

doi: 10.3969/j.issn.1674-8530.2013.05.015

迷宫流道齿转角与齿间距对滴头性能的影响

谢巧丽¹, 牛文全^{1,2}, 李连忠¹

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)



谢巧丽

摘要: 以齿形迷宫流道为研究对象, 齿转角和齿间距分别设置4个水平, 采用两因素四水平全面试验方法设计, 根据流体动力学两相流理论, 利用Fluent 6.3软件对设计滴头进行了液固两相流数值模拟, 分析了齿转角和齿间距对滴头水力性能和抗堵塞性能的影响。结果表明: 齿转角、齿间距与流量系数均呈正相关关系, 流量系数随齿转角和齿间距的增大而增大; 齿转角对流态指数的影响较为复杂, 以120°为转折角呈2种变化趋势, 当齿转角大于120°时, 流态指数随着齿间距的增大呈先减小后增大的趋势; 当小于120°时, 流态指数随着齿间距的增大呈先增大后减小的趋势。提出以颗粒浓度的某个范围分析灌水器的抗堵塞性能的方法, 流道内悬浮颗粒最高浓度的高低与高浓度区域所占比例并不完全一致, 但最高浓度越高, 则颗粒聚集的机会越大, 发生局部沉淀的可能性就越大, 高浓度区域所占面积也相对较大, 滴头越易发生堵塞。

关键词: 滴头; 迷宫流道; 齿转角; 齿间距; 抗堵塞性能; 水力性能

中图分类号: S275.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2013)05-0449-07

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.

Effect of tooth angle and pitch of labyrinth channel on performance of emitter

Xie Qiaoli¹, Niu Wenquan^{1,2}, Li Lianzhong¹

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: An emitter with labyrinth channel was used as the study model, the channels were designed by using a full factorial experiment for two factors with four levels, the liquid-solid two-phase flows in them were simulated numerically by means of Fluent 6.3. Influences of tooth angle and pitch on the hydraulic and anti-clog performances of emitter were explored. The results showed that discharge coefficient can be correlated to tooth angle and pitch with a positive relationship; moreover, the discharge coefficient increases with increasing tooth angle and pitch. The influences of tooth angle are more complicated; when the tooth angle is more than 120°, the flow regime index decreases initially then increases with increasing tooth pitch; when the tooth angle is less than 120°, however, the index decreases firstly, then increases with increasing tooth pitch. It was proposed that the anti-clog performance can be analyzed by certain range of suspended sand particle concentration. The level of the maximum particle concentration in the channel is not completely proportional to the size of the area of high concentration, but the higher the maximum concentration, the greater chance the suspended particles to gather together and the greater the probability that a local sediment happens; at last the size of the area of

收稿日期: 2012-07-08; 网络出版时间: 2013-05-07

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20130507.1704.027.html>

基金项目: 国家863计划项目(2011AA100507)

作者简介: 谢巧丽(1987—)女, 河北石家庄人, 硕士研究生(wwwhappyxie@126.com), 主要从事灌溉理论与节水技术研究。

牛文全(1972—)男, 甘肃甘谷人, 副教授, 博士(通信作者, nwq@vip.sina.com), 主要从事灌溉理论与节水技术研究。

high concentration gets larger and the emitter becomes clogged more easily.

Key words: emitter; labyrinth channels; tooth angle; inter-tooth space; anti-clogging performance; hydraulic performance

流道结构影响滴头内部流动状态,对整个灌水器性能有很大影响,可通过改变灌水器结构,优化水流的流动状态,从而提高水力性能与抗堵塞性能。

影响滴头水力性能的主要因素是流道的结构形式^[1],国内学者对结构参数与水力性能之间的关系进行了大量的研究工作:魏正英等^[2]对梯形迷宫流道灌水器进行了水力性能实验,提出了其结构特征参数与流量的关系公式;王芳等^[3]对迷宫流道灌水器进行模拟研究后认为,流道断面面积与水力性能存在一定的相关关系;张俊等^[4]研究了三角形迷宫流道灌水器关键参数对水力性能的影响,指出流道转角对流态指数的影响最显著。这些研究成果为提高灌水器水力性能提供了重要的依据。

滴灌堵塞问题,一直影响系统的使用寿命和灌水效率。因此,灌水器不仅要有优秀的水力性能,还要有很高的抗堵塞性能。Haman 等^[5]发现最常见的滴头堵塞是固体颗粒引起的物理堵塞。虽然滴灌系统都配备过滤设备,但极小的颗粒仍能穿过过滤介质进入滴灌系统^[6]。Duran - Ros 等^[7]研究了 3 种不同类型的滴头,发现影响滴头堵塞的主要原因是滴头的类型和其在滴灌带上的位置。仵峰等^[8]对运行 8 年的地下滴灌系统进行实地调查,发现滴头堵塞的位置绝大多数是进口及齿角处。

灌水器的流道尺寸一般在 0.3 ~ 2.0 mm 范围内,尺寸微小且结构复杂,传统的试验仪器和试验手段很难精确测试滴头流道内部流场,致使灌水器堵塞问题的精确研究工作难以开展。近年来,计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)发展迅速,网格划分技术不断提高,对复杂流动问题的模拟也得以迅速发展。

利用 CFD 软件对灌水器进行模拟可以获得流道内部流场,有助于全面了解流道内部流动机理。Li 等^[9]、李云开等^[10]、李永欣等^[11]、Lu 等^[12]通过对实测(利用传统试验、粒子图像测速技术 PIV、平面激光诱导技术 PLIF、激光多普勒测速仪 LDV 等技术)与模拟数据的比较,认为 CFD 软件模拟结果与实际情况基本相符,可以为研究灌水器性能以及灌水器的设计和制造提供参考。许多学者应用 CFD 软件对灌水器的水力性能和抗堵塞性能进行了研究^[13-14]。

文中根据计算流体力学固液两相流理论,应

用 Fluent 软件对不同结构参数齿形迷宫流道进行两相流模拟,探讨滴头结构参数对其水力性能和抗堵塞性能的影响。

1 材料与方法

1.1 滴头流道结构设计

目前滴头流道结构形式中,齿形流道灌水器所占的比重最大,因此,以齿形迷宫流道结构灌水器为研究对象,其流道结构参数如图 1 所示,图中 θ 为齿转角, l 为齿间距, h 为齿高, D 为流道深度, j 为齿参差值。选择 θ 、 l 、 h 、 D 作为流道的 4 个基本结构参数,它们之间相互独立;当 j 确定后,上述几个结构参数可完全控制流道形状,因此流道的宽度 w 可以表示为

$$w = \sqrt{(0.5l + h \cot \theta)^2 + (h + j)^2} \times \sin\left(\theta - \arctan \frac{2h + 2j}{l + 2h \cot \theta}\right). \quad (1)$$

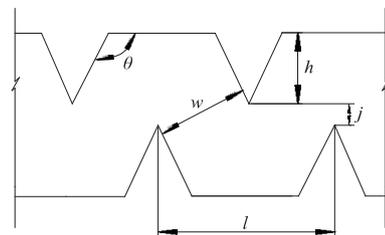


图 1 滴头流道结构参数示意图
Fig. 1 Schematic of structure parameters for emitter channel

采用齿转角、齿间距、齿高、流道深度等单一结构参数,研究流道结构对灌水器水力性能与抗堵塞性能的影响具有局限性。根据前人研究结果及水力学理论分析,迷宫流道的最小宽度是影响滴头流量的重要参数,该值为流道宽度、齿高与齿参差值之和的最小值,即流道最小宽度 w_{\min} 为 $\min(h + j, w)$ 。本试验中确定的齿参差值 j 为 0,则流道最小宽度表示为

$$w_{\min} = \min \left\{ h, \sqrt{(0.5l + h \cot \theta)^2 + h^2} \times \sin\left(\theta - \arctan \frac{2h}{l + 2h \cot \theta}\right) \right\}. \quad (2)$$

为了排除其他参数对灌水器的影响,将齿高 h

和流道深度 D 设为定值, 重点来测试齿转角 θ 与齿间距 l 对灌水器性能的影响. 根据市场上常见滴头尺寸将齿高 h 和流道深度 D 分别设为 0.6 和 1.0 mm; 齿转角 θ 设置为 $110^\circ, 115^\circ, 120^\circ, 125^\circ$ 等 4 个水平; 齿间距 l 设置为 1.2, 1.5, 1.8, 2.0 mm 等 4 个水平; 流道单元 $n = 10$. 采用全面试验法安排, 可得 16 个流道结构.

1.2 数值模型与边界条件

数值模拟研究方法的基本思想: 首先利用计算流体动力学理论建立滴头流场的数学模型, 即偏微分形式的控制方程; 然后采用离散的数值方法(例如有限元法、有限体积法)将控制方程转化为在离散节点上的代数方程组, 最后求解代数方程组, 得到流场中计算节点上的速度和压力. 这种方法的好处是只要计算网格足够细, 理论上可计算出空间任意一点的三维速度、压力、温度等值, 还可通过积分求出水力损失等参数^[15].

文中采用离散相模型(DPM), 其实质是在欧拉(Euler)坐标系中处理流体相问题, 而在拉格朗日(Lagrange)坐标系中处理颗粒问题, 建立颗粒的运动方程与流体相的运动方程, 耦合求解得到颗粒的运动轨迹.

流体相采用 RNG $k - \epsilon$ 湍流模型, 湍流对颗粒的随机影响采用了离散相随机游走模型(discrete random walk), 流道壁面的处理采用壁面函数法, 数值计算有限体积法离散控制方程, 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. 计算域利用 Gambit 划分网格, 采用六面体网格单元, 长度约为 0.1 mm.

滴头进出口设置为压力条件, 进水口在 5 ~ 12 m 水头之间设置 8 个水平(分别为 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 m)输入, 出口压力为 0(自由出流), 并在滴头正常工作进口压力(10 m 水头)下模拟悬浮颗粒运动. 悬浮颗粒浓度为 1%(体积分数), 颗粒密度为 2500 kg/m^3 ; 颗粒粒径设定为 0.05 mm; 收敛精度设为 10^{-4} .

2 结果与分析

2.1 水力性能

按照上述模型, 模拟得出各滴头不同压力下的流量. 将入口压力及对应流量代入式(3)做回归计算, 得到表 1 所示流量系数与流态指数.

$$Q = kH^x, \quad (3)$$

式中: Q 为滴头流量, L/h; H 为压力水头, m; k 为流量系数; x 为流态指数.

优秀的水力性能可以保证灌水器在一定的压力范围内具有比较稳定的出水量, 使滴灌系统保持较高的均匀度.

表 1 各滴头的流量系数与流态指数

Tab. 1 Discharge coefficient and flow regime index for various emitters

滴头编号	$\theta / (^\circ)$	l / mm	$\min(w, D, h) / \text{mm}$	k	x
d1	110	1.2	0.56	0.68	0.45
d2	110	1.5	0.60	0.85	0.47
d3	110	1.8	0.60	0.98	0.48
d4	110	2.0	0.60	1.04	0.48
d5	115	1.2	0.54	0.67	0.44
d6	115	1.5	0.60	0.88	0.46
d7	115	1.8	0.60	1.05	0.48
d8	115	2.0	0.60	1.15	0.47
d9	120	1.2	0.52	0.65	0.47
d10	120	1.5	0.60	0.89	0.44
d11	120	1.8	0.60	1.11	0.46
d12	120	2.0	0.60	1.19	0.48
d13	125	1.2	0.49	0.69	0.45
d14	125	1.5	0.60	0.93	0.44
d15	125	1.8	0.60	1.16	0.46
d16	125	2.0	0.60	1.29	0.47

根据表 1 数据绘制曲线图, 分析齿转角和齿间距对流量系数、流态指数的影响, 见图 2.

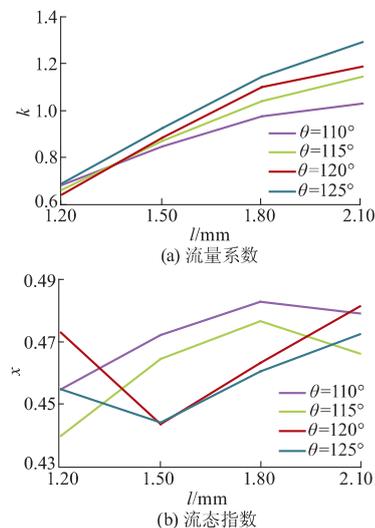


图 2 齿转角、齿间距对流量系数和流态指数的影响

Fig. 2 Effects of tooth angle and pitch on discharge coefficient and flow regime index

由图 2a 可知, 流量系数随齿转角和齿间距的增大而增大, 同时, 当齿转角增大, 流量系数随齿间距增大的趋势增强, 而当齿间距增大时, 流量系数随齿转角增大的趋势也在增强. 当齿间距为 1.2, 1.5 mm 时, 流量系数随齿转角的变化趋势不明显, 而当齿间距增大到 1.8 mm 时, 流量系数随齿转角的增大而增大.

由图 2b 可知,对于齿形迷宫流道结构,流态指数随齿间距与齿角度的变化趋势较弱,其值为 0.44~0.48。齿转角在 110°~125°之间变化时,流态指数随齿间距的变化趋势虽然均呈单峰曲线,而以 120°为转捩角度,呈 2 种变化趋势:当齿转角大于 120°时,流态指数随着齿间距的增大呈先减小而后增大的趋势;当小于 120°时,流态指数随着齿间距的增大呈先增大而后减小的趋势。

根据表 1 数据,绘制曲线图,分析流道最小宽度对流量系数 k 、流态指数 x 的影响(由表 1 可知仅在齿间距为 1.2 mm 时流道最小宽度有变化,其余齿间距对应流道最小宽度均为 0.6 mm,因此只绘制了 1.2 mm 对应的流道最小宽度对流量系数和流态指数的影响),见图 3。

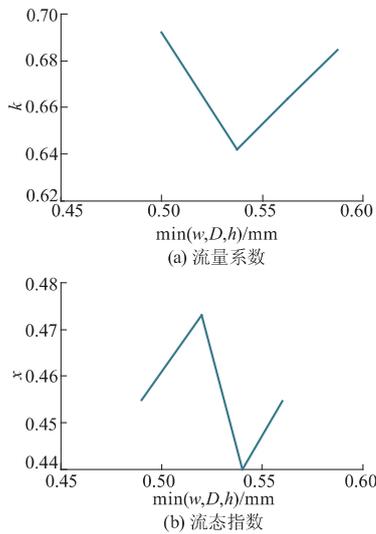


图 3 流道最小宽度对流量系数和流态指数的影响

Fig. 3 Effects of $\min(w, D, h)$ on discharge coefficient and flow regime index

由图 3 可知,齿间距为 1.2 mm 时,流量系数随流道最小宽度的增大呈先减小后增大的趋势,流态指数随流道最小宽度的增大呈先增大后减小而后又增大的趋势。

对于流态指数和流量系数的影响,在齿转角与齿间距之间均存在相互作用的现象。

2.2 抗堵塞性能

利用离散相模型,在 10 m 水头压力下模拟了各滴头流道内悬浮颗粒的分布情况。图 4 为滴头 d1 位于 1/2 深度处的颗粒浓度 S 分布图,其他滴头的颗粒浓度分布与图 4 相似,悬浮颗粒最大浓度(maximum granule concentration, Max-c)主要出现在迎水面齿转角处,但不同滴头的最大颗粒浓度不同。

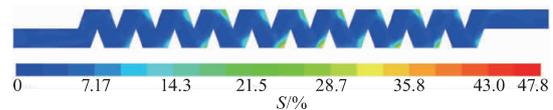


图 4 滴头 d1 流道内泥沙颗粒浓度分布

Fig. 4 Particle concentration distribution in channel of emitter d1

数值模拟得到的 Max-c 是按照插值计算得到的网格节点上的颗粒浓度值,仅代表一个极小区域上的颗粒浓度,因此应以颗粒浓度的某个范围来分析灌水器的抗堵塞性能。悬浮颗粒初始浓度为 1%,观察体积分数大于 10% 的高浓度范围(high-concentration, High-c)内的悬浮颗粒分布。将模拟计算获得的颗粒浓度分布图通过处理,计算得到了 High-c 在 1/2 截面上所占面积的百分比。表 2 为计算得到的各滴头内最大颗粒浓度 Max-c 和高浓度范围 High-c 的面积百分比 φ_M 、 φ_H 。

表 2 各滴头内最大颗粒浓度与高浓度范围百分比

Tab. 2 Maximum and high concentrations in various emitters

滴头编号	$\varphi_M / \%$	$\varphi_H / \%$	滴头编号	$\varphi_M / \%$	$\varphi_H / \%$
d1	17.91	5.21	d9	26.81	10.20
d2	22.17	0.43	d10	34.11	10.66
d3	19.41	0.10	d11	27.81	1.29
d4	17.27	0.04	d12	19.29	0.02
d5	11.50	0.08	d13	20.57	2.20
d6	21.52	1.14	d14	29.20	4.69
d7	11.40	0.25	d15	12.45	1.46
d8	7.68	0.02	d16	25.85	1.48

根据表 2 数据绘制曲线图分析齿转角和齿间距对 Max-c 和 High-c 的影响,见图 5。

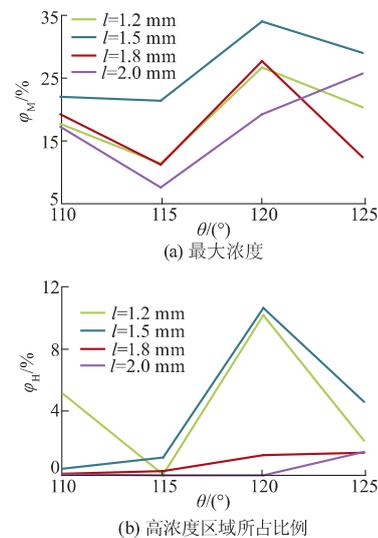


图 5 齿转角、齿间距对流道内固体颗粒分布的影响

Fig. 5 Effects of tooth angle and pitch on concentration distribution in channel

由图 5 可知, 不同滴头内的最大颗粒浓度有很大差异, 其中最大值、最小值极差达 26.43%。流道内最大泥沙浓度基本随齿角度的增大呈先降低后升高而后再降低的趋势。齿间距为 2.0 mm 时, 出现单峰现象, 可能是由于选择的齿转角范围较小的原因。

流道内高含沙区域占整个流道的比例随齿转角的变化趋势比较复杂; 齿间距为 1.2、1.5 mm 时, 高含沙区域所占比例随齿转角变化剧烈, 在齿转角为 120° 处达到最大, 当齿间距为 1.8、2.0 mm 时, 高含沙区域所占的比例随齿转角变化非常平缓。

对于滴头 d10、d9、d1、d14, 流道内高浓度颗粒分布如图 6 所示。此 4 个滴头的 Max-c 的值分别为 34.11%、26.81%、17.91%、29.20%。Max-c 最高的滴头 d10, 其 High-c 所占面积也最大; 滴头 d9、d1 的 Max-c 均低于滴头 d14, 而 High-c 所占比例却大于 d14。Max-c 最高的 5 个滴头为 d10、d14、d11、d9、d16

(其值分别为 34.11%、29.20%、27.81%、26.81%、25.85%)。其中 d10、d14、d9 这 3 个滴头的 High-c 所占比例较大; 其他 Max-c 低的滴头, 除滴头 d1 外, High-c 所占比例都很小。

悬浮颗粒 Max-c 的高低与 High-c 所占比例并不完全一致, 但 Max-c 越高, 则颗粒聚集的机会越大, 发生局部沉淀的可能性就越大, High-c 所占面积也相对较大, 滴头越易发生堵塞。

另外, 滴头 d1 的 Max-c 较低而 High-c 却很大; 滴头 d11、d16 的 Max-c 较高而 High-c 所占比例却很小。对比滴头 d16 与滴头 d1 的典型位置处的流速分布(见图 7 所示), 可知 d16 比 d1 主流区宽, 有明显的主流区, 而 d1 主流区狭窄, 旋涡区占据了流道的大部分面积; d1 水流在迎水面齿角处脱离了主流区, 出现了低流速区域, 因此悬浮颗粒容易在此停留沉淀。

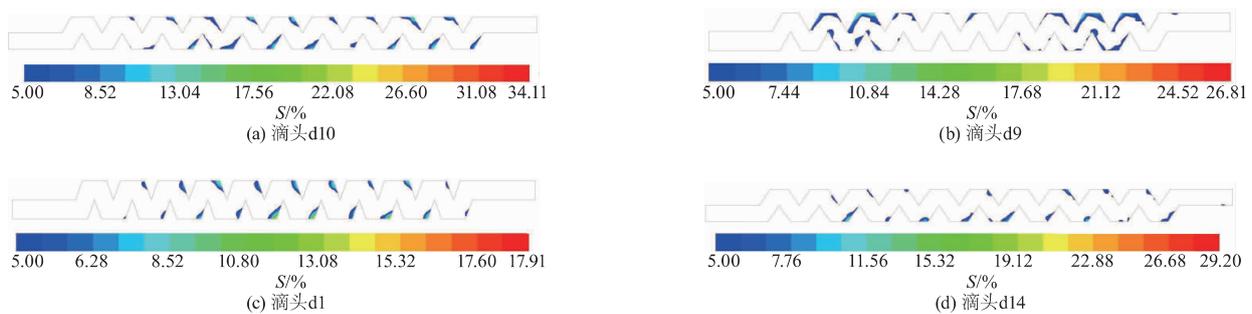


图 6 流道内高浓度颗粒分布
Fig. 6 High particle concentration distribution in channels

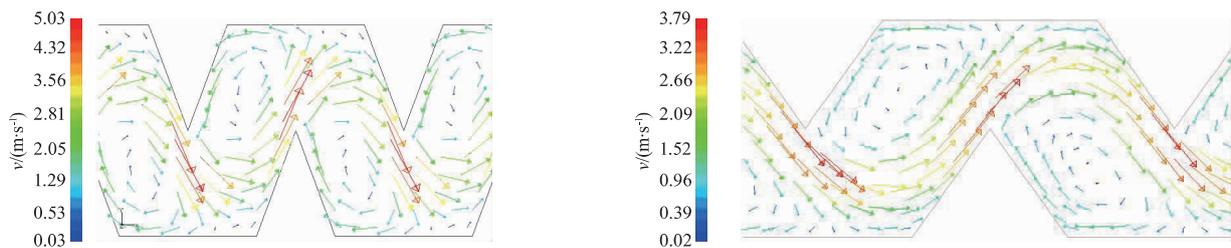


图 7 滴头 d16、d1 的第 4 流道单元 1/2 深度处流速分布
Fig. 7 Velocity profile in fourth cell of channel in emitter d16 and d1

综上所述可知, 齿间距的增大有利于降低 Max-c 和 High-c, 进而提高滴头的抗堵塞性能, 而齿转角对 Max-c 和 High-c 的影响很大, 但规律性不明显。

3 讨论

文中研究后认为齿转角大于 120° 时, 流态指数 x 在齿间距大于 1.5 mm 后呈直线增大的趋势, 这是因为当齿转角为 120° 时, 迷宫流道的齿形状为正三

角形, 齿尖角为 60°; 随着齿角度的增大, 齿尖角也逐渐增大, 迷宫流道将变得更加顺直, 流道内齿结构对水流的扰动将减小, 流态指数将增大。李永欣等^[11]认为齿距 l 的改变对流态指数的影响不大。因此流态指数 x 变化是齿间距和齿转角的耦合作用形成的, 且在一定范围内变化较小。

文中流道最小宽度试验数据少, 因此对流量系数和流态指数影响关系的研究结果, 还待以后进一步的验证。

研究发现,悬浮颗粒在流道齿角处大量聚集。这是因为,在流道的拐弯和转角处水流方向发生很大的变化,流道背水面容易形成旋涡区,流道转角越小,流速方向变化越大,旋涡区所占的比例也越大;在流道迎水面,流道转角越小,流速方向在剧烈变化的同时,一部分水流脱离主流区形成低流速小旋涡区域,使得颗粒在此旋转停滞,后来的颗粒也容易被带进小旋涡区域,周而复始颗粒在迎水面停留沉淀形成了高浓度区域。

前人对迷宫式滴头流道模拟分析得出长弯道处的流道边界始终存在颗粒大量堆积^[16];王文娥等^[17]对贴壁片状迷宫滴头模拟后发现,在进水口、流道拐弯处、出口的缓水区及齿形单元的拐弯处浓度均有升高。Niu 等^[18]试验发现迷宫流道滴头堵塞位置通常发生在进口和流道转角处。

滴头 d1 与 d16 的对比中,d16 的 High- ϵ 值较小,由图 7 可见 d1 水流在迎水面齿角处脱离了主流区,滴头 d16 迎水面水流流速均与主流区方向一致。而齿间距增大后流道中有较长长度,流道趋于平缓,也有利于水流方向与主流区趋于一致,有利于颗粒通过流道。武鹏等^[19]也指出齿形流道齿间距越小,其抗堵塞性能也越低;齿宽不变时增大齿间距有利于提高灌水器的抗堵塞性能。灌水器结构是决定其内部流动状态的内因,也是影响抗堵塞性能的决定因素。牛文全等^[20]在其他流道参数不变的情况下研究了不同转角的齿形流道,认为迷宫流道灌水器的抗堵塞性能随着齿角度的减小呈下降趋势;王文娥等^[13]对流道参数采用正交设计,研究了流道结构对悬浮颗粒的影响,认为齿角度对其有显著影响,随着齿角度的增大,流道内悬浮颗粒浓度先下降后小幅上升,后再次下降。综合以上结论,灌水器抗堵塞性能的重要影响因素为齿转角,但其规律性还没有一致的结论。

4 结 论

1) 齿形迷宫流道的齿转角、齿间距与流量系数均呈正相关关系,流态指数随齿间距的变化范围很小,齿转角对流态指数的影响比较复杂,存在一个转折角,为 120° 。

2) 流道结构对悬浮颗粒的分布影响很大。随齿间距的增大,水流速度方向变化逐渐平滑,悬浮颗粒可以顺利地随水流排出,有利于提高滴头的抗堵塞性能。转角是影响灌水器抗堵塞性能的重要因素,但

其规律性还有待进一步研究。

参考文献(References)

- [1] 王建东,李光永,邱象玉,等.流道结构形式对滴头水力性能影响的试验研究[J].农业工程学报,2005,21(S1):100-103.
Wang Jiandong, Li Guangyong, Qiu Xiangyu, et al. Effects of flow passage forms on hydraulic performance of emitters [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(S1): 100-103. (in Chinese)
- [2] 魏正英,唐一平,赵万华,等.滴灌灌水器迷宫流道结构与水力性能实验研究[J].农业机械学报,2005,36(12):51-55.
Wei Zhengying, Tang Yiping, Zhao Wanhua, et al. Structure and hydraulic performance experimental research on labyrinth channels of drip irrigation emitters [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(12): 51-55. (in Chinese)
- [3] 王芳,吴普特,范兴科.滴灌灌水器迷宫流道数值模拟与结构优化设计[J].灌溉排水学报,2007,26(3):35-37.
Wang Fang, Wu Pute, Fan Xingke. Numerical simulation and frame designing of emitter's labyrinth channel [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2007, 26(3): 35-37. (in Chinese)
- [4] 张俊,洪军,赵万华,等.基于正交试验的迷宫流道灌水器参数化设计研究[J].西安交通大学学报,2006,40(1):31-35.
Zhang Jun, Hong Jun, Zhao Wanhua, et al. Parameterized design of labyrinth-channel emitters based on orthogonal experiments [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(1): 31-35. (in Chinese)
- [5] Haman D Z, Smajstrla A G, Zazueta F S. Setting basins for trickle irrigation in Florida [Z]. Gainesville: University of Florida, 2003.
- [6] 翟国亮,吕谋超,王晖,等.微灌系统的堵塞及防治措施[J].农业工程学报,1999,15(1):144-147.
Zhai Guoliang, Lü Mouchao, Wang Hui, et al. Plugging of microirrigation system and its prevention [J]. Transactions of the CSAE, 1999, 15(1): 144-147. (in Chinese)
- [7] Duran-Ros M, Puig-Bargues J, Arbat G, et al. Effect of filter, emitter and location on clogging when using effluents [J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(1): 67-79.
- [8] 仵峰,范永申,李辉,等.地下滴灌灌水器堵塞研究[J].农业工程学报,2004,20(1):80-83.
Wu Feng, Fan Yongshen, Li Hui, et al. Clogging of e-

- mitter in subsurface drip irrigation system[J]. Transactions of the CSAE ,2004 ,20(1) : 80 - 83. (in Chinese)
- [9] Li Yunkai , Yang Peiling , Xu Tingwu , et al. CFD and digital particle tracking to assess flow characteristics in the labyrinth flow path of a drip irrigation emitter [J]. Irrigation Science , 2008 26(5) : 427 - 438.
- [10] 李云开 杨培岭 任树梅,等. 滴头分形流道设计及其流动特性的试验研究与数值模拟[D]. 北京: 中国农业大学水利与土木工程学院, 2005.
- [11] 李永欣, 李光永, 邱象玉, 等. 迷宫滴头水力特性的计算流体力学模拟[J]. 农业工程学报, 2005, 21(3) : 12 - 16.
Li Yongxin, Li Guangyong, Qiu Xiangyu, et al. Modeling of hydraulic characteristics through labyrinth emitter in drip irrigation using computation fluid dynamics [J]. Transactions of the CSAE , 2005 ,21(3) : 12 - 16. (in Chinese)
- [12] Lu Gang , Wei Qingsong , Liu Jie , et al. Investigation of head loss along drip emitter channel by using computational fluid dynamics [C]//Proceedings of 7th World Congress on Computers in Agriculture and Natural Resources 2009. St. Joseph , USA: ASABE , 2009: 170 - 177.
- [13] 王文娥, 王福军 牛文全, 等. 滴头流道结构对悬浮颗粒分布影响的数值分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(5) : 1 - 6.
Wang Wen'e , Wang Fujun , Niu Wenquan , et al. Numerical analysis of influence of emitter channel structure on suspended granule distribution [J]. Transactions of the CSAE , 2009 25(5) : 1 - 6. (in Chinese)
- [14] Wei Qingsong , Lu Gang , Liu Jie , et al. Evaluations of emitter clogging in drip irrigation by two-phase flow simulations and laboratory experiments [J]. Computers and Electronics in Agriculture , 2008 , 63 (2) : 294 - 303.
- [15] 王福军, 王文娥. 滴头流道 CFD 分析的研究进展与问题[J]. 农业工程学报, 2006 22(7) : 188 - 192.
Wang Fujun , Wang Wen'e. Research progress in analysis of flow passage in irrigation emitters using Computational Fluid Dynamics techniques [J]. Transactions of the CSAE , 2006 22(7) : 188 - 192. (in Chinese)
- [16] 闫大壮 杨培岭 任树梅. 滴头流道中颗粒物运移动态分析与 CFD 模拟[J]. 农业机械学报, 2007 38(6) : 71 - 74.
Yan Dazhuang , Yang Peiling , Ren Shumei. Study on dynamic analysis of particle movement in drip emitter based on CFD [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery , 2007 38(6) : 71 - 74. (in Chinese)
- [17] 王文娥 王福军. 片状迷宫滴头中悬浮颗粒浓度分布规律数值分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(3) : 1 - 6.
Wang Wen'e , Wang Fujun. Effects of complete fluidic sprinkler on hydraulic characteristics based on some important geometrical parameters [J]. Transactions of the CSAE , 2007 , 23(3) : 1 - 6. (in Chinese)
- [18] Niu Wenquan , Liu Lu , Chen Xue. Influence of fine particle size and concentration on the clogging of labyrinth emitters [J]. Irrigation Science , 2012: 1 - 11.
- [19] 武鹏 牛文全 常莹华, 等. 齿形迷宫流道不同结构参数下灌水器抗堵塞性能研究[J]. 节水灌溉, 2010(5) : 1 - 4.
Wu Peng , Niu Wenquan , Chang Yinghua , et al. Research on anti-clogging performance of different structural parameters for dental channel emitters [J]. Water Saving Irrigation , 2010(5) : 1 - 4. (in Chinese)
- [20] 牛文全, 喻黎明, 吴普特, 等. 迷宫流道转角对灌水器抗堵塞性能的影响[J]. 农业机械学报, 2009 40(9) : 51 - 55.
Niu Wenquan , Yu Liming , Wu Pute , et al. Influence of angel of labyrinth channels on anti-clogging performance of emitter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery , 2009 40(9) : 51 - 55. (in Chinese)

(责任编辑 张文涛)