滴灌灌水器迷宫流道的内部流体 数值模拟与流动分析

常莹华,牛文全,王维娟

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100)

[摘 要] 【目的】研究滴灌灌水器的结构参数对其水力性能的影响。【方法】提取齿形迷宫流道灌水器齿宽、齿底距、齿高为结构控制参数,在 CAD 几何建模的基础上,应用基于 CFD(Computational Fluid Dynamics)的流体分析 软件 FLUENT,对灌水器迷宫流道内流体的流动进行数值模拟,得到流量压力关系以及流场可视化图,由此分析了各 参数对灌水器性能的影响,以及流道内水流的速度矢量分布规律。【结果】当齿高保持恒定时,齿宽和齿底距均与流 量、流态指数呈正相关关系,且齿宽对流量、流态指数的影响较齿底距更显著;而齿宽和齿底距保持不变时,齿高与流 量、流态指数呈负相关关系。【结论】齿宽相对越小,灌水器消能效果与抗堵塞性能越好。因此,可以通过适当减小齿 宽和齿底距、增大齿高等措施改善灌水器的水力性能。

[关键词] 滴灌灌水器;迷宫流道;流道结构;流态指数;数值模拟

[中图分类号] S274.2;TV131 [文献标识码] A [文章编号] 1671-9387(2009)02-0203-06

Numerical simulation and flow analysis of labyrinth path of drip irrigation emitters

CHANG Ying-hua, NIU Wen-quan, WANG Wei-juan

(College of Hydrulic and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The research studied the influnce of structural parameters on the hydraulic performance of emitters. [Method] Extracting the dental width, space between dental bottom and dental height as the structural parameters of emitters, based the CAD geometric model, FLUENT software based on CFD(Computational Fluid Dynamics) to progress numerical simulation was used to find out the relationship of flux and pressure and visual figure of the flow channel of emitters. Finally the effect that the change of parmeters act on hydraulics performance and the law of flow characteristics of emitters was analyzed. [Result] When the dental height maintained constant, there was a positive correlation between the discharge and dental width, as well as the space between dental bottoms. Moreover, the effect of dental width was more significant than the space between dental bottoms. While under the condition that the dental width, space between dental bottom were unchangeable, there was a negative correlation between the discharge and dental height. [Conclusion] The smaller the size of dental width is, the better the emitter hydraulic peformance and anti-clogging are. So taking measures such as to reduce the dental width, space between dental bottom or increase the dental height can improve the hydraulic performance of emitters.

Key words: drip irrigation emitter; labyrinth flow channel; flow channel structure; flow index; numerical

* [收稿日期] 2008-09-05
 [基金项目] 国家"十一五"863 重点课题"微压滴灌系统与产品"(2006AA100214);国家科技支撑计划子课题"低能耗小流量滴灌系统研发与产业化"(2007BAD38B07)
 [作者简介] 常莹华(1981-),女,陕西渭南人,硕士,主要从事节水灌溉新技术研究。
 [通信作者] 牛文全(1971-),男,甘肃甘谷人,副研究员,博士,主要从事灌溉理论与节水技术研究。E-mail: nwq@vip. sina. com

simulation

灌水器水力性能与流道结构形式密切相关。目 前,许多学者在灌水器结构对水力性能和抗堵塞性 能的影响方面,做了大量的研究工作,为灌水器的设 计提供了一定的理论依据。这些研究主要集中在结 构参数与水力性能的关系,以及灌水器内部流场和 抗堵塞性的关系等方面。王建东等[1]以齿形流道结 构中齿角度、齿间距、齿高、流道深度为试验因素,研 究了齿形流道结构参数对滴头水力性能的影响,并 对参数影响的显著性进行了排序;陈瑾^[2]建立了以 流道结构三要素(齿宽、齿底距、齿高)为基础的滴头 流道构建方法:姚彬等[3]通过试验研究了齿形流道 灌水器流道长度对流量系数和流态指数的影响,得 出流道长度与流量之间的关系式。滴灌灌水器结构 复杂,其内部流动状态对滴头性能有很大影响,因此 研究滴头内部流场至关重要[4]。许多学者通过研究 内部流场,分析了灌水器内部流态与其抗堵塞性的 关系,并多见于圆弧形流道灌水器。李云开等[5]借 助 FLUENT 软件,通过对 3 种圆柱型灌水器内部 流动的模拟,通过可视化的流场分布,分析了流道内 流体的流动特性,指出在流道设计时,应将紊流强度 作为边界优化的因素之一,以提高灌水器的抗堵塞 性;张俊等^[6-7]、孟桂祥等^[8]、魏正英等^[9]通过可视化 的流场分析,认为流道设计应尽量避免流道内产生 漩涡区、低速区,以提高灌水器的抗堵塞性能。

在提取结构参数的基础上,借助 FLUENT 软 件模拟流道内流体流动,分析其流动特性,从而为结 构优化设计提供参考,已成为十分重要的研究手段。 现有的研究对同一结构形式齿形灌水器各参数与内 部流动状态的分析较少。为此,本研究选取齿宽、齿 底距、齿高为流道结构控制参数,分析了结构参数对 灌水器性能的影响,以及齿宽变化对流场分布规律 的影响,以期为灌水器结构的设计提供参考。

1 设计与方法

1.1 几何模型的构建

将齿宽 a、齿底距 b、齿高 h 作为流道齿结构控制三要素^[2],滴头流道结构标记为 D(a,b,h)。在Auto CAD2004 中完成滴头几何模型的构建,该模型如图 1 所示。



图 1 齿形迷宫流道结构几何模型示意图

Fig. 1 Geometric model of dental structural labyrinth flow channel

图 1 中流道外宽为 2h,即上下齿尖在同一条水 平线上。齿宽和齿高可以固定齿角(θ);齿宽、齿底 距、齿高可以固定流道宽(w);将流道深固定为 1.0 mm,流道单元数定为 16。根据常见灌水器的结构 尺寸范围,3 种结构参数取值见表 1。各因素水平进 行均匀试验,共可得 27 种灌水器结构。

表1 灌水器的结构参数及其水平值

 Table 1
 Structural parameters and horizon

value of drip emitters mm

齿宽(a) Dental width	齿底距(b) Space between dental bottom	齿高(h) Dental height		
0.5	1.6	0.8		
1.0	1.8	1.0		
1.2	2.0	1.2		

1.2 网格划分

将 CAD 模型导入 CFD 模拟工具 FLUENT 软件的 GAMBIT 模块中,进行网格划分。网格划分 尺寸为 0.1 mm 的六面体网格。

1.3 基本控制方程及边界条件的设置

应用 CFD 有限体积法进行数值模拟,将灌水器 内部的水流运动视为粘性不可压缩流体运动,其运 动规律符合质量守恒和动量守恒定律,基本控制方 程由连续性方程和 Navier-Stokes 方程等构成。连 续性方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0.$$
 (1)

Navier-Stokes 方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla(\rho u U) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^{2} u + F_{x}, \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla(\rho v U) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^{2} v + F_{y}, \\ \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla(\rho w U) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \nabla^{2} w + F_{z}. \end{cases}$$
(2)

式中:t 为时间,s;U 为流体流速,m/s;u、v、w 分别 为U 在x、y、z 方向的分量; ρ 为水的密度,kg/m³; μ 为动力粘度系数,Pa•s;p 为流体上的压力,Pa; F_x 、 F_y 、 F_z 分别为质量力在x、y、z 方向上的分量,若质 量力只有重力,则 F_x =0, F_y =0, F_z =-g。

应用 FLUENT 软件对流道内水流流动进行数 值模拟时,对于每种结构的滴头,流道进出口均设为 压力条件。进口压力水头在 1~5 m 时,每间隔 1 m 选 1 个压力水平;在 6~10 m 时,每间隔 2 m 选 1 个 压力水平。进口共输入 8 个压力水平,出口压力均 设为大气压。采用有限体积法离散控制方程,对流 项为二阶迎风格式,应用 SIMPLE 算法对控制方程 进行求解。湍流模型采用标准 k-ε 模型。用 FLU-ENT 软件默认的标准壁面函数法,对滴头流道的壁 面进行处理。

2 结果与分析

流量-压力关系是灌水器的重要性能指标,在一 定的压力范围内,流量与压力的关系一般用下式表 示:

$$q = K H^x \,. \tag{3}$$

式中:q为给定压力下灌水器的流量,L/h;K为灌水器的流量系数;H为灌水器的入口压力水头,m;x 为灌水器的流态指数,0≪x≪1。

由数值模拟得到流道出口流量,根据式(3)对 8 个不同压力下的灌水器流量进行曲线拟合,可得公 式中的流量系数和流态指数。计算 8 个压力下的平 均流量,以平均流量来衡量灌水器的流量大小。齿 高为 0.8,1.0 和 1.2 mm 的计算结果如表 2 所示。

表 2 不同结构、不同入口压力下灌水器结构的参数模拟

Tal	ole	2 5	Simulati	ion	results	of	different	structures	under	different	pressures
-----	-----	-----	----------	-----	---------	----	-----------	------------	-------	-----------	-----------

Detal height	N		Emitter structure	e	K	r	-/(I • 1-1)	
	No.	a	<i>b</i>	h		x	$q/(L \cdot n^{-1})$	
	A ₁₋₁	0.5	1.6	0.8	0.967 1	0.453 9	1.92	
	A_{1-2}	0.5	1.8	0.8	1.033 7	0.462 2	2.05	
	A_{1-3}	0.5	2.0	0.8	1.092 9	0.4637	2.14	
	B_{1-1}	1.0	1.6	0.8	1.277 1	0.474 4	2.58	
0.8	B ₁₋₂	1.0	1.8	0.8	1.367 0	0.481 2	2.79	
	B_{1-3}	1.0	2.0	0.8	1.404 2	0.509 1	3.00	
	C1-1	1.2	1.6	0.8	1.415 4	0.481 4	2.90	
	C1-2	1.2	1.8	0.8	1.510 9	0.483 2	3.08	
	C ₁₋₃	1.2	2.0	0.8	1.573 9	0.491 6	3.27	
	A ₂₋₁	0.5	1.6	1.0	0.956 0	0.461 2	1.97	
	A_{2-2}	0.5	1.8	1.0	1.073 9	0.469 1	2.12	
	A_{2-3}	0.5	2.0	1.0	1.151 5	0.488 0	2.31	
	B_{2-1}	1.0	1.6	1.0	1.273 2	0.474 5	2.58	
1.0	B_{2-2}	1.0	1.8	1.0	1.334 2	0.476 3	2.70	
	B_{2-3}	1.0	2.0	1.0	1.427 9	0.477 4	2.90	
	C ₂₋₁	1.2	1.6	1.0	1.359 9	0.476 2	2.75	
	C ₂₋₂	1.2	1.8	1.0	1.461 0	0.478 9	2.97	
	C ₂₋₃	1.2	2.0	1.0	1.553 1	0.481 9	3.17	
	A ₃₋₁	0.5	1.6	1.2	1.085 1	0.4597	2.19	
	A ₃₋₂	0.5	1.8	1.2	1.232 9	0.473 6	2.43	
	A ₃₋₃	0.5	2.0	1.2	1.274 2	0.490 8	2.64	
	B_{3-1}	1.0	1.6	1.2	1.227 3	0.453 3	2.40	
1.2	B_{3-2}	1.0	1.8	1.2	1.345 2	0.454 8	2.63	
	B_{3-3}	1.0	2.0	1.2	1.433 9	0.460 4	2.83	
	C ₃₋₁	1.2	1.6	1.2	1.331 3	0.454 2	2.60	
	C ₃₋₂	1.2	1.8	1.2	1.437 2	0.456 4	2.82	
	C ₃₋₃	1.2	2.0	1.2	1.530 2	0.461 6	3.03	

从表 2 可以看出,固定齿高不变,在齿宽相同的

情况下,平均流量随着齿底距的增加而增大。齿底 距尺寸相同时,平均流量与齿宽呈正相关关系。滴

头流态指数 x 为 0.453 3~0.509 1,接近于 0.5,水 流流态为紊流。流态指数和流量系数均随着齿底距 和齿高的增加呈增大趋势。

图 2 为当 h=0.8 mm 时模拟结果拟合的流量 压力曲线。从图 2 可以看出,在同一入口压力条件 下,当齿高保持不变时,流量随着齿宽和齿底距的增 加而增大,说明适当增加齿宽和齿底距,可以增大流 道有效过流断面面积,增强流道过流能力。从图 2 还可以看出,流量压力曲线随着齿宽的增加而逐渐 变陡,其变化对流量的影响增强,流态指数显著增 大;当其他结构参数保持恒定时,流量压力曲线也随 着齿底距的增加而变陡,但其明显小于齿宽对流量 压力曲线变化幅度的影响。说明齿宽和齿底距的增 加均可迅速提高灌水器的流量,但齿宽对流量的影 响较齿底距显著;另外,二者在影响流量的同时,也 提高了灌水器的流态指数,降低了灌水器的水力性 能,与对流量的影响相似,对流态指数的影响也以齿 宽较齿底距显著。因此,在灌水器设计时,为了提高 灌水器流量或者抗堵塞能力,同时降低灌水器的流 态指数,建议尽量减小齿宽,而适当增大齿底距。图 2中,A₁₋₁曲线最平缓,即齿宽和齿底距尺寸相对最 小的结构;与之相反,C₁₋₃曲线最陡,为齿宽和齿底距 尺寸相对最大的结构,这表明,流道结构尺寸越小, 压力流量曲线越平缓,水力性能越好。这与魏正英 等^[10]对梯形迷宫流道结构灌水器水力性能影响的 研究结论相符。





Fig. 2 Curves of relationships of inlet pressure and discharges with h=0.8 mm

2.2 齿高对水力性能的影响

选取编号为 B₁₋₂、B₂₋₂、B₃₋₂的结构,分析齿高对 水力性能的影响,其流量压力关系曲线如图 3 所示。 由图 3 可以看出,当齿宽和齿底距保持不变时,在同 等压力条件下,齿高越大,流量越小,流量压力曲线 越平缓,灌水器的水力性能越好。表 2 中,齿高为 0.8,1.0,1.2 mm 时,平均流量分别为 2.79,2.70 和 2.63 L/h,流态指数分别为 0.481 2,0.476 3, 0.454 8,即随着齿高的增加,流量与齿高呈负相关 关系。灌水器流态指数也逐渐减小,这主要是由于 随着齿高的增加,流道主航道变窄,流量有效过流断 面面积减小;同时,流道局部水头损失增大,水流紊 流效果增强。其他工况与此类似。



discharges with different heights

2.3 流场特性分析

灌水器主要依靠其流道实现对水流流量的调节 功能,其流场特性直接影响和决定了灌水器的水力 性能。以结构分别为 *a*=0.5 mm,*b*=1.6 mm,*h*= 0.8 mm; a=1.0 mm, b=1.6 mm, h=0.8 mm; a= 1.2 mm, b=1.6 mm, h=0.8 mm 的 A₁₋₁、B₁₋₁、C₁₋₁ 型灌水器为例, 模拟得到每种灌水器在 10 m水头下 流道局部 2 个单元段的速度矢量图(图 4)。



图 4 3 种不同齿宽的灌水器速度矢量图

Fig. 4 Velocity vectorgraph of three different dental width emitters

图 4 中流线疏密度表明了流场速度大小,流线 密的地方流速大,流线疏的地方流速小。由图 4 可

以清楚地看到主流线。由图 4 中流道内单元段速度 矢量图可以看出,各个单元处流速分布状态相似,即 在流道尖角处,流动速度方向和大小变化都较为剧 烈,流道中均存在漩涡。对比 3 种不同齿宽的速度 矢量图可以看出,随着齿宽的增加,流道中的流线更 为集中,主流线更趋于平滑。

3种结构的流道单元中均存在漩涡。在漩涡中 心,流线相对主流区稀疏,流速接近于零。漩涡的存 在使得水流在运动中有强烈的扰动,不断冲刷流道 壁面,既可以起到消能作用,又可以冲洗流道,有利 于提高滴头的抗堵塞性能。随着齿宽的增加,漩涡 中流线随之渐疏,漩涡形状越不明显,扰动变弱,消 能效果越弱。由此可以得出,当齿高和齿底距保持 恒定时,齿宽相对越小,灌水器消能效果及抗堵塞性 能越好。

3 结 论

(1)齿宽和齿底距均与流量、流态指数呈正相 关,且齿宽对流量和流态指数的影响较齿底距更显 著,而齿高与流量呈负相关关系。在进行流道设计 时,建议尽量减小齿宽或齿底距。也可通过增大齿 高的方法,减小流道有效过流面积,提高灌水器的水 力性能,降低流量受压力的波动。

(2)齿高和齿底距一定时,齿宽越小,流道内漩 涡体积越大,涡流越明显,流道内水流扰动越剧烈, 水流局部能量损失越大。漩涡的运动有利于灌水器 的抗堵塞和消能。要取得较好的抗堵塞和消能效 果,应适当减小齿宽。

[参考文献]

- [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(2):100-103.
 Wang J D,Li G Y,Qiu X Y,et al. Effects of flow passage forms on hydraulic performance of emitters [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2005,21(2):100-103. (in Chinese)
- [2] 陈 瑾.迷宫滴头流道结构形式的性能研究 [D].北京:中国农 业大学,2006:9-13.

Chen J. Study on the performance of the labyrinth channels forms of drip emitters [D]. Beijing: China Agricultural University.2006:9-13. (in Chinese)

[3] 姚 彬,刘志烽,张建萍.流道长度对内镶贴片式滴头性能参数 影响的初步研究[J].节水灌溉,2003,28(5):38-39. Yao B, Liu Z F, Zhang J P. Preliminary study on influence of flow path length on embedded emitter capability parameter [J]. Water Saving Irrigation, 2003, 28(5): 38-39. (in Chinese)

- [4] 王尚锦,刘小民,席 光,等.迷宫式滴头内流动的有限元数值 分析 [J].农业机械学报,2000,31(4):44-46.
 Wang S J,Liu X M,Xi G, et al. Numerical simulation of flows inside a drip faucet by finite element method [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31 (4):44-46. (in Chinese)
- [5] 李云开,杨培岭,任树梅,等. 圆柱型灌水器迷宫式流道内部流体流动分析与数值模拟[J].水动力学研究与进展:A辑,2005,20(6):736-743.
 Li Y K, Yang P L, Ren S M, et al. Analyzing and modeling flow regime in labyrinth path drip irrigation column emitter with CFD [J]. Journal of Hydrodynamics: Ser A,2005,20(6):736-743. (in Chinese)
- [6] 张 俊,魏公际,赵万华,等. 灌水器内圆弧形流道的液固两相流场分析 [J]. 中国机械工程,2007,18(5):589-593.
 Zhang J,Wei G J,Zhao W H,et al. Numerical analysis on liquid-solid two-phase flows in arc-type channel of the emitter [J]. China Mechanical Engineering,2007,18(5):589-593. (in Chinese)
- [7] 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 J,Hong J,Zhao W H, 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)
- [8] 孟桂祥,张鸣远,赵万华,等. 滴灌滴头内流场的数值模拟及流 道优化设计 [J]. 西安交通大学学报,2004,38(9):920-924.
 Meng G X,Zhang M Y,Zhao W H,et al. Numerical flow simulation and optimum channel design of drip irrigation emitter
 [J]. Journal of Xi' an Jiaotong University, 2004, 38(9):920-924. (in Chinese)
- [9] 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.
 Wei Z Y, Zhao W H, Tang Y P, et al. Anti-clogging design method for the labyrinth channels of drip irrigation emitters
 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2005,21(6):1-7. (in Chinese)
- [10] 魏正英,唐一平,赵万华,等. 滴灌灌水器迷宫流道结构与水力 性能试验研究 [J]. 农业机械学报,2005,36(12):51-55.
 Wei Z Y, Tang Y P, Zhao W H, 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)