

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0009

多孔材料下气体爆炸转扩散燃烧的特性研究*

段玉龙^{1,2}, 王硕^{1,2}, 贺森^{1,2}, 万琳^{1,2}

(1. 重庆科技学院安全工程学院, 重庆 401331;

2. 重庆科技学院油气化工过程安全多尺度研究中心, 重庆 401331)

摘要: 为分析多孔材料对预混气体爆炸特性参数的影响效果, 采用自主搭建的爆炸实验平台, 探究不同孔隙度和厚度的多孔材料对当量比为1的甲烷/空气预混气体爆炸的作用行为。实验研究表明, 不同孔隙度的多孔材料对爆炸火焰和超压具有促进或抑制两种不同的影响。孔隙度较小时, 爆燃火焰传播速度随着材料厚度的增大而降低, 并在厚度较大时, 火焰有短暂的传播延时现象。孔隙度较大时, 预混火焰冲击多孔材料时发生淬熄, 但随后一段时间内, 由于负压抽吸作用, 在已爆区域一侧的材料表面产生扩散燃烧现象, 且扩散燃烧程度与材料厚度成反比关系。多孔材料的固相结构能降低压力的泄放效率, 同时可吸收能量, 进而提高爆炸超压的上升速率, 降低超压峰值。当每英寸长度孔数 $\delta=10$ 的多孔材料促进火焰传播时, 与当量比为1的预混气体爆炸相比, 超压峰值最大可提高约2倍, 造成更严重的后果。火焰冲击 $\delta=20$ 的多孔材料时发生淬熄, 最大超压衰减可达47.17%, $\delta=30$ 时最大超压衰减了24.62%。

关键词: 气体爆炸; 多孔材料; 淬熄; 扩散燃烧; 抑爆

中图分类号: O383; X932

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Characteristics of gas explosion to diffusion combustion under porous materials

DUAN Yulong^{1,2}, WANG Shuo^{1,2}, HE Sen^{1,2}, WAN Lin^{1,2}

(1. College of Safety Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China;

2. Center for Multiscale Process Safety Research in Oil and Gas,

Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331, China)

Abstract: To analyze the effect of porous materials on the explosion characteristics of premixed gas, a self-built explosion experiment platform was used to investigate the behavior of porous materials with different porosities and thicknesses on premixed methane/air gas explosion with a stoichiometric ratio of 1. Experimental studies have shown that porous materials with different porosities can either promote or suppress the explosive flame and overpressure. When the porosity was low, the propagation speed of the deflagration flame decreased with the increase of material thickness, and when the thickness was large, the flame had a short propagation delay. When the porosity was high, the quenching effect occurred when the premixed flame impacted the porous material. However, in the following period, due to negative pressure suction, diffusion combustion occurred on the surface of the material towards the side of the exploded area, and the degree of diffusion combustion was inversely proportional to the thickness of the material. The solid phase structure of porous materials could reduce the efficiency of pressure release and absorb energy, resulting in increasing the rate of explosion overpressure rise and reducing the overpressure peak. When the porous material with $\delta=10$ were used to promote flame propagation, compared with premixed gas explosions with a stoichiometric ratio of 1, the peak overpressure could be increased by about 2 times at most, causing more

* 收稿日期: 2020-01-03; 修回日期: 2020-06-17

基金项目: 重庆市自然科学基金(cstc2019jcyj-msxmX0324); 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN201801517); 重庆科技学院校内科研基金(ck2017zkyb001)

第一作者: 段玉龙(1982—), 男, 博士, 副研究员, dylnhz@126.com

serious consequences. Quenching occurred when flame impacted the porous material with $\delta=20$, and the maximum overpressure attenuation was 47.17%. The maximum overpressure decreased by 24.62% at the porous material with $\delta=30$.

Keywords: gas explosion; porous materials; quenching; diffusion combustion; explosion suppression

现阶段燃气管网四通八达,一旦发生燃气泄漏爆炸,在没有防护措施或防护措施失效情形下,爆炸产生的高温高压会造成巨大的人员伤亡和财产损失。因此,相应的隔爆抑爆技术措施亟待提高。

阻隔抑制气体爆炸一直受到众多学者关注。多孔材料由于其特有的孔隙结构,对爆炸火焰具有淬熄的抑制效果,并且其自身具有环保、硬度大、耐高温和抗烧结能力强等优点^[1],被广泛应用于抑爆领域。Pramod等^[2]研究发现,随着多孔材料孔隙度的增大,压力峰值逐渐减小。Olim等^[3]发现冲击波在可压缩的多孔材料中相互作用时,气固两相之间的动量传递至关重要,而多孔材料的弹性也至关重要。Kitagawa等^[4]研究发现了氮或氧浓度的增大会导致多孔材料中火焰传播速度明显变化。邵继伟等^[5]将多孔材料分层放置于管道中观察对爆炸的影响,结果表明,双层多孔材料的抑爆效果相比于单层和三层具有更好的稳定性。梁滔等^[6]发现当把泡沫镍铺设在管道中间位置时其对爆炸超压的抑制效果最好。陈鹏等^[7-8]揭示了多孔材料对火焰的淬熄作用与微孔通道和火焰的相互作用有关。魏春荣等^[9-10]和孙建华等^[11]对比分析发现多孔材料的厚度、孔径、相对密度是影响火焰温度衰减效果的重要因素。聂百胜等^[12-13]研究了泡沫陶瓷在管道内可导致火焰传播速度和结构不稳定,同时可抑制火焰的传播,起到淬熄火焰的作用。蒋新生等^[14]发现网状高分子材料能使油气爆炸最大超压降低94%、平均升压速率下降98%、湍流发展和振荡加强过程明显削弱。由于细水雾的响应时间延后,温小萍等^[15]、余明高等^[16]将细水雾和多孔材料结合协同抑制甲烷爆炸,发现两者协同抑制优于单一抑制效果。

上述研究表明,多孔材料对气体爆炸火焰和超压均具有一定的抑制和衰减作用,根据材料属性和规格的不同,抑制效果存在差别,甚至会存在促进爆炸发展的可能。然而,对于火焰在传播过程中的不同阶段,多孔材料对其产生的影响行为也有显著的区别。以往的研究主要分析了多孔材料对爆炸火焰的瞬间淬熄效应。而火焰淬熄后,已爆区域和未爆区域内的后续现象研究相对缺乏。有鉴于此,本文中主要研究了多孔材料位于甲烷/空气爆炸火焰加速传播位置处,火焰形态、传播状态、淬熄效率和超压的变化规律,并对火焰淬熄后爆炸区域内的变化现象进行持续监测,分析爆炸初始阶段、火焰淬熄瞬间和火焰淬熄后一段时间内的爆炸参数变化。

1 实验方法

1.1 实验平台

本实验平台是自主搭建的,系统集成如图1所示,主要由配气与集气模块、压力采集模块、高速摄像模块和点火模块组成。配气与集气系统包括甲烷气瓶、空气瓶(避免不同湿度的空气对爆炸反应产生的影响)、气体流量计和爆炸激波管道。爆炸管道由PMMA制成,尺寸为1000 mm×100 mm×100 mm。压力采集模块包括NUXI-1 004压力采集系统和压力传感器(-0.1~0.2 MPa),可对高频信号进行有效收集与处理。高速摄像模块由Phantom710 L高速摄像机和PCC图形处理软件组成。点火模块采用自制电火花发生器和直流控制系统组成,在点火器处通过金属铂丝产生高温电火花触发甲烷/空气预混气体爆炸反应。

1.2 实验步骤与工况

实验开始前预先调试高速摄像机和压力采集系统。高速摄像机采样率为2000 Hz,曝光时间为

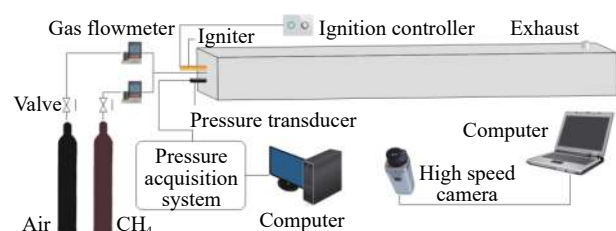


图1 实验系统图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental system

499.96 μs , 为了提高图像亮度和清晰度, 二次曝光时间设置为200 μs 。压力采集系统设置采样率为60 kHz^[16]。管道泄压口采用塑料膜进行封闭, 以保证管道安全泄压。预混气体通过气体流量计预混后充入管道, 采用四倍体积排气法排出管道中的多余杂质气体。点火前关闭进气口与排气口阀门, 启动点火控制器, 触发甲烷/空气预混气体爆炸。高速摄像机和压力采集系统采用自动触发方式, 当空间内图像和压力发生变化时, 采集系统自动触发并储存数据。

多孔材料采用碳化硅泡沫陶瓷, 如图2所示。多孔材料每英寸长度孔数 $\delta=10, 20, 30$, 厚度分别为2、4、6 cm。具体实验工况组合如表1所示。

图3所示为高速摄像机测得火焰锋面在全管道沿程的瞬时速度, 与以往的研究相比, 火焰锋面在管道内的传播速度规律相似^[17-18]。通过图像可以看出, 火焰锋面传播到管道轴向距离30 cm时速度最大, 因此将多孔材料置于距离点火源30 cm处, 观察与分析不同孔隙度、不同厚度多孔材料对火焰加速传播时的淬熄行为及对超压传播特性的影响。为减小实验误差, 每组实验工况重复5次。

表1 实验工况

Table 1 Experimental conditions		
序号	δ	厚度/cm
1	10	2
2	10	4
3	10	6
4	20	2
5	20	4
6	20	6
7	30	2
8	30	4
9	30	6

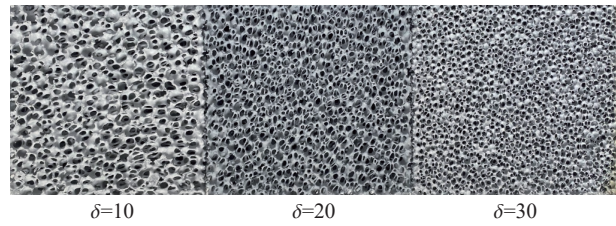


图2 多孔材料

Fig. 2 The porous materials

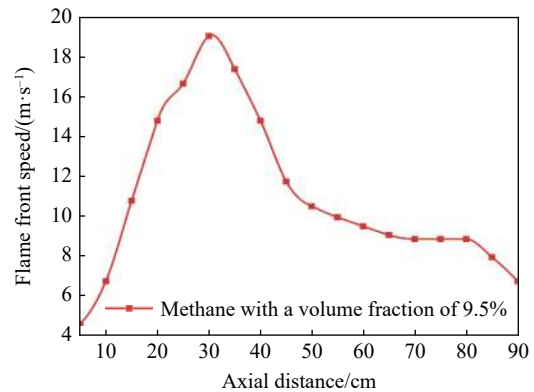


图3 火焰锋面速度均值

Fig. 3 Mean speed of flame front

2 结果与分析

2.1 多孔材料对预混爆炸火焰的影响

当量比为1的甲烷/空气预混气体爆炸过程如图4所示, 火焰由球形($t=8$ ms)发展为指形($t=30.5$ ms), 之后火焰锋面变平($t=50$ ms)并逐渐发展为郁金香形($t=59$ ms), 直到传播过程结束。当多孔材料放置于距离点火点30 cm时(火焰加速发展阶段), 其对爆炸火焰的传播状态具有显著影响。多孔材料孔隙度和厚度不同, 其影响效果存在较大差异。图5所示为 $\delta=10$ 的多孔材料影响下, 爆炸火焰在管道中的传播状态。由图5中可以看出, 指形火焰冲击多孔材料后, 在材料后部喷射而出, 此时火焰锋面与未燃气体之间无明显分界, 火焰由之前的层流燃烧瞬间转变为不规则的湍流燃烧, 产生爆燃现象。比较图5(a)、图5(b)与图5(c)可以看出, 随着材料厚度的增大, 火焰锋面褶皱程度增强, 导致火焰与未燃气体的接触面积增大。但随着材料厚度增大, 火焰穿过多孔材料后其传播速度依次递减, 且火焰穿透材料的过程产生延时的时间越长。分析认为, $\delta=10$ 的多孔材料因其孔径较大, 孔隙的占比大于固相结构的占比, 参与燃烧爆炸反应的预混气体经过孔隙结构时, 由于传播路径的截面积突然减少导致火焰加速, 由于固相结构在空间内的占比较低, 因而无法及时销毁链式反应中的自由基基团^[19-20], 从而爆炸火焰以更剧

烈的湍流状态继续传播。当多孔材料厚为 2 cm 且 $\delta=10$ 时对爆炸具有明显地促进作用, 层流火焰穿过材料后传播速度大大提高, 与体积分数 9.5% 的甲烷常规爆炸相比, 传播时间减少约 30 ms。此时多孔材料加速了火焰由层流向湍流状态的转变, 对爆炸区域可产生更大的危害。当材料厚度为 4 cm 时, $\delta=10$ 的多孔材料对火焰传播有一定的延时作用, 约为 40.5 ms。6 cm 厚的材料对火焰产生了约 110.0 ms 的延时, 材料上游火焰淬熄, 随后爆炸火焰继续向未燃气体传播。原因为当火焰经过 $\delta=10$ 且厚度较大的多孔材料时, 火焰无法立即穿过多孔材料继续传播, 但在多孔材料孔隙空间中存在可燃气体, 经过火焰的冲击, 在材料内部进行了短暂的燃烧反应, 由于材料的吸热作用, 材料内部热量传递相对缓慢。当材料内部燃烧反应透过多孔材料的孔隙结构时, 材料下游的可燃气体被点燃, 厚度越大, 燃烧反应穿过材料所需的时间越长。



图 4 体积分数 9.5% 的甲烷爆炸火焰传播过程

Fig. 4 Flame propagation of methane explosion with a volume fraction of 9.5%

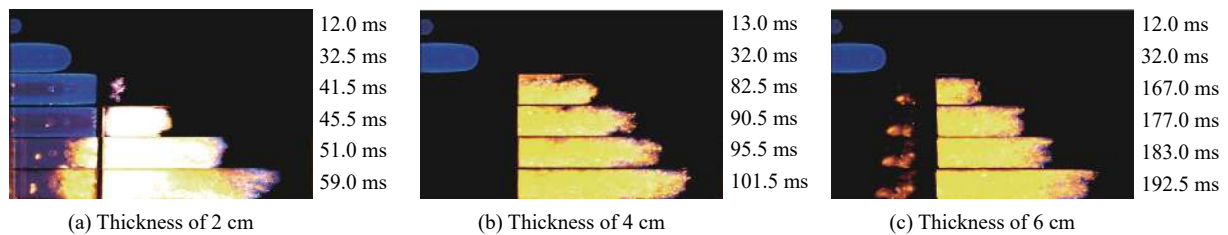


图 5 每英寸长度孔数为 10 的多孔材料对火焰的影响

Fig. 5 Effect of the porous material with 10 pores per inch in length

图 6 所示为 $\delta=20$ 的多孔材料, 不同厚度时对爆炸火焰的影响, 与 $\delta=10$ 的影响效果不同, 爆炸火焰冲击接触 $\delta=20$ 的多孔材料后发生淬熄, 火焰无法通过多孔材料继续向下游传播。分析原因为, $\delta=20$ 的多孔材料固相结构在流体区域内的占比提高, 火焰通过多孔材料所受的阻力增加, 其次, 固相结构占比增加使得对高温火焰的吸能效率提高, 火焰能量快速耗散, 无法维持爆炸反应继续进行, 从而导致火焰淬熄。火焰淬熄后, 在已爆区域一侧的材料表面伴有火焰持续燃烧的现象, 燃烧过程中, 材料右侧可燃气体不断供给燃烧, 形成边燃烧边混合的状态, 火焰在材料表面燃烧时, 不再随时间发展向火焰前锋方向推移, 燃烧状态发生改变, 火焰由之前的预混爆炸转变为扩散燃烧。如图 6(b) 和图 6(c) 可以看出, 随着多孔材料厚度的增大, 反向扩散燃烧的火焰剧烈程度减弱, 图 6(a) 中多孔材料厚度为 2 cm, 此时, 扩散燃烧火焰锋面的距离最远, 几乎可以到达点火源的位置。图 7 为 $\delta=30$ 的多孔材料对当量比为 1 的预混甲烷/空气爆炸火焰的影响。对比图 6 可以看出, 多孔材料对层流火焰的传播影响效果微弱, 火焰在冲击多孔材料之前, 其空间结构不随多孔材料的孔隙度或厚度的改变而发生变化。火焰接触 $\delta=30$ 的多孔材料发生淬熄后, 同样在已爆区域一侧的材料表面有持续燃烧的火焰产生, 由之前的预混爆炸转变为扩散燃烧。随着多孔材料孔隙度的增大, 扩散燃烧剧烈程度下降, 扩散燃烧火焰长度减小。分析此现象产生的原因为, 多孔材料将已爆区域和未爆区域分隔, 火焰发生淬熄后, 高温产物没有立即熄灭, 冲击进入多孔材料内部或被材料固相结构反射, 未燃气体由未爆区域向已爆区域运输接触到多孔材料内部和已爆区域内残留的高温产物, 未燃气体由高温产物再次被点燃, 在材料表面持续燃烧, 可燃气体是否在材料表面被点燃需进一步研究观察。 $\delta=30$ 的多孔材料的厚度越小, 预混爆炸火焰淬熄后转变扩散燃烧越剧烈, 即扩散燃烧程度与材料厚度之间所表现的规律为材料厚度越小, 扩散燃烧越猛烈。如果在扩

散燃烧的时间内, 继续为空间中供给可燃气体, 很有可能再次转变为预混气体爆炸, 今后需对此现象做进一步研究。

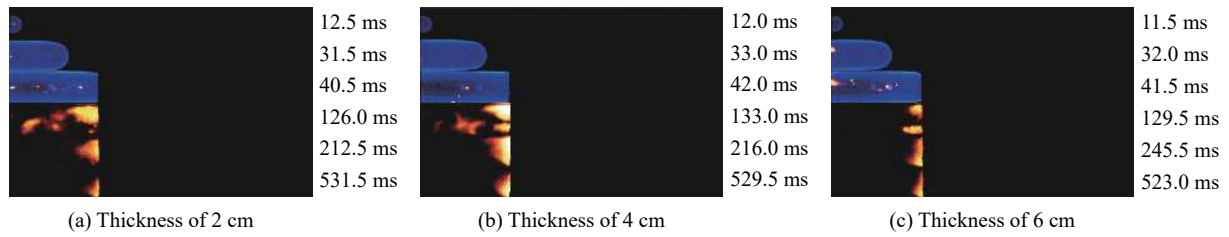


图 6 每英寸长度孔数为 20 的多孔材料对火焰的影响

Fig. 6 Effect of the porous material with 20 pores per inch in length

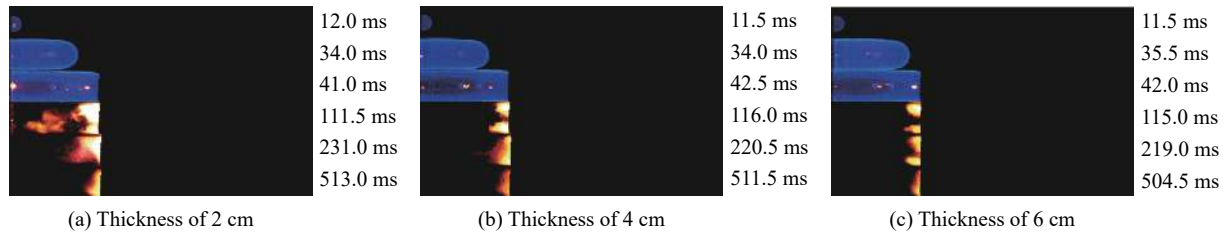


图 7 每英寸长度孔数为 30 的多孔材料对火焰的影响

Fig. 7 Effect of the porous material with 30 pores per inch in length

2.2 多孔材料对火焰速度和压力的影响

图 8 所示为爆炸火焰在接触多孔材料前的平均传播速度。火焰传播速度受多孔材料孔隙度和厚度的双重影响。随着多孔材料孔隙度和厚度的增大, 爆炸火焰的传播速度减慢, 原因为火焰传播速度与火焰前方未燃气体密切相关, 火焰前锋速度主要由火焰前方未燃气体构成, 当多孔材料的孔隙度或厚度增大时, 材料的固相结构在空间中的占比提高, 多孔材料对火焰前锋处未燃气体运动的阻塞率增大, 未燃气体穿过多孔材料的效率降低, 进而影响火焰前锋处未燃气体的流速, 爆炸初始阶段未燃气体在已爆区域内被压缩的速度大于气体穿过多孔材料的速率。因此, 火焰锋面在向前推移的过程传播速度随着多孔材料孔隙度或厚度的增大而降低。

气体爆炸产生的超压与火焰在传播过程相互作用。根据多孔材料孔隙度不同, 对爆炸反应表现出抑制或促进两种不同的效果。图 9 所示为 $\delta=10$ 的多孔材料对爆炸超压的影响, 超压曲线上升速率和峰值明显高于无多孔材料时爆炸超压的发展。对比图 5 可以看出, 厚度为 2 cm 时, 爆炸超压与体积分数

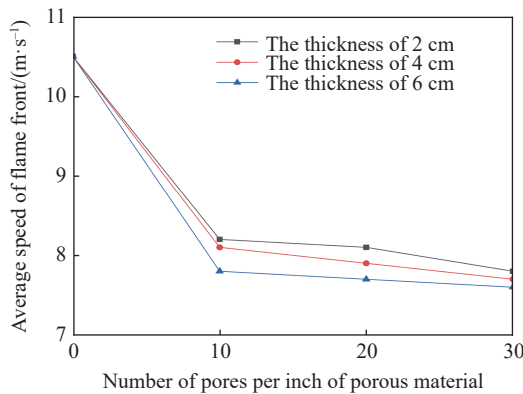


图 8 火焰锋面接触多孔材料前的传播速度
Fig. 8 Speed of flame front before impacting on porous materials

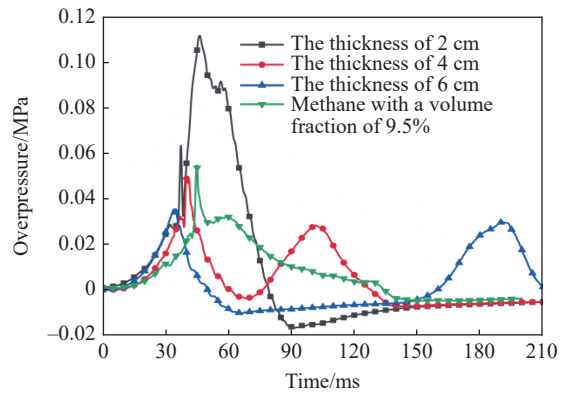


图 9 每英寸长度孔数为 10 的多孔材料下的压力时程曲线
Fig. 9 Histories of pressure for porous material with 10 pores per inch in length

9.5% 甲烷爆炸超压峰值相同时,有短暂的下降趋势, $t=40$ ms 时,火焰穿过多孔材料发生爆燃,促进空间内的超压进一步升高,最终达到最大值 0.11 MPa。相比于体积分数为 9.5% 甲烷爆炸时,超压峰值提高了 107.54%,随后快速下降。当 $\delta=10$ 的多孔材料厚度为 4 和 6 cm 时,超压峰值为 0.050 和 0.038 MPa,分别降低了 5.6% 和 28.3%。在放置 4 和 6 cm 厚多孔材料时,火焰在传播过程中经过短暂延时后再次发生爆炸反应,因此,多孔材料厚度为 4 和 6 cm 的情形下,超压曲线出现 2 次峰值,分别在 $t=103$ ms 和 $t=190$ ms 时,峰值分别为 0.030 和 0.031 MPa,但均小于第一次超压峰值。

图 10 所示为 $\delta=20$ 的多孔材料对爆炸超压的影响,超压上升速率与 $\delta=10$ 的多孔材料情形时相似,均大于体积分数 9.5% 的甲烷爆炸超压上升速率,且多孔材料的厚度越大,超压上升速率越高,所能达到的峰值越大。厚度为 2、4 和 6 cm 时超压峰值分别为 0.028、0.034 和 0.045 MPa,相比于体积分数 9.5% 的甲烷爆炸时,分别降低了 47.17%、35.85% 和 15.09%。达到超压峰值的时间约为 37 ms,时间缩短了 21.28%。当 $\delta=20$ 时,火焰发生淬熄,但超压上升速率依然大于体积分数 9.5% 的甲烷爆炸超压的上升趋势。分析原因为,爆炸区域内超压上升速率受多孔材料固相结构的阻碍,因多孔材料内孔隙随机分布,孔隙度增或厚度加时,多孔材料阻碍气体流动的能力增加,从而降低了爆炸区域超压的泄放效率,超压在有限空间内积累的速率更快。因此,多孔材料提高了超压上升速率,但降低了超压所能达到的最大值,缩短了爆炸持续的时间。图 11 为 $\delta=30$ 的多孔材料对超压的影响,与图 10 相比,超压上升速率曲线趋势相似,但上升速率更快,超压峰值与图 10 相比有很大地提高。材料厚度为 2 和 4 cm 情形时,超压峰值分别达到了 0.039、0.052 MPa,与体积分数 9.5% 的甲烷爆炸超压峰值相比降低了 26.42% 和 1.89%。材料为 6 cm 厚时超压峰值为 0.061 MPa,达到了体积分数 9.5% 的甲烷爆炸的 115%。因此, $\delta=30$ 的多孔材料阻碍超压泄放的影响更显著,且随着厚度的增加,爆炸区域内的超压甚至超过无多孔材料爆炸时产生的超压峰值。相比于 $\delta=20$ 的多孔材料超压积累速率更快。因此,考虑对爆炸超压的衰减作用, $\delta=20$ 的多孔材料对爆炸超压的衰减效能优于 $\delta=10, 30$ 的多孔材料,且厚度为 2 和 4 cm 时对超压的衰减效果更显著。

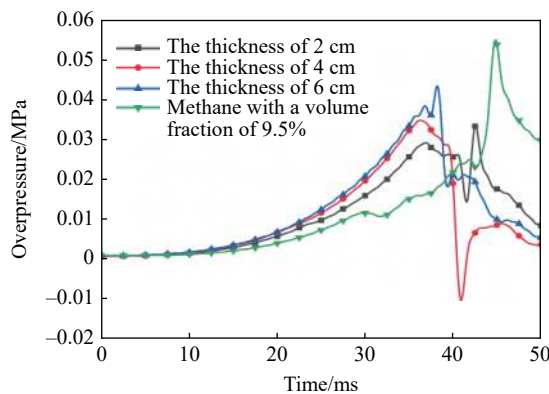


图 10 每英寸长度孔数为 20 多孔材料的压力历程曲线

Fig. 10 Histories of pressure for porous material with 20 pores per inch in length

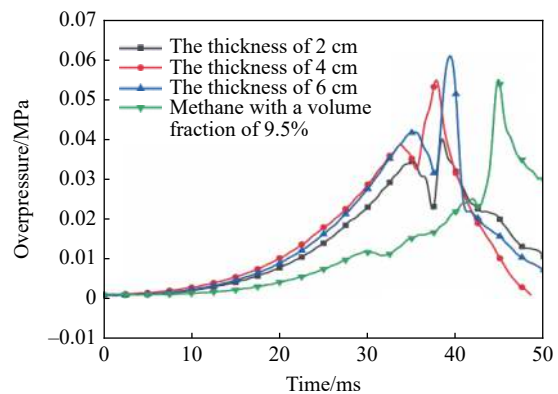


图 11 每英寸长度孔数为 30 多孔材料的压力历程曲线

Fig. 11 Histories of pressure for porous material with 30 pores per inch in length

图 12 为 $\delta=20$ 的多孔材料淬熄火焰后,已爆区域内的压力变化。由图 12 中可以看出,火焰被多孔材料淬熄后已爆区域内的压力迅速降低,小于常规大气压,且厚度相对较小的多孔材料对已爆区域内压力下降的影响愈明显。多孔材料孔径较大时,压力穿过多孔材料的效率提高,当火焰被瞬间熄灭后,厚度越小的多孔材料对已爆区域内压力的泄放效率越高,从而导致一定时间内已爆区域的压力值小于常规大气压力。图 12 中显示, $\delta=20$ 的多孔材料厚度为 2、4 和 6 cm 时,火焰淬熄后压力分别降低到 -0.0088、-0.0092 和 -0.0069 MPa。 $\delta=20$ 的多孔材料厚度为 4 cm 时,压力下降值最大,结合图 6(b) 分析,当爆炸火

焰被淬熄后, 多孔材料另一端的未燃气体由于压力差的作用被抽吸运输到已爆区域, 未燃气体遇到高温产物后在多孔材料的表面形成扩散燃烧的现象, 以此更充分地解释了扩散燃烧的产生。当多孔材料两端压差越大时, 负压抽吸的作用越强, 可燃气体供给扩散燃烧的效率越高, 导致扩散燃烧程度越剧烈。图 13 为 $\delta=30$ 的多孔材料, 不同厚度时火焰淬熄后区域内压力值的变化。由于孔径减小, 多孔材料固相结构增加, 影响压力变化规律更加明显。随着多孔材料厚度的增大, 压力下降到负压的最大值减小。厚度为 2、4 和 6 cm 时, 负压值分别为 -0.011 、 -0.0082 和 -0.006 MPa。对比图 7(a) 所示可以看出, 扩散燃烧的程度最大, 因此, 说明了负压抽吸作用对火焰持续扩散燃烧起到了主导作用。从已爆区域负压角度分析, 6 cm 厚多孔材料限制扩散燃烧火焰的程度要优于 2、4 cm。根据肖华华^[21]对气体爆炸反应区的分析, 激波管内温度与密度在不同位置处的变化如图 14 所示。爆炸压力快速释放导致已燃气体密度较低, 同样促进了可燃气体由多孔材料下游向已爆区域扩散。

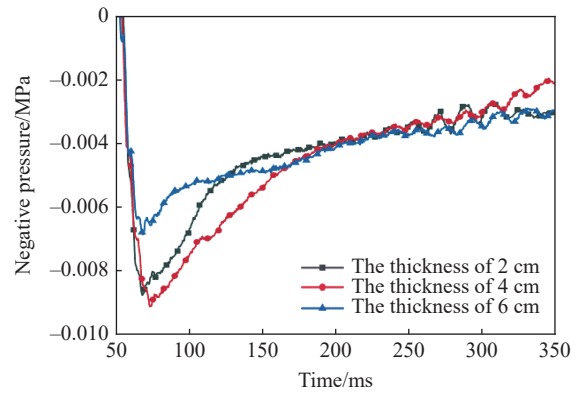


图 12 每英寸长度孔数为 20 的多孔材料下火焰淬熄后压力变化

Fig. 12 Pressure change after quenching of flame affected by the porous material with 20 pores per inch in length

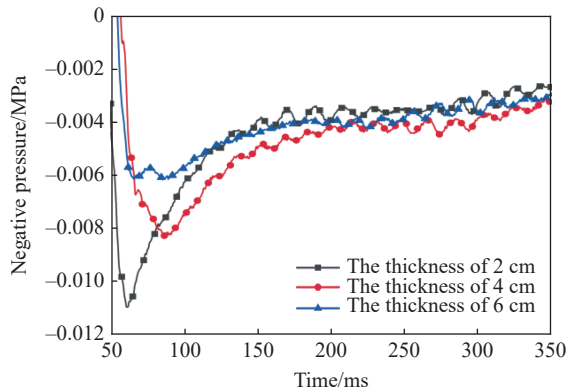


图 13 每英寸长度孔数为 30 的多孔材料下火焰淬熄后压力变化

Fig. 13 Pressure change after quenching of flame affected by the porous material with 30 pores per inch in length

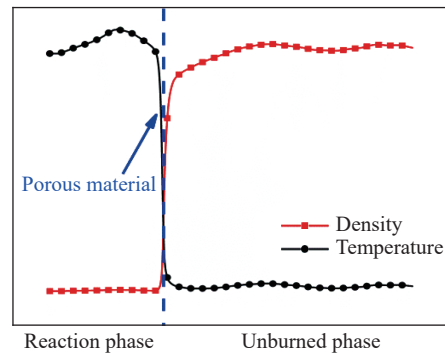


图 14 激波管内温度与密度变化示意图

Fig. 14 Schematic of temperature and density change in duct

3 结 论

(1) 管道中放置多孔材料时, 爆炸火焰接触多孔材料前的火焰结构不发生改变, 随着材料孔隙度和厚度的增大, 火焰接触材料之前的传播过程中, 锋面速度依次降低。 $\delta=10$ 的多孔材料无法淬熄爆炸火焰, 并可加速火焰由层流向湍流的转变, 促进爆炸的传播。 $\delta=20$ 和 $\delta=30$ 的多孔材料可使火焰发生淬熄, 但在已爆区域一侧的材料表面转变为扩散燃烧。

(2) 多孔材料对爆炸超压具有促进或抑制作用。与无多孔材料相比, $\delta=10$ 的多孔材料厚度为 2 cm 时, 超压峰值提高了 107.54%, 4 和 6 cm 厚时, 分别降低了 5.6% 和 28.3%。 $\delta=20$ 的多孔材料情形下, 超压峰值分别降低了 47.17%、35.85% 和 15.09%。 $\delta=30$ 的多孔材料厚度为 2 和 4 cm 时, 超压峰值分别降低了 26.42% 和 1.89%, 厚度为 6 cm 时, 超压峰值为无多孔材料时的 115%。 $\delta=20$ 的多孔材料对超压的衰减

效率优于 $\delta=10$ 和 $\delta=30$ 情形,且厚度越小,超压衰减效率越高。

(3)多孔材料对爆炸火焰的抑制行为主要表现为降低层流火焰速度-淬熄-爆炸转扩散燃烧-熄灭。扩散燃烧程度主要受多孔材料两端压力差影响,材料厚度越小,火焰淬熄后,已爆区域内负压值越大,对未燃气体的抽吸输运能力越强,扩散燃烧现象越剧烈。因此,扩散燃烧程度与材料厚度之间呈反比关系。

参考文献:

- [1] SUN J H, ZHAO Y, WEI C R, et al. The comparative experimental study of the porous materials suppressing the gas explosion [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 26: 954–960. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.2262.
- [2] PRAMOD B, Prudhvi R J, PARASHAR C H, et al. Attenuation of shock waves by using porous media [C]//AIP Conference Proceedings. Karnataka, India, 2019: 030015. DOI: 10.1063/1.5092918.
- [3] OLIM M, DONGEN M, KITAMURA T, et al. Numerical simulation of the propagation of shock waves in compressible open-cell porous foams [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1994, 20(3): 557–568. DOI: 10.1016/0301-9322(94)90029-9.
- [4] KITAGAWA K, YASUHARA M, TAKAYAMA K. Attenuation of shock waves propagating in polyurethane foams [J]. *Shock Waves*, 2006, 15(6): 437–445. DOI: 10.1007/s00193-006-0042-1.
- [5] 邵继伟, 庄春吉, 王志荣, 等. 组合型多孔材料对容器管道系统内甲烷/空气的抑爆效果 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(4): 905–912. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0064.
SHAO J W, ZHUANG C J, WANG Z R, et al. Explosion suppression effect of CH₄/air by combined porous materials in a container piping system [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(4): 905–912. DOI: 10.11883/bzycj-2017-0064.
- [6] 梁滔, 孙永夺, 杨锡军. 泡沫镍对甲烷-空气预混气体爆燃超压影响的研究 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2017, 13(8): 170–174. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2017.08.027.
LIANG T, SUN Y D, YANG X J. Study on effect of nickel foam on deflagration overpressure of methane-air premixed gas [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2017, 13(8): 170–174. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2017.08.027.
- [7] 陈鹏, 黄福军, 何昕, 等. 多孔材料对管道内甲烷-空气预混火焰传播的影响 [J]. *工业安全与环保*, 2016, 42(1): 49–52. DOI: 10.3969/j.issn.1001-425X.2016.01.015.
CHEN P, HUANG F J, HE X, et al. Effects of different porous foam upon premixed methane/air flame propagation in closed ducts [J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2016, 42(1): 49–52. DOI: 10.3969/j.issn.1001-425X.2016.01.015.
- [8] 陈鹏, 孙永夺. 泡沫金属对甲烷/空气爆燃火焰的淬熄实验研究 [J]. *中国安全生产科学技术*, 2017, 13(7): 37–41. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2017.07.006.
CHEN P, SUN Y D. Experiment study on quenching effect of foam metal on methane-air deflagration flame [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2017, 13(7): 37–41. DOI: 10.11731/j.issn.1673-193x.2017.07.006.
- [9] 魏春荣, 徐敏强, 王树桐, 等. 多孔材料抑制瓦斯爆炸火焰波的实验研究 [J]. *中国矿业大学学报*, 2013, 42(2): 206–213. DOI: 10.13247/j.cnki.jcmt.2013.02.008.
WEI C R, XU M Q, WANG S T, et al. Experiment of porous materials for suppressing the gas explosion flame wave [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2013, 42(2): 206–213. DOI: 10.13247/j.cnki.jcmt.2013.02.008.
- [10] 魏春荣, 徐敏强, 孙建华, 等. 多孔材料抑制瓦斯爆炸传播的实验及机理 [J]. *功能材料*, 2012, 43(16): 2247–2250; 2255. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9731.2012.16.031.
WEI C R, XU M Q, SUN J H, et al. Experiment and mechanism of porous materials for suppressing the gas explosion [J]. *Journal of Functional Materials*, 2012, 43(16): 2247–2250; 2255. DOI: 10.3969/j.issn.1001-9731.2012.16.031.
- [11] 孙建华, 赵益, 魏春荣, 等. 金属丝网和泡沫陶瓷组合体抑制瓦斯爆炸的实验研究 [J]. *煤炭学报*, 2012, 37(7): 1156–1160. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2012.07.018.
SUN J H, ZHAO Y, WEI C R, et al. Experimental study of combination of metal wire mesh and foam ceramic for suppressing the gas explosion [J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(7): 1156–1160. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2012.07.018.
- [12] 聂百胜, 何学秋, 张金锋, 等. 泡沫陶瓷对瓦斯爆炸过程影响的实验及机理 [J]. *煤炭学报*, 2008(8): 903–907. DOI: 10.3321/j.issn.0253-9993.2008.08.013.
NIE B S, HE X Q, ZHANG J F, et al. The experiments and mechanism of foam ceramics affecting gas explosion process [J].

- Journal of China Coal Society*, 2008(8): 903–907. DOI: 10.3321/j.issn:0253-9993.2008.08.013.
- [13] 聂百胜, 何学秋, 张金锋, 等. 泡沫陶瓷对瓦斯爆炸火焰传播的影响 [J]. *北京理工大学学报*, 2008(7): 573–576. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2008.07.001.
- NIE B S, HE X Q, ZHANG J F, et al. Effect of foam ceramics upon gas explosion flame propagation [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2008(7): 573–576. DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2008.07.001.
- [14] 蒋新生, 谢威, 杨卫, 等. 网状材料抑制中尺度密闭空间爆炸试验研究 [J]. *中国安全科学学报*, 2017, 27(12): 20–25. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2017.12.004.
- JIANG X S, XIE W, YANG W, et al. Experimental study on suppression of gasoline-air mixture explosion in narrow-confined space using polymer mesh [J]. *China Safety Science Journal*, 2017, 27(12): 20–25. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2017.12.004.
- [15] 温小萍, 郭志东, 王发辉, 等. 一维多孔介质和超细水雾协同抑制瓦斯爆炸试验 [J]. *安全与环境学报*, 2020, 20(2): 539–547. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2019.0114.
- WEN X P, GUO Z D, WANG F H, et al. Experimental approach to the synergistic inhibition of the gas explosion through the one-D porous media and the ultrafine water mist [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2020, 20(2): 539–547. DOI: 10.13637/j.issn.1009-6094.2019.0114.
- [16] 余明高, 刘梦茹, 温小萍, 等. 超细水雾-多孔材料协同抑制瓦斯爆炸实验研究 [J]. *煤炭学报*, 2019, 44(5): 1562–1569. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2018.0795.
- YU M G, LIU M R, WEN X P, et al. Synergistic inhibition of gas explosion by ultrafine water mist-porous materials [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(5): 1562–1569. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2018.0795.
- [17] 王大龙, 周心权, 张玉龙, 等. 煤矿瓦斯爆炸火焰波和冲击波传播规律的理论研究与实验分析 [J]. *矿业安全与环保*, 2007(2): 1–3; 89. DOI: 10.3969/j.issn.1008-4495.2007.02.001.
- WANG D L, ZHOU X Q, ZHANG Y L, et al. Theoretic study and experimental analysis of propagation law of mine gas explosion flame wave and shock wave [J]. *Mining Safety & Environmental Protection*, 2007(2): 1–3; 89. DOI: 10.3969/j.issn.1008-4495.2007.02.001.
- [18] 段玉龙, 王海燕, 程彩霞, 等. 瓦斯爆炸火焰波热作用下巷道煤壁温度变化规律的探讨与分析 [J]. *煤矿安全*, 2010, 41(9): 100–104. DOI: 10.13347/j.cnki.mkaq.2010.09.024.
- DUAN Y L, WANG H Y, CHEN C X, et al. Discussion and analysis on the variation law of coal wall temperature under the action of flame wave heat of gas explosion [J]. *Safety in Coal Mines*, 2010, 41(9): 100–104. DOI: 10.13347/j.cnki.mkaq.2010.09.024.
- [19] ZHANG D, NIE B S, WANG C, et al. Preliminary research on porous foam ceramics against gas explosions in goaf [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 26: 1330–1336. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.11.2308.
- [20] NIE B S, ZHANG R M, HE X Q, et al. Potential applications of foam ceramics in gas explosion prevention [J]. *Advanced Materials Research*, 2011: 284–286. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.284-286.1330.
- [21] 肖华华. 管道中氢-空气预混火焰传播动力学实验与数值模拟研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013: 5–6.

(责任编辑 王易难)