

· 综 合 ·



垂直淹没射流对泥沙冲刷效果影响的试验研究*

张贡赫¹, 陈加琦¹, 史鸿博¹, 王希坤¹, 方玉建²

(1. 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013;

2. 浙江省水泵产品质量检验中心, 浙江 温岭 317599)

摘要:为了研究垂直淹没射流中各因素对泥沙冲刷效果的影响规律, 利用自行设计搭建的射流冲刷试验系统, 基于“半模型”理论进行试验, 通过摄像机和图像处理软件得到随冲刷参数 E_c 变化的冲坑形态, 以及射流速度、靶距、喷嘴直径对冲坑尺寸的影响规律。结果表明, 冲坑深度随冲刷时间的增加先迅速增大、后缓慢增大直至稳定状态, 在此过程中, 冲坑形状保持几何相似性; 冲坑尺寸随射流速度的增加而增加, 动态冲坑深度明显大于静态冲坑深度。此外, 通过试验得出了使冲坑深度达到最大值的最佳射流靶距。研究结果可为射流清淤的实际工程应用提供参考。

关键词:淹没射流; 泥沙冲刷; 冲击射流; 射流靶距; 冲坑

中图分类号: U 616

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)12-0017-08

Experimental study on influence of vertical submerged jet on sediment scour effect

ZHANG Gong-he¹, CHEN Jia-qi¹, SHI Hong-bo¹, WANG Xi-kun¹, FANG Yu-jian²

(1. Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Zhenjiang 212013, China;

2. Quality Inspection Center for Pump Products in Zhejiang Province, Wenling 317599, China)

Abstract: To study the effects of various factors of a submerged vertical jet on sediment scour process, a jet scouring test system has been designed and built based on the “semi-model” theory. Through image capturing and processing technique, variations of the scour hole shape with the scour parameter E_c are obtained, which takes into the account the influence of jet velocity, target distance and nozzle diameter. The results show that initially the scour hole depth increases rapidly and then increases slowly towards reaching equilibrium state, during this process, the shape of the scour hole maintains geometric similarity. The size of the scour hole increases with the increase of jet exit velocity, whereas the dynamic scour hole depth is significantly greater than the static scour hole depth. In addition, the optimum jet target distance is obtained through the tests, at which the depth of the scour hole reaches the maximum. The results can provide useful reference for the practical engineering application of jet dredging.

Keywords: submerged jet; sediment erosion; impinging jet; jet target distance; scour hole

射流在疏浚工程中有着广泛应用。比如, 射流清淤技术因其结构简单、性能可靠等优点被广泛应用于河道、航线等水域的清淤工作^[1], 但是其清淤能力的大小与众多因素有关, 机理十分复杂。

国外学者早在 20 世纪已开始对射流冲刷进行理论和试验方面的研究, Nallamuthu 等^[2]对圆形喷

嘴冲击射流进行研究并将流场分为自由射流区、冲击射流区和贴壁射流区。Aderibigbe 等^[3]针对垂直淹没射流冲刷进行大量试验, 对冲刷轮廓进行分析, 引入冲刷参数 E_c , 建立了冲坑特征尺寸的经验公式。Westrich 等^[4]探究了冲坑尺寸与冲刷时间的关系, 发现最大深度和宽度都随冲刷时间对数线性增加。李文学等^[5]针对黄河潼关段进行了

收稿日期: 2022-04-08

*基金项目: 国家自然科学基金项目(52079057;52106043)

作者简介: 张贡赫(1998—), 男, 硕士, 研究方向为射流冲刷泥沙特性研究。

70 组射流冲刷试验，探究冲刷坑几何尺寸与射流流速、喷嘴直径的关系，但基于试验条件的限制，射流流量可调节范围设置较小。齐梅兰等^[6]通过水槽试验分析观察冲刷平衡时最大冲刷深度的变化规律，并建立了平衡深度关系式。张浩等^[7]使用不同粒径的模型沙进行垂直射流试验研究，对比不同沙床条件下的清淤效果，得出不同速度条件下的冲坑形状具有几何相似性。董传明等^[8]采用注浆成型法获取冲刷挖掘体积，并可直观衡量冲刷效果。刘超等^[9]采用粒子图像测速法(PIV)对水垫塘内斜向淹没射流的紊流流场特性进行研究，分析了流场的瞬时信息及水力特性。申振等^[10]针对粗沙和中沙进行不同靶距的淹没射流试验，发现最优靶距可使冲坑深度达到最大值，冲刷初期冲坑深度随时间成对数规律发展。夏保琴等^[11]利用泥沙冲刷模型进行数值模拟，发现淹没水深的变化对冲刷效果并无明显影响。刘思源^[12]对二维垂直淹没射流冲刷沙床进行数值模拟，分析了泥沙粒径对沙床冲刷的影响，发现最大冲坑深度与粒径成负相关。

综上所述，射流冲刷是一个极其复杂的问题，国内外学者进行了大量的试验研究，发现平衡状态下的冲坑尺寸受到多因素的影响，主要与以下因素有关：

$$L = f\{U_0, h, D, \rho, v, d, \Delta\rho\} \quad (1)$$

式中： L 为冲坑的特征长度 (mm)； U_0 为喷嘴处射流速度 (m/s)； h 为射流靶距 (即喷嘴出口与初始沙床高度差 mm)； D 为喷嘴直径 (mm)； ρ 为射流流体密度 (kg/m^3)； v 为射流流体的黏性 (m^2/s)； d_{50} 为沙粒的中值粒径 (mm)； $\Delta\rho$ 为固液两相的密度差 (kg/m^3)。

前人对冲坑尺寸的测量大多使用探针，精确度不足，也有学者采用透明坐标纸作为参照读取尺寸数值，但测量结果受坐标纸最小刻度限制，且对于动态冲坑的瞬态测量操作不便。此外，因为试验条件的限制，之前的研究射流流量变化范围较小，对冲刷开始后短时间内的冲坑变化和悬沙特性研究较少。因此，本文基于“半模型”理论观察分析射流冲刷过程中粗沙冲坑在一定时间

内的发展变化，并通过摄像机和图像处理软件对数据进行处理，分析宏观和微观角度下的射流冲刷效果，探究射流速度、靶距、喷嘴直径对冲坑尺寸的影响规律。

1 试验设计

为了验证各影响因素下冲坑尺寸及泥沙悬浮情况，自行设计并搭建了射流冲刷试验系统，见图 1。试验所用泥沙放置在 80 cm×80 cm(宽×深)的玻璃水槽中，水槽底部设置溢流口与左侧水槽及水箱相连，从而保证试验在固定水位高度上进行，提供一个稳定可循环的淹没射流环境。射流装置固定在水槽上方，喷管通过夹具固定在滑块上，松动夹具可调节喷管上下移动从而获得不同喷射靶距，同时喷管通过软管与水泵相连，通过调节阀门控制不同流量并采用电磁流量计测量。系统采用 Pagliara 等^[13]提出的“半模型”射流方法，通过引入 1 个玻璃平面模拟半模型的射流，更有利于冲刷过程的实时观测，等效喷嘴直径 $D^* = \sqrt{2}D$ ，使半模型与实际模型射流速度相同，冲坑尺寸的误差可以忽略。通过透明玻璃观察动态冲刷过程，并确定冲刷达到稳定的时间。在冲刷截面正前方放置 1 台摄像机(频率为 25 帧/s)对冲刷过程进行实时拍摄记录，将采集到的图像逐帧导出，通过图像处理软件对冲坑尺寸进行测量分析，操作更为简单，数据更为精确可靠。

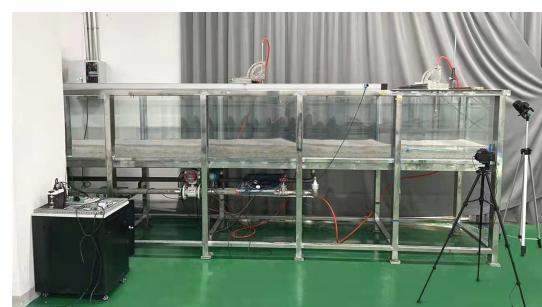


图 1 射流冲刷系统试验台

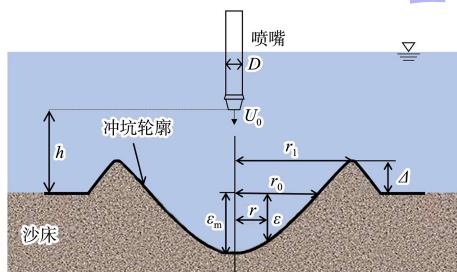
模型沙的选择对试验成果的可靠性具有极其重要的影响，较小粒径的沙粒静止状态下比较密实，受到冲击后具有较强的流动性。以沙粒中值粒径 d_{50} 反映沙粒粒径大小，试验所用沙粒粒径 d_{50}

为 2.4 mm, 密度为 $2\,650 \text{ kg/m}^3$ 。试验前对沙粒试样进行冲洗、干燥、筛分, 去除试样中的杂质。水槽内沙床初始高度设置为 300 mm, 喷管为 800 mm 长的不锈钢管, 保证水流达到充分湍流状态, 喷嘴采用收缩角为 13° 的锥形喷嘴, 保证射流衰减最慢, 效率最高。基于单因素方法依次改变射流速度、喷射靶距、喷嘴直径, 观察不同时刻下冲坑形态的变化, 通过视频软件对拍摄的视频进行逐帧处理, 对比分析各影响因素对冲坑尺寸的影响, 试验参数设计为: 等效喷嘴直径 D^* 分别取 11.31、14.14、16.97 mm; 射流靶距 h 分别取 50、100、150、200、250、300、350、400 mm; 射流流量 Q 分别取 0.42、0.56、0.81、0.92、1.10、1.30 m^3/h 。

2 试验结果与分析

2.1 射流冲坑形态

由于实际工程的需要, 冲坑的形态和尺寸是学者最关心的问题, 涉及到的主要参数见图 2。



注: ε 为任一时刻与喷嘴中轴线距离为 r 的冲坑深度; ε_m 为最大冲坑深度; r_0 为原始沙床高度处的冲刷坑半径; r_1 为沙脊峰值位置处到射流中线处的距离; Δ 为沙脊高度; U_0 为射流出口速度; D 为喷嘴直径; h 为射流靶距。

图 2 冲坑参数

在垂直射流的工况下, 水经过喷嘴射流冲击沙床, 形成对称分布的沙坑形状, 结合 Aberibigbe 等的研究结果, 引入冲刷参数 E_c :

$$E_c = U_0 \cdot \frac{D}{h} \cdot \frac{1}{\sqrt{g d_{50} \frac{\Delta \rho}{\rho}}} \quad (2)$$

式中: U_0 为射流出口速度 (m/s); D 为喷嘴直径 (本文采用等效直径 D^* , mm); h 为射流靶距 (mm); g 为当地重力加速度 (m/s^2); d_{50} 为泥沙中

值粒径 (mm); $\Delta \rho$ 为水沙两相密度之差 (kg/m^3); ρ 为水的密度 (kg/m^3)。

图 3 为冲坑试验及冲坑形态。当 $E_c > 2.00$ 时 (试验 1), 冲坑呈现第 I 种形态, 射流较大程度穿透河床, 形成强偏转射流, 垂向冲坑深度较大, 径向宽度较小; 当 E_c 值在 $0.35 \sim 2.00$ 时 (试验 2), 冲坑呈现第 II 种形态, 垂向冲坑深度有所减小, 径向宽度有所增大, 冲坑内形成旋涡, 可以观察到冲刷坑的底部; 当 $E_c < 0.35$ 时 (试验 3), 冲坑呈现第 III 种形态, 射流对沙床的冲击作用很弱, 射流将推移质沿冲坑轮廓将泥沙冲出, 悬移质存在较少。

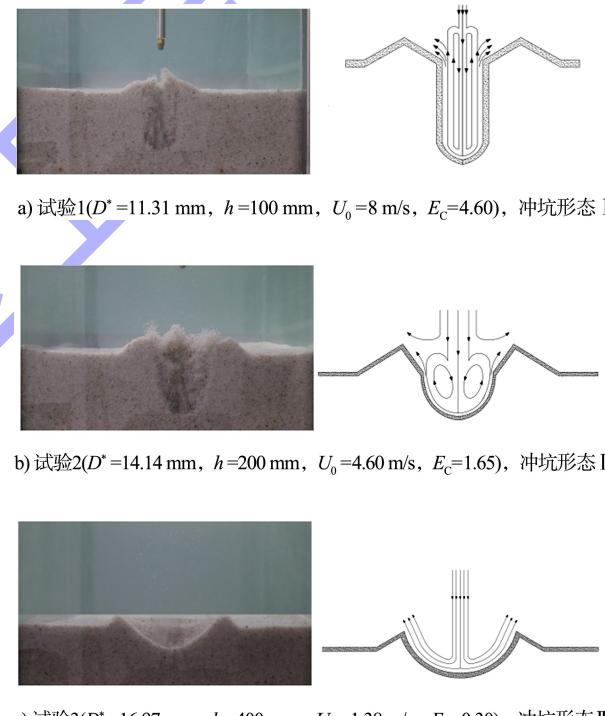


图 3 冲坑试验及冲坑形态

随着 E_c 值的减小, 冲刷过程达到平衡的时间逐渐变长。这是由于射流过程中, 水流会对周围的水体产生卷吸作用, 流速降低的同时也会增加流量, 从而导致冲坑形态 I 向形态 III 改变, 径向距离增大的同时, 偏转射流的输送能力降低, 导致沉积物不能完全从冲刷坑冲出, 同时沙脊处的泥沙由于重力作用向沙坑底部滑动, 达到平衡的时间有所延长。当射流停止, 悬浮和沉积的部分颗粒出现滑动, 填补冲刷过程中的动态冲坑, 形

成尺寸范围更小的静态冲坑。

2.2 冲刷坑的几何相似性

冲刷坑的几何相似性是指针对相同粒径沙床进行的所有试验在所有时刻的冲刷坑剖面在经过无量纲化处理后，可以叠加在一起并用同一曲线进行描述。为了研究冲刷坑的几何相似性，选取4组工况的稳定冲刷坑进行无量纲化处理，以 r/b 作为横坐标，以 $\varepsilon/\varepsilon_m$ 作为纵坐标。将相同靶距($h=200$ mm)不同射流速度和喷嘴直径下的稳定动态冲刷坑叠加，见图4。结果参考Aderibigbe等的研究成果，发现公式(3)能够很好地描绘无量纲曲线，表明冲刷坑形态具有几何相似性。

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon_m} = -\exp \left[-0.693 \left(\frac{r}{b} \right)^2 \right] \quad (3)$$

式中： ε 为冲刷深度(mm)； ε_m 为最大冲刷深度(mm)； r 为冲刷坑宽度(mm)； b 为达到 $1/2\varepsilon_m$ 的冲刷坑宽度(mm)。

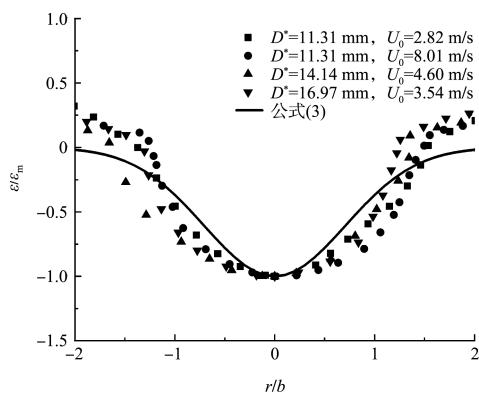


图4 不同工况下稳定冲刷坑的几何相似性

2.3 射流时间对冲刷效果的影响

在实际工程中，除了关注冲刷坑最大深度，冲刷过程中的动态冲刷坑尺寸变化也具有重要意义。为了对冲刷效果进行研究，观察各工况下冲刷坑的发展变化，发现冲刷坑呈现相似的发展规律。选取 $D^* = 11.31$ mm, $h = 200$ mm, $U_0 = 3.48$ m/s工况下不同时刻的冲刷坑形态(图5)，定性地展示了射流在一定时间内的冲刷坑由浅入深之后保持稳定的变化过程。从射流开始到20 s过程中，冲刷深度不断增大；20~600 s范围内，冲刷深度增加缓慢，冲刷坑宽度不断增加；到600 s时冲刷坑尺寸基本稳定。



a) $t = 2$ s



b) $t = 4$ s



c) $t = 6$ s



d) $t = 10$ s

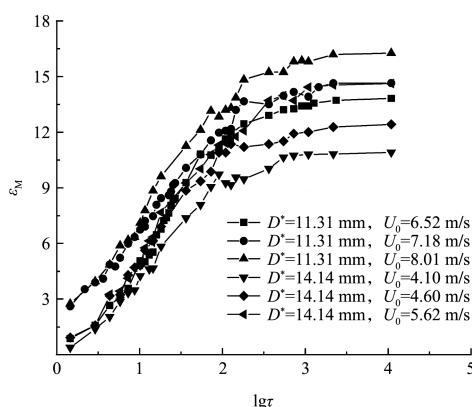


e) $t = 20$ s

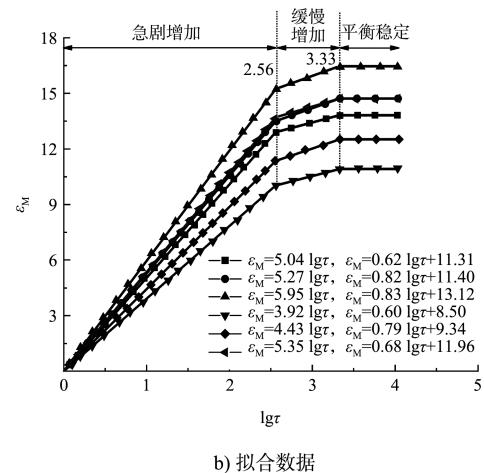
f) $t = 100 \text{ s}$ g) $t = 300 \text{ s}$ h) $t = 600 \text{ s}$

图 5 冲坑形态随时间的发展演变

图 6 为不同工况下冲坑深度随时间的变化规律。记录 $D^* = 11.31, 14.14 \text{ mm}$ 时不同射流速度下冲坑深度的变化情况, 将冲坑深度和时间进行无量纲化处理后见图 6a), 其中 $\varepsilon_M = \varepsilon_m/D^*$, $\tau = (gd_{50} \cdot \Delta\rho/\rho)^{1/2} \cdot t/D^*$ 。



a) 试验数据



b) 拟合数据

图 6 不同工况下冲坑深度随时间的变化规律

由图 6 可知: 射流冲刷前期, 冲坑深度成线性变化, 随着冲刷时间的增加, 冲坑深度增加速率变缓, 随后冲坑深度基本保持稳定, 大致可分为 3 个阶段:

1) 急剧增加阶段 ($lg\tau \leq 2.56$)。水从喷嘴中喷出之后, 形成稳定射流, 到达非黏性沙床后迅速将沙粒冲开, 流线发生偏转, 大量沙粒被携带出冲坑形成沙丘, 冲坑尺寸迅速增加。

2) 缓慢增加阶段 ($2.56 \leq lg\tau \leq 3.33$)。随着流线的偏转, 冲坑中形成旋涡, 将部分沙粒甩出沙坑, 随着时间的增加, 冲坑深度不断增加但增加速度变缓, 因为随着冲刷深度的不断增加, 射流需要克服更大的阻力到达冲坑底部, 从而对泥沙的冲刷作用减弱, 推移质沙粒无法移动, 部分悬移质被甩出沙坑。

3) 平衡稳定阶段 ($lg\tau \geq 3.33$)。当冲坑深度达到一定尺寸, 射流冲击最深处的泥沙达到临界状态(即沙粒所受的曳力等于沙粒的重力与所受阻力的合力), 无法被带出冲坑, 存在悬移质被冲起但无法超过沙脊宽度, 而从沙脊滑落的沙粒量与沙坑中被冲起的沙粒量达到动态平衡, 冲坑深度达到基本稳定。

2.4 射流速度对冲坑深度的影响

为了探究射流速度对冲坑尺寸的影响, 通过固定射流靶距 $h = 200 \text{ mm}$, 采用 3 种不同直径的喷嘴

进行试验研究, 即 $D^* = 11.31, 14.14, 16.97 \text{ mm}$ 。不同射流速度工况下冲坑尺寸的变化见图 7, 结果参考刘成等^[14]的研究成果, 公式(4)可以很好地描述静水环境下垂直淹没射流的冲刷坑尺寸:

$$\frac{\varepsilon_m}{D^*} = KFr^{a_1} \cdot \left(\frac{h}{D^*}\right)^{a_2} \cdot \left(\frac{d_{50}}{D^*}\right)^{a_3} \quad (4)$$

式中: K 为无量纲的比例常数; a_1, a_2, a_3 为待定指数; Fr 为喷嘴出口弗劳德数, 定义如下:

$$Fr = \frac{U_0}{\sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} g D^*}} \quad (5)$$

试验数据与公式(4)拟合较好, 其中 $(h/D^*)^{a_2}$ 和 $(d_{50}/D^*)^{a_3}$ 拟合后近似值为 1, 可忽略不计。保持其他因素不变, Fr 和 U_0 成正相关, 图中可以看到 ε_m 随 U_0 的增加而增加, $D^* = 16.97 \text{ mm}$ 工况下的冲坑深度及增长速度明显高于 $D^* = 11.31 \text{ mm}$ 工况。

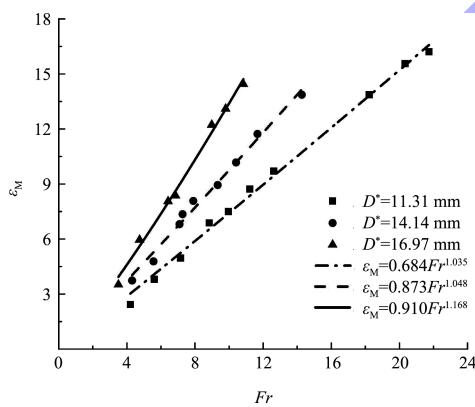


图 7 喷嘴出口 Fr 对冲坑深度的影响

图 8 为 $D^* = 11.31 \text{ mm}$ 、 $h = 200 \text{ mm}$ 工况下冲坑特性尺寸的变化趋势, 可以看出, 随着射流速度的增加, 冲坑宽度和沙脊高度呈线性增加趋势。随着射流速度的增加, 射流用于冲击沙床的能量增加, 更有利于将沙粒冲起, 沿沙坑轮廓输送形成沙脊。

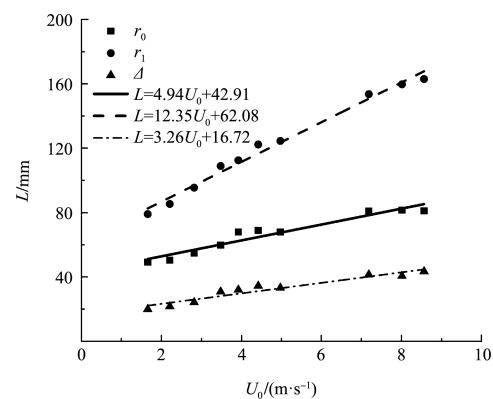


图 8 射流速度对冲坑尺寸的影响

2.5 射流靶距对冲坑深度的影响

选取 $D^* = 16.97 \text{ mm}$ 的喷嘴, 固定流量为 $Q = 0.56 \text{ m}^3/\text{h}$, 根据流量公式计算得喷嘴出口流速 $U_0 = 0.69 \text{ m/s}$, 保持出口流速不变, 改变靶距 h 进行试验。图 9a) 为不同射流靶距下的冲坑深度, 可以看到冲坑深度呈先增加后减小的趋势, 当射流靶距从 0 开始增加时, 射流沿径向拓展, 射流冲击沙床损失较小, 从而携带沙粒沿冲坑轮廓冲出冲坑, 冲坑深度增大。但射流靶距继续增加, 水从喷嘴喷出到达沙床的路径距离增大, 需要克服更大的阻力, 用于冲刷的能量相应减少。动态冲坑在 $h = 100 \text{ mm}$ 附近达到最大值为 56.06 mm , 而静态冲坑在 $h = 250 \text{ mm}$ 附近达到最大值为 33.35 mm 。由于推移质和悬移质的共同作用, 动态冲坑深度明显高于静态冲坑深度, 且出现最大冲坑深度时的对应靶距值不同。自出现静态冲坑最大深度后, 动态冲坑和静态冲坑深度基本保持一致, 这是由于当射流靶距增加到一定程度, 沙坑中无悬移质存在, 冲坑尺寸基本稳定, 停止射流后无明显变化。图 9b) 为 $D^* = 14.14 \text{ mm}$ 喷嘴射流动静冲坑深度随射流靶距的变化, 射流靶距小于 150 mm 时, 冲坑深度较大, 悬移质难以到达沙床面, 无法冲出, 停止射流后由于重力作用下落填补冲坑, 导致静态冲坑深度保持 20 mm 基本不变。

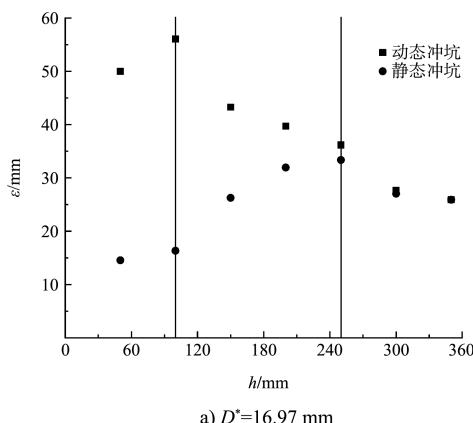
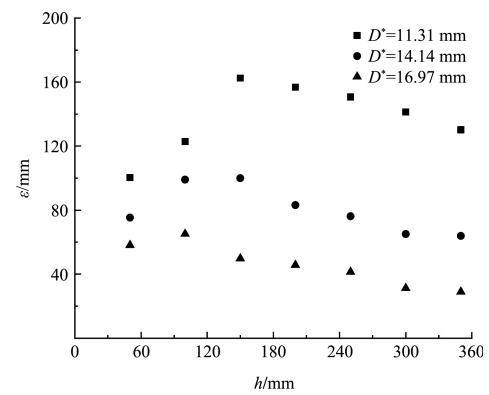
a) $D^* = 16.97 \text{ mm}$ 

图 10 动态冲坑深度随射流靶距的变化规律

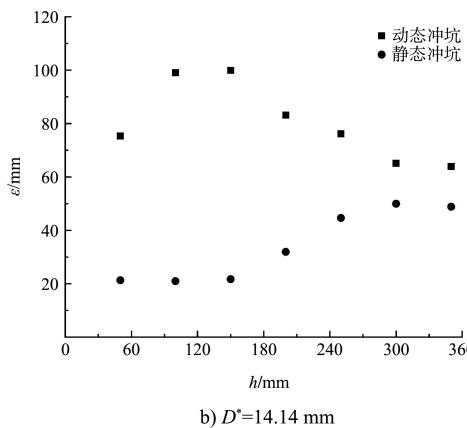


图 9 射流靶距对动、静冲坑深度的影响

为了探究不同直径喷嘴工况下射流靶距对冲坑深度的影响, 选取 3 种不同直径的喷嘴, 固定射流流量 $Q = 0.56 \text{ m}^3/\text{h}$, 对射流靶距的影响进行研究。由图 10 可以看出, 3 种不同直径条件下冲坑深度呈现出相似的变化趋势: 随着射流靶距的增大, 冲坑深度先增大后减小, 即存在最优射流靶距。在 $D^* = 11.31$ 、 14.14 、 16.97 mm 的工况下, 最佳射流靶距分别为 150 、 150 、 100 mm , 且相较于 $D^* = 16.97 \text{ mm}$, $D^* = 11.31$ 、 14.14 mm 在最佳喷射靶距处的最大冲坑深度分别增加 149.4% 和 53.4% 。这是由于固定射流流量时, 射流速度 U_0 与 D^{*2} 成反比关系, 喷嘴直径的减小有利于射流速度的大幅提高, 增加了 E_c 值, 冲坑坑型向 I 型转变, 穿透沙床形成强偏转射流, 增加冲坑深度。试验结果与 Aderibigbe 等提出的经验公式进行对照(图 11), 验证了试验结果的可靠性。

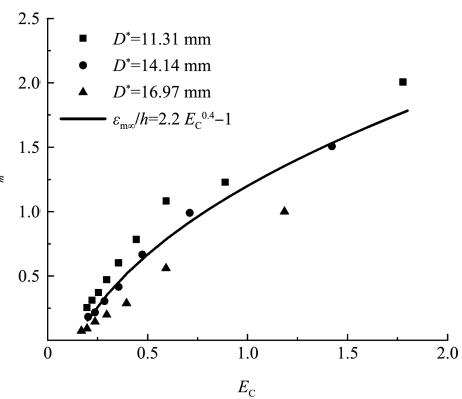


图 11 冲刷深度随冲刷参数的变化规律

3 结论

- 1) 垂直淹没射流冲击形成的冲刷坑的形态可以根据冲刷参数 E_c 进行划分, 冲坑剖面轮廓在冲刷过程中的任何时刻具有几何相似性。
- 2) 冲坑深度随冲刷时间的推移可分为 3 个阶段, 即: 迅速增大阶段、缓慢增大阶段和保持稳定阶段。若给定工况, 可以通过线性拟合方程对冲坑深度的演变进行预测。
- 3) 在其他参数保持不变的情况下, 减少喷嘴直径和增大射流速度有利于提高冲坑深度。
- 4) 冲坑深度随射流靶距的增加呈先增加后减小的趋势, 最优靶距可使冲坑深度达到最大值, 且动态冲坑深度明显大于静态冲坑深度。

参考文献:

- [1] 倪福生.国内外疏浚设备发展综述[J].河海大学常州分校学报, 2004(1): 1-9.

- [2] NALLAMUTHU R, SPYRIDON B Erosion by impinging circular turbulent jets[J]. Journal of hydraulics division, 1977, 103(10) : 1191-1205.
- [3] ADERIBIGBE O O, RAJARATNAM N. Erosion of loose beds by submerged circular impinging vertical turbulent jets. Journal of hydraulic research, 2010, 134 (1) : 19-33.
- [4] WESTRICH B, KOBUS H. Erosion of a uniform sand bed by continuous and pulsating jets[C]//Proceedings of the 15th international association for hydraulic research congress, Istanbul: [s.n.], 1973(A13) : 1-8.
- [5] 李文学, 张隆荣, 张原锋, 等. 射流冲刷试验研究[J]. 泥沙研究, 1999(4) : 7-13.
- [6] 齐梅兰, 府仁寿, 陈稚聪. 射流冲刷平衡深度研究[J]. 水动力学研究与进展(A 辑), 2005(3) : 368-372.
- [7] 张浩, 王姗姗, 秦振, 等. 不同砂床条件下垂直射流清淤的试验探究[J]. 海河水利, 2021(4) : 63-65.
- [8] 董传明, 张民曦, 喻国良. 垂直淹没射流对黏性底床冲刷挖掘体积的试验研究[J]. 水运工程, 2022 (2) :
- [9] 刘超, 李龙国, 李乃稳. 利用 PIV 技术对淹没射流瞬时流场特性的研究[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(3) : 471-475, 509.
- [10] 申振, 徐立群, 张浩, 等. 射流作用下不同沙床动态冲坑变化规律的试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(2) : 182-185.
- [11] 夏保琴, 倪福生, 顾磊. 淹没水深对射流冲刷泥砂影响的数值模拟[J]. 机械设计与制造工程, 2020, 49 (6) : 72-75.
- [12] 刘思源. 泥沙粒径及射流速度对沙床冲刷的影响[J]. 人民长江, 2017, 48(23) : 79-83, 99.
- [13] PAGLIARA S, HAGER W H, UNGER J. Temporal evolution of plunge pool scour[J]. Journal of hydraulic engineering, 2008, 134(11) : 1630-1638.
- [14] 刘成, 何耘, 韦鹤平. 圆形射流冲刷疏松淤泥沙的研究[J]. 泥沙研究, 2001(3) : 40-45.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 11 页)

5) 要求充分发挥自贸港和自贸试验区探路优势, 深化体制机制创新。随着改革向纵深推进, 我国更加注重强化体制机制创新, 激发新发展活力。新发展格局下, 需要充分发挥自贸试验区、自由贸易港等先行先试、示范引领作用, 对标国际最高标准, 打造水运改革开放和政策创新的高地, 助力改善口岸营商环境, 完善行业治理能力。目前, 海南自贸港、上海自贸试验区等已在积极探索“境内关外”口岸监管模式, 以及拓展国际中转集拼、进口消费品分拨、保税燃供等多种港口服务。未来, 我国水运系统将进一步扩大开放力度, 打造更加国际化的港航、物流、贸易及产业平台, 促进更好地融入全球经贸物流体系。同时, 稳步推进“放管服”等方面改革, 优化服务, 实现水运物流行业治理体系和治理能力现代化^[4]。

6) 要求加强新技术研发应用, 推动水运高质量发展。十九届五中全会将科技创新放在了突出位置, 对水运行业新业态、新模式、新技术的发展和应用提出迫切要求, 水运应积极应用现代科

技创新成果、加快自身转型升级, 推动新型基础设施建设。建议着力推进 5G、北斗系统和遥感卫星在水路运输领域的应用^[5], 推进智慧港口、智慧航道、智能航运等示范应用, 依托大数据技术, 建立水铁、水公等多式联运公共信息平台。

参 考 文 献:

- [1] 靳廉洁, 姚海元, 胡贵麟, 等. 我国沿海集装箱运输及码头能力适应性分析[J]. 水运工程, 2022(5) : 44-49.
- [2] 张浩宏, 黄斐玲. 国土空间规划体系下的综合交通规划编制思考[J]. 规划师, 2021, 37(23) : 33-39.
- [3] 李天宇, 陆林, 张海洲, 等. 长三角城市群 A 级物流企业空间演化特征及驱动因素[J]. 经济地理, 2021, 41(11) : 157-166.
- [4] 孙翊, 吴静, 刘昌新, 等. 加快推进我国应急物资储备治理体系现代化建设[J]. 中国科学院院刊, 2020, 35(6) : 724-731.
- [5] 黄书雷, 方行明, 鲁玉秀, 等. 交通和信息基础设施对经济增长的影响机制、效应评估和路径优化研究[J]. 经济问题探索, 2021(10) : 100-111. (本文编辑 武亚庆)