

同轴双向搅拌钻机关键技术与应用研究

林光杰 黄振勇

温州振中基础工程机械科技有限公司

DOI:10.32629/etd.v7i4.20273

[摘要] 为解决传统水泥土搅拌桩机在软土地基处理中存在的搅拌不均匀、成桩质量不稳定、施工效率低等问题,本文设计了一款新型同轴双向搅拌钻机,主要由动力头总成、同轴双钻杆系统、中心距可调式导向架、互剪式钻头及智能电控系统等组成。分析了其工作原理,对动力传动系统进行理论建模与校核,研制物理样机开展性能测试与工程应用验证。结果表明,与传统单向搅拌工艺相比,该钻机搅拌均匀度提升30%以上,桩体强度离散性显著降低,质量合格率达98%;单桩施工周期缩短约40%,为高效、高质量深厚软基处理技术提供参考,具有重要的工程应用价值。

[关键词] 搅拌桩机; 同轴双向搅拌; 软基处理; 设计应用

中图分类号: U415.52+2 **文献标识码:** A

Key Technology Design and Application Research of Coaxial Bidirectional Drilling Rig

Guangjie Lin Zhenyong Huang

Wenzhou Zhenzhong Foundation Construction Machinery Technology Co., Ltd

[Abstract] To address issues such as uneven mixing, unstable pile quality, and low construction efficiency in soft soil foundation treatment with traditional soil-cement mixing piles, this study designed a novel coaxial bidirectional mixing drill rig. It primarily consists of a power head assembly, a coaxial double drill rod system, a center distance adjustable guide frame, a cross-cutting drill bit, and an intelligent electrical control system. The working principles were analyzed, followed by theoretical modeling and verification of the power transmission system. A physical prototype was developed for performance testing and engineering application validation. Results indicate that compared to traditional unidirectional mixing processes, this drill rig achieves over 30% improvement in mixing uniformity, significantly reduces pile strength variability, and maintains a 98% quality pass rate. The single-pile construction cycle is shortened by approximately 40%, providing a reliable technical reference for efficient, high-quality deep soft foundation treatment. This innovation holds significant engineering application value.

[Key words] soil mixing machine; coaxial bidirectional mixing; soft foundation treatment; Design Application

引言

随着我国“交通强国”、“海洋强国”战略的推进,大量基础设施建设向沿海、滩涂等软弱地基区域延伸,对地基处理的承载力、均匀性及施工效率提出了更高的要求。水泥土搅拌法(DCM)作为一种经济高效的软基加固技术,其成桩质量的核心在于水泥浆与土体的搅拌均匀性^[1-2]。然而,传统单向搅拌钻机在深厚软基处理中存在以下问题:①搅拌流场单一,容易在钻杆中心和叶片间形成搅拌盲区,导致桩身强度离散性大;②需要复搅,施工效率低;③单向旋转扭矩导致钻具受力不平衡,在深孔施工中容易偏斜,影响桩基性能;④对周边土体扰动较大^[3-4]。为改善搅拌效果,相关技术研发公司提出了双向搅拌技术,如日本的RAS(Rotary Auger Soil-mixing)工法,该工法通过内外钻杆反

向旋转,显著提升了混合质量。然而,现有双向搅拌设备主要采用双动力头或多动力头驱动单一搅拌轴,导致设备结构复杂、体积庞大、成本高昂,且多轴设备的轴间距通常固定,难以适应不同工程的桩距要求,限制了其推广应用^[5]。

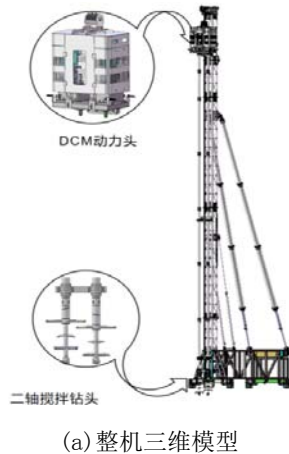
为解决上述问题,本文提出了一种新型同轴双向搅拌钻机,即采用单动力头驱动同轴双钻杆反向旋转,同时实现了钻杆中心距可调。本文重点阐述其总体方案与关键技术设计、理论分析,并研制物理样机进行性能测试验证其应用效能。

1 同轴双向搅拌钻机总体方案与关键技术

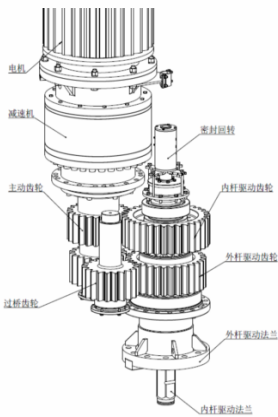
1.1 总体结构与工作原理

该钻机主要由动力头总成(含永磁同步变频电机、减速机、齿轮传动箱)、同轴双钻杆系统(内钻杆、外钻杆)、中心距可调

式导向架、互剪式钻头及智能电控系统等组成。其核心工作原理如图1所示,单一动力头通过内置的复合齿轮系,将动力分配给相互嵌套的内外钻杆,并使之反向旋转^[6]。钻进与搅拌时,内外钻杆间反向旋转的叶片对土体产生强烈的“互剪”作用,形成复杂的空间立体流场,强制土体在水平和垂直方向上翻滚、对流,从而实现水泥浆与土体的快速、无死角混合。该设计将双向搅拌功能高度集成,结构紧凑,为实现多轴联动与中心距调节创造了条件。



(a) 整机三维模型



(b) 动力头传动机构示意图

图1 工作原理示意图

1.2 关键部件设计

1.2.1 单动力头同轴双向驱动与中心距可调机构

该机构是实现设备高集成度与高适应性的核心。在驱动方面,单台动力头内部设计了紧凑的复合齿轮传动箱,实现了单输入、双反向输出的功能,相较于双动力头方案,大幅减小了设备体积与重量^[7]。在调距方面,于动力头安装座上设计了线性导向机构与丝杠/液压调距装置。通过驱动调距装置,可使相邻动力头沿导向支架平滑移动,实现两钻杆中心距在600mm至1000mm范围内的无级调节(图2)。相邻钻杆间增设的中间支撑架进一步保证了长钻杆在多轴同步作业时的整体刚度与稳定性,有效控制钻孔垂直度^[8]。该集成化设计成功解决了传统设备难以兼顾高效搅拌与桩距适应性的难题。

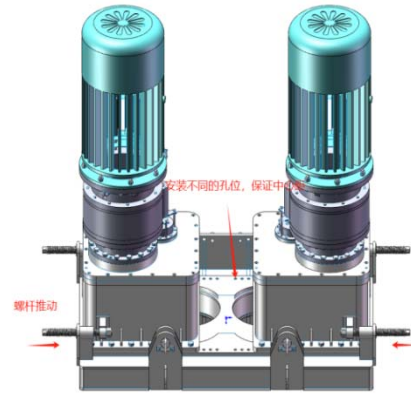


图2 中心距可调机构

1.2.2 高强度抗扭钻杆接头

钻杆接头是传递大扭矩的关键薄弱环节。传统穿孔式销轴连接因开会显著削弱接头截面,造成应力集中。本文设计了一种新型高强度钻杆接头(已获专利: ZL 2023 2 1090519.4),其结构特点在于:内接头设置盲孔,外接头对应设置通孔,销轴穿过通孔后与盲孔底部抵触实现连接(图3)。此结构避免了对内接头(传递核心扭矩)的贯穿性削弱,根据材料力学理论,其抗扭截面模量显著大于同尺寸的穿孔结构,从而在传递同等扭矩时,剪应力更低,抗疲劳强度和可靠性更高^[9]。同时解决了钻杆的内部密封问题,避免了外部泥浆的流入。

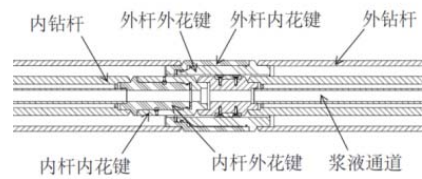


图3 高强度抗扭钻杆接头

1.2.3 “互剪式”搅拌系统与驱动控制优化

(1) 互剪式钻头: 根据内外杆反向旋转的流场特性,优化设计钻头叶片的螺旋升角、叶片数量及角度排布,形成“互剪”效应,解决搅拌盲区的问题,实现立体高效混合^[10]。

(2) 多介质注入系统: 采用多通道高压密封回转接头,实现双组分浆液与高压压缩空气($\leq 1.2\text{MPa}$)的同步输送,有效降低浆液粘度、置换土层中的孔隙气,强化浆液渗透与混合效果^[11]。

(3) 高效驱动与智能控制: 采用2个132kW永磁同步变频电机作为动力源,实现大启动力矩、0-38 r/min调速范围^[12]。开发基于PLC的智能控制系统,通过实时监测扭矩、转速、垂直度等关键参数,实现根据地层变化而自适应调节电流和钻杆转数,保证了施工的安全性及质量可控性^[13]。

2 关键部件设计分析与校核

2.1 传动系统动力校核

根据钻机搅拌工艺要求, 实际施工时采用50kN·m, 实现低速大扭矩钻机; 提升搅拌时采用高速小扭矩, 实现快速、高速搅拌。钻杆输出功率 P_d 、扭矩 T 与转速 n 的关系为

$$P_d = T \cdot \frac{2\pi n}{60} \quad (1)$$

其中, T 为钻杆输出扭矩($N \cdot m$), n 为钻杆转速(r/min), P_d 为钻杆输出功率(kW)。

钻机单轴由一台额定功率为132 kW的永磁同步变频电机驱动。取减速机及齿轮传动的综合效率为90%, 则电机的有效输出功率 P_{eff} 约为119 kW。根据有效输出功率进行传动系统动力校核。

(1) 低速大扭矩钻进工况校核

当单轴最大输出扭矩 $T_{max}=50 \text{ kN} \cdot \text{m}$, 则所需的转速 n

$$n = 9550 \frac{P_{eff}}{T_{max}} \approx 22.7 \text{ r/min} \quad (2)$$

因此, 传动动力系统可在0至22.7 r/min的转速范围内, 稳定提供50 kN·m的最大扭矩, 满足钻机在遭遇坚硬夹层或复杂地层时所需的低速大扭矩破土要求。

(2) 高速提升搅拌工况校核

当钻杆最高转速 $n_{max}=38 \text{ r/min}$, 则此时系统所能提供的扭矩 T 为:

$$T = 9550 \frac{P_{eff}}{n_{max}} \approx 29.8 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (3)$$

因此, 在38 r/min的最高转速下, 钻机能输出近30 kN·m的扭矩, 满足提升搅拌的功率要求, 可以实现高效、快速的搅拌作业, 有效缩短施工周期。综上所述, 单轴动力取132kW永磁同步变频电机与传动系统匹配合理。

2.2 齿轮传动比设计

为了实现内外钻杆同轴反向旋转, 传动系统的传动箱采用了含惰轮的换向齿轮机构。同时, 为了强化“互剪”效果, 将内外钻杆的传动比($i=n_{内}/n_{外}$)设定为非1:1。不同的转速使内外叶片间产生速度差, 进而加强对土体的剪切与搓揉作用。据相关研究及流场模拟分析, 当转速比在1.2至2.2之间时, 搅拌流场的湍动能与混合效率较优, 本文为实现更佳的土体破碎与浆土混合效果, 取内外转杆转速比为1.5。

3 性能测试与工程应用验证

3.1 样机性能测试

根据设计方案研制物理样机(如图4所示), 委托浙江盛诺检测技术有限公司依据JB/T 12316-2015《建筑施工机械与设备多轴式地下连续墙钻孔机》等标准进行检测^[14], 主要技术参数的检测结果如表1所示。



图4 实物样机

表1 主要技术参数设计与检测结果

项目	设计值	测试结果
电机功率(kW)	132×2	132×2
钻杆转速(r/min)	0~38	0~38(连续可调)
单轴最大扭矩(kN·m)	50	≥50
轴数	双轴	双轴
旋转方式	同轴正反转	同轴正反转
中心距可调范围(mm)	600~1000	600~1000(调节顺畅)
噪声(dB(A), 距机7.5m)	≤80	72
连续运转温升℃	≤35	30

3.2 工程应用验证

为了进一步验证同轴双向搅拌钻机实际应用效果, 将钻机在广州、深圳等地的软基处理项目中进一步实际作业测试, 其中地层条件涵盖淤泥、淤泥质土、黏土及砂土地层。工程应用测试反馈情况如下^[15]:

(1) 通过对成桩芯样进行无侧限抗压强度测试, 发现桩身强度分布均匀, 离散系数较传统单向搅拌桩显著降低。桩体完整性好, 质量合格率由传统工艺的约70~80%提升至98%以上。

(2) 双轴同步作业, 与传统单轴单向搅拌钻机相比, 单桩施工周期平均缩短约40%。

(3) 设备中心距可调功能实现了项目对不同桩距的要求, 即一台设备可满足多种设计方案, 减少了设备调配成本, 验证了其良好的工程适应性。

(4) 内外钻杆反向扭矩部分相互抵消, 设备施工时振动极小, 对周边土体和建筑物的影响远小于传统设备。

4 结束语

本文研制了一种单动力头驱动、中心距可调的同轴双向搅拌钻机, 有效解决了传统双向搅拌设备结构复杂、成本高、适应性差的难题。通过对动力传动系统进行理论校核, 验证了功率匹配的合理性; 并开展了设备性能测试与工程应用。测试结果显示, 该钻机搅拌均匀度提升30%以上, 施工效率提高了约40%。因此, 其搅拌均匀性、成桩质量、施工效率和工程适应性方面均显著优于传统设备, 为复杂地质条件下的软基处理提供了一种高效、可靠的搅拌钻机。

[参考文献]

- [1]郑刚,龚晓南.水泥土搅拌桩复合地基技术研究进展[J].岩土工程学报,2018,40(1):1-20.
- [2]刘松玉,钱国超,章定文.软土地基处理[M].2版.北京:人民交通出版社,2017.
- [3]叶观宝,徐超.地基处理技术[M].4版.上海:同济大学出版社,2015.
- [4]张可能,刘志祥.双向搅拌桩技术及其在软基处理中的应用[J].施工技术,2016,45(15):98-101.
- [5]王曙光,邓亚光,李进军.深基坑工程支护结构与施工技术[M].北京:中国建筑工业出版社,2019.
- [6]林光杰.一种带有双向搅拌头的多轴搅拌桩机:CN219961678U[P].2023-11-03.
- [7]曹高峻,陈爱勉,林光杰,等.同轴双向搅拌钻机开发工作总结报告[R].温州:温州振中基础工程机械科技有限公司,2024.
- [8]浙江省经济和信息化厅.浙江省省级工业新产品开发项目立项通知:202403A01096[Z].2024-03-25.
- [9]林光杰.一种钻杆接头:CN220021679U[P].2023-11-03.
- [10]林光杰.同轴双向搅拌桩设备介绍[R].温州:温州振中基础工程机械科技有限公司,2024.
- [11]周红星,李伟,张军.高压旋喷与搅拌复合工法在超深软基中的应用研究[J].岩土力学,2021,42(S1):321-328.
- [12]唐任远.现代永磁电机理论与设计[M].2版.北京:机械工业出版社,2016.
- [13]浙江盛诺检测技术有限公司.桩工机械委托检验报告:ZJW202402073[R].杭州:浙江盛诺检测技术有限公司,2024.
- [14]中华人民共和国工业和信息化部.JB/T12316-2015,建筑施工机械与设备多轴式地下连续墙钻孔机[S].北京:机械工业出版社,2015.
- [15]温州振中基础工程机械科技有限公司.浙江省工业新产品(同轴双向搅拌钻机)鉴定技术文件汇编[G].温州,2024.

作者简介:

林光杰(1982--),男,汉族,浙江瑞安人,大专,工程师,研究方向:桩工设备技术研发与定制化产品开发,长期深耕桩工设备核心领域,以振动锤类、钻机类桩工装备为核心研究对象,开展产品标准化设计、关键技术攻关、性能优化迭代;同时针对各类特殊工程地质、差异化施工工艺及专项工程需求,开展定制化桩工设备的方案设计、技术研发与成果转化,解决特殊工况下桩工装备适配性、高效性、可靠性等核心技术问题,助力桩工机械产品体系完善与工程施工技术提升。