

# 迷宫流道转角对灌水器水力性能的影响<sup>\*</sup>

喻黎明<sup>1</sup> 吴普特<sup>2</sup> 牛文全<sup>2</sup> 范兴科<sup>2</sup> 张林<sup>1</sup>

(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国家节水灌溉杨凌工程技术研究中心, 陕西杨凌 712100)

**【摘要】** 为研究齿形、梯形以及矩形流道转角变化对水力性能的影响,采用 Fluent 软件对不同形状下不同转角的流道进行了数值模拟。研究表明:当其他条件相同时,转角的变化与流量系数、流态指数呈负相关,其变化对梯形流道灌水器的流量系数影响最大,最多下降了 19.03%,齿形流道次之,下降了 10.14%,矩形流道是梯形流道转角角度增加的延伸,具有相同的水力性能变化规律;随着角度的增加,梯形流道总的局部水头损失系数最多增加了 32.5%,而齿形流道总的局部水头损失系数最多增加了 23.4%,变化都很明显;压力较高时,摩擦系数基本保持不变,流体为紊流状态。

**关键词:** 滴灌 灌水器 迷宫流道 转角 水力性能

中图分类号: S275.6

文献标识码: A

## Influence of Angle of Labyrinth Channels on Hydraulic Performance of Emitter

Yu Liming<sup>1</sup> Wu Pute<sup>2</sup> Niu Wenquan<sup>2</sup> Fan Xingke<sup>2</sup> Zhang Lin<sup>1</sup>

(1. College of Water Resource and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi

712100, China 2. National Engineering Research Center for Water Saving Irrigation at Yangling, Institute of

Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China)

### Abstract

To analyze the influence of angle of labyrinth channels to the hydraulic performance of emitter, Fluent 6.2 CFD software was used to study the sawtooth, trapezoid and rectangle channels with the different angles. The results showed negative relationship between angle and discharge coefficient and flow state exponent when the other conditions did not change. With the increasing of angle the discharge coefficient of trapezoid labyrinth channels decreased by 19.03 percent, the hydraulic performance of rectangle labyrinth path was similar with trapezoid flow path; it was apparent change to local damage coefficient  $\zeta_l$  with the increasing of angle, the  $\zeta_l$  of trapezoid labyrinth path increased by 32.5 percent, but sawtooth flow path increased by 23.4 percent in the changing range of angle; when the working pressure was higher, the fraction coefficient was stabilized to value and changed nothing, the state of water is keeping turbulence.

**Key words** Drip irrigation, Emitter, Labyrinth channels, Angle, Hydraulic performance

### 引言

灌水器是滴灌系统核心部件之一。在灌水器各流道中,迷宫流道是公认的最好的流道形式,迷宫流

道的形状有很多种,主要有齿形、梯形、矩形以及由这几种基本形状加以圆角或变化各种参数数值而生成的衍生形状。在这些流道形状中,有许多对水力性能有重要影响的结构参数,其中转角是一个非常

收稿日期: 2008-05-27 修回日期: 2008-08-15

<sup>\*</sup> 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2006AA100214)

作者简介: 喻黎明, 博士生, 主要从事节水灌溉技术研究, E-mail: liming16900@yahoo.cn

通讯作者: 吴普特, 研究员, 博士生导师, 主要从事节水灌溉技术研究, E-mail: gjzwpt@vip.sina.com

重要的参数。李光永等<sup>[1]</sup>认为在影响灌水器出流量的结构参数中,转角的影响仅次于流道深度,并且与流量成反比;张俊等<sup>[2]</sup>认为转角对流态指数影响显著。转角的变化引起流道内部边界的复杂多变,造成很大的局部水头损失,魏青松等<sup>[3]</sup>认为水头损失几乎全部为局部水头损失;Ozekici B 等<sup>[4]</sup>认为水头损失的 90% 发生在与转角关系非常密切的齿尖结构处。因此,转角是造成局部水头损失的一个重要原因,转角不同,则局部水头损失系数也不同,从而导致不同转角的流道水力性能发生很大变化。本文利用计算流体力学 Fluent 软件对齿形、梯形、矩形不同转角的流道进行数值模拟,通过改变转角的角度,使灌水器流道形状产生变化以研究灌水器水力性能的变化规律,探讨灌水器结构参数中转角与灌水器水力性能之间的关系,为灌水器流道系统化和快速设计提供参考和依据。

表 1 灌水器流道结构参数

Tab.1 Structural parameters of the different emitters

流道形状	$\alpha/(\circ)$	$L/\text{mm}$	$w/\text{mm}$	$h/\text{mm}$	流道单元个数 $n$	流道深/mm
齿形	60,65,70,75,80	0	0.9	0.9	12	0.8
梯形	60,65,70,75,80	0.2	0.9	0.9	12	0.8
矩形	90	0.2	0.9	0.9	12	0.8

按照 CFD 计算过程,在建立物理模型的基础上进行网格划分,由于流道边界变化较大,因此采用混合多面体进行网格划分,并进行局部加密,网格单元长度为 0.1 mm 左右,共计约  $1.5 \times 10^5$  个单元。

## 1.2 数学模型

由于流道内的水流视为不可压缩流体,考虑重力的作用,应用连续性方程和 Navier - Stokes 方程<sup>[5]</sup>,灌水器流量为 0.81 ~ 4.32 L/h,流体运动平均速度  $\bar{v}$  为 0.65 ~ 1.15 m/s,流道断面特征长度  $R$  为  $0.21 \times 10^{-3}$  m,运动粘滞系数为  $10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s,雷诺数  $Re$  为 69.5 ~ 333。Nishimura 等人<sup>[6~7]</sup>对类似的相位差为 0° 的正弦波纹流道进行了数值模拟和试验研究,结果发现这种正弦型流道的层流转变发生在雷诺数  $Re$  为 200 ~ 350 之间,远小于常规平直流道的临界雷诺数。李云开等<sup>[8]</sup>对 3 种重力滴灌灌水器内部流道流体的研究表明,当  $Re$  为 73 ~ 930 时,流道内流态转换的临界雷诺数比常规尺度流道的值要小,  $Re \leq 321$ ; 其对 6 种迷宫式流道灌水器内部流体流动 ( $Re$  为 105 ~ 930) 的研究认为,流态转换的临界雷诺数低于 255<sup>[9]</sup>。张俊等<sup>[10]</sup>通过对弧形流道的研究,对比使用层流模型、紊流模型模拟出的流量和试验测试流量,发现使用紊流模型得到的流量更加接近测试结果。因此,本文的灌水器流道

## 1 材料与方法

### 1.1 物理模型及网格划分

本文所选用的灌水器流道截面形状如图 1 所示。其主要参数有上底宽  $L$ 、流道宽  $w$ 、斜边与底边转角  $\alpha$  和高  $h$ 。当  $L = 0$  时,截面是一个齿形流道单元;当  $\alpha < 90^\circ$  时,则是一个梯形流道单元;当  $\alpha = 90^\circ$  时,则是一个矩形流道单元。灌水器流道结构参数如表 1 所示。

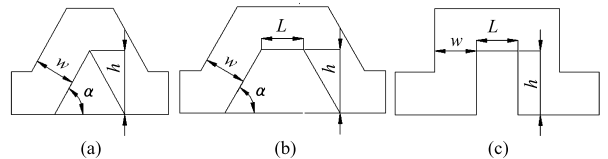


图 1 灌水器基本流道结构形式

Fig.1 Basic forms of flow path of emitter

(a) 齿形流道单元 (b) 梯形流道单元 (c) 矩形流道单元

水力计算都采用标准  $k - \epsilon$  紊流模型,其计算公式见文献[5]。

### 1.3 边界条件及数值计算方法

模拟压力水头分 9 个水平,分别是 1、2、3、4、5、6、8、10 和 12 m。出水口为自由出流。目前 CFD 对壁面的处理方法有 2 种:一种采用半经验公式(壁面函数);另一种是改进紊流模型进行求解<sup>[11]</sup>。在标准  $k - \epsilon$  模型中,这 2 种处理方式对流量的影响不明显,因此本文采用 Fluent 软件默认的标准壁面函数法对流道壁面进行处理。

数值计算采用有限体积方法离散控制方程,对流项等各参数的离散都采用二阶迎风格式,速度和压力的耦合采用 SIMPLE 算法求解,收敛精度为  $10^{-4}$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 转角与流量、流量系数、流态指数的关系

按照上述试验方案,应用 Fluent6.2 软件对表 1 中不同结构参数的流道进行水力性能 CFD 模拟计算,流量  $q$  与入口压力水头  $H$  的关系为

$$q = kH^x \quad (1)$$

式中  $k$ ——流量系数  $x$ ——流态指数

回归计算结果如表 2 所示。当流道截面积、流道单元数、高和入口压力相同而转角不同时,齿形流

道和梯形流道的流量系数都随角度的增大而逐渐减小, 流量系数反映了流量的波动, 其值越小, 灌水器的流量变动就越小。模拟中, 转角 80°时齿形流道的流量系数比 60°时的相应值减小了 10.14%, 而转角 90°时的梯形流道(即矩形流道)的流量系数比 60°时的相应值减小了 19.03%, 并且随着角度的增

加, 流量系数减小的程度变小, 流量系数变化越来越趋于平缓; 随着转角的增大, 齿形流道和梯形流道的流态指数也减小, 其平均值分别为 0.466 和 0.483, 流态指数反映了灌水器的流态特征, 即流量对压力变化的敏感程度, 从数值来看, 齿形流道的流态指数要优于梯形流道。

表 2 不同转角的流量和流量方程式

Tab.2 Flow rate and flow rate equation of the different angles

转角/(°)	齿形流道		梯形流道	
	流量/L·h <sup>-1</sup>	流量方程式	流量/L·h <sup>-1</sup>	流量方程式
60	1.92	$q = 0.896 9H^{0.473 9}$	2.81	$q = 1.286 7H^{0.486 2}$
65	1.84	$q = 0.865 2H^{0.470 2}$	2.51	$q = 1.156 8H^{0.484 4}$
70	1.82	$q = 0.861 1H^{0.466 1}$	2.43	$q = 1.118 2H^{0.481 8}$
75	1.72	$q = 0.813 6H^{0.464 0}$	2.35	$q = 1.081 6H^{0.480 8}$
80	1.68	$q = 0.805 9H^{0.457 4}$	2.31	$q = 1.065 3H^{0.480 4}$
90			2.26	$q = 1.041 8H^{0.479 8}$

注: 所示流量是入口压力为 5 m 水头的模拟流量, 宽为 0.9 mm, 高为 0.9 mm。

转角对流量和流态指数的影响是由于角度的增加加大了水流在流道内方向改变的程度, 从而加大了水流的紊流程度, 使流量和流态指数都下降, 而且转角的变化对流量的影响大于对流态指数的影响。齿形流道与梯形流道的流量也有很大的差别, 入口压力为 5 m 水头时, 不同转角下平均流量分别为 1.8 L/h 和 2.48 L/h, 矩形流道可以看成是梯形流道在转角增加时的特例, 其流量为 2.26 L/h, 也是下降的。

2.2 压力损失沿长度的分布特性及摩阻系数

假设迷宫式灌水器流道能量损失全部为流道局部水头损失<sup>[12~13]</sup>, 即

$$H = h_f = \zeta_t \frac{\bar{v}^2}{2g} \quad (2)$$

式中  $h_f$ ——局部水头损失, m  
 $\bar{v}$ ——流道内水流的平均速度, m/s  
 $\zeta_t$ ——总的局部水头损失系数

当入口工作压力为 5 m 水头时,  $g$  为 9.81 m/s<sup>2</sup>, 即

$$\zeta_t = \frac{98.1}{\bar{v}^2} \quad (3)$$

其中  $\frac{\bar{v}^2}{A} = \frac{q}{A} \quad (4)$

式中  $A$ ——流道横截面积, m<sup>2</sup>

将式(4)代入式(3)即可计算出齿形、梯形、矩形等流道总的局部水头损失系数  $\zeta_t$  和各流道单元的局部水头损失系数  $\zeta$ , 见表 3。

局部水头损失主要是当栅格入口、流道出入口

表 3 流道局部水头损失系数表

Tab.3 Local loss coefficient of flow path of the different forms

流道结构形式	$\alpha/(°)$	$\bar{v}/m \cdot s^{-1}$	$\zeta_t$	$\zeta$
齿形	60	0.74	178.22	14.85
	65	0.71	193.82	16.15
	70	0.70	199.61	16.63
	75	0.66	222.09	18.51
	80	0.65	232.79	19.40
梯形	60	1.08	83.469	6.96
	65	0.97	104.61	8.72
	70	0.94	111.62	9.30
	75	0.91	119.34	9.95
	80	0.89	123.72	10.31
矩形	90	0.88	125.68	10.47

注:  $\zeta$ 、 $\zeta_t$  和  $\bar{v}$  是入口压力为 5 m 时的模拟量。

尺寸变化以及流道内部角度等局部突变时引起流动边界的剧烈变化, 从而引起附近局部流体流动结构变化造成的压力损失。栅格入口局部损失系数由两部分组成, 即毛管向灌水器供水水流方向的改变和栅格过滤,  $\zeta$  共计为 3.62。流道入口  $\zeta = 0.37$ , 流道出口  $\zeta = 1.47$ 。以矩形流道为例, 每个向下的闸板式矩形凸出局部水头损失系数为  $\zeta$ , 共计 25 个, 即有  $\zeta_t = 5.46 + 25\zeta$ , 由文献[14]知,  $\zeta = 4.02$ , 即  $\zeta_t = 105.96$ (其中出入口尺寸变化、入口水流方向改变和栅格过滤造成的损失占 5.2%), 与表 3 中矩形流道的  $\zeta_t = 125.68$  对比, 其误差为 15.69%。在 Fluent

模拟计算时,因没有考虑出入口面积变化、栅格过滤和入口水流方向改变造成的水力损失,所以计算出的流量偏大, $\zeta_l$  相对偏大。假设此部分的比例也是 5.2%,那么只有 10.49% 是由沿程水头损失等造成,局部水头损失占整个水头损失的 89.51%,接近 90%,所以当计算总的水头损失时,可以将沿程水头损失忽略不计<sup>[15~17]</sup>。

从表 3 可以看出,齿形流道和梯形流道的  $\zeta$ 、 $\zeta_l$  都随着转角的增大而增大。在齿形流道中,随着角度的增大, $\zeta_l$  也增大,最多增大了 23.4%,平均为 205.3;而在梯形流道中,随着角度的增大, $\zeta_l$  也增大,最多增大了 32.5%,平均为 108.6。齿形流道和梯形流道的  $\zeta$  平均值分别为 17.12 和 9.05,考虑到入口栅格、出入口尺寸变化所引起的压力损失,两者的局部水头损失系数差距接近一倍。另外,当工作压力均为 5 m 水头时,齿形流道和梯形流道的平均流速分别为 0.69 m/s 和 0.96 m/s,即局部水头损失系数的增加使对应的流速下降,符合水力学规律。

同时,由于局部压力损失系数只与流道形状有关,对于相同流道形状按流道长度分布的局部水头损失而言,其压力损失是均匀分配在长度上的,符合线性叠加规律,因此可将整个压力损失离散而均匀的分在整个流道内<sup>[15]</sup>,并借助 Darcy - Weisbach 公式

$$H = \frac{fL'\bar{v}^2}{2Dg} \quad (5)$$

计算摩擦系数

$$f = \frac{2HDg}{L\bar{v}^2} \quad (6)$$

式中  $L'$ ——流道长度,mm

$D$ ——水力半径,mm

通过式(6)计算出不同流道形状和不同角度的摩擦系数如图 2、3 所示(T 表示梯形,C 表示齿形)。从图 2 可以看出,梯形流道的摩擦系数随着角度的增大而明显增加,当转角为 60°时,平均摩擦系数为 0.586,而转角为 80°时,平均摩擦系数为 0.97。对于同一转角,摩擦系数随压力的增加而增大并稳定于某一数值上,在整个压力区,摩擦系数变化较小,最大偏差率为 8%。从图 3 可以看出,不同流道形状下的摩擦系数有较大的区别,齿形流道平均摩擦系数最大,能达到 1.489,而梯形流道的最小,平均只有 0.59。矩形流道和梯形流道的摩擦系数在整个压力区变化较小。对于相同转角、相同形状的流道,不同的压力水头对应不同的平均水流流速,但由图 2、3 所示,当转角相同时,在整个测试压力范围

内,摩擦系数的变化较小,基本上为常值,仅与灌水器流道的相对粗糙度有关,与雷诺数  $Re$  无关,所以在流道内部不存在流态转换的情况,基本上是紊流状态。当压力较低时,摩擦系数主要取决于供水管路的相对粗糙度, $Re$  在流态变化范围内时,摩擦系数的变化不大,齿形流道和梯形流道还有可能存在从光滑紊流到全紊流的转换情况<sup>[18]</sup>。

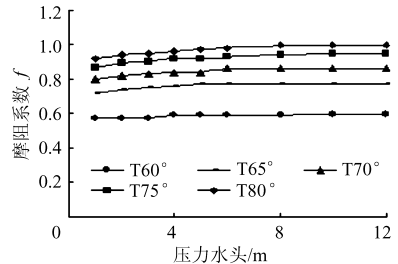


图 2 梯形流道不同转角下摩擦系数曲线

Fig. 2 Friction coefficient curves of the different angles of trapezoid flow path

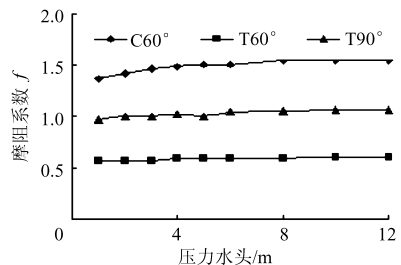


图 3 不同流道形状下摩擦系数曲线

Fig. 3 Friction coefficient curves of the different flow path forms

### 3 结论

(1) 转角与齿形流道和梯形流道的流量系数及流态指数呈负相关,随着转角的增大,齿形流道的流量系数最多下降了 10.14%,而梯形流道的流量系数最多下降了 19.03%,并且随着角度的增加,流量系数下降趋势趋于平缓;矩形流道是梯形流道角度变化的延伸,所表现出的水力性能与梯形流道的规律相同。

(2) 随着转角的变化, $\zeta_l$  明显变化,齿形流道最多增大了 23.4%,平均为 205.3;而梯形流道的  $\zeta_l$  最多增大了 32.5%,平均为 108.6,局部压力损失系数的巨大差异使流量有明显差异。

(3) 压力损失在整个迷宫流道的长度上符合线性叠加规律,转角对摩擦系数有非常大的影响,随着角度的增大,摩擦系数明显增大;转角相同时,流速的变化对摩擦系数影响较小,流体的流态基本不会变化,都保持紊流状态。

## 参 考 文 献

- 1 Li Guangyong, Wang Jangdong, Alam M, et al. Influence of geometrical parameters of labyrinth flow path of drip emitters on hydraulic and Anti-clogging performance[C]. ASABE Paper, 2006, 49(3): 637~643.
- 2 张俊, 魏公际, 赵万华. 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 Jun, Wei Gongji, Zhao Wanhua. 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)
- 3 魏青松, 史玉升, 芦刚, 等. 内镶式滴灌带绕流流道水力性能研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(10): 83~87.  
Wei Qingsong, Shi Yusheng, Lu Gang, et al. Hydraulic performances of round-flow channel in an in-line drip-tape[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(10): 83~87. (in Chinese)
- 4 Ozekici B, Ronald S. Analysis of pressure losses in tortuous path emitters[M]. America society of Agriculture Engineering, 1991: 12~115.
- 5 王福军. 计算流体力学分析—CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- 6 Nishimura T, Bain Y N, Matsumoto Y. Fluid flow and mass transfer characteristics in a sinusoidal wavy-walled tube at moderate Reynolds numbers for steady flow[J]. Heat and Mass Transfer, 2003, 39(3): 239~248.
- 7 Nishimura T, Murakami S, Arakawa S, et al. Flow observations and mass transfer characteristics in symmetrical wavy-walled channels at moderate Reynolds numbers for steady flow[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1990, 33(5): 843~845.
- 8 李云开, 杨培岭, 任树梅. 重力滴灌灌水器水力性能及其流道内流体流动机理[J]. 农业机械学报, 2005, 36(10): 54~57.  
Li Yunkai, Yang Peiling, Ren Shumei. Hydraulic performance and its mechanism of liquid flow in gravity drip irrigation emitter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(10): 54~57. (in Chinese)
- 9 李云开, 杨培岭, 任树梅. 滴灌灌水器迷宫式流道内部流体流动特性分析与试验研究[J]. 水利学报, 2005, 36(7): 886~890.  
Li Yunkai, Yang Peiling, Ren Shumei. Experimental study on flow characteristics in labyrinth path emitters[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(7): 886~890. (in Chinese)
- 10 Zhang Jun, Zhao Wanhua, Wei Zhengying, et al. Numerical and experimental study on hydraulic performance of emitter with arc labyrinth channels[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 56(2): 120~129.
- 11 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 Wene. 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)
- 12 Potter M C, Wiggert D C. Mechanics of fluids[M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- 13 李云开, 杨培岭, 任树梅, 等. 分形流道设计及几何参数对滴头水力性能的影响[J]. 机械工程学报, 2007, 43(7): 109~113.  
Li Yunkai, Yang Peiling, Ren Shumei. Effects of fractal flow path designing and its parameters on emitter hydraulic performance[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(7): 109~113. (in Chinese)
- 14 傅琳, 董文楚, 郑耀泉. 微灌工程技术指南[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1988.
- 15 李云开, 刘世荣, 杨培岭, 等. 滴头锯齿型迷宫流道消能特性的流体动力学分析[J]. 农业机械学报, 2007, 38(12): 49~52.  
Li Yunkai, Liu Shirong, Yang Peiling, et al. Hydrokinetics analysis on the pressure losses in sawtooth-labyrinth path drip irrigation emitters [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(12): 49~52. (in Chinese)
- 16 王文娥, 王福军, 严海军. 迷宫滴头 CFD 分析方法研究[J]. 农业机械学报, 2006, 37(10): 70~73.  
Wang Wene, Wang Fujun, Yan Haijun. Study on CFD method for flow simulation in labyrinth in the emitter [J]. Transactions for the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2006, 37(10): 70~73. (in Chinese)
- 17 Wei Qingsong, Shi Yusheng, Dong Wenchu. Study on hydraulic performance of drip emitters by computational fluid dynamics[J]. Agricultural Water Management, 2006, 84(1~2): 130~136.
- 18 吴持恭. 水力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.