

乳化液在人造金刚石钻进中的减摩作用

中南矿冶学院探工教研室

用人造金刚石钻头钻进时,为了能高速回转,目前多使用乳化液冲洗钻孔。乳化液的应用不仅提高了钻进效率,延长了钻头、钻具寿命,还提高了岩心采取率。要正确地选择和用好乳化液,就必须对它进行深入的研究。要研究的内容很多,我们仅对乳化液的减摩作用做了一些室内、外试验。

为了测定钻杆与岩石的摩擦系数,自装了一套简单的测试仪器(图1)。测试方法是:把岩样压在高速回转的钻杆上,由于岩样与钻杆之间存在着摩擦力,推动岩样,从而压缩导杆上的弹簧。当摩擦力与弹簧推力平衡时,岩样不再移动,稳定在一个位置上。根据弹簧的压缩值,可以知道摩擦力的大小,并计算出摩擦系数。

测试条件:

- 1.用60#碳化硅砂轮磨平岩样的接触面;
- 2.钻杆直径 $\phi 38.5$ 毫米,表面光洁度 $\nabla 6$;

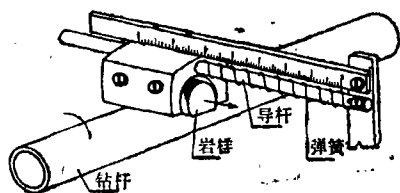


图1

3.钻杆转速1270转/分,线速度为2.59米/秒;

4.加在接触面上的负荷为600~700克,接触面上的单位面积压力平均约为10公斤/厘米²,最大达50公斤/厘米²。

钻杆与岩石的摩擦系数有多大

摩擦系数受很多因素影响,如接触面的光洁度、相对滑动的速度、接触面的温度、单位面积上的压力以及接触面上是否有污垢等,都会影响摩擦系数的大小。表1列出钻杆与岩石的干摩擦系数,是在简化的条件下测出的,虽然与生产情况不完全相同,但能定性地说一些。从表1看出,不同的岩石与钻杆的摩擦系数是不同的,但相差并不大,一般都在0.12~0.22之间。只有花岗闪长岩有时达到很大的摩擦系数,这是由于所测定的是一种中等颗粒的花岗闪长岩,含有大量的角闪石,在与钻杆高速摩擦的情况下,发生碎裂剥落,从而使摩擦系数升高到0.4,当角闪石磨掉之后,摩擦系数又降回到0.17。

在所测的岩石中,致密磁铁石英岩最硬,它的干摩擦系数最小,为0.12~0.16;大理岩最软,它的干摩擦系数最大,为0.17~0.22。可见硬而致密的岩石摩擦系数小些,软的、易磨损的岩石摩擦系数大些。

钻杆与岩石的干摩擦系数 $\mu_{干}$

表1

岩石名称	致密磁铁石英岩	粗粒磁铁石英岩	混合花岗岩	花岗闪长岩	大理岩	安山岩
$\mu_{干}$	0.12~0.16	0.16	0.17~0.18	0.17 (0.40)	0.17~0.22	0.18~0.19

钻杆与岩石的水摩擦系数 $\mu_{\text{水}}$

表 2

岩石名称	致密磁铁矿石岩	粗粒磁铁矿石岩	混合花岗岩	花岗岩闪长岩	大理岩	安山岩	凝灰岩*
$\mu_{\text{水}}$	0.31~0.40	0.30~0.38	0.38~0.42	0.60	0.46	0.36~0.43	0.36 (0.49)

*凝灰岩中含有脉状矿物，其成分为方解石及绿泥石。这层脉状矿物与钻杆的摩擦系数较周围矿物为高，达到0.49。

清水对钻杆与岩石的摩擦 起什么作用

当用清水冲洗钻杆与岩石的接触面时，摩擦系数增高了。在所测的岩石中都有这种现象。测定结果列于表 2。

从所测结果看出，钻杆与岩石的水摩擦系数在0.3~0.6范围内，一般在0.35~0.40左右，比干摩擦系数大一倍以上。由此可知，在很多情况下，水对钻杆与岩石的摩擦不是起减摩作用，而是起增摩作用。

为什么清水洗孔钻机转速 开不上去

根据以上测出的结果，可以大致计算出100米深的钻孔，在不同转速下，钻杆与孔壁摩擦所消耗的功率。根据功率消耗可以看出，为什么用清水洗孔，钻机转速开不上去。

为了进行计算，必须先求出钻杆对孔壁的压力及钻杆与孔壁的摩擦力。

大家知道，钻杆在垂直钻孔内是弯曲的，大致成正弦曲线，每个弦波的顶点是钻杆与孔壁的接触点，如图 2。在每个接触点上，钻杆给予孔壁的压

力是由以下三个因素造成的：

1. 钻杆由于承受纵向压力而弯曲，产生对孔壁的横向压力；
2. 钻杆承受扭矩而弯曲给予孔壁压力；
3. 钻杆高速回转产生离心力给予孔壁压力。

前两项所产生的压力不是主要的，引起钻杆压向孔壁的压力主要是由于钻杆高速回转而产生的离心力。

$$\text{离心力 } N = \frac{q\omega^2}{g} \int_0^l r ds$$

式中 q —钻杆单位长度的重量(包括冲洗液的重量)，对于 $\phi 42$ 钻杆 $q = 4.56 + 0.8$ 公斤/米；

ω —钻杆回转速度，弧度/秒；

g —重力加速度，9.81米/秒²；

l —钻杆在孔内弯曲的半弦波长，是随着钻杆的受力状态而变化的。这里暂定为5米(参看图 2)；

r —钻杆横断面重心距钻孔中心的距离，由于钻杆在孔内成正弦曲线形，所以 r 值是个变数。若钻孔直径为 $\phi 47$ 毫米，钻杆直径为 $\phi 42$ 毫米， r 的最大值为2.5毫米；

s —钻杆在半弦波内的弧长。

计算结果列于表 3。

由计算结果看出，离心力 N 随转速的提高而急剧增加。这是由于离心力 N 与钻杆回转角速度 ω 的平方成正比的原因。

用以下公式计算一个接触点的摩擦力

表 8

转速 n , 转/分	500	800	1000	1200	1500
一个半弦波长的钻杆所产生的离心力 N , 公斤	9.3	28.8	37.2	53.5	83.4

图 2

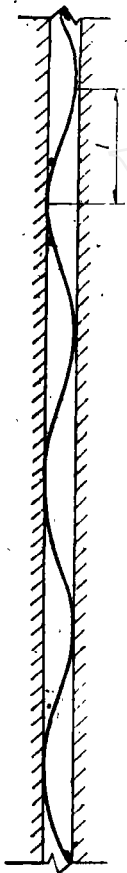


表 4

转速n, 转/分	500			800			1000			1200			1500		
μ	0.6	0.5	0.4	0.6	0.5	0.4	0.5	0.4	0.5	0.6	0.5	0.4	0.6	0.5	0.4
F, 公斤	5.6	4.7	3.7	14	12	9.5	19	15	19	32	17	21	50	42	33

$$F = N \cdot \mu$$

式中F—钻杆与孔壁的一个接触点上的摩擦力;

N—半弦波长的钻杆所产生的离心力, 即钻杆作用于孔壁上的压力;

μ —钻杆与孔壁的摩擦系数。

计算结果列于表 4。

根据以上得出的 μ 和F值, 可以计算出100米深的钻孔, 在不同的转速下 钻杆与孔壁摩擦所消耗的功率W。

$$W = \frac{M \cdot 2\pi \cdot m \cdot i}{75}$$

式中M—在钻杆与孔壁的一个接触点上所消耗的扭矩; $M = F \cdot r_1$

r_1 —钻杆的半径. $\phi 42$ 钻杆为0.021米;

m—钻杆每秒钟转速;

i—100米深的钻孔中, 钻杆与孔壁的接触点数, $i = \frac{100}{5} = 20$ 个。

计算结果列于表 5。

从表 5 的数据可以看出:

1. 随着钻机转速的提高, 消耗于钻杆与孔壁摩擦的功率增大得很快。n = 500转/分, $\mu = 0.4$ 时 W 仅有1.1马力; 可是当n = 1500转/分时, μ 值不变, W 达到30马力 两者相差约26倍。这是由于W值与钻杆转速 ω 的立方成正比的关系。

2. 在n = 500转/分时 μ 由0.4增到0.6, W值仅增加0.5马力; 可是当n = 1500转/分

时, μ 由0.4增到0.6, 则W值增加了14马力。这说明在低转速时, 用清水洗孔, 摩擦系数虽然大些, 但对钻杆摩擦所消耗的功率影响并不大; 可是在高转速时, 钻杆摩擦所消耗的功率则随着摩擦系数的增加而急剧地增加。

以上计算出的W值是在孔深仅有100米的情况下得出的结果(但W值并不与孔深成比例地增加, 在减压钻进时, 只有孔底受压缩状态的钻杆与所讨论的情况相同), 而且还未考虑钻杆与孔内的液体摩擦及钻头磨削岩石所消耗的功率。如果都考虑进去, 功率消耗就会更大。这个计算虽然是近似的, 但它定性地说明了为什么用清水洗孔时, 钻机转速开不上去的原因。

孔壁给予钻杆的摩擦阻力对孔底压力的影响

根据以上数据可知, 当钻机转速很高时, 孔壁给予钻杆的摩擦阻力是很大的。设孔深为100米, 摩擦系数为0.4, 钻机转速为1500转/分时, 整个钻孔孔壁给予钻杆的摩擦阻力为 $F_{总} = F \cdot i = 33 \times 20 = 660$ 公斤。这样大的摩擦阻力是否会影响钻头的井底压力? 是否需要极大的压力才能迫使钻头向下钻进? 实践证明, 在钻机高速回转钻进时, 并不需要加极大的压力, 钻头即可向下钻进。这是什么原因呢? 在钻进过程中, 钻杆在孔壁上沿着一条螺旋线滑动的。这条螺旋

表 5

转速n, 转/分	500			800			1000			1200			1500		
μ	0.6	0.5	0.4	0.6	0.5	0.4	0.6	0.5	0.4	0.6	0.5	0.4	0.6	0.5	0.4
W, 马力	1.8	1.4	1.1	6.8	5.6	4.5	13	11	8.7	22	19	15	44	37	30

螺旋线的螺距的大小, 取决于钻进速度与钻杆回转速度的比值, 即

$$\text{螺距 } S = \frac{v}{n}$$

式中 v —钻进速度, 米/分;

n —钻具转速, 转/分。

假设钻具转速为1500转/分, 钻进速度为4米/时 (即0.067米/分), 则

$$S = \frac{0.067}{1500} = 4.47 \times 10^{-5} \text{ 米}$$

$$= 4.47 \times 10^{-2} \text{ 毫米}$$

可见这是一条螺距非常小的螺旋线。钻杆就是沿着这样一条螺旋线在孔壁上滑动的。摩擦力的方向就是螺旋线的切向方向。如果把这条螺旋线展开为一斜面, 就可看出斜边的方向就是摩擦力的方向 (图8)。摩擦力沿水平方向的分力 F_x 非常之大, 而沿着钻杆轴向方向的力 F_y 非常之小。 F_y 值的计算如下:

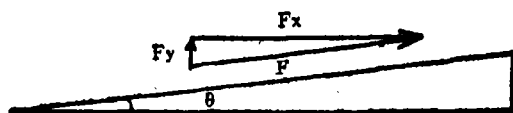


图8

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{S}{\pi d}$$

式中 d —钻孔直径, 47毫米。

$$\sin \theta = \frac{F_y}{F}$$

当 $\theta \rightarrow 0$ 时, $\operatorname{tg} \theta \approx \sin \theta$

$$\therefore \frac{F_y}{F} = \frac{S}{\pi d}$$

$$F_y = \frac{S}{\pi d} \times F = \frac{4.47 \times 10^{-2}}{\pi \times 47} \times 660$$

$$\approx 0.18 \text{ 公斤}$$

F_y 即为钻进时孔壁在垂直方向给予钻杆的摩擦阻力。螺旋线的螺距 S 值越小, F_y 值也越小。也就是说在钻具转速不变的情况下, 钻进时效越低, F_y 值越小。如果用乳化液洗孔, F_y 值就更小了, 完全可以忽略不计。因此, 不用担心钻杆与孔壁的摩擦力加大会影响井底压力。

乳化液的减摩作用

我们测定乳化液减摩作用的条件与生产条件是不完全相同的。在生产条件下乳化液携带有大量岩粉, 钻杆与孔壁的摩擦是浸在乳化液中进行的, 而实验中乳化液不含岩粉, 同时乳化液冲洗钻杆与岩样的摩擦面。因此所测出的数据虽然给出一定数量的概念, 但与实际有一定出入。

表6为用皂化溶解油配制的乳化液 (浓度0.5%) 冲洗摩擦面测得的摩擦系数。

对比表2与表6可以看出, 皂化溶解油配制的乳化液可以把钻杆与岩石的摩擦系数降至0.13~0.18, 只相当于用清水时的摩擦系数的1/2~1/3。这样, 钻杆与孔壁摩擦所消耗的功率就大为降低了。

为了说明问题, 我们粗略地计算了孔深100米, 用乳化液冲洗钻孔时, 钻杆与孔壁摩擦所消耗的功率 (表7)。当钻具转速达到1500转/分时, 消耗于钻杆与孔壁的摩擦功率仅为9.5~15.4马力, 较清水洗孔时所消耗的功率 (22~37马力) 低12.5~21.6马力。

表6

岩石名称	致密磁铁石英岩	粗粒磁铁石英岩	花岗岩闪长岩	混合花岗岩	大理岩	安山岩	凝灰岩
摩擦系数	0.13	0.17	0.17(0.28)*	0.21	0.14(0.26)**	0.18	0.17(0.27)***

* 当花岗岩闪长岩中的角闪石剥落时, 摩擦系数就显著提高, 而后摩擦系数又降下来;

** 开始时摩擦系数较高, 为0.26, 但随着接触面形成一层乳化油与岩粉混在一起的油膜后, 摩擦系数就降低到0.14;

*** 凝灰岩中有一层绿泥石、方解石组成的夹层, 其摩擦系数很高, 用水冲洗接触面时为0.48; 用皂化油乳化液 (浓度0.2%) 冲洗时为0.27。

表 7

转速n, 转/分	500			800			1000			1200			1500		
μ	0.13	0.17	0.21	0.13	0.17	0.21	0.13	0.17	0.21	0.13	0.17	0.21	0.13	0.17	0.21
W, 马力	0.35	0.46	0.57	1.45	1.90	2.34	4.88	6.40	7.85	8.08	10.0	13.0	9.50	12.5	15.4

乳化液的减摩特性

乳化液的减摩作用与其浓度、岩石性质有着密切的关系。通过测定发现有如图 4、图 5 所示的关系。从图中看出:

1. 当乳化液浓度等于零, 亦即用清水冲洗摩擦面时, 岩石与钻杆的摩擦系数是很大的。随着乳化液浓度的增加, 摩擦系数开始下降很快, 最后保持在一定的数值, 不再随着乳化液浓度的增加而继续下降。这个结果告诉我们, 乳化液浓度的选择有一个合理值的问题。

2. 乳化液只要极低的浓度(0.02%)就可起到减摩作用。我们在首钢勘探队进行的试验也证明了这一点。在孔深 98~133 米和用单管取心的情况下, 所用乳化液(皂化溶解油或太古油)浓度仅为 0.02~0.04%, 钻机转速开到 800 转/分, 电动机电流未超过 30A。

3. 同样岩石用不同乳化液, 或不同岩石用同样乳化液, 所测得的减摩特性曲线不

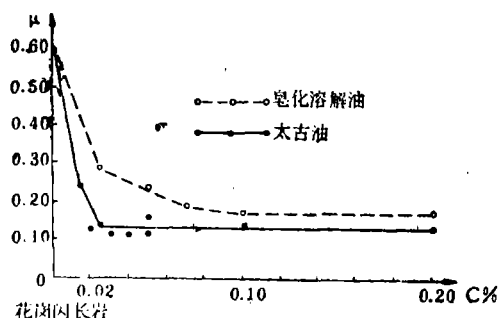


图 4 摩擦系数与不同乳化液浓度的关系

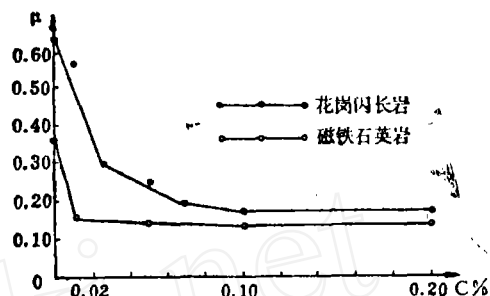


图 5 不同岩石摩擦系数与乳化液浓度的关系

同。就花岗闪长岩来说, 使用太古油比皂化溶解油具有更好的减摩效果。

乳化液的减摩效果与乳化液对岩石, 钻杆的吸附性有密切关系。不同的乳化液对岩石、钻杆的吸附性不同, 因而其减摩效果也各异。

应指出的是, 在室内测定的乳化液所需浓度非常低, 有的仅需 0.02~0.1% 就能使摩擦系数降至 0.12。但机台实际使用浓度要高, 达到 0.1~0.5%。这是由于金刚石钻头磨削下来的岩粉很细, 单位体积的表面积非常大, 而有些乳化剂又与岩粉有强烈的吸附性, 这样就使乳化液经过井底工作面后, 一部分乳化剂被岩粉吸附掉了, 从而降低了浓度。还有, 乳化液由于破乳不断地消耗, 也要求其配制浓度高于室内测定的浓度。

几种乳化液的比较

前已述及, 乳化液的减摩作用是随着岩石的不同而变化的。为了比较, 我们对一种岩石用几种乳化液作减摩试验。第一批测试

表 8

乳化液种类	防锈乳化油	太古油	极压乳化油	皂化溶解油
浓度, %	0.02	0.02	0.02	0.02
摩擦系数	0.23	0.12	0.15	0.15

表9

钻孔倾角	孔 深 (米)	岩 石	乳 化 液 种类及浓度	钻机转速 (转/分)	电 动 机 电 流 (A)
79°	400	石英闪长岩	皂化溶解油 0.3~0.5%	604	24~26
			太 古 油 0.2%		23~25
			防锈乳化油 0.2%		30~35

表10

序号	乳 化 液 成 分	减 摩 果
1	OP-10 3毫升 柴 油 30毫升 聚乙二醇 1毫升 +水至2000毫升	不 好
2	洗衣粉10克+水至2000毫升	不 好
3	广东934队自制乳化油配制0.1%乳化液	很 好
4	湖北皂化溶解油	很 好
5	平平加-A20 10% 30*机油 90% 配0.1%乳化液	不 好
6	C-125 3毫升 30*机油 30毫升 加水至2000毫升	好

的乳化剂是防锈乳化油、太古油、极压乳化油和皂化溶解油。岩样用斜长角闪岩。乳化液浓度均为0.02%。测试结果列于表8。

从表8看出,太古油的减摩效果最好,极压乳化油与皂化溶解油次之,防锈乳化油最差。在安徽812队试验机台也对这四种乳化剂进行了现场比较试验,结果与室内测定的是一致的(表9)。不过,现场测定的结果,不单是反映钻杆与孔壁的摩擦情况,还包含有乳化液对钻头、扩孔器磨削岩石的影响。

第二批测试的乳化液有六种,岩样用花岗闪长岩,减摩效果如表10。

小 结

综合以上试验可以认为:

1. 岩石与钻杆的干摩擦系数是不大的(在0.12~0.22之间)。
2. 在很多情况下,水对钻杆与孔壁的摩擦起增摩作用。钻杆对岩石的水摩擦系数为0.3~0.6,相当于摩擦系数的2~3倍。
3. 钻机高速回转时,消耗于钻杆与孔壁

摩擦上的功率,随着摩擦系数的增大而迅速增加,因此用清水洗孔,钻机转速开不上去。

4. 钻机高速回转时,虽然钻杆与孔壁的摩擦力增加了,但对井底压力影响极小,可以忽略不计。

5. 乳化液可将钻杆与孔壁的摩擦系数降低,从而使钻杆摩擦所消耗的功率大为降低。

6. 摩擦系数与乳化液浓度的关系,可以分为三个阶段:第一阶段,摩擦系数随着浓度的增加下降很快;第二阶段下降缓慢;第三阶段保持一定数值,不再随着浓度的增加继续下降。

7. 不同的乳化液对不同的岩石具有不同的减摩特性曲线。这与岩石、钻杆对乳化液的吸附作用大小有关。

8. 就斜长角闪岩来说,在所测定的几种乳化剂中,太古油的减摩效果最好,皂化溶解油和极压乳化油次之,防锈乳化油最差。自配的乳化液中,OP-10、洗衣粉、平平加-A20都有一定的减摩作用,但都不好,C-125较好。