



砂岩磨蚀性在“天鲲号”绞吸挖泥船 挖掘过程中的应用

张更生^{1,2}, 殷瑞林¹, 曹凯¹, 李能¹

(1. 中交(天津)生态环保设计研究院有限公司, 天津 300202;

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

摘要: 广西某港航道扩建工程, 重型绞吸船“天鲲号”疏浚典型风化砂岩时刀齿出现磨蚀和断裂现象, 影响施工效率发挥。在分析疏浚风化砂岩抗拉强度和矿物成分特性指标基础上, 结合疏浚岩石磨蚀性理论, 推导出广西钦州砂岩磨蚀性指数与绞刀刀齿消耗的经验性关系公式, 用来预测重型绞吸船挖掘风化岩石的绞刀齿消耗量。研究结果表明: 1) 中风化砂岩岩体完整性较好, 单轴饱和抗压强度为 9~41 MPa, 疏浚岩土工程特性分级为 12~13 级。施工中风化砂岩岩体时绞刀刀臂和刀齿磨蚀断裂问题突出, 中风化砂岩是影响疏浚效率的关键土质。2) 创新性引入改进的 Schimazek 值 F 理论, 综合考虑矿物成分种类、矿物含量、矿物硬度、岩石粒度和岩石饱和抗拉强度因素, 来评估岩石材料的磨蚀性。3) 基于疏浚岩石磨蚀性理论和施工参数, 推导出“天鲲号”万方刀齿消耗量和改进 Schimazek 值 F 之间公式。4) 预测“天鲲号”万方刀齿消耗量计算值和实测值的相对偏差绝对值在 17.3% 以下, 可靠性良好, 为疏浚岩石提供技术支撑。

关键词: 疏浚工程; 风化砂岩; 磨蚀性; 刀齿消耗

中图分类号: U 616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)06-0226-06

Application of sandstone abrasiveness in excavation process of cutter suction dredger “Tiankun”

ZHANG Geng-sheng^{1,2}, YIN Rui-lin¹, CAO Kai¹, LI Neng¹

(1. CCCC Tianjin Eco-environmental Protection Design & Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300202, China;

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

Abstract: In the channel expansion project of a port in Guangxi, the cutter teeth of the heavy-duty cutter suction dredger “Tiankun” are worn out and fractured during the dredging operation of typical weathered sandstone, which affects the efficiency of construction. On the basis of analyzing the tensile strength and mineral composition characteristic indexes of the dredged weathered sandstone, we deduce the empirical relationship formula between the abrasiveness index of the sandstone in Qinzhou of Guangxi and the consumption of cutter teeth by the theory of dredged rock abrasiveness. This formula is used to predict the consumption of cutter teeth for digging weathered rocks by a heavy-duty cutter suction dredger. The research results reveal that 1) the integrity of the moderately weathered sandstone rock mass is good, with the uniaxial saturated compressive strength of 9-41 MPa and the geotechnical engineering property grading of the dredging as Level 12-13. In the dredging of the moderately weathered sandstone rock mass, the problems of abrasion and fractures of the cutter arm and teeth are prominent, and the moderately weathered sandstone is the key soil quality that affects dredging efficiency. 2) The improved theory of Schimazek’s F value is innovatively introduced to evaluate the abrasiveness of rock materials by comprehensively

收稿日期: 2021-09-18

作者简介: 张更生(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事岩土工程勘察设计和疏浚土质研究工作。

considering mineral compositions, mineral content, mineral hardness, rock particle size, and saturated tensile strength of rock. 3) On the basis of the theory of rock abrasiveness and construction parameters of dredging, the formula between the cutter teeth consumption of “Tiankun” per 10,000 cubic meters and the improved Schimazek’s F value is derived. 4) The absolute relative deviation between the calculated value and the measured value of the cutter tooth consumption of “Tiankun” per 10,000 cubic meters is less than 17.3%, which indicates good reliability and can provide technical support for rock dredging.

Keywords: dredging engineering; weathered sandstone; abrasiveness; cutter teeth consumption

广西某港航道扩建工程疏浚土质为风化砂岩, 此类土在我国东部和西南部沿海分布较为广泛, 主要为砂土颗粒在水力、压力和温度等作用下与钙质胶结沉积而成。砂岩具有不均匀性、软硬交替、强度较大、可挖性相对较差, 在挖掘过程中对接触刀齿、水下泵和管线等磨蚀严重, 刀齿更换增加非正常施工时间, 降低了重型绞吸船挖掘效率、提高了疏浚施工成本、增大疏浚管理和运作风险。针对此类典型风化砂岩特性进行分析研究, 基于磨蚀性理论找出广西钦州砂岩特性指标、磨蚀性指数与绞刀刀齿消耗的内在关系, 预估绞刀刀齿消耗是某港航道扩建工程亟待解决的问题。

目前, 国内外关于风化岩石特性对施工机具磨蚀的研究取得了一系列成果。王昶皓等^[1]通过室内试验, 分析了岩石各种属性对钻探复合片磨蚀的影响规律, 揭示了影响复合片磨蚀的顺序为: 弹性模量>石英含量>内摩擦角>表面粗糙度>泊松比>内聚力; 将复合片磨蚀体积与岩石可钻性级值相结合, 建立了岩石的研磨性评价指标, 然后将岩石研磨性重新划分为 7 个等级, 对制定岩石研磨性的分级标准具有一定的借鉴意义。世界水运基础设施协会组织编制了《海洋疏浚岩土分类》标准, 指出疏浚岩石矿物成分、抗压强度、抗拉强度等指标对机具磨蚀量影响较大, 提出了采用相对维氏硬度(HVQeq)、改进的 Schimazek 值 F 和 Cerchar 划痕试验等方法来衡量疏浚岩石的磨蚀严重程度^[2]。王旭等^[3]进行岩石掘进机 TBM 破碎岩石机理研究, 指出影响刀具磨蚀的因素有机械因素和地质因素, 机械因素包括施加在滚刀上的荷载和刀盘转速; 地质因素主要包括岩石的物质组成、岩石的强度或硬度、结构面发育状况以及岩石颗粒的形状和尺寸等。屠晓利等^[4]进行了冲

击凿岩磨蚀性研究, 指出冲击凿岩钻头的磨蚀是多种磨蚀机理共同起作用、影响岩石磨蚀性的主要因素是岩石的整体坚固程度和硬矿物含量、岩石磨蚀性系数是凿碎比功和硬矿物含量的函数。综上所述, 国内外关于风化岩对机具磨蚀性的研究, 主要集中在石油开采、隧道挖掘等方向, 分析岩石物理力学指标及矿物成分对施工机械的影响; 而疏浚工程领域风化岩石对疏浚机具磨蚀性研究鲜见报道。因此, 结合国内外关于风化岩磨蚀性研究成果, 采用室内试验、理论推导和数据统计等方法衡量疏浚风化岩石关键特性指标对疏浚机具磨蚀性的影响, 从而带动疏浚技术理论革新、促进疏浚行业整体水平提升具有重大意义。

本文借鉴国内外风化岩石物理力学指标与磨蚀性关系研究成果, 依托广西某港航道扩建工程, 采用重型绞吸船疏浚典型风化砂岩, 在充分了解此类土质特性的基础上, 探索影响刀齿、管线等疏浚机具关键岩石指标, 基于风化岩磨蚀性理论, 采用改进的 Schimazek 值 F , 评估风化砂岩磨蚀性能, 创新性地建立风化砂岩特性指标、改进的 Schimazek 值 F 和刀齿消耗量之间的相关关系, 利用拟合经验公式预测绞刀刀齿消耗量, 优化疏浚施工工艺, 提升该类土质疏浚工程施工的时效性、经济性和可靠性, 为典型土质疏浚施工提供技术支撑, 具有重要的实际应用价值。

1 疏浚风化砂岩磨蚀指标

为了充分了解疏浚风化砂岩的磨蚀特性, 基于疏浚工程勘察成果、现场施工刀齿磨蚀和更换情况, 对应采取施工过程中岩石样品, 进行了岩石单轴饱和抗压强度、抗拉强度和矿物成分分析试验。试验结果见表 1。

表 1 疏浚风化砂岩特性指标

岩石类别	项目	单轴饱和抗压强度/MPa	饱和抗拉强度/MPa	矿物成分含量/%				
				石英	长石	方解石	云母	其它
强风化砂岩	范围值	2~8	0.16~0.60	30~49	12~32	10~26	8~19	3~16
	平均值	5.9	0.39	38.6	20.3	19.0	12.1	10.0
中风化砂岩	范围值	9~41	0.6~4.6	41~80	4~26	3~25	1~19	0~12
	平均值	20.6	1.72	59	15.1	11.7	8	6.2

由表 1 可知，广西某港航道扩建工程疏浚土质为风化砂岩，风化程度为强风化和中风化。强风化砂岩裂隙发育强烈，岩体较为破碎，完整性很差，单轴饱和抗压强度为 2~8 MPa，饱和抗拉强度为 0.16~0.6 MPa，疏浚岩土工程特性分级为 11~12 级，为极软岩-软岩，且遇水软化，重型绞吸船“天鲲号”绞刀齿在外力作用下入岩顺畅，挖掘较为容易；强风化砂岩经过绞刀破坏、水力作用和管线输送撞击，到达泥塘后呈角砾和卵石混合物。中风化砂岩裂隙发育不强烈，岩体完整性较好，单轴饱和抗压强度为 9~41 MPa，饱和抗拉强度为 0.6~4.6 MPa，疏浚岩土工程特性分级为 12~13 级^[5]，重型绞吸船“天鲲号”挖掘不容易，施工时绞刀刀臂和刀齿磨蚀断裂问题突出，是影响疏浚效率关键土质；特别当单轴饱和抗压强度大于 25 MPa 时，绞刀齿入岩深度减小，在万方刀齿消耗量中断齿比例增加，使得挖掘效率难以控制，给疏浚生产成本控制造成极大风险。

经过 X 衍射矿物频谱分析和显微镜观察，风化砂岩骨架颗粒主要成分为石英、长石、云母和方解石等；颗粒之间钙质胶结，含有少量的黏粒基质，元素以硅和钙最多，其次为铁、钛、铝、钾等元素，石英是最主要的硅质胶结物质，莫氏硬度为 7，石英含量大小和钙质胶结密实程度将决定风化砂岩强度大小，是疏浚挖掘刀齿磨蚀主要微观影响因素。强风化砂岩石英的含量为 30%~49%，平均值为 38.6%；中风化砂岩石英的含量为 41%~80%，平均值为 59%。可见石英含量中风化砂岩是强风化砂岩的 1.53 倍，因此随着风化砂岩石英含量增加，绞刀刀齿入岩深度逐渐减小、刀齿万方磨耗逐渐增加，将导致疏浚挖掘生产率逐渐减小。

2 岩石磨蚀评价理论

影响重型绞吸船挖掘刀齿磨蚀的主要因素是

疏浚岩土的磨蚀性，磨蚀性是疏浚岩土和挖掘设备材料硬度对比的函数，风化岩石硬度取决于所含矿物种类、矿物成分含量、矿物相对硬度和岩石强度。通过风化岩石的物理力学和矿物成分试验，采用加权方法计算风化岩石相对于石英的相对维氏硬度(HVQ_{eq})：

$$HVQ_{eq} = \sum_i^n \left(\frac{h_i}{100} \right) \cdot VH_i$$

(1)

式中：HVQ_{eq}为风化岩石的相对于石英的相对维氏硬度；h_i为矿物成分质量百分比(%)；VH_i为矿物相对于石英的相对维氏硬度，见表 2。

表 2 矿物硬度

矿物类别	莫氏硬度	VH _i
滑石	1.0	0.02
石膏	2.0	0.05
方解石	3.0	0.12
萤石	4.0	0.16
磷灰石	5.0	0.47
正长石	6.0	0.70
石英	7.0	1.00
黄玉	8.0	1.35
刚玉	9.0	1.99
金刚石	10.0	9.00
长石	6.0	0.70
粘土和云母	2.5	0.09
碳酸盐	3.0	0.14
方解石	3.0	0.12
文石(贝壳)	3.5	0.26
白云石	3.8	0.36

疏浚机具等效石英维氏硬度为刀齿 0.54、碳化钨 1.26、管道钢材 0.18。通过疏浚风化岩石与挖掘刀齿的等效石英维氏硬度对比，可定量衡量疏浚风化岩石对疏浚机具磨蚀程度评价。通常，当疏浚风化岩石等效石英维氏硬度/挖掘刀齿的等效石英维氏硬度≤1，表明疏浚风化岩石磨蚀性相对较低；当疏浚风化岩石等效石英维氏硬度/挖掘

刀齿的等效石英维氏硬度>1 时, 表明疏浚风化岩石磨蚀性相对较高。

为了更全面衡量风化岩石特性对挖掘机具磨蚀程度影响, 综合考虑矿物成分种类、矿物含量、矿物硬度、岩石粒度和岩石饱和抗拉强度因素, 可通过采用改进的 Schimazek 值 F 理论来评估岩石材料的磨蚀性:

$$F=BTS\cdot\phi\cdot HVQ_{eq}$$

(2)

式中: HVQ_{eq} 为风化岩石相对于石英的相对维氏硬度; BTS 为岩石饱和抗拉强度(MPa); ϕ 为风化岩石颗粒平均粒度(mm), 本工程风化砂岩取值为 0.2 mm。

基于风化岩石特性指标, 采用计算定量指标改进的 Schimazek 值 F , 将风化岩石对疏浚刀齿的

磨蚀由低磨蚀性-高磨蚀性, 共分为 5 级, 见表 3。

表 3 岩石磨蚀性程度分级

磨蚀性级别	改进的 Schimazek 值 $F/(N\cdot mm^{-1})$
低磨蚀性	<0.05
中等磨蚀性	[0.05, 0.1)
磨蚀性	[0.1, 0.5)
较高磨蚀性	[0.5, 1)
高磨蚀性	[1, 3.5)

3 风化砂岩磨蚀评价指标分析

依托广西某港航道扩建工程, 综合考虑矿物成分种类、矿物含量、矿物硬度、岩石粒度和岩石饱和抗拉强度等因素, 计算了强风化砂岩和中风化砂岩改进的 Schimazek 值 F , 见表 4。

表 4 改进的 Schimazek 值 F

岩石类别	项目	单轴饱和抗压强度/MPa	饱和抗拉强度/MPa	改进的 Schimazek 值 $F/(N\cdot mm^{-1})$	万方刀齿消耗/个	磨蚀性等级
强风化砂岩	范围值	2~8	0.16~0.6	0.014~0.081	6~56	低磨蚀性-中等磨蚀性
	平均值	5.9	0.39	0.046	21	
中风化砂岩	范围值	9~41	0.6~4.6	0.072~0.787	18~175	中等磨蚀性-较高磨蚀性
	平均值	20.6	1.72	0.264	72	

从表 4 可以看出, 强风化砂岩改进的 Schimazek 值 F 平均值为 0.046 N/mm, 范围值为 0.014~0.081 N/mm, 磨蚀性等级为低磨蚀性-中等磨蚀性, 多为中等磨蚀性, 万方平均刀齿消耗 21 个; 中风化砂岩改进的 Schimazek 值 F 平均值为 0.264 N/mm, 范围值为 0.072~0.787 N/mm, 磨蚀性等级为中等磨蚀性-较高磨蚀性, 万方平均刀齿消耗 72 个, 中风化砂岩万方平均刀齿消耗是强风化砂岩万方平均刀齿消耗的 3.43 倍, 因此重型绞吸船挖掘中风化砂岩时, 刀齿消耗量和换齿时间的增加, 严重影响了疏浚船舶效率发挥。

重型绞吸船“天鲲号”采用两泵(水下泵和舱内泵)施工, 管线总长度为 2 700~4 000 m, 流速为 5.3~7.0 m/s, 挖掘刀齿采用挖岩绞刀并配尖齿。基于现场施工日志、项目部报表和船舶存储数据, 统计了挖掘不同强度和矿物含量风化砂岩的刀齿消耗量; 通过风化砂岩力学指标和矿物成分测试结果, 计算得出不同特性风化砂岩改进的 Schimazek 值 F , 选取正常施工的 86 组数据链建立

联系, 进行数据拟合, 得出风化砂岩改进 Schimazek 值 F 与万方刀齿消耗量存在幂函数关系, 见图 1。

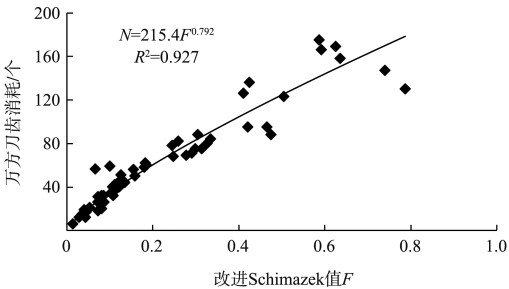


图 1 万方刀齿消耗量和改进 Schimazek 值 F 关系曲线

挖掘风化砂岩时, “天鲲号”万方刀齿消耗量和改进 Schimazek 值 F 之间经验关系为:

$$N=215.4F^{0.792}$$

(3)

式中: F 为改进 Schimazek 值(N/mm), $0.014\text{ N/mm}\leq F\leq 0.787\text{ N/mm}$; N 为“天鲲号”万方刀齿消耗量(个)。

从图 1 可知, 强风化砂岩万方刀齿消耗量为 6~56 个、中风化砂岩刀齿消耗量为 18~175 个, 随着 Schimazek 值 F 增大万方刀齿消耗呈现逐渐增

大趋势。当 *Schimazek* 值 *F* 小于 0.4 N/mm 时, 万方刀齿消耗量离散程度小; 当 *Schimazek* 值 *F* 大于 0.4 N/mm 时, 此时风化砂岩的石英含量在 65% 以上, 单轴饱和抗压强度在 25 MPa 以上, 刀齿消耗离散程度逐渐变大; 当 *Schimazek* 值 *F* 大于 0.62 N/mm 时, 单轴饱和抗压强度在 32 MPa 以上, 绞刀刀齿入岩较浅, 疏浚施工挖掘效率低, 刀齿与风化岩石接触面减小, 刀齿万方磨蚀消耗量反而降低, 主要以受力断裂为主。

4 “天鲲号”挖掘风化砂岩刀齿消耗估算

基于广西某港航道扩建工程, 选取 5 组不同强度的风化砂岩进行岩石性能指标测试, 得出风化砂岩的单轴饱和抗压强度、饱和抗拉强度和矿物含量, 依据万方刀齿消耗量和改进 *Schimazek* 值 *F* 之间经验关系, 估算了“天鲲号”挖掘风化砂岩刀齿消耗量。对应“天鲲号”施工不同特性风化砂岩, 实测了刀齿消耗量, 挖掘风化砂岩刀齿消耗量预测值和实测值对比见表 5。

表 5 刀齿消耗量预测值和实测值对比

岩石类别	单轴饱和抗压强度/MPa	饱和抗拉强度/MPa	矿物成分含量/%					改进的 <i>Schimazek</i> 值 <i>F</i> /(N·mm ⁻¹)	磨蚀性等级	万方刀齿消耗量/个		万方刀齿消耗量相对偏差/%
			石英	长石	方解石	云母	其它			预测	实测	
强风化砂岩	4	0.28	36	25	16	14	9	0.032	低磨蚀性	14	15	-6.6
	8	0.65	48	22	19	5	6	0.086	中等磨蚀性	31	35	-11.9
中风化砂岩	14	1.10	59	20	11	8	2	0.165	磨蚀性	52	57	-9.3
	26	2.50	73	15	6	6	0	0.424	磨蚀性	109	93	17.3
	39	4.20	78	12	5	1	4	0.732	较高磨蚀性	168	146	15.2

注: 万方刀齿消耗量相对偏差=(预测值-实测值)/实测值×100%。

基于表 5 中的挖掘万方风化砂岩刀齿消耗量计算值和实测值, 绘制对比图, 见图 2。

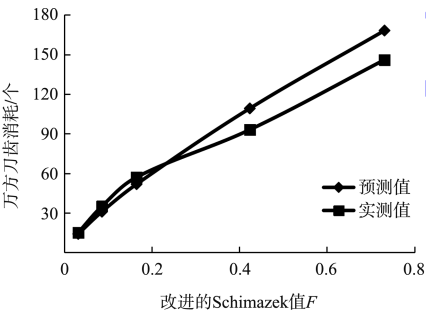


图 2 万方刀齿消耗量计算值和实测值对比

从表 5 和图 2 可以看出, “天鲲号” 重型绞吸船在挖掘风化砂岩时, 利用推导公式计算万方刀齿消耗量, 与实际监测万方刀齿消耗量相对偏差值区间为 -11.9% ~ 17.3%。从曲线的形态可知, 挖掘相同特征风化砂岩, 随着改进 *Schimazek* 值 *F* 增大, 万方刀齿消耗量的实测值和预测值均在变大, 两者趋势一致。改进 *Schimazek* 值 *F* 为 0.25 N/mm 时, 为挖掘万方风化砂岩刀齿消耗量预测值与实测值相对偏差分界线。当改进 *Schimazek* 值 *F* 小于 0.25 N/mm 时, 预测值小于实测值, 相对偏差为 -11.9% ~ -6.6%; 当改进 *Schimazek* 值 *F*

大于 0.25 N/mm 时, 预测值大于实测值, 相对偏差为 15.2% ~ 17.3%。随着风化砂岩磨蚀性增加, 重型绞吸船挖掘破岩的难度增加, 万方刀齿消耗量预测偏差增大。万方刀齿消耗量计算值和实测值的相对偏差绝对值在 17.3% 以下, 推导万方刀齿消耗量和改进 *Schimazek* 值 *F* 关系公式, 在指定工况条件下应用于刀齿消耗量预测的可靠性好, 并可在以后的施工生产中, 利用挖掘岩石磨蚀性理论来预测绞刀齿消耗量, 为疏浚施工投标决策、施工过程的管理控制提供技术支持, 具有重要实际应用价值。

5 结论

1) 基于广西某港航道扩建工程, 分析风化砂岩磨蚀特性, 指出中风化砂岩裂隙发育不强烈、岩体完整性较好, 单轴饱和抗压强度为 9~41 MPa, 饱和抗拉强度为 0.6~4.6 MPa; 石英含量大小和钙质胶结密实程度将决定风化砂岩强度大小, 是疏浚挖掘刀齿磨蚀主要微观影响因素, 中风化砂岩石英含量平均值为 59%, 是强风化砂岩的 1.53 倍, 疏浚岩土工程特性分级为 12~13 级, 重型绞吸船“天鲲号” 挖掘不容易, 施工时绞刀刀臂和刀齿磨蚀

断裂问题突出, 中风化砂岩是影响疏浚效率关键土质。

2) 创新性引入改进的 Schimazek 值 F 理论, 综合考虑矿物成分种类、矿物含量、矿物硬度、岩石粒度和岩石饱和抗拉强度等因素, 来评估岩石材料的磨蚀性。

3) 基于疏浚岩石磨蚀性理论, 推导出“天鲲号”万方刀齿消耗量和改进 Schimazek 值 F 之间公式。

4) 基于推导出的公式, 预测“天鲲号”万方刀齿消耗量计算值和实测值的相对偏差绝对值在 17.3% 以下, 可靠性好, 可为类似工程经营生产提供借鉴。

(上接第 214 页)

[8] 姚强岭, 朱柳, 黄庆享, 等. 含水率对细粒长石岩屑砂岩蠕变特征影响试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(5): 1034-1042, 1051.

[9] 蒋腾健, 赵立财, 余建星. 砂岩蠕变力学特性及流变模型研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(3): 124-128, 133.

[10] 王军保, 刘新荣, 郭建强, 等. 盐岩蠕变特性及其非线性本构模型[J]. 煤炭学报, 2014, 39(3): 445-451.

[11] 苏艳军. 不同干密度条件下的地基土非线性蠕变特性

参考文献:

[1] 王昶皓, 李士斌, 张立刚. PDC 破岩条件下的岩石研磨性评价[J]. 地质与勘探, 2019, 55(3): 850-861.

[2] PICNIC. Classification of soils and rocks for the maritime dredging process [S]. Brussel: The World Association for Waterborne Transport Infrastructure, 2014.

[3] 王旭, 赵羽, 张宝刚, 等. TBM 滚刀刀圈磨蚀机理研究[J]. 现代隧道技术, 2010, 47(5): 15-19.

[4] 屠晓利, 费寿林. 冲击凿岩的岩石磨蚀性[J]. 东北工学院学报, 1992, 13(4): 319-324.

[5] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 中交天津港航勘察设计研究院有限公司. 疏浚与吹填工程设计规范: JTS 181-5—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 225 页)

为便于使用, 将管径 1 m 时的 K_D 推荐值列于表 3。

表 3 管径 1 m 时的 K_D 推荐值

土颗粒粒径/mm	K_D					
	5%	10%	15%	20%	25%	30%
0.1	1 250	650	450	380	320	270
0.5	160	120	98	93	90	86
30	140	105	90	82	72	65
50	125	100	82	72	60	50
100	65	—	—	—	—	—

4 结论

1) 《疏浚与吹填工程设计规范》对 Durand 公式中的 K_D 推荐取值 121, 但经过实际计算, 杜兰德系数的取值大小与输送土颗粒大小、土颗粒浓度有关。

2) 杜兰德系数 K_D 随着土颗粒粒径和土颗粒浓

度的变大而减小, 并逐渐趋于稳定, 本文表 3 总结了不同土颗粒粒径和土颗粒浓度情况下的 K_D 推荐值, 以供参考。

参考文献:

[1] 天津航道局. 疏浚技术 [M]. 天津: 天津航道局, 2001.

[2] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学 [M]. 北京: 科学出版社, 1983.

[3] 胡寿根, 秦宏波, 白晓宁, 等. 固体物料管道水力输送的阻力特性[J]. 机械工程学报, 2002, 38(10): 12-16.

[4] 郝夏楠. 不同雷诺数条件下筒装料管道水力输送的水力特性研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.

[5] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 中交天津港航勘察设计研究院有限公司. 疏浚与吹填工程设计规范: JTS 181-5—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.

(本文编辑 王璁)