DOI: 10.11883/bzycj-2017-0064 文章编号: 1001-1455(2018)04-0905-08

组合型多孔材料对容器管道系统内甲烷/空气的抑爆效果*

邵继伟[1],庄春吉[1],王志荣[2],黄予楠[1],卢雯婷[1]
(1. 宁波工程学院安全工程学院,浙江 宁波 315211;
2. 南京工业大学安全科学与工程学院,江苏 南京 210009)

摘要: 为研究多孔材料对可燃气体的抑爆效果,选取了 3 类 6 种多孔材料分别组合后进行实验研究。以甲烷/空气预混气体作为研究对象,利用自制薄型铁环将多孔材料固定在密闭容器管道系统内,对比分析了薄型铁环、单层型多孔材料、双层组合型多孔材料和三层组合型多孔材料的抑爆效果。结果表明:薄型铁环增强了气体爆炸强度,铁环后爆炸压力最大;多孔材料抑爆效果明显,双层组合型多孔材料抑爆效果相比单层型多孔材料和三层组合型多孔材料稳定;抑爆效果最佳的组合型多孔材料为 Al_2O_3 10 mm/30 PPI+SiC 20 mm/20 PPI,爆炸压力抑制效果最佳的组合型多孔材料为 Al_2O_3 10 mm/30 PPI+Fe-Ni 10 mm/90 PPI+SiC 20 mm/10 PPI。

关键词: 多孔材料;甲烷/空气预混气体;容器管道系统;抑爆效果;爆炸强度指数
中图分类号: O381;TE687 **国标学科代码**: 13035;62030 **文献标志码**: A

工业生产过程中,易燃易爆气体得到了广泛的应用。绝大多数情况下,这些可燃气体通过容器或管道进行储存和运输,一旦遇到负压、密封失效等原因导致空气混入,极易发生爆炸危害事故[1]。多孔材料对爆炸火焰和压力具有较好的抑制和衰减作用,已在军用和民用工程中得到了广泛关注,学者们对多孔材料抑爆方面也陆续开展了研究[2-3]。Vasil'Ev[4]发现实验管道壁面附上多孔材料涂层后,在近临界区能够观察到明显的爆轰波衰减现象,并根据抑爆衰减程度选择多孔材料的最佳尺寸。Diamantis 等[5]采用数值模拟技术对多孔介质燃烧器中浸没火焰和表面火焰进行了研究,比较了 2 种燃烧方式下的火焰辐射效率。Joo 等[6]对陶瓷泡沫材料的爆炸火焰淬熄性能进行了研究,根据等效淬熄直径,认为泡沫陶瓷材料的火焰淬熄效果不如填充球,淬熄直径受到多个参数的影响,且无法用一维热淬熄理论来进行解释。喻健良等[7]研究了丝网结构对可燃气体爆炸的抑制作用,建立了临界淬熄速度、临界淬熄超压和熄爆参数与多层丝网结构抑爆性能之间的关系。Nie 等[8]通过实验研究了 Al_2O_3 和 SiC 泡沫陶瓷在长方形爆炸实验管中的火焰传播特性,发现泡沫陶瓷能将最大爆炸超压衰减 50%,泡沫陶瓷微观网络结构有助于气体爆炸火焰淬熄和抑制冲击波超压。魏春荣等[9]对不同参数的多孔材料进行了火焰温度实验研究,发现多孔材料的厚度、孔径、相对密度是影响火焰温度的重要因素,而且不同多孔材料的抗烧结能力和抗冲击能力也有很大区别。

综上可以看出,多孔材料在可燃气体抑爆方面能够起到较好作用,其抑爆效果跟多孔材料的尺寸、厚度、材料以及微观结构等参数有关,选用时还要综合考虑多孔材料的经济性和抗烧结、抗冲击、抗腐蚀等方面的能力。当前的研究主要集中在单一型多孔材料的抑爆,对于组合型多孔材料的研究未见报道。因此,本工作选取 3 类 6 种多孔材料,将其进行组合后嵌入自制的密闭容器管道系统内开展抑爆实验,探索不同组合型多孔材料对容器管道系统内甲烷/空气的抑爆效果。

* **收稿日期**: 2017-02-24; **修回日期**: 2017-04-08
基金项目: 国家自然科学基金项目(51376088);浙江省大学生科技创新活动项目(2016R424008);
宁波工程学院 2015 年度校级科研项目(2015001)
第一作者: 邵继伟(1997—),男,本科生; **通信作者**: 庄春吉,zhuangcj@nbut.edu.cn。

1 实验装置与实验方法

1.1 实验装置

实验装置如图 1 所示:球形容器内径为 0.60 m,容积约为 110 L;水平管道为圆形管道,分别由 1 节 0.25 m和 2 节 2 m 的管道用法兰连接而成,内径为 0.06 m,管道由壁厚为 0.015 m 的无缝钢管制成;管道末端用盲板进行封堵,形成一个密闭的球形容器管道系统。在球形容器管道系统上安装了高能点火枪、充/抽气阀和压力变送器。

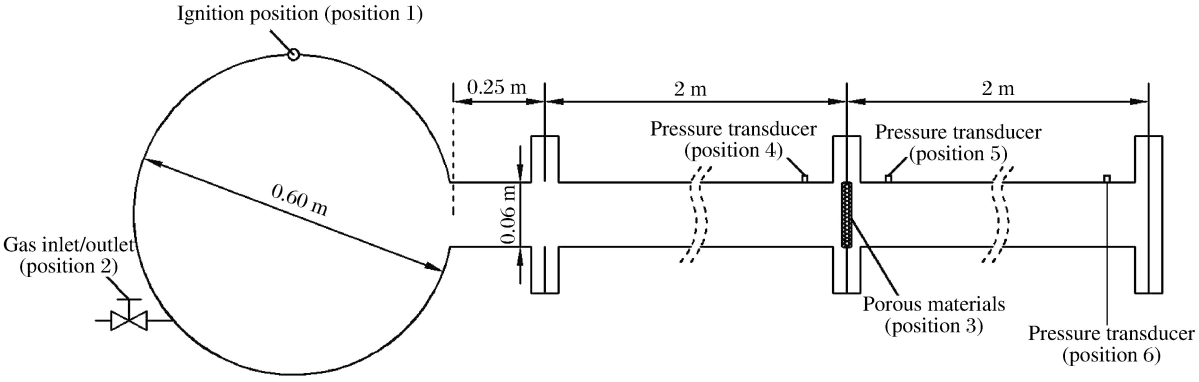


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematics of the experimental device

1.2 实验方法

选用泡沫 Fe-Ni、泡沫陶瓷 Al_2O_3 和泡沫陶瓷 SiC 等 3 类多孔材料作为研究对象,每类多孔材料选取 2 种结构,多孔材料的结构参数见表 1,表中 PPI 为每平方英寸面积上的孔数。采用甲烷的体积分数为 10%的甲烷/空气作为爆炸气体环境,初始压力设定为 0 MPa。实验过程中将多孔材料用 26 号不锈钢丝固定在一薄型铁环上,固定方式见图 2。薄型铁环的内径为 55 mm,稍小于管道直径,将该铁环固定在 2 节管道之间,记为位置 3,多孔材料的直径与管道直径相吻合。在多孔材料前、后和管道末端分别设置了压力变送器,依次记为位置 4、5、6,各位置到球形容器左侧壁面中心的水平距离记为 L。

表 1 多孔材料几何参数

Table 1 Geometrical parameters of porous materials

多孔材料	厚度/mm	孔径/PPI	体积密度/(g·cm^{-3})	通孔率/%
Fe-Ni	10	90	0.417 2	≥98
	10	40	0.269 4	≥98
SiC	20	20	0.603 0	80～90
	20	10	0.579 5	80～90
Al_2O_3	10	50	0.580 3	80～90
	10	30	0.724 9	80～90

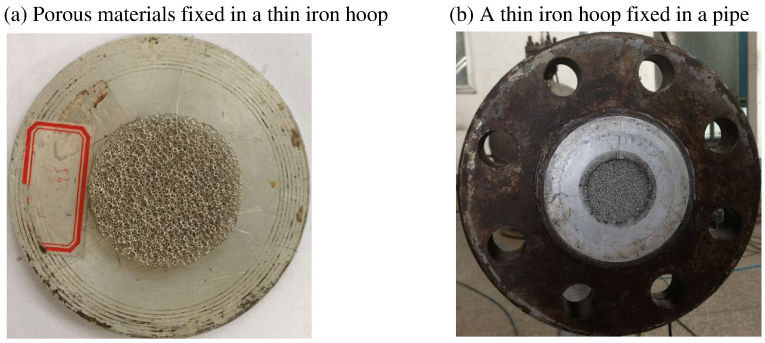


图 2 多孔材料固定方式

Fig. 2 Installation of porous materials

通过在充/抽气阀上连接真空泵,将容器管道系统抽真空至−0.09 MPa,在保证气密性的情况下,用 RCS2000-B 型自动配气系统充入预先配好的甲烷体积分数为 10%的甲烷/空气混合气至初始压力0 MPa,静置3～5 min。由于流体与壁面的接触部分更容易产生静电,因此利用 XDH-6 型高能点火器(点火能量为 6 J)在球形容器的上壁面利用点火枪进行点火,引爆容器管道系统内的可燃气体[10-11]。通过 HM90-

H3-2 型高频压力变送器(量程0～5 MPa，测量精度±0.25%FS，响应频率200 kHz)和配套的数据采集系统 DEWE-43 型数据采集仪及 DEWESoft 7.0 配套分析软件进行数据采集。

1.3　实验方案

将 3 类 6 种多孔材料分别进行组合，探讨抑爆效果最佳的多孔材料组合模式，实验方案见表 2。

表 2　多孔材料抑爆实验方案

Table 2　Experimental scheme of porous materials for suppressing explosion

分组	实验方案		
A	(1) None	(2) Iron hoop	
B	(1) Fe-Ni 10 mm/90 PPI	(2) Fe-Ni 10 mm/40 PPI	(3) SiC 20 mm/20 PPI
	(4) SiC 20 mm/10 PPI	(5) Al_2O_3 10 mm/50 PPI	(6) Al_2O_3 10 mm/30 PPI
C	(1) Fe-Ni 10 mm/90 PPI+SiC 20 mm/20 PPI	(2) Fe-Ni 10 mm/90 PPI+SiC 20 mm/10 PPI	
	(3) Fe-Ni 10 mm/40 PPI+SiC 20 mm/20 PPI	(4) Fe-Ni 10 mm/40 PPI+SiC 20 mm/10 PPI	
	(5) Fe-Ni 10 mm/90 PPI+Al_2O_3 10 mm/50 PPI	(6) Fe-Ni 10 mm/90 PPI+Al_2O_3 10 mm/30 PPI	
	(7) Fe-Ni 10 mm/40 PPI+Al_2O_3 10 mm/50 PPI	(8) Fe-Ni 10 mm/40 PPI+Al_2O_3 10 mm/30 PPI	
	(9) Al_2O_3 10 mm/50 PPI+SiC 20 mm/20 PPI	(10) Al_2O_3 10 mm/30 PPI+SiC 20 mm/20 PPI	
	(11) Al_2O_3 10 mm/50 PPI+SiC 20 mm/10 PPI	(12) Al_2O_3 10 mm/30 PPI+SiC 20 mm/10 PPI	
D	(1) Al_2O_3 10 mm/50 PPI+Fe-Ni 10 mm/90 PPI+SiC 20 mm/20 PPI		
	(2) Al_2O_3 10 mm/30 PPI+Fe-Ni 10 mm/90 PPI+SiC 20 mm/20 PPI		
	(3) Al_2O_3 10 mm/50 PPI+Fe-Ni 10 mm/90 PPI+SiC 20 mm/10 PPI		
	(4) Al_2O_3 10 mm/30 PPI+Fe-Ni 10 mm/90 PPI+SiC 20 mm/10 PPI		
	(5) Al_2O_3 10 mm/50 PPI+Fe-Ni 10 mm/40 PPI+SiC 20 mm/20 PPI		
	(6) Al_2O_3 10 mm/30 PPI+Fe-Ni 10 mm/40 PPI+SiC 20 mm/20 PPI		
	(7) Al_2O_3 10 mm/50 PPI+Fe-Ni 10 mm/40 PPI+SiC 20 mm/10 PPI		
	(8) Al_2O_3 10 mm/30 PPI+Fe-Ni 10 mm/40 PPI+SiC 20 mm/10 PPI		

2　实验结果与分析

2.1　密闭容器管道系统内气体的爆炸特性

为能清晰比较多孔材料的抑爆效果，在开展多孔材料对密闭容器管道系统抑爆影响研究前，如表 2 中 A 组，在无多孔材料情况下进行 2 组空白实验。第 1 组实验中密闭容器管道系统内无任何阻碍物，第 2 组在位置 3 处放入用于固定多孔材料的薄型铁环，2 组实验的爆炸压力随时间变化见图 3。为了对多孔材料的抑爆效果进行综合定量分析，引入表征爆炸强度指数的特征参数 K，其定义为最大爆炸压力 p_{max} 和最大爆炸压力上升速率 $(dp/dt)_{max}$ 的乘积，K 值越大，说明爆炸危害越大，抑爆效果越差[12]。2 组实验在位置 4 和 5 处的最大爆炸压力、最大爆炸压力上升速率和爆炸强度指数见表 3。

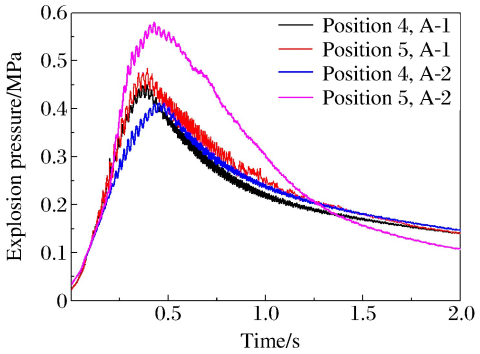


图 3　无多孔材料情况下密闭容器管道系统内爆炸压力随时间的变化

Fig. 3　Explosion pressure varying with time in closed vessel piping system without porous materials

从图 3 和表 3 可以看出，密闭容器管道系统内无任何阻碍物的情况下，位置 4 和 5 处的爆炸压力随时间变化趋势基本相同，位置 5 处的最大爆炸压力稍微大于位置 4 处的。加入薄型铁环后，位置 4 和 5 两处的爆炸力随时间变化趋势有明显区别，位置 4 处的最大爆炸压力较无任何阻碍物时有明显减小和滞后，而位置 5 处的最大爆炸压力明显增大，达到了 0.580 MPa。从表 3 可知，无任何阻碍物情况下的 K 值远大于加入薄型铁环后的 K 值，位置 4 处的 K 值大于位置 5 处的。在加入薄型铁环的情况下，位置 4 处的 K 值小于位置 5 处的。分析上述现象，当密闭容器管道系统内无阻碍物

的情况下，爆炸火焰从球形容器进入到管道后，能沿着管道进行稳定传播，促使最大爆炸压力上升速率达到一个较大值。当密闭容器管道系统内加入薄型铁环，铁环的内径小于管道的内径，使铁环成了一个障碍物加设在管道中，爆炸火焰在传播过程中受到了阻碍。因此，位置 4 处的爆炸压力有所减小，当火焰跃过铁环传播到位置 5 处时，被铁环压缩的爆炸气体被引燃，发生了强烈的物理/化学耦合作用，增强了混合物的湍流程度，增大了位置 5 处的最大爆炸压力，而爆炸火焰和压力的传播速度被铁环阻碍，使得最大爆炸压力上升速率增大不明显[13-14]。

表 3 在无多孔材料的情况下密闭容器管道系统内气体爆炸特征参数

Table 3 Characteristic parameters of gas explosion in closed vessel piping system without porous materials

实验编号	p_{max}/MPa		$(dp/dt)_{max}$/(MPa·s^{-1})		K/(MPa^2·s^{-1})	
	位置 4	位置 5	位置 4	位置 5	位置 4	位置 5
A-1	0.450	0.476	22.611	19.770	10.175	9.412
A-2	0.411	0.580	6.318	7.179	2.597	4.164

2.2 单层型多孔材料对气体爆炸的抑爆效果

如表 2 中 B 组，对 6 种多孔材料分别进行抑爆效果实验研究。密闭容器管道系统内加入单层型多孔材料后，位置 4 和 5 处的爆炸压力随时间变化如图 4 所示，最大爆炸压力、最大爆炸压力上升速率和爆炸强度指数见表 4。

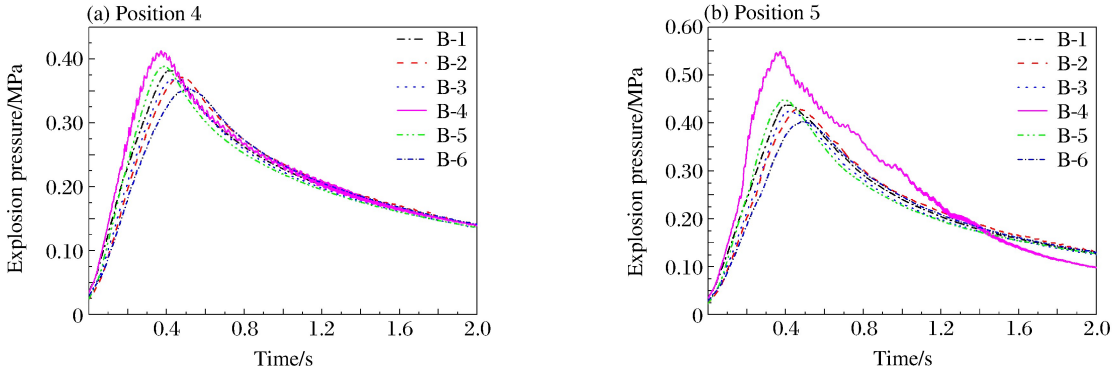


图 4 加入单层多孔材料后密闭容器管道系统内爆炸压力随时间的变化

Fig. 4 Explosion pressure varying with time in closed vessel piping system with single-layer porous materials

表 4 加入单层型多孔材料后密闭容器管道系统内气体爆炸特征参数

Table 4 Characteristic parameters of gas explosion in closed vessel piping system with single-layer porous materials

实验编号	p_{max}/MPa		$(dp/dt)_{max}$/(MPa·s^{-1})		K/(MPa^2·s^{-1})	
	位置 4	位置 5	位置 4	位置 5	位置 4	位置 5
B-1	0.383	0.438	2.445	2.855	0.936	1.250
B-2	0.373	0.430	1.990	2.820	0.742	1.213
B-3	0.368	0.424	1.945	1.810	0.716	0.767
B-4	0.413	0.549	5.330	7.260	2.201	3.986
B-5	0.389	0.449	2.435	2.890	0.947	1.298
B-6	0.354	0.403	1.835	1.840	0.650	0.742

从图 4 和表 4 可以看出，单层型多孔材料对甲烷/空气预混气体起到了一定的抑爆作用。加入 SiC 20 mm/10 PPI后位置 5 处的最大爆炸压力明显大于位置 4 处的最大爆炸压力，其与加入薄型铁环时的爆炸效果相似，抑爆效果较差。通过比较位置 5 处的 K 值，得知 Al_2O_3 10 mm/30 PPI 的抑爆效果最好，SiC 20 mm/10 PPI 的抑爆效果最差。说明单层型多孔材料的抑爆效果受其孔径影响较大，大孔径多孔材料无法起到有效的抑爆作用。多孔材料 Al_2O_3 10 mm/50 PPI 的孔径要小于 Al_2O_3 10 mm/30 PPI 的孔径，而其抑爆效果却不如 Al_2O_3 10 mm/30 PPI的。根据动量守恒定律可知，当爆炸火焰经过多孔介质时，

造成黏性损失和内部损失，表现为火焰淬熄和压力阻碍，这又与多孔材料的材质、厚度、孔径和组合模式密切相关[15-16]。因此，综合分析认为 Al_2O_3 10 mm/30 PPI在火焰抑制和压力正常传播方面的综合效果优于其他单层型多孔材料。

图 5 为加入单层型多孔材料后在位置 4、5 和 6 处的最大爆炸压力值。与无任何障碍物和加设薄型铁环时的最大爆炸压力值比较可以看出，除 SiC 20 mm/10 PPI外，其他单层型多孔材料均实现了一定的抑爆效果，爆炸压力抑制效果区间较大。加入 SiC 20 mm/10 PPI 后，位置 5 处的最大爆炸压力要明显大于无任何障碍时的最大爆炸压力，但小于加入薄型铁环时的最大爆炸压力，说明 SiC 20 mm/10 PPI 也能起到抑爆作用，但效果不如其他单层型多孔材料。

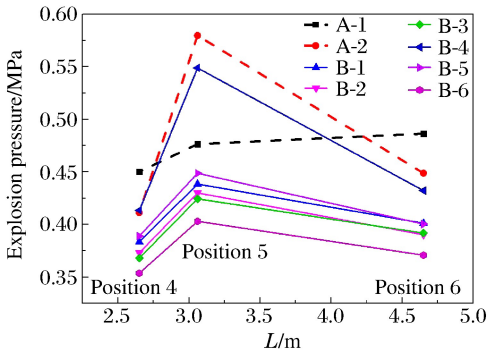


图 5　加入单层多孔材料后位置 4、5、6 处的最大爆炸压力

Fig. 5　Maximum explosion pressures at positions 4, 5, 6 with single-layer porous materials

2.3　组合型多孔材料对气体爆炸的抑爆效果

如表 2 中 C 组，对 6 种多孔材料分别进行两两组合，研究双层组合型多孔材料的抑爆效果。其在位置 4 和 5 处的爆炸压力随时间变化见图 6，最大爆炸压力、最大爆炸压力上升速率和爆炸强度指数见表 5。

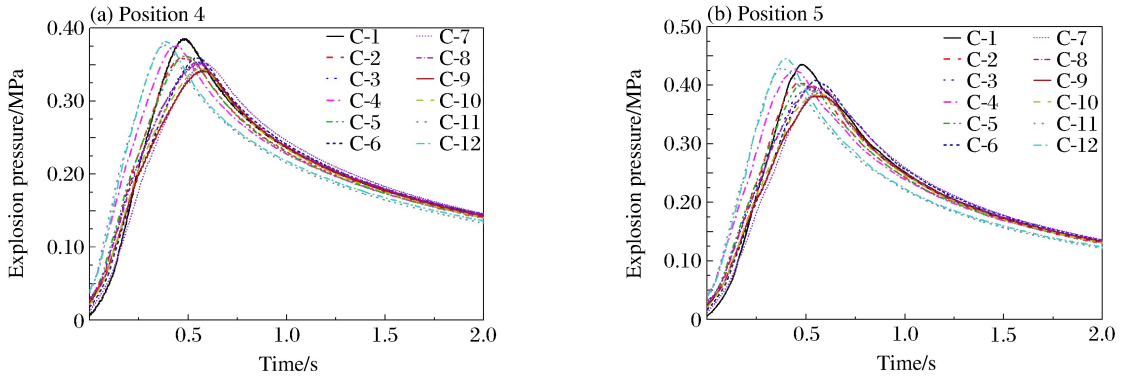


图 6　加入双层组合型多孔材料后密闭容器管道系统内爆炸压力随时间的变化

Fig. 6　Explosion pressure varying with time in closed vessel piping system with double-layer combination porous materials

表 5　加入双层组合型多孔材料后密闭容器管道系统内气体爆炸特征参数

Table 5　Characteristic parameters of gas explosion in closed vessel piping system with double-layer combination porous materials

实验编号	p_{max}/MPa		$(dp/dt)_{max}$/(MPa·s^{-1})		K/(MPa^2·s^{-1})	
	位置 4	位置 5	位置 4	位置 5	位置 4	位置 5
C-1	0.386	0.436	2.685	2.995	1.036	1.306
C-2	0.360	0.405	3.075	3.160	1.107	1.280
C-3	0.355	0.394	2.495	2.210	0.886	0.871
C-4	0.377	0.426	1.925	2.185	0.726	0.931
C-5	0.362	0.401	2.030	1.825	0.735	0.732
C-6	0.359	0.409	1.785	1.990	0.641	0.814
C-7	0.352	0.393	1.500	1.590	0.528	0.625
C-8	0.353	0.400	2.225	2.630	0.785	1.052
C-9	0.342	0.382	1.545	1.610	0.631	0.615
C-10	0.345	0.386	1.460	1.510	0.504	0.583
C-11	0.377	0.430	2.820	2.870	1.063	1.234
C-12	0.383	0.446	2.890	3.335	1.107	1.487

从图 6 和表 5 可以看出，加入双层组合型多孔材料后位置 5 处的最大爆炸压力均大于位置 4 处的最大爆炸压力，位置 4 和 5 处的最大爆炸压力小于无任何障碍物时的最大爆炸压力，说明双层组合型多孔材料的抑爆效果较好。比较位置 5 处的 K 值，得知 Al_2O_3 10 mm/30 PPI＋SiC 20 mm/20 PPI 的抑爆效果最好，Al_2O_3 10 mm/30 PPI＋SiC 20 mm/10 PPI 的效果最差。

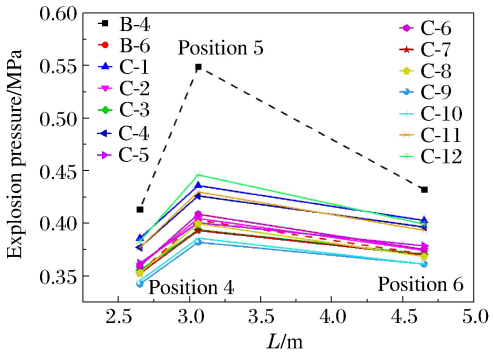


图 7 加入双层组合型多孔材料后位置 4、5、6 处的最大爆炸压力

Fig. 7 Maximum explosion pressures at positions 4, 5, 6 with double-layer combination porous materials

图 7 为加入双层组合型多孔材料后密闭容器管道系统内位置 4、5 和 6 处的最大爆炸压力值。与加入单层型多孔材料后的爆炸压力抑制效果区间比较可以看出，双层组合型多孔材料的抑爆效果均优于单层型多孔材料 SiC 20 mm/10 PPI 的抑爆效果，爆炸压力抑制效果区间较小。Fe-Ni 10 mm/40 PPI＋Al_2O_3 10 mm/30 PPI、Fe-Ni 10 mm/40 PPI＋Al_2O_3 10 mm/50 PPI、Al_2O_3 10 mm/30 PPI＋SiC 20 mm/20 PPI、Al_2O_3 10 mm/50 PPI＋SiC 20 mm/20 PPI 的抑爆效果均优于单层型多孔材料中抑爆效果最佳的 Al_2O_3 10 mm/30 PPI，说明这 4 种组合型多孔材料的组合结构模式对密闭容器管道系统内甲烷/空气爆炸起到了较好的抑爆效果。

如表 2 中 D 组，对三层组合型多孔材料的抑爆效果进行实验研究，位置 4 和 5 处的爆炸压力随时间变化如图 8 所示，最大爆炸压力、最大爆炸压力上升速率和爆炸强度指数见表 6。

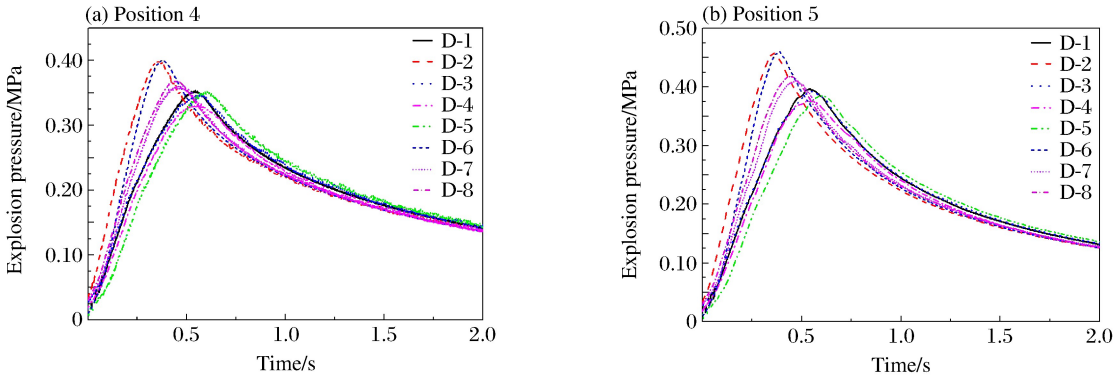


图 8 加入三层组合型多孔材料后密闭容器管道系统内爆炸压力随时间的变化

Fig. 8 Explosion pressure varying with time in closed vessel piping system with three-layer combination porous materials

表 6 加入三层组合型多孔材料后密闭容器管道系统内气体爆炸特征参数

Table 6 Characteristic parameters of gas explosion in closed vessel piping system with three-layer combination porous materials

实验编号	p_{max}/MPa		$(dp/dt)_{max}$/(MPa·s^{-1})		K/(MPa^2·s^{-1})	
	位置 4	位置 5	位置 4	位置 5	位置 4	位置 5
D-1	0.354	0.397	4.038	2.290	1.429	0.909
D-2	0.401	0.458	4.340	2.500	1.740	1.145
D-3	0.348	0.392	3.270	1.950	1.138	0.764
D-4	0.334	0.376	3.090	1.975	1.032	0.743
D-5	0.353	0.386	3.720	1.830	1.313	0.706
D-6	0.400	0.460	3.410	3.285	1.364	1.511
D-7	0.362	0.411	3.940	2.130	1.426	0.875
D-8	0.369	0.419	2.295	2.385	0.847	0.999

从图 8 和表 6 可以看出，加入三层组合型多孔材料后位置 5 处的最大爆炸压力均大于位置 4 处的最大爆炸压力，这与加入双层组合型多孔材料情况下的爆炸特点相似。层数的增多，导致多孔材料微观结构更为复杂，且厚度更大，对火焰和压力正常传播起到了更大的阻碍作用。通过比较位置 5 处的 K 值，得知 Al_2O_3 10 mm/50 PPI＋Fe-Ni 10 mm/40 PPI＋SiC 20 mm/20 PPI 的抑爆效果最好，Al_2O_3 10 mm/30 PPI＋Fe-Ni 10 mm/40 PPI＋SiC 20 mm/20 PPI 的抑爆效果最差。

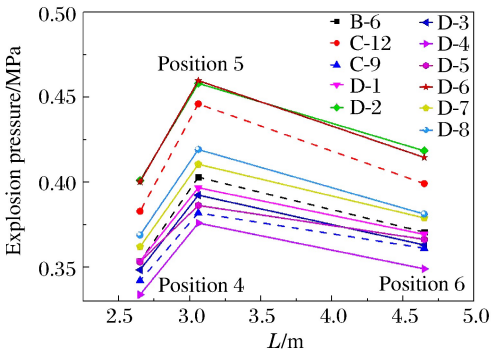


图 9 加入三层组合型多孔材料后位置 4、5、6 处的最大爆炸压力

Fig. 9 Maximum explosion pressures at positions 4，5，6 with three-layer combination porous materials

图 9 为加入三层组合型多孔材料后在密闭容器管道系统内位置 4、5 和 6 处的最大爆炸压力值。与加入双层组合型多孔材料时的爆炸压力抑制效果区间比较可以看出，三层组合型多孔材料的抑制效果区间较大，其中 Al_2O_3 10 mm/30 PPI＋Fe-Ni 10 mm/40 PPI＋SiC 20 mm/20 PPI 和 Al_2O_3 10 mm/30 PPI＋Fe-Ni 10 mm/90 PPI＋SiC 20 mm/20 PPI 的抑爆效果在双层型多孔材料爆炸压力抑制区间之上，抑爆效果较差，说明多孔材料对爆炸压力传播的阻力起到了主导作用。Al_2O_3 10 mm/30 PPI＋Fe-Ni 10 mm/90 PPI＋SiC 20 mm/10 PPI 的抑爆效果在双层型多孔材料爆炸压力抑制区间之下，说明抑爆效果最好。

3　结　论

(1)密闭容器管道系统内加入薄型铁环后，铁环前(位置 4)爆炸压力有明显减小和滞后，铁环后(位置 5)爆炸压力明显增大。

(2)比较爆炸特征参数 K，抑爆效果最佳的组合型多孔材料为 Al_2O_3 10 mm/30 PPI＋SiC 20 mm/20 PPI。比较压力抑制效果区间，爆炸压力抑制效果最佳的组合型多孔材料为 Al_2O_3 10 mm/30 PPI＋Fe-Ni 10 mm/90 PPI＋SiC 20 mm/10 PPI。

(3)组合型多孔材料在密闭容器管道系统内的抑爆效果明显。3 种组合模式多孔材料中，双层组合型多孔材料的抑爆效果相比单层型多孔材料和三层组合型多孔材料更稳定。

参考文献：

[1] 崔克清，张礼敬，陶刚. 化工安全设计[M]. 北京：化学工业出版社，2004：1-2.

[2] ROBERT Z. Deflagration suppression using expanded metal mesh and polymer foams[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries，2007，20(4)：659-663.

[3] 孙建华，李艳霞，魏春荣，等. 泡沫铁镍金属抑制瓦斯爆炸冲击波的实验研究[J]. 功能材料，2013，44(10)：1390-1394.
SUN Jianhua，LI Yanxia，WEI Chunrong，et al. Experimental study on the porous foam iron-nickel metal inhibition of gas explosion wave[J]. Journal of Functional Materials，2013，44(10)：1390-1394.

[4] VASIL'EV A A. Near-limiting detonation in channels with porous walls[J]. Combustion，Explosion，and Shock Waves，1994，30(1)：101-106.

[5] DIAMANTIS D J，MASTORAKOS E，GOUSSIS D A. Simulations of premixed combustion in porous media[J]. Combustion Theory and Modelling，2002，6(3)：383-411.

[6] JOO H I，DUNCAN K，CICCARELLI G. Flame quenching performance of ceramic foam[J]. Combustion Science and Technology，2006，178(10/11)：1755-1769.

[7] 喻健良，蔡涛，李岳，等. 丝网结构对爆炸气体淬熄的试验研究[J]. 燃烧科学与技术，2008，14(2)：97-100.
YU Jianliang，CAI Tao，LI Yue，et al. Experiment to quench explosive gas with structure of wire mesh[J]. Journal of Combustion Science and Technology，2008，14(2)：97-100.

[8] NIE B, HE X, ZHANG R, et al. The roles of foam ceramics in suppression of gas explosion overpressure and quenching of flame propagation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011,192(2):741-747.

[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.
WEI Chunrong, XU Minqiang, WANG Shutong, et al. Experiment of porous materials for suppressing the gas explosion flame wave[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2013,42(2):206-213.

[10] 石油化工静电接地设计规范:SH/T 3097-2017[S].北京:国家石油和化学工业局,2000:6.

[11] 尤明伟,喻源,蒋军成,等.不同管长条件下连通容器预混气体的爆炸[J].燃烧科学与技术,2012,18(3):256-259.
YOU Mingwei, YU Yuan, JIANG Juncheng, et al. Premixed flammable gas explosion in containers connected by pipes with different lengths[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2012,18(3):256-259.

[12] CUI Y Y, WANG Z R, ZHOU K B, et al. Effect of wire mesh on double-suppression of CH_4/air mixture explosions in a spherical vessel connected to pipelines[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2017,45:66-77.

[13] ZHANG J, SUN Z, ZHENG Y, et al. Coupling effects of foam ceramics on the flame and shock wave of gas explosion [J]. Safety Science, 2012,50(4):797-800.

[14] OH K H, KIM H, KIM J B, et al. A study on the obstacle-induced variation of the gas explosion characteristics[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2001,14(6):597-602.

[15] 韩丰磊.多孔材料抑制火焰传播的实验研究及数值模拟[D].大连:大连理工大学,2008:27-34.

[16] SUN J, YI Z, WEI C, et al. The comparative experimental study of the porous materials suppressing the gas explosion [J]. Procedia Engineering, 2011,26:954-960.

Explosion suppression effect of CH_4/air by combined porous materials in a container piping system

SHAO Jiwei[1], ZHUANG Chunji[1], WANG Zhirong[2], HUANG Yunan[1], LU Wenting[1]

(1. *School of Safety Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo* 315211, *Zhejiang*, *China*;
2. *College of Safety Science and Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing* 210009, *Jiangsu*, *China*)

Abstract: The combinations which were structured from three categories of porous materials including six sub-categories, were tested for studying the suppression effects of the porous materials on the explosion of the combustible gas. The combustible gas was the methane-air mixture. The porous materials were fixed in a closed container piping system by using a self-made thin iron hoop, then the explosion suppression effects of a thin iron hoop, single-layer porous materials, double-layer combination porous materials and three-layer combination porous materials were compared. The results show that the thin iron hoop could enhance the gas explosive intensity and the maximum explosion pressure was achieved behind the iron hoop. The explosion suppression effects of the porous materials were obvious, and the explosion suppression effects of the double-layer combination porous materials were more stable compared to those of the single-type porous materials and the three-layer combination porous materials. The optimized combination of the porous materials for explosion suppression turned out to be Al_2O_3 10 mm/30 PPI+SiC 20 mm/20 PPI, and the optimized combination of the porous materials for explosion pressure suppression turned out to be Al_2O_3 10 mm/30 PPI+Fe-Ni 10 mm/90 PPI+SiC 20 mm/10 PPI.

Keywords: porous material; CH_4/air mixture; container piping system; explosion suppression effect; explosion intensity index

(责任编辑 张凌云)