

# 滴头锯齿型迷宫流道消能特性的流体动力学分析\*

李云开 刘世荣 杨培岭 任树梅 林雄财

**【摘要】** 在对所选取的3种代表性锯齿型迷宫式滴头流道参数进行精确测定的基础上,利用圆管紊流理论和CFD流场模拟软件对锯齿形迷宫流道的消能机理进行了研究。结果表明:光滑圆管紊流理论不足以解释锯齿型迷宫流道的消能机理;压力沿流道长度方向呈线性递减,各消能尖角单元压力损失相等,符合线性叠加规律;摩擦系数随着压力增加而降低,并很快稳定在一定数值上;在中、高压区滴头流道内部流动为紊流,在低压区可能存在从层流到紊流或者光滑紊流到全紊流的流态转换行为。

**关键词:** 滴头 迷宫式流道 压力损失 消能机理 摩擦系数

**中图分类号:** S275.6; O351.2 **文献标识码:** A

## Hydrokinetics Analysis on the Pressure Losses in Sawtooth-labyrinth Path Drip Irrigation Emitters

Li Yunkai Liu Shirong Yang Peiling Ren Shumei Lin Xiongcai  
(China Agricultural University)

### Abstract

Labyrinth path drip irrigation emitter is one of the predominant drippers. Based on the exact test to the geometry parameters of three representative sawtooth-labyrinth paths, the mechanism of pressure losses in the flow path was studied by the smooth pipe turbulence theory and CFD (computational fluid dynamics) technology of flow regime. The mechanism of pressure losses in sawtooth-labyrinth path couldn't be explained with smooth pipe turbulence theory. The pressure was descending with linearity rules along the flow path, and the head losses was equaled. The friction coefficient reduced with the pressure increasing, and it was stabilized to a value soon. The flow regime is turbulent within the sawtooth-labyrinth paths the pressure zone higher than 50 kPa, and it is possible that the transformation behaviors of the flow from laminar flow or smooth turbulent into turbulent flow were existed.

**Key words** Drip irrigation emitter, Sawtooth-labyrinth flow path, Pressure loss, Mechanism of pressure loss, Friction coefficient

### 引言

迷宫流道主要是借助管壁摩擦、流道尖角弯道、流道的收缩与扩大等因素进行消能,被视为目前性

能最优越的滴头流道形式。Gilaad等指出局部水头损失是流道消能的主要形式<sup>[1]</sup>;Ozekici和Sneed对圆片式滴头水力特性的研究表明,98%的压力损失发生在流道齿型结构处<sup>[2]</sup>。从迷宫流道的组成

收稿日期:2006-08-25

\* 国家自然科学基金资助项目(项目编号:50609029、50379053)、国家“863”高新技术研究发展计划资助项目(项目编号:2002AA6Z3091)和中国农业大学科研启动基金资助项目(项目编号:2005065)

李云开 中国农业大学水利与土木工程学院 讲师,100083 北京市  
刘世荣 中国农业大学烟台研究院 高级畜牧师,264670 山东省烟台市  
杨培岭 中国农业大学水利与土木工程学院 教授  
任树梅 中国农业大学水利与土木工程学院 教授  
林雄财 中国农业大学水利与土木工程学院 硕士生

结构来看,可将迷宫流道视为多个弯管连接而成的组合管道,已有学者利用圆管紊流理论对迷宫流道的消能机理进行了分析。山田哲丰利用光滑圆管紊流理论对直通型迷宫流道的阻力系数进行了研究<sup>[3]</sup>;方部玲、赵德菱等对圆片式滴头锯齿形迷宫流道的研究表明,因为流道的截面积小,管道流态理论不能解释其中的水流现象,利用圆管紊流理论来解释迷宫流道的消能机理还是一个极具争议的科学问题<sup>[4~5]</sup>,对于复杂交错型迷宫流道的消能机理及摩阻系数的研究更为缺乏。本文在简化滴头结构的基础上利用计算流体力学方法和粗糙圆管紊流理论对锯齿型迷宫流道的消能机理进行研究。

## 1 流体流动的数学物理模型建立与验证

### 1.1 流体流动的 CFD 模型建立

滴头迷宫式流道内部流体流动可视为典型的粘性不可压缩(流体密度  $\rho$  为常数)流动,其基本控制方程和定解条件为<sup>[6]</sup>:

连续方程

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

Navier - Stokes 方程

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

标准  $k - \epsilon$  输运方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k U) =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon U) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) +$$

$$C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{\mu} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

$$G_k = \mu_t \left\{ 2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right] + \right.$$

$$\left. \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} \quad (5)$$

其中

$$U = ui + vj + wk$$

式中  $U$ ——流体流速  $p$ ——流体压力

$u, v, w$ ——流速在  $x, y, z$  方向的分量

$\rho$ ——水密度  $\mu$ ——动力粘度系数

$f_x, f_y, f_z$ ——质量力分量,当质量力只有重力作用时,  $f_x = f_y = 0, f_z = -g$

$\mu_t$ ——湍流粘性系数

$G_k, G_b$ ——平均速度梯度和浮力作用引起的紊流脉动动能,  $G_b = 0$

$Y_M$ ——紊流脉动扩张引起的动能耗散率,  $Y_M = 0$

$C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{\mu}, \sigma_k, \sigma_\epsilon$ ——常数,  $C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, C_{\mu} = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$

边界条件:流道除了出、入口外,其他边界上速度矢量均为零,即  $y=0, z=0$  时,  $u=v=w=0$ 。

初始条件:在流道的入口加上一定的工作压力,出口为大气压,即  $x=0$  时,  $p=p_0$ (工作压力);  $x=L$ (流道长度)时,  $p=0$ 。

### 1.2 网格划分与模型求解

采用流体分析软件 Fluent 的前处理器 GAMBIT 进行网格划分,3种滴头内部流道的网格划分均采用基本尺寸为 0.1 mm 的六面体网格,如图 1 所示。

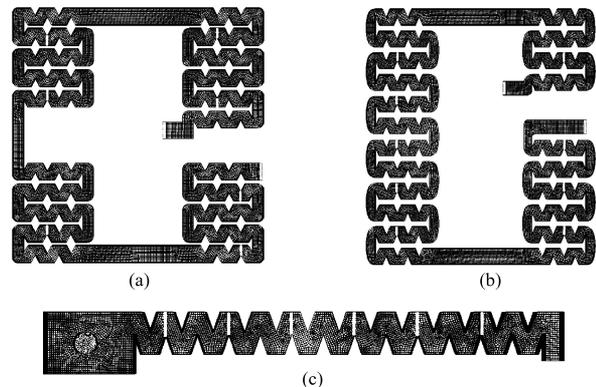


图 1 锯齿型迷宫流道型式及滴头截面位置分布(截面用白色线段表示)

Fig. 1 Forms of representative labyrinth path in drip irrigation emitters and its location distribution of sections denoted with white line

(a) A 型 (b) B 型 (c) C 型

近壁面采用标准壁面函数法对滴头壁面进行处理,滴头流道壁面的表面粗糙度根据目前塑料成型工艺水平设置为 0.01 mm。

滴头流道内部流场采用定常计算和分离式求解。压力项采用一阶迎风格式,速度压力耦合采用 SIMPLEC 算法。选择  $k - \epsilon$  模型对滴头流道内部流场进行定常计算时选择收敛精度为 0.000 1。

### 1.3 模型验证

选择我国最为常用的 3 种锯齿型迷宫式滴头进行研究。对 3 种迷宫式流道滴灌管流道几何参数进行了测试<sup>[7]</sup>,结果如表 1 所示。试验测试了 3 种滴头在 15、30、50、70、90、100、110、130、150 kPa 压力下滴头的流量<sup>[7]</sup>,并对测试范围内的流量和压力利用

SPSS10.0 进行拟合,测试结果如表 2 所示。从中可以看出在 15~150 kPa 压力条件下 CFD 模拟结果同实测值误差较小,流量相对误差都在 6.5% 以内,

数值模拟具有很高的精度,利用 CFD 模拟滴头流道内部流场,结果与实测结果有良好的一致性,选取的紊流数学模型与数值计算方法是合适的。

表 1 滴头流道几何参数

Tab. 1 Geometrical parameters of flow path in drip irrigation emitters

| 型号 | 最大流道宽度<br>$W_{\max}/\text{mm}$ | 最小流道宽度<br>$W_{\min}/\text{mm}$ | 流道深度<br>$D/\text{mm}$ | 流道长度<br>$L/\text{mm}$ | 齿数<br>$N$ | 截面积<br>$A/\text{mm}^2$ | 当量直径<br>$D_e/\text{mm}$ | 产地  |
|----|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------|------------------------|-------------------------|-----|
| A  | 1.23                           | 1.23                           | 0.91                  | 300                   | 122       | 0.996 3                | 1.14                    | 西班牙 |
| B  | 1.08                           | 1.08                           | 0.85                  | 360                   | 128       | 0.918                  | 1.05                    | 中国  |
| C  | 1.16                           | 0.77                           | 0.72                  | 40                    | 25        | 0.638~0.424            | 0.87~0.99               | 以色列 |

注:流道长度指水流通过路径中心线锯齿区长度(竖向直线段除外)。

表 2 迷宫流道滴头自由出流的实测值与模拟值

Tab. 2 Measuring and predicting values of labyrinth path in drip irrigation emitters

| 滴头<br>型号 | 流量/ $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$ | 工作压力 $p_0/\text{kPa}$ |       |       |      |      |      |      |      |      |
|----------|------------------------------------|-----------------------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|
|          |                                    | 15                    | 30    | 50    | 70   | 90   | 100  | 110  | 130  | 150  |
| A        | 实测值                                | 0.80                  | 1.38  | 1.62  | 1.98 | 2.27 | 2.40 | 2.54 | 2.73 | 2.94 |
|          | 模拟值                                | 0.84                  | 1.45  | 1.70  | 2.04 | 2.30 | 2.43 | 2.55 | 2.77 | 2.98 |
|          | 相对误差/%                             | 5.00                  | 5.07  | 4.94  | 3.03 | 1.32 | 1.25 | 0.39 | 1.47 | 1.36 |
| B        | 实测值                                | 0.55                  | 1.07  | 1.08  | 1.27 | 1.48 | 1.55 | 1.64 | 1.79 | 1.92 |
|          | 模拟值                                | 0.58                  | 1.12  | 1.12  | 1.32 | 1.54 | 1.59 | 1.69 | 1.82 | 1.98 |
|          | 相对误差/%                             | 5.45                  | 4.67  | 3.70  | 3.94 | 4.05 | 2.58 | 3.05 | 1.68 | 3.13 |
| C        | 实测值                                | 0.67                  | 1.11  | 1.47  | 1.65 | 1.95 | 2.05 | 2.11 | 2.28 | 2.45 |
|          | 模拟值                                | 0.88                  | 1.184 | 1.495 | 1.76 | 2.00 | 2.08 | 2.18 | 2.36 | 2.51 |
|          | 相对误差/%                             | 6.02                  | 6.52  | 1.94  | 6.62 | 2.56 | 1.46 | 3.11 | 3.34 | 2.61 |

## 2 平均压力沿流道长度方向的分布特性

利用 Fluent 软件平台对 100 kPa 压力条件下各滴头流道内部流体流动 CFD 数值模拟模型进行求解。借助 Flunent 软件工具对不同位置的流道横截面进行压力分布积分,求出断面的平均压力,计算结果如图 2 所示。由图 2 可以看出,沿长度方向不同位置压力分布呈线性递减的规律,流道长度同流道消能锯齿的分布是一致的,锯齿区各消能尖角单元的压力损失相等,对于迷宫式流道复杂边界引起的连续压力损失符合线性叠加规律。局部压力损失是

指由于局部突变引起流动边界发生急剧变化,从而引起附近的局部地区内流体流动结构的变化而引起的压力损失,对于迷宫式流道边界复杂引起的连续局部压力损失同样也符合线性叠加规律。

## 3 粗糙圆管紊流理论分析

迷宫式流道压力损失为管壁摩阻沿程损失以及流道尖角弯道、流道的收缩与扩大等因素造成的压力损失之和,同时流道总压力损失沿流道长度方向呈线性分布,为此可将整个压力损失离散而均匀分配于整个流道长度,并可借助 Darcy - Weisbach 公式来计算不同流道长度的消能结果,对 3 种滴头摩擦阻力系数计算结果如图 3 所示(图中  $C_{\max}$  型、 $C_{\min}$  型分别表示 C 型滴头流道最大、最小摩擦系数)。从图 3 可以看出,A、B 型 2 种滴头在低压区 ( $15 \text{ kPa} < p_0 < 50 \text{ kPa}$ ) 摩擦系数随着压力的增加而降低,并稳定在一定数值上;在中压区 ( $50 \text{ kPa} < p_0 < 100 \text{ kPa}$ )、高压区 ( $100 \text{ kPa} < p_0 < 150 \text{ kPa}$ ) 摩擦系数变化较小,偏差都在 5.0% 以内;C 型滴头的最大、最小摩擦系数在整个测试压力区间,摩擦系数

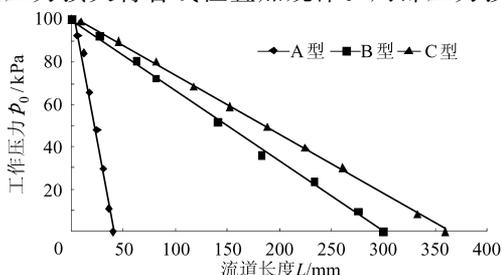


图 2 不同型号滴头工作压力和流道长度关系曲线

Fig. 2 Estimation of pressure along the flow path

变化较小,都在5.0%以内。C型滴头在整个测试压力范围内流速对摩阻系数的影响极小,流道内不存在流态转换,流态为紊流;A、B型滴头在 $50\text{ kPa} < p_0 < 150\text{ kPa}$ 压力范围内流道内部流态为紊流,在 $15\text{ kPa} < p_0 < 50\text{ kPa}$ 可能存在从层流到紊流或者光滑紊流到全紊流的流态转换行为。

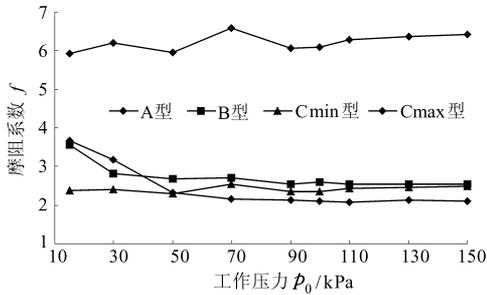


图3 不同滴头锯齿型迷宫流道摩阻系数

Fig. 3 Friction coefficient of flow path in drip irrigation emitters

## 4 结论

(1) 光滑圆管紊流理论不能够描述锯齿型迷宫式流道消能特性与机理。

(2) 锯齿型迷宫式流道沿长度方向压力分布呈线性递减的规律,各消能尖角单元压力损失相等,符合线性叠加规律。

(3) 锯齿型迷宫流道摩阻系数随着压力的增加而降低,并很快稳定在一定数值上,在 $50\text{ kPa} < p_0 < 150\text{ kPa}$ 压力范围内摩阻系数偏差都在5.0%以内。

(4) C型滴头在整个测试压力范围内流道内部流动为紊流,不存在流态转换行为;A、B型滴头在 $p_0 > 50\text{ kPa}$ 压力范围内流道内部流动为紊流,在低压区可能存在从层流到紊流或者光滑紊流到全紊流的流态转变。

## 参 考 文 献

- Gilaad Y K, Klous L Z. Hydraulic and mechanical properties of drippers[C]//Proceedings of the 2nd International Drip Irrigation Congress, 1976.
- Ozekici B, Ronald S. Analysis of pressure losses in toutuous-path emitters[G]. America Society of Agriculture Engineering, 1991.
- 山田哲丰. ろどりソスパソキソ内の液体の流动损失[J]. 日本机械会 ■, 1963, 66(3):1 428~1 430.
- 方部玲, 赵德菱. 圆片式迷宫长流道滴头的研究[C]//耕作机械学会论文集, 1997:145~150.
- 华绍曾, 杨学宁. 实用流体阻力手册[M]. 北京:国防工业出版社, 1985.
- 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.
- 李云开, 杨培岭, 任树梅, 等. 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): 61~65.

(上接第48页)

- Yakhot V, Orszag S A. Renormalization group analysis of turbulence: basic theory [J]. Journal of Scientific Computing, 1986, 1(1):1~11.
- Shih T H, Liou W W, Shabbir A, et al. New  $k-\epsilon$  eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows [J]. Computers & Fluids, 1995, 24(3):227~238.
- Kader B. Temperature and concentration profiles in fully turbulent boundary layers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1981, 24(9):1 541~1 544.
- Jiang C W, Liu H L, Huang T T. Determination of wind tunnel wall effects and corrections [C]//Proceedings of the 19th International Towing Tank Conference, Madrid, Spain, 1990:310~317.