

低压灌溉管道输浑水阻力损失试验与建模^{*}

宗全利^{1,2} 汤 骅¹ 安 杰¹

(1. 石河子大学水利建筑工程学院, 石河子 832000;

2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

摘要: 通过低压管道输水阻力损失试验, 分别研究了清水和浑水条件下的阻力损失变化规律。清水条件下, 得到了清水阻力系数与清水雷诺数的定量关系式, 可以用于后续清水阻力损失的计算; 浑水条件下, 重点分析了浑水阻力损失随流速和含沙量体积比的变化规律, 其中浑水阻力损失随流速的增大而增大, 在含沙量较小时, 随含沙量体积比增大而增大, 在含沙量较大时却随含沙量体积比增大而减小, 并从泥沙的制紊和减阻角度分析了产生这种变化规律的原因。研究了浑水阻力损失系数变化规律, 得到了阻力损失系数与无量纲综合因子之间定量关系式, 试验结果与标准 Durand 和陈广文计算模型验证比较表明: 两种模型计算结果与试验结果存在较大差异, 不能用于计算管道浑水阻力损失。根据试验结果得到了浑水阻力损失与水流弗劳德数和含沙量体积比乘积以及泥沙沉降弗劳德数之间定量关系式, 该关系式相关系数 $R=0.90$, 拟合度较高, 可以用于实际工程浑水阻力损失计算。

关键词: 低压管道 浑水 阻力损失系数 试验

中图分类号: S275.1; TV134 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)06-0148-08

Experiment and Modelling on Resistance Loss of Muddy Water Delivery for Irrigation in Low-pressure Pipeline System

Zong Quanli^{1,2} Tang Hua¹ An Jie¹

(1. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China

2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Through experimental study on resistance loss of water delivery in pipeline system, the variation laws of resistance loss for clean and muddy water were researched respectively. In clean water experiment, the quantitative formula between resistance loss coefficient of clean water and Reynolds number was achieved. It could be used to calculate resistance loss of clean water. In muddy water experiment, the variation law of resistance loss with the difference of velocity and sediment content was focused on, which the resistance loss increased with the increasing of velocity. On the condition of small sediment content the resistance loss increased with the increasing of sediment content, while it decreased with the increasing of sediment content on the condition of large sediment content. The reason for producing this variation law of resistance loss was analyzed from turbulence prevention and drag reduction by sediment. Based on this analysis, the variation law of resistance loss coefficient for muddy water was researched, and the calculation formula between the resistance loss coefficient and the dimensionless comprehensive factor was developed. Comparison between the experimental results and standard Durand and Chen Guangwen calculation model showed that there was large difference between them, and the existing models couldn't applied to calculate the resistance loss of muddy water. According to the results of experiment, the quantitative formula, between resistance loss and the product of the flow Froude number and sediment concentration, and the Froude number of sediment deposition was developed. Result showed that the correlation coefficient R was 0.90.

Key words: Low-pressure pipeline Muddy water Resistance loss coefficient Experiment

引言

低压管道灌溉由于具有节水、省地、省工、低能耗等优点^[1-3],在中国北方地区正大力推广。目前,井灌区低压管道输水灌溉技术已基本成熟,但渠灌区由于在管道水力计算、防淤堵技术、分水量水等方面问题有待进一步研究解决,仍处于试验示范阶段,浑水(多泥沙河流水源)低压管道输水灌溉是近几年来渠灌区低压管道输水灌溉技术的一种发展^[4]。浑水的阻力损失是管道输水系统规划设计的一个重要参数,在低压输浑水管道水流中,因为有泥沙颗粒的存在,必将在一定程度上影响到水流的粘性、水流的紊动结构以及水流的能量耗损和能量之间的相互转化等,因此管道输浑水的阻力损失与清水阻力损失是不一样的。对浑水的阻力损失,现有研究成果主要集中在二相流阻力损失规律^[5-9]、高含沙水流阻力特性^[10-12]以及管道输送浆体阻力特性^[13-15]等方面,其中二相流阻力损失以 Durand 公式最具代表性。对于低压管道输浑水阻力损失方面,现有研究成果较少^[16-18],主要针对某一具体实际工程,缺乏系统性。

综上,由于缺少有关管道输浑水阻力损失规律的试验研究资料和计算依据,以往工程设计中,管道浑水水力计算或借用清水阻力损失公式,或采用管道输送浆体有关阻力损失公式,其结果无论是准确性还是适用性上,都存在一定的缺陷。因此,针对低压灌溉浑水管道,开展浑水阻力损失规律的试验研究,对于弥补管道输浑水设计计算的不足,促进管道灌溉技术在渠灌区的推广应用具有重要意义。

1 材料与试验方法

1.1 试验材料

试验装置如图 1 所示,主要包括蓄水池、搅拌机、水泵、浑水管道系统、测压管、电磁流量计、透明有机玻璃观测管和管道系统(聚氯乙烯硬塑料管

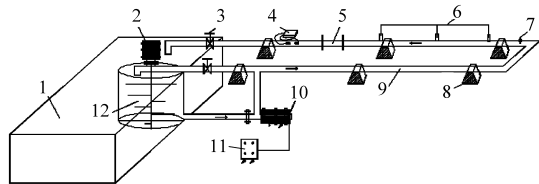


图 1 管道输浑水试验系统示意图

Fig. 1 Tester diagram of experimental system about muddy water pipe

- 1. 蓄水池 2. 电动机 3. 阀门 4. 电磁流量计 5. 有机玻璃观测管 6. 测压管 7. 排气阀 8. 支架 9. 试验管道 10. 水泵 11. 变频器 12. 搅拌机

UPVC)等,试验管道长度为 50 m,铺设坡度为 2.0%,管道外径为 200 mm,壁厚 5 mm;管道中间布置 3 个测压管测量阻力损失,测压管间距均为 5 m;管道末端布置一段透明有机玻璃观测管,长度 2 m,以观测管中泥沙淤积情况。试验沙样为天然河沙,其粒径级配分析结果如表 1 所示,中值粒径 $d_{50} = 0.15 \text{ mm}$ 。

表 1 泥沙颗粒级配

Tab. 1 Grain-size distribution of sand

粒径/mm	0.075	0.25	0.5	1	2
小于该粒径质量比/%	3.54	73.01	90.09	99.88	100

1.2 试验方法及步骤

试验在同一泥沙粒径不同含沙量组合下进行,使管道的进口流速先由大到小然后再由小到大进行调节变化,试验分清水试验和浑水试验。

1.2.1 清水试验

清水试验目的主要测量试验管段的清水阻力损失,得到管道的清水阻力损失与管道中水流流速关系,并与浑水试验对比。试验流量 Q 范围 $10 \sim 50 \text{ m}^3/\text{h}$,共进行了 20 组不同流量的清水阻力损失试验。

1.2.2 浑水试验

浑水试验主要测量不同含沙量的浑水阻力损失,每组试验均是在含沙量一定前提下,测量不同流量(流速)对应的阻力损失值,并且每组试验均要求试验过程中泥沙不能发生沉降。本文共设计进行了 22 组不同含沙量试验,含沙量变化范围为: $0.185 \sim 17.226 \text{ kg}/\text{m}^3$,每组含沙量试验对应流量变化范围均为 $10 \sim 50 \text{ m}^3/\text{h}$,试验不同处理浑水水样的实际物理性状如表 2 所示。

表 2 浑水水样物理性状

Tab. 2 Physical properties of muddy water sample

水样编号	含沙量混	含沙量	水样编号	含沙量混	含沙量
	合比 S_w	体积比 S_v		合比 S_w	体积比 S_v
	$/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$/\text{L}\cdot\text{m}^{-3}$		$/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$/\text{L}\cdot\text{m}^{-3}$
1	0.19	0.07	12	5.03	1.90
2	0.62	0.24	13	5.64	2.13
3	0.79	0.30	14	6.03	2.27
4	0.96	0.36	15	6.40	2.42
5	1.64	0.62	16	6.85	2.59
6	1.76	0.66	17	7.19	2.71
7	2.62	1.00	18	8.36	3.15
8	2.69	1.02	19	11.06	4.17
9	3.44	1.30	20	15.09	5.69
10	4.05	1.53	21	16.60	6.26
11	4.63	1.75	22	17.23	6.50

2 结果与分析

2.1 清水阻力损失变化规律

对清水而言,当边界条件给定时,与阻力损失有关的只有流速大小,清水的粘度在定温下是常量,其坡降和流速的 n 次方成正比,层流时 $n = 1$,在紊流粗糙管区 $n = 2.0$,紊流其他区 n 为 $1.75 \sim 2.0$ 。通过试验得到的阻力损失水力坡降与流速之间关系如图 2 所示,从图中可以看出,清水的阻力损失与流速之间呈幂函数关系,其指数介于 $1 \sim 2$ 之间,计算得到的清水雷诺数 Re_0 介于 $(1.9 \sim 8.5) \times 10^4$ 之间,水流属于紊流。为了进一步判断水流所处的紊流分区,可以采用 $Re_0 \Delta/d$ 对水流所处的紊流分区进行判断, d 为管道内径(m):当 $Re_0 \Delta/d < 10$ 时为紊流光滑管区, $10 < Re_0 \Delta/d < 500$ 时为紊流过渡区, $Re_0 \Delta/d > 500$ 时为紊流粗糙区(阻力平方区)。试验用聚氯乙烯硬塑料管(UPVC)当量粗糙度 $\Delta = 0.03$ mm,可以计算出水流的 $Re_0 \Delta/d$ 为 $2.85 \sim 12.66$,可见一部分水流位于紊流的光滑管区,一部分位于过渡区,此时计算阻力损失需要分区分别计算。由于本文清水实验目的是为了得到不同流速下的清水阻力损失值,以便与浑水阻力损失对比,所以简化计算,将不考虑水流分区,统一用达西-威斯巴赫公式计算阻力损失,只是阻力损失系数需要重新拟合得到。

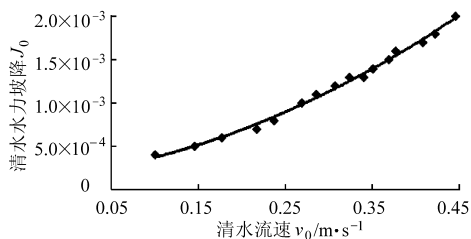


图 2 清水阻力损失水力坡降与流速之间关系

Fig. 2 Relationship between velocity and hydraulic gradient of clean water resistance loss

将计算阻力损失的达西-威斯巴赫公式进行变换,得到阻力系数计算公式为

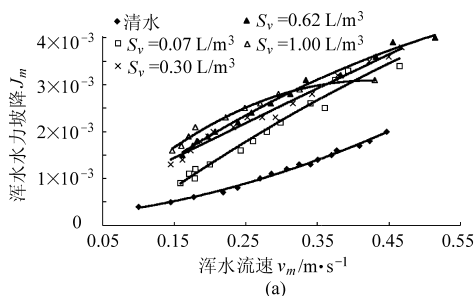


图 4 浑水阻力损失水力坡降与流速之间关系

Fig. 4 Relationship between velocity and hydraulic gradient of muddy water resistance loss

$$\lambda_0 = \frac{2gdJ_0}{v_0^2} \quad (1)$$

式中 λ_0 ——清水阻力系数

J_0 ——清水阻力损失水力坡降

v_0 ——清水断面平均流速, m/s

g ——重力加速度, m/s²

通过式(1)可以反算清水的阻力系数 λ_0 ,得到 λ_0 与清水雷诺数 Re_0 之间关系曲线如图 3 所示。如前所述,由于水流位于紊流光滑管区和过渡区,根据尼古拉兹试验结果,光滑管区阻力系数 $\lambda_0 = f(Re_0)$,过渡区 $\lambda_0 = f(Re_0, \Delta/d)$ ^[19]。若不考虑水流分区,则阻力系数 λ_0 将随着雷诺数 Re_0 变化而变化,具体如图 3 所示。从图 3 中可以看出,清水阻力损失系数 λ_0 随着雷诺数 Re_0 的增大而减小, λ_0 与 Re_0 之间呈幂函数关系,根据试验结果可以拟合得到 λ_0 与 Re_0 之间关系式为

$$\lambda_0 = 497.7 Re_0^{-1} \quad (2)$$

式(2)拟合相关系数 $R = 0.958$,拟合度较高,完全可以用于后续清水阻力损失的计算。

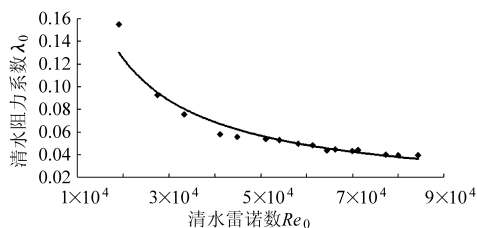
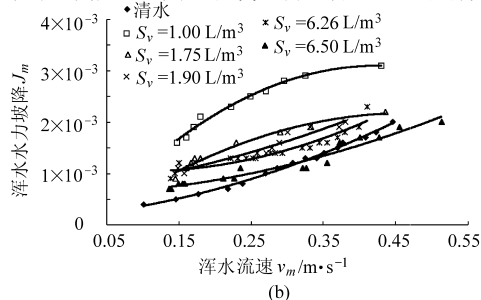


图 3 清水阻力损失系数 λ_0 与 Re_0 之间关系

Fig. 3 Relationship between resistance loss coefficient of clean water λ_0 and Reynolds number Re_0

2.2 浑水阻力损失变化规律

由于泥沙存在的影响,当边界条件给定时,与浑水阻力损失有关的除了流速等水流因素外,还有含沙量、泥沙粒径、泥沙容重等泥沙因素,其中尤以含沙量对浑水阻力损失的影响最大。以浑水水柱高度表示浑水阻力损失大小,通过试验得到几种典型含沙量体积比下浑水阻力损失与水流流速关系如图 4 所示。从图 4 可以看出,各种含沙量体积比下浑水阻力损失的水力坡降均随着流速的增大而增大,这



(b)

与清水阻力损失的变化规律相同,说明水流流速同样是影响浑水阻力损失的重要因素,这主要体现在以下两方面:一方面管道中的流速大小发生变化会导致管中流速分布发生改变,使得管中各液流层之间以及液流与管壁之间的相对滑移程度受到一定影响,进而影响到液流内部之间的切应力,以及液流与管壁之间的切应力,消耗一定的能量,从而使管道中的浑水阻力损失发生相应变化,这与流速对清水阻力损失的影响类似;另一方面,在浑水管道中流速的大小将会直接影响管道中水流的流态和紊动程度,流速越大,水流流态越不稳定,其紊动程度就越大,浑水中固体颗粒之间以及固体颗粒与边壁之间的相互碰撞作用就越频繁,从而增加水流动量和动能的消耗,导致阻力损失的增大,相反,如果管中的流速变小则会导致浑水阻力损失也相应减小。

上述流速对浑水阻力损失的影响分析表明:浑水阻力损失主要由两部分产生,一部分是不考虑泥沙存在的清水产生的阻力损失 J_0 ,另一部分是由于泥沙颗粒运动所产生的阻力损失 J_s ,总的阻力损失 J_m 为两者之和,即

$$J_m = J_0 + J_s \quad (3)$$

从式(3)可以看出,浑水阻力损失比相同水流条件下清水阻力损失要大。图4是相同泥沙粒径和比重条件下,得到的不同含沙量的阻力损失随流速的变化关系,从图中可以看出:含沙量的微小变化均会导致浑水阻力损失的变化,在含沙量较小的图4a中,在相同流速下,随着含沙量体积比的增大,浑水阻力损失逐渐增大,但当含沙量体积比增大到一定程度时($S_v = 1.00 \text{ L/m}^3$),随着 S_v 的增大,浑水阻力损失却逐渐减小,同样如图4b所示。究其原因主要与泥沙的制紊和减阻作用有关。

关于泥沙制紊的机制,虽然目前尚无确切的理论描述,但现有研究成果已经证实泥沙制紊的作用,并且通过大量试验获得了泥沙制紊和减阻的规律。现有研究成果表明:泥沙含量越高,特别是细颗粒泥沙含量越高,泥沙抑制水流脉动的作用就越大,泥沙的制紊和减阻作用也就越显著^[20-21]。当含沙量体积比较小(本文试验结果为 $S_v < 1.00 \text{ L/m}^3$)时,泥沙的制紊作用并不突出,可以忽略不计,此时阻力损失主要决定于水流紊动程度;当含沙量增大到一定程度时,泥沙对水流的制紊作用逐渐增强,此时虽然含沙量的增大导致了泥沙颗粒碰撞产生的阻力损失增加,但泥沙对水流紊动的抑制作用更明显,当这种抑制作用效果超过了由于泥沙含量增大而产生阻力损失增加的效果时,就会出现浑水阻力损失随着含沙量的增大而减小的趋势,甚至当含沙量增大到一

定程度时,浑水阻力损失会小于清水阻力损失。

资料表明,粒径小于 0.06 mm 泥沙占 85% 以上时,即可使浑水阻力损失小于清水水力损失^[20],由此可见泥沙对水流制紊作用的显著性。从本文试验结果图4b中可以看出,当 $S_v = 6.50 \text{ L/m}^3$ 时,其水力坡降与流速关系曲线已与清水关系曲线相交,在交点上方浑水阻力损失比清水时小,说明 $S_v = 6.50 \text{ L/m}^3$ 为浑水阻力损失与清水阻力损失大小关系转化的临界值。至于阻力损失随含沙量增大逐渐增大和随含沙量增大逐渐减小的含沙量的临界值,现有研究中并未见相关成果报道,在本文试验条件下,得到的含沙量体积比临界值为 $S_v = 1.00 \text{ L/m}^3$,从图4a中很容易看出,当泥沙含量增大到 $S_v = 1.00 \text{ L/m}^3$ 时,其水力坡降与流速关系曲线已与其他含沙量的关系曲线相交,说明此时浑水阻力损失已经开始减小。

2.3 浑水阻力损失系数变化规律

2.3.1 浑水阻力损失系数与雷诺数之间变化关系

与清水阻力损失类似,将计算阻力损失的达西-威斯巴赫公式进行变换得到浑水阻力系数计算公式为

$$\lambda_m = \frac{2gdJ_m}{v_m^2} \quad (4)$$

式中 λ_m ——浑水阻力系数

v_m ——浑水断面平均流速, m/s

通过式(4)可以反算浑水的阻力损失系数 λ_m ,得到 λ_m 与浑水水流雷诺数 Re_m 之间关系曲线如图5所示,其中浑水水流的雷诺数为

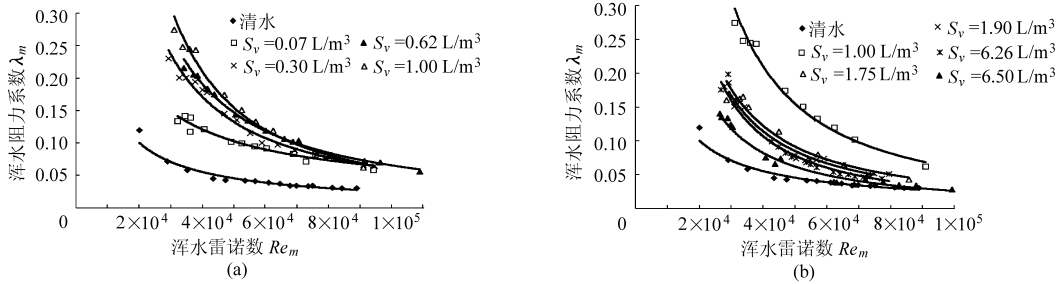
$$Re_m = \frac{v_m d}{\nu_m} \quad (5)$$

其中 $\nu_m = \nu_0 (1 - 1.35S_v)^{-2.5}$ (6)

式中 ν_m ——浑水的运动粘滞系数, m^2/s

ν_0 ——清水的运动粘滞系数, m^2/s

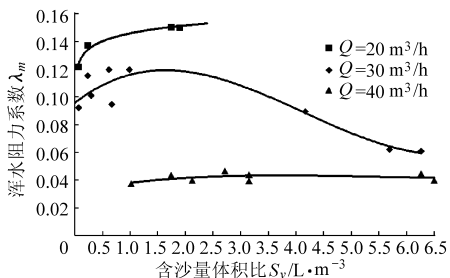
从图5可以看出,浑水阻力损失系数 λ_m 随着浑水雷诺数 Re_m 的增大而减小,并且两者之间的变化规律与清水阻力损失系数相同。这与浑水水流所在的紊流分区有关,与清水水流类似,同样可计算出浑水水流的 $Re_m \Delta/d$ 为 $3.21 \sim 17.20$,根据前述清水水流判断标准,浑水水流同样一部分位于紊流的光滑管区,一部分位于过渡区,在紊流区当含沙量为常数时,水流的水力坡降也和流速的平方成正比,在此条件下可以推断浑水水流的阻力损失系数 λ_m 也将与浑水雷诺数 Re_m 有关,和清水在光滑管区和过渡区的规律是一致的;不过含沙水流阻力系数 λ_m 比清水的阻力系数 λ_0 的数值要大,这是因为在一定含沙量体积比范围内($S_v < 6.50 \text{ L/m}^3$),当两者流速相同时,含沙水流的水力坡降比清水的水力坡降大。

图5 浑水阻力损失系数 λ_m 与 Re_m 之间关系Fig. 5 Relationship between resistance loss coefficient of muddy water λ_m and Reynolds number Re_m

2.3.2 浑水阻力损失系数与含沙量体积比之间变化关系

当含沙量为变量时,浑水阻力系数 λ_m 情况就大不相同,根据前面不同含沙量浑水阻力损失水力坡降 J_m 与流速 v_m 之间关系,在紊流区对于某一固定流速,当含沙量较小时其水力坡降随含沙量增大而增大,当含沙量较大时其水力坡降随含沙量增大而减小,在此情况下阻力系数必然随含沙量变化而变化,这样在紊流区浑水阻力系数 λ_m 不再只和浑水雷诺数 Re_m 有关,还与含沙量体积比 S_v 有关,即 λ_m 同时是含沙量体积比和雷诺数的函数 $\lambda_m = f(Re_m, S_v)$ 。

在相同水流流速或流量前提下,可以计算出不同含沙量下的浑水阻力损失系数 λ_m ,点绘出两者之间的关系曲线如图6所示。从图6可以看出,随着含沙量的增大,浑水阻力系数 λ_m 总体呈现先逐渐增大,然后逐渐减小,最后趋于稳定的变化特点;阻力系数 λ_m 对应的含沙量体积比临界值与图4中水力坡降对应的含沙量体积比临界值基本一致, $S_v = 1.00 \text{ L/m}^3$,产生这种现象的原因也主要与泥沙的制紊作用有关,前面已经详细分析,在此不再赘述。孙东坡等通过整理分析黄河滩区典型堤防淤筑工程现场量测成果资料,也得到浑水阻力损失系数 λ_m 随着含沙量增大先增大后减小趋势^[12],南京水利科所与黄委的系统实验,得出了 λ_m 随含沙量体积比变化的这种反向变化关系,长江中下游若干测站的实测资料也显示了 λ_m 随含沙量增大而减小的趋势^[22]。

图6 浑水阻力损失系数 λ_m 与含沙量体积比 S_v 之间关系Fig. 6 Relationship between resistance loss coefficient of muddy water λ_m and sediment content S_v

2.3.3 浑水阻力系数综合关系

实际上影响管道浑水阻力系数既有动力因子(流速、泥沙密度等),又有泥沙因子(含沙量、粒径等),同时管径也通过流速成为间接影响阻力系数的重要因素。为了反映水流、泥沙、管径条件等对浑水阻力的综合影响,考虑因次和谐,引入无量纲综合因子为

$$\xi = Re_m S_v \frac{d_{50} \rho_m}{d \rho} \quad (7)$$

式中 ρ_m ——泥沙密度, g/cm^3

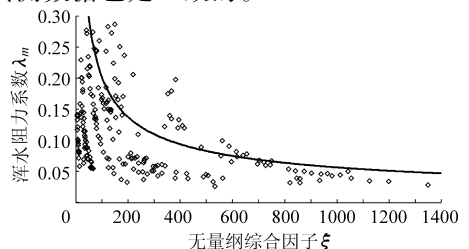
ρ ——清水密度, g/cm^3

d_{50} ——泥沙中值粒径

根据试验数据,整理得到无量纲综合因子 ξ 与浑水阻力系数 λ_m 之间关系曲线如图7所示。从图7可以看出,虽然浑水阻力系数 λ_m 与无量纲综合因子 ξ 之间关系点较分散,但仍显示出 λ_m 随 ξ 增大而减小的趋势,这与上述分析阻力系数随浑水雷诺数增大而减小以及阻力系数随含沙量增大先增大后减小最后趋于稳定的趋势是一致的。通过对所得数据进行拟合,可以得到浑水阻力系数 λ_m 与综合因子 ξ 之间的幂函数关系式为

$$\lambda_m = 2.53 \xi^{-0.55} \quad (8)$$

虽然该关系式拟合相关系数 $R = 0.70$, 相对较低,但该式仍在一定程度上反映了浑水阻力系数 λ_m 与综合因子 ξ 之间的定量关系,并且该关系式的趋势与实测数据也是一致的。

图7 浑水阻力系数 λ_m 与综合因子 ξ 之间关系Fig. 7 Relationship between resistance coefficient of muddy water λ_m and comprehensive factor ξ

3 浑水阻力损失的计算

3.1 浑水阻力损失基本理论

国内外很多专家、学者对管道阻力损失进行了大量的试验和理论分析研究,其基本理论主要有3种。

3.1.1 扩散理论

该理论是在1931年,由前苏联学者马卡维叶夫 B. M. 提出的,其浑水阻力损失的经验计算公式为

$$J_m = J_0 \frac{\rho_m}{\rho} \quad (9)$$

该理论由于没有考虑两相流中固体颗粒与流体之间的相互影响及相互作用,所以只适合于固体颗粒的粒径较小且浓度较低的悬移质两相流运动,国内具有代表意义的扩散理论公式为鞍山矿山设计院的经验公式^[23],即

$$J_m = kJ_0 \frac{\rho_m}{\rho} \quad (10)$$

式中当固体质量分数为0.1~0.3时, $k=1$;当固体质量分数为0.3~0.6时, $k=1.01\rho_m/\rho$ 。

3.1.2 重力理论

于1944年前苏联学者维里卡诺夫 M. A. 提出,其总结出的浑水阻力损失计算公式为

$$J_m = J_0 + \Delta J_0 \quad (11)$$

式中 ΔJ_0 ——附加阻力损失,即水对固体颗粒所作的悬浮功

属于重力理论的公式较多,其中比较有代表意义、应用最广的是 Durand 公式,其公式形式为^[6-7]

$$J_m = J_0 + KS_v Fr_v^{-3} Fr_\omega^{1.5} J_0 \quad (12)$$

其中 $Fr_v = v_m / \sqrt{gd}$ $Fr_\omega = \omega / \sqrt{gd_{50}}$

式中 Fr_v ——管道平均流速弗劳德数

Fr_ω ——颗粒沉降弗劳德数

ω ——泥沙沉降速度, m/s

K ——系数,标准 Durand 公式中取 180

重力理论克服了扩散理论的缺陷,考虑到了固体颗粒和流体之间的相互影响和相互作用,但只考虑了固体颗粒悬浮所需消耗能量,没有考虑到固体颗粒运动也需要消耗能量,因此此理论公式只适用于较粗固体颗粒情况。

3.1.3 能量理论

能量理论是对前面的扩散理论和重力理论取其长避其短后总结出的新理论,最早由苏联煤矿科学研究院提出,其经验公式为^[23]

$$J_m = J_0 \frac{\rho_m}{\rho} + \Delta J_0 \quad (13)$$

从公式中不难看出,能量理论不但克服了扩散理论中因没有考虑到固体颗粒和流体之间的相互影

响和相互作用而存在的缺陷,而且也同时克服了在重力理论中没有考虑固体颗粒在管道中运动所消耗能量的不足,此理论具有一定的优势。但随着对浑水阻力损失问题的大量研究与分析,发现此理论也并不是十分完美的,仍需进一步修改和完善。

3.2 浑水阻力损失产生过程

浑水阻力损失产生过程主要可以归纳为以下几个方面:

(1) 摩擦所产生的阻力损失。摩擦作用所产生的浑水阻力损失和清水阻力损失所产生的原因基本相同,均是由两种作用所产生,一是在浑水流动过程中,其内部悬浮在液流中的泥沙颗粒之间的摩擦作用,另一个则是液流与管道内壁之间的摩擦作用而消耗的能量。摩擦所产生的阻力损失是产生浑水阻力损失的最主要原因。研究摩擦阻力损失较多的以 Lazarus 和 Neilson^[9]为代表,他们研究了比较多的影响因素,且得出了摩擦阻力损失的变化规律。

(2) 泥沙颗粒碰撞所产生的阻力损失。颗粒碰撞对阻力损失的影响作用主要体现在泥沙的粒径大小方面,但是具体泥沙颗粒在什么情况下或是多大尺寸的泥沙颗粒,需要考虑泥沙颗粒之间的碰撞作用所产生的阻力损失,到目前为止尚没有研究清楚。

(3) 泥沙颗粒沉降所产生的阻力损失。由于泥沙颗粒的密度比水的密度要大,因此泥沙颗粒在液流中会出现沉降现象。要想使泥沙颗粒一直在液流中悬浮而不至于沉降到管道底部,就需要消耗一部分能量来维持泥沙颗粒悬浮,这部分能量被视为泥沙颗粒沉降阻力损失。这种阻力损失主要与两方面的因素有关:管道中的泥沙含量和泥沙的粒径级配。

根据浑水阻力损失产生的上述3个过程,陈广文等得到计算上述3种阻力损失的计算公式,即^[15]

$$J_m = J_f + J_s + J_c \quad (14)$$

其中

$$J_s = \zeta S_v \frac{\rho_m - \rho}{\rho} \frac{\omega}{v_m} \quad (15)$$

$$J_c = a S_v \frac{d_{50} v_m}{d} \frac{1}{\left(1 - \frac{S_v}{S_{vm}}\right)^{2.5 S_v}} \quad (16)$$

式中 J_f ——摩擦阻力损失,清水情况时 $J_f = J_0$

J_c ——颗粒碰撞阻力损失

ζ ——沉降速度的形状修正系数,球形为 1.0,椭圆形为 0.85,扁平形为 0.50

a ——比例常数, $a \approx 1$

S_{vm} ——含沙量极限体积比, Vocado 取 0.62,

倪晋仁取 0.65 和 0.70^[15]

综上,可得浑水总的阻力损失为

$$J_m = J_0 + \zeta S_v \frac{\rho_m - \rho}{\rho} \frac{\omega}{v_m} + k S_v \frac{d_{50} v_m}{d} \frac{1}{\left(1 - \frac{S_v}{S_{vm}}\right)^{2.5 S_v}} \quad (17)$$

3.3 浑水阻力损失计算模型的验证比较和分析

在上述浑水阻力损失计算公式中,选用标准 Durand 和陈广文计算模型对阻力损失进行了计算,并将计算值与试验值进行了比较,结果如图 8 所示。从图中可以看出:标准 Durand 模型与试验值在低流

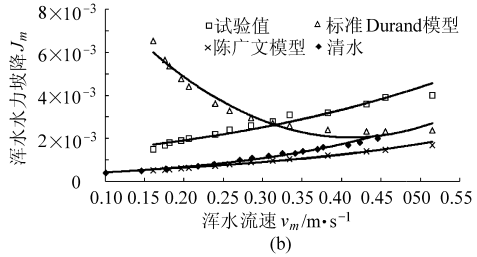
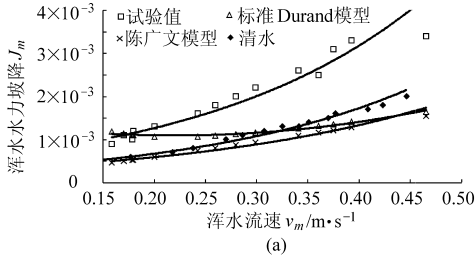


图 8 浑水阻力损失计算值与实测值的比较

Fig. 8 Comparison of calculated and measured values of resistance loss of muddy water

(a) $S_v = 0.07 \text{ L/m}^3$ (b) $S_v = 0.62 \text{ L/m}^3$

3.4 浑水阻力损失与清水阻力损失的关系

通过上述阻力损失计算模型的验证比较和分析可知,本文试验所得结果并不符合 Durand 和陈广文等公式,但试验发现浑水阻力损失与清水阻力损失之差即 $(J_m - J_0)/J_0$ 与水流弗劳德数和含沙量体积比乘积 $Fr_v S_v$ 却吻合较好,具体如图 9 所示。从图 9 可以看出, $(J_m - J_0)/J_0$ 随 $Fr_v S_v$ 增大而减小的规律

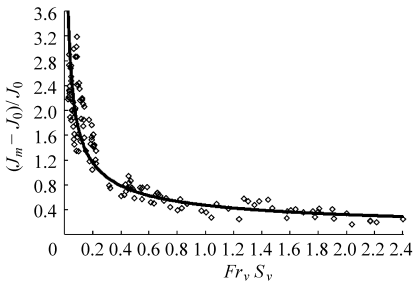


图 9 $(J_m - J_0)/J_0$ 与 $Fr_v S_v$ 关系

Fig. 9 Relationship between $(J_m - J_0)/J_0$ and $Fr_v S_v$

明显,通过对所得数据进行拟合,并结合 Durand 公式,可以得到 $(J_m - J_0)/J_0$ 与 $Fr_v S_v$ 之间的幂函数关系式为

$$\frac{J_m - J_0}{J_0} = 2.35 (Fr_v S_v)^{-0.55} Fr_\omega^{1.5} = 2.35 \left(\frac{v_m S_v}{\sqrt{gd}}\right)^{-0.55} \left(\frac{\omega}{\sqrt{gd_{50}}}\right)^{1.5} \quad (18)$$

将式(18)变化后得到浑水阻力损失计算公式

速区计算值大于实测值,在高流速区计算值小于实测值,尤其在含沙量体积较大时 ($S_v = 0.62 \text{ L/m}^3$),高速区和低速区差别明显;陈广文模型计算值与试验相比,计算值明显小于试验值;值得注意的是,随流速增加标准 Durand 模型能够给出非单调的变化趋势,陈广文模型只能给出阻力损失随流速增加而单调上升的结果,但两种模型计算结果与试验结果均存在较大差异,不能直接应用上述两种模型计算管道输浑水阻力损失。

$$J_m = J_0 + 2.35 \left(\frac{v_m S_v}{\sqrt{gd}}\right)^{-0.55} \left(\frac{\omega}{\sqrt{gd_{50}}}\right)^{1.5} J_0 \quad (19)$$

式(19)拟合相关系数 $R = 0.90$,拟合度较高,可以用于实际工程应用。

4 结束语

在清水条件下,得到了清水阻力系数 λ_0 与清水雷诺数 Re_0 之间关系式,其相关系数 $R = 0.958$,拟合度较高,完全可以用于后续清水阻力损失的计算;在浑水条件下,得到各种不同含沙量下浑水阻力损失与水流流速关系曲线,结果表明:浑水阻力损失的水力坡降随流速的增大而增大,同时含沙量较小时,阻力损失随含沙量增大而增大,含沙量增大到一定程度时,浑水阻力损失随含沙量增大而减小,究其原因主要与泥沙的制紊和减阻作用有关;对浑水阻力损失系数 λ_m 变化规律进行了分析,得到无量纲综合因子 ξ 与 λ_m 之间关系式;将实测数据与标准 Durand 和陈广文计算模型进行了验证比较,结果表明:两种模型计算结果与试验结果均存在较大差异,不能直接应用上述两种模型计算浑水管道阻力损失;根据试验结果得到了浑水阻力损失与水流弗劳德数和含沙量体积比乘积 $Fr_v S_v$ 以及泥沙沉降弗劳德数 Fr_ω 之间定量关系式,该关系式相关系数 $R = 0.90$,拟合度较高,可应用于实际工程。

参 考 文 献

- 1 康绍忠. 农业水土工程概论[M]. 北京: 中国农业出版社, 2007.
- 2 延耀兴, 阎庆斌, 孙西欢. 农业灌溉供水系统中的非定常流动[J]. 农业机械学报, 2006, 37(7): 66~68, 89.
Yan Yaoping, Yan Qingfu, Sun Xihuan. Unsteady flow in the agricultural irrigating and supplying system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(7): 66~68, 89. (in Chinese)
- 3 刘玉林, 李幼康, 林墩. 管道沿程水头损失的试验研究[J]. 农业机械学报, 1991, 22(1): 46~50.
Liu Yulin, Li Youkang, Lin Dun. Test and research for the loss head along pipeline [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1991, 22(1): 46~50. (in Chinese)
- 4 安杰, 宗全利, 汤骅. 低压输浑水管道临界不淤流速的试验研究[J]. 石河子大学学报: 自然科学版, 2012, 30(1): 84~86.
An jie, Zong Quanli, Tang Hua. Experimental study on non-depositing critical velocity of muddy water delivery in low-pressure pipeline system [J]. Journal of Shihezi University: Natural Science, 2012, 30(1): 84~86. (in Chinese)
- 5 Durand R. The hydraulic transportation of coal and other materials in pipes[M]. London: Colloq National Coal Board, 1952.
- 6 Durand R. Basic relationships of the transportation of solids in pipes-experimental research [C] // Proceedings: Minnesota International Hydraulic, 1953: 89~103.
- 7 Matousek V. Pressure drops and flow patterns in sand-mixture pipes [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2002, 26(6~7): 693~702.
- 8 Matousek V. Concentration distribution in pipeline flow of sand-water mixtures [J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2000, 48(3): 180~196.
- 9 邓祥吉. 管道输沙阻力特性研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- 10 任增海. 管道高含沙水流的阻力特性[J]. 泥沙研究, 1985(3): 73~78.
- 11 孙东坡, 王二平, 许继刚, 等. 管道高浓度泥浆阻力系数的试验研究[J]. 泥沙研究, 2004(4): 44~50.
Sun Dongpo, Wang Erping, Xu Jigang, et al. Experimental study on pipe resistance coefficient with hyperconcentration of sediment [J]. Journal of Sediment Research, 2004(4): 44~50. (in Chinese)
- 12 孙东坡, 王二平, 严军, 等. 高浓度泥浆输送管道阻力及输送能力研究[J]. 水利学报, 2004(9): 93~99.
Sun Dongpo, Wang Erping, Yan Jun, et al. Resistance and carrying capacity of hyperconcentration sediment pipe flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(9): 93~99. (in Chinese)
- 13 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.
- 14 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.
- 15 陈广文. 浆体管道输送流型特性及其阻力损失分析[J]. 有色金属, 1994, 46(1): 15~19.
Chen Guangwen. Analysis on flowing model drag lost of slurry pipeline transportation [J]. Nonferrous Metals, 1994, 46(1): 15~19. (in Chinese)
- 16 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, 38(12): 230~234.
Zhang Yingpu, Wang Yubao, He Wuquan, 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, 38(12): 230~234. (in Chinese)
- 17 张英普, 何武全, 蔡明科, 等. 关于浑水管道阻力损失规律的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2004, 23(4): 16~18.
Zhang Yingpu, He Wuquan, Cai Mingke. Experimental study on muddy water head loss in pipeline [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2004, 23(4): 16~18. (in Chinese)
- 18 高桂仙, 尚民勇. 东雷抽黄灌区低压管道输浑水应用研究[J]. 泥沙研究, 1994(4): 60~67.
Gao Guixian, Shang Minyong. Application of muddy water conveyance in low pressure piping of Donglai irrigation area [J]. Journal of Sediment Research, 1994(4): 60~67. (in Chinese)
- 19 赵昕, 张晓元, 赵明登, 等. 水力学[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- 20 朱鹏程. 管道高浓度含沙紊流试验资料的初步分析[J]. 水利学报, 1982(9): 57~61.
- 21 陈晓宏, 胡荣轩. 紊流消能与泥沙制紊分析[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2001, 40(5): 113~117.
- 22 张瑞瑾. 河流泥沙动力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998.
- 23 白晓宁, 胡寿根. 固液两相流管道水力输送的研究进展[J]. 上海理工大学学报, 1999, 21(4): 366~372.