

仿生自补偿一体式高胎体孕镶金刚石取心钻头研究

高科, 王金龙, 赵研, 张宗正, 谢晓波*

(吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026)

摘要:针对孕镶金刚石钻头齿间相互独立,在坚硬地层中钻进极易产生打滑和单齿受力太大导致钻头损坏的难题,引入仿生爪趾结构原理和自补偿理念,研制了仿生自补偿一体式高胎体孕镶金刚石取心钻头。钻头的一体式切削齿设计,主要在单齿的齿单元间采用加强筋方式强化单齿强度,单齿与单齿间设置齿间加强筋加强,使得钻头相邻齿单元、相邻单齿间相互连接形成一个整体,在钻进过程中,钻头齿的工作唇面会产生多个超过岩石极限破坏强度但远低于钻头胎体强度的应力集中区域,不容易出现少数几个接近或超过钻头胎体强度的应力集中区域的情况。如此,钻头的整体性更好,受力均匀,切削岩石的效率更高,寿命更长,尤其对于坚硬地层,防打滑效果更好。经现场试验表明:仿生自补偿一体式高胎体孕镶金刚石取心钻头较常规钻头具有更高的碎岩效率和更长的使用寿命。

关键词:仿生;自补偿;一体式;高胎体;环齿钻头;孕镶金刚石取心钻头

中图分类号:P634.4 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2022)01-0016-09

Bionic self-compensating integrated high-matrix impregnated diamond coring bit

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

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

Abstract: In view of the problem that the impregnated diamond bit teeth are independent of each other, and the bit is easy to slip and the individual tooth of the bit is easy to fail due to excessive force in drilling hard rocks, the bionic claw toe structure theory and the self-compensating concept are introduced to develop a bionic self-compensating integrated high-matrix impregnated diamond coring bit. In the integral cutting tooth design of the drill bit, reinforcement ribs are placed between individual teeth and also between individual tooth units to strengthen the strength of individual teeth, and in such a way, the individual teeth and the individual tooth units are connected to form a whole. In the process of drilling, the working lips of the bit teeth will produce multiple stress concentration zones that exceed the ultimate failure strength of rock, but are much lower than the strength of the bit matrix. It is not prone to produce a few stress concentration zones that approach or exceed the strength of the bit body. As a result, the bit provides better integrity, more uniform force, more efficient rock cutting, longer life, and better slippage resistance, especially in hard formations. The field experiment shows that the bionic self-compensating integrated high-matrix impregnated diamond coring bit has higher rock breaking efficiency and longer service life than the conventional bit.

Key words: bionic; self-compensating; integrated; high matrix; ring-tooth bit; impregnated diamond coring bit

收稿日期:2021-09-03; 修回日期:2022-01-09 DOI:10.12143/j.ztgc.2022.01.003

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“深海钻探技术与工程支撑(广州海洋地质调查局)”(编号:DD20190584)

第一作者:高科,男,汉族,1977年生,教授,博士生导师,地质工程专业,主要从事仿生钻探机具、科学钻探装备、地热钻探等研究工作,吉林省长春市西民主大街938号,gaokenm@jlu.edu.cn。

通信作者:谢晓波,女,汉族,1976年生,高级工程师,地质工程专业,主要从事仿生钻探机具与工艺、钻井液方面的研究工作,吉林省长春市西民主大街938号,xiexiaobo@jlu.edu.cn。

引用格式:高科,王金龙,赵研,等.仿生自补偿一体式高胎体孕镶金刚石取心钻头研究[J].钻探工程,2022,49(1):16-24.

GAO Ke, WANG Jinlong, ZHAO Yan, et al. Bionic self-compensating integrated high-matrix impregnated diamond coring bit [J]. Drilling Engineering, 2022, 49(1): 16-24.

0 引言

众所周知,钻头是钻探技术中必不可少的重要组成部分,钻头的效率和寿命直接影响整个钻探的周期、成本和效果,对于深孔钻进,尤其深海钻探,钻头的质量对工期和钻进成本影响尤为显著^[1-3]。国内外专家学者开展了大量研究,主要从胎体配方、钻头工作层结构、水口个数及形状等方面来提高钻头切削效率及使用寿命,其中提高钻头使用寿命的最直接有效的方法就是提高钻头胎体高度^[4-13]。高胎体钻头能使钻头在钻孔中与井壁接触面积增大,减弱钻头在孔底的振动,减弱脆性材料金刚石受到的振动和冲击损伤,使钻头的整体寿命得到较大提高^[14-19]。目前钻头切削效率研究提高幅度较小,尤其是坚硬“打滑”地层,是目前钻探行业一大难题^[20-21],本文以土壤动物蝼蛄的爪趾为仿生原型,从钻头工作唇面结构入手进行设计,旨在提高钻头在坚硬“打滑”地层的钻进效率和使用寿命,为我国深海钻探提供技术支撑。

1 仿生生物原型特征和工作原理

1.1 蝼蛄爪趾结构特征

图1所示,蝼蛄由5个爪趾组成,其中有4个爪趾十分相近,其长短、粗细和大小差异不大,趾尖相连形成一个大圆弧线,特别平缓。



图1 蝼蛄前爪

Fig.1 Fore claw of the mole cricket

1.2 掘土特征描述

蝼蛄挖洞是2个前爪交替进行,在土壤中穿行速度很快。蝼蛄的前爪挖掘土壤动作更为单一,在挖掘土壤时的运动轨迹以其活动自由度很小的前足胫节和跗节为轴形成简单弧形,轨迹在身体的对称轴位置有重叠。图2为蝼蛄掘土工作原理示意图。

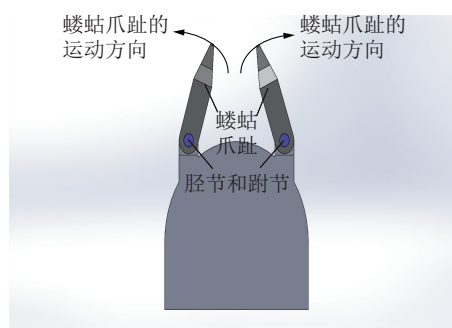


图2 蝼蛄掘土工作原理示意

Fig.2 Mole cricket excavation principle

1.3 测量

图3是蝼蛄前爪各爪趾的角度测量,图4是蝼蛄前爪各爪趾的长度测量,图5是蝼蛄前爪相邻4个爪趾尖相连形成圆弧的直径测量。表1是测量所得数据。同时,图3和图4中为各爪趾做了编号,其中1号为内侧边爪趾,向外依次编号为2号、3号、4号和5号。

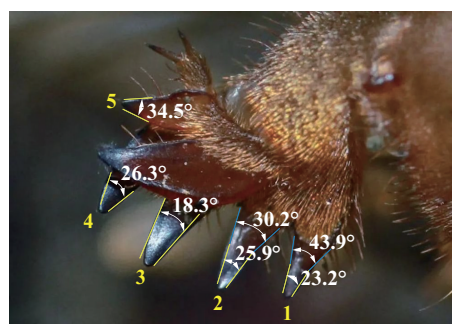


图3 蝼蛄前爪各爪趾的角测量

Fig.3 Angle measurement of the claw toes of the mole cricket fore claw

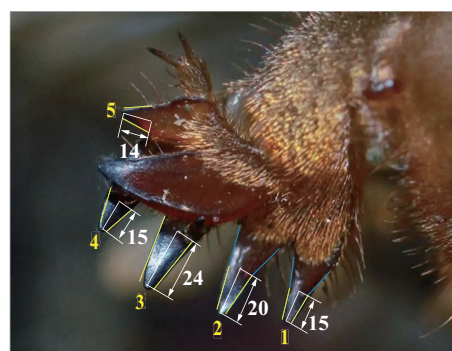


图4 蝼蛄前爪各爪趾的长度测量

Fig.4 Length measurement of the claw toes of the mole cricket fore claw

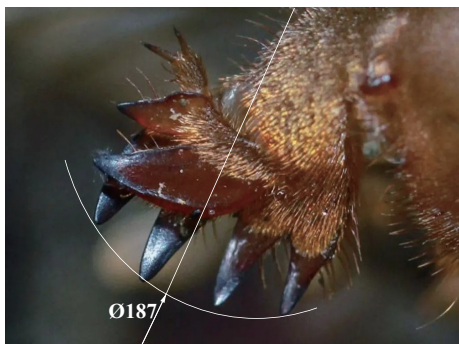


图5 蜈蚣前爪各爪趾尖相连形成圆弧的直径测量

Fig.5 Diameter measurement of circular arc formed by connecting the toes of the mole cricket fore claw

表1 蜈蚣开掘足各爪趾结构的测量

Table 1 Measurement of the claw toe structure

爪趾编号	爪趾角度/(°)	爪趾长度	趾尖圆弧直径
1	23.2/43.9	15	187
2	25.9/30.2	20	
3	18.3	24	
4	26.3	15	
5	34.0	14	

注:本表所列数值均为图3、图4所示蜈蚣前爪爪趾测量所得的数值,均为相对值,没有单位

2 仿生自补偿一体式高胎体孕镶金刚石钻头结构设计

2.1 仿蜈蚣爪趾孕镶金刚石钻头单齿设计

以外径/内径为 $\varnothing 76\text{ mm}/\varnothing 49\text{ mm}$ 的规格设计仿蜈蚣爪趾孕镶金刚石钻头单齿的齿单元,钻头的齿厚为 13.75 mm ,结合钻头工作层胎体材料的强度极限,选择8个切削齿,结合蜈蚣爪趾的角度范围、爪趾结构形态、钻头齿厚以及加工难度的多因素影响,去掉角度范围较大的1号爪趾和结构形态与其他爪趾不同的5号爪趾,选择中间3个角度范围和结构形态相近的3个爪趾,仿此爪趾在每个齿上设计3个同轴环齿单元。根据蜈蚣中间3个爪趾趾角关系及加工难度确定钻头齿单元厚度,具体计算按如下公式:

$$\frac{\partial_{2\text{号}}}{d_{\text{内环}}} = \frac{\partial_{3\text{号}}}{d_{\text{中间环}}} = \frac{\partial_{4\text{号}}}{d_{\text{外环}}}$$

式中: $\partial_{2\text{号}}、\partial_{3\text{号}}、\partial_{4\text{号}}$ ——分别为蜈蚣2、3、4号爪趾的趾尖角度。

蜈蚣爪趾与仿蜈蚣爪趾孕镶金刚石钻头的齿单

元具体对应关系如表2所示。

表2 蜈蚣前爪趾角及仿蜈蚣爪趾孕镶金刚石钻头单齿齿单元尺寸对照

Table 2 Angle of the mole cricket fore claw toes and the individual tooth unit size of the impregnated diamond bit imitating the mole cricket claw toes

名称	爪 趾		
	2号(内)	3号(中)	4号(外)
蜈蚣/(°)	25.9	18.3	26.3
齿单元厚度/mm	4.2	3.0	4.3

根据表2,确定 $\varnothing 76\text{ mm}/\varnothing 49\text{ mm}$ 规格的仿蜈蚣爪趾孕镶金刚石钻头单齿的齿单元厚度由内到外分别设计为4、3、4 mm,为保证钻头整体的对称性以及加工方便,使齿单元间的2个环形沟槽厚度均为 1.375 mm ,且环形沟槽均由硬度较软材料填充,具体结构如图6所示。

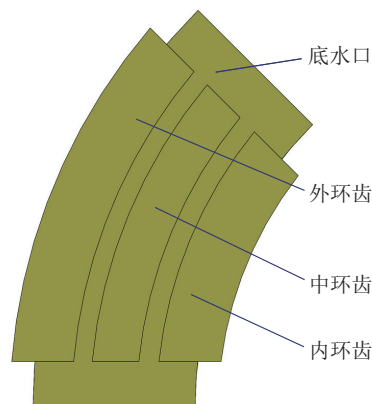


图6 $\varnothing 76\text{ mm}/\varnothing 49\text{ mm}$ 规格的仿蜈蚣爪趾钻头单齿的齿单元设计

Fig.6 Design of the individual tooth unit of $\varnothing 76\text{ mm}/\varnothing 49\text{ mm}$ bit imitating the mole cricket claw toes

2.2 仿蜈蚣爪趾孕镶金刚石钻头单齿强化设计

在设计仿蜈蚣爪趾孕镶金刚石钻头单齿的齿单元时,既要考虑仿生的元素,更要考虑齿的整体强度,以保证钻头在钻进岩石时具有足够的抗扭和抗剪冲击能力。图6的设计中每个齿单元间相互独立,无依无靠,强度无法得到满足,如果按照切削花岗岩的高径比 $1.5^{[22]}$ 的比例计算,其高度只能为 $4\text{ mm} \times 1.5 = 6\text{ mm}$,只适应于低工作层胎体钻头的设计,并不适合高工作层胎体。因此,需要对单齿进行

强化。利用无压浸渍烧结法能够烧结不同形状的切削齿的独特优势,设计了一系列的径向筋将各个齿单元很好地连接在一起使其成为一个有机的整体,如此会大大加强钻头单齿的强度,具体设计效果如图7、图8所示。其中加强筋的材料和配方与钻头工作层胎体的配方相同,在装料和烧结过程中同步生成,钻头的配方与烧结工艺与常规无压浸渍法生产钻头的配方和烧结工艺相同。

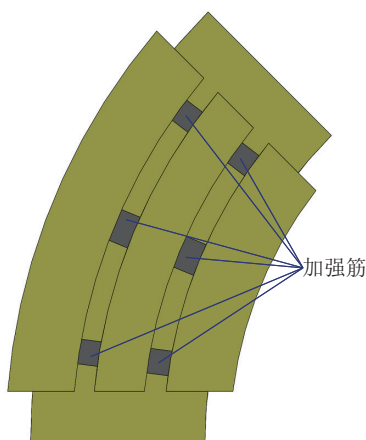


图7 钻头单齿环齿单元加强设计效果

Fig.7 Strengthening design of the individual ring tooth unit of the bit

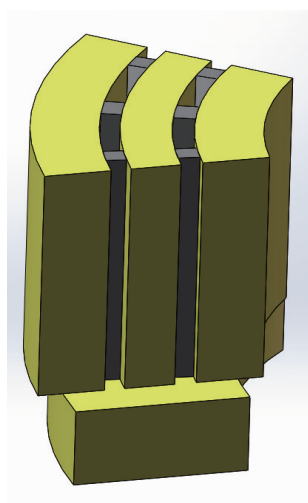


图8 钻头单齿径向剖面

Fig.8 Radial profile of the individual teeth

但是,即使将各齿单元连接成为一个整体后,其高度也有一定的高度限制,按照切削花岗岩的高径比1.5的比例计算,其高度只能为 $13.75\text{ mm} \times 1.5 = 20.625\text{ mm}$ 。也就是说,仿蜈蚣爪趾孕镶金刚石钻

头单齿的高度理论极限是21 mm,否则其折损的机率会很高。

2.3 仿蜈蚣爪趾孕镶金刚石钻头整体强化设计

为了突破钻头单齿高度的理论极限,有效增加钻头工作层胎体的高度,想办法在保证泥浆循环通畅的基础上通过同心环状加强筋将单切削齿连接到一起,使整个钻头的切削齿形成一个整体,理论上切削齿的整体抗弯强度只与钻头过渡层胎体材料与钢体间的结合力有关,而此结合力远远高出所有钻头齿切削岩石所需要的切削力,能够保证钻头的整体强度。同时,为了保证内环齿单元与外环齿单元的磨损速度大致相同,需要进一步采用加强措施。为此,设计了如图9所示的切削齿一体式高工作层胎体的钻头,在钻头的外环齿中设置间隔的两两相连的加强筋共4个,距离底唇面的高度为10 mm,加强筋的高度设计为5 mm;在钻头的内环齿中设置间隔的两两相连的加强筋共4个,加强筋的高度设计为5 mm,钻头有效工作层高度为21 mm,形成的高工作层仿蜈蚣爪趾孕镶金刚石钻头的效果如图10所示。

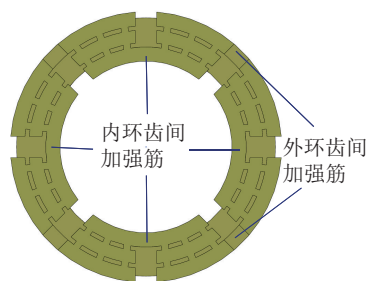


图9 钻头单齿齿单元加强设计效果

Fig.9 Strengthening design of the single tooth unit

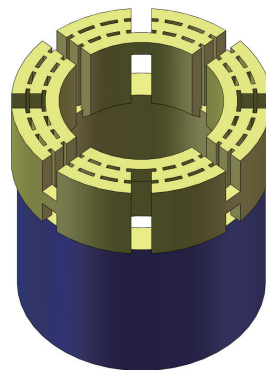


图10 高工作层仿生钻头效果

Fig.10 Bionic bit with the high working layer

为确定钻头的各个齿单元的受力情况,确定其整体性能,对钻头整体进行了回转扭矩的受力分析。单齿施加的回转扭矩为 $375 \text{ N}\cdot\text{m}$, 分别对常规钻头、没有设置内外环齿间加强和设置有内外环齿间加强的单齿进行分析,如图11所示。从图中可以看到有加强筋的单齿的应力集中区域数量增加,且将应力分散到了整个切削齿的内外环齿加强部位。从应力数值上看,有加强和常规钻头的单齿最大应力值为 501.7 和 502.2 MPa ,两者相差很小,而无加

强筋的最大应力值高达 818.7 MPa ,很容易发生断齿掉块情况。轴向多层分布的内外加强将切削齿切削岩石产生的摩擦阻力对齿根的力矩有效分担,进一步提升了钻头整体强度;常规钻头的应力集中区域比较单一且应力值较大,主要分布在齿根部及唇面边角处,而仿生钻头存在多处应力集中区域,应力数值相对较小,主要分布在齿根部、内外加强处、径向加强筋处,这种应力集中区域可以有效地减小钻头的损伤。

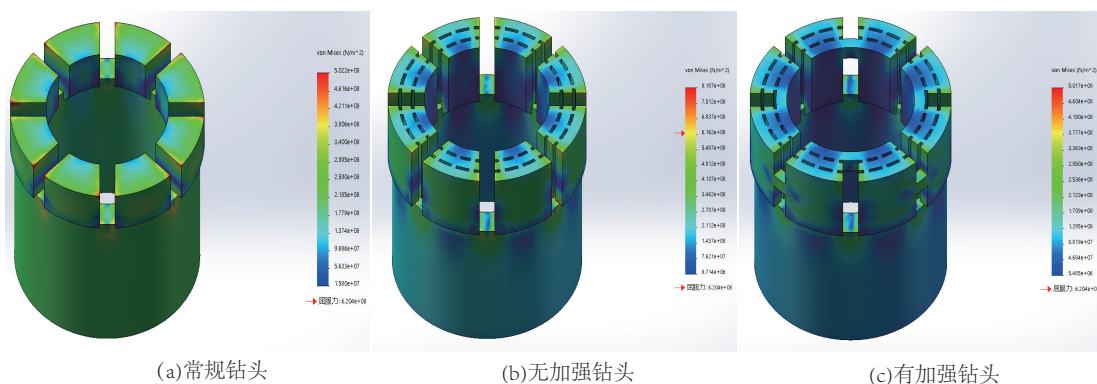


图11 钻头齿单元受力分析

Fig.11 Force analysis of the bit tooth unit

3 仿生自补偿一体式高胎体孕镶金刚石钻头制作与加工

3.1 $\varnothing 76 \text{ mm}$ 钻头模具设计

模具设计包括钻头外模具、底模、心模、水口及

钢体。采用3D减材加工工艺加工模具,故外模具、底模、心模将不会分开设计,将其一体化设计,保证钻头唇面环齿结构尺寸的精确,水口采用车床加工然后切割成对应水口宽度,图12为外模具和心模、水口、钢体设计图,图13为模具装配示意图。

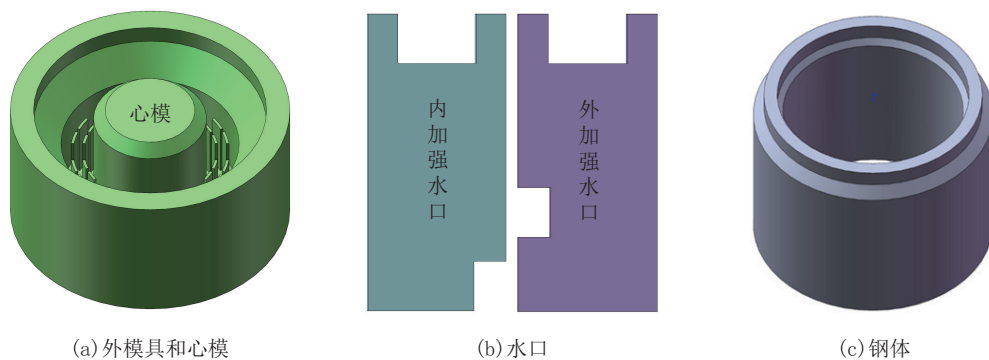


图12 模具设计

Fig.12 Design of mold

3.2 $\varnothing 76 \text{ mm}$ 钻头加工工艺

模具加工采用3D减材加工工艺(如图14所示),再经过装料[将胎体基体与金刚石采用无水乙

醇进行湿混,混料时间为 12 h ,使金刚石在基体中分散均匀,然后将混合充分的骨料装入到已经制作完成的模具中进行压实和振捣,提高骨料的密实度,振

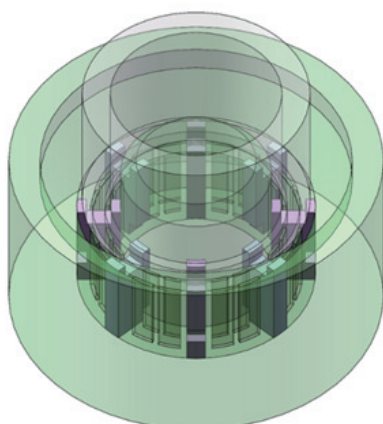


图13 模具装配设计

Fig.13 Mold assembly design

捣完成后在骨料上方安装钢体,在钢体与外模具环空间隙填入计算过质量的粘结金属(焊料)以及焊剂]、烧结以及钻头后处理等过程,最终成型。

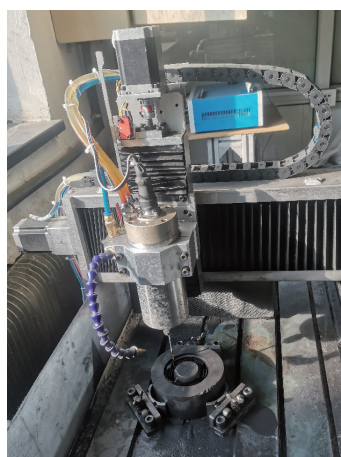


图14 3D减材加工工艺

Fig.14 3D cutting process

4 实验

根据前述讨论设计并制作了 $\varnothing 76.5\text{ mm}/\varnothing 49\text{ mm}$ 仿蜈蚣爪趾环齿钻头(如图15所示),钻头工作层高度为11 mm; $\varnothing 76.5\text{ mm}/\varnothing 49\text{ mm}$ 内外加强高胎体仿蜈蚣爪趾环齿孕镶金刚石钻头(如图16所示),钻头工作层高度为21 mm;并且在内蒙古多伦县进行了实验,现场用尖齿热压钻头(如图17所示),钻头胎体硬度为HRC10~15,现场使用磨损后的钻头如图18所示,钻头在钻进过程中会自动形成同心径向的环齿结构。试验条件如表3所示,岩心实验结果如表4所示,其中 $\varnothing 76.5\text{ mm}/\varnothing 49\text{ mm}$

如图19所示。



使用前

使用后

图15 $\varnothing 76.5\text{ mm}/\varnothing 49\text{ mm}$ 仿蜈蚣爪趾环齿孕镶金刚石钻头使用前后对比Fig.15 Comparison of $\varnothing 76.6\text{ mm}/\varnothing 49\text{ mm}$ ring impregnated diamond bit imitating the mole cricket claw toes图16 $\varnothing 76.5\text{ mm}/\varnothing 49\text{ mm}$ 内外加强仿蜈蚣爪趾环齿孕镶金刚石钻头Fig.16 Internal and external reinforced $\varnothing 76.5\text{ mm}/\varnothing 49\text{ mm}$ ring impregnated diamond bit imitating the mole cricket claw toes

图17 现场用热压尖齿钻头

Fig.17 Hot pressed pointed bit for field use

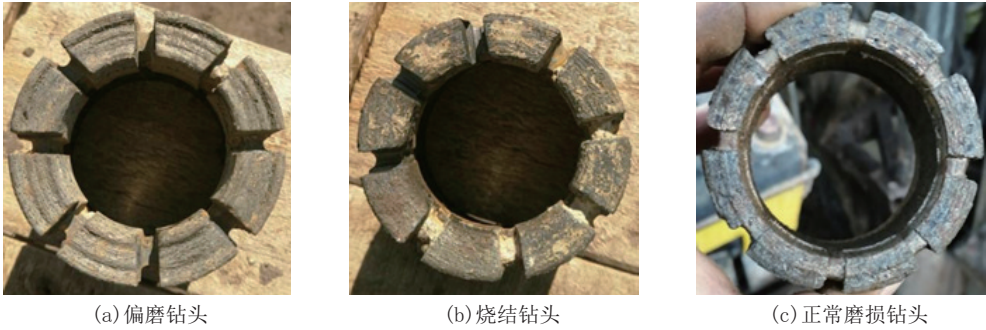


图 18 现场使用后的尖齿钻头
Fig.18 Pointed bit after field use

表 3 现场试验条件
Table 3 Field test conditions

钻头种类	钻机型号	转速/(r·min ⁻¹)	泵量/(L·min ⁻¹)	钻压/kN	地层岩性
环齿未加强钻头	阿特拉斯 C8C	450~550	32	10~20	地层完整,花岗岩,硬度 7~8 级
内环形齿加强钻头	阿特拉斯 C8C	450~550	32	10~20	地层完整,花岗岩,硬度 7~8 级
尖齿热压钻头	阿特拉斯 C8C	600~700	32	10~20	地层完整,花岗岩,硬度 7~8 级



图 19 Ø76.5 mm/Ø49 mm 钻头取出的岩心
Fig.19 Core taken out by Ø76.5mm/Ø49mm drill bit

仿蜈蚣爪趾环齿孕镶金刚石钻头 3 只代号为 I、II、III, Ø76.5 mm/Ø49 mm 内外加强仿蜈蚣爪趾环齿孕镶金刚石钻头 3 只代号为 IV、V、VI, 现场尖齿钻头代号为 VII、VIII、IX, 为更好展示钻进效果, 排除不同钻孔地层岩性的干扰, 本实验采用对比试验的方式

进行实验研究。其中钻头 I、II、IX 在同一个钻孔 ZKH39-1 中钻进; 钻头 III、VI、VII 在同一个钻孔 ZKH10-1 中钻进; 钻头 IV、V、VIII 在同一个钻孔 ZKH22-1 中钻进。

表 4 仿生钻头与常规钻头实验结果对比
Table 4 Comparison of experimental results between the bionic drill bit and the conventional drill bit

钻头代号	试验钻孔	实验井段/m	平均机械钻速/(m·h ⁻¹)	进尺/m	备 注
I	ZKH39-1	18~151	6.8	133	地层较软
IX	ZKH39-1	151~371	5.0	220	地层较软
II	ZKH39-1	371~582	6.6	211	地层较软
III	ZKH10-1	131~200	3.53	69	坚硬"打滑"地层
VI	ZKH10-1	200~281	3.64	81	坚硬"打滑"地层
VII	ZKH10-1	281~352	3.32	71	坚硬"打滑"地层, 钻头打滑、偏磨
V	ZKH22-1	66~195	3.73	129	坚硬"打滑"地层
VIII	ZKH22-1	195~220	1.22	25	坚硬"打滑"地层, 钻头打滑
IV	ZKH22-1	220~390	3.85	170	坚硬"打滑"地层

普通尖齿钻头与内外加强仿蜈蚣爪趾环齿孕镶金刚石钻头均采用金刚石粒度为30/35、35/40(各占金刚石总质量50%),金刚石浓度为70%(400%浓度制),胎体硬度为HRC10~15,除烧结方法外其他参数基本相同。 $\varnothing 76.5\text{ mm}/\varnothing 49\text{ mm}$ 内外加强仿蜈蚣爪趾环齿孕镶金刚石钻头在钻进坚硬“打滑”地层时平均机械钻进效率为3.74 m/h,平均寿命为127 m(胎体高度为21 mm)。普通尖齿热压钻头(胎体高度为14 mm)在钻进坚硬“打滑”地层时平均机械钻进效率为2.27 m/h,平均寿命为38 m。普通尖齿钻头在地层较软情况下胎体完全磨损,金刚石出刃良好,在钻进坚硬打滑地层时出现偏磨和烧钻情况,偏磨钻头内径部位胎体磨损高度5 mm左右,外径部位胎体磨损高度1 mm左右;烧钻钻头仅将尖齿部位全部磨损,2只钻头内外径基本未磨损。除I号仿生钻头外,工作层磨损高度基本在19 mm左右,金刚石层已经完全磨损。I号仿生钻头胎体磨损高度为7~8 mm,而且从I号仿生钻头可以明显看出同心径向的环齿结构出刃效果良好。通过表4可以得出在地层较软的情况下,仿蜈蚣环齿钻头的钻进效率较普通钻头提高34%,在坚硬“打滑”地层情况下仿蜈蚣环齿钻头的钻进效率较普通钻头提高65%,寿命提高2倍左右。

5 结论

(1)仿蜈蚣环齿钻头在钻进坚硬地层时未出现打滑现象,在钻头的工作中同心径向的环齿结构可以自动形成,并且可以始终保持这一结构,运行稳定性得到提高,可有效解决常规钻头坚硬地层打滑问题;

(2)内外环齿间加强筋结构提高钻头的整体性,将钻头的切削齿单元从“单兵作战”变成“群体作战”,避免了高胎体钻头因胎体过高而导致的弯折掉块情况;

(3)采用“内外加强型”结构设计提高工作层高度,可大大提高硬度7~8级坚硬花岗岩地层中的钻头寿命。

参考文献(References):

- [1] 叶建良,张伟,谢文卫.我国实施大洋钻探工程的初步设想[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(2):1-8.
- YE Jianliang, ZHANG Wei, XIE Wenwei. Preliminary

thoughts on implementation of the ocean drilling project in China [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(2):1-8.

- [2] 王艳丽,尹献涛,殷国乐,等.深海硬岩连续取心钻头的研制[J].钻探工程,2021,48(7):26-32.
- WANG Yanli, YIN Xiantao, YIN Guoyue, et al. Development of the continuous coring bit for hard rock formation in deep-sea [J]. Drilling Engineering, 2021,48(7):26-32.
- [3] 吴海霞,沈立娜,李春,等.博孜区块新型表孕镶金刚石全面钻头的研究与应用[J].钻探工程,2021,48(3):101-105.
- WU Haixia, SHEN Lina, LI Chun, et al. Research and application of the new surface impregnated diamond bit in the Bozi Block [J]. Drilling Engineering, 2021,48(3):101-105.
- [4] 王佳亮,张绍和.胎体耐损性弱化孕镶金刚石钻头的试验及碎岩机理分析[J].中南大学学报(自然科学版),2015,46(4):1436-1441.
- WANG Jialiang, ZHANG Shaohe. Experiment and rock fragmentation mechanism of impregnated diamond bit with weakening matrix [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2015,46(4):1436-1441.
- [5] 刘志江,姚远基,王文正,等.胎体组分对热压孕镶金刚石钻头胎体腐蚀磨损性能的影响[J].金刚石与磨料磨具工程,2021,41(2):75-81.
- LIU Zhijiang, YAO Yuanji, WANG Wenzheng, et al. Effect of composition on abrasion-corrosion behavior of WC-based matrix material for impregnated diamond bits [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2021,41(2):75-81.
- [6] 王佳亮,张绍和.硬质磨粒对孕镶金刚石钻头胎体磨损性能的影响[J].中国有色金属学报,2017,27(9):1873-1878.
- WANG Jialiang, ZHANG Shaohe. Effects of hard abrasive particles on matrix wear resistance of diamond impregnated bit [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017,27(9):1873-1878.
- [7] 王殿江.孕镶金刚石钻头钝化与锐化机制探讨[J].地质与勘探,1995,31(6):58-61.
- WANG Dianjiang. Study on the blunting and sharpening mechanism of impregnated diamond bit [J]. Geology and Prospecting, 1995,31(6):58-61.
- [8] 高科,孙友宏,高润峰,等.仿生非光滑理论在钻井工程中的应用与前景[J].石油勘探与开发,2009,36(4):519-522,540.
- GAO Ke, SUN Youhong, GAO Runfeng, et al. Application and prospect of bionic non-smooth theory in drilling engineering [J]. Petroleum Exploration and Development, 2009,36(4):519-522,540.
- [9] 程敏,庞丰,孙荣,等.高转速/低钻压/大泵量的全面钻进孕镶金刚石钻头[J].金刚石与磨料磨具工程,2015,35(1):61-67,82.
- CHENG Min, PANG Feng, SUN Rong, et al. Comprehensive drilling impregnated diamond bit under high rotate speed/low

- wob/large pump output[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2015, 35(1): 61-67, 82.
- [10] 孙友宏, 高科, 张丽君, 等. 耦合仿生孕镶金刚石钻头高效耐磨机理[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(3): 220-225.
SUN Youhong, GAO Ke, ZHANG Lijun, et al. High drilling efficiency and wear-resistant mechanism of coupling bionics impregnated diamond bit[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(3): 220-225.
- [11] 梁振德, 韦锋. 适应深孔条件的孕镶金刚石钻头分析[J]. 中国设备工程, 2020(8): 161-162.
LIANG Zhende, WEI Feng. Analysis of impregnated diamond bits suitable for deep hole conditions[J]. China Plant Engineering, 2020(8): 161-162.
- [12] 汤凤林, 宁伏龙, 段隆臣. 各向异性岩石钻进用钻头和孔底装置的分析研究与探讨[J]. 钻探工程, 2021, 48(2): 54-63.
TANG Fenglin, NING Fulong, DUAN Longchen. Analytical research and discussion about drill bit and borehole bottom device used for drilling in anisotropic formations[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(2): 54-63.
- [13] 徐良, 孙友宏, 高科. 仿生孕镶金刚石钻头高效碎岩机理[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2008, 38(6): 1015-1019.
XU Liang, SUN Youhong, GAO Ke. Efficient rock fragmentation mechanism analysis of impregnated diamond bionics bit[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2008, 38(6): 1015-1019.
- [14] 王训波, 谭刚, 高晓亮. 多层水口高胎体孕镶金刚石钻头研究[J]. 硬质合金, 2011, 28(2): 93-98.
WANG Xunbo, TAN Gang, GAO Xiaoliang. Study on impregnated diamond bit using multilayer water way[J]. Cemented Carbide, 2011, 28(2): 93-98.
- [15] 李梦, 苏义脑, 孙友宏, 等. 高胎体仿生异型齿孕镶金刚石钻头[J]. 吉林大学学报(工学版), 2016, 46(5): 1540-1545.
LI Meng, SU Yinao, SUN Youhong, et al. High matrix bionic abnormal shape impregnated diamond bit[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2016, 46(5): 1540-1545.
- [16] 肖丽辉, 李国民, 刘宝林. 高胎体金刚石钻头设计制造中的几个关键技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(6): 77-79.
- XIAO Lihui, LI Guomin, LIU Baolin. Several key technologies in the design and manufacture of diamond drill bit with high matrix[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012, 39(6): 77-79.
- [17] 阮海龙, 沈立娜, 胡远彪, 等. 硬岩超高胎体偏心齿钻头的研制及应用[J]. 钻探工程, 2021, 48(3): 56-60.
RUAN Hailong, SHEN Lina, HU Yuanbiao, et al. Development and application of ultrahigh matrix eccentric-cutter bits for deep hard rock[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(3): 56-60.
- [18] 孙祺斌, 沈丽娜, 杨甘生, 等. 特高多层胎体孕镶金刚石钻头设计与数值模拟[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(3): 225-230.
SUN Qibin, SHEN Lina, YANG Gansheng, et al. Design and numerical simulation of multi-layer bit with extra-high matrix[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(3): 225-230.
- [19] 王传留, 李建军, 孙荣军. 孕镶块式高胎体金刚石钻头的研制[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2014, 44(4): 1276-1280.
WANG Chuanliu, LI Jianjun, SUN Rongjun. Development of high matrix drill bit with impregnated diamond block[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2014, 44(4): 1276-1280.
- [20] 王佳亮, 张绍和. 坚硬致密弱研磨性地层孕镶金刚石钻头性能优化[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 44(6): 161-163.
WANG Jialiang, ZHANG Shaohe. Performance optimization of diamond-impregnated bit for extra-hard and strong-abrasive rocks[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 44(6): 161-163.
- [21] 庞丰, 段隆臣, 童牧, 等. 钻进打滑地层时造孔剂对镶金刚石钻头性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2014, 19(5): 791-795.
PANG Feng, DUAN Longchen, TONG Mu, et al. Effect of pore-forming agent on drilling performance of impregnated diamond bits for slipping formation[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2014, 19(5): 791-795.
- [22] 李梦. 无硬质相胎体仿生异型齿孕镶金刚石钻头研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
LI Meng. Research on no-hardphase-matrix impregnated diamond bit with bionic abnormal shape [D]. Changchun: Jilin University, 2017.

(编辑 李艺)