

单翼迷宫灌水器进口流场数值模拟与结构优化

王新坤, 李亚飞

(江苏大学 流体机械工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013)

摘要: 针对单翼迷宫式滴灌灌水器工程应用中, 大多数堵塞都发生在灌水器进口及其邻近区域的问题, 对单翼迷宫式滴灌灌水器进口结构特性和水力性能进行分析, 并对内部流场的计算流体进行动力学(CFD)数值模拟研究, 发现目前广泛使用的单翼迷宫式滴灌灌水器的进口在实现灌水器多进口安全保障、过滤、抗堵塞等功能方面的设计存在不足之处. 应用 CAD - CFD 技术改进单翼迷宫式滴灌灌水器进口的结构, 优化其水力性能. 改进后的灌水器 5 个进口流量基本相同, 流速分布也较为均匀. 不存在超低流速区, 能有效减少灌水器进口的沉积和堵塞, 提高灌水器的抗堵塞能力, 实现了多进口的安全保障功能.

关键词: 滴灌灌水器进口; 水力性能; 数值模拟; 结构优化; 计算流体动力学

中图分类号: S275.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005 - 6254(2009)01 - 0060 - 04

Numerical calculation and structural optimization for inlet flow field of single wing labyrinth drip irrigation emitter

Wang Xinkun, Li Yafei

(Technical and Research Center of Fluid Machinery Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract: Through the survey about the clog for using emitters, it is found that clog happens in the inlets and their neighboring regions. From the investigation about the structure characteristic, the hydraulic performance analysis and numerical simulation of the internal flow field for the inlet of single wing labyrinth drip irrigation emitter, which are extensively used now, we conclude that there are disadvantages in the design of the emitter multi-inlets safety control, filtration, anti-clogging functions and so on. CAD is used to modify the structure and size. CFD is used to optimize hydraulic performances of single wing labyrinth drip irrigation emitters. It is found that there is a similar flow rate among the five inlets, and well-proportioned flow velocity distribution in the inlets. As a result, there is no ultra-low velocity region, the sediment of the inlets region is reduced, the anti-clogging ability of the emitter is improved, and the safeguard function of the multi-inlets is realized.

Key words: inlet of drip irrigation emitter; hydraulic performance; numerical calculation; structural optimization; CFD

滴灌作为一种高效节水灌溉技术, 具有灌水均匀、高效节水节肥、增产增收、便于管理等优点, 被各

国广泛应用. 灌水器是滴灌技术的核心部件, 其成本占滴灌系统造价的 25% ~ 35%. 灌水器流道结构、

收稿日期: 2008 - 06 - 17

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK2008246); 国家“863”计划项目(2006AA100211); 江苏大学校基金资助项目(08JDC002)

作者简介: 王新坤(1966—), 男, 陕西临潼人, 博士, 高级工程师(xjwzk@126.com), 主要从事节水灌溉理论与新技术的研究.

李亚飞(1982—), 男, 湖北天门人, 硕士研究生(liyu0912@163.com), 主要从事节水灌溉理论与新技术的研究.

尺寸等因素决定了其出流稳定性、抗堵能力等水力性能,水力性能的优劣对滴灌系统的造价、能耗、灌水质量及使用寿命等具有决定性的作用。

国外关于滴灌灌水器流道设计方面具有实际指导意义的研究论文极少见^[1,2]。国内采用常规水力学试验,通过统计回归分析,对迷宫式灌水器的压力-流量关系、滴水均匀性、抗堵塞性能及流道结构对水力性能的影响进行了试验研究^[3,4];同时应用CFD数值模拟^[5,6]、微流体粒子图像测速(Micro-PIV)^[7]及激光多普勒测速(LDV)^[8]等技术,开展迷宫主流道内部流动机理、消能机理的理论分析及微观可视化测试研究,在灌水器流道构建、内部流场分析、设计理论等方面取得了诸多成果,但上述研究大都是针对灌水器主流道进行研究,没有关于灌水器进口部分水力性能的研究,缺乏对灌水器进口水力设计及结构合理性评价的理论研究。

单翼迷宫式灌水器是大田膜下滴灌系统中主要滴灌灌水器之一。如图1所示,对单翼迷宫滴灌灌水器工程应用中的堵塞情况调查显示,大多数堵塞都发生在灌水器进口及其邻近区域。本研究对单翼迷宫滴灌灌水器进口流场进行数值模拟及结构优化研究,对于改进灌水器进口结构,增强灌水器抗堵塞能力,提高滴灌工程灌水质量及使用寿命等具有重要的意义。

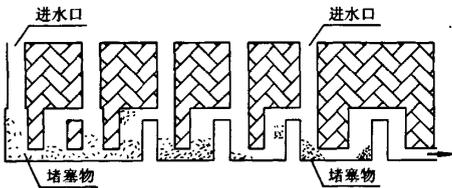


图1 单翼迷宫滴灌灌水器进口堵塞状况示意图
Fig.1 Schematic diagram state of clog for inlet of single wing labyrinth drip irrigation emitters

1 灌水器进口流道结构及水力性能

1.1 单翼迷宫式滴灌灌水器进口流道结构

如图2所示,目前工程中所用的单翼迷宫式滴灌灌水器的进口由5个进口单元组成,各进口单元采用近似于串联的方式进行连接,汇总到一个出口后与主流道相连接。

1.2 单翼迷宫式滴灌灌水器进口水力特性分析

灌水器流道进口是滴灌系统毛管与灌水器主流道的连接部,一般都有多个进水口,以保证当个别进

口被堵塞后,还有其他灌水器进口能够正常运行。灌水器流道进口应设置滤网,当不具备设置滤网的条件时,进口尺寸宜小于主流道尺寸,起到过滤水中杂质的功能,减少主流道堵塞的几率。由图2可知,5个单翼迷宫式滴灌灌水器进口的尺寸与主流道尺寸接近,难以起到良好的过滤作用。由于5个进口端的工作压力均为毛管内的水压力,而5个进口端至主流道所流经的路径长度却相差较大,将导致水流阻力的较大差异,那么通过5个进口的流量也会出现较大差异,过流量小的进口流速较小,携带杂质的能力也相对较弱,容易造成堵塞。而且5个进口为串联连接结构,当某个进口被堵塞后,其上游所有进口都将失去作用,使得多进口的设计意图无法实现。

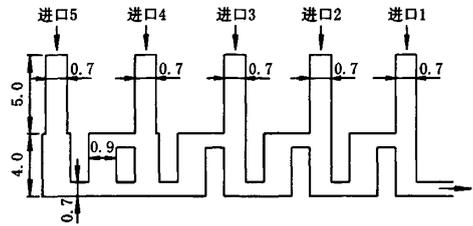


图2 单翼迷宫滴灌灌水器进口结构示意图
Fig.2 Inlet structure of single wing labyrinth drip irrigation emitter

2 灌水器进口流场数值模拟

传统的水力学试验只能获得灌水器的整体水力特性,难以对灌水器各个部分的水力特性进行研究,近年来兴起的CFD数值模拟方法为滴灌灌水器内部流动机理的研究提供了便捷的手段^[9-13]。尽管目前CFD数值模拟还难以达到灌水器微细流道精确计算及量化分析的程度,但对于反映流道内部流动规律及压力-流量关系趋势是完全可以满足要求的。因此本研究应用CFD数值模拟分析单翼迷宫滴灌灌水器进口流道内流场的流量、流速分布规律,对其水力特性做进一步研究。

应用商用CFD软件Fluent的RNG $k-\epsilon$ 模型对单翼迷宫滴灌灌水器进口流场进行三维数值模拟,在计算区域内,采用六面体网格单元进行CFD仿真计算。离散方法采用有限体积法,利用GAMBIT划分网格,网格单元长度为0.15 mm。滴头流道进口设为压力进口,设定压力为100 kPa;流道出口设置压力出口,设定压力为0。模拟计算得到的灌水器进口1至进口5的流量百分比分别为73.10%, 19.40%, 4.93%, 1.60%和0.97%,流速分布见图3。



图3 进口流速分布图

Fig.3 Distribution of flow velocity in inlets

由此可知,进口1的流量占到了总流量的73.10%,进口1,进口2合计为总流量的92.50%,进口5的过流量还不到1.00%,各进口流量的分布严重失衡.图3显示了进口的流速分布状况,进口流速从进口1至进口5呈现大幅度下降的趋势,与流量分布相似,进口1,进口2占据主导地位,而其他3个进口的流速非常小,易发生沉积堵塞,灌水器进口CFD数值模拟与水力特性分析结果及实际应用基本相符.

3 灌水器进口结构改进与优化

对单翼迷宫滴灌灌水器进口的改进是通过改变进口结构与尺寸,达到优化进口水力性能、提高灌水器抗堵塞性能的目标,同时灌水器的压力-流量关系应保持不变.将原串联连接改为并联结构方式,各进口的尺寸要小于主流道尺寸,通过CFD数值模拟预测进口水力性能,调整各个进口尺寸,使各进口至主流道的水流阻力相同,保证各进口通过的流量相同.为便于与原结构进行对照,采用与原灌水器相同的进口数目,以图4所示的结构形式,采用CAD-CFD进行性能预测、改进与优化.优化后进口1至进口5的流量百分比分别为19.90%,19.90%,20.28%,19.90%和20.02%,流速分布见图5.

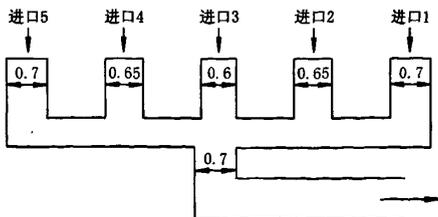


图4 改进后进口结构示意图

Fig.4 Structure of improved inlet

由此可知,改进后的灌水器5个进口流量基本相同,流速分布也较为均匀,表明每个进口获得了均等的过流机会,即使个别进口发生堵塞,不会阻碍其

他进口水流的通过.不存在超低流速区,能有效减少灌水器进口的沉积和堵塞,提高灌水器的抗堵塞能力,说明改进后的进口结构和水力性能都得到了优化.

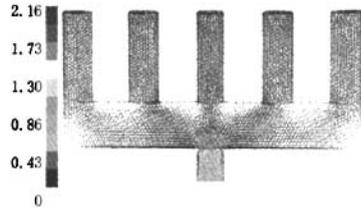


图5 改进后进口流速分布图

Fig.5 Distributing of flow velocity in improved inlet

4 结论

根据单翼迷宫式滴灌灌水器实际应用调查结果和进口结构特性,对进口结构水力性能、抗堵塞能力及设计合理性等进行了分析,应用CFD数值模拟方法,对分析结果进行了验证.

1)目前单翼迷宫式滴灌灌水器5个进口的尺寸与主流道尺寸接近,难以起到良好的过滤作用;5个进口到达主流道所遇到的水流阻力差异较大,通过的流量差异较大,存在低流速区,容易造成堵塞;进口的串联连接结构,无法实现多进口的安全保障功能.

2)将CAD和CFD技术有机结合,可建立灌水器的CAD-CFD结构改进与优化设计的系统方法.以提高灌水器性能指标为目标,采用CAD技术修正过流部件结构及尺寸,用CFD技术分析其内部的流动状态,预测灌水器性能,判断设计的合理性,通过优化相关的几何参数,保证灌水器具有良好的综合性能.通过对单翼迷宫式滴灌灌水器进口的改进与优化,说明该方法具有较好的有效性和实用性,可以降低灌水器结构改进和优化设计的费用,缩短研制周期.

参考文献(References)

- [1] Madramootoo C A, Khatri K C, Rigby M. Hydraulic performances of five different trickle irrigation emitters [J]. *Canadian Agricultural Engineering*, 1988, 30 (1):1-4.
- [2] Yildirim G, Agiralioğlu N. Linear solution for hydraulic analysis of tapered micro-irrigation laterals [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 2004, 130

- (1):78-87.
- [3] 张新燕,陈凤,李华莹.单翼迷宫贴壁式滴灌带水力性能初步试验研究[J].干旱地区农业研究,2004,22(4):225-228.
Zhang Xinyan, Chen Feng, Li Huaying. The Research of the hydraulic properties in drip irrigation tape resisting blockage[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2004, 22(4):225-228. (in Chinese)
- [4] 王建东,李光永,邱象玉,等.流道结构形式对滴头水力性能影响的试验研究[J].农业工程学报,2005,21(增刊):100-103.
Wang Jiandong, Li Guangyong, Qiu Xiangyu, et al. Effects of flow passage forms on hydraulic performance of emitters[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(s1):100-103. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 闫大壮,杨培岭,任树梅.滴头流道中颗粒物质运移动态分析与CFD模拟[J].农业机械学报,2007,38(6):71-74.
Yan Dazhuang, Yang Peiling, Ren Shumei. Study on dynamic analysis of particle movement in drip emitter based on CFD[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(6):71-74. (in Chinese)
- [7] 李云开.滴头分形流道设计及其流动特性的试验研究与数值模拟[D].北京:中国农业大学水利与土木工程学院,2005.
- [8] 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. Anti-clogging design method for the labyrinth channels of drip irrigation emitters[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(6):1-7. (in Chinese)
- [9] Nilsson H, Davidson L. Validations of CFD against detailed velocity and pressure measurements in water turbine runner flow [J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2003, 41:863-879.
- [10] Palau S G, Arviza V J, Bralts V F. Hydraulic flow behaviour through an in-line emitter labyrinth using CFD techniques[C]. *ASAE/CSAE Annual International Meeting*. Ottawa:[s.n.], 2004.
- [11] Palau S G, González A P, Arviza V J. Numerical modeling of cavitating flows for simple geometries using FLUENT V6.1[J]. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 2007, 5(4):460-469.
- [12] 石祥钟,于佐东,肖英奎.水力机械CAD-CFD系统设计方法[J].农业与技术,2005,25(3):142-144.
Shi Xiangzhong, Yu Zuodong, Xiao Yingkui. The CAD-CFD system design method for hydro-machine[J]. *Agriculture & Technology*, 2005, 25(3):142-144. (in Chinese)
- [13] 任涛,闫永强,梁武科. CFD技术在离心泵优化设计中的应用[J].排灌机械,2007,25(1):26-28.
Ren Tao, Yan Yongqiang, Liang Wuke. Application of CFD to optimization design for centrifugal pump [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2007, 25(1):26-28. (in Chinese)

(责任编辑 赵 鸥)