

金刚石—岩石摩擦付和正常钻进的条件

汤凤林, 李粮纲

(中国地质大学工程学院, 武汉 430074)

[摘要] 提出了金刚石—岩石摩擦付的概念, 认为应用摩擦学理论来研究岩石破碎和钻进过程。根据岩石破碎比功评价法, 提出了利用轴压 P 、钻头转速 V 或钻头每分钟转数 n 的乘积, 即功率 $N = PV$ 或 $N = Pn$ 来研究钻探工艺规律性, 认为“轻压、快转、充足水量”符合这个规律性。

[关键词] 金刚石—岩石摩擦付 功率消耗 钻进工艺规律

[中图分类号] P634.4⁺ [文献标识码] A [文章编号] 0495-5331(2000)02-0063-04

地质钻探工程中, 特别是固体矿产勘探中, 金刚石钻进得到了广泛的应用。在市场经济条件下, 金刚石钻进正在不断地拓宽服务领域, 金刚石工具在地质钻探、工程勘察、石材加工、机械加工等行业的需求量日趋扩大。但是, 由于我国尚未找到大的天然金刚石矿床, 而且人造金刚石的质量不断提高, 产量足以满足需要, 因此在金刚石钻进和金刚石工具中主要使用人造金刚石。而人造金刚石颗粒很小, 常用的 46 目~80 目金刚石的粒径只有 0.4 mm~0.16 mm, 且在碎岩工具中多采用孕镶方式, 因此讨论在这种情况下金刚石是怎样破碎岩石的, 如何掌握金刚石钻进工艺的规律性是非常重要的。

1 金刚石—岩石摩擦付的提出

关于金刚石是如何破碎岩石的, 金刚石与岩石的关系怎样, 在过去的文献中有过许多的叙述和研讨, 但是意见不很一致, 前已指出, 我国地质钻探中孕镶钻头常用的人造金刚石大小多为 46 目~80 目, 其直径为 0.4 mm~0.16 mm。如以最大允许出刃按粒径的 1/3 考虑, 则仅为 0.13 mm~0.053 mm, 而且孕镶钻头自锐出刃情况不同, 实际上出刃值远远小于这个数字。在这种情况下, 将金刚石和岩石看成是一个摩擦付, 即金刚石—岩石摩擦付是合乎逻辑的, 国外许多专家学者也支持这种观点。

当向金刚石钻头施加轴载和扭矩时, 金刚石出刃切入岩石, 形成实际的接触点。钻头回转时, 旧的接触点被破坏, 形成新的接触点。金刚石切入岩石的深度取决于金刚石在胎体上出刃大小的高差、岩石性质、金刚石钻头机构和钻进规程参数等。

金刚石与岩石相互作用的示意图见图 1。其中

1 处金刚石处于外摩擦状态, 使岩石产生弹性变形, 不产生脆性破碎; 2 处金刚石使岩石产生脆性破碎, 此时先产生拉伸裂隙, 然后形成压密核, 然后形成剪切裂隙和剪切体; 3 处金刚石沿着先前金刚石破碎的岩层滑动; 4 处金刚石对因拉伸应力作用而变得松软的岩石进行剪切。

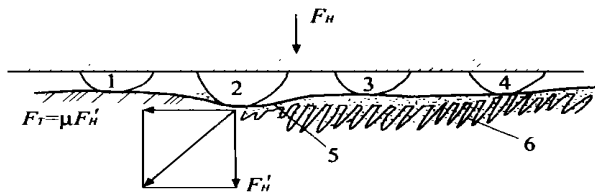


图 1 钻头上金刚石与岩石相互作用示意图

1—金刚石以外摩擦形式进行工作; 2—金刚石使岩石产生脆性破碎; 3—金刚石顺着前面破碎的岩层滑动; 4—金刚石剪切(因拉伸应力而引起的)松软岩石; 5—破碎区; 6—预破碎区; F_H —AB 线上的轴载; F'_H —单粒金刚石上的载荷; F'_T —剪切力; μ —摩擦系数

金刚石钻头(胎体和金刚石)在克服其在岩石中移动时产生的阻力过程中也经受磨损。其磨损程度与岩石变形性质有关, 分别可能是疲劳磨损、磨粒磨损或磨蚀磨损。如果把钻头胎体唇面看成是不均匀的粗糙面, 则胎体与岩石的接触将是点接触。当钻头沿岩石滑动时, 由于摩擦力做功, 则在触点区内产生一定数量的热。一是由于克服分子键而在摩擦表面生热, 二是由于表面变形而在一定深处生热。触点温度可以达到 1000℃左右, 正常钻进条件下岩体和胎体内温度为 100℃~200℃左右, 而且这个温度随距触点距离的增加而迅速下降。金刚石和胎体可通过冲洗液进行有效的冷却。

如果不能保证金刚石切入足够深度, 则在外界参数(轴载、转速、周围环境)不变情况下, 触点面积

增大,单位压力发生变化,摩擦系数变小,并在达到某个最小值后,形成带有弹性接触的摩擦付,这个过程在钻探工程中称之为金刚石钻头抛光。这种抛光在非常坚硬岩石(可钻性 11~12 级)中是非常稳定的,在钻进规程变化条件下,在不太硬的岩石中是容易被破坏的。

金刚石切入岩石的深度 h 与金刚石半径 r 之比 $\varepsilon = h/r$ 对金刚石钻头磨损有很大的影响。磨损过程与产生的热量有关,而热量又取决于接触面积,所以可以认为,在金刚石切入深度一定条件下,其传给岩石的热量小于本身产生的热量,因此金刚石磨损开始增加,在达到某一个正常水平后,金刚石钻头产生严重磨损或烧钻。

根据上述分析可把钻进过程分为 3 个阶段,即钻头抛光阶段、正常钻进阶段和钻头严重磨损阶段,如果处理不当,甚至可能发生烧钻(图 2)。

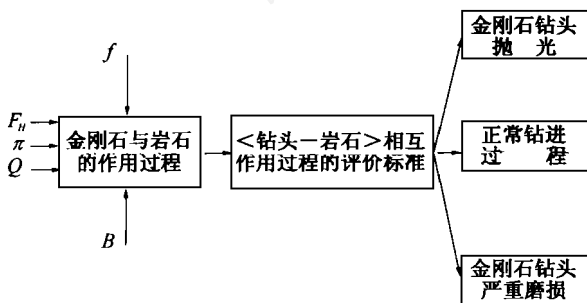


图2 《金刚石钻头—岩石》付相互作用过程示意图
 F_H —轴载; n —钻头转速; Q —冲洗液量; f —外界因素(岩石物理力学性质等); B —与钻进规程参数无关(钻头类型等)的参数

2 正常钻进过程的边界条件

如果把钻头—岩石相互作用看成是个摩擦付,则可利用摩擦学中的公式求出钻头—岩石相互作用付三个阶段的分析表达式。根据这个公式可以计算出由外摩擦转为微切削(内摩擦)的条件,即:

$$h/r + \tau/\sigma_T \geq 1/2 \quad (1)$$

式中: h —金刚石切入深度; r —球状金刚石半径; τ —摩擦剪切强度; σ_T —岩石屈服极限。

正常钻进过程可用下列不等式表示:

$$h_1 \leq h_H \leq h_3 \quad (2)$$

式中: h_1 —金刚石满足(1)式并表示转为微切削的切入深度; h_3 —与金刚石严重磨损相应的切入深度。

$$\because \tau = 2 F_T / A_{\text{球}}; A_{\text{球}} = 2\pi rh; F_T = \mu_c F'_H$$

式中: F_T —剪切力; $A_{\text{球}}$ —球状扇形块(金刚石切入部分)面积; 2 —考虑球状扇形块在运动过程中

只有一半承担载荷的系数; μ_c —金刚石运动阻力系数; F'_H —单粒球状金刚石上的载荷

$$\therefore \tau = \mu_c F'_H (\pi rh)$$

将 $\tau = \mu_c F'_H (\pi rh)$ 代入(1)式,我们得到

$$h^2 - \frac{r}{2} h + \frac{\mu_c F'_H}{\pi \sigma_T} = 0 \quad (3)$$

这是一个一元二次方程式,其根为

$$h_{1,2} = \frac{r}{4} \pm \sqrt{\frac{r^2}{16} - \frac{\mu_c F'_H}{\pi \sigma_T}}$$

假设(3)式是某个表示钻进过程状态函数 $f(h)$ 的导数,

$$f(h) = \int \left(h^2 - \frac{r}{2} h + \frac{\mu_c F'_H}{\pi \sigma_T} \right) dh$$

我们对其进行积分得

$$f(h) = \frac{h^3}{3} - \frac{r}{4} h^2 + \frac{\mu_c F'_H}{\pi \sigma_T} h$$

我们利用二阶导数来研究这个函数关系

$$f'(h) = h^2 - \frac{r}{2} h + \frac{\mu_c F'_H}{\pi \sigma_T}$$

$$f''(h) = 2h - \frac{r}{2}$$

对二阶导数进行分析表明, $h > r/4$ 时, $f''(h) > 0$, $h < r/4$ 时, $f''(h) < 0$,这就是说,在 $(r/4, -\infty)$ 区间, $f(h)$ 函数图形向上凸起;在 $(r/4, +\infty)$ 区间向下凸起。考虑到 $h = 0$ 时, $f(h) = 0$,而且 $f(h)$ 函数等于零就是这个函数与横轴的交点。我们来画这个函数的曲线图(图3),分析这个曲线图可见, $h = h_2$ 时, $f(h)$ 函数为负值,没有意义;满足不等式(2)左面部分的是 h_1 ,即

$$\frac{r}{4} - \sqrt{\frac{r^2}{16} - \frac{\mu_c F'_H}{\pi \sigma_T}}$$

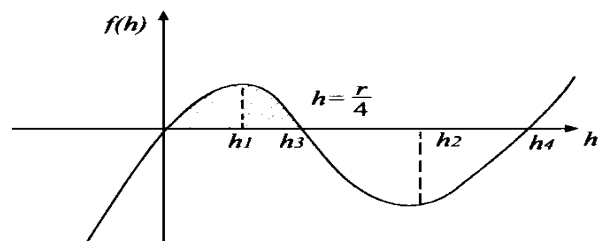


图3 函数 $f(h) = \frac{h^3}{3} - \frac{r}{4} h^2 + \frac{\mu_c F'_H}{\pi \sigma_T} h$ 曲线图

从图3可见, h_3 应该接近 $r/4$,因为函数就是在这个点二阶导数变号。这与 $f(h)$ 函数曲线在这个点与横轴相交有关。因此图3上的剖面线部分可近似地用不等式 $0 < h < r/4$ 表示。同时, $h < h_1$ 时的值

与外摩擦过程(金刚石钻头抛光) 相应, $h = h_1$ 的函数值与微切削过程相应。因此对于《金刚石 - 岩石》付接触一次情况来说, 正常钻进的边界条件为:

$$\frac{r}{4} - \sqrt{\frac{r^2}{16} - \frac{\mu F_H'}{\pi \sigma_T}} < h < \frac{r}{4}$$

3 钻进工艺规律性问题

象其它回转钻进方法一样,除了正确选择、使用钻头和正确操作之外,金刚石钻进工艺主要包括轴压、钻头转速和冲洗液(性能和数量)。冲洗液主要是保证钻进过程的正常进行,而破碎岩石主要靠轴压和钻头转速的作用。在衡量岩石破碎效果方面,比较公认的一种方法是比功法,即用破碎单位体积岩石所消耗的功的数量来衡量,这个功的数量愈小,则破碎效果愈好。而轴压和钻头回转是同时进行的,轴压 P (N) 和转速 V (m/s) 或 n (r/min) 的乘积正是功率消耗 $N = PV$ (N m/min) 或 $N = Pn$ (N τ/min)。可见,岩石破碎效果好坏、钻进过程正常与否,与功率消耗的关系非常密切。乌克兰超硬材料研究所进行的试验证明了这一点(图 4, 图 5)。

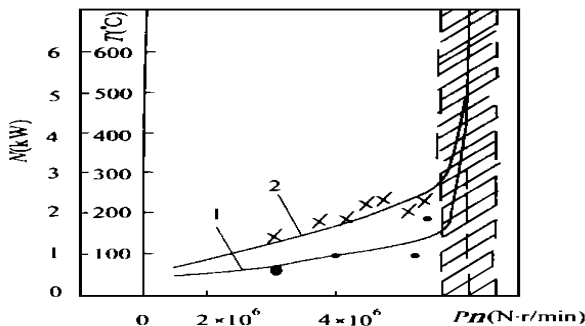


图 4 钻头胎体温度 (T , °C)、钻进功率消耗 (N , kW) 与 (Pn) 乘积的关系(剖面线部分为乘积临界值范围)

从图 4、图 5 可见,在正常规程 ($Pn < Pn$ 临界值) 条件下,胎体温度比较平稳,功率消耗增加比较平缓,钻头磨损正常;一旦 Pn 达到 Pn 临界值范围时,胎体温度急剧上升(提高 5~6 倍),功率消耗大幅增加(2~3 倍),钻头正常磨损变为非正常磨损(磨损强度增加 3~4 倍),甚至发生事故。所以,对于判断钻进过程是否正常来说, Pn 临界值范围是非常重要的。这个范围可以根据实验室试验结果确定,也可根据野外生产实践经验、用统计方法确定。乌克兰超硬材料研究所用直径 46 mm 孕镶钻头钻进石英含量高(达 23 %)的花岗岩时得到的 Pn 临界值范围为 $(61.1 \pm 3.8) \times 10^5$ N τ/min。

从数学上看, $Pn = \text{常数}$ (临界值范围) 是一个

双曲线(图 6)。我们使用的规程参数应该小于这个临界值范围,否则将会变成非正常钻进过程,甚至发生烧钻或其它事故。但另一方面, Pn 值不能太小,否则钻进效果将大为降低,甚至金刚石钻头抛光,因此,应该尽量接近这个临界值范围,如图 6 所示。图 6 上 P 和 n 有很多组合,如 P_1 、 P_2 、 $P_3 \cdots$ 和 n_1 、 n_2 、 $n_3 \cdots$ 等,其中 $P_1 > P_2 > P_3$, $n_1 < n_2 < n_3$ 。令图上第一个点 P_1 、 n_1 是较大压力、较小转速(重压慢转),第二个点 P_2 、 n_2 是较大转速较小压力(轻压快转)。究竟是轻压快转,还是重压慢转? 这要视岩石性质而定。例如,对于可钻性 9~10 级、研磨性不强的岩石来说,轻压快转是可取的;而对于研磨性强(如石英含量高)的坚硬岩石来说,重压慢转则是合理的。当然,在任何情况下,冲洗液都是非常重要的,其性能和数量都应能够满足正常钻进过程的需要,否则将影响正常钻进过程的进行,甚至可能发生事故。由此可见,我国前些年总结出来的“轻压、快转,充足水量”经验是符合这个规律的。但这只是这个规律性的一部分,而不是全部,因为在另一种情况下,可能就是“重压、慢转、充足水量”了。

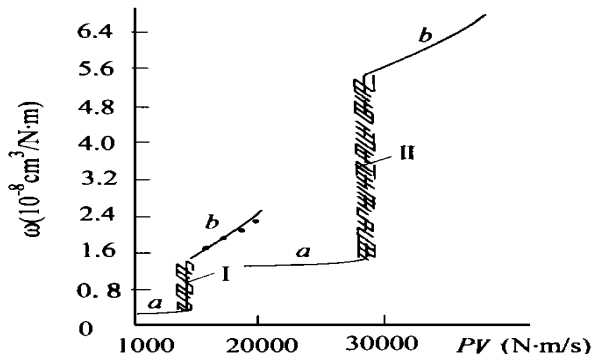


图 5 钻头磨损强度 (ω) 与 (PV) 乘积的关系
I—实验室条件下; II—生产条件下;
a—正常磨损; b—非正常磨损

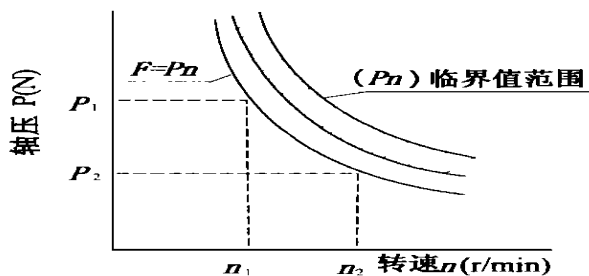


图 6 轴压 P (N) 和转速 n (r/min) 组合图

4 结束语

根据上述可以得出以下结论:

1) 与其它观点相比,用摩擦学中摩擦付理论来

分析和研究孕镶金刚石钻头破碎岩石过程是较为符合实际情况的,建议根据这种理论来设计钻头结构、研究钻探工艺过程和处理孔内复杂情况。其中金刚石切入深度是非常重要的,往往由它来决定钻头是否抛光还是严重磨损。当然这个切入深度与岩石性质、摩擦系数和金刚石大小有关。

2) 用功率消耗,即轴压和钻头转速的乘积作为衡量正常钻进过程的依据是合乎逻辑的。功率消耗极限值,即轴压和钻头转速乘积极限值是非常重要的,因为它是由正常钻进过程转为非正常过程、甚至发生事故的分界线。这个值可以通过实验室试验确定,也可根据生产实践总结确定。但在确定使用具体的轴压和转速时,还要考虑岩石性质、钻头性能、钻具尺寸和钻机特性等。

3) 从原则上讲,孕镶金刚石锯片切割岩石的情况与金刚石钻头钻进是类似的。关于金刚石一岩石

摩擦付的概念,应该同样适用。当然,锯切与钻进也不完全相同,其特点也应予以充分考虑并引起足够重视,不能完全照搬。

4) 地质勘探工作在调整,钻探工作量在压缩。但是,只要不断拓宽服务领域,继续提高钻头的使用性能,进一步认识并掌握钻进工艺的规律性,金刚石钻进和金刚石工具就可继续做出自己的贡献,就会大有作为的。

[参考文献]

- [1] Тан Феликс, Ламин Применение А И метода случайно Баланса для изучения износа алмазоносных матриц Межвузовский научный тематический сборник [J]. Свердловск 1987, стр 32~37.
- [2] Блинов Г. А., Васильев В. И., Егоров М. Г. и др. Алмазобработка технологии бурения недр [M]. Негра, 1989.
- [3] 李世忠. 钻探工艺学(上) [M]. 北京:地质出版社, 1992.
- [4] 汤凤林,等. 岩心钻探学 [M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1997.

DIAMOND - ROCK FRICTION COUPLE AND CONDITIONS OF NORMAL DRILLING

TANG Feng - lin , LI Liang - gang

Abstract : The concept of diamond - rock friction couple is proposed according to very small exposure of diamond from matrix in impregnated bit ,and the analysis and research on drilling process should be made with the concept. The product of bit weight and rotary speed is power expenditure ,which has a critical value under given conditions for normal drilling. In mathematics $PV = \text{constant}$ is a hyperbola ,and an experience of "less bit weight ,more rotary speed (and enough volume fluid) ", summarized more than ten years ago ,is one of the points at the curve ,therefore correct.

Key words : diamond - rock friction couple ,power expenditure ,optimization of drilling technology



第一作者简介:

汤凤林(1933 年 -),男,教授,博士生导师。中国地质大学(武汉)超硬材料应用研究所所长、俄罗斯自然科学院外籍院士、俄罗斯工程院外籍院士,现主要从事勘察工程和基础工程方面的教学和科研工作。

通讯地址:湖北省武汉市 中国地质大学工程学院 邮政编码:430074

我国首部《建设工程质量管理条例》发布实施

《建设工程质量管理条例》于 2000 年 1 月 30 日经国务院总理朱镕基签署,以第 279 号中华人民共和国国务院令发布,并自发布之日起正式施行。

《建设工程质量管理条例》共分九章八十二条。该《条例》全面规定了建设单位、勘察单位、设计单位、施工单位以及工程监理单位的建设工程质量责任和义务;规范了建设工程实行质量保修制度。同时,《条例》还明确了县级以上地方人民政府建设行政主管部门对本行政区域内的建设工程质量实施监督管理。

尤其令人关注的是,该《条例》的第八章罚则共用了二十四条,占了整个《条例》的四分之一强。对违反工程质量的,将被处理以罚款、降低资质等级或者吊销资质证书、行政处分直至依法追究法律责任。在罚款条款中最高可处 50 万元以上 100 万元以下的罚款。