DOI: 10.11883/bzycj-2017-0117
文章编号: 1001-1455(2018)02-0455-10

半封闭空间明火引燃油气特性实验*

欧益宏[1],李 润[1],袁广强[2],周建忠[1],王 波[1],李阳超[1]
(1.陆军勤务学院油料系,重庆 401311;
2.陆军 72489 部队,山东 烟台 265301)

摘要: 为研究明火引燃油气着火爆炸特性,建立了半封闭着火爆炸实验平台。通过高速摄影仪拍摄的火焰图像,研究不同油气体积分数下的火焰传播特性。根据高频压力传感器采集的容器内压力变化情况,分析不同油气体积分数下的压力发展特性。结果表明,油气体积分数对火焰组分、火焰传播速度、压力和压力变化速率有显著影响;火焰具有明显的分区现象,可分为燃烧核和火焰阵面,并且纵向火焰阵面速度大于横向火焰阵面速度;容器内压力发展历程可分为 4 个阶段,而且会形成压力双峰现象;油气爆炸过程中,火焰结构与压力波形成了强烈的耦合作用。

关键词: 半封闭空间;明火;火焰传播特性;压力发展特性
中图分类号: O381;X932 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

液态油料中的轻烃成分在常温下极易挥发形成油气,一旦油气达到一定浓度,遇到点火源,就会产生爆炸。对 437 例油库着火爆炸事故点火源的统计表明[1],明火在各种点火源中居首位,占 24%。明火容易引燃油气的原因是高温,且明火中含有大量原子或自由基,可诱发油气着火爆炸的链式反应[2]。

对明火引燃可燃气体,国内外许多学者进行了研究[3-10]。例如,Kundu 等[3]把明火归为外部点火源,并得到不同类型点火源空间尺度与热释放速率之间的关系。Werle 等[4]通过实验发现,氧化剂温度约为1 100 K时,甲烷燃烧时的着火延迟期最短,温度上升最大。Ryu 等[5]和 Elbaz 等[6]研究了火焰稳定性,发现增大流速可提高火焰温度及稳定性。范宝春等[7]模拟了高温火团诱导的爆炸,实验中要求火团初温不能过高或过低且形成适当的温度梯度。欧益宏等[8-9]进行了油气热着火实验,发现热壁巨大的温度梯度导致着火温度高于自燃点。吴松林等[10]分析了不同点火方式对油气起燃速度、火焰结构等的影响。然而,这些研究大多针对密闭空间内氢气、甲烷等单一工质气体的燃烧爆炸现象,对油气这种混合工质气体研究较少[11]。同时,在日常生产、生活中油气不仅产生于密闭空间中,也常聚集在仓库、泵房等半封闭空间。因此,本文中对明火引燃半封闭空间油气爆炸特性进行实验研究,分析火焰传播特性和压力发展特性,包括火焰形状、火焰组分、火焰纵向和横向位置及速度、容器内压力和压力变化速率等参数,探讨火焰与压力波的耦合作用,以期为预防、控制和分析油气着火爆炸事故提供参考依据。

1 实验系统

采用文献[12]中的实验系统,如图 1 所示。采用 SPKM-13Z 明火点火枪于盲板中心点火,为避免阳光对火焰颜色的干扰,实验在暗室条件下进行。实验初始温度为 20 ℃,初始压力为 0.1 MPa,点火位置在容器底板中心。油气体积分数有低、中和高 3 种,分别为 1.0%、1.7%和 2.4%,对应的化学当量比为 0.62、1.05 和 1.48。为保证实验准确性,每组体积分数进行 5 组实验。实验时,配气系统在达到所需油气体积分数并稳定后,停止配气,然后启动同步控制器依次触发高速摄影仪以及压力采集系统,采集压力数据和火焰图像。在触发后,利用明火点火器引燃油气。最后关闭实验仪器,分析数据。

* **收稿日期**: 2017-01-13; **修回日期**: 2017-05-08
基金项目: 国家自然科学基金项目(51276195);重庆市自然科学基金项目(CSTC 2012jjA900015);
后勤工程学院学术创新科研启动经费资助项目(yz13-43805)
第一作者: 欧益宏(1972—),女,博士,副教授; **通信作者**: 李 润,827833976@qq.com。

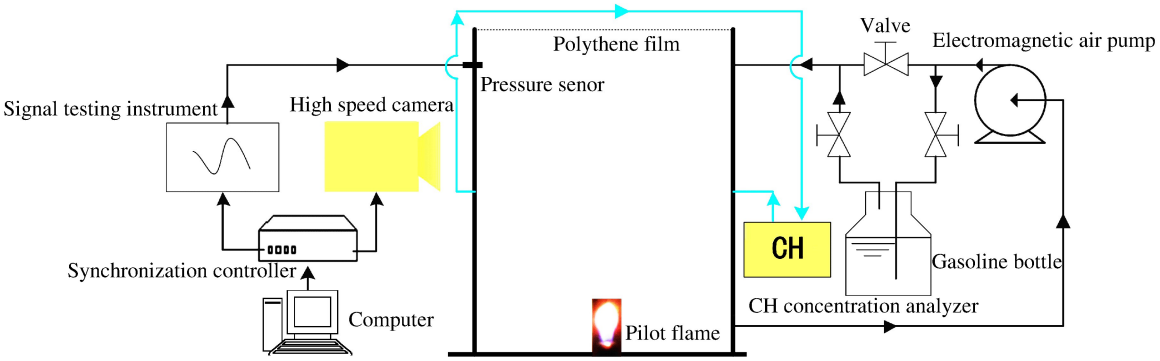


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of experimental equipment

2 实验结果与分析

2.1 火焰传播特性

通过高速摄影仪对低(1.0%)、中(1.7%)、高(2.4%)这 3 种油气体积分数的火焰传播过程进行了拍摄,分析火焰精细结构、火焰传播分区、火焰组分和火焰速度等传播特性。

2.1.1 火焰传播分区及火焰组分

图 2 所示为油气体积分数 φ=1.0%的火焰传播过程。0 ms 时油气被明火瞬间引燃,火焰开始出现明显分区,可分为燃烧核和火焰阵面。燃烧核为白色明火,火焰阵面为淡蓝色光圈。0～24 ms 阶段,明火还未熄灭,导致燃烧核范围先扩大后减小。在明火的加热作用下,淡蓝色火焰阵面逐渐扩大,呈圆锥形。24～68 ms阶段,明火熄灭导致燃烧核消失,剩下淡蓝色火焰阵面。由于反应油气与未反应油气之间存在温度梯度,从而形成密度梯度,进而产生浮力效应[13-14],导致火焰的纵向扩展速度远大于横向拉伸速度,火焰阵面变为圆柱形。在燃烧产物膨胀和压力波的双重作用下,52 ms 时,聚乙烯薄膜破裂,此时火焰阵面还未传播到容器口。68 ms 时,火焰阵面传播到容器口并引燃溢出的油气,但还未接触到侧壁,淡蓝色火焰范围继续扩大。直到 116 ms 时,火焰阵面才传播到侧壁,此时容器内淡蓝色光圈范围达到最大。随着反应继续进行,容器中心油气逐渐消耗,亮度降低。随着容器壁面油气燃烧耗尽,火焰熄灭,整个过程历时 194 ms。

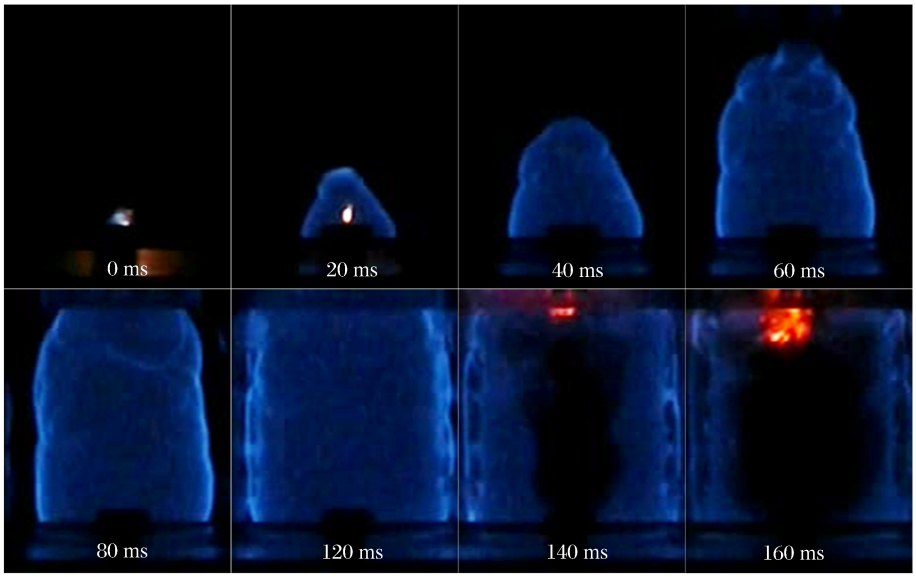


图 2 体积分数为 1%时火焰传播过程

Fig. 2 Flame propagation process at volume fraction of 1%

图 3 所示为油气体积分数 $\varphi=1.7\%$的火焰传播过程。0 ms 时明火点火枪引燃油气，形成小的蓝色火焰。0～10 ms 时火焰出现明显的分区，中心为红色丝状燃烧核，外部为蓝色火焰阵面。火焰阵面受浮力和拉伸的影响，出现一些倾斜和扭曲，说明产生了小尺度湍流燃烧，火焰形状近似为圆锥形。因为压力波传播速度大于火焰传播速度，25.4 ms 时压力波冲破薄膜，此时火焰还未传播到容器口。由于燃烧产物膨胀和湍流的正反馈作用，火焰阵面位置逐渐移动，到 32.0 ms 时火焰阵面传播到容器口并引燃溢出的油气，此时红色丝状燃烧核长度达到最大，之后迅速消失，火焰形状近似为圆柱形。随后在内外压差、泄爆诱导的湍流作用下，火焰阵面急剧变形，变成了大尺度湍流燃烧，导致燃烧速率增大。因为火焰纵向扩展速度远大于横向拉伸速度，火焰阵面继续向侧壁传播。56.0 ms 火焰阵面开始抵达侧壁，容器内蓝色光圈范围达到最大。随着反应继续进行，火焰结构变得更加紊乱。容器中间颜色变暗，蓝色光圈内油气逐渐耗尽，至 108.0 ms 时火焰熄灭，蓝色光圈消失。

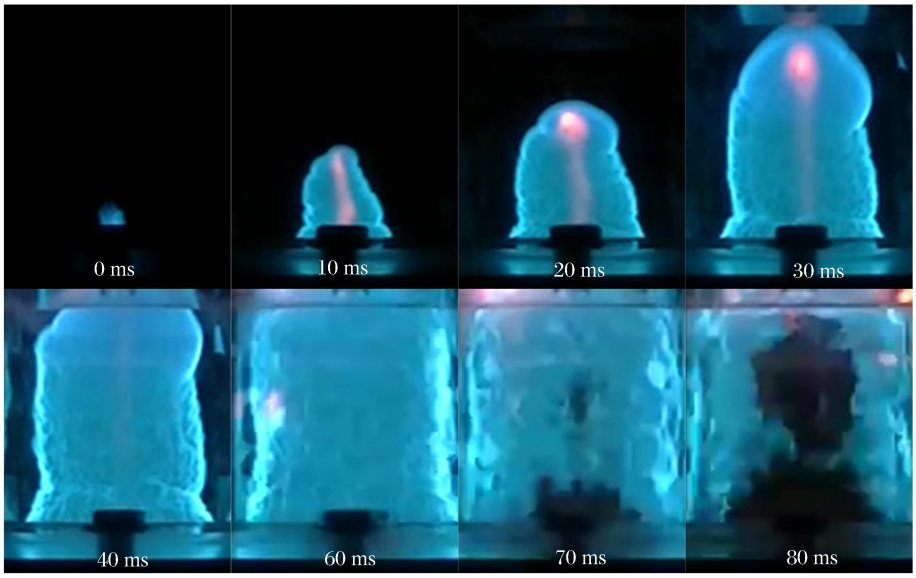


图 3 体积分数为 1.7%时火焰传播过程

Fig. 3 Flame propagation process at volume fraction of 1.7%

图 4 所示为油气体积分数 $\varphi=2.4\%$的火焰传播过程。0 ms 时明火瞬间引燃油气，产生淡蓝色蘑菇状火焰。0～20 ms 时火焰出现明显的分区，中间为橘红色燃烧核，边缘为淡蓝色火焰阵面，火焰形状变成圆柱形。燃烧核出现皱褶、折叠，表现出不稳定燃烧，说明发生了湍流燃烧现象。由于是富燃条件($\varphi=2.4\%$)，受浮力影响显著，火焰纵向扩展速度远大于横向拉伸速度并且火焰下部保持停滞。20～112 ms时随着反应的进行，燃烧核湍流度增大，亮度增大，火焰形状仍然为圆柱形。因为火焰阵面较压力波有所滞后，火焰还未到达容器口时，聚乙烯薄膜已经被压力波冲破，导致部分未燃油气被冲到空气中。112 ms 时火焰阵面传播到容器口，引燃泄放的油气，燃烧核颜色变为黄白色。此时，火焰还未传播到侧壁，到188 ms，火焰阵面才接触到侧壁。由于氧气不足，容器内大量油气还未完全燃烧。200～500 ms时，由于空气的流入，火焰开始从容器顶部向下缓慢燃烧，燃烧核亮度明显增强，颜色变为白色，淡蓝色火焰阵面逐渐消失。随后，火焰进一步发展，直至熄灭。耗时 1 092 ms。

结合图 2～4 可以看出，明火引燃油气后，火焰具有明显的分区现象，即可分为燃烧核和火焰阵面。不同油气体积分数，火焰组分差异巨大，中低油气体积分数火焰颜色呈现蓝色或淡蓝色，主要是因为氧气充足，燃烧反应完全，产生大量 OH、CH 自由基，而 OH、CH 光谱呈淡蓝色[15-16]。高体积分数油气燃烧时，低链碳氢组分迅速发生反应并离解，生成大量 OH、CH 自由基，火焰颜色呈现淡蓝色，同时高链碳氢组分也裂解为低链碳氢组分。随后随着氧气体积分数的下降以及温度的上升，反应不充分，生成大量碳烟粒子，碳烟粒子在高温受热条件下会发出明亮的黄白光[17-18]。随着油气体积分数的提高，油气爆炸持续时间呈现出先缩短后延长的趋势。



图 4 体积分数为 2.4%时火焰传播过程

Fig. 4 Flame propagation process at volume fraction of 2.4%

2.1.2 火焰阵面传播特性及影响因素

根据高速摄影仪拍摄的火焰图片与着火容器的位置关系，可得到不同体积分数的油气在不同时刻的纵向和横向火焰阵面位置，再根据两幅图片的时间间隔就可以得到不同体积分数的油气在不同时刻的纵向和横向火焰阵面速度。图 5～6 所示分别为 3 种油气体积分数的纵向火焰阵面位置、纵向火焰阵面速度、横向火焰阵面位置和横向火焰阵面速度随时间的变化曲线。

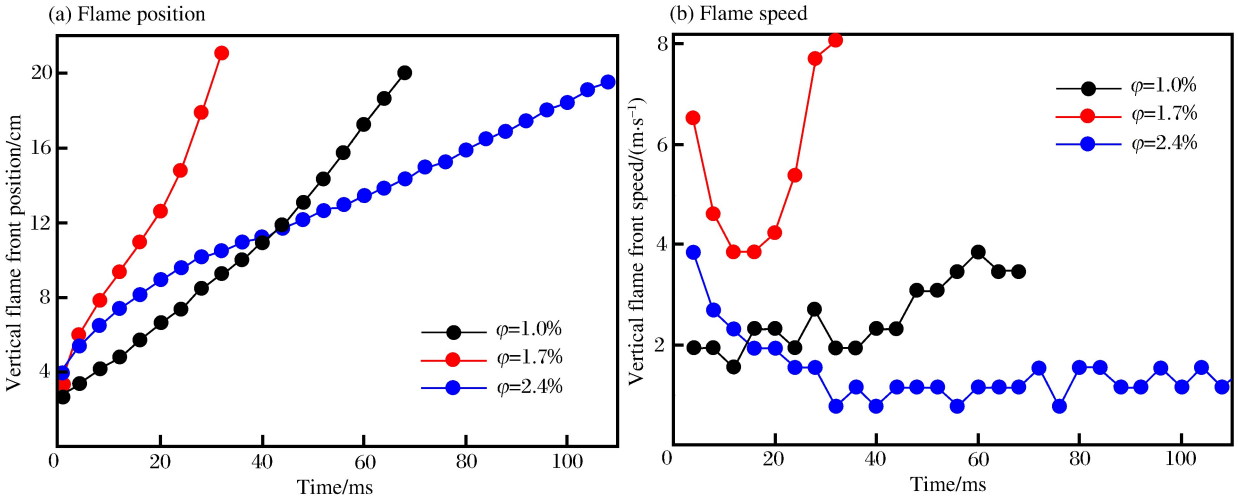


图 5 纵向火焰阵面位置及速度

Fig. 5 Position and speed of vertical flame front

从图 5(a)中可以看出，同一时刻，体积分数为 1.7%的油气纵向火焰阵面距容器底端最远，说明其速度也最大，与图 5(b)中结果相符。44 ms 之前体积分数为 2.4%的油气纵向火焰阵面位置比体积分数为 1.0%的油气距离更远，之后比体积分数为 1.0%的油气距离近。原因是高浓度油气引燃阶段受热浮力推举作用比低浓度大，火焰能够快速上升到较高位置，而后由于氧气不足，高浓度油气化学反应速率没有低浓度快，导致纵向火焰阵面传播速度小于体积分数为 1.0%的油气的。3 种油气体积分数纵向火焰阵面位置的斜率都是先减小后增大的趋势，说明纵向火焰阵面传播速度也是先减小后增大，与图 5(b)基本相符。从图 5(b)中可以看出，体积分数为 1.7%的油气纵向火焰阵面速度最大，最大值为 8.08 m/s，是体积分数为 1.0%和 2.4%的油气的纵向火焰阵面速度最大值的 2.1 倍和 2.1 倍。3 种油气体积分数纵向火焰阵面速度均先减小后增大，原因是明火引燃初期，油气被急剧加热发生膨胀，并在

热浮力推举作用下，火焰阵面短时间传播到较高位置，速度较大。随后由于薄膜约束，燃烧核压强减小，浮力作用减弱，导致纵向火焰阵面传播速度降低。最后压力波冲破薄膜，在内外压差和泄爆诱导的湍流作用下，容器内部反应速率迅速增大，纵向火焰阵面传播速度提高。

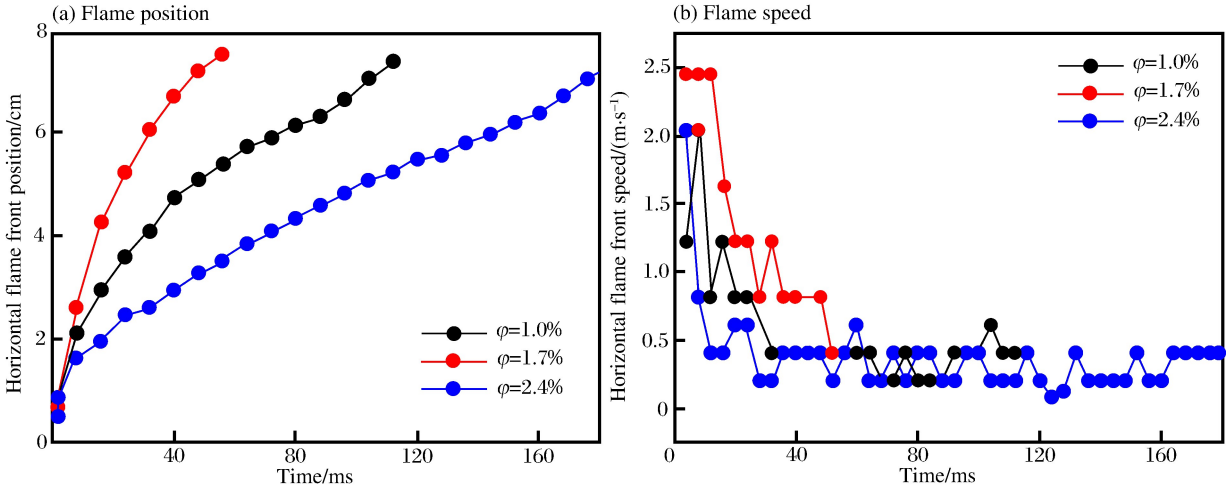


图 6　横向火焰阵面位置及速度

Fig. 6　Position and speed of horizontal flame front

从图 6(a)中可以发现，相同时刻，随着油气体积分数的增加，横向火焰阵面位置的距离先增大后减小，说明火焰阵面传播到侧壁时间先减小后增大，横向火焰阵面传播速度先增加后降低，与图 6(b)中曲线吻合。3 种油气体积分数横向火焰阵面位置的斜率都有先减小后稳定的趋势，表明横向火焰阵面速度先降低后趋于稳定，与图 6(b)曲线相符。从图 6(b)中可以发现，体积分数为 1.7%的油气横向火焰阵面速度最大，最大值为 2.45 m/s，是体积分数 1.0%和 2.4%的横向火焰阵面速度最大值的 1.2 倍和 1.2 倍。3 种油气体积分数横向火焰阵面传播速度均先减小后趋于稳定，原因是明火瞬间点燃，将能量高速传递给油气，促使横向火焰阵面传播速度短时达到最大。由于明火持续时间极短，能量传递有限，导致横向火焰阵面速度迅速下降。之后因为侧壁限制，压力波反射抑制了横向火焰阵面，使横向火焰阵面速度保持稳定。

结合图 5(a)和图 6(a)可以得出，相同时间、相同体积分数油气的纵向火焰阵面位置比横向火焰阵面位置远，并且随着油气体积分数的增大，火焰阵面位置的距离先变大后变小。油气体积分数分别为 1.0%、1.7%和2.4%的火焰阵面传播到侧壁用时是传播到容器口用时的 1.71 倍、1.75 倍和 1.68 倍。结合图 5(b)和图 6(b)可以得出，相同时间、相同体积分数油气的纵向火焰阵面速度大于横向速度，并且随着油气体积分数的增大，火焰阵面的速度先增大后减小。体积分数分别为 1.0%、1.7%和 2.4%的油气的最大纵向火焰阵面速度是最大横向火焰阵面速度的 1.89 倍、3.30 倍和 1.89 倍。

2.2　压力发展特性

2.2.1　*压力发展历程*

根据高频压力传感器测得的容器内压力变化情况，可得到不同油气体积分数着火爆炸的压力发展历程，结果如图 7～9 所示。

图 7 所示为油气体积分数 $\varphi=1\%$时的压力及压力变化速率时程曲线。从压力的发展历程来看可以分为 4 个阶段。第Ⅰ阶段为压力平稳阶段，持续约 25.3 ms，在这段时间内压力没有上升。原因是明火引燃油气后，火焰以层流状态传播，火焰面积小，单位时间放热量少，产生的压力波还未传播到传感器，所测压力在 0 kPa 附近，无明显变化；第Ⅱ阶段为压力陡升阶段，持续约 27 ms。25.3 ms 时压力波传播到传感器，未燃油气温度升高，产物膨胀，从而使燃烧强度增加，火焰面积增大，导致火焰纵向扩展速度加快，压力快速上升，上升速率最大为 0.197 kPa/ms。52.3 ms 时薄膜破裂，形成第 1 个超压峰值 $p_1=2.014$ kPa。第Ⅲ阶段为压力猛降后回升阶段，持续约 15.7 ms。由于压力波传播速度大于火焰传

播速度，薄膜破裂时，火焰前锋距容器口仍有5.69 cm。此时大量未燃油气在内外压差的作用下冲出容器，导致容器内部超压开始下降。下降速率最大达到0.367 kPa/ms，至62.2 ms时压力下降到0.986 kPa。随着火焰向管口推进，因受内外压差和泄爆诱导流动，燃烧面积进一步增大。油气剧烈燃烧产生的升压大于容器内气体泄压，致使容器内超压重新开始上升。68 ms后火焰锋面传播至容器口，外部油气被引燃，形成喷射火焰，导致容器内压力进一步上升，并形成第2个压力峰值 p_2[19-20]，数值为1.077 kPa。第Ⅳ阶段为振荡衰减阶段，持续约72 ms。因为火焰纵向扩展速度远大于横向拉伸速度，火焰继续向侧壁传播。在内部火焰和管口附近压力波反向传播的相互作用下，容器内出现压力振荡，即Helmholtz振荡[21-22]，振荡频率约为430 Hz。116 ms时火焰接触到侧壁，由于火焰和压力波耦合作用，振荡幅度变大。随着容器内外油气的耗尽，压力迅速下降，直至压强变为零。

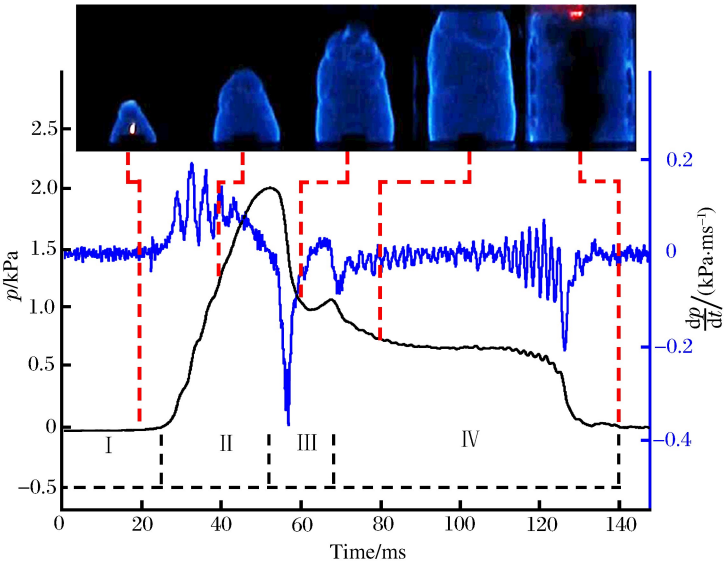


图7 油气体积分数1.0%时超压及超压变化速率时程曲线

Fig. 7 History of overpressure and its rate of overpressure variation at the gasoline/air volume fraction of 1.0%

图8所示为油气体积分数 $\varphi=1.7\%$ 时压力及压力变化率时程曲线。压力发展过程同样分为4个阶段。第Ⅰ阶段为压力平稳阶段，压力无明显变化，持续约15.6 ms。0 ms时油气被明火引燃，压力波经过15.6 ms传播至传感器，在此期间所测压力稍微大于0 kPa。第Ⅱ阶段为压力陡升阶段，持续约9.8 ms。随着火焰快速传播，容器内压力急剧上升，上升速率最大为0.647 kPa/ms。到25.4 ms时聚乙烯薄膜破裂，形成第1个压力峰值 $p_1=2.606$ kPa。第Ⅲ阶段为压力猛降后回升阶段，持续约6.8 ms。因为火焰传播速度小于压力波传播速度，薄膜破裂时，火焰传播到距离容器口1.54 cm处，大量未燃油气泄放到空气中，引起容器内压力迅速下降。下降速率最大为0.492 kPa/ms，至29 ms时压力下降到1.645 kPa；随着火焰向管口推进，受内外压差和泄爆诱导流动，燃烧面积进一步增大。油气剧烈燃烧产生的升压大于容器内气体泄压，致使容器内超压重新上升。32.2 ms时火焰锋面传播至容器口，外部油气被引燃，形成喷射火焰，引起容器内压力进一步上升，形成第2个压力峰值 $p_2=1.889$ kPa。第Ⅳ阶段为振荡衰减阶段，持续约45.8 ms。火焰传播到容器口后继续向侧壁扩展，在内部火焰和管口附近压力波反向传播的相互作用下，容器内产生Helmholtz振荡，振荡频率约为546 Hz。56 ms时火焰抵达侧壁，由于火焰和压力波耦合作用，振荡幅度变大。之后容器内外油气快速减少，振荡减弱，压力迅速回落，最后变为零。

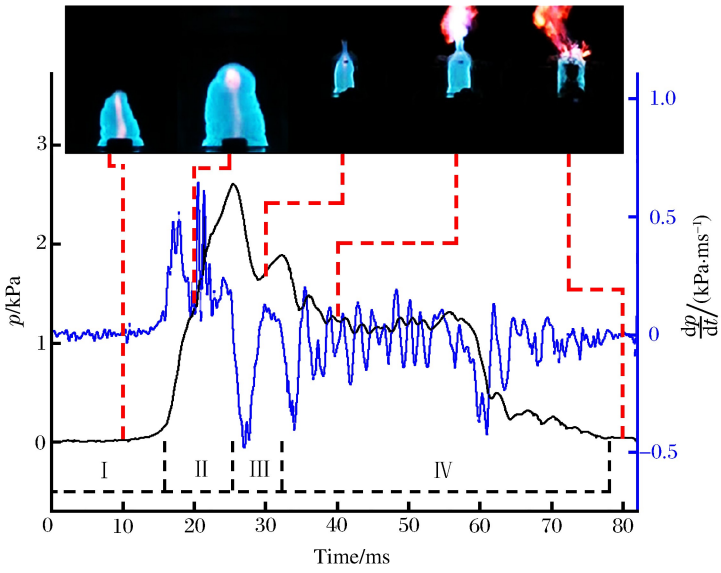


图8 油气体积分数1.7%时超压及超压变化速率时程曲线

Fig. 8 History of overpressure and its rate of overpressure variation at the gasoline/air volume fraction of 1.7%

图 9 为油气体积分数 $\varphi=2.4\%$ 的压力及压力变化速率时程曲线，压力曲线可分为 4 个阶段。第Ⅰ阶段为压力平稳阶段，持续约25.5 ms，这段时间内压力没有上升，约为0 kPa。第Ⅱ阶段为压力陡升阶段，持续约58.9 ms。由于油气体积分数高，燃烧不完全，释放的热量较少，纵向火焰阵面速度较低，约为 1 m/s，导致容器内压力上升较慢，上升速率最大为 0.092 kPa/ms。至84.4 ms时，形成第 1 个压力峰值 p_1，为1.989 kPa。第Ⅲ阶段为压力猛降后回升阶段，持续约27.6 ms。因为压力上升较慢，薄膜发生膨胀，在 p_1 点没有破裂。随后在火焰高温和压力波的双重作用下，102 ms 时薄膜破裂，此时火焰传播到距容器口1.23 cm处。破膜后，泄爆速度大于未燃气体速度，导致容器内超压迅速下降。下降速率最大达到1.026 kPa/ms，至 106.2 ms 压力下降到 0.038 kPa。112 ms 时，火焰锋面传播至容器口，外部油气被引燃，形成喷射火焰。导致容器内压力上升，并形成第 2 个压力峰值 p_2，约为0.246 kPa。第Ⅳ阶段为振荡衰减阶段，持续约 15.8 ms。火焰传播到容器口后继续向侧壁扩展，在内部火焰和管口附近压力波反向传播的相互作用下，容器内产生 Helmholtz 振荡，振荡频率约为 506 Hz。由于油气体积分数较高，燃烧反应不完全，导致燃烧并不剧烈[19]。随着空气的回流和氧气的补充，形成稳定燃烧状态，导致振荡快速衰减，容器内压力迅速减小到零。

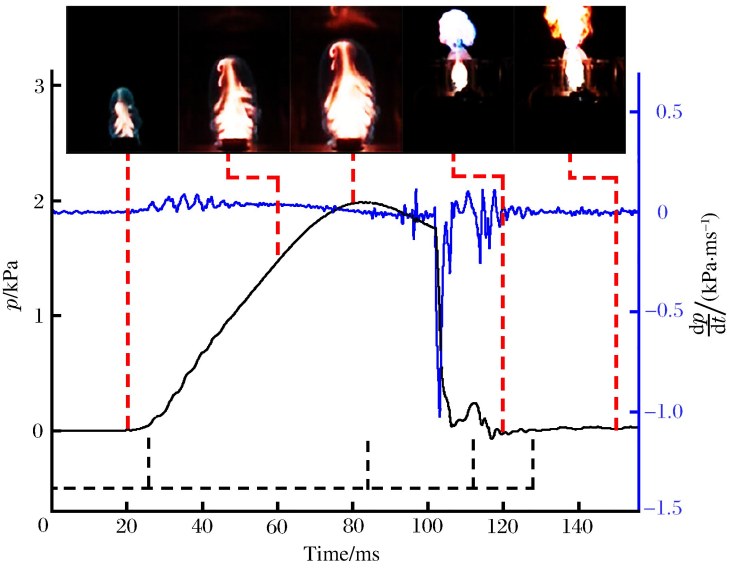


图 9 油气体积分数 2.4%时超压及超压变化速率时程曲线

Fig. 9 History of overpressure and its rate of overpressure variation at the gasoline/air volume fraction of 2.4%

结合图 7～9 可以得出，明火引燃不同体积分数油气时都会形成压力双峰现象。对中、低体积分数油气，第 1 个压力峰值为破膜压力；对高体积分数油气，第 1 个压力峰值略微大于破膜压力。第 2 个压力峰值则都是由于外部油气被引燃，导致容器内部超压急剧上升而形成。明火引燃油气的压力发展历程都可分为 4 个阶段，即压力平稳阶段、压力陡升阶段、压力猛降后回升阶段和振荡衰减阶段。随着油气体积分数的增大，振荡频率先增大后减小。

2.2.2　油气体积分数对压力参数影响

根据图 7～9 得到不同油气体积分数下的压力参数值，如表 1 所示。

表 1 不同油气体积分数下的压力参数

Table 1 Pressure parameter for different gasoline/air volume fractions

φ/%	压力峰值		$(dp/dt)/(kPa\cdot s^{-1})$		t/ms			
	p_1/kPa	p_2/kPa	最大值	最小值	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
1.0	2.014	1.077	0.197	−0.986	25.3	27.0	15.7	72.0
1.7	2.606	1.889	0.647	−0.492	15.6	9.8	6.8	45.8
2.4	1.989	0.246	0.092	−1.026	25.5	58.9	27.6	15.8

从表 1 可以看出，随着油气体积分数的增大，p_1、p_2、$\left.\frac{dp}{dt}\right|_{max}$ 和 $\left.\frac{dp}{dt}\right|_{min}$ 呈先增大后减小的趋势，说明油气体积分数对容器内压力发展和压力变化速率有显著的影响。原因是低体积分数条件下，油气过少，容器内空气富余量大，在空气的冷却作用下，反应产生的热量散失较快，火焰传播速度较小，导致压力上升速率和峰值压力较小。高体积分数条件下，油气过多，氧气不足，燃烧不完全，燃烧产物和释放的热量少，火焰传播速度低，致使压力上升速率和峰值压力小。中间体积分数条件下，化学反应充分，单位体积内释放的热量高，火焰传播速度快，因而压力上升速率和峰值压力最大。

从压力发展历程的 4 个阶段来看，在压力平稳阶段，不同油气体积分数的持续时间差别较小，而在其余 3 个阶段，不同油气体积分数的持续时间差别很大，这说明油气体积分数对压力平稳阶段影响较弱，对其余阶段影响较弱；随着油气体积分数的升高，经过压力平稳阶段、压力陡升阶段和压力猛降阶段后，回升阶段的持续时间先算短后增长，而振荡衰减阶段的持续时间一直减小。由表 1 中数据可得到不同油气体积分数压力发展各阶段所占发展历程总时间比例的直方图，结果如图 10 所示。图 10 中可看出，3 种油气体积分数在第Ⅰ阶段中的持续时间所占比例基本一致，最大差别不超过 2%，同样说明油气体积分数对压力平稳阶段影响较弱。油气体积分数为 1.0%和1.7%时的压力发展各阶段的持续时间所占比例大致相同，压力变化曲线走势也基本一致。而油气体积分数为2.4%的压力发展各阶段持续时间所占比例与1.0%和 1.7%时的差别较大，其压力变化曲线走势与 1.0%和 1.7%时的也不一样。第Ⅱ阶段所占比例较大，是1.0%和 1.7%时的 2.42 倍和 3.54 倍；而第Ⅳ阶段所占比例小，是1.0%和1.7%时的 0.23 倍和 0.20 倍。原因是由于油气浓度较高时，压力上升较慢且振荡持续时间短。

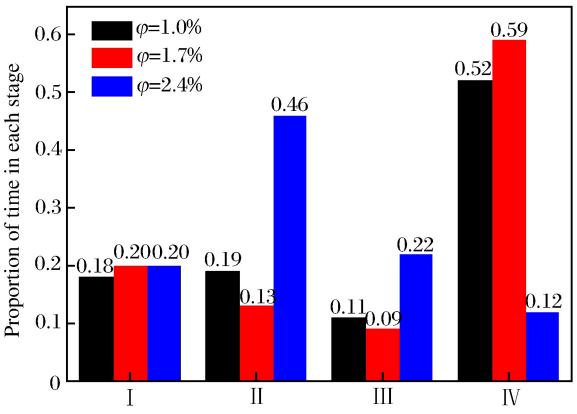


图 10 不同油气体积分数下压力发展 4 个阶段的时间比例

Fig. 10 Proportion of time in four stages at different gasoline/air volume fractions

2.3 火焰和压力波之间的耦合作用分析

结合火焰图像和压力发展历程可得出，火焰和压力波之间形成了强烈的耦合作用，两者相互作用，相互影响，存在一定的空间位置关系。以体积分数为 2.4%的油气为例来说明火焰与压力波的耦合作用，如图 11 所示。从图中可以看出：一方面，火焰的发展对压力波具有强烈的促进作用。当火焰阵面面积增大时，未燃气体温度升高，已燃气体与未燃气体的组分输送速率加快，燃烧速度加快，超压急剧上升。另一方面，压力波的变化也会对火焰结构产生影响。由于压力波传播速度大于火焰传播速度，压力波在传播过程中会产生反射、折射，使火焰阵面出现局部停滞和失稳变形。破膜前，压力波对火焰起诱导作用，后面紧跟着淡蓝色的火焰阵面；破膜后，由于开口邻进的压力波反向传播，导致容器外部气体向内部流动，油气界面不稳定，产生 Helmholtz 振荡。

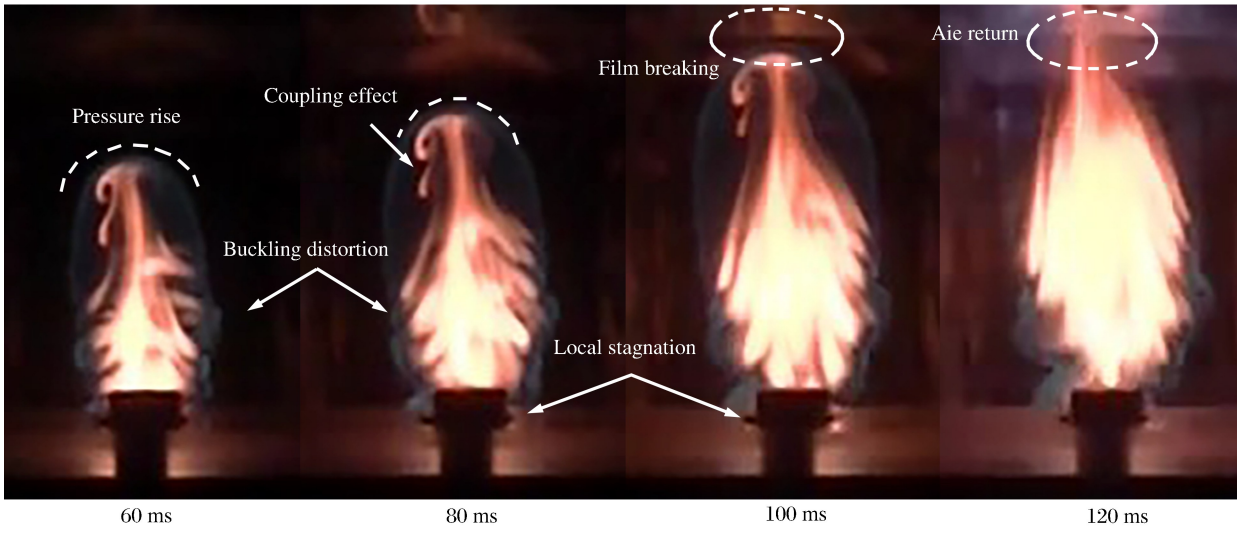


图 11 火焰与压力波的耦合作用

Fig. 11 Coupling effect between flame and pressure wave

3 结　论

(1)不同体积分数的油气火焰组分不同，并且火焰具有明显的分区现象，可分为燃烧核和火焰阵面。

(2)油气体积分数在 1%～2.4%范围内时，随着体积分数增加，纵向和横向火焰阵面速度均先变大后变小，并且纵向火焰阵面速度要大于横向火焰阵面速度。

(3)容器内的压力发展历程可分为 4 个阶段，即压力平稳阶段、压力陡升阶段、压力猛降后回升阶段和振荡衰减阶段，而且会形成压力双峰现象。

(4)油气体积分数对容器内压力和压力变化速率有显著影响，但对压力平稳阶段影响较弱。油气体积分数在 1%～1.7%范围内时，压力发展各阶段持续时间所占比例大致相同；油气体积分数大于 2.4%时，与 1.0%～1.7%油气体积分数相比在第Ⅱ阶段所占比例大，而在第Ⅳ阶段所占比例小。

(5)油气爆炸过程中火焰和压力波之间形成了强烈的耦合作用。火焰加速造成压力上升，反射、折射的压力波导致火焰阵面停滞和失稳变形，压力波反向传播和火焰湍流增强产生 Helmholtz 振荡。

参考文献：

[1] 帅先勇，王元刚. 油库着火爆炸事故的形成原因及预防[J]. 石油库与加油站，2003，12(5)：17-18.
SHUAI Xianyong, WANG Yuangang. Causes and prevention of fire and explosion accident in oil depot[J]. Oil Depot and Gas Station, 2003,12(5):17-18.

[2] 赵衡阳. 气体和粉尘爆炸原理[M]. 北京：北京理工大学出版社，1996.

[3] KUNDU S, ZANGANEH J, MOGHTADERI B. A review on understanding explosions from methane-air mixture [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016,40:507-523. DOI:10.1016/j.jlp.2016.02.004.

[4] WERLE S, WILK R K. Ignition of methane and propane in high-temperature oxidizers with various oxygen concentrations[J]. Fuel, 2010,89(8):1833-1839. DOI:10.1016/j.fuel.2010.03.012.

[5] RYU Jungwan, KWON Jongseo, KIM Ryanggyun, et al. Surface ignition behaviors of methane-air mixture in a gas oven burner[J]. Applied Thermal Engineering, 2014,65(1/2):262-272.

[6] ELBAZ A M, ZAYED M F, SAMY M, et al. The flow field structure of highly stabilized partially premixed flames in a concentric flow conical nozzle burner with coflow[J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2016, 73:2-9. DOI:10.1016/j.expthermflusci.2015.08.016.

[7] 范宝春，邢晓江，李鸿志. 可燃介质中高温火团诱导的爆炸及其抑制[J]. 兵工学报，2001，22(2)：195-198.
FAN Baochun, XING Xiaojiang, LI Hongzhi. Explosion induced by a hot reactive gas pocket and its suppression [J]. Acta Armamentarii, 2001,22(2):195-198.

[8] 欧益宏，杜扬，张峥，等. 高热壁油气热爆燃实验研究[J]. 安全与环境学报，2008，8(4)：115-118.
OU Yihong, DU Yang, ZHANG Zheng, et al. Experiment analysis of gasoline-air mixture deflagration under the condition of hot wall[J]. Journal of Safety and Environment, 2008,8(4):115-118.

[9] 欧益宏，杜扬，蒋新生，等. 地下坑道瓦斯热着火实验研究[J]. 煤矿安全，2011，42(2)：4-7.
OU Yihong, DU Yang, JIANG Xinsheng, et al. Experimental study on thermal ignition of gas in underground tunnel[J]. Safety in Coal Mines, 2011,42(2):4-7.

[10] 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研究[J]. 化工学报，2015，66(2)：1-8.
WU Songlin, DU Yang, ZHANG Peili, et al. Study on ignition effect for gasoline-air deflagration behavior in confined space[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2015,66(2):1-8.

[11] 程平，张为俊，储焰南，等. 用选择离子流动管质谱测定汽油和柴油蒸汽成分[J]. 分析化学，2003，31(5)：548-551.
CHENG Ping, ZHANG Weijun, CHU Yannan, et al. Analysis of petrol and diesel vapor using selective ion flow tube/mass spectrometry[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2003,31(5):548-551.

[12] 欧益宏，袁广强，周建忠，等. 半封闭空间钨丝点燃油气特性研究[J]. 后勤工程学院学报，2016，32(4)：38-44.
OU Yihong, YUAN Guangqiang, ZHOU Jianzhong, et al. Experiment characteristics of tungsten wire ignition gasoline-air mixture in semi-confined space[J]. Journal of Logistics Engineering University, 2016,32(4):38-44.

[13] 徐进生，刘洋，陈先锋，等. 甲烷与空气质量浓度当量比对火焰结构及传播特性的影响[J]. 中国安全科学学报，2014，24(9)：64-69.

XU Jinsheng, Liu Yang, Chen Xianfeng, et al. Effect of CH_4 to air mass concentration ratio on flame structure and propagation characteristic[J]. China Safety Science Journal, 2014,24(9):64-69.

[14] MENON S K, BOETTCHER P A, VENTURA B, et al. Hot surface ignition of *n*-hexane in air[J]. Combustion and Flame, 2015,163:42-53.

[15] 汪泉.有机玻璃方管内瓦斯爆燃火焰传播特性研究[D].合肥:中国科学技术大学,2013.

[16] 牛芳,刘庆明,白春华,等.甲烷/空气预混气的火焰传播过程[J].北京理工大学学报,2012,32(5):441-445.
NIU Fang, LIU Qingming, BAI Chunhua, et al. Observation of propagating flame of methane-air mixture[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2012,32(5):441-445.

[17] 牛芳,刘庆明,白春华,等.甲烷-煤尘爆炸物火焰传播特性[J].高压物理学报,2012,26(4):455-461.
NIU Fang, LIU Qingming, BAI Chunhua,et al. Flame propagation and combustion in methane-coal-air mixture [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2012,26(4):455-461.

[18] NIE Baisheng, HE Xueqiu, ZHANG Chen, et al. Temperature measurement of gas explosion flame based on the radiation thermometry[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2014,78:132-144.

[19] GUO Jin, SUN Xuxu, RUI Shengchao, et al. Effect of ignition position on vented hydrogen-air explosions[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015,40(45):15780-15788. DOI:10.1016/j.ijhydene.2015.09.038.

[20] 胡俊,万士昕,浦以康,等.柱形容器开口泄爆过程中的火焰传播特性[J].爆炸与冲击,2004,24(4):330-336.
HU Jun, WAN Shixin, PU Yikang, et al. The characteristics of flame propagation during explosion venting from cylindrical vessel[J]. Explosion and Shock Waves, 2004,24(4):330-336.

[21] Rocourt X, Awamat S, Sochet I, et al. Vented hydrogen-air deflagration in a small enclosed volume[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014,39(35):20462-20466.

[22] GUO Jin, WANG Changjian, LI Quan, et al. Effect of the vent burst pressure on explosion venting of rich methane-air mixtures in a cylindrical vessel[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016,40:82-88.

Explosion of gasoline/air mixture ignited by pilot flame in semi-confined space

OU Yihong[1], LI Run[1], YUAN Guangqiang[2], ZHOU Jianzhong[1], WANG Bo[1], LI Yangchao[1]

(1. *Department of Oil, Army Logistics University of PLA, Chongqing* 401311, *China*;
2. *No.* 72489 *Troop of Army, Yantai* 265301, *Shandong, China*)

Abstract: A semi-confined vessel was built to study the explosion of the gasoline/air mixture ignited by a pilot flame. The flame propagation at different gasoline/air volume fractions were characterized through the flame images from a high-speed camera. The pressures development at different gasoline/air volume fractions were characterized according to the pressure data acquired by a high-frequency pressure sensor. The results showed that the gasoline/air volume fraction had a significant influence on the flame's species, propagation velocity, pressure and pressure rise rate. The flame exhibited an obvious zoning phenomenon, was observed to divide into a flame kernel and a flame front. The speed of the vertical flame front was faster than that of the horizontal flame front. The pressure development process went through four stages, and produced a phenomenon of two pressure peaks. A strong coupling effect was formed between the flame and the pressure wave in the process of the gasoline/air explosion

Keywords: semi-confined space; pilot flame; flame propagation characteristics; pressure development characteristics

(责任编辑 王易难)