DOI: 10.11858/gywlxb.20230776

刚性和柔性多孔材料作用下氢气爆轰胞格结构的演化规律

罗荣钦[1], 彭 澳[1], 张静雯[1], 王 珺[1], 陈先锋[1], 申利远[2], 师吉浩[3], 孙绪绪[1]

(1. 武汉理工大学安全科学与应急管理学院, 湖北 武汉 430070;
2. 中国消防救援学院, 北京 102220;
3. 香港理工大学建筑环境与能源工程系, 香港 ZS843)

摘要: 多孔材料作为高效吸波耗能介质, 广泛应用于爆轰衰减研究中。为进一步揭示多孔材料的抑爆机理, 系统研究了柔性(海绵)和刚性(金属丝网)2 种典型多孔材料对氢氧爆轰胞格结构的影响, 以及海绵和金属丝网厚度、孔隙率对爆轰胞格结构、尺寸等参数的影响。采用烟熏板技术记录爆轰波的胞格图案, 并计算得到爆轰胞格尺寸; 采用压力传感器记录爆轰波到达时间, 进而计算得到爆轰波的平均传播速度。结果表明, 爆轰胞格结构与海绵和金属丝网的厚度、孔隙率密切相关, 此外研究发现了多个爆轰传播阶段, 包括爆轰失效、加速和再起爆。爆轰胞格尺寸也与海绵和金属丝网的厚度、孔隙率密切相关, 增大多孔材料厚度和减小孔隙率均能显著增大爆轰胞格尺寸。通过对比分析海绵与金属丝网对爆轰胞格尺寸的影响发现, 在相同条件下, 刚性多孔材料对爆轰的抑制作用更强, 但这种差距会随着多孔材料厚度的增加而减小。最后, 通过引入无量纲参数 D_{H}/λ 量化分析爆轰传播极限。对于柔性和刚性多孔材料而言, 其爆轰传播极限可分别近似量化为 $D_{\mathrm{H}}/\lambda\approx3.0$ 和 $D_{\mathrm{H}}/\lambda\approx3.1$。

关键词: 爆轰胞格结构; 柔性多孔材料; 刚性多孔材料; 爆轰极限; 氢气

中图分类号: O381 **文献标志码:** A

现代社会能源危机和环境污染日益加剧, 氢气因具有清洁环保、高效的特点, 成为 21 世纪最有潜力的化石燃料替代品之一[1−4]。然而, 氢气具有点火能量低、爆炸极限宽的缺点, 一旦泄漏极易发生燃爆事故[5−8], 特别是在较为狭长的空间内[9−11], 更容易形成燃烧转爆轰, 危害巨大。因此, 开展氢气爆轰衰减机理及方法研究尤为重要。多孔材料作为高效吸波耗能材料, 被广泛应用于爆轰波衰减研究中。Evans 等[12] 首次研究了多孔壁面对氢气-空气混合物爆炸传播的影响, 发现管壁上覆盖多孔材料可显著增大爆燃转爆轰(deflagration-to-detonation transition, DDT)的形成距离。之后, Teodorczyk 等[13] 进一步研究了吸波材料对氢气-空气混合物爆轰波的影响, 利用高速纹影技术记录了爆轰波在传播过程中的变化, 发现在管壁引入适当的吸波材料可有效地衰减横波, 导致反应区与冲击波解耦, 抑制爆轰波的传

* **收稿日期:** 2023-11-01; **修回日期:** 2023-11-22

基金项目: 湖北省重点研发“揭榜挂帅”科技项目(2022BEC024); 广东省自然科学基金(2023A1515012080); 国家自然科学基金(12302443); 国家重点研发计划(2021YFB4000901); 火灾与爆炸安全防护重庆市重点实验室开放基金(LQ22KFJJ06); 中央高校基础研究项目(223161001); 中国民航大学民航热灾害防控应急重点实验室开放基金(RZH2021-KF-05); 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室开放基金(HZ2022-KF09)

作者简介: 罗荣钦(2003—), 男, 本科, 主要从事气相爆轰传播动力学研究. E-mail: 1633909116@qq.com

通信作者: 王 珺(1983—), 女, 讲师, 主要从事风险评估与应急管理研究. E-mail: 9805@whut.edu.cn

孙绪绪(1994—), 男, 博士, 教授, 主要从事气相爆轰传播动力学及氢能燃爆安全技术研究. E-mail: xuxusun@whut.edu.cn

播。周凯元教授团队[14–18]详细研究了不同工况下声学吸收壁材料对气体爆轰衰减的影响，得出了气体爆轰衰减与再起爆机理。Guo 等[19]系统研究了穿孔钢板、钢丝网和钢丝棉对氢气-空气混合物爆轰波的抑制作用，发现三者均可衰减横波，导致反应区与冲击波解耦，从而抑制爆轰传播，且 3 种刚性多孔介质对爆轰波传播的抑制效果区别不大，该结论再一次证明了 Teodorczyk 等[13]的观点。Bivol 等[20]研究了不同厚度多孔材料对氢气-空气混合物爆轰波的抑制作用，发现爆轰传播与吸波材料的厚度密切相关，吸波材料越厚，对爆轰波的衰减作用越强，当抑制作用达到最强时，冲击波压力为 Chapman-Jouguet（CJ）压力的 40%，冲击波速度在 CJ 速度附近。Zhang[21]进一步研究了吸波材料长度对甲烷-氧气混合物爆轰波的影响，发现增加材料长度也可显著抑制爆轰传播。之后，Bivol 等[22]研究了多孔材料聚氨酯泡沫孔径对氢气-氧气混合物爆轰波的影响，发现材料孔径越小，爆轰波衰减越明显，爆轰波通过孔隙率为 80PPI 多孔材料的最终压力是通过孔隙率为 10PPI 多孔材料的 50%，速度则低 40%。

通过上述研究发现，前人已经开展了多孔材料抑制爆轰波传播机理的研究工作，但主要关注多孔材料对爆轰波传播过程中的压力、速度等参数的影响。爆轰胞格结构和胞格尺寸作为重要的爆轰动态参数[23]，可用来描述爆轰波产生的难易程度和爆轰强弱，对于掌握爆轰传播、发展和衰减过程十分重要。本研究将针对刚性和柔性 2 种典型多孔介质，探讨介质厚度、孔隙率等参数对氢气-氧气爆轰胞格结构、胞格尺寸的影响规律，量化爆轰衰减机理，以期为完善气相爆轰理论提供参考。

1　实验装置和方法

实验装置如图 1 所示，主要包括：点火系统、配气系统、数据测试系统和爆炸管道。点火系统主要由高压点火器和点火电极组成，点火能量约为 5 J。配气系统由混气罐、真空泵和控制面板组成，每次实验需要提前将氢气和氧气充入混气罐中预混 24 h，以保证气体的均匀性。爆炸管道包括驱动段和测试段两部分。驱动段为长 4 m、内径 60 mm、壁厚 20 mm 的圆形截面不锈钢管道，在驱动段部分插入一个 Shchelkin 螺旋，用来加速形成稳定的爆轰波；测试段为长 0.5 m、截面尺寸 60 mm×60 mm、厚度 20 mm 的方形截面不锈钢管道，将不同孔隙率、不同厚度的海绵裁剪为 50 mm×480 mm 的矩形固定在方管底部。

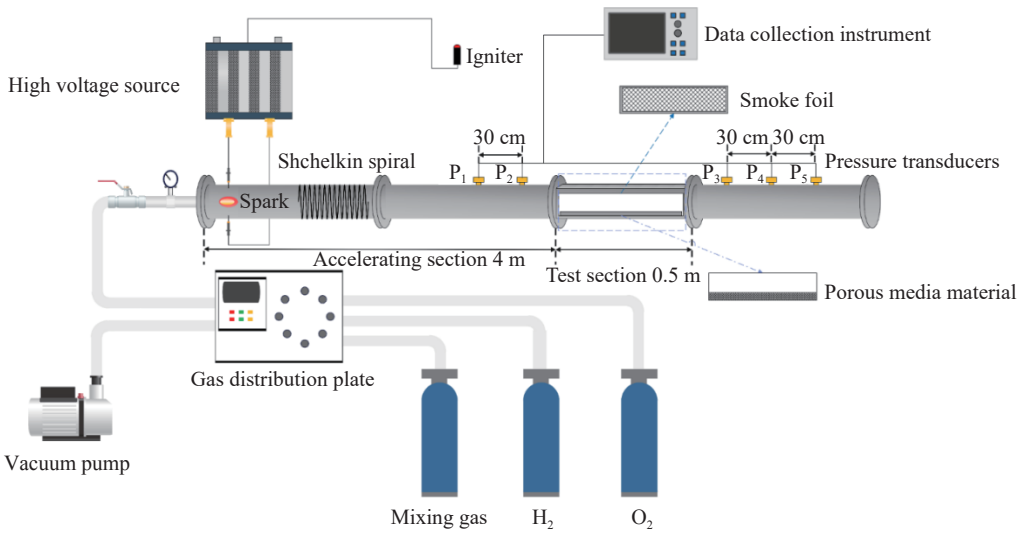


图 1　实验装置示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the experimental arrangements

本实验通过压力传感器（型号 Y1001E, 5 MPa）计算爆轰的传播速度。压力传感器系统主要包括压力传感器、恒流源和数据采集仪。恒流源主要用于给传感器供电，当爆轰波到达压力传感器所在位置时，数据采集仪便可以记录到压力信号。根据实验需要布置了如图 1 所示的 5 个压力传感器（P_1～P_5），测得压力分别为 p_1～p_5，除 P_2 与 P_3 相距 600 mm 外，其余相邻 2 个传感器之间的距离均为 300 mm。通

过相邻 2 个传感器之间的距离除以爆轰波到达的时间差就可以计算得到爆轰波的平均传播速度。烟熏板技术被用于测试爆轰波的结构，如图 1 所示，将烟熏板放置在测试段，用钢板固定，烟熏板技术可以将三维胞格结构二维化，进一步解释爆轰传播机理。为了得到更加准确的爆轰二次起爆的临界压力，每个工况重复 12 次实验，如果 12 次实验全部没有发生再次起爆，则将混合物的初始压力升高 0.1 kPa，再重复 12 次实验，直至出现二次起爆现象，并将此时混合物的初始压力视为二次起爆的临界压力。

如图 2 所示，本研究使用的多孔材料为柔性多孔材料海绵和刚性多孔材料金属丝网。海绵的孔隙率 n_s（每英寸孔数，值越大，孔径越小）分别为 10、20 和 30PPI，厚度 h_s 为 10、20 和 30 mm，长度为 0.5 m；金属丝网的孔隙率 n_w 分别为 10、20 和 30PPI，厚度 h_w 为 10、20 和 30 mm，长度为 0.5 m。海绵和金属丝网放置在方形管道内壁的正下方。不同厚度多孔材料对应的阻塞比见表 1。

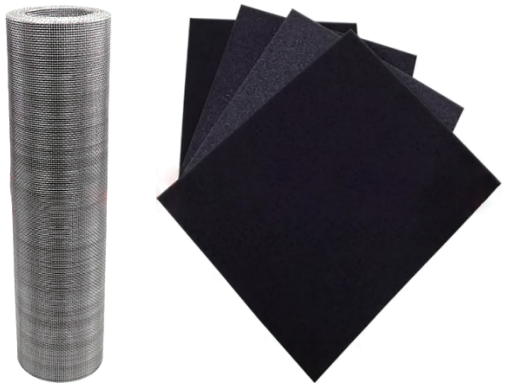


图 2　金属网和海绵

Fig. 2　Wire mesh and sponge

表 1　多孔材料的阻塞比

Table 1　Blockage ratio of porous material

No.	Thickness of porous materials/mm	Internal diameter of pipe/mm	Blockage ratio
1	10	60	0.167
2	20	60	0.333
3	30	60	0.500

本研究记录了氢气与氧气的当量比（φ）为 1.0 时的爆轰波胞格结构。

$$\varphi = \frac{n_{H_2}/n_{O_2}}{(n_{H_2}/n_{O_2})_{stoic}} \tag{1}$$

式中：n_{H_2}/n_{O_2} 为密闭管道中氢气与氧气的摩尔比，$(n_{H_2}/n_{O_2})_{stoic}$ 为化学计量摩尔比。

2　实验结果和讨论

2.1　光滑管道内的爆轰胞格结构

图 3 给出了光滑管道内氢氧混合物（$2H_2$-O_2）爆轰胞格结构随初始压力（p_0）的变化情况，可以看出，随着初始压力的增大，爆轰胞格尺寸减小，胞格数量增加。为了更加直观地研究管道内初始压力对爆轰胞格结构的影响，测量了不同初始压力下的爆轰胞格尺寸。胞格尺寸是通过将胞格图案上传至 Digimizer 测量软件后手动测量获得，具体方法为：分别在烟熏板前部、中部和后部取若干个点，测量后计算算术平均值，得到平均胞格尺寸。图 4 给出了 $2H_2$-O_2 在光滑管内的爆轰胞格尺寸随初始压力的变化情况。将该测量数据与 Sun 等[24] 的测量数据、爆轰数据库[25] 数据进行对比，发现三者具有相同的变化趋势，且相对误差较小，验证了本实验的实验条件良好且所测数据可靠。另外，从图 4 还可以看出：随着初始压力增大，爆轰胞格尺寸呈指数减小。当初始压力从 9 kPa 增加到 15 kPa 时，爆轰胞格尺寸显著减小，随后爆轰胞格尺寸的减小趋势减缓。随着氢氧混合物的初始压力增加，化学反应强度增大，横波之间的碰撞频率增大[26−29]，爆轰胞格尺寸变小。

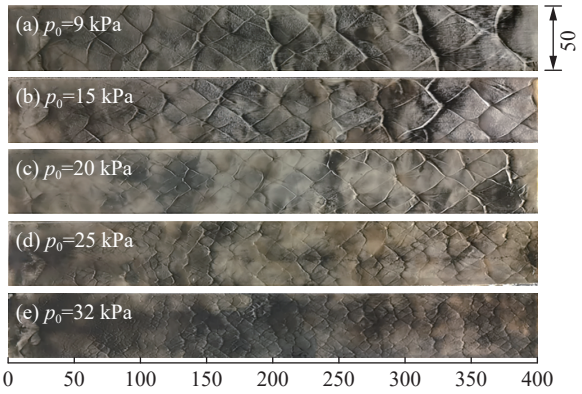


图 3　不同初始压力下光滑管道内的爆轰胞格结构(单位: mm)

Fig. 3　Structures of detonation cell in smooth tube under different initial pressure (Unit: mm)

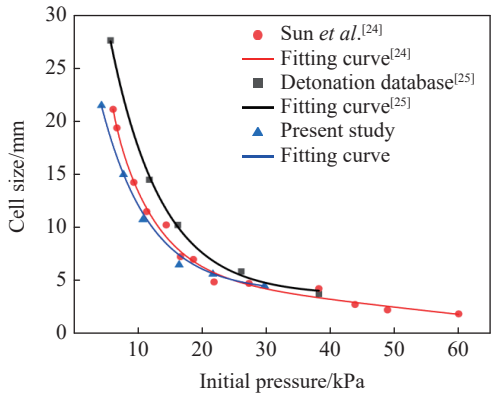


图 4　光滑管道内爆轰胞格尺寸与初始压力的关系

Fig. 4　Relationships between detonation cell size and initial pressure in smooth tube

2.2　海绵对爆轰胞格结构的影响

图 5 给出了 p_0=20 kPa 时，在管道内壁下方放置不同孔径、不同厚度的海绵，爆轰波经过烟熏板后留下的烟迹。可以看出，爆轰波刚进入方管时会出现短暂失效，这是因为爆轰波进入方管时管径突然扩大，爆轰波阵面曲率随之变大，爆轰波发生衍射导致短暂失效。然而，由于柔性多孔材料中海绵的存

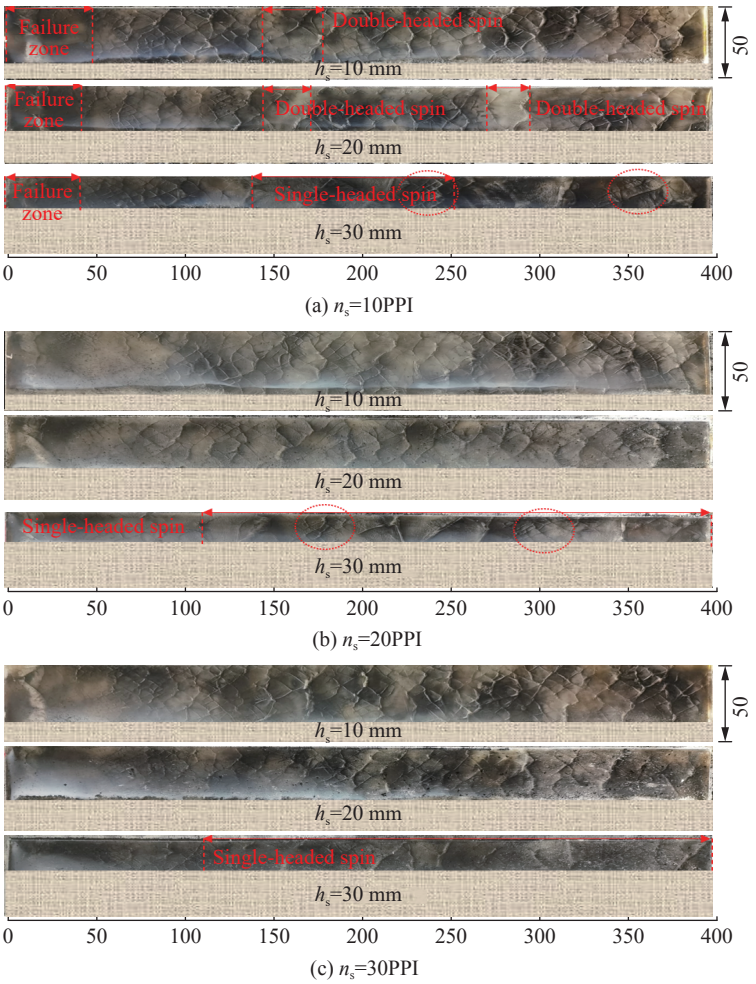


图 5　p_0=20 kPa 时不同海绵厚度及 PPI 孔隙率下的爆轰胞格结构(单位: mm)

Fig. 5　Detonation cellular structures for different thickness of sponge and PPI porosity at p_0=20 kPa (Unit: mm)

在，爆轰波接触多孔材料后会诱导产生较强的局部湍流[21]，对爆炸火焰起到加速作用，因此存在一个再起爆过程，从爆轰胞格情况也可以看出，在失效区后，爆轰胞格重新变得密集。由于海绵具有多孔特性，因此爆轰波在经过海绵时其质量和能量产生了较大损失，同时，沿着孔隙方向爆轰波阵面的弯曲曲率增大，一定程度上抑制了爆轰波的传播，从而使胞格尺寸增大。此外，还可以观察到，当爆轰波通过海绵区域时，爆轰胞格结构变得更加不规则，爆轰波由多头螺旋转化成双头螺旋，之后再次转换成多头螺旋，表明爆轰波在传播过程中不断地重复出现衰减和再加速现象。这是因为海绵对爆轰既有抑制作用，又通过诱导产生较强的湍流[21−22]，对较弱的爆轰形成促进作用。当海绵厚度相对于管道高度较小时，这 2 种作用实力相当，因此产生爆轰衰减与加速交替出现的现象。

为了更加直观地分析海绵对爆轰胞格结构的影响，通过测量得到爆轰胞格尺寸的变化规律。在 p_0=20 kPa 条件下，统计得到爆轰胞格尺寸与海绵厚度的关系，如图 6 所示。可以看出，随着海绵厚度的增加，爆轰胞格尺寸逐渐增大，爆轰波强度显著减弱。增加海绵厚度不仅增大了阻塞比，同时由于海绵的多孔特性，爆轰波的能量和质量损失均变大，导致爆轰波平均速度降低。可以注意到，当固定海绵孔隙率为 30PPI，海绵厚度从 20 mm 增加到 30 mm 时，爆轰胞格尺寸显著增大，说明改变海绵厚度对爆轰胞格尺寸的影响并非是线性的。

图 7 给出了海绵孔隙率与爆轰胞格尺寸之间的关系。同样发现，增大海绵的孔隙率，胞格尺寸会变大，孔隙率增大也意味着海绵的孔密度增大，因此抑制效应增强。通过对比图 6 与图 7 拟合曲线的斜率可以看出，增加海绵厚度对爆轰波的削弱作用更强，这在图 5 中也得到了证实。当固定海绵厚度为 10 mm 时，改变海绵的孔隙率依然可以得到完整的胞格结构，且分布较为均匀；但增大海绵厚度到 30 mm 后，烟熏板上大多呈现单头螺旋爆轰，并且胞格结构并不完整。

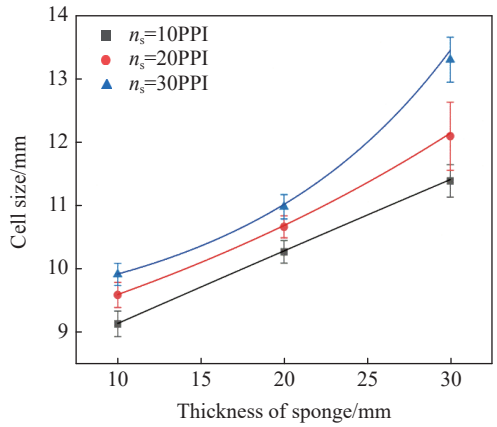


图 6　p_0=20 kPa 时海绵厚度对爆轰胞格尺寸的影响

Fig. 6　Effect of sponge thickness on detonation cell size at p_0=20 kPa

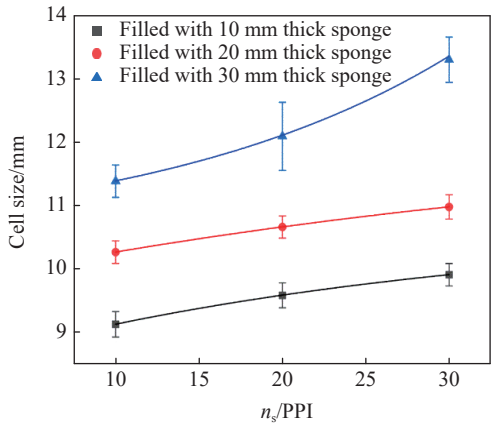


图 7　p_0=20 kPa 时海绵孔隙率对爆轰胞格尺寸的影响

Fig. 7　Effect of sponge porosity on detonation cell size at p_0=20 kPa

如图 8 所示，当海绵厚度为 30 mm 时，测得不同孔隙率下的爆轰胞格结构，发现了一个有趣的现象，即爆轰失效现象与细密的胞格结构交替出现，此时的爆轰波非常不稳定，在方管内存在多个再起爆过程。如图 9 所示，通过对比实验得到的速度数据可以发现，此时爆轰速度接近产物中的声速，但爆轰并未完全失效，这也证实了方管内存在多个加速及失效过程。随着海绵厚度由 10 mm 增加到 30 mm，爆轰波由多头螺旋转变成单头螺旋，而且当海绵孔隙率增加到 30PPI 时，爆轰波传播过程中不再产生精细的胞格结构，爆轰波不再出现再起爆过程，爆轰波传播接近极限。为了定量研究爆轰传播的临界条件，通常将爆轰胞格尺寸与方管水力直径（D_H）联系起来[23−25]，方管水力直径被定义为 4 倍湿周面积与上湿周周长之比，经计算得到，填充 10、20、30 mm 多孔材料时，管道水力直径分别为 54.5、48.0 和 40.0 mm）。如图 7 所示，当接近爆轰传播极限时，爆轰胞格尺寸为 13.29 mm，此时 D_H/λ≈3.0。

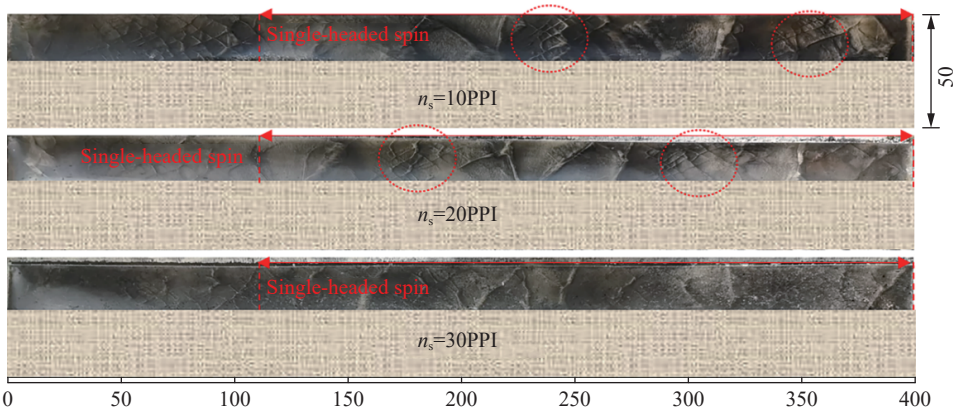


图 8　p_0=20 kPa、h_s=30 mm 时不同孔隙率下的爆轰胞格结构(单位：mm)

Fig. 8　Structures of the detonation cell under different sponge porosity conditions at p_0=20 kPa and h_s=30 mm (Unit: mm)

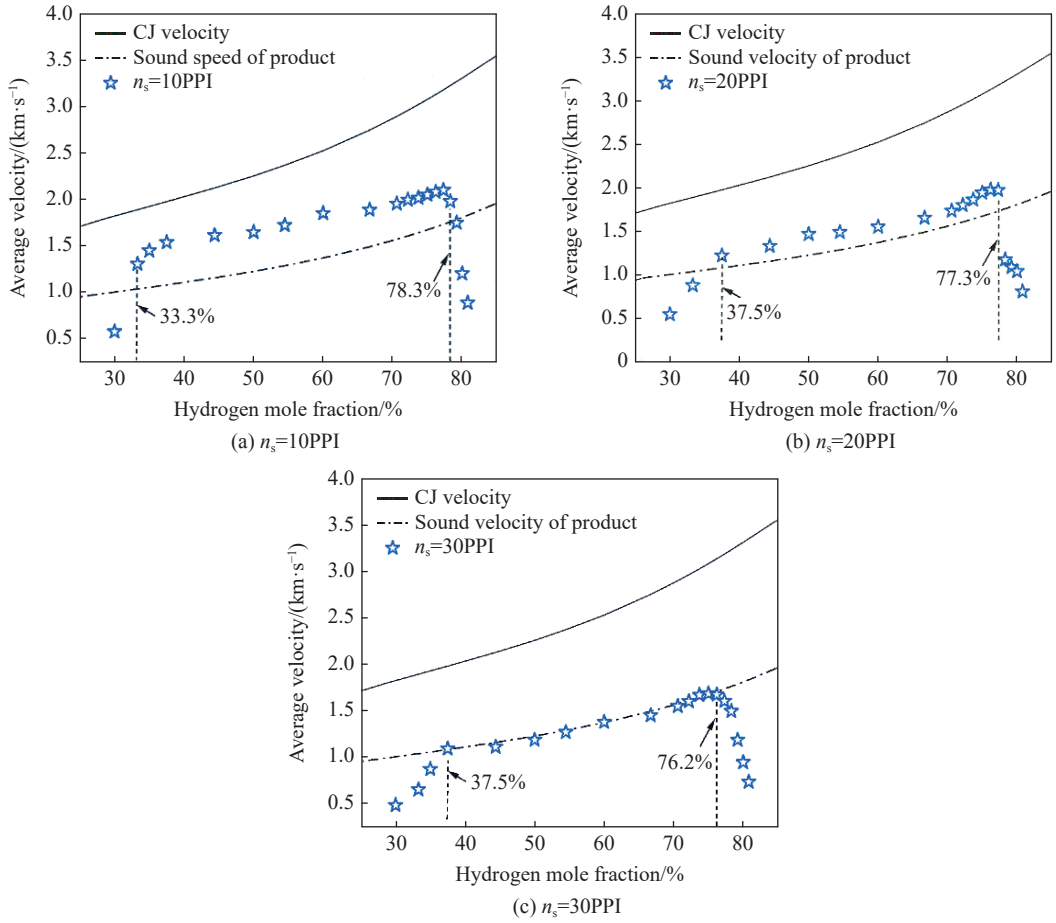


图 9　海绵厚度为 30 mm 时爆轰波的平均传播速度与氢气摩尔分数的关系

Fig. 9　Relationships between the average velocity of detonation wave and hydrogen mole fraction at 30 mm sponge thickness

2.3　金属丝网对胞格结构的影响

图 10 给出了金属丝网孔隙率 n_w 为 20PPI 时，爆轰波通过不同厚度金属丝网的氢氧混合物爆轰胞格结构。可以看出，爆轰波在通过放置金属丝网的管道区域时，爆轰胞格结构变得十分不规则。为了更好地比较金属丝网对爆轰胞格尺寸的影响，测量了 n_w=20PPI、金属丝厚度 h_w 不同时的爆轰胞格尺寸，如图 11 所示。当 n_w=20PPI 时，随着金属丝网厚度的增加，爆轰胞格尺寸增大，这是因为金属丝网也可视为多孔材料，当爆轰波通过时，爆轰波的质量和能量发生了损失，横波数量减少，此时胞格尺寸增大。

图 12 给出了金属丝网厚度为 10 mm、不同 n_w 下的氢氧混合物爆轰胞格结构，可以看出，随着金属丝网孔隙率增加，爆轰胞格尺寸发生了明显变化。当 n_w=20PPI 时，爆轰波通过厚度为 10 和 20 mm 的金属丝网后，烟熏板上也存在大胞格与小胞格交替出现的情况，但与柔性多孔材料对比发现，金属丝网作用下的小胞格没有海绵作用下的小胞格那样细密，胞格尺寸也更大；将金属丝网厚度增大到 30 mm 后，小胞格并未出现，此时多孔材料的抑制作用达到最强，爆轰波后无法形成热点使之再起爆。图 13 给出了孔隙率对胞格尺寸的影响，与柔性多孔材料得到的结果一致，增大金属丝网厚度和孔隙率均能显著抑制爆轰传播。当抑制效果达到最强也就是爆轰即将失效时，爆轰传播条件可近似量化为 D_H/λ≈3.1。

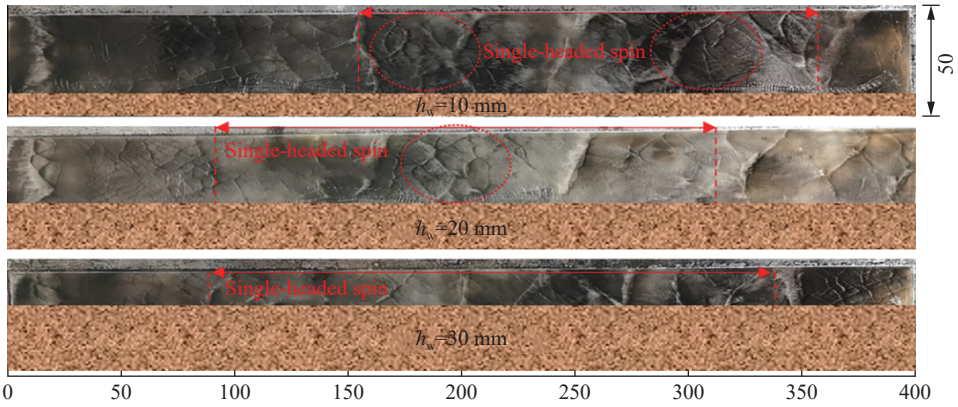


图 10　p_0=20 kPa、n_w=20PPI 时不同金属网厚度下的爆轰胞格结构(单位：mm)

Fig. 10　Structures of the detonation cell under different wire mesh thickness conditions at p_0=20 kPa and n_w=20PPI (Unit: mm)

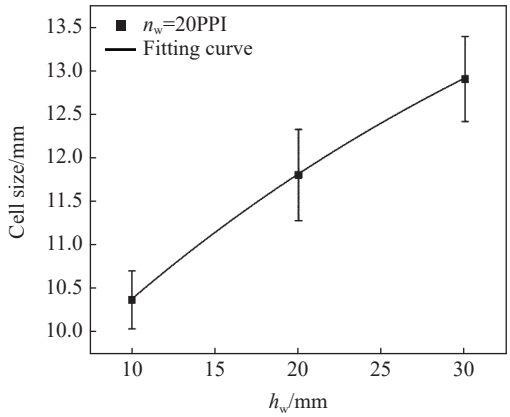


图 11　n_w=20PPI 时金属网厚度对爆轰胞格尺寸的影响

Fig. 11　Effect of wire mesh thickness on detonation cell size at n_w=20PPI

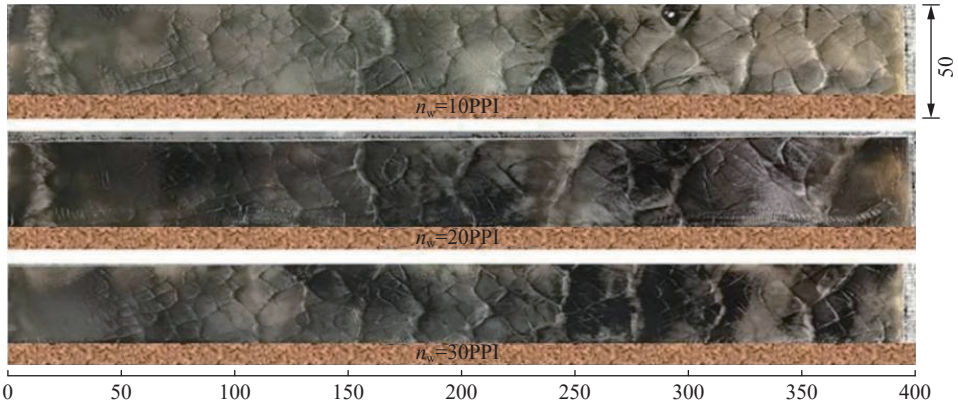


图 12　p_0=20 kPa、h_w=10 mm 时不同孔隙率下的爆轰胞格结构(单位：mm)

Fig. 12　Structures of the detonation cell under different wire mesh porosity conditions at p_0=20 kPa and h_w=10 mm (Unit: mm)

为对比研究柔性多孔材料与刚性多孔材料对爆轰的抑制作用，图 14 给出 n_w=20PPI 的金属网和 n_s=20PPI 时的海绵对爆轰胞格尺寸的影响曲线。可以发现，在厚度相同时，金属丝网的抑制作用更强，这是因为金属网除了具有多孔特性，还具有较好的导热性。但通过曲线斜率可以看出，当多孔材料厚度较大时，海绵对爆轰的抑制能力接近金属丝网，并有越来越强的趋势，这是由于在多孔材料厚度较大的情况下，受爆轰波的影响，海绵的形变更大，与此同时，海绵的阻塞比也发生了剧烈变化，使得爆轰波阵面经历较强的拉伸，进一步抑制了爆轰波的传播。

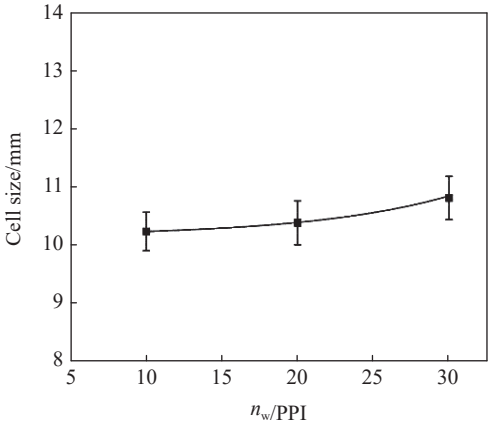


图 13　p_0=20 kPa、h_w=10 mm 时金属网孔隙率对爆轰胞格尺寸的影响

Fig. 13　Effect of wire mesh porosity on detonation cell size at p_0=20 kPa and h_w=10 mm

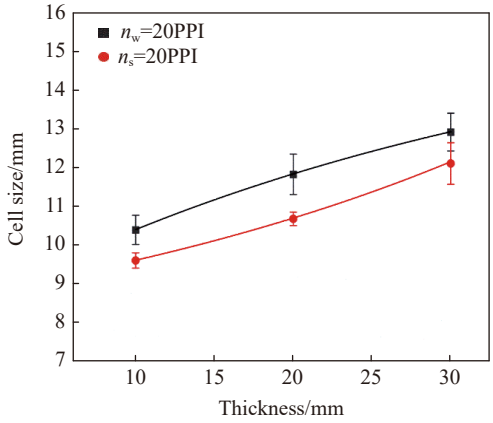


图 14　p_0=20 kPa 时金属网和海绵厚度对爆轰胞格尺寸的影响

Fig. 14　Effect of metal mesh and sponge thickness on detonation cell size at p_0=20 kPa

3　结　论

通过实验研究了 2 种典型多孔介质对爆轰胞格结构、胞格尺寸等参数的影响。研究结果表明：爆轰胞格结构与海绵及金属丝网的厚度、孔隙率密切相关，并发现了多个爆轰传播阶段，包括爆轰失效、加速和再起爆；此外，爆轰胞格尺寸也与海绵及金属丝网的厚度、孔隙率密切相关，增大多孔材料厚度和减小孔隙率均能显著增大爆轰胞格尺寸。通过对比分析海绵与金属丝网对爆轰胞格尺寸的影响发现，在相同条件下，刚性多孔材料对爆轰的抑制作用更强，但这种差距会随多孔材料厚度的增加而减小。通过引入无量纲参数 D_H/λ 量化分析了爆轰传播极限，对于柔性和刚性多孔材料，其爆轰传播极限可分别近似量化为 D_H/λ≈3.0 和 D_H/λ≈3.1。

参考文献：

[1] DINCER I, ACAR C. Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(34): 11094–11111.

[2] VERHELST S, WALLNER T. Hydrogen-fueled internal combustion engines [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2009, 35(6): 490–527.

[3] ZHENG L G, DOU Z G, DU D P, et al. Study on explosion characteristics of premixed hydrogen/biogas/air mixture in a duct [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(49): 27159–27173.

[4] MOLNARNE M, SCHROEDER V. Hazardous properties of hydrogen and hydrogen containing fuel gases [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2019, 130: 1–5.

[5] WU X L, XU S, PANG A M, et al. Hazard evaluation of ignition sensitivity and explosion severity for three typical MH_2 (M= Mg, Ti, Zr) of energetic materials [J]. Defence Technology, 2021, 17(4): 1262–1268.

[6] ALVES J J N, NETO A T P, ARAÚJO A C B, et al. Overview and experimental verification of models to classify hazardous

areas [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2019, 122: 102–117.

[7] JIAO F Y, ZHANG H R, LI W J, et al. Experimental and numerical study of the influence of initial temperature on explosion limits and explosion process of syngas-air mixtures [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(52): 22261–22272.

[8] CHEN Y R, CHANG J, BUSSONNIÈRE A, et al. Evaluation of wettability of mineral particles via cavitation thresholds [J]. Powder Technology, 2020, 362: 334–340.

[9] ROYLE M, WILLOUGHBY D. The safety of the future hydrogen economy [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2011, 89(6): 452–462.

[10] HALIM S Z, YU M X, ESCOBAR H, et al. Towards a causal model from pipeline incident data analysis [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2020, 143: 348–360.

[11] AIZAWA K, YOSHINO S, MOGI T, et al. Study of detonation initiation in hydrogen/air flow [J]. Shock Waves, 2008, 18(4): 299–305.

[12] EVANS M W, GIVEN F I, RICHESON W E JR. Effects of attenuating materials on detonation induction distances in gases [J]. Journal of Applied Physics, 1955, 26(9): 1111–1113.

[13] TEODORCZYK A, LEE J H S. Detonation attenuation by foams and wire meshes lining the walls [J]. Shock Waves, 1995, 4(4): 225–236.

[14] 周凯元, 李宗芬. 丙烷-空气爆燃波的火焰面在直管道中的加速运动 [J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(2): 137–142.
ZHOU K Y, LI Z F. Flame front acceleration of propane-air deflagration in straight tubes [J]. Explosion and Shock Waves, 2000, 20(2): 137–142.

[15] 年伟民, 周凯元, 王汉良, 等. 气体爆轰波在声学吸收壁下游的再加强过程 [J]. 实验力学, 2005, 20(1): 37–43.
NIAN W M, ZHOU K Y, WANG H L, et al. The re-intension process of gaseous detonation downstream of the acoustic absorbing walled section [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2005, 20(1): 37–43.

[16] 夏昌敬, 周凯元. 气相爆轰波在 90°矩形弯管中传播时胞格结构的演化 [J]. 爆炸与冲击, 2005, 25(2): 151–156.
XIA C J, ZHOU K Y. Cellular structure evolution of gaseous detonation in a 90° rectangular bend [J]. Explosion and Shock Waves, 2005, 25(2): 151–156.

[17] 王汉良, 周凯元, 杨志, 等. 气体爆轰波在管道中绕射和反射的实验研究 [J]. 火灾科学, 2005, 14(3): 177–181.
WANG H L, ZHOU K Y, YANG Z, et al. Experimental study of diffraction and reflection of gaseous detonation wave in the tube [J]. Fire Safety Science, 2005, 14(3): 177–181.

[18] 杨志, 周凯元, 谢立军, 等. Z 型管道中气体火焰传播规律的实验研究 [J]. 火灾科学, 2006, 15(3): 111–115.
YANG Z, ZHOU K Y, XIE L J, et al. Experimental study of flame transition in the “Z” type tube [J]. Fire Safety Science, 2006, 15(3): 111–115.

[19] GUO C, THOMAS G, LI J, et al. Experimental study of gaseous detonation propagation over acoustically absorbing walls [J]. Shock Waves, 2002, 11(5): 353–359.

[20] BIVOL G Y, GOLOVASTOV S V, GOLUB V V. Attenuation and recovery of detonation wave after passing through acoustically absorbing section in hydrogen-air mixture at atmospheric pressure [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, 43: 311–314.

[21] ZHANG B. The influence of wall roughness on detonation limits in hydrogen-oxygen mixture [J]. Combustion and Flame, 2016, 169: 333–339.

[22] BIVOL G Y, GOLOVASTOV S V, GOLUB V V. Effects of the pore size on hydrogen-air detonation propagation in the channel with porous walls [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2019, 1147: 012046.

[23] MALIK K, ŻBIKOWSKI M, TEODORCZYK A. Detonation cell size model based on deep neural network for hydrogen, methane and propane mixtures with air and oxygen [J]. Nuclear Engineering and Technology, 2019, 51(2): 424–431.

[24] SUN X X, LU S X. Effect of orifice plate on the transmission mechanism of a detonation wave in hydrogen-oxygen mixtures [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(22): 12593–12603.

[25] KANESHIGE M, SHEPHERD J E. Detonation database: technical report FM97-8, GALCIT [EB/OL]. (1999-09-03)[2023-03-01]. https://shepherd.caltech.edu/EDL/publications/m_kane97b/db.pdf.

[26] LIU S Z, CHEN X, ZHAO N B, et al. Experimental study on initiation and propagation behavior of propane/oxygen/nitrogen detonation wave [J]. Fuel, 2021, 293: 120487.

[27] ZHANG B. Detonation limits in methane-hydrogen-oxygen mixtures: dominant effect of induction length [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(41): 23532–23537.

[28] PERALDI O, KNYSTAUTAS R, LEE J H. Criteria for transition to detonation in tubes [J]. Symposium (International) on Combustion, 1988, 21(1): 1629–1637.

［29］ CROSS M, CICCARELLI G. DDT and detonation propagation limits in an obstacle filled tube [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015, 36: 380–386.

Evolution Law of Hydrogen Detonation Cellular Structure under the Effect of Rigid and Flexible Porous Materials

LUO Rongqin[1], PENG Ao[1], ZHANG Jingwen[1], WANG Jun[1], CHEN Xianfeng[1], SHEN Liyuan[2], SHI Jihao[3], SUN Xuxu[1]

（1. *School of Safety Science and Emergency Management*, *Wuhan University of Technology*, *Wuhan* 430070, *Hubei*, *China*;
2. *China Fire and Rescue Institute*, *Beijing* 102220, *China*;
3. *Department of Building Environment and Energy Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong* ZS843, *China*）

Abstract: As highly efficient absorbing and dissipating materials, porous materials were widely used in the study of detonation wave attenuation. In order to further explore the mechanism of explosion suppression by porous materials, the effects of typical flexible (sponge) and rigid (wire mesh) porous materials on the detonation cellular structure for hydrogen and oxygen mixture were investigated systematically. The effects of thickness and porosity of sponge and wire mesh on the structure and size of detonation cell were discussed in detail. The cellular pattern of detonation wave was recorded by using smoke plate technology, and the cell size was calculated. The pressure sensors were used to record the arrival time of the detonation wave, and the average propagation velocity of detonation wave was obtained. The results show that the detonation cellular structure closely depends on the thickness and porosity of sponge and wire mesh, and three phases of the propagation can be observed in the tube, including detonation failure, acceleration and re-initiation. In addition, size of the detonation cell is also closely related to the thickness and porosity of sponge and wire mesh. Increasing the thickness of porous materials and decreasing the porosity both can increase the size of the detonation cell. By comparing the effects of sponge and wire mesh on the detonation cellular structure, it can be found that at the same initial condition, the rigid porous material has a stronger inhibition effect on detonation. But the difference will be gradually decreased with the increase of the thickness of the porous materials. Finally, the limit of the detonation propagation is analyzed quantitatively by introducing the dimensionless parameter D_H/λ. For flexible and rigid porous materials, the detonation limit can be nearly quantified as $D_H/\lambda\approx3.0$ and $D_H/\lambda\approx3.1$.

Keywords: detonation cellular structure; flexible porous material; rigid porous material; detonation limit; hydrogen