

分叉角与回转半径对双向流道灌水器 水力性能影响模拟研究

王亚林,符剑平,吕从聪,钟韵,朱士江

(三峡大学水利与环境学院,湖北宜昌443000)

摘要:为研究双向流道灌水器水力性能,将其结构单元作为研究对象,以分叉角和回转半径两个结构参数为影响因素,采用正交试验设计16种结构参数组合方案,利用计算流体动力学软件Ansysfluent对流道内部流体的流动状态进行数值模拟,通过量纲分析建立流道结构参数与流道单元局部水头损失的回归模型。结果表明:双向流道单元局部水头损失与分叉角、回转半径和流道流速有关,分叉角与局部水头损失呈负相关关系,回转半径和速度与局部水头损失呈正相关关系;当入口流速为固定值时,分叉角为 32.4° 、回转半径为1.72 mm,流道单元局部水头损失最大;当设置10个流道单元时,交叉排列方式组合的灌水器流态指数较优。

关键词:滴灌灌水器;双向流道;局部水头损失;数值模拟;量纲分析

中图分类号:S277.9 文献标志码:A

Simulation study on influence of fork angle and turning radius on hydraulic performance of bidirectional channel emitter

WANG Yalin, FU Jianping, LV Congcong, ZHONG Yun, ZHU Shijiang

(College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443000, China)

Abstract: In order to study the hydraulic performance of bidirectional channel emitter, its structural unit was taken as the research object, with two structural parameters, fork angle and turning radius were used as the influencing factors. The orthogonal experimental design method was used to design 16 kinds of structural parameter combination schemes. The flow state of the fluid inside the flow channel was simulated by the computational fluid dynamics software Ansysfluent, and the regression model of the flow channel structure parameters and the local head loss of the flow channel unit was established by dimensional analysis. The results showed that the local head loss was related to the fork angle, turning radius and flow velocity, the fork angle was negatively correlated with the local head loss, and the turning radius and flow velocity were positively correlated with local head loss. When the inlet flow velocity was fixed, the fork angle was 32.4° and the turning radius was 1.72 mm, the local loss of the runner unit was the largest. When 10 channel units were set, the flow index of the emitter with cross arrangement was better.

Keywords: drip irrigation emitter; bidirectional flow channel; local head loss; numerical simulation; dimensional analysis

灌水器是滴灌系统的重要组成部分,灌水器流道的主要作用是调节压力和流量,因此流道的结构特征对灌水器的水力性能有直接影响。由于灌水器流道是一个小尺度且相对封闭空间,传统试验方法难以准确直观地获取其内流体流动的物理参数,

计算流体动力学(Computational fluid dynamics, CFD)技术在一定程度上弥补了上述不足,可实现流场特征可视化,从而准确反映出流道流场结果。

国内外众多学者对灌水器流道进行了大量的理论、试验及数值模拟研究。部分学者对灌水器结

收稿日期:2023-08-12

修回日期:2023-10-01

基金项目:国家自然科学基金(52209164);湖北省教育厅科技计划重点项目(D20221206);湖北省水利重点科研项目(HBSLKY202121);三峡库区地质灾害教育部重点实验室开放基金(2022KDZ20)

作者简介:王亚林(1986-),男,山东烟台人,讲师,主要从事节水灌溉理论与装备、岸坡防护及生态修复研究。E-mail: gmxh535@163.com

通信作者:朱士江(1980-),男,河南南阳人,副教授,主要从事节水灌溉与水资源高效利用研究。E-mail: 358277824@qq.com

构设计进行研究,通过多元线性回归分析方法建立流态指数和流量系数与结构参数的回归模型,可用于流道流态指数和流量系数的预测^[1-4]。另有研究者尝试将渐缩、渐扩、分流、对冲等增大局部压力损失的方法应用到灌水器流道设计中,设计了新式迷宫流道灌水器^[5-8]。有研究表明流道结构显著影响灌水器抗堵塞性能^[9-14],通过改变流道结构参数和工作压力可调整流道中的旋涡区分布,进而优化灌水器抗堵特性^[15-16];网格划分、湍流模型和计算域选取对模拟精度有影响,标准 $k-\varepsilon$ 模型更适合模拟迷宫流道滴头的内流场^[17-19],栅栏区对滴头流量的影响甚微,构建计算域时可忽略^[20]。有学者基于试验测试手段对 5 种流道尺寸的模型中水流流动现象进行观测与分析,认为迷宫灌水器中水流流态为紊流或过渡区^[21]。上述研究对于灌水器流道性能改进提供了有价值的参考和借鉴,但是并未针对双向流道灌水器给出分叉角和回转半径对其水力性能的影响。

基于此,本文采用 CFD 软件对双向流道灌水器水力性能以及流场分布进行研究,同时采用量纲分析方法分析流道结构参数与流道单元局部水头损失之间的数学关系,寻找灌水器结构参数最优解,并通过试验对数值模拟进行验证,以期为流道结构尺寸的最优设计提供新的方法。

1 试验设计

1.1 双向流道设计与模型结构

双向流道工作原理如图 1(见 275 页)所示,有压水流通过双向流道进水口进入后,在分叉角影响下,水流被分成主流道水流和支流道水流,支流道水流经过半圆形流道形成反向水流,两股水流对冲碰撞,产生强烈的扰动涡旋,结合弯曲多变的流道壁面结构,持续稳定消能,最终流出流道,从而具有较好的水力性能。

如图 2 所示,双向流道的主要结构参数包括流道宽度 B 、支流道长度 l_1 、支流道长度 l_2 、主流道长度 l_3 、回转半径 R 、分叉角 A ;其中支流道长度 l_1 、回转半径 R 及分叉角 A 可确定支流道长度 l_2 和主流道长度 l_3 。根据现有灌水器的结构形式和结构尺寸范围,将流道深度设为 1 mm。由于灌水器流道结构单元的数目主要影响灌水器流量,因此以单个双向流道单元为研究对象,选取支流道长度 l_1 、回转半径 R 及分叉角 A 这 3 个特征参数作为试验因素,考察流道结构参数对流道单元局部水头损失的影响。

流道深度 D 和流道宽度 B 均为固定值 1 mm,

分叉角 A 选取 4 个水平,包括 30° 、 45° 、 60° 、 75° ,回转半径 R 选取 4 个水平,包括 0.50、0.75、1.00、1.25 mm,支流道长度 l_1 为固定值 7 mm,试验设计方案见表 1,并利用 CAD 对流道进行 1:1 建模。

1.2 测试装置

试验在三峡大学水工厅进行,试验装置主要由供水箱、水泵、大量程压力表、小量程压力表、阀门、灌水器 and 烧杯组成,装置构造如图 3 所示。试验开始后首先将止水阀关闭,灌水器压力由小量程压力表测定,压力表精度为 0.1 kPa,压差范围为 0~10 m,通过调节压力控制阀控制灌水器压力,采用量筒容积法测量不同压力下灌水器流量。

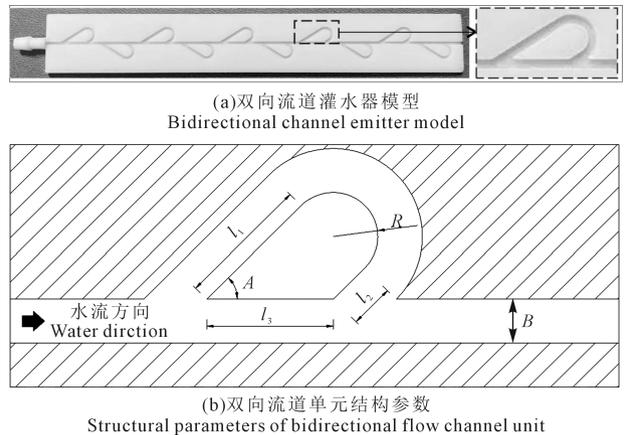


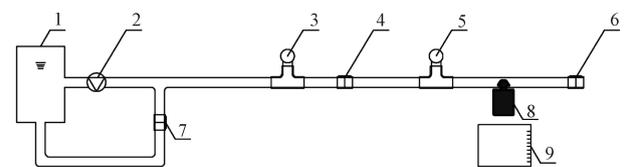
图 2 双向流道灌水器

Fig.2 Bidirectional channel emitter

表 1 试验设计方案

Table 1 Experimental design scheme

试验编号 Test number	流道结构参数 Geometric parameter of flow channel			试验编号 Test number	流道结构参数 Geometric parameter of flow channel		
	$A/(^\circ)$	R/mm	l_1/mm		$A/(^\circ)$	R/mm	l_1/mm
1	30	0.50	7	9	30	1.00	7
2	45	0.50	7	10	45	1.00	7
3	60	0.50	7	11	60	1.00	7
4	75	0.50	7	12	75	1.00	7
5	30	0.75	7	13	30	1.25	7
6	45	0.75	7	14	45	1.25	7
7	60	0.75	7	15	60	1.25	7
8	75	0.75	7	16	75	1.25	7



1. 供水箱; 2. 水泵; 3. 大量程压力表; 4. 保护阀; 5. 小量程压力表; 6. 止水阀; 7. 压力控制阀; 8. 灌水器; 9. 烧杯
1. Water supply tank; 2. Water pump; 3. Large range pressure gauge; 4. Protection valve; 5. Small range pressure gauge; 6. Water stop valve; 7. Pressure control valve; 8. Irrigator; 9. Beaker

图 3 测试装置图

Fig.3 Test device drawing

2 数值模拟

目前,计算流体动力学(Computational fluid dynamics, CFD)数值模拟已经成为一种被国内外学者广泛应用于灌水器水力性能研究的最有效、最接近实际的模拟方法^[22]。

2.1 物理模型及网格划分

在对模型进行数值模拟之前,将 AutoCAD 所设计的流道三维模型导入 Ansysfluent 的前处理器 Mesh 中,通过 Mesh 对各结构参数组合而成的不同结构尺寸流道进行网格划分。模型的进、出口以及内部结构均属于规则体,为保证模拟精度,将 0.1 mm 六面体网格设为基本尺寸对流道进行网格划分,划分的网格数大约为 30 000。

灌水器流道内的流体可视为不可压缩的连续性流体,流道流动基本控制方程为连续性方程与 Navier-Stokes 方程,分别如式(1)、(2)~(4)所示:

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\mu \nabla^2 u_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} = 0 \quad (2)$$

$$\mu \nabla^2 u_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\mu \nabla^2 u_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

式中, u_x 、 u_y 、 u_z 分别为流速 v 在 x 、 y 、 z 三个方向的速度分量($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); ρ 为水的密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); μ 为运动粘滞系数($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$); P 为流体上所承受的压力(Pa)。

2.2 边界条件设定及数值计算方法

网格模型划分后导入 Ansysfluent 软件进行数值模拟求解计算,为确保水流均匀而稳定地流出,对每种结构形式的流道分别按照 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的进口流速输入,流道出口边界条件设置为自由出流,流道壁面采用标准壁面函数法处理,壁面设为无滑移边界,流体选取 20℃ 水。

根据流道内部流体流动特性,标准 k - ε 模型具有稳定性强、计算精度高、更易于收敛的优点,故采用标准 k - ε 模型进行数值模拟,具体形式如下。

k 方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial t} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \varepsilon \rho \quad (5)$$

ε 方程:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon \mu_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{C_{1\varepsilon} \rho G_k}{k} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

其中:

$$G_k = \mu_i \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \mu_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

式中, $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 σ_k 、 σ_ε 为经验常数,分别取 1.44、1.92、1.0、1.3; t 代表时间(s)。

为了提高数值模拟精度,将压力项、动量项、湍动能项及湍动能耗散率项设置为精度更高的二阶迎风公式,采用更高次的插值公式计算,避免出现假扩散和过早收敛等现象,同时残差标准设置为 10^{-6} ,速度和压力耦合采用 SIMPLE 算法处理,增强计算的稳定性。

3 结果与分析

3.1 流道单元局部水头损失与流道结构参数关系

本文将所有相关变量列在一个关系式中,基于量纲分析原理建立流道单元局部水头损失结构关系。通过试验观测得知,流道单元局部水头损失与支流道长度 l_1 、支流道长度 l_2 、回转半径 R 、流速 v 、重力加速度 g 和水流运动粘滞系数 μ 有关,采用式(8)表示。

$$h_j = \varphi(l_1, l_2, R, v, \mu, g) \quad (8)$$

式中, h_j 为流道单元局部水头损失(m); l_1 为支流道长度(m); l_2 为支流道长度(m); R 为回转半径(m); v 为水流流速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); g 为重力加速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$); μ 为水流运动粘滞系数($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)。

选取几何量回转半径 R 和运动量流道水流流速 v 作为基本量,把 $(l_1 - l_2)/2$ 作为一个一般量,和剩余 3 个一般量及 2 个基本量分别组合成 4 个无量纲 π 项,并根据式(8)得到各 π 项中相关量指数,结果如表 2 所示。

表 2 流道局部水头损失相关无量纲项

Table 2 Non-dimensional items related to local head loss in flow channels

π 项 π item	表达式 Expression
π_1	$\frac{h_j}{R}$
π_2	$\frac{l_1 - l_2}{2R}$
π_3	$\frac{gR}{v^2}$
π_4	$\frac{\mu}{Rv}$

将表 2 中无量纲项带入式(8)得:

$$\frac{h_j}{R} = \varphi\left(\frac{l_1 - l_2}{2R}, \frac{gR}{v^2}, \frac{\mu}{Rv}\right) \quad (9)$$

以 $\cot A$ 作为衡量分叉角倾斜程度的标准,根据角度公式可知, $(l_1 - l_2)/2$ 一般量与回转半径 R 基本量组成的无量纲量等于 $\cot A$,代入无量纲数学模型式(9)得:

$$\frac{h_j}{R} = \left(\cot A, \frac{gR}{v^2}, \frac{\mu}{Rv}\right) \quad (10)$$

流道单元总水头损失通过 Ansysfluent 软件导

出的首末段压力差获得,并根据沿程水头损失公式计算出首末段沿程水头损失,两者相减得到流道单元局部水头损失,如图 4 所示为进口流速分别为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,流道单元局部水头损失随分叉角和回转半径变化关系图。

根据 16 组方案结果,将式(10)各项取对数处理后,通过 SPSS 进行线性回归,得到流道单元局部水头损失计算表达式(11),误差分析列于表 3。

$$\frac{h_j}{R} = e^{2.005} \left(\frac{gR}{v^2}\right)^{-0.701} \left(\frac{\mu}{Rv}\right)^{0.12} (\cot A)^{0.231} \quad (11)$$

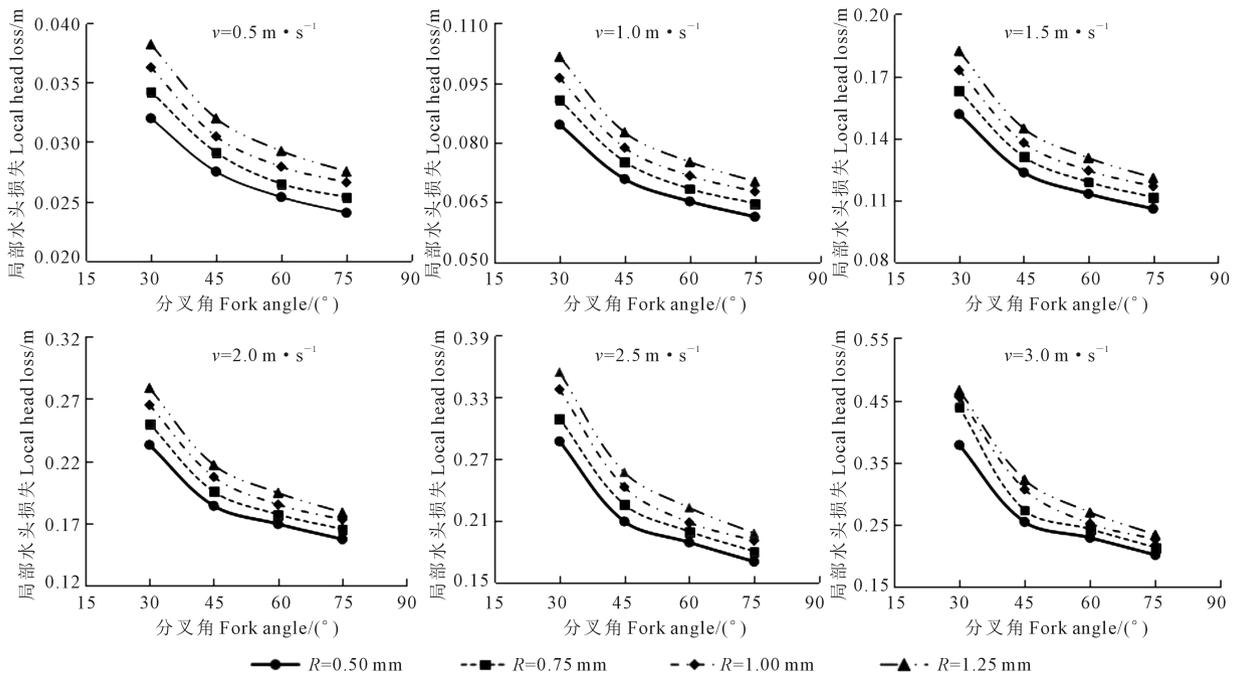


图 4 不同进口流速、流道单元局部水头损失随分叉角和回转半径变化关系图

Fig.4 Relationship of inlet velocity and local head loss with fork angle and radius of rotation

表 3 流道单元局部水头损失回归分析结果

Table 3 Results of regression analysis of local head loss of flow channel unit

测试项目 Test item	系数 Coefficient	标准差 Standard deviation	t 检验 t-test	P
常数 Constant	2.005	0.111	18.060	<0.001
$\cot A$	0.231	0.015	15.790	<0.001
gR/v^2	-0.701	0.011	-62.052	<0.001
μ/Rv	0.120	0.020	5.859	<0.001

注:式(11)相关系数 $R=0.993$,判定系数 $R^2=0.987$,显示出回归方程具有很高的拟合度。

Note:The correlation coefficient $R=0.993$ and the determination coefficient $R^2=0.987$ of equation (11) show that the regression equation has a high degree of fitting.

根据试验设计方案中流道结构参数极值,得到式(11)的适用范围为 $30^\circ \leq A \leq 75^\circ, 0.50 \text{ mm} \leq R \leq 1.25 \text{ mm}$,重力加速度取值 $9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$,忽略温度对水流的影响,水流运动粘滞系数取 20°C 对应的值 $1.01 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,其他系数进行相应的化简整理,得到式(12):

$$h_j = 0.286R^{0.179}v^{1.282}\cot A^{0.231} \quad (12)$$

由上式可知,流道单元局部水头损失与分叉角呈负相关关系,而与回转半径和速度正相关,各因素的重要程度表现为速度>分叉角>回转半径,双向流道结构设计中应着重考虑分叉角的影响。

3.2 流道单元水力性能分析

图 5(见 275 页)为入口流速为 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,不同分叉角和回转半径流道流速云图。随着分叉角的增大,分叉区的涡流面积增大,对冲区的涡流面

积减小,支渠道流速呈减小趋势。在分叉角 A 为 30° 和 75° 时,支渠道流速分别为 $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,这是由于分叉角越小,支渠道与主流道夹角越接近 0° ,水流受到惯性作用,流入支渠道流量越大;当分叉角越大,水流流速转折越大,造成部分水流回流,进入支渠道的流量减小,对冲区涡流强度降低,局部水头损失减小(图 5a)。

随着回转半径的增大,分叉区涡流面积没有明显变化,对冲区涡流面积增大,支渠道流速呈增大趋势,在回转半径 R 为 0.50 mm 和 1.25 mm 时,支渠道流速分别为 $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,这是由于在支渠道前段,流体受到离心力的作用,速度变化较大,分布不均匀,内侧速度小于外侧速度;在支渠道后段,随着回转半径增大,支渠道内侧低速区范围逐渐减小,支渠道段各截面最小流速逐渐增大,对冲区涡流主要发生在支渠道内侧,支渠道内侧流体速度增大,对冲区涡流强度提升,局部水头损失增大,同时阻碍主流道水流通过,促使主流道水流流向支渠道(图 5b)。

图 6(见 275 页)为入口流速为 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时,不同分叉角和回转半径流道压力云图。随着分叉角的增大,分叉区的压降无明显变化,但压降范围增大,对冲区的压降减小,在分叉角 A 为 30° 时,对冲区压降为 600 Pa ;而在 A 为 75° 时,对冲区压降为 300 Pa ,且压降程度明显大于分叉区(100 Pa),因此对冲区的水头损失在总局部水头损失中占主要部分(图 6a)。

随着回转半径的增大,分叉区压降大小和范围没有明显变化,对冲区压降增大,在 R 为 1.25 mm 和 0.50 mm 时,对冲区压降分别为 600 Pa 和 300 Pa ,因此回转半径主要影响的是对冲区的水头损失(图 6b)。

3.3 灌水器水力性能优化设计

根据 $\cot A = (l_1 - l_2) / 2R$ 可得 $\cot A$ 和 R 呈负相关关系,因此当入口流速 v 为固定值时,式(12)存在最优解,使流道的局部水头损失达到最大值。将 $\cot A = (l_1 - l_2) / 2R$ 带入到式(12),得到当 l_2 达最小值 $\cot A$ 、 $A = 32.4^\circ$ 、 $R = 1.72 \text{ mm}$ 时, h_j 达最大值。对公式最优解流道单元进行数值模拟,得出公式最优解流道单元不同进口流速时的局部水头损失,与试验方案中局部水头损失最大的组别相比较,如图 7 所示。

按照正常内镶贴片式灌水器设计,双向流道单元设置为 10 个,间距为 3 mm ,排列方式设置为交叉排列和并列排列,比较两种排列方式灌水器的水力

性能。利用 Ansysfluent 对双向流道灌水器进行数值模拟,灌水器的进口边界设置为压力进口,并给定压力水头范围 $1 \sim 6 \text{ m}$,每隔 1 m 压力水头计算一次流量,其余边界条件、网格划分和数值计算方法的设置与单流道数值模拟相同,模拟不同压力水头下对应的流量值,将 6 个不同压力水头值和对应的流量值进行回归分析,拟合出双向流道灌水器的流态指数和流量系数。如图 8 所示,交叉排列时,灌水器的流量系数为 3.7859 ,流态指数为 0.5776 ;并列排列时,灌水器的流量系数为 4.0725 ,流态指数为 0.6556 。因此交叉排列灌水器水力性能较优。

3 m 压力水头下交叉排列灌水器流速分布如图 9a 所示,流道内部各单元水流流速分布相似。根据流速的不同可以分为主流区、支流区、分叉区、对冲区和汇流区,主流区位于主流道段,支流区位于支渠道段,分叉区位于支渠道入口处,对冲区位于支渠道出口处,而汇流区位于支渠道出口至下一单元入口。主流区流线较密集,速度较大($1.91 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),支流区速度较小($0.76 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)。主流道水流流进支

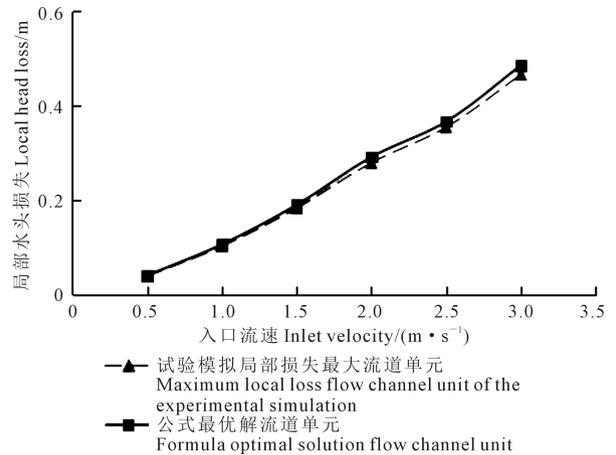


图 7 公式最优解局损和试验模拟最大局损对比图

Fig.7 Comparison diagram of formula optimal solution and test simulation maximum loss

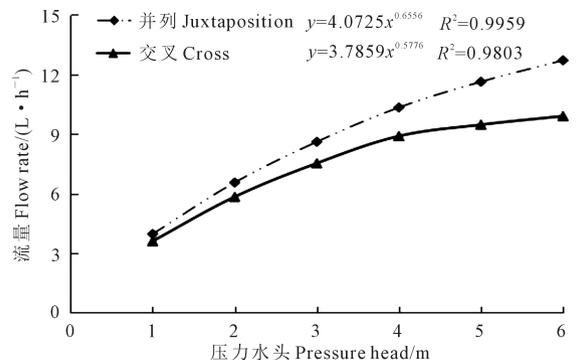
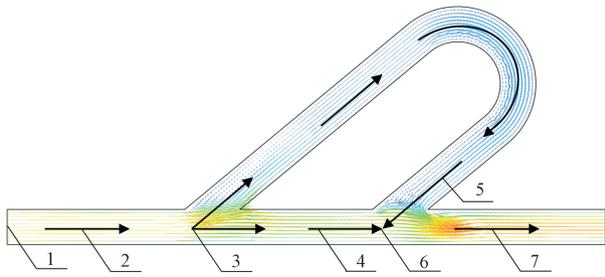


图 8 两种排列方式灌水器压力水头-流量曲线图

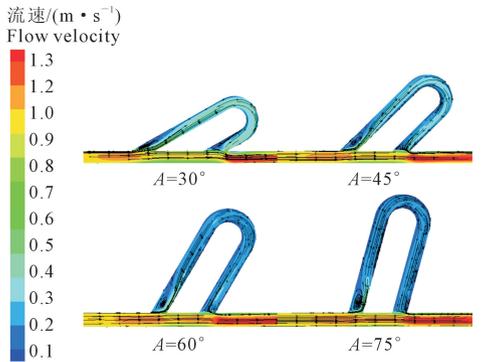
Fig.8 Pressure head-flow curve of two arrangement emitters



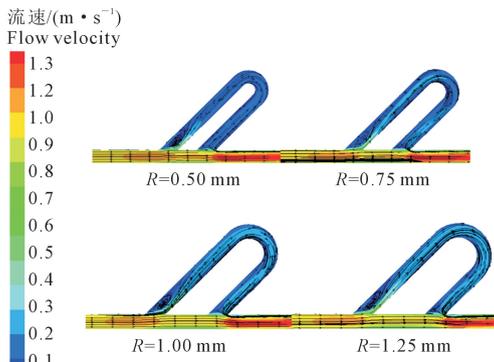
1. 进水口; 2. 来流; 3. 分流; 4. 主流道水流; 5. 支流道水流;
6. 对冲混掺; 7. 流向下一个单元
1. Inlet; 2. Inflow; 3. Diffluence; 4. Mainstream channel flow;
5. Branch channel flow; 6. Hedge mixing; 7. Flow to the next unit

图 1 双向流动灌水器工作原理

Fig.1 Working principle of bidirectional flow channel emitter



(a) 不同分叉角 Different fork angle

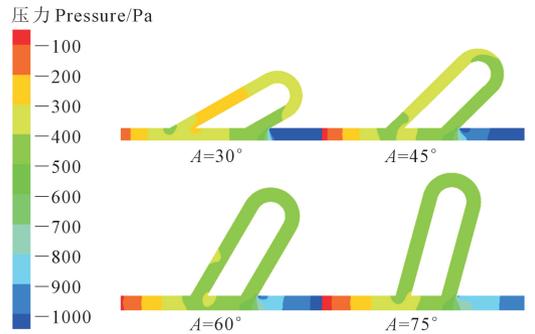


(b) 不同回转半径 Different turning radius

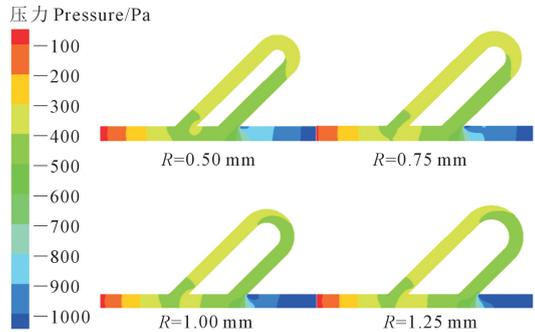
图 5 不同分叉角和回转半径渠道流速云图

Fig.5 Flow velocity diagram of channel with different fork angles and turning radiuses

渠道, 流速、方向突然转变, 在分叉区产生漩涡, 并且水流从支流道出口流出, 其 x 方向流速与主流道水流流速相反, 两者在对冲区产生漩涡。漩涡流线较为稀疏, 表明流速较小, 流速由漩涡边缘到中心处逐渐变小, 漩涡最外侧流速为 $0.38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 漩涡中心处流速趋于 0。漩涡处流速大小及方向变化剧



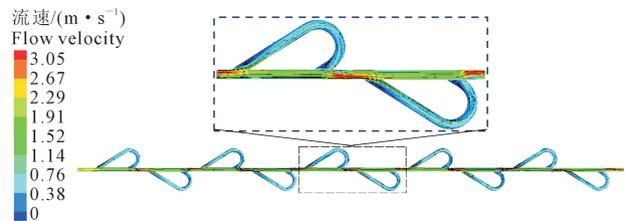
(a) 不同分叉角 Different fork angle



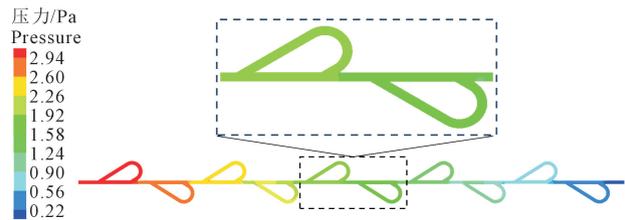
(b) 不同回转半径 Different turning radius

图 6 不同分叉角和回转半径渠道压力云图

Fig.6 Flow channel pressure diagram with different fork angles and turning radiuses



(a) 交叉排列灌水器流速云图
Flow velocity diagram of cross-arrayed emitter



(b) 交叉排列灌水器压力云图
Pressure diagram of cross-arrayed emitter

图 9 交叉排列灌水器渠道流速和压力分布

Fig.9 Flow velocity and pressure distribution of cross-arrayed emitter channels

烈, 漩涡的存在使水流产生较大扰动, 不断冲刷渠道壁面, 从而产生局部水头损失, 可以起到消能作用; 主流道水流受到支流道水流 y 方向流速的作用, 导致汇流区入口减小, 流速增大, 最大流速为 $3.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 同时促进汇流区水流流向下一单元的支流道, 增大下一单元的局部水头损失, 这是交叉排列

灌水器水力性能比并列排列灌水器较优的原因。

交叉排列灌水器压力分布如图 9b 所示,图中可以明显地看到压力由进口到出口逐级减小,从 29.4 kPa 下降为 0.22 kPa,压力骤降的区域发生在流道单元对冲区后,表明流道对冲湍流产生相对较大的局部水头损失,达到了良好的消能效果,每个单元段水头损失大约为 2.9 kPa。

为了验证模拟模型选取与计算精度的可靠性,利用 3D 打印技术,选用有机树脂材料,按照最优方案模型 1:1 比例加工灌水器模型,并利用高倍显微镜校核流道尺寸。将灌水器模型放到测试装置测试,每组测试 3 次,每次测试时间 5 min,取平均值与模拟结果进行对照。从图 10 看出,实测值比模拟值略低,误差 < 10%,符合误差要求。试验对模拟计算的验证,充分证明了模拟软件的模型选取、参数设置以及模拟计算精度的准确性。

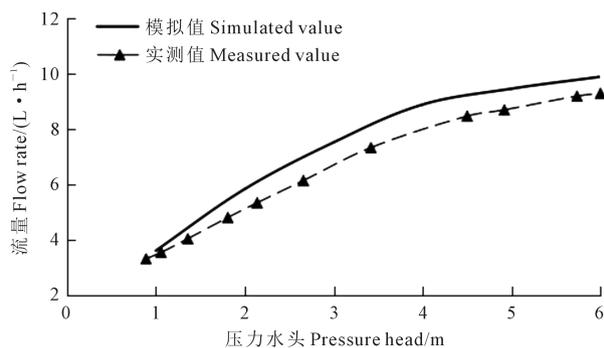


图 10 交叉排列灌水器压力水头-流量曲线

Fig.10 Cross arrayed emitter pressure head-flow curve

4 结 论

1) 双向流道单元局部水头损失与分叉角、回转半径和流道流速有关,分叉角与局部水头损失呈负相关关系,回转半径及流速与局部水头损失呈正相关关系,在流道结构因素中分叉角对其影响最大,可在流道设计中着重考虑分叉角的影响。

2) 利用 Ansysfluent 软件对流道内部的流场分布进行可视化研究,其中流速云图漩涡区基本呈现分叉区和对冲区两种分区。随着双向流道分叉角增大,支流道流速减小,流道转折处分叉区紊动程度提升,对冲区紊动程度降低,但对冲区局部水头损失始终大于分叉区,说明对冲区局部水头损失占主要部分。随着双向流道回转半径减小,支流道流速减小,流道转折处分叉区紊动程度无明显变化,对冲区

紊动程度降低,流道整体局部水头损失减小,说明回转半径主要影响的是对冲区局部水头损失。

3) 根据双向流道单元局部水头损失结构关系式,当入口流速为固定值时,分叉角取 32.4° ,回转半径取 1.72 mm,双向流道单元局部水头损失最大。当流道单元按照交叉和并列两种方式排列时,交叉排列双向流道灌水器的流态指数较优,且其优化后结构灌水器模型模拟精度较高。

参 考 文 献:

- [1] 王新端,白丹,郭霖,等.改进的滴灌双向流道结构参数对水力性能影响[J].排灌机械工程学报,2016,34(12):1093-1098.
WANG X D, BAI D, GUO L, et al. Influence of structural parameters of improved bidirectional flow channel on hydraulic performance in drip irrigation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2016, 34(12): 1093-1098.
- [2] XU T Y, SU Y R, SU Z M, et al. Simulation of the hydraulic behavior of a bionic-structure drip irrigation emitter[J]. Fluid Dynamics & Materials Processing, 2022, 18(4): 1169-1182.
- [3] XU T Y, ZHANG L X. Hydraulic performance and energy dissipation effect of pit structure flow channel emitter[J]. IFAC-PapersOnLine, 2019, 52(30): 143-148.
- [4] 张丽娟,李双营.滴灌齿型迷宫流道灌水器水力性能数值试验研究[J].水电能源科学,2017,35(8):103-106.
ZHANG L J, LI S Y. Numerical experimental investigation of douche hydraulic performance on drop irrigation of tooth-type labyrinth channel[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(8): 103-106.
- [5] QIN C, ZHANG J Z, WANG Z H, et al. Anti-clogging performance optimization for shunt-hedging drip irrigation emitters based on water-sand motion characteristics[J]. Water, 2022, 14(23): 3901.
- [6] 苑伟静,魏正英,楚华丽,等.分流式灌水器结构优化设计与试验[J].农业工程学报,2014,30(17):117-124.
YUAN W J, WEI Z Y, CHU H L, et al. Optimal design and experiment for divided-flow emitter in drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(17): 117-124.
- [7] 朱月亭,曹伟,刘洁.新型分段插杆式灌水器结构设计及水力特性研究[J].节水灌溉,2020,(7):49-53.
ZHU Y T, CAO W, LIU J. Study on structural design and hydraulic characteristic of a new type segmented rod emitter[J]. Water Saving Irrigation, 2020, (7): 49-53.
- [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] 翟英剑,吴文勇,王振华,等.基于 Ansys Fluent 的压力对灌水器流道单元水力特性及抗堵塞性能探究[J].节水灌溉,2022,(5):47-53,59.
ZHAI Y J, WU W Y, WANG Z H, et al. Analysis of the effect of pressure on hydraulic and anti-clogging performance of the flow channel unit of the irrigator based on Ansys Fluent software[J]. Water

- Saving Irrigation, 2022, (5): 47-53, 59.
- [10] 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 Q L, NIU W Q, LI L Z. 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.
- [11] 王新端, 白丹, 宋立勋, 等. 不同结构滴灌双向流道灌水器抗堵性能对比试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14): 78-85.
WANG X D, BAI D, SONG L X, et al. Contrast experiment on anti-clogging performance of bidirectional flow channel emitters with different structures in drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(14): 78-85.
- [12] 楚华丽, 魏正英, 马胜利, 等. 基于灰关联分析的卡门涡街形流道多目标优化[J]. 灌溉排水学报, 2015, 34(12): 99-103.
CHU H L, WEI Z Y, MA S L, et al. Multi-objective optimization of Karman vortex street emitter based on grey relational analysis [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2015, 34(12): 99-103.
- [13] 郭市政, 张传杰, 郭彬, 等. 单内齿灌水器齿宽对其抗堵塞性能的影响[J]. 节水灌溉, 2022, (6): 66-71.
GUO S Z, ZHANG C J, GUO B, et al. Influence of tooth width of single internal tooth emitter on its anti-clogging performance [J]. Water Saving Irrigation, 2022, (6): 66-71.
- [14] 杨彬, 吴勇, 王建东, 等. 齿型迷宫灌水器抗堵塞性能分析与结构优化模拟[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(8): 84-89, 128.
YANG B, WU Y, WANG J D, et al. Anti-clogging performance analysis and structure optimization simulation for dental labyrinth emitter [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(8): 84-89, 128.
- [15] 金文, 张鸿雁. 灌水器流道结构优化数值分析[J]. 节水灌溉, 2013, (12): 74-78.
JIN W, ZHANG H Y. Numerical analysis on the optimization of the emitter's flow channel structure[J]. Water Saving Irrigation, 2013, (12): 74-78.
- [16] 邢少博, 张金珠, 王振华, 等. 不同工作压力下穿孔形灌水器内的旋涡作用分析[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(10): 1075-1080.
XING S B, ZHANG J Z, WANG Z H, et al. Analysis of vortex action in perforated emitters under different working pressures[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2021, 39(10): 1075-1080.
- [17] 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 X L, ZHAO X H, LI Y K, 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.
- [18] 田济扬, 白丹, 于福亮, 等. 基于 Fluent 软件的滴灌双向流道灌水器水力性能数值模拟[J]. 农业工程学报, 2014, 30(20): 65-71.
TIAN J Y, BAI D, YU F L, et al. Numerical simulation of hydraulic performance on bidirectional flow channel of drip irrigation emitter using Fluent [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(20): 65-71.
- [19] 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 C J, NIU Y, LIU X H. 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.
- [20] 张爱习, 霍倩, 檀海斌. 齿型流道灌水器数值模拟计算域的优化分析[J]. 节水灌溉, 2019, (8): 98-101.
ZHANG A X, HUO Q, TAN H B. Optimization analysis of numerical simulation calculation domain of emitter with tooth type flow channel [J]. Water Saving Irrigation, 2019, (8): 98-101.
- [21] 李治勤, 马静. 迷宫灌水器水流流态试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 82-86.
LI Z Q, MA J. Experiment on flow pattern in labyrinth emitter [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(1): 82-86.
- [22] 常莹华. 齿形迷宫流道结构设计及性能试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
CHANG Y H. Study on structural design and performance experiment of dental shape labyrinth path [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2009.