

Study on Numerical Simulation of Drug Reduction on the Bionic Surface of Shark Skin Fabricated by Roller Embossing

Xuefeng Yang, Danyang Zhao*

School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning
Email: *zhaody@dlut.edu.cn

Received: May 5th, 2018; accepted: May 23rd, 2018; published: May 30th, 2018

Abstract

U-shaped riblet could be pressed on the polymer films by wire winding roller embossing. In the process, the size and structure characteristic of micro-riblets are significantly influenced by the embossing deformation process parameters and the diameter of stainless steel wires. The numerical simulation of micro-riblet drag reduction has also been performed on basis of the riblets obtained by roll-to-roll embossing process. And the influence of micro-riblet size and structure on turbulent drag reduction has been revealed in three-dimensional incompressible turbulent flow. We find the turbulent drag reduction could be achieved when the micro-riblet size is small enough in the simulation. When the diameter of the micro-riblet is 0.02 mm, the drag reduction rate could be up to 10%. The influence of external interference on micro-riblet drag reduction is further studied by adding turbulence through a vortex generator and it intuitively shows vortex structure on micro-riblet also affects drag reduction. The micro-riblet drag reduction effect is more obvious when the flow is under the interference of turbulence.

Keywords

Wire Winding, Roller Embossing, Micro-Riblet Structure, Drag Reduction, Vortex Structure

仿生鲨鱼皮滚压成型表面减阻数值模拟研究

杨雪峰, 赵丹阳*

大连理工大学机械工程学院, 辽宁 大连
Email: *zhaody@dlut.edu.cn

收稿日期: 2018年5月5日; 录用日期: 2018年5月23日; 发布日期: 2018年5月30日

*通讯作者。

摘要

通过绕丝和滚压成型工艺在聚合物薄膜上压印出U形沟槽, 滚压过程中钢丝的直径和滚压成型工艺决定了沟槽的尺寸和形状。在实际成型效果的基础上, 对微沟槽表面进行减阻数值模拟, 研究了三维不可压缩湍流流动条件下不同尺寸和形状的微沟槽对减阻特性的影响, 研究表明在微沟槽尺寸足够小时微沟槽表面才会表现出湍流减阻的特性。当沟槽直径是0.02 mm时, 减阻率最高可达10%。为了进一步研究外界干扰对微沟槽面减阻特性的影响, 通过加涡流发生器产生扰流的方法可以更直观的表现涡结构对减阻效果的影响, 研究表明在产生扰流的情况下, 微沟槽面的减阻效果更加明显。

关键词

绕丝, 滚压, 微沟槽结构, 减阻, 涡结构

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

大自然的物种多样性指引着人类向更高的高度发展和创新, 纵观人类的发展历程, 飞机的发明与创造、潜艇的出现和雷达等高科技的诞生无不与大自然的启发息息相关。为了利用生物特殊的结构和功能发展制造新材料和新技术, 美国的斯蒂尔在1960年提出了仿生学的概念[1][2]。在节能减阻方面, 仿生鲨鱼皮结构已经被越来越多的人认可, 而学者们对仿生鲨鱼皮的研究也没有停止过。各种各样的仿生鲨鱼皮结构和复制方法也层出不穷。并且该项研究已经被国内外各领域投入到了实际应用中, 例如悉尼奥运会上鲨鱼皮泳衣的出现就使大家眼前一亮。

目前较多的仿生鲨鱼皮结构有盾鳞结构、凹坑非光滑结构和沟槽结构[3][4][5][6], 沟槽结构又有各种形状, 如三角形, 矩形, 半圆形, 梯形等[6][7][8]。比较常见的仿生鲨鱼皮复制方法有如下几种: 滚压法、模具复制法、浇注翻模法、复型翻模法、表面微细加工、微纳米压印和微塑铸法等[3][8][9][10][11]。大连理工大学的赵丹阳教授提出了真空浇铸法和热压电铸法实现了仿生鲨鱼皮盾鳞结构的复制[12][13]。哈佛大学的研究员通过3D打印技术制造出鲨鱼皮盾鳞结构并贴附在机翼表面进行了空气动力性能测试, 结果发现仿生鲨鱼皮结构不仅可以减小阻力, 还能有效的提升机翼升力[14]。

随着实验条件和计算机技术的不断发展, 仿生鲨鱼皮的减阻效果也越来越多的通过实验和数值模拟得到了验证。在减阻实验中, 比较常用的方法是将仿生鲨鱼皮蒙皮贴附在模型表面, 通过压差法或测力天平法直接通过压差的变化或阻力的变化来验证仿生鲨鱼皮表面的减阻特性[15][16]。热线风速法和氢气泡流动显示法在探究仿生鲨鱼皮减阻机理上也比较常用[17][18]。在数值模拟中, 二维横向沟槽结构被验证减阻率可达到9% [19], U形, 三角形, 梯形, 矩形等三维纵向沟槽结构、肋条状结构和凹坑状结构表面也被证明了可实现减阻效果。Boomsma等[20]通过数值模拟比较了皮齿状结构表面和沟槽表面的减阻效果, 结果表明皮齿状结构可以增加44%~50%的阻力, 而沟槽表面可以实现5%的减阻效果。

本文通过绕丝工艺, 将不同直径的钢丝缠绕在滚筒表面来代替传统模具, 利用滚压成型技术在聚合物薄膜上压印出微沟槽结构, 不同的滚压工艺会对成型结果造成不同的影响, 可以压印出不同结构的微

沟槽结果, 在此基础上对不同成型结构的微沟槽进行湍流减阻数值模拟, 验证滚压成型的微沟槽结构在湍流流动下的减阻效果。

2. 微沟槽结构的确定

2.1. 滚压成型

滚压成型技术是目前实现微沟槽结构大面积复制的最有效的方法之一。将不同直径的钢丝缠绕在压印轮上, 如图 1 所示, 不仅可以实现微沟槽结构的连续压印, 还减少了微沟槽结构模具的开发时间以及模具贴附在滚筒表面发生变形造成的形状误差。当对聚合物薄膜进行滚压成型实验时, 不同直径的钢丝可以压印出不同尺寸的沟槽结构, 同时滚筒温度、滚压速度和压缩比等滚压成型工艺会对聚合物成型产生影响, 使微沟槽结构的形状发生变化, 因此微沟槽结构是直径不同的圆弧状结构。

2.2. 流体域网格的划分

随着计算机技术的飞速发展, 数值模拟不仅可以弥补理论难以求解的难处, 还可以弥补苛刻的实验条件的要求。为了得到满意的数值模拟结果, 又不至于计算量过大, 将流体域模型简化为矩形管流动湍流减阻模型, 流体域底部分别采用光滑平面和微沟槽面结构, 微沟槽面结构采用顺流向微沟槽结构, 通过与光滑平面结构的对比来分析讨论微沟槽面的减阻效果。在实际滚压成型结果的基础上, 根据微沟槽直径和形状的不同, 以沟槽直径为 0.5 mm、0.2 mm、0.1 mm、0.05 mm 和 0.02 mm 和深宽比为 0.5、0.41、0.33、0.25 和 0.17 为基础建立三维流体域模型, 如图 2 所示。

流体域的长宽高设置为 $25 \times 15 \times 1$ mm, 底面分别用光滑平面和微沟槽面表示。流体域采用非结构四面体网格, 网格太密会使计算机运算速度减慢, 网格太稀疏又会导致运算结果不准确, 因此只对流体域底部的光滑平面和沟槽面结构进行面网格加密处理即可, 如图 3 所示。

2.3. 边界条件的设置

利用 Fluent 软件对仿生鲨鱼皮表面进行减阻模拟。由于鲨鱼皮沟槽表面的流场状态比较复杂, 因此为了提高数值模拟的精度, 本文采用 RNG k- ϵ 湍流模型。RNG k- ϵ 模型不仅考虑了湍流涡旋, 而且在 ϵ 方程中加了一个条件, 提高了模拟的精度和可信度。考虑到鲨鱼皮沟槽表面流体的不可压缩湍流流动, 本文采用压力基稳态求解器进行求解, 采用水作为流体介质。具体的边界条件设置如下:

- 1) 流体域的入口设置为速度入口;
- 2) 流体域的出口设置为自由流出口;

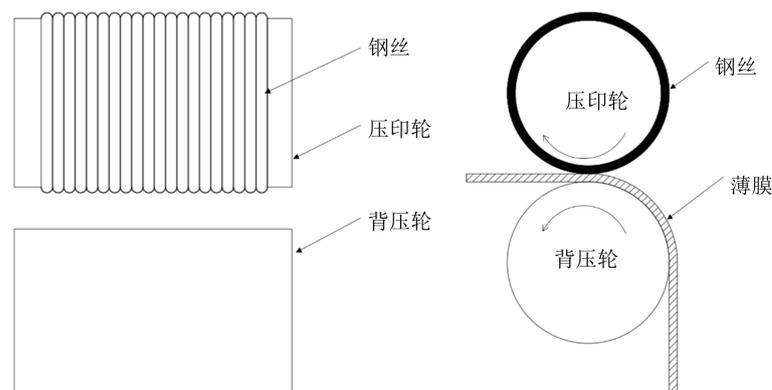


Figure 1. Schematic of roller embossing
图 1. 滚压成型示意图

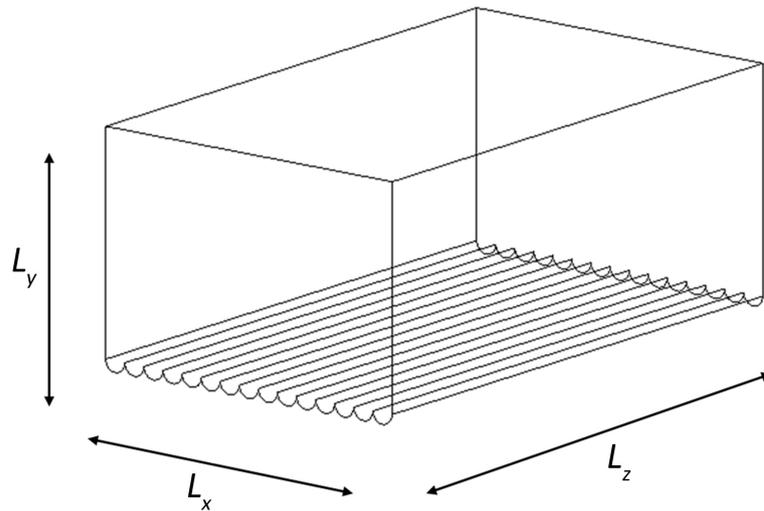


Figure 2. The fluid domain
图 2. 流体域模型

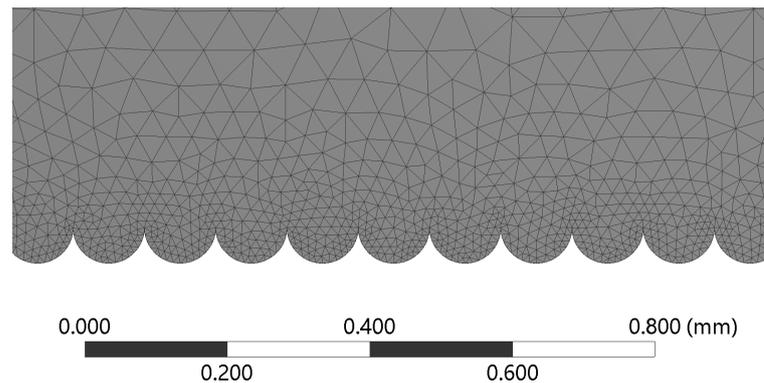


Figure 3. Grid distribution of computing domain
图 3. 流体域网格划分结果

3) 流体域的其他壁面设置为无滑移壁面条件。

3. 减阻数值模拟及结果分析

雷诺数是表征流体流动状态的无量纲数, 当流体在相同的雷诺数条件下流动时, 流场具有相似的流动状态。因此为了清楚的比较微沟槽面的减阻效果, 各个流体域模型的湍流状态要保持一致, 保证各个流体域模型都要在相同的雷诺数条件下进行减阻数值模拟。在管流动中, 雷诺数表达式如公式(1)所示:

$$R_e = \frac{vd_H}{\nu} \quad (1)$$

其中, d_H 是矩形管的水力直径(mm), $d_H = 4 (A/S)$, A 是矩形管的截面积(mm^2), S 是矩形管的湿周(mm), v 是流体速度(m/s), ν 是运动粘度(m^2/s)。

可以看出, 当流体域确定后, 流体速度可以影响雷诺数的大小, 不同流速对应的雷诺数如下表所示。在管流动中, 一般认为当雷诺数大于 2320 时, 流动状态就可以认为是湍流, 当雷诺数大于 13,800 时, 流动状态一定为湍流, 从表 1 中可以看出, 数值模拟的流动状态均为湍流状态。

微沟槽面的减阻效果在宏观上表现为壁面阻力的减小, 在壁面阻力中, 壁面摩擦阻力占非常大的比

重, 因此也可以说表现为壁面摩擦阻力的减小。在表示减阻率时, 大多文献用壁面剪切应力的变化表示。当光滑平面结构用微沟槽面结构代替时, 虽然壁面剪切应力有所减小, 但因为微沟槽面结构表面积的增大导致壁面摩擦阻力并不一定会减小, 只有当微沟槽结构的尺寸达到一定条件时, 壁面剪切应力和壁面摩擦阻力才会同时减小。因此用壁面摩擦阻力的变化来表示减阻率更为合理, 如公式(2)所示。

$$\eta = \frac{F_s - F_g}{F_s} \times 100\% \quad (2)$$

其中 τ_s 是光滑平面结构壁面剪切应力, τ_g 是微沟槽面结构壁面剪切应力, F_s 是光滑平面结构壁面摩擦阻力, F_g 是微沟槽面结构壁面摩擦阻力。

3.1. 理想型微沟槽结构的减阻模拟

在理想情况下, 滚压成型过程中聚合物薄膜会完全填充, 圆形截面的钢丝决定了聚合物薄膜经过滚压成型后会压印出完整的半圆形微沟槽结构, 半圆形微沟槽的直径由钢丝的直径决定, 所以取半圆形沟槽的直径为 0.5 mm、0.2 mm、0.1 mm、0.05 mm 和 0.02 mm。在不同的流速条件下, 光滑平面和微沟槽表面的壁面剪切应力和壁面摩擦阻力的变化规律如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 随着流速的不断增大, 光滑平面和半圆形沟槽表面的壁面剪切应力和壁面摩擦阻力不断增加, 并且随着沟槽直径的增大, 壁面剪切应力和壁面摩擦阻力也随之增大。当沟槽直径为 0.5 mm 时, 沟槽表面的壁面剪切应力和壁面摩擦阻力都比光滑平面大, 没有表现出减阻效果; 当沟槽直径为 0.2 mm、0.1 mm 和 0.05 mm 时, 虽然壁面剪切应力明显减小, 但壁面摩擦阻力比光滑平面大, 没有表现出减阻效果; 只有当沟槽直径为 0.02 mm 时, 壁面剪切应力和壁面摩擦阻力都比光滑平面小, 表现出了明显的减阻效果。

通过减阻率的计算, 得到不同沟槽表面的减阻率随流体速度的变化趋势如图 5 所示。当沟槽直径为 0.02 mm 时, 沟槽表面表现出了明显的减阻效果, 减阻率最高可达 10%, 并且随着流速的增大减阻率有

Table 1. The states of flow field

表 1. 流场状态

流速	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
雷诺数	4800	9600	14,400	19,200	24,000	28,800	33,600	38,400	43,200	48,000

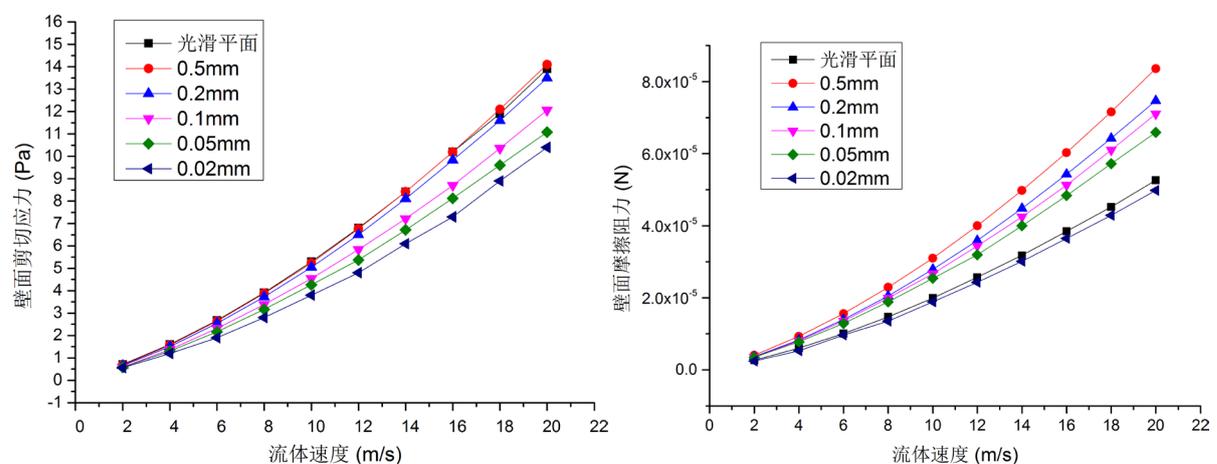


Figure 4. Contrast curves of wall shear stress and wall frictional resistance on smooth surface and riblet surface

图 4. 光滑平面和沟槽表面壁面剪切应力和壁面摩擦阻力对比

下降趋势并逐渐平稳。当沟槽直径为 0.5 mm、0.2 mm、0.1 mm 和 0.05 mm 时, 沟槽表面起到了增阻的效果, 并且沟槽直径越大, 阻力越大。沟槽直径为 0.05 mm 时, 流速越大, 阻力增长越慢; 沟槽直径为 0.1 mm 时, 阻力基本稳定, 不随流速的增加而发生较大的变化; 沟槽直径为 0.2 mm 时, 流速越大, 阻力增长越快; 沟槽直径为 0.5 mm 时, 随着流速的增大, 阻力增长更快, 最大可以增阻 60%。

当流体速度为 10 m/s 时, 取沟槽直径为 0.02mm 的沟槽表面为例, 得到光滑平面和沟槽表面的壁面剪切应力分布和速度矢量分布, 如图 6 和图 7 所示, 可以明显看出沟槽表面的剪切应力比光滑平面小, 光滑平面的流动显得杂乱, 而沟槽壁面的流场更平稳些。可以得出结论: 随着沟槽直径的减小, 沟槽表面的壁面剪切应力和壁面摩擦阻力都有不同程度的减小, 只有壁面剪切应力比光滑平面小时才能表现出减阻效果。

3.2. 实际成型微沟槽结构的减阻模拟

在实际滚压成型实验中, 由于滚筒温度、滚筒速度和压缩比等滚压成型工艺以及弹性回复等条件的综合影响, 使聚合物薄膜在滚压成型过程中不能完全填充, 因此实际滚压成型中沟槽结构是圆弧状沟槽,

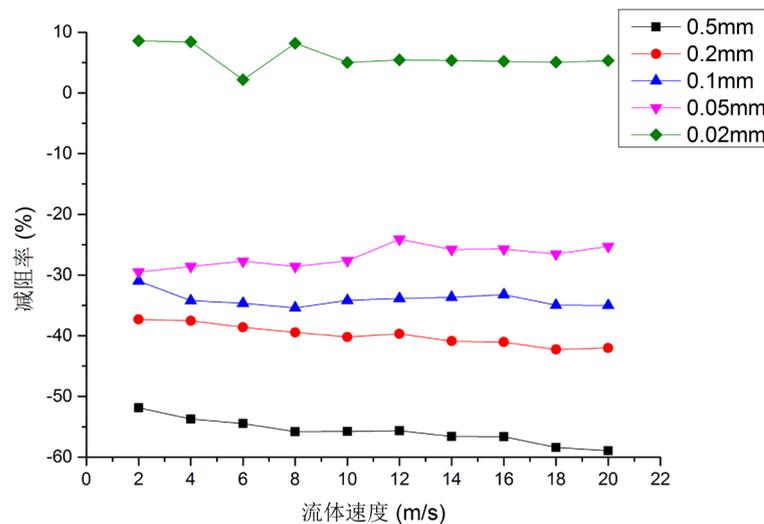


Figure 5. Drag reduction rate of semicircular riblets with different diameters
图 5. 不同直径半圆形沟槽面的减阻率

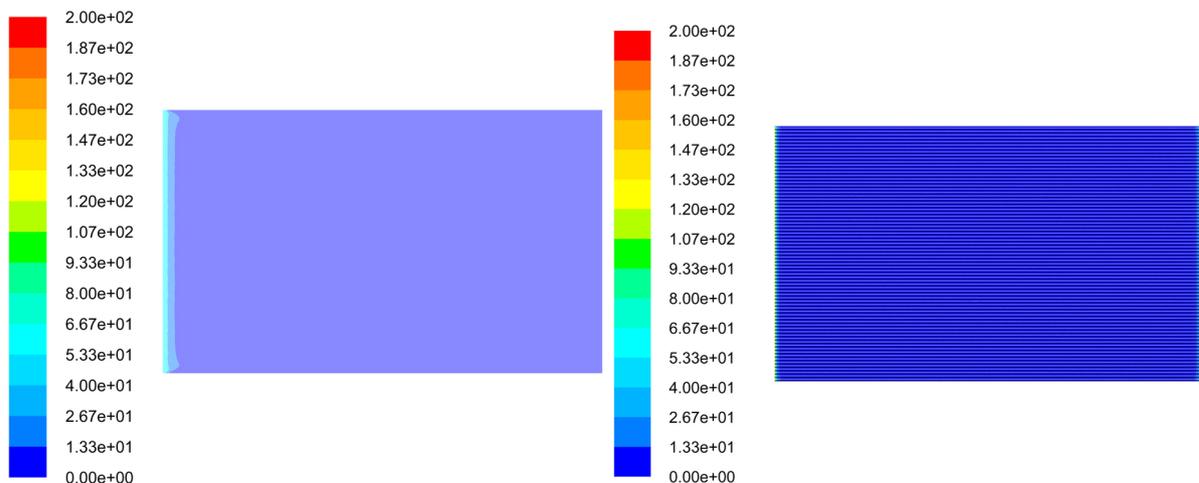


Figure 6. Distribution of shear stress on smooth surface and riblet surface
图 6. 光滑平面和沟槽面壁面剪切应力分布

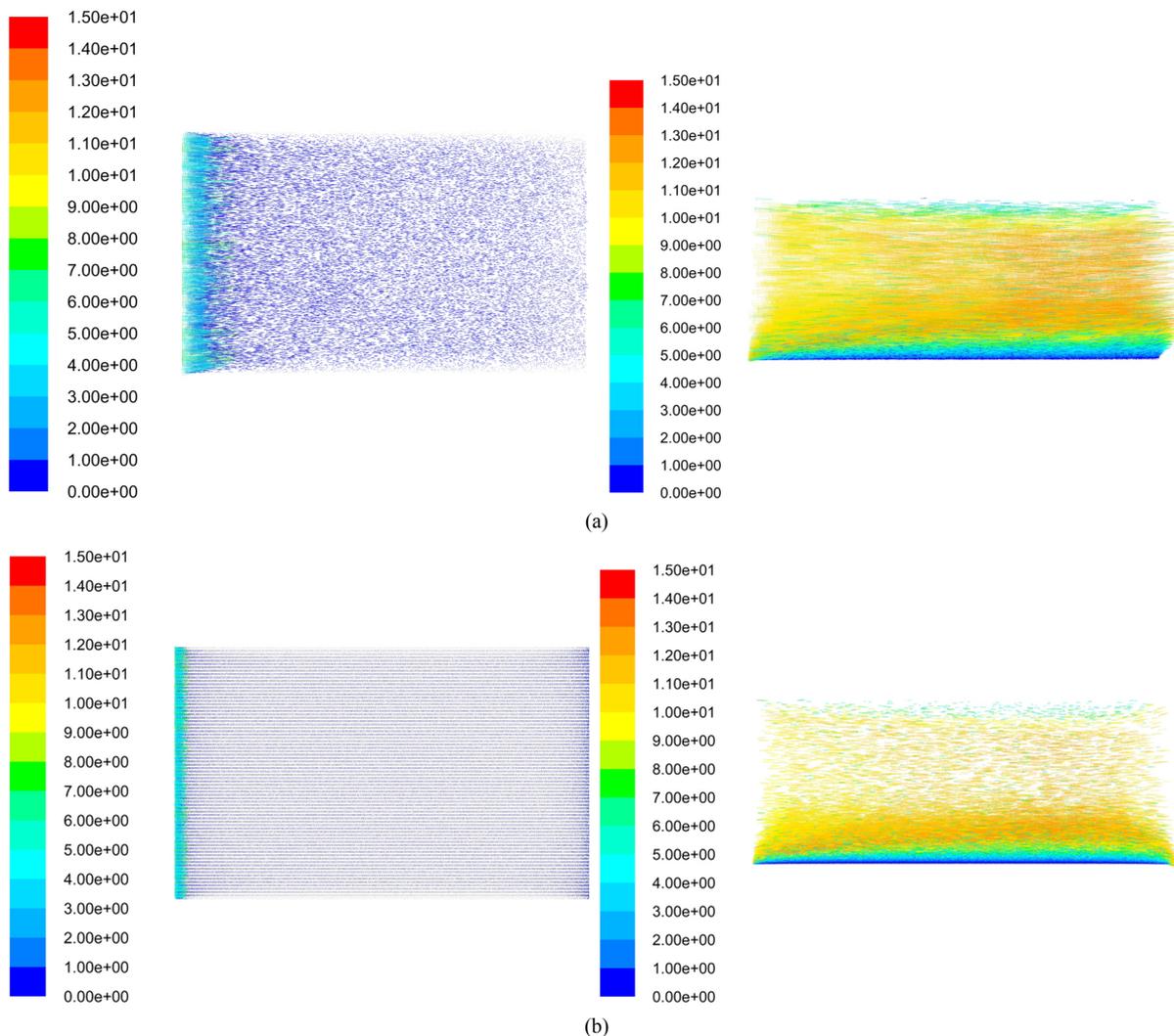


Figure 7. Velocity vector diagram on smooth surface and riblet surface. (a) Smooth surface; (b) Riblet surface

图 7. 沟槽面壁面和光滑平面速度矢量对比。(a) 光滑平面；(b) 沟槽表面

如图 8 所示。

在实际滚压过程中, 钢丝的最小直径为 0.2 mm, 因此微沟槽结构的最小直径也是 0.2 mm。由于沟槽直径越小, 沟槽表面的减阻效果越明显, 因此在滚压成型结果的基础上, 选择沟槽直径为 0.2 mm 的微沟槽表面, 对不同填充状态下的微沟槽面进行减阻数值模拟, 沟槽深宽比取 0.5、0.41、0.33、0.25 和 0.17, 光滑平面和沟槽面的壁面剪切应力和壁面摩擦阻力的变化规律如图 9 所示。

从图 9 中可以看出, 随着流速的不断增大, 光滑平面和沟槽表面的壁面剪切应力和壁面摩擦阻力不断增加, 并且随着深宽比的增大, 壁面剪切应力和壁面摩擦阻力也随之增大。沟槽面的壁面剪切应力小于光滑平面的壁面剪切应力, 但当沟槽深宽比为 0.17 时, 壁面摩擦阻力才比光滑平面小。因此只有沟槽深宽比为 0.17 时, 沟槽表面才表现出减阻效果。

通过减阻率的计算, 得到不同填充程度的沟槽表面减阻率随流体速度的变化趋势, 如图 10 所示。当沟槽的深宽比为 0.17 时, 沟槽表面表现出了减阻效果, 减阻率随着流速的增加基本没有变化, 稳定在了 5% 左右。当深宽比为 0.25 时, 在流速为 2 m/s 和 4 m/s 时, 沟槽面表现出了减阻效果, 减阻率达到了将近 10%, 但随着流速的增加, 减阻率逐渐减小, 当流速超过 6 m/s 时, 不再具有减阻效果。当深宽比为

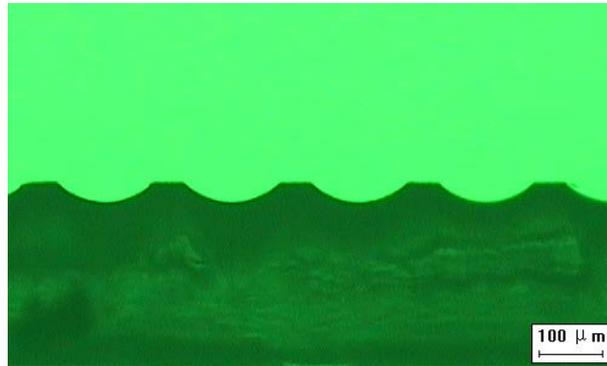


Figure 8. Embossing results on polymer films
图 8. 聚合物薄膜实际压印效果

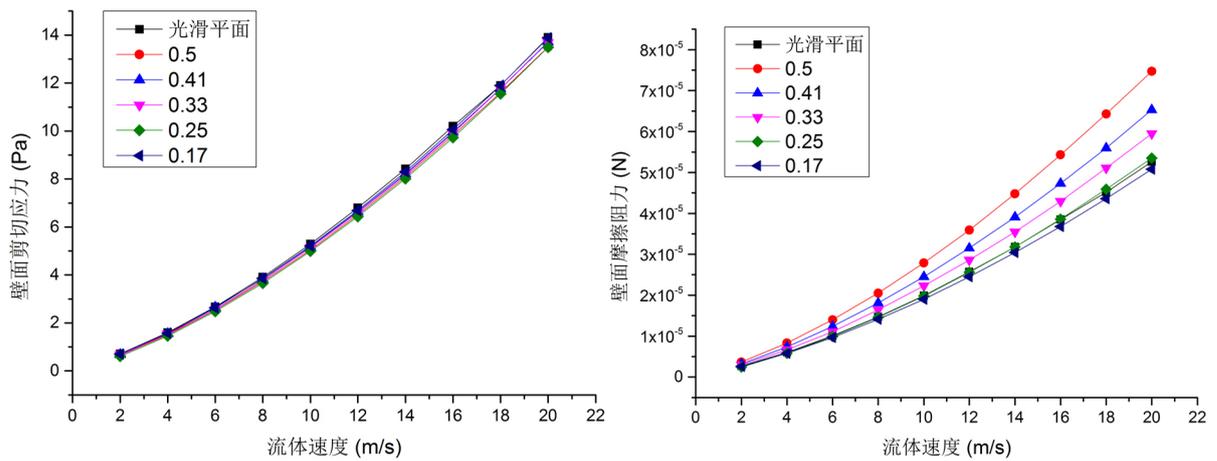


Figure 9. Contrast curves of wall shear stress and wall frictional resistance
图 9. 光滑平面和沟槽表面壁面剪切应力和壁面摩擦阻力对比

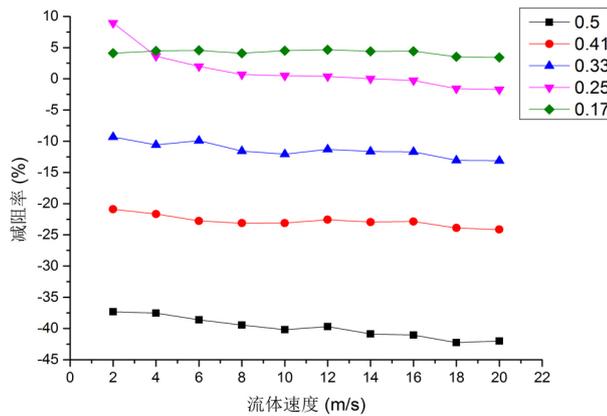


Figure 10. Drag reduction rate of riblet surface with different depths
图 10. 不同深度沟槽的减阻率

0.33、0.41 和 0.5 时, 沟槽面表现出了增阻的效果, 并且都随着流速的增加, 阻力增加越大, 深宽比越大, 阻力增加越大, 最大增阻 43%。

当流体速度为 10 m/s 时, 得到光滑平面和沟槽表面的壁面剪切应力分布和速度矢量分布, 如图 11 和图 12 所示, 可以明显看出沟槽表面的剪切应力比光滑平面小, 同样, 光滑平面的流动显得杂乱无序,

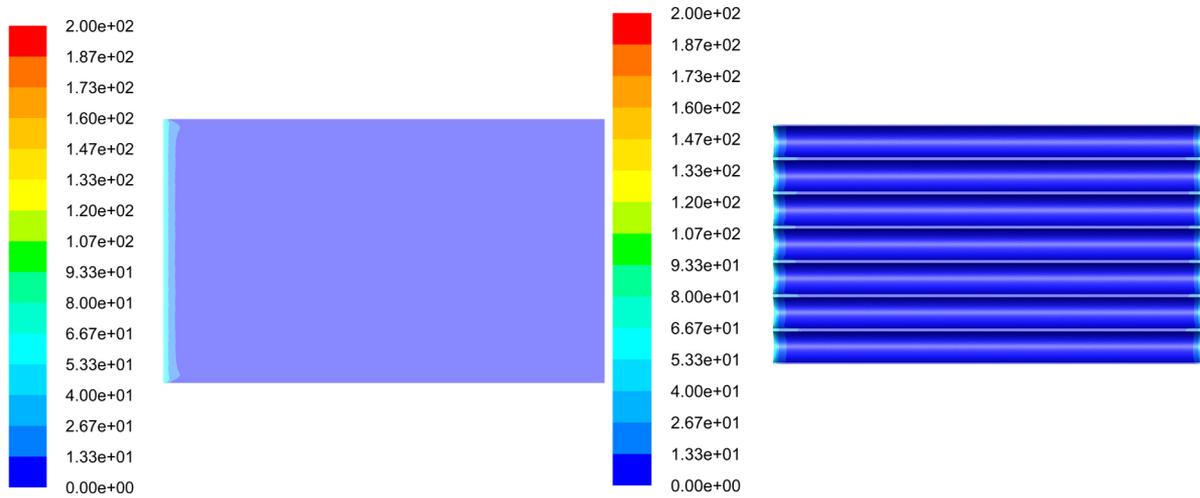


Figure 11. Distribution of shear stress on smooth surface and riblet surface
图 11. 光滑表面和沟槽面壁面剪切应力对比

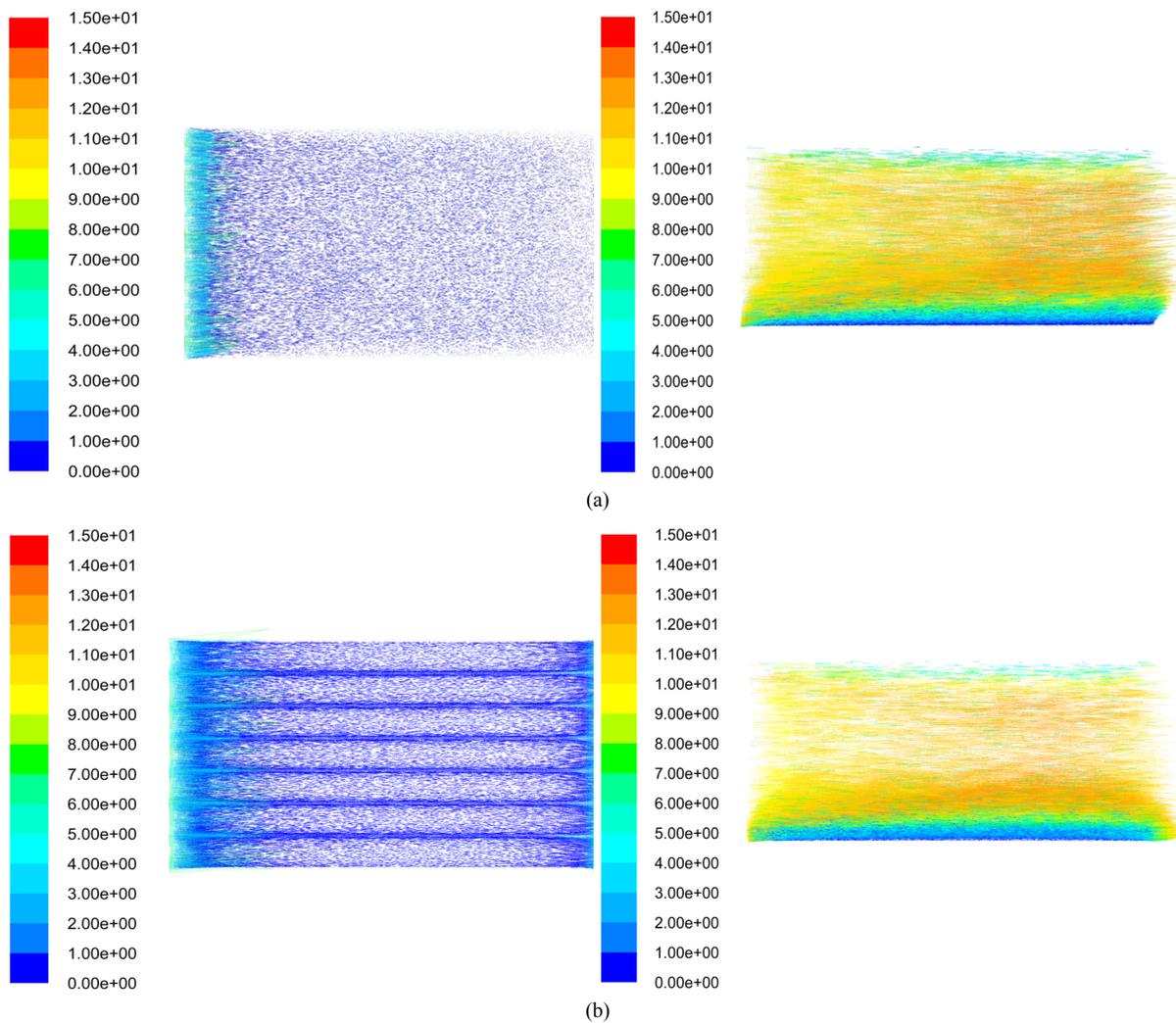


Figure 12. Velocity vector diagram on smooth surface and riblet surface. (a) Smooth surface; (b) Riblet surface
图 12. 沟槽面壁面和光滑平面速度矢量对比。(a) 光滑平面；(b) 沟槽表面

而沟槽壁面的流场更加平稳。可以得出结论: 随着深宽比的减小, 沟槽表面的壁面剪切应力和壁面摩擦阻力都有不同程度的减小, 壁面剪切应力比光滑平面小时才能表现出减阻效果。

3.3. 带有涡发生器的微沟槽结构的减阻模拟

当把仿生鲨鱼皮蒙皮贴附在船体或飞机表面时, 不规则表面凸起和贴附结合处等都会对蒙皮表面的流场产生干扰, 这些干扰都会产生涡流, 所以探究沟槽面结构在外界对流场产生干扰情况下的减阻特性也是十分有意义的。在流体域前面加一个倾斜的平板作为涡流发生器对流体域的流场产生干扰, 如图 13 所示。

当涡流发生器对流体域流场产生干扰的情况下, 选择沟槽直径为 0.2 mm 时的微沟槽结构流体域, 对光滑平面结构和微沟槽面结构进行减阻数值模拟, 壁面剪切应力和壁面摩擦阻力曲线如图 14 所示。可以看出, 在有外界干扰的情况下, 光滑平面的壁面剪切应力和壁面摩擦阻力都有所增加, 只有在深宽比为 0.17、0.25 和 0.33 时, 沟槽面的壁面摩擦阻力小于光滑平面, 表现出了明显的减阻效果。

通过减阻率的计算, 得到在有外界干扰情况下的减阻率, 如图 15 所示, 当沟槽深宽比为 0.17、0.25 和 0.33 时沟槽面表现出了减阻效果, 并且减阻率随着流速的增加而增大最后趋于稳定。深宽比为 0.17 时, 减阻率达到最大为 25%; 深宽比为 0.33 时, 减阻率最大为 5%。当深宽比为 0.41 和 0.5 时, 沟槽面表现出了增阻的效果。深宽比为 0.41 时, 随着流速的增加, 阻力增加减小, 并趋于稳定; 深宽比为 0.5 时, 随着流速的增加, 阻力增加先减小后增大。

当流体速度为 10 m/s 时, 得到光滑平面和沟槽表面的壁面剪切应力分布和速度矢量分布, 如图 16 和图 17 所示, 可以看出沟槽面的壁面剪切应力明显较小, 而且光滑平面上的流动波动更大, 还产生了明

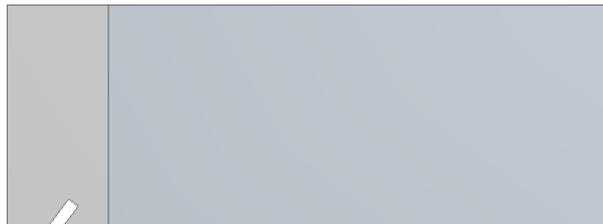


Figure 13. Computing domain with vortex generator
图 13. 带有涡流发生器的流体域模型

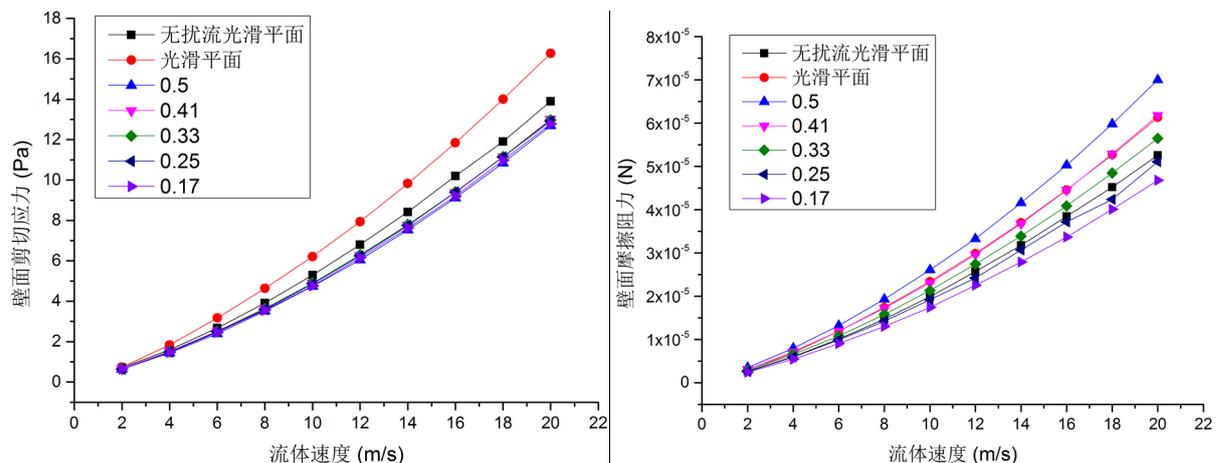


Figure 14. Contrast curves of wall shear stress and wall frictional resistance
图 14. 光滑平面和沟槽表面壁面剪切应力和壁面摩擦阻力对比

显的涡结构, 而沟槽面上则产生了更大的涡结构, 并且流动平稳。在没有外界干扰时, 只有深宽比为 0.17 的沟槽面表现出了减阻效果, 而有外界干扰时, 深宽比为 0.17、0.25 和 0.33 的沟槽面都表现出了减阻效果。

3.4. 减阻机理分析

在微沟槽湍流减阻理论中, 被接受最多的是涡减阻理论, 湍流中会产生很多的涡结构, 涡结构与表面接触摩擦会产生能量损失, 导致阻力增加, 涡结构的扩散也会产生二次涡, 同样会使阻力增加。而沟槽可以将涡抬升, 使涡停留在沟槽槽脊上方, 这就使得沟槽内的速度梯度和速度脉动减小, 小于平面上的速度梯度和速度脉动, 壁面剪切应力也随之减小; 同时, 沟槽结构还减小了涡的横向迁移, 减弱了涡的猝发、缠结及边界层外的湍流。在图 7 和图 12 中, 涡结构不明显, 沟槽面的减阻效果相对较小; 图 17 中, 外界干扰使涡结构增多、变大, 之前没有表现出减阻效果的沟槽面也表现出了减阻效果。

当涡结构的尺寸比沟槽小时, 会掉入沟槽内与沟槽表面发生相互作用, 当涡结构的尺寸比沟槽结构大时, 涡结构被抬升, 与沟槽表面的接触面积减小, 相互作用也减小, 同时沟槽面的表面积比平面的大,

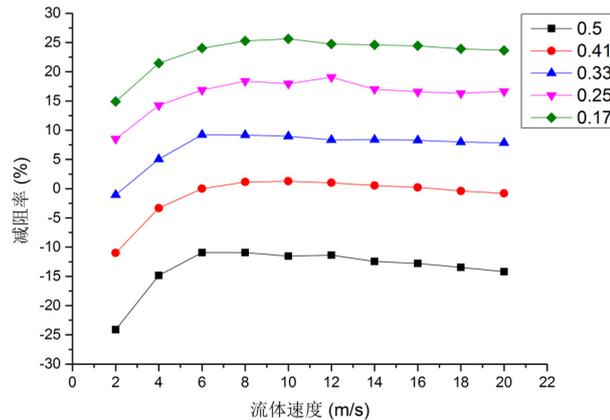


Figure 15. Drag reduction rate of riblet surface with different depth
图 15. 沟槽面的减阻率

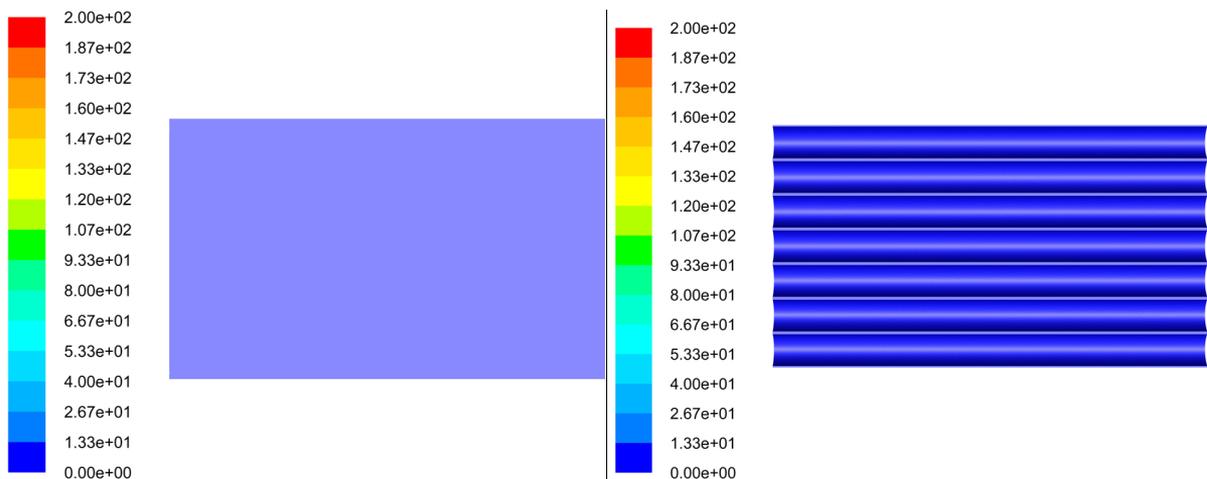


Figure 16. Contrast curves of wall shear stress and wall frictional resistance
图 16. 光滑平面和沟槽表面壁面剪切应力和壁面摩擦阻力对比

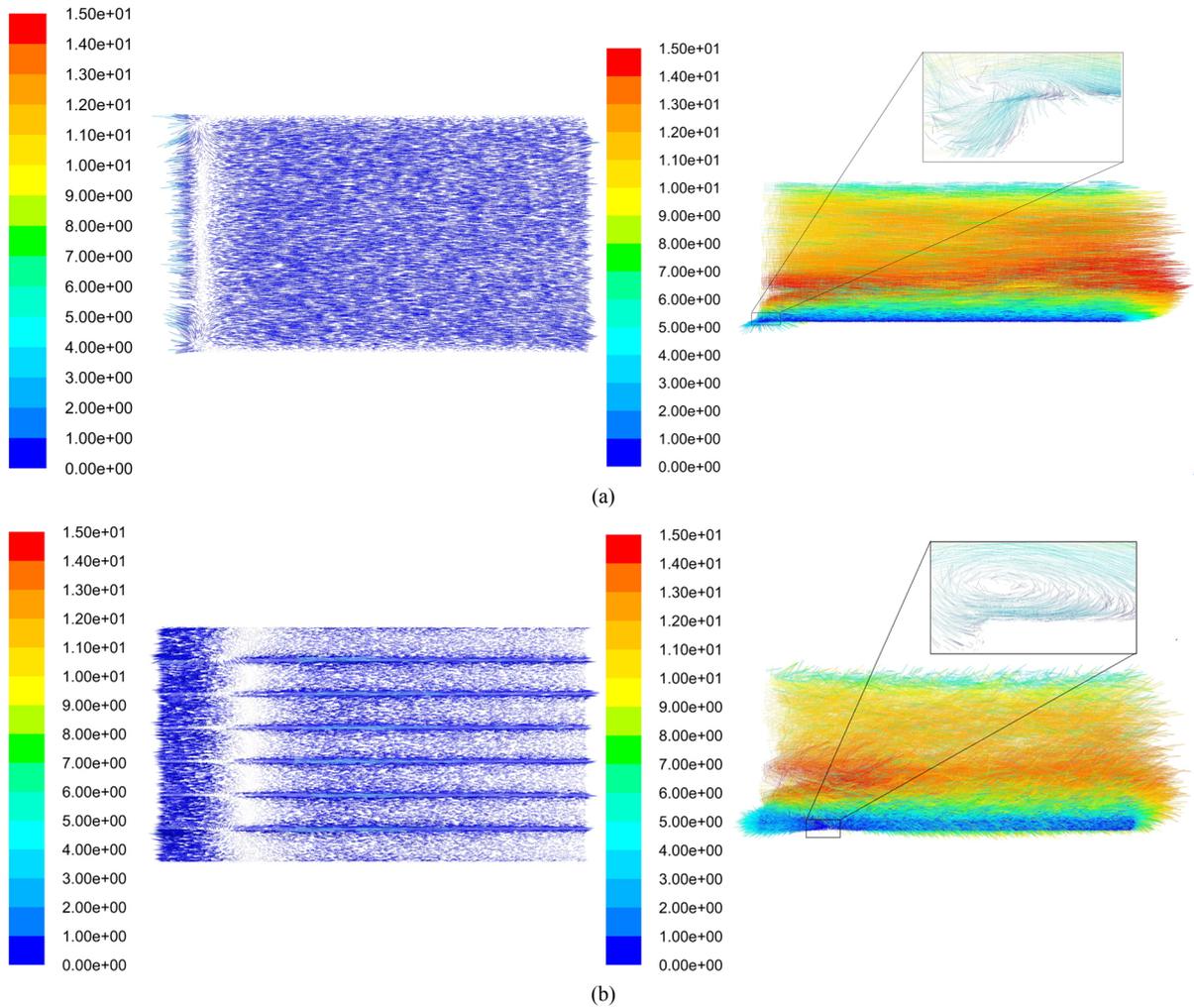


Figure 17. Velocity vector diagram on smooth surface and riblet surface. (a) Smooth surface; (b) Riblet surface
图 17. 沟槽面壁面和光滑平面速度矢量对比。(a) 光滑平面；(b) 沟槽表面

因此只有当沟槽直径足够小，使壁面摩擦阻力比光滑平面小时才能表现出减阻效果。深宽比跟沟槽的深度和宽度都有关系，深宽比大，沟槽宽度大，涡结构容易掉入沟槽内与沟槽表面发生相互作用；深宽比小，沟槽宽度小，涡结构不容易掉入沟槽内，与沟槽面的接触减小，相互作用减小。因此只有当深宽比合适时，并且壁面摩擦阻力比光滑平面小时才能表现出减阻效果。

4. 结论

通过对不同直径和形状的沟槽面结构进行减阻数值模拟分析可以得出结论：湍流中产生的涡结构与表面相互作用，发生接触摩擦产生能量损失，导致阻力增加。沟槽结构可以减小涡结构与表面的相互作用，起到减阻的效果，并且与涡结构尺寸和沟槽结构尺寸有关，所以只有在一定条件下，沟槽面才可以表现出减阻效果。1) 当半圆形沟槽结构的尺寸足够小时，沟槽面结构才表现出减阻效果，并且半圆形沟槽的尺寸越小，减阻效果越明显，流速越高，减阻效果越明显；2) 当滚压过程中由于聚合物填充不充分压印出圆弧沟槽结构时，沟槽结构的尺寸越小，深宽比越小，减阻效果越明显，流速越高，减阻效果越明显；3) 当流动受到外界扰动，流动发生不规则变化时，沟槽面结构的减阻效果有明显提升，沟槽的尺寸越小，深宽比越小，流速越大，减阻效果越好。

基金项目

本论文获国家自然科学基金(51275071)资助。

参考文献

- [1] Bhushan, B. and Jung, Y.C. (2011) Natural and Biomimetic Artificial Surfaces for Superhydrophobicity, Self-Cleaning, Low Adhesion, and Drag Reduction. *Progress in Materials Science*, **56**, 1-108. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2010.04.003>
- [2] Ma, P.X. (2008) Biomimetic Materials for Tissue Engineering. *Advanced Drug Delivery Reviews*, **60**, 184-198. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2007.08.041>
- [3] 张德远, 李元月, 韩鑫, 等. 高精度复合减阻鲨鱼皮复制成形研究[J]. 科学通报, 2010(32): 3122-3127.
- [4] 赵军. 凹坑形仿生非光滑表面的减阻性能研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [5] 徐中, 赵军, 吴正华, 等. 凹坑形非光滑表面的减阻性能分析[J]. 航空精密制造技术, 2009, 45(1): 33-34.
- [6] 黄桥高, 潘光, 胡海豹, 等. 脊状表面航行器模型减阻特性的水洞实验研究[J]. 实验流体力学, 2010, 24(3): 50-53.
- [7] 赵琳珊, 白秀琴, 付宜凤, 等. 船用梯形微沟槽表面减阻效应的仿真分析与实验验证[J]. 船舶工程, 2015(10): 15-20.
- [8] Guo, C.F., Tian, Q.Q., Wang, H.R., *et al.* (2017) Roller Embossing Process for the Replication of Shark-Skin-Inspired Micro-Riblets. *Micro & Nano Letters*, **12**, 439-444. <https://doi.org/10.1049/mnl.2016.0759>
- [9] Ahn, S.H. and Guo, L.J. (2009) Large-Area Roll-to-Roll and Roll-to-Plate Nanoimprint Lithography: A Step toward High-Throughput Application of Continuous Nanoimprinting. *ACS Nano*, **3**, 2304-2310. <https://doi.org/10.1021/nn9003633>
- [10] Hirt, G. and Thome, M. (2008) Rolling of Functional Metallic Surface Structures. *CIRP Annals*, **57**, 317-320. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.034>
- [11] 苏炳煌, 李光吉, 蒲侠, 等. 鲨鱼皮表面微结构在分子表面的复制方法初探[J]. 材料研究与应用, 2008, 2(4): 460-464.
- [12] Zhao, D.Y., Huang, Z.P., Wang, M.J., *et al.* (2012) Vacuum Casting Replication of Micro-Riblets on Shark Skin for Drag-Reducing Applications. *Journal of Materials Processing Technology*, **212**, 198-202. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2011.09.002>
- [13] 孙鹏翔. 鲨鱼皮微沟槽减阻机理与复制技术基础研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2010.
- [14] Domel, A.G., Saadat, M., Weaver, J.C., *et al.* (2018) Shark Skin-Inspired Designs That Improve Aerodynamic Performance. *Journal of the Royal Society, Interface*, **15**.
- [15] 卢思, 姚朝晖, 郝鹏飞, 等. 具有微纳结构超疏水表面的槽道减阻特性研究[C]//北京力学会. 北京力学会第 16 届学术年会: 2010 年卷. 北京: 北京力学会, 2010.
- [16] 胡海豹, 黄桥高, 蒋雄, 等. 脊状表面的准 LIGA 成形技术及其减阻试验研究[J]. 中国机械工程, 2010(3): 336-339.
- [17] 宫武旗, 李新宏, 黄淑娟. 沟槽壁面减阻机理实验研究[J]. 工程热物理学报, 2002, 23(5): 579-582.
- [18] 常跃峰, 姜楠, 夏振炎, 等. 沟槽壁湍流减阻机理的氢气泡流动显示及数字图像分析[J]. 天津大学学报, 2009(9): 839-844.
- [19] 史小军, 王树立, 李恩田, 等. 肋条在湍流减阻中的数值模拟[J]. 管道技术与设备, 2008(1): 8-10.
- [20] Boomsma, A. and Sotiropoulos, F. (2016) Direct Numerical Simulation of Sharkskin Denticles in Turbulent Channel Flow. *Physics of Fluids*, **28**, 0351063.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2324-8696，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：mos@hanspub.org