

· 施 工 ·



岩石水力输送的管阻特性和阻力模型修正

秦 斌¹, 李金峰¹, 秦 亮¹, 田桂平²

(1. 中交天津航道局有限公司, 天津 300461; 2. 天津市疏浚工程技术企业重点实验室, 天津 300457)

摘要: 岩石破碎后在排泥管线内的运动状态、管阻特性与其他土质有较大区别, 岩石输送的阻力损失机理复杂, 因而针对岩石输送, 目前在疏浚领域内缺乏通用性的计算模型。对固体颗粒运动状态及阻力损失特性、阻力模型基本理论进行论述, 对 Durand 经典阻力模型的特点和适用性进行分析, 并基于“天鲲号”在大连大窑湾和俄罗斯某岩石疏浚工程中的输送数据, 对 Durand 模型进行修正计算, 得出杜兰德系数 K_D 的修正值。结果表明, 管阻计算精度得到较大提高, 使得模型的适用范围扩展至粒径 100 mm 以内的岩石土质。

关键词: 岩石; 水力输送; 阻力损失

中图分类号: U 616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)06-0221-05

Pipe resistance characteristics and resistance model modification of hydraulic transportation for rock

QIN Bin¹, LI Jin-feng¹, QIN Liang¹, TIAN Gui-ping²

(1. CCCC Tianjin Dredging Co., Ltd., Tianjin 300461, China;

2. Tianjin Key Laboratory for Dredging Engineering Enterprises, Tianjin 300457, China)

Abstract: The movement state and pipe resistance characteristics of broken rock in the discharge pipeline are quite different from other soil properties, and the resistance loss mechanism of rock transportation is complex. Therefore, there is a lack of universal calculation model for rock transportation in the field of dredging. We discuss the motion state of solid particles, the characteristics of resistance loss and the basic theory of resistance model, and analyze the characteristics and applicability of Durand classic resistance model. Based on the transportation data of “Tiankunhao” in Dayaowan, Dalian and a rock dredging project in Russia, we modify and calculate the Durand model, and obtain the modified value of Durand coefficient K_D . The results show that the accuracy of pipe resistance calculation is greatly improved, so that the application scope of the model is extended to the rock with particle size less than 100 mm.

Keywords: rock; hydraulic transmission; resistance loss

岩石输送常见于绞吸船岩石疏浚工程, 其一般消耗挖泥船的大部分装机功率^[1], 故准确计算岩石输送的管路损失对挖泥船的管线布设、产量预估及整体施工安排具有重要意义。

泥浆的输送受固体颗粒物料的物理性质、浆体流态、流型、流动性质、黏性、管径等因素的影响, 针对非均匀流动的泥沙, 不同粒径大小的

泥沙, 其水动力学特性相差较大^[2]。岩石破碎后在排泥管线内的运动状态、管阻特性与其他土质有较大区别, 对于风化程度较高的岩石, 经开挖和输送过程, 岩石呈现碎屑状态, 对于风化程度较低、节理不发育、抗压强度高的岩石, 破碎后的岩石在排泥管线内呈块状, 因而这种区别会更加明显。

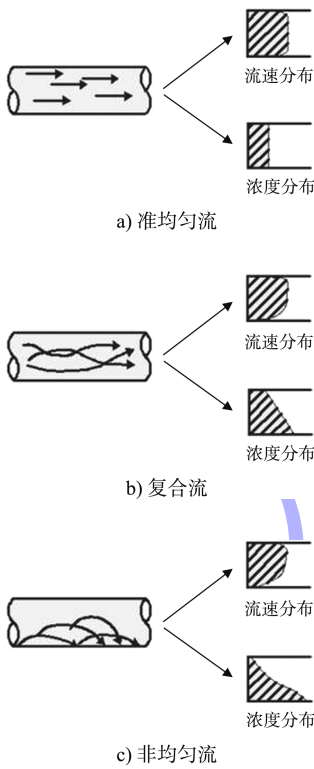
收稿日期: 2021-10-24

作者简介: 秦斌(1969—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事疏浚技术管理。

对于岩石输送，目前国内外通用的阻力模型较少，多数模型是基于实验室模型试验数据后得出的，适用于小管径的特定工况条件，但对于大管径、大粒径等工况的扩展性较差。本文在“天鲲号”多个岩石输送工程施工数据的基础上，对传统经典管阻模型进行修正，对岩石水力输送的管阻特性进行研究并得出适用于岩石输送的修正阻力模型。

1 固体颗粒运动状态及阻力损失特性

根据泥浆中泥沙颗粒的组成不同有不同的运动状态^[3]，见图 1。



注：流速与浓度分布均为纵向分布。

图 1 泥浆流动特性

1) 准均匀流。泥沙颗粒以细颗粒为主，固液混合物在浓度较高时具有非牛顿体的特性，颗粒自身重力在由宾汉剪切力、浮力及紊动扩散作用下维持其均匀的悬移运动，在管道轴线的垂线方向上泥沙浓度分布十分均匀。

2) 非均匀流。泥沙颗粒以粗颗粒为主，在水流作用下以推移、跃移和悬移的形式运动。

3) 复合流。复合流介于准均匀流与非均匀流

之间。泥沙颗粒组成中的粗、细颗粒分布范围较广，泥浆浓度在达到一定程度后，细颗粒与清水组成准均匀泥浆，粗颗粒则以推移、跃移的形式运动。随着泥浆浓度的提高，越来越多的粗颗粒物质成为浆液的组成部分。复合流具有良好的流动性，相同颗粒浓度及相同管径下复合流的阻力远低于相同流速下的非均匀流阻力。严格意义上，在生产中出现的绝大部分输送过程都属于复合流的范畴。

泥浆管路输送的阻力损失与泥浆中泥沙颗粒的运动状态直接相关。管道输送的水力损失主要包括泥浆与管壁之间摩擦引起的摩擦阻力损失、维持泥沙悬浮需要的颗粒沉降阻力损失、泥沙颗粒之间碰撞引起的阻力损失。泥浆阻力特性曲线见图 2。

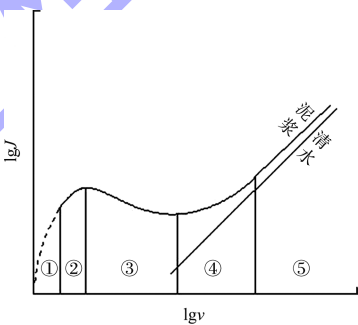


图 2 泥浆阻力特性曲线

图 2 显示了泥浆输送水力坡度 J 与流速 v 的关系，对于清水水力坡度 J 与流速的平方成正比，泥浆可以分为 5 个不同阶段：①阶段流速小，泥沙颗粒沉积在管线底部不随水流运动；②阶段流速增加，泥沙颗粒中的细颗粒起动并以推移、跳跃、悬浮的形式随水流运动；③阶段更多的泥沙以跳跃、悬浮的形式随水流运动，泥沙与管壁的摩擦减少，因此水力坡度会下降；④阶段绝大部分泥沙以跳跃、悬浮的形式随水流运动，泥沙与管壁的摩擦进一步减少，但是由于维持泥沙悬浮需要的能量和泥沙颗粒之间碰撞损失的能量越来越大，并占据主导，水力损失表现为整体上升；⑤阶段流量进一步增大，泥沙颗粒几乎全部以悬浮形式运动，阻力损失趋势接近清水情况。

岩石由于破碎后粒径较大，在疏浚管路输送流速 5~7 m/s 的情况下，多数处于③④阶段，即

管道输送的阻力损失由摩擦阻力损失、颗粒沉降阻力损失、颗粒碰撞阻力损失共同组成。

2 经典阻力模型及基本理论

管道输送的阻力损失机理复杂, 仅从理论研究方面很难提供对应的计算模型, 目前的计算公式多数建立在理论、试验、统计结合的基础上, 为此国内外关于泥浆输送的水力损失进行了大量试验和研究, 并提出了经验及半经验计算公式, 按照公式的基本理论可以分为 3 种类型: 第 1 种为扩散理论, 将泥浆作为一定密度的纯液体处理, 仅考虑泥浆与管壁的摩擦阻力损失, 因此它只是用于细颗粒(如淤泥、粉土、不成球的黏土)在浓度较低情况下的输送计算; 第 2 种为重力理论, 其在扩散理论基础上考虑颗粒沉降阻力损失(重力能耗), 适用于粗颗粒的输送计算, 如 Durand 公式、Wasp 公式、Jufin & Lopatin 公式; 第 3 种为能量理论, 它吸取了前两种理论的合理之处, 属于二者的结合, 但仍需要进一步完善^[4]。

岩石水力输送最适宜采用重力理论解释。重力理论中, 最为经典的模型即 Durand 模型, 我国的《疏浚与吹填工程设计规范》^[5]关于水力输送的计算公式即基于此模型。

Durand 在粗颗粒泥浆流水力梯度的经验预测上做了先驱性的工作, 其最早发现: 对于一定粒径的泥沙颗粒而言, 非均质流管道附加损失与管道流动的弗劳德数有关, 通过试验建立了附加损失 I_s 与弗劳德数 Fr 的关系。Durand 模型基于模型试验, 最早应用于采矿业的水力输送中, 在重力理论为基础的计算公式中应用最广泛。其试验条件为: 管径 D 为 40~580 mm, 泥沙粒径 d 为 0.2~25 mm, 泥沙相对密度为 1.50~3.95, 泥沙浓度 S 为 50~600 kg/m³。

该模型将两相流的阻力损失 I_m 表示为清水阻力损失 I_0 和附加损失 I_s 之和, 引入固体颗粒沉降的阻力系数以后, 通过分析回归得出关系式:

$$\frac{I_m - I_f}{I_f C_{vd}} = K_D \left[\frac{v_m^2}{gD(\rho_s - 1)} \cdot \frac{\sqrt{gd(\rho_s - 1)}}{v_t} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (1)$$

式中: I_f 为清水阻力损失; C_{vd} 为颗粒浓度; v_m 为泥浆流速; D 为管径; v_t 为泥沙的沉降速度; ρ_s 为颗粒密度; d 为颗粒粒径; K_D 是为杜兰德系数, 《疏浚与吹填工程设计规范》取 121。

$$\text{式(1)代入达西公式 } I_m = \lambda_m \frac{1}{D} \frac{v_m^2}{2g}, \quad I_f = \lambda_f \frac{1}{D} \frac{v_m^2}{2g},$$

可得:

$$\lambda_m = \lambda_f \left\{ 1 + C_{vd} K_D \left[\frac{v_m^2}{gD(\rho_s - 1)} \cdot \frac{\sqrt{gd(\rho_s - 1)}}{v_t} \right]^{\frac{3}{2}} \right\} \quad (2)$$

$$\lambda_m = \lambda_f \left[1 + C_{vd} K_D \cdot \frac{g^{\frac{3}{4}} (\rho_s - 1)^{\frac{3}{4}} D^{\frac{3}{2}} v_m^{\frac{3}{2}}}{v_m^3 d^{\frac{3}{4}}} \right] \quad (3)$$

式中: λ_f 为清水管路阻力系数; λ_m 为泥浆管路阻力系数。

式(2)(3)揭示了泥浆阻力系数与清水阻力系数的关系, 其中与泥浆中固体颗粒相关的参数项为 $(\rho_s - 1)^{\frac{3}{4}} v_t^{\frac{3}{2}} / d^{\frac{3}{4}}$, 其中颗粒密度 ρ_s 基本恒定, d 与 $v_t^{\frac{3}{2}} / d^{\frac{3}{4}}$ 关系见图 3。

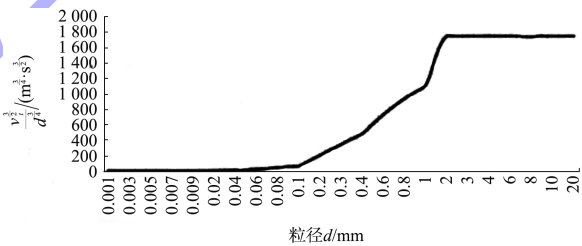


图 3 $d-v_t^{\frac{3}{2}}/d^{\frac{3}{4}}$ 关系曲线

由图 3 可见, K_D 取恒定值, 在相同 D 和 v_m 情况下, d 在小于 0.06 mm 和大于 2 mm 范围内变化时, λ_m 将基本保持恒定值, 这与实际施工不符, 尤其在 2 mm 以上范围内, λ_m 应随着粒径 d 的增大而继续上升, 而不应保持恒定, 因此 K_D 需要进行修正。经过大量实际施工数据反算也印证了这一点, 实际数据显示, 对于粉土、黏性土等 $d < 0.07$ mm 的细颗粒土, 阻力系数计算值小于实测值, 即 K_D 取 121 偏小, 对于粗砂、砾砂、砾石等大颗粒土质, 阻力系数计算值大于实测值, 即 K_D 取 121 偏大。

3 实例计算及模型修正

本文选取“天鲲号”在大连大窑湾和俄罗斯

某岩石疏浚工程中的输送数据，对 Durand 模型进行修正计算。

两项工程的排泥管线由水上管、水下管及陆地管 3 部分组成，水上管线采用直径 1 m、长

11.8 m 的自浮管；陆地管线采用规格直径 1 m、长 6 m 的钢管组成。选取 8 个工况进行管阻系数计算，土质包括岩石及各种混合土质，各工况参数见表 1，各工况典型土质见图 4。

表 1 各工况参数

工况	日期	工地位置	土质	中值粒径 (估算值)/mm	管线长度/m
1	2019-08-08	俄罗斯	粉质黏土、粉砂、少量岩石碎块	0.1	756(自浮管 720+陆地管 36+缩口 0.70)
2	2019-08-17	俄罗斯	粉质黏土(不起球)、砂岩碎块	0.5	696(自浮管 552+陆地管 144+缩口 0.70)
3	2019-08-26	俄罗斯	粉质黏土(不起球)、砂岩碎块	0.5	516(自浮管 260+陆地管 256+缩口 0.78)
4	2019-08-29	俄罗斯	砂岩块石、碎石	30	546(自浮管 260+陆地管 286+缩口 0.78)
5	2019-04-01	俄罗斯	起球黏土，少量砂岩块石	50	599.6(自浮管 566.4+陆地管 33.2+缩口 0.53)
6	2019-04-01	俄罗斯	砂岩块石	50	599.6(自浮管 566.4+陆地管 33.2+缩口 0.53)
7	2019-08-12	俄罗斯	砂岩块石	50	1 564(自浮管 744+水下管 490+陆地管 330+缩口 0.70)
8	2018-12-21	大窑湾	泥灰岩块石	100	2 826(自浮管 736+水下管 2 050+陆地管 40)

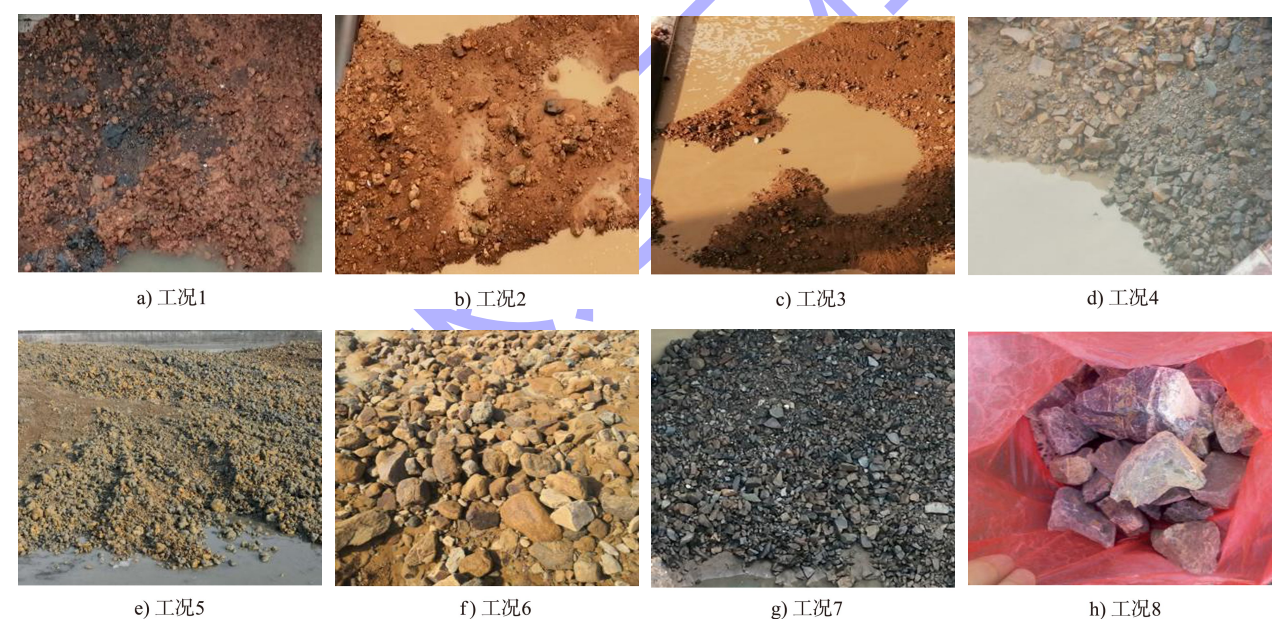


图 4 各工况典型土质

船舶总排压与泥浆管路流速可以简化为：

$$p_m = \lambda_m \cdot \frac{L}{D} \frac{v_m^2}{2g} + (Z - X) \rho_m g \tag{4}$$

式中： p_m 为输送泥浆时船舶总排压（mH₂O）； λ_m 为管路浆体阻力系数； X 为排压测量仪器所在位置高程（m）； Z 为管口中心点位置高程（m）； L 为折算标准钢管长度（m）； D 为管路管径（m）； ρ_m 为泥浆密度（t/m³）。

依据式(4)，在已知施工排压、流速、浆体密

度、管径、管线长度、管口高程与排出传感器高程差的情况下可反求出阻力系数 λ_m ，进而式(3)反推出杜兰德系数的公式为：

$$K_D = \frac{I_m - I_f}{I_f C_{vd}} \bigg/ \left[\frac{v_m^2}{gD(\rho_s - 1)} \frac{\sqrt{gd(\rho_s - 1)}}{v_t} \right]^{-\frac{3}{2}} \tag{5}$$

其中边界条件中考虑了泥沙颗粒滑移比、输送管路中不同管径等因素。计算典型结果见图 5 和表 2。

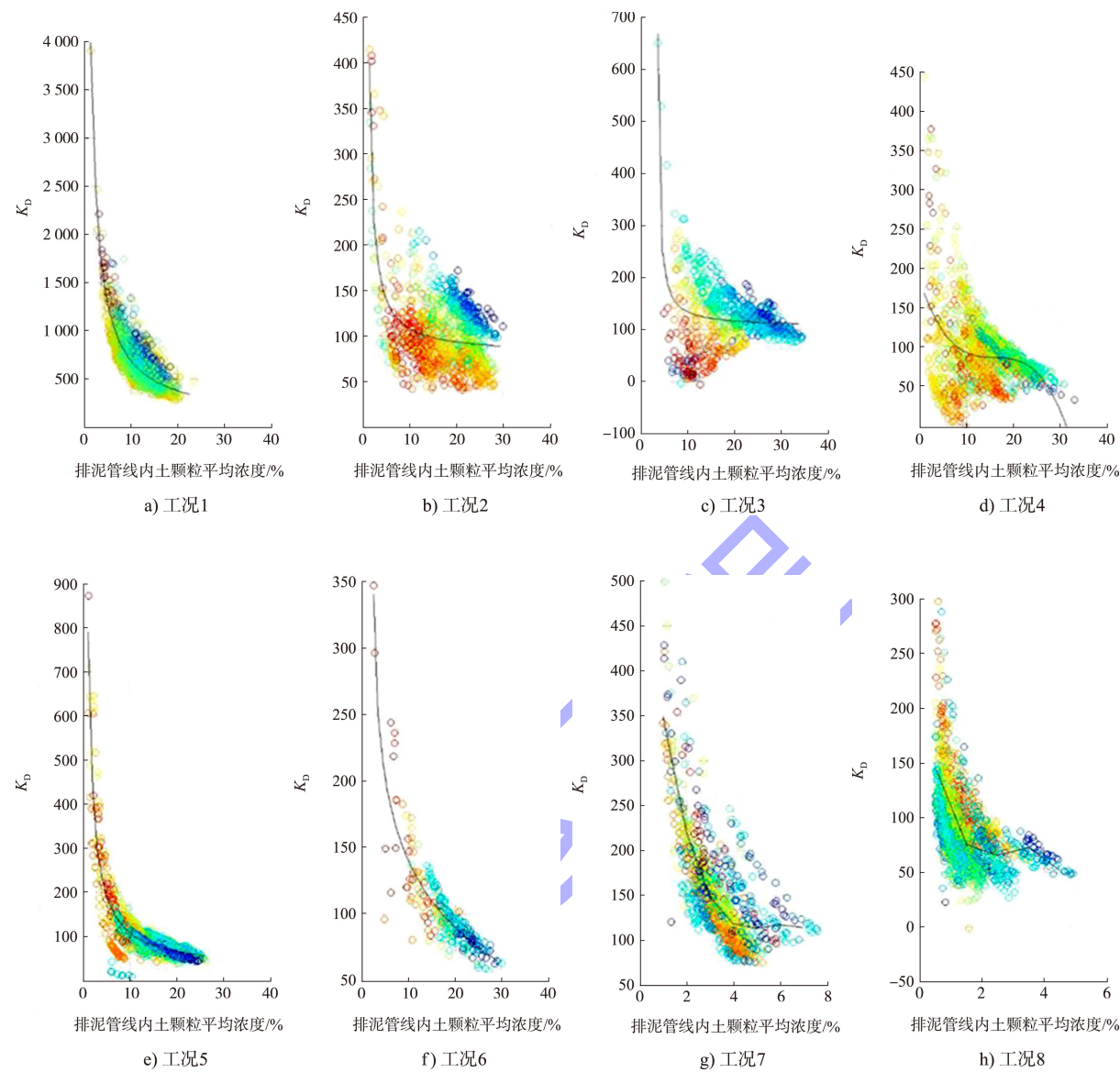


图 5 土颗粒浓度与 K_D 关系

表 2 土颗粒浓度与 K_D 的拟合回归系数及对应关系

工况	拟合回归系数	K_D													
		2%	4%	6%	8%	10%	12%	14%	16%	18%	20%	22%	24%	26%	28%
1	0.85	2 459	1 545	979	808	653	550	485	433	410	380	—	—	—	—
2	0.63	284	143	120	110	105	100	95	93	92	90	89	88	87	85
3	0.41	—	200	170	155	110	105	100	97	95	94	93	92	91	90
4	0.36	152	107	105	100	95	93	91	89	87	85	82	78	74	70
5	0.89	419	202	151	112	105	98	92	85	81	71	64	57	52	—
6	0.89	322	200	170	155	140	120	110	105	95	90	85	80	73	70
7	0.82	212	120	85	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	0.60	75	70	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—