

王亚林, 李京芳, 鄢锐, 等. 圆柱式滴头内镶及外包对滴灌毛管水力特性影响的模拟研究 [J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(4): 106-112.
WANG Yalin, LI Jingfang, YAN Rui, et al. Simulation study on the influence of trickle laterals equipped with integrated in-line and out-line emitters on the hydraulic characteristics[J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(4): 106-112.

圆柱式滴头内镶及外包对滴灌毛管 水力特性影响的模拟研究

王亚林, 李京芳, 鄢锐, 胡紫寒, 姚田成, 胡怡玲

(三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443000)

摘要:【目的】研究圆柱式滴头镶嵌方式对滴灌毛管水力特性的影响。【方法】对 2 种内镶式滴灌毛管和 1 种外包式滴灌毛管进行灌水试验, 同时采用计算流体动力学 (Computational fluid dynamics, CFD) 方法对 3 种滴灌毛管进行数值模拟并验证。在此基础上, 对不同滴头流量下内镶式及外包式滴灌毛管水头损失及铺设长度进行模拟计算。【结果】滴头内镶式及外包式滴灌毛管总水头损失模拟值略低于实测值, 滴头外包式滴灌毛管模拟值与实测值相对偏差较小; 滴头镶嵌方式对滴灌毛管水力特性影响显著, 滴头外包式滴灌毛管相较滴头内镶式滴灌毛管总水头损失较小, 总水头损失减小比例超过 49.2%, 且随滴头流量增加总水头损失减小比例逐渐增大; 滴头外包式滴灌毛管最大铺设长度较滴头内镶式滴灌毛管更长, 长度增加了 21.6%~56.9%; 滴头内镶式滴灌毛管总水头损失相对更大的主要原因是断面流速再分布引起压力梯度急变消耗了大量水流能量。【结论】滴头外包式滴灌毛管水力性能优于滴头内镶式滴灌毛管, 对于长距离经济作物滴灌系统设计, 可优先考虑滴头外包式滴灌毛管。

关键词: 滴灌毛管; 镶嵌方式; 滴头; 水力特性; 数值模拟

中图分类号: S275.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2021)04-0106-07

Simulation study on the influence of trickle laterals equipped with integrated in-line and out-line emitters on the hydraulic characteristics

WANG Yalin, LI Jingfang, YAN Rui, HU Zihan, YAO Tiancheng, HU Yiling

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

Abstract: 【Objective】To study the influence of emitter mosaic mode on the hydraulic characteristics of trickle laterals. 【Method】Two kinds of trickle laterals equipped with integrated in-line emitters and one trickle lateral equipped with integrated out-line emitters were tested. At the same time, three kinds of trickle laterals were simulated and verified by computational fluid dynamics (CFD) method. On this basis, the head loss and laying length of trickle laterals equipped with integrated in-line and out-line emitters under different discharge were simulated and calculated. 【Result】The simulated values of the total head loss of trickle laterals equipped with integrated in-line and out-line emitters were slightly lower than the measured values, and the relative deviation between the simulated and measured values of trickle laterals equipped with integrated out-line emitters was smaller. The drip head embedding mode had a significant influence on the hydraulic characteristics

收稿日期: 2020-09-04 网络首发时间: 2021-03-18 14:44:11

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20210318.1125.002.html>

作者简介: 王亚林 (1986—), 男, 讲师, 博士, E-mail: gmhx535@163.com

基金项目: 湖北宜昌自然科学基金 (A1930210); 三峡大学高层次人才专项 (1910103)

of trickle laterals. Compared with trickle laterals equipped with integrated in-line emitters, the total head loss of trickle laterals equipped with integrated out-line emitters was smaller, with the reduction ratio of the total head loss exceeding 49.2%, and the reduction ratio of the total head loss gradually increased with the increase of the drip head flow. The maximum laying length of trickle laterals equipped with integrated out-line emitters was longer than that of trickle laterals equipped with integrated in-line emitters, and the length increased by 21.6% to 56.9%. The main reason for the greater total head loss of trickle laterals equipped with integrated in-line emitters was that the pressure gradient of trickle laterals equipped with integrated in-line emitters consumes a large amount of water flow energy due to the redistribution of the flow velocity in the section. 【Conclusion】 The hydraulic performance of trickle laterals equipped with integrated out-line emitters is better than that of trickle laterals equipped with integrated in-line emitters. For the design of long distance economic crop drip irrigation system, trickle laterals equipped with integrated out-line emitters can be given priority.

Key words: trickle lateral; mosaic mode; emitter; hydraulic characteristic; numerical simulation

滴灌作为有效的节水灌溉和一体化管理方式在很多地区得到应用。滴灌设计时,为了保证灌水质量和提高水分利用率,要求滴灌毛管网中滴头出水相对均匀,而水流动过程中受毛管边壁及滴头阻力影响,毛管压力沿水流方向逐渐衰减。如何在低压条件下最大化地减少管网水流水头损失及提高灌水均匀度成为滴灌设计的关键^[1-3]。滴灌毛管水头损失包括滴头段的局部水头损失和非滴头段的沿程水头损失。针对滴灌毛管沿程水头损失的研究已经较为成熟,主要基于 Darcy-Weisbach 公式确定^[4]。对于滴头局部水头损失,依据滴灌设计规范,在缺乏资料情况下,滴头局部水头损失按毛管沿程水头损失的 10%~20% 计算^[5]。不少学者针对滴头局部水头损失做了相关研究,虽然取得了一些成果,但是仍未给出被行业一致认可的计算模型^[6]。

毛管局部水头损失因其滴头种类、尺寸差异较大,目前仍没有形成统一认识。Bagarello 等^[7]和 Provenzano 等^[8]对毛管局部水头损失做了相关研究,通过回归试验结果得出了滴头局部水头损失系数与滴头相对形状有关的结论,并给出计算表达式。仇振杰等^[9]通过试验研究了滴头插入式毛管水头损失规律,认为毛管局部水头损失既与滴头形状有关又与雷诺数有关,但由于只是对特定尺寸毛管进行了研究,其公式适用范围受限。上述研究都是通过试验回归得出的经验公式。此外,Demir 等^[10]、Ferro^[11]和 Yildirim^[12]利用量纲分析法对毛管综合摩擦阻力做了相关研究,认为试验与量纲分析理论结合可得到更合理、准确的结果。Provenzano 等^[13]通过计算流体动力学 (Computational fluid dynamics, CFD) 模拟对内镶式毛管流速分布进行相关研究,认为 CFD 具有很高的准确性,且节省时间和成本。石喜等^[14]通过 CFD 数值模拟与试验研究了三通管

局部水头损失,认为模拟在研究边壁形状不规则、存在流体分离等强旋流时有较高的精度。

以上关于毛管局部水头损失的研究,大多是根据试验得到经验公式,在实际应用时计算精度仍有待继续提高。本文选用 2 种内镶式及 1 种外包式滴灌毛管,并以 CFD 数值模拟为基础,采用试验与模拟相结合的方法,对圆柱式滴灌毛管水力特性进行了研究。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验在三峡大学水工厅进行,试验装置主要包括水箱、离心泵、变频柜、高精度压力表、游标卡尺、内镶式滴灌毛管、外包式滴灌毛管、电子秤等,如图 1 所示。试验选用外径分别为 12 和 16 mm 的 2 种内镶式滴灌毛管和一种外径为 16 mm 的外包式滴灌毛管,利用游标卡尺测量滴头尺寸、滴头间距等,精

1: 泵; 2: 水箱; 3: 进水管; 4: 回水管; 5: 阀门; 6: 变频稳压器; 7: 电脑; 8: 压力表; 9: 回水箱; 10: 毛管; 11: 滴头; 12: 外包式滴头; 13: 内镶式滴头

1: Pump; 2: Water box; 3: Water inlet pipe; 4: Return pipe; 5: Valve; 6: Variable frequency stabilizer; 7: Computer; 8: Pressure gauge; 9: Return tank; 10: Trickle lateral; 11: Emitter; 12: Out-line emitter; 13: In-line emitter

图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device

度为 0.01 mm, 利用称重法测定毛管流量, 精度为 0.01 g。试验首先将滴头封堵, 在毛管首末端安装精度为 0.1 kPa 的压力计, 通过首末端阀门控制毛管流量, 测量周期为 100 s, 首部压力范围为 0~20 m (压力单位用水头高度表示)。滴头间距为 0.33 m, 毛管长度为 8.42 m, 毛管详细尺寸参数见表 1。温度计测得水体温度为 18~23 ℃。根据所测毛管流量

计算毛管流速及雷诺数, 毛管首末端压力差即为总水头损失。内镶式滴灌毛管采用秦川节水公司生产的 12 和 16 mm 毛管, 外包式滴灌毛管采用三峡大学自研的 16 mm 毛管。外包圆柱式滴头主要由滴头入口、外包迷宫流道、滴头外壁、滴头出口组成。滴头流道采用矩齿形迷宫流道, 迷宫流道螺旋环绕于毛管外壁。

表 1 滴灌毛管几何参数
Table 1 Geometric parameters of drip irrigation pipes

编号 No.	毛管类型 Type of trickle lateral	毛管外径/mm External diameter of trickle lateral	毛管内径/mm Internal diameter of trickle lateral	滴头内径/mm Emitter internal diameter	滴头长度/mm Emitter length	滴头间距/mm Emitter spacing
E1	内镶式 In-line emitter	12	10.68	8.50	40	260
E2	内镶式 In-line emitter	16	14.34	11.60	40	260
E3	外包式 Out-line emitter	16	14.34	14.34	40	260

1.2 数值分析

通过绘图软件 CAD 建立毛管滴头几何模型, 采用 GAMBIT 构建网格模型, 将网格文件导入 FLUENT 进行模拟计算, 进口边界采用速度进口边界, 出口边界采用压力边界条件, 以实测温度均值 20 ℃ 为模拟水体温度, 对应运动黏滞系数为 1.01×10^{-6} m/s², 毛管采用混合网格形式, 非滴头段网格单元以六面体网格元素进行划分, 滴头段网格单元采用四面体网格形式, 增加局部形变处网格个数和离散程度, 网格数范围为 $1.2\times10^5\sim2.8\times10^5$ 。模拟计算采用 Realizable $k-\varepsilon$ 模型^[15], 方程如下:

$$\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k + \rho \varepsilon, \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon}^* G_k - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon), \tag{2}$$

式中: k 为湍动能; ε 为耗散速率; u_i 为流速在 i 方向的分量, m/s; ρ 为液体的密度, kg/m³; μ_{eff} 为修正后流体的黏滞系数, Pa·s。 $C_{1\varepsilon}^*$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 为经验常数; G_k 为平均速度梯度引起的湍动能产生项; 修正系数 $\alpha_k=1.39$; x_i, x_j 表示 i, j 方向符号。

滴灌毛管出口与大气相接, 出口条件选择自由出流, 采用标准壁面函数法处理近壁区流动, 使用 SIMPLE 算法进行求解, 外包式滴头实体模型和网格模型如图 2 所示。

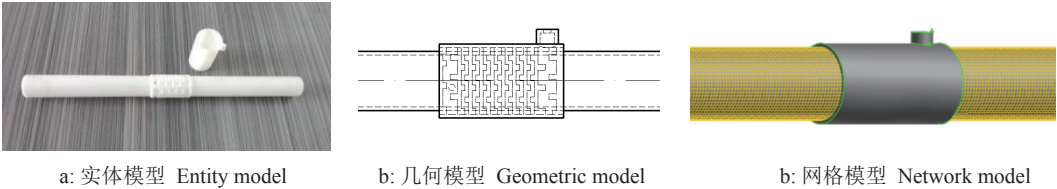


图 2 外包式滴头实体和网格模型

Fig. 2 Entity and network models of trickle laterals equipped with integrated out-line emitters

2 结果与分析

2.1 数值模拟验证

根据表 1 中的几何参数, 分别构建 3 组滴灌毛管几何模型及网格模型, 通过 Fluent 对模型数值模拟。图 3 列出了 3 组滴灌毛管总水头损失实测值与模拟值对比关系。从图 3 中可以看出, 随流速增大, 毛管总水头损失逐渐增大; 毛管总水头损失实测值

与模拟值略有偏差, 但趋势基本吻合。E1 内镶式滴灌毛管实测值与模拟值最小相对误差为 6.9%, 最大相对误差为 12.8%; E2 内镶式滴灌毛管实测值与模拟值最小相对误差为 5.9%, 最大相对误差为 17.5%。E3 外包式滴灌毛管实测值与模拟值最小相对误差为 3.1%, 最大相对误差为 7.2%。通过实测值与模拟值对比结果可以看出, 2 种内镶式滴灌毛管模拟值略低于实测值, 主要由于试验中毛管入口、毛管

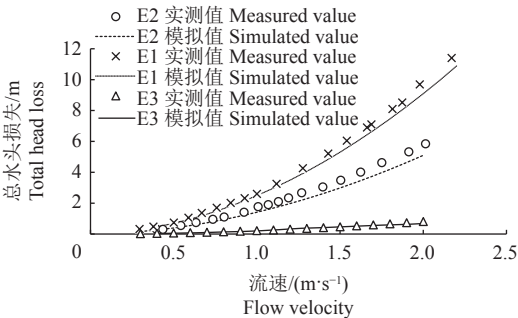


图 3 滴灌毛管水头损失实测值与模拟值

Fig. 3 Measured and simulated head loss of drip irrigation pipes

出口与支管通过管道直接相连,水流经过此处存在突然扩大和突然收缩的局部水头损失,而 Gambit 几何模型没有考虑此段管径变化。外包式滴灌毛管模拟值与实测值相对误差更小,分析原因认为实测内镶式滴灌毛管圆柱滴头存在制造偏差,导致滴头圆柱空腔与标准圆形存在偏差,而此偏差对毛管局部水头损失影响很大,外包式滴灌毛管圆柱滴头镶嵌于毛管外部,滴头偏差不会对毛管水力特性造成影响,因此外包式滴灌毛管总水头损失模拟值与实测值更吻合。与试验相比,数值模拟具有操作方便、省工省时,具有可避免试验中制造偏差、读数误差等不可控因素的影响等优点。

2.2 滴灌毛管总水头损失

为比较外包式滴灌毛管与内镶式滴灌毛管总水头损失差异,按照标准灌溉小区毛管铺设长度 60 m 计算,设置 5 组滴头流量:1、3、5、7 和 9 L/h,并假定滴头流量均匀一致,对内镶式滴灌毛管 E2 和外包式滴灌毛管 E3 进行模拟分析。图 4 列出了 2 组毛管总水头损失对比结果。从图 4 中可以看出,内镶式滴灌毛管总水头损失明显大于外包式滴灌毛管,3、5、7 和 9 L/h 流量下,外包式滴灌毛管只有内镶式滴灌毛管总水头损失的 0.454、0.423、0.402 和 0.387;1 L/h 流量下外包式滴灌毛管与内镶式滴灌毛管总

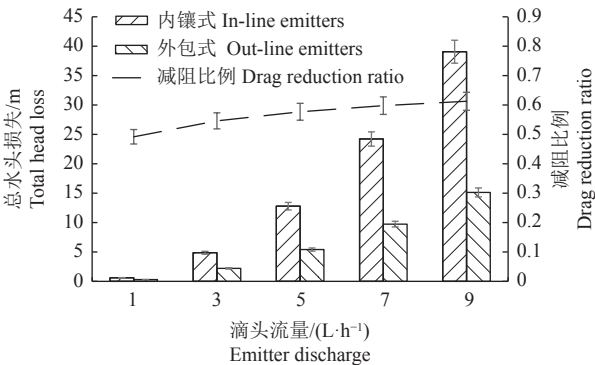


图 4 内镶式与外包式滴灌毛管总水头损失比较

Fig. 4 Comparison of total head loss of trickle laterals equipped with integrated in-line and out-line emitters

水头损失的比值为 0.508。图 4 还显示了外包式滴灌毛管相对内镶式滴灌毛管减阻比例变化关系,由图 4 可以看出,相对于内镶式滴灌毛管,外包式滴灌毛管减阻比例随滴头流量的增大不断增大,在灌溉流量较大时,外包式滴灌毛管相对内镶式滴灌毛管水头损失更小,减阻优势更明显,外包式滴灌毛管相较内镶式滴灌毛管减阻比例最小值为 49.2%,最大值为 61.3%。

2.3 滴灌毛管最大铺设长度

为比较外包式与内镶式滴灌毛管最大铺设长度,以内镶式滴灌毛管 E2 和外包式滴灌毛管 E3 为研究对象,设置首部初始工作压力水头 20 m,假定滴头在 5~20 m 压力水头范围内流量恒定,毛管末端的压力水头刚好为 5 m,设置 4 组流量,分别为 1、3、5 和 7 L/h,沿程水头损失采用 Darcy-Weisbach 公式和 Blasius 公式计算^[16],公式如下:

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{v^2}{2g}, \tag{3}$$

$$\lambda = \frac{64}{Re}, \tag{4}$$

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}, \tag{5}$$

式中: h_f 为毛管沿程水头损失, m; λ 为沿程阻力系数; d 为毛管内径, m; l 为滴头长度, m; v 为毛管水流速度, m/s; g 为重力加速度, m/s^2 , Re 为毛管水流雷诺数。在 $Re < 2\,000$ 的层流范围内,沿程阻力系数 λ 主要采用式 (4) 计算;在 $3\,000 < Re < 100\,000$ 的光滑紊流范围内, λ 采用式 (5) 计算;在 $2\,000 < Re < 3\,000$ 的过渡区,将沿程阻力系数 λ 视为常数 0.04^[17]。局部水头损失 h_j 的计算采用内镶式滴灌毛管局部水头损失系数法,计算表达式采用式 (6) 和式 (7):

$$h_j = \alpha \frac{v^2}{2g}, \tag{6}$$

$$\alpha = 0.056 \left[\left(\frac{D_i}{D_g} \right)^{17.83} - 1 \right], \tag{7}$$

式中: α 为局部水头损失系数; D_g 为圆柱式滴头内径, m; D_i 为毛管内径, m。

内镶式与外包式滴灌毛管最大铺设长度如图 5 所示。由图 5 可知,在初始压力水头为 20 m,滴头设计流量为 1 L/h 时,内镶式滴灌毛管最大铺设长度为 178 m,相同首部压力水头、毛管内径和设计流量条件下,外包式滴灌毛管极限铺设长度为 240 m,极限铺设长度增加了 34.8%。当设计流量为 3 L/h 时,内镶式滴灌毛管最大铺设长度为 79 m,同等条

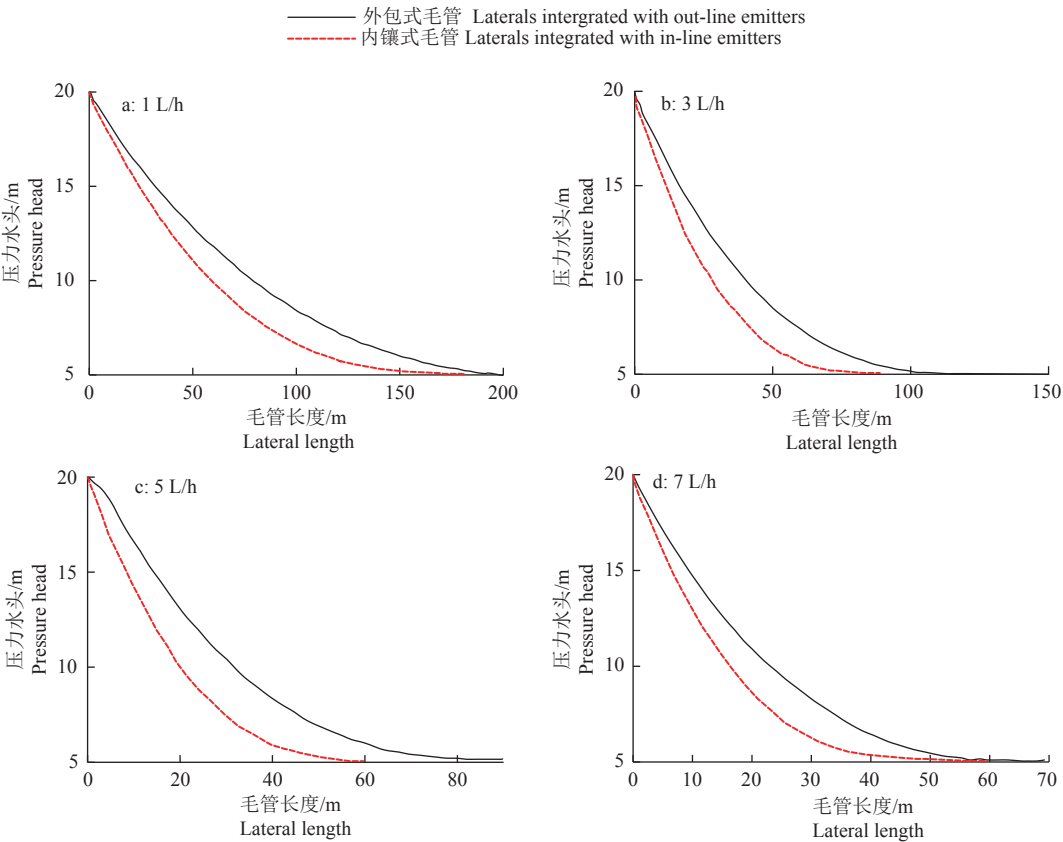


图 5 各流量下的内镶式与外包式滴灌毛管最大铺设长度

Fig. 5 Maximum laying length of trickle laterals equipped with integrated in-line emitters and out-line emitters at each flow rate

件下, 外包式滴灌毛管极限铺设长度为 124 m, 极限铺设长度增加了 56.9%。当设计流量为 5 L/h 时, 内镶式滴灌毛管最大铺设长度为 63 m, 同等条件下, 外包式滴灌毛管极限铺设长度为 92 m, 极限铺设长度增加了 46.0%。当设计流量为 7 L/h 时, 内镶式滴灌毛管最大铺设长度为 51 m, 同等条件下, 外包式滴灌毛管极限铺设长度为 62 m, 极限铺设长度增加了 21.6%。结果表明: 相同条件下, 外包式滴灌毛管相较内镶式滴灌毛管可增大铺设长度、增加灌溉面积。

从图 5 可以看出, 随着流量的增加, 内镶式和外包式滴灌毛管极限铺设长度逐渐减少, 同时, 外包式滴灌毛管极限铺设长度明显优于内镶式滴灌毛管, 外包式滴灌毛管在满足灌水均匀性的同时,

能够有效地减少滴头局部水头损失, 更适合较长距离的灌溉小区。相较于内镶式滴灌毛管, 外包式滴灌毛管能有效地提高铺设长度, 在相同铺设长度条件下, 外包式滴灌毛管灌水均匀度提高。

2.4 流场特性分析

根据试验, 外包式滴灌毛管压力-流量关系为 $q = 1.86 H^{0.54}$, 其中, q 代表滴头流量, H 代表压力。图 6 给出了外包式滴头流道流速及压力分布规律。压力最大值出现在流道入口处, 沿水流方向流道压力逐渐减小。低压区主要集中在直角弯道凸面, 由于直角转弯导致边壁处水流边界层分离出现低压回旋区。高压区主要分布在弯道凹面拐角处, 由于流道凹面拐角水流发生滞留回旋, 流速相对较低, 由能量守恒原理可知, 此处压力较高, 由图 6a 可得到验

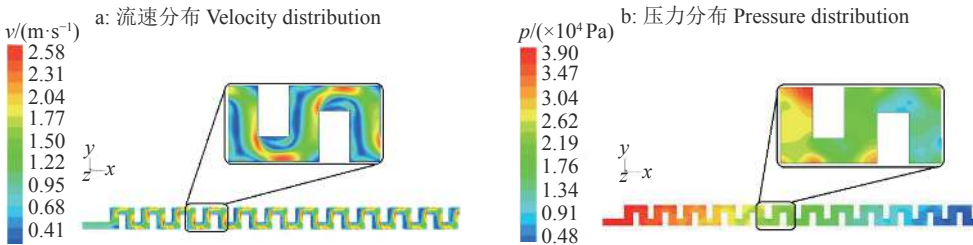


图 6 滴头流道流速和压力分布

Fig. 6 Velocity and pressure distribution in emitter channel

证。流速较大处主要发生在流道主流区, 这与部分学者研究结果一致^[18-19]。在流道直角弯折处流速较低, 边壁直角弯折引起水流向突变, 水流以涡流回旋的形式存在于折角处, 导致折角近壁流速降低。

由图 7a 可知, 外包式滴灌毛管过水断面沿程均匀光滑, 毛管至滴头过渡处不存在断面突变, 水流沿程平顺, 因此外包式滴灌毛管局部水头损失很小, 压力衰减主要由管道沿程阻力引起。最大流速发生在管轴线位置, 主流区流道较大, 靠近边壁流速逐级减小。内镶式滴灌毛管由于滴头镶嵌于毛管内部, 滴头厚度引起毛管断面形状突变, 导致滴

灌毛管出现局部阻力, 产生局部水头损失, 由图 7a 流速分布可知, 内镶圆柱滴头处断面平均流速明显大于非滴头的毛管断面, 水流从毛管到滴头段以及从滴头段到毛管段, 流速大小和方向发生激变, 流速在滴头段重新分布, 此过程消耗大量水流能量, 产生局部阻力, 引起局部水头损失。由图 7b 可知, 外包式滴灌毛管压力梯度基本均匀变化且压力衰减较慢, 滴头段压力未发生急剧变化; 内镶式滴灌毛管在毛管至滴头过渡段, 压力梯度急剧变化, 压力值迅速减小, 滴头至毛管段压力逐渐增大, 在滴头下游恢复至均匀衰减。

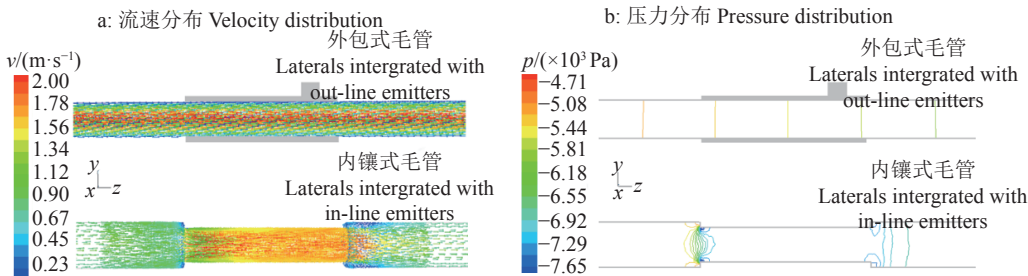


图 7 滴灌毛管流速和压力分布

Fig. 7 Velocity and pressure distribution in drip irrigation pipes

3 讨论与结论

3.1 讨论

数值模拟因操作方便、省工省时、可精确表达管网流场特性等优点在滴灌领域得到广泛应用。数值模拟在构建滴头外包式滴灌毛管几何模型时, 通常采用标准几何体, 而实际滴灌毛管存在制造偏差和运行偏差, 导致实际管道几何形状与数值模拟建立的几何模型存在一定偏差, 引起模拟结果与实际产生一定差异^[4]。滴灌毛管总水头损失包括毛管非滴头段沿程水头损失和滴头段局部水头损失, 滴头内镶改变毛管原断面形状, 产生额外局部水头损失, 毛管断面变化规律对滴灌毛管总水头损失影响显著, 这与部分学者研究结果一致^[20-22]。在流量一定条件下, 毛管沿程水头损失主要与毛管管径和相对形状有关, 对于首部运行压力水头大于 10 m 的滴灌毛管, 沿程管径可视为标准圆形, 而对于低压灌溉毛管沿程管径并非标准圆形, 应根据实际形状进行换算^[23-24]。在管径和管长一定情况下, 毛管沿程水头损失通常无法减小, 但通过改变滴头形状或改变镶嵌方式可降低滴头局部水头损失, 本文借助 CFD 数值模拟滴灌毛管压力梯度衰减和精确显示流场特性的优势, 研究了滴头结构形式对滴灌毛管阻力变化的影响。

滴头流态指数是衡量滴头水力性能的一个重要指标, 流态指数越小滴头流量受压力变化影响越小, 而流态指数主要与流道水流紊动特性有关, 流道制紊能力越强水流在流道中消耗能量越大, 滴头流量受压力影响越小。因此流道结构形式对滴头水力性能影响很大^[25-26]。在流道宽度和深度固定的前提下, 流道锯齿形状、间距和高度偏差等是影响流道水力性能的重要因素, 主要可通过增大主流区长度、增加主航道弯折频率和弯折幅度的形式增加流道水流沿程和局部水头损失, 实现压力补偿, 提高滴头水力性能。矩齿形迷宫流道最大流速主要发生在流道主流区, 这与部分学者研究结果一致^[27]。在流道直角弯折处流速较低, 边壁直角弯折引起水流向突变, 水流以涡流回旋的形式存在于折角处, 导致折角近壁流速降低。魏正英等^[28]提出最大流速发生在流道主航道内, 低速区主要发生在主航道以外, 这与本文模拟结果相符, 通过优化流道形状可降低阻滞区范围, 增大流道过流能力和抗堵能力。

3.2 结论

对内镶式和外包式滴灌毛管进行灌水试验, 同时采用 CFD 方法对不同滴头流量下内镶式及外包式滴灌毛管水力特性模拟计算, 结果如下:

1) 外包式滴灌毛管及内镶式滴灌毛管总水头损失模拟值略低于实测值, 但变化趋势基本吻合。

外包式滴灌毛管模拟值与实测值相对误差更小。内镶式滴灌毛管实测值与模拟值最小相对误差为 5.9%，最大相对误差为 17.5%，外包式滴灌毛管实测值与模拟值最小相对误差为 3.1%，最大相对误差为 7.2%。

2) 外包式滴灌毛管相较于内镶式滴灌毛管总水头损失更小，总水头损失减小比例随滴头流量增加而增大，减阻比例大于 49.2%。相同条件下，外包式滴灌毛管最大铺设长度比内镶式滴灌毛管更长，试验所选工况下，最大铺设长度增加范围为 21.6%~56.9%。内镶式滴灌毛管滴头处，流速重分布引起压力梯度急变，消耗水流能量，这是内镶式滴灌毛管总水头损失增大的主要原因。

3) 外包式滴灌毛管相较于内镶式滴灌毛管滴头段水流平顺，滴灌毛管局部水头损失更小，在允许流量偏差范围内，可提高滴灌毛管铺设长度，更适合较长距离的灌溉小区，在相同铺设长度条件下，外包式滴灌毛管灌水均匀度更高。

参考文献:

- [1] 丁法龙, 王文娥, 胡笑涛, 等. 水头损失影响因素试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(10): 13-18.
- [2] 洪明, 李援农, 马英杰, 等. 低压条件下滴灌毛管水头损失试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(1): 50-52.
- [3] 张林, 吴普特, 范兴科, 等. 低压滴灌灌水均匀度试验研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(12): 207-212.
- [4] 王亚林, 朱德兰, 张林, 等. 基于量纲分析的内镶圆柱式毛管局部水头损失研究[J]. 水利学报, 2015, 46(5): 602-611.
- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 微灌工程技术规范: GB/T50485—2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009: 17-18.
- [6] 白雨薇, 罗坤, 周小波, 等. 低压滴灌灌水均匀性研究[J]. 中国农村水利水电, 2018, 60(3): 62-65.
- [7] BAGARELLO V, FERRO V, PROVENZANO G, et al. Evaluating pressure losses in drip-irrigation lines[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1997, 123(1): 1-7.
- [8] PROVENZANO G, PUMO D. Experimental analysis of local pressure losses for micro irrigation laterals[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2004, 130(4): 318-324.
- [9] 仇振杰, 朱德兰, 张林, 等. 滴头插入对滴灌毛管水头损失影响试验研究[J]. 排灌机械工程学, 2013, 31(3): 265-269.
- [10] DEMIR V, YURDEM H, DEGIRMENCIOGLU A. Development of prediction models for friction losses in drip irrigation laterals equipped with integrated in-line and on-line emitters using dimensional analysis[J]. *Biosystems Engineering*, 2007, 96(4): 617-631.
- [11] FERRO V. Applying hypothesis off self-similarity for flow-resistance law of small-diameter plastic pipe[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1997, 123(3): 175-179.
- [12] YILDIRIM G. Total energy loss assessment for trickle lateral lines equipped with integrated in-line and on-line emitters[J]. *Irrigation Science*, 2010, 28(4): 341-352.
- [13] PROVENZANO G, PIETRO D D, GUILLERMO P S. New computational fluid dynamic procedure to estimate friction and local losses in coextruded drip laterals[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2007, 133(6): 520-527.
- [14] 石喜, 吕宏兴, 朱德兰, 等. PVC 三通管水流阻力与流动特征分析[J]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 73-79.
- [15] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 165-168.
- [16] VON BERNUTH R D. Simple and accurate friction loss equation for plastic pipe[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1990, 116(2): 294-298.
- [17] YITAYEW M. Simplified method for sizing laterals with two or more diameters[J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2009, 135(1): 111-114.
- [18] 颜廷熠. 基于 CFD 模拟的迷宫滴头工作性能研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2008.
- [19] 王文娥, 王福军. 迷宫滴头水力特性非定常数值模拟研究[J]. 水利学报, 2010, 41(3): 332-337.
- [20] 梁谦, 程建萍, 李星, 等. 短管水力计算中水头损失系数的研究[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2017, 38(5): 57-61.
- [21] 赵青青, 冯俊杰, 黄修桥, 等. 滴灌带在低压模式下水力性能变异特征研究[J]. 节水灌溉, 2018(11): 1-4.
- [22] 刘杨, 黄修桥, 李金山, 等. 低压地下与地表滴灌滴灌带水力性能对比试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(9): 114-122.
- [23] WANG J, RUI C. An improved finite element model for the hydraulic analysis of drip irrigation subunits considering local emitter head loss[J]. *Irrigation Science*, 2020, 38(2): 147-162.
- [24] WANGJ, YANG T, WEI T, et al. Experimental determination of local head loss of non-coaxial emitters in thin-wall lay-flat polyethylene pipes[J]. *Biosystems Engineering*, 2020, 190(2): 71-86.
- [25] CHAMBA D, ZUBILZU S, JUANA L. Determining hydraulic characteristics in laterals and drip irrigation systems[J/OL]. *Agricultural Water Management*, 2019, 226(12): 105791. [2020-08-20]. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105791>.
- [26] 喻黎明, 吴普特, 牛文全. 迷宫流道偏差量对灌水器水力性能及抗堵塞性能的影响[J]. 农业机械学报, 2011, 42(9): 64-68.
- [27] 侯诗文, 张朋杨, 李亮, 等. 基于 CFD 可调式微滴头流场特性分析[J]. 排灌机械工程学, 2020, 38(8): 855-860.
- [28] 魏正英, 赵万华, 唐一平, 等. 滴灌灌水器迷宫流道主航道抗堵设计方法研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(6): 1-7.