

# 热-机碎岩孕镶金刚石钻头的设计及试验研究

常思<sup>1</sup>, 刘宝昌<sup>\*1,2,3</sup>, 韩哲<sup>1</sup>, 王雪琪<sup>1</sup>, 白皓亮<sup>1</sup>

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 吉林大学超硬材料国家重点实验室, 吉林 长春 130012;  
3. 自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室, 吉林 长春 130026)

**摘要:**为提高钻进效率,合理利用钻进过程中产生的热量,本文采用摩擦热能辅助机械能碎岩(简称:热-机碎岩)的方法,将氮化硅作为摩擦元件引入孕镶金刚石钻头中,以提高钻头工作层的钻进性能。本文通过对钻头水口、摩擦元件的尺寸计算,钻头胎体、结构的设计,制造了一种新型热-机碎岩孕镶金刚石钻头(简称:热-机碎岩钻头),并与常规六水口钻头和三水口钻头开展了室内钻进试验对比。结果表明,与六水口钻头和三水口钻头相比,热-机碎岩钻头加入摩擦元件后能够因摩擦生热而使岩石产生弱化作用,钻头钻速提高,在相同钻井液流量下最高可比六水口钻头的机械钻速高33.3%。热-机碎岩钻头胎体的磨损程度比三水口钻头小,热-机碎岩钻头可用于强研磨性地层的钻进。

**关键词:**热-机碎岩;摩擦元件;孕镶金刚石钻头;钻头设计;钻进试验

**中图分类号:**P634.4<sup>+</sup>1 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2022)02-0077-08

## Design and test of the impregnated diamond drill bit assisted by frictional heat

CHANG Si<sup>1</sup>, LIU Baochang<sup>\*1,2,3</sup>, HAN Zhe<sup>1</sup>, WANG Xueqi<sup>1</sup>, BAI Haoliang<sup>1</sup>

(1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China;

2. State Key Laboratory of Superhard Materials, Jilin University, Changchun Jilin 130012, China;

3. Key Lab of Drilling and Exploitation Technology in Complex Conditions, Ministry of Natural Resources, Changchun Jilin 130026, China)

**Abstract:** In order to improve drilling efficiency and make proper use of the heat generated during drilling, this paper investigates the thermo-mechanical rock fragmentation method by which ceramic material is added as a friction element to the impregnated diamond bit to improve the mechanical properties of the working layer. A new type of thermo-mechanical diamond bit was manufactured by calculating the size of the water ports and friction elements, and designing the bit matrix and structure, and compared with the conventional six-water-port and the three-water-way bits (the same structure as that of the thermo-mechanical diamond bit except for the friction element in the matrix) in lab drilling test. The results showed that, compared with the six-water-port and the three-water-port bits, the thermo-mechanical diamond bit with the friction element can generate heat and weaken the rock, and increase the drilling speed. At the same flow rate, the maximum ROP was 33.3% higher than that of the six-water-port bit. The matrix of the thermomechanical diamond bit had a small degree of wear than the three-water-port bit, and the thermo-mechanical diamond bit can be used for drilling highly abrasive formations.

**Key words:** thermo-mechanical rock fragmentation; friction element; impregnated diamond bit; bit design; drilling experiment

收稿日期:2021-09-19; 修回日期:2022-02-03 DOI:10.12143/j.ztgc.2022.02.010

第一作者:常思,女,汉族,1997年生,硕士研究生在读,地质工程专业,研究方向为碎岩材料与工具,吉林省长春市朝阳区西民主大街938号, changsi19@mails.jlu.edu.cn。

通信作者:刘宝昌,男,汉族,1975年生,教授,博士生导师,长期从事钻探用超硬复合材料及钻头、轻质高强铝合金钻杆、地下资源钻采、科学钻探等方面的研究工作,吉林省长春市朝阳区西民主大街938号, liubc@jlu.edu.cn。

引用格式:常思,刘宝昌,韩哲,等.热-机碎岩孕镶金刚石钻头的设计及试验研究[J].钻探工程,2022,49(2):77-84.

CHANG Si, LIU Baochang, HAN Zhe, et al. Design and test of the impregnated diamond drill bit assisted by frictional heat[J]. Drilling Engineering, 2022,49(2):77-84.

## 0 引言

近年来,随着钻探深度的增加,钻进条件越来越复杂,采用传统的机械碎岩方法已经很难满足深部硬岩钻进的要求<sup>[1-2]</sup>,因此世界各国都在完善机械碎岩的同时,积极探索新的碎岩方法,发展了很多新型的碎岩技术<sup>[3-4]</sup>。当前一些主要的破岩方法包括:水力辅助碎岩、粒子冲击碎岩、激光钻井碎岩、等离子体碎岩、微波碎岩、火焰辅助碎岩、热熔钻进碎岩等<sup>[5-9]</sup>。这些方法虽然相对传统的机械碎岩方法的钻进效率有提升,但是由于需要特殊设备而使得成本较高,而且很多关键技术还不成熟,限制了其进一步推广应用。

摩擦热-机械碎岩技术是借助钻头钻进岩石过程中产生的摩擦热来辅助机械碎岩的一种方法。钻头与岩石产生摩擦导致温度升高,使得大多数岩石的强度明显降低,经过钻井液与岩石表面的热交换作用后,岩石表面会迅速冷却,内部产生极大的热冲击应力,使与钻头接触的岩石强度削弱,钻进速度大幅度提高<sup>[10]</sup>。俄罗斯的钻探专家在此领域开展了诸多研究,比较有代表性的是全俄勘探技术研究所的Г.С.勃拉托夫教授,他研制了取心式及全面钻进式热-机碎岩硬质合金钻头,在碎岩机理、摩擦元件材料选择、钻头结构设计等方面开展了研究。与常规硬质合金钻头相比,热-机碎岩硬质合金钻头的钻进性能有较大幅度的提升<sup>[11-12]</sup>。20世纪90年代,长春地质学院的张祖培教授、孙友宏教授引进了这项技术,开展了一系列研究工作,在摩擦元件<sup>[13]</sup>、胎体配方<sup>[14]</sup>、钻进工艺<sup>[15-16]</sup>等方面取得了进展,研制了摩擦热能-机械能硬质合金取心钻头<sup>[17]</sup>。

上述研究的利用摩擦热碎岩的钻头主要是以切削软-中硬地层为主的硬质合金钻头。随着硬质合金钻头在地质钻探中的应用逐渐减少,对热-机碎岩钻头的研究也相应减少。孕镶金刚石钻头是硬岩钻进中最常用的钻头<sup>[18-20]</sup>,并且孕镶金刚石钻头靠金刚石刻划磨削岩石时也会产生摩擦热<sup>[21-23]</sup>,有助于碎岩。因此,本研究向孕镶金刚石钻头中引入摩擦元件,设计制备了一种新型热-机碎岩钻头,并开展了室内钻进试验研究。

## 1 热-机碎岩钻头的设计及制备

### 1.1 钻头参数计算

热-机碎岩金刚石钻头在钻进过程中,摩擦元件

周期性地对孔底岩石进行摩擦加热,同时钻井液对岩石又有冷却作用。摩擦元件的尺寸、钻井液流经钻头的水口尺寸和数量是决定孔底接触温度的重要参数。为保证摩擦热和冷热交替作用更为显著,有必要对钻头水口和摩擦元件的结构参数进行设计计算。

#### 1.1.1 钻头水口参数计算

热-机碎岩钻头钻进孔底岩石过程中会出现周期性的胎体摩擦加热(加热的最高温度为 $T_{hot}$ )和钻井液冷却(冷却的最低温度为 $T_{cool}$ ),使得岩石表层在热冲击作用下产生裂纹<sup>[24]</sup>,此外岩石表面分布有不同发育水平的微裂纹网络,当冲洗液流经后,微裂纹内产生向外的拉应力而出现扩展现象<sup>[25]</sup>,如图1所示。

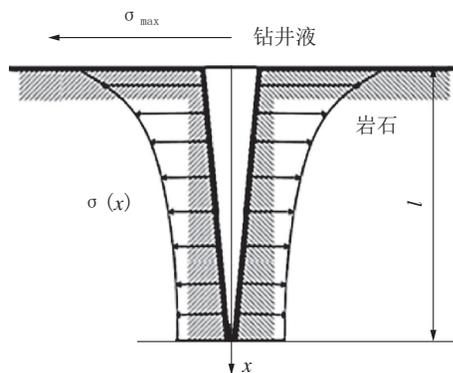


图1 岩石裂纹受到热冲击产生向外扩展的拉应力

Fig.1 Rock cracks produce outward expanding tensile stress caused by thermal shock

裂纹的最大拉应力可由公式(1)确定<sup>[26]</sup>:

$$\sigma_{max} = \frac{\beta \cdot E \cdot (T_{hot} - T_{cool})}{1 - \mu} \quad (1)$$

式中: $\beta$ ——岩石热膨胀系数, $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ;  $E$ ——岩石弹性模量,GPa;  $T_{hot}$ ——摩擦加热温度, $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{cool}$ ——钻井液冷却温度, $^{\circ}\text{C}$ ;  $\mu$ ——岩石泊松比。

拉应力 $\sigma$ 的大小取决于岩石本身的热物理参数及受到的加热冷却温度梯度( $T_{hot} - T_{cool}$ ),因此裂纹并不会在钻井液冷却瞬间立刻扩展,力的作用存在一个最小延迟时间 $t_{min}$ 。当钻井液作用时间 $t < t_{min}$ 时,岩石仅在拉应力的作用下被拉伸,裂纹未发生扩展;当钻井液作用时间 $t > t_{min}$ 时,裂纹扩展,岩石表层出现弱化现象。取临界值 $t = t_{min}$ 作为钻井液作用时间,其与钻头水口的最小宽度 $l_0$ 有关,可通过计

算确定。

若已知钻头直径、钻井液作用时间和钻头转速,可得钻头线速度 $u$ :

$$u = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} = \frac{l_0}{t_{\min}} \quad (2)$$

即:

$$l_0 = \frac{\pi \cdot D \cdot n \cdot t_{\min}}{60} \quad (3)$$

式中: $D$ ——钻头外径,mm; $n$ ——钻头转速,r/min。

已有研究得知<sup>[27]</sup>,在加热冷却温度差( $T_{\text{hot}} - T_{\text{cool}}$ )为300℃的条件下,裂纹扩展最小延迟时间 $t_{\min}$ 为0.0028 s;在加热冷却温度差( $T_{\text{hot}} - T_{\text{cool}}$ )为600℃的条件下,裂纹扩展最小延迟时间 $t_{\min}$ 为0.0001 s。

由式(3)可以得到直径59 mm的金刚石钻头在不同转速下钻头水口的最小宽度值(见表1)。

表1 钻头水口最小宽度计算

Table 1 Calculation of the minimum water port width of the drill bit

编号	转速 $n$ / (r·min <sup>-1</sup> )	加热冷却温度差 $T$ /℃	钻头水口最小宽度 $l_0$ /mm
1	400	300	3.4582
2	470	300	4.0634
3	600	300	5.1873
4	400	600	0.1235
5	470	600	0.1451
6	600	600	0.1853

由表1可知,当加热冷却温度差为600℃时,钻头水口最小宽度数值较小,研究意义不大,所以在设计时不以其作为设计参考依据。而且花岗岩在加热冷却温度差为300℃时,抗拉强度随温度的升高有明显的降低,微裂纹处于快速发育阶段<sup>[28-29]</sup>,故选择加热冷却温度差为300℃时的钻头水口最小宽度作为设计参考依据。随着钻头转速的增加,钻头水口最小宽度值增大,故需要将高转速时的钻头水口宽度作为参考依据。 $\varnothing 59$  mm钻头在转速为300 r/min时,钻头水口最小宽度为5.1873 mm,本文取5.5 mm。

### 1.1.2 摩擦元件尺寸计算

将常规六水口钻头胎体块的其中3块作为摩擦元件胎块,其余3块与它们之间的一个水口形成新

的金刚石胎块,与摩擦元件胎块相连,形成三水口钻头(参见图2)。

钻头胎体面积可由公式(4)计算:

$$S = \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_2^2) - mba \quad (4)$$

式中: $m$ ——水口数; $b$ ——水口宽度,mm; $a$ ——胎体厚度,mm。

钻头胎体中金刚石的浓度为80%(400%浓度制),金刚石的粒径为35/40目。为保证加入摩擦元件前后金刚石受到的压力一致,加入的摩擦元件的面积需要等效于原钻头失去的金刚石的有效面积。80%浓度金刚石占金刚石底唇面面积的20%,则每个胎块上摩擦元件所占面积 $S'$ 可由公式(5)算出:

$$S' = \frac{0.2S}{m} \quad (5)$$

计算可得每个摩擦元件胎块中摩擦元件材料所占面积至少为42.7 mm<sup>2</sup>。考虑到实际钻头胎体厚度较小,对较大的摩擦元件包镶能力低,故采用两个小尺寸来构成摩擦元件所占面积。本文选择的摩擦元件的尺寸为6.4 mm×3.5 mm×3 mm,则摩擦元件胎块中包含的摩擦元件面积为44.8 mm<sup>2</sup>。

### 1.2 钻头胎体设计

热-机碎岩钻头胎体的设计主要包括胎体材料耐磨性、包镶能力,金刚石粒径、浓度,以及摩擦元件材料、尺寸、排布方式的选择<sup>[30-31]</sup>。

通常情况下胎体的硬度越小,胎体与岩石的接触面积越大,摩擦所获得的热量也就越高,并且软胎体也有利于摩擦元件的有效露出。因此,综合考虑坚硬岩石的可钻性和研磨性,同时兼顾胎体与热-机碎岩相适应的性质,选用的胎体材料为吉林省勘探技术研究所提供的软胎体64号配方,胎体配方成分如表2所示,胎体配方密度为9.926 g/cm<sup>3</sup>,硬度为HRC15~18。

表2 钻头胎体配方成分

Table 2 Formula composition of the bit

组分	含量/%	颗粒粒径 $d$ / mm	颗粒密度 $\rho$ / (g·cm <sup>-3</sup> )
WC	20	0.061~0.074	15.5
YG6	7.5	—	15.1
Ni	2.5	0.061~0.074	8.9
Mn	2.5	0.050~0.061	7.43
663青铜	67.5	0.050~0.061	8.8

热-机碎岩钻头主要通过摩擦元件与岩石的摩擦生热弱化岩石,因此摩擦元件应耐高温、耐摩擦,并具有较高的抗压强度,以保证孔底所必需的温度。本研究选择氮化硅( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )作为摩擦元件材料<sup>[32]</sup>,其性能如表3所示。

本文设计的热-机碎岩孕镶金刚石钻头胎体为摩擦元件胎块-水口-金刚石胎块交替的结构。摩擦元件与岩石相互摩擦使岩石表层温度升高,随后钻

井液从钻头水口流出,冲刷岩石使之迅速冷却,使岩石内部出现内应力导致裂纹产生,最后由金刚石对经过热冲击弱化的岩石进行破碎。热-机碎岩钻头胎体结构如图2所示。

表3 摩擦元件氮化硅的性能参数  
Table 3 Property parameters of the friction element  $\text{Si}_3\text{N}_4$

指标名称	数值
密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	3.2
泊松比 $\mu$	0.26
弹性模量 $E/\text{GPa}$	310.14
抗弯强度 $\sigma_{\max}/\text{MPa}$	765.92
抗压强度 $\sigma_{\text{bc}}/\text{GPa}$	3.27
断裂韧性 $K_{\text{IC}}/(\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2})$	6.22
热膨胀系数 $\alpha/(10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1})$	3.2
	19.81(25 $^\circ\text{C}$ )
	11.00(400 $^\circ\text{C}$ )
导热系数 $\lambda/[\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}]$	8.86(600 $^\circ\text{C}$ )
	8.08(800 $^\circ\text{C}$ )
比热容 $c/[\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}]$	0.8

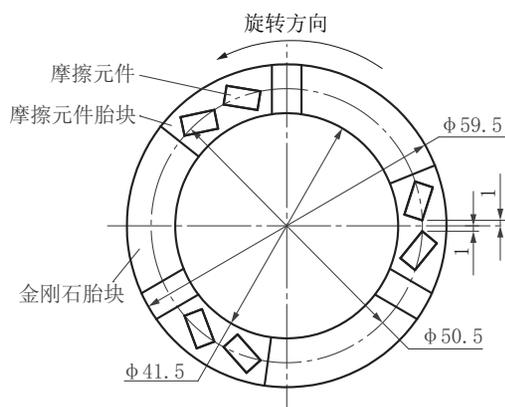


图2 热-机碎岩钻头胎体结构

Fig.2 Matrix structure of the thermo-mechanical impregnated diamond bit

### 1.3 钻头结构设计

本文设计的热-机碎岩钻头的外径为59.5 mm、内径为41.5 mm。胎体工作层高度5 mm。钻头有3个矩形水口,水口宽度5.5 mm、高度8 mm。钻头结构如图3所示。

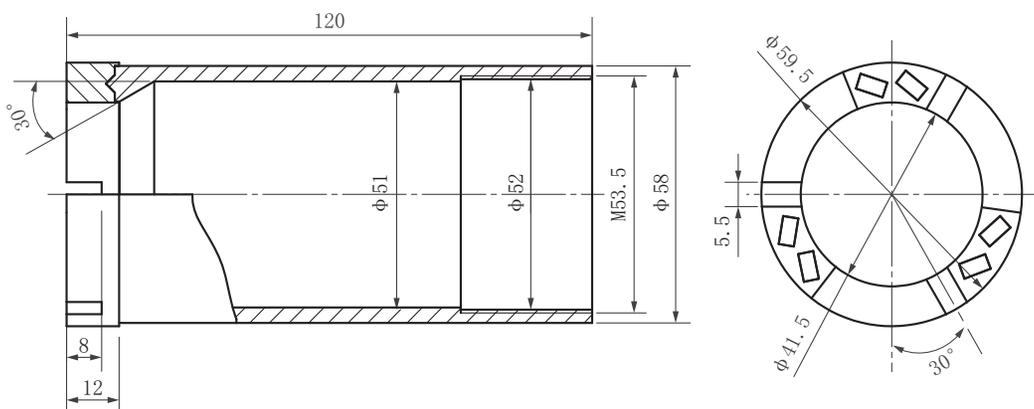


图3 钻头结构示意图

Fig.3 Structure of the drill bit

### 1.4 钻头制备工艺

设计的热-机碎岩钻头由中频感应热压法制备,其制备工艺流程与常规孕镶金刚石钻头类似<sup>[33]</sup>。具体烧结过程如下<sup>[34]</sup>:以10  $^\circ\text{C}/\text{s}$ 的速度升温到700  $^\circ\text{C}$ 时压力到10 kN,继续以3  $^\circ\text{C}/\text{s}$ 的速度升温到

890  $^\circ\text{C}$ 时压力到30 kN,保温保压8 min,保温时间结束以9  $^\circ\text{C}/\text{s}$ 的速度降温到610  $^\circ\text{C}$ 时卸压,烧结结束放入保温材料中缓慢冷却。最终烧结制备的钻头成品如图4所示。



图4 烧结制备的钻头

Fig.4 Sintered drill bit

## 2 室内钻进试验及结果分析

### 2.1 钻进试验

利用常规六水口钻头、热-机碎岩钻头和三水口钻头(与热-机碎岩钻头结构相同,摩擦元件胎块中不含摩擦元件)对可钻性9级、强研磨性的中粒黑云二长花岗岩进行室内钻进试验,研究不同钻进参数组合下的钻头的钻进效率和磨损情况。岩体体积尺寸为 $24.5\text{ cm} \times 24.5\text{ cm} \times 48\text{ cm}$ ,试验时环境温度为 $18\text{ }^\circ\text{C}$ 。主要试验设备有XY-4型立轴式钻机, PMB-50型泥浆泵。钻进参数为<sup>[35-37]</sup>:钻压 $10\text{ kN}$ , 转速 $388\text{ r/min}$ , 泵量 $10\sim 30\text{ L/min}$ 。

采用KZR90-08V0型无纸记录仪,配套Pt100型防水热电偶,测量并记录钻头与孔底岩石的接触温度。热电偶安装与测试见图5。每个钻孔垂直方向相距 $100\text{ mm}$ 埋设一个热电偶。

### 2.2 试验结果及数据分析

孔底接触温度、机械钻速等钻进试验测试结果

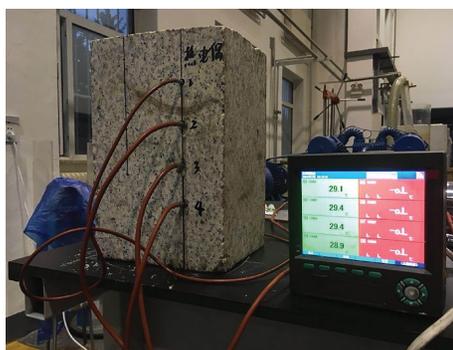
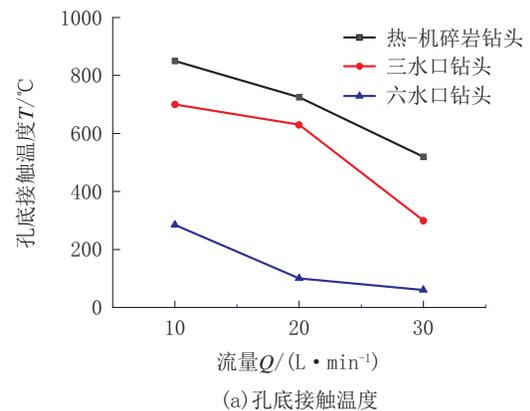


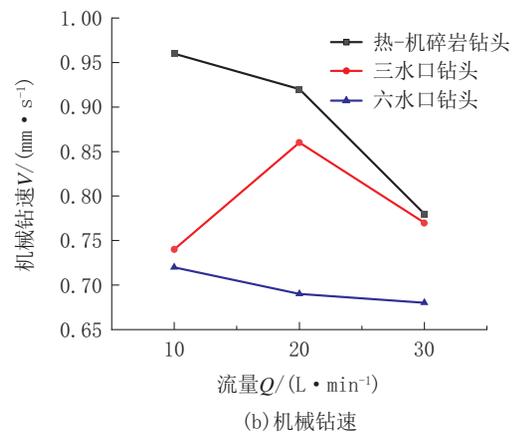
图5 热电偶安装与测试

Fig.5 Thermo-couple installation and testing

如图6所示。每个钻头钻进3块岩石,不同排量下采用同种结构的全新钻头进行钻进实验,测得数据后取平均值。



(a) 孔底接触温度



(b) 机械钻速

图6 钻进试验测试结果

Fig.6 Drilling test results

从图6(a)和(b)可以看出,随着钻井液流量升高,3组钻头的孔底接触温度和机械钻速总体呈下降趋势。产生这种现象的原因主要是钻井液在孔底循环过程中带走了产生的热量,使得岩石弱化程度降低,机械钻速从而降低。由此可见,机械钻速与孔底接触温度有关。这也可以解释图6(b)中六水口钻头比热-机碎岩钻头和三水口钻头机械钻速低的原因:因为水口数越多,冷却效果越好,岩石表面裂纹的扩展受温度影响较小。相同钻井液流量下热-机碎岩钻头最高可比六水口钻头的机械钻速高 $33.3\%$ 。与三水口钻头相比,热-机碎岩钻头的机械钻速更高,说明摩擦元件具有提升钻速的作用。

三水口钻头在 $10\text{ L/min}$ 时钻速较低,其原因是三水口钻头在钻进过程中大部分都是胎体磨损,没

有摩擦元件支撑,而且泵量低,导致排粉效果不好,岩屑分布在金刚石区域(从后面图片也可以看出来),影响钻头钻进效率,在泵量达到20 L/min时,达到了钻压、转速、泵量、岩石温度的较好匹配,摩擦热发挥作用,也有足够的钻井液冷却和排粉,因此机械钻速有所上升。

图7为热-机碎岩钻头钻进试验后摩擦元件高度位置,从图中可以看出摩擦元件与钻头底唇面的金刚石保持近乎相同的高度,确保了摩擦元件超前摩擦生热后,金刚石能切削到受到热冲击的岩石。



图7 热-机碎岩钻头钻进试验后摩擦元件高度位置

Fig.7 Height position of the friction element of the thermo-mechanical diamond bit after drilling experiment

六水口钻头、三水口钻头和热-机碎岩钻头胎体唇面磨损和侧面氧化痕迹情况如图8所示。

通过对比图8(a)和(b)可以看出,热-机碎岩钻



六水口钻头 三水口钻头 热-机碎岩钻头

(a) 钻头胎体唇面磨损



六水口钻头 三水口钻头 热-机碎岩钻头

(b) 钻头胎体侧面氧化

图8 钻头胎体唇面磨损和侧面氧化痕迹

Fig.8 Lip surface wear and side oxidation traces of the drill body

头和三水口钻头胎体唇面和边缘磨损程度比六水口钻头大,这是由于热-机碎岩钻头为了适配摩擦元件的出露,胎体比六水口钻头胎体软,遇到花岗岩这种坚硬岩石磨损更快。而与三水口钻头相比,热-机碎岩钻头胎体磨损程度更小,是由于加入摩擦元件相当于在钻头胎体中加入硬质相,起到支撑、耐磨的作用。图8(b)的热-机碎岩钻头和三水口钻头侧面在摩擦元件附近有氧化现象(颜色变白),而六水口钻头没有氧化现象。这是由于摩擦元件摩擦生热,提高了孔底接触温度,胎体受热氧化。由于在钻头唇面结构设计时考虑了钻头自身受到温度影响,将摩擦元件放置在冷却程度低的胎体中间,使得唇面产生的最高温度直接作用在摩擦元件上,而且钻进过程中摩擦热经过水口冷却之后金刚石碎岩,金刚石有良好的冷却作用,因此虽然胎体表面会氧化,但对整体性能影响不大。

### 3 结论

向孕镶金刚石钻头中加入摩擦元件,设计制备了一种热-机碎岩钻头,并进行了钻进试验。与常规六水口钻头和三水口钻头相比,得到了以下结论:

(1)与常规六水口钻头和三水口钻头相比,热-机碎岩钻头加入摩擦元件后能够因摩擦生热而弱化岩石,使得钻头钻速提高,在相同钻井液流量下最高可比六水口钻头的机械钻速提高33.3%。

(2)热-机碎岩钻头在钻进试验后胎体磨损程度比三水口钻头小,因此,热-机碎岩钻头可用于强研磨性地层的钻进。

(3)虽然本研究设计的热-机碎岩钻头有了初步的研究成果,但尚未完全解决高温对金刚石、胎体热损伤的影响,因此碎岩效率的提升效果可能受金刚石石墨化、胎体软化等影响有所降低。在未来的研究中,可能会采用高温合金、立方氮化硼等作为热碎岩专用基体和磨料代替传统64号配方与金刚石颗粒,提高热辅助碎岩的钻速提升效果。

### 参考文献(References):

- [1] 沈立娜,阮海龙,李春,等.坚硬致密“打滑”地层新型自锐金刚石钻头的研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(11):57-59. SHEN Lina, RUAN Hailong, LI Chun, et al. Study on a new type self-sharpening diamond bit for drilling in hard-compact-slipping formation [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014,41(11):57-59.

- [2] Edoardo Rossi, Shahin Jamali, Volker Wittig, et al. A combined thermo-mechanical drilling technology for deep geothermal and hard rock reservoirs[J]. *Geothermics*, 2020, 85:101771.
- [3] 赵秉成,陈晨,房治强,等.非常规碎岩技术的研究进展[J]. *中国矿业*, 2010, 19(4):87-88, 112.  
ZHAO Bingcheng, CHEN Chen, FANG Zhiqiang, et al. Research and development of unconventional rock fragmentation [J]. *China Mining Magazine*, 2010, 19(4):87-88, 112.
- [4] 闫铁,杜婕妤,李玮,等.高效破岩前沿钻井技术综述[J]. *石油矿场机械*, 2012, 41(1):50-55.  
YAN Tie, DU Jieyu, LI Wei, et al. Synthesizing comment on efficient rock fragmentation method in frontier drilling technology [J]. *Oil Field Equipment*, 2012, 41(1):50-55.
- [5] 刘柏禄,潘建忠,谢世勇.岩石破碎方法的研究现状及展望[J]. *中国钨业*, 2011, 26(1):15-19.  
LIU Bailu, PAN Jianzhong, XIE Shiyong. On the research development of rock fragmentation and its prospect [J]. *China Tungsten Industry*, 2011, 26(1):15-19.
- [6] 金雪萌,黄宇渊,袁钟涛,等.高效破岩新方法研究进展及其应用前景分析[J]. *石油化工应用*, 2019, 38(5):1-6.  
JIN Xuemeng, HUANG Yuyuan, YUAN Zhongtao, et al. Research progress and application prospects of new methods for efficient rock breaking [J]. *Petrochemical Industry Application*, 2019, 38(5):1-6.
- [7] Edoardo Rossi, Michael A. Kant, Claudio Madonna, et al. The effects of high heating rate and high temperature on the rock strength: feasibility study of a thermally assisted drilling method [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2018, 51(9):2957-2964.
- [8] 张辉,蔡志翔,姜敞,等.深部岩石高效破碎方法研究[J]. *西部探矿工程*, 2018, 30(9):75-79.  
ZHANG Hui, CAI Zhixiang, JIANG Chang, et al. Research on high efficient fragmentation method of deep rock [J]. *West-China Exploration Engineering*, 2018, 30(9):75-79.
- [9] Edoardo Rossi, Shahin Jamali, Dennis Schwarz, et al. Field test of a combined thermo-mechanical drilling technology. mode II : flame-assisted rotary drilling [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, 190:106880.
- [10] 张祖培,张书刚.热能-机械碎岩机理及其应用[J]. *探矿工程*, 1997(3):22-24.  
ZHANG Zupei, ZHANG Shugang. Thermo-mechanical rock fragmentation mechanism and its applications [J]. *Exploration Engineering*, 1997(3):22-24.
- [11] 徐金鉴,姚天骄,王子祥,等.热机碎岩技术研究[J]. *资源信息与工程*, 2017, 32(5):108-110.  
XU Jinjian, YAO Tianjiao, WANG Zixiang, et al. Research on thermo-mechanical drilling technology [J]. *Resource Information and Engineering*, 2017, 32(5):108-110.
- [12] 赵建康,孙友宏,张祖培.摩擦热-机械碎岩钻进技术试验研究[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2004, 31(12):36-39.  
ZHAO Jiankang, SUN Youhong, ZHANG Zupei. Study on drilling technology of thermo-mechanical rock fragmentation [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2004, 31(12):36-39.
- [13] 高科,张祖培,孙友宏,等.热机碎岩钻头摩擦元件材料研究[J]. *矿冶工程*, 2005(2):85-87.  
GAO Ke, ZHANG Zupei, SUN Youhong, et al. Researches on friction element of thermal-mechanical bit [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2005(2):85-87.
- [14] 吴金刚,谭忠盛,吴景华.规划求解法研究热机碎岩胎体配方[J]. *北京交通大学学报*, 2006(1):63-65, 70.  
WU Jingang, TAN Zhongsheng, WU Jinghua. Research on aspect of matrix in the thermo-mechanical drilling by programming design [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2006(1):63-65, 70.
- [15] 赵建康,孙友宏,张祖培.热机碎岩钻进工艺中钻进规程参数的理论分析[J]. *地质与勘探*, 2001(2):94-96.  
ZHAO Jiankang, SUN Youhong, ZHANG Zupei. Studying on thermo-mechanical drilling regime parameters [J]. *Geology and Prospecting*, 2001(2):94-96.
- [16] 吴景华,孙友宏,李军.热机碎岩钻进工艺的试验研究[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2008, 35(1):9-11.  
WU Jinghua, SUN Youhong, LI Jun. Testing study of thermo-chemical drilling technology [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2008, 35(1):9-11.
- [17] 吴景华,孙友宏.热机碎岩钻具设计与工程试验研究[J]. *长春工程学院学报(自然科学版)*, 2011, 12(4):32-34.  
WU Jinghua, SUN Youhong. Drill string design and engineering test research of thermo-mechanical rock fragmentation [J]. *Journal of Changchun Institute of Technology (Natural Sciences Edition)*, 2011, 12(4):32-34.
- [18] 汤凤林,沈中华,段隆臣,等.关于金刚石钻头底出刃锐化处理的试验研究[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2017, 44(9):58-64.  
TANG Fenglin, SHEN Zhonghua, DUAN Longchen, et al. Experimental research on sharpening face exposure of diamond drill bit [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2017, 44(9):58-64.
- [19] 刘晓阳.孕镶金刚石-针状合金复合式取心钻头的应用研究[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2009, 36(S1):377-381.  
LIU Xiaoyang. Research on the application of impregnated diamond-needle alloy composite core bit [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2009, 36(S1):377-381.
- [20] 李成龙,赵江,段隆臣.  $\text{CaF}_2/\text{hBN}$  自润滑 Fe 基孕镶金刚石钻头性能研究[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2018, 45(11):78-82.  
LI Chenglong, ZHAO Jiang, DUAN Longchen. Study on the properties of Fe-based impregnated diamond bits with  $\text{CaF}_2/\text{hBN}$  self-lubricating additives [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2018, 45(11):78-82.
- [21] 刘宝昌,曹鑫,计胜利,等.孔底流场和温度场数值模拟与试验研究——以取心孕镶金刚石钻头为例[J]. *金刚石与磨料磨具工程*, 2018, 38(5):33-38.

- LIU Baochang, CAO Xin, JI Shengli, et al. Simulation and experimental research on flow field and temperature field of diamond impregnated drill bit[J]. *Diamond & Abrasives Engineering*, 2018, 38(5):33-38.
- [22] 钱磊, 王晓川, 康勇, 等. 岩石取芯切削钻进过程温度分析与试验研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2020, 51(5):1402-1409.
- QIAN Lei, WANG Xiaochuan, KANG Yong, et al. Temperature analysis and experimental study of core drill cutting and drilling process[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2020, 51(5):1402-1409.
- [23] 王殿江, 袁公昱. 孕镶金刚石钻头工作温升的实验研究[J]. *探矿工程*, 1991(6):1-3.
- WANG Dianjiang, YUAN Gongyu. An experimental research on the working temperature rising for impregnated diamond bit [J]. *Exploration Engineering*, 1991(6):1-3.
- [24] 罗江. 温度应力诱发的岩石裂纹扩展研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- LUO Jiang. Study on rock crack propagation induced by temperature stress[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2018.
- [25] 熊继有, 钱声华, 孙文涛, 等. 石油工程中岩石裂纹扩展与破坏机理研究[J]. *地下空间*, 2002(2):157-160, 189.
- XIONG Jiyou, QIAN Shenghua, SUN Wentao, et al. Research on the mechanism of rock crack propagation and failure in petroleum engineering[J]. *Underground Space*, 2002(2): 157-160, 189.
- [26] 蔡双有. 大体积混凝土裂缝控制技术在工程中的应用研究[J]. *科技经济导刊*, 2021, 29(23):76-77.
- CAI Shuangyou. Research on application of crack control technology for mass concrete in engineering[J]. *Technology and Economic Guide*, 2021, 29(23):76-77.
- [27] 韩哲. 摩擦热能辅助碎岩孕镶金刚石钻头研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020.
- HAN Zhe. Research on impregnated diamond drill bit with friction thermal energy generating elements[D]. Changchun: Jilin University, 2020.
- [28] 寇绍全, O. Alm. 微裂隙和花岗岩的抗拉强度[J]. *力学学报*, 1987(4):366-373.
- KOU Shaoquan, O. Alm. Microcracks and the tensile strength of granite[J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 1987(4):366-373.
- [29] 朱振南, 田红, 董楠楠, 等. 高温花岗岩遇水冷却后物理力学特性试验研究[J]. *岩土力学*, 2018, 39(S2):169-176.
- ZHU Zhennan, TIAN Hong, DONG Nannan, et al. Experimental study of physico-mechanical properties of heat-treated granite by water cooling[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2018, 39(S2):169-176.
- [30] 蒋青光, 张绍和. 深部岩芯钻探孕镶金刚石钻头参数设计机理探讨[J]. *西部探矿工程*, 2012, 24(12):58-62.
- JIANG Qingguang, ZHANG Shaohu. Discussion on the parameter design mechanism of impregnated diamond bit for deep core drilling[J]. *West-China Exploration Engineering*, 2012, 24(12):58-62.
- [31] 高玉彬, 陈洋. 钻进坚硬致密岩层的金刚石钻头试验研究[J]. *超硬材料工程*, 2021, 33(3):1-6.
- GAO Yubin, CHEN Yang. Experimental study of diamond bit for drilling hard and compact rock[J]. *Superhard Material Engineering*, 2021, 33(3):1-6.
- [32] 孙亚光, 贺胜利, 刘荣安, 等. 氮化硅陶瓷的制备与应用[J]. *中国陶瓷工业*, 2016, 23(5):31-34.
- SUN Yaguang, HE Shengli, LIU Rongan, et al. Preparation and application of silicon nitride ceramics[J]. *China Ceramic Industry*, 2016, 23(5):31-34.
- [33] 王磊, 陈佰辉, 汪洪民, 等. 青海野马泉矿区钻头水口改进的研究[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2013, 40(9):47-51.
- WANG Lei, CHEN Baihui, WANG Hongmin, et al. Study on the improvement of bit water outlets in Yemaquan mine of Qinghai[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2013, 40(9):47-51.
- [34] 汤凤林, 彭莉, Чихоткин В. Ф., 等. 关于提高金刚石钻头胎体耐磨性的试验研究[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2016, 43(1):7-13.
- TANG Fenglin, PENG Li, CHIKHOTKIN V. F., et al. Experimental research on matrix wear resistance (matrix hardness) of impregnated diamond bit[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2016, 43(1):7-13.
- [35] 汤凤林, Нескоромных В. В., 宁伏龙, 等. 金刚石钻进岩石破碎过程及其与规程参数关系的研究[J]. *钻探工程*, 2021, 48(10):43-55.
- TANG Fenglin, NESKOROMNYH V. V., NING Fulong, et al. Research on the rock fragmentation process and its relationship with drilling parameters in diamond drilling[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(10):43-55.
- [36] 汤凤林, Чихоткин В. Ф., 段隆臣, 等. 机械钻速与金刚石底出刃、钻进规程参数关系的试验研究[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2019, 46(12):73-79.
- TANG Fenglin, CHIKHOTKIN V. F., DUAN Longchen, et al. Experimental research on dependence of penetration rate on diamond exposure at bit face and drilling parameters[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2019, 46(12):73-79.
- [37] 汤凤林, Чихоткин В. Ф., 高申友, 等. 关于金刚石钻进规程参数合理配合的分析研究[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2015, 42(10):76-80.
- TANG Fenglin, CHIKHOTKIN V. F., GAO Shenyou, et al. Analytical research on rational combination of dilling parameters in diamond dilling engineering[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2015, 42(10):76-80.

(编辑 荐华)