

压力补偿灌水器分步式计算流体动力学设计方法

王立朋, 魏正英*, 邓 涛, 唐一平

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049)

摘 要: 为提高压力补偿灌水器的设计和研发效率, 该文采用计算流体动力学 (computational fluid dynamics, CFD) 分析方法, 结合有限元分析技术, 提出一种压力补偿灌水器的分步式 CFD 设计方法, 研制了圆柱式压力补偿灌水器, 并进行了灌水器流量预测, 得到其设计压力-流量曲线。利用光固化快速成型技术, 快速制作出压力补偿灌水器试验件, 进行了水力性能试验, 得到了灌水器试验压力-流量曲线, 发现通过分步式 CFD 计算得到的预测压力-流量曲线, 与水力性能试验得到的试验压力-流量曲线在压力补偿灌水器的有效工作压力区间内吻合度良好, 验证了分步式 CFD 设计方法。在此基础上研究了压力补偿灌水器补偿区结构对其压力补偿性能的影响, 发现补偿区高度对灌水器补偿性能影响显著, 可以通过改变补偿区高度来设计不同补偿性能的灌水器。该研究对指导压力补偿灌水器的设计和开发具有一定的意义。

关键词: 灌溉, 计算流体力学, 压力, 灌水器, 水力性能试验, 压力-流量曲线, 压力补偿

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.11.015

中图分类号: S275.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-11-0086-07

王立朋, 魏正英, 邓 涛, 等. 压力补偿灌水器分步式计算流体动力学设计方法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(11): 86-92.

Wang Lipeng, Wei Zhengying, Deng Tao, et al. Step-by-step CFD design method of pressure compensating emitter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(11): 86-92. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

灌水器是影响滴灌系统性能的核心部件之一, 根据其工作性能可以将其分为非压力补偿式 (non pressure compensating, NPC) 和压力补偿式 (pressure compensating, PC) 灌水器^[1-4]。压力补偿式灌水器在一定工作压力范围内可以保持出口流量稳定, 使滴灌系统的灌水均匀度得到有效保证, 因此在实际应用中表现出极大优越性。

目前, 计算流体动力学 (CFD) 已被广泛应用于灌水器设计当中。Palau-Salvador 等^[5]、魏正英等^[2,6]、李云开等^[7]、魏青松等^[8]、张俊等^[9]、喻黎明等^[10]、金文等^[11]学者, 通过 CFD 技术对多种不同结构形式的迷宫流道内部流场及两相流场进行数值仿真以探索迷宫流道结构与灌水器水力性能及抗堵性能之间的关系。并通过粒子成像测速 (particle image velocimetry, Micro-PIV) 可视化试验观测了迷宫流道内部流场及颗粒运动状态, 验证了 CFD 计算结果。但压力补偿灌水器是三件式组装结构, 其内部水流的流动状态非常复杂, 流场内部存在固体元件与水流的相互作用, 且固体元件为软材料, 在水

流的作用下存在很大变形 (最大变形量约为膜片厚度的 2 倍), 数值计算很难有效进行。因此, 压力补偿灌水器的研制仍是以传统灌水器开发技术为主, 普遍存在开发周期长、费用高, 设计盲目性大、效率低、产品性能差等问题。对此, 本文提出了分步式 CFD 设计方法, 以 CFD 数值计算预测灌水器压力-流量关系、探索其水力性能, 以期实现一条以流体计算、CAD (computer aided design) 设计为基础, 快速成型技术和水力性能试验为依托, 精确水力性能试验为核心的压力补偿灌水器快速开发技术。

1 压力补偿灌水器分步式 CFD 数值计算

通过 CFD 数值计算检验灌水器结构 CAD 设计的合理性能够有效降低物理试验次数和耗费, 从而降低灌水器开发成本, 缩短研制周期。由于补偿区内部固体结构与水流的相互作用, 压力补偿灌水器 CFD 数值计算无法有效进行, 导致其快速研制技术路线被打断。本文根据压力补偿灌水器工作原理提出分步式 CFD 设计方法以完成其数值计算, 形成如图 1 所示的闭环压力补偿灌水器快速研制技术路线。

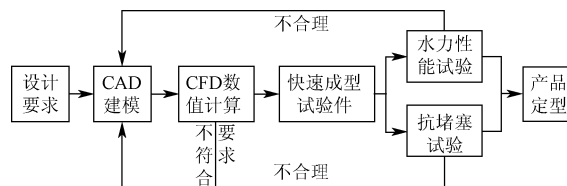


图 1 压力补偿灌水器快速研制技术路线
Fig.1 Rapid development route of pressure compensating emitter

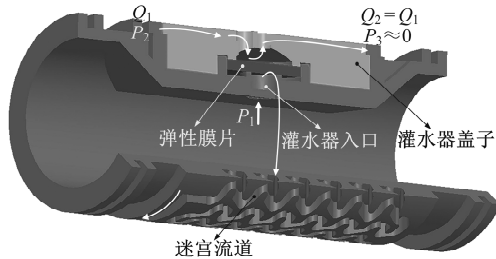
收稿日期: 2011-11-21 修订日期: 2012-05-21

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50975227); 全国博士学位论文作者专项项目 (FANEDD200740); 科技人员服务企业项目 (2009GJG41039)

作者简介: 王立朋 (1985—), 男, 河北石家庄, 主要从事滴灌灌水器 CFD 设计及快速开发技术研究。西安, 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049。Email: lpwang8511@163.com

※通信作者: 魏正英 (1967—), 女, 教授, 博士生导师, 西安, 主要从事微纳结构的快速设计制造及其可视化研究。西安, 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049。Email: zywei@mail.xjtu.edu.cn

压力补偿灌水器的结构及工作原理如图 2 所示，压力为 P_1 的水流经灌水器入口顶开弹性膜片进入迷宫流道，经迷宫流道消能后进入压力补偿区压力降为 P_2 ，在压力补偿区内与膜片相互作用，经压力补偿区出口到达灌水器上设置的缓水区后从灌水器出口流出滴灌系统。

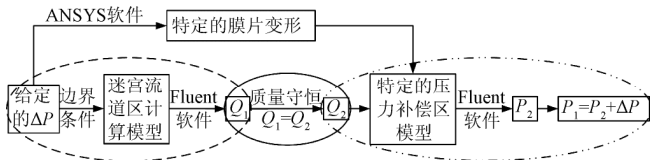


注： P_1 为灌水器入口压力； P_2 为压力补偿区内的压力； P_3 为灌水器出口压力； Q_1 为由迷宫流道流入补偿区的水流量； Q_2 为灌水器出口处的水流量。

图 2 圆柱式压力补偿灌水器的结构及工作原理

Fig.2 Structure and working principle of pressure compensating emitter

压力补偿灌水器分步式 CFD 计算方法总体流程如图 3 所示。该方法的思路是将灌水器内部水体(如图 4 所示)分割为迷宫流道区和压力补偿区分别进行数值计算。首先针对迷宫流道区采用 Fluent 软件进行 CFD 流量预测，然后结合膜片变形分析结果对压力补偿区进行与之对应的建模和数值计算，以预测整个压力补偿灌水器的压力-流量关系。一个模拟周期可以预测灌水器的一个特定的压力-流量对应关系 (P_1, Q_1)，最终通过多次的分步计算，可得到压力补偿灌水器的一系列压力-流量关系预测值，从而绘制出预测压力-流量关系曲线，即 $P-Q$ 曲线。



注：图中各字母定义同图 2， $\Delta P=P_1-P_2$ 。虚线椭圆为迷宫流道区部分；双点画线椭圆为压力补偿区部分；实线椭圆为分步计算的连接条件。

图 3 压力补偿灌水器分步式计算流体力学计算流程图

Fig.3 Computational fluid dynamics process with step-by-step method of pressure compensating emitter

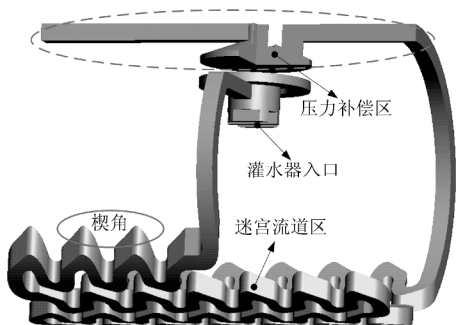


图 4 圆柱压力补偿灌水器内部水体整体模型

Fig.4 Integral model of water inside cylinder pressure compensating emitter

1.1 灌水器迷宫流道区的 CFD 计算

由于灌水器的实际成型工艺多为注塑成型，在灌水器设计时考虑了模具制造与开模的结构工艺性，首先确定了模具的分型面为灌水器设计基面，基体上的迷宫流道、进口处的过滤栅格等均垂直于设计基面进行设计^[6]。因此，在圆柱面迷宫流道上必然会形成很多楔角结构，这些楔角结构薄且非常尖，在对迷宫流道划分网格时，该结构对网格质量的影响十分显著。为了避免楔角结构给网格划分带来的困难，多数学者均采用平面计算模型来研究迷宫流道的水力特性，即将圆柱面迷宫流道展开为平面模型进行网格划分和 CFD 计算，但对该方法所预测流量的准确度却很少进行量化研究。本文采用了圆柱面迷宫流道原型作为数值计算的模型，迷宫流道单元长度为 3.0 mm，单元高 2.1 mm，流道入口截面长，即迷宫流道深度为 0.9 mm，宽 0.7mm。采用 Gambit 软件进行网格划分，基于分块网格的思想，通过在模型内部进行面的合并以及分割，建立大量虚拟面将流道原型进行体分割。然后，在贴体坐标系中分别将各分割体进行 Cooper 六面体网格划分，生成高质量的六面体网格(如图 5 所示)，网格大小为 0.1 mm，网格总数约为 105 万。在 Gambit 中定义迷宫流道区的入口和出口分别为压力入口和压力出口，并定义迷宫流道内外圆柱面为壁面边界。

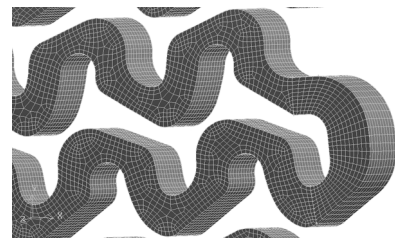


图 5 迷宫流道区的网格划分

Fig.5 Grid generation of labyrinth channel

进行流体计算首先要进行流动状态判别，通常采用雷诺数 R_e 来判别流体的流动状态，Nishimura 等^[12]研究了断面为矩形，纵截面带有强弯曲率的弯曲流道内的流动，发现层流、紊流转变发生在 $R_e=350$ 处。张俊等^[9]通过对迷宫流道内流动进行研究发现在 $R_e=250\sim 300$ 之间就过渡为紊流状态。李治勤等^[13]通过迷宫灌水器水流流态试验发现流道中水流可以在 $R_e=87.5\sim 125$ 时转变为紊流状态。远小于常规平直流道的临界雷诺数。雷诺数采用式 (1) 进行计算

$$R_e = \frac{D_e \bar{V}}{\nu} \quad (1)$$

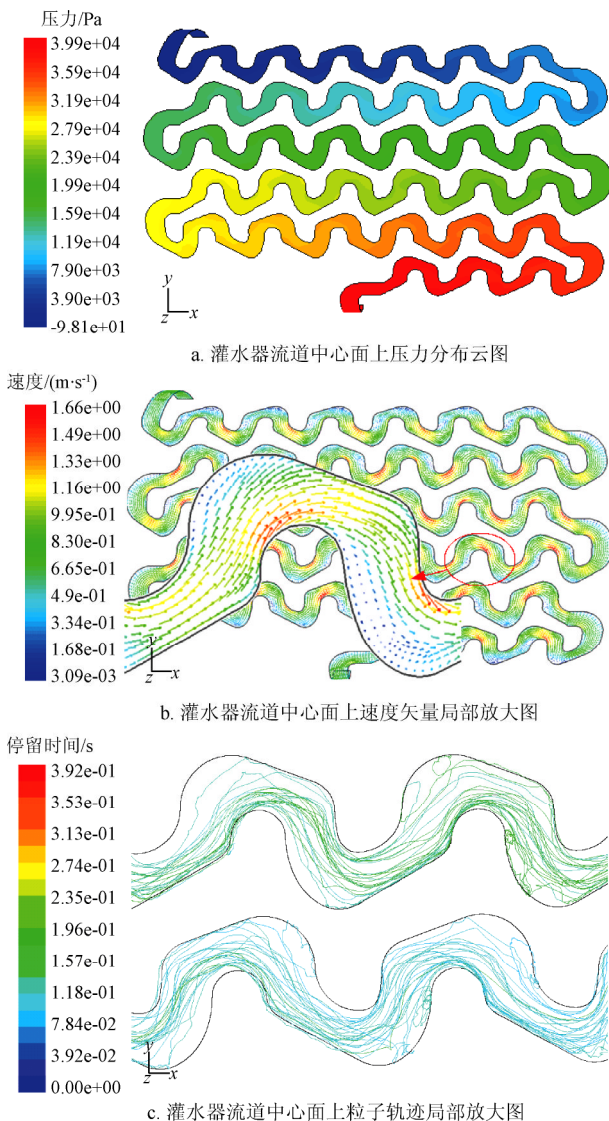
式中， ν 为流体的运动黏性系数，20°C 时水的运动黏性系数 $\nu = 1.003 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ； $\bar{V} = \frac{Q}{A}$ 为流体的平均速度，m/s；其中， Q 为灌水器流量， m^3/s ， A 为流道横截面(近似矩形)的面积， m^2 ； D_e 为当量直径，m，为水力半径 R 的 4 倍^[14]

$$R = \frac{a \cdot b}{2(a+b)} \quad (2)$$

式中， a 、 b 分别为流道横截面的长和宽， $A = a \times b$ 。对

于该流道 $a=0.9\text{ mm}$, $b=0.7\text{ mm}$ 。

根据灌水器的流量要求,在工作压力下(100 kPa),流量 $Q=1.5\sim 2.0\text{ L/h}$,可得相应的 $Re=519\sim 612$,流道内流体处于紊流态。考虑到迷宫流道内的旋转流动和小漩涡的影响,选用 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型求解灌水器内部流场。根据实际情况设置入口和出口均为压力条件,由小到大依次改变入口与出口间的压力差值,采用 Simple 压力速度耦合算法,二阶迎风离散格式求解不可压缩流体 Navier-Stokes 方程对流场进行求解,并统计在不同压差条件下迷宫流道区出口的流量,作为后续计算压力补偿区的入口边界条件。针对液固两相流动,由于在实际应用中,滴灌系统的前端过滤装置能滤掉水中大部分泥沙,灌溉水中沙粒的体积比远小于 5%,属于稀相流,因此在拉格朗日坐标系下采用离散相模型追踪了沙粒的运动轨迹。考虑到湍流脉动作用的影响,采用了随机轨道模型跟踪颗粒在流场中的运动。经过 CFD 计算,灌水器流道内的压力、速度分布及粒子轨迹追踪如图 6 所示。



注: 迷宫流道入口与出口的压差为 40 kPa。

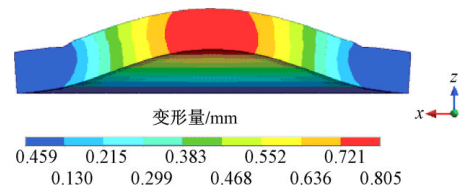
图 6 迷宫流道区 CFD 计算结果

Fig.6 Computational fluid dynamics simulation results of cylindrical channel

由图 6a 和图 6b 可知,流道内压力随流道单元平稳下降,流道内侧弯角处存在小面积的低速区,流道内主流区域宽,没有明显的漩涡存在。由图 6c 可知流道内颗粒运动轨迹与流场结构一致性较好,沙粒在流道内运动路径较平滑、停留时间很短,可预测流道内大部分杂质粒子能够沿主流区顺利流出,降低在灌溉水中沙粒的沉积几率,从而提高灌水器的抗堵塞性能。

1.2 灌水器压力补偿区的 CFD 计算

在灌水器工作过程中,补偿区体积的大小和补偿区内弹性膜的变形密切相关,因此对压力补偿区的 CFD 计算分以下 3 个步骤进行。首先,采用 Ansys12.0 软件模拟补偿区内弹性膜片在 ΔP 压力作用下的变形情况。本文设计的压力补偿灌水器所采用的弹性膜片直径 8 mm,厚度 0.84 mm,密度 $1\ 078.5\text{ kg/m}^3$,邵氏硬度 37,弹性模量 2.0 MPa,泊松比 0.46。在 Ansys workbench 环境中进行建模和网格划分,并将上述材料属性定义到结构模型中。定义弹性膜片外圆周面为固定约束,并在其下表面施加压力载荷,进行弹性膜片受力变形分析。以灌水器入口和出口的压差 $\Delta P=40\text{ kPa}$ 为例,在 Ansys 中求解得到膜片的变形图如图 7 所示。



注: 灌水器入口和补偿区内的压差为 40 kPa。

图 7 特定压差下弹性膜的变形剖面图

Fig.7 Deformation of elastic membrane

由于灌水器入口压力大于补偿区压力,弹性膜片向补偿区内部发生变形,导致补偿区体积变小,弹性膜片变形的上边界为补偿区底部边界。因此,只要得到膜片变形后上表面的变形信息就可以建立与膜片变形一一对应的压力补偿区几何模型。采用 Matlab 软件编写程序,从上一步 Ansys 计算结果中统计膜片上表面的变形信息,再通过 Pro/E 软件中绘制与之对应的样条曲线,就可以建模对应膜片变形后的补偿区水体模型,如图 8 所示。



图 8 对应 40 kPa 压差下的补偿区模型

Fig.8 Model of pressure compensating emitter cavity under pressure of 40 kPa

完成补偿区建模后,利用 Fluent6.3 软件对压力补偿区几何计算模型进行数值模拟,预测压力补偿灌水器的工作压力和出口流量的关系曲线。同样在 Gambit 软件中进行网格划分,采用四面体自适应网格划分,在膜片顶部与出口的狭窄间隙对网格进行局部加密。数值计算时补偿区入口边界条件设置为速度入口。入口处平均速度 V 由第一步迷宫流道区模拟得到的出口流量进行计算:

$$V = \frac{Q_2}{S} = \frac{Q_1}{S} \quad (3)$$

式中, $Q_2=Q_1$, m^3/s , 其定义如前所示, S 为压力补偿区入水口的横截面积, m^2 。当 $P_1=40\text{ kPa}$ 时, Q_1 为 1.764 L/h , 由此可得 $V=0.6049\text{ m/s}$ 。经过 CFD 计算得到压力补偿区的压力分布如图 9 所示。

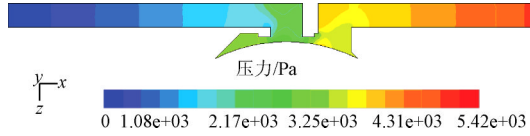


图 9 40 kPa 压差下压力补偿区压力云图

Fig.9 Contours of pressure compensating emitter cavity under pressure of 40 kPa

由图 9 可知, 在 ΔP 作用下, 压力补偿区入水口处的压力为 P_2 , 利用式 $P_1=P_2+\Delta P$ (其中 P_1 、 P_2 、 ΔP 的定义如前所示) 反向推导出 ΔP 作用下压力补偿灌水器进口压力 P_1 。于是, 就得到了压力补偿灌水器预测压力流量曲线上的一个点 (P_1 , Q_1)。通过有计划地给定一系列 ΔP 列值, 采用上述分步式 CFD 计算方法, 即可得到压力补偿灌水器预测压力流量曲线的一系列点, 进而做出预测压力-流量曲线 (具体见图 10)。

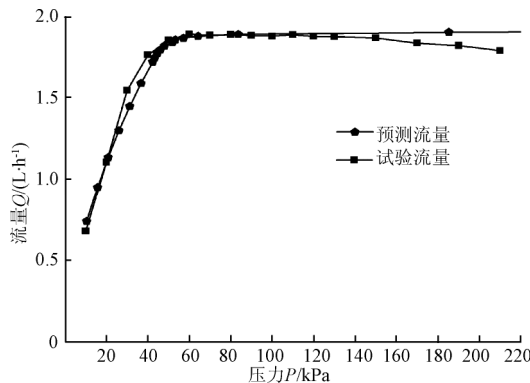


图 10 分步式 CFD 预测 $P-Q$ 曲线与试验 $P-Q$ 曲线对比

Fig.10 Compare of prediction and experiment $P-Q$ curves

从图 10 中预测压力-流量曲线可以看到, 当灌水器入口工作压力在小于 50 kPa 的范围内变化时, 其流量随压力增大迅速增大, 而当灌水器入口工作压力超过 50 kPa 后, 其流量表现出其稳定的特性, 不再随入口压力的升高而增加, 表现出了良好的压力补偿性能。

2 灌水器水力性能综合试验

2.1 压力补偿灌水器压力-流量试验

为了验证分步式 CFD 计算方法的可行性, 同时也为了评价压力补偿灌水器实际的工作性能, 采用光固化快速成型技术加工了灌水器试验件进行水力性能试验。按照《农业灌溉设备 滴头和滴灌管 技术规范和试验方法》和《中华人民共和国行业标准—微灌灌水器》^[15-16] (以下简称《方法》和《标准》) 进行灌水器压力-流量试验测定, 试验台实物如图 11 所示。在试验台进水端和排水

端均安装了精密压力表 (0.25 级, 最大示数 0.4 MPa) 以精确调整试验中灌水器工作压力, 在灌水器出口下方放置量筒用于测量灌水器出口流量, 根据试验结果绘制压力-流量关系曲线 (具体见图 10)。

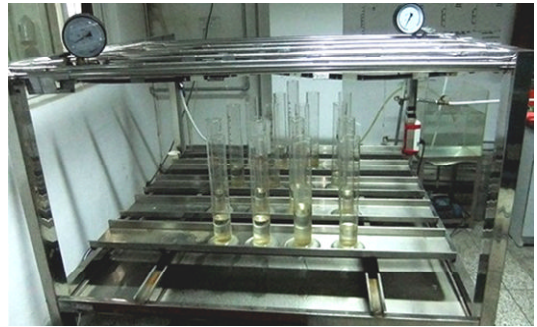


图 11 灌水器水力性能试验台

Fig.11 Hydraulic performance test bed of drip emitter

由试验压力-流量曲线可以看到, 该迷宫型圆柱压力补偿灌水器在 $50\sim 160\text{ kPa}$ 范围内表现出较好的压力补偿性能, 补偿区间大, 在工作状态下灌水器出口流量维持稳定, 在过高工作压力 ($P_1>170\text{ kPa}$) 时, 灌水器出口流量有较为明显的小幅下降。

2.2 灌水器抗堵塞试验

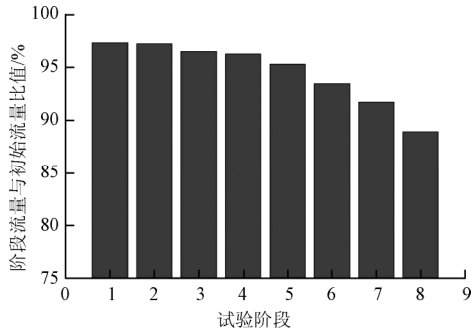
灌水器堵塞试验方案参考了 ISO 标准“ISO/TC 23/SC 18/WG5 N4 短周期堵塞测试程序”来设计^[17], 主要测定灌水器在水中只含有固体无机悬浮物的情况下流量随时间的变化关系。参照标准, 选用天然河沙进行试验, 其粒径具体分布如表 1 所示。

表 1 抗堵试验各阶段水中沙粒质量分数及其粒径分布
Table 1 Sand mass fraction and its size distribution during the anti-clogging test

试验阶段	粒径范围/mm								沙粒总质量分数 /%
	≤ 0.07	0.07~0.09	0.09~0.105	0.105~0.125	0.125~0.15	0.15~0.2	0.2~0.224	0.224~0.3	
1	0.25								0.25
2	0.25	0.25							0.50
3	0.25	0.25	0.25						0.75
4	0.25	0.25	0.25	0.25					1.00
5	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25				1.25
6	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25			1.50
7	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25		1.75
8	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	2.00

试验在室温条件下进行, 参照“短周期堵塞测试程序”对灌水器分 8 个阶段进行测试, 每个测试阶段持续约 50 min , 并按照表 1 所示粒子浓度分阶段依次添加对应粒径的河沙以提高各阶段水中沙粒浓度及粒径分布范围。试验过程中, 灌水器工作压力调整并保持在额定工作压力 (100 kPa), 控制管路末端流速约 1 m/s 。每个阶段内灌水器首先保持有压工作状态 15 min , 然后卸载系统压力并保持灌水器处于无压状态 30 min , 最后重新调整至有压工作状态并保持 5 min , 在每个试验阶段的 $10\sim 15\text{ min}$ 进行灌水器流量的测量。经过试验, 该斜弧

齿型流道灌水器的抗堵塞试验结果如图 12 所示。



注: 试验阶段见表 1。

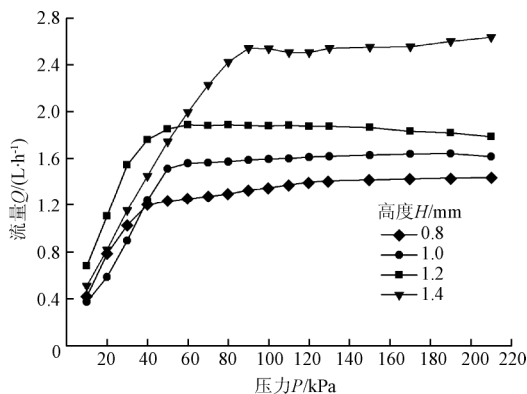
图 12 抗堵塞试验各阶段灌水器平均流量

Fig.12 Average flow rate of the emitter in anti-clogging test

ISO 标准中规定,当灌水器出口流量低于初始流量的 75%时认为灌水器开始堵塞,低于初始流量的 25%,则认为完全堵塞。由图 12 可知,经过 8 个阶段测试后,灌水器流量仍然保持在初始流量的 75%以上。可见该压力补偿灌水器抗堵塞性能良好,无机物杂质粒子能够顺利流出灌水器,有效地降低了堵塞的发生概率。

2.3 压力补偿区结构对灌水器压力补偿性能的影响

压力补偿式灌水器的压力补偿性能受压力补偿区结构的影响。灌水器压力补偿区高度 H (灌水器压力补偿区出水孔距离膜片的高度) 限制了弹性膜片的最大变形值及补偿区出口位置的过流断面面积,因此对压力补偿灌水器的工作性能有重要的影响。本文对不同的压力补偿区高度条件下灌水器的压力补偿性能进行了单因素试验研究,旨在探索灌水器工作性能与压力补偿区的高度之间的关系。在灌水器补偿区结构允许的范围内选取了 4 个水平 (H 分别设计为 0.8、1.0、1.2 和 1.4 mm) 采用光快速成型技术,加工了 4 种补偿区高度不同的压力补偿灌水器,按照《方法》和《标准》中的方法对灌水器进行压力-流量关系的测定,结果如图 13 所示。



注: H 为出水孔距离膜片的高度。

图 13 补偿区高度 H 对灌水器压力补偿性能的影响

Fig.13 Influence of H to emitter's hydraulic performance

由图 13 可知,压力补偿区高度增大时,压力补偿灌水器进入压力补偿状态的起调压力增大,同时,在补偿状态时,灌水器的流量也相应增大。分析其原因为,

当压力补偿区高度增大时,要调节压力补偿区出水口的过流断面面积为同样大小时,需要膜片的变形量增大,因此其进入补偿状态的起调压力值会有所增加,这也是补偿状态下灌水器流量增加的原因。图 13 的结果也说明,可以通过改变补偿区高度来改变灌水器的稳定流量及其进入压力补偿状态的起调压力值,从而可以设计针对不同应用场合的压力补偿灌水器。

3 压力补偿灌水器分步式预测结果与水力性能试验结果的比较与分析

如前所述,CFD 计算的有效性是压力补偿灌水器闭环快速开发线路得以顺利实现的关键。有效的 CFD 计算能够预测压力补偿灌水器设计模型的压力流量关系,即 $P-Q$ 曲线,进而能对其水力性能、抗堵性能进行模拟分析,使得参数化设计做到有的放矢,减少因盲目的试验和制作不合理试件造成的浪费,大大缩短研发周期,降低成本。为了对这种压力补偿灌水器分步式 CFD 计算方法的有效性进行检验,本文将直径 16 mm 圆柱压力补偿灌水器分步式 CFD 计算结果和水利性能试验结果进行了比较,如图 10 所示。

由图 10 可以看到,压力补偿灌水器采用分步式 CFD 计算方法得到的预测压力-流量曲线与水力性能试验得到的实际压力流量曲线在 50~160 kPa 的压力范围内吻合得较好,而在 20~50 kPa 范围内及 160 kPa 以上二者有一定偏差。但在 50~160 kPa 范围内两曲线均表现出了良好的压力补偿性能,试验压力-流量曲线在 170 kPa 时出现明显的下降。

产生以上问题的主要原因有三点:其一,试验中采用的弹性膜片均匀一致性存在问题;其二,本文设计的灌水器,在补偿区出口位置设计有微细凹槽作为灌水器在高工作压力下的泄水槽,由于建模可行性的限制,在 CFD 分析中,无论压力增加至何值,计算模型均未考虑膜片在大压力下进入泄水槽结构的情况,灌水器的出口断面面积最小为泄水槽结构的断面面积,所以随着压力的持续增大,灌水器流量依然维持在较稳定的值(见图 10)甚至表现出微小的上升趋势;然而,实际情况中弹性膜片完全有可能挤入泄水槽结构,此时灌水器出口过流断面尺寸会进一步减小,甚至有可能对灌水器补偿区出口形成封堵效应,从而导致流量有所下降;其三,水力性能试验过程中,随着压力增大,补偿区出水口断面面积减小,水中较大的颗粒杂质有可能被阻挡在出水口泄水槽位置,导致灌水器发生一定程度的堵塞,致其流量下降。

针对以上问题,后续的研究中可以通过选用材质均匀性更好的弹性膜片作为补偿区压力调节元件。本课题组也在研究通过流固耦合计算方法,将补偿区流固耦合行为进行考虑,采用瞬态计算模拟补偿区内部流固耦合行为,从而研究压力补偿灌水器性能与补偿区结构及弹性膜片之间的关系。通过对压力补偿区结构的优化,尤其是泄水槽结构的合理设计,能够提高压力补偿灌水器

的补偿性能。

4 结 论

1) 针对压力补偿灌水器数值模拟困难这个问题, 提出了一种分步式 CFD 计算方法, 利用 Fluent 软件预测了压力补偿灌水器的压力-流量关系。

2) 设计了迷宫型圆柱压力补偿灌水器, 采用快速成型技术快速加工了试验件原型, 进行了压力补偿灌水器的水力性能综合试验, 试验结果与分步式模拟结果进行对比, 验证了模拟结果, 证明了分步式 CFD 计算方法的可行性。

3) 对试验值与预测值的偏差进行了分析, 提出了分步式 CFD 计算方法进一步改善的方向, 即可以通过采用材料均一性更好的弹性膜片来作为压力补偿灌水器的调节元件, 改善灌水器的压力补偿性能。

4) 研究了压力补偿灌水器补偿区高度对灌水器压力补偿性能的影响, 发现补偿区高度与灌水器进入补偿状态的起调压力值及其稳定状态下的流量存在相关关系。因此, 可以通过改变压力补偿区高度来调节压力补偿灌水器的压力补偿性能。这对指导压力补偿灌水器的设计和开发具有一定的意义。

[参 考 文 献]

- [1] Dutta Deba Prasad. Characterization of Drip Emitters and Computing Distribution Uniformity in a Drip Irrigation System at Low Pressure under Uniform Land Slopes[D]. Mymensing: Bangladesh Agricultural University, 2008.
- [2] 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 (Transactions of the CSAE), 2005, 21(6): 1-7. (in Chinese with English abstract)
- [3] 刘春景, 唐敦兵, 郑加强, 等. 滴灌梯形迷宫滴头流道水力性能的响应曲面法优化[J]. 农业工程学报, 2011, 27(2): 46-51. Liu Chunjing, Tang Dunbing, Zheng Jiaqiang, et al. Optimization of hydraulic performance for drip irrigation trapezoidal labyrinth channel of emitter using response surface methodology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(2): 46-51. (in Chinese with English abstract)
- [4] 何静, 李光永, 刘志烽. 典型压力补偿滴头结构分析[J]. 节水灌溉, 2006(5): 29-31. He Jing, Li Guangyong, Liu Zhifeng. Analysis on the structure of typical pressure compensating emitters[J]. Water Saving Irrigation, 2006(5): 29-31. (in Chinese with English abstract)
- [5] Palau-Salvador G, Sanchis L H, González-Altozano P, et al. Real local losses estimation for on-line emitters using empirical and numerical procedures[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2006, 132(6): 522-530.
- [6] 魏正英, 唐一平, 程应社, 等. 一体式压力补偿灌水器快速设计新方法[J]. 中国机械工程, 2008, 19(12): 1387-1392. Wei Zhengying, Tang Yiping, Zhao Wanhua, et al. A new method for rapid design of the integral pressure-compensating emitters[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(12): 1387-1392. (in Chinese with English abstract)
- [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, 2005. Li Yunkai. Design of Fractal Flow Path for Emitters and Experiment Study and Modeling on its Fluid Mechanism[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [8] 魏青松, 史玉升, 鲁俊, 等. 滴灌灌水器低成本快速开发理论与方法研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(2): 17-21. Wei Qingsong, Shi Yusheng, Lu Jun, et al. Method and theory for rapid development of drip emitters for drip irrigation with low cost[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(2): 17-21. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张俊, 赵万华, 醋强一, 等. 基于计算流体力学的迷宫型灌水器流量预测[J]. 机械工程学报, 2007, 43(4): 159-162. Zhang Jun, Zhao Wanhua, Cu Qiangyi, et al. Prediction for discharges of labyrinth-channel emitters based on computational fluid dynamics[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(4): 159-162. (in Chinese with English abstract)
- [10] 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 Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 45-51. (in Chinese with English abstract)
- [11] 金文, 张鸿雁. 灌水器内流道流场 Micro-PIV 试验分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 12-17. Jin Wen, Zhang Hongyan. Micro-PIV analysis of flow fields in flow channel of emitter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(2): 12-17. (in Chinese with English abstract)
- [12] Nishimura T, Ohori Y, Kawamura Y. Flow characteristics in a channel with symmetric wavy wall for steady flow[J]. Journal of Chemical Engineering of Japan, 1984, 17(5): 466-471.
- [13] 李治勤, 马静. 迷宫灌水器水流流态试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 82-86. Li Zhiqin, Ma Jing. Experiment on flow pattern in labyrinth emitter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(1): 82-86. (in Chinese with English abstract)
- [14] Anderson J D, Wendt J F. Computational Fluid Dynamics[M]. Belgium: McGraw-Hill. 1995.

- [15] GB/T 17187—2009/ISO 9261:2004. 农业灌溉设备滴头和滴灌管技术规范 and 试验方法[S]. 中国标准出版社. 2010.
- [16] GB/T 19812.2—2005. 塑料节水灌溉器材压力补偿式滴头及滴灌管[S]. 2005.
- [17] Standards ISO. Clogging test methods for emitters[S]. ISO/TC23/SC18/WG5N4. 2003.
- [18] 杜少卿, 曾文杰, 施泽, 等. 工作压力对滴灌管迷宫流道灌水器水力性能的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(14): 55—60.
Du Shaoqing, Zeng Wenjie, Shi Ze, et al. Effects of working pressure on hydraulic performances of labyrinth path emitters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(14): 55—60. (in Chinese with English abstract)
- [19] 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 channel[J]. Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(10): 70—73. (in Chinese with English abstract)
- [20] Liu Jie, Wei Qingsong, Li An, et al. Experimental study on micro-pressure hydraulic characteristics of drip irrigation emitters with multiple types of channels[J]. Advanced Materials Research, 2011, 255-260, 3553—3557.

Step-by-step CFD design method of pressure compensating emitter

Wang Lipeng, Wei Zhengying*, Deng Tao, Tang Yiping

(State key Laboratory of Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In order to improve the design and development efficiency of the pressure compensating drip irrigation emitter, a step-by-step computational fluid dynamics (CFD) design method combined with finite element technology was proposed in the paper. The emitter flow rate was predicted by the step-by-step CFD method and the designed pressure-flow (P-Q) curve of the emitter was obtained. The test samples of pressure compensating emitter were manufactured by means of rapid prototype and manufacturing technology, the hydraulic performance experiment of the emitter was carried out and the experimental P-Q curve was obtained consequently. The results showed that the predicted values were coincident with the experimental results well within normal range of the emitter's working pressures, which verified the step-by-step CFD design method. On this basis, the influence of the emitter structure on its pressure compensating performance was studied, which showed that the height of pressure compensating chamber had significant effect on the emitter pressure compensating performance, based on that the series of pressure compensating emitter could be designed by changing the chamber height. This research can provide a reference for design and development of pressure compensating drip emitter.

Key words: irrigation, computational fluid dynamics, pressure, drip emitter, hydraulic performance experiment, pressure-flow curve, pressure compensating