

V 形肋条减阻技术在输气管道中的数值研究

唐绍猛

山西天然气有限公司规划技术部, 山西 太原 030032

摘 要: 为了提高管道输送效率, 有必要研究降低管道输送阻力的方法。天然气在管道输送时大多数位于阻力平方区, 而该区域的管道摩阻系数只与管壁粗糙度有关。在天然气管道中, 采用 V 形肋条可达到减阻效果。采用 FLUENT 软件对小管径管道中两种不同几何尺寸的 V 形肋条进行数值模拟, 并与大管径管道进行对比。一般来说, 在不同流速下, $h = s = 0.51 \text{ mm}$ 的 V 形肋条输气管道均具有减阻效果, 而 $h = s = 0.90 \text{ mm}$ 的 V 形肋条输气管道则在流速超过 7.5 m/s 时开始增阻; 大管径管道在 $h = s = 0.9 \text{ mm}$ 尺寸的对称 V 形肋条具有较好的减阻效果, 小管径管道在 $h = s = 0.51 \text{ mm}$ 尺寸的对称 V 形肋条具有较好的减阻效果。

关键词: 肋条; 输气; 数值模拟; 湍动能

DOI: 10.3969/j.issn.1006-5539.2018.02.003

Numerical Research for V-Shaped Riblets Drag Reduction Technology in Gas Pipeline

Tang Shaomeng

Shanxi Natural Gas Co., Ltd. Planning & Technology Department, Taiyuan, Shanxi, 030032, China

Abstract: In order to improve the efficiency of pipeline transportation, it is necessary to study the methods to reduce the resistance of pipeline transportation. When the natural gas is transported in the pipeline, most of it is in the square resistance area, and the friction coefficient of the pipeline is only related to the roughness of the pipe wall. In natural gas pipeline, the V-shaped riblets can reach the effect of drag reduction. The V-shaped riblets on two different dimensions of small diameter pipeline were simulated by FLUENT and compared with the large diameter pipeline. In general, under different flow rate, the output of the $h = s = 0.51 \text{ mm}$ V-shaped riblets are the drag reduction effect of gas pipeline, while the $h = s = 0.90 \text{ mm}$ V-shaped riblets pipeline is increasing resistance in velocity higher than 7.5 m/s ; the large diameter pipeline has better drag reduction in symmetrical V-shaped riblets when $h = s = 0.9 \text{ mm}$, and the small diameter pipeline with better drag reduction in symmetrical V-shaped riblets when $h = s = 0.51 \text{ mm}$.

Keywords: Riblet; Gas transmission; Numerical simulation; Turbulent kinetic energy

收稿日期: 2017-10-25

基金项目: 山西省重点项目“山西天然气管网对接陕京四线输气管道工程”(S 2016-077 C)

作者简介: 唐绍猛(1987-), 男, 回族, 辽宁锦州人, 工程师, 硕士, 主要从事输气管道减阻技术研究工作。

0 前言

目前,中国天然气产业已进入高速发展期,具有广阔的发展前景。由于天然气流速快、压力高,天然气管道几乎都运行在阻力平方区域内^[1],在此区域内的流体流动摩阻系数只与管壁粗糙度有关。因此,降低管道输送阻力对于提高管道输送效率具有重要意义^[2]。目前,输气管道的减阻方法主要有三种:内涂层减阻法^[3]、减阻剂减阻法^[3]和界面仿生减阻法^[4]。但内涂层减阻法^[2]不适用于管径 500 mm 以上的输气管道,并且在管道快速泄压和清管等外力作用下会使涂层出现起泡、剥离现象;减阻剂减阻法目前在实验室小口径环道测试中应用,可靠性尚需验证和改进,而且尚未有大口径管道实验相关报道;而仿生非光滑表面减阻法是借鉴仿生学研究理论,把物体表面加工成非光滑形态,进而改变表面边界层流场结构,抑制湍流猝发频率和强度,降低表面摩擦阻力。此类减阻技术不需要添加特殊设备,且不会造成额外的能源消耗,故具有极高的科研意义和应用前景。

国内外学者对不同结构和尺寸的仿生肋条进行了大量的研究。目前,最典型的非光滑表面主要是沟槽表面,而仿鲨鱼皮表面的盾鳞沟槽是目前流体减阻技术中研究的热点。Lee S J 等人^[5]、马付良等人^[6]和 Hough G R 等人^[7]从流体力学角度对鲨鱼皮盾鳞结构的减阻机理进行了解释。Bechert D W 等人^[8]对三角形(V形)、U形、L形和 Space-V 形沟槽进行了阻力测试,结果表明 V 形沟槽是最利于减阻的结构,最大减阻效果可达 10%,具有极大的减阻潜力。文献^[9-10]研究了 U 形、L 形、正弦形、半圆形和对称 V 形等沟槽结构形态时发现,对称 V 形具有最优的减阻性能。在管道运输方面,KSB 公司将多级泵的叶片表面设计成沟槽结构^[11-12],输送效率提高了 1.5%。Bechert D W 等人^[8]通过油洞试验对各种沟槽的阻力性能进行了研究,结果表明 V 形沟槽结构单元体的减阻性能最好,且在沟槽顶角为 60°时取得最大的减阻效果。Djenidi 等人^[13]运用 LDA 技术对 V 形沟槽表面减阻技术进行了研究,发现沟槽间距尺寸对减阻效果有很大影响,间距过大时会表现出增阻现象。Neumann D 等人^[14]对椭圆旋成体布置纵向沟槽表面的减阻效果进行了研究,实验表明 V 形沟槽的减阻率可达 9%。而攸连庆^[15]采用数值模拟方法对沟槽表面减阻性能进行了数值计算,结果发现 V 形沟槽顶角为 60°时减阻率为 11%。

肋条的尺寸由肋条高度以及肋条间距确定,通常用无量纲化表示,即无量纲肋条高度 h^+ 和无量纲肋条间距 s^+ ,满足公式(1)和(2):

$$h^+ = \frac{h \times U_\infty}{\nu} \sqrt{\frac{C_f}{2}} \quad (1)$$

$$s^+ = \frac{s \times U_\infty}{\nu} \sqrt{\frac{C_f}{2}} \quad (2)$$

式中: h^+ 为肋高度,无量纲; s^+ 为肋间距,无量纲; h 为肋高度,m; s 为肋条间距,m; U_∞ 为流速,m/s; ν 运动黏度, m^2/s ; C_f 为阻力系数,无量纲。

Walsh M J^[16-17]通过在低速湍流边界层上对一系列的纵向沟槽进行热线实验研究,发现 h^+ 和 s^+ 的范围在 $h^+ \leq 25$, $s^+ \leq 30$ 时具有减阻效果,对称 V 形肋条在 $h^+ = s^+ = 12$ 时达到最大减阻率 8%。Park S R 等人^[18]通过微型单传感器对特定尺寸 $h^+ \approx 14$, $s^+ \approx 28$ 的三角形肋条的不同位置进行不同速度的热线实验测量,得到减阻 4% 的效果,肋条减阻的主要原因是由于肋条底部切应力较小。Bechert D W 等人^[8]对油槽进行实验,将肋条的尺寸放大至 2~10 mm,得到最优肋条减阻率为 8.7%。宋娟娟等人^[19]通过数值模拟对肋条进行研究,当肋条高度一定时,减阻率及无量纲肋条高度均随雷诺数的增大而增加,具有最优减阻效果的 h^+ 值随雷诺数的改变而改变,并非局限在 $15 \leq h^+ \leq 25$ 范围内。

以小管径输气管道($\varphi = 25$ mm)为研究对象,如计算整个圆管内的肋条,肋条数量较多,网格数量较大,因此仅计算圆管的一部分肋条,以周期性边界给出,这样可以达到减少网格的计算量,同时提高计算效率,来分析肋条在小管径输气管中的减阻和流动状况,并与大管径输气管道($\varphi = 1\,219$ mm)进行对比,把大管径输气管道上进行仿生肋条的数值模拟近似转化为光滑平板上增加肋条的输气管道数值模拟^[20]。

1 数值模拟

1.1 计算域及边界条件

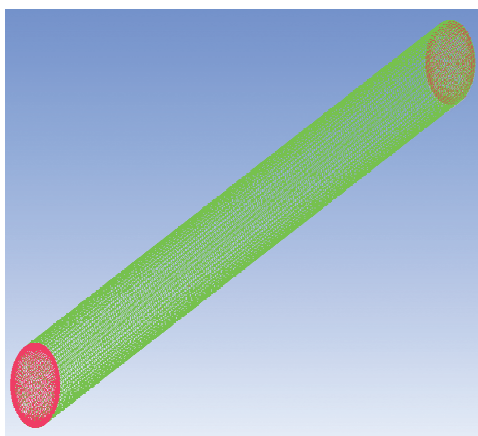
流向长度为 2 m,保证湍流充分发展,圆管的公称直径为 25 mm。进口处为速度入口,出口为自由流出口,壁面为无滑移壁面,肋条部分为旋转周期性边界条件。图 1 为计算域网格和切平面网格,轴向方向网格节点均匀分布,径向方向在靠近管壁处进行了网格加密,并进行网格无关性验证。

1.2 工质的选取

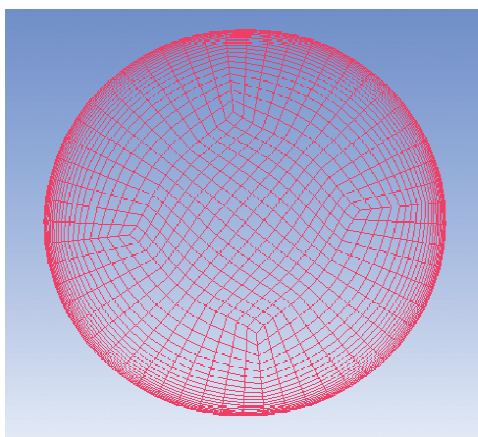
研究对象为天然气,采用 fluent 自带材料数据库中 CH_4 进行数值模拟。 $T = 288.16$ K, $\rho = 0.667\,9$ kg/m^3 , $\mu = 1.087 \times 10^{-5}$ $\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$ 。

1.3 肋条几何尺寸

由于输气管道的公称直径较小,选取具有最佳减阻效果的对称 V 形肋条^[21-22]进行数值模拟,对称 V 形肋条输气管道的几何尺寸取 $h = s = 0.51$ mm 以及 $h = s = 0.9$ mm^[21]。



a) 计算域网格



b) 切平面网格

图1 计算域网格及切平面网格

1.4 模拟参数设置

采用重整化 RNG(重整化群湍流模型)的增强壁面函数湍流模型进行数值模拟,可以得到较准确的模拟结果。离散格式采用二阶迎风格式,具有一定的稳定性并具有较高的精度。流场的迭代求解方法为 SIMPLEC 算法,具有较快的收敛速度,其残差精度为 10^{-6} 。

1.5 流动参数

城市燃气管道多为低压管道,流速较小,流速范围为 $2.5 \sim 12.5 \text{ m/s}$ 。流动参数见表 1。

表1 流动参数

流速 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$Re / (\times 10^3)$	湍动能参数	epsilon 参数
2.5	3.84	0.030 487	0.499 833
5	7.68	0.102 547	3.083 392
7.5	11.52	0.208 489	8.938 575
10	15.36	0.344 926	19.020 96
12.5	19.20	0.509 704	34.168 13

流速为 2.5 m/s 时,流动处于临界区域,在进行数值模拟时,近似其流动为湍流,当流速增大时,流动处于湍流区。

2 光滑输气管道的数值模拟

2.1 光滑输气管道的阻力系数模拟值

对光滑输气管道的整个圆周及肋条相匹配的部分圆周进行数值模拟, $h = s = 0.51 \text{ mm}$ V 形肋条(一个肋)的圆心角约 2.44° , $h = s = 0.90 \text{ mm}$ V 形肋条(一个肋)的圆心角约 4.43° 。表 2 为光滑输气管道的阻力系数误差值,误差值 1 对应于小尺寸的 V 形肋条误差百分比,误差值 2 对应于大尺寸的 V 形肋条误差百分比。

表2 光滑输气管道的阻力系数误差值

流速 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	整圆周模拟值	$h = s = 0.51 \text{ mm}$ 模拟值 / ($\times 10^{-4}$)	$h = s = 0.9 \text{ mm}$ 模拟值 / ($\times 10^{-4}$)	误差值 1 / (%)	误差值 2 / (%)
2.5	0.074	5.21	8.97	3.8	1.8
5	0.057	4.00	6.97	2.6	1.7
7.5	0.050	3.52	6.00	3.2	3.2
10	0.046	3.13	5.52	0.6	2.5
12.5	0.043	2.92	5.11	0.7	3.2

小尺寸的 V 形肋条在流速为 2.5 m/s 时,误差值最大为 3.8% ;大尺寸的 V 形肋条在流速为 7.5 m/s 和 12.5 m/s 时的误差最大,误差值为 3.2% 。在不同流速下,部分圆周阻力系数与整个圆周的阻力系数的误差均在 5% 以内。对小管径输气管道肋条减阻分析时,可采用与之相对应的部分圆周光滑输气管道进行对比。

2.2 V 形肋条输气管道的减阻率

V 形输气管道的减阻采用的是计算整个管道的总阻力系数,与光滑输气管道的模拟总阻力系数值进行对比,得到 V 形输气管道的减阻率。表 3 为不同速度下 V 形肋条输气管道的减阻率。

表3 V 形肋条输气管道减阻率

流速 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	减阻率 / (%)	
	$s = h = 0.51 \text{ mm}$	$s = h = 0.9 \text{ mm}$
2.5	3.3	1.2
5	3.5	2.9
7.5	5.7	-2.3
10	6.4	-1.3
12.5	6.5	-4.3

不同流速下,V 形肋条输气管道减阻效果不同, $h = s = 0.51 \text{ mm}$ V 形肋条在不同流速下具有减阻效果,而且随着流速增大,减阻效果增大,在流速为 12.5 m/s 时,减阻率为 6.5% ;而 $h = s = 0.9 \text{ mm}$ V 形肋条则在高于 7.5 m/s 时,输气管道增阻,在流速为 5 m/s 时具有最大

的减阻率为 2.9 %。因此,对于小管径输气管道,应采用 $h=s=0.51\text{ mm}$ V 形肋条。

3 光滑输气管道与 V 形肋条管道的流场分析

取来流速度 2.5 m/s , 轴向 1.5 m 位置处的切平面, 对小管径输气管道的流场进行分析, 云图可以更直观地表现流场的差异。

3.1 速度云图分析

光滑输气管道与 V 形肋条管道速度云图见图 2, 如图 2-a) 所示, 光滑输气管道的速度云图体现管道内流速的变化情况, 在靠近壁面处, 流速较小, 而输气管道中心位置处的流速较大, 满足圆管内的流速分布规律。而对不同尺寸对称 V 肋条输气管道的部分肋条输气管道进行分析, 如图 2-b) 和 2-c) 所示, V 形肋条输气管道在肋条位置的速度较小, 靠近轴心位置的速度较大, $h=s=0.51\text{ mm}$ 的 V 形输气管道在靠近轴心位置的速度比 $h=s=0.90\text{ mm}$ 的 V 形输气管道的小。这是由于沟槽底部的大部分流体受粘性作用影响, 导致等价光滑表面以下的流体速度梯度变小, 相当于增高粘性底层的厚度, 壁面平均速度梯度较小, 进而减小了边界层内流动剪切力, 导致摩擦阻力减小, 符合突出高度理论。

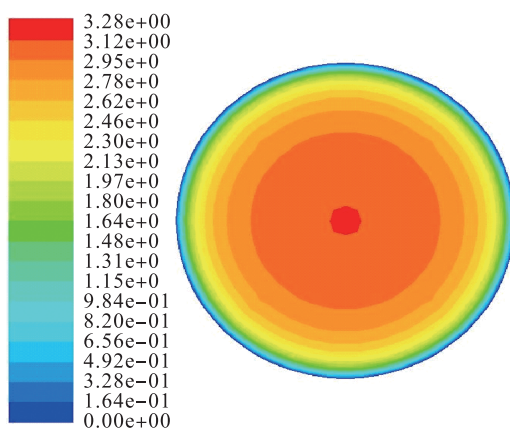
3.2 湍动能云图分析

对于小管径光滑输气管道, 湍动能沿着径向分布是不均匀的, 由壁面向轴心位置的径向距离不断增大, 湍动能是先增大而后减小。不同流速下的湍动能也有同样规律, 当流速较大时, 湍动能也增大。小、大管径光滑输气管道与 V 形肋条管道湍动能云图见图 3~4。在相同的天然气进口速度下, 对于小管径 V 形输气管道, 肋底湍动能较小, 沿着径向方向指向轴心, 湍动能先增大而后减小。而对于大管径光滑输气管道, 湍动能沿着法向方向是变化的, 随着法向距离的增大而逐渐增大; 在展向方向是均匀分布的。对比不同尺寸的 V 形肋条, $h=s=0.51\text{ mm}$ V 形输气管道在靠近肋条顶部的湍动能要比 $h=s=0.9\text{ mm}$ V 形输气管道的湍动能小, 因此, $h=s=0.51\text{ mm}$ V 形输气管道具有减阻效果。这是由于肋条阻滞了流向涡, 会在肋条顶部产生二次涡。沟槽的减阻效果主要是由于其尖角结构与湍流边界层内反向旋转的流向涡, 使得沟槽底部能够保留较多的低速流体, 多个沟槽作用下形成二次涡群, 二次涡群将流向涡与沟槽底部分隔开, 稳定沟槽底部的流场, 达到减阻效果。

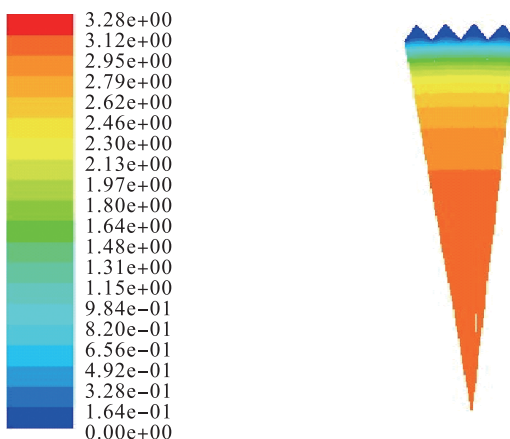
3.3 切应力云图分析

小、大管径光滑输气管道与 V 形肋条管道湍动能云图见图 5~6。由图 5~6 可知, 对于小管径输气管道, 光滑输气管道切应力沿轴向方向分布不均匀, 在入口处的切应力较大。切应力沿径向分布是均匀的。不同几何

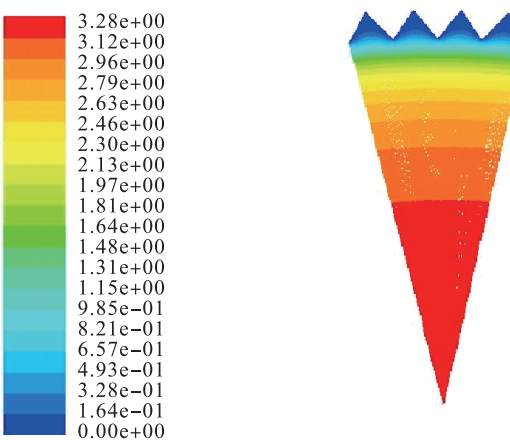
尺寸 V 形肋条输气管道切应力非均匀分布, 在肋底切应力较小, 在肋顶切应力较大。受入口处进口速度的影响, 切应力较大。对于小管径管道, $h=s=0.9\text{ mm}$ 和 $h=s=0.51\text{ mm}$ 的肋条, 在肋顶处的切应力几乎相同。而对于大管径输气管道, 光滑输气管道在展向位置的切应力是均匀分布的, 由于入口段受来流影响, 切应力较大, 随着流向距离的增大, 切应力逐渐减小。



a) 光滑输气管道

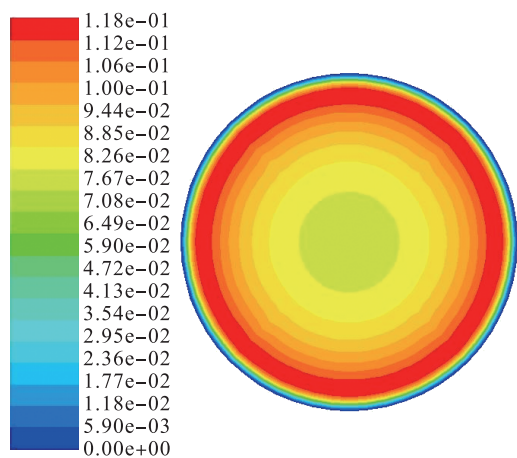


b) $h=s=0.51\text{ mm}$

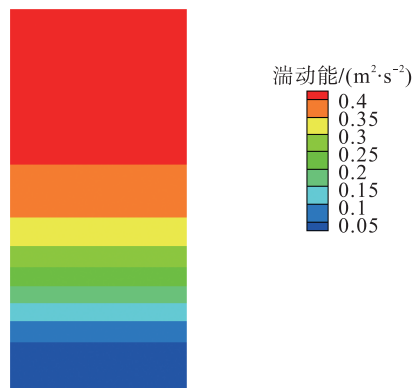


c) $h=s=0.9\text{ mm}$

图 2 光滑输气管道与 V 形肋条管道速度云图



a) 光滑输气管道



a) 光滑输气管道

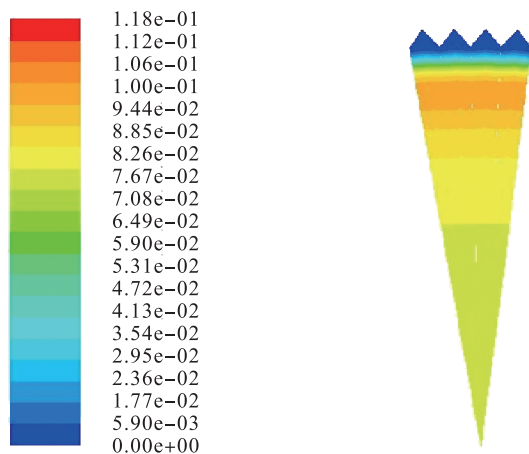
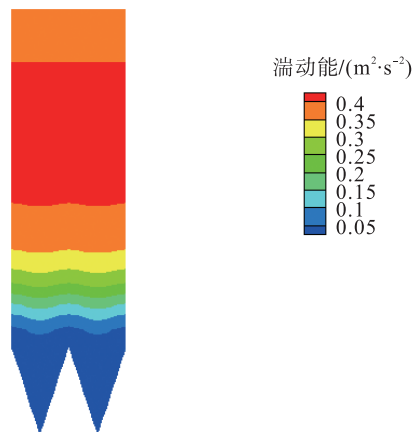
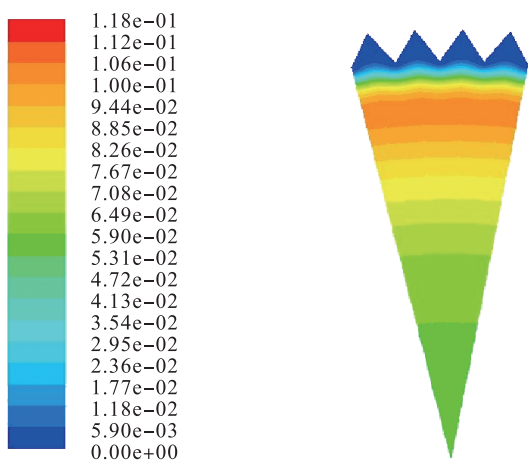
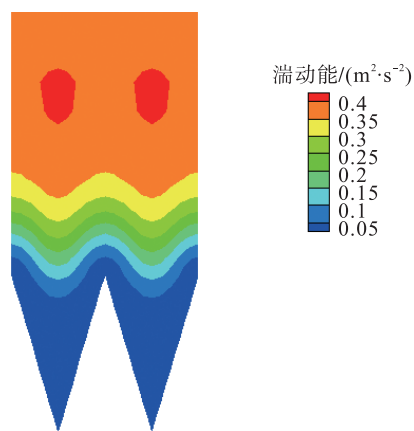
b) $h = s = 0.51 \text{ mm}$ b) $h = s = 0.51 \text{ mm}$ c) $h = s = 0.9 \text{ mm}$ c) $h = s = 0.9 \text{ mm}$

图3 小管径光滑输气管道与V形肋条管道湍动能云图

图4 大管径光滑输气管道与V形肋条管道湍动能云图

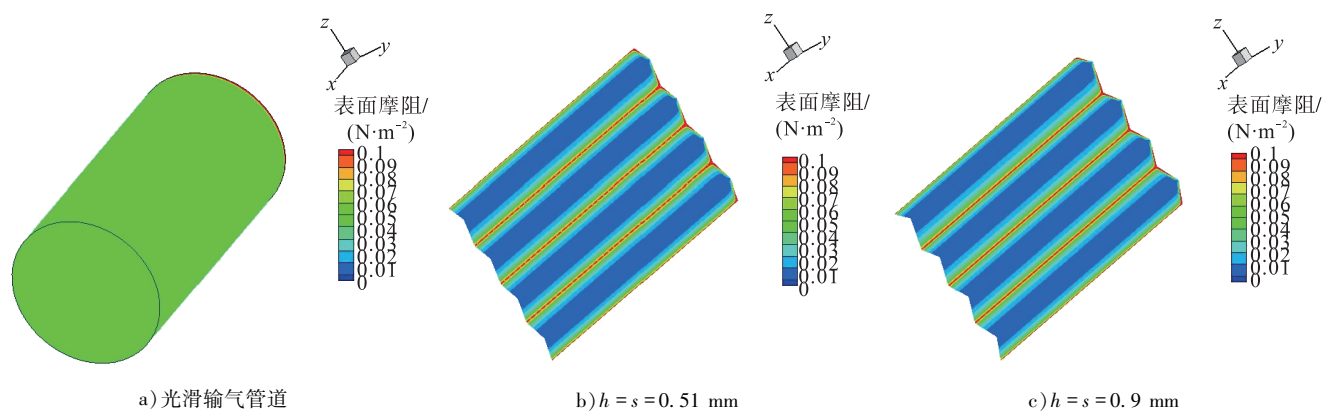


图 5 小管径光滑输气管道与 V 形肋条管道切应力云图

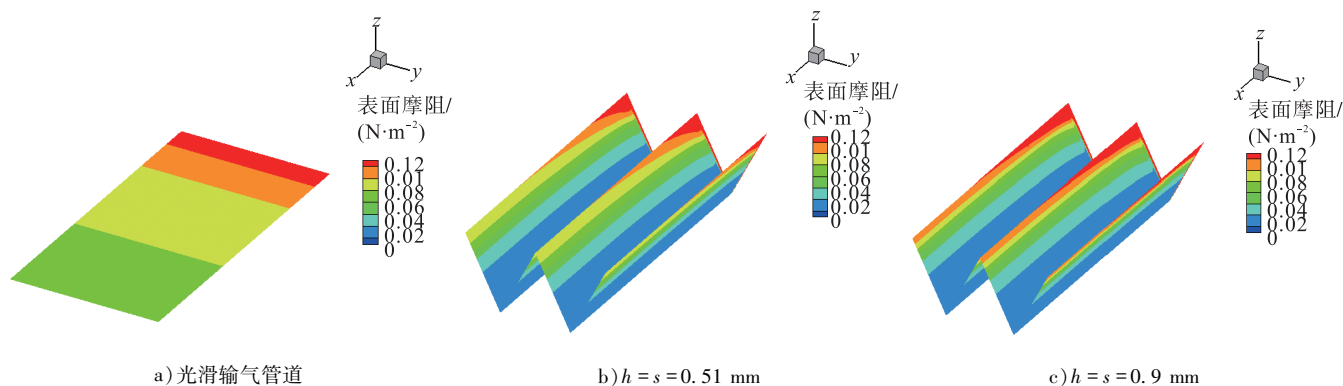


图 6 大管径光滑输气管道与 V 形肋条管道切应力云图

4 结论

1) 小管径输气管道上的对称 V 形肋条输气管道具有减阻效果, $h=s=0.51$ mm 对称 V 形肋条输气管道在不同流速下均具有减阻效果, 在流速为 12.5 m/s 时具有最优减阻效果为 6.5%, 而 $h=s=0.90$ mm 对称 V 形肋条输气管道则在流速增大到 7.5 m/s 时开始增阻, 且在流速为 5 m/s 时, 最优减阻效果为 2.9%。

2) 对于小管径输气管道, 对称 V 形肋条输气管道在肋底速度较小, 沿着径向方向指向轴心处的速度逐渐增大。靠近管壁位置的湍动能, $h=s=0.51$ mm 对称 V 形肋条输气管道要比 $h=s=0.9$ mm 对称 V 形肋条输气管道小。而对于大管径输气管道, $h=s=0.9$ mm 对称 V 形肋条输气管道比 $h=s=0.51$ mm V 形肋条输气管减阻效果好。

参考文献:

- [1] 王剑波, 王晓霖, 陈建磊, 等. 天然气减阻剂研究进展[J]. 表面技术, 2016, 45(2): 40-49.
Wang Jianbo, Wang Xiaolin, Chen Jianlei, et al. Research Progress in Drag Reducing Agents with Inhibition Performance for Natural Gas [J]. Surface Technology, 2016, 45(2): 40-49.
- [2] 张兴水, 曹杰. 输气管道减阻内涂层与减阻剂应用现状及效益分析[J]. 油气储运, 2013, 32(6): 675-678.
Zhang Xingshui, Cao Jie. Application and Economic Benefits of Internal Drag-Reduction Coating and DRA in Gas Pipeline [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2013, 32(6): 675-678.
- [3] 周昊, 徐啸, 赵会军, 等. 仿生非光滑表面减阻技术在输气管道中的应用[J]. 管道技术与设备, 2014, (2): 8-10.
Zhou Hao, Xu Xiao, Zhao Huijun, et al. Application of Biomimetics No-Smooth Surface Drag Reduction Technique to Oil and Gas Pipeline [J]. Pipeline Technique and Equipment, 2014, (2): 8-10.
- [4] Choi H, Moin P, Kim J, et al. Direct Numerical Simulation of Turbulent Flow over Riblets [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1993, 255(1): 503-539.
- [5] Lee S J, Jang Y G. Control of Flow Around a NACA 0012 Airfoil with a Micro-Riblet Film [J]. Journal of Fluids & Structures, 2005, 20(5): 659-672.
- [6] 马付良, 曾志翔, 高义民, 等. 仿生表面减阻的研究现状与进展[J]. 中国表面工程, 2016, 29(1): 7-15.
Ma Fuliang, Zeng Zhixiang, Gao Yimin, et al. Research Status and Progress of Bionic Surface Drag Reduction [J]. China Surface Engineering, 2016, 29(1): 7-15.
- [7] Hough G R. Drag Characteristics of V-Groove and Transverse

- Curvature Riblets [J]. Viscous Flow Drag Reduction, 1980, 72: 168 - 184.
- [8] Bechert D W, Bruse M, Hage W, et al. Experiments on Drag-Reducing Surfaces and Their Optimization with an Adjustable Geometry [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2000, 338: 59 - 87.
- [9] 陈莹, 陈迎春, 黄炜, 等. 旋成体表面沟槽减阻试验研究[J]. 实验流体力学, 2012, 26(2): 42 - 45.
- Chen Ying, Chen Yingchun, Huang Wei, et al. Experiment Investigation of Drag Reduction Using Riblets for a Slender Body [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2012, 26(2): 42 - 45.
- [10] 谢峰, 王秀英, 雷小宝. 鲨鱼皮减阻结构的几何建模与数值分析[J]. 系统仿真学报, 2014, 26(7): 1472 - 1476.
- Xie Feng, Wang Xiuying, Lei Xiaobao. Geometric Modeling and Numerical Analysis on Drag Reduction Structure of Shark's Surface [J]. Journal of System Simulation, 2014, 26(7): 1472 - 1476.
- [11] 李天然. 仿生减阻表面的数值研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- Li Tianran. Numerical Study of Bionic Surface for Drag Reduction [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.
- [12] Pauly C P. What is a Shark Doing in This Pump? [J]. World Pumps, 2001, 2001(423): 15 - 16.
- [13] Djenidi L, Antonia R A. Laser Doppler Anemometer Measurements of Turbulent Boundary Layer over a Riblet Surface [J]. AIAA Journal, 2012, 34(5): 1007 - 1012.
- [14] Neumann D, Dinkelacker A. Drag Measurements on V-Grooved Surfaces on a Body of Revolution in Axial Flow [J]. Applied Scientific Research, 1991, 48(1): 105 - 114.
- [15] 攸连庆. V形沟槽表面结构特征与减阻性能的关联性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.
- You Lianqing. Study on the Relationship Between Structure Characteristics and Drag Reduction Performance of V Shaped Groove Surface [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [16] Walsh M J. Riblets as a Viscous Drag Reduction Technique [J]. AIAA Journal, 1983, 21(4): 485 - 486.
- [17] Walsh M J. Turbulent Boundary Layer Drag Reduction Using Riblets; Riblets as a Viscous Drag Reduction Technique [C]//Proceedings of the AIAA 20th Aerospace Sciences Meeting, January 11 - 14 1982, Orlando, Florida, USA. Reston: AIAA.
- [18] Park S R, Wallace J M. Flow Alteration and Drag Reduction by Riblets in a Turbulent Boundary Layer [J]. AIAA Journal, 1994, 32(1): 31 - 38.
- [19] 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.
- Song Juanjuan, Xu Yu, Huang Chenwu, et al. Numerical Simulation of Drag Reduction by Non-Smooth Surfaces in Turbulent Flow [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(5): 771 - 774.
- [20] 黎润恒, 赵成璧, 唐友宏, 等. 三角形沟槽面圆管湍流减阻的大涡模拟数值研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(8): 2021 - 2026.
- Li Runheng, Zhao Chengbi, Tang Youhong, et al. Large Eddy Simulation on Turbulent Drag Reduction over Triangle Riblet Surfaces of Pipes [J]. Science Technology & Engineering, 2013, 13(8): 2021 - 2026.
- [21] 于洋, 刘德俊. 仿生肋条减阻技术在输气管道中的应用[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2017, 37(4): 23 - 28.
- Yu Yang, Liu Dejun. The Application of Bionic Riblets on Drag Reduction in Gas Transmission Pipeline [J]. Journal of Liaoning Shihua University, 2017, 37(4): 23 - 28.
- [22] 刘德俊, 于洋, 王国付, 等. 三种形状肋条减阻特性与机理研究[J]. 工程热物理学报, 2016, 37(7): 1411 - 1415.
- Liu Dejun, Yu Yang, Wang Guofu, et al. The Characteristic and Mechanism of Three Different Shapes of Riblets on Drag Reduction [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(7): 1411 - 1415.