

# 滴灌灌水器迷宫流道主航道抗堵设计方法研究

魏正英<sup>1</sup>, 赵万华<sup>1</sup>, 唐一平<sup>1</sup>, 卢秉恒<sup>1</sup>, 张鸣远<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学先进制造技术研究所, 西安 710049; 2. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 西安 710049)

**摘要:** 为从结构设计上解决灌水器的堵塞问题, 针对滴灌灌水器的各种微小迷宫流道形式, 应用计算流体力学(CFD)数值模拟可视化地揭示了迷宫流道内部流动场的情况, 并通过流体力学相似实验, 用激光多普勒测速仪(LDV)测量了流道中的速度流场, 验证了流态模拟计算的正确性。在此基础上, 分析了迷宫流道的堵塞机理, 针对流道中存在的流动滞止区结构, 提出迷宫流道主航道抗堵优化设计方法, 使优化后流道中不存在流动滞止区, 提高迷宫型灌水器的抗堵性能, 并通过了实验验证。

**关键词:** 滴灌灌水器; 迷宫流道; 堵塞; 数值模拟; 主航道抗堵设计

**中图分类号:** S275.4; TK124

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-6819(2005)06-0001-07

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 Zhengying, Zhao Wanhua, Tang Yiping, et al. Anticlogging design method for the labyrinth channels of drip irrigation emitters[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(6): 1- 7. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

灌水器堵塞问题一直是滴灌系统难以解决的瓶颈问题, 虽然综合利用各种物理化学方法进行处理, 但灌水器仍存在不同程度的堵塞<sup>[1,2]</sup>。迷宫灌水器内部流动状态对整个灌水器性能有很大的影响, 而其流道形状复杂, 制造和测量难度都较大, 现有的研究多倾向于宏观水力学特性的研究, 对于灌水器迷宫流道内部流动场的微观化分析研究较少。王尚锦等<sup>[3,4]</sup>分析了圆弧迷宫式灌水器流道内的流动特性, 层流时流道内存在较多涡旋, 认为灌水器的抗堵塞主要依赖于旋涡运动。M. R. Soler 等<sup>[5]</sup>分析了在巴塞罗那(西班牙)的某一地区, 由于地形的原因形成空气流动在此滞止, 使其附近工业区的污染空气在此聚集, 造成这一地区严重的空气污染; N. A. Bogdanov<sup>[6]</sup>分析了由于环境因素使加里宁格勒海湾(波兰)的某些区域形成流动滞止区域, 在此形成高度的化学污染和底部沉积。因此, 在采用计算流体力学(CFD)对迷宫灌水器流道内流动状态进行数值模拟计算的基础上, 笔者认为灌水器的堵塞是由于其小流道中存在流动滞止区, 水中微小颗粒会在此沉积滞留并引起微生物滋生而形成的, 应针对流道中存在的流动滞止区进行优化, 以提高灌水器的抗堵能力。

## 1 灌水器迷宫流道流态分析原理

### 1.1 灌水器迷宫流道设计模型

选择实际使用中典型的国产灌水器(陕西秦川节水、和平公司)的迷宫流道进行研究, 其设计如图 1, 流

道进口截面面积 1 mm × 1 mm, 其中圆弧迷宫型灌水器的设计流量为 4 L/h, 梯形迷宫灌水器的设计流量为 2 L/h。

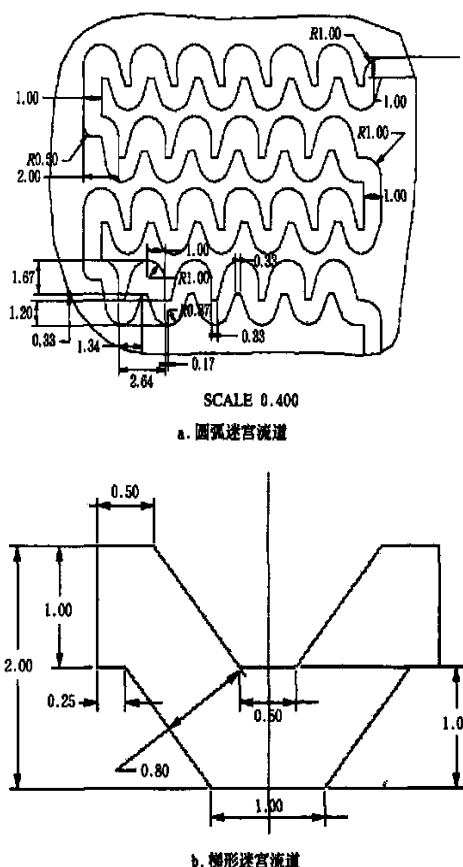


图 1 灌水器迷宫流道设计图

Fig 1 Drawing of labyrinth channels for emitters

### 1.2 小流道流体力学分析原理

灌水器流道尺寸一般在 0.3~2.0 mm 之间, 其中的流体为连续流体, 这符合 N-S 方程, 在此假设流道

收稿日期: 2004-07-30 修订日期: 2005-04-01

基金项目: 国家“863”重大专项(2002AA 2Z4081); 国家自然科学基金(50275119); “863”项目(2001AA 242101)

作者简介: 魏正英(1967-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为节水设备的快速开发技术, 西安 西安交通大学先进制造技术研究所, 710049. Email: weizhengying8@163.com

中的水为定常流动的常温不可压缩流体<sup>[7-9]</sup>。

流道中流体的控制方程为

层流:  $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$

式中  $u, v, w$  —— 分别表示流体在  $x, y, z$  方向的速度分量。

紊流:  $\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0$

$\epsilon$  方程:  $\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0$

$\rho \frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} [(\eta + \frac{\eta}{\sigma_\epsilon}) \frac{\partial \bar{c}}{\partial x_k}] + \frac{c_1 \epsilon \eta}{k} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) - c_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k}$

$k$  方程:  $\rho \frac{\partial \bar{k}}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial \bar{k}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} [(\eta + \frac{\eta}{\sigma_k}) \frac{\partial \bar{k}}{\partial x_j}] + \eta \frac{\partial u_i}{\partial x_j} (\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) - \rho \epsilon$

式中  $\eta$  —— 分子粘性;  $\eta$  —— 紊流粘性系数。  $k - \epsilon$  方程中的 3 个系数 ( $c_\mu, c_1, c_2$ ) 和 3 个常数 ( $\sigma_k, \sigma_\epsilon, \sigma_r$ ) 为经验常数, 其值如表 1。

表 1  $k - \epsilon$  模型中的系数

Table 1 Coefficients of  $k - \epsilon$  model

$c_\mu$	$c_1$	$c_2$	$\sigma_k$	$\sigma_\epsilon$	$\sigma_r$
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3	0.9~1.0

1.3 流体流动状态的判别

雷诺数  $Re$  通常用来判别流动状态:

$Re = \frac{DeV}{\nu} = \frac{De}{\nu} \cdot q$

式中  $q$  —— 灌水器的流量, L/h;  $A$  —— 灌水器流道横截面面积,  $mm^2$ ;  $De$  —— 当量直径, mm, 因灌水器流道横截面为矩形, 当量直径  $De$  为水力半径  $R$  的 4 倍,  $De = 4R = 4 \frac{a \cdot b}{2(a+b)} = \frac{2a \cdot b}{(a+b)}$ ,  $a, b$  —— 流道横截面长和宽, mm,  $A = a \cdot b$ , 此处  $a = b = 1$  mm;  $\nu$  —— 流体的运动粘性系数, 20 时水的运动粘性系数  $\nu = 1.003 \times 10^{-6} m^2/s^{[10]}$ 。

灌水器常用流量为 2~4 L/h, 其雷诺数  $Re = 554 \sim 1108$ , 流道中的流体应为层流; 而对于大流量灌水器其流量为 8~10 L/h, 雷诺数  $Re = 2488 \sim 2769.5$ , 流道中的流体应为紊流。

本文应用基于 CFD 的流体分析软件 FLUENT 对灌水器迷宫小流道进行流动特性的数值模拟分析。由于迷宫流道是由方管和弯管组成, 在模拟分析迷宫流道之前, 为检验用 FLUENT 软件对灌水器小流道 CFD 模拟计算结果的准确性, 首先对与灌水器流道尺度相当的小圆直管、方管和弯管进行模拟计算, 结果与流体力学理论计算结果和参考文献<sup>[11, 12]</sup>进行比较, 误差基本上在 0.5%~0.8% 之间, 弯管的计算误差最大的只有 3.2%, 误差很小, 说明应用 FLUENT 进行灌水器迷宫流道流态分析是适用的<sup>[13]</sup>。

2 圆弧迷宫流道内流体流态及结构堵塞机理分析

针对迷宫流道结构(图 1), 分别假设在层流和紊流流态下分析迷宫流道内的流动场。  $q = 4$  L/h 时,  $Re = 1108 < 2100$ (层流);  $q = 10$  L/h 时,  $Re = 2769.5 > 2100$ (紊流)。

2.1 圆弧迷宫流道流态分析模型的构建

根据迷宫流道设计图 1a 的流道形状及水流路径的特征, 截取两排圆弧迷宫流道作为数值计算模型如图 2 所示。为清楚起见, 图 3 为轴向和进口面网格划分图。

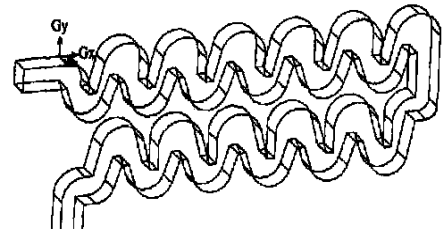


图 2 圆弧迷宫流道数值计算模型

Fig. 2 Numerical computation model of arc labyrinth channel

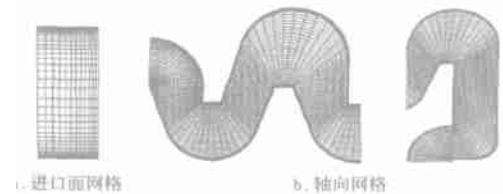


图 3 迷宫流道网格划分图

Fig. 3 Grid plot of labyrinth channel

结合模型实际情况, 进出口面为方形, 采用矩形网格划分如图 3a。轴向迷宫流道因为弯曲变化剧烈, 圆弧拐角处采用扇形网格划分, 直线段采用矩形网格。在截面形状变化较大的区域, 将网格划分得密集一些, 在进出口段和两排迷宫的连接段因为形状简单, 将网格划分得稀疏一些, 同时采用加密边界层网格划分, 如图 3b 所示。模拟计算进口条件  $q = 4$  L/h 时, 进口平均速度  $V = 1.11$  m/s, 用层流模型(Laminar)模拟计算;  $q = 10$  L/h 时, 进口平均速度  $V = 2.778$  m/s, 用紊流模型(K-epsilon)模拟计算。出口条件为表压等于零。

2.2 圆弧迷宫流道流体的流态和防堵结构分析

通过模拟计算, 层流和紊流时流道中的速度矢量图如图 4 和图 5 所示。

由图 4、图 5 可以看出, 偏离速度主流区的弯角处(A 区、B 区)都有一定的涡旋区存在(紊流时有所减小), 流道出口处上侧(C 区)尤为明显。

根据流体力学以及流体动力学的基本理论可知, 此旋涡区对于消能具有积极作用, 然而, 定量的分析旋涡区的形成可以看到, 在旋涡区的中心水流的速度近似为零, 形成流动滞止区, 这样的特点对保持流道始终通畅具有明显的不利。因为灌水器在实际使用时, 其内部流

动并不是单一的流体-水,而是含过滤不掉的固体颗粒和使用中水肥往往同步供给使肥料固体不能完全溶解,以及盐类的结晶造成水中含有固体颗粒。当这些颗粒运

动到这些旋涡区极易在此处沉积下来,这就是造成堵塞的根本原因。

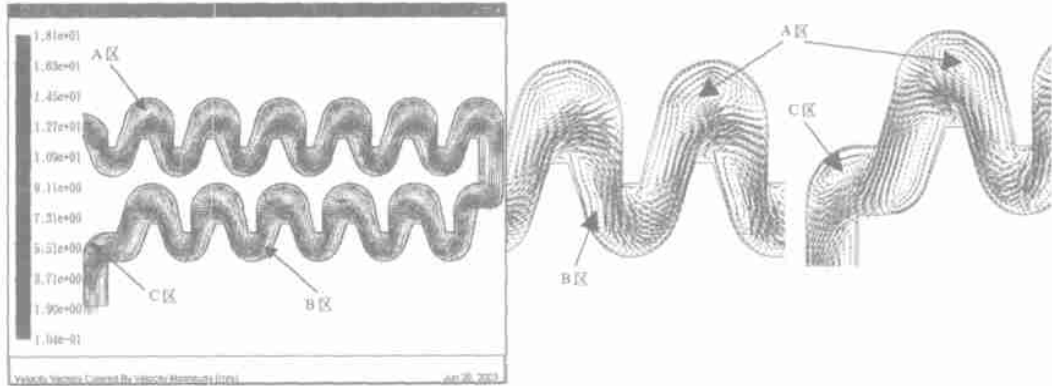


图 4 圆弧迷宫流道层流速度矢量图

Fig 4 Velocity vectorgraph of lam inar flow of arc labyrinth channel

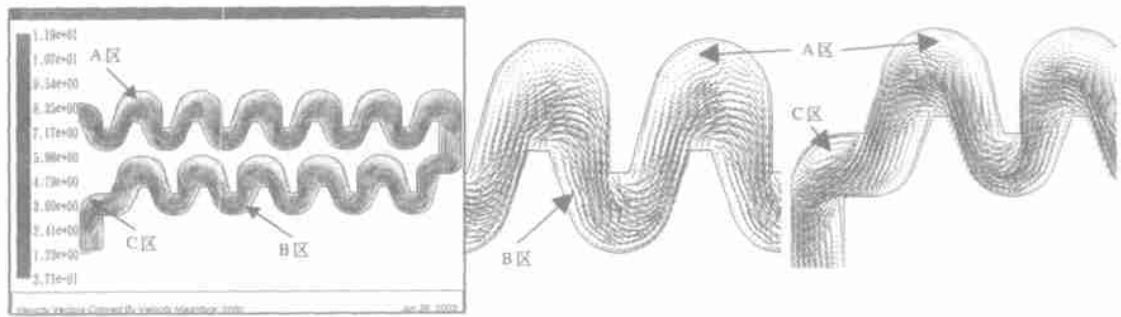


图 5 圆弧迷宫流道内紊流速度矢量图

Fig 5 Velocity vectorgraph of turbulent flow of arc labyrinth channel

### 2.3 圆弧迷宫流道流态相似实验分析

为检验迷宫流道流态模拟计算与实际情况的相符性,需通过实验进行检验。因迷宫小流道尺寸微小不便观察测试,在此应用水力相似(雷诺)原理<sup>[10]</sup>,采用尺寸放大的模型模拟微小流道内的流动。

考虑到现有的激光多普勒设备和实验件的加工可行性,截取两排迷宫流道按照其设计尺寸(图 1a)同一比例放大 15 倍在有机玻璃实体上加工出迷宫流道,为使起始段流体充分发展,将起始段加长为流道截面尺寸的 40 倍

(图 6a),在其上覆盖薄层有机玻璃板并进行密封形成图 6b 中的实验件。在相似实验中雷诺数应与流体分析相等即  $Re_m = Re_p = 1108$ ,经计算相似实验管路中平均速度应为  $V_m = 0.072 \text{ m/s}$ ,因此调整实验流量为  $q_m = 57.71 \text{ L/h}$ ,使水压波动小于 2%,在室温 20 环境中,用测量分辨率为 0.1 mm 的激光多普勒测速仪 LDV (Laser Doppler Velocimeter) 实际测量迷宫流道内的流速分布。图 6b 为相似实验台。

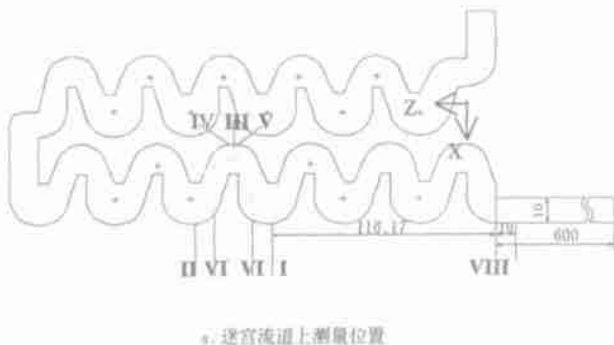


图 6 迷宫流道相似实验

Fig 6 Sim ilitude characteristic experiment of labyrinth channel

在此选取一个完整的迷宫流道单元(图 6a 中截面 I—II 之间)测量其中的速度场,如图 6a 上的 I—VIII 截面为流道单元的测量位置,图 7 为截面 III 上沿流道深度方向等间隔的截线(a~g)上测量出的速度分布图,将其合成为截面 III 上的速度分布图 8。

由速度分布图 7、图 8 可看出,在迷宫流道拐弯处流动速度大小和方向变化比较剧烈,存在较多涡旋。由相似实验测量得到迷宫流道局部拐弯处(即 A 区)的速

度矢量值,输入数据分析处理软件 Origin 7.0 中,得到其速度矢量分布如图 9,在迷宫流道的圆弧拐弯处存在较大的涡旋且速度极低,形成流动滞止区。

进行灌水器堵塞实验(强制加沙),在实验过程和实验后分别剥开灌水器外管,可以看出在迷宫流道的流动滞止区中沙粒逐渐沉积,增多直到流道全部堵塞的情况(图 10)。由此验证了 FLUENT 流体分析的正确性。

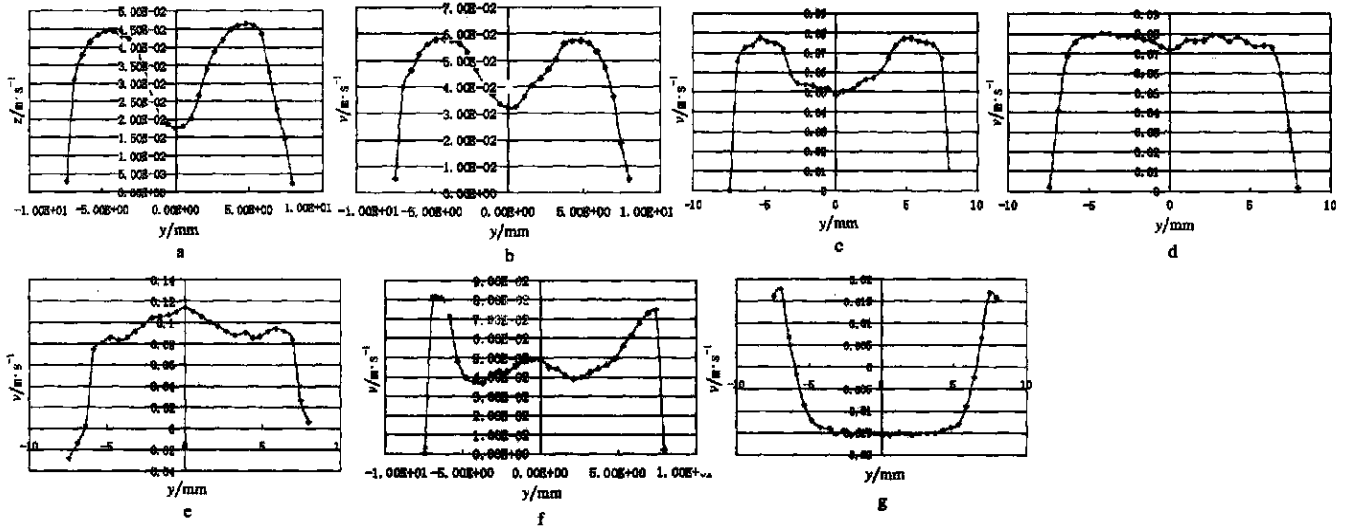


图 7 截面 III 的截线 a~g 上的速度分布图

Fig 7 Velocity distribution plot of transversal (a~ e) on cross-section III

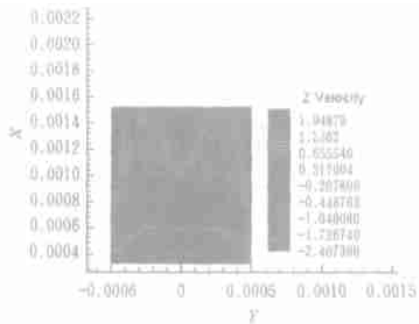


图 8 截面 III 上的速度分布图

Fig 8 Velocity distribution plot on cross-section III

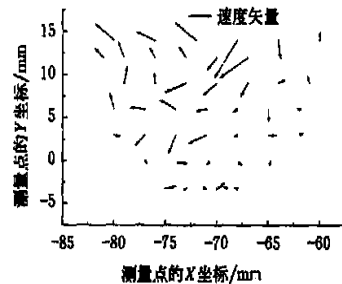


图 9 迷宫流道中速度矢量分布图(A 区)

Fig 9 Velocity vectorgraph of labyrinth channel (A)



a. 流道中沙粒开始沉积的情况 b. 流道中沙粒逐渐增加的情况 c. 沙粒完全堵塞流道的情况

图 10 圆弧迷宫流道堵塞情况

Fig 10 Clogging instance of arc labyrinth channel



成流道的突扩和突缩等引起压力损失,当然流道中的涡旋对消能具有积极的作用,但涡旋并不是迷宫流道中唯一的消能方式。消除了涡旋区的迷宫流道消能效果会有所减弱,灌水器流量将会增加,如影响滴头使用就要考虑增加流道迷宫单元数以增加流阻。

为检验采用优化的圆弧迷宫流道的灌水器的水力性能,针对圆弧迷宫流道优化前后的流道结构设计了两组迷宫单元数分别为 15 和 19 的灌水器,标记为 YH15、YH19、KD15 和 KD19。为简化实验灌水器采用滴片结构,除了流道结构不同外,其它的形状(包括整体结构、进出水口)和结构尺寸都相同,这两组滴片的 CAD 实体模型如图 14。应用快速成形技术制作出的一体化滴片进行水力性能实验<sup>[13]</sup>,其平均流量和流量性能如表 2。

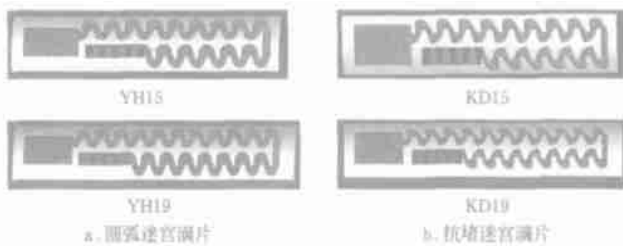


图 14 实验滴片 CAD 实体模型

Fig. 14 CAD model of experimental emitters

表 2 两种流道灌水器水力性能实验结果

Table 2 Experiment results of hydraulics performance of two emitters

灌水器	平均流量/L · h <sup>-1</sup>	压力-流量关系
圆弧迷宫滴片	YH15	$q = 0.2203H^{0.5331}$
	YH19	$q = 0.1965H^{0.5047}$
抗堵迷宫滴片	KD15	$q = 0.1632H^{0.5622}$
	KD19	$q = 0.2655H^{0.5049}$

由表 2 可知此两组迷宫滴片的流态指数相近都靠近 0.5,说明迷宫流道灌水器流量对压力的敏感性很小,水力性能都比较优越,而且迷宫单元数越多流态指数越靠近 0.5,灌水器水力性能就越好。在迷宫单元数相同的情况下,优化流道迷宫滴片比优化前的迷宫滴片测得的平均流量有所增加,KD15 相对于 YH15 流量增加 5.06%,KD19 相对于 YH19 流量增加 6.53%,流量增加很小,因而不需增加流道单元数,这也说明此抗堵迷宫流道具有很好的消能效果。

对于抗堵塞效果显著的小管出流,其灌溉的流量较大为 100~180 L/h,所用出水小管为直径是  $\varnothing 3$ 、 $\varnothing 4$ 、 $\varnothing 6$  的光滑小圆管,且其出水口尺寸也较大,因而不易堵塞,但此小管出流管所引起的水头损失的消能作用不明显,其中的流态和迷宫流道中的流动场是完全不同的<sup>[14]</sup>。

#### 4.2 优化的圆弧迷宫流道灌水器堵塞实验分析

对抗堵迷宫滴片 KD15 产品进行堵塞实验,所用堵塞实验台是中国农业大学参考 ISO 短周期堵塞实验方案(ISO 8486-1)搭建的。对抗堵能力的评价方法是在不

同阶段向水中掺入不同浓度的细砂通过被测灌水器,在额定压力下测量其流量的变化。按照 ISO 评价标准当灌水器的流量小于其清水额定流量的 75% 时,就认为灌水器堵塞了,而抗堵迷宫滴片的流量均大于其额定流量的 80%,说明按照主航道设计方法所设计的迷宫流道具有很强的抗堵能力。

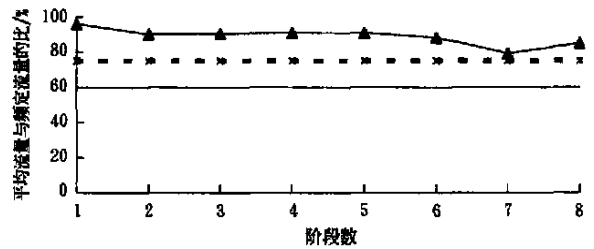


图 15 抗堵迷宫滴片流量变化曲线

Fig. 15 Flow change curve of anti-clogging emitter

应用迷宫流道主航道抗堵设计方法,可显著优化迷宫流道结构和改善其中的流动状态,水流主体可完全充盈整个流道,消除了流动滞止区,进入灌水器流道中的微小杂质会被水流主体承载着流出灌水器,因而可提高圆弧迷宫型灌水器的抗堵性能。可应用此方法对其它迷宫流道形式进行 CFD 模拟分析和优化,图 16 和图 17 是对梯形迷宫流道(图 1b)进行流态分析和结构优化的图例。

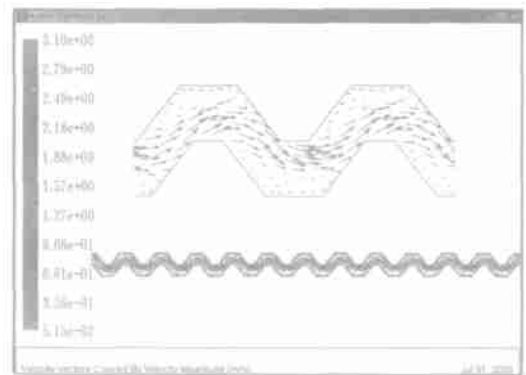


图 16 梯形流道速度矢量图

Fig. 16 Velocity vectorgraph of trapezoid channel

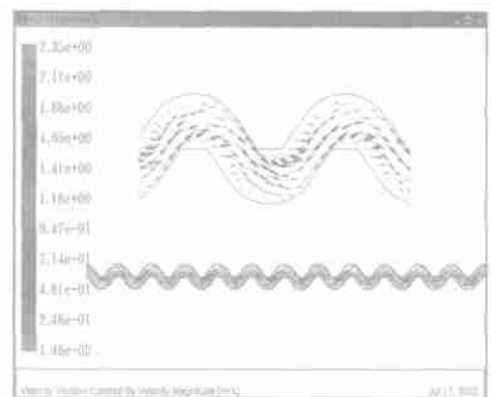


图 17 优化的梯形流道速度矢量图

Fig. 17 Velocity vectorgraph of optimized trapezoid channel

## 5 结论

1) 应用计算流体力学(CFD)数值模拟的方法,对圆弧迷宫流道结构进行流态分析,得到可视化的压力速度分布图,从中可以看出迷宫流道圆弧转弯处都存在流动滞止区,并通过流体力学相似实验验证了此流态模拟计算的正确性。分析灌水器流道的堵塞机理,认为流道中存在的流动滞止区是引起灌水器堵塞的主要结构因素,并通过了实际验证。

2) 根据灌水器抗堵塞结构设计要求,提出迷宫流道主航道抗堵设计方法,参照流道流态的数值模拟结果,将流道内主流体视为主航道对流道结构进行优化设计,通过CFD模拟分析优化后流道中流体的整体的流动特性得到了很大改善,流道中已不存在流动滞止区,可提高迷宫型灌水器的抗堵性能,为设计高性能的灌水器提供了有效方法,并通过了实验验证。

### [参 考 文 献]

- [1] 石秀兰,张明炷 滴头堵塞的水质化学处理[J] 喷灌技术, 1995, (2): 39- 41.
- [2] 王瑞环,魏正英 滴灌系统中有关堵塞问题的探讨[J] 灌溉排水, 2002, 21(6): 77- 78
- [3] 王尚锦,刘小民,席光,等 农灌用新型迷宫式滴头内流动特性分析[J] 农业工程学报, 2000, 16(4): 61- 63
- [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): 43- 44
- [5] Soler M R, Hinojosa J, Bravo M, et al Analyzing the basic features of different complex terrain flows by means of a Doppler Sodar and a numerical model: some implications for air pollution problems [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2004, 85(1- 3): 141- 154
- [6] Bogdanov N A, Vorontsov A A, Morozova L N. Trends in the Chemical Pollution and Dynamics of Kaliningrad Bay [J]. *Water Resources*, 2004, 31(5): 531- 544
- [7] 刘顺隆,郑群 计算流体力学[M] 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1998: 160- 310
- [8] 陶文铨 数值传热学[M] 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 195- 251, 333- 468
- [9] Currie I G. *Fundamental mechanics of fluids* [M]. Department of Mechanical Engineering McGraw-Hill, Inc New York, 35- 308
- [10] 景思睿,张鸣远 流体力学[M] 西安: 西安交通大学出版社, 2002: 10- 13, 42- 191, 295- 296
- [11] Humphrey J A C, Taylor A M K, Whitelaw J H. Laminar flow in a square duct of strong curvature [J]. *J Fluid Mech*, 1977, 83(3): 509- 527.
- [12] Humphrey J A C, Whitelaw J H, Yee G. Turbulent flow in a square duct with strong curvature [J]. *J Fluid Mech*, 1981, 103: 443- 463
- [13] 魏正英 迷宫型滴灌灌水器的结构与快速开发技术研究[D] 西安: 西安交通大学, 2003
- [14] 郑耀泉,刘婴谷小管出流灌溉技术的研究(I) [J] 喷灌技术, 1994, (1): 2- 9

## Anti-clogging design method for the labyrinth channels of drip irrigation emitters

Wei Zhengying<sup>1</sup>, Zhao Wanhua<sup>1</sup>, Tang Yiping<sup>1</sup>, Lu Bingheng<sup>1</sup>, Zhang Mingyuan<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** In order to resolve the clogging problem of emitter from structure design and aiming at various kinds of small labyrinth channels of the drip irrigation emitters, the Computational Fluid Dynamics (CFD) was used to conduct the numerical simulation and visually reveal the flow behaviors in the labyrinth channels of emitters. The velocity field was measured by Laser Doppler Velocimeter (LDV) in hydrodynamic similarity experiment to verify the computational results. On this basis, the anti-clogging mechanism was analyzed. A "main-route anti-clogging design" method was proposed to optimize the structure in the stagnant areas in order to enhance anti-clogging performance of emitter channels. And it was verified through anti-clogging experiment.

**Key words:** drip irrigation emitters; labyrinth channel; clogging; digital simulation; main-route anti-clogging design