

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2025.03.004

## 阻隔防爆材料对氢气爆炸特性的影响\*

程家彭 陈清 李斌 王永旭 张丹 解立峰  
南京理工大学安全科学与工程学院(江苏南京,210094)

[摘要] 搭建5 L圆柱形爆炸实验平台,在不同初始压力 $p_0$ 下,进行了球形非金属材料(SNM)、铝合金拉网材料(MAA)和聚氨酯多孔材料(PU)3种阻隔防爆材料对氢气爆炸压力影响的实验。结果表明,实验数据和拟合曲线整体呈现出倒U型,最大爆炸压力 $p_{\max}$ 均在氢气体积分数 $\varphi=40\%$ 时达到最大,填充阻隔防爆材料对容器底部湍流的影响更显著,底部所测 $p_{\max}$ 要大于侧壁和顶部。此外,3种材料对氢气/空气预混气爆炸都具有双重作用。当 $\varphi<20\%$ 时,对氢气均表现出抑制效果,抑制作用随 $p_0$ 的增大而减弱。由于冷壁效应和器壁效应,具有较大比表面积的PU抑制效果最佳,最小 $p_{\max}$ 为47 kPa,比空白组降低83.6%。当 $\varphi\geq 20\%$ 时,3种材料均促进氢气爆炸,促进效果随 $p_0$ 的增大而增强。由于材料的孔径和压缩程度均会影响容器内的湍流程度,3种材料对不同 $p_0$ 下 $p_{\max}$ 的增幅不同, $p_{\max}$ 最大可增大为空白组的7.5~9.5倍。

[关键词] 氢气;阻隔防爆材料;初始压力;5 L圆柱形爆炸容器;爆炸压力

[分类号] X932;TQ116.2

## Effect of Explosion-Proof Materials on the Explosion Characteristics of Hydrogen

CHENG Jiapeng, CHEN Qing, LI Bin, WANG Yongxu, ZHANG Dan, XIE Lifeng

School of Safety Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] A 5 L cylindrical explosion test platform was constructed to conduct experiments on the effects of three types of explosion-proof materials, namely spherical non-metallic material (SNM), aluminum alloy stretched mesh material (MAA), and polyurethane porous material (PU), on hydrogen explosion pressure under different initial pressures  $p_0$ . The results indicate that the experimental data and fitting curves for the material group as a whole show an inverted U-shape. The maximum explosion pressures  $p_{\max}$  all reach their maximum values when the hydrogen volume fraction  $\varphi=40\%$ . The effect of the filled explosion-proof materials on the turbulence at the bottom of the vessel is more significant, resulting in a higher measured  $p_{\max}$  at the bottom than that at the side walls and top. In addition, all the three materials have a dual effect on the hydrogen-air premix explosion. When  $\varphi<20\%$ , there is an inhibitory effect on hydrogen, and the inhibitory effect decreases with the increase of  $p_0$ . Due to the cold-wall effect and the vessel-wall effect, PU with larger specific surface area has the best inhibition effect, with a minimum  $p_{\max}$  of 47 kPa, which is 83.6% lower than that of the control group. When  $\varphi\geq 20\%$ , the three materials all promote hydrogen explosion, and the promotion effect is more obvious with the increase of  $p_0$ . Both the pore size and the degree of compression of the materials affect the degree of turbulence in the vessel, resulting in different increases of  $p_{\max}$  at different  $p_0$  for the three materials. The porous material has the maximum increase of  $p_{\max}$  by 7.5-9.5 times.

[KEYWORDS] hydrogen; explosion-proof material; initial pressure; 5 L cylindrical explosion container; explosion pressure

\* 收稿日期:2024-06-06

基金项目:江苏省科研创新计划(KYCX24\_0624)

第一作者:程家彭(1999—),男,硕士,主要从事气体爆炸方面的研究。E-mail: xuede@njust.edu.cn

通信作者:李斌(1984—),男,博士,副研究员,主要从事多相爆轰相关研究。E-mail: libin@njust.edu.cn

## 0 引言

作为一种新能源,氢能目前被广泛应用于石油化工、天然气、核电、能源等领域。与温室气体相比,氢能具有高热值、绿色可循环、无污染等优点。随着全球气候变暖,氢能的开发和利用可以有效解决能源危机,并保护环境。近年来,我国陆续发布了一系列政策措施,如《氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)》等。并在2021年首次将氢能写入“十四五”规划,明确了我国氢能的战略地位。目前,人们将氢能以高压气态、低温液态或者金属吸附态等形式进行储存和利用<sup>[1]</sup>。其中,高压气态仍然是目前最广泛的氢能利用形式<sup>[2]</sup>。但是,氢气具有较宽的爆炸极限范围和较高的反应活性<sup>[3]</sup>,在空气中的点火能仅为0.019 mJ。在氢气的生产、储运和使用中,若发生爆炸事故,会造成极大的人员伤亡和财产损失。如,2019年5月23日,韩国江原道江陵市一处储氢罐发生泄漏爆炸事故,造成2人死亡。因此,对氢气事故的预防控制至关重要。目前,抑制氢气爆炸效果的研究包括细水雾<sup>[4-8]</sup>、惰性气体<sup>[9-11]</sup>、卤代烃<sup>[12]</sup>、复合抑制<sup>[13]</sup>和阻隔防爆材料<sup>[14]</sup>等。

在防爆材料领域中,多孔材料具有较高的比表面积、可调节的孔径尺寸和较好的热稳定性,可以有效地阻隔火焰传播。其中,主要涉及铝合金拉网材料(MAA)、球形非金属材料(SNM)和聚氨酯多孔材料(PU)。MAA和SNM具有较高的结构强度。而PU具有出色的阻燃性能和弹性,在经历爆炸冲击后,能有效吸收冲击波的动能,并能恢复到原来的状态<sup>[15-16]</sup>。Zalosh<sup>[17]</sup>总结了在军用飞机油箱中使用金属网和聚合物的要求,详细介绍了使用这些材料的一些细节。研究表明,MAA对一些典型的甲烷、丙烷等碳氢燃料具有良好的抑爆性能<sup>[18]</sup>。Yang等<sup>[19]</sup>研究了MAA和SNM对氢气/空气预混气体燃爆特性的影响,发现这2种材料均能促进氢气爆炸。然而,在添加丙烷后,这2种材料对氢气爆炸效果的抑制具有可行性。Chen等<sup>[20]</sup>在激波管中研究了PU和二氧化碳对氢气爆炸特性的影响,发现PU单位英寸的平均孔数(孔隙密度)PPI $\geq 60$ 时,对氢气的促进效果将转变为抑制效果,且PU在对较低体积分数的氢气爆炸具有更好的抑制效果。

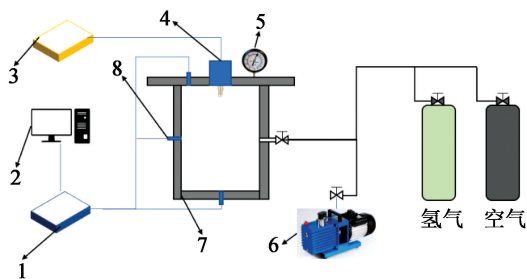
综上所述,多孔材料对氢气爆炸具有双重影响,效果取决于材料的物理化学性质以及氢气的体积分数。目前,多孔材料对激波管道的气体抑爆研究较多,而在高压密闭容器中对氢气爆炸的燃爆特性研

究较少。因此,选择SNM、MAA和PU这3种常见的多孔材料作为阻隔防爆材料,探究它们对高压密闭容器中氢气/空气预混气体的爆炸压力的影响。不同初始压力 $p_0$ 下,分析不同氢气体积分数 $\varphi$ 的氢气/空气预混气体的爆炸特性,为高压容器中氢气储存的安全抑爆、防爆提供参考。

## 1 实验装置及方案

### 1.1 实验系统

如图1所示,实验系统由5 L圆柱形爆炸容器、压力采集装置、点火装置等组成。爆炸容器为一个直径160 mm、高250 mm、壁厚20 mm的圆柱形爆炸罐。容器顶部、侧壁和底部设计多个开孔。3个压力传感器PT1、PT2和PT3分别安装于容器顶部、侧壁和底部,用于测量压力。压力传感器型号为603CBA00690.0(Kistler公司),测量范围0~69 MPa,非线性误差可达到1%以内。为了确保能在较高的压力下成功点火并控制变量进行对照实验,设置点火装置最大的点火能量为20 J,点火时间为2.4 s。爆炸容器上安有高精度防振数显压力表,量程为-100~600 kPa,误差为0.1%。压力采集装置为TraNET 404S8数据采集器(瑞士Elsys公司),共有16个通道,采集频率设置为1 MHz。



1 - 数据采集器;2 - 电脑;3 - 点火装置;4 - 点火电极;  
5 - 压力表;6 - 真空泵;7 - 5 L爆炸容器;8 - 压力传感器。

图1 氢气爆炸特性测试系统

Fig. 1 Hydrogen explosion characteristic test system

### 1.2 实验材料

SNM、MAA和PU如图2所示。SNM直径为30 mm,结构为球形薄壁骨架,具有较高的结构强度,江苏科邦安全技术有限公司。MAA网间间距为5 mm,山东浩壹盛智有限公司。PU孔隙密度PPI为10,尺寸为20 mm $\times$ 20 mm $\times$ 20 mm,具有较大的比表面积,中国广东东莞泡沫塑料厂。根据标准<sup>[21-22]</sup>,阻隔防爆材料的安装 $\leq 80$  kg/L,当SNM、MAA和PU的

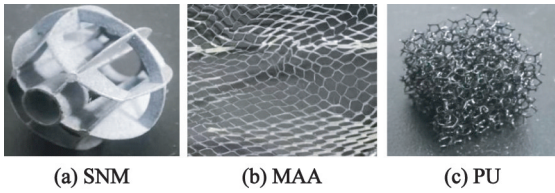


图 2 实验材料

Fig. 2 Experimental materials

填充密度分别为 58.0、35.0 g/L 和 13.2 g/L 时,在自然状态下刚好填满 5 L 爆炸容器。

### 1.3 实验方案

首先,将容器抽至真空,5 min 内压力下降不超过 0.02 MPa,表明装置气密性良好;然后,将不同的阻隔防爆材料填满爆炸容器;启动真空泵,将容器抽至真空;采用分压法依次向容器充入一定体积的氢气和空气,当压力显示达到预计压力(100、300、600 kPa)时,停止进气;静置 5 min,待气体混合均匀后,开始点火,传感器采集爆炸中的瞬态爆炸压力。

填充材料分别为 SNM、MAA 和 PU,并设置空白组(无填充材料)进行对照。氢气/空气预混气体中,氢气的体积分数  $\varphi$  按 10%、20%、30%、40%、50% 和 60% 共 6 种工况变化。不同工况下,每组实验至少重复 3 次,确保得出的结果具有一定的规律性和可重复性。

## 2 结果及分析

图 3 为  $p_0 = 100$  kPa、 $\varphi = 30\%$  时由 PT1 传感器测得的典型氢气/空气预混气体的爆炸时程曲线。约 0 ms 时点火,爆炸反应开始。PT1 传感器所测瞬态压力迅速上升,等到爆炸反应完成,曲线逐渐恢复至稳定状态。最大爆炸压力是表征爆炸危险性的重要参数之一。为了更好地阐述爆炸反应的剧烈程

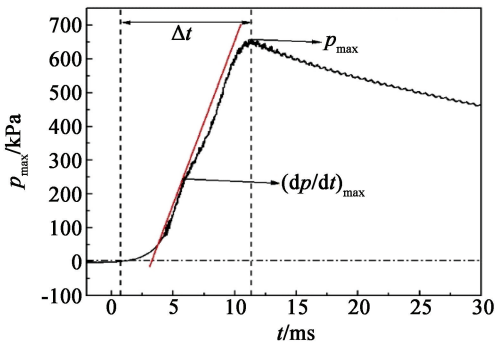


图 3 典型氢气/空气预混气体的爆炸时程曲线

Fig. 3 Typical explosion time history curves of hydrogen/air premixed gas

度,将爆炸压力上升超过初始压力 2% 的时间与达到最大爆炸压力时间的间隔定义为最大压力到达时间  $\Delta t$ 。以不同工况下 PT1、PT2 和 PT3 传感器所测最大爆炸压力作为依据,对爆炸过程进行分析。重点研究初始压力  $p_0$  和氢气体积分数  $\varphi$  对氢气最大爆炸压力  $p_{\max}$  的影响。

### 2.1 氢气体积分数对不同初始压力下的氢气爆炸参数的影响

#### 2.1.1 不同初始压力下的最大爆炸压力

用压力传感器 PT1、PT2、PT3 测试初始压力  $p_0$ 。分析  $p_0$  分别为 100、300、600 kPa 时,氢气体积分数  $\varphi$  对最大爆炸压力  $p_{\max}$  的影响,并运用 Origin 软件分别进行多项式拟合。拟合表达式为

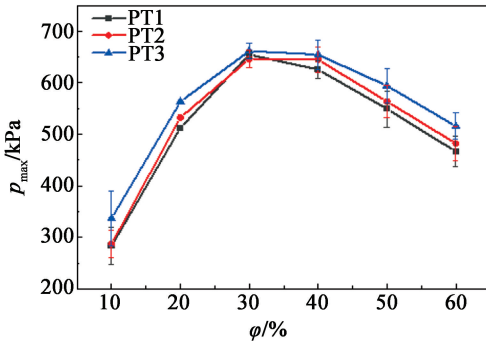
$$p_{\max} = A + B_1 \varphi + B_2 \varphi^2 + B_3 \varphi^3 + B_4 \varphi^4. \quad (1)$$

式中: $A$  为截距; $B_1$  为一次拟合系数; $B_2$  为二次拟合系数; $B_3$  为三次拟合系数; $B_4$  为四次拟合系数。

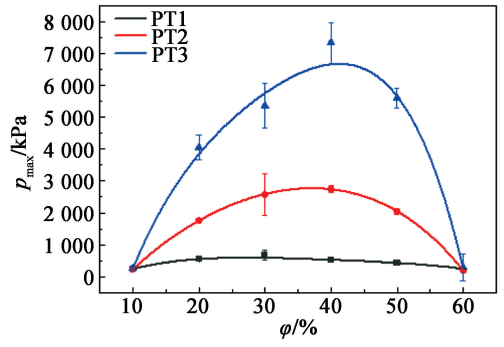
$p_0 = 100$  kPa,材料组与空白组的  $p_{\max}$  随  $\varphi$  的变化见图 4。当容器顶部开始点火后,燃烧产生的前驱冲击波向底部扩散,此时顶部的湍流较小。随着湍流程度逐渐增大,火焰进入快速发展期,爆燃火焰快速发展,压力开始急剧增加。在燃烧后期,氢气逐渐消耗,爆炸压力积聚到一个最大值。此时,由于位置的不同,3 个传感器所测  $p_{\max}$  会先后达到最大,且由于顶部受到湍流影响最小,而底部由于反射波和叠加波作用,湍流程度最大。最终,所测  $p_{\max}$  由大到小为 PT3、PT2、PT1。

空白组中,当  $\varphi$  较低时,容器内活化分子氧气虽然过量,但是较少的氢气导致链传递反应速率较低, $\varphi$  对  $p_{\max}$  的影响占主导作用,故  $p_{\max}$  较小,此时,  $p_{\max}$  随着  $\varphi$  的增加而增大。当  $\varphi$  达到一定值后,氧气对  $p_{\max}$  的影响逐渐增大,直到占主导作用,此时容器内较少的氧气导致链传递反应速率降低,从而  $p_{\max}$  随着  $\varphi$  的增大而减小。由图 4(a)可知,空白组在  $\varphi = 30\%$  时  $p_{\max}$  最大,  $p_{\max} = 646 \sim 662$  kPa,与  $\varphi = 40\%$  时的  $p_{\max}$  差距较小。然而,加入多孔材料后,一方面,以障碍物的形式加速火焰湍流化,加速自由基碰撞频率,自由基的数量会急剧增加,起到促进爆炸的作用;另一方面,多孔材料具有阻隔火焰和吸能散热的作用。根据相关文献[23-24],多孔材料独特的网格结构将容器内分割成小单元,火焰传播经过多孔材料时,在这些小单元互相碰撞至壁面。由于冷壁效应和器壁效应,多孔材料通过壁面会加快热量传递和加速自由基消耗,达到抑制爆炸的效果。

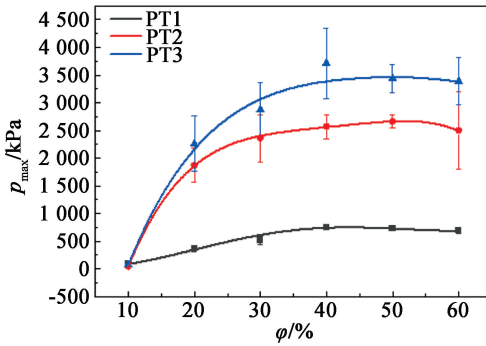
对图 4 中 3 种填充材料组的  $p_{\max} - \varphi$  曲线进行拟合,相关参数见表 1。表 1 中,曲线拟合度  $R_1^2 \geq 0.960$ ,



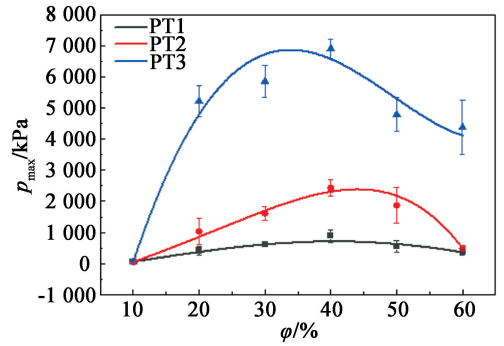
(a) 空白



(b) SNM



(c) MAA



(d) PU

图4  $p_0 = 100$  kPa 时的  $p_{\max}$ - $\varphi$  曲线Fig. 4  $p_{\max}$ - $\varphi$  curves at  $p_0 = 100$  kPa表1  $p_0 = 100$  kPa 时的拟合参数Tab. 1 Fitting parameters at  $p_0 = 100$  kPa

填充材料	$A$	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$R_1^2$
SNM	7 243.575	1 060.697	-38.068	0.769	-0.007	0.986
MAA	-4 016.482	544.596	-15.444	0.203	-0.001	0.993
PU	-7 940.992	973.584	-17.597	0.017	0.001	0.965

说明  $p_{\max}$  与  $\varphi$  的拟合效果较好。由图 4(b) ~ 图 4(d) 可知, 多孔材料对氢气的抑制和促进效应互相竞争, 最终效果取决于  $\varphi$ 。当  $\varphi = 10\%$ , 氢气体积分数较低, 导致火焰湍流较小, 多孔材料能够有效地阻隔火焰传播。因此, 3 种多孔材料均抑制氢气爆炸。其中, PU 的  $p_{\max}$  为 47 ~ 62 kPa, 比空白组降低了 79.4% ~ 83.6%; MAA 次之,  $p_{\max}$  为 44 ~ 92 kPa; SNM 抑制效果最差,  $p_{\max}$  为 234 ~ 260 kPa。当  $\varphi \geq 20\%$ , 爆炸反应过程能量较大, 导致多孔材料以障碍物形式加速火焰湍流化。因此, 3 种多孔材料均促进氢气爆炸,  $p_{\max}$  均在  $\varphi = 40\%$  达到最大。PT3 所测 PU 的  $p_{\max}$  为 7 332 kPa, 比空白组增加了 954%, 高于 SNM 的 7 131 kPa 和 MAA 的 4 789 kPa。综上所述, 多孔材料的孔径对湍流的影响占主导作用; 当多孔材料表现出抑制效果时, PU 的比表面积大于

SNM 和 MAA, 由于冷壁效应和器壁效应, 导致  $p_{\max}$  减小; 当多孔材料表现出促进效果时, PU 较小的孔径将容器分割出更多的小单元, 增大了爆炸体系的湍流程度, 导致  $p_{\max}$  最大。

图 5 为  $p_0 = 300$  kPa 时的  $p_{\max}$ - $\varphi$  曲线, 拟合参数见表 2。由图 5 可知, 空白组和材料组的  $p_{\max}$  均大于  $p_0 = 100$  kPa 的  $p_{\max}$ 。空白组在  $\varphi = 40\%$  时的  $p_{\max}$  最大, 为 2 114 ~ 2 135 kPa。材料组的曲线拟合度  $R_2^2 \geq 0.990$ 。当  $\varphi = 10\%$ , 3 种多孔材料均抑制氢气爆炸。其中, PU 的  $p_{\max}$  为 326 ~ 342 kPa, 比空白组降低了 54.9% ~ 59.9%; MAA 次之, 而 SNM 抑制效果最差。当  $\varphi \geq 20\%$ , PT3 所测 MAA 的  $p_{\max}$  在  $\varphi = 40\%$  时最大, 达到 17.96 MPa, 比空白组增加了 749%, 高于 SNM 组的 11.10 MPa 和 PU 组的 8.64 MPa。

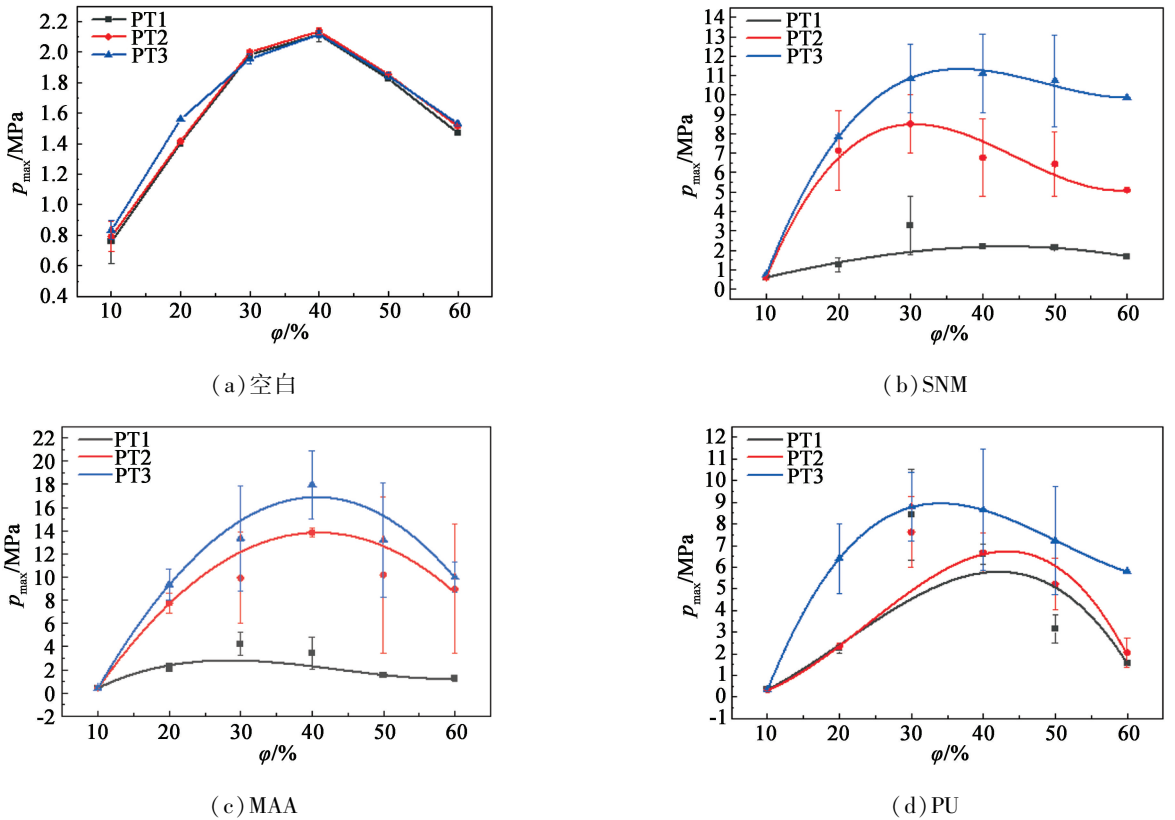


图 5  $p_0 = 300$  kPa 时的  $p_{\max}$ - $\varphi$  曲线

Fig. 5  $p_{\max}$ - $\varphi$  curves at  $p_0 = 300$  kPa

表 2  $p_0 = 300$  kPa 时的拟合参数

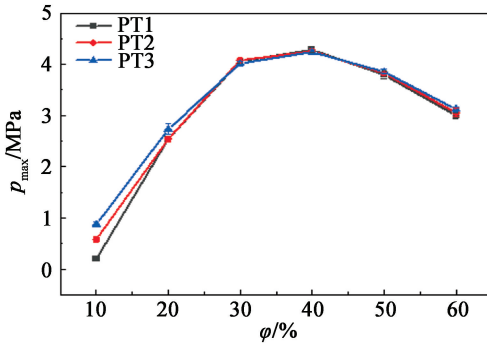
Tab. 2 Fitting parameters at  $p_0 = 300$  kPa

填充材料	$A$	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$R_2^2$
SNM	-11.782	1.574	-0.034	0.000 24	0	0.999
MAA	-11.745	1.376	-0.016	-0.000 02	0	0.993
PU	-10.672	1.388	-0.031	0.000 20	0	0.999

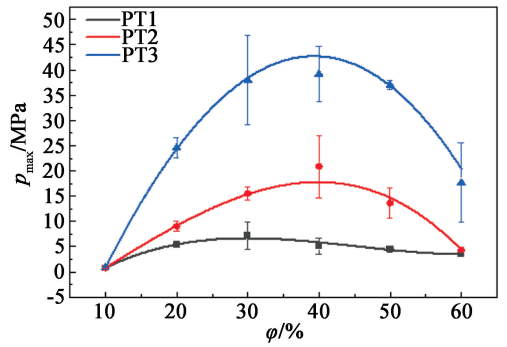
由于初始压力  $p_0$  增大会压缩多孔材料,材料的孔径和压缩程度均会对湍流造成影响。当  $p_0$  增大,常压下填满容器的多孔材料受到压缩而顶部留空,顶部空白区域湍流变小,从而顶部 PT1 所测  $p_{\max}$  偏低,爆炸体系中湍流的影响区域变小。3 种材料的结构强度由大到小为 SNM、MAA、PU,被压缩的程度由大到小为 PU、MAA、SNM。因为 SNM 孔径过大和 PU 被压缩程度较大,孔径和压缩程度对湍流的共同影响较小,最终导致在  $p_0 = 300$  kPa 时,填充 MAA 的氢气爆炸体系的湍流最大, $p_{\max}$  最大。

图 6 为  $p_0 = 600$  kPa 时的  $p_{\max}$ - $\varphi$  曲线,拟合参数见表 3。由图 6 可知:空白组在  $\varphi = 40\%$  的  $p_{\max}$  最大,为 4 240 ~ 4 281 kPa;但是在  $\varphi = 10\%$  时的  $p_{\max}$  差距过大,PT1 所测  $p_{\max}$  仅 198 kPa,而 PT3 测得为 874 kPa。这是因为,高压下氢气体积分数较低,导致气

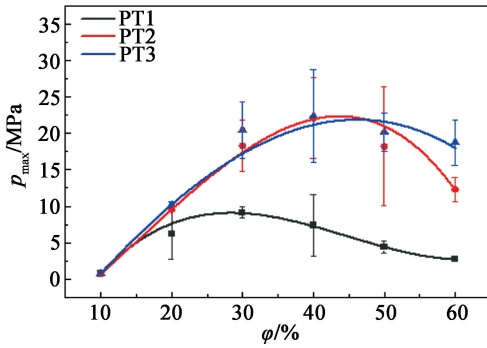
体分布不均匀。材料组的曲线拟合度  $R_3^2 \geq 0.990$ 。当  $\varphi = 10\%$ ,与空白组的  $p_{\max}$  不同,材料组的  $p_{\max}$  相差较小,所测  $p_{\max}$  由大到小为 PT3、PT1、PT2。当  $p_0$  增大,材料被进一步压缩,顶部区域氢气体积分数较高,多孔材料对顶部区域氢气的抑制作用转变为促进作用,PT1 所测 SNM 的  $p_{\max}$  为 849 kPa,比空白组增加 329%,高于 PU 的 799 kPa 和 MAA 的 753 kPa。而 PT3 所测 PU 的  $p_{\max}$  为 756 kPa,比空白组降低 13.5%;MAA 次之,而 SNM 的  $p_{\max}$  为 885 kPa,稍大于空白组。当  $\varphi \geq 20\%$ ,PT3 所测 SNM 的  $p_{\max}$  在  $\varphi = 40\%$  最大,为 39.17 MPa,比空白组增加了 876%,大于 PU 的 36.48 MPa 和 MAA 的 22.33 MPa。由于初始压力  $p_0$  过大,压缩程度对湍流的影响占主导作用:当多孔材料促进氢气爆炸时,SNM 的压缩程度较小,湍流影响区域最大,导致 SNM 的  $p_{\max}$  最大。



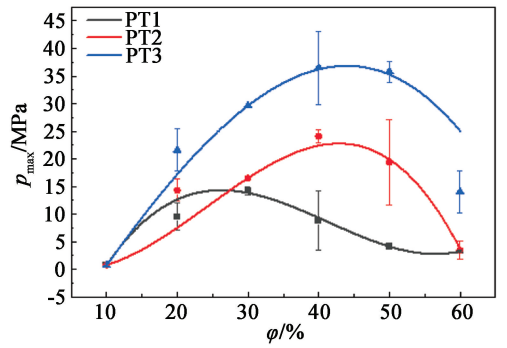
(a) 空白



(b) SNM



(c) MAA



(d) PU

图6  $p_0 = 600$  kPa 时的  $p_{\max}$ - $\varphi$  曲线Fig. 6  $p_{\max}$ - $\varphi$  curves at  $p_0 = 600$  kPa表3  $p_0 = 600$  kPa 时的拟合参数Tab. 3 Fitting parameters at  $p_0 = 600$  kPa

填充材料	$A$	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$R_3^2$
SNM	-31.586	3.685	-0.043	-0.000 06	0	0.999
MAA	-10.660	1.224	-0.007	-0.000 90	0	0.993
PU	-18.072	1.943	-0.003	-0.000 29	0	0.999

### 2.1.2 不同初始压力下最大压力的到达时间

为研究氢气体积分数  $\varphi$  对最大压力到达时间  $\Delta t$  的影响,选择受湍流影响最大的 PT3 传感器所测得的  $\Delta t$  进行分析,如表 4 所示。空白组中,当  $\varphi = 10\%$ ,氢气爆炸产生的能量较低,爆炸强度较小,火焰传播速度较慢,导致  $\Delta t$  较大。当  $\varphi \geq 20\%$ ,爆炸产生的自由基数量较多,火焰传播速度超过一定值,达到爆燃, $\Delta t$  急剧缩小。其中, $\varphi = 40\%$  时,不同  $p_0$  的氢气爆炸强度最剧烈,故  $\Delta t$  最小,区间为 6.26 ~ 7.95 ms。然而,加入多孔材料后,由于多孔材料以障碍物的形式增大火焰的湍流程度,火焰传播变快,导致材料组的  $\Delta t$  远小于空白组, $\Delta t$  均在  $\varphi = 40\%$  时最小,区间为 0.01 ~ 0.18 ms,比空白组缩短百倍以上。这也表明空白组与材料组的  $p_{\max}$  应在氢气体积分数为 40% 时达到最大。

### 2.2 初始压力对不同氢气体积分数的氢气爆炸压力的影响

为研究初始压力  $p_0$  对氢气爆炸压力的影响,选择受湍流影响最大的 PT3 传感器所测得的  $p_{\max}$  进行分析。运用 Origin 软件分别对空白组和材料组进行拟合。图 7 中,空白组与材料组的  $p_{\max}$  均随着  $p_0$  的增大而增大。这是因为, $p_0$  增大时,氢气的分压变大,会增加自由基之间的碰撞频率,最大实验安全间隙(MESG)会随着  $p_0$  的增大而降低<sup>[11]</sup>。例如:在 100 kPa 下,MESG 为 0.29 mm;而在 200 kPa,降低到 0.19 mm。因而,高压爆炸会产生更多的自由基,产生更多的活化分子,爆炸反应的速度加快,加速链传递反应,导致  $p_{\max}$  增大。

由图7(a)可以看出,空白组的  $p_{\max}$  与  $p_0$  具有较好的线性关系, $p_{\max}$  在  $\varphi = 40\%$  时达到最大。加入多

表 4 不同初始压力下  $\varphi$  对  $\Delta t$  的影响  
Tab.4 Influence of  $\varphi$  on  $\Delta t$  under different initial pressures

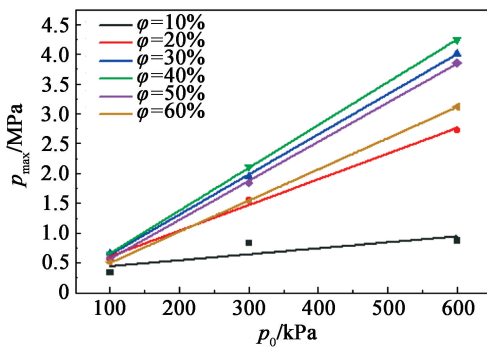
$\varphi/\%$	$p_0/\text{kPa}$	$\Delta t/\text{ms}$			
		空白	SNM	MAA	PU
10	100	97.56	4.17	16.46	22.33
	300	247.10	7.97	10.93	20.21
	600	319.20	5.35	18.84	37.73
20	100	16.30	0.51	0.92	0.97
	300	13.51	0.59	0.58	0.11
	600	38.38	0.34	1.40	0.20
30	100	10.12	0.21	0.66	0.16
	300	7.87	0.33	0.13	0.03
	600	8.07	0.11	0.17	0.10
40	100	7.95	0.18	0.17	0.15
	300	6.70	0.15	0.08	0.01
	600	6.26	0.02	0.11	0.07
50	100	10.23	0.21	0.19	0.24
	300	8.27	0.46	0.47	0.38
	600	8.82	0.09	0.28	0.19
60	100	15.54	0.54	0.60	0.59
	300	14.51	0.58	0.66	0.63
	600	17.03	0.57	0.41	0.26

孔材料后,  $p_{\max}$  均在  $\varphi = 40\%$  最大。当  $\varphi = 10\%$  或  $\varphi = 60\%$ , 材料组的  $p_{\max}$  与  $p_0$  呈线性关系。这是因为, 氢气或氧气不足, 爆炸体系的湍流较小。然而, 当  $\varphi = 20\% \sim 50\%$  时, 随着  $p_0$  的增大, SNM 和 PU 的  $p_{\max}$  呈指数增加。这是因为, 随着  $p_0$  的增加, 多孔材料被进一步压缩, 底部湍流程度增加。而 MAA 的  $p_{\max}$  先快速上升、然后缓慢增加。这是因为, MAA 是脆性金属材料, 爆炸反应造成 MAA 被破坏成许多小碎屑, 这些碎屑吸收和分散了爆炸体系的能量 (体系总能量仍增加), 导致 MAA 的  $p_{\max}$  的增加幅度随着  $p_0$  的增加而减小。此外, 材料组在  $\varphi = 60\%$  时的  $p_{\max}$  仍大于空白组。

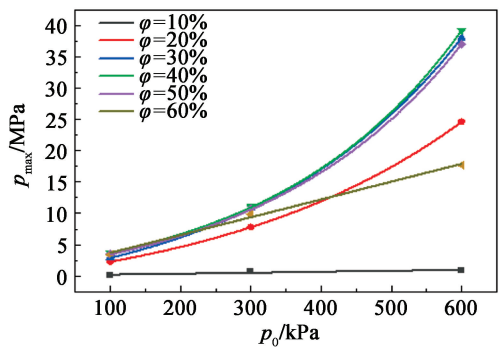
### 3 结论

研究了不同  $p_0$  下的 SNM、MAA、PU 3 种阻隔防爆材料对氢气爆炸特性的影响。得到如下结果:

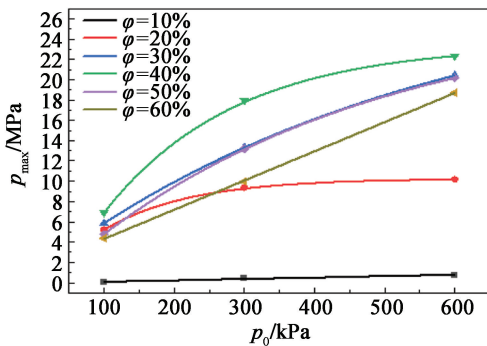
- 1) 填充 3 种阻隔防爆材料后, 材料的孔径和压缩程度的不同, 导致不同位置的湍流程度不同, 这比点火位置引起的湍流现象更显著, 从而容器顶部、侧壁和底部的  $p_{\max}$  有差异, 底部 PT3 所测  $p_{\max}$  最大。
- 2) 3 种材料对氢气/空气预混气爆炸同时具有



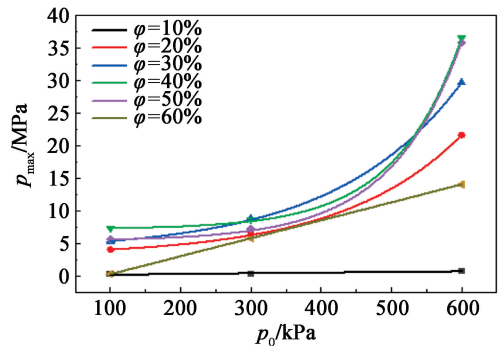
(a) 空白



(b) SNM



(c) MAA



(d) PU

图 7 不同氢气体积分数时的  $p_{\max}-p_0$  曲线

Fig. 7  $p_{\max}-p_0$  curves at different volume fractions of hydrogen

促进和抑制作用,效果主要取决于 $\varphi$ 。当 $\varphi < 20\%$ , 3种材料均抑制氢气的爆炸。其中,SNM的抑制性能要明显低于MAA和PU,具有较大比表面积的PU对氢气的抑制效果最佳。当 $\varphi \geq 20\%$ ,材料组均对氢气爆炸表现出促进作用,SNM、PU和MAA在 $\varphi = 40\%$ 的 $p_{\max}$ 达到最大。当 $\varphi = 60\%$ ,材料组的 $p_{\max}$ 仍大于空白组。

3)当抑制氢气爆炸时,随着 $p_0$ 的升高,3种材料对氢气的抑制效果减弱。不同 $p_0$ 下,PU整体的抑制效果最好;MAA次之;而SNM抑制效果最差。当促进氢气爆炸时,随着 $p_0$ 的增加,3种材料会使 $p_{\max}$ 产生不同的增幅。PU在 $p_0 = 100$  kPa的 $p_{\max}$ 最大,为7 332 kPa,是空白组的9.5倍;MAA在 $p_0 = 300$  kPa对氢气促进效果最好, $p_{\max}$ 是空白组的7.5倍;SNM在 $p_0 = 600$  kPa促进效果最佳, $p_{\max}$ 是空白组的8.8倍。

### 参 考 文 献

- [1] HASSAN Q, SAMEEN A Z, SALMAN H M, et al. Hydrogen energy future: advancements in storage technologies and implications for sustainability [J]. *Journal of Energy Storage*, 2023, 72: 108404.
- [2] SARKAR A, BANERJEE R. Net energy analysis of hydrogen storage options [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2005, 30(8): 867-877.
- [3] 路长, 李毅, 潘荣银. 管道氢气-空气预混气体爆炸特征的试验研究[J]. *安全与环境学报*, 2016, 16(3): 38-42.  
LU C, LI Y, PAN R K. Experimental study on explosion tendency of hydrogen-air premixed gases in the duct [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2016, 16(3): 38-42.
- [4] WEN X P, WANG M M, SU T F, et al. Suppression effects of ultrafine water mist on hydrogen/methane mixture explosion in an obstructed chamber [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(60): 32332-32342.
- [5] SHI L, MENG X B, WU Y, et al. Numerical simulation study of the mechanism of hydrogen explosion inhibition by fine water mist containing NaOH [J]. *Powder Technology*, 2024, 432: 119166.
- [6] HOLBORN P G, BATTERSBY P N, INGRAM J M, et al. Modelling the mitigation of a hydrogen deflagration in a nuclear waste silo ullage with water fog [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2013, 91(6): 476-482.
- [7] XIA Y C, ZHANG J N, ZHANG B, et al. Localized water mist method enabling superior premixed hydrogen-methane-air deflagration mitigation in semi-confined space [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 50: 1458-1469.
- [8] WEI S M, YU M G, PEI B, et al. Experimental and numerical study on the explosion suppression of hydrogen/dimethyl ether/methane/air mixtures by water mist containing NaHCO<sub>3</sub> [J]. *Fuel*, 2022, 328: 125235.
- [9] LI Y C, BI M S, HUANG L, et al. Hydrogen cloud explosion evaluation under inert gas atmosphere [J]. *Fuel Processing Technology*, 2018, 180: 96-104.
- [10] XU J T, CHEN X F, JIANG H P, et al. Coupling effects of venting and inerting on hydrogen-air explosions at elevated static activation pressures [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 56: 207-218.
- [11] MITU M, STOLZ T, ZAKEL S. The influence of inert gas on limiting experimental safe gap of fuel-air mixtures at various initial pressures [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2023, 83: 105094.
- [12] DIXON-LEWIS G, MARSHALL P, RUSCIC B, et al. Inhibition of hydrogen oxidation by HBr and Br<sub>2</sub> [J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159(2): 528-540.
- [13] NAN F, LUO Z M, CHENG F M, et al. Research progress and development trends of hydrogen explosion suppression materials and mechanisms [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, 184: 1318-1331.
- [14] SONG X Z, ZUO X C, YANG Z K, et al. The explosion-suppression performance of mesh aluminum alloys and spherical nonmetallic materials on hydrogen-air mixtures [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(56): 32686-32701.
- [15] ZHUANG W, BI Y F, LIU B J, et al. Mechanical properties of polyurethane mixture and load response behaviour of polyurethane composite pavement [J]. *Polymers*, 2023, 15(2): 417.
- [16] LI C H, ZHANG G Y, YUAN B H. Exceptional performance of flame-retardant polyurethane foam: the suppression effect on explosion pressure and flame propagation of methane-air premixed gas [J]. *Materials*, 2023, 16(24): 7602.
- [17] ZALOSH R. Deflagration suppression using expanded metal mesh and polymer foams [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2007, 20(4/5/6): 659-663.
- [18] 宋先钊, 解立峰, 李斌, 等. 甲烷气氛条件下网状铝合金材料阻隔防爆性能研究[J]. *消防科学与技术*, 2018, 37(11): 1494-1497.  
SONG X Z, XIE L F, LI B, et al. Study on the barrier

explosion-proof performance of mesh aluminum alloy under methane atmosphere [J]. Fire Science and Technology, 2018, 37(11): 1494-1497.

[19] YANG Z K, ZHAO K, SONG X Z, et al. Effects of mesh aluminium alloys and propane addition on the explosion-suppression characteristics of hydrogen-air mixture [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(70): 34998-35013.

[20] CHEN Q, LI B, WANG Y X, et al. Effect of polyurethane foam and carbon dioxide on the suppression of hydrogen/air explosion [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 63: 538-546.

[21] 中华人民共和国应急管理部. 加油(气)站油(气)储存罐体阻隔防爆技术要求: AQ/T 3001—2021 [S]. 2021. Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China. Specifications of separate and explo-

sion-proof techniques for oil (gas) storage tanks in petrol (gas) stations; AQ/T 3001—2021 [S]. 2021.

[22] 中华人民共和国应急管理部. 阻隔防爆橇装式加油(气)装置技术要求: AQ/T 3002—2021 [S]. 2021. Ministry of Emergency Management of the People's Republic of China. Separate and explosion-proof technical specification of portable fuel (gas) device; AQ/T 3002—2021[S]. 2021.

[23] 田宏, 王旭, 高永庭. 多孔填充材料的防火防爆机理及应用[J]. 工业安全与防尘, 2000(4): 43-46. TIAN H, WANG X, GAO Y T. Mechanism of fire protection and explosion suppression of porous materials and application [J]. Industrial Safety and Dust Control, 2000(4): 43-46.

[24] CHEN S N. Application of inherent safety explosion-proof technology in oil storage & transportation device [J]. Procedia Engineering, 2011, 15: 4814-4818.

(上接第 17 页)

[6] 杨欣, 舒钢, 杨云龙, 等. 一种金属-玻璃热失配多插针封接工艺研究[J]. 火工品, 2023 (2): 7-11. YANG X, SHU G, YANG Y L, et al. Study on metal-glass thermal mismatch multipin sealing process [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2023 (2): 7-11.

[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012. Ministry of Housing and Urban Development of the People's Republic of China. Load code for the design of

building structures; GB 50009—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.

[8] 陆培文, 高凤琴. 阀门设计计算手册[M]. 2 版. 北京: 中国标准出版社, 2009: 277-278.

[9] 中国兵器工业集团公司. 火工品试验方法 第三部分: 泄漏试验 氦气法: GJB 5309.3—2004 [S]. 2004: 14-19. China North Industries Group Corporation Limited. Test methods of initiating explosive devices—Part 3: leak test—helium gas method; GJB 5309. 3—2004 [S]. 2004: 14-19.