



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.05.0024

曾杉, 秦毅, 李时. 小浪底水库泥沙管道高效输送的合理参数分析[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(5): 156-163. ZENG Shan, QIN Yi, LI Shi. Rational parameter analysis of high efficiency pipeline transport of sediment in Xiaolangdi Reservoir[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(5): 156-163. (in Chinese)

小浪底水库泥沙管道高效输送的合理参数分析

曾杉, 秦毅, 李时

(西安理工大学 水利水电学院, 西安 710048)

摘要: 针对管路中沿程实时变化的含沙量和颗粒级配情况, 借鉴以往的研究成果, 从管路中泥沙的冲淤变化、悬浮特性等多角度分析确定了管道输送泥沙的临界不淤流速; 并采用实测值与模型计算值对比拟合的方法, 确定了用费祥俊的临界不淤流速计算模型来分析本次管道输送的临界不淤流速; 最后, 以理论与实践结合提出小浪底水库泥沙管道高效输送的管径和含沙量, 为今后试验或生产实践提供参考依据。提出了管径为0.325 m和0.63 m两种不同工况的高效输送参数: 含沙量均为620 kg/m³, 中值粒径范围0.051 2~0.062 9 mm, D₉₀为0.14 mm, 输送流速分别可在1.75~2.08 m/s和2.08~2.2 m/s之间进行调节。对应最大月排沙量分别为8.95万t和34.72万t。

关键词: 水库泥沙; 管道输送; 临界不淤流速; 高效输送

中图分类号: TV 145; TV 134 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)05-0156-08

Rational parameter analysis of high efficiency pipeline transport of sediment in Xiaolangdi Reservoir

ZENG Shan, QIN Yi, LI Shi

(Institute of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Based on previous research results as well as the scour and deposition changes and suspension characteristics of sediment in the pipeline, we identified the non-depositing critical velocity of pipeline transport of sediment considering the real time changes in sediment concentration and particle size distribution along the pipeline. We compared the measured values with the calculated values of different models, and chose Fei Xiangjun's model to calculate the non-depositing critical velocity of pipeline transport. Finally, on both theoretical and practical bases, we proposed the pipe diameter and sediment concentration for high efficiency pipeline transport of sediment in Xiaolangdi Reservoir, which can be a reference for future testing or production practices. We proposed the high efficiency transport parameters for two different diameters of 0.325 m and 0.63 m. The two conditions both had the following parameters: a sediment concentration of 620 kg/m³, a median particle size of 0.051 2~0.062 9 mm, and 0.14 mm D₉₀. The transportation velocity can be adjusted between 1.75~2.08 m/s and 2.08~2.2 m/s. The corresponding largest sand discharge quantity per month was 89500 tons and 347200 tons.

Key words: reservoir sediment; pipeline transport; non-depositing critical velocity; high efficiency sediment transport

1 研究意义及研究现状

小浪底水利枢纽工程位于黄河中游最后一个峡

谷河段, 控制黄河流域98%以上的泥沙来量。然而小浪底水库“淤排排细”设计没有很好实现, 粗颗粒泥沙大量淤积在库尾, 较细的泥沙则淤积在坝前, 而

收稿日期: 2016-03-22 修回日期: 2016-10-20 网络出版时间: 2017-08-29
网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20170829.1931.023.html>
基金项目: 水利部公益性行业科研专项经费项目(201301063)

Fund: National Public Welfare Foundation of the Ministry of Water Resources of China(201301063)

作者简介: 曾杉(1993-), 男, 湖北天门人, 主要从事水文学及水资源方面的研究工作。E-mail: 940971127@qq.com

通讯作者: 秦毅(1959-), 女, 江苏常州人, 教授, 主要从事干旱区水文水资源、河流泥沙研究。E-mail: 13571991500@126.com

且淤积也不是完全按照初步设计发展,非常不利于水库总库容的利用和水库异重流排沙,尤其是随着水库运用逐步进入拦沙后期,这一问题将越来越突出严重。为解决这一问题,河南河务局经过多年实践研究,提出了“远距离管道输沙”的水库清淤方法。其基本思想是:利用水泵喷射系统捣碎库底泥沙使其悬浮,再用管道输送到库外。根据远距离管道输沙的设想,河南河务局设计了水库库区输沙装置并在小浪底库区进行现场水上试验。管道输沙最主要的两个参数是阻力与不淤流速。本文主要基于该试验,利用现场试验数据分析泥沙管道输送的临界不淤流速,并根据现场实践,从理论上提出管道高效输沙的合理参数。

近几十年来,对于临界不淤流速的研究,国内外的众多学者都进行了相关的工作,获得了一系列有价值的研究成果^[1-4]。但至今为止,对临界流速的定义不尽相同。Durnad^[5]所使用的是管道底部刚刚出现固体颗粒淤积时的流速——极限淤积流速。国内的一些研究学者包括费祥俊、张兴荣、王绍周等使用的“临界不淤流速”^[6-8],是指颗粒由悬浮的状态过渡为在床面滑动或滚动时的流速。管道水力输送固体物质的理论比较复杂,多数的研究都是以试验的方法为基础的。由于试验方法的区别,试验条件各有不同,观察角度的各异,观测误差和试验仪器产生的误差,数据处理方法的区别,导致各研究者提出了各自的经验或半经验性的公式,但同一条件下采用不同的公式计算,其结果差异很大,甚至会出现完全相反的变化规律。因此如何确定临界不淤流速仍然是值得探讨的问题。

与以往试验研究不同的是本次试验是在小浪底库区现场水上进行的,由于条件限制,缺乏泥浆混配装置,所以管道输送泥沙时管路中的含沙量和粒径是随机变化的。另外,试验数据的采集比较困难,从而导致了数据样本较少。因此这里借鉴已有成果,多角度分析,综合考虑,合理选取的方法,应对复杂的试验条件,分析确定小浪底水库泥沙管道输送的不淤流速及高效输送的合理参数,以供今后的试验或生产实践参考。

2 试验装备与试验资料的获取

2.1 装备与试验

通过分析小浪底库区不同区域泥沙淤积特点和规律,库区抽沙试验地点选择在距离坝址约 40 km 处。图 1 为抽排沙示意图。水上试验作业平台采用

280 T 的自动驳船,配备两台 110 kW、抽水能力为 $650 \text{ m}^3/\text{h}$ 、扬程 48 m、抽沙体积浓度为 12%~50% 的 LQ 型渣浆泵。排沙管道采用直径 325 mm 的钢管,为缓解水上的风力摆动的影响,每 6 m 长的钢管之间用 $325 \text{ mm} \times 1.2 \text{ m}$ 软管连接。管道总长度为 980 m,排沙钢管由自制浮筒支撑浮于水面如图 2 所示。

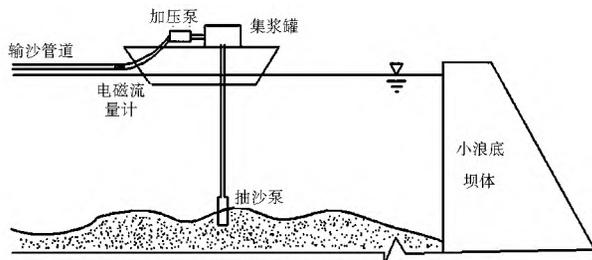


图 1 管道输沙示意

Fig. 1 Schematic diagram of pipeline transport of sediment



图 2 水上试验作业平台及管道布设

Fig. 2 Test platform and pipelines layout

2.2 资料的获取

为得到整个管路中压力、含沙量和颗粒级配的纵向变化情况,特别是软硬管交接处的压力变化,试验中,沿管道长度方向共布设 7 个测验断面,记第 1 个断面的起点距为 0 m,其它 2 至 7 断面起点距分别为 25 m, 35 m, 515 m, 525 m, 535 m, 965 m。为避免测沙取样对压力测量的影响,测压断面与含沙量取样断面以 1.5 m 的距离分开。每个含沙量取样断面分布有上、中、下三个取样点,以便观察泥沙的垂向分布。以压力计测压,重量置换法测定含沙量;在入口断面前布设一台 DN 300 电磁流量计,测量流量。

本次试验主要测量了 $950 \text{ m}^3/\text{h}$ (双泵) 和 $620 \text{ m}^3/\text{h}$ (单泵) 两个流量量级下的浑水输送水沙要素的变化(见表 1),同时为了与输送清水情况比较,还分别测量了两个流量级下输送清水的沿程压力变化。

经比较,两个流量级下输送的月排沙量和输送距离相差不大,但大流量下阻力损失相对较大,所以本文只具体分析了单泵工况下的试验情况(如表 1)。图 3 为泥浆泵从河底抽取的泥浆浓度变化图,图 4 为各含沙量级所占百分比,图 5 为以第 1、7 断

面为例的颗粒级配变化图。

表 1 单泵工况测量情况

Tab. 1 The measurements of single pump

工况	流量 $/(m^3 \cdot h^{-1})$	流速 $/(m \cdot s^{-1})$	中值粒径/mm		含沙量/ $(kg \cdot m^{-3})$	
			范围	测次	范围	测次
单泵	620	2.08	0.0126~0.1257	34	11.4~628.2	333

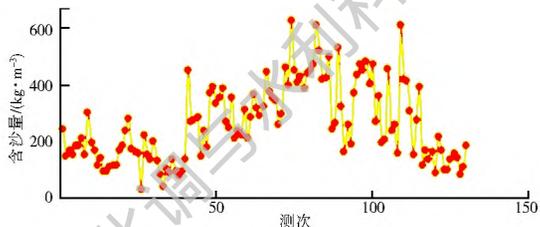


图 3 620 m³/h 流量下不同测次含沙量变化

Fig. 3 The variation of sediment concentration under the flow of 620 m³/h

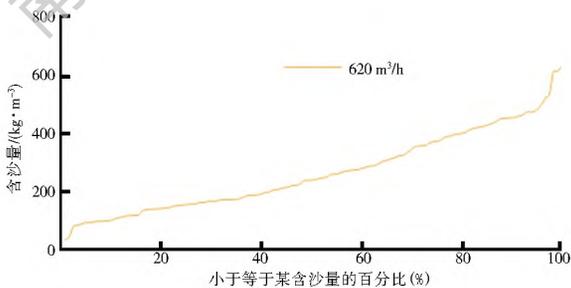


图 4 620 m³/h 流量下各含沙量级所占百分比

Fig. 4 The proportion of sediment concentration magnitude under the flow of 620 m³/h

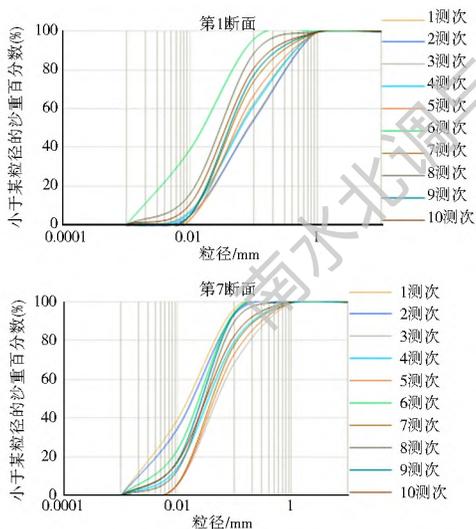


图 5 第 1、第 7 断面颗粒级配

Fig. 5 The particle size distribution of the first and seventh cross sections

由图 3、图 4 可知,本次试验的含沙量和颗粒级

表 2 试验管道输送冲淤分析

Tab. 2 Analysis of scour and deposition in pipeline transport

流速/ $(m \cdot s^{-1})$	含沙量浓度(%)	D_{50}/mm	D_{90}/mm	排沙比	悬浮指数 Z	运动形式	是否淤积	临界不淤流速范围
2.08	6.57	0.0629	0.125	0.9326	0.0517	悬移	不淤积	小于等于 2.08 m/s
2.08	10.53	0.0512	0.107	0.9573	0.0314	悬移	不淤积	小于等于 2.08 m/s
2.08	9.09	0.0603	0.136	0.9135	0.0455	悬移	不淤积	小于等于 2.08 m/s

配是随机变化的,所以在分析计算时,将 7 个断面所测中值粒径和含沙量的均值分别作为小组试验的中值粒径和含沙量。单泵情况下,共做了三组压力试验,各组试验的沿程压力变化如图 6,可见软管对压力的影响很小。

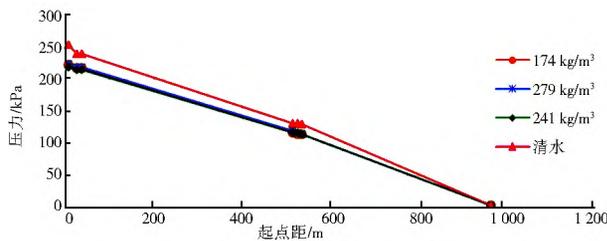


图 6 620 m³/h 下各组试验的沿程压力变化

Fig. 6 The variation of the pressure along the pipeline in each test under the flow of 620 m³/h

3 试验临界不淤流速分析

临界不淤流速是管道输沙的一个重要参数,它表示含沙水流在管道中输送时不出现沉积物所需的最小平均输送流速。含沙水流在管道中输送是否发生淤积可以通过泥沙的运动形式来判断。不淤流速的主要影响因素有固体颗粒密度、输送管径、粒径以及浆体浓度。下文结合这几个方面来分析确定泥浆管道输送的不淤流速。

3.1 试验管道中泥沙的冲淤分析

管道输送中泥沙的冲淤情况可以从泥沙的运动形式进行判定。固体颗粒在水流中的运动模式大体可分为三类,即推移运动、悬移以及中性悬浮运动。推移运动时颗粒贴着管壁滑动,由于管道底部粗糙不平,很可能造成淤积,悬移运动时颗粒脱离管壁运动,不容易发生淤积,而中性悬浮只有在含沙量很高时才有可能出现。针对现场试验情况,本文采用了两种方法来判定管道中泥沙输送时的运动形式:方法一:排沙比分析(排沙比=出口输沙量/入口输沙量),排沙比为 1 则表示没有产生淤积,否则就淤积;方法二:悬浮指数分析($Z = \frac{\omega}{K U_*}$; Z 为悬浮指数; ω 为沉速(m/s); K 为卡门常数,取 0.4; U 为摩阻流速(m/s)),悬浮指数小于 0.1 则表示泥沙颗粒运动形式为悬移,大于 5 表示泥沙颗粒运动形式为推移。分析排沙比时,考虑了管道输送所需要的时差影响。分析结果见表 2。

表 2 中排沙比均接近于 1,且分析颗粒级配时可以看出小流速时出口处的颗粒级配并没有发生显著的细化现象,考虑试验测量取样存在误差,认为三组情况均不发生淤积,进口和出口排沙平衡。同时四组的悬浮指数均小于 0.1,说明四组均发生悬移运动,进一步验证管道中没有发生淤积。在试验完毕后拆卸管道过程中也未发现存在泥沙残留的现象,故认为三组情况均不发生淤积。说明在此试验工况下,临界不淤流速是小于等于输送流速 2.08 m/s 的。

3.2 确定临界不淤流速计算公式

前面提到,许多学者根据自己的试验得出管道

输送的不淤流速计算公式,其中最为常用的公式列于表 3。本文采用实测值与公式计算值的拟合优度确定计算公式。由于本次试验在小浪底库区水上进行,数据采集比较困难,所以借用丁宏达^[9]的试验数据初步选择计算公式。丁宏达试验的基本参数是:管径为 315 mm,固液密度比为 2.65,中值粒径 0.14 mm,平均粒径 0.17 mm,与本次试验参数:管径 325 mm,固液密度比为 2.65,中值粒径 0.051 2~0.062 9 mm 相比,除粒径外试验条件基本相当,只是本次试验的泥沙中值粒径相对较小,所以本次试验临界不淤流速应该比丁宏达的实测值小。丁宏达试验值与各公式计算值的结果列于表 4 和图 7。

表 3 临界不淤流速计算模型

Tab. 3 Calculation models of non-depositing critical velocity

临界不淤流速计算模型	计算公式	试验参数
Durnad 模型	$U_c = F_L \times [2gd(s-1)]^{1/2}, F_L = f(S, d)$ $F_L = U_c / [2gd(s-1)]^{1/2}$	$\gamma_s = 2.7 \text{ t/m}^3, D < 1 \text{ mm}, d = 0.15 \text{ m}$
Shook 模型 ^[10]	$U = U_c = 2.43 \sqrt{2gd(s-1)} \frac{C_v^{1/3}}{C_D^{1/4}}$	
Spells 模型 ^[11]	$U_c^{1.225} = 0.025gd \left(\frac{D\rho_m^{0.775}}{\mu_m} \right) (s-1)$	
Wasp 模型 ^[12-13]	$U_c = F_L [2gd(s-1)]^{0.5} \left(\frac{D_{50}}{d} \right)^{1/6}$	
蒋素绮模型 ^[14-15]	$U_c = 0.293 \sqrt{2gd} e^{-\left(\frac{1}{\sqrt{S_p}} s_p - 10 \right)^2} + \sqrt{2gd}$ $(s-1)$	$\gamma_s = 2.7 \text{ t/m}^3, D < 0.1 \text{ mm}, d = 0.067 \sim 0.149 \text{ m}$
费祥俊模型 ^[16-24]	$U_c = 2.3 \frac{C_v^{1/4}}{\sqrt{\lambda}} \sqrt{gd(\rho/\rho_w - 1) \left(\frac{D_{50}}{d} \right)^{1/3}}$	$\gamma_s = 1.5 \sim 4.4 \text{ t/m}^3, D_{90} = 0.08 \sim 1.35 \text{ mm}, d = 0.094 \sim 0.205 \text{ m}$

上述公式中: F_L 为淤积开始时的修正福氏数; d 为管径(m); D 为粒径(mm); s 为固液比, $s = \rho/\rho_w$, ρ 为固体颗粒密度, ρ_w 为清水密度; ρ_m 为浑水密度(kg/m^3); C_v 为体积比浓度; C_D 为自由沉降系数,雷诺数大于 1000 时, $C_D = 0.43$; S_p 为固液比的 100 倍,固液比指的是浑水中固液的体积比; U_c 为临界不淤流速(m/s); λ 为达西阻力系数; g 为重力加速度(m/s^2)。

观察表 4 和图 7 可知, Durnad、Wasp 模型中在中值粒径确定之后,临界不淤流速只与管径有关,且 Durnad 和 Wasp 适用于浓度为 2%~15% 的浆体计算,故本次计算中无论浓度如何变化,临界不淤流速都不改变,与实际情况相违背。相比之下,费祥俊和蒋素绮模型与丁宏达的实测数据规律更相近。即:当粒径和管径一定时,随着浓度的增加,临界不淤流速会稍稍下降。低浓度时(体积比含沙量为 12% 以下),费祥俊模型比蒋素绮模型更接近丁宏达实测值。故本文可用费祥俊模型来计算临界不淤流速,进而确定输送流速。

表 4 各个模型计算值与实测值对比

Tab. 4 The comparison between model calculations and measured value

浓度 (%)	临界不淤流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)						
	实测值	费祥俊	Durnad	Wasp	Spells	Shook	蒋素绮
12	2.56	2.47	3.51	1.00	2.43	2.35	3.32
18	2.46	2.46	3.51	1.00	2.08	2.69	2.82
24	2.43	2.36	3.51	1.00	1.73	2.96	2.71
25	2.43	2.33	3.51	1.00	1.67	3.00	2.71
30	2.42	2.18	3.51	1.00	1.39	3.19	2.70

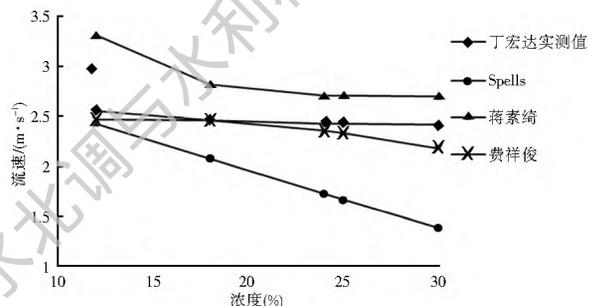


图 7 模型计算值和实测值对比

Fig. 7 The comparison between model calculations and measured value

3.3 本次试验输送流速合理性分析

由表 2 知, 本次管道试验中, 泥沙中值粒径的范围是 0.051 2 mm~0.062 9 mm(D_{90} 范围 0.107 mm~0.136 mm), 含沙量浓度为 4.84%~10.53%, 均低于 12%, 则可以利用费祥俊临界不淤流速模型来计算分析在此中值粒径范围内, 2.08 m/s 输送流速的合理性, 同时也可以检验费祥俊模型的合理性。为此考虑了 3 种粒径工况, 分别计算了不同工况下的临界不淤流速, 见表 5。

表 5 临界不淤流速计算值随粒径变化情况

Tab. 5 Non-depositing critical velocity along with the variation of particle size

体积浓度 (%)	含沙量 I ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	不同粒径工况下的临界不淤流速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$		
		$D_{50} = 0.0512 \text{ mm}$ $D_{90} = 0.107 \text{ mm}$	$D_{50} = 0.0629 \text{ mm}$ $D_{90} = 0.125 \text{ mm}$	$D_{50} = 0.0603 \text{ mm}$ $D_{90} = 0.136 \text{ mm}$
3.77	100	1.29	1.35	1.39
7.55	200	1.46	1.54	1.58
11.32	300	1.55	1.64	1.68
15.09	400	1.60	1.68	1.73
18.87	500	1.61	1.69	1.75
22.64	600	1.42	1.68	1.73

4 高效输送不淤流速分析

4.1 高效输送的意义与要素

本文最终目的是为了确定管道输沙的高效输送参数。所谓高效输送, 就是在满足输沙过程中不发生淤积时, 一定输送流速下输沙量大的输送。由前文分析可知, 本次试验中, 输送流速为 2.08 m/s 时, 含沙量 279 kg/m^3 (体积浓度 10.53%), 中值粒径 0.051 2 mm 时, 输沙效果最好。试验中输送水头为 22.44 m, 若取工作时间每天 8 h, 每个月 30 d 来计算, 则此条件下输送的效率为: 月排沙量 4.15 万 t, 输送距离为 1.06 km。可见, 此条件的输送效率不高, 所以还要在此实验基础上继续分析确定合理的输送参数, 达到高效输送的目的。影响输沙效率的重要因素包括含沙量和管径。提高输送含沙量或增大输送管径都能提高输送效率。

4.2 高效输送管径选择

管径是影响输送效率的一个关键因素, 理论上认为, 管径越大, 同一输送含沙量下的输送效率越高。除了本次试验所用管径为 0.325 m, 还调查到市场常用管径分为 0.63 m、0.92 m、1.22 m。不同管径下输送流量相差很大。如单泵工况下流速为 2.08 m/s、管径 0.325 m 时的输送流量为 620 m^3/h 即 0.17 m^3/s , 若管径为 0.63 m 时, 输送流量为

观察表 5 可知, 不论是含沙量变化还是粒径的变化, 临界不淤流速计算值变化并不大, 且均小于输送流速 2.08 m/s, 所以可以确定 2.08 m/s 的输送流速是安全的。由前面分析知临界不淤流速的范围小于 2.08 m/s, 给定工况下的费祥俊公式计算值即小于 2.08 m/s 也均小于丁宏达实测值(大粒径时), 则证明了费祥俊模型是合理的。故可以将输送流速 2.08 m/s 作为小浪底水库管道输沙的基本参数采用。

0.65 m^3/s , 相当于需要 4 台泵同时工作, 而管径为 0.9 m 和 1.22 m 时则分别需要 8 台与 14 台泵同时工作, 对于水上作业平台而言, 泵的数量越多, 越难以甚至不可能实现, 故为提高输沙效率, 合适的管径只可能取 0.63 m。四台泵同时工作可提供的流量为 0.68 m^3/s , 在 0.63 m 管径下可提供的流速为 2.21 m/s。下面主要分析 0.325 m 和 0.63 m 管径两种工况下, 高浓度泥浆管道输送的可行性, 并确定其高效输送的合理参数。

4.3 不同管径工况高效输送含沙量的确定

理论上讲, 含沙量变化会影响到临界不淤流速, 所选含沙量下的临界不淤流速应小于输送流速; 另外在实际输送中应避免层流的输送方式, 故临界雷诺数需大于 4000, 使水流在管道中进行紊流输送; 同时还要考虑抽沙装置的抽沙能力, 由前文知本次抽沙试验含沙量最大为 622.5 kg/m^3 。所以高效输送含沙量需要综合考虑以上几方面因素来确定。

本次实验中的最大 D_{90} 为 0.136 mm, 为保证安全输送, 不发生淤积, 现以输送流速 2.08 m/s, $D_{90} = 0.14 \text{ mm}$ 为基本参数, 计算不同浓度情况时的输送临界雷诺数和费祥俊模型临界不淤流速, 从而选择出最佳输送浓度。其中, 临界雷诺数采用高含沙水流的有效雷诺数公式计算, 具体如下:

$$Re = \frac{\rho_m U d}{\eta \left(1 + \frac{2\tau_b R}{3\eta U} \right)} \quad (1)$$

式中： ρ_m 为浑水密度 (kg/m^3)； U 为输送流速 (m/s)； d 为管径 (m)； η 为刚度系数； τ_b 为宾汉体剪应力 (Pa)； R 为水力半径 (m)。

经分析研究得 $500 \text{ kg}/\text{m}^3$ 为本次试验牛顿体与非牛顿体的分界值，故当含沙量小于 $500 \text{ kg}/\text{m}^3$ 时，公式中 τ_b 为 0。

观察表 6、表 7 可知，在 0.325 m 和 0.63 m 两种管径下，所列含沙量的临界雷诺数均大于 4 000，且根据费祥俊公式计算的临界不淤流速均小于输送流速 2.08 m/s，故均符合输送含沙量的确定原则，其中含沙量 $620 \text{ kg}/\text{m}^3$ (体积浓度 23.4%) 为最大者，同时也在抽沙泵的有效工作范围之内，所以可选取两种工况的高效输送含沙量为 $620 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。试验中 $600 \text{ kg}/\text{m}^3$ 以上含沙量出现机会很少，是由于当时的气候条件和操作技术影响，它们是可以改进的条件。

表 6 0.325 m 管径下不同浓度输送的临界雷诺数和临界不淤流速

Tab. 6 The critical Reynolds number and non depositing critical velocity under different concentrations with 0.325 m pipe diameter

体积浓度 (%)	含沙量 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	临界雷诺数	临界不淤流速 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
3.77	100	466 551	1.40
7.55	200	368 629	1.60
11.32	300	284 328	1.70
15.09	400	213 432	1.75
18.87	500	155 297	1.76
22.64	600	28 594	1.55
23.4	620	25 860	1.54

4.4 不同管径工况下不淤流速的确定

实际输送过程中应考虑含沙量存在上下波动，因此临界不淤流速应随含沙量波动而变化。由以上计算可知，输送含沙量为 $\leq 620 \text{ kg}/\text{m}^3$ 时，0.325 m

管径下，临界不淤流速最大值为 1.76 m/s，小于输送流速 2.08 m/s，从经济角度出发，可以适当减小输送流速。在减小输送流速时，要保证其在该流速下的临界不淤流速之上，且还需保证临界雷诺数大于 4 000。而对于 0.63 m 管径，输送含沙量为 $\leq 620 \text{ kg}/\text{m}^3$ 时，临界不淤流速最大值为 2.05 m/s，已经非常接近输送流速 2.08 m/s，为保证安全输送，不发生淤积，可将输送流速提高，且不能超过 4 台泵同时工作所能提供的最大流速。由表 6 与表 7 知，当含沙量 $\leq 620 \text{ kg}/\text{m}^3$ 时，两种管径下的临界雷诺数均远大于 4 000，故下面只需分析不同输送流速下的临界不淤流速情况，从而确定两种管径下合理的输送流速范围。

表 7 0.63 m 管径下不同浓度输送的临界雷诺数和临界不淤流速

Tab. 7 The critical Reynolds number and non depositing critical velocity under different concentrations with 0.63 m pipe

体积浓度 (%)	含沙量 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	临界雷诺数	临界不淤流速 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
3.77	100	904 391	1.63
7.55	200	714 573	1.86
11.32	300	551 158	1.98
15.09	400	413 729	2.04
18.87	500	301 037	2.05
22.64	600	17 755	2.02
23.4	620	15 964	1.63

观察表 8 可知，对于 0.325 m 管径，含沙量为 $620 \text{ kg}/\text{m}^3$ ，输送流速为 1.75 ~ 2.08 m/s 时，均大于对应临界不淤流速计算值，可取输送流速下限值为 1.75 m/s。所以，管径为 0.325 m，含沙量 $\leq 620 \text{ kg}/\text{m}^3$ ，输送流速可在 1.75 ~ 2.08 m/s 之间进行调节。对于 0.63 m 管径，含沙量 $\leq 620 \text{ kg}/\text{m}^3$ ，输送流速为 2.00 m/s 时，部分浓度下临界不淤流速大于输送流速，输送流速应该在 2.08 ~ 2.20 m/s 之间进行调节。

表 8 不同输送流速下两种管径的临界不淤流速计算值

Tab. 8 The calculated values of non depositing critical non deposition velocity under the two different pipe diameters with different delivery velocities with two different pipe diameters

含沙量 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	输送流速 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)							
	2.20		2.08		2.00		1.90	
	$d = 0.63 \text{ m}$	$d = 0.325 \text{ m}$	$d = 0.63 \text{ m}$	$d = 0.325 \text{ m}$	$d = 0.63 \text{ m}$	$d = 0.325 \text{ m}$	$d = 0.325 \text{ m}$	$d = 0.325 \text{ m}$
100	1.70	1.40	1.63	1.28	1.63	1.40	1.40	1.4
200	1.95	1.60	1.86	1.46	1.86	1.60	1.59	1.59
300	2.07	1.70	1.98	1.55	1.97	1.70	1.69	1.69
400	2.13	1.75	2.04	1.60	2.02	1.74	1.74	1.73
500	2.14	1.76	2.05	1.61	2.05	1.75	1.75	1.74
620	1.66	1.54	2.02	1.60	2.02	1.51	1.50	1.49

综上所述,管径为 0.325 m 和 0.63 m 的高效输送参数为:含沙量均为 620 kg/m^3 ,中值粒径范围 $0.0512 \sim 0.0629 \text{ mm}$, D_{90} 最大为 0.14 mm ,输送

流速分别可在 $1.75 \sim 2.08 \text{ m/s}$ 和 $2.08 \sim 2.2 \text{ m/s}$ 之间进行调节。表 9 为计算这两种工况输送效率最高的计算结果。

表 9 两种工况高效输送计算结果

Tab. 9 Calculation results of high efficiency transport in two conditions

工况	管径/m	含沙量 $/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	输送流速 $/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	输送距离/km		月排沙量 /万 t	月排沙量提高 百分比(%)
				50 m 水头	100 m 水头		
本次实验最佳输送	0.325	279	2.08			4.15	
0.325 m 管径最高效率输送	0.325	620	2.08	2.85	5.7	8.95	116
0.63 m 管径最高效率输送	0.63	620	2.2	4.51	9.01	34.72	737

注:月排沙量提高百分比即高效输送情况下比本次试验最佳输送情况的月排沙量提高的百分比。

当管径为 0.325 m,含沙量为 620 kg/m^3 ,流速为 2.08 m/s 时,输送效率最高,50 m 水头输送距离为 2.85 km,100 m 水头输送距离为 5.7 km,月排沙量为 8.95 万 t,比本次试验最佳输送情况的月排沙量提高了 116%。当管径为 0.63 m,含沙量为 620 kg/m^3 ,流速为 2.20 m/s 时,输送效率最高,50 m 水头输送距离为 4.51 km,100 m 水头输送距离为 9.01 km,月排沙量为 34.72 万 t,是 0.325 m 管径最高效率输送的 3.88 倍,同时比本次试验最佳输送情况的月排沙量提高了 737%。

5 结论

本文以小浪底水库现场试验为基础,论证了水库泥沙管道输送是可行的,并给出了以下高效输送的参数及输送结果,可为以后试验或生产实践作参考。

(1)管径为 0.325 m 和 0.63 m 的高效输送参数为:含沙量均为 620 kg/m^3 (自然条件适当,抽砂泵的操作技术改进时),中值粒径范围 $0.0512 \sim 0.0629 \text{ mm}$, D_{90} 为 0.14 mm ,输送流速分别可在 $1.75 \sim 2.08 \text{ m/s}$ 和 $2.08 \sim 2.2 \text{ m/s}$ 之间进行调节。

(2)在以上输送参数下,管径 0.325 m 的最高效率输送结果为:流速 2.08 m/s ,50 m 水头输送距离为 2.85 km,100 m 水头输送距离为 5.7 km,月排沙量为 8.95 万 t;管径 0.63 m 的最高效率输送结果为:流速 2.20 m/s ,50 m 水头输送距离为 4.51 km,100 m 水头输送距离为 9.01 km,月排沙量为 34.72 万 t。

参考文献(References):

[1] 闭治跃. 挖泥船泥浆管道输送系统效率优化与控制研究[D]. 浙江大学, 2008. (BI Zhiyue. Research on efficiency optimization and control for dredging slurry pipeline transport system [D]. Zhejiang University, 2008. (in Chinese))

[2] 何成. 长距离矿浆管道输送过程检测与控制关键技术的研究

[D]. 湖南大学, 2014. (HE Cheng. Research on detecting and control key technologies in long distance slurry pipeline transportation[D]. Hunan University, 2014. (in Chinese))

[3] 曹斌. 复杂条件下颗粒物料管道水力输送机理试验研究[D]. 中央民族大学, 2013. (CAO Bin. Experimental study on hydraulic transport mechanism of particulate material pipeline under complicated conditions[D]. Minzu University of China, 2013. (in Chinese))

[4] 张雪兰, 孙西欢, 李永业, 等. 浅析国内管道水力输送试验系统设计[J]. 山西水利, 2011, 27(2): 36-37. (ZHANG Xuelan, SUN Xihuan, LI Yongye, et al. Analysis of test system design of pipeline hydraulic transmission in the domestic[J]. Shanxi Water Resources, 2011, 27(2): 36-37. (in Chinese))

[5] Durand R. The hydraulic transportation of coal and solid materials in pipes [J]. Processing of Colloquium on Hydraulic Transport of Coal, London, 1952: 39-52.

[6] 秦德庆, 曹斌, 夏建新. 不同颗粒物料管道水力输送不淤临界流速的确定[J]. 矿冶工程, 2014, 34(1): 9-11. (QIN Deqing, CAO Bin, XIA Jiexin. Study on non-depositing velocity of different particle materials in pipeline by hydraulic transportation[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2014, 34(1): 9-11. (in Chinese))

[7] 甘德清, 高锋, 陈超, 等. 高浓度全尾砂充填料浆临界输送流速研究[J]. 金属矿山, 2015(11): 22-26. (GAN Deqing, GAO Feng, CHEN Chao, et al. Study on critical conveying velocity of full tailings filling slurry of high concentration[J]. Metal Mine, 2015(11): 22-26.

[8] 刘海洋, 王海霞, 李维明, 等. 稳定流状态下似膏体料浆管输临界流速的研究[J]. 西部探矿工程, 2007, 19(6): 86-89. (LIU Haiyang, WANG Haixia, LI Weiming, et al. Study on the critical flow velocity of paste like slurry in pipeline transportation under steady flow condition[J]. West China Exploration Engineering, 2007, 19(6): 86-89. (in Chinese))

[9] 韩旭, 张奇志, 佟庆理. 用人工神经网络研究大直径浆体输送管道的淤积临界流速[J]. 中国有色金属学报, 1997(4): 26-29. (HAN Xu, ZHANG Qizhi, TONG Qingli. Study on critical deposition velocity of slurry flow in large pipe by artificial neural network[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1997(4): 26-29. (in Chinese))

[10] Shook C A. Some experimental studies of the effects of parti

- cle and fluid properties upon the pressure drop for slurry flow [M]. Saskatoon, Saskatchewan: Saskatchewan Research Council, Engineering Division, 1972.
- [11] Vanoni V A. Sedimentation engineering[M]. American Society of Civil Engineers, 2014.
- [12] 瓦斯普. 固体物料的浆体管道输送[M]. 水利出版社, 1980. (Wasp E J, et al. Solid liquid flow: slurry pipeline transportation[M]. Water Conservancy Press, 1980. (in Chinese))
- [13] Wasp E J, Aude T C, Seiter R H, et al. Heterogeneous solids/liquid flow in the turbulent regime [J]. Advances in Solid Liquid Flow in Pipes and Its Application, 1971: 199-210.
- [14] 蒋素琦, 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): 51-60. (JIANG Su qi, SUN Dong zhi. The research of high concentrations of sediment pipeline transport and its basic characteristics[J]. Shaanxi Water Resources, 1980(2): 51-60. (in Chinese))
- [15] 张英普, 王玉宝, 何武全, 等. 浑水管道输水灌溉系统防淤堵技术研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2010(12): 230-234. (ZHANG Ying pu, WANG Yu bao, HE Wu quan, et al. Research on anti clogging technology of muddy water pipeline conveyance and irrigation system[J]. Journal of Northwest A & F University: Nat. Sci. Ed., 2010(12): 230-234. (in Chinese))
- [16] 费祥俊. 煤浆管道输送参数的计算模型[J]. 煤炭学报, 1991(1): 1-11. (FEI Xiang jun. A model for calculating hydraulic parameters of coal slurry pipeline transportation[J]. Journal of China Coal Society, 1991, 16(1): 1-11. (in Chinese))
- [17] 费祥俊. 浆体管道的不淤流速研究[J]. 煤炭学报, 1997(5): 532-536. (FEI Xiang jun. Study of nondeposit velocity in slurry pipeline[J]. Journal of China Coal Society, 1997, 22(5): 532-536. (in Chinese))
- [18] 费祥俊. 浆体的物理特性与管道输送流速[J]. 管道技术与设
- 备, 2000(1): 1-4. (FEI Xiang jun. The physical property of slurry and its velocity of pipeline transportation[J]. Pipeline Technology and Equipment, 2000(1): 1-4. (in Chinese))
- [19] 陈成林. 管道水力输送在大库盘水库排沙淤积中的应用研究[D]. 新疆农业大学, 2012. (CHEN Cheng lin. Application research on pipeline hydraulic transportation in sediment ejection and dredging of reservoir with large bottom area[D]. Xinjiang Agricultural University, 2012. (in Chinese))
- [20] 甘德清, 高峰, 陈超, 等. 高浓度全尾砂料浆管道输送数值模拟研究[J]. 金属矿山, 2014(10). (GAN De qing, GAO Feng, CHEN Chao, et al. Numerical simulation study of high density total tailings slurry pipeline transport[J]. Metal Mine, 2014(10). (in Chinese))
- [21] 何成, 王耀南, 邹伟生, 等. 矿浆管道输送流速仿人智能多模态控制研究[J]. 控制与决策, 2012, 27(2): 295-298. (HE Cheng, WANG Yao nan, ZOU Wei sheng, et al. Research on humanoid intelligent multimodality control of flow velocity in mineral slurry pipeline transportation[J]. Control and Decision, 2012, 27(2): 295-298. (in Chinese))
- [22] 王冬冬. 长距离铁精矿输送管道优化设计[D]. 沈阳大学, 2015. (WANG Dong dong. Optimization design of long distance iron ore concentrate transportation pipeline[D]. Shenyang University, 2015. (in Chinese))
- [23] 张继军, 桂晓莉. 浆体管道磨损机理研究[J]. 甘肃科技, 2011, 27(1): 60-62. (ZHANG Ji jun, GUI Xiao li. Study on the wear mechanism of slurry pipeline[J]. Gansu Science and Technology, 2011, 27(1): 60-62. (in Chinese))
- [24] 郑文慧. 不同体表比的管道车在有压管道内运行时水流流速特性研究[D]. 太原理工大学, 2015. (ZHENG Wen hui. Study on flow velocity characteristics of pipe vehicles under different volume and surface area ratios running in pressure pipeline[D]. Taiyuan University of Technology, 2015. (in Chinese))