

钻孔救援连续缆管储放设备研制

高科 牛鑫 赵研 秦小琳 吕晓姝 谢晓波

引用本文:

高科, 牛鑫, 赵研, 等. 钻孔救援连续缆管储放设备研制[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(3): 168–176.

GAO Ke, NIU Xin, ZHAO Yan, et al. Development of storage equipment of continuous cable pipe for borehole rescue[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(3): 168–176.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.22.06.0443>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

井下定向钻进用小直径通缆水力振荡器的研制

Development of small diameter hydraulic agitator with cable for directional drilling in underground coal mine

煤田地质与勘探. 2020, 48(2): 30–35,41 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.02.006>

高温钻孔测斜仪研制

Development of high temperature borehole inclinometer

煤田地质与勘探. 2019, 47(3): 201–207 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2019.03.031>

新型煤矿井下单分量无缆地震仪研制

The development of a single-component non-cable seismograph in underground coal mines

煤田地质与勘探. 2021, 49(3): 219–226 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.03.028>

地面大直径应急救援钻孔成孔工艺设计与分析

Design and analysis of hole-forming technology for surface large diameter emergency rescue borehole

煤田地质与勘探. 2021, 49(1): 277–284 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.01.031>

采动影响下逆断层活化规律的数值模拟

Numerical simulation on mechanism of thrust fault reactivation during mining

煤田地质与勘探. 2019, 47(4): 144–152 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2019.04.022>

基于优化SPFA算法的矿井突水救援模型

Mine water inrush rescue model based on optimized SPFA algorithm

煤田地质与勘探. 2019, 47(6): 78–83 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2019.06.013>



移动阅读

高科, 牛鑫, 赵研, 等. 钻孔救援连续缆管储放设备研制[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(3): 168–176. doi: 10.12363/issn.1001-1986.22.06.0443

GAO Ke, NIU Xin, ZHAO Yan, et al. Development of storage equipment of continuous cable pipe for borehole rescue[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(3): 168–176. doi: 10.12363/issn.1001-1986.22.06.0443

钻孔救援连续缆管储放设备研制

高科^{1,2}, 牛鑫^{1,2}, 赵研^{1,2}, 秦小琳^{1,2}, 吕晓姝^{1,3,4}, 谢晓波^{1,2}

(1. 吉林大学 建设工程学院, 吉林 长春 130061; 2. 地热资源开发技术与装备教育部工程研究中心, 吉林 长春, 130061; 3. 瓦萨大学 电气工程与能源技术系, 芬兰 瓦萨, FIN-65101; 4. 阿尔托大学 土木工程学院, 芬兰 埃斯波, FIN-02130)

摘要: 双钻头仿生自平衡连续钻进技术具有无需钻机、钻进速度快和对井壁扰动小等优点, 是构建矿山灾害保障救援通道的潜在关键技术之一。该技术中的连续缆管由于内置有电源、信号和排屑等通道, 要求在储放过程中不能出现像现有滚筒式绞车储存连续管时存在的互咬、挤压和设置动静导电滑环等情况, 故需研制与之匹配的专用连续缆管地面储放设备。依据双钻头自平衡钻进技术的需求和连续管滚筒式绞车储存技术存在的不足, 提出了连续缆管套筒式储存和夹持式输送原理, 构建了连续缆管套筒式储存和输送模型, 并应用有限元分析软件对连续缆管的夹持输送过程进行模拟分析。依据双钻头仿生自平衡钻进系统对连续缆管的性能要求, 确定了整机尺寸参数, 并对整机的运行参数进行了计算, 建立了适用于连续缆管外径为 50.8 mm、井眼深度小于 1 016.8 m、场地面积小于 50 m² 钻井工况的钻孔救援连续缆管储放设备三维模型。最后, 研发了与本设备匹配的电控系统, 并对加工组装好的整机进行了连续缆管夹持输送、储放设备运行、连续缆管储放等机电一体化联调与试验。结果表明: 连续缆管储放设备运行平稳, 在连续缆管存储和输送过程中, 无互咬和锁死现象, 没有动静导电滑环, 能够满足双钻头仿生自平衡钻进系统的技术要求, 为钻孔救援双钻头自平衡连续钻进提供了必要的装备支撑。

关键词: 钻孔救援; 连续缆管; 储放设备; 多套筒式连续储缆; 矿山灾害

中图分类号: TD41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2023)03-0168-09

Development of storage equipment of continuous cable pipe for borehole rescue

GAO Ke^{1,2}, NIU Xin^{1,2}, ZHAO Yan^{1,2}, QIN Xiaolin^{1,2}, LYU Xiaoshu^{1,3,4}, XIE Xiaobo^{1,2}

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130061, China; 2. Engineering Research Center of Geothermal Resources Development Technology and Equipment, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130061, China; 3. Department of Electrical Engineering and Energy Technology, University of Vaasa, Vaasa FIN-65101, Finland; 4. Department of Civil Engineering, Aalto University, Espoo FIN-02130, Finland)

Abstract: The double-bit bionic self-balancing continuous drilling technology has the advantages including requiring no drilling rig, high drilling speed and slight disturbance to the borehole wall. It is one of the key potential technologies for constructing the security and rescue passages against mine disasters. In this technology, as there are passages for power supply, signal, chip removal and other aspects that are built in the continuous cable pipe, it is required that there shall be no such interference, extrusion or arrangement of dynamic/static conductive electric conduction link as in using the existing drum hoist to store continuous pipes during storage. Therefore, the special ground storage equipment for continuous cable pipes that fits with the technology shall be developed. Firstly based on the demand of the double-bit self-bal-

收稿日期: 2022-06-02; 修回日期: 2022-10-31

基金项目: 国家重点研发计划课题(2018YFC0808201); 国家自然科学基金项目(42172345, 41972324); 吉林省教育厅科学研究项目(JJKH20221016KJ, JJKH20221014KJ)

第一作者: 高科, 1977 年生, 男, 内蒙古乌兰察布人, 博士, 教授, 博士生导师, 从事仿生钻探机具、科学钻探装备和地热钻探等方面的研究工作. E-mail: gaokenm@jlu.edu.cn

通信作者: 赵研, 1983 年生, 男, 吉林松原人, 博士, 副教授, 博士生导师, 从事仿生自平衡钻探技术和多相介质耦合传热等方面的研究工作. E-mail: zhaoyan1983@jlu.edu.cn

anced drilling technology and the deficiency in the drum hoist storage technology for continuous pipes. We proposed the sleeve storage and hold-down conveying principle for continuous cable pipes, constructed models, and applied the software of finite element analysis to conduct simulation analysis for the hold-down conveying process of the continuous cable pipes. Secondly according to the double-bit bionic self-balancing drilling system's requirements about the continuous cable pipe performance, the 3D model of the storage equipment of continuous cable pipe for borehole rescue that was applicable to the drilling conditions with the outer diameter of the continuous cable pipe of 50.8 mm, the borehole depth smaller than 1 016.8 m and the site area smaller than 50 m² was constructed. Finally, the electronic control system fitting with this equipment was developed, and the mechatronics combined adjusting and test, including the continuous cable pipe's hold-down conveying, operation of storage equipment and storage of continuous cable pipes, were conducted for the machined, assembled equipment. As indicated by the results, during the storage and conveying of the continuous cable pipes, there was no interference, locking or dynamic and static electric conduction link, which can meet the technical demand of the double-bit bionic self-balancing drilling system and provide necessary equipment support for the double-bit self-balancing continuous drilling for borehole rescue.

Keywords: borehole rescue; continuous cable pipe; storage equipment; multi-sleeve continuous storage cable; mine disaster

钻孔救援是矿难救援的重要技术措施之一。配备先进的钻孔救援装备和技术,迅速有效地处理矿难事故、保护职工生命安全、减少国家资源和财产损失意义重大^[1-3]。

双钻头自平衡钻进技术采用内外钻头双向回转切削岩石,对井壁扰动小,钻进速度快,钻孔精度高^[4-5],是矿山灾害钻孔救援的理想方案之一。然而,该技术需要配套有电、信号和钻井液通道的多功能连续缆管,缆管长度要满足钻孔深度要求。同时,由于缆管在钻进过程中要承受内外液体压力和外力弯曲等无法消除的客观外力作用^[6],在其材料和结构确定的情况下使用寿命已经确定,如果再受到来自缆管储运设备和钻进工艺的影响,其寿命将进一步缩短。常规连续管钻机采用滚筒旋转的方式存储和输送连续管^[7],连续管在滚筒上层层排布极易发生互卡、锁死、挤压变形等情况^[8],连续管的疲劳寿命会受到很大影响。此外,滚筒旋转方式必须配备多通道滑环来实现电、信号和钻井液的动静传输,这将导致连续缆管很容易因其内外温差和压力差较大而失效,从而导致连续缆管寿命较低,且存在较大的不稳定性^[9-11]。

为了解决以上技术难题,笔者提出一种阻断连续管互卡、锁死、挤压变形的多套筒连续缆管储放原理,取消连续缆管在设备上使用的多通道滑环,在相关理论分析的基础上研制连续缆管储放设备,并对设备进行性能测试,确保连续缆管的高效率长寿命运行。以期为钻孔救援双钻头自平衡连续钻进提供装备支撑。

1 连续缆管储放原理

1.1 多套筒连续缆管储放原理

1.1.1 储筒与连续缆管间的受力

1) 常规滚筒式连续管存储受力

常规连续管在存储时,滚筒提供的扭矩 M 与连续管一端受到拉力 F 产生的扭矩相平衡,原理如图1所示,滚筒转动将连续管存储到滚筒外壁上,滚筒外壁对连续管支撑力为 N ,连续管存储一层后继续沿着连续管外侧存储,管与管之间的受力复杂,容易使连续缆管之间发生相互挤压变形。缠绕时,连续缆管因自身弹性产生的外力导致其在工作过程中具有不稳定性,更容易使连续管出现互卡、锁死等不良情况^[12-16]。

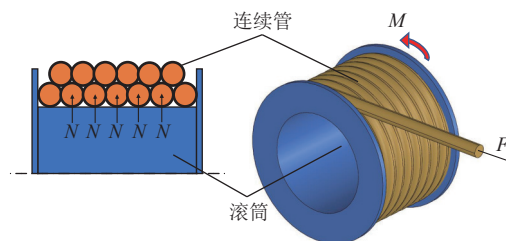


图1 连续缆管储入滚筒时受力
Fig.1 Stress principle of continuous cable pipe when stored in drum

2) 多套筒连续缆管存储受力

多套筒连续缆管原理如图2所示,存储筒固定不动,给连续缆管施加轴向压力 F ,连续缆管弯曲产生的

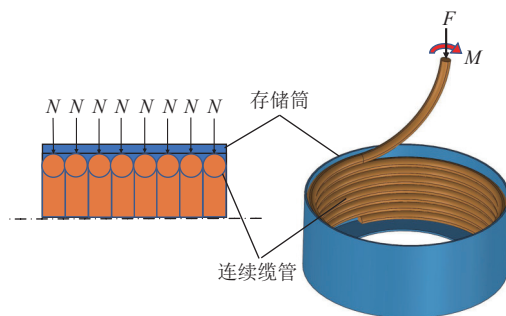


图2 连续缆管储入套筒式存储筒受力原理
Fig.2 Stress principle of continuous cable pipe storage sleeve storage cartridge

弹性力将促使连续缆管沿着套筒内壁存储,连续缆管弯曲产生的弹力 N 使其自身与套筒内壁紧紧贴合。每存满一个存储筒,连续缆管沿存储筒出口经由过渡筒进入下一个存储筒,通过多个存储筒来存储连续缆管,在整个存储过程中连续缆管的受力几乎不变,从而消除连续缆管之间的挤压、互卡及锁死等问题。

1.1.2 主副多套筒储存原理

图 3 为设备工作原理,储放导正机构将连续缆管注入存储套筒最内圈第一级存储筒底部,并用固定环将连续缆管头部固定到第一级存储筒某一位置。旋转牵引车带动储放导正机构旋转,连续缆管逐圈自下而上进入到存储筒内。连续缆管存储弯曲产生的外力由筒壁平衡,当第一级存储筒自下而上存满时,启动储放导正机构使其与第一级过渡筒下上对正,使得连续缆管由第一级存储筒出口顺利进入第一级过渡筒,如图 4 所示。连续缆管绕行一圈从第一级过渡筒上部入口到达其底部出口,此时再启动储放导正机构使其与第二级存储筒存储下上对正,使得连续缆管由第一级过渡筒出口进入第二级存储筒存储,如此重复以上动作逐次存储在第二级存储筒、第二级过渡筒、第三级存储筒、第三级过渡筒等,直到储满最后一级存储筒。图 5 为 5 层连续管储存筒,分为 3 层存储筒和 2 层过渡筒,由此形成了多套筒储管技术。

1.1.3 主副多套筒存储量

根据主副多套筒储存原理,计算连续缆管的存储

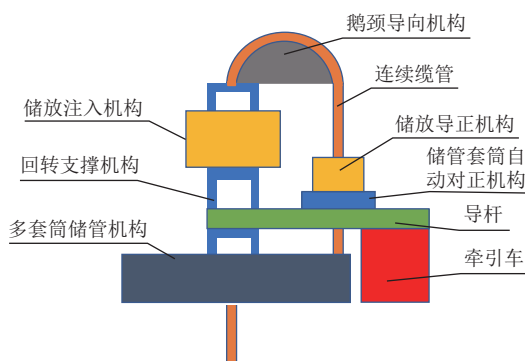


图 3 连续缆管存储原理

Fig.3 Storage principle of continuous cable pipe

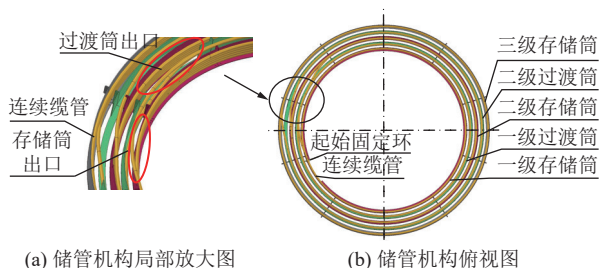


图 4 多套筒储管机构

Fig.4 Multi sleeve pipe storage mechanism

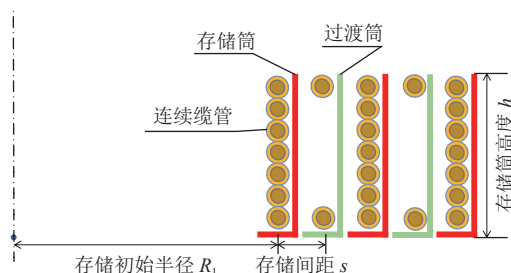


图 5 5 层连续管存储筒截面

Fig.5 5-layer coiled tube storage cylinder

长度。连续缆管在单筒上螺旋线存储,其储量为:

$$t_1 = m \times \sqrt{(\pi D)^2 + d^2} \quad (1)$$

式中: t_1 为连续缆管在单筒上的存储长度; m 为单筒连续缆管存储层数; D 为此单筒存储内直径; d 为缆管外径。

多套筒储管机构单筒存储层数 m 为:

$$m = \frac{h}{d} \quad (2)$$

式中: h 为单筒高度, mm。

多套筒储管机构一个过渡筒存储长度 t_2 为:

$$t_2 = \sqrt{(\pi D)^2 + h^2} \quad (3)$$

存储筒内直径 D 为:

$$D = D_1 + 2 \times s \times z \quad (4)$$

式中: D_1 为初始存储筒直径, mm; s 为存储筒与过渡筒之间间隔, mm; z 为存储的筒数(其中存储筒 $z=2x$, 过渡筒 $z=2x+1$, x 取正整数)。

存储筒存储总长度 T_1 为:

$$T_1 = \sum_{i=1}^x \frac{h}{d} \times \sqrt{\pi^2 (D_1 + 4xs)^2 + d^2} \quad (5)$$

过渡筒存储总长度 T_2 为:

$$T_2 = \sum_{i=1}^x \sqrt{\pi^2 (D_1 + 2s(2x+1))^2 + h^2} \quad (6)$$

总存储量 T 为:

$$T = T_1 + T_2 \quad (7)$$

多套筒储管机构相关数据见表 1。

将以上数据代入式(1)—式(7), 计算得出该多套筒储管机构存储量 T 为 1 016.8 m。

1.2 连续缆管注入驱动原理

1.2.1 连续缆管夹持与注入工作原理

储放注入机构作为连续缆管式双钻头自平衡钻进设备的关键部件,用于输送连续缆管的动力部分,主要由夹持输送链条、承压弹簧、输送电机、夹持电机等组成。

具体工作原理如图 6 所示, 4 个夹持丝杠电机可

表1 多套筒储管机构参数

Table 1 Parameters of multi sleeve storage mechanism

参数	数值
连续缆管直径 d/mm	50.8
单筒高度 h/mm	1 100
初始存储筒直径 D_1/mm	2 190
存储过渡间隔 s/mm	150
存储筒数/个	3
过渡筒数/个	2

以带动两个注入架体向内靠拢或向外张开,使夹持链条夹紧或松开连续缆管,夹持丝杠电机与夹持丝杠电机支撑之间安装有压力传感器,用以实时监测夹持输送链条对连续缆管的夹持力大小。储放注入架体上侧安装有纵向轮组和横向轮组,可使储放注入架体悬挂于滑道上,并且能在滑道内滑动,滑道安装于上层架体内。输送电机通过带动夹持链条转动从而带动连续缆管,且输送电机与注入架体之间安装有压力传感器,可以记录和显示对连续缆管的提升力,从而判断井下遇阻等异常情况。

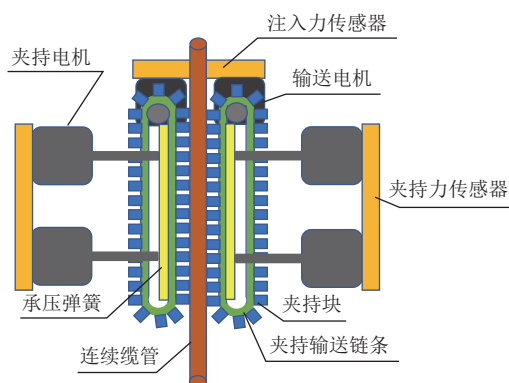


图6 储放注入机构夹持连续缆管工作原理

Fig.6 Working principle diagram of storage and injection mechanism clamping continuous cable pipe

1.2.2 连续缆管夹持与注入参数计算

储放注入机构的参数包括最大夹持力、最大提升力、最大速度等,需要对其计算和分析。储放注入机构对连续缆管的夹持力的原理模型如图7所示, N_1 、 N_2 、 N_3 、 N_4 分别为夹持电机提供的夹持力, f_1 、 f_2 分别为左右夹持块组对连续缆管的摩擦力, F 为连续缆管受到井下钻具的拉压作用力。

最大夹持力取决于选用夹持电机的额定推力,选用夹持电机的额定推力为62.4 kN,左右各两组丝杠电机,所以最大夹持力 $N_{\max}$ 为:

$$N_{\max} = N_1 + N_2 = N_3 + N_4 \quad (8)$$

最大注入力 $F_{\max}$ 由夹持块组对连续缆管的摩擦力提供:

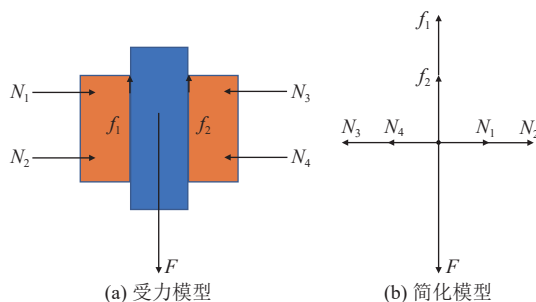


图7 夹持块夹持输送连续缆管的理论模型

Fig.7 theoretical model of clamping block clamping and conveying continuous cable pipe

$$F_{\max} = f_1 + f_2 = \mu(N_1 + N_2) + \mu(N_3 + N_4) \quad (9)$$

式中: f_1 为左侧夹持块提供的摩擦力, N_1 、 f_2 为右侧夹持块提供的摩擦力, N_3 、 N_4 为连续缆管与夹持块间的静摩擦因数,取0.4。

最大注入速度依据输送电机转速决定:

$$v_m = \frac{2\pi r_1 n_1}{\alpha_1} \eta \quad (10)$$

式中: r_1 为输送电机链轮半径,m; n_1 为输送电机额定转速,r/min; α_1 为转速比; η 为输送电机传输效率。

储放注入机构的相关参数见表2。

表2 储放注入机构相关参数

Table 2 Relevant parameters of storage and injection mechanism

参数	数值
夹持电机额定推力/kN	62.4
摩擦因数 μ	0.4
输送电机转速 $n/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	2 000
输送电机减速机减速比 a	120
输送电机效率 η	0.9
输送电机链轮半径/m	0.09

将表2数据代入式(8)—式(10)得:夹持链条对连续缆管的最大夹持力 N 为124.8 kN,最大注入力 $F_{\max}$ 为102.72 kN,最大注入速度为 v_m 为8.48 m/min。

1.2.3 连续缆管夹持机构受力分析

夹持块是储放注入机构的核心部件,对储放注入机构整体可靠性至关重要,有限元分析了单对夹持块夹持输送连续缆管的受力^[9-11],以验证其在最大夹持力时工作情况。在夹持链条夹持连续缆管时,60对夹持块共同夹持连续缆管,每个夹持块只需提供2.08 kN的夹持力即可。

应用Abaqus软件建立夹持输送模型,如图8所示,设连续缆管外径为50.8 mm,壁厚为4 mm,采用Q235钢材,材料参数见表3。

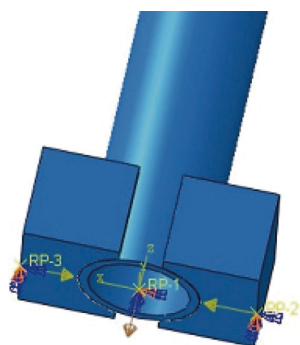


图 8 夹持连续缆管加载

Fig.8 Clamping a continuous cable pipe loading diagram

表 3 Q235 钢材相关参数
Table 3 Relevant parameters of Q235 steel

质量密度/(g·cm ⁻³)	泊松比	弹性模量E/MPa	屈服应力σ/MPa
7.85	0.3	210 000	235

两个夹持块采用刚体耦合到点 RP-2 和 RP-3 上, 对其施加夹持荷载 2.08 kN, 连续缆管施加 300 mm 的轴向位移, 时间增量设为 1 s。

图 9 所示, S 表示 Mises 应力, 单位为 MPa。连续缆管夹持输送过程中, 在时间增量为 0.45 s 时出现最大应力点, 数值为 117 MPa, 可见应力值远小于许用值 235 MPa。因此, 该储放注入机构对连续缆管的夹持损伤相对较小, 可有效增大其使用寿命。

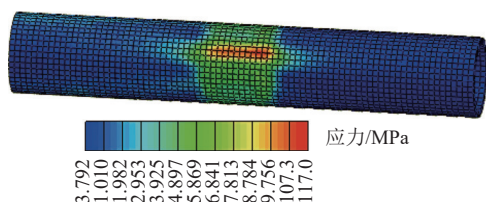


图 9 连续缆管应力云图

Fig.9 Stress nephogram of clamping block

为了保证储放注入机构有足够的夹持力与摩擦力, 又不会出现将连续缆管咬伤或划伤等影响其疲劳寿命的不良情况, 要尽可能让更多的夹持块同时夹持连续缆管, 避免出现较大的应力集中, 将连续缆管受到损伤的可能降到最低。

2 连续缆管储放设备研制

2.1 连续缆管储放设备结构设计

连续缆管储放设备主要由以下机构组成: 鹅颈导向机构、储放注入机构、回转支撑机构、辅助夹持起降机构、储放导正机构、储管套筒自动对正机构、牵引车、供电滑环、多套筒储管机构等部件, 整体结构如图 10 所示。

回转支撑机构与底座之间安装有回转轴承, 使回



图 10 钻孔救援连续缆管储放设备整体结构

Fig.10 Overall structure of drilling rescue continuous cable pipe storage equipment

转支撑机构可以相对底座转动; 辅助夹持起降机构在钻具需要时将其夹持住并提升或下放, 以达到钻进目的。

储放注入机构实现对连续缆管的夹紧、张开放作, 如图 11 所示, 其主要作用是驱动连续缆管向井下运动或者从井下提起。鹅颈导向组件为连续缆管提供支撑, 使其在能承受的最佳弯曲半径内更好地从井内进出。储放导正机构的作用是对连续缆管的存储和输送动作进行位置调整, 保证连续缆管在存储筒中精准存取。通过导杆与回转支撑机构下层连接, 牵引车可以围绕回转支撑机构中心做圆周运动, 带动储放导正机构运动。

多套筒储管机构作为连续缆管的存储机构, 分为存储筒和过渡筒, 连续缆管从一级存储筒自下而上存储完成后进入一级过渡筒, 绕行一圈后进入二级存储筒, 依次类推, 进而对连续缆管进行存储。输出连续缆管是存储连续缆管的逆过程。

表 4 为钻孔救援连续缆管储放设备主要参数。

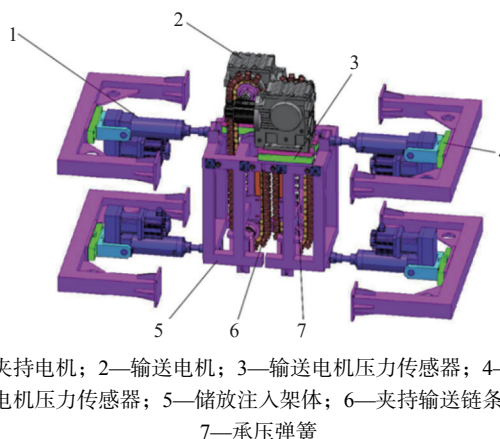


图 11 储放注入机构

Fig.11 Storage and injection mechanism

表 4 钻孔救援连续缆管储放设备参数

Table 4 Parameters of drilling rescue continuous cable pipe storage equipment

参数	数值
鹅颈导向器半径/mm	1 010
存储筒间隔/mm	150
存储筒厚度/mm	10
设备高度/m	8.6
连续缆管存储量/m	1 016.8
最小存储筒半径/mm	2 190
牵引车运行半径/mm	3 141

2.2 连续缆管储放设备运行参数的计算

图 12 为连续缆管储放设备的俯视原理图,在连续缆管存储运输过程中,要保证牵引车、储放导正机构、储放注入机构对连续缆管的输送速度一致,因此需对连续缆管通过各机构的速度进行计算。表 5 为各机构的相关参数。

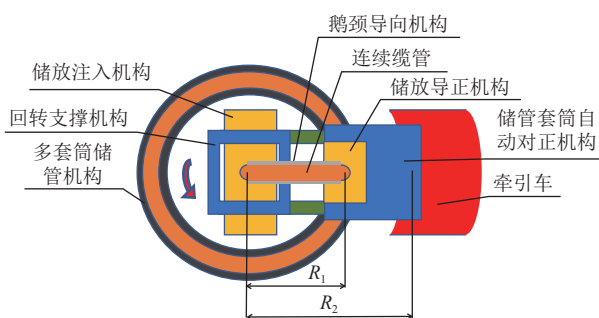


图 12 连续缆管储放设备运行俯视图

Fig.12 Operation top view of continuous cable pipe storage equipment

表 5 连续缆管储放设备各机构参数

Table 5 Parameters of Various Mechanisms of Continuous Cable Pipe Storage Equipment

储放设备单元	链轮半径/mm	转速比	额定转速/(r·min ⁻¹)
牵引车电机	80	45	1 300
储放注入机构输送电机	90	120	2 000
储放导正机构电机	90	120	2 000

设定注入速度为 v , 储放注入机构与储放导正机构对连续缆管夹持输送的电机转速根据式(10)计算, 牵引车的运行半径 R_2 与连续缆管存储半径 R_1 不同, 需进一步计算牵引车电机转速。

$$v_1 = \frac{vR_2}{R_1} \quad (11)$$

式中: v_1 为牵引车速度, r/min。

将式(10)代入式(11)得:

$$v_1 = \frac{2\pi r_1 n_1 R_2}{\alpha_1 R_1} \eta \quad (12)$$

牵引车转速还可以计算为:

$$v_1 = \frac{2\pi r_2 n_2}{\alpha_2} \eta \quad (13)$$

式中: r_2 为牵引车电机链轮半径, mm; n_2 为牵引车电机转速, r/min; α_2 为牵引车减速机减速比。

联立式(12)、式(13)式即可得储放注入电机与牵引车电机转速关系为:

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\alpha_1 r_2 R_1}{\alpha_2 r_1 R_2} \quad (14)$$

将表 4、表 5 数据代入式(14)得: $\frac{n_1}{n_2} = 1.65$ 。因此设置运行速度时, 储放注入机构输送电机转速为牵引车电机转速的 1.65 倍。

2.3 连续缆管储放控制系统设计

2.3.1 控制逻辑与策略

连续缆管的储放设备的控制逻辑如图 13 所示。

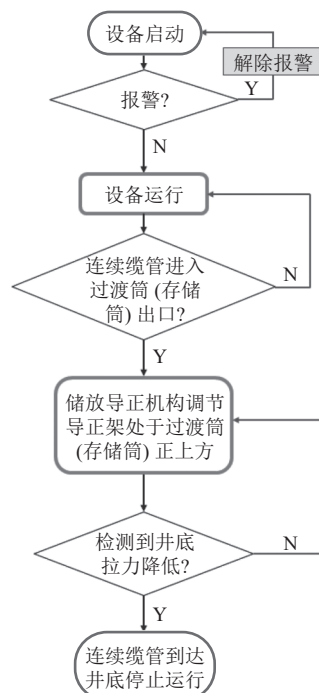


图 13 钻孔救援连续缆管储放系统控制逻辑

Fig.13 Control logic diagram of drilling rescue continuous cable pipe storage and release system

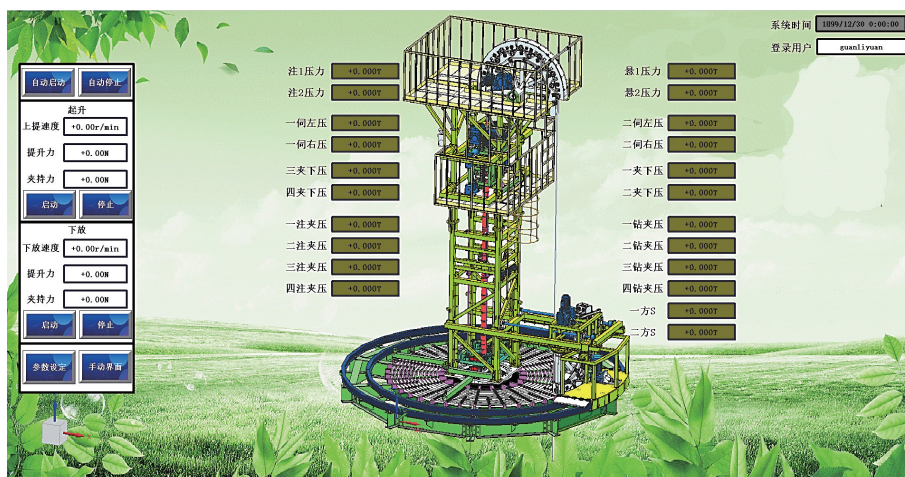
2.3.2 可视化操作界面设计

可视化操作界面分为自动和手动两种模式, 图 14a 为自动模式, 当自平衡钻进系统运行平稳时采用该模式。图 14b 为手动模式, 用于设备调试或自平衡钻进系统试钻使用。同时, 手动与自动两种模式能够自由切换, 操作方便。

3 连续缆管储放设备试验

3.1 整机运行试验

采用长 30 m 直径 50.8 mm 连续缆管, 设置不同运



(a) 连续缆管储放系统自动模式



(b) 连续缆管储放系统手动模式

图 14 连续缆管储放系统可视化操作界面

Fig.14 Visual operation interface of continuous cable pipe storage and release system

行参数使连续缆管依次通过储放注入机构, 鹅颈导向机构, 储放导正机构, 储管套筒自动对正机构, 储入多套筒储管机构内, 再逆向运行, 由套筒内输送到储放注入机构, 如图 15 所示。表 6 为按照 2.2 节计算所得的规律设置不同的牵引车转速、储放注入机构转速和储放导正机构转速(储放注入机构转速与储放导正机构转速相等, 储放注入机构转速为牵引车速度的 1.65 倍), 代入式(10) 得到连续缆管注入速度与实测数据。由数据可知实测值与计算值相差不大, 连续缆管在整个输送过程中, 运行平稳, 各机构之间联动协调。

3.2 注入试验

采用长 2 m, 直径 50.8 mm 连续缆管, 从储放注入机构上方进入, 夹持电机设置不同大小夹持力, 输送电机转速 10 r/min, 测试对连续缆管的向下的最大注入力, 如图 16 所示。

将设置的夹持力与检测到的注入力代入式(2) 计算得到连续缆管与夹持块间的实际静摩擦因数, 见表 7。由数据可以看出, 静摩擦因数与夹持力有关系,

当夹持力较小时, 静摩擦因数偏小, 但当夹持力接近或大于 2 kN 时, 静摩擦因数 μ 趋于稳定约为 0.90, 将得



图 15 连续缆管储放设备运行实验

Fig.15 Operation experiment of continuous cable pipe storage and release equipment

表6 钻孔救援连续缆管储放设备运行参数
Table 6 Operation parameters of drilling rescue continuous cable pipe storage equipment

序号	牵引车速度/(r·min ⁻¹)	储放注入机构转速/(r·min ⁻¹)	储放导正机构速度/(r·min ⁻¹)	计算注入速度/(m·min ⁻¹)	实测注入速度/(m·min ⁻¹)
1	61	102	102	0.432	0.424
2	90	150	150	0.636	0.638
3	121	200	200	0.848	0.858
4	182	300	300	1.272	1.279
5	212	350	350	1.484	1.488



图16 连续缆管夹持输送实验

Fig.16 Continuous cable pipe clamping and transportation experiment

表7 连续缆管夹持输送实验数据

Table 7 Experimental data of continuous cable pipe clamping and transportation

序号	夹持力/N	注入力/N	静摩擦因数 μ
1	7 815	4 800	0.61
2	13 865	11 720	0.84
3	19 165	17 473	0.91
4	23 355	21 026	0.90
5	31 282	28 261	0.90

到的摩擦因数和设定的最大夹持力 124.8 kN 代入式(9)中得到实际最大注入力 F 为 112.32 kN。

3.3 套筒式储管试验

为了测试多套筒式储管模式的可行性,采用长 300 m 直径 50.8 mm 连续缆管,使其通过储放注入机构、鹅颈导向机构、储放导正机构和储管套筒自动对正机构,按照 1.1.2 中的储管原理,储入多套筒储管机构内。连续缆管存储顺畅,连续缆管间未发生互卡、锁死等不良情况。

4 结论

a. 依据双钻头仿生自平衡钻进技术及钻孔救援需求,提出了连续缆管套筒式储存和夹持式输送原理,构

建了连续缆管套筒式储存和输送模型,研制了钻孔救援连续缆管储放设备。

b. 试验表明,与常规的绞车-滚筒式存储方式不同,多套筒储管技术能有效避免动静滑环稳定性差、连续缆管互咬锁死等不良情况,为连续管钻进技术提供了储管新思路。

c. 研发的电控技术实现了连续缆管的套筒式存储、可控式夹持输送等功能。连续缆管储放机电一体化控制,为钻孔救援双钻头自平衡连续缆管钻进技术提供了装备支撑。

d. 本设备进一步工作计划为结合双钻头仿生自平衡钻进系统进行现场钻进实验,开展与双钻头仿生自平衡钻进系统的配合联动情况,并确保其整机的稳定性和可靠性。

参考文献(References)

- [1] 田宏亮, 邹祖杰, 郝世俊, 等. 矿山灾害生命保障救援通道快速安全构建关键技术与装备[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(11): 1-13.
TIAN Hongliang, ZOU Zujie, HAO Shijun, et al. Key technologies and equipment of quickly and safely building life support and rescue channel in mine disaster[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(11): 1-13.
- [2] 郝世俊, 莫海涛. 地面大直径应急救援钻孔成孔工艺设计与分析[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(1): 277-284.
HAO Shijun, MO Haitao. Design and analysis of hole-forming technology for surface large diameter emergency rescue borehole[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(1): 277-284.
- [3] 高科, 陈杭凯, 许晓慧, 等. 双孕镶金刚石钻头的自平衡逆向回转破岩性能[J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 51(3): 866-874.
GAO Ke, CHEN Hangkai, XU Xiaohui, et al. Rock fragmentation characteristics of double impregnated diamond bits with self-balancing reverse rotation[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2021, 51(3): 866-874.
- [4] 邓禹, 辉辉, 高建东, 等. 脐带缆轻量化设计及其力学性能[J]. 船舶工程, 2022, 44(3): 150-157.
DENG Yu, XIA Hui, GAO Jiandong, et al. Lightweight and mechanical properties of umbilical cable[J]. Ship Engineering, 2022, 44(3): 150-157.
- [5] 高科, 张聪, 赵研, 等. 救援钻孔用双钻头扭矩自平衡钻进系统理论与实验[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(11): 85-93.

- GAO Ke, ZHANG Cong, ZHAO Yan, et al. Theory and experiment of the dual-bit torque self-balancing drilling system for rescue drilling[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(11): 85–93.
- [6] 李银银, 周志宏, 臧传贞, 等. 连续管卷绕破坏分析[J]. *石油机械*, 2015, 43(10): 81–85.
- LI Yinyin, ZHOU Zhihong, ZANG Chuazhen, et al. Analysis of coiled tubing failure caused by winding[J]. *China Petroleum Machinery*, 2015, 43(10): 81–85.
- [7] LIU Shaohu, ZHOU Hao, XIAO Hui, et al. A new theoretical model of low cycle fatigue life for coiled tubing under coupling load[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 124: 105365.
- [8] YUE Qianbei, SUN Guohao, WANG Gang, et al. Experimental study on the influence of bending and straightening cycles for non-destructive and destructive coiled tubing[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 123: 105218.
- [9] 宋生印, 王英杰, 林元华, 等. 连续管疲劳寿命预测[J]. *煤田地质与勘探*, 2006, 34(6): 73–76.
- SONG Shengyin, WANG Yingjie, LIN Yuanhua, et al. Fatigue life estimate for coiled tubing[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2006, 34(6): 73–76.
- [10] 李现东, 文涛. 连续管注入头夹持块结构优化研究[J]. *石油机械*, 2012, 40(11): 48–52.
- LI Xiandong, WEN Tao. Structural optimization of CT clamping block on injection head[J]. *China Petroleum Machinery*, 2012, 40(11): 48–52.
- [11] 胡志强, 刘寿军, 袁文才, 等. 注入头夹持块夹持性能研究及结构优化[J]. *石油机械*, 2019, 47(12): 69–74.
- HU Zhiqiang, LIU Shoujun, YUAN Wencai, et al. Research on gripping performance of CT injector head gripper block and structure optimization[J]. *China Petroleum Machinery*, 2019, 47(12): 69–74.
- [12] 杨高, 刘菲, 唐纯静, 等. 连续管注入头夹持块的夹持性能研究[J]. *石油机械*, 2012, 40(11): 10–14.
- YANG Gao, LIU Fei, TANG Chunjing, et al. Research on the gripping performance of CT clamping block on injector head[J]. *China Petroleum Machinery*, 2012, 40(11): 10–14.
- [13] 杨高, 罗刚. 连续管缠绕力学研究[J]. *石油矿场机械*, 2010, 39(5): 10–13.
- YANG Gao, LUO Gang. Mechanics research on bending coiled tubing[J]. *Oil Field Equipment*, 2010, 39(5): 10–13.
- [14] 肖建秋, 张燕萍, 马青芳, 等. 连续管测井机滚筒总成结构设计[J]. *石油矿场机械*, 2009, 38(9): 55–58.
- XIAO Jianqiu, ZHANG Yanping, MA Qingfang, et al. Structural design of reel used in coiled tubing logging unit[J]. *Oil Field Equipment*, 2009, 38(9): 55–58.
- [15] 吴大飞, 张三坡, 马曾林, 等. 连续管滚筒排管液压离合器的研制与应用[J]. *石油机械*, 2012, 40(11): 27–30.
- WU Dafei, ZHANG Sanpo, MA Zenglin, et al. Development and application of hydraulic clutch for CT level wing[J]. *China Petroleum Machinery*, 2012, 40(11): 27–30.
- [16] 殷卓成. 连续管速度管柱滚筒控制系统研究[J]. *科学技术创新*, 2018(34): 62–63.
- YIN Zhuocheng. Research on the control system of continuous pipe velocity string drum[J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2018(34): 62–63.

(责任编辑 郭东琼)