

额定压力及低压下内镶片式滴头抗堵塞性能试验*

马晓鹏 龚时宏 王建东 于颖多

(中国水利水电科学研究院水利研究所, 北京 100048)

【摘要】 依据 ISO 短周期滴头堵塞测试方法,测试了 12 种内镶片式齿型迷宫滴头在额定压力和低压情况下的抗堵塞性能。结果表明:滴头抗堵塞性能随着流道断面最小尺寸增加而提高,当滴头流道断面最小尺寸大于等于 0.6 mm 时滴头将获得较好的抗堵塞性能,但在 0.04 MPa 时滴头流道设计形式对滴头抗堵塞性能有更为明显的影响。在过滤器滤网孔径大小选择方面,压力为 0.10 MPa 时,可选用流道断面最小尺寸的 1/5 作为有效孔径,而压力为 0.04 MPa 时,则应按流道最小断面尺寸的 1/7 来选择。研究还表明,滴灌系统在低压运行时,可通过间歇灌溉的方式来预防和减少滴头的堵塞。

关键词: 灌水器 低压 抗堵塞性能

中图分类号: S275.6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)07-0086-05

Anti-clogging Performance of Dental Labyrinth Emitters under Rated Pressure and Low Operating Pressure

Ma Xiaopeng Gong Shihong Wang Jiandong Yu Yingduo

(Department of Irrigation and Drainage, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract

Based on short term clogging test procedure in ISO clogging test methods for drip emitters, twelve kinds of dental labyrinth emitters were tested for anti-clogging ability under different operating pressures. The results showed that as the minimum size of labyrinth passage section increased, the anti-clogging ability of emitters was improved. When the minimum size of labyrinth passage section was greater than 0.6 mm, the anti-clogging ability of emitters would be better. However, the design of labyrinth passage section showed more significant effect on the anti-clogging ability of emitters under 0.04 MPa operating pressure. Aperture of the filter can select 1/5 of the effective aperture of minimum size of labyrinth passage section under 0.10 MPa, and 1/7 of the minimum size of labyrinth passage section under 0.04 MPa. In addition, the results also showed that intermittent irrigation could contribute to the improvement of anti-clogging performance of emitters under low operating pressure.

Key words Emitter, Low operating pressure, Anti-clogging performance

引言

滴头是滴灌系统的重要设备之一,其抗堵塞性能直接影响滴灌系统的运行。滴头堵塞原因可归结为物理堵塞、化学堵塞和有机堵塞,也可能是这几种堵塞原因的结合^[1~2]。为了预测滴头的潜在堵塞问

题,研究分析不同流道结构、尺寸和流道形式的滴头对不同粒径砂粒堵塞的敏感性、堵塞几率和方式等极为重要,国内外学者对此进行了一些研究^[3~8]。

近年来随着一次性滴灌带的推广使用,由于使用周期较短,滴灌系统堵塞问题在一定程度上有所缓解,面对资源节约型社会的建设需求,低压滴灌渐

收稿日期: 2010-08-19 修回日期: 2010-11-09

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2006AA100213)、国家自然科学基金资助项目(50709045)和中国水科院科研专项资助项目(节集 1111)

作者简介: 马晓鹏,工程师,博士生,主要从事节水灌溉研究,E-mail: maxp@iwhr.com

通讯作者: 龚时宏,研究员,博士生导师,主要从事节水灌溉研究,E-mail: gshh@iwhr.com

成为滴灌领域发展的新趋势,其主要特点就是运行压力逐渐降低。滴灌系统运行压力降低可能带来的滴头堵塞问题处于滴灌系统运行管理技术上的盲区,目前并没有可参考的研究,特别是针对额定流量为1~3 L/h(滴灌系统较多采用的流量范围)的灌水器在低压情况下抗堵塞性能研究基本处于空白。本文针对额定流量为1~3 L/h典型内镶片式滴头在额定压力和低压情况下的抗堵塞性能进行研究,旨在为滴灌系统特别是低压滴灌系统中滴头生产、设计选型提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验设备及方法

试验在中国水科院大兴试验基地进行,试验主

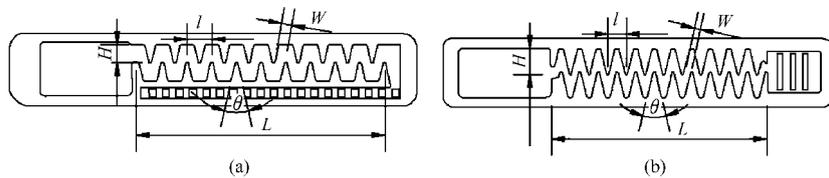


图1 A型和B型流道结构示意图

Fig.1 Schematic diagram for the A-type and B-type of the flow passage

(a) A型 (b) B型

表1 滴头流道结构参数

Tab.1 Geometrical parameters of flow path of emitters

规格	流道形式	流道宽度 W/mm	流道深度 D/mm	齿高 H/mm	齿角度 $\theta/(\circ)$	齿间距 L/mm	流道长度 L/mm	流道面积 S/mm ²
N1.05	A	0.53	0.46	0.95	30	1.34	20.28	0.27
N1.75	B	0.65	0.65	1.13	30	1.59	18.30	0.42
N2.6	A	0.85	0.60	1.43	30	1.92	19.70	0.56
D0.8	A	0.38	0.38	0.85	35	1.20	18.90	0.14
D1.38	A	0.53	0.65	0.90	31	1.42	35.60	0.31
D3.0	B	0.55	0.80	2.00	27	1.47	17.00	0.40
M1.2	A	0.57	0.50	0.93	38	1.39	19.50	0.34
M1.6	A	0.57	0.70	0.85	46	1.37	19.50	0.44
L1.38	A	0.59	0.65	0.80	30	1.42	35.50	0.35
L2.78	B	0.56	0.80	1.94	34	1.48	18.40	0.38
P1.2	A	0.51	0.53	0.60	38	1.25	19.30	0.28
Y1.4	A	0.58	0.53	1.22	34	1.52	20.70	0.32

头内部最小的过流尺寸,以建立对过滤系统尺寸要求的指导)^[9]。本试验采用短周期方法,试验中没有考虑长期运行条件下出现的沉淀和化学反应等。试验测试压力分别为0.10 MPa和0.04 MPa,其中压力0.10 MPa时每一阶段运行15 min,压力0.04 MPa时为其与0.10 MPa时具有可比性,运行时间为23 min,使测试滴头过流量等于相同类型滴头在压

要设备为水力性能与抗堵塞性能综合测试装置,试验相关测试设备还包括加压泵1台、250 mL量筒25个、量程0.25 MPa精密压力表1块和秒表1只。在测试装置上安装5条同一规格滴灌带,每条滴灌带上滴头不少于5个,测试滴头数为25个,试验选用12种市场可买到的内镶片式滴头的滴灌带,常见滴头流道形式分为A型(梯形)和B型(三角型)两种,流道结构参数及表示方法详见图1和表1,规格中首位字母代表生产厂家,数值代表额定流量。

目前国内还没有滴头抗堵塞性能的测定标准,本文中滴头抗堵塞试验方案参考了ISO抗堵塞国际标准草案的短周期方法(短周期方法主要测试滴头的抗物理堵塞能力,即测试滴头允许某尺寸粒径的固体颗粒通过或阻止其通过的能力,着眼于了解滴

力0.10 MPa时运行15 min的过流量。

1.2 堵塞物质及颗粒尺寸

在ISO抗堵塞国际标准草案中堵塞物使用的是氧化铝粉末,但在实际灌溉系统运行中,主要颗粒堵塞物为天然河砂,并且砂粒在水中的粘结性与氧化铝粉末不同,因此本试验采用天然河砂作为堵塞物^[4-5]。根据标准中的试验方法,试验分8个阶段,试验水中砂粒质量浓度和粒径随着试验阶段的递进而逐渐加大。河砂粒径选配主要参考了抗堵塞试验国际标准草案中建议的氧化铝粉末颗粒尺寸分布曲线,天然河砂粒径选配从F60到F220,分别代表了从60目筛网到220目筛网范围内筛选的砂粒。试验各阶段堵塞物质量浓度要求详见文献[9],根据试验装置水箱容积(60 L)、试验每个阶段粒径级配累积曲线和砂粒质量浓度要求,可以计算出堵塞试验每个阶段中不同颗粒粒径间的质量分布。

2 结果分析与讨论

2.1 滴头相对流量随各阶段的变化

每种滴头的抗堵塞试验按0.10 MPa和0.04 MPa两种运行压力进行,试验过程分为8个试验阶段,运行压力0.10 MPa时每个试验阶段开始后的12~15 min之内测定25个滴头的单个流量,计算其平均流量作为滴头在该阶段的平均流量,然后计

算出相对流量(相对流量是指25个滴头每阶段平均流量占其清水时额定流量的百分比)。运行压力0.04 MPa时每个试验阶段开始后的20~23 min之内测定25个滴头的单个流量,然后计算出相对流量。本试验堵塞判断标准是滴头堵塞试验的相应阶段(阶段1~8)测试样品的相对流量是否大于75%,

即当相对流量小于75%时,认为滴头样本堵塞;或以堵塞率评价滴头,堵塞率是本试验阶段堵塞的滴头个数除以试验总滴头个数(25个)所得的比值,如果堵塞率大于临界值25%即滴头样本堵塞,否则滴头样本不堵塞^[9]。图2为各滴头相对流量各阶段的变化。

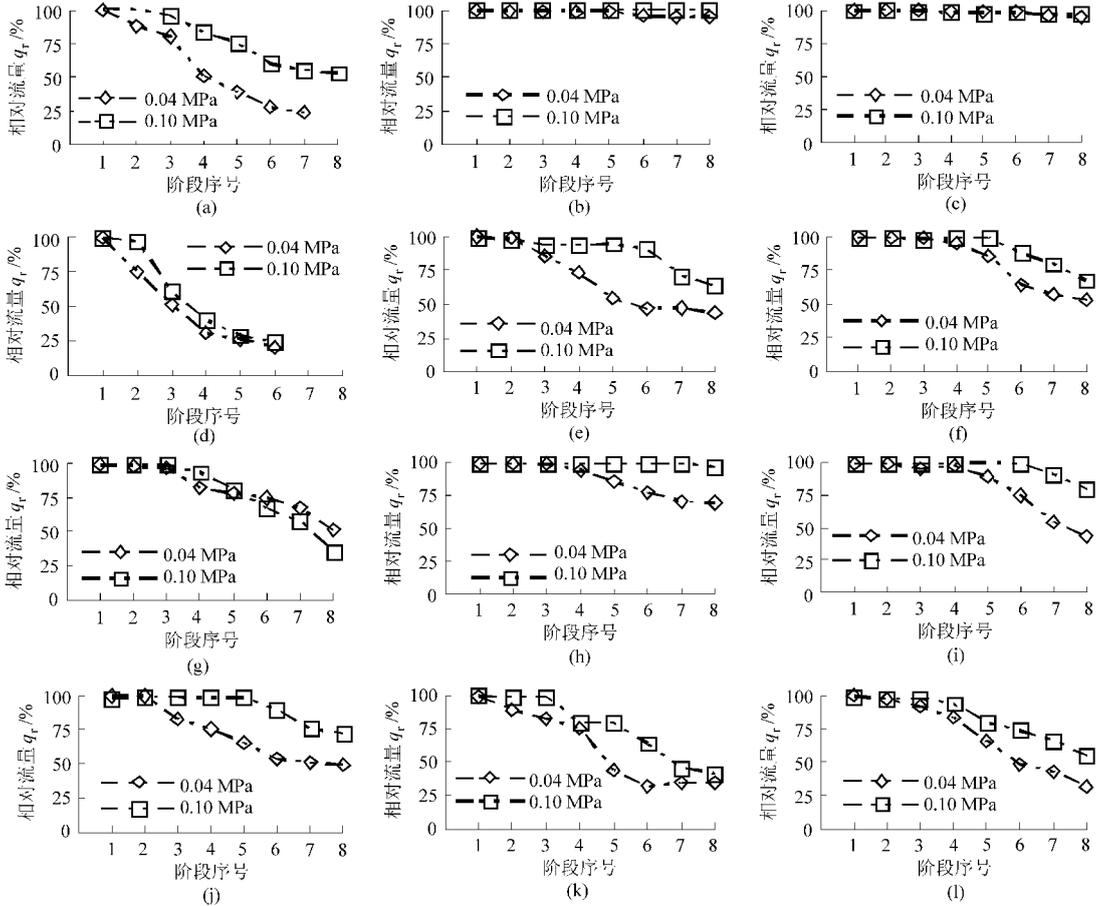


图2 灌水器相对流量随阶段变化曲线

Fig. 2 Relationship between experimentation phase and relative flow

(a) N1.05 (b) N1.75 (c) N2.6 (d) D0.8 (e) D1.38 (f) D3.0 (g) M1.2 (h) M1.6 (i) L1.38 (j) L2.78 (k) P1.2 (l) Y1.4

从图2中可以看出,抗堵塞试验过程中,不同滴头的平均流量随不同加砂阶段呈现不同的规律,滴头各规格的抗堵塞性能表现出很大差异性。根据滴头堵塞判别标准,可以看到在第1~4阶段,压力0.10 MPa时,除D0.8规格的滴头堵塞外,其余滴头均没有堵塞,压力0.04 MPa时,N1.05、D0.8、D1.38规格的滴头堵塞,其余滴头则没有堵塞。在第5阶段各规格12个样本中,除D0.8外,其余流道宽度都大于等于0.5 mm,运行压力为0.10 MPa时滴头均未堵塞,运行压力为0.04 MPa时有50%滴头堵塞,表明在此压力下滴头流道尺寸对粒径0.09 mm的砂粒,质量浓度1 250 mg/L时较敏感,当运行压力降低后,滴头抗堵塞性能明显降低。在第6~8阶段0.04 MPa时滴头堵塞数量要明显多于0.10 MPa时的堵塞数量,从试验可以得出滴头在0.10 MPa下

抗堵塞性能明显好于压力0.04 MPa下的抗堵塞性能。抗堵塞性能并不完全随滴头流量增大而增大,滴头流量较大的N2.6、N1.75、M1.6规格滴头在压力0.1 MPa和0.04 MPa下的8个阶段都没有堵塞,而D3.0和L2.78在第8阶段都发生了堵塞。

2.2 滴头单一结构参数与抗堵塞性能关系

滴头流道单一结构参数为:流道宽度 W 、流道深度 D 、齿高度 H 和齿角度 θ 。由试验结果分析可知,试验样本齿高度 H 和齿角度 θ 与表征抗堵塞性能的相对流量的相关性均不明显,这与文献[10]结论一致,但流道宽度 W 、流道深度 D 与相对流量则有一定的相关性。

表2可以看出第6阶段运行压力0.10 MPa、流道深度大于0.6 mm时,其相对流量都大于75%,而运行压力0.04 MPa、流道深度大于0.6 mm时,各规

格滴头相对流量则出现了较大波动,对运行压力 0.04 MPa 时各规格滴头抗堵塞性能作进一步分析可知, D1.38 与宽度相近滴头相比,相对流量较小,抗堵塞性能差,是由于其流道宽度相对较小,其流道长度达到 35.6 mm,而且存在 0.2 mm 齿差量,因此造成其抗堵塞性能相对较差。L2.78 和 D3.0 虽然流道深度都为 0.8 mm,但流道宽度都为 0.55 mm,相对较小,更为关键的是其流道形式为 B 型,与 A 型流道滴头不同,这在一定程度上说明 B 型流道形式滴头抗堵塞能力较 A 型流道滴头差。由表 2 也可看出,滴头相对流量总体是随流道深度的增加而提高,但相对流量波动幅度也比较大,如 M1.2 在第 6 阶段两种压力情况下都已经堵塞,这是由于其流道深度只有 0.50 mm。总之,相对流量在压力 0.10 MPa 时波动幅度明显小于运行压力 0.04 MPa 时的波动幅度,表 2 显示流道深度和宽度与相对流量有一定相关性,但并不能很好反映出参数与抗堵塞性能的关系。因此,用滴头流道单一结构参数并不能很好地反映滴头抗堵塞性能的变化趋势,所以还需要结合其他滴头特征参数进行讨论。

表 2 不同流道宽度和深度下的第 6 阶段滴头相对流量

Tab. 2 Phase 6 relative flow under different depths and widths of the flow passage %

规格	流道宽度 W/mm	流道深度 D/mm	测试压力/MPa	
			0.04	0.10
N1.05	0.53	0.46	27.6	59.9
N1.75	0.65	0.65	95.3	100
N2.6	0.85	0.60	98.8	98.0
D0.8	0.38	0.38	20.0	23.8
D1.38	0.53	0.65	47.0	90.6
D3.0	0.55	0.80	64.3	87.6
M1.2	0.57	0.50	74.8	67.3
M1.6	0.57	0.70	77.7	100
L1.38	0.59	0.65	74.9	99.7
L2.78	0.56	0.80	53.5	89.9
P1.2	0.51	0.53	31.6	63.6
Y1.4	0.58	0.53	47.9	73.4

2.3 滴头断面最小尺寸与抗堵塞性能关系

断面最小尺寸指流道最小过水断面宽度 W 和深度 D 中的较小者,记作 $\min(D, W)$,它直接影响颗粒的通过能力。表 3 反映试验第 8 阶段滴头相对流量与流道断面最小尺寸关系, D0.8、N1.05 由于在试验第 8 阶段前相对流量已经小于 25% (根据标准当相对流量小于 25% 时,试验结束),所以它们在第 8 阶段相对流量值统一取为零。在运行压力 0.10 MPa 下滴头相对流量随断面最小尺寸增加而增加,在运行压力 0.04 MPa 下则出现较大波动,其中

L1.38 相对流量只有 43%,这主要是因为其流道长度较长。图 3 对第 8 阶段相对流量与断面最小尺寸进行拟合,呈线性相关,在 0.10 MPa 下相对流量与断面最小尺寸相关性要好于 0.04 MPa,当断面最小尺寸大于 0.6 mm 时,滴头在两种压力下都满足相对流量大于 75% 的标准要求。

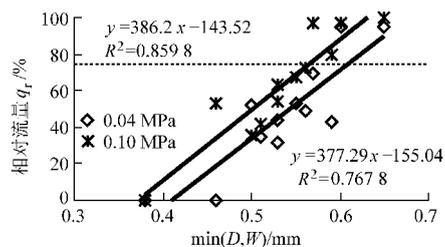


图 3 滴头第 8 阶段相对流量与流道断面最小尺寸拟合关系

Fig. 3 Relationship between minimum size of labyrinth passage section and relative flow of the phase 8

因此,剔出长度因素影响,断面最小尺寸可以较好地反映其与相对流量(抗堵塞性能)的关系,相对流量是随着断面最小尺寸的增大而提高,但在低压情况下相对流量波动较大,说明灌水器在低压运行时,流道设计优劣跟额定压力相比,对灌水器抗堵塞性能有更大影响。

表 3 不同流道断面最小尺寸下的第 8 阶段滴头相对流量
Tab. 3 Phase 8 relative flow under the minimum size of the different labyrinth passage sections %

规格	最小断面尺寸 min(D, W)/mm	测试压力/MPa	
		0.04	0.10
D0.8	0.38	0	0
N1.05	0.46	0	53.0
M1.2	0.50	51.6	35.8
P1.2	0.51	34.5	41.6
D1.38	0.53	43.7	63.8
Y1.4	0.53	31.2	54.2
D3.0	0.55	52.7	67.2
L2.78	0.56	49.1	72.0
M1.6	0.57	69.7	96.6
L1.38	0.59	43.0	79.6
N2.6	0.60	94.9	97.1
N1.75	0.65	95.1	100

2.4 滴头断面最小尺寸与过滤介质有效孔径的关系

本试验各阶段加入砂粒累计分布符合 Rosin-Rammler 分布^[10-12],试验各阶段砂粒粒径尺寸分布参数详见表 4(n 值越小,粒径分布范围越广, \bar{d} 表示颗粒群的粗细程度)。图 4 中滴头堵塞时砂粒粒径采用表 4 的特征直径。

根据实践经验,滴灌系统中一般要求所选用过

表4 试验各阶段尺寸分布参数

Tab.4 Parameters of Rosin-Rammler distribution for tested phases

参数	阶段序号							
	1	2	3	4	5	6	7	8
分布指数 n	2.828 1	3.345	3.358 4	3.258 8	3.104 1	2.635 8	2.323 3	2.103 9
特征直径 $\bar{d}/\mu\text{m}$	56.00	66.24	77.64	87.61	97.82	113.08	129.31	146.89

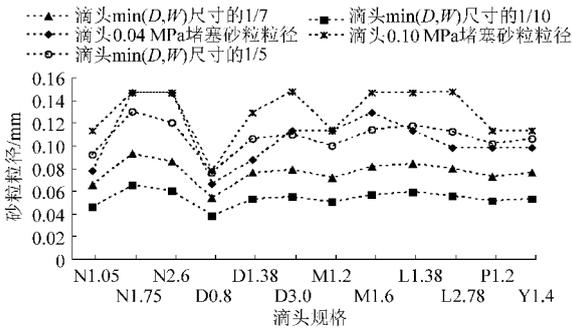


图4 滴头断面最小尺寸与过滤介质有效孔径的关系

Fig.4 Relationship between minimum size of labyrinth passage section and effective aperture of the filter

过滤器滤网的孔径大小应为所使用灌水器孔径大小的 $1/7 \sim 1/10$ [13~14]。从图4可以看出滴头堵塞时砂粒粒径都大于流道断面最小尺寸的 $1/7$, 图中给出了流道断面最小尺寸的 $1/5$, 在压力为 0.1 MPa 时其中大部分也满足要求, 但在 0.04 MPa 时, 只有部分滴头满足要求。因此, 在进行过滤器滤网孔径大小选择时, 对滴头运行压力为 0.1 MPa 的滴灌系统, 可选用流道断面最小尺寸的 $1/5$, 而对滴头运行压力为 0.04 MPa 的滴灌系统, 则应按流道断面最小尺寸的 $1/7$ 来选择。

2.5 滴头堵塞部位及过程分析

试验对各规格滴头在抗堵塞试验过程中发生堵塞的滴头进行了剖切, 滴头剖切如图5所示。

通过选取部分堵塞滴头进行剖切, 发现滴头堵塞一般在滴头流道入口处、滴头流道中部和滴头流道末端。抗堵塞试验过程中, 在 0.04 MPa 压力运行时, 滴头堵塞有一定的随机性, 部分滴头堵塞后, 在下一个阶段运行时又会恢复流量, 堵塞滴头并不一定是完全堵塞, 产生这种情况的原因一方面是由于运行压力小, 滴头堵塞处, 砂粒结构较松散, 另一方面是在下一阶段开启阀门时, 水流对堵塞部分的冲

击, 这与 Jackson R C [15] 提出的利用间歇灌溉减少滴头堵塞的思想相一致。而在 0.10 MPa 压力运行时, 当滴头在某一阶段堵塞后, 绝大多数情况下, 这种堵塞都不可逆, 在剩余试验阶段滴头都处于堵塞状况。

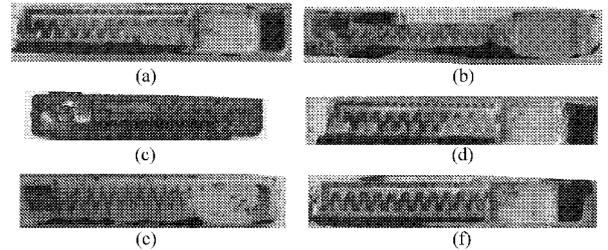


图5 滴头流道不同位置堵塞剖切图

Fig.5 Split graph of emitters clogging

(a) A型, 入口堵塞 (b) B型, 入口堵塞 (c) A型, 中部堵塞
(d) B型, 中部堵塞 (e) B型, 全部堵塞 (f) A型, 全部堵塞

3 结论

(1) 在运行压力 0.10 MPa 下各规格内镶片式滴头抗堵塞性能随着流道最小断面尺寸的增加而提高, 滴头的流道形式对其抗堵塞性能影响相对较小, 而在 0.04 MPa 时, 滴头抗堵塞性能随着流道最小断面尺寸的增加而提高, 但滴头流道的设计形式对滴头抗堵塞性能有更为明显的影响。好的流道结构设计参数可以获得更好的抗堵塞性能。根据结果分析, 当滴头流道最小断面尺寸大于等于 0.6 mm 时滴头将获得较好的抗堵塞性能。

(2) 在过滤器滤网孔径大小的选择时, 压力为 0.10 MPa 时, 可选用流道断面最小尺寸的 $1/5$ 作为有效孔径, 而对 0.04 MPa 时, 则应按流道断面最小尺寸的 $1/7$ 来选择。

(3) 滴灌系统在低压运行时, 滴头堵塞有一定的可逆性, 因此可通过间歇灌溉来预防和减少滴头的堵塞。

参考文献

- Sietan Chieng, Ghaemi Ali A. Uniformity in a micro-irrigation with partially clogged emitters [C] // 2003 ASABE Annual Meeting, Paper 032097, 2003.
- Hills D J, Brenes M J. Micro-irrigation of wastewater effluent using drip tape[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2000, 17(3): 303~308.
- Benham B, Ross B. Filtration, treatment and maintenance considerations for micro-irrigation systems[M]. Virginia Cooperation Extension, 2002: 442~757.

- Engineering of Japan, 1979, 12(1): 46 ~ 50.
- 5 Drake J G. Structural feature in granular flows [J]. Journal of Geophysical Research, 1990, 95(B6): 8 681 ~ 8 696.
 - 6 张洲波, 谢洪勇, 胡大鹏. 颗粒在斜槽中流动的实验研究[J]. 中国粉体技术, 2001, 7(6): 1 ~ 4.
Zhang Zhoubo, Xie Hongyong, Hu Dapeng. Experimental study on flows of granular materials downinclined chute [J]. China Powder Science and Technology, 2001, 7(6): 1 ~ 4. (in Chinese)
 - 7 何芳, 易维明, 李永军, 等. 固体热载体和生物质粉沿倾斜管流动和传热的计算[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 190 ~ 193.
He Fang, Yi Weiming, Li Yongjun, et al. Flow and heat transfer of mixture of solid media and biomass in inclined tube [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(6): 190 ~ 193. (in Chinese)
 - 8 易维明, 王娜娜, 张波涛, 等. 水平携带床气固两相流动的实验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(1): 11 ~ 14.
Yi Weiming, Wang Nana, Zhang Botao, et al. Experimental study on gas-solid two-phase flow in a horizontal entrained bed [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(1): 11 ~ 14. (in Chinese)
 - 9 袁廷璧, 易维明, 李志合, 等. 竖直下降管换热实验台改进设计与实验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(7): 107 ~ 111.
Yuan Tingbi, Yi Weiming, Li Zhihe, et al. Improved design and experiment of heat transfer platform for a down-flow tube [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(7): 107 ~ 111. (in Chinese)
 - 10 李志合, 刘焕卫, 高巧春, 等. 垂直下降管散体颗粒换热实验台设计与应用[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 100 ~ 104.
Li Zhihe, Liu Huanwei, Gao Qiaochun, et al. Design and experiment of downward vertical tube for heat transfer of particles [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 100 ~ 104. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 90 页)

- 4 Li Guangyong, Wang Jiandong, Alam M, et al. Influence of geometrical parameters of labyrinth flow path of drip emitters on hydraulic and anti-clogging performance [J]. Transactions of the ASABE, 2006, 49(3): 637 ~ 643.
- 5 王建东. 滴头水力性能与抗堵塞性能试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004.  
Wang Jiandong. Study on the hydraulic and anti-clogging performance of emitters [D]. Beijing: China Agricultural University, 2004. (in Chinese)
- 6 王冬梅. 迷宫迷宫滴头流道结构形式和尺寸对水力及抗堵塞性能的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2007.  
Wang Dongmei. Study on the hydraulic and anti-clogging performance of flow-passage form and size of labyrinth emitters [D]. Beijing: China Agricultural University, 2007. (in Chinese)
- 8 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.  
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. (in Chinese)
- 7 喻黎明, 吴普特, 牛文全, 等. 迷宫流道内固体颗粒运动的 CFD 模拟及 PIV 验证[J]. 农业机械学报, 2009, 40(5): 45 ~ 51.  
Yu Liming, Wu Pute, Niu Wenquan, et al. CFD numerical simulation and PIV verification about the movement of solid particles in labyrinth channel [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(5): 45 ~ 51. (in Chinese)
- 9 ISO/TC23/SC18/WG5N4 Clogging test methods for emitters [S]. 2003.
- 10 穆乃君, 张昕, 李光永, 等. 内镶片式齿型迷宫滴头抗堵塞试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(8): 34 ~ 38.
- 11 Terence Allen. Particle size measurement. Powder technology series [M]. New York: Chapman and Hall, 1981.
- 12 Djamarani K M, Clark I M. Characterization of particle size based on fine and coarse fractions [J]. Powder Technology, 1997, 93(2): 101 ~ 108.
- 13 傅琳, 董文楚, 郑耀泉, 等. 微灌工程技术指南 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1988: 71 ~ 74.
- 14 顾烈烽. 滴灌工程设计图集 [M]. 北京: 中国水利电力出版社, 2005: 10 ~ 11.
- 15 Jackson R C, Kay M G. Use of pulse irrigation for reducing clogging problems in trickle emitters [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1987, 37(8): 323 ~ 327.