

# 汽蚀管流场数值模拟

唐 虎, 张金容, 韩红伟  
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

**摘 要:** 根据汽蚀管结构, 采用 FLUENT 软件进行了汽蚀管流场数值模拟, 比较了不同结构尺寸对流量的影响。结果表明: 汽蚀管入口倒角对流量控制有较大影响, 不倒角时流量明显减小。

**关键词:** 汽蚀管; 流场; 数值模拟

**中图分类号:** V434-34   **文献标识码:** A   **文章编号:** 1672-9374 (2013) 04-0052-04

## Numerical simulation of venturi flow field

TANG Hu, ZHANG Jin-rong, HAN Hong-wei  
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** Based on venturi configuration, venturi inner flow field was simulated with FLUENT software. The influence of different configuration size on flow rate was compared. The results indicate that the inlet chamfer of venturi plays an important role in flow rate control and flow rate will decrease obviously without inlet chamfer.

**Keywords:** venturi; flow field; numerical simulation

## 0 引言

随着技术的发展, 特别是计算机技术的发展, 在经典流体力学与数值计算方法基础上, 建立了计算流体动力学 (简称 CFD)。经过多年的发展, CFD 出现了多种数值解法。这些方法的主要区别在于对控制方程的离散方式。根据离散的原理不同, 大体可分为: 有限差分法、有限元法、有限体积法。有限体积法导出的离散方程可

以保证具有守恒特性, 离散方程系数物理意义明确, 计算量相对较小, 应用范围较广<sup>[1]</sup>。

本文采用 FLUENT 软件对汽蚀管流场进行了数值模拟, 对影响汽蚀管流量的结构参数进行了计算比较。

## 1 汽蚀管简介

从结构上看, 汽蚀管先收缩后扩张, 有的汽蚀管喉部有直线段<sup>[2]</sup> (见图 1)。

收稿日期: 2012-12-15; 修回日期: 2013-01-16

作者简介: 唐虎 (1977—), 男, 工程师, 研究领域为火箭发动机系统设计

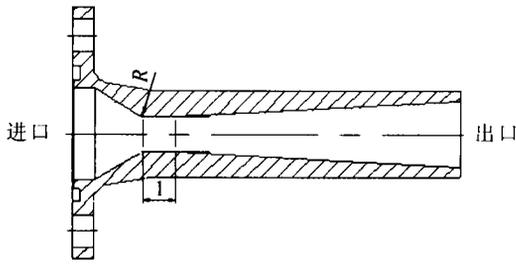


图 1 汽蚀管示意图

Fig. 1 Schematic of venturi

根据伯努利方程, 在入口压力一定的情况下, 随着出口压力的降低, 液体在管中的流速增加, 喉部由于流通面积最小, 增加最为明显, 喉部静压降低最快。当出口压力降低到一定程度时, 喉部静压降低到液体的饱和蒸汽压, 液体在喉部发生汽蚀, 此时流动为汽液两相流。随着液体向下游流动, 扩张段的流通面积增加, 流速减小, 压力逐渐升高, 产生的气泡在压力作用下破裂, 汽液两相流恢复为液体流动。从气泡产生到消失的过程中, 在汽蚀管内形成一定长度的汽蚀区。当出口压力继续降低, 汽蚀区的长度增加, 但流量基本不变。

利用汽蚀管发生汽蚀时流量基本不变的特点, 液体火箭发动机常用作流量控制元件, 控制发动机的流量。这种控制方式简单, 控制精度高, 但流阻损失较大。

## 2 计算模型

### 2.1 多相流模型

汽蚀管发生汽蚀时, 流动变为汽液两相流, 当以水为介质时, 由于蒸汽/液态水密度比很小, 可以忽略相变潜热, 计算时不考虑能量方程。这样, 忽略体积力后控制方程为:

连续方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot \left[ \mu_m \left( \nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T \right) \right] \quad (2)$$

式中:  $\vec{v}_m$  为质量平均速度,  $\vec{v}_m = \sum_{i=1}^n \alpha_i \rho_i \vec{v}_i / \rho_m$ ;  $\rho_m$

为混合物密度,  $\rho_m = \sum_{i=1}^n \alpha_i \rho_i$ ;  $\mu_m$  为混合物粘性,

$\mu_m = \sum_{i=1}^n \alpha_i \mu_i$ ;  $\alpha_i$  为第  $i$  相的体积分,  $\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1$ ;  $n$  为总相数。

### 2.2 汽蚀模型

采用 Singhal 等提出的完全汽蚀模型, 该模型假设流体由液相、气相和不溶性气体组成, 蒸汽输运方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m f_v) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_v f_v) = R_c - R_e \quad (3)$$

$$R_e = C_e \frac{\sqrt{k}}{\sigma} \rho_l \rho_v \sqrt{\frac{2(p_v - p)}{3\rho_l}} (1 - f_v - f_g), \quad (p < p_{sat}) \quad (4)$$

$$R_c = C_c \frac{\sqrt{k}}{\sigma} \rho_l \rho_v \sqrt{\frac{2(p - p_v)}{3\rho_l}} f_v, \quad (p > p_{sat}) \quad (5)$$

式中:  $\vec{v}_v$  为蒸汽相速度;  $R_e$  和  $R_c$  分别为气泡的产生和溃灭速度;  $k$  为湍动能;  $\sigma$  为表面张力系数;  $C_e$  和  $C_c$  为相变率经验系数, 分别取 0.02 和 0.01;  $p_v$  为相变临界压力,  $p_v = p_{sat} + 0.39\rho_m k/2$ 。

### 2.3 湍流模型

至今还没有一种方法能够全面、准确地对所有流动问题中的湍流现象进行模拟。 $k-\epsilon$  模型具有较好的稳定性、经济性和计算精度, 成为湍流模型中应用范围最广的模型。本文也采用  $k-\epsilon$  模型进行计算。

## 3 结果及分析

汽蚀管通常为轴对称结构, 计算前对汽蚀管轴截面流道采用 Gambit 前处理软件进行网格划分, 边区及喉部进行了加密 (见图 2)。

计算时, 选用分离式求解器, 轴对称。参考压力设置为 0, 不考虑重力影响。选用 Mixture 模型和  $k-\epsilon$  模型, 不考虑能量方程, 介质选用水及水蒸汽。入口设置为压力进口, 出口设置为压力出口。选用 SIMPLE 求解。

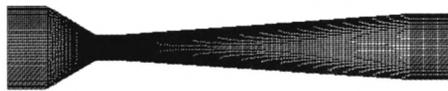
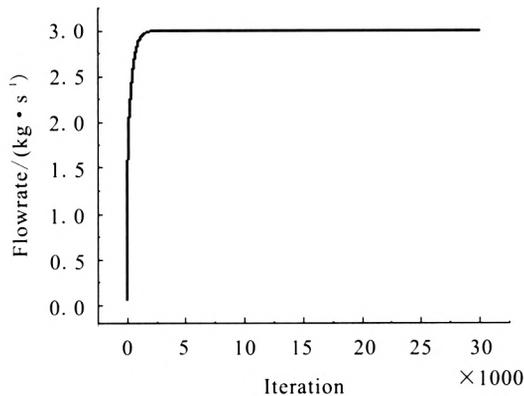
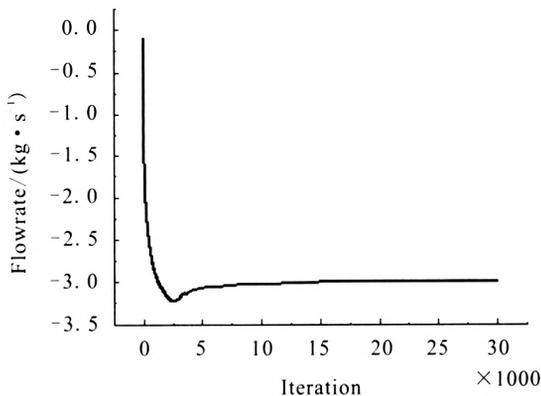


图2 汽蚀管网格  
Fig. 2 Venturi grid

迭代过程中汽蚀管入口、出口流量（负号表示流出）变化见图3。迭代到一定程度时，两者基本一致，且均很稳定，说明迭代过程已收敛。



(a) 入口流量



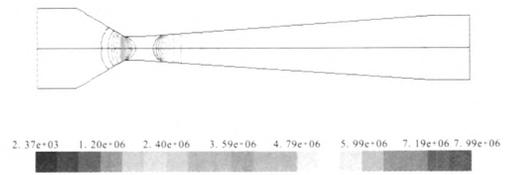
(b) 出口流量

图3 流量曲线

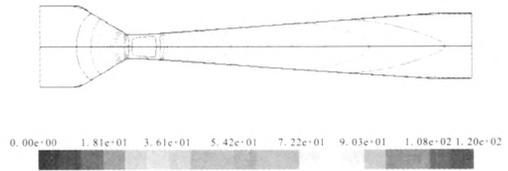
Fig. 3 Curves of flow rate

根据上面的计算模型进行了流场数值模拟。主要参数云图见图4。

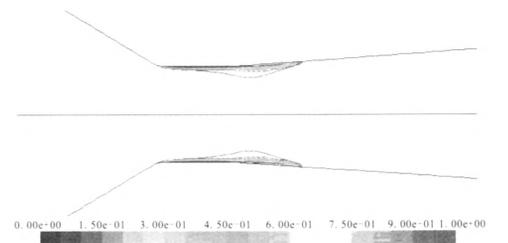
从云图可以看出，水流经汽蚀管时，在收缩段速度逐渐增加，静压降低。到喉部，速度达到最高，静压降低到饱和蒸汽压，汽蚀管发生汽蚀，产生的气泡主要集中在靠近管壁的环形区域，长度较短，主要位于喉部及扩张段前部。



(a) 静压云图



(b) 速度大小云图



(c) 水蒸汽体积百分比云图

图4 计算云图

Fig. 4 Contours of calculation

汽蚀管通常用于流量控制，设计时考虑的结构参数有入口角度、直线段长度、扩张角度、倒角等，为此计算比较了不同结构参数对流量的影响（见表1）。

从表1可以看出：

1) 汽蚀管喉部入口倒角对流量的影响较为明显。无倒角时流量明显小于有倒角时的流量。有倒角的情况下，倒角半径较大，流量较大，但变化不明显。

2) 汽蚀管入口收缩角度在一定范围内变化时，角度越小，流量越大，变化量不大。但角度越小，汽蚀管长度就会越大。

3) 汽蚀管喉部直线段在一定范围内变化时，长度越大，流量越小，但影响非常小。

4) 汽蚀管出口扩张角度在一定范围内变化时，流量不变。

表 1 不同影响因素比较

Tab. 1 Comparison of different influence factors

| 影响参数                                     | 流量/(kg·s <sup>-1</sup> ) | 备注    |
|--|--------------------------|-------|
| 无倒角                                      | 2.732                    |       |
| 喉部入口倒角 $R$ 影响                            | 倒角半径 1 mm                | 2.898 |
|  | 倒角半径 2 mm                | 2.995 |
| 入口收缩角 $2\alpha$ 影响                       | 收缩半角 25.0°               | 3.027 |
|  | 收缩半角 30.3°               | 2.995 |
|  | 收缩半角 37.9°               | 2.954 |
| 喉部直线段长度 $l$ 影响<br>(喉部直径 $d$ 为<br>6.0 mm) | 直线段长度 3.0 mm             | 2.996 |
|  | 直线段长度 5.0 mm             | 2.995 |
|  | 直线段长度 7.0 mm             | 2.991 |
| 扩张角 $2\beta$ 影响                          | 扩张半角 3.08°               | 2.995 |
|  | 扩张半角 3.92°               | 2.995 |
|  | 扩张半角 5.39°               | 2.995 |

## 4 结论

以水为介质, 采用 FLUENT 软件进行了某汽蚀管流场数值模拟。在工作状态下, 在喉部附近靠近壁面的环形区域形成汽蚀区。通过改变结构参数进行了对比计算, 结果表明汽蚀管喉部入口有无倒角对流量影响较为明显, 无倒角时流量明显减小, 倒角大小影响不大, 收缩角度、喉部直线段长度、扩张角度影响较小。

### 参考文献:

- [1] 王福军. 计算流体力学分析-CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [2] 刘国球. 火箭发动机原理[M]. 北京: 宇航出版社, 1993.
- [3] 杜炜强, 吴宝元. 带不同长度凹坑超声速燃烧数值研究[J]. 火箭推进, 2005, 31(4): 26-29.
- [4] 张玫, 张蒙正, 付秀文. 火箭/冲压组合发动机工作特性分析[J]. 火箭推进, 2010, 36(1): 33-37.
- [5] 吴东波, 李家文, 常克宇.  $\text{GH}_2/\text{CO}_2$  涡流冷却推力室设计与数值计算[J]. 火箭推进, 2010, 36(5): 17-22.
- [6] 王智勇, 张晓东, 杨会中. 文丘里管中空化流场的数值模拟[J]. 计算机与应用化学, 2006, 23(10): 939-942.
- [7] 张小斌, 曹潇丽, 邱利民, 等. 液氧文氏管汽蚀特性计算流体力学研究[J]. 化工学报, 2009, 60(7): 1638-1643.
- [8] 史刚, 梁国柱. 以  $\text{N}_2\text{O}$  为工质的汽蚀文氏管流场仿真[J]. 航空动力学报, 2012, 27(2): 465-471.
- [9] 郭善广, 柳军, 金亮, 等. 高超飞行器内流道激波振荡问题的数值研究及试验验证 [J]. 实验流体力学, 2012 (1): 7-11.
- [10] 雷红帅, 王振清, 付际, 等. 高超声速飞行器二维全尺寸流场数值模拟[J]. 弹箭与制导学报, 2012 (3): 157-160.

(编辑: 王建喜)