

# 迷宫流道转角对灌水器抗堵塞性能的影响<sup>\*</sup>

牛文全 喻黎明 吴普特 范兴科 张林

(西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

**【摘要】** 以转角分别为 45.0°、60.0°、67.5° 和 75.0° 的齿形流道灌水器为研究对象,应用 CFD 流场速度数值分析、PIV 颗粒运动轨迹线和速度观测对比以及浑水抗堵塞测试相结合的方法,研究了转角对灌水器水力性能和抗堵塞能力的影响。结果表明转角与流量系数及流态指数均呈负相关关系,而灌水器的抗堵塞能力随着转角的增加呈下降趋势。综合分析转角对水力性能和抗堵塞性能的影响,提出迷宫流道结构灌水器的合理转角为 60.0°。

**关键词:** 灌水器 迷宫流道 转角 抗堵塞性能

中图分类号: S275.6

文献标识码: A

## Influence of Angle of Labyrinth Channels on Anti-clogging Performance of Emitter

Niu Wenquan Yu Liming Wu Pute Fan Xingke Zhang Lin

(Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

### Abstract

The influences of angles (45.0°, 60.0°, 67.5°, 75.0°) of dental labyrinth channels drip emitter on hydraulic and anti-clogging performance was studied by the following methods: the CFD numerical simulation of the velocity in the flow field, the PIV observation of the trajectories and velocity of particles in flow path and the samples experiment. The results showed that there is a negative relationship between angle and discharge coefficient together with flow state exponent, in addition with the increasing of the angle of emitters, the anti-clogging ability declines. Therefore, combining the hydraulic and anti-clogging performance, a reasonable angle of 60.0° is put forward.

**Key words** Emitter, Labyrinth channels, Angle, Anti-clogging performance

### 引言

在各种灌水器流道结构中,迷宫流道因能使水流成紊流状态,并具有良好的消能能力被公认为是最好的流道形式。为使迷宫流道达到紊流及消能的目的,要尽量缩短流道直线段长度<sup>[1]</sup>,增加水流方向的改变。本文将水流原方向与改变后方向的夹角称为转角。迷宫流道转角对灌水器水力性能和抗堵塞性能均有非常大的影响,许多学者对此进行了研究,以期发现转角影响灌水器水力性能和抗堵塞性能的机制<sup>[2~6]</sup>。

迷宫流道结构尺寸微小,一般在 0.5~1.2 mm

之间,尽管在使用滴灌系统时会采用各种过滤器,但仍会有一些悬浮固体颗粒进入流道<sup>[7~11]</sup>,这就要求灌水器流道结构具有一定的抗堵塞能力<sup>[12~14]</sup>。以前主要针对转角对水力性能的影响进行 CFD 数值模拟或者试验研究,较少涉及抗堵塞性能。固体颗粒如何通过迷宫流道、在流道内的运动状态如何、采用多大的转角最有利于颗粒通过等问题目前尚不明晰,因此本文结合 CFD 数值模拟、水力性能测试、浑水试验以及采用离子速度成像仪 (particle image velocity, 简称 PIV) 观测镁颗粒在流道中的轨迹线和速度,以寻求最佳的流道转角,为获得较好的抗堵塞性能灌水器流道结构形式提供理论依据。

收稿日期: 2008-09-01 修回日期: 2008-12-29

\*国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2006AA100214)

作者简介: 牛文全,副研究员,主要从事节水灌溉理论与设备研究, E-mail: nwq@vip.sina.com

通讯作者: 吴普特,研究员,主要从事现代节水农业理论与技术研究, E-mail: gjzwpt@vip.sina.com

## 1 材料与方法

### 1.1 物理模型

选用的灌水器流道形状如图1所示,流道转角分别为 $45.0^\circ$ 、 $60.0^\circ$ 、 $67.5^\circ$ 和 $75.0^\circ$ ,流道宽 $w$ 为 $1.0\text{ mm}$ ,流道深 $D$ 为 $1.18\text{ mm}$ ,齿高 $H$ 为 $1.5\text{ mm}$ ,流道长度 $L$ 用流道单元数表示,流道单元数为12个。

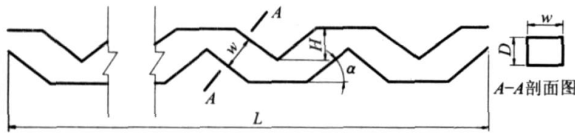


图1 齿形流道结构简图

Fig.1 Structural form of dentation channel

### 1.2 CFD 数值模拟

按照CFD计算过程,在建立的物理模型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 $0.1\text{ mm}$ 左右,共计约 $2.5 \times 10^5$ 个单元。

灌水器流道水力计算大多采用标准 $k-\epsilon$ 紊流模型为模拟模型,其计算公式见文献[15]。模拟压力水头为 $5\text{ m}$ ,出水口为自由出流,采用Fluent软件默认的标准壁面函数法对流道壁面进行处理[15];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 $10^{-4}$ 。

### 1.3 PIV测试平台、观测模型及固体颗粒

为准确测量迷宫流道内固体颗粒的运动情况,设计了PIV流场测试平台。该测试平台包含连续光源、HotShot512型高速摄像仪、VS-M0910型放大镜、计算机、水泵、蓄水箱、支撑平台及管道等[16-22],其中HotShot512型高速摄像仪最高拍摄速度为 $200\,000\text{ 帧/s}$ ,VS-M0910可调放大为 $12 \sim 108$ 倍。该系统能清楚的看到直径大于 $0.03\text{ mm}$ 粒子的运动轨迹,有利于颗粒追踪;配置的计算机采用Intel(R) core(TM)2 Duo 2.19 GHz CPU,1 GB内存,速度较快,能实时显示颗粒运行情况;软件Movias Pro Viewer 1.63能描绘出颗粒的运动轨迹,计算粒子运动的距离与运动速度。

迷宫流道试验样件用高透明有机玻璃材料,按照物理模型参数应用高精度数控雕刻流道,并在其上覆盖透光性好的有机玻璃板密封成完整流道。

在一般堵塞试验中采用的固体颗粒是氧化铝[23]。为便于观测,本试验采用经过筛网筛过的镁粉。在一般的灌溉系统中经常使用120目的过滤器,因此本文使用的镁粉是通过 $150 \sim 120$ 目筛网挑

选出的粒径范围为 $125 \sim 100\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒,其平均直径为 $113\text{ }\mu\text{m}$ [24],质量浓度为 $12\text{ g/L}$ 。

### 1.4 水力性能、抗堵塞测试平台

水力性能和抗堵塞性能测试平台是按照行业标准加工的标准化测试装置。设置水面高度为 $0.5\text{ m}$ 、周长为 $2\text{ m}$ 的水桶作为水源;水泵额定扬程为 $25\text{ m}$ ,额定流量为 $1.8\text{ m}^3/\text{h}$ ;为保证测试装置中压力一致,使滴灌带两端水流相通,在装置进、出口处装有压力调节阀和精确压力表;灌水器出水口下放置 $1\text{ L}$ 大口烧杯作为盛水容器,用电子秤称量,秒表计时,最后分别计算滴头流量。

分别开模制造4种转角流道结构的片式灌水器,并在滴灌带生产线上分别生产 $150\text{ m}$ 滴灌带供测试。根据测试要求分别从4种滴灌带随机截取 $5 \times 1.6\text{ m}$ (包含25个灌水器出水口)安装到测试平台上,采用清水试验,水温为室内温度( $23^\circ\text{C}$ )。额定工作压力水头为 $5\text{ m}$ 时,此4种灌水器的制造偏差分别为 $1\%$ 、 $3\%$ 、 $1\%$ 、 $2\%$ ,符合规范要求。其他的测试压力水头分别为 $1$ 、 $2$ 、 $3$ 、 $4$ 、 $6$ 、 $7$ 、 $8\text{ m}$ ,测试时间为 $10\text{ min}$ ,试验重复2次,2次重复之间的差值小于 $2\%$ ,取其平均值计算该压力下灌水器的流量;按所测灌水器流量由大到小顺序排列,取第3、12、13、23号试样进行分析。

进行抗堵塞性能测试时,采用与上述相同的方法。为了加快堵塞过程,人工配置试验用浑水,质量浓度为 $10\text{ g/L}$ ,泥沙为风干沙壤土,采用120目筛网,即泥沙的最大粒径约为 $0.125\text{ mm}$ 。为了模拟滴头实际工作状态,试验连续进行,以次为单位,每隔 $24\text{ h}$ 进行一组测定,每次试验重复2次,取2次的平均值[25]。

## 2 结果与分析

### 2.1 灌水器水力性能测试

按照上述试验方案,将各入口压力及对应的流量代入

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

式中  $q$ ——滴头流量,  $\text{L/h}$

$h$ ——压力水头,  $\text{m}$

$k$ ——流量系数  $x$ ——流态指数

进行回归计算获得表1所示各压力下的流量。表1中,转角为 $45.0^\circ$ 、 $60.0^\circ$ 、 $67.5^\circ$ 和 $75.0^\circ$ 时的流量系数分别为 $1.24$ 、 $1.14$ 、 $1.07$ 、 $0.97$ ,流态指数分别为 $0.52$ 、 $0.49$ 、 $0.47$ 、 $0.47$ 。

当流道断面面积、流道长度和齿高以及对应的入口压力相同而转角不同时,灌水器的流量系数随转角的增大而逐渐减小,流量系数反映了流量的波

表 1 不同转角、不同水头下灌水器流量

Tab.1 Discharge of the emitter with different angles

转角 / (°)	压力水头/ m							
	1	2	3	4	5	6	7	8
45.0	1.24	1.78	2.20	2.56	2.87	3.16	3.42	3.67
60.0	1.14	1.59	1.94	2.23	2.49	2.72	2.93	3.13
67.5	1.08	1.44	1.80	2.05	2.32	2.48	2.66	2.84
75.0	0.97	1.34	1.62	1.86	2.06	2.24	2.41	2.57

动性,其值越小,灌水器的流量变动就越小,随着转角的增加,流量系数的变动越来越趋于平缓,随着转角的增大,流态指数也呈减小趋势,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,说明随着转角的增加,灌水器对压力的敏感性下降,水力性能略有提高。转角对流量系数和流态指数产生影响主要是由于转角的变化改变了水流的方向,随着转角的增加,水流的紊流程度增加,增大了流道内局部水头损失系数,使流道内的水流动能下降,因而流量下降,增加水流的紊流程度使压力变化时流量变化的敏感性下降,从而使流态指数下降。因此,从灌水器的水力性能角度出发,在设计灌水器流道结构时,需要适当加大转角。

2.2 CFD 流场分析

应用 CFD 软件模拟了转角对流道流场变化的影响,绘制了流速分布图,如图 2 所示。

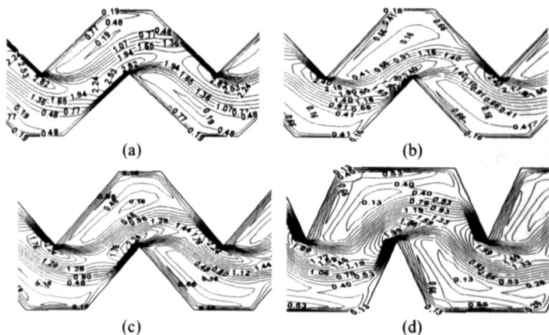


图 2 不同转角第 4 流道单元水流速度分布图

Fig.2 Distribution of water velocity in the fourth unit with different angle

(a) 转角 45.0° (b) 转角 60.0° (c) 转角 67.5° (d) 转角 75.0°

根据流速分布图分别计算了典型位置处的最大流速和最低流速,如表 2 所示。

图 2 是入口压力水头为 5 m 时,第 4 流道单元位于流道 1/2 深处的速度图,图 2 左侧为进口。从图中可知,随着转角的增加对应位置处的速度下降,即表现在流量的下降,同时造成边界层流速和漩涡处的流速下降。随着转角的增大,流道内的漩涡增多,漩涡最大速度减少了 16.7%,漩涡中心最小速

度减少了 31.6%,漩涡中心的速度越小,沙粒越容易停留并最终沉积于此。因此转角的增加,将会导致沙粒在流道内停留时间加长,沉积并发生堵塞的可能性增大。

表 2 不同流道转角第 4 流道单元极限速度值

Tab.2 Extreme velocities in the fourth unit with different angles

转角 / (°)	齿尖最高	漩涡最高	漩涡最低	边界速度
	速度/ m·s <sup>-1</sup>	速度/ m·s <sup>-1</sup>	速度/ m·s <sup>-1</sup>	/ m·s <sup>-1</sup>
45.0	2.82	0.77	0.19	0.19
60.0	2.40	0.66	0.16	0.16
67.5	2.24	0.66	0.16	0.13
75.0	1.99	0.66	0.13	0.13

2.3 流道颗粒运动的 PIV 试验

按照上述研究方法加工 PIV 观测模型,在进行 PIV 观测的同时测量模型在不同压力下的出水量,其流量如表 3 所示,转角为 45.0°、60.0°、67.5°、75.0 时的流量系数分别为 1.63、1.45、1.41、1.35,流态指数分别为 0.53、0.52、0.52、0.52。

表 3 不同转角灌水器 PIV 观测模型的流量

Tab.3 Discharge of the testing models with different angles

转角 / (°)	压力水头/ m							
	1	2	3	4	5	6	7	8
45.0	1.61	2.32	2.88	3.65	3.76	4.14	4.49	4.82
60.0	1.45	1.96	2.70	3.12	3.46	3.71	3.93	4.18
67.5	1.41	2.03	2.54	2.98	3.35	3.67	3.97	4.01
75.0	1.35	1.94	2.39	2.77	3.11	3.42	3.71	3.97

转角与流量、流量系数、流态指数呈负相关关系,这与表 1 的试验结果十分类似。由于在实际加工 PIV 观测模型过程中的误差等因素,实际成品尺寸比设计尺寸偏大,但转角是完全相同的,本文认为其对转角研究的影响可以忽略。应用 HotShot512 型高速摄像仪对待试样品分别进行了 PIV 测试,选择加工精度较高、视觉清晰度较好的区间(流道第 4.5 单元)进行拍摄,拍摄结果如图 3 所示。通过 PIV 拍摄后,应用 Movias Pro Viewer 软件对拍摄结果进行分析,分别计算不同转角时粒子的运行速度,并绘制成速度沿流道的变化曲线,如图 4 所示。

从图 3 可明显看出,当转角为 45.0 和 60.0 时,颗粒进入凹形流道处的几率较低,各有一次进入并很快逃离,粒子轨迹线比较光滑;当转角大于 60.0° 时,颗粒进入凹形流道处的几率显著增大,当转角为 67.5 时,颗粒两次进入;转角为 75.0 时,颗粒进入

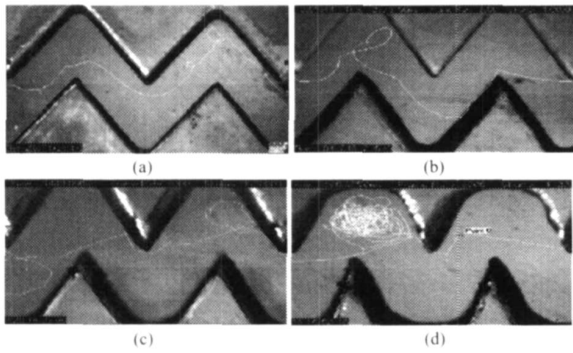


图3 迷宫流道内不同转角的镁粒运动轨迹线图

Fig. 3 Comparison the trajectories of Mg in labyrinth channel with the different angles

(a) 转角 45.0° (b) 转角 60.0° (c) 转角 67.5° (d) 转角 75.0°

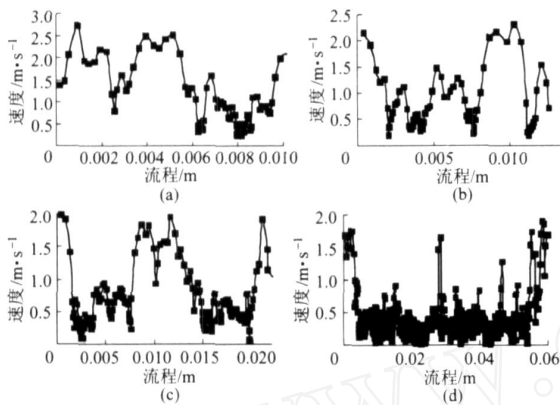


图4 迷宫流道内不同转角的镁粒沿流道运动速度变化曲线

Fig. 4 Comparison the velocity of Mg in labyrinth channel with the different angles

(a) 转角 45.0° (b) 转角 60.0° (c) 转角 67.5° (d) 转角 75.0°

流道凹形处的漩涡中,并有较长时间的旋转运动。说明随着转角的增大,流道流场运动越紊乱,流体内固体颗粒越容易进入漩涡区,其停留的时间也越来越长,增加了流道堵塞的可能性。

对图4中的数据统计分析发现,当转角分别为45.0°、60.0°、67.5°、75.0°时,观测的固体颗粒的平均速度分别为1.03、0.89、0.71、0.33 m/s,在2个流道单元中的运行时间分别为0.0097、0.0112、0.0282和0.1818 s,小于0.5 m/s的速度占整个沿程流速的比例分别约为28%、34%、43%和76%。从图4也可看出,无论转角为多少,固体颗粒进入同一流道单元时的速度均相对较高,在1.5~2.2 m/s之间,当转角较小(不大于60°)时,每个单元流速变化幅度较小,沿程平均流速较大;而当转角逐渐增大,大于67.5°时,每个流道单元中流速变化幅度明显增大,低速段明显增加,沿程流速以小于0.5 m/s的低速为主,颗粒沿程平均流速显著下降,固体颗粒在流道内的停留时间显著增大,在流道凹形处沉积

发生堵塞的概率也将显著增加。

## 2.4 浑水抗堵塞性能测试

为验证CFD数值模拟与PIV试验结果,应用测试平台进行了浑水抗堵塞试验。重点考查了转角在流量随测试次数变化过程中的作用,将试验结果绘制成如图5所示的时间-流量关系曲线图。

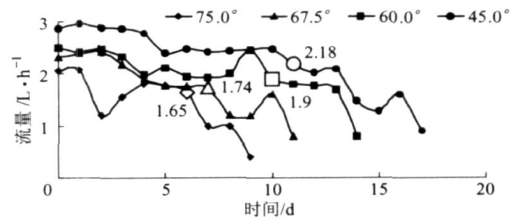


图5 不同转角灌水器流量随时间变化曲线

Fig. 5 Discharge of emitters with different angles as times going

在图5中,横坐标为零时表示使用清水时灌水器的流量。从图中可以看出,当浑水灌溉时,随着灌溉时间的增加,所有滴灌带都发生不同程度的堵塞,滴头流量随着灌溉天数的增加逐渐下降,并最终造成所有的灌水器接近堵塞。但就转角而言,当其他条件相同时,转角越大,滴头流量随灌溉次数增加而下降的趋势越明显。

由于灌水器的流量不同,能够始终有浑水流出的灌水器持续的时间各有不同,基本上是灌水器的流量越大则持续的时间越长。当转角为45.0°时,流量最大,测试17 d后,流量从最初的3 L/h下降到1 L/h,平均每天下降变化率为3.9%;而当转角为75.0°时,测试9 d后,流量从最初的2 L/h下降到0.4 L/h,平均每天下降变化率为8.9%,说明转角越大灌水器越容易发生堵塞,与CFD、PIV测试结果完全吻合,表明用CFD与PIV相结合的方法研究灌水器设计及性能是可行的。参照《ISO/TC23/SC18/WG5N4短周期堵塞测试程序》,当灌水器出流量为清水试验时的75%时即表明灌水器已经被堵塞的规定,流道转角为45.0°、60.0°、67.5°、75.0°的灌水器的流量分别在11、10、7、6 d时接近额定流量的75%,即2.18、1.90、1.74、1.65 L/h。说明转角越小,其抗堵塞能力越强。

另外,从图5还可以看出,无论转角为多少,灌水器发生堵塞是一个累积过程,也是一个堵塞、冲洗的反复过程。如本次试验中,转角为75.0°的灌水器在浑水试验时,流量变化比较大,第2 d流量从第1 d的2 L/h下降到1.21 L/h,但到第4 d后又上升,流量接近2 L/h,第6 d后就不可逆转地发生堵塞。转角为60.0°与67.5°时,也发生了类似的情况。

### 3 结论

(1) 灌水器流态指数随着转角的增大而减小,因此,灌水器设计时适当增加转角能提高灌水器的水力性能。

(2) 转角越大,流道内流场运动越紊乱,固体颗粒在流道内的平均运动速度越小,低速运动时间越

长,灌水器发生堵塞几率越大,因此,适当降低转角可以提高灌水器的抗堵塞能力。

(3) 转角为 60.0° 时,灌水器流态指数相对较小,而抗堵塞能力相对较强,可以将 60.0° 作为流态指数与抗堵塞能力平衡的合理转角,因此,建议迷宫流道灌水器设计时采用 60.0° 转角。

### 参 考 文 献

- 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):736~742.  
Li Yunkai, Yang Peiling, Ren Shumei, et al. Analyzing and modeling flow regime in labyrinth path drip irrigation column emitter with CFD[J]. Journal of Hydrodynamics:A, 2005,20(6):736~742. (in Chinese)
- 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 the round-flow channel in an in-line drip-tape[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22 (10): 83~87. (in Chinese)
- Ozekici B, Ronald S. Analysis of pressure losses in tortuous path emitters[M]. America Society of Agriculture Engineering, 1991:112~115.
- Li Guangyong, Wang Jiandong, Alam M, et al. Influence of geometrical parameters of labyrinth flow path of drip emitters on hydraulic and anti-clogging performance[J]. Transactions of the ASABE, 2006, 49(3):637~643.
- 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 Jun, Hong Jun, Zhao Wanhua, et al. Parameterized design of labyrinth-channel emitters based on orthogonal experiments[J]. Journal of Xian Jiaotong University, 2006,40(1):31~35. (in Chinese)
- 张俊,赵万华,魏正英,等. 梯形流道灌水器流量定量设计研究[J]. 中国机械工程,2007,18(24):2997~3000.  
Zhang Jun, Zhao Wanhua, Wei Zhengying, et al. Research on quantitative design of discharges for trapezoidal-channel emitters[J]. China Mechanical Engineering, 2007,18(24):2997~3000. (in Chinese)
- Wei Qingsong, Shi Yusheng, Dong Wenchu. Advanced methods to develop drip emitters with new channel types[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2006,22(2):243~249.
- Bucks D A, Nakayama F S, Gilbert R G, et al. Trickle water quality and preventive maintenance[J]. Agricultural Water Management, 1979,2(2):149~162.
- Nakayama F S, Gilbert R G, Bucks D A. Water treatments in trickle irrigation systems[J]. ASCE Journal of the Irrigation and Drainage Engineering, 1978,104(1):23~34.
- Taylor H D, Bastos R K X, Person H W, et al. Drip irrigation with waste stabilization pond effluents: solving the problem of emitter fouling[J]. Water Science Technology, 1995,31(12):417~424.
- 喻黎明,吴普特,牛文全,等. 迷宫流道内固体颗粒运动的 CFD 模拟及 PIV 验证[J]. 农业机械学报,2009,40(5):45~51.  
Yu Liming, Wu Pute, Niu Wenquan, et al. CFD numerical simulation and PIV verification about the movement of solid particles in labyrinth channel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009,40(5):45~51. (in Chinese)
- Adin A, Sacks M. Drip-logging factors in waster irrigation[J]. ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1991,117(6):813~826.
- 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 of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(10):70~73. (in Chinese)
- 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 Guixiang, Zhang Mingyuan, Zhao Wanhua, et al. Numerical flow simulation and optimum channel design of drip irrigation emitter[J]. Journal of Xian Jiaotong University, 2004,38(9):920~924. (in Chinese)
- 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.

(下转第 67 页)

- 11 邹林, 马光文, 丁晶. 给水管管径优化设计的遗传算法[J]. 四川大学学报:工程科学版, 1998, 2(1):1~6.  
Zou Lin, Ma Guangwen, Ding Jing. Optimal diameter design of water networks using genetic algorithms[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 1998, 2(1):1~6. (in Chinese)
- 12 王圃, 衡洪飞, 岳健. 基于退火遗传算法的给水管网优化[J]. 中国给水排水, 2007, 23(1):60~63.  
Wang Pu, Heng Hongfei, Yue Jian. Optimization of urban water network by annealing genetic algorithm[J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(1):60~63. (in Chinese)
- 13 王新坤. 基于模拟退火遗传算法的自压树状管网优化[J]. 水利学报, 2008, 39(8):1012~1016.  
Wang Xinkun. Optimization of gravity pipe network based on annealing genetic algorithm [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(8):1012~1016. (in Chinese)
- 14 王新坤, 蔡焕杰. 多重群体遗传算法优化树状给水管网[J]. 农业工程学报, 2004, 20(6):20~22.  
Wang Xinkun, Cai Huanjie. Multi-group genetic algorithms for optimization of pumping tree pipe network [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(6):20~22. (in Chinese)
- 15 周荣敏, 买文宁, 雷延峰, 等. 自压式树状管网神经网络优化设计[J]. 水利学报, 2002, 33(2):66~70.  
Zhou Rongmin, Mai Wenning, Lei Yanfeng, et al. Artificial neural networks optimal design of gravity tree pipe network [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(2):66~70. (in Chinese)
- 16 付玉娟, 蔡焕杰. 基于列队竞争算法的重力输配水管网优化设计[J]. 农业机械学报, 2008, 39(6):117~122.  
Fu Yujuan, Cai Huanjie. Pipe network optimization for maximal utilization rate of gravity head based on LCA [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(6):117~122. (in Chinese)
- 17 王跃宣, 吴澄, 胡昔祥, 等. 求解约束问题的退火遗传算法[J]. 高技术通讯, 2004(7):10~14.  
Wang Yuexuan, Wu Cheng, Hu Xixiang, et al. Annealing genetic algorithm for constrained optimization problems[J]. Chinese High Technology Letters, 2004(7):10~14. (in Chinese)
- 18 白丹, 李占斌, 宋立勋. 模糊线性规划在微灌干管管网系统优化中的应用[J]. 水利学报, 2003, 34(7):36~41.  
Bai Dan, Li Zhanbin, Song Lixun. Application of fuzzy linear programming to optimal design of micro-irrigation main pipe network[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(7):36~41. (in Chinese)

## (上接第55页)

- 16 阮驰, 孙传东, 白永林, 等. 水流场 PIV 测试系统示踪粒子特性研究[J]. 实验流体力学, 2006, 20(2):72~77.  
Ruan Chi, Sun Chuandong, Bai Yonglin, et al. The characteristics of the tracer particles used in water flow field for PIV system[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2006, 20(2):72~77. (in Chinese)
- 17 赵宇. PIV 测试中示踪粒子性能的研究[D]. 大连:大连理工大学, 2004.  
Zhao Yu. Study to the performance of tracer in the PIV test [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004. (in Chinese)
- 18 胡华, 刘书亮, 王天友, 等. 关于测量内燃机缸内流场用示踪粒子的研究[J]. 小型内燃机与摩托车, 2002, 31(1):5~8.
- 19 Koutsiaris A G, Mathioulakis D S, Tsangaris S. Microscope PIV for velocity-field measurement of particle suspensions flowing inside glass capillaries[J]. Measurement Science & Technology, 1999, 10(11):1037~1046.
- 20 Klank H, Goranovic Q, Kutter J P. PIV measurements in a microfluidic 3D-sheathing structure with three-dimensional flow behaviour[J]. Journal Micromechanics & Microengineering, 2002, 12(2):862~869.
- 21 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.
- 22 魏正英, 唐一平, 温聚英, 等. 灌水器细微水道水沙两相流分析和微 PIV 及抗堵试验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6):1~9.  
Wei Zhengying, Tang Yiping, Wen Juying, et al. Two-phase flow analysis and experimental investigation of micro-PIV and anti-clogging for micro-channels of emitter[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(6):1~9. (in Chinese)
- 23 张俊, 魏公际, 赵万华, 等. 灌水器内圆弧形流道的液固二相流场分析[J]. 中国机械工程, 2007, 18(5):589~593.  
Zhang Jun, Wei Gongji, Zhao Wanhua, 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)
- 24 唐学林, 余欣, 任松长, 等. 固-液两相流体动力学及其在水力机械中的应用[M]. 郑州:黄河水利出版社, 2006.
- 25 喻黎明, 吴普特, 牛文全, 等. 迷宫流道转角对灌水器水力性能的影响[J]. 农业机械学报, 2009, 40(2):63~67.  
Yu Liming, Wu Pute, Niu Wenquan, et al. Influence of angle of labyrinth channels on hydraulic performance of emitter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(2):63~67. (in Chinese)