

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2025.04.020

剪切增稠液复合多孔材料对氢爆炸阻隔研究*

凡辰,陈先锋,牛奕,马天明,韩禄阳,黄楚原
(武汉理工大学安全科学与应急管理学院,武汉430070)

摘要: 剪切增稠液(Shear thickening fluid, STF)表现出可逆的能量吸收特性,表现出良好的隔振性能,并且也是难燃液体,因此考虑与传统的多孔隔爆材料复合提升隔爆性能。采用常压浸渍的方法,以泡沫铜为基体,引入剪切增稠液涂层,复合制备新型多孔隔爆材料 STF@Cu。为了测试新型多孔隔爆材料 STF@Cu 在氢-空气预混气体爆炸中的隔爆性能,将材料安装在自主设计的水平管道第二节的末端,使用纹影技术和压力传感器探究 STF@Cu 对不同剪切增稠液中气相二氧化硅的浓度(0%、5%、10%)和泡沫铜孔隙率(20PPI、40PPI、60PPI)中火焰形貌和压力阻隔效果的影响。结果发现:相对于空爆和泡沫铜,填充新型多孔隔爆材料 STF@Cu 可以有效地降低管道内超压和最大爆炸压力上升速率。对氢燃爆的阻隔效果与剪切增稠液分散相浓度和泡沫铜孔隙率呈正相关。当填充10%浓度剪切增稠液、孔隙率60PPI的 STF@Cu 时,最大爆炸压力较空爆和填充泡沫铜分别降低了82.75%、41.48%。

关键词: 氢爆炸;剪切增稠;爆炸压力;隔爆机制;复合隔爆材料

中图分类号: X932 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2025)04-0187-07

Hydrogen Explosion Suppression Using Shear Thickening Fluid Composite with Porous Matrices

FAN Chen, CHEN Xian-feng, NIU Yi, MA Tian-ming, HAN Lu-yang, HUANG Chu-yuan
(School of Safety Science and Emergency Management, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Shear thickening fluid (STF) possesses reversible energy absorption capacity, superior vibration isolation performance, and inherent flame-retardant properties. Consequently, STF is being investigated for composite integration with conventional porous explosion-proof materials to enhance explosion-proof performance. The new porous explosion-proof material STF@Cu was prepared through pressure impregnation, utilizing copper foam as the substrate and introducing a shear-thickening fluid coating. To evaluate the explosion-proof performance of STF@Cu in a hydrogen-air premixed gas explosion, the composite material was installed at the terminal segment of the second section of a horizontally designed pipeline. The study utilized shadowgraph imaging and pressure sensor arrays to examine how STF@Cu influences flame morphology and pressure isolation by systematically varying the concentration of gas-phase

收稿日期(Date of reception): 2025-04-07

网络首发日期(Published online): 2025-05-15

作者简介: 凡辰(2000-),男,扬州江都人,硕士,主要研究可燃气体防火防爆方向, (E-mail) mmbz00@163.com。

通信作者: 黄楚原(1991-),男,汉中南洋县人,博士、副教授,主要从事危险品防火防爆技术方向, (E-mail) hcy@whut.edu.cn。

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB4000904); 国家自然科学基金(52274224); 武汉曙光重点研究与知识创新计划项目(2023020201020304); 湖北省自然科学基金创新群体项目(2023AFA013)

About the author: FAN Chen(2000-), male, born in Jiangdu area, Yangzhou city, master's degree, mainly engaged in fire and explosion prevention of combustible gases, (E-mail) mmbz00@163.com.

Corresponding author: HUANG Chu-yuan(1991-), male, born in Yangxian county, Hanzhong city, Ph. D, associate Professor, mainly engaged in fire and explosion prevention technology for hazardous materials, (E-mail) hcy@whut.edu.cn.

Fund Programs: National Key Research and Development Program of China (Grant No. 2021YFB4000904), National Natural Science Foundation of China (52274224), the Key Research and the Knowledge Innovation Program of Wuhan-Shuguang Project (2023020201020304), Hubei Provincial Natural Science Foundation Innovation Group Project (Grant No. 2023AFA013)

silica in the shear thickening fluid(0%,5%,10%) and the copper foam porosity(20 PPI,40 PPI,60 PPI). The results demonstrate that the filling of the new porous explosion-proof material STF@ Cu, compared with the empty explosion and copper foam, significantly reduces both peak overpressure and maximum pressure rise rate within the pipeline. Meanwhile, the blocking effect on hydrogen detonation is positively correlated with both shear thickening fluid dispersion phase concentration and copper foam porosity. More importantly, the implementation of STF@ Cu with a 10% shear thickening fluid concentration and 60 PPI porosity achieves reductions of 82.75% and 41.48% in maximum explosion pressure compared to empty pipeline conditions and copper foam configurations, respectively.

Key words: hydrogen explosion; shear thickening; explosion pressure; explosion-proof mechanism; composite explosion-proof material

氢作为清洁能源,具有较高的热值和零碳排放,因此受到了世界各国的重视。但使用氢作为能源燃料时需要克服高扩散率、泄漏、火灾和爆炸的危险^[1],近年来氢能安全事故屡有发生,因此需要采取合适的氢防爆技术来降低氢的危险性。

多孔材料比表面积大、比强度高、质量轻,其微小复杂的孔隙可以消灭火焰传播所需要的自由基,进而可以淬熄火焰,降低爆炸造成的危害。段玉龙等发现不同孔隙率的 SiC 泡沫陶瓷对爆炸参数有着促进和抑制两种效果^[2]。邢志祥等发现降低留空率、增加填充密度能够有效提高新型多孔非金属材料在丙烷-空气混合气体的阻火抑爆性能^[3]。唐毅等发现与单一球形多孔非金属材料相比^[4],组合球形多孔非金属材料对甲烷掺氢的抑爆效果更突出。非金属材料阻隔可燃气体爆炸展现出良好的效果,以泡沫铜为代表的金属多孔材料的隔爆性能同样优异。Li 等发现随着泡沫铜孔径的减小^[5],冲击波和火焰速度降低。Duan 等指出 1 cm 的泡沫铜会加速火焰^[6],而 2 cm 和 3 cm 厚的泡沫铜会熄灭火焰并降低超压峰值。以泡沫铜为代表的金属多孔材料抗静电,且力学性能优异,易于改性复合其他介质。但传统金属多孔材料存在着易氧化烧结的缺陷,大大限制了多孔材料在隔爆领域的应用^[7]。

剪切增稠液(Shear thickening fluid, STF)作为一类非牛顿流体能在高速率剪切应力的冲击下团缩成类固体,表现出可逆的能量吸收特性,去除载荷,会迅速恢复到初始状态,因此可以被应用于工程防护领域。Jeon 和 Eliasson 发现含有玉米淀粉和水的 STF 可以有效地削弱激波管中 1.34 和 1.46 马赫的冲击波^[8]。Dawson 发现填充 STF 的金属丝网有效降低了 90% 左右的爆破压力^[9]。STF 在振动与冲击响应控制系统中展现出广泛的应用潜力。

剪切增稠液通常由液体介质中分散高质量分数微米或纳米颗粒制成。本文拟将气相二氧化硅(Fumed silica)分散到聚丙二醇(PPG)中制成剪切增稠液,将制备好的剪切增稠液与泡沫铜复合形成复合隔爆材料,命名为 STF@ Cu。在自主设计的水

平管道爆炸测试实验平台研究 STF@ Cu 对氢-空气预混气体的隔爆效果,旨在为氢气爆炸防护提供有效方案。

1 实验装置和方案

1.1 复合隔爆材料制备

使用的气相二氧化硅(fumed silica)源自上海阿拉丁生化有限公司,为亲水性纳米 SiO₂ 粉末,比表面积:200 m²/g。聚丙二醇(PPG)源自海安化工,平均分子量:400。泡沫铜购自昆山广嘉源新材料有限公司,孔隙率分别为 20、40 和 60 PPI (pores per inch),泡沫铜厚度 1 cm,直径 85 mm。

采用“分散-浸渍-冷冻-晾干”技术,剪切增稠液均匀地涂敷在泡沫铜孔隙结构表面上。首先称取一定质量的气相二氧化硅,放入恒温干燥箱 120℃ 干燥 24 h,去除水分;将气相二氧化硅分批少量添加到装有聚丙二醇的料筒中,使用搅拌砂磨分散多用机搅拌,适当调整转速,促使两者充分混合。初步制备好的 STF 含有大量气泡,使用超声波清洗机去除其中的 STF 的气泡;待气泡消除后,将泡沫铜浸渍在装有 STF 的玻璃皿当中,放入冰箱冷藏 24 h,放在室外晾干,制得 5% 和 10% 两种浓度的 STF@ Cu 备用,命名如表 1 所示。

表 1 隔爆材料类型及命名
Table 1 Experimental conditions

序号 Index number	孔隙率 Porosity/ PPI	STF 浓度 STF concentration/%	命名 Naming
1	20		20 PPI Cu
2	40	0	40 PPI Cu
3	60		60 PPI Cu
4	20		5 - STF@ 20 - Cu
5	40	5	5 - STF@ 40 - Cu
6	60		5 - STF@ 60 - Cu
7	20		10 - STF@ 20 - Cu
8	40	10	10 - STF@ 40 - Cu
9	60		10 - STF@ 60 - Cu

1.2 隔爆测试平台及流程

气体爆炸及隔爆实验实验平台示意图如图 1 所示,主要包括爆炸实验管道平台、点火系统、配气系

统、同步控制系统、火焰拍摄系统以及数据采集系统,用于记录爆炸压力、火焰传播图像等参数。

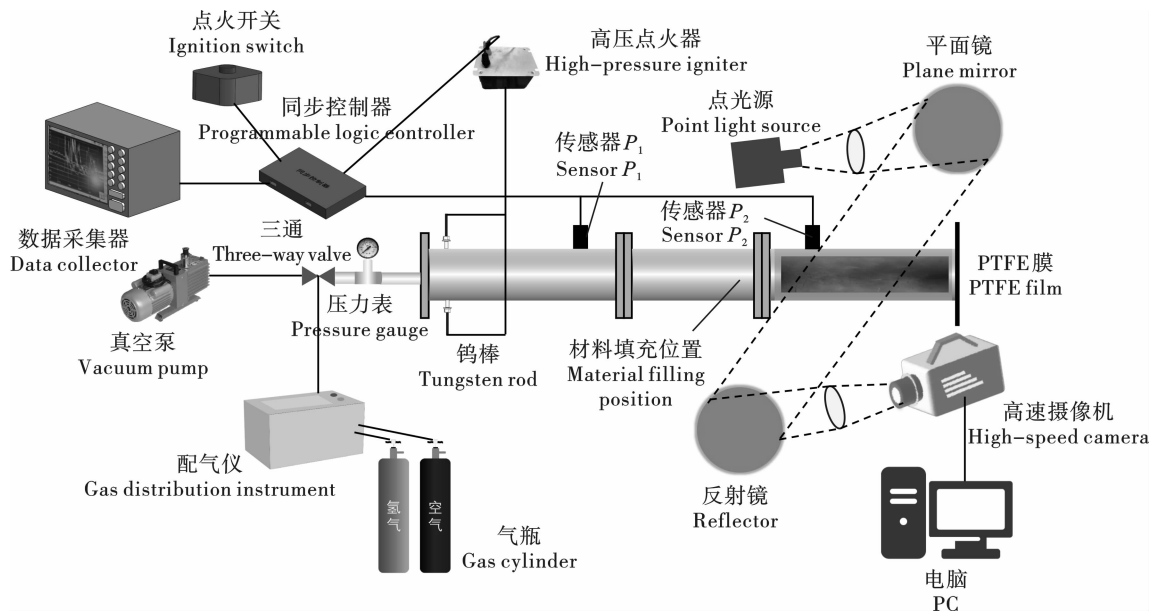


图 1 隔爆测试平台

Fig. 1 Explosion-proof test platform

水平管道由长度分别为 500 mm 和 360 mm 的两截圆形管道和一截长度为 500 mm 的并配有观察窗口方形管道组成,所有管道内径均为 100 mm。管道的厚度为 10 mm,连接处均为法兰螺栓结构,气密性良好,末端用 0.4 mm 的聚四氟乙烯 (PTFE) 薄膜阻隔。点火系统由点火开关、高压点火器和点火电极组成,安装在距离管道前端 0.05 m 的位置,输出电压为 14 kV,可以释放出稳定明亮的电火花。型号为 PCB 113B24 的压力传感器 P_1 和 P_2 ,分别安装在距离点火系统 0.35 m 和 0.56 m 的位置。配气系统配制 18% 体积分数的氢-空气混合物用于实验。氢气火焰传播速度快,为保证火焰形态被捕捉,拍摄速度设置为 10000 fps,采样点设置为 1 M,采样时间为 5 s。分拣得到 1000 个数据点,使用 Origin 软件绘制。测试流程:填充隔爆材料,填充位置在第二节管道末端(距离管道前端 0.86 m),连接管道;设置预混气体参数,首先通过真空泵将真空表抽到稳定在 -98 kPa,打开三通和进气阀门,将气体通入管道中;触发点火开关,数据采集系统记录爆炸压力以及火焰传播图像相关爆炸参数;排出废气,更换材料,重复实验多次。

2 实验结果与讨论

2.1 STF@Cu 对氢爆炸火焰传播的阻隔

图 2 为不同孔隙率的复合隔爆材料复合不同浓度 STF 的爆炸纹影图像,从图像上未观察到明显的

火焰锋面传播及演变过程^[10]。仅填充泡沫铜的爆炸火焰结构较为完整,轮廓分明,火焰较厚。复合 STF 后,火焰结构破碎且稀薄,火焰掺杂着 STF 液滴以不规则的形态移动。随着复合隔爆材料孔隙率和 STF 涂层浓度的增大,火焰被完全阻隔。对比泡沫铜,STF@Cu 对氢气爆炸火焰的阻隔效果明显提升,火焰被淬熄分割,结构破碎失稳。

2.2 STF@Cu 对氢爆炸超压的影响

图 3 为填充 20 PPI 的 STF@Cu 后氢爆炸压力图像。随着 STF@Cu 中 STF 浓度的增加, P_1 传感器处测得的最大爆炸压力为 151 kPa、54 kPa、53 kPa,相对于空爆分别下降了 42.0%、79.3%、79.8%; P_2 传感器处测得的最大爆炸压力为 146 kPa、105 kPa、79 kPa,相对于空爆分别下降了 38.2%、55.8%、66.9%。复合 STF 后,氢气最大爆炸压力有了明显的衰减,表明 STF@Cu 能够有效降低氢气爆炸压力,并且 STF 的浓度越大对氢气爆炸的阻隔效果越强,这是由于分散相颗粒体积分数升高,粒子间的频繁碰撞有利于应力传递,剪切增稠效果增强。

图 4 为填充 40 PPI 的 STF@Cu 后氢爆炸压力图像。随着 STF@Cu 中分散相粒子体积分数的增加, P_1 传感器处测得爆炸超压峰值由空爆下的 260 kPa 下降到了 10% 浓度下的 63 kPa,压力峰值下降了 75.9%; P_2 传感器处测得爆炸超压峰值由空爆下的 237 kPa 下降到了 10% 浓度下的 60 kPa,压力峰值

下降了 74.8%, 与 20 PPI 的 STF@Cu 相比, 40 PPI 的 STF@Cu 对氢爆炸阻隔的效果更为优异。

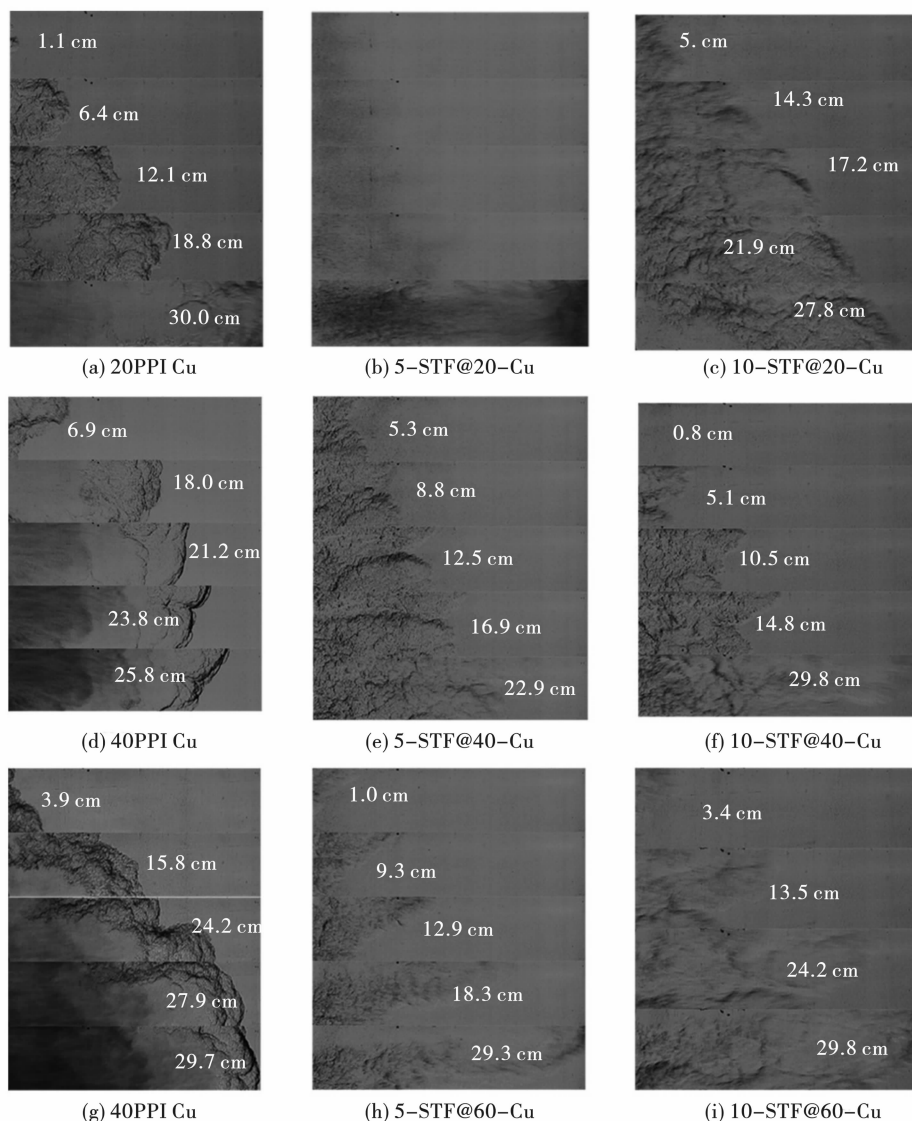


图 2 STF@Cu 对氢爆炸火焰传播的阻隔

Fig. 2 The barrier effect of STF@Cu on hydrogen explosion flame propagation

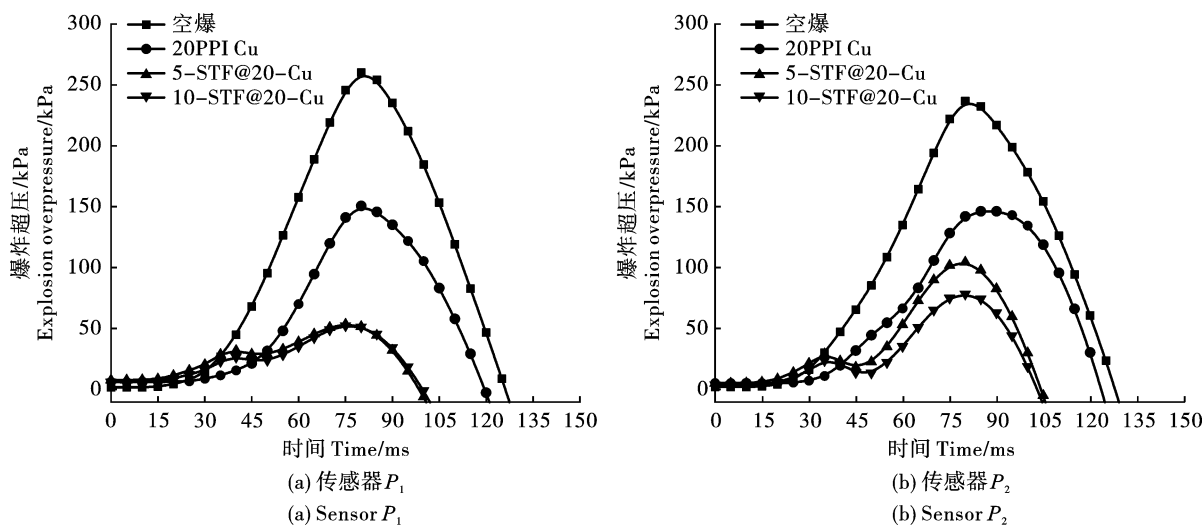


图 3 20 PPI 的 STF@Cu 对氢燃爆压力的阻隔

Fig. 3 The barrier effect of 20 PPI STF@Cu on hydrogen deflagration pressure

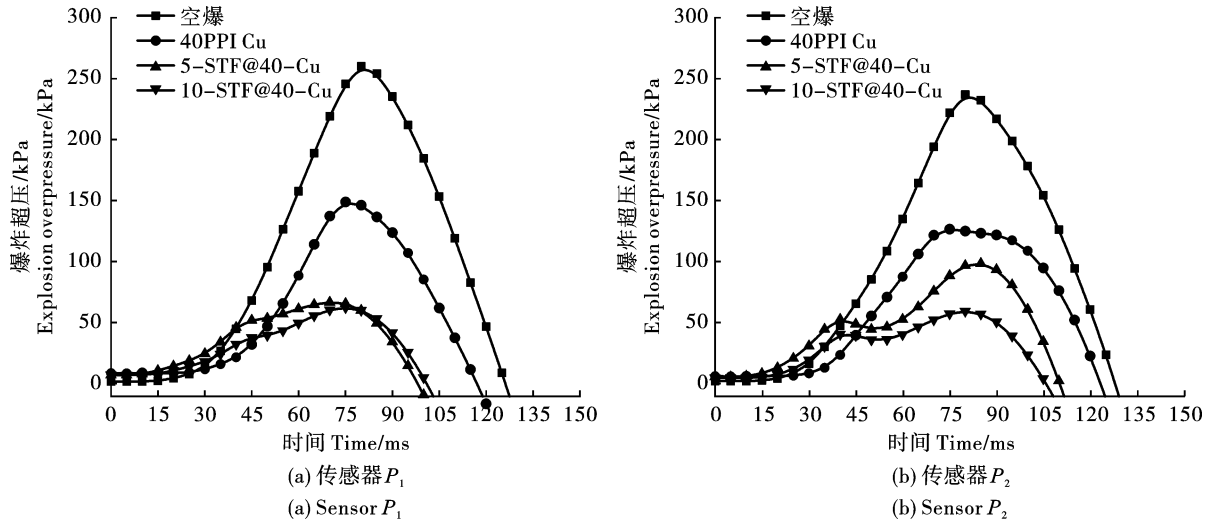


图 4 40 PPI 的 STF@ Cu 对氢燃爆压力的阻隔

Fig. 4 The barrier effect of 40 PPI STF@ Cu on hydrogen deflagration pressure

图 5 为填充 60 PPI 的 STF@ Cu 后氢爆炸压力图像。图像表明,在增加 STF@ Cu 中分散相粒子体积分数的情况下, P_1 传感器处测得最大爆炸超压降低了 41.3%、80.3% 和 82.7%, P_2 传感器处测得爆炸超压峰值分别下降了 36.5%、71.3% 和 74.8%。随着泡沫铜基底材料孔径的减小,对氢爆炸阻隔效

果提升,这是因为孔隙率增加使泡沫铜的表面积增大,增强了对火焰和冲击波的吸收能力。泡沫铜的多孔结构可以分割火焰,良好的导热性可以迅速散失火焰产生的热量,最终导致火焰熄灭。因此,孔隙率大的泡沫铜能更有效地阻隔爆炸,降低超压^[5,11]。

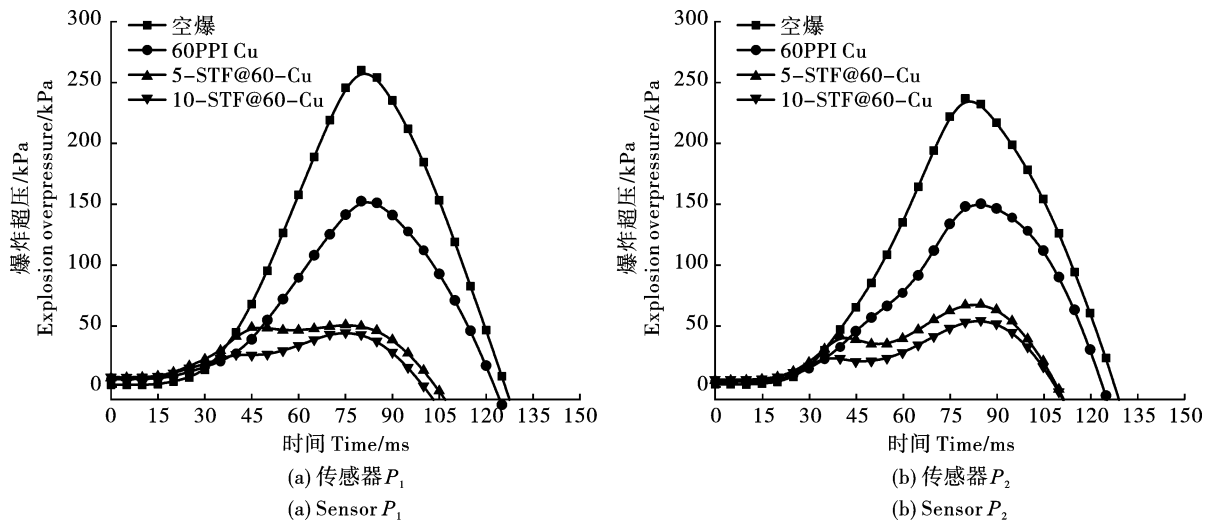


图 5 60 PPI 的 STF@ Cu 对氢燃爆压力的阻隔

Fig. 5 The barrier effect of 50 PPI STF@ Cu on hydrogen deflagration pressure

由表 2 可知,STF@ Cu 对氢燃爆压力上升速率的阻隔效果同样显著。复合 STF 后,最大压力上升速率明显下降。但由于 STF 对着泡沫铜的孔隙有着阻塞效应,造成了传感器 P_2 的最大爆炸压力上升速率略高于传感器 P_1 ,这是冲击波与材料截面的压缩作用引起的^[12,13]。

综上所述,填充 10-STF@ 60-Cu 对爆炸压力以及爆炸压力上升速率衰减的提升最为明显,复合隔爆材料对氢爆炸压力和爆炸压力上升速率的阻隔效

率与 STF 中分散颗粒的体积分数和基体材料孔隙率均呈正相关,这为复合多孔隔爆技术在工业生产的实际应用提供了指导。

2.3 STF@ Cu 对氢爆炸的阻隔机理

如图 6 所示,STF@ Cu 在受到外部冲击时,STF 的剪切增稠特性使其在瞬间表现出固化效果,迅速增加粘度,显著增强了复合材料的抗冲击能力^[14]。STF 包括分散相颗粒和分散介质,既可以作为氢键的供体,又可以作为氢键的受体,通过氢键液体溶剂

化层,分散相颗粒之间通过空间相互作用形成紧密的“粒子簇”,赋予高速应力冲击下的刚性,在宏观上展现出剪切增稠的效果^[15]。STF 在液固转化过程中消耗大量能量,使 STF 在受到高速爆炸冲击波的冲击时表现出良好的抗冲击性能^[16]。泡沫铜的

多孔结构有利于 STF 的分布和固化,复合后,STF 在泡沫铜的孔隙中形成三维网络结构,在受到冲击时,STF 的剪切增稠特性与泡沫铜的结构特性协同作用,显著提高了复合材料的隔爆性能。

表 2 STF@Cu 对于氢气燃爆最大爆炸压力上升速率
Table 2 STF@Cu on the maximum explosion pressure rate of hydrogen gas

孔隙率 Porosity/ PPI	最大压力上升速率 Maximum pressure rise rate/(kPa·ms ⁻¹)					
	0% STF		5% STF		10% STF	
	<i>P</i> ₁ 位置 Position <i>P</i> ₁	<i>P</i> ₂ 位置 Position <i>P</i> ₂	<i>P</i> ₁ 位置 Position <i>P</i> ₁	<i>P</i> ₂ 位置 Position <i>P</i> ₂	<i>P</i> ₁ 位置 Position <i>P</i> ₁	<i>P</i> ₂ 位置 Position <i>P</i> ₂
20	4.99	4.48	1.33	3.66	1.40	1.99
40	4.85	3.52	2.14	2.56	1.38	2.11
60	3.47	4.22	1.88	2.18	0.91	1.34

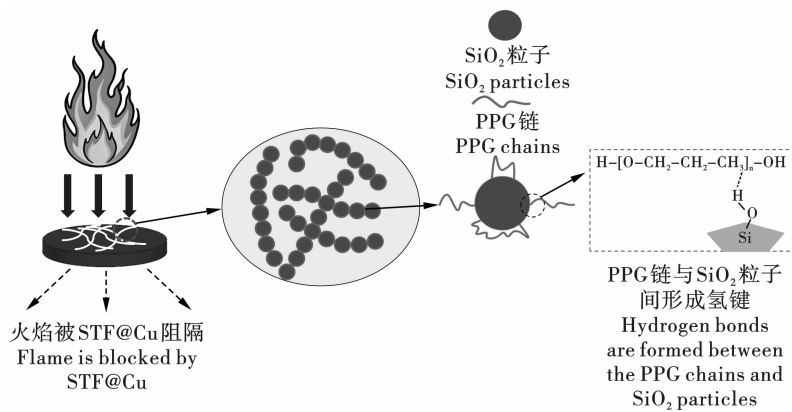


图 6 STF@Cu 的阻燃隔爆机理

Fig. 6 Explosion-Proof mechanism of STF@Cu

此外,泡沫铜的高比表面积有利于将热量迅速散发,从而避免局部过热,增强材料的传热性和耐冲击性。如图 7 和图 8 所示,含 SiO₂ 的 STF 本身具有一定的阻燃性,其在高温条件下析出并包覆在泡沫铜骨架上,呈现淡白色,有效防止高温烧结,复合 STF 后,泡沫铜基体烧结现象基本消失,并且爆炸冲击后也未发生明显形变。综上所述,STF 涂层和泡沫铜基体协同作用,通过散射、分散爆炸冲击波能量,有效衰减爆炸冲击波^[17]。

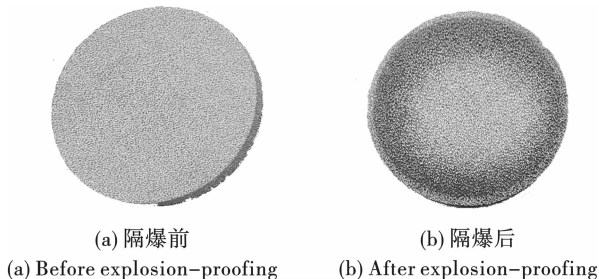


图 7 泡沫铜爆炸前后的外观变化

Fig. 7 Appearance changes of copper foam
before and after explosion

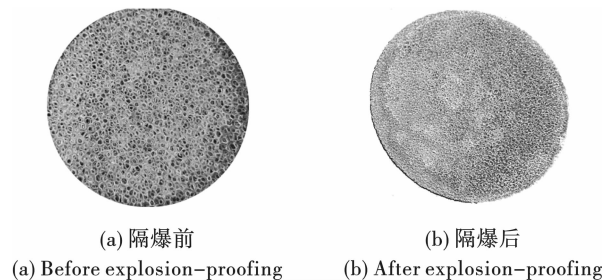


图 8 STF@Cu 爆炸前后的外观变化

Fig. 8 Appearance changes of STF@Cu
before and after explosion

3 结论

本研究制备了剪切增稠液和泡沫铜复合的新型隔爆材料 STF@Cu,研究了其对氢-空气预混气体的隔爆效果,并且探讨了 STF@Cu 的隔爆机理,主要结论如下:

(1) STF@Cu 可以有效地削减氢爆炸的压力和火焰,其中当填充 10% 浓度剪切增稠液,孔隙率

60PPI 泡沫铜的 STF@ Cu 时,最大爆炸超压相对于空爆降低了 82.75%,相对于单一泡沫铜降低了 41.48%。复合剪切增稠液前,火焰轮廓清晰,火焰前沿厚度较厚。复合剪切增稠液后,火焰结构变得破碎且稀疏,火焰掺杂着 STF 液滴以不规则的形态移动。随着复合隔爆材料孔隙率和 STF 涂层浓度的增加,火焰最终被彻底隔绝。此外,最大压力上升速率明显下降。但由于 STF 对着泡沫铜的孔隙有着阻塞效应,造成了传感器 P_2 的最大爆炸压力上升速率略高于传感器 P_1 。

(2) STF 的剪切增稠效应不仅成功地提升了泡沫铜的隔爆性能,还有效解决了泡沫铜易烧结、易氧化的缺陷,提升了泡沫铜的力学性能。

参考文献 (References)

- [1] MESSAOUDANI Z Labidine, RIGAS F, HAMID M D B, et al. Hazards, safety and knowledge gaps on hydrogen transmission via natural gas grid: A critical review[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(39): 17511-17525.
- [2] 段玉龙,王 硕,贺 森,等. 多孔材料下气体爆炸转扩散燃烧的特性研究[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(9): 113-121.
- [2] DUAN Yu-long, WANG Shuo, HE Sen, et al. Characteristics of gas explosion to diffusion combustion under porous materials[J]. Explosion And Shock Waves, 2020, 40(9): 113-121. (in Chinese)
- [3] 邢志祥,杜 贞,欧红香,等. 新型多孔非金属材料阻火抑爆性能研究[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(7): 74-79.
- [3] XING Zhi-xiang, DU Zhen, OU Hong-xiang, et al. Study on fire resistance-explosion proof performance of novel porous non-metallic material[J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(7): 74-79. (in Chinese)
- [4] 唐 毅,员亚龙,李开源,等. 球形非金属材料对甲烷掺氢爆炸抑制机理研究[J]. 高压物理学报, 2022, 36(6): 182-189.
- [4] TANG Yi, YUAN Ya-long, LI Kai-yuan, et al. Explosion suppression performance of spherical non-metallic materials for methane hydrogen-doped syngas explosion[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2022, 36(6): 182-189. (in Chinese)
- [5] LI Yi, ZHAO Qi, LIU Li-juan, et al. Investigation on the flame and explosion suppression of hydrogen/air mixtures by porous copper foams in the pipe with large aspect ratio[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2022, 76: 104744.
- [6] DUAN Yu-long, LONG Feng-ying, HUANG Jun, et al. Effects of porous materials with different thickness and obstacle layout on methane/hydrogen mixture explosion with low hydrogen ratio[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(63): 27237-27249.
- [7] HE Yun-long, FANG Quan, YUAN Bi-he, et al. Explosion evolution behavior of methane/air premixed gas in a closed pipe filled with a bio-based porous material[J]. Fuel, 2022, 318: 123716.
- [8] JEON H, ELIASSON V. Shock wave interactions with liquid sheets[J]. Experiments in Fluids, 2017, 58(4): 24.
- [9] DAWSON M A. Composite plates with a layer of fluid-filled, reticulated foam for blast protection of infrastructure[J]. International Journal of Impact Engineering, 2009, 36(10): 1288-1295.
- [10] 孙从煌,曲艳东. 特征管内 H₂/Air 预混气体燃爆特性数值模拟研究[J]. 爆破, 2020, 37(4): 155-165.
- [10] SUN Cong-huang, QU Yan-dong. Numerical simulation of combustion and explosion characteristics of premixed H₂/Air gas in characteristic tubes[J]. Blasting, 2020, 37(4): 155-165. (in Chinese)
- [11] NIE Bai-sheng, HE Xue-qiu, ZHANG Ru-ming, 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.
- [12] 徐景德,冯若尘,田思雨,等. 100%置障与浓度梯度耦合作用甲烷爆炸激励效应实验研究[J]. 爆破, 2020, 37(1): 134-140.
- [12] XU Jing-de, FENG Ruo-chen, TIAN Si-yu, et al. Excitation effect of methane explosion propagation under condition of coupling of 100% blocking probability and concentration gradient[J]. Blasting, 2020, 37(1): 134-140. (in Chinese)
- [13] 刘梦杰,徐景德,张延炜,等. 受限空间内瓦斯爆炸障碍物附近流场结构演化实验研究[J]. 爆破, 2021, 38(2): 160-166.
- [13] LIU Meng-jie, XU Jing-de, ZHANG Yan-wei, et al. Experimental study on evolution of flow field near gas explosion barriers in confined space[J]. Blasting, 2021, 38(2): 160-166. (in Chinese)
- [14] 张进秋,赵明媚,李 欣,等. 剪切增稠液体流变特性研究进展[J]. 化工新型材料, 2021, 49(12): 236-241.
- [14] ZHANG Jin-qiu, ZHAO Ming-mei, LI Xin, et al. Research progress on rheological property of shear thickening Fluid[J]. New Chemical Materials, 2021, 49(12): 236-241. (in Chinese)
- [15] WAITUKAITIS S R, JAEGER H M. Impact-activated solidification of dense suspensions via dynamic jamming fronts[J]. Nature, 2012, 487(7406): 205-209.