

用双爆轰驱动的激波管技术

陈宏 赵伟 林建民 俞鸿儒

(中国科学院力学所, 北京 100080)

摘要: 本文通过对前向双爆轰驱动和前向单爆轰驱动激波管实验比较证实: 在双氢氧爆轰驱动激波管中, 辅驱动段的初始压力只需大于主驱动段初始压力的几倍, 且辅驱动段的长度比主驱动段短许多, 便可在被驱动段获得比单氢氧爆轰驱动较低的入射激波衰减率, 且 P5 区获得更长的驱动时间。

关键词: 爆轰驱动; 激波; 激波管; 稀疏波; 衰减

1. 引言

爆轰驱动激波管有两种驱动方式。一种是反向爆轰驱动, 起爆点在主膜片的上游附近, 产生一个向上游末端传播的爆轰波; 该驱动方式一个显著的优点就是, 能够产生较长的定常驱动时间^[1]。另一种是前向爆轰驱动, 爆轰波由驱动段的上游末端起爆, 其传播方向与入射激波相同; 由于爆轰波后气体的高动能的加强作用, 前向爆轰驱动产生的驱动能力远强于反向爆轰驱动^[1,2]。但由于前向爆轰波后紧跟着的稀疏波的干扰, 入射激波速度不断下降, 波后无定常的实验区, 使得该驱动方式还不能应用于气体动力学实验。

爆轰波后之所以紧跟着稀疏波, 是因为爆轰波在一端封闭的管内离开端面向前传播时, 波后高速前向运动的气体受端面静止的边界条件限制将产生一系列的膨胀波(即 Taylor 稀疏波), 其压力、温度和速度将逐渐降低。若利用一运动的活塞或气体柱来代替静止的端面, 其运动速度等于或大于 CJ 爆轰波后气体速度, 则可消除 Taylor 稀疏波, 使爆轰波后的气体参数为定常值。

根据上述原理 Coates 和 Gaydon^[3]首先在低初始压力的状态下进行了双驱动段爆轰驱动激波管实验。其方法是: 在驱动段与被驱动段之间增设中间段作为主驱动段, 原驱动段作为辅驱动段。为了使被驱动段产生均匀的入射激波, 在辅驱动段充入高压氢气, 而主驱动段充入氢氧混合气体。但当两段之间的第一道膜打开时, 利用高压氢气压缩氢氧混合气体产生的激波, 不足以保证混合气体在第一道膜附近点爆。还由于氢气膨胀加速达到的速度小于氢氧混合气体在主驱动段中 CJ 爆轰波后的气体速度, 故只能部分消除爆轰波后的 Taylor 稀疏波。后来 Wilson 和 Sussman^[4]等采用类似的方法, 利用高压氢气压缩氢氧混合气体产生强激波, 来试图消除或消弱 Taylor 稀疏波。但效果都不太好, 因而这种驱动方式并没有得到实际应用。

本文提出了一种双爆轰驱动方式: 在辅驱动段用爆轰气体代替氢或氦气。在这种驱动方式中, 前一个爆轰很容易引爆后一个爆轰, 而且起爆前辅驱动段中的混合气体压力也只大于几倍的主驱动段中的混合气体的压力。通过单和双前向氢氧爆轰驱动的初步实验表明: 双爆轰驱动方式获得了较低的入射激波衰减率和较长的定常驱动时间。

2. 实验装置与测试系统

本实验在中科院力学所高温气体实验室进行。双爆轰驱动激波管实验装置如图 1 所示, 激波管全长约为 11.3 米, 由相同内径为 100 毫米的三段管子组成, 即辅驱动段(约 2 米)、主驱动段(约 3.7 米)和被驱动段(约 5.6 米), 每两段之间用涤纶膜隔开。辅驱动段和主驱动段分别充入

压力为 0.6-1.0MPa 和 0.2-0.3MPa, 且相同混合比 $4H_2/O_2$ 的氢氧混合气体; 被驱动段中充入压力为 1.3-4kPa 的空气。位于辅驱动段上游端末的电阻丝点火器点火后产生爆轰波向辅膜方向传播。爆轰波到达辅膜后立即使膜片破裂并进入主驱动段, 从而在主驱动段引爆了新的爆轰。若辅和主驱动段之间不安装膜片, 则形成单前向爆轰驱动方式, 其驱动段初始压力为 0.2-0.45MPa。

在被驱动段和主驱动段中分别安装了七个和三个电离探头, 分别用于测量入射激波和主爆轰波的传播速度。在被驱动段下游末端和主驱动段管壁上, 分别安装了若干个压电压力传感器, 用于测量 P5 实验区域和主驱动段的压力, 压力信号经传感器和电荷放大器放大后, 送入 SC500 采集系统变成数字信号, 再经过计算机进行分析和处理。

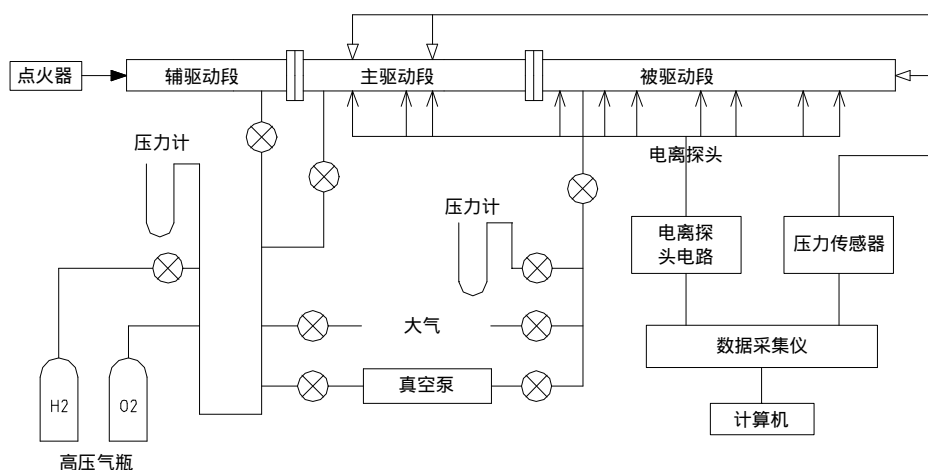


图 1. 实验装置示意图

3. 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器产生的伴随 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, 从而消弱主爆轰波的强度, 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。

图 3(a) 是双爆轰驱动实验中在主爆轰驱动段, 沿爆轰波传播方向位于管壁上安装的两个压力传感器测量到的压力信号。位置距离 y 以辅膜处作为起点。本次实验中主驱动段和被驱动段的初始压力分别为 0.25MPa 和 2.67kPa, 而辅驱动段的初始压力略大于 3 倍的主驱动段的初始压力。可以看出在 $y=45\text{cm}$ 处, 最大峰值压力已达到 $30P_{4i}$, 而 CJ 爆轰波的相应值一般为 $20P_{4i}$ 。说明由于辅爆轰波后爆轰气体具有更高的速度和压力, 导致主爆轰的前半段为过驱动爆轰。随着主爆轰波向下游传播, 其强度逐渐减弱。到 $y=195\text{cm}$ 时, 最大峰值压力已接近 CJ 值, 此处波后压力随时间的变化也已接近定常值。

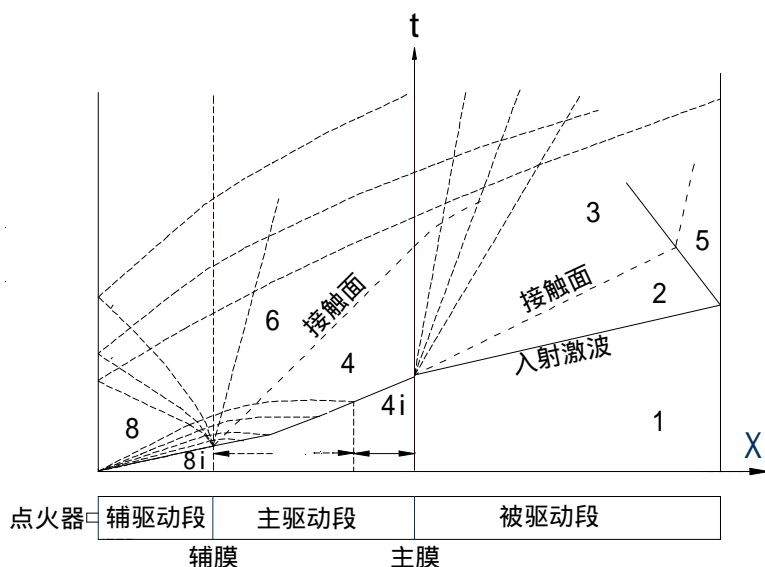


图 2. 激波管波系图
过驱动爆轰 无稀疏波紧随的爆轰区

图 3(b)是单爆轰驱动实验的结果，压力测量点的位置与双爆轰实验相同。单爆轰驱动段的初始压力与双爆轰主驱动段的相同 ($P_{4i}=0.25\text{MPa}$)。可以看出两个位置测量得到的曲线均为典型的 CJ 爆轰波后的压力曲线。爆轰波后的 Taylor 稀疏波越走越宽，因此 $y=195\text{cm}$ 处的压力曲线由峰值衰减比上游处缓慢，以后又受到主膜片破裂时产生的中心稀疏波的影响，压力进一步下降。而在双爆轰驱动实验中，该点处的压力却不受主膜处产生的中心稀疏波的影响，如图 3(a)，因为该处爆轰波后的气体速度是大于或等于当地声速的。

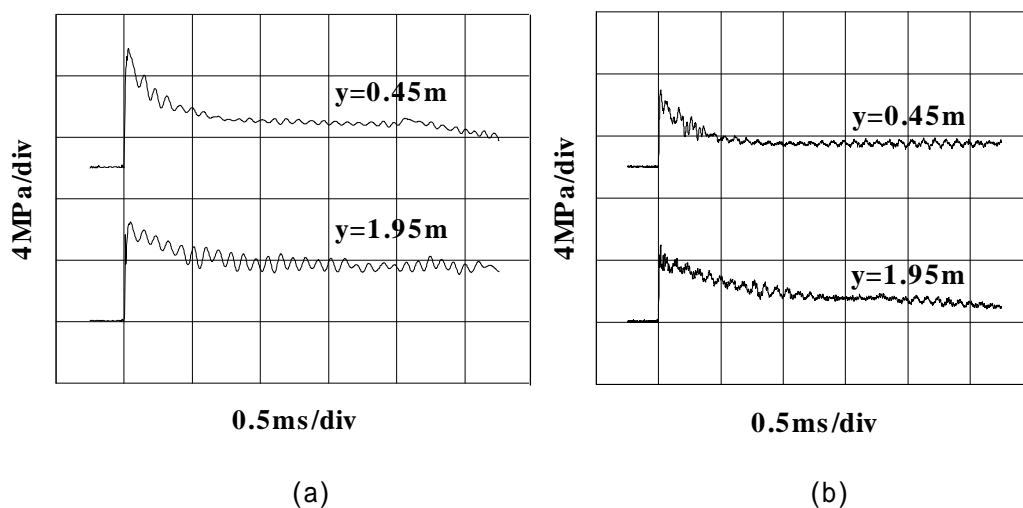


图 3. 压力测量曲线

- (a) 位于双爆轰驱动激波管的主驱动段 ($P_{8i}=0.8\text{MPa}$, $P_{4i}=0.25\text{MPa}$, $P_1=2.67\text{kPa}$)
- (b) 位于单爆轰驱动激波管的驱动段 ($P_{4i}=0.25\text{MPa}$, $P_1=2.67\text{kPa}$)

另外由图 3(a)可见，在 $y=195\text{cm}$ 处主爆轰波后压力值尚未达到定常值且高于 CJ 值，说明在该处由辅膜处开始的过驱动爆轰波后仍有稀疏波存在。从原理上分析，要获得定常的 CJ 爆轰或者定常的过驱动爆轰（即波后无稀疏波），压力测量位置还应向下游移动，或者将辅驱动段长度减少，使得由辅驱动段上游末端开始的 Taylor 稀疏波的波尾在主驱动段的后半段前追上主爆轰

波。

从图 4 可以看出，尽管双爆轰驱动方式中，主驱动段后半段的爆轰波强度已接近单爆轰驱动中的 CJ 爆轰波强度，但前者的驱动能力明显高于后者。若将单爆轰驱动段的初始压力提高直到它产生的入射激波在起始处的速度与双爆轰驱动产生的入射激波相同，如图 5 所示，我们可以看到前者所产生的入射激波衰减率高于后者。同时，如图 6 所示的被驱动段下游末端实验区的压力曲线还表明：双爆轰驱动方式有较长的定常驱动时间。

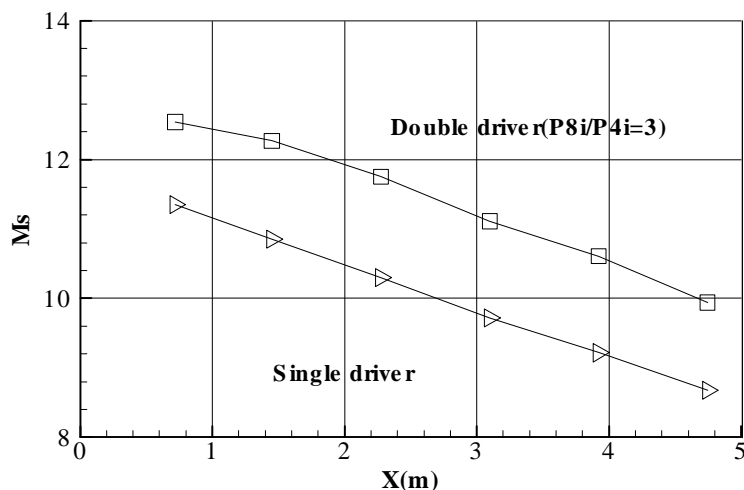


图 4. 入射激波沿传播方向的强度变化
($P_{4i}=0.25\text{MPa}$, $P_1=2.67\text{kPa}$, $H_2/O_2=4$)

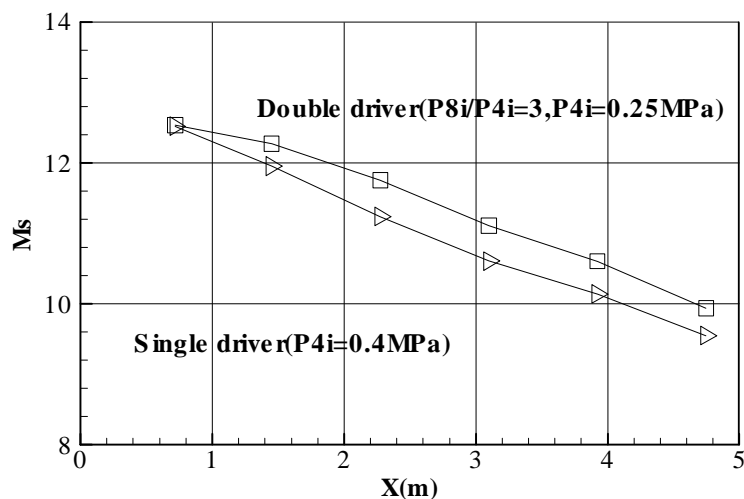


图 5. 入射激波的衰减特性
($P_1=2.67\text{kPa}$, $H_2/O_2=4$)

然而，本次实验是初步的原理性实验，驱动参数较低，而且双爆轰驱动实验中入射激波的衰减还尚未明显改善。这可能是因为被驱动段管内壁的粗糙度较高，初始压力又很低，导致入射激波传播过程中粘性过大所致。通过改善实验装置和提高驱动能力，将使激波衰减率偏大的问题得以克服。

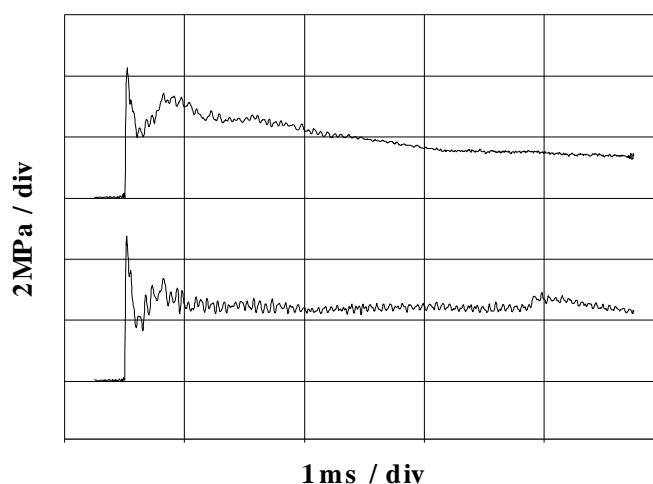


图 6. 被驱动段末端的压力测量曲线 ($H_2/O_2=4$)

上图为单爆轰驱动: $P_{4i}=0.4\text{MPa}$, $P_1=2.67\text{kPa}$

下图为双爆轰驱动: $P_{8i}/P_{4i}=3$, $P_{4i}=0.25\text{MPa}$, $P_1=2.67\text{kPa}$

4. 结论

在双爆轰驱动方式中, 辅爆轰驱动段的初始压力仅大于主爆轰驱动段的初始压力几倍, 且不需增大内管直径。辅爆轰驱动段产生的爆轰波进入到主爆轰驱动段后, 开始产生过驱动爆轰然后形成无伴随稀疏波的 CJ 爆轰或过驱动爆轰。从而, 与单爆轰驱动方式相比, 双爆轰驱动获得较弱的入射激波衰减率和较强的驱动能力。

如果适当调整双爆轰驱动激波管的辅和主驱动段的长度及初始压力, 将在被驱动段的实验区产生较长的定常驱动时间, 本实验驱动时间为 3 毫秒, 而单爆轰驱动方式几乎无定常实验时间。一般来说, 辅驱动段与主驱动段的初始压力比约为 3 左右, 而且辅驱动段的长度应更短。

然而, 本次双爆轰驱动实验中, 被驱动段的入射激波衰减率比预想的要高, 我们将在后续的实验中进行改进。

参考文献

1. 俞鸿儒: 氢氧燃烧及爆轰驱动激波管, 力学学报, Vol.31(4), pp.389-396, 1999.
2. G. A. Bird: A Note on Combustion Driven Shock Tubes, In: AGARD Report 146, 1957.
3. P. B. Coates, A. G. Gaydon: A Simple Shock Tube with Detonating Driver Gas, In: Proc. Roy. Soc. A283, pp.18-32, London, 1965.
4. G. J. Wilson, M. A. Sussman, D. W. Bogdanoff: A Study of Combustion and Detonation Drivers for High Enthalpy Expansion Tubes and Shock Tubes, NASA CDP-20009, December 1995.