

小颗粒金刚石切削具破碎岩石阻力分析研究

汤凤林^{1,2}, 赵荣欣¹, Нескоромных В. В.³, 李 博¹,
刘 浩¹, 段隆臣², Чихоткин В. Ф.²

(1. 上海市建筑科学研究院有限公司, 上海 200032; 2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 3. 西伯利亚联邦大学(Сибирский федеральный университет), 克拉斯诺亚尔斯克(г.Красноярск) 660095, 俄罗斯(Россия))

摘要:钻进过程实际上是岩石破碎过程,是钻头破碎岩石的过程,也是岩石阻碍破碎的过程,二者都很重要。过去研究钻头破碎岩石较多,研究岩石阻碍破碎较少。孕镶钻头可以在6~12级可钻性岩石钻进中使用,适用范围比较广。孕镶金刚石钻头多用小颗粒金刚石作为切削具。俄罗斯钻探工作者研究了小颗粒金刚石切削具钻进时的岩石阻碍破碎问题,提出了可以用破碎阻力系数来研究和分析岩石阻碍破碎的情况。通过这个系数可以了解钻探技术指标与规程参数的关系、如何提高钻进效率、岩石破碎处于表面破碎状态还是体积破碎状态,以及确定如何提高钻探技术经济指标等。中国在这方面研究较少,尚未见到相关报道。此项研究具有参考和借鉴价值,建议对其进行讨论、研究,以确认其在提高岩石破碎效果和钻探工程技术经济指标方面的重要性。

关键词:切削具;孕镶金刚石钻头;小颗粒金刚石;岩石破碎;破碎阻力系数;规程参数;技术经济效益

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2025)05-0018-07

Analytical research on rock fragmentation resistance while drilling with small-sized diamond cutters

TANG Fenglin^{1,2}, NESKOROMNYKH V.V.¹, ZHAO Rongxin³, LI Bo¹,
LIU Hao¹, DUAN Longchen², CHIKHOTKIN V.F.²

(1. Shanghai Research Institute of Building Sciences Co., Ltd, Shanghai 200032, China; 2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China; 3. Siberian Federal University, Krasnoyarsk 660095, Russia)

Abstract: Drilling is a process of rock fragmentation practically. In the rock fragmentation process, on the one hand, the bit fragments the rock, on the other hand, the rock resists the fragmentation. Both aspects should be considered. In the past, the research on how drill bits fragment rocks has been extensive, but research on how rock resists fragmentation is insufficient. Impregnated diamond bits can be used to drill rocks with drillability grades 6 to 12. Their application scope is wide. Impregnated bits usually contain small-sized diamond cutters. Russian drillers have studied rock fragmentation resistance during drilling with small-sized diamond cutters and proposed using the resistance coefficient to analyze how rocks resist fragmentation. Understanding this coefficient can help address issues such as the dependence of technical indexes on drilling parameters, how to improve drilling results, what kind of state the rock fragmentation is in and to determine how to increase technical and economic indexes of drilling and so on. In China, the research on the resistance coefficient is insufficient and there are no relevant research reports. Therefore the research has certain reference value and practical significance. It is suggested that this research topic be explored to confirm its importance in improving the results of rock fragmentation and increasing the technical and economical indexes of drilling engineering in China.

收稿日期:2025-04-21; 修回日期:2025-05-20 DOI:10.12143/j.ztgc.2025.05.003

基金项目:国家自然科学基金面上项目“不同结构高压电脉冲钻头的破岩过程与预测模型研究”(编号:42272366)

第一作者:汤凤林,男,汉族,1933年生,教授,博士生导师,俄罗斯工程院外籍院士,俄罗斯自然科学院外籍院士,国际矿产资源科学院院士,主要从事探矿工程相关教学和科研工作,湖北省武汉市洪山区鲁磨路388号,fttang_wuhan@aliyun.com。

引用格式:汤凤林,赵荣欣,Нескоромных В. В.,等.小颗粒金刚石切削具破碎岩石阻力分析研究[J].钻探工程,2025,52(5):18-24.

TANG Fenglin, NESKOROMNYKH V.V., ZHAO Rongxin, et al. Analytical research on rock fragmentation resistance while drilling with small-sized diamond cutters[J]. Drilling Engineering, 2025,52(5):18-24.

Key words: cutting tool; impregnated diamond bit; small-sized diamond; rock fragmentation; fragmentation resistance coefficient; procedure parameters; technical and economic effects

0 引言

钻探工程在地质勘探和工程建设中起着重要作用。地质勘探和工程建设要求钻探工程有好的技术经济指标,取得好的技术经济效益。这些要求归根结底都与孔内岩石破碎情况有关。孔底岩石破碎与所使用的钻探设备、钻头钻具和钻探工艺参数有关。钻探技术指标可用机械钻速、钻头每转进尺和单位进尺能耗量表示。这些技术指标均与钻进规程参数有关,可以通过调节规程参数来调整和提高。

孔底岩石破碎实际上是钻头破碎岩石、岩石抵抗破碎的过程,是矛盾的两个方面,都要考虑。过去考虑钻头破碎岩石较多,考虑岩石抵抗破碎(阻力)较少^[1-9]。但是,研究和分析岩石破碎阻力,有助于更好地分析岩石破碎类型,讨论钻探技术指标与钻头、钻进规程参数的关系,从而提高钻探的技术指标。

金刚石钻进是一种高效的钻进方法,在地质勘探中也得到了广泛应用,特别是在可钻性6~12级岩石钻进中,推荐使用孕镶金刚石钻头。孕镶钻头中主要使用小颗粒金刚石,因此,研究小颗粒金刚石钻进时的孔底岩石破碎阻力具有重要意义^[10-30]。

1 钻探技术指标与钻进规程参数的关系^[1,3-4,9-10]

为了进行对比,俄罗斯钻探工作者^[10]利用二水平全因子试验方法研究了O1A3表镶金刚石钻头钻进辉长岩时的钻探技术指标:机械钻速 $V_m(\text{m}\cdot\text{h}^{-1})$ 、钻头每转进尺 $h_0(\text{mm}\cdot\text{r}^{-1})$ 和钻进单位进尺能耗量 $E(\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-1})$ 与钻头轴载 $P_{oc}(\text{dN})$ 、回转速度 $\omega(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$ 及其交互关系。研究表明,轴载的二水平是-1(400 dN)和+1(1200 dN),回转速度的二水平是-1(71 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)和+1(725 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)。考虑到钻井液的泵量和质量可以满足钻进的工艺要求,未予考虑,得到的相关数学模型分别为:

$$V_m = 4.525 + 1.425P_{oc} + 2.775\omega + 0.875P_{oc}\cdot\omega;$$

$$h_0 = 0.017 + 0.005P_{oc} - 0.007\omega - 0.002P_{oc}\cdot\omega;$$

$$E = 0.56 + 0.09P_{oc} + 0.16\omega + 0.017P_{oc}\cdot\omega。$$

模型的图解见图1,反映了钻探技术指标与规程参数的关系。图上的每一条曲线都反映了该指标与轴载、回转速度的关系。例如,图1(a)中,每一条机械钻速曲线(不同颜色)都是由轴载和回转速度配合得到。若想得到某一机械钻速的规程参数,可以从该条曲线与坐标系统的交点找到。例如,在该条曲线与横坐标的交点得到回转速度的值,该曲线与纵坐标的交点就是轴载的相应数值,以此类推。

2 岩石破碎方式与钻头每转进尺的关系^[9-10]

2.1 岩石破碎方式

根据压模试验结果^[9],按照破碎特点和钻进效果,岩石破碎有3种方式,见图2。

从图2可见,切削具上轴载 P 不大时,切削具与岩石的接触压力远远小于岩石硬度,由于破碎岩石必须克服岩石的结构强度(岩石硬度),所以,此时切削具不能破碎岩石。切削具移动时,将研磨孔底岩石,岩石的破碎是由切削刃与岩石接触摩擦所做的功引起的,因此,分离下来的岩石颗粒很小,钻进速度低,钻头进尺很小。这种破碎方式称为岩石表

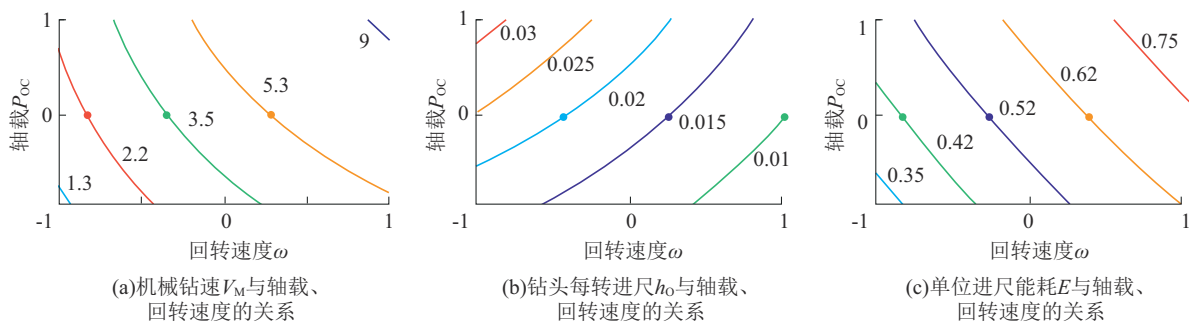


图1 数学模型图解

Fig.1 Graphic interpretation of the mathematic models

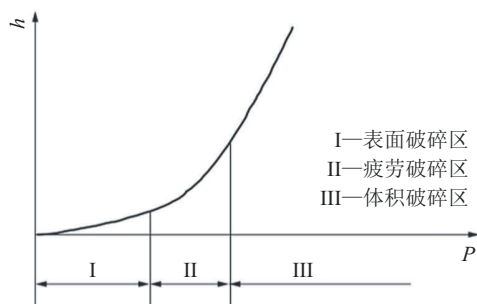


图2 岩石的不同破碎变形方式
Fig.2 Different modes of rock fragmentation and deformation

面研磨,这个区域称为表面破碎区 I。如果切削具上的轴向载荷增加,使岩石晶间结构破坏,岩石结构间缺陷发展,特别是孔底岩石受多次载荷影响产生的疲劳裂隙发展,于是众多裂隙交错,尽管切削具与岩石的接触压力仍然小于岩石硬度,但可产生

较粗颗粒的分离。这种破碎方式称为疲劳破碎,这个区域称为疲劳破碎区 II。如果切削具上的轴向载荷继续增加,达到切削具可以有效切入岩石的数值,其结果是:切削具在孔底移动时不断克服岩石的结构强度,切下岩屑。此时切削具与岩石的接触压力大于岩石硬度。这种破碎方式称为体积破碎,这个区域称为体积破碎区 III。体积破碎时,可以分离出大颗粒岩石,破碎效果好。

2.2 钻头每转进尺 h_o 与岩石破碎方式的关系^[10]

现以钻头每转进尺 h_o 为切入点,讨论岩石破碎方式与规程参数的关系。

钻头每转进尺 h_o ($m \cdot r^{-1}$) 如下计算:

$$h_o = \frac{V_M}{60\omega} \quad (1)$$

式中: V_M ——机械钻速, $m \cdot h^{-1}$; ω ——钻头回转速度, $r \cdot min^{-1}$ 。

表面疲劳破碎见图 3, 体积破碎见图 4。

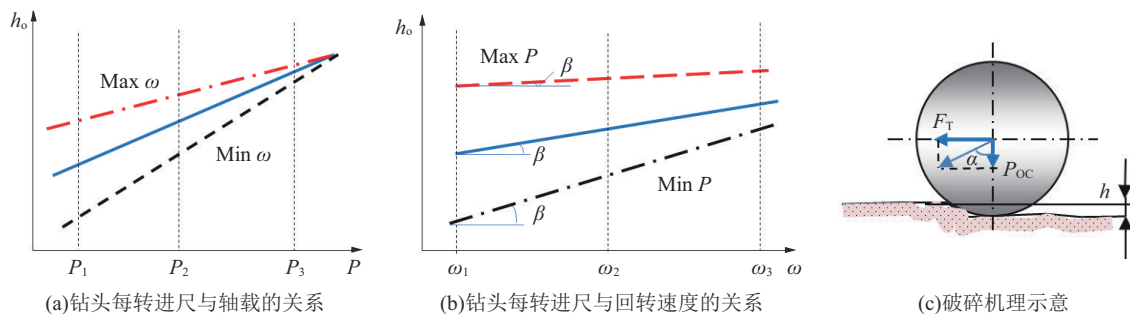


图3 岩石表面疲劳破碎方式
Fig.3 Mode of rock surface-fatigue fragmentation

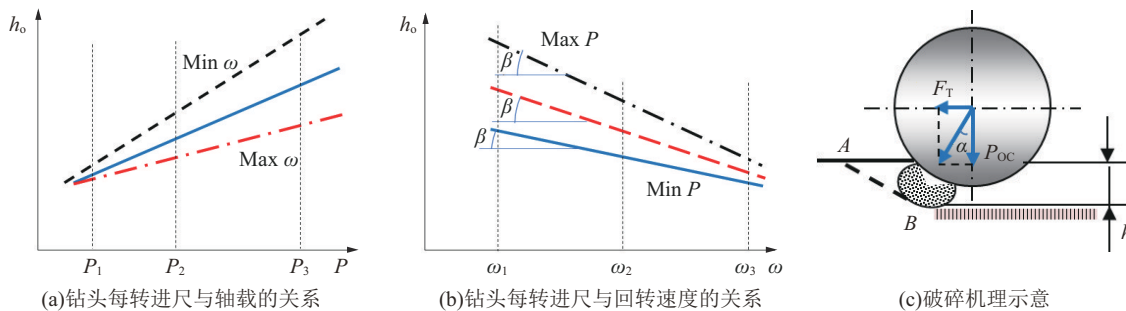


图4 岩石体积破碎方式
Fig.4 Mode of rock volumetric fragmentation

从图 3(b) 和图 4(b) 可见, 反映钻头每转进尺与回转速度关系的曲线(直线)的方向不同, 其倾斜方向相反, 表示这两种情况下岩石破碎机理不同。可以根据回转速度对每转进尺的影响特性, 判断出孔

底岩石破碎机理的特点。图 4(b) 中, 回转速度增加导致每转进尺降低, 说明岩石切削线性速度增加时, 孔底岩石破碎阻力增加。每转进尺直线倾斜角度 β 表示岩石破碎阻力大小, 所以, 可根据倾斜角度

β 的数值来判断岩石破碎阻力的大小,且 $\tan\beta$ 的数值等于钻头破碎岩石综合阻力指标(系数) μ_K 。

3 岩石破碎阻力系数 μ_K 的确定及其分析讨论^[9-10]

3.1 岩石破碎阻力系数的确定

孔底功率:

$$N = \mu_K P_{OC} R_n \omega \quad (2)$$

式中: μ_K ——岩石破碎阻力系数; R_n ——钻头唇面平均半径。

扭矩:

$$M_{kp} = F_T R_n = \frac{N}{\omega} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2),并考虑到钻头唇面上金刚石的数量 N_c 和岩石破碎槽深度 h_n ,整理后得切向力 F_T 为:

$$F_T = \frac{\mu_K P_{OC} h_n}{N_c h} \quad (4)$$

再考虑钻头钻进动力学分力 R_c ,得:

$$F_T = \frac{\mu_K P_{OC} h_n}{N_c h} + R_c \quad (5)$$

式中: h ——切削具切入岩石深度。

从图2和图3可知, $\alpha = \arctan \frac{F_T}{P_{OC}}$,代入式(5)

后得 $\alpha = \arctan \left(\frac{\mu_K P_{OC} h_n}{N_c h P_{OC}} + \frac{R_c}{P_{OC}} \right)$ 。

从资料^[10]可知, $\alpha = \arctan \frac{h}{d}$,故 $\frac{\mu_K h_n}{N_c h} + \frac{R_c}{P_{OC}} = h/d$,由此得:

$$\mu_K = \frac{N_c h (h/d - R_c/P_{OC})}{h_n} \quad (6)$$

式中: d ——切削具直径。

把摩擦系数 f 考虑在内,得:

$$\mu_K = \frac{N_c h (h/d - R_c/P_{OC})}{h_n} + f \quad (7)$$

从式(7)可见,与岩石破碎阻力有关的参数有:切削具切入岩石深度 h 、钻头唇面上切削具数量 N_c 、轴载 P_{OC} 、切削具直径 d 、破碎槽深度 h_n 、切削具和岩石的摩擦系数 f 、钻头钻进动力学分力 R_c 等。

3.2 岩石破碎阻力系数 μ_K 与切削具移动线速度、回转速度的关系

根据试验数据得到的岩石破碎阻力系数 μ_K 与切削具移动线速度和回转速度的关系见图5^[9-10]。从图5可见,岩石破碎阻力系数 μ_K 随切削具移动和

回转速度的增加而减小,这可能与岩石破碎槽深度 h_n 随切削具和回转速度的增加而减小有关(见图6)。

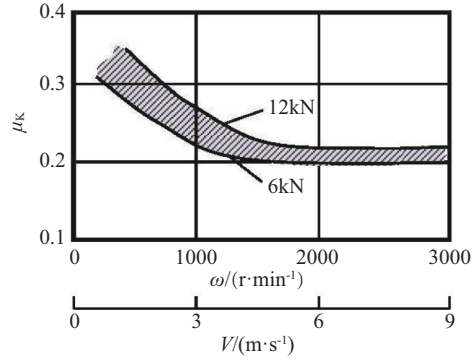


图5 岩石破碎阻力系数与切削具线速度、回转速度关系

Fig.5 Dependence of rock fragmentation resistance coefficient on linear speed of the cutter movement and rotary speed

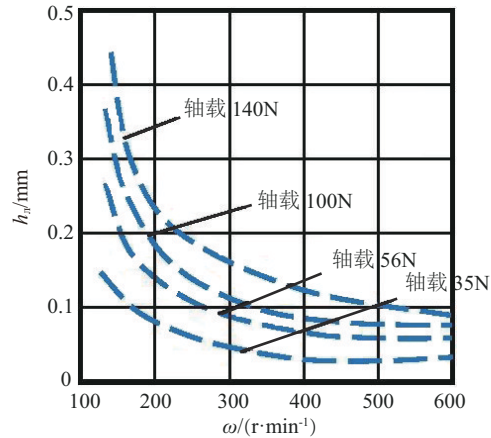


图6 岩石破碎槽深度与切削具回转速度的关系

Fig.6 Dependence of furrow depth of the rock fragmentation on rotary speed of the cutter

由式(7),岩石破碎阻力系数 μ_K 随着破碎槽深度 h_n 的增加而减小,说明理论推导和实际试验结果一致。

3.3 岩石破碎阻力系数 μ_K 与金刚石颗粒直径 d 的关系^[10,12,27]

式(7)表明,岩石破碎阻力系数 μ_K 与 h/h_n 有关,而 h/h_n 与所钻岩石硬度和钻头上所镶金刚石颗粒大小有关。例如,对于塑性强和硬度低的岩石来说, $h/h_n = 1$,说明钻头唇面上的所有金刚石颗粒都

参与了破碎岩石。如果破碎槽深度大于切削具切入岩石深度, $h/h_a < 1$, 则说明岩石破碎由切削破碎方式变为大颗粒和抛光金刚石切削具破碎坚硬弹性岩石时的压碎破碎方式。如果 h/h_a 位于 0.5~0.7 范围内, 则说明只有 50%~70% 的切削具参与了岩石破碎。

根据试验研究结果^[12], 切削具切入岩石深度 h 可由下式确定:

$$h = r - \sqrt{r^2 \frac{P}{\pi P_m (1 + \tan \Phi)}} \quad (8)$$

式中: r ——切削具半径; P ——切削具轴载; P_m ——岩石硬度; Φ ——岩石变形层的内摩擦角。

考虑式(7)和式(8), 得到岩石破碎阻力系数 μ_k 与金刚石切削具直径的关系, 见图 7。

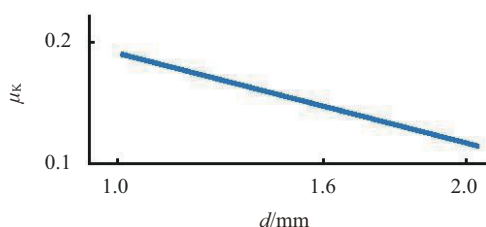


图 7 破碎阻力系数与切削具直径的关系

Fig.7 Dependence of fragmentation resistance coefficient on the diameter of cutter

3.4 岩石破碎阻力系数 μ_k 的分析与讨论

岩石破碎阻力系数 μ_k 是影响岩石破碎效果的重要指标。现有资料和试验研究结果^[9-10]表明, μ_k 通常在 0.02~0.6 范围内变化, 金刚石钻头钻进时, μ_k 为 0.22~0.31。如果切削具在孔底表面移动, 切削具切入岩石深度 $h=0$, 则从式(7)可知, μ_k 等于切削具和岩石的摩擦系数 f 。由于岩石性质、切削具的材料及其相互作用环境不同, f 通常在 0.02~0.13 范围内。

如果切削具切入岩石深度 h 为 $(0.16 \sim 0.36)d$ (金刚石颗粒直径), 则根据抛光金刚石切削具钻进试验资料得知, $\mu_k = 0.12 \sim 0.15$ 。金刚石钻头热力机械破碎岩石时, $\mu_k = 0.4 \sim 0.6$ 。故有效破碎岩石的阻力系数为 $\mu_k = 0.15 \sim 0.4$ 。

根据研究结果^[27], 岩石破碎阻力系数 μ_k 与机械钻速 V_m 的关系为 (参见图 5):

$$\mu_k = 0.135 + 0.0285 V_m \quad (9)$$

从图 5 可知, 回转速度增加时, 岩石破碎阻力系

数减小, 轴载增加时, 岩石破碎阻力系数增大。

可以用钻头回转速度调整每转进尺变化的情况, 来讨论和研究岩石破碎机理的特点。如果钻头在孔底产生的应力不能破碎孔底岩石、达不到破碎岩石需要的应力, 则会形成表面疲劳破碎。在这种情况下, 轴载的数值小, 不能实现体积破碎, 只有增加回转速度, 才能增加钻头每转进尺, 见图 3(b) 和图 4(b)。如果孔底岩屑堵塞, 岩屑排不出去留在孔底, 甚至在轴载达到岩石体积破碎需要的数值时, 也会出现类似情况。如果冲洗液供给量不能有效排出孔底岩屑, 岩石破碎仍是表面疲劳破碎。如果机械钻速增加而岩石破碎阻力减小, 就可以把这种情况区分出来。岩石切削剪切线速度增加时, 破碎阻力增加, 说明岩石破碎是体积破碎。在这种情况下, 回转速度增加会导致钻头每转进尺降低。所以, 可以说岩石破碎阻力的大小, 反映了岩石破碎的强度。根据阻力系数的变化情况及其数值大小, 可以判断岩石破碎的可能性。例如, 当岩石破碎阻力系数 μ_k 等于摩擦系数 f 时, 表明孔底没有进尺。

钻头回转速度对钻头每转进尺的影响, 在表镶金刚石钻头钻进时是曲线形式; 在孕镶金刚石钻头钻进时, 当回转速度超过一定限度条件下, 是直线形式, 见图 8。

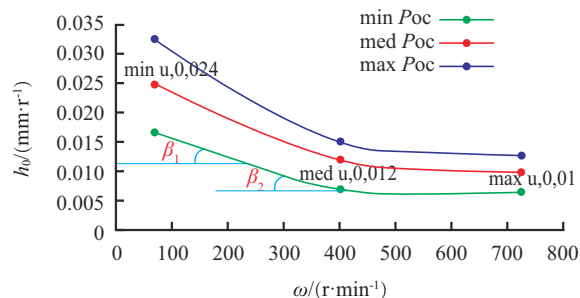


图 8 孕镶金刚石钻头每转进尺与轴载、回转速度的关系

Fig.8 Dependence of bit penetration rate per revolution on axial load and rotary speed

根据试验结果^[10], 孕镶钻头钻进时钻头每转进尺与轴载、钻头回转速度的关系见图 8^[9]。

图 8 中, β 角度的变化表示钻头每转进尺的变化。当回转速度达到 $400 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 以上时, β 的角度不变, 趋于零, 表示钻头不再进尺。说明应采用比较低回转速度进行钻进。

4 讨论与建议

根据上述研究成果,可做如下讨论和建议。

(1)钻进过程实际上是孔底岩石破碎过程。岩石破碎过程是钻头破碎岩石,岩石阻碍钻进,是矛盾的两个方面。过去对钻头钻进岩石的研究较多,对岩石阻碍钻进研究较少。

(2)岩石阻碍钻进,可用岩石破碎阻力大小,即阻力系数 μ_k 表示。与岩石破碎阻力系数 μ_k 有关的参数有:切削具切入岩石深度 h 、钻头唇面上切削具数量 N_c 、轴载 P_{oc} 、切削具直径 d 、破碎槽深度 h_a 、切削具和岩石的摩擦系数 f 、钻头钻进动力学分力 R_c 等。

(3)一般情况下,岩石破碎阻力系数 μ_k 在0.02~0.6范围内变化。金刚石钻头钻进时, $\mu_k=0.22\sim 0.31$,抛光金刚石切削具钻进时, $\mu_k=0.12\sim 0.15$ 。金刚石钻头热力机械破碎岩石时, $\mu_k=0.4\sim 0.6$ 。故有效破碎岩石的阻力系数 $\mu_k=0.15\sim 0.4$,应该根据这个阻力系数来调整钻进规程参数,以便得到更好的钻进效果。

(4)根据岩石破碎阻力系数的不同,可以判断岩石破碎是表面疲劳破碎,还是体积破碎。当切削剪切线速度增加时阻力增加,是体积破碎;机械速度增加时阻力系数降低,是表面疲劳破碎。应该据此调整规程参数,以实现体积破碎。

(5)6~12级可钻性岩石钻进时可用孕镶金刚石钻头,孕镶钻头多用小颗粒金刚石。小颗粒金刚石钻进时,应注意钻头的回转速度,过高的回转速度会导致岩石破碎槽变浅, $\tan\beta$ 趋近于0,钻头每转进尺大幅减少。此时应采用较低的回转速度进行钻进。可以根据回转速度对钻头每转进尺的影响特性,来判断岩石破碎机理的特点。

(6)中国过去对钻进时岩石破碎阻力研究较少,建议对此进行讨论、分析、研究,以确认其在改善岩石破碎效果和提高钻探工程技术经济指标中的重要性。

参考文献(References):

[1] 汤凤林, Нескоромных В В, 宁伏龙, 等. 金刚石钻进岩石破碎过程及其与规程参数关系的研究[J]. 钻探工程, 2021, 48(10): 43-55.
TANG Fenglin, NESKOROMNYKH V V, NING Fulong, et al. Research on the rock fragmentation process and its relationship with drilling parameters in diamond drilling[J]. Drilling En-

gineering, 2021, 48(10): 43-55.
[2] 汤凤林, 赵荣欣, 周欣, 等. 深部钻进用新型复合片钻头的试验研究[J]. 钻探工程, 2023, 50(1): 39-48.
TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, ZHOU Xin, et al. Experimental research on a new generation PDC bit used for deep drilling[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(1): 39-48.
[3] 汤凤林, 赵荣欣, Нескоромных В В, 等. PDC钻头钻进岩石破碎过程及其与钻进规程参数关系的分析研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(1): 5-14.
TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, Нескоромных В В, et al. Analytical research on the rock fragmentation process and its relationship with drilling parameters in PDC bit drilling[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(1): 5-14.
[4] 胡郁乐, 张惠, 王稳石, 等. 深部岩心钻探关键技术[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2018.
HU Yule, ZHANG Hui, WANG Wenshi, et al. Key Technologies in Deep Core Drilling [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2018.
[5] 汤凤林, 沈中华, 段隆臣, 等. 关于切削型多节式刮刀钻头的分析研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2017, 44(6): 88-92.
TANG Fenglin, SHEN Zhonghua, DUAN Longchen, et al. Analytical research on cutting type multitier wing bit[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(6): 88-92.
[6] 段隆臣, 潘秉锁, 方小红. 金刚石工具的设计与制造[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2013.
DUAN Longchen, PAN Bingsuo, FANG Xiaohong. Design and Manufacture of Diamond Tools[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2013.
[7] 朱恒银. 深部地质钻探金刚石钻头研究与应用[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2014.
ZHU Hengyin. Research and Application of Diamond Bit for Deep Geological Drilling[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2014.
[8] 朱恒银. 深部岩心钻探技术与管理[M]. 北京: 地质出版社, 2014.
ZHU Hengyin. Deep Core Drilling Technology and Management [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.
[9] 汤凤林, 加里宁, 段隆臣. 岩心钻探学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2009.
TANG Fenglin, Kalining A G, DUAN Longchen. Coing Drilling Technology[M]. Wuhan: The Press Of The China University of Geosciences, 2009.
[10] Нескоромных В В, Попова М С, Лию Б. Сопротивление породы при бурении мелкорезцовым алмазным инструментом [J]. Известия Томского политехнического университета, 2021, 332(6): 167-177.
[11] Нескоромных В В, Петенёв П Г, Неверов А Л, et al. Разработка и экспериментальные исследования особенностей работы алмазной коронки для бурения в твердых анизотропных породах [J]. Известия Томского политехнического университета, 2015, 326(4): 30-40.
[12] Скоромных В В. Разрушение Горных Пород При Бурении [M]. Красоярск: Издательство СФУ, 2014.
[13] Нескоромных В В, Петенев П Г, Иванов Д С. Основы

- проектирования буровых инструментов эксцентриситетом вооружения торцевой части для бурения анизотропных горных пород [J]. Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море, 2024, 2(374):63–69.
- [14] Нескоромных В В, Петенев П Г, Попова М С, et al. Алмазная коронка для бурения: RU 214925 U1[P]. 2022–05–04.
- [15] Спирин В И, Будюков Ю Е, Нескоромных В В, et al. Алмазная коронка для бурения: RU2014132259/03 [P]. 2014–08–05.
- [16] Кривошеев В В, Алмазная буровая коронка: 16205906[P]. 1988–10–17.
- [17] Нескоромных В В, Попова М С, Парахонько Е В. Разработка породоразрушающего инструмента с резцами PDC [J]. Инжиниринг георесурсов, 2020, 331 (2) : 131 – 138.
- [18] Чихоткин А В. Совершенствование методики проектирования инструмента с резцами PDC равнопрочного профиля с учетом особенностями механизма разрушения горных пород и сопротивления среды [D]. Россия, г. Москва: Российский государственный геологоразведочный университет, 2020.
- [19] Нескоромных В В, Попова М С, ЛБаочанг. Влияние среды прибойной зоны скважины на эффективность разрушения горной породы резцом PDC [J]. Инженеринг георесурсов, 2021, 332(9):119–127.
- [20] Нескоромных В В, Попова М С, ЛБаочанг. Резцы PDC с вогнутой поверхностью режущей грани [J]. Инженеринг георесурсов, 2022, 333(4):181–192.
- [21] Нескоромных В В, Попова М С, А Чихоткин В. Методика проектирования долот с резцами PDC, учитывающая динамические процессы резания – скалывания горной породы и сопротивление среды [J]. Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и море, 2020(4):14–17.
- [22] Нескоромных В В, Попова М С, Зотов З Г. Алгоритм управления системой алмазного бурения [J]. Инженеринг георесурсов, 2022, 333(2):81–89.
- [23] Нескоромных В В, СМПопова. Разработка методики управления процессом бурения на основе комплексного анализа критериев [J]. Записки Горного Института, 2019, 240:701–710.
- [24] Нескоромных В В, попова М С, ЛБаочанг. Разрушение Горных Пород При Бурении Скважин Алмазным Буровым Инструментом [М]. Красноярск, Россия: Сибирский федеральный университет, 2020.
- [25] В Нескоромных. Оптимизация В Геологоразведочном Производстве [М]. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2013.
- [26] Нескоромных В В, Попова М С, ЮХаритонов А. Влияние сил сопротивления на глубину резания – скалывания горной породы алмазным резцом [J]. Инжиниринг георесурсов, 2020, 331(10):40–48.
- [27] Буканов А А, Горшков Л К, Осецкий А И, et al. Принципы конструирования и эксплуатации алмазобго породоразрушающего инструмента [J]. Разведка и охрана недр, 2013, (7):44 – 49.
- [28] Коротков А В. Современный взгляд на основные задачи оптимизации алмазного бурения [J]. Науки о Земле и недропользование, 2011, 39(2):205–209.
- [29] Борисов К И. Современные Методы Оценки Сопротивления Горных Пород Резанию–Скалыванию При Бурении Долотами PDC [М]. Томск: ТПУ, 2013.
- [30] Третьяк А Я, Попов В В, Гроссу А Н, et al. Инновационные подходы к конструированию высокоэффективного породоразрушающего инструмента [J]. Горный информационно – аналитический бюллетень (научно–технический журнал), 2017, (8):217–222.

(编辑 王跃伟)