DOI: 10.11883/1001-1455(2017)01-0053-08

油气在顶部含弱约束结构受限空间内的爆炸特性*

杜 扬,王世茂,齐 圣,王 波,李阳超,李国庆
(中国人民解放军后勤工程学院军事供油工程系,重庆 401311)

摘要: 建立了顶部含有弱约束结构的受限空间油气爆炸实验系统,并对含有弱约束的受限空间中油气爆炸特性进行实验研究,获得超压变化规律及火焰发展特征。结果表明:(1)容器内部超压受泄流、外部爆炸、火焰扩张等因素的影响,出现多个峰值,并伴以强烈的振荡;容器外部超压随着距离的增大而减小,且竖直方向超压大于水平方向超压。(2)与无约束爆炸相比,弱约束结构对爆炸的影响主要体现在对爆炸超压的增强效应和对爆炸发展速率的滞后效应。(3)爆炸超压随着油气体积分数的增加先增大后减小,最大超压所对应的初始油气体积分数为 1.79%。(4)容器外火焰发展过程分为初级燃烧阶段、过渡燃烧阶段、次级燃烧阶段,由于受 Rayleigh-Talor 不稳定、Helmholtz 不稳定、斜压效应的影响,火焰出现褶皱和卷曲,最大火焰高度和直径分别为0.8和 0.55 m。

关键词: 爆炸力学;油气爆炸;受限空间;弱约束;超压;火焰
中图分类号: O383 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

油气具有易燃易爆的性质,近年来因油气爆炸所导致的事故不断发生,尤其是在加油站、泵房、阀室、操作间、油罐等受限空间中。这类空间大多有塑料隔膜、玻璃、木门、弱链接罐顶等,这些结构相对于空间主体而言承压能力较小,在可燃气体爆炸冲击荷载作用下会最先破坏,称为弱约束结构[1]。当前针对油气等可燃气体爆炸特性的研究主要通过实验和数值模拟来实现。实验方面,赵衡阳等[2]用乙炔/空气和液化石油气/空气作为可燃介质,研究了满罐充气和半罐充气时的点火爆炸,并与 TNT 炸药进行对比,进而确定了可燃气体爆炸的 TNT 的当量值。杜扬等[3]、陈思维等[4]基于模型实验研究了汽油蒸汽在洞库坑道和容积式油罐中的爆炸发展过程,得到了长坑道和油罐中油气爆炸的超压荷载分布,确定了油气爆炸最大超压对应的体积分数,并分析了不同体积分数下的油气爆炸产物。

在数值模拟方面,近年来多种数值模型被提出并广泛应用于可燃气体爆炸的研究中。杜扬等[5]提出了基于多种控制机理的湍流爆炸燃烧模型,该模型采用分解、混合、反应的分步方式来模拟油气爆炸过程,结果表明该模型能较好地模拟油气爆炸的过程;V. Molkov[6]提出了基于大涡模拟的可燃气体泄爆过程的数值计算模型,其计算结果表明开口泄爆过程中外部爆燃会引起空间内超压的升高。A. Qiao 等[7]和 M. Dadashzadeh 等[8]分别针对蒸汽云爆炸事故和可燃气体爆炸后引发火灾的连锁事故提出了数值计算模型,并计算分析了两类爆炸事故的毁伤参数分布规律以及成灾机制。H. H. Pedersen 等[9]提出了大尺寸联通房屋可燃气体泄压爆炸的数值计算模型,利用 FLACS 计算软件模拟了联通房屋中的 LNG 爆炸过程,其结果显示单个房屋中的可燃气体爆炸会导致其相邻房屋中压力迅速升高。丁宇奇等[10]研究了大型储油罐内的油气爆燃过程,并分析了容器内爆炸荷载的时序变化和空间分布规律。

尽管学者们对密闭空间内可燃气体爆炸特性进行了大量的研究,但针对于油气在顶部含有弱约束结构的受限空间内爆炸特性的研究仍相对欠缺。本文中以 93# 汽油蒸汽/空气混合气体作为反应介质,重点研究油气在顶部含有弱约束结构受限空间中的爆炸特性,并进行相应的机理分析。

* **收稿日期**: 2015-06-02; **修回日期**: 2015-06-23
基金项目: 国家自然科学基金项目(51276195);重庆市研究生创新基金项目(CYB15127)
第一作者: 杜 扬(1958—),男,教授,博士生导师; **通信作者**: 王世茂,wangshim1990@163.com。

1 实验系统与方案

1.1 实验系统

实验系统由实验容器、配气系统、点火系统、同步控制系统、数据采集系统、高速摄像系统构成，如图 1 所示。实验容器直径为 30 cm，高为 26 cm，容器底部封闭，顶部设置开口，开口率为 80%。用较薄的铝箔膜片对顶部开口进行封口，设置弱约束结构边界时，采用破坏压力 $p_v=2.5$ kPa 的薄铝箔膜片封口，该薄膜破坏时会产生较大的扰动；设置无约束结构边界时，考虑到配气时需要将顶部开口密封以防止预混油气泄漏蔓延，同时要尽可能降低密封薄膜的强度以便减少薄膜破坏时带来的扰动，采用破坏压力为 $p_v=0.4$ kPa 的薄铝箔膜片进行封口，该膜片产生的扰动较小，足以模拟无约束边界的工况条件。容器内设置压力传感器 P0，容器外沿水平方向设置压力传感器 P1～P4，沿竖直方向设置压力传感器 P5～P8；P1～P4 到容器顶部中心的距离分别为 0.3、0.5、0.8 和 1.1 m；P5～P8 到顶部中心的距离分别为 0.2、0.3、0.5 和 0.8 m。使用高速摄影仪对爆炸火焰发展过程进行捕捉。

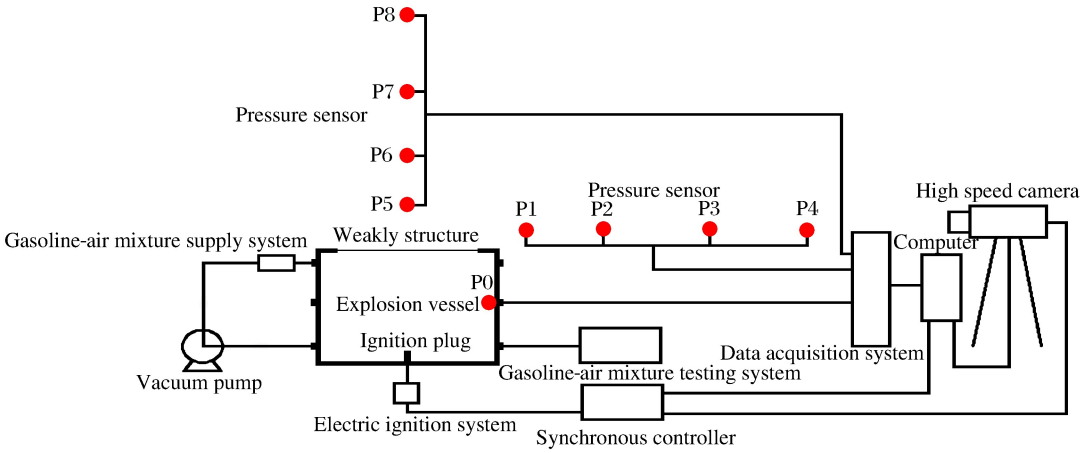

图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Scheme of experimental system

1.2 实验方案

常温常压下，油气的爆炸极限约为 0.9%～3.1%[11]。为最大程度反映爆炸极限范围内不同初始体积分数条件下的油气爆炸特性，设定初始体积分数为 1.07%、1.30%、1.56%、1.79%、1.98%、2.20%、2.48%、2.75%和 3.00%。用压力传感器 P0～P9 配合动态数据测试系统采集测试容器内外爆炸超压，同时利用高速摄影系统对爆炸火焰形态变化过程进行记录，拍摄速率为 500 s^{-1}，初始压力为常压，初始温度为 293 K，利用高能电火花发生装置进行点火，点火杆位于底部中心，火花产生的位置距离容器底部约 6 cm，点火能量为 3.2 J。

2 实验结果及机理分析

2.1 爆炸超压变化规律

2.1.1 容器内部超压

已有的研究表明，开口容器内可燃气体爆炸超压的变化受多种机制控制，出现多峰值现象[12-15]。图 2 给出了顶部含有弱约束结构和无弱约束结构条件下容器内部超压随时间的变化曲线。

从图 2 中可以得出含有弱约束结构受限空间内部超压变化可分为 4 个阶段。

(1)约束破坏泄流阶段(0～0.024 s)：点火后，容器内超压上升使得约束膜破裂，大量未燃油气喷出，由于顶部弱约束膜强度较小，约束膜的破坏和油气的泄放几乎同时进行，超压相互耦合并共同作用，最终形成泄流超压峰值 p_{fv}，大小为 2.58 kPa。当膜片破坏后，油气在燃烧波的推举下边燃烧边泄放，导致容器内气体密度降低，进而使超压下降。

(2)外部爆炸反馈阶段(0.024～0.051 s)：泄出的油气云团在容器口附近膨胀扩散，使出口轴心处附近压力下降，膨胀波在云团边缘反射形成压缩波，压缩波在云团内部集聚并形成高压区，使得油气云团内形成高密度、高体积分数预热区域。随着火焰射流点燃高压区的油气并使其迅速燃烧，引起压力的急剧上升，发生外部爆炸，进而形成外部爆炸超压峰值 p_{ext}，大小为 3.98 kPa。

(3)波动振荡阶段(0.051～0.091 s)：热量损失导致火焰锋面后燃烧产物的温度降低，而且火焰向外部的加速运动产生较强的泄放惯性，二者共同作用使容器内压力降低，最终形成负压真空区；真空区的倒吸作用和外部爆炸的挤压作用造成气体回流，回流气体与火焰锋面对撞产生剧烈的湍流，使得燃烧加剧，火焰锋面发生强烈的振荡，压力再次上升；扩张的火焰锋面将更多的气体挤压到容器外，压力又再一次降低，形成周期性的往复振荡流动，使得容器内部产生振荡超压，即 Helmholtz 振荡[14-15]。

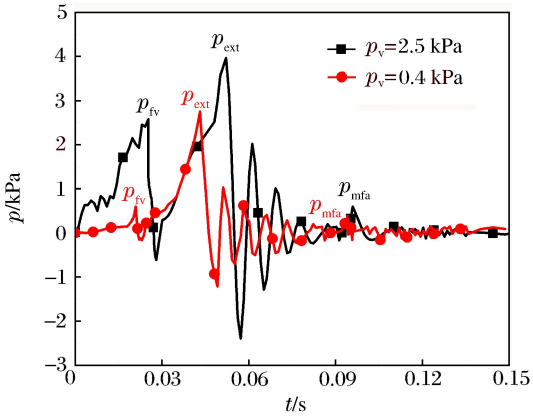

图 2　容器内部爆炸超压时程曲线

Fig. 2　Histories of internal overpressure

(4)火焰扩张阶段(0.091～0.112 s)：由于开口容器中可燃气体爆炸火焰的轴向传播速度大于径向扩张速度[15]，火焰锋面沿侧向扩张触壁后受到外部爆炸、泄流、振荡流动等因素的影响，火焰面进一步扩展，褶皱增多，容器内火焰区域增大，产生火焰扩展超压峰值 p_{mfa}=0.594 kPa，且 p_{mfa} 远小于 p_{ext}，这是由于开口面积较大，大量油气泄放到容器外部，残余油气较少，难以再产生较大的超压峰值。

图 2 中的对比说明有弱约束结构时内部爆炸超压会增大，而达到超压峰值的时间会略为滞后，其对比如表 1 所示，表中 T 为超压振荡周期，Δt 为振荡持续时间。

表 1　容器内部爆炸特性对比

Table 1　Comparison of internal explosion characteristics

约束条件	泄流超压峰值		外部爆炸超压峰值		火焰扩展超压峰值		T/s	Δt/s
	p_{fv}/kPa	t/s	p_{ext}/kPa	t/s	p_{mfa}/kPa	t/s		
2.5 kPa	2.58	0.025	3.96	0.051	0.59	0.096	0.008	0.039
0.4 kPa	0.59	0.021	2.45	0.046	0.39	0.093	0.008	0.040

从表 2 中可以得出，弱约束结构对内部爆炸超压有增强作用，与无约束爆炸相比，p_{fv}、p_{ext}、p_{mfa} 分别增加了 337.2%、63.1%和 51.3%，这是因为破坏弱约束结构需要一定程度的憋压，从而导致弱约束破坏瞬间内外压差较大，泄出的未燃油气在外部形成体积分数较大的油气云团，被引燃后短时间内燃烧并释放大量能量，产生较大的超压值；而无约束时，由于破坏压力较小，点火后顶部的薄膜迅速破裂，油气处于扩散燃烧的状态，超压值相对较小。另外，在弱约束条件下超压峰值分别滞后了0.004、0.005 和 0.003 s，这是由于无约束时火焰传播速度更快，破膜泄流和外部爆炸的时间略为提前。

2.1.2　容器外部超压

图 3～4 给出了不同边界下容器外压力测点 P1～P8 的压力变化曲线，分别反映了水平方向和竖直方向的压力变化规律。

以传感器 P1 为例，沿水平方向超压变化规律为“最大正超压-最大负超压-二次正超压”。约束膜破裂后，未燃油气泄出并形成油气云团，随后被引燃发生外部爆炸，超压上升并于 0.056 s 时达到最大值 0.79 kPa；随后高密度油气变为低密度燃烧产物，由于热量迅速散失，温度降低使得压力下降形成真空区，产生稀疏波并于 0.076 s 达到最小值－0.24 kPa；爆炸产物膨胀做功使压力回升并于0.091 s形成二次正超压，大小为 0.097 kPa，当燃烧产物扩散后压力变为大气压强。

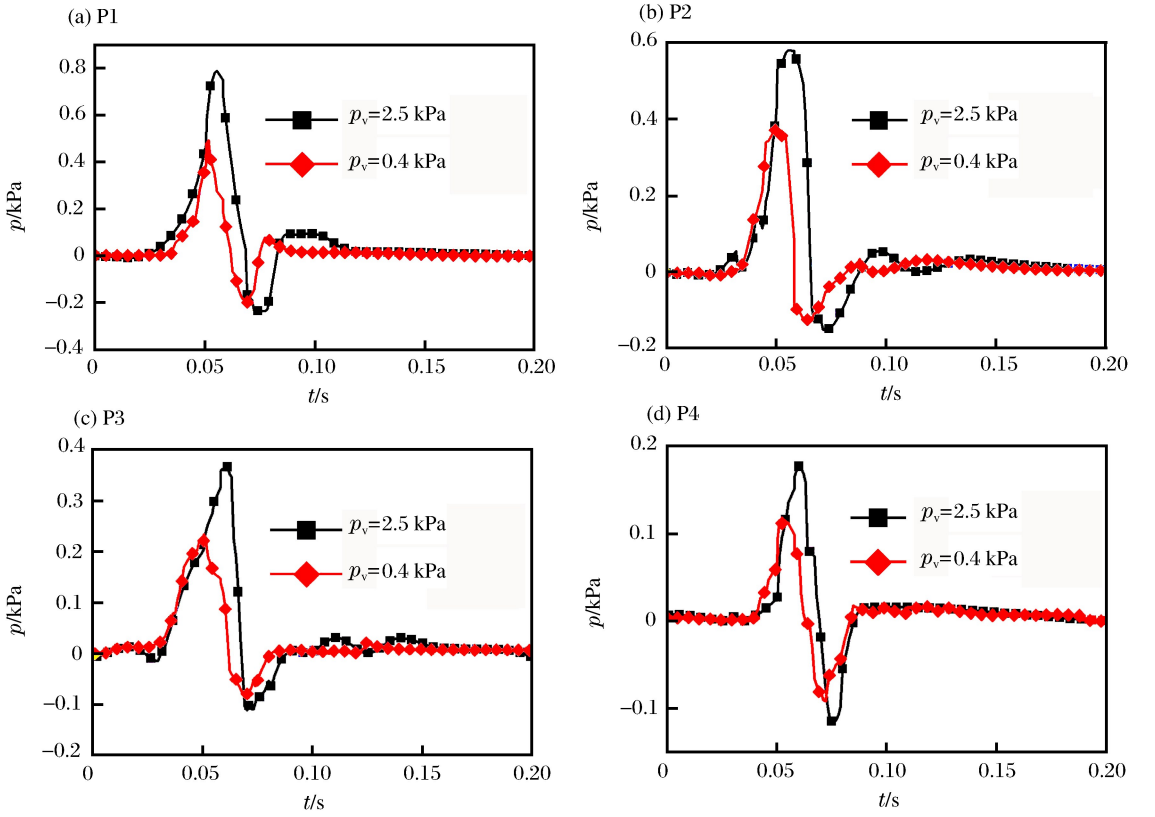

图 3 容器外水平方向超压与时间的关系

Fig. 3 Histories of external overpressure along the horizontal direction

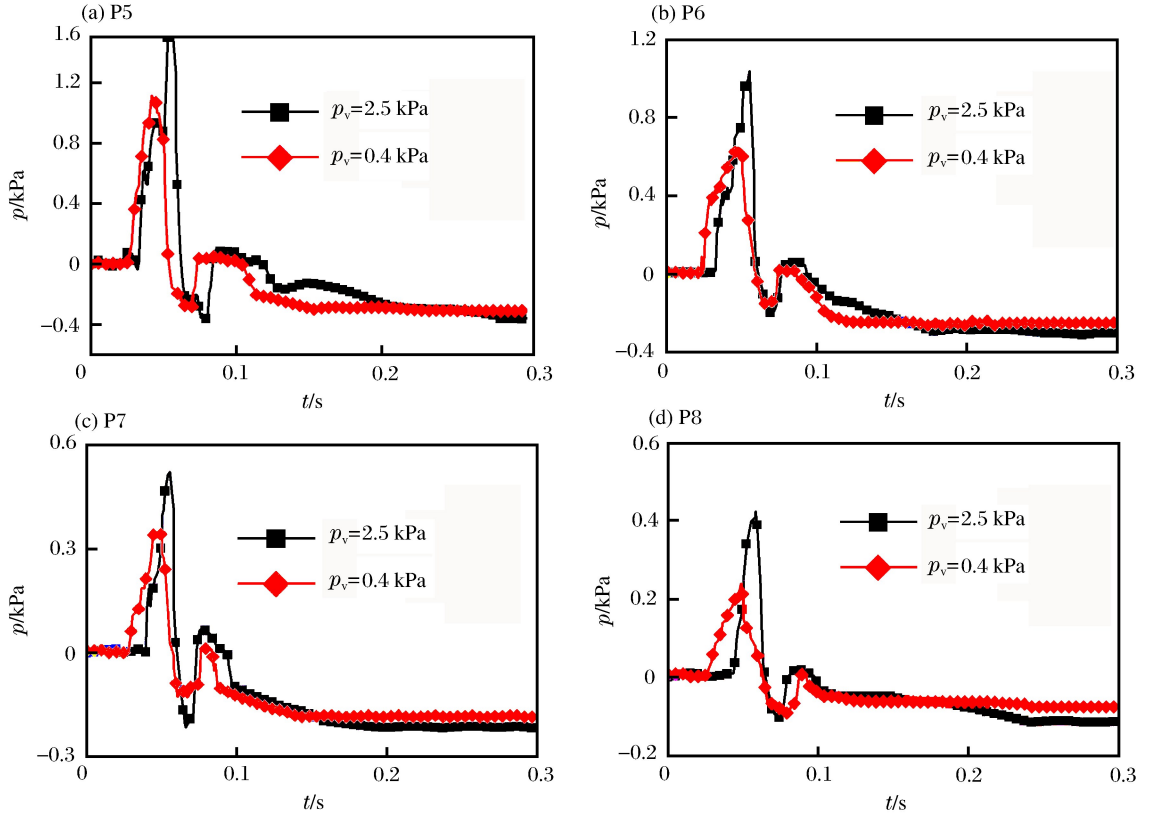

图 4 容器外竖直方向超压与时间的关系

Fig. 4 Histories of external overpressure along the vertical direction

以传感器 P5 为例，沿竖直方向超压变化规律为“最大正超压-最大负超压-二次正超压-二次负超压”。与 P1 不同，P5 最大正超压为 1.59 kPa；这是由于未燃油气受爆炸超压的挤压作用和燃烧热流的推举作用集中于竖直方向，被引燃后产生更大的超压值。另外，在二次正超压形成后，受上升热流的影响，测点处压力会继续下降形成持续时间较长的二次负超压，最大二次负超压为－0.36 kPa。

表 2　外部爆炸超压对比

Table 2　Comparison of external explosion overpressure

传感器	p_1/kPa	t/s	p_2/kPa	t/s	$(\Delta p/p_1)$/%	传感器	p_1/kPa	t/s	p_2/kPa	t/s	$(\Delta p/p_1)$/%
	p_v=0.4 kPa		p_v=2.5 kPa				p_v=0.4 kPa		p_v=2.5 kPa		
P1	0.49	0.051	0.79	0.055	61.2	P5	1.10	0.048	1.59	0.055	44.5
P2	0.37	0.051	0.58	0.055	56.7	P6	0.63	0.049	1.07	0.055	69.8
P3	0.23	0.052	0.38	0.058	65.2	P7	0.33	0.049	0.52	0.055	57.5
P4	0.11	0.054	0.19	0.059	72.7	P8	0.23	0.050	0.42	0.057	78.2

由表 2 可知，弱约束结构对外部超压有增强作用，当 p_v=2.5 kPa 时（弱约束条件），膜片破坏后，未燃油气在外部形成高压缩度油气云团，能量释放相对集中，产生较大的爆炸超压；当 p_v=0.4 kPa 时（近似无约束条件），油气处于扩散燃烧的状态，能量释放较为分散，产生的超压相对较小。此外，当 p_v=2.5 kPa时，达到超压峰值的时间略为滞后，这是由于顶部有约束面封堵，火焰传播速度较慢，泄流和外部爆炸发生的时间均滞后。

2.2　爆炸超压与初始油气体积分数之间的关系

图 5～6 分别反应了水平方向测点和竖直方向测点的超压值与初始油气体积分数的关系。从图中可以看出，爆炸超压随着初始油气体积分数的增高先增大后减小，当初始油气体积分数为1.79%时，爆炸超压均达到最大值，此时的油气体积分数为最危险油气体积分数。

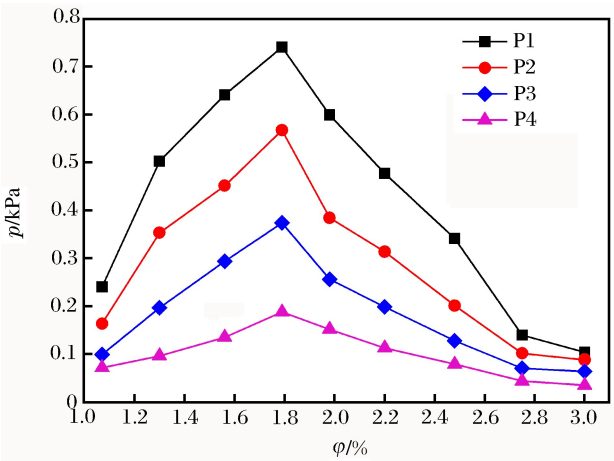

图 5　容器外沿水平方向爆炸超压与油气体积分数关系

Fig. 5　Relationship between overpressure and volume fraction of fuel/air mixture along the horizontal direction

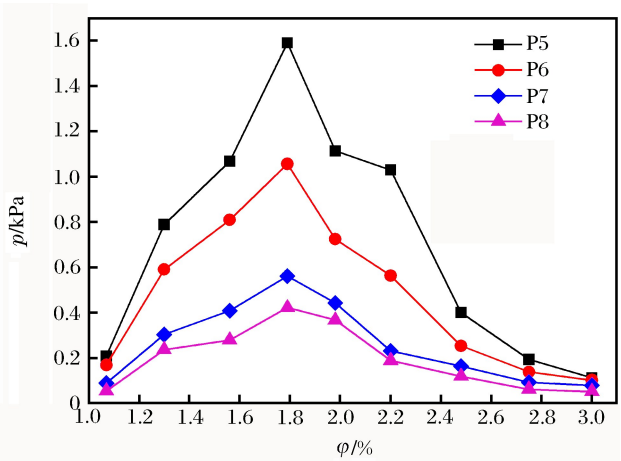

图 6　容器外沿竖直方向爆炸超压与油气体积分数关系

Fig. 6　Relationship between overpressure and volume fraction of fuel/air mixture along the vertical direction

当油气体积分数较小时，容器内参加爆炸反应的实际空气量小于空气总量，整个反应为富氧反应，空气剩余量较大，能量释放率较少；另外，较低的油气体积分数导致整个反应体系中活化基团的数目相对不足，化学反应速度减慢，降低了爆炸强度；因此，低油气体积分数条件下爆炸超压较小。随着油气体积分数增加，单位质量混合气体所释放的能量增加，爆炸超压增强，当油气体积分数达到 1.79 %时，油气与氧气的配比更接近当量比，油气燃烧更加迅速，化学反应最为充分，能量释放率最高，爆炸超压达到最大。当油气体积分数进一步增大，油气燃烧反应所需的空气量大于容器内的空气总量，反应为贫氧反应，燃烧反应不完全，能量释放率降低；另外，油气体积分数的提高，使得反应体系内活化基团的体积分数相对降低，减小了体系内的化学反应速度，从而导致爆炸强度降低。

2.3 爆炸火焰形态

图 7 所示为爆炸过程中火焰形态变化规律，当点火后，弱约束膜破裂，容器内的油气泄出，火焰沿竖直方向加速，由界面稳定理论可知，燃烧产物向未燃的高密度油气的加速过程会增强体系内的 Rayleigh-Taylor 不稳定性，导致火焰湍流强度增大，火焰由此失稳；另外，由于火焰的燃烧，导致火焰锋面前方温度升高，气体受热膨胀而运动，诱导火焰锋面变形产生 Helmholtz 不稳定，火焰进一步加速[16]。加速的火焰更加不稳定，不稳定的火焰进一步加速变形，进而形成正反馈效应。在这种正反馈的作用下，湍流火焰从容器内喷射而出。此时火焰前锋面为毛刷状的蓝色火焰，主要是由轻质的低链碳氢化合物燃烧所形成，此阶段称为初级燃烧阶段[17]。

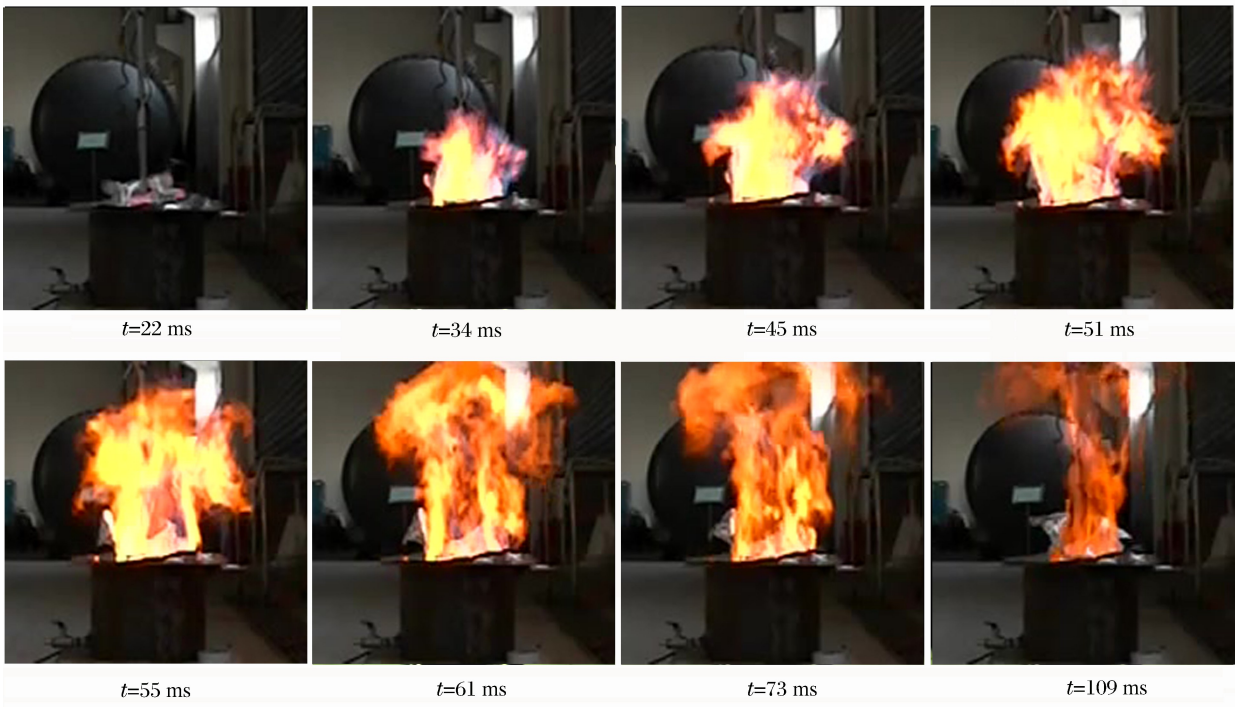

图 7 火焰形态变化

Fig. 7 Morphological changes of flame

火焰从破坏口泄出后快速膨胀和变形，使流场结构发生复杂变化，导致压力梯度和密度梯度斜交，产生漩涡并形成旋卷构造，称为斜压效应[16]。在湍流和斜压效应的影响下，火焰锋面发生剧烈的翻转和扭曲，火焰上半部沿水平方向拉伸，形成近似球状的火焰并有向蘑菇云状发展的趋势。在该过程中，火焰内出现亮黄色燃烧区，这是由于的 C2 基团和燃烧产物受热发光所导致，火焰颜色最终完全变为橙红色，此阶段称为过渡燃烧阶段[17]。

随着外部爆炸反应的进行，由于受到热浮力的推举作用应和斜压效应的翻转扭曲作用，火焰锋面进一步扩散，下半部火焰面面积变小，上半部火焰面进一步扩张，形成典型的蘑菇云状火焰，最大火焰高度为 0.8 m，最大火焰直径为 0.55 m。油气燃烧过程中形成的大量的 C2 活化基团进一步燃烧产生黄橙色火焰[17]，此阶段称为次级燃烧阶段。

当容器外部油气大部分反应，火焰亮度减弱，变为暗橙色。由于燃烧产物的膨胀做功，火焰面在保持燃烧的状态下进一步扩散变形，燃烧强度减弱，无法继续维持蘑菇云状火焰，并最终熄灭，此阶段称为变形溃散阶段。

3 结 论

构建顶部含弱约束结构的受限空间油气爆炸实验系统，并基于实验研究了油气在该空间中的爆炸特性，并与无约束条件下的爆炸特性进行对比，具体结论如下：

(1)内部超压变化受破膜泄流、外部爆炸、振荡流动、火焰扩展等多种机制控制，产生多个峰值，并伴有强烈的振荡；外部超压随着距离的增大而减小，沿竖直方向超压大于沿水平方向的超压。

(2)同无约束爆炸相比，当受限空间含有弱约束结构时，内外超压均增大，而达到最大超压的时间均延后，即弱约束结构对爆炸超压有增强效应，而对爆炸发展速率有滞后效应。

(3)初始油气体积分数对油气爆炸强度影响较大，随着初始油气体积分数的增加，爆炸超压先增大后减小，最大超压所对应的初始油气体积分数为 1.79%。

(4)火焰发展分为初级燃烧阶段、过渡燃烧阶段、次级燃烧阶段，其颜色变化为“蓝绿色-橙红色-黄橙色”。火焰传播过程中受到 Rayleigh-Taylor 不稳定、Helmholtz 不稳定、斜压效应的影响，发生剧烈的翻转和卷曲，形成蘑菇云状火焰，最大火焰直径为 0.55 m，最大火焰高度为 0.8 m。

参考文献：

[1] 曹凤霞. 爆炸综合毁伤效应研究[D]. 南京：南京理工大学，2008.

[2] 赵衡阳，王廷增，卢晓勇. 贮油罐的爆炸模拟试验[J]. 北京理工大学学报，1990，10(3)：16-21.
Zhao Hengyang, Wang Tingzeng, Lu Xiaoyong. Laboratory simulation of the explosion of large oil storage vessels [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 1990, 10(3): 16-21.

[3] 杜扬，蒋新生，钱海兵，等. 地下轻质油料储存库火灾模拟实验研究[J]. 油气储运，2002，21(4)：47-49.
Du Yang, Jiang Xinsheng, Qian Haibing, et al. The simulative experiment study on the fire of underground light oil storage[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2002, 21(4): 47-49.

[4] 陈思维，杜杨，王博. 油罐中油气爆炸规律研究[J]. 安全与环境学报，2007，7(3)：102-104.
Chen Siwei, Du Yang, Wang Bo. On regularity of likely explosion of oil-gas mixture in a simulated fuel tank[J]. Journal of Safety and Environment, 2007, 21(3): 7-9.

[5] 杜扬，杨小凤，蒋新生，等. 基于多种控制机理的湍流爆炸燃烧模型研究[J]. 工程热物理学报，2006，27(6)：1045-1047.
Du Yang, Yang Xiaofeng, Jiang Xinsheng, et al. Turbulence explosion combustion model study based multi-control mechanisms[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2006, 27(6): 1045-1047.

[6] Molkov V, Makarov D. LES modelling of an unconfined large-scale hydrogen-air deflagration[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39(18): 4366-4376.

[7] Qiao A, Zhang S. Advanced CFD modeling on vapor dispersion and vapor cloud explosion[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2010, 23(6): 843-848.

[8] Dadashzadeh M, Khan F, Hawboldt K, et al. An integrated approach for fire and explosion consequence modelling [J]. Fire Safety Journal, 2013, 61(5): 324-337.

[9] Pedersen H H, Tomlin G, Middha P, et al. Modelling large-scale vented gas explosions in a twin-compartment enclosure[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013, 26(6): 1604-1615.

[10] 丁宇奇，沙金成，刘巨保，等. 储罐内可燃气体燃烧引起的瞬时超压机理分析与动力学仿真计算[J]. 压力容器，2014，31(3)：20-27.
Ding Yuqi, Sha Jincheng, Liu Jubao, et al. Mechanism analysis of instantaneous overpressure caused by the combustion of combustible gas in tank and dynamics simulation[J]. Pressure Vessel Technology, 2014, 31(3): 20-27.

[11] 刘文辉，蒋新生，周建忠，等. 不同环境条件油气爆炸极限测试模拟实验系统[J]. 后勤工程学院学报，2013(06)：24-29.
Liu Wenhui, Jiang Xinsheng, Zhou Jianzhong, et al. Simulation experimental system for explosion limit measurement of gasoline-air mixture under different environmental conditions[J]. Journal of Logistical Engineering University, 2013, 29(6), 24-29.

[12] Guo J, Li Q, Chen D, et al. Effect of burst pressure on vented hydrogen-air explosion in a cylindrical vessel[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(19): 6478-6486.

[13] Kasmani R M, Andrews G E, Phylaktou H N. Experimental study on vented gas explosion in a cylindrical vessel with a vent duct[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2013, 91(4): 245-252.

[14] Fakandu B M, Andrews G E, Phylaktou H N. Vent burst pressure effects on vented gas explosion reduced pressure[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015,36(7):1-10.

[15] Chao J, Bauwens C R, Dorofeev S B. An analysis of peak overpressures in vented gaseous explosions[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2011,33(2):2367-2374.

[16] 姜孝海. 泄爆外流场的动力学机理研究[D]. 南京:南京理工大学,2004.

[17] Bai Chunhua, Gong Guangdong, Liu Qingming, et al. The explosion overpressure field and flame propagation of methane/air and methane/coal dust/air mixtures[J]. Safety Science, 2011,10(49):1349-1354.

Explosion of gasoline/air mixture in confined space with weakly constrained structure at the top

Du Yang, Wang Shimao, Qi Sheng, Wang Bo,
Li Yangchao, Li Guoqing
(*Department of Petroleum Supply Engineering, Logistical Engineering University of PLA, Chongqing* 401311, *China*)

Abstract: An experimental system of a confined space with a weakly constrained structure at the top was established. A series of gasoline/air mixture explosion experiments were conducted, and overpressure characteristics as well as flame behaviors were obtained. The results show that the internal overpressure exhibited a phenomenon of multi-peaks and pressure oscillations, induced by such factors as venting, external explosion, flame extension, etc. The value of the external overpressure decreased obviously with the increase of the distance from the weakly constrained structure, and the value along the vertical direction was larger than that along the horizontal direction. The impact of the weakly constrained structure was mainly reflected in the enhancement effect on the overpressure value and the lagging effect on the development rate of the explosion. The overpressure value showed the tendency to increase at first and then to decrease with the increase of the volume fraction of the gasoline/air vapor volume corresponding to the maximum overpressure, which is 1.79%. The flame propagation process involves three stages, i.e. stages of primary combustion, transitional combustion and secondary combustion. Affected by the Rayleigh instability, the Helmholtz instability and the baroclinic effect, the flame front was twisted and wrinkled, and the maximum height and maximum diameter were 0.80 and 0.55 m, respectively.

Keywords: mechanics of explosion; fuel/air mixture explosion; confined space; weak constraint; overpressure; flame;

(责任编辑 王易难)