



Vaasan yliopisto  
UNIVERSITY OF VAASA

OSUVA Open  
Science

This is a self-archived – parallel published version of this article in the publication archive of the University of Vaasa. It might differ from the original.

## 双钻头自平衡钻进系统用多通道连续缆管设计

**Author(s):** Zhao, Yan; Ai, Hongxin; Gao, Ke; Zhang, Congshan; Lyu, Xiaoshu; Xie, Xiaobo

**Title:** 双钻头自平衡钻进系统用多通道连续缆管设计

**Year:** 2023

**Version:** Publisher's PDF

**Copyright** ©2023 Authors. Published by China Coal Research Institute. Published under the following license: CC BY-NC-ND.

### Please cite the original version:

Zhao, Y., Ai, H., Gao, K., Zhang, C., Lyu, X. & Xie, X. (2023). 双钻头自平衡钻进系统用多通道连续缆管设计. *Coal Geology & Exploration*, 51(4), 164-169. <https://doi.org/10.12363/issn.1001-1986.22.06.0472>

## 双钻头自平衡钻进系统用多通道连续缆管设计

赵研 艾红欣 高科 张丛珊 吕晓姝 谢晓波

### 引用本文:

赵研, 艾红欣, 高科, 等. 双钻头自平衡钻进系统用多通道连续缆管设计[J]. *煤田地质与勘探*, 2023, 51(4): 164–169.

ZHAO Yan, AI Hongxin, GAO Ke, et al. Design of multi-channel continuous cable duct for double-bit self-balancing drilling system[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2023, 51(4): 164–169.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.22.06.0472>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

#### 煤层顶板大直径定向钻孔用双级双速PDC钻头设计及应用

Design and application of PDC bit for large diameter directional drilling of coal seam roof with double stage and double speed  
*煤田地质与勘探*. 2021, 49(5): 272–277 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.05.031>

#### 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>

#### 双煤层煤层气井四通道分层控压排采技术及试验

Drainage technology and test of stratified pressure control with four-channels of CBM well in double coal seams  
*煤田地质与勘探*. 2019, 47(6): 73–77 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2019.06.012>

#### 特高多层胎体孕镶金刚石钻头设计与数值模拟

Design and numerical simulation of multi-layer bit with extra-high matrix  
*煤田地质与勘探*. 2020, 48(3): 225–230 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2020.03.032>

#### PDC锚杆钻头回转钻进的力学特性与试验

Mechanical characteristics and test of rotary drilling of PDC anchor bit  
*煤田地质与勘探*. 2019, 47(2): 207–211,216 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2019.02.032>

#### 一种隔水隔卡的自锁式绳索取心钻具及应用

Introductions and applications of a self-locking wire-line coring system with a water-shielding bit and a circlip-shielded core barrel  
*煤田地质与勘探*. 2021, 49(4): 178–286 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.04.033>



移动阅读

赵研,艾红欣,高科,等.双钻头自平衡钻进系统用多通道连续缆管设计[J].煤田地质与勘探,2023,51(4):164-169. doi: 10.12363/issn.1001-1986.22.06.0472

ZHAO Yan, AI Hongxin, GAO Ke, et al. Design of multi-channel continuous cable duct for double-bit self-balancing drilling system[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(4): 164-169. doi: 10.12363/issn.1001-1986.22.06.0472

## 双钻头自平衡钻进系统用多通道连续缆管设计

赵研<sup>1,2</sup>, 艾红欣<sup>1,2</sup>, 高科<sup>1,2</sup>, 张丛珊<sup>1,2</sup>, 吕晓姝<sup>1,3,4</sup>, 谢晓波<sup>1,2</sup>

(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:**为解决矿山灾害钻孔救援过程中地面钻机对地下钻头“长臂管辖”式驱动导致的钻进效率低、对孔壁扰动大和起下钻辅助时间长等问题,提出了无钻机双钻头仿生自平衡连续缆管钻进技术,而多功能连续缆管设计是该技术的重点和难点之一。为此,根据自平衡钻进系统的需求,从功能、结构、参数三大方面对多通道连续缆管进行设计。为实现连续钻进,多通道缆管需要同时具备泥浆循环、电能与信号传输和电磁屏蔽等功能,此外,还要具有足够强度和良好的弹性。对缆管的铠装缆线外径、内管与外管内外径参数进行设计并计算钻井液环空上返流速,计算结果表明缆管内外管直径参数设计满足最低上返流速要求。采用理论计算与数值模拟相结合的方法对缆管的关键部件进行受力分析,对外管抗拉压弯强度及外管壁抗挤压强度等进行强度校核。结果表明:多通道连续缆管结构设计合理,性能可靠,能够满足无钻机双钻头仿生自平衡钻进系统的技术要求,为矿山灾害无钻机双钻头仿生自平衡钻孔救援工作提供一种安全可靠、快速机动的多通道连续缆管技术和方法。

**关键词:** 双钻头; 自平衡钻进; 多通道; 连续缆管; 钻孔救援

**中图分类号:** TD41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2023)04-0164-06

### Design of multi-channel continuous cable duct for double-bit self-balancing drilling system

ZHAO Yan<sup>1,2</sup>, AI Hongxin<sup>1,2</sup>, GAO Ke<sup>1,2</sup>, ZHANG Congshan<sup>1,2</sup>, LYU Xiaoshu<sup>1,3,4</sup>, XIE Xiaobo<sup>1,2</sup>

(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 problems, such as low drilling efficiency, large disturbance to the hole wall and long assistance time of tripping caused by the “long arm jurisdiction” drive of the ground drilling rig to the underground drill bit, are faced during the drilling rescue of mine disaster. In order to solve these problems, the bionic self-balancing continuous cable duct drilling technology of double drill bit without drilling rig was proposed, the design of the multi-function continuous cable duct is one of the key and challenging aspects of this technology. In terms of the technology, a multi-functional continuous cable duct with built-in channels of power supply, signal and chip removal is required. Therefore, the multi-channel continuous cable duct was designed according to the needs of the self-balancing drilling system from three aspects: function, structure and parameters. For continuous drilling, the multi-channel cable duct should have the functions of mud circulation, electrical and signal transmission, and electromagnetic shielding, as well as sufficient strength and good elasticity. Further, the parameters of the outer diameter of the armoured cables for the cable duct, as well as the inner and outer diameters of the inner and outer pipes, were designed, and the upward reflux rate of drilling fluid in the annu-

收稿日期: 2022-06-02; 修回日期: 2022-11-22

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)

第一作者: 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

通信作者: 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

lus was calculated. The calculation results show that the diameter parameters of the inner and outer pipes of the cable duct meet the requirements of the minimum upward reflux rate. Therefore, force analysis was conducted for the key components of the cable duct with the theoretical calculation and numerical simulation in combination. Meanwhile, the tensile strength, compressive bending strength and extrusion strength of the outer pipe wall were checked. The results show that the multi-channel continuous cable duct is designed with reasonable structure and reliable performance, which could meet the technical requirements of the bionic self-balancing drilling system of double drill bit without drilling rig. Generally, a safe, reliable and fast mobile multi-channel continuous cable duct technology and method is provided for the bionic self-balancing drilling rescue work of the double drill bit without drilling rig for mine disaster.

**Keywords:** double bit; self-balancing drilling; multi-channel; continuous cable duct; drill rescue

矿山发生重大灾害事故时,工作人员被困井下,通过地面钻孔方式构建小直径生命保障孔进行人员搜寻、信息联络、给氧输送,从而实现人员脱困,是一种有效的手段。然而,目前地面钻孔救援所用常规钻进方法存在一些局限性:钻进效率低、对孔壁扰动大、钻进成本高等。为此,提出了不用钻机和钻杆的连续缆管式双钻头自平衡钻进技术<sup>[1]</sup>,并为双钻头自平衡钻进系统设计一种多通道多功能连续缆管。

由于连续缆管式钻进技术较为新颖,未见相关报道。调研国内外大量文献资料,发现相近的连续油管钻进研究现状如下:贝克休斯 CoilTrak 第3代系统设计了3个液压扩展肋,以减少阻力并延长钻井过程中的水平井长度<sup>[2-4]</sup>。斯伦贝谢的 Anadrill 部门开发了 Viper 连续油管定向井底钻具组合系统,该系统主要由钻井头模块、测井工具、定向装置和导向马达等4部分组成,满足了连续油管钻井的需求和特点<sup>[5-6]</sup>。AnTech 的 COLT 连续油管组件系统主要用在欠平衡钻井,这种钻井工具具有较高的效率和很好的安全性,钻进效果好<sup>[7-9]</sup>。连续油管钻井工具的研究与应用在国外已较成熟,而在国内尚处于起步阶段<sup>[8]</sup>。宝鸡石油钢管有限责任公司于2009年建成了国内首条连续油管生产线,产品主要用于井下作业、悬挂及地面铺设3个方面<sup>[10-11]</sup>。四川宏华石油设备有限公司研发的 ZJ-30T 连续油管钻机,其主要设备安装在3台大型拖车上,能更好地满足用户对浅油气藏勘探开发作业的需要<sup>[12]</sup>。中石油江汉机械研究所的 LZ580-73T 连续油管钻机组装完成。经过严格的调试和改进,连续油管主机性能试验、压力密封性能试验和钻井模拟试验在江汉机械研究所潜江试验基地顺利完成<sup>[13-14]</sup>。然而,通过调研国内外研究现状发现,目前已有连续油管是单管,功

能单一,不能同时具备钻井液循环、电能和信号传输和屏蔽功能,无法满足自平衡钻进系统对缆管的需求。

为提高矿山救援效率,降低钻进成本,从而更有效地保障井下工作人员的生命安全,将为双钻头自平衡钻进系统设计一种能够满足多种功能要求的多通道连续缆管。重点开展缆管的功能设计、结构设计以及参数设计,并对缆管关键受力部件进行强度校核与效果分析,以达到多通道连续缆管可以满足自平衡钻进系统对缆管需求的目的。

## 1 自平衡钻进系统

双钻头自平衡钻进系统如图1所示,由内外钻头组件、回转驱动组件、传压隔扭机构、交替钻进限位机构、内外钻头压力调节机构等组成。该系统能够驱动内、外钻头同时逆向回转、协同钻进,两个钻头产生的反扭矩大小相等,在回转部实现平衡,对回转部上面的钻具不产生扭力作用,使得上部钻具始终处于无扭矩环境下工作,进而减少了对岩心和井壁的扰动。连续缆管内管与自平衡钻进系统相连,使钻井液在起下钻过程中实现连续循环,保持良好的温度、压力和井壁保护环境<sup>[15-18]</sup>。

图2为双钻头自平衡钻具原理样机,试验结果表明该系统可以顺利地完钻工作,对岩石扰动小,双钻头自平衡钻进系统具有足够的稳定性。然而,该钻进系统需要配备多功能连续缆管,才能进行野外施工任务,体现出节能高效特性。

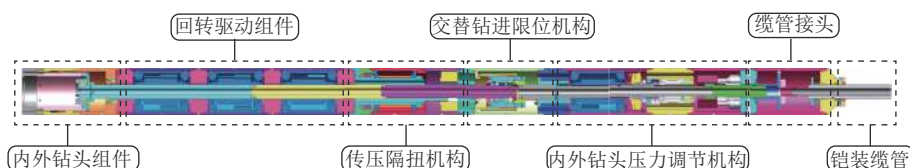


图1 双钻头自平衡钻进系统

Fig.1 Double-bit self-balancing drilling system



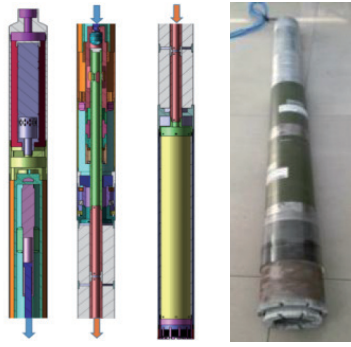


图 2 自平衡钻进系统原理样机

Fig.2 Principle prototype of self-balancing drilling system

自平衡钻进系统需要有一种在钻进全过程(包括钻进和起下钻等)中能够连续循环钻井液、连续传输电能和信号的具有足够抗拉强度和抗压强度的无接头连续缆管,以保证自平衡钻进系统顺利完成钻进和起下钻等作业<sup>[19]</sup>。因此,亟需为双钻头自平衡钻进系统设计一种多通道多功能连续缆管。

## 2 自平衡钻进系统用多通道连续缆管的结构设计

### 2.1 多通道缆管的功能

根据双钻头自平衡钻进系统对连续有缆钻进的需求,多通道缆管需要具备以下功能:第一,满足泥浆循环通道的需要,确保可以实现冲洗孔底岩屑和冷却钻头的功能;第二,通过缆管连续向井内输送电能,保障设备的正常运行;第三,构建信号传输通道,实时监控井下设备的信息并将信息传递到井面。此外,还要满足自平衡钻进系统的使用要求,具备承受井内钻具系统的自重及系统的运动阻力的强度、良好的弹性、畅通的钻井液循环、连续的电源及信号传输和信号屏蔽等功能和特性。

### 2.2 多通道缆管的结构设计

#### 2.2.1 多通道缆管的整体结构设计

缆管由内管、外管、电源缆线和信号缆线等组成,图 3 为多通道缆管的整体结构。其中内管外管同心布置,作为钻井液的循环通道。电源缆线、信号缆线均匀分布于内管与外管间的环状空隙中,由夹持机构夹紧固定,图 4 为多通道缆管的整体截面。电源缆线用于传输强电和弱电,信号缆线用于传输信号。外管起保护作用,防止钻井液与强弱电源缆线直接接触,使整个系统更加安全可靠。

#### 2.2.2 铠装电源缆线和信号缆线设计

电源缆线为钻进系统提供正常工作所需的电能,设置 8 根单芯 6 mm<sup>2</sup> 的铠装缆线为 3 台回转驱动电机和 1 台内、外钻头调压电机提供电能,1 根单芯 4 mm<sup>2</sup> 的铠装缆线作为 4 台电机的共用地线。设计 1 根 16

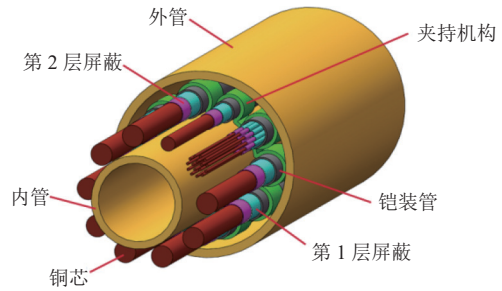


图 3 多通道缆管整体结构

Fig.3 Overall structure of multi-channel cable duct

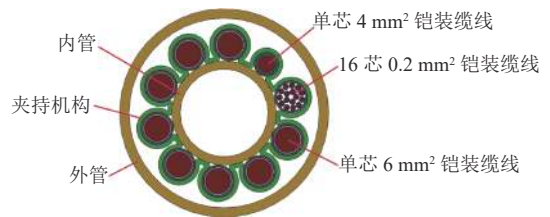


图 4 多通道缆管截面

Fig.4 Cross section of multi-channel cable duct

芯 0.2 mm<sup>2</sup> 铠装缆线作为信号缆线,负责传输信号,具体包括:4 根温度传感器,4 根密封式传感器,4 根压力传感器,2 个接近开关,每个接近开关需要 2 根线。图 5 为单芯 6 mm<sup>2</sup> 和 4 mm<sup>2</sup> 的铠装缆线截面,图 6 为 16 芯 0.2 mm<sup>2</sup> 铠装缆线截面。

## 3 自平衡钻进系统用多通道连续缆管的参数设计

### 3.1 铠装缆线外径参数设计

铠装缆线芯全部采用铜导线,铜导线的安全截流量为  $K=5\sim 8 \text{ A/mm}^2$ ,所用电机均为 380 V 三相电,单

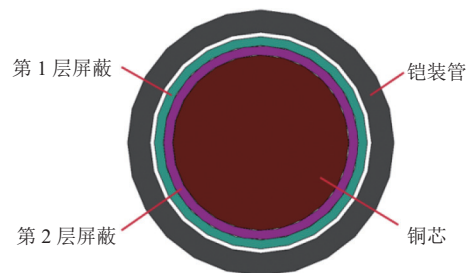


图 5 单芯 6 mm<sup>2</sup> 和 4 mm<sup>2</sup> 铠装缆线截面

Fig.5 Cross section of 6 mm<sup>2</sup> and 4 mm<sup>2</sup> armored cable with single core

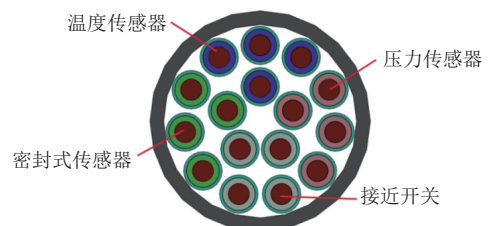


图 6 16 芯 0.2 mm<sup>2</sup> 铠装缆线截面

Fig.6 Cross section of 0.2 mm<sup>2</sup> armored cable with 16 cores

线缆线的截面积与电流的关系为:

$$S = \frac{I}{K} \quad (1)$$

式中:  $S$  为单线缆线的截面积,  $\text{mm}^2$ ;  $I$  为铠装缆线的额定电流,  $\text{A}$ ;  $K$  为铜导线的安全截流量,  $\text{A}/\text{mm}^2$ 。

铠装缆线的直径与电流的关系为:

$$D = 2\sqrt{\frac{I}{K\pi}} \quad (2)$$

式中:  $D$  为铠装缆线的直径,  $\text{mm}$ 。

以回转驱动电机用电为例, 已知回转驱动电机用铠装缆线的额定电流为 26 A, 代入式(1)和式(2)可算得该电机选用的铠装缆线铜芯截面积要求大于  $5.2 \text{ mm}^2$ , 故选用  $6 \text{ mm}^2$ , 对应直径约为 2.76 mm, 加上铠装缆线的绝缘层、保护层、屏蔽层和铠装层, 最后的铠装缆线的外径为 8 mm。同理, 算得内、外钻头调压电机、传感器用信号线的铠装缆线的外径, 所得结果见表 1。

表 1 不同电机的额定电流对应铠装缆线外径  
Table 1 Rated current of different motors corresponding to the outer diameter of armored cables

铠装缆线类型	额定电流/A	铠装缆线外径/mm
单芯 $6 \text{ mm}^2$	26	8
单芯 $4 \text{ mm}^2$	6	6
16芯 $0.2 \text{ mm}^2$	0.02	8

### 3.2 多通道缆管的内管与外管内外径参数设计

根据自平衡钻进系统内钻头传动轴内径尺寸, 确定多通道连续缆管的内管内径, 内钻头传动轴内径为 24 mm, 则设置缆管内管的内径  $d$  为 24 mm, 内管的外径为 25.4 mm。但该设置需要满足钻头排屑和冷却的要求, 反循环泵量  $Q$  的取值为 130 L/min(最佳钻头冷却泵量), 钻井液在内管中的上返流速要求大于 0.5 m/s(最低排屑上返流速)。内管的内径校核和外管内外径计算如下。

#### 3.2.1 内管的内径校核

根据钻进上返流速计算公式:

$$v = \frac{4Q}{\pi d^2} \quad (3)$$

式中:  $v$  为上返流速,  $\text{m/s}$ ;  $Q$  为反循环泵量,  $\text{L}/\text{min}$ ;  $d$  为缆管内管的内径,  $\text{m}$ 。

将  $Q$  与  $d$  的数值代入式(3)得到计算结果  $v = 4.79 \text{ m/s}$ , 大于最低排屑上返流速 0.5 m/s, 故缆管内管内径能够满足要求。

#### 3.2.2 外管的内外径计算

已知多通道缆管内管外径为 25.4 mm, 内外管之间的环状间隙存放直径为 8 mm 的铠装缆线 8 根, 直

径为 6 mm 的铠装缆线(单芯  $4 \text{ mm}^2$ )1 根, 直径为 8 mm 的 16 芯铠装缆线 1 根, 考虑到铠装缆线的排布方式, 最终确定的参数为: 外管外径 50.8 mm、外管厚度为 2.3 mm, 外管内径 46.2 mm。

外管外径为 50.8 mm, 已知钻孔直径为 165 mm, 则缆管外管与井壁间的环空面积  $S_1$  为  $19\,356 \text{ mm}^2$ 。

$$v_1 = \frac{Q}{S_1} \quad (4)$$

式中:  $v_1$  为流速,  $\text{m/s}$ ;  $S_1$  为缆管外管与井壁间的环空面积,  $\text{mm}^2$ 。

将  $Q$  与  $S_1$  的数值代入式(4)得到  $v_1 = 0.11 \text{ m/s}$ , 该流速要低于正循环钻井液最低排屑上返流速 0.5 m/s, 故环空的钻井液流速对井壁的冲刷和扰动更小。

## 4 实验效果及分析

缆管在整个运行过程中受到较大的外力主要集中在外管, 外管要承受提升井内钻具需要的拉力、钻进时给钻具施加轴向的压力、夹具对外管夹持力和缆管在地面储缆设备上弯曲储存时受到的外力等, 需要根据外管的极限强度来校核以保证其安全性。

### 4.1 外管抗拉强度与抗压强度分析

缆管的外管可近似看作薄壁圆筒<sup>[20]</sup>, 确定缆管所受拉力与压力后, 还需判断横截面的轴向正应力分布情况, 通过度量横截面正应力大小以及材料承受载荷的能力来判断筒体是否会因强度不足而破坏。假设外筒横截面上正应力均匀分布, 则有:

$$\int \sigma \cdot dA = \sigma A \quad (5)$$

式中:  $\sigma$  为外管受到的拉(压)应力,  $\text{Pa}$ ;  $A$  为外管的横截面积,  $\text{mm}^2$ 。

即轴向正应力的计算公式为:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (6)$$

式中:  $F$  为外管受到的拉(压)力,  $\text{N}$ 。

室温条件下, 310S 不锈钢力学性能参数见表 2。钻具总质量为 2 t, 最大钻压为 20 000 N, 缆管每米质量为 7.6 kg, 取安全系数  $n=2$ , 则在外管抗拉强度的允许范围内, 缆管的适用钻进深度为 0~970 m。对缆管施加的最大压力为 20 000 N, 将  $F=20\,000 \text{ N}$ ,  $A=350 \text{ mm}^2$  代入式(6)得:  $\sigma=57 \text{ MPa}$ , 计算结果小于 310S 不锈钢的屈服强度 362 MPa, 说明缆管的抗拉强度与抗压强度均能够满足设计要求。

### 4.2 外管壁抗挤压强度分析

缆管外管的材料为 310S 不锈钢, 该材质的滑动摩擦因数设为 0.4, 缆管由 5 组 10 个夹持块夹紧实现固定, 又在缆管与夹持块之间增加“倒刺”装置, 如图 7

表 2 310S 不锈钢力学性能参数

Table 2 Mechanical parameters of 310S stainless steel

弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
184	650	362	7.98

所示,能够有效提高其摩擦因数,约为正常摩擦因数的 3 倍,因此,取静摩擦因数  $\mu$  为 1.2。钻具总质量为 2 t,为实现整体的平衡,需要每个夹持块承受的摩擦力为 2 000 N。计算得:施加在每 1 个夹持块上的力为 1 667 N。

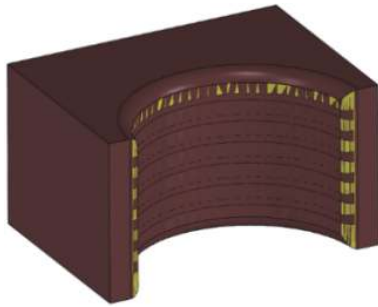


图 7 缆管夹持装置

Fig.7 Cable clamping device

夹块与缆管外管之间的配合如图 8 所示。将模型导入三维设计软件进行受力分析,缆管夹持部位的应力分布如图 9 所示,缆管所受最大的应力为 5.491 MPa,远远小于材料的屈服强度 362 MPa,故缆管的抗挤压性能符合要求。

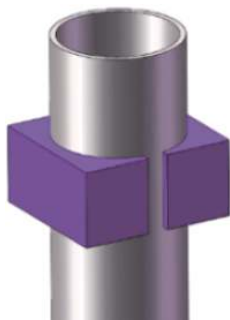


图 8 缆管夹持部位结构

Fig.8 Structure of cable duct clamping position

### 4.3 缆管抗弯强度分析

缆管通过缠绕的方式固定在卷筒上,卷筒的最小直径由缆管的最小弯曲半径决定<sup>[2]</sup>。根据表 3 中电缆和 310S 钢管最小允许弯曲半径可知,缆管的弯曲半径与缆管的直径成正比。以外管为依据,对应的弯曲半径为 1.016 m,设置最小弯曲半径为 1.1 m。

对缆管弯曲进行模拟,模拟的具体参数为:缆管长度 1 000 mm,卷筒直径是 2 200 mm,厚度为 100 mm。

模拟结果如图 10 所示,分析可知,当施加给缆管的载荷为 1 500 N 时,缆管与卷筒没有完全接触;当施

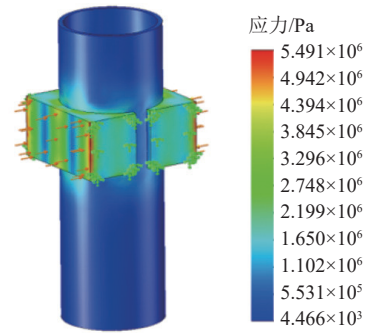


图 9 缆管夹持部位的应力分布

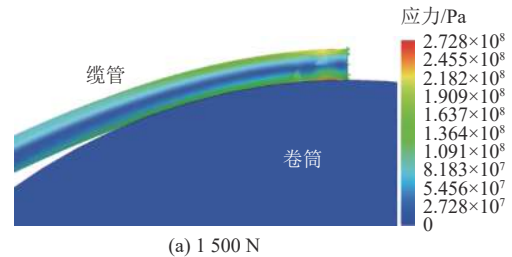
Fig.9 Stress distribution of cable duct clamping position

表 3 电缆最小允许弯曲半径

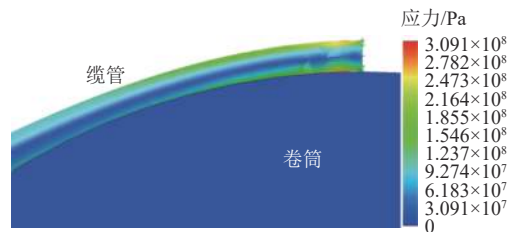
Table 3 Minimum allowable bending radius of cables

序号	电缆种类	最小允许弯曲半径与 电缆外径的比值
1	交联聚氯乙烯绝缘电力电缆	15
2	多芯控制电缆	10
3	310S 不锈钢	20

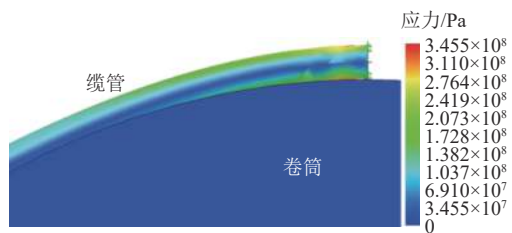
加的载荷为 2 000 N 时,缆管与卷筒过度接触。故若使缆管在弯曲过程中达到 1.1 m 的弯曲半径,所施加的载荷就应该在 1 500 ~2 000 N。通过模拟发现,当施加的载荷为 1 700 N 时,缆管与卷筒完全接触,此时缆管所受的最大应力为 309 MPa,小于材料的屈服强度,缆管不会产生塑性变形。



(a) 1 500 N



(b) 1 700 N



(c) 2 000 N

图 10 不同载荷时弯曲静应力

Fig.10 Static bending stress under different loads



## 5 结论

a. 根据双钻头仿生自平衡钻进技术对连续缆管的多功能需求, 设计了多通道多功能连续缆管, 并对连续缆管的关键部件进行了受力分析。

b. 双钻头仿生自平衡连续缆管钻进技术无需依靠钻机、钻杆就可以完成钻进动作, 解决了常规钻进方法中钻机在地面驱动钻头产生的能耗大的技术瓶颈, 具有钻进效率高、钻孔质量好、对孔壁扰动小等技术优势。

c. 多通道连续缆管同时具备泥浆循环、电能和信号传输、电磁屏蔽等功能, 并且在钻探全过程(包括钻进和起下钻等)中能够连续循环钻井液、连续传输电能和信号, 节约钻进时间, 降低钻进成本。

d. 下一步将结合双钻头仿生自平衡钻进系统进行现场钻进实验, 为双钻头仿生自平衡钻进系统的平稳高效运行提供稳定、可靠、持续的泥浆循环、电源输送和信号传输, 为矿山灾害救援提供一种高质量的多通道连续缆管技术。

## 参考文献(References)

- [1] 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.
- [2] KRUEGER S, PRIDAT L. Twenty years of successful coiled tubing re-entry drilling with e-line BHA systems—improving efficiency and economics in maturing fields worldwide[C]//SPE/ICo TA Coiled Tubing and Well Intervention Conference and Exhibition. Houston, 2016.
- [3] MAEHS J, LAW A, PRUITT R, et al. Drilling with success: BHA optimization for coiled-tubing drilling in harsh environment[C]//SPE/ICo TA Coiled Tubing Conference and Exhibition. The Woodlands, 2005.
- [4] 张承良, 杨钊, 马庆利. 连续油管侧钻井的最新进展及新技术应用[J]. 国外油田工程, 2009, 25(3): 34-36.  
ZHANG Chengliang, YANG Zhao, MA Qingli. The latest development and new technology application of coiled tubing side drilling[J]. *Foreign Oilfield Engineering*, 2009, 25(3): 34-36.
- [5] ANDERSON D R, DOREL A, MARTIN R. A new, integrated, wireline-steerable, bottom hole assembly brings rotary drilling—link capabilities to coiled tubing drilling[R]. SPE 37654, 1997.
- [6] TURNER D R, HARRIS T W, SLATER M, et al. Electric coiled tubing drilling: A smarter CT drilling system[C]//SPE/IADC Drilling Conference. Amsterdam, 1999.
- [7] 尹方雷, 余雷, 夏炎, 等. 连续管钻井工具现状及趋势[J]. 辽宁化工, 2013, 42(9): 1068-1071.  
YIN Fanglei, YU Lei, XIA Yan, et al. Development status and trend of coiled tubing drilling tools[J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2013, 42(9): 1068-1071.
- [8] MCCUTCHION P, MISZEWSKI T, HEATON J. Coiled tubing drilling: Directional and horizontal drilling with larger hole sizes[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. San Antonio, 2012.
- [9] BINGHAM B. Rotational toolface orientation to facilitate coiled tubing target acquisition[C]//IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology. Kuala Lumpur, 2000.
- [10] 张帅. 一种连续管钻井电驱动转向器研究与设计[D]. 北京: 中国石油大学, 2020.  
ZHANG Shuai. The research and design of an electric device orienter for continuous tube drilling[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2020.
- [11] 鲁明春, 姜方林, 章志轩. 我国连续管技术的发展与展望[J]. 焊管, 2019, 42(12): 1-5.  
LU Mingchun, JIANG Fanglin, ZHANG Zhixuan. Development and prospect of coiled tubing technology in China[J]. *Welded Pipe and Tube*, 2019, 42(12): 1-5.
- [12] 栗子剑, 李霖玉, 李耀产, 等. 连续油管钻机国内外现状[J]. 辽宁化工, 2013, 42(1): 68-71.  
LI Zijian, LI Linyu, LI Yaohan, et al. Domestic and international actuality of coiled-tubing unit[J]. *Liaoning Chemical Industry*, 2013, 42(1): 68-71.
- [13] 贺会群, 熊革, 李梅, 等. LZ580-73T连续管钻机的研制[J]. 石油机械, 2012, 40(11): 1-4.  
HE Huiqun, XIONG Ge, LI Mei, et al. Development of the LZ580-73T CT drilling rig[J]. *China Petroleum Machinery*, 2012, 40(11): 1-4.
- [14] LZ580-73T连续管钻机型式试验圆满完成[J]. 石油机械, 2012, 40(7): 11.  
Type test of LZ580-73T continuous pipe drilling rig successfully completed[J]. *China Petroleum Machinery*, 2012, 40(7): 11.
- [15] 高科, 孙友宏, 王治刚, 等. 一种井下扭矩自平衡有缆钻具系统: CN106761480B[P]. 2018-08-28.
- [16] 高科, 陈杭凯, 赵研. 一种井下扭矩自平衡有缆钻具的回转驱动系统: CN110219587A[P]. 2019-09-10.
- [17] 高红通. 双向回转条件下钻头碎岩过程分析与试验[D]. 长春: 吉林大学, 2019.  
GAO Hongtong. Analysis and experiment of breaking rock process under two-way rotary condition[D]. Changchun: Jilin University, 2019.
- [18] 高科, 谢晓波, 徐英超, 等. 一种扭矩自平衡嵌套式双钻头: CN201720269191.0[P]. 2017-03-20.
- [19] 邢立东. 无钻杆自平衡钻具缆管的地面存储系统研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.  
XING Lidong. Research on the ground storage system of the cable pipe of the self-balancing drill tool without drill pipe[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [20] 伍涛. 煤矿井下可退式卡瓦打捞筒的研制及应用[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(8): 165-170.  
WU Tao. Development and application of a retractable slip over-shot in underground coal mines[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(8): 165-170.

(责任编辑 郭东琼)