

泥沙管道输送计算方法探讨

李铭志¹, 何炎平¹, 韩政², 黄超¹

(1. 上海交通大学海洋工程国家重点实验室, 上海 200240; 2. 中港疏浚有限公司, 上海 200120)

摘要: 对当前使用较多的泥沙管道输送计算方法包括王绍周公式、Durand公式、Wasp公式、Turian公式及Wilson公式分别进行了详细介绍。并就某工程项目分别使用不同计算方法进行计算, 且与实际测量数据进行比较分析, 以供设计人员和施工人员参考。

关键词: 两相流; 泥沙输送; 管道输送; 水力输送

中图分类号: U 616⁺. 21

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)05-0036-05

Calculation methods of slurry transportation by pipeline

LI Ming-zhi¹, HE Yan-ping¹, HAN Zheng², HUANG Chao¹

(1. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;

2. CHEC Dredging Co., Ltd., Shanghai 200120, China)

Abstract: Several popular resistance calculation methods for slurry transportation by pipeline, including Wang Shaozhou's way, Durand's mode, Wasp's formula, Turian's equation, and Wilson's manner are described in detail, and the results by them are given and compared with the measure data, the result of which may serve as reference for the designers and operators.

Key words: two phase flow; slurry transportation; pipeline transportation; hydraulic transportation

由于泥沙浆体中颗粒之间相互作用的不确定, 目前还不能通过理论推导直接给出浆体管道摩阻损失的计算公式, 只能基于试验和生产数据给出半理论半经验的计算方法。浆体管道的摩阻损失是疏浚工程设计中的重要参数之一, 管道摩阻损失的大小直接决定系统的产量和能耗。因此在系统设计过程中要求计算尽可能地符合实际, 计算值偏大会带来资源浪费, 计算值偏小会使生产运行不可靠。

为了使设计中的浆体管道摩阻损失不至于产生过大的出入, 曾有人期望通过环管试验直接给出浆体管道的摩阻损失, 以规避比较复杂的影响因素。但这未必是可靠的途径, 因为如何从模型试验结果放大到原型存在着比尺效应问题, 试验条件也难以保证与未来的生产条件相吻合。另外,

还存在一个试验的精度问题, 凡此种种都会促使利用试验结果推断未来的实际情况具有一定的模糊性和盲目性。

因此近些年来国内外学者都趋向于主张通过流变参数来预测浆体管道摩阻损失, 问题在于怎样预测, 这就存在依据何种理论的问题。

1 典型理论

不同学者提出过不同的理论, 目前浆体管道计算中常遵循的典型理论包括: 扩散理论、重力理论和能量理论。

扩散理论的基本论点是两相流中固体颗粒与流体质点一起参加扩散, 因此可把浆体视为与浆体密度相同的纯液体。其摩阻损失 i_m 的基本形式为:

$$i_m = i_w S_m \quad (1)$$

收稿日期: 2013-09-15

作者简介: 李铭志(1983—), 男, 工程师, 主要从事船舶设计方面的研究。

式中: i_w 为清水摩阻损失; S_m 为浆体密度比。

重力理论的基本论点是重力能耗, 两相流的能量消耗由于重力的增加而大于输送清水时的能量消耗。其摩阻损失的基本形式为:

$$i_m = i_w + \Delta i_m \quad (2)$$

式中: Δi_m 为附加摩阻损失。

单独依靠某种理论都有其局限性, 扩散理论忽略了固体颗粒与流体质点扩散的不同及其相互作用, 因此扩散理论只在粒度较小、浓度较低的浆体输送计算中误差较小。重力理论只考虑了使固体悬浮所需的能量, 而未考虑固体颗粒在运动中的能量消耗。

王绍周^[1]在前两种理论的基础上提出了能量理论, 其基本形式为:

$$i_m = i_w S_m + \Delta i_m S_m \quad (3)$$

式中的第1项体现了扩散理论, 克服了重力理论未计及固体物料在管道中运动所需能量的缺陷; 式中的第2项体现了重力理论, 克服了扩散理论忽略固体颗粒与流体质点扩散的不同及其相互作用的缺陷。

2 典型计算方法

2.1 王绍周公式^[1]

王绍周^[1]认为, 由固体颗粒产生的能耗包括悬浮能耗、旋转能耗和旋移能耗3部分。通过实测数据回归得出如下公式:

$$i_m = \frac{\alpha \lambda}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \cdot S_m + \left(1.86 - 6.85 \frac{\bar{w}}{v}\right) C_v \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho_w}\right) \frac{\bar{w}}{v} \quad (4)$$

式中: λ 为达西摩阻系数; D 为管道直径; v 为浆体流速; g 为重力加速度; S_m 为浆体密度比; \bar{w} 为颗粒平均沉降速度; C_v 为浆体体积浓度; ρ 为二相载体密度; ρ_s 为颗粒密度; ρ_w 为水密度; α 为减阻系数, 是浆体相对黏度 μ_r 的函数:

$$\alpha = 1.05 - 0.42 \lg \mu_r + 0.21 (\lg \mu_r)^2 \quad (5)$$

利用该公式对 100 mm 和 154 mm 直径管道输送平均粒径为 0.175 mm 且体积浓度在 0.3 ~ 0.41 内的精铁矿以及 100 mm 直径管道输送平均粒径为 5.923 mm 且体积浓度在 0.32 ~ 0.45 内的煤颗粒进行试验验证, 计算结果和试验数据之间的误差

均小于 5%^[1]。

2.2 Durand 公式^[2]

Durand R. 在大量试验中发现, 附加阻力与福氏数之间存在良好的关系。进一步试验发现, 当颗粒粒径大于 2 mm 后, 附加阻力与福氏数之比值不再随颗粒粒径的变化而变化, 因此, Durand 引入了阻力系数, 解决了不同颗粒粒径的问题。最后综合不同密度比的物料试验结果, 回归得出如下公式:

$$i_m = i_w \left\{ 1 + 121 C_v \left[\frac{v^2}{gD(S-1)} \cdot \frac{\sqrt{gD(S-1)}}{\bar{w}} \right]^{-1.5} \right\} \quad (6)$$

式中: S 为颗粒密度比。该公式对管径 40~580 mm, 平均粒径 0.2~25 mm, 颗粒密度比 1.5~3.95, 固体含量 50~600 kg/m³ 的颗粒内进行了试验验证。

2.3 Wasp 公式^[3]

Wasp E J 在 Durand 公式提出 10 a 后, 基于扩散理论和重力理论, 把浆体中的颗粒分为两种状态:

1) 均匀地扩散在液体中的小颗粒, 充当运输工具的作用, 阻力计算公式如式(1);

2) 被运输的、在重力作用下明显不均匀分布的大颗粒, 该部分的计算按照 Durand 公式, 如式(6)。

这两种状态根据下式进行划分:

$$\lg \frac{C}{C_A} = -\frac{1.8w}{\beta kv^*} \quad (7)$$

式中: C 为距管顶 0.08D 处的浆体体积浓度; C_A 为管中心处的浆体体积浓度; w 为颗粒沉降速度; k 为卡门系数 (一般取 0.36~0.4); β 为比例常数 (一般取 1~1.5); v^* 为摩阻流速。

2.4 Turian 公式^[4]

Turian R M 和 Yuan Tran-Fu 同样以重力理论为基础, 广泛搜集了前人的试验成果, 并进行了大量的补充试验, 通过量纲分析, 最后得出如下公式:

$$f_m - f_w = KC_v^\alpha f_w^\beta C_D^\gamma Fr^\tau \quad (8)$$

式中: f_w, f_m 分别为清水和浆体的范宁系数, $K, \alpha, \beta, \gamma, \tau$ 均为待定系数; C_D 为颗粒阻力系数; Fr 为

福氏数。该公式支持数据的范围非常广，试验管径 12.6~699 mm，颗粒直径 0.03~38 mm，颗粒密度比 1.16~11.3，浆体浓度 0.000 06~0.42，流速 0.009~6.7 m/s。其中各参数在不同流型中的取值见表 1。

表 1 参数取值

流区条件	K	α	β	γ	τ
推移质	12.13	0.738 9	0.771 7	-0.405 4	-1.096 0
跳跃质	107.10	1.018 0	1.046 0	-0.421 3	-1.354 0
伪均质	30.11	0.868 0	1.200 0	-0.167 7	-0.693 8
均质流	8.54	0.502 4	1.428 0	0.151 6	-0.353 1

2.5 Wilson 公式^[5]

Wilson K C 积累几十年研究经验，把颗粒按照粒径分为 4 个部分。第 1 部分是粒径小于 0.04 mm 的颗粒，与水均匀混合，形成均质流体，即两相流的液相部分；第 2 部分粒径大于 0.04 mm 且小于 0.15 mm，该部分由于颗粒的增大，重力逐渐起到了作用，虽然所有颗粒在高流速下仍然保持悬浮，但重力已经影响了其分布，使其成为伪均质，这部分颗粒满足扩散理论；第 3 部分称为复合流体，包括粒径从 0.15 mm 到 0.018 倍输送管道直径，按照重力理论计算；第 4 部分是粒径大于 0.018 倍输送管道直径的部分，这部分属于推移质，也符合重力理论。其公式如下：

$$i_m = i_e + \Delta i_h + \Delta i_s \quad (9)$$

式中：均质流和伪均质流部分摩阻损失之和 i_e ，复合流部分摩阻损失 Δi_h 和推移质部分摩阻损失 Δi_s 的计算方法分别为：

$$i_e = i_w S_f S_e \quad (10)$$

$$\Delta i_h = 0.22 C_v X_h (S - S_e) (v_{50}/v)^M \quad (11)$$

$$\Delta i_s = B C_v X_s (S - S_h) (v/0.55 v_{sm})^{-0.25} \quad (12)$$

式中： S_f, S_e, S_h 和 S 分别为均质流、伪均质流、复合流及固体密度比； X_h, X_s 分别为伪复合流和推移质部分颗粒所占的比例； v_{50} 表示能够使 50% 的颗粒悬浮时的流速； v_{sm} 表示颗粒沉降速度最大时的流速； M 取值 0.25 ~ 1.7； B 取值 0.5 ~ 1。

3 数据分析

本文选择中港疏浚有限公司“新海凤”号进行了各种算法的比较计算，并与其 2011 年在巴西疏浚工程中的一段工作测量数据进行了比较。

3.1 同一浓度浆体输送

输送工况如下：海水密度 1 025 kg/m³，温度 10 ℃，运动黏性系数 1.146 × 10⁻⁶ m²/s，输送距离 3 800 m；泥泵吸入段管径 1.2 m，排出口至船舶接头段管径为 1.1 m；其它管径均为 1 m。计算土质为中沙，堆积密度为 2 000 kg/m³，颗粒密度比取 2.65，颗粒形状系数选用 0.65，级配见表 2。泵扬程曲线见图 1。

表 2 输送土质级配

粒级/%	10	30	50	70	90
粒径/mm	0.1	0.2	0.3	0.5	1.5

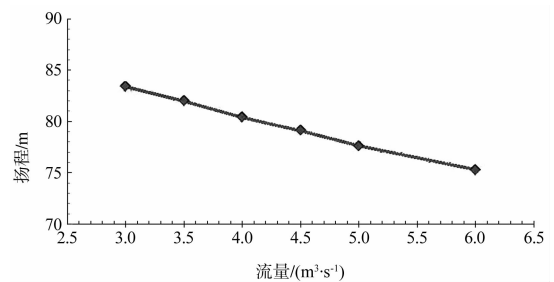


图 1 舱内泥泵清水流量-扬程曲线

在输送浆体密度为 1 300 kg/m³ 时，各阻力计算方法计算的结果和实测结果见图 2。

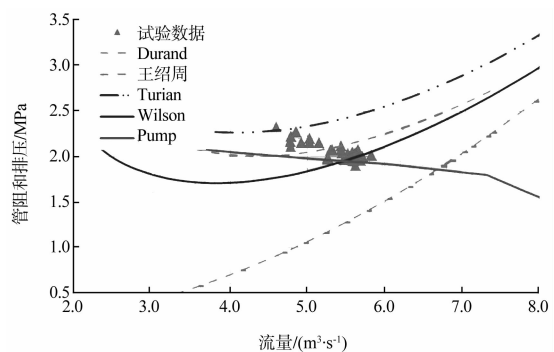


图 2 管阻曲线 (浆体浓度为 1 300 kg/m³)

由图 2 可以看出，Turian 计算方法得出的阻力偏高，王绍周计算方法得出的曲线阻力偏低，其他 2 种阻力在工作点附近相当。

3.2 不同浓度浆体输送

为了体现不同浓度下的情况, 单独取 Wilson 计算方法在输送密度比为 1.2, 1.3 和 1.4 浆体时的流量排压曲线 (图 3)。图 3 显示, 该计算方法基本符合实际生产情况。

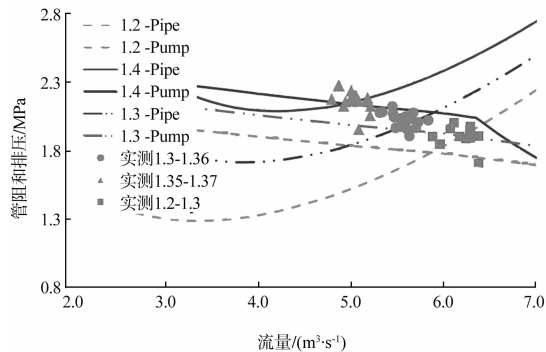


图 3 不同密度比浆体流量排压曲线

3.3 小管径细颗粒输送

在细颗粒、小管径管道输送方面, 选取管径 500 mm 的细颗粒管道输送案例进行计算, 计算结果见图 4。

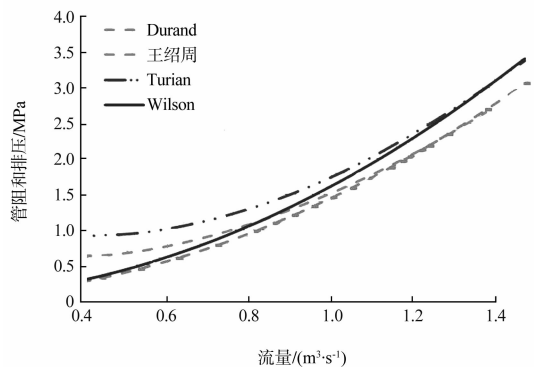


图 4 细颗粒浆体流量排压曲线

图 4 显示各计算方法的计算结果在流速 4 m/s (流量 $0.8 \text{ m}^3/\text{s}$) 附近时, Turian 公式结果偏大, 其它 3 种算法结果相近。随着流速的进一步增大, 各家算法计算结果差异的百分数逐渐缩小。

4 讨论

4.1 王绍周公式

王绍周吸收了扩散理论和重力理论的各自优点, 提出了由固体物料产生的悬浮能耗、旋转能耗、悬移能耗的物理概念, 意义比较清晰。但是

用于该公式参数回归的试验数据都来自管路系统的工作数据, 即超临界流速状态, 因此, 在小于临界流速的时候不能反映实际情况。

另外, 用于回归阻力计算公式的数据都来自各输煤、输矿工程, 这类浆体的共同特点是颗粒细、级配窄、浓度高, 管道管径一般都比泥浆输送管径小^[1]。因此, 在粗颗粒、大管径的泥浆输送计算中, 其结果比实际值偏小。

4.2 Durand 公式

Durand 公式是最早的经典公式之一。因为有大量的试验验证, 所以从 1952 年该公式提出至今仍然有很多设计院在沿用此公式。

Durand 公式是根据大量的试验及试验结果的分析而得出的, 虽然它是一个经验公式, 但它所概括的资料范围、包括的流动条件、固体颗粒的种类及特性参数等都相当广。因此, 在一定条件下, 尤其在复合流阶段, 其阻力计算较准确。但是, Durand 公式的基础是重力理论, 即在公式的推导过程中, 认为由于固体颗粒的加入, 要消耗比输送清水更多的能量来维持固体颗粒悬浮, 因而要消耗大量的悬浮功, 而当浆体在复合流流型之前的推移质或跃移质阶段, 大多数固体粗颗粒是处于非悬浮状态, 此时应用 Durand 公式的计算值比较偏大。另外, 该公式没有考虑到输送高浓度、宽级配浆体时颗粒之间的相互作用, 因此在计算高浓度宽级配浆体输送时, 计算值偏大。有学者验证, 该公式在高浓度或者小管径时都有较大的偏差^[6]。

4.3 Wasp 公式

Wasp 公式弥补了 Durand 公式对颗粒间相互作用的忽视, 至少考虑了细颗粒形成的均质流对粗颗粒的影响。因此, Wasp 公式在使用范围上更加宽泛。但是, Wasp 公式的验证数据也是来自于煤输送, 因此在大颗粒输送时也会有明显偏差^[7]。另外, 由于 Wasp 公式在计算阶段需要知道两个基准面的体积浓度, 因此在设计阶段的管路计算中难以准确把握, 应用比较困难。

4.4 Turian 公式

Turian 公式覆盖几乎所有的流型, 涵盖大量的试验数据, 因此其适用范围也非常广阔。但是, 由于重力理论的局限性和试验数据在大管径、宽级配颗粒方面的缺乏, 使其在高浓度、宽级配浆体输送计算中结果偏大。

4.5 Wilson 公式

Wilson 公式在考虑了不同流型中不同的主要能量消耗模式, 也部分照顾到了不同粗细颗粒之间的相互影响。另外, 该算法的数据基础涉及相当广泛, 因此其适用范围非常广。

5 结论

1) 对输送颗粒细小且级配较窄、输送管道管径较小的管阻计算, 各家计算方法可以相互参考。

2) 在大管径管道输送中细沙, 尤其在复合流阶段, Wilson 公式、Turian 公式、Durand 公式的计算结果都相近。其中 Wilson 公式在多数情况下更加切合实际。

3) 在宽级配、粗粒径颗粒的大管径水力输送中, Wilson 公式的计算结果比较符合实际。

参考文献:

[1] 王绍周. 粒装物料的浆体管道输送[M]. 北京: 海洋出版社, 1998: 64-66.

[2] Durand R. The Hydraulic Transportation of Coal and Other Materials in Pipes[M]. London : Collage of National Coal Board, 1952.

[3] Wasp E J, Kenny J P, Gandhi R L. Soild-liquid Flow Slurry Pipeline Transportation[M]. Switzerland: Trans Tech Publications, 1977.

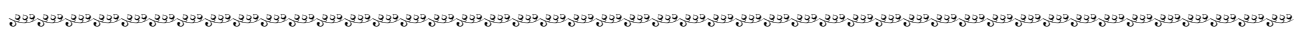
[4] Turian R M, Yuan Tran fu. Flow of slurries in pipelines[J]. J Amer inst Chem Angrs, 1977(3): 232-242.

[5] Wilson K C, Addie G R, Sellgren A, et al. Slurry Ransport Using Centrifugal Pumps[M]. German: Springer Science and Business Media, Inc., 2004.

[6] 钱宁, 万兆慧. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1991.

[7] Ni Fusheng, Zhao Lijuan, Xu Liqun, et al. A model calculation for flow resistance in the hydraulic transport of sand[C]. Florida, USA: Proceedings of the 18th World Dredging Congress, 2007.

(本文编辑 武亚庆)



(上接第 35 页)

参考文献:

[1] 杨运泽. 混凝土异形护面块体的现状及展望[J]. 港工技术, 1996(2): 24-33.

[2] Liu Philip, Lin Pengzhi, Wang Dongchao. Numerical modeling of wave interation with porous structures [J]. Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1999, 125(6): 322-330

[3] Arikawa T, Shimosaki K I. Numerical simulations of

hydraulic overflow pressure acting on structures behind the seawall[J]. Coastal Structure, 2003, 147(50): 606-618.

[4] 张九山, 吴卫, 王本龙, 等. 带异形块体海堤越浪的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2006, 21(5): 572-578.

[5] 贺朝敖, 任佐皋. 带胸墙斜坡堤越浪量的试验研究[J]. 海洋工程, 1995, 13(2): 62-70.

(本文编辑 武亚庆)