doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.12.033

压力补偿式灌水器补偿腔结构参数对颗粒运动的影响

喻黎明[1]　余家锐[1]　李　娜[1]　钟　艺[2]　王昌满[2]　赵思懿[1]
(1.昆明理工大学现代农业工程学院,昆明 650500;2.云南交投生态环境工程有限公司,昆明 650500)

摘要:为解决颗粒在迷宫流道压力补偿式灌水器内大量沉积或堵塞以致影响灌水器正常工作的问题,采用 FSI 模拟固定垫片变形后,基于 CFD-DEM 耦合模拟,经试验对比验证其可靠性后,设计单因素及 Box-Behnken 响应面试验,分析了压力补偿腔内副流道截面积、压力补偿腔出口直径、压力补偿腔直径 3 个结构参数及其交互作用对灌水器抗堵塞性能的影响,通过建立回归模型预测灌水器颗粒停留率,综合判断灌水器的抗堵塞性能。结果表明:副流道截面积由 0.018 mm^2 提升至 0.054 mm^2 时,颗粒停留率降低 5.09 个百分点;压力补偿腔出口直径由 1.4 mm 下降至 0.8 mm 时,颗粒停留率降低 2.87 个百分点;且颗粒沉积受副流道截面积和压力补偿腔出口直径、副流道截面积和压力补偿腔直径两种交互作用影响显著,交互影响下颗粒停留率最低为 7.67%。拟合出颗粒停留率与压力补偿腔内副流道截面积、压力补偿腔出口直径、压力补偿腔直径 3 个结构参数的回归方程,可用于评判和预测灌水器抗堵塞性能,且推荐了一组副流道面积为 0.051 mm^2、压力补偿腔出口直径为 0.894 mm、压力补偿腔直径为 6.923 mm 的最优抗堵塞参数组合。通过研究压力补偿式灌水器堵塞机理,建立了能预测颗粒停留率的评判模型,降低了灌水器堵塞概率,提高了其稳定灌水时长,可为该类型灌水器抗堵塞性能设计提供理论支持。

关键词:压力补偿式灌水器;抗堵塞;预测模型;压力补偿腔;CFD-DEM
中图分类号:S275.6　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2023)12-0338-12　　**OSID**:

Effect of Pressure-compensated Irrigator Compensation Chamber Structure Parameters on Particle Movement

YU Liming[1]　YU Jiarui[1]　LI Na[1]　ZHONG Yi[2]　WANG Changman[2]　ZHAO Siyi[1]
(1. *Faculty of Modern Agriculture Engineering*, *Kunming University of Science and Technology*, *Kunming* 650500, *China*
2. *YCIC Ecological Environment Engineering Co.*, *Ltd.*, *Kunming* 650500, *China*)

Abstract: In order to solve the problem of massive deposition or blockage of particles in the labyrinth runner pressure-compensated irrigator to the extent of affecting the normal operation of the irrigator, after simulating the deformation of the fixed gasket by FSI, and based on the coupled simulation of CFD-DEM, and after verifying its reliability through experimental comparisons, the design of the one-factor and Box-Behnken response surface test was carried out to analyze the effects of the three structural parameters of the sub-runner cross-sectional area in the pressure-compensated chamber, the outlet diameter of the pressure-compensated chamber, the diameter of the pressure-compensated chamber and their interactions on the anti-clogging performance of the irrigator, and to make comprehensive judgments on the anti-clogging performance of the irrigator through the establishment of a regression model for the prediction of the particles retention rate in the irrigator. The results showed that the particle retention rate was decreased by 5.09 percentage points when the cross sectional area of the secondary flow channel was increased from 0.018 mm^2 to 0.054 mm^2; and the particle retention rate was decreased by 2.87 percentage points when the diameter of the pressure-compensated outlet was decreased from 1.4 mm to 0.8 mm. Particle deposition was significantly affected by two interactions, the cross-sectional area of the secondary flow channel and the outlet diameter of the pressure-compensated chamber, and the cross-sectional area of the secondary flow channel and the diameter of the pressure-compensated chamber, with

收稿日期:2023-05-15　修回日期:2023-07-04
基金项目:国家自然科学基金项目(52269011)和云南省重大科技专项(202302AE090024)
作者简介:喻黎明(1976—),男,教授,博士,主要从事节水灌溉理论与设备研究,E-mail:liming16900@163.com
通信作者:李娜(1978—),女,实验师,主要从事节水灌溉理论与设备研究,E-mail:kjclina@163.com

the lowest particle retention rate of 7.67% under the interaction. The regression equations of particle retention rate and three structural parameters, namely, cross-sectional area of the secondary flow channel in the pressure-compensated chamber, outlet diameter of the pressure-compensated chamber, and diameter of the pressure-compensated chamber, were fitted, which can be used to judge and predict the anti-clogging performance of the irrigator, and a set of optimal anti-clogging parameters with a secondary flow channel area of 0.051 mm^2, an outlet diameter of the pressure-compensated chamber of 0.894 mm, and a diameter of the pressure-compensated chamber of 6.923 mm were recommended. In conclusion, by studying the clogging mechanism of the pressure-compensated irrigator, a judgment model that can predict the particle retention rate was established, which reduced the probability of clogging of the irrigator and improved its stable filling time, and provides theoretical support for the design of anti-clogging performance of this type of irrigator.

Key words: pressure-compensated irrigator; anti-clogging; prediction model; pressure-compensated chamber; CFD－DEM

0　引言

现代农业处于快速发展阶段，传统灌溉方式也逐渐被滴灌等科学的灌溉方式取代，精准灌溉技术的应用是未来农业发展必不可少的一步，不仅节约水资源，也有利于水肥等养分因子直接输送到作物根部附近。压力补偿式灌水器作为实现精准灌溉技术的关键设备，在丘陵、边坡地区或大面积、长距离铺设的灌区得到了广泛应用[1]，因此延长其稳定灌水时长，减缓其堵塞发生概率，增加其寿命，成为众多学者的研究热点。灌水器堵塞主要诱因为物理堵塞，减少颗粒在灌水器内的沉积是从本质上进行灌水器抗堵塞优化的关键，对于颗粒在灌水器中的运动、沉积情况，有部分学者采用数值模拟的方法对其进行了可视化研究且已取得一定进展，翟英剑等[2]用计算流体动力学（Computational fluid dynamics，CFD）两相流数值模拟研究不同工作压力下颗粒在灌水器内运行轨迹，指出了粒径和随水性的关系；喻黎明等[3]通过计算流体力学－离散元法（Computational fluid dynamics－discrete element method，CFD－DEM）耦合数值模拟的方法指出不同流道结构参数对堵塞的影响；魏正英等[4]通过 CFD 两相流数值模拟观测颗粒的运动轨迹特点；部分学者采用可视化试验平台的方法直接观察颗粒的运动沉积情况，如郑超等[5]用该技术观测多种波形动态水压模式下颗粒物的停留时间；也有部分学者通过流固耦合（Fluid-structure-interaction，FSI）模拟研究了迷宫流道内流场分布[6-7]，借此从流场角度推导颗粒沉积的原因。

现研究大多停留在对流道堵塞上，亦或是关注结构对水力性能影响，未分析压力补偿腔参数对颗粒运动的影响。在发生堵塞或较大流量波动的灌水器内部出现颗粒在补偿腔内大量淤积，因补偿腔内颗粒淤积极易引起流量波动，甚至发生堵塞，因此本文基于双向 FSI 结合 CFD－DEM 探索补偿腔内副流道截面积、压力补偿腔出口直径、压力补偿腔直径 3 个结构参数对颗粒停留率的影响，结合 Box－Behnken 响应面法，探究其交互作用，通过回归分析建立补偿腔结构参数对颗粒停留率预测模型，完善灌水器设计方法，为后续设计提供参考。

1　压力补偿式灌水器堵塞状况分析

在现有实际灌溉用灌水器或试验用灌水器中选取出现堵塞或间歇堵塞及产生较大流量波动的灌水器，通过剖开多类多个灌水器，发现压力补偿腔内存留大量泥沙或副流道出现堵塞，且发现堵塞程度不同，因此选取 2 种堵塞程度差异较大的 2 类共 6 个（图 1b、1d、1e～1h）不同压力补偿式灌水器进行展示，图 1 中未剖开的为未灌水前灌水器外形图（图 1a、1c），其余为灌水后局部剖开展示图，灌水器内在补偿腔中均出现泥沙沉积。因补偿作用对压力补偿式灌水器流量起最终调控作用，且补偿作用受副流道截面积、压力补偿腔直径、压力补偿腔出口直径 3 个因素影响显著[6-7]，为保证延长灌水器稳定灌溉时间，减小其堵塞概率，本文选取上述 3 个因素展开研究。

2　材料与方法

2.1　压力补偿式灌水器几何形状

图 2 为本试验所用压力补偿式灌水器三维结构示意图，灌水器内流域主要包括迷宫流道、辅流道、压力补偿腔内流域 3 部分。灌水器水流从入口流入压力补偿腔上方，先后流经迷宫流道前段、辅流道、迷宫流道后段再进入压力补偿腔下方，经压力耗散后产生垫片上下压力差形成压力补偿作用。压力补偿腔内几何参数如图 3 所示，包括副流道宽度 L、副流道高度 H、压力补偿腔直径 D_1、压力补偿腔出口

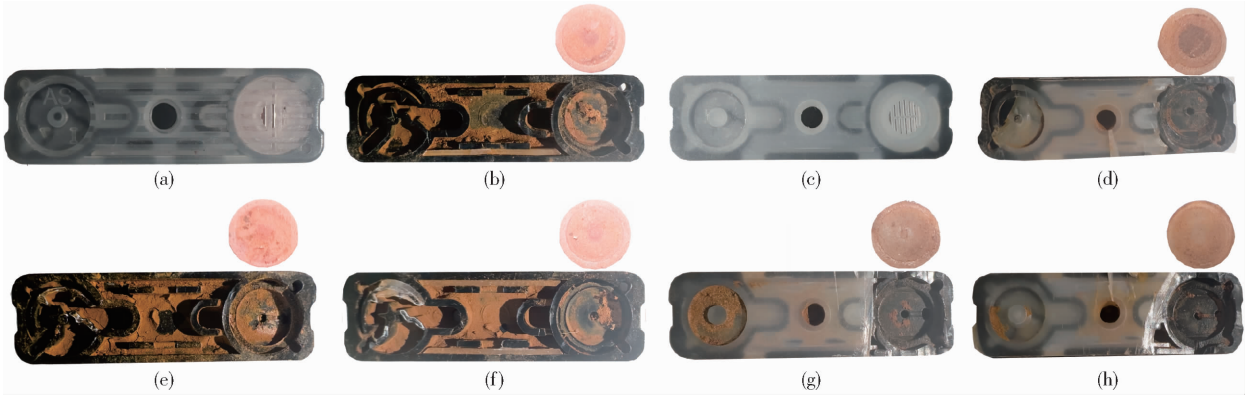

图 1 压力补偿式灌水器灌水前后对比

Fig. 1 Pressure-compensated irrigator before and after irrigation comparison chart

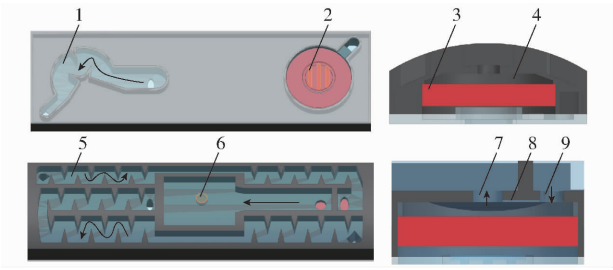

图 2 压力补偿式灌水器结构示意图

Fig. 2 Pressure-compensated irrigator diagram

1. 辅流道 2. 入口 3. 弹性垫片 4. 压力补偿腔 5. 迷宫流道 6. 出口 7. 压力补偿腔出口 8. 副流道 9. 压力补偿腔入口

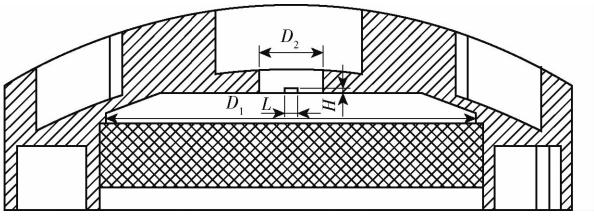

图 3 压力补偿腔内结构参数示意图

Fig. 3 Structural parameters in pressure-compensated chamber

直径 D_2,压力补偿腔高度为 0.52 mm。

2.2 数学模型

2.2.1 湍流模型

灌水器内流体可视为粘性不可压缩的流体,非定常流动,考虑重力对水流的影响,忽略表面张力的影响。选择剪切应力传输(Shear stress transfer, SST)$k-\omega$ 模型进行数值模拟,其质量和动量方程可以表示为[8]

$$\nabla \cdot \boldsymbol{v} = 0 \tag{1}$$

$$\rho \frac{\partial \boldsymbol{v}}{\partial t} + \rho \boldsymbol{v} \cdot \nabla \boldsymbol{v} - \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{F} \tag{2}$$

其中

$$\boldsymbol{\tau} = -(P + \lambda \nabla \cdot \boldsymbol{v})\boldsymbol{I} + 2\mu \boldsymbol{e}$$

$$\boldsymbol{e} = \frac{1}{2}(\nabla \boldsymbol{v} + \nabla \boldsymbol{v}^{\mathrm{T}})$$

式中 $\boldsymbol{v}$——速度矢量 ρ——流体密度

$\boldsymbol{\tau}$——应力张量

$\boldsymbol{F}$——流体的力向量

P——压力

λ、μ——流体粘度系数

$\boldsymbol{e}$——速度应变张量

运输方程为

$$\frac{\partial(\rho \boldsymbol{k})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{v} \boldsymbol{k}) = \nabla \left[\left(\mu_0 + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla \boldsymbol{k} \right] - \beta^* \rho \boldsymbol{k} \omega \tag{3}$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{v} \omega) = \nabla \left[\left(\mu_0 + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right] - \beta \rho \omega^2 + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \nabla \boldsymbol{k} \cdot \nabla \omega \tag{4}$$

式中 β^*、β、σ_ω、$\sigma_{\omega 2}$、σ_k——常数系数

μ_0——层流粘度 μ_t——湍流粘度

$\boldsymbol{k}$——湍流动能

F_1——开关函数,对壁面湍流时为 1,对自由剪切湍流为 0

ω——湍动能耗散率

2.2.2 双向 FSI 耦合数据传递方程

在垫片接触前采用双向 FSI 耦合,流体和固体进行数据传递[9],方程为

$$d_f = d_s \quad (\boldsymbol{X} \in \boldsymbol{A}_i) \tag{5}$$

$$\boldsymbol{n} \cdot \boldsymbol{\tau}_f = \boldsymbol{n} \cdot \boldsymbol{\tau}_s \quad (\boldsymbol{X} \in \boldsymbol{A}_i) \tag{6}$$

式中 d_f——流体计算域节点位移

d_s——固体节点位移

$\boldsymbol{\tau}_f$——流体应力

$\boldsymbol{\tau}_s$——固体应力

$\boldsymbol{n}$——单位法向量

$\boldsymbol{X}$——几何点坐标

$\boldsymbol{A}_i$——固液耦合面

2.2.3 颗粒计算模型

颗粒计算时,工作压力为 100 kPa,粒径为 50 μm,颗粒质量浓度为 0.99 g/L。采用拉格朗日耦合方法,颗粒的移动、颗粒与颗粒之间的碰撞、颗粒

与壁面之间的碰撞以及颗粒运动对周围连续相的作用、能量和动量交换均采用离散方法模拟，颗粒之间及颗粒与壁面之间的碰撞不会发生显著的塑性形变，属于硬颗粒接触，是湿颗粒接触模型，本文采用 Hertz－Mindlin（no slip）built－in 模型计算，主要考虑曳力和重力，其他附加力如压力梯度力、虚假质量力、升力等与前者相比数量级较小，故不予考虑[10]，所采用的模型参数参照文献[11]。颗粒相连续性方程和动量方程[12]为

$$\frac{\partial \overline{\alpha}_d}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\alpha}_d v_{di})=0 \tag{7}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\overline{\alpha}_d \rho_d v_d)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\alpha}_d \rho_d v_{di} v_{dj})=-\overline{\alpha}_d\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i}+\frac{\partial \overline{p}_d}{\partial x_i}+\frac{\partial \tau_{dji}}{\partial x_j}+F_{dc,di}+F_{d,si}+\overline{\alpha}_d\rho_d g_i+\frac{\partial}{\partial x_i}(\overline{\alpha}_d\rho_d\overline{v''_{di}v''_{dj}}) \tag{8}$$

其中

$$F_{dc,di}=\beta_{dc}(v_{ci}-v_{di})$$

$$F_{d,si}=\sum \beta_{ds}(v_{ci}-v_{di})$$

式中　$\overline{\alpha}_d$——粘性系数　　v_d——颗粒速度

ρ_d——颗粒密度　　$\overline{p}$——固体压力

v_{ci}——流体相速度

$\overline{p}_d$——颗粒碰撞引起的固体压力

β_{dc}——水相和颗粒相间阻力系数

$F_{d,si}$——颗粒相 d 和颗粒相 s 间的碰撞阻力

β_{ds}——颗粒相阻力系数

τ_{dji}——颗粒碰撞和位移引起的黏性应力

其中 $\overline{\alpha}_d\rho_d\overline{v''_{di}v''_{dj}}$为颗粒相雷诺应力。

颗粒间法向力 F_n 计算方程[13-14]为

$$F_n=\frac{4}{3}E^* R^{*\frac{1}{2}}k^{\frac{3}{2}} \tag{9}$$

其中

$$\frac{1}{E^*}=\frac{1-v_1^2}{E_1}-\frac{1-v_2^2}{E_2}$$

式中　E^*——等效弹性模量

R^*——等效颗粒半径　　k——重叠量

v_1——颗粒 1 泊松比

v_2——颗粒 2 泊松比

E_1——颗粒 1 弹性模量

E_2——颗粒 2 弹性模量

颗粒间法向阻尼力 F_n^d 计算方程为

$$F_n^d=-2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta^*\sqrt{S_n m^* v_n^{(rel)}} \tag{10}$$

其中

$$m^*=\frac{m_1 m_2}{m_1+m_2}$$

式中　m^*——等效质量　　β^*——阻力系数

S_n——法向刚度　　m_1——颗粒 1 质量

$v_n^{(rel)}$——法向相对速度

m_2——颗粒 2 质量

颗粒间切向力 F_t 计算方程为

$$F_t=-S_t\delta \tag{11}$$

其中

$$S_t=8G^*\sqrt{R^* k}$$

$$G^*=\frac{2-v_1^2}{G_1}-\frac{2-v_2^2}{G_2}$$

式中　δ——切向重叠量

S_t——切向刚度

G^*——等效剪切模量

G_1——颗粒 1 剪切模量

G_2——颗粒 2 剪切模量

颗粒间切向阻尼力 F_t^d、颗粒接触力矩 T_i 计算方程为

$$F_t^d=-2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta^*\sqrt{S_t m^* v_t^{(rel)}} \tag{12}$$

$$T_i=-\mu_r F_n R_i \omega_i \tag{13}$$

式中　S_t——切向刚度

$v_t^{(rel)}$——切向相对速度

μ_r——滚动摩擦因数

R_i——质心到接触点间的距离

ω_i——接触点处物体的单位角速度

2.3　网格固定方法与边界条件

因灌溉中多为稀相流，且颗粒与壁面之间的碰撞不会发生显著的塑性形变，即忽略颗粒对垫片变形的影响，在颗粒耦合计算前确认并固定垫片变形形状及大小。整体策略：先采取双向瞬态 FSI 耦合，在垫片接触时采取单向 FSI 耦合减小收敛难度，节省计算时间。详细步骤及设置：在双向瞬态 FSI 耦合分析中动网格变化过程采取弹簧近似光滑模型计算，采取四面体网格进行划分，考虑计算精度和时间划分最大网格尺寸为 0.2 mm，网格总数为 508 710，网格图集如图 4 所示。双向瞬态 FSI 耦合入口设置为压力入口，压力为用户自定义引入随时间逐步增加的时间函数，湍流强度 0.686%，水力直径计算后取 1.099 mm。出口设置为标准大气压压力出口，垫片靠近固体端圆周表面设置其各向节点位移为 0 限制其运动，靠近流体端上下表面边界位移条件选取固有 FSI。计算至垫片变形后期，网格质量下降明显，如图 4c 所示，甚至出现计算不收敛或出现负体积网格导致计算无法进行，且接触模型难以添加，考虑时间成本及节省计算资源引入单向 FSI 耦合计算，固体接触边界设置摩擦接触，设定初始表面压力后将垫片变形逆向导入流体计算中核算压力差，不断重复此过程至压力差相同，在单向 FSI 耦合中结

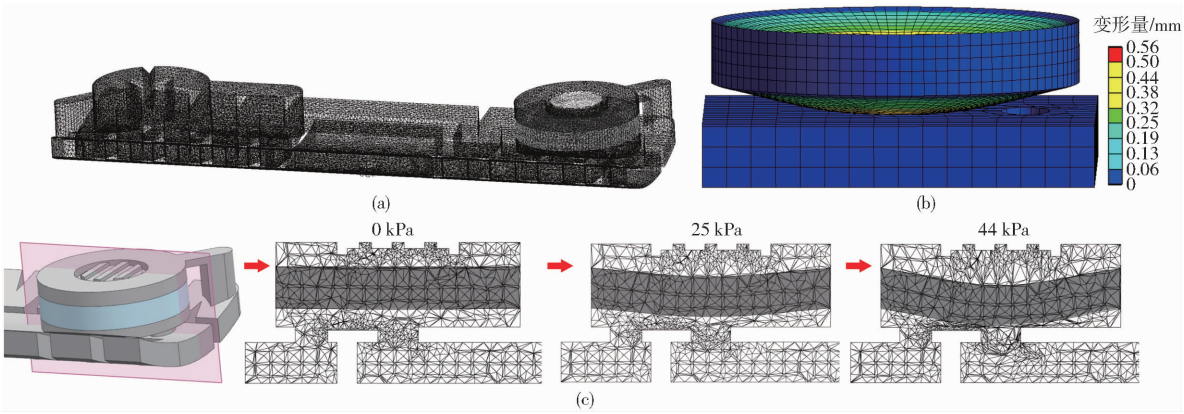

图 4 灌水器网格

Fig. 4 Drip irrigation mesh

构计算亦采用四面体网格,垫片采取六面体网格划分,计算后 44 kPa 垫片网格及变形量如图 4b 所示。

计算至稳定后,导出入口压力 100 kPa 下滴灌器垫片变形节点数据,逆向重新建模绘制网格。进入 CFD 与 DEM 双向耦合过程,CFD 求解获得流场信息后,通过曳力模型转化为作用在颗粒上的流体曳力,计算颗粒新的坐标位置等信息传回 CFD,循环往返,二者通过一定的模型进行质量、动量和能量的传递,实现耦合[15]。

2.4 堵塞评价指标

颗粒停留率是直接衡量颗粒沉积及灌水器堵塞发生概率的重要指标,颗粒停留率 P_t 计算公式为

$$P_t = \frac{m_b\left(1-\frac{T_{\min}}{T}\right)}{m_t}\times 100\% \tag{14}$$

式中 m_b——计算停止时灌水器内颗粒总质量

m_t——总投放颗粒质量

T——计算总时间

$T_{\min}$——颗粒通过最短时间

2.5 试验设计

2.5.1 验证试验

搭建图 5 所示流量验证平台,清水试验按照 ISO9261 的标准进行,测量 0 ~ 200 kPa 的灌水器流量,测量方法:灌水时在每个灌水器下方放置一个 1 L 量杯用来收集灌水器排出的清水,每次灌水持续时间 30 min,间隔 1 h,用精度为 0.01 g 数字天平称量,取流量平均值作为每个压力点的流量。对比仿真试验结果验证垫片变形误差,因为压力补偿式滴头实现补偿作用的实质为通过垫片变形控制最小过流截面积控制流量,因此可借流量验证垫片变形误差。

浑水试验在灌水前对颗粒进行筛选,用激光粒度仪对泥沙的粒径及分布情况进行分析。试验配置浑水质量浓度为 1 g/L,灌水时工作压力为 100 kPa,灌水持续时间 2 h,灌水试验结束后,如清水试验所

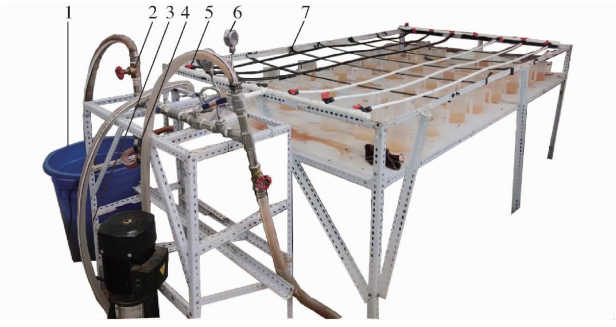

图 5 验证试验台

Fig. 5 Verification test bench

1. 蓄水桶 2. 入水口端调压阀 3. 潜水泵 4. 出水口端调压阀 5. 球阀 6. 压力表 7. 毛管

述统计流量,后取下全部毛管剖开并取出灌水器,分 2 组,第 1 组干燥后对灌水器进行称量记录;第 2 组清洗并收集滴头内沉积泥沙,将溶液充分混合后倒入激光粒度仪测量其粒径分布,试验中共测量 6 × 3 × 6 个灌水器(3 条取泥沙测粒径分布,3 条晾干称量,3 次重复,每条毛管安装 6 个灌水器)。误差计算方法:通过流出总量及初始粒径分布计算得出初始粒径 50 μm(45 ~ 55 μm 范围粒径视为 50 μm)颗粒进入灌水器总质量;通过灌水器测量增加质量及淤积泥粒径分布计算得出 50 μm 淤积泥沙总质量;计算其两者比值得出 50 μm 颗粒实际停留率;响应面中 5 次数值模拟重复试验与真实试验结果对比得出误差。

2.5.2 单因素试验

单因素试验选取副流道截面积、压力补偿腔出口直径和压力补偿腔直径 3 个因素分别考察其对颗粒停留率的影响,试验在灌水器尺寸可调节范围内选取 5 个水平进行试验,观测其单独作用对颗粒运动的影响。

2.5.3 响应面试验

响应面试验选取副流道截面积、压力补偿腔出口直径和压力补偿腔直径 3 个结构参数对颗粒停留

率进行分析，响应面试验因素编码范围为该款灌水器补偿腔内参数合理变化范围，如表 1 所示；响应面试验选用 Box－Behnken 响应面法设计，用合理的试验次数，进行多因素分析，通过方差分析得出各因素对颗粒运动的影响，及各因素间的交互作用显著性，通过建立曲面模型直观分析预测响应结果，通过回归分析建立可靠的颗粒停留率预测模型。

表 1　试验因素编码

Tab. 1　Experimental factors and codes

编码	因素		
	副流道截面积(副流道宽度×副流道高度)A/mm^2	压力补偿腔出口直径 D_1/mm	压力补偿腔直径 D_2/mm
－1	0.018(0.15×0.12)	0.8	5.50
0	0.036(0.23×0.155)	1.1	6.25
1	0.054(0.3×0.18)	1.4	7.00

3　结果与分析

3.1　试验与数值模拟

清水验证误差在灌水压力为 120 kPa 时达到最大 9.58%，在 100 kPa 时误差为 8.72%（图 6），在 50 kPa 后误差增加原因为引入单向 FSI 逆向过程存在误差引起流量误差。试验灌溉用水及灌水器内粒径分析结果如图 7（图中累积相对体积为 10%、25%、50%、75%、90%时，测得沉积物中的最大粒径分别表示为 V10、V25、V50、V75、V90。灌溉用水表示灌溉用水中泥沙粒径，灌水器内表示灌水后灌水器内停留泥沙粒径）所示，灌水前 45～55 μm 范围粒径泥沙占 24.89%，灌水后灌水器内 45～55 μm 范围粒径泥沙占 35.14%。经 2 h 灌水后平均流出总量为 2.92 L，晾干后灌水器平均增加质量 0.156 g，通过与颗粒停留率预测结果对比：数值模拟预测粒径 50 μm 颗粒停留率和真实试验测得粒径 50 μm 颗粒停留误差为 15.2%。按此方法加入 20、35、50、65、80 μm 共 5 种粒径颗粒，停留率对比图如图 8 所示，可以看出在粒径相对较小时因无法仿真其絮凝过程误差较大。

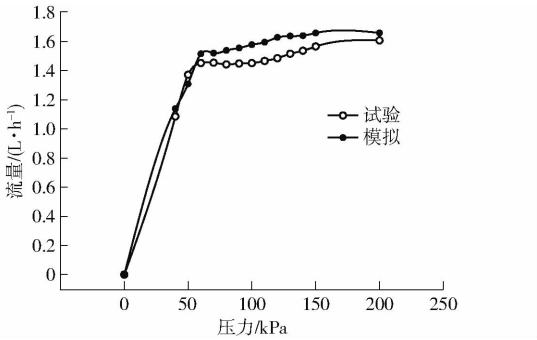

图 6　验证试验结果对比

Fig. 6　Comparison of validation test results

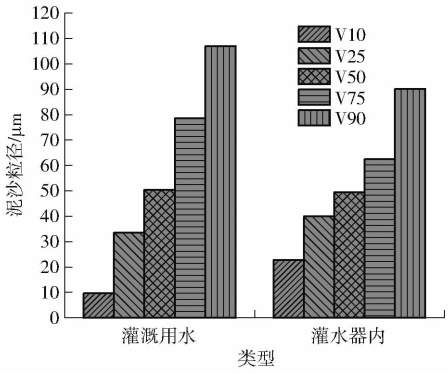

图 7　颗粒粒径分布

Fig. 7　Particle size distribution

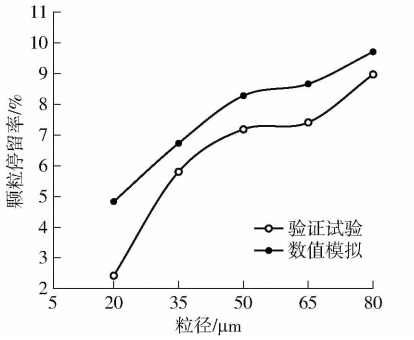

图 8　不同粒径颗粒停留率对比

Fig. 8　Comparison of retention rates of different particle sizes

3.2　单因素试验

分别考察副流道截面积、压力补偿腔出口直径和压力补偿腔直径对颗粒停留率的影响，结果如图 9 所示。从图 9a 可知，副流道截面积增大致使颗粒停留率下降，这是因为副流道截面积变大使补偿腔内颗粒高速通过区变深变宽，直接提高颗粒在压力补偿腔内通过率。同时补偿作用发生后微小的副流道流体通过面成为灌水器内阻力最大的区域，而副流道截面积变大使最小过流截面相对增大，灌水器整体流量提升明显，其余部位流体流速增加，颗粒停留率随之下降。副流通截面积由 0.018 mm^2 提升至 0.054 mm^2 时，颗粒停留率降低 5.09 个百分点。从图 9b 可知，压力补偿腔出口直径减小致使颗粒停留率下降，这是因为出口直径减小，压力补偿腔下方压力相对增加，使压力补偿腔内及灌水器内部整体流速提升，同时使垫片变形达到补偿阈值的时间延缓，缩小垫片最大变形量及垫片下方颗粒滞留区的范围，提高颗粒在补偿腔内通过率。因此副流道结构参数及压力补偿腔出口直径改变对灌水器流量影响较大且能够改变灌水器内流场压力分布，同时压力梯度的改变导致水流紊流程度变化，紊流程度增加会使得流道内局部水头损失系数变化，流道内水流总体速度变化、连续性降低，水流携带能力下降致

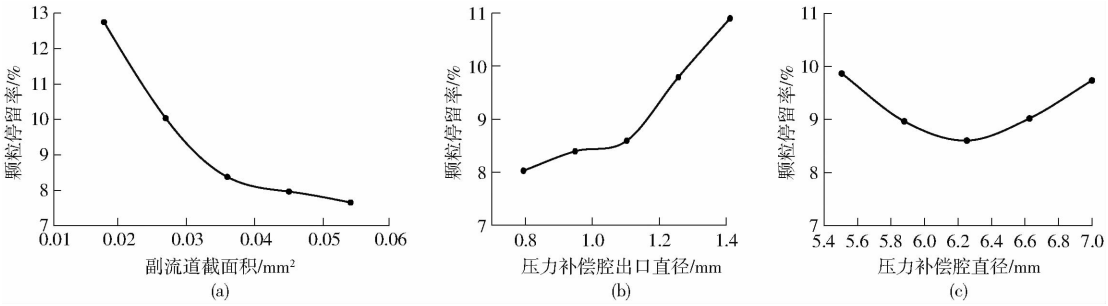

图 9 各因素对颗粒停留率的影响

Fig. 9 Effect of various factors on particle retention rate

使颗粒停留率增大。压力补偿腔出口直径由 1.4 mm 下降至 0.8 mm 时,颗粒停留率降低 2.87 个百分点。从图 9c 可知,压力补偿腔直径对颗粒停留率影响较小,但存在极值点,这是因为当压力补偿腔直径较大时,垫片更容易变形,同样的压力差,垫片变形更易达到补偿阈值,补偿腔下方颗粒滞留区变大,颗粒在补偿腔内更易停留;压力补偿腔直径较小时,补偿腔内循环区和滞留区比例减小,颗粒在补偿腔中环形低速运动,更易进入滞留区滞留。

3.3 Box – Behnken 试验

Box – Behnken 试验结果如表 2 所示,17 次试验中安排 5 次重复试验,检验试验是否具有随机性。且通过前人研究可知,用颗粒停留率能够有效评估灌水器堵塞性能[15]。试验结果能有效评价灌水器抗堵塞性能。

表 2 Box – Behnken 试验结果

Tab. 2 Results of Box – Behnken test

试验序号	因素			颗粒停留率/%
	副流道截面积/mm²	压力补偿腔出口直径/mm	压力补偿腔直径/mm	
1	0.018	1.4	6.25	14.395 4
2	0.036	1.4	7.00	11.054 6
3	0.036	1.1	6.25	8.542 65
4	0.036	0.8	5.50	8.329 9
5	0.054	1.1	7.00	7.493 7
6	0.036	1.4	5.50	10.601 5
7	0.036	1.1	6.25	8.929 9
8	0.036	0.8	7.00	8.472 9
9	0.054	0.8	6.25	8.242 7
10	0.054	1.4	6.25	9.172 1
11	0.018	1.1	5.50	11.897 3
12	0.036	1.1	6.25	8.160 65
13	0.054	1.1	5.50	9.259 15
14	0.036	1.1	6.25	8.907 35
15	0.018	1.1	7.00	13.827 3
16	0.018	0.8	6.25	11.124 0
17	0.036	1.1	6.25	8.890 5

颗粒停留率回归模型方差分析结果如表 3 所示,副流道截面积和压力补偿腔出口直径对颗粒停留率影响极显著,压力补偿腔直径对颗粒停留率影响不显著,与单因素试验结果一致。由颗粒停留率回归模型方差分析得知决定系数 R^2 为 0.990 1,接近 1,证明选取的 3 个参数与颗粒停留率相关性大;矫正后 R^2 为 0.980 2,预测 R^2 为 0.952 6,差值为 0.027 6,小于 0.2 且数值较小,拟合的回归模型能够充分证明其过程,考虑的因素影响极为充分;变异系数为 2.88,表明试验可信度、准确性高;模型信噪比为 33.634,有效信号与噪声比值在合理范围。

表 3 颗粒停留率回归模型方差分析结果

Tab. 3 Particle retention rate regression model ANOVA results

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	64.06	9	7.12	80.71	<0.000 1 **
A	36.45	1	36.45	413.31	<0.000 1 **
D_1	10.25	1	10.25	116.19	<0.000 1 **
D_2	0.072	1	0.072	0.82	0.395 3
AD_1	1.37	1	1.37	15.55	0.005 6 **
AD_2	3.41	1	3.41	38.71	0.000 4 **
D_1D_2	0.024	1	0.024	0.27	0.617 7
A^2	9.80	1	9.80	111.18	<0.000 1 **
D_1^2	1.14	1	1.14	12.98	0.008 7 **
D_2^2	0.70	1	0.70	7.91	0.026 0 *
残差	0.62	7	0.088		
失拟项	0.17	3	0.057	0.51	0.697 3
纯误差	0.45	4	0.11		

注:** 表示差异极显著($P < 0.01$),* 表示差异显著($P < 0.05$)。

3.4 灌水器内流场与颗粒运动分析

3.4.1 对压力补偿腔流场与颗粒运动的影响

通过试验观测发现,在垫片接触到压力补偿腔底部后,压力补偿腔对水流产生巨大阻力,副流道内存在阶梯状压力,腔内流速分布图如图 10 所示。在压力补偿腔入口下方处存在散射状中速区域,颗粒随水流进入腔内弧形低速旋转区,后受流体曳力作用运动进入垫片与腔体底部接触区域,在垫片底部周围形成流动滞止带,受到垫片和底部的作用力后

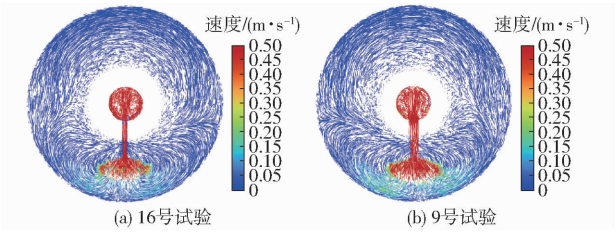

图 10　压力补偿腔内流速对比

Fig. 10　Comparison of flow velocity in pressure-compensated chamber

沉积。当颗粒在压力补偿腔内长时间堆积后凝聚，灌溉停止后部分颗粒进入副流道内沉积，使压力补偿腔内结构改变，灌水器逐渐丧失补偿功能甚至发生堵塞。扩大压力补偿腔副流道截面积，可以使颗粒更易直接进入副流道，提高从补偿腔入口到副流道流场连续性，同时扩宽高流速辐射面，使最初未进入副流道的颗粒更易随着流场排出灌水器，减少颗粒停留可能，同时在一定范围内可以纵向扩大副流道高速流动的影响，使副流道内高速流动区域延伸进迷宫流道区域，副流道截面积扩宽，从压力补偿腔入口到副流道再进压力补偿腔出口流出该过程阻力减小，流体更易通过压力补偿腔，在压力补偿腔入口处垂直结构中提高流体流速。当扩宽压力补偿腔直径时，虽颗粒进入易滞留区主要受到副流道参数影响，单独分析其补偿腔直径影响作用较小，但腔内弧形低速旋转区变大，且垫片下方流动滞止带更广，颗粒若无法及时排出则停留可能性增大，因此交互作用显著。同时因为补偿腔结构改变，致压力补偿腔内压力改变及迷宫流道内压力改变(图 11)。

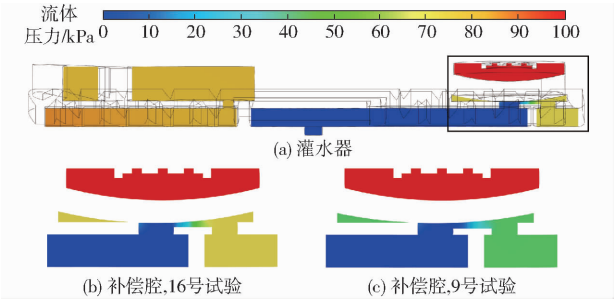

图 11　压力补偿腔内压力云图对比

Fig. 11　Comparison of pressure in pressure-compensated chamber

除流速流场改变外，改变副流道结构参数也会引起垫片变形的改变，若副流道更浅更窄，最小过流截面相对减小，水流受到的阻力增加，垫片难以进入副流道，垫片下方颗粒滞留区变大，即使相同粒径的颗粒也会在滞留区形成多层堆叠，灌水器堵塞风险增加(图 12)，且在真实试验观测中淤积物亦出现多层淤积，如图 1 所示。结合图 10a 和图 12a 发现，若颗粒从侧边进入外部弧形低速旋转区再进入循环后排出，更易发生颗粒沉积，因为颗粒贴着垫片通过，途径滞留区边界，易受曳力作用挤入滞留区。

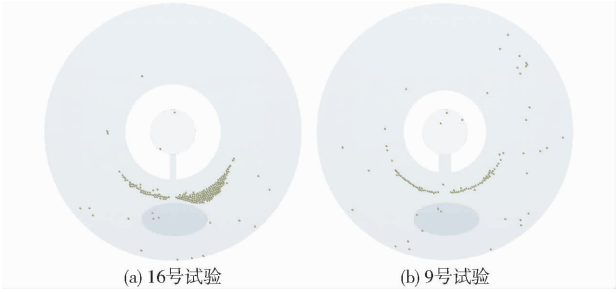

图 12　压力补偿腔内颗粒沉积对比

Fig. 12　Comparison of particle deposition in pressure-compensated chamber

3.4.2　对迷宫流道流场与颗粒运动的影响

因在压力补偿作用下，压力耗散主要发生在压力补偿腔内，且迷宫流道结构没有改变，因此在迷宫流道内高速区前后段无明显差异，如图 13 所示，但副流道截面积变大引起流量、流速改变，使迷宫流道内高速区域扩宽且更加连贯，颗粒不易离开高速区进入低速涡流区停留，如图 14 所示(图 14b 为 16 号试验在图 14a 红框处颗粒分布，图 14c 为 9 号试验在图 14a 红框处颗粒分布，图 14d 为 16 号试验辅流道下方迷宫流道颗粒分布，图 14e 为 9 号试验辅流道下方迷宫流道颗粒分布)，同时流速提升引起的高速冲刮亦可减小发生生物堵塞的可能性。低速漩涡区分布受迷宫流道结构影响，没有发生较明显位置改变。同时发现在多次试验中均出现颗粒在辅流道接口处出现大量停留。

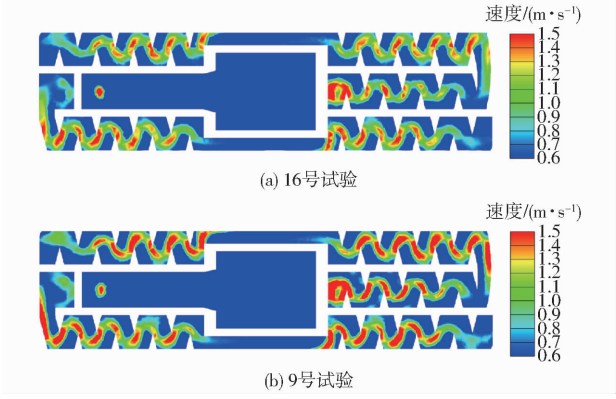

图 13　迷宫流道切片流速对比

Fig. 13　Comparison of flow rates of slices of labyrinth runner

3.5　曲面模型交互作用

响应面可以直观反映因素间的交互作用对颗粒停留率的影响。响应面的斜率越大、响应面越陡、等高线越接近椭圆则证明因子的交互作用越明显。压力补偿腔出口直径上升、副流道截面积下降对颗粒停留率影响呈递减趋势，当对两者交互作用分析时，在副流道截面积较小时，压力补偿腔出口直径增大

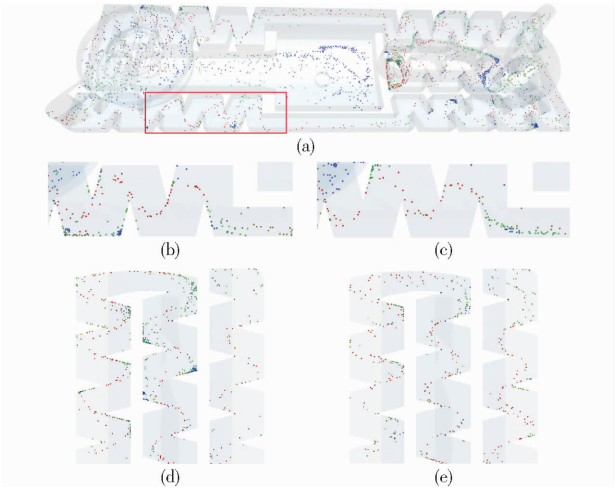

图 14 迷宫流道颗粒分布对比

Fig. 14 Comparison of particle distribution in labyrinth runner

导致颗粒停留率下降(图 15),在副流道截面积为 0.046 mm^2、压力补偿腔出口直径为 0.85 mm 时颗粒停留率达到最小值(7.67%)。这是因为垫片变形分为 3 个阶段,第 1 阶段垫片未接触到灌水器底部,第 2 阶段垫片接触到压力补偿腔出口边缘,第 3 阶段垫片开始陷入副流道内[6]。而当压力补偿腔出口直径减小时,第 3 阶段垫片变形受到影响;随着副流道截面积增加,流量、流速增大,第 3 阶段垫片变形更易陷入流道内,因此两者共同作用影响垫片变形,均对颗粒运动产生影响。

副流道截面积和压力补偿腔直径对颗粒停留率的影响如图 16 所示。在压力补偿腔直径较大时,垫片更易变形,压力补偿作用将更易体现,流量波动较大;当副流道截面积增大时,最小过流截面积变大,流速、流量增大,共同作用致使颗粒通过率达到峰

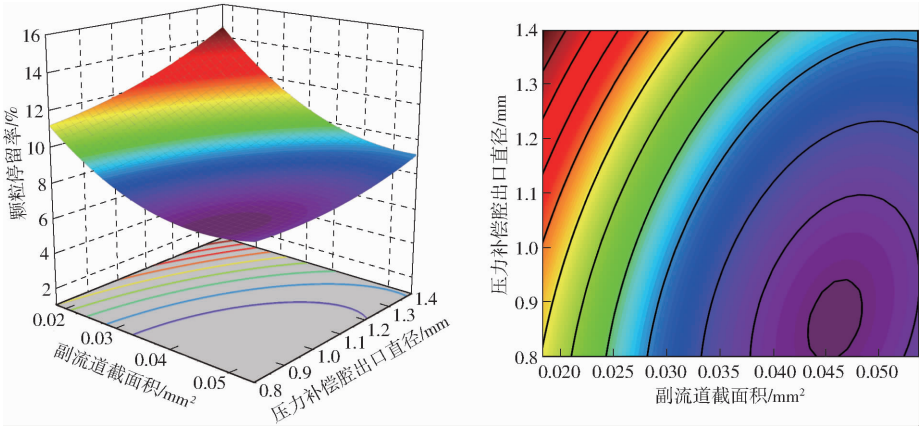

图 15 副流道截面积和压力补偿腔出口直径对颗粒停留率影响响应面和等高线图

Fig. 15 Impact response surface and contour plots of interaction of sub-flow channel cross-sectional area and pressure-compensated chamber outlet diameter on particle retention rate

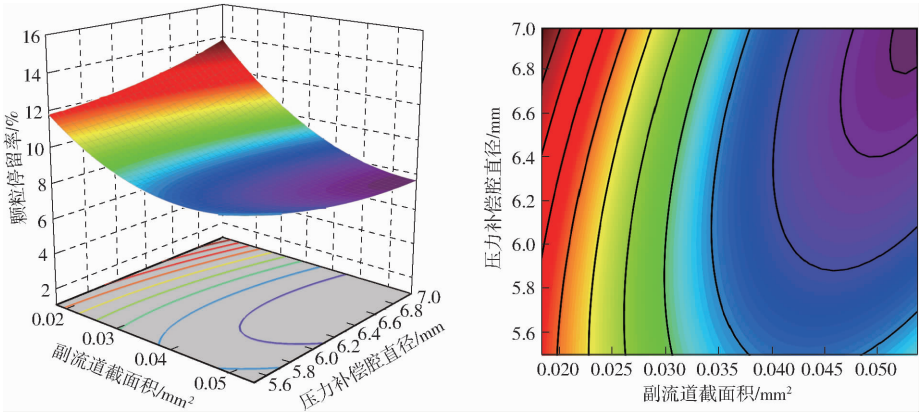

图 16 副流道截面积和压力补偿腔直径对颗粒停留率影响响应面和等高线图

Fig. 16 Impact response surface and contour plots of interaction of sub-flow channel cross-sectional area and pressure-compensated chamber diameter on particle retention rate

值。这是因为当副流道截面积下降时,流态指数增大,流量受压力变化敏感程度变高,在灌水器内部更易形成低速涡流区,颗粒容易淤积;压力补偿腔直径增大,在垫片硬度相同时,补偿作用发生点提前,垫片更易接近压力补偿腔底部,滞留区变大,同时变相增加副流道参与补偿作用长度,共同作用致使颗粒通过率变低,反之上升。等高线在尾部出现椭圆长半径变长,同时压力补偿腔直径影响垫片变形量,间接影响副流道有效长度,但当长度到达一定值时,对流量影响作用微小[16],对流场改变较小。

压力补偿作用关键点在垫片嵌入副流道后，随着上下表面压力差发生的微小变形引起的最小过流截面改变，最小过流截面是由多个结构参数综合影响决定的，因此考虑其结构参数间的交互影响在设计中十分重要，需考虑其交互作用。

3.6　模型建立与最优解

利用 Design-Expert 12 软件对表 2 数据进行拟合，去除不显著项[17]，建立响应面多项式回归方程

$$P_t = 29.71 + 89.29A - 5.07D_1 - 6.46D_2 - 108.43AD_1 - 68.43AD_2 + 4\,709.84A^2 + 5.79D_1^2 + 0.72D_2^2 \quad (15)$$

基于响应面模型求解得出一组最优参数为副流道面积为 0.051 mm^2、压力补偿腔出口直径为 0.894 mm、压力补偿腔直径为 6.923 mm 时颗粒停留率为 7.445%。类似结构灌水器可将补偿腔参数对应代入评判其抗堵塞性能，因结构存在差异亦可类似拟合出相应模型。

4　讨论

4.1　补偿腔参数对流场流速与颗粒运动的影响

本研究表明，补偿腔结构对灌水器内流速有显著影响，随着副流道截面积增加或压力补偿腔出口直径减小，压力补偿腔内流速增加，迷宫流道内高速区范围增加、高速流动区更加连贯。本研究迷宫流道流场分布与前人研究类似[18-20]，但当压力到达一定值后，迷宫流道内未存在明显压力梯度，这是因为压力补偿式灌水器当垫片补偿作用介入后，能量耗散主要出现在补偿腔内[21-22]；魏正英等[16]通过单因素试验分析了补偿腔出口直径、凸台直径、副流道深度等补偿腔结构参数对水力性能的影响，结果表明副流道宽度增加或副流道高度增加时流量增加明显，在迷宫流道结构不变的前提下，流道内及补偿腔内流速提升与本文研究结果一致；SHAMSHERY 等[23]通过揭示补偿作用原理也揭示了补偿腔结构对流量、流速的影响，研究结果表明增大副流道深度、减小副流道宽度使灌水器流量、流速增加，在流道深度对流速的影响结论与本文副流道截面积对流速影响的研究结论一致，但 SHAMSHERY 等[23]单独提出副流道宽度的影响，与本文整体研究结论有差异，是因为其考虑宽度时对宽度取值范围较小且因为压力补偿腔高度的影响，单独改变副流道宽度，以致垫片变形过大超过补偿调节范围，或宽度不足垫片难以在副流道内产生微小变形，或垫片的微小变形难以抵消水压对流量的影响，阻碍了压力补偿过程的发生，垫片无法对最小过流面进行控制，因此出现和本文研究部分结论有较大差距的情况。

前人研究重点关注了补偿腔结构对整体水力性能的影响，未提出压力补偿腔内流场流速分布的变化对颗粒运动的影响。本研究发现提高压力补偿腔内散射状中速区流速，扩宽副流道截面积可以减小颗粒进入滞留区概率，且改变压力补偿腔结构参数时，应防止垫片下方滞留区径向扩宽且颗粒出现多重堆叠的情况；同时在迷宫流道内颗粒运动受流速影响较大，扩宽副流道截面积可以提高迷宫流道内高速区连续性和宽度，减小颗粒进入低速区可能[24-25]。在颗粒受紊动重力沉降方面，文献[18-19]通过 PIV 试验发现颗粒易在灌水器内低速区或漩涡区停留，减小颗粒进入这些区域的可能，提高流场连续性是提高颗粒通过率关键，同时翟英剑等[2]研究指出主流区携沙能力强，验证本研究的增大高速区宽度、提高连续性的出发点的合理性，亦和本文观测结果相同；魏正英等[4]通过研究一体式压力补偿灌水器发现，垫片覆盖到补偿区时，部分区域流速增大，在结构拐角处产生明显的漩涡，颗粒可能在此区域堆积、堵塞，结果和本研究观测到当垫片变形后除副流道高速区外形成低速漩涡区，且颗粒进入低速漩涡区更易沉积结果相同，但在补偿腔内沉积的主要区域和本文研究结果不同，这是因为本文研究灌水器补偿作用在于控制副流道最小过流截面因此出现垫片下方滞留区，研究中补偿作用在于控制迷宫流道最小过流截面，两者补偿作用点不同导致沉积区域不同。灌水器在实际生产使用过程中抗堵塞能力是评价灌水器性能的重要指标，因此在灌水器设计中应综合考虑其水力性能和抗堵塞性能，减小最小补偿压力可以节省配套灌水装置的整体费用，提高灌水器的使用稳定性及使用寿命可以减少灌水带整体更换次数，节约费用。

4.2　补偿腔参数交互作用对颗粒运动的影响

本文研究发现压力补偿腔内补偿腔直径、补偿腔出口直径和副流道截面积存在明显交互作用，在特定配比下出现颗粒停留率达到最小值的情况，且在部分区域出现陡然下降的情况，因此单因素试验难以从整体分析其颗粒运动，但前人研究多进行单因素分析进行抗堵塞研究，或未考虑其交互作用对颗粒运动的影响。前人在交互作用影响研究中，CHEN 等[6-7]等通过响应面研究了补偿腔结构对灌水器最低补偿压力、流量波动指数的影响，发现副流道高度和补偿腔直径等交互作用对流量波动指数影响较大，对流场影响推断和本文部分结论吻合。本文通过对补偿腔内流场影响分析发现在后续研究中可以考虑设计弧形面，在不影响补偿作用的前提下，减少颗粒进入弧形低速旋转区的比例，解决颗粒在压力补偿腔内的沉积可能；同时发现除流道外立体

结构易造成颗粒沉积,在后续设计中可减少辅流道等类似结构。

4.3 颗粒停留率预测模型分析

本研究采用 FSI 固定垫片后引入 CFD - DEM 的方法研究颗粒运动,通过模拟和实测数据对比发现,流量模拟值与实测值随压力的变化曲线吻合较好,同时浑水灌溉实测颗粒停留率误差在可靠范围内。本文采用颗粒停留率评价灌水器抗堵塞性能和喻黎明等[11,15]方法相同,该方法能有效描述、评价灌水器抗堵塞性能,综合表明该预测方法有效、合理,通过此方法结合 Box - Behnken 试验研究建立了高相关性颗粒停留率预测模型。但本文研究模型预测结果与侯鹏等[26]分析结果有一定差距,是因为本文研究方法主要考察其紊动重力沉降颗粒对堵塞的影响,意在提高灌水器稳定灌水时长,预防其堵塞,防止因压力补偿腔内发生泥沙淤积后改变腔内结构,导致流动阻力不能随着压力发生线性变化,压力补偿作用失效或发生堵塞。前人亦建立了不同模型用于灌水器设计前预测,SHAMSHERY 等[23]通过遗传算法,分析补偿腔结构对灌水器最小补偿压力的影响进行优化;MOHAMED 等[27]通过回归分析建立了迷宫流道结构对水力性能的回归模型;CHEN 等[7]通过响应面分析考虑其交互作用,建立了补偿腔结构参数对最小补偿压力和流态指数的回归模型。前人的研究不断完善压力补偿式灌水器的设计方法,但未考虑补偿腔结构参数对颗粒运动的影响,本研究完善了压力补偿式灌水器设计方法,同时建立了决定系数为 0.974 4 的回归模型,准确预测压力补偿腔结构参数对颗粒停留率的影响,为后续灌水器设计提供参考。

5 结论

(1)随着副流道截面积增大或压力补偿出口直径减小,颗粒沉积可能性降低,灌水器稳定灌水时长增加,堵塞风险降低。同时颗粒沉积受副流道截面积和压力补偿腔出口直径、副流道截面积和压力补偿腔直径两种交互作用影响显著,在限定范围内出现极值点,在灌水器抗堵塞结构优化中应综合考虑其影响。

(2)压力补偿腔参数对灌水器补偿作用及流量影响显著,但应同时考虑其对灌水器堵塞的影响,如在副流道截面积增加时,颗粒在副流道内通过性提高,可减少在垫片下方滞留区颗粒形成多层堆积的情况,同时迷宫流道内流速提升,提高了迷宫流道内高速区宽度及连接连贯性,使颗粒离开高速区可能性降低,堵塞风险减小。在实际设计中,应综合调控补偿腔内各参数,选出水力性能和抗堵塞性能较优的灌水器补偿腔参数配置,或设计斜面、凸台减小滞留区范围,改变滞留区流场分布,提高颗粒通过性。

(3)拟合出的回归方程可靠性高,可用于压力补偿腔结构参数对颗粒停留率影响的预测,评判灌水器抗堵塞性能,并推荐了一组该款灌水器最优抗堵塞结构参数。在灌水器设计中可仿照建立类似模型,为压力补偿式灌水器的压力补偿腔结构设计提供一种高效的方法,为灌水器整体设计提供参考。

参 考 文 献

[1] 李久生,栗岩峰,王军,等. 微灌在中国:历史、现状和未来[J]. 水利学报,2016,47(3):372 - 381.
LI Jiusheng, LI Yanfeng, WANG Jun, et al. Microirrigation in China: history, current situation and prospects[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2016,47(3):372 - 381. (in Chinese)

[2] 翟英剑,吴文勇,王振华,等. 基于 Ansys Fluent 的压力对灌水器流道单元水力特性及抗堵塞性能探究[J]. 节水灌溉,2022(5):47 - 53,59.
ZHAI Yingjian, WU Wenyong, WANG Zhenhua, et al. Analysis of the effect of pressure on hydraulic and anti-clogging performance of the flow channel unit of the irrigator based on Ansys Fluent software[J]. Water Saving Irrigation,2022(5):47 - 53,59. (in Chinese)

[3] 喻黎明,余兴娇,李娜,等. 不同冲洗措施下迷宫流道灌水器泥沙运行分布机理研究[J]. 农业机械学报,2021,52(7):304 - 312.
YU Liming, YU Xingjiao, LI Na, et al. Sediment distribution mechanism of labyrinth-channel emitters under different flushing measures[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(7):304 - 312. (in Chinese)

[4] 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 - 1392,1405.
WEI Zhengying, TANG Yiping, CHENG Yingshe, et al. A new method for rapid design of the integral pressure-compensating emitters[J]. China Mechanical Engineering,2008,19(12):1387 - 1392,1405. (in Chinese)

[5] 郑超,吴普特,张林,等. 不同动态水压模式下迷宫流道内颗粒物运动特性研究[J]. 农业机械学报,2017,48(3):294 - 301.
ZHENG Chao, WU Pute, ZHANG Lin, et al. Particles movement characteristics in labyrinth channel under different dynamic water pressure modes[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(3):294 - 301. (in Chinese)

[6] CHEN X L, WEI Z Y, WEI C X, et al. Effect of compensation chamber structure on the hydraulic performance of pressure

compensating drip emitters[J]. Biosystems Engineering,2022,214:107 - 121.
[7] CHEN X L, WEI Z Y, MA C, et al. Flow characteristics and diaphragm deformation of pressure-compensating drip irrigation emitters[J]. Irrig. and Drain.,2021,70:996 - 1009.
[8] 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.
[9] BATHE K J, BOUZINOV P A. On the constraint function method for contact problems[J]. Computers & Structures, 1997, 64(5 - 6):1069 - 1085.
[10] 唐学林,余欣,任松长. 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.
[11] 喻黎明,谭弘,邹小艳,等. 基于 CFD - DEM 耦合的迷宫流道水沙运动数值模拟[J]. 农业机械学报,2016,47(8):65 - 71.
YU Liming, TAN Hong, ZOU Xiaoyan, et al. Numerical simulation of water and sediment flow in labyrinth channel based on coupled CFD - DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(8):65 - 71. (in Chinese)
[12] 王国强,郝万军,王维新. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M]. 西安:西北工业大学出社,2010.
[13] CHU K W, WANG B, YU A B, et al. CFD - DEM modelling of multiphase flow in dense medium cyclones[J]. Powder Technology,2009,193(3):235 - 247.
[14] QIU L H, WU C Y. A hybrid DEM/CFD approach for solid-liquid flows[J]. Journal of Hydrodynamics, 2014,26(1):19 - 25.
[15] 喻黎明,徐霞,杨启良,等. 滴灌灌水器迷宫流道结构对泥沙运动的影响[J]. 农业机械学报,2017,48(2):256 - 261.
YU Liming, XU Xia, YANG Qiliang, et al. Influence of geometrical parameters of labyrinth passage of drip irrigation emitter on sand movement[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(2):256 - 261. (in Chinese)
[16] 魏正英,马胜利,周兴,等. 压力补偿灌水器水力性能影响因素分析[J]. 农业工程学报,2015,31(15):19 - 25.
WEI Zhengying, MA Shengli, ZHOU Xing, et al. Influence factors on hydraulic performance of pressure-compensating emitter [J]. Transactions of the CSAE,2015,31(15):19 - 25. (in Chinese)
[17] 王宝民,宋凯,韩瑜. 响应面法优化硅藻土制备水玻璃工艺研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2013,21(4):748 - 755.
WANG Baomin, SONG Kai, HAN Yu. Optimization of preparing water glass from diatomite process by response surface method [J]. Journal of Basic Science and Engineering,2013,21(4):748 - 755. (in Chinese)
[18] 喻黎明,梅其勇. 迷宫流道灌水器抗堵塞设计与 PIV 试验[J]. 农业机械学报,2014,45(9):155 - 160.
YU Liming, MEI Qiyong. Anti-clogging design and experimental investigation of PIV for labyrinth channel emitters of drip irrigation emitters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(9):155 - 160. (in Chinese)
[19] 魏正英,唐一平,温聚英,等. 灌水器微细流道水沙两相流分析和微 PIV 及抗堵实验研究[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)
[20] 王文娥,王福军,牛文全,等. 滴头流道结构对悬浮颗粒分布影响的数值分析[J]. 农业工程学报,2009,25(5):1 - 6.
WANG Wen'e, WANG Fujun, NIU Wenquan, et al. Numerical analysis of influence of emitter channel structure on suspended granule distribution[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(5):1 - 6. (in Chinese)
[21] NIU W Q, LIU L, CHEN X. Influence of fine particle size and concentration on the clogging of labyrinth emitters[J]. Irrig. Sci.,2013,31:545 - 555.
[22] WEI Q S,LU G, LIU J, et al. Evaluations of emitter clogging in drip irrigation by two-phase flow simulations and laboratory experiments[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2008,63:294 - 303.
[23] SHAMSHERY P, WANG R, TRAN D V, et al. Modeling the future of irrigation: a parametric description of pressure compensating drip irrigation emitter performance[J]. PLoS One,2017,12(4). DOI:10.1371/journal.pone.0175241
[24] ZHANG J, ZHAO W H,TANG Y P, et al. Structural optimization of labyrinth-channel emitters based on hydraulic and anti-clogging performances[J/OL]. Irrig. Sci.,2011,29:351 - 357.
[25] 唐学林,赵旭红,李云开,等. 迷宫流道滴头内流场和颗粒运动的不同湍流模型数值模拟[J]. 农业工程学报,2018,34(16):120 - 128.
TANG Xuelin, ZHAO Xuhong, LI Yunkai, et al. Numerical simulation of flow fields and particle movement characteristics in labyrinth channel emitter using different turbulence models[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(16):120 - 128. (in Chinese)
[26] 侯鹏,肖洋,吴乃阳,等. 黄河水滴灌系统灌水器结构-泥沙淤积-堵塞行为的相关关系研究[J]. 水利学报,2020,51(11):1372 - 1382.
HOU Peng, XIAO Yang, WU Naiyang, et al. Cascade relationship between the emitter structure-sedimentation-clogging behavior in drip irrigation systems with Yellow River water[J]. Journal of Hydraulic Engineering,2020,51(11):1372 - 1382. (in Chinese)
[27] MOHAMED A M, AHMED I A, MOHAMED A I, et al. Impact of water temperature and structural parameters on the hydraulic labyrinth-channel emitter performance[J]. Spanish Journal of Agricultural Research,2014,12(3):380 - 393.