

脊状表面的加工成型技术及其减阻试验研究^{*}

Machining Molding Technology of Riblet Surface and Experimental Study on Drag Reduction

西北工业大学航海学院 胡海豹 黄桥高 潘光 刘占一 吴文辉

[摘要] 为了研究脊状表面的减阻特性,采用数控加工技术在有机玻璃平板上制备脊状表面。在制备过程中,成功解决了脊状结构尺寸的确定、材料的选择、表面粗糙度的提高等问题。利用热线风速仪在低速风洞中分别对光滑表面和多个脊状表面进行了流场测试,获得了湍流边界层内流动参数的分布情况。试验结果表明,脊状表面改变了边界层内的流场结构,抑制了湍流脉动,降低了湍流强度,导致了减阻效果。同时,采用数控加工技术在有机玻璃平板上制备脊状表面的方法是可行的。

关键词: 数控加工技术 脊状表面 湍流边界层 流动参数 减阻

[ABSTRACT] In order to study drag reduction characteristic of riblet surface, riblet surface on plexiglass flat is manufactured by using computerized numerical control (CNC) machining technology. In the preparation, some questions, such as confirmation of size, choice of material and improvement of surface finish are solves successfully. Field flow about smooth and different riblet surfaces have been tested separately in low speed wind tunnel by hot-wire anemometry and distribution of turbulent boundary layer flow parameters is obtained. Experimental results show that riblet surface changes field flow structure of boundary layer, restrains turbulent variance, decrease turbulence intensity, brings on drag reduction effect. Preparation of riblet surface by using CNC machining technology is feasible.

Keywords: CNC machining technology Riblet surface Turbulent boundary layer Flow parameter Drag reduction

动物学研究表明,许多水生动物具有并非光滑的表皮形态,已经证明鲨鱼表皮的脊状结构具有很好的减阻功能。该技术在海外已投入实际应用,如NASA兰利中心在Learjet型飞机上开展的类似飞行试验显示,脊状

表面的减阻量约为6%左右;1984年夏季奥运会上,美国划艇队在划艇底部成功地使用了脊状结构薄膜;另一个典型的例子就是Speedo公司(美国)生产的具有脊状表面的游泳衣,该游泳衣在悉尼奥运会上大放异彩。

在该项技术中,脊状结构的加工成型方法是该技术能否进入工程应用的前提。国内外对于脊状表面的制备方法报道较少,研究者主要是通过试验和数值仿真的途径来获得脊状结构的形状、尺寸等因素对减阻效果的影响规律,以及探讨其减阻机理^[1-2]。

目前,对于脊状表面的制备方法主要有LIGA加工法、激光微加工法和辊压法等。LIGA加工法具有精度高的优点,但其强烈依赖于价值昂贵而稀缺的同步辐射光源,难以实现真正意义上的普及^[3];激光微加工法的主要缺点是加工效率低下,激光剥蚀材料的速度极其有限,致使加工周期很长,同时加工成本也很高,不适用于大尺寸和大面积的表面加工;辊压法的缺点是辊筒表面的脊状结构前期加工较为困难,且一个辊筒只能加工出一种规格的脊状结构^[4]。由于上述加工技术存在不可避免的缺陷,本课题采用数控加工技术在有机玻璃平板上制备脊状表面,并对制得的试验板进行风洞试验以探讨其减阻特性和验证该加工方法的可行性。

1 模型的设计

1.1 脊状结构尺寸的确定

脊状结构的几何尺寸对湍流减阻的影响始终是人们研究的一个重点。研究认为具有减阻效应的脊状结构必须具有锐利的峰脊而且脊状结构间距与低速条带间距必定存在某种关系。通过将脊状结构的间距与湍流猝发时低速条带的间距相比得出这样的推测:脊状结构尺寸的设计要以抑制低速条带的振荡和成长为目的。因此,国内外一致的看法是当脊状结构的无量纲尺寸小于30个粘性长度时,脊状表面具有减阻效应。

已有研究结果表明,脊状表面湍流边界层与光滑表面湍流边界层一样,流速沿法向的分布不仅具有分区特性,而且线性分布公式和对数分布公式仍适用,只是对数公式中的积分常数不同而已^[5]。在粘性底层内流速分布为 $u^+=y^+$,其中, u^+ 为无量纲速度, y^+ 为距表面的垂向高度。假设普朗特假定^[6](即平板从前缘 $x=0$ 处开始

^{*} 国家自然科学基金重点项目(50835009);陕西省自然科学基金研究计划项目(2010JQ1009);西北工业大学科技创新基金项目(2008KJ02012)。

就是湍流边界层,且当雷诺准则数 $Re_x=ux/v < 10^7$ 时边界层内时均速度分布符合 $1/7$ 次方规律)成立,则利用边界层动量积分方程可推导出无量纲尺寸计算公式如下:

$$h^+ = h / (v/u^*), \quad (1)$$

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}, \quad (2)$$

$$\tau_w = 0.0225 \rho u^2 \left(\frac{v}{\delta u}\right)^{1/4}, \quad (3)$$

$$\delta = 0.37(Re_x)^{-1/2} x, \quad (4)$$

$$Re_x = \frac{ux}{v}. \quad (5)$$

式中, h 为脊状结构的实际几何尺寸; u^* 为摩擦速度; τ_w 为壁面摩擦应力; δ 为边界层厚度; ρ 为空气密度; u 为来流速度; v 为空气运动粘性系数。

取 $h^+=30$, 根据上述方法计算得到的沿流向不同位置处脊状结构尺寸与风速的关系曲线,如图 1 所示。从图中可见,在 $x=2\text{m}$ 处要实现减阻,风速为 15m/s 时脊状结构尺寸应小于 0.75mm , 风速为 10m/s 时脊状结构尺寸应小于 1.09mm , 风速为 6m/s 时脊状结构尺寸应小于 1.72mm , 风速为 4m/s 时脊状结构尺寸应小于 2.48mm , 即存在减阻效果的脊状结构尺寸随来流速度的增大而减小,而沿流动方向缓慢变大。从脊状表面加工角度来看,脊状结构尺寸越小加工难度越大,且加工质量不易保证。因此为降低试验模型加工的难度和成本,应在尽可能低的风速下实现充分发展湍流流动。另外,测试风速的降低也可以使壁面边界层厚度增厚,进一步提高对边界层流场的测试精度和分辨率。

为了获得最大的减阻效果,前人对截面为各种形状的脊状结构进行了研究^[7], 结果发现高宽比(脊状结构

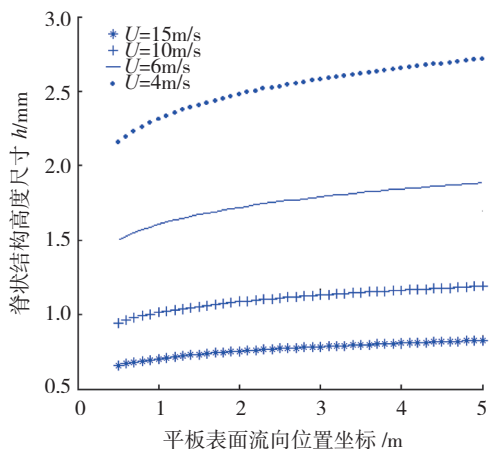


图1 平板表面流向不同位置处脊状结构尺寸与风速的关系
Fig.1 Relationship between size of riblet structure and wind speed in different stream position of flat surface

深度 h 与宽度 s 之比)在 1 附近的对称 V 型脊状结构具有最好的减阻效果。因此,本课题选择高宽比为 1 的 V 形脊状结构。

1.2 材料的选择

本课题采用数控加工技术制备脊状表面,由于刀具是靠与工件的接触进行加工的,所以不可避免地产生刀具磨损的现象,致使加工精度降低,不能达到加工要求。工件硬度较大,走刀次数很多时,更容易产生这种情况。解决这个问题有 2 个方法,一是在加工过程中换刀,但在这里不适用,因为换刀要将高速运转的机床停下,使工作区温度降低,产生位移,导致加工误差;另外就是在保证强度的基础上找一种硬度小的材料,因为硬度小的材料对刀具磨损减小,可以一次性完成脊状结构的加工,且不会对脊状结构的尺寸有较大影响。因此,材料的选择至关重要。

项目组通过试样加工发现有机玻璃作为加工脊状表面的材料具有明显的优势:良好的透明度和耐老化性;优良的绝缘性和机械强度;对酸、碱、盐有较强的耐腐蚀性;易于加工,可进行粘接、锯、刨、钻、刻、磨、丝网印刷以及喷砂等工艺。同时,由于有机玻璃具有易加工和热绝缘性好的特点,在用有机玻璃加工平板模型时,每次铣削所产生的残余应力较金属表面小,为保证平面度而需要的工序就可以减少。此外,通过试样加工可以看出,在有机玻璃平板上加工脊状结构,与在金属平板上加工相比,毛刺的影响也大为减小。

2 模型的加工

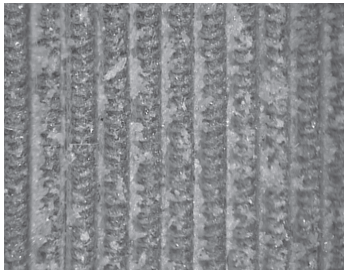
2.1 模型外形加工

平板模型外形尺寸为 $400\text{mm} \times 300\text{mm} \times 10\text{mm}$, 作为毛坯有机玻璃板尺寸大约为 $405\text{mm} \times 305\text{mm} \times 15\text{mm}$ 。加工外形时,先用 4 个压板把板料固定在数控加工中心的工作平台上,压板压在板料的一组对边上,铣削另一组对边。然后改变压板位置,压在已加工好的对边上,铣削未加工的对边。平板的厚度则留下 0.5mm 余量。在这个加工过程中,机床主轴转速为 800r/min 、走刀速度为 300mm/min 。

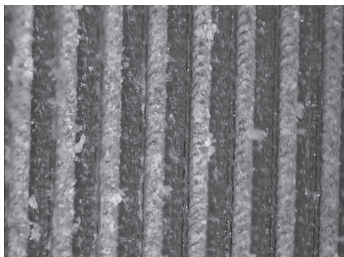
2.2 脊状结构加工

在上一步加工的基础上,分 2 步进行此工序。第一步,厚度加工,加工平板的厚度到要求的尺寸,并且保证上下两面的平行度和平面度达到 0.02mm ,此过程中的机床主轴转速为 2000r/min 、走刀速度为 500mm/min 。第二步,脊状结构加工,依靠刀尖的高速旋转铣削出脊状结构。首先半精加工脊状结构深度,为精加工留量,然后精加工到图纸要求的尺寸。在加工脊状结构时,提高刀尖转速后,通过放大镜可发现脊状结构表面光洁度

有所提高,如图 2 所示。此过程中的刀尖转速为 3800r/min、走刀速度为 600mm/min。



(a) 刀尖转速 2 000r/min



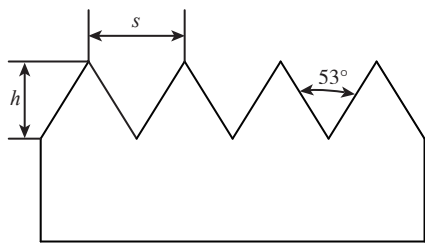
(b) 刀尖转速 3 800r/min

图2 刀尖转速对表面光洁度的影响

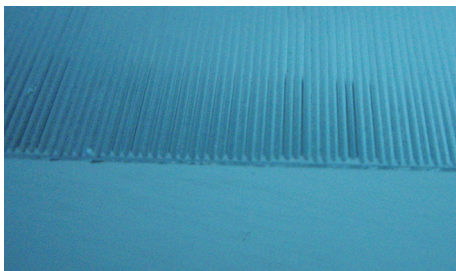
Fig.2 Effect of rotation at speed on surface roughness

2.3 脊状表面后处理

模型加工完成之后,发现模型表面出现了一些微小毛刺。这是机械加工方法不可避免的问题。而毛刺对于减阻试验是很不利的,因此必须去除这些附在脊状结构上的毛刺。用一般的机械方法去除这里的毛刺是不可取的,因为脊状结构尺寸太小,去毛刺时很可能严重破坏脊状结构,所以需要手工处理,用最细的砂纸



(a) 示意图



(b) 照片

图3 脊状表面示意图及模型照片

Fig.3 Diagram and partial model picture of riblet surface

打磨模型表面,但要注意力度的控制,力度小去除不掉毛刺,力度大则易破坏脊状结构。至此,脊状表面平板模型加工完成,本课题共制备了 5 块脊状表面试验板和 1 块光滑平板,如图 3 所示,脊状结构的尺寸分别为 $s=h=0.5\text{mm}$ 、 0.65mm 、 0.8mm 、 0.9mm 和 1mm 。

3 脊状表面减阻特性风洞试验

3.1 试验测试仪器及测试方法

试验在西安交通大学流体机械国家专业实验室的小型吸式低速风洞^[8]中完成,风洞的布局及总体尺寸如图 4 所示。气流依次经过进口稳定段、收敛段、发展段、试验段、弯道、流量调节阀、风机,最后由风机出口排出。试验中通过流量调节阀的控制可以在试验段的中心处得到 0~15m/s 范围内的任意流速。试验选用了美国 TSI 公司的最新一代恒温式 IFA300 智能型热线风速仪对脊状表面湍流边界层进行测试^[8-9]。

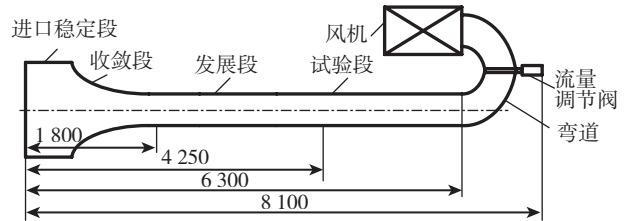


图4 小型低速风洞示意图

Fig.4 Diagram of small low-wind tunnels

试验中热线风速仪的具体安装关系如图 5 所示^[8],坐标架置于风洞试验段壳体上方,热线探针杆顶端固定在坐标架上并可随坐标架上下移动,移动精度为 0.01mm,热线探针杆末端通过风洞试验段壳体上方预留测试孔伸入试验段内。测量点分布在图中所示的 y 方向上,跨度范围从下壁面到中心,共 50mm。风洞下壁面有斜线部分试验板,可调换。当研究光滑平板壁面边界层时,斜线部分为光滑平板;当研究脊状表面边界层时更换为脊状结构平板。试验中,采样频率取 50kHz,采样时间 60s,第一个测量点在保证不损坏热线的前提下应尽量靠近壁面,且靠近壁面的地方取点较密集,目的是能够准确地获取脊状表面近壁面的流动信息,采样点数超过 30 个。

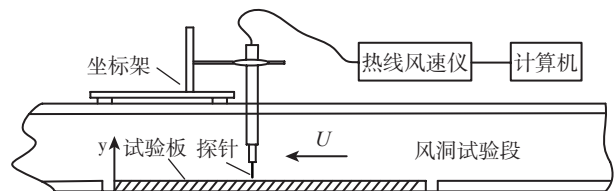
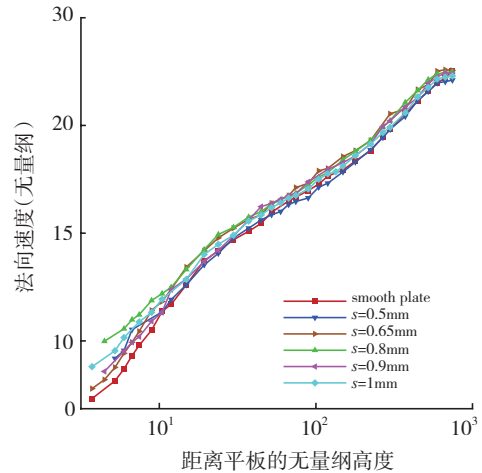


图5 热线风速仪测试装置示意图

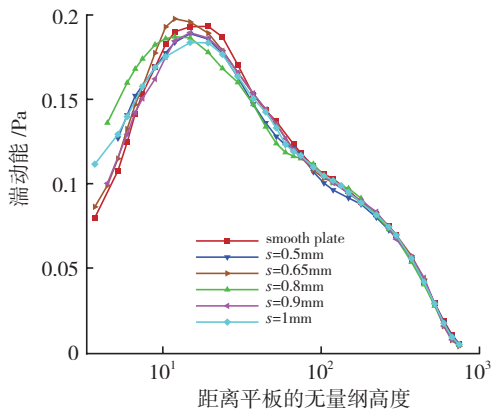
Fig.5 Diagram of testing equipment of hot-wire anemometry

3.2 试验结果及分析

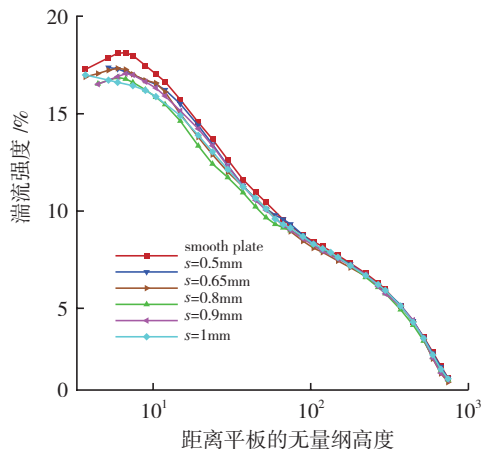
图6(a)~(c)分别为5m/s风速下光滑平板和脊状表面湍流边界层的时均速度、湍动能、湍流强度的分布曲线。对比脊状表面与相同条件下光滑平板沿法线方向的流动参数分布曲线,可以发现:(1)脊状表面湍



(a) 均速度分布曲线



(b) 湍动能分布曲线



(c) 湍流强度分布曲线

图6 5m/s风速下, 时均速度、湍动能和湍流强度分布曲线

Fig.6 Average velocity profile, turbulence kinetic energy profile and turbulence intensity profiles of riblet surface in 5m/s

流边界层的粘性底层增厚、近壁面法向速度梯度降低以及过渡层与对数律区上移;(2)在湍流边界层的大部分区域内,脊状表面的湍动能明显小于光滑平板;(3)脊状表面近壁区的湍流强度相比光滑平板有明显降低,在粘性底层内尤为明显;(4)不同尺寸的脊状结构,其减阻效果具有较大差别。

深入分析这些差异可以得到,脊状结构的存在抑制了湍流的脉动,阻碍了湍流猝发过程的进行,降低了湍流猝发的强度,提高了湍流运动的稳定性,最终导致湍流摩擦阻力的降低。

4 结束语

本课题采用数控加工技术在有机玻璃表面加工脊状结构,并在风洞中对试验板进行了湍流边界层流场测试,对比分析试验数据可以得到以下结论:

(1)脊状结构的存在改变了湍流边界层的流场结构,速度曲线在过渡层与对数律区明显上移,湍动能和湍流强度也有所降低,产生了一定的减阻效果;

(2)对比分析各流动参数分布曲线可以发现,脊状结构的存在只改变了边界层内的流场结构,对边界层以外的流场没有影响。同时,对于不同尺寸的脊状结构,其减阻效果不一样;

(3)风洞减阻特性试验表明,采用数控加工技术在有机玻璃平板上制备脊状表面的方法是可行的,且具有加工精度高、工艺简单、成本较低、可实现工业化大面积生产的优点。

致谢:感谢西安交通大学流体机械国家专业实验室宫武旗在风洞试验方向给予的指导和帮助。

参考文献

- [1] 胡海豹,宋保维,潘光,等. 回转体表面条纹沟槽减阻水洞试验研究. 力学季刊,2006,27(2):267-268.
- [2] 胡海豹,宋保维,潘光,等. 鲨鱼沟槽表皮减阻机理的仿真研究. 系统仿真学报,2007,19(21):4901-4903.
- [3] 陈迪,李昌敏,章吉良,等. LIGA技术X光深层光刻工艺研究. 微细加工技术,2000,2:66-70.
- [4] 李小兵,刘莹,郭纪林,等. 不同机加工表面微观形貌的特征分析. 润滑与密封,2007,32(7):26-28.
- [5] 刘占一,宋保维,胡海豹,等. 脊状表面减阻特性的风洞试验研究. 试验力学,2008,23(5):469-474.
- [6] 张兆顺,崔贵香,许春晓. 湍流理论与模拟,北京:清华大学出版社,2005.
- [7] 宫武旗,李新宏,黄淑娟. 沟槽壁面减阻机理试验研究. 工程热物理学报,2002,23(5):579-582.
- [8] 宫武旗. 应用小波变换以及分形理论对湍流边界层壁面脊状减阻机理的研究[D]. 西安:西安交通大学,2000.
- [9] 潘光,黄明明,胡海豹,等. Spalding公式在脊状表面湍流壁面摩擦力测量中的应用. 力学学报,2009,41(5):15-20. (责编 岩石)