆炸初期 CaCO₃ 对燃烧反应抑制较弱的缺陷, 两种粉末协同作用下对气体爆炸的抑制效果优于单一抑爆效果。

(2) 不同浓度下的混合粉末均能对爆炸起到抑制作用, 但随着混合粉末浓度的不断提高, 火焰传播速度和最大爆炸压力的衰减率并没有继续增大, 且当粉末浓度超过一定范围后还会对初期的爆炸形成促进作用。

(3) 通过对火焰传播速度和压力变化的耦合分析可知, 火焰速度和压力随时间变化的曲线线形具有一定的相似性。在粉末的抑制作用下, 爆炸压力达到最大值时速度几乎降至最低, 粉末的抑制作用会使压力变化有一定的滞后, 同时, 管内爆炸压力的瞬间变化也会影响火焰传播速度, 所以火焰速度只能在一定程度上反映燃烧区域反应的强弱。本研究在纳米疏水性 SiO₂ 粉末作为流动增强剂和阻燃剂与纳米 CaCO₃ 粉末的质量比为 1 : 1 混合、质量浓度为 106 g/m³ 的条件下, 对丁烷体积分数为 4.20% 的丁烷-空气混合气体爆炸的抑制效果最佳, 火焰传播平均速度和爆炸超压的衰减率分别为 85.5% 和 59.6%。

参考文献:

- [1] 李重情, 穆朝民, 许登科, 等. 空腔长度对瓦斯爆炸冲击波传播影响研究 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2018, 35(6): 1293–1300. DOI: 10.13545/j.cnki.jmse.2018.06.028.
LI Z Q, MU C M, XU D K, et al. Influence of cavity length on shock wave propagation of gas explosion [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2018, 35(6): 1293–1300. DOI: 10.13545/j.cnki.jmse.2018.06.028.
- [2] CHENG J W. Explosions in underground coal mines: risk assessment and control [M]. Cham: Springer, 2018: 2–20.
- [3] DUPLESSIS J J L. Active explosion barrier performance against methane and coal dust explosions [J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2015, 2(4): 261–268. DOI: 10.1007/s40789-015-0097-7.
- [4] 李润之. 瓦斯煤尘共存条件下的煤尘云爆炸下限 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(4): 913–917. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0331.
LI R Z. Minimum explosive concentration of coal dust cloud in the coexistence of gas and coal dust [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(4): 913–917. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0331.
- [5] ZHANG J J, XU K L, YOU G, et al. Causation analysis of risk coupling of gas explosion accident in Chinese underground coal mines [J]. *Risk Analysis*, 2019, 39(7): 1634–1646. DOI: 10.1111/risa.13311.
- [6] LU C, ZHANG Y, ZHU H, et al. Spurting NH₄H₂PO₄ powder to prevent the propagation of gas explosion along the duct [J]. *Combustion Science and Technology*, 2020: 1–19. DOI: 10.1080/00102202.2020.1748607.
- [7] HUANG D M, WANG X Q, YANG J. Influence of particle size and heating rate on decomposition of BC Dry chemical fire extinguishing powders [J]. *Particulate Science and Technology*, 2015, 33(5): 488–493. DOI: 10.1080/02726351.2015.1013591.
- [8] LIU Q M, HU Y L, BAI C H, et al. Methane/coal dust/air explosions and their suppression by solid particle suppressing agents in a large-scale experimental tube [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2013, 26(2): 310–316. DOI: 10.1016/j.jlp.2011.05.004.
- [9] CHEN X F, ZHANG Y, ZHANG Q M, et al. Experimental investigation on micro-dynamic behavior of gas explosion suppression with SiO₂ fine powders [J]. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2011, 1(3): 032004. DOI: 10.1063/2.1103204.
- [10] LUO Z M, WANG T, TIAN Z H, et al. Experimental study on the suppression of gas explosion using the gas–solid suppressant of CO₂/ABC powder [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2014, 30: 17–23. DOI: 10.1016/j.jlp.2014.04.006.
- [11] GAO R J, YAO Y, WU H, et al. Effect of amphoteric dispersant on the dispersion properties of nano-SiO₂ particles [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2017, 134(29): 45075. DOI: 10.1002/app.45075.
- [12] MENG T, YU H M, LIAN S S, et al. Effect of nano - SiO₂ on properties and microstructure of polymer modified cementitious materials at different temperatures [J]. *Structural Concrete*, 2020, 21(2): 794–803. DOI: 10.1002/suco.201900170.
- [13] ZHU J, XU C B, HUANG Q, et al. Improving fluidizability of cohesive particles by surface coating with flow conditioners [C]// Proceedings of the Fifth World Congress on Particle Technology. Florida: AiChE, 2006: 1–9.

- [14] ANTHONY J L, MARONE C. Influence of particle characteristics on granular friction [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2005, 110(B8): B08409. DOI: 10.1029/2004JB003399.
- [15] SAENKO E V, HUO Y, SHAMSUTDINOV A S, et al. Mesoporous hydrophobic silica nanoparticles as flow-enhancing additives for fire and explosion suppression formulations [J]. *ACS Applied Nano Materials*, 2020, 3(3): 2221–2233. DOI: 10.1021/acsnm.9b02309.
- [16] 王维, 刘玉硕, 房冉冉, 等. 疏水性可调型纳米二氧化硅的制备 [J]. *中国粉体技术*, 2018, 24(4): 44–48. DOI: 10.13732/j.issn.1008-5548.2018.04.009.
WANG W, LIU Y S, FANG R R, et al. Preparation of hydrophobic adjustable nano-silica [J]. *China Powder Science and Technology*, 2018, 24(4): 44–48. DOI: 10.13732/j.issn.1008-5548.2018.04.009.
- [17] 王浩杰, 张嘉琪, 王丽, 等. 基于 LabVIEW 的多场景环境监测系统优化设计 [J]. *仪表技术与传感器*, 2019(10): 66–70. DOI: 10.3969/j.issn.1002-1841.2019.10.016.
WANG H J, ZHANG J Q, WANG L, et al. Optimization design of multi-scene environment monitoring system based on LabVIEW [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2019(10): 66–70. DOI: 10.3969/j.issn.1002-1841.2019.10.016.
- [18] FROLOVA S M, GEL'FAND B E. Shockwave attenuation in gas suspensions [J]. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1991, 27(1): 124–129. DOI: 10.1007/bf00785372.
- [19] SOMMERFELD M. The unsteadiness of shock waves propagating through gas-particle mixtures [J]. *Experiments in Fluids*, 1985, 3(4): 197–206. DOI: 10.1007/BF00265101.
- [20] OLIM M, BEN-DOR G, MOND M, et al. A general attenuation law of moderate planar shock waves propagating into dusty gases with relatively high loading ratios of solid particles [J]. *Fluid Dynamics Research*, 1990, 6(3): 185–199. DOI: 10.1016/0169-5983(90)90061-3.
- [21] 高正江, 张国庆, 李周, 等. 粉末粒度和氧含量对 HIP 态 FGH96 合金组织的影响 [J]. *稀有金属*, 2012, 36(4): 665–670. DOI: 10.3969/j.issn.0258-7076.2012.04.026.
GAO Z J, ZHANG G Q, LI Z, et al. Effect of size distribution and oxygen content of powder on microstructure of HIPed superalloy FGH96 [J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2012, 36(4): 665–670. DOI: 10.3969/j.issn.0258-7076.2012.04.026.
- [22] 程方明, 邓军, 罗振敏, 等. 硅藻土粉体抑制瓦斯爆炸的实验研究 [J]. *采矿与安全工程学报*, 2010, 27(4): 604–607. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3363.2010.04.031.
CHENG F M, DENG J, LUO Z M, et al. Experimental study on inhibiting gas explosion using diatomite powder [J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2010, 27(4): 604–607. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3363.2010.04.031.
- [23] 丁浩青, 温小萍, 邓浩鑫, 等. 障碍物条件下纳米 SiO₂ 粉体抑制瓦斯爆炸特性 [J]. *安全与环境学报*, 2017, 17(3): 958–962. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2017.03.028.
DING H Q, WEN X P, DENG H X, et al. Suppression function of SiO₂ nanoparticles against the gas explosion in the presence of obstacles [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2017, 17(3): 958–962. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2017.03.028.

(责任编辑 曾月蓉)