

# 沧州盐矿古近系塑脆性地层取心钻头选型研究

景龙<sup>1,2</sup>, 李伟<sup>3</sup>

(1. 河北省地矿局第三水文工程地质大队, 河北衡水 053000; 2. 河北省地热资源开发研究所, 河北衡水 053000;  
3. 河北省地矿局第四水文工程地质大队, 河北沧州 061000)

**摘要:** 沧州盐矿普查项目完成了3眼勘探孔, 钻探深度3000~3451 m, 取心总长度3791 m, 取心层段主要为古近系塑脆性岩石。根据钻进特性, 针对工区弹塑性层段和脆性层段提出了钻头选型原则。结合施工实践, 经过多次试验、改进, 在累计使用的硬质合金、复合片、巴拉斯3类15种钻头中, 通过典型钻头结构型式、碎岩机理以及使用效果进行综合分析, 优选出H-4-II、F-3、F-6型3种钻头, 在古近系地层取心钻进中效率高、取心质量好, 适合工区地质条件, 建议推广应用。

**关键词:** 古近系; 塑脆性地层; 取心钻头; 硬质合金钻头; 复合片钻头

**中图分类号:** P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2022)06-0071-08

## Study on coring bit selection for Paleogene plastic-brittle strata in Cangzhou Salt Mine

JING Long<sup>1,2</sup>, LI Wei<sup>3</sup>

(1. No. 3 Geological Brigade of Hebei Geology and Mineral Exploration Bureau, Hengshui Hebei 053000, China;  
2. Hebei Institute of Geothermal Resources Development, Hengshui Hebei 053000, China;  
3. No. 4 Geological Brigade of Hebei Geology and Mineral Exploration Bureau, Cangzhou Hebei 061000, China)

**Abstract:** Three exploration boreholes have been completed in the Cangzhou Salt Mine general survey project, with the drilling depth ranging from 3000 to 3451m, and the total coring length of 3791m in Paleogene plastic-brittle formation. Based on the drilling characteristics, the proper bit selection principle was determined for the elastic-plastic interval and brittle interval in the work area. After several tests and improvements, 15 kinds of bits belonging to three categories—carbide, PDC and Balas were used. Comprehensive analysis was carried out according to the bit structure, rock fragmentation mechanism and application effect, and three kinds of bits of H-4-II, F-3 and F-6 were optimized. These bits had high efficiency and good coring quality when drilling in Paleogene strata, which are suitable for the geological conditions in the work area, and can be recommended to popularize and apply in this area.

**Key words:** Paleogene; plastic-brittle formation; coring bit; carbide drill bits; PDC drill bits

沧州盐矿普查项目钻探工程完成了3眼勘探孔, 钻探深度3000~3451 m, 取心段为1650~3451 m, 均为古近系层段。三眼钻孔取心总长度3791 m, 钻探孔径215.9 mm, 岩心直径90~101 mm。钻探工程作为项目实施的重点工作, 因耗时长、成本高、

难度大等直接影响着项目的进展。以CY1钻孔1650~3000 m取心钻进施工为例, 纯钻耗时占到53%<sup>[1]</sup>。因钻头选型是提高钻探效率的关键, 工区内无经验可循, 针对岩层钻进特性, 有必要进行钻头选型探讨。

收稿日期: 2021-08-25; 修回日期: 2022-04-30 DOI: 10.12143/j.ztgc.2022.06.010

基金项目: 河北省地矿局科技项目“沧州深部大口径盐矿钻进技术研究”(编号: 454-0601-YBN-MU6P)

第一作者: 景龙, 男, 汉族, 1978年生, 副队长, 探矿工程专业, 主要从事钻探及钻井技术和管理工, 河北省衡水市桃城区红旗大街808号, 1768901833@qq.com。

引用格式: 景龙, 李伟. 沧州盐矿古近系塑脆性地层取心钻头选型研究[J]. 钻探工程, 2022, 49(6): 71-78.

JING Long, LI Wei. Study on coring bit selection for Paleogene plastic-brittle strata in Cangzhou Salt Mine[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(6): 71-78.

## 1 工区地层钻进特性

取心层段钻遇主要为塑脆性岩石,根据孔内钻进效果,结合地层岩石力学特性,将工区内塑脆性岩石划分为弹塑性层段和脆性层段。

### 1.1 弹塑性层段

弹塑性层段以古近系东营组( $E_d$ )、沙一段( $E_s^1$ )、沙二段( $E_s^2$ )为主,含部分沙三段( $E_s^3$ ),底界深度一般在2300~2500 m,岩性以泥岩、泥灰岩为主,地层半固结—固结。

该层段岩石硬度低,根据典型样品测试结果,抗压入硬度多数为140~400 MPa,岩石密度2.2~2.7 g/cm<sup>3</sup>,其单轴抗压强度检测值在11~38 MPa(见表1),地层可钻性一般为2~5级,通过岩样分析结果

可知,地层矿物主要成分为粘土矿物、石英、碳酸盐矿物(见图1)。

表1 工区地层岩石单轴抗压强度统计

Table 1 Summary of uniaxial compression strength of rock in the work area

层位	单轴抗压强度/MPa	地层岩性	备注
东营组 $E_d$	11.8~12.5	泥岩为主	取样2件
沙一段 $E_s^1$	16.6~38.0	泥岩、泥灰岩为主	取样11件
沙二段 $E_s^2$			
沙三段 $E_s^3$			
沙四段 $E_s^4$	14.3~74.1	泥岩、石膏盐岩	取样15件
孔店组 $E_k$	25.9	含砂质泥岩	取样1件

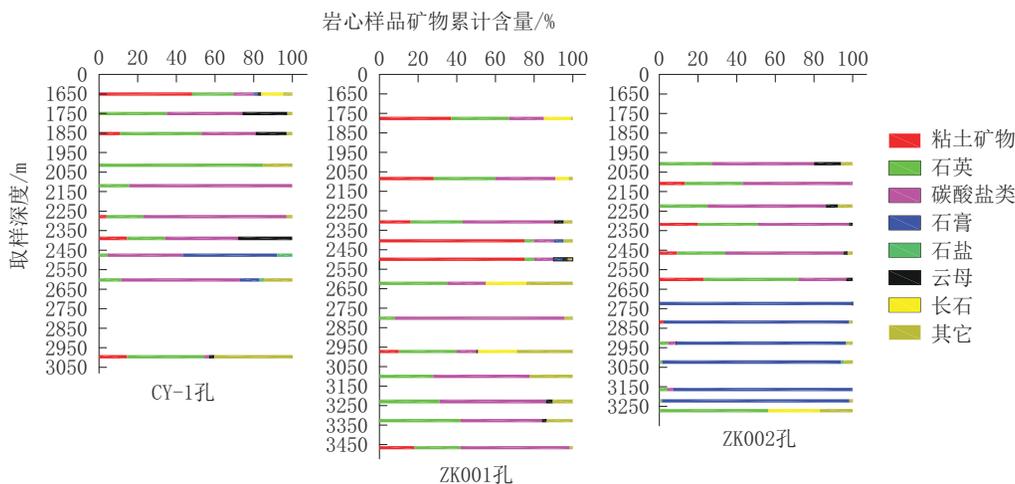


图1 工区岩石矿物成分含量分析

Fig.1 Analysis chart of rock mineral composition in the work area

地层具有一定胶结性,但固结稍差,部分岩心内钻取试验小样不能成型(见图2)。实测岩心塑性系数为1.44~2.12,属低塑性岩石,因受到地层围压影响,钻进中表现出典型的弹塑性特征<sup>[2]</sup>,类似“胶皮”层,调整钻进参数,钻速无明显提高。首眼钻孔施工初期,钻头选型没有经验,取心机械钻速仅为0.47~0.79 m/h,且采取率<70%。该层段取心钻头选型重点解决提高机械钻速和取心质量两个问题。

### 1.2 脆性层段

脆性层段以古近系沙三段( $E_s^3$ )、沙四段( $E_s^4$ )为主,深度一般从2300~2500 m开始,底界埋深差异较大,与沉积环境有关。上部岩性以泥岩、泥灰岩、含砂质泥岩为主,下部为含盐膏层段,岩性以泥灰岩、石膏泥岩、石膏层、石盐矿层为主,地层固结。



(a) 钻孔内取出的岩心 (直径95mm) (b) 岩心中钻取的试验小样 (直径30mm)

图2 岩心试验小样

Fig.2 Sample of core test

该层段岩石抗压入硬度多数达400~720 MPa,岩石密度2.2~2.9 g/cm<sup>3</sup>,其单轴抗压强度检测值在14~74 MPa(见表1),地层可钻性一般为3~5级。通过典型样品分析结果可知,地层矿物主要成分为

石英、碳酸盐矿物、长石、石膏、粘土矿物(见图1)。

地层表现出明显的脆性特征,岩石硬度普遍较高,局部层段软硬不均,互层状发育。地层胶结强度高,取心质量容易保证,钻头的选型重点考虑高效耐磨以实现提速。

## 2 钻头选型原则

钻头是提高机械钻速的重要因素。只有适宜的钻头型式,方能达到安全、高效、低耗的钻进指标。工区内无可借鉴的古近系连续取心案例,钻头选型难度大。综合分析地层特性、技术要求等多方因素,提出钻头选型原则:

(1)根据工区地层钻进特性选型。在较浅部的以弹性为特征的岩层,岩石硬度偏低,重点尝试使用硬质合金切削齿钻头,以剪切碎岩方式提高钻效。深部以脆性为特征的岩层,宜使用耐磨性较好的复合片切削齿钻头,以压切碎岩提高钻效。

(2)根据钻探工艺进行选型。岩心口径(90~101 mm)与钻孔口径(216 mm)级差大,全面破碎面积占83%,居主导地位,需要充分借鉴小口径钻探钻头和大口径全面破碎钻头的结构型式,分析各类钻头碎岩方式的基础上进行选型。

(3)根据经验选型。结合岩石力学特性、其它工区类似工程<sup>[3-7]</sup>以及以往实施的深部钻探工作经验<sup>[8-14]</sup>进行钻头优选。

(4)根据实钻效果选型。在勘探孔施工过程中,根据每个回次机械钻速、取心质量、钻头磨损等因素选型,即对每个回次的钻进参数、钻头型号进行记录,把取心质量好、机械钻速高的钻头优选出来。

按照上述原则完成了首眼钻孔钻头的选型及研究工作,后期又逐步改进,高效地完成了其余两眼钻孔的取心任务。

## 3 钻头选型过程

钻探过程中,在钻头的选型、改型上不断进行试验,三眼钻孔完成的263个回次取心中,累计使用了硬质合金、复合片、巴拉斯3类15种钻头,其中硬质合金类钻头7种,复合片类钻头7种,巴拉斯类钻头1种,各种钻头结构特征及试验数据见表2,不同结构类型的钻头钻速悬殊。

## 3.1 弹性层段钻头选型

在首眼钻孔(CY1孔)弹性层段钻进中,开始选择了市场广泛应用的硬质合金刮刀类、PDC类钻头,均出现钻速低、取心质量差的问题。通过5次改进、多回次试验,针对既有一定硬度又具弹塑性的浅部古近系层段研发而成H-4-II型硬质合金钻头(专利号ZL201720689738.2)。钻头胎体为圆筒状,材质为35CrMo,上部连接取心筒外筒,底部外形为锥面,内部成台阶状,钻头结构及实物见图3、图4。

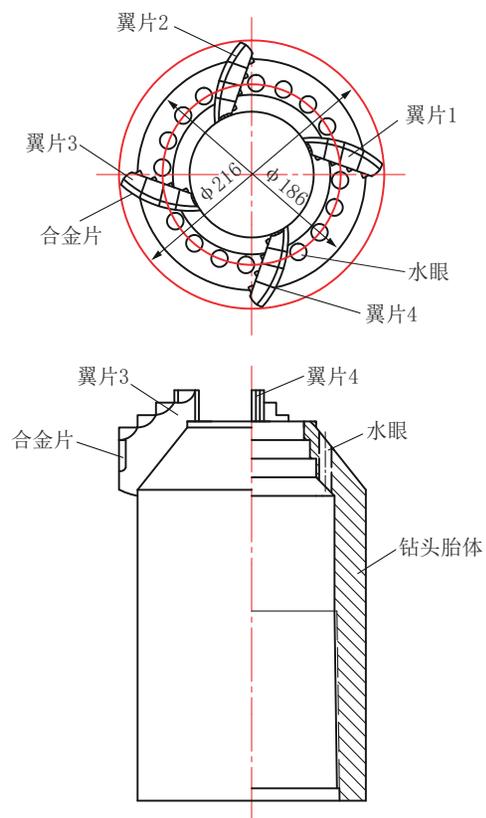


图3 H-4-II型钻头结构示意图

Fig.3 Structure of H-4-II bit



图4 H-4-II型钻头

Fig.4 H-4-II drill bit

表 2 钻头结构特征及钻进数据  
Table 2 Drill bit features and drilling data

钻头种类	钻头形式	使用型号	通用型号	结构特征	施工钻孔	回次/个	累计进尺/m	平均转速/ (m·h <sup>-1</sup> )
硬质合金钻头	刮刀式	H-1-I		对称6翼片、三阶梯式; 镶焊薄片硬质合金片; 平底式	CY1	16	227.83	0.79
	刮刀式	H-1-II		对称6翼片、三阶梯式; 镶焊薄片硬质合金片; 底部锯齿式	CY1	8	97.80	0.75
	刮刀式	H-2		对称6翼片、二阶梯式; 镶焊薄片硬质合金片; 底部刃尖式	CY1	3	14.66	0.45
	肋骨式	H-3-I		对称6翼、纵横三阶梯式; 外设肋骨, 镶焊八角柱合金; 底部刃尖式	CY1	2	26.82	0.48
	肋骨式	H-3-II		对称4翼、三阶梯式; 外焊肋骨, 镶焊八角柱合金; 底部刃尖式	CY1	1	13.28	0.68
	翼片式	H-4-I	HSC44-1	对称4翼、四阶梯式; 镶焊薄片合金; 平底式	CY1	3	51.08	0.80
	翼片式	H-4-II	HSC44-2	对称4翼片、四阶梯式; 镶焊薄片合金; 平底式	CY1 ZK001 ZK002	31 22 37	349.23 216.76 567.42	1.29 1.16 1.14
	常规	F-1	M123	分布6排间隔齿; 镶焊柱状复合片; 尖平底式	CY1 ZK002	2 2	10.13 16.88	0.47 0.30
	刮刀式	F-2		对称6翼片、三阶梯式; 镶焊柱状复合片; 平底式	CY1	1	7.68	0.47
	大齿	F-3	M124	分布6排对称齿; 镶焊柱状复合片; 尖平底式	CY1 ZK001 ZK002	24 26 32	353.95 380.31 289.89	0.63 1.65 0.91
复合片钻头	大齿	F-4	M133	分布6排对称齿; 镶焊柱状复合片; 尖底式	CY1 ZK001 ZK002	5 2 4	87.34 21.99 59.88	0.60 0.74 0.42
	尖齿	F-5	JPC1336M	分布6排对称柱齿; 圆弧冠部; 镶焊尖齿复合片; 尖平底式	ZK001	3	29.43	0.36
	小齿	F-6	M433	镶焊6排对称齿; 镶焊柱状复合片, 全出刃; 尖平底式	ZK001 ZK002	22 13	373.67 168.68	4.13 0.71
	翼片式	F-7		对称4翼片、四阶梯式; 镶焊柱状复合片; 平底式	ZK001	1	17.45	1.13
	巴拉斯钻头	B-1		对称10翼; 镶焊三角聚晶复合片, 半出刃; 平底式	ZK001 ZK002	1 2	13.69 16.97	0.34 0.55

注: (1)所用钻头外径均为215.9 mm, 内径为102 mm; (2)H代表切削齿为硬质合金类型, F代表切削齿为复合片类型, B代表切削齿为巴拉斯类金刚石

### 3.1.1 结构特征

(1) 弧形翼片。4个翼片加工呈弧形,呈台阶面。钻头破碎面呈不同高度的台阶,增加了破碎自由面,提高了破碎效率;将翼片设计为弧形,翼片前方剪切破碎的岩屑易于排除,弧形翼片减少冲洗液上返流动阻力,避免重复破碎;阶梯式环状孔底结构(见图5)有利于中心岩心进入取心内筒,减少对岩心的扰动,有利于提高岩心采取率。

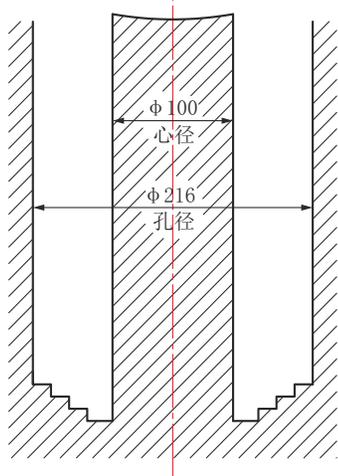


图5 阶梯式环状孔底示意

Fig.5 Stepped annular shaped hole-bottom

(2) 薄片式硬质合金切削刃。主切削刃采用薄片式硬质合金,累计16块,刃角75°;辅助切削刃采用方柱和长柱状硬质合金,累计20块;镶嵌方式均为直镶。将硬质合金片嵌焊于钻头翼片的迎层面上,有利于切削破碎,选用薄片式硬质合金为主切削刃,有利于增加对塑性岩石的切入深度。

(3) 底喷式水眼。在钻头内台肩上均匀加工16个φ10 mm底喷式水眼,可及时清除岩屑,减少重复破碎,降低泵压,同时也可以起到保护岩心减少冲刷的作用。

### 3.1.2 碎岩效率分析

根据钻头结构特点,进行钻头碎岩效率分析。合金块切入弹塑性岩石时受力情况见图6。根据受力图,按照力学平衡原理,当磨锐式钻头上的切削具未磨钝时推算H-4-II型钻头硬质合金齿切入地层深度 $h_0$ 见式(1),机械钻速预测见式(2)<sup>[15]</sup>。

$$h_0 = \frac{\eta P_y}{b H_y \tan \beta} \quad (1)$$

$$v = h_0 m n t \quad (2)$$

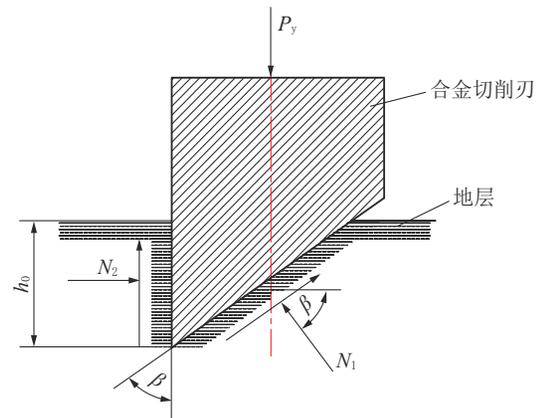


图6 硬质合金切削齿碎岩受力示意

Fig.6 Load on the carbide cutting teeth when cutting rocks

式中: $P_y$ ——切削齿上的轴向力,常规钻压40 kN,单块合金承受轴向力2.5 kN; $b$ ——切削具的刃宽,取15 mm; $\beta$ ——切削具的刃角,取75°; $H_y$ ——岩石的压入硬度,取值140~400 MPa; $\eta$ ——考虑到摩擦力的系数,取值0.88~0.97,工区取0.90; $v$ ——机械钻速,m/h; $m$ ——钻头翼片数,取4; $n$ ——钻头转速,取心钻进取50 r/min; $t$ ——钻进时间,取60 min。

结合现场钻进参数计算,对于弹塑性岩层段,硬质合金在未磨损时切入深度 $h_0$ 可达到0.28~0.10 mm,此时机械钻速可达到1.20~3.36 m/h。可见,选用硬质合金切削刃在弹塑性层钻进可行,钻头碎岩效率较高。

### 3.2 脆性层段钻头选型

古近系深部,岩石硬度增加,选择钻头必须考虑碎岩效率和耐磨性。在深部硬层试验时,新硬质合金钻头开始钻速很高,但切削刃很快磨损(或崩齿)而使钻速骤降,甚至不能完成一个完整回次钻进。而复合片钻头切削齿由于具有金刚石耐磨层,刃口锋利,可持续切削岩层,实现高效碎岩<sup>[16]</sup>。因此,在深部钻进,钻头切削齿优选PDC复合片。

市场上PDC钻头类型比较多,根据地层特征,试验应用了7种,其中自制2种(F-2、F-7型),成品5种(F-1、F-3、F-4、F-5、F-6型),各类钻头的钻速差异较大,最终优选出F-3、F-6型钻头。

#### 3.2.1 结构特征

F-3型钻头通用型号为M124。钻头体为胎体式,底喷式水眼,钻头为6翼,镶焊6排对称复合片切削齿30块,钻头结构见图7(钻头外径215.9 mm,内

径102 mm)。该类钻头刀翼出刃较高,切削齿较大,易切入地层,提高钻进效率,适用于胶结性较强的脆性地层。切削齿呈等差角方式布置,避免了同时切入地层引起扭矩增加,确保钻进平稳。



图7 F-3型钻头

Fig.7 F-3 drilling bit

F-6型钻头通用型号为M433,钻头体为胎体式,水口为唇面直开式,各翼片中间有扇形水路。设6翼,累计镶焊复合片54块,钻头结构见图8(钻头外径215.9 mm,内径102 mm)。该类钻头刀翼较低,切削齿全出刃,齿小而多,小齿的切削刃具有更大的曲率,可在岩层接触区域形成更高的接触应力,以压切碎岩为主,容易在硬岩中形成连续的小体积破碎。这种钻头耐磨性好,钻进平稳。



图8 F-6型钻头

Fig.8 F-6 drilling bit

#### 4 应用效果

H-4-II型硬质合金钻头通过CY1孔试验成功后,在浅部层段推广使用,各孔使用统计数据见表3。从表3可以看出,该型钻头在2000~2500 m均保持了较高的机械钻速,平均在1.1 m/h以上,个别回次在3 m/h以上(见图9),与计算数据相近。岩心均可呈柱状,采取率达到95%(见图10)。可见该类钻头在该工区1650~2500 m弹塑性地层钻进效率高,宜优先使用。

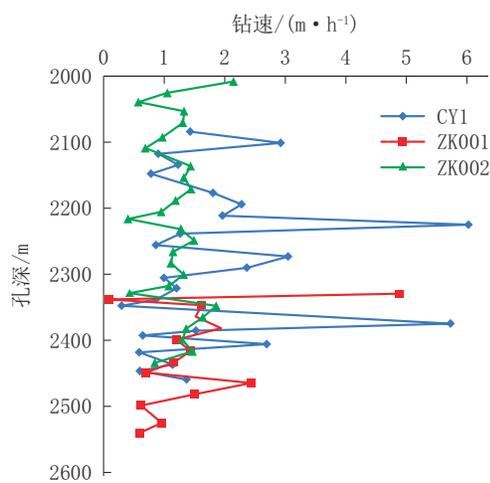
F-3型钻头在3个钻孔中均有使用,各孔使用

表3 H-4-II型钻头钻进数据统计

Table 3 Drilling data of H-4-II bit

孔号	应用孔段/ m	钻头进尺/ m	平均钻速/ (m·h <sup>-1</sup> )	岩心采取 率/%
CY1	2080~2470	349.23	1.29	95
ZK001	2300~2550	216.76	1.16	95
ZK002	2000~2450	567.42	1.14	98

注:钻头进尺为对应孔段内采用H-4-II钻头累计进尺



(孔深取各回次对应孔段的中点深度;机械钻速取回次平均钻速)

图9 H-4-II型钻头使用回次钻速曲线

Fig.9 ROP per run of H-4-II bit



(a) 第36回次(2094.8~2098.0m)



(b) 第48回次(2293.2~2296.4m)

图10 CY-1孔岩心实物

Fig.10 Core taken from Borehole CY-1

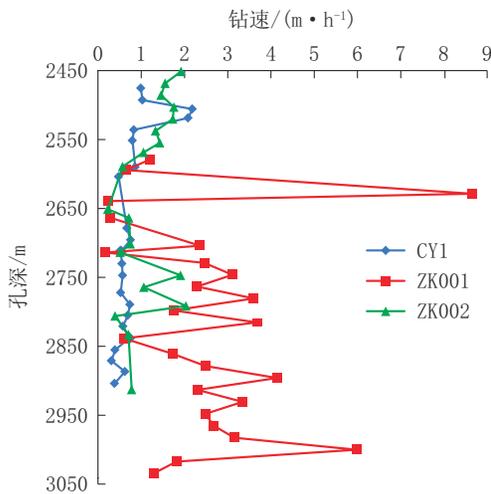
统计数据见表4。该类钻头在ZK001孔中使用效果最佳,平均钻速达1.65 m/h,在CY1孔与ZK002孔中,钻速达0.63 m/h以上(见图11),岩心采取率均达96%以上。可见该类钻头适宜在该工区2500~3000 m脆性层段使用。

表4 F-3型钻头钻进数据统计

Table 4 Drilling data of F-3 bit

孔号	主要孔段/ m	钻头进尺/ m	平均钻速/ (m·h <sup>-1</sup> )	岩心采取 率/%
CY1	2466~2912	353.95	0.63	96
ZK001	2570~3043	380.31	1.65	100
ZK002	2442~2920	289.89	0.91	96

注:钻头进尺为对应孔段内采用F-3型钻头累计进尺数



(孔深取各回次对应孔段的中点深度;机械钻速取回次平均钻速)

图11 F-3型钻头使用回次钻速曲线

Fig.11 ROP per run of F-3 bit

F-6型钻头使用统计数据见表5。该类钻头使用于两个钻孔中,在ZK001孔的使用中钻效高,机械钻速均在2 m/h以上,最高钻速达9 m/h(见图12)。在含大段盐膏层的ZK002孔的钻速低,实钻发现,盐膏层具蠕变特性,压切破碎作用无法高效发挥。该钻头的特点是在较硬的地层中具有良好的稳定性,寿命长,机械钻速较高,在该工区3000~3450 m硬度较高的脆性层段宜优先使用。

### 5 认识

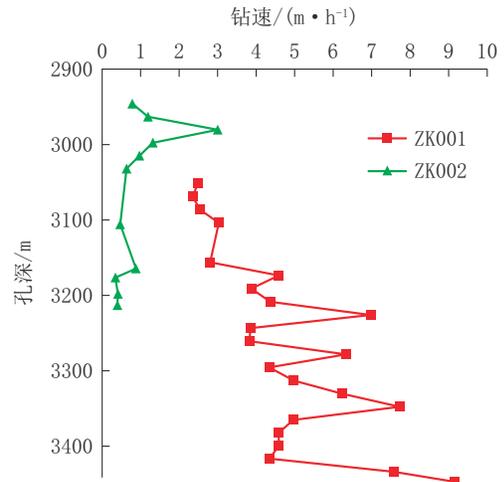
通过钻头结构分析和实钻检验,优选出F-6、F-

表5 F-6型钻头钻进数据统计

Table 5 Drilling data of F-6 bit

孔号	主要孔段/ m	钻头进尺/ m	平均钻速/ (m·h <sup>-1</sup> )	岩心采取 率/%
ZK001	3043~3451	373.67	4.13	100
ZK002	2937~3219	168.68	0.71	99

注:钻头进尺为对应孔段内采用F-6型钻头累计进尺数



(孔深取各回次对应孔段的中点深度;机械钻速取回次平均钻速)

图12 F-6型钻头使用回次钻速曲线

Fig.12 ROP per run of F-6 bit

3、H-4-II型3种钻头,在沧州古近系地层取心钻进中应用,效率高、取心质量好,适合该工区地质条件,建议推广应用。

(1)1650~2500 m对应工区古近系弹塑性特征明显的塑脆性层段,宜选以剪切方式破碎岩石的H-4-II型硬质合金钻头。该型钻头剪切效率高,但易崩齿,不宜在深部脆性层段内钻进。

(2)2500~3450 m对应工区古近系脆性特征明显的塑脆性层段,宜选耐磨性强的复合片切削齿钻头。其中F-3型属大齿、耐磨型钻头,采用切削-压切方式破碎岩层,更适合3000 m以浅层段。F-6型属小齿、耐磨型钻头,采用压切方式破碎岩层,更适合3000 m以深层段。

### 参考文献(References):

[1] 景龙,徐树,常林祯,等. 沧州深部盐矿钻探施工关键技术探讨[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(5): 8-12.  
JING Long, XU Shu, CHANG Linzhen, et al. Discussion of essential technologies for drilling construction in deep salt mine of

- Cangzhou [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2013, 40(5):8-12.
- [2] 王建学, 万建仓, 沈慧. 钻井工程[M]. 北京: 石油工业出版社, 2008:7-8.
- WANG Jianxue, WAN Jiancang, SHEN Hui. *Drilling Engineering*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008:7-8.
- [3] 仲玉芳, 赵岩. 宁晋-辛集勘探区2-1盐井的施工[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2014, 41(7):24-27.
- ZHONG Yufang, ZHAO Yan. Construction of 2-1 salt well in Ningjin-Xinji exploration area [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2014, 41(7):24-27.
- [4] 靳红兵. 深部岩盐取心钻探技术[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2011, 38(10):10-12.
- JIN Hongbing. Coring drilling technology for deep rock salt[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2011, 38(10):10-12.
- [5] 王卫民, 仲玉芳. 深部石盐层取心技术[J]. *中国煤炭地质*, 2010, 22(S1):120-122.
- WANG Weimin, ZHONG Yufang. Deep part rock salt layer coring technology [J]. *Coal Geology of China*, 2010, 22 (S1) : 120-122.
- [6] 汤凤林, 宁伏龙, 段隆臣. 各向异性岩石钻进用钻头和孔底装置的分析研究与探讨[J]. *钻探工程*, 2021, 48(2):54-63.
- TANG Fenglin, NING Fulong, DUAN Longchen. Analytical research and discussion about drill bit and borehole bottom device used for drilling in anisotropic formations[J]. *Drilling Engineering*, 2021, 48(2):54-63.
- [7] 蓝海锋, 鲜保安, 高彦尊. 盐岩层大直径岩心取心技术[J]. *钻采工艺*, 2005, 28(4):9-11.
- LAN Haifeng, XIAN Baoan, GAO Yanzun. Coring technology of full diameter core in salt bed[J]. *Drilling & Production Technology*, 2005, 28(4):9-11.
- [8] 孙庆仁, 申胡成, 杨新斌, 等. 松科1井南孔钻井取心技术[J]. *石油钻采工艺*, 2007, 29(5):8-12.
- SUN Qingren, SHEN Hucheng, YANG Xinbin, et al. Nankong well drilling and coring technology for Songke 1 well[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2007, 29(5):8-12.
- [9] 阮海龙, 沈立娜, 李春, 等. 弹塑性致密泥岩用新型尖齿PDC钻头的研制与应用[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2014, 41(12):80-83.
- RUAN Hailong, SHEN Lina, LI Chun, et al. Research and application of new sharp-tooth bit used in elastic-plastic compact mudstone [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2014, 41(12):80-83.
- [10] 刘晓阳, 段隆臣. 松辽盆地第三系含砾砂岩、砂砾岩层钻探硬质合金钻头的研究[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2002, 29(4):33-35.
- LIU Xiaoyang, DUAN Longchen. The research on TC bit used in the tertiary sandstone conglomerate and sandstone formations in the Song-Liao Basin [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2002, 29(4):33-35.
- [11] 朱永宜, 王稳石. 松科一井(主井)取心钻进工艺[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2008, 35(9):1-10.
- ZHU Yongyi, WANG Wenshi. Coring drilling technology in Well-1 (main shaft) of Songliao Scientific Drilling [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2008, 35(9):1-10.
- [12] 闫吉增. 红河油田地层可钻性研究与钻头优选[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2018, 45(6):63-66.
- YAN Jizeng. Research on the formation drillability and bit selection in Honghe Oilfield [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2018, 45(6):63-66.
- [13] 朱芝同, 伍晓龙, 董向宇, 等. 松辽盆地页岩油勘探大口径取心技术[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2019, 46(1):45-50.
- ZHU Zhitong, WU Xiaolong, DONG Xiangyu, et al. Large diameter coring technology for shale oil exploration in Songliao Basin [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2019, 46(1):45-50.
- [14] 罗冠平. 绳索取心钻进工艺在盐矿深部钻探中的应用研究[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2018, 45(6):8-13.
- LUO Guanping. Application research on wire-line core drilling technology for deep drilling in salt mine [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2018, 45(6):8-13.
- [15] 鄢泰宁, 孙友宏, 彭振斌, 等. 岩土钻掘工程学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2001:57-62.
- YAN Taining, SUN Youhong, PENG Zhenbin, et al. *Rock & Soil Drilling and Tunneling Engineering* [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2001:57-62.
- [16] 李大佛, 屠厚泽, 李天明. 金刚石、PDC钻头与工艺学[M]. 北京: 地质出版社, 2008:302-303.
- LI Dafo, TU Houze, LI Tianming. *Diamond & PDC Bits and Technology* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008:302-303.

(编辑 荐华)