

氢氧爆轰驱动激波风洞的性能*

俞鸿儒 赵伟 袁生学

(中国科学院力学研究所)

摘要 本文对膜片处起爆的氢氧爆轰驱动的概念作了简要描述。爆轰波在管端盖板上的反射压力峰值高出初始压力 200 多倍, 在高起始压力条件下产生的如此高的反射峰压对设备安全极为不利。串接在驱动段末端的卸爆段既能消除高的反射峰压, 又能延长有效驱动时间。实验结果还表明: 爆轰波后气流的定常性和重复性品质优良。用爆轰驱动来产生高焓(具有高压)试验气流是一种高性能且节省费用的新方法。还可用来获得高雷诺数高马赫数试验气流。爆轰驱动具有广阔的应用前景。

关键词 爆轰; 爆轰波反射; 激波管; 激波风洞; 驱动技术

1 前 言

近年来随着人们对高超声速飞行的兴趣日益增长, 对高焓地面设备的需求日益迫切。激波风洞是产生高焓(同时具有高滞止压力)试验气流最有前景的一种设备。为了提高气流焓值, 需提高入射激波强度。这就要求尽可能提高驱动气体的声速和压力。70 年代前, 较实用的强驱动技术为加热氢和氢氧燃烧驱动^[1]。近来, Stalker 发展成一种新的强驱动技术——自由活塞驱动^[2], 这种驱动技术受到广泛的重视。Rocketdyne 高超声速流实验室、加州理工大学 Guggenheim 航空实验室^[3]和德国宇航院实验流体研究所^[4]都正在建造大型自由活塞激波风洞。在这些风洞中, 所采用的活塞的最大质量已高达 1750kg。这种驱动方法的优点是能将驱动气体压缩升压并升温到很高的数值, 但膜片处定常驱动时间短促, (HEG 中亦只有 1.3ms)且压缩系统结构庞大。数值计算^[5]和实验结果^[6]表明: 激波后气流的定常性还不够理想。俞鸿儒提出在驱动段末端串接一卸爆段来消除反射高压, 在高起始压力条件下由膜片处直接起爆的氢氧爆轰驱动来产生高焓试验气流的新方法^[7]。根据原理性实验结果和数值计算外推: 最高焓值和驻室压力接近自由活塞驱动, 但定常驱动时间长得多, 结构简单, 造价低, 运行费用省。

爆轰驱动已有不少研究者作过探索。Bird^[8]对驱动段末端和膜片处起爆的氢氧爆轰驱动激波管流动波图和参数进行了分析计算。结果指出: 末端起爆的驱动, 由于受紧跟

* 国家自然科学基金资助项目。
本文于 1993 年 2 月 18 日收到。

爆轰波后的膨胀波的干扰，入射激波强度不断下降，波后无定常气流区。膜片处起爆的爆轰驱动，入射激波最大强度低于前者，但在爆轰波反射波赶上入射激波前，激波强度不受干扰而保持定常值，俞鸿儒^[9]于1962年进行膜片处多火花点火氢氧燃烧驱动实验中，有数次偶然起爆直接形成爆轰。在这种情况下，较其它条件相同的燃烧驱动形成更强的入射激波，激波衰减率显著降低。但由于激波管装置较弱，初始压力又不低($P_{i0}=1.08\text{MPa}$)，爆轰波在驱动段末端反射形成的高压脉冲对激波管猛烈冲击，使整体设备剧烈振动，所有联接螺栓均被震松。由于当时未想出安全保护措施，这种高性能驱动方法未能完善与实用。Balcarzak^[10]进行了驱动段尾端起爆的爆轰驱动实验，证实了Bird分析的部分结果。Coates^[11]和Lees^[12]先后对氢/氧和甲烷/空气在膜片处起爆的爆轰驱动进行了实验。前者采用双驱动段，利用主膜处反射激波起爆，后者利用爆炸丝起爆，两者初始压力均低于大气压，不足以产生高超声速试验气流所要求的驱动压力。

2 卸爆段的功能

为了获得高贮室压力，激波管驱动气体压力必须提高。对于爆轰驱动，起爆前的初始压力值要增加。Edwards指出^[13]：氢氧爆轰波在固壁上反射时，反射波后 Von Neumann 峰压超出初始压力200倍。如此高的反射峰压尤其在高初始压力条件下，对设备的结构造成极大的威胁。俞鸿儒^[7]提出在驱动段末端串接一个卸爆段，两者之间用薄膜隔开，卸爆段内充不能点燃的气体或抽成真空。当主膜附近起爆的爆轰波，传播到达卸爆段与驱动段分界处，爆轰波阵面冲破薄膜传入卸爆段，消除了爆轰波在该处的正反射，传入卸爆段内的爆轰波立即熄灭。

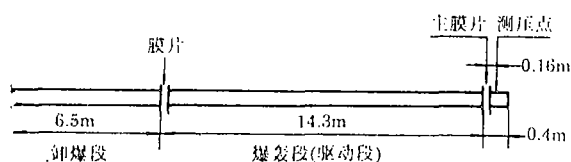


图1 氢氧爆轰驱动段实验装置简图
(内径150mm, 外径270mm)

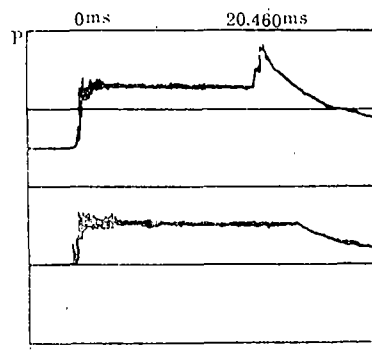


图2 主膜附近测出的压力曲线

当爆轰波在固壁上反射时，反射回强激波，如果卸爆段预先抽成真空，爆轰波冲破薄膜进入真空，则反射回膨胀波。由于激波速度总是高于膨胀波，因此反射膨胀波与反射激波相比，赶上分界面和入射激波的时间将延迟，亦即有效驱动时间将延长。

为了解膜片处起爆的氢氧爆轰驱动段内的流动特性，我们对驱动段内的参数进行了实验测定。图1为实验装置简图。驱动段内充 $\text{H}_2:\text{O}_2=4:1$ 的混合气，初始压力1MPa。采用20mg火药点火起爆。起爆点靠近主膜片。卸爆段抽成真空。为了避免点火药的初

始干扰,测压传感器安在主膜片的下游。图2为测出的压力时间曲线。上线为驱动段与卸爆段之间采用厚3mm,开十字槽的不锈钢膜片时测出的压力曲线。由于膜片的惯性,膜片打开需一定时间,因而仍反射激波。下线为改用强度刚能抵抗初始压力差的薄塑料膜片时测出的压力曲线。爆轰波阵面抵达薄膜处,薄膜立即被冲破,反射回膨胀波。从图2曲线可以看到,上线定常压力持续时间约为9.5ms,下线约为12ms。下线较上线延长1/4时间。由于不锈钢膜片变形与破开后的膨胀波赶上激波互相干扰,反射激波强度较刚性壁反射要低得多。有无卸爆段的有效驱动时间差还要大。从实验结果还可得出:在有效驱动期内,驱动气体压力随时间变化很小。多次实验结果表明,重复性亦很好。这些品质远非燃烧驱动所能比拟。

当卸爆段抽成真空并正确选用膜片,则每米长度驱动段,膜片起爆轰驱动可形成0.9ms定常驱动时间,HEG自由活塞激波风洞,压缩管驱动段长33m,可产生定常驱动时间1.3ms。约为每米驱动段0.04ms。两者相比,驱动段长度相同时,爆轰驱动较自由活塞有效驱动时间长出20多倍。

3 爆轰驱动气体参数和最佳混合比

爆轰波是伴随着化学反应的强激波。可爆气体混合物经激波阵面压缩升到很高的温

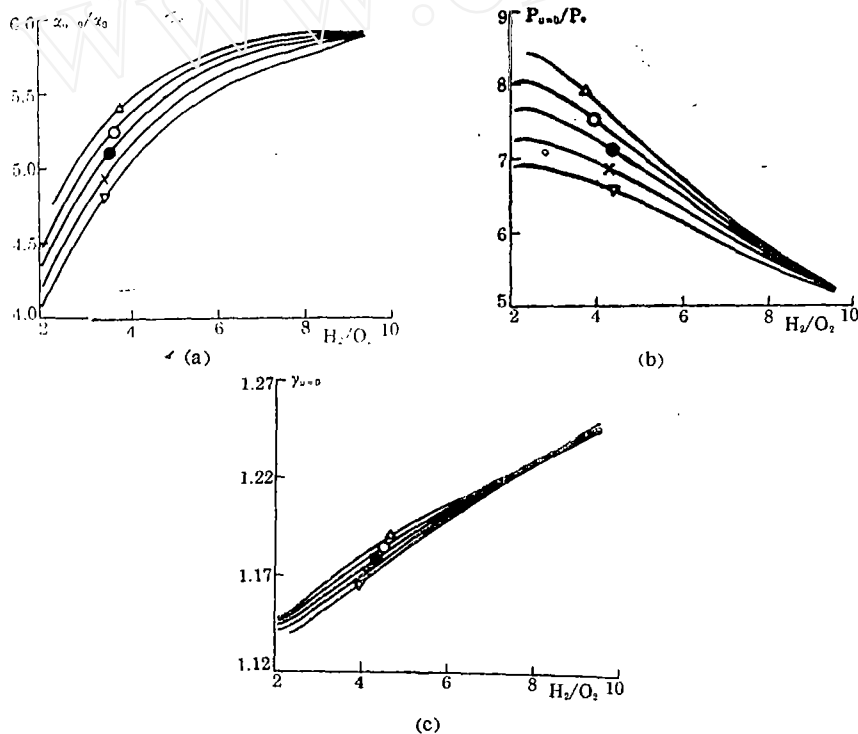


图3 氢氧爆轰波后静止状态参数 ($T_0 = 293K$ $\alpha_0 = 348m/s$)
 $\Delta P_0 = 10MPa$ $\circ P_0 = 3MPa$ $\bullet P_0 = 1MPa$ $\times P_0 = 0.3MPa$ $\nabla P_0 = 0.1MPa$

度,在一定的诱导时间后,混合物剧烈反应。反应完成处的参数为CJ值。CJ点后的流

动状态决定于波后的边界条件。如果在封闭管中, CJ 点后气体经膨胀波减速到静止状态。静止状态相当于普通激波管驱动段初始状态。我们对不同初始压力和不同混合比条件下的氢氧爆轰 CJ 值和静止状态参数进行了数值计算。图 3 列出爆轰波波后静止状态下声速比、压力比和比热比。由图可以看出: 氢含量愈高, 声速比和比热比上升, 压力比下降。按激波管驱动特性, 驱动气体声速愈高, 压力愈高和比热比愈低, 驱动能力愈强。声速对产生强激波作用明显, 而压力则对中高强度激波影响较大。驱动能力最强的混合比, 需经激波管流动计算才能确定。

图 4 给出了入射激波马赫数 $M_s = 3.2$ 和 $M_s = 10$ 两种条件下不同氢氧混合比对贮室

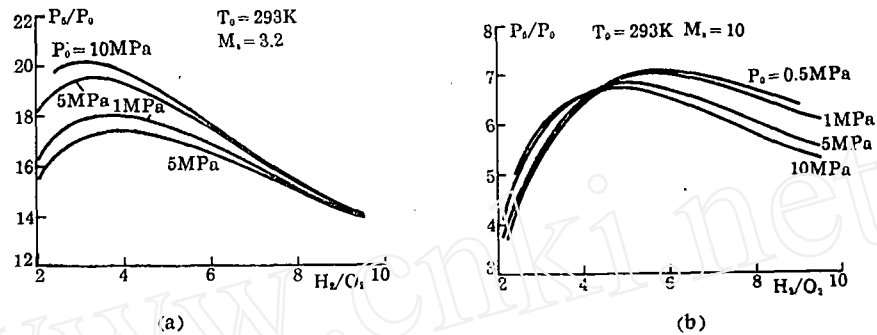


图 4 不同混合比下的贮室压力

压力的影响。前者适于高雷诺数模拟。氢氧混合比约为 3 左右时驱动能力最强。后者能产生高焓气流, 最佳混合比较前者提高。当初始压力为 10MPa 时, 比值约为 5 最有利。上述混合比范围便于起爆爆轰。

本实验工作还有林建民、于伟、李仲发、谷笏华和力学所八室其他同志参加。本文结果包括他们的贡献。

参 考 文 献

- 1 Warren W R, Harris C J. A Critique of High Performance Shock Tube Driving Techniques. In: Glass I I (ed.) Shock Tubes. University of Toronto Press. 1970. 143~176
- 2 Stalker R J. Shock Tunnels for Real Gas Hypersonics. AGARD-CP-428 Paper 4, 1987.
- 3 Morrison WRB, Stalker R J, Duffin J. New generation of Free-piston shock tunnels. In: Kim YW (ed) Current Topics in Shock Waves. AIP New York 1990, 582~587
- 4 Beck W H, Eitelberg G, McIntyre T J, Baird J P, Lacey J, Oimon H. The High Enthalpy Shock Tunnel (HEG) in Göttingen. In: Takayama K (ed) Shock Tubes. Springer-Verlag Berlin. 1992. 677~682
- 5 Burtschell Y, Brun R, Leitoun D. Two Dimensional Numerical Simulation of the Marseille University Free Piston Shock Tunnel TCM2. In: Takayama K (ed) Shock Waves. Springer-Verlag Berlin. 583~590, 1992.
- 6 Hornung H, Sturtevant B, Belanger J, Sanderson S, Brouillette M and Jenkins M. Performance Data of the New Shock Tunnel T5 at GALCIT. In: Takayama K (ed) Shock Waves. Springer-Verlag Berlin. 603~610. 1992.
- 7 Yu HR. Recent Developments in Shock Tube Application. In: Takayama K (ed) Proc. of the 1989 Nat. Symp. on Shock Wave Phenomena, Shock Wave Res. Centre, Tohoku Univ. Sendai

- 1~9, 1989.
- 8 Bird G A. A Note on Combustion Driven Shock Tubes. AGARD Rep. 146, 1957.
 - 9 俞鸿儒.激波风洞及其在传热实验研究中的应用.中国科学院力学研究所研究生毕业论文.1962.
 - 10 Balcarzak M J, Johnson M R. The Gaseous Detonation Driver and Its Application to Shock Tube Simulation Techniques. In: Slawsky ZI, Moulton JF, Filler WS(eds) Proc 5th Int. Shock Tube Symp. US Naval Ordn. Lab. White Oak. 1111~1128, 1966.
 - 11 Coates H B, Gaydon A G. A Simple Shock Tube With Detonation Driver Gas. Proc. Roy. Soc(London) A283 pp18-32, 1965.
 - 12 Lees B(1967) Detonation Driven Shocks in a Shock Tube. *AIAA J.* 1967, 5: 791~792
 - 13 Edwards D H. Pressure and Velocity Measurements on Detonation Waves in Hydrogen-oxygen Mixtures. *JFM* 1959, 16: 497~517

PERFORMANCE OF SHOCK TUNNEL WITH H_2-O_2 DETONATION DRIVER

Yu Hongru Zhao Wei Yuan Shengxue
(*Institute of Mechanics, Academia sinica*)

Abstract The idea of a driver utilizing gaseous detonation initiated at diaphragm is described. The pressure peak of reflected detonation wave from end plate of driver section is over 200 times of initial pressure. It is dangerous while such high pressure acts upon the end plate. A damping tube attached to driver section can both reduce the load of the structure and delay the effective driving duration. Experimental results show that the steadiness and the repeatability of the flow behind detonation wave are excellent. The detonation driving technique is a high performance and cheap approach for producing high enthalpy flow with high pressure and the high *Re* number test flow.

key words detonation, reflection of detonation wave, shock tube, shock tunnel, driving technique