排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2022 年 11 月 Nov. 2022 | 第 40 卷 第 11 期 Vol.40 No.11

弹性片特性对压力补偿滴头水力性能的影响


王彦邦

王彦邦[1,2]，吕畅[1,2]，董爱红[1,2]，张文倩[1,2]，张二信[1,2]，牛文全[1,3*]
（1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院，陕西 杨凌 712100；2. 西北农林科技大学水土保持研究所，陕西 杨凌 712100；3. 中国科学院水利部水土保持研究所，陕西 杨凌 712100）

摘要：为了探明弹性片性能与滴头水力性能之间的关系，提高建立压力补偿滴头设计方法，采用滴头样品进行水力性能测试，研究了弹性片硬度和厚度对迷宫流道结构滴头流量系数、流态指数、起调压力、补偿区间的影响.结果表明：弹性片硬度和厚度对滴头流量影响具有统计学意义（$P \leqslant 0.01$），且硬度对滴头流量的影响程度大于厚度；弹性片硬度和厚度均与流量系数、起调压力、补偿区间呈正相关关系，与流态指数呈负相关关系；存在适宜的弹性片特性范围，使不同结构压力补偿滴头拥有较小的起调压力、最小的流态指数和最大补偿区间.该试验滴头在弹性片硬度为 60 HA、厚度为 1.2 mm 时，流态指数最小，其值为 0.078.建立了弹性片特征参数与滴头流量、流态指数、起调压力和补偿区间的数学关系，可为压力补偿滴头的快速开发提供一定的理论依据.

关键词：压力补偿滴头；弹性片；硬度；厚度；水力性能
中图分类号：S275.6　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2022)11-1132-06
Doi：10.3969/j.issn.1674-8530.21.0162

王彦邦，吕畅，董爱红，等. 弹性片特性对压力补偿滴头水力性能的影响[J].排灌机械工程学报，2022，40(11)：1132-1137.
WANG Yanbang，LYU Chang，DONG Aihong，et al. Effect of elastic diaphragm characteristics on hydraulic performance of pressure-compensating emitter[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME)，2022，40(11)：1132-1137.(in Chinese)

Effect of elastic diaphragm characteristics on hydraulic performance of pressure-compensating emitter

WANG Yanbang[1,2]，*LYU Chang*[1,2]，*DONG Aihong*[1,2]，*ZHANG Wenqian*[1,2]，*ZHANG Erxin*[1,2]，*NIU Wenquan*[1,3*]
(1. College of Water Resources and Architectural Engineering，Northwest A&F University，Yangling，Shaanxi 712100，China；2. Institute of Soil and Water Conservation，Northwest A&F University，Yangling，Shaanxi 712100，China；3. Institute of Soil and Water Conservation，CAS & MWR，Yangling，Shaanxi 712100，China)

Abstract：In order to determine the relationship between the performance of the elastic diaphragm and the hydraulic performance of the emitter，and promote the establishment of the scientific design method of the pressure-compensating emitter in China. The influence of the elastic diaphragms hardness and thickness on the hydraulic performance of the emitter was studied by means of flow pattern index，starting pressure and compensation range of the labyrinth channel structure emitter were studied. The results show that the hardness and thickness of the elastic diaphragm have significant effects on the emit-

收稿日期：2021-06-10；**修回日期**：2021-07-28；**网络出版时间**：2022-11-10
网络出版地址：https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20221109.2107.024.html
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52079112，51679205)；山东省重大科技工程创新项目(2020CXGC010808)
第一作者简介：王彦邦(1991—)，男，甘肃静宁人，硕士研究生(wyb6636@163.com)，主要从事节水灌溉技术研究.
通信作者简介：牛文全(1971—)，男，甘肃甘谷人，研究员，博士生导师(nwq@vip.sina.com)，主要从事水土资源高效利用与节水灌溉研究.

ter flow ($P \leqslant 0.01$), and the hardness has a greater effect on the emitter flow than the thickness. The hardness and thickness of the elastic diaphragm are positively correlated with the flow coefficient, the starting pressure and the compensation interval, but negatively correlated with the flow index. There is an appropriate elastic diaphragm characteristic range, so that different structure pressure-compensating emitters have small starting pressure, minimum flow index and maximum compensation interval. When the elastic diaphragm hardness is 60 HA and thickness is 1.2 mm, the emitters have the minimum flow index of 0.078. The mathematical relationship between the characteristic parameters of the elastic diaphragm and the flow, flow pattern index, starting pressure and compensation interval is established, which can provide a theoretical basis for the rapid development of the pressure-compensating emitter.

Key words: pressure-compensating emitter; elastic diaphragm; hardness; thickness; hydraulic performance

滴灌是目前节水效果较好的灌溉技术之一[1-2];滴头在滴灌系统中至关重要,其结构对灌水均匀性和系统的寿命影响很大[3].压力补偿滴头是一种在一定压力(文中所述压力,实质上全部为滴头入口处的相对压强,单位为 kPa 或者水柱高)范围内,流量能保持稳定的滴头,主要通过压力变化促使弹性片变形,进而改变滴头流道出口断面面积,以调节滴头流量[4].压力补偿滴头已在山丘区、果园等实际生产中得到广泛应用,具有极好的适用性.

弹性片是调控滴头流量稳定的核心部件,其变形特性与滴头流量变化特性有显著相关性[5].部分学者利用数值模拟方法,研究了滴头补偿及与滴头部分流道结构参数之间的关系[6-8],并分析了压力变化对弹性片变形和滴头流量变化的影响[9-11].也有学者通过样品测试的方法,初步探讨了弹性片特性、滴头流道结构等对滴头水力性能的影响[12-13],揭示了各结构参数变化对滴头性能的影响规律[14-15].上述研究结果对于探明压力补偿滴头流量调节机理,建立滴头水力性能与结构参数之间的关系等奠定了基础;但对于弹性片特性、滴头流道结构参数、滴头水力性能之间的系统化数学关系建立的报道少,也无法根据现有的研究成果建立行之有效的压力补偿滴头设计方法.为了进一步确定弹性片性能与滴头水力性能,加快建立压力补偿滴头科学设计方法,文中采用样品测试的方法,研究弹性片对迷宫流道结构滴头水力性能的影响.

1　材料与方法

1.1　试验材料与装置

试验在西北农林科技大学滴头水力性能测试平台上进行,研究对象为一种管上式压力补偿滴头,结构如图 1 所示.试验装置示意图如图 2 所示,可同时布置 5 条毛管,每条毛管上有 5 个滴头,滴头间距为 50 cm.该装置由水泵提供压力(0 ~ 400 kPa),网式过滤器(0.125 mm)过滤杂质,压力表(0~400 kPa,精度 0.1 kPa)读取进水口压力.灌溉水为自来水,用电子秤(精度 0.01 g)称量每个滴头的出水量,并计算流量.

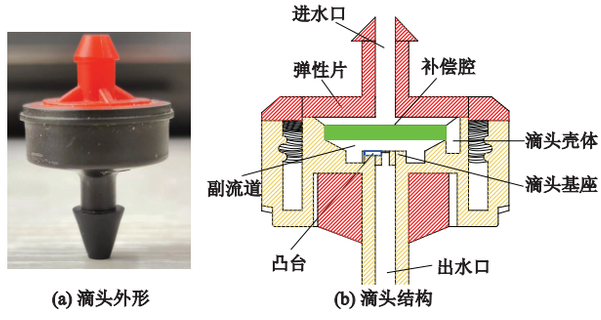


图 1　压力补偿滴头结构示意

Fig.1　Schematic diagram of pressure compensation emitter structure

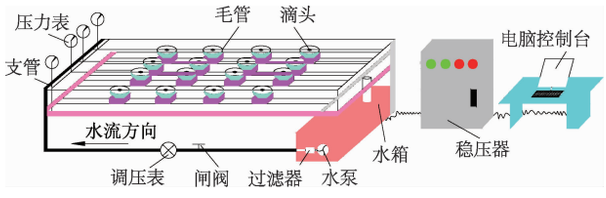


图 2　试验装置示意

Fig.2　Schematic diagram of test device

1.2　试验方法

试验拟定具体参数见表 1,表中物理量为硬度 A、厚度 T、流量系数 k、流态指数 x、起调压力 H_0、补偿区间 P_r(采用补偿范围中最大压力值与最小压力值之差表示)、平均流量 q,其中弹性片硬度按邵氏硬度计法测取,精度 1 HA,厚度由厚度计测取,精度为0.01 mm.试验进水口压力值设置为 20,40,…,300

kPa,共 15 个压力水平.为保证试验过程中试验装置运行正常和处于稳定状态,试验以 20 kPa 为极差,从 20 至 300 kPa,每次测量前保持 3 min 后将量筒放置滴头下方开始测试.每次测试时长 5 min,重复 3 次,取平均值.

表 1 弹性片参数及水力性能指标

Tab.1 Elastic diagram parameters and hydraulic performance indicators

序号	A/HA	T/mm	k	x	H_0/kPa	P_t/kPa	q/(L·h^{-1})
1	40	0.8	4.340	0.147	38	112	2.70
2	50	0.8	5.250	0.130	48	133	3.02
3	60	0.8	5.755	0.114	59	150	3.52
4	70	0.8	6.039	0.112	73	166	3.74
5	40	1.0	4.689	0.136	40	124	2.86
6	50	1.0	5.328	0.122	53	149	3.11
7	60	1.0	6.326	0.106	64	166	3.58
8	70	1.0	6.489	0.105	77	170	4.00
9	40	1.2	5.054	0.119	46	130	2.94
10	50	1.2	5.729	0.100	58	161	3.37
11	60	1.2	6.695	0.078	69	182	3.96
12	70	1.2	6.898	0.089	84	175	4.37
13	40	1.4	5.226	0.125	58	146	2.98
14	50	1.4	5.831	0.112	68	178	3.89
15	60	1.4	6.780	0.089	81	194	4.48
16	70	1.4	6.811	0.097	95	180	4.84

注:流态指数 x 为正数;平均流量 q 为补偿区间的平均流量

1.3 评价指标

1.3.1 流态指数与流量系数

流态指数和流量系数是压力补偿式滴头的重要衡量指标,流量-压力关系计算式为

$$q=kh^x, \tag{1}$$

式中:q 为滴头流量,L/h;x 为流态指数;k 为流量系数;h 为工作压力,kPa.

1.3.2 起调压力与补偿区间

压力补偿滴头开始保持稳定出流时的压力为滴头的起调压力.当压力超过一定范围后,流量出现下降趋势,起调压力与这个压力之间的范围就是滴头的补偿区间.

2 结果与分析

2.1 弹性片硬度和厚度对滴头流量的影响

图 3 为弹性片硬度和厚度对压力补偿滴头流量的影响.由图可知,弹性片硬度和厚度对滴头流量具有较为明显的影响.在不同厚度下,4 种硬度的流量-压力曲线均呈现先上升后下降的趋势.在相同厚度下,滴头流量随着硬度增大而增大.在不同硬度下,4 种厚度的流量-压力曲线均呈现先上升后下降的趋势.在相同硬度下,滴头流量随着厚度增大而增大.由表 1 可以看出,硬度为 40 HA、厚度为 0.8 mm 时,滴头平均流量最小,q 为 2.70 L/h;硬度为 70 HA、厚度为 1.4 mm 时,滴头平均流量最大,q 为 4.84 L/h.

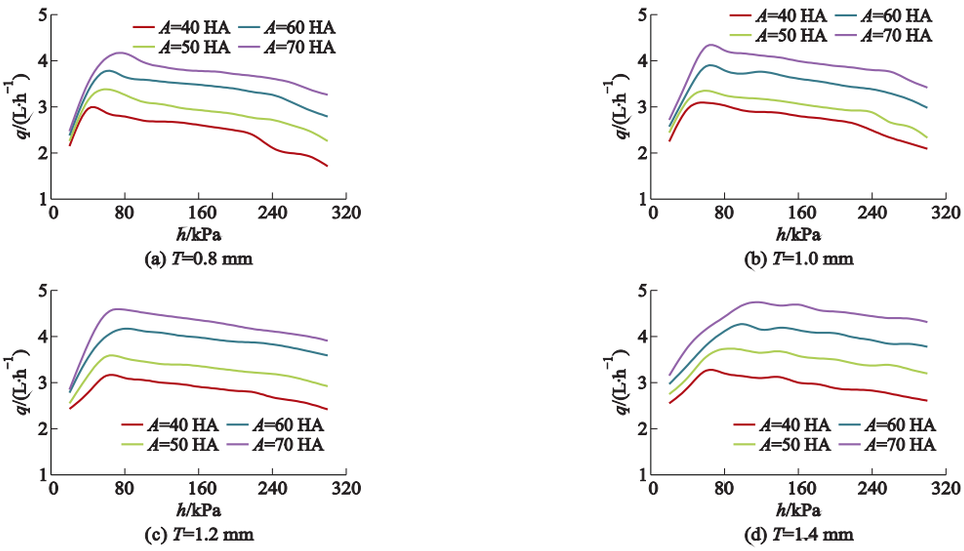


图 3 弹性片硬度和厚度对压力补偿滴头流量的影响

Fig.3 Infiuence of elastic diagram hardness and thickness on flow rate

2.2 弹性片硬度和厚度对滴头水力性能的影响

图 4 为弹性片硬度和厚度对压力补偿滴头水力性能的影响.由图 4a 可知,弹性片硬度和厚度对滴头流量系数影响较明显.在(40,60] HA,流量系数增长较快;在(60,70] HA,缓慢减小.滴头流量系数随着弹性片厚度增大也增大.当厚度为(0.8,1.0]

mm,流量系数增长较快;当厚度为(1.0,1.4] mm,流量系数增加变缓.弹性片硬度为(60,70] HA,厚度为 1.2 和 1.4 mm 的曲线发生交叉现象,流量系数从 6.898减小至 6.810,故并非厚度和硬度同步越大,滴头的流量系数越大.

由图 4b 可知,弹性片硬度和厚度均对流态指数有很大的影响.随着弹性片硬度和厚度的增大,压力补偿滴头流态指数呈先减小后增大的趋势,不同硬度的弹性片存在最小流态指数的拐点厚度,从试验结果观察,4 个硬度下弹性片的拐点厚度均为 1.2 mm.所有处理中厚度为 1.2 mm、硬度为 60 HA 弹性片滴头的流态指数最小,其值为 0.078.

由图 4c 可知,弹性片硬度和厚度越大,压力补偿滴头的起调压力则会越大.当弹性片厚度为 0.8~1.2 mm,或者硬度为(40,60] HA 时,起调压力变化幅度小于 10 kPa;当厚度大于 1.2 mm,或者硬度大于 60 HA 时,起调压力的变化幅度明显增大,部分变化幅度大于 15 kPa,说明弹性片厚度和硬度越大,硬度和厚度变化对压力补偿滴头起调压力变化的敏感性增强,反之则越低.

由图 4d 可知,当弹性片厚度为 0.8~1.0 mm,弹性片硬度从 40 HA 增加到 70 HA 时,压力补偿滴头的补偿区间呈递增趋势;厚度为 0.8 和 1.0 mm 时,滴头的补偿区间分别从 112 和 124 kPa 增加到 166 和 170 kPa.不同处理中,弹性片厚度为 1.4 mm、硬度为 60 HA 时补偿区间最大.

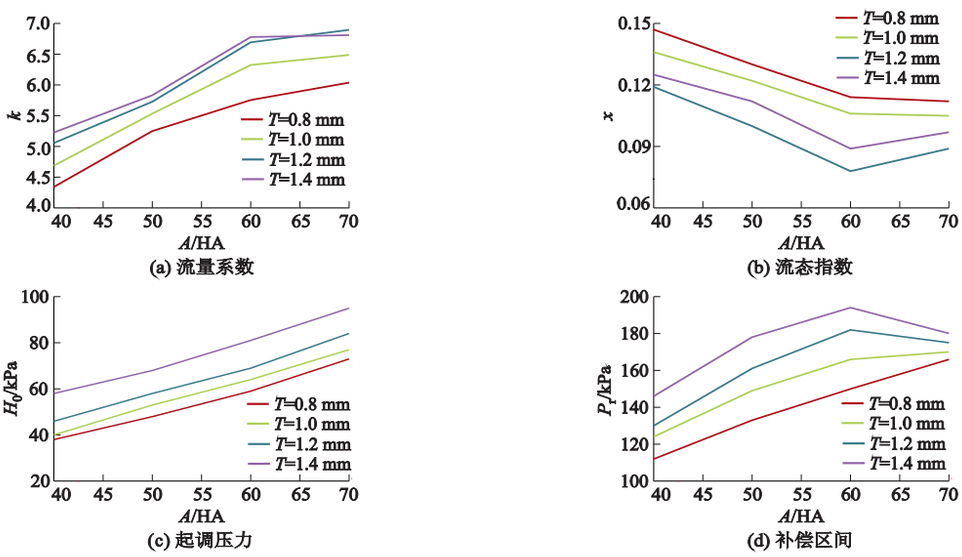


图 4　弹性片硬度和厚度对压力补偿滴头水力性能的影响

Fig.4　Influence of elastic diagram hardness and thickness on hydraulic performance

2.3　弹性片特征参数与滴头水力性能的关系

为了进一步研究弹性片特征参数与滴头水力性能的关系,利用多元回归的方法建立数学模型.一方面从定量角度研究其内在关系;另一方面,可用于快速准确地预测滴头的水力性能.采用 SPSS 软件对表 1 中的 16 组数据进行多元线性回归,回归结果见表 2.

表 2 列出了滴头流量 q、流态指数 x、起调压力 H_0、补偿区间 P_r 的回归系数及相应的 t 检验值及 P 值,由非标准回归系数可得这 4 个物理量的回归方程分别为

$$q=-0.441+0.046A+1.340T, \quad (2)$$

$$x=0.217-0.001A-0.040T, \quad (3)$$

$$H_0=-41.588+1.218A+34.375T, \quad (4)$$

$$P_r=11.775+1.520A+56.250T. \quad (5)$$

表 2　弹性片参数与水力性能的回归系数及 t 检验

Tab.2　Regression coefficient and t test of elastic diaphragm parameters and hydraulic performance

评价指标	变量	非标准回归系数	标准回归系数	t	P
q	C	−0.441		−1.496	0.159
	A	0.046	0.840	12.367	≤0.01
	T	1.340	0.485	7.143	≤0.01
x	C	0.217		12.456	0
	A	−0.001	−0.702	−5.503	≤0.01
	T	−0.040	−0.505	−3.635	0.003
H_0	C	−41.588		−10.162	0
	A	1.218	0.863	23.379	≤0.01
	T	34.375	0.487	13.202	≤0.01
P_r	C	11.775		0.717	0.486
	A	1.520	0.747	7.275	≤0.01
	T	56.250	0.553	5.385	≤0.01

注:C 表示常量

由表 2 可知,影响水力性能指标因素的重要程度从大到小依次为 A 和 T,其中滴头流量 q、起调压力 H_0和补偿区间 P_r 均与 A,T 呈正相关关系,流态指数 x 与 A,T 呈负相关关系.由 t 检验可知,弹性片特征参数对滴头流量 q、流态指数 x、起调压力 H_0、补偿区间 P_r 均具有统计学意义.

为了验证回归模型的可行性和准确性,重新设计 A 为 65 HA,T 为 1.1 mm 的弹性片进行验证.将该弹性片与试验滴头组装后进行水力性能试验,测得 20~300 kPa 工作压力下的一系列流量值,绘制成图 5 流量-压力曲线.通过式(1)拟合数据,可得滴头补偿区平均流量为 3.89 L/h、流态系数为 0.108(取正数)、起跳压力为 69 kPa、补偿区间为 180 kPa.将上述弹性片参数代入式(2)—(5),得到平均流量为 4.02 L/h、流态系数为 0.112、起调压力为 72 kPa、补偿区间为 173 kPa.回归模型得到的平均流量、流态系数、起调压力、补偿区间,与验证试验所测值的偏差分别为 2.75%,3.57%,4.23%,4.04%,此回归模型与试验值的偏差均小于 5.00%,具有较高的准确度,能较好地反映弹性片参数与水力性能之间的量化关系.

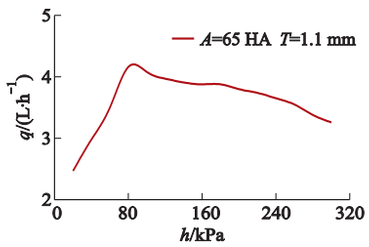


图 5 验证试验的流量-压力曲线

Fig.5 Pressure-flow curve of verification test

3 结 论

1) 弹性片硬度和厚度显著影响滴头流量($P \leqslant 0.01$),硬度对滴头流量的影响大于厚度,可通过改变弹性片硬度和厚度,在一定范围内有效调整滴头流量.试验中滴头流量范围为 2.70~4.84 L/h.

2) 弹性片硬度和厚度耦合作用影响滴头的流量系数、起调压力、补偿区间和流态指数,弹性片硬度对滴头水力性能的影响大于厚度.当滴头流道结构确定时,有着适宜的弹性片硬度和厚度,使滴头具有较低起调压力、最小的流态指数和最大的补偿区间.文中试验滴头适合的弹性片硬度为 60 HA,当厚度为 1.2 mm 时,流态指数最小,为 0.078.

3) 建立了弹性片厚度和硬度与滴头流量、流态指数、起调压力和补偿区间的拟合关系,通过验证各评价指标值偏差均小于 5.00%,可为压力补偿滴头的快速开发提供指导.

参考文献(References)

[1] 王军,李久生,栗岩峰,等. 滴灌玉米根系生长动态对灌水量响应的试验研究[J]. 排灌机械工程学报,2018,36(10):925-930.
WANG Jun, LI Jiusheng, LI Yanfeng, et al. Response of maize root growth dynamic stodrip irrigation amount [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2018, 36(10): 925-930. (in Chinese)

[2] 沈婧丽,杨建国. 滴灌条件下不同改良模式对碱化土壤性质和枸杞产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(2):343-349.
SHEN Jingli, YANG Jianguo. Effects of different improvement modes on the properties of alkalized soil and the yield of Chinese wolfberry under drip irrigation[J]. Jiangsu journal of agricultural sciences, 2020, 36(2): 343-349.(in Chinese)

[3] 龚时宏,李久生,李光永. 喷微灌技术现状及未来发展重点[J].中国水利,2012(2):66-68.
GONG Shihong, LI Jiusheng, LI Guangyong. Current status and future development focus of micro-spray irrigation technology [J]. China water resources, 2012 (2):66-68. (in Chinese)

[4] 李仰斌,刘俊萍.中国节水灌溉装备与技术发展展望[J]. 排灌机械工程学报,2020,38(7):738-742.
LI Yangbin, LIU Junping. Prospects for development of water-saving irrigation equipment and technology in China[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2020,38(7):738-742.(in Chinese)

[5] 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):29-31,34.
HE Jing, LI Guangyong, LIU Zhifeng. Analysis on the structure of typical pressure compensating emitters[J]. Water saving irrigation, 2006(5):29-31,34. (in Chinese)

[6] 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 CSAE, 2012,28(11): 86-92. (in Chinese)

[7] 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 CSAE, 2013, 29(2): 30-36. (in Chinese)

[8] 楚华丽,魏正英,苑伟静,等. 压力补偿灌水器流固耦合数值模拟及可视化试验研究[J]. 机械工程学报,2015,51(12):170-177.
CHU Huali, WEI Zhengying, YUAN Weijing, et al. Fluid-structure interaction simulation and visualization experiments for pressure-compensating emitters[J]. Journal of mechanical engineering, 2015,51(12):170-177. (in Chinese)

[9] SHAMSHERY P, WANG Ruoqian, 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):1-24.

[10] 杨小坤,牛文全,张亮. 一体化压力补偿式热塑性弹性材质滴头设计与试验[J]. 农业工程学报, 2019,35(21):60-68.
YANG Xiaokun, NIU Wenquan, ZHANG Liang. Design and experiment of integrated pressure-compensating emitter made of thermoplastic elastomer[J]. Transactions of the CSAE, 2019,35(21): 60-68. (in Chinese)

[11] 徐耀,苏艳平,杨培岭,等. 膜片对压力补偿灌水器水力性能影响及内部流固耦合模[J]. 排灌机械工程学报,2020,38(7):743-750.
XU Yao, SU Yanping, YANG Peiling, et al. Influence of elastic diaphragm on hydraulic performance of pipe-type pressure compensating emitter and simulation of internal fluid structure interaction[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2020, 38(7): 743-750. (in Chinese)

[12] 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)

[13] 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)

[14] SHAMSHERY P, AMOS G V. Shape and form optimization of on-line pressure-compensating drip emitters to achieve lower activation pressure[J]. Journal of mechanical design, 2018,140(35):035001.

[15] 徐耀,苏艳平,杨培岭,等. 膜片对管上式压力补偿灌水器水力性能的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(8):702-706,731.
XU Yao, SU Yanping, YANG Peiling, et al. Impact of diaphragm parameters on hydraulic performance of pressure compensating emitter on the pip[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2018, 36(8): 702-706,731. (in Chinese)

(责任编辑　张文涛)