

灌溉输水管道沟槽减阻研究

陈雪丽, 魏正英*, 马睿佳, 马胜利, 马超

(西安交通大学 机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049)

摘要:【目的】探索沟槽结构对灌溉输水管道的减阻作用。【方法】采用SA与RNG $k-\epsilon$ 湍流模型,模拟分析了沟槽在湍流流动中的减阻效果,并与Bechert的试验结果进行了对比;采用RNG $k-\epsilon$ 湍流模型对灌溉输水管道开展了0.1~1 mm尺度下的V形沟槽减阻研究;采用LES湍流模型对沟槽减阻机理进行了探索。【结果】①相较于SA湍流模型,RNG $k-\epsilon$ 湍流模型的计算结果与Bechert的试验结果相比误差更小,为4.6%,即RNG $k-\epsilon$ 湍流模型计算精确度更高;②夹角为60°的V形沟槽,当沟槽边长为0.5 mm时对灌溉输水管道具有最佳减阻效果,减阻率为7.17%,对应无量纲沟槽间距 $s^+=15.2$,无量纲沟槽尺寸 $l_g^+=10$;③沟槽中存在很小的涡旋,这些小涡旋可能是沟槽在湍流中具有减阻作用的原因之一。【结论】夹角为60°的V形沟槽对灌溉输水管道的最佳减阻效果为7.17%。

关键词:灌溉管道; 沟槽减阻; 数值模拟; RNG $k-\epsilon$ 湍流模型

中图分类号:S277

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.2016.0262

陈雪丽,魏正英,马睿佳,等. 灌溉输水管道沟槽减阻研究[J]. 灌溉排水学报,2018,37(3):90-95.

0 引言

随着可利用水资源的减少,世界各国都越来越重视水资源节约问题。目前我国农业用水约占国民总用水量的70%^[1],所以发展高效节水农业势在必行。随着微灌技术的发展,农业节水已取得一定成效^[2],但灌溉需将水输送到农作物的根部,有时受地域限制,需长距离输水,这就造成水资源在输送过程中产生很大能源浪费,致使农业用水利用率低下。因此,研究灌溉输水管道减阻方法对提高农业用水利用率具有重要意义。

20世纪30年代至今,人们一直致力于研究湍流减阻技术,减小摩擦阻力的方法主要包括微气泡喷射法^[3]、壁面吸入法^[4]、聚合物添加法^[5]、疏水表面处理法^[6]以及沟槽表面处理法^[7],其中,沟槽表面处理法即在表面加工出一系列特定形状的微小结构并按照一定规则排布^[8],由于这种方法易于加工,生产成本低,便于维护,一直被广大研究者所青睐。Walsh等^[8]最先开展沟槽平板减阻研究,分别研究了V形、矩形、半圆形沟槽的减阻效果,其中沿流向对称的V形沟槽结构表面具有最佳减阻效果,当沟槽的无量纲间距 $s^+ \leq 30$ 且无量纲高度 $h^+ \leq 25$ 时,沟槽具有减阻效果。Ricardo等^[7]研究发现沟槽无量纲间距 $s^+=10 \sim 20$,无量纲尺寸 $l_g^+=10.7 \pm 1$ 时,具有最佳减阻效果。胡海豹等^[9]进行回转体沟槽表面水洞实验,发现沟槽结构最佳减阻效果可达6.34%。前人大多针对船舶、航空、风力发电、赛车、天然气运输领域进行沟槽减阻研究,尚未有针对灌溉输水管道沟槽减阻方面的研究。为此,对灌溉输水管道进行沟槽减阻研究,减少灌溉管道输水能源浪费。

1 数值模拟方法选用及验证

1.1 沟槽减阻数值模拟计算方法

由于Bechert等^[10]进行了2个平板沟槽减阻试验,且得到了广大研究者的认同,故在此先利用2个平板湍流模型验证沟槽减阻数值模拟方法的正确性。将2个平板湍流模型上表面设为光滑表面,下表面设为沟槽

收稿日期:2016-12-19

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0400202);国家科技支撑计划项目(2015BAD24B01);中央高校基本科研业务费专项资金项目(SK2013jdhz13)

作者简介:陈雪丽(1993-),女。博士研究生,主要从事灌水器性能分析和结构优化研究。E-mail: 1969076283@qq.com

通信作者:魏正英(1967-),女。教授,博士生导师,主要从事数字化产品开发与快速制造、快速成型与模具制造、微流体器件设计与制造研究。E-mail: zywei@mail.xjtu.edu.cn

表面,计算模型如图1所示,定义 x 方向为展向方向, y 方向为法向方向, z 方向为流向方向,流动沿着正 z 方向进行,沟槽形状为 $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 的三角形,法向高为 $2\delta=20\text{ mm}$,流向长为 $2\pi\delta\approx 63\text{ mm}$,展向宽为 20 mm 。模型网格划分采用结构化网格,在展向与流向方向网格节点均匀分布,法向方向非均匀分布,网格在近壁区分布密集,中心区分布稀疏,如图2所示。模拟求解时流向和展向均采用周期性边界,用质量流量条件进行初始化,压力速度耦合采用SIMPLEC算法,用二阶离散格式进行离散,收敛精度为 10^{-5} 。

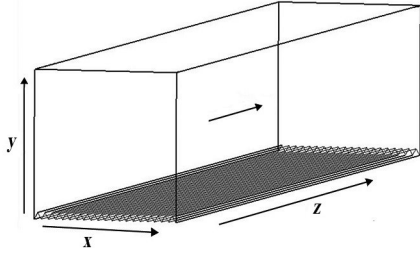


图1 2个平板计算模型

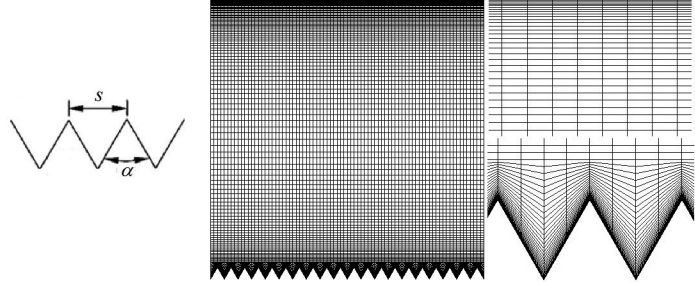


图2 2个平板计算模型网格划分

1.2 沟槽减阻数值模拟方法验证

研究沟槽结构对湍流的减阻作用,需考虑沟槽结构对壁面边界层的影响作用。综合计算时间、收敛难易与计算精度,初选SA模型与RNG $k-\epsilon$ 模型。分别采用SA模型与RNG $k-\epsilon$ 模型对雷诺数为5 600的2个平板湍流流动进行沟槽减阻模拟,将模拟结果与Bechert等^[10]的2个平板湍流沟槽减阻试验进行对比,分析2种湍流模型数值模拟计算的准确性与正确性。

壁面摩擦阻力与壁面摩擦阻力系数计算公式为:

$$drag_w = \tau_w \times A_w, \quad (1)$$

$$C_f = drag_w / (0.5 \rho u^2 A_w) = \tau_w / (0.5 \rho u^2), \quad (2)$$

式中: τ_w 为壁面切应力; A_w 为壁面面积; ρ 为流体密度; u 为流体速度。

减阻率(DR)的计算公式为:

$$DR = (drag_{ws} - drag_w) / drag_{ws} \times 100\%, \quad (3)$$

式中: $drag_w$ 为沟槽壁面的摩擦阻力; $drag_{ws}$ 为光滑壁面的摩擦阻力。

沟槽无量纲参数计算公式为:

$$s^+ = s \times u_\tau / \nu, \quad (4)$$

$$h^+ = h \times u_\tau / \nu, \quad (5)$$

$$l_g^+ = (A_g^+)^{1/2}, \quad (6)$$

式中: s 为沟槽间距; h 为沟槽高度; A_g 为沟槽面积; ν 为运动黏滞系数; u_τ 为壁面摩擦速度, $u_\tau = (\tau_w / \rho)^{1/2}$ 。

SA模型与RNG $k-\epsilon$ 模型对雷诺数为5 600的2个平板湍流流动沟槽减阻模拟结果如表1所示。由表1可知,对SA模型,沟槽无量纲间距 s^+ 为17.90,减阻率为6.53%;对RNG $k-\epsilon$ 模型,沟槽无量纲间距 s^+ 为18.82,减阻率为5.23%。在Bechert等^[10]的试验中,60°的V形沟槽,无量纲间距 s^+ 为17.90时,沟槽减阻率为5.05%,无量纲间距 s^+ 为18.82时,沟槽减阻率为5%。与Bechert等^[10]的试验结果相比,SA模型计算误差为29.3%,RNG $k-\epsilon$ 模型计算误差为4.6%。由此可见,对比于SA模型,RNG $k-\epsilon$ 模型数值模拟计算精度更高;RNG $k-\epsilon$ 模型的计算结果与Bechert等^[10]的试验结果相比误差不超5%,验证了使用RNG $k-\epsilon$ 模型进行灌溉输水管道沟槽减阻计算的可信度与准确性。

表1 雷诺数为5 600的平板湍流流动沟槽减阻计算结果

参数	SA模型	RNG $k-\epsilon$ 湍流模型
光滑壁面剪切力/Pa	0.323	0.357
光滑壁面摩擦阻力系数	0.008 2	0.009 0
光滑壁面阻力/N	4.072×10^{-4}	4.494×10^{-4}
沟槽壁面剪切力/Pa	0.151	0.169
沟槽壁面摩擦阻力系数	0.007 6	0.008 5
沟槽壁面阻力/N	3.806×10^{-4}	4.259×10^{-4}
沟槽无量纲间距	17.90	18.82
沟槽无量纲间距	15.50	16.30
沟槽无量纲尺寸	11.78	12.38
减阻率/%	6.53	5.23

2 灌溉输水管道沟槽减阻研究

灌溉输水管道一般常用的PVC/PE管径为:400、355、315、250、200、180(*)、160、140(*)、125、110、90、75、63、50、40、32、25、20、15、12、8 mm(为外圆直径,标注*为不常用管)。采用各个管径的经济流速判断管内流态,对于低压管道输水灌溉系统,流速一般控制在0.5~1.3 m/s之间,最小流速为0.3~0.4 m/s^[1]。以最小流速0.3 m/s计算,外径为16 mm的管也能得到4 532的雷诺数,而且实际情况会复杂得多,故灌溉输水管道中的流态为湍流。在前文中已经详细论证了RNG $k-\epsilon$ 模型模拟沟槽减阻数值计算的正确性,故利用RNG $k-\epsilon$ 模型对沟槽在灌溉输水管道中的减阻作用进行研究。

2.1 数值模型

圆管沟槽减阻需建立2个模型,一个为光滑表面圆管,一个为沟槽表面圆管,保证二圆管的横截面积及模型长度相同,且在相同流场条件下进行模拟对比。为保证二圆管的横截面积相同,定义有效直径为:

$$d_e = (4A_{\text{riblet}}/\pi)^{1/2}, \quad (7)$$

式中: A_{riblet} 为沟槽模型的横截面积。计算雷诺数和阻力时均使用圆管的有效直径。

在外径32 mm的圆周上遍布60°的V形沟槽作为沟槽圆管模型,利用式(7)计算有效直径,取光滑圆管的直径为 d_e ,流向方向长为 2π 倍的有效直径,即 $2\pi d_e$ 。对边长分别为0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0 mm的60° V形沟槽进行计算模拟分析,选出具有最佳减阻效果的沟槽尺寸。由于圆管具有轴对称性,故建立1/4计算模型,如图3所示,计算时采用对称边界条件。模型网格划分采用结构化网格,如图4所示,对网格进行多次计算修正,保证第一层网格落在 $y^+ \approx 1$ 处,确认最终网格数量使得继续细化网格对计算结果影响不大。采用RNG $k-\epsilon$ 湍流模型进行模拟,流向采用周期边界条件,壁面为无滑移壁面,用质量流量条件进行初始化,保证流速为0.5 m/s,压力速度耦合采用SIMPLEC算法,求解器中动量、湍流动能、湍流耗散率均采用二阶迎风格式进行离散,残差收敛标准取 10^{-5} 。

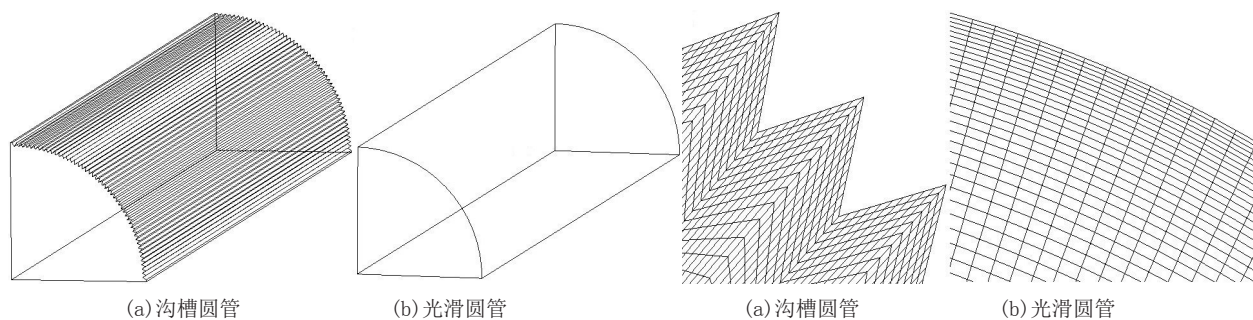


图3 沟槽圆管及对应的光滑圆管模型

图4 沟槽圆管网格及对应的光滑圆管模型网格

2.2 模拟结果分析

首先,以边长0.5 mm、夹角60°的V形沟槽的减阻计算结果为例进行详细分析,表2对不同管径处沟槽圆管与光滑圆管的流速进行了对比分析,图5分析了沟槽结构对流动中湍流速度、湍流强度、湍流动能、湍流耗散率的影响,图中线 $x=0$ 左侧为沟槽圆管计算结果,右侧为光滑圆管计算结果。由表2与图5(a)可知,在靠近壁面处,沟槽圆管中槽顶、槽中、槽底所对应速度均低于光滑圆管处速度,但在远离壁面区,沟槽圆管中槽顶、槽中、槽底所对应速度均大于光滑圆管处速度,且离壁面越远即管径接近0处,2种圆管的速度差距越大,同时在远离壁面区,沟槽槽顶、槽中、槽底处的速度趋于一致;由图5(b)—图5(d)可知,沟槽圆管中的湍流强度、湍流动能和湍流耗散率的峰值均低于光滑圆管端的峰值,且圆管中心处即半径为0处沟槽圆管中的湍流强度、湍流动能和湍流耗散率均低于光滑圆管端。由此可知,沟槽结构在灌溉输水管道中起减阻作用。

表2 不同管径处沟槽圆管与光滑圆管速度

半径/mm	沟槽圆管			光滑圆管		
	槽顶处速度/(m·s ⁻¹)	槽中处速度/(m·s ⁻¹)	槽底处速度/(m·s ⁻¹)	槽顶处速度/(m·s ⁻¹)	槽中处速度/(m·s ⁻¹)	槽底处速度/(m·s ⁻¹)
0	0.600 6	0.600 6	0.600 6	0.596 2	0.596 2	0.596 2
3	0.596 7	0.596 8	0.596 9	0.592 0	0.592 0	0.592 0
6	0.583 2	0.583 5	0.593 0	0.577 8	0.577 8	0.577 8
9	0.560 8	0.561 2	0.561 6	0.554 3	0.554 3	0.554 3
12	0.521 2	0.524 5	0.525 5	0.516 9	0.516 9	0.516 9
15	0.347 4	0.353 6	0.359 6	0.380 0	0.379 9	0.379 9

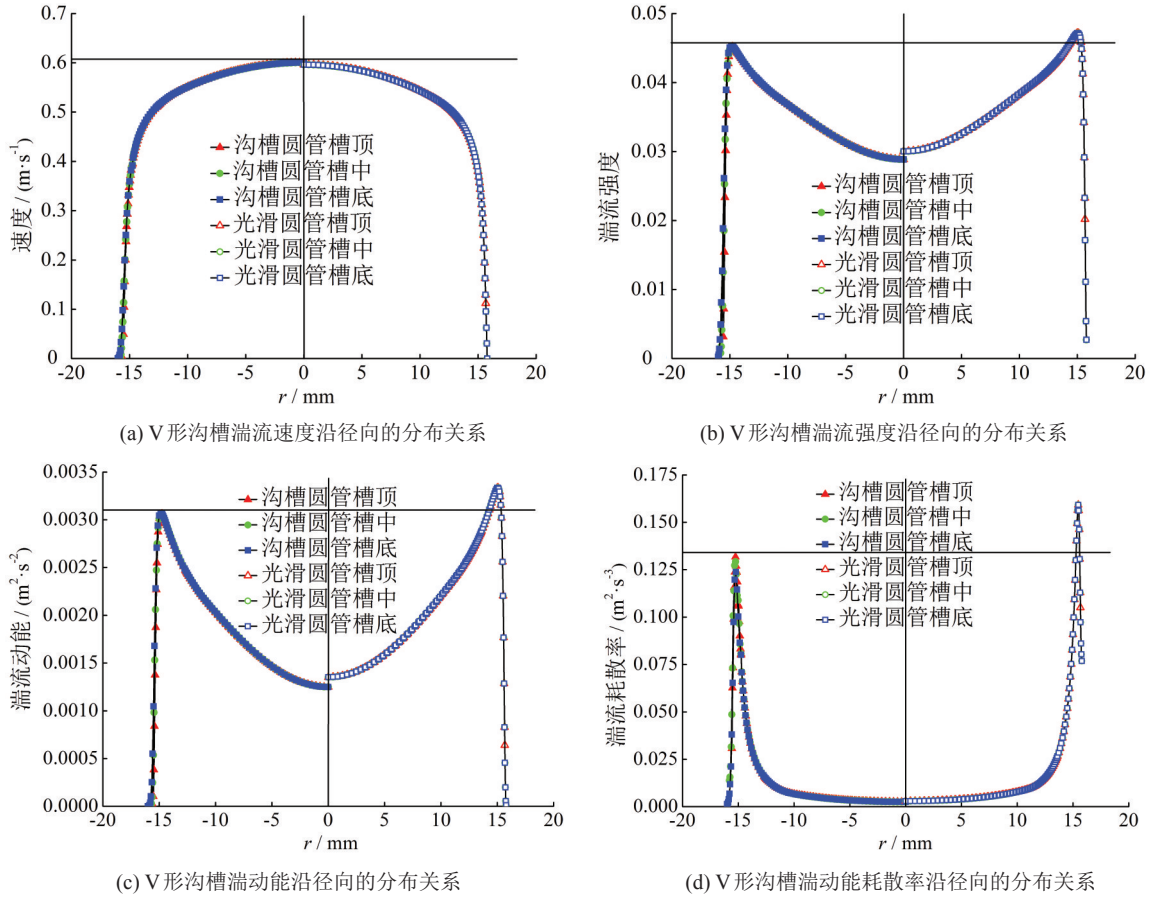


图5 沟槽结构对灌溉输水圆管减阻作用的计算结果

其次,分别计算了边长为0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0 mm和夹角为 60° 的V形沟槽在圆管中的减阻率,并分析了减阻效果与沟槽尺寸、沟槽无量纲间距及沟槽无量纲尺寸的关系,结果如图6所示。由图6可知,并不是沟槽尺寸越小,减阻率就会越大,也不是沟槽尺寸越大,减阻率就会越大;对管径为32 mm的圆管,沟槽尺寸为0.5 mm时, 60° 夹角V形沟槽减阻效果达到最好,减阻率为7.17%,对应无量纲间距 $s^+=15.2$,沟槽无量纲尺寸 $l_g^+=10$ 。 $l_g^+=10$ 落在了Bidkar等^[6]研究的最佳减阻效果所对应沟槽无量纲尺寸区间[9.7, 10.7]内。

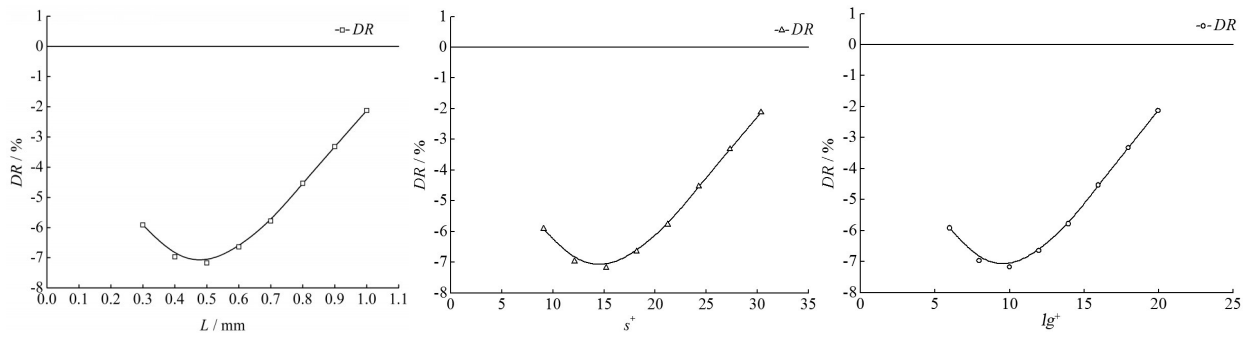


图6 沟槽减阻效果与沟槽尺寸、沟槽无量纲间距、沟槽无量纲尺寸的关系

3 沟槽减阻机理研究

由于湍流机理并不是完全清楚,所以到目前为止沟槽减阻机理一直处于探索阶段,主要有2种沟槽减阻机理被大多数研究者认同。Bacher等^[12]在1985年提出了第一种理论,即“第二涡群理论”,认为沟槽产生的二次涡能够削弱沟槽上方流向涡的强度,从而起到减阻效果。另一种理论是Bechert等^[13]在1989年提出的突出高度概念,对速度曲线定义了一个等效的原点,这个原点是通过将沟槽面等效为光滑面的速度曲线确定的,突出高度就是这个等效原点到沟槽顶端的距离,进而形成“突出高度理论”,在等效原点以下沟槽

内的流动,绝大部分被黏性所阻滞,相当于增加了黏性底层的厚度,故降低了近壁面的平均速度梯度,增加了边界层流动稳定性,结果导致了表面摩阻的减少^[14]。针对前人研究基础,文章也对沟槽减阻机理进行了初步探索。

由于LES亚格子模型较RNG $k-\epsilon$ 模型更为精细,且可以模拟得到湍流中的漩涡,故利用LES亚格子模型对V形沟槽在湍流中的减阻机理进行探索。由于LES亚格子模型需要划分网格非常细密才能保证计算准确性及捕捉到细小湍流漩涡,造成计算量非常大,所以选取的计算模型较小,仍用2个平板模型进行沟槽减阻探索研究,计算模型选取 y 方向为法向,高为 $2\delta=0.2\text{ mm}$, x 方向为展向,宽为 $0.289\pi\delta=0.0908\text{ mm}$, z 方向为流向,长为 $\pi\delta=0.314\text{ mm}$,沟槽形状为 $0.01135\text{ mm}\times0.01135\text{ mm}\times0.01135\text{ mm}$ 的三角形。流向和展向均采用周期性边界条件,对雷诺数为5600的湍流进行计算模拟,计算结果如图7所示(图中下部为沟槽壁面,上部为光滑壁面),右侧小图为沟槽中流动的放大图。由图7(a)可知,在垂直流向平面内,沟槽中的流体形成了较小的涡,而光滑壁面没有这种现象;由图7(b)可知,光滑壁面区域速度的波动明显大于沟槽壁面区域,光滑壁面区域存在很大的涡旋,而沟槽壁面区域涡旋明显较小,且在沟槽中都存在很小的涡旋,这些沟槽中产生的小涡旋可能是沟槽在湍流中具有减阻作用的原因之一。

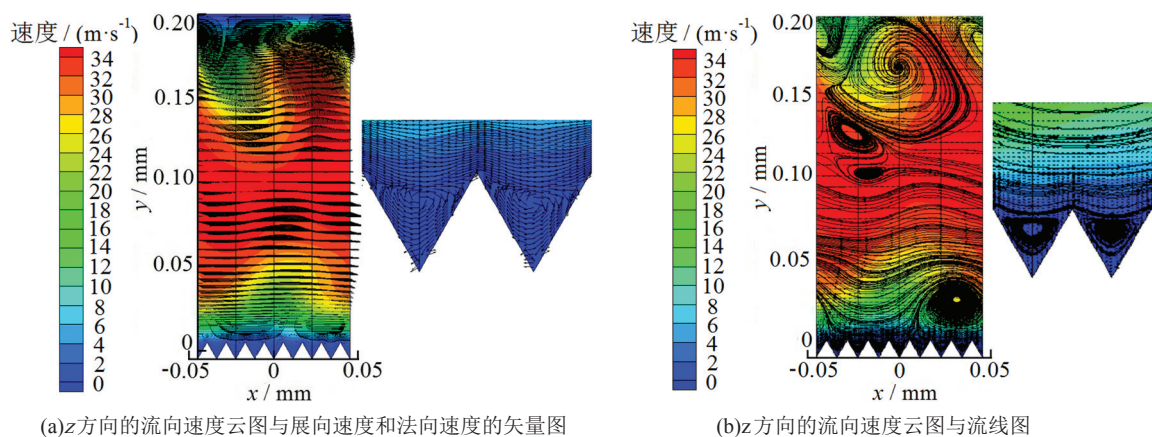


图7 LES湍流模型对两平板沟槽湍流流动的计算结果

4 结论与讨论

1)选用RNG $k-\epsilon$ 模型模拟计算沟槽湍流减阻是可行的,模拟计算结果与Bechert等^[10]的试验结果相比误差低于5%。在湍流中,沟槽结构可以降低近壁区的湍流强度,起到减阻作用,且在每个小沟槽中都存在很小的涡旋,这可能与沟槽的减阻机理有关。

2)管径32 mm、流速0.5 m/s的灌溉输水管道,对于夹角为 60° 的V形沟槽,当沟槽边长为0.5 mm时,具有最佳减阻效果,为7.17%,对应沟槽无量纲间距为15.2,沟槽无量纲尺寸为10,此结果落在Ricardo等^[7]研究得出的最佳减阻效果所对应的沟槽无量纲尺寸区间 $[9.7, 10.7]$ 内。

文章仅对管径32 mm的灌溉输水管道 60° 夹角的V形沟槽减阻效果,后期需对不同管道尺寸、不同角度的V形沟槽进行减阻研究,对不同管径的管道均给出最佳沟槽减阻角度与尺寸;文章主要是进行了灌溉输水管道沟槽减阻数值模拟研究,后期需加工带沟槽的输水管道进行试验验证;由于沟槽减阻原理比较复杂,文章只进行了初步探索,后期需对沟槽结构的减阻机理进行进一步的研究。

参考文献:

- [1] 张丽君, 时述凤, 杨天礼. 我国农业灌溉用水定额编制和应用现状[J]. 中国水利, 2014 (9): 10-12.
- [2] 吴玉芹, 杨鹏, 刘思若. 关于我国微灌技术发展的几点思考[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34 (12): 1-4.
- [3] SANDERS W C, WINKEL E S, DOWLING D R, et al. Bubble friction drag reduction in a high-Reynolds-number flat-plate turbulent boundary layer [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2006, 552:353-380.
- [4] ANTONIA R A, ZHU Y, SOKOLOV M. Effect of concentrated wall suction on a turbulent boundary layer [J]. Physics of Fluids, 1995, 7(10):2 465-2 474.
- [5] LUMLEY J L. Drag reduction in turbulent flow by polymer additives[J]. Journal of Polymer Science Macromolecular Reviews, 1973, 7(1):263-290.
- [6] BIDKAR R, LEBLANC L, KULKAMI A, et al. Skin-friction drag reduction in the turbulent regime using random-textured hydrophobic surfaces[J]. Physics of Fluids, 2014, 26(8):263-290.

- [7] GARCIA-MAYORAL R, JIMENEZ J. Hydrodynamic stability and breakdown of the viscous regime over riblets[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2011, 678(4): 317-347.
- [8] WALSH M J, LINDEMANN A M. Optimization and application of riblets for turbulent drag reduction[C]//AIAA 22nd Aerospace Science Meeting. Reno, Nevada, 1984: 1-10.
- [9] 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]. 力学季刊, 2006, 27(2): 267-272.
- [10] BECHERT D W, BRUSE M, HAGE W, et al. Experiments on drag-reducing surface and their optimization with an adjustable geometry[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1997, 338: 59-87.
- [11] 施炯林. 节水灌溉技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- [12] BACHER E V, SMITH C R. A combined visualization-anemometry study of the turbulent drag reducing mechanisms of triangle micro-groove surface modifications[C]//American Institute of Aeronautics and Astronautics, Shear Flow Control Conference, Boulder, CO, Mar.12-14, 1993. 11 p. USAF-supported research. 1985, 1.
- [13] BECHERT D W, BARTENWERFER M. The viscous flow on surfaces with longitudinal ribs[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1989, 206: 105-129.
- [14] 杨海霞. 沟槽面湍流边界层减阻的数值研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.

Research on Drag Reduction of Irrigation Delivery Pipeline

CHEN Xueli, WEI Zhengying*, MA Ruijia, MA Shengli, MA Chao

(State Key Lab for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: **【Objective】** Explore the drag reduction effect of riblet structure on the irrigation pipeline. **【Method】** The drag reduction effect of the riblet in the turbulent flow was simulated by SA and RNG $k-\varepsilon$ turbulence model, and compared with the results of Bechert's test, then the RNG $k-\varepsilon$ turbulence model was used to analyze the V-shaped riblet drag reduction at the scale of 0.1~1 mm for the irrigation pipeline, finally the LES turbulence model was used to explore the drag mechanism of the riblet structure. **【Result】** Compared with the SA turbulence model, the RNG $k-\varepsilon$ turbulence model had the smaller error compared with the Bechert's test result, which was 4.6%, in other word, the RNG $k-\varepsilon$ turbulence model was more accurate. For a V-shaped riblet with the angle of 60° , when the riblet length was 0.5 mm, it had the best drag reduction effect on the irrigation pipeline, the drag reduction rate was 7.17%, corresponding to the dimensionless pitch s^+ was 15.2, and dimensionless riblet size l_g^+ was 10. There were small vortices in the riblets that might be one of the causes of the drag reduction in the turbulence. **【Conclusion】** The best drag reduction effect of the V-shaped riblet with an angle of 60° for the irrigation pipelines was 7.17%.

Key words: irrigation pipeline; riblet drag reduction; numerical simulation; RNG $k-\varepsilon$ turbulence model

责任编辑:白芳芳