排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2013 年 1 月 Jan. 2013 | 第 31 卷 第 1 期 Vol. 31 No. 1
doi:10.3969/j.issn.1674-8530.2013.01.008

引黄灌区浑水管道输水临界不淤流速分析与计算


何武全

何武全[1,2]，蔡明科[1]，何欣烨[1]，张晨笛[1]
（1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院，陕西 杨凌 712100；2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室，陕西 杨凌 712100）

摘要：为了解决引黄灌区浑水管道输水灌溉工程中泥沙淤堵问题，合理确定临界不淤流速，用试验沙样和清水配制了 6 组不同含沙量的浑水水样，在 4 种规格管径的管道中进行了浑水管道输水临界不淤流速试验. 分析了浑水含沙量、输水管径、泥沙密度和颗粒粒径对临界不淤流速的影响. 结果表明：当管径和泥沙密度不变时，临界不淤流速随含沙量的增大而增大；当含沙量和泥沙密度不变时，临界不淤流速随管径的增大而增大；泥沙密度和粒径对临界不淤流速影响也很明显，特别是泥沙颗粒的上限粒径（d_{90} 或 d_{95}），一般最先沉降到管底的是粒径比较大的泥沙颗粒. 同时，基于泥沙悬浮效率系数和悬浮泥沙能量耗损的角度，建立了临界不淤流速计算公式；利用试验数据，确定了泥沙悬浮效率系数计算方法；经试验并比较了临界不淤流速的实测值与计算值，两者之间的最大误差为 2.958%.

关键词：引黄灌区；临界不淤流速；浑水；影响因素；管道输水；计算方法
中图分类号：S275　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2013)01-0036-05

水利水电工程

Analysis and determination of critical non-silting velocity of muddy water conveyance pipelines in Yellow River irrigation districts

He Wuquan[1,2], *Cai Mingke*[1], *He Xinye*[1], *Zhang Chendi*[1]
(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Sediment problem is the key factor that restricts the development of pipeline water conveyance irrigation engineering in Yellow River irrigation districts. In order to solve this problem, it is necessary to reasonably determine a critical non-silting velocity of water conveyance pipelines in Yellow River irrigation districts. In doing so, a series of experiments on muddy water transport in pipelines were carried out by using four kinds of size of pipe diameter and six groups of sediment concentrations which were mixtures of water and various sand contents. Then influences of sand density, particle size, sediment concentration and pipe diameter on the critical non-silting velocity were analyzed. The results showed that as the pipe diameter and sand density remain unchanged, the critical non-silting velocity is increased with increasing sediment concentration. If the sediment concentration and sand density are kept constant, then the critical velocity is increased with increasing pipe diameter. The influence of sand density and particle size on the critical non-silting velocity is also very obvious, especially for the sand particles with a size close to the upper limit of sand particle size (d_{90} or d_{95}), which often deposit in the bottom of a pipe initially. Further, an empirical formula for calculating the critical non-silting

收稿日期：2012-09-19
基金项目：“十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD08B01)；“十二五”国家农村领域科技计划项目(2011BAD25B04)
作者简介：何武全(1967—)，男，陕西合阳人，副教授(hewuquan1967@sina.com)，主要从事节水灌溉理论与技术研究.
蔡明科(1970—)，男，陕西扶风人，讲师(cmk197006@163.com)，主要从事水文水资源与节水技术研究.

velocity was established based on the sediment suspension efficiency coefficient and the suspended sediment energy dissipation principal. The sediment suspension efficiency coefficient has been determined by the experimental data. It was confirmed that the maximum error is 2.958% between the predicted critical velocity and experimental one.

Key words: Yellow River irrigation; critical non-silting velocity; muddy water; influencing factor; water delivery in pipeline; calculation method

管道输水灌溉是目前应用最广泛的节水灌溉工程技术措施之一，它具有成本低、节水明显、管理方便等特点，已成为世界许多发达国家发展节水灌溉，进行工程技术改造的一个方向性技术措施[1-2]. 据统计，截至 2010 年底，我国节水灌溉工程总面积 2.733×10^7 hm^2，其中管道输水灌溉面积为 6.67×10^6 hm^2，占节水灌溉工程总面积的 24.4%. 临界不淤流速是浑水管道输水灌溉工程规划、设计和建设中的一个重要参数，以往在管道输水灌溉工程设计中，由于缺乏相关计算依据，其临界不淤流速的计算多借用有关固体颗粒管道输送的临界流速公式确定，例如杜兰德(Durand)、B·C·克诺罗兹等公式[3-4]. 周维博等[5]在宝鸡峡灌区管道输水灌溉工程试验中，采用 B·C·克诺罗兹公式计算确定管道临界不淤流速；张英普等[6]利用管道试验资料，参考舒克(Shook)和杜兰德(Durand)公式，通过回归分析得出管道临界不淤流速经验公式. 这些公式均是利用试验资料对固体颗粒管道输送的临界流速公式进行修正，其适用性和可靠性差. 李永业等[7]与 Calejo 等[8]通过模型分析提出了解决浑水管道淤堵的方法，但其方法均有一定的局限性. 因而有必要对浑水管道输水灌溉的临界不淤流速进行系统地研究.

黄河是一条多泥沙河流，据多年黄河径流资料统计，月平均含沙量变化为 8 ~ 52.23 kg/m^3，年平均含沙量为 25.84 kg/m^3，泥沙密度为 2 610 ~ 2 750 kg/m^3. 另外，黄河泥沙主要来源于中游地区，因而水体的悬浮泥沙细颗粒含量大[9]，与固体颗粒管道输送的情况差异较大，在计算浑水管道输水临界不淤流速时，采用固体颗粒管道输送临界流速计算公式的误差较大.

文中利用浑水管道输水临界不淤流速试验的结果，分析浑水管道输水临界不淤流速的影响因素，基于泥沙悬浮效率系数和悬浮泥沙能量耗损的角度，提出一种适用于引黄灌区浑水管道输水灌溉的临界不淤流速计算公式.

1　临界不淤流速的影响因素

影响浑水管道输水临界不淤流速的因素很多，一般包括泥沙颗粒的粒径、密度、形状和粒度级配，以及含沙量、输送管径、外界温度等因素.

浑水管道输水临界不淤流速试验沙样采用黄河支流渭河的淤积泥沙，密度为 2 650 kg/m^3，中值粒径 d_{50} 为 0.033 mm；用试验沙样和清水配制了 6 组不同含沙量 S_W(重量比分别为 2.65%，4.18%，5.46%，6.58%，8.23%，10.59%)的浑水水样；试验管道采用 4 种管径 D(90，110，140，160 mm)、长度均为 60 m、管材为聚氯乙烯的硬塑料管(UPVC 管)；临界不淤流速采用目测法测定，即在试验管道平直段下游安装 1 段透明有机玻璃管，观察水流及泥沙运动状态，配合流量计测定临界不淤流速；流量采用多普勒超声波流量计测定，测量精度为 0.5%[10].

表 1 为浑水管道输水临界不淤流速试验结果. 分析该试验结果，并结合固体颗粒管道输送资料，认为影响浑水管道输水临界不淤流速的主要因素是浑水的含沙量、输水管径以及泥沙密度和粒径[11].

表 1　浑水管道输水临界不淤流速试验结果

Tab. 1　Measured critical non-silting velocity of muddy water pipeline　m/s

D/mm	S_W/%					
	2.65	4.18	5.46	6.58	8.23	10.59
90	0.657	0.710	0.733	0.757	0.779	0.805
110	0.681	0.734	0.764	0.785	0.810	0.842
140	0.706	0.747	0.782	0.802	0.836	0.884
160	0.707	0.759	0.807	0.826	0.859	0.907

1.1　浑水含沙量的影响

浑水含沙量对临界不淤流速的影响表现在 2 个方面：① 当管径和泥沙粒径等为一定的条件下，泥沙含量增大会抑制紊动强度，减弱了对泥沙颗粒的支持力；若使泥沙不淤积，可以增大流速以维持一定的紊动强度，因此含沙量增大会导致临界不淤流

速增大. ② 含沙量增大时,可以增大水体的黏性,使其中泥沙颗粒的沉速下降,紊动对泥沙颗粒的支持力相应减小,因此含沙量增大可以导致临界不淤流速降低. 当含沙量较小时,含沙量的提高对抑制紊动起主要作用,临界不淤流速随含沙量的增大而增大;当含沙量较大时,含沙量增大对减小泥沙颗粒的沉速起主要作用,因而临界不淤流速随含沙量的增大而减小,但当含沙量增大到一定程度时,多泥沙水体容易形成层流状态,阻力急剧增大.

根据浑水管道输水试验结果,得出不同管径条件下含沙量 S_W 与临界不淤流速 u_c 的关系曲线,见图1.

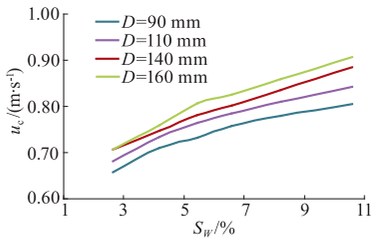


图1 含沙量与临界不淤流速的关系曲线

Fig. 1 Correlation curves of critical non-silting velocity to sediment concentration

由图1可知,含沙量对临界不淤流速有明显的影响,当管径和泥沙密度一定时,临界不淤流速随含沙量的增大而增大. 管道输水灌溉中,一般枢纽均采取一定的拦沙措施(例如拦河坎),且对引水含沙量有一定的限制,含沙量(重量比)多数小于12%,且细颗粒含量大,因此,临界不淤流速随含沙量的增大而增大与理论分析结论是一致的.

1.2 输水管径的影响

在固体颗粒管道输送方面,管径对临界流速的影响程度仍不统一. 一些学者认为大型管道中管径对临界流速的影响不大[12];而另外一些学者认为管径增大则临界流速也增大,例如著名的杜兰德公式中,临界流速与管径的1/3次方成正比[3]. 图2为根据浑水管道输水试验结果得出的不同含沙量条件下管径 D 与临界不淤流速 u_c 的关系曲线.

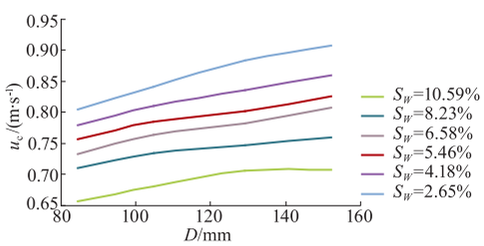


图2 管径与临界不淤流速的关系曲线

Fig. 2 Correlation curves of critical non-silting velocity to diameter of pipe

由图2可知,当含沙量和泥沙密度一定时,临界不淤流速随管径的增大而增大.

1.3 泥沙密度和粒径的影响

泥沙密度和粒径对临界不淤流速的影响非常明显. 泥沙颗粒密度越小,越易于形成均匀悬浮,流动中用于支持泥沙颗粒均匀悬浮的能量就越小,阻力减小,则临界不淤流速越小;反之则相反. 同时试验中发现,泥沙颗粒级配对临界不淤流速也有影响,特别是泥沙颗粒的上限粒径(d_{90}或d_{95}),一般最先沉降到管底的是粒径比较大的泥沙颗粒. 因为水体中泥沙颗粒在合理的比例时,细颗粒间容易形成絮网结构,粗颗粒的沉速因阻尼作用而大幅度减小,不易形成滑、跳移状态,减小了阻力损失,并且能降低水体的黏度,使水体更易于流动. 因此,泥沙粒径及颗粒级配对于临界不淤流速的影响也不容忽视.

2 临界不淤流速的计算公式

2.1 计算公式的建立

根据水流挟沙能力研究可知,浑水管道输水时,泥沙颗粒维持运动需要克服重力下沉而做功(称为悬浮功),对于以悬移质运动为主的紊动挟沙水流,泥沙悬浮功来自于挟沙水流的紊动能量,两者的比值为泥沙悬浮效率系数[13-15],其表达式为

$$e_s=\frac{E_s}{E_1}=\frac{(\gamma_s-\gamma_m)S_V u_d}{k_i\gamma_m J_m u_{av}},\tag{1}$$

式中:e_s 为泥沙悬浮效率系数;E_s,E_1 分别为泥沙悬浮功和紊动能量,J;γ_s,γ_m 分别为泥沙和挟沙水流的容重,kN/m^3;S_V 为体积含沙量;u_d 为在含沙量为 S_V 中的泥沙颗粒沉速,m/s,可从泥沙手册中查得;k_i 为挟沙水流紊动能量转化率;J_m 水力坡降;u_{av} 为管道水流平均流速,m/s.

水力坡降 J_m 的表达式为

$$J_m=\frac{f_m u_{av}^2}{2gD},\tag{2}$$

式中:f_m 为挟沙水流阻力系数;g 为重力加速度,m/s^2;D 为管道内径,m.

浑水管道输水中,一般情况下水流总能量有一小部分用于泥沙颗粒的推移运动及黏性摩阻损失,而大部分能量转化为紊动动能;在研究临界不淤流速时,管道中的泥沙颗粒尚未形成推移运动. 因此,对于以悬移质运动为主的挟沙水流,可以近似认为

紊动动量等于水流总能量，挟沙水流紊动能量转化率 k_i 为 1[14].

由式(1)－(2)可得

$$e_s=\frac{2gDS_V u_d(\gamma_s-\gamma_m)}{\gamma_m f_m u_{av}^3}. \tag{3}$$

式(3)实际上表示泥沙颗粒悬移运动的临界状态，式中管道水流平均流速 u_{av} 即为临界不淤流速 u_c. 整理式(3)可得

$$u_c=\left[\frac{2gDS_V u_d(\gamma_s-\gamma_m)}{e_s\gamma_m f_m}\right]^{\frac{1}{3}}. \tag{4}$$

理论上，当给定泥沙和输水管道资料后，如果确定泥沙悬浮效率系数 e_s，利用式(4)就可以计算出临界不淤流速 u_c.

2.2　泥沙悬浮效率系数的确定

浑水管道输水过程中，对于一定的水沙条件，当泥沙处于临界悬浮状态时，泥沙悬浮效率系数的大小意味着悬浮泥沙消耗紊动能的大小以及紊动能量的耗散变化规律. 泥沙悬浮效率系数 e_s 主要与 S_V 和 D 有关，利用表 1 中管径为 90，110 mm 的试验数据，通过拟合得到 e_s 的计算式(5)，其中相关系数 R^2 为 0.990 4.

$$e_s=0.004\ 6\ln(D^{2.1}S_V)+0.052\ 1, \tag{5}$$

利用式(4)，(5)即可计算出临界不淤流速 u_c.

图 3 为泥沙悬浮效率系数 e_s 与 S_V，D 的关系曲线，由图可知，它们之间具有非常好的相关关系.

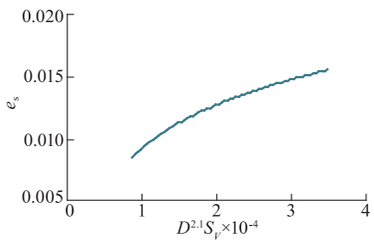


图 3　e_s 与 S_V，D 的关系

Fig. 3　Relationship between e_s, S_V and D

3　临界不淤流速公式的验证

为了验证上述临界不淤流速计算公式，采用表 1 中 2 组管径 140，160 mm 试验数据进行验证. 利用试验沙样和配置不同含沙量试验水样的基础数据，根据式(4)，(5)计算得出临界不淤流速计算值，并与试验实测的临界不淤流速比较，结果如表 2 所示. 由表可知，实测值 u_{c0} 与计算值 u_{cc} 之间的最大误差 δ 为 2.958%.

表 2　临界不淤流速的计算值与实测值比较

Tab. 2　Comparison of measured and predicted critical non-silting velocity

D/mm	S_W/%	S_V/%	u_{c0}/(m·s^{-1})	u_{cc}/(m·s^{-1})	δ/%
140	2.65	1.00	0.685	0.706	2.958
	4.18	1.58	0.747	0.747	－0.004
	5.46	2.06	0.786	0.782	－0.554
	6.58	2.48	0.814	0.802	－1.558
	8.23	3.11	0.848	0.836	－1.479
	10.59	3.40	0.886	0.884	－0.172
160	2.65	1.00	0.702	0.707	0.654
	4.18	1.58	0.771	0.759	－1.568
	5.46	2.06	0.814	0.807	－0.857
	6.58	2.48	0.845	0.826	－2.253
	8.23	3.11	0.881	0.859	－2.614
	10.59	3.40	0.922	0.907	－1.636

4　结　论

临界不淤流速是浑水管道输水灌溉工程规划、设计和建设中的一个重要参数，影响临界不淤流速的主要因素是浑水含沙量、输水管径以及泥沙密度和粒径. 引黄灌区浑水管道输水时，当管径和泥沙密度等不变时，临界不淤流速随含沙量的增大而增大；当含沙量和泥沙密度不变时，临界不淤流速随管径的增大而增大. 基于泥沙悬浮效率系数和悬浮泥沙能量耗损的角度，建立了临界不淤流速计算公式，并利用浑水管道输水临界不淤流速试验数据，确定了泥沙悬浮效率系数计算方法，经试验实测值与计算值比较，两者之间的最大误差为 2.958%，计算精度较高，能够满足实际工程应用要求，在引黄灌区发展管道输水灌溉工程中具有广阔的应用价值. 临界不淤流速计算公式中的泥沙悬浮效率系数是通过试验资料拟合得到的，因此，该计算公式的适用范围仍需进一步研究.

参考文献(References)

[1]　王留运，杨路华. 低压管道输水灌溉工程技术[M]. 郑州：黄河水利出版社，2011.

[2]　Alandí P Planells, Álvarez J F Ortega, Martin-Benito J M Tarjuelo. Optimization of irrigation water distribution networks, layout included[J]. Agricultural Water Management, 2007, 88(1/2/3): 110－118.

[3]　Durand R. Basic relationships of the transportation of

solids in pipes—Experimental research [C]//Proceedings of Minnestoa International Hydraulic Convention. Minneapolis, USA:[s. n.], 1953:89 – 103.

[4] 何武全,王玉宝,张英普,等. 浑水低压管道输水灌溉试验[J]. 沈阳农业大学学报,2007,38(1):98 – 101.
He Wuquan, Wang Yubao, Zhang Yingpu, et al. Experimental on muddy water delivery for irrigation in low-pressure pipeline system[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2007, 38(1): 98 – 101. (in Chinese)

[5] 周维博,党育宏,王幼涛. 陕西宝鸡峡渠灌区浑水低压管道输水灌溉试验工程规划设计与施工[J]. 灌溉排水,1992,11(4):24 – 27.
Zhou Weibo, Dang Yuhong, Wang Youtao. Designment and construction of muddy water low pressure pipeline irrigation test project in gorge and channel irrigation of Baoji in Shaanxi province[J]. Irrigation and Drainage, 1992,11(4):24 – 27. (in Chinese)

[6] 张英普, 何武全, 蔡明科, 等. 关于浑水管道输水系统临界不淤流速的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2004,23(6):34 – 36.
Zhang Yingpu, He Wuquan, Cai Mingke, et al. Experimental study on non-depositing critical velocity of muddy water delivery in pipeline system[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2004,23(6):34 – 36. (in Chinese)

[7] 李永业,孙西欢,王锐. 起旋器内部的流速场和涡量场特性[J]. 排灌机械工程学报,2011,29(2):155 – 159.
Li Yongye, Sun Xihuan, Wang Rui. Characteristics of velocity field and vorticity field in generator[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011,29(2):155 – 159. (in Chinese)

[8] Calejo M J, Lamaddalena N, Teixeira J L, et al. Performance analysis of pressurized irrigation systems operating on-demand using flow-driven simulation models [J]. Agricultural Water Management, 2008, 95(2): 154 – 162.

[9] 程素珍,许尚杰,杜滨,等. 黄河浑水特性及泥沙防渗性试验研究[J]. 水利与建筑工程学报,2011,9(4):76 – 79.
Cheng Suzhen, Xu Shangjie, Du Bin, et al. Study on characteristics of turbid water from Yellow River and impervious test of sediment[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2011, 9(4): 76 – 79. (in Chinese)

[10] He Wuquan, Cai Mingke, Zhang Yingpu. Study on non-depositing critical velocity of water delivery in pipeline system under different conditions of sediment-laden water source [J]. Advanced Materials Research, 2011, 243/244/245/246/247/248/249:4660 – 4664.

[11] 何武全,娄宗科,蔡明科,等. 灌区输水系统新材料(装置)开发与应用技术研究报告[R]. 杨凌:西北农林科技大学水利与建筑工程学院,2010.

[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 Dong, Xu Zhenliang, Meng Qinghua. 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] 舒安平. 水流挟沙能力公式的转化与统一[J]. 水利学报,2009,40(1):19 – 26.
Shu Anping. Transformation and unification of the formulas for sediment transport capacity in sediment-laden flows[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(1):19 – 26. (in Chinese)

[14] 舒安平. 挟沙水流悬移质运动效率系数的研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2010,18(2):209 – 216.
Shu Anping. Study on efficiency coefficient of suspended load motion in sediment-laden flows[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2010, 18(2): 209 – 216. (in Chinese)

[15] 汪东. 非均质流水平管道临界流速研究[J]. 矿冶工程,2008,28(4):20 – 22.
Wang Dong. The study of critical flow velocity of non-homogeneous flow in horizontal pipeline[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2008, 28(4): 20 – 22. (in Chinese)

(责任编辑 张文涛)