

· 综 合 ·

## 淹没水射流破碎密实粉土试验研究

孙守胜<sup>1,2</sup>, 刘 峰<sup>3</sup>, 林 森<sup>1,2</sup>, 陈 浩<sup>1,2</sup>, 尹崧宇<sup>1,2</sup>

(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;  
3. 上海振华重工(集团)股份有限公司, 上海 200125)

**摘要:** 耙头在挖掘密实粉土时, 使用常规高压冲水来辅助破土的作用机理尚不明晰。为了解高压冲水破碎密实粉土的实际作用效果, 采用现场试验和仿真分析的手段, 对实验室制备的密实粉土开展常规压力高压冲水破土试验并进行理论分析。结果表明: 高压冲水破土深度和宽度受喷嘴移动速度、靶距和直径影响较大, 并呈现不同规律; 挖掘密实粉土时, 高压冲水虽然辅助破土作用不明显, 但可以明显降低耙头挖掘阻力, 应根据现场实际情况合理使用高压冲水。试验结论可为耙头设计和密实粉土施工工艺提供指导。

**关键词:** 淹没水; 密实粉土; 高压冲水; 射流; 破碎

中图分类号: U 615.31; U 616+.21

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)S2-0001-05

### Experimental study on crushing dense silt by submerged water jet

SUN Shou-sheng<sup>1,2</sup>, LIU Feng<sup>3</sup>, LIN Sen<sup>1,2</sup>, CHEN Hao<sup>1,2</sup>, YIN Song-yu<sup>1,2</sup>

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

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

3.Shanghai Zhenhua Heavy Industry Co., Ltd., Shanghai 200125, China)

**Abstract:** When the draghead excavates dense silt, the mechanism of using conventional high-pressure flushing to assist soil breaking is not clear. To understand the actual effect of high-pressure flushing on crushing dense silt, the conventional high-pressure flushing soil breaking test and theoretical analysis are carried out on the dense silt prepared in the laboratory by means of field test and simulation analysis. The results show that the depth and width of soil breaking by high-pressure flushing are greatly affected by the moving speed of nozzle, target distance and diameter, and show different laws. When excavating dense silt, although the auxiliary breaking effect of high-pressure flushing is not obvious, it can reduce the excavation resistance of rake head significantly, high-pressure flushing should be used reasonably according to the actual situation of the site. The results of the test can provide guidance for the design of draghead and the construction technology of dense silt.

**Keywords:** submerged water; dense silt; high-pressure flushing water; jet; crushing

耙头高压冲水系统由高压冲水泵、供水输送管路、开闭阀件、水箱和喷嘴组成。在施工过程中, 耙头上的多排喷嘴喷射出的高速射流冲刷泥床可使泥沙液化或松散, 进而辅助耙齿切削泥土, 提高船舶施工效率。

国内外对高速射流的破土机理进行了大量的理论和试验研究, 形成了一些理论成果。20 世纪

90 年代, Aderibigbe 等<sup>[1]</sup>研究了水下冲刷射流的靶距与冲坑深度之间的关系。左用中等<sup>[2]</sup>研究了低速条件下小比尺耙头模型在不同冲水压力和泥泵清水流量时底料的耙吸效果。林风等<sup>[3]</sup>通过数值模拟手段研究耙头喷嘴的高速射流对高压冲水效率的影响。沈伟平等<sup>[4]</sup>通过试验研究高压冲水破土深度等影响因素并总结了经验计算公式。顾磊

收稿日期: 2022-02-10

作者简介: 孙守胜(1982—), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 从事挖掘装备与技术研究工作。

等<sup>[5]</sup>指出 2 种典型土质的冲刷坑深在初始阶段均线性增长, 相同冲刷速度下黏土的发展速度较慢, 冲刷坑形均具有相似性等结论。洪国军等<sup>[6]</sup>通过模型试验的方法对高压冲水淹没射流的流动形态进行研究。舒敏骅等<sup>[7]</sup>也通过试验进行了高压冲水破土机理的探索性研究。陈浩等<sup>[8]</sup>通过 CFD 技术研究射流压力在不同影响因素下的变化规律。

滨州密实粉土是在风、浪、流 3 种条件叠加作用下形成的, 属于类似水淀粉性质的坚硬土质, 具有含水量低、标贯击数大、坚硬难挖等特点, 因而给疏浚船舶施工带来较大的困难, 特别是对耙吸船的耙头挖掘提出了更大挑战, 表现为耙齿入土困难、泥浆进舱浓度偏低, 严重影响船舶施工效率。因此, 常需要开启耙头高压冲水系统对海底泥土进行预处理以辅助耙齿挖掘, 提高耙头挖掘效率, 但对于高压冲水在施工中发挥的实际作用如何则缺乏系统的研究, 均通过经验进行判断。为此, 在实验室制备一定标贯击数的密实粉土, 并针对性改造实验室高压冲水系统, 进行了不同工况下高压冲水淹没水射流破碎密实粉土的试验, 直观观测实际破土效果。

1 土质制备

结合港区疏浚施工区域的地质勘探资料, 分析研究密实粉土的标贯击数、密实程度、土颗粒分布、级配、含水率、原状土密度等参数, 为实验室制备密实粉土奠定理论基础。由分析可知, 滨州密实粉土为典型的振动液化粉土, 标贯击数达到 20 击以上, 孔隙比小于 0.75, 密实程度较高。

基于小型物理模型土质制备和密实粉土固化试验的前期探索, 在实验室内通过多种方法制备了 3 箱大方量试验用粉土, 其物理特性指标满足试验要求。制备的密实粉土物理特性参数见表 1。

表 1 密实粉土物理特性参数

箱号	含水率/ %	湿密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	塑性 指数	液性 指数	标贯 击数
1	14.8	2.01	6.2	-0.08	23
2	16.3	2.02	6.2	0.16	19
3	13.8	2.06	6.2	-0.24	22

2 高压冲水系统改造

试验在挖掘平台和大槽内进行, 对挖掘平台上的耙吸高压冲水系统做适当改造, 以达到试验工况所需的多种功能。该系统由高压冲水泵、输送管路、模型耙头组成, 分析相关设备参数可知, 除模型耙头外, 其余设备均可满足常规高压冲水破土试验的各项要求。对模型耙头的高压冲水管路、水箱和喷嘴进行适当改造后可调节喷射角度、靶距和直径, 喷嘴的移动速度可由平台直接驱动模型耙头来实现, 最高可达到 1.5 m/s, 接近实船航速。改造后的高压冲水喷嘴见图 1。

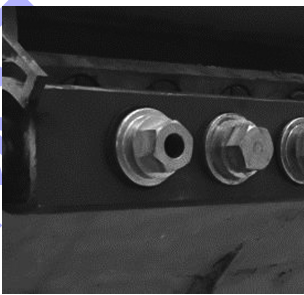


图 1 高压冲水喷嘴

3 密实粉土高压冲水破土试验

3.1 试验工况

进行了喷嘴在不同速度、不同靶距和不同直径 3 种工况下的水下试验, 射流角度均设置为 90°, 其中: 速度分别为 0.2、0.5、0.8、1.0、1.2 m/s, 常用速度为 0.8 m/s; 靶距分为 0、30、60、90、130 mm; 喷嘴内径分别为 10、16、20 mm; 喷嘴出口流速为 36 m/s(0.66 MPa 条件下), 基本与实船一致。

3.2 移动速度对破土的影响分析

该工况下共进行了 5 组试验。移动速度按照从小到大变化, 并最终与船舶施工的 2.5 kn 航速保持一致。试验前对土体表面进行整平处理, 同时确定了 5 组试验下喷嘴所行经土体的轨迹, 利用挖掘平台规定每种速度下喷嘴所行经的路线及其间隔。土箱长度为 5 m, 每次试验持续时间不同, 最快约 4.17 s, 最慢约 25 s。高压冲水射流破土后的冲坑呈长条状, 见图 2。



图 2 不同移动速度下的射流冲坑

试验显示, 随着喷嘴移动速度的不断增加, 密实粉土冲坑深度、宽度不尽相同。在移动速度较低情况下, 冲坑深度深、宽度窄, 而当移动速度增加至 0.5 m/s 以上时, 冲坑深度下降明显, 但宽度变化不大, 约为喷嘴直径的 2.5 倍, 见图 3。冲坑深度主要与射流的压力和作用时间有关; 射流宽度主要与喷嘴直径和压力有关。当移动速度较高时, 射流作用在土体上的时间较短, 无法进一步进入土体内部、提升破土量。

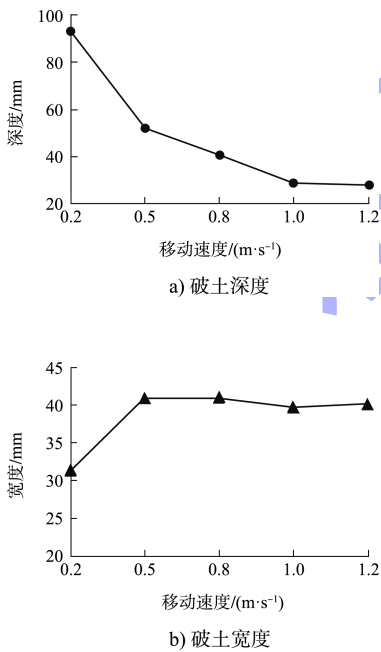


图 3 不同移动速度下的射流冲坑变化趋势

3.3 喷嘴靶距对破土的影响分析

该工况下进行了 5 组试验。保持移动速度 0.8 m/s 不变, 靶距从 0、30、60、90、130 mm 依次变化, 模拟耙头在不同挖掘层厚下喷嘴的实际工作深度。高压冲水射流破土后的冲坑见图 4。



图 4 不同靶距下的射流冲坑

试验显示, 在靶距较低情况下, 随着靶距的增大, 冲坑深度减小, 宽度基本不变; 当靶距增加至 60 mm 以上时, 冲坑深度变化趋于平缓, 宽度变化加剧, 见图 5。射流的压力随靶距的增加而减小, 因此破土深度也随着靶距的增加而减小。由于靶距增加, 射流处于扩散阶段, 导致冲坑宽度增加。当靶距增加至一定程度时, 射流冲坑效果下降极为剧烈, 辅助破土的作用逐渐降低, 极大浪费能量而无法显著提高船舶施工效率。

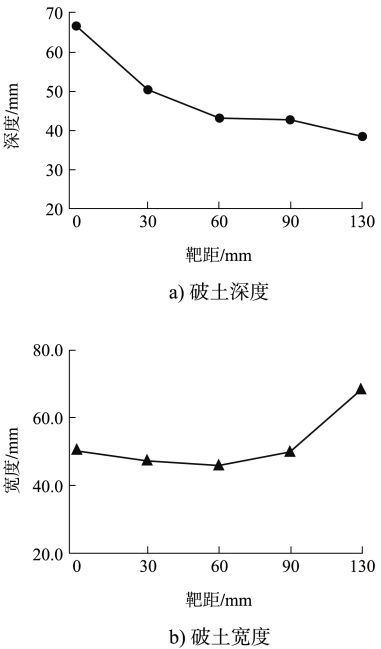


图 5 不同靶距下的射流冲坑变化趋势

3.4 喷嘴直径对破土的影响分析

该工况下, 共进行了 3 组试验。保持移动速度 0.8 m/s、靶距 0 mm 不变, 喷嘴直径按照 10、

16、20 mm 依次变化, 模拟不同直径喷嘴的实际作用过程。土箱长度为 5 m, 高压冲水射流破土后的冲坑, 见图 6。



图 6 不同喷嘴直径下的射流冲坑

在本节工况下, 射流作用时间随喷嘴直径增加而略微增加, 但射流流量则随着喷嘴直径增加而大幅提高, 在压力一定的情况下, 射流流量的增加直接提升了破土量。试验显示, 在大直径喷嘴的情况下, 随着喷嘴直径的改变, 冲坑深度和宽度随喷嘴直径增加而增大, 见图 7。

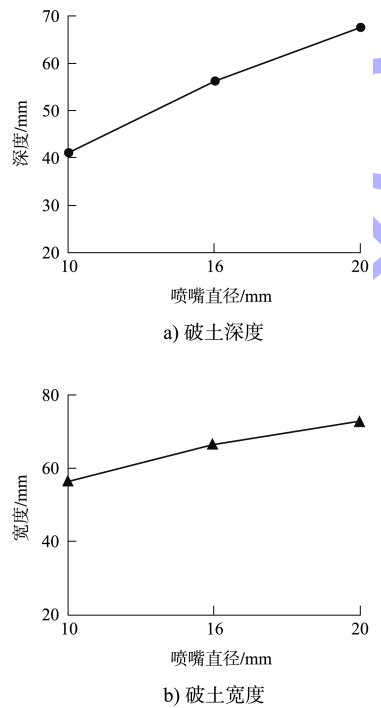


图 7 不同喷嘴直径下的射流冲坑变化趋势

3 种工况下的破土深度和宽度稍有差别在于每种工况下所用土的物理特性稍有不同, 见表 1, 但在同样工况下土质特性保持不变, 以验证参数的改变对于破土规律的影响。

4 土体破坏仿真分析

4.1 有限元模型

采用喷嘴清水流场数值模拟与土体破坏有限元仿真分析技术对一定射流压力的高压水作用在一定特性土质的破坏情况进行分析。

土体模型采用二维网格模型, 模型宽 5 m, 高 1 m, 土体弹性模量 30 MPa, 泊松比 0.25, 土体密度 2 t/m<sup>3</sup>。有限元模型采用软件自动划分网格, 见图 8, 土体网格加载区域做网格细化处理, 保证计算精度, 其他区域网格均匀化处理。

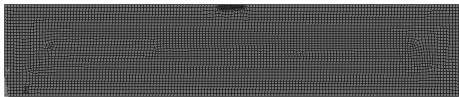


图 8 土体有限元模型

4.2 边界条件

根据流场仿真计算结果, 将 36 m/s (0.66 MPa 条件下) 的射流压力加载到土体破坏计算区域, 土体四周设置 X 和 Y 向的位移约束, 设置土体破坏准则, 在计算过程中以时间步来确定土体的破坏程度。

4.3 计算结果及分析

按照喷嘴横移速度 (0.2、0.5、0.8、1.0、1.2 m/s) 和喷嘴直径计算出在不同横移速度下的大概作用时间, 通过软件的计算结果得出在某一时间段的土体破坏深度和宽度是否与试验结果相符。计算结果见图 9。



a) 1.2 m/s



b) 1.0 m/s



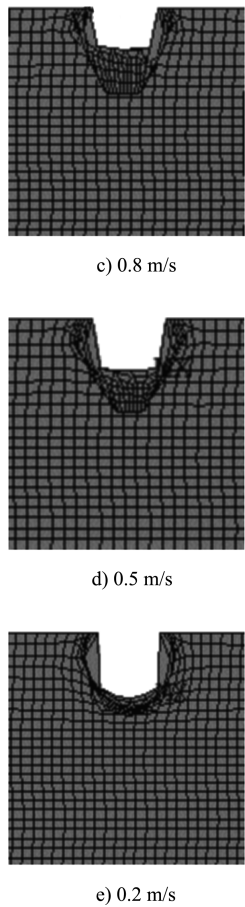


图 9 不同移动速度下土体破坏仿真分析

通过分析仿真结果可知, 随着速度从快到慢, 土体破坏深度不断增加, 破坏宽度基本相同, 与试验趋势基本吻合。在不同速度下, 射流压力虽然相同, 但在 0.2 m/s 移动速度下, 作用土体的时间可以增加到 80 ms; 而在 1.2 m/s 移动速度下, 射流作用土体的时间则降至 12 ms 以内, 最慢速度与最快速度下, 作用土体的时间相差较大, 直接导致破土深度变化。如果继续放慢喷嘴移动速度, 则射流的压力一直作用于土体, 当土体被破坏至一定深度后, 由于射流下方土体已经随流动的水流溢出, 此时相当于增加了喷嘴靶距, 土体的破坏深度增加幅度会大幅下降。

使用高压冲水时, 若施工航速在 2.5 kn 左右, 由于射流作用于土体时间较短, 对于标贯较高的密实粉土破土能力有限。试验用土在水的浸泡下会发生一定的表面软化, 根据试验结果可知, 2.5 kn 时喷嘴射流破土深度约 1 cm, 单只喷嘴小

时破土量约 1.8 m<sup>3</sup> (仅对靶距较小的喷嘴适用), 对于利用耙齿破土的方量占比较小, 效果一般。根据密实粉土切削机理研究所得出的结论, 在高压冲水的作用下, 其耙齿切削阻力下降到原来的 77%<sup>[9]</sup>, 使可用主机负荷增加, 此时可以适当提高施工航速以提高船舶施工效率。

5 结论

- 1) 冲坑深度随移动速度增加而增大, 随靶距增加而减小, 随喷嘴直径增大而增大。
- 2) 冲坑宽度随移动速度增加变化不大, 随靶距增加而增大, 随喷嘴直径增大而增大。
- 3) 耙头挖掘密实粉土时, 虽然射流破土量有限, 但其减阻效果明显, 可适时开启高压冲水。

参考文献:

[1] ADERIBIGBE O 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] 左用中, 唐允吉, 夏逸民. 耙头模型冲水特性的试验研究[J]. 武汉造船, 1981(3) : 54-61.

[3] 林风, 洪国军. 自航耙吸挖泥船耙头垂直高压冲水系统的数值模拟[C] //中国水力发电工程学会. 中国水力发电工程学会机械疏浚专业委员会第二十次疏浚与吹填技术经验交流会论文汇编. 武汉: [ 出版者不详], 2007: 105-112.

[4] 沈伟平, 孙雪梦, 赵学, 等. 耙头高压冲水改进技术[J]. 水运工程, 2012( 3) : 159-162.

[5] 顾磊, 倪福生, 张浩. 基于 ALE 方法的射流冲刷砂土和黏土的数值计算[J]. 科学技术与工程, 2017, 17( 11) : 103-107.

[6] 洪国军, 江帅, 尹纪富, 等. 耙吸挖泥船高压冲水淹没射流演化过程试验[J]. 水运工程, 2018( 10) : 42-46, 67.

[7] 舒敏骅, 朱时茂, 尹纪富, 等. 高压冲水喷嘴破土性能试验研究[J]. 水运工程, 2019( 12) : 14-18.

[8] 陈浩, 孙守胜, 郭志勇. 耙头高压冲水喷嘴流场数值模拟及分析[J]. 水运工程, 2022( 2) : 202-208.

[9] 李章超, 郭志勇, 张更生, 等. 密实粉土单耙齿及三耙齿水下切削试验及耙齿切削阻力计算[J]. 水运工程, 2022( 1) : 204-208, 228.

( 本文编辑 王传瑜)