

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0131

柴油舱组集中透气管燃爆危险性及其阻隔防爆技术*

孙绪绪¹, 郭 进², 陆守香¹

(1. 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽 合肥 230027;

2. 福州大学环境与资源学院, 福建 福州 350108)

摘要: 对常温常压下柴油舱组集中透气管中柴油蒸汽的燃爆危险性以及阻隔防爆技术的抑爆效能开展了实验研究。利用 nac HX-3 高速相机和 CY-YD-205 压力传感器记录燃爆传播过程和爆炸超压, 阻隔防爆装置分别采用新型抑爆小球和普通波纹型阻火器。结果表明: 常温常压下, 一旦柴油油舱发生爆炸, 爆炸火球可以通过透气管传播到相邻油舱, 并引起二次爆炸, 具有较大的危险性; 普通波纹型阻火器在爆炸过程中阻火失效, 而新型抑爆小球具有较好的抑爆效果; 相对于光滑透气管工况, 在点火舱上方安装抑爆小球后, 被点火舱内的最大爆炸超压可以显著地从 552.5 kPa 降低到 35.0 kPa; 抑爆小球的中空多孔结构是其阻隔防爆的关键, 多孔结构不仅可以增大比表面积、扩大热损失, 而且还可以有效地分割削弱反应面。

关键词: 柴油; 透气管; 爆燃; 抑爆小球

中图分类号: O383

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Explosion hazard in the concentrated ventilation tube for a group of diesel tanks and its suppression technologies

SUN Xuxu¹, GUO Jin², LU Shouxiang¹

(1. State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China;

2. College of Environment and Resources, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China)

Abstract: In this study, the explosion hazard and suppression technology were investigated in a concentrated ventilation tube filled with diesel fuel under room temperature and environmental pressure. A high-speed camera (model: nac HX-3) and pressure sensors (model: CY-YD-205) were used to record the flame picture and explosion overpressure. New explosion suppression balls and an ordinary corrugated flame arrester were employed as explosion suppression apparatuses. The results indicate that the explosion flame can propagate into the adjacent fuel tank through the ventilation tube under room temperature and environmental pressure, causing the second explosion. In addition, the ordinary corrugated flame arrester fails to suppress explosion, and the new explosion suppression balls have better anti-explosion effect. Compared to the case of a smooth ventilation tube, the maximum explosion overpressure can be significantly decreased from about 552.5 kPa to 35.0 kPa in the ignited chamber after the new explosion suppression balls are introduced into the tube. The superior explosion suppression effect of the explosion suppression balls can be due to the hollow porous structures. The porous structures not only can significantly increase the specific surface area and heat loss, but also can effectively segment and weaken the reaction surface.

Keywords: diesel; ventilation tube; deflagration; explosion suppression ball

柴油作为一种非常重要的化石燃料和现代舰船的重要能源, 普遍存在于舰油的油舱中, 为了平衡油舱内和大气之间的压力, 通常会在油舱上方安装透气管。此外, 为了节省甲板上的有效空间, 大多数舰

* 收稿日期: 2020-05-06; 修回日期: 2021-03-02

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0802101)

第一作者: 孙绪绪(1994—), 男, 博士研究生, xxsunaqq@mail.ustc.edu.cn

通信作者: 陆守香(1962—), 男, 博士, 教授, sxlu@ustc.edu.cn

船采用集中式透气管,即将多个油舱的透气管在甲板上方汇合在一处,如图 1(b)所示。集中式透气管在带来巨大便利的同时,也存在极大的安全隐患,一旦其中一个柴油舱发生意外爆炸,爆炸火球很可能沿着透气管传播到其他油舱,引起二次爆炸,严重威胁舰船上人员的生命和财产安全。因此,常温常压下爆炸火球能否通过透气管传播到相邻的油舱亟待确定,并急需给出有效的阻隔防爆方法。

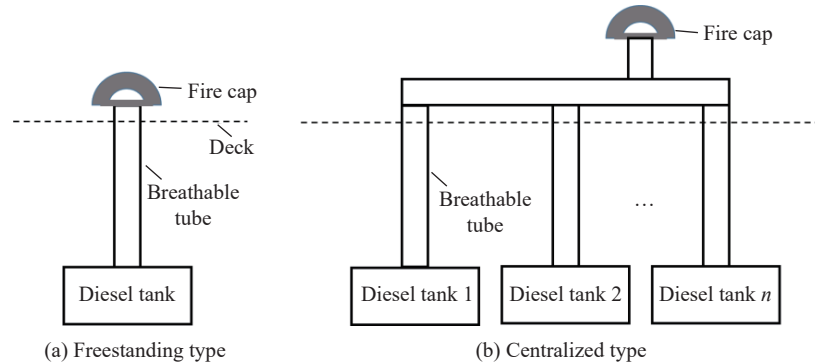


图 1 透气管结构

Fig. 1 Schematic diagrams of ventilation tubes

柴油的燃爆危险性已经得到普遍关注。Wang 等^[1]采用新型有效的评估方法预测了柴油爆炸火球的爆炸参数,在危险性评估领域具有重要意义。Lu 等^[2]通过实验研究了新型非金属球形材料对柴油爆炸火球的抑制作用,结果表明该种材料在柴油燃料二次爆炸过程中具有较好的抑爆效果。黄勇等^[3]采用静爆实验研究了安全柴油的抑爆能力;之后,刘健等^[4]通过烤燃实验研究了 3 种柴油的抑爆性能,结果表明阻燃抑爆柴油具有较好的阻燃抑爆能力。黄勇等^[5]和罗琳等^[6]实验研究了柴油云雾的最小点火能和燃爆特性。宋刚等^[7]采用内部强起爆的方法研究了军用柴油的燃爆性能,得出结论为安全柴油在爆炸火球高温持续时间和池火上的抑制效果较好。虽然柴油的燃爆特性已被普遍研究,但是柴油蒸汽爆炸火球在大尺寸复杂管道中的传播能力尚没有得到关注。尽管贾佳等^[8]通过数值模拟研究了柴油爆炸火球在透气管中的传播特性,但是其结果没有得到实验验证。本文中,拟首次对全尺寸舰船柴油油舱透气管中柴油蒸汽的燃爆传播危险性进行实验研究,并给出有效的阻隔防爆方法。

1 实验

1.1 装置与仪器

图 2 为柴油燃爆实验装置实物。两个柴油油舱通过透气管连接在一起。柴油油舱采用缩比模型,长度和宽度均按照 1:10 缩小,高度按照 1:5 缩小,两个油舱之间的距离为 4 m,缩尺后的油舱为一个边长 0.6 m 的正方体。两个油舱侧面各有一个直径 30 cm 的透明亚克力板观察窗,用来观察舱内的点火情况。透气管采用 1:1 原尺寸模拟,管径为 150 mm,高度为 7 m。在两个油舱表面和上方 0.5、2.5 m 处分别安装 CY-YD-205 压力传感器,用来记录爆炸超压。在距离实验装置 6 m 处,架设一台 nac HX-3 高速相机,拍摄频率为 $2\,000\text{ s}^{-1}$,用来记录油舱内的火焰传播图像。值得注意的是:本工作的主要目的是探索其中一个油舱发生意外爆炸时,爆炸火球能否传播到相邻的油舱并引起二次爆炸,在此过程中,柴油油舱的尺寸并不是主要影响因素,透气管的尺寸才是需要重点考虑的参数,因而透气管采用 1:1 原尺寸模拟,柴油油舱的缩比模型并没有考虑相似准则。



图 2 柴油燃爆实验装置

Fig. 2 An experimental device for diesel fuel explosion

1.2 燃料准备

在本文中,为了模拟舰船柴油油舱在海面上行驶的工况,采用 10#柴油作为实验燃料,实验开始前,分别向两个油舱中注入 5 L 柴油,在阳光下暴晒 30 min,环境温度为 15~27 ℃,风向为偏南风 3 级。暴晒期间,为使柴油蒸汽充满整个透气管,在两个油舱之间安装一个防爆循环风机,风机循环时间为 30 min,以保证柴油蒸汽充分循环。在右侧油舱中间安装一个点火电极,用来点燃柴油蒸汽。相较于本文中的实验条件,舰船油舱所处的实际环境更加苛刻,因为海面上无处遮挡,甲板上的温度时常超过 40 ℃,油舱在海面上长时间处于阳光下暴晒,且受海浪的影响,柴油燃料在油舱内发生剧烈摆动,致使透气管内充满柴油蒸汽。以此类推,如果爆炸火球在本文中的实验条件下能够通过透气管进入相邻的油舱,那么在实际情况下,爆炸火球也一定能够通过透气管,并引燃相邻的油舱。

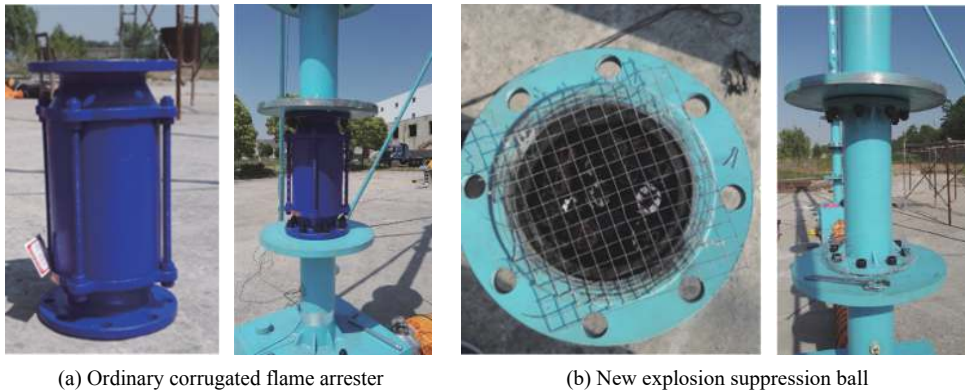
1.3 阻隔防爆装置

采用新型抑爆小球作为阻隔防爆装置来研究其阻隔防爆效果。抑爆小球是一种球形蜂窝状、高比表面积、不易燃、质轻,却有较高的比表面积,主要应用于网状抑爆材料不易填充的局部小空间。抑爆小球的外观如图 3 所示。实验之前,将新型抑爆小球填充满长 50 cm、直径 150 mm 的管道中,充满小球的管道安装在点火舱上方 0.5 m 处。使用相同规格普通波纹型阻火器与抑爆小球的阻隔防爆效果进行对比,如图 4 所示。波纹型阻火器型号为 ZGB-1,符合 GB 5908-86《石油储罐阻火器阻火性能和试验方法》的要求,其阻火芯材料为不锈钢防爆阻火波纹板,质量为 25 kg。



图 3 抑爆小球外观

Fig. 3 Picture of explosion suppression balls



(a) Ordinary corrugated flame arrester

(b) New explosion suppression ball

图 4 阻隔防爆装置实物

Fig. 4 Pictures of explosion suppression apparatuses

1.4 实验工况与步骤

本实验工况如表 1 所示,具体步骤如下:

- (1) 实验人员检查仪器设备是否正常,并进行设备调试;
- (2) 在确定设备正常的情况下,着手开展空白对照实验,即测试常温常压下,点火舱发生意外爆炸后是否可以通过透气管传播到相邻的油舱,并发生二次爆炸;
- (3) 测试普通波纹型阻火器是否能够成功阻火,即将普通波纹型阻火器安装在点火舱上方 0.5 m 处,点燃点火舱内的燃料,观察爆炸火球能否传播到被点火舱;

(4)测试新型抑爆小球阻隔防爆装置的阻隔防爆效果,即将填充抑爆小球的阻火器安装在点火舱上方 0.5 m 处,点燃点火舱内的燃料,观察爆炸火球能否传播到被点火舱;

(5)对比分析普通波纹型阻火器和新型抑爆小球阻隔防爆装置的阻隔防爆效果,分析新型抑爆小球的阻隔防爆机理。

2 实验结果与分析

2.1 柴油蒸汽燃爆危险性及阻隔防爆装置抑爆效果分析

本部分主要介绍柴油蒸汽在透气管中的燃爆危险性以及相应阻隔防爆装置的抑爆效果。光滑透气管中点火舱与被点火舱的高速图像如图 5 所示。从图 5 中可以清晰地看出,在常温常压下,一旦点火舱内的柴油蒸汽发生爆炸,爆炸火球可以通过透气管传播到相邻的油舱,并产生二次爆炸,危及人们的生命和财产安全。从图 5 中还可以发现,相较于点火舱,被点火舱内燃烧更剧烈。这是因为爆炸火球在管道中传播时经历了加速过程,而且此时条件允许(燃料充足、管径较大),所以管道越长,火焰加速越快,爆炸超压越大,相应的燃烧也更剧烈。

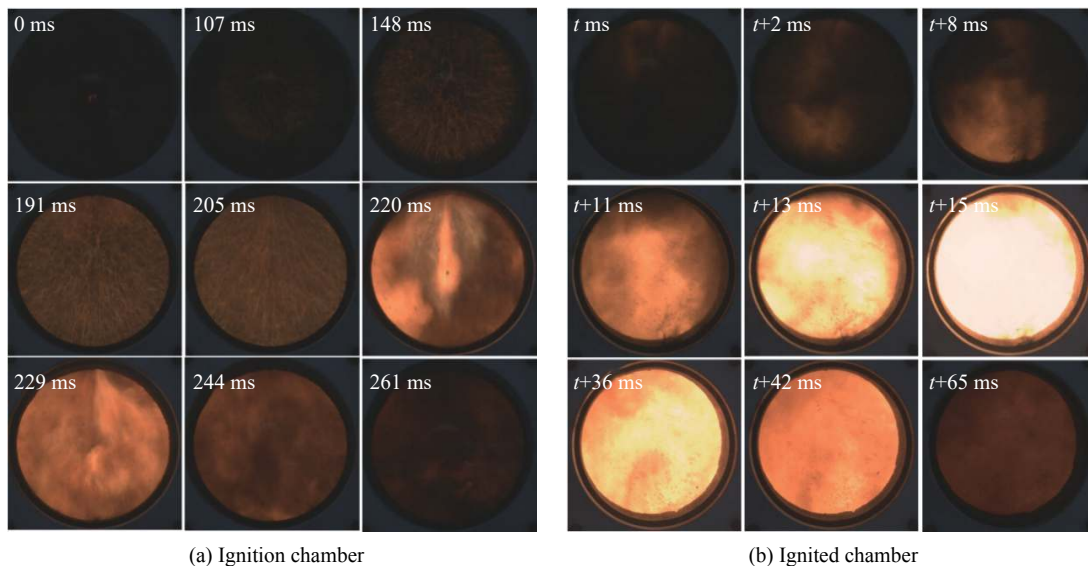


图 5 火焰传播高速图像

Fig. 5 High-speed pictures of flame propagation

安装两种阻隔防爆装置后,被点火舱的高速图像如图 6 所示。由图 6 可以明显看出,波纹型阻火器阻火失效,爆炸火球成功传播到被点火舱。而新型抑爆小球起到了很好的阻隔防爆作用,成功抑制爆炸火焰传播到被点火舱。火焰传播过程中的爆炸超压通过分布在管道上的压力传感器记录。

图 7(a)展示了光滑透气管中不同位置处的爆炸超压随时间的变化曲线。由图 7(a)可知,相对于油舱内的爆炸超压,油舱上方 2.5 m 处的透气管中爆炸超压更大。这是由于点火之后,火焰进入透气管中经历了加速过程。管道越长,火焰加速越快,相应的爆炸超压也越大。但是,当火焰传播进入油舱后,由于突然进入开放空间,火球急剧膨胀,导致火焰速度下降,爆炸超压降低。波纹型阻火器被安装在点火舱上方后,各处爆炸超压降低约 300 kPa,说明波纹型阻火器起到了一定的阻隔防爆效果,但火焰还是传播到了被点火舱,因此仍然认为其未成功阻火(见图 7(b))。将新型抑爆小球安装在点火舱上方相同位置,点火舱内的爆炸超压急剧降至约 300 kPa,被点火舱内的压力降至约 35 kPa,抑爆小球阻火成功(见图 7(c))。

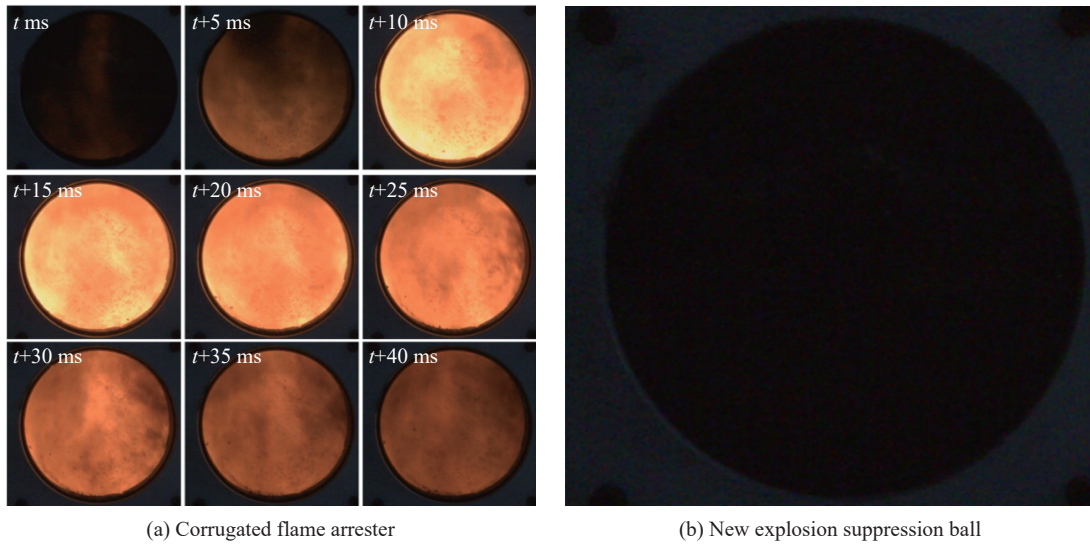


图 6 被点火舱火焰传播高速图像

Fig. 6 High-speed flame pictures in ignited chamber

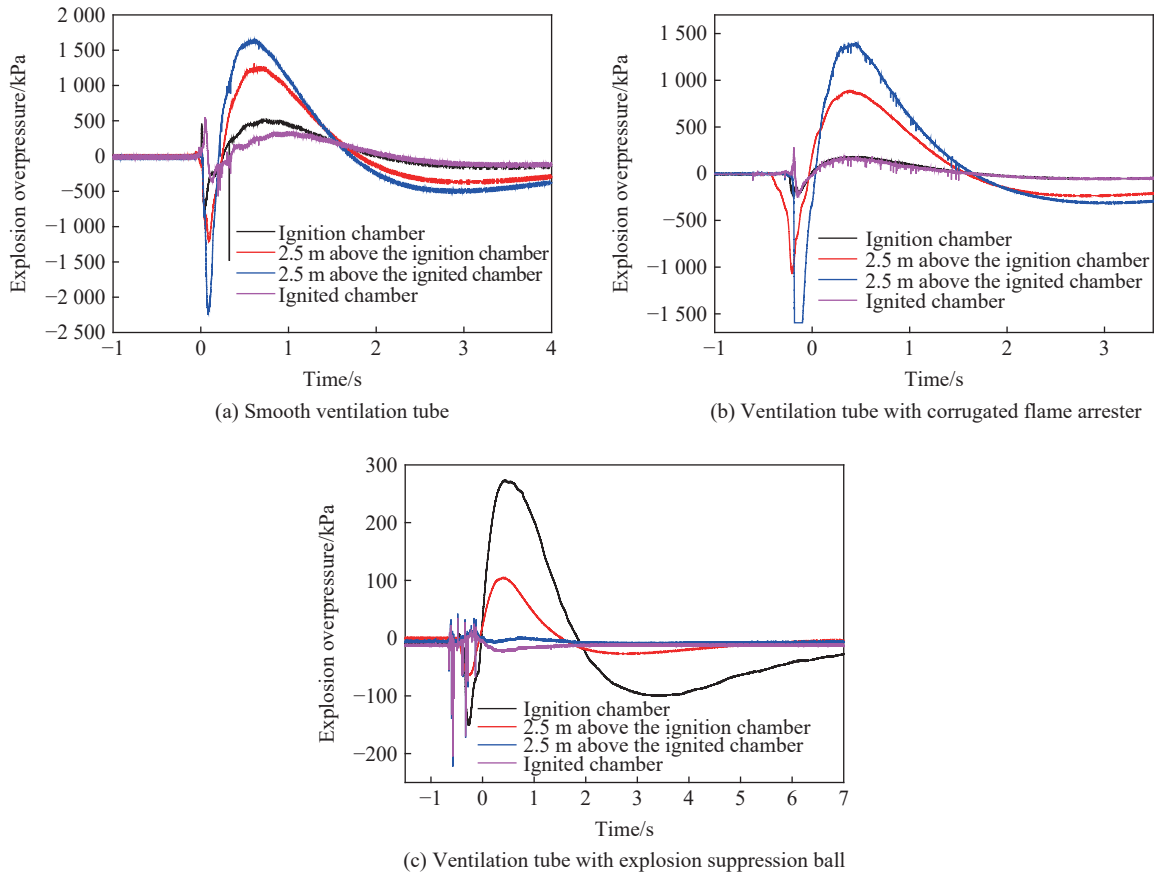


图 7 爆炸超压随时间变化曲线

Fig. 7 Explosion overpressure versus time

光滑透气管、含有波纹型阻火器透气管和含有抑爆小球阻火器透气管 3 种工况中被点火舱内的最大爆炸超压分别为 552.5、282.0 和 35.0 kPa。另外,从图 7 可知,在光滑透气管和含有波纹型阻火器的透气管中,点火舱内的压力较低,而在含有抑爆小球的透气管中,点火舱内的爆炸超压远大于其他两种工况。这是因为在含有抑爆小球的透气管中,抑爆小球完全阻挡住了爆炸火焰的传播,燃烧产物无法及时

扩散出去,致使点火舱内压力急剧增加。而另外两种工况中,火焰可顺利通过透气管,燃烧产物及时扩散出去,没有积聚,所以点火舱内的压力较低。

2.2 抑爆小球阻隔防爆机理分析

新型抑爆小球为多孔中空的塑料球形结构,这种特殊的结构具有较大的比表面积,当火焰通过抑爆小球时,可以保证大部分的热量都被小球吸收,起到降低火焰表面温度、减小火焰传播速度的作用,从而达到阻隔防爆的目的。实验后的抑爆小球如图 8 所示,可以发现在抑爆小球下方有约 10 cm 高的烧焦区,而上方的抑爆小球结构并未被破坏,这表明火焰在进入抑爆小球装置后,传播约 10 cm 就已经完全熄灭。

为了定性分析抑爆小球的阻隔防爆机理,采用二维数值模拟方法近似模拟燃烧波通过多孔结构的情形。充满抑爆小球的管道被近似简化为二维多孔结构,如图 9 所示。控制方程为欧拉方程,采用两步诱导反应动力学模型和 GPU 数值模拟方法,具体细节可以参考文献 [9-12]。由图 9 可知,当燃烧波进入多孔结构后,反应面被迅速分割成多个独立的小区域,增加了反应面与小球表面的接触面积,增大了热损失。另外,当燃烧波面通过第一排障碍物后,被分割的反应面与后面的障碍物迅速发生碰撞,进一步降低反应面的传播速度,扩大热损失。如此循环往复,最终导致反应终止,燃烧熄灭。

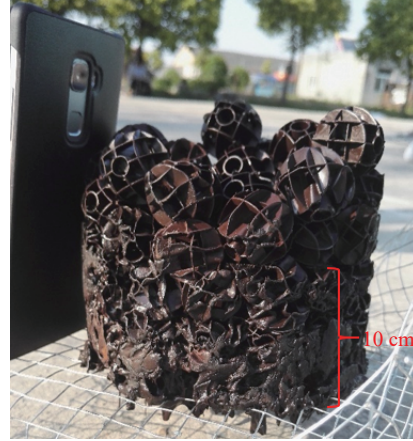


图 8 实验后的抑爆小球

Fig. 8 Explosion suppression balls after experiments

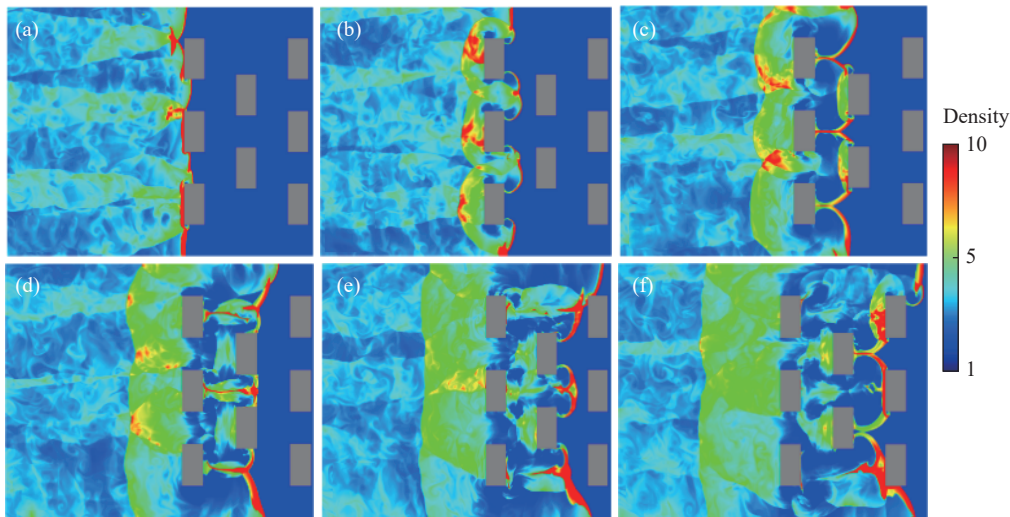


图 9 燃烧波通过多孔结构的密度云图

Fig. 9 Density field showing combustion wave propagating through porous structure

3 结 论

(1) 常温常压下,采用集中透气管的柴油舱组,一旦其中一个油舱发生爆炸,爆炸火球可以通过透气管传播到相邻的油舱,并引起二次爆炸。

(2) 新型抑爆小球可以起到很好的抑爆效果,与光滑透气管工况相比,安装抑爆小球后,被点火舱内的爆炸超压可以从约 552.5 kPa 显著降低到 35.0 kPa。

(3) 抑爆小球多孔的中空球形结构是其成功阻隔防爆的关键, 较大的比表面积吸收了大量的热量, 降低了火焰温度和传播速度, 从而有效地起到阻隔防爆效果; 另外, 抑爆小球的多孔结构还可以起到分割削弱反应面的作用, 这也是导致化学反应终止的重要原因。

参考文献:

- [1] WANG H Z, LU C B, AN G J, et al. Assessment method of liquid fuel field explosion hazardousness [J]. *Procedia Engineering*, 2014, 84: 394–401. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.10.449.
- [2] LU C B, AN G J, XIONG C H, et al. Progress on fire and explosion suppression technologies for light petroleum fuel [J]. *Procedia Engineering*, 2014, 84: 384–393. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.10.448.
- [3] 黄勇, 解立峰, 鲁长波, 等. 安全柴油燃爆性能的静爆试验研究 [J]. *爆破器材*, 2015, 44(6): 20–24. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2015.06.005.
HUANG Y, XIE L F, LU C B, et al. Static experimental for combustion and explosion performances of safety diesel fuel [J]. *Explosive Materials*, 2015, 44(6): 20–24. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2015.06.005.
- [4] 刘健, 姚箭, 宋述忠, 等. 柴油的烤燃燃爆性能实验 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(3): 534–540. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0291.
LIU J, YAO J, SONG S Z, et al. Experimental study on cook-off performance of diesel fuel [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(3): 534–540. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0291.
- [5] 黄勇, 解立峰, 鲁长波, 等. 柴油云雾最小点火能量的实验研究 [J]. *高压物理学报*, 2015, 29(2): 149–154. DOI: 10.11858/gywlb.2015.02.010.
HUANG Y, XIE L F, LU C B, et al. Experimental study on minimum ignition energy of diesel-air cloud [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2015, 29(2): 149–154. DOI: 10.11858/gywlb.2015.02.010.
- [6] 罗琳, 解立峰, 韩志伟, 等. 柴油的抛撒成雾及燃爆特性研究 [J]. *高压物理学报*, 2015, 29(3): 213–218. DOI: 10.11858/gywlb.2015.03.008.
LUO L, XIE L F, HAN Z W, et al. Cloud character in explosion dispersion and combustion feature of diesel [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2015, 29(3): 213–218. DOI: 10.11858/gywlb.2015.03.008.
- [7] 宋刚, 张文铖, 封晓杰, 等. 油箱内部强起爆条件下安全柴油燃爆性能的试验研究 [J]. *爆破器材*, 2018, 47(2): 28–32. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2018.02.006.
SONG G, ZHANG W C, FENG X J, et al. Experimental study on combustion and explosion performance of safe diesel under strong detonation conditions in fuel tank [J]. *Explosive Materials*, 2018, 47(2): 28–32. DOI: 10.3969/j.issn.1001-8352.2018.02.006.
- [8] 贾佳, 吴晓伟, 黎昌海. 舰船柴油舱组及其集中透气管内柴油蒸气燃爆数值模拟 [J]. *航海工程*, 2018, 47(6): 21–28. DOI: 10.3963/j.issn.1671-7953.2018.06.006.
JIA J, WU X W, LI C H. Numerical simulation of diesel evaporation explosion in diesel oil tank set with its centralized venting tube [J]. *Ship and Ocean Engineering*, 2018, 47(6): 21–28. DOI: 10.3963/j.issn.1671-7953.2018.06.006.
- [9] NG H D, RADULESCU M I, HIGGINS A J, et al. Numerical investigation of the instability for one-dimensional Chapman-Jouguet detonations with chain-branching kinetics [J]. *Combustion Theory and Modelling*, 2005, 9(3): 385–401. DOI: 10.1080/13647830500307758.
- [10] TORO E F. The equations of fluid dynamics [M] // TORO E F. *Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2009: 1–40.
- [11] KIYANDA C B, MORGAN G H, NIKIFORAKIS N, et al. High resolution GPU-based flow simulation of the gaseous methane-oxygen detonation structure [J]. *Journal of Visualization*, 2015, 18(2): 273–276. DOI: 10.1007/s12650-014-0247-9.
- [12] MI X C, HIGGINS A J, NG H D, et al. Propagation of gaseous detonation waves in a spatially inhomogeneous reactive medium [J]. *Physical Review Fluids*, 2017, 2(5): 053201. DOI: 10.1103/PhysRevFluids.2.053201.

(责任编辑 蔡国艳)