

doi: 10.7690/bgzdh.2013.06.010

超燃冲压发动机凹腔流动特性

孙洪宾, 孙波, 陈洁, 于栋梁

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 为准确预测超声速燃烧室凹腔结构内的流场流动情况, 对凹腔流场进行冷态数值模拟研究。采用 Fluent 软件和 SST $k-\omega$ 湍流模型, 分析 6 种纵深比情况下凹腔的流动特性, 得到凹腔进口高度和不同的转换模型对流动特性的影响。研究结果对定量认识凹腔流场、优化凹腔构型、设计效率高的火焰稳定器具有一定借鉴作用。

关键词: 超燃冲压发动机; 凹腔; 数值模拟

中图分类号: TJ86 **文献标志码:** A

Characteristics of Cavity Flow in Scramjet Combustor

Sun Hongbin, Sun Bo, Chen Jie, Yu Dongliang

(College of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to accurately predicting the flow field inside the cavity structure of the supersonic combustor, cold numerical simulation of the flow field of the cavity was studied. Use the Fluent software and SST $k-\omega$ turbulence model, six kinds of vertical height ratio of the flow characteristics of the situation cavity was analyzed. The research result has a certain reference for providing a better understanding of the cavity flow field, optimizing the configuration of the cavity and designing of high efficiency flame holder.

Key words: scramjet combustor; cavity; numerical simulation

0 引言

超声速燃烧室设计是超燃冲压发动机发展中面临的关键技术问题之一。燃烧室必须在最小总压损失的前提下, 让燃料和高速流动的空气均匀、快速混合, 保持稳定燃烧。目前国内外普遍认为, 结构简单的凹腔是一种有潜力的火焰稳定装置^[1-2]。

Ben-Yaker 在超音速燃烧室中采用的凹腔结构成功地实现了固体燃料的自点火和持续稳定燃烧^[3]。

尽管国内外的研究者对各种构型的凹腔在不同来流条件下的流场进行了诸多研究^[4-7], 但凹腔流场集中了流体力学的诸多流动现象, 如剪切层的不稳定性, 前后台阶产生的流动分离与再附, 激波/膨胀波与边界层的相互干扰等现象。准确地预测凹腔内的流动现象, 设计最有效的火焰稳定器在工程应用中非常有意义。

目前对于凹腔入口高度对流场的研究较少, 在后台阶研究文献[8]中有研究凹腔入口高度对流场的复杂影响, 笔者主要对同时拥有前后台阶的凹腔中关于凹腔入口高度对冷态流场的影响进行研究。

1 计算方法及模型

笔者选用 Fluent 软件对二维守恒 N-S 方程组进

行计算, 其中, 对流项采用基于 MUSCL 方法的三阶 AUSM 格式, 湍流模型采用做了可压缩修正和跨音速修正的 SST $k-\omega$ 模型。

燃烧室被设计成带前后台阶的凹腔结构, 如图 1。左端为来流入口, 右端为出口, 超声速来流在前后台阶组成的凹腔内形成复杂的流场, 笔者主要研究凹腔内的流场特点。参照肖隐利^[9]的研究, 定义凹腔构型几何参数: 凹腔前壁面高度 h ; 凹腔入口高度的一半 H ; 纵深比 H/h ; 凹腔长度 L 即为凹腔前后台阶垂直壁面间的距离; 笔者研究的凹腔构型前后台阶垂直壁面高度一致。几何参数如下: 前壁面高度 $h=8.9$ mm, 凹腔长度 $L=15h=133.5$ mm, 研究了纵深比 $H/h=1, 1.5, 1.8, 2, 2.5, 3$ 等 6 种情况。

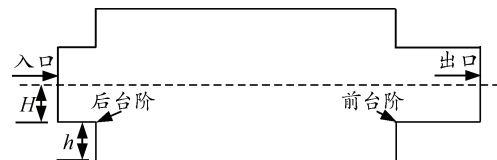


图 1 凹腔示意图

计算中所有算例的边界条件相同, 边界条件设置为总压进口, 静压出口, 壁面绝热无滑移边界条件。来流参数参照文献[9]所给参数即来流马赫数 $Ma=3.0$, 总压 $P_0=690$ kPa, 总温 $T=300$ K。近壁面

收稿日期: 2012-12-10; 修回日期: 2013-01-21

基金项目: 南京理工大学卓越计划“紫金之星”项目资助(AB42596)

作者简介: 孙洪宾(1988—), 男, 江苏人, 在读硕士, 从事超燃冲压发动机燃烧室性能研究。

网格采用等比法加密, 确保近壁面处 y^+ 接近于 1.0。

2 数值模拟结果与分析

2.1 凹腔入口高度对流场的影响

图 2 给出了纵深比 H/h 为 1 时的流场数值纹影图与流线图。在图 2 中可以清楚地看到, 在凹腔的后台阶拐点处产生了斜激波与剪切层, 斜激波是由于受到腔内气体的压缩而产生的, 剪切层的速度梯度比较大, 因此在纹影图中颜色比较深。后台阶拐点位置处的两道斜激波规则相交成两道透射激波, 透射激波在剪切层上反射形成膨胀波, 膨胀波再在剪切层上反射形成激波, 不断重复。由于剪切层附到凹腔前台阶竖直壁面上, 因此流场是一个开式凹腔流场^[10](open cavity flow, OCF), 即一个凹槽内有一个大回流区。从流线图中可以看出, 凹槽内的大回流区内有 3 个漩涡, 正好对应了数值纹影图中激波与剪切层的 3 次相互作用。

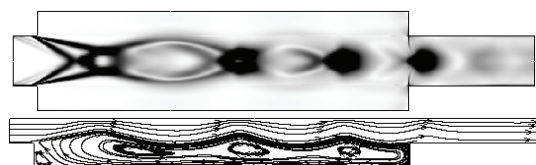


图 2 纵深比 $H/h=1$ 时数值纹影图与流线图

纵深比 H/h 为 1.5 时的流场数值纹影图与流线图如图 3 所示。与图 2 对比可以看到, 由于凹腔入口高度的增加, 凹腔后台阶拐点处产生的斜激波交汇位置向下游推进。因此与剪切层的作用位置也相应向下游推进, 在相同的凹腔长度下, 相互作用的次数减小为 2 次, 在流线图 3 中也可清楚地看到, 凹槽内的大回流区内有 2 个漩涡。

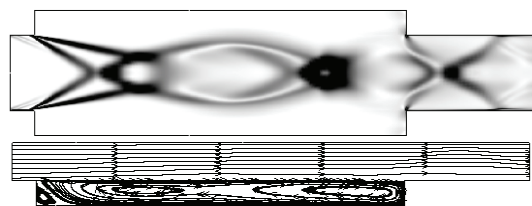


图 3 纵深比 $H/h=1.5$ 时数值纹影图与流线图

随着来流宽度的进一步增加, 凹腔后台阶拐点处产生的斜激波与剪切层作用位置进一步向前推进, 如图 4 纵深比为 1.8 时, 在相同的凹腔长度下, 相互作用的次数减小为 1 次, 流线图中清晰可见, 凹槽内的大回流区内有 1 个漩涡。

纵深比 H/h 为 2 时的流场数值纹影图与流线图如图 5 所示。这是典型的闭式凹腔流场^[10](closed cavity flow) 结构, 流场即为后台阶与前台阶流场的组合。凹腔后台阶拐点处产生膨胀波与自由剪切层。

自由剪切层再附于凹腔上、下壁面, 在上、下壁面各形成一道再附激波, 再附后附面层沿壁面向前发展, 由于凹腔前台阶的影响, 在接近凹腔前台阶处附面层发生分离现象, 形成分离激波与剪切层。在凹腔轴线附近两道再附激波规则相交形成两道透射斜激波, 再与两道分离激波相互作用, 在凹腔前台阶之后形成复杂的激波系, 其中在轴线附近包含一段正激波, 它们之后的马赫数为亚声速, 很多激波交汇形成滑移面, 这是典型的马赫反射特征。这是由于激波系和剪切层的相互干扰在凹腔前台阶之后形成分离包, 分离包的产生形成了一个气动喉道, 使流动发生壅塞导致的。

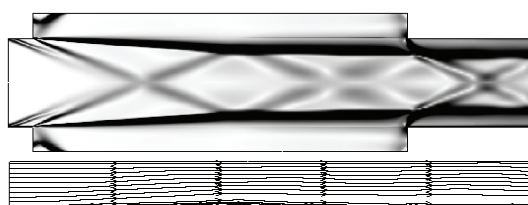


图 4 纵深比 $H/h=1.8$ 时数值纹影图与流线图

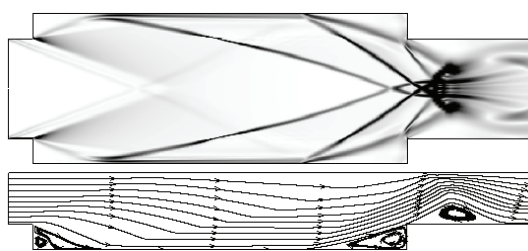


图 5 纵深比 $H/h=2$ 时数值纹影图与流线图

纵深比 2 的数值纹影图与上述纵深比 1、1.5、1.8 相比较, 闭式凹腔向开式凹腔转变应该是由纵深比的减小, 导致马赫反射向上游推移造成的。

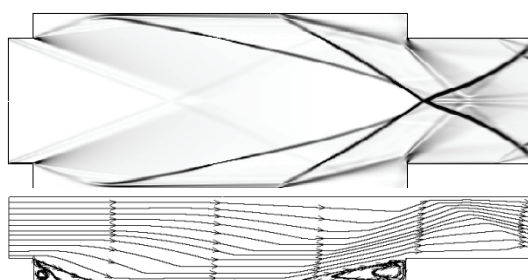


图 6 纵深比 $H/h=2.5$ 时数值纹影图与流线图

图 6、7 给出了纵深比 H/h 为 2.5、3 时的流场数值纹影图与流线图。与图 5 相比较, 由于两道再附激波在与分离激波交汇前未发生相互穿透, 而是先与再附激波相互作用形成强激波后再相互作用, 因此并未出现图 5 的马赫反射。激波交汇形成的滑移面也渐渐减弱, 在图 7 中再附激波与分离激波相互交汇形成一道充分发展的强激波, 形成了非常微

弱的滑移面。

图 5~图 7 后台阶形成的回流区都有 2 个涡，这与文献[9]中数值结果一致。

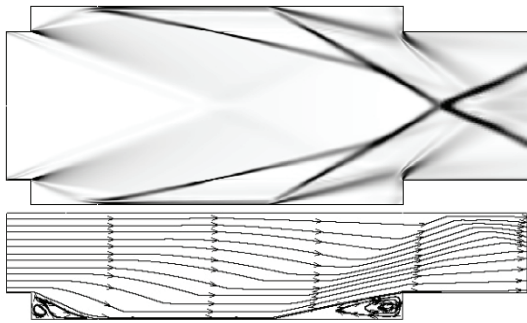


图 7 纵深比 $H/h=3$ 时数值纹影图与流线图

2.2 凹腔入口高度对壁面剪切应力的影响

图 8 给出了纵深比为 1、1.5、1.8 三组 x 方向壁面剪切应力。 x 方向 0 点即为凹腔后台阶角点， $x=0.1335$ m 处即为凹腔前台阶角点。此 3 种情况下流场皆为开式凹腔流场。3 条曲线在接近 0 点处由于后台阶的影响 x 方向壁面剪切应力在 0 值上下微弱波动，在前台阶处(接近 $x=0.1335$ m)壁面剪切应力一直上升，峰值点位置都接近 $x=0.132$ m，峰值都接近 30 Pa，然后在 $x=0.1335$ m 处归为 0。在 $x=0.01\sim 0.12$ m 的凹腔主要流动区域内，壁面剪切应力皆小于 0，在流场中表现为产生分离包。当 $H/h=1.0$ 时，曲线在 $x=0.044, 0.083, 0.128$ m 处为波谷，从图 2 中可以看到，前 2 个波谷是两漩涡交界处，第 3 个波谷是漩涡接近前台阶处；与此相似，当 $H/h=1.5$ 时，曲线在 $x=0.061, 0.129$ m 处为波谷，当 $H/h=1.8$ 时，曲线在 $x=0.129$ m 处为波谷。

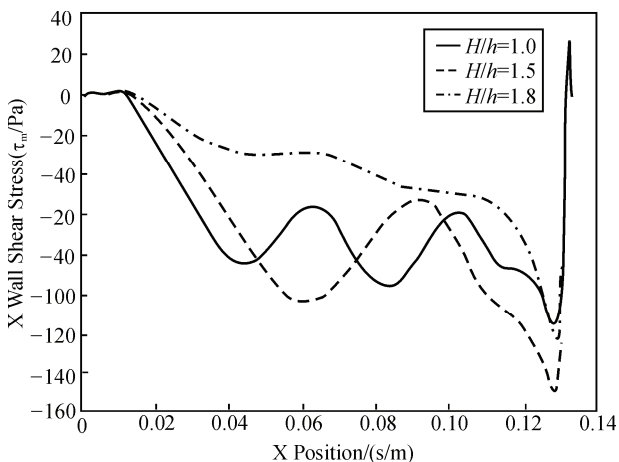


图 8 开式凹腔 x 方向壁面剪切应力 (Wall Shear Stress)

图 9 给出了纵深比为 2、2.5、3 三组 x 方向壁面剪切应力。此 3 种情况流场皆为闭式凹腔。该 3 组流场的流动特性基本相同，由于后台阶的影响，在 $x=0\sim 0.01$ m 内 x 方向壁面剪切应力在 0 值上下

微弱波动。流场后台阶处产生分离包时开始急降，降至最低点后开始迅速上升，骤升的零点则是流动的再附点，升至一定程度后渐趋平稳，在凹腔前台阶处出现一个更大的分离包时开始突坠，突坠的零点则是流动的分离点。这 3 组流场的再附点位置基本相同，而分离点的位置却有所区别，可见由于纵深比的增加，流动的分离点往上游移动，但增加到一定程度时，变化幅度在减小。

研究的 6 个流场在 $x=0.120$ m 以后壁面剪切应力皆表现为急剧下降，在 $x=0.128$ m 左右又急剧上升，在 $x=0.132$ m 左右达到峰值，然后又突降，这是凹腔尾部前台阶的影响。

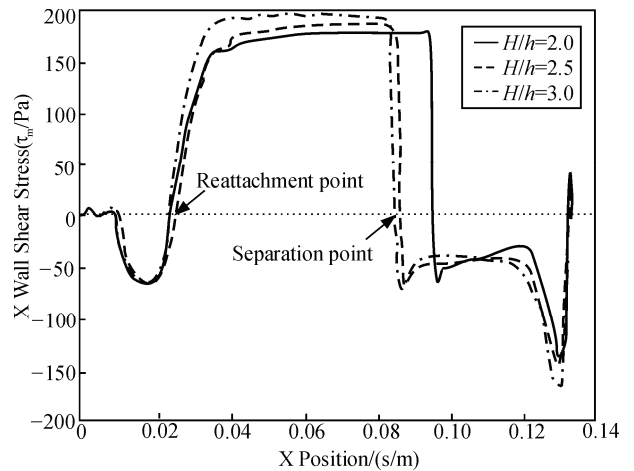


图 9 闭式凹腔 x 方向壁面剪切应力 (Wall Shear Stress)

2.3 湍流间歇性

图 10 给出了纵深比为 2.0 时，2 个模型计算出的 x 方向壁面剪切应力。其中湍流模型计算出的凹腔流场为闭式凹腔，而转换模型计算出的凹腔流场为开式凹腔，这是由于层流抗反压能力比湍流低，层流状态更易形成较大的分离造成的。从图 11 的转换模型的湍流间歇系数可以看出，转换发生在后台阶附近剪切层内，而在凹腔壁面处初始一直是层流，待到 $x=0.01$ m 左右渐渐向湍流转变。

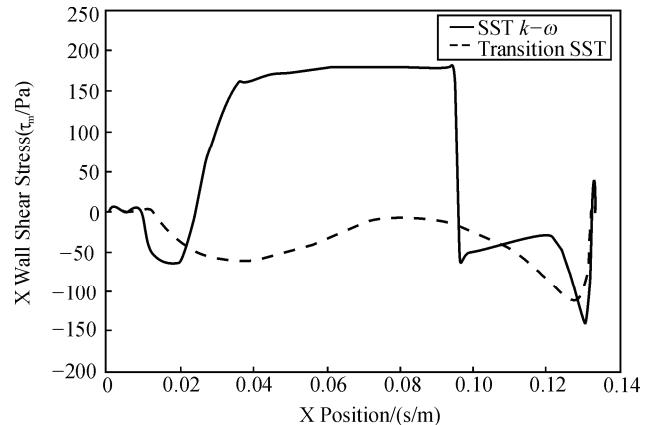


图 10 纵深比 2 时 x 方向壁面剪切应力 (Wall Shear Stress)

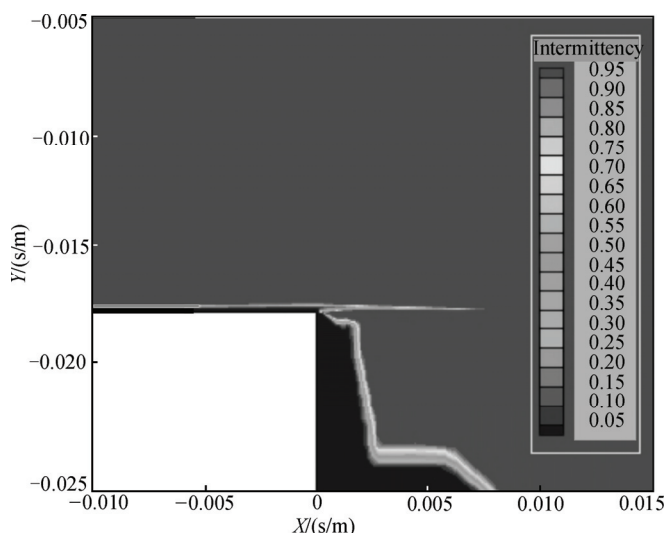


图 11 纵深比为 2.0 时转捩模型计算的湍流间歇系数

3 结论

1) 由于纵深比的减小, 使得凹腔由闭式凹腔向开式凹腔转变; 2) 闭式凹腔向开式凹腔转变是由于纵深比的减小, 导致马赫反射向上游推移造成的; 3) 由于纵深比的增加, 闭式凹腔分离点的位置往上游移动, 但增加到一定程度时, 上移的幅度减小; 4) 进口附面层状态对凹腔流场有很大影响, 采用转

(上接第 35 页)

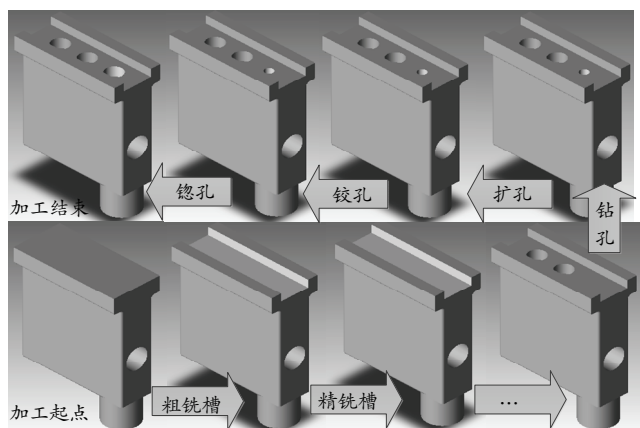


图 11 中间工序实体生成过程

5 结束语

三维工艺技术正逐步成为制造领域研究的热点, 而三维 CAPP 系统中对于三维模型加工特征的识别和中间工序模型的恢复是其发展中的瓶颈。笔者在给出的面向机械加工的加工特征定义与分类的基础上, 建立了基于三维工序模型的零件工艺信息模型, 实现了工艺信息与工序实体模型的关联。根据加工特征生成的工艺路线、工艺方法和切削参数等信息, 采用了 3 种几何模型恢复方法, 实现了对

据模型计算更易得到开式凹腔。

参考文献:

[1] Sudhir L. Gai, Estevan Samanes, John F. Milthorpe. An Investigation into Supersonic Swept Cavity Flows[R]. AIAA 2006-2429.
 [2] 刘兴洲. 中国超燃冲压发动机研究回顾[J]. 推进技术, 2008, 29(4): 385-395.
 [3] Ben-Yakar A, Natan B, Gany A. Investigation of a solid fuel scramjet combustor[J]. Journal of Propulsion and Power, 1998, 14(4).
 [4] Gruber M R, Baurle R A, Mathur T, et al. Fundamental studies of cavity-base flameholder concepts for supersonic combustors[R]. AIAA 99-2248.
 [5] Habeeb K M, Kurian J. Cavity aided mixing enhancement of supersonic streams[R]. ISABE-2001-1189.
 [6] 杜炜强, 吴宝元. 带不同长度凹腔超声速燃烧数值模拟[J]. 火箭推进, 2005, 31(4): 26-29.
 [7] 李丽, 叶中元, 刘兴洲. 壁龛稳焰超声速燃烧室流场的数值模拟[J]. 推进技术, 2003, 24(6): 521-523.
 [8] V Lijo, H D Kim, T Setoguchi. Numerical investigation of the effects of base size on supersonic flow through a sudden duct enlargement[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2011.
 [9] 肖隐利, 陈亮, 等. 超音速燃烧室凹槽流动特性研究[J]. 固体火箭技术, 2008, 31(6).
 [10] Hyung Jo Kim, Selin Aradag, Doyle D. Knight. Two and Three Dimensional Simulations of Supersonic Cavity Flow[R]. AIAA 2006-2431.

三维工艺中间工序模型的自动生成, 解决了机加工工艺设计中零件模型工序模型的恢复和构造问题。通过实例验证, 笔者提出的方法对于常规的孔、腔体、回转体、轮廓等基本的加工特征可以方便、有效地实现中间工序模型的自动生成。该方法已在课题组与某航天企业合作开发的三维零件工艺设计系统中得到应用验证。

参考文献:

[1] 宁汝新, 赵汝嘉. CAD/CAM 技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 140-142.
 [2] 周广平. 网络化加工特征识别方法研究[M]. 浙江: 浙江大学, 2004: 3-14.
 [3] 高曙明. 自动特征识别技术综述[J]. 计算机学报, 1998, 21(3): 281-288.
 [4] Gao S, SHah J J. Automatic recognition of interacting machining features based on minimal condition subgraph[J]. Computer-Aided Design, 1998, 30(9): 727-739.
 [5] Hyun Chan Lee, Henson Park. Generative CAPP through projective feature recognition[J]. Computers & Industrial Engineering, 2007, 53: 241-246.
 [6] 田富君, 田锡天, 耿俊浩. 基于模型定义的工艺信息建模[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(5): 913-919.
 [7] 罗雪雁. 利用 UG 的 WAVE 技术实现典型零件快速工艺编制[J]. 科技论坛, 2010, 28: 19-20.