

# 一体化压力补偿式热塑性弹性材质滴头设计与试验

杨小坤<sup>1</sup>, 牛文全<sup>1,2\*</sup>, 张亮<sup>3</sup>

(1.西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100;  
3.山东春雨节水灌溉设备有限公司, 济南 271100)

**摘要:**为克服硅胶片类压力补偿式滴头“回收难”的问题,设计开发了一种含热塑性弹性体的全塑料材质的一体化压力补偿式滴头。基于压力补偿式滴头流量补偿原理及计算流体力学数值计算方法,对一体化滴头关键结构参数齿尖角、流道宽度、流道深度、流道单元个数开展正交设计试验,通过 Ansys15.0 软件对滴头迷宫流道结构进行确定,以参数组合齿尖角 34°,流道宽度 0.4 mm,流道深度 0.4 mm,流道单元数 12 个,进行滴头试制并对其补偿性能及抗堵塞性能进行测试。结果表明:该一体化压力补偿滴头流态指数为 0.07,起调压力为 35 kPa,补偿区间为 35~300 kPa,属于恒流灌水器—压力补偿滴头范畴;与国内滴头相比,设计滴头的水力性能更优;在低压堵塞试验中,一体化压力补偿式滴头具有更好的抗堵塞性能,当泥沙浓度为 1.0 g/L,灌水 15 次后,一体化压力补偿滴头与另外两种普通迷宫流道滴头的相对流量分别下降至 93.1%、54.2%、81.8%,一体化压力补偿滴头的抗堵塞性能明显优于普通迷宫流道滴头。该滴头研发周期短、成本低、便于回收利用,是传统滴头的良好替代品。该研究可为一体化压力补偿式滴头结构设计、相关产品研发提供参考。

**关键词:**流量;压力;计算流体力学;堵塞;热塑性弹性体;一体化压力补偿滴头;结构设计

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.21.008

中图分类号: S275.6

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-21-0060-09

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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.21.008 http://www.tcsae.org

Yang Xiaokun, Niu Wenquan, Zhang Liang. Design and experiment of integrated pressure-compensating emitter made of thermoplastic elastomer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019,35(21):60—68. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.21.008 http://www.tcsae.org

## 0 引言

滴头和过滤器是滴灌工程2个核心装置,性能优良的过滤器可以使进入管网系统的水质合格,防止滴头堵塞,保证滴灌系统的正常运行<sup>[1]</sup>,好的滴头可以使灌溉水均匀地滴入灌溉区域,且具有较高的抗堵塞能力<sup>[2-3]</sup>。目前,根据流量对工作水压的适应能力,滴头可以分为压力补偿式滴头和一般滴头。压力补偿式滴头在较大的工作水压变化范围内可以实现流量基本稳定,因此,压力补偿滴头适应范围更广<sup>[4-5]</sup>,在干旱缺水的丘陵山区地区的山坡地或起伏较大的田间进行滴灌时,压力补偿式滴头具有更好的适应性和灌水均匀度<sup>[6-8]</sup>。据调查,对于压力补偿式滴头在结构优化设计、材料选择和产业化稳定生产控制技术等方面,中国节水灌溉企业还没有完全掌握,不具备完全的自主设计和生产能力。中国亟待攻克压力补偿式滴头的设计和产业化生产的控制技术<sup>[9]</sup>。

为了探明压力补偿式滴头结构参数与性能之间的关系,探索压力补偿式滴头的设计方法,中国节水灌溉科

技人员开展了大量的研究<sup>[10-16]</sup>,为建立压力补偿式滴头结构设计方法奠定了良好的基础。但上述研究均是基于三件式结构滴头,即滴头均由基底、硅胶片和盖扣组成。目前,市场上使用的压力补偿式滴头基本为国外进口产品,这些产品生产过程复杂,需要多副模具,生产成本低,周期长<sup>[16]</sup>,产品质量控制困难。同时,由于含有硅胶补偿片,致使压力补偿式滴头和滴灌带回收利用难度更大,回收成本更高,闲置在田间的废旧滴灌带不仅造成浪费,也会造成土壤环境污染<sup>[17]</sup>。因此,研制性能更优良、便于回收利用的滴灌产品与设备,对推广中国的滴灌技术具有重要意义<sup>[18-19]</sup>。

王栋<sup>[20]</sup>基于具有弹性的聚氨酯材料提出了一款扁平式压力补偿滴头的设计方法,该滴头摒弃了硅橡胶材料作为补偿元件,试图通过改变弹性片覆盖流道的长度达到调节流量的目的,但该设计仍采用了基片、弹性膜片、盖扣三件式结构,并没有简化生产工艺,目前也未见类似产品面世。魏正英等<sup>[16]</sup>提出了一体式压力补偿圆柱式滴头的设计构想,虽然简化了弹性膜片固定装置,但仍需要硅橡胶等材料作为补偿元件进行二次组装,且在滴头回收时需要分拣出该硅橡胶材料,增加人工成本等。综上所述,中国压力补偿式滴头的研究与生产仍是以国外常见的传统产品为主,主要包括管上式、内镶圆柱式和贴片式,且所用弹性材料都是以硅橡胶为主,并没有一款真正的自主研发的创新性产品。

收稿日期: 2019-04-14 修订日期: 2019-10-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51679205); 国家重点研发计划项目(2016YFC0400202); 宁夏重点研发计划项目(2018BBF02006); 杨凌示范区科技计划项目(2018GY-08); 山东省重点研发计划项目(2019QYTPY004)

作者简介: 杨小坤,主要从事节水灌溉新技术研究。

Email: yxk@nwfufu.edu.cn

\*通信作者: 牛文全,博士,研究员,主要从事节水灌溉理论与技术研究。Email: nwq@vip.sina.com

为此，牛文全等<sup>[21-22]</sup>提出了一种一体化的压力补偿式滴头设计方法并给出了该滴头的生产工艺技术，该滴头采用热塑性弹性材料（thermoplastic elastomer, TPE）代替硅橡胶材料实现补偿效果，生产工艺简单，弹性材料可完全回收利用，生产成本明显降低。TPE，是指在常温下显示橡胶状弹性、高温下能够塑化成型的一类新型高分子材料，因其既具有橡胶的弹性，又具有塑料的易加工性，已被广泛应用于各大领域，同时被用于塑料改性剂以提高塑料的抗冲击能力<sup>[23]</sup>。为了验证该滴头成型技术的可行性以及一体化压力补偿式滴头的基本性能，本文研究了TPE流道结构参数对滴头基本性能的影响，并测试了该结构滴头的抗堵塞性能，以期为该结构滴头的优化和推广应用提供依据。

### 1 一体化压力补偿式 TPE 滴头设计

#### 1.1 技术要求

研制一种经济环保、成型工艺简单、水力性能及抗堵塞性能优良的一体化压力补偿式滴头。利用TPE代替传统硅橡胶弹性片，实现降低回收利用成本的目的，摒弃传统三件式结构，全部采用塑料一次性注塑成型滴头。要求滴头有良好的水力性能和抗堵塞性能，流量在1.5~2.0 L/h之间，流态指数 $\leq 0.1$ ，起调压力 $\leq 40$  kPa，补偿区间最大值 $\geq 250$  kPa<sup>[24]</sup>，流量补偿效果不差于国外常见滴头，抗堵塞性能不差于一般贴片式滴头。

#### 1.2 基本结构与工作原理

滴头主要由固定流道与可变形流道2个部分组成。其中，固定流道采用低密度聚乙烯(low density polyethylene, LDPE)材料注塑而成，可变形流道由TPE材料注塑而成。选用双色注塑机，先注塑产生固定流道部分，再用TPE材料注塑成型可变形流道结构部分组合成型，结构见图1。

水流从进水口进入固定迷宫流道，经过第1次消能后进入可变迷宫流道；由水力学能量守恒定理知，经过消能后的水流流速减缓，水流压强降低，从而与图1b中弹性片一侧的水流形成压差，在压差的作用下弹性片发生变形，弹性片向弹性齿方向靠近，可变迷宫流道过水断面

面积减小。在可变迷宫流道内，水流进行第2次消能，流速进一步减小，并在弹性体变形与流体压强耦合作用下，水流最终达到稳定状态。当毛管水流压力较小时，迷宫流道内水流流速较小，弹性体变形较小，可变迷宫流道过水断面较大；反之，过水断面较小；由 $Q=S \cdot V$  ( $Q$ 为流量， $m^3/s$ ； $S$ 为过水断面面积， $m^2$ ； $V$ 为水流流速， $m/s$ )知，滴头出水口流量能达到流量保持不变或变化量较小的补偿效果。在可变流道内，当灌水压强小于一定值时，滴头内的TPE弹性片脱离迷宫流道，此时过水断面增大，附着在齿间、弹性片表面的沙粒可以轻易地被水流带走，因此该滴头还具有一定的冲洗功能，可以减缓滴头堵塞的问题。

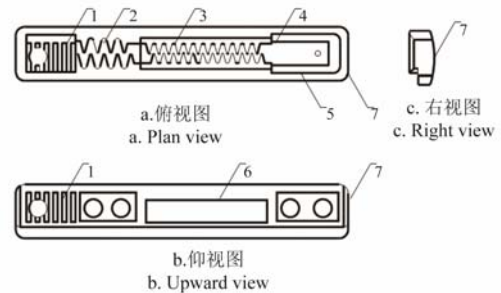
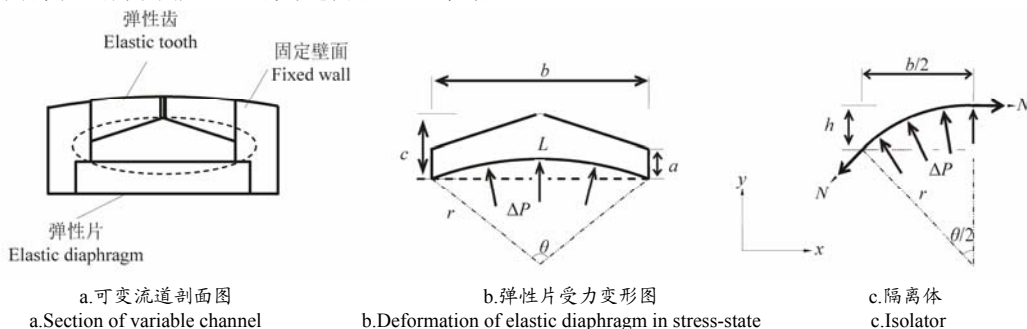


图1 一体化压力补偿滴头结构  
Fig.1 Structure diagram of integrated pressure-compensating emitter

### 2 关键结构参数设计

#### 2.1 弹性片力学分析

水流进入可变流道后，部分水流从弹性齿组成的迷宫流道通过，另一部分从弹性齿面与弹性片围成的五边形(图 2a 虚线部分)流道通过。补偿效果发生时，弹性片两侧的压力差  $F$  使得弹性片发生一定变形，进而通过改变迷宫流道过水断面的方法达到流量平衡的效果<sup>[25]</sup>，补偿区迷宫流道结构剖面图如图 2 所示。下面对弹性片变形过程进行受力分析。



注：---为弹性片未发生补偿效果时的状态； $a$ 为固定壁面处弹性齿到弹性片之间的距离，mm； $b$ 为弹性片在可变流道中的宽度，mm； $c$ 为可变流道中心处弹性齿到弹性片的垂直距离，mm； $r$ 为弹性片变形后形成的圆弧对应的半径，mm； $\theta$ 为弹性片变形后所形成的圆弧对应的圆心角， $(^\circ)$ ； $L$ 为弹性片变形后的弧长，mm； $\Delta P$ 为弹性片所受的压强，Pa； $h$ 为弹性片变形后凸起的高度，mm； $N$ 为弹性片所受的轴向拉力，N。  
Note: --- is original state of elastic diaphragm;  $a$  is distance between elastic tooth and elastic diaphragm in fixed wall, mm;  $b$  is elastic diaphragm width, mm;  $c$  is distance between elastic tooth and elastic diaphragm in center of channel, mm;  $r$  is arc radius when elastic diaphragm changes shape, mm;  $\theta$  is central angle of the arc after deformation,  $(^\circ)$ ;  $L$  is the arc length after elastic diaphragm deformation, mm;  $\Delta P$  is pressure on elastic diaphragm, Pa;  $h$  is the vertical height after deformation, mm;  $N$  is axial tension on elastic diaphragm, N.

图2 可变流道剖面及弹性片变形示意图  
Fig.2 Variable channel section and structure diagram of deformation of elastic diaphragm

弹性片发生变形时形成凸起(图 2b),从材料力学来讲,是弹性片受到了轴向拉伸的作用,设该轴向拉力为  $N$ ,并选取弹性片的一半进行受力分析。

由弧长公式得:

$$L = \frac{\theta \cdot \pi \cdot r}{180} \quad (1)$$

$$b = 2r \cdot \sin \frac{\theta}{2} \quad (2)$$

流量稳定时,弹性片基本处于稳定平衡状态,由  $\Sigma Y=0$ ,即弹性片在  $Y$  轴方向所受合力为 0,得到:

$$\frac{\Delta P \cdot b \cdot f}{2 \times 10^6} = N \cdot \sin \frac{\theta}{2} \quad (3)$$

式中  $f$  为弹性片在流道中的长度, mm。

由材料力学知:

$$\frac{N}{m \cdot f} = E \cdot \frac{L - b}{b} \quad (4)$$

式中  $m$  为弹性片的厚度, mm;  $E$  为弹性片的弹性模量, MPa。

由几何关系,得弹性片凸起高度:

$$h = r - r \cdot \cos \frac{\theta}{2} \quad (5)$$

式中  $h$  为弹性片变形后凸起的高度, mm。

同时,橡胶弹性模量和硬度之间存在如下关系<sup>[26]</sup>:

$$\lg E = 0.0184H_a - 0.457 \quad (6)$$

式中  $H_a$  为邵氏硬度, HA。

联立式(1)~(5)得:

$$\Delta P = \frac{E \cdot m}{b} \cdot \left( \frac{\theta \cdot \pi}{180} - 2 \cdot \sin \frac{\theta}{2} \right) \quad (7)$$

$$h = \frac{b \cdot \left( 1 - \cos \frac{\theta}{2} \right)}{2 \sin \frac{\theta}{2}} \quad (8)$$

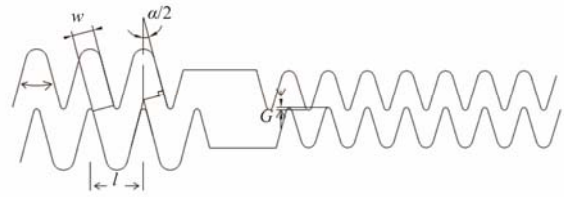
当流道结构尺寸确定后,最大要求工作压强下  $\Delta P$  就可以确定,由于弹性片凸起后的最大高度  $h_{\max} \approx c$ ,分别代入式(7)和式(8)即可求得  $E$  值,再代入式(6),进而确定弹性片的硬度。

$\Delta P$  值的范围确定:弹性片两边的压强差值  $\Delta P$  的大小不仅与工作压强有关,还与流道结构有关。由水力学知,固定迷宫流道消能效果越好,  $\Delta P$  的值越大,同时可变流道调节流量的作用就会越小甚至消失,因此有必要控制固定迷宫流道与可变迷宫流道的比例。本文通过数值模拟的方法确定  $\Delta P$ 。

## 2.2 迷宫流道结构与参数

滴头流道结构不仅与滴头的水力性能有关<sup>[11,27]</sup>,还对滴头的抗堵塞性能起决定性作用<sup>[12,28]</sup>。以 Netfim、Plastro 等产品锯齿型滴头流道结构为参考,通过数值模拟的方法对滴头水力性能进行 CFD 模拟计算<sup>[29-30]</sup>,筛选较优的参数组合作为滴头的设计依据。为了减少流道中死角、低流速区等易产生泥沙停滞区域,对齿尖进行了倒圆角

处理<sup>[31-32]</sup>。迷宫流道结构的主要参数如图 3 所示。



注:  $\alpha$  为齿夹角, ( $^\circ$ );  $w$  为流道宽度, mm;  $G$  为齿间参差量, mm;  $l$  为一个流道单元长度, mm。

Note:  $\alpha$  is tip angle, ( $^\circ$ );  $w$  is channel width, mm;  $G$  is stagger distance of elastic tooth, mm;  $l$  is unit channel length, mm.

图 3 迷宫流道结构示意图

Fig.3 Structure diagram of labyrinth channel

### 1) 固定流道结构参数

本滴头通过可变迷宫流道结构过水断面的变化实现流量稳定的效果,固定迷宫流道的主要作用是稳定初始流量、保证在低压条件下滴头也能保持水流形态为紊流。因此,根据经验直接设定固定迷宫流道的尺寸,其中,齿尖角为  $30^\circ$ ,齿宽 0.6 mm,齿间距 1.5 mm,流道深度 0.9 mm,齿尖进行倒圆角处理,流道中心的齿尖倒圆角半径为 0.1 mm,边壁的齿尖倒圆角半径为 0.3 mm,齿尖参差量为 0,流道单元个数为 4。

### 2) 可变流道结构参数设计

滴头通过改变弹性片与可变迷宫流道间的过水断面面积进行流量调节,因此可变迷宫流道的结构尺寸对滴头的水力性能起决定性作用。对于迷宫流道,本设计固定 1 个单元长度为 1.1 mm,当齿夹角  $\alpha$  及其所对应的流道宽度  $w$  确定时,该流道的结构就已确定,因此选取齿夹角、流道宽度、流道深度、单元数为试验因素,每个试验因素取 3 个水平,如表 1 所示。根据选定的模拟试验因素和水平,采用正交试验设计,选取正交试验表 L9 ( $3^4$ )。同时根据固定迷宫流道尺寸的规格,设定弹性片与边壁弹性齿间的距离  $a$  为 0.3 mm,弹性片宽度  $b$  为 3 mm,且为了使弹性片能够充分变形,弹性齿形状呈中间窄两边宽形状,  $c$  为 0.9 mm,见图 2;流道中心的齿尖倒圆角半径为 0.1 mm,边壁的齿尖倒圆角半径为 0.2 mm。

表 1 正交试验因素与水平表

Table 1 Factors and levels of orthogonal experimental design

水平 Levels	试验因素 Factors			
	齿夹角 Tip angles/ $^\circ$	流道宽度 Channel widths/mm	流道深度 Channel depths/mm	单元数 Channel number
1	30	0.3	0.4	6
2	34	0.4	0.5	10
3	38	0.5	0.6	14

### 2.3 CFD 计算过程及结果

滴头流量受流道最小过水断面尺寸影响较大,且补偿式滴头在工作时补偿片的具体运动形式不明确<sup>[5]</sup>,为了得到设计流量所对应的流道结构,令 250 kPa 时弹性片基本贴附在迷宫流道上,此时水流仅从迷宫流道通过,并假设 100、150 kPa 时弹性片的变形情况,简化后的可变迷宫流道过水截面结构如图 4 阴影部分所示。

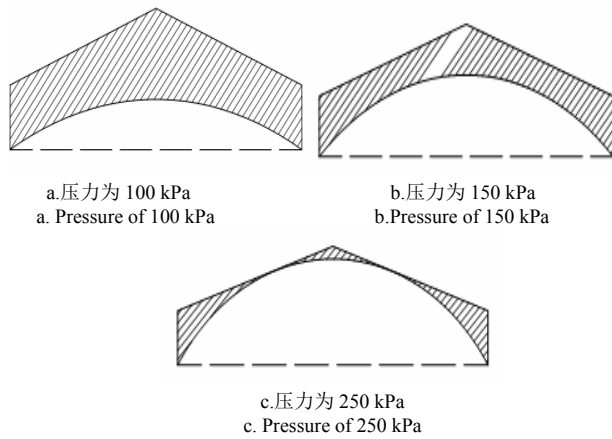


图 4 不同压力下弹性片变形简化示意图

Fig.4 Simplified diagram of deformation of elastic diaphragm for different pressures

本文采用 ANSYS15.0 数值模拟软件，模型网格尺寸为 0.2 mm，网格单元数量为 9.9~16.5 万个，计算选用 *k-e* 湍流

模型。可变流道结构 CFD 数值模拟计算结果如表 2 所示。由计算结果可以看出，滴头 N4、N5、N7 在 250 kPa 时滴头流量分别为 2.1、1.6 和 1.7 L/h，接近流量为 1.5~2.0 L/h 的设计要求。根据三者的流量变化幅度及本文设计流量要求，选取 N5 滴头结构参数作为滴头尺寸设计依据，考虑到弹性片可能完全贴附流道壁面时的流量情况以及结合 N4、N5 流道单元数，将两者可变迷宫流道单元数取均值，调整为 12 个。最终可变流道结构尺寸：齿尖角 34°，流道宽度 0.4 mm，流道深度 0.4 mm，流道单元数 12 个。

弹性片的尺寸及弹性（或硬度）对滴头的补偿性能起到关键作用，为了确定合适的弹性片尺寸及物理性能，需要确定弹性片的使用条件，图 5 为计算过程中不同结构尺寸条件下部分滴头的计算压强云图。在进水口压强为 250 kPa，弹性片贴附在弹性齿上时，弹性片两侧的压强  $\Delta P$  为 70~150 kPa，拟选用的弹性片厚度为 0.5 mm，当流道结果尺寸确定后，据式（6）~式（8）可得出，弹性片的硬度为 26~44 HA。

表 2 正交试验设计与数值模拟计算结果

Table 2 Orthogonal experimental design and results of numerical simulation

滴头编号 Emitter labels	齿尖角 Tip angles /(°)	流道宽度 Channel widths /mm	流道深度 Channel depths /mm	单元数 Channel number	不同灌水压强时滴头流量 Flow rate with different pressures/(L·h <sup>-1</sup> )		
					100 kPa	150 kPa	250 kPa
N1	30	0.3	0.4	6	5.0	5.6	5.4
N2	30	0.4	0.5	10	4.8	5.4	4.1
N3	30	0.5	0.6	14	4.1	5.1	5.3
N4	34	0.3	0.6	10	4.2	4.4	2.1
N5	34	0.4	0.4	14	4.3	3.8	1.6
N6	34	0.5	0.5	6	4.9	5.6	5.1
N7	38	0.3	0.5	14	4.1	3.5	1.7
N8	38	0.4	0.4	6	4.7	5.0	3.2
N9	38	0.5	0.6	10	4.9	4.7	3.8

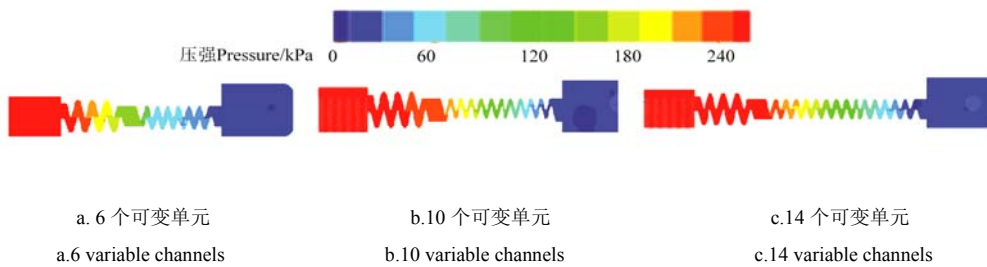


图 5 不同流道结构尺寸时各滴头的压力云图

Fig.5 Pressure nephogram of emitters with different structure size

### 3 滴头测试内容与方法

#### 3.1 测试材料与测试装置

为了验证设计滴头补偿效果及小流道结构尺寸下滴头的堵塞情况，选取 TPE 硬度分别为 30 和 40 HA，结构完全相同的一体化压力补偿式滴头 2 种（分别记为 A30 和 A40，由山东春雨节水灌溉设备有限公司代生产加工）进行水力性能和抗堵塞试验，滴头样式如图 6 所示。其中，可变流道结构参数：齿间距 1.1 mm，齿尖角 34°，流道宽度 0.4 mm，流道深度为 0.4 mm 可变流道单元数 12 个；弹性片宽度 3.5 mm，厚度 0.5 mm，弹性齿与弹性

片之间距离 0.3 mm。同时选取 2 种流量相当的压力补偿滴头（一种为国外滴头 Corona-2L，记为 Corona，另外一种为国内杨凌锦川管业有限公司生产滴头，记为 JC）进行水力性能对比试验；选取 2 种一般贴片式迷宫流道滴头（分别记为滴头 B 和滴头 C）进行 3 种滴头抗堵塞性能的对比试验。抗堵塞试验所用的泥沙选自渭河滩地淤泥，去杂质、风干研磨后过 0.1 mm 筛网，取小于 0.1 mm 粒径的土样作为试验材料，过筛后的泥沙级配（质量分数）：0~0.002(13.24%)，>0.002~0.005(3.61%)，>0.005~0.01(4.85%)，>0.01~0.02(11.98%)，>0.02~0.05(41.4%)



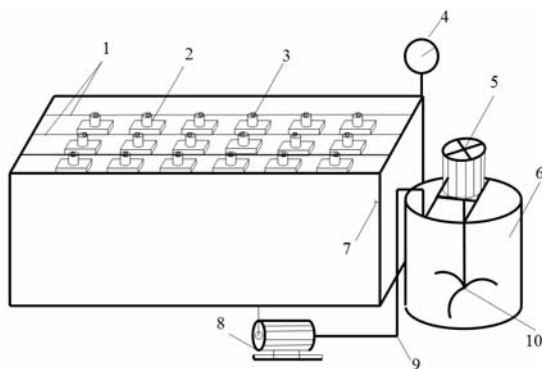
和>0.05~0.1 mm (24.92%)。试验用水为杨凌自来水, 测试水温平均为 29.5 ℃。

试验装置参照《农业灌溉设备—灌水器—技术规范 和试验方法》<sup>[33]</sup> 组装, 主要由水沙混合桶 (高 0.55 m、直径 0.6 m)、水泵 (上海哈单机电有限公司-DBZ 单相自吸泵, 最高扬程 60 m)、搅拌机 (摆线针轮减速搅拌机, 转速 1 390 r/min)、压力表 (上海自动化仪表股份有限公司, 精密度 0.25 级) 等组成, 如图 7 所示。



图 6 一体化压力补偿滴头成品试样

Fig.6 Integrated pressure-compensating emitter samples



- 1.滴灌管 2.量筒 3.滴头 4.压力表 5.搅拌器 6.水沙混合桶 7.止水阀
- 8.水泵 9.管道 10.搅拌器叶片
- 1.Emitting pipe 2.Measuring cylinder 3.Emitters 4.Pressure gauge 5.Stirrer
- 6.Water tank 7.Valve 8.Pipeline 10.Stirrer vane

图 7 水力性能测试平台

Fig.7 Diagram of hydraulic performance test bed

### 3.2 测试方法

试验前将水压分别调至最小、最大压强并保压 5 min, 测试过程以 20 kPa 为极差从 20 kPa 测试压强开始测量, 至 260 kPa 测试压强结束。每次压强稳定后, 将量筒放至各滴头下, 单个水头测试时间 5 min, 重复 2 次, 2 次质量误差小于 2% 并取平均值作为滴头的流量。

采用周期性间歇浑水滴灌试验法测试滴头抗堵塞性能, 试验选用粒径小于 0.1 mm 的泥沙。在 100 kPa 测试压强下, 先测定清水条件下的滴头平均流量  $Q_0$ , 再分别对泥沙浓度为 0.50、0.75 和 1.00 g/L 的 3 种水质进行滴头抗堵塞测试。每次灌水时间 30 min, 间歇 30 min, 共 25 次灌水, 每条毛管含 7 枚滴头, 设 3 条毛管为重复。每次灌水结束后, 记录各滴头流量并取平均流量记为  $Q_i$ , 取  $Q_r=Q_i/Q_0$  为该次灌水的相对平均流量, 另采用每次灌水时各滴头流量的变差系数  $C_v$  (表征滴头流量灌水均性, %) 对滴头的抗堵塞性能进行评价。

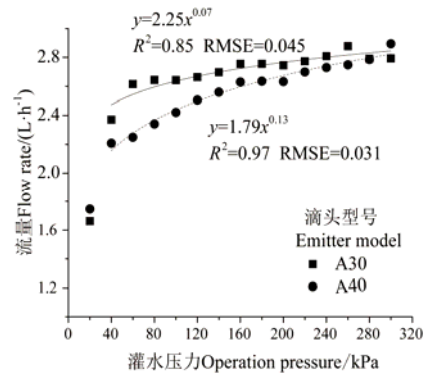
$$C_v = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i} \quad (9)$$

式中  $\bar{Q}$  为多个滴头的平均流量, L/h。

## 4 结果与分析

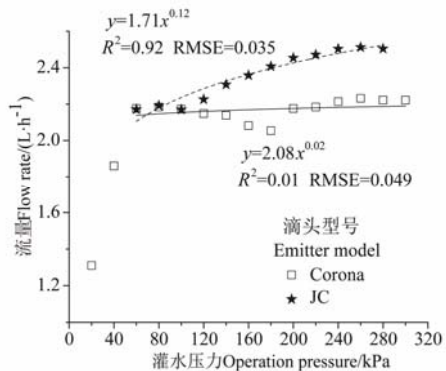
### 4.1 滴头的补偿性能

图 8 为 A30、A40 及其他滴头压力—流量实测曲线。各曲线均在 40~60 kPa 区间存在拐点, 其中 JC 滴头在灌水压强小于 40 kPa 时无流量, 对实测数据进行曲线拟合, 得到各滴头的拟合  $Q-H$  曲线, 见图 8。



a. 一体化压力补偿滴头

a. Integrated pressure-compensating emitter



b. 2 种其他压力补偿式滴头

b. Other pressure-compensating emitter

图 8 不同滴头水力性能测试曲线

Fig.8 Curve of hydraulic performance of different emitters

### 4.2 抗堵塞性能

#### 4.2.1 泥沙浓度对一体化滴头抗堵塞性能的影响

从图 9 可以看出, 在压力补偿区间, 滴头  $Q_r$  随着灌水次数的增加呈下降趋势, 滴头  $C_v$  呈上升趋势, 与其他类型滴头堵塞情况一致。当泥沙浓度较高时, 滴头的  $Q_r$  和  $C_v$  都出现了突然减小或增大, 说明滴头堵塞程度并不一定是一直加重, 而是具有一定的波动性与随机性, 这得益于一体化压力补偿滴头的特殊结构。当泥沙浓度为 0.50、0.75 g/L 时,  $Q_r$  在第 25 次灌水时下降到 75%,  $C_v$  在第 22 次灌水后大于 20%, 该一体化压力补偿滴头有效灌水次数达到 22 次以上, 抗堵塞性能良好。

压力补偿式滴头的水力性能评价指标包括起调压力、流态指数、补偿区间等, 补偿区间范围按标压 (100 kPa) 下流量的 15% 偏差确定, 各指标如表 3 所示。A30、A40 滴头在 100 kPa 时流量均为 2.4 L/h, 流量系数分别为 2.25 和 1.79, 起调压力在 34~35 kPa; 流态指数分别为 0.07 和 0.13, 符合行业标准<sup>[24]</sup> 小于 0.2 的要求,

性能优良；补偿区间分别为 35~300 及 34~250 kPa，补偿范围大于 150 kPa。Corona 滴头起调压力为 49 kPa，流态指数 0.02；JC 滴头起调压力为 52 kPa，流态指数 0.12，由此看出，国内压力补偿式滴头性能距离国际水平仍有差距。对比分析知，当弹性片硬度为 30 HA 时，滴头流态指数为  $0.07 < 0.2$ ，补偿区间最大压力  $265 \text{ kPa} > 150 \text{ kPa}$ ，满足行业标准<sup>[24]</sup>要求，故该一体化压力补偿滴头设计及功能属于恒流灌水器-压力补偿式滴头范畴。

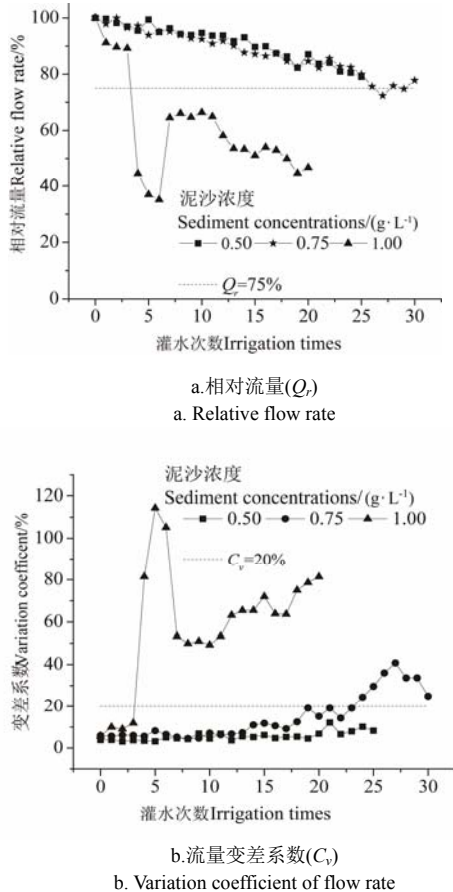


图 9 泥沙浓度对滴头流量的影响

Fig.9 Influence of sediment concentrations on flow rate of emitter

表 3 不同滴头水力性能测试结果

Table 3 Results of hydraulic performance of different emitters

滴头型号 Emitter model	起调压力 Starting compensation pressure/kPa	流量系数 Flow coefficient	流态指数 Flow index	补偿区间 Compensation interval/kPa	$R^2$
A30	35	2.25	0.07	35~300	0.85
A40	34	1.79	0.13	34~250	0.97
Corona-2L	39	2.08	0.02	39~300	0.01
JC	52	1.71	0.12	52~300	0.92

4. 2. 2 不同类型滴头抗堵塞性能对比

采用 2 种一般贴片滴头 B 和 C 与一体化压力补偿滴头（记为 A）进行对比，3 种滴头主要参数如表 4 所示，分别在 50、100 kPa 测试压力下对滴头进行短周期堵塞试验，泥沙浓度为 1.00 g/L。

由图 10 可知，50、100 kPa 工作压力下，3 种滴头的

$Q_r$  都随着灌水次数的增加而减小。当系统压力为 50 kPa，15 次灌水后，A、B、C 滴头的相对流量分别下降至 93.1%、54.2%、81.8%，滴头的抗堵塞性能为  $A > C > B$ ；当压力为 100 kPa 时，滴头的抗堵塞性能为  $C > B \geq A$ 。对于流道结构不可变的非补偿式滴头，其抗堵塞性能与流道最小断面尺寸有关<sup>[13,34-35]</sup>，一般而言，流道结构断面尺寸越大，相同情况下发生堵塞的概率越小，因此对于 B、C 滴头，C 的抗堵塞性能优于 B。在 100 kPa 工作压力下，A 滴头可变形流道过水断面大幅度减小，导致泥沙迅速淤积，致使滴头较快地出现堵塞现象；但在 50 kPa 工作压力时，弹性片变化较小，流道结构相对较大，且每次管网系统开启或关闭时，通过弹性片的震动，可以排出附着、停留的泥沙而达到减缓滴头堵塞情况。

表 4 3 种滴头主要结构参数

Table 4 Main structure parameters of 3 different emitters

滴头类型 Emitter model	额定流量 Rated flow rate / (L·h <sup>-1</sup> )	齿高 Tooth height/mm	流道宽度 Channel width/mm	流道深度 Channel depth/mm	流道断面面积 Sectional area/mm <sup>2</sup>	流道结构 Structure type
A	2.5	1.2	0.4	1.0	0.4	
B	3.0	1.1	0.8	0.8	0.6	
C	3.5	2.0	1.5	0.8	1.2	

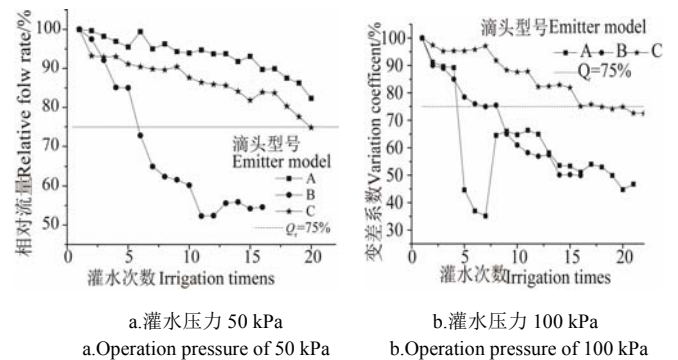


图 10 不同滴头堵塞情况

Fig.10 Clogging of different emitters

与传统硫化橡胶相比，TPE 的生产不需硫化、成型加工简单，生产流程短、节约能耗、效率高 10 倍以上，被人们称为继天然橡胶、合成橡胶后的第三代橡胶<sup>[36]</sup>。设计滴头采用一体化结构，精简了结构设计，减少了模具使用数量，量产时单个滴头成本在 0.05~0.1 元，是传统“三件式”滴头成本的 15%~35%，生产效率提升 50%~150%。设计滴头采用 TPE 作为压力补偿元件，属于国内首例产品。由于补偿效果发生时弹性片处于波动或震动状态，为了真实地观测滴头的补偿状态情况以及弹性结构对泥沙颗粒的响应，建议采用数字式粒子图像测速仪（digital particle Image velocimetry, DPIV）与平面激光诱导荧光技术相结合的方式观测滴头内部的水沙流动情况。

## 5 结 论

1) 基于压力补偿式滴头补偿原理, 借助计算流体力学仿真软件设计了一体化压力补偿式滴头, 滴头流态指数为 0.07, 补偿区间为 35~300 kPa, 起调压力 35 kPa, 水力性能指标满足压力补偿式滴头设计要求。

2) 与流道结构相似的一般贴片式滴头相比, 在低压灌水压力时, 滴头 A 的抗堵塞性能优于滴头 B、C, 且滴头具有一定自冲洗功能, 能够减缓滴头堵塞问题。

3) 滴头采用一体化设计, 生产工艺简单, 降低了生产成本, 且材料可完全回收利用, 该产品的研制有助于中国节水灌溉滴灌技术的推广。

### 参 考 文 献

- [1] Carles Solé-Torres, Jaume Puig-Bargués, Miquel Duran-Ros, et al. Effect of different sand filter underdrain designs on emitter clogging using reclaimed effluents[J]. *Agricultural Water Management*, 2019:223. DOI:10.1016/j.agwat.2019.105683.
- [2] 史吉刚, 李玮, 张瑞喜, 等. 引黄灌区黄河水滴灌关键技术研究与示范[J]. *水利科学与寒区工程*, 2018, 1(12): 77—80. Shi Jigang, Li Wei, Zhang Ruixi, et al. Key technology of drip irrigation with the Yellow River water in the Yellow River irrigation region[J]. *Hydro Science and Cold Zone Engineering*, 2018, 1(12):77—80. (in Chinese with English abstract)
- [3] Jafar Al-Muhammad, Séverine Tomas, Fabien Anselmet. Modeling a weak turbulent flow in a narrow and wavy channel: Case of micro-irrigation[J]. *Irrigation Science*, 2016, 34 (5): 361—377.
- [4] 马福才, 彭贵芳. 补偿式滴头的研制[J]. *喷灌技术*, 1992(1): 16—19, 64. Ma Fucui, Peng Guifang. The development of compensated emitter[J]. *Water Saving Irrigation*, 1992(1): 16—19, 64. (in Chinese with English abstract)
- [5] 张海文, 韩敏琦, 赵桂生, 等. 滴灌微喷灌水器对梯田地形的适应性研究[J]. *现代园艺*, 2018(2): 15—17.
- [6] Boulos Abou Zakhem, Farid Al Ain, Rania Hafez. Assessment of field water budget components for increasing water productivity under drip irrigation in arid and semi - arid areas, Syria[J]. *Irrigation and Drainage*, 2019, 68(3): 452—463. (in Chinese with English abstract)
- [7] 袁寿其, 李红, 王新坤. 中国节水灌溉装备发展现状、问题、趋势与建议[J]. *排灌机械工程学报*, 2015, 33(1): 78—92. Yuan Shouqi, Li Hong, Wang Xinkun. Status, problems, trends and suggestions for water-saving irrigation equipment in China[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering(JDIME)*, 2015, 33(1): 78—92. (in Chinese with English abstract)
- [8] 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—67. Gong Shihong, Li Jiusheng, Li Guangyong. Current status and future development focus of micro-spray irrigation technology[J]. *China Water Resources*, 2012(2): 66—67. (in Chinese with English abstract)
- [9] 李久生, 栗岩峰, 王军, 等. 微灌在中国: 历史、现状和未来[J]. *水利学报*, 2016, 47(3): 372—381. Li Jiusheng, Li Yanfeng, Wang Jun, et al. Microirrigation in China: history, current situation and prospects[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47(3): 372—381. (in Chinese with English abstract)
- [10] 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 Jianping. Preliminary study on hydraulic characteristic of embedded compensated emitter[J]. *Water Saving Irrigation*, 2004 (4): 21—22. (in Chinese with English abstract)
- [11] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(15): 19—25. (in Chinese with English abstract)
- [12] 王建东, 李光永, 邱象玉, 等. 流道结构形式对滴头水力性能影响的实验研究[J]. *农业工程学报*, 2005, 21 (2): 100—103. Wang Jiandong, Li Guangyong, Qiu Xiangyu, et al. Effects of flow passage forms on hydraulic performance of emitters[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE)*, 2005, 21(2): 100—103. (in Chinese with English abstract)
- [13] 王新端, 白丹, 宋立勋, 等. 不同结构滴灌双向流道灌水器抗堵性能对比试验[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(14): 78—85. Wang Xinduan, Bai Dan, Song Lixun, et al. Contrast experiment on anti-clogging performance of bidirectional flow channel emitters with different structures in drip irrigation [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(14): 78—85. (in Chinese with English abstract)
- [14] 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)
- [15] 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 with English abstract)
- [16] 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—1405. Wei Zhengying, Tang Yiping, Cheng Yingshe, et al. A new method for rapid design of the integral pressure-compensating emitters[J]. *China Mechanical Engineering*, 2008, 19(12): 1387—1405. (in Chinese with English abstract)
- [17] 徐飞鹏, 李云开, 任树梅. 新疆棉花膜下滴灌技术的应用与发展的思考[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(1): 25—27. Xu Feipeng, Li Yunkai, Ren Shumei. Investigation and discussion of drip irrigation under mulch in Xinjiang Uygur Autonomous Region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2003,

- 19(1): 25—27. (in Chinese with English abstract)
- [18] 姚振宪, 王三建. 我国滴灌发展历程及建议[J]. 农业工程, 2011, 1(2): 54—58.  
Yao Zhenxian, Wang Sanjian. The drip irrigation development progress and suggestion of China[J]. Agricultural Engineering, 2011, 1(2): 54—58. (in Chinese with English abstract)
- [19] 李云开, 冯吉, 宋鹏, 等. 低碳环保型滴灌技术体系构建与研究现状分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 83—92.  
Li Yunkai, Feng Ji, Song Peng, et al. Developing situation and system construction of low-carbon environment friendly drip irrigation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 83—92. (in Chinese with English abstract)
- [20] 王栋. 内镶扁平紊流压力补偿式滴头的研制[J]. 节水灌溉, 2007(1): 36—37.  
Wang Dong. Trial-manufacture of in-line compressed turbulence pressure-compensated drip irrigation emitter[J]. Water Saving Irrigation, 2007(1): 36—37. (in Chinese with English abstract)
- [21] 牛文全, 张亮. 中国专利: 一种压力补偿式偏平滴头 CN105393894A [P]. 2016-03-16.
- [22] 牛文全, 张亮, 范兴科. 中国专利: 一种一体化压力补偿式扁平滴头生产方法 CN105479653A [P]. 2016-04-13.
- [23] 钱伯章. 热塑性弹性体(TPE)及其市场和产品研发[J]. 橡塑资源利用, 2010(6): 20—29.  
Qian Bozhang. Market and product R&D of Thermoplastic elastomer (TPE) [J]. Rubber & Plastics Resources Utilization, 2010(6): 20—29. (in Chinese with English abstract)
- [24] 塑料节水灌溉器材压力补偿式滴头及滴灌管 GB/T 19812.2—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [25] 李光永. 压力补偿灌水器的研究新进展与使用中应注意的几个问题[J]. 节水灌溉, 2000(3): 19—21.  
Li Guangyong. Advances and problems to be cared in using for pressure equalizing emitters[J]. Water Saving Irrigation, 2000(3): 19—21. (in Chinese with English abstract)
- [26] Yeoh O H, 张学义. 橡胶的硬度及杨氏模量[J]. 橡胶译丛, 1985(4): 80—83.
- [27] 李令媛. 压力补偿式灌水器结构参数对水力性能的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.  
Li Lingyuan. The Effects of Pressure Compensating Emitter Structure Parameter on Hydraulic Performance[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [28] 牛文全, 喻黎明, 吴普特, 等. 迷宫流道转角对灌水器抗堵塞性能的影响[J]. 农业机械学报, 2009, 40(9): 51—55, 67.  
Niu Wenquan, Yu Liming, Wu Pute, et al. Influence of angle of labyrinth channels on anti-clogging performance of emitter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(9): 51—55, 67. (in Chinese with English abstract)
- [29] 邓涛, 魏正英, 王立朋, 等. 压力补偿灌水器分步式 CFD 设计与实验研究[J]. 清华大学学报自然科学版, 2012, 52(4): 513—516, 522.  
Deng Tao, Wei Zhengying, Wang Lipeng, et al. Stepwise CFD simulation and experiments of pressure-compensating emitters [J]. Journal of Tsinghua University Science and Technology, 2012, 52(4): 513—516, 522. (in Chinese with English abstract)
- [30] 王立朋, 魏正英, 邓涛, 等. 压力补偿灌水器分步式计算流体力学设计方法[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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(11): 86—92. (in Chinese with English abstract)
- [31] 王尚锦, 刘小民, 席光, 等. 迷宫式滴头内流动的有限元数值分析[J]. 农业机械学报, 2000, 31(4): 43—46.  
Wang Shangjin, Liu Xiaomin, Xi Guang, et al. Numerical simulation of flows inside a drip faucet by element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 31(4): 43—46. (in Chinese with English abstract)
- [32] 张俊, 洪军, 赵万华, 等. 基于正交试验的迷宫流道灌水器参数化设计研究[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(1): 31—35.  
Zhang Jun, Hong Jun, Zhao Wanhua, et al. Parameterized design of labyrinth-channel emitters based on orthogonal experiments[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(1): 31—35. (in Chinese with English abstract)
- [33] 农业灌溉设备滴头和滴灌管技术规范 and 试验方法 GB/T 17187—2009/ISO 9261: 2004[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [34] 马晓鹏, 龚时宏, 王建东, 等. 额定压力及低压下内镶片式滴头抗堵塞性能试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 86—90, 134.  
Ma Xiaopeng, Gong Shihong, Wang Jiandong, et al. Anti-clogging performance of dental labyrinth emitters under rated pressure and low operating pressure[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 86—90, 134. (in Chinese with English abstract)
- [35] 牛文全, 吴普特, 喻黎明. 基于含沙量等值线的迷宫流道结构抗堵塞设计与模拟[J]. 农业工程学报, 2010, 26(5): 14—20.  
Niu Wenquan, Wu Pute, Yu Liming. Anti-clogging experimental investigation and optimized design of micro-channels of emitter based on isoline of sand content[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(5): 14—20. (in Chinese with English abstract)
- [36] 余庆彦, 田洪池, 韩吉彬, 等. 热塑性弹性体的研究与产业化进展[J]. 中国材料进展, 2012, 31(2): 24—32, 15.  
She Qingyan, Tian Hongchi, Han Jibin, et al. Study of thermoplastic elastomer and its industrialization[J]. Materials China, 2012, 31(2): 24—32, 15. (in Chinese with English abstract)



## Design and experiment of integrated pressure-compensating emitter made of thermoplastic elastomer

Yang Xiaokun<sup>1</sup>, Niu Wenquan<sup>1,2\*</sup>, Zhang Liang<sup>3</sup>

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

3. Shandong Spring Rain Water-Saving Irrigation Equipment Co, Ltd., Jinan 271100, China)

**Abstract:** From the 1980s, China had begun to introduce water-saving irrigation technology and equipment, but China's water-saving equipment research and development mainly relied on technology introduction and product imitation and did not have a completely independent design method and innovative products. Drip irrigation is the most common water-saving irrigation technology. The emitter and the filter are the 2 core devices of the drip irrigation project. The filter with excellent performance can make the water entering the pipe network system qualified, prevent the emitter from being blocked, and ensure the normality of the drip irrigation system when running. A good emitter can make the irrigation water drip into the irrigation area evenly, and has the high anti-blocking ability. The pressure-compensating emitters can achieve stable flow in a wide range of working water pressure changes, so its application range is wider. At present, the pressure-compensating emitters used in the market are imported products from abroad. The production process of these products is complex, requiring multiple molds, high production costs, long cycles, and difficult product quality control. In the promotion of drip irrigation technology, the recovery of drip irrigation belts or emitters is a bottleneck that needs to be overcome in the promotion of drip irrigation technology in China. To overcome the "difficulty of recycling" of pressure-compensating emitters of silicone tablets, this paper designed and developed an all-plastic-integrated pressure-compensating emitter containing thermoplastic elastomer (TPE). TPE is a new type of polymer material that exhibits rubber-like elasticity at normal temperature and can be plasticized at high temperature. Because of its rubber elasticity and easy processing of plastics, TPE has been widely used in various fields. The design emitter was made of TPE and low-density polyethylene materials. Based on the principle of pressure-compensating emitter flow compensation and numerical calculation method of computational fluid dynamics with Ansys 15.0, this study used an orthogonal design test on some important factors of the emitter, such as tip angle, channel width, channel depth, number of channel quantity. With the optimized design which parameter combination tip angle 34°, channel width 0.4 mm, channel depth 0.4 mm, number of channel quantity 12, the emitter was manufactured and tested for its compensating performance and anti-clogging performance. The results showed that the integral pressure-compensating emitter had a flow index of 0.07, a starting compensation pressure of 35 kPa, and a compensation range of 35-300 kPa. With well compensation performance, it belonged to the regulated pressure-compensating emitter; compared with one domestic emitter, the hydraulic performance of the integral pressure-compensating was much better; under low-pressure conditions, the integral pressure-compensating emitter had better anti-clogging performance than the B and C emitters. For example, when the sediment concentration was 1.0 g/L and the system pressure was 50 kPa, and 15 times irrigation later, the relative flows of the emitter A, B and C dropped to 93.1%, 54.2%, and 81.8%, respectively. Based on the integrated "all-plastic" design, the integral pressure-compensating emitter used a two-color injection on rapid prototyping which injected the mold of LDPE followed TPE material, and the two materials could be quickly combined. It was 15%-35% of the production cost of the traditional three-piece (substrate, silicon sheet, base) structure pressure-compensated emitter, and the production efficiency was increased by 50%-150%. Low production cost, short development cycle and easy recycling, it is a better substitute for the traditional emitter, and the study results provide valuable information for the integrated pressure-compensating emitter on construction designing and developing.

**Keywords:** flow rate; pressure; computational fluid dynamics; clogging; thermoplastic elastomer; integrated pressure-compensating emitter; structure design