

适用于中空管桩的高压射流破碎关键技术研究

袁玮皓, 赵 龙, 袁一翔, 王志华, 严 浪, 王晓东, 包 蓁

上海隧道工程有限公司, 上海

收稿日期: 2025年11月8日; 录用日期: 2025年11月29日; 发布日期: 2025年12月12日

摘 要

针对地下工程中传统刀具直接破除桩基所产生的弊端, 进行高压射流切割桩基的可行性研究, 开展了高压磨料射流切割等比中空管桩试验。研究结果表明: 高压射流切割每隔 20° 的纵向切割以及间隔100 mm的环向切割, 可以实现法兰连接部分的破碎, 且破碎后的粒径不大于180 mm, 达到了试验所需的破碎要求; 切断中部法兰需同时满足高切割压力(>180 Mpa)和低切割速度(<12 mm/min)。

关键词

隧道工程, 中空管桩切割, 高压射流破碎技术, 直接破除

Study on Key Technologies of High-Pressure Water Jet Demolition Applicable to Hollow Tubular Piles

Weihaoyuan, Long Zhao, Yixiang Yuan, Zhihua Wang, Lang Yan, Xiaodong Wang, Zhen Bao

Shanghai Tunnel Engineering Co., Ltd., Shanghai

Received: November 8, 2025; accepted: November 29, 2025; published: December 12, 2025

Abstract

Aiming at the shortcomings of traditional tools in directly breaking pile foundations in underground engineering, a feasibility study on cutting pile foundations using high-pressure water jet technology was conducted. Experiments involving cutting scaled-down hollow tubular piles with abrasive water jets were carried out. The research results indicate that longitudinal cuts at 20° intervals combined with circumferential cuts at 100 mm intervals can achieve the fragmentation of the flange connection section. The resulting fragmented particles have a size of no more than 180 mm, meeting the crushing

requirements of the experiment. To cut through the central flange, it is necessary to simultaneously satisfy the conditions of high cutting pressure (>180 MPa) and low cutting speed (<12 mm/min).

Keywords

Tunnel Engineering, Hollow Tubular Pile Cutting, High-Pressure Jet Demolition Technology, Direct Removal

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

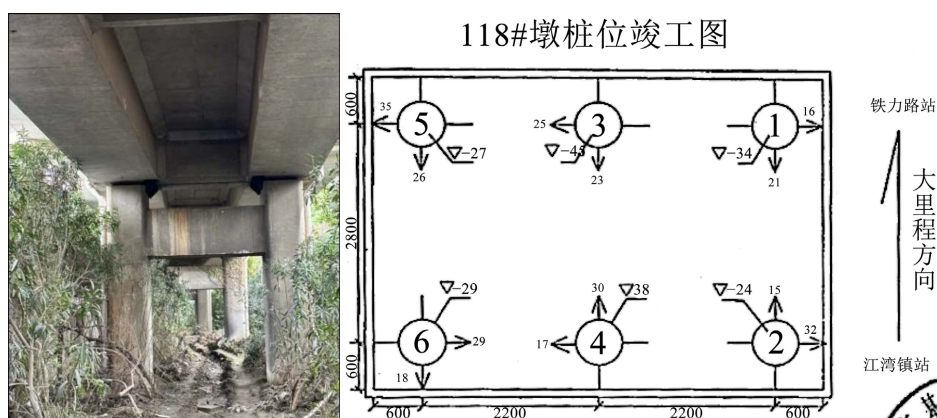
1. 引言

随着地下工程建设规模的不断扩大,在城市建筑密集区无法避免地会正面遭遇桩基、孤岩等障碍物,若采用传统方法破除[1]势必会增加工期、扩大成本和扰动周边环境。随着盾构法的不断发展[2],盾构直接破除障碍物技术实现了突破,相继完成深圳地铁9号线[3]、上海地铁7号线和10号线[4]区段桩基的直接切削,但目前仍面临着刀具的磨耗、崩断等难题。

磨料水射流作为一种液固两相射流,是由高压水射流混合磨料颗粒形成,因其具有较大的能量而广泛运用于工业切割技术中[5]。若将作为破除地下障碍物的切割刀具,将有效解决现有刀具损耗难题,目前已有较多的学者对射流在隧道领域的运用进行了探索,刘鹏飞[6]等将开展了射流切割盾构泥饼试验研究,中铁一局也成功地研制出了全球第一台射流联合机械破岩盾构,但目前对于磨料射流切割金属管桩技术仍不完备,尚无可直接借鉴的相关参数。

2. 工程概述

通铁路隧道位于上海同济路与富锦路交叉口附近,盾构需从地铁三号线 PIII118 桥墩正下方穿越。PIII118 墩下部结构为双柱式桥墩接承台,桩基采用 $\phi 600$ PHC 管桩,管桩深度 51.9 m,单个承台下共 6 根。管桩接头端板为 19 mm 厚的 Q235 法兰接头(单侧),如图 1 所示。接头位置正位于盾构机刀盘中心区域位置,钢结构接头不易于被刀盘切削,最终可能会形成 $\phi 600$ mm 端板整体,难以通过刀盘以及排渣,存在施工风险。因此在切割前期需要进行陆地试验,确保使用磨料射流装备可以将桩基整体破碎,形成易于通过盾构泥水吸口的碎块(粒径小于 180 mm)。



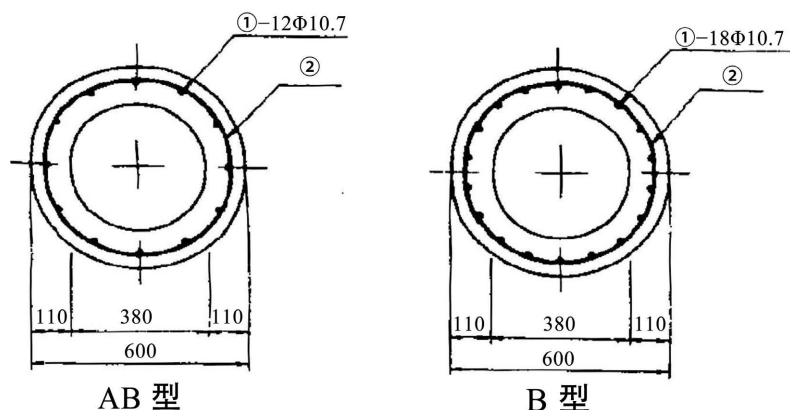


Figure 1. Schematic diagram of a pipe pile

图 1. 管桩示意图

3. 工法对比分析

盾构法施工中遇到地下管桩时，最安全及经济的施工方式为利用大型设备或沉井开挖法移除管桩。当施工区域受限时，通过适当调整盾构的掘进参数和模式进行直接掘进，但施工过程中管桩上部分高强度结构会影响到盾构机切削及出渣效率，易引起刀具过量磨损甚至损坏，同时管桩被刀盘切削时受力状况差极可能影响管桩切削效果，使得切削粒径过大，造成出渣不畅乃至堵塞。

在本次施工项目中，若采用高压水射流设备破除地下管桩，可实现高压水射流设备沿管桩轴线升降移动进行竖向切削，将原有的圆筒形块进一步破碎成更小粒径的扇形块，有利于刀盘的切削及排渣，综合来看该工法无论在设备的操作性、体积及破碎效果均具备优势。

本次研究基于上海通铁路隧道桩基切割的施工需求，对高压射流切割中空管桩的可行性进行试验研究。

4. 试验研究

本次切割模拟体为 1:1 复制地铁三号线 PIII118 桥墩桩基，将法兰环浇筑在水泥桩中，固化后形成长 3 米，直径 0.6 米的圆形桩基，放入试验池中，使用磨料射流切割设备对模拟体(图 2)进行切割试验。

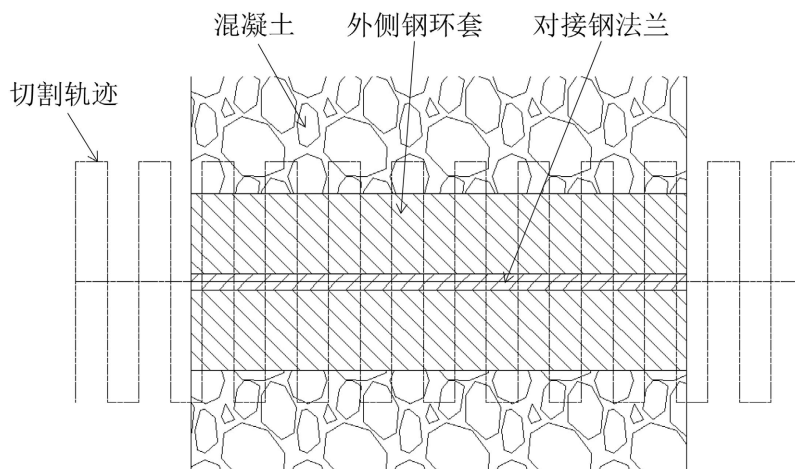


Figure 2. Cutting test schematic

图 2. 切割试验示意图

4.1. 试验设备

试验设备采用中海油高压射流切割设备，如图 3 所示，包含高压泵、控制室和磨料桶等设备，在高压射流外喷管处安装夹具套筒用以控制油缸的行程(图 4)。



Figure 3. High-pressure jet testing apparatus
图 3. 高压射流试验装置图

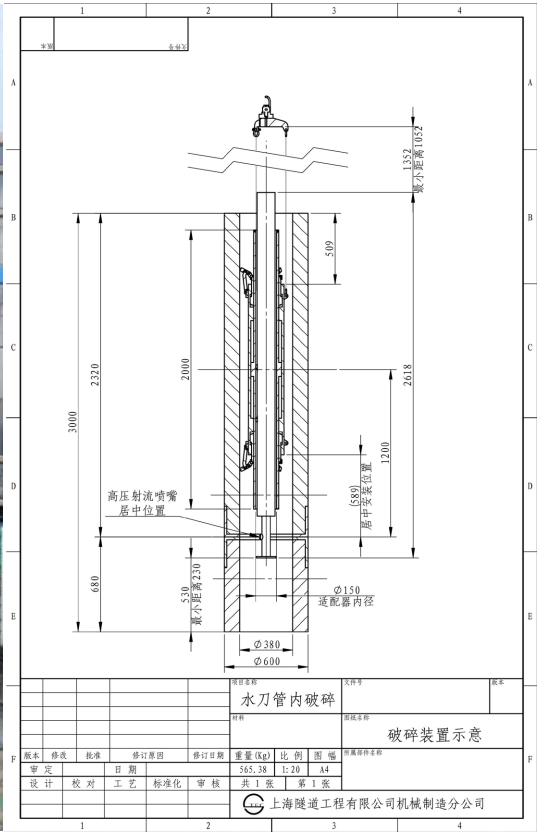


Figure 4. Improved design of the high-pressure jet nozzle
图 4. 高压射流喷头改进设计

4.2. 试验流程

试验流程如图 5 所示，破碎装置自上而下进行轴向切割(共 600 mm 行程)，切割期间按照破碎装置设计速度缓慢切割，上部 250 mm 长度按照 66 mm/min 切割速度切割混凝土及外侧钢环套；中间 100 mm 长度按照 25 mm/min 的切割速度切割金属法兰接头，下部 250 mm 长度按照 66 mm/min 切割速度切割混凝土及外侧钢环套。

模拟体轴向环切完成后，将破碎装置移动至预定位置进行环向切割，切割过程中实时监控切割参数，通过切割参数实时调整切割策略，完成环向切割。

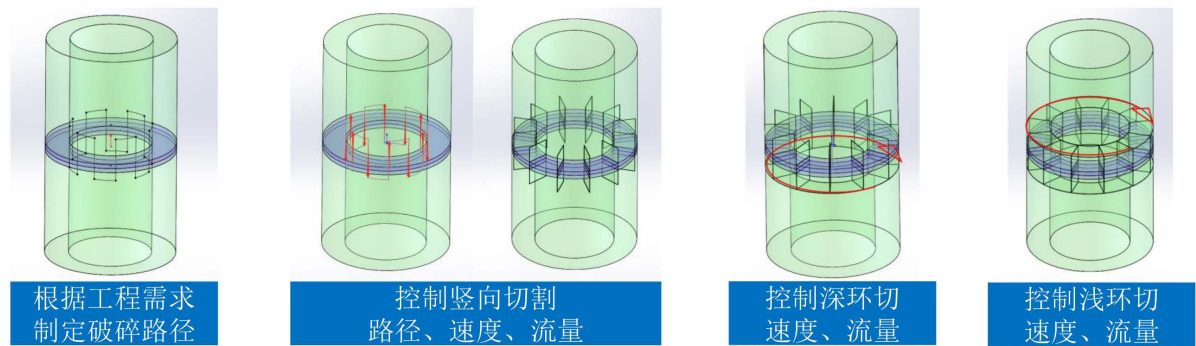


Figure 5. Cutting process flowchart
图 5. 切割流程

4.3. 试验结果分析

(1) 纵向切割

纵向切割共开展了 13 次试验，切割路径如图 6 所示，实线为切割路径，虚线为移动路径，前 3 次纵向切割试验中混凝土块和外侧钢套环可在 180 Mpa 压力和 25 mm/min 移速下被轻易切割，但法兰处在最大压力(220 Mpa)和较慢移速(17 mm/min)下仍无法完成完全切断(图 7)，因此后续的试验主要针对对接法兰开展。

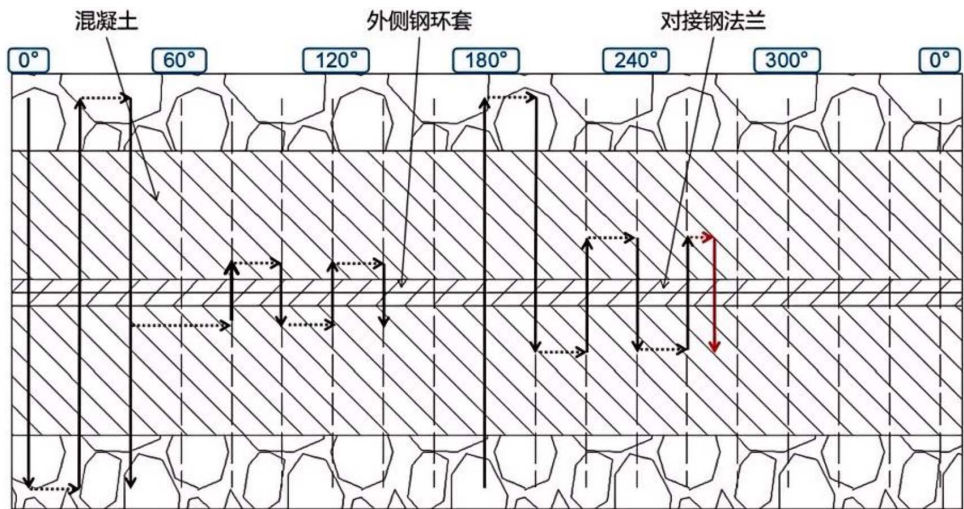


Figure 6. Longitudinal cutting path
图 6. 纵向切割路径

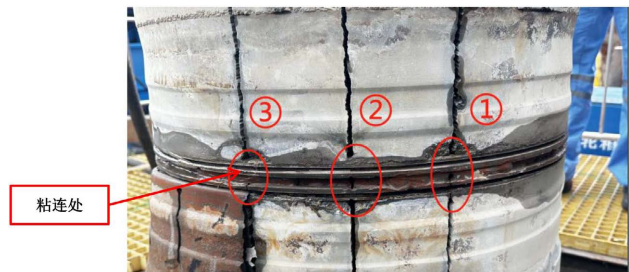


Figure 7. Cutting results from the first three tests
图 7. 前 3 次试验切割效果

法兰切割试验结果见表 1，依据试验结果，切断法兰需同时满足高切割压力(>180 MPa)和低切割速度(<12 mm/min)，否则极易产生切割残余。

Table 1. Cutting results from Tests 4 to 13
表 1. 第 4~13 次切割结果

切割次数	位置	切割压力	移动方向	移动速度(切割法兰)	切割长度	试验结果
4	80°	200 MPa	纵向	25 mm/min	60 mm	除法兰部分仍有粘连，其余全部切断
5	100°	220 MPa		20 mm/min		
6	120°	220 MPa		15 mm/min		
7	140°	220 MPa	纵向	12 mm/min	60 mm	全部切断
8	180°	190 MPa	纵向	12 mm/min	600 mm	全部切断(设备故障，法兰部分出现重复切割情况)
9	正转至 200°	190 MPa	纵向	12 mm/min	600 mm	法兰环存在粘连
10	220°	195 MPa	纵向	17 mm/min	140 mm	除法兰部分仍有粘连，其余全部切断。
11	240°	185 MPa		15 mm/min		
12	260°	185 MPa		12 mm/min		
13	270°	185 MPa	纵向	8 mm/min	140 mm	切割结果：法兰环存在极少粘连(约 2 × 2 × 2 mm 的粘连体积)

(2) 环向切割

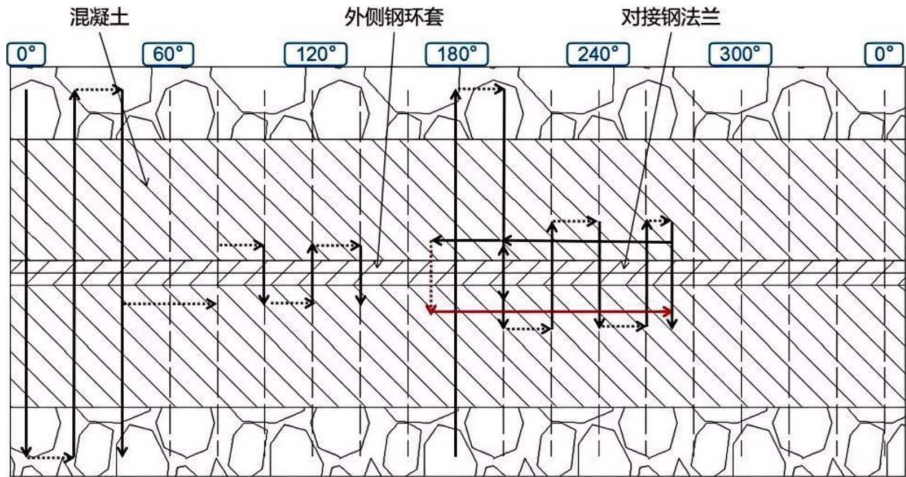


Figure 8. Circumferential cutting path
图 8. 环向切割路径

为实现高压射流破碎形成的最小中空管桩法兰连接的最小粒径,对 200°位置,即第 9 次切割时剩余的粘连部分进行再次切割,从而完成 200°位置完全切割,与 180°割缝形成的切割扇区,最终再与两道相隔 100 mm 的环切形成最小破碎扇块。图 8 中的横向实线为两次环向路径,切割数据和结果见表 2,从相关数据及图 9 的实际效果可以看出,高压射流较好对区域试验块完成了较好的切割。

Table 2. Circumferential cutting results

表 2. 环向切割结果

切割次数	旋转角度	切割压力	移动方向	移动速度	切割长度	切割时间	试验结果
1	270°~200°	190 MPa	环向	300°/h	366	14 min	达到切割效果
	200°~169°		环向	300°/h	162	7 min	
2	169°~270°	190 MPa	环向	300°/h	470 mm	20 min	达到切割效果



Figure 9. Circumferential cutting effect

图 9. 环向切割效果

(3) 试件测量

在所有的切割试件中,180°~200°区间内形成的是最小粒径试件,最小粒径试件的粒径为 175.72 mm,小于 180 mm 的粒径需求,达到最小粒径的试验要求(图 10)。



Figure 10. Minimum particle size measurement

图 10. 最小粒径测量

对 200°~270°扇块中,未完全切割穿透的缝隙进行测量,并统计该工况下的试验参数(表 3),进一步对比证明了切断法兰需同时满足高切割压力(>180 MPa)和低切割速度(<12 mm/min)的施工要求。

Table 3. Measurement of incompletely cut through gaps
表 3. 未完全切割穿透的缝隙测量

角度	切割压力	移动速度	切割时间	剩余未切割穿透厚度
220°	195 MPa	17 mm/min	17 min	32 mm
240°	185 MPa	15 mm/min	20 min	27 mm
260°	185 MPa	12 mm/min	25 min	18 mm
270°	185 MPa	8 mm/min	28 min	穿透

5. 结语

- (1) 高压射流切割试验中，每隔 20°的纵向切割以及间隔 100 mm 的环向切割，可以实现法兰连接部分的破碎。
- (2) 水射流破碎后的粒径不大于 180 mm，达到了试验所需的破碎要求。
- (3) 为保证切割效果，切割法兰环时，切割压力应保持在高切割压力(>180 Mpa)，纵向移动速度保持在低切割速度(<12 mm/min)，并且在切割完成后宜进行切割速度约为 30 mm/min 回扫循环切割。

参考文献

[1] 徐前卫, 朱合华, 马险峰, 等. 地铁盾构隧道穿越桥梁下方群桩基础的托换与除桩技术研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 34(7): 1217-1226.

[2] 王梦恕. 中国铁路、隧道与地下空间发展概况[J]. 隧道建设, 2010, 30(4): 351-364.

[3] 孙波, 肖龙鸽, 孙正阳, 等. 深圳地铁盾构穿越建筑群及切削桩基施工[J]. 隧道建设, 2015, 35(6): 571-578.

[4] 傅德明. 盾构切削混凝土模拟试验和切削桩基施工技术[J]. 隧道建设, 2014, 34(5): 472-477.

[5] 弓永军. 磨料水射流切割技术研究现状及其发展趋势[J]. 液压与气动, 2016(10): 1-5.

[6] 刘朋飞, 温博为, 杨钊, 等. 基于高水压射流的盾构泥饼切割试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(增刊 1): 230.