

淹没式移动水射流的倾角对破土深度的影响 实验研究

郑浩男, 常宗瑜, 王海波

中国海洋大学工程学院, 山东 青岛

收稿日期: 2024年12月10日; 录用日期: 2025年1月9日; 发布日期: 2025年1月20日

摘要

本文以淹没式移动水射流为研究对象, 通过实验分析在一定射流速度、移动速度、土体抗剪强度下, 射流的倾角对于开沟破土深度的在相同射流能力下, 改变射流倾角会略微影响开沟深度。基于LS-DYNA搭建移动射流破土开沟仿真模型, 分析射流倾角对于破土开沟效果的影响, 并得到存在最佳射流倾角的结论。搭建单喷嘴移动射流破土实验装置, 进行了单喷嘴移动射流破土开沟实验, 进一步验证了仿真得到的结论。

关键词

移动射流, 射流破土, 射流角度

Experimental Study on the Effect of Inclination Angle of Submerged Mobile Water Jets on the Groundbreaking Depth

Haonan Zheng, Zongyu Chang, Haibo Wang

College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao Shandong

Received: Dec. 10th, 2024; accepted: Jan. 9th, 2025; published: Jan. 20th, 2025

Abstract

This paper takes the submerged mobile water jet as the research object, and analyzes the influence of the inclination angle of the jet on the depth of trenching and breaking through experiments under a certain jet speed, moving speed and soil shear strength. Based on LS-DYNA, the simulation model

文章引用: 郑浩男, 常宗瑜, 王海波. 淹没式移动水射流的倾角对破土深度的影响实验研究[J]. 环境保护前沿, 2025, 15(1): 86-95. DOI: 10.12677/aep.2025.151012

of mobile jet breaking and trenching is constructed to analyze the influence of jet inclination angle on the effect of breaking and trenching, and the conclusion that there is an optimal jet inclination angle is obtained. A single-nozzle mobile jet breaking experimental device was built, and a single-nozzle mobile jet breaking trenching experiment was carried out to further verify the conclusions obtained from the simulation.

Keywords

Moving Jets, Jet Groundbreaking, Jet Angle

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

射流式开沟机是目前海底开沟机的主要类型之一，其通过高压水射流进行破土开沟，开沟过程水是水射流与海床土体接触作用的过程，射流的流量性质对沟槽的成型至关重要[1]。众多学者在射流性质对破土效果的影响方面进行了广泛的研究。唐立志[2]等人进行了不同土体配比的实验和测定，得到不同实验用土的剪切强度，并经过破土效果测定后选择了圆形喷嘴进行实验。董俊伟[3]在固定射流冲刷过程的数值模拟研究基础上，进行了移动射流冲刷过程的数值模拟研究，研究得出冲刷深度和宽度与射流移动速度成非线性关系，且射流移动速度对沟宽的影响大于沟深的影响。郑健等[4]针对软粘土和硬粘土分别进行了二维垂直淹没射流破土实验，两者冲坑发展特点不同，软粘土冲坑的发展接近于无粘性土，压力导致的剪切破坏是硬粘性土冲坑发展的主要因素，最后建立了硬质粘性土射流破土模型。张树森等人[5]结合中心线剪应力公式和弯曲射流实验思想，提出了圆形移动射流开沟的侵蚀方程和开沟深度的理论预测方法，并在实验基础上给出了粘性土开沟深度预测方法。刘健[6]等通过高压移动水射流破土试验，研究了射流压力和喷嘴移动速度对冲蚀面形态特征的影响，并提出了一个可以预测侵蚀面几何形状的经验公式。李继宏[7]等探究了移动射流的移动速度、射流角度以及射流功率对于射流开沟效果的影响，结果表明，在控制其他条件不变的情况下，开沟深度随射流移动速度的增加而减小，随射流角度的增加而增加，随射流功率的增加而增加。

以上学者研究射流破土的过程，重点在于探究包括射流移动速度、射流喷嘴压力、粘土抗剪强度等参数对于破土的影响，但值得注意的是，在研究射流角度对开沟深度的影响时，与李继宏相似的众多学者，仅仅考虑了自射流射出后向水平移动的反方向倾斜的情形。

有关射流破土过程的计算实际困难使用进行射流破土算极为复杂，一般通过计算机仿真的方式进行计算模拟，当前主要的计算机仿真方法有计算流体力学方法(CFD)、光滑粒子方法(SPH)、物质点方法(MPM)以及流固耦合方法(ALE)。Wang Boyao [8]等基于 CFD 方法，建立了粘性土移动射流破土的模型，并结合实验结果，在一定的喷射压力、土壤的不排水剪切强度和喷嘴的横向移动速度条件下，准确预测了开沟深度。Yue Pan [9]接触耦合算法建立了高速水射流冲击岩石破碎模型，发现射流冲击岩石的入射角极大地影响了岩石内部张力型中心轴向裂纹的传播。Dongfang Liang [10]等采用了三维材料点方法(MPM)构建水土模型研究了水射流速度对挖沟过程的影响，结果显示，双点三维材料点方法模型能够有效地模拟高速水射流与土壤床的相互作用。杨志鹏[11]等通过 ALE 流固耦合算法建立了淹没水射流的数值模型，并研究了靶距和射流速度对于破土效果的综合影响。对比其他三种方法，ALE 方法便于调整各种环境及射

流参数，且适用于分析大变形问题，但其缺点是需要划分复杂的网格模型，且需进行大量的计算。

鉴于海底开沟射流喷冲系统一次开沟得到理想沟深的要求，本文研究了单喷嘴移动射流在一定的的射流速度、移动速度、土壤硬度下，移动射流前倾倾角大小与开沟深度的具体关系，基于 LS-DYNA 内置的 ALE 方法进行了模拟仿真，探究了单喷嘴移动射流在特定条件下的理想倾角，分析了此理想倾角产生的原因，并搭建了单喷嘴移动射流平台，进行了淹没式移动射流破土试验，验证了射流倾角、射流移动速度以及土体抗剪强度在内的关键参数对于开沟深度的影响。仿真及实验结果表明存在最优前倾倾角，使开沟深度达到理想要求。

2. 基于 LS-DYNA 的淹没式移动射流仿真分析

2.1. 仿真流程

粘性土射流破土过程涉及水土接触流固耦合，针对粘性土的大变形过程，可采用 Arbitrary Lagrangian-Eulerian 方法(ALE)进行，该方法不仅改善了欧拉法中网格空间位置始终保持不变的缺点，而且克服了拉格朗日法中出现的网格畸变问题[12]，相关算法设定只需在 LS-DYNA 中调整即可。

首先，应用 HyperMesh 对土体材料和水体材料分别进行建模，并将模型进行网格划分及局部网格加密，网格加密区域为射流水柱区域及可能接触到的土壤区域，如图 1(b)所示。完成上述步骤后，导出 K 文件，并将 K 文件导入 LS-PrePost 中进行下一步的仿真过程。仿真过程需要对射流倾角进行调整，此过程通过绕固定点旋转水体网格来实现，并不需要对水体进行重新建模及网格划分。仿真过程中的关键在于粘性土土壤参数的构建，使用 LS-DYNA 中自带的 MAT-147 土壤材料 MAT_FHWA_SOIL，其失效准则为摩尔库伦破坏准则。通过关键字 ALE_MULTI-MATERIAL_GROUP 区分射流水域及淹没水域，关键字 CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 实现射流水柱与土体的接触，关键字 BOUNDARY_PRESCRIBED_MOTION_SET 来调整射流的出口速度，关键字 ALE_REFERENCE_SYSTEM_GROUP 和 ALE_REFERENCE_SYSTEM_CURVE 来调整射流的移动速度。最后的仿真计算过程采用北龙超算平台 MPP 双精度计算，得到仿真结果。

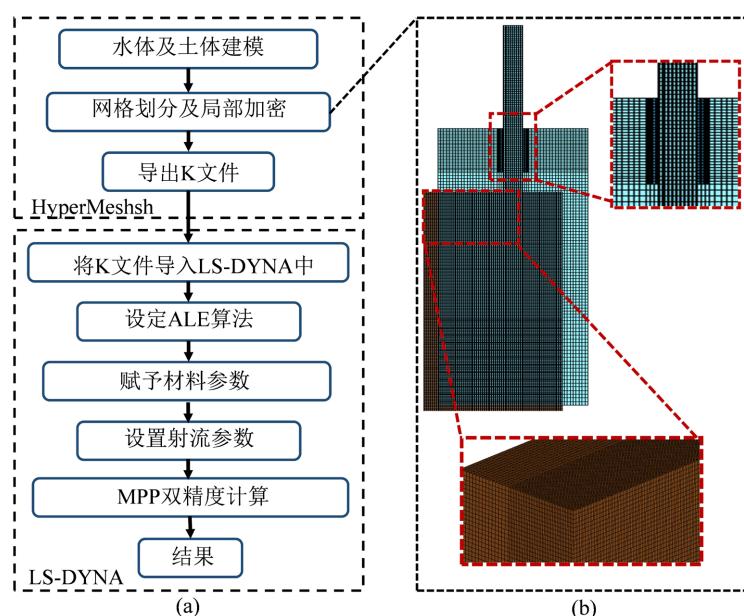


Figure 1. (a) The process of modeling and simulation; (b) The effects of meshing and local mesh encryption
图 1. (a) 建模及仿真流程；(b) 网格划分及局部加密效果

土壤材料在接触过程中产生失效情况，在 LS-DYNA 中网格单元在达到材料的失效阈值后将会被删除，当射流水柱与土体材料接触并达到失效条件后土体网格单元被删除，当大量网格单元被删除后即形成沟槽。因此要精准模拟射流破土过程，需要在网格划分时将土体区域精细划分，考虑到计算量及计算时间的问题，添加对称边界条件建立半模型，并采用 HyperMesh 将淹没射流水柱与土体接触区域进行切分后网格局部加密，在保证计算精度的同时也可以缩减计算时间。

2.2. 仿真结果

定义射流水柱与竖直方向夹角为射流倾角，且射流自射出之后倾斜方向均朝向射流移动方向。水土交界面初始段(近似倾斜直线段)与竖直方向夹角为水土交界面倾角。设定射流速度为 14 m/s，移动速度为 0.6 m/s，变射流倾角为 0°至 7°，稳定后不同射流倾角开沟深度如图 2 所示。

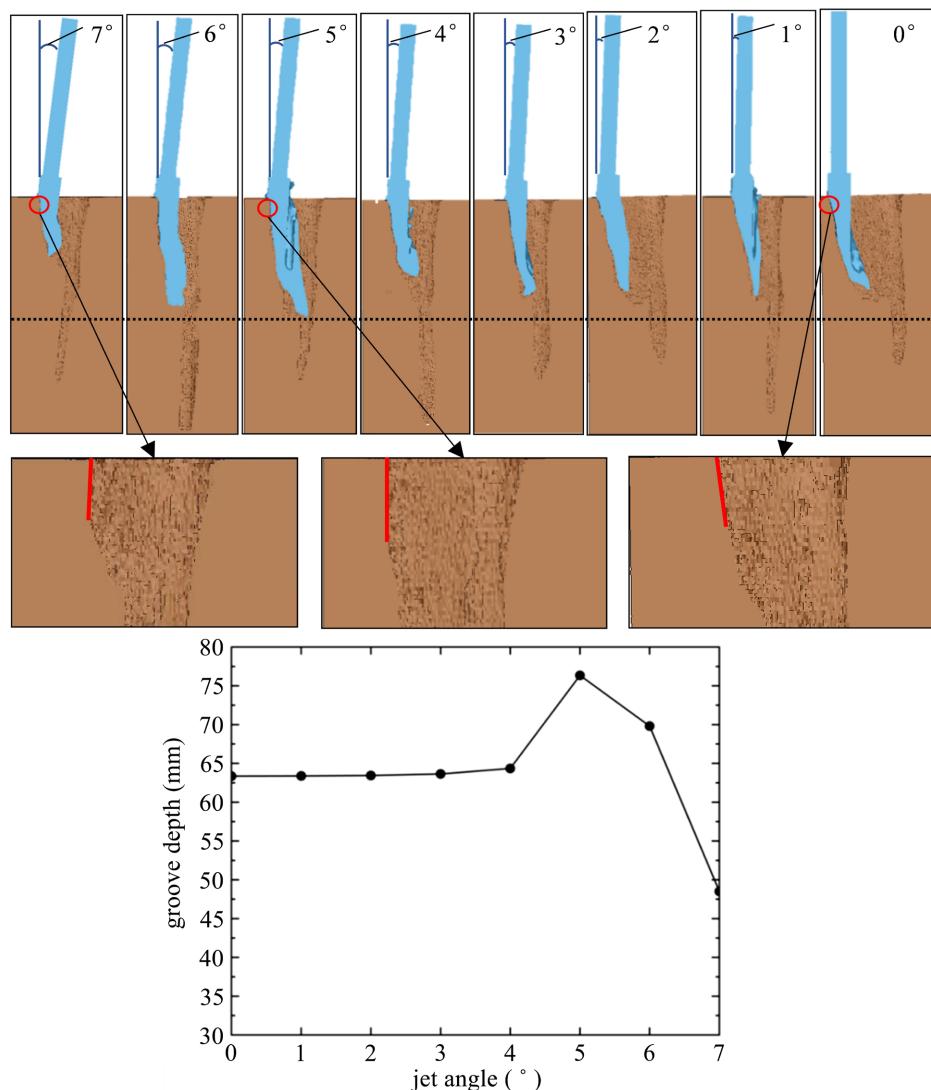


Figure 2. Simulation of moving jets at 0°~7° inclination (water bodies other than the jet water column were eliminated for ease of observation), inclination of the initial section of the trench at 7°, 5°, and 0° inclination, and line plots of the depth of the trench opening. The jet movement velocity is shown from right to left

图 2. 0°~7°倾角的移动射流仿真情况(为方便观察，消除了除射流水柱之外的水体)，7°、5°、0°倾角下的沟槽初始段倾角以及开沟深度折线图。射流移动速度由图示右向左

在移动射流初始时刻会首先形成较深射流冲孔，随后才能平稳开挖沟槽。这是由于在计算启动时刻水平移动关键字延时执行，计算启动时刻近似为定点静止射流，从而导致形成较深的冲刷孔。在后续的实验中也会出现类似情况，在实验开始时刻，移动射流破土过程并未达到稳定状态，后续沟深测量均忽略初始时间端内的沟深，而选择稳定状态时的沟深进行测量。

由单喷嘴移动射流仿真结果分析可以得知，射流速度和移动速度一定时，改变射流倾角会影响射流开沟深度，倾角在 0° 到 4° 范围时，各倾角工况最大射流深度与垂直移动射流最大深度保持一致，水土交界面倾角保持向右倾斜状态，但倾角在逐渐减小；倾角在 4° 到 7° 范围时，最大射流深度随倾角变化先变大后逐渐变小，在 5° 倾角时可获得最大开沟深度，相对垂直移动射流工况开沟深度增幅在15%左右，当射流倾角为 7° 时，其开沟深度已明显小于垂直移动射流工况。即在移动速度与射流速度不变的情况下，适当改变射流倾角可以增加喷嘴的破土能力，但倾角过大时也会减小喷嘴的开沟深度，因此，存在最佳的射流倾角可以使得在相同工况下获得最佳开沟深度，而由本文仿真条件下获取的最佳射流倾角为 5° 。

进一步分析仿真中 5° 射流倾角工况时可开挖最大深度的原因。不同射流倾角下的沟槽初始段倾角如图5所示，在射流倾角变化时，垂直移动射流工况水土交界面倾角向后倾斜，在 5° 射流倾角工况时水土交界面倾角近似达到 0° ，当继续增大射流倾角至 6° 后，水土交界面倾角由向后倾斜改变为向前倾斜， 7° 射流倾角工况红线标注处明显向前倾斜。通过分析可以得知，水土交界面倾角在达到 0° 时其开沟深度最佳，在此工况下射流水柱与海床土体接触作用充分，因此开挖效果最好。

通过仿真结果可以得知，在移动速度与射流速度不变的情况下，适当改变射流倾角可以使开沟深度有小幅增加，但射流倾角过大也会减小开沟深度。因此，存在最佳的射流倾角，在相同工况下该倾角射流可开挖最大沟深。

3. 单喷嘴移动射流实验

3.1. 实验装置

在实验设置上，通过伺服电机驱动丝杠模组，进行缩尺模型实验及原尺寸实验，该型实验装置不仅负载能力大，而且速度控制精准可靠，精度高。以此为依据，此次研究搭建了基于丝杠模组的移动射流实验平台，并在此基础上设计出了可变射流倾角的破土射流装置，如图3所示。实验开始时，由PC向伺服电机控制器发送运动指令，在伺服电机的驱动下，通过丝杠以及滑台将电机输出的转动转化为喷嘴及其悬架的水平匀速运动，实现移动射流的效果。

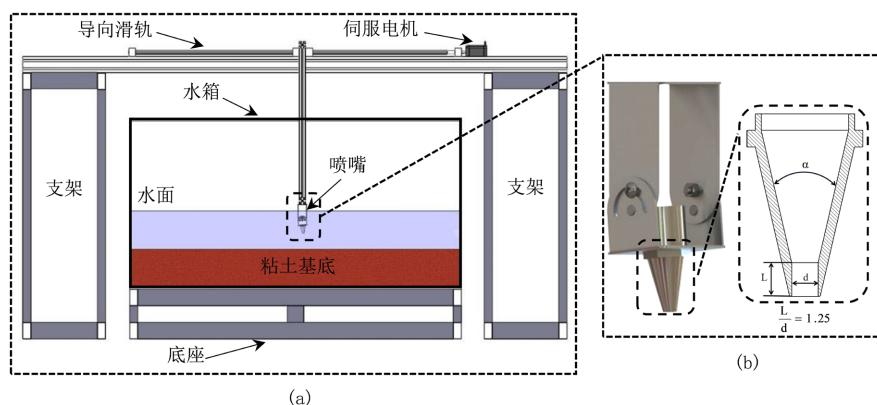


Figure 3. (a) Jet ground-breaking device with variable jet inclination. (b) Nozzle angle adjustment device and nozzle planing surface drawing. α is the internal contraction angle, L is the length of the exit parallel section, d is the nozzle outlet diameter
图3. (a) 可变倾角的射流破土装置。(b) 倾角调整装置及喷嘴平面图。 α 是喷嘴内收缩角， L 是喷嘴出口平行段长度， d 是喷嘴出口直径

为实现实验过程中喷嘴角度的随时可调整，结合现有铝型材框架设计了喷嘴角度调节装置。喷嘴角度调节装置根据所需调整夹角参数可实现射流角度调整。针对喷嘴与海床泥面夹角，在靠近喷嘴端可通过半圆螺栓孔实现前后双向0~90°调节，调节时只需松动紧固螺栓转动调节所需角度即可。实验中所选择喷嘴为长径比(出口平行段长度与喷嘴出口直径之比)为1.25，内部收缩角为13°的圆锥形喷嘴。此型喷嘴不仅可以获得良好的射流效率，而且可获得良好的射流性质。

3.2. 开沟深度测量方法

在开沟深度测量设置上，综合考虑实验水池条件及测量方案，针对不锈钢实验水池尺寸设计直线轴承导向式细杆探测装置，装备设计如图4所示。细杆探测法是指将细长直杆缓慢插入水中直至其触碰到实验底质后进行深度测量，装置由支架、光轴、绳索、滑管、标尺、浮球、转轴和摇柄组成，通过将多个细杆进行并列并通过绳索进行牵引，一次测量获得同一截面多个位置处的深度。该方法不仅不需要排水测量，而且可实时测量不同截面处的沟型，效率较高，但每次仅可以测量一个深度，不能测量完整沟型数据，且细杆导向性较差，测量时会引入额外误差，有待进一步设计优化。

测量过程中，同时测量同一截面12个点作为沟深数据点，探测细杆底部加配浮球提供一定浮力，防止细杆在水中快速下落插入土壤中。测量过程将装置放置于测量位置上方，待细杆缓慢在水中下落直至与土面接触，记录细杆前后变化即可在不排水情况下获得水下沟深。

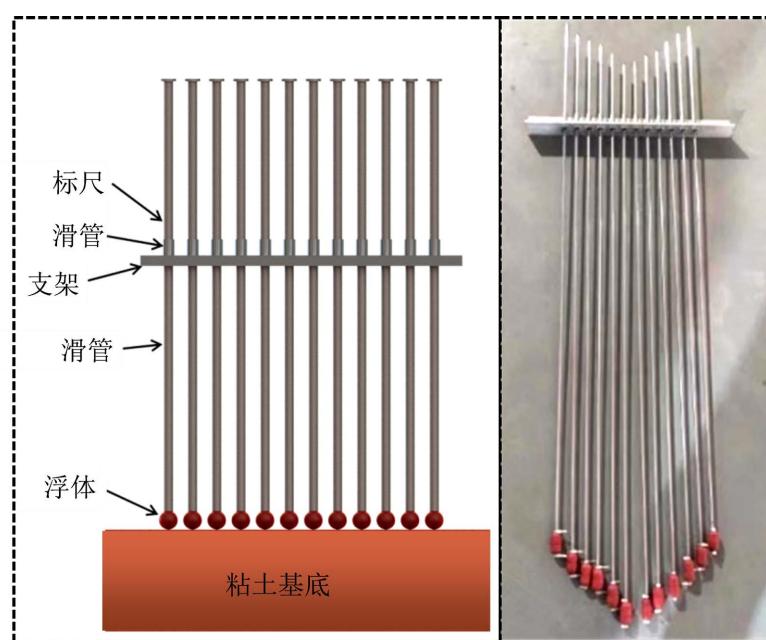


Figure 4. Schematic diagram of the groove measuring device. The left side shows the measuring device in actual measurement, the right side shows a physical drawing of the measuring device
图4. 沟型测量装置示意图。左为测量装置在实际测量中的情况，右为测量装置的实物图

3.3. 土壤配置方法

在土壤配置方法上，为达到所需土体抗剪强度，需要对粘土与粉土比例及试件养护时长进行探索。在制备粘土土样时，采用黄土、高岭土与水泥混合的方法，在不同时间点分别测量土体的剪切强度，当土体剪切强度达到强度要求后进行开沟实验。如图5所示，配置过程中选用三种不同配置比例，不同配置比例及养护时间后，土体的表层抗剪切强度如表1所示。

考虑到配置时间以及需要大量配置，参考固结法和添加水泥的方法，首先进行小规模土体配置。通过配比实验可知，在粉土与粘土各 50%时分别养护 4 小时和 24 小时的土体抗剪强度可达到 10 kPa 和 14 kPa，并且配比中不含水泥粉。以渤海海域海床为例，其不排水抗剪切强度约为 10.2 kPa，因此，实验中进行 10 kPa 粘性土材料配置，且为设置土体抗剪强度对照试验，提高材料利用效率，同时进行 14 kPa 粘性土材料配置。

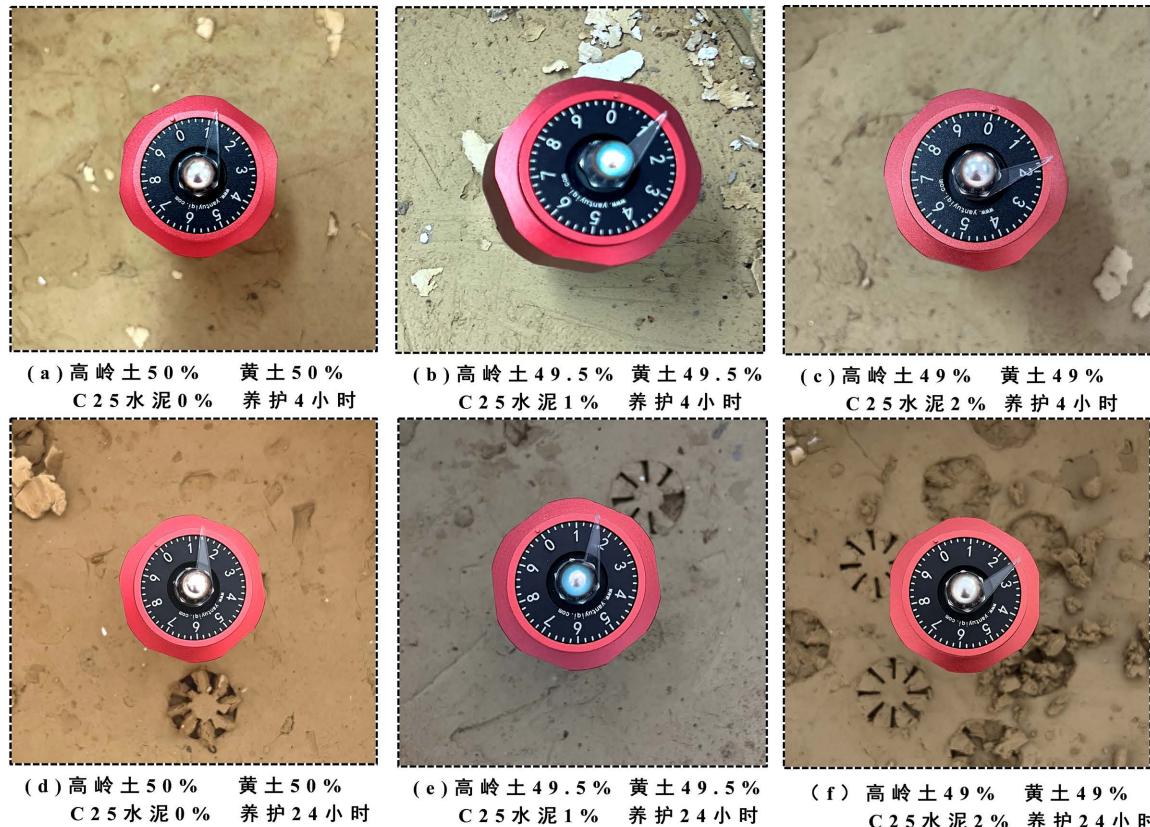


Figure 5. Soil proportioning and hardness measurements

图 5. 土壤配比及硬度测量

Table 1. Cohesive soil blending ratio

表 1. 粘性土配比

土样编号	黄土	高岭土	C25 水泥	养护 4 小时强度	养护 24 小时强度
1	50%	50%	0%	10 kPa	14 kPa
2	49.5%	49.5%	1%	12 kPa	15 kPa
3	49%	49%	2%	16 kPa	24 kPa

3.4. 单喷移动嘴射流实验结果

单喷嘴移动射流开沟实验部分主要研究在一定出口流速下射流破土深度与喷嘴倾角、土壤强度、喷嘴移动速度之间的关系，实际开沟作业中射流喷嘴往往与海床面呈一定角度进行射流切割破土，实验过程通过专用喷嘴夹具对喷嘴角度进行调整，考虑到喷嘴倾角较大将会影响最大破土深度，所以倾角变化范围设定为 0° 到 7°。对两种水平移动速度 5 mm/s、10 mm/s，两种土壤强度 10 kPa、14 kPa，8 种喷嘴倾

角 0° 、 1° 、 2° 、 3° 、 4° 、 5° 、 6° 、 7° 进行32组单喷嘴移动射流实验，研究不同土壤强度不同水平移动速度下，喷嘴倾角对于最大开沟深度的影响，实验时喷嘴均保持零喷射靶距。实验所用装置实物图以及实验所开沟槽如图6所示。



Figure 6. Physical drawing of the device used for the experiment and the grooves made for the experiment.

图6. 实验所用装置实物图以及实验所开沟槽。图中标注了测量时的点位

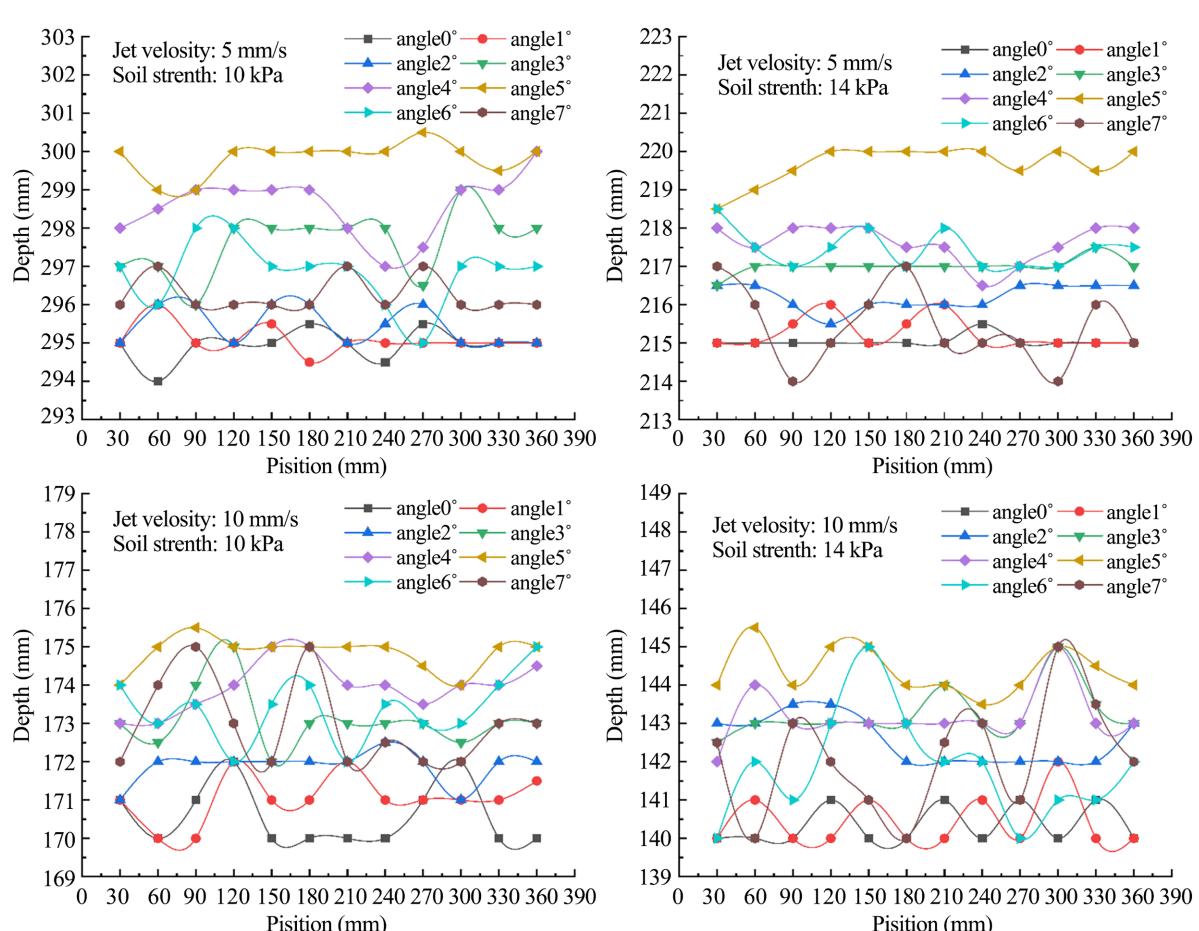


Figure 7. Trench furrow depth for different jet angles

图7. 不同射流角度开沟沟深

实验结果如图 7 所示。10 kPa 土壤强度及 5 mm/s 移动速度工况下，有倾角射流破土与垂直移动射流破土(无倾角)破土深度在 295 mm~300 mm, 5°倾角开沟深度达到 300 mm; 10 kPa 土壤强度及 10 mm/s 移动速度工况下，有倾角射流破土与垂直移动射流破土深度均在 170 mm~175 mm, 5°倾角开沟深度达到 175 mm; 14 kPa 土壤强度及 5 mm/s 移动速度工况下，有倾角射流破土与垂直移动射流破土深度均在 215 mm~220 mm, 5°倾角开沟深度达到 220 mm; 14 kPa 土壤强度及 10 mm/s 移动速度工况下，有倾角射流破土与垂直移动射流破土深度均在 140 mm~145 mm, 5°倾角开沟深度达到 145 mm。

通过实验结果可知，最大开沟深度随土壤强度的上升及喷嘴水平移动速度的变大而变小，10 kPa 土壤水平移动速度变大一倍，最大开沟深度变为原来深度的 57.6%，14 kPa 土壤水平移动速度变大一倍，最大开沟深度变为原来深度的 65.1%。移动速度对于强度较小的土壤影响稍大，原因可分析为同样出口速度和移动速度下，较软土壤开沟深度更深，射流衰减较大，较硬土壤开沟深度更浅，射流衰减较小，因此在移动速度变大时，较深层次土壤开沟需要射流接触时间更久，而对于较硬土壤，本身开沟深度较浅，射流衰减较弱，对深度影响稍小。

另外，因使用的抽吸泵所能提供的最大喷射压力有限，射流倾角的改变并不会在很大程度上影响射流开沟的最大的深度，但射流倾角的变化会直接影响水土的接触角度、二次冲刷效果，这些变化会间接对最大开沟深度产生影响。在相同射流能力及土壤硬度下，改变射流倾角会略微影响开沟深度，在 5°倾角时可开挖最大沟深，这在图 7 上侧所示结果中可明显看出，在另外几组实验结果中也可观察到相应趋势，这与仿真分析取得的结果相一致。

4. 结论

本文针对海洋工程中黏性土海底底质射流开沟合格海底管道铺设沟槽的迫切需要，通过仿真与实验分析一定移动速度、土体剪切强度下，喷嘴倾斜角度对于开沟深度的影响，设计出了一种可变倾角的射流系统，为今后射流式开沟机的设计与优化提供了新的角度与方法。本文主要工作和结论如下：

- 1) 首先，总结了国内外众多学者在对射流的各种性质对开沟效果的影响及用于射流破土的计算机仿真方法方面的研究进展及成果。
- 2) 基于 HyperMesh 与 LS-DYNA 联合仿真搭建单喷嘴移动射流破土仿真模型，分析了移动速度、射流速度及射流倾角对于开沟效果的影响，在相同射流能力下，改变射流倾角会略微影响开沟深度，且存在开沟效果最佳的射流倾角。
- 3) 搭建了单喷嘴移动射流破土实验装置及沟型测量装置，创新设计了喷嘴角度调节装置，进行了单喷嘴移动射流破土实验，验证了存在开沟效果最佳的射流倾角的结论。

参考文献

- [1] 王亮. 国内海底管道挖沟装备现状介绍[C]//中国造船工程学会, 中国海洋学会, 中国石油学会, 中国高科技产业化研究会. 2016 年深海能源大会论文集. 2016: 390-393.
- [2] 唐立志. 适用于硬质黏土的淹没射流物理模型[J]. 油气储运, 2016, 35(4): 432-438.
- [3] 董俊伟. 海底开沟机射流破土数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- [4] 郑健, 来向华, 陈小玲, 等. 黏性土淹没射流破土实验研究[J]. 海洋学研究, 2019, 37(1): 67-74.
- [5] Zhang, S., Zhao, M., Ge, T. and Wang, C. (2016) Experimental Research on Trenching in Stiff Clay by Submerged Vertical Traveling Jets. *Journal of Coastal Research*, **32**, 365-373. <https://doi.org/10.2112/jcoastres-d-14-00038.1>
- [6] Liu, J., Lan, X., Wang, G., Luo, S. and Yang, Z. (2022) Study on the Erosion Morphology of Cohesive Soil under the Vertical Impact of a High-Pressure Moving Water Jet. *Applied Sciences*, **12**, Article No. 12343. <https://doi.org/10.3390/app122312343>

-
- [7] Li, J., Lee, M., Kang, H., Kim, M. and Cho, G. (2021) Design, Performance Evaluation and Field Test of a Water Jet Tool for ROV Trencher. *Journal of Marine Science and Engineering*, **9**, Article No. 296. <https://doi.org/10.3390/jmse9030296>
 - [8] Wang, B., van Rhee, C., Nobel, A. and Keetels, G. (2021) Modeling the Hydraulic Excavation of Cohesive Soil by a Moving Vertical Jet. *Ocean Engineering*, **227**, Article ID: 108796. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108796>
 - [9] Pan, Y., Zhai, S., Meng, X., Pei, K. and Huo, F. (2022) Study on the Fracturing of Rock by High-Speed Water Jet Impact. *Processes*, **11**, Article No. 114. <https://doi.org/10.3390/pr11010114>
 - [10] Liang, D., Zhao, X. and Martinelli, M. (2017) MPM Simulations of the Interaction between Water Jet and Soil Bed. *Procedia Engineering*, **175**, 242-249. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.019>
 - [11] 杨志鹏, 刘剑, 蓝雄东, 等. 基于 ALE 算法的水射流破土特性[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(15): 6378-6384.
 - [12] 邱玥钦, 蓝雄东, 刘剑, 等. 基于响应面分析的淹没水射流破土施工参数优化设计[J]. 矿业科学学报, 2024, 9(1): 32-41.