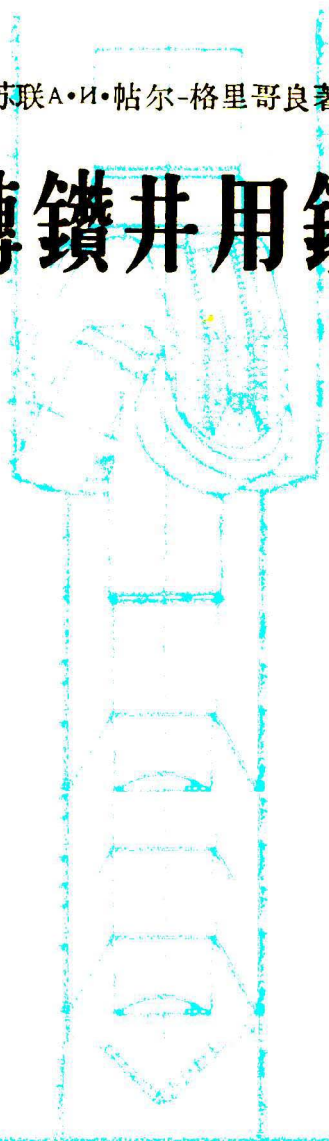


苏联А·И·帖尔-格里哥良著

# 旋轉鑽井用鑽頭



石油工業出版社

# 旋轉鑽井用鑽頭

苏联 А.И.帖尔-格里哥良著

石油工業出版社

# 目 录

## 原序

第一章 岩石的物理-机械性質 .....	3
岩石的类型 .....	3
岩石的自然状态 .....	5
外摩擦系数 .....	7
研磨性 .....	10
塑性和脆性 .....	13
粘性 .....	14
硬度 .....	14
硬度減低剂 .....	29
不同破碎方式下的岩石强度 .....	32
岩石的可鑽性 .....	35
第二章 旋轉鑽井用鑽头及其工作 .....	44
鑽头分类 .....	44
全面鑽进用鑽头 .....	44
翼狀鑽头 .....	44
整形鑽头 .....	52
牙輪鑽头 .....	53
关于三牙輪鑽头的鑽井方式 .....	70
取心鑽具 .....	71
固定內岩心筒式取心鑽具 .....	71
可提取內岩心筒式取心鑽具 .....	76
不同类型取心鑽具的应用范围 .....	84
取心鑽具的工作 .....	86

特殊功用的鑽头	92
第三章 制造鑽头的材料	98
第四章 翼狀鑽头工作理論	108
总論	108
平均机械鑽速和进尺的决定	109
抗磨强度及耐磨性	117
第五章 牙輪鑽头工作理論	124
牙輪鑽头运动学和动力学	124
A. Ф. 叶格列夫的研究	133
用牙輪鑽头鑽井时的井底表面	145
第六章 三牙輪鑽头几何学	149
造形錐体頂角的确定	149
牙輪佈置圖	151
齿形設計	153
牙輪軸綫的偏移	157
軸承几何尺寸的确定	159
第七章 鑽进所需功率	160
总論	160
鑽头所需功率的分析公式	161
旋轉鑽具及地面設備有害阻力所消耗的功率	175
第八章 鑽头的合理使用	179
鑽头工作的經濟時間	179
鑽井方式	180
鑽头的合适直徑	197
每公尺进尺成本	199

## 原 序

鑽頭是鑽具直接与井底接触、用来破碎岩石的部分。

鑽頭破碎岩石的效率，在極大程度上取决于鑽頭的類型、結構及制造質量。

大家都知道，在不同的情況下，应用同一种鑽頭是不可能获得同样的效果的。

例如，用魚尾鑽頭來鑽粘滯粘土很有效，但用它來鑽砂岩和石灰岩時，其效果就小了；反之，如果三牙輪鑽頭在砂岩及石灰岩中以高的機械鑽速可以获得頗大的進尺，但是在粘滯粘土層中，鑽頭的進尺則減少了，鑽頭的效率也降低了。

其次，我們知道，用不同的硬合金來鑲焊魚尾鑽頭和設計不同牙輪牙齒形狀的三牙輪鑽頭，當使用得當時可以提高進尺和機械鑽速。所有這些都無可反駁地証明了，應根據岩石的物理及機械性質來選擇鑽鑿不同岩石的鑽頭類型和結構。

雖然上述原則并不需要特別的說明和很好地論証，但是這個原則並沒有經常地完全付諸實現。

近年來，三牙輪鑽頭的应用急劇增長，有很多地層，以前用魚尾鑽頭鑽進時效率不高，而現在用三牙輪鑽頭鑽進，却獲得了比較高的進尺。

不同地層因鑽頭類型（魚尾或三牙輪）不同而進尺差異的問題，只獲得問題的初步解決。以後，更複雜的任務在於對具體目標正確地選擇鑽頭類型，即如果所指的是魚尾鑽頭，

就是選擇刀翼的修整剖面；如果所指的是三牙輪鑽頭，就是選擇牙輪牙齒的形狀。

后一任務直到現在為止，還沒有給以應有的注意。這就可以部分地說明蘇聯三牙輪鑽頭結構的牙輪類型有限的原因。

忽視岩石的物理機械性質對進尺和機械鑽速的影響，常常表現在鑽井實踐中，也常表現在確定鑽頭的結構和製造質量時。鑽井處、鑽井托拉斯或聯合局的“鑽頭平均進尺”、“平均行程鑽進時間”、“平均機械鑽速”的觀念，因為沒有考慮到井段深度、所鑽的地層、鑽頭尺寸、鑽井方式等等，因而就不能用來作為評定鑽頭結構和製造質量的充分根據，因為，在這裡掩蓋了主要的因素——所鑽岩石的物理機械性質。

## 第一章 岩石的物理-机械性質

### 岩石的类型

岩石的物理-机械性質决定于許多因素：矿物成份，構造和結構，埋藏深度，地壳構造的条件，充填岩石孔隙的物質的性質等等。

上述各种因素的組合是多样的，这就是在油井鑽进中常遇到許多性質不同的岩石的原因。

苏联的油田系由沉积岩組成，可以分成三个基本类型：脆硬的、粘結的和鬆散的。

脆硬岩石(砂岩、石灰岩、泥灰岩)的特征是在其顆粒間具有分子膠結力和摩擦力。

該类岩石的膠結力，常可达到極大的数值。而且当这种力量的作用受到破坏时，利用压力的作用或潮湿的作用，或者二者的同时作用不能使其恢复。

脆硬岩石当被压缩时，膠結力和摩擦力与切力的关系方程式为

$$Q = F + T, \quad (1)$$

式中  $Q$ ——切力； $T$ ——膠結力； $F$ ——摩擦力。

$$\text{但} \quad F = \mu N, \quad (2)$$

式中  $N$ ——正压力； $\mu$ ——岩石的内摩擦系数。

根据公式(2)，并以單位面积上的作用力表示，則將有

$$\tau = \tau_0 + \mu \sigma. \quad (3)$$

公式(3)通常称之为庫侖定律。由此公式可知，岩石的

抗剪强度  $\tau$  决定于膠結力  $\tau_0$  和加于岩石的正压力  $\sigma$ 。

最常見的脆硬岩石是砂岩和石灰岩。

砂岩主要是由石英顆粒及某种膠結物質組成。砂岩的不同性質，决定于各种不同石英顆粒的性質和数量或其他矿物的性質和数量，同时也与其膠結物質有关。

石灰岩系由方解石矿物  $\text{CaCO}_3$  組成，各种石灰岩的差別，視其粒子的数量、形狀及其彼此結合的方法而定。方解石顆粒可以依靠本身的膠結力而直接結合，或者是借助于某些膠結物質結合在一起。

粘結岩石的特征是在其顆粒間具有膠結力，其大小則視其湿度而变。当此类岩石的完整性受到破坏以后，如再施以相当的压力及潤湿，則其膠結力可部分地或完全地恢复起来。

粘結岩石受潮湿后，其膠結力的恢复有賴于該岩石的可塑性，亦即在一定大小的力量作用之下，改变形狀而不改变其体积及不破坏其完整性的能力。

岩石的粘結性是毛細管力作用的結果，根据赫赤的理論，毛細管力可以看作是附加的、外来的、平均分佈的、压力强度为  $P_x$  的負荷。

將毛細管力的作用考慮在內，則用于粘結岩石的庫侖定律，可用下式表示

$$\tau = \tau_0 + (P_x + \sigma)\mu. \quad (4)$$

隨構成粘結岩石的顆粒的大小及其湿度而变的  $P_x$  值是由 Г.И. 波克罗夫斯基教授和 В.Г. 布雷切夫教授确定的。 $P_x$  值隨岩石湿度及顆粒尺寸的減低而增高。

屬于粘結岩石的，是由最細致的石英顆粒和其他的矿物



所組成的粘土。

粘土系由有彈性的、可塑的和鱗片狀的顆粒組成，其大小(長度、寬度)不超過 0.002 公厘。粘土的物理性質(高孔隙度、壓縮性、可塑性、低透水性、濕潤後膨脹和乾燥後縮小等)決定於組成顆粒的形狀、大小和彈性。

公式(4)中粘土的內摩擦係數，等於 0.2—0.5。

鬆散岩石的特征是在乾燥及完全水飽和以後，顆粒之間完全沒有膠結力。在潮濕情況下，鬆散岩石稍具膠結力。根據 Г. И. 波克羅夫斯基教授的数据，鬆散岩石當濕度在 16—20% 限內時，其粘結性最大(即當含水佔全部岩石體積的 16—20% 時)。

因此，可認為該類岩石系由許多不粘結的顆粒，互相間只以摩擦力的作用相聚結而已。故鬆散岩石的庫倫定律可以表示為

$$\tau = \sigma \mu \quad (5)$$

從(5)式可知，鬆散岩石的抗剪強度，等於與正壓力成比例的摩擦阻力。

屬於鬆散的岩石是砂子，系由 0.05—2 公厘的石英顆粒組成。中粒砂層的內摩擦係數在 0.60—0.65 之間。

### 岩石的自然狀態

在自然狀態下的岩石可能為單相系、二相系或三相系三種。

在第一個系中，岩石系由“骨架”所組成，即由固體顆粒及空間組成；第二個系中，岩石則系由“骨架”及其空間或充以液體或充以氣體所組成；第三個系中，岩石則系由“骨架”

及由液体和气体所共同充填的空间所组成的。

在破碎岩石时，如系单相系的岩石，则有一部分功消耗在压缩岩石上；如系二相系，则消耗在排挤液体或气体上；而在三相系中，则系用于同时排挤液体和气体上。

因为排挤气体时的阻力很小，故重要的只是单相系和空间中充满液体的二相系。

如单相系的岩石体积为一单位，从  $A$  代表，骨架部分的体积， $B$  代表孔隙的体积，则比值

$$\frac{B}{A} = \varepsilon \quad (6)$$

称为孔隙率。

$$\text{因 } A+B=1, \text{ 故得 } A = \frac{1}{1+\varepsilon} \text{ 和 } B = \frac{\varepsilon}{1+\varepsilon},$$

外压力与孔隙率之间的关系可用公式表示：

$$d\varepsilon = -\alpha \cdot dp, \quad (7)$$

由(6)式和(7)式可以表示成下列形状

$$dB = -\alpha_1 \cdot dp, \quad (8)$$

即孔隙体积的改变与外压力的改变成比例。

负号表示当  $p$  增加时  $B$  (或  $\varepsilon$ ) 的减低。

公式(7)与(8)的形式，和表示在弹性变形限度内，相对压缩和正应力关系的虎克定律公式  $\lambda = -\frac{1}{E} \sigma$  相似。

岩石的压缩性，即在外力作用下岩石变致密的能力，可以用所谓压缩曲线来表示。岩石的压缩性以其已知点在压缩曲线上的切线斜度，即  $-\alpha = \operatorname{tg} \alpha$  表示之。

将压缩岩石的外力除掉以后，岩石并不能完全恢复其原来的状态，由于个别颗粒重新分佈，而发生了残余变形，亦

即使岩石致密起来。

H.M. 格尔謝万諾夫教授提議把二相系的岩石(骨架+液体)称为土团(грунтовая масса)。

土团被压缩时,可能有两种情况:一种是内部液体能自孔隙中压出的,而另一种是不能压出的。

第一种情况下,将使岩石变密,即压缩(这与单相系相似),同时将液体压出,这样就需要消耗一部分相当于静水压力的外力,该压力等于 $\frac{p}{\Delta_0}$ ,其中 $p$ —加于岩石的外压力, $\Delta_0$ —液体的单位体积重量。

第二种情况下,因为实际上液体是不可压缩的,所以土团也将是不可压缩的了。

### 外摩擦系数

当钻头作用于岩石时,在相互作用的表面之间,就产生一种摩擦力(外摩擦),这种摩擦力对于钻井过程产生着巨大的影响。

根据岩石性质的不同,其摩擦性质也有极大的变化。脆性岩石是被钻头磨碎,磨成细粉而钻掉的;而塑性岩石则是部分地被钻掉,其余的岩石因压力而产生变形,压入岩石中,即磨碎与挤压是同时发生的。

许多研究者进行了确定外摩擦系数的工作。

不同的学者对不同的岩石在不同的条件下,做过实验室的试验和现场生产的观察,自然,所得到的一些外摩擦系数值,在它们相互之间也就相差得很多。

近年来在这方面工作做得很多的就是B.C. 费多洛夫和E.Ф. 爱普施坦两人的试验。

B.C. 費多洛夫在最接近于生产条件下，在特殊的設備上，对大量的岩石試样进行了实验，并确定了靜摩擦系数。

如 E.Φ. 爱普施坦所指出的，B.C. 費多洛夫在計算靜摩擦系数上是不精确的。摩擦系数的实际数值只等于 B.C. 費多洛夫根据实验所得数值的  $\frac{3}{4}$ 。

和其他作者的实验比較起来，因为 B. C. 費多洛夫的实验广泛地包括了鑽井中所遇得到的各种岩石，所以有着大的价值。

当用伯別基特合金鑲焊的鑽头时，所得的不同岩石的摩擦系数，根据 E. Φ. 爱普施坦对 B. C. 費多洛夫的校正，如表 1 所示。

表 1

岩石名称	靜 摩 擦 系 数	
	干 燥 时	在泥漿中时
尖角粒砂岩	0.219	0.135
圓粒砂岩	0.195	0.18
尖角非均質粗粒砂岩	0.18	0.115
尖角中粒坚硬砂岩	0.24	0.157
尖角粗粒坚硬砂岩	0.172	0.10
細圓粒坚硬砂岩	0.105	0.15
弱膠結粗粒砂岩	0.165	0.127
弱膠結泥質粗粒砂岩	0.157	0.157
弱膠結泥質粗粒砂岩	0.135	0.083
泥灰岩	0.135	0.127
泥板岩(麦克普系)	0.15	0.083
砂質粘土	0.21	—
壤土	0.105	0.045
均質圓細粒砂岩	0.17	0.135

E. Ф. 爱普施坦用实验的方法确定了静摩擦系数和动摩擦系数。

为了确定静摩擦系数，E. Ф. 爱普施坦利用了有名的斜面方法；为了确定动摩擦系数，他利用了旋转的光滑环形表面的取心钻头的办法。

E. Ф. 爱普施坦在测量动摩擦力矩上，使用了自己设计的特殊的力矩仪。

动摩擦系数可按下列公式求得

$$M_{mp} = \int_{R_2}^{R_1} qr dF = 2\pi q \int_{R_2}^{R_1} r^2 dr = \frac{2}{3} \pi q (R_1^3 - R_2^3), \quad (9)$$

式中  $M_{mp}$ ——由力矩仪所测定的摩擦力矩，公斤·公分；  
 $q$ ——取心钻头单位摩擦面积上的摩擦力，公斤/公分<sup>2</sup>；  
 $dF$ ——直径为  $r$ 、宽度为  $dr$  的钻头环形面积，等于  $2\pi r dr$ ，公分<sup>2</sup>； $R_1$ ——取心钻头外径，公分； $R_2$ ——取心钻头内径，公分。

因  $q = \frac{P\mu}{\pi(R_1^2 - R_2^2)}$ ，故(9)式可写成下列形式

$$M_{mp} = \frac{2}{3} P\mu \frac{R_1^3 - R_2^3}{R_1^2 - R_2^2},$$

式中  $P$ ——岩心钻头压力，公斤。

当  $R_2 = 0$  时，即将取心钻头换成普通钻头，则上述公式可写成

$$M_{mp} = \frac{2}{3} P\mu R_1 = \frac{1}{3} PD\mu, \quad (10)$$

式中  $D$ ——钻头直径。

表 2

岩 石 名 称	动摩擦系数	静 摩 擦 系 数	
		地面干燥时	在 水 中
花崗岩	0.52	0.50	0.41
泥質膠結砂岩	0.47	0.53	0.35
石英岩	0.60	0.60	0.57

E. Ф. 爱普施坦利用公式(10)对 B. C. 費多洛夫依公式  $M_{mp} = \frac{1}{A} P \mu D$  所計算出来的摩擦系数的数值进行了校正 (B. C. 費多洛夫进行实验时, 认为施于鑽头刀翼上的摩擦力合力是处在距离鑽头中心  $\frac{R}{2}$  的地方)。

表 2 为 E. Ф. 爱普施坦在某些岩石中, 用 PЭ-8 和 PЭ-15 的伯別基特合金所得到的动摩擦系数和静摩擦系数。

由表 2 数据可以看出, 干的动摩擦系数和静摩擦系数相差无几, 实际上这些差别可略而不計。在液体介質(水, 泥漿)中的摩擦系数, 則較干燥时的摩擦系数为低。

鑽头与岩石間的摩擦是極其不利的, 因为它造成鑽头的磨損, 減低鑽头的机械鑽速。

从进尺的观点来看, 与鑽头磨損同时所發生的岩石的研磨, 是沒有重要意义的。

### 研 磨 性

各种岩石都具有的不同程度的研磨性, 这种研磨性对鑽头的磨損也有着很大的影响。所謂岩石的研磨性, 是指岩石与鑽头接触的表面上, 受到由鑽头所切掉的大量岩石碎屑的

顆粒稜角的劇烈切削的作用。因此岩石的研磨性是由于它的顆粒結構所致。顆粒的形狀與大小，對於這一點尤其有巨大的影響。

主要由石英顆粒所膠結成的砂岩，具有最大的研磨性。

在顆粒的物理-機械性質中，硬度對研磨性的影響最大。

脆性是研磨性岩石的特點，也就是說在永久變形之前，它具有被破壞的性能，因此，形成了新的對鑽頭表面起研磨作用的尖銳稜角。

晶體的解理不完善，也是研磨性岩石的特性。這種特性可以形成帶尖銳稜角的邊緣。

鑽頭在井底的停留時間和每分鐘轉數，即在全部鑽井時間內的鑽頭總轉數，影響着鑽頭因研磨而來的磨損。

在實際上，是以鑽頭的磨損程度來確定岩石的研磨性。因此，這只不過是研磨性的一種相對尺度。

B. C. 費多洛夫得出了鑽頭刀翼磨損高度的公式

$$x = \delta \mu k_{\sigma} A \sum n, \quad (11)$$

式中  $x$ ——刀翼磨損高度； $\delta$ ——鑽頭磨損度係數； $\mu$ ——鑽頭與岩石的內摩擦係數； $k_{\sigma}$ ——岩石抗壓斷裂強度； $A$ ——鑽頭的幾何形狀係數； $\sum n$ ——鑽頭在一行程中的總轉數。他認為可以用  $\mu k_{\sigma} = \eta$  來表示岩石的研磨性。

十分明顯，B. C. 費多洛夫所給的  $\mu k_{\sigma}$  值不是別的，而是在岩石破碎時，岩石與鑽頭間單位接觸面積上的摩擦力。這並不是岩石的研磨性質。如上所述，岩石研磨能力的大小，首先決定於造岩礦物顆粒的硬度、形狀及大小。

E. Ф. 愛普施坦的實驗，也證明了上述的說法。他指出：鑽頭磨損係數（作一公斤公尺的摩擦功時，鑽頭體積的

磨損)与摩擦系数之間,不成直綫比例的关系,且鑽头的磨損大小,与岩石的抗压强度無关。他借助实验的方法曾确定了,磨損系数的值,首先决定于岩石的結構及顆粒硬度与膠結物質硬度之間的比值。

例如,根据 E. Ф. 爱普施坦的实验知道, PЭ-8 的伯別基特合金,对碧玉鉄質岩的磨損系数,比砂岩的磨損系数低 30—50 倍,但它的極限抗压强度却比砂岩約高 2.5 倍。

因此, E. Ф. 爱普施坦关于岩石的研磨性質的数据和結論,是和 B. C. 費多洛夫的推論完全不同的。

由于工業上磨損材料的需要而研究的材料研磨性質的結果,作出了用数学方法表示的材料研磨性質。

例如,一定数量的扩散性材料,在  $t$  時間內的研磨能力  $a$  可用下式表示

$$a = gvs(1 - e^{-ct}), \quad (12)$$

式中  $g$ ——材料的單位总研磨能力,以單位重量表示;  $v$ ——速度,公尺/秒;  $s$ ——研磨材料的量,克;  $c$ ——表示某一种磨料的磨損度常数。

某些研究者以單位時間內研磨作用的量来表示研磨性質,即

$$v = \frac{da}{dt}, \quad (13)$$

式中  $a$ ——代表在一定的時間內的总研磨效果。

在某一時間內的总研磨能力  $A$ , 由下面的积分式求得

$$A = \int_0^t v dt. \quad (14)$$



## 塑性和脆性

固体受負荷作用产生变形，当負荷除去后，仍然保持其变形的性質，称为塑性。在岩石中，粘土具有塑性。大家都知道，塑性物体是服从虎克定律的。这些物体在發生了殘余和塑性变形以后，才發生破坏。塑性物体的断裂强度，較其屈伏極限高得多。研究証明，晶体間的膠結力較晶体为大的坚硬物体，也具有塑性，故当該物体破坏时，系在晶体內發生。实验証明，只有一定数量的固体，才沒有塑性。

塑性与物体的应力状态有关，如在一般情况下不表現塑性的物体，当同时受到各方面的压缩时，即表現了塑性。因此，正确的說法是应当把物体分为真塑体（即在任何应力条件下，都具有塑性的物体）和有限塑体（即只在各方受压缩的条件下，才表現塑性的物体）两种。

真塑体如金屬是，在岩石中則为粘土；大部分的岩石都屬於有限塑体。

当固体破坏时，沒有塑性变形，謂之脆性，即不吸收不可逆的机械能。最明显的脆性物体的例子是玻璃。大部分的岩石都屬於脆性的。但如上面所說的，脆性物体实际上是有限塑性的。

塑性物体在各方面同时受到張力时，也可以表現出脆性来。負荷作用時間的長短，也影响着塑性或脆性的表現。例如，当負荷作用時間極短时，脆性物体也可呈現塑性。各方向同时受压缩对呈現塑性的影响，可視為当剪切时垂直于剪切平面的方向上，發生極大的法向力，該法向力对膠結压力产生附加的效果。