

# 双孕镶金刚石钻头跟套管连续钻进机构 设计及模拟分析

王金龙, 高科, 张宗正\*, 赵研, 谢晓波

(吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026)

**摘要:**跟管钻进技术是解决复杂地层钻进的有效方法之一,针对跟管钻进过程中内外管环间隙卡阻、钻具受力复杂、能耗大和套管连续下入深度有限、深孔干热岩花岗岩在热应力作用下破碎卡钻等技术难题,本文创新设计了一种双孕镶金刚石钻头跟套管连续钻进机构。理论分析表明:双钻头同心回转钻进岩屑小,避免内外管卡阻,极大地改善了钻具的受力状态,降低了钻具发生断裂的风险;内钻头通过齿轮啮合方式带动外钻头独立回转,相较于常规跟套管钻进能量消耗降低29.29%;外钻头采用高胎体交替式结构,有效避免了钻井液局部循环现象的发生,从而提高了套管连续下入的深度。该机构设计为跟套管钻进技术提供了一种新思路。

**关键词:**跟管钻进;破碎地层;双钻头;孕镶金刚石钻头;高胎体;数值模拟

**中图分类号:**P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2022)03-0092-08

## Design and simulation of a continuous casing drilling mechanism with twin impregnated diamond bits

WANG Jinlong, GAO Ke, ZHANG Zongzheng\*, ZHAO Yan, XIE Xiaobo

(College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China)

**Abstract:** The technology of casing drilling is one of the effective methods to solve the problem of complex formation drilling. In view of the technical problems in the process of casing drilling, such as sticking in the annulus between the inner and outer tubes, complex load on the drilling string, high energy consumption, limited continuous running depth of casing, bit sticking in deep hole hot dry rock granite broken under the action of thermal stress, a continuous casing drilling mechanism with twin impregnated diamond bits is innovatively designed in this paper. Theoretical analysis shows that concentric rotary drilling with the twin bits produces small size cuttings to avoid sticking of both the inner and outer drilling strings, improve the stress state of the drilling tool and reduce the risk of breaking of the drilling tool. Compared with conventional casing drilling, the energy consumption of the inner bit is reduced by 29.29%. The outer bit employs a high matrix with the staggered water port and reinforcement structure, which effectively avoids local circulation of drilling fluid and improves the continuous running depth of casing. The design of this mechanism provides a new idea for casing drilling technology.

**Key words:** casing drilling; broken formation; twin bits; impregnated diamond bit; high matrix; numerical simulation

## 0 引言

为提高破碎地层、卵砾石地层钻进时孔壁稳定

性和施工效率,在常规泥浆护壁和冲击钻进粘土护壁等方法不能有效稳定孔壁或者发生泥浆大量漏

收稿日期:2022-03-07; 修回日期:2022-04-12 DOI:10.12143/j.ztgc.2022.03.012

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:42172345,41972324);地热资源开发技术与装备教育部工程研究中心开放课题(编号:21023,21022)

第一作者:王金龙,男,汉族,1996年生,在读博士研究生,主要从事仿生钻头的研究工作,吉林省长春市西民主大街938号,1810993911@qq.com。

通信作者:张宗正,男,汉族,1997年生,在读硕士研究生,主要从事仿生钻头的研究工作,吉林省长春市西民主大街938号,510169497@qq.com。

引用格式:王金龙,高科,张宗正,等.双孕镶金刚石钻头跟套管连续钻进机构设计及模拟分析[J].钻探工程,2022,49(3):92-99.

WANG Jinlong, GAO Ke, ZHANG Zongzheng, et al. Design and simulation of a continuous casing drilling mechanism with twin impregnated diamond bits[J]. Drilling Engineering, 2022,49(3):92-99.

失时,通常采用跟管钻进技术来维持孔壁稳定<sup>[1-4]</sup>。目前,常规跟管钻进技术主要分为两种,一种是偏心跟管钻进,另一种是同心跟管钻进<sup>[5-12]</sup>。目前,跟管钻进工艺常用硬质合金球齿搭配潜孔锤钻进,这限制了跟管钻进技术的钻进地层,例如干热岩地层,不但埋藏深度大、冲击回转钻进井壁不规整外,井壁的花岗岩在热应力及骤冷的作用下还容易发生破裂,极易卡钻,现有跟套管钻进工艺已无法满足深井钻进需求。

为解决上述问题,本文研究了一种泥浆环境下的双孕镶金刚石钻头跟套管连续钻进机构,该机构结构简单,内钻头可重复置换,当内钻头磨损严重时,可以起钻更换钻头,而孔内由于有套管与外钻头提供支撑,使得孔内环境稳定,进而可以使更换后的内钻头顺利进入对应位置并继续钻进。外钻头是课题组研发的超高工作层胎体一体化渐开式水口孕镶金刚石钻头<sup>[13]</sup>,外钻头胎体高度根据所需下套管的深度而定,套管需要下放的越深,则胎体高度越高;而内钻头为常规钻头,这样可以保证钻井液顺利涌入孔底,限制钻井液的流动轨迹。内外钻头均使用孕镶金刚石钻头,磨削碎岩,岩屑颗粒小,避免造成内外管总成卡阻问题。高胎体外钻头与套管的独立回转的组合可以实现不更换外钻头,无需提升套管,可持续高效钻进。此外,针对高胎体外钻头在钻进过程中受力易崩齿、断齿的问题,进行了高胎体外钻头的受力模拟分析,校核高胎体外钻头的强度。该机构可以有效地解决由于地层破碎发生卡钻、埋钻、以及干热岩遇冷破碎塌孔等问题。

## 1 常规跟管钻进原理及存在的问题

常规跟管钻进原理如图1所示。

偏心跟管钻进通过钻具组合中冲击器的振动冲击作用,带动偏心钻具进行钻孔,钻进时由于偏心钻具受到离心力及摩擦力的作用,偏心钻头向外偏出,从而达到扩大孔径的目的<sup>[8,14-15]</sup>,再通过钻具组合中稳杆器的冲击作用,带动套管跟进,钻孔内部产生的岩屑通过稳杆器上的键槽由空压机吹出孔外<sup>[16-19]</sup>。钻孔结束后,通过反转,使偏心轮收拢回套管内,进而将其提出套管,套管留在孔内护壁而成孔。

同心跟管钻进通过中心钻头及套在中心钻头外的同心套共同冲击破碎岩石造孔,并且同时利用同心套的扩孔作用将套管带入孔内,同心套内设键槽,

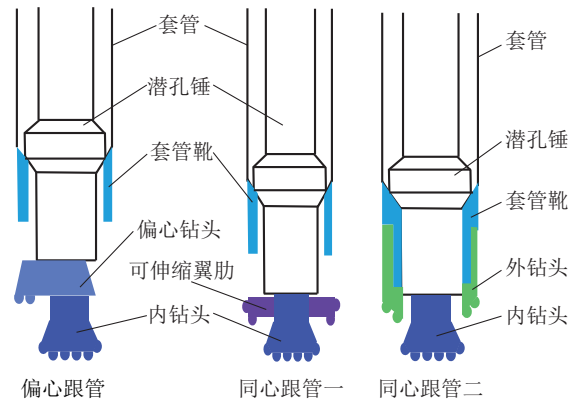


图1 传统跟管钻进原理示意

Fig.1 Typical casing drilling principles

到基岩后,中心钻头反转通过同心套中退出<sup>[20]</sup>。同心跟管能较好地解决偏心跟管钻进时因地质条件复杂而造成的卡钻及孤石钻进问题,更加有利于施工操作,提高钻孔工效。

以上两种常规方法存在一定局限性,表1为两种跟管钻进方法的工艺对比<sup>[9,21-23]</sup>。

## 2 双孕镶金刚石钻头跟套管连续钻进机构结构设计

### 2.1 双孕镶金刚石钻头跟套管连续钻进机构工作原理

以取心钻进为研究目标,设计的双孕镶金刚石钻头跟套管连续钻进机构为原理机构,非标准钻具系统。主要由孕镶金刚石内钻头、高胎体孕镶金刚石外钻头、钻杆、套管、外钻头连接接头、内钻头传动齿、外钻头传动齿、键、承压轴承3个、导正轴承、导正轴承限位、连接接头限位及螺栓组成,见图2。

双钻头跟套管连续钻进机构在工作过程中,内钻头的钻压和扭矩由钻杆提供,钻进形式与常规钻进形式一致,高胎体外钻头的扭矩是由内钻头通过内外传动齿轮啮合的方式提供,外钻头传动齿内径大于内钻头外径,有利于内钻头起下钻,钻压通过套管提供给承压轴承,由承压轴承将钻压传递给高胎体外钻头(高胎体外钻头与外钻头连接接头为螺纹连接),因承压轴承和导正轴承的存在使得高胎体外钻头能够回转钻进而套管只提供压力不进行回转。

### 2.2 独立传压机构

独立传压机构设计的目的是将高胎体外钻头与套管进行独立,使套管仅为高胎体外钻头提供钻进

表1 两种跟管钻进方法工艺对比

Table 1 Process comparison of two casing drilling methods

方 法	生产公司	适用地层	循环介质	跟管深度	优 点	不 足
潜孔锤偏心跟管钻进	中国无锡钻探工具厂	卵砾石地层	空气	小于15 m	效率高	偏心钻头收拢失效易造成孔内事故
	中国无锡钻探工具厂	卵砾石地层	空气		效率高	内管被大块岩屑卡住反转失灵,无法分离
潜孔锤同心跟管钻进	美国 Ingersoll-Rand 公司	卵砾石地层	空气	与地层包裹能力有关	效率高	钻孔深度受限
	芬兰 Oy Atlas Copco Ro-tex 公司	卵砾石地层等破碎地层	空气	浅孔	钻头寿命长	钻孔深度受限,结构复杂,成本高

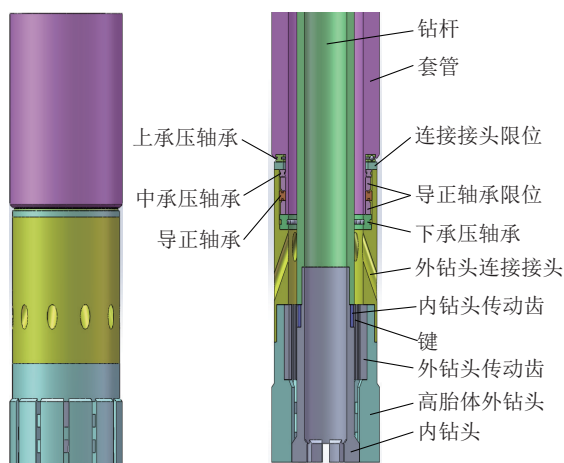


图2 双孕镶金刚石钻头跟套管连续钻进机构结构示意图

Fig.2 Structure of the continuous casing drilling mechanism with the twin bits

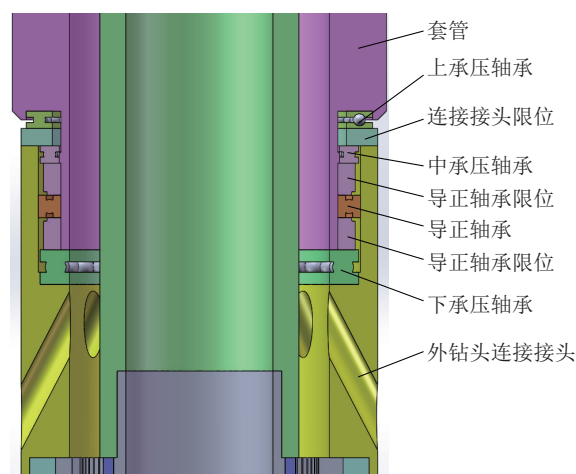


图3 连接机构局部放大剖视

Fig.3 Enlarged sectional view of the connecting mechanism

压力,高胎体钻头只能进行回转钻进,而不能将回转扭矩作用给套管。具体结构如图3所示,外钻头连接接头与连接接头限位通过螺栓连接,套管通过上中下承压轴承将压力传递给连接接头限位和外钻头连接接头,导正轴承通过导正轴承限位进行位置固定,导正轴承限位通过螺纹连接到套管上,高胎体外钻头通过承压轴承和导正轴承将回转扭矩释放,当出现套管被破碎岩石卡住这种特殊情况,在不影响高胎体外钻头正常钻进情况下,套管也可以通过地面设备带动回转起到解卡的作用。

### 2.3 高胎体孕镶金刚石外钻头交替式加强结构

为满足钻头的正常冷却及岩屑上返,本文设计高胎体孕镶金刚石外钻头水口个数为12个,水口宽度为15 mm,为提高钻进深度,胎体高度设计为100 mm,通过加强的方式将单齿进行交替式加强,加强高度为15 mm,水口沿轴向均分5等份,每份高度

20 mm,通过交替加强的方式提高高胎体外钻头的整体性,并且不影响泥浆的正常循环,如图4所示。其相邻水口内布置的加强所在高度不同,且互相补充,此种设计的交替式水口会在第一层加强完全磨损后原本是加强的位置出露成水口,而原本是水口的位置则变成了加强,使得在磨削过程中,钻头底部始终具有水口和加强结构。另外,外钻头胎体高度根据所需下套管的深度而定,套管需要下放的越深,则胎体高度越高,而内钻头为常规钻头,这样其优点主要有两个,第一是解决了高胎体钻头工作时钻井液局部循环导致钻井液无法运送至孔底的问题,使得在无论外钻头胎体高度多高的情况下,钻井液都会先运送至钻孔底部,起到为底部接触岩石的钻头部分冷却和携带岩屑的作用。第二是结构简单,内钻头可重复置换,当内钻头磨损严重时 can 起钻更换,而孔内由于有套管与外钻头提供支撑,使得孔内

环境稳定,进而可以使更换后的内钻头顺利进入对应位置并继续钻进。

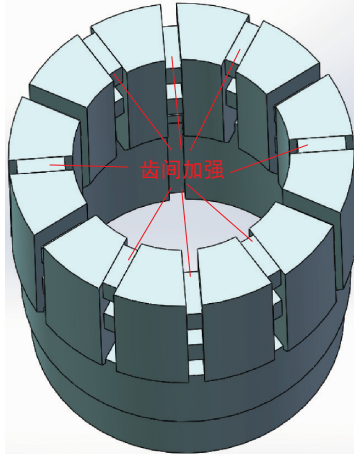


图4 高胎体孕镶金刚石外钻头齿间加强示意

Fig.4 Reinforcement between the teeth of the high matrix outer bit

### 3 双孕镶金刚石钻头跟套管连续钻进机构与常规跟管钻进能量消耗对比分析

#### 3.1 能量消耗对比计算

区别于常规同心跟管钻进,双孕镶金刚石钻头跟套管连续钻进机构套管部分是独立的,在不发生套管卡阻时套管不进行回转,发生卡阻时套管通过回转的方式进行解卡,套管不回转会节省大量能量。首先计算常规同心跟管钻进,一般情况下井孔很难完全垂直,假设井斜角为 $5^\circ$ ,则当套管在地层中转动时,下方外钻头打出的井孔大于套管直径,则套管在旋转下放时主要受地层和套管间的摩擦力,而这部分摩擦力则作用在接触面,且方向一个为沿接触面与下套管运动方向相反,另一个方向为其法线方向,且与套管转动方向相反,因将地层与套管简化为各向同性的均质材料,所以其两个方向的摩擦力大小相等,方向相互垂直。则两方向的合力为:

$$F_2 = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (1)$$

而该方法套管不转动,只下滑,所以只受到沿接触面与下套管运动方向相反的摩擦力 $F_1$ 。

而X、Y方向的摩擦力:

$$F_x = F_y = F_1 \quad (2)$$

所以常规方法的合力:

$$F_2 = \sqrt{F_1^2 + F_1^2} = \sqrt{2} F_1 \quad (3)$$

因消耗的能量绝大部分作用在抵抗摩擦力做功

上,因此:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{F_1}{F_2} = \frac{\sqrt{2}}{2} = 70.71\%$$

即该跟套管内外钻头钻进方法所消耗的能量是常规方法的70.71%。

通过计算结果可以得出在套管不进行回转的情况下,本文设计的跟套管机构相较于常规的跟套管钻进能量消耗可节约29.29%。

#### 3.2 模拟校核

本文运用Abaqus进行数值模拟,主要模拟跟套管钻进时套管旋转和不旋转两种状态时摩擦应力的变化,借此来验证之前的计算。本文通过对以下参数(见表2)进行模拟。

表2 摩擦力模拟参数

Table 2 Friction simulation parameters

参 数 项	参 数 值
井斜角/ $^\circ$	5
土壤容重 $\gamma_m/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	24
土与套管间摩擦系数 $\mu_1$	0.35
套管容重 $\gamma_g/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	78.5
(套管内径 $d$ /外径 $D$ )/mm	150/214
外钻头外径 $D_2$ /mm	220

以下为建模尺寸(参见图5),土层为 $2.5\text{ m} \times 2.5\text{ m} \times 25\text{ m}$ 的立方体,其中心竖直方向有一钻孔,为外钻头钻孔形成的直径为220 mm的大井孔,套管长为10 m,外径略小于井孔,埋入大井孔中。

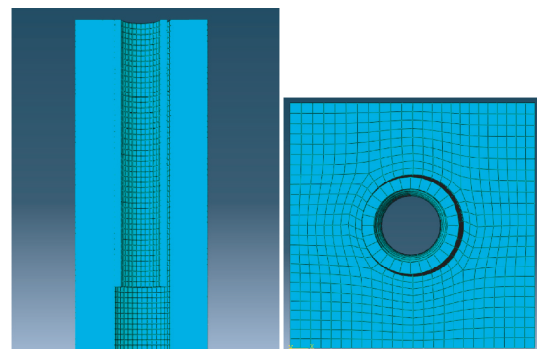


图5 Abaqus建模示意

Fig.5 Abaqus modeling

因为要模拟其旋转,但Abaqus中旋转只能绕X、Y、Z轴,所以本文通过改变重力的方向,从而实现井斜的模拟。因此套管受到的重力分解为沿钻孔



方向与垂直于钻孔方向,即:

$$g_x = g \times \sin 5^\circ = 0.854 \text{ m/s}^2$$

$$g_y = g \times \cos 5^\circ = 9.763 \text{ m/s}^2$$

图6为套管旋转时运算到0.3 s时应力云图,图7为套管不旋转时运算到0.3 s时应力云图,从图中可以看出其应力相差不大,即土层所给的支持力相差不大。而图8为旋转时摩擦应力变化曲线,图9为不旋转时摩擦力变化曲线,由图可知,其在0.3 s时套管旋转的摩擦力为 $3.465 \times 10^6 \text{ N}$ ,而套管不旋转的摩擦力在0.3 s时为 $2.387 \times 10^6 \text{ N}$ ,其比例为68.89%,与前文计算的70.71%相接近,验证了理论计算的正确性。

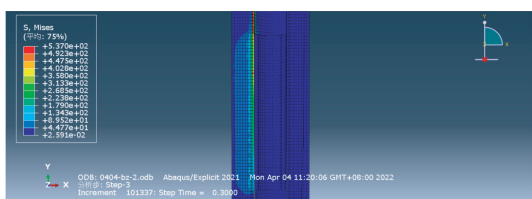


图6 套管旋转时运算到0.3 s时应力云图

Fig.6 Stress nephogram at 0.3s during casing rotation

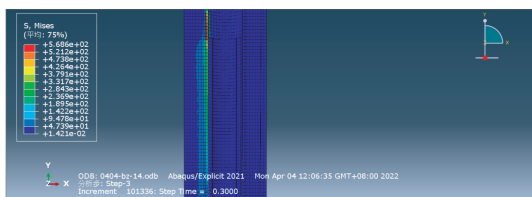


图7 套管不旋转时运算到0.3 s时应力云图

Fig.7 Stress nephogram at 0.3s when casing is not rotating

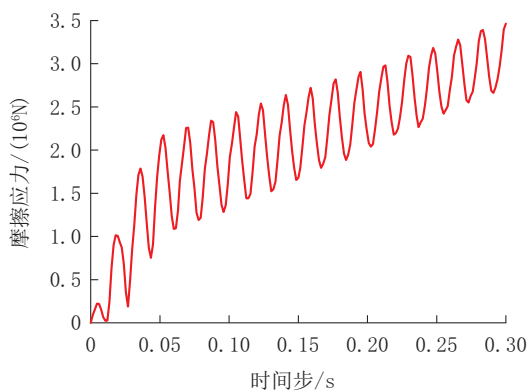


图8 套管旋转时摩擦应力变化曲线

Fig.8 Variation curve of friction stress during casing rotation

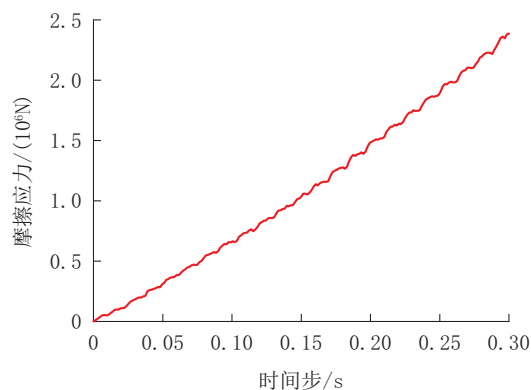


图9 套管不旋转时摩擦力变化曲线

Fig.9 Variation curve of friction when casing is not rotating

## 4 数值模拟分析

### 4.1 高胎体外钻头抗剪强度分析

本文设计的外钻头采用高胎体孕镶金刚石钻头的形式来适应不同下套管深度,而高胎体钻头因为切削齿的增高往往面临强度问题,尤其是抗剪强度,抗剪强度低时会发生断齿事故。所以对高胎体外钻头进行抗剪强度应力模拟,设计的内外钻头为孕镶金刚石钻头,考虑到钻头胎体强度一般大于钢体强度,在钢体不变形的情况下,可以将其视为整体进行校核。采用 Solidworks Simulation Xpress 数值模拟,钢体选材为45号钢,其抗拉强度 $>600 \text{ MPa}$ ,屈服极限 $>355 \text{ MPa}$ ,抗剪强度一般取材料屈服极限数值的一半,故45号钢的抗剪强度 $>178 \text{ MPa}$ ,安全系数取1.6,所以45号钢许用应力 $\geq 112 \text{ MPa}$ 。考虑到实际井下情况,钻头受到的扭矩 $\geq 2000 \text{ N}\cdot\text{m}$ <sup>[21]</sup>。通过对内外钻头所受的最大应力进行校核,判断交替式结构钻头是否能满足强度要求。为简化模拟,内外钻头整体材料选择45号钢,但不影响对比结果,具体模拟参数如表3所示。

图10为内外钻头应力云图,根据结果可知,外钻头最大Mises应力为14.59 MPa,内钻头最大Mises应力为53.75 MPa,均未超过钢体的许用应力,满

表3 应力模拟参数

Table 3 Stress simulation parameters

项 目	钢体材料	扭矩/ (N·m)	(内径/外 径)/mm	水口高 度/mm
高胎体外钻头	45号钢	2000	136/216	100
内钻头	45号钢	2000	75/135	20

足正常钻进需求。内钻头的最大应力处于齿根部及钻头切削齿边缘,外钻头最大应力多集中在切削齿边缘以及齿间加强处,齿根部应力相对较小,这说明外钻头交替式加强结构的设计将钻头单齿连接成为一个整体,极大分散了应力集中的现象,不仅降低了齿根部的应力集中,而且还保证了水口的交替式出露。综上所述,由于交替式加强结构的存在,增高外钻头胎体高度反而减小了应力集中区域的最大应力,并且应力集中区域更加分散。通过模拟结果可知交替式加强结构可以解决钻头胎体过高而强度降低的负面影响,所以在理论上采用交替式加强结构的孕镶金刚石钻头强度不再是限制其胎体高度的关键因素。本文设计的外部高胎体钻头胎体高度为100 mm,理论上可以设计成更高胎体来适应套管下入深度,其强度都可以满足实际需求。

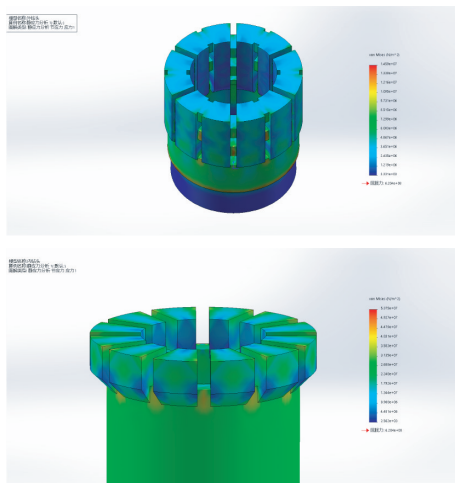


图10 外钻头、内钻头应力云图

Fig.10 Stress nephogram of the outer and inner bits

#### 4.2 双钻头跟套管连续钻进机构流场分析

本文设计的双钻头跟套管连续钻进机构,通过常规内钻头来限制泥浆循环轨迹,使其必须经过两钻头工作唇面水口以满足钻头的正常冷却和排屑,外钻头通过交替式加强的方式使泥浆的循环路径交替变换。为验证此结构能否满足上述泥浆循环特征,所以采用Solid works Flow Simulation进行泥浆循环通道的模拟,泥浆模拟参数如表4所示。

通过模拟得到如图11所示的泥浆循环矢量图,图中红色和橙色居于中间向下的矢量箭头代表入口泥浆,绿色和蓝色外围箭头代表泥浆上返矢量,从图中可以看出泥浆循环分为2条路径:一是从内钻头

表4 泥浆模拟参数

Table 4 Mud simulation parameters

参数项	参数值	备注
模拟深度/m	400	
循环方式	正循环	
循环介质	水	
流量/(L·s <sup>-1</sup> )	25	
入口压力/MPa	0.1	一个标准大气压
出口压力/MPa	3.92	出口压力为静水压力

流出经过内钻头水口底部和外钻头水口底部,再沿着外钻头外部水口上返,最后通过套管钻头连接接头上的泥浆通道,进入到钻杆与套管中间的环空间隙,完成整体循环;二是因孕镶金刚石高胎体外钻头的水口是交替式加强结构,所以有部分泥浆循环路径为:从内钻头流出经过内钻头水口底部和外钻头内部水口,再沿外钻头上部水口上返,最后通过套管钻头连接接头上的泥浆通道,进入到钻杆与套管中间的环空间隙,完成整体循环。随着钻头的磨损,齿间加强结构也随之磨损,当第一层加强完全磨损后,新的水口以及加强结构变换位置再次出现,两条泥浆循环路径也发生变换,如此循环往复直至外钻头完全磨损。通过泥浆循环流迹的模拟,可以说明双钻头跟套管连续钻进结构设计在理论上钻进过程中可以正常携带岩屑,冷却钻头,能够正常循环钻进。

#### 5 结论

(1)设计的双孕镶金刚石钻头跟套管连续钻进机构可以解决常规跟管钻进存在的孔斜,钻具根部受力不均匀、容易产生断裂,在紧密地层中套管的跟进深度受到限制等问题,可以实现套管的连续跟进,提高钻进效率。

(2)通过力学模拟分析,泥浆循环模拟分析及强度校核结果,理论上可以实现破碎地层高效快速钻进,解决破碎地层易发生卡钻、塌孔以及地层裂隙大易出现井漏等问题,相较于常规回转式跟套管钻进,能量消耗降低29.29%,节约能量消耗,降低钻进成本,对跟套管钻进技术具有一定指导意义。

(3)交替式高胎体外钻头结构可以分散钻头所受的应力,增加应力集中区域的数量,降低钻头所受最大应力,通过模拟结果显示所设计的常规钻头与高胎体外钻头的强度均能够满足实际钻进需求,理

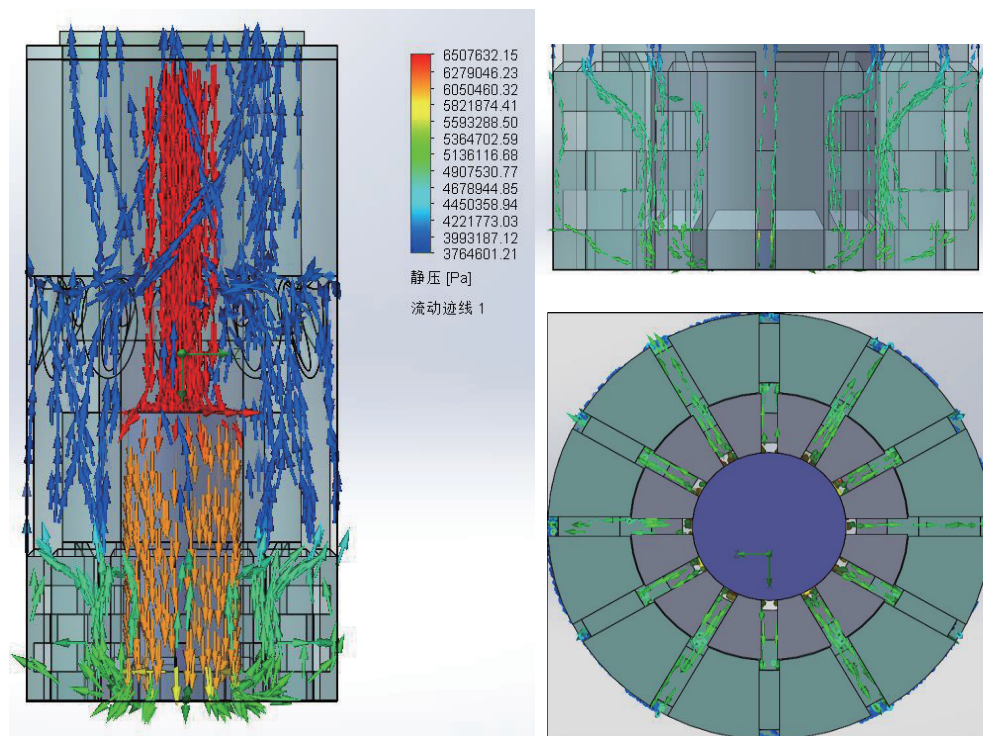


图 11 泥浆循环矢量图

Fig.11 Mud circulation vector diagram

论上胎体高度可以随套管深度增加而提高,不会出现因切削齿过高而出现断齿情况。

(4)外钻头的交替式结构与常规钻头结合应用的方式可以实现泥浆正常循环,且不会出现因泥浆“局部循环”而影响钻头冷却的问题。

#### 参考文献 (References):

- [1] 王朝阳,孙文怀,郝彦超.全护筒跟管灌注桩护筒受力分析[J].山西建筑,2021,47(3):57-58,63.  
WANG Zhaoyang, SUN Wenhui, HAO Yanchao. Stress analysis of filling pile with full fully-cased [J]. Shanxi Architecture, 2021,47(3):57-58,63.
- [2] 龙先润,曾猛.深厚覆盖层跟管钻进新工艺[J].西北水电,2017(4):99-101.  
LONG Xianrun, ZENG Meng. New technology of drilling with casing in deep and thick overburden [J]. Northwest Hydropower, 2017(4):99-101.
- [3] 刘纳兵,张扬,史晓阳.复杂地质条件下边坡偏心跟管钻孔费用分析——以某蓄能电站为例[J].工程经济,2020,30(3):11-14.  
LIU Nabin, ZHANG Yang, SHI Xiaoyang. Cost analysis of slope eccentric drill with pipe—Following drilling under complicated geological conditions: Take a storage power station as an example [J]. Engineering Economy, 2020,30(3):11-14.
- [4] 戴亚军,刘婷.导向跟管钻进法在超大断面地铁暗挖车站超长管棚工程中的应用[J].湖南交通科技,2019,45(3):191-195.  
DAI Yajun, LIU Ting. Application of guide-pipe drilling method in super-long pipe shed project of mined metro station with super-large section [J]. Hunan Communication Science and Technology, 2019,45(3):191-195.
- [5] 张永勤,刘辉,陈修星.复杂地层钻进技术的研究与应用[J].探矿工程,2001(S1):159-165.  
ZHANG Yongqin, LIU Hui, CHEN Xiuxing. Study and application of difficult formation drilling technology [J]. Exploration Engineering, 2001(S1):159-165.
- [6] 李伟涛,殷琨,张德龙.贯通式气动潜孔锤在复杂破碎地层钻进的研究[J].山西建筑,2004(10):30-31.  
LI Weitao, YIN Kun, ZHANG Delong. Drilling experimental study of run-through DTH in complicated broken stratum [J]. Shanxi Architecture, 2004(10):30-31.
- [7] 韩永昌.复杂地层潜孔锤跟管钻进工艺问题研究[D].成都:成都理工大学,2009.  
HAN Yongchang. Research on the technology issue of down-the-hole hammer drilling with casing for complex stratum [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2009.
- [8] 刘鹏,廖明海,姚海平.跟管钻进技术在梁河盆地金属矿开采涌水钻孔施工中的运用[J].世界有色金属,2021(4):151-153.  
LIU Peng, LIAO Minghai, YAO Haiping. Application of following pipe drilling technology in construction of water gushing drilling in Lianghe Basin [J]. World Nonferrous Metals, 2021

- (4):151-153.
- [9] 赵大军. JSL-30型卵砾石地层地震勘探孔钻机、钻具及钻进参数检测系统的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005.  
ZHAO Dajun. Research on JSL-30 seismic drilling rig, drilling tool and drilling parameter detection system for gravel formation [D]. Changchun: Jilin University, 2005.
- [10] 张杰. 煤矿井下复杂岩层跟管定向钻进技术研究[J]. 钻探工程, 2021, 48(4): 73-78.  
ZHANG Jie. Research on directional drilling technology for complex rock strata in coal mines [J]. Drilling Engineering, 2021, 48(4): 73-78.
- [11] 张野, 刘政儒, 田兴举. 跟管钻进大管棚搭接在地下管廊暗挖下穿特大风险源施工中的应用[J]. 建筑技术, 2020, 51(7): 809-812.  
ZHANG Ye, LIU Zhengru, TIAN Xingju. Important application of lapping construction of large pipe shed by drilling into pipe after pipe is applied in construction of large risk source under underground tunnel [J]. Architecture Technology, 2020, 51(7): 809-812.
- [12] 武洋, 兰君, 教波, 等. 水电工程复杂岩石地层跟管钻孔预算定额编制及其应用[J]. 四川水力发电, 2021, 40(4): 116-119.  
WU Yang, LAN Jun, JIAO Bo, et al. Compilation and application of budget quota for casing drilling in complex rock stratum of hydropower projects [J]. Sichuan Water Power, 2021, 40(4): 116-119.
- [13] 高科, 王金龙, 赵研, 等. 超高工作层渐开式水口孕镶金刚石钻头及其制备方法[P]. CN113802989A, 2021-12-17.  
GAO Ke, WANG Jinlong, ZHAO Yan, et al. Diamond impregnated bit and its preparation method for ultra-high working layer [P]. CN113802989A, 2021-12-17.
- [14] 李正昭. 复杂地层金刚石取心跟管钻进技术[J]. 探矿工程, 2003(S1): 197-200.  
LI Zhengzhao. Technology of diamond coring with casing in adverse formations [J]. Exploration Engineering, 2003 (S1): 197-200.
- [15] HE BO, LEE JUNGHOON, PATANKAR NEELESH A. Contact angle hysteresis on rough hydrophobic surfaces [J]. Colloids and Surfaces. A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2004, 248: 101-104.
- [16] SHALE L. Underbalanced drilling with air offers many pluses [J]. Oil and Gas Journal, 1995, 93(26): 33-39.
- [17] RAMADAN A, SKALLE P, JOHANSEN S T, et al. Mechanistic model for cuttings removal from solid bed inclined channels [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2001, 30(3-4): 129-141.
- [18] HAJIDAVALLOO E, SADEGHI-BEHBAHANI-ZADEH M, SHEKARI Y. Simulation of gas-solid two-phase flow in the annulus of drilling well [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2013, 91(3): 477-484.
- [19] LI J, GUO B, LIU G, et al. The optimal range of the nitrogen-injection rate in shale-gas well drilling [J]. SPE Drilling & Completion, 2013, 28(1): 60-64.
- [20] 熊亮, 谢文卫, 张伟, 等. 跟管钻进下套管技术在大洋钻探中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(7): 16-22, 35.  
XIONG Liang, XIE Wenwei, ZHANG Wei, et al. Application of casing-while-drilling technology in ocean drilling [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(7): 16-22, 35.
- [21] 侯振, 徐宇光, 江泽侯. 偏心钻跟管钻进法在边坡预应力锚索成孔施工中的应用[J]. 施工技术, 2017, 46(5): 129-132.  
HOU Zhen, XU Yuguang, JIANG Zehou. Application of eccentric drill with pipe-following drilling method in drilling construction of prestressed anchor cable in slope [J]. Construction Technology, 2017, 46(5): 129-132.
- [22] 张永强, 于亮. 跟管钻进旋挖工艺在万达维多利亚湾项目中的应用[J]. 工程建设与设计, 2019(7): 210-212.  
ZHANG Yongqiang, YU Liang. The application of rotary drilling with pipe in wanda victoria bay project [J]. Construction & Design for Engineering, 2019(7): 210-212.
- [23] 赵建勤, 李子章, 石绍云, 等. 空气潜孔锤跟管钻进技术与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2008, 35(7): 55-59.  
ZHAO Jianqin, LI Zizhang, SHI Shaoyun, et al. Technology of DTH drilling with simultaneous casing and the application [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2008, 35(7): 55-59.

(编辑 荐华)