

分步管充气混合装置

董志成, 姜杨, 陈兵, 陈宏

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 在爆轰驱动实验研究中, 爆轰驱动段内试验气体各组分的分布均匀性对爆轰的稳定性和重复性起着极其重要的作用。分步充气法是一种实用的充气方法, 试验气体组分的分布均匀性受到分步充气管上小孔密集程度、小孔孔径大小、充气方式等因素的影响, 其相互影响有待进一步研究。本文通过实验的方法, 初步研究了充气孔的密集程度即孔距大小的变化, 对促进气体均匀混合的作用和对激波管流场品质的影响。

关键词 爆轰驱动, 充气, 混合

引言

在氢氧爆轰驱动实验研究中, 气体的混合均匀程度及其空间分布均匀度, 对爆轰燃烧的稳定性 and 重复性有重大的影响。

爆轰驱动段充气通常有两种充气方法: 第一种为临界喷管混合充气法(也称“同时充气法”)。即在同一截面安装充气管, 按要求的混合比同时充入不同气体, 不同气体在爆轰驱动段中剧烈互相混合, 同时向周围扩散, 直到爆轰驱动段达到预定压力参数。同时充气法具有以下优点: 1)混合比较均匀; 2)结构简单、容易实现; 3)适用于较高压力状态等。但该方法也有局限性: 1)试验所需的气体达到三种或三种以上时很难完成; 2)充气时对各种气体的充气压力要求精确控制, 不易保证精度和重复性; 3)要求经常对临界喉道进行标定; 4)某些气体(如乙炔气体)压力较低也很难充要求压力高的状态。

第二种为分步管混合充气法(简称“分步充气法”)。爆轰驱动段中多种气体的分压比也就是其摩尔混合比, 分步充气可以保证每一种气体的混合比精确控制到位; 在碳氢燃料实验中, 为了控制燃气的温度, 爆轰驱动段要求充入多种气体(大于3种), 分步充气法就可以发挥其优势。但其不足是, 不一定能满足空间分布上的每一局部、每一点是均匀的。因此, 我们采用在爆轰驱动段中安置分步管做为充气的

辅助手段。在分步管上按一定间距分布有一定直径的小充气孔; 充气时, 分步管内部的压力高于爆轰驱动段内的压力, 此压差使后充入的气体能利用射流的扰动和扩散作用, 与先充入的气体加速均匀混合。

本文通过多次实验对比, 着重叙述了不同直径的分步管及分步管上的充气孔的不同孔距和不同孔径大小等参数对爆轰驱动激波管流场品质的影响。

1 实验设备和装置

本实验在高温气体动力学国家重点实验室的 JF-14 高温燃气激波风洞的爆轰驱动激波管运行状态下完成。

JF-14 的激波管部分全长约为 31 米, 由相同内径为 224 毫米的三段管道组成: 即被驱动段、爆轰驱动段、卸爆段三大主要部分。根据不同的实验需要, 三段的长度可以相应调整, 每两段之间用膜片隔开。被驱动段中充入低压实验气体(如空气); 爆轰驱动段充入高压驱动气体(氢气、氧气和氮气); 卸爆段抽真空。如图 1 所示。

激波管各段沿轴向安装有多个压力传感器, 利用压力传感器测出激波到达的时间和各传感器之间固定的距离, 从而可计算出激波和爆轰波的速度。

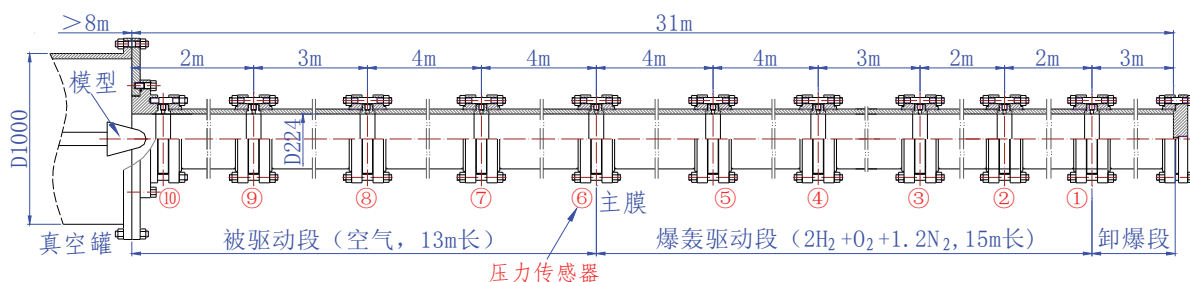


图1 JF-14 高温燃气激波管实验装置

我们制作了两种不同直径的分步充气管：粗管选用外径 14 毫米、内径 12 毫米的不锈钢管，细管选用外径 8 毫米、内径 5.4 毫米的不锈钢管。分步充气管安装在爆轰驱动段底部，长度略短于爆轰驱动段。在分步充气管上，沿轴向排列着许多充气孔，孔径有 0.4 毫米、0.8 毫米和 1.5 毫米三种，孔间距分为 100 毫米和 500 毫米两种。分步充气管在爆轰驱动段中的位置如图 2 所示。

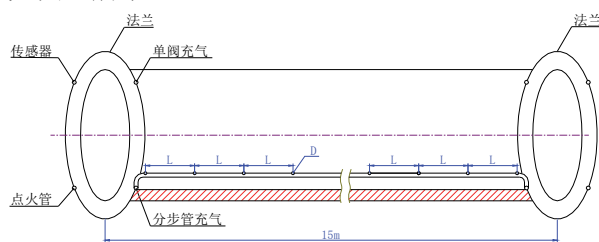


图2 孔径 0.8mm、孔间距 100mm 分步管示意图

2 实验方法

实验中，各段先抽到真空状态；然后，按照各种气体的分压比，向爆轰驱动段中依次分步管充入燃料（如氢气）、空气（含有氮气和氧气），最后充入氧气。最先充入的燃料也可以通过单阀气路充气。充气压力分为 0.4MPa、0.8 MPa 和 1.2 MPa 三种状态。充气位置根据与主膜的距离不同，分为近端充气和远端充气两种；点火管在爆轰驱动段下游靠近主膜处。起爆后在激波管各连接环上的压力传感器除了测出激波和爆轰波速度，还要计算出激波衰减率和激波后压力等参数。

3 实验原理与混合优劣的判别标准

根据伯努利方程

$$p_0 = p + \frac{1}{2} \rho v^2$$

可知速度越小，压差越小。我们希望每个分步充气管上的充气孔内外压差尽量小一些，以便充气流量均匀。当充气孔直径小一些、排列稀一些，分步充气管内的气流速度就低一些，管内的压差小一些，而驱动段相对于分步充气管是大环境，其压力是一样的，也就是说，各充气孔内外的压差基本一致；进而充气速度尽量一致，可以认为各点先后充入的气体混合也是均匀的。这样就达到了气体混合均匀的目的。

判断气体混合是否达到要求的依据如下：被驱动段激波衰减率、激波衰减率平均值和激波速度平均值的重复性。

通过计算平均值和和相对误差来判断不同的分步管孔径和和孔距、以及充气状态对实验结果的影响。具体公式如下：

速度平均值计算：

$$\bar{V}_s = (V_1 + V_2 + \dots + V_n) / n;$$

$$\text{残差: } \mu_i = V_i - \bar{V}_s;$$

$$\text{残差平方和: } \mu_{in}^2 = \mu_1^2 + \mu_2^2 + \dots + \mu_n^2;$$

$$\text{标准偏差: } \sigma = \sqrt{\mu_{in}^2 / (n-1)};$$

利用以上公式，可以判断数据中是否有粗大误差存在。如果 $\mu_i \leq 3\sigma$ ，即无粗大误差存在，可以继续计算。如果 $\mu_i > 3\sigma$ ，即为粗大误差。剔除粗大误差以后重新再次计算，直到没有粗大误差为止。

$$\text{均值标准偏差: } \sigma_x = \sigma / \sqrt{n};$$

$$\text{设置信概率区间为: } 0.95 \sim 0.9973;$$

$$\text{置信分布因子: } t_p = 2.31 \text{ 和 } 4.28;$$

$$\text{相对误差为: } \gamma = t_p / \bar{V}_s。$$

利用以上公式，可以计算出速度、压力和激波衰减率的均值和相对误差。其中相对误差越大说明波动越大，相对误差越小说明重复性越好。因此相对误差大小是判断实验状态好坏的一个重要指标。

激波衰减计算公式如下：

$$\xi = (\Delta M_s / M_s) / (L/d)$$

其中 M_s 一为多次衰减值的平均值；

ΔM_s 一为前后衰减值的差值；

L—为前后传感器测点的距离；

d—为炮管内径。

利用激波衰减公式、可以计算出激波衰减的平均值 $\bar{\xi}_s$ 和相对误差 γ 。平均值 $\bar{\xi}_s$ 越小说明衰减越小，相对误差 γ 越小说明重复性越好。

4 实验结果和误差分析

利用平均值和相对误差计算公式，可以进行数据处理，得出如下结论。

表 1 充气位置对流场品质的影响

试验状态	孔距(mm)	孔径(mm)	充气压力
	100	0.8	0.4MPa
充气位置		远端充气	近端充气
速度 Vs(m/s)	平均值	1046.4	1039.7
	重复误差	0.42%	0.27%
Ms 衰 减率	平均值	1.22E-03	1.24E-03
	重复误差	3.45%	8.93%

由表 1 可以看出，远离主膜位置充气时，被驱动段激波衰减率的平均值和重复误差都较小，激波速度波动比较小，重复性比较好。因此远离主膜位置充气效果略好。但在远端充气时，激波速度的重复误差又略大，并且远端充气时还要在爆裂驱动段下游补氧，使操作的复杂程度增加。因此综合考虑，我们选用近端充气方式。

由表 2 可以看出，在充气完成后，等待的时间稍长一些，被驱动段激波衰减率的平均值和重复误差都较小，激波速度波动比较小，重复性比较好。这说明充气后等待一段时间，有利于试验气体混合均匀。但等待时间过长，又会降低试验效率。因此，我们建议在正式实验中，等待时间为 10 分钟。

由表 3 可以看出，当孔径为 0.4mm 时，被驱动段激波衰减率的平均值和重复误差都较小，激波速度波动比较小，重复性比较好。说明充气孔径比较小时，充气效果更好，符合我们预想的孔径小充气流量和分步管内速度低，从而压差小、充气混合均匀的效果。

表 2 等待时间对流场品质的影响

试验 状态	孔径 (mm)	孔距 (mm)	充气 压力	充气 位置
	0.4	500	1.2MPa	近端 充气
等待时间(min)		1	5	13
速度 Vs(m/s)	平均值	1045.1	1049.5	1050.4
	重复 误差	0.40%	0.41%	0.43%
Ms 衰 减率	平均值	1.27E-0 3	1.29E-0 3	1.24E-0 3
	重复 误差	9.71%	11.75%	6.99%

表 3 充气孔径对流场品质的影响

试验状态	等待时间	孔距(mm)	充气位置
	1min	100	近端充气
充气孔径(mm)		0.4	0.8
速度 Vs(m/s)	平均值	1037.4	1039.7
	重复误差	1.10%	0.27%
Ms 衰减率	平均值	1.23E-03	1.24E-03
	重复误差	5.03%	8.93%

由表 4 可以看出，当孔距为 100mm 时，被驱动段激波衰减率的平均值和重复误差都较小，激波速度波动比较小，重复性比较好。说明充气孔数量适当地增多，充气效果更好。

表 4 充气孔距对流场品质的影响

试验状态	等待时间	孔径(mm)	充气压力
	1min	0.4	1.2MPa
充气孔距(mm)		100	500
速度 Vs(m/s)	平均值	1037.4	1045.1
	重复误差	1.10%	0.40%
Ms 衰减率	平均值	1.23E-03	1.27E-03
	重复误差	5.03%	9.71%

5 结 论

根据多次实验结果可以得出如下结论：

第一，远离主膜位置充气比靠近主膜位置充气时，气体混合效果更好，实验结果更加理

想。但是点火管因远离充气点，混合效果差，需要补氧才能正常起爆。

第二，充气完成后，等待约 10 分钟，既能使气体混合更均匀，以得到更好的实验效果；又对实验效率影响不大，

第三，分步管充气孔的孔径细一些时，实验结果较好。

第四，充气孔数量适当地增多时，充气效果更好。

综上所述可以初步得出结论：应该选择孔径较小但数量较多的分步管进行实验充气。并且充气位置应该选择在距离主膜较近的地方。这样得出的实验结果效果更好一点。

完成上述实验研究后，我们还研究了外径为 14mm，孔距为 100mm 和 500mm，孔径为 0.4mm、0.8mm 和 1.5mm 的分步管对充气效果和实验结果的影响。但是由于环境等外界因素

的影响，为正常直接起始爆轰，故暂时未得出理想的实验结果。

在后续的实验工作中，我们将要继续研究不同的分步管对充气效果和实验结果的影响。争取得出更加理想的结论，选择更加合适的分步管进行充气实验研究。

参考文献

- 1 俞鸿儒. 氢氧爆轰驱动激波风洞性能. 气动实验与测量控制, 1993, 7(3):38-42.
- 2 于伟, 俞鸿儒. 临界喷管充气混合装置. 气动实验与测量控制, 1994, 8(3):25-28.
- 3 赵伟, 俞鸿儒. 双过临界喷管充气混合装置. 空气动力学学报, 1999, 17(3):279-283.
- 4 陈宏, 冯珩, 俞鸿儒. 用于基波管/风洞的双爆轰驱动段. 中国科学 G 辑, 2004, Vol.34(2):183-191
- 5 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, 35(3): 315-322.