



垂直淹没射流对黏性底床冲刷 挖掘体积的试验研究^{*}

董传明，张民曦，喻国良

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院，上海 200240)

摘要：射流冲刷作为一种高效挖掘手段被广泛应用于深海工程领域。针对黏性底床条件下垂直淹没射流冲刷挖掘体积进行研究，利用注浆成型法制备冲刷坑的胚体并利用3d扫描技术获取冲刷挖掘体积。通过开展室内试验探索了射流流速、射流靶距、冲刷时间以及泥样含水率与冲刷挖掘体积的关系：1) 冲击射流挖掘体积随着射流靶距的增加而减小；2) 冲击射流挖掘体积随着射流流速的增加而增加；3) 冲击射流挖掘体积随着冲刷时间的增加而增加，但逐渐趋于平衡；4) 随着泥样含水率的增加，冲击射流挖掘体积也显著增加。最后，利用54组试验数据和无量纲分析得到了冲击射流挖掘体积的经验公式，可为射流挖沟以及射流沉桩等海洋工程实践提供参考。

关键词：垂直淹没射流；黏性泥沙；冲刷挖掘体积；射流靶距；射流流速；含水率

中图分类号：P 615.3；U 616

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2022)02-0008-08

Experimental study on scour volume from a cohesive bed by vertically submerged water jet

DONG Chuan-ming, ZHANG Min-xi, YU Guo-liang

(School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: As an efficient and convenient method, water jet scouring technology has been widely used in deep sea engineering. The scour volume from a cohesive bed under a vertical submerged jet scouring has been studied. The contour embryo of scour volume was obtained by grouting method, and the scour volume of was evaluated by 3D scanning technology. Through indoor test, the relationship among jet velocity, impingement height, scour time and water content of mud sample and scour volume are explored: 1) Scour volume decreases with the increase of impingement height. 2) Scour volume increases with the increase of jet velocity. 3) Scour volume increases with the increase of scour time, but gradually tends to balance. 4) With the increase of water content of mud sample, the scour volume increases significantly. Finally, based on 54 sets of experimental data and dimensionless analysis, an empirical formula of scour volume is obtained, which may provide a reference for water jet trenching and water jet assisting pile installation in ocean engineering.

Keywords: vertical submerged water jet; cohesive sediment; scouring volume; impingement height; jet velocity; water content

在航道、湖泊、港口水域的清淤工程中，射流清淤的疏浚方式已得到了广泛的应用^[1-3]。此外，射流冲刷挖掘作为一种高效、简洁、安全的

技术也已广泛用于深海水域，如射流辅助油气导管安装^[4-5]、射流沉桩^[6-7]、射流挖沟埋设海底管线^[8-9]等。

收稿日期：2021-05-07

*基金项目：装备预研教育部联合基金项目(6141A02022337)

作者简介：董传明(1987—)，博士研究生，主要从事海洋工程装备开发及射流冲刷等领域研究。

通讯作者：喻国良(1963—)，博士，教授，从事泥沙流变学及海洋工程装备开发等。E-mail: yugl@sjtu.edu.cn

垂直淹没射流对非黏性泥沙的冲刷已得到广泛关注。Westrich 等^[10]研究发现最大冲刷深度和冲刷宽度随冲刷时间的对数线性增加。Aderibigbe 等^[11]研究了非黏性泥沙的冲刷坑发展过程, 发现了平衡态下冲刷坑的特征长度主要受射流参数(包括射流流速、靶距、坑径等)和泥沙参数(泥沙粒径和密度等)的影响。张浩等^[12]研究发现非黏性泥沙的冲刷坑深度和宽度随射流流速呈现线性增加。顾磊等^[13]通过改变射流速度、喷射靶距、泥沙粒径, 开展了平面射流冲刷沙床的试验, 发现射流冲刷坑尺寸变化是一个不断发展的过程, 可将其分为快速增长期、缓慢发展期和动态稳定期。相比非黏性泥沙, 垂直淹没射流对黏性泥沙的冲刷特征研究相对较少。Mazurek 等^[14]通过试验研究发现冲刷平衡状态下的黏性底床冲刷坑尺寸是射流动量通量、射流靶距、水流的黏度和密度以及土壤的临界剪切应力的函数, 并得出射流最大冲刷挖掘力。Dong 等^[15]研究发现垂直射流对泥床的冲刷挖掘尺寸与底床含水率、射流流速以及射流靶距和射流口径等参数有关, 并给出了估算床面临界剪切应力 τ_c 的方法。总之, 垂直射流对黏性底床冲刷已有一些代表性的研究成果, 但对冲刷挖掘体积的研究仍较少。

本文采用注浆成型法制备底床冲刷挖掘坑的胚体, 并通过3D扫描技术获取射流挖掘体积以及冲刷坑深度和宽度等尺寸参数。通过改变射流流速、黏性底床的含水率、射流冲刷靶距等参数, 研究垂直淹没射流对黏性底床冲刷挖掘体积的影响, 从而探究垂直淹没射流对黏性底床的冲刷挖掘规律。

1 试验及测量

1.1 试验装置

射流冲刷挖掘试验的装置见图1, 冲刷试验的泥样放置在直径20 cm、高度20 cm的塑料圆桶中, 并将泥样桶放入一个直径为66 cm、高度为75 cm的圆柱形水槽中。在距离圆桶底部64.5 cm处的桶壁开有一直径为2 cm的溢流口, 其为试验提供了一个固定高度的淹没射流环境, 在试验过

程中水位始终保持在固定高度上, 多余的水会从出口流出, 以便提供一个稳定的淹没环境。水槽上方安置有射流装置, 射流管通过水管和水泵相连, 水泵为功率370 W的变频自吸泵, 通过变频和控制阀一起调节水流流速, 其中利用电磁流量计测量射流管中的流速。射流管可以通过一个电压为220 V、功率为250 W的交流变频电机转动使安装在导轨上的射流管上下移动, 进而调整试验过程中喷嘴与泥样表面的距离(简称射流靶距H)。试验中, 采用淹没射流对泥样进行冲刷, 射流口位于泥样的正上方, 且始终位于液面以下, 桶内水位始终保持在64.5 cm。

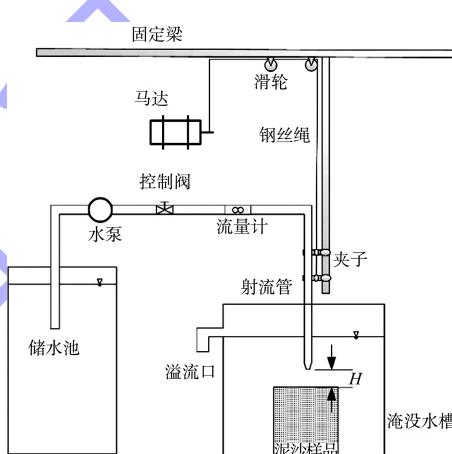


图1 试验装置

试验采用的泥样取自阳澄湖湖底和黄浦江河道的重塑软黏土, 其粒径级配曲线见图2。阳澄湖湖底泥样(YCL泥沙)和黄浦江河道泥样(MHR泥沙)具体参数见表1。射流喷嘴的口径d为0.5 cm, 射流的流速8.5~13.0 m/s。射流喷嘴始终淹没在水面以下10 cm以上, 射流靶距H在4~10 cm, H/d范围为8~20。

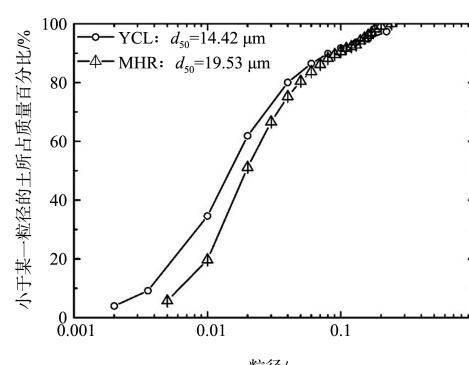


图2 泥样粒径级配曲线

表 1 黏性泥沙的基本参数

泥沙	颗粒密度/(kg·m ⁻³)	干密度/(kg·m ⁻³)	泥沙中值粒径 $d_{50}/\mu\text{m}$	塑限值 $W_p/\%$	液限值 $W_L/\%$	含水率 $W/\%$
YCL 泥沙	2 714	1 250	14.4	22.5	53.5	30~50
MHR 泥沙	2 702	1 245	19.5	19.6	38.0	30~40

1.2 试验步骤

1) 底床的制备。试验开始前, 先将试验泥样放入恒温 105 ℃干燥箱中干燥 12 h, 将烘干后的泥样取出并用孔径为 1.0 mm 的网筛筛分去除其中的杂草、砾石、贝壳等杂质, 然后加入适量的水, 重塑为不同含水率的泥样。在底床的制备过程中需要充分压实, 使泥样填满容器, 并保证泥样表面保持水平。在试验前需将配制好的泥样用保鲜膜包裹, 再静置 24 h。泥样制备过程中, 每次同时制备 8~20 桶相同含水率的泥样样品以供进行冲刷试验。

2) 泥样放置水槽。将准备好的泥样去除保鲜膜后放置在水槽的中心, 根据试验条件, 开启电机使射流管在导轨上上下移动, 并调整好射流喷嘴到泥面的距离; 然后往水槽内缓慢注水, 直到水槽内水位达到溢出口为止。

3) 泥样临界切应力估计。打开水泵, 将流量控制阀调节至适当位置, 然后使用步进电机逐步降低射流喷口到水槽正下方泥样的垂直距离, 同时观察水槽底部泥样床面的变化, 当泥沙开始被冲刷时, 关闭步进电机, 并记录此时射流口到泥面的垂直距离, 即为临界射流靶距值 H_c 。根据临界射流靶距和射流流速估算黏性底床的临界切应力。

4) 黏性底床冲刷挖掘试验。根据每次试验的冲刷时间、射流靶距和射流流速, 打开水泵开关和阀门, 调整好射流靶距, 并进行泥样的冲刷试验。射流冲击到泥面上会对泥样产生冲蚀并形成冲刷坑, 见图 3a)。到设定冲刷时间后关闭射流, 并记录相关数据。

5) 灌浆法测冲刷体积。冲刷结束后, 将水槽中水缓慢排出, 取出冲刷后的泥样。利用注浆成型法制备冲刷坑轮廓胚体, 待胚体凝固后取出利用 3D 扫描仪获取其体积。当冲刷完成后, 将泥样从水槽中取出, 将配制好的灌浆液注入冲刷坑中,

使灌浆液略高于冲刷坑表面, 静止一段时间, 待灌浆液凝固成型后, 将成型后的胚体取出, 见图 3b)。然后利用 EinSan-SE 三维扫描仪, 将成型的胚体进行扫描建模, 进而可以得到冲刷坑的外部轮廓, 见图 3c), 并计算出射流挖掘体积。试验中的灌浆液为水和超细硅酸盐水泥按照 1:0.6 比例混合而成。

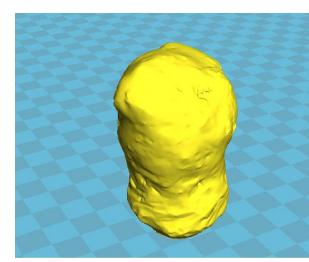
6) 重复以上操作, 直至试验完成, 最后整理数据和试验设备。



a) 黏性底床形成冲刷坑



b) 利用灌浆法形成冲刷坑轮廓坯体后形状



c) 冲刷坑轮廓坯体3D扫描

图 3 冲刷坑形状

2 试验结果与分析

在实验室共开展了 54 组射流冲刷试验, 其中 1~43 组为 YCL 泥样的底床、44~54 组为 MHR 泥样的底床, 具体试验数据见表 2。

表 2 射流挖掘体积试验结果

续表2

序号	$U_0 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	H/mm	射流的最大剪切力 τ/Pa	泥样的临界切应力 τ_c/Pa	含水率 $W/\%$	t/min	V/cm^3
12	11.00	60	136.95	15.39	42.0	1	182
						3	358
						5	476
						10	562
13	11.00	70	100.60	15.39	42.0	1	162
						3	326
						5	454
						10	548
14	11.00	80	77.04	15.39	42.0	1	142
						3	286
						5	428
						10	526
15	8.80	50	126.23	21.51	39.5	1	74
						3	145
						5	160
						10	216
16	8.80	40	197.23	21.51	39.5	1	82
						3	143
						5	178
						10	226
17	8.85	55	105.51	16.46	40.5	1	102
						3	196
						5	250
						10	296
18	10.75	75	58.14	14.84	42.5	1	114
						2	182
						3	238
						5	298
19	10.75	65	73.58	14.52	43.5	1	160
						2	228
						3	275
						5	392
20	10.15	90	51.83	16.08	41.0	3	218
						3	244
						3	272
						3	298
24	12.65	90	80.51	16.08	41.0	3	328
25	10.15	90	51.83	14.84	43.0	3	226
26	10.15	90	51.83	14.84	43.0	3	298
27	10.65	90	57.06	14.84	43.0	3	346
28	10.65	90	57.06	14.84	43.0	3	374
29	11.15	90	62.55	14.84	43.0	3	398
30	10.15	90	62.55	13.76	45.0	3	248
31	10.65	90	69.46	13.76	45.0	3	298
32	11.15	90	69.46	13.76	45.0	3	356

续表2

序号	$U_0 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	H/mm	射流的最大剪切力 τ / Pa	泥样的临界切应力 τ_c / Pa	含水率 W/%	t/min	V/cm ³
33	11.75	90	80.51	13.76	45.0	3	414
34	12.65	90	80.51	13.76	45.0	3	474
35	10.00	100	40.75	12.78	46.5	3	256
36	10.55	100	45.36	12.78	46.5	3	326
37	11.60	100	54.84	12.78	46.5	3	374
38	12.10	100	59.66	12.78	46.5	3	424
39	9.55	45	183.53	17.86	38.2	3	184
40	10.00	45	201.34	17.86	38.2	3	218
41	10.75	45	232.55	17.86	38.2	3	276
42	11.50	45	266.13	17.86	38.2	3	342
43	12.15	45	297.07	17.86	38.2	3	422
44	8.80	60	87.66	24.64	32.5	3	162
45	8.95	60	90.67	24.64	32.5	3	214
46	9.55	60	103.24	34.64	32.5	3	280
47	8.80	50	104.32	22.15	34.0	3	252
48	8.95	60	107.91	22.15	34.0	3	326
49	8.80	65	155.84	27.62	31.0	3	202
50	8.95	65	161.19	27.62	31.0	3	268
						1	102
51	8.95	45	66.62	20.08	35.0	3	258
						5	352
						10	446
						1	146
52	8.80	45	74.69	20.08	35.0	3	286
						5	362
						10	406
						1	184
53	10.15	50	65.60	17.44	36.5	3	338
						5	412
						10	468
						1	112
54	8.95	40	40.30	17.44	36.5	3	238
						5	322
						10	384

注: τ 和 τ_c 可以通过试验测算。

2.1 射流挖掘时间对挖掘体积的影响

如图 4 所示, 随着冲刷时间的增加, 射流对 YCL 底床冲刷挖掘体积不断增加。根据冲刷挖掘体积随时间的变化趋势, 可以将其分为 3 个阶段, 即急剧增加阶段、缓慢增加阶段、趋于平衡状态。
 1) 急剧增加阶段。当射流刚接触床面时, 依靠其水射流切应力, 很快会将泥面从床面剥离, 其射流挖掘体积变化较大且冲刷坑形状变化较为不规则。

2) 缓慢增加阶段。随着冲刷的持续, 冲刷挖掘体积持续增加, 但随着深度的增加以及射流在冲刷坑中能量的消耗, 射流对底床冲刷效率会明显减弱, 虽然射流挖掘体积仍不断增加, 但其增加速率减缓。
 3) 趋于平衡阶段。随着冲刷的持续, 射流挖掘体积增加到一定程度, 水射流很难从冲刷坑掘取泥沙, 或将其带出冲刷坑, 此时射流挖掘体积基本保持稳定, 冲刷挖掘体积的增长趋于平缓。此外, 随着射

流靶距的增加，射流挖掘体积也会逐渐减小。

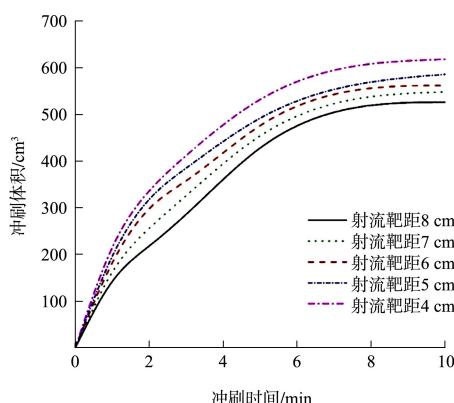


图 4 射流挖掘体积随冲刷时间的变化情况

2.2 射流靶距对冲刷挖掘体积的影响

在保持底床泥样参数和射流等其他参数不变的情况下，研究射流靶距与射流挖掘体积的关系，其中射流喷距为 4~8 cm、射流流速为 11 m/s、YCL 底床的含水率为 42%。如图 5 所示，随着射流靶距的增大，射流挖掘体积呈现出近似线性减小的趋势。当射流靶距增加时，喷射出的水流从射流口到床面的运动路径越长，则射流需要克服水体阻力所做的功越大、水射流冲刷挖掘床面时所具有的能量越低，从而床面挖掘体积便相应减小。另一方面，冲击射流在其运动的过程中会卷吸周围的水，在卷吸水体过程中会减小射流流速，但随着卷吸水体加入，冲刷射流的流量会相应增加，导致较大面积的床面受到冲刷挖掘，从而形成较浅而宽的坑。因此，在一定靶距范围内，随着射流靶距的增加形成的冲刷挖掘的体积有减小趋势，但其减小幅度并非理论分析的那么剧烈。

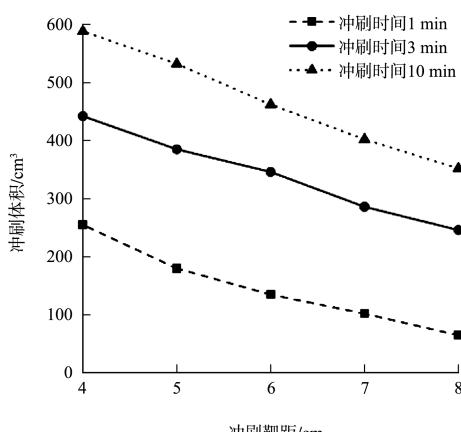


图 5 射流靶距对冲刷挖掘体积的影响

2.3 射流流速对冲刷挖掘体积的影响

如图 6 所示，针对射流靶距为 9 cm，以不同的射流速度对含水率为 41%、43% 和 45% 的 YCL 底床进行冲刷试验。试验结果表明，当射流流速增加时射流挖掘体积相应增加，床面形成的冲刷坑对射流冲刷挖掘能力存在一定削弱作用。随着射流冲刷挖掘体积的增加，射流对底床冲刷作用的增加速度也会相应减弱，其体积增加相应减缓。分析认为，射流流速越大，水从射流口流出后具有的能量越高，其具有的剪切力越大，冲击到泥样后形成的射流挖掘体积越大。另一方面，随着射流对泥样的持续冲刷，射流挖掘体积和深度不断增加，射流掘取更深处或更边缘处泥样并将其携带出冲刷坑外所需消耗的能量越大，因此其冲刷挖掘体积增加的幅度有所减缓。

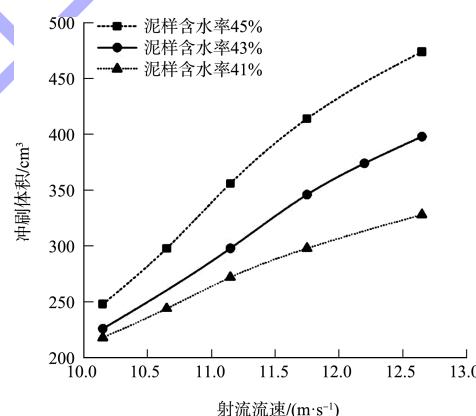


图 6 射流流速对射流挖掘体积变化的影响

2.4 底床含水率对冲刷挖掘体积的影响

如图 7 所示，针对含水率 0.30~0.42 的 YCL 底床，当射流靶距为 4 cm、射流流速为 8.95 m/s 时进行垂直冲刷试验。试验结果表明，随着泥样含水率的增加，不同时间段射流形成的射流挖掘体积逐渐增加。分析认为，随着泥样含水率的增加，黏性颗粒间的水分填充颗粒间的间隙，底床泥样含水率增加会削弱颗粒间的黏结力，黏性底床的抗冲刷能力相应减弱，射流对底床的冲刷耗能也逐渐减小，从而底床的冲刷挖掘体积增加。

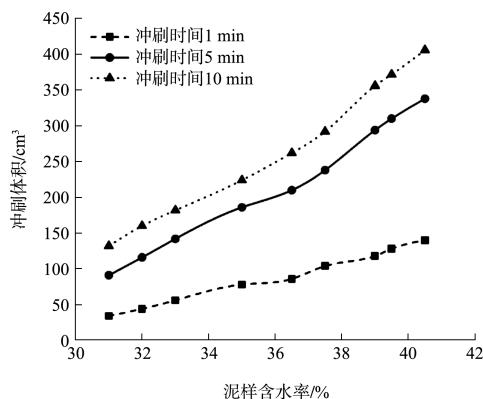


图 7 底床含水率对冲刷挖掘体积的影响

2.5 射流挖掘体积变化无量纲分析

结合上述试验研究和文献分析, 射流挖掘体积为 V , 可以用以下方程表示:

$$V = f(t, \mu, d, \rho, H, U_0, \tau_c, W, W_L) \quad (1)$$

式中: t 为冲刷时间; μ 为水的黏度系数; d 为射流口径; ρ 为水的密度; U_0 为射流流速; τ_c 为泥样的临界切应力; W 为泥样的含水率; W_L 为泥样的液性指数数。

泥样射流挖掘体积的无量纲函数可以表示为:

$$\frac{\sqrt[3]{V}}{H} = f \left(\ln \frac{\mu}{\rho d^2}, \frac{W}{W_L}, \frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right) \quad (2)$$

通过对试验数据(表 2)进行拟合分析, 最终得到射流挖掘体积变化的无量纲公式为:

$$\frac{\sqrt[3]{V}}{H} = 5.023 \cdot \left(\ln \frac{\mu}{\rho d^2} \right)^{0.87} \cdot \left(\frac{W}{W_L} \right)^{2.556} \cdot \left(\frac{\tau - \tau_c}{\tau_c} \right)^{0.672} \quad (3)$$

其中, R^2 为 95.5%。

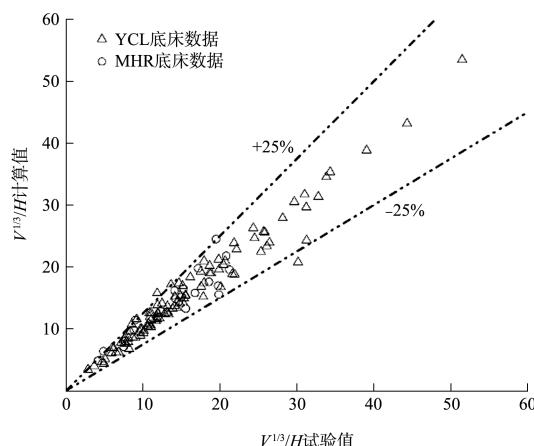


图 8 射流挖掘体积的试验值与计算值的比较

利用公式(3)对试验的所有工况进行计算分析,

将射流挖掘体积无量纲化的试验值和计算值在图 8 中进行比较, 可以看出计算值与试验值吻合度较高, 93.6% 的数据都在误差线 $\pm 25\%$ 以内。

3 结论

1) 射流挖掘体积与射流参数有关。射流挖掘体积随着射流速度增加而射流挖掘体积显著增加; 射流挖掘体积随着射流靶距的增加而显著减小。

2) 冲刷坑的冲刷体积与黏性底床的性质有关。随着含水率的增加, 黏性泥沙颗粒间的黏结强度降低, 更容易被冲刷, 因而射流挖掘体积会显著增加。

3) 通过综合射流参数与黏性参数对黏性泥沙冲刷的影响, 最终得出了射流挖掘体积的表征公式, 该公式为无量纲化, 可以为水下射流挖沟、射流疏浚以及射流沉桩等工程应用提供一定理论参考价值。

参考文献:

- [1] 王楠, 何炎平, 黄超. 射流清淤船技术进展[J]. 船海工程, 2013, 42(3): 1-6.
- [2] 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.
- [3] BAILARD J A. Controlling sedimentation in harbor berthing areas using scour jet array systems [C]// Sedimentation control to reduce maintenance dredging of navigational facilities in estuaries: report and symposium proceedings. Washington, D. C.: National Academies Press, 1987: 141-152.
- [4] 汪顺文, 杨进, 严德, 等. 深水表层导管喷射钻进机理研究[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(8): 157-160, 169.
- [5] ZHOU B, YANG J, LIU Z, et al. Model and experimental study on jetting flow rate for installing surface conductor in deep-water[J]. Applied ocean research, 2016, 60: 155-163.
- [6] 王京印, 张振禹, 王艳丽, 等. 水射流辅助动力沉桩技术研究[J]. 海洋工程, 2014, 32(3): 116-121.
- [7] LOURENÇO D E, SCHNAID F, CAMAÑO SCHETTINI E B. Model pile installation by vertical water jet in clay[J]. Journal of offshore mechanics and arctic engineering, 2020, 142(4): 045001.

(下转第 22 页)