

# 天阳盆地高温硬岩地热钻探PDC钻头的研究应用

王勇军<sup>1,2</sup>, 聂德久<sup>1,3\*</sup>, 袁宝宏<sup>1,2</sup>, 袁宝新<sup>1,2</sup>, 赵长亮<sup>1,2</sup>, 张涛<sup>1,2</sup>, 刘振新<sup>4</sup>

(1. 山东省地质矿产勘查开发局第二水文地质工程地质大队(山东省鲁北地质工程勘察院), 山东德州 253072;

2. 山东省地热清洁能源探测开发与回灌工程技术研究中心, 山东德州 253072;

3. 山东省核工业二七三地质队大队, 山东烟台 264006; 4. 山东省地矿局钻探工程技术研究中心, 山东烟台 264004)

**摘要:**在天阳盆地高温地热钻探施工中,受变质岩系硬岩地层岩性和高温的影响,牙轮钻头机械钻速低、磨损严重、使用寿命短,严重影响钻探施工。对PDC钻头的应用进行了探索研究,针对地层岩性特征,对钻头体、刀翼、剖面轮廓及复合片的选择和布设等关键技术进行了探索,并在钻探实践中优化改进,研究出了一种抗冲击性能较好、适宜于变质岩系硬岩地层的PDC钻头。有效地提高了机械钻速、降低了钻井成本,为天阳盆地高温地热钻探项目的顺利实施提供了技术支持。

**关键词:**高温硬岩;地热钻探;PDC钻头;复合片选择和布设

**中图分类号:**TE921<sup>+</sup>.1;P634.4<sup>+</sup>1 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2024)06-0125-07

## Research and application of PDC bit for geothermal drilling in high temperature hard rock in Tianyang Basin

WANG Yongjun<sup>1,2</sup>, NIE Dejiu<sup>1,3\*</sup>, YUAN Baohong<sup>1,2</sup>, YUAN Baoxin<sup>1,2</sup>,

ZHAO Changliang<sup>1,2</sup>, ZHANG Tao<sup>1,2</sup>, LIU Zhenxin<sup>4</sup>

(1. The Second Hydrogeology and Engineering Geology Brigade of Shandong Provincial Bureau of Geological Survey (Lubei Geological Engineering Survey Institute of Shandong Province), Dezhou Shandong 253072, China;

2. Shandong Engineering Technology Research Center for Geothermal Clean Energy Exploration and Reinjection, Dezhou Shandong 253072, China;

3. 273 Geological Brigade of Shandong Nuclear Industry, Yantai Shandong 264006, China;

4. Drilling Engineering Technology Research Center of Shandong Bureau of Geology and Mineral, Yantai Shandong 264004, China)

**Abstract:** In the drilling construction of high-temperature geotherm in the Tianyang Basin, affected by the lithology and high temperature of the hard rock strata of the metamorphic rock system, the cone bit has low mechanical drilling efficiency, serious wear, and short service life, which seriously affects the drilling construction. As a result, the application of PDC bit was explored. Aimed at the lithological characteristics, the key technologies such as the selection and layout of bit body, blade, profile and composite pieces were explored and optimized in drilling practice. A PDC bit with good impact resistance and suitable for metamorphic hard rock formations is developed, which effectively improves the mechanical drilling speed and reduces the drilling cost, which provides technical support for the smooth

收稿日期:2024-04-08; 修回日期:2024-05-28 DOI:10.12143/j.ztgc.2024.06.016

基金项目:山东省地矿局地质勘查引领示范与科技攻关项目“高温地热超深孔勘查取心钻探关键技术研究与应用”(编号:KY202219);山东省地矿局地质勘查和科技创新项目“大口径深部钻探钻完井技术研究”(编号:KY201946)

第一作者:王勇军,男,汉族,1984年生,高级工程师,勘查技术与工程专业,主要从事深部资源钻探技术研究工作,山东省德州市大学东路1499号,wyjcd511@sina.com。

通信作者:聂德久,男,汉族,1983年生,高级工程师,土木工程专业,主要从事水工环地质和地热资源勘查研究工作,烟台开发区厦门大街50号21483126@qq.com。

引用格式:王勇军,聂德久,袁宝宏,等.天阳盆地高温硬岩地热钻探PDC钻头的研究应用[J].钻探工程,2024,51(6):125-131.

WANG Yongjun, NIE Dejiu, YUAN Baohong, et al. Research and application of PDC bit for geothermal drilling in high temperature hard rock in Tianyang Basin[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(6):125-131.

implementation of the high-temperature geothermal drilling project in the Tianyang Basin.

**Key words:** high-temperature hard rock; geothermal drilling; PDC bit; composite sheet selection and layout

## 0 引言

天阳盆地即阳高一天镇盆地,是大同盆地东北一个NEE向展布的次级盆地,盆地内覆盖层主要为新生界地层,岩性主要为粘土及砂砾石,部分地区有侵入的玄武岩,覆盖层厚度200~500 m;盆地基底为新太古界集宁群变质岩系,岩性主要为正长斜长片麻岩,正长斜长麻粒岩及黑云角闪片麻岩,其中伴有燕山期花岗岩、辉绿岩和石英脉岩侵入<sup>[1-2]</sup>。

天阳盆地内蕴藏着丰富的地热资源,2020年3月,山西省地质工程勘察院有限公司在天阳盆地的地热资源勘探项目取得重大突破,钻获井口温度高达160.2℃、井口压力1.12 MPa、自流量达231.15 m<sup>3</sup>/h的高温流体,是迄今为止我国中东部地区2000 m以浅探获的温度最高、自流量最大的地热井<sup>[1-2]</sup>。为了进一步摸清天阳盆地高温地热资源蕴藏情况,加快地热能开发利用、促进山西能源绿色低碳转型,山西省自然资源厅委托山西省地质工程勘察院有限公司组织实施该地区高温地热资源详查项目,山东省地质矿产勘查开发局第二水文地质工程地质大队(山东省鲁北地质工程勘察院)负责项目中HG1和DR4井的钻探施工工作。

## 1 研究背景及意义

天阳盆地区域已有钻孔资料显示:区内新太古界集宁群变质岩硬度高、研磨性强且不均质,牙轮钻头机械钻速低、钻头磨损严重、使用寿命短,随温度升高问题愈加突出,同时牙轮钻头保径效果差、换新钻头时往往需要扫进较长井段,掉轮事故亦时有发生,严重影响了钻探施工效率,影响地热资源勘探工作的推进。

目前国内外已有研究成果及相关工程实践表明,选择与地层岩性特征相适宜的PDC钻头,无论是在机械钻速、还是使用寿命方面都优于牙轮钻头;同时PDC钻头为固定翼,不用考虑温度对轴承和密封件的影响,钻头事故少<sup>[3-7]</sup>。但PDC钻头受复合片性能特征(硬度高、耐磨性好、抗冲击性差)的影响,现阶段普遍认为其不适宜在硬度高、软硬不均的地层中使用<sup>[7-9]</sup>。

近年来,随着材料科学及复合片制造工艺技术的发展,研制出了抗冲击性能较好的复合片,PDC钻头抗冲击性能得到了一定的提高,PDC钻头在石油钻井硬岩地层中得到了一定的应用;石油钻探与地热钻探所钻遇地层岩性特征存在差异,受PDC钻头制造成本高、适应地层变化能力差等因素影响,针对地热钻探硬岩地层的PDC钻头研究应用案例较少。

因此,针对天阳盆地区域地层岩性特征,开展PDC钻头研究探索,对顺利完成天阳盆地地热钻探施工任务、推进该区地热资源勘探具有重要意义,可以为类似钻探项目提供可借鉴的经验教训,有利于PDC钻头在高温硬岩地层中的推广应用,有利于推动地热硬岩钻探技术的发展。

## 2 PDC钻头设计加工

已有研究成果显示,PDC钻头在软硬不均和硬度较高的地层使用时,极易造成碎齿、复合层崩脱等先期破坏,从而快速磨毁钻头影响正常钻进<sup>[8-9]</sup>。天阳盆地变质岩系地层具有硬度高、不均质等特性,因此,抗冲击性能是本次PDC钻头研究的重点,同时研究设计钻头还应有较好的碎岩能力,以提高钻进效率。

### 2.1 钻头体选择

钻头体按材质可分为胎体式和钢体式。胎体由碳化钨合金粉末烧制而成,具有较好的抗研磨和抗流体冲刷侵蚀性能,合金材料强度高,钻头体可以承受相对较高的载荷;但合金粉末烧制的胎体韧性较差、相对易碎,以致钻头体抗冲击能力相对较低,且损坏后不易修复;同时烧制个性化的胎体,首先需要设计加工相应的模具,制作工序复杂、耗时长、制造成本较高<sup>[10-12]</sup>。钢体钻头由特种钢材制成,钢材具有较好的韧性,因此钻头体的抗冲击韧性较好、可以承受较高的冲击载荷,且磨损后易于修复;同时,利用现代化车床,可以便捷的实现个性化加工,加工周期短、制造成本低<sup>[10-12]</sup>;但钢材的抗冲刷侵蚀能力较弱,需要进行表面处理来提高钻头体的抗冲刷侵蚀能力<sup>[13]</sup>。

综合考虑地层岩性特征、加工周期、成本等因

素,本次设计的PDC钻头体选用钢体。

## 2.2 剖面轮廓设计

剖面轮廓即钻头底部切削结构剖面轮廓,不同剖面轮廓的PDC钻头,其适宜的地层也不同。相关研究表明,短抛物线型剖面轮廓的PDC钻头在硬岩地层使用效果较好<sup>[14]</sup>,因此本次研究设计的PDC钻头剖面轮廓设计为短抛物线型(见图1)。

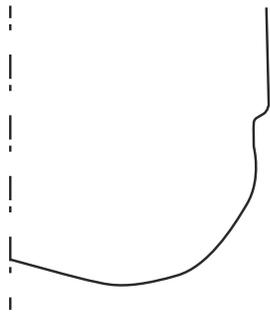


图1 短抛物线型剖面轮廓

Fig.1 Short parabolic profile

## 2.3 刀翼设计

刀翼设计主要包括刀翼的数量和形状等。刀翼数量越多,钻头在回转过程中的稳定性越好,但相应钻头的碎岩效率会降低;刀翼形状按其投影可分为直线形和螺旋形,直线形有利于破碎岩石、排除岩屑,螺旋形有利于增强钻头在回转过程中的稳定性、从而减小因钻头回转不稳定而带来的冲击载荷<sup>[11-14]</sup>。借鉴相关研究成果、结合以往类似地层PDC钻头应用经验,此次PDC钻头刀翼数量设计为6刀翼,底翼设计为直线形、侧翼设计为螺旋型。

## 2.4 复合片选择

主要是对复合片的片面直径、长度、金刚石复合层厚度等参数进行选择。抗冲击性是本次研究的重点,根据复合片的性能特征,其片面直径越小、复合层越厚,抗冲击性能越好,但片面直径减小会降低其碎岩能力,复合层厚度增加则会使其成本增加<sup>[11-15]</sup>。目前在硬岩地层钻井中,常用片面直径为 $\varnothing 9(10)$  mm/ $\varnothing 13$  mm/ $\varnothing 16$  mm、复合层厚度为2.5~3.2 mm的复合片。

相关研究成果显示,目前国产复合片质量与国际先进产品相比还存在一定差距,特别是适宜于硬岩地层、抗冲击性能较好的复合片。近年来,国内相关科研单位、生产企业及学者对聚晶金刚石复合片材料、配方及制造工艺进行了深入研究,国产复

合片得到快速发展,质量大幅提高,已基本能够满足钻井需求<sup>[15]</sup>。

结合以往应用经验和研究区域地层特征,本次设计的PDC钻头选用片面直径为 $\varnothing 13$  mm的复合片;同时,综合复合片性能、价格及项目实际情况等因素,选用了国产复合层厚达3 mm、抗冲击性能好的1613和1313型复合片。

## 2.5 复合片布设

目前实际应用中,径向复合片布设主要依据等切削量原则、并根据地层岩性特征进行优化调整,周向复合片布设常用螺旋和分组对称布设法。结合地层岩性特征,为进一步提高PDC钻头运行的稳定性、从而提高钻头的抗冲击能力,周向复合片布设采用了优化的螺旋布设法——“多级平衡布设法”<sup>[16-17]</sup>。同时,为加强对主切削片的保护、提高布片密度,在主切削片后布设了加强片,复合片后倾角设计为硬岩地层常用的 $15\sim 20^\circ$ 。

## 2.6 耐磨硬质合金敷焊

为提高钻头保径及钻头体的耐磨、抗冲刷侵蚀性能,提高钻头整体抗冲击性能,在钻头切削部及保径处整体敷焊耐磨硬质合金材料。

## 2.7 试验加工

首先试验性地加工了主切削片后布设一排球(柱)状加强片的6翼双排13片型、以及主切削片后布设2排较短复合片加强片的6翼三排16片型PDC钻头各1只(见图2),通过不同型号特征钻头的实践应用、对比分析,为后续优化改进提供依据。

## 3 实践应用与优化改进

### 3.1 试验应用

研究设计的PDC钻头首先在天阳盆地深部高温地热勘探HG1井中试验应用,HG1井进入新太古界集宁群后,地层主要为黑云角闪斜长片麻岩,岩石矿物成分以斜长石、石英、角闪石、黑云母为主,夹少量辉绿石、黄铁矿及蚀变产物等。为更好对比研究PDC钻头的应用效果,首先采用牙轮钻头、配合螺杆钻具复合钻进,随后换用设计加工的6翼双排13片型PDC钻头、配合螺杆钻具复合钻进,机械钻速大幅提高(见表1),但钻头冠顶部出现了“环切”磨损现象(见图3)。

分析认为,钻进地层岩石硬度较高且不均质,钻头冠顶部的复合片首先接触孔底岩石且该处回



图2 设计加工的PDC钻头实物

Fig.2 Real products of the optimized and improved PDC bit

转线速度较高,在切削碎岩过程中复合片承受着较大的冲击力,同时螺杆钻具提供的较高转速,进一步放大了复合片所承受的冲击力<sup>[18-19]</sup>,以致该处复合片的聚晶金刚石复合层首先崩裂、进而快速磨损,并磨损钻头体形成环沟。

换用设计加工的6翼三排16片型PDC钻头,该型号钻头刀翼更宽、并在主切屑齿后设置了2排加强片,理论上抗冲击性能更好。该钻头机械钻速低



图3 6翼双排13片PDC钻头“环切”磨损

Fig.3 “Ring cut” wear of 6-wing 2-row and 13-piece PDC bit

(见表1),调节钻进参数亦未有效果,钻进43 m后起钻检查,钻头磨损情况见图4。

### 3.2 优化改进

从设计加工的2种钻头试验应用磨损状况看,复合片都出现了崩裂磨损的现象,特别是6翼三排



图4 6翼三排16片PDC钻头磨损情况

Fig.4 The wear condition of 6-wing 3-row and 16-piece PDC bit

表1 钻头应用情况

Table 1 The drill bit application

井段/m	井径/mm	钻头型号特征	钻压/kN	转速/(r·min <sup>-1</sup> )	泵量/(L·s <sup>-1</sup> )	泵压/MPa	进尺长度/m	使用时间/h	平均机械钻速/(m·h <sup>-1</sup> )
320~428	311.2	三牙轮	80~120	40+159	45.6	7	108	61	1.77
428~612	311.2	6翼双排13片	40~60	40+159	45.6	7~8	184	54	3.41
612~655	311.2	6翼三排16片	40~100	40+159	45.6	8	43	24	1.79
655~760	311.2	三牙轮	80~120	40+159	45.6	8	105	62	1.69
760~875	311.2	三牙轮	80~120	40+159	45.6	8~9	115	55	1.85
875~978	311.2	三牙轮	80~120	40+159	45.6	9	103	60	1.71

16片PDC钻头,在设有2排加强片、进尺较短的情况下,复合片崩磨亦较严重,说明设计钻头在破碎此类岩层时出现了先期损坏,所使用的复合片不能满足此类地层钻进需求。同时,从各型号钻头应用统计数据可以看出:6翼双排13片PDC钻头相较牙轮钻头机械钻速和回次进尺大幅提高,而6翼三排16片PDC钻头机械钻速低,说明6翼双排13片PDC钻头较为适宜此类地层,而6翼三排16片PDC钻头则不适宜于在此类地层使用。决定对应用效果较好的6翼双排13片PDC进行优化改进,进一步提高钻头的抗冲击性能,提高钻头在此类地层中的使用寿命。

相关研究及实践应用表明,复合片的质量,特别是其抗冲击性能是提高PDC钻头抗冲击性能和使用寿命的关键。相关研究成果显示,进口1313GOS型复合片具有良好的抗冲击性能,在硬岩地层表现良好,同时脱钻处理可以进一步提高复合片的抗冲击性能<sup>[16-17]</sup>。再次加工的PDC钻头在保持原6翼双排型结构特征的基础上,采用脱钻的1313GOS型复合片替换原用国产复合片,以进一步提升钻头的抗冲击性能。

### 3.3 优化改进后实践应用

新加工2只PDC钻头在HG1井深978 m时开始使用,机械钻速略有降低,这与深部地层岩石性能特征有关。在钻头磨损情况方面,其中1只钻头钻进1个回次后,出现了复合片棱磨损、个别复合片金刚石复合层崩落的现象,总体磨损较轻(见图5);另1只钻头使用1个回次后,出现了轻微的“掏心”磨损的状况(见图6)。



图5 优化后磨损较轻的PDC钻头

Fig.5 PDC bit with less wear after optimization



图6 “掏心”磨损的PDC钻头

Fig.6 Center worn of PDC bit

针对磨损情况分析认为:复合片片棱磨损是正常磨损现象,反映出地层岩石研磨性强;金刚石复合层崩落则是由于钻头回转碎岩过程中,复合片受到的冲击力较大、钻头回转碎岩时不稳定,从而致使复合片金刚石复合层崩落,一方面说明复合片金刚石复合层抗冲击性能还需进一步提高,另一面反映出地层岩石岩性不均一;“掏心”磨损则是由于钻头中心处复合片切削碎岩能力差,主要依靠复合片压碎岩石,当钻头中心处遇硬度高、抗压强度高、研磨性强的燧石岩块,而井底其它部位岩石硬度、抗压强度相对较低时,钻头中心处的岩块长时间未被破碎、钻头底面各复合片受力不均、钻头回转不稳定,钻头中心处复合片受力较大而使该处复合片聚晶金刚石复合层崩裂脱落,进而快速磨损复合片基层和钻头体,形成“掏心”磨损的现象<sup>[8-12]</sup>。

优化调整后的钻头基本满足了钻进需求,对磨损的钻头进行了修复:片棱磨损的复合片进行了角度旋转,将片棱磨损的一侧旋转至与钻头体接触侧、以往受钻头体保护未磨损的一侧旋转至钻头底面;对金刚石复合层崩落的复合片进行了更换;出现轻微“掏心”磨损的钻头采用了补体、更换复合片、旋转复合片角度等工艺进行修复。

HG1井使用修复的钻头完成311.2 mm孔径段钻探工作任务,2只钻头在后续实施的天阳盆地高温地热勘探DR4井中再次应用,该井311.2 mm孔径段亦为新太古界集宁群变质岩,钻遇地层与HG1井相似。DR4井自井深702 m时开始试用HG1井使用后修复的钻头,应用效果较好,因此又新加工相同型号特征的钻头2只,实物见图7。

在DR4井中受定深取心要求影响,全面钻进回次进尺较短;同时受地层岩性特征变化影响,钻头



图7 PDC钻头实物照片

Fig.7 Physical photo of PDC bit

进尺寿命较HG1井短;少数钻头可以使用2个回次才需进行修复,多数钻头使用一个回次后就需要进行修复。至井深1746 m钻遇地层岩石硬度极高、研磨性极强,且节理发育(见图8),钻进中伴有严重的憋跳钻现象,PDC钻头平均机械钻速约2 m/h,但进尺寿命很短、仅有30~40 m。分析认为研制的PDC钻头已不适宜于在此类地层中使用,随后换用牙轮钻头,牙轮钻头平均机械钻效约为1 m/h、进尺寿命

为56 m,完成311.2 mm井段工作任务。



图8 硬度高、研磨性强、节理发育的岩心照片

Fig.8 Core photos with high hardness, strong abrasiveness and joint development

#### 4 效果评价

研制加工的4只PDC钻头,其中1只累计修复使用3回次、1只累计修复使用5回次后钻头体磨损严重报废,另外2只未出现严重磨损、仍可再次修复使用,累计完成钻探工作量1494 m,机械钻速和进尺寿命较牙轮钻头都有大幅提高(见表2)。

表2 优化调整后钻头应用情况统计

Table 2 Statistical of drill bit application after optimization and adjustment

井号	井径/ mm	钻头类型	钻头 编号	下井 回次	钻压/kN	转速/ ( $r \cdot \text{min}^{-1}$ )	泵量/ ( $L \cdot s^{-1}$ )	泵压/ MPa	进尺/ m	用时/ h	平均机械钻 速/( $m \cdot h^{-1}$ )
HG1	311.2	PDC	1	2	40~60	40+159	45.6	9~11	327	104	3.14
	311.2	PDC	2	1	40~60	40+159	45.6	10	177	55	3.22
	311.2	PDC	1	3	50~80	40+159	45.6	8~11	202	72	2.81
DR4	311.2	PDC	2	2	60~80	40+159	45.6	8~10	146	53	2.75
	311.2	PDC	3	5	60~80	40+159	45.6	9~13	301	114	2.64
	311.2	PDC	4	6	60~80	40+159	45.6	9~14	341	127	2.69
	311.2	牙轮	5	1	100~140	40+159	45.6	13~14	56	59	0.95

通过对实践应用相关数据进行整理,发现研制的PDC钻头较牙轮钻头平均机械钻速提高了111%、累计进尺寿命提高了283%、纯钻时间寿命提高了123%。PDC钻头的机械钻速和使用寿命都远超牙轮钻头,虽然其全寿命费用(设计制造及使用后修复)也远超牙轮钻头,每米钻井的钻头成本相较于牙轮钻头降低了17%,效益显著。

#### 5 结论

(1)通过对PDC钻头体、剖面轮廓、刀翼及复合片选择布设的优化设计,研制出了一种适宜于天阳盆地片麻岩地层的PDC钻头,为6翼双排13片PDC结构,采用进口脱钻的1313GOS型复合片,有

效地提高了机械钻速和钻头使用寿命,缩短了钻探作业工期,降低了钻探施工成本,具有良好的社会效益。

(2)设置2排加强片,在此类地层中并未起到更好的保护主切削片、提高钻头抗冲击能力的作用,同时机械钻速降低明显,设置2排加强片的PDC钻头不适宜于在此类地层中使用。

(3)复合片自身抗冲击性能是PDC钻头抗冲击的基础,使用高质量的进口抗冲击复合片、并进行脱钻处理,有利于提高复合片的抗冲击能力,进而提高PDC钻头的抗冲击性能,提高了PDC钻头在天阳盆地片麻岩地层中的使用寿命。

(4)在硬度极高、研磨性极强,且节理发育的地

层中,研制的PDC钻头虽然机械钻速与牙轮钻头相比较,但进尺寿命较短,下一步应继续研究探索适用于此类地层的PDC钻头。

### 参考文献(References):

- [1] 王平,师鹏峰.大同地区干热岩勘查高温高压自喷井综合治理工艺[J].钻探工程,2021,48(S1):258-263.  
WANG Ping, SHI Pengfeng. Comprehensive treatment technology for high temperature and high pressure blowing wells in hot dry rock exploration in Datong[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(S1):258-263.
- [2] 邵一臻,赵福金,荆京,等.山西干热岩GR1井高温固井技术研究与实践[J].钻探工程,2022,49(6):42-47.  
XI Yizhen, ZHAO Fujin, JING Jing, et al. Research and practice of cementing slurry technology for Well GR1 in Shanxi high temperature hot dry rock[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(6):42-47.
- [3] 李琴,傅文韬,黄志强,等.硬地层中新型PDC齿齿岩机理及试验研究[J].工程设计学报,2019,26(6):635-644.  
LI Qin, FU Wentao, HUANG Zhiqiang, et al. Rock breaking mechanism and experimental study of new PDC tooth in hard formation[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2019, 26(6):635-644.
- [4] 祝效华,王燕飞,刘伟吉,等.PDC单齿切削破碎非均质花岗岩性能的评价新方法[J].天然气工业,2023,43(4):137-147.  
ZHU Xiaohua, WANG Yanfei, LIU Weiji, et al. A new method for evaluating the rock cutting and breaking performance of PDC cutters in heterogeneous granites[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(4):137-147.
- [5] 祝效华,刘伟吉,贾彦杰.切削和侵入作用下层理岩层破碎机理浅析[J].地下空间与工程学报,2018,14(2):444-451.  
ZHU Xiaohua, LIU Weiji, JIA Yanjie. Investigation on the mechanism of laminated rock fragmentation under the action of cutting and indenting[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018, 14(2):444-451.
- [6] 王勇军,梁伟,杜志强,等.雄安新区D05井燧石白云岩地层钻头应用探索[J].钻探工程,2023,50(4):142-148.  
WANG Yongjun, LIANG Wei, DU Zhiqiang, et al. Exploration of drill bit applied in chert dolomite strata in Well D05 of Xiong'an New Area[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(4):142-148.
- [7] 杨迎新,杨燕,陈欣伟,等.PDC钻头复合钻进破岩机理及个性化设计探讨[J].地下空间与工程学报,2019,15(2):565-575.  
YANG Yingxin, YANG Yan, CHEN Xinwei, et al. Discussion on rock-breaking mechanism and individuation design of PDC drill bit in compound drilling[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(2):565-575.
- [8] 高明洋,张凯,周琴,等.高温硬地层钻进中PDC钻头切削齿磨损研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(10):185-189.  
GAO Mingyang, ZHANG Kai, ZHOU Qin, et al. Wear of PDC cutters in high temperature hard formation drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018, 45(10):185-189.
- [9] 王滨,李军,邹德永,等.强研磨性硬岩PDC钻头磨损机理及磨损分布规律研究[J].特种油气藏,2018,25(4):149-153.  
WANG Bin, LI Jun, ZOU Deyong, et al. Mechanisms and distribution pattern of abrasions on PDC bits for highly-abrasive hard-

rock[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(4):149-153.

- [10] 沈立娜,吴海霞,蔡家品,等.高效耐冲击复合片取心钻头的研制与应用[J].钻探工程,2021,48(S1):366-369.  
SHEN Lina, WU Haixia, CAI Jiapin, et al. Development and application of high-efficiency and impact-resistance PDC core bits[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(S1):366-369.
- [11] 王勇军,梁伟,张涛,等.深部地热钻探中硬塑性泥岩地层钻头应用研究[J].钻探工程,2023,50(3):92-98.  
WANG Yongjun, LIANG Wei, ZHANG Tao, et al. Research on bit application of hard plastic mudstone formation in deep geothermal drilling[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(3):92-98.
- [12] 胡书锴,田锋,李汉月,等.超高温地热钻井高效耐磨PDC钻头研制及应用[J].钻采工艺,2020,43(3):1-3.  
HU Shukai, TIAN Feng, LI Hanyue, et al. Development and test application of high efficiency PDC bit for ultra-high temperature geothermal well[J]. Drilling & Production Technology, 2020, 43(3):1-3.
- [13] 汤凤林,沈中华,段隆臣,等.关于PDC钻头低温氢,磁化综合处理的试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(2):80-85.  
TANG Fenglin, SHEN Zhonghua, DUAN Longchen, et al. Experimental research on integrative treatment of PDC drill bit with cryogenic Nitrogen and magnetization[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(2):80-85.
- [14] Heydarshahy S A, Karekal S. 钻头冠部形状对破岩效果的影响[J].石油勘探与开发,2017,44(4):630-637.  
Heydarshahy S A, Karekal S. Influences of bit profiles on possible fracture modes[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(4):630-637.
- [15] 方啸虎,崔祥仁,谢德龙.近年来钻探用超硬材料的发展与展望[J].钻探工程,2021,48(S1):18-24.  
FANG Xiaohu, CUI Xiangren, XIE Delong. Development and prospect of the super hard materials applied to the drilling industry in recent years[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(S1):18-24.
- [16] 马亚超,陶垒,荣准.PDC钻头布齿技术研究综述[J].工程设计学报,2023,30(1):1-12.  
MA Yachao, TAO Lei, RONG Zhun. Review of PDC bit cutter arrangement technology[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2023, 30(1):1-12.
- [17] 居培,王传留.弧角型PDC钻头切削齿布齿模式仿真分析[J].煤田地质与勘探,2020,48(5):240-245.  
JU Pei, WANG Chuanliu. Simulation of the cutter arrangement pattern of the arc PDC drill bit[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(5):240-245.
- [18] 郑宇轩,单文军,赵长亮,等.青海共和干热岩GR1井钻井工艺技术[J].地质与勘探,2018,54(5):1038-1045.  
ZHENG Yuxuan, SHAN Wenjun, ZHAO Changliang, et al. The drilling technology for the GR1 well in hot-dry rock of Gonghe, Qinghai Province[J]. Geology and Exploration, 2018, 54(5):1038-1045.
- [19] 谭现锋,马哲民,段隆臣,等.复合动力钻进工艺在干热岩钻井中的应用研究[J].钻探工程,2021,48(7):1-8.  
TAN Xianfeng, MA Zhemin, DUAN Longchen, et al. Application of compound power drilling technology in hot dry rock drilling[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(7):1-8.