

单翼迷宫式滴灌带进出水口数、 梯形流道齿数对抗堵塞性能的影响

陶娟琴^{1,2}, 陶洪飞^{1,2*}, 李巧^{1,2}, 刘姚^{1,2}, 张慧^{1,2},
马合木江·艾合买提^{1,2}, 姜有为^{1,2}, 杨文新^{1,2}

(1.新疆农业大学 水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052;
2.新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 乌鲁木齐 830052)

摘 要:【目的】研究进水口数、梯形流道齿数、出水口数对单翼迷宫式滴灌带抗堵塞性能的影响。【方法】采用物理试验、数值模拟、建立线性数学模型等方法, 设计 9 组工况进行数值模拟, 研究额定流量为 1.8 L/h 的单翼迷宫式滴灌带的水沙两相流场, 以及滴灌带不同进出水口数、梯形流道齿数对流态指数、流量系数的影响。【结果】SST $k-\omega$ 两方程低雷诺数紊流模型更加适用于单翼迷宫式滴灌带流场的数值模拟; 从进水口到梯形流道再到出水口, 泥沙颗粒质量浓度逐渐变小; 滴灌带第 5 进水口为主要进水口, 第 3 出水口为主要出水口; 进水口数、梯形流道齿数、出水口数对流态指数影响极小, 对流量系数的影响显著性排序为梯形流道齿数 > 出水口数 > 进水口数; 构建了流量系数与三因素之间的多元线性模型, 该模型决定系数为 0.987, 精度较好。【结论】在梯形迷宫流道尺寸相同时, 梯形流道齿数越少流道内部流速越大, 更有利于泥沙颗粒排出流道。构建的流量系数与三因素的公式可实现出水口位置精准灌溉植物, 合理利用土地资源。

关键词: 单翼迷宫式滴灌带; SST $k-\omega$ 紊流模型; 水沙两相流; 进水口数; 梯形流道齿数; 出水口数

中图分类号: S275.6

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023053

OSID: 

陶娟琴, 陶洪飞, 李巧, 等. 单翼迷宫式滴灌带进出水口数、梯形流道齿数对抗堵塞性能的影响[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(9): 53-60.

TAO Juanqin, TAO Hongfei, LI Qiao, et al. Effects of the Number of Inlet and Outlet Ports and Trapezoidal Channel Teeth on Anti-clogging Performance of a Single-wing Labyrinth Drip Irrigation Belt[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(9): 53-60.

0 引言

【研究意义】压力补偿灌水器水力性能好, 但结构复杂造价高, 因而大多灌水器都采用迷宫式流道, 其中单翼迷宫式滴灌带被广泛应用^[1]。单翼迷宫式滴灌带流道结构的优劣对滴灌系统的抗堵塞性能和寿命影响很大, 研究进出水口和梯形流道结构的流动机理和优化流道结构是提升滴灌系统水力性能的关键之一^[2]。

【研究进展】诸多紊流模型被应用于计算灌水器流场, 如 Wei 等^[3]应用标准 $k-\epsilon$ 模型计算贴片式和单翼迷宫式灌水器流场, Wei 等^[4]应用 Renormalization Group (RNG) $k-\epsilon$ 模型计算贴片式灌水器流场, Chen 等^[5]应用 Shear Stress Transport (SST) $k-\omega$ 模型计算压力补偿式灌水器流场, Palau-salvador 等^[6]应用

Laminar 模型计算圆柱形灌水器流场, Zhang 等^[7]应用雷诺应力模型计算贴片式灌水器流场, Wu 等^[8]应用 Large Eddy Simulation (LES) 模型计算圆柱形灌水器流场等。张传杰等^[9]、唐雪林等^[10]应用标准 $k-\epsilon$ 模型对梯形迷宫流道 8 个流道单元进行数值模拟, 研究流场的变化规律。谢巧丽等^[11]以内镶贴片式滴灌带为研究对象, 应用 RNG $k-\epsilon$ 紊流模型对进口结构数值模拟, 分析进口数目、进口宽度、进口高度和缓水区深度对滴头水力性能的影响。郭霖等^[12]在众多紊流模型中证明 SST $k-\omega$ 紊流模型更适用于计算双向对冲流灌水器流场, 并应用该紊流模型计算灌水器流量和流道内各点的流速。影响单翼迷宫式滴灌带水力性能的因素很多, 如流道转角、流道宽度、流道深度、齿参差值、齿高、齿数、齿间距、齿底距、齿型等^[13]。吴争光等^[14]认为影响流量的因素为流道深度、流道宽度、流道转角。胡宇祥等^[15]认为影响流态指数的因素为齿参差值、齿高、齿数、流道转角、齿间距。谢巧丽等^[16]认为流量系数随流道转角和齿间距的增大而增大, 流态指数随着齿间距的增大呈先减小后增大的趋势。马晓鹏等^[17]以 4 种单翼速宫滴灌带为研究对

收稿日期: 2023-02-18 修回日期: 2023-05-05 网络出版日期: 2023-09-18
基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项项目 (2022A02003-4); 新疆农业大学研究生科研创新项目 (XJAUUGRI2022020)

作者简介: 陶娟琴 (1997-), 女。硕士研究生, 主要从事节水新技术与新设备以及计算水力学研究。E-mail: 2665501228@qq.com

通信作者: 陶洪飞 (1987-), 男。副教授, 博士生导师, 主要从事节水新技术与新设备以及计算水力学研究。E-mail: 304276290@qq.com

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

象,分析不同压力和梯形流道单元数量对滴灌带水力和抗堵塞性能的影响,发现抗堵塞性能会随梯形流道单元数的减少而提高。Tao 等^[18]、张慧等^[19]对额定流量为 1.8 L/h 的单翼迷宫式滴灌带运行压力、铺设坡度、铺设长度、含沙量、化肥质量浓度 5 个因素进行研究,评价运行方式对滴灌带抗堵塞性能的影响。

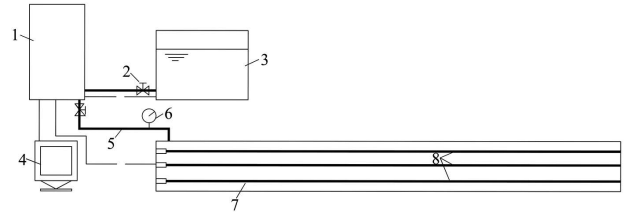
【切入点】国内外诸多研究学者在数值模拟选取紊流模型时存在差异,主要是由于数值模拟流道型式不尽相同,也忽略了圆管流道、进水口及出水口对流场带来的影响,有必要选取适用于单翼迷宫式滴灌带的紊流模型对 1 个完整的滴灌带流道单元进行数值模拟研究。关于进水口数、梯形流道齿数、出水口数对抗堵塞性能影响的研究鲜见。

【拟解决的关键问题】为此,本研究选取适用于单翼迷宫式滴灌带的紊流模型对进水口数、梯形流道齿数和出水口数 3 个因素的 9 组工况进行数值模拟,研究 3 个因素对流态指数、流量系数的影响,为单翼迷宫式滴灌带流道参数优化设计提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 物理试验设备与方法

滴灌带(管)抗堵塞性能测试平台试验装置示意图见图 1,本套滴灌带抗堵塞性能试验台型号为 KD-DJC,由河北可道试验机科技有限公司制造,系统适用电压 380 V。



注 1-主控柜;2-闸阀;3-水箱;4-计算机;5-供水管;
6-压力表;7-流量测试平台;8-滴灌带

图 1 滴灌带(管)抗堵塞性能测试平台示意

Fig.1 Schematic of the test platform for anti-clogging performance of drip irrigation tape (pipe)

滴灌带测试平台长度为 35 m,试验时滴灌带铺设 35 m,共铺设 3 条滴灌带,每条滴灌带放置 25 个集水桶,总共放置 75 个集水桶。滴头流量采用称质量法,使用的电子天平型号为 YP2002N,由上海菁海仪器有限公司制造,最大量程 2 000 g,精度值 0.01 g。每次测量时间为 15 min,测量 3 次,取平均值。

1.2 数值模拟

本研究对 1 个单翼迷宫式滴灌带单元进行数值模拟分析,其结构参数由高清拍照技术和 AutoCAD 技术相结合的方式测量,物理模型结构由 ANSYS 19.0 DM 软件建立,单翼迷宫式滴灌带物理模型及尺寸见图 2,进水口数为 5 口、梯形流道齿数为 85 齿、出水口为 3 口,流道深 1 mm。

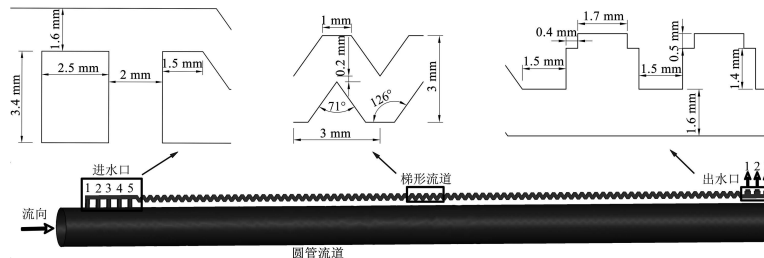


图 2 单翼迷宫式滴灌带物理模型及尺寸

Fig.2 Physical model and dimensions of the single-wing labyrinth drip irrigation belt

在 ANSYS 19.0 Fluent 软件中进行数值模拟,梯形迷宫流道内水流运动可被视为不可压缩流体的运动范畴。设定圆管流道处进口边界条件为压力进口,出水口处出口边界条件为压力出口,其他固体边界均采用标准无滑移固壁边界条件。梯形单元内部会产生涡流运动^[20],因此对各种紊流模型的精度逐一进行对比分析,选择适于单翼迷宫式滴灌带的紊流模型是十分必要的。Eddy-viscosity models 对流线曲率不敏感,为使 Standard Eddy-Viscosity Models 对流线曲率的影响敏感,需对涡流产生项进行修正,以及对紊流模型的曲率修正。Standard Two-Equation Turbulence Models 的缺点是在停滞点附近会过多地产生湍流量,为了避免在停滞区域形成湍动能,使用两方程

模型生产限制器来限制湍动能方程的产生项。为提高数值模拟计算精度,对流项等参数采用二阶迎风格式,速度和压力的耦合采用 SIMPLE 算法求解,残差收敛精度为 10^{-4} 。浑水条件下悬浮颗粒质量浓度为 1 g/L(泥沙颗粒体积分数设置为 0.057 9%),颗粒密度为 1 725.9 kg/m³,颗粒粒径设定为级配分级中间值 0.056 8 mm。

1.3 评价指标

采用流量-压力关系对单翼迷宫式滴灌带模型进行评价,计算式为^[21]:

$$Q=kP^x, \quad (1)$$

式中:Q 为流量(L/h);k 为流量系数;P 为压力(kPa);x 为流态指数。

2 结果与分析

2.1 网格无关性验证

在 ANSYS 19.0 Mesh 软件中进行网格单元划分, 采用非结构四面体混合型网格。为增加 Mesh 软件和 Fluent 软件的运行速度, 将滴灌带单元分为圆管流道和梯形迷宫流道进行网格划分。SST $k-\omega$ 模型被诸多学者用于计算迷宫灌水器流场, 因此验证网格无关性时采用该模型^[11]。本研究设定进口边界条件为压力进口, 相对压力为 100 kPa, 出口边界条件为压力出口, 相对压力为 0, 网格无关性验证见表 1。第 6~第 10 组网格尺寸的加密对出口流量的影响变幅不大, 与实际流量误差范围在 5.655% 内; 而当圆管流道网格尺寸为 2 mm, 梯形迷宫流道网格尺寸为 0.2 mm 时, 模拟流量值 (1.902 L/h) 与实际流量值 (1.892 L/h) 比较误差最小, 为 0.529%; 网格数量越多计算机运行速度越慢 (计算机性能: 二核四线程), 第 9 组和第 10 组流量差距为 0.003。为减少计算量, 最后网格数量确认为 300 182, 单翼迷宫式滴灌带整体及局部网格见图 3。

表 1 网格无关性验证

Table 1 Mesh independence verification

序号	网格尺寸/mm		网格数量	计算机运行 速度/(步 s^{-1})	流量/(L h^{-1})
	圆管流道	小流道			
1	10	1	7 652	13.198	2.420
2	9	0.9	12 299	10.283	2.088
3	8	0.8	14 796	8.884	2.145
4	7	0.7	21 349	6.997	2.080
5	6	0.6	30 291	5.612	1.936
6	5	0.5	41 560	4.195	1.999
7	4	0.4	62 489	2.901	1.936
8	3	0.3	123 538	1.401	1.929
9	2	0.2	300 182	0.600	1.902
10	1	0.1	1 241 949	0.150	1.905

注 小流道包括进水口、梯形迷宫流道、出水口。

2.2 试验与仿真对比分析

为探究单翼迷宫式滴灌带低压小流量技术, 本研究设计进水口压力为 20、40、60、80、100 kPa。使用滴灌带 (管) 抗堵塞性能测试平台进行压力-流量物理试验, 进水口压力为 20、40、60、80、100 kPa

对应的出水口流量分别为 0.847、1.211、1.477、1.664、1.892 L/h。

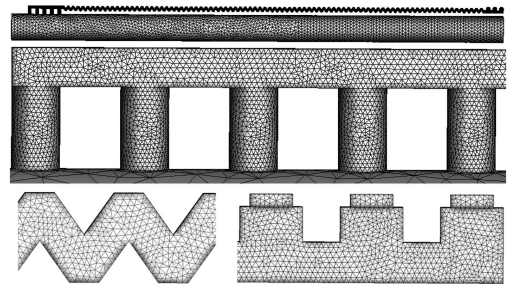


图 3 单翼迷宫式滴灌带整体及局部网格图

Fig.3 Overall and local mesh diagrams of the single-wing labyrinth drip irrigation belt

本研究主要采用 ANSYS 19.0 Fluent 软件进行压力-流量数值模拟, 仿真模型选用 Laminar 模型, Spalart-Allmaras (S-A) 为单方程模型, Scalable wall Function (SWF) RNG $k-\epsilon$ 、Enhanced wall Functions (EWF) RNG $k-\epsilon$ 、Menter-Lechner (M-L) RNG $k-\epsilon$ 为两方程模型, Standard $k-\omega$ 、BaseLine $k-\omega$ 、SST $k-\omega$ 为两方程模型, 试验与仿真对比结果见表 2。仿真模型模拟误差排序为 $k-\omega$ 模型 > Laminar 模型 > RNG $k-\epsilon$ 模型, SST $k-\omega$ 低雷诺数紊流模型更接近物理试验值, 说明单翼迷宫式滴灌带内水流流动属于低雷诺数紊流。 $k-\omega$ 模型中精度排序为 SST $k-\omega$ 模型 > BaseLine $k-\omega$ 模型 > Standard $k-\omega$ 模型, 3 个模型的区别 BaseLine 模型是在 Standard 的基础上使用近壁面的混合函数进行修正, 而 SST 模型更进一步引入另一个湍流黏度限制的混合函数, 可知在单翼迷宫式滴灌带的模拟中需要对近壁区和湍流黏度进行修正。M-L RNG $k-\epsilon$ 模型应用一种低雷诺数公式, 因此 EWF RNG $k-\epsilon$ 模型、SWF RNG $k-\epsilon$ 模型模拟精度高。SWF RNG $k-\epsilon$ 两方程模型模拟精度较差, 误差在 -19.225% 以上; BaseLine $k-\omega$ 、SST $k-\omega$ 两方程模型模拟精度较优, 误差在 $\pm 5.007\%$ 以内, 2 种紊流模型在进水口压力为 20、40、60、80 kPa 时模拟结果一致, 而在进水口压力为 100 kPa 时 SST $k-\omega$ 两方程模型流量值与单翼迷宫式滴灌带实际流量更吻合, 众多紊流模型中 SST $k-\omega$ 两方程紊流模型更适用于单翼迷宫式滴灌带数值模拟。

表 2 试验与仿真对比结果

Table 2 Comparative analysis of test and simulation

紊流模型	数值模拟出口流量/(L h^{-1})					误差/%				
	20 kPa	40 kPa	60 kPa	80 kPa	100 kPa	20 kPa	40 kPa	60 kPa	80 kPa	100 kPa
Laminar	0.889	1.199	1.433	1.627	1.793	5.007	1.032	3.006	2.194	5.228
S-A	0.889	1.199	1.429	1.624	1.789	5.007	1.032	3.249	2.410	5.418
RNG $k-\epsilon$	SWF	0.684	0.950	1.152	1.328	1.480	19.225	21.539	22.015	20.154
	EWT	0.922	1.267	1.526	1.742	1.933	8.833	4.615	3.331	4.730
	M-L	0.889	1.199	1.429	1.624	1.793	5.007	1.032	3.249	2.410
$k-\omega$	Standard	0.889	1.202	1.436	1.627	1.796	5.007	0.735	2.762	2.194
	BaseLine	0.889	1.210	1.444	1.634	1.804	5.007	0.140	2.275	1.761
	SST	0.889	1.210	1.444	1.634	1.902	5.007	0.140	2.275	1.761

2.3 水沙两相流场研究

为研究单翼迷宫式滴灌带进水口和梯形流道的水沙两相流流动状态,应用 SST $k-\omega$ 紊流模型及欧拉-欧拉两相流模型对单翼迷宫式滴灌带进行浑水条件的仿真,分别计算在运行压力为 50、100、150 kPa,时间为 36、72、108、144、180 s 的流场。滴灌带在运行压力为 50、150 kPa 的不同时间的流量无变化,分别为 1.497、2.454 L/h;而运行压力为 100 kPa 在时间为 144~180 s 时流量由 2.040 L/h 下降到 2.039 L/h,流量下降率为 0.035%。时间为 36、72、108、144、180 s,滴灌带运行压力为 50、100、150 kPa 下的流量变化不明显,取 36 s 时流量做仿真流量对比分析发现,模拟流量与实际流量对比误差在 10.958% 以下,仿真效

果较好。

运行压力为 150 kPa 时,清水和浑水流速与流线叠加见图 4。清水条件下环绕的流线多出现在青色以下区域,对应的流速为 0.6 m/s 以下区域;浑水条件下环绕的流线出现在浅蓝色以下区域,流速为 0.4 m/s 以下区域。浑水条件下低速区流线环绕比清水条件下复杂,漩涡分布范围越大代表水流在此处停留时间越长,浑水条件下易积累泥沙造成堵塞。清水条件下低速区的面积比浑水条件下的大,浑水条件下高速区的面积比清水条件下的大。浑水条件下主流区的水流流动弧度大于清水条件下的,这是由于浑水条件梯形流道拐角处的惯性力大于清水条件梯形流动拐角处的惯性力,致使清水水流较浑水水流平缓。

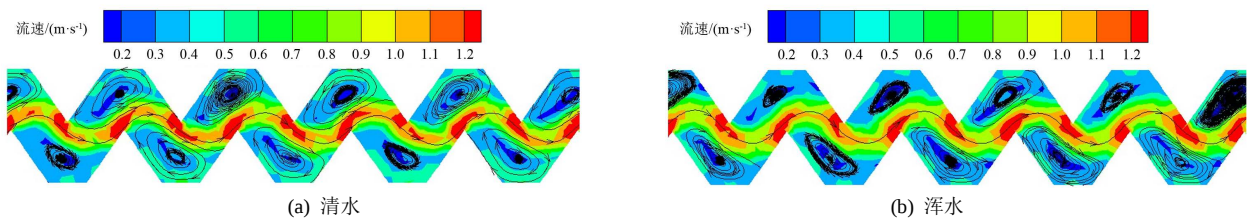


图 4 清水和浑水流速与流线叠加图

Fig.4 Clear and muddy water velocity overlay cloud map with streamline

运行压力为 150 kPa、时间为 180 s 时,泥沙颗粒及流线分布规律见图 5。图 5 (a) 中红色区域代表泥沙颗粒的体积分数(泥沙颗粒与水的体积之比) $>0.0579\%$,相当于泥沙颗粒质量浓度 >1 g/L,即泥沙颗粒在圆管底部沉积质量浓度 >1 g/L。大部分泥沙颗粒将沉积在圆管流道底部,圆管后段蓝色区域和梯形流道部分蓝色区域代表体积分数 $<0.00579\%$,相当于泥沙颗粒质量浓度 <0.1 g/L,即泥沙颗粒在圆管后段上部和梯形流道内沉积质量浓度 <0.1 g/L。

圆管进口处泥沙颗粒质量浓度梯度分布明显,底部流线旋滚不一。图 5 (b) 中红色区域代表泥沙颗粒体积分数 $>0.000579\%$,相当于泥沙颗粒质量浓度 >0.01 g/L,即泥沙颗粒在进水口处和梯形流道前部沉积质量浓度 >0.01 g/L,从进水口到梯形流道再到出水口,泥沙颗粒质量浓度逐渐变小,泥沙颗粒沉积在梯形流道内,出水口只有极少区域的泥沙颗粒质量浓度 >0.01 g/L。

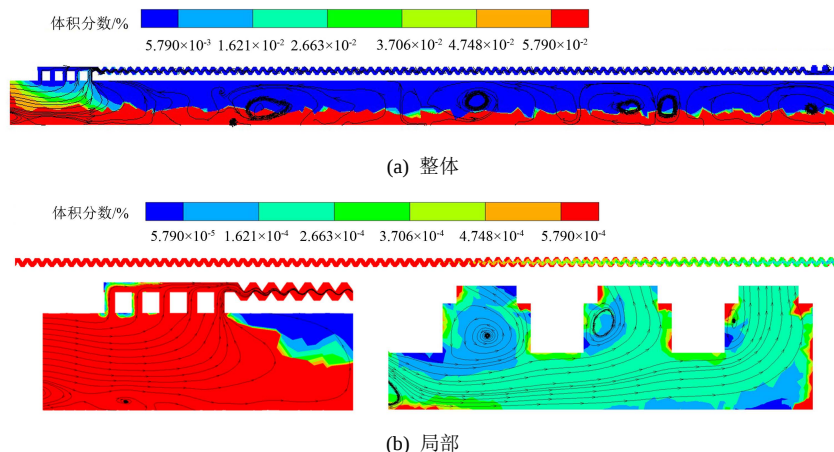


图 5 泥沙颗粒及流线分布规律

Fig.5 Law of sediment particles and flow line distribution

2.4 进水口数、梯形流道齿数、出水口数数值模拟分析

图 5 (a) 中梯形流道主流区流线主要来源为第 5 进水口,第 5 进水口为主要进水口,流量主要集中在靠近迷宫流道的进水口;图 5 (b) 中主流区流线流

往第 3 出水口,第 3 出水口为主要出水口。因此为探究进水口数、梯形迷宫流道齿数、出水口数与流量的关系,在单翼迷宫式滴灌带模型进水口、梯形流道、出水口尺寸不变的基础上,设计 9 组均匀正交工况进

行数值模拟。

按 9 组均匀正交试验进行数值模拟，进水口数、梯形流道齿数、出水口数数值模拟结果见表 3。流态指数波动幅度为 1.367%，进水口数、梯形流道齿数

和出水口数的变化不会造成流态指数较大波动。流量系数波动幅度为 12.698%，不同进水口数、梯形流道齿数和出水口数下的出口流量差别较大。

表 3 进水口数、梯形流道齿数、出水口数数值模拟结果

Table 3 Numerical simulation results of the number of water inlets, the number of trapezoidal runner teeth, and the number of water outlets

序号	进水口数/口	梯形流道齿数/齿	出水口数/口	数值模拟出口流量/(L h ⁻¹)					流量系数	流态指数
				20 kPa	40 kPa	60 kPa	80 kPa	100 kPa		
1	1	65	1	0.990	1.346	1.609	1.822	2.009	0.266	0.440
2	1	75	3	0.940	1.278	1.526	1.728	1.904	0.253	0.439
3	1	85	2	0.886	1.206	1.440	1.631	1.796	0.238	0.439
4	3	65	3	0.997	1.354	1.616	1.832	2.020	0.268	0.439
5	3	75	2	0.940	1.274	1.523	1.724	1.901	0.253	0.438
6	3	85	1	0.882	1.199	1.429	1.620	1.786	0.238	0.438
7	5	65	2	0.990	1.350	1.609	1.822	2.009	0.266	0.439
8	5	75	1	0.925	1.264	1.508	1.710	1.883	0.247	0.442
9	5	85	3	0.889	1.210	1.444	1.634	1.902	0.240	0.438

本研究使用 SPSS 26.0 软件建立进水口数、梯形流道齿数、出水口数与流量系数的多元线性关系（式（2）），决定系数 R^2 为 0.987，精度较好。

首先确定进水口数、梯形流道齿数、出水口数，根据式（2）得流量系数，再根据式（1）推求流量。如当出水口间距为 20 cm 时，根据图 6 可设计进水口数为 3 口、出水口数为 3 口，确定梯形流道齿数为 60 齿，流态指数取 0.439，由式（2）计算得 k 为 0.276，因此运行压力为 100 kPa 时流量为 2.083 L/h。当已知作物最优需水量时，根据滴灌带流量确定作物灌溉时长。这种方法对出水口间距进行控制，实现精准灌溉，合理利用土地资源，提高作物产量。

$$k=0.355\ 6-0.000\ 3j-0.001\ 4t+0.001\ 7c, \quad (2)$$

式中： k 为流量系数； j 为进水口数； t 为梯形流道齿数； c 为出水口数。

对进水口数、梯形流道齿数和出水口数进行分析，因素水平均值见图 6，梯形流道齿数对流量系数影响最显著，与流量系数负相关；出水口数与流量系数正相关；在数值模拟因素水平范围内，流量系数较优的组合是进水口为 3 口、梯形流道齿数为 65 齿、出水口数为 3 口。

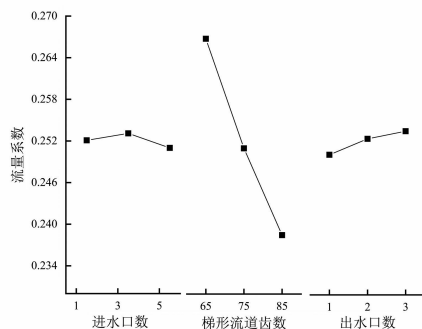


图 6 因素水平均值

Fig.6 Factor level mean plot

对计算得到的流量系数进行方差分析，进水口数、梯形流道齿数、出水口数的方差分析结果见表 4。进水口数和出水口数对流量系数影响不显著，梯形流道齿数影响极显著。流量系数影响因素显著性排序为梯形流道齿数 (t) > 出水口数 (c) > 进水口数 (j)。单纯增减进水口和出水口数目，流量变化不大。

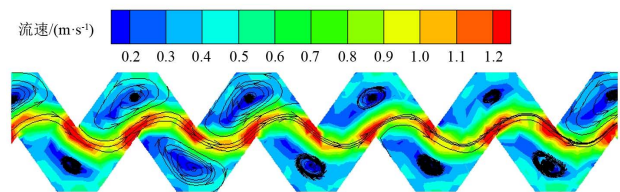
表 4 流量系数方差分析

Table 4 Analysis of variance for flow coefficient

因素	平方和	自由度	均方差	F	P
j	0.000 006	2	0.000 003	1.000	0.500
t	0.001	2	0.001	189.893	0.005**
c	0.000 016	2	0.000 008	2.714	0.269
空白列	0.000 006	2	0.000 003		

注 *表示在 $P<0.05$ 水平差异显著；**表示在 $P<0.01$ 水平差异极显著。

结合方差分析结果，最终选取进水口数-梯形流道齿数-出水口数为 3-65-3、1-75-3、5-85-3 的组合梯形流道中部进行分析，不同进水口数和梯形流道齿数流速与流线叠加见图 7。在运行压力为 20、40、60、80、100 kPa 情况下，3 种型式滴灌带流速排序均为 3-65-3 型 > 1-75-3 型 > 5-85-3 型，在此只对运行压力为 100 kPa 流速及流线进行分析。流线在主流区呈波浪状前进，由图 7 可知，主流区水流流速大于近壁区，中部转角处流速均偏大，上转角和下转角会产生涡流。梯形流道齿数越少，流道内部流速越大，更有利于泥沙颗粒排出流道。



(a) 3-65-3 型

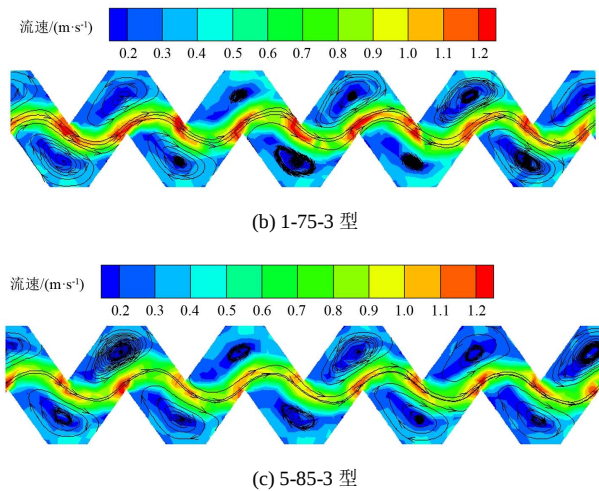


图7 不同进水口数和梯形流道齿数流速与流线叠加图

Fig.7 Different number of inlets and trapezoidal runner teeth, velocity and streamline overlay cloud map

3 讨论

3.1 SST $k-\omega$ 紊流模型的适用性

RNG $k-\varepsilon$ 、 $k-\omega$ 模型对于以涡流为主的流动问题模拟精度较高,但 RNG $k-\varepsilon$ 模型受涡流黏性各向同性假设限制更适合于计算雷诺数较高的流动问题, $k-\omega$ 模型适合计算雷诺数偏低的流动问题。对于 $k-\varepsilon$ 模型,通常使用 Enhanced wall Functions 或 Menter-Lechner;如果壁面函数与 ε 方程相似,用 Scalable wall Function。Menter-Lechner 函数利用一种新的低雷诺数公式,避免了湍流雷诺数划分流态的一些缺点(湍动能值极低的区域可能容易产生 <200 的湍流雷诺数) [12]。Spalart-Allmaras 模型不再使用湍动能和湍流耗散率计算涡黏性系数,而是直接导出涡黏性系数的输运方程,更适合平均流场中有剧烈变化的湍流。单翼迷宫式滴灌带仿真模拟中 SST $k-\omega$ 低雷诺数紊流模型更接近物理试验值,说明单翼迷宫式滴灌带内水流流动属于低雷诺数紊流, Aitmouheb 等 [22]、Demir 等 [23] 研究也证明,迷宫通道内的流动具有相当低的雷诺数。SST 可以更进一步引入另一个湍流黏度限制的混合函数,对近壁区和湍流黏度进行修正。

单翼迷宫式滴灌带流道内湍动能随着压力的增加而增加,但湍动能均较小,是由于流道尺寸小不具有很强的扩散性和耗散性,迎水区湍动能较大,并随着压力的增加而增加 [24]。迎水区湍动能会随着压力的增加而增加,水流在梯形流道内紊动较低。

3.2 水沙两相流流场规律

低速漩涡区易积累泥沙造成堵塞,设计滴灌带结构时应尽量减少低速漩涡区,郑超 [25]、刘春景 [26] 式滴灌带流道内泥沙颗粒质量浓度较大的位置是圆管流

道底部缓水区、进水口及梯形流道近壁区。每次灌水前后应当对滴灌带进行冲沙处理,防止堵塞梯形流道不易冲出,这样避免了再次灌溉时流量极不均匀的情况。

3.3 进水口数、梯形流道齿数、出水口数对流道的影响

单翼迷宫式滴灌带第 5 进水口为主要进水口,流量主要集中在靠近迷宫流道的进水口,这与文献 [11] 研究结果一致,单翼迷宫式滴灌带涡流发生在流道低速区,在梯形流道上转角和下转角处易形成大小不一的漩涡,在涡流区分布范围越大代表水流停留时间越长,在此处易积累泥沙造成堵塞;此结论与文献 [20] 研究结果一致,涡流增强流道内水流的湍动强度,提高水力性能,但同时增加了堵塞风险。梯形流道齿数越少,流道内部流速越大,更有利于泥沙颗粒排出流道,可减少泥沙在流道内部形成堵塞,因此在梯形迷宫流道尺寸相同时应优先选用齿数较少滴灌带进行农业灌溉。文献 [17] 也同样证明了单翼迷宫滴灌带在梯形迷宫流道尺寸相同的情况下,抗堵塞性能会随着梯形流道单元数的减少而提高。随着流道单元数的增加消能效果越好 [27],但不利于悬浮颗粒的排出,更容易发生物理堵塞、化学堵塞、生物堵塞和复合堵塞。

本研究的不足在于只研究 30 cm 的 1 个单翼迷宫式滴灌带单元,忽略了长度上沿程水头损失带来的压力影响;未对单翼迷宫式滴灌带进水口、梯形流道、出水口尺寸进行研究。今后将从单翼迷宫式滴灌带进出水口、梯形流道尺寸对抗堵塞性能的影响开展研究工作。

4 结论

1) SST $k-\omega$ 两方程紊流模型更加适用于单翼迷宫式滴灌带的数值模拟。仿真模拟精度表现为 $k-\omega > \text{Laminar} > \text{RNG } k-\varepsilon$, 单翼迷宫式滴灌带的流动属于低雷诺数紊流,主流区湍动能较大。

2) 大部分泥沙颗粒将沉积在圆管流道底部,少量泥沙颗粒会通过进水口到梯形流道并沉积,只有极少泥沙颗粒会到达出水口。

3) 进水口数、梯形流道齿数、出水口数对流态指数影响极小,对流量系数的影响显著性表现为梯形流道齿数 > 出水口数 > 进水口数;确定进水口数、梯形流道齿数、出水口数后,可根据 $k=0.355 \ 6-0.000 \ 3j-0.001 \ 4t+0.001 \ 7c$ 计算流量系数,以此得到单翼迷宫式滴灌带流量,再确定灌水时长,实现对植物的精准灌溉;在梯形迷宫流道尺寸相同时,应优先选用齿数较少滴灌带进行农业灌溉。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献:

- [1] 顾烈烽. 滴灌工程设计图集[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [2] 李云开, 杨培岭, 任树梅. 滴灌灌水器流道设计理论研究若干问题的综述[J]. 农业机械学报, 2006, 37(2): 145-149.
LI Yunkai, YANG Peiling, REN Shumei. General review on several fundamental points of design theory about flow path in drip irrigation emitters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(2): 145-149.
- [3] WEI Q S, SHI Y S, DONG W C, et al. Study on hydraulic performance of drip emitters by computational fluid dynamics[J]. Agricultural Water Management, 2006, 84(1): 130-136.
- [4] WEI Z Y, CAO M, LIU X, et al. Flow behaviour analysis and experimental investigation for emitter micro-channels[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(4): 729-737.
- [5] CHEN X L, WEI Z Y, MA C, et al. Flow characteristics and diaphragm deformation of pressure-compensating drip irrigation emitters[J]. Irrigation and Drainage, 2021, 70(5): 996-1 009.
- [6] PALAU-SALVADOR G, SANCHIS L H, GONZÁLEZ-ALTOZANO P, et al. Real local losses estimation for on-line emitters using empirical and numerical procedures[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2006, 132(6): 522-530.
- [7] ZHANG J, ZHAO W H, TANG Y P, et al. Numerical investigation of the clogging mechanism in labyrinth channel of the emitter[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2007, 70(13): 1 598-1 612.
- [8] WU D, LI Y K, LIU H S, et al. Simulation of the flow characteristics of a drip irrigation emitter with large eddy methods[J]. Mathematical and Computer Modelling, 2013, 58(3/4): 497-506.
- [9] 张传杰, 牛勇, 刘道航. 齿间角对迷宫灌水器水力特性影响的数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2022, 40(7): 751-756.
ZHANG Chuanjie, NIU Yong, LIU Xiaohang. Numerical simulation of influence of tooth angle on hydraulic characteristics of labyrinth emitter[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(7): 751-756.
- [10] 唐学林, 赵旭红, 李云开, 等. 迷宫流道滴头内流场和颗粒运动的不同湍流模型数值模拟[J]. 农业工程学报, 2018, 34(16): 120-128.
TANG Xuelin, ZHAO Xuhong, LI Yunkai, et al. Numerical simulation of flow fields and particle movement characteristics in labyrinth channel emitter using different turbulence models[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(16): 120-128.
- [11] 谢巧丽, 牛文全, 李连忠. 进口结构对迷宫流道滴头性能影响的模拟研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(1): 206-212.
XIE Qiaoli, NIU Wenquan, LI Lianzhong. Influence of inlets on performance of labyrinth channels emitter[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2015, 43(1): 206-212.
- [12] 郭霖, 白丹, 王新端, 等. 双向对冲流滴灌灌水器水力性能与消能效果[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 77-82.
GUO Lin, BAI Dan, WANG Xinduan, et al. Hydraulic performance and energy dissipation effect of two-ways mixed flow emitter in drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(17): 77-82.
- [13] 吕敏. 齿形迷宫流道结构滴头的设计方法[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.
LYU Min. Design method of drippers with labyrinth runner structure in tooth shape[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2019.
- [14] 吴争光, 李泰来, 杨琳. 锐角转折式滴灌带流道水力性能研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(S2): 72-75.
WU Zhengguang, LI Tailai, YANG Lin. Study on hydraulic performance of flow channel in acute angle turning drip tape[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(S2): 72-75.
- [15] 胡宇祥, 彭军志, 殷飞, 等. 基于MATLAB与COMSOL联合仿真的梯形迷宫滴头流道优化[J]. 农业工程学报, 2020, 36(22): 158-164.
HU Yuxiang, PENG Junzhi, YIN Fei, et al. Optimization of trapezoidal labyrinth emitter channel based on MATLAB and COMSOL co-simulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(22): 158-164.
- [16] 谢巧丽, 牛文全, 李连忠. 迷宫流道齿转角与齿间距对滴头性能的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(5): 449-455.
XIE Qiaoli, NIU Wenquan, LI Lianzhong. Effect of tooth angle and pitch of labyrinth channel on performance of emitter[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(5): 449-455.
- [17] 马晓鹏, 王新勇, 刘国宏, 等. 单翼迷宫式滴灌带工作性能试验与数值模拟[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(S1): 88-91.
MA Xiaopeng, WANG Xinyong, LIU Guohong, et al. Experiment and numerical simulation of the hydraulic performance of drip tape[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(S1): 88-91.
- [18] TAO Hongfei, TAO Juanqin, LI Qiao, et al. Average relative flow of single-wing labyrinth drip irrigation tape based on projection pursuit regression[J]. Scientific Reports, 2022, 12(1): 8 543.
- [19] 张慧, 陶洪飞, 如苏力 努尔, 等. 单翼迷宫式滴灌带的关键参数与灌水均匀度的响应关系[J]. 节水灌溉, 2021(4): 98-103.
ZHANG Hui, TAO Hongfei, RUSUL Nur, et al. Response relationship between key parameters of single-wing labyrinth drip irrigation belt and irrigation uniformity[J]. Water Saving Irrigation, 2021(4): 98-103.
- [20] 马炎超. 涡漩对迷宫流道灌水器水流流态的数值影响分析[J]. 节水灌溉, 2021(3): 73-78.
MA Yanchao. Numerical analysis of the effect of vortex on flow pattern of emitter with labyrinth flow channel[J]. Water Saving Irrigation, 2021(3): 73-78.
- [21] 刘春景, 唐敦兵, 郑加强, 等. 滴灌梯形迷宫滴头流道水力性能的响应曲面法优化[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 46-51.
LIU Chunjing, TANG Dunbing, ZHENG Jiaqiang, et al. Optimization of hydraulic performance for drip irrigation trapezoidal labyrinth channel of emitter using response surface methodology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(2): 46-51.
- [22] AIT-MOUHEB N, SCHILLINGS J, AL-MUHAMMAD J, et al. Impact of hydrodynamics on clay particle deposition and biofilm development in a labyrinth-channel dripper[J]. Irrigation Science, 2019, 37(1): 1-10.
- [23] DEMİR V, YÜRDEM H, YAZGI A, et al. Determination of the hydraulic properties of a flat type drip emitter using computational fluid dynamics[J]. Journal of Agricultural Sciences, 2020, 26(1): 226-235.
- [24] YANG B, WANG J D, ZHANG Y Q, et al. Anti-clogging performance optimization for dentiform labyrinth emitters[J]. Irrigation Science, 2020, 38(3): 275-285.
- [25] 郑超. 动态水压下迷宫流道内水沙运动特性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
ZHENG Chao. Study on movement characteristics of water and solid particle in labyrinth channel under dynamic water pressure[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2018.
- [26] 刘春景. 基于CAD/CFD的滴灌滴头流场动力学分析与结构优化[D]. 南京: 南京林业大学, 2009.
LIU Chunjing. Dynamical analysis and structural optimization of drip irrigation emitter based on CAD/CFD[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2009.
- [27] 刘洁, 魏青松, 史玉升, 等. 滴灌灌水器复杂流道局部阻力特征的试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2011(6): 55-59, 62.
LIU Jie, WEI Qingsong, SHI Yusheng, et al. Experimental research on local resistance characteristics of drip irrigation emitters with complex flow channel[J]. China Rural Water and Hydropower, 2011(6): 55-59, 62.

Effects of the Number of Inlet and Outlet Ports and Trapezoidal Channel Teeth on Anti-clogging Performance of a Single-wing Labyrinth Drip Irrigation Belt

TAO Juanqin^{1,2}, TAO Hongfei^{1,2*}, LI Qiao^{1,2}, LIU Yao^{1,2}, ZHANG Hui^{1,2},
MAHEMUJIANG Aihemat^{1,2}, JIANG Youwei^{1,2}, YANG Wenxin^{1,2}

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China;

2. Xinjiang Key Laboratory of Water Conservancy Engineering Safety and Water Disaster Prevention, Urumqi 830052, China)

Abstract: 【Objective】 This paper is to study the effects of the number of water inlets, the number of teeth of the trapezoidal flow channel and the number of outlets on the anti-clogging performance of the single-wing labyrinth drip irrigation belt. We designed nine groups of working conditions for numerical simulation. 【Method】 Physical experiments, numerical simulations, linear mathematical models were used to study water and sand flow in a single-wing labyrinth drip irrigation belt when the flow rate was 1.8 L/h, as well as the influence of different inlet and outlet numbers and trapezoidal flow channel teeth on the flow index and flow coefficient of the drip irrigation belt. 【Result】 The SST $k-\omega$ two-equation for low Reynolds number turbulence model is more suitable for numerical simulation of flow field in the single-wing labyrinth drip irrigation belt. From the inlet to the trapezoidal channel and then to the outlet, the mass concentration of sediment particles gradually decreases; the fifth water inlet of drip irrigation belt is the main water inlet, and the third water outlet is the main water outlet; the number of water inlets, trapezoidal channel teeth, and the number of water outlets have a minimal impact on flow regime index; the their impact on the flow coefficient is ranked in the order of trapezoidal channel teeth>number of water outlets>number of water inlets; a multivariate linear model between the flow coefficient and the three factors was constructed, with a decision coefficient being 0.987. 【Conclusion】 When the size of the trapezoidal labyrinth flow path is the same, the smaller the number of teeth in the trapezoidal flow path was, the greater the internal flow velocity in the flow path would be. This facilitates discharge of sediment particles from the flow path. The constructed flow coefficient and three factor formula can achieve accurate irrigation at the outlet location, making reasonable use of land resources.

Key words: single-wing labyrinth drip irrigation belt; SST $k-\omega$ turbulence model; the two-phase flow of water and sand; number of water inlets; trapezoidal channel teeth; number of water outlets

责任编辑: 白芳芳