

人造金刚石孕镶钻头唇面状态与钻进的关系

罗超 李世忠 李砚藻 刘宝林

(探矿工程系, 北京 100083)

摘要 本文以金刚石在孕镶钻头中均匀分布为基础, 从理论上推导出唇面径向不同位置的金刚石切深、受力。结果表明, 在正常钻进情况下, 金刚石切深约为其出刃的 $1/10$, 且距钻头中心越近, 金刚石切深、受力越大; 并由此解释了实钻较微钻钻进能力更强以及随着钻压 (p)、每转进尺 (h) 的增大, 碎岩效果, 即单位钻压每转进尺 (h/p) 下降的现象。

关键词 金刚石, 出刃, 切深, 受力, 每转进尺。

中图法分类号 P634.53

第一作者简介 罗超, 男, 1966年生, 1987年毕业于中南工业大学地质系, 1993年获中国地质大学(北京)研究生院博士学位, 现为石油大学石油工程系博士后, 主要从事金刚石圆锯片的研制以及孕镶金刚石地质钻头和PDC石油钻头的设计及优化钻进研究工作。

0 引言

金刚石钻头唇面状态包括金刚石出刃状况、参与切削岩石的金刚石数目、金刚石切入岩石深度、金刚石受力、钻头唇面压力分布及其与金刚石浓度、粒度的关系等。

在金刚石钻进过程中, 钻头的唇面状态具有十分重要的地位, 它决定了金刚石出刃大小和金刚石切入岩石深度及数量, 进而决定了碎岩方式及岩粉颗粒大小; 岩粉颗粒大小又对金刚石及胎体的磨损结果起非常重要的作用, 进而影响钻头寿命, 因此钻头唇面状态很大程度上决定了金刚石的碎岩效果。

1 钻头唇面金刚石切深 h_r

现用人造金刚石可假定为圆球体, 且在工作层内均匀分布。设钻头金刚石浓度为 K (400%浓度制), 则单位体积内金刚石实际所占体积 $V_1(\text{mm}^3)$ 为

$$V_1 = 0.25 K \quad (1)$$

单粒金刚石体积 V_0 为

$$V_0 = \frac{200}{n_s \gamma} \quad (2)$$

式中200为1克拉金刚石质量(mg) γ 为人造金刚石密度, 取 $\gamma = 3.52 \text{ mg/mm}^3$; n_s 为1克拉金刚

石的颗粒数量, (粒).

则单位体积的工作层内金刚石数目 m_v (粒/mm³) 为

$$m_v = \frac{V_1}{V_0} = 4.4 \times 10^{-3} n_s K \quad (3)$$

金刚石在胎体内均匀排列, 按晶体正方结点排列计算唇面单位长度出刃金刚石颗粒数量 m_l (粒/mm) 为

$$m_l = (m_v)^{1/3} = 0.164 \times (n_s K)^{1/3} \quad (4)$$

根据式(4)得出唇面单位面积内出刃金刚石数目 m_A (粒/mm²) 为

$$m_A = m_l^2 = 0.0269 \times (n_s K)^{2/3} \quad (5)$$

图 1 是式(5)计算结果和实测结果对比. 实测结果以显微镜可视范围内所有出刃金刚石数量除以该可视范围的面积而得. 这里式(5)计算结果较实测结果大, 原因是金刚石分布、出刃不均等诸多因素引起, 因此以下的计算须进行修正, 即引入修正系数.

当钻头每转进尺为 h , 因金刚石相比于钻头胎体极其微小, 可以认为钻头为刚性体, 即唇面上每一点都同步前进, 亦即唇面每一切削线上所有金刚石每转切深之和相等, 为 h , 则钻头径向位置 r 处切削线上每粒金刚石切深 h_r (μm) 为

$$h_r = \frac{h}{(2\pi r - ab) \cdot m_l} \cdot \frac{c_3 c_4}{c_1 c_2} = \frac{6.1 \times h c_3 c_4}{(2\pi r - ab)(n_s K)^{1/3} c_1 c_2} \quad (6)$$

式中 r 为唇面金刚石距钻头中心的距离, 简称唇面半径 (mm); a 为水口数; b 为水口宽度 (mm); h 为钻头每转进尺 (μm); c_1 为金刚石分布不均匀系数, $c_1 \leq 1$, 金刚石分布越均匀, c_1 越接近于 1; c_2 为参与克取岩石的金刚石百分率, c_2 由出刃不均引起, 取 $c_2 = 1/2 \sim 1/3$, 混合目数时, c_2 取较小值; c_3 为金刚石非球体系数, 为球体时不易脱落, 且无尖锐切刃, 取 $c_3 = 1.2 \sim 1.5$; c_4 为金刚石加强系数, 一般取 $c_4 = 1.2 \sim 1.5$, 即由于金刚石钻进过程中崩刃, 脱粒而钻速加快之故, 金刚石品级越低, c_4 越大.

根据式(6), 现就以下几个方面进行探讨.

(1) 钻速 v_m 或钻头每转进尺 h 与浓度 K 的关系. 由式(6)得机械钻速 v_m (mm/min) 为

$$v_m = \frac{0.164 \times c_1 c_2}{c_3 c_4} \times h_r \cdot n \cdot (2\pi r - ab) (n_s \cdot K)^{1/3} \times 10^{-3} \quad (7)$$

式中 n 为钻头转速 (r/min). 可见, 钻速或钻头每转进尺与浓度 K 的立方根成正比, 即随着浓度

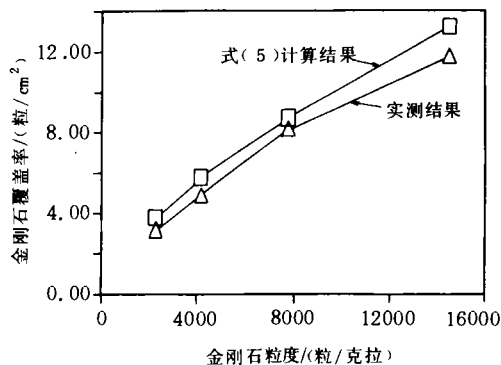


图 1 唇面单位面积金刚石出露数量的计算结果与实测结果

Fig. 1 Computed and measured protrusive diamond amounts on crown bit per unit area

的增大而缓慢地增加,如图 2 所示(这里为 $\Phi 65/39$ 实大钻情况,取 $c_1=0.8$, $c_2=0.5$, $c_3=1.4$, $c_4=1.4$, 金刚石粒度为 46 目,以钻头唇面平均半径处金刚石为准)。

(2) 每转进尺 h 与金刚石粒度关系. 式 (7) 又表明钻头每转进尺 h 或钻速 v_m 与金刚石粒度 n_s 的立方根成正比(在钻压能保证的条件下),即 n_s 越大,亦即金刚石颗粒越小,或粒度级别越大,每转进尺 h 或钻速 v_m 越高. 这是在保证 h_r 不变,亦即每粒金刚石切深一致情况下的结果. 这点同 Marx^① 试验研究的结果相同. Marx 以 150 粒/克拉粒度的金刚石代替 60 粒/克拉粒度,钻速或每转进尺可提高 50% 以上;相反,以 30 粒/克拉金刚石代替 60 粒/克拉时,钻速或每转进尺下降 30%. 用式 (7) 计算上述两种情况所得结果分别为 35.7% 和 26.0%,与 Marx 的试验结果相近. 在硬砂岩、片岩、花岗闪长岩以及片麻岩中的钻进试验结果也证实了这一点^②. 事实上,出刃随颗粒粒度的减小而减小,钻进实践中,金刚石出刃大到一定程度就脱落掉,即金刚石颗粒较小时更容易脱落. 同时,考虑到较大的金刚石颗粒为较大的金刚石出刃提供了可能性,而较大的金刚石出刃又为其较大的切深提供了可能. 因此以采用较大颗粒的金刚石为宜,且混合目数较好,这时 c_2 较小,这也验证了式 (6)。

(3) 单粒金刚石切深 h_r 与钻头每转进尺 h 的关系. 钻头每转进尺 h 越大,单粒金刚石切入岩石深度 h_r 也越大,如图 2 所示。

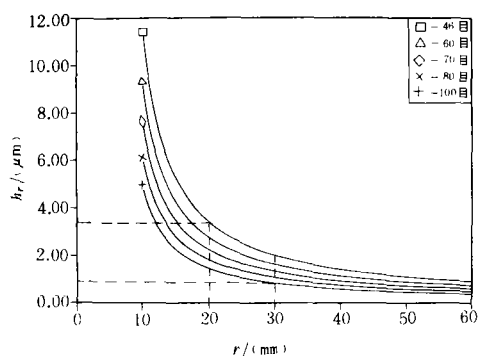


图 3 金刚石切深与其所处径向位置的关系

Fig. 3 Effect of diamond position on crown bit on diamond cutting depth

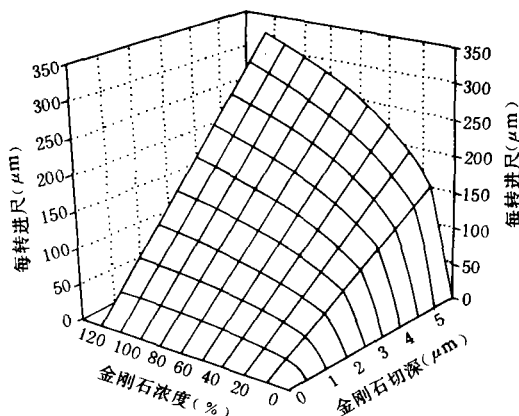


图 2 钻头每转进尺随金刚石浓度和切深变化情况

Fig. 2 Effect of diamond consistency and cutting depth on bit penetration per revolution

(4) 金刚石切入深度 h_r 与唇面半径 r 的关系. 当钻头一定, 即 n_s 、 K 不变, 则唇面不同径向位置的金刚石克入深度不一致, 距钻头中心越近, 金刚石切深越大. 从图 3 中可以明显看出 h_r 和 r 的关系, 这里 $c_1=0.8$, $c_2=0.5$, $c_3=1.4$, $c_4=1.4$, $h=120 \mu\text{m}$, $K=75\%$. 由图可见, 常规钻头(图 3 中半径在 20 ~ 30 mm 之间)的单粒金刚石切深在 0.4 ~ 4 μm 之间, 这与他人的研究结果相吻合. 同时, 式 (6) 和他人的研究结果都表明, 金刚石切深占其出刃的 1/10 左右, 即约 90% 出刃的空间供冷却

① Marx C; 安丽霞译. 金刚石钻岩研究. 北京: 冶金部地质研究所, 1981. 92 ~ 93

② Gerry Eng K 等; 齐世议译. 地质钻探孕镶岩心钻头设计参数的研究. 见: 地质矿产部勘探技术研究所编. 国外地质钻探学术讨论会论文集. 1987. 105 ~ 110

钻头和排除岩粉用,可见,钻进过程中胎体与孔底岩石表面直接接触摩擦的可能性是很小的。这点对金刚石钻进非常重要,如果切深过多且超过金刚石出刃的 1/10,一方面产生过多的岩粉,另一方面相应地减小了空间尺寸,这些都加剧胎体的磨损,且使得岩粉不能及时排出,水流不畅而引起糊钻;如果切深过小且不足其出刃的 1/10,钻速太低,易引起钻头抛光。

2 钻头唇面压力分布

设每粒金刚石切入岩石深度为 h_r , 则唇面径向位置 r 处半径为 a_0 的金刚石与岩石接触圆截面积 $A_0(\text{mm}^2)$ 为

$$A_0 = \pi(2a_0h_r - h_r^2) \times 10^{-3} = \pi h_r(2a_0 - h_r) \times 10^{-3} \quad (8)$$

式中 a_0 为金刚石半径 (mm)。

设岩石抗压入硬度为 σ_k , 为使金刚石切入岩石深度为 h_r , 据式 (8), 其上所受压力 p_r 要满足如下条件

$$p_r = A_0 \sigma_k = \pi h_r \sigma_k (2a_0 - h_r) \times 10^{-2} \quad (9)$$

式中 σ_k 为岩石压入硬度 (MPa)。

由于金刚石切深 h_r 小于其直径 $2a_0$ 许多, 可得金刚石受力 p_r 为

$$p_r = \frac{12.2\pi a_0 h \sigma_k c_3 c_4}{(2\pi r - ab)(n_s K)^{1/3} c_1 c_2} \times 10^{-2} \quad (10)$$

式 (10) 表明, 金刚石受力 p_r 与其距钻头中心距离 r 的关系和切深 h_r 与 r 关系类似, r 越小处的金刚石受力 p_r 越大, 即钻头内侧金刚石较外侧金刚石受力要大, 如图 4 所示 (这里为 $\Phi 56/39$ 实大钻情况, 钻头每转进尺: $h = 120 \mu\text{m}$; 浓度: $K = 75\%$; 岩石: 混合花岗岩, $\sigma_k = 4070 \text{ MPa}$ 。

对于常规钻头 (半径在 $20 \sim 30 \text{ mm}$ 之间), 单粒金刚石受力 $1.96 \sim 19.6 \text{ N}$ 之间。

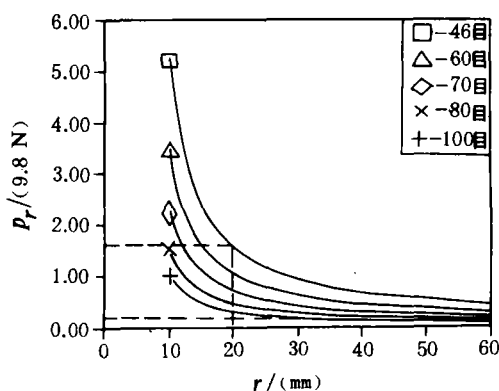


图 4 金刚石受力与其所处径向位置的关系

Fig. 4 Effect of diamond position on crown bit on the force on diamond

3 钻进试验研究

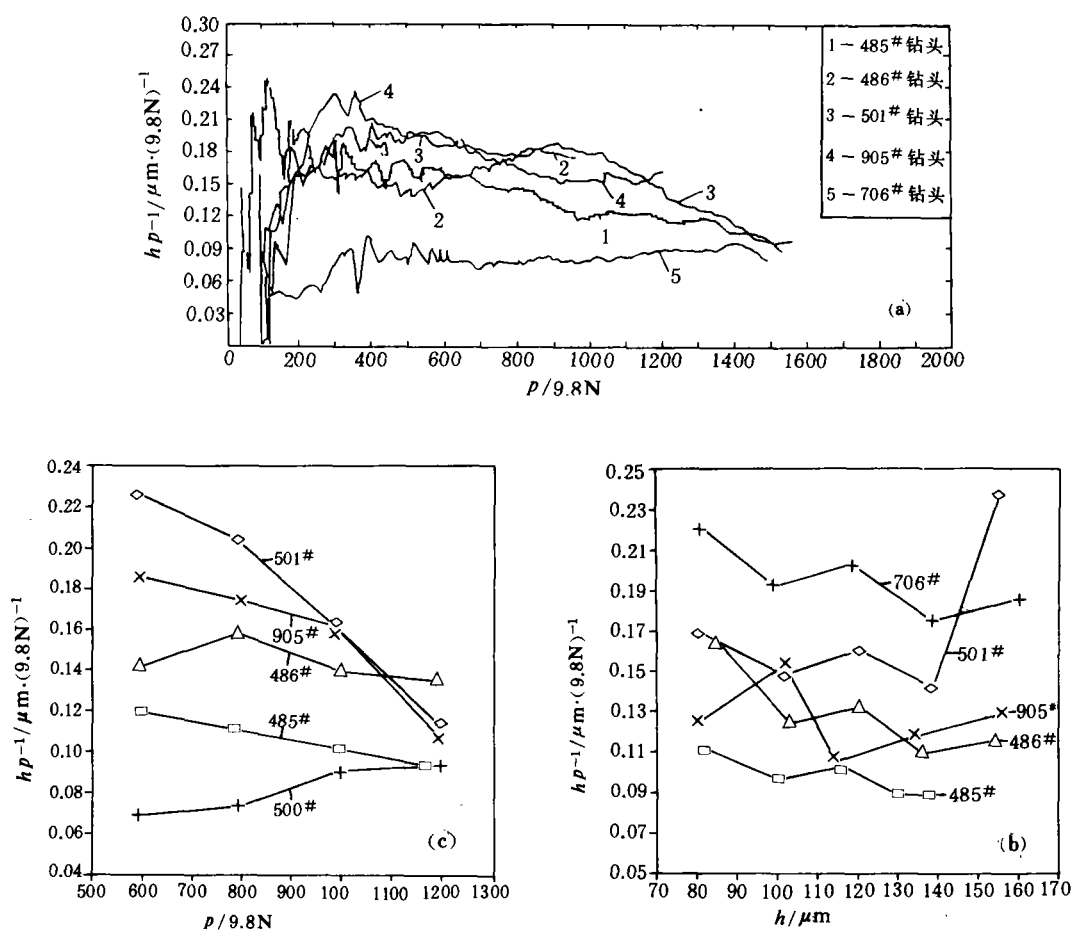
试验在中国地质大学 (北京) 实钻模

拟钻进试验台上进行, 该试验台采用微机对钻进过程中的钻压、转速、进尺、钻速、冲洗液量和压力等参数进行自动检测, 并实现对 3 个主要钻进工艺规程参数的闭环自动控制。

试验用钻头性能参数见表 1, 岩石为混合花岗岩 (压入硬度 $\sigma_k = 4070 \text{ MPa}$, 塑性系数

表1 $\Phi 56/39$ 人造孕镶金刚石钻头性能Table 1 Performance of $\Phi 56/39$ synthetic diamond impregnated bit

钻头 编号	金 刚 石 参 数			胎体 硬度 (HRC)	唇面形状	水口数量及规格 (个数, 宽度 $\times$ 深度) (个, mm $\times$ mm)
	品质	浓度 (%)	粒度 (目)			
485 [#]	JR ₄	75	80	33	平底形	6, 6 $\times$ 4
486 [#]	JR ₄	75	46	34	平底形	6, 6 $\times$ 4
501 [#]	JR ₅	75	60~70	30~35	梯齿形	6, 6 $\times$ 4
905 [#]	JR ₃	75	80	42.9	平底形	6, 6 $\times$ 4
500 [#]	JR ₅	72	60~70	30~35	平底形	6, 6 $\times$ 4
706 [#]	JR ₄	75	70	29	平底形	8, 5 $\times$ 5

图5 h/p 随钻压 p , 每转进尺 h 变化情况Fig. 5 Effect of bit weight p , penetration per revolution h on h/p a. 定 p 钻进; b. 定 h 钻进; c. 变 p 钻进

$k=1.44$).

试验在 3 种控制方式进行, 即定钻压 p 、定每转进尺 h 和逐渐增大钻压 p 、转速恒定. 研究表明, 在常规转速范围内, 转速对每转进尺影响很小. 当转速太高时, 由于岩心较短, 不利于数据采集, 因此, 这里转速采用 600 r/min, 同时, 用多个具各种钻头性能参数的 $\Phi 26/14$ 微钻头在中国地质大学(北京)的微机自控微钻模拟钻进试验台上进行对比试验, 以考查实钻和微钻的钻进能力以及随着 p 、 h 的升高、碎岩效果的变化情况, 并试图用上述结果进行解释. 这里碎岩效果以单位压力每转进尺 h/p 来衡量, 研究表明, 钻头不同、岩石不同时, h/p 不同, 它反映了岩石性能和钻头使用效果, 同时也表明了碎岩效果的高低. 试验结果表明: 同在混合花岗岩中钻进, 实钻可达每转进尺 180 μm , 甚至 200 μm , 而微钻达 60 μm 、甚至 50 μm 时, 金刚石已严重损伤; 同时发现, 随着 p 、 h 的增大, h/p 呈下降趋势, 即碎岩效果下降, 如图 5 所示.

现以式 (7) 和式 (9) 分别解释上述现象.

(1) 由上所述, 钻头唇面内侧金刚石切深较大, 承受的压力亦较大, 所以最内侧刃金刚石钻进情况决定了整个钻头使用效果, 因此以最内侧刃金刚石碎岩情况考查实钻碎岩能力较强的原因.

设实钻、微钻具有相同的金刚石浓度、粒度, 即 K 、 n_s 分别相等. 由于实钻规格尺寸较大, 其每条切线上出刃金刚石数量亦较微钻多, 本次试验用实钻内径为微钻内径的 3.09 倍, 按每粒金刚石切削同样深度的岩石, 即 h_r 相等. 根据式 (7), 实钻可达到的最大每转进尺 h 是微钻的 3.09 倍, 这正好与试验结果相吻合, 亦即微钻不可能获得实钻同样高的每转进尺. 若实钻、微钻规格尺寸相差大到一定程度, 即使强制加大微钻每转进尺, 因金刚石颗粒极其微小, 其结果则导致金刚石脱粒、断裂、破碎, 致使钻头寿命大幅度下降.

(2) 由式 (9) 可以证明金刚石受力 p_r 是其切深 h_r 的增函数 ($dp_r/dh_r = 2\pi(a_0 - h_r) > 0$). 这表明, 随着切深 h_r 的增大, 其受力 p_r 以大于切深 h_r 的增大幅度而增大, 即金刚石压力的增大导致切深较小幅度的增大. 切深的增大需压力的较大幅度增大, 于是便有图 5 的结果. 这是因为金刚石与岩石接触面截面积 A_0 随切深 h_r 的增大而增大, 并非为定值, 如式 (8) 所示.

4 结论

(1) 在正常钻进情况下, 金刚石切入深度约为其出刃的 1/10, 其余空间作为冲洗液的通道, 切深过大地超过其出刃的 1/10, 金刚石容易脱落、折断, 岩粉粗而多, 胎体磨损严重且易糊钻. 过小不足其出刃的 1/10, 钻速效率低, 且钻头易抛光.

(2) 钻头唇面不同径向位置金刚石的切深、受力不一致, 距钻头中心越近, 金刚石切深、受力越大.

(3) 实钻由于其规格尺寸较大, 较微钻可达到更高的每转进尺, 即实钻较微钻具有更强的工作能力.

(4) 随着钻压 p 、每转进尺 h 的增大, h/p 呈下降趋势, 即碎岩效果下降.

Relationship Between Crown Condition of Synthetic Diamond Impregnated Bit and Drilling

Luo Chao Li Shizhong Li Yanzao Liu Baolin

(China University of Geosciences, Beijing 100083)

Abstract

On the basis of that the diamonds distribute in the impregnated bit homogeneously, the article calculates the cutting depth and the normal force on the protrusion diamond on the crown. The results show that under the condition of normal drilling the cutting depth is about 1/10 of the diamond protrusion. And the closer the distance between the bit center and the diamond, the deeper the diamond cuts and the higher force the diamond stands. In the meantime, these results can be used to explain the phenomenon that the real-bit has more powerful drilling ability than the micro-bit, and the rock fragmentation effect decreases with the increase of bit pressure of penetration per revolution.

Key words diamond, protrusion, cutting depth, force on diamond, penetration per revolution.

* * * * *

(上接 864 页)

“分布于温度梯度大、热流强度大的部位”,有一定的指导找矿意义。

总之,该书内容丰富、资料翔实,是一部学术水平较高的花岗岩类岩浆动力学专著,对有关专业的科研人员、高等院校师生以及从事区域地质调查和矿产普查勘探的地质工作者均有重要的参考价值。

花岗岩类岩浆动力学这门新兴学科目前仍然有待深化、完善,诸如:地质历史长河中,地壳均衡作用、造山运动、海面升降、沉积岩相以及生物演化与岩浆动力学的关系;热点(柱)作用与岩浆动力学;挤压性和张裂性深成岩套同时存在的动力学机理,能否引入材料力学弹性基础悬臂梁概念加以论证(李扬鉴,1992);不同成因类型花岗岩类产出的地质背景不同,而且各自具有不同的岩石学、地球化学和成矿作用特征,S型和I型花岗岩类常成对同时产出,以及I型花岗岩类随距俯冲带的远近,其岩石学和地球化学特征逐渐变化等的原因;主动侵位和被动侵位的概念和判别标志;前构造、同构造和后构造侵入体的划分原则和标志;包体的成因分类及其地质意义;造岩矿物和副矿物中岩浆动力学信息的进一步发掘(如钾长石和斜长石的结构状态和环带状构造,钛铁氧化物中副矿物的平均粒度、分布密度和分布均匀程度等);热液成矿动力学研究领域的扩大和深化等,这些问题不单是该书作者,而且也是与岩浆动力学有关专业的地质工作者,今后必须共同努力解决的问题。