DOI: 10.11883/bzycj-2015-0242 文章编号:1001-1455(2018)02-0465-08

含弱约束端面短管道油气爆炸特性实验研究*

杜 扬,王世茂,袁广强,齐 圣,王 波,李国庆,李阳超
(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: 构建了长径比为 4 的含弱约束端面的短管道实验系统,对短管道油气爆炸特性进行了实验研究,得到油气爆炸压力和火焰的变化规律。实验结果表明:(1)受破膜、泄流、外部爆炸等因素的影响,含弱约束端面短管道油气爆炸具有多个超压峰值,并产生 Helmholtz 振荡;(2)弱约束端面对管道内外爆炸超压均具有增强作用,内部最大超压为 24.23 kPa,外部最大超压为 5.45 kPa,分别为无约束条件下的 4.9 和 2.7 倍;(3)火焰变化过程可划分为"层流燃烧-突变加速-外部爆炸-衰弱熄灭"4 个阶段;由于湍流、界面不稳定、斜压效应等因素的影响,火焰在突变加速和外部爆炸两个阶段会发生剧烈的拉伸褶皱和卷曲变形,形成 Tulip 火焰和蘑菇云状火焰。(4)在层流燃烧阶段,弱约束端面对火焰速度有减弱作用,此阶段最大火焰速度为 3.5 m/s,相比于无约束时减弱了 41.3%;而在突变加速和外部爆炸阶段,弱约束端面破坏产生的强泄流对火焰传播速度有增强作用,此阶段最大火焰速度为 80.2 m/s,相比于无约束时增强了 106.2%。(5)不同初始油气浓度条件下火焰发展模式具有显著差异,在低浓度和中浓度条件下火焰能够冲出弱约束端面形成外部火球,而在高浓度条件下,火焰无法冲出管道。

关键词: 油气;短管道;弱约束;超压;火焰传播速度
中图分类号: O381 **国标学科代码:** 13035 **文献标志码:** A

近年来,发生于管道等受限空间中的可燃气体爆炸事故不断,造成严重的人员伤亡和财产损失。因此,诸多学者对狭长受限空间中的可燃气体爆炸特性进行了大量实验研究[1-8],其研究介质为瓦斯、氢气、丙烷、天然气等工业可燃气体,主要侧重点为受限空间中可燃气体的爆炸特性如超压、超压上升速率、火焰传播速度等。数值模拟方面,近年来各种计算模型被广泛应用于对受限空间中的可燃气体爆炸特性的计算,主要针对不同几何形状、不同初始条件下的可燃气体爆燃压力、火焰发展的计算[9-12]。上述研究表明现阶段研究方向集中于甲烷、氢气等工业可燃气体在受限空间中的爆炸特性,而对油气这种多分子复杂介质的研究相对欠缺,尤其是缺乏对含有弱约束端面管道中油气爆炸特性的研究。本文中以 93 号油气作为反应介质,研究含有弱约束端面短管道油气爆炸特性,并进行相应的机理分析。

1 实验系统与方案

1.1 实验系统

如图 1 所示,实验系统由长径比为 4 的一端开口的透明玻璃管道、参数测试系统、配气系统、点火系统、同步控制系统、高速摄像系统构成。玻璃管规格为 10 cm×10 cm×40 cm,采用强度 20 kPa 泄爆膜作为弱约束端面进行封口,当构造无约束工况条件时,利用强度为 0.3 kPa 的塑料膜封口,此时薄膜固有强度对爆炸的影响可忽略不计。管道内 P_1 点、管道外 P_2 点分别设一压力传感器,以测量爆炸压力,P_1 在管道内距底部 20 cm,P_2 位于管道外部中轴线上,距离开口端 20 cm;用高速摄影系统对火焰发展过程进行捕捉。

1.2 实验方案

根据已有的研究,93 号油气在常温常压条件下爆炸极限为 0.85%~3.1%[13],因此本文中采用体

* **收稿日期:** 2015-12-25; **修回日期:** 2016-10-03
基金项目: 国家自然科学基金项目(51276195,51704301);重庆市研究生科研创新项目(CYB17150)
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。

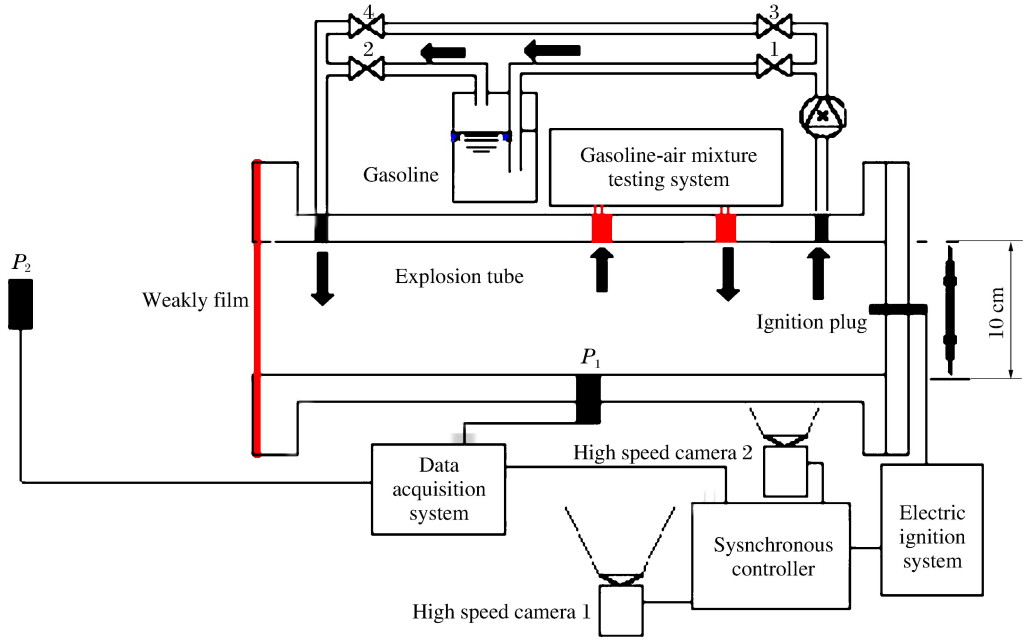


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Experimental system

积分数为 0.9%～3.15%的 93 号油气为实验介质，对含弱约束端面短管道油气爆炸特性进行研究。一方面测量管道内外的爆炸压力随时间的变化特性，另一方面使用高速摄影系统对不同初始油气浓度条件下火焰形态发展蔓延规律进行可视化研究，两部高速摄影仪分别用于拍摄火焰总体变化过程和点火初期火焰的局部细节变化过程。使用同步控制器实现对压力采集、高速摄影、点火激发的同步控制。

2 实验结果及讨论

2.1 油气爆炸超压特性变化规律

2.1.1 管道内部超压随时间的变化规律

图 2 反应了在含弱约束端面和无约束端面条件下管道内部测点 P_1 处的爆炸超压随时间的变化关系。可以看出，对于含有弱约束端面的短管道，其超压变化受多个机制控制，总体呈现为多峰值现象。

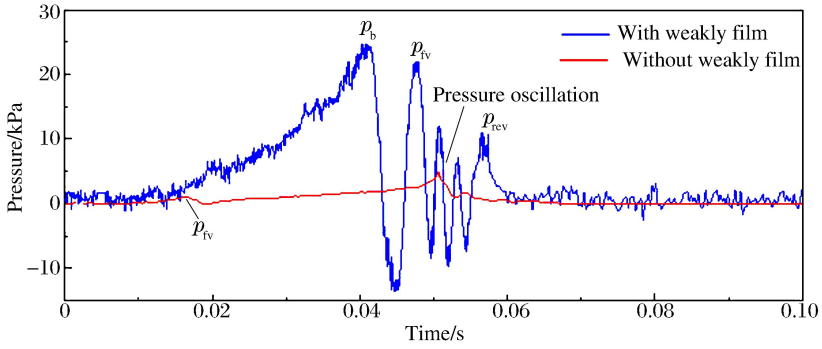


图 2 管道内部爆炸超压与时间的关系

Fig. 2 Relationship curves of time and internal overpressure

(1) 发展破坏阶段(0～0.042 s)：点火后，管道内压力上升，当压力上升至 24.23 kPa 时，泄爆膜破裂，大量未燃油气喷射泄出。在泄爆膜破裂前管道油气爆炸类型为定容爆炸，在泄爆膜破坏时形成第一个超压峰值 p_b。(2) 加速泄流及外部爆炸阶段(0.042～0.048 s)：当泄爆膜破裂后，压力瞬间泄放导致

管道内压力迅速降低。在超压的推动作用下，压缩的油气从管道内迅速喷出引发压力的升高，形成泄流冲击超压峰值 p_{fv}，同时高速运动的火焰射流将在极短时间内引燃泄放出的油气，云团内油气迅速燃烧也引起压力的急剧上升，诱导形成外部爆炸超压峰值 p_{ext}，且泄流冲击超压峰值和外部爆炸超压峰值出现合并，大小为 22.07 kPa。(3) 振荡波动阶段(0.048～0.057 s)：由于剧烈的热损失，已燃物的温度会有所下降，从而引发管道内压力下降；由于真空区的倒吸作用和外部爆炸的挤压作用，外部未燃的油气回流至管道内，回流油气与火焰锋面对撞产生剧烈的燃烧，火焰锋面进一步扩张，使得压力再次上升；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，形成一个周期性的往复振荡流动，管道变为典型的 Helmholtz 谐振腔，诱导产生峰值递减的振荡超压，称为 Helmholtz 振荡[14-15]。(4) 衰弱熄灭阶段(0.057～0.100 s)：由于管道内的油气被燃烧殆尽，导致高密度油气变为低密度燃烧产物，管道内形成负压真空，外部未燃尽的油气被倒吸至管道内，油气燃烧增强了体系内的湍流强度，形成超压 p_{rev}，大小为 6.71 kPa。

从图 2 中可以看出，与无约束条件下相比，含弱约束端面管道爆炸超压随时间的变化更为复杂和剧烈，出现部分峰值合并、强振荡等特点，二者的对比如表 1 所示。

表 1 管道内部爆炸特性对比

Table 1 Comparison of internal explosion characteristics

端部条件	p_b/kPa	p_{fv}/kPa	t_{fv}/s	p_{ext}/kPa	t_{ext}/s	p_{ref}/kPa	振荡期	Δt/s	T/s
有约束	24.23	22.07	0.047	22.07	0.047	6.71	有	0.009	0.003
无约束	—	1.28	0.016	4.97	0.051	—	无	—	—

注：p_b 为破膜超压峰值；p_{fv} 为泄流冲击超压峰值；t_{fv} 为泄流冲击超压峰值时刻；p_{ext} 为外部爆炸超压峰值；t_{ext} 为外部爆炸超压峰值时刻；p_{ref} 为回流燃烧超压；Δt 为震荡持续时间；T 为振荡周期。

当管道端面含有弱约束端面时，出现 3 个超压峰值，而无约束时，仅有 2 个超压峰值；说明弱约束端面的存在会诱导管道内部的超压发生剧烈的变化，主要体现在多超压峰值的出现和超压值的剧增：(1) 含有弱约束端面时，出现破膜超压 p_b 和反向燃烧超压 p_{rev}，而当无约束时，这 2 个超压值并未出现；(2) 含有弱约束端面时泄流超压 p_{fv} 为 13.70 kPa，外部爆炸超压 p_{ext} 为 22.07 kPa，分别是无约束条件下的 p_{fv} 的 17.24 倍和 p_{ext} 的 4.44 倍。

2.1.2 管道外部超压随时间的变化规律

图 3 为含弱约束端面和无约束条件下测点 P_2 的爆炸超压时程曲线。从图中可以看出，当管道含有弱约束端面时，P_2 测点第一个超压峰值 p_b 出现于 0.042 s，大小为 1.94 kPa，此超压峰值由端面泄爆膜破坏所产生；当破膜压缩波 p_b 通过 P_2 测点位置后，随后而来的稀疏波导致压力下降；当油气云团被喷射的火焰点燃，发生外部爆炸，导致压力上升，并于 0.048 s 时达到超压峰值 p_{ext}，大小为 5.45 kPa；外部爆炸结束后，由于受到振荡流动的影响，测点 P_2 处产生压力振荡，即 Helmholtz 振荡；随着油气的燃烧，振荡逐渐减小，并最终变为大气压强。

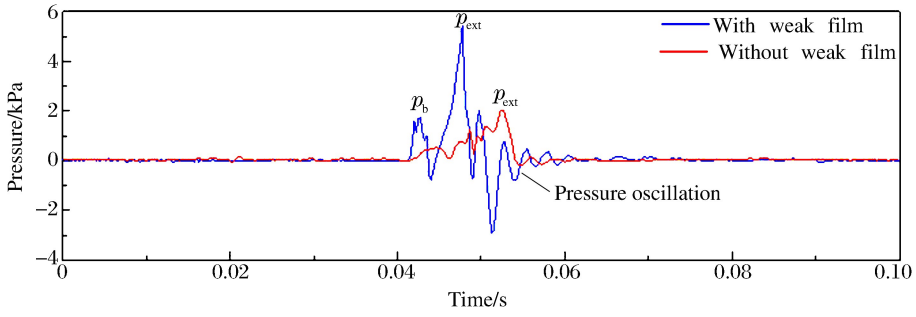


图 3 管道外部爆炸超压与时间的关系

Fig. 3 Relationship curves of time and external overpressure

同无约束端面的管道相比，含弱约束端面管道外部测点 P_2 的超压时序变化则相对复杂，二者对比如表 2 所示。从表 2 中可以看出，相对于无约束管道而言，含弱约束端面的管道外部测点有两个超压峰值，即破膜超压 p_b 和外部爆炸超压 p_{ext}，大小分别为 1.94 和 5.45 kPa，其中外部爆炸超压 p_{ext} 是无约束管道爆炸的 2.7 倍，这是由于弱约束端面破坏瞬间高度压缩的未燃油气大量泄出，形成高浓度高密度油气云团，引燃瞬间释放更多的能量，产生更大的超压值。

表 2 管道外部爆炸特性对比

Table 2 Comparison of external explosion characteristics

端部条件	p_b/kPa	p_{ext}/kPa	t_{ext}/s	振荡期	Δt/s	T/s
有约束	1.94	5.45	0.048	有	0.009	0.003
无约束	—	2.02	0.053	无	—	—

2.2 油气爆炸火焰特性变化规律

2.2.1 火焰形态发展变化的对比

图 4 为含弱约束端面条件下油气爆炸火焰发展时序图像。当油气被点燃后形成球状层流火焰(图 4(a))。当弱约束膜破坏瞬间，火焰前锋面加速变形，并向湍流火焰转变(图 4(b))。爆炸压力驱动产生强泄流效应，进而诱导使火焰形态发生剧烈变化，迅速变为倒“V”形 Tulip 火焰(图 4(c))。由界面稳定理论可知，燃烧产物组成的低密度介质向未燃高密度油气的加速是不稳定的，称为 Rayleigh-Taylor 不稳定；由于火焰的燃烧，火焰锋面前的气体受热膨胀，诱导火焰锋面变形并产生 Helmholtz 不稳定；当火焰加速喷出时，两种不稳定因素共同作用使火焰前锋面形态变为毛刷状(图 4(d))。随着外部未燃油气发生膨胀和变形，流场结构发生复杂变化，压力梯度和密度梯度不再平行，而是发生斜交，流场涡量发生变化，产生旋涡并形成旋卷构造，即斜压效应[16]；在湍流、不稳定因素、斜压效应的影响下，外部火焰锋面发生剧烈的翻转和扭曲，形成直径为 0.4 m 的蘑菇云状火焰(图 4(e))。当油气大部分反应，火焰变为暗橙色并逐渐消散，管道内仍保持燃烧状态；随着油气的燃尽，火焰逐渐熄灭(图 4(f))。

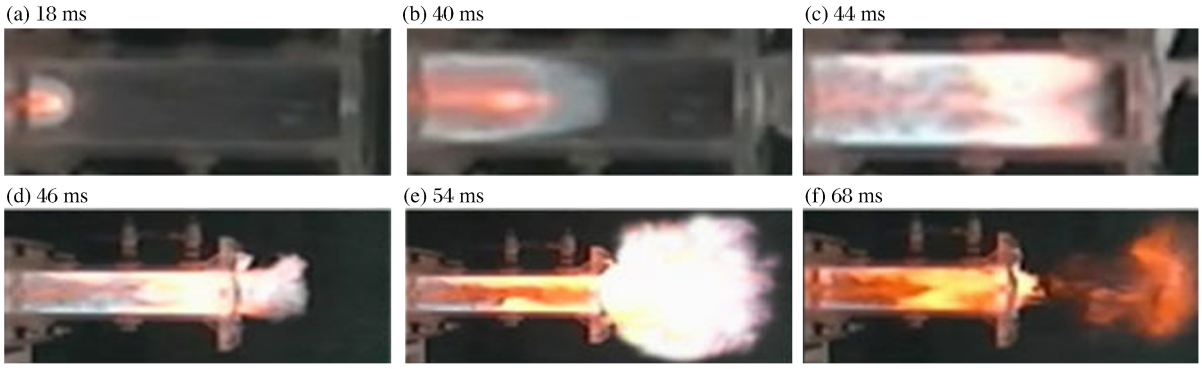


图 4 含弱约束端火焰形态变化规律

Fig. 4 Morphological changes of flame in the tube with a weakly confined face

图 5 为有无约束条件下油气爆炸火焰发展时序图像，从图 5(a)～(d)可以看出，当无约束时，火焰面始终保持半椭球状发展直至泄出，球状层流火焰面最大拉长至 0.4 m；另外，无约束条件下外部火焰未产生剧烈的形变，最大直径约为 0.2 m。这是由于无约束时整个爆炸过程中压力变化较小，没有产生强泄流效应，无法诱导产生较强的湍流、不稳定因素、斜压效应等影响火焰形态变化的因素。

2.2.2 火焰传播速度的对比

图 6 为含弱约束端面和无约束时，火焰速度随时间变化的关系。结合火焰速度变化趋势和火焰形态变化图像，将油气爆炸过程划分为 4 个阶段：层流燃烧期(阶段 A)、加速变形期(阶段 B)、外部爆炸期(阶段 C)、衰弱期(阶段 D)。在层流燃烧期(0～0.031 s)，火焰形态为半椭球形层流火焰，此阶段无约束

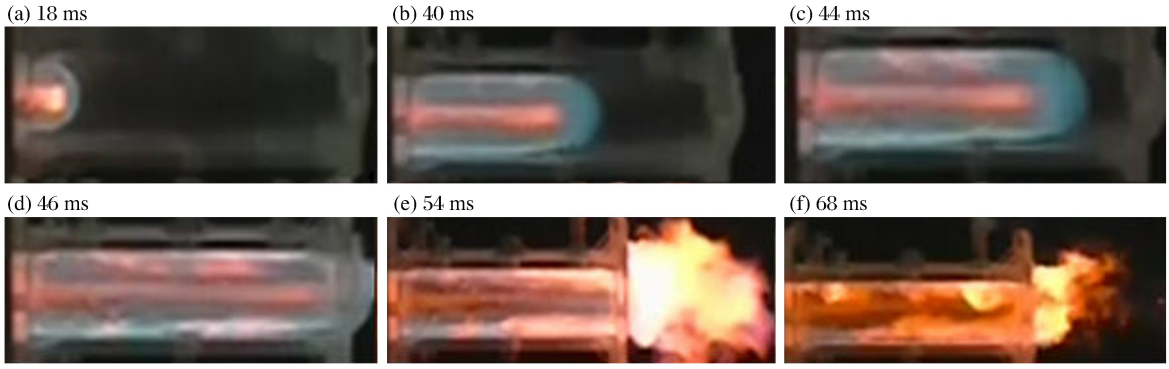


图 5　无约束火焰形态变化规律

Fig. 5　Morphological changes of flame in the tube without confined structure

条件下的火焰速度比弱约束端面条件下火焰速度较大，这是由于弱约束端面阻碍了层流火焰的传播速度，此阶段无约束管道和含弱约束端面管道的最大火焰速度为 5.95 和 3.5 m/s。在加速变形阶段(0.031～0.046 s)，对于无约束条件下的火焰传播，主要加速机制为火焰壁面接触引发的拉伸加速，因此火焰速度的上升相对平缓，最大火焰速度为 38.9 m/s；而对于含弱约束端面的管道而言，除了受到壁面加速的作用以外，还受到弱约束端面破坏引发的强泄流效应的加速作用，火焰速度的变化更剧烈，最大火焰速度为 80.2 m/s。在外部爆炸阶段(0.046～0.058 s)含弱约束端面管道火焰速度和无约束管道火焰速度均下降，相比无约束端管道而言，含弱约束端面管道火焰速度下降更快。在衰弱熄灭阶段(0.058～0.150 s)，二者的火焰速度变化无明显差别，这是由于管道内气体成分为低密度产物，负压也几乎相同，导致火焰锋面沿反向速度相同。

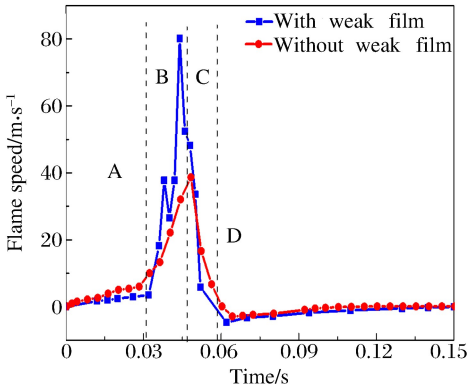


图 6　火焰速度随时间变化关系

Fig. 6　Variation of flame speed with time

2.3　不同初始油气浓度条件下火焰发展模式研究

图 7 给出了低、中、高 3 种不同初始油气浓度条件下，含弱约束端面短管道油气爆炸火焰形态变化发展模式，从图 7 可以看出，不同的初始油气浓度条件下，火焰发展规律具有显著的差异性。

图 7(a)为低油气浓度(C_{CH}=1.23%，C_{CH}为油气体积分数)条件下油气爆炸火焰发展特性，其火焰发展变化模式为“光滑球形层流火焰-Tulip 形火焰-外部射流火焰-衰弱熄灭”。点火后油气被引燃并形成高能着火点，着火点引燃附近的油气，形成具有光滑阵面的半椭球形层流火焰(18 ms)。当压力上升最终导致弱约束端面破裂，爆炸产生的内外压差诱导产生强泄流效应，进而产生 Rayleigh-Taylor 不稳定、Helmholtz 不稳定及湍流，使得火焰瞬间加速，加速变形的火焰更加不稳定，使得火焰锋面前面的气体也随之加速从而形成正反馈作用，火焰箱管道口喷射并产生剧烈变形，形成 Tulip 形火焰(54 ms)。由于初始油气浓度较小，因此泄放到外部的油气较少，火焰主要沿纵向分布，呈射流状火焰(60 ms)。随着油气燃烧反应的进行，管道内部高密度油气混合物变为低密度燃烧产物，使得内部压力降低形成负压，导致管道外部火焰逐渐衰弱(76 ms)。当管道内油气完全反应，火焰最终熄灭(98 ms)。

图 7(b)为中油气浓度(C_{CH}=1.85%)条件下油气爆炸火焰发展特性，其火焰发展变化模式为“鳞状褶皱球形层流火焰-Tulip 形火焰-蘑菇云状火焰-衰弱熄灭”。中浓度条件下，点火初期火焰锋面不再是光滑球形，而是带有明显的鳞状褶皱(24 ms)。当压力升高弱约束端面破裂，火焰阵面迅速变形拉伸，形成 Tulip 形状的火焰(44 ms)，并从管道端面加速喷出(58 ms)。外部未燃油气发生膨胀和变形，流场结构发生复杂变化，压力梯度和密度梯度不再平行，而是发生斜交，流场涡量发生变化，产生旋涡并形成旋

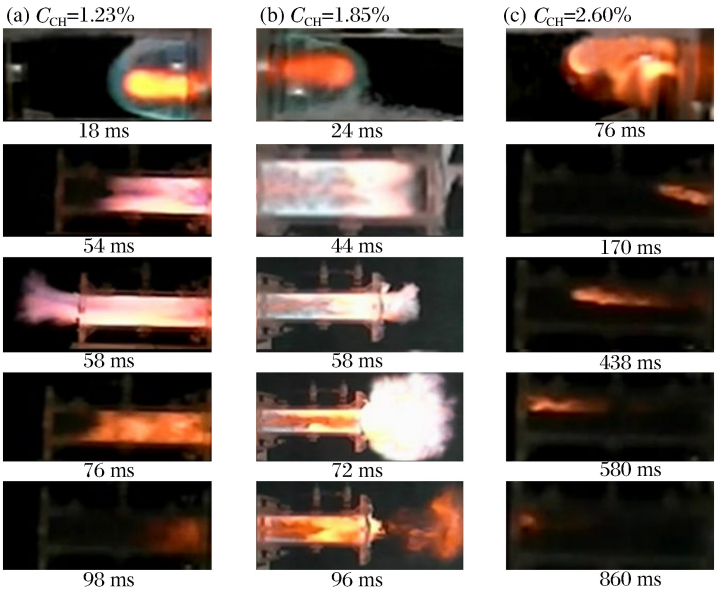


图 7 不同油气体积浓度下的油气爆燃火焰发展特性

Fig. 7 Flame development at different fuel-air mixture concentration

卷构造，即斜压效应[16]；在湍流、不稳定因素、斜压效应的影响下，外部火焰锋面发生翻转和扭曲，形成直径为 0.4 m 的蘑菇云状火焰(72 ms)。随着油气的逐渐减少，火焰逐渐衰弱熄灭(96 ms)。

图 7(c)为高油气浓度(C_{CH}=2.60%)条件下油气爆炸火焰发展特性，火焰发展变化模式为“絮状火焰-沿壁面蔓延燃烧-衰弱熄灭”。当 C_{CH}=2.60%时，火焰燃烧初期为缓慢发展的橙红色絮状火焰，呈现扩散燃烧的特点，火焰传播速度较慢(76 ms)。随着燃烧的进行，火焰沿管道顶部壁面向前扩展拉伸，并沿着壁面蔓延燃烧(170～580 ms)；随着容器内氧气不断消耗，火焰逐渐衰弱，范围减小，并最终熄灭(860 ms)。由于初始油气浓度较高，油气在燃烧过程中能量释放率低，弱约束端面未被破坏，呈封闭燃烧状态。

对比图 7(a)～(c)可以看出，弱约束端面短管道油气爆炸火焰发展的规律为封闭爆炸、开口泄爆、衰弱熄灭，据此可将爆炸分为 3 个阶段：封闭爆炸阶段、开口发展阶段、衰弱熄灭阶段。对不同初始油气浓度条件下油气爆炸火焰发展特性进行了总结，如表 3 所示。

表 3 不同油气体积分数下的油气爆燃火焰发展特性

Table 3 Flame development at different oil volume fraction

C_{CH}/%	火焰发展类型			C_{CH}/%	火焰发展类型		
	封闭爆炸阶段	开口发展阶段	衰弱阶段		封闭爆炸阶段	开口发展阶段	衰弱阶段
1.07	A	D	G	2.45	C	E	G
1.23	A	D	G	2.60	C	—	—
1.50	A	E	G	2.76	C	—	—
1.83	B	F	G	2.90	C	—	—
2.07	B	F	G	3.15	Null	Null	Null
2.20	B	E	G				

注：A-光滑椭球形层流火焰，B-鳞状褶皱椭球层流火焰，C-卷曲絮状火焰，D-射流火焰，E-球形火焰，F 蘑菇云状火焰，G-衰弱熄灭，Null-未燃

在点火初期，约束膜未被破坏，整个过程属于封闭受限空间的油气爆炸过程。根据已有的研究，可将封闭式受限空间油气爆炸的火焰发展形态划分为光滑球形火焰、鳞状褶皱火焰、絮状扩散火焰，火焰形态划分的临界体积分数分别为 1.76%和 2.37%[13]，该临界油气体积分数与表 3 封闭爆炸过程的火焰变化规律一致。C_{CH}<1.76%时，爆炸氧气含量相对充足，油气被点燃后，向各个方向的传播速度几

乎相等，形成光滑球形火焰；1.76%＜C_{CH}＜2.45%时，由于此时管道中的氧气不能足以使油气完全燃烧，从而导致火焰表面的燃烧反应类型不再均匀，进而导致不规则的变形，产生鳞状波纹；C_{CH}＞2.37%时，爆炸在严重贫氧条件下进行，倾向于发生析碳反应，反应速度较为缓慢，形成橙色卷曲絮状火焰。

当端面处约束膜破坏，油气泄放到管道外部，当浓度较低时（C_{CH}＜1.35%），容器外油气主要集中在纵向上，因此外部火焰主要为射流燃烧；随着浓度增大（1.35%＜C_{CH}＜1.83%），爆炸产生较大的压力，破膜后诱导产生更强的湍流和不稳定因素，并引发较强的斜压效应，火焰阵面发生翻转和扭曲，形成球状火焰；当浓度接近当量比（1.83%＜C_{CH}＜2.07%），爆炸强度最强，火焰进一步拉伸形成蘑菇云状火焰；当油气浓度较高时（2.07%＜C_{CH}＜2.60%），爆炸强度又开始减小，无法诱导形成蘑菇云状火焰，外部火焰形状又变为球形；随着油气浓度进一步增大（2.60%＜C_{CH}＜3.15%），属极度贫氧燃烧，无法达到泄爆膜的破坏压力，导致火焰无法冲出管道，最终形成封闭扩散式燃烧。

当大部分油气燃烧完毕，火焰开始衰弱，由于管道内氧气消耗殆尽，残余的燃烧产物密度较低，形成负压区，在负压区的倒吸作用下，火焰逐渐衰弱熄灭。当油气浓度较高时（C_{CH}＞2.60%），爆炸强度较小，端面薄膜未破裂，火焰保持封闭燃烧直至熄灭。

3　结　论

（1）含弱约束端管道内部超压变化受破膜、泄流、外部爆炸、振荡流动、火焰反向传播等多种机制控制，产生多个峰值，在爆炸过程中形成 Helmholtz 谐振腔，产生强烈的振荡；容器外部超压具有 2 个峰值，分别由破膜和外部爆炸所引起。（2）同无约束爆炸相比，含弱约束端管道内外爆炸超压均具有增强，管道内部最大超压为 24.23 kPa，外部最大超压为 5.45 kPa，分别为无约束条件下的 4.9 倍和 2.7 倍。（3）火焰变化过程可划分为“层流燃烧-突变加速-外部爆炸-衰弱熄灭”4 个阶段；对于含有弱约束端的管道，由于受泄流诱导的湍流、界面不稳定、斜压效应等因素的影响，火焰发生剧烈的拉伸褶皱和卷曲变形，形成 Tulip 火焰和球状火焰。（4）在层流燃烧阶段，弱约束端对火焰速度有减弱作用，此阶段最大速度为 3.5 m/s，相比于无约束时减弱了 41.3%；而在突变加速和外部爆炸阶段，弱约束端破坏产生的强泄流对火焰传播速度有增强作用，此阶段最大速度为 80.2 m/s，相比于无约束时增强了 106.2%。（5）含弱结构端面狭长受限空间油气爆炸过程可分为 3 个阶段：封闭爆炸阶段、开口发展阶段、衰弱熄灭阶段。爆炸过程中火焰发展模式受到初始油气浓度的制约，不同初始油气浓度条件下，爆炸火焰的发展模式具有明显差异。

参考文献：

[1] 王引群. 矿井瓦斯爆炸火焰传播试验研究[J]. 山西煤炭，2012(9)：52-53.
WANG Yinqun. Experimental study on flame propagation of gas explosion in mines[J]. Shanxi Coal，2012(9)：52-53.

[2] 温小萍，武建军，解茂昭. 瓦斯爆炸火焰结构与压力波的耦合规律[J]. 化工学报，2013(10)：3871-3877.
WEN Xiaoping，WU Jianjun，XIE Maozhao. Coupled relationship between flame structure and pressure wave of gas explosion[J]. CIESC Journal，2013(10)：3871-3877.

[3] CAO W，Gao W，LIANG J，et al. Flame-propagation behavior and a dynamic model for the thermal-radiation effects in coal-dust explosions[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries，2014，29(1)：65-71.

[4] KIM W K，MOGI T，DOBASHI R. Flame acceleration in unconfined hydrogen/air deflagrations using infrared photography[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries，2013，26(6)：1501-1505.

[5] NISHIMURA I，MOGI T，DOBASHI R. Simple method for predicting pressure behavior during gas explosions in confined spaces considering flame instabilities[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries，2013，26(2)：351-354.

[6] SNOEYS J，GOING J E，TAVEAU J M R. Advances in dust explosion protection techniques：flameless venting[J]. Procedia Engineering，2012，45(3)：403-413.

[7] YAN X，YU J，GAO W. Flame behaviors and pressure characteristics of vented dust explosions at elevated static activation overpressures[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries，2015，33：101-108.

[8] TOMLIN G, JOHNSON D M, CRONIN P, et al. The effect of vent size and congestion in large-scale vented natural gas/air explosions[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015,35:169-181.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 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.

[12] TOMIZUKA T, KUWANA K, SHIMIZU K, et al. Estimation of turbulent flame speed during DME/air premixed gaseous explosions[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013,26(2):369-373.

[13] 齐圣.受限空间油气爆燃及其细水雾抑制实验研究与数值仿真[D].重庆:解放军后勤工程学院,2014.

[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: 429-438.

[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.

Experimental study of fuel-air mixture explosion characteristics in the short pipe containing weakly confined face at the end

DU Yang, WANG Shimao, YUAN Guangqiang,
QI Sheng, WANG Bo, LI Guoqing, LI Yangchao
(*Department of Petroleum Supply Engineering, Logistic Engineering University of PLA, Chongqing* 401311, *China*)

Abstract: In this paper, we studied the characteristics of the fuel-air mixture explosion using an experiment system built in a short pipe containing a weakly confined face at the end, with the following results achieved. (1) Multiple pressure peaks were observed due to the rupture, discharge, external explosion, accompanied with the Helmholtz oscillation. (2) The constraint surface produced a strengthening effect on the explosion overpressure, the maximum internal overpressure being 24.23 kPa and the maximum external overpressure being 5.45 kPa, respectively 4.9 and 2.7 times that of the pressure as compared in an unconstrained structure. (3) The morphological changes of the flame can be divided into four stages, those of the laminar combustion, the mutation and acceleration, the external explosion, and the extinction. Due to the influence of such factors as turbulence, interface instability and baroclinic effects, the flame shape was folded and crimped, forming a tulip during the mutation and acceleration stage and a sphere during the external explosion stage. (4) During the laminar combustion stage, the weakly confined face had a lessening effect on the flame speed, with 3.5 m/s as its maximum, which is reduced by 41.3%. In the states of mutation-acceleration and external explosion, the destruction of the confined surface had a strengthening effect on the flame speed, with 80.2 m/s as its maximum, which is enhanced by 106.2%. (5) The flame development made a significant difference at different concentrations. The flame can break through the weak confinement and form an external explosion at low and medium concentration, while at high concentration, the flame was unable to do so.

Keywords: fuel-gas mixture; short pipe; weakly confined film; overpressure; flame propagation speed

(责任编辑 王小飞)