

# 尖齿状金刚石复合片钻头在油页岩矿区的钻进实验

张献振<sup>1</sup>, 刘宝昌<sup>1,2,3</sup>, 卢彬<sup>4</sup>, 赵生庆<sup>5</sup>

(1. 吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026; 2. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 吉林 长春 130025; 3. 吉林大学超硬材料国家重点实验室, 吉林 长春 130012; 4. 吉林省地质工程勘察院, 吉林 长春 130012; 5. 吉林省地矿勘察设计研究院, 吉林 长春 130061)

**摘要:** 松辽盆地青山口组和嫩江组含油页岩系, 夹有数十层白云岩透镜体或条带。在对该油页岩系进行钻探时, 由于经常遇到硬度较大的白云岩层, 使用普通的硬质合金钻头不仅进尺极其缓慢, 而且钻头损坏严重, 寿命短。为解决此钻探难题, 研制开发具有高耐磨性和穿透能力强的钻头势在必行。为此, 研发了尖齿状金刚石复合片钻头, 并进行了现场钻进实验。结果表明, 这种钻头在含白云岩层的油页岩地层钻进时, 不仅钻进速度快, 而且具有高耐磨性、寿命长, 其综合技术经济指标远远优于常规硬质合金钻头。

**关键词:** 松辽盆地; 油页岩; 白云岩层; 钻探; 尖齿状金刚石复合片钻头

**中图分类号:** P634.4<sup>+</sup>1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2011)08-0064-04

**Drilling Experiments of Teeth-shaped PDC Bit in Shenjingzi Oil Shale Mining Area of Song Liao Basin/ZHANG Xian-zhen<sup>1</sup>, LIU Bao-chang<sup>1,2,3</sup>, LU Bin<sup>4</sup>, ZHAO Sheng-qing<sup>4</sup>** (1. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China; 2. Key Laboratory of Bionic Engineering, Jilin University, Ministry of Education, Changchun Jilin 130025, China; 3. National Key Laboratory of Superhard Materials, Jilin University, Changchun Jilin 130012, China; 4. Jilin Investigation and Design Institute of Geology and Minerals, Changchun Jilin 130061, China; 5. Geo-engineering Investigation Institute of Jilin Province, Changchun Jilin 130012, China)

**Abstract:** There are often dozens of layers of dolomite body or bands embedded in oil shale formation in Qingshankou and Nenjiang group at Song Liao basin. While drilling in above mentioned oil shale formations, dolomite interlayers with relatively high hardness were often encountered. If ordinary tungsten carbide cutter drilling bit was used, not only the footage was too slow in drilling process, but also the bit was seriously damaged. To solve above drilling problems, the development of new drilling bit with high wear resistance and high penetration ability was eagerly needed. In this paper, a new type of teeth-shaped PDC bit was designed and manufactured. Field drilling experiments using these teeth-shaped PDC bits were conducted and their drilling performances were compared with those of tungsten carbide bits. The results indicated that the new teeth-shaped PDC bit demonstrated high rate of penetration, high wear resistance and long service life while drilling in oil shale formation containing dolomite interlayer. The technical and economical index of teeth-shaped PDC drill bit was better than that of conventional tungsten carbide cutter bits.

**Key words:** Song Liao basin; oil shale; dolomite interlayer; drilling; teeth-shaped PDC bit

## 1 概述

松辽盆地深井子油页岩矿区地层主要由砂岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、泥岩、页岩、油页岩组成, 成分大多以泥质胶结, 属于可钻性较好的地层, 其地层综合柱状图如图1所示<sup>[1]</sup>。2006年, 壳牌石油公司使用美国长年公司的复合片钻头在此矿区钻探, 由于钻头结构和水路系统不合理, 在钻进时造成糊钻、烧钻、吸附性卡钻等事故, 严重影响钻进效

率<sup>[2]</sup>。2010年吉林省地矿建设集团有限公司在深井子矿区 ZK4197 孔钻井过程中使用常规硬质合金钻头, 但由于嫩江组部分地层泥岩结构非常致密, 且夹有较硬的白云岩岩脉(如图2), 常规硬质合金钻头在孔底出现打滑现象, 并很快被磨钝。使用金刚石钻头时, 由于金刚石不易出刃, 造成不进尺或进尺极其缓慢。因此选择一种适应该矿区地层的新型钻头显得极其重要。

收稿日期: 2011-03-13; 修回日期: 2011-05-09

**基金项目:** 中国博士后科学基金项目“土壤洞穴动物趾形仿生钻头研究”(20080430158); 国家自然科学基金青年基金项目“硬岩钻进用仿生结构金刚石复合片及钻头研究”(200902487)、“仿生非光滑表面 PDC 复合齿切削岩石防粘机理研究”(51004052)

**作者简介:** 张献振(1987-), 男(汉族), 山东临清人, 吉林大学在读硕士研究生, 地质工程专业, 主要从事钻探用超硬材料与钻头的研究, 吉林省长春市东民主大街吉林大学前卫北区三舍 526, zxz1087@163.com; 刘宝昌(1975-), 男(汉族), 吉林梨树人, 吉林大学建设工程学院及超硬材料国家重点实验室副教授、工程仿生教育部重点实验室博士后、美国洛斯阿拉莫斯国家实验室访问学者, 地质工程专业, 主要从事钻探新技术、超硬复合材料及钻头、仿生技术在钻探中的应用等研究工作。

统	组	岩系	厚度 /m	柱状图	岩性描述
上白垩统	嫩江组	灰绿色岩系	168		泥质粉砂岩、粉砂质泥岩互层,部分白云岩层
			137		白云岩、灰色泥岩与灰色细砂岩组成三个旋回
			150		深灰色、灰黑色泥岩、页岩,底部为油页岩
			116		灰黑色泥岩、页岩夹灰绿色泥质粉砂岩、碳质泥岩,中间为油页岩
	姚家组	棕红色岩系	100		上部为紫红色、红绿色块状页岩、粉砂岩,含介形虫、脊椎动物化石
			108		棕红色泥岩、粉砂岩和泥岩互层
			56		棕红色、暗紫色页岩、砂页岩
	青山口组	灰绿色岩系	109		上部紫红、灰绿色泥岩夹薄层粉砂岩,下部灰绿色、灰色泥岩夹绿色粉砂岩
			57		下部为灰黑色、灰绿色页岩,底部为油页岩

图 1 松辽盆地深井子油页岩矿区地层综合柱状图

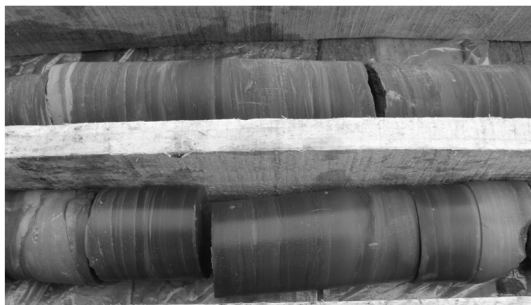


图 2 油页岩矿区夹白云岩层的岩心

## 2 钻头选择

深井子矿区 ZK4197 孔上部砂层遇水易水化,孔壁极易发生缩颈和塌陷现象,当遇到白云岩层(“打滑”地层)时使用硬质合金钻头不进尺,施工人员便加压钻进,最终使钻杆成为绳状摇摆,钻杆接手断裂,进而容易造成钻杆断裂,给施工带来严重损失。

金刚石复合片钻头(Polycrystalline Diamond Compact Bit),简称 PDC 钻头。它由钻头体和切削齿两部分组成。其镶焊形式类似于硬质合金钻头,其碎岩原理以及钻进规程也类似于硬质合金钻进,对岩石主要以切削碎岩方式为主。这种钻头无活动零件,具有高效切削作用,钻头寿命长,机械钻速和耐磨性较其它类型钻头高,但抗冲击性能较差<sup>[3]</sup>。常规 PDC 钻头一般采用圆片状金刚石复合片作为切削具。考虑到本矿区的地质特点,依据岩石破碎学中楔形压头碎岩比功较小的理论<sup>[4]</sup>,为提高钻进

效率,同时解决某些孔段钻头不易进尺的难题,本文选择了内径 58 mm、外径 91 mm 的尖齿状金刚石复合片钻头,以减少钻头切削刃与孔底的接触面积。在钻进过程中,由于钻头底唇面与地层接触面积小,受力集中,齿下岩石在较大的接触应力作用下产生破裂裂纹,因此尖齿比较容易吃入地层<sup>[5]</sup>。使用该类型钻头在吉林省地矿建设集团有限公司施工现场减压低速的情况下进行了钻进实验。

现场使用的硬质合金钻头和实验用尖齿状金刚石复合片钻头见图 3~5。

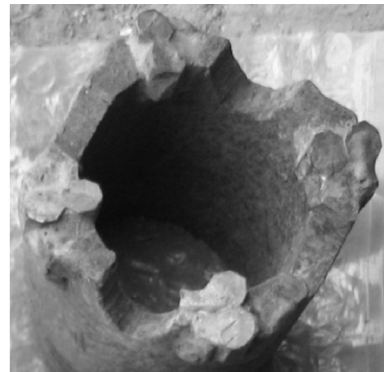


图 3 硬质合金钻头



图 4 尖齿状金刚石复合片钻头

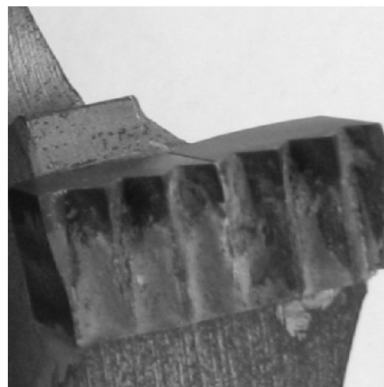


图 5 尖齿状金刚石复合片切削齿形状

### 3 尖齿状金刚石复合片钻头设计和制造

#### 3.1 钻头设计

金刚石复合片钻头的基体分为钢体式 and 胎体式,本文采用钢体式。金刚石复合片的直径为13 mm,厚度为8 mm(其中金刚石聚晶层厚1 mm,硬质合金基片厚7 mm)。复合片的切割主要有近红外Nd:YAG激光切割方法与电火花线切割方法。由于电火花线切割会造成金刚石层与硬质合金层界面处存在金属钻过量去除现象,出现较多明显的凹槽<sup>[6]</sup>,故本文采用了脉宽较窄的近红外Nd:YAG激光切割方法,使得复合片切割速度和切割质量均有很大程度的提高。图6为尖齿状复合片钻头示意图,钻头由8块复合片尖齿焊接在钻头钢体上,每2块焊接在一起,相对称的4块尖齿数相同,分别采用了单块三齿和单块四齿的复合片,这样在钻进岩层的过程中对岩层的切削有互补作用。钻头有4个抛物线状水口,这样更利于泥浆液对钻头底唇面的冷却。

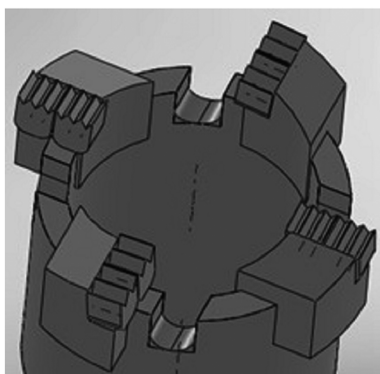


图6 尖齿状复合片钻头示意图

#### 3.2 钻头制造

考虑到复合片金刚石层的热稳定极限温度只有700℃,超过极限温度,复合片金刚石层的抗磨能力下降,影响钻头的使用寿命,对钻头钢体和复合片的焊接采用高频感应加热钎焊与氧-乙炔火焰钎焊相结合的钎焊方法。即焊前进行切削齿穴粗化处理、切削齿氧化处理等工作,先采用高频感应进行局部焊接,然后采用氧-乙炔火焰钎焊的方法,然后放入400~500℃的电阻炉中进行随炉降温冷却,最后取出成品钻头。

## 4 实钻试验

#### 4.1 钻探设备及钻具结构

结合现场实际情况,选择了XY-6B型钻机,BW-250型泥浆泵,AY-12型钻塔,塔高13.5 m。

钻具结构组合:Ø91 mm钻头+Ø73 mm岩心管+Ø68 mm钻铤8根+Ø60 mm钻杆+扁六方钻杆<sup>[5]</sup>。

#### 4.2 钻进参数

由于实验现场油页岩地层含有白云岩硬夹层,尖齿状金刚石复合片在高速钻进中容易崩齿,因此需要较低的钻压和转速。现场钻进实验时实际采用的钻压是5 kN,转速为200~260 r/min,冲洗液泵量为90 L/min<sup>[7]</sup>。

#### 4.3 试验情况及效果

为说明尖齿状金刚石复合片钻头的钻进效果,将其与在同矿区使用的硬质合金钻头的钻进情况进行对比。

在相同地层,钻压5 kN、钻速200~260 r/min、泵压6 MPa的情况下,硬质合金钻头在深井子矿区ZK5789孔的进尺情况如表1所示。

表1 硬质合金钻头进尺情况

钻进回次	钻进深度/m	进尺/m	用时/h	时效/m
91	501.35~507.21	5.86	4.17	1.40
92	507.21~511.59	4.38	2.5	1.75
93	511.59~517.61	6.02	3.3	1.81
94	517.61~523.47	5.86	6.17	0.95
95	523.47~529.62	6.15	2	3.08
96	529.62~534.28	4.66	6.17	0.76
97	534.28~538.66	4.38	0.5	8.76
98	538.66~545.00	6.34	2	3.17
99	545.00~547.00	2.00	2.67	0.75
100	547.00~552.66	5.66	4.67	1.21
101	552.66~557.02	4.36	4	1.09

尖齿状金刚石复合片钻头在深井子矿区ZK4197孔的进尺情况如表2所示。

表2 尖齿状金刚石复合片钻头进尺情况

钻进回次	钻进深度/m	进尺/m	用时/h	时效/m
98	498.55~504.12	5.57	1	5.57
99	504.12~510.58	6.46	1.17	3.87
100	510.58~516.63	6.05	1	6.05
101	516.63~522.81	6.18	1.5	4.12
102	522.81~528.67	5.86	2	2.43
103	528.67~534.77	6.10	1	6.10
104	534.77~540.31	5.54	1	5.54
105	540.31~546.77	6.46	1.17	5.57
106	546.77~552.87	6.10	1.5	4.07
107	552.87~557.28	4.41	2	2.21

此次实验一共使用了6只复合片钻头,每个钻孔实验2只,对3个钻孔进行了钻进实验,硬质合金钻头和尖齿状金刚石复合片钻头的综合钻进效果对比如表3所示。

表3 钻头总进尺和总花费时间及平均机械钻速对比表

钻头类型	钻孔 孔号	总进尺 /m	总花费 时间/h	平均机械钻速 /(m·h <sup>-1</sup> )
硬质合金钻头	ZK5789	157.16	111.8	1.4
尖齿状金刚石复合片钻头1	ZK4197	98.32	32.8	3.1
尖齿状金刚石复合片钻头2	ZK4197	108.41	34.5	3.1
尖齿状金刚石复合片钻头3	ZK4105	189.21	75.7	2.5
尖齿状金刚石复合片钻头4	ZK4105	172.20	66.1	2.6
尖齿状金刚石复合片钻头5	ZK7397	137.94	51.3	2.69
尖齿状金刚石复合片钻头6	ZK7397	227.65	77.7	2.93

## 5 试验效果分析

### 5.1 钻探技术效果分析

从表1~3可以看出,与硬质合金钻头相比,尖齿状金刚石复合片钻头钻进效率高,回次钻进时间缩短,平均机械钻速也提高很多。在打滑地层用此钻头无论是钻进花费时间还是机械钻速都要优于硬质合金钻头,平均机械钻速2.82 m/h,是硬质合金钻头平均机械钻速(1.4 m/h)的2倍多。钻头寿命最高可达227.65 m,远高于硬质合金钻头(硬质合金钻头在该矿区的寿命一般不超过20 m)。

### 5.2 经济性分析

(1)尖齿状金刚石复合片钻头现场使用报废前不用换钻头,而使用硬质合金钻头钻进时,每钻进一个回次就要换一次钻头。在白云岩层每只硬质合金钻头的寿命大约20 m,钻孔深度按照600 m计算,大约要使用硬质合金钻头30只,每只硬质合金钻头的价格在80元左右,使用钻头总费用约2400元。

(2)根据图1可以看出,白云岩地层在150~300 m之间较多,其它地层泥岩砂岩居多,用尖齿状金刚石复合片钻头易钻进,钻头磨损少,经过现场钻进用2只钻头就可以完成600 m整个钻孔的钻进工作。每只尖齿状金刚石复合片钻头的价格为2900元,钻头总费用5800元。钻头的费用将提高5800-2400=3400元。

(3)按照ZK4197孔有100 m难钻进“打滑”地层计算,硬质合金钻头用时 $100/1.4=71$  h,尖齿状金刚石复合片钻头平均钻速为 $(3.1+3.1+2.5+2.6+2.69+2.93)/6=2.82$  m/h,用时 $100/2.82=35$  h,节省 $71-35=36$  h。

(4)现场人员费用是70元/天,一班4个人,一

个班工作8 h,3个班连续接替钻进,仅人员费用每天可以节省 $70\text{元}/\text{人}\times 4\text{人}/\text{班}\times 3\text{班}/\text{天}\times 36/24=1260$ 元。现场每24 h消耗燃料费用约1400元,节省36 h意味着节省燃料费用约2100元左右。费用上可以近似抵消,时间上减少了36 h,即缩短了36 h的工期,提高了施工现场整体的效率。预计若额外的36 h继续钻进,可比硬质合金钻进提高产值约 $300\text{元}/\text{m}\times (2.82-1.4)\text{m}/\text{h}\times 36\text{h}=15336$ 元。

由以上分析可以得知,采用尖齿状金刚石复合片钻头,一个钻孔可以节省大于36 h的时间,提高了施工效率,如换算成产值,预计可提高15336元的产值,这对施工单位来说是非常划算的。

## 6 结论

(1)在松辽盆地深井子油页岩矿区白云岩层的钻采施工中,常规硬质合金钻头出现打滑进尺极其缓慢、寿命短现象,使用尖齿状金刚石复合片钻头钻进速度快,而且具有高耐磨性、寿命长的特点,这些都优于常规硬质合金钻头。

(2)使用尖齿状金刚石复合片钻头为现场钻采提高了效率,缩短了工期,降低了施工成本,整体的经济技术指标远远超过常规硬质合金钻头。

(3)油页岩矿区由于地层条件,长期使用常规硬质合金钻头。此次使用金刚石复合片钻头大大加快了油页岩矿区白云岩层的钻采速度,并开辟了新的思路。今后的应用前景非常可观。

## 参考文献:

- [1] 刘招君,杨虎林,董清水,等.中国油页岩[M].北京:石油工业出版社,2009.
- [2] 迟玉亮.奇偶齿鱼脊式聚晶钻头的设计及在油页岩地层的钻进效果[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(3).
- [3] 张艺瀚,王希勇.PDC钻头在沙南油田沙丘3井区的推广应用[J].西部探矿工程,2005,(2).
- [4] 张祖培,刘宝昌.碎岩工程学[M].北京:地质出版社,2004.
- [5] 邹德永.新型PDC钻头切削齿的发展[J].石油钻探技术,2003,(6).
- [6] 吴煜,张高峰.聚晶金刚石的Nd:YAG激光切割与电火花线切割损伤分析[J].中国机械工程,2010,(5).
- [7] 赵生庆,卢彬,李录波,李强.松原油页岩地层硬质合金裸孔钻进技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(10).