



移动射流靶距对冲刷细砂特性影响的 数值模拟*

倪雁¹, 夏保琴², 顾磊²

(1. 中交上海航道勘察设计研究院有限公司, 上海 200120;

2. 河海大学, 疏浚技术教育部工程研究中心, 江苏常州 213022)

摘要: 针对在工程实践中如何设置射流靶距以提高冲刷产能和降低能耗的问题, 开展数值模拟研究。将中值粒径为 0.13 mm 的细砂作为研究对象, 建立移动射流冲刷模型, 通过对比物理模型试验结果对数值模拟参数选取的可靠性进行验证。使用该模型模拟垂直淹没射流冲刷细砂现象, 并分析射流靶距对冲沟深度、冲刷产能及冲刷比能的影响。结果表明: 随着射流靶距的增大, 冲沟深度先增大后减小, 冲刷产能先增大后减小, 冲刷比能先减小后增大; 存在最优靶距, 使得冲刷产能保持较高时消耗尽可能少的能量。

关键词: 移动射流; 靶距; 冲刷; 细砂; 数值模拟

中图分类号: U616+.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)11-0209-06

Numerical simulation of influence of moving jet target distance on fine sand scouring characteristics

NI Yan¹, XIA Baoqin², GU Lei²

(1. Shanghai Waterway Engineering Design and Consulting Co., Ltd., Shanghai 200120, China;

2. Engineering Research Center of Dredging Technology of Ministry of Education, Hohai University, Changzhou 213022, China)

Abstract: Regarding the problem that how to set jet target distance to improve scouring capacity and reduce energy consumption in engineering practice, we carry out a numerical simulation study. Taking fine sand with a median particle size of 0.13 mm as the research object, we build a moving jet scouring model, and verify the reliability of some parameters chosen by comparing with physical test outcome. Then we use this model to simulate vertical submerged jet scouring on fine sand, and analyze effects of target distance on scour depth, productivity and specific energy of jet. The results show that with the increase of moving jet target distance, scour depth first increases and then decreases. Sour capacity first increases and then decreases, while scour specific energy first decreases and then increases. An optimal target distance exists with limited energy consumption but high scour capacity.

Keywords: moving jet; target distance; scouring; fine sand; numerical simulation

射流是现阶段泥沙清淤的有效手段, 由于耙头上多排射流喷嘴的安装位置不同以及施工中耙头角度的不断变化, 都会导致各股射流的实际冲

刷靶距不同。为设计出更高效的耙头, 优化射流冲刷工艺, 并为工程实践提供技术支撑, 有必要开展移动射流靶距对冲刷特性影响的研究。

收稿日期: 2024-02-01

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC0407404); 国家自然科学基金项目(51709094); 江苏省科技成果转化专项资金项目(BA2016143)

作者简介: 倪雁(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口航道工程设计与科学研究。

国内外关于射流冲刷特性影响的研究有很多,冲刷可分为定点和移动冲刷两类。定点冲刷的研究中, Aderibigbe 等^[1-2]通过开展垂向圆柱淹没射流试验,提出射流冲刷强度 E_c 的概念,研究还表明存在一个最优靶距使得冲坑深度最大,增大或减小靶距都会导致冲坑深度减小;李雯等^[3]、张浩等^[4]、顾磊等^[5-6]开展不同射流速度、靶距、泥沙粒径工况下的平面射流冲刷试验,还探讨了单喷嘴与双喷嘴射流冲刷的差异。移动冲刷的研究中, Yeh 等^[7]开展大比尺移动射流冲刷试验,采用最大冲坑深度、冲坑半径及沙丘高度的函数描述冲刷坑形态;白志刚等^[8]、孟然^[9]进行移动双喷嘴射流试验及数值模拟,研究射流速度和喷嘴角度对冲刷效果的影响;高亚平等^[10]进行移动射流试验,探究射流移动速度及沙床坡度对冲刷效果的影响;张芝永等^[11]开展移动射流的数值模拟,研究射流速度及喷嘴移动速度对冲刷效果的影响。但尚未开展移动射流靶距对冲刷特性影响的研究。

由于靶距对冲刷特性的影响停留在射流定点冲刷的研究中,并且以往文献对试验现象的描述较多,对内部机理的解释较为表面。因此,本文以中值粒径为 0.13 mm 的长江入海口泥沙作为研究对象(根据 JTS 133—2013《水运工程岩土勘察规范》^[12]的分类标准,认定该泥沙主要成分属于细砂),在物理试验研究的基础上,用数值模拟的方法研究移动射流对细砂沙床的冲刷情况,探究靶距对冲刷特性的影响。

1 试验装置及数值模型

在水槽实验室中进行移动射流冲刷试验,便于后期对数值模型进行有效性验证。试验装置见图 1,射流喷嘴固定在台车下方,可随台车移动,并与软管相连,电机负责带动台车移动。



图 1 试验装置

根据试验装置,建立冲刷区域的几何模型,见图 2。设置水深为 0.06 m (沙床表面以上),射流喷嘴直径 d 设置为 0.002 m,射流速度 u_{j0} 为 10 m/s,移动速度 v 恒定设置为 0.1 m/s。为探究靶距 S 对冲刷特性的影响,采用单一变量法,参考 Westrich 等^[13]以 $10d$ 为界划分大靶距和小靶距,在 $S/d < 10$ 与 $S/d \geq 10$ 区间中分别设置工况进行数值模拟计算,工况见表 1。因此,试验设置的射流靶距 S 的变化范围为 5~40 mm。

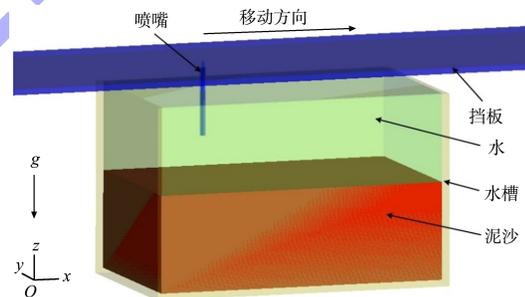


图 2 几何模型

表 1 工况设计

S/d	2.5	5	10	15	20
S/mm	5	10	20	30	40

流体模型计算方程为连续性方程与动量方程,连续性方程的表达式为:

$$V_F \frac{\partial \rho_w}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_w u A_x) + R \frac{\partial}{\partial y} (\rho_w v A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_w w A_z) + \xi \cdot \frac{\rho_w u A_x}{x} = R_{DIF} + R_{SOR} \quad (1)$$

式中: V_F 为流体流动部分的体积分数; ρ_w 为流体密度; t 为时间; u 、 v 和 w 分别为 x 、 y 和 z 方向的速度分量; A_x 、 A_y 和 A_z 分别为流体在 x 、 y 和 z 方向的投影面积; R 、 ξ 为与坐标系相关的参数,

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial u}{\partial y} + wA_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \xi \cdot \frac{A_y v^2}{xV_F} = -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{R_{SOR}}{\rho_w V_F} (u - u_w - \Delta u_s) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial v}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \xi \cdot \frac{A_y uv}{xV_F} = -\frac{1}{\rho_w} \left(R \frac{\partial p}{\partial y} \right) + G_y + f_y - b_y - \frac{R_{SOR}}{\rho_w V_F} (v - v_w - \Delta v_s) \\ \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left(uA_x \frac{\partial w}{\partial x} + vA_y R \frac{\partial w}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = -\frac{1}{\rho_w} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{R_{SOR}}{\rho_w V_F} (w - w_w - \Delta w_s) \end{cases} \quad (2)$$

式中: p 为压力, G_x 、 G_y 和 G_z 分别为 x 、 y 和 z 方向流体重力加速度, f_x 、 f_y 和 f_z 分别为 x 、 y 和 z 方向黏滞加速度, b_x 、 b_y 和 b_z 分别为 x 、 y 和 z 方向流体通过多孔介质或导板的能量损失, u_w 、 v_w 和 w_w 分别为 x 、 y 和 z 方向源项的速度, u_s 、 v_s 和 w_s 为与源相相关的 x 、 y 和 z 方向流体表面速度。

湍流模型采用重整化群(RNG) $k-\varepsilon$ (湍流动能-湍流耗散率) 模型, 在该模型中, 对标准 $k-\varepsilon$ 模型低雷诺数的解析式进行了修正, 边壁效应的精度得到有效提高。因此, RNG $k-\varepsilon$ 模型更适用于一般流态, 也更适用于局部冲刷的模拟运算。

泥沙冲刷模型是数值模拟中的关键模型, 其中参数设置见表 2。关于各参数设置, 本文通过物理模型试验的测量结果获得最大体积分数、泥沙粒径及休止角, 通过公式推导获得临界希尔兹数及推移质系数, 通过试参法获得挟带系数。

表 2 泥沙模型参数

C_v	D_s/mm	$\rho_s/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	θ_{cr}	α	β	$\varphi/(\text{°})$
0.59	0.13	2 650	1.47	0.084	0.1	47

注: C_v 为最大体积分数, D_s 为泥沙中值粒径, ρ_s 为泥沙密度, θ_{cr} 为临界希尔兹数, α 为挟带系数, β 为推移质系数, φ 为休止角。

2 结果与分析

2.1 冲沟形貌

取靶距为 30 mm 的工况, 从冲沟深度与冲沟坡角两个方面进行对比, 冲刷结果见图 3。可以看出, 数值模拟与试验的冲沟深度非常相近。只是冲沟坡角稍有不同, 物理模型试验的结果为 53°,

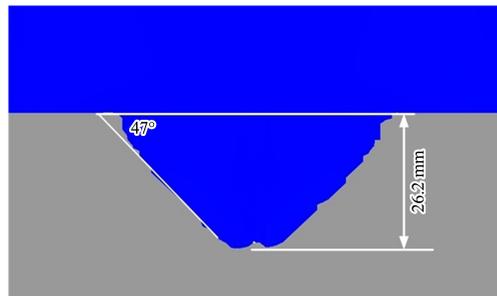
在笛卡尔坐标系中 $R=1$ 、 $\xi=0$; R_{DIF} 为湍流扩散项; R_{SOR} 为质量源项。

流体在 3 个方向上速度分量的动量方程是带有一些附加项的 Navier-Stokes 方程:

数值模拟的结果为 47°。这是由于在数值模拟中, 水下泥沙被认为是松散沙, 颗粒间不存在相互作用力。即使在数值模拟中设置泥沙休止角至 89°, 冲沟发展到一定程度时泥沙颗粒仍会发生滑坡, 导致冲沟坡面的角度增长受到制约; 而在物理模型试验中, 由于泥沙颗粒粒径小, 水下颗粒之间存在的相互作用力会约束滑坡, 因此物理模型试验中观察到的冲沟坡角稍大。整体来看, 数值模拟的参数选取是可靠的。



a) 试验



b) 模拟

图 3 冲刷结果

由于冲沟底部不平整, 冲沟深度取值的随机性会带来较大误差, 难以比较靶距变化对冲刷结

果的影响。因此，冲沟深度取值应统一标准。本文重点关注不同靶距下移动射流的冲刷能力，因此冲沟深度应取刚好完成强剪切冲刷位置的冲沟深度，不考虑水平移动喷嘴远离时产生的尾流刷蚀作用。以统一标准后的冲沟深度作为冲刷效果的量化指标，冲沟深度随射流靶距的变化曲线见图4。

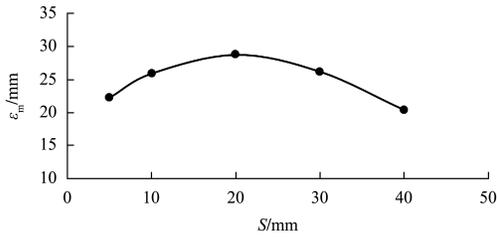


图4 冲沟深度 ϵ_m 随靶距 S 的变化曲线

由图4可看出，靶距对冲沟深度的影响为：在5~40 mm的靶距范围内，随着靶距的增大，冲沟深度先增大后减小。该变化说明，存在最优靶距使得冲沟深度最大；当靶距较大时，可以通过将射流喷嘴下调，即减小靶距的方式，有效提升冲刷效果，然而靶距过小时，冲刷效果又会变差。分析其原因，影响冲沟深度的因素主要有射流水提供的动力、冲沟形貌及泥沙本身产生的阻力。提取不同靶距下冲沟内的密度、速度及湍动能分布云图，见图5~7。

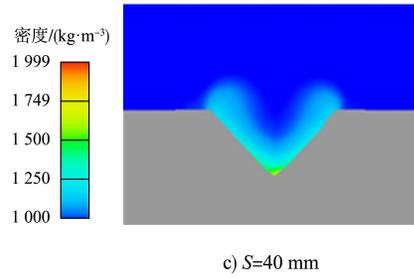
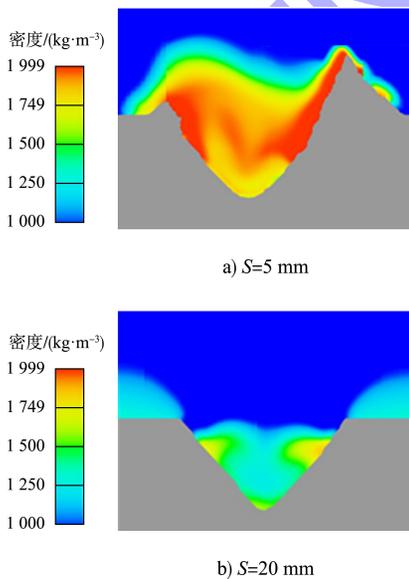


图5 $t=0.6$ s 时不同靶距的密度云图

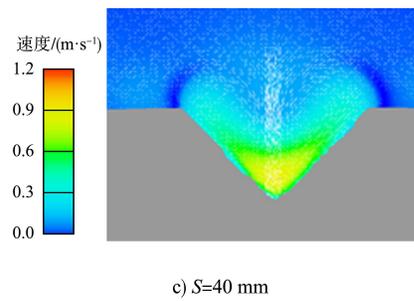
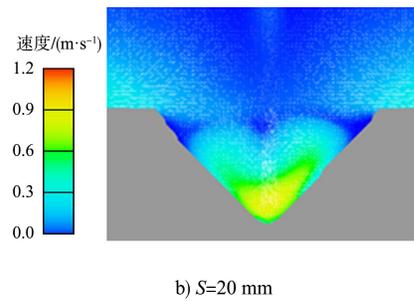
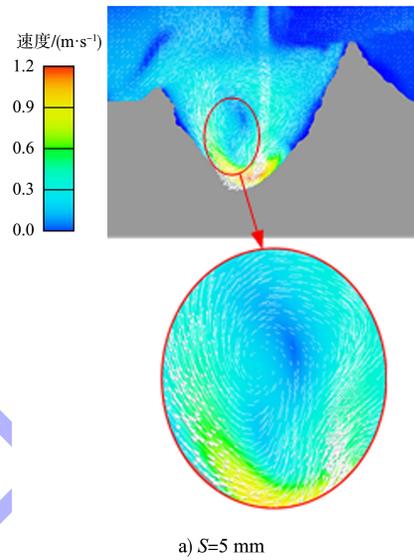


图6 $t=0.6$ s 时不同靶距的速度云图

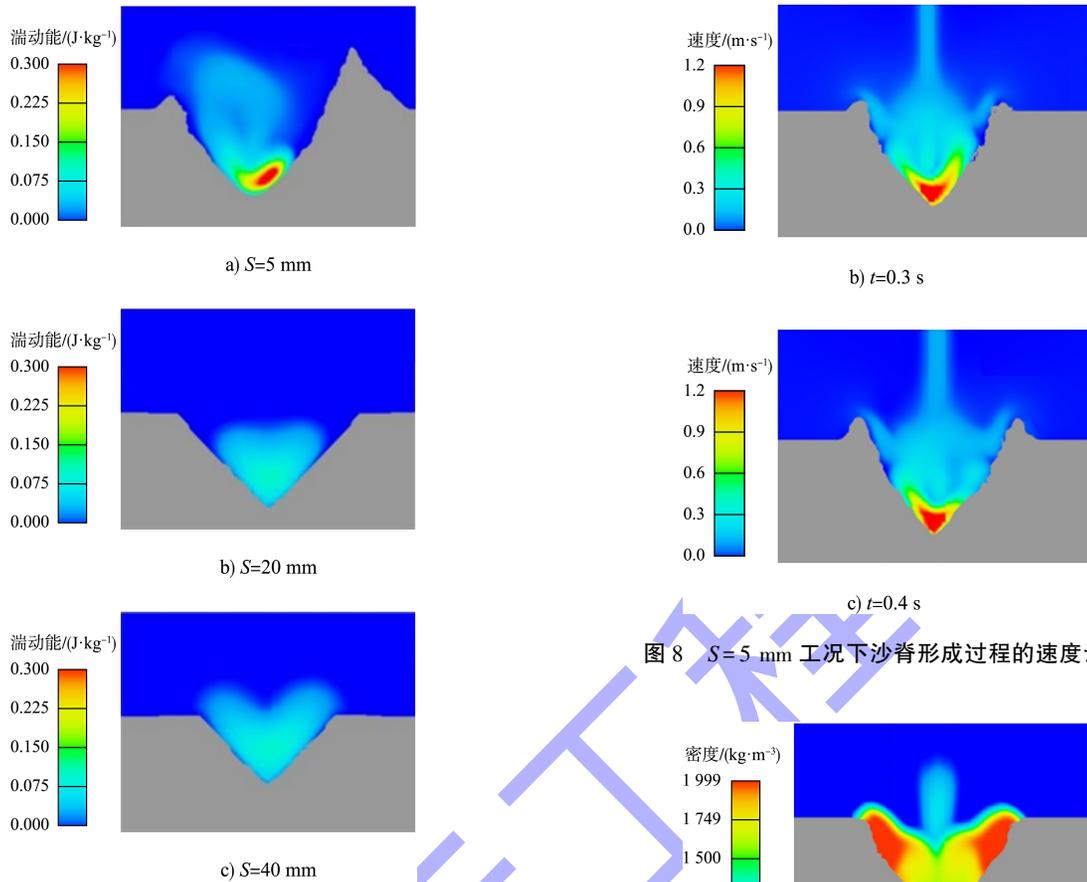


图 7 $t=0.6\text{ s}$ 时不同靶距的湍动能云图

由图 5a)、6a)、7a) 可以看出, 对于 $S=5\text{ mm}$ 的小靶距工况, 冲沟内物质密度高, 射流水在冲坑内形成了漩涡, 泥沙与水在局部高强度相互作用, 引起了较高的局部能量耗散, 导致冲沟内水流速度不足以将冲起的所有泥沙带出冲沟。部分泥沙随漩涡在冲沟内运动, 部分泥沙被甩出冲沟。因此, 在冲沟内高强度的能量耗散下, 冲沟内水流速度较小, 导致泥沙堆积在冲沟两侧逐渐形成了沙脊。沙脊堆积过程的速度、密度分布云图见图 8、9。

图 8 $S=5\text{ mm}$ 工况下沙脊形成过程的速度云图

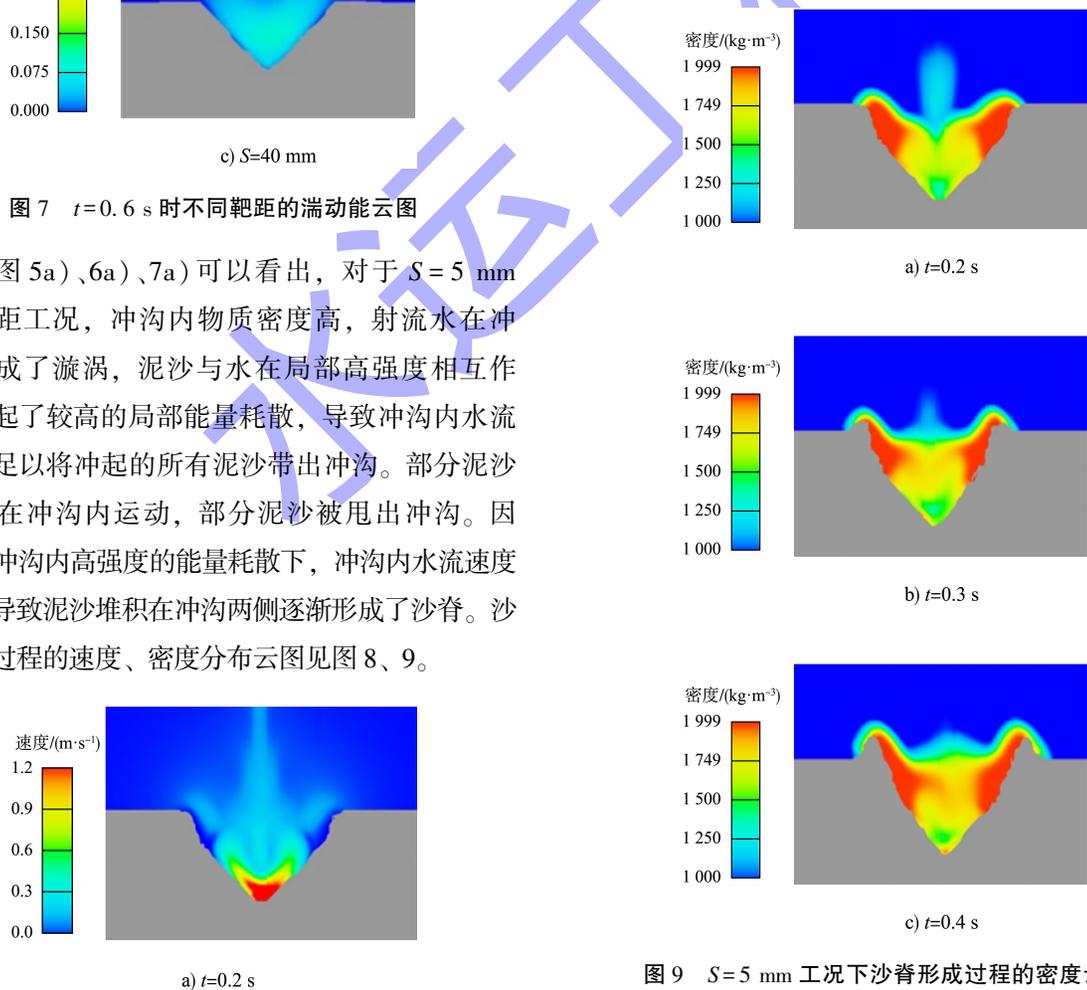


图 9 $S=5\text{ mm}$ 工况下沙脊形成过程的密度云图

由图 5b)、6b)、7b) 可看出, 对于 $S=20\text{ mm}$ 的中靶距工况, 虽然到达沙床的水流能量有所减小, 冲起的泥沙也相应减少, 但冲沟内的水流速度较大, 且未发现局部高强度水沙作用及能量耗散。因此, 冲沟内水流速度足以将大部分泥沙带出冲沟, 进而加深冲沟深度。由图 5c)、6c)、7c) 可看出, 对于 $S=40\text{ mm}$ 的大靶距工况, 射流水在冲刷泥沙床面之前就已耗散了较多能量。靶距越大, 到达泥沙床面的射流水动能越小, 冲起的泥沙越少, 冲沟深度越浅。随着冲刷的进行, 当冲沟底部能量不足以再将泥沙冲起时, 冲沟深度则不再发展。

以上论述解释了随着射流靶距的逐步增大, 冲沟深度先增大后减小的物理原因。

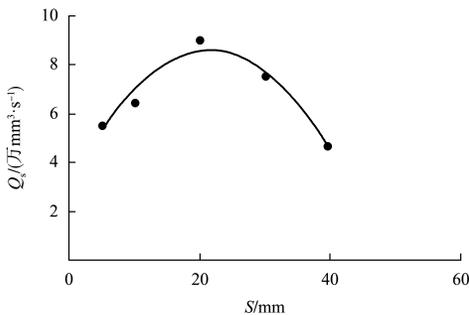
2.2 冲刷产能

从工程实际出发, 理想的施工目标是用最少的射流能量获取最大的冲刷产能。因此, 关键参数还有冲刷产能和冲刷能耗。其中, 冲刷产能 Q_s 为单位时间内冲刷的泥沙体积, 冲刷比能为冲刷单位体积泥沙所消耗的能量, 用 E_{sp} 表示。

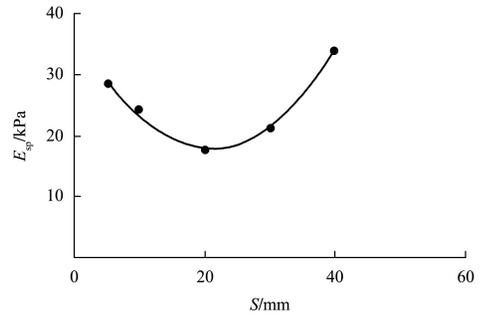
冲刷比能的计算公式为:

$$E_{sp} = \frac{\pi}{8} \rho_w u_{j0}^3 d^2 / Q_s \quad (3)$$

提取冲刷产能 Q_s 及冲刷比能 E_{sp} 随靶距 S 的变化曲线, 见图 10。可以看出, 随着射流靶距的增大, 冲刷产能先增大后减小, 与冲沟深度变化趋势相同; 随着射流靶距的增大, 冲刷比能先减小后增大。因此, 在本文工况下, 存在最优靶距 $S=20\text{ mm}$ 使得冲刷比能最小, 冲刷最为经济。



a) 冲刷产能随靶距的变化曲线



b) 冲刷比能随靶距的变化曲线

图 10 冲刷产能、冲刷比能随靶距的变化曲线

3 结论

- 1) 通过对比物理模型试验结果, 对建立的移动射流冲刷模型参数选取的可靠性进行验证。该模型可以成功模拟垂向淹没射流冲刷细砂的过程。
- 2) 数值模拟研究发现, 随着移动射流靶距的增大, 冲沟深度先增大后减小, 冲刷产能先增大后减小, 冲刷比能先减小后增大。
- 3) 在本文研究的射流靶距与泥沙粒径范围内, 存在最优靶距, 可使冲刷产能保持较高时消耗尽可能少的能量, 对射流节能减排具有参考价值。

参考文献:

[1] ADERIBIGBE O, RAJARATNAM N. Erosion of loose beds by submerged circular impinging vertical turbulent jets [J]. Journal of hydraulic research, 1996, 34 (1): 19-33.

[2] ADERIBIGBE O, RAJARATNAM N. Effect of sediment gradation on erosion by plane turbulent wall jets [J]. Journal of hydraulic engineering, 1998, 124 (10): 1034-1042.

[3] 李雯, 倪福生, 王建军. 靶距对淹没射流冲刷沙床影响的数值模拟 [J]. 科学技术与工程, 2014, 14 (29): 290-294.

[4] 张浩, 倪福生, 顾磊. 某靶距下射流垂直冲刷坑深的实验研究 [J]. 科学技术与工程, 2014, 14 (2): 238-240.

[5] 顾磊, 倪福生, 李雯, 等. 喷嘴间距对双股平面射流冲刷的影响 [J]. 泥沙研究, 2016 (6): 32-37.

(下转第 235 页)