

# “松科二井”用硬岩长寿命钻头的设计与应用

李 春, 沈立娜

(北京探矿工程研究所, 北京 100083)

**摘要:**为提高“松科二井”在深井硬岩钻进中的寿命与效率,选用了高性能胎体材料、高强度焊接材料,并采用了合理的钻头结构与水路结构设计,研制的  $\text{O}216/124$  mm 金刚石取心钻头在“松科二井”取得了良好的效果,本文介绍了适用于深井硬岩的金刚石钻头的设计及应用效果。

**关键词:** 金刚石钻头; 深井硬岩; 长寿命; 岩心钻探

**中图分类号:** P634.4<sup>+</sup>1    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-7428(2018)02-0056-05

**Design and Application of Long Service Life Bit in Hard Rock Drilling for “SK-II” Well/LI Chun, SHEN Li-na**  
(Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to improve the service life and efficiency in deep hard rock drilling for “SK-II” well, high performance matrix formula and high strength welding material are selected with reasonable bit structure and waterway structure design. Good results of the developed  $\text{O}216/124$ mm diamond coring bit have been achieved in “SK-II” well drilling. The design and the application of the diamond bits suitable for deep hard rock drilling are introduced in this paper.

**Key words:** diamond bit; deep hard rock; long service life; core drilling

## 1 概述

“松科二井”将是全球第一口钻穿白垩纪陆相地层的大陆科学钻探井,其设计井深为 6400 m,为 ICDP 迄今为止所资助项目之最深科学钻探井,也是我国目前第一深的科学钻探井。松辽盆地大陆科学钻探工程的实施,将获取大约 4500 m 的关键岩心。它与 2007 年 10 月完成的松科一井,将实现“两井四孔、万米连续取心”,构成全球首个近乎完整的白垩纪陆相沉积记录,从而获取白垩纪时期亚洲东部高分辨率气候环境变化记录。同时,也为大庆油田可持续发展奠定坚实的基础。这项研究将把传统地质学百万年的时间分辨率提高到万年的尺度,进而为预测未来全球时间尺度气候变化趋势提供更为科学的依据<sup>[1]</sup>。

“松科二井”钻探深度达到 6400 m,将穿过营城组、沙河子组、火石岭组等地层,该地层岩性为酸性火山岩夹少量粉砂岩、砂岩、泥质岩及煤线,为火山喷发相及其间歇期形成的河湖相沉积。现有的普通金刚石钻头在 4500~5000 m 钻进过程中进尺缓慢,进尺效率约 0.5 m/h,浪费了大量的时间和资源,同时也增加了钻探工程风险。

针对以上情况,我单位研制了“松科二井”用硬

岩长寿命钻头,采用了高性能胎体材料,高强度焊接材料,以保证钻头在井内恶劣环境下的强度与寿命;采用了合理的钻头结构与水路结构,保证了钻头的钻进效率;并在“松科二井”进行了试验,取得了良好的效果。

## 2 钻头的设计

### 2.1 岩石室内试验

为了了解“松科二井”地层的特性,我们对“松科二井”钻探现场取得的岩样(见图 1、图 2)进行了室内分析和实验。

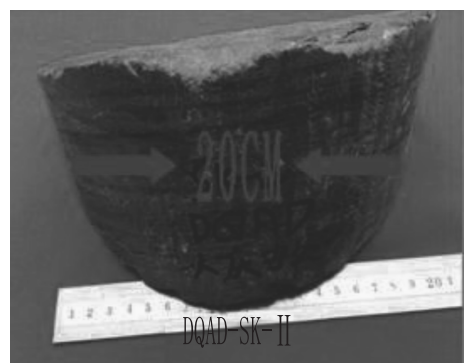


图 1 “松科二井”岩石样品

收稿日期:2017-06-25; 修回日期:2017-11-17

基金项目:中国地质调查局地质调查项目“松辽盆地资源与环境深部钻探工程”(编号:121220120000171102)

作者简介:李春,男,汉族,1987年生,土木工程(工程地质方向)专业,主要从事金刚石钻头、钻具的设计及制造工艺研究工作,北京市房山区良乡工业开发区创新路1号,459755765@qq.com。

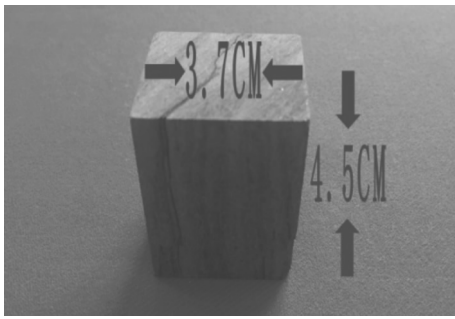


图 2 加工后的岩样

### 2.1.1 岩样分析

岩石样品经显微镜观察分析结果如下。

(1) 矿物成分及含量。碎屑物：石英 10%，长石 15%，黑云母 5%，岩屑 30%；胶结物：粘土矿物 35%，碳质物 5%。

(2) 结构构造。凝灰质细粒砂状结构，微层状构造。

(3) 特征描述。岩石为凝灰质长石岩屑细砂岩，主要由细岩屑、长石、石英细砂粒和泥质胶结物组成，其中混有少量长英质晶屑，具凝灰质细粒砂状结构，微层状构造；砂粒呈次棱角状、次圆状，粒径 0.06~0.3 mm，岩屑成分为粉砂岩和泥岩，呈碎屑状，粒径 0.2~0.5 mm。晶屑呈棱角状、熔蚀状，表面碎裂纹发育，粒径大小与砂粒相似。黑云母呈碎片状、长条状，具定向分布。胶结物主要是粘土矿物，具隐晶质结构。其中分布细纹层状碳质物，构成微层理构造，见图 3 显微照片。

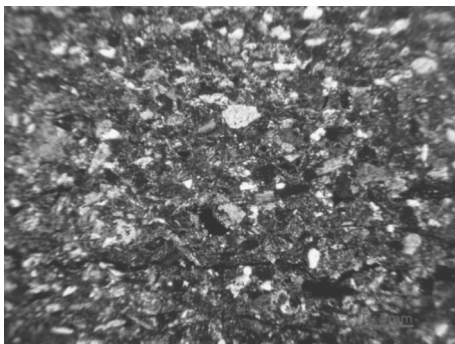


图 3 凝灰质长石岩屑细砂岩正交偏光照片

依据岩石中矿物组成和组构特征，结合标本观察，该岩石镜下鉴定结果为凝灰质长石岩屑细砂岩。

### 2.1.2 岩样实验

采用综合分级法对制备的岩样进行了可钻性分级：

$$K = 3.198 + 0.008854H_y + 0.002578H_N \quad (1)$$

式中： $K$ ——岩石可钻性等级； $H_y$ ——压入硬度值， $\text{kg}/\text{mm}^2$ ； $H_N$ ——摆球弹跳次数<sup>[2]</sup>。

利用岩石压入硬度计测试岩样的压入硬度，摆球硬度计测试岩样的摆球弹跳次数，代入式(1)计算岩石的可钻性等级，具体数值及岩样物理性质为：凝灰质长石岩屑细砂岩，压入硬度  $272.8 \text{ kg}/\text{mm}^2$ ，摆球弹跳 20.1 次，可钻性 6~7 级。

### 2.1.3 岩样分析测试结论

由以上岩石成分及物理性质可以看出，岩样的压入硬度及可钻性都不高，不是非常难钻进的岩石，但是由于“松科二井”井深深达 5000 m 以上，井底的工况不同于浅层钻进，非常复杂，地表的动力很难有效地传达到井底，导致井底的碎岩效率低，表现为进尺慢、钻头磨损严重。针对这种情况，我们对钻头的胎体材料、焊接材料及钻头结构进行研究，优选高强度的胎体材料及焊接材料，提高钻头对“松科二井”深井复杂工况的适应性；重新设计钻头端面结构，保证钻头的进尺效率及寿命，研制适用于“松科二井”硬岩长寿命钻头。

## 2.2 高性能胎体材料的实验

选用 4 种强度较好的胎体材料，编号 R1~R4，烧制实验标准块，进行胎体材料性能实验，包括表面洛氏硬度、抗冲击实验、抗弯强度实验及胎体耐磨实验。

### 2.2.1 表面洛氏硬度实验

采用热压法制备  $\text{O}30 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  的标准试样；表面用 80 号砂纸打磨，除去粘结的石墨，直至试样表面平整并呈现金属光泽。利用全洛氏硬度计对试样进行洛氏硬度测试(HRC)，每个试块测 5 个点，取平均值；每种材料测 3 块，取平均值为该材料的表面洛氏硬度。具体数值见表 1。

表 1 不同胎体材料物理性能

| 编号 | 表面洛氏硬度 HRC | 抗冲击韧性/<br>( $\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) | 抗弯强度/<br>MPa | 耐磨性(磨损率)/ $\text{E}^{-5}$ |
|----|------------|---|--------------|---------------------------|
| R1 | 21~25      | 4.97  | 1123         | 1.62469                   |
| R2 | 15~19.5    | 8.26  | 1245         | 2.71135                   |
| R3 | 17.4       | 15.40   | 1016         | 2.15089                   |
| R4 | 34.2~36.5  | 20.60   | 2066         | 1.32231                   |

### 2.2.2 抗冲击实验

采用热压法制备  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  的标准试样；表面用 80 号砂纸打磨，除去粘结的石墨，直至试样表面平整并呈现金属光泽。利用摆锤式冲

击试验机对试样进行抗冲击试验,摆锤冲断试样并指示冲击值后,对摆锤进行制动,记录数值,每种材料测3块,取平均值。冲击后的试样如图4,具体抗冲击韧性数值见表2。

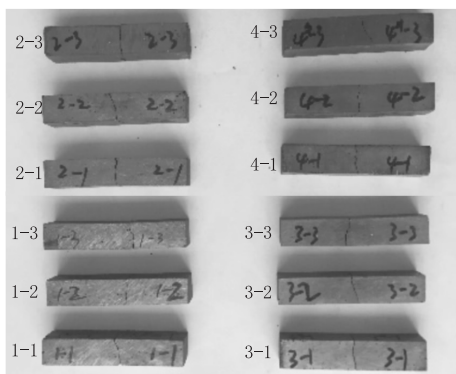
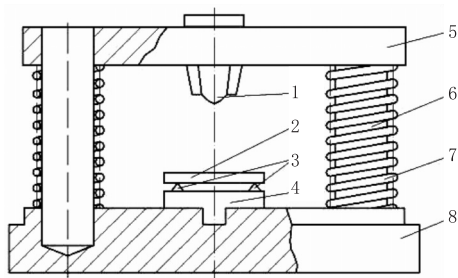


图4 抗冲击韧性击试验块

### 2.2.3 抗弯强度实验

采用热压法制备  $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 30\text{ mm}$  的标准试样;表面用80号砂纸打磨,除去粘结的石墨,直至试样表面平整并呈现金属光泽。将试样放置于胎体抗弯强度测试夹具中部,如图5所示,利用100 kN 电子万能试验机对试样进行测试,待抗弯试样压断后,记录数值,每种材料测试4个试样,取平均值。具体抗弯强度见表2。



1—硬质合金上压块;2—抗弯试样;3—支点;4—下压块底座;5—上压板;6—导杆;7—弹簧;8—底座

图5 胎体抗弯强度测试夹具

### 2.2.4 胎体耐磨实验

采用热压法制备  $\text{O}6\text{ mm} \times 8\text{ mm}$  的标准试样;将试样夹紧于耐磨试验机的卡头上进行初磨,直至试样被磨端面全部与砂纸均匀接触,将初磨后的试样用无水酒精或丙酮擦洗干净,放入干燥箱中,烘干30 min。利用耐磨试验机对初磨后的试样进行耐磨试验,具体操作过程如下:

(1)将烘干的试样放在精度0.1 mg 电子天平上称重为  $W_1$ ;

(2)将试样固定在耐磨试验机卡头上,试样与回转盘上标准砂纸接触;

(3)装有标准砂纸的转盘以  $120\text{ r/min}$  的转速回转;

(4)试样在标准砂纸上做前进或后退运动,行程7.5 cm 后设备自动停止;

(5)从卡头上卸下耐磨试样,进行清洗和烘干(在干燥箱中,温度  $75\text{ }^\circ\text{C}$ ,烘干1 h),冷却至常温;

(6)将烘干后并冷却的样品放在精度0.1 mg 电子天平上进行称重  $W_2$ ;

(7)按公式(2)计算试样的磨耗率  $ML$  :

$$ML = \frac{W_0}{(\pi/4) \cdot d^2 \cdot s \cdot \gamma} \quad (2)$$

式中: $ML$ ——磨耗率; $W_0$ ——试样检测前后的质量差,g; $d$ ——试样直径,cm; $s$ ——试样的摩擦行程,cm; $\gamma$ ——试样的密度, $\text{g/cm}^3$ 。

每种材料测试3个试样,取平均值。具体耐磨性见表2。

### 2.2.5 测试结果

通过以上实验分别得出  $R1 \sim R4$  的表面洛氏硬度、抗冲击韧性、抗弯强度与耐磨性,由表1可见, $R4$  材料的性能最好,测试的性能均优于其他材料,故选取  $R4$  为制作硬岩长寿命钻头的胎体材料。

## 2.3 高强度焊接材料实验

选用几种强度较高的焊接材料,编号为  $H1 \sim H4$ ,其中  $H1$  是常规使用的焊料,为对比实验;以  $R4$  为焊接基材,以45钢为焊接母材,通过使用不同材料的焊料,测试相应的焊接强度,优选出适合焊接基材与母材的高强度焊接材料。

### 2.3.1 实验模型

依照《烧结双金属材料剪切强度的测定方法》(YS/T 485—2005)的剪切实验模型进行焊接强度测试,模型如图6所示。

### 2.3.2 试样制备

采用热压法制备  $R4$  材料的基材标准试样,尺寸为  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ ;用80号砂纸打磨试样表面,除去粘结的石墨,直至试样表面平整并呈现金属光泽;加工45钢母材标准试样,尺寸为  $10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ ;用无水酒精或丙酮擦洗2种材质的试样,以清除油渍和氧化物;采用气焊方式焊接,分别以  $H1 \sim H4$  为焊接材料,将基材和母材焊接为一体,如图7所示。

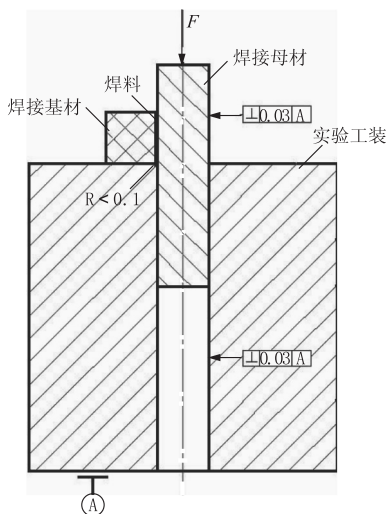


图 6 焊接实验模型示意图

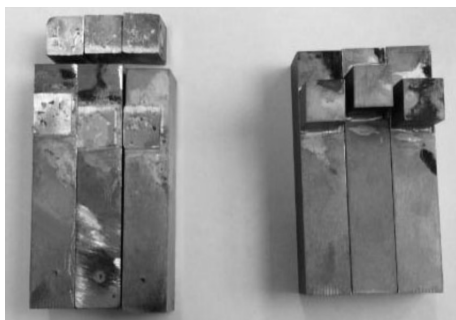


图 7 测试前后的焊接强度试块

### 2.3.3 测试结果

利用 100 kN 电子万能试验机对制备的试样进行焊接强度实验,沿垂直方向施加压力,直至基材和母材被剪切分开,记录剪切强度,每种焊接材料测试 3 个试样,取平均值,即为该材料的焊接强度,具体数值见表 2。

表 2 不同焊接材料与 R4 胎体焊接强度

| 编号 | 焊接强度/<br>MPa | 最高值/<br>MPa | 编号 | 焊接强度/<br>MPa | 最高值/<br>MPa |
|----|--------------|-------------|----|--------------|-------------|
| H1 | 112.5        | 115         | H3 | 135.3        | 146         |
| H2 | 187.7        | 210         | H4 | 109.3        | 166         |

由表 3 可知, H2 焊料与 R4 胎体焊接强度最高,比常规焊料 H1 的焊接强度提高了 60% 左右,故选取 H2 为焊接硬岩长寿命钻头的焊接材料。

### 2.4 钻头结构设计

为提高岩心采取率,“松科二井”现场采用双管取心钻具、提钻取心的方式钻进,岩心筒长约 30 m,故最长每 30 m 需提钻一次,这种取心工艺下,钻头

寿命不再是影响钻进效率的主要因素,钻头的机械钻速则显得比较重要,设计钻头的主要目标是提高机械钻速,解决现场钻探效率低的问题。

“松科二井”井深达 5000 多米,地层致密,为了提高钻进效率采用螺杆为井下动力,由于螺杆的特性限制了泵的排量(30~35 L/s),钻头考虑减小切削面积,增大过水面积,采用宽水路的设计;这样不但可以提高钻进效率,还保证了钻头端面过水通畅,及金刚石的充分冷却。

在上述思路的指导下,我们设计了异形端面钻头:减小钻头端面切削块的长度,用 1~2 块交错覆盖钻头端面,从而减小钻头端面的接触面积,研制的异形钻头如图 8 所示。

### 3 现场实验

异形钻头在“松科二井”进行了现场实验,平均机械效率为 0.6~0.7 m/h,比现场上一回次使用的钻头提高了 10%~15%,进尺 24.07 m 后由于堵心提钻。钻头提出孔口后,观察发现:由于采用 2 块与 1 块交错覆盖的方案,导致钻头胎块不同步磨损,重合覆盖的部分磨损量小,单块覆盖的部分磨损量大,磨损示意图见图 9。剩余寿命无法满足下一回次钻进需要(30 m),不再下井使用。



图 8 异形钻头端面照片

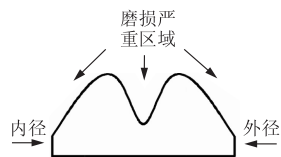


图 9 异形钻头端面磨损示意

异形钻头虽然没有取得预想的效果,但是验证了设计思路的正确性:“松科二井”深达 5000 多米的复杂工况下,减小切削面积,增大过水面积,可以提高钻进效率。由于钻头胎块不同步磨损,导致寿命较短,仅为 24.07 m,下步工作改进钻头端面设计,保证钻进效率的情况下,尽量使钻头同步磨损,以提高钻头寿命。

### 4 钻头的改进

现场使用的普通扇形块钻头,在寿命方面表现良好,可以达到 80 m 左右,只是钻进效率偏低(0.5

m/h左右),所以考虑在普通扇形块结构的基础上改进,以提高钻进效率。

在扇形块的中部加底喷眼,以及与底喷眼相通的底水路与外水路,使得单个孕镶块类似字母U形,这种U形块相对于普通扇形块,优点在于减小钻头唇面面积,提高钻速;增加过水面积,保证过水的通畅,及金刚石层的冷却;防止孕镶块中部形成泥垫,影响钻进效率。钻头的平面布置如图10所示。

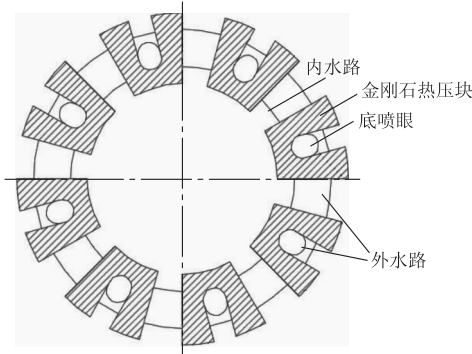


图10 钻头唇面布置图

U形块采用高品级35~40目人造金刚石,95%的金刚石浓度,热压工艺烧结成型,用高强度焊料焊接到加工好的钢体上。这种加工工艺由于不需要传统的高温烧结,可以降低制作成本,减少加工周期;并且减少金刚石的热损伤,保证一定的寿命和钻进效率。内外焊接无压烧结的聚晶块保径,以保证长时间钻进时的钻孔直径及岩心直径。

## 5 改进后的效果

改进后的硬岩长寿命钻头在“松科二井”四开井段( $\varnothing 216/124$  mm)5258.16~5369.64 m进行了实验,取得了良好的效果,成品照片见图11,出井照片见图12,具体实验数据见表3。

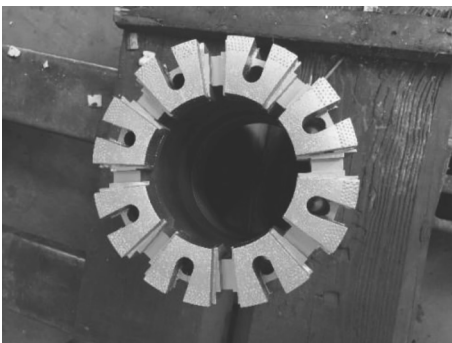


图11 硬岩长寿命钻头入井前照片



图12 硬岩长寿命钻头出井后照片

表3 钻头(金刚石钻头)使用效果对比

| 钻头直径/mm | 生产厂家  | 井段/m            | 进尺/m   | 钻速/( $m \cdot h^{-1}$ ) | 新度/% |
|---------|-------|-----------------|--------|-------------------------|------|
| 216/124 | 北京探工所 | 5258.16~5369.64 | 105.78 | 0.9~1                   | 40   |
| 216/124 | 其他厂家  | 5369.64~5441.9  | 72.26  | 0.5~0.6                 | 15   |

由表3可见,改进后的硬岩长寿命钻头较普通钻头,寿命提高50%,单只钻头钻进最高可达约150 m;效率提高40%~50%,最高可达1 m/h,得到了现场人员的一致好评。

## 6 结论

(1)硬岩长寿命钻头选用高性能胎体材料、高强度焊接材料,以及合理的钻头结构与水路结构,适用于“松科二井”这种深井硬岩地层钻进,寿命及效率较普通金刚石钻头均有提高,有利于节约钻井成本。

(2)硬岩长寿命钻头采用热压块焊接的制作工艺,较普通无压烧结的金刚石钻头制作工艺简单,成本有所降低,适合推广应用,具有一定的经济效益。

## 参考文献:

- [1] 郑文龙,乌效鸣,朱永宜,等.松科2井特殊钻进工艺下钻井液技术[J].石油钻采工艺,2015,37(3):32-35.
- [2] 刘广志,等.金刚石钻探手册[M].北京:地质出版社,1991.
- [3] 赵尔信,等.金刚石钻头与扩孔器[M].北京:地质出版社,1982.
- [4] 沈立娜,阮海龙.国内外金刚石钻头的部分技术进展[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(5):78-80.
- [5] 朱英,周原,赵宪富.卵砾石地层钻探用大直径加强型金刚石钻头的研制[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2011,38(8):68-71.
- [6] 阮海龙,纪卫军,沈立娜,等.针对复杂地层金刚石钻头的改进与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(1):67-69.
- [7] 蒋青光,张绍和,陈平,等.新型优质孕镶金刚石钻头研制[J].金刚石与磨料磨具工程,2008,(6):12-16.
- [8] 孙丙伦,孙友宏,徐良.金矿复杂地层金刚石取心钻头选型试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(8):70-72,76.