

气相爆轰波马赫反射非自相似性特征的实验

刘杰¹, 赵焕娟², 杜忠华¹, 陈曦¹

(1. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094;

2. 北京理工大学化工与环境学院, 北京 100081)

摘 要: 为了研究在 CJ(Chapman-Jouguet)状态下气相爆轰波马赫反射的非自相似性特征, 搭建了由驱动段、传播段以及观测段组成的矩形管道; 利用纹影和烟膜实验方法分别对 3 种预混气发生马赫反射现象进行了实验研究. 实验结果表明: 对稳态或非稳态气体, 测量了马赫反射三波点位置高度, 验证了马赫反射三波点轨迹线为波动的曲线, 即自相似性对爆轰波马赫反射失效; 非自相似性的重要特征是三波点轨迹线在楔角初始位置时基本遵循无反应冲击波理论计算结果, 随后逐渐偏离并向有反应冲击波转变, 之后接近平行于反应冲击波理论计算并稳定地处于两个理论值之间. 最后给出在初始压力为 10 kPa 和楔角为 30° 的条件下, 对于所研究的 3 种气体, 其马赫反射三波点发生转变的位置高度分别约为 0.8, 1.05 cm 以及 0.5 cm, 可见相同初始条件下非稳态气体的马赫反射发生转变比稳态气体提前.

关 键 词: 气相爆轰; 马赫反射; 三激波理论; 非自相似性; 胞格结构

中图分类号: V211.7

文献标志码: A

Experiment on non-self-similar of Mach reflection of gaseous detonation wave

LIU Jie¹, ZHAO Huan-juan², DU Zhong-hua¹, CHEN Xi¹

(1. School of Mechanical Engineering,

Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. School of Chemical Engineering and Environment,

Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to study the non-self-similarity of Mach reflection of detonation waves, Mach reflection of detonation waves was investigated in a thin rectangular channel, and the schlieren system and smoked foils were used respectively to obtain experimental results about Mach reflection that happened in three kinds of pre-mixtures. The results illustrate that for stable or unstable mixtures, the triple point trajectory rendered by Mach reflection is a curve, which means that the Mach reflection of detonations waves along the wedge doesn't have the characteristic of self-similarity as that of the non-reactive shocks. A crucial feature about the non-self-similarity is found that the trajectory of Mach reflection in detonation waves roughly follows triple point trajectory of non-reactive shock theory at beginning of wedge, and then falls on a line parallel to triple point trajectory of reactive shock theory. When the initial pressure was 10 kPa and the wedge angle was 30°, the height of Mach triple point of the pre-mixtures for the transition was 0.8, 1.05 cm and 0.5 cm respectively, which demonstrates that the transition of unstable mixture happens early than stable mixture.

Key words: gaseous detonation; Mach reflection; three-shock theory; non-self-similar; cellular structure

对于冲击波的马赫反射现象,许多学者^[1-4]进行了详细而深入的研究,近年 Ben-Dor 在其专著中对冲击马赫反射的理论和实验研究两方面进行了全面的描述和总结,具体内容可见参考文献[5],至今,马赫反射仍然是激波领域研究的热点.类似的,气相爆轰波经过楔角同样可发生马赫反射,但是气相爆轰波带有化学反应,根据 ZND (Zel'dovich-von Neumann-Döring) 模型^[6]可知波阵面主要由冲击波头、诱导区和反应区组成,整个厚度尺度通常在 $10^{-5} \sim 10^{-1}$ m 范围内^[7];另外,根据大量实验研究表明^[8],除了沿着爆轰波传播方向外,在波阵面上还存在着横波,并作周期性脉动,导致波阵面上产生三波点,三波点运动所形成的胞格结构可由熏制的烟膜和光学快门照相相等实验手段记录^[9],可见,上述特征会使得气相爆轰波马赫反射现象变的复杂,从而导致冲击波的马赫反射所具有的特征并不适用于气相爆轰波的马赫反射.在工程实践方面,气相爆轰波经过收敛截面管道、楔形障碍物发生斜爆轰或者推进器的收敛喷管时^[10-12],适当条件下发生马赫反射现象,也是经常容易遇到的问题.因此,对于爆轰波马赫反射现象的研究既是基础实验研究,同时也具有重要的工程应用价值.

虽然很早就有学者对爆轰波的马赫反射现象进行研究,例如:Meltzer 等^[13]利用烟膜实验研究了气体 $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{XAr}$ 发生马赫反射的现象;之后 Akbar^[14]选取高浓度氩气稀释的稳态气体 $\text{C}_2\text{H}_2 + 2.5\text{O}_2 + 14\text{Ar}$ 及 $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{XAr}$,并利用纹影实验对其马赫反射现象进行了研究,测量了纹影实验结果中马赫反射轨迹角,发现所测量结果和三激波理论计算结果存在明显的差异.另外,由于爆轰波具有不稳定性及多维结构特征^[15],使得爆轰波的马赫反射变的更加复杂,并且一直存在许多实验现象尚未得到合理的解释和验证,其中之一是爆轰波的马赫反射是否具有类似于冲击波马赫反射的自相似性特征,现已有学者认识到这一问题,Trotskyuk^[16]对气体 $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ 在初始压力 $p_0 = 200$ kPa 条件下的马赫反射现象进行了数值计算研究,以楔面长度 L 同胞格尺寸 λ 之比 L/λ 得到无量纲量为横坐标,同时也对所测量的马赫杆高度 H 用胞格尺寸 λ 进行无量纲化,结果显示,爆轰波马赫反射三波点轨迹线不是一条直

线. Shepherd 等^[17]基于 Akbar 的纹影实验结果,从爆轰波化学反应进程和反应区尺度 ΔR 之间的耦合关系进行分析,发现爆轰波的马赫反射存在于无反应极限(frozen limit)和反应释放平衡极限(equilibrium limit)之间,指出由于横波的运动使得马赫反射三波点轨迹线具有波动性. Hu 和 Jiang^[18]利用数值模拟对 $\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{Ar}$ 稀释气体发生二维马赫反射进行了分析,讨论了两个区域三波点及横波相互碰撞形成马赫三波点轨迹线的过程.直接利用数值模拟,采用带化学反应源项的非定常欧拉方程,往往可以更早地获得对这一现象的初步认识,同时能够得到详细的瞬态流场信息,但由于数值计算有其自身的局限性,常采用单步化学反应模型,即简化真实的化学反应,因此只能定性解释部分气相爆轰波的马赫反射现象.由上述分析可知,虽然之前提到爆轰波马赫反射的轨迹线具有波动性,但是关于爆轰波马赫反射三波点轨迹线变化趋势的认识相当局限,因此有必要对爆轰波马赫反射现象进行更加深入的研究.

本文选择此 3 种预混气体,分别是 $\text{C}_2\text{H}_2 + 2.5\text{O}_2 + 70\% \text{Ar}$, $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ar}$ 和 $\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2$,用于研究稳态与非稳态气体的爆轰波在不同楔角 θ_w 和初始压力 p_0 条件下发生马赫反射的现象.首先,利用三激波理论对无反应冲击波和反应冲击波(作为带反应间断的爆轰波)进行了计算,对比两者在经过相同楔角发生马赫反射时波前、波后压力变化和偏转角之间 polar 曲线的差异;根据实验结果,测量了在楔面上方马赫反射三波点的位置高度,然后同三激波理论计算进行对比,明确指出了爆轰波马赫反射行为演变发展的过程,同时也分析了楔角 θ_w 和初始压力 p_0 对马赫反射轨迹线及其非自相似性特征的影响.

1 实验方法和装置

采用纹影实验和烟膜技术分别记录爆轰波在不同初始压力 p_0 和楔角 θ_w 条件下发生马赫反射的实验结果.爆轰管道由驱动段、传播段以及观测段组成,爆轰波在管内传播的截面尺寸统一为 $100 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$,管材为 6061 铝合金,实验中预混气的初始压力 p_0 和楔角 θ_w 的范围分别是 $3 \sim 20$ kPa 和 $20^\circ \sim 40^\circ$.

实验步骤:准备阶段,首先在观测段内固定所

需的楔角,然后用真空泵抽取密封爆轰管内的空气,使得管内气压小于 0.01 Pa 且保证泄露率小于 2 kPa/h;充气阶段,在整个爆轰管道内缓慢地充入静止混合不少于 24 h 的实验用预混气,达到设定的初始压力 p_0 即可,之后在长度为 500 mm 的驱动段内快速充入定量且活性更高的驱动气体,既保证实验用预混气快速形成在 CJ 条件下的爆轰,又避免对实验设定状态的影响;起爆阶段,迅速采用 18 kV 高压电火花起爆,期间经历两个过程,首先是利用高压电火花释放能量直接起爆过驱动气体,形成过驱爆轰,强过驱爆轰波在实验用预混气中生成一个很强的激波,再次直接起爆预混气体,特别是对不敏感的临近状态预混气,采用这种强过驱爆轰来实现直接起爆是有效的起爆方式^[9]. 另外,在爆轰管的传播段管壁上顺序固定压力传感器 PCB-113A24,用于确定实验中在 CJ 条件下的爆轰速度. 因此,烟膜实验中采用厚度为 1 mm 聚酯乙烯膜片,用富含碳氢化合物燃料煤油来熏制,在楔角完成固定之后可靠地平铺

在爆轰管的观测段内楔角两侧壁;对于纹影实验,由于系统要求观测段能被光线穿透,故在放置楔面的部位两侧由透明钢化玻璃包夹;此外,楔角两侧放置的熏制好的烟膜会遮挡纹影系统所要求的光透通道,为避免发生干涉,两个实验手段分开单独重复进行,具体实验装置布局如图 1 所示. 最后,在观察段末端放置一个吸收装置,目的是迅速降低反射冲击波的压力,以免损坏放置在楔面两侧的烟膜.

胞格结构较为规则且化学反应区具有薄片层状结构的爆轰气体,称为稳态气体;而对于胞格结构非常不规则,反应区具有湍流结构的,称为非稳态气体^[19]. 根据上述,将实验用预混气列于表 1,同时给出在初始压力 $p_0 = 10$ kPa 和 $T_0 = 298$ K 条件下基本的爆轰参数,包括 CJ 状态下的爆轰速度 D_{CJ} 、马赫数 Ma_{CJ} 以及反应前后比热比 γ_0 和 γ_1 ,可通过 CEA(chemical equilibrium and applications)^[20] 进行计算得到,为下文中三激波理论计算提供必要的数据.

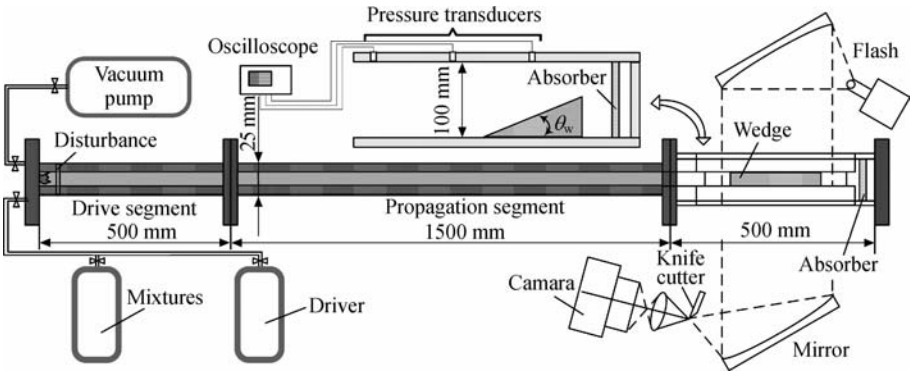


图 1 实验装置示意图
Fig. 1 Schematic of experimental apparatuses

表 1 实验用预混气
Table 1 Pre-mixtures for experiments

混气	状态	p_0 /kPa	γ_0	γ_1	Ma_{CJ}
$C_2H_2 + 2.5O_2 + 70\%Ar$	稳态	10	1.51	1.17	5.48
$2H_2 + O_2 + 3Ar$	稳态	10	1.50	1.15	4.86
$C_3H_8 + 5O_2$	非稳态	10	1.29	1.12	7.35

2 三激波理论

采用 Von Neumann^[21]所提出用于分析激波马赫反射的三激波理论,可对冲击波经过楔角发生马赫反射的波前波后的压力等状态参数计算. 根据有无反应热 q 的释放,分为无反应冲击波和

反应冲击波,其中无反应冲击波中比热比 γ 为常数;而反应冲击波则是将爆轰波视为带有反应间断的冲击波,由于其反应前后比热比 γ 差异较大,为减小计算误差,尽量更加贴近实际物理模型,故采用 $2-\gamma$ 模型^[22],即定义未反应时比热比为 γ_0 和反应后均匀的比热比 γ_1 ,根据上面表 1 中的参

根据上面三激波理论,采用表 1 中 3 种预混气体的爆轰参数,分别对相应的无反应冲击波和反应冲击波的马赫反射进行了计算并对理论进行相应的验证,给出了两者在波面坐标系下经过 $\theta_w = 20^\circ$ 所对应的 polar 曲线图,如图 3. 观察图 3(a)、图 3(b)和图 3(c)各自的反应冲击波和无反应冲击波 polar 曲线变化趋势并进行对比:①无反应冲击波跨过入射激波的压力变化先从 $p/p_0 = 1 (\theta = 0^\circ)$ 发出,与反向进行的反射激波之间存在两个交点,对应的横坐标分别为为无反应冲击波跨过入射波和马赫杆的偏转角 θ_{si} 和 θ_{sm} ,与跨过反射激波的偏转角 θ_{sr} 之间满足式(9);而对于反应冲击波,入射波和反射波的特征曲线都是从所满足的平衡 CJ 点发出,因为反应冲击波具有反应放热间断(不考虑反应区厚度),同样与反

向进行的反射激波相交,代表反应冲击波跨过过驱的马赫杆发生偏转,跨过入射波和马赫杆的偏转角 θ_{di} 和 θ_{dm} ,与跨过反射激波的偏转角 θ_{dr} 之间同样也满足式(9). 总体来看,反应冲击波和无反应冲击波之间的 polar 曲线在出发点存在差异,但入射波和反射波各自的 polar 曲线类似. ②反应冲击波跨过入射波和马赫杆,波前、波后压力比值 p/p_0 随偏转角 θ 的变化范围比对应的无反应冲击波要小,后者与前者之间所对应的压力比值 p/p_0 变化基本处在 1.5~2 范围内,说明经过反应放热过程之后,波后产物流场压力明显降低;另外,反应冲击波跨过间断的偏转角范围相比于无

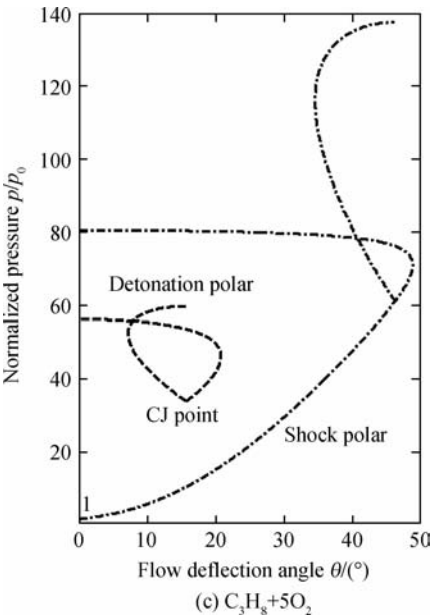


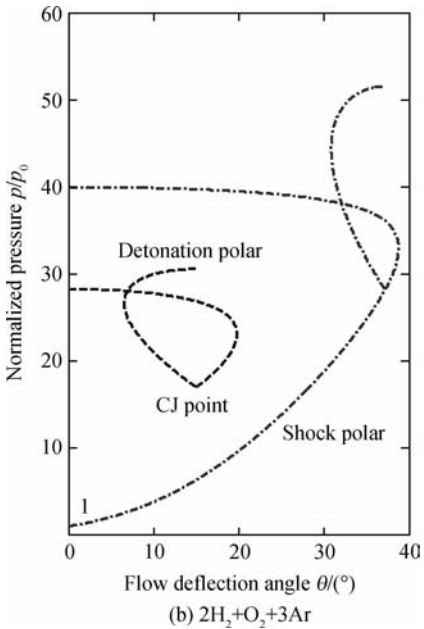
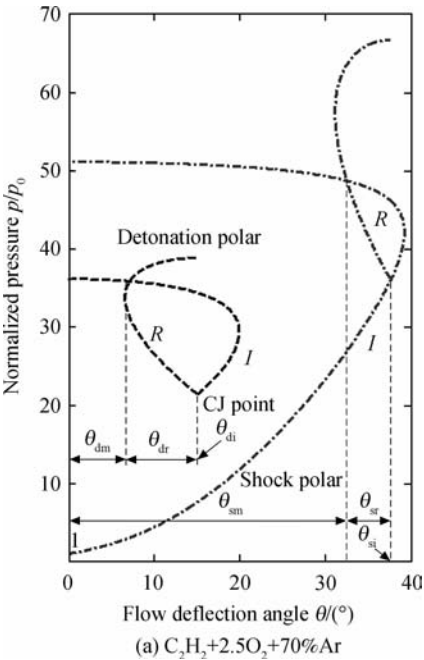
图 3 反应和无反应冲击波经过 $\theta_w=20^\circ$ 的 polar 曲线
Fig. 3 Polar curves of non-reactive and reactive shock over $\theta_w=20^\circ$

反应冲击波缩小. ③对于图 3(a)、图 3(b)和图 3(c)相比马赫数 Ma 相对较低,跨过间断的压力变化幅度较小,反应和无反应冲击波的最小的偏转角分别接近 20° 和 40° ;对于图 3(c),反应和无反应冲击波的最小的偏转角分别接近 20° 和 50° .

3 实验结果及分析

3.1 $C_2H_2+2.5O_2+70\%Ar$ 马赫反射特征

图 4 为 $C_2H_2+2.5O_2+70\%Ar$ 在不同初始压力 p_0 下经过 $\theta_w=30^\circ$ 楔角时马赫反射的纹影实验结果. 在 $p_0=3\text{ kPa}$ 时,未受马赫反射影响区域的 CJ 爆轰波波阵面波动较大,说明入射波和马赫杆之间的曲率差异明显,因此,由前导冲击波 (leading shock wave)、马赫杆 (Mach stem, MS) 以及横波 (transverse wave, TW) 组成的三波点在波阵面上位置清晰可辨,另外,反射波 (reflected wave, RW) 强度较弱,因此显示并不明显. 随着初始压力逐渐升高,例如在 $p_0=10\text{ kPa}$,CJ 波阵面结构波动程度缓和,三波点个数明显增多,波阵面后反射波逐渐清晰,而且,不论是 CJ 波阵面还是马赫杆的波阵面,相比于之前,两者的反应区厚度 ΔR 略有相应减小; $p_0=20\text{ kPa}$ 时,前导冲击波和马赫杆交替频率提高,因而使得横波间距极小,所以波阵面显示近乎为直线;另外,马赫三波点更加贴近楔面,反射波则进一步增强,从马赫三波点后直线延伸,经过一段直线距离后近似以半



圆轨迹向楔角方向弯曲,直至与管壁相交,说明反射区域下面膨胀波压力在靠近马赫三波点处压力较高,随后压力出现非线性衰减. 马赫反射三波点的位置在入射波、马赫杆以及反射波的交汇点,入射波上存在横波向下运动,使得入射波上的三波点和马赫反射三波点周期性的碰撞,随着初始压力升高,两者碰撞频率加快,能够确定马赫反射三波点轨迹线的波动性是由横波运动引入的三波点之间相互碰撞所造成的.

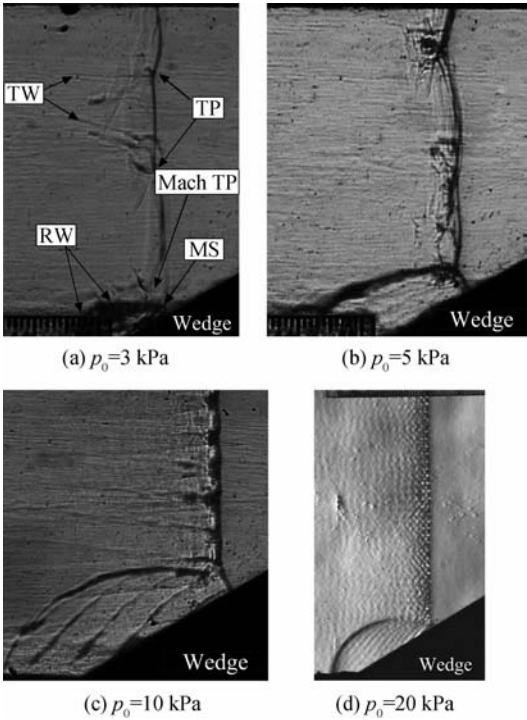


图 4 $C_2H_2 + 2.5O_2 + 70\% Ar$ 经过 30° 楔角纹影实验结果
Fig. 4 Shlieren photographs of $C_2H_2 + 2.5O_2 + 70\% Ar$ over 30°

图 5 是利用烟膜记录爆轰波在不同初始压力 p_0 下经过 $\theta_w = 30^\circ$ 楔角的整个马赫反射过程. 对于稳态气体爆轰波,具有较为规则的胞格结构. 在初始压力较低时($p_0 = 3\text{ kPa}$),清楚看出三波点运动的轨迹,由爆轰波与楔角碰撞后形成马赫反射三波点,和楔面之间的部分为马赫杆,沿着楔面运动,并且在楔面的顶部,由于马赫杆的不稳定性,隐约分裂出马赫杆上的三波点;除 $p_0 = 3\text{ kPa}$ 外,其他三个相对较高的初始压力 p_0 下,CJ 爆轰区域和马赫反射区域均可明显区分各自的三波点. 由于马赫反射三波点轨迹线是由两侧区域的横波之间相互碰撞形成,因此轨迹线具有波动性, $C_2H_2 + 2.5O_2 + 70\% Ar$ 稳态气体爆轰波的胞格尺寸 $\lambda(\text{mm})$ 和初始压力 $p_0(\text{kPa})$ 的关系为^[24]

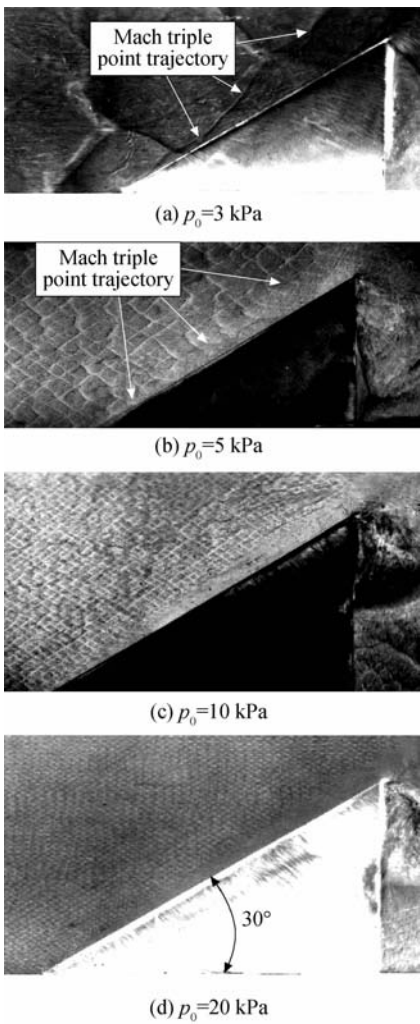


图 5 $C_2H_2 + 2.5O_2 + 70\% Ar$ 经过 30° 楔角烟膜实验结果
Fig. 5 Smoked foils of $C_2H_2 + 2.5O_2 + 70\% Ar$ over 30°

$$\lambda = a \cdot (p_0)^b \quad (a = 113.8, b = -1.20) \quad (7)$$

根据式(7),胞格尺寸 λ 和初始压力 p_0 成衰减指数关系,因此马赫反射三波点轨迹线的波动性在初始压力 p_0 较小时尤为明显,当初始压力升高至 $p_0 = 20\text{ kPa}$ 时,马赫反射三波点轨迹线两侧胞格的尺寸显著减小,因此胞格尺度 λ 相对于楔面长度 L 也相应下降,使得轨迹线的波动不明显,对马赫反射非自相似性影响不再显著.

因此,为了确定爆轰波的马赫反射非自相似性特征,对烟膜实验结果中马赫反射三波点的位置高度进行测量统计,并与上面所列出的三激波理论加以比较,如图 6 所示,其中横坐标代表沿楔面的长度 L ,纵坐标为马赫反射三波点相对于楔面的高度 H . 在图 6(a)中,初始压力 $p_0 = 10\text{ kPa}$ 下的爆轰波经过 $\theta_w = 30^\circ$ 马赫三波点高度,其中无

反应冲击波和反应冲击波理论值分别为 8.9° 和 1.7° (忽略初始压力影响), 可以看出, 三波点高度 H 在初始位置接近并跟随无反应冲击波理论, 但随后存在逐渐缓慢转变趋势, 其马赫反射三波点发生转变的位置在 0.8 cm 左右, 之后渐进向反应冲击波偏离, 而且趋势是接近平行于反应冲击波, 因此, 实验结果证明 $\text{C}_2\text{H}_2 + 2.5\text{O}_2 + 70\% \text{ Ar}$ 所形成的爆轰波发生马赫反射时的三波点轨迹线为一波动的衰减曲线, 衰减是指马赫杆的过驱程度逐渐下降, 导致马赫反射三波点轨迹线在相当距离内也随之下降, 但由于实验中楔面长度有限, 无法得知马赫反射最终稳定的位置高度; 在图 6(b) 中, 楔角 θ_w 较小时, 马赫三波点位置较高, 轨迹线的波动性较大; 随着楔角 θ_w 升高, 马赫杆高度整体降低, 逐渐靠近楔面, 同时马赫反射三波点轨迹线曲率也随之变小.

计, 给出了其在 CJ 爆轰下胞格尺寸 $\lambda(\text{mm})$ 和初始压力 $p_0(\text{kPa})$ 之间所拟合的关系式(8)

$$\lambda = A(p_0)^{-\alpha} \quad (A = 183.4; \alpha = 1.149)$$

(8)

另外, Akbar 的论文^[14]中给出了 $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{XAr}$ 在 $T_0 = 295\text{ K}$ 下在楔面不同位置所捕获的大量纹影实验照片, 本文并未重复纹影实验, 而是对其进行了烟膜实验补充, 下面是 $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ar}$ 的爆轰波在不同楔角 θ_w 下的烟膜实验结果, 如图 7. 在图 7(a) 中, 马赫反射的胞格结构清晰, 在楔面的中间部位存在一个从 CJ 区域向马赫杆运动的三波点, 即开始是作为入射波面上的三波点, 随着横波的运动, 与马赫反射三波点发生碰

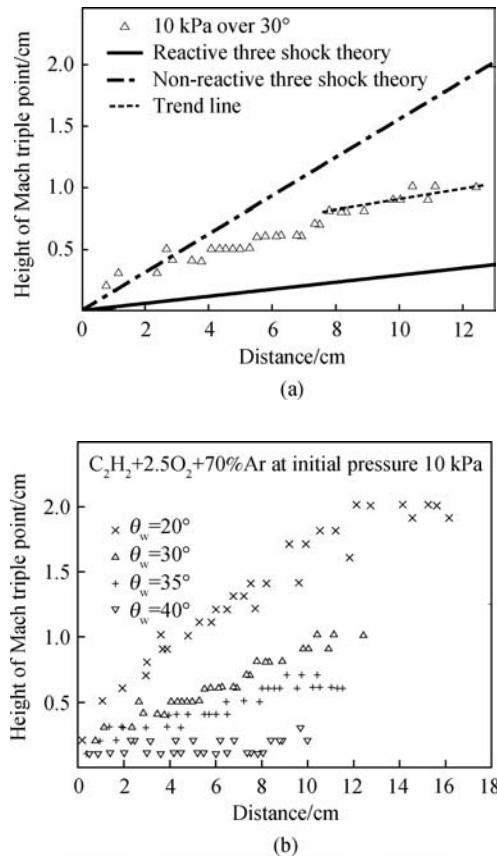


图 6 $\text{C}_2\text{H}_2 + 2.5\text{O}_2 + 70\% \text{ Ar}$ 的马赫反射三波点的高度位置

Fig. 6 Height of Mach triple point of $\text{C}_2\text{H}_2 + 2.5\text{O}_2 + 70\% \text{ Ar}$

3.2 $\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ar}$ 马赫反射特征

另外一种典型的稳态气体是 $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ar}$, 根据大量烟膜实验结果中, 对胞格尺寸 λ 进行了统

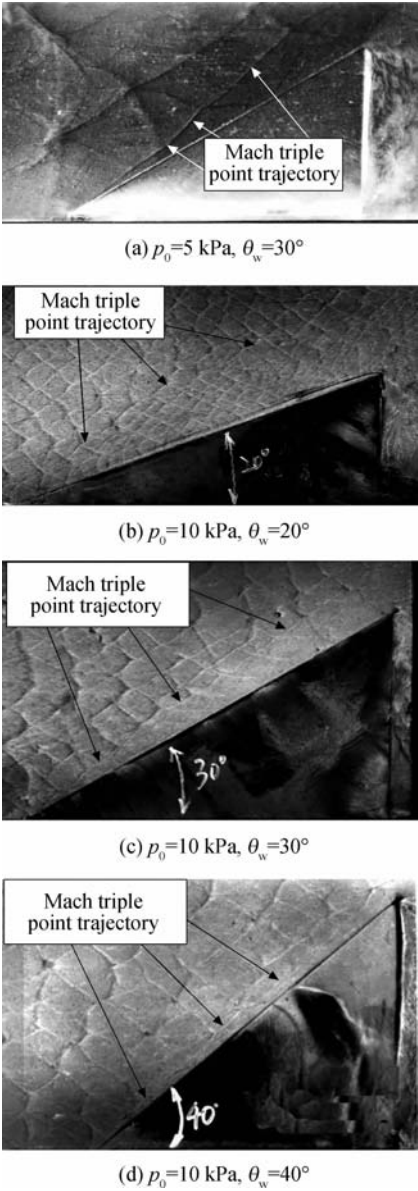


图 7 $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ar}$ 的烟膜实验结果^[14]

Fig. 7 Smoke foils of $2\text{H}_2 + \text{O}_2 + 3\text{Ar}$ ^[14]

撞,但由于受到马赫杆运动速度加快和方向改变的影响,三波点的运动轨迹角减小并且自身转变为马赫杆上的三波点,之后与壁面发生碰撞并反射,最终与马赫反射三波点进行合并.图 7(b)中,在较小的 $\theta_w=20^\circ$ 楔角发生马赫反射,观察胞格结构,楔面上部胞格尺寸差异并不明显.随着楔角 θ_w 增大,马赫反射轨迹线容易辨别,同时两侧的胞格尺寸差异更加明显,说明马赫反射马赫杆的过驱程度加剧,在楔角 $\theta_w=40^\circ$ 时,马赫反射三波点轨迹线非常接近楔面,马赫杆高度 H 进一步被压缩,因此,难以观察马赫杆上的三波点.

在图 8(a)中,楔角为 $\theta_w=30^\circ$,其中无反应冲击波和反应冲击波理论值分别为 10.6° 和 2.34° ,根据实验结果,马赫反射三波点的运动轨迹趋势是在楔面的初始部位相当接近无反应冲击波,经过一短暂距离之后,向反应冲击波靠近且有平行于反应冲击波的趋势, $p_0=20\text{ kPa}$ 的条件下马赫反射三波点轨迹线比 $p_0=10\text{ kPa}$ 要提前发生转变和偏转,前者马赫三波点的转变高度约为 0.7 cm ,而后者约为 1.05 cm ,而且马赫反射三波点的高度位置更加接近楔面.图 8(b)中,给出的是爆

轰波在 10 kPa 和 20 kPa 经过 40° 楔角时的实验结果对比,无反应冲击波理论为 5.76° ,而根据反应冲击波理论计算表明爆轰波已由马赫反射转变为正规反射,但实验结果表明: 10 kPa 和 20 kPa 条件下,马赫三波点的转变高度基本在 0.5 cm 以下,而且马赫杆的更加贴近楔面,说明 40° 楔角比较靠近由马赫反射向正规反射转变的临界角,但实验中爆轰波仍然发生马赫反射.

3.3 C₃H₈+5O₂ 马赫反射特征

图 9 为非稳态气体 $\text{C}_3\text{H}_8+5\text{O}_2$ 在不同初始压力 p_0 下的马赫反射纹影实验结果. $p_0=3\text{ kPa}$ 时,爆轰波反应区所具有的湍流结构以及横波运动毫无规律所导致的不稳定性,使得爆轰波阵面结构紊乱,难以辨别三波点准确位置,但反射波和与其相交的马赫杆能够被观察到,并且由于非稳态气体 $\text{C}_3\text{H}_8+5\text{O}_2$ 波阵面的极不稳定性,导致其后面出现滞后反应气团,马赫三波点区域以及马赫杆出现强剪切层涡流,这是和稳态气体主要区别之一.随着初始压力 p_0 升高,CJ 爆轰波阵面结构进一步相对稳定,反射波强度明显增加,当在初始压力 $p_0=10\text{ kPa}$ 时,在马赫杆后面以及反射波下面区域明显出现多条密度间断层,根据反应物流场显示可知^[23],区域内压力相同、法向速度相同,但密度不同,产生向外层状扩散分布密度梯度接触间断层,表现在纹影实验图片中为不同灰度条状带.可见,非稳态气体在爆轰中的不稳定性以及湍流在反应区中起主导作用^[25],对非稳态气体马赫反射具有一定的影响.

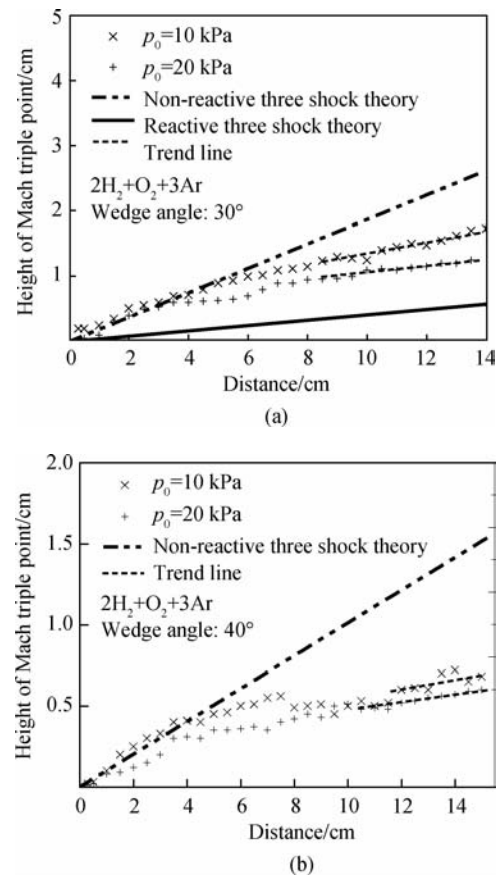


图 8 $2\text{H}_2+\text{O}_2+3\text{Ar}$ 的马赫反射三波点的位置
Fig. 8 Height of Mach triple point of $2\text{H}_2+\text{O}_2+3\text{Ar}$

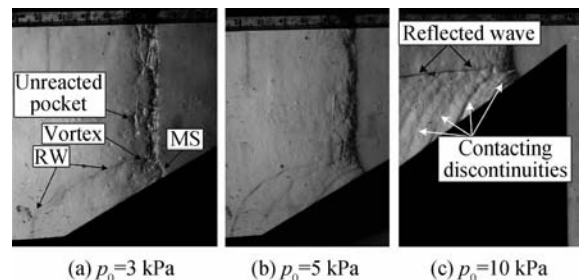


图 9 $\text{C}_3\text{H}_8+5\text{O}_2$ 经过 30° 楔角纹影实验结果
Fig. 9 Schlieren photographs of $\text{C}_3\text{H}_8+5\text{O}_2$ over 30°

在图 10 中,烟膜实验结果记录了非稳态气体 $\text{C}_3\text{H}_8+5\text{O}_2$ 在不同初始压力 p_0 下发生马赫反射的胞格变化过程.在图 10(a)和图 10(b)中,两者初始压力 p_0 都较低,胞格结构不规则,有限宽度之内难以准确测量胞格宽度 λ 值,但是马赫反射三波点轨迹线比较清晰,而且马赫反射区域内胞

格非常细小,说明非稳态气体对于过驱度的响应程度比稳态气体要敏感;对比图 10 中实验结果发现:初始压力 p_0 越大,胞格结构的规则程度明显提高;另外一个共同特征是在马赫杆后过驱区域内的胞格尺寸相对于 CJ 爆轰区域胞格尺寸明显减小。 $C_3H_8+5O_2$ 非稳态气体的马赫反射,在楔面初始位置胞格转变区不明显,而当过驱度增大时,过驱区域内胞格变得小而密集,形状较为规整,这一点与稳态气体不同;相比与稳态气体,在初始压力 p_0 较低的情况下非稳态气体转变过程则比较明显。此外,确定并区分马赫反射三波点轨迹线位置的标准之一可根据从 CJ 爆轰区过渡到过驱区域内三波点轨迹线的斜率减小来进行判断。

图 11 为非稳态气体 $C_3H_8+5O_2$ 发生马赫反射三波点的位置高度实验测量值,同三激波理论

计算值进行对比,可发现马赫反射三波点和稳态气体存在相似的变化趋势,同样展示出马赫反射三波点运动的轨迹为一条不具有自相似性的波动曲线。另外,随着初始压力 p_0 升高,反应区厚度 ΔR 减小,横波间距进一步缩小,胞格尺度 λ 相对于楔面长度可近似忽略不计,因此,导致马赫反射三波点轨迹逐渐靠近反应冲击波理论解,在初始压力 $p_0=10\text{ kPa}$ 经过 30° 楔角时,马赫三波点向发生偏离转变的高度约为 0.5 cm 。

4 结 论

通过对 3 种预混气,包括稳态气体和非稳态气体,发生马赫反射现象的研究,得到了爆轰波马赫反射非自相似性相关的实验特征,结论如下:

- 1) 给出了 3 种实验预混气的 polar 曲线,对各自所对应的反应冲击波和无反应冲击波进行了比较分析。无反应冲击波跨过入射激波的压力变化先从 $p/p_0=1(\theta=0^\circ)$ 发出,而对于反应冲击波,入射波和反射波的特征曲线都是从所满足的平衡 CJ 点发出。后者的波前、波后压力比值 p/p_0 随偏转角 θ 的变化范围比对应的无反应冲击波要小,而且反应冲击波跨过间断的偏转角范围相比于无反应冲击波缩小。
- 2) 在 CJ 爆轰条件下气相爆轰波发生马赫反射,其非自相似性特征的一个规律是:气相爆轰波的马赫反射轨迹线既没有完全遵循无反应冲击波理论计算,也没有直接跟随反应冲击波理论计算,而是在两者之间存在一个偏离转变的过程。
- 3) 对于 $C_2H_2+2.5O_2+70\%Ar$, $2H_2+O_2+3Ar$ 以及 $C_3H_8+5O_2$ 这 3 种所研究的预混气,给出了各自马赫反射三波点的运动趋势,分别对应图 6、图 8 和图 11。

参考文献:

[1] Hornung H. Regular and Mach reflection of shock waves [J]. Annual Review Fluid Mechanics,1986,18:33-58.
[2] Ben-Dor G, Takayama K. The phenomena of shock wave reflection;a review of unsolved problems and future research needs[J]. Shock Waves,1992,2(4):211-223.
[3] Kobayashi S, Adachi T. Consideration of Von Neumann reflection and Mach reflection for strong shock waves[C]// Proceedings of 28th International Symposium on Shock Waves. Heidelberg, Berlin:Springer,2012:485-491.
[4] Viero D P, Susin F M, Defina A. Anote on weak shock wave reflection[J]. Shock Waves,2013,23(5):505-511.
[5] Ben-Dor G. Shock wave reflection phenomena[M]. New York:Springer-Verlag,2007.

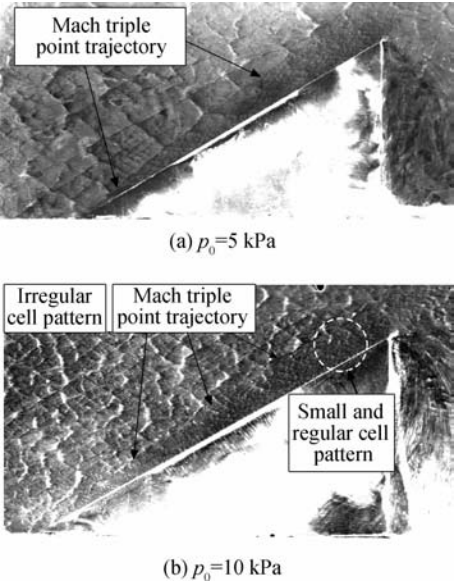


图 10 $C_3H_8+5O_2$ 经过 30° 楔角烟膜实验结果
Fig. 10 Smoked foils of $C_3H_8+5O_2$ over 30°

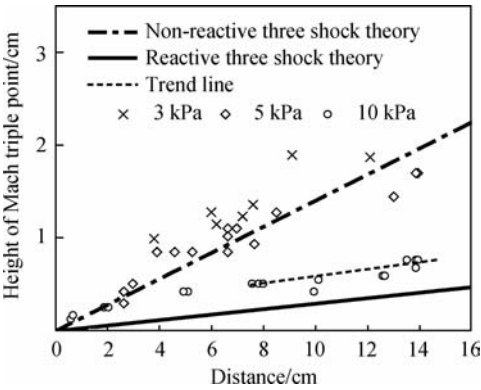


图 11 $C_3H_8+5O_2$ 马赫反射三波点的高度
Fig. 11 Height of Mach triple point of $C_3H_8+5O_2$

- [6] Fickett W, Davis W C. Detonation: theory and experiment [M]. Berkeley, California: University of California Press, 1979.
- [7] Zhang F. Shock wave science and technology reference library, Vol. 6 [M]. New York: Springer, 2012.
- [8] Austin J M. The role of instability in gaseous detonation [D]. California: California Institute of Technology, 2003.
- [9] Lee J H S. Detonation phenomenon [M]. Livermore, CA: Cambridge University Press, 2007.
- [10] 于勇, 徐新文. 拉瓦尔喷管外发生激波反射工况详细分析 [J]. 航空动力学报, 2012, 27(9): 1988-1996.
YU Yong, XU Xinwen. Further detailed analysis about shock wave reflection outside Laval nozzle in different working states [J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(9): 1988-1996. (in Chinese)
- [11] 王栋. 脉冲爆震发动机工作过程数值模拟研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
WANG Dong. Numerical simulation of pulse detonation engine cycle [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [12] 孙晓辉, 陈志华, 薛大文, 等. 双楔面诱导的斜爆轰波阵面的磁流体控制 [J]. 航空动力学报, 2012, 27(4): 735-741.
SUN Xiaohui, CHEN Zhihua, XUE Dawen, et al. MHD control of oblique detonation wave front induced by double wedges [J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(4): 735-741. (in Chinese)
- [13] Meltzer J, Shepherd J E, Akbar R, et al. Mach reflection of detonation waves [J]. Progress in Astronautics and Aeronautics, 1991, 153: 78-94.
- [14] Akbar R. Mach reflection of gaseous detonations [D]. Troy: Rensselaer Polytechnic Institute, 1997.
- [15] Pintgen F, Eckert C A, Austin J M, et al. Direct observations of reaction zone structure in propagating detonations [J]. Combustion and Flame, 2003, 133(3): 211-229.
- [16] Trotsyuk A V. Numerical study of the reflection of detonation waves from a wedge [J]. Combustion, Explosion, and Shock Waves, 1999, 35(6): 690-697.
- [17] Shepherd J E, Schultz E, Akbar R. Detonation diffraction [C] // Proceedings of 22nd International Symposium on Shock Waves. London: Southampton University Media, 2000: 41-48.
- [18] Hu Z M, Jiang Z L. Wave dynamic processes in cellular detonation reflection from wedges [J]. Acta Mechanica Sinica, 2007, 23(1): 33-41.
- [19] Lee J H S. Dynamic parameters of gaseous detonations [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1984, 16: 311-336.
- [20] Gordon S, McBride B J. Computer program for calculation of complex chemical equilibrium compositions and application [R]. Washington, DC: NASA, Reference Publication 1311, 1994.
- [21] 杨旸, 姜宗林, 胡宗民. 激波反射现象的研究进展 [J]. 力学进展, 2012, 42(2): 141-161.
YANG Yang, JIANG Zonglin, HU Zongmin. Advances in shock wave reflection on phenomena [J]. Advances in Mechanics, 2012, 42(2): 141-161. (in Chinese)
- [22] Li H, Ben-Dor G, Grönig H. Analytical study of the oblique reflection of detonation waves [J]. AIAA Journal, 1997, 35(11): 1712-1720.
- [23] Takayama K, Ben-Dor G. State-of-the-art in research on Mach reflection of shock waves [J]. Sandhana, 1993, 18(3): 695-710.
- [24] Desbordes D, Gueraud C, Hamada L, et al. Failure of the classical dynamic parameters relationships in highly regular cellular detonation systems [J]. Progress in Astronaut and Aeronaut, 1993, 153: 347-359.
- [25] Eckert C A, Quirk J J, Shepherd J E. The role of unsteadiness in direct initiation of gaseous detonation [J]. Fluid Mechanics, 2000, 421: 147-183.

(编辑: 秦理曼)