

# 压力补偿灌水器水力性能影响因素分析

魏正英, 马胜利<sup>\*</sup>, 周 兴, 苑伟静

(西安交通大学机械工程学院机械制造系统国家重点实验室, 西安 710049)

**摘 要:** 压力补偿灌水器以其补偿性能好、灌水均匀、铺设长度长等优点得到广泛应用。但由于影响压力补偿灌水器水力性能的因素比较复杂, 因此造成压力补偿灌水器设计和优化的困难。该文通过理论分析确定影响压力补偿灌水器水力性能的关键因素包括压力调节腔出水口位置、出水口直径、压力调节腔凸台高度、直径、小槽宽度、弹性膜片的材料性能与厚度, 并进一步通过水力性能试验研究了这些关键因素对灌水器水力性能的影响。结果表明: 压力调节腔出水口距离越远, 流量调节性能越差; 压力调节腔出口直径增大会导致工作区间减小; 凸台高度应该 $<0.3\text{ mm}$ , 否则无补偿效果; 凸台直径的改变对灌水器性能影响不大; 槽宽的增大有利于提高压力补偿过程的平稳性, 但减弱流量调节性能; 膜片硬度对补偿效果影响很大, 硬度为 50 HA 时补偿效果最优; 膜片厚度的增加可减缓高压阶段流量随压力增长而下降的趋势, 有利于灌水器在高压工况下保持流量稳定。研究为压力补偿灌水器的设计和优化提供了参考。

**关键词:** 灌溉; 结构; 膜片; 滴灌; 压力补偿灌水器; 水力性能; 影响因素

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.003

中图分类号: S277.9<sup>+</sup>5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-15-0019-07

魏正英, 马胜利, 周 兴, 苑伟静. 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.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.003 <http://www.tcsae.org>

Wei Zhengying, Ma Shengli, Zhou Xing, Yuan Weijing. Influence factors on hydraulic performance of pressure-compensating emitter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(15): 19—25. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2015.15.003 <http://www.tcsae.org>

## 0 引 言

滴灌是目前节水效率最高的微灌方式<sup>[1-5]</sup>, 灌水器在滴灌系统中占主要地位, 压力补偿灌水器属于其中的一种, 由于其可自调压的作用使出流保持稳定而受到重视。压力补偿灌水器一般通过改变不同压力下水流通过流道的长度或过流断面面积来调节流量, 使流量在一定的压力范围内保持恒定。同时, 压力补偿灌水器由于其流道大小与几何形状可发生改变, 抗堵性能好。

大量学者<sup>[6-7]</sup>针对现有压力补偿灌水器产品进行研究发现, 压力补偿灌水器工作压力都在 5~7 m 水头以上, 在低压条件下表现出无补偿性能或部分补偿性能, 且出水流量稳定性差。姚彬等<sup>[8]</sup>采用水力性能试验方法研究了一种内镶贴片式补偿滴头的流道断面尺寸、出水口台阶高度、出水槽断面尺寸及膜片性能对其水力性能的影响。何静<sup>[9]</sup>通过试验对 NETA-FIM 公司 Ram 结构形式的扁平式灌水器进行分析, 确定了压力补偿区结构、弹性膜片以及迷宫流道结构等多个参数对其水力性能的影响趋势。魏正英等<sup>[10]</sup>通过试验研究, 发现压力补偿式灌水器补偿区流道单元数量与剪切深度对其性能有显著影响。

武永安<sup>[11]</sup>探讨了一种无迷宫流道的简单管上式压力补偿灌水器中弹性膜片参数对其水力性能的影响规律。王立朋<sup>[12]</sup>针对灌水器压力补偿腔结构参数对其流量与起调压力值的影响进行了正交试验及单因素试验研究, 发现压力调节腔高度与直径对灌水器流量与起调压力值影响显著。李令媛<sup>[13]</sup>研究了无迷宫流道压力补偿式灌水器结构参数对灌水器水力特征的影响, 分析了基座下腔高度, 垫片厚度和垫片硬度对灌水器补偿区内的流态指数和流量的影响, 发现腔高度影响流态指数, 垫片硬度改变补偿区的起调压力。同时她还研究了大流量压力补偿灌水器的水力性能, 通过正交试验确定了补偿区结构参数对灌水器流量的影响顺序<sup>[14]</sup>。李刚等<sup>[15]</sup>讨论了地下滴灌中不同土壤质地对压力补偿灌水器出流的影响, 试验表明, 在压力补偿范围内, 土壤对灌水器流量影响很小。

周兴研究了压力补偿灌水器流固耦合数值计算方法, 计算所得到的流量结果与试验结果最大偏差为 2.5%, 为压力补偿灌水器快速开发提供理论依据<sup>[16]</sup>。魏正英建议在压力补偿灌水器影响因素的分析中, 应该结合流固耦合数值模拟和可视化试验来分析补偿机制<sup>[17]</sup>。白济扬等<sup>[18-19]</sup>设计了一种双向流流道, 并研究了流道结构参数对水力性能的影响, 灌水器压力低于 0.10 MPa 区间, 由于正向水流与反向水流的混掺过程, 使得双向流流道的流态指数低于迷宫式流道。这些试验研究为灌水器设计积累了经验, 但是所有的试验都只是对部分影响因素进行探讨, 只能为灌水器设计提供有限参考。本文主要通过

收稿日期: 2015-05-04 修订日期: 2015-07-06

基金项目: 国家“十二五”863 计划资助项目 (2011AA100507-4)

作者简介: 魏正英, 女, 陕西西安人, 教授, 博士生导师, 主要从事微细产品结构设计和快速制造技术研究。西安 西安交通大学先进制造技术研究所, 710049。Email: zywei@mail.xjtu.edu.cn

\*通信作者: 马胜利, 男, 陕西西安, 博士生, 主要从事灌水器研究。西安 西安交通大学机械制造系统国家重点实验室, 710049。Email: mashengli1987@163.com

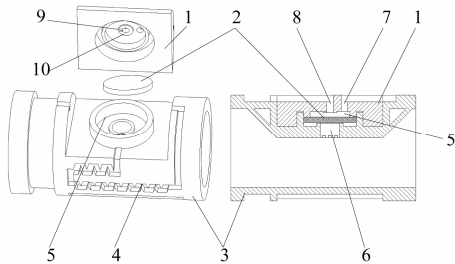
试验研究,从而确定各因素及其交互效应对灌水器流量的影响,为压力补偿灌水器的设计与性能优化提供参考。

1 材料与方法

1.1 灌水器及其影响因素确定

1.1.1 灌水器

由于圆柱孔口补偿型压力灌水器迷宫流道由滴灌毛管的管壁进行密封,迷宫流道固定,减小了冲洗状态流量的变化,因此本文选取了 PLASTRO 公司型号为 HydroPC 的圆柱孔口补偿型压力灌水器,其工作压力为 60~350 kPa、流量为 1.2 L/h,其结构参数包括压力调节腔出口直径 1.0 mm、凸台高度 0.1 mm、凸台小槽宽度 0.35 mm、出口距离 2.8 mm、压力调节腔直径 6.8 mm、调节腔出口凸台直径 2 mm、流道单元数 10 个、流道宽度 1 mm、膜片硬度 30 HA、膜片厚度 0.85 mm。灌水器结构如图 1 所示,圆柱孔口补偿型压力补偿灌水器由压盖、弹性膜片以及灌水器主体 3 部分组成。其中灌水器主体上主要有入水口、迷宫流道、出水环形槽等结构。入水口有过滤栅格可以过滤灌溉水中杂质以减少堵塞。迷宫流道布置在灌水器主体外表面。灌水器出水口与压力调节腔结构均在压盖上,压盖起到固定膜片的作用,弹性膜片变形将改变压力调节腔体积从而改变过流断面面积,达到调节流量的目的。



1.压盖 2.弹性膜片 3.灌水器主体 4.迷宫流道 5.压力调节腔 6.灌水器入水口 7.压力调节腔入水口 8.压力调节腔出水口 9.凸台 10.小槽  
1.Gland 2.Elastic diaphragm 3.Emitter body 4.Labyrinth channel  
5.Pressure regulating cavity 6.Emitter inlet 7.Cavity inlet 8.Cavity outlet  
9.Boss 10.Groove

图 1 内镶圆柱式孔口补偿型压力补偿灌水器结构示意图  
Fig.1 Schematic diagram of cylindrical pressure-compensating emitter with orifice inline

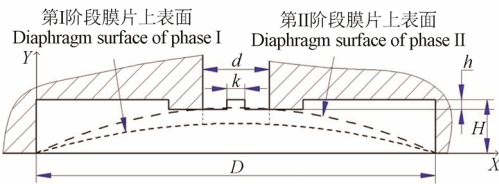
1.1.2 灌水器影响因素确定

压力补偿灌水器的工作过程即为膜片变形的 2 个阶段,如图 2 所示: 1) 在水压作用下,膜片表面逐渐贴近出口;

2) 膜片与压力调节腔出口凸台接触,在水压作用下继续变形,压入凸台上所开小槽内。由压力补偿灌水器工作原理可知,压力调节腔内的过流断面面积变化规律是灌水器流量调节性能的关键。在压力调节腔内,水流向出口处汇聚,流速垂直于调节腔出口曲面。而在凸台小槽内,流速平行于壁面。从而取压力调节腔内过流断面面积  $A_2$  为调节腔出口曲面面积与凸台小槽截面面积之和,  $m^2$ , 即:

$$A_2=\pi\cdot d\cdot\left[H-h-\psi\cdot\frac{\Delta P\cdot(D^2-d^2)}{8}\right]+h\cdot k\tag{1}$$

式中:  $d$  为压力调节腔出口直径, m;  $H$  为压力调节腔高度, m;  $h$  为出口凸台高度, m;  $D$  为压力调节腔直径, m;  $k$  为出口小槽宽度, m;  $\psi$  为膜片材料属性,通常指硬度 (HA) 和厚度 (m);  $\Delta P$  为上下表面压力差, kPa。



注:  $D$  为调节腔直径;  $d$  为调节腔出口直径;  $k$  小槽宽度;  $H$  为调节腔高度;  $h$  为凸台高度。  
Note:  $D$  is cavity diameter;  $d$  is cavity outlet diameter;  $k$  is groove width;  $H$  is the cavity height;  $h$  is boss height.

图 2 补偿腔内部弹性膜片变形示意图  
Fig.2 Schematic diagram of elastic deformation of diaphragm in compensation cavity

由式 (1) 可知,压力调节腔过流断面面积  $A_2$  取决于  $d$ 、 $D$ 、 $h$ 、 $H$  4 个结构参数、膜片上下表面压力差  $\Delta P$ 、膜片材料应力应变关系和膜片厚度  $W$ 。由于膜片为圆形,中心位置变形量最大,又由于压力调节腔内出水口位置固定于压力调节腔顶面中心位置,从入水口流出的水流直接冲击在膜片上表面,因此入水口位置将影响膜片上表面受力,从而对灌水器水力性能造成影响。因此在流道结构一定时,压力补偿灌水器流量调节性能主要取决于入水口位置、压力调节腔出口直径、压力调节腔凸台直径、压力调节腔凸台高度、压力调节腔凸台小槽宽度、弹性膜片的材料性能与厚度以及能够影响膜片表面受力分布的其他因素。

1.2 水力性能试验

1.2.1 试验设计

先进行单因素进行试验,分析单个因素对灌水器水力性能的影响。各影响因素设计水平如表 1 所示。

表 1 单因素试验设计  
Table 1 Design for single factor experiment

试验因素 Tested factors	$L/mm$	$d/mm$	$h/mm$	$d_t/mm$	$k/mm$	$H_A/HA$	$W/mm$
$L$	1.9、2.2、2.5、2.8	1.0	0.1	2.0	0.35	30	0.85
$d$	2.8	1.1、0.9、0.7、0.5	0.1	2.0	0.35	30	0.85
$h$	2.8	1.0	0.1、0.2、0.3、0.4	2.0	0.35	30	0.85
$d_t$	2.8	1.0	0.1	1.5、2、2.5、3	0.35	30	0.85
$k$	2.8	1.0	0.1	2.0	0.35、0.4、0.45、0.5	30	0.85
$H_A$	2.8	1.0	0.1	2.0	0.35	30、40、50、60	0.85
$W$	2.8	1.0	0.1	2.0	0.35	30	0.70、0.85、1.0

注:  $L$  为出口距离,  $d$  为出口直径,  $h$  为凸台高度,  $d_t$  为凸台直径,  $k$  为凸台小槽宽度,  $H_A$  为膜片硬度,  $W$  为膜片厚度, 下同。  
Note:  $L$  is outlet distance,  $d$  is outlet diameter,  $h$  is boss height,  $d_t$  is boss diameter,  $k$  is groove width,  $H_A$  is diaphragm hardness,  $W$  is diaphragm, same as below.

各因子均在其常规尺度范围内等距地取 4 个水平。以入水口与出水口中心距离  $L$  标定入水口位置，受压力调节腔结构尺寸和出水口入水口直径的限制，入水口与出水口的距离范围在 1.7~3.0 mm。研究单个因素对灌水器水力性能影响时，将其他因素设为固定值。

开展正交试验研究多因素对灌水器水力性能的交互效应。为了减少工作量，根据单因素试验结果，选择对灌水器水力性能影响较大的因素进行正交试验。本研究对  $d$ 、 $h$ 、 $L$  进行 3 因素 3 水平  $L_9(3^3)$  正交试验，如表 2 所示。

表 2 补偿区关键参数正交试验设计及其对应的流态指数

Table 2 Orthogonal experimental design for key parameters in compensation area and their flow index values

试验号 Labels	$L/\text{mm}$	$d/\text{mm}$	$h/\text{mm}$	流态指数 Flow index
1	2.0	0.8	0.1	0.028
2	2.0	1.0	0.2	0.186
3	2.0	1.2	0.3	0.293
4	2.4	0.8	0.2	0.158
5	2.4	1.0	0.3	0.301
6	2.4	1.2	0.1	-0.428
7	2.8	0.8	0.3	0.320
8	2.8	1.0	0.1	-0.216
9	2.8	1.2	0.2	0.103

注： $d_i$  为 2.0 mm， $k$  为 0.35 mm， $H_A$  为 30 HA， $W$  为 0.85 mm。  
Note:  $d_i$  is 2.0 mm,  $k$  is 0.35 mm,  $H_A$  is 30 HA, and  $W$  is 0.85 mm.

1.2.2 试验件制作

试验件通过快速成型方式制作出灌水器模型的试验件，灌水器试验件采用 DSM Somos 14120 光敏树脂，制作出的灌水器试验件如图 3 所示。按照《农业灌溉设备滴头和滴灌管技术规范 and 试验方法》<sup>[20]</sup>，针对每一种结构，做相同的 25 个灌水器并测量其实际尺寸，统计其平均误差，平均误差如表 3 所示。试验件中压力调节腔内出水口直径、凸台小槽宽度、凸台直径以及流道宽度尺寸采用 Keyence 公司的 VH-8000 光学显微镜在 100 倍放大倍数下进行测量，凸台高度、流道深度、压力调节腔高度采用 OLYMPUS OLS4000 激光共聚焦显微镜在 5 倍放大倍数、 $2\mu\text{m}$  步长下三维成像测量。



图 3 压力补偿灌水器快速成型试验件

Fig.3 Rapid prototyping pressure-compensating emitter

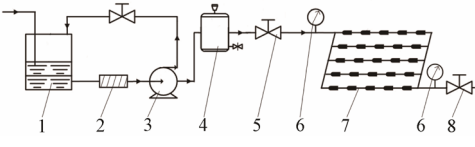
表 3 实际和设计尺寸的平均误差表

Table 3 Average errors of designed and physical dimensions

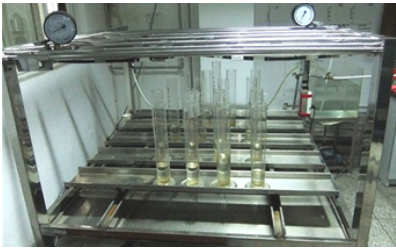
结构参数 Structural parameters	实际尺寸 Physical dimension/mm	平均误差 Average error/%
出口距离 Outlet distance	1.90、2.20、2.50、2.79	0.26、-1.8、-1.07、-2.61
出口直径 Outlet diameter	1.10、0.89、0.70、0.51	-0.045、-0.75、-0.39、1.75
凸台高度 Boss height	0.10、0.20、0.30、0.39	-0.016、-2.053、-1.13、-2.9
凸台直径 Boss diameter	1.51、1.94、2.41、2.95	0.37、-3.25、-3.72、-1.61
小槽宽度 Groove width	0.34、0.39、0.46、0.51	-2.2、-1.75、2.17、1.75

1.2.3 试验过程

试验所用的水力性能试验台装置示意图与实物图如图 4 所示，试验测试了压力变化从 10 kPa 到 200 kPa 时的流量变化情况。根据国家标准 GB/T 17187-2009/ISO9261:2004 要求，试验开始前首先将压力调至最小测试压力 10 kPa 并保压 3 min，然后调制最大测试压力 200 kPa 保压 3 min，循环 3 次后将压力值调制 100 kPa 保压 42 min，整个调节过程持续 1 h 结束。试验中以 10 kPa 的极差从 10 kPa 开始测量至 120 kPa，然后以 20 kPa 极差测量至 200 kPa 结束。每次测量前调整压力至压力表读数稳定后保持压力 5 min，然后将量筒移至灌水器正下方开始测量，测量时间为 5 min，测其流量，L/h。



a. 装置示意图  
a. Schematic diagram of test bed



b. 装置实物照

b. Photo of test bed

- 1.水池 2.过滤器 3.自吸水泵 4.稳压罐 5.调压阀 6.压力表 7.灌水器 8.冲洗阀  
1.Sink 2.Filter 3.Self-prime pump 4.Surge tank 5. Pressure-regulating valve 6.Pressure gauge 7.Irrigation emitter 8.Fulshing vale

图 4 灌水器水力性能试验台

Fig.4 Diagram of hydraulic performance test bed

2 结果与分析

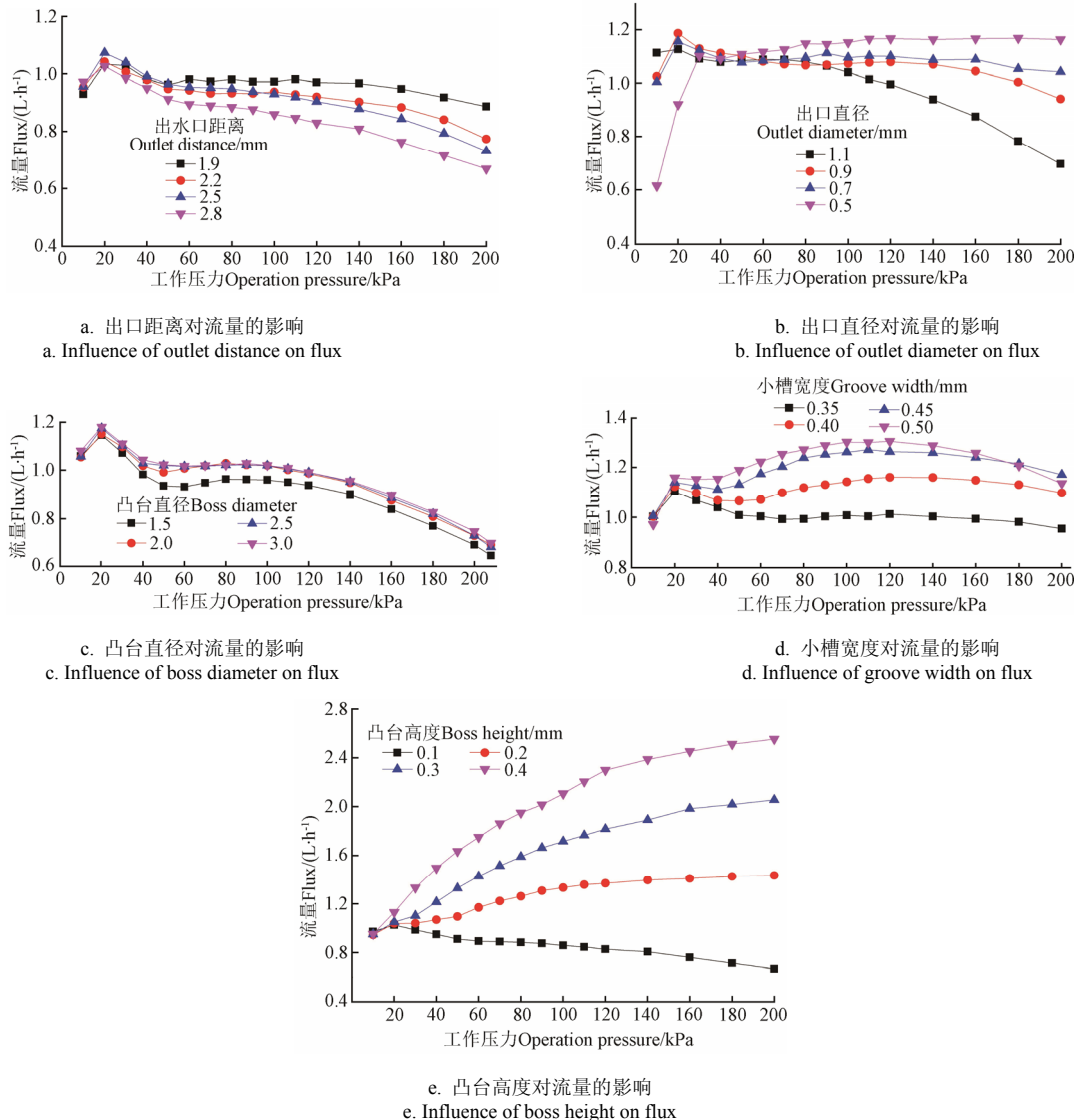
2.1 补偿区关键结构参数对流量的影响

2.1.1 单因素试验结果

根据行业标准 SL/T67.2-1994<sup>[21]</sup>，灌水器流量在进入压力补偿区时曲线上存在明显拐点，将该拐点对应的压力定义为灌水器起调压力  $H_0$ 。当工作压力  $H > H_0$  时，压力  $H$ -流量  $q$  的水力特征曲线拟合方程( $q=l \cdot H^x$ )中  $x$  为流态指数， $l$  为流量系数。 $H_0$  和  $x$  是衡量压力补偿灌水器的重要指标。统计不同工作压力下的流量绘制压力-流量曲线如图 5 所示。由图 5a 可知，入水口位置对流量的影响在低压条件下表现不明显，起调压力基本相同(均为 45 kPa)，对压力流量曲线起调压力值前段无明显影响，后段有较为明显的影响。入水口距离出水口越远，流量随着工作压力的增大而下降的趋势越明显，灌水器流量调节性能越差。因此，减小入水口与出水口之间的距离有助于提高压力补偿灌水器补偿性能。图 5b 可以看出，压力  $> 100\text{ kPa}$  时，压力调节腔出口直径增大，流量随压力增大而下降幅度越大，工作区间(稳定阶段)减小。而在  $< 100\text{ kPa}$  时，直径的减小对流量影响微小，有利于提高高压

力补偿灌水器流量调节性能, 增大其工作区间, 并使其在低压工况下补偿性能更好, 但是减小出口直径也将使得起调压力值增大。试验中, 直径最小 (0.5 mm) 的灌

水器补偿效果明显优于其余 3 个尺寸的灌水器, 但其起调压力值相对较大, 不利于微压滴灌的情况, 因此建议压力调节腔出口直径不要  $>0.5$  mm。



注: 试验设计中, 出口距离为 2.8 mm、出口直径为 1.0 mm、凸台高度 0.1 mm、凸台直径 2.0 mm、凸台小槽宽度 0.35 mm、膜片硬度 30 HA、膜片厚度 0.85 mm; 图 a~e 中, 分别只有出口距离、出口直径、凸台直径、凸台小槽宽度、凸台高度为变量, 其他参数值保持固定。

Note: In experiment design, outlet distance is 2.8 mm, outlet diameter is 1.0 mm, boss height is 0.1 mm, boss diameter is 2.0 mm, groove width is 0.35 mm, diaphragm hardness is 30 HA, and diaphragm is 0.85 mm; For fig a-e, outlet distance, outlet diameter, boss diameter, groove width, and boss height are variables with other parameters kept constant.

图 5 压力调节腔关键结构参数对流量的影响

Fig.5 Influence of key structural parameter in pressure regulating cavity on flux

图 5e 中, 凸台高度越大流量越大。对  $>20$  kPa 压力的曲线区段按指数函数进行拟合, 得到凸台高度为 0.1、0.2、0.3、0.4 mm 时的流态指数 -0.11、0.16、0.30、0.35。随着凸台高度的增大, 流态指数明显增大, 按照流态指数  $<0.2$  的灌水器为压力补偿灌水器的规定, 凸台高度为 0.3 和 0.4 mm 的灌水器已经没有压力补偿性能。这是由于在膜片变形过程中, 压力调节腔过流断面面积由凸台小槽横截面积与膜片挤压入小槽的体积决定, 凸台高度大时, 由于膜片在压力作用下挤压入小槽的体积小, 过流断面面积几乎不变, 压力补偿灌水器失去补偿作用。因此凸台高度取值为 0.2 mm, 否则无补偿效果或出现流量反而随压力增大而减小。

图 5c 中, 凸台直径的改变对灌水器性能影响不大,

凸台直径  $>2.0$  mm 时灌水器水力性能几乎一致, 而凸台直径较小时灌水器水力性能存在差异, 但差异不大。凸台直径为 1.5 mm 的灌水器与其余 3 个凸台直径的灌水器相比, 其流量略小。总体来说, 当凸台直径  $\geq 2.0$  mm 时, 对灌水器性能影响微小。

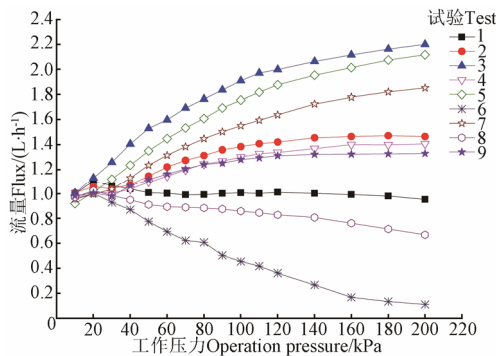
图 5d 中, 随着槽宽的增大流量略有增大, 起调压力值不变 (20 kPa)。由压力补偿灌水器工作过程可知, 槽宽主要决定了压力补偿灌水器在膜片变形第 II 阶段的性能, 由图中曲线可以明显看到, 槽宽越小压力流量曲线补偿区平缓, 槽宽为 0.35 mm 的灌水器在 70 kPa 压力后表现出非常平稳的补偿性能, 而随着槽宽的增大, 流量随压力增大先上升后下降的变化趋势越来越明显, 且变化幅度增大, 这对压力补偿灌水器的流量调节性能很不利。



综上,  $d$ 、 $h$ 、 $L$ 、以及  $k$  都对灌水器水力性能有较为明显的影响作用。而  $d$  影响很小, 同时由于  $k$  在  $>0.4$  mm 时使流量曲线呈明显先上升后下降趋势, 不利于对灌水器的压力补偿, 因此  $k$  固定为 0.35, 以减小出现压力流量曲线先升后降弯曲的情况。其余参数对流量曲线的影响均为单调影响。故进行如表 2 所示的正交试验研究参数交互作用对灌水器水力性能的影响。

### 2.1.2 正交试验结果

由图 6 所示的压力流量关系曲线结果可以看出, 各因素组合得到的灌水器补偿性能差异明显, 在压力流量曲线补偿区表现出上升或下降的趋势, 其中第 1 组试验参数的灌水器流量曲线最为平缓, 补偿性能最好, 此时出口距离为 2.0 mm, 出口直径为 0.8 mm, 凸台高度为 0.1 mm (表 2)。为了定量分析各因素的影响大小, 对流量曲线补偿区进行最小二乘拟合, 拟合函数为指数函数, 得到不同结构参数灌水器的流态指数结果, 并针对流态指数指标进行直观分析, 具体结果见表 2。



注: 凸台直径 2.0 mm、凸台小槽宽度 0.35 mm、膜片硬度 30 HA、膜片厚度 0.85 mm。

Note: Boss diameter is 2.0 mm, groove width is 0.35 mm, diaphragm hardness is 30 HA, and diaphragm thickness is 0.85 mm.

图 6 正交试验结果

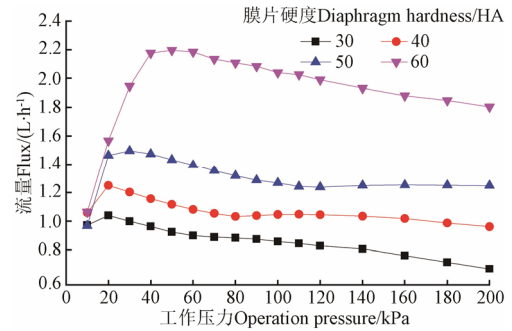
Fig.6 Orthogonal experiment results

由表 2 可知, 第 1 组参数组合的灌水器流态指数最小, 补偿性能最好。而第 6 组和第 8 组出现了负的流态指数, 这明显不符合流态指数的要求。对比结果表明, 凸台高度对流态指数影响最大, 压力调节腔入水口位置对流态指数影响最小, 凸台高度的影响居中。考虑到过小的出口直径容易造成堵塞, 试验中选取的出口直径水平相对较大, 但出口直径对流态指数的影响仍然大于入水口位置因素。

综上, 压力补偿灌水器的最优组合为: 出口距离 2.0 mm, 出口直径 0.8 mm, 凸台高度 0.1 mm, 凸台直径 2.0 mm、凸台小槽宽度 0.35 mm、膜片硬度 30°、膜片厚度 0.85 mm 时。此组合下的压力补偿灌水器的水力性能最好, 起调压力为 25 kPa, 流态指数为 0.02795。

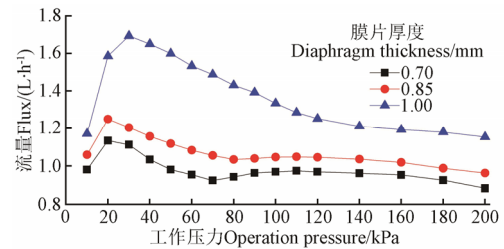
### 2.2 弹性膜片结构参数对流量的影响

弹性膜片的变形情况是影响压力补偿效果的很重要的因素。图 7 为弹性膜片对灌水器性能的影响。



a. 膜片硬度对灌水器流量的影响

a. Influence of diaphragm hardness on flux



b. 膜片厚度对灌水器流量的影响

b. Influence of diaphragm thickness on flux

注: 试验设计中, 出口距离为 2.8 mm、出口直径为 1.0 mm、凸台高度 0.1 mm、凸台直径 2.0 mm、凸台小槽宽度 0.35 mm、膜片硬度 30 HA、膜片厚度 0.85 mm;

Note: In experiment design, outlet distance is 2.8 mm, outlet diameter is 1.0 mm, boss height is 0.1 mm, boss diameter is 2.0 mm, groove width is 0.35 mm, diaphragm hardness is 30 HA, and diaphragm is 0.85 mm; For fig a and b, diaphragm hardness and diaphragm are variables with other parameters kept constant.

图 7 膜片对灌水器流量的影响

Fig.7 Influence of diaphragm on flux of emitter

由图 7a 可以看出, 膜片硬度对灌水器的流量、起调压力值、压力流量曲线起调压力、补偿区均有较为明显的影响。随着膜片硬度的增大, 灌水器流量与起调压力值随之增大, 随压力增大流量下降速率增大, 不利于灌水器在低压环境下工作。膜片硬度为邵氏 A 类 60 HA 的灌水器压力流量关系曲线在 200 kPa 压力前未表现出补偿效果。由 30 HA、40 HA、50 HA 这 3 种膜片硬度的灌水器的试验结果对比可以看出, 随着膜片硬度增大, 补偿区流量随压力增大而下降的趋势减小, 在硬度为 50 HA 时曲线达到水平状态 (最佳状态), 这有利于改善压力补偿灌水器的补偿性能。图 7b 中, 膜片厚度对灌水器流量、起调压力值、压力流量关系曲线均有较为明显的影响 (厚度由小到大依次对应起调压力分别为 25、30、38 kPa)。随着膜片厚度的增大, 流量也随之增大, 流量增长幅度较大。膜片厚度对压力流量曲线起调压力前段的影响与膜片硬度一致, 厚度越大, 起调压力前段所对应的压力区间范围越大, 流量下降幅度越大, 不利于压力补偿灌水器适应低压工作环境。膜片厚度的增加可减缓在高压阶段流量随压力增长而下降的趋势, 有利于灌水器在高压工况下保持流量稳定。因此, 膜片厚度为 0.7 mm 得到相对较好的水力性能。

### 3 结论与讨论

本文分析了圆柱孔口补偿型压力补偿灌水器水力性能影响因素, 结果表明: 1) 入水口距离出水口越远, 流

量随着工作压力的增大而下降的趋势越明显, 灌水器流量调节性能越差; 2) 压力调节腔出口直径对流量影响微小, 直径为 0.5 mm 时, 其补偿效果较优, 但其起调压力值相对较大, 因此在非微压滴灌的情况下, 建议压力调节腔出口直径不要  $>0.5$  mm; 3) 压力调节腔凸台高度对补偿效果影响显著, 凸台高度应该为 0.2 mm, 过大则补偿失效, 过小则会出现流态指数为负的情况; 凸台直径的改变对灌水器性能影响不大, 凸台直径  $>2.0$  mm 时灌水器水力性能几乎一致; 4) 小槽宽度的增大有利于提高压力补偿过程中的平稳性, 但不利于流量调节性能, 槽宽为 0.35 mm 的灌水器在 70 kPa 压力后表现出非常平稳的补偿性能; 5) 补偿区关键结构参数正交试验中得出, 凸台直径固定在 2.0 mm, 小槽宽度固定为 0.35 mm 情况下, 出口距离为 2.0 mm, 出口直径为 0.8 mm, 凸台高度为 0.1 mm 时灌水器性能最优, 其流态指数为 0.02795, 起调压力为 25 kPa; 6) 膜片硬度对补偿效果影响显著, 硬度为 50° 时补偿效果最优; 膜片厚度的增加可减缓在高压阶段流量随压力增长而下降的趋势, 有利于灌水器在高压工况下保持流量稳定, 膜片厚度为 0.7 mm 得到相对较好的水力性能。

综上所述, 在压力补偿灌水器的设计中, 应该综合考虑各影响因素影响水平, 保证其设计值在适当的域值内, 从而使压力补偿灌水器的满足水力性能要求。本研究的不足之处为: 仅仅对调节腔关键参数做了正交分析, 并未将膜片的硬度和厚度一并考虑, 建议进一步研究中考虑多因素多水平的正交试验分析。

### [参 考 文 献]

- [1] 王金丽. 滴灌技术的特点及应用[J]. 农业科技与装备, 2012(1): 62—63.  
Wang Jinli. Features of drip irrigation and its present applications[J]. Agricultural Science and Technology and Equipment, 2012(1): 62—63. (in Chinese with English Abstract)
- [2] 李久生, 李蓓, 饶敏杰. 地面灌溉技术参数对氮素运移分布影响的研究进展[J]. 农业工程学报, 2004, 20(6): 51—55.  
Li Jiusheng, Li Pei, Rao Minjie. Influence of surface irrigation technical parameter on nitrogen transport and distribution: A review[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2004, 20(6): 51—55. (in Chinese with English Abstract)
- [3] Karmeli D, Keller J. Trickle Irrigation Design[M]. Glendora: Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corporation, 1975.
- [4] 张新星, 杨振杰. 我国节水灌溉的现状与分析[J]. 安徽农业科技, 2015, 42(33): 11972—11974.  
Zhang Xinxing, Yang Zhenjie. Status and analysis of water saving irrigation in china[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 42(33): 11972—11974. (in Chinese with English Abstract)
- [5] 杨士红, 王乙江, 徐俊增, 等. 节水灌溉稻田土壤呼吸变化及其影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 140—146.  
Yang Shihong, Wang Yijiang, Xu Junzeng, et al. Changes of soil respiration of paddy fields with water-saving irrigation and its influencing factors analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(8): 140—146. (in Chinese with English abstract)
- [6] Duan X, Lesikar B J, Kenimer A L, et al. Performance of wastewater subsurface drip emitters at low and normal pressure[J]. Water Environment Research, 2008, 80(2): 142—148.
- [7] 黎安, 刘洁, 魏青松, 等. 滴灌灌水器多类型流道的微压水力性能研究[J]. 中国农村水利水电, 2012(2): 4—7.  
Li An, Liu jie, Wei Qingsong, et al. The hydraulic properties of multiple flow channels of drip emitter under micro-pressure[J]. China Rural Water and Hydropower, 2012(2): 4—7. (in Chinese with English Abstract)
- [8] 姚彬, 刘志烽, 张建萍. 内镶补偿贴片式滴头水力性能的初步研究[J]. 节水灌溉, 2004(4): 21—22.  
Yao Bin, Liu Zhifeng, Zhang Jinping. Research on the hydraulic properties of the pressure compensating emitter with patch type inline[J]. Water Saving Irrigation, 2004(4): 21—22. (in Chinese with English Abstract)
- [9] 何静. 压力补偿滴头设计机理研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.  
He Jing. Research on the Mechanism of the Drip Head Design of the Pressure Compensating Emitter[D]. Beijing: China Agricultural University, 2006. (in Chinese with English Abstract)
- [10] 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, Cheng Yingshe, et al. A new method for rapid design of the integral pressure-compensating emitter[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(12): 1387—1392. (in Chinese with English Abstract)
- [11] 武永安. 压力补偿滴头流道流场的数值模拟与补偿元件分析[D]. 北京: 北京化工大学, 2009.  
Wu Yongan. Pressure Compensating Emitter Numerical Simulation of Flow Field and Analysis of Compensation Component[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2009. (in Chinese with English Abstract)
- [12] 王立朋. 迷宫型压力补偿灌水器结构设计和快速开发[D]. 西安: 西安交通大学, 2012.  
Wang Lipeng. Structure Design and Rapid Development of the Pressure Compensating Emitter with Labyrinth Channel[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2012. (in Chinese with English Abstract)
- [13] 李令媛, 朱德兰, 张林. 补偿区结构参数对灌水器水力性能的影响[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(6): 66—70.  
Li Lingyuan, Zhu Delan, Zhang Lin. Effect of pressure compensation structural parameter on hydraulic performance of emitter[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(6): 66—70. (in Chinese with English Abstract)
- [14] 李令媛, 朱德兰, 张林. 大流量压力补偿式灌水器水力性能[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(12): 1083—1088.  
Li Lingyuan, Zhu Delan, Zhang Lin. Hydraulic performance

- of new pressure-compensating emitter with large flow[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2013, 31(12): 1083—1088. (in Chinese with English Abstract)
- [15] 李刚, 白丹, 王晓愚. 地下滴灌中压力补偿式滴头水力要素试验研究[C]. 中国农业工程学会农业水土工程专业委员会第五届全国学术会议论文集. 北京: 中国农业工程学会, 2008: 151—155.
- [16] 周兴, 魏正英, 苑伟静, 等. 压力补偿灌水器流固耦合计算方法[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(2): 30—36. Zhou Xing, Wei Zhengying, Yuan Weijing, et al. Fluid-structure interaction analysis method for pressure compensating emitter[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2013, 29(2): 30—36. (in Chinese with English abstract)
- [17] 魏正英, 苑伟静, 周兴, 等. 我国压力补偿灌水器的研究进展[J]. *农业工程学报*, 2014, 45(1): 94—101. Wei Zhengying, Yuan Weijing, Zhou Xing, et al. Research progress of pressure compensating emitters in micro-irrigation systems in china[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2014, 45(1): 94—101. (in Chinese with English abstract)
- [18] 田济扬, 白丹, 任长江, 等. 滴灌双向流道灌水器水力特性分析[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(20): 89—94. Tian Jiyang, Bai Dan, Ren Changjiang, et al. Analysis on hydraulic performance of bidirectional flow channel of drip irrigation emitter[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2013, 29(20): 89—94. (in Chinese with English abstract)
- [19] 田济扬, 白丹, 于福亮, 等. 基于 Fluent 软件的滴灌双向流道灌水器水力性能数值模拟[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(20): 65—71. Tian Jiyang, Bai Dan, Yu Fuliang, et al. Numerical simulation of hydraulic performance on bidirectional flow channel of drip irrigation emitter using Fluent[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2014, 30(20): 65—71. (in Chinese with English abstract)
- [20] 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.
- [21] SL/T 67.2-1994. 微灌灌水器——微灌管、微灌带[S].

## Influence factors on hydraulic performance of pressure-compensating emitter

Wei Zhengying, Ma Shengli<sup>\*</sup>, Zhou Xing, Yuan Weijing

(State Key Lab for Manufacturing System Engineering, School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Pressure-compensating emitter is widely used in the agricultural irrigation due to its better compensation and higher uniformity performance than non-pressure compensating one. However, the factors that influence the hydraulic properties of pressure-compensating emitter are complicated, which causes difficulty in design and optimization of the structure of the pressure-compensating emitter. In this study, we determined important influential factors of pressure-compensating emitter based on theoretical analysis and investigated effects of those important factors on its hydraulic performance in laboratory tests. Single factor and orthogonal experiment designs were carried out to analyze the each factor's and their interactive effect. The HydroPC cylindrical pressure-compensating emitter with orifice inline was purchased from PLASTRO. It had working pressure of 60-350 kPa, flow rate of 1.2 L/h, outlet distance of 2.8 mm, cavity diameter of 6.8 mm, boss height of 0.1 mm, groove width of 0.35 mm, boss diameter of 2 mm, diaphragm hardness of 30 HA, and diaphragm thickness of 0.85 mm. The theoretical analysis showed that the hydraulic performance of the emitter could be affected by the distance of outlet from inlet, the outlet diameter of the pressure regulating cavity, the height of the boss in the regulating cavity, the diameter of the boss in the regulating cavity, the width of the boss in pressure regulating cavity, the materials characteristics of the diaphragm such as hardness and thickness. The hydraulic performance experiment of single-factor design showed that: 1) The far distance of inlet from outlet could result in poor flow regulating performance of the emitter since the flow rate tended to be reduced with high working pressure; 2) When the pressure regulating cavity diameter was 0.5 mm, the emitter had good compensating performance and also high initial pressure, which suggested the diameter should be less than 0.05 mm under non-micro drip irrigation; 3) Boss height had a large influence on pressure-compensating performance and its optimal value was 0.2 mm; 4) Boss height did not greatly affect hydraulic performance of the emitter and the performance was almost same when its value was high than 2.0 mm; and 4) The large value of groove width could facilitate pressure-compensating process but not the flow regulating performance. The orthogonal experiment revealed that the hydraulic performance of the emitter was optimal with flow exponent of 0.02795 and initial pressure of 25 kPa when its boss diameter was 2.0 mm, groove width was 0.35 mm, outlet distance and diameter were 2.0 and 0.8 mm, boss height was 0.1 mm. In addition, the material properties of the diaphragm could greatly affect pressure-compensating performance and the performance was best when the hardness of diaphragm was 50° and the thickness was 0.7 mm. In sum, those factors should be considered in design of pressure-compensating emitters. The results would provide important data for emitter design.

**Key words:** irrigation; structure; diaphragms; drip irrigation; pressure-compensating emitter; hydraulic performance; influential factors