# 三角形微沟槽飞艇蒙皮表面的流场分析

## 谭惠丰,康敬天,卫剑征,王长国

(哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所,150001哈尔滨)

**摘 要:**微米尺度的沟槽是临近空间飞艇大面积减阻的一种可行的减阻形式.以临近空间飞艇减阻为研究背景,通过采用 k-ωSST 湍流模式,对微米尺度的三角形沟槽进行了流场分析,得到了三角形沟槽壁面流的速度场和压力场.通过计算不同尺寸三角形微沟槽的减阻率和沟槽内的流线形状,分析了微米尺度沟槽的减阻机理和不同沟槽尺寸对减阻能力的影响.研究表明,沟槽内的流线形状对沟槽的减阻能力有重要影响,尺寸合适的沟槽可以减小流体和壁面之间的切应力,减小流动阻力,对临近空间飞艇的蒙皮设计和减阻研究提供了一定参考.

关键词:微沟槽;临近空间飞艇;减阻;蒙皮

中图分类号: V214.8 文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2014)07-0032-04

### Flow field analysis of Micro-V shape riblets airship surface

TAN Huifeng, KANG Jingtian, WEI Jianzheng, WANG Changguo

(Center of Composite Material and Structure, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China)

Abstract: It is a viable form of drag reduction for airship to use airship envelope with micron-scale grooves. In this paper, the k- $\omega$  SST turbulence model is used to analyze the V-shaped micro-riblets. The velocity and pressure field are obtained using this model. Both the drag reduction mechanism for micro-grooves and the influence of different groove size are analyzed by the streamline pattern and the drag reduction rate. The results show that the streamline pattern is an important reason for drag reduction ability, and the grooves with appropriate size can reduce the drag between fluid and wall.

Keywords: micro-riblets; airship; drag reduction; envelope

近年来,临近空间飞艇作为侦察、导航、通信 中继的应用研究引起了世界范围的普遍关注.其 应用过程中提出了许多如大面积减阻、高效能量 应用等亟待解决地关键问题.其中,如何通过设计 蒙皮表面微沟槽有效减小风阻是实现大型临近空 间飞艇长航时的核心问题之一<sup>[1]</sup>.

沟槽减阻初期主要采用试验测试的手段对不同截面形状沟槽减阻效果进行研究,文献[2-4] 较早开展了刚性面沟槽湍流下减阻的研究,对不同截面形状和尺寸沟槽的减阻效果进行了风洞试 验测试,并发现具有一定高度和尺寸的 V 型沟槽 具有最佳的减阻效果,进一步通过实验验证,获得 了在较高 Ma (0.3~0.6,相对于飞艇而言)时 6% 的减阻效果.文献[5-6]采用直接模拟法对沟槽 壁面减阻的机理进行了分析,然而直接模法需要 十分庞大的计算成本难以满足工程需要.随着计 算机性能的大幅提高,数值模拟成为研究沟槽减 阻效果及减阻机理的重要方法.一些学者采用基 于浸入边界技术和控制体积法等数值模拟技术分 析了毫米级刚性面沟槽的减阻效果.文献[7-10] 采用数值模拟方法对不同沟槽壁面流动进行了研 究.文献[11-12]在沟槽减阻的实验等方面做了 比较有代表性的工作,基于仿生模拟思想,研究了 沟槽在风场和水流场作用下的减阻效果和减阻 机制.

然而,以前绝大多数的学者所研究的沟槽的 尺寸都在毫米级,对于临近空间飞艇的蒙皮材料 它的强度、耐候性、阻隔性都有很高的要求<sup>[13]</sup>,并

收稿日期: 2013-09-04.

基金项目: 航空科学基金资助项目(2013ZA77001).

作者简介:谭惠丰(1969—),男,教授,博士生导师;

王长国(1979—),男,教授,博士生导师. **通信作者:**王长国,wangeg@hit.edu.cn.

且蒙皮的厚度都很薄,因此在蒙皮上使用毫米级的微沟槽是不现实的.因此有必要对微米甚至纳 米级的微沟槽进行研究.

1 理论模型

本文使用  $k - \omega$ SST 湍流模式计算.SST 湍流模 型的优点在于其综合了常用湍流模型  $k - \varepsilon$ 模型在 边界层外部独立性的特点,以及近壁面  $k - \omega$ 模型 的稳定性的特点. $k - \omega$ SST 模型由 BSL 模型和涡粘 度的限制方程共同组成的,其中,BSL 模型为

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U k) &= \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_{t}}{\sigma_{k3}} \right) \nabla k \right] + \\ P_{k} - \beta' \rho k \omega + P_{kb} , \\ \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \omega) &= \nabla \cdot \left[ \left( \mu + \frac{\mu_{t}}{\sigma_{\omega3}} \right) \nabla \omega \right] + \\ \alpha_{3} \frac{\omega}{k} P_{k} - \beta_{3} \rho \omega^{2} + (1 - F_{1}) 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega2} \omega} \nabla k \nabla \omega + P_{\omega b}. \end{aligned}$$

式中: k 为湍动能;  $\mu$  为流体黏性系数;  $\mu_{t}$  为湍流黏 度, 各项系数分别为 $\beta' = 0.09$ 、 $\alpha_{1} = \frac{5}{9}$ 、 $\beta_{1} = 0.075$ 、 $\sigma_{k1} = 2$ 、 $\sigma_{\omega 1} = 2$ 、 $\alpha_{2} = 0.44$ 、 $\beta_{2} = 0.0828$ 、 $\sigma_{k2} = 1$ 、 $\sigma_{\omega 2} = \frac{1}{0.856}$ · $P_{kb}$ 、 $P_{\omega b}$ 分别为浮力引起的湍动能项;  $P_{k}$ 为黏性力引起的湍动能项,表达为  $P_{k} = \mu_{t} \nabla U \cdot (\nabla U + \nabla U^{T}) - \frac{2}{3} \nabla \cdot U(3\mu_{t} \nabla \cdot U + \rho k)$ .

湍流黏度 $\mu_i$ 与湍动能k和耗散率 $\varepsilon$ 具有以下 关系

$$\mu_{\iota}=C_{\mu}\rho\,\frac{k^2}{\varepsilon}.$$

SST 湍流模型中的涡黏度限制方程为

$$\nu_{i} = \frac{a_{1}k}{\max(a_{1}\omega, SF_{2})}.$$
 (1)

式中: $\nu_{\iota} = \frac{\mu_{\iota}}{\rho}$ ; $F_2$ 为混合函数;S为应变率的不变测度.

2 计算模型和离散化

如图 1 所示,计算模型前端导引段 10 mm,沟 槽为 10 mm,尾部稳流段 30 mm,高度为 15 mm, 计算简化为 2D 平面计算问题,计算区域整个纵 深为单位宽度(1 000 mm).采用 V 型沟槽,对不 同尺寸的沟槽分为 9 种工况进行模拟.沟槽尺寸 如表 1 所示.来流速度为 10 m/s,气相密度为 0.088 91 kg/m<sup>3</sup>,动力黏性系数:1.421 6×10<sup>-5</sup> (kg・m)/s,采用四边形结构化网格划分,对沟槽 处进行网格加密使得近壁面  $Y_{olus} < 0.3$ .



图1 模型示意图和网格划分

沟槽减阻涉及宏观大尺度模型中微观沟槽内 精细流场的数值计算,计算量大、计算精度要求 高.本数值计算选用了比传统湍流模式精度更高 的 SST 湍流模式,近壁面进行低 Re 修正.选取高 精度湍流模式,需要精细的网格支持,模型建立和 数值计算工作量相应增大.

#### 3 计算结果

计算了1组光滑平板和9组不同宽度高度比的 V型沟槽,当流动达到稳定的状态.总阻力可以分为 压差阻力和黏性阻力两部分.减阻率η可以通过

$$\eta = \frac{f_{\mathbb{P}_{\overline{W}}} - f_{\mathbb{N}_{\overline{W}}}}{f_{\mathbb{P}_{\overline{W}}}}$$

来确定,其中f为模型的流动阻力.减阻率 $\eta > 0$ 表示由于微沟槽的存在使阻力减小,达到了减阻 的目的;相反,如果 $\eta < 0$ 微沟槽不但没有减小阻 力,反而使阻力增加了.10 组模型的压差阻力、黏 性阻力、总阻力和减阻率如表 1 所示.

XI 小时工机时并非未及规图平						
工况	沟槽尺寸/µm	压差阻力/mN	黏性阻力/mN	总阻力/mN	减阻率/%	
1	100 ×25	0.89	1.820 0	2.71	0.973	
2	100 ×50	2.12	0.668 0	2.79	3.370	
3	100 ×75	2.66	0.119 0	2.78	3.810	
4	100 ×100	2.74	-0.078 8	2.66	7.910	
5	100 ×125	3.00	-0.159 0	2.84	1.540	
6	100 ×150	3.06	-0.184 0	2.87	0.602	
7	100 ×175	3.09	-0.187 0	2.91	-0.611	
8	100 ×200	3.12	-0.181 0	2.94	-1.600	
9	100 ×225	3.12	-0.171 0	2.95	-1.950	
10	<b>赤</b> 酒 工 祀	0	2 800 0	2 80	0	

表1 不同工况的计算结果及减阻率

7、8、9组由于高度宽度比太大,没有减小阻 力反而增大了阻力;1组和6组减阻率还不到1% 同样没有达到减阻的目的;只有4组的减阻率最 高,减阻效果最明显,最高的减阻率达到了7.9%. 图2清楚地表示出不同组的减阻率的异同.



图 2 不同工况下沟槽的减阻率分析

由此可见,沟槽的宽度高度比直接影响了沟 槽减阻效率,决定了沟槽减阻方法的有效性.究其 原因,本文认为减阻率跟沟槽中的流动形态有关. 如图 3 所示,第1 组沟槽的宽度高度比较大,没有 形成明显的流动涡,因此这组基本没有减阻效果. 2、3 组形成了流动涡,2 组的流动涡仅仅在沟槽底 部尖端的位置,3组的流动涡较2组大,位置更偏 向于沟槽的中心,但仍然只是占据沟槽的小面积, 所以这两组虽然起到了减阻的作用,但是效果不 明显.4 组的流动涡形态非常好,它的中心基本在 沟槽的中心,流动涡的面积也是几组中最大的,沟 槽上部分的流动涡方向与流体的主流动方向相 同,它没有流出沟槽而聚集在沟槽的内部形成了 所谓的"第2涡群",形成的"第2涡群"减少了壁 面与流体之间的剪切力,抑制了湍流的生长,相当 于减少了壁面与流体的接触面积,此时沟槽中的 流动涡相当于"滚动轴承".这正是4组减阻率最 高的原因.相反,5~9组没有形成明显的流动涡, 尤其是最后3组,沟槽内的流动涡复杂,方向也不 一致,甚至形成了多个方向不同,相互作用的流动 涡,这反而增加了流动阻力.

在所有模型的模拟结果中4组的减阻率是最高的.为了更加清楚地将有沟槽和没有沟槽的结 果进行对比,本文选择光滑平板为A组,4组即 100μm\*100μm微型沟槽为B组.图4表示了B 组即工况4的速度场和压力场分布云图.

从图 4 可知,沟槽改变平板表面压力分布.在 沟槽前段形成压力峰值点,与逆来流方向侧沟槽 的压力的差值构成单个沟槽的压差阻力,压差阻 力顺来流方向向后逐渐减小.



图 4 工况 4 速度场和压力场分布云

从图 5 沟槽及光滑平板表面剪切应力分布可 以看出,沟槽减小表面剪切应力,甚至产生逆来流 方向的剪切应力,整体剪切应力值远小于光滑平 板剪切应力值.



沿来流方向,分别在距离沟槽平板前端2.5、 5.0、7.5、10.0 mm 布置速度监测点,图6为工况 A 与工况 B 边界层内监测点速度分布曲线及其对 比关系.可以看出,沟槽平板黏性底层速度大于光 滑平板,而沟槽平板的速度梯度较光滑平板小,因 此,布置沟槽有利于降低平板的黏性阻力,但这也 是以增加压差阻力为代价的.总之,沟槽要满足 减小黏性阻力,并且要不明显地增加压差阻力才 能达到最终的减阻目的.



4 结 论

 1)本文对微米尺度的 V 型沟槽减阻机理进行了分析.其减阻机理在于沟槽内部形成的漩涡 能够减小壁面与流体之间的壁面剪应力,使滚动 摩擦代替滑动摩擦. 2)通过对不同高度的 V 型沟槽进行分析发 现沟槽的形状能够影响减阻效率,宽高比过大或 过小的沟槽减阻率都很差,减阻率高的沟槽能够 形成充满整个沟槽的规则涡.

3) 通过优化微沟槽形貌,获得了减阻率 8% 的微沟槽尺寸设计,计算证明了临近空间飞艇蒙 皮利用微沟槽减阻的有效性.

#### 参考文献

- [1] 任一鹏,田中伟,吴子牛. 飞艇空气动力学及其相关 问题[J]. 航空学报,2010,31(3):431-443.
- [2] WALSH M J, SELLERS III W L, MCGINLEY C B. Riblet drag at flight conditions [J]. Journal of Aircraft, 1989, 26(6): 570-575.
- [3] WALSH M J. Riblets as a viscous drag reduction technique[J]. AIAA Journal, 1983, 21(4): 485-486.
- [4] WALSH M J, LINDEMANN A M. Optimization and application of riblets for turbulent drag reduction [M]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1984.
- [5] CHOI H, MOIN P, KIM J. Direct numerical simulation of turbulent flow over riblets [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1993, 255: 503-539.
- [6] CHOI H, MOIN P, KIM J. Active turbulence control for drag reduction in wall-bounded flows [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1994, 262: 75–110.
- [7] 丛茜,封云,任露泉. 仿生非光滑沟槽形状对减阻效 果的影响[J]. 水动力学研究与进展(A辑),2006, 21(2):232-238.
- [8] 潘光,黄桥高,胡海豹,等.回转体表面不同间隔脊状 结构的减阻数值仿真研究[J].空气动力学学报, 2010,28(3):267-271.
- [9] 宋娟娟, 徐宇, 黄宸武, 等. 非光滑表面湍流减阻的数值模拟研究[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(5): 771-774.
- [10] SONG Xiaowen, ZHANG Guogeng, WANG Yun, et al. Use of bionic inspired surfaces for aerodynamic drag reduction on motor vehicle body panels [J]. Journal of Zhejiang University Science, 2011, 12(7): 543-551.
- [11] 胡海豹, 宋保维, 潘光, 等. 回转体表面条纹沟槽减阻 水洞实验研究[J]. 上海力学, 2006, 27(2):267-272.
- [12] ZHANG Deyuan, LUO Yuehao, LI Xiang, et al. Numerical simulation and experimental study of dragreducing surface of a real shark skin[J]. Journal of Hydrodynamics, 2011,23(2):204-211.
- [13]谭惠丰,刘羽熙,刘宇艳,等.临近空间飞艇蒙皮材料研究进展和需求分析[J].复合材料学报,2012,29(6):1-8.

(编辑 张 红)