

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.03.008

浑水特性与水温对滴头抗堵塞性能的影响^{*}

牛文全 刘璐

(西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

【摘要】 为探明迷宫流道滴头发生物理堵塞的成因及过程,采用分段粒径浑水周期间歇滴灌的试验方法,分别对含沙量、泥沙颗粒粒径和水温对滴头堵塞发生过程的影响进行研究。结果表明:对于泥沙颗粒粒径小于0.1 mm的浑水滴灌而言,粒径越小越易造成滴头堵塞,且其堵塞程度随浑水含沙量的升高而急剧升高;存在造成滴头堵塞的敏感粒径范围,在夏季灌溉时小于0.031 mm的粒径为易堵塞粒径;水温是影响滴头堵塞的重要因素,水温越高滴头的抗物理堵塞性能越好。

关键词: 滴头 堵塞 泥沙粒径 含沙量 温度

中图分类号: S275.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)03-0039-07

Influences of Sediment Concentration and Water Temperature of Muddy Water on Emitter Clogging

Niu Wenquan Liu Lu

(Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract

In order to better understand the causes and the processes of clogging for labyrinth-path emitters, the influences of sediment concentration, sediment particle size distribution and water temperature on emitter clogging were investigated through the intermittent drip irrigation method. The result showed that smaller particles tended to cause emitter be clogged during the irrigation when the particle sized in muddy water were less than 0.1 mm, and the degree of clogging increased remarkably as sediment concentrations increased. The degree of emitter clogging was also impacted by water temperature. Emitters were less likely clogged by muddy water with higher temperature. It was found that in the summer when water temperature was relatively high labyrinth-path emitters were prone to clogging by sediment with particle sizes below 0.031 mm.

Key words Emitter, Clogging, Sediment particle size, Sediment concentration, Water temperature

引言

滴头易堵塞的特点直接影响滴灌系统的应用效率和工程造价,也是导致流量下降,进而导致灌水均匀度下降的重要原因。目前大部分研究主要围绕基于堵塞不同成因的滴头堵塞过程^[1-2]以及滴头抗堵性能的改进^[3-5]。Bucks等将堵塞分为物理堵塞、化学堵塞和生物堵塞3种类型,滴灌水质不同,其堵塞主导成因不同。Capra A^[6]研究发现滴头堵塞程

度是随悬浮颗粒、铁离子、镁离子、钙离子和锰离子浓度升高而加剧的。基于Capra A的研究,刘海军^[7]等利用再生水滴灌试验对滴头堵塞物质进行了分析,认为再生水的温度升高有利于钙、镁离子的沉淀。闫大壮^[8-9]等侧重于再生水中由微生物富集开始的堵塞研究;徐文礼等^[10-11]利用试验手段对粒径在0.1~0.25 mm之间的物理颗粒引起滴头堵塞规律进行了研究。以往研究中对悬浮沙粒(粒径0~0.1 mm)的研究多采用计算机软件模拟^[12-15],

收稿日期:2011-09-13 修回日期:2011-11-14

*“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011AA100507)

作者简介:牛文全,副研究员,主要从事灌溉理论与节水技术研究,E-mail:nwq@vip.sina.com

试验验证相对较少;另外,灌水温度对滴头堵塞性能的影响多见于再生水滴灌研究,而就浑水滴灌条件下,水温对固体微粒的运动机理、堵塞过程等影响研究相对较少。

总结以往众多学者对滴灌水质的研究成果,结合我国西部地区多引河水灌溉,即使经过完善的沉淀、过滤处理,滴灌水源中仍然含有许多细小悬浮固体沙粒,经长时间滴灌这些物质仍会造成滴头不同程度堵塞。本文通过室内抗堵测试平台,测试齿形流道滴头在不同粒径、含沙量、灌水温度条件下堵塞程度和灌水均匀度的变化过程,分析浑水特性及灌水温度对滴头堵塞程度的影响。

1 试验内容及方法

1.1 试验材料与装置

试验在西北农林科技大学滴灌设备研发实验室内进行,试验浑水中采用的微颗粒是经研磨过筛处理的风干土壤,滴灌带为杨凌秦川节水灌溉设备工程有限公司生产的内镶贴片斜齿形迷宫流道滴灌带,其流道宽 $w = 0.8 \text{ mm}$,流道深 $d = 0.8 \text{ mm}$,齿间距 $b = 2.3 \text{ mm}$,流道单元数 $n = 14$ 个,流量系数 $k = 0.301$,流态指数 $x = 0.53$,额定流量 $q_0 = 3.0 \text{ L/h}$,流道结构如图 1 所示。

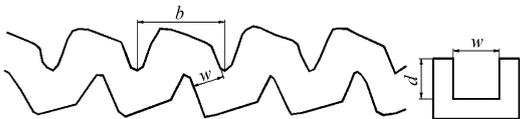


图 1 灌水器流道结构

Fig. 1 Illustration of flow path structure of emitters

浑水抗堵塞试验装置参照《农业灌溉设备-灌水器-技术规范 and 实验方法》和《中华人民共和国行业标准-微灌灌水器》搭建而成,装置由压力变频设备、数据自动采集设备、水沙混合设备以及滴灌带性能测试设备组成。变频调压表由计算机控制,精度为 0.01 m 水头;数据采集采用电子秤,质量误差为 0.2 g ;水沙混合设备利用回水管喷射搅拌,试验装置如图 2 所示。

1.2 试验方法

采用周期性间歇浑水滴灌试验方法,试验所用泥沙粒径小于 0.1 mm 。

(1) 试验分别于 2011-02-20 ~ 2011-03-10 和 2011-07-01 ~ 2011-08-01 期间进行,采用过筛处理方法,筛分出 $0.075 \sim 0.1 \text{ mm}$ 、 $0.031 \sim 0.075 \text{ mm}$ 和 $0 \sim 0.031 \text{ mm}$ 3 种泥沙粒径,在 0.06 MPa 进口压力下,分别对泥沙质量浓度为 1.2 、 1.6 和 2.0 g/L 的 3 种浑水进行滴头抗堵性能的测试。测试时间为 30 min ,灌水间隔 2 h ,共 20 次灌水,试验

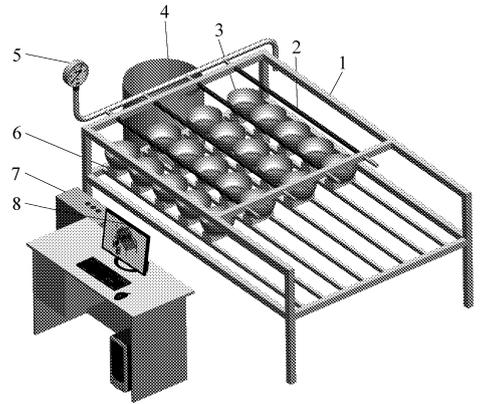


图 2 浑水试验测试平台

Fig. 2 Experimental layout of a drip irrigation system

1. 支架 2. 测试毛管 3. 集水盆 4. 水沙混合桶 5. 压力表
6. 传感器 7. 变频箱 8. 计算机

重复一次,每次灌水结束后,记录滴头平均流量,试验结束后计算该压力条件下的浑水流量 q_i 与清水流量 q_p 的比值,即平均相对流量 $q_r = q_i/q_p$,且采用克里斯琴森系数 $C_u^{[16]}$ 表征的灌水均匀系数对滴头堵塞程度进行评价。测得试验水温在 3 月份平均为 8°C ,8 月份平均为 28°C 。

(2) 采用 150 目网式过滤器(筛网孔径小于 0.1 mm)过滤,过滤后采用沉降分析方法分析泥沙颗粒级配^[17],其中粒径在 $0 \sim 0.001 \text{ mm}$ 、 $0.001 \sim 0.005 \text{ mm}$ 、 $0.005 \sim 0.03 \text{ mm}$ 、 $0.03 \sim 0.05 \text{ mm}$ 、 $0.05 \sim 0.1 \text{ mm}$ 的泥沙含量分别为 20.68% 、 9.84% 、 44.13% 、 16.01% 和 9.34% 。在 0.06 MPa 压力下测试泥沙质量浓度为 2.0 g/L 浑水的堵塞情况,灌水时间、间隔和次数设置同上。试验结束后,将 20 个滴头的出水量收集起来,沉淀、干燥并测定其粒级组成,与试验前颗粒组成对比,观察造成滴头堵塞颗粒的主要粒径范围。

2 结果及分析

2.1 含沙量

图 3 为根据 2011 年 8 月抗堵塞测试结果,绘制的不同粒径条件下滴头平均相对流量随含沙量(泥沙质量浓度)的变化趋势。从图 3 可以看出,不同粒径范围,滴头堵塞程度均随含沙量的升高而加剧。当粒径小于 0.031 mm ,含沙量为 1.2 g/L 时,灌水 20 次后滴头平均相对流量为 89.68% ,降幅只有 10% 左右;当含沙量增加到 1.6 g/L ,试验结束时,相对流量已小于 75% 额定流量线,说明滴头发生较为严重的堵塞;当含沙量增至 2.0 g/L 时,最终其平均相对流量仅为 56.61% ,滴头发生了较为严重的堵塞。当粒径在 $0.031 \sim 0.1 \text{ mm}$ 范围时,滴头整体流量降幅不大,仅为 $9\% \sim 13\%$,含沙量对堵塞的影响

并不明显,滴头均保持了较好的抗堵性能。这是由于颗粒间的作用与浑水浓度密切相关,当进口压力一定时,流场速度分布大体不变,颗粒浓度越小,粒子速度与水体速度分布越一致^[12],当浓度增加,颗粒与水分子、微粒与微粒间碰撞摩擦的几率增加,相应的能量损失也越大,容易在流道拐角处沉积下来,造成堵塞。

2.2 粒径

图4是在温度为30℃时,9种不同浑水特性水质抗堵试验测试的滴头流量及灌水均匀系数变化曲线。

从图4可以看出,含沙量条件相同时,粒径越小越容易造成堵塞,粒径小于0.031 mm的泥沙粒径对于滴头堵塞影响最为显著。当含沙量为1.2 g/L时,3种粒径范围泥沙浑水均保持较高的抗堵性能,粒径对滴头堵塞的影响并不显著,灌水结束时滴头相对流量和灌水均匀系数均保持在90%上下

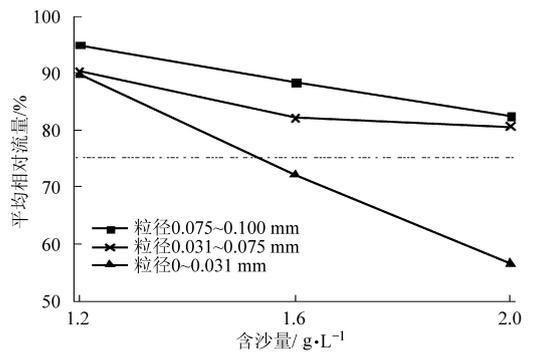
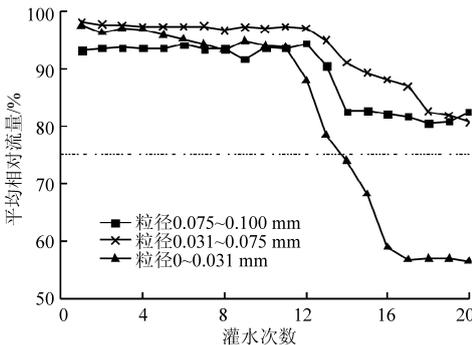
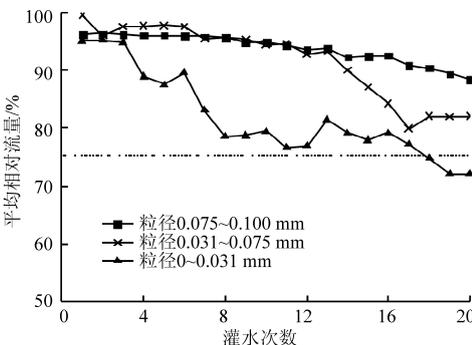
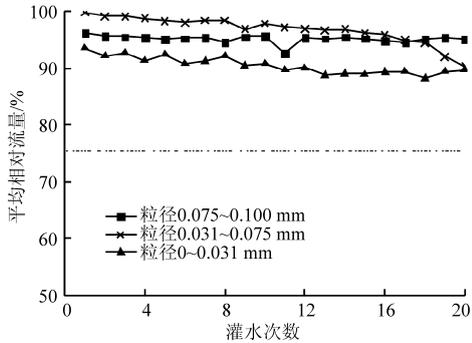
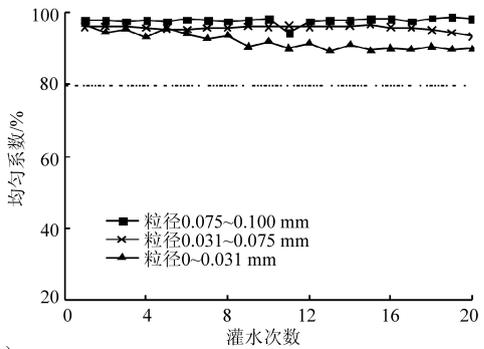


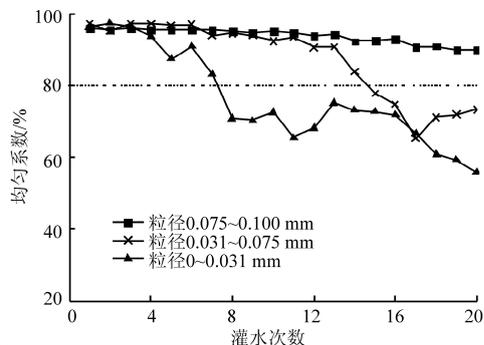
图3 试验期间滴头流量随含沙量变化曲线

Fig.3 Impact of sediment concentration on emitter discharge

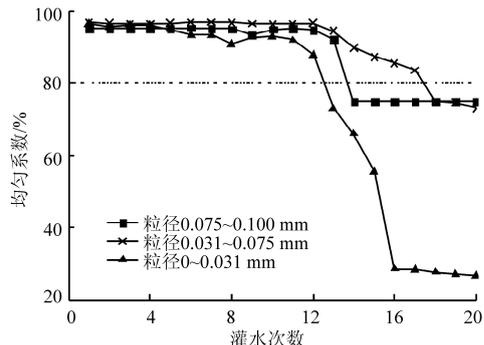
(图4a);当浑水含沙量为1.6 g/L时,粒径对滴头堵塞影响的显著性开始明显增强,其中粒径为0.075~0.1 mm时,滴头仅发生轻微堵塞且堵塞程度比较均一,滴头抗堵塞性相对较高,试验结束时滴头平均相对流量为88.4%,且灌水均匀度变化趋势十分平缓。粒径为0.031~0.075 mm时,从第13次



(a)



(b)



(c)

图4 粒径、含沙量对滴头流量及均匀系数的影响

Fig.4 Impact of sediment particle size on emitter discharge and C_u under various sediment concentrations

(a) 含沙量 1.2 g/L (b) 含沙量 1.6 g/L (c) 含沙量 2.0 g/L

灌水开始个别滴头出现明显的堵塞现象,平均流量从93%突降至80%,灌水均匀系数明显下降。当粒径小于0.031 mm时,滴头流量变化整体波动较大,从第4次灌水开始个别滴头出现明显堵塞,虽在第6次后流量有所回升,但随后又有明显下降,存在流道频繁的堵塞和冲洗反复过程,灌水结束后滴头平均流量和均匀系数分别为72.2%和55.9%,滴头发生严重堵塞(图4b);当含沙量为2.0 g/L时,3种粒径泥沙浑水条件下,滴头流量变化均呈现先缓后陡再稳定的变化趋势,其中粒径大于0.031 mm的泥沙颗粒对于滴头堵塞的影响不显著,这与2.1节中分析结果一致。当粒径小于0.031 mm时,个别滴头存在严重堵塞的现象,从图4c可以看出,在第11次灌水开始,部分滴头发生严重堵塞,流量剧减,从而导致灌水均匀系数相应剧减,第16次灌水后,滴头堵塞情况基本保持平稳,最终其平均相对流量降为56.61%,均匀系数仅为26.55%。

按1.2节方案(2)进行浑水滴灌试验,试验结束后,滴灌前后粒径组成比例发生了变化,其中粒径0~0.001 mm、0.001~0.005 mm、0.005~0.03 mm、0.03~0.05 mm、0.05~0.1 mm的泥沙含量分别为13.04%、7.27%、36.11%、21.95%和21.63%。灌水前粒径小于0.03 mm的泥沙颗粒占74.45%,灌水结束后其比例降为整体的56.41%,下降了18.04个百分点。结果表明,粒径小于0.1 mm的微粒,在灌溉过程中滞留到迷宫流道内的概率不同,存在较易停留于迷宫流道导致堵塞的敏感粒径段。

2.3 水温

以含沙量为1.2 g/L的泥沙浑水为例,说明在不同季节条件下水温对滴头堵塞的影响。图5为3种粒径范围泥沙颗粒在特定含沙量条件下不同季节灌水试验,滴头平均相对流量和均匀系数随灌水次数的变化曲线。从图5可以看出,在水质条件一定时,冬季浑水试验比夏季试验更容易造成滴头的堵塞,水温成为影响细小颗粒堵塞另一个重要因素。当泥沙粒径为0.075~0.1 mm时(图5a),与冬季相比,夏季灌水试验中滴头流量的变化更为平缓,在第11次灌水时才出现个别滴头轻微的堵塞,且沉积沙粒随后就被冲洗出流道,滴头流量恢复正常。冬季试验出现极个别滴头的严重堵塞,灌水13次时滴头流量开始出现明显下降,直至第15次灌水结束后保持稳定,平均滴头流量为90.2%,对应的灌水均匀系数下降明显,第16次降至73.8%,结束时保持在83.4%;当粒径范围在0.031~0.075 mm时(图5b),水温对滴头堵塞影响并不显著,在第20次灌水后才出现个别滴头的轻微堵塞;当泥沙颗粒粒

径小于0.031 mm时,冬季试验中所有滴头均发生堵塞,而且滴头个体之间堵塞程度的差异性较大,从图5c可以看出,滴头平均相对流量和均匀系数的下降幅度较大。在第8次和第13次灌水后个别滴头发生严重堵塞,平均相对流量与灌水均匀系数分别为72.9%和47.85%,所有滴头都发生了严重堵塞,而夏季试验中滴头仅发生了轻微堵塞,平均相对流量和均匀系数变化幅度仅为3.9%和6.83%,仍保持优良的抗堵性和灌水质量,且灌水期间存在流道频繁的冲淤现象。说明水温增高可适当提高滴头的抗堵塞性能。

3 讨论

对于小粒径泥沙浑水的滴灌,滴头堵塞过程可以概括为:颗粒团聚吸附与水流冲刷分散的制衡作用。流道内流场的紊动性决定了颗粒间碰撞、粘结、分散、沉降过程,而紊动对颗粒絮凝的双向性使得滴头堵塞发生过程及影响因素也具有两面性。一方面水流紊动程度高增大了滴头流道中细小颗粒的碰撞几率,易形成絮团,加大团粒的沉降速度,另一方面水流的高紊乱度引起的剪切力会破坏团聚体的稳定及沉降。

3.1 含沙量

含沙量的高低决定了颗粒在流场内碰撞的几率,但含沙量对堵塞的影响,在一定范围内是由于其与泥沙粒径共同作用的结果。粒径小于0.075 mm颗粒的跟随性接近于1,泥沙颗粒速度与流体速度相差较小,易随水流出^[18],如图2所示,当粒径在0.075~0.1 mm范围内,整体表现为较好的抗堵性能,其跟随性与粒径小于0.075 mm的颗粒相比略差,当含沙量增至2.0 g/L时,颗粒间、颗粒与流道壁面的碰撞加剧,滴头堵塞程度略有加剧;粒径小于0.031 mm时含沙量对堵塞的影响最不明显,说明当含沙量在1.0~2.0 g/L范围内时,含沙量对于跟随性较好的非粘粒抗堵塞性较好,即较高含沙量增加了颗粒间碰撞几率,改变了流道内泥沙浓度的分布状况^[19],但颗粒的高跟随性使得其能够顺利从流道流出,滴头流量变化相差无几;对于粒径小于0.031 mm的泥沙颗粒,粘粒含量高,当含沙量增加时,颗粒自身紊动性大大提高,更易碰撞粘结形成絮凝团粒堵塞流道。

3.2 粒径

前人研究认为,粒径的大小是引起堵塞的重要因素,泥沙粒径为流道尺寸的1/10~1/6时滴头不易堵塞^[12],当颗粒小于流道尺寸1/10时,粒径越小越容易引起滴头堵塞(絮凝沉淀),当颗粒大于流道

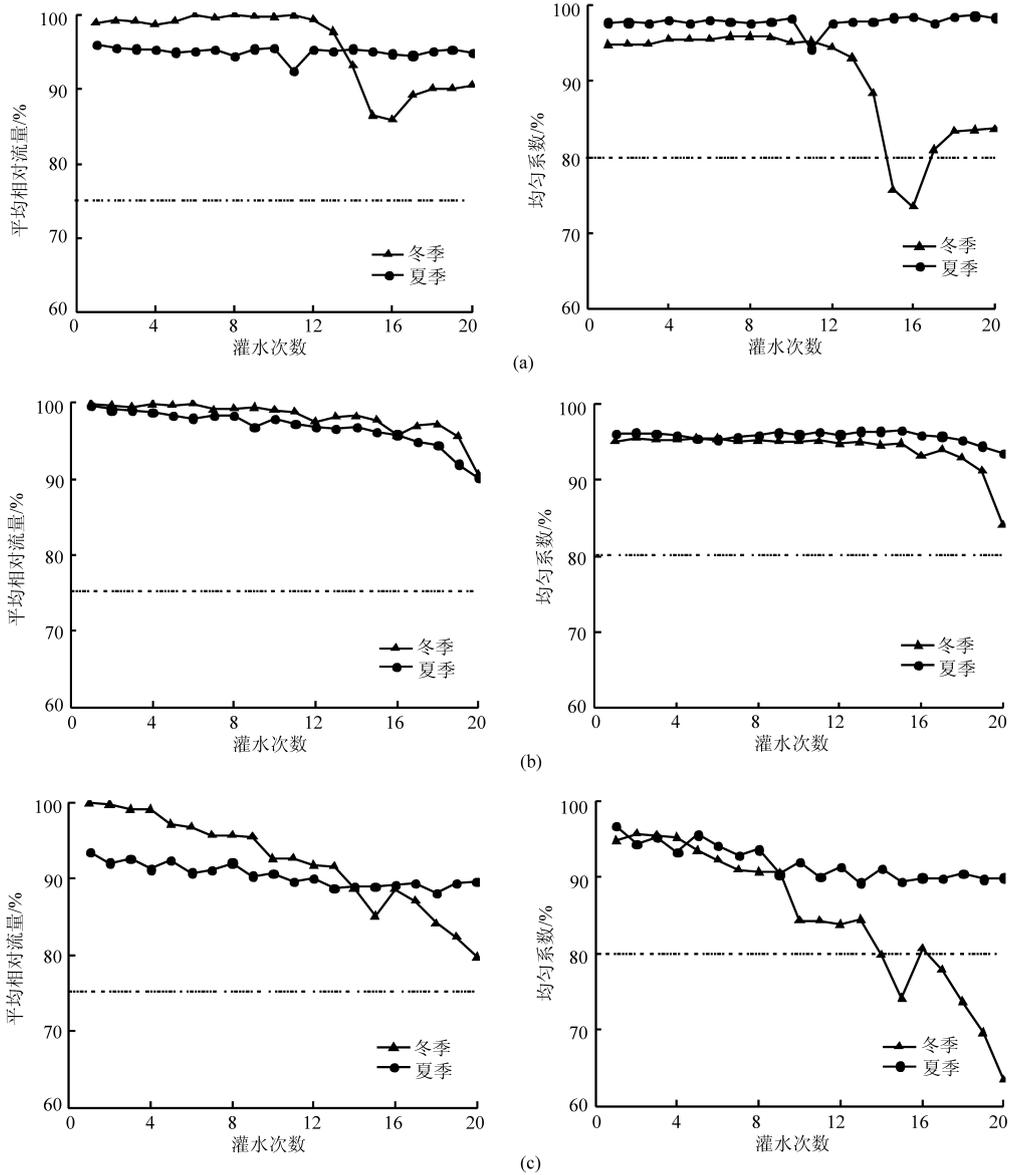


图5 温度对滴头流量及均匀系数的影响

Fig.5 Impact of water temperature on emitter discharge and C_u

(a) 粒径 0.075 ~ 0.1 mm (b) 粒径 0.031 ~ 0.075 mm (c) 粒径 0 ~ 0.031 mm

尺寸 1/6 时, 粒径越大越容易引起滴头堵塞(碰撞消能)。张德茹^[20] 等对细小颗粒发生絮凝的临界粒径进行了研究, 试验结果指出, 对于天然沙粒, 大于 0.03 mm 的泥沙颗粒凝絮作用不明显。本试验粒径为小于 0.1 mm 的细小泥沙颗粒, 颗粒间的团聚凝絮现象是造成堵塞发生的不可忽略因素, 粒径小于 0.03 mm 的粘粒, 表现出特殊的物理特性, 较小粒径泥沙颗粒间的碰撞和粘结作用以及紊乱性均较强, 加之其较大的表面吸附力更有利于较大团聚体的形成, 从而易于堵塞流道造成滴头的堵塞。由于粒径分析前颗粒样本经过充分的分散处理, 故不考虑凝絮造成的粒径组成改变, 另外试验采用的毛管长度为 1.7 m, 压力的沿程损失很小, 管腔内泥沙淤积量很小^[21], 故造成颗粒入流前后粒径变化的原因主要是指流道内滞留的沙粒含量。由此可以认为, 粒径

小于 0.030 mm 的泥沙微粒是造成滴头堵塞的敏感粒径, 其最易粘附在迷宫流道内造成滴头堵塞。

3.3 水温

温度对滴头堵塞的影响, 主要通过影响流道内溶剂的内能、粘度系数和扩散系数, 和溶质间相互的物理、化学作用来影响滴头出流状况的^[22]。温度越高, 水分子间、泥沙颗粒间、水分子与颗粒间的碰撞作用就越剧烈, 使得流体的内能增加, 粘度系数减小, 另外水分子间氢键作用随温度升高减弱, 使其大大偏离了初始位置, 进而减弱了分子之间的相互作用力, 导致扩散系数的增大^[23], 宏观表现为滴头流量的增加, 从而提高了滴头的抗堵塞性能。

但对于水质复杂、污染物众多的再生水源, 滴头堵塞程度是随水温升高而加剧, 与本试验单纯物理沙粒水质结果有所不同。这是由于再生水源含大量

的化学离子、有机物质等,较高的温度条件有利于离子间沉淀的形成以及有机物代谢活性升高,这些在一定程度上加速了生物膜或杂质絮状团体的形成,从而造成滴头堵塞^[7-8]。而在本试验条件下,浑水中杂质只有粒径小于 0.1 mm 的微沙粒,这些细小泥沙颗粒受到周围液体分子热运动的影响,产生无规则且不停息的布朗运动,当温度升高,水分子热运动加剧,颗粒的布朗运动也增强,从而产生较强的粒子扩散能力,微粒更容易从高浓度区流向低浓度区,另外水温的增高可以在一定压力范围内提高滴头流量^[24],故这些高紊流程度的颗粒更易随水流出流道,不易造成滴头的堵塞。另一方面,温度对颗粒热运动的影响还与其自身的粒径大小有关,粒径大于 0.01 mm 的颗粒在流场中主要受重力沉降作用控制,颗粒粒径较小时(0 ~ 500 nm)主要表现为颗粒的扩散运动^[25],易随流体流出流道。所以图 5a 和图 5b 中温度对滴头堵塞影响并不明显,当泥沙颗粒粒径小于 0.031 mm 时,粒径小于 0.01 mm 粒级的颗粒含量较高,温度对滴头堵塞的影响较为显著。

3.4 颗粒的絮凝与沉降

颗粒的絮凝与沉降是造成滴头物理堵塞的根本原因,絮凝与沉降过程在灌水期与灌水停止期均会发生。在灌水期内,流场紊流度高,颗粒间团聚和分散作用频繁的交替进行,特别是细小的固体颗粒,由于其表面张力较大,在水流紊动作用下,易形成絮团结构,一些稳定性较高的絮团,会在流道拐角的漩涡

处,盘旋沉降,最终在此处形成沉淀。而在灌水结束后间歇期间,主要以静水中颗粒的不等速沉降为主^[26],滞留在流道内水体中的固体颗粒、细小颗粒的团聚体等在重力作用下沉降,且彼此形成较大尺寸的团聚体,依附在流道壁面,下次灌水开始时,部分沉积物被冲洗,而部分则永久保留在流道内形成堵塞。故灌水时间和灌水间隔的长短,对滴头堵塞也有较大的影响。

4 结 论

(1)对于粒径小于 0.1 mm 的细小泥沙颗粒,流道堵塞随着灌水次数的增加而逐渐加剧。浑水含沙量越高越容易造成滴头的堵塞。当粒径在 0.031 ~ 0.1 mm 之间时,含沙量小于 2.0 g/L 时,对堵塞的影响力大大减弱,滴头堵塞程度不明显。

(2)夏季灌水试验,当含沙量条件相同时,粒径越小越容易造成堵塞,其中粒径小于 0.031 mm 颗粒对堵塞最为敏感,粒径 0.031 ~ 0.1 mm、浑水含沙量高于 1.6 g/L 时,滴头堵塞程度较为明显;冬季灌水试验,含沙量、粒径、温度 3 因素间存在较为复杂的耦合作用。

(3)对于水质状况单一仅含物理泥沙颗粒的浑水滴灌而言,水温越高,滴头抗堵塞性能越好。当泥沙颗粒粒径小于 0.031 mm 时,水温对滴头堵塞的影响最为显著,且温度较低的冬季灌水易造成滴头堵塞。

参 考 文 献

- 1 Bucks D A, Nakayama F R. Trickle irrigation water quality and preventive maintenance[J]. *Agricultural Water Management*, 1979, 2(2): 149 ~ 162.
- 2 Nakayama F R, Bucks D A. Water quality in drip/trickle irrigation: a review [J]. *Irrigation Science*, 1991, 12(4): 187 ~ 192.
- 3 魏正英,赵万华,唐一平,等. 滴灌水器迷宫流道主航道抗堵设计方法研究[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(6): 1 ~ 7. Wei Zhengying, Zhao Wanhua, Tang Yiping, et al. Anti-clogging design method for the labyrinth channels of drip irrigation emitters [J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 21(6): 1 ~ 7. (in Chinese)
- 4 李云开,杨培岭,任树梅. 滴灌水器流道设计理论研究若干问题的综述[J]. *农业机械学报*, 2006, 37(2): 145 ~ 149. Li Yunkai, Yang Peiling, Ren Shumei. General review on several fundamental points of design theory about flow path in drip irrigation emitters [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2006, 37(2): 145 ~ 149. (in Chinese)
- 5 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 CSAE*, 2010, 26(5): 14 ~ 20. (in Chinese)
- 6 Capra A, Scicolone B. Water quality and distribution uniformity in drip trickle irrigation systems [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1998, 70(4): 355 ~ 365.
- 7 刘海军,黄冠华,王鹏超,等. 再生水滴灌对滴头堵塞的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(9): 15 ~ 20. Liu Haijun, Huang Guanhua, Wang Pengchao, et al. Effect of drip irrigation with reclaimed water on emitter clogging [J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(9): 15 ~ 20. (in Chinese)
- 8 闫大壮,刘杰,杨培岭,等. 滴头堵塞诱发过程及其可控方法的研究进展[J]. *中国农村水利水电*, 2009(4): 39 ~ 41. Yan Dazhuang, Liu Jie, Yang Peiling, et al. Progress in research on blockage inducing process and controllable modes of

- dripper emitter [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2009(4):39~41. (in Chinese)
- 9 闫大壮,杨培岭,李云开,等. 再生水滴灌条件下滴头堵塞特性评估[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(5):19~24.
- 10 李治勤,陈刚,杨晓池. 浑水引起迷宫灌水器物理堵塞因素实验研究[J]. *西安理工大学学报* 2006,22(4):395~398.
Li Zhiqin, Chen Gang, Yang Xiaochi. Experimental study of physical clogging factor of labyrinth emitter caused by muddy water [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2006, 22(4):395~398. (in Chinese)
- 11 徐文礼,李治勤. 迷宫灌水器堵塞与输沙能力实验研究[J]. *山西水利科技*, 2008(2):10~12.
- 12 王文娥,王福军,牛文全,等. 滴头流道结构对悬浮颗粒分布影响的数值分析[J]. *农业工程学报*, 2009,25(5):1~6.
Wang Wen'e, Wang Fujun, Niu Wenquan, et al. Numerical analysis of influence of emitter channel structure on suspended granule distribution [J]. *Transactions of the CSAE*, 2009,25(5):1~6. (in Chinese)
- 13 喻黎明,吴普特,牛文全,等. 迷宫流道转角对灌水器水力性能的影响[J]. *农业机械学报*, 2009,40(2):63~67.
Yu Liming, Wu Pute, Niu Wenquan, et al. Influence of angle labyrinth channels on hydraulic performance of emitter [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(2):63~67. (in Chinese)
- 14 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 labyrinth channels on anti-clogging performance of emitter [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(9):51~55. (in Chinese)
- 15 葛令行,魏正英,唐一平,等. 迷宫流道内沙粒-壁面碰撞模拟与 PTV 实验[J]. *农业机械学报*, 2009,40(9):46~50.
Ge Lingxing, Wei Zhengying, Tang Yiping, et al. Simulation and experimental analysis on sand-wall collisions in labyrinth channel emitter [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(9):46~50. (in Chinese)
- 16 姚振宪,何松林. 滴灌设备与滴灌系统规划设计[M]. 北京:中国农业出版社,1999.
- 17 SL 42—2010 河流泥沙颗粒分析规程[S]. 2010.
SL 42—2010 Technical standard for determination of sediment particle size in open channels [S]. 2010. (in Chinese)
- 18 李志平,李恩邦,李淳,等. 全场光学测量中示踪粒子跟随性的数值分析[J]. *科学技术与工程*, 2007,7(20):5208~5212.
Li Zhiping, Li Enbang, Li Chun, et al. Numerical analysis of following behaviors of particle tracers in full flow field observation and measurement [J]. *Science Technology and Engineering*, 2007,7(20):5208~5212. (in Chinese)
- 19 王文娥,王福军. 片状迷宫滴头中悬浮颗粒浓度分布规律数值分析[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(3):1~6.
Wang Wen'e, Wang Fujun. Numerical analysis of the distribution rule for suspended granule concentration in labyrinth integrated emitter [J]. *Transactions of the CSAE*, 2007,23(3):1~6. (in Chinese)
- 20 张德茹,梁志勇. 不均匀细颗粒泥沙粒径对絮凝的影响试验研究[J]. *水利水运科学研究*, 1994(1):11~17.
Zhang Deru, Liang Zhiyong. Experiment study of effect of nonuniform fine sediment on flocculation [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 1994(1):11~17. (in Chinese)
- 21 姜珊,范兴科,叶成恒,等. 不同水质条件下灌水器抗堵塞性能研究[J]. *中国农村水利水电*, 2010(5):25~28.
Jiang Shan, Fan Xingke, Ye Chengheng, et al. Research on the anti-clogging performance of emitters with different water qualities [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2010(5):25~28. (in Chinese)
- 22 娄彦敏,刘娟红,周晓平,等. 温度对水的粘度和扩散系数影响的研究[J]. *西南师范大学学报:自然科学版*, 2009, 34(6):34~39.
Lou Yanmin, Liu Juanhong, Zhou Xiaoping, et al. Temperature on the viscosity and diffusion coefficient of water [J]. *Journal of Southwest China Normal University: Natural Science Edition*, 2009, 34(6):34~39. (in Chinese)
- 23 周健,陆小华,王延儒,等. 不同温度下水的分子动力学模拟[J]. *计算机与应用化学*, 1999,16(4):241~244.
Zhou Jian, Lu Xiaohua, Wang Yanru, et al. Molecular dynamics simulation of water at different temperatures [J]. *Computers and Applied Chemistry*, 1999, 16(4):241~244. (in Chinese)
- 24 徐明金,聂境,葛旭峰,等. 低压条件下滴管带的水力特性及温度影响效应试验[J]. *中国农村水利水电*, 2010(12):8~10.
- 25 杨蒙,王昊利,韩魏. 不同温度亚微米离子扩散运动的实验研究[J]. *中国计量学院学报*, 2010,21(4):305~309.
Yang Meng, Wang Haoli, Han Wei. Experimental study on the diffusive motions of submicron particles under different temperatures [J]. *Journal of China University of Metrology*, 2010, 21(4):305~309. (in Chinese)
- 26 张庆河,王殿志,吴永胜,等. 粘性泥沙絮凝现象研究评述(1):絮凝机理与絮团特性[J]. *海洋学报*, 2001,20(6):80~90.
Zhang Qinghe, Wang Dianzhi, Wu Yongsheng, et al. A review on aggregation phenomena for cohesive sediment (I): mechanism for aggregation and properties of flocks [J]. *Marine Science Bulletin*, 2001, 20(6):80~90. (in Chinese)