

# 三维“燕尾形”壁面凹槽流动特性的数值模拟

孙晓峰 王春 姜宗林

(中国科学院力学研究所高温气体动力学实验室, 100190)

**摘要** 本文对一种新型壁面凹槽结构——三维“燕尾形”壁面凹槽的超声速混合流场进行了数值模拟, 并与二维壁面凹槽超声速混合流场进行了对比。数值模拟采用 NND 有限差分方法求解无化学反应的可压缩雷诺平均 Navier-Stokes 方程, 湍流模型采用了带有低雷诺数和可压缩修正的  $k-\epsilon$  双方程湍流模型。计算结果得到了来流马赫数为 2 的情况下两种结构的流动参数分布。数值模拟结果显示, 三维“燕尾形”凹槽产生了螺旋式三维结构的涡流动, 出现侧向混合效应。

**关键词:** 超声速燃烧 超声速混合 壁面凹槽 数值模拟

## 一、引言

超燃冲压发动机作为一种新型的吸气式动力推进装置, 在高超声速飞行器上有重要的应用前景。其中燃烧室的设计是超燃冲压发动机中的核心技术, 针对目前超燃燃烧室存在的火焰稳定、空气和燃料混合问题, 本文对一种新式的壁面凹槽结构——三维“燕尾形”壁面凹槽的超声速混合流场进行了数值模拟, 研究了其参数分布特性, 分析其混合强化效果和机制。与同样来流条件下二维斜坡式壁面凹槽超声速混合流场进行了对比。本文主要考虑三维凹槽内的旋涡流动作用, 分析其中凹槽流动与超声速主流的混合增强机制, 暂不考虑燃料注入、化学反应和流动中的非定常效应。

## 二、数值计算

使用捕捉激波能力较好的 NND 差分格式, 离散雷诺时均的 N-S 方程。(对流项采用 NND 差分格式, 粘性项采用二阶中心差分格式)。湍流模拟采用了带低雷诺数和可压缩型修正的  $k-\epsilon$  双方程湍流模型。

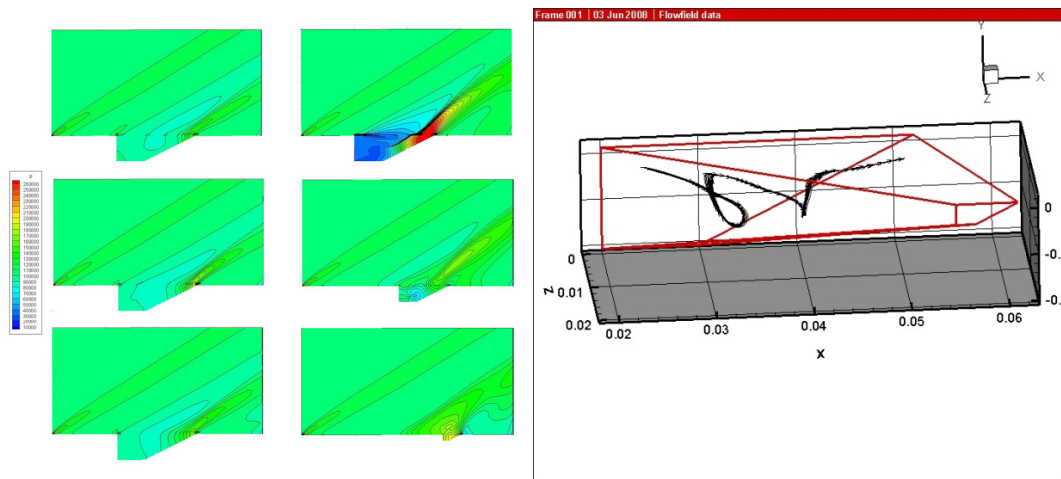
## 三、湍流模型验证

超声速燃烧数值模拟中, 湍流模型的适用性目前还没有确定型的结论。但是已有的资料表明  $k-\epsilon$  双方程湍流模型在本问题中是适用的。验证案例为双燃式超燃冲压发动机燃烧室。使用  $k-\epsilon$  双方程湍流模型的计算结果和实验结果吻合良好, 说明  $k-\epsilon$  双方程湍流模型适用于超声速燃烧湍流流场的数值计算。

## 四、计算结果

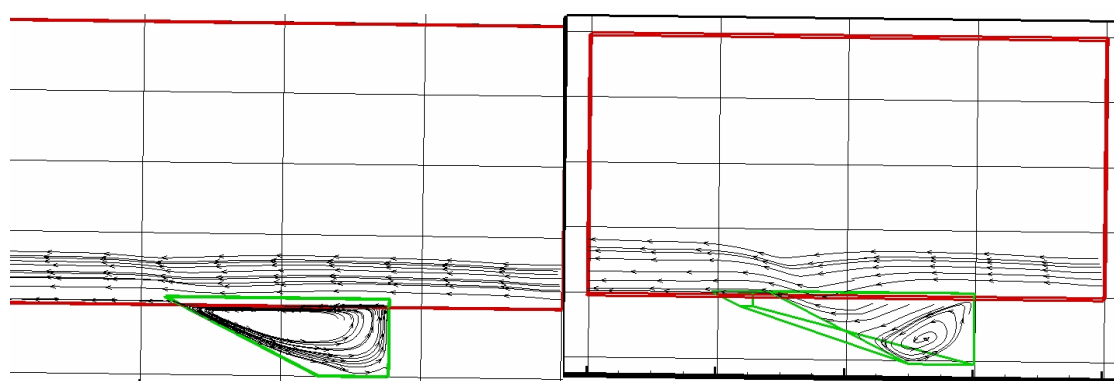
计算结果显示, 三维“燕尾形”壁面凹槽周围流场呈现强烈的三维特性, 压力密度等参数侧向差异明显。侧向分布存在差异的三维结构涡具有的抽吸作用, 可以在凹槽内诱导出侧方向的流动。得到的流线图显示, 气体从对称面附近的中心区域进入壁面凹槽, 之后在槽内螺旋式向侧下游运动, 在外侧端口被排出。

三维“燕尾形”壁面凹槽中心对称面附近低压区的压力更低, 从而使主流流体更深入地切入到凹槽的内部。



压强分布图

典型流线



二维结构壁面凹槽

三维“燕尾槽”

中心对称面上的流线分布

## 五、结论

三维“燕尾形”壁面凹槽周围流场呈现强烈的三维特性，侧向分布存在差异的三维结构涡具有的抽吸作用，可以在凹槽内诱导出侧方向的流动，三维旋涡产生的侧向混合效应将使其获得更大的混合能力。三维凹槽中的卷吸涡结构在凹槽内中心对称面附近制造了更强的低压区，从而使边界层更深入地切入到凹槽的内部，这同样也有利于主流和凹槽流动的混合。

## 参 考 文 献

- 1 张涵信，无波动，无自由参数，耗散的隐式差分格式，应用数学和力学，1991；
- 2 张涵信，罗俊荣，超声速剪切层的混合问题，空气动力学学报，2007；
- 3 Numerical study on supersonic combustion with cavity-based fuel injection, Kyung Moo Kim<sup>1</sup>, Seung Wook Baek\*, Cho Young Han<sup>2</sup>, International Journal of Heat and Mass Transfer 47 (2004) 271–286