

# 利用激波风洞设备进行塞式喷管流动的模拟实验

马家驩 李江 潘文欣 翟曼玲

中科院力学研究所高温气体动力学重点实验室

北京 100080

**摘要** 本文详细叙述利用力学所 JF-8A 激波风洞设备改造后, 进行的塞式喷管流动的模拟实验。对 20% 和 35% 两种截短长度的喷管在压比 7-400 范围中进行了喷管壁面及底部的压力分布测量。纹影流动显示也给出了流场分析的直接的物理图象。实验证实了塞式喷管的高度补偿特性。实验还考察了有无侧板及底部二次流的影响, 实验给出的压力分布与数值模拟计算吻合较好, 说明所发展的程序切实可用。

## 0. 引言

塞式喷管火箭发动机具有高度补偿能力的优点, 在相同的面积比下, 其低空性能显著高于钟型喷管; 由于不会出现过膨胀, 可以将设计面积比取的很大, 在一定程度上避免了欠膨胀。另外塞式喷管还有结构短、重量轻, 便于采用差分流量调节实现推力矢量控制等很多优点。因此, 在以火箭为动力单级入轨的天地往返运输系统方案中, 自然这种具有高度补偿特性喷管的发动机倍受关注, 成为单级入轨运载器的首选方案。但是, 作为这种火箭发动机核心部分的塞式喷管的流动比起传统的钟型喷管来要复杂的多, 影响喷管性能的因素也很多, 所以, 对气动塞式喷管气体动力学过程进行实验模拟, 开展深入细致的研究是非常有必要的。<sup>[1,2]</sup>

本文利用激波风洞的设备条件, 对其进行了改造, 并专门设计了一套二维的塞式喷管模型, 对它的流动进行了实验模拟。主要测量压力分布并进行流动显示照相。实验获得了不同压比条件下塞体表面的压力分布, 考察了压比、不同的喷管截取长度、有无侧板以及不同的底部二次引流状况对喷管流动的影响。实验结果验证了塞式喷管所具有的高度补偿能力, 同时实验给出的压力分布与数值模拟计算结果<sup>[3]</sup>吻合较好, 说明了所发展的一套对气动塞式喷管流场和性能进行预报的程序是恰当的、合理的, 具有分析流场结构和工程应用的实用价值。

## 1. 实验设备

实验设备主要包括两部分: 一是气源, 提供实验所需的工作气体, 另一部分是背压模拟设备, 提供不同高度下的背压条件。由于激波风洞具有可耐高压的驱动和被驱动管以及有容量巨大可提供不同真空度的真空室的设备特色, 现将力学所 JF-8A 激波风洞进行了改造来满足实验的要求。首先, 去掉风洞的喷管, 将风洞高低压段连通, 整体作为提供气源的容器。另一方面, 将风洞的实验段和真空罐一起用于提供背压条件。根据估算, 气源和真空设备均能满足实验的要求。图 1 是实测的贮室压力变化的典型曲线, 可以看出, 在启动过程完成后设备可以提供大于 100 毫秒的稳定的气源条件, 在采集实验数据的时间段中参数变化小于  $\pm 2\%$ 。

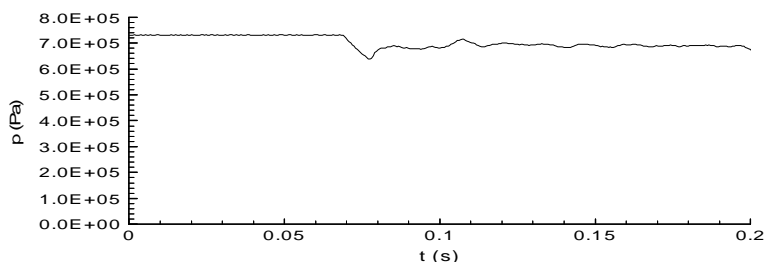


图 1 总压随时间变化的曲线

实验模型是紧连着作为贮室的激波管管体的末端，并置于真空室中。实验的启动采用单膜破膜方式，在实验模型与气源之间夹膜，实验开始向管道中充气，当充到一定压力，膜片破裂，实验启动。实验准备阶段进行了破膜试验，通过试验来选择合适的膜片类型以及膜片厚度，同时考察破膜压力的重复性以及是否有碎片脱落。经过多次试验，选定 0.25mm 的纯铝膜，其破膜压力可以满足实验要求，并具有较好的重复性。试验表明，如果得当地控制充气过程压力上升的速率，完全可以避免破膜以后出现碎片。

## 2. 实验模型

塞式喷管模型选用线型点膨胀的结构形式，具体的设计方法在文献[4]里做了详细说明。

实验采用的基本参数是：

设计压比	200
燃烧室压力	0.7 Mpa
喉部尺寸	7 mm
横向长度	100 mm
喉部面积	1400 mm <sup>2</sup>
流量	2.7 kg/s

为了对比不同截断长度的塞式喷管的差别，实验模型选用了两种截断长度：20%喷管和 35%喷管。

有无侧板，塞式喷管的流动会有差别，尤其是底部流动，无侧板时，底部二次流可能无法起到增压的效果，为了对这个问题进行研究，设计了有侧板和无侧板的两种结构形式。

为了研究底部二次流的影响，在塞体底部均匀开小孔，二次流通过这些小孔加入。二次流的流量用不同孔径的孔板来控制，二次流的流量分别选取主流的 0.5%、1%、1.5%、2%和 3%。

测点布置方面，为了研究侧板的影响以及三维效应，20%喷管不仅在对称面上布置测点，还选取若干站点沿横向布点。塞体型面分布测点 29 个，底部 15 个。为了考察上下面的流动是否对称在下表面放置 2 个测点。35%喷管的测点都是在对称面上，型面 24 个测点，底部 4 个测点。

实验模型的结构示意，如图 2 所示。

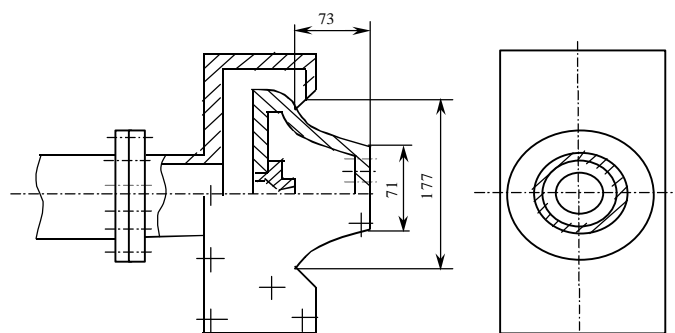


图 2 气动塞式喷管实验模型结构示意图

为了便于加工和安装，喷管模型分成内件、外件和盖板三部分。外件和内件采用插接模式，既便于定位和保证喉部尺寸，又便于拆装，内件插接到外件以后，再安装盖板。

## 3. 实验测量

测压采用的是压阻传感器。根据设计过程中得到的表面压力分布选择合适的量程，塞体上游的压

力较高,选用量程为 0.8Mpa 的传感器,下游的选用量程为 0.5Mpa 的传感器。由于底部压力一般不会超过一个大气压,所以底部全都选用量程为 0.1Mpa 的传感器。测量总压的传感器选用量程为 1.0Mpa 的传感器。

为了消除整个测量系统的误差,实验前进行了标定。其中量程为 0.1Mpa 的传感器的标定,选择绝对真空状态和大气两种状态。绝对真空状态根据设备最大抽空能力,约为 8Pa 左右。大气条件下的压力采用水银气压表读数。对上行和下行都进行标定,然后取平均值。对 0.5Mpa 的传感器进行了重复标定,结果显示重复性很好。

压力传感器与信号调理器相连,信号调理器有恒流源,给传感器提供桥压,传感器输出的电压经过信号调理器放大,输入到 64 通道的 SC-28 数据采集系统进行采集。SC-28 数据采集系统由 AD 板、信号调理板、同步触发控制电路以及微型计算机、打印机等组成。采集得到的数据直接存储在计算机中,经过数据处理转换为压力值。

实验中流动显示采用离轴的平行光纹影系统。视场直径 $\varnothing 350\text{mm}$ ,球面反射镜的焦距为 3.5m,使用的光源为火花光源,闪光脉冲宽度为  $0.5\mu\text{s}$ 。火花光源的触发由一台时间延迟控制器来控制,采用第一个测点的压力信号来触发。实验前打开照相机,处于等待状态,破膜以后,压力传感器产生压力信号传到延迟控制器,延迟控制器按照预先设置的延迟时间触发火花光源,火花光源发出脉冲闪光。

#### 4. 实验结果及分析

图 3 给出了 35%喷管设计状态下 ( $\text{NPR}=200$ ),塞体型面中心线上压力分布的实验结果和根据 Prandtl-Meyer 膨胀得到的理论值的比较,可以看出靠近喷管出口的点有差异,主要原因是理论分析假设喷管喉部的参数均匀且达到临界状态,而实际上喉部的流动参数并非均匀分布。下游理论值和实验值比较接近。20%喷管得到的实验结果情况也大致如此。

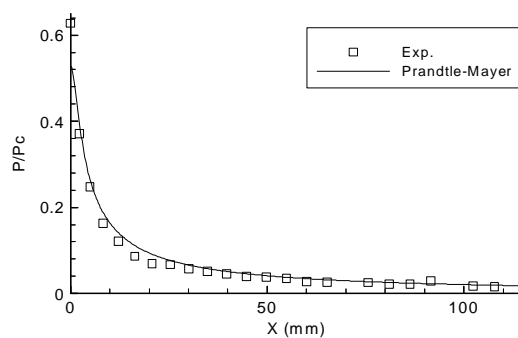


图 3 设计状态下 35%喷管塞体型面压力分布

图 4 是不同压比条件下 35%喷管塞体型面压力沿中心线的分布。从图中可以看出,压比较低的情况下,塞体表面压力呈现波状分布,波状变化以前的压力分布与设计状态完全一样,有波动的这一段的平均值与环境压力接近。实验结果与分析基本一致,证实了气动塞式喷管高度补偿特性。对于截短塞式喷管来说,高度补偿特性是在一定的压比范围内才在塞体型面起作用,大于某个压比以后型面压力分布保持不变,这时高度补偿特性通过塞体底部起作用的。这个压比很好确定,等于设计条件下喷管总压与截短处压力之比,在设计过程就可以大致确定出来。所以截短塞式喷管塞体长度越长,高度补偿特性在型面起作用的压比范围越大,全长度喷管在设计压比以下都起作用。对于 35%喷管来说这个压比为 58,对 20%喷管来说为 32。从图中也可以看出高于这个压比,塞体型面的压力分布不再变化。

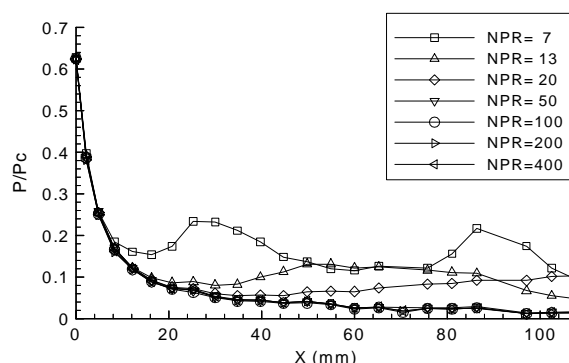


图 4 不同压比条件下 35%喷管塞体型面压力分布

实验测量表明,不同压比条件下塞体底部沿中心线的压力分布近似呈水平直线,说明底部压力沿坐标变化不大。底部平均压力随压比的变化曲线,以环境压力  $P_a$  为参比,实验表明在压比小于 100 的情况下,底部压力随压比增加而降低。压比大于 100 以后,底部压力不再随环境压力降低而降低,这时尾迹处于闭合状态。尾迹闭合以后底部压力不再随环境压力变化这个特性对于塞式喷管来说很重要,这时底部提供的净推力随环境压力降低而增加。

实验测量结果还表明,有、无侧板对中心线位置的压力分布影响并不明显,但对塞体边缘压力分布有明显差别。图 5 给出压比  $NPR=200$  时有无侧板边缘压力分布的比较。无侧板情况下压力总体低于有侧板情况,这会造成推力损失。

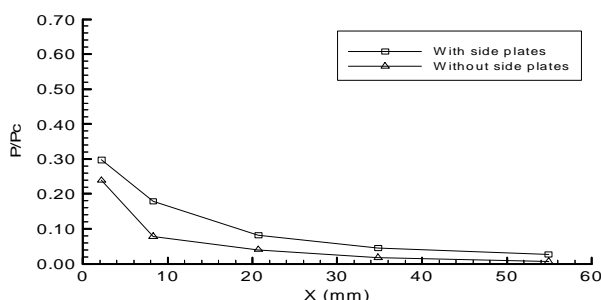


图 5  $NPR=200$  时有无侧板边缘压力分布比较

有侧板情况下中心线和边缘压力分布的比较,可以看出压力分布也有明显差别。此外从  $NPR=7$  塞体表面三个站点沿横向压力分布图中可以看出,无侧板情况下沿横向压力分布并不是水平直线,而是有一定变化,反映出流动所呈现的三维特性。总的说来无侧板对喷管的性能影响还是比较可观的,实际设计气动塞式喷管结构时应该考虑采用某种形式的侧板结构。

此外,从不同二次流流量条件下的底部平均压力随压比变化曲线。可以看出,当压比小于 100 时,底部压力随环境压力的降低(随压比的增加)而降低,这个阶段处于开尾迹的状态。当压比大于 100 以后,底部压力基本保持不变,不再随环境压力改变,此时尾迹处于闭合状态。在尾迹开放的阶段,底部二次流加入并没有起到明显的增压效果。

图 6 为无侧板情况下 20%喷管底部压力随压比变化规律。可以看出,底部压力一直随环境压力降低(压比增加)而降低,加入二次流以后没有任何增压效果,证明了无侧板底部无法真正封闭,二次流起不到增压效果。

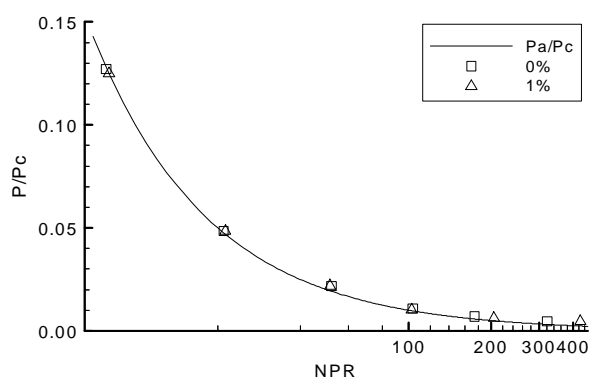


图6 无侧板情况下 20%喷管底部压力随压比的变化

如果我们将塞式喷管提供的推力区分为三部分：内喷管推力、型面推力和底部推力，型面推力和底部推力可以统称为外喷管推力。如果内喷管不出现分离，不同的压比条件下内喷管的推力是一样的，所以只要比较外喷管推力的差别就可以了。实验中测得了塞体型面和底部压力的分布，而且测点比较密，只要沿整个表面进行积分就可以得到外喷管的推力。评价喷管性能一般是用推力系数来衡量的，推力系数是喷管推力除以燃烧室压力和喉部面积，推力系数排除了燃烧室压力和喉部尺寸的差异。这里借用推力系数的概念，将各部分的推力求出以后，归一化成推力系数的形式。表1是20%和35%喷管的推力系数。

表1 不同截短长度喷管推力系数的比较

NPR	20%			35%			外喷管推力 系数差值
	型面	底部	外喷管	型面	底部	外喷管	
7	0.647	-0.071	0.576	0.736	-0.191	0.545	0.031
20	0.738	0.018	0.756	0.840	-0.117	0.723	0.033
50	0.853	-0.038	0.815	0.883	-0.027	0.856	-0.041
100	0.938	-0.018	0.920	0.969	-0.025	0.944	-0.024
200	0.973	0.010	0.983	0.988	-0.009	0.979	0.004
400	0.970	0.027	0.997	1.023	-0.001	1.022	-0.025

可以看出，型面推力的变化规律比较简单，随着压比的增加型面推力增加，塞体长度越长，型面推力越大。底部推力的变化规律相对比较复杂了，其变化规律和塞体底部特性的分析一致。在实验压比范围内，20%喷管底部推力既有负又有正，35%喷管底部推力都是负的。比较两种截短长度外喷管推力系数，可以看出，在低空20%喷管的性能优于35%喷管，高空低于35%的喷管，35%喷管推力性能上并没有明显高于20%喷管。而塞体长的喷管尺寸和结构重量上都会增加，所以采用20%喷管比35%喷管显然更合适一些。至于是不是可以更短，还需要结合实验和数值计算进行更细致的研究。

流场显示照片可以比较直观的提供气动塞式喷管的流动特性。但由于光路的限制，拍摄纹影都只能针对无侧板的情况。从纹影照片可以看出，在压比较低条件下，射流紧贴壁面流动，由于压缩波和膨胀波的干扰，射流边界发生偏折，呈现波浪状。初始的压缩波比较明显，压缩波与边界干扰使边界向外偏转也比较明显，后面的波系和边界变化就不是很明显，这主要是由于附面层和剪切层的粘性耗散使得波系减弱，另外由于没有侧板限制，气流向两侧膨胀也使得波系和边界模糊。随着压比的增加，射流膨胀的程度增加，射流边界向外推移。设计压比条件下，射流边界与中心线基本平行，而

且在塞体表面的膨胀比较均匀，没有出现明显的干扰波系。当压比大于设计状态下，射流边界向外的角度更大。当  $NPR=100$  时，底部开始出现尾激波，但不是很强，结合前面压力分析也可以知道，这时尾迹已经开始处于闭合状态。而在  $NPR=200$ 、 $400$  时的尾激波则比较明显。（见图 7）

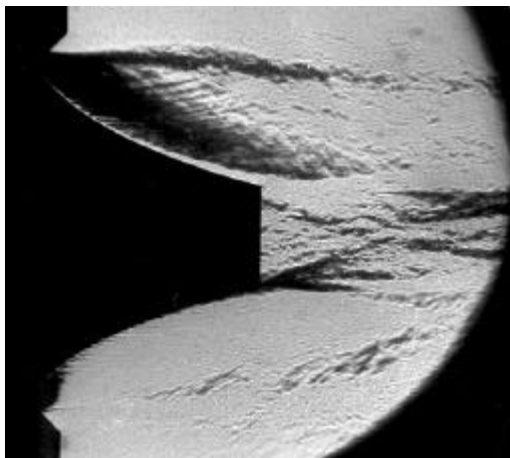


图 7 35% 喷管压比  $NPR=200$  条件下的纹影照片

## 5. 结论

利用激波风洞实验设备，改造后成功地模拟了塞式喷管的流动现象。在不同的压比条件下，测量了 20%、35% 两种截短长度喷管的壁面压力分布，考察了二次流及有无侧板的影响。纹影流动照片提供了流场分析直观的物理图象。通过实验，揭示了气动塞式喷管基本的流动特性，验证了高度补偿性能，得到一些有价值的结论：

（1）有无侧板对中心线压力分布影响不明显，但对边缘压力分布影响比较明显。无侧板的情况下喷管推力会有一定损失，因此在气动塞式喷管设计中应该考虑采用某种形式的侧板结构。

（2）开尾迹状态下，底部压力随环境压力变化，由于底部涡的影响，底部压力低于环境压力；闭尾迹状态下，底部压力保持不变，不随环境压力变化。塞体长的喷管比短的喷管底部压力更低。

（3）闭尾迹状态下，加入二次流，有比较明显的增压效果；开尾迹状态下，二次流对长喷管有增压效果，对短喷管增压效果不明显。底部压力随二次流流量增加而上升，但流量增加到一定量以后压力随流量增加缓慢。实验条件下，加入 1-1.5% 左右的二次流就能起到比较明显的增压效果，流量再多增压效果有限。无侧板情况下底部和环境相通，压力和环境压力保持接近，二次流无法起到增压效果。（4）塞体长度为 35% 的喷管的推力性能在低空低于 20% 的喷管，在高空高于 20% 喷管，总体上 35% 喷管的推力性能没有明显高于 20% 喷管。

## 致谢

感谢国家自然科学基金委对本项目的支持。（项目编号为：19882006）同时，特别感谢力学所高温气体动力学重点实验室（LHD）在设备改造、实验运行中给予的大力协助。

## 参考文献

- [1] 王柏懿、郭唐稳、王世芬 一种单级入轨火箭发动机概念--气动塞式喷管发动机 力学进展 Vol.30 No. 2 p.283-294 2000.5.
- [2] 李江 气动塞式喷管气体动力学过程研究 力学研究所博士后研究工作报告 2001.6.
- [3] Li Jiang, Guo Tang-wen, Ma Jia-huan. A numerical analysis of slipstream effect influence on aerospike performance Proceedings of International Conference on Application Computational Fluid Dynamics Beijing China 2000.10.
- [4] Angelino G Approximate method for plug nozzle design AIAA. J. Vol.10. No.2 1964.2.