

基于 MSJ 工法立井钻井过深厚流沙层的应用研究

Research on the Application of MSJ in the Shafts Across Deep Thick Drift-sand Formation

郭行运, 汪青仓, 刘全辉, 李翔宇 (陕西延长石油榆林可可盖煤业有限公司, 陕西 榆林 719000)

摘要:可可盖煤矿位于陕西榆横矿区北区,处于毛乌素沙漠南缘,在我国黄河以北地区首次引进钻井法施工立井井筒。井筒检查孔揭露第四系流砂层达 61 m,为保证井孔安全顺利施工,避免塌孔事故发生,常规处理工法一般采用冻结法或深孔预注浆,本工程创造性地将土建施工中的 MJS 高压旋喷桩地基处理技术应用到井筒施工中的第四系松散层加固治理中,达到了快速加固流砂层的目的,保证了井孔施工安全,取得了良好的安全技术效果,也为陕北地处毛乌素沙漠的矿井建设采用钻井法施工立井消除松散层塌孔隐患提供了参考;同时,煤矿建设工程是一项综合技术,应结合或借鉴国内外最新科技发展成果来推动本行业技术进步。本工程实践提供了跨界技术合作的成功范例,为广大从事煤矿建设的安全技术管理人员解决本专业遇到的技术难题拓展了思路。

关键词:钻井法; MJS 旋喷; 流砂层; 塌孔; 隐患

中图分类号: TD265 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2022)05-0054-05

Abstract: Kekegai Coal Mine, located in northern Yuheng mining area and on the southern fringe of the Mu Us Desert, introduced drilling method in vertical shaft construction for the first time in the north of the Yellow River. The pilot hole of the shaft reveals that the Quaternary drift-sand formation is up to 61 m thick. To ensure safe and smooth construction of the shaft and avoid borehole collapse, freezing method or deep-hole pre-grouting method is generally used, while in this project, the MJS jet grouting method was creatively adopted in the shaft construction, achieving the goal of fast reinforcement of the unconsolidated formation, guaranteeing the construction safety and obtaining good safety and technical effects. The innovative practice has also provided reference for eliminating the hidden danger of collapse in shaft construction using drilling method in Mu Us Desert area. Meanwhile, coal mine construction is an integration of multiple technologies, thus, the latest scientific and technological achievements at home and abroad shall be combined or learned to drive the technological progress of the industry. This practice is a model of cross-industry technical cooperation, it has provided ideas to those safety and technical management personnel committed to coal mine construction for solving the technical difficulties they encountered.

Key words: drilling method; MJS; drift-sand formation; borehole collapse; hidden danger

1 前言

陕西延长石油可可盖煤矿中央进、回风立井采用钻井法施工,井筒检查孔显示,井筒所处第四系层厚逾 90 m,其中上部为风积沙+萨拉乌苏组松散砂层,厚度达 61 m。钻井法临时锁口基础坐落在第四系松散砂层上,由于本地区松散砂层含泥量少、胶结性差,含水量大,在受力扰动失稳的情况下易形成流

砂,钻孔可能发生塌孔风险,钻井施工前必须对松散砂层进行加固处理。为确保钻井的安全顺利施工,需要采取特殊工法对流沙层进行加固,经论证比较,决定采用 MJS 高压旋喷咬合桩技术加固该深厚松散砂层。

可可盖煤矿隶属陕西延长石油矿业有限责任公司,井田位于榆横矿区北区,总面积 179.42 km²,可采储量 12.39 亿 t,设计规模 1 000 万 t/年,配套建设同等规模选煤厂,服务年限 88.5 年。矿井采用斜井开拓,移交时全井田共布置 5 条井筒,在西部工业场地内布置主斜井、副斜井,在中央风井场地布置中央进、回风立井,在北一风井场地布置北一回风立井。矿井正常涌水量 1 120 m³/h,最大涌水量 1 350 m³/h,水文地质类型为复杂型。

[作者简介] 郭行运(1970-),男,江苏赣榆人,高级工程师,注册安全工程师,长期从事煤矿基本建设及开拓掘进工作。

[引用格式] 郭行运,汪青仓,刘全辉,等.基于 MSJ 工法立井钻井过深厚流沙层的应用研究[J].中国矿山工程,2022,51(5):54-58.

中央进风立井、中央回风立井均采用钻井法施工,井筒设计垂深分别为 513 m、517.5 m,井筒净直径均为 6.0 m,钻孔直径 8.5 m,采用泥浆护壁,泥浆比重 1.18 ~ 1.27 g/cm³、黏度 20 ~ 30 s、失水量 ≤ 20 mL/30 min、泥皮厚度 ≤ 2 mm。中央进风立井施工采用 ZDZD/100 重型多用途全液压工程钻机,该机设计钻井深度 650 m、钻井直径 4 ~ 12 m、最大提升能力 9 000 kN、动力头扭矩 1 000 kN·m、装机功率 960 kW、钻机重量 340 t、转速 0 ~ 22 r/min;中央回风立井施工采用 AD130/1000 型全液压竖井钻机,该机设计钻井深度 1 000 m、最大钻井直径 13 m、最大提升能力 7 000 kN、动力头扭矩 600 kN·m、装机功率 1 050 kW、钻机重量 561 t、转速 0 ~ 22 r/min。井壁在地面预制,井筒上部井壁采用钢筋混凝土,井筒深部井壁采用单层钢板 + 钢筋混凝土,混凝土强

度等级 C40 ~ C70,壁厚 600 mm。

2 工程地质及水文地质简述

以中央回风立井为例,井筒检查孔地质报告显示,第四系厚度 91.62 m,其中萨拉乌苏组以上松散砂土层厚 61.71 m,含风积沙 5.2 m、细砂 50.5 m、亚砂土 2.7 m、粉砂 3.31 m。砂层结构松散,工业场地内全区分布,粒径以 0.5 ~ 0.075 mm 颗粒为主,岩性主要为中细砂,属于松散 ~ 中密状态、不良级配的均匀砂,自然坡角为 39.3°(水上)、28.5°(水下)。地下水位 5.75 m,井筒涌水量 321 m³/d,含水层富水性中等,透水性能良好。砂层下是第四系离石组黄土层,厚度 29.91 m,该地层岩性为棕黄色粉砂土、黏土,遇水黏性较大,易污手,手搓可成条,下部为类钙质结核层,底部见风化洛河组基岩。具体见表 1。

表 1 中央回风立井地质柱状图第四系地层统计表

系	地层		层序	层厚/ m	累深/ m	名称	岩性描述
	统	组					
第四系	全新统	风积沙	1	5.2	5.2	粉砂	浅黄色,松散状,表层含现代植物根系,属风积沙
			2	50.5	55.7	细砂	浅黄色,松散状,初见水位 5.75 m
	上更新统	萨拉乌苏组	3	2.7	58.4	亚砂土	灰绿色,粉砂质亚黏土,含砂量较大,取芯可成型,易污手
			4	3.31	61.71	粉砂	土黄色,松散状,干燥时可随风飞扬
	中更新统	离石组	5	11.39	73.1	粉砂土	棕黄色,粉砂质亚砂土,亚黏土,易污手,手搓成条,下部类钙质结核层
			6	18.52	91.62	黏土	棕红色,遇水黏性较大,手搓成条,失水干硬,岩芯破碎,底部见风化基岩

3 MJS 高压旋喷工艺简介

3.1 工艺原理及应用范围

MJS 高压旋喷桩工法(Metro Jet System)又称全方位高压喷射工法^[1],是从综合角度出发,将浆液加压输送、喷射、地层切割、混合、强制排浆、集中泥浆这一系列工序作为监控对象,是一种能进行水平地基加固和垂直 360°全方位三维地基加固的施工方法,对于周边环境及地基扰动影响微小,能实施大深度地基加固及水面下的施工。

MJS 高压旋喷桩工法在传统高压喷射注浆工艺的基础上,采用独特的多孔旋喷管和前端造成装置,

实现了孔内强制排浆和地下压力监测,并通过调整强制排浆量来控制地内压力,从而大幅度减少对环境的影响,而地下压力的动态调整也进一步保证了成桩直径。

MJS 高压旋喷咬合桩施工技术即将 MJS 高压旋喷桩之间按一定的间距布置^[2],使桩与桩之间的外缘有一定尺寸的交集,保证两桩接茬处有足够的咬合尺寸,使之联成一道密闭的屏障。目前,MJS 高压旋喷咬合桩技术已广泛应用于地铁、地下停车场、深基坑的围墙加固及涌水处理施工中。

3.2 工艺流程

MJS 高压旋喷工艺流程如图 1 所示。

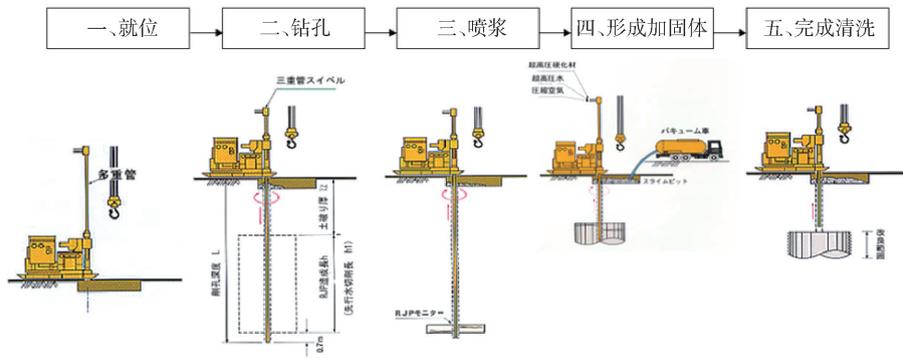


图1 施工工艺流程图

4 施工方案

4.1 施工设备配套选型

拟投入1台套MJS高压旋喷主机、1台引孔机、1台汽车吊机、2台泥浆泵及其他配套设备等。具体见表2。

表2 MJS高压旋喷施工设备配套选型

名称	型号	产地	数量
MJS高压旋喷主机	SI-50S-220-C	日本	1台
高压泵	SG-200SV-C	日本	1台
高压泵	GF-75SV	日本	2台
引孔机	安曼 HDL-180D1	中国	1台
汽车吊	50T	中国	1台
排污泵	NL100-15	中国	1台
空压机	75 kW	日本	1台
水泥浆搅拌系统	BZ-20L	中国	1台
泥浆泵	3PNL	中国	2套

4.2 施工参数设计

4.2.1 技术参数的确定

经专家论证,井口钻井设备载重应力及扰动干扰随着地层的深入而逐渐散发消失,当松散层加固深度超过钻井直径3倍以上时,锁口处地层集中应力基本消除。设计MJS旋喷咬合桩帷幕内径9.2 m,外径12.2 m;单桩深度30.0 m,直径1500 mm, @988 mm,桩间咬合512 mm,搭接宽度1129 mm,数量34根;引孔直径300 mm,引孔深度31 m。

桩身设计强度不低于1.5 MPa,采用P. O42.5普通硅酸盐水泥,水灰比1:1,水泥浆液压力40 MPa,空气压力0.8~1 MPa;浆液流量85~100 L/min,空气流量1.0~2.0 m³/min,水流量50~75 L/min,水泥掺入量750 kg/m³,全圆喷射。具体参数根据试桩情况可做调整。主要技术参数见表3。

表3 主要技术参数统计

序号	名称/单位	参数	序号	名称/单位	参数
1	数量/根	34	8	水灰比	1:1
2	桩径/m	1.5	9	水泥浆压力/MPa	40
3	深度/m	30	10	浆液流量/L·min ⁻¹	85~100
4	咬合/mm	512	11	提升速度/mm·min ⁻¹	≤55
5	桩间距/mm	988	12	空气压力/MPa	0.8~1
6	旋喷角度/(°)	360	13	倒吸水压力/MPa	0~20

4.2.2 技术参数验算

按锁口本身及设备载荷计算锁口压力,按长圆管环向稳定临界压力验算。

$$\sigma = \frac{G_{\max} + Q_s}{S} = \frac{627 + 1555}{564} = 0.38 \text{ bar}$$

式中,σ为锁口压力,bar;G_{max}为钻机加钻台平车的重量,t;Q_s为锁口自重,t;S为锁口盘的水平承载面积,m²。

$$q_{ij} = \frac{EI}{(1-\mu^2)R^4} \quad \text{其中,} I = \frac{\pi D^4 \left[1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4\right]}{64}$$

式中,q_{ij}为水泥旋喷桩帷幕环向稳定临界压力,bar;E为旋喷桩砗体弹性模量,取3×10⁵ Pa;I为圆环截面惯性矩,m⁴;μ为砗体泊松比,取0.02;R为旋喷桩帷幕内半径,m;d为旋喷桩帷幕内直径,m;D为旋喷桩帷幕外直径,m;

经计算,q_{ij}=4.9 bar,q_{ij}>σ,MJS旋喷咬合桩帷幕环向承载力富余。

4.3 施工顺序

采用引孔机按顺序依次施工注浆引孔,随后采用MJS高压旋喷机依次进行旋喷桩的施工。MJS高压旋喷桩施工过程中必须具有强制排泥功能,相邻桩体在强制排泥的时候,上一根桩水泥需满足终凝时间条件(24小时)。为保证MJS桩施工质量,采

取跳桩施工方案,桩位施工顺序如图2所示:1号→9号→18号→27号→2号→10号→19号→28号→3号→11号→20号→29号→4号→12号→21号→30号→5号→13号→22号→31号→6号→14号→23号→32号→7号→15号→24号→33号→8号→16号→25号→34号→17号→26号。

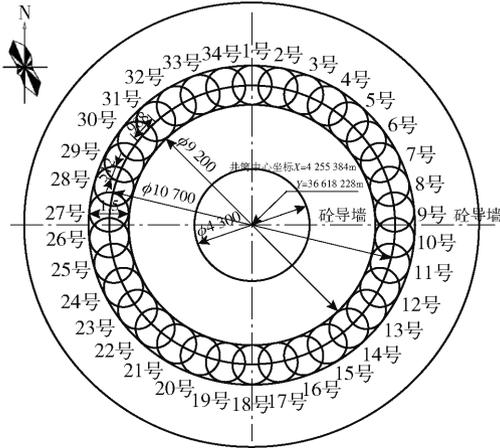


图2 桩位施工顺序图

5 MJS 高压旋喷快速施工技术

5.1 桩位放样

施工前用全站仪测定旋喷桩施工的控制点,即井筒中心,根据桩位布置图,用钢尺和测线实地布设桩位,并用方木定位,一桩一标识,保证桩孔中心位置偏差不大于50 mm。

5.2 导墙施工

旋喷桩施工前需进行导墙施工,导墙能为MJS施工机具提供作业平台,同时起到钻孔定位和导向的作用^[3]。导墙设计为素混凝土结构,混凝土强度等级C30,浇筑厚度0.4 m,外圈直径17.1 m,内圈直径4.3 m,中心位置预留宽1.5 m的导向槽,MJS旋喷桩圈直径10.7 m。导墙结构如图3所示。

5.3 试桩

为确定现场施工参数,验证实际旋喷后的咬合效果,检查旋喷后地层的抗压强度,需在正式旋喷施工前进行试桩,然后根据试桩情况调整施工参数,达到松散层最佳加固效果。

试桩布置位置在进风立井锁口西侧20 m处。试桩3根,直径1500 mm,长度30.0 m,桩间距988 mm,咬合512 mm;引孔直径300 mm、深度31 m。跳打施工,先施工两侧的2根,再施工中间的1根。

试桩完成后,经对试桩开挖及咬合部分钻孔取芯检验,各项加固指标符合设计值。

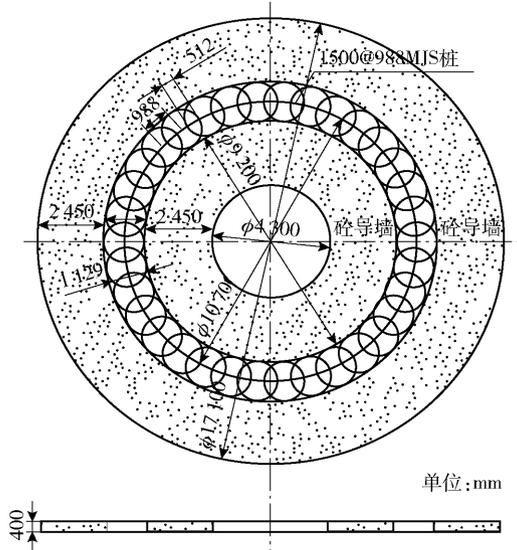


图3 导墙结构图

5.4 引孔施工

采用1台国产安曼HDL-180D1型引孔机造孔,配备多孔钻杆、三叶钻头^[4],引孔直径300 mm,保证引孔口径大于旋喷管外径100~200 mm、终孔深度大于开喷深度1.0 m;采用泥浆护壁,泥浆比重1.1~1.2 g/cm³。

造孔每钻进5 m用水平尺测量机身水平和立轴垂直1次,保证引孔垂直度偏差不大于1/300。

5.5 MJS 高压旋喷桩施工

采用1台SI-50S-220-C型日本产MJS高压旋喷桩机配合专用 $\phi 142$ mm多孔旋喷注浆管施工旋喷桩。采用360°摆喷施工,水泥浆液压力40 MPa,浆液流量85~100 L/min,倒吸压力0~20 MPa,旋喷管提升速度不大于55 mm/min。施工过程中,通过各种控制措施,保证桩身位置误差不大于50 mm,成桩直径不小于设计直径^[5]。

施工步骤:对接旋喷管和钻头→旋喷管下放→校零、设定参数→孔底喷射→提升喷射→逐节拆除旋喷管→冲洗旋喷管→单孔喷射完毕。

为保证桩底部的施工质量,孔底喷射时,首先用清水向上喷射1000 mm,压力20 MPa,喷射时间5 min,然后把清水切换成水泥浆,旋喷管重新下放到孔底后开始向上正常喷射施工。

5.6 旋喷机移位

旋喷提升到设计桩顶标高时停止旋喷,将旋喷管提出孔口,清洗设备、注浆泵及输浆管路,然后将旋喷机移位,依次循环,直至将全部旋喷桩施工完毕^[6]。

6 技术经济效果

6.1 主要技术经济指标

MJS 高压旋喷咬合桩施工采用两班 12 h 工作制,每班 6 人,中央进、回风立井各布置 1 台引孔机和 1 台旋喷机施工,单井耗用水泥约 1 580 t,平均每桩 46.5 t,单井费用约 300 万元。中央进风立井旋喷桩 2021 年 5 月 6 日开工、5 月 29 日旋喷完毕,中央回风立井旋喷桩 2021 年 5 月 7 日开工、5 月 30 日旋喷完毕;中央进、回风立井各施工旋喷桩 34 根,施工工期均为 23 d,每台 MJS 高压旋喷机平均日成桩 1.5 根,达到了快速加固松散层的目的。而据测算,采用冻结法或深孔预注浆加固松散层,工期约需 6 个月、3 个月,单井费用约需 1 000 万元、800 万元。

6.2 质量检测结果及应用效果

1) 质量检测结果

采用文登 GJ-150S 型钻机 + 113 mm 钻头 + 108 mm 岩芯管,选择旋喷桩加固圈内 28 d 旋喷桩样品全深取芯,经检测,岩芯完整^[7],单抽抗压强度平均达 2.2 MPa 以上,具体如图 4 所示,符合设计预期要求。

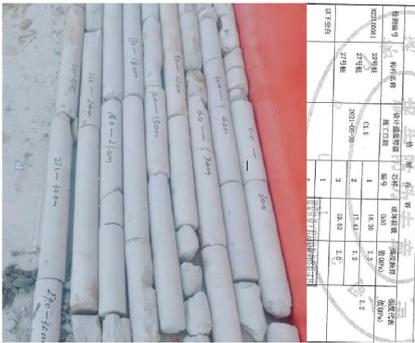


图 4 旋喷桩钻芯取样检测结果

2) 应用效果

中央进风立井第四系松散层厚 85.1 m,其中萨拉乌苏组以上流砂层厚 61.11 m,井筒于 8 月 6 日正式开钻,8 月 14 日钻进至萨拉乌苏组底界,平均日进尺 7.67 m;中央回风立井第四系松散层厚 91.62 m,其中萨拉乌苏组以上流砂层厚 61.71 m,井筒于 7 月 12 日正式开钻,7 月 21 日钻进至萨拉乌苏组底界,平均日进尺 7.05 m。经超声波测井,井筒偏斜度为零,泥皮厚度 2 mm,井壁无坍塌现象。

7 施工中需注意的几个问题

(1) 引孔成孔质量直接决定了高压旋喷桩施工质量,必须保证引孔中心与桩位中心误差小于 50 mm,垂直度误差小于 1/300。

(2) 旋喷应自下而上连续进行,确保后台水泥的连续供应。若旋喷管不能一次提升完成,则两次旋喷注浆的搭接长度至少应保持 200 mm 以上,以保证固结体的整体性和连接质量要求^[8],防止断桩。

(3) 每一孔的高压旋喷注浆完成后,应及时清洗多孔旋喷管和输浆管路,防止因清洗不及时使浆液在输浆管路中凝结沉淀,堵塞输浆管路和喷嘴,影响下一桩的施工。

8 结论

(1) 可可盖煤矿立井井筒采用钻井法施工,实现了全机械破岩、打井不下井本质安全。施工过程中遇到的深厚流沙层通过引用 MJS 高压旋喷桩技术已得到有效解决,且技术经济成本有着显著的优势。

(2) 煤矿建设工程是一项综合技术,应结合国内外最新科技发展成果来推动本行业技术进步。因此,跨界技术合作是一个有效途径。

[参考文献]

- [1] WANG Z F, SHEN S L, HO C E, et al. Investigation of field-installation effects of horizontal twin-jet grouting in Shanghai soft soil deposits [J]. Canadian geotechnical journal, 2013, 50(3): 288 - 297.
- [2] CROCE P, FLORA A, MODONI G. Experimental investigations of jet-grouting [J]. Geotechnical Special Publication, 2014, 412(1): 45 - 55.
- [3] NJOCK P G A, CHEN J, MODONI G, et al. A review of jet grouting practice and development [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2018, 11(16): 459.
- [4] 徐至均. 高压喷射注浆法处理地基[M]. 北京:机械工业出版社, 2004.
- [5] 刘晓丰. 高压喷射注浆检测装置研究[硕士学位论文][D]. 长沙:中南大学, 2008.
- [6] 曾国熙, 卢肇钧, 蒋国澄. 地基处理手册[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1988.
- [7] 高大钊. 土力学与基础工程[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1998.
- [8] 邓开鸿. 高压旋喷桩的成桩机理和挤土效应研究[D]. 广州:华南理工大学, 2012.