

DOI: 10.11883/bzycj-2022-0012

模拟立式拱顶油罐内油气爆炸实验研究*

蔡运雄¹, 蒋新生¹, 王世茂², 余彬彬¹, 王子拓¹, 王春辉¹, 李玉玺¹

(1. 陆军勤务学院油料系, 重庆 401331;

2. 中国空气动力研究与发展中心空天技术研究所, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为探究立式拱顶油罐内油气体积分数、点火位置和液位对爆炸超压特性参数与火焰发展的影响规律, 开展了一系列的实验研究, 得到以下结果: (1) 1.7% 是任一工况下的最危险油气体积分数, 内场超压发展都可以分为超压上升、超压泄放和振荡衰减 3 个阶段。爆炸过程中 CH、C₂、OH 等自由基的生成和空间分布, 使得不同初始油气体积分数下或不同爆炸阶段的火焰呈现不同的颜色变化。(2) 点火位置对油气爆炸超压特性参数的影响较大, 位置越靠下, 爆炸威力越大。罐底中心点火时, 内外场平均升压速率取得最大值, 分别为 0.46 和 0.05 MPa/s。(3) 液位变化对油气爆炸内外场超压的影响较大, 油罐侧壁上部位置点火时, 50% 液位是最危险的液位。任意液位下外场超压随比例距离的增大都呈现幂指数衰减规律, 不同液位下油气爆炸外场冲击波超压峰值与距离和油气混合物体积的关系可以用一个公式统一表示。相比于气相空间, 液相空间的超压变化具有延后性、负压增强和振荡衰减更快的特点。

关键词: 立式拱顶油罐; 油气爆炸; 化学反应; 超压; 火焰

中图分类号: O389; X932

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Experimental study of gasoline-air mixture explosion in imitated vertical dome oil tank

CAI Yunxiong¹, JIANG Xinsheng¹, WANG Shimao², YU Binbin¹, WANG Zituo¹, WANG Chunhui¹, LI Yuxi¹

(1. *Petroleum, Oil & Lubricants Department, Army Logistics Academy, Chongqing 401331, China;*

2. *Aerospace Technology Institute of China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, Sichuan, China)*

Abstract: To investigate the influence of gasoline-air mixture volume fraction, ignition position and liquid level on explosion overpressure parameters and flame development in vertical dome oil tank, a series of experiments with nine initial hydrocarbon volume fractions, four ignition positions and five liquid levels were carried out in a transparent imitated oil tank. Dynamic data acquisition system and high-speed camera were employed to detect the changes of internal and external field pressure, and to record the transformation of flame shape. The following results were found. (1) 1.7% is the most dangerous gasoline-air mixture volume fraction under any working condition. The development of overpressure in the inner field can be divided into three stages: overpressure rise, overpressure release and oscillation attenuation. The formation and spatial distribution of free radicals such as CH, C₂ and OH during the explosion process make the flame show different color changes under different initial volume fractions or at different explosion stages. (2) Ignition position has a great influence on explosion overpressure parameters. The lower the ignition position is, the greater the explosion power is. When the ignition position is in the center of the bottom of the tank, the average pressure boost rate of the internal and external fields reaches the maximum value, being

* 收稿日期: 2022-01-10; 修回日期: 2022-03-03

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0809502); 国家自然科学基金(51574254);

军委科技委基础加强计划重点基础研究项目(2019-JCJQ-198-04); 重庆市研究生科研创新项目(CYB20201)

第一作者: 蔡运雄(1995—), 男, 博士研究生, yunxiongcai@outlook.com

通信作者: 蒋新生(1972—), 男, 博士, 教授, jxs_dy@163.com

0.464 MPa/s and 0.053 MPa/s, respectively. (3) The change of liquid level has a great influence on the overpressure of the internal and external field of oil and gas explosion. When the position ignition is located at the top of the side wall of the oil tank, the 50% liquid level is the most dangerous level. At any liquid level, the outfield overpressure decreases exponentially with the increase of scaled distance. The relationship among the maximum overpressure peak of the outfield shock wave of gasoline-air mixture explosion at different liquid levels, the distance and the volume of gasoline-air mixture can be expressed by a unified expression. Compared with gas space, the overpressure in liquid space has the characteristics of delay, enhancement of negative overpressure and faster oscillation attenuation frequency.

Keywords: vertical dome oil tank; gasoline-air mixture explosion; chemical reaction; overpressure; flame

石油是重要的战略物资, 由于其易燃易爆特性, 在石油储备过程中容易发生火灾, 由此引发的沸溢、喷溅现象不仅难以扑救, 也对周围事物造成重大危害, 发生在储罐区内的火灾还容易导致多个油罐连续爆炸^[1-2]。2005 年, 英国邦斯菲尔德油库因设备故障引发油气爆炸、燃烧, 损毁储罐 20 座, 40 多人受伤, 直接经济损失 2.5 亿英镑^[3-4]。2016 年 12 月, 广州石化公司的一个 5 000 m³ 汽油储罐因油气泄漏引发闪爆, 造成 8 人伤亡。2020 年 6 月, 沈海高速温岭段一辆液化石油气运输槽罐车因侧翻导致重大爆炸事故, 造成 195 人伤亡, 直接经济损失 9 477 万元。2021 年 5 月, 河北沧州的 5 个 2 000 m³ 储油罐由于防火堤内的切割作业发生火灾, 喷溅的火焰引起了相邻储罐的闪爆起火, 直接经济损失 3 872 万元。发生于储罐中的爆炸通常伴随着油气泄爆现象, 冲击波与火焰的传播相对复杂, 并且两者之间的相互作用促使爆炸发展更为激烈, 由此产生巨大的破坏力。因此, 探究立式拱顶油罐中油气爆炸的发展规律对相关领域的安全防护工程有着十分重要的意义。

当前, 有关可燃气体爆炸的实验研究多采用氢气、甲烷和丙烷等单质气体, 关注于气体体积分数和点火位置等初始条件对爆炸超压等特性参数的影响。例如, Rui 等^[5]在边长为 0.5 m 的立方体容器中开展了一系列氢气-空气混合物的泄爆实验, 揭示了点火位置和泄爆压力对外场超压峰值与火焰速度的影响规律。Li 等^[6]在城市管道人孔结构中利用甲烷/空气混合物, 开展了不同气体浓度和点火位置等条件下的爆炸实验, 研究表明当甲烷浓度越接近化学当量比并且点火位置越低时, 泄爆到外场的冲击波超压峰值越大。苏航等^[7]在微小空间中探究了丙烷-空气混合物以及在加氢情况下的火焰传播情况, 实验观察到了光滑、皱褶和断裂三种火焰锋面形态。相比于这些单质气体, 油气混合物的成分较为复杂, 但仍然可以借鉴其研究方法开展油气爆炸实验。然而, 当前有关油气爆炸的实验通常都是在圆形、方形管道或者小型容器中开展的研究。例如, 吴松林等^[8]在圆柱形管道中开展了电火花、高温热壁等不同点火方式下的油气爆炸研究, 指出点火方式对火焰结构、火焰颜色等都有较大影响。Li 等^[9-10]在半开口的方形管道中探究了障碍物位置和油气体积分数对爆炸的影响, 分析了超压变化、火焰传播以及超压与火焰之间的耦合关系。Wang 等^[11]在 20 L 圆形容器中研究了油气体积分数和泄爆口尺寸对泄爆过程的影响, 指出超压变化和火焰演变存在 4 个阶段, 超压峰值、火焰速度与火焰传播距离受到初始条件的影响较大。此外, 还有部分学者在不同结构的管道中开展了油气泄爆研究^[12-14], 然而这些研究多是聚焦于容器内部的爆炸发展, 较少关注到外场空间的爆炸演变过程, 尤其是涉及到外场冲击波传播特性的相关研究较为欠缺。而相比于这些管道容器, 油料储罐的结构较为特殊, 当罐内发生油气爆炸时, 通常会从侧壁与拱顶连接处的一点开始泄爆, 然后逐渐扩大直到整个拱顶被掀开。虽然有部分学者针对这种结构形式的容器开展了少量实验研究^[15-16], 但并没有关注到油气体积分数对火焰形态, 以及点火位置和液位变化对油气泄爆带来的影响。然而在实际的油罐爆炸中, 这些影响因素都在较大程度上决定了爆炸的威力, 因而有必要对此开展全面的研究。

针对目前研究的不足, 本文中, 以立式拱顶油罐内发生油气爆炸对周围事物造成重大危害为工程背景, 利用可视化的模拟油罐, 系统地开展不同初始油气体积分数、不同点火位置 and 不同液位的油气爆炸实验, 记录油罐内外场空间超压参数与火焰形态变化, 探索立式拱顶油罐内油气爆炸的发展规律, 以期对相关领域的安全防护工程提供理论支撑。

1 实 验

1.1 实验系统

实验系统如图 1 所示, 主要包括油气爆炸发生的容器, 即透明的模拟立式拱顶油罐; 构建实验工况的仪器设备, 即油气产生与循环系统、红外线分析器、高能无干扰点火器等; 探测实验参数的仪器设备, 即动态数据采集系统、高速摄影仪、同步触发控制器等。其中爆炸容器是根据相似原理, 以 $5\ 000\ \text{m}^3$ 立式拱顶油罐为原型同比例缩制而成, 总高 $380\ \text{mm}$, 内径 $500\ \text{mm}$, 拱顶曲率半径 $600\ \text{mm}$ 。罐壁采用 $28\ \text{mm}$ 厚 PMMA 材质, 具有良好透光性。罐底采用 $10\ \text{mm}$ 厚钢材, 罐体设计承压 $2\ \text{MPa}$ 。模拟油罐拱顶采用白铁皮冲压成型, 与罐壁的连接处进行强度弱化处理, 以模拟拱顶的弱连接结构, 设定损坏压力为 $20\ \text{kPa}$ 。实验中采用动态信号测试分析系统, 配合使用 $0\sim 10\ \text{kPa}$ 和 $0\sim 50\ \text{kPa}$ 两种量程的压力传感器来采集压力信号, 使用光电型火焰传感器来采集光照强度信号。其他设备与文献 [10] 相同, 其中爆炸介质为 92 汽油蒸气与空气的混合物, 点火能量为 $1.5\ \text{J}$, 高速相机拍摄帧率为 $1\ 000\ \text{s}^{-1}$ 。

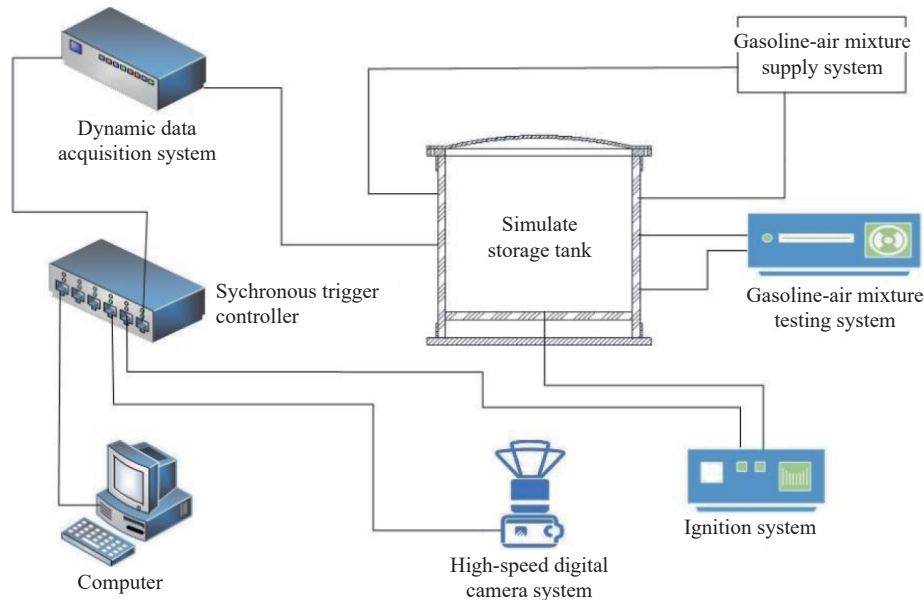


图 1 实验系统

Fig. 1 The experimental system

1.2 实验内容

针对空罐、25% 储油量、50% 储油量、75% 储油量和 100% 储油量等 5 种液位情况, 分别开展了 0.9%、1.1%、1.4%、1.6%、1.7%、1.8%、2.0%、2.3% 和 2.6% 等 9 种初始油气体积分数下的爆炸实验。对于空罐情况, 在最危险油气体积分数下, 开展了 4 种不同点火位置的油气爆炸实验。当液位变化时, 为保证安全, 先在油罐下层倒入一定量的水, 再在水层上倒入 $0.05\ \text{m}$ 厚的汽油层, 控制总液位达到设定值来模拟不同液位下的油气爆炸。实验发现, 爆炸过程中罐内液体并没有大量波动, 因密度差汽油层始终位于水层之上。而爆炸中主要是上层汽油挥发后参入后续的燃烧, $0.05\ \text{m}$ 厚的汽油层已经足够, 采用水代替部分汽油对爆炸超压等特性参数带来的影响可以忽略。实验中利用动态数据采集系统和高速摄影仪记录爆炸超压和火焰形态的发展过程。如图 2 所示, 测点 I1~I4 用于放置点火杆, 分别为侧壁上部、中部、下部和罐底中心位置等 4 种点火位置。测点 F 用于放置火焰传感器, 测点 P1~P3 和 P4~P27 分别为油罐内外场压力测点。I1~I3 和 P1~P3 分别位于罐壁两侧的上中下 3 个位置, 间隔距离为 $0.2\ \text{m}$ 。24 个外场测点与油罐侧壁同高, 均匀分布在 6 条夹角 60° 的直线上, 与油罐中心的距离分别为 0.65 、

1.05、1.45 和 1.85 m。实验时周围环境温度约为 298 K, 压强约为 98.5 kPa, 对于每种工况至少重复开展 3 次以保证实验的可重复性。

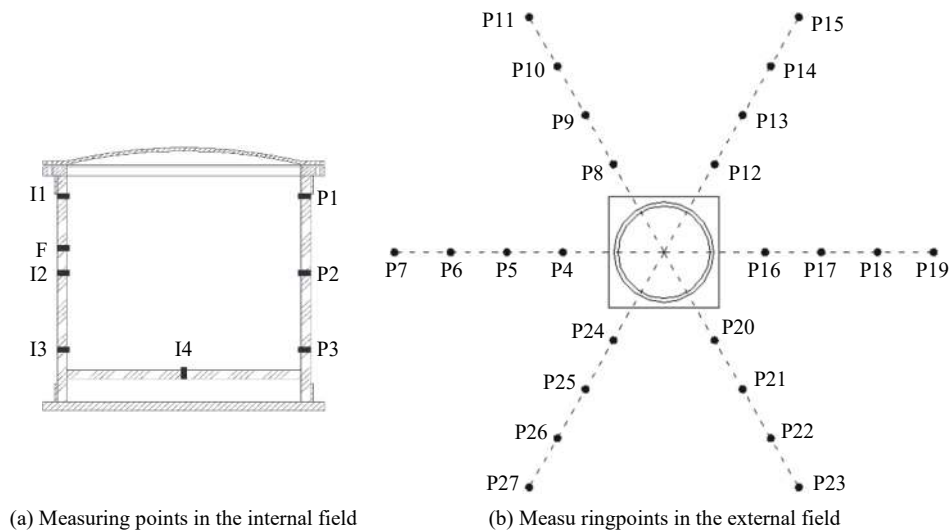


图 2 模拟油罐测点分布图

Fig. 2 Simulated tank measuring point distribution diagram

2 实验结果与讨论

2.1 初始油气体积分数对油气爆炸的影响规律

2.1.1 油气体积分数对超压参数的影响

油气爆炸超压是重要的爆炸特征参数, 超压变化可以直观地反映出油气爆炸的发展过程, 并衡量爆炸的威力。由于爆炸发展迅速, 实验所用的爆炸容器较小, 所以 3 个内场压力测点所测得的超压数据十分接近。图 3 所示为点火杆位于 I4, 初始油气体积分数 $\varphi_{CH}=1.8\%$ 时, 3 个内场压力测点的压力时序曲线。从图中可以看出, 3 条曲线的变化历程一致, P1、P2 和 P3 处最大值分别为 27.61、27.44 和 27.55 kPa, 误差不超过 0.6%, 达到最大值所用的时间都接近于 91 ms。由于容器相对较小, 爆炸并未发展到爆轰状态, 传感器所测压力更多是由于热量释放导致容器内压力的整体提升, 另外 3 个传感器的位置比较接近, 所以最大值和相应时间都比较接近, 即油罐气体空间内不同位置的超压变化几乎一致^[1]。所以在下文中, 仅选取测点 P2 的数据对油罐内场的超压变化进行分析。

根据内场超压时序曲线, 油罐油气爆炸的发展大致可以分为 3 个阶段, 分别为超压上升阶段 (0~91 ms)、超压泄放阶段 (91~101 ms) 和超压振荡衰减阶段 (101~180 ms)。在第 1 阶段, 超压发展由慢而快, 火焰对称发展。在 91 ms 时, 罐内超压到达拱顶承受极限, 开始泄爆并进入第 2 阶段。泄爆从拱顶与罐壁的连接处产生, 且方向具有随机性。因为罐内冲击波经过多次反射在拱顶和侧壁连接的角隅处产生了压力汇聚, 并且施加在拱顶的压力传递到连接处时形成了较大的拉伸力。而连接处的强度相对较弱, 不同位置的强度并不完全一致, 爆炸发生后强度最弱的地方会首先被破坏, 然后沿着连接处向两侧扩展, 进而使得整个拱顶被掀起。在第 2 阶段, 泄流效应使得罐内超压迅速降至负值, 在 101 ms 时产生最大负超压。泄爆过程中未燃油气被抛向外场空间, 继续发生强烈的燃烧反应。在第 3 阶段, 超压保持一定的频率振荡衰减, 外场空间的油气混合物进一步燃烧消耗。

由实验可知, 不同油气体积分数下的超压变化趋势相同, 都可以用 3 个阶段来简单表述, 仅在数值和时间上有所区别, 表 1 所示为不同初始油气体积分数 φ_{CH} 所对应的油气爆炸内场最大超压峰值 $p_{in,max}$ 、内场最大超压峰值的形成时间 $t_{in,max}$ 和内场平均升压速率 $(dp/dt)_{in,ave}$ 。可以看出随着 φ_{CH} 的提升, $p_{in,max}$ 先增后减, 在 $\varphi_{CH}=1.7\%$ 时取得最大值 31.59 kPa。其中内场最大超压 $p_{in,max}$ 实际上就是泄爆压力, 实验

中设定拱顶连接处破坏压力为 20 kPa, 是指在升压相对较慢时的泄爆压力。但在油气体积分数不同时, 化学反应的激烈程度有所不同, 升压速率差异明显。而拱顶连接处的破坏属于动压破坏, 按照塑性变形滞后理论, 在爆炸剧烈时, 泄爆压力会更大。

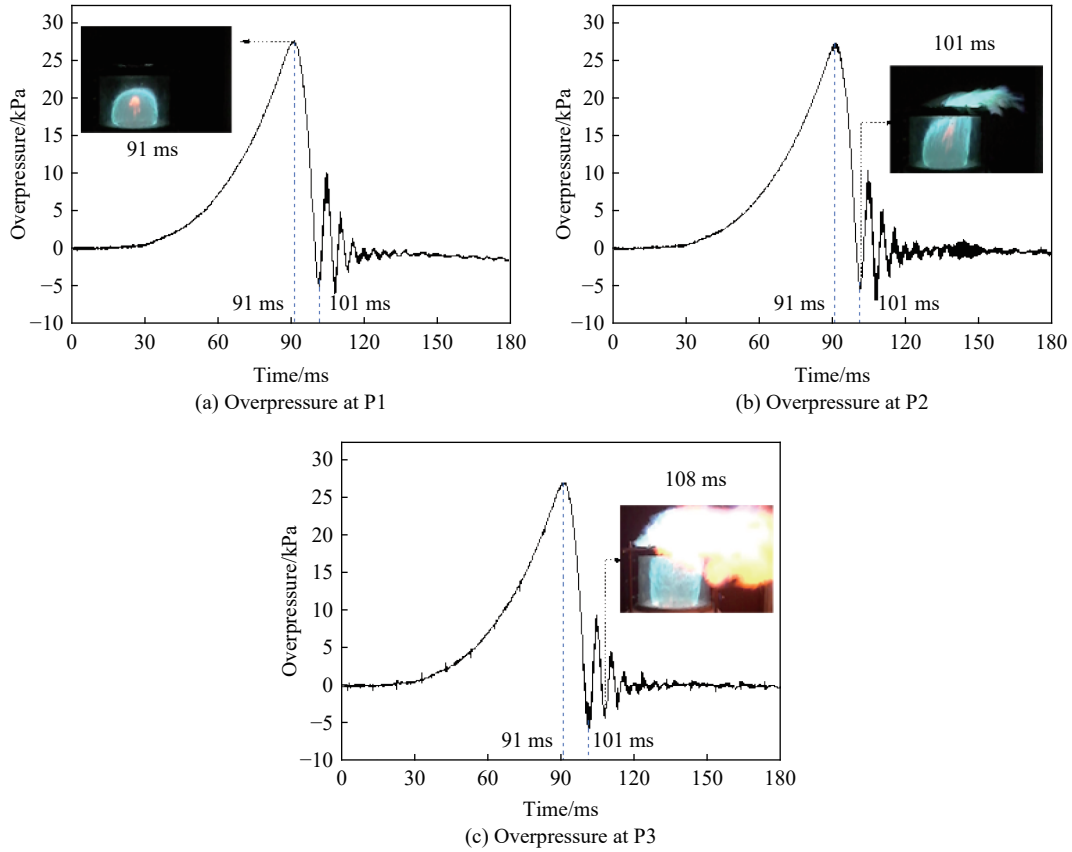


图 3 模拟油罐油气爆炸内场测点超压时序曲线

Fig. 3 The time history of overpressure measurement points in the field of gasoline-air mixture explosion in simulated tank

表 1 不同初始体积分数下的油气爆炸内场超压参数

Table 1 Internal field overpressure parameters of gasoline-air mixture explosion at different initial volume fractions

$\varphi_{CH_4}/\%$	$p_{m,max}/kPa$	$t_{m,max}/ms$	$(dp/dt)_{m,ave}/(MPa \cdot s^{-1})$
0.9	20.37	212	0.10
1.1	26.71	103	0.26
1.4	27.02	70	0.39
1.6	27.86	69	0.40
1.7	31.59	68	0.46
1.8	27.44	90	0.31
2.0	24.67	115	0.22
2.3	22.98	194	0.12
2.6	20.26	462	0.04

平均升压速率反映了爆炸发展的快慢, 内外场平均升压速率都可用于衡量爆炸的威力, 是重要的爆炸特性参数。其中外场平均升压速率 $(dp/dt)_{ext,ave}$ 选用 24 个外场压力测点中最大的超压峰值 $p_{ext,max}$ 除以发展时间 $t_{ext,max}$ 。分析实验数据发现, 外场超压大小与测点的位置关系密切, 在拱顶泄爆方向的超压数值

整体大于其他方向, 距离最近测点的数值大于其他数值。所以 $p_{\text{ext,max}}$ 实际上就是泄爆方向最近测点的最大超压峰值, 而发展时间 $t_{\text{ext,max}}$ 是从泄爆开始到形成外场最大超压峰值所用的时间, $(dp/dt)_{\text{ext,ave}}$ 也反映了冲击波在空气中传播的快慢。如图 4 所示为 $(dp/dt)_{\text{in,ave}}$ 和 $(dp/dt)_{\text{ext,ave}}$ 与 φ_{CH} 的关系曲线。由图 4 可知, 两者的大致变化趋势都是随着 φ_{CH} 的提升先增后减, 在 $\varphi_{\text{CH}}=1.7\%$ 时取得最大值, 分别为 0.46 和 0.05 MPa/s, 分别是 $\varphi_{\text{CH}}=0.9\%$ 时的 4.6 倍和 8.5 倍, 是 $\varphi_{\text{CH}}=2.6\%$ 时的 11.5 倍和 15.8 倍。由此可见初始油气体积分数对爆炸发展的快慢影响很大, $\varphi_{\text{CH}}=1.7\%$ 时的油气爆炸最危险。而 $(dp/dt)_{\text{in,ave}}$ 比 $(dp/dt)_{\text{ext,ave}}$ 大很多, 这与冲击波在空气中的快速衰减有关。

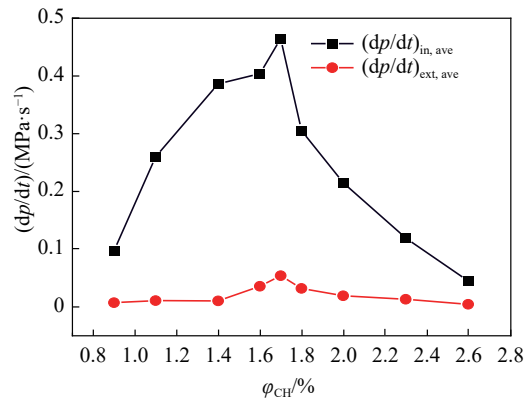


图 4 内外场平均升压速率与初始油气体积分数的关系

Fig. 4 Average overpressure rise rate in the internal and external fields at different initial volume fractions

2.1.2 油气体积分数对火焰传播的影响

不同初始油气体积分数下爆炸的火焰形态会呈现一定的差异性, 但同样具有一定的规律性, 图 5 所示为不同初始体积分数下油气爆炸火焰传播图像, 选取 0.9%、1.4%、1.7%、2.0% 和 2.6% 等 5 种体积分数下的火焰传播图像进行对比, 其中初始油气体积分数为 0.9% 的火焰图像颜色较浅, 对图片亮度进行了调整以便于观察。

油气爆炸时, 在剧烈的化学反应过程中会有中间产物 CH、 C_2 、OH 等自由基生成, 这些自由基使得火焰呈现出相应的颜色^[17], 从图 5 可以看出, 在火焰发展的初始阶段, 中心呈现橙红色, 是因为在火焰中心没有外界氧气的补充, 而且温度较高, 靠近中心的碳氢分子受热产生了 C_2 基, 伴随有碳颗粒的析出, 使火焰中心呈现橙红色^[18]。而火焰周围呈现蓝色, 是因为反应过程中产生了大量的 CH、OH 等自由基, 并且不断有外界氧气加入, 使反应较为充分, 其中 CH 基使火焰呈现出蓝色。在火焰冲出罐外之后, 油罐内部靠近壁面处仍有部分未来得及燃烧的油气混合物继续反应, 所以罐内火焰在短时间里仍然呈现蓝色, 在氧气被逐渐消耗之后, 自罐底向上, 火焰逐渐变为橙红色。火焰经由破口处泄放到外部空间后, 外界氧气的加入以及泄爆扰动使得反应突然变得剧烈, 放出大量的热, 所以火焰在开口处呈现亮白色。

由图 5 中可以看出, 当 φ_{CH} 较小时, 反应速率较慢但反应充分, 即使在黑暗环境中, 火焰形态也难以分辨, 火焰颜色呈现出较浅的蓝紫色。是因为氧的体积分数较高, 在反应过程中产生的 CH 自由基迅速被消耗, 使得火焰锋面内 CH 自由基的体积分数较低, 所以火焰颜色较浅。随着油气体积分数的提升, 罐内火焰颜色由较浅的蓝紫色向较深的蓝色转变, 进而转变为蓝绿色, 再向黄色转变。这种变化主要是由于罐内油气体积分数的提升, 使得氧含量变少, 反应过程中形成的 CH、 C_2 等自由基来不及消耗产生累积, 自由基的累积使得火焰表现出相应的颜色。当 φ_{CH} 过大时, 碳颗粒的析出使得火焰直接呈现出黄色, 此时罐内的反应属于贫氧燃烧, 反应缓慢且不充分。另外, 当 φ_{CH} 较大时, 罐外火焰传播的更远。这是因为泄爆时, 在浮力和冲击波的作用下, 油罐顶部聚集有大量的未燃油气混合物, 当拱顶被破坏时, 这些被

压缩且体积分数较高的混合物随着冲击波泄放到罐外空间, 与空气混合继续燃烧。而 φ_{CH} 越大, 泄放到罐外空间的油气越多, 所以罐外火焰传播得更远。



图 5 不同初始体积分数的油气爆炸火焰传播图像

Fig. 5 Images of flame propagation of gasoline-air mixture explosion at different initial volume fractions

表 2 所示为不同油气体积分数下, 储罐内火焰强度的最大峰值 I_{max} 与形成时间 t_{max} , 为避免换算中引入误差, 其中火焰强度采用火焰传感器所采集的光照强度信号值代替, 用于对比数值大小和定性分析。由表 2 可知, 随着 φ_{CH} 的提升, I_{max} 先升再降, 然后再升。在爆炸较为激烈的 1.7%、1.8% 体积分数附近 I_{max} 较低, 是因为火焰传感器检测的是光的照度。结合图 5 可以看出, $\varphi_{CH}=1.4\%$ 时, 火焰较亮, 随着 φ_{CH} 的提升, 在燃烧过程中产生的 C_2 基和碳颗粒逐渐增多, 使得火焰变得深暗, 所以 I_{max} 降低。但在 φ_{CH} 较高时, 此时火焰内部碳颗粒更多, 使得火焰颜色逐渐变为亮黄色, 所以 $\varphi_{CH}=2.3\%$ 和 $\varphi_{CH}=2.6\%$ 时 I_{max} 有所提升。 I_{max} 的形成时间 t_{max} 随着 φ_{CH} 的提升先减后增, 在 $\varphi_{CH}=1.6\%$ 时取得最小值 184 ms, $\varphi_{CH}=1.7\%$ 时的 t_{max} 与之相近。另外, 出现火焰强度最大的时刻并不是在超压上升最快的罐内发展阶段,

而是在泄爆产生之后, 是因为爆炸前期的燃烧反应较为充分, 各种自由基消耗较快, 火焰颜色较淡。而在泄爆后, 火焰锋面受到一定的扰动作用, 锋面处反应速率加快, 热量释放增多, 因而火焰亮度变高, 所以火焰强度最大的时间出现在泄爆后。

表 2 不同初始体积分数下油气爆炸罐内火焰强度最大峰值和形成时间

Table 2 Maximum peak flame intensity and time of formation in the tank at different initial volume fractions

$\varphi_{\text{CH}_4}/\%$	I_{max}/mV	t_{max}/ms
0.9	14	483
1.1	69	238
1.4	190	175
1.6	137	184
1.7	107	188
1.8	70	238
2.0	97	313
2.3	162	485
2.6	161	798

2.2 点火位置对油气爆炸的影响规律

在工程实际中, 油罐内出现电火花等点火源的位置并不明确。为了探究点火位置变化对油气爆炸的影响规律, 在空罐情况下, 开展了侧壁上部、中部、下部和罐底中心位置等 4 种点火位置的油气爆炸实验, 所用油气体积分数为上文中得出最危险体积分数, 即 $\varphi_{\text{CH}_4}=1.7\%$ 。如表 3 所示为相关爆炸特性超压参数, 其中 $p_{\text{in,max}}$ 、 $(dp/dt)_{\text{in,ave}}$ 和 $p_{\text{ext,max}}$ 都随着点火位置的下移而呈现增大趋势, 在罐底中间点火时取得最大值, 分别为 31.59 kPa、0.47 MPa/s 和 0.53 kPa, 相比于侧壁上部点火分别增长了 44.2%、38.2% 和 194.4%。由此可见, 点火位置对油罐内场超压影响很大。其原因是点火位置靠近上面时, 冲击波能够很快抵达弱连接处, 及时泄爆使得超压上升阶段持续时间较短, 密闭空间的爆炸转换为开敞空间的爆炸, 爆炸威力无法因憋压而得到增强。对于外场超压参数, 当点火位置靠近上部时, $t_{\text{ext,max}}$ 较小, 而冲击波相对较弱。当点火位置靠近下部时, $t_{\text{ext,max}}$ 较大, 而冲击波相对较强。所以 $(dp/dt)_{\text{ext,ave}}$ 并不是随着点火位置的下移单调变化, 但同样在罐底中间点火时取得最大值 0.05 MPa/s, 相比于上中下 3 个点火位置分别提升了 25%、66.7% 和 66.7%。以 $p_{\text{in,max}}$ 、 $p_{\text{ext,max}}$ 、 $(dp/dt)_{\text{in,ave}}$ 和 $(dp/dt)_{\text{ext,ave}}$ 作为衡量指标, 油罐底部中心位置点火的油气爆炸威力最大。所以在实际应用中, 当罐内油品用完之后, 应及时排空油气, 可采用惰气置换或者其他方式进行, 同时避免罐底产生点火源。

表 3 不同点火位置的油气爆炸超压参数

Table 3 Overpressure parameters of gasoline-air mixture explosion at different ignition locations

点火位置	$p_{\text{in,max}}/\text{kPa}$	$t_{\text{in,max}}/\text{ms}$	$(dp/dt)_{\text{in,ave}}/(\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1})$	$p_{\text{ext,max}}/\text{kPa}$	$t_{\text{ext,max}}/\text{ms}$	$(dp/dt)_{\text{ext,ave}}/(\text{MPa}\cdot\text{s}^{-1})$
上部点火	21.91	64	0.34	0.18	5	0.04
中部点火	22.60	64	0.35	0.27	9	0.03
下部点火	26.22	65	0.40	0.37	12	0.03
底部点火	31.59	68	0.47	0.53	10	0.05

图 6 所示为不同点火位置的油气爆炸罐内火焰传播图像, 从每种工况的最后一个火焰图像可以看出, 点火位置越靠下, 火焰泄放到罐外时罐内火焰锋面的面积越大, 即泄爆时参与反应的油气混合物越多。结合图 3 可以看出, 在超压上升阶段, 随着时间的增加, 罐内超压的增长速度越来越快, 也即平均泄压速率越来越大, 这些从侧面解释了为什么 $p_{\text{in,max}}$ 和 $(dp/dt)_{\text{in,ave}}$ 均随点火位置的下移而增大。另外当点

火位置为罐底中心时, 拱顶连接处的破坏方向具有不可预测性, 但当点火位置在侧壁时, 拱顶一般从点火位置上方的连接处开始破坏, 例如图 6(a) 中的 68 ms、图 6(b) 中的 70 ms 和图 6(c) 中的 72 ms 时刻的火焰图像, 连接处都以这种方式破坏。所以在工程实际中, 更容易产生点火源方向的油罐安全距离应该更大。



图 6 不同点火位置油气爆炸罐内火焰传播图像

Fig. 6 Images of flame propagation of gasoline-air mixture explosion inside the tank at different ignition locations

2.3 液位对油气爆炸的影响规律

2.3.1 液位对最危险油气体积分数的影响

在实际应用中, 油罐内液位不断变化, 当罐内储存油料时, 油气爆炸过程中会涉及到液面的变形、液滴的破碎与蒸发等较为复杂的相变过程, 对爆炸的发展产生影响。另外, 液位变化引起油罐上方油气混合物的空间发生变化, 相当于爆炸容器发生改变。根据课题组的前期研究成果可知, 受限空间的容积和形状变化都对油气爆炸的发展造成影响^[19]。为探索液位不同对油气爆炸发展和爆炸威力的影响规律, 对空罐、25% 储油量、50% 储油量、75% 储油量和 100% 储油量共 5 种情况, 分别开展了 9 种油气体积分数下的爆炸实验, 分析相关参数, 为控制无关变量, 点火位置均选用图 2(a) 中 II 点火位置, 压力参数选用 P1 测点数据。

当液位较低时, 罐内气体空间相对于空罐来说变化不大, 因而选取 75% 和 100% 两种液位下的数据进行分析, 其中 100% 液位是指到达油罐安全高度的液位, 本文以罐壁高度的 0.9 倍作为安全高度, 在该液位时, 油罐上部仍然具有较大的气体空间。表 4 所示为不同液位下不同 φ_{CH} 的爆炸超压特性参数, 由表中数据得到 $p_{in,max}$ 、 $p_{ext,max}$ 与 φ_{CH} 的关系, 分别如图 7~8 所示。

由图 7~8 可以看出, 无论是 75% 液位还是 100% 液位, 随着 φ_{CH} 的增大, $p_{in,max}$ 和 $p_{ext,max}$ 都呈现出先增后减的趋势, 在个别体积分数上有些波动, 但不影响总体趋势, 并且都在 $\varphi_{CH}=1.7\%$ 时取得最大值, 分别为 24.02 和 0.22 kPa, 22.47 和 0.18 kPa。在 75% 液位下, $p_{in,max}$ 和 $p_{ext,max}$ 在 $\varphi_{CH}=1.7\%$ 时, 相比于 $\varphi_{CH}=0.9\%$ 分别增大了 21.9% 和 100%, 相比于 $\varphi_{CH}=2.6\%$ 分别增大了 20.4% 和 69.2%。在 100% 液位下, 相比于 $\varphi_{CH}=0.9\%$ 分别增大了 13% 和 260%, 相比于 $\varphi_{CH}=2.6\%$ 分别增大了 11.5% 和 500%, 可见液位变化对 $p_{ext,max}$ 的影响比 $p_{in,max}$ 要大。通过对其他液位下的数据进行分析, 发现其超压数值表现出同样的规律。根据前面的分析可知, 超压峰值和平均升压速率基本都在同一工况下出现。所以以 $p_{in,max}$ 和 $p_{ext,max}$ 作为衡量指标, $\varphi_{CH}=1.7\%$ 是油罐在任一液位下的最危险体积分数, 即此体积分数下的油气爆炸威力最大, 液位变化对最危险体积分数的取值影响不大。

表 4 不同液位下不同初始体积分数
油气爆炸内外场最大超压峰值

Table 4 The maximum overpressure peak in the internal and external field of gasoline-air mixture explosion with different initial volume fraction at different liquid levels

$\varphi_{CH}/\%$	75%液位		100%液位	
	$p_{in,max}/kPa$	$p_{ext,max}/kPa$	$p_{in,max}/kPa$	$p_{ext,max}/kPa$
0.9	19.70	0.11	19.88	0.05
1.1	20.95	0.12	20.76	0.09
1.4	22.94	0.17	20.91	0.09
1.6	23.29	0.18	21.41	0.16
1.7	24.02	0.22	22.47	0.18
1.8	23.89	0.20	21.08	0.15
2.0	22.39	0.19	20.63	0.09
2.3	22.55	0.15	20.15	0.07
2.6	19.95	0.13	20.16	0.03

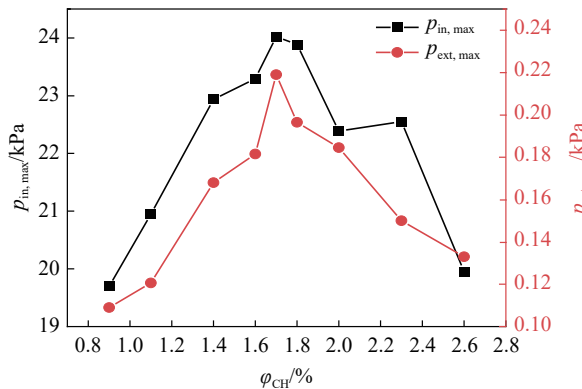


图 7 75% 液位油气爆炸内外场最大超压峰值与初始油气体积分数的关系

Fig. 7 The maximum overpressure peak in the internal and external field of gasoline-air mixture explosion with different initial volume fraction at 75% liquid level

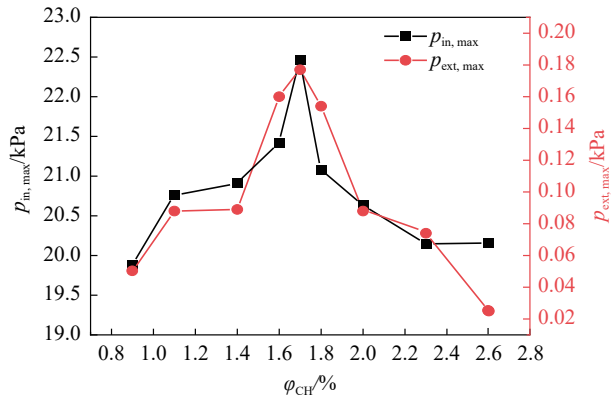


图 8 100% 液位油气爆炸内外场最大超压峰值与初始油气体积分数的关系

Fig. 8 The maximum overpressure peak in the internal and external field of gasoline-air mixture explosion with different initial volume fraction at 100% liquid level

2.3.2 液位对超压参数的影响

由表 4 可以看出, 对应于某一种油气体积分数, 不同液位下油气爆炸的超压特性参数具有差异性, 例如 1.7% 体积分数下, 75% 和 100% 液位的内场最大超压峰值 $p_{in,max}$ 分别为 24.02 和 22.47 kPa, 说明在同一种体积分数下, 液位变化对油罐内场超压具有影响。为了解其影响规律, 选取 $\varphi_{CH}=1.7\%$ 时不同液位下油气爆炸参数进行对比, 具体数据见表 5。

由表中数据可知, 随着液位从 0 到 100%, $t_{in,max}$ 逐渐减小, 而 $p_{in,max}$ 和 $(dp/dt)_{in,ave}$ 都呈现先增后减的趋势, 在 50% 液位时取得最大值, 为 25.40 kPa 和 0.43 MPa/s。最大值并不是在空罐时产生, 是因为点火位置在 I1, 发生油气爆炸时, 拱顶是受到爆炸产生的入射冲击波和罐壁、罐底或液面反射的冲击波共同作用下才发生失稳的, 当液位从 0 升到 50% 时, 液位的提升使得气体空间更小, 冲击波的反射更加迅速, 所

以在拱顶失稳前的极短时间内, 压力上升更快, 平均升压速率的变化也一样。因而相比于 0 和 25% 液位, 50% 液位下的 $p_{in,max}$ 分别提升了 15.9% 和 9%, $(dp/dt)_{in,ave}$ 分别提升了 26.5% 和 16.2%。但是随着液位继续提升, 从 50% 到 100%, 最大超压峰值逐渐降低, 是因为油罐上方气体空间的减少使得油气爆炸的发展受限, 在油气爆炸发展的初始阶段, 受火焰不稳定性 and 压力冲击波的耦合作用, 化学反应速率是逐渐加快的。但是当油罐上方气体空间太小时, 油气爆炸的发展便受到体积限制, 使得拱顶过早被破坏, 泄压时间更早。因而相比于 50% 液位, 75% 和 100% 液位的 $p_{in,max}$ 分别降低了 5.4% 和 11.5%。

液位变化引起油罐上方气体空间体积产生变化, 使得爆炸特性参数发生相应变化。为探究两者之间的对应关系首先需要计算不同液位下的气体空间体积, 即油气混合物的体积 V 。根据模拟油罐的尺寸计算可得, 0 至 100% 不同液位罐内油气混合物的体积分别为 0.069、0.055、0.041、0.026 和 0.012 m^3 , 如图 9 所示为 $\varphi_{CH}=1.7\%$ 时, $p_{in,max}$ 、 $p_{ext,max}$ 与 V 的关系。

由图可知, 随着油气混合物体积 V 的增大, $p_{in,max}$ 和 $p_{ext,max}$ 均先增后减, 在 0.041 m^3 , 即

50% 液位时取得最大值, 分别为 25.40 和 0.27 kPa。对于泄压爆炸, 当点火位置接近泄压口时, 内场的爆炸发展受到空间体积的直接影响, 最大超压峰值受到空间形状、可燃气体化学性质等因素的控制。当罐外没有发生猛烈的油料蒸汽云爆炸时, 外场超压的产生主要是内场爆炸冲击波泄放到罐外空间造成的, 内场超压越大外场超压也越大, 因而两者呈现的变化趋势相同。以 $p_{in,max}$ 和 $p_{ext,max}$ 作为衡量指标, 50% 液位是油罐的最危险液位, 即此液位下的油气爆炸威力最大, 而且在实际情况下, 更可能伴随有油品的飞溅, 引燃周围物体, 进一步造成损害。但是对比表 3 可知, 当罐内没有油品时, 若点火位置为油罐底部中心, 内外场最大超压峰值分别为 31.59 和 0.53 kPa, 即此时油气爆炸产生的毁伤力更大, 造成两者不同的主要原因是点火位置的不同, 在实际工程中, 对于这两种情况都应该给予足够的重视。

2.3.3 液位对外场超压衰减的影响

探究外场冲击波的衰减对于认识储罐油气爆炸的威力十分重要, 外场超压不但与油罐内部油气体积有关, 还与测点位置有关。如图 10 所示为空罐情况下, $\varphi_{CH}=1.7\%$ 时外场 P4~P27 压力测点的最大超压峰值分布, 其中泄爆方向设为 0° 。由图可知, 泄爆方向的超压数值大于其他角度的数值, 与泄爆方向的夹角越大, 数值通常越小。为了反映爆炸威力的传播距离, 选取泄爆方向的超压数据分析不同液位外场冲击波的衰减规律, 因此引入比例距离 R :

$$R = \frac{L}{V^{1/3}} \quad (1)$$

式中: L 为外场测点与模拟油罐中心的水平距离, V 是模拟油罐中混合气体的体积。计算可得不同液位时泄爆方向上各测点的比例距离, 空罐时, 4 个测点的比例距离分别为 1.58、2.56、3.53 和 4.50; 25% 液位时, 比例距离分别为 1.71、2.76、3.81 和 4.86; 50% 液位时, 比例距离分别为 1.89、3.05、4.22 和 5.38;

表 5 不同液位油气爆炸内场超压参数

Table 5 Overpressure parameters inside tank of gasoline-air mixture explosion at different liquid levels

液位/%	$p_{in,max}/kPa$	$t_{in,max}/ms$	$(dp/dt)_{in,ave}/(MPa \cdot s^{-1})$
0	21.91	64	0.34
25	23.30	63	0.37
50	25.40	59	0.43
75	24.02	56	0.43
100	22.47	53	0.42

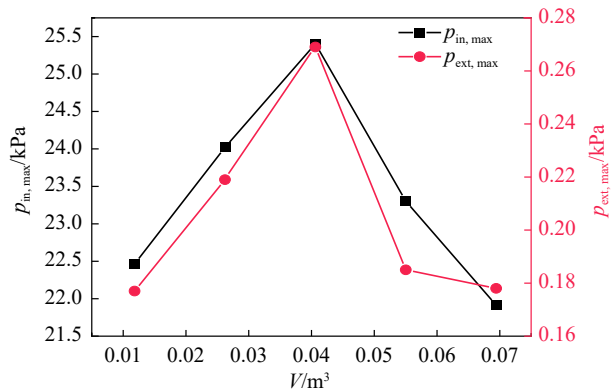


图 9 油气爆炸内外场最大超压峰值与油气混合物体积的关系

Fig. 9 Relationship between the maximum overpressure peak in the internal and external field of gasoline-air mixture explosion and the volume of gasoline-air mixture

75% 液位时, 比例距离分别为 2.19、3.53、4.88 和 6.23; 100% 液位时, 比例距离分别为 2.85、4.61、6.36 和 8.12, 不同液位油气爆炸外场某一距离下的最大超压峰值与比例距离的关系如图 11 所示。

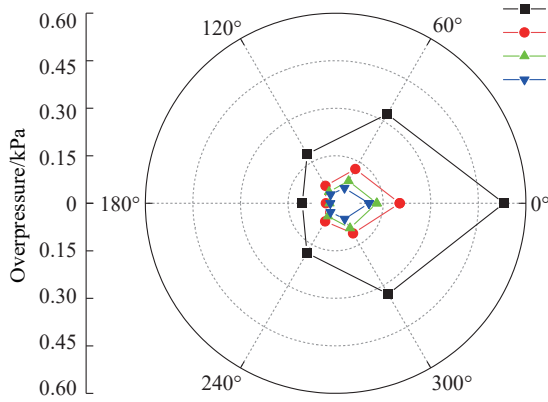


图 10 油罐外场最大超压峰值分布

Fig. 10 Distribution of the maximum overpressure peak in the external field of the tank

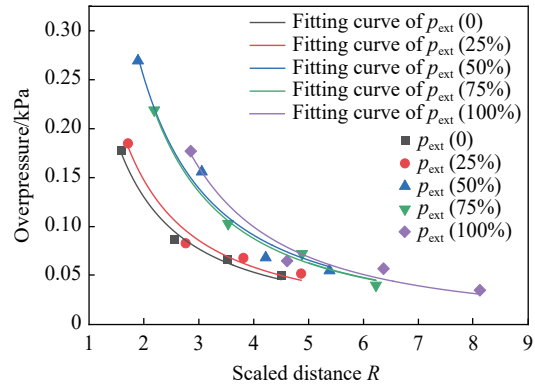


图 11 不同液位外场最大超压峰值与比例距离的关系

Fig. 11 Relationship between the maximum overpressure inside the tank and the scaled distance at different liquid levels

由图可知, 不同液位时外场超压的衰减规律相似, 可以采用幂指数公式进行拟合^[20,21]。

$$p_{\text{ext}} = kR^{-\alpha} \tag{2}$$

式中: p_{ext} 表示油罐外场某一距离下的最大超压峰值, k 为指前因子, α 为衰减系数。

$$p_{\text{ext}} = 0.32 \left(LV^{-\frac{1}{3}} \right)^{-1.29} \tag{3}$$

$$p_{\text{ext}} = 0.37 \left(LV^{-\frac{1}{3}} \right)^{-1.33} \tag{4}$$

$$p_{\text{ext}} = 0.7 \left(LV^{-\frac{1}{3}} \right)^{-1.47} \tag{5}$$

$$p_{\text{ext}} = 0.71 \left(LV^{-\frac{1}{3}} \right)^{-1.51} \tag{6}$$

$$p_{\text{ext}} = 0.98 \left(LV^{-\frac{1}{3}} \right)^{-1.65} \tag{7}$$

式(3)~(7)分别为0、25%、50%、75%和100%液位的拟合公式, 相关系数分别为0.990、0.976、0.976、0.995和0.973。5个公式的指前因子分别为0.32、0.37、0.70、0.71和0.98, 衰减系数分别为1.29、1.33、1.47、1.51和1.65, 即随着液位的升高, 油气混合物体积的减小, 两个参数都呈现增大趋势, 两者与油气混合物体积 V 的对应关系都可以用二次多项式拟合:

$$k = 42.08V^2 - 15.07V + 1.14 \tag{8}$$

$$\alpha = 32.37V^2 - 8.98V + 1.75 \tag{9}$$

拟合公式(8)和(9)的相关系数分别为0.938和0.978。所以, 在不同液位情况下油气爆炸外场冲击波超压峰值与距离和油气混合物体积的关系可以表示如下:

$$p_{\text{ext}} = (42.08V^2 - 15.07V + 1.14) \left(LV^{-\frac{1}{3}} \right)^{-(32.37V^2 - 8.98V + 1.75)} \tag{10}$$

2.3.4 液下超压分析

通过对内场不同测点超压数据的分析发现, 当存在液位时, 放置于液面以下压力传感器测得的数值与液面以上压力传感器测得的数值存在一定的差异, 接下来以50%液位时的油气爆炸内场超压数据进行分析。选用图2(a)所示P1和P3两个测点的数据, 其中P1所测数据为气体空间中的爆炸超压, P3所

测数据为液体空间中的爆炸超压。由于测点 P3 位于液位以下, 相比测点 P1 多了液体施加的压强。为了便于对比分析, 将测点 P3 的数据减去液体压强, 得到如图 12 所示的不同测点的超压时序曲线, 其中 $\phi_{CH}=1.7\%$, 点火杆位于油罐侧壁上部位置。

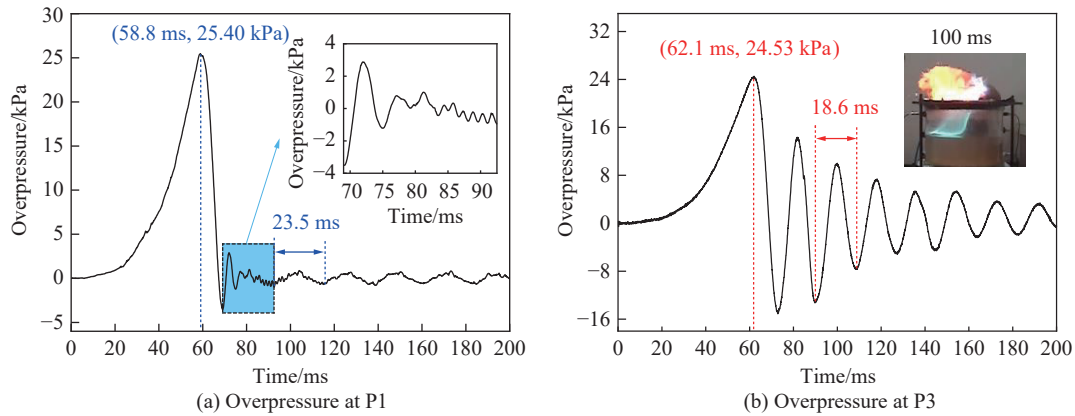


图 12 50% 液位油罐油气爆炸内场测点超压时序曲线

Fig. 12 Time series curve of overpressure inside tank of gasoline-air mixture explosion at 50% liquid level

根据前文, 将油气爆炸内场压力发展分为 3 个阶段: 超压上升阶段、超压泄放阶段和振荡衰减阶段。由图中曲线可知, 在超压上升阶段, 液位上、下 2 个测点的超压数据都呈现上升趋势, 但是测点 P1 的最大超压峰值要大于测点 P3, 两者分别为 25.40 和 24.53 kPa, 相差 0.87 kPa, 约为测点 P1 超压峰值的 3.4%。而测点 P1 和测点 P3 到达最大超压峰值的时刻分别为 58.8 和 62.1 ms, 平均升压速率分别为 0.43 和 0.40 MPa/s, 前者达到峰值的时间稍早, 且平均升压速率稍大于后者。在超压泄放阶段, 两个测点都在短时间内降为负值, 但是测点 P1 形成最大负超压的时间早于测点 P3, 而且两者的最大负压数值相差较大, 分别为 -3.51 和 -15.11 kPa, 测点 P3 的最大负超压约为测点 P1 的 4.3 倍。在振荡衰减阶段, 测点 P1 的超压数据在第一个振荡周期里比较杂乱, 这与冲击波在液面的反射和拱顶泄爆的扰动有关, 之后超压缓慢振荡衰减, 逐渐回到零点。而测点 P3 的超压振幅和振荡频率明显大于前者, 经过一段时间的振荡衰减之后回到零点, 两者的振荡频率分别约为 42.6 和 53.8 Hz。

当压力冲击波在不同介质中传播时, 介质物理属性对冲击波的影响较大^[22], 当冲击波传播到介质交界面时, 会产生扰动, 影响冲击波的传播, 并且不同介质内冲击波的传播存在明显差异^[23]。发生于储罐内的油气爆炸属于爆燃, 在初始阶段受到外界的扰动较少, 化学反应速率较慢, 火焰锋面要落后于前驱冲击波阵面, 形成如图 13 所示的双波三区结构。前驱冲击波的形成是化学反应区能量释放的一种方式, 前驱冲击波和火焰锋面分别以速度 D_s 和 D_f 传播, 将罐内流场划分为三个区域, 其中 0 区的可燃气体未被扰动, 处于初始状态, 1 区的可燃气体分子经过冲击波的扰动后参与到化学反应中去, 2 区为燃烧后的区域, 即燃烧产物的聚集区。压力波自爆炸中心向四周传播, 到达液面时产生反射波和透射波。由镜像爆心原理^[24], 反射冲击波可看作是由与爆心关于液面对称的镜像爆心所产生的冲击波, 但由于反射削弱作用, 其强度要小于入射波。由图 13 可知, 点火位置 I1 与测点 P3 的距离比测点 P1 远, 更主要的是液相空间的压力是由气相空间传递而来的, 所以在压力响应上测点 P3 相比于测点 P1 具有延后性, 但由于模拟油罐的体积较小, 两者时间间隔较短。冲击波在液面产生的反射, 削弱了传入液体空间的透射冲击波强度, 而且反射冲击波使得气体空间的压强更高。由于液体的黏性比空气大很多, 阻尼系数更高, 在冲击波传至液面以下超压测点时, 已经消耗了部分能量, 所以在最大超压峰值上, 气体空间的数值大于液体空间。由相关研究可知, 冲击波负压的形成与稀疏波和介质的惯性有直接关系^[25], 当冲击波到达油罐壁面后会反射得到稀疏波, 在介质惯性的共同作用下, 该区域空间处于拉伸状态, 即产生负压。由于气体和液体的密度、弹性模量等物质属性相差很大, 所以在超压泄放阶段, 液位以下测点 P3 的最大负超压明显低于液位以上测点 P1 的数值, 负压的强度更大。在随后的超压振荡衰减阶段, 由于液体的阻尼系数更高, 测点 P3 的超压衰减更加迅速, 而且观察可知, 液位以下超压的振荡频率更高, 这是因为在液体中冲击波的传

播速度更快。液相空间的超压变化在振荡衰减阶段振幅较大、频率较快, 所以当罐内储存油品而发生爆炸时, 罐底板在爆炸振荡中容易受损。

总的来说, 油气爆炸时, 液位上下不同测点超压变化的总体趋势相近, 但由于冲击波在气相和液相之间传播的差异性, 液相空间测点的超压响应要慢于气相空间测点, 在超压峰值的形成时间上具有延后性, 而且气相空间的最大超压峰值稍大于液相空间的最大超压峰值, 液相空间的最大负超压明显大于气相空间的最大负超压, 在超压衰减阶段, 液相空间内的超压振荡幅值和频率大于气相空间, 而且衰减更快。在不同液位、不同初始油气体积分数或者不同点火位置时, 液位上下测点的具体数值在大小上有所差别, 但是两者之间的对应规律与之相似。

2.3.5 液位对火焰传播的影响

当罐内液位发生变化时, 液面对火焰的传播产生影响, 但液面的存在并不是简单地阻碍火焰锋面的传播, 还涉及到热量的吸收、液体的相变等一系列复杂的相互作用, 这使得存在液位时的火焰发展与空罐情况下的油气爆炸有所不同。为便于观察, 选取 25% 和 50% 两种液位下的油气爆炸火焰传播图像进行分析, 其中拱顶破坏前的火焰传播与空罐时类似, 主要展示破口时和破口后的火焰传播, 如图 14 所示, 初始油气体积分数都为 1.7%。

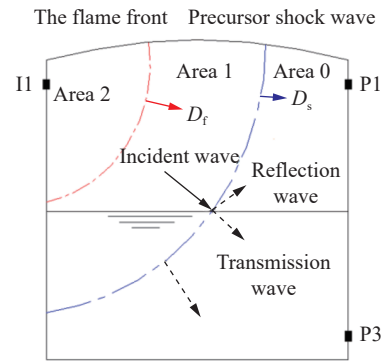


图 13 油气爆炸油罐内场压力传播图

Fig. 13 Pressure propagation diagram of gasoline-air mixture explosion inside tank

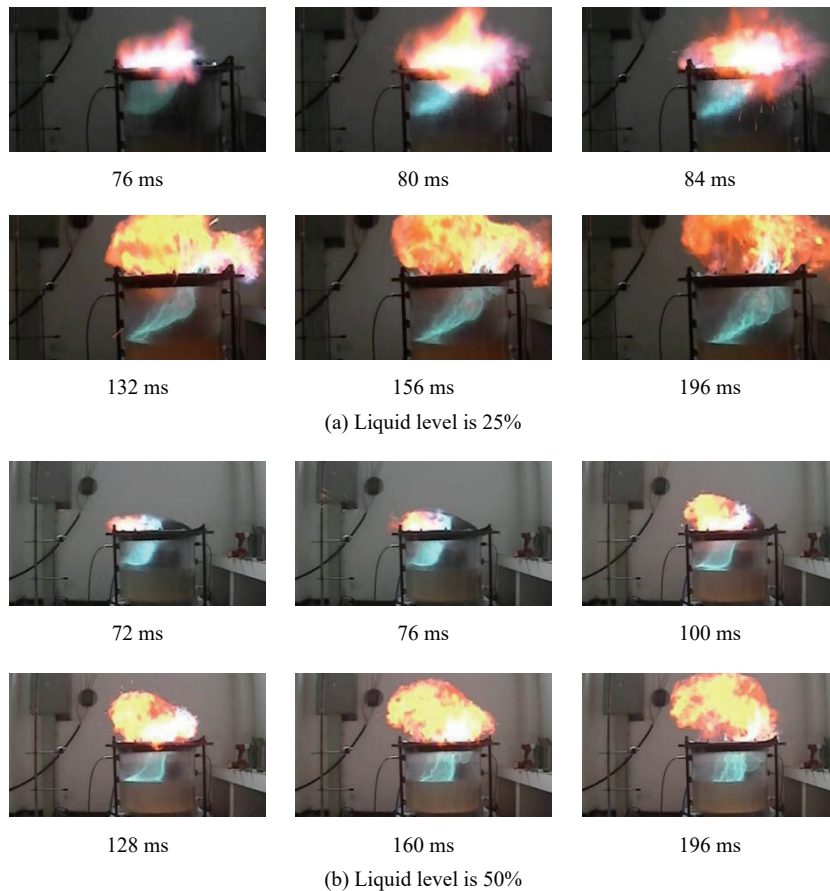


图 14 不同液位油气爆炸火焰传播图像

Fig. 14 Images of flame propagation of gasoline-air mixture explosion at different liquid levels

由图可知, 当液位较高时, 火焰从破口处泄放的时间更早, 这与表 5 中液位越高到达最大超压峰值的时间越短是相对应的, 这也显示了压力与火焰变化的同步性。如图 14(a) 中 80 和 84 ms 时刻的图像, 在火焰泄放到外场空间时, 有部分液体的相变参与反应, 这些使火焰传播与超压变化变得更为复杂。在 25% 液位时, 部分火焰传播到罐外空间后, 罐内火焰以四分之一球形向前传播, 如图 14(a) 中 156 ms 时刻。当右侧火焰前端传到罐壁时, 受拱顶和罐壁的共同限制, 火焰前端开始向下转折, 如图 14(a) 中 196 ms 时刻, 直到受到液面的限制而停止。在 50% 液位时, 罐内火焰的传播受到液面的限制更大, 如图 14(b) 中 76 ms 时刻, 当火焰前锋即将接触液面时, 受到马赫杆的作用^[26], 罐内流场与罐壁平行, 罐内火焰锋面逐渐变平。到 128 ms 时, 罐内火焰锋面已经变得平整, 之后, 受到拱顶反射冲击波的影响, 右侧火焰锋面逐渐向下传播, 直到受到液面限制而停止。从火焰锋面随时间变化的图像可以看出, 罐内火焰传播时间越久, 锋面越褶皱, 越趋于形成胞格结构^[27-28], 其原因是火焰固有的不稳定性以及冲击波对火焰前锋的扰动^[29-30]。胞格结构的形成增大了锋面面积, 使得燃烧速率大幅提升, 让爆炸发展更为激烈。而更加激烈的爆炸会形成更强的冲击波和反射冲击波, 在传播过程中继续扰动火焰的传播。当其穿过火焰锋面时, 会在锋面内产生涡量, 增大该区域的湍流度, 增加活性自由基相互碰撞的概率, 从而提升化学反应速率, 使爆炸发展更为激烈。而在泄爆时, 冲击波的扰动作用还会促进未燃油气与新鲜空气的混合, 进一步加快爆炸的发展, 火焰与冲击波的相互作用、相互耦合机制贯穿整个油气爆炸的发展过程。

3 结 论

本文中利用可视化实验台架, 开展了 9 种初始油气体积分数、4 种点火位置和 5 种液位下的油气爆炸研究, 探究了立式拱顶油罐内油气爆炸的发展规律, 主要结论如下。

(1) 不同工况下的油气爆炸内场超压发展都可以分为超压上升、超压泄放和振荡衰减 3 个阶段。空罐条件下, 内外场平均升压速率都随着油气体积分数的提升先增后减, 在 1.7% 时取得最大值。不同初始油气体积分数和不同阶段下的油气爆炸呈现出不同的火焰颜色变化, 这与化学反应中间产物 CH、C₂、OH 等自由基的生成和空间分布有关。随着初始油气体积分数的提升, 罐内火焰颜色由较浅的蓝紫色向较深的蓝色转变, 进而转变为蓝绿色, 再向黄色转变, 火焰的光照强度先上升再下降, 然后再上升, 在油气体积分数较高并且在泄爆之后取得最大值。

(2) 点火位置对油气爆炸的影响较大, 点火位置越靠下, 泄爆越晚, 内外场最大超压峰值越大。罐底中心点火时, 内外场平均升压速率取得最大值, 分别为 0.46 和 0.05 MPa/s。空罐条件下, 油罐底部中心位置点火时的油气爆炸威力最大。

(3) 液位变化对油罐内油气爆炸最危险体积分数的取值影响不大, 1.7% 体积分数下发生油气爆炸的威力最大。但液位变化对内外场超压影响较大, 随着液位的提升, 内外场最大超压峰值呈现先增后减的趋势, 在 50% 液位时取得最大值, 分别为 25.40 和 0.27 kPa。任意液位下外场超压随比例距离的增大都呈现幂指数衰减规律, 不同液位油气爆炸外场冲击波超压峰值与距离和油气混合物体积的关系可以统一表示为 $p_{\text{ext}} = (42.08V^2 - 15.07V + 1.14) \left(LV^{-\frac{1}{3}} \right)^{-(32.37V^2 - 8.98V + 1.75)}$ 。当罐内储存油品时, 液相空间的超压变化规律与气相空间有所不同, 主要表现在时间的延后性、负压增强和振荡衰减的频率更快, 其主要原因是传播介质的物理属性对冲击波的影响。

参考文献:

- [1] COZZANI V, ANTONIONI G, SPADONI G. Quantitative assessment of domino scenarios by a GIS-based software tool [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2006, 19(5): 463-477. DOI: 10.1016/j.jlp.2005.11.007.
- [2] LANDUCCI G, GUBINELLI G, ANTONIONI G, et al. The assessment of the damage probability of storage tanks in domino events triggered by fire [J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2009, 41(6): 1206-1215. DOI: 10.1016/j.aap.2008.05.006.
- [3] ATKINSON G, COLDRICK S, GANT S, et al. Flammable vapor cloud generation from overfilling tanks: learning the lessons

- from Buncefield [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2015, 35(5): 329–338. DOI: 10.1016/j.jlp.2014.11.011.
- [4] HERBERT I. The UK Buncefield incident—The view from a UK risk assessment engineer [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2010, 23(6): 913–920. DOI: 10.1016/j.jlp.2010.09.001.
- [5] RUI S, WANG C, LUO X, et al. Experimental study on the effects of ignition location and vent burst pressure on vented hydrogen-air deflagrations in a cubic vessel [J]. *Fuel*, 2020, 278(10): 118342. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118342.
- [6] LI P, HUANG P, LIU Z, et al. Experimental study on vented explosion overpressure of methane/air mixtures in manhole [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 374(7): 349–355. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.04.046.
- [7] 苏航, 蒋利桥, 曹海亮, 等. 微小空间内丙烷/空气火焰传播特性与加氢爆燃实验 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(2): 381–389. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0198.
- SU H, JIANG L Q, CAO H L, et al. Characteristics of propane/air flame propagation and propane/hydrogen/air detonation in a micro chamber [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(2): 381–389. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0198.
- [8] 吴松林, 杜扬, 张培理, 等. 点火方式对受限空间油气爆燃规律的影响 [J]. *化工学报*, 2016, 67(4): 1626–1632. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20150958.
- WU S L, DU Y, ZHANG P L, et al. Effect of ignition node on gasoline-air deflagration behavior in confined space [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2016, 67(4): 1626–1632. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20150958.
- [9] LI G Q, WU J, WANG S M, et al. Effects of gas concentration and obstacle location on overpressure and flame propagation characteristics of hydrocarbon fuel-air explosion in a semi-confined pipe [J]. *Fuel*, 2021, 285(9): 119268. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119268.
- [10] 李国庆, 杜扬, 齐圣, 等. 障碍物位置和油气浓度对油气泄压爆炸特性影响 [J]. *化工学报*, 2018, 69(5): 2327–2336. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20171184.
- LI G Q, DU Y, QI S, et al. Effects of obstacle position and gas concentration on gasoline-air explosion venting [J]. *CIESC Journal*, 2018, 69(5): 2327–2336. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20171184.
- [11] WANG S M, YAN Z H, LI X D, et al. The venting explosion process of premixed fuel vapour and air in a half-open vessel: An analysis of the overpressure dynamic process and flame evolution behaviour [J]. *Fuel*, 2020, 268(5): 117508.
- [12] 李蒙, 杜扬, 李国庆, 等. 含 90°直角弯管结构受限空间油气泄压爆炸实验与大涡模拟研究 [J]. *化工学报*, 2018, 69(12): 5370–5378. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20180519.
- LI M, DU Y, LI G Q, et al. Experimental and large eddy simulation study on gasoline-air mixture explosions in semi-confined pipe with 90° right-angle bend [J]. *CIESC Journal*, 2018, 69(12): 5370–5378. DOI: 10.11949/j.issn.0438-1157.20180519.
- [13] 杜扬, 李蒙, 李国庆, 等. 含双侧分支结构受限空间油气泄压爆炸超压特性与火焰行为 [J]. *化工进展*, 2018, 37(7): 2557–2564. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2017-2522.
- DU Y, LI M, LI G Q, et al. Effects of bilateral branches structure on characteristics of gasoline-air mixtures explosion overpressure and flame behavior in a semi-confined space [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2018, 37(7): 2557–2564. DOI: 10.16085/j.issn.1000-6613.2017-2522.
- [14] 杜扬, 王世茂, 袁广强, 等. 含弱约束端面短管道油气爆炸特性实验研究 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(2): 465–472. DOI: 10.11883/bzycj-2015-0242.
- DU Y, WANG S M, YUAN G Q, et al. Experimental study of fuel-air mixture explosion characteristics in the short pipe containing weakly confined face at the end [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(2): 465–472. DOI: 10.11883/bzycj-2015-0242.
- [15] WANG S M, WU D J, GUO H, et al. Effects of concentration, temperature, ignition energy and relative humidity on the overpressure transients of fuel-air explosion in a medium-scale fuel tank [J]. *Fuel*, 2020, 259(1): 116265.1–116265.8. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116265.
- [16] CAI Y X, JIANG X S, WANG S M, et al. Experimental study on explosion overpressure and flame propagation characteristics of simulated vertical dome oil tank [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2022, 76: 104752. DOI: 10.1016/j.jlp.2022.104752.
- [17] 刘洪涛, 陈志莉, 胡潭高, 等. 油料池火焰红外光谱特性分析研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(10): 3442–3448. DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2016)10-3442-07.
- LIU H T, CHEN Z L, HU T G, et al. Analytic study on the characteristics of infrared spectrum of oil pool flame [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(10): 3442–3448. DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2016)10-3442-07.

- [18] 蒋新生, 徐建楠, 冯军, 等. 汽油着火初期光谱特征及燃烧动力学分析 [J]. *发光学报*, 2018, 39(11): 1639–1645. DOI: 10.3788/fgxb20183911.1639.
JIANG X S, XU J N, FENG J, et al. Flame spectral characteristics and analysis of combustion kinetics at initial stage of gasoline fire [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(11): 1639–1645. DOI: 10.3788/fgxb20183911.1639.
- [19] ZHANG P L, WANG J, LIANG J J, et al. Explosions of gasoline vapor/air mixture in closed vessels with different shapes and sizes [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2018, 57: 327–334. DOI: 10.1016/j.jlp.2018.12.010.
- [20] 段晓瑜, 崔庆忠, 郭学永, 等. 炸药在空气中爆炸冲击波的地面反射超压实验研究 [J]. *兵工学报*, 2016, 37(12): 2277–2283. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.12.013.
DUAN X Y, CUI Q Z, GUO X Y, et al. Experimental investigation of ground reflected overpressure of shock wave in air blast [J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(12): 2277–2283. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.12.013.
- [21] ZHOU Z Q, NIE J X, OU Z C, et al. Effects of the aluminum content on the shock wave pressure and the acceleration ability of RDX-based aluminized explosives [J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 116(14): 113–33305. DOI: 10.1063/1.4897658.
- [22] DISIMILE P J, DAVIS J, TOY N. Mitigation of shock waves within a liquid filled tank [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, 38: 61–72. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2010.10.006.
- [23] 徐海斌, 张德志, 秦学军, 等. 炸药周围水层对空气冲击波反射超压影响的实验研究 [J]. *兵工学报*, 2014, 35(7): 1027–1031. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2014.07.014.
XU H B, ZHANG D Z, QIN X J, et al. An investigation on mitigation effect of water surrounding an explosive on reflected overpressure of shock wave [J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(7): 1027–1031. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2014.07.014.
- [24] 杨亚东, 李向东, 王晓鸣. 长方体密闭结构内爆炸冲击波传播与叠加分析模型 [J]. *兵工学报*, 2016, 37(8): 1449–1455. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.08.016.
YANG Y D, LI X D, WANG X M. An analytical model for propagation and superposition of internal explosion shockwaves in closed cuboid structure [J]. *Acta Armamentarii*, 2016, 37(8): 1449–1455. DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2016.08.016.
- [25] 刘小龙, 黄建国, 雷开卓. 水下等离子体声源的冲击波负压特性 [J]. *物理学报*, 2013, 62(20): 1–7. DOI: 10.7498/aps.62.204301.
LIU X L, HUANG J G, LEI K Z. Shock wave negative pressure characteristics of underwater plasma sound source [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(20): 1–7. DOI: 10.7498/aps.62.204301.
- [26] 陈先锋. 丙烷—空气预混火焰微观结构及加速传播过程中的动力学研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007.
CHEN X F. Study on fine flame structure behavior and flame accelerating mechanism of premixed propane-air[D]. Hefei: University of Science and Technology China, 2007.
- [27] WU F, JOMAAS G, LAW C K. An experimental investigation on self-acceleration of cellular spherical flames [J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2013, 34(1): 937–945. DOI: 10.1016/j.proci.2012.05.068.
- [28] WEI S, YU M, PEI B, et al. Suppression of CO₂ and H₂O on the cellular instability of premixed methane/air flame [J]. *Fuel*, 2020, 264(9): 116862. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.116862.
- [29] XIAO H H, MAKAROV D, SUN J, et al. Experimental and numerical investigation of premixed flame propagation with distorted tulip shape in a closed duct [J]. *Combustion and Flame*, 2012, 159(4): 1523–38. DOI: 10.1016/j.combustflame.2011.12.003.
- [30] LI Y C, BI M, GAO W. Theoretical pressure prediction of confined hydrogen explosion considering flame instabilities [J]. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2019, 57(1): 320–326. DOI: 10.1016/j.jlp.2019.01.001.

(责任编辑 王易难)