

浑水管道输水灌溉系统防淤堵技术研究

张英普,王玉宝,何武全,蔡明科

(西北农林科技大学 水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100)

【摘要】【目的】对浑水管道输水灌溉系统的水沙运动规律进行研究,并探讨其防淤堵技术措施,为管道输水灌溉技术在渠灌区的推广应用提供技术支撑。【方法】以泥沙运动力学和管道水力学为理论基础,通过管道输水试验系统,采用室内试验观测分析浑水管道的临界不淤流速,并结合已建管灌工程实践,探讨浑水渠灌区管道淤堵的成因及其防淤堵技术。【结果】测得了不同含沙量下的临界不淤流速,并依此建立了浑水管道临界不淤流速的经验计算公式。浑水管道较管道输送的临界不淤流速小。渠灌区管道输水系统的淤堵成因包括水源、规划设计和运行管理等 3 方面的因素。浑水管道输水灌溉系统的防淤堵技术应从工程规划设计和运行管理 2 方面着手解决。【结论】提出了浑水管道输水灌溉系统的防淤堵技术措施;建立了浑水管道临界不淤流速的经验计算公式,该公式计算结果可靠,可作为含沙量小于 100 g/kg 渠灌区管道输水灌溉工程设计的依据。

【关键词】 管道输水系统;水沙运动规律;管道淤堵;淤堵成因;流速校核

【中图分类号】 S274.2;TV131

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2010)12-0230-05

Research on anti-clogging technology of muddy water pipeline conveyance and irrigation system

ZHANG Ying-pu, WANG Yu-bao, HE Wu-quan, CAI Ming-ke

(College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 Movement mechanisms of water and sediment in muddy water pipeline conveyance and irrigation system were investigated in this study. The anti-clogging technology was studied as well, which can provide some technical support for the application and extension of pipeline conveyance and irrigation technology in irrigation districts. 【Method】 Based on sediment transportation mechanics and pipeline hydraulics, the critical non-silting velocity in muddy water pipeline was observed and analyzed by using indoor water pipeline conveyance experimental system. Together with the practice of built-up water pipeline conveyance system, the pipeline clogging mechanism and anti-clogging technology in muddy water irrigation district were discussed. 【Result】 Critical non-silting velocities with different sediment concentrations were obtained and thereby an empirical formula was founded to calculate critical non-silting velocities. The critical non-silting velocity in muddy water pipeline was smaller than the critical deposition velocity. The cause of pipeline deposition included water source, designing, operation and management in irrigation districts. 【Conclusion】 The anti-clogging technology measure of muddy water pipeline conveyance and irrigation system have been put forward. The empirical formula of critical non-silting velocity were investigated, and the calculated results of this empirical formula are relatively reliable, which can be regarded as the design basis of pipeline irrigation project for silt concentration less than 100 g/kg.

Key words: water delivery in pipeline system; movement law of water and sediment; pipeline clogging;

* [收稿日期] 2010-10-27

[基金项目] 国家“十一五”科技支撑计划项目(2006BAD11B03)

[作者简介] 张英普(1956—),男,河北饶阳人,高级工程师,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: zypu@nwsuaf.edu.cn

clogging mechanism; velocity check

管道输水灌溉由于具有节水、节地、省劳、增产和投资少、见效快、运行管理方便等优点,已成为目前世界上应用最为广泛的节水灌溉技术^[1]。在国外,该技术发展较早,相关技术及产品较为成熟和先进。近年来,国内在井灌区进行了大量的管道输水灌溉研究^[2],并进行了大面积推广应用,取得了显著的经济效益和社会效益。渠灌区管道输水灌溉具有灌溉面积大、流量大、管网系统庞大、水源多为浑水的特殊性,其推广应用存在管道淤堵、大口径管材^[3]、渠道与管道衔接^[4]、管网系统配置与系统模式设计、浑水管道水力计算及分水配水等许多尚未解决的理论、技术和相关配套硬件产品问题,其中管道淤堵问题是影响该技术推广的最主要的制约因素。此前,有关管道水沙运动规律和防止管道淤堵的试验研究,国内外都曾做过大量的工作^[5]。1953 年, Durand 对法国尼尔匹克水利实验室管道水力输送的系统资料进行了初步总结,后经多人分析研究,总结出著名的 Durand 公式^[6]和 Gibert 公式^[7]。Hanks 通过对宾汉流体的研究,提出了过渡临界流速方法^[8]。20 世纪 80 年代,蒋素绮等^[9-10]基于尾矿管道输送的目的,对管道高浓度输沙的基本特性和计算进行了研究;戴继岚等^[11]对高流速条件浑水阻力损失规律进行了研究;汪东等^[12]对浆体管道输送临界流速进行了研究,提出了比较适合管道输送的普遍临界流速公式。上述报道均是以管道输送矿物固体颗粒为研究对象,而以管道输水灌溉为对象的浑水水沙运动规律研究^[13]还比较少,且系统性较差。鉴于管道输水灌溉与管道输送在管内流体流变

特性上的不同及运行目的和运行方式的差异,在浑水管道输水系统规划设计中,若管道水力计算采用清水管道阻力损失公式、流速校核采用管道输送有关临界淤积流速公式,其结果无论在适用性上,还是在准确性、可靠性上都存在一定的缺陷。根据泥沙运动力学和管道水力学原理,为了解决浑水管道淤堵问题,首先必须解决基础理论问题,即明确浑水管道输水系统的水沙运动规律,其研究内容包括浑水管道阻力损失规律和管道临界不淤流速;其次是解决工程实践问题,其研究内容包括浑水渠灌区管道输水系统的泥沙淤积机理和防淤堵技术。为此,本研究以浑水管道为对象,根据浑水管道输水系统水沙运动规律研究内容^[14],建成浑水管道输水试验系统,依此对浑水管道阻力损失规律、管道临界不淤流速进行了系统研究,并结合已建管灌工程运用实践,分析了渠灌区管道输水系统淤堵的成因,提出了浑水管道输水灌溉系统防淤堵技术措施,以期为浑水渠灌区管灌工程的设计提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验系统与沙样

根据浑水管道输水系统水沙运动规律研究的内容和目的^[14],建成的浑水管道输水试验系统如图 1 所示。该系统由国内外先进的机电仪器、仪表及管材组装而成,主要包括输水动力系统、搅沙系统、压差计、电磁流量计、电导率仪、透明有机玻璃管段、管道系统和贮水池等部分,系统管道长 100 m,管径 110 mm;贮水池直径 3 m,深 2.5 m。

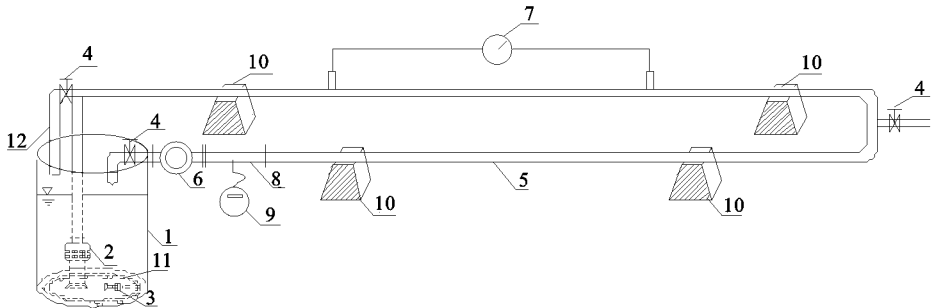


图 1 管道输水试验系统示意图

1. 贮水池;2. 动力系统;3. 泥浆泵;4. 阀门;5. 实验管段;6. 电磁流量计;7 压差计;
8. 有机玻璃观察段;9. 电导率仪;10. 支架;11. 冲沙管;12 分水管

Fig. 1 Testing system sketch for muddy water pipeline conveyance

1. Reservoir;2. Dynamic system;3. Slime pump;4. Valve;5. Testing pipeline section; 6. Magnetic flowmeter;

7. Differential manometer;8. Observing section of synthetic glass;9. Conductivity meter; 10. Stand;11. Scouring pipe;12. Distributive pipe

试验沙样为宝鸡峡引渭干渠和二支渠洪水季节淤沙,其颗粒级配分析结果见表 1。

表 1 供试沙样的颗粒级配

Table 1 Grading of sediment

粒径/mm Particle size	<0.15	<0.1	<0.05	<0.025	<0.01	<0.005	<d ₅₀
质量比/% Quality ratio	100	97.34	71.22	18.96	6.00	1.14	0.033

1.2 试验设计

根据我国北方地区以多泥沙河流为水源的渠灌区运行实际,以引黄灌区和引渭灌区为研究对象进行试验,设计泥沙含量分别为 20,40,60,80,100

g/kg,流量分别为 15,20,25,30,35,45,60,80,100,120 m³/h。试验不同处理水样的实际物理性状见表 2,其中水体积质量为 1.01 g/cm³,泥沙体积质量为 2.647 8 g/cm³。每组试验设 3 个重复。

表 2 试验水样的物理性状

Table 2 Physical testing of water samples

水样编号 Run No.	含沙质量比/(g·kg ⁻¹) Quality ratio	含沙体积比/(L·m ⁻³) Volume ratio	含沙混合比/(kg·m ⁻³) Mixed ration	浑水体积质量/(g·cm ⁻³) Density of muddy water
1	21.6	8.35	22.11	1.024
2	39.0	15.24	40.35	1.035
3	57.5	22.74	60.21	1.047
4	73.7	29.46	78.00	1.058
5	93.4	37.81	100.11	1.072

1.3 研究方法

采用试验水力学原型观测法,流量采用电磁流量计测定;阻力损失用压力表和压差计观测;临界不淤流速采用电导率仪和目测透明有机玻璃管段进行判断。试验流速自大到小,通过闸阀和分水管调节流量来控制试验流速。应用泥沙运动力学原理,参考 Durand^[6]和 Shook^[15]公式,采用回归分析法探讨临界不淤流速计算公式。根据渠灌区浑水管道输水灌溉系统的工程实践和浑水管道水沙运动规律,分析管道淤积成因,探讨渠灌区浑水管道防淤堵技术。

2 浑水管道水沙运动规律分析

2.1 泥沙运动随流速的变化过程

浑水管道输水试验观测结果显示,随着管道水流流速的减小,在含沙量为 93.4 g/kg 条件下,管道中的泥沙运动将经历下面几个变化过程。

1)试验开始,管内水流流速高达 3.95 m/s,强烈的紊动使泥沙在管道断面上的分布比较均匀,泥沙处于均匀悬浮运动状态。

2)随着流速的降低,紊动减弱,当流速降至1.58 m/s 左右时,泥沙在断面上的分布已不再均匀,而是愈近管道底部含沙量愈大,泥沙处于不均匀悬浮运动状态。

3)流速进一步降低至 0.76 m/s 左右时,近底的泥沙以滑动、滚动或跳跃的方式运动,属于推移质的范畴,管底床面存在明显的推移运动。

4)流速降低到 0.697 m/s 时,泥沙在管底开始

出现很不稳定的沉积,一会儿在管底形成一系列沙纹,一会儿又被水流冲走,似淤非淤,此时的流速即为管道临界不淤流速;当流速低于 0.697 m/s 时,一部分泥沙开始在管底沉积,形成不动的底床。

5)流速降低到 0.69 m/s 以下时,沉积在管底的泥沙愈来愈多。

浑水含沙量不同,以上几个流区的临界流速值也不同。在浑水管道输水系统中,由于泥沙含量不高,泥沙沉积有个逐步积累过程,管道淤积堵塞可能不是一两次灌溉造成的,而是多次淤积积累的结果。

2.2 浑水管道临界不淤流速经验公式的建立与验证

浑水管道临界不淤流速即管底不出现沉积物时的最小平均流速,是浑水管网系统流速校核的依据。管道临界不淤流速试验流速由大到小、含沙量由小到大进行。不同含沙量条件下的临界不淤流速试验观测结果见表 3。根据表 3 结果,参考 Durand^[6]和 Shook^[15]公式,通过回归分析,可得浑水管道临界不淤流速的经验公式为:

$$U_c=0.182\ 94S_v^{0.184\ 7}\omega^{\frac{1}{2}}\sqrt{gd\frac{\rho_s-\rho}{\rho}}。$$

(1)

式中:U_c为临界不淤流速(m/s);S_v为含沙体积比(L/m³);ω为泥沙自由沉降速度(m/s);g为重力加速度;d为管径(mm);ρ_s为泥沙密度(g/cm³);ρ为水的密度(g/cm³)。

将不同含沙量条件下的临界不淤流速试验观测结果与浆体管道输送的临界不淤积流速公式

(Shook 公式)计算结果进行对比,发现试验观测值较计算值小,如体积含沙量为 37.81 L/m^3 时,临界不淤流速观测值为 0.697 m/s ,而 Shook 公式的计算值为 0.849 m/s 。出现差异的主要原因在于:1)管道输水灌溉系统与浆体管道输送系统的输送介质差异较大,前者为浑水,沙限一般小于 120 g/kg ,而后者为浆体,其含沙量可达 700 g/kg ;2)输送目的不同,前者以输水灌溉为目的,后者以矿物输送为目的;3)流体的流变特性不同,浑水为牛顿体,而浆体可能是牛顿体,也可能是非牛顿体,且更多的是非牛顿体。

表 3 含沙量与临界不淤流速的关系

Table 3 Relationship between sediment concentration and critical non-silting velocity		
含沙体积比/ ($\text{L} \cdot \text{m}^{-3}$) Volume ratio	含沙混合比/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) Mixed ration	临界不淤流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) Critical non-silting flow velocity
8.35	22.11	0.533
15.24	40.35	0.601
22.74	60.21	0.665
29.46	78.00	0.681
37.81	100.11	0.697

由于输送介质的差异较大,管道输水系统的水沙运动规律有别于管道输送,浑水管道较浆体管道输送的临界不淤流速小。因此,在浑水管道水力计算和流速校核时,不能采用管道输送计算公式。

根据国家“十一五”科技支撑计划项目的要求,以宝鸡峡灌区咸阳双照镇龙泉南村管道输水灌溉工程^[14]为试验工程,对所建立的浑水管道临界不淤流速经验公式进行实际工程验证,结果表明,该经验公式可靠,可以作为含沙量小于 100 g/kg 的渠灌区管道输水灌溉工程流速校核的依据。

3 管道淤堵成因分析

管道淤堵问题是制约管道输水技术在渠灌区,特别是浑水渠灌区推广应用的主要因素,根据对渠灌区管道输水灌溉失败与成功工程实践的分析,认为造成淤堵的原因包括水源问题、规划设计和运行管理问题。

3.1 水源问题

1)水源存在有机漂浮物。目前,在我国大中型灌区,由于输水渠道绝大多数采用明渠输水,渠水中存在或多或少的有机漂浮物,如柴、草、垃圾等,极易造成管道堵塞。

2)水源泥沙含量超限。水源泥沙含量大于灌区引水沙限,但灌区为了抗旱需要超限引水,由于渠灌

区管网系统中水位差相对固定,无压力补偿作用,流速变化很小,若管道设计流速小于泥沙启动流速,长此以往,由量变到质变,就会导致管道系统因泥沙逐渐淤积而淤堵。

3.2 规划设计问题

1)管道规划设计时未进行流速校核,或临界不淤流速计算公式选用不当,管道实际流速小于临界不淤流速。2)泥沙含量大于管道挟沙能力,而设计时未采取泥沙处理技术措施。3)由于地形条件,输水管道有时会出现较长的倒虹吸管,而管道规划时又未设计排水设施,故会造成静水淤堵。4)管网系统未设排水设施,或排水设施设置不当,停灌后泥沙沉积,而系统流速又小于泥沙启动流速,长此以往,致使管道淤堵。5)管网系统存在盲管,在轮灌间隙和停灌后,盲管处水流流速接近于零,导致盲管淤堵。6)在较大系统的管网中,由于种植结构的原因,局部作物灌水次数悬殊,而在管网设计时未增设必要的分水闸阀,长此以往,会导致部分支管淤堵。7)管网系统进口未布设拦污排污装置,或拦污排污装置设置不当,造成有机漂浮物堵塞。

3.3 运行管理问题

1)忽视、缺乏管道系统防淤堵运行管理制度。2)轮灌中,支管闸阀长期开启,以给水栓代替支管闸阀启闭,形成人为盲管,致使非灌溉组别支管产生静水泥沙沉积。3)系统停灌后,未打开排水阀进行系统排水排沙。4)管网系统超沙限引水运行。

4 管道系统防淤堵技术措施

根据对管道输水系统水沙运行规律和淤堵成因的分析和工程实践研究,管道系统防淤堵技术应从工程规划和运行管理两方面着手解决,具体措施如下。

1)通过水力计算,合理选择管径,并通过管路调节使管内流速不小于临界不淤流速。2)根据灌区设计引水含沙量上限(沙限)及泥沙组成,进行流速校核,管道流速应不小于不淤流速。3)在管网系统规划布置中,综合考虑管网防淤堵问题,合理布局,合理走线,尽量避开易产生管道淤堵的因素。4)在管网倒虹吸管最低处、盲管末端、系统末端和系统低洼处,设置排水排沙设施。5)选择、配置合理的分水装置。6)制定合理的防淤堵运行管理制度。7)渠道与管道之间应布设衔接建筑物,衔接建筑物应包括衔接段、进水池、调压井、拦污排污装置等,必要时应设拦沙坎。8)当泥沙含量大于管道引水含沙量上

限,且通过管路调节不能满足防淤条件时,应利用地形条件,设泥沙处理建筑物,如沉沙池等。

5 结论与建议

通过浑水管道输水系统防淤堵技术试验,并结合渠灌区管灌工程实践,本研究得出以下结论和建议。

1)根据水沙运动规律试验所得的临界不淤流速经验公式适合于含沙量小于 100 g/kg 的灌区。2)浑水管道水力计算和流速校核应根据水源泥沙情况,采用符合引水沙限的浑水管道计算公式,切不可采用清水公式和管道输送计算公式。3)浑水渠灌区管道输水系统的淤堵问题应从工程规划设计和运行管理两方面着手解决。在规划设计阶段,应根据工程实际情况,综合考虑,采取行之有效的防淤堵措施;在运行管理中,应建立并严格执行防淤堵运行管理制度。

[参考文献]

[1] 李龙昌,王彦军,李永顺,等.管道输水工程技术 [M].北京:中国水利水电出版社,1998.
Li L C,Wang Y J,Li Y S,et al. Piping water engineering technology [M]. Beijing:China Water Power Press,1998. (in Chinese)

[2] 水利部科技教育司.低压管道输水灌溉技术 [M].北京:水利电力出版社,1991.
Science and Technology in Ministry of Water Resources, Department of Education. Low-pressure piping water irrigation technology [M]. Beijing:Water Resources and Electric Power Press,1991. (in Chinese)

[3] 李 晓,孙福文,张兰亭.管道灌溉系统的管材与管件 [M].北京:科学出版社,1996.
Li X ,Sun F W,Zhang L T. Pipes and fittings of pipeline irrigation systems [M]. Beijing:Science Press,1996. (in Chinese)

[4] 羊锦忠.地下排灌工程 [M].北京:水利电力出版社,1988.
Yang J Z. Underground drainage and irrigation engineering [M]. Beijing:Water Resources and Electric Power Press,1988. (in Chinese)

[5] 钱 宁,万兆惠.泥沙运动力学 [M].北京:科学出版社,1983.
Qian N,Wan Z H. Sediment movement mechanics [M]. Beijing:Science Press,1983. (in Chinese)

[6] Durand R. Basic relationships of the transportation of solids in pipes-experimental research [C]//Hyd Proc Minnesota Intern. Conv,1953:89-103.

[7] Gibert R. Hydraulic transport and upsetting of mixtures in pipes [J]. Annaul of Bridges and Highways,1960,3:307-373.

[8] 瓦斯普 E J. 固体材料的浆体管道输送 [M]. 北京:水利出版社,1980.
Wasp E J. Slurry pipeline transportation of solid material [M]. Beijing:China Water Conservancy Press,1980. (in Chinese)

[9] 蒋素绮,孙东智. 高浓度管道输沙及其基本特性的研究 [J]. 陕西水利科技,1980(2):51.
Jiang S Q,Sun D Z. Study of high-concentration slurry pipeline transportation and its basic characteristics [J]. Shaanxi Water Conservancy Technology,1980(2):51. (in Chinese)

[10] 蒋素绮,孙东智.管道高浓度输沙的计算方法 [J]. 泥沙研究,1982(2):43-44.
Jiang S Q,Sun D Z. Calculation methods of high-concentration slurry pipeline transportation [J]. Journal of Sediment Research,1982(2):43-44. (in Chinese)

[11] 戴继岚,万兆惠.泥浆管道输送的试验研究 [C]//水利部泥沙研究中心.河流泥沙国际学术讨论会论文集.北京:水利出版社,1980:195-204.
Dai J L,Wan Z H. Experimental study of slurry pipeline transportation [C]// Sediment research centre in Ministry of Water Resources. Symposium on international symposium of river sediment. Beijing:Water Conservation Press,1980:195-204. (in Chinese)

[12] 汪 东,许振良,孟庆华.浆体管道输送临界流速的影响因素及计算分析 [J].管道技术与设备,2004(6):1-2.
Wang D,Xu Z L,Meng Q H. Effect factors and calculating analysis of critical flow velocity in slurry pipeline transportation [J]. Pipeline Technique and Equipment,2004(6):1-2. (in Chinese)

[13] 周维博,党育宏.陕西宝鸡峡渠灌区浑水低压管道输水管灌试验工程规划设计与施工 [J].灌溉排水学报,1992,11(4):24-27.
Zhou W B,Dang Y H. Pipe irrigation experimental engineering plan design and construction on muddy water low pressure pipeline delivery in Baojixia irrigation district,Shaanxi [J]. Journal of Irrigation and Drainage,1992,11(4):24-27. (in Chinese)

[14] 邢义川,李远华,何武全,等.现代渠道与管网高效输水新材料及新技术 [M].河南 郑州:黄河水利出版社,2006.
Xing Y C,Li Y H,He W Q,et al. New material and technology of modern channel and piping network water delivery [M]. Zhengzhou,He'nan: Yellow River Water Conservancy Press,2006. (in Chinese)

[15] Shook C A. Pipelining solids: the design of distance pipelines [C]//Canaadian Soc. Chem Engin, Proc symp on Pipeline Transport of Solids Ottawa:Ontario,1969:56-59.