

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.023

# 自适应滴头的控制体受力分析\*

冯俊杰<sup>1,2</sup> 费良军<sup>1</sup> 翟国亮<sup>2</sup> 邓忠<sup>2</sup> 贾艳辉<sup>2</sup> 孙浩<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048; 2. 中国农业科学院农田灌溉研究所河南省节水农业重点实验室, 新乡 453003)

**摘要:** 为分析自适应滴头的自动调流功效,研究了自适应滴头控制体的弹性调节膜原始尺寸和装配后的预变形挠度,进行了弹性调节膜的综合受力分析,并运用力学的作用应力、挠度和有效面积以及接触面的密封比压等理论分析与计算方法,得出控制合力对接触面的实际密封比压。结果表明:自适应滴头弹性膜片在装配变形挠度产生的预紧力和土壤负压 20 kPa 等控制分力的共同作用下,产生的最小实际密封比压为 0.61 MPa,而计算的理论密封比压也为 0.61 MPa,符合两个接触面正向压紧密封需要的“实际密封比压不小于理论密封比压”条件,足以维持滴头的初始断水模式,并处于止水、通水的临界状态。当土壤继续干旱、土壤负压微微变大到 21 kPa 以上时,实际密封比压降至 0.54 MPa,远小于理论密封比压,滴头即开始滴水,进入自动调节通水状态,有效地实现了自动调流功效。

**关键词:** 滴头 自适应 控制体 受力分析

中图分类号: S275.6; TV93 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)08-0133-06

## Force Analysis of Control Volume in Adaptive Drip Irrigation Emitter

Feng Junjie<sup>1,2</sup> Fei Liangjun<sup>1</sup> Zhai Guoliang<sup>2</sup> Deng Zhong<sup>2</sup> Jia Yanhui<sup>2</sup> Sun Hao<sup>2</sup>

(1. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

2. Key Laboratory of Water-saving Agriculture of Henan Province, Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453003, China)

**Abstract:** For theoretical analysis effect of self-adjustment flow on the adaptive drip irrigation emitter, the original size and pre-deformation deflection after fixed of the elastic adjustment diaphragm on the control volume were designed, and the total force to the elastic adjustment diaphragm based on description of its structure and working mechanism were analyzed. The theory and calculation method of mechanics to calculate the stress, the stiffness, the effective area of diaphragm and the sealing pressure ratio at interface of rubber adjustment diaphragm and energy dissipation hole were used. Then the actual sealing pressure ratio of the together control force was obtained. Results indicated that the minimum of actual sealing pressure ratio was 0.61 MPa at the combined action of the force produced from the pre-deflection and soil negative pressure of 20 kPa, but the computational theoretical sealing pressure ratio was 0.61 MPa too. The former was equal to the latter in both of them and met the condition of the actual sealing pressure ratio which was equal to or greater than the theoretical sealing pressure ratio. So the minimum of actual sealing pressure ratio was enough to maintain the drip emitter at the mode of initial shutoff water, and in a critical state of shutoff water and supply water. As long as soil negative pressure was bigger slightly when soil was drought little by little and it was equal to 21 kPa only or more than it, the actual sealing pressure ratio reduced to 0.54 MPa and far less than the theoretical sealing pressure ratio. Then the adaptive drip irrigation emitter began to drip water, and entered the mode of automatic regulation. So it had realized the effective of self-adjustment drip flow really at the same time.

**Key words:** Drip emitter Adaptive Control volume Force analysis

收稿日期: 2013-01-23 修回日期: 2013-03-26

\* “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD25B01、2011BAD29B04、2012BAD20B02)、国家自然科学基金资助项目(51279157、51079121)、公益性行业科研专项资助项目(201203077、201203003)和农转资金资助项目(2011GB23320014)

作者简介: 冯俊杰, 博士生, 中国农业科学院农田灌溉研究所副研究员, 主要从事节水灌溉技术研究, E-mail: fjjdg@sina.com

## 引言

自适应滴头是具有理想智能化、自动化滴水流量调节效果的一种新型滴灌灌水器,它在保证灌溉系统连续供水的前提下,不需要人为设定灌溉时间和灌水量等参数,即可根据作物实际需水量自动调节其流出状况,使土壤水分含量自动、持续、恒定地维持在作物生长所需的适宜范围<sup>[1~3]</sup>,这在一定程度上改变了人们常根据微灌技术理论计算或凭经验总结而确定灌水定额的人为主观性和常规灌水器计划被动的出水方式,并方便利用土水势作为作物灌溉的有效控制指标,真正实现精准灌溉<sup>[4]</sup>。

目前,国内外还没有自适应滴头的研究,仅有少量有关负水头灌溉理论、毛细束吸灌技术和无压根灌等近似于自适应灌溉技术的相关研究<sup>[5~18]</sup>,也未查到专门针对自适应滴头的理论分析和数值计算方面的文献资料。

本文提出的自适应滴头控制体的组成结构复杂、活动部件较多、受力情况多变,出水流量主要由控制体的调节部件变形程度决定,而控制体的变形程度受控制合力的作用,控制合力的大小将改变接触面的密封程度和实际过水断面面积,并直接影响着滴头的流量自动调节效果。因此,本文结合自适应滴头的关键组件,从理论上对流量控制体进行受力和结构平衡计算,以检验自适应滴头控制体结构设计和弹性膜硬度、变形尺寸等指标的合理性,并为进一步提高自适应滴头的自动调流功能提供理论依据。

## 1 自适应滴头结构和工作原理

### 1.1 滴头结构

在保留普通滴头具有的灌溉水流经流道消能后实施滴水灌溉的结构基础上,自适应滴头设计增添了灌水器滴水状态的控制体,在结构上主要有进水体、消能体、控制体和负压体共4个组件,如图1所示。其中,控制体和负压体是自适应滴头的关键组成部件。控制体由橡胶塞和平面橡胶膜片合为一体的弹性调节膜、紧固环和套管等组成;负压体类似于张力计的负压管,由有机玻璃管和陶土头组成。装配时,先把弹性调节膜放入等径的控制体套管的腔内台阶上,并用紧固环压紧、固定,再与负压体的螺纹进行旋紧密封安装,然后把消能体完全嵌入进水体,接着把消能体与进水体紧配合扣压后,即形成完整的既具有常规的滴水流量补偿效果,又具有滴水流量自适应功能的自适应滴头,如图2所示。

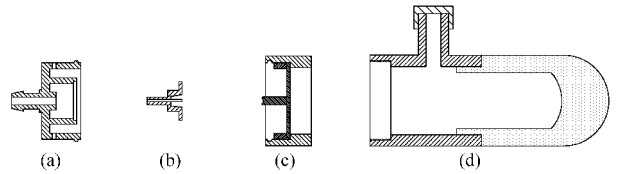


图1 自适应滴头的组件结构示意图

Fig.1 Sketch of adaptive drip irrigation emitter  
(a) 进水体 (b) 消能体 (c) 控制体 (d) 负压体

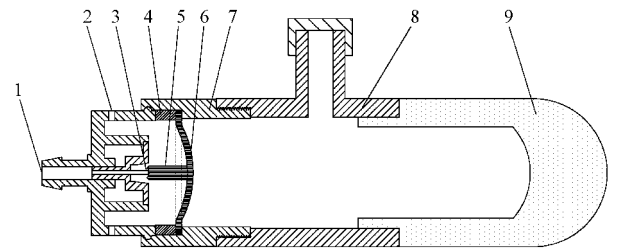


图2 自适应滴头的总体结构简图

Fig.2 General assembly of adaptive drip irrigation emitter

1. 进水口 2. 出水口 3. 消能孔 4. 紧固环 5. 橡胶塞 6. 平面橡胶膜片 7. 套管 8. 有机玻璃管 9. 陶土头

### 1.2 工作原理

自适应滴头的控制体充分利用土壤负压这一天然动力<sup>[13,19]</sup>,在土壤负压(吸力)、弹性橡胶膜变形产生弹力和灌溉水压力等控制动力的共同作用下,橡胶膜的变形量对接触面的实际密封比压不断变化<sup>[20]</sup>,依靠橡胶膜的弹性变形、密封性能,实时有效地控制调节消能孔的通、断,维持滴头不断处于通水、断水2个不同的工作状态,并通过控制体的实时自动调节,保证滴水状态和流量大小始终与土壤实际含水量相适应,如图3所示。

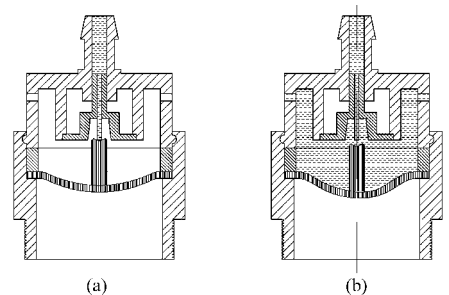


图3 自适应式地下滴灌灌水器工作原理示意图

Fig.3 Work principle for adaptive subsurface drip irrigation emitter

(a) 断水状态 (b) 通水状态

自适应滴头的工作原理为:装配成型的自适应滴头在初始状态下,消能孔受到控制体弹性调节膜因挠度变形而产生回弹的压紧力作用,并达到橡胶塞与消能孔接触面完全止水所需的初始密封比压,使消能孔停止出水,自适应滴头处于初始状态的断水模式。当自适应滴头的负压体先充满无气水、并密封,滴头的进水口连接灌溉毛管、负压体与土壤接

触,并微压供水、管网充满水流时,随着土壤含水率的变化状况而实时、自动调节控制出流状态,实施自适应滴灌。当土壤含水率较大、土壤负压较小时,负压体对弹性调节膜的吸力较小,形成的实际比压不能大于自适应滴头在初始状态的密封比压,滴头仍维持断水,如图3a所示。随着土壤含水率的不断减小,受土壤负压固有特性的影响,负压体内的水与土壤水之间产生一定的能量差,即土壤负压不断增大,在此能量差的作用下,负压体腔内的水将通过陶土头渗入到周围土壤,以达到能量平衡,于是滴头控制体的弹性调节膜受到外力发生曲面变形,减小对消能孔口的密封比压。当土壤含水率减小到一定程度时,相应的土壤负压对弹性调节膜的吸力将明显增大,形成的实际比压将大于初始状态的密封比压,滴头开始滴水,实施灌溉,如图3b所示。灌溉滴水流量主要受土壤含水率状态(土壤负压)的影响,土壤含水率越小,滴水量越大,土壤含水率增大。滴灌一段时间后,土壤含水率不断提高,土壤负压也不断变小,当灌溉土壤含水率较大或接近饱和时,土壤负压又降低至一定程度,土壤负压力吸力形成的实际比压又小于密封比压时,滴头随即停止滴水灌溉,又回到初始工作状态的断水模式。如此反复,控制体靠弹性调节膜随土壤负压的变化而发生弹性变形来实时不断地调节控制着滴头流道的出流状态,达到自适应灌溉的效果。

## 2 控制体受力分析

### 2.1 控制体的变形及其关键尺寸

弹性调节膜是滴头控制体的关键部件,由硅胶原材料经塑炼、密炼、混炼、压延、压出和硫化等制成的平面橡胶膜片和橡胶塞注塑一体而成。弹性调节膜的结构、设计尺寸和变形量分别如下:平面橡胶膜片为圆形薄片,设计的膜片厚度 $h$ 为1 mm,半径 $R$ 为15 mm;橡胶塞呈圆柱状,圆柱的底面半径和高分别为2.5 mm和10 mm。橡胶塞其中一个柱端面为凹面,与消能孔相配合;另一柱端面为平面,与平面橡胶膜片中心对应位置相互粘结,形成一个相当于带硬芯的弹性膜片,半径等于橡胶塞的半径,即硬芯半径 $r_0$ 为2.5 mm。用于压紧、固定弹性调节膜的圆形紧固环内、外半径分别为10 mm和15 mm。根据滴头的消能体结构和套管腔内的空间尺寸,装配成型的自适应滴头的平面橡胶膜受到消能体的接触并产生一定的位移,通过对空间尺寸的实际测定,初步设计消能体推动平面橡胶膜片产生的初始挠度 $\omega$ 为6.0 mm,如图4所示。

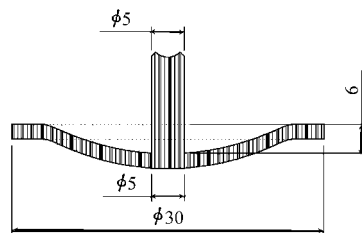


图4 装配后的弹性调节膜变形挠度尺寸图

Fig. 4 Deformation deflection size of elastic adjustment diaphragm after fixed

### 2.2 受力分析

在灌溉系统正常供水期间,自适应滴头控制体的弹性调节膜受力情况复杂,主要受灌溉系统供水压力、土壤负压和橡胶膜片自身变形产生的弹性预紧力等多个控制分力的综合作用。现以控制体内部的调节部件(弹性膜)为分析对象,以消能孔和橡胶塞的接触面为作用点,对其进行不同出流状态的综合受力分析,如图5所示。

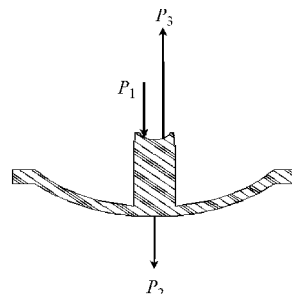


图5 弹性调节膜的受力分析图

Fig. 5 Stress analysis of elastic adjustment diaphragm

在初始断流状态下,弹性调节膜受供水压力 $P_1$ 、土壤负压吸力 $P_2$ 和自身弹性预紧力 $P_3$ 的共同作用,其中: $P_1$ 是灌溉来水作用于消能孔和橡胶塞的有效接触面而产生的压力, $P_2$ 是土壤负压作用于弹性膜片形成的吸力,为一均布荷载, $P_1$ 、 $P_2$ 方向相同,此方向合力是弹性膜发生弯曲挠度变形的主动力;预紧力 $P_3$ 为一集中荷载,与 $P_1$ 、 $P_2$ 方向相反,是由于自适应滴头的消能体作用于平面橡胶膜片中心,并推动平面橡胶膜片变形、出现一定挠度而产生的反作用力,也是弹性膜片自身恢复原位的主动力。 $P_1$ 、 $P_2$ 与 $P_3$ 的合力 $T$ ,作用于消能孔形成的实际密封比压 $q_F$ ,将决定弹性膜对滴头出水口的压紧密封程度和效果。如果实际密封比压 $q_F$ 大于或等于接触面压紧密封所需的理论密封比压 $q_{MF}$ ,即 $q_F \geq q_{MF}$ ,则密封止水,可维持滴头处于断水状态;若实际密封比压 $q_F$ 小于接触面压紧密封所需的理论密封比压 $q_{MF}$ ,即 $q_F < q_{MF}$ ,则不能压紧止水,滴头就处于通水状态,具体的滴水流量受接触面压紧程度和偏移距离的影响。



### 3 控制力平衡计算

#### 3.1 灌溉供水压力 $P_1$

自适应滴头消能体的消能孔是直径为 1.8 mm 的圆孔,灌溉供水压力对橡胶塞的有效作用面积即为消能孔的孔口面积,仅为  $3.14 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ ,而自适应滴头的额定供水压力为 0.05 MPa,产生的作用力  $P_1$  为 0.13 N。

#### 3.2 土壤负压吸力 $P_2$

各种作物处于不同的生长阶段,所需的适宜土壤含水率不同。结合土壤水分常数和土壤水分特征曲线<sup>[18]</sup>可知:土壤含水率越低,土壤负压越大、表现出的吸力越大。对于田间的壤土,一般情况下,土壤含水率约为田间持水量的 65% ~ 80% 时,有利于作物的正常生长,表现出的土壤负压约在 5 ~ 20 kPa 范围。当土壤含水率接近或超过田间持水量时,水分过多,需要排水;当土壤的含水率低于田间持水量(体积含水率)的 65% 以下时,土壤水分不足,需要灌溉,此时的土壤负压值多在 20 kPa 以上<sup>[19]</sup>。针对自适应滴头的控制体来说,田间土壤需要灌溉时表现出的土壤负压  $S$  最小值为 20 kPa,此值也为土壤负压作用于控制体时表现出的控制分力最小值,即  $S \geq 20 \text{ kPa}$ 。

土壤负压是以均布荷载的形式垂直作用于平面橡胶膜片,而平面橡胶膜片在产生相应挠度时对平面橡胶膜片中心点的吸力  $P_{2\min}$  需根据有效作用面积进行均布力与集中力的相互转换。由于均布荷载土壤负压对弹性调节膜片单位面积上的功相同<sup>[18]</sup>,则可根据硬芯膜片的有效面积和均布荷载换算为集中荷载,其计算公式为

$$P = A_{ef} p \quad (1)$$

$$\text{其中 } A_{ef} = \frac{\pi R^2}{4} \left(1 + \frac{r_0}{R}\right) \quad (2)$$

式中  $A_{ef}$ ——有效面积,  $\text{mm}^2$

$P$ ——集中荷载, N

$p$ ——均布荷载, MPa

经计算,  $A_{ef} = 240 \text{ mm}^2$ ,  $P_{2\min} = P = 4.81 \text{ N}$ 。

#### 3.3 橡胶膜片的自身弹性预紧力 $P_3$

橡胶膜片的自身弹性预紧力  $P_3$  是橡胶膜片变形产生的自身回弹力,相当于引起平面橡胶膜片变形的集中荷载的反作用力。由于橡胶塞的端面与平面橡胶膜片在中心对应位置相互粘结,类似于带硬芯的弹性膜片,因此,计算平面橡胶膜片变形至设计挠度产生的预紧力计算方法采用集中荷载作用于带硬芯膜片的计算方法<sup>[20~23]</sup>。

Jeffreys 考虑膜片弯距、剪力以及应力和应变的

关系后得出的曲面微分方程为<sup>[20]</sup>

$$\nabla^2 \nabla^2 \omega = \frac{q}{D} \quad (3)$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (4)$$

$$\frac{d}{dr} \left[ \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( \frac{d\omega}{dr} \right) \right] = \frac{Q}{D} \quad (5)$$

其中

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}$$

式中  $r$ ——膜片半径, m  $q$ ——横向荷载, Pa

$D$ ——膜片抗弯刚度,  $\text{N} \cdot \text{m}$

$E$ ——膜片材料弹性模量, Pa

$\mu$ ——泊松比

$Q$ ——半径  $r$  处单位圆周长度剪力,  $\text{N}/\text{m}$

由弹性理论知,集中荷载  $P$  与半径  $r$  处的单位长度剪力  $Q$  之间的关系为

$$P = 2\pi r Q \quad (6)$$

考虑膜片的边界条件:  $r = R, \omega = 0, \frac{d\omega}{dr} = 0$ ;

$r = r_0, \frac{d\omega}{dr} = 0$ , 得出

$$\omega = \frac{PR^2}{16\pi D} \left\{ 1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2 + 2 \left(\frac{r}{R}\right)^2 \ln \frac{r}{R} + \frac{2r_0}{R} \ln \frac{r_0}{R} \left[ \left(\frac{r}{R}\right)^2 - 2 \ln \frac{r}{R} - 1 \right] \right\} \quad (7)$$

根据自适应滴头的设计尺寸和选用弹性材料性能,已知:膜片厚度  $h = 1 \text{ mm}$ ,弹性模量  $E = 8 \times 10^{-6} \text{ Pa}$ ,泊松比  $\mu = 0.47$ ,膜片内半径  $r = 10 \text{ mm}$ ,膜片外半径  $R = 15 \text{ mm}$ ,膜片硬芯半径  $r_0 = 2.5 \text{ mm}$ ,则平面弹性调节膜的设计初始挠度  $\omega = 6.0 \text{ mm}$ 。由式(7)计算得出膜片达到设计初始挠度时的实际集中力  $P_3 = 7.3 \text{ N}$ 。

#### 3.4 控制合力 $T$

由于  $P_1, P_2$  与  $P_3$  这 3 个分力作用点相同,且  $P_1, P_2$  对橡胶膜片的作用方向相同,垂直于橡胶膜片平面,向远离消能孔的方向;  $P_3$  的作用方向与  $P_1, P_2$  相反,是垂直于橡胶膜片平面,并接近消能孔。故形成的控制合力  $T$  的最小值  $T_{\min} = P_1 + P_{2\min} - P_3 = -2.36 \text{ N}$ ,方向与  $P_1$  相反。

### 4 控制力校验

两个接触面在相互贴合、相互压缩的过程中,即使接触面都是表面加工质量较好、粗糙度较小的高光洁度表面,但它们表面都存在着一系列凹凸不平微细“峰”区和“谷”区,在装配过程中,随着拧紧力

矩的逐渐增大,两个接触面在正向的相互挤压和切向的相互错动,“峰”区被逐渐削平,“谷”区被逐渐充实,最终使接触面上的微观空隙被填满,达到密封效果。如果控制力不足够大,则在密封面上就会出现流体的泄漏<sup>[24]</sup>。因此,控制力决定两个接触面在正向相互挤压、保证面密封的重要因素。

端面密封比压决定密封效果,受密封材料结构、操作条件和工作压力等多指标参数的影响,端面比压过小,易于漏泄、密封性不好;端面比压过大,将影响密封件的使用寿命。因此,设计弹性膜片的合理预变形挠度参数,并选取适宜的弹性材料,以正确分析与计算弹性膜片的反弹力和接触端面的密封比压,将为自适应滴头的流量自动调节功能和滴水出流效果提供理论依据。

#### 4.1 实际密封比压 $q_F$

消能孔口的内、外直径分别为 2.0、3.0 mm,有效接触面积  $A = 3.9 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ ,则控制合力  $T_{\min}$  对橡胶塞的端面密封比压最小值  $q_{F\min} = \frac{T_{\min}}{A} = 0.61 \text{ MPa}$ 。

#### 4.2 理论所需密封比压 $q_{MF}$

根据控制体中的橡胶塞和消能孔在实际接触面的密封宽度、自适应滴头的正常工作压力等参数,按照常规中等硬度橡胶材料的理论密封比压计算公式为

$$q_{MF} = (0.4 + 0.6P_N) / \sqrt{0.1b_M} \quad (8)$$

式中  $P_N$ ——密封对象的实际工作压力,MPa

$b_M$ ——密封面宽度,mm

自适应滴头正常工作时,额定工作压力  $H = 0.05 \text{ MPa}$ ,紧固环的实际密封宽度 5 mm,则  $P_N = H = 0.05 \text{ MPa}$ ,  $b_M = 5 \text{ mm}$ 。由式(7)计算得出自适应滴头控制体的理论所需密封比压  $q_{MF} = 0.61 \text{ MPa}$ 。

#### 4.3 控制合力校验

自适应滴头在初始断水状态下,由灌溉供水压力、土壤负压和橡胶膜片恢复弹性变形产生各控制分力的合力  $T$  的最小值 ( $T_{\min} = 2.36 \text{ N}$ ),形成的实际密封比压  $q_{F\min} = 0.61 \text{ MPa}$ ,而理论计算所需的密

封比压  $q_{MF} = 0.61 \text{ MPa}$ 。二者相等,满足两个接触面正向压紧密封需要的条件:  $q_{F\min} \geq q_{MF}$ ,则控制合力  $T$  的最小值  $T_{\min}$  能够确保自适应滴头初始状态的止水模式,并处于止水、通水的临界状态。

上述各控制分力中,灌溉供水压力相对稳定,而土壤负压不固定,并随着土壤含水状况实时发生较大变化。随着土壤干旱情况的发展,土壤含水率逐渐减少、土壤负压逐渐增大,如果土壤负压这一控制分力微微变大到 21 kPa,虽说弹性调节膜片还未增大变形挠度,可实际密封比压  $q_F$  已降低至 0.54 MPa,远小于理论密封比压  $q_{MF} = 0.61 \text{ MPa}$ ,不满足  $q_{F\min} \geq q_{MF}$  的密封条件,则滴头进入通水状态,并开始滴水、实施灌溉,即实现了自动调节流量的功效,保证了初始断水、自动调节通水两种工作状态的相互切换。

## 5 结论

(1) 自适应滴头在保留了常规滴头结构的基础上,设计增添的滴水状态控制体结构,实现了滴头具有初始止水和自适应滴水 2 种滴水状态。

(2) 自适应滴头在初始状态下,当控制体中弹性膜的设计挠度为 6.0 mm 时,变形后产生的预弹力适宜,对消能孔的实际密封比压为 0.61 MPa,与理论所需的密封比压相等,确保了弹性调节膜对消能孔的有效密封,较好地实现了初始状态的止水模式。

(3) 当控制体的弹性调节膜受到的土壤负压控制分力微微变大,则控制合力对接触面形成的实际密封比压将明显变小,开始通水,并根据土壤实际水分状况实时进行初始止水和自适应滴水 2 种滴水状态的相互灵活切换和流量的自动调节。

(4) 自适应滴头改变了常规灌水器被动出水的工作方式,真正实现了作物、土壤的按需主动连续取水,有助于提高灌溉系统操作管理的自动化、智能化水平和精准灌溉水平。

## 参 考 文 献

- 1 张明柱,黎庆淮,石秀兰. 土壤学与农作学[M]. 3版. 武汉:水利电力出版社,1994.
- 2 冯俊杰,仵峰,郭群善,等. 自适应地下滴灌灌水器的设计开发[J]. 节水灌溉,2008(10):24~26.  
Feng Junjie, Wu Feng, Guo Qunshan, et al. Design of self-adaptive emitter of subsurface drip irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2008(10):24~26. (in Chinese)
- 3 Feng Junjie, Fei Liangjun, Deng Zhong, et al. Research of flow adaptive function and structure design for subsurface drip irrigation emitter[C]//2011 International Conference on New Technology of Agricultural Engineering, 2011: 377~381.
- 4 Mitsubishi Chen Crop (MITU). Negative pressure difference irrigation system has pair of pipes which connect ends of porous pipe, embedded in soil layer, to separate reservoirs, arranged at lower, to perform forced water flow: Japan, JP10323133-A[P]. 1998-09-15.
- 5 李亚龙,崔远来,李远华,等. 以土水势为灌溉指标的水稻节水灌溉研究[J]. 灌溉排水学报,2004,23(5):14~17.  
Li Yalong, Cui Yuanlai, Li Yuanhua, et al. Research on water saving irrigation by using soil water potential as irrigation criterion

- [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2004, 23(5): 14 ~ 17. (in Chinese)
- 6 Read D W L. Self-irrigation greenhouse pots[J]. *Agronomy Journal*, 1962, 54(5): 467 ~ 468.
- 7 苏德荣, 田媛, 高前兆. 日光温室中自流式低压滴灌技术的研究[J]. *农业工程学报*, 2000, 16(3): 73 ~ 76.  
Su Derong, Tian Yuan, Gao Qianzhao. Application of gravity and low head drip irrigation techniques in solar greenhouses[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2000, 16(3): 73 ~ 76. (in Chinese)
- 8 Richards L A, Loomis W E. Limitations of auto-irrigations for controlling soil moisture under growing plant[J]. *Plant Physiology*, 1942, 17(2): 223 ~ 235.
- 9 Kato Z S, Tejima S. Theory and fundamental studies on subsurface method by use of negative pressure[J]. *Japanese Society of Irrigation Drainage and Rural Engineering(JSIDRE)*, 1982, 101: 46 ~ 54.
- 10 王泽南. 节水吸灌技术探讨与实践[J]. *湖南水利水电*, 2002(6): 43 ~ 44.
- 11 左宇, 李绍才. 毛细束自适应灌溉初探[J]. *节水灌溉*, 2005(5): 48 ~ 49.
- 12 陈新明, 蔡焕杰, 王占兵, 等. 无压根区地下灌溉技术试验研究[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(1): 76 ~ 79.  
Chen Xinming, Cai Huanjie, Wang Zhanbing, et al. Experiment of non-pressure subsurface drip irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(1): 76 ~ 79. (in Chinese)
- 13 雷廷武, 江培福, Vincent F Bralts, 等. 负压自动补给灌溉原理及可行性试验研究[J]. *水利学报*, 2005, 36(3): 298 ~ 302.  
Lei Tingwu, Jiang Peifu, Vincent F Bralts, et al. Principle of negative pressure difference irrigation system and feasibility experimental study[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36(3): 298 ~ 302. (in Chinese)
- 14 邹朝望, 薛绪掌, 张仁铎, 等. 负水头灌溉原理与装置[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(11): 17 ~ 22.  
Zou Chaowang, Xue Xuzhang, Zhang Renduo, et al. Principle and equipment of negative pressure irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(11): 17 ~ 22. (in Chinese)
- 15 王佳甜, 段福义, 范永申, 等. 植物负压给水系统概述[J]. *水利科技与经济*, 2012, 18(3): 76 ~ 78.  
Wang Jiatian, Duan Fuyi, Fan Yongshen, et al. An overview of negative pressure water supply system for plants[J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2012, 18(3): 76 ~ 78. (in Chinese)
- 16 郑耀泉. 讨论我国滴头性能技术指标和结构形式的选择问题[J]. *灌溉排水*, 1992, 11(2): 8 ~ 13.  
Zheng Yaoquan. The selection of dripper's technical performance parameters and structure in China[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 1992, 11(2): 8 ~ 13. (in Chinese)
- 17 GB/T 17187—2009/ISO 9261:2004. 农业灌溉设备滴头和滴灌管技术规范和试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- 18 吕谋超, 彭贵芳, 杨跃辉, 等. 微灌流量调节器的研制与应用[J]. *灌溉排水*, 2001, 9(3): 29 ~ 32.  
Lü Mouchao, Peng Guifang, Yang Yaohui, et al. Development and application of micro-irrigation flow regulator[J]. *Irrigation and Drainage*, 2001, 9(3): 29 ~ 32. (in Chinese)
- 19 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- 20 张原. 带硬芯膜片的应力、刚度和有效面积的计算[J]. *推进技术*, 1997, 18(4): 65 ~ 68.  
Zhang Yuan. Calculation of stress stiffness and effective area of diaphragm with hardpan [J]. *Journal of Propulsion Technology* [J]. 1997, 18(4): 65 ~ 68. (in Chinese)
- 21 古国纪, 顾璆琳. 弹塑性圆板大挠度问题[J]. *力学学报*, 1958, 2(3): 232 ~ 248.  
Gu Guoji, Gu Qiulin. On the large deflection of elasto-plastic bending of circular plates[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1958, 2(3): 232 ~ 248. (in Chinese)
- 22 段浩, 胡宗武, 杨赅石, 等. 大挠度储能橡胶圆板的受载挠曲特性分析[J]. *机械强度*, 2002, 24(4): 531 ~ 534.  
Duan Hao, Hu Zongwu, Yang Chenshi, et al. Analyse on the load-deflection character of a large deflection rubber circular plate of storing energy[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2002, 24(4): 531 ~ 534. (in Chinese)
- 23 胡海昌. 在均布及中心集中载荷作用下圆板的大挠度问题[J]. *物理学报*, 1954, 10(4): 383 ~ 394.  
Hu Haichang. On the large deflection of a circular plate under combined action of uniformly distributed load and concentrated load at the center[J]. *Acta Physica Sinica*, 1954, 10(4): 383 ~ 394. (in Chinese)
- 24 杜秋华, 杜海深, 巫宗萍, 等. 分子流状态平面密封结构漏率预估[J]. *真空*, 2012, 49(1): 36 ~ 38.  
Du Qiuhua, Du Haishen, Wu Zongping, et al. Leakage rate estimate of the plane sealing structure under the state of molecular flow [J]. *Vacuum*, 2012, 49(1): 36 ~ 38. (in Chinese)