

超高压喷射搅拌成桩(墙)施工工艺及应用

徐 璋

(上海宏波工程咨询管理有限公司, 上海市 201707)

摘 要: 随着地下空间开发的蓬勃发展,国内深基坑工程越来越多,国内现有施工设备及技术无法满足超深基坑围护止水及地基加固施工需求。介绍了国内唯一的、目前世界上能施工直径最大、深度最深、最先进的超高压喷射搅拌成桩(墙)旋喷工艺。总结了大直径旋喷工法的特点,通过实际工程应用实例,阐述了超高压喷射搅拌成桩(墙)工法在城市建设的应用前景。

关键词: 垂直度;水灰比;提升速度;喷嘴流量;浆液比重

中图分类号: TU473.1

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2020)11-0122-05

0 引 言

超高压喷射搅拌成桩(墙)即 N-Jet 工法(以下简称 N-Jet 工法)是通过钻管(杆)连接特殊喷浆装置(钻头)全方位旋转或角度旋转、向上提升、变换提升等方法结合多喷嘴多角度喷射切削土体(喷射角度 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 、垂直自由设定),通过水泥浆液的高压喷射切削土体,将切削土体与浆液混合搅拌,凝固后可形成圆形、扇型、网格状圆形、网格状扇形的桩体形状,同时配有一套国际先进智能化、数字化的施工管理装置,对浆、气、水流量及施工时地内压力实时监控,对周边扰动微小,特别是对于复杂敏感地质成桩(墙)、止水帷幕及加固效果理想,可实现大深度地基改良,最大深度达 100 m 以上,桩径大质量好,最大桩径可达 10 m 且适应各种复杂地质。1 工艺简介

N-JET 工法是通过钻杆全方位旋转或角度旋转、向上提升、变换提升等方法结合多喷嘴多角度喷射操作,可形成圆形、扇型、网格状圆形、网格状扇形的桩体形状。N-Jet 工法是目前世界上能施工直径最大、深度最深最先进的旋喷工艺。

2 工艺特点

(1)成桩速度快、质量好和材料使用少;喷气、喷浆的结合及交叉喷射搅拌提高效率,从而缩短施工时间,使施工所需水泥的使用量和排浆量减少。

(2)成桩的多样性,加固的桩体形状 4 种类型:圆形、扇形、网格状、自由组合四种类型;

(3)经济性和适应各种复杂地质的地基加固、构造物防护、地墙侧壁加固、地基改良、止水、软地层加固、隔离加固等工程;施工时间、水泥使用量、排泥量的减少,使施工成本下降。

(4)对周边扰动微小,特别是对于复杂敏感地质成桩(墙)、止水帷幕及加固效果理想,最大深度达 100 m 以上,最大桩径可达 10 m,可实现大深度地基的改良且桩径大质量好。

(5)可实现垂直、倾斜施工。

(6)实现两次切削土体,确保土体和浆液均匀。

(7)加固直径可以自由选择,N-JET 工法桩桩径可在 2~10 m 选择,360°旋转喷射,消除喷射死角。

3 N-JET 主要桩型、桩径、强度、适用范围

N-JET 主要桩型、桩径、强度、适用范围见表 1。

表 1 N-JET 主要桩型、桩径、强度、适用范围表

类型	桩型	桩径	强度	用途
Z1	圆形	直径 2~7 m	标准	地基加固、构造物防护、地墙侧壁加固、地基改良、止水、软地层加固
	扇形	半径 1~3.5 m		
Z2	圆形	直径 4.5~8 m	标准	地基加固、构造物防护、地下连续墙墙、侧壁加固、地基改良、止水、软地层加固
	扇形	半径 2.25~4 m		
Z3	网络状圆形桩体	直径 2~7 m	低	地基加固、止水、隔离加固、软地基加固
	网络状扇形桩体	半径 1~3.5 m		
	扇形桩体	半径 1~3.5 m		
ZF	现场需求设定	半径 1~5 m	自由	地基加固、构造物防护、地下连续墙墙、侧壁加固、止水、隔离加固等

收稿日期: 2020-06-01

作者简介: 徐璋(1971—),男,工程师,从事工程监理工作。

4 N-JET 工法

N-JET 超高压喷射工法前端改良部模式,见图 1。

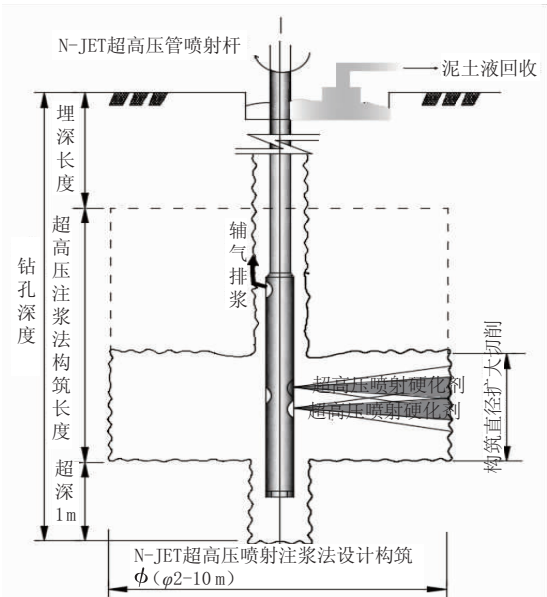


图 1 N-JET 超高压喷射工法前端改良部模式图

4.1 施工工艺流程图

施工工艺流程见图 2。

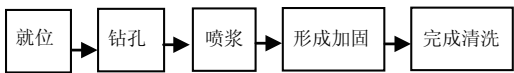


图 2 施工工艺流程图

正式施工前先做 3 根试桩,试桩完成 7 d 后在离桩中心 1/4 处取芯(取芯过程控制 1/200 垂直度),确定桩径及成桩质量,根据试桩的质量情况技术参数作相应调整。

4.2 N-JET 工法桩(墙)施工方法

4.2.1 施工准备

(1)开挖沟槽;(2)桩位放样;(3)修建排污和灰浆拌制系统。

4.2.2 引孔钻机就位

保证钻杆应与桩位一致,偏差应在 10 mm 以内,钻孔垂直度误差小于 0.5%;钻孔前应调试泥浆泵,使设备运转正常;校验钻杆长度,引孔深度略比设计深度深 50~100 cm。

4.2.3 引孔钻进埋设套管

用钻机预先在成桩位置进行引孔,减少削孔时间,避免障碍物对 N-JET 钻头的损伤和影响垂直度。引孔直径不小于 220 mm,引孔深度超过桩底 1 m 以上,以保证 N-JET 施工的范围需要。

采用膨润土泥浆护壁提高引孔质量的方法,对上部空孔部位根据地质情况如容易出现塌孔的宜埋入护壁钢管支撑孔壁,钢管埋入深度不小于 4 m。

4.2.4 引孔垂直度的控制

引孔垂直度是控制旋喷桩偏差的关键,引孔必须满足 1/200 要求,在引孔过程中需确保钻机水平状态及钻杆垂直,引孔采用导向钻头,经常检查钻杆垂直度,当钻杆偏差过大上提钻杆至垂直度较好部位开始扫孔,无法扫孔时需回填后重新引孔。上海陆家嘴某地铁工程地下连续墙隔水帷幕引孔垂直度检测数据(60 m 深度,有效直径为 2 400 mm,搭接 1 000 mm,成桩垂直度小于等于 1/200),见图 3 及表 2 某孔检测数据。

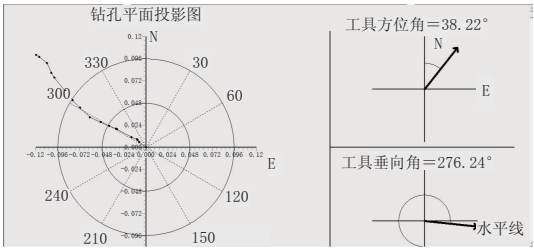


图 3 N-JET 工法某孔位垂直度检测平面投影图

表 2 N-JET 工法某孔垂直度检测数据深度 /m

深度 /m	垂距 /m	水平位 移 /m	垂直 度 /%	X 位 移 /m	Y 位 移 /m	剖面位 移 /m
0.010	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
0.110	0.110	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5.000	5.000	0.080	1.600	-0.010	-0.080	-0.070
10.010	10.010	0.100	1.000	-0.010	-0.100	-0.100
15.490	15.490	0.120	0.770	-0.020	-0.120	-0.110
21.500	21.500	0.170	0.790	-0.010	-0.170	-0.150
25.000	25.000	0.190	0.760	0.000	-0.190	-0.160
28.000	28.000	0.190	0.680	0.000	-0.190	-0.160
31.500	31.500	0.190	0.600	0.020	-0.190	-0.150
35.500	35.500	0.190	0.540	0.040	-0.190	-0.140
39.000	39.000	0.200	0.510	0.060	-0.200	-0.140
42.500	42.500	0.210	0.490	0.060	-0.200	-0.150
45.000	45.000	0.230	0.510	0.060	-0.220	-0.170
46.000	46.000	0.230	0.500	0.060	-0.230	-0.170
49.500	49.500	0.250	0.510	0.080	-0.230	-0.160
53.010	53.010	0.260	0.490	0.100	-0.240	-0.160
56.500	56.500	0.290	0.510	0.130	-0.260	-0.160
60.0	60.0	0.30	0.50	0.140	-0.27	-0.160

检测结果:垂直度为 1/200,满足要求。

4.2.5 喷射钻机就位下放钻杆

4.2.6 成桩施工

(1)机具就位。

(2)贯入多孔管。

(3)喷射注浆。按照要求参数,进行成桩施工,施工时密切监测地内压力,压力不正常时,必须及

时调整。当提升一根钻杆后,对钻杆进行拆卸,注意在拆卸钻杆的过程中,认真检查密封圈和数据线的情况,看是否损坏,地内压力显示是否正常。如有问题及时排除。

(4)出泥。

(5)拔管。

(6)冲洗。

4.2.7 钻机移位

为确保桩顶标高及质量,水嘴提升至桩顶标高以上 100 mm 后停止喷射,继续提升钻杆喷射浆液,浆液喷嘴提升到设计桩顶标高以上 100 mm 时停止旋喷,提升钻杆逐节拆除出孔口,清洗钻杆、注浆泵及输送管道,然后将钻机移位至下一孔。

5 N-JET 与其他大直径旋喷工法(MJS、RJP)的优势比较

N-JET 与其他大直径旋喷工法(MJS、RJP)的优势比较见表 3。

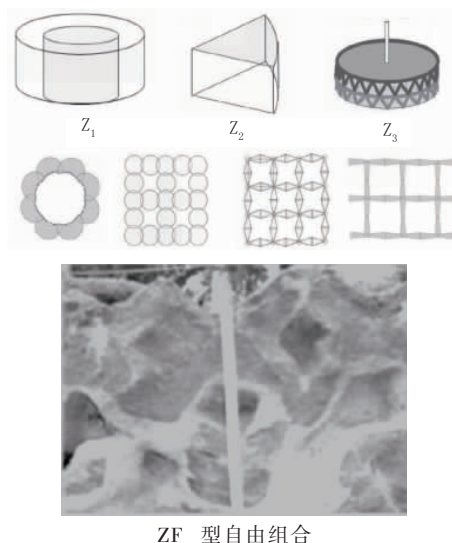
表 3 N-JET 工法某孔垂直度检测数据及结果

名称	N-JET 工法	MJS 工法	RJP 工法
桩径	最大直径 10 m	最大直径 2.8 m	最大直径 3.5 m
深度	最大深度达 115 m(卵石层)	最大深度 60 m	最大深度 60 m
喷射压力	最大 45 MPa	最大 40 MPa	最大 40 MPa
流量	最大 600 L/min	最大 190 L/min	最大 190 L/min
喷嘴数量	2~8 喷嘴喷浆	单喷嘴	上部单喷嘴喷水,下部单喷嘴喷浆
适合地层	卵石、砂性土及黏性土	砂性土及黏性土	黏性土及少量砂性互层
特点	立体布置喷嘴,多种组合,搭接效果好,适合多种地质条件,成桩均匀,环境影响小,对周边扰动微小	单喷嘴,加较均匀,环境影响小	环境影响较小,成桩均匀性较好

小结:RJP、MJS 工法桩最大深度只能达到 60 m,搭接一般在 500~800 mm,且在深度超过 30 m 时每加深 10m 有效直径减少 300 mm。如设计要求深度大于 60 m,考虑大直径旋喷桩施工在不同深度及地层直径折减影响,确保超深基坑围护止水及地基加固下部的搭接质量,N-JET 工法的优势非常明显。

6 N-JET 各种成桩形式,满足各类加固需求

N-JET 各种成桩形式,满足各类加固需求见图 4。



ZF 型自由组合

图 4 N-JET 工法各种成桩形式

7 N-JET 多喷嘴喷射适用范围及构造介绍

(1)各种喷嘴适用范围,见图 5~图 8。



图 5 双喷嘴对称倾斜喷射、适合卵石层、漂石层施工



图 6 多喷嘴单侧喷射,适合大直径大深度加固施工
(2)注浆多孔管构造,见图 9。

8 N-JET 施工质量控制主要技术参数

(1)N-JET 主要技术参数。N-JET 工法桩采用跳打形式进行施工,经试钻确定主要施工参数。

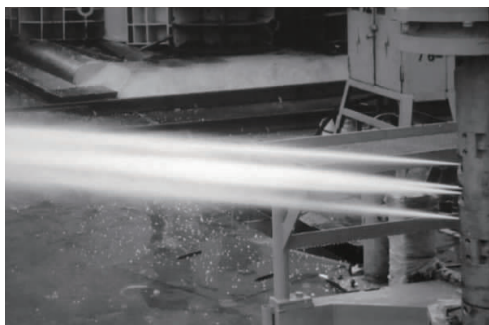
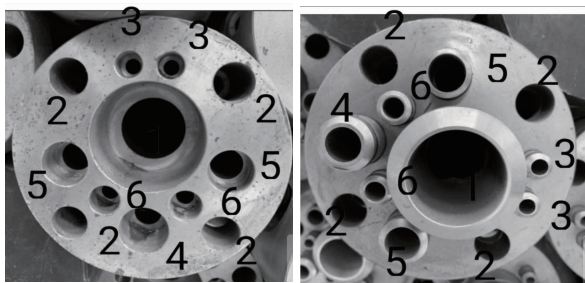


图 7 三喷嘴三角形组合喷射,可以适用于深层槽壁加固,深层地下水隔断,深基坑坑底大直径快速封止地下水



图 8 多喷嘴单侧喷射,适用于超大直径大深度快速加固施工、深基坑底深层止水加固,各种角度复杂地形组合施工



孔号注释:1.注浆孔 2.螺丝孔 3.膨润土孔 4.水孔
5.备用孔 6.气孔

图 9 注浆多孔管雌雄两端接头

主要技术参数有:水灰比、浆液比重、桩径、水泥掺量、注浆压力、空气压力、成桩垂直度误差、水泥用量、提升速度、提升步距、喷嘴流量等。

(2)N-JET 单桩施工周期及主要技术参数匹配性验算。适当的技术参数是成桩质量和材料的用量的前提。以某工程基坑止水帷幕 3 200 直径、桩长:35 m 先序为例。

单桩水泥总用量: $\pi R^2 \rho L F = 3.14 \times 1.2 \times 1.2 \times 18 \times 35 \times 45\% = 1\,281.87 \text{ kN}$

每米用量: $1\,281.87/35 = 36.63 \text{ kN}$

泥浆总量(S 取 1:1): 单桩水泥总用量 $\times (1+1) = 1\,281.87 \times 2 = 2\,563.74 \text{ kN} \approx 256.4 \text{ t}$

泥浆比重: $(1+S)/(1 \div \rho_c + S) = (1+1)/(1 \div 3.1+1) = 1.51 \text{ g/cm}^3$

水泥浆体积 = 泥浆总量 / 泥浆比重 = $256.4/1.51 = 169.8 \text{ m}^3$

桩身总体积 = 水泥浆总量 / 掺量 = $169.8/45\% = 377.33 \text{ m}^3$

每米浆重 = $169.8/35 = 4.851 \text{ m}^3 = 4\,851 \text{ L}$

每米喷浆时间: 每米浆重 / $P = 4\,851/180 = 26.95 \text{ min/m} \approx 27 \text{ min/m}$

单桩喷浆时间: $27 \times 35/60 = 15.75 \text{ h} \approx 16 \text{ h}$

单桩施工周期估算: 单桩施工周期 = 钻机移位 + 下喷浆钻杆 + 单桩喷浆 + 喷浆完成拆钻杆

其中钻机移位: 1~2 小时、下喷浆钻杆: 3~4 h、单桩喷浆: 16 h、喷浆完成拆钻杆: 3~4 h。

单桩施工周期 = 23~26 h

其中: L 为桩长 m; ρ 为土比重, 取 18 kN/m^3 ; ρ_c 为水泥密度, 取 3.1 g/cm^3 ; S 为水灰比, 取 1:1; F 为掺量, 取 45%; P 为喷嘴流量, 取 180 L/min 。

9 N-JET 工法运用现状和前景

随着深基坑工程的规模和深度不断增大,超过地下四层的轨道交通车站和开挖深度超过 30 m 的工程已不少见。各种高压喷射注浆法如 RJP、MJS 等成熟工艺在各工程中广泛使用,但都存在不足,N-JET 作为一种新型的水泥土加固工法,完全能够满足这一趋势的需要。

拿上海市为例,城市发展处于高峰期,市中心的工程周图建构筑物密集,保护等级很高,工程建址的水文地质环境复杂,超深基坑的承压水处理为超深基坑控制的关键,尤其是在缺失⑥号土,微承压水和承压水相接通的地质条件下,承压水治理是基坑施工的重点和难点。

目前 N-JET 工艺尚未成规模的使用,在上海地区一些工程使用为今后成规模推广做了有益的实践。

10 工程实例

10.1 北京地铁大红门站 N-JET

根据开挖结果预定桩径 1.8 m 的桩径最大达到 2.0 m 以上,最小桩径 1.8 m;咬合处水泥土强度高,见图 10。



图 10 北京地铁大红门站成桩截面

10.2 在上海黏土层的喷射效果

在上海黏土层的喷射效果,见图 11、图 12。



图 11 上海黏土层喷射直径达 6 m 180°摆喷成桩质量开挖,水泥土喷射搅拌均匀。



图 12 N-JET20 度摆喷在黏土层成桩半径达 3 m

10.3 上海轨道交通 14 号线陆家嘴站(地下三层)地墙外侧隔水帷幕的应用

(1)工程概况:车站主体为地下三层结构,总长为 219 m,标准段埋深 27.4 m,端头井埋深 28.865 m。基底与⑦₁₋₂层承压水层顶板最近处仅有 1.5 m;⑦₁₋₂层、⑦₂层、⑨层承压水层贯通,承压含水层总厚超过 100 米,给水极其丰富;基坑围护体系为悬挂式地下连续墙(墙厚 1 200 mm,墙深 52 m);基坑北侧为浦东威立雅水厂,大部分建筑为砖混结构,其中高配间距离车站 4 号出入口最近距离 1.8 m,距离主体结构最近距离 15.9 m;基坑南侧为国金大厦燃气房区域,燃气房距基坑最近距离为 3 m;基坑周边临近道路下分布大量地下管线。

(2)考虑到周边环境条件极为复杂,车站施工时将周围环境造成影响。在选择隔水帷幕形式时应认真分析、充分评估周边建(构)筑物对本工程车站深基坑开挖的限制和要求,以便采取相应措施将施工影响降低到允许范围。

(3)主要考虑因素

a. 成孔垂直精度高

根据工程的特点,本工程大直径旋喷桩要求成孔垂直精度不大于 1/200,超过常规标准 1/100,成孔难度非常大。

b. 对周边环境的影响

施工区域离管线较近,为防止对管线造成影

响,大直径旋喷桩施工期间应对周边环境影响减小到最低,施工难度高。

c. 旋喷桩直径大深度深

根据拟定设计方案,大直径旋喷桩采用直径 2 400 mm 及 3 200 mm,深度均为 60 m,考虑大直径旋喷桩施工在不同深度及地层直径有折减,需充分考虑各地层及深度的喷射技术参数及工艺,以确保成桩直径。

d. 旋喷桩需连续施工

因考虑旋喷施工必须连续施工不得间断,开工前需办好夜间施工手续,确保大直径旋喷桩一次成型。

e. 回填土层较厚,引孔难度大

拟建场地杂填土厚度约 1.8~4.5 m 左右。填土厚度较大,且土质松散,尤其是杂填土含较多碎石、三合土等大块硬杂质,采用常规引孔施工难度大,极易造成孔斜及塌孔。

(4)止水帷幕工艺的选择

在止水帷幕工艺上对 RJP、MJS 和 N-JET 等工法进行比较。考虑到 RJP、MJS 等工法桩最大深度只能达到 60 m,搭接一般在 500~800 mm,且在深度超过 30 m 时每加深 10 m 有效直径减少 300 mm 等因素,且本工程隔水帷幕设计要求 60 m 深度,搭接 1 000 mm,成桩垂直度小于等于 1/200。为了保证隔水帷幕在不同深度及地层有效直径以及搭接质量,经过各方反复论证,最终采用 N-JET 工法。

(5)N-JET 主要技术参数(见表 4、表 5)

表 4 有效直径为 2 400 mm 主要技术参数

项目	施工参数
水灰比	1 : 1
浆液比重	1.51
桩径	2 400 mm
水泥掺量	≥45%(先序)/50%(后序)
浆压力	40 ± 2 MPa
空气压力	1.05 ~ 1.2 MPa
成桩垂直度误差	≤1/200
水泥用量	≥3.66 t/m
提升速度	40 ~ 50 min/m(先序);27 ~ 38 min/m(后序)
提升步距	60 ~ 75 s/25 mm(先序);80 ~ 110 min/50 mm(后序)
浆液流量	110 ~ 120 L/min

(下转第 148 页)

表 11 IT 大道综合舱地下综合管廊各管线维护费用统计表

项目名称	长度 /km	数量	维护费单价 /[万元·(km·孔(根)) ⁻¹]	维护费 / 万元
电力中压	5.75	35	0.38	77.48
通讯管道	5.75	18	0.29	29.79
配水 DN400	5.75	1	10.07	57.88
小计			28.72 万元 /km	165.15

注:通信工程管线维护费年单价单位采用“万元 /km·孔”;
其他管线维护费年单价单位采用“万元 /km·根”。

廊费和日常维护费测算模型,通过管廊工程实例分析,得出以下主要结论:

(1)构建的有偿使用收费方式较全面客观,以管线全寿命周期为基准,充分考虑了入廊管线的漏损率、破损率和税率等因素后,采用直埋成本法测算管线入廊费更为公平合理,测算结果更易让管线单位接受,有效地提高了管线单位入廊积极性。

(2)通过空间比例法测算了综合管廊各管线维护费单价,进一步得到成都市综合管廊各管线维护费单价样本数据,该测算结果对于建立成都

市管廊有偿使用收费标准提供参考。

(3)根据成都市地域特征和综合管廊建设实际情况,提出了入廊费和日常维护费的测算方法,符合“一城一价”管廊收费定价模式,验证了本文管廊有偿使用收费测算方法的使用性和科学性。

参考文献:

- [1] 中国人民共和国国务院办公厅.关于推进城市地下综合管廊建设指导意见(国办发[2015]61号)[Z].北京:中华人民共和国国务院办公厅,2015.
- [2] 国家发展改革委,住房和城乡建设部.关于城市地下综合管廊实行有偿使用制度的指导意见(发改价格[2015]2754号)[Z].北京:中华人民共和国国家发展改革委 住房和城乡建设部,2015.
- [3] 于晗.中新广州知识城地下综合管廊收费定价研究[D].广东广州:华南理工大学,2019.
- [4] 张帅.城市地下综合管廊收费定价方法研究[D].山东青岛:青岛理工大学,2017.
- [5] 郭玮,王彦亭,刘景伟,等.青岛市地下综合管廊有偿使用费收费标准研究[J].建筑经济,2019,40(11):94-100.
- [6] 喻萍.海口市地下综合管廊有偿使用费收费标准的测算[J].现代建筑电气,2018,9(5):55-59.
- [7] GB 50838—2015,城市综合管廊工程技术规范[S].

(上接第 126 页)

表 5 有效直径为 300 mm 主要技术参数

项目	施工参数
水灰比	1 : 1
浆液比重	1.51
桩径	3 200 mm
水泥掺量	≥45%(先序)/50%(后序)
浆压力	40 ± 2 MPa
空气压力	0.9 ~ 1.25 MPa
成桩垂直度误差	≤1/200
水泥用量	≥6.5 t/m
提升速度	40 ~ 60 min/m(先序);40 ~ 50 min/m(后序)
提升步距	60~90 s/25 mm(先序);120~150 min/50 mm(后序)
浆液流量	110 ~ 120 L/min

11 结 语

(1)超高压喷射搅拌成桩(墙)工法因具有超深、超大直径、成桩形式多样、成桩速度快等特点,能适应各类复杂地质情况下对超深基坑围护止水及地基加固、隔离加固、防护、地基改良等有特殊要求的工程。

(2)施工单位应掌握地质条件、水文地质特征,通过试桩结果对泥浆比重、垂直度、水灰比、提升速度、提升步距、浆液流量等参数进行合理设置,撰写针对性、可操作性的专项施工方案。

(3)在施工过程中,监理人员除加强现场巡视,检查工艺参数等的执行情况外还应关注周围环境的影响,必须做到实时监测、实时控制。

目前对施工的效果来看,此功法能适用于上海的地质条件,效果理想,待进一步总结工程经验改进工艺,为上海的城市建设增加动力。