

# JF-14 高温燃气激波风洞运行浅谈

董志成

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

**摘要** 在学术带头人俞鸿儒院士的学术思想指导下, 解离气体动力学课题组研制成功了 JF-14 高温燃气激波风洞。本文简述了在风洞运行中, 为了提高流场品质、保证重复性, 在膜片技术、充气系统、点火系统等方面要重视的几个问题。

**关键词** 高温燃气、激波风洞、爆轰驱动、运行

## 引言

20 世纪 50 年代, 美国的 Hertzberg 提出了激波风洞的概念, 它是由激波管以及连于其后的喷管、实验段等风洞主要部件组成。激波管通常是由膜片隔成高低压两段(或驱动段和被驱动段)的一根直管子, 分别充以满足实验要求的高压驱动气体和低压实验气体。激波管与喷管由膜片(第二膜片)隔开, 喷管以后均被抽成真空。

高焓激波风洞主要应用 3 种驱动方式: 加热轻气体(如氢气、氦气), 自由活塞和爆轰驱动方式。爆轰驱动方式虽然出现于 20 世纪 60 年代, 但是仅仅在近十几年才成功地发展成为一种先进的驱动技术。

在驱动段尾端点火, 形成的爆轰波传播方向与入射激波相同, 这种操作模式称为前向爆轰驱动; 在临近主膜处点火, 产生的爆轰波向上游运动, 其传播方向与入射激波相反, 称为反向爆轰驱动。前向爆轰驱动的驱动能力虽强, 但激波马赫数随着传播距离和时间增加而明显衰减, 不适于做气动试验; 反向爆轰驱动虽然可以提供分布均匀的状态参数, 但当爆轰波达到驱动段尾部时, 将产生超过初始压力百余倍的反射高压, 因此初始压力只能被限制在较低的范围, 也难满足实用要求。上世纪 60 年代以后, 爆轰驱动技术处于停滞状态。

1988 年俞鸿儒先生提出在驱动段尾部串接一卸爆管的反向氢氧爆轰驱动新方法。只要卸爆管初始压力很低, 其尾部就不会出现高压,

有效地消除了被驱动段尾部的反射高压, 使反向爆轰驱动技术获得了实际应用。

2001 年俞鸿儒院士提出了双爆轰驱动方法: 在前向爆轰驱动段上游串接一辅爆轰驱动段, 利用此段正向爆轰后产生的高温高压气体柱, 来起爆主驱动段中的氢氧混合气体, 并基本消除主驱动段爆轰波后的 Taylor 稀疏波。

2003 年俞鸿儒院士又提出在辅爆轰驱动段下游起始一反向爆轰波, 消除了 Taylor 波, 爆轰波后的气体将与加热气体一样均匀, 不仅提高了前向爆轰驱动的品质, 而且为进一步提高驱动能力开辟了新途径。

2006 年俞鸿儒院士以国家高超声速科技工程为背景, 以突破高超声速推进关键技术为目的, 又提出冲压发动机采用催化复合的方法提高发动机推力的新概念和新方法。这个新方法能实现推力的增加, 目前已得到初步验证。其中为了实验检验催化复合增加推力, 需要研制一座能产生高温空气与气态燃料燃烧产物的高温燃气激波风洞实验装置, 2008 年, 在俞鸿儒院士的学术思想指导下, 陈宏研究员带领解离气体动力学课题组研制成功该实验装置: 高温燃气激波风洞 JF-14, 获得了压力约为 20 大气压, 温度约为 4000K, 定常实验时间约为 20ms, 且状态参数稳定的实验结果。而实现该装置的基本思路就是利用俞鸿儒院士提出的双爆轰驱动的概念。

在高温燃气激波风洞的运行中, 在相同参数状态时, 几次实验的数据结果要在误差允许范围内, 才能证明数据有

效、可靠,所以,重复性必须得到保证。在实践中,我们注意到,从膜片的破膜技术、实验气体的充气、激波风洞的腔内的清洁等几方面入手,对提高风洞实验的重复性,是有益的。

## 1 高温燃气激波风洞工作原理

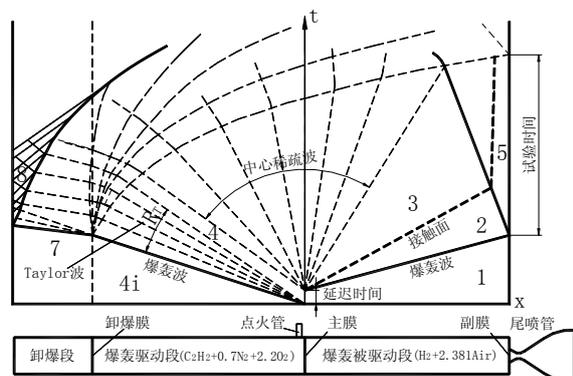


图1 双爆轰法产生燃气原理

爆轰驱动是应用可燃混合气体爆轰产生的化学能来压缩实验气体的一种驱动技术。如果爆轰波后面跟着一个运动活塞,则爆轰波后Taylor稀疏波波尾质点速度等于活塞速度。如果活塞速度达到爆轰气体速度,则爆轰波后将不出现Taylor波,跟随在爆轰波后的是一段不断增长的恒速和恒状态参数的气柱。当活塞速度大于爆轰气体速度,亦不会出现Taylor波。

在爆轰驱动段主膜片附近点火后产生一个较强的爆轰波向上游传播,爆轰驱动段中的气体经过爆轰波和紧随的Taylor稀疏波产生足够高的温度和压力,使被驱动段中的混合气体直接起始爆轰,并产生没有Taylor稀疏波的CJ爆轰波或过爆轰波并在末端形成符合缝合条

件的反射激波,从而在 $P_5$ 区形成所要求高温燃气。调节爆轰驱动段中的混合气体组分和驱动段与被驱动段初始压力之比,可改变 $P_5$ 区燃气温度和压力,并保持缝合条件以尽可能地延长实验时间。卸爆段用来缓解爆轰驱动段爆轰波产生的超强压力及反射波对实验气体的不利影响。双爆轰法产生燃气的原理,如图1所示。

## 2 JF-14 的运行

在空气动力学中,风洞实验对验证和发展有关的理论和计算具有很重要的作用。运行人员在实验运行中,实验前要领会项目负责人的实验设想,明确实验目的、流程,做好充分的准备工作;实验中要保证实验参数准确、密切观察实验过程、及时发现问题,并尽量当时解决问题,保证安全操作;实验后应讨论分析实验数据、根据遇到的不同问题,改进操作方法,和项目负责人一起讨论新问题的解决方案,提出有益的建议,为扩大现有设备的科学实验功能和提高工作效率打好基础。

JF-14由全长31米、内径224毫米的激波管和长度大于10米、直径1米、容积约8立方米的试验段组成的高温燃气激波风洞。激波管部分包括驱动段、被驱动段、卸爆段、过渡环、夹膜环、双膜环等部件,根据不同的实验目的,可与锥型喷管(扩张段)、试验段、真空罐调整、组合。如图2所示。

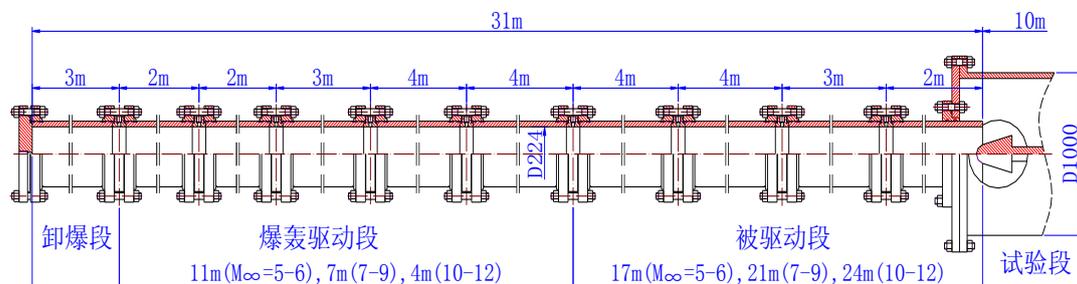


图2 高温燃气激波风洞 JF-14 实验装置

JF-14 的运行主要有 3 大实验步骤: 夹膜、充气、点火。

## 2.1 膜片系统

被驱动段的2个关键参数是初始压力和入射激波速度，JF-14各段之间要夹不同组合的膜片。驱动段充气为燃气与氧气（有时还要加入氮气或空气）；被驱动段充气为空气+氢气或空气，压力小于驱动段的压力；卸爆段要求真空度不高，目的是消除爆轰波的反射高压；试验段和真空罐抽到指定压力，从几Pa到几kPa。所以，驱动段两端的膜片往往承压最大。点火起爆也是在驱动段。

目前JF-14都用平板膜片。对于不同实验目的，根据各段的耐压要求，可选用不同厚度的金属膜或涤纶膜；并且为了控制控制破膜压力，都要在金属膜片的一侧开有中心对称、一定宽度、一定深度的十字诱导槽（气体爆轰驱动激波管的膜片承受突加载荷，金属平面膜片如果不铣诱导槽，有时会来不及变形撕裂而被

剪切下来），有时还可能要与不同开孔率的孔板组合，这是为了调整驱动段和被驱动段的压力比，控制激波速度、调整破膜效率、避免膜片碎渣伤害试验模型及测试传感器；在膜片材质的选择上也要注意。

夹膜时，铣过诱导槽的膜片夹在驱动段两端，有槽的一面，面向压力较低的方向，以利于在点火起爆的瞬间，膜片能顺利打开（充气时，一般是用气瓶通过减压器和喉道充气，对膜片来说是慢加载过程，膜片的略微变形可以忽略不计；而点火起爆时，压力陡增，对膜片的冲击猛烈，膜片沿着诱导槽裂开，并迅速完全打开，膜瓣贴到下游的管壁上）。如果膜片材质选得不合适，或开槽不理想，就会膜瓣张开不全、影响流场，或者膜片在夹膜环处被剪切、掉膜、打坏模型和压力传感器。图3是不同状态的膜片。



图3膜片 a已开诱导槽的膜片 b破膜后的主膜膜片 c破膜后的喉道膜片

## 2.2 充气系统

目前，高超声速推进实验装置用于超燃冲压模型发动机实验，在地面上非常难模拟发动机的燃气，因为一般设备材料都很难承受住高温、高压而烧毁。现在往往采用烧氢补氧加热方式，让空气与氢气在加热器内部燃烧，再加入适当氧气补偿空气中消耗掉的氧气，使燃烧加热后的气体含有与空气相同含量的氧气成分，用这种方式提供实验气流条件（如总温、总压、流量等），但这不是真正燃气状态，而我们解离气体动力学课题组是第一家能够模拟真实燃气的科研团队。

### 2.2.1 组分

混合气体组分空间分布对于爆轰起始和爆轰产物特性具有重要的影响，爆轰驱动实验的高重复性也依赖于氢氧气的均匀混合。被驱动段要充入我们需要的组合气体：氢气+空气，

有时还需要氧气；驱动段：氧气+氢气或乙炔，有时还要配空气或氮气，以提高驱动段和被驱动段的压力比，来调节激波速度；

### 2.2.2 方法

充气混合系统由气源、过滤器、减压调压器、单向阀（止回阀）、开关阀门、喉道和气路组成；气源选用瓶装高压气体（氢气/乙炔、空气/氮气、氧气）通过气路经过滤器引入减压调压器，用调压器限定气流的流量，再通过开关阀门和喉道控制气体同时向爆轰管；在每次充气前，要依次标定喉道；根据要求选择：分步充气法、喉道同时充气法。

分步充气法用在驱动段中，在驱动段中安装比其略短的小直径充气管，通过沿轴向均匀分布的大量小孔充气来促进混合均匀。这种分步充气法，一般是抽真空后，先直接充燃气（氢气或乙炔）到预定压力，再通过小直径充

气管依次充空气(或氮气),最后充氧气。充氧气时要注意,既要节省试验时间,又要让氧气尽可能地有足够的时间与燃气混合均匀;

喉道同时充气法常用在被驱动段中,按混合比要求同时充入氢和氧。根据压力要求,选择一级减压、二级减压(如图4);两个喉道安装在同一截面互相正对的地方(如图5),氢和氧射流充入管中后互相碰撞,强烈干扰、混合后再流向其他部位,这种充气混合方法简单方便,但要求减压器精密、稳定。



图4 两级减压



图5 喉道同时充气

### 2.2.3 顺序

驱动段可先充燃气(氢气或乙炔)+空气,等被驱动段充气完毕、关闭监测设备,准备好试验段的测试设备,再充氧气;

### 2.2.4 特殊情况

夏季空气潮湿时,要充干燥空气,以稀释潮气,再抽真空。

## 2.3 点火系统

爆轰驱动激波风洞的关键技术之一就是在混合的可燃气体中点火起爆。

目前,使用较多的点火方式有:电火花点火、电爆丝点火、爆轰波点火、射流点火等;

电火花点火:研究发现,相同混合气体的直接起始点火能量不仅与火花塞的形状有关,而且火花塞的放电时间的长短对它也有相当大的影响,与其他点火方式相比,火花塞点火操作简便,点火频率高,比较适用于多次爆轰的点火;不足之处是,点火能量较低;

电爆丝点火:这也是一种高能量的点火方式,电源可以是高压电容或220V交流电。通电瞬间,大电流熔化电阻丝,利用释放的能量进行点火。这种点火方式能量较大,但不适于连续多次点火;

爆轰波点火:爆轰波点火是驱动段中的混合气体发生爆轰、破膜后,它形成的爆轰波引爆被驱动段中的混合气体形成爆轰。这种点火方式往往需要配比两种不同组分的气体,实际操作及实验装置比较复杂,难以连续多次操作;

射流点火:射流点火就是将点火管沿径向接入激波风洞驱动段,在向驱动段充入混合可燃气体时,点火管也同时被充满;点火管中的混合可燃气体被火花塞点燃后,高温、高压气体,快速射入驱动段中,使之立即形成爆轰的方式。



图6 射流点火管



图7 爆轰点火装置

本课题组采用本实验室研制成功的一种结构紧凑、点火能力强的新型射流点火管(如图

6 所示)。它兼有电火花点火和爆轰波点火的优点,克服了它们的不足。首先,电火花点爆点火管中的可燃混合气体,这种混合气体就是激波风洞驱动段中的可燃混合气体,而且它们是相通的;接着,已点爆的点火管中的混合气体,再点爆驱动段中的实验用驱动气体。我们选用中国科大研制的爆轰点火装置(如图 7 所示)来控制火花塞,选用‘外触发’方式,在控制室与数据采集仪器同步触发。

### 3 讨论

经过运行实践,我们发现以下几个问题,在风洞运行中要加以重视:

装配气路时,注意氧气气路中,必须保证禁油!氧气压力表、减压器等部件要选用专用部件;过滤器、止回阀等非专用部件,都要做脱脂处理,保证无油!

充气时,如果发现混合气体的比例不对或与预定压力不符,如果还没充氧气,可以直接抽真空,重新充气;如果已充氧气,由于高浓度的氧气与真空泵中的油相遇会发生燃烧爆炸,相当危险,所以必须先稀释。这点非常重要,必须注意!

因为氢氧爆轰会产生水,所以要注意点火管和火花塞的角度,保持干燥(充气的喉道也要注意),以免影响实验效果。打炮后,产生

的水汽在高温的条件下,易使炮管内壁生锈,所以打炮后,要立即用真空泵把废气抽走,卸膜后,要用鼓风机吹,加速干燥;

用乙炔配制燃气时,爆轰后,有可能在炮管内壁积碳,应定期清理;

打炮后,要观察膜片开模情况,注意是否掉膜(辅助方法:夹膜前、卸膜后,要称膜片重量),如有掉膜,必须立即清理炮管,以保护模型、炮管、传感器等);

擦炮时,拆下小直径充气管,如发现充气管已弯曲,应尽量理直;在炮管外,卸掉充气管末端的堵头,用较大的气压从初始端向末端吹气,把锈粉、积碳等杂质冲刷出去,再装上堵头,用较小的气压通气时注意检查充气管沿轴向均匀分布的小孔通气是否均匀;再安装充气管时,注意小孔的方向不能朝下被其自身压住,以保证燃气的混合均匀。

### 参考文献

- 1 陈宏,冯珩,俞鸿儒. 用于激波管/风洞的双爆轰驱动段. 中国科学 G 辑, 2004, Vol. 34(2): 183~191
- 2 俞鸿儒,李斌,陈宏. 激波管氢氧爆轰驱动技术的发展进程. 力学进展, 2005, Vol. 35(3), 315~322
- 3 姜宗林,俞鸿儒. 高超声速激波风洞研究进展. 力学进展, 2009, Vol. 39(6), 766~776