排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2017 年 7 月 July 2017 | 第 35 卷 第 7 期 Vol. 35 No. 7
doi:10.3969/j.issn.1674-8530.16.0319

3 种微灌砂过滤器水动三向阀性能比较试验研究


蔡九茂

蔡九茂[1]，李莉[2]，翟国亮[1]，吕谋超[1]，邓忠[1]，许睿[3]
（1. 中国农业科学院农田灌溉研究所，河南 新乡 453002；2. 新乡职业技术学院材料工程系，河南 新乡 453000；3. 河南科技学院信息工程学院，河南 新乡 453000）

摘要：为了研究不同水动三向阀对砂石过滤器进行过滤和反冲洗过程切换的影响，通过对市场上常用的 2 种进口水动三向阀和国内自主生产的水动三向阀进行试验对比，测试了 3 种阀门过滤和反冲洗条件的水头损失、启闭时间、最小切换压力等参数. 测试结果表明：不同阀门过滤和反冲洗条件下的水头损失差异具有统计学意义，建立了 3 种阀门正向过滤和反向反冲洗过程的水头损失和流量的回归模型，符合幂函数关系；国产阀门在水损控制上与进口阀门差异不大；在 60～350 kPa 条件下进行 3 种阀门启闭时间和最小切换压力试验，测得 3 种阀门正向切换时间均长于反向切换时间，且单腔结构三向阀的启闭时间要长于双腔结构阀门，而国产三向阀在材料和精度上的不足导致阀门在启闭时间和最小切换压力两方面均落后于进口阀门. 试验数据对实际应用中阀门选型及灌溉规划设计能够提供一定的数据参考.

关键词：水动三向阀；介质过滤器；水头损失；反冲洗；换向阀
中图分类号：S275.6　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2017)07-0596-06

蔡九茂，李莉，翟国亮，等. 3 种微灌砂过滤器水动三向阀性能比较试验研究[J]. 排灌机械工程学报，2017，35(7)：596-601.

CAI Jiumao，LI Li，ZHAI Guoliang，et al. Comparative experiment on performance of three hydrodynamic three-way valves in micro-irrigation sand filter[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME)，2017，35(7)：596-601.(in Chinese)

Comparative experiment on performance of three hydrodynamic three-way valves in micro-irrigation sand filter

CAI Jiumao[1]，*LI Li*[2]，*ZHAI Guoliang*[1]，*LYU Mouchao*[1]，*DENG Zhong*[1]，*XU Rui*[3]
(1. Farmland Irrigation Research Institute，Chinese Academy of Agricultural Science，Xinxiang，Henan 453002，China；2. Department of Materials Engineering，Xinxiang Vocational and Technical College，Xinxiang，Henan 453000，China；3. College of Information Engineering，Henan Institute of Science and Technology，Xinxiang，Henan 453000，China)

Abstract：The hydraulic three-way valve is one of the core component of a sand filter and can affect swit-ching process between filtration and backwashing. Two kinds of imported and commonly used hydraulic three-way valve on the market and one backwashing valve designed and made in China were chosen for experimental study. The parameters such as valve head loss，opening and closing times，minimum pressure for switching filtration and backwashing process were measured. The results show that the difference in head loss under filtration and backwashing conditions is statistically significant for three kinds of valve. The experimental hydraulic loss-flow rate data were fitted with a power law，and the corresponding regression models were established. It was shown that the domestically made valve

收稿日期：2016-12-28；**网络出版时间**：2017-07-01
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20170701.1005.014.html
基金项目：中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y2016PT33)
作者简介：蔡九茂(1984—)，男，河北衡水人，助理研究员(caijiumao@163.com)，主要从事农业节水灌溉技术与应用研究.
翟国亮(1963—)，男，河南周口人，研究员(通信作者，zhai3393@126.com)，主要从事农业节水灌溉技术与应用研究.

exhibits little difference in the hydraulic loss in comparison with the imported valves. The opening and closing times, minimum pressure for switching process were tested at 60 – 350 kPa pressures. It was indicated that the forward switching time is always longer than the reverse switching time, the opening and closing times for the single cavity structure valve (A) are longer than those for the double cavity structure valves (B,C). Unfortunately, because the domestic three-way valve was made with ordinary material and had been manufactured less accurately, its measured parameters are all poorer than the imported valves. The test data provide a certain reference for a practical application in valve selection and irrigation planning.

Key words: hydrodynamic three-way valve; media filter; head loss; backwash; reversing valve

微灌技术是一种高效节水的现代灌溉技术. 现阶段影响微灌系统正常运行最常见的问题是灌水器堵塞. 灌水器堵塞会导致滴头出水量不统一,严重影响微灌系统灌溉均匀性. 因此,微灌系统中的过滤环节必不可少[1]. 目前,微灌领域常用的几种过滤方式有网式过滤器、旋流过滤器、砂石过滤器和叠片过滤器. 在实际应用中,一般根据水源情况来选用不同类型过滤器进行搭配使用,以最大限度将水中不同类型杂质进行过滤. 其中,砂石过滤器被公认为最有效的微灌过滤设备之一,在世界范围内被广泛采用[2]. 但是,砂石过滤器的一个弊端是水头损失较大,过滤反冲洗过程中,对压力要求较为苛刻,同时反冲洗耗水量较大[3].

微灌系统中泵的出口压力不仅取决于灌水器的工作压力,还由过滤系统最低工作压力决定[4]. 一般而言,泵出口压力会比灌水器工作压力高出 50% ~100%. 文献[5]认为在平地滴灌时,当滴头工作压力需要 41 ~82 kPa 时,首部水泵出口平均压力为 310 kPa. 在以往关于砂石过滤器的研究中,认为砂石过滤器水头损失主要集中在水动三向阀、布水器、滤层以及集水器这几个部位[6-7]. 通过提高砂石过滤器的设计水平和优化关键部件的结构,可以改善砂石过滤器水损较大、启闭耗时长的弊端.

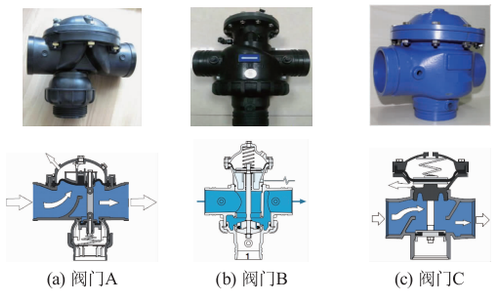
水动三向阀作为砂石过滤组中的核心部件,属于水力驱动的两位三通阀,用于完成过滤和反冲洗过程的切换[8]. 采用水动三向阀控制过滤器组的反冲洗,能够极大地简化切换流程,降低电气同步控制系统复杂性,最大限度减少阀门使用数量,降低设备投入成本,同时,采用电磁阀控制反冲洗阀,相对电动阀门,还能够大幅降低耗电量[9].

文中对市场上常用的 2 种进口水动三向阀和国内自主研发的 1 种水动三向阀进行试验对比,分析水动三向阀 3 个关键性能参数在实际应用中对于改善砂石过滤器整体性能的实用意义.

1　试验装置与方案

1.1　试验装置

购置了市场上最常用的 2 种水动反冲洗阀门,一种是以色列多诺特(Dorot)公司 58P – 3 ×2 三向阀,一种是以色列伯尔梅特(Bermad)公司的 IR – 3 ×3 – 350 – P,均为进口产品,同时,作为对比,选用国内某企业自主研发,并在市场上推广了一定规模的 SXF – 80 型水动三向阀,分别进行试验,3 种阀门分别定义为 A,B,C. 阀门的外观及内部结构如图 1 所示,相关参数详见表 1,表中 m 为质量,l_1 为进出口尺寸,l_2 为排污口尺寸,S 为外形尺寸.



(a) 阀门A　(b) 阀门B　(c) 阀门C

图 1　试验阀门外观及内部构造图

Fig. 1　Appearance and internal structure of tested valves

表 1　3 种水动三向阀的主要参数值

Tab. 1　Main parameters of three kinds of three-way valve

	品牌	阀体材料	m/kg	l_1/mm	l_2/mm	S/mm
A	多诺特	增强聚酰胺	4.2	80 ×80	50	286 ×220 ×325
B	伯尔梅特	聚酰胺	2.8	80 ×80	80	287 ×161 ×378
C	国产	铸铁	13.0	80 ×80	50	305 ×235 ×365

试验按照过滤和反冲洗 2 个过程进行顺序试验. 试验地点选在中国农科院农田灌溉研究所水力试验大厅进行,试验厅内供水、测试、排水装置齐全,能够保证试验进行. 试验管路连接如图 2 所示. 采用循环供水方式,由水泵供水,水泵额定流量为 80 m^3/h,扬程 63 m. 管路布置由测试支路和旁路组成,测试支路和旁路上均装有电磁流量计(XFE –

80),待测阀门进出口均装有数字式远传压力表(BD-801Y),输出形式为电流型4~20 mA信号.在进水总管路上装有分流阀,用于调节管道压力;出水汇流管上装有蝶阀用于调节流量.为了测试的准确性和连续性,设计了一套数据采集系统,采集模块为ADAM-6051,用于实时采集系统各管路的流量和压力数据,并存储,试验完毕,通过U盘将数据导出进行分析.

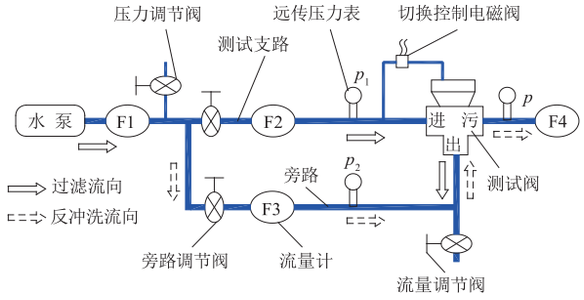


图2 试验管路布置图

Fig. 2 Experimental pipe-loop layout

1.2 试验步骤

该试验主要对三向阀过滤及反冲洗过程的水头损失、阀门正向和反向启闭时间及阀门最小切换压力进行了测量.试验步骤操作如下:首先,关闭旁路控制阀,通过调整压力调节阀和流量调节阀,使测试阀门前的压力维持在40 kPa,流量为40 m^3/h,然后,打开旁路阀门,调整该支路阀门,使旁路流量为15 m^3/h,重新调整压力和流量调节阀门,使测试支路重新建立起压力40 kPa和流量40 m^3/h,此时,记录总干管瞬时流量Q_0、测试支路流量Q_1和旁路流量Q_2、测试阀进出口压力p_1和p_2.然后,使水动三向阀的切换电磁阀得电接通,此时,水动三向阀的上腔体开始充水,随着水的增多,下压隔膜,推动与隔膜相连的芯轴连同底部柱塞一起下移,当柱塞下移到底部时,完成水路切换.此时,进水口关闭,出水口和排污口连通.因此,当切换电磁阀得电后,开始计时,直到测试支路的流量下降为0时,说明彻底完成切换过程,记录总共用时T_0、最终的总干管流量Q_0、旁路流量Q_2、进出口的压力p_1和p_2.然后,将压力调整至50,65,80,100,120,140,150,170 kPa,重复以上过程.

2 结果与分析

2.1 水头损失

在砂石过滤器组实际应用过程中,与之组装配套应用的反冲洗阀门最重要的水力特性参数之一是水头损失[10].在过滤状态时,水头损失小对于提高过滤系统运行效率、减少水泵耗电及降低整个微灌系统水头要求都具有重要意义[11].在反冲洗时,水头损失小对低压灌溉系统有效清洗过滤器、降低清洗频率都有重要作用.因此性能优秀的反冲洗阀门不仅能够提高能源使用效率,并且能够在低压工况下具有出色的性能,尤其对于近年来提倡的低压灌溉,首部反冲洗所需的压力和系统工作压力有直接关系.

试验将过滤状态切换到反冲洗状态定义为正向切换,而将反冲洗状态切换到过滤状态定义为反向切换.因为水动三向阀的机械结构不同,每种阀门的过水阻力也不相同.针对每种阀门,过滤和反冲洗过程中的过水流道形状差别较大,因此在过滤过程和反冲洗过程中产生的水头损失差异明显.图3所示分别为正向过滤和反向反冲洗条件下,3种测试阀门在不同流量时的水头损失情况.根据得到的水动三向阀压降数据,可拟合出各水动阀过滤和反冲洗工况下的流量-水头损失经验计算公式为

$$\Delta p_{1A}=0.041Q^{1.708},\ \Delta p_{1B}=0.042Q^{2.596},\ \Delta p_{1C}=0.034Q^{2.768}, \tag{1}$$

$$\Delta p_{2A}=0.052Q^{3.182},\ \Delta p_{2B}=0.051Q^{1.264},\ \Delta p_{2C}=0.046Q^{2.568}, \tag{2}$$

式中:Δp为水头损失,kPa;Q为流量,m^3/h;下标1为过滤工况,下标2为反冲洗工况.

以上拟合的水头损失公式为目前水动三向阀水头损失计算的一般形式公式,并且公式的决定系数R^2均大于0.95,拟合度较高[12].式中的指数和系数大小,均随水动三向阀的结构、材料、规格等参数的变动而变化,但是以上3种阀门代表了目前市场上普遍采用的水动三向阀,因此该拟合公式可以为设计者选取三向阀提供参考,用户可以查到不同流量下的三向阀水头损失大小,为计算整个砂石过滤器总水头损失提供了准确依据[13].从试验测得的数据上可以看出,在过滤和反冲洗条件下,阀门的水头损失均和过流量呈正相关关系,随着流量的增大,水头损失也随之增大.由过滤工况拟合公式看出,因为A的指数1.708小于B的2.596和C的2.768,所以阀门A过滤时水头损失对过流量变化的敏感性要低于B和C,反冲洗时,则是阀门B的敏感性最低;同时,阀门A的正向过水能力明显好于反向过水能力,而阀门B和C则是反向过水能力更强,相同流量下,阀门A的正向水头损失最小,阀门

B 最大;而反冲洗工况下,正好相反. 主要是由于阀门 A 和阀门 B,C 采用的结构是不相同的,阀门 A 采取的是传统形式的单腔式堰流构造,而 B 和 C 采用的是双腔式结构,因此阀门 A 在反冲洗时的阀座结构正处在水流中心位置,阻水严重,同时,由于实际应用中,在反冲洗时,为了控制砂石滤层的膨胀高度,倾向于将排污口直径比进出水口降低一个级别设计,文中试验采用的阀门 A 为该种设计,也会导致水头损失增大,而 B 和 C 则不存在该问题. 但是正向流时,阀门 A 的流道明显要比 B 和 C 的流道更顺畅,水头损失因此较小. 总体上,3 个阀门的水头损失均能够满足要求,国内阀门制造技术与国外相比,在控制水头损失方面相差不大.

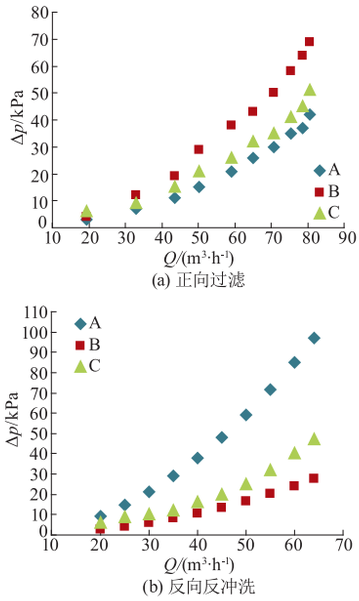


图 3　不同状态下不同流量水动三向阀水头损失

Fig. 3　Hydraulic loss-flow rate curves for three valves under different conditions

2.2　启闭时间

阀门切换速度的快慢也是水动三向阀性能的重要参数. 因为快速地切换水流方向,就会更快地建立起反冲洗所需的压力值,减少了在阀门启动和关闭过程中水的浪费,也降低了滤前水和滤后水的混合机会. 在行程改变过程中,上游进水口的原水会从排水口排出,大量的水资源被白白浪费,同时行程的延长也会导致反冲洗时间延长,过滤器系统整体性能降低. 因此,阀门设计与选取时要控制好状态切换过程中的启闭时间,达到提高效率、减少浪费的目的[14].

试验中,将正向切换时间以测试支路水流量从稳定流量减少到 0 时,反向切换以测试支路流量从 0 增加到稳定流量时作为一个完整的切换过程. 试验过程中记录了正向切换过程的行程时间,即从电磁阀得电触发开始,到测试支路流量降为 0 为止,反向过程以从电磁阀断电开始记录,至测试支路流量稳定为止. 试验分别测试了 3 种阀门在过滤和反冲洗 2 种工况,压力在 0.06 ~ 0.35 MPa 状态下的启闭时间,如表 2 所示,表中 p_e 为压力水平,$t_{正向}$ 为正向过滤状态阀门启闭时间,$t_{反向}$ 为反向切换状态阀门启闭时间.

表 2　3 种阀门在不同状态下的启闭时间

Tab. 2　Opening and closing times for three valves under different conditions

p_e/MPa	$t_{正向}$/s			$t_{反向}$/s		
	阀门 A	阀门 B	阀门 C	阀门 A	阀门 B	阀门 C
0.06	/	/	/	/	/	/
0.08	/	25	/	/	12	/
0.10	32	24	/	20	11	/
0.12	28	24	45	16	11	28
0.14	25	22	36	13	10	26
0.16	22	20	35	11	10	22
0.18	18	16	30	9	9	20
0.20	15	14	31	8	7	20
0.22	11	10	25	8	6	16
0.25	10	6	24	8	6	14
0.28	10	5	25	7	5	10
0.32	10	5	24	8	5	12
0.35	9	5	24	7	5	11

注:“/”代表在该压力下,阀门未发生切换动作或者未完成整个切换动作

从表 2 中可以看出,正向过滤状态下的阀门启闭时间均要大于反向反冲洗状态下的关闭时间,尤其是阀门 B 的启动时间差不多是关闭时间的 2 倍. 随着压力升高,阀门启闭时间会降低,符合该阀门的运动特性. 阀门 A 在最小切换压力 0.100 MPa 下,启动时间为 32 s,压力足够条件下的稳定启动时间为 10 s 左右. 阀门 B 最低启动压力 0.080 MPa 下,启动时间为 25 s,稳定启动时间为 5 s;阀门 C 最低启动压力 0.120 MPa 下,启动时间为 45 s,稳定启动时间为 24 s. 各压力条件下,阀门 A 的启动时间要长于阀门 B,主要是因为阀门 A 的驱动隔膜直接与水流接触,在过滤切换到反冲洗时,隔膜阀在运动过程中,下表面直接受到来自系统的压力,该作用会阻止隔膜下移,并且阀门 A 的单腔结构使得隔膜组件的切换行程变长,反应变慢. 而阀门 B 将驱动腔和过水流道分开,隔膜不会受到水流的压力,因此启动更迅速. 阀门 C 的启动时间和关闭时间均远大于 A,B,并且切换过程中出现顿挫现象,分析原因可能是因为核心部件阀轴与密封件配合精度不够,同轴性差造成顿挫. 同时,拆开阀门后,发现密

封橡胶材料相比另外2种阀门质地较硬,表面光滑性不均匀.因此试验过程中阀门C初期切换动作不连续,经过多次预切换后,使各部件连接润滑,才开始记录数据,阀门C的运行稳定和一致性有待加强.

2.3 最小切换压力

由于砂石过滤器反冲洗阀属于水力驱动阀门,因此阀门在某个方向的启闭主要是通过有压水进出隔膜腔控制水流的通断,以完成换向.如果反冲洗阀门需要非常高的水压才能完成切换,那么该压力可能远远超出了滴灌系统正常工作所需的压力,这是不合理的应用.因此有必要对阀门的最小切换压力进行试验研究,为实际应用提供参考.试验采取压力递增法对阀门进行启闭测试,当进出口流量开始出现差异时,视为阀门开始切换.直到阀门能够完成一个完整的切换行程,则将该压力视为最小切换压力.如果阀门切换到中途不能继续,则不作为参考值.试验数据如表2所示.从表中可以看出,阀门A的最小切换压力为0.100 MPa阀门B为0.080 MPa,阀门C为0.120 MPa.反冲洗过程进行最小切换压力测试没有实际意义,因此不考虑反冲洗过程切换压力.阀门A切换压力较B大的原因主要是水流压力除了要克服弹簧阻力、隔膜反向力以及阀轴中心摩擦阻力外,还要克服水流的反向阻力,因此启动切换过程需要更大的水流压力,使隔膜上下的压差足够大才能够完成切换.并且阀门A的隔膜中心与阀轴中心是不同轴的,该设计可能会导致初始切换过程中隔膜上下受力不均匀,导致隔膜运动不平衡,也是行程延长的可能原因.而阀门B由于阀轴中心和隔膜中心同轴,不存在该问题.阀门C切换压力大于阀门A,B,主要考虑是因为阀轴材料、表面精度和隔膜橡胶成分原因,导致阀轴运动卡顿,在较低压力条件下,无法完成连续运动.

3 结 论

文中对市面上常见的3种不同的砂石过滤器水动三向阀的水力性能参数进行了试验测试,主要结论如下:

1)3种水动三向阀在正向过滤和反向反冲洗2种状态下的水头损失差异明显,阀门A正向水头损失小于反向水头损失,阀门B和C与之相反;在该项指标上,国产三向阀性能和进口阀门相比差异不明显.

2)建立了3种水动三向阀正向过水和反向过水条件下水头损失与流量之间的回归模型,可用于阀门选型和设计时进行估算水头损失.

3)通过对3种不同结构形式的阀门进行启闭试验,发现3种阀门的启闭时间和最小启闭压力差异具有统计学意义,但是3种阀门正向启动时间都长于反向启动时间,阀门A的稳定启动时间为10 s,阀门B为5 s,阀门C为24 s;阀门A的最小启动压力为0.100 MPa,阀门B为0.080 MPa,阀门C为0.120 MPa.

4)在3种阀门的压降损失均能够满足要求的条件下,从启闭时间和最小启闭压力比较,阀门B性能较优;国产阀门应提高加工精度,改善材料性能.

参考文献(References)

[1] 张文正. 微灌砂滤层气水反冲洗与过滤的试验研究[D]. 北京:中国农业科学院,2013.

[2] 翟国亮,陈刚,赵武,等. 微灌用石英砂滤料的过滤与反冲洗试验[J]. 农业工程学报,2007,23(12):46-50.
ZHAI Guoliang, CHEN Gang, ZHAO Wu, et al. Experimental study on filtrating and backwashing of quartz sand media in micro-irrigation filter[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(12): 46-50. (in Chinese)

[3] 赵红书. 微灌用石英砂滤料的过滤与反冲洗性能研究[D]. 北京:中国农业科学院,2010.

[4] TARJUELO J M, RODRIGUEZ-DIAZ J A, ABADÍA R, et al. Efficient water and energy use in irrigation modernization: lessons from Spanish case studies[J]. Agricultural water management, 2015, 162:67-77.

[5] BOVÉ J, ARBAT G, PUJOL T, et al. Reducing energy requirements for sand filtration in microirrigation: improving the underdrain and packing[J]. Biosystems engineering, 2015, 140:67-78.

[6] BOVÉ J, ARBAT G, DURAN-ROS M, et al. Pressure drop across sand and recycled glass media used in micro irrigation filters[J]. Biosystems engineering, 2015, 137:55-63.

[7] MESQUITA M, TESTEZLAF R, RAMIREZ J C S. The effect of media bed characteristics and internal auxiliary elements on sand filter head loss[J]. Agricultural water management, 2012, 115:178-185.

[8] 张杰武,冯吉,徐飞鹏,等. 引黄滴灌砂石过滤器滤料过滤性能[J]. 排灌机械工程学报, 2016, 34(4): 357-361.

ZHANG Jiewu, FENG Ji, XU Feipeng, et al. Sand filter performance on drip irrigation with the Yellow River [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2016, 34(4): 357 – 361. (in Chinese)

[9] 邓忠,翟国亮,宗洁,等. 浑水质量分数对石英砂滤料过滤性能的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(11): 1007 – 1012.
DENG Zhong, ZHAI Guoliang, ZONG Jie, et al. Influence of muddy water mass fraction on performance of packed quartz sand bed[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2013, 31(11): 1007 – 1012. (in Chinese)

[10] 宗全利, 刘飞, 刘焕芳,等. 大田滴灌自清洗网式过滤器水头损失试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(16):86 – 92.
ZONG Quanli, LIU Fei, LIU Huanfang, et al. Experiments on water head losses of self-cleaning screen filter for drip irrigation in field [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(16):86 – 92. (in Chinese)

[11] BOVÉ J, PUIG – BARGUÉS J, ARBAT G, et al. Development of a new underdrain for improving the efficiency of microirrigation sand media filters[J]. Agricultural water management, 2017, 179:296 – 305.

[12] 谢苗,刘治翔,鲁启通,等. 换向阀启闭特性对流量测量试验的影响分析[J]. 中国机械工程, 2015, 26(20):2699 – 2704.
XIE Miao, LIU Zhixiang, LU Qitong, et al. Analyses of influences of valve open and shut characteristics on flow measurement tests[J]. China mechanical engineering, 2015, 26(20):2699 – 2704. (in Chinese)

[13] ELBANA M, CARTAGENA F R D, PUIG – BARGUÉS J. New mathematical model for computing head loss across sand media filter for microirrigation systems[J]. Irrigation science, 2013, 31(3):343 – 349.

[14] 刘季华,朱彤,谢飞博,等. ORC 涡旋膨胀机旁通阀/开启阀切换工况系统性能参数变化研究[J]. 流体机械,2015,43(4):1 – 7.
LIU Jihua, ZHU Tong, XIE Feibo, et al. Experimental investigation on the changes of performance in an ORC system using scroll expander in the case of bypass-valve and opening-valve switching [J]. Fluid machinery, 2015, 43(4):1 – 7. (in Chinese)

(责任编辑　谈国鹏)

(上接第 580 页)

[6] 史婷,李海生,王建松,等. 隔膜压缩机金属膜片层间接触力学行为的研究[J]. 流体机械,2016,44(10):14 – 18.
SHI Ting, LI Haisheng, WANG Jiansong, et al. Contact mechanics behavior research on the metal membrane layers of the diaphragm compressor[J]. Fluid machinery, 2016, 44(10):14 – 18. (in Chinese)

[7] 颉克元. 隔膜泵隔膜破裂类型及预防措施研究[J]. 科技与企业,2012 (3):225.
JIE Keyuan. Research on rupture type of diaphragm for diaphragm pump and preventive measures [J]. Science – technology enterprise, 2012 (3):225. (in Chinese)

[8] 张洪生,史有程,徐波. 隔膜泵液力特性的数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(11):984 – 989.
ZHANG Hongsheng, SHI Youcheng, XU Bo. Numerical simulation on hydraulic characteristics of diaphragm pump[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2014, 32(11):984 – 989. (in Chinese)

[9] 朱俊华. 往复泵及其它类型泵[M]. 北京:机械工业出版社,1982.

[10] 往复泵设计编写组. 往复泵设计[M]. 北京:机械工业出版社,1987

[11] 许福玲,陈晓明. 液压与气压传动[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

[12] 陶自强. 往复式隔膜泵隔膜设计及行程控制系统的研究[D]. 沈阳:东北大学,2007.

[13] 张洪生,缴文会,张宏利,等. 三缸单作用隔膜泵新型液压动力端研究[J]. 机床与液压, 2013, 41(5):40 – 43.
ZHANG Hongsheng, JIAO Wenhui, ZHANG Hongli, et al. Design of new hydraulic power end for three cylinder and single function diaphragm pump [J]. Machine tool & hydraulics, 2013, 41(5):40 – 43. (in Chinese)

(责任编辑　陈建华)