

# 高温硬地层钻进中 PDC 钻头切削齿磨损研究

高明洋<sup>1,2</sup>, 张 凯<sup>1,2</sup>, 周 琴<sup>1,2</sup>, 周辉峰<sup>1,2</sup>, 刘宝林<sup>1,2</sup>

(1.中国地质大学(北京)工程技术学院,北京 100083; 2.国土资源部深部地质钻探技术重点实验室,北京 100083)

**摘要:**随着新时代对绿色环保资源的需求日渐旺盛,地热资源即将进入大规模开发阶段。为经济、高效获取地热资源,目前主要应用的是 PDC 钻头。但是,部分钻取地热井存在遭遇高温硬地层的情况,常规 PDC 钻头存在耐高温性能差、硬度略低、耐磨性不足等问题。本文总结了深部高温硬地层钻进时 PDC 切削齿受到磨粒磨损,冲击磨损,热损伤等 3 种磨损机理,介绍了 4 种提高 PDC 切削齿耐高温性、硬度及耐磨性的方法:涂层技术、改善钻进参数,复合钻头和钎焊切削齿。根据目前研究情况,建议单个 PDC 切削齿实验可以从实现独立分析与切削齿关联性相结合方面展开,通过动态建模和工作状态实时模拟优化设计方案。

**关键词:**绿色能源;地热;高温;PDC;磨损;复合钻头

**中图分类号:**P634.4<sup>+</sup>1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2018)10-0185-05

**Wear of PDC Cutters in High Temperature Hard Formation Drilling/GAO Ming-yang<sup>1,2</sup>, ZHANG Kai<sup>1,2</sup>, ZHOU Qin<sup>1,2</sup>, ZHOU Hui-feng<sup>1,2</sup>, LIU Bao-lin<sup>1,2</sup>**(1.School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2.Key Laboratory of Deep Geological Drilling Technology, Ministry of Land and Resources, Beijing 100083, China)

**Abstract:** With the increasing demand for green environmental protection resources in the new era, geothermal resources are about to enter a large-scale development stage. At present, PDC bits are mainly used to achieve the economic and efficient access to geothermal resources. However, when drilling into high-temperature hard formations, there are problems with conventional PDC bits such as poor high-temperature resistance, slightly lower hardness than required, insufficient wear resistance. This paper summarizes the three wear mechanisms of PDC cutters: abrasive wear, impact wear, and thermal damage, which occur in drilling deep high temperature hard formations. Four methods for improving the high temperature resistance, hardness, and wear resistance of PDC cutters are described: coating technology, improvement of drilling parameters, composite drill bits and brazed cutting teeth. According to the current research situation, it is recommended that experiment on single PDC cutters be carried out from the perspective of combining the realization of independent analysis with the cutter correlation, and the design be optimized by dynamic modeling and real-time simulation of the working status.

**Key words:** green energy; geothermal; high temperature; PDC; wear; composite drill bit

## 0 引言

近年来,随着我国经济的快速发展,资源开发的同时兼顾保护环境已经成为未来能源开发与使用的新趋势。地热能作为一种储藏量巨大的绿色能源,在这种条件下需求量剧增。《国土资源“十三五”科技创新发展规划》明确了“十三五”期间,我国将以深地、深海、深空为主攻方向和突破口,构建“三深一

土”的国土资源战略科技新格局。合理、高效开发地热能源已经成为新时代,新阶段开发地质资源的主攻方向。

地热能蕴藏地层通常有高温、高压、地层复杂等特点,聚晶金刚石复合片(PDC)钻头在钻进极软—中硬地层中具有广泛适用性、制作成本低、钻进速度快、可以用于小口径钻进等优势<sup>[1]</sup>,十分适合地热

收稿日期:2018-04-23; 修回日期:2018-05-04

基金项目:战略性国际科技创新合作重点专项“多金属矿岩心钻探关键技术装备联合研发及示范”(编号:2016YFE0202200);中国地质大学(北京)基本科研业务费专项资金资助项目“超高速金刚石钻进钻头热效应及其碎岩机理研究”(编号:2652017070);中国地质调查局地质调查项目“科学深钻实验室建设工程预研究”(编号:DD20160083-4)

作者简介:高明洋,男,壮族,1994年生,硕士研究生在读,主要从事超硬材料在地质工程中的应用的研究,北京市海淀区学院路29号,657857639@qq.com。

通信作者:张凯,男,汉族,1989年生,实验师,博士,主要从事超硬材料在地质工程中的应用、岩石破碎机理与碎岩工具方面的研究,北京市海淀区成学院29号,zhangkai66@cugb.edu.cn。

资源的开发。结合 PDC 钻头的优异性能,为高效开发地热能源,近年来国内外钻井工作者开始把注意力转到如何提高 PDC 钻头对高温硬地层适应能力的问题上来。

对比常规地质与石油资源的开发,运用 PDC 钻头开发地热能源主要存在两方面的难题<sup>[2]</sup>。首先,由于地热能源往往需要钻进地温梯度异常区块,井底温度压力较高,岩石的物理力学性质会从弹脆性转化为弹塑性<sup>[3]</sup>,切削性能发生较大的变化。其次,由于井底温度与岩石切削性能的变化影响了常规 PDC 钻头的切削效果和磨损形式。

PDC 切削齿是 PDC 钻头在切削作业时的基本单元,据统计在高温硬地层钻井作业中超过 70% 的 PDC 钻头失效是由于 PDC 切削齿的断裂、磨损和脱落造成的<sup>[4]</sup>,其中磨损是 PDC 切削齿失效的主要形式。因此本文介绍了国内外学者近期针对高温硬地层钻进时 PDC 切削齿磨损问题的研究成果,分析了切削齿的磨损机理,提出改善切削齿磨损的措施,以期延长 PDC 钻头的使用寿命、提高钻井作业的钻进速度提供一些可行性建议。

## 1 深部高温硬地层中 PDC 切削齿磨损机理

在获取地热资源的过程中,井底高温高压条件会造成岩石内部矿物晶间胶结物活化性能增加,导致岩石塑性增加,强度降低<sup>[5]</sup>。岩石的主要破坏形式也从脆性破坏转化为塑性破坏过程。深部高温硬地层钻进时 PDC 切削齿磨损的形式有磨料磨损、冲击磨损、热损伤(金刚石层与硬质合金基体分层)等,其中由于高温条件下加剧了金刚石层与基体的热冲击效应,因此,相对于常温常压地层钻进其最主要的磨损形式为热损伤<sup>[6]</sup>。

### 1.1 磨料磨损

地热资源开发过程在,PDC 切削齿的磨料磨损发生在切削齿-岩石界面,随着钻头的旋转 PDC 切削齿向岩石传递能量,当能量到达一定程度后岩石出现小的沟槽,由于钻头本身的冠部设计和布齿密度使得岩石形成的沟槽宽度大于 PDC 切削齿,在切削过程中岩石产生的岩屑会充当磨料填充到切削齿与岩石沟槽的缝隙中。

在切削过程中,新的 PDC 切削齿在逐渐进入稳定的磨损阶段之后表面的金刚石层磨损出一个平面,从而增大切削齿的金刚石层与岩石表面的接触

面积,在摩擦系数基本稳定的情况下导致切削齿磨损率的增加。并且由于磨料填充在切削齿-岩石界面中,多次磨损后 PDC 切削齿内部产生不同程度的微裂纹,这些微裂纹在高频冲击下开始扩展,PDC 切削齿的磨损表面形成解理断裂平面和解理台阶(如图 1 所示),最后发生脆性断裂。在钻进含有较大颗粒硬地层时,颗粒的磨损率在一定程度上受到岩石莫氏和肖氏硬度的影响,这些磨损指数的增加反映了钻头的磨损率增加<sup>[7]</sup>。

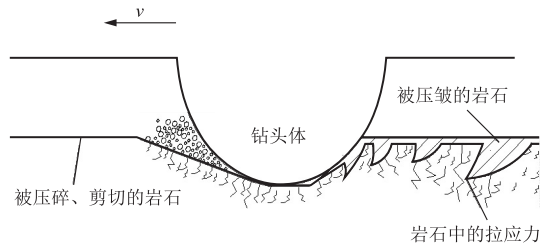


图 1 磨料磨损示意图

针对深部高温硬地层钻进过程中的磨料磨损情况,高温、高硬度、高研磨性地层直接导致了 PDC 切削齿磨损率的增加,因此选取合适的材料与形状制备 PDC 切削齿是提高 PDC 切削齿的硬度及其耐磨性的合理方法。

### 1.2 冲击磨损

由于常规钻进方法钻入深部高温硬地层时破岩效率低,近年来在钻井作业中开始使用液动旋冲工具辅助破岩,通过钻井液提供的动力,在周向产生高频冲击,在径向产生水力脉冲,使钻头的破岩方式由普通的刮削转变为机械冲击与水力脉冲相结合的破岩方式<sup>[8]</sup>。

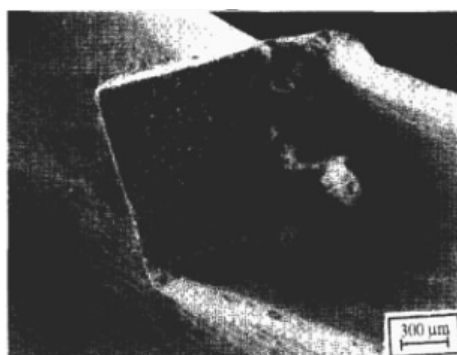
总体来说钻进过程中,冲击磨损可能存在两个阶段。

磨损阶段:金刚石颗粒在岩石表面切削留下初期裂纹。

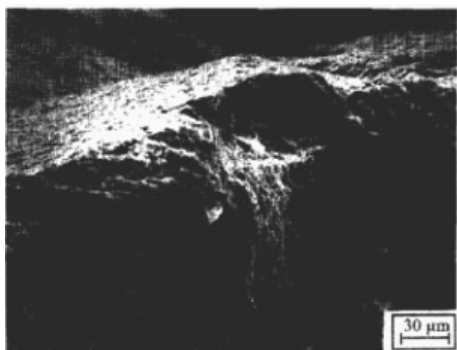
冲击阶段:冲击疲劳与热应力共同作用扩散初期裂纹,形成大裂纹。

高频的机械冲击导致的冲击疲劳以及 PDC 切削齿内部的残余应力引起冲击震动,高压高温工艺后留下的残余应力会在 PDC 刀具受到高冲击力时导致宏观破裂,高频冲击产生通过金刚石颗粒的内部夹杂物或表面凹坑的冲击波,冲击磨损通过冲击载荷和冲击的过程在微观水平上发生,并且冲击单个金刚石颗粒。金刚石磨粒周围的胎体首先经受冲刷侵蚀和空化,然后遇到磨损和侵蚀的作用,直到其

粘结性不再支撑粒子为止,此时发生严重的损坏。金刚石磨粒在与岩石颗粒碰撞时,摩擦平面下岩石颗粒围绕着金刚石颗粒流动,导致金刚石颗粒沿金刚石层边缘逐渐被去除。如图 2(a)所示,在损坏严重的金刚石颗粒的右侧可以看到磨损平面,其中晶界弱化导致一些晶体析出。然而,如图 2(b)所示粒子的左侧保持完整,显示了金刚石颗粒是由于胎体的磨损而导致的突出。



(a) 晶界弱化导致晶体析出



(b) 胎体磨损情况下金刚石颗粒突出

图 2 金刚石层受到冲击磨损表面形貌图

部分研究者通过将磨损平面上的摩擦角与岩石的内部摩擦角相关联计算冲击摩擦系数,证明冲击摩擦力主要取决于冲击角和切削齿前端面的岩石颗粒速度,而岩石材料对冲击摩擦力影响较小<sup>[9]</sup>。

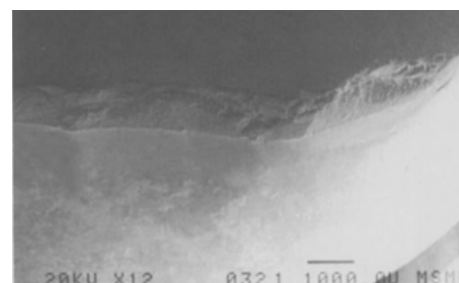
综上所述,通过合理的 PDC 钻头冠部设计与布齿密度用以改变冲击角和减小岩石颗粒入射速度;并且尽可能地选取抗冲击材料来减小钻头的冲击磨损速率。

### 1.3 热损伤

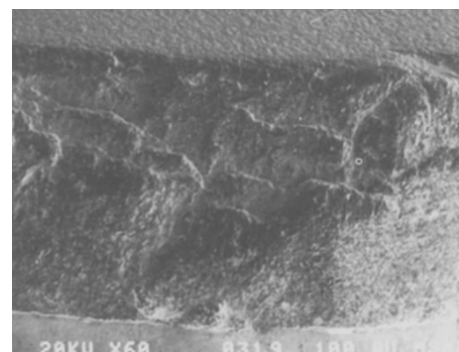
PDC 是通过在高温和高压下将金刚石粉末烧结到 WC 胎体上制造的。随着温度的降低,金刚石层的残余压应力和胎体的拉应力均发生了变化。这个残余应力随着温度下降而增加。当温度升高时,金刚石层产生了高的拉应力。在这个拉应力的作用

下,PDC 齿可能会出现崩齿与分层的现象。

PDC 切削齿主要依靠金刚石层破碎硬质岩石,在金刚石层中往往会残存用于催化的触媒金属,这些金属材料与金刚石材料的热膨胀系数相差甚远,在 PDC 钻头钻入高温硬地层的过程中,由于岩石弹塑性性质明显增强,常规 PDC 齿在井下旋转切削往往表现为在岩石表面的往复运动。绝大多数能量从破碎地层转变为产生热量,井下原先具有的环境高温以及切削摩擦产生的热量形成叠加效应导致金刚石层热应力剧烈升高,导致破坏金刚石晶体之间的连接键,造成金刚石颗粒沿边缘脱落最后致使 PDC 切削齿出现崩齿现象<sup>[10]</sup>(如图 3 所示)。



(a) 金刚石层崩齿形貌



(b) 崩齿放大图

图 3 金刚石层由于热损伤出现崩齿

此外,聚晶金刚石层脱落也是一个十分严重的问题。PDC 钻头在钻进高温硬地层时由于存在热冲击导致的金刚石层与硬质合金基体之间的粘结部分遭到破坏导致磨损破坏现象。金刚石层和硬质合金基体的分层常常归因于高温下多晶金刚石层和硬质合金基体的热膨胀之间的不匹配。伴随着钻进过程,切削齿金刚石层与岩石界面的摩擦力产生巨大的热应力,切削齿出现热龟裂,随着温度升高时,在金刚石台面上会随之产生高的拉应力,同时由于钻井液的冷却作用会导致金刚石层与硬质合金基体产生不同的收缩情况,加速了裂纹的扩展<sup>[11]</sup>(如图 4 所示)。

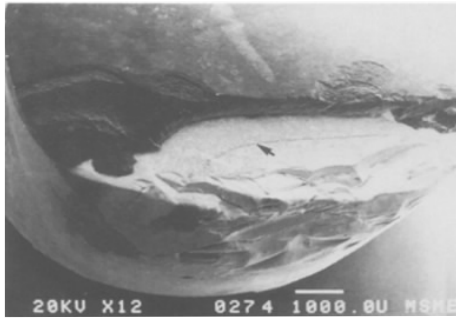


图4 金刚石层由于热损伤与胎体分层

由于PDC切削齿主要是由金刚石层与硬质合金基体以及中间的粘接材料组合而成。因此,选取拥有适宜热膨胀系数的粘接过渡材料,使得结合层中各物质的热膨胀系数趋于一致是降低热冲击对PDC切削齿影响的关键。

## 2 改善PDC切削齿耐磨性的措施

受到井下高温影响,岩石性质从以弹性转变为弹塑性,强度和硬度出现略微下降现象,在常规钻进规程下常规PDC钻头的硬度与耐磨性依旧不能很好满足钻进的需要,钻头容易受到磨料磨损、冲击磨损以及热冲击等方面的影响造成切削齿磨损速率高、脱落,最终缩短钻头寿命。本文主要介绍涂层技术、改进钻进参数、选取复合钻头和优化PDC复合片设计等方面以改善PDC钻头钻进高温硬地层的效率。

### 2.1 涂层技术

PDC钻头在井底环境高温条件下切削硬岩过程中产生巨大的摩擦能量与环境高温叠加,切削齿表面受到高速钻井液的冲蚀和冷却作用使得切削齿的金刚石层与基体产生不同程度的热胀冷缩效果,这就对PDC切削齿的硬度及耐磨性有很高的要求。为了达到钻进硬地层的需求,部分研究者采用表面熔覆、高温喷涂、超高速火焰喷涂等方法为PDC切削齿表面覆盖一层适用于硬地层耐磨性、硬度要求的合金涂层<sup>[12-13]</sup>。

运用火焰喷焊的方法,对PDC切削齿表面硬化处理,使其具有良好的耐磨性和抗冲蚀性,满足硬地层钻进的基本需求。选择超高速火焰喷涂技术为PDC切削齿制备致密性碳化钨涂层,涂层的气孔夹杂越少、致密性越高、涂层中硬质颗粒越细小、分布越均匀,则涂层的显微硬度越高,抗钻井液冲蚀能力越高。

### 2.2 改进钻进参数

由于地热能源开采的地质条件复杂,我国在钻探施工方面一直没有统一的合理钻进规程,部分井段存在盲目进尺的情况不仅降低了钻进效率,甚至会出现卡钻、埋钻、烧钻等事故。因此针对地热能源开采作业中钻进参数的选择十分重要。钻井参数主要包括钻压、转速、钻井液的量等,在高温硬地层钻井作业中,切削齿与岩石表面形成的摩擦能量会由于岩石高的硬度和耐磨性而高于普通地层,因此在该地层钻进中改进钻进参数更显得尤为重要<sup>[14]</sup>。

部分研究者选取PDC钻头钻速方程、磨损方程结合钻井成本和钻速权重系数,建立钻井成本和钻速双目标约束下的PDC钻头钻进参数优化模型。在多个地区实际钻进中使用该模型计算最优磨损量、最优钻压、最优钻头转速等数据,发现根据该模型可以有效降低PDC切削齿的磨损率,同时钻进速度不同程度的提高。

各钻进参数如钻压、转速和冲洗液量等对钻进速度的影响,是相互关联的,根据具体钻进条件存在各自的最优值。特别在高温硬地层钻进中,通常使用低钻压、高转速来控制切削齿与岩石表面形成的摩擦能量,因此根据当地地层条件选取合适的PDC钻头钻进参数优化模型是改进钻进参数、改善PDC切削齿耐磨性的有效方法。

### 2.3 复合钻头

为适应井下高温和复杂地层条件,部分公司开始研制复合PDC钻头,PDC切削齿与孕镶金刚石、TSP等相结合,可以改善钻头与岩石的接触形状以及切削效果,拓宽了PDC钻头的适用地层,增加钻头的破岩效率,减少更换钻头频率,极大地提高了目标地层的钻进效率。

PDC/TSP复合钻头是将常规的PDC与TSP钻头设计为一体,TSP钻头成本较高但是具有耐高温的性质以及在高硬度、高耐磨性地层依旧具有良好的钻进效果,有效避免了在高温硬地层条件下常规PDC钻头出现往复摩擦温度迅速升高导致异常磨损的问题<sup>[15]</sup>。

在常规PDC钻头的基础上增加孕镶金刚石保径,使其具有剪切和研磨两种破岩形式,在切削过程中,遭遇较易破碎地层,PDC切削齿可以作为先行刀具对岩石进行剪切作用,如遇到弹塑性岩石刀具在往复运动中保径附带的孕镶金刚石可以通过研磨

进行破岩。根据设计推算,对比常规 PDC 钻头,在 PDC 切削齿磨损到常规 PDC 钻头失效的情况下该复合钻头仍然具有一半以上的剩余寿命。

## 2.4 钎焊切削齿

针对开采地热能遇到的井下高温硬地层条件下,热损伤造成的 PDC 复合片失效比例高的情况,部分研究者提出了一种嵌入式 PDC 钻头的方案。通过几何理论和布齿密度分析其金刚石层厚度,尺寸,组合形式对 PDC 磨损机制的影响。设计了一种钎焊的方法使金刚石层与硬质合金基体有更良好的抗冲击性连接。实验结果表明,该新型 PDC 齿相对于常规 PDC 齿具有更高的耐磨性,切削岩石过程中更容易实现均匀磨损,并且提高了金刚石层与基体分层剥落的负载上限<sup>[16]</sup>。

## 3 总结

PDC 切削齿的磨损问题是高效获取地热能过程中一个不可避免的问题,与常规地层钻进中 PDC 钻头切削齿的磨损机理相比,高温硬地层钻进条件下 PDC 切削齿相对于磨料磨损和冲击磨损更容易出现热损伤的破坏形式,无论是崩齿还是分层都是由于环境高温与 PDC 切削齿的异常磨损产生的局部高温综合作用造成的。本文介绍了几种改进 PDC 钻头的技术,其中有两种 PDC 钻头的改进方式:涂层技术和钎焊切削齿技术在实验室和实际作业实验中都有良好的耐热损伤的表现。无论是高温硬地层条件下的磨损机理还是改进技术,在可预见的未来研究点依旧十分丰富。因此,总结国内外 PDC 切削齿磨损方面的研究,对充分合理发挥 PDC 钻头在地热资源开发中的钻进能力有深远的影响。今后针对高温硬地层钻进中 PDC 切削齿磨损的研究应该注意以下两个方面:

(1)目前针对 PDC 切削齿的研究实验主要通过单个 PDC 切削齿进行,这对独立分析切削齿的性质以及观察都提供了便利,但是完全忽略钻头中各个切削齿的关联性会造成与实际钻进差异过大。通过设计可调节位置,装配多个切削齿的刀具可以高度还原真实钻头工作环境,并且实现独立分析和高度还原钻进环境相结合是今后的发展方向。

(2)本文作者介绍了涂层技术、改进钻进参数、选取复合钻头和优化 PDC 复合片设计等 4 种改善高温硬地层条件下 PDC 切削齿耐磨性的方法。但

是,PDC 钻头钻进是一个钻头本身、地质条件、岩石性质、钻柱与钻井液等相结合共同作用的实时动态过程,而目前的研究者主要根据公式计算以及根据钻头本身性能进行改善研究,尚且存在很大的不足。通过动态建模和工作状态实时模拟给出优化设计方案,结合实际工况对 PDC 钻头进行改进,是设计改进 PDC 钻头的一个方向。

## 参考文献:

- [1] 左汝强.国际油气井钻头进展概述(三)——PDC 钻头发展进程及当今态势(上)[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(3):1-8.
- [2] 徐云鹏,李振杰.天津市塘沽区地热井钻井技术改进分析[J].西部探矿工程,2012,(5):82-86.
- [3] 赵金昌.高温高压条件下冲击一切削孔破岩实验研究[D].山西太原:太原理工大学,2010.
- [4] 张富晓,黄志强,周已.PDC 钻头切削齿失效分析[J].石油矿场机械,2015,44(9):44-49.
- [5] 吴海东.高温条件下金刚石钻头钻进实验研究[D].吉林长春:吉林大学,2017.
- [6] 冯涛,龚冲,刘永鹏,等.太原地热优快钻井技术[J].河南科技,2017,(17):128-130.
- [7] 田家林,付传红,杨琳.基于扭矩振动的 PDC 钻头布齿角度对复合片磨损规律的影响研究[J].固体力学学报,2014,35(6):574-582.
- [8] 贾涛,徐丙贵,李梅.钻井用液动冲击器技术研究进展及应用对比[J].石油矿场机械,2012,41(12):83-87.
- [9] M. Yahiaoui, J-Y. Paris, K. Delbé, J. Denape, A. Dourfaye. Independent analyses of cutting and friction forces applied on a single polycrystalline diamond compact cutter[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences,2016,85:20-26.
- [10] Baek.Min-Seok, Park.Hee-Sub, Lee.Jae-il.Effect of Diamond Particle Size on the Microstructure and Wear Property of High Pressure High Temperature (HPHT) Sintered Polycrystalline Diamond Compact (PDC)[J]. KOREAN JOURNAL OF METALS AND MATERIALS,2017,55(11):790-797.
- [11] G.Hareland, W.Yan, R.Nygaard, J. L. Wise. Cutting Efficiency of a Single PDC Cutter on Hard Rock[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology,2009,48(6):60-65.
- [12] 徐建飞,邹德永.喷焊技术在钢体 PDC 钻头表面硬化中的应用[J].金刚石与磨料磨具工程,2017,37(4):48-52.
- [13] 肖明颖,王引真,徐依吉,等.超音速火焰喷涂涂层耐泥浆冲刷性研究[J].兵器材料科学与工程,2007,30(1):42-45.
- [14] 金业权,王茂林.综合考虑成本和钻速的 PDC 钻头钻进参数优化设计[J].石油钻探技术,2012,40(5):13-16.
- [15] 潘军,王敏生,光新军.PDC 钻头新进展及发展思考[J].石油机械,2016,44(11):5-13.
- [16] Tian.Jialin, Liu.Gang, Yang.Lin.The wear analysis model and rock-breaking mechanism of a new embedded polycrystalline diamond compact[J]. PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS PART C-JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING SCIENCE, 2017,231(22):4241-4249.