

爆轰波三波点擦除烟迹表面积碳机制

赵焕娟¹⁾, John H. S. Lee²⁾, 张英华¹⁾✉, 严屹然¹⁾

1) 北京科技大学土木与资源工程学院, 北京 100083

2) Mechanical Engineering Department, McGill University, Montreal, Quebec, Canada H3A 2K6

✉通信作者, E-mail: zyhustb@163.com

摘 要 为理解三波点在壁面及端面积碳留下记录的确切机制, 推动对螺旋爆轰内部结构的研究, 采用端面烟熏玻璃与内壁烟膜结合的实验方法记录胞格结构, 并得到不稳定、较稳定及稳定预混气的侧壁及端面爆轰记录。2H₂ + O₂ + 3Ar 给出了清晰精细的端面结果, 其单头螺旋结果表明相对于结果近似的侧壁结果, 内部螺旋结构并非固定。进而从附着碳粒的粒度尺寸分析出碳迹附着原理并结合五种预混气的反应特性, 确定键能足以克服碳迹吸附在表面的力时才能擦除烟迹。另外预混气中的碳分子也会导致烟迹堆积而影响端面结果, 反射激波的强度也影响记录的清晰度。最终确定烟迹擦除机制受预混气影响, 应针对预混气选用表面粗糙度载体和积碳颗粒尺寸, 并给出了记录爆轰结构的方法。

关键词 螺旋爆轰; 烟膜; 烟熏玻璃; 三波点; 胞格结构

分类号 TD77⁺4; O381

Precise mechanism of triple point passage removing soot on soot-coated surface

ZHAO Huan-juan¹⁾, John H. S. LEE²⁾, ZHANG Ying-hua¹⁾, YAN Yi-ran¹⁾

1) School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Mechanical Engineering Department, McGill University, Montreal, Quebec, Canada H3A 2K6

✉Corresponding author, E-mail: zyhustb@163.com

ABSTRACT To understand the precise mechanism by what the soot is removed when the triple point passed over the smoked inner wall foil or smoked end-on glass and promote the research on spinning detonation structure, smoked end-on glasses and inner wall smoked foils were established to record the trajectories of triple-shock Mach intersections of spinning detonation. Detonation records of unstable, a little stable and very stable premixed mixtures were obtained in wall foils and end-on glasses. Smoked end-on glass of 2H₂ + O₂ + 3Ar gave clear records. Sing-head spinning detonation records of 2H₂ + O₂ + 3Ar indicates that the internal structure of the spinning detonation is not stable while the inner wall results are similar. The cause why soot can be adsorbed on foils and glasses is one factor. Another factor is that reaction characteristics performance of different mixtures should be considered according to above experimental results. The soot can be removed when bond energy is bigger than adsorption energy between the soot and the foil or glass surface. What's more, the carbon molecules particles in detonation front reaction may lead to carbon accumulation and affect the records. In another hand, the strength of reflected shock wave may affect the clarity of the records. Finally, the precise mechanism is affected by characteristics of mixtures. Using appropriate surface roughness and soot particle size according to mixtures characteristics can give satisfying detonation structure records.

KEY WORDS spinning detonation; smoked foils; smoked end-on glass; triple point; cellular structure

收稿日期: 2016-05-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(E041003); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(FRF-TP-15-105A1); 中国博士后科学基金资助项目(2015M580049)

针对爆轰发动机广泛的应用需求^[1],自20世纪五十年代以来,Voitsekhovskii、Bykowski等^[2-3]等学者已对旋转爆轰进行研究,诸多学者^[4-11]在燃烧室内对多种燃料的旋转爆轰进行了实验研究.旋转爆轰的稳定性可通过实验给出的压力、速度结果判断,但所给出的实验记录所包含的爆轰波结构信息非常局限,计算也大都局限于二维^[12-15],并未深入研究爆轰波内部结构.爆轰波通常具有复杂的结构,研究爆轰面结构最有用的技术之一是烟膜技术^[16].把熏制的烟膜放置在爆轰管内壁,通过三波点扫过后留下的痕迹来研究爆轰面,已经成为测量爆轰面胞格结构及尺寸的标准技术^[17-19].国内学者也通过这种实验与仿真结合来研究爆轰结构^[20-25].

虽然有充分的实验证据表明烟膜上的刻痕是马赫结构上的三波点扫过壁面时留下的^[16],但是人们仍未理解三波点划过积碳表面擦除烟膜的确切机制.在三波点附近马赫杆和反射激波产生的高温和高压不可能刻出如此清晰的细线.一种机制认为烟灰是被三波点处滑移线上巨大的速度梯度擦除的.这个跨过剪切间断面的速度梯度被认为起到了冲刷的作用.然而,在管壁表面总存在着边界层,表面上的无滑移边界条件总趋于把三波点相关联的滑移线两侧的速度梯度耗散掉.因此,剪切流的冲刷作用可以擦除烟膜沉积物这一观点是值得怀疑的.另一方面,假如存在着垂直于壁面的压力梯度,积碳颗粒就能够有效地从表面擦除.平面剪切层可看作是一系列线涡的叠加.因此,在三波点处就会有一个非常集中的剧烈涡流管,而且当三波点扫过时,积碳颗粒就能被垂直地从表面移出.在湍流边界层中,Wu等^[26]假设湍流边界层中存在着发

卡涡,认为涡单元中的低压中心能够从壁面处吸起积碳颗粒. Head等^[27]则通过实验在很多涡中观察到了发卡涡.因此,可以想象当三波马赫结构的剪切层扫过烟膜时,可能存在一个类似的烟膜擦除机制.本文希望结合前人工作及微观尺度方法来分析烟膜擦除机制.

环绕在管子内壁的烟膜上仅记录了爆轰面外圈上的三波点经过的路径,想要确定离管壁较远处靠近管轴的前导激波面形状,可把烟膜垂直于管轴放置^[16],这样爆轰面会在该烟膜上发生反射,对于爆轰内部结构的研究十分重要.但是,烟膜固定在端面的难度较高,且烟膜的厚度和不完全平整面会影响波的传播,甚至在实验中产生的高温高压中遭到破坏,导致实验失效.所以前期研究未能给出足够清晰的端面结构.为了更精确的记录端面爆轰结构,创造了烟熏玻璃来记录端面爆轰结构的方法.这一方法也有利于研究如何将来自螺旋爆轰波反射的激波相交记录在端面烟膜面上的复杂过程.实验中使用多种气体来获得管道内壁面结构及端面结构,以对比分析三波点在烟膜及端面留下痕迹的机制.并且利用端面烟熏玻璃和 H_2 作为实验气体获取了十分清晰的端面爆轰结构,这是先前的学者所没有获得的.这将对得到爆轰内部结构做出贡献.

1 实验装置

建立管道内爆轰波传播实验装置,由爆轰管道、配气系统、点火系统、测试及采集装置等结构组成.爆轰管道系统如图1所示,钢制圆管爆轰管道,由金属驱动段及实验段组成.驱动段长1560 mm,内径63.5 mm,壁厚10 mm;实验段由两段长1200.0 mm的钢管构成,管

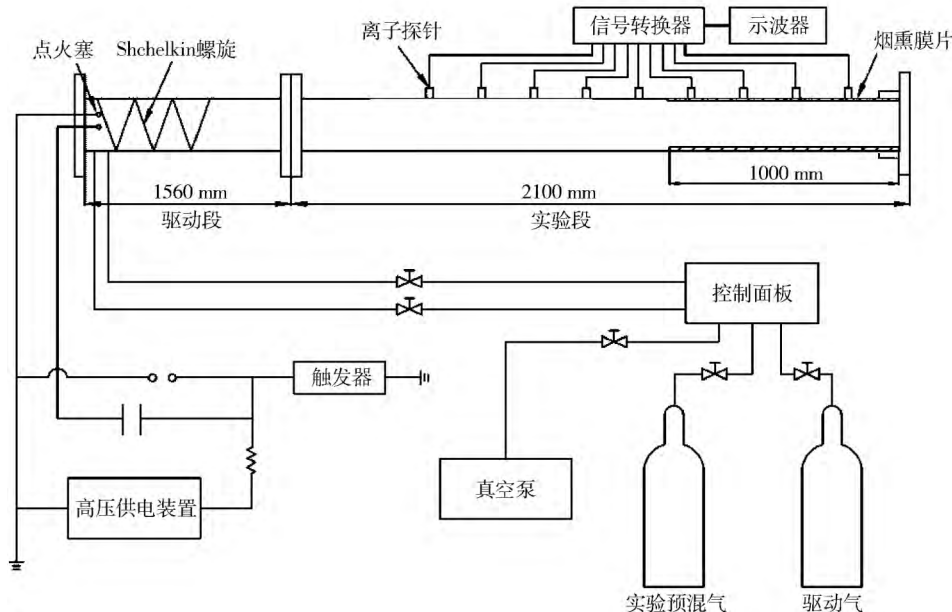


图1 爆轰管道结构示意图

Fig. 1 Detonation tube structure diagram

段间通过法兰装配而成。在驱动段远离实验段的一侧法兰端面处安装点火塞,并在靠近点火塞位置布置 Shchelkin 螺旋^[28],用以加速爆燃向爆轰的转变过程,从而在驱动段内形成稳态爆轰。驱动段外接小型驱动气储存管,实验中使用敏感度高的 $C_2H_2 + O_2$ 作为驱动气。常规的烟膜仅记录了内壁的胞格结构,为记录完整的管道内部爆轰结构,在实验段末端装有烟熏玻璃结构。

选用不稳定预混气($CH_4 + 2O_2$, $C_2H_2 + 5N_2O$)、较稳定预混气($C_2H_2 + 2.5O_2 + 8.17Ar$)、稳定预混气($C_2H_2 + 2.5O_2 + 19.83Ar$, $2H_2 + O_2 + 3Ar$)^[29]作为实验介质,数值为体积比。因为需要将一定量的 $C_2H_2 + O_2$ 充入驱动段以驱动实验段内的预混气形成爆轰,为了保证实验初始压力的精确,采用分压法获得精确的预混气体初始压力及驱动气压力。使用高精度 OMEGM 3597 压力表,获得 0.005 kPa 高精度级别的绝对压力。往管内充气方法如下:对管道系统抽真空后,首先断开小型金属管与驱动段间的阀门,在实验段内充入预混气至压力达到 P_1 ,然后在小型金属管内充驱动气压力至 P_2 ,之后打开阀门将驱动气平稳放入驱动段。连通小型金属管与驱动段,压力变为 P_i , P_i 既实验初始压力。计算如下:

$$\begin{cases} P_1 V_1 = P_i (V_1 - V_0)^r, \\ P_2 V_2 = P_i (V_2 - V_0)^r. \end{cases} \quad (1)$$

式中: P_1 为实验前充入实验管道内的预混气压力, kPa; P_2 为充入小型金属管内的驱动气压力, kPa; V_1 为实验段及连通通路体积, m^3 ; V_2 为小型金属管及连通通路体积, m^3 ; V_0 为驱动气进入驱动管后的体积, m^3 , 驱动需要长度为 $6 \sim 8D_1$ 的驱动气(经验值, D_1 为管径), r 为比热比,取为 1.4。取 V_0 计算后在管道内利用空气进行试验,修改 V_0 校核,至 P_i 与计算值一致。

速度测量系统由离子探针、示波器与信号转换器组成。离子探针安装位置如图 1 所示,离子探针能快速感应到反应面的阴阳离子变化,通过信号转换器反馈到示波器上,获得爆轰面到达设置的离子探针的时间。爆轰实验过程中,通过计算相邻探针的间距及采集信号的时间差计算出爆轰波在管道内传播的速度,所获得速度为两探针中点附近的平均速度。

采用烟迹法测量爆轰波在管道内传播时的胞格结构变化特征。实验中采用耐高温的聚脂薄膜,根据实验压力选取聚脂薄膜的厚度,厚度经验值为:初始压力低于 8 kPa 时采用 0.4 mm,初始压力低于 15 kPa 时采用 0.6 mm,烟膜宽度 180 mm,使其装入管道内时覆盖大部分管径,以记录完整的内部结构,长度为 1 m。采用厚度为 6 mm 的高强度玻璃,根据管道截面尺寸将玻璃宽高尺寸加工为 150 mm × 150 mm。在制作烟熏薄膜

及烟熏玻璃前使用酒精清洗薄膜及玻璃,保证薄膜及玻璃的表面清洁无油迹污渍。

在熏制过程中保证煤油灯火焰的稳定性,使用漏网控制烟尘的尺寸,控制熏制时间,以获得均匀且厚度适中的烟熏。制造烟熏玻璃的过程应保证烟熏的直径与管道内径一致,玻璃的光滑面所吸附的烟尘比普通膜片所吸附的烟尘尺寸要更小更均匀,安装前用酒精将空白部分擦拭干净,以免影响密封。

安装及拆卸烟熏薄膜及烟熏玻璃的过程为:在实验管道的末端联接开槽的法兰,在开槽处安装橡胶密封圈,末端法兰为开口法兰。测试主体管的密封性后,在内部管壁放置烟膜,并保证烟膜贴近管道内壁。抽真空的过程中将烟熏玻璃的烟熏部分对准末端法兰开口,见图 2,此时橡胶密封圈的柔性加之管道内外因抽真空产生的压力差会将烟熏玻璃压在橡胶密封圈上,继续抽真空,利用压力差及玻璃光滑面与橡胶密封圈的接触面来保证玻璃和橡胶密封圈之间的密封,使用夹子将木板、缓冲海绵、烟熏玻璃和开槽法兰四者固定。抽真空后,充入驱动气及实验气体,点火,爆轰结束后抽真空,平稳缓慢的放入大气,扶住木板,拆卸夹子,拿下木板及玻璃,取出烟膜。

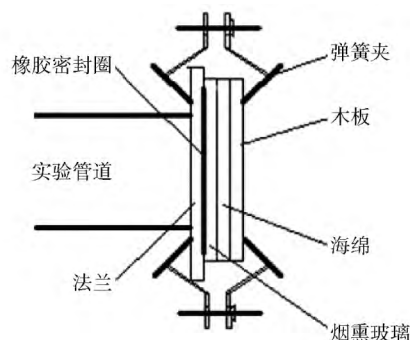


图2 烟熏玻璃安装示意图

Fig. 2 Schematic diagram of smoked glass installing

高压点火系统由点火塞、电容组、高压供电装置、触发器、隔开关、电阻等组成。点火塞所释放出的能量约为 30 J。考虑到实验的重复性及可靠性,相同参数的爆轰实验均重复 3 次以上。由于要得到完全重复的胞格结构比较困难,因此本实验中若胞格形状基本一致,大小偏差不超过 10%,即认为满足重复性要求。

2 实验结果及分析

2.1 管道内部预混气爆轰结构

通过实验中两种不稳定预混气速度曲线数据(图 3)确定在距点火端 2500.0 mm 处这两种不稳定可获得稳态爆轰,纵坐标为实验所测爆轰速度 v 与 CJ 速度(即根据 CJ 理论计算的爆轰波稳定传播速度) v_{CJ} 之比。图 3(a)中, $CH_4 + 2O_2$ 在 3.75 kPa 初始压力实验中

起爆后速度经过很短时间的下降过程又重新升高,表明起爆成功。但是图 3(b) 中, $C_2H_2 + 5N_2O$ 在 0.87 kPa 压力实验中起爆后经过很长一段下降过程最后在末端压力才重新升高,此压力略高于极限压力,此时爆轰成功获得单头螺旋结果。在极限压力附近爆轰波维持原有运动状态的能力是非常差的,而且 $C_2H_2 + 5N_2O$ 没有 $CH_4 + 2O_2$ 维持爆轰的能力强,在 1.1 kPa 时出现较大的速度波动,用来形成稳态爆轰的距离也较长。

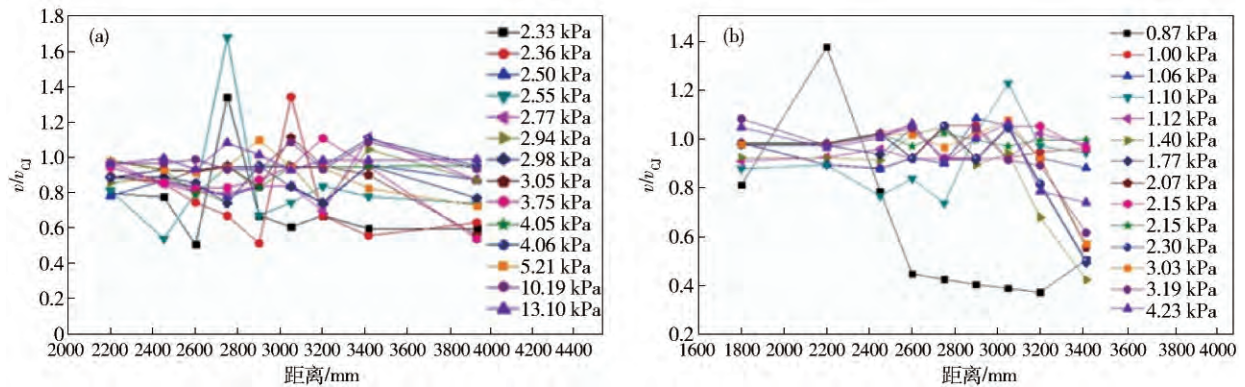


图 3 速度曲线。(a) $CH_4 + 2O_2$; (b) $C_2H_2 + 5N_2O$

Fig. 3 Velocity curves of $CH_4 + 2O_2$ detonation (a) and $C_2H_2 + 5N_2O$ detonation (b)

将烟膜结果及烟熏玻璃结果扫描,烟膜中观察到爆轰波的结构,给出在侧壁和端面烟膜上同时记录的完整螺旋爆轰结构,见图 4,其中爆轰传播方向均为从左向右。端面烟膜记录了内壁烟膜上的折痕朝着管轴

向内延伸的痕迹。图 4 显示了 $CH_4 + 2O_2$ 、 $C_2H_2 + 5N_2O$ 、 $C_2H_2 + 2.5O_2 + 8.17Ar$ 、 $C_2H_2 + 2.5O_2 + 19.83Ar$ 及 $2H_2 + O_2 + 3Ar$ 的实验结果。其中,对于以上 5 种预混气,压力分别为 3.75、0.87、2.6、3.1 和 2.99 kPa

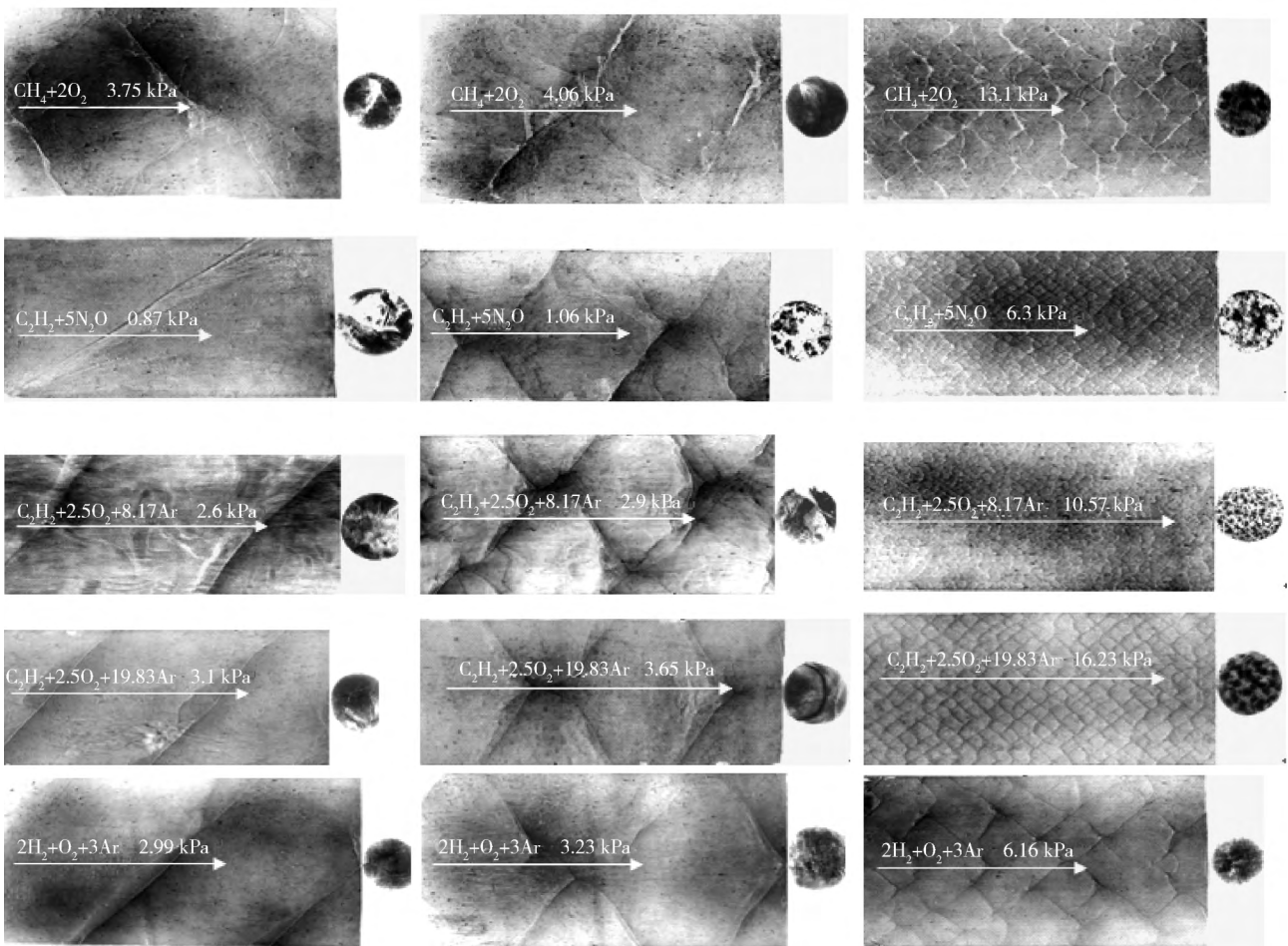


图 4 5 种预混气侧壁及端面结果

Fig. 4 Results of side-wall and end-on records of 5 mixtures

时, 结果为单头螺旋结构; 压力分别为 4.06、1.06、2.9、2.65 和 3.23 kPa 时, 第二个横向模式出现; 当压力继续增大, 分别为 13.1、6.3、10.57、16.23 和 6.16 kPa 时, 多头螺旋已不具有固定结构。总体上, 在高于爆轰极限压力下, 预混气体在内壁和端面结果都表现出不同的形式, 前 4 种气体的端面结果均碳迹堆积厚重、痕迹模糊不清, 对于这种情况, 可以将端面结果反色, 例如 $C_2H_2 + 2.5O_2 + 8.17Ar$ 在 10.57 kPa 下的实验结果。在 $C_2H_2 + 2.5O_2 + 19.83Ar$ 的结果中, 随着 Ar 气浓度升高, 烟膜上记录的胞格结构变得规则且非常容易分辨, 端面玻璃上单头螺旋和双头螺旋的结果略微容易辨认, 但是碳迹的堆积导

致烟熏玻璃记录的端面结果仍然有些模糊且难以辨认。仅 $2H_2 + O_2 + 3Ar$ 的端面结果清晰且碳迹堆积不明显。

2.2 $2H_2 + O_2 + 3Ar$ 单头螺旋记录

为了更清楚的展示结果, 单独给出 $2H_2 + O_2 + 3Ar$ 单头螺旋的爆轰记录, 见图 5。此状态下恰能形成单头螺旋爆轰, 但爆轰极不稳定, 故重复多次实验, 其结果如图 6 所示。当初始压力下降, 部分条件下爆轰波速度达到 $0.6v_{cl}$ 左右, 速度波动十分明显。但是从端面玻璃和烟膜留下爆轰结构来看, 并未失效或者发生弛振爆轰。相对于学者曾给出的端面结果而言^[1], 端面玻璃给出了更加清晰便于分析的结果。

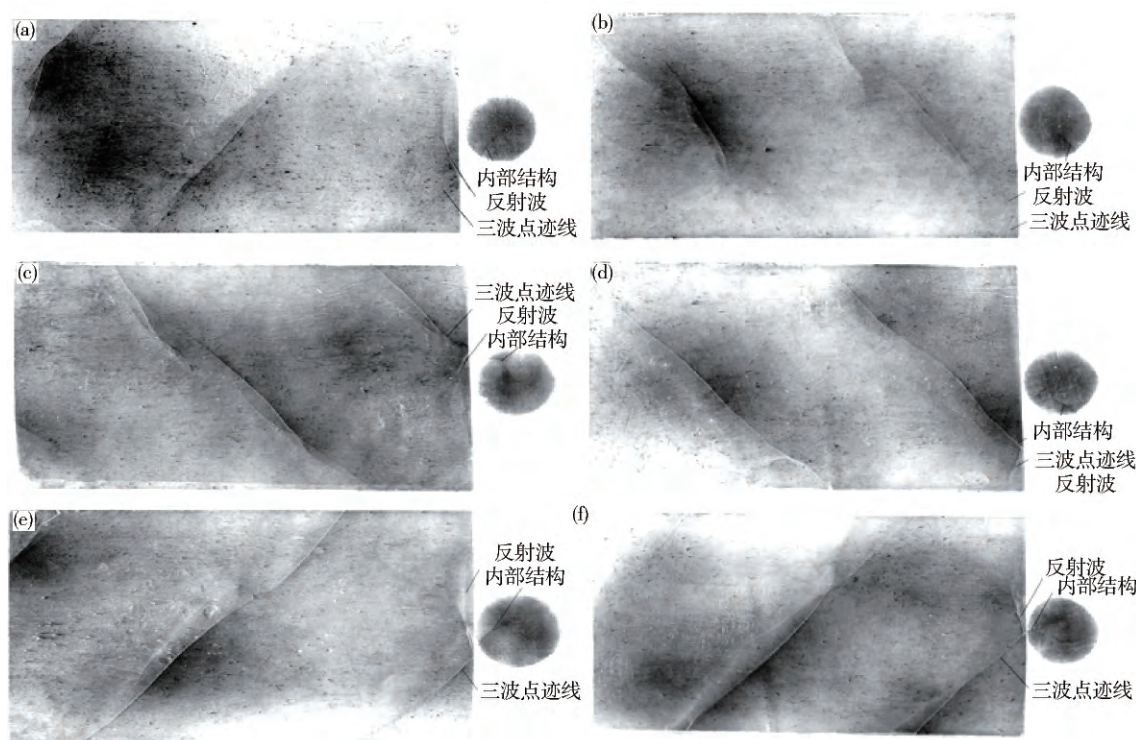


图 5 $2H_2 + O_2 + 3Ar$ 单头螺旋爆轰结果(初始压力为 2.99 kPa)

Fig. 5 Series of end-on soot records of a single head detonation wave with initial pressure of 2.99 kPa

侧壁面上单头螺旋说明了在激波面上只有一个折痕, 并且这个折痕并没有延伸到对面的管壁上也就是随着马赫相交点朝向管轴中心移动记录消失。对于单头螺旋爆轰, 尽管侧壁上的烟膜只记录了一个螺旋, 但是前导激波的锋面结构则是大不相同的。图 5 的几个实例为单头螺旋爆轰波在端面的一系列烟膜记录。因为都只记录了一条螺旋, 所以在侧壁上所有的结果都很相似。然而, 远离管壁不同的内部结构表明, 螺旋结构一般不是固定的。径向模式与周向模式之间的相互作用可能导致单头螺旋爆轰结构出现不同的内部构型。各图都指出了端面反射波在膜片上留下的记录, 但是实际上反射波相对于三波点而言并不特别强烈, 并且即使是三波点轨迹十分规则的 $2H_2 + O_2 + 3Ar$ 的

爆轰面处也明显存在非均匀能量释放。

2.3 三波点擦除轨迹的机制分析

实验发现, 在其他参数均相同的情况下, $CH_4 + 2O_2$ 、 $C_2H_2 + 5N_2O$ 、 $C_2H_2 + 2.5O_2 + 8.17Ar$ 以及 $C_2H_2 + 2.5O_2 + 19.83Ar$ 4 种预混气体均在烟熏薄膜上形成了胞格结构, 但在烟熏玻璃上形成的胞格结构并不清晰; 仅有 $2H_2 + O_2 + 3Ar$ 预混气体在烟熏薄膜和烟熏玻璃上均留下清晰胞格结构。这说明气体特性影响爆轰波传播时的烟迹擦除机制。

图 7 所示为烟熏薄膜及烟熏玻璃样品的显微电镜。可见碳颗粒尺度仅为 10 nm 级别, 在分析碳迹擦除机制时必须考虑分子力学。由图 7 可知, 玻璃吸附碳迹粒度小于膜片。这是因为, 玻璃的致密度和光滑度

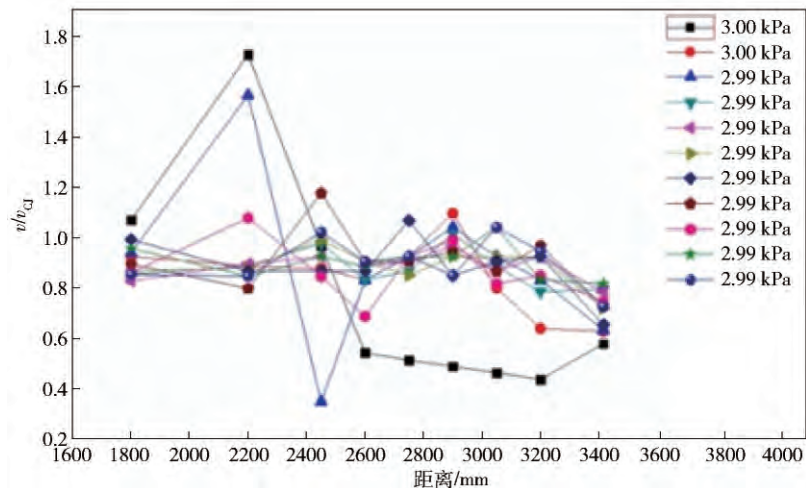
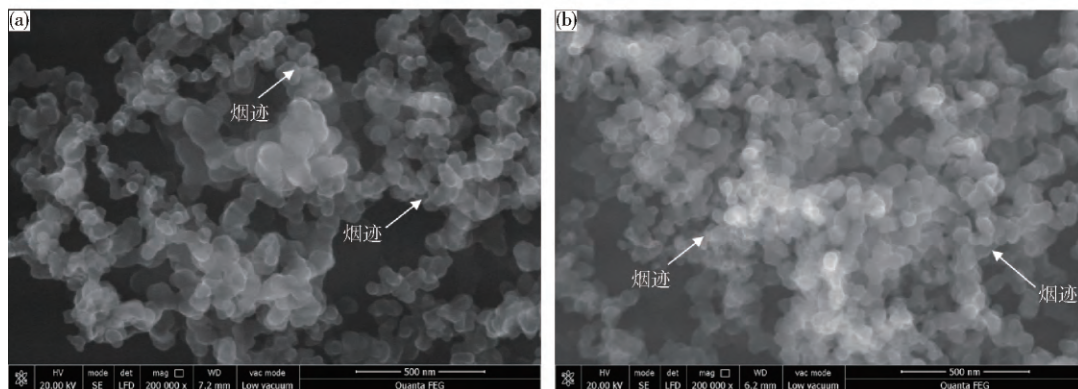
图 6 $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ar}$ 速度曲线Fig. 6 Velocity curves of $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ar}$ detonation

图 7 烟膜 (a) 及端面玻璃 (b) 样本电镜扫描照片

Fig. 7 Scanning electron microscope of smoked foil sample (a) and smoked end-on glass sample (b)

高于薄膜, 摩擦系数非常低 (≤ 0.05). 因此, 单位面积玻璃吸附的碳粒数量更多, 单位面积的范德华力大, 则擦除烟熏玻璃上碳粒所需的力大于烟熏薄膜的数值. $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2 + 5\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2 + 2.5\text{O}_2 + 8.17\text{Ar}$ 和 $\text{C}_2\text{H}_2 + 2.5\text{O}_2 + 19.83\text{Ar}$ 的 C—H 键与 $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ar}$ 的 H—H 键之间存在差异, 分子反应时, 轨道跃迁过程释放的能量与爆轰波的能量有关.

$$E_{\text{C-H}} = 304 \text{ kJ} \cdot \text{mol} < E_{\text{H-H}} = 339 \text{ kJ} \cdot \text{mol}. \quad (2)$$

碳迹和玻璃/烟膜间靠范德华力吸附, 那么因为超强氢键的存在导致 $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ar}$ 比其他气体的键能可以克服更强的玻璃和碳迹之间的范德华力. 即是 $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ar}$ 预混气爆轰在烟熏玻璃上留下更清晰轨迹记录的原因.

然后, 考虑前 4 种气体的共同特性之一是反应物含有 C 分子, 玻璃上的光滑度较高, 爆轰传播过程中 C 分子的存在导致玻璃上烟迹堆积而模糊, 最终端面结果有些地方太黑有些地方太亮而不清晰.

最后, 因为端面结构实际上是由反射激波扫过经过激波压缩的反应物所产生的, 那么不同气体的反射激波强度不同也导致记录的清晰度不同.

3 结论

(1) 设计了记录精确完整的内部胞格结构的端面玻璃记录方法, 给出不稳定预混气 ($\text{CH}_4 + 2\text{O}_2$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2 + 5\text{N}_2\text{O}$)、较稳定预混气 ($\text{C}_2\text{H}_2 + 2.5\text{O}_2 + 8.17\text{Ar}$)、稳定预混气 ($\text{C}_2\text{H}_2 + 2.5\text{O}_2 + 19.83\text{Ar}$ 、 $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ar}$) 5 种预混气螺旋爆轰的壁面烟膜及端面玻璃记录, 发现 $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ar}$ 的端面结果清晰且碳迹堆积不明显, 可以作为分析螺旋爆轰内部结构的实验气.

(2) 通过电镜照片与分子力学, 分析了烟膜及端面玻璃的碳迹吸附能力和 5 种预混气的微观键能, 确定不可忽视气体种类及反应对烟迹机制的影响, 如果碳迹和玻璃/烟膜表面间是靠范德华力吸附, 那么 $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ar}$ 因氢键留下清晰的痕迹在玻璃上, 而其他气体的键能不足以留下清晰的痕迹在玻璃上, 是因为不同气体键能大小的差别; 而且预混气中碳的存在是导致烟迹不清晰的原因之一; 气体反射激波强度不同也导致烟膜轨迹记录的清晰度不同.

(3) 确定得到附着力合适的烟膜和烟熏玻璃对获得清晰的实验结果有重要作用, 也就是合适的表面粗

糙度和碳迹中积碳颗粒的尺寸.

参 考 文 献

- [1] Fan B C, Zhang X D, Pan Z H, et al. Fundamental characteristics of three types of detonation waves utilized in propulsion. *Adv Mech*, 2012, 42(2): 162
(范宝春, 张旭东, 潘振华, 等. 用于推进的三种爆轰波的结构特征. *力学进展*, 2012, 42(2): 162)
- [2] Voitsekhovskii B V. Stationary detonation. *Dokl USSR Acad Sci*, 1959, 129(6): 1254
- [3] Bykowski F A, Mitrofanov V V, Vedernikov E F. Continuous detonation combustion of fuel-air mixtures. *Combust Explo Shock Waves*, 1997, 33(3): 344
- [4] Bykovskii F A, Zhdan S A, Vedernikov E F. Continuous spin detonation in ducted annular combustors: 2. Combustor with an expanding annular channel. *Combust Explo Shock Waves*, 2008, 44(3): 330
- [5] Bykovskii F A, Zhdan S A, Vedernikov E F. Realization and modeling of continuous spin detonation of a hydrogen oxygen mixture in flow-type combustors. *Combust Explo Shock Waves*, 2009, 45(5): 716
- [6] Wang Y H, Wang J P. Coexistence of detonation with deflagration in rotating detonation engines. *Int J Hydrogen Energy*, 2016, 41(32): 14302
- [7] Yang C L, Wu X S, Ma H, et al. Experimental research on initiation characteristics of a rotating detonation engine. *Exp Therm Fluid Sci*, 2016, 71: 154
- [8] Daniau E, Falempin F, Getin N, et al. Design of a continuous detonation wave engine for space application // 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. California, 2006: 4794
- [9] Zhang B, Bai C H, Lee J H S. Experimental research on the relation of parameters of $C_2H_2-2.5O_2-Ar$ mixtures detonation: Critical tube diameter, cell size and critical energy of direct initiation. *Trans Beijing Inst Technol*, 2012, 32(3): 226
(张博, 白春华, John H S Lee. $C_2H_2-2.5O_2-Ar$ 混合气体临界管径和爆轰胞格及临界能量的实验研究. *北京理工大学学报(自然科学版)*, 2012, 32(3): 226)
- [10] Wu Y W, Lee J H S. Stability of spinning detonation waves. *Combust Flame*, 2015, 162(6): 2660
- [11] Mazaheri K, Mahmoudi Y, Sabzpooshani M, et al. Experimental and numerical investigation of propagation mechanism of gaseous detonations in channels with porous walls. *Combust Flame*, 2015, 162(6): 2638
- [12] Hishida M, Fujiwara T, Wolanski P. Fundamentals of rotating detonations. *Shock Waves*, 2009, 19(1): 1
- [13] Zhdan S A, Bykovskii F A, Vedernikov E F. Mathematical modeling of a rotating detonation wave in a hydrogen-oxygen mixture. *Combust Explos Shock Waves*, 2007, 43(4): 449
- [14] Pan Z H, Fan B C, Zhang X D, et al. Wavelet pattern and self-sustained mechanism of gaseous detonation rotating in a coaxial cylinder. *Combust Flame*, 2011, 158(11): 2220
- [15] Trotsyuk A V, Fomin P A, Vasil'ev A A. Numerical study of cellular detonation structures of methane mixtures. *J Loss Prev Proc Ind*, 2015, 36: 394
- [16] Lee J H S. *The Detonation Phenomenon*. Cambridge: Cambridge University Press, 2008
- [17] Zhao H J, Lee J H S, Zhang Y H. Quantitative irregularity analysis for spinning detonation of premixed $CH_4 + 2O_2$. *Chin J Eng*, 2016, 38(11): 1552
(赵焕娟, John H. S. LEE, 张英华. 甲烷预混气螺旋爆轰的定量不稳定性研究. *工程科学学报*, 2016, 38(11): 1552)
- [18] Zhang B, Bai C H. Research progress on the dynamic characteristics of gaseous detonation. *Sci Sin Phys Mech Astron*, 2014, 44(7): 665
(张博, 白春华. 气相爆轰动力学特征研究进展. *中国科学: 物理学力学天文学*, 2014, 44(7): 665)
- [19] Zhang B, Mehrjoo N, Ng H D, et al. On the dynamic detonation parameters in acetylene-oxygen mixtures with varying amount of argon dilution. *Combust Flame*, 2014, 161(5): 1390
- [20] Zhang W, Liu Y F, Jiang Z L. Study on the relationship between ignition delay time and gaseous detonation cell size. *Chin J Theor Appl Mech*, 2014, 46(6): 977
(张薇, 刘云峰, 姜宗林. 气相爆轰波胞格尺度与点火延迟时间关系研究. *力学学报*, 2014, 46(6): 977)
- [21] Wang C J, Xu S L, Fei L S. Study on reaction zone structure of gaseous detonation wave by planar laser induced fluorescence technique. *Chin J Theor Appl Mech*, 2007, 39(5): 661
(王昌建, 徐胜利, 费立森. 气相爆轰波反应区结构的平面激光诱导荧光测量. *力学学报*, 2007, 39(5): 661)
- [22] Xu X F, Xie L F, Peng J H, et al. Study on the detonation cellular structure of propylene epoxide-Air. *Explos Shock Waves*, 2004, 24(2): 158
(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. *爆炸与冲击*, 2004, 24(2): 158)
- [23] Liu S J, Qin H, Lin Z Y, et al. Detailed structure and propagating mechanism research on continuous rotating detonation wave. *J Propuls Technol*, 2011, 32(3): 431
(刘世杰, 覃慧, 林志勇, 等. 连续旋转爆轰波细致结构及自持机理. *推进技术*, 2011, 32(3): 431)
- [24] Cheng G B, Li J X, Li S M, et al. An experimental study on detonation characteristics of binary fuels hydrogen/propane-air mixtures. *Explos Shock Waves*, 2015, 35(2): 249
(程关兵, 李俊仙, 李书明, 等. 氢气/丙烷/空气预混气体爆轰性能的实验研究. *爆炸与冲击*, 2015, 35(2): 249)
- [25] Hu X Y, Zhang D L. Variation of the gaseous detonation wave through the detonation cell. *J Beijing Inst Technol*, 2001, 21(3): 2861
(胡湘渝, 张德良. 气相爆轰波贯穿胞格变化研究. *北京理工大学学报*, 2001, 21(3): 286)
- [26] Wu Y, Chri Stensen K T. Population trends of spanwise vortices in wall turbulence. *J Fluid Mech*, 2006, 568: 55
- [27] Head M R, Bandyopadhyay P. New aspects of turbulent boundary-layer structure. *J Fluid Mech*, 1981, 107: 297
- [28] Yu J L, Gao Y, Yan X Q, et al. Correlation between the critical tube diameter and annular interval for detonation wave in high-concentration argon diluted mixtures. *Explos Shock Waves*, 2015, 35(4): 603
(喻健良, 高远, 闫兴清, 等. 高浓度氩气稀释气体爆轰波临界管径和临界间距关系. *爆炸与冲击*, 2015, 35(4): 603)
- [29] Zhao H J, Lee J H S, Lee J L, et al. Quantitative comparison of cellular patterns of stable and unstable mixtures. *Shock Waves*, 2016, 26(5): 621