

迷宫流道偏差量对灌水器水力性能及抗堵塞性能的影响*

喻黎明^{1,2} 吴普特³ 牛文全³

(1. 清华大学水利系, 北京 100084; 2. 长沙理工大学水利工程学院, 长沙 410114;
3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100)

【摘要】 以齿尖偏差量分别为 -0.25、0、0.25 和 0.50 mm 的齿形流道结构形式的灌水器为研究对象,应用 CFD 单相流场速度数值分析、CFD 两相流沙粒浓度分布数值分析、试验样品清水和浑水测试相结合的方法,研究了偏差量对灌水器水力性能和抗堵塞能力的影响。结果表明:偏差量与流态指数呈正相关关系,与流量系数呈负相关关系,而随着偏差量的增加灌水器的抗堵塞能力也在下降,综合分析偏差量对水力性能和抗堵塞性能的影响,认为在满足流态指数的要求下应尽量减小偏差量以提高抗堵塞能力。

关键词: 灌水器 迷宫流道 水力性能 抗堵塞性能 偏差量

中图分类号: S275.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)09-0064-05

Influence of the Offset of Labyrinth Channels of Drip Emitters
on Hydraulic and Anti-clogging Performance

Yu Liming^{1,2} Wu Pute³ Niu Wenquan³

(1. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China
2. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China
3. College of Water Resource and Architectural Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract

The influence of offsets (-0.25 mm, 0, 0.25 mm, 0.50 mm) of dental labyrinth channels of drip emitters on hydraulic and anti-clogging performance was studied by the following methods: there were numerical simulations carried out for the liquid-phase flow and the liquid-solid two-phase flows in the flow field by the CFD program Fluent, and the samples were tested. The obtained results showed positive relationship between offset and discharge coefficient, and negative relationship between offset and flow state exponent. With the increasing of the offset of emitters, the anti-clogging ability declined. Thus, combining the hydraulic and anti-clogging performance, under the condition of adequate flow state exponent, it put forward a suggestion that reducing the offset as much as possible to enhance the anti-clogging performance.

Key words Emitters, Labyrinth channels, Hydraulic performance, Anti-clogging ability, Offset

引言

灌水器优良的水力性能和抗堵塞性能是滴灌技术成功应用的关键因素之一,在灌水器各流道形式中,迷宫流道因能使水流呈紊流状态,且具有良好的消能能力而被公认为最好的流道形式^[1]。但是迷

宫流道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防堵,但灌水器仍存在不同程度的堵塞^[2~3]。Adin 等^[4]认为灌水器流道形状对堵塞影响很大。Nakayama 等^[5]认为滴头的堵塞是流道几何参数等多个因素综合作用下的结果。Taylor、Robert、Bucks

收稿日期: 2010-12-10 修回日期: 2011-03-06
* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2011AA100507)
作者简介: 喻黎明,博士后,长沙理工大学讲师,主要从事节水灌溉理论与设备研究,E-mail: liming16900@yahoo.cn

等^[6-7]认为灌水器的设计比水质情况对灌水器的堵塞更重要。李光勇、魏正英等^[8-9]研究了迷宫流道部分结构参数对抗堵塞能力的影响。这些研究在解决堵塞问题时,容易忽略结构参数的变化对水力性能的影响。郑耀泉等^[10]研究直径为3、4、6 mm的小管出流,抗堵塞效果显著,但是其水力性能较差,尤其是流态指数,几乎没有补偿能力。魏正英等^[11]通过消除流道内制止区而形成的主航道抗堵塞设计方法提高了灌水器的抗堵塞能力,但导致灌水器的流量和流态指数都上升。喻黎明等^[12-13]通过对流道转角影响灌水器水力性能和抗堵塞性能的分析认为,转角的变化使得水力性能和抗堵塞性能呈反方向变化,最终建议采用60°的转角。由此可知,灌水器每个结构参数都会对水力性能和抗堵塞性能产生影响^[14-16],因此,需要综合各种因素选择最佳尺寸。本文采用CFD模拟水流流场速度分布、CFD模拟沙粒浓度分布、试验样品水力性能测试与浑水试验的方法,分析齿形流道结构参数中的偏差量对水力性能和抗堵塞性能的影响。

1 材料与方法

1.1 物理模型

本文所选用的灌水器流道形状如图1所示,其主要参数有流道宽 W (1 mm)、斜边与底边转角 α (60°)和高 h (1 mm),共计8个流道单元,流道深为0.80 mm,定义齿尖偏差量为 J ,当流道外轮廓宽 $H < 2h$ 时, J 为正值;当 $H > 2h$ 时, J 为负值;当 $H = 2h$ 时, J 为零。本试验中, J 分别为-0.25、0、0.25、0.50 mm(对应的齿间距数值分别为2.02、2.31、2.60、2.89 mm),即在下文中,只变化 J 的数值,其他参数都不变。

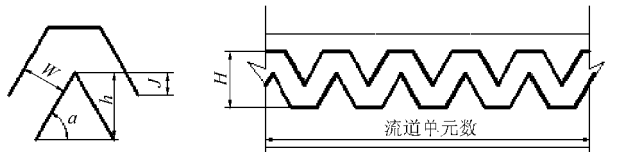


图1 灌水器流道结构形式

Fig. 1 Forms of flow path of emitter

1.2 CFD数值模拟

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 3.10×10^5 个单元。

本文的灌水器流道水力计算中单相流采用标准 $k-\epsilon$ 紊流模型,其计算公式参照文献^[17]。模拟压力水头见表1,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。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} 。

表1 不同偏差量的流量

Tab.1 Discharge of the different offset								L/h
偏差量 /mm	测试工作压力/m							
	1	2	3	4	5	6	8	10
0.50	0.97	1.43	1.80	2.13	2.24	2.63	3.03	3.44
0.25	1.18	1.72	2.11	2.47	2.73	3.01	3.45	3.74
0	1.20	1.77	2.18	2.63	2.76	3.25	3.68	3.94
-0.25	1.44	1.96	2.37	2.74	3.08	3.28	3.73	4.12

两相流模拟过程中采用的基本控制方程是Euler-Euler方法中的Eulerian模型;湍流粘性数模型是对标准型 $k-\epsilon$ 模型改进的RNG $k-\epsilon$ 模型,其计算公式见文献^[18],流道入口的含沙量为1%(体积分),沙粒直径为80 μm 。其他与单相流模拟相同。

1.3 水力性能、抗堵塞性能测试平台及滴灌带

根据国家标准和短周期测试标准^[19-20]建测试平台,如图2所示。水源由水桶向装置供给,水桶高为1 m,周长为2 m。水泵额定扬程为25 m,额定流量为1.8 m^3/h ,从装置的前后端同时供水,以保证压力一致,装置进口处装有压力调节阀,前后压力表用来读取压力,每个灌水器出水口下端放置一个容量为1 L的大口烧杯,试验时使用精度为1 g的电子秤测量水质量。装置末端装有回水管,将回水收集到水桶里。

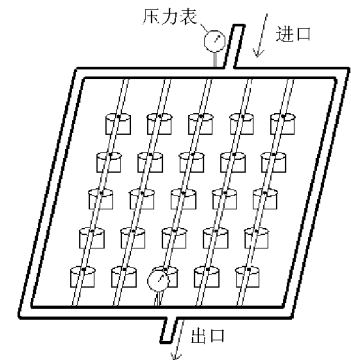


图2 水力性能与抗堵塞测试装置

Fig. 2 Testing platform of hydraulic and anti-clogging

将上述4种灌水器流道结构形式开模制作成片式灌水器,并制成滴灌带形式,根据测试要求从这4种滴灌带各随机截取5根长1.60 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℃),额定工作压力为10 m水头时,此4种灌水器的制造偏差分别为0.01、0.03、0.01、0.02,这是符合标准的。其测试工作压力见表1,每次测试时间为10 min,观测水量2次,其差

值小于 2%,取其平均值为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,同样各随机截取 5 根长 1.60 m(包含 25 个灌水器出水口)安装到测试平台上,通过调节流量调节阀和分流阀获得额定工作压力 5 m 水头,保持压力稳定。每次供水测试时间为 10 min,重复两次,取两次测得水量的平均值作为该滴头的出水量。直至大部分滴头堵塞可以明显作出判断为止,停止试验。为了加快堵塞过程,试验用浑水为人工配置,泥沙质量浓度为 10 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 mm。为了模拟滴头实际的工作状态,每隔 24 h 进行一组测定,每组重复 2 次,取 2 次的平均值。

2 结果与分析

2.1 灌水器水力性能测试

流量系数和流态指数可通过各入口压力及对应的流量代入公式进行回归计算,即^[21]

$$q = kh_1^x \tag{1}$$

式中 q ——滴头流量,L/h h_1 ——压力,m
 k ——流量系数 x ——流态指数

可通过表 1 中各压力下的流量,计算出偏差量 -0.25、0、0.25、0.50 mm 下的流量系数分别为 0.98、1.20、1.21、1.44;流态指数分别为 0.55、0.51、0.49、0.46。

可以看出,当流道截面积、流道长度和高度以及对应的入口压力相同而偏差量不同时,灌水器的流量系数随偏差量的减小而逐渐增大,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,此规律与文献[22]吻合;随着偏差量的减小,流态指数也是减小的,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,流态指数越小即灌水器水力性能越高,越能适应高低不平的地形地势。

2.2 流场分析

图 3 是入口压力为 5 m 时第 4 流道单元位于流道深 1/2 处的速度图,结合表 2 可知,偏差量的减小即主流区的宽度在增加,偏差量从 0.50 mm 变化到 -0.25 mm 时,主流区的宽度增加了 22.8%,而漩涡区的宽度增加了 57.2%,随着偏差量的减小,主流区宽度与漩涡区宽度的比例在下降,即漩涡区的宽度增加很快。水流主要是在主流区流过,随着偏差量下降,主流区宽度增加,而流道深度不变,则过流面积增加,当工作压力为 5 m 时,流量和主流区的平均流速都随着偏差量的下降而增加,平均流速的增加,则临界于主流区和漩涡区之间的速度也会增加,因而漩涡区的最大流速也是增加的,这从表 2 和图 3 得到印证。结合表 3,主流区宽度增加意味着流量的增加,而漩涡区宽度增加即加大了流道内能量的消耗^[1],压力的变化引起流量下降的趋势,即流态指数的下降。

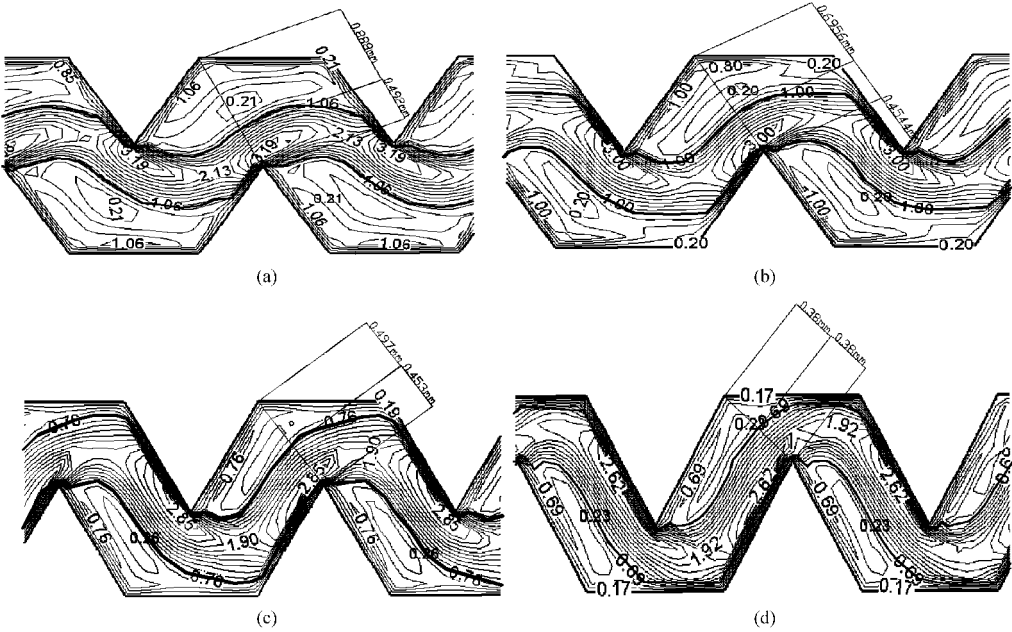


图 3 不同偏差量下流道第 4 单元流场速度分析

Fig. 3 Distribution of velocity in the fourth unit of the flow path with different offsets

(a) $J = -0.25\text{ mm}$ (b) $J = 0$ (c) $J = 0.25\text{ mm}$ (d) $J = 0.50\text{ mm}$

表 2 不同偏差量下的过流区域宽度

Tab.2 Width of flow path with different offsets				
偏差量	主流区	漩涡区	工作压力 5 m	主流区平均
/mm	宽度/mm	宽度/mm	时流量/L·h ⁻¹	速度/m·s ⁻¹
0.50	0.38	0.38	2.24	2.05
0.25	0.45	0.49	2.73	2.11
0	0.45	0.69	2.76	2.13
-0.25	0.49	0.89	3.08	2.18

表 3 不同流道偏差量第 4 流道单元极限速度值

Tab.3 Extreme velocities in the fourth unit with different angles				
偏差量	齿尖最高	漩涡最高	漩涡最低	边界
/mm	速度	速度	速度	速度
0.50	2.62	0.69	0.17	0.17
0.25	2.65	0.76	0.19	0.19
0	3.00	1.00	0.20	0.20
-0.25	3.19	1.06	0.21	0.21

同时从表 3 可知,流道偏差量的减小使对应位置上的速度增加,即表现在流量的增加,同时造成边界层流速和漩涡处的流速增加。随着偏差量的减小,漩涡最高速度增加了 34.9%,漩涡中心最低速度增加了 19.0%。漩涡中心速度越低,沙粒越容易停留并容易最终沉积于此处,因此偏差量的增加使漩涡中心速度下降而容易造成沙粒的沉积,同时,漩涡边界最大速度的下降,使得沙粒的离心力也随之下降,致使沙粒也易最终沉积。因此偏差量越小,抗堵塞能力越强,此处的主流区类似于魏正英等^[11]提出的主航道思想,但从结果来看,尽管漩涡区加大了,其最高速度和最低速度却明显增加,不利于沙粒沉积,对提高抗堵塞有利。

2.3 两相流数值模拟

针对不同偏差量的流道进行两相流模拟,在流道深度 1/2 位置上的模拟结果如图 4 所示。当偏差量为 -0.25 mm 时,流道内含沙量较小,流道入口处含沙量为 1%,流道内的最大含沙量仅为 2%;随着偏差量的增加,最大含沙量则迅速增加,当偏差量为 0、0.25、0.50 mm 时,最大含沙量分别达到 15%、21%、28%。而且当偏差量为 -0.25、0、0.25 mm 时,最大的偏差量出现在流道的中部,而当偏差量为 0.50 mm 时,最大含沙量出现在入口处。随着灌水器使用时间的延长,次数的增多,流道内的含沙量会逐渐增加,位于最大含沙量位置的灌水器发生堵塞的几率也随之上升。

2.4 浑水抗堵塞性能测试

图 5 是不同偏差量(-0.25、0、0.25、0.50 mm)

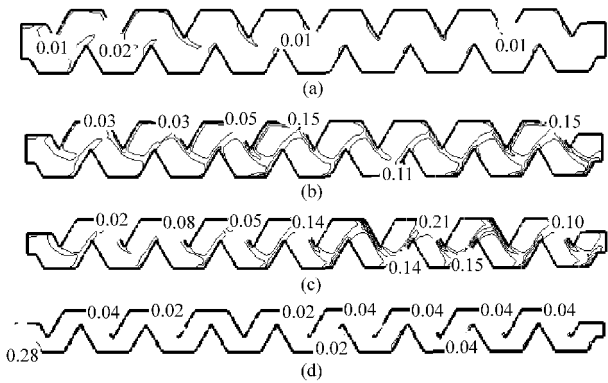


图 4 灌水器流道结构形式模拟

Fig.4 Forms of flow path of emitter

(a) $J = -0.25\text{ mm}$ (b) $J = 0$ (c) $J = 0.25\text{ mm}$ (d) $J = 0.50\text{ mm}$

的灌水器在泥沙质量浓度为 10 g/L 浑水试验时测试时间与灌水器流量的关系曲线。总体来看,随着时间的增长,灌水器流量都大幅下降,并最终造成所有的灌水器接近甚至完全堵塞。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时间各有不同,基本上是灌水器流量越大则持续时间越长,流量最大、偏差量为 -0.25 mm 的灌水器持续时间最长,到第 16 天才基本完全堵塞;流量最小、偏差量为 0.50 mm 的灌水器持续时间最短,到第 9 天时基本堵塞。参照 ISO 标准 ISO/TC 23/SC 18/WG5 N4 短周期堵塞测试程序,当灌水器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,流道偏差量为 -0.25、0、0.25、0.50 mm 的灌水器的流量分别在 11、10、8、5 d 时接近额定流量的 75%,即 2.24、2.0、2.05、1.68 L/h。也即说明,流道偏差量越小,其保持正常出流的时间越长,其抗堵塞能力越强。

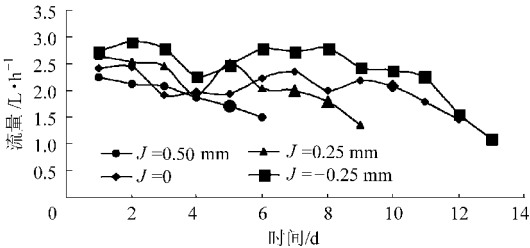


图 5 不同偏差量灌水器流量随时间的变化

Fig.5 Discharge of emitters with different offsets as time goes

从图中偏差量为 0.25 mm 的灌水器流量曲线可以看出,在浑水试验时,灌水器流量变化比较大,其第 4 天的流量比较小,只有 1.91 L/h,然后又上升,甚至有时灌水器本来已经被堵塞不再出流了,可过几天后又会有出流,而且有时还能达到正常的流量。这是因为滴头堵塞是一个逐步累积的过程,外界条件的变化也会引起堵塞程度的变化。多次间歇性灌溉后流道内沉积的大量颗粒物将导致滴头堵塞。

3 结论

(1)从水力性能测试和两相流模拟试验结果可知,随着偏差量的减小,漩涡区的宽度增加,流态指数下降,最大含沙量也下降,即抗堵塞性能增强。

(2)从浑水试验的结果来看,灌水器流道偏差

量减小时,其流量在增加,其持续时间也在增加,参照 ISO 灌溉 75% 的判断标准,随着流道偏差量的减小,灌水器正常运行时间越长。

(3)对于迷宫流道灌水器的抗堵塞性能而言,应当取较小的偏差量。

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, 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)
- 穆乃君,张昕,李光永. 内镶式齿形迷宫滴头抗堵塞实验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(8): 34 ~ 39.
Mu Naijun, Zhang Xin, Li Guangyong. Experimental study on anti-clogging performance of dental labyrinth flow passage of drip emitters [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(8): 34 ~ 39. (in Chinese)
- 张俊,魏公际,赵万华. 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)
- Adin A, Sacks M. Dripper-clogging factors in waster irrigation [J]. ASCE Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 1991, 117(6): 813 ~ 826.
- Nakayama F S, Gilbert R G, Bucks D A. Water treatments in trickle irrigation systems [J]. ASCE Journal of 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.
- 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.
- Li Guangyong, Wang Jiangdong, 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.
- 魏正英,唐一平,温聚英,等. 灌水器细微流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)
- 郑耀泉,刘婴谷. 小管出流灌溉技术的研究[J]. 喷灌技术, 1994(1): 2 ~ 9.
Zheng Yaoquan, Liu Yinggu. A study on the technique of small-pipe out-flow irrigation [J]. Water Saving Irrigation, 1994(1): 2 ~ 9. (in Chinese)
- 魏正英,赵万华,唐一平. 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. Anti-clogging design method for the labyrinth channels of drip irrigation emitters[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(6): 1 ~ 7. (in Chinese)
- 喻黎明,吴普特,牛文全. 迷宫流道转角对灌水器水力性能影响的研究[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)
- 牛文全,喻黎明,吴普特,等. 迷宫流道转角对灌水器抗堵塞性能的影响[J]. 农业机械学报, 2009, 40(9): 51 ~ 55.
Niu Wenquan, Yu Liming, Wu Pute, et al. Influence of angle of labyrinth channels on anti-clogging performance of emitter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(9): 51 ~ 55. (in Chinese)
- Li Jiusheng, Chen Lei. Assessing emitter clogging in drip irrigation systems with sewage effluent [J]. Transactions of the ASABE, 2009, 49(3): 637 ~ 643.
- Li Y K, Yang P L T W. Hydraulic property and flow characteristics of three labyrinth flow paths of drip irrigation emitters under micro-pressure [J]. Transactions of the ASABE, 2009, 52(4): 1 129 ~ 1 138.
- Zhang Jun, Zhao Wanhua, Tang Yiping. Structural optimization of labyrinth-channel emitters based on hydraulic and anti-clogging performances [J] Irrigation Science, 2010, 52(4): 1 129 ~ 1 138.

- Zhang Weizhen, Cai Meijuan. Numerical simulation and laboratory test for special yield of homogeneous soil [J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1988(2): 1~11. (in Chinese)
- 4 李佩成. 黄土含水层给水度合理取值的研究[J]. 水利学报, 1999, 30(11): 38~41.
Li Peicheng. Study on rational determination of specific yield in aquifer of loess area [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 30(11): 38~41. (in Chinese)
- 5 张家发. 地下水位匀速下降条件下层状非均质多孔介质给水度的初步研究[J]. 水利学报, 1988, 19(8): 9~17.
Zhang Jiafa. On the variation of specific yield in response to uniform fall of water table in stratified porous media [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988, 19(8): 9~17. (in Chinese)
- 6 张家发. 给水度概念和广义给水度变化规律的初步分析[J]. 长江科学院院报, 1991, 8(1): 63~69.
Zhang Jiafa. Specific yield concepts and laws on the generalized specific yield variation [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1991, 8(1): 63~69. (in Chinese)
- 7 刘廷玺, 朱仲元, 王亚娟, 等. 给水度的变化机理及其试验分析[J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2002, 23(2): 17~21.
Liu Tingxi, Zhu Zhongyuan, Wang Yajuan, et al. Variations mechanism and experimental analysis of specific yield [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition, 2002, 23(2): 17~21. (in Chinese)
- 8 朱仲元, 贾德彬, 高瑞忠, 等. 推求潜水变幅带给水度 μ 的非稳定流公式法[J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2002, 23(2): 26~29.
Zhu Zhongyuan, Jia Debin, Gao Ruizhong, et al. The unsteady flow formula method to calculate storage coefficient μ [J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Science Edition, 2002, 23(2): 26~29. (in Chinese)
- 9 高瑞忠, 朝伦巴根, 朱仲元, 等. 确定潜水含水层系统参数的 Boulton - RAGA 方法[J]. 农业工程学报, 2004, 20(6): 23~26.
Gao Ruizhong, Chaolunbagen, Zhu Zhongyuan, et al. Boulton - RAGA method for identifying unconfined aquifer parameters [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(6): 23~26. (in Chinese)
- 10 常安定, 李佩成. 用割离井公式反求水文地质参数的直线图解法[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(4): 135~138.
Chang Anding, Li Peicheng. The flow jacob linear graphic method of converse calculating the hydrogeology parameters with the isolated-well formulas [J]. Journal of Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry: Natural Science Edition, 2006, 34(4): 135~138. (in Chinese)
- 11 王旭升. 可变给水度的潜水面运动方程[J]. 水利学报, 2009, 40(3): 335~339.
Wang Xusheng. Equations of phreatic surface movement with variable specific yield [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(3): 335~339. (in Chinese)
- 12 霍崇仁, 王禹良. 水文地质学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988.
- 13 冯国栋. 土力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1986.

(上接第 68 页)

- 17 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.
- 18 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.
- 19 SL/T67. 1~67. 3—1994 微灌灌水器[S]. 1994.
- 20 ISO/TC 23/SC 18/WG5 N4: Clogging test methods for emitters[S]. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2003.
- 21 Potter M C, Wiggert D C. Mechanics of fluids [M]. Beijing: China Machine Press, 2003.
- 22 陈雪, 吴普特, 范兴科, 等. 灌水器迷宫流道结构参数数值模拟与抗堵塞分析[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(2): 35~38.
Chen Xue, Wu Pute, Fan Xingke, et al. Numerical simulation of structural parameters using CFD and anti-clogging design analysis on drip emitter [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(2): 35~38. (in Chinese)