

# 三牙轮钻头齿面结构对破岩效率的影响

侯季康 罗肇丰

(西南石油学院)

## 摘 要

本文叙述了极软到中硬地层三牙轮钻头齿面结构对破岩效率影响的研究方法,研究工作是用全尺寸钻头在地面钻头试验架上进行。作者根据试验钻头对不同岩石钻进时所测得的钻进参数、钻进速度和钻头的井底模式,结合它们的齿面结构,分析其对破岩效率的影响,找出各钻头齿面结构的优缺点,从而对现有国产钻头提出改进意见,并将所获得的认识用于新钻头的设计之中。本文叙述的研究方法也适用于中硬到极硬地层钻头。

## 前 言

牙轮钻头的齿面结构是影响钻头破岩效率的主要因素之一。近四年来,我们利用地面钻头试验架和一些测量仪器,初步进行了这方面的研究工作。在台上用全尺寸钻头对不同岩石作钻进试验,测定钻头钻进时的钻压、转速、排量、机械钻速、扭矩、牙轮平均转速和单位体积破碎功等数据。用不同厂家生产的同类型钻头在同一种岩石上钻进,通过对测得的这些数据和每只钻头的井底模式进行对比分析,找出各钻头齿面结构的优缺点,并分析其对破岩效率的影响,为国产钻头齿面结构设计提出改进意见。我们分别用了九只国产钻头和八只引进钻头作试验,即成都石油总机厂的镶齿滑动密封喷射式2、3、4、5型钻头,上海第一石油机械厂的镶齿滑动密封喷射式2、3型钻头,美国休斯公司的J11、J22、J33、J44、J55R、J77钻头,瑞德公司的HS51钻头,史密斯公司的F3钻头。共钻不同岩石200多块,试验所得数据和结论与钻头设计意图和使用情况基本一致。

## 实验装置和测试计算方法

钻进试验在地面钻头试验架上进行<sup>[1]</sup>,测试装置如图1所示。

### 1. 牙轮平均转速的测定

分别在三个牙轮上安装牙轮相位脉冲转换器,它与每一颗外排齿接触一次,就给予光线示波器一个电脉冲信号,由记录纸上的牙轮相位脉冲曲线可算出牙轮平均转速。

### 2. 机械钻速 $V_m$ 的测定

将钻柱随钻头钻进而产生的位移转换为滑动变阻器触头的位移,变阻器、稳压电源、光线示波器振子接在一个回路里,在示波器记录纸上可得到进尺——时间曲线。用多项式回归

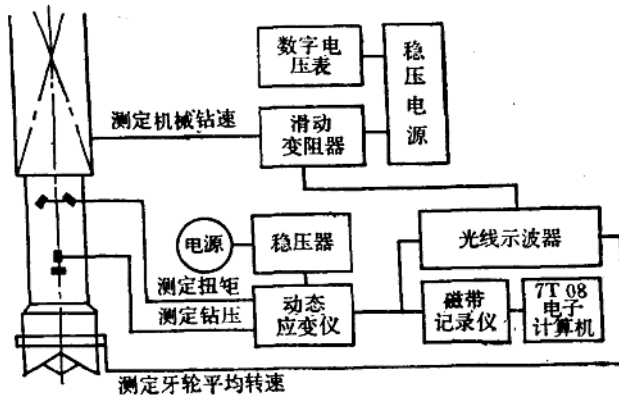


图1 测试装置示意图

求出机械钻速 $V_m$ 的计算式为:

$$V_m = \frac{3.6}{N} \times \sum_{i=1}^N \frac{0.063h_i^2 + 2.3h_i}{t_i} \text{米/小时} \quad (1)$$

式中  $h_i$ ——记录纸上一段进尺标高, 毫米;  
 $t_i$ ——记录纸上一段进尺标高对应的时间, 秒;  
 $N$ ——计算时所分段数。

### 3. 钻压 $P$ 与扭矩 $M$ 的测定

用电测应变法测定和记录钻头在试验架上钻进时的 $P$ 和 $M$ 动态变化值, 然后在专用电子计算机上处理, 先作平稳性和正态性检验, 判断过程均属平稳随机过程, 各钻头的振幅概率密度曲线符合正态分布。数据处理可求取 $P$ 和 $M$ 的均值、均方差值、概率密度函数等数字特征, 并对它们作谱分析。平均钻压 $\bar{P}$ 和平均扭矩 $\bar{M}$ 的计算式为:

$$\bar{P} = \frac{\varepsilon_p}{A_p} E F \quad (2)$$

$$\bar{M} = W \frac{E}{1+\mu} \cdot \frac{\varepsilon_M}{A_M} \quad (3)$$

式中  $E$ ——钢的弹性模量;  
 $F$ ——贴应变片处的横截面面积;  
 $\varepsilon_p, \varepsilon_M$ —— $P$ 与 $M$ 的应变均值;  
 $A_p, A_M$ ——测定 $P$ 与 $M$ 时的桥臂系数;  
 $W$ ——贴应变片处的抗扭截面系数;  
 $\mu$ ——钢的泊松系数。

### 4. 单位体积破碎功 $A_v$ 的计算

钻头破碎单位体积岩石所需能量为 $A_v$ , 它是衡量输入能量有效利用率的标志之一。

$$A_v = \frac{2\pi n \bar{M} + \bar{P} V_m}{F V_m} \quad (4)$$

式中 $n$ ——钻头转速;

F——井眼横截面面积。

## 齿面结构对破岩效率的影响

牙轮钻头的牙齿齿形、牙齿结构参数、牙齿的布置以及牙轮的布置等都对破岩效率有一定影响。钻头齿面结构合理，不仅 $V_m$ 高，而且在井底模式上也反映出破岩效果好。

### 1. 牙齿结构参数、齿数、移轴距及超顶距等对破岩效率的影响

钻头牙齿的齿形、齿高、齿径、齿数，牙轮的移轴距及超顶距等参数如能与所钻地层岩性相适应，破岩效率即高。一般软地层钻头的牙齿较高，齿径较大，齿数较少，移轴距和超顶距都较大，而硬地层钻头则相反。不过目前各钻头厂家生产的同类型钻头的这些参数差别也较大。因此，在相同钻进参数和水力参数条件下钻同一种岩石，不仅获得的 $V_m$ 不相同，而且牙齿的寿命也不相同。我们通过井底模式观察到它们有不同的破岩特点，再结合台架测定的数据进行对比分析，就不难发现它们破岩效率及牙齿寿命差别较大的原因。

我们分别作过三组同类型钻头的台架对比试验：第一组为三只极软到软地层钻头；第二组为四家钻头厂家生产的四只中软地层钻头；第三组为二只中等硬度地层钻头。本文仅以第一组钻头为例，介绍对比试验的研究分析方法。

第一组钻头所钻岩石均为软沙溪庙砂岩（岩石机械性质见附录1）。在钻头转速、钻压和排量基本相同的情况下，所测的 $V_m$ 值和井底模式如图2所示。

所测数据说明一号和三号钻头的 $V_m$ 较二号钻头高一些。三号钻头井底模式上的破碎坑虽然较小，但很深，坑数最多，故其 $V_m$ 较高。这些破碎特点与三号钻头牙齿直径小，齿尖角小，牙齿出刃较高的结构是对应的。它的牙齿直径比一号和二号钻头小2~4毫米，牙齿出刃高度比二号钻头高1.0~1.5毫米。此外，它的牙齿总齿数为99颗，而一号和二号钻头仅有68颗和75颗，故它的井底模式上破碎坑数最多。但三号钻头因超顶距和移轴距都比一号和二号钻头小（移轴距为5毫米）；所以它的井底模式上反映出牙齿滑动较小。一号钻头除排齿采用劈顶楔形齿保径外，其余各排齿均采用尖锐楔形齿。它的井底模式上反映出的特点是：破碎坑深而大，牙齿在井底的切向滑动和径向滑动都非常明显，破碎坑数目较少，岩石基本上都是被牙齿剪切刮挤掉的。出现这些破碎特点的原因是：虽然它的牙齿直径大，但齿尖角小，齿顶部分尖而长，牙齿出刃很高，故在软砂岩中吃入较深。另外它的超顶距大，移轴距大（为7毫米<sup>①</sup>），牙齿在井底滑动较大，能大块剪切刮挤岩石，故其破岩效率高， $V_m$ 也高。二号钻头除排齿采用劈顶楔形齿保径外，其余各排均采用瓢形齿。这种牙齿强度高，并有助于清除破碎坑中的岩屑<sup>[2]</sup>。该钻头井底模式上的破碎坑不如一号和三号钻头深，是因

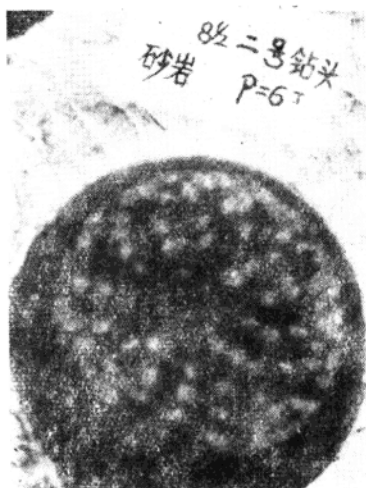
表1 钻屑尺寸对比表

钻头编号	钻屑厚度 毫米	钻屑面积 毫米 <sup>2</sup>
一号钻头	5~13	165~625
二号钻头	3~9	165~600
三号钻头	4~13	126~460

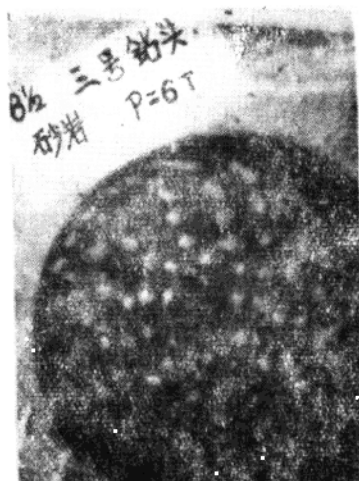
①为测量值，不解体钻头，用投影法测量。



$V_m = 17.3 \text{ 米/小时}$



$V_m = 10.5 \text{ 米/小时}$



$V_m = 18.0 \times \text{/小时}$

图2 三只极软到软地层钻头的井底模式

其齿顶部分比前两只钻头宽。但该钻头因超顶距和移轴距大，故从井底模式上也可看出牙齿的切向和径向滑动均较明显，岩石主要是被牙齿大块剪切刮掉的，现场井下试验结果，普遍也是一号和三号钻头的 $V_m$ 较高，二号钻头的 $V_m$ 较低。

表1是上面三只钻头在相同钻压、转速、排量下作台架试验，钻进沙溪庙砂岩时所收集到的钻屑尺寸，可看出一号和三号钻头牙齿吃入岩石较深，使钻屑厚度较大，一号和二号钻头牙齿在井底滑动较大，使钻屑面积较大。这与上述齿面结构及井底模式的分析是一致的。

由上述分析可见，三只钻头的齿面结构不同，其破岩特点也不相同。然而齿面结构参数的确定，不仅要利于提高破岩效率，还必须保证牙齿强度，否则会因牙齿强度不够而出现钻头寿命低、总进尺低、钻井成本高等问题。81年在四川试用八只三号钻头的统计材料表明，

平均碎断掉齿数占总齿数的67%，而一号和二号钻头使用时碎断掉齿数都较少。另外近两年的钻头井下使用资料还表明，二号钻头的平均进尺和寿命都约为三号钻头的两倍，一号钻头的平均进尺约为三号钻头的2.5倍，寿命也约为它的两倍。

三号钻头碎断掉齿严重的主要原因之一是它的牙齿直径小，齿尖角小，牙齿强度低。经理论计算一号和二号钻头牙齿的抗弯强度为三号钻头的1.5~2.3倍。原因之二是三号钻头的外排齿没有采取保径措施，牙齿直径小，牙齿出刃又太高，它的齿刃高与齿埋深的比值为1，而一号和二号钻头外排齿的齿刃高的齿埋深的比值为0.5，故三号钻头外排齿碎断掉齿情况更为严重。上述统计的钻头，平均外排齿碎断掉齿数占外排齿数的80%。原因之三为三号钻头牙齿所受水平力比一号和二号钻头的更大。钻头钻进时，测量接头所测钻压和扭矩的应变—时间曲线都是随机曲线，通过专用电子计算机可对钻压和扭矩作谱分析。图3是这三只钻头的扭矩幅度谱图（钻压为13.5吨，钻头转速为60转/分）。幅度谱图表示扭矩的幅度随

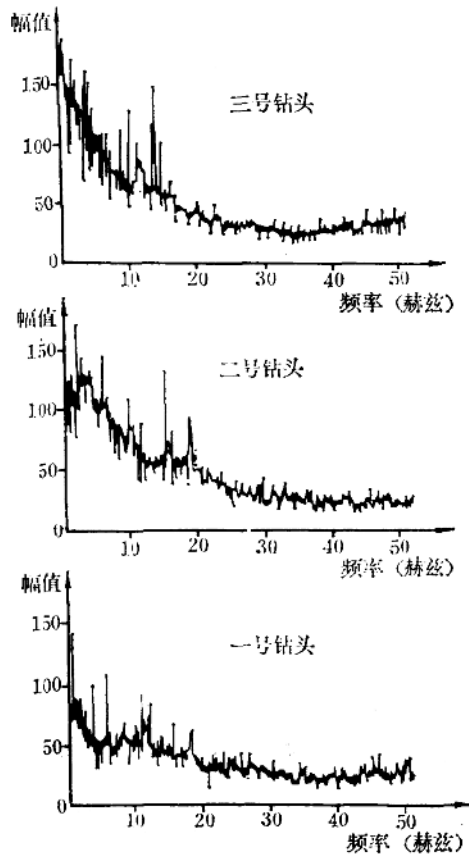


图3 三只极软到软地层钻头的扭矩幅度谱图

频率的分布情况，可用它来判断扭矩在各频率成分能量的强弱，即能判别钻头牙齿所受水平力的情况。从图中可看出，三号钻头的扭矩频谱幅值不仅远远高于二号钻头，而且基本上也高于一号钻头，曲线上的峰值也是三号钻头最高。这说明三号钻头牙齿所受水平力最大，它的牙齿强度低，受力又复杂，钻进时碎断掉齿现象自然会严重。

目前三号钻头已由钻头制造厂家作了改进，牙齿直径增加2~3毫米，降低了部分齿圈的牙齿出刃高度。特别是外排齿，齿径增加3毫米，牙齿出刃高度降低了1.5毫米，齿刃高与齿埋深的比值降低到0.67。同时，在钻头的其它结构上作了相应的改进，这样不仅大幅度地降低了牙齿的碎断率，增长了钻头寿命，更主要是提高了钻头使用中后期的机械钻速，使平均钻速增加，平均进尺提高，钻井成本降低（见附录2）。

### 2. 齿圈布置对破岩效率的影响

过去我们仅用井底遮盖系数和井底击碎图来反映齿圈的布置。但钻头钻进时，齿痕圈在井底怎样分布的、又怎样分布才较为合理这一问题没有解决。我们用齿痕圈距（指井底模式上相邻两齿痕圈破碎坑中心之间的平均距离）来反映齿痕圈在井底的分布情况。各厂家生产的同类型钻头不仅齿痕圈距不一样，而且变化规律也不一样。这在一定程度上影响了它们的破岩效率。例如图4中的数据是从适用于中软地层的四号、五号和六号三只钻头的井底模式上测出的齿痕圈距。可看出由井底外缘到中心，五号和六号钻头的齿痕圈距越来越大，而四号钻头除第二、三圈之间的距离特别小外，基本上是靠外的几圈齿痕圈距较大，靠井底中心的几圈齿痕圈距较小。这种差别对它们的破岩效率有一定影响，因为牙轮钻头形成的井底都是外

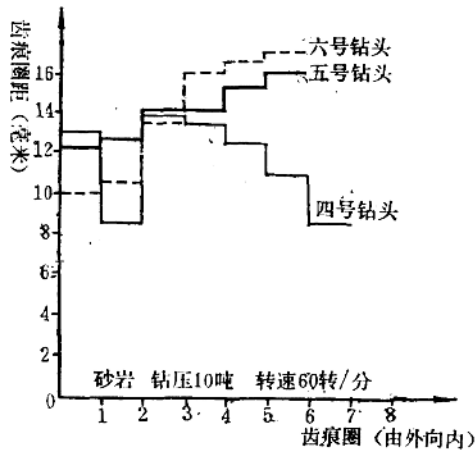


图4 井底模式上的齿痕圈距图

缘较低，中心部分呈锥状凸起，外缘岩石因受到周围岩石的“约束作用”，岩石强度较高，而中心锥状凸起的岩石，因四周没有岩石包围，岩石强度较低，在牙齿径向滑移对岩石产生的作用力和牙齿的脉动冲击力的作用下，四周的裂纹易向中部扩展，故井底中心部分齿痕圈之间的岩石更易破碎。此外，三牙轮钻头的结构，使靠井底中心牙齿的径向滑移速度大于靠外缘牙齿的径向滑移速度<sup>[3]</sup>，这是引起岩石更易破碎的又一重要原因。因此，钻头齿圈布置（在井底击碎图上），由外缘到中心，齿圈之间的距离由小到大更为合理。

### 3. 齿距对破岩效率的影响

同一个齿圈上，牙齿的布置对破岩效率的影响也较大。因此，合理地确定齿距也是一个重要问题。过去设计钻头时，已经认识到齿距的确定应尽量使牙齿接触井底时不落入旧的破碎坑中，但设计计算公式是按牙轮在井底作纯滚动的情况来考虑的，没有考虑到牙齿在井底的切向滑动对确定齿距有影响。钻头钻进时，由于牙齿在井底有滑动，实测的牙轮平均转速

远小于按纯滚动计算的牙轮转速（如表 2 所示），所以齿距的计算公式应考虑牙齿的切向滑移量。我们建议用下式来计算齿距：

$$\frac{L}{t_z + \epsilon} + K + e \quad (5)$$

即 
$$t_z = \frac{L}{K + e} - \epsilon \quad (5a)$$

式中  $L$  —— 钻头转一周，某齿圈在井底滚动的圆的周长；

$t_z$  —— 该齿圈的齿距；

$e$  —— 该齿圈牙齿在井底的切向平均滑移量；

$K$  —— 正整数；

$e$  —— 真分数（根据井底模式和电子计算机计算， $e = 0.3 \sim 0.7$ ，牙齿接触井底时不落入旧破碎坑中的概率较高）。

该式的意思是钻头转一周，某一齿圈在井底滚动的圆的周长  $L$  与该齿圈的齿距  $t_z$  加上该圈牙齿在井底的切向平均滑移量  $e$  之比不为整数。

表 2 牙 轮 平 均 转 速

钻 头 编 号	钻 压, 吨	实测的牙轮转速, 转/分			按纯滚动计算的牙轮转速 转/分
		1#	2#	3#	
一 号 钻 头	13.3	63.4	60.0	68.8	94
二 号 钻 头	13.6	66.7	62.6	65.6	95
三 号 钻 头	13.5	67.3	69.1	65.7	93
四 号 钻 头	15.1	66	65	67	95
五 号 钻 头	14.5	66.6	69	65	96
七 号 钻 头	14.1	63	70	69	95

注：岩石为嘉陵江石灰岩；钻头转速为60转/分。

在文献〔3〕中，导出了牙轮上一点  $M$  对井底的切向线速度  $V_{TM}$  的计算式。我们由台架试验可测出钻头角速度  $\omega_1$  和牙轮角速度  $\omega_2$ ，因此某齿圈上的一颗牙齿，从接触井底到离开井底这段时间  $T$  内的  $e$  应为：

$$\begin{aligned} \epsilon &= \int_0^T V_{TM} dt \\ &= \sum \left[ \rho_M \omega_1 t - \frac{j_M}{\rho_M} (l \sin \omega_2 t + S \cos \beta \cos \omega_2 t - S \cos \beta) - \frac{j_M^2 \omega_2 t \cos \beta}{\rho_M} \right] \quad (6) \end{aligned}$$

式中  $\rho_M$  ——  $M$  点到钻头轴线的距离；

$j_M$  ——  $M$  点到牙轮轴线的距离；

$l$  —— 齿圈中心到钻头轴线的距离在牙轮垂直轴面上的投影（牙轮垂直轴面为过牙轮轴线并平行于钻头轴线的平面）；

$S$  —— 牙轮移轴距；

$\beta$  —— 钻头轴线与牙轮轴线的夹角。

用电子计算机，按(6)式可算出钻头上每圈牙齿在井底的  $e$ ，代入(5)式，可求出  $(k + e)$  值，即可判断该圈牙齿的齿距是否合理。若不合理，可调整齿数或适当改变齿圈半

径和牙齿到钻头轴线的距离，再用(6)式和(5)式进行计算，再次判断。

#### 4. 外排齿的破岩方式

从表 3 的五只钻头钻出的井底模式上，测量外排齿垂直破岩的井径 $D_1$ 与外排齿最大直径处刮切出的井径 $D_2$ （见图5），并列入对比表3中。

表 3

钻头类型	钻头直径 毫米	岩性	$D_1$ , 毫米	$D_2$ , 毫米	刮切量占 总量%①	移轴距, 毫米
史密斯公司 8-1/2F3	215	砂岩	214	218	3.6	6.5
		石灰岩	213.5	218	4.1	
休斯公司 8-1/2J44	215	石灰岩	214.5	218	3.2	4
成都 8-1/2XHP4—1	217	砂岩	214.5	218	3.2	4
		石灰岩	214.5	218.5	3.6	
川M—9X	216.5	石灰岩	216.5	217.5	0.9	0
休斯公司 8-1/2J77②	214.5	石灰岩	214	217	2.8	很小

①外排齿最大直径处刮切井壁岩石的水平投影面积占井眼总面积的百分数。

②J77 是已用 174 小时的旧钻头，没测移轴距。

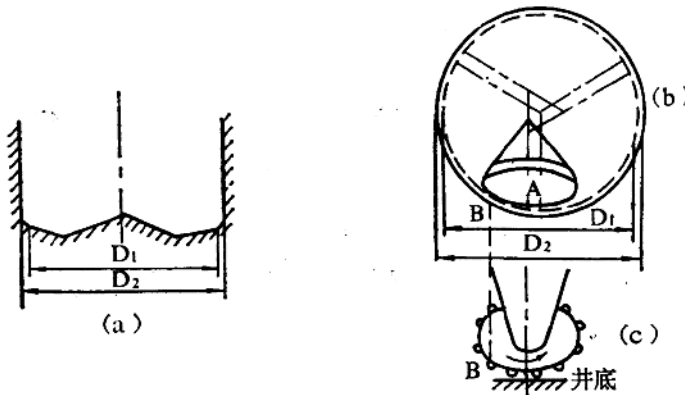


图 5 移轴钻头与井径的关系图

由表 3 及图 5 可以看出 $D_2 > D_1$ ，这是由于钻头移轴后，井径最大位置不在外排齿与井底接触的位置 A，而是在位置 B，所以有一环形面积 $\frac{\pi}{4}(D_2 - D_1)^2$ 是靠外排齿的外缘由位置 B 运动到位置 A 时破碎的。这时牙齿对井壁的破碎方式仅是刮切破碎（从图 6 中可清晰地看到外排齿刮切井壁的痕迹），而牙齿在位置 A 时对井底是作冲击压碎和剪切刮挤破碎。因此，在钻研磨性较大的岩石时，这种情况不仅影响 $V_m$ ，而且极易磨损外排齿外缘。在钻研磨性较大的地层时，常采用两种方法，一是采用牙轮不移轴的钻头，可减少 $D_2$ 与 $D_1$ 的差值，但这使牙齿在井底的滑动减小，不利于全面破碎井底岩石。另一种方法是保持一定的牙轮移轴量，外排齿采用牙齿刃高度较短，齿刃高和齿埋深的比值较小，强度和抗磨性较大的保径齿。这样既可减小钻头直径的磨损，减少外排齿的碎断掉齿数，改善轴承受力状态，又利于提高 $V_m$ 。



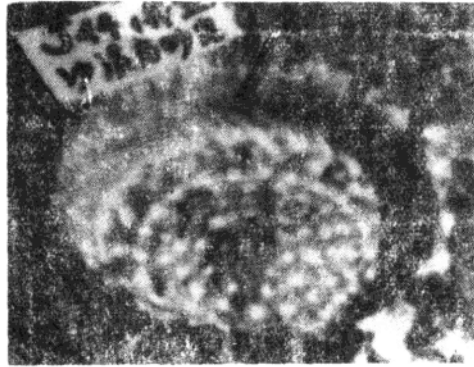


图6 外排齿刮切井壁痕迹

## 结 论

1. 国产镶齿滑动密封喷射式1、2、3型钻头, 应当适当加大移轴距和超顶距, 以增加牙齿在井底的滑动, 更利于大块剪切刮挤岩石, 提高破岩效率。在加大移轴距和超顶距后, 注意必须同时加大牙齿直径, 增加牙齿强度, 并采用较小的齿刃高和齿埋深的比值及提高固齿能力的措施。

2. 齿圈的布置(在钻头井底击碎图上), 由钻头外缘到中心, 齿圈之间的距离由小到大更为合理。

3. 确定齿距时(特别是极软到中硬地层钻头), 应该计入牙齿在井底的滑移量, 才能使牙齿接触井底时不落入旧的破碎坑中, 以利于提高破岩效率。

4. 国产镶齿滑动密封喷射式钻头的外排齿都应采用牙齿出刃较低, 齿刃高与齿埋深的比值较小, 碳化钨含量较高, 牙齿强度和抗磨性都较强的保径齿。

## 参 考 文 献

〔1〕罗肇丰、侯季康、黄春中, “三牙轮钻头台架试验与井底模式分析,” 西南石油学院学报, 1981年第4期。

〔2〕U.S. Patent, 4, 108, 260 Aug. 22, 1978.

〔3〕马德坤、杨世良, “牙轮钻头运动学的新研究”, 国际石油工程会议论文集(一), 石油工业出版社, 44—56, 1982。

## 附 录

附表1 岩石机械性质

岩 性	层 位	平均硬度 公斤/毫米 <sup>2</sup>	平均塑性系数
砂 岩	沙 溪 庙	93	3.2
石 灰 岩	嘉 陵 江	126	2.0

附表2 三号钻头改进前后井下钻进指标对比表

钻头编号	统计数量, 只	地层岩性	平均进尺 米/只	平均纯钻时间 小时/只	平均机械钻速 米/小时	平均碎断掉齿率 %
三号钻头 8-1/2英寸	8	重庆统红色	199.73	55:42	3.59	67
改进三号钻头 8-1/2英寸	10	泥岩夹砂岩	373	64:05	5.82	17.8

注: 改进三号钻头在现场使用时, 有几只钻头因操作不稳, 蹩跳钻严重, 这几只钻头的碎断掉齿率仍较高, 故10只钻头的平均值不够低。