

微压滴灌灌水器设计及快速开发平台技术*

魏正英 温聚英 唐一平 卢秉恒

【摘要】 针对目前滴灌技术研究向低能耗方向发展的趋势,为降低滴灌系统成本,基于计算流体力学两相流 CFD 数值计算,进行了新型的微压抗堵灌水器结构 CAD 设计,并应用微 PIV 系统测量研究其内部流动特性,着重进行了微通道两相流 PIV 测量和分析。结合高精度激光快速成形技术(RP&M),建立了微压滴灌灌水器快速开发平台,制作微压灌水器实验件并进行其水力性能及抗堵性能分析,经过回归分析得到微压滴灌灌水器的结构参数水力性能经验公式,为设计新型抗堵微压灌水器提供理论依据。

关键词: 微压滴灌 灌水器 CFD PIV

中图分类号: S275.6 **文献标识码:** A

Structural Design and Rapid Development Platform of Emitters under Lower Water Pressure

Wei Zhengying Wen Juying Tang Yiping Lu Bingheng
(Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract

Aiming at the development trend of drip-irrigating study toward low energy consumption and low cost at present, CAD structural design of new anti-clogging emitters with lower water pressure was conducted by using CFD(computational fluid dynamics) numerical simulation on two-phase flow, and micro-PIV system was utilized to investigate the flow behaviors in various labyrinth channels. Based on rapid prototyping manufacturing (RP&M), a rapid development platform for new drip emitters with lower water pressure was established. Hydraulics performance and anti-clogging experimental analysis was performed in order to summarize formulas of structural parameters versus hydraulics performance by means of regression analysis. It would provide a theoretical base for new emitters with lower water pressure design.

Key words Drip irrigation with lower water pressure, Emitter, CFD, PIV

引言

滴灌技术是目前节水灌溉中行之有效的高效灌溉技术,但也是“最昂贵的灌水技术”。滴灌系统一般的工作压力为 10 m 水头,当在微压(5 m 水头以下)时,其能够降低灌溉系统输配水管路的材质要求和灌水器厚度,从而大幅度节省投资及降低成

本^[1~4]。美国 IDE 公司,津巴布韦 FORSTER 公司,以色列 Netafim、Plastro、EIN-TAL 公司^[5~6]分别推出了在微压下工作稳定、出水量大的配套滴灌系统,但国外对灌水器设计理论和方法的核心技术均严格保密,且不一定适合我国的灌溉条件,为实现微压灌水器的自主开发,就必须研究微压灌水器的设计方法和开发平台技术。

收稿日期: 2007-06-29

* 国家自然科学基金资助项目(项目编号:50675172)、国家“863”高技术研究发展计划资助项目(项目编号:2006AA100214-5)和教育部优秀博士论文基金资助项目(项目编号:200740)

魏正英 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室 教授 博士生导师, 710049 西安市
温聚英 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室 硕士生
唐一平 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室 教授 博士生导师
卢秉恒 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室 教授 博士生导师

近年来,不少学者利用 CFD 进行滴头的水力特性研究分析其内部流场,为滴头的设计、制造提供参考。美国的 Salvador^[7]、中国农业大学的李永欣^[8]、王福军^[9]等对滴头迷宫式流道内部的压力、流速分布进行了模拟,并与滴头放大模型的实验结果进行对比,但都局限在单相流动的研究。针对灌水器实际的使用情况,在 CFD 分析时应应对滴头流道进行液固两相流模拟。对于滴头内流场的测试,魏正英^[10]利用激光多普勒 LDV 观测流道内单相流速度分布,得到了放大尺寸滴头流道的内部相似流场分布,而由于实验条件的限制,缺乏对实际微小尺寸流道中的流动状态的液固两相流测量和分析。浙江大学的邵学明等^[11]采用模板匹配法和灰度加权标定法研究了两相 PIV 图像处理方法,并将其应用在搅拌槽内液固两相流流场分析,具有较高的精度,将此方法用于迷宫流道流场分析国内却未见报道。本文拟采用两相流 CFD 方法对迷宫滴头进行数值模拟,并利用两相 PIV 测量的方法得出流道液相流场。

1 微压灌水器的设计方法

1.1 流道初步设计

根据文献[12]可知,目前微压滴灌系统主要通过单纯减小毛管壁厚和简化系统结构 2 个方面进行

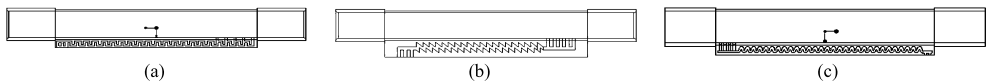


图 1 3 种流道单元初步设计

Fig. 1 Three-type channel unit design

(a) 矩形 (b) 锯齿形 (c) 圆弧形

图 2 3 种滴灌带 CAD 造型

Fig. 2 Three-type dripping kits CAD model

(a) 矩形流道 (b) 锯齿形流道 (c) 圆弧形流道

1.2 流量预测与流道 CFD 分析

根据多次模拟实验比较,初步选定滴灌带流道各单元特征参数,其中矩形、锯齿形、圆弧形流道单元数个数分别为 40、20、35。

首先将流道 CAD 的 STP 文件格式导入划分软件 Gambit 中对迷宫流道进行划分网格,根据流道的特征,本文选用 Cooper 非结构六面体网格,网格大小为 0.1 mm,进出口都设成压力边界,再将文件导入 Fluent6.2 计算,将尺寸单位转化为毫米,选用稳态分离隐式求解器。由于灌水器的流道断面为近似矩形,其内部流体流动状态的转折点显然不同于光滑直管,已有不少学者对其开展过计算和实验研究,结果都发现层流向紊流的过渡大大提前,甚至有些结构内的流体雷诺数 $Re = 300 \sim 500$ 之间就已经处于紊流状态,因此选用 RNG $k - \epsilon$ 数学模型^[13-14],运用 SIMPLE 压力速度耦合算法,二阶迎风离散格式对不可压缩流体 N-S 方程求解压力场问题。设定压力边界条件,进口压力为 40 kPa,出口压力为

设计,大部分微压滴灌带的结构相对简单,即在外径为 4 mm 的管上挖孔,外部罩一内壁附有弹性海绵体的外套,外套环抱 PE 管,这一定程度上影响了灌溉质量。滴灌系统能量消耗主要是由灌水器的工作压力决定的,研制新型灌水器产品是开发微压滴灌系统的关键。基于以上分析,本文拟采用两相流 CFD 流量预测模型和实验分析相结合的设计方法设计符合要求的微压灌水器,其工作压力小于 50 kPa,流量为 1.4~2 L/h。微压灌水器结构形式选用旁翼迷宫式滴灌带,迷宫流道形式选用 3 种(矩形、锯齿形,圆弧形),用参数化设计软件 PROE 进行流道 CAD 初步设计(如图 1~2 所示)。再利用计算流体力学(CFD)进行数值模拟,分别分析比较 3 种流道在微压下灌水器的内部流动状态,设计出适合于工作压力在 5 m 水头以下的滴灌灌水器。

零。离散相颗粒设为沙粒,密度为 2 500 kg/m³,在离散相模型中入射沙粒的半径为 Rosin-Rammler 分布拟合,收敛精度为 10⁻⁴。

1.2.1 微压灌水器流量预测

用 Fluent 软件中 Report-fluxes 命令可以预测在不同压力下的 3 种不同形式的微压灌水器的流量,在计算时将入口压力设为 10~55 kPa,每隔 5 kPa 取一个值。滴灌带在微压下的压力-流量关系曲线如图 3 所示,其中模拟计算的矩形、锯齿形、圆弧形流道的压力-流量关系分别为: $Q = 0.2856H^{0.4715}$, $Q = 0.305H^{0.4435}$, $Q = 0.2739H^{0.4852}$ 。压力流量模拟计算结果如表 1 所示。

由压力流量公式可知,流态指数 $x < 0.5$,得知微压灌水器中的流态为紊流。微压灌水器在压力 40 kPa,当矩形单元数为 40 个,锯齿形单元数为 20 个,圆弧形单元为 35 个时满足流量设计要求,模拟流量为 1.57~1.63 L/h。

表 1 不同压力下流量模拟计算结果

Tab.1 Pressure flow rate simulation results L/h

渠道	压力/kPa							
	10	20	30	35	40	45	50	55
矩形	0.84	1.18	1.44	1.52	1.62	1.74	1.80	1.85
锯齿形	0.85	1.15	1.38	1.45	1.57	1.65	1.74	1.81
圆弧形	0.83	1.18	1.42	1.54	1.63	1.75	1.81	1.91

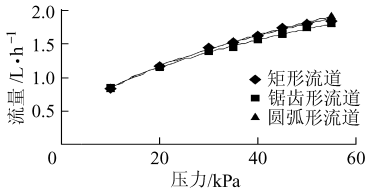


图 3 3 种滴灌器压力-流量关系曲线图

Fig.3 Relationship curve between flow rate and pressure of three emitters

1.2.2 微压迷宫水道水沙两相流 CFD 分析

(1) 3 种渠道压力分布图(图 4)

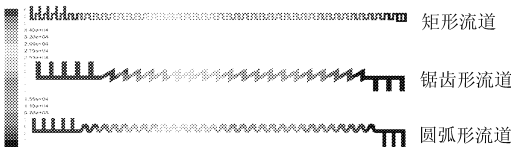


图 4 渠道压力云图

Fig.4 Channel pressure contours

从压力分布可看出,从进口沿迷宫流道的排列方向到出口,压力逐渐降低,每个单元段的压降基本相同,呈现线性下降的趋势。这样根据滴灌器不同流量的要求,可通过增减单元数来线性调整渠道消能大小,为设计系列流量的滴灌器渠道结构奠定了理论基础。

(2) 矩形渠道内流线和沙粒轨迹图(图 5)

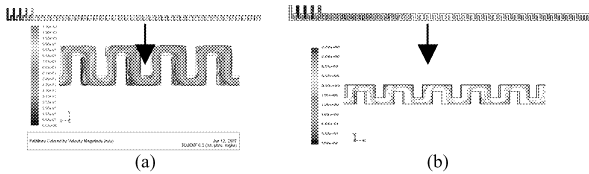


图 5 矩形渠道滴灌带模拟图

Fig.5 Rectangle-channel dripping kits simulation

(a) 流线图 (b) 沙粒轨迹图

(3) 锯齿形渠道内流线和沙粒轨迹图(图 6)

(4) 圆弧形渠道内流线和沙粒轨迹图(图 7)

从 CFD 模拟沙粒轨迹图中分析得出,随着压力的降低,各渠道运动状态明显下降,各渠道沙粒运动比较散乱,部分沙粒沿着主流区运动,还有部分沙粒在漩涡处回转,最终停留在漩涡的低速区,尤其是锯齿形渠道漩涡区域和低速区域最大,造成堵塞隐患,圆弧形渠道其漩涡相对较少。在同一工作压力下,灌

水器进口流速对沙粒在渠道内的运动情况有很大影响。本文以矩形迷宫水道为重点研究对象,随着压力的减小,颗粒沉积越严重,以 2 025 个粒子为跟踪对象,工作压力为 10 kPa 时,逃逸出 206 个粒子,1 819 个粒子沉积在滴灌器中,沉积率 89.8%;工作压力为 40 kPa 时,逃逸出 255 个,1 770 个沉积在微渠道中,沉积率为 87.4%。

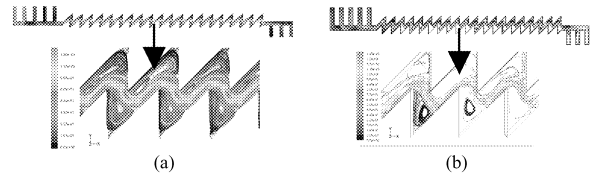


图 6 锯齿形渠道滴灌带模拟图

Fig.6 Tooth-channel dripping kits simulation

(a) 流线图 (b) 沙粒轨迹图

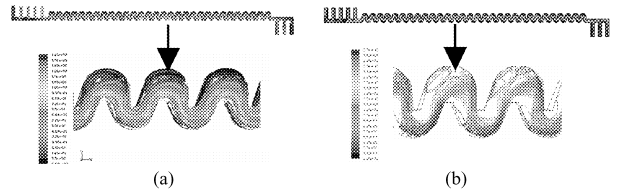


图 7 圆弧形渠道滴灌带模拟图

Fig.7 Arc-channel dripping kits simulation

(a) 流线图 (b) 沙粒轨迹图

2 实验试件制作及结构分析

2.1 微压滴灌器快速开发平台技术

应用光固化快速成型技术制作试件,通过实验验证设计的准确性和合理性,还可进行大量的水力性能试验以及短周期抗堵塞性能试验,经过回归分析得到微压滴灌器的结构参数水力性能经验公式,为滴灌器渠道设计提供理论依据。避免了传统的开发模具注塑出实物,整个过程周期长而且成本高等缺点。工作路线如图 8 所示。此项技术以流体力学计算、一体化快速成形为核心,形成产品开发过程的闭环控制,从而大大缩短了产品的设计开发周期,并提供了滴灌器产品的设计验证平台,快速成型技术的应用可解决滴灌器微细结构的设计制造瓶颈问题,使设计水平大大提高^[15]。

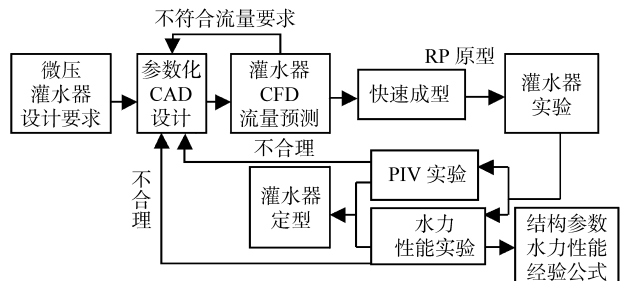


图 8 快速开发技术流程图

Fig.8 Technical route for rapid development

2.2 微流道可视化 PIV 实验分析

染色线流场显示属于液体示踪粒子流场显示,它是显示旋涡运动的流动结构和涡结构中的各种流动现象的有力工具。本文用该法对锯齿形流道单元内的单相流场进行了测定;基于 PIV 实验的固体粒子示踪法是在流场中散布示踪粒子,将粒子的运动图像记录在 CCD 相机上,通过后处理获得流场的速度分布,用两相流 PIV 实验对实际尺寸大小的灌水器矩形和圆弧形流道内的流场进行了测量。实验选用随水性好的小颗粒铝粉(代表液相)和大颗粒二氧化硅(代表离散相)加入水中,基于流场可视化技术的迷宫流道流动测试,用微 PIV 实验台(图 9a)观察流道内部流动情况来验证 CFD 数值模拟。拍摄图片中铝粉呈黑色,而二氧化硅呈白色,大小和颜色的不同便于区分并跟踪各相粒子的速度及运动轨迹,从而得到其流场流线图。PIV 实验台与试件如图 9 所示。

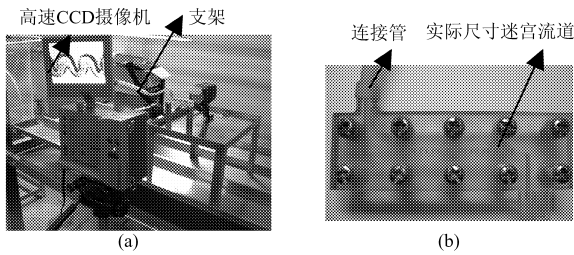


图 9 PIV 实验台整体图
Fig. 9 PIV experimental bed
(a) PIV 摄像机 (b) 实验件

设进口压力 40 kPa,粒子质量浓度 500 mg/L,图像大小为 640 × 480 像素,用高速 CCD 摄像机拍摄图如 10a 所示,将 PIV 后处理流线图(图 10b)与 CFD 模拟的液相速度流线图结果相对照,发现两者吻合较好,证实了对迷宫流道灌水器进行 CFD 数值模拟的可行性和准确性。

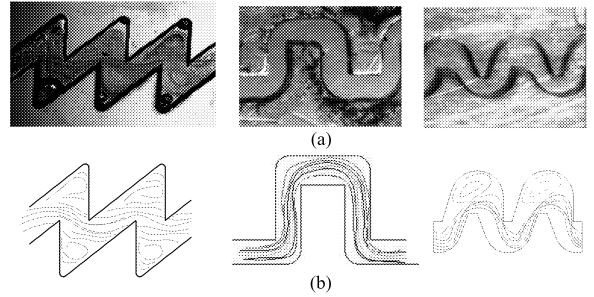


图 10 PIV 测试迷宫流道结果
Fig. 10 PIV experimental results
(a) PIV 测试摄像机拍摄图 (b) 后处理迷宫流道单元内流线图

3 微压灌水器堵塞性能实验分析

利用迷宫流道水力性能实验台(图 11)以清水来精确测量流道在 10~50 kPa 之间的流量-压力关系,用 Matlab 软件拟合出不同区间的流量-压力曲线 $Q = kH^x$,评价数值分析的精确性,参照流态指数大小是否符合工作要求。

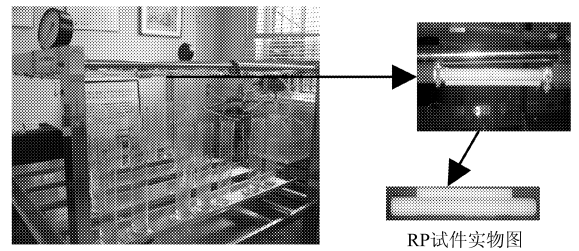


图 11 水力性能实验台整体图
Fig. 11 Hydraulics performance experimental bed

短周期灌水器堵塞测试实验台测定 40 kPa 工作压力下灌水器的流量随时间的变化关系。灌水器堵塞实验方案参考了“短周期灌水器堵塞测试程序”来设计,选用天然河砂粒径的选配从 F60 至 F220,验证在微压下灌水器短周期的出水均匀度和抗堵塞性能。灌水器压力-流量关系曲线和短周期堵塞实验中矩形迷宫流道灌水器流量随时间变化曲线,分别如图 12a、12b 所示。

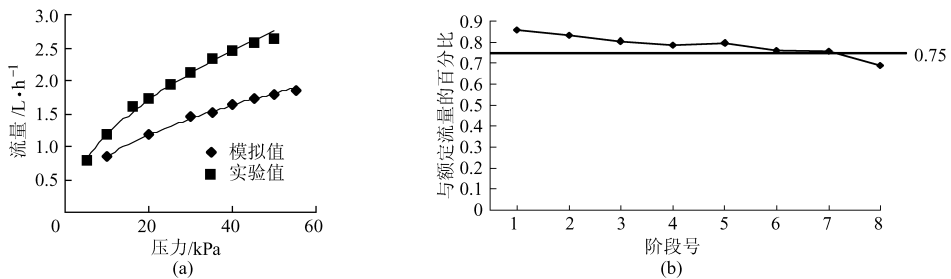


图 12 水力性能实验曲线
Fig. 12 Hydraulics performance experimental curves
(a) 压力-流量关系 (b) 堵塞实验

以上实验结果分析可知,由于试件的制造误差、压力不稳定等原因,使得矩形迷宫滴灌带在工作压

力 40 kPa 时,实验流量在 2.3 L/h 左右,流量偏大。由实验灌水器流量随时间的变化曲线可知,随着时

间和沙粒含量的增加,灌水器流量也逐渐减小,下降量很多,超过了标准要求,设计的流道其抗堵性能较差。通过设计正交实验找出单元关键参数与灌水器水力性能试验的影响规律曲线,从而合理地减小单元数或者增加截面尺寸,以改善灌水器性能。

4 微压灌水器结构的优化设计

根据 CFD 模拟实验和一系列实际实验可以看出,微压情况下灌水器更容易堵塞,因此应着手设计灌水器来尽量减小沙粒的沉积,并达到适宜的流量。灌水器迷宫流道内的流动滞止区是造成堵塞的重要因素,基于此对整体流道进行抗堵优化设计,并对优化后迷宫流道和进出口进行 CFD 分析。

(1) 优化后矩形流道模拟流线和粒子轨迹图 (图 13)

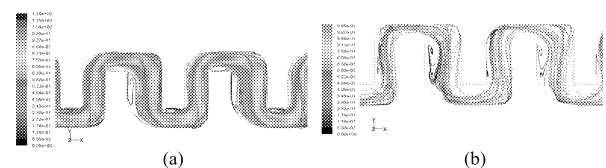


图 13 优化后矩形流道流线和粒子轨迹图

Fig. 13 Optimization of rectangle labyrinth channel simulation
(a) 流线图 (b) 沙粒轨迹图

(2) 优化后锯齿流道流线和粒子轨迹图 (图 14)

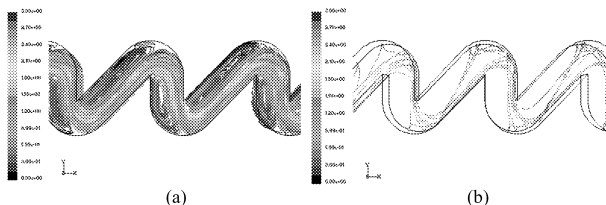


图 14 优化后锯齿流道流线和粒子轨迹图

Fig. 14 Optimization of sawtooth labyrinth channel simulation
(a) 流线图 (b) 沙粒轨迹图

(3) 优化后圆弧流道的流线和粒子轨迹图 (图 15)

由图 13~15 可以看出,流线主流体与流道形状很接近,粒子大部分沿主流流出,少数进入低速区;通过圆角的方式拐角处的漩涡已经被缩减得很小,

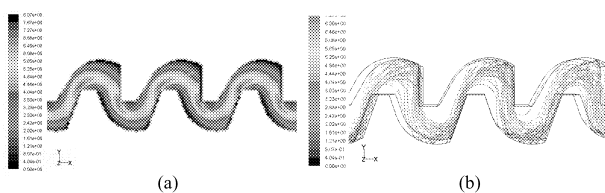


图 15 优化后圆弧流道流线和粒子轨迹图

Fig. 15 Optimization of arc labyrinth channel simulation
(a) 流线图 (b) 沙粒轨迹图

减少了沙粒在此处的沉积,但是没有完全消除,需要更进一步在结构单元尺寸上改进。

(4) 优化后的流道进出口流线和粒子轨迹图 (图 16)

因流道进出口结构与数量对流量和沙粒沉积也有一定的影响,所以将进口数目从 5 个减少到 3 个,出口数目由 3 个减少到 2 个来进行结构优化改进。由图 16 分析可知,进出口流速比优化前的进出口流速较均匀,速度也相对较高,减少了沙粒在进出口沉积率,有助于抗堵性能的提高。

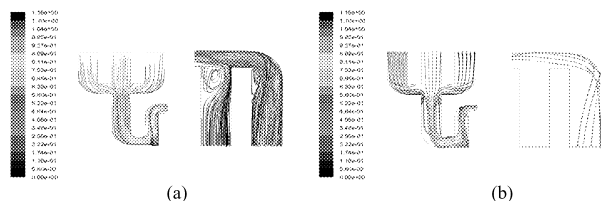


图 16 优化后进出口流线和粒子轨迹图

Fig. 16 Optimization of inlets pathlines and outlets particle tracks
(a) 进出口流线图 (b) 进出口粒子轨迹图

5 结论

(1) 基于计算流体力学的流量预测方法建立微压灌水器模型,并结合光固化快速成型制作试件进行水力性能和抗堵塞实验,检验了利用 CFD 的方法预测灌水器在一定工作压力下流量的可行性。

(2) 利用水沙两相流 CFD 方法分析微压灌水器内部流场和堵塞机理,并采用两相流 PIV 技术来检验数值模拟的正确性,基于此对微压灌水器结构进行了优化。

参 考 文 献

- 1 范永申,仵峰,李金山,等. 微压滴灌水器的研制[J]. 节水灌溉,2005(4):34~35.
Fan Yongshen, Wu Feng, Li Jinshan, et al. Manufacture of dripping irrigation emitter with lower water pressure[J]. Water Saving Irrigation, 2005(4): 34~35. (in Chinese)
- 2 仵峰,范永申,李金山,等. 低压条件下灌水器水力性能试验研究[J]. 节水灌溉,2003(1): 14~16.
Wu Feng, Fan Yongshen, Li Jinshan, et al. Experimental study on hydraulic characteristic of emitter under low pressure[J]. Water Saving Irrigation, 2003(1): 14~16. (in Chinese)
- 3 范永申,仵峰,宰松梅,等. 新型微压滴灌水器水力性能试验研究[J]. 灌溉排水学报,2006,25(5): 39~40.

- Fan Yongshen, Wu Feng, Zai Songmei, et al. Experimental study on hydraulic property of emitters with tiny water pressure [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2006, 25(5): 39~40. (in Chinese)
- 4 宰松梅, 仵峰, 范永申, 等. 淹没出流条件下滴灌水器水力性能试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2004, 23(5): 59~61. Zai Songmei, Wu Feng, Fan Yongshen, et al. Experimental study on emitters' hydraulics under submergence condition [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2004, 23(5): 59~61. (in Chinese)
- 5 Bhatnagar P R, Srivastava R C. Gravity-fed drip irrigation system for hilly terraces of the northwest Himalayas [J]. *Irrigation Science*, 2003, 21(4): 151~157.
- 6 Jeskia Chigerwe. Low head drip irrigation kits and treadle pumps for smallholder farmers in Zimbabwe: a technical evaluation based on laboratory tests [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2004, 29(15~18): 1 049~1 059.
- 7 Paulau Salvador, Bralts J V F. Hydraulic flow behavior through an in-line emitter labyrinth using CFD techniques [C]. *ASAE Paper*, 2004.
- 8 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 Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(3): 12~16. (in Chinese)
- 9 王福军, 王文娥. 滴头流道 CFD 分析的研究进展与问题 [J]. *农业工程学报*, 2006, 22(7): 188~193.
- 10 魏正英. 迷宫型滴灌水器结构设计 with 快速开发技术研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2003. Wei Zhengying. Structural design and rapid development of labyrinth drip irrigation emitters [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2003. (in Chinese)
- 11 邵雪明, 颜海霞, 辅浩明. 两相流 PIV 粒子图像处理方法的研究 [J]. *实验力学*, 2003, 18(12): 445~451. Shao Xueming, Yan Haixia, Fu Haoming. Research on the particle image velocimetry for two-phase flow [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2003, 18(12): 445~451. (in Chinese)
- 12 牛文全. 微压滴灌技术理论与系统研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006. Niu Wenquan. Theory and system research of micro-pressure drip irrigation technology [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2006. (in Chinese)
- 13 王福军. 计算流体动力学分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- 14 张俊, 魏公际, 赵万华, 等. 灌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): 589~594. 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): 589~594. (in Chinese)
- 15 魏正英, 唐一平, 李涤尘, 等. 农业节水灌溉微滴头的快速开发 [J]. *农业机械学报*, 2001, 32(6): 45~48. Wei Zhengying, Tang Yiping, Li Dichen, et al. Rapid developing technique for mini-emitters of water-saving irrigation [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2001, 32(6): 45~48. (in Chinese)

沉痛哀悼袁矿苏教授

2008年9月23日,我国老一辈著名的农业机械专家和教育家、合肥工业大学教授(原安徽工学院院长)袁矿苏同志因病医治无效在合肥逝世,享年94岁。

袁矿苏同志1915年9月出生于湖南宁乡,1939年毕业于国立湖南大学机械系,1945年~1946年在美国依阿华州立大学农业工程系留学。1949年5月参加工作,历任上海华东工业部吴淞机器厂(上海柴油机厂前身)副厂长、上海华东工业部机器工业局生产处科长、北京第一机械工业部四局及汽车局副处长。1958年4月担任吉林工业大学农机系主任,1980年1月任安徽工学院院长,1981年晋升为教授,1981年12月~1983年9月任安徽工学院院长。

袁矿苏同志曾任国家科委农业工程学科组成员、中国农业机械第三届理事会理事、安徽省农业机械学会第三届理事会名誉理事长。袁矿苏同志教学经验丰富,具有很高的专业素养和理论水平,在农业机械领域享有一定声誉,他为农业机械行业培养了大批的科研人才,他的逝世是我国农业机械领域的重大损失。