DOI: 10.11883/1001-1455(2017)02-0201-07

边界条件对甲烷预混气爆轰特性的影响*

赵焕娟[1],J. H. S. Lee[2],张英华[1],钱新明[3],严屹然[1]

(1. 北京科技大学教育部金属矿山高效开采与安全重点实验室,北京 100083;
2. Mechanical Engineering Department, McGill University, Montreal, Quebec, Canada H3A 2K6;
3. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室,北京 100081)

摘要: 通过实验研究及数字化处理研究了边界条件对 CH_4 预混气体爆轰特性的影响。在内径为 63.5、50.8 mm 圆柱形管道及长方体管道进行爆轰实验,得到胞格结构和爆轰速度曲线。烟膜数字化处理量化了预混气体的爆轰不稳定性,并计算出胞格尺寸。3 种管道内测得的平均爆轰速度与 CJ 速度接近,边界条件的影响不明显。分析爆轰速度曲线发现,极限压力受到边界条件的影响,∅50.8 和∅63.5 mm 管道内预混气的极限压力分别为 5 和 4.05 kPa,即随着管径增大,爆轰极限压力降低。数字化处理所得不同管道内烟膜轨迹的不规则程度无明显差别,因此可以认为不稳定性是预混气固有的性质。在相同爆轰初始压力下,管径增大,胞格数量变多,表明爆轰传播时爆轰螺旋头数增多以维持传播。

关键词: 爆轰实验;甲烷预混气;边界条件;爆轰极限;数字化处理;胞格尺寸

中图分类号: O381 **国标学科代码**: 1303510 **文献标志码**: A

爆轰波通过其前导激波压缩可燃气体实现自燃点火,并借助燃烧释放的化学能实现自持传播,维持稳定的激波强度,在可燃预混气体中以超声速或高超声速传播。爆轰波这种能够自持燃烧的特性给许多存在可燃气体的场所带来了严重的安全隐患,所以对爆轰特性及防护技术的研究在目前仍然是一个非常重要的研究课题[1]。

虽然常规研究中很少考虑爆轰,但是,安全领域不可避免地涉及各种爆燃形态,有些事故仅用普通燃爆理论是无法解释的。例如 20 世纪 50 年代美国新墨西哥州 Albuquerque 发生的一起爆炸事故以及 2014 年西安某航天研究所的爆炸事故,事故后所有炸裂的碎片都很小,超压非常大。自主传播的爆燃波本质上是不稳定的,存在着很多不稳定机制可以使得反应面变成湍流,从而增加爆燃波传播速度。因此,自持传播的爆燃波会不断加速,只要边界条件允许,将突然向爆轰转变。在不同的初始和边界条件下会出现不同类型的燃烧波,爆轰的形成是很多严重爆炸事故的重要原因之一。

爆轰胞格结构受边界条件影响,与爆轰极限、爆轰速度、爆轰不稳定性等研究联系密切。因此,爆轰胞格结构是气相爆轰机理研究的基础,可以用于表征气相爆轰的动力学特征,在安全领域也是研究事故发生和发展的关键内容。爆轰机理是国际上现在公认的难题之一,实验发现,初始条件和边界条件对爆轰波的传播有很大的影响,爆轰波的传播强烈依赖于壁面条件,边界在爆轰传播过程中可以起到有利或不利的作用。边界层更为重要的作用也许是对爆轰波面不稳定性的影响。G. B. Kistiakowsky 等[2-3]通过分析大量的数据得出了爆轰速度与管径的依赖关系,结果显示,边界条件(受限壁面)的突然变化能够明显破坏爆轰传播机制。J. H. S. Lee[4]指出,根据爆轰是否稳定,存在着两种熄爆机制:稳定爆轰的爆轰结构可以通过 ZND 模型描述,横波在爆轰传播中的作用可以忽略;相反,对于不稳定爆轰,横波则起到了决定性作用。三波点所形成胞格结构的量化研究在爆轰传播研究中非常重要,是分析边界条件对爆轰传播影响不可忽视的方面。最近,在胞格形成机理及其规律的研究方面取得了重大进展[5-12]。

* **收稿日期**: 2015-08-31; **修回日期**: 2015-10-27
基金项目: 国家自然科学基金项目(11602017);中央高校基本科研业务费专项资金项目(FRF-TP-15-105A1);
中国博士后科学基金项目(2015M580049)
第一作者: 赵焕娟(1985—),女,博士,讲师; **通信作者**: 张英华,zyhustd@163.com。

许多学者采用烟膜研究边界条件对爆轰传播的影响，此时，烟膜记录的胞格结构是研究爆轰现象的关键[13-14]。然而，实验中获得的轨迹不是直线，为了解释该现象并选择“代表轨迹间距”的数据，就需要相当多的经验。另外，国内学者也对气相规则胞格爆轰波的起爆与传播进行了研究[15-17]。作为典型不稳定爆轰气体，CH_4+2O_2爆轰初始压力极限较高，CH_4是一种不敏感、不稳定气体，在实验过程中需要十分精确地操作以避免影响不规则度的分析，因此，目前为止少见有针对 CH_4的研究。

本文中，首先采用两种不同管径（为达到细致研究的效果，两种管径差别控制在 25%）的圆形截面光滑管来研究 CH_4+2O_2预混气的爆轰速度、爆轰不稳定程度，确定 CH_4+2O_2预混气的性质；然后采用小尺寸类巷道的长方体管道进行爆轰实验，获得 CH_4+2O_2预混气的速度及压力变化特征，分析不同边界条件下，CH_4+2O_2预混气的爆轰不稳定性、胞格变化及速度等。

1 管道内 CH_4+2O_2预混气爆轰实验

1.1 ∅50.8 mm 圆形截面管道中 CH_4+2O_2预混气爆轰实验

1.1.1 实验内容

图 1 中金属引爆管长 1 010 mm，实验段为透明的高强度塑料管，管段间通过法兰联接，法兰内部有橡胶密封圈。所有的预混气已预先制备，并确保均匀混合。在金属引爆管内充 $C_2H_2+O_2$（采用化学计量配比），用于促进实验段爆轰的发生。管道后端放入 1 m 长烟膜，依初始压力选用烟膜厚度。在实验段管子外壁固定处装有光纤，可以感知爆轰传播面的光，传输信号到数据盒。金属引爆管接存储驱动气的小金属管。在小型金属管与实验管道不连通的情况下，在实验管道内充满预混气（压力为 p_1），在小型金属管内充驱动气（压力为 p_2），然后将小型金属管内驱动气快速平稳地放到实验管道内，以免由于 $C_2H_2+O_2$过多而影响实验结果。小型金属管与实验管道连通后，两个管道内压力均变成 $p_{initial}$，$p_{initial}$即为实验初始压力。利用等容条件计算所需要使用的驱动气及 CH_4+2O_2预混气分压，计算后校核以获得精准的实验初始压力，计算公式如下：

$$\begin{aligned} p_1V_1^{\gamma}&=p_{initial}(V_1-V_0)^{\gamma}\\ p_2V_2^{\gamma}&=p_{initial}(V_2+V_0)^{\gamma} \end{aligned} \tag{1}$$

式中：p_1为实验管道内预混气的压力；p_2为小型金属管内驱动气的压力；V_1为实验管道及连通通路体积；V_2为小型金属管及连通通路体积；V_0为驱动气在实验管道内的体积，甲烷气引爆需要长度为 6～8 个实验管道直径的驱动气；γ为比热比，取为 1.4。

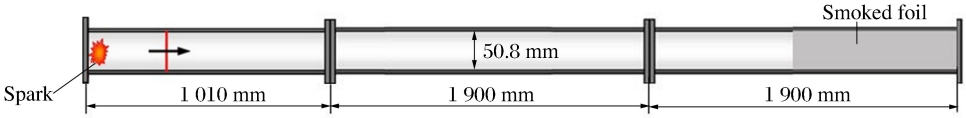

图 1 ∅50.8 mm 爆轰管道结构简图

Fig. 1 Detonation tube structure with inner diameter of 50.8 mm

1.1.2 实验结果

烟膜记录了螺旋爆轰结构，取管道内 CH_4+2O_2初始压力 5 kPa 时出现的单头螺旋以及初始压力为 7.25、10、13 和 19 kPa 时的稳定爆轰为例，分析烟膜扫描后图片可知（见图 2）：随着初始压力的增大，烟膜上的胞格尺寸减小；CH_4+2O_2的单头螺旋表现出比较弯曲的轨迹，并且反应区留下的轨迹时宽时窄，极不稳定。

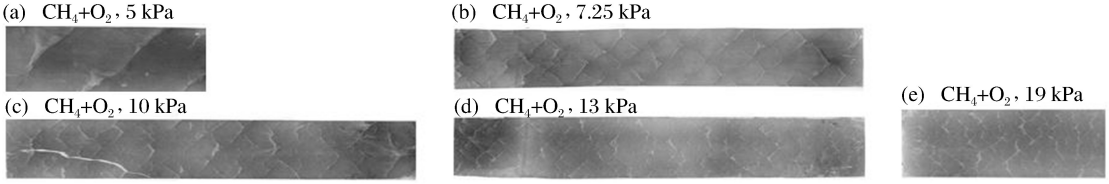

图 2 ∅50.8 mm 管道内 CH_4+2O_2预混气不同初始压力下爆轰烟膜

Fig. 2 Smoked foils of premixed CH_4+2O_2 in tube with inner diameter of 50.8 mm

由“Chemical Equilibrium Analysis”程序计算出不同边界条件下的 CJ 爆轰速度，通过示波器上爆轰波到达的时间与固定光纤的位置，计算出每一处的平均速度。不同起爆压力下的爆轰平均速度与 CJ 爆轰速度比见图 3。

CH_4+2O_2 形成的爆轰轨迹十分不规则，是爆轰十分不稳定的气体。在起爆压力低于 5 kPa 时，不能起爆；高于 5 kPa 时，才能获得稳定的爆轰传播结果，此时得到的平均爆轰波传播速度应当靠近 CJ 爆轰速度。爆轰初始压力 5 kPa 的烟膜为极限状态附近才能出现的单头螺旋；且起爆压力低于 5 kPa 时，在起爆段形成的爆轰会转为爆燃，速度会陡降，因此该管道爆轰极限在 5 kPa 左右。

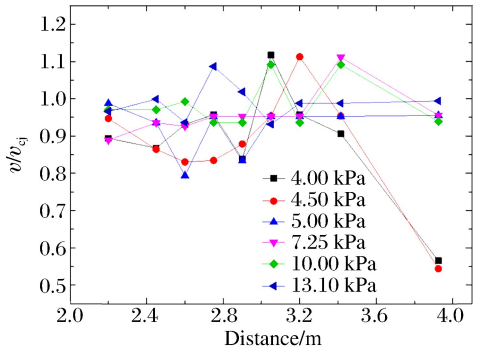

图 3　不同初始压力下∅50.8 mm 管道内 CH_4+2O_2 爆轰速度曲线

Fig. 3　Velocity curves of premixed CH_4+2O_2 in ∅50.8 mm tube at different initial pressures

1.2　∅63.5 mm 圆形截面管道中 CH_4+2O_2 预混气爆轰实验

1.2.1　实验内容

钢质起爆管内径为 63.5 mm，见图 4。使用 $C_2H_2+O_2$ 点燃测试端预混气，实验段装有离子探针，探测爆轰面的阴阳离子变化。探针在管壁内探出 1 mm 之内，以免干涉爆轰波的传播。探针感知的信号将被传输到数据盒。

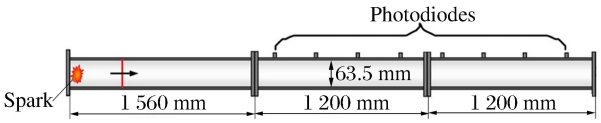

图 4　∅63.5 mm 爆轰管道结构简图

Fig. 4　Detonation tube structure with inner diameter of 63.5 mm

1.2.1　实验结果

图 5 为取出烟膜并喷涂保护漆后扫描得到的图片。爆轰速度曲线如图 6 所示。

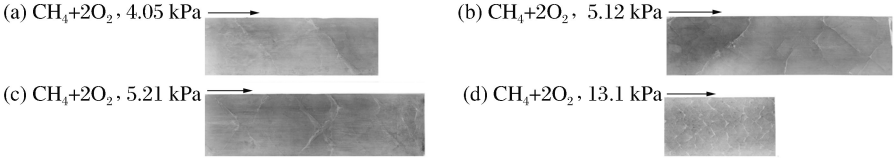

图 5　∅63.5 mm 管道内 CH_4+2O_2 预混气不同初始压力下爆轰烟膜

Fig. 5　Smoked foils of premixed CH_4+2O_2 in tube with inner diameter of 63.5 mm

由图 6 可知，当初始压力为 2.33～2.55 kPa 时，速度曲线在距离起爆点 2.5 m 左右出现骤变，这可能是由于发生了过驱爆轰。在 3.4 m 以后，当起爆压力低于 4.05 kPa 时，爆轰失败；高于 4.05 kPa 时，则获得稳定的爆轰传播果。同时，爆轰初始压力为 4.05 kPa 形成单头螺旋，因此该管道爆轰极限约为 4.05 kPa。极限爆轰压力受管径影响，但是一旦形成稳定传播的爆轰，边界条件（管径）对爆轰速度的影响却不明显。对比管径∅50.8 mm 和∅63.5 mm 管道内部爆轰轨迹发现：对于很不稳定的 CH_4+2O_2 预混气，随着管径的增大，起爆极限压力降低，爆轰极限变宽；并且形成稳定爆轰后，初始压力确定条件下，内部管壁记录的轨迹胞格尺寸随着管径增大而减小。

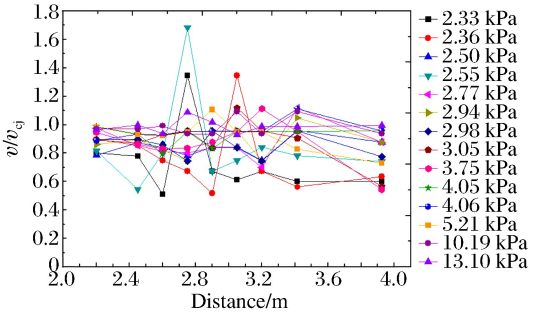

图 6　不同初始压力下∅63.5 mm 管道内 CH_4+2O_2 爆轰速度曲线

Fig. 6　Velocity curves of premixed CH_4+2O_2 in ∅63.5 mm tube at different initial pressures

1.3 矩形截面管道中 CH_4+2O_2 预混气爆轰实验

1.3.1 实验内容

图 7 为小尺寸长方体实验管道。该爆轰通道由两块钢板及中间挖空的铝合金板构成，合金板两侧开槽，槽内安装密封橡胶圈，3 块板合并时在外侧均匀加紧以达到合格的密封效果。合金板外侧打孔，通过装有密封橡胶圈的螺栓塞子将两个压力传感器安装于孔内。两个传感器的间距 $\Delta L=20.4$ cm，测量所得波形的波峰距离为 Δt。在实验段管子的后端壁面处放入烟膜。

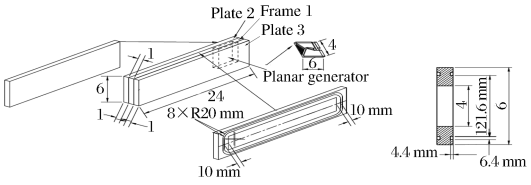

图 7 矩形截面管道设计图

Fig. 7 Structure diagram of the rectangle tube

1.3.1 实验结果

图 8 为取出烟膜并喷涂保护漆后扫描得到的图片。实验测得的爆轰速度如图 9 所示，其中前 3 次实验的初始压力为 5 kPa，后 2 次实验的初始压力为 10 kPa。可以看出，爆轰速度均在 v_{cj} 附近。



图 8 矩形截面管道内 CH_4+2O_2 爆轰烟膜

Fig. 8 Smoked foils of premixed CH_4+2O_2 in the rectangle tube

在实验所涉及的 3 种光滑管内，爆轰极限均强烈依赖于边界条件，但是爆轰速度却不会因边界条件不同而产生很大的区别。爆轰速度对于管径的依赖关系主要是由于管壁造成的，随着管径的减小，壁面效应逐渐增强，混合物中的爆轰传播速度降低。两种圆管的爆轰初始压力极限有差别，原因可能与形成螺旋爆轰的原理有关，即两种圆形管道内形成一个胞格所需的能量不同，内径越大，爆轰初始压力极限越低。综上所述，边界条件在爆轰传播过程中起着重要的作用，尤其是在爆轰极限附近。

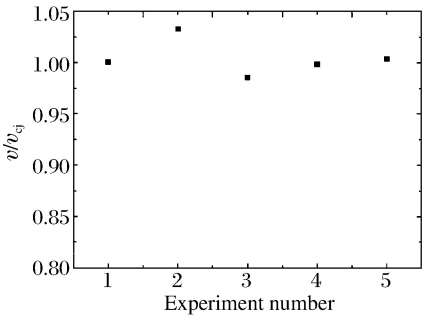

图 9 矩形截面管道内 CH_4+2O_2 预混气爆轰速度

Fig. 9 Velocity of premixed CH_4+2O_2 in the rectangle tube

螺旋爆轰一般只能在有限管径的管道内产生，边界条件(管径)的作用可能与气体性质有关，气体可以承受压力但不太能够承受剪力，综合管壁起到的作用，才形成螺旋爆轰。管道内螺旋爆轰结构存在大于半个胞格才能传播，所以管径越大，爆轰极限越低。当管径大到一定程度时，爆轰初始压力极限下的胞格尺寸无法容纳于管道中，因此将不能出现单头螺旋或螺旋爆轰。

2 实验结果分析

2.1 烟膜数字化处理

使用 Photoshop 软件描画烟膜轨迹得到初始压力 13 kPa 条件下，∅50.8 mm 和∅63.5 mm 管道内的烟膜轨迹线如图 10 和图 11 所示。可以看出，轨迹线可分为两个方向：轨迹与传播方向夹角的角度在 0°～90°范围的称为“右旋波”($\theta+$)，在 −90°～0°范围的称为“左旋波”($\theta-$)。

取一条垂直线在“左旋”或“右旋”轨迹上运动，当垂直线碰到轨迹线时，像素发生突变，记录下该像素点的位置并令其取值为“1”，其他的像素点值则记为“0”。通过以上处理，图 10 和图 11 中所有像素均被离散数值化，轨迹图即转化为离散函数。通过该离散函数可以直接计算轨迹间距，即相邻两个取值为“1”像素点之间的距离，计算过程中需要注意像素值与实际尺寸的换算。



图 10　∅50.8 mm 管道内烟膜轨迹线

Fig. 10　Trajectory in two sets in tube with inner diameter of 50.8 mm

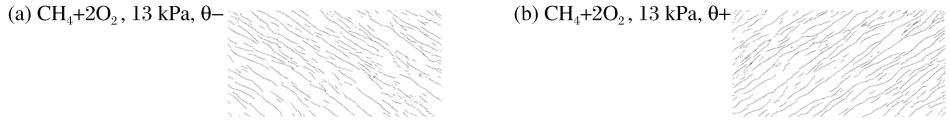

图 11　∅63.5 mm 管道内烟膜轨迹线

Fig. 11　Trajectory in two sets in tube with inner diameter of 63.5 mm

2.2　轨迹间距柱状图

在轨迹图上画一条竖线，记录下竖线与轨迹的交点坐标，那么一条竖线上相邻交点的距离就是轨迹间距。实际的轨迹总是因为相互干涉等原因而弯曲，轨迹间距是一个范围，该范围及分布情况与爆轰稳定度有关。如图 12 和图 13 所示，为比较间距数据之间的差别，尝试不同间距尺寸后，将轨迹间距数据每 5 mm 定为一个统计区间，在不同统计区间内有不同比率的轨道间距数据，柱子的高低和分布情况即反映了轨迹间距的不规则程度。从图 12 和图 13 中可以看出：在同一初始压力条件下，两管道内烟膜轨迹柱状图的峰值大致接近，柱状图的分布比较离散，并且均不服从高斯分布。

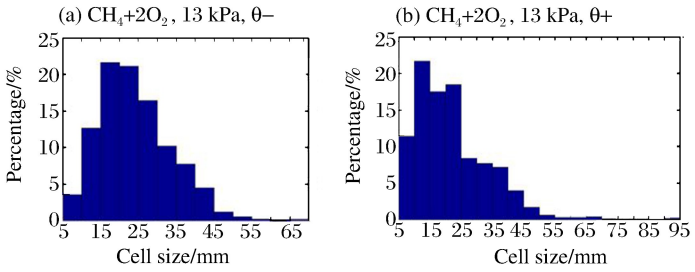

图 12　∅50.8 mm 管道内典型轨迹柱状图

Fig. 12　Typical trajectory histograms of tube with inner diameter of 50.8 mm

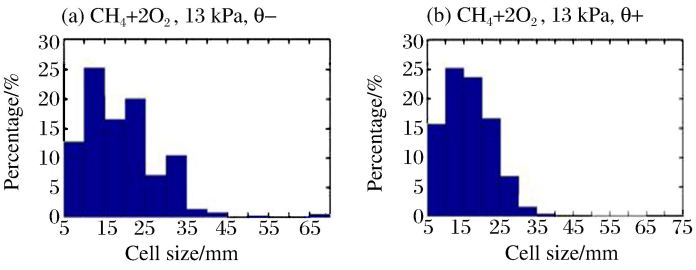

图 13　∅63.5 mm 管道内典型轨迹柱状图

Fig. 13　Typical trajectory histograms of tube with inner diameter of 63.5 mm

2.3　爆轰不稳定度定量化

根据已经获得的大量轨迹间距数据，使用统计学公式计算得到轨迹间距的方差，以定量分析轨迹间距的不规则度，确定反应预混气的不稳定性。以所有轨迹间距数据的平均值作为胞格尺寸，由此计算得到两种管径条件下爆轰轨迹间距的方差如图 14 所示。从图 14 中可以看出：甲烷预混气轨迹间距的方差较大，即甲烷预混气胞格尺寸数据的离散程度较高；∅63.5 mm 和∅50.3 mm 管道的爆轰不规则程度并没有明显差别，说明不稳定性是预混气固有的性质。

2.4　爆轰结构胞格尺寸

图 15 给出了两种圆形截面管道内胞格尺寸的比较。分析图 15 中数据发现：相同初始压力条件下，∅63.5 mm 的管道内胞格尺寸明显小于∅50.8 mm 管道内爆轰胞格尺寸；同时边界条件影响胞格数量，管径增大时，螺旋头数增多以维持传播。

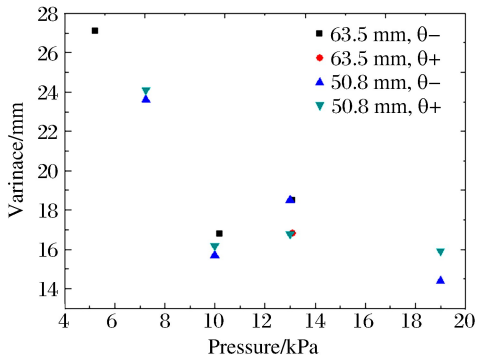

图 14 两种管径爆轰轨迹间距方差

Fig. 14 Variance of distance between waves in cylindrical tubes

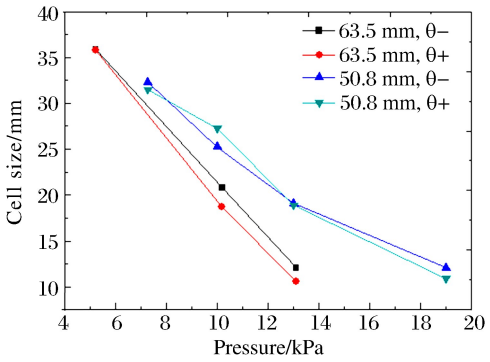

图 15 圆形管道内胞格尺寸

Fig. 15 Cell size of waves in cylindrical tubes

3 结 论

(1) 管道内测得的 CH_4+2O_2 预混气的平均爆轰速度数据均与 CJ 爆轰速度接近。

(2) ∅50.8 mm、∅63.5 mm 圆形管道内的 CH_4+2O_2 预混气的爆轰极限压力分别为 5、4.05 kPa。极限爆轰压力受边界条件影响,随着管径增大,起爆极限压力降低,爆轰极限变宽。形成稳定的爆轰传播后,小尺寸矩形截面管道与圆形截面管道中传播速度与胞格结构形式无明显差别,表明爆轰速度主要受初始爆轰压力及预混气的类型影响,边界条件对爆轰速度未产生很大影响。

(3) 管道内爆轰轨迹的不规则程度无明显差别,说明不稳定性是预混气固有的性质。

(4) 在相同爆轰初始压力下,管径增大,胞格数量变多,表明爆轰传播时螺旋头数增多以维持传播。

感谢航天二院 207 所苟铭江博士给予的技术支持。

参考文献:

[1] 姜宗林,滕宏辉. 气相规则胞格爆轰波起爆与传播统一框架的几个关键基础问题研究[J]. 中国科学,2012,42(4):421-435.
Jiang Zonglin, Teng Honghui. Research on some fundamental problems of the universal frame works for regular gaseous detonation initiation and propagation[J]. Scientia Sininca, 2012,42(4):421-435.

[2] Kistiakowsky G B, Zinman W G. Gaseous detonations. Ⅶ: A study of thermodynamic equilibration in acetylene-oxygen waves[J]. The Journal of Chemical Physics, 1955,23(10):1889-1894.

[3] Kistiakowsky G B, Knight H T, Malin M E. Gaseous detonations. Ⅴ: Nonsteady waves in CO-O_2 mixtures[J]. The Journal of Chemical Physics, 1952,20(6):994-1000.

[4] Lee J H S, Bowen J R. Dynamics of exothermicity[M]. Gordon and Breach, 1995.

[5] Schwartz M, Shaw L. Signal processing: Discrete spectral analysis, detection, and estimation[M]. McGraw-Hill Companies, 1975.

[6] Oppenheim A V, Schafer R W. Discrete-time signal processing[M]. New Jersy: Prentice Hall, 1989.

[7] Lee J J, Frost D L, Lee J H S, et al. Digital signal processing analysis of soot foils[J]. Progress in Astronautics and Aeronautics, 1993,153:182-202.

[8] Lee J J, Garinis D, Frost D L, et al. Two-dimensional autocorrelation function analysis of smoked foil patterns[J]. Shock Waves, 1995,5(3):169-174.

[9] Sharpe G J. Transverse waves in numerical simulations of cellular detonations[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2001,447:31-52.

[10] 刘云峰,王健平. 有限谱 ENO 格式在爆轰波数值模拟中的应用[J]. 爆炸与冲击,2003,23(4):343-348.
Liu Yufeng, Wang Jianping. Numerical simulation of detonation wave with finite spectral ENO scheme[J]. Explosion and Shock Waves, 2003,23(4):343-348.

[11] 王昌建,徐胜利. 直管内胞格爆轰的基元反应数值研究[J]. 爆炸与冲击,2005,25(5):405-416.

Wang Changjian, Xu Shengli. Numerical study on cellular detonation in a straight tube based on detailed chemical reaction model[J]. Explosion and Shock Waves, 2005,25(5):405-416.

[12] 徐晓峰，解立峰，彭金华，等. 环氧丙烷-空气混合物爆轰波胞格结构的研究[J]. 爆炸与冲击，2004,24(2):158-162.
Xu Xiaofeng, Xie Lifeng, Peng Jinhua, et al. Study on the detonation cellular structure of propylene epoxide-Air [J]. Explosion and Shock Waves, 2004,24(2):158-162.

[13] Trotsyuk A V, Fomin P A, Vasil'ev A A. Numerical study of cellular detonation structures of methane mixtures [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2015,36:394-403.

[14] 刘岩，武丹，王健平. 低马赫数下斜爆轰波的结构[J]. 爆炸与冲击，2015,35(2):203-207.
Liu Yan, Wu Dan, Wang Jianping. Structure of oblique detonation wave at low in flow Mach number[J]. Explosion and Shock Waves, 2015,35(2):203-207.

[15] 张旭东，范宝春，潘振华，等. 旋转爆轰胞格结构的实验和数值研究[J]. 爆炸与冲击，2011,31(4):337-342.
Zhang Xudong, Fan Baochun, Pan Zhenhua, et al. Experimental and numerical investigation on cellular patterns of rotating detonations[J]. Explosion and Shock Waves, 2011,31(4):337-342

[16] Teng H, Ng H D, Li K, et al. Evolution of cellular structures on oblique detonation surfaces[J]. Combustion and Flame, 2015,162(2):470-477.

[17] 张博，白春华. 气相爆轰动力学特征研究进展[J]. 中国科学：物理学，力学，天文学，2014,44(7):665-681.
Zhang Bo, Bai Chunhua. Research progress on the dynamic characteristics of gaseous detonation[J]. Scientia Sinica: Physica, Mechanica, and Astronomica, 2014,44(7):665-681.

Effects of boundary conditions on premixed CH_4+2O_2 detonation characteristics

Zhao Huanjuan[1], J. H. S. Lee[2], Zhang Yinghua[1], Qian Xinming[3], Yan Yiran[1]

(1. *State Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines, University of Science and Technology Beijing, Beijing* 100083, *China*;
2. *Mechanical Engineering Department, McGill University, Montreal, Quebec, Canada H3A 2K6*;
3. *State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: To find out the exact effects of boundary conditions on premixed CH_4+2O_2 detonation characteristics, detonation experiments were conducted respectively in two cylindrical tubes with inner diameters of 63.5 mm and 50.8 mm and one rectangle tube. The detonation velocity curves were obtained using a signal detection system, and cellar patterns drawn from the smoked-foil records were obtained using a digital image processing program. Quantitative irregularities of CH_4+2O_2 detonation and cell size data under different initial pressures in the three tubes were analyzed and compared. It is found that the average velocities in the three tubes always closely resembled v_{cj}, showing that the detonation velocity is mainly determined by the initial detonation pressure and mixture type rather than by the boundary conditions. In addition, judging by the detonation velocity curves, the limit pressures of the tubes with inner diameter of 50.8 and 63.5 mm are 5 and 4.05 kPa, respectively. Therefore, the boundary conditions can influence the limit pressure. Quantitative irregularities exert little significant difference under different boundary conditions of the tubes. Besides, as the detonation needs to compensate for the energy loss with the increase of the tube diameter, there is a greater number of spin heads in the tubes.

Keywords: detonation experiments; premixed CH_4+2O_2; boundary conditions; detonation limits; image processing; detonation cell size

（责任编辑　王玉锋）