

高等学校教学用书

油 井 工 程

中 册

石油院校教材编写组编



中国工业出版社

目 录

第三篇 钻 井 技 术

第七章 钻进技术	1
第1节 钻进技术参数对机械钻速的影响	2
第2节 钻进技术措施的制定	13
第3节 钻头的合理使用	24
第4节 复杂地层条件下的钻进技术	34
第5节 钻开生产层	42
第6节 起下钻工作的小型机械化	43
第八章 涡轮钻井	53
第1节 涡轮钻进过程的综合特性	54
第2节 涡轮钻井时能量传递的特点	58
第3节 涡轮钻具的选择	65
第4节 涡轮钻进技术参数的确定	72
第5节 涡轮钻具的合理使用	80
第九章 电动钻井	84
第1节 电动钻具的结构及其附属设备	84
第2节 电动钻井的优越性	88
第3节 无杆电钻	97
第4节 新型电动钻具	94
第十章 斜向钻井	97
第1节 斜向钻井的用途	97
第2节 在钻垂直井时产生井斜的原因及井斜的基本规律	99
第3节 人工造斜	103
第4节 斜向井的井身剖面及其制定	117
第5节 斜向钻井的技术特点	124
第6节 斜向钻井的应用	126
第十一章 取心钻井	131
第1节 钻井取心	131
第2节 构造钻井取心与筒式取心	143
第3节 井壁取心	154
第十二章 气体钻井	157
第1节 气体的选择及气量、气压的确定	157
第2节 空气钻井设备	159
第3节 空气钻井技术	162
第十三章 复杂情况处理及事故解除	164
第1节 井漏与堵漏	164
第2节 井喷与压井	167
第3节 落物与打捞	170
第4节 卡钻与解卡	173
参考文献	179

第三篇 鑽井技术

第七章 鑽进技术

鑽进是鑽井过程中的基本工作，是它的重要组成部分。鑽进是指从地面开始，直到鑽穿目的层为止的全部工作。只有实现了鑽进，才能取得地下的地质資料、打开油气层，达到油气田勘探与开发的目的。

为了加速油气田的勘探与开发工作、改变我国石油工业的落后面貌，必須多打井、快打井、打好井。因此，在鑽进过程中必須努力爭取鑽井工作的高速度和高水平。

然而，不仅如此。

由于鑽井本身具有的特点所决定，在鑽进速度与鑽井质量之間，存在着特別密切的关系。鑽井质量的高低，在很大程度上取决于鑽进速度。鑽进速度愈高，鑽井质量愈有保証；井眼质量愈好，鑽进过程会愈順利，因而鑽进速度也才会愈高。

鑽进时井眼中存在的洗井液对井壁岩石同时产生两种相互对立的作用：一是保护与稳定井壁；一是浸泡与破坏井壁。这两种作用随着裸眼时间的加长将互相轉化。一般說来，時間愈长，破坏作用也愈大。鑽进時間延长，井下的复杂情况得以逐步发展扩大，泥浆性能难于保持，井眼质量变坏。結果，一方面使鑽进过程愈拖愈长，另一方面又为完鑽以后的測井和固井工作带来很大的困难，严重地影响完井质量。还必须特別指出，如果鑽开生产层的速度不高，油层长期受洗井液的浸泡，这必将减低試油成效、延长試油期限、影响油井的投产時間。这种油井，甚至在投产之后，也还可能长期不能正常生产。

此外，在鑽进过程中，地面設備、鑽具以及各种器材不断地被磨損与消耗。鑽进時間拖长，鑽井成本将大大提高；設備損坏严重时，还会給安全生产带来很大威胁。

从鑽井本身的这些特点出发不难看出，为了得到合乎要求的井眼、順利地取得地下地质資料、保証优等的完井质量、降低鑽井成本，必須千方百计地爭取時間，提高鑽进速度，实现快速鑽进。实践証明，快速鑽进是带动鑽井工作水平全面提高的中心环节。

但是，单纯地追求速度是达不到目的的，在鑽进过程中必須时刻地注意质量与安全，否則不能得到整个鑽进过程的高速度。在任何一个阶段或任何一項工作中，如果忽視了质量与安全，虽然可能得到暫时的較高的速度，但是往往会引起相反的后果。例如，在淺井阶段忽視了防斜，当井加深后，就可能需要花費更多的時間进行糾斜；而糾斜措施不当时，又会带来其它难于預計的結果。

由此可見，在鑽进过程中，只有爭取高速才能保証优质，并进一步促进鑽速提高；而爭取高速度又必須以保証质量和安全为前提。鑽进过程的快速与优质是相輔相成、互相影响、互相促进的，二者缺一不可。

为了实现快速鑽进，必須深入地研究鑽进过程中的各种工艺和技术問題，不断地总结和提高生产实践中的先进經驗，作好以下三方面的工作。

首先，井眼加深是借助于鑽头以机械方式連續地破碎岩石而实现的。因此，必須从

具体的钻井地质条件和地面设备条件出发, 选择适当类型与尺寸的钻头, 制定积极的钻进技术措施, 合理地使用钻头并充分发挥其威力, 以便达到提高岩石破碎效率的目的。这是实现快速钻进的基本方面。

其次, 由于钻头破碎岩石的工作, 要连续地进行到几百、甚至是几千米的深处, 所以一定会遇到各种不同性质的岩层。为了保证快速钻进, 开钻前必须加强调查研究, 在思想上、组织上和技术上, 对可能出现的复杂情况做充分准备; 而在钻进过程中, 则必须运用地层的变化规律, 主动地采取措施, 战胜复杂地层, 及至安全钻穿目的层。

最后, 由于目前钻井方法所具有的特点, 要完成几千米井深的钻进, 必须不断地加长钻柱、更换新钻头, 所以要进行大量的接单根和起下钻工作。不断改善操作方法, 充分利用设备能力, 逐步采用各种机械化和自动化装置(包括小型机械化设备), 是提高这部分工作的效率、缩小其在钻进时间中所占的比重, 从而加速钻进过程、实现快速钻进的重要手段。

钻头的工作效率具有特别重大意义。高的钻进效率必须以相应的钻头工作效果为前提。同时, 钻头的工作效果, 又往往是一系列钻进技术措施的综合作用的集中反映。

通常以平均机械钻速 $V_{\text{纯}}$ 和每只钻头的进尺数 H 作为钻头的基本工作指标。前者说明进尺速度的高低; 后者说明钻头使用寿命的长短。这可以用公式表示如下:

$$V_{\text{纯}} = \frac{H}{t_{\text{纯}}} \quad (7-1)$$

式中 $V_{\text{纯}}$ ——全井的平均机械钻速, 或简称机械钻速, 米/小时;

H ——总进尺数, 米;

$t_{\text{纯}}$ ——共计纯钻进时间, 小时。

但是在目前, 一口几百、以至几千米深的井的全部进尺, 还不是一、两只钻头所能完成的。在钻进过程中, 钻头逐渐被磨损, 故必须起下钻具、更换钻头。因此, 无论平均机械钻速, 或者每只钻头的进尺数, 均不足以说明钻头工作的最终效果。就一口井来说, 可能平均机械钻速很高, 但每只钻头的进尺很少, 结果钻头用量大。更换钻头的起下钻时间、以及伴随而来的循环泥浆及划眼时间必然增加; 相反地, 也可能钻头进尺很高, 钻头用量小, 而平均机械钻速却是不高的, 结果纯钻进时间大大增加。在上述两种情况下, 钻进的效率, 都不会最好。因此可以看出, 有必要建立包括在不同井深条件下更换钻头所需要的时间在内的速度概念, 即平均行程钻速, 以作为钻头的又一工作指标。其数学表示式如下:

$$V_{\text{行程}} = \frac{H}{t_{\text{纯}} + t_{\text{起下}} + t_{\text{其它}}} \quad (7-2)$$

式中 $V_{\text{行程}}$ ——全井的平均行程钻速, 米/小时;

$t_{\text{起下}}$ ——更换钻头所用的全部起下钻时间, 小时;

$t_{\text{其它}}$ ——接单根、换钻头、划眼时间, 小时。

第1节 钻进技术参数对机械钻速的影响

在钻进过程中, 钻头上的压力和钻头的转动是引起井底岩石内部应力发生变化, 并使岩石发生破碎的最直接的因素。因此钻压和转速是钻进过程中影响钻进速度的主要参

变数。此外，钻井时，钻头是在几百米、以至数千米的井下破碎岩石的。井底的空间有限，为了使钻进得以连续不断地进行，就必须排除岩石破碎后产生的岩屑，使井内保持清洁的破碎表面。否则，岩屑大量地堆积在井底，钻头破碎岩石的工作受到阻碍，甚至使钻进过程中断。生产实践证明，井眼的清洁程度对钻头的工作效率有重大的影响，正常的洗井工作，是保证钻头在井底发挥其最大威力的重要条件。

下面我们分别进行讨论，找出它们对钻进过程的影响，以及在此过程中它们彼此间的相互联系和相互制约性。

钻压对钻进速度的影响

1. 刮刀钻头钻进时的情况

目前使用于各种软岩石和各种高塑性泥岩中的刮刀钻头，主要是依靠切削或刮挤作用破碎岩石的。

钻进时刀翼每旋转一圈所破碎岩石的深度 δ ，因所加的压力不同，可分为三种情况（图7-1所示）：开始加压时刀翼工作面下的岩石被压缩，表面层的孔隙减小，破碎深度 $\delta = f(P)$ 呈直线关系；继续增加压力，则出现剪应力面，破碎深度 δ 增加，使 $\delta = f(P)$ 呈曲线（ ab ）段；压力继续加大，超过某一极限值 $P_{\text{极}}$ 后，每转破碎深度 δ 迅速增加，岩石破碎效果显著提高。这里所说的压力极限值 $P_{\text{极}}$ 大体上与以压模测得的岩石硬度数值相应。

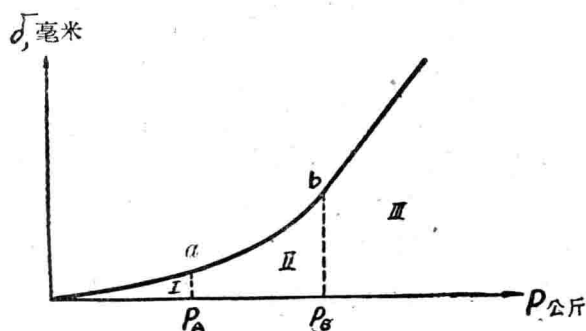


图 7-1

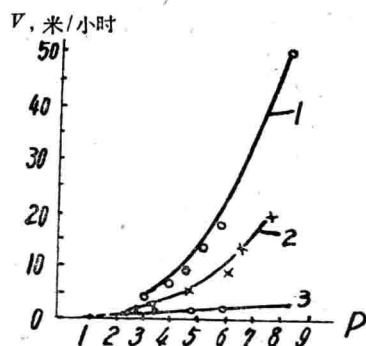


图 7-2 在泥岩中使用刮刀钻头时
钻速与钻压的关系

1- $\sigma=50$ 公斤/厘米²， $n=142$ 转/分，
 $Q=45$ 公升/秒；2- $\sigma=175$ 公斤/厘米²，
 $n=150$ 转/分， $Q=23$ 公升/秒；3- $\sigma=$
270公斤/厘米²， $n=142$ 转/分， $Q=18$
公升/秒

使用刮刀钻头钻进时的规律是比较简单的。图7-2中列出了泥岩中使用刮刀钻头时钻速与钻压的关系曲线 $V=f(P)$ ，用以作为这类情况的代表。

根据图7-2中具有代表性的资料进行分析，可以得出以下结论：

1) 钻速与钻压的关系 $V=f(P)$ 可以是直线，也可以是曲线，即 $V=A \cdot P^m$ ， $\frac{P}{F_t} \leq \sigma$ 时主要为表面破碎（ P 为钻压， F_t 为钻头的工作底面积， σ 为岩石抗压入强度）， $m=1$ ；

$\frac{P}{F_t} > \sigma$ 时为体积破碎, $1 < m < 3$ 。

2) 井底清洗状况对破碎过程影响极为显著: 洗井液量充分、岩屑及时被排除时, m 约等于 3, 井底清洗不良, 岩屑堆积时, $m < 3$, 甚至 $m < 1$ 。

由此可见, 取决于钻压与洗井条件配合的指数 m 通常是在 1 与 3 之间。

3) 在正常条件下, 钻压增加, 钻速即相应地提高, 不存在临界压力数值。但在实际工作中, 刮刀钻头上的压力是受到钻头、钻柱强度以及转盘马力的限制的, 不能无限制地增加。

在钻进过程中, 随着时间的增加, 刀翼工作底面逐渐变钝, 支承面积扩大, 因而接触压力下降, 使钻速不断减小。钻头的磨损主要是由于岩石具有不同的研磨性所引起的。为了说明钻头磨损对钻进速度的影响, 我们以钻头每工作一小时, 工作表面所增加的数值 θ 厘米²/小时来估计岩石的研磨性。

综合上述, 可以说在钻进过程中钻速 V 的变化, 取决于钻压 P 、岩石强度 σ 及钻头工作表面积(钝度), 其关系如下式:

$$\frac{dV}{V} = m \frac{dP}{P} - m_1 \frac{dF}{F} - m_2 \frac{d\sigma}{\sigma}$$

式中 m 、 m_1 及 m_2 为与岩石性质及井底清洁条件有关的数值。

就該式积分, 可得:

$$V_t = \frac{CP^m}{\sigma^{m_2} F_t^{m_1}}$$

式中常数 C 是考虑与钻进速度有关的因素, 如钻头、转速、刀翼数目等。

由实验分析得知, 对所有岩石来说, 其强度 σ 的指数 $m_2 = 1$; 刀翼工作底面积 $F_t = F_{初} + \theta t$ ($F_{初}$ 为初工作底面积)。

由此, 刮刀钻头钻进时, 钻速的基本关系式为:

$$V_t = \frac{CP^m}{\sigma^{m_2} (F_{初} + \theta t)^{m_1}}$$

2. 牙輪钻头钻进时的情况

牙輪钻头使用于比较坚硬的岩石, 其在井底破碎岩石的过程比刮刀钻头要复杂得多。这是由于牙輪钻头工作时, 不象刮刀钻头那样接連不断地切削井底岩石, 而主要是以压入形式进行部分的破碎, 以致使井底凹凸不平; 牙齿吃入岩石具有冲击的性质, 使岩石在破碎之前即出现许多微裂缝; 由于牙齿在同一地方重复作用的结果, 往往使岩石在载荷小于其强度极限的条件下破碎, 即疲劳破碎。所有这些都是使牙輪钻头破碎岩石的过程复杂化的因素。

还必须指出, 这些影响岩石破碎的因素, 彼此之间是相互联系的, 一个因素的改变, 必然引起其它因素的变化, 结果使问题更加复杂。到目前为止, 我们还只能根据钻进时所得到的综合效果, 对其中几个主要因素, 进行一般的估计; 由于岩石破碎问题研究得还不够全面, 指望利用现有的数据和公式对某一过程进行破切的计算, 还是办不到的。

使用牙輪钻头钻进时, 钻压对于钻速的影响具有自己的特点。根据充分的生产实践资料及实验数据, 可将牙輪钻头钻进时钻速与钻压的关系 $V = f(P)$ 归纳入图 7-3 中的几

种情况。

一般情况下，钻进速度随钻压增加而增加，但存在一临界钻压数值。临界值的存在，主要是由于钻压增加有可能使钻头的齿全部吃入岩石，此后钻压继续增加，牙齿的吃入深度也不会再有很大改变；有时反而会引起钻头的泥包，使钻速下降。

临界压力的大小取决于下列条件：

1) 岩石的物理机械性质，岩石的抗压入强度愈大，临界值愈高；

2) 井底岩屑的清洗程度，井底愈清洁，临界压力值愈高；

3) 钻头的类型和尺寸也影响钻压的临界数值，例如当岩石性质相同时，齿高愈大，则临界压力也愈大。

牙轮钻头钻进时，钻速与钻压的关系也遵循下列关系式： $V = A \cdot P^m$ ，取决于钻压的绝对数值和岩石的性质指数 m 在1与3之间变化，现以曲线1为例加以说明如下。

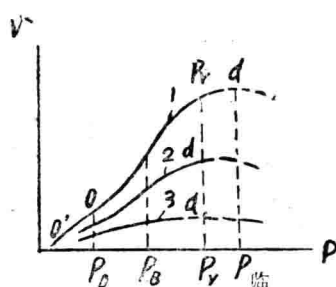


图 7-3 牙轮钻头钻进时，钻速与钻压的关系

钻压从零增加到 P_0 时， $\frac{P}{F} \leq \sigma$ ， $m=1$ ；钻压从 P_0 增加到 P_d 时， $1 < m < 3$ ，对于坚硬岩石， $1.25 \leq 2$ ，对于泥岩层 m 数值较高，但不超过3。钻压继续加大，钻速上升速度缓慢(ab段)，接近 $P_{极}$ 时，钻速不再增加。指数 m 与钻头类型有密切的关系，钻头工作表面的几何形状与所钻岩石的性质愈相适应，则每转的破碎深度愈大， m 值也愈高。

正如使用刮刀钻头一样，井底的清洁程度对钻速有很大的影响。井底不清洁，有岩屑存在时，指数 m 的数值总会下降，甚至小于1。图中曲线1是清洗条件良好，岩屑能够及时排除的情况，在这种理想的条件下压力增加，钻速显著上升；曲线2是洗井工作基本正常，而井底积有少部分岩屑的情况，这是实际工作中最常遇到的；如果洗井工作极不正常，井底堆积大量的岩屑，则正常钻进将受到阻碍，增加钻压并不能使钻速有很大的提高，如果有钻头泥包现象，钻速反而会迅速地下降，如曲线3所示。

当钻头转速很高，特别是钻压不足时，井底岩石只能是表面破碎。这种情况在硬岩石中是经常遇到的。在表面破碎的情况下，可以认为，牙齿每冲击一次，岩石的破碎深度与转速无关，岩石的破碎速度与转速成正比。如果钻进时，钻压和转速均保持不变，

则钻进速度仅仅受钻头磨损的影响(正常的洗井条件)。此时，钻进速度的变化，将与时间成正比，而与磨损系数成反比，即：

$$\frac{dV_t}{V_t} = - \frac{dt}{\theta_t}$$

积分得

$$V_t = V_0 e^{-\frac{t}{\theta_t}} \quad (7-3)$$

式中 V_0 ——钻头未磨损时的初速度；

θ_t ——磨损系数，即钻速下降 e 倍所需的时间。

磨损系数 θ_t 取决于岩石的研磨性质、钻头的耐磨能力

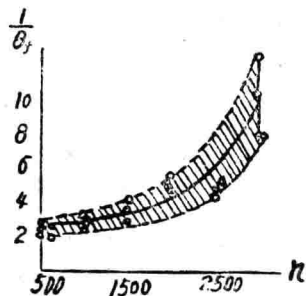


图 7-4 $\frac{1}{\theta_t}$ 与 t 的关系曲线

及钻进技术参变数。由实验的结果得知： $\frac{1}{\theta_r}$ 大致与钻压 P 成正比； $\frac{1}{\theta_r}$ 随轉数增加而变大，并且变化的速度比轉数的增加要快，图7-4中的数据是很好的说明。

鑽头旋轉速度对鑽进速度的影响

除去钻压之外，鑽头的旋轉速度是钻进过程中影响巨大的又一活跃因素。轉速的改变，往往影响到整个岩石的破碎过程。

使用刮刀鑽头时，旋轉速度增加，則切削速度增加，因而使钻速提高。从破碎岩石角度看，不存在轉数的临界值。但是考虑到钻柱的强度、鑽头的寿命以及轉盘功率的限制，实际上鑽头轉数是不能任意加大的。

牙輪鑽头钻进时，随着轉速的增加，单位時間內牙齒冲击岩石的次数增多，冲击速度加快，对提高钻进速度有积极意义。但是随着轉速的增加，牙齒与岩石接触時間縮短，使每轉一圈的岩石破碎深度下降，钻速相应变緩。根据岩石性质、鑽头压力等条件，正确地选择鑽头轉数，使上述矛盾得到統一，是提高钻速的有效措施。

当压力不大($\frac{P}{F} < \sigma$)时，井底为表面破碎，轉数提高，钻速上升。此时钻速的变化主要决定于单位時間內牙齒冲击岩石的次数，而与冲击速度(动载荷)关系不大。使用牙輪鑽头($\phi 118$ 毫米)进行試驗的结果証明，钻速正比于鑽头旋轉速度，当轉数达到4500轉/分时，仍未发现其极限数值。在表面破碎的情况下，可以认为实际上不存在临界轉数值。

在使用牙輪鑽头时，为了取得高的破碎速度，必須使鑽头上的压力大于岩石的抗压入强度，保証岩石的体积破碎，此时岩石的破碎規律要复杂得多。

实验証明，在体积破碎的条件下，鑽头每轉一圈岩石的破碎深度和牙齒与岩石接触的時間长短有关。在旋轉鑽井中，这个時間是由旋轉速度 n 来决定的。为了使岩石的变形和破碎能够进行到底，必須使鑽头工作面与岩石有足够的接触時間。轉数提高，接触時間縮短，作用力在每一瞬間停留的時間不够长，在变形和破碎进行到底之前就撤走了。因而使鑽头每旋轉一周的破碎深度，随着轉数的增加而下降。使用牙輪鑽头钻井时，由于時間因素的影响，当轉数增加时，破碎速度的提高低于轉数提高的速度。

图7-5中列出了三牙輪鑽头在大理岩石上钻进时，鑽头每轉一圈的破碎深度与轉数在半对数座标上的关系曲綫。对于其它类型的鑽头，也得到了相似的关系曲綫。从图7-5中不难得出 $h=f(n)$ 的关系，如下式：

$$h = h_0 + C(1 - k \lg n).$$

h_0 相当于载荷 P_0 时的破碎深度。当 $P \leq P_0$ 时，破碎深度不决定于轉数，破碎过程属于表面研磨的性质。当 $P > P_0$ 时，同时发生两种破碎过程，即表面破碎和体积破碎的过程。系数 C 决定于钻压、岩石的性质以及鑽头的几何形状。常数 k 决定于破碎深度 h 与轉数 n 的关系。

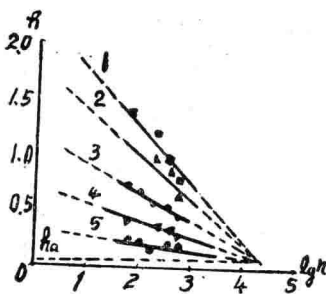


图 7-5

1— $P=424$ 公斤/厘米²；2— $P=339$ 公斤/厘米²；3— $P=254$ 公斤/厘米²；4— $P=170$ 公斤/厘米²；5— $P=95$ 公斤/厘米²

k 值对于不同的岩石是不相同的,例如花岗岩 k 为0.26,大理岩为0.25,白堊为0.38。

常数 k 对于大理岩和花岗岩几乎相同,而白堊的 k 值却大很多。这一区别和它们的变形性质有关。花岗岩和大理岩属于脆性岩石或塑性不高的岩石,它们的 $\frac{h}{\varepsilon}$ (h ——破碎深度, ε ——破碎前的变形)比值不同。花岗岩和大理岩 $\frac{h}{\varepsilon} \geq 5$,白堊的 $\frac{h}{\varepsilon} = 1$ 。也就是说,当破碎深度 h 相同时,必须使白堊的变形大于花岗岩或大理岩的四倍。因此白堊的 k 值比其它二种岩石要高很多。由此可见,塑性愈高,轉数对钻头每轉一圈的破碎深度的影响愈明显。塑性愈高,破碎深度下降得愈快。这是因为在塑性岩石中,破碎岩石所需要的接触时间比在脆性岩石中要大的緣故。

这方面的研究結果說明,不同旋轉速度下破碎过程的規律主要与岩石的塑性有关,硬度的影响却不大。

钻进时的初速度 $V_0 = n \cdot h,$

代入 $h=f(n)$ 則得:

$$V_0 = [h_0 + C(1 - k \lg n)] n.$$

钻头经过 t 時間磨损后的钻进速度为

$$V_t = [h_0 + C(1 - k \lg n)] n \cdot e^{-\frac{t}{Q_t}} \quad (7-4)$$

对上述钻速的基本关系式进行分析后不难看出,存在一极限值 $n_{\text{极}}$,使钻速达到最大。如果轉数繼續增加,則钻速下降。

当轉数很低时, $n \ll n_{\text{极}}$,牙齿与岩石接触時間相当充分,钻头每圈破碎岩石深度与轉数变化无关,所以钻速将随轉数的增加而增加,呈直綫关系。轉数 n 繼續加大,超过某一定数值,但仍小于 $n_{\text{极}}$ 时,牙齿与岩石接触時間縮短,破碎深度开始随轉数的增加而减小,钻速上升的速度減緩;当 $n > n_{\text{极}}$ 时,轉数提高 h 迅速下降,钻进速度也同时下降。对于高塑性或高孔隙度的岩石,钻速上升得慢,极限轉数值低,在这类岩石中钻进,轉数超过200~300轉/分未必是恰当的。对于塑性不大的脆性岩石,钻速上升的高,极限轉数值很高。广泛使用高轉速的渦輪钻井实践說明,对于坚硬岩石的极限轉数在1000轉/分以上。

岩石的破碎是随時間的变化而逐渐发展的过程,所需時間的长短取决于破碎时所加的載荷。因此在体积破碎的条件下,为了保持钻速与轉数間的直綫关系,当轉数增加时,钻压也必须相应的加大。

綜合上述,可以将牙輪钻头钻进时,轉数对钻进速度的影响,归納如图7-6中的几种情况:曲綫1为表面破碎,钻速随轉数的增加而直綫上升;曲綫2、3均为体积破碎,存在轉数的极限值 n_2 及 n_3 ,钻压愈高,极限轉数也愈大,故 $P_3 > P_2, n_3 > n_2$ 。

实际上,极限轉数的存在,不仅取决于岩石破碎的時間因素,而且与井底的清洁程

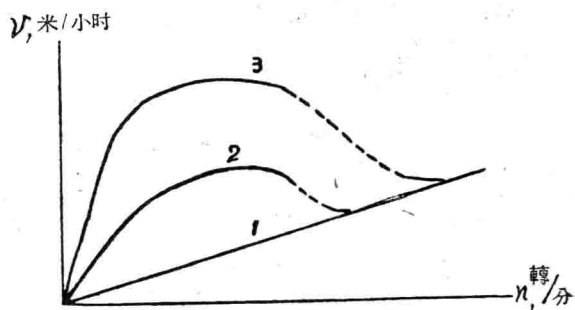


图7-6 牙輪钻头钻进时轉数对钻进速度的影响

度有关。由于岩屑不能及时排除，部分岩屑将受到重复破碎，这样会使钻头每轉一周的破碎深度下降，促使极限轉数出現。

洗井对鑽进速度的影响

通过分析钻压和钻头旋轉速度对钻进的影响，我們可以得出如下結論：在钻进过程中，只有不断地进行洗井工作，及时清除井底岩屑，才能保証破碎岩石的正常条件。

关于洗井液清除和携带岩屑的問題，目前还缺乏完整的理論。人們利用已有的一些实验結果，对泥浆洗井的問題得出了如下的結論。被钻碎的岩屑大小不同，小于一定尺寸的岩屑顆粒浮在洗井液中，和它一道返上地面；大于一定尺寸的顆粒，在重力的作用下，則以不同的速度在液体中下沉。开始时以 $g=981$ 厘米/秒²的速度下降，經過一段時間，由于液体阻力的增加，下沉速度降低，最后变为一常数 u 。

为了分析上的方便，設岩屑顆粒为球形，直徑为 d ，則在靜止液体中顆粒同时受下列三种力的作用：

$$\text{顆粒自重引起的向下作用力} \quad G = \frac{\pi d^3}{6} \cdot \gamma_1.$$

$$\text{液体的浮力} \quad P = \frac{\pi d^3}{6} \cdot \gamma.$$

下沉液体給岩屑向上的阻力

$$R = \psi \gamma \frac{\pi d^3}{4} \cdot \frac{u^2}{2g}$$

式中 γ_1 ——岩屑的比重；

γ ——洗井液的比重；

g ——重力加速度；

u ——顆粒下沉速度；

ψ ——与顆粒几何形状，液体性质有关的系数，是雷諾数的函数。

顆粒等速下降时，

$$G = P + R$$

$$\text{即：} \quad -\frac{\pi d^3}{6} \gamma_1 + \frac{\pi d^3}{6} \gamma + \psi \gamma \frac{\pi d^3}{4} \frac{u^2}{2g} = 0$$

由此得出顆粒下沉速度

$$u = \sqrt{\frac{4g}{3\psi}} \cdot \sqrt{\frac{d(\gamma_1 - \gamma)}{\gamma}} = k \cdot \sqrt{\frac{d(\gamma_1 - \gamma)}{\gamma}}.$$

$k = \sqrt{\frac{4g}{3\psi}}$ 为一与顆粒几何形状及液体流型有关的系数，通常均以实验的方法求得。

此处仅提出下列供参考的数值，对于球形顆粒 $k=40$ ；对于正方体及多边形 $k=30$ 。

看来似乎是，如果洗井液在环形空間上返的速度 ω 等于 u ，則岩屑顆粒将处于悬浮状态。其实不然，实验結果証明，为了使直徑为 d 的岩屑顆粒悬浮于上返的液流中，必須使液流速度 ω 比顆粒下沉速度大13~14%。

这样就可以得出，岩屑上升的条件为 $\omega > a \cdot u$ ， $a = 1.13 \sim 1.14$ 。設岩屑被携上升的速度为 C ，則液流上返速度为 ω 、岩屑上升速度 C 及岩屑顆粒下沉速度 u 有如下关系：

$$\omega = au + C.$$

正常钻进时, 如果岩屑颗粒上升速度 C 太小, 则上返液流中的岩屑含量升高, 致使其比重 γ_2 大为增加, 岩屑在液流中的停留时间加长, 对维持洗井液质量极为不利。因此钻速越大, C 值应该越大。 C 值可以下式求之:

$$C = \frac{F_{井} V_{平均} (\gamma_1 - \gamma)}{F_{环} (\gamma_2 - \gamma)} \quad (7-5)$$

式中 $F_{井}$ ——井底断面积;

$F_{环}$ ——环形空间断面积;

V ——机械钻速。

为了保持正常钻进, 上返液体的比重 γ_2 与进口液体之比重差 $\gamma_2 - \gamma_1$ 以不超过 0.03 为宜。

在求得岩屑颗粒的下沉速度 u 及确定对岩屑上返速度 C 的要求之后, 就可以进一步找出能够满足这些条件的液流上返速度 ω 及适当的洗井液量 Q 。用简单的计算, 我们只能求得洗井液在环形空间上返的平均速度 $\omega_{平均}$:

$$\omega_{平均} = \frac{Q}{F}$$

实际上, 岩屑在垂直液流中运动时, 液流各个截面上各个流束的速度是不相同的。液流速度在截面上的分布情况与截面形状, 液体性质及流型等因素有关。在垂直运动的液流中, 由于浮力的存在, 岩屑颗粒有被推向速度梯度减少的方向的趋势, 即被推向液流的中心。所以在钻井过程中, 大部分岩屑颗粒是被处于环形空间中部的流束以高于 ω 的速度携出到地面上来的。液流中心的速度是平均速度的 1—2 倍, 对紊流状态则在 1.2 倍左右。假若液流速度的不均匀程度的系数 $m = \frac{\omega_{最大}}{\omega_{平均}}$ 表示, 则洗井液携带岩屑的基本关系式应改写如下:

$$m\omega_{平均} = a \cdot u + C$$

实践证明, 洗井液排量 Q 对钻进速度的影响极大。如果不考虑洗井液对岩石的冲洗作用, 则洗井液排量 Q 对钻进速度的影响可归纳为 B.C. 费多洛夫提出的下列关系式:

$$V = \frac{Q}{a + bQ} \quad (7-6)$$

式中 a, b 为常数, 它与岩石的机械性质、钻头类型、环形空间的尺寸、钻井技术参数等有关。从公式中可清楚地看出, 当排量 Q 很小, 不足以清除全部岩层时, Q 增加, 钻进速度显著提高; 当排量较大时, 其数量的改变对钻进速度的影响就小得多了。B.C. 费多洛夫在试验中曾经得出下列可供参考的数值: 当 $\frac{Q}{F} < 0.43 - 0.05$ 升/秒/毫米² 时, Q 增加, 钻速增加得较快; $\frac{Q}{F} = 0.05 - 0.057$ 时, Q 增加也会提高钻速, 但增加率降低了; $\frac{Q}{F} > 0.05 - 0.065$ 时, Q 的增加对钻速的变化影响已不显著。式中 F 为井底破碎面积。

上述公式中的常数 a, b 与洗井液的性能有密切关系, 也就是说, 洗井液质量对钻进速度有巨大影响。它一方面影响到井底清洁的完善程度, 另一方面也影响到破碎岩石的效果。

为了对各种洗井液从井底排除岩屑的能力进行比较，有些研究人員作了专门的試驗，并且得到如表7-1中的結果：

表 7-1

洗 井 液	清 水	加重泥浆	石 油	壤土泥浆
相 对 清 洗 能 力	1	0.75	0.57	0.38
清除岩屑所需洗井液量	1	1.32	1.70	2.65

从表 7-1 中的数据中可以看出，洗井液清除岩屑的能力与其粘度有关，比重的影响不大。例如原油的比重小于清水，而原油的清洗能力却低于清水，这主要是石油粘度高于清水的緣故；加重泥浆的比重比清水大很多，但也由于具有高的粘度，其清洗能力不如清水。在同样的钻井条件下，将一般泥浆($\gamma=1.15-1.25$)换成重泥浆，則钻速降低50—100%。世界各地使用清水钻进取得了令人滿意的結果。凡是以清水代替泥浆的地区，钻速均得到不同程度的提高。在使用泥浆作为洗井液的情况下，比重升高、粘度也往往随之增大，因而对岩屑的清除极为不利，使钻进速度下降。

洗井液比重增加，則井內液柱压力升高，处于高压作用下的井底岩石的抗破碎强度将升高，破碎速度减小。对于不同地区，洗井液液柱压力对钻进速度的影响是不一样的，图7-7中給出了有关不同液柱压力对各种地层影响問題的資料，它們是在专门的試驗架上使用 $1\frac{1}{4}$ " 牙輪钻头钻进时得到的。

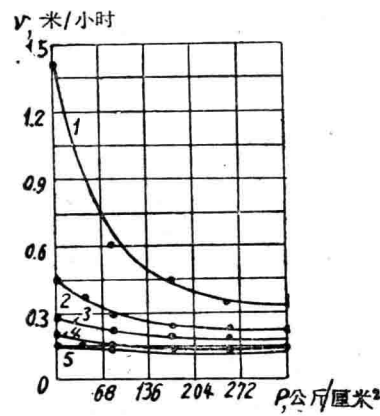


图 7-7

1—頁岩；2—石灰岩；3—砂岩；
4—玄武岩；5—白云岩

以钻速相对减少的百分率來說明，在不同岩石中井內液柱压力的影响，即可得出表7-2中的結果。
钻速相对减少的百分率：

表 7-2

岩 石		%
泥 岩		93—63
石 灰 岩		50
砂 岩		33
玄 武 岩		33
白 云 岩		20

$$\Delta\% = \frac{V_{\text{最大}} - V_{\text{最小}}}{V_{\text{最大}}}$$

試驗結果証明，在易于压缩的地层中液柱压力的影响比较大；对于坚硬岩石或孔隙度大的岩石，液柱压力的影响不够显著。

近年来使用空气或天然气洗井的情况逐渐增加。生产实践表明，只有在一定的钻井条件下，才可以使用气体钻井。但是，凡是使用气体钻井时，钻井速度均大为提高。看来，这与气柱压力不大，井底岩石容易破碎有关。空气钻井时，钻速的升高也可能是由

另一种原因所引起的，就是利用气体洗井时，钻头牙齿与岩石每作用一次后所产生的体积破碎，比在使用泥浆或水时要大的缘故。对某些密质岩石在干燥情况下，作压入试验的结果表明，此时岩石破碎区的体积比在潮湿状态下大4—5倍。

钻进技术措施各参变数之间的相互配合

从有利于破碎岩石、提高钻进速度的角度出发，钻头上的压力 P 、钻头每分钟轉数 n 、洗井液排量 Q 及其性质等各个参变数，是一个紧密联系、相互制约的整体。其中任何一个参数的改变，必须在其它参数同时发生相应的变化的条件下，才能取得积极的效果。使用不同类型的钻头， P 、 n 、 Q 三者之间的相互关系是不一样的，所以钻进技术参数的配合问题，必须在既定的钻头结构类型的条件下，进行讨论和分析。

从前面的叙述中，我们知道，在使用刮刀钻头的情况下，不存在钻压和轉数的极限数值。如果洗井液量能够得到保证，则钻压和轉数的增加，都可能促使机械钻速相应地提高。钻进技术参变数的选择主要地是受钻具强度、地面设备能力等的限制。

在使用目前各种结构类型的牙轮钻头钻进时，情况要复杂得多。此时，对钻头上的压力和轉数均存在极限值，在极限数值以内，增加钻压和轉数，均使钻速升高，超过这一数值，钻进指标反而会下降。

使用牙轮钻头时的这种复杂情况与其工作本身的特点有关。牙轮钻头工作的特点，在于它以动压入(冲击)方式破碎岩石。实验研究表明，破碎岩石的效果，在很大程度上取决于牙轮齿的冲击能量，冲击能愈高，则每冲击一次所破碎的岩石体积愈大，而破碎单位体积岩石所需的能量却愈小。钻头工作单元(牙轮齿)上具有能量 A 可由下式表示：

$$A = P \frac{V_0^2}{2g}$$

式中 P ——钻压；

V_0 ——牙齿的冲击初速度。

可见，既然牙轮钻头的工作是由无数次牙齿的连续冲击组成的，则为了取得良好的钻进效果，必须力争使钻头在可能大的钻压和牙齿冲击速度的条件下工作，而其中足以保证牙齿吃入岩石一定深度的钻压，又是提高破碎岩石效应的先决条件。

但是，仅仅具有高的冲击能量，还不能保证钻头的工作效果。如前面曾经指出的，为了使岩石在牙齿的每次冲击下发生破碎，要求牙齿与岩石有一定的接触时间。在一定的压力 P 和冲击初速度 V_0 的条件下，破碎岩石所需要的时间由下列两部分组成： t_1 ——岩石发生初次脆性破碎所需要的时间； t_2 ——一定冲击能量时牙齿吃入岩石最大深度所需要的时间。牙齿与岩石的接触时间小于 t_1 时，不能得到理想的体积破碎。

钻头牙齿与岩石的接触时间 τ 与钻头轉数 n 成反比，如下式：

$$\tau = \frac{60 \frac{d_{\text{牙轮}}}{D_{\text{钻头}}}}{nz}$$

式中 z ——最大齿圈上的牙齿数目。

不难看出，牙齿与岩石的接触时间 τ 不仅与 n 有直接关系，而且还取决于钻头的结构参数。其它条件相同时，为了保持一定的接触时间 τ ，齿数 z 愈大，即齿距愈小，则 n 应

該愈小，所选定的 $z \frac{d_{\text{牙輪}}}{D_{\text{钻头}}}$ 值愈大，允許的轉數 n 也愈高。因此，在既定钻头类型的条件下，只有在一定的轉數 n 时才能得到最大的机械钻速。應該指出的是，用降低轉數的办法来延长牙齿与岩石的接触時間，是不恰当的。因为破碎岩石所要求的接触時間与冲击速度成反比，轉數 n 下降，冲击速度减小，則需要的接触時間将延长，反而不利于钻进。这一矛盾應該采取选择大齿高大齿距的钻头的办法来解决。

取决于钻头牙齿与岩石接触時間的不同，钻压对钻进过程的影响是不相同的。

$\frac{\tau}{t_2} \geq 1$ 时，每冲击一次的岩石破碎深度和钻进时的机械钻速与钻压的增加量成正比例地上升； $\frac{\tau}{t_2} < 1$ 时，由于接触時間的限制，钻压的影响是不显著的。

由此可以得出結論，在使用牙輪钻头时，取决于钻头結構的不同，钻压 P 和轉數 n 之間必須有很好的配合，否則不能得到高的机械钻速。地层岩石的性质变化多端，可能选择的钻头的結構类型又有多种多样，因此，钻压 P 和轉數 n 之間的相互配合，自然不應該是一成不变的。目前，在轉盘钻井当中，钻头的钻压、特别是轉數，受設備能力和钻具强度的限制較多，实际工作中所采用的数值比理論分析中得出的极限数值要低的多；而在渦輪钻井中，由于钻井方法本身具有的特点，以及大大提高了的钻头旋轉速度， P 与 n 之間的合理配合問題是显得比較突出的。

钻进过程中所需要的洗井液排量 Q 的数值，与其它钻进技术参数有密切联系。

使用刮刀钻头时，井底的岩屑，除去随洗井液的速度 C 上升之外，还与钻头刀翼一道，以圓周速度 v 轉动，因此，被破碎的岩屑，是沿螺旋綫方向以合速度 v 离开井底的合速度 v ：

$$v = \sqrt{v_p^2 + C^2} \quad (7-7)$$

在任何情况下，合速度 v 均大于 C ，钻头轉數愈高， v 与 C 的差別也愈大。所以，钻头轉數 n 愈高，岩屑离开井底的速度愈快，井底的清洁程度也愈好。

使用牙輪钻头时，井底清除岩屑的条件不同于上述情况。此时所需要的洗井液排量，必須保証岩屑在被某一牙輪破碎之后，即刻离开井底，以免被下一牙輪重复破碎。为了避免重复破碎，轉速愈高，要求岩屑离开速度也愈大，即所需要的排量也愈大。钻头旋轉速度 n 与洗井液排量 Q 之間，存在着下列形式的关系：

$$Q \geq \frac{1}{240} F D_{\text{钻头}} e \cdot n \cdot \sin 2\beta$$

式中 F ——在岩屑可能被牙輪重复破碎处液流上返的平均斷面积；

e ——牙輪数目；

β ——牙輪軸綫与钻头軸綫之間的夹角。

綜合上述，可以說钻头压力、轉數和洗井液排量之間的相互配合，是很复杂的，只有从具体的地质条件出发，綜合所选定的钻头的特点，正确地处理它們之間的关系，才能获得令人滿意的結果。 P 、 n 、 Q 三者之間的关系，很难用数学公式加以正确的反映。但是，对实际資料的統計分析表明，如果钻压是以保証钻头工作刃吃入岩石，但不超过极限数值，轉數正常（不超过极限制），洗井液能够保持井底清洁，則在平均机械钻速和钻压与轉數之間存在下列关系：

$$\frac{V_{\text{平均}_1}}{V_{\text{平均}_2}} = \frac{n_1^x \cdot P_1^Y}{n_2^x \cdot P_2^Y}$$

或者改写为

$$V_{\text{平均}} = A \cdot n^x \cdot P^Y \quad (7-8)$$

当 $n = 300 - 500$ 轉/分时, $x = 0.7$, $Y = 1.1$; 如果 $n \geq 840$ 轉/分, $x = 0.45$, $Y = 1.1$, $A = 0.0024$ 。

第2节 钻进技术措施的制定

鑽头的选择

钻进时在井身剖面中会遇到各种不同性质的岩石, 如果在全部井段中使用同一类型的钻头, 则很难得到理想的效果。为了取得高的钻头工作指标, 必須从所钻岩石的性质出发, 选择不同类型的钻头。正确地选择钻头, 是合理使用钻头、充分发挥其威力的前提。

1. 选择钻头类型的依据

为了有效地破碎岩石, 必須消耗一定的能量。钻头在井底工作时所需要的功率, 可由下式表示:

$$N_{\text{钻头}} = \frac{M_{\text{钻头}} \cdot n}{716.2} \quad (7-9)$$

由此不难看出, 钻头每旋轉一圈所消耗的能量, 正比于钻头上的轉矩。

牙輪钻头上用来克服岩石的轉矩为:

$$M_{\text{钻头}} = \frac{1}{\eta} A \cdot P + M_0$$

式中 η ——牙輪軸承的效率, 对于新钻头 $\eta = 0.98 \sim 0.96$, 钻头磨損的 $\eta = 0.45 \sim 0.35$;

A —— η 为常数时钻压每增加一公斤所引起的钻头轉矩的增长量;

M_0 ——钻头上与钻压无关的部分轉矩。

实际上, 钻头上与钻压无关的部分轉矩 M_0 是很小的, 为了討論分析的方便, 可略去不計。此时設 η 为常数, $m = \frac{1}{\eta} \cdot A$, 则上述公式可簡化为同样适用于刮刀钻头的如下形式:

$$M_{\text{钻头}} = m \cdot P \quad (7-10)$$

实践証明, 钻头上克服岩石阻力的轉矩 $M_{\text{钻头}}$, 与所钻岩石的机械性质, 钻头的尺寸及結構, 以及钻压的大小有关。

保持钻压不变, 使用同一結構类型钻头在不同岩石中钻进时, 所需要的轉矩是不相同的; 同样, 岩石不变, 而钻头类型不同时, 钻头的轉矩也不一样。以牙輪钻头为例, 表 7-3 中列出了在保持钻压不变条件下使用不同类型钻头, 在不同岩石

表 7-3

钻头类型	$M_{\text{軟}}$ 、 $M_{\text{中}}$ 及 $M_{\text{硬}}$ 三者之間的比例
M	$M_{\text{軟}} = 1.45 M_{\text{中}} = 2.5 M_{\text{硬}}$
C	$M_{\text{軟}} = 1.25 M_{\text{中}} = 1.70 M_{\text{硬}}$
T	$M_{\text{軟}} = 1.15 M_{\text{中}} = 1.40 M_{\text{硬}}$

中钻进时的有关数据。表中的 $M_{\text{软}}$ 、 $M_{\text{中}}$ 、 $M_{\text{硬}}$ 分别代表在软岩石、中硬岩石及硬岩石中钻进时的钻头转矩。

因此可以认为，公式(7-10)中的系数 m ，一方面表示以一定结构类型的钻头，在一定性质的岩石中钻进时，每吨钻压所需要的转矩数值 $\left(\frac{\text{公斤} \cdot \text{米}}{\text{吨}}\right)$ ；另一方面也可以说系数 m ，是一定类型的钻头，在岩石性质及其破碎方式（一般指体积破碎）不变的情况下，能够消耗多少井底功率的标志。

钻头的结构对其所需要的转矩有巨大影响。刮刀钻头工作时的转矩与其刀翼数目、刀刃尖锐程度以及切削角度有关；牙轮钻头的转矩则取决于牙轮齿的高度，齿间距离和牙轮的滑动情况。

不同类型的钻头，其吸收和利用功率以破碎岩石的能力（即钻头的能容量）是不相同的，而在不同性质的岩石中钻进时，为了充分利用同样的井底功率，就必须根据岩石的性质（主要是硬度及塑性），选择不同类型的钻头。

就目前广泛使用的钻头类型说来，刮刀钻头吸收和利用井底能量以破碎岩石的能力最大，也就是它的能容量最高。在联结力不大的软岩石中使用这种钻头，能够得到大块的岩屑，岩石的破碎效率也最高。牙轮钻头的能容量低于刮刀钻头；而其中又以单锥、纯滚动的K型钻头的为最低，T、C、M型依次升高。

为了得到令人满意的钻头工作指标，就须根据所钻岩石的性质，确定钻头的结构类型；而在井底功率足够、钻头结构强度能以保证正常工作的条件下，应该尽量选择高能容量的钻头类型。

2. 各种类型钻头的使用范围

目前，我国现场广泛地使用各种刮刀钻头和牙轮钻头。刮刀钻头依靠切削作用破碎岩石，适于钻软及松软地层；各种不同类型的牙轮钻头，则主要以冲击（压碎）方式破碎岩石，同时兼有不同程度的剪切作用。

在钻井时会遇到各种不同的岩石，其机械性质间的差异很大。但是，我们所使用的钻头类型却是有限的。所以，应当认为，目前生产的钻头类型（双刮刀钻头、三刮刀钻头、M、C、T、K型牙轮钻头等）与所钻岩石的性质之间不是相对的适应；从发展上看，必须不断地增加新的钻头种类，以便更好地满足钻井的需要。钻头的类型有限，而岩石的性质却是变化万千，因之钻头类型的选择具有很大的灵活性。在选择钻头过程中，除去岩石性质之外，必须同时考虑钻进技术措施，以及其它方面的各种可能性。

由于钻井技术的发展，钻井深度的增加，在世界各国的钻井工程中，刮刀钻头使用的比重逐渐减少，而有些地区则已完全使用牙轮钻头。但是，这并不意味着在制造和使用刮刀钻头的工作中，已经没有潜力可挖。大量的实践证明，在结合钻井地区的特点，认真地研究和改进了刮刀钻头的制造和使用之后，刮刀钻头的工作指标不仅不低于牙轮钻头，而在很多情况下，却大大地超过它了。可见，从合理使用钻头的角度出发，在刮刀钻头与牙轮钻头的使用范围之间，尚难划定一个一成不变的界限。

刮刀钻头在很多种泥岩、泥质砂岩、硬度较低的砂岩中钻进，能够得到良好的效果；甚至在含有坚硬夹层的泥岩中工作，如果钻进措施得当，也能达到很高的工作指标。刮刀钻头不适于在坚硬岩石中使用。在埋置深度较大的泥岩中，刮刀钻头的使用也

往往受到限制，这是因为随着深度的增加，岩石强度有所提高的缘故。

我們知道，钻头只在下列条件下，才能有效地工作，即

$$P \geq \sigma F_t \quad (7-11)$$

式中 P ——钻压；

σ ——岩石强度；

F_t ——刀翼的工作底刃面积， $F_t = F_{初} + \theta \cdot t$ 。

岩石的强度与井深 L 及上部岩石的平均比重 $\gamma_{岩}$ 有关，可用下式表示：

$$\sigma = \sigma_o + \gamma_{岩} L$$

式中 σ_o ——接近地表处的岩石初强度（或不受深度影响的岩石强度）。

将 σ 代入上述条件内，则可得到：

$$L = \frac{1}{\gamma_{岩}} \left(\frac{P}{F_{初} + \theta t} - \sigma_o \right).$$

由此可见，使用刮刀钻头钻进的深度与可能施加的钻压 P 有关，而钻头上的压力是受到钻杆强度及设备条件的限制。在可能使用强化钻进措施的情况下，刮刀钻头的使用范围可以扩大。

在我国各主要油区的岩层中，有很大一部分是高塑性低硬度的岩层，从岩石破碎的角度看，是适于使用刮刀钻头钻进的。我国现场大量使用刮刀钻头，特别是三刮刀钻头。由于不断改进钻头结构和采用强化措施的结果，这种钻头的使用效果逐年提高。机械钻速为 50~60 米/小时；每只钻头进尺最高达到 1000 米以上。这样就使刮刀钻头制造简单、成本低廉的特点得到充分显示。

三刮刀钻头是目前刮刀钻头中使用效果最好的一种。它具有多刮刀钻头切削刃较多、工作平稳的优点，而刀翼的支承面积又不过大，因此可以得到足够的钻压。三刮刀钻头的水眼装置，对钻头工作有很大影响。成功地使用下水眼钻头，可以大大地提高其工作指标。在洗井液量不足的条件下，有时使用双刮刀钻头可以得到比三刮刀钻头要高的指标。

和刮刀钻头相比较，牙轮钻头的结构要完善得多，它的结构种类也大大地超过了刮刀钻头。因之，牙轮钻头能够在更大的程度上适应不同地层中岩石性质的各种变化。

不同结构类型的牙轮钻头适于用来钻各种泥质页岩、砂岩以及硬度更大的岩石。具体地说，M 型钻头适用于比较松软的泥砂质页岩、泥灰岩、盐岩和石膏等；C 型钻头适用于硬度较大的泥砂质页岩、泥灰岩、砂岩、石灰岩，以及其它中等硬度的岩石；T 型钻头适用于坚硬的砂岩、石灰岩、白云岩等；K 型钻头适用于极为坚硬的硅化岩石。

象使用刮刀钻头一样，取决于不同的钻进技术参数，每种钻头的使用范围，可以扩大和缩小。

如果有可能提高钻压，则在中等硬度的岩石中可以使用 M 型钻头，而不是 C 型钻头；在硬岩石中可以使用 C 型钻头，而不是 T 型钻头。实质上，这里指出的每一种情况，都是在加大了钻压的条件下使用尽可能高的能容量的钻头类型。钻压增加，钻头的能容量升高，钻进时钻头克服岩石阻力的转矩必然产生相适应的变化 ($M_{钻头} = m \cdot P$)。因此，为了使这种想法得以实现，必须提高钻头本身的强度和保证破碎岩石所需要的井底功率；而足够大的钻头强度和井底功率又是允许钻压有显著增加的先决条件。