

阀门调节式比例施肥泵吸肥部件改进设计及试验研究

张乾坤, 李红, 汤攀, 孙彩珍

(江苏大学 流体机械工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013)

摘要: 阀门调节式比例施肥泵具有价格低廉、可依靠三通阀调节施肥比例、结构较一般施肥泵更简单、零部件更少的优点,但该施肥泵还存在部分结构不合理、应用范围较窄的缺点急需改进。以减少施肥泵零部件、提高其应用范围为目的,对施肥泵的吸肥部件进行了改进设计,并为验证其施肥性能开展了与原产品的比较试验研究。试验结果表明:改进施肥泵较原产品有更大的压差应用范围,在进出口压差为0.04~0.40 MPa范围内可以保持每周期吸肥量的高均匀性,最大施肥比例在进出口压差为0.10~0.40 MPa的范围内稳定在0.62%。表明吸肥部件的改进设计具有可行性和高稳定性,从而扩大了施肥泵的应用范围。研究结果可为比例施肥泵的整体设计及优化提供参考。

关键词: 比例施肥泵; 吸肥腔体; 单向阀; 改进设计; 进出口压差; 施肥比例

中图分类号: S224.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)04-0186-07

Improved design and experimental research of fertilizer suction structure of a valve-regulated proportional fertilization pump

ZHANG Qiankun, LI Hong, TANG Pan, SUN Caizhen

(Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: The valve-regulated proportional fertilization pump has many advantages, including low price, fertilization ratio adjustment of three-way valve, simpler structure and fewer parts; however, it also faces some shortcomings that need addressing, such as structural defects and small application range. In this paper, in order to reduce the parts of the fertilization pump and improve its application range, an improved design of the fertilizer suction components was proposed. Then the performance comparison test between improved fertilization pump and the original product was carried out. The test results show that the improved fertilization pump has a larger pressure difference application range than the original product. The uniformity of fertilizer suction per cycle can be maintained within the range of 0.04 MPa - 0.40 MPa, and the largest fertilization proportion can be stably maintained at 0.62% within the range of 0.10 MPa - 0.40 MPa. It shows that the improved design of the fertilizer suction component is feasible and highly stable, which can expand the application scope of the fertilization pump. The research results can provide some guidance for the overall design and optimization of proportional fertilization pumps.

Key words: proportional fertilization pump; fertilizer suction cavity; check valve; improved design; pressure difference between inlet and outlet; fertilization ratio

1 研究背景

随着我国乡村振兴战略的全面实施和国家农业节水行动、农业绿色生产行动的稳步推进,对高效节水灌溉装备、水肥一体化装备的要求也在不断提

高^[1-3]。目前市场中存在着各式各样的施肥装备,按照其结构、原理不同大致分为压差式施肥罐、文丘里施肥器、智能施肥机、柱塞式注肥泵和水动式比例施肥泵,它们性能各异,既有优势也有不足。

比例施肥泵是一种性能优良的施肥装备,它不

收稿日期:2020-05-31; 修回日期:2020-06-30

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD0300803、2017YFD0201502);江苏省农业科技自主创新资金项目(CX(19)2040);江苏省高等学校自然科学基金项目(19KJB470014)

作者简介:张乾坤(1995-),男,江苏沛县人,硕士研究生,研究方向为流体机械及排灌机械。

通讯作者:李红(1967-),女,江苏泰州人,博士,研究员,博士生导师,研究方向为流体机械及排灌机械。

需要外加驱动设备,仅依靠来流水压便能够持续、精量地向主管路注入液体肥,实现管道内水肥混合的作用^[4-5]。近年来,我国许多专家、学者对比例施肥泵进行了相关研究^[6-8]。杨大森等^[9]对国内外的同类型、同参数的比例施肥泵进行了对比试验研究,并利用高速摄影技术分析了活塞运动规律。骆志文等^[10]研究了比例施肥泵内的关键结构参数,通过仿真模拟、试验等多种方法开展了对比比例施肥泵吸肥性能的影响,对施肥泵的改进设计提供了理论支持。汤攀等^[11]通过理论分析研究了施肥泵的活塞运动机理,并采用流固耦合仿真技术研究了其运动规律。孙彩珍等^[12]对阀门调节式比例施肥泵的施肥比例调节部件三通阀进行了理论及试验研究,并提出了吸肥部分采用施肥罐的改进设计。吴锡凯等^[13]进行了施肥泵应用在地膜下滴灌系统中的性能试验研究,分析了施肥泵及滴灌带的工作参数对施肥泵吸肥性能及滴灌带肥液均匀度的影响。由此可以看出,以上研究多集中在比例施肥泵的原理及应用研究,而对于产品结构改进设计、结构创新略显不足。

比例施肥泵产品起源于国外,目前已经实现批量生产。Bron^[14]发明了一种可以依靠换向机构进行行程调节的活塞式施肥泵;Thierry等^[15]发明了一种来流驱动活塞运动进而实现加肥功能的水力驱动泵;Silva等^[16]发明了一种原理和活塞泵相同的安装在大型拖拉机上的施肥装置,提高了肥料利用率。由于国外对此研究领先国内,且施肥泵制造工艺要求较高,因此市场上所销售的比例施肥泵多为进口产品,但由于价格昂贵而不能在国内普及。

总而言之,施肥泵作为一款优质的施肥设备深受用户喜爱,但现有研究中缺乏对施肥泵的有效改进方案,导致结构相对复杂、价格昂贵,同时对于价格较为低廉的阀门调节式比例施肥泵的研究也较少。而阀门调节式比例施肥泵具有可依靠三通阀调节施肥比例、结构较一般施肥泵更简单、零部件更少的优点,具有一定的研究意义,但同时也存在部分结构不合理、应用范围较窄的缺点而急需改进。本文以减少施肥泵零部件、提高其应用范围为目的,对施肥泵的吸肥部件进行了改进设计,并为检验其施肥性能开展了与原产品的对比试验研究。

2 阀门调节式比例施肥泵原理

阀门调节式比例施肥泵安装在压力管道中,主要依靠来流水压驱动泵内驱动活塞往返运动,带动驱动活塞上的吸肥活塞进行强迫运动,并通过换向

部件完成吸肥和混肥工作的转换,从而将肥液吸入泵内经混合后排出到主管路中。图1为阀门调节式比例施肥泵的结构示意图,按照机械结构的不同功能划分主要包括流量调节部件、驱动部件和吸肥部件^[17]。其中流量调节部件包括进口螺纹管、三通阀、出口螺纹管;驱动部件包括驱动腔体,腔内进出口管、换向机构,驱动活塞;吸肥部件包括混肥腔体、吸肥活塞、吸肥腔体、下盖板、单向阀、肥液瓶。重要的结构参数主要有:三通阀角度 α ,驱动活塞/吸肥活塞行程 L ,施肥泵腔体内径 D 、吸肥活塞腔体内径 d 、泵内进口管内径 d_{in} 、泵内出口管外径 d_{out} 、扭簧弹性系数 k 、单向阀弹簧弹性系数 k_1 、 k_2 。

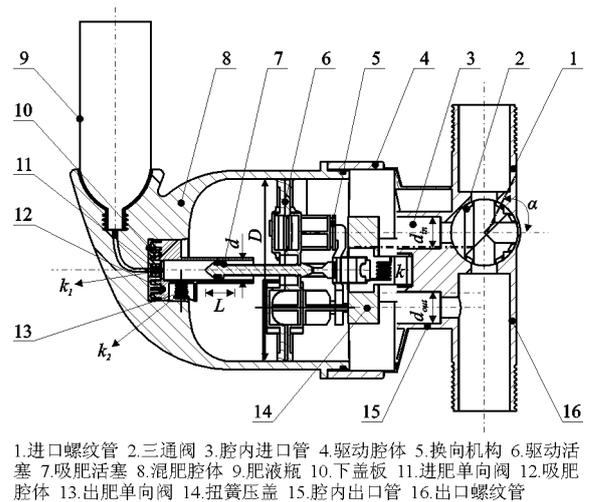


图1 阀门调节式比例施肥泵结构示意图

阀门调节式比例施肥泵通过三通阀进行施肥比例调节,三通阀的手柄旋转角度不同,施肥比例也不同。手柄位置与入口管平行时为灌水模式,来流不经过施肥泵;手柄位置与入口管垂直时为灌水施肥模式,来流全部经过施肥泵进行吸肥工作;手柄处于其他中间角度位置时三通阀将水分成两部分,一部分进入施肥泵内进行吸肥混肥工作后经腔内出口管流出,另一部分则直接由出口螺纹管流出。

3 吸肥部件改进设计及理论计算

3.1 混肥腔体改进设计

如图1所示,由于原产品单次工作的吸肥量取决于肥液瓶内肥液的多少,使用完一瓶后需再次更换肥液,较为繁琐,因此原设计不适用于大面积的灌溉施肥操作。为扩大施肥泵单次工作的吸肥量,混肥腔体改进设计主要有两部分,一是使用吸肥螺纹管取代肥液瓶吸肥流道,该设计结构简单、易加工更换且可以实现吸肥的密封性,在其上可安装塑料软

管作为吸肥流道;二是使用肥液桶取代肥液瓶,扩大吸肥量。图2为混肥腔体改进设计图。

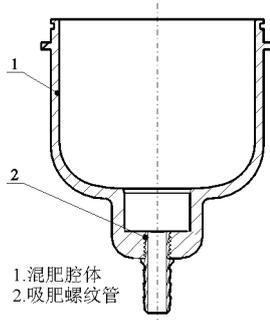


图2 施肥泵混肥腔体改进设计图

3.2 出肥单向阀改进设计

图3为原设计吸肥部件剖面图。如图3所示,原设计吸肥部件在吸肥过程中,主要是通过吸肥活塞上行产生真空后打开吸肥单向阀和关闭出肥单向阀来实现的,从而将肥液吸入到吸肥腔内;在混肥过程中,吸肥活塞下行,从而使吸肥单向阀关闭,出肥单向阀打开,肥液排入到混肥腔内,如此循环往复完成吸肥、混肥工作。出肥单向阀、混肥单向阀的结构都是由弹簧、密封球体、密封圈和单向阀压盖组成的,依靠压盖内的弹簧压住球体控制通道关闭,当通道内侧压力大于外侧时会压缩弹簧从而打开通道。在吸肥和混肥过程中,两个单向阀承担着重要作用。而单向阀的设计原理必定会极其依赖于弹簧的性能优劣,且弹簧的弹性系数极大地影响了施肥泵的启动压力和压力损失等。因此若取消使用弹簧,改进该结构将会增加施肥泵的使用寿命,极大减少零件个数和装配难度。

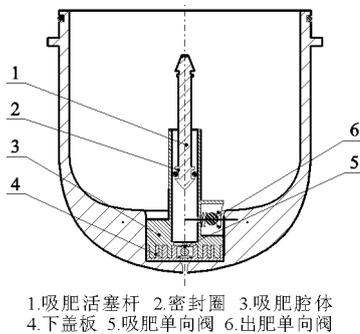


图3 原设计施肥泵吸肥部件剖面图

出肥单向阀的改进设计三维图如图4所示,吸肥部件整体改进设计如图5所示。其设计思路简述如下:取消原出肥单向阀设计,对吸肥活塞杆装配密封圈部件进行无接触处理,即密封圈与活塞杆留有一定可以让肥液流通的间隙,且密封圈可以沿着活

塞杆长度方向来回移动一定距离。在密封圈来回移动的过程中,和活塞杆具有上、下两个接触面,下接触面为密封面,上接触面进行了开孔处理,为出流面。实际上在吸肥活塞杆上下运动时,密封圈和上下接触面就形成了一个出肥单向阀。

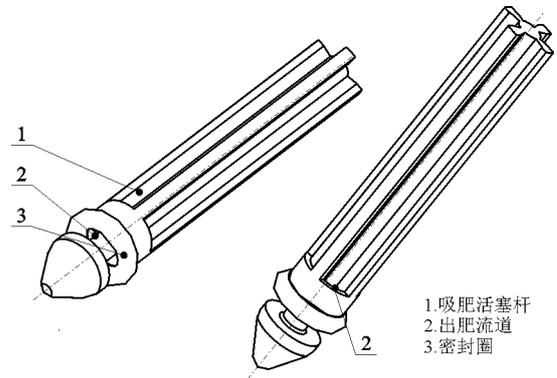


图4 出肥单向阀改进设计三维图

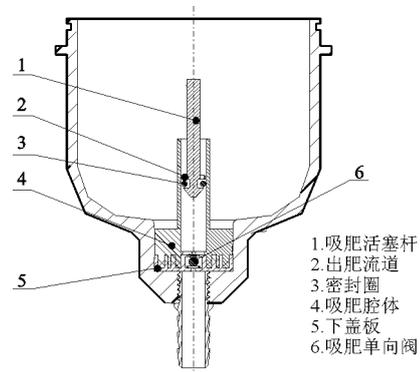


图5 吸肥部件改进设计剖面图

3.3 施肥比例理论计算

施肥比例 R 是指施肥泵单位时间内吸取肥液量与出口流量的比值,因此施肥比例实际上为单位周期吸肥量与出口水肥总量的比值。且由于三通阀的调节作用,该施肥泵的施肥比例是一个范围,当来流全部进入施肥泵内进行吸肥、混肥工作时,此时的施肥比例最大。

每周期进入施肥泵内的流量可以用流体体积来表示,其大小即为驱动活塞每周期运动所挤压的流体体积:

$$V_1 = \frac{1}{4} \pi D^2 L \cdot 2 \quad (1)$$

式中: V_1 为驱动活塞每周期运动所挤压的流体体积, m^3 ; D 为施肥泵腔体内径, m ; L 为驱动活塞行程, m 。

施肥泵的单位周期吸肥量表示为:

$$V_2 = \frac{1}{4} \pi d^2 L \quad (2)$$

式中: V_2 为施肥泵每周期吸肥量, m^3 ; d 为施肥泵吸肥腔体内径, m ; L 为吸肥活塞行程, m 。

吸肥部件的吸肥比例为:

$$R_1 = \frac{V_2}{V_1 + V_2} \times 100\% = \frac{1}{2} \left(\frac{d^2}{D^2 + d^2} \right) \times 100\% \quad (3)$$

式中: R_1 为吸肥部件的吸肥比例,%。

三通阀的分流比 γ 定义为进入比例施肥泵的流量占入口总流量的比例,则施肥比例 R 为:

$$R = \gamma \cdot R_1 \quad (4)$$

由原产品的相关参数 $d = 6.1 \text{ mm}$ 、 $D = 71.6 \text{ mm}$,可以得出 $\gamma = 1$ 时最大施肥比例 $R_{\max} = 0.363\%$ 。本次试验中由于原比例施肥泵的吸肥活塞直径较小,考虑到快速成型加工制造的材料性能问题,因此改进设计后的吸肥活塞直径为 8 mm ,因本次试验主要进行改进设计的可行性探究,故对试验结果没有太大影响。由改进施肥泵的相关参数: $d = 8 \text{ mm}$ 、 $D = 71.6 \text{ mm}$ 可以得出,改进施肥泵最大施肥比例 $R_{\max} = 0.62\%$ 。

由于本试验中施肥泵来流全部进入到泵体内,因此此时的施肥比例 R 最大,即为吸肥部件的吸肥比例 R_1 。

4 施肥泵性能试验

4.1 试验台搭建

试验地点在江苏大学喷灌实验室,搭建的试验台示意图如图6所示。在蓄水桶、肥液桶中注入一定量的水以备试验使用,管路布置采用 $\Phi 25 \text{ mm}$ PVC给水管,吸肥管为 $\Phi 8 \text{ mm}$ 塑料透明软管。水泵用来供给管道流量和压力;两个球形阀(图6中的标号3和10)分别用于调节施肥泵进口流量和进出口压差;智能涡轮流量计(0.5% 级精度)用来测量入口流量大小;两个压力表(图6中的标号6和8, 0.4% 级精度)分别用于测量施肥泵进口压力和出口压力大小。

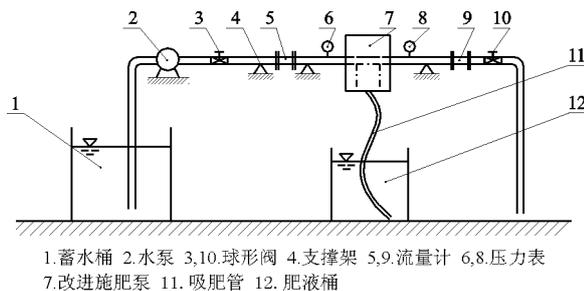


图6 阀门调节式比例施肥泵试验台示意图

4.2 试验方案

为研究改进施肥泵与原产品的施肥性能差异,可以通过测量在不同进出口压差下、一定时间内的吸肥总量 m 和活塞周期运动次数,再依据测试数据间接计算得到施肥比例、每周期吸肥量等相关性能参数,试验方案如下:

由于只进行施肥泵的性能试验,不考虑三通阀带来的影响,因此将三通阀调节至全开使得来流全部进入施肥泵内进行吸肥混肥工作。根据国家标准《农业灌溉装备 水动化肥-农药施肥泵》(GB/T 19792-012)^[18]的指导意义,本试验中使用清水代替化肥-农药进行试验。试验前,将装有一定量水的肥液桶置于电子秤上,改进施肥泵安装在试验台上,保持球形阀3、10全开。

试验时开启水泵,通过调节球形阀(图6中的标号3),调节入口压力,入口压力 P_1 从 $0.04 \sim 0.40 \text{ MPa}$ 变化,每次增高 0.02 MPa 。待入口压力 P_1 稳定在设定的数值且吸肥稳定时,开始计时和录音,同时测量计时开始时装有水的肥液桶质量 M_1 ,记录下设定入口压力 P_1 、入口流量 Q_1 。每次测量时间 T 为 3 min ,待 3 min 后,立即停止计时,同时关闭球形阀,测量此时肥液桶的质量 M_2 。每个压力条件下的试验重复3次,试验结果取平均值。

在 3 min 内施肥泵吸入肥液的总量 m 可以通过两次测量肥液桶的质量差得到。每周期吸肥量可以通过在 3 min 内施肥泵吸入肥液的总量 m 除以吸肥活塞的周期运动次数 n 得到。在试验中,由于吸肥活塞和换向机构的运动频率相同,且施肥泵的换向机构在换向时会发出脆响,因此可以测量一定时间内的换向响声得出换向的次数 n 。对脆响进行录音数得换向部件在 3 min 中内的换向次数 n ,可以得出吸肥活塞的周期运动总次数 f 。

为了进一步证实阀门调节式比例施肥泵是依靠水压驱动的工作原理,即试验中采用的自由出流试验方式所得到的研究结果同样也适用于压力管道中,因此本文首先进行了保持在原产品入口流量压力恒定,出口为自由出流和有压出流的两组试验。试验管路自由出流,即施肥泵出口流出的水流直接进入空气中,因此施肥泵出口压力与大气压相同,施肥泵进出口压差即为施肥泵进口压力。有压出流的压力大小主要通过调节末端球阀(图6中的标号10)的开度实现的。

4.3 结果与分析

4.3.1 自由出流与有压出流对比试验 在进行自

由出流与有压出流对比试验时,由于球形阀调节整数压力难度较大,因此以入口压力依次增加的方式记录有压出流下的试验数据,然后再根据进出口压

差的大小作为自由出流的前后压差,即为自由出流时的入口压力。表1和表2分别为有压出流和自由出流条件下的原产品性能试验数据。

表1 有压出流下原产品性能试验数据

入口压力 P_1/MPa	出口压力 P_2/MPa	进出口 压差 P/MPa	入口流量 $Q_1 /$ $(\text{L} \cdot \text{h}^{-1})$	施肥桶初 始质量 M_1/kg	3min时施肥 桶质量 M_2/kg	吸肥总量 M/mL	3min内换 向次数 n	每周期 吸肥量 V/mL
0.074	0.026	0.048	503	5.330	5.238	092	145	0.6345
0.094	0.030	0.064	605	5.160	5.050	110	172	0.6395
0.118	0.040	0.078	690	5.020	4.898	122	192	0.6354
0.140	0.049	0.091	756	4.870	4.736	134	212	0.6321
0.178	0.063	0.115	868	4.706	4.554	152	241	0.6307
0.208	0.077	0.131	948	4.508	4.342	166	262	0.6336
0.222	0.082	0.140	982	4.326	4.154	172	270	0.6370

表2 自由出流下原产品性能试验数据

入口压力 P_1/MPa	出口压力 P_2/MPa	进出口 压差 P/MPa	入口流量 $Q_1 /$ $(\text{L} \cdot \text{h}^{-1})$	施肥桶初 始质量 M_1/kg	3min时施肥 桶质量 M_2/kg	吸肥总量 M/mL	3min内换 向次数 n	每周期 吸肥量 V/mL
0.048	0.000	0.048	474	4.040	3.950	90	142	0.6338
0.064	0.000	0.064	576	3.914	3.806	108	170	0.6353
0.078	0.000	0.078	696	3.764	3.638	126	200	0.6300
0.091	0.000	0.091	762	3.594	3.456	138	219	0.6301
0.115	0.000	0.115	870	3.292	3.136	156	247	0.6316
0.131	0.000	0.131	955	3.062	2.892	170	268	0.6343
0.140	0.000	0.140	996	2.684	2.508	176	276	0.6377

由于施肥泵与压力有关的主要性能参数为施肥比例,其值大小可以通过每周期吸肥量 V 和活塞换向次数这两个工作参数来间接表示。由表1和2数据对比得知,这两个工作参数在不同出流工况下,当进出口压差相同时,其值大致相同,3 min内总吸肥量 M 的大小也基本相同,由此可得出结论:阀门调节式比例施肥泵依靠进出口压差进行工作,在出口为自由出流条件下不会影响施肥泵的施肥性能。

4.3.2 进出口压差与进口流量的关系 通过调节施肥泵的进出口压差测得进口流量的大小,绘制出原产品和改进施肥泵进出口压差与进口流量的关系曲线如图7所示。

由图7可以看出,在一定进口流量下,来流提供给改进施肥泵的进口压力(进出口压差)比原产品略小约0.04 MPa,该差异表明改进施肥泵内的水力

损失略大于原产品,表现在进出口压差相同时,改进施肥泵进口流量较大。产生该差异的主要原因一是吸肥腔体内径增大导致吸肥量增大,因此摩擦力也增大;二是快速成型的加工方式导致腔内表面粗糙度较大,也增大了密封圈和吸肥腔体内壁的摩擦力。从图7中曲线形式来看,进口流量与进出口压差的关系呈指数增长,这也是该施肥泵的主要特征之一。

4.3.3 进出口压差与最大施肥比例的关系 根据公式(3)及试验中测得的数据计算得到不同进出口压差下最大施肥比例的大小,其二者的关系曲线如图8所示。

由图8可以看出,改进施肥泵的最大施肥比例曲线在进出口压差大于0.10 MPa时,整体较为平稳,因此表明改进设计工况良好,且压力应用范围更大,可以稳定运行到0.40 MPa以上。改进施肥泵保

持较为稳定的最大施肥比例,可达0.62%,略大于理论计算值,表明其性能更优。同时图8表明,该施肥泵的施肥比例在一定压力适用范围内,入口流量、压力对施肥泵的该性能没有太大影响。因此从该性能参数来看,该改进设计是有效的。

4.3.4 进出口压差与活塞周期运动总次数的关系

试验中测得的在不同进出口压差下,3min内活塞周期运动总次数如图9所示。

由图9可以看出,3min内活塞周期运动总次数与进出口压差呈指数增长关系,与图7关系曲线趋

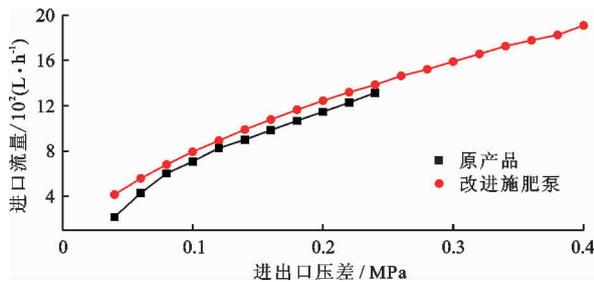


图7 施肥泵进出口压差与进口流量关系曲线

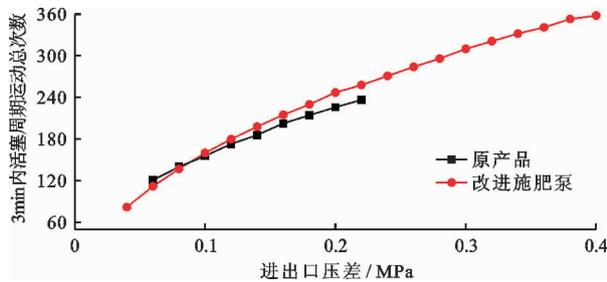


图9 施肥泵进出口压差与活塞运动总次数关系曲线

势相同,表明活塞周期运动总次数与进口流量有关,经过计算也发现二者关系为线性关系。同时由图9还可以看出,当进出口压差大于0.10 MPa时,在相同进出口压差下,改进施肥泵活塞周期运动总次数要略大于原产品。该参数的增大在一定程度上会增加施肥比例,从而提高施肥泵的应用范围。

势相同,表明活塞周期运动总次数与进口流量有关,经过计算也发现二者关系为线性关系。同时由图9还可以看出,当进出口压差大于0.10 MPa时,在相同进出口压差下,改进施肥泵活塞周期运动总次数要略大于原产品。该参数的增大在一定程度上会增加施肥比例,从而提高施肥泵的应用范围。

4.3.5 进出口压差与每周期吸水(肥)量的关系

通过试验测得在不同进出口压差下,3min内肥液桶的质量差计算得到每周期吸肥量,绘制了进出口压差与每周期吸肥量的关系曲线如图10所示。

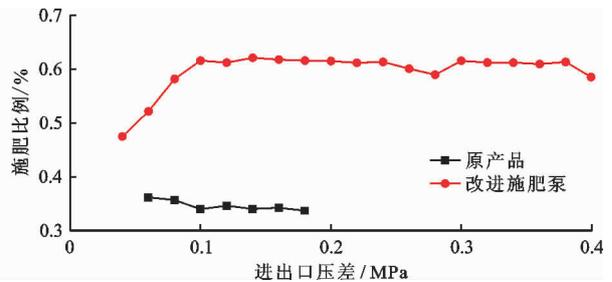


图8 施肥泵进出口压差与最大施肥比例关系曲线

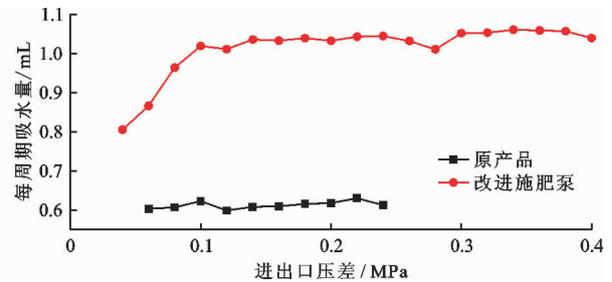


图10 施肥泵进出口压差与每周吸肥量关系曲线

案能提高施肥泵的施肥性能。

(2) 阀门调节式比例施肥泵依靠管道内的来流压力驱动,其施肥性能与进口流量(进出口压差)有关,与施肥泵出口压力大小无关。

(3) 当来流全部经过施肥泵时,改进施肥泵在进出口压差为0.04~0.40 MPa范围内可以保持每周吸肥量的高均匀性,最大施肥比例在进出口压差为0.10~0.40 MPa范围内可以稳定在0.62%左右,因此表明改进后的混肥腔体和单向阀运行良好,改进施肥泵性能更优,改进设计具有可行性、高稳定性,扩大了施肥泵的应用范围。

5 结论

(1) 本文介绍了阀门调节式比例施肥泵的工作原理及主要结构参数,并提出了一种吸肥部件改进方案,主要包括混肥腔体部件的设计和吸肥腔体吸肥单向阀设计,并对原产品及加工好的改进试验泵进行性能对比试验,试验结果表明改进设计方

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 夏华猛,李红,陈超,等. 溶解混施水肥一体化装置自动控制系统研制[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37

- (1): 80-85.
- [3] 张志洋, 李红, 陈超, 等. 溶解混施水肥一体化装置施肥性能试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(11): 1115-1119.
- [4] 吴锡凯, 王文娥, 胡笑涛, 等. 水动式比例施肥泵大田性能影响因素试验研究[J]. 节水灌溉, 2019(2): 18-21+28.
- [5] 卢珍, 周小波, 李光辉, 等. 水动比例施肥泵研究现状及存在的问题[J]. 现代农业科技, 2019(19): 171-172.
- [6] TANG Pan, LI Hong, ISSAKA Z, et al. Methodology to investigate the hydraulic characteristics of a water-powered piston-type proportional injector used for agricultural chemigation[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2018, 34(3): 545-553.
- [7] 杨大森. 水动比例注入泵运动分析及性能优化[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [8] 王睿, 王文娥, 胡笑涛, 等. 微灌用施肥泵施肥比例与肥水比对过滤器堵塞的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 117-122.
- [9] 杨大森, 李红, 骆志文. 活塞式比例施肥器性能对比试验[J]. 节水灌溉, 2015(11): 47-50.
- [10] 骆志文, 李红, 杨大森. 水动比例注入泵容积效率分析[J]. 中国农村水利水电, 2016(9): 91-94.
- [11] 汤攀, 李红, 骆志文, 等. 比例施肥泵驱动活塞受力分析及内部流动模拟与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23): 93-100.
- [12] 孙彩珍, 李红, 汤攀. 三通调节阀分流比及内部流动特性分析[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(5): 441-446.
- [13] 吴锡凯, 王文娥, 胡笑涛, 等. 水力驱动式比例施肥器性能影响因素试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2018(4): 6-9.
- [14] BRON D. Pump for variable dosing: US, 4118152[P]. 1978-10-03.
- [15] THIERRY G, HIGHAM D, VACHER D. Reciprocating hydraulic machine, especially a motor, and dosing apparatus comprising such a motor: US, US7207260B2[P]. 2007-04-24.
- [16] SILVA M J D, MAGALHES P S G. A liquid injection dosing system for site-specific fertiliser management[J]. Biosystems Engineering, 2017, 163: 150-158.
- [17] 孙彩珍. 阀门调节式比例施肥器理论及试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2018.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 农业灌溉设备 水动化肥-农药注入泵: GB/T 19792-2012[S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [19] LI Jiusheng, MENG Yibin, LI Bei. Field evaluation of fertigation uniformity as affected by injector type and manufacturing variability of emitters[J]. Irrigation Science, 2007, 25(2): 117-125.

(上接第185页)

- [19] 陈成龙, 高明, 倪九派, 等. 三峡库区小流域不同土地利用类型对氮素流失影响[J]. 环境科学, 2016, 37(5): 1707-1716.
- [20] 宋林旭, 刘德富, 崔玉洁. 三峡库区香溪河流域非点源氮磷负荷分布规律研究[J]. 环境科学学报, 2016, 36(2): 428-434.
- [21] 杨金玲, 张甘霖, 周瑞荣. 皖南丘陵地区小流域氮素径流输出的动态变化[J]. 农村生态环境, 2001(3): 1-4.
- [22] 华玲玲, 李文超, 翟丽梅, 等. 三峡库区古夫河小流域氮磷排放特征[J]. 环境科学, 2017, 38(1): 138-146.
- [23] 刘涓, 谢谦, 倪九派, 等. 基于农业面源污染分区的三峡库区生态农业园建设研究[J]. 生态学报, 2014, 34(9): 2431-2441.
- [24] 杨林章, 冯彦房, 施卫明, 等. 我国农业面源污染治理技术研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(1): 96-101.