

用于大直径钢圆筒振沉的装配式夹持装置研究

李亮, 张涛, 杨合林*, 苏义如
(中交一航局第一工程有限公司, 天津 300456)

摘要: 针对传统大直径钢圆筒振沉施工中夹持装置与振动梁刚性连接导致适配不同直径钢圆筒时需整体更换振动梁, 造成材料浪费、工期延长及环境污染等问题, 研究一种可快速适配的装配式夹持装置。通过分析激振力传递的力学共轴性要求, 提出在振动梁与夹持器之间增设可更换连接板的模块化设计方案; 对关键连接结构进行材料优选与力学优化设计, 并推导了夹持器径向安装直径与夹持器夹角的计算公式。设计了一种基于高强度螺栓副连接的装配式夹持装置, 其核心连接板采用 Q355D 钢材, 并通过双级螺栓连接体系确保了在高频激振下的连接可靠性与能量高效传递。实际应用中可根据钢圆筒直径快速更换连接板, 无需重构振动梁。该装配式夹持装置实现了连接板的快速适配与更换, 解决了传统工艺的资源浪费与环保问题, 提高了施工效率与经济效益, 具有显著的工程应用价值。

关键词: 钢圆筒振沉; 装配式夹持装置; 模块化设计; 力学优化; 连接结构

中图分类号: U6; U655 文献标志码: B 文章编号: 2095-7874(2026)07-0099-04

doi: 10.7640/zggwjs202607016

Prefabricated clamping device for vibration sinking of large diameter steel cylinders

Li Liang, Zhang Tao, Yang Helin*, Su Yiru

(No.1 Engineering Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300456, China)

Abstract: To address the issues in traditional large-diameter steel cylinder vibration sinking construction, such as material waste, prolonged construction periods, and environmental pollution caused by the need to replace the entire vibration beam when adapting to cylinders of different diameters due to the rigid connection between the clamping device and the vibration beam, a rapidly adaptable prefabricated clamping device was studied. By analyzing the mechanical coaxiality requirements for exciting force transmission, a modular design scheme was proposed that incorporates replaceable connecting plates between the vibration beam and the clamps. Material selection and mechanical optimization design were conducted for the key connection structures, and calculation formulas for the radial positioning dimension of the clamps and the angle between clamps were derived. A prefabricated clamping device based on high-strength bolt connections was designed. Its core connecting plate utilizes Q355D steel, and a two-stage bolt connection system ensures connection reliability and efficient energy transmission under high-frequency excitation. In practical applications, the connecting plates can be quickly replaced according to the cylinder diameter without reconstructing the vibration beam. The prefabricated clamping device enables rapid adaptation and replacement of clamps, solving the resource waste and environmental problems of traditional processes, improving construction efficiency and economic benefits, and demonstrating significant engineering application value.

Key words: steel cylinder vibration sinking; prefabricated clamping device; modular design; mechanical optimization; connection structure

收稿日期: 2025-12-08 修回日期: 2026-03-28

作者简介: 李亮 (1984—), 男, 辽宁葫芦岛人, 硕士, 高级工程师, 桥梁与隧道工程专业, 从事技术质量管理、科技研发及信息化建设工作。

*通讯作者: 杨合林, E-mail: 598182460@qq.com

0 引言

大直径钢圆筒快速成岛技术因其施工周期短、经济性显著等优势,在港珠澳大桥岛隧工程、深中通道岛隧工程等国家重大工程中得到成功应用^[1-2]。该技术体系的核心实施环节——钢圆筒振沉,主要依托多台联动振动锤组产生的激振力,通过夹持装置传递至钢圆筒,使其周围土体液化从而实现下沉^[3]。其中高精度液压夹持系统通过接触面摩擦系数 $\mu \geq 1$ 的曲面咬合机构,可有效实现大直径钢圆筒的静力平衡夹持。为确保激振能量高效、定向地传递至钢圆筒,并保证施工过程的结构安全与系统稳定,必须满足一个关键的力学准则:振动锤的激振力作用线、夹持装置作用于钢圆筒的夹持力合力作用线,应与该合力作用点处钢圆筒截面的形心位于同一条竖直线上^[4]。若两者不共线,将产生有害的偏心力矩,导致能量损耗、筒体偏斜及连接结构局部应力过大。传统施工中,夹持装置通常通过焊接或高强度螺栓直接刚性固定于振动梁底部,构成一个整体^[5]。

传统工艺为满足不同的夹持器夹角,只能为每种工况定制专用的振动梁。这不仅导致钢材(单次约150 t)和工期的巨大浪费,其重复焊接制造过程还会产生严重的职业健康与环境污染问题^[6],违背绿色施工理念。因此,研发一种能快速适应不同夹持器夹角要求的装配式、可调节夹持装置,对提升该技术的通用性、经济性与环保性具有重要意义。本文旨在阐述此类装配式夹持装置的工作原理、结构设计、关键参数确定方法以及实施效果。

1 装配式夹持装置的工作原理与总体设计

如表1所示,不同工程中由于钢圆筒直径 D 不同,夹持器在钢圆筒周向上的分布角度(以下简称夹持器夹角)差异显著。为解决传统刚性连接振动梁适配性差问题,本研究提出模块化设计思想,将振动梁与夹持器之间的连接界面进行“解耦”。核心思路是:保持振动梁主体结构不变,在其与夹持器之间增设一个可独立设计、制造的“夹持器连接板”。通过更换具有不同接口尺寸的连接板,即可改变夹持器相对于振动梁的安装角度,从而适应不同直径钢圆筒对夹持器夹角 θ 的要求,而无需改动或更换振动梁本身。

表1 不同工程参数下夹持器夹角

Table 1 Clamp angles under different engineering parameters

工程名称	钢圆筒直径 D/m	单振动梁连接夹持器数量 n /个	夹持器夹角/ (°)
港珠澳大桥岛隧工程	22	3(对应8台锤)	7.49
深中通道工程 ^[9]	28	3(对应12台锤)	5.88
三亚新机场工程	30	3(对应12台锤)	5.49
渤海湾工程	24	3(对应12台锤)	6.87

以渤海湾工程为例,钢圆筒直径为24 m,采用12台液压锤组,其装配式夹持装置总体架构如图1所示。每个振动锤下方连接1个振动梁,每个振动梁通过3块独立的夹持器连接板与3个夹持器相连。中间夹持器的连接板为标准件,两侧夹持器的连接板则根据计算出的夹角 θ 制成系列化标准件。当钢圆筒直径变化时,仅需更换两侧的连接板,即可实现整套振沉设备快速适配新的工况。

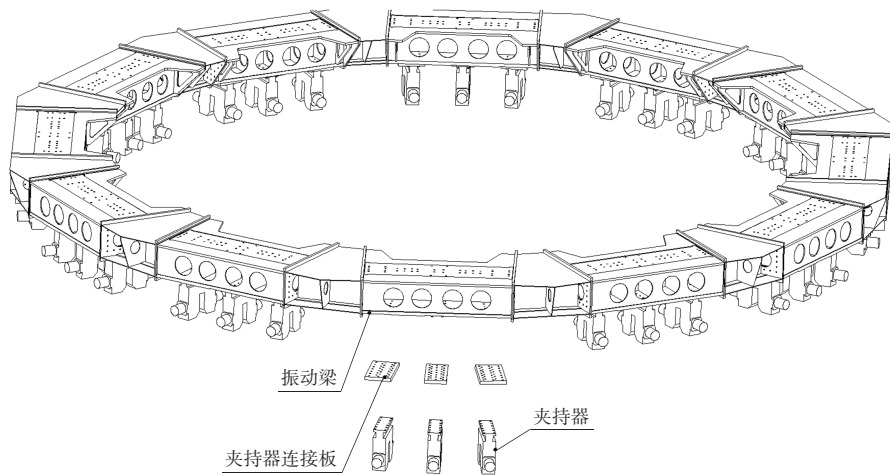


图1 装配式夹持装置总体架构示意图

Fig. 1 Overall structure schematic of the prefabricated clamping device

2 关键连接结构设计

连接板作为实现模块化功能的核心部件, 其与振动梁、夹持器之间的连接必须保证在高频、高载荷振动下的绝对可靠, 设计采用双级高强度螺栓连接体系, 见图 2。

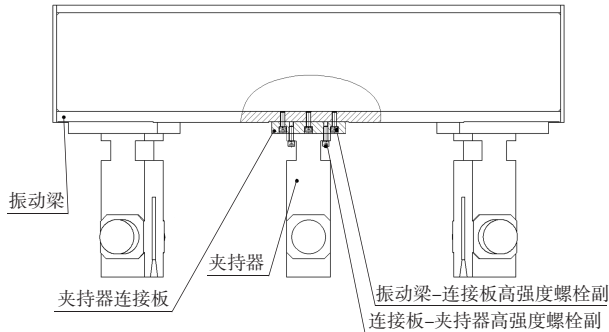


图 2 夹持装置连接结构示意图

Fig. 2 Detailed diagram of connection structure of the clamping device

2.1 连接板材料选用

夹持器连接板选用 Q355D 低合金高强度结构钢, 屈服强度 ≥ 355 MPa, -20 °C 冲击功 34 J。该材料经正火处理具有优良的强韧性及抗疲劳性能, 能满足振动工况下的循环载荷冲击^[7]。

2.2 一级连接界面(振动梁-连接板)

采用 12 组 10.9 级高强度螺栓副^[8], 振动梁底板加工内螺纹, 连接板加工沉头孔, 实现螺栓全埋入, 降低应力集中。通过精密控制螺纹加工精度(如 H6 级公差)和螺栓预紧力(0.6~0.7 倍屈服强度), 确保界面在高频振动下不发生相对滑移。

2.3 二级连接界面(连接板-夹持器)

采用 18 组 8.8 级摩擦型高强度螺栓副, 形成摩擦-承压复合连接。螺栓孔位采用等强度布局, 孔径按 H12 级公差控制。采用螺旋插补铣工艺加工螺纹孔, 保证表面粗糙度 $Ra \leq 3.2$ μm , 以维持长期振动下的预紧力稳定性。经有限元分析验证, 该连接体系在最大激振力(5 000 kN)下, 连接界面滑移量小于 0.06 mm, 应力分布均匀, 一阶固有频率(135 Hz)远高于工作频率(12.5~35 Hz), 有效避免共振。

3 夹持器定位关键参数

3.1 夹持器径向安装直径

为确保激振力有效传递, 夹持器应作用于钢圆筒的特定径向位置。通过总结工程经验与力学分析, 夹持器径向安装直径 D_1 可简化为式(1):

$$D_1 = D - 400 \quad (1)$$

式中: D_1 为夹持器径向安装直径, mm; D 为钢圆筒直径, mm。

该公式为经验简化公式, 便于工程快速使用。

3.2 夹持器夹角

夹持器布置示意图如图 3 所示, 其中 L 为相邻夹持器在安装圆上的弦向距离, 由设计计算确定。当工程中钢圆筒直径改变, 为适应不同地质条件而调整振动锤数量时, 夹持器夹角也须进行相应改变。

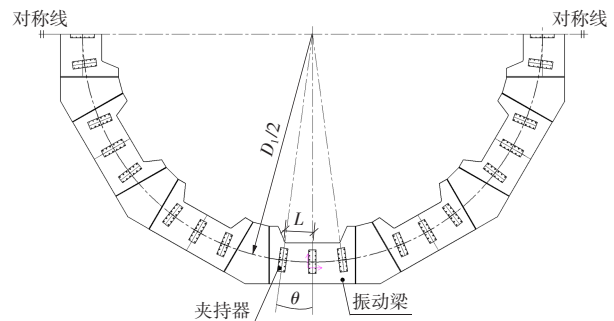


图 3 夹持器布置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the clamping device arrangement

对于单个振动梁连接 n 个夹持器的情况, 相邻夹持器间的圆心角 θ (即夹持器夹角) 由相邻夹持器在安装圆上的弦向距离 L 和夹持器径向安装直径 D_1 决定, 其计算公式为:

$$\theta = 2 \arcsin \frac{D_1}{L} \quad (2)$$

在本文讨论的常见设计中($n=3$), 中间夹持器位置固定, 两侧夹持器对称布置, 其与中间夹持器的夹角由式(2)计算得出。通过更换连接板改变 L 值, 即可调整夹持器夹角 θ 。

4 实施效果与优势分析

该装配式夹持装置已在多项工程中成功应用, 装置整体拆装便捷, 具备良好的工程推广价值。与传统整体式振动梁相比, 其优势主要体现在以下 4 个方面。

1) 显著节约成本与工期。避免为不同直径钢圆筒重复制造振动梁, 单次施工可节约钢材约 150 t, 缩短工期约 30 d。

2) 提升施工环保性与安全性。大幅减少了现场焊接作业, 从根本上降低了电焊烟尘、有害气体及热辐射污染, 改善了作业环境, 符合绿色建

造要求。

3) 提高设备通用性与周转率。该装置通过更换系列化连接板可适配多种直径钢圆筒,在夹持器夹角 $5^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 范围内均能适用,显著提升了设备通用性、周转率与施工适用范围。

4) 连接可靠、维护方便。模块化设计使连接检查、螺栓预紧力复核及局部更换更为便捷,维护成本降低约35%。

5 结语

本文针对大直径钢圆筒振沉施工中夹持装置适配性难题,提出并设计了一种装配式、模块化的夹持装置解决方案。通过增设可更换夹持器连接板,实现了振动梁与夹持器连接角度的灵活调整,满足了不同直径钢圆筒对激振力共轴传递的力学要求。对关键连接结构进行了材料与力学优化,确保了连接的可靠性。推导了夹持器定位关键参数的计算公式,为设计提供了依据。工程实践表明,该装置能有效解决传统工艺存在的资源浪费、工期长、污染重等问题,具有较高的经济效益和推广价值。

参考文献:

- [1] 滕爱国,吴启和,仇正中.大直径钢圆筒多锤联动振沉设备及工艺[J].中国港湾建设,2017,37(9):85-89.
Teng A G, Wu Q H, Qiu Z Z. Joint pile-hammer vibration sinking equipment and construction technology of large diameter steel cylinder[J]. China Harbour Engineering, 2017, 37(9): 85-89.
- [2] 孔令磊,刘昊彬,王从李.深中通道西人工岛钢圆筒成岛应用及稳定性分析[J].中国港湾建设,2022,42(1):7-10,56.
Kong L L, Liu H B, Wang C L. Application and stability analysis of island-formation technology by steel cylinder in west artificial island of Shenzhen-Zhongshan Link[J]. China Harbour Engineering, 2022, 42(1): 7-10, 56.
- [3] 孟凡利,孔令磊,刘昊彬,等.大直径钢圆筒振动下沉工艺及设备的开发与应用[J].中国港湾建设,2015,35(7):116-119.
Meng F L, Kong L L, Liu H B, et al. Development and application of vibration sinking technology and equipment of large diameter steel cylinder[J]. China Harbour Engineering, 2015, 35(7): 116-119.
- [4] 付院平,李家林,黄涛,等.人工岛围护结构钢圆筒及副格振沉装备与施工技术[J].中国港湾建设,2019,39(3):52-56.
Fu Y P, Li J L, Huang T, et al. Equipment and construction technology of steel cylinder and deputy vibration and sinking of enclosure structure of artificial island[J]. China Harbour Engineering, 2019, 39(3): 52-56.
- [5] 杨合林,黄金阳.大直径钢圆筒振沉设备及工艺系统研究[J].建筑机械,2020(4):40-42.
Yang H L, Huang J Y. Research on vibration sinking equipment and technology system of large diameter steel cylinder[J]. Construction Machinery, 2020(4): 40-42.
- [6] 石啸,张福亮,王岩.水下振沉大型钢圆筒施工技术研究及应用[J].中国港湾建设,2024,44(4):78-82,102.
Shi X, Zhang F L, Wang Y. Research and application of underwater vibration sinking construction technology for large steel cylinders[J]. China Harbour Engineering, 2024, 44(4): 78-82, 102.
- [7] JTS 167-13—2019 插入式钢圆筒结构设计及施工规范[S].
JTS 167-13—2019 Design and construction code of embedded steelplate cylinder structure[S].
- [8] ASME B18.3—2012 Socket cap, shoulder, set screws, and hex keys(inch series)[S].
- [9] NCIG. NCIG'S 2019 Sustainability report[EB/OL].(2025-10-15).
<https://ncig.com.au/policies-reports/reports/>.
- [10] NQBP. Port throughputs[EB/OL].(2025-10-15). <https://nqbp.com.au/trade/throughputs>.
- [11] Dalrymple Bay Infrastructure. Dalrymple Bay infrastructure management master plan 2023.[EB/OL].(2025-10-13). <https://dbin-frastructure.com.au/dalrymple-bay-terminal/terminal-overview/#master-plan>.
- [12] Portos e Navios. Terminal marítimo ponta da madeira completa 35 anos com novo patamar de embarque[EB/OL].(2025-10-18).
<https://www.portosenavios.com.br/noticias/portos-e-logistica/terminal-maritimo-ponta-da-madeira-completa-35-anos-com-novo-patamar-de-embarque>.
- [13] Vale. Regulation of the terminal of Ponta da Madeira.[EB/OL].(2025-10-18). https://saladeimprensa.vale.com/documents/d/guest/port-regulation-pdm-en_rev1.
- [14] Transnet Port Terminals. Saldanha Terminal[EB/OL].(2025-10-20). <https://www.transnet.net/Subsite/Render.aspx?id=7449942>.

(上接第82页)