

孕镶金刚石钻头胎体磨损的几何效应

王殿江

(中南工业大学·长沙市)

本文以摩擦学理论为基础,运用微观分析方法,探讨了孕镶金刚石钻头胎体磨损受岩屑粒度、骨架颗粒尺寸和唇部间隙等几何因素影响问题。特别是对硬磨粒磨损的粒度条件、唇部间隙对磨粒载荷的影响,以及骨架成分粒度对硬磨粒磨损和软磨粒磨损的不同影响进行了理论分析和阐述。

关键词 孕镶金刚石钻头 胎体 磨粒 磨损 几何效应



图 1 孕镶金刚石钻头

所谓胎体磨损的几何效应,是指胎体中的骨架成分粒度、岩屑粒度,以及唇面间隙值等几何因素对胎体磨损的影响。由于金刚石钻头胎体构成的复合性、钻进岩层的差异性以及钻进工艺的多变性,决定了胎体磨损方式和机理的复杂性,这也正是本课题的困难之处。国内外对孕镶金刚石钻头磨损问题进行了大量研究,但这类研究大多侧重于金刚石的磨损,对胎体磨损的研究却不多。关于胎体磨损的几何效应问题,虽有个别文献曾涉及到,但总的来说,这方面的工作还是初步的,远非完善和深入,理论方面的探讨尤嫌不足。

孕镶胎体磨损模式

钻头的工作过程是金刚石破碎岩石以及岩石和岩屑磨损金刚石和胎体两个同时进行的过程。钻头、岩石和岩屑构成了三体磨损摩擦副,从而形成对胎体的磨损。从摩擦角度看,这是一种磨粒磨损。进一步从岩屑与胎体的作用方式看,又存在 3 种不同的磨粒磨损形式。

首先是钻进时产生的未经二次破碎的岩屑挤夹在胎体唇部间隙中,以滚动和滑动方式作用于胎体,发生磨削式磨粒磨损。其次是冲洗液冲刷唇面时,其中的岩粉及粘土等固相颗粒发生冲蚀式磨粒磨损。最后,振动是钻头基本工作特征这一,而钻头回转线速度可达 3m/s 以上,并且岩屑从岩体上分离下来及受冲液作用均可获得动能,这些因素均导致岩屑以碰撞方式磨损胎体。因此,岩屑磨损胎体的方式的磨削、冲蚀和碰撞 3 种磨粒磨损的复合形式,属复合磨损。

对孕镶金刚石钻头胎体磨损机理的研究表明⁽¹⁾,磨损胎体的岩屑磨粒,根据其粒度和硬度的不同可分为 3 类:即硬磨粒、软磨粒和冲刷磨粒。磨粒硬度、粒度及所受载荷是影响磨损机制的三大要素。根据磨粒满足判断条件的不同,存在 3 种磨损机制。

1. 硬磨粒满足载荷条件时发生硬磨粒磨削式磨损。胎体消耗过程为整体磨耗。这是一种非正常磨损,有很高的磨损率,属体积磨损,其特征是唇面上出现超过骨架颗粒尺寸的深大磨削沟槽。

2. 软磨粒以及不满足载荷条件的硬磨粒发生软磨粒选择式磨损。胎体消耗过程为粘

本文 1992 年 10 月收到,王梅编辑。

结剂的优先消耗。这种磨损属正常磨损，磨损率较低，是一种选择性磨耗，其特征是唇面上的骨架颗粒“出露”于粘结剂面上，而骨架颗粒周围的粘结成分被优先磨耗掉了，这是由于许多磨粒对粘结相的磨损仍属硬磨粒磨损。

3. 冲刷磨粒及部分不受载荷作用的软磨粒发生磨蚀式磨损。胎体消耗过程为表面磨耗，亦属粘结剂优先消耗，但磨损率更低。由于磨粒所承载很小或无载荷，甚至对粘结相亦属软磨粒冲蚀磨损。

岩屑粒度的影响

磨损胎体的磨粒主要是岩屑。磨损试验表明，磨粒粒度不仅影响材料磨损率，更重要的是它还影响磨损机制。泰伯(D.Tabor)

发现，两种材料的硬度比达到 1.2 时，较硬者可划伤较软者⁽²⁾。使用普通材料和硬质合金材料完成的磨损试验也都证实，当磨粒硬度 H_a 和被磨材料硬度 H_m 之比达到 1.2 时，磨损机制发生转变^(3~5)。当 $(H_a/H_m) > 1.2$ 时，材料磨损率很高，且与载荷成正比，这种情况称之为硬磨粒磨损；当 $(H_a/H_m) < 1.2$ 时，材料磨损率很低，且变化复杂，称之为软磨粒磨损。

对孕镶金刚石钻头胎体的硬度 H_m 而言，有相当多的岩屑在硬度上属“硬磨粒”，但能否发生硬磨粒磨损，与粒度有关。假设有一颗硬度满足 $(H_a/H_m) > 1.2$ 条件的磨粒（如石英）位于钻头唇部间隙中，并与胎体表面上的一颗骨架颗粒 WC 相接触（图 1）。现在我们分析二者间的相互作用。

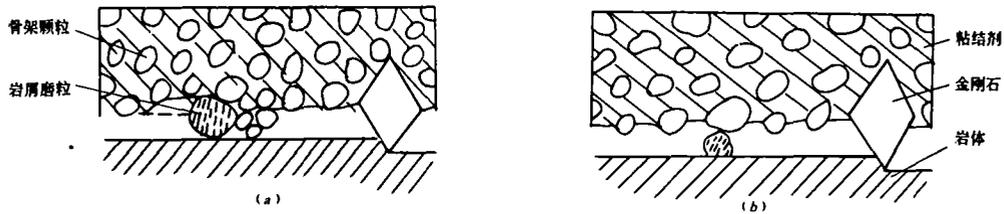


图 1 岩屑粒度影响示意图

显然，磨粒的单粒抗压强度 P_a 随其粒径 d_a 的增大而增加，虽然二者间的具体关系尚不清楚，但可表示为函数式

$$P_a = f(d_a) \quad (1)$$

而 WC 颗粒在受力方向上的投影面积 S_{wc} 与其投影面直径间的关系为

$$S_{wc} = K \cdot d_{wc}^2 \quad (2)$$

式中， K 为考虑非圆性的面积形状因子。

若胎体抗压入强度为 H_{pm} ，由使 WC 颗粒周围粘结相发生塑性变形的临界载荷应为

$$P_m = H_{pm} \cdot S_{wc}$$

将 (2) 式代入上式，则有

$$P_m = H_{pm} \cdot K \cdot d_{wc}^2 \quad (3)$$

在磨粒所承载足够大，即其最大值满

足

$$P_{max} > \min\{P_a, P_m\} \quad (4)$$

前提下，该磨粒与 WC 颗粒的作用结果不外如下两种：

① 若 d_a 较大， d_{wc} 较小，而使 $P_a > P_m$ 。则当磨粒与 WC 颗粒间的作用力 P 增大到 $P_a > P > P_m$ 时，WC 颗粒周围的粘结金属开始发生塑性变形，WC 颗粒被磨粒挤压入胎体深部，并随钻头回转，在切向载荷作用下，磨粒（推碾 WC 颗粒）在唇面上形成尺度大于 WC 粒径的深大犁削沟槽（图 1a），即发生硬磨粒磨损。此时，由于 P 仍小于 P_a ，石英颗粒不会发生破碎。

② 若 d_a 较小， d_{wc} 较大，而使 $P_a < P_m$ ，则当 P 增大到 $P_a < P < P_m$ 时，

该石英颗粒将首先破碎(图1b)。而此时 P 仍小于 P_m , WC颗粒周围粘结相不会发生塑性变形,因而只能发生软磨粒磨损。

由此可知,发生硬磨粒磨损的临界条件为 $P_a = P_m$,由(1)、(3)式得

$$f(d_{ao}) = H_{pm} \cdot K \cdot d^2 w_c \quad (5)$$

由(5)式确定的 d_{ao} 即为发生硬磨粒磨损的临界粒径。由该式可以看出, d_{ao} 除与磨粒本身单粒抗压强度有关,还受WC粒度、胎体抗压入强度等因素影响。而磨粒粒径只有满足

$$d_a > d_{ao} \quad (6)$$

才可能发生硬磨粒磨损,也才能成为名副其实的硬磨粒。

岩屑粒径受很多因素影响,如造岩矿物粒度、胶结程度、岩石强度和硬度、载荷大小,金刚石出刃等等。对于矿物颗粒粗、胶结弱、强度不大的岩石,在载荷较大、金刚石出刃较大的情况下,矿物颗粒多发生沿晶破裂,易形成粗颗粒岩屑,符合硬度和粒度条件的硬磨粒所占比重大,对胎体磨损较强烈。相反,对于硬度很高,胶结很强的岩石,即使造岩矿物颗粒粗,由于载荷相对不足,金刚石切深小,也会因矿物颗粒的穿晶断裂而细化^[6]。很少产生粗颗粒岩屑,因而很难发生硬磨粒磨损,对胎体的磨损很弱,打滑层即是例子。

胎体唇面间隙的影响

金刚石钻头胎体磨损与一般形式的磨粒磨损之间有一个重要差别,就是岩屑磨粒大多数情况下是在“载荷不足”的情况下磨损胎体的。这主要是由于金刚石出刃形成的唇面间隙 δ 的存在,使得钻头上的大部分轴向载荷被出刃金刚石所承担,而位于间隙中的磨粒所承载荷 P 很小,一般 $P < \min\{P_a, P_m\}$,不满足(4)式。因此,即便是满足硬度和粒度条件的硬磨料仍不能保证发生硬

磨粒磨损。而唇面间隙值 δ 的大小直接影响 P 的大小,因为只有

$$d_a > \delta \quad (7)$$

时,磨粒才有可能被挤夹在唇面间隙之间,获得足够大的载荷 P ,满足载荷条件(4)式。因此,在其它条件不变的前提下, δ 值愈小,满足载荷条件的硬磨粒将愈多,从而胎体磨损越强烈。

影响 δ 值的因素很多,如金刚石粒度、胎体耐磨能力和包镶能力、岩石硬度和研磨性、轴向载荷以及岩屑排出状况等等。研究表明,孕镶金刚石钻头出刃值约为金刚石粒径的10%^[7],对于常用的60/80目金刚石,出刃值应为25~18 μm 。而金刚石的切入深度,据计算非常微小^[8],可以粗略认为金刚石出刃值即为间隙值 δ 或略上。而对岩屑的研究表明,显然未能避免二次破碎的影响,仍有少数粗颗粒岩屑尺寸达到甚至超过金刚石出刃值^[8]。因此满足(6)式的磨粒在正常钻进情况下,是存在的,尽管数量很少。当金刚石粒度细、胎体耐磨能力强且包镶能力差、岩石研磨性弱时,金刚石出刃将减小,从而使唇面间隙 δ 值减小;而当岩石硬度低、轴向载荷大,导致金刚石切深增加时,其作用是双重的,一方面使唇面间隙减小,另一方面使岩屑粒径增大,从而使符合硬磨粒磨损条件的磨粒迅速增加,加剧胎体的磨损。值得一提的是,此时软磨粒磨损也会因岩屑量的增加和堆集而增大。这就是为什么采用不适当的大钻压追求过高时效,往往导致钻头磨损急剧增加,寿命缩短的原因。

骨架颗粒尺寸的影响

孕镶胎体由骨架成分WC颗粒和粘结相合金构成。其中骨架颗粒WC的粒度对胎体磨损有重要影响。

WC粒径尺寸对磨粒磨损机制的影响集中反映在(5)式中,即WC粒径影响硬磨

粒磨损的临界粒径尺寸，此处不再讨论。WC 粒度对胎体磨损还有其它的重要影响。

由克瑞门斯(W·S·Cremens)公式^[9]可知，若 WC 体积含量为 α ，WC 粒径为 d_{wc} ，WC 颗粒间距为 λ ，则

$$\lambda = \frac{2}{3} d_{wc} \left(\frac{1}{\alpha} - 1 \right) \quad (8)$$

即，当 WC 体积含量一定时，WC 粒度愈细，WC 颗粒间距 λ 值愈小，而 λ 值是影响软磨粒磨损以及冲刷磨粒磨损的一个重要因素。

1.对软磨粒和冲刷磨粒磨损的影响

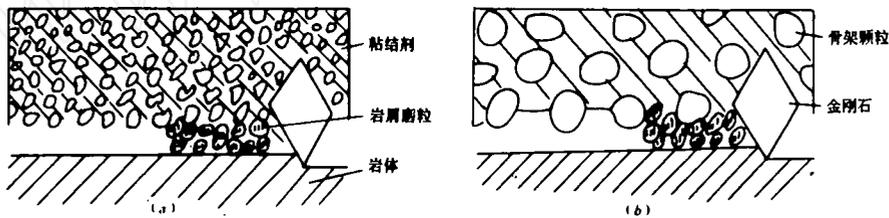


图 2 骨架颗粒间距 λ 值的影响示意图

2.对硬磨粒磨损的影响

对于满足载荷条件 (4) 式的硬磨粒磨损而言，胎体是以整体消耗模式被磨损的，此时 λ 值不是影响磨损率的主要因素，WC 的粒度才起主要作用。由 (5) 式可知，WC 粒径 d_{wc} 减小，则 d_{ao} 也相应减小，即有更多的磨粒满足硬磨粒粒度条件。一方面，在其它条件不变前提下，硬磨粒在载荷相对较小的情况下即可达到 P_m 值，形成犁削沟槽。因此，为了阻止软磨粒磨损而降低 WC 粒径时，会导致硬磨粒磨损的加剧。增大 WC 粒径尺寸 d_{wc} ，情况正好相反，会使某些原来以整体消耗模式磨损胎体的磨粒转变为以粘结剂优先消耗模式磨损胎体。增强了胎体抵抗硬磨粒磨损的能力。另一方面，WC 粒度的增大。同样又会导致软磨损的加剧 (因 λ 值增大)。

因此，在实际设计金刚石钻头孕镶胎体耐磨性时，首先应考虑钻进岩层的研磨性及

在胎体中 WC 含量不变条件下，采用细粒度 WC，而导致 λ 值减小时，岩屑中的相当大一部分软磨粒的粒径 $d_a > \lambda$ 。这些磨粒不能进入 WC 颗粒缝隙而有效地磨损粘结相 (图 2a)；相反，对粗粒 WC， λ 值较大，绝大多数岩屑粒径 $d_a < \lambda$ ，因而可以进入 WC 颗粒缝隙间，有效磨损胎体粘结剂 (图 2b)。即图 2a 中的有效软磨粒数目少于图 2b 中的。因此，胎体(a)磨损较慢，耐磨性好，而(b)正好相反。对软磨粒和冲刷磨粒以粘结剂优先消耗机制磨损胎体而言，降低 WC 粒度有利于提高胎体耐磨能力。

钻进其它具体条件，确定何种磨损为主要矛盾，然后再决定骨架颗粒的粗细。当然，还应注意骨架粒度的增大或减小都是有限的，还应考虑其相反方面的影响。此外，为了兼顾硬、软磨粒两种磨损模式，还可采取增加 WC 含量 α ，从而达到减小 λ 值的目的。但 α 值的增大也是有限的。WC 含量高，将降低胎体的抗冲击强度和包镶金刚石的能力。理想的解决办法是采用粗细混合粒度的骨架成分。均匀分布于胎体中的粗粒 WC 抵抗硬磨粒磨损，分布于粗颗粒 WC 间隙中的细粒 WC 阻止软磨粒磨损 (图 3)。从而，在不过多增加 WC 含量情况下，获得耐磨性能优良的胎体。采用球磨混料的意义也正在于此。

结 论

孕镶金刚石钻头胎体的磨损与岩屑粒度、胎体中骨架成分粒度以及唇面间隙值等

几何因素有密切关系。几何因素不仅影响磨损率，更重要的是还能导致磨损机制的转变。

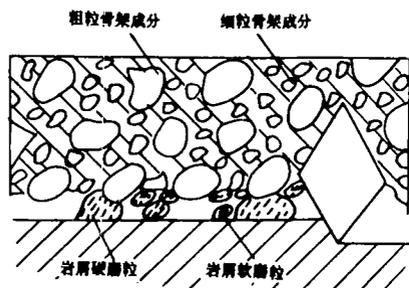


图3 混合粒度骨架成分胎体示意图

1.对硬度满足 $(H_a / H_m) > 1.2$ 的岩屑磨粒而言，能否发生硬磨粒整体消耗磨损与岩屑粒径有关。 $d_a > d_{a0}$ 是发生硬磨粒磨损的必要条件之一。

2.胎体唇面间隙值是影响胎体磨损的另一个重要因素， $d_a < \delta$ 是磨粒获得足够大的载荷前提之一。

3.胎体骨架成分粒度对两种机制的磨损有不同的影响。对软磨粒以粘结剂优先消耗模式磨损胎体而言，降低骨架颗粒粒度，有利于提高胎体耐磨能力；相反，在硬磨粒以

整体消耗模式磨损胎体情况下，增大骨架成分粒度，有助于增强胎体耐磨能力。

4.采用混合粒度的骨架成分，可以获得性能优良的胎体。粗颗粒骨架硬质点抵抗硬磨粒磨损的发生，细粒度骨架成分则起阻止软磨粒磨损的作用。因而，在无需过多增加WC含量的情况下，即可使胎体具有优良的耐磨性能。同时，并不损害胎体良好的抗冲击强度和包镶金刚石的能力

参考文献

- [1] 王殿江等，《第七届全国探矿工程学术会论文集》，中国地质学会探矿工程专业委员会，1992年。
- [2] Tabor D., Brit. J. APPL. Phys., 1956, 7, 159.
- [3] Richardson R.C.D., Wear, 1968, 11, 245.
- [4] Badese et al J.L., Wear of Materials, 1983, 161.
- [5] 科曼多端 R.,《硬质材料工具技术进展》，冶金工业出版社，1982年。
- [6] Marx C., Industrial Diamond Review, 1973, 11, 421.
- [7] 高森编译，冶金地质探矿技术，1990，4，31。
- [8] 布加耶夫 A.A.等，《人造金刚石在地质勘探钻进中的应用》，地质出版社，1981。
- [9] 黄培云，《粉末冶金原理》，冶金工业出版社，1982年。

Geometrical Effect of Diamond Impregnated Bit Crown Wearing

Wang Dian'jiang

On the basis of friction theory, the present paper deals with the problem that the wearing of diamond impregnated bit crown is affected by some geometrical factors, such as: grain size of drilling cuttings, dimension of bit frame grains and clearance of bit face. In particular, the influence of grain size upon the wearing of hard abrasive grains, the influence of bit face clearance upon the load capacity of abrasive grains and the different influences of grain size of different bit frame composition upon the wearing of hard and soft abrasive grains are analysed theoretically and expounded in detail.

