

潜人喷管背壁流场模拟显示

黄志柱 何国强 吴心平

(西北工业大学)

摘要: 为了研究固体火箭发动机潜人喷管背壁流场的特点,设计了一种冷模拟实验装置。利用引入外加烟雾以及片光照明的显示技术进行背壁区域的流动显示,并用照相机和摄象机记录显示结果。结果表明:在雷诺数较高、潜人度较大和喷管潜人部分型面为凹弧面条件下,背壁区域容易形成旋涡;同时,针对实验条件进行内流场的数值计算,实验和计算结果相比较,二者在定性上具有良好的一致性。

主题词: 固体火箭发动机, 喷管, 流场模拟, 流场显示

VISUALIZATION OF SIMULATIVE BACK-WALL FLOWFIELD AROUND SUBMERGED NOZZLE

Huang Zhizhu He Guoqiang Wu Xinping

(Northwestern Polytechnical University)

Abstract: A cold-flow simulation experiment is accomplished, in order to study back-wall flowfield features around submerged nozzle of solid rocket motors. The visualization technique of inducing additional substance and sheet lighting are used to carry out flow visualization of the back-wall flowfield, and the results are recorded with a conventional and a television camera. The results show that it is easy to form vortex in back-wall flow field for a submerged nozzle with concave back surface and higher submerging rate under higher flow Reynolds number. Moreover, the internal flowfield is simulated through computer according to the experimental conditions. The pictures of flow visualization are in good accordance with the numerical simulation.

Keywords: Solid rocket engine, Nozzle, Flow field simulation, Flow visualization

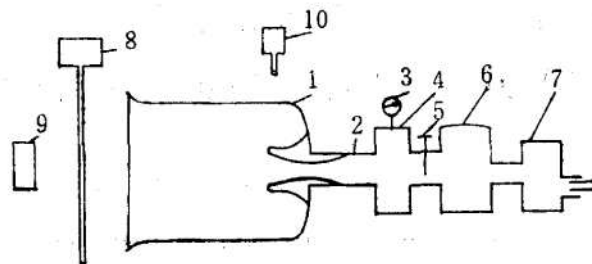
一、引言

对于大型的固体火箭发动机,尤其是体积受到限制的系统中,经常采用潜入式喷管。然而,喷管的潜入,使燃烧室内流场,特别是潜入喷管入口附近及喷管背壁区域的流场,变得十分复杂,可能会对发动机的工作过程带来不利影响。

由于发动机燃烧室内燃气的高温、高压条件,以及与时间相关的燃面退移,进行直接测量十分困难。现有的实验研究主要是对燃烧室内流场进行冷模拟实验。Dunlap^[1]、Traineau等^[2]和王晓等^[3]都做过一些模拟实验,但它们主要着眼于装药通道内的流动,而不在于潜入喷管背壁区域的流动。Salvetat B 等^[4]对具有潜入喷管后端翼柱装药的流场计算结果表明,对有翼柱狭缝的潜入喷管进口部位会受到较强的气流冲刷,但没有论及背壁区域的流动。迄今似乎对潜入喷管背壁流场还缺少研究。为此,作者设计了一种内流场冷模拟实验装置,利用引入外加烟雾和片光照明相结合的方法,进行潜入喷管背壁流场的实验研究,同时进行了内流场的数值计算,以求揭示潜入喷管背壁流场的某些特性。

二、实验装置和原理

流场显示冷模拟实验是在西北工业大学706实验室进行的,模拟的外型和大小受该实验室设备条件的限制。整个实验装置由实验模型、连接件、抽气系统、发烟装置、片光照明仪和摄像系统组成,如图1所示。现分段简述如下:



1.实验模型 2.连接件 3.精密真空表 4.稳压箱 5.阀门 6.真空罐 7.真空泵
8.发烟装置 9.片光照明仪 10.摄像系统

图1 模拟实验装置简图

1. **实验模型**: 由导流环、筒体、封盖、喷管组成,是产生所研究的内流场并加以显示的实验对象。为便于观察,导流环、筒体、封盖均由透明的有机玻璃材料制造。

2. **连接件**: 连接实验模型和抽气系统、喷管与连接件采用螺纹连接,以便在实验过程中容易进行喷管的替换。

3. **抽气系统**: 由真空泵、真空罐、稳压箱、精密真空表以及阀门组成,为模拟实验提供气源。

4. **发烟装置**: 由烟雾剂、发烟器、排烟管组成,是生成烟雾,使之按预定排烟方案进入实验段,为实验流场提供烟流的装置。

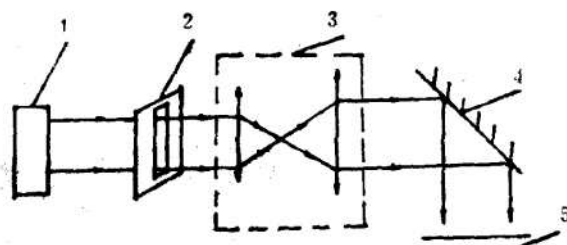
5. **片光照明仪**: 为实验流场提供光源,对所研究的轴向截面进行片光照明。

6. **摄像系统**: 由照相机和摄像机组成,担负着记录流场显示结果的任务。

流场模拟显示的工作原理是：真空泵工作时，真空罐内的空气因抽走而形成低压，由于压差，带烟雾的外界气体经导流环后均匀地进入实验段从而形成实验流场，利用片光光束照射某轴向截面，并将显示结果用照相机和摄象机记录下来，以便事后分析和研究，其流速由阀门控制。

实验的烟雾是由烟雾剂经发烟器加热，由液态转变为气态，然后由排烟管放出进入实验流场。烟雾的质量对显示效果至关重要，是显示结果清晰与否的保证。在我们的模拟实验中，选择 WJ-1 型烟雾剂，这是一种无色、无毒、无刺激、烟雾时间长的白色烟雾。艺术效果好，适用于流场显示。

由于条件的限制，目前产生片光照明的装置比较简单，其光学原理如图 2 所示。由光源发出的光束经狭缝片后形成一束和狭缝宽窄一致的片光光束，经过镜头后，由反射镜照射到试验段模型的某一需要拍摄的轴向截面，当烟流以一定流速流经实验段时，在筒体外面用照相机或摄象机拍摄，所得到的照片即为该截面上的流动图象。



1.光源 2.狭缝片 3.镜头 4.反射镜 5.流场

图 2 片光照明显示原理图

为了提高反差，衬托出烟雾的鲜艳色彩，达到突出流谱的目的，特将模型外表面的一半涂成黑色，而将喷管潜入部分外表面涂成红色。出于对烟量及对称系统的考虑，我们仅在半平面范围内进行流场显示。

三、实验结果与分析

根据现有潜入喷管设计资料^[5]，喷管潜入部分型面一般设计成三种类型，如图 3 所示。本文设计了一组喷管，它们分别代表了不同潜入段上游的流动状态，不同潜入度（ λ = 潜入深度/喷管总长）和不同喷管潜入部分型面，进行了潜入喷管背壁流场的流动显示，获得了烟雾流动的照片和录象等实验结果。表 1 是流动显示模拟实验主要参数表，图 4~8 是用照相机记录获得的烟雾图象；用摄象机记录的显示结果存贮于磁带中，更加详细地记录了气流流动的全过程，尤其是背壁区域旋涡的形成。为了进行分析和比较，按照与实验情况相仿的条件，进行了数值计算，图 9~12 是通过计算获得的速度矢量图，其长度方向取计算域的一半。

实验时环境大气的压力、温度分别是 $9.64 \times 10^4 \text{ Pa}$ 和 302.10 K ，空气动力粘性系数取， $\mu = 1.87 \times 10^{-5} \text{ kg/m} \cdot \text{s}$ 。

图 4 是 1 号喷管的烟雾流动图象，雷诺数 $Re = 9.50 \times 10^4$ 、潜入度 $\lambda = 0.462$ ，从图中可以发现，因具有较大的 Re 和 λ ，潜入喷管背壁前缘区域出现了旋涡。

表1 模拟实验主要参数表

实验序号	入口直径 cm	喷嘴直径 cm	出口直径 cm	喷管总长 cm	潜入度	型面类型	流量 kg/s	筒体入口雷诺数
1	5.0	3.2	3.2	6.5	0.462	III	0.1584	9.50×10^4
2	5.0	2.5	3.2	6.5	0.462	I	0.1100	6.65×10^4
3	4.0	2.5	3.2	5.0	0.300	II	0.1100	6.65×10^4
4	4.0	2.0	3.2	6.3	0.414	I	0.0704	4.25×10^4
5	4.0	2.0	3.2	8.0	0.563	II	0.0704	4.25×10^4

图5是2号喷管的烟雾流动图象, $Re = 6.65 \times 10^4$ 、 $\lambda = 0.462$, 由于具有较大的 Re , 同时喷管潜入部分型面为凹弧面, 背壁区域已有烟雾的积累, 形成了旋涡。

图6是3号喷管的烟雾流动图象, 虽然雷诺数与图5相同, 但由于 λ 较小 ($\lambda = 0.300$), 来流从筒体入口平稳地流进喷管内, 背壁区域没有出现旋涡。

图7与图8分别是4号与5号喷管的烟雾流动图象, 尽管 Re 偏小 ($Re = 4.25 \times 10^4$), 但由于4号喷管背壁型面为凹弧面, 5号喷管具有较大的潜入度 $\lambda = 0.563$, 从图中明显可以看出, 背壁区域形成了旋涡。

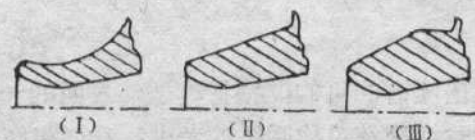


图3 喷管潜入部分背壁型面简图

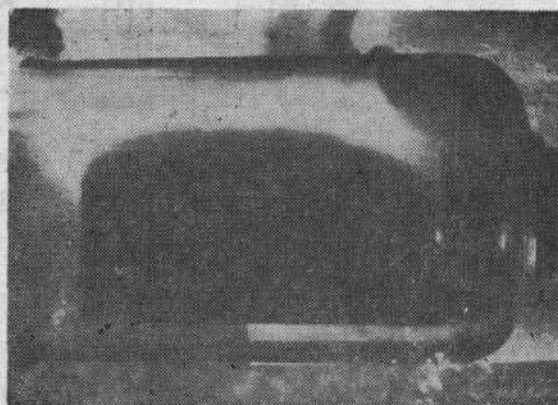


图4

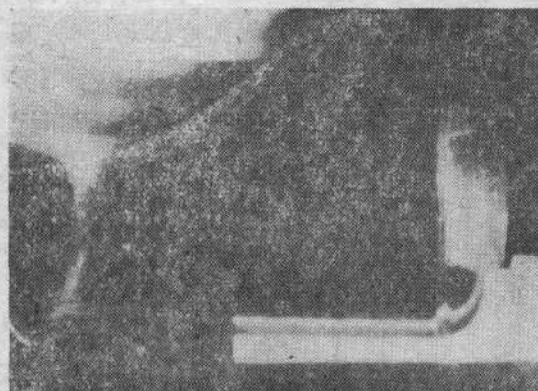


图5

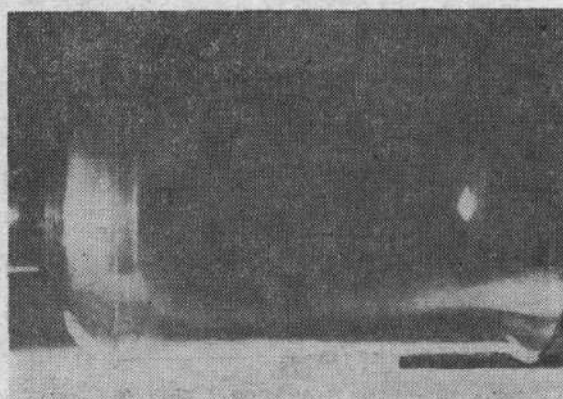


图6



图 7

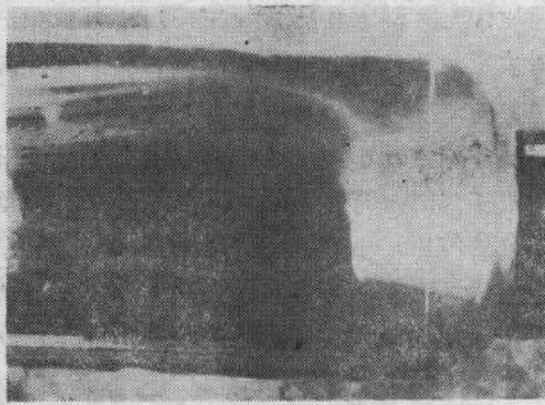


图 8

图 9、图10是潜入深度和背壁区域容积较大， Re 分别为 6.6×10^4 、 1.0×10^2 的速度矢量图。从图中可以看出，二者背壁区域均出现旋涡。

图11是与图10相对应，仅是背壁区域容积较小的速度矢量图。图中表明，在潜入度一定条件下，随着 Re 下降，旋涡有所减弱；空腔容积减小，背壁区域没有旋涡出现。

图12是 λ 较小， Re 为 6.6×10^4 的速度矢量图。图中表明， λ 较小条件下，背壁区域不会出现旋涡。

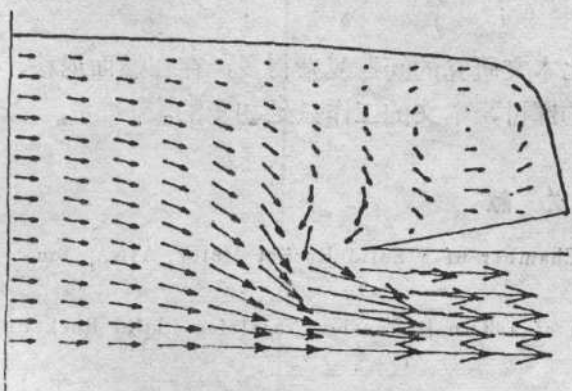


图 9 $Re = 6.6 \times 10^4$

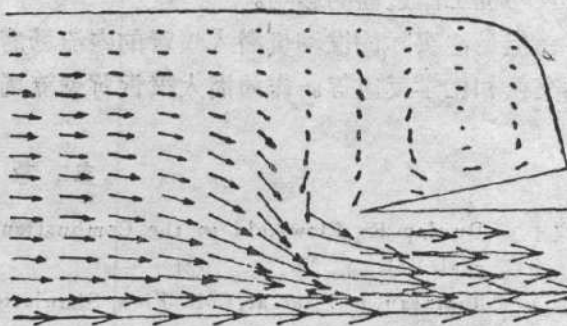


图10 $Re = 1.0 \times 10^2$

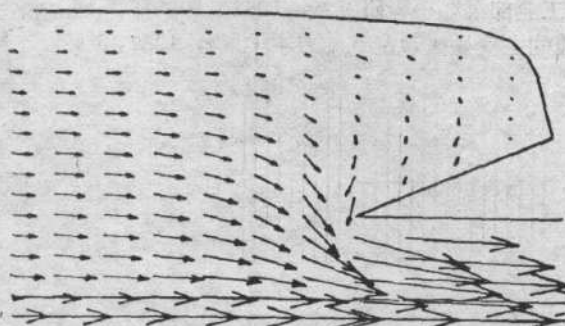


图11 $Re = 1.0 \times 10$

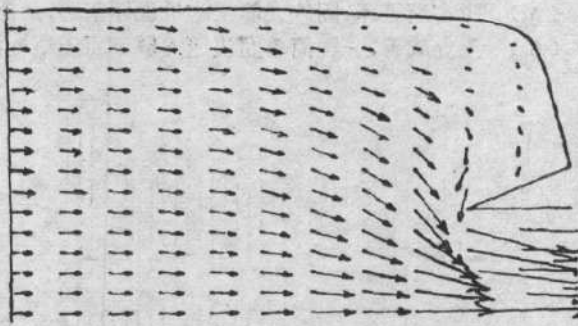


图12 $Re = 6.6 \times 10^4$

从以上的实验结果(照片和录象)和计算结果分析可得,喷管的潜人对发动机内流场有着不可忽视的影响。背壁区域容易形成旋涡,尤其当 Re 较高、 λ 较大,喷管潜入部分型面为凹弧面情况下,旋涡更容易发生。

实际发动机工作过程中,由于 Re 比较高,量级一般为 $10^4 \sim 10^5$ 范围内^[6],因此实际发动机工作时,背壁区域容易形成旋涡。背壁旋涡的存在,可以想象燃气势必增强对喷管潜入部分的传热,引起喷管潜入部分的烧蚀和烧蚀不均匀现象;随着推进剂燃烧表面的后移,引起喷管环形空腔深度以及燃烧产物从空腔流向燃烧室的流率皆随时间而增加,由于旋涡的存在,会使该区边界装药的燃烧发生一定的变化,从而影响发动机的燃烧过程,改变发动机工作过程的推力-时间特性;此外,空腔“逆向”流动减少了有效喷管阻尼,有可能导致发动机从稳定状态向不稳定状态过渡。

四、结 论

1. 实验和计算结果相对照,二者在定性上具有良好的一致性,证明本文的研究方案是可行的。本文设计的实验装置结构比较简单,容易实现,可以作为模拟发动机内流场的一种研究手段和方法。

2. 结果表明:潜入喷管背壁流场与潜入段上游的流动状态,喷管的潜入度和潜入部分的背壁型面有密切的联系。背壁区域容易形成旋涡,尤其当雷诺数较高、潜入度较大、喷管潜入部分型面为凹弧面情况下,旋涡更容易发生。

3. 对于喷管潜入式固体火箭发动机,需要充分重视燃烧室内可能产生的带旋涡的流动对发动机工作过程的影响。

但是,实际的发动机潜入喷管的内流场需比本文研究的问题复杂得多,存在燃面退移,热交换和化学反应等。作为潜入喷管背壁流场的探讨,本文的工作只是初步的。

参 考 文 献

- (1) Dunlap R. Flowfield in the Combustion Chamber of a Solid Rocket Motor. AIAA Journal Vol.12, No.10, 1974
- (2) Traineau J C, et al. Cold-Flow Simulation of a Two Dimension Nozzleless Solid Rocket Motor. AIAA-86-1447
- (3) 王晓等. 有加质和复杂几何边界内流场的实验研究.《固体火箭技术》,1989, 3
- (4) Salvatat B, et al. Analysis of Gas Flow in Three Dimension Solid Propellant Grains. AIAA-84-1357
- (5) 张吉瑞等译. 固体火箭发动机设计基础. 兵器工业部第二一零研究所, 1982, 10
- (6) 王立成等. 一种简单而快速的解不可压粘性流的主变量法.《空气动力学学报》, 1987, 3