DOI: 10.11883/1001-1455(2016)06-0832-07

受限空间油气爆燃火焰形态*

齐 圣,杜 扬,梁建军,张培理
(后勤工程学院军事供油工程系,重庆 401311)

摘要:通过受限空间油气爆燃可视化实验发现,在不同初始油气体积分数下,爆燃火焰呈现出不同的表观特征,据此提出了受限空间油气爆燃的 3 种火焰形态,即光滑球形火焰、褶皱球形火焰和卷曲絮状火焰。分析了 3 种火焰形态的形成机理,并通过实验观测与理论分析,给出了区分 3 种火焰形态的临界条件。结合实验中采集到的关键参数,总结了不同的火焰形态下受限空间油气爆燃的反应产物、最大压力、升压速率、反应时间、火焰强度等关键参数的特征与变化规律。

关键词:爆炸力学;火焰形态;爆燃;油气;受限空间
中图分类号:O354.1 **国标学科代码**:1303510 **文献标志码**:A

油气是生产、生活中必不可少的能源物质,也是典型的易燃易爆物。如何在油气储存、运输、使用的过程中预防或控制火灾、爆炸事故的发生,是被长期关注的问题。油气火灾爆炸事故发生的初始阶段,通常体现为局部油蒸汽-空气混合气着火,发生以亚音速传播、并伴随有压力波的燃烧反应(即爆燃)[1-2],而这个阶段,正是采取有效抑制措施、防止事故扩大的关键阶段[3]。

火焰的形成是可燃混合气爆燃过程的典型外部特征之一,火焰形态即是灾害预警、燃烧模式识别的重要依据,也是探索爆燃发展支配机理、变化规律与分析模型的重要资料。针对燃烧爆炸过程的火焰形态,有了广泛的研究。A. Yoshida 等[4]通过火焰图像观察了未燃气体中的湍流尺度对预混火焰褶皱尺度的影响,K. H. Oh 等[5]基于火焰形态分析了障碍物对液化石油气爆炸火焰传播的影响。P. Zhang 等[6]对坑道内的油气爆燃进行了实验研究,采集了爆燃火焰传播过程中局部的火焰图像,但未对火焰的形态结构进行探讨。M. Zhang 等[7]研究了在开敞空间 $CO/H_2/O_2/CO_2$ 混合气湍流预混火焰的火焰锋面结构,测量了火焰厚度、平均火焰体积等参数,并指出具有褶皱的火焰锋面是湍流预混火焰的普遍特征。S. Jerzembeck 等[8]指出,在高于当量浓度时,爆燃火焰会产生褶皱和胞状结构,但他们专注于火焰速度的测量,并未针对火焰特征进行详细阐述。

本文中,基于油气爆燃可视化实验,提出受限空间油气爆燃的 3 种火焰形态,定量给出区分不同火焰形态的临界判据,分析不同火焰形态的产生机理,并探讨不同火焰形态下油气爆燃特征参数的差异。

1 实验系统

图 1 为实验系统示意图,实验台架主体为四周密闭、水平放置的长方体,内部尺寸为 500 mm×200 mm×200 mm,正面设有可视化窗口,上加装钢化玻璃。实验台架顶板设置传感器接口,与压力传感器、火焰强度传感器连接,通过数据采集系统实时记录油气爆燃过程中的瞬时压力与火焰亮度变化;底板中央布置点火装置,点火头伸入实验台架内部 50 mm,点火电平为 1 500 V,点火能为 3 J。压力与火焰数据的采集采用成都泰斯特电子信息有限责任公司的 TST6300 多用动态信号测试仪。采用自制的雾化装置(包括变径管和油瓶)将油气混入空气中形成可燃混合气。混合气组分的测定采用北京均方理化科技研究所的 GXH-1050 型红外线分析仪。图像采集采用日本 Photron 公司的 FAST CAM Ultima 512 型高速摄影仪。实验所用油品为中石化 93 号汽油。

* **收稿日期**:2015-04-16;**修回日期**:2015-06-26
基金项目:国家自然科学基金项目(51276195)
第一作者:齐 圣(1990—),男,博士研究生,qscups@163.com。

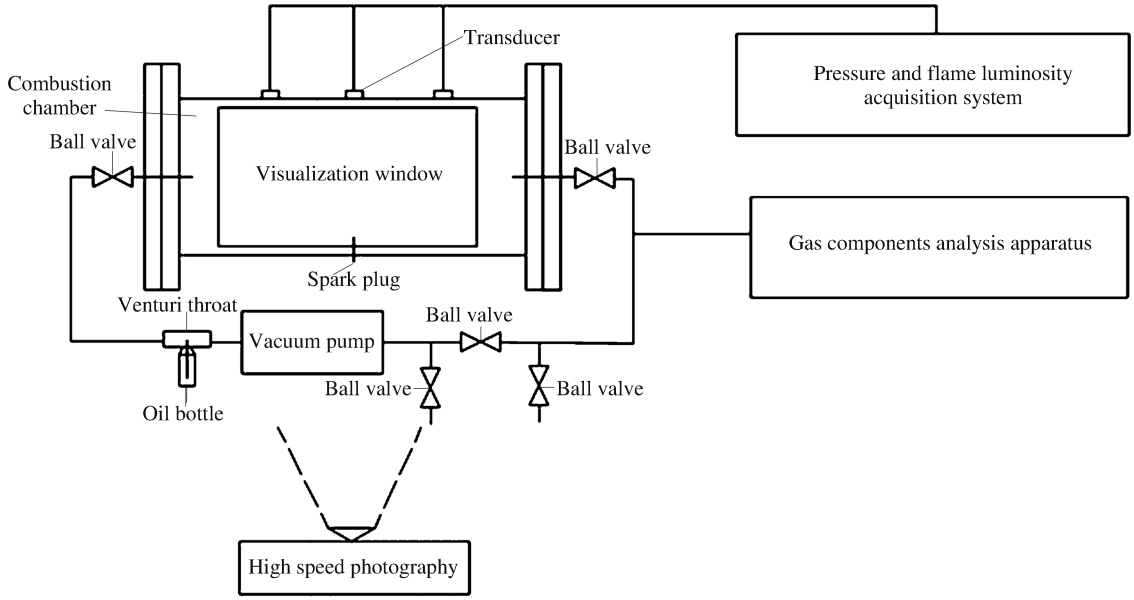

图 1　油气爆燃实验系统

Fig. 1　Gasoline-air mixture deflagration experimental system

2　不同油气浓度下油气爆燃火焰形态

图 2 为油气浓度(混合气中碳氢化合物的体积分数)$Y_{CH}=1.50\%$时油气爆燃火焰的时序图像，拍摄频率为 250 s^{-1}，图中可视化窗口的实际尺寸为 300 mm×200 mm，中部下方黑色柱状体为点火头，点火位置即位于其尖端。当 $t=0$ 时，点火器启动，电火花释放出的能量在它附近形成高能点火气云，并引燃周围可燃气，形成光滑的淡蓝色椭球形火焰锋面(8～12 ms)。之后，反应区迅速扩大(12～21 ms)，此时的火焰形态类似于层流预混火焰，但通过火焰传播至容器边缘所用的时间可以估算，其火焰速度高于层流预混火焰[1]一个数量级。火焰到达容器壁面(28 ms)后，反应区内发出亮白色光(34～42 ms)，直至火焰完全熄灭。

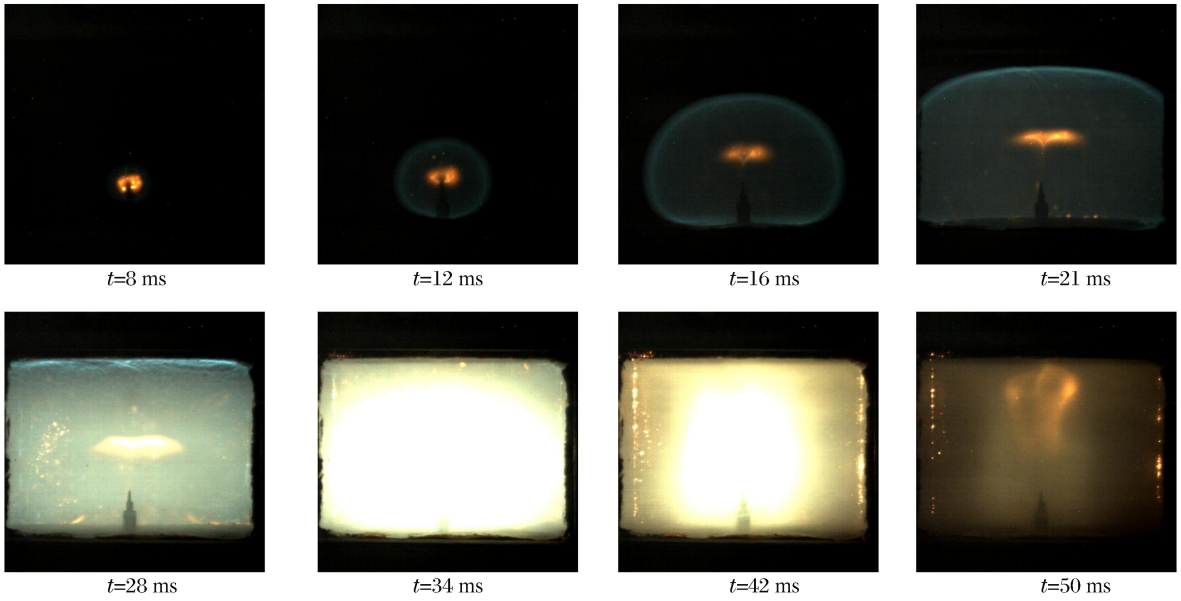

图 2　油气爆燃火焰时序图像($Y_{CH}=1.50\%$)

Fig. 2　Instantaneous images of gasoline-air mixture deflagration

图 3 为 $Y_{CH}=2.33\%$时的油气爆燃过程。点火初期(8 ms),点火点附近可见与图 2 类似的点火气云和球形火焰锋面,但随着反应的传播,火焰不断产生褶皱(18～32 ms),火焰锋面表面可见凹凸不平的鱼鳞状波纹(37 ms)。在火焰传播过程中,反应区中下方可观察到细小的黄色次生火焰点(26～37 ms)。火焰锋面到达容器边界后,除部分凝结在壁面上的组分仍在燃烧,整个反应区呈现暗黄色,直至反应完全熄灭。

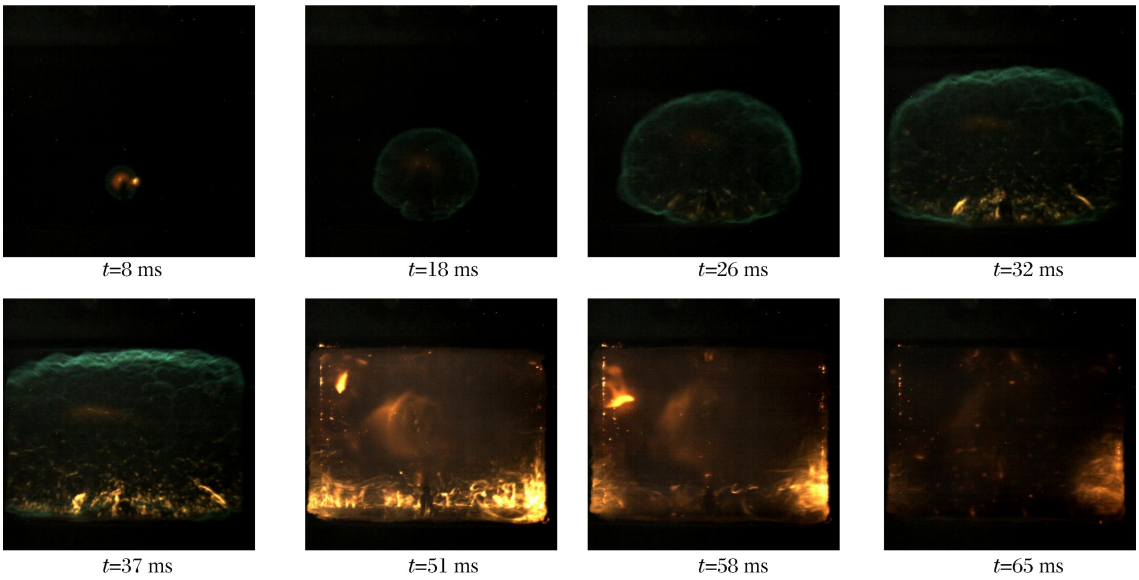

图 3 油气爆燃火焰时序图像($Y_{CH}=2.33\%$)

Fig. 3 Instantaneous images of gasoline-air mixture deflagration

图 4 为 $Y_{CH}=2.90\%$时的油气爆燃过程。与图 2～3 比较,图 4 中观察不到鲜明的火焰包络面,反应区为卷曲的絮状黄白色火焰。由于此时油气浓度较高,氧气相对不足,爆燃反应相对缓慢,火焰传播速度取决于传质速度,因而更多的体现出扩散燃烧的特征。混合气被点燃(8 ms)后,火焰首先向上方蔓延(32 ms),并形成一条条火焰束,顶部弯向四周未燃区域(53～68 ms)。随着反应的进行,火焰束在容器中上方交织,形成亮白色反应区,并最终扩散到整个容器。之后,火焰自上而下逐渐熄灭。

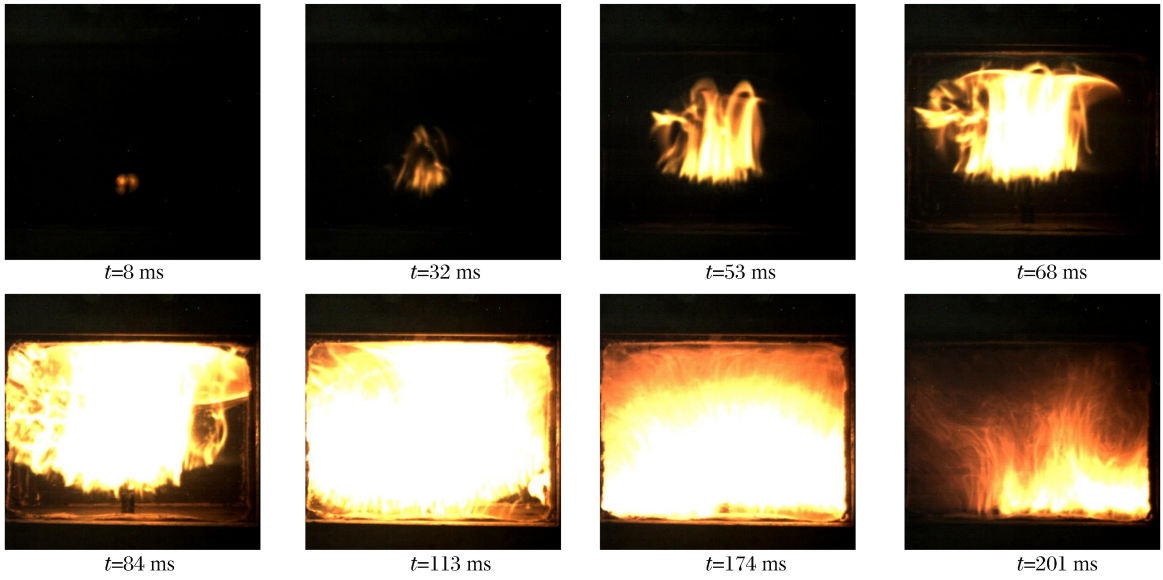

图 4 油气爆燃火焰时序图像($Y_{CH}=2.90\%$)

Fig. 4 Instantaneous images of gasoline-air mixture deflagration

3　3 种典型火焰形态的临界条件与形成机理

对比图 2～4 可以看出，不同浓度下的油气爆燃火焰形态具有显著的差异，然而，在一定的浓度变化范围内，火焰形态又具有一定的相似性。图 5 给出了 6 个不同浓度下爆燃反应的典型火焰图像，可以看出，每列上下两幅图中火焰形态比较相似，而列与列之间的火焰形态则有明显区别。具体而言，从左第 1 列火焰锋面的形状为光滑的球面（图片中呈弧形），整个流场被火焰锋面清晰地分为已燃区和未燃区，这类火焰称为光滑球形火焰。第 2 列中，流场仍然被火焰锋面区分为已燃区和未燃区，但火焰锋面并不光滑，而是呈带有明显褶皱的球面，存在大量火焰褶皱形成的鱼鳞状波纹，这类称为褶皱球形火焰。第 3 列中，已观察不到鲜明的火焰包络面，火焰以絮状传播并向四周弯曲，这类称为卷曲絮状火焰。

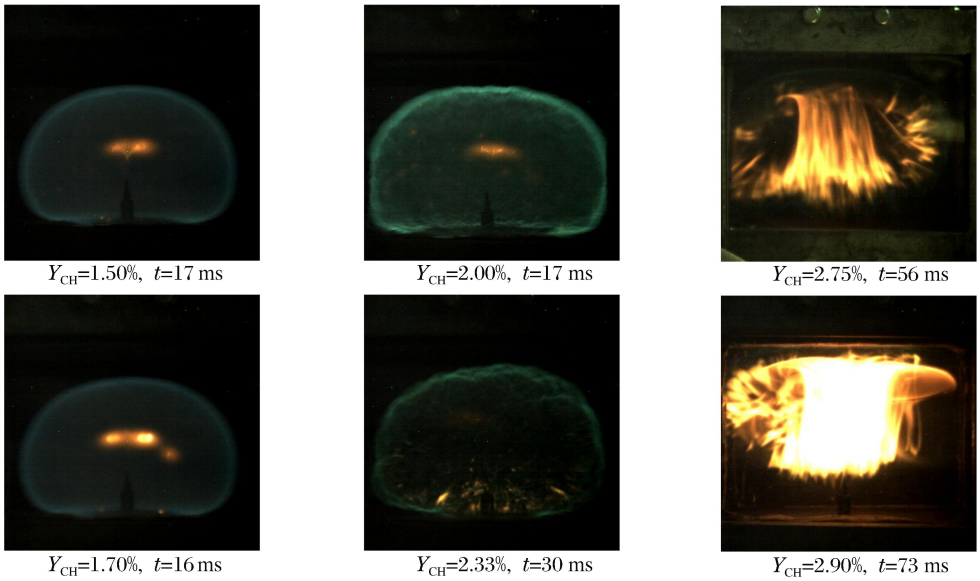

图 5　不同浓度油气爆燃的典型火焰图像

Fig. 5　Three typical flame models of gasoline-air mixture deflagration

进一步的实验从低于爆炸下限的浓度开始，逐步提高油气浓度，并观察其火焰特征、归纳火焰形态，直至浓度高于爆炸上限。结果为：当 $Y_{CH}=1.20\%$，1.48%，1.50%，1.65%，1.70%时，为光滑球形火焰；当 $Y_{CH}=2.00\%$，2.15%，2.33%时，为褶皱球形火焰；当 $Y_{CH}=2.75\%$，2.90%，3.25%时，为卷曲絮状火焰；当 $Y_{CH}=0.95\%$，3.70%时，未点燃。可见，在爆炸极限范围内，不同浓度的油气爆燃火焰可概括为上述 3 种模式：油气浓度低于 1.70%时，为光滑球形火焰；油气浓度在 2.00%～2.33%之间时，为褶皱球形火焰；在油气浓度大于 2.75%时，为卷曲絮状火焰。

3 种火焰形态对应着 3 个油气浓度区间，而划分 3 个区间的临界浓度，可以从油气燃烧的化学当量进行理论分析。由于汽油是由近百种烃类组成的复杂混合物，难以确定具体的化学组分，通常的方法是采用异辛烷、PRF（primary reference fuel）[8] 等与汽油燃烧特性近似、且具有确定化学组分的化合物或简单混合物作为替代燃料。以异辛烷为例，根据化学反应方程式可以计算：它在空气中恰好完全燃烧，生成产物完全为 CO_2 和 H_2O 时，对应的体积浓度为 1.68%（取空气中氧浓度为 21%）；生成产物完全为 CO 和 H_2O 时，对应的体积浓度为 2.47%。这两个浓度与上述火焰形态发生变化的临界油气体积分数相近。通常定义燃料的实际浓度与其当量浓度的比为燃料当量比 φ，根据上文的讨论，对于油气，取临界当量比 $\varphi_{CH,1}=1$、$\varphi_{CH,2}=2.47/1.68=1.47$。

当 $\varphi<1$ 时，爆燃在富氧条件下进行，混合气被点燃后，由于混合气中氧含量充足，火焰不受氧化剂浓度的制约，向各个方向的传播速度相等；同时，油气浓度较低，反应较弱，对流场的扰动相对较小，因此形成了光滑的球形火焰。当 $1<\varphi<1.47$ 时，爆燃在贫氧条件下进行，由于局部耗/含氧量的不均匀，反

应进度在空间上出现差异，火焰锋面不再光滑；同时，油气浓度的增加使反应更剧烈，湍流作用进一步加剧了火焰面的形变，因此形成了褶皱球形火焰。S. Jerzembeck 等[8]针对合成气的研究指出：在低于当量浓度时，湍流预混火焰表面是光滑的，而在等于和略大于当量浓度时，合成气湍流预混火焰在点燃后将迅速出现褶皱和胞状结构。本文中所得结果与此一致。当 $\varphi>1.47$ 时：爆燃在严重贫氧条件下进行，倾向于发生析碳反应，即 $C_mH_{2n}\rightarrow mC+nH_2$，点火头最初的点火能激发了周边的可燃气，释放能量并形成高能活性基团；由于氧气严重不足，反应速度较缓慢，反应区气体升温后，向混合气上方对流，处于其中的剩余可燃气则与上方的氧气混合，继续进行反应；当正上方的氧气不足时，还原性基团向侧上方“寻氧”。这样，就形成了卷曲絮状火焰。

4 火焰形态与爆燃关键参数的关系

图 6 为燃烧产物与油气当量比的关系。可以看出，在不同的火焰形态下，油气爆燃的产物组成显著不同，具体如下。

(1)当 $\varphi\approx0.7$ 时，油气相对含量较少，燃烧几乎不产生 CO，O_2 大量剩余。之后，当 $\varphi<1$ 时，随着油气浓度增加，可燃混合气中的碳元素总量增加，O_2 仍然富余，生成越来越多的 CO_2；同时，燃烧的不完全程度增加，燃烧产物中的 CO 含量持续上升。

(2)当 $1<\varphi<1.47$ 时，随着可燃物增加，反应速度加剧，加之湍流混合作用变得显著，导致了局部混合气的反应并不充分，O_2 剩余量增加；随着 φ 的增大，产物中 CO 含量不断上升，CO_2 含量不断下降，这是因为空气含氧量是有限的，油气的增加使得更多的碳不能被充分氧化。应当考虑到，由于 O_2 的大量剩余，在此阶段油气组分的析碳反应已经出现，并相应的随着 φ 的增大，将生成更多的碳颗粒。

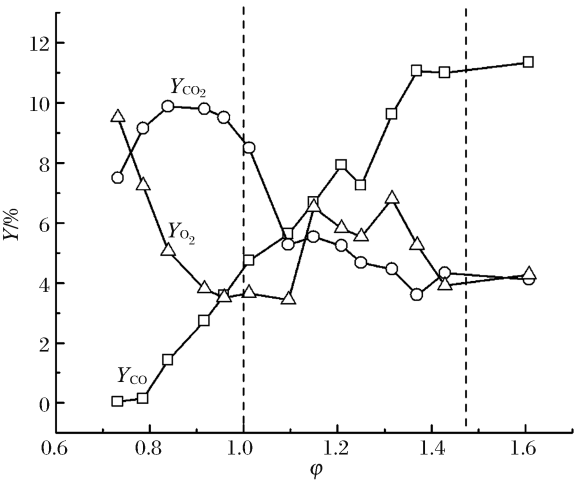

图 6 不同油气当量比下的反应产物

Fig. 6 Reaction product fue at different equivalence ratio

(3)当 $\varphi>1.47$ 时，反应产物中 CO 与 CO_2 几乎不再变化，这是因为此时氧含量已经严重不足，更多的可燃物只能发生析碳反应，生成更多的碳颗粒。而由于化学反应链竞争的存在，总有部分 CO 基团能够成功捕获 O，生成一定的 CO_2；产生的碳颗粒也可能继续与 O_2 发生反应，延长了反应的时间，也使得 O_2 进一步被消耗。

图 7 为爆燃升压速率 $\dot{p}$、最大火焰强度 I 与油气当量比的关系，并通过两个临界当量比(图中虚线)区分了不同火焰形态。当 $\varphi<1$ 时，由于氧含量充足，油气浓度提高增加了可燃混合气中可燃物含量，使单位时间内参与燃烧反应的活性物质数量增加，火焰强度与升压速率因而增大。当 $1<\varphi<1.47$ 时，在油气适度过量的情况下，少部分油气与氧气反应生成 CO，加速了反应进程，但在相同耗氧量下降低了释放出的总能量，因此升压速率增加，而火焰强度减弱。W. K. Kim 等[9]的研究表明，富燃气条件下湍流混合作用将引起火焰褶皱加速，反应速度将大于富氧条件。本文中所得结果与此一致。当 $\varphi>1.47$ 时，随着油气的进一步增加，氧含量相对不足，析碳反应产生的碳颗粒 O_2 的反应延长了总反应时间，大幅降低了升压速率，却促进了氧气的充分燃烧，增加了空间内的热量积累，从而使得火焰强度增强。

图 8 为爆燃压力峰值 p_m、火焰持续时间 τ 与油气当量比的关系。可以看出，压力峰值随油气当量比的增大呈先增后减的变化规律，这与升压速率的变化是一致的。同时，火焰持续时间随油气当量比的增大呈先减后增的变化规律，即：在油气浓度略高于当量浓度的褶皱球形火焰形态下，爆燃反应速率最快，破坏性也最强。C. Tang 等[10]针对天然气的研究指出，当可燃气当量比为 1.1 时，火焰持续时间最短，压力峰值最大。本文中数据与此十分接近。

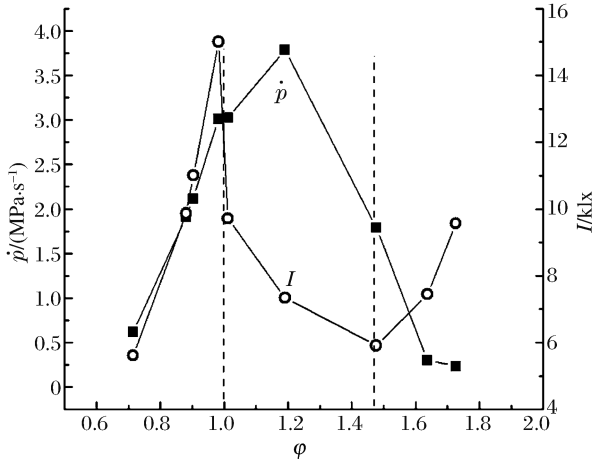

图 7　不同油气当量比下的最大火焰强度与升压速率

Fig. 7　Maximum flame intensity and rate of pressure rise under different equivalence ratio

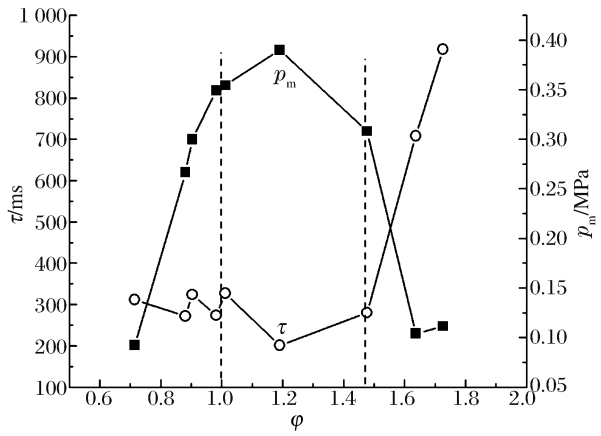

图 8　不同油气当量比下的火焰持续时间与最大压力

Fig. 8　Duration of flame and maximum pressure under different equivalence ratio

然而，从图 5 中可以看出，当 $\varphi>1.6$ 时，火焰持续时间（约 600～900 ms）远大于 $\varphi<1$ 时（约 250～400 ms）。这点本文中结果与文献[10]的研究结果并不一致。这主要原因是：相对于文献[10]中的天然气，油气中重质成分含量更多，燃烧反应需要经过更多的步骤，反应速度受贫氧条件的制约更显著。

图 6～8 说明，火焰形态与油气爆燃的反应产物、升压速率、火焰强度、压力峰值、火焰持续时间等诸多关键参数密切相关，在火焰形态发生变化的临界油气当量比前后，上述参数随当量比的变化关系往往发生改变。对 3 种典型火焰形态下的油气爆燃特征进行了汇总，见表 1。

表 1　3 种典型火焰形态下的油气爆燃特征变化规律

Table 1　Gasoline-air mixture deflagration characteristics of three different flame patterns

爆燃参数	光滑球形火焰	褶皱球形火焰	卷曲絮状火焰
φ	<1	$1\sim1.47$	>1.47
Y_{CO}	增加	增加	最大
Y_{CO_2}	增加后减小	减小	最小
Y_{O_2}	减小	增加后减小	最小
I	增加	减小	增加
$\dot{p}$	增加	最大	减小
τ	减小	最小	增加
p_m	增加	最大	减小

注：增加或减小均指随初始油气体积分数增加而发生的变化。

5　结　论

通过受限空间油气爆燃可视化实验研究，提出了受限空间油气爆燃的 3 种火焰形态，通过实验数据与理论计算给出了区分不同火焰形态的临界判据，分析了 3 种火焰形态产生的机理，并探讨了 3 种火焰形态下油气爆燃特征参数的差异。主要结论如下。

（1）初始油气体积分数的不同，使油气爆燃体现出 3 种典型的火焰形态，即光滑球形火焰、褶皱球形火焰和卷曲絮状火焰，不同火焰形态的形成源自于油气与空气不同配比下燃烧反应机理的差异。

（2）临界油气当量比 $\varphi_{CH,1}=1$、$\varphi_{CH,2}=1.47$，可作为 3 种火焰类型的划分依据。

（3）火焰形态与油气爆燃的关键参数密切相关：对光滑球形火焰，最大火焰强度、升压速率和最大压力随当量比的增加而增加，火焰持续时间随当量比的增加而减小；对褶皱球形火焰，最大火焰强度随当量比的增加而减小，升压速率和最大压力达到其最大值，而火焰持续时间达到最小值；对卷曲絮状火焰，最大火焰强度和火焰持续时间随当量比的增加而增加，升压速率和最大压力随当量比的增加而减小。

参考文献：

[1]　Kuo K K. Principles of combustion[M]. John Wiley & Sons, 2005.

[2] Turns S R. An introduction to combustion: Concepts and applications[M]. McGrw-Hill Companies, 2000.
[3] 杜扬. 油料火灾科学导论[M]. 北京:中国石化出版社,2010.
[4] Yoshida A, Tsuji H. Characteristic scale of wrinkles in turbulent premixed flames[C]// Symposium (International) on Combustion. Elsevier, 1982:403-411.
[5] Oh K H, Kim H, Kim J B, et al. A study on the obstacle-induced variation of the gas explosion characteristics[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2001,14(6):597-602.
[6] Zhang P, Du Y, Zhou Y, et al. Explosions of gasoline-air mixture in the tunnels containing branch configuration [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2013,26(6):1279-1284.
[7] Zhang M, Wang J, Wu J, et al. Flame front structure of turbulent premixed flames of syngas oxyfuel mixtures[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014,39(10):5176-5185.
[8] Jerzembeck S, Peters N, Pepiot-Desjardins P, et al. Laminar burning velocities at high pressure for primary reference fuels and gasoline: Experimental and numerical investigation[J]. Combustion and Flame, 2009,156(2):292-301.
[9] Kim W K, Mogi T, Dobashi R. Effect of propagation behaviour of expanding spherical flames on the blast wave generated during unconfined gas explosions[J]. Fuel, 2014,128(14):396-403.
[10] Tang C, Zhang S, Si Z, et al. High methane natural gas/air explosion characteristics in confined vessel[J]. Journal of Hazardous Materials, 2014,278:520-528.

Flame patterns of gasoline-air mixture deflagration in a confined space

Qi Sheng, Du Yang, Liang Jianjun, Zhang Peili
(*Department of Petroleum Supply Engineering, Logistical Engineering University, Chongqing* 401331, *China*)

Abstract: In order to investigate the flame characteristics of gasoline-air mixture deflagration in a confined space, visualized experiments were performed at different equivalence ratios. Three flame patterns of gasoline-air deflagration were proposed: smooth spherical flame, fold spherical flame and curling flocculent flame. Based on the chemical kinetics and flame spectroscopy, the forming mechanism of each flame pattern was examined. Then, the critical equivalence ratio, here used to distinguish the flame patterns, was obtained by theoretical analysis and experimental measurement. Combined with the collected key parameters in the experiments, the differences in key parameters of each flame pattern were summarized, such as reaction products, rate of pressure rise, flame intensity, duration of flame and maximum pressure.

Key words: mechanics of explosion; flame pattern; deflagration; gasoline-air mixture; confined space

(责任编辑 丁 峰)