

文章编号: CSTAM2014-P19-0080

双前向爆轰驱动激波管性能研究

李 贤, 姜 杨, 陈 宏, 俞鸿儒

(中国科学院力学研究所, 高温气体动力学国家重点实验室, 北京 100190)

摘 要: 反向与前向爆轰驱动激波管都已经应用于实验研究。前向爆轰驱动激波管驱动能力强, 但存在激波衰减严重与实验气流品质不佳的问题。在前向爆轰驱动段上游尾部再串接一段辅爆轰驱动段, 点火位置位于辅爆轰驱动段上游端部, 形成双前向爆轰驱动激波管。通过单前向与双前向爆轰驱动激波管实验比较表明: 相对于单前向爆轰驱动, 双前向爆轰驱动有利于提高驱动能力并获得较低的激波衰减, 同时还能够提高实验气体品质。

关键词: 激波管; 双前向爆轰; 入射激波; 衰减; 爆轰

中图分类号: O354.5

文献标识码: A

0 引 言

激波管是产生可控实验气流的实验装置。作为一种实验装置, 激波管很容易将气体加热、加压和加速至很高的参数值, 同时设备受热时间短, 不需要一套冷却系统, 也不需要消耗大量能源, 因而广泛使用与许多科学试验中。

爆轰驱动激波管是一种能够产生高激波马赫数的强驱动实验装置, 它使用爆轰波产生的高温高压气体驱动被驱动段产生强激波。根据其点火起始爆轰的位置不同, 分为反向爆轰与前向爆轰。反向爆轰驱动在临近主膜上游处点火起始爆轰, 形成的爆轰波反向朝驱动段尾端传播。前向爆轰在驱动段上游尾端点火, 形成的爆轰波向下游传播, 方向与被驱动段的入射激波相同。反向爆轰驱动气体的均匀性优于前向爆轰驱动, 但前向爆轰驱动能力远高于反向爆轰驱动^[1]。

爆轰波后的Taylor波是导致前向爆轰所产生入射激波衰减的主要因素。为了消除Taylor波, Costes和Gaydon^[2]在爆轰驱动段上游串接充入高压氢气的

辅驱动段, 但是所需初始压力比过高, 很难实用。俞鸿儒等^[3]提出反向-前向双爆轰只需要数倍初始压力比就可消除Taylor波, 前向爆轰驱动的性能也因此得到了极大的提高。

反向-前向双爆轰驱动虽能够有效消除爆轰波后的Taylor波并提高驱动品质, 但是在完全消除Taylor波情况下, 氢氧比为3时辅驱动段初始压力是主驱动段的6倍左右^[3], 当驱动能力要求较高的高焓实验, 此辅驱动段压力将高得难以承受。本文主要在反向-前向双爆轰驱动基础上, 研究双前向爆轰驱动的驱动性能。这种驱动方式是将原辅驱动段的反向爆轰改成前向爆轰, 爆轰波在辅驱动段上游端部起始, 并传播到主驱动段引爆主爆轰, 本文就是实验研究双前向爆轰的驱动能力与实验气流品质。

1 实验装置与测试系统

本实验在高温气体动力学国家重点实验室进行。双爆轰驱动激波管实验装置如图 1所示, 激波管全长11.3米由三段等内径管子组成, 即辅驱动段(2米)、主驱动段(3.7米)与被驱动段(5.6米)。

双前向爆轰驱动运行时，每两段之间加涤纶膜，点火管位于辅驱动段上游端部。点火管点火产生的爆轰波往主驱动段方向传播，爆轰波到达辅膜后立即冲破膜片，引爆并推动主驱动段燃气。如在辅与主驱动段之间用厚钢板隔开，并在主驱动段上游端部点火起始爆轰，则形成单前向爆轰驱动。如在辅与主驱动段之间加膜片并在辅驱动段端部串接卸爆段^[4]，在辅驱动段下游膜片附近点火，爆轰波在辅驱

动段往上游传播，波后高温高压气流冲破膜片并引爆主驱动段燃气，这形成反向-前向爆轰驱动。

在被驱动段安装了7个电离探针，用于测量入射激波的传播速度。在主驱动段与被驱动段下游端部分别安装若干个压电传感器，用于测量主驱动与P5实验区压力，压力信号经压力传感器和电荷放大器后，送入采集系统变成数字信号，再经过计算机进行分析和处理。

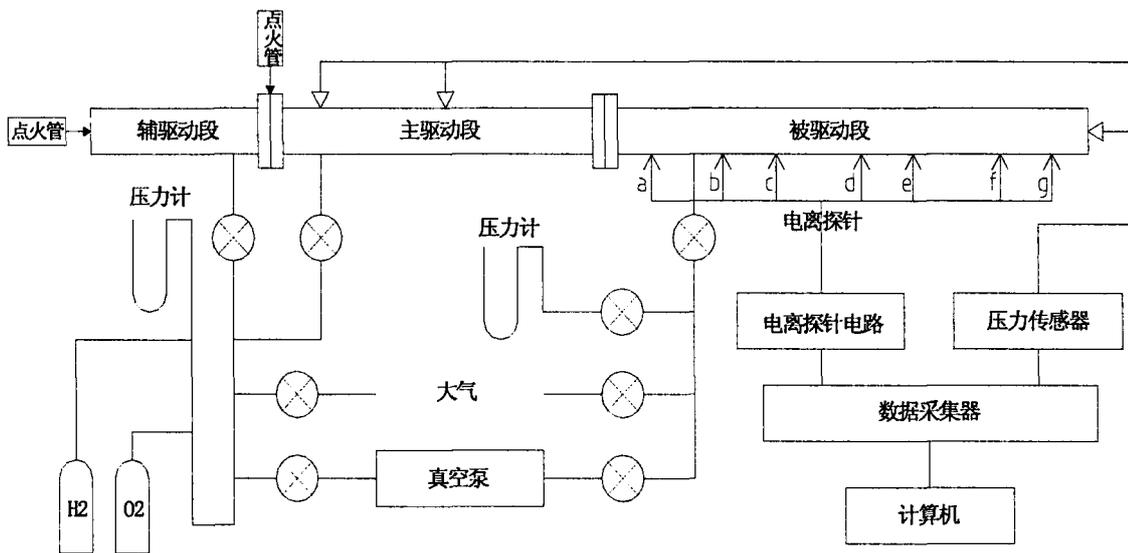


图 1 实验装置示意图

Figure 1 Schematic diagram of experimental apparatus

2 试验结果与分析

双爆轰激波管波系图如图 2所示。由位于辅驱动段上游端末的点火产生的伴随Taylor稀疏波的爆轰波向辅膜传播并使其破裂，随后在主驱动段产生了新的爆轰波。由于辅驱动段的初始混合气体压力高于主驱动段的压力，则辅爆轰波在进入主驱动段时，波后爆轰气体速度高于主驱动段中的CJ爆轰波后的气体速度，因此主驱动段中的前半段产生的是过驱动爆轰。随着辅爆轰后的Taylor稀疏波与破膜时产生的中心稀疏波的相互

作用而不断加速并逐渐追上主爆轰波，从而削弱主爆轰波的强度，最终导致在主驱动段的后半段形成无稀疏波伴随的CJ爆轰波或过驱动爆轰波。由此，双爆轰驱动方式可以在被驱动段产生较高强度的入射激波，且波后实验气体参数具有较长的定长时间。

评价激波管驱动段的优缺点时，主要是以入射激波的强度和激波的衰减程度作为判断标准，即在驱动段与被驱动段初始压力比给定时，希望

产生更强的入射激波，同时衰减程度要尽可能的小。因此在研究双前向爆轰的驱动性能时，被驱动段空气与主驱动段燃气初始压力分别固定为4000Pa与2bar，通过改变辅驱动段压力观察入射激波特性，燃气为3H₂/O₂的氢氧混合气体。同时，进行了与单前向爆轰与反向-前向双爆轰驱动对比实验。定义激波衰减率 $\xi_1 = \Delta Ms / (L/d)$ ，激波管理论表明^[5]入射激波马赫数越高时，激波衰减越厉害，因而更科学地用相对激波衰减率 $\xi = (\Delta Ms / \bar{Ms}) / (L/d)$ 来表征激波衰减程度，其中 ΔMs 为 a-b 与 f-g 激波马赫数之差， \bar{Ms} 为平均激波马赫数， L 为探针 a-f 的距离， d 为管壁内径。

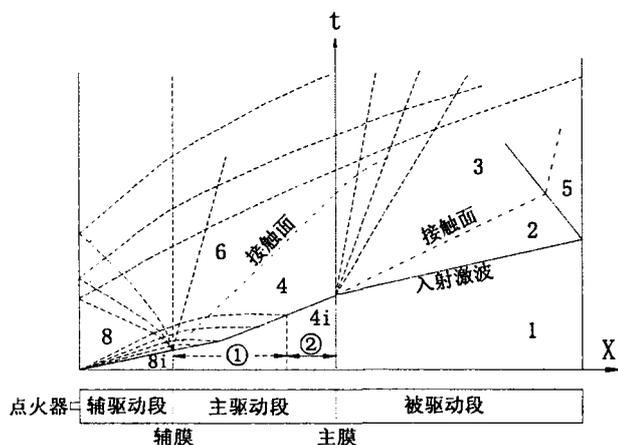


图 2 双前向爆轰驱动激波管波系图

Figure 2 Wave of double forward detonation driven shock tube

单爆轰驱动时，被驱动段入射激波沿传播方向的强度变化见图 3。从图中可以看出，在给定被驱动段压力4000Pa时，入射激波强度随着主驱动段压力升高而增强，且在传播的过程中有明显的衰减。结合图中前向驱动激波衰减率，显示激波衰减随着驱动段压力升高而增大，这意味着前向爆轰驱动在获得更高入射激波地同时会有更大的激波衰减损失。

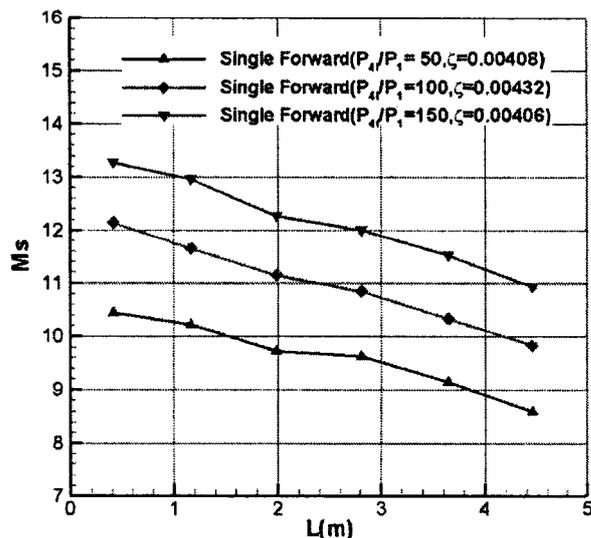


图 3 单爆轰驱动入射激波沿传播方向的强度变化

Figure 3 Strength of incident shock wave along the propagation direction of single detonation driver (P₁=4000Pa, 3H₂/O₂)

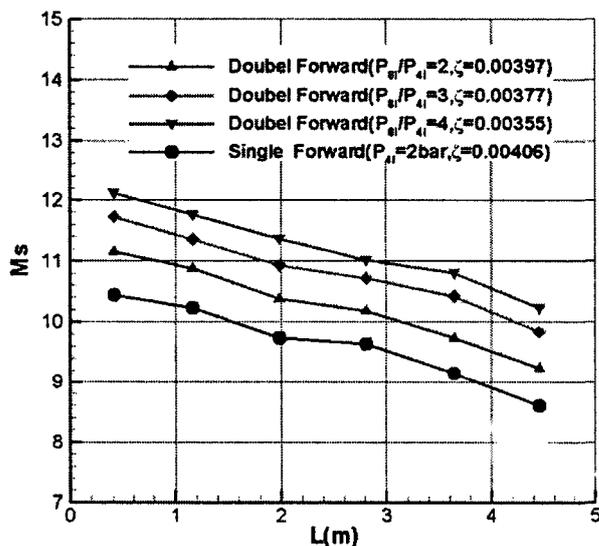


图 4 双前向驱动入射激波沿传播方向的强度变化

Figure 4 Strength of incident shock wave along the propagation direction of two forward detonation drivers (P_{4i}=2bar, P₁=4000Pa, 3H₂/O₂)

双前向爆轰驱动时，被驱动段入射激波沿传播方向的强度变化见图4。从图中可以看出，在给定主驱动段与被驱动段初始压力2bar与4000Pa时，双爆轰驱动入射激波马赫数大于单爆轰驱动入射激波马赫数，并随着辅驱动段压力增大而增大。结合图中数值可知双前向爆轰驱动的激波衰减率小于单前向爆轰驱动，同时随辅驱动段压力

增大而降低。这意味着前向爆轰可以通过在驱动段尾部串联辅驱动段的方法，来提高入射激波强度并降低激波衰减损失。图5中为调试的两个入射激波强度相同的单与双前向爆轰驱动状态，图中显示在获得相同的入射激波时双前向爆轰驱动有着更低的激波衰减率，这也进一步证明了双爆轰驱动有助于降低激波衰减损失。

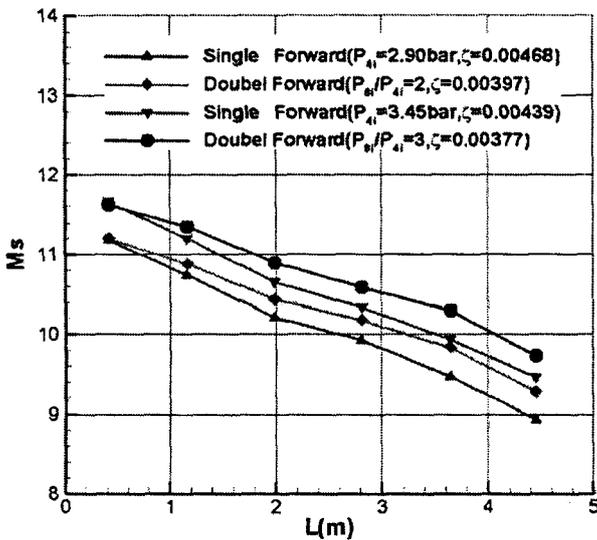


图 5 单与双前向驱动入射激波的衰减特性

Figure 5 Attenuation characteristic of incident shock wave along the propagation direction of single and two forward detonation drivers ($P_{4i}=4000\text{Pa}, 3\text{H}_2/\text{O}_2$)

图 6 描述了反向-前向双爆轰驱动入射激波沿传播方向的强度变化，同时也附带单与双前向爆轰驱动结果作为对比。从图中可以看出，在给定主驱动段压力与被驱动段压力 2bar 与 4000Pa 时，反向-前向爆轰驱动有较低的激波衰减率，有助于降低激波衰减。按照反向-正向爆轰驱动理论可知当 P_{8i}/P_{4i} 大于 6 左右^[3]时，主驱动段内变成无 Taylor 波的 C-J 或过爆轰，在无粘假设下被驱动段入射激波马赫数应该无衰减的，然而从图中可知激波马赫数沿着传播过程是降低的，其原因是气体在炮管中流动不可避免地受到粘性边界层的影响。本文描述的实验在现有设备上进行，管

壁表面状态差，初始压力又低，边界层效应引起的激波衰减很严重。反向-前向爆轰驱动与双前向爆轰驱动对比时，可以发现双前向爆轰驱动在 P_{8i}/P_{4i} 较低就可以获得更高的激波马赫数，尽管双前向驱动的激波衰减更为严重，但在获得更强驱动能力方面有较大潜力。

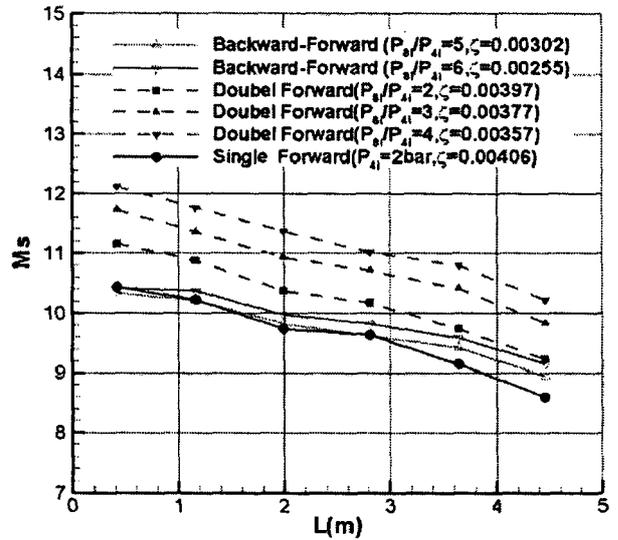


图 6 两种双驱动入射激波沿传播方向的强度变化

Figure 4 Strength of incident shock wave along the propagation direction of backward-forward and double-forward detonation drivers ($P_{4i}=2\text{bar}, P_{1i}=4000\text{Pa}, 3\text{H}_2/\text{O}_2$)

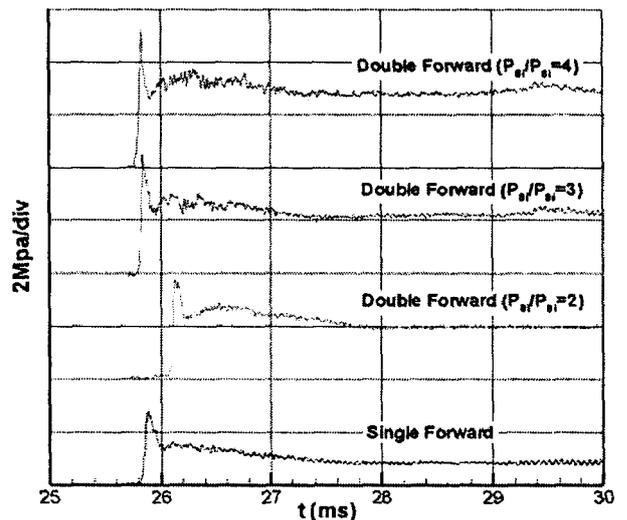


图 7 实验 P5 压力曲线

Figure 7 Profile of P_5 pressure ($P_{4i}=2\text{bar}, P_{1i}=4000\text{Pa}, 3\text{H}_2/\text{O}_2$)

图 7 为被驱动段实验 5 区压力曲线。从图中可以看出，在给定主驱动段与被驱动段初始压力

2bar与4000Pa时,双前向爆轰可以提高5区气体压力值,并随辅驱动段压力(或压力比 P_{8i}/P_{4i})增大而增大。 P_5 压力抬升是增加辅驱动段提高了入射激波马赫数的必然结果,但是更加值得关注的是 P_5 压力的品质。从图7看出单前向驱动几乎没有定常实验时间,双前向驱动有助于改善 P_5 压力的品质, P_{8i}/P_{4i} 等于3或4时有2.5ms左右的定常实验时间。

3 结论

在前向爆轰驱动激波管驱动段上游再串接一个辅爆轰驱动段,并在辅驱动段上游端部点火,形成双前向爆轰驱动激波管,本文对其驱动性能进行了初步研究。实验结果表明:相对于反向-正向爆轰驱动方式,双前向爆轰驱动的激波衰减率较高,但在驱动能力方面有很大提高;相对于单爆轰驱动方式,双前向爆轰驱动能够提高驱动

能力且具有较低的入射激波衰减率,与此同时还提高了实验 P_5 压力品质。

此次实验只是对双前向爆轰驱动激波管的初步研究,双前向驱动在缝合状态下性能研究将会是下一步工作的重点。

参考文献

- [1] LI J, JIANG Z, CHEN H, et al. Numerical Study On Backward-Forward Double-Detonation Driver for High Enthalpy Shock Tubes [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2007, 39(3): 343-9.
- [2] COATES P B, GAYDON A G. A Simple Shock Tube with Detonating Driver Gas [J]. Proceedings of the Royal Society of London Series a-Mathematical and Physical Sciences, 1965, 283(1392): 18-&.
- [3] CHEN H, FENG H, YU H R. Double detonation drivers for a shock tube/tunnel [J]. Science in China Series G-Physics Mechanics & Astronomy, 2004, 47(4): 502-12.
- [4] 俞鸿儒 中. 探索发展激波风洞爆轰驱动技术 [J]. 力学学报, 2011, 06): 978-83.
- [5] 陈强. 激波管流动中的边界层效应 [M]. 激波管流动的理论及实验技术. 1979.

The Experimental Research on Shock Tube Driven by Double Forward Detonation

Li Xian, Jiang Yang, Chen Hong

(State Key Laboratory of High-Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Backward and forward detonation driven shock tube have already been utilized in experiment research. The shock tube driven by forward detonation is much powerful, however, there are two obvious deficiencies, one is serious attenuation of incident shock wave, and the other is poor quality of test gas. The shock tube driven by double forward detonation is formed by connecting a auxiliary forward detonation section at the rear of the detonation driver of the forward detonation driven shock tube. According to the experimental results, double forward detonation drivers is beneficial for enhancing driving capacity and obtaining low attenuation of shock tube., and the quality of the test gas is improved at the same time.

Key words: shock tube; double forward detonation; incident shock; attenuation