

# 射流作用下不同沙床动态冲坑变化规律的试验研究

申振, 徐立群, 张浩, 顾磊

(河海大学 a. 机电工程学院; b. 疏浚技术教育部工程研究中心, 江苏 常州 213022)

**摘要:** 基于泥沙动力学和射流冲刷理论,对粗沙沙床和中沙沙床在某一流速下进行不同靶距的淹没射流实验,通过高速摄像机捕捉动态冲坑在短时间内的变化,分析了在前10s和前1s内的坑深发展规律。并将前1s等分成24个时间段分析其细微变化。结果表明:冲坑深度在前10s内基本呈对数规律发展;射流冲刷刚开始时中沙沙床冲坑深度的发展趋势有时滞后于粗沙沙床;冲坑深度随时间有先增加后减小的趋势,在此流速下存在一个最优靶距。此实验的研究成果在疏浚工程施工作业时具有一定的参考价值。

**关键词:** 粗沙沙床; 中沙沙床; 射流冲刷; 靶距; 漩涡; 动态冲坑; 疏浚工程

中图分类号: TV131.6

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2015)02-0182-04

## Experiment on change law of dynamic scour in different sand bed under the role of jet

SHEN Zhen, XU Liquan, ZHANG Hao, GU Lei

(a. College of Mechanical and Electrical Engineering; b. Engineering Research Center of Dredging Technology of Ministry of Education, Hohai University, Changzhou 213022, China)

**Abstract:** Based on sediment dynamics and jet erosion theory, the paper carried out submerged jet experiment of different target under certain velocity of the erosion of sand bed and fine sand bed. Through capturing the change of scour hole in short time by using high-speed camera, it analyzed the law of this hole depth before 10s and 1s. The first 1 second is separated into 24 time periods to analyze the subtle change. The results show that scour depth is logarithmically before 10s; the trend of the fine rustle bed lags the erosion of sand bed at the beginning of jet scour; the scour depth demonstrates the trend of first increase and then decrease and exists an optimal target under this velocity. The result has certain reference value for the construction of dredging.

**Key words:** sand bed; fine sand bed; jet scour; target distance; whirlpool; dynamic scour; dredging project

射流冲刷一直是水利工程界研究的重点,其影响因素复杂多变(主要为沙床因素和射流因素),由于其发展的物理过程主要是沙床和射流的相互作用,此过程变化因素多,较为复杂,所以实验的方法成为研究射流冲刷技术的重要方法。近年来,射流冲刷技术逐渐被广泛运用于工程领域,尤其在疏浚工程施工中应用更为广泛。例如,在自航式耙吸挖泥船施工时,高压水射流装置作为一种有效的疏浚施工手段,可以明显提高工作效率,节约成本<sup>[1-3]</sup>。

Rajaratnam N等<sup>[4]</sup>对无粘性松散沙床进圆柱冲坑,测量了最大的动态沙坑和最大的静态沙坑以及

冲坑的跨度,实验发现动态沙坑深度是静态沙坑的3倍。刘成等<sup>[5]</sup>通过模型实验,研究和探讨了水平圆形射流冲刷淤埋喷口的疏松淤沙的规律。根据实验现象,可将圆形射流对淤沙的冲刷过程分为3个阶段,即泥沙初始流化阶段、泥沙完全流化阶段和形成稳定、清晰的冲刷坑阶段。通过量纲分析和对试验数据进行回归分析,分别提出了圆形水平射流在静水环境下对淤埋喷口的疏松淤沙冲刷的临界射流冲刷流速、冲刷坑尺寸计算的公式。Mazurek K A等<sup>[6]</sup>介绍了一种估计圆柱淹没射流冲坑的方法,基于冲刷机理对实验数据进行处理,发现平衡状

收稿日期:2014-09-28; 修回日期:2015-03-11

基金项目:河海大学中央高校基本科研业务费项目(2013B19114)。

作者简介:申振(1990-),男,山东日照人,硕士研究生,研究方向:疏浚设备与技术。

态下冲坑尺度是动量通量的函数。

以上学者的研究主要是从宏观角度出发,用不同的试验方法对射流冲刷进行不同方向的研究。本文是从微观角度出发,研究在短时间内同一射流速度下不同靶距在两种沙床中的动态冲坑的发展变化。由于在疏浚工程应用中耙头上射流喷嘴的冲刷时间短,所以本文时间段主要分为前 1 s 和前 10 s,并且将前 1 s 进行了 24 等分,观察并分析了在射流刚开始阶段沙床的变化并得出相关结论。所以在疏浚工程中对于不同的沙床选择不同的射流时间和射流速度本文都可以起到一定的参考价值,并为以后研究射流冲刷技术提供了一种新的借鉴方法。

## 1 试验装置及方法

本试验在大型水槽内安置了一个小型玻璃水槽,其长 1.3 m,宽 0.3 m,高 1 m,并在两侧高 0.9 m 处设置溢流挡板。泵是从大水槽内吸水,通过 ABB 变频器控制水泵产生稳定的水流<sup>[7]</sup>,水流通过管道流经尺寸为 290 mm × 2.5 mm 的矩形喷嘴,当水过多时会从溢流挡板流出,以此实现水的循环使用。此装置通过 solidworks 画出示意图如图 1 所示。

此实验速度为 5 m/s,根据流量公式  $Q = VA$ ,计算出流量为  $Q = 13.05 \text{ m}^3/\text{h}$ ,通过调节变频器控制水泵的转速并从电磁流量计上读取流量,实验显示:流量为  $13.05 \text{ m}^3/\text{h}$  时,频率是 31 Hz。沙床原始高度为 400 mm,泥沙密度为  $2\ 650 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,沙粒的中值粒径分别为 1.8 和 0.5 mm,孔隙度为 50%,实验工

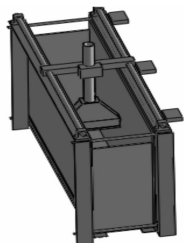


图 1 小水槽三维示意图

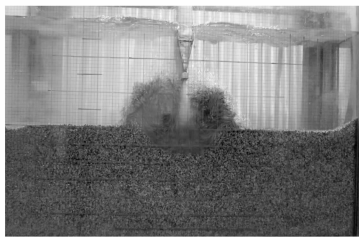


图 2 冲坑在 1s 时的动态图

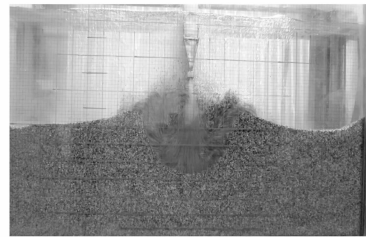


图 3 冲坑在 10s 时的动态图

由图可以看出,射流中轴线和冲坑的边缘处沙粒运动最为剧烈,一部分沙粒以推移质运动方式沿沙丘上爬,随着射流流线继续偏转在冲坑中形成漩涡;另一部分沙粒以悬移质方式随漩涡在冲坑内循环运动,此时冲坑的形态逐渐清晰。由于射流与沙床的相互作用,在射流中轴线处产生左右摆动现象,加之两侧沙丘的沙粒塌陷,使冲坑两侧边缘处的流线进一步向坑内偏转,此时冲坑内出现两个上下摆动的漩涡<sup>[10]</sup>。

况如表 1 所示。

表 1 试验组次和参数

编号	速度/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	靶距/mm	时间/min
1	5	50	10
2	5	100	10
3	5	150	10
4	5	200	10

## 2 试验现象分析

研究射流冲刷首先要了解射流冲蚀沙床的发展演化过程,下面以射流速度为 5 m/s、射流靶距为 150 mm 工况下为例,通过对不同沙床特性的比较,探索冲坑随着时间的发展规律<sup>[8]</sup>。

实验在刚开始阶段,射流正向冲击沙粒,射流作用在沙床表面的动力  $F_x$  和  $F_y$  远大于沙床自身的重力  $F_g$  和阻力  $F_c$ ,射流与沙床之间剧烈地相互作用。射流向周围的环境注入动能,由于受沙床面的作用,速度减小,压强增大,并大于周围的静压,形成较大的压力梯度,促使流线急剧偏转,泥沙受横轴环流作用被挟持,流线逐渐平行于壁面。大量沙床表面的沙粒在射流的作用下起动,沙床表面沙粒主要以推移质方式运动。比较两种沙床现象发现,在粗沙沙床条件下,由于沙粒的水下重力  $F_g$ 、推力  $F_x$ 、上举力  $F_y$  都相对较大并且粗沙之间几乎无粘性力,所以沙粒在受压力偏转的时候显得更为剧烈<sup>[9]</sup>。由实验现象可知,此阶段内射流剧烈冲刷沙床,大量沙粒在瞬间被冲起。

对于粗沙沙床而言,由于粗沙的水下休止角相对较大,冲坑两侧与沙丘的交汇处塌陷沙粒的量和程度都比较大,从而使流线向冲坑内侧偏转的程度较大,致使大量已经起动的沙粒不能被带出冲坑,反而随着漩涡在冲坑内运动,但由于两漩涡所具有能量的不均匀性,从而导致能量大的漩涡挤压能量小的漩涡,产生漩涡的上下摆动,并在漩涡随机性摆动的过程中,当处于上面的漩涡摆动到足够高且具有足够能量时,漩涡所携带的部分沙粒将被甩出沙坑,落到两侧的沙

丘上。对于中沙沙床而言,由于沙粒的水下休止角相对较小,冲坑与两侧沙丘的交汇处塌陷沙粒的量和程度相对较小,而相应的流线偏转幅度相对较小,加之中沙的沉降速度较小,部分在冲坑中运动的沙粒可以通过附面射流带离沙坑,此时也可以观察到冲坑内漩涡摆动的现象,但摆动现象相对于粗沙条件下并不明显<sup>[11]</sup>。在此阶段中随着时间的推移,冲坑深度和两侧沙丘的高度都有所发展。

### 3 结果分析

通过试验得到射流速度为  $V = 5 \text{ m/s}$  下靶距分别为 50、100、150、200 mm 时,冲坑深度在开始前 10 s 内的发展变化规律,如图 4(a、b、c、d)。冲坑在初始阶段冲刷剧烈,且冲坑深度发展迅速,随着时间的推移冲坑深度持续增加,但发展的速度有所放缓,曲线整体呈对数规律发展。

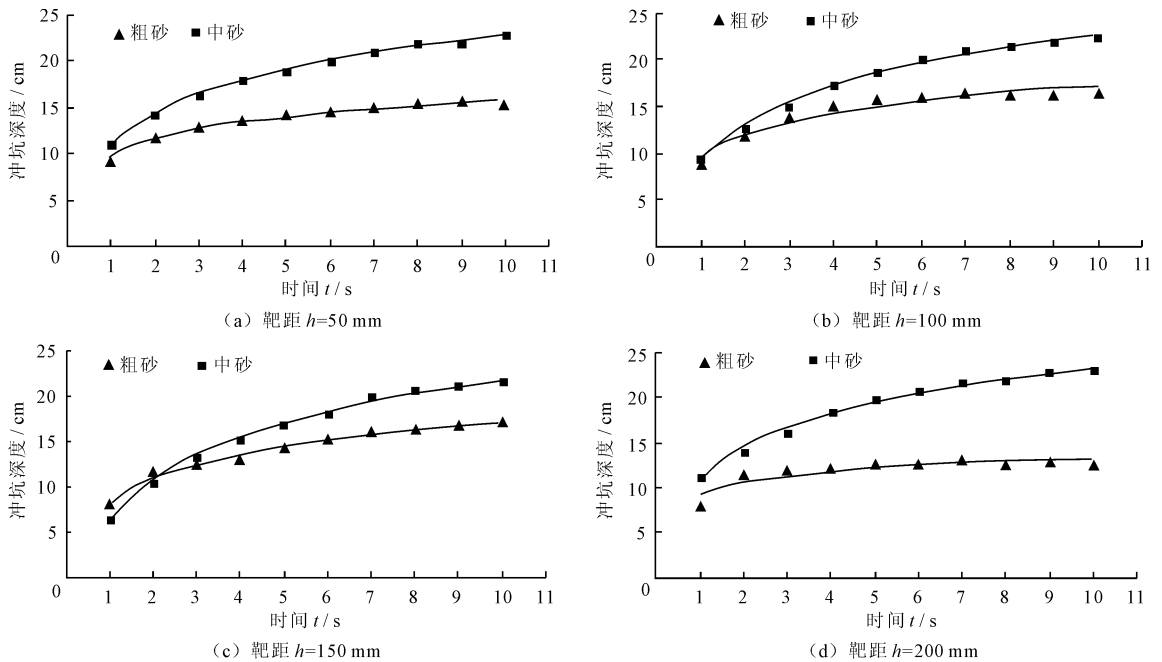


图4 不同靶距下冲坑在前 10 s 内的发展变化

通过图 4 中(a)、(d)对比 50 mm 靶距和 200 mm 靶距粗沙沙床下的冲坑发展,发现在射流靶距为 50 mm 时候,冲坑在前 1 s 内发展很迅速,而随后的 9 s 内冲坑发展相对缓慢。对于上述的现象可以从紊动射流理论方面解释,由于射流的发展需要经过起始段、过渡段、主体段,这样射流才能够发展充分。而射流靶距的减小,使得射流在水下没有充足的发展空间,因而使冲坑在后期发展相对乏力。可以认为:靶距越小冲坑前期发展越迅速,但中后期冲坑深度的发展迟缓。通过对比两种沙床的冲坑深度可以发现,在同等射流条件下,中沙沙床冲坑深度的发展趋势总体大于粗沙沙床,但在射流冲刷刚开始阶段中沙沙床冲坑深度的发展趋势有时会滞后于粗沙沙床,如图 4 中(c)所示。对于这种现象,主要由于在中沙沙床下射流与沙床表面接触时中沙更易于起动,射流与沙床的接触面积相对较大,加之冲蚀两种沙床的射流能量相等,从而使冲坑的发展首先沿宽度方向迅速拓开,然后再沿深度方向发展。随着

冲蚀时间的推移,越来越多的沙粒被射流挟持,中沙沙床下起动沙粒的量大于粗沙沙床,冲坑沿深度方向上的变化速度逐渐大于粗沙沙床的坑深变化速度,并在某一时刻和粗沙沙床的坑深发展曲线相交,随后两种沙床沿坑深方向的差距慢慢拉大为了深入研究冲坑刚开始阶段接触沙床时的发展状况,下面对冲坑在前 1 s 内进行深入分析,通过高速摄像机采集冲坑前 1 秒内 24 组冲坑的深度数据,并绘制出冲坑随时间的发展曲线。

图 5 中(a)、(b)、(c)、(d)为射流速度  $V = 5 \text{ m/s}$  下靶距分别为 50、100、150、200 mm 时,冲坑深度在刚开始 1 s 内的发展变化规律。可以看出,在前 1 s 内冲坑的深度随时间的增加而增大,并且在靶距为 150、200 mm 时整体曲线呈线性发展趋势。

通过对比两种沙床发现,在 50、100、150 mm 的靶距时,中沙沙床冲坑沿深度方向的发展大于粗沙沙床,而在 200 mm 靶距时,中沙沙床冲坑沿深度方向的发展速度小于粗沙沙床。

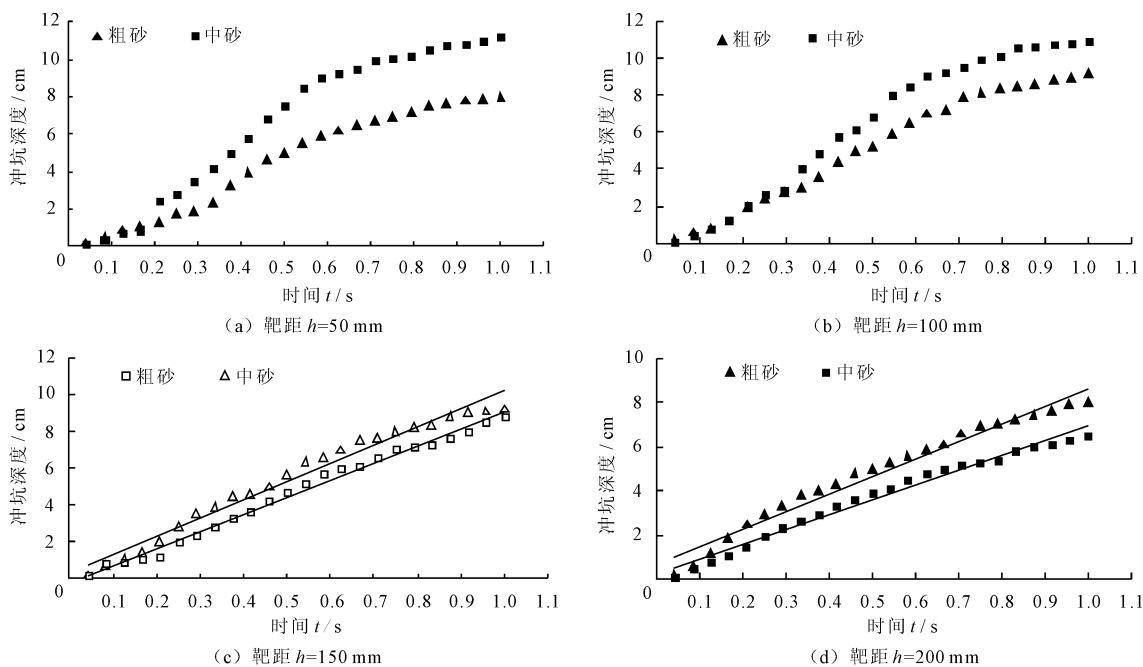


图5 不同靶距下冲坑在前1 s内的发展变化

以1 s时刻为关注的时间点,随着射流靶距的增加,在粗沙沙床条件下,冲坑的发展深度分别为8、9.2、8.9、8 cm;在中沙沙床条件下,冲坑的发展深度分别为11.2、10.9、8.9、6.5 cm。通过以上数据可以发现,随着射流靶距的增加,冲坑深度呈现先增加后减小的趋势。

## 4 结 语

(1) 冲坑深度在前10 s内随冲蚀时间的推进整体呈对数规律发展,而对于刚开始前1 s内深入研究发现在靶距为150、200 mm时冲坑深度的变化符合线性规律。

(2) 同等射流条件下,中沙沙床下冲坑深度的发展趋势总体大于粗沙沙床,但在射流冲刷刚开始时中沙沙床冲坑深度的发展趋势有时滞后于粗沙沙床。

(3) 当射流速度同为5 m/s的情况下,冲坑的深度随射流靶距的增加而增大;随着射流靶距的持续增加,冲坑的深度随射流靶距的增加而减小,从以上的规律可以发现,射流靶距 $h = 150$  mm为相对最优的射流靶距,使冲坑的形态达到最大。

### 参考文献:

[1] 张原锋,张隆荣. 射流冲刷试验及其在黄河潼关河段的应用[J]. 水利水电技术,2004,35(12):19-22.

[2] 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,2004,18(1):1-9.

[3] 陈五洲. 浅谈疏浚业发展趋势[J]. 江苏水利,2007(12):25+27.

[4] Rajaratnam N, Mazurek K A. Erosion of sand by circular impinging water jets with small tailwater[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 129(3): 225-229.

[5] 刘成,何耘,韦鹤平. 圆形射流冲刷疏松淤沙的研究[J]. 泥沙研究,2001(3):40-45.

[6] Mazurek K A, Rajaratnam N, Sego D C. Scour of cohesive soil by submerged circular turbulent impinging jets[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127(7): 598-606.

[7] 董景新,赵长德,熊沈蜀,等. 控制工程基础(第二版)[M]. 北京:清华大学出版社,2003.

[8] 槐文信,王增武,钱忠东,等. 二维垂向射流沙质河床冲刷的数值模拟[J]. 中国科学(技术科学),2012,42(1):72-81.

[9] 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),2005,20(3):368-372.

[10] 吴俊辉. 淹没射流冲刷粗砂砂床特性实验研究[D]. 南京:河海大学,2013.

[11] 石雨亮,陆晶,詹义正,等. 泥沙的水下休止角与干容重计算[J]. 武汉大学学报(工学版),2007,40(3):14-17.