

# 迷宫滴头水力特性的计算流体动力学模拟

李永欣, 李光永, 邱象玉, 王建东

(中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 建立了迷宫滴头的CFD (Computational Fluid Dynamics) 数值模型, 并对滴头的压力流量关系、流道内部的压力和流速分布进行了数值模拟计算。利用原型滴头和滴头放大模型实测值对模型和模拟计算结果进行了实验验证。结果表明, 滴头流量压力关系模拟计算值与实测值之间的平均偏差小于5%; 滴头放大模型内部压力分布的模拟值与实验值间的平均偏差小于3%。结果还表明, 迷宫式滴头流道内压力沿流道长度呈线性变化, 在滴头齿尖附近的主流区流速达1.6~2.8 m/s, 而滴头齿根附近的旋流区的流速为0.1~0.4 m/s, 在其它尺寸保持不变时, 滴头齿距对滴头流态指数的影响不大。CFD 数值模拟可以为滴头水力性能的进一步研究提供有效的研究手段。

**关键词:** 滴头; 水力特性; 计算流体动力学; 数值模拟

**中图分类号:** S275

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2005)03-0012-05

李永欣, 李光永, 邱象玉, 等 迷宫滴头水力特性的计算流体动力学模拟[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 computational fluid dynamics[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(3): 12-16 (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

滴头是滴灌系统中的关键部件, 滴头水力性能的好坏对整个滴灌系统的运行具有十分重要的影响。在滴灌系统的运行过程中, 滴头内部的流动状态对滴头的水力性能和抗堵塞性能影响很大。由于滴头的结构形式多种多样, 流道结构复杂, 尺寸小, 采用传统的流场量测方法无法清楚地显示滴头内部的流动状态, 因此目前对于滴头的研究主要是进行滴头宏观水力性能的研究。

采用数值计算方法对流体的流动过程进行研究已经是一种较为成熟的方法<sup>[1]</sup>, 目前流体流动的数值计算方法主要有: 有限差分法(Finite Difference Method, FDM); 有限体积法(Finite Volume Method, FVM); 有限元法(Finite Element Method, FEM)和有限分析法(Finite Analytic Method, FAM)<sup>[2]</sup>。但用于模拟和分析滴头内部流动状态及滴头水力性能的研究还不多见, 王尚锦, 刘小民, 席光等(2000年)采用有限元方法对滴头流道内部的流动进行了数值模拟, 并根据数值计算得到的滴头流场分布, 研究了雷诺数对流场的影响, 给出了滴头流态指数及流量计算公式<sup>[3,4]</sup>, 魏青松等(2004年)以有限元软件ANSYS为平台对滴头流道内部的流速分布和压力分布进行了数值模拟<sup>[5,6]</sup>, P. Salvador等(2004年)采用CFD(Computational Fluid Dynamics)商业软件FLUENT对圆柱型滴头的流量压力特性进行了计算<sup>[7]</sup>。但上述模拟计算缺乏足够的实验验证, P. Salvador(2004年)也仅仅对流量压力关系进行了验证。

本文采用以FVM为基础的CFD方法对迷宫滴头的水力特性进行数值模拟, 应用CFD商业软件FLUENT计算滴头的流量压力特性和滴头内部的压力和流量分布。

## 1 迷宫滴头水力特性的CFD建模与计算

CFD(Computational Fluid Dynamics)方法采用有限体积法(FVM)把空间计算域离散, 划分成一系列控制体积, 在控制体积上对由质量、动量、能量守恒方程组成的守恒型控制方程进行积分, 建立离散方程, 对离散方程进行数值求解得到流动参数的变量值, 进而在整个计算域上分析流体流动、传热和传质的规律。下面对迷宫滴头CFD数值模拟的控制方程, 紊流模型, 网格生成, 边界条件处理等方面的内容进行介绍。

### 1.1 控制方程

迷宫滴头内部的水流运动可以视为不可压缩流体的运动, 因此基本控制方程由连续性方程和Navier-Stokes方程等构成, 它们在直角坐标系中的形式为<sup>[8]</sup>:

连续性方程:

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

Navier-Stokes方程:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u U) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u + \rho f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v U) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 v + \rho f_y \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w U) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \nabla^2 w + \rho f_z \quad (4)$$

式中  $U$  —— 流体流速,  $U = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}$  ( $m \cdot s^{-1}$ );  $u, v, w$  —— 流速在  $x, y, z$  三个坐标轴方向的分量;  $\rho$  —— 水的密度,  $kg \cdot m^{-3}$ ;  $\mu$  —— 动力黏度系数, Pa·s;  $p$  —— 流体的压力, Pa;  $f_x, f_y, f_z$  —— 质量力的分量, 当质

收稿日期: 2004-04-26 修订日期: 2004-12-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(50249004)

作者简介: 李永欣(1971-), 男, 博士, 副教授, 北京 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083

通讯作者: 李光永(1963-), 男, 博士, 教授, 北京 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083, Email: lgy1@cau.edu.cn

量力只有重力作用时,  $f_x = f_y = 0, f_z = -g$ 。

### 1.2 紊流模型

采用雷诺时均法将流动参数的瞬时值分解为时均值和脉动值两部分代入控制方程, 目前已经有多种紊流模型对紊流的脉动值和时均值进行处理。本文对滴头中的紊流选择标准  $k - \epsilon$  紊流模型, 模型中流体紊流脉动动能  $k$  (J) 和耗散率  $\epsilon$  (%) 的表达式为<sup>[9]</sup>:

$$K = \frac{1}{2} (\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2})$$

$$\epsilon = \nu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right)$$

式中  $u, v, w$  —— 流速脉动值的分量,  $m \cdot s^{-1}$ ;  $\nu$  —— 流体的运动黏度系数,  $m^2 \cdot s^{-1}$ , 标准  $k - \epsilon$  模型求解紊流脉动动能  $k$  和耗散率  $\epsilon$  的输运方程为<sup>[10]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k U) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon U) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

式中  $\mu_t$  —— 湍流黏性系数;  $G_k, G_b$  —— 分别是平均速度梯度和浮力作用引起的紊流脉动动能;  $Y_M$  —— 紊流的脉动扩张引起的动能耗散率;  $C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, C_{3\epsilon}, \sigma_k, \sigma_\epsilon$  —— 均为常数。

### 1.3 网格生成

在CFD数值计算过程中, 每个控制体积都是由一个网格节点来代表, 网格节点的生成对CFD数值模拟至关重要。本文对两种结构形式的原型塑料迷宫滴头进行了CFD数值模拟, 这两种滴头的进水口和流道尺寸有所不同, 分别命名为1#和2#滴头, 两种滴头的结构和基本尺寸如图1a, c所示, 其中2#滴头的齿距有1.5, 1.8和2.1mm三种尺寸, 图中滴头的齿距为1.5mm。图1b, d是对两种滴头进行的网格划分。网格划分采用FLUENT的前处理器GAMBIT对滴头流道进行, 滴头原型内部流道的网格划分均采用了基本尺寸为0.1mm的六面体网格, 网格数约为105个。

本研究制作了1#滴头的放大模型进行压力测试<sup>[11]</sup>, 滴头放大模型与原型滴头的尺寸比例为10:1。放大模型流道的网格划分方法与1#滴头基本相同, 而网格划分时采用了基本尺寸为1mm的六面体网格, 网格数与1#滴头基本相同。

### 1.4 边界条件

滴头进水口设置为压力入口边界条件, 分别按照最小压力  $0.2 \times 10^5 Pa$ , 最大压力  $3 \times 10^5 Pa$ , 共15个因素水平输入。滴头出口设置为压力出口边界条件, 数值为当地大气压。滴头内部流道的壁面对紊流有明显影响, 目前CFD方法对壁面的处理方法有两种: 一种是采用半经验公式(壁面函数)来求解层流底层与紊流核心区域, 第二种是改进紊流模型进行求解。壁面函数方法具有计算量小和精度高的优点, 在工程实际流动的计算中

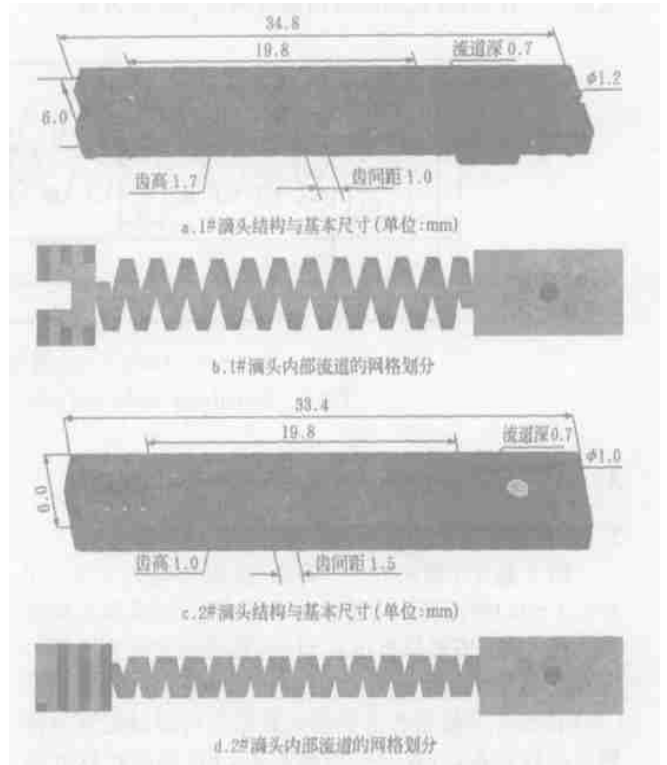


图1 两种型式滴头结构尺寸与网格划分

Fig 1 Geometry and grid generation of two kinds of emitters

得到了广泛应用, 本文采用了标准壁面函数方法对滴头的流道壁面进行处理。在处理过程中, 原型滴头壁面的表面粗糙度根据目前塑料成型工艺水平设置为0.01mm, 滴头放大模型采用金属锌板制作, 壁面粗糙度设置为0.001mm。

数值计算采用了定常的非耦合隐式算法, 压力项等采用了一阶迎风格式, 压力速度耦合采用了SIMPLEC算法。

## 2 实验材料与方法

### 2.1 实验材料

实验于2003年5月在中国农业大学水利与土木工程学院的灌排实验室进行。在进行滴头流道内压力分布的实验时, 由于滴头尺寸小, 难以直接对滴头流道压力进行测量, 实验中专门制作了1#滴头的放大模型<sup>[11]</sup>(图2), 滴头放大模型和原型的结构相同, 尺寸比例为10

1, 采用了重力相似定律, 在滴头放大模型的流道内不同位置打了8个测压孔(图2中黑色圆点), 接压力表(0.4级精密压力表)测量流道内压力值。

### 2.2 实验方法

利用北京绿源公司的生产线将1#滴头和齿距分别为1.5, 1.8和2.1mm的2#滴头镶入滴灌带中, 然后进行滴头的流量压力特性实验, 实验参照国标农业灌溉设备-滴头-技术规范 and 实验方法(GB/T17187-1997)及中华人民共和国行业标准-微灌灌水器(SL/T67.1.3-94)进行。采用同样方法测定滴头放大模型的流量压力

特性, 并记录流道内部各测压孔的压力值<sup>[12]</sup>。

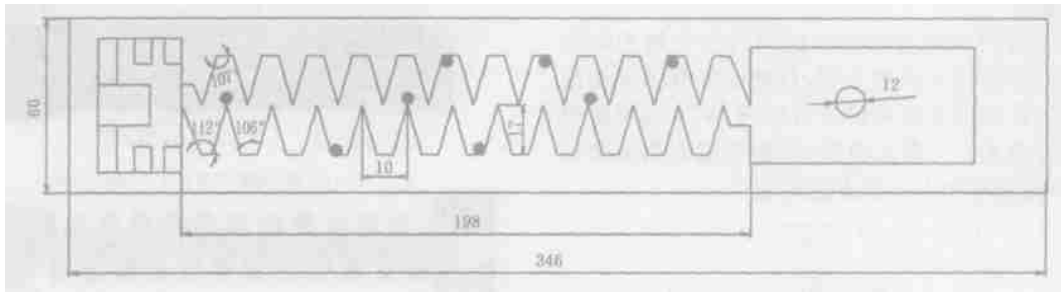


图2 1# 滴头放大模型及测压孔位置(单位:mm)

Fig 2 Amplifying model and pressure measuring position of emitter No. 1

### 3 结果与分析

#### 3.1 原型滴头的流量压力特性

图3是1#滴头和2#滴头(齿距分别为1.5、1.8和2.1mm)的流量压力特性的CFD模拟结果和实验测试结果。从图中可以看出,CFD计算得到的滴头原型的流量压力特性曲线与实验测试结果非常接近。表1是对CFD模拟计算数据和实验测试数据进行回归处理后得到的函数关系式,表中平均偏差是CFD模拟计算数据与实验测试数据的绝对差值,除以实验测试结果后得到的百分数的平均值。从表中可以看出:在一定工作压力下CFD计算得到的4种滴头流量值与实验测试值的平均偏差小于5%,CFD计算得到的滴头流态指数与实验测试结果也基本一致,说明采用CFD方法计算出的迷宫式滴头流量压力特性与实验测试结果具有较好的一致性。

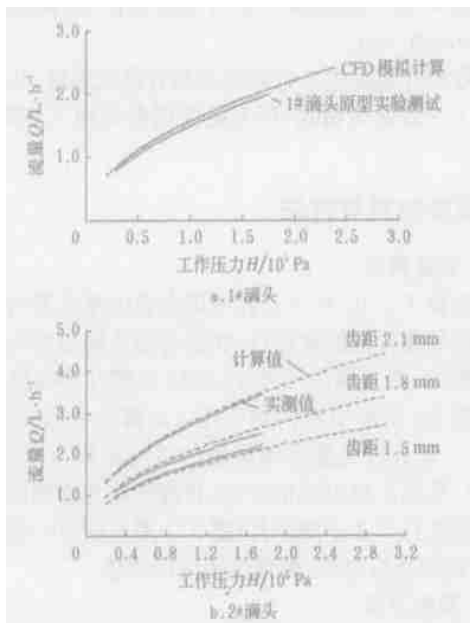


图3 原型滴头流量压力特性的CFD模拟结果与测试结果

Fig 3 Comparison between CFD modeling and measuring on pressure and flux characteristic curve

对齿距分别为1.5、1.8和2.1mm的2#滴头原型的流量压力特性进行分析可以看出,滴头的出口流量随

着滴头齿距增加而增加,三种齿距下的迷宫滴头的流态指数差异不大,说明迷宫式滴头齿距的改变对流态指数的影响不大。

表1 滴头流量压力函数关系式的CFD模拟结果和实验测试结果比较

Table 1 Comparison between CFD modeling and measuring on the function of them itter flux and pressure

滴头类型	CFD 模拟结果	实验测试结果 回归方程	平均偏差 /%
1# 滴头	$Q = 1.5668H^{0.5004}$	$Q = 1.4994H^{0.5132}$	4.5
齿距 1.5 mm	$Q = 1.6144H^{0.4600}$	$Q = 1.6845H^{0.4585}$	4.2
2# 滴头 齿距 1.8 mm	$Q = 2.0083H^{0.4678}$	$Q = 1.9162H^{0.4602}$	4.3
齿距 2.1 mm	$Q = 2.6796H^{0.4659}$	$Q = 2.6349H^{0.4591}$	1.9

#### 3.2 滴头放大模型的流量压力特性和压力分布

滴头放大模型的流量压力特性测试结果和CFD模拟结果如图4所示,图中实线为实验测试结果,虚线为CFD模拟结果,从图中可以看出,CFD模拟的滴头放大模型的流量压力特性与实验测试结果一致,两条特性曲线非常接近。

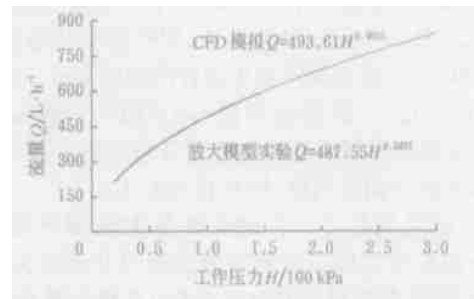


图4 滴头放大模型流量压力特性的CFD模拟结果与测试结果

Fig 4 Comparison of pressure and flux characteristic curve of amplifying model between CFD modeling and measuring

当滴头进口工作水头为100 kPa时,CFD数值模拟得到的流道内的压力分布如图5。图中左侧图标中的单位为Pa,灰度的由浅入深代表了流道内压力从0到100 kPa的压力变化。

CFD模拟得到的滴头流道内各点的压力值与所处的位置有关,也与模拟时设置的滴头进口压力有关。为了了解滴头流道内部压力分布情况,从流道进口到出口

均匀选取了16个点,将这16个点的压力值的CFD 模拟结果进行了标准化处理,即将16个点在不同进口压力下计算得到的压力值除以滴头的进口压力,得到无量纲的标准化压力,这样就可以对不同进口压力下计算得到的流道内的压力值进行比较。图6 绘出了CFD 数值计算和实测的标准化压力沿滴头流道长度变化的回归曲线。从图中可以看出:在迷宫滴头流道内,压力沿流道长度呈线性变化,从进口到出口逐渐降低。在靠近滴头进口部分,CFD 计算的流道压力值略高于实验测试值;在靠近滴头出口部分,CFD 计算的流道压力值略低于实验测试值。但是总体上CFD 计算值与实验测试值较为接近,两者的平均偏差小于3%。

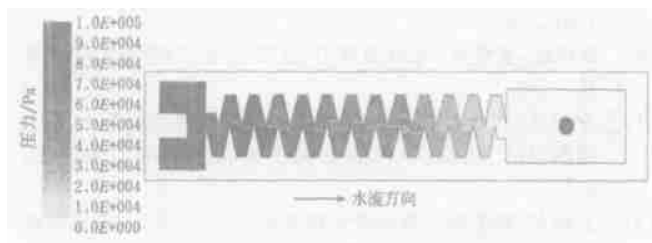


图5 CFD 数值模拟得到的滴头流道内部的压力分布示意图

Fig 5 CFD modeling pressure distribution in flow path of the emitter No. 1

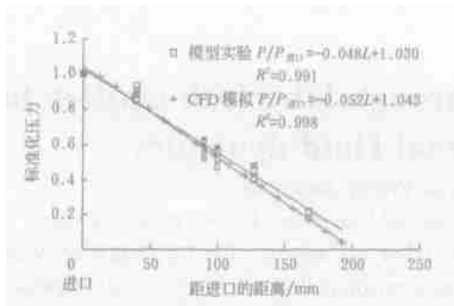


图6 滴头流道内部压力分布的CFD 模拟结果与实验测试结果比较

Fig 6 Comparison of pressure distribution in flow path between CFD modeling and measuring

### 3.3 滴头内部流速分布

当滴头进口工作水头为100 kPa 时,CFD 模拟得到的1# 滴头流道内流速分布如图7。图7a 为总体流速分布,图中左侧图标中的单位为m/s,不同的灰度表示不同的流速,灰度越深的部位的流速值也越大。图7b 为流速分布的局部放大图,图中箭头长短表示流速的大小。从图中可以看出:根据流速的不同可以把迷宫滴头流道内部分为两个区:滴头齿尖附近的主流区,以及滴头齿根附近的旋流区,主流区内流速较高,达1.6~2.8 m/s,旋流区的流速范围为0.1~0.4 m/s。在流动过程中一部分水流从主流区流入旋流区,在两个齿尖之间形成旋涡;随着流动过程的进行,进入旋流区的水流与主流区的水流交汇,获得能量重新进入主流区流动,水流在主流区和旋流区进行着能量交换。

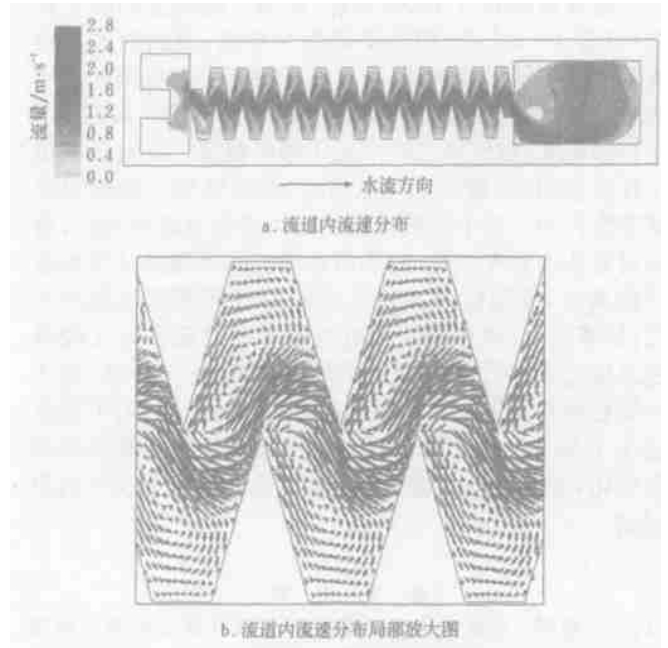


图7 CFD 模拟的1# 滴头流道内的流速分布

Fig 7 CFD modeling flow velocity field in flow path of emitter No. 1

## 4 结论与讨论

1) 1# 滴头和齿距分别为1.5, 1.8和2.1 mm 的2# 滴头及滴头放大模型的流量压力特性的CFD 模拟和实测结果比较,二者的平均偏差小于5%;滴头齿距的改变对迷宫式滴头流态指数的影响不大。

2) 滴头放大模型内部压力分布的CFD 模拟值和实测值显示,二者的平均偏差小于3%,迷宫滴头流道内压力沿流道长度呈线性变化。

3) 1# 滴头的CFD 模拟计算结果表明,迷宫滴头流道内部由于流速的明显不同可以分为两个区,主流区和旋流区,主流区内流速范围达1.6~2.8 m/s,旋流区的流速范围为0.1~0.4 m/s。水流在主流区和旋流区进行着能量交换。

4) 关于水流在迷宫流道中的水流流态问题,雷诺实验表明,圆管中液流的临界雷诺数  $Re_c = 2000$ , 即当  $Re < 2000$  时,水流为层流,当  $Re > 2000$  时,水流为紊流。对于非圆管中的液体,其雷诺数计算表达式中的  $R$  应采用水力半径。对于滴灌灌水器,其流道一般为正方形或矩形,断面积一般在0.49~1.44 mm<sup>2</sup> 之间,而流量一般为1~4 L/h,因此流道中水流的平均流速在0.5~1.2 m/s 之间,此种情形下,其雷诺数在100~300 之间,如果根据传统的临界雷诺数  $Re_c = 2000$  来判断,灌水器中的水流流态为层流。但迷宫流道灌水器的流量压力关系  $q = kH^x$  中的  $x$  值一般为0.5~0.55 左右,其水流流态应该为紊流。这显然是矛盾的。这给我们提出了一个新问题,即,对于非圆管且水流方向始终变化的迷宫流道,其临界雷诺数应该为多少? 这个问题前人并没有进行过研究。Paulau Salvador 在数值模拟时,假定了一个

临界雷诺数为1500, 据此, 认为一般流量的灌水器中(流量 $1\sim 6\text{ L/h}$ )的水流流态为层流, 因此他的数值模拟中采用了层流模型, 这显然是没有实验依据的。本文中, 根据迷宫流道灌水器的流态指数 $x$ 值一般在0.5左右的事实, 数值模拟时采用了紊流模型。这对于额定工作状态时(即额定工作压力时)的水流特性的模拟应该是恰当的。对于在模拟滴头压力流量关系曲线时, 滴头流量从小到大变化, 滴头内水流流态可能是从层流变化到紊流, 模型应该反映从层流模型到紊流模型的变化, 计算时, 应该根据雷诺数与临界雷诺数实时比较判断来决定采用层流模型还是紊流模型, 如上所述, 由于水流在迷宫流道中流动时临界雷诺数的未知(有可能远远小于2000), 而无法实现从采用层流模型到紊流模型的变化, 这可能是造成本文中计算值与实测值误差的原因之一。

#### [参 考 文 献]

- [1] 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
- [2] 陶文铨 数值传热学 [M] 西安: 西安交通大学出版社, 2001
- [3] 王尚锦, 刘小明, 席光, 等 农灌用新型迷宫式滴头内流动特性分析 [J] 农业机械学报, 2000, 31(4): 43- 46
- [4] 王尚锦, 刘小明, 席光, 等 迷宫式滴头内流动的有限元数值分析 [J] 农业工程学报, 2000, 16(4): 61- 63
- [5] 魏青松, 史玉升, 董文楚, 等 滴灌灌水器流体流动机理及其数字可视化研究 [J] 中国农村水利水电, 2004, 3: 1- 4
- [6] 魏青松, 史玉升, 董文楚, 等 新型灌水器快速自主开发数字试验研究 [J] 节水灌溉, 2004, 2: 10- 14
- [7] Paulau Salvador, Arviza Valverde G, Bralts J, V F. Hydraulic flow behavior through an in-line emitter labyrinth using CFD techniques [A] ASAE/CSAE meeting paper No. 042252 [C] Ottawa, Ontario, Canada, 2004
- [8] John D Anderson Computational Fluid Dynamics: The basics with application [M] McGraw-Hill Inc, New York, 1995
- [9] 章梓雄, 董曾南 粘性流体力学 [M] 北京: 清华大学出版社, 1998
- [10] 李永欣 Venlo 型温室自然通风降温的实验研究与CFD 模拟 [D] 北京: 中国农业大学水利与土木工程学院, 2003
- [11] 王建东 紊流滴头结构设计机理研究 [D] 北京: 中国农业大学水利与土木工程学院, 2004

## Modeling of hydraulic characteristics through labyrinth emitter in drip irrigation using computational fluid dynamics

Li Yongxin, Li Guangyong, Qiu Xiangyu, Wang Jiandong

(College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract** Mathematical model for hydraulic characteristics through labyrinth emitter in drip irrigation was established using computational fluid dynamics (CFD) in this paper. Computational fluid dynamics method was applied to calculate the relationship between the emitter discharge and pressure and the distributions of the pressure and velocity inside the emitter. The calculated results were compared with the test results of original emitters using amplified emitter model with dimension ratio of 10:1. The results showed that the average error was less than 5% between the calculated values and tested values on the relationships of emitter discharge with pressure. The average pressure distribution error between calculated and measured value was less than 3%. The pressure change in the emitter was linear with the length of the flow path. The velocities near tooth cusp and bedrock in the labyrinth emitter were 1.6~2.8 m/s and 0.1~0.4 m/s, respectively. CFD method could be a powerful tool for emitter design and manufactures.

**Key words** emitter; hydraulic characteristics; computational fluid dynamics; modeling