

定向钻进连续取心钻具设计及取心参数仿真分析

韩泽龙¹, 李小洋^{1*}, 施山山¹, 王瑛俐^{1,2}, 周庆权³, 马银龙³, 田英英¹

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 06500; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 3. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026)

摘要:在战略性矿产资源勘探取样过程中,传统的垂直孔面临着单孔投资高、获取地质信息有限等难题,无法满足高效增储勘探的需求。为此,基于绳索取心和定向钻井技术,设计了一种定向钻进连续取心钻具,能够高效精准的获取地下三维空间的地质岩心。针对该技术在硬岩中钻进效率低、钻具易折断、岩心难以连续获取等技术难点,采用仿真模拟的方法分别研究了钻压、转速、造斜率对定向取心钻进的影响。仿真分析结果表明,钻压、转速与钻进速度、造斜率和弯接头应力成正比,当钻压 >30 kN、转速 >230 r/min时即可满足 $6^{\circ}/30$ m的造斜需求。综合考虑钻具使用寿命,优选钻压为 $25\sim30$ kN,转速为 $230\sim300$ r/min。随着造斜率增大,岩心与岩心管之间的接触应力也随之变大,但最终的接触应力会保持在稳定范围内。当造斜率为 $9^{\circ}/30$ m时,最大的接触应力为 514.7 MPa,均小于岩心管材质的屈服强度。上述仿真模拟为定向钻进连续取心钻具的钻进参数与造斜能力协调优化提供理论支撑。

关键词:定向钻进;绳索取心;连续取心;单弯接头;钻进参数;钻进速度;造斜率

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2025)01-0039-08

Design of drilling tool and simulation analysis of parameters for continuous coring in directional drilling

HAN Zelong¹, LI Xiaoyang^{1*}, SHI Shanshan¹, WANG Yingli^{1,2}, ZHOU Qingquan³, MA Yinlong³, TIAN Yingying¹

(1. *Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China*; 2. *China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China*; 3. *College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China*)

Abstract: In the process of strategic mineral resources exploration and sampling, the traditional vertical hole faces some difficulties, such as high investment in a single hole and limited access to geological information, which cannot meet the needs of high efficient exploration. Therefore, a directional continuous coring technique is proposed based on wireline coring and directional drilling technology, which can efficiently and accurately obtain geological cores in underground three-dimensional space. To solve the technical difficulties of low drilling efficiency in hard rock, easily break of drilling tools and difficulty in continuous core acquisition, the effects of weight on bit (WOB), rotation speed and deviation rate on directional coring were studied by simulation. The results show that the WOB and rotation speed are proportional to the drilling speed, deviation rate and bend-joint stress. When the WOB is more than 30kN and the rotation speed is more than 230r/min, the deviation rate of $6^{\circ}/30$ m can be satisfied. Based on the comprehensive consideration of drilling tool life, the preferred WOB is $25\sim30$ kN and the preferred rotation speed is $230\sim300$ r/min. The contact stress between the core and core tube becomes larger with the increase of the deviation rate, but the final contact stress will be kept within the stable range. The maximum contact stress was 514.7 MPa when the deviation rate

投稿日期:2024-08-22; 修回日期:2024-10-30 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.01.006

基金项目:国家重点研发计划青年科学家项目“精准勘探定向钻进连续取心前沿技术研发”(编号:2021YFC2900200);国家自然科学基金项目“海洋天然气水合物保压取样球阀密封失效机理及优化设计研究”(编号:42102352)

第一作者:韩泽龙,男,汉族,1993年生,工程师,石油与天然气工程专业,硕士,从事深地、深海钻探取心技术研究工作,河北省廊坊市广阳区金光道77号,785674682@qq.com。

通信作者:李小洋,男,汉族,1988年生,高级工程师,地质工程专业,硕士,从事深部钻探取心技术研究工作,河北省廊坊市广阳区金光道77号,Lixy0692@163.com。

引用格式:韩泽龙,李小洋,施山山,等.定向钻进连续取心钻具设计及取心参数仿真分析[J].钻探工程,2025,52(1):39-46.

HAN Zelong, LI Xiaoyang, SHI Shanshan, et al. Design of drilling tool and simulation analysis of parameters for continuous coring in directional drilling[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(1): 39-46.

is $9^{\circ}/30\text{m}$, which is less than the yield strength of coring tube. The study provides theoretical support for the coordinated optimization about drilling parameters and deviation capacity of directional continuous core drilling tools.

Key words: directional drilling; wire-line coring; continuous coring; single bend joint; drilling parameters; drilling speed; deviation rate

0 引言

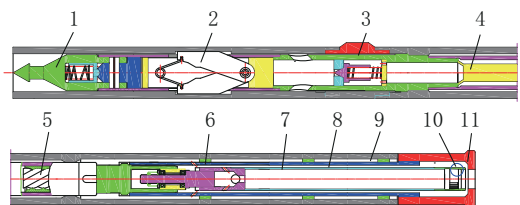
随着新一代智能技术、高端装备及新能源技术的快速发展,我国对战略性矿产资源的需求仍将持续保持在高位状态^[1-2]。但是目前我国约有2/3的战略性矿产资源需要进口,其中石油、铁矿石、铜、锂、镍等对外依存度已经超过了70%,再加上近年来全球局势动荡,严重影响了我国矿产资源供应链安全^[3-4]。为此,在战略性矿产资源十四五发展纲要中指出,通过地质找矿理论和技术方法创新,加大战略性矿产资源勘查,做好重要矿产资源战略接续,为国家资源能源安全提供保障^[5]。取心钻探是直接获取地下实物样品的唯一技术方法,通过地下岩心样品的分析,才能有效验证地质理论和物化探结果^[6]。然而传统的垂直孔钻探面临着“单孔揭示地质信息有限、高寒陡峭地形设备难以进入、地下勘探辐射空间小”等难题^[7-8],无法满足新一轮找矿突破战略行动对高效勘探取样方法的需求,因此开展新型高效增储勘探方法研究势在必行。

定向钻进连续取心技术作为一种高效精准的取样技术,不仅能够以“一孔多枝”、“分支井”等方式大幅降低地面布孔数量^[9-11],在地下三维空间内精准控制钻孔轨迹,获取目标地质体的岩心,同时还可减少因设备搬迁、井场建设等工程对地表植被破坏的面积,改变传统的资源勘探手段,加快资源勘探向着绿色、环保低碳方向转型升级,提高勘探效率和精度^[12-13]。当前只有挪威 Devico、美国 Azirwell 和 Eprico 三家公司掌握了定向钻进连续取心技术,并且已经在矿山增储、隧道建设、海底勘探等多个领域取得了良好的应用效果,其常用造斜能力达到了 $4\sim 9^{\circ}/30\text{m}$ ^[14-15]。虽然国内在小口径定向钻探实践方面已经取得了丰硕的成果,比如中煤科工集团西安研究院的煤矿井下超长定向钻进技术^[16-17]、中国地质科学院勘探技术研究所的长距离慧磁中靶技术^[18-19],此外吴金生团队^[20-21]、谢毅团队^[22]在川藏铁路勘查施工中也对水平孔定向取心技术进行了有益的应用,但在定向钻进过程中连续获取岩心及造斜能力方面与国外仍有一定差距。

本文基于绳索取心技术和定向钻井技术,提出了一种新型定向钻进连续取心钻具结构和工艺。针对定向孔在硬岩中钻进效率低、钻具受力复杂易折断、岩心难以连续获取等难题^[23-25],开展了钻进参数、造斜率对定向取心钻进的仿真模拟,旨在评价定向钻进连续取心钻具的整体工作效能,为该器具及工艺定型、推广应用提供协调优化方案。

1 定向钻进连续取心钻具结构及工艺原理

定向钻进连续取心钻具(见图1)主要包括外管总成和内管总成两部分,外管总成主要由连接管、推靠机构、传扭机构、硬质合金轴承和取心钻头等组成,内管总成主要由打捞组件、螺杆马达、万向节及取心管等组成。以螺杆马达来驱动取心钻头回转钻进,通过打捞组件实现绳索取心的功能,以推靠机构和中空单弯短节实现钻具的造斜功能,采用取心钻头和取心管来获取岩心。设计的定向取心钻具技术参数:钻具总长7.3 m,取心管长度3 m,取心直径50 mm,取心钻头外径135.5 mm,造斜能力 $< 6^{\circ}/30\text{m}$ 。



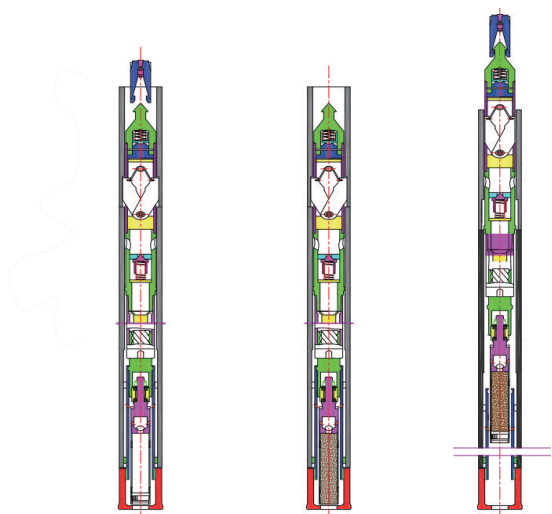
1—绳索打捞机构;2—弹卡定位机构;3—推靠导向机构;4—随钻测量存储探管;5—可提携式小口径大扭矩螺杆马达;6—偏心轴承组件;7—轻质高强取心管;8—传扭管;9—外管;10—岩心定向机构;11—定向取心钻头

图1 定向钻进连续取心钻具结构原理示意

Fig.1 The structural principle of directional continuous coring tool

实施定向取心钻进的目的之一是获取地下矿层的岩心,掌握更多的地质矿产信息。基于当前成熟的绳索取心工艺,制定了定向钻进连续取心工艺。定向钻进过程中根据随钻测量仪器的测量结

果及钻孔设计轨迹来调整实际钻进轨迹,具体的取心工艺流程主要包括(见图2):



(a) 内总成送入 (b) 定向取心钻进 (c) 内总成回收

图2 定向钻进绳索取心工艺流程

Fig.2 The processes of wire-line directional coring

(1)内管总成投放。在定向钻进过程中,钻孔轨迹可能存在垂直段、倾斜段和水平段,内管总成自由落体投放很可能无法到位。因此需要通过泥浆泵将其泵送到孔底指定位置。当内管总成到位后,钻井液会流经螺杆马达,驱动螺杆马达回转,通过花键将回转扭矩传递到传扭管,进而带动取心钻头回转。其中的偏心轴承组件将传扭管和外管的运动隔离,只有取心钻头回转,减小螺杆马达的工作扭矩。当螺杆马达到位后,泥浆泵泵压会有一定程度的增加,用于判断内管总成是否到位。

(2)钻进取心。当内管总成投放到位后,开始取心钻进。在钻进过程中会根据设计的钻孔轨迹来调整钻孔的方位角和倾斜角。此时就要求取心钻具的内外管总成轴线能够与钻孔轴线保持一致,不仅要确保岩心能够顺利进入取心管内,还能有效

减少钻具的折断、磨损及岩心脱落等事故的发生。

(3)内管总成回收。当回次进尺达到取心管长度时,即可进行内管总成的回收打捞。通过打捞器抓取取心钻具,随着打捞器的上提,取心钻具弹卡回收,实现解卡,将整套取心钻具打捞到孔口。拆卸钻具,取出岩心管内的岩心。重新组装钻具,重复以上流程继续进行取心钻进。

2 定向钻进连续取心仿真分析

2.1 钻具造斜能力理论计算

2.1.1 钻具造斜率计算

基于三点定圆法,计算定向钻具的几何造斜率,需要建立坐标系,并确定圆点^[26-27]。圆点通常选在钻具单弯点和钻头的中心线上,以此中心线作为 y 轴,垂直于中心线的钻头底面作为 x 轴。对于定向钻进连续取心钻具,简化构建出如图3所示的坐标系。

根据模型中的坐标参数,得到的造斜曲率计算公式见式(1):

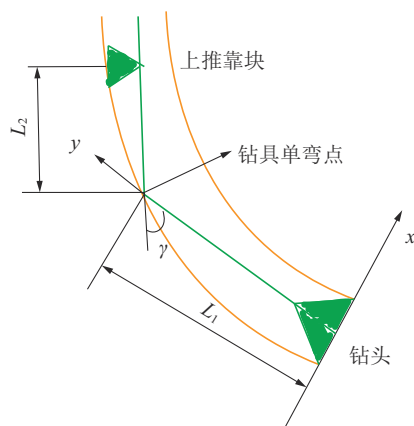


图3 定向钻进连续取心钻具造斜模型示意

Fig.3 The deviation model of directional continuous coring tool

$$k = \frac{2L_2 \sin \gamma}{\sqrt{L_1^2 L_2^2 \sin^2 \gamma + [L_2^2 \sin^2 \gamma + (L_1 + L_2 \cos \gamma)^2 - L_1(L_1 + L_2 \cos \gamma)]^2}} \quad (1)$$

式中: k ——造斜曲率; L_1 ——钻具单弯点到PDC钻头的距离,m; L_2 ——单弯点到上推靠块的距离,m; γ ——结构弯角,(°)。

2.1.2 PDC钻头在定向钻井中受力计算

定向钻进过程中PDC钻头是实现定向造斜钻

进的重要部件之一,既受到地层的约束,也受到钻杆传递下来的钻压和螺杆马达扭矩的影响,受力情况较复杂,如图4所示^[28],假设钻头中心线与井眼中心线的夹角为 θ ,根据受力平衡原则可得出PDC钻头的力学平衡方程。在 z 轴方向上施加钻压 F_1 ,并

壁对钻头的反力为 F_2 、 F_3 ,井壁对钻头的摩擦力为 f_1 、 f_2 ,以及各切削齿对钻头的反力 N ,螺杆马达给钻头施加的扭矩 M_1 ,钻杆回转传递给钻头的扭矩 M 。

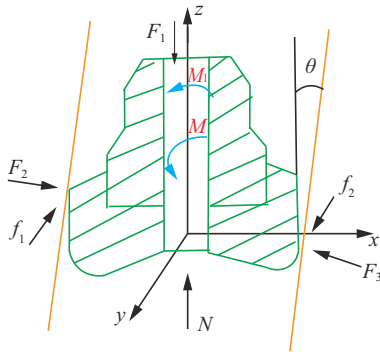


图4 定向钻进PDC钻头受力示意^[28]

Fig.4 The force diagram of PDC bit for directional drilling

在 z 轴方向上受力平衡方程;

$$F_1 - F_2 \sin \theta - F_3 \sin \theta - N = 0 \quad (2)$$

在 x 轴方向上受力平衡方程:

$$F_2 \cos \theta + F_3 \cos \theta + N = 0 \quad (3)$$

在 y 轴方向上受力平衡方程:

$$N + f_1 + f_2 = 0 \quad (4)$$

扭矩平衡方程为:

$$M = N_h r_h + f_1 R + f_2 R \quad (5)$$

式中: M ——钻头受到钻杆回转的扭矩; N_h ——切削齿在水平方向的反力; f_1 、 f_2 ——井壁对钻头两侧的摩擦力; R ——钻头半径; r_h ——切削齿距离中心距离。

由于单弯螺杆马达的作用,为钻头施加了扭矩 M_1 ,因此扭矩平衡方程:

$$M_1 = \sum N_h r_h + \sum N_v r_v + F_2 \sin \theta R + F_2 \cos \theta L + F_3 \sin \theta R + F_3 \cos \theta L \quad (6)$$

式中: N_v ——切削齿在垂直方向反力; r_v ——切削齿垂向距离。

2.2 模型参数设置及网格划分

定向钻进连续取心钻具在钻进过程中受力十分复杂,为了研究钻进效率和岩心与钻具之间的相互作用关系,将绳索打捞机构、弹卡定位机构、随钻测量存储探管、螺杆马达等对分析结果影响较小的部件进行简化,构建了定向钻进连续取心钻进模型,如图5所示,先做如下假设:(1)钻具的变形都为弹性小变形;(2)井壁皆为刚性体,钻进岩层为各向

均质体;(3)钻压施加于单弯接头上端,钻头中心线与井眼中心线一致;(4)扶正器、单弯支点与井壁为点接触;(5)钻具在自重作用下贴于钻孔的低边。定向钻进连续取心钻进模型参数见表1。

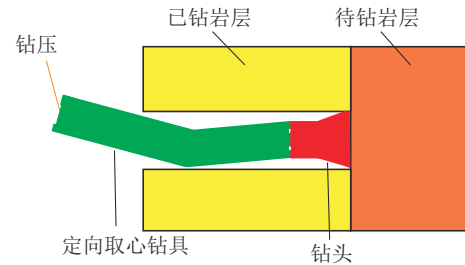


图5 定向钻进连续取心模型示意

Fig.5 The schematic model of directional continuous coring

表1 定向钻进连续取心钻进模型参数

Table 1 The parameters of directional continuous coring model

参 数 名 称	取 值
取心钻头外径/mm	135.5
取心钻头内径/mm	50
中空单弯接头角度/(°)	0~3
外管总成最小内径/mm	85
内管总成最大外径/mm	90
取心管内径/mm	56

通过Solidworks软件建立了定向取心钻具与地层的三维模型,利用Abaqus软件对钻进效率和岩心与钻具的相互作用关系开展仿真分析。建模过程中由于钻头形状不规则,拓扑结构复杂,很难划分为六面体网格,又由于钻头要与岩层发生相互作用,因此采用C3D10M二次修正四面体单元,对钻头施加刚体约束,由于其各个节点自由度不参与平衡方程的计算,因此采用四面体网格进行计算。实钻岩层选择为泥质砂岩,为了提高计算精度和缩短计算时间,井壁网格尺寸设置相对较大,可有效减少网格数量,实钻岩层网格划分较细,网格尺寸设置为2 mm,可有效模拟钻进过程,所有网格划分完毕后,总网格数达到442714个。

2.3 钻压、转速及造斜率对定向取心钻进的影响

在定向取心钻进过程中,钻进效率主要涉及到两个方面:(1)钻进速度,决定了能否快速钻达目标地层;(2)造斜能力,这个指标是体现定向钻进质量

的一个重要指标,决定了能否按照设计轨迹完成钻孔任务。因此,为了研究定向取心钻进过程中的钻进效率及造斜工艺参数,通过 Abaqus 软件运用有限元分析法对钻进过程进行动力学仿真模拟,以探讨不同钻压、转速对定向钻进效率影响规律,提出定向取心钻进与造斜能力的协调优化工艺参数。

2.3.1 钻压对定向取心钻进的影响

钻压作为重要的钻进参数之一,对钻进速度和钻具的造斜能力有着至关重要的影响。因此,通过设置不同的钻压来仿真模拟定向取心钻进效率的变化情况。依次在定向钻进连续取心钻具上端面施加了 15、20、25、30、35 kN 五组不同钻压,中空单弯短节角度设置为 1.0° ,转速为 200 r/min。通常情况下钻具与井壁的滑动摩擦系数为 0.1~0.5,根据钻具表面的粗糙度和井壁的完整性,模型中设置钻具与井壁滑动摩擦系数为 0.2。

从图 6 可以看出,随着钻压的加大,钻进速度基本成线性增加。当钻压为 35 kN 时,钻进速度达到了 1.89 m/h,是 15 kN 时的 1.9 倍,钻进时效增加非常明显。但由于取心钻头唇面较厚,导致整体钻速较慢。定向井造斜率通常采用钻进 30 m 的倾角变化作为评价指标,从模拟结果来看,造斜率与钻压成正比关系,当钻压在 15~25 kN 之间时,造斜率增长比较缓慢,由 $4.87^\circ/30\text{ m}$ 增加到 $5.31^\circ/30\text{ m}$ 。当钻压超过 25 kN 后,造斜率增长迅速。钻压为 30 kN 时,造斜率已经超过了 $6^\circ/30\text{ m}$ 的设计要求。35 kN 时,造斜率达到了 $8.14^\circ/30\text{ m}$,完全能够满足定向钻进连续取心的需求。中空单弯接头既是造斜的关键部件之一,也是绳索打捞的取心通道之一,此处的壁厚远小于常规弯接头的壁厚,因此该弯接头处的应力变化是影响定向钻进连续取心安全高效实施的关键点。如图 6 所示,中空单弯接头处的应力随着钻压加大而不断增加,最大应力为 548 MPa,低于单弯接头材料的屈服应力。因此,在考虑中空单弯接头受力状况和满足造斜率设计要求的基础上,应优选钻压为 25~30 kN。

图 7 是不同钻压条件下与钻头接触实钻岩层的应力云图。从图中可以得出,钻进地层最大 Mises 应力为 134.1 MPa,并且随着钻压的加大,应力集中区域逐渐变大,应力延伸深度也有明显的扩展,进而说明了在 PDC 钻头钻进过程中岩石破碎的体积也有增大的趋势。此外,在钻压 15~20 kN 时,应力

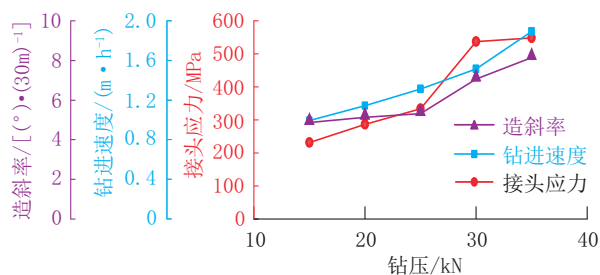


图 6 钻压对钻进速度、弯接头应力和造斜率的影响

Fig.6 The effect of WOB on drilling speed, stresses on bent joint and deviation rate

集中区域分布范围较小,没有明显的倾斜方向。但是当钻压在 25~35 kN 之间时,应力集中区域明显扩大,且有明显的倾斜方向,钻孔造斜趋势明显。

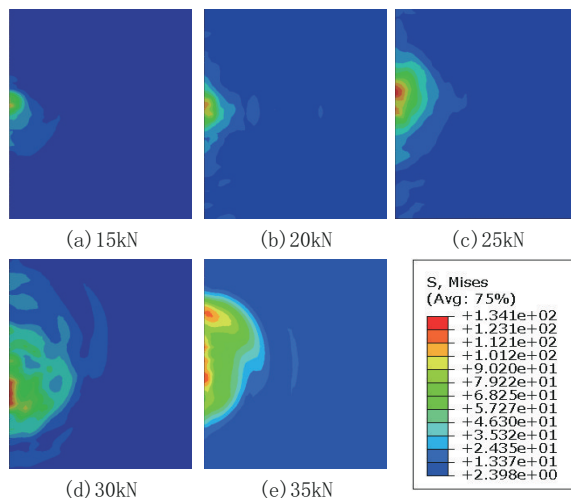


图 7 不同钻压下钻进岩层应力分布云图

Fig.7 Cloud maps of stress distribution in drilled rock under different WOB

2.3.2 转速对定向取心钻进的影响

转速是影响钻进效率的又一关键因素,定向钻进 PDC 钻头的回转主要通过螺杆马达来提供。选用螺杆马达所需钻井液流量为 200~500 L/min,压降 1.2~7.0 MPa,最大转速 413 r/min,最大扭矩为 690 N·m。因此在仿真模拟过程中,根据选定的螺杆马达产生的转速,设置 100、200、300 和 400 r/min 四组转速,钻压优化后设置为 30 kN,钻具与井壁的滑动摩擦系数为 0.2。

图 8 展示了 PDC 钻头不同转速情况下,钻进速度、造斜率和单弯接头应力的变化情况。三者都与转速成正比关系,但增长趋势不同。钻进速度在 100~200 r/min 区间内增长明显,随后增长速度明

显放缓。400 r/min时的钻进速度为1.89 m/h,对比100 r/min时的钻速1.14 m/h有较大幅度的提升。造斜率在200 r/min之后,基本是线性增加,最大值达到了 $10.13^{\circ}/30\text{ m}$ 。从曲线图上可以出,当造斜率达到 $6^{\circ}/30\text{ m}$ 时,对应的转速约为230 r/min。单弯接头处的应力在200 r/min后迅猛增长,400 r/min时单弯接头应力为379 MPa,仍然在弯接头壳体材料的许用范围之内。因此,从造斜率设计要求、单弯接头受力状况和螺杆转速与扭矩需求等方面综合分析,优选转速区间为230~300 r/min。

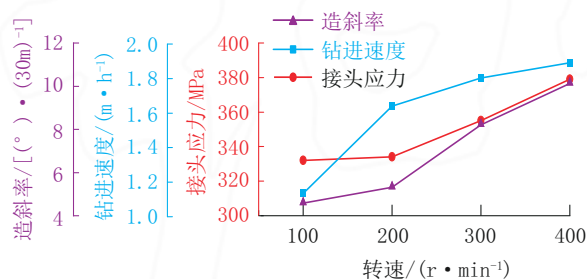


图8 转速对钻进速度、弯接头应力和造斜率的影响

Fig.8 The effect of rotational speed on drilling speed, stresses on bent joint and deviation rate

图9为PDC钻头在不同转速工况下的实钻地层应力分布云图。从图中可以看出,岩层最大的Mises应力为124.5 MPa,并且在PDC钻头切削齿附近出现了一定范围的应力集中。应力集中范围随着转速的增大而变大。图9中转速作用下的岩层应力比较分散,且有很多不连续区域,延展深度也要比图7大得多。由此可见,转速作用下的岩石破碎机理与钻压作用下的破碎机理有着明显的区别。

2.3.3 造斜率对定向取心的影响

造斜率是衡量定向钻进的一个重要指标,同时也对岩心的获取有着重要影响。为此分别设置3、6、 $9^{\circ}/30\text{ m}$ 三种造斜率来研究岩心与岩心管相互作用的接触应力,进而讨论对定向岩心的影响。模型设置钻进速度为2 m/h。造斜强度主要是通过调整单弯短节的弯角来实现,取心部件不变,并且取心筒在穿过单弯短节后有柔性扶正环进行扶正,确保取心筒和单弯短节的轴线保持一致,保证既能造斜又能获取岩心。

从图10中得出,当造斜率为 $3^{\circ}/30\text{ m}$ 时,两者的接触应力比较小,增长比较缓慢,最大值为147.5

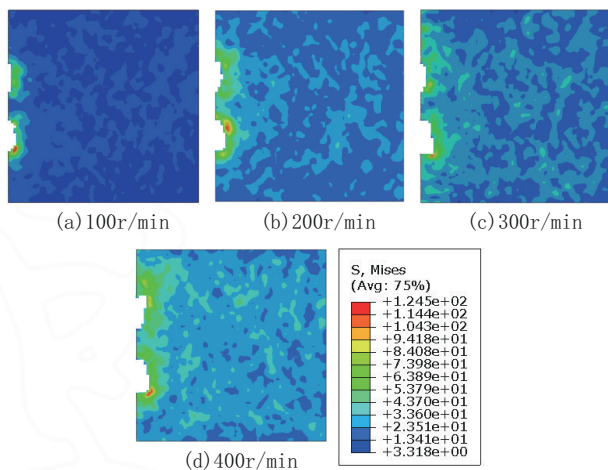


图9 不同转速下钻进岩层应力分布云图

Fig.9 Cloud maps of stress distribution in drilled rock under different rotational speeds

MPa,岩心能够顺利进入岩心管中。造斜率为 $6^{\circ}/30\text{ m}$ 时,接触应力在岩心长度1.75 m处有比较剧烈的升高,在此点之前都在210 MPa上下波动,此后也比较平稳,最大接触应力为312.7 MPa。当造斜率为 $9^{\circ}/30\text{ m}$ 时,岩心进入岩心管约0.6 m之前,两者的接触应力保持增加的趋势。此后维持在小波动范围内,最大接触应力为514.7 MPa。上述出现的接触应力极值都小于岩心管材料的屈服强度,因此设置的三种造斜率都能够确保定向岩心的获取。但随着造斜率的增加,岩心与岩心管之间的接触应力也随着增加,这在一定程度上加大了获取岩心的难度。

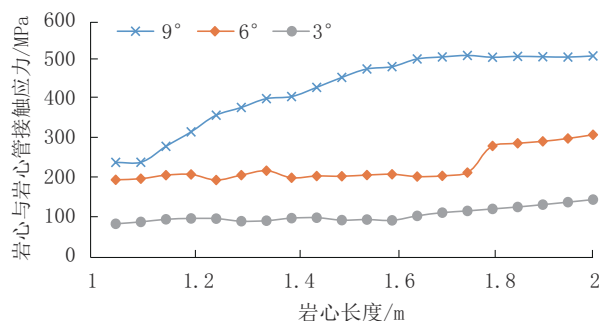


图10 不同造斜率条件下岩心与岩心管接触应力

Fig.10 Contact stress between core and core tube under different deviation rate

3 结论

(1)基于对战略性矿产资源增储勘探新技术的需求,提出了一种定向钻进连续取心钻具结构及工艺,通过绳索取心的方式能够在定向造斜过程中连

续获取岩心,助力实现地下三维空间岩心的精准获取。

(2)仿真结果表明,随着钻压、转速的增大,定向钻进连续取心钻具的造斜能力、钻进速度和弯接头应力都在增加。在满足 $\leq 6^\circ/30\text{ m}$ 的造斜能力情况下,优选钻压为25~30 kN,转速为230~300 r/min。

造斜率和岩心与岩心管之间的接触应力成正比关系,但最大接触应力会稳定在一定范围内。适当控制钻进速度和造斜率有利于提高定向取心质量。

参考文献(References):

- [1] 毛景文,杨宗喜,谢桂清,等.关键矿产:国际动向与思考[J].矿床地质,2019,38(4):689-698.
MAO Jingwen, YANG Zongxi, XIE Guiqing, et al. Critical minerals: international trends and thinking [J]. Mineral Deposits, 2019,38(4):689-698.
- [2] 曹代勇,王路,刘志飞,等.我国煤系石墨研究及资源开发利用前景[J].煤田地质与勘探,2020,48(1):1-11.
CAO Daiyong, WANG Lu, LIU Zhifei, et al. The research status and prospect of coal-based graphite in China[J]. Coal Geology & Exploration, 2020,48(1):1-11.
- [3] 代鸿章,王登红,刘善宝,等.国外锂矿找矿新进展(2019-2021年)及对我国战略性矿产勘查的启示[J].地质学报,2023,97(2):583-595.
DAI Hongzhang, WANG Denghong, LIU Shanbao, et al. New progress in Lithium prospecting abroad (2019—2021) and its significance to China's strategic mining resources exploration [J]. Acta Geologica Sinica, 2023,97(2):583-595.
- [4] 左更.中国金属矿产品资源安全保供问题亟待全面思考与布局[J].冶金经济与管理,2022(3):4-6.
ZUO Geng. The safety supply of metal mineral products in China needs comprehensive consideration and layout[J]. Metallurgical Economy and Management, 2022(3):4-6.
- [5] 国家发展与改革委员会.推进资源地区高质量发展“十四五”实施方案[EB/OL].(2021-11-05)[2024-08-27].https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-11/14/content_5650830.htm.
Development and Reform Commission. The implementation Plan of the 14th Five-Year Plan for high-quality development in resource areas[EB/OL]. (2021-11-05)[2024-08-27]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-11/14/content_5650830.htm.
- [6] 徐峰阳,刘成双,陈宁.短曲率半径水平钻孔取心技术研究及试验[J].钻采工艺,2021,44(2):26-28,37.
XU Fengyang, LIU Chengshuang, CHEN Ning. Research and test on coring technology of horizontal borehole with short curvature radius[J]. Drilling & Production Technology, 2021,44(2):26-28,37.
- [7] 罗显梁,徐正宣,吴金生,等.川藏铁路千米级水平孔绳索取心钻进技术与应用[J].地质与勘探,2022,58(3):665-675.
LUO Xianliang, XU Zhengxuan, WU Jinsheng, et al. Application of the drilling technology based on wireline coring to a Kilometer-level horizontal hole on the Sichuan-Tibet railway[J]. Geology and Exploration, 2022,58(3):665-675.
- [8] 吴纪修,尹浩,张恒春,等.水平定向勘察技术在长大隧道勘察中的应用现状与展望[J].钻探工程,2021,48(5):1-8.
WU Jixiu, YIN Hao, ZHANG Hengchun, et al. Application status and R & D trend of horizontal directional investigation technology for long tunnel investigation [J]. Drilling Engineering, 2021,48(5):1-8.
- [9] 高德利.非常规油气井工程技术若干研究进展[J].天然气工业,2021,41(8):153-162.
GAO Deli. Some research advances in well engineering technology for unconventional hydrocarbon [J]. Natural Gas Industry, 2021,41(8):153-162.
- [10] 李泉新,石智军,史海蛟.煤矿井下定向钻进工艺技术的应用[J].煤田地质与勘探,2014,42(2):85-88.
LI Quanxin, SHI Zhijun, SHI Haiqi. The application of directional drilling technology in coal mine [J]. Coal Geology & Exploration, 2014,42(2):85-88.
- [11] 宋先知,李嘉成,石宇,等.多分支井地热系统注采性能室内实验研究[J].石油钻探技术,2021,49(1):81-87.
SONG Xianzhi, LI Jiacheng, SHI Yu, et al. Laboratory-scale experimental study on the injection-production performance of a multilateral-well enhanced geothermal system [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021,49(1):81-87.
- [12] 熊涛,周立明,张维生,等.对现行煤层气资源勘查技术规范中若干问题的思考[J].中国煤炭地质,2022,34(3):55-58.
XIONG Tao, ZHOU Liming, ZHANG Weisheng, et al. Pondering on several issues in current effect “technical specification of coalbed methane resource exploration” [J]. Coal Geology of China, 2022,34(3):55-58.
- [13] 刘蓓,寇少磊,朱芝同,等.便携式模块化钻机在绿色地质勘查工作中的应用实践[J].钻探工程,2022,49(2):30-39.
LIU Bei, KOU Shaolei, ZHU Zhitong, et al. Practical application of the portable modular drill in green geological exploration work [J]. Drilling Engineering, 2022,49(2):30-39.
- [14] Shinmoto Y, Miyazaki E, Wada K, et al. Development of a continuous directional coring system for deep-sea drilling [J]. SPE Drilling and Completion, 2012,27(1):139-144.
- [15] Tsang K C, Chau S F, Chan J, et al. Sub-sea horizontal directional coring (HDC) [J]. Geotechnical Engineering, 2016,47(3):31-36.
- [16] 石智军,董书宁,杨俊哲,等.煤矿井下3000m顺煤层定向钻孔钻进关键技术[J].煤田地质与勘探,2019,47(6):1-7.
SHI Zhijun, DONG Shuning, YANG Junzhe, et al. Key technology of drilling in-seam directional borehole of 3000 m in underground coal mine [J]. Coal Geology & Exploration, 2019,47(6):1-7.
- [17] 王明华,刘维,段绪林,等.川渝地区深层破碎地层取心工艺优化研究[J].钻采工艺,2022,45(6):26-30.
WANG Minghua, LIU Wei, DUAN Xulin, et al. Optimization and application of coring technology in deep fractured formations in Sichuan-Chongqing area [J]. Drilling & Production Technology, 2022,45(6):26-30.
- [18] 涂运中,陈剑钊,刘春生,等.“慧磁”定向钻井中靶系统超高精度中靶技术研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47

- (10):1-6,12.
- TU Yunzhong, CHEN Jianyao, LIU Chunsheng, et al. Study on ultra-high precision target-hitting technology of SmartMag system[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(10):1-6,12.
- [19] 刘鹏,陈剑垚,侯岳,等. 钻井利器之“慧磁”高精度定向中靶导向系统[J]. 钻探工程, 2023,50(4):155-159.
- LIU Dan, CHEN Jianyao, HOU Yue, et al. The story of a drilling weapon: SmartMag drilling target-hitting guide system[J]. Drilling Engineering, 2023,50(4):155-159.
- [20] 吴金生,黄晓林,蒋炳,等. 水平绳索随钻定向钻进技术研究与应用[J]. 煤田地质与勘探, 2021,49(5):260-264,271.
- WU Jinsheng, HUANG Xiaolin, JIANG Bing, et al. Research and application of horizontal wire-line directional deviation correction while drilling[J]. Coal Geology & Exploration, 2021,49(5):260-264,271.
- [21] 石绍云,李杰,罗显梁,等. 超深涌水水平孔绳索取心钻具投送和打捞技术[J]. 钻探工程, 2021,48(11):1-7.
- SHI Shaoyun, LI Jie, LUO Xianliang, et al. Running-in-hole and fishing technology for the wireline coring tool in ultra-deep horizontal holes with water gushing[J]. Drilling Engineering, 2021,48(11):1-7.
- [22] 谢毅,徐正宣,陈明浩,等. 山区铁路隧道超长定向钻探关键技术研究[J]. 铁道工程学报, 2022,39(8):1-5,11.
- XIE Yi, XU Zhengxuan, CHEN Minghao, et al. Research on the key technology of ultra long directional drilling in railway tunnel in mountainous area[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022,39(8):1-5,11.
- [23] 黄壮,侯作富,陈锟,等. 水平井眼中单弯螺杆钻具组合力学分析方法[J]. 石油机械, 2021,49(8):8-15.
- HUANG Zhuang, HOU Zuofu, CHEN Kun, et al. Mechanical analysis method for single-bend PDM assembly in horizontal hole[J]. China Petroleum Machinery, 2021,49(8):8-15.
- [24] Guo Z L, Gao D L. An analysis of the Bottom hole assembly (BHA) in directional drilling by considering the effects of the axial displacement[J]. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2013,90(1):65-76.
- [25] Feng T H, Kim I, Chen D M. Dynamic modeling of directional drill-string: A linearized model considering well profile[J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 2018,140(6):061005.
- [26] 李子丰,赵新瑞,赵德云. 通用下部钻具三维小挠度静力分析的数学模型及应用[J]. 工程力学, 2000,17(6):121-129.
- LI Zifeng, ZHAO Xinrui, ZHAO Deyun. A mathematical model for 3D analysis of general bottomhole assembly under small deflection and its application[J]. Engineering Mechanics, 2000,17(6):121-129.
- [27] 张辉,张日鹏,何军,等. 单弯螺杆钻具组合造斜能力研究[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2016,13(2):41-46.
- ZHANG Hui, ZHANG Ripeng, HE Jun, et al. Study on build-up capacity of Positive Displacement Drill(PDD)with single bend[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2016,13(2):41-46.
- [28] 徐玉超. 定向井PDC钻头受力模型及优化设计研究[D]. 青岛:中国石油大学, 2008.
- XU Yuchao. Mechanical model and optimizing design of oriented PDC bit [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2008.

(编辑 王文)