

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

汤凤林^{1,2}, 赵荣欣¹, Нескоромных В.В.³, 李博¹,
周欣⁴, 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 Федеративный Университет), 俄罗斯克拉斯诺雅尔斯克市
(г.Красноярск, Россия) 660095; 4. 湖北省地震局, 湖北 武汉 430064)

摘要: PDC复合片钻头在地质勘探和石油天然气钻井等领域得到了广泛的应用, 取得了很好的技术经济效果。但是, 对于其碎岩过程及其与钻进规程参数间的关系研究不够深入, 影响了技术经济指标的进一步提高。俄罗斯钻探工作者在这方面做了很多工作, 取得了一定效果, 值得引起我们的注意。例如, 他们建议, 由于岩石破碎方式是变化的, 所以, 尽量使岩石破碎处于体积破碎状态; 如果把钻头每转进尺能耗量指标作为一个评价指标考虑进去, 则评价系统会更加科学和更加全面; 钻头每转进尺, 不是越高越好, 有一个最优值, 这个最优值与钻进规程参数密切相关; 提出了临界钻进规程的概念, 即当轴载和转速的乘积高达一定数值时, 切削具温度急剧上升、钻头磨损明显加剧, 冲洗液量再大也无济于事, 因此, 此时应该采取措施, 及时调整规程参数, 避免钻进过程处于临界规程状态, 以便使钻进处于正常状态, 继续钻进下去。

关键词: PDC钻头; 油气钻井; 地质勘探; 技术经济指标; 岩石破碎过程; 钻进规程参数
中图分类号: P634.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)01-0005-10

Analytical research on the rock fragmentation process and its relationship with drilling parameters in PDC bit drilling

TANG Fenglin^{1,2}, ZHAO Rongxin¹, NESKOROMNYH V.V.³, LI Bo¹,
ZHOU Xin⁴, DUAN Longchen², CHIKHOTKIN V.F.²

(1. Shanghai Institute of Building Sciences Limited Company, Shanghai 200032, China;
2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China;
3. Siberian Federal University, Krasnoyarsk 660095, Russia;
4. Hubei Province Earthquake Agency, Wuhan Hubei 430064, China)

Abstract: Drill bits with PDC (Polycrystalline Diamond Compact) are used widely in geological exploration, oil and gas drilling and other corresponding fields and good technical, and economic results have been obtained. However, the research on the rock fragmentation process and relationship with drilling parameters is not enough and it affects the further increase of the technical and economic indexes of the PDC bits. Russian drillers have made a lot of work in this field, including the bits, and obtained definite success and it worth us pay attention to. For example, they propose that

收稿日期: 23-06-08; 修回日期: 2023-08-24 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.01.002

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, 中国地质大学(武汉)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, 从事探矿工程方面的教学和科研工作, 湖北省武汉市鲁磨路388号, fttang_wuhan@aliyun.com。

引用格式: 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, NESKOROMNYH V.V., 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.

rock fragmentation should be proceeded under volumetric fragmentation state as well as possible because the rock fragmentation mode is changed; If energy consumption of penetration per revolution of bit is included as an evaluation index, the evaluation system will be more scientific and more overall; Penetration per revolution of bit is not the higher the better, it has an optimum value. The value is depended from drilling parameters closely; it is put forward an idea of critical drilling parameters, meaning that while the product of bit weight and rotary speed is more, than the product, the temperature of the bit will rise drastically, the bit will wear seriously and any large quantity of drilling fluid cannot help resolve the problems. In this case it is necessary to take measures, adjust drilling parameters and avoid drilling process being in the critical state, so that drilling is in the normal state and the drilling can be continued.

Key words: PDC bit; oil and gas drilling; geological exploration; technical and economic indexes; rock fragmentation process; drilling parameters

1 岩石破碎概述

PDC(Polycrystalline Diamond Compact)复合片钻头在地质勘探、石油天然气钻井及其它有关领域得到了广泛的应用,取得了很好的技术经济效果^[1-12]。但是,对于其岩石破碎过程及其与钻进规程参数间的关系研究不够深入,影响了技术经济指标的进一步提高。俄罗斯钻探工作者在这方面做了很多工作,取得了一定效果,值得引起我们的注意^[13-34]。

在地质钻探和石油钻井中,向下钻进过程中如何破碎岩石是用压模试验台通过试验确定的,即根据压模试验结果,按照破碎特点和破碎结果确定的,岩石破碎有3种方式,见图1^[6,9-10]。

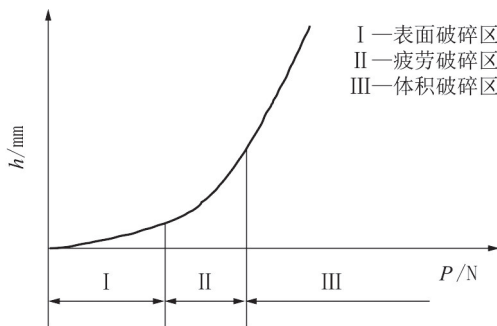


图1 岩石的不同破碎方式

Fig.1 Different modes of rock fragmentation

从图1可见,切削具上压模压力 P 不大时,切削具与岩石的接触压力远远小于岩石硬度,切削具不能破碎岩石,岩石的破碎是由切削刃与岩石接触摩擦所做的功引起的,分离下来的岩石颗粒很小,破碎速度低,破碎深度 h 很浅,这种破碎方式称为岩石表面破碎,这个区域称为表面破碎区I。如果切削具上的压模压力增加,使岩石晶间破坏,岩石结构间缺陷发展,特别是岩石受多次压力影响产生的疲劳裂

隙更加发展,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,但仍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。如果切削具上的压模压力继续增加,大于或等于岩石硬度,切削具可以有效切入岩石,在岩石移动时切下岩屑,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。

可见,在钻进过程中,应该尽量使岩石破碎处于体积破碎状态。

2 金刚石钻进岩石破碎过程及其与钻进规程参数的优化关系

2.1 金刚石钻进岩石破碎过程

我们可以以钻头切入岩石深度为切入点,来讨论金刚石钻进时的岩石破碎过程^[6,13,16](见图2)。

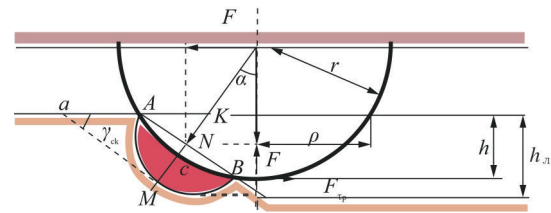


图2 金刚石破碎岩石过程示意

Fig.2 Scheme of rock fragmentation process by diamond

机械钻速 V_M 可按下式计算:

$$V_M = 60h_{\pi}nm_p$$

$$V_M = 60 \frac{V_T}{V_p \lambda C_r} \sigma n n_p = 60 \frac{V_T}{V_p \lambda C_r} \sigma n \frac{N_0 h}{h_{\pi}} \quad (1)$$

式中: V_T 、 V_p ——分别为岩石破碎形成裂隙的速度和金刚石移动的线速度,m/s; λ ——影响提高 V_T 各因素(如岩石结构缺欠等)的系数; C_r ——岩石单位体积刚度, N/cm^3 ; σ ——岩石压缩核中的应力, $N/$

cm^2 ; n ——钻头转速, r/min ; n_p ——切削线上有效破碎岩石的金刚石粒数, 粒; N_0 ——切削线上的金刚石总粒数, 粒; h, h_n ——分别为金刚石颗粒切入岩石的深度和岩石破碎形成裂隙的深度, mm 。

假设金刚石是球状的, 则式(1)中:

$$\sigma = R/S_{\text{ck}} = 4R/\pi dh \quad (2)$$

式中: R ——扭矩切力 F 和轴载 P 的合力; S_{ck} ——岩石破碎时的剪切面积。

岩石破碎形成裂隙的深度 h_n , 可以如下表示:

$$h_n = 0.25\cos\alpha(2h + \sqrt{dh}) \quad (3)$$

式中: α ——合力 R 和轴载 P 的夹角; d ——金刚石直径; h ——金刚石切入岩石深度。

金刚石切入岩石深度 h 为:

$$h = \frac{12\sqrt{P^2 + F^2}(1 + 2\sqrt{2l/a})}{\pi dE(3\varepsilon - \alpha_n t \ln \frac{\tau}{\tau_0})} \quad (4)$$

式中: P ——轴载, N ; F ——扭矩切力, N ; $2l$ ——裂隙长度, mm ; a ——晶格常数, mm ; d ——金刚石直径, mm ; E ——岩石弹性模量, Pa ; ε ——岩石破碎时岩石变形的相对变形量(长度); α_n ——岩石热膨胀系数, $\text{mm}/^\circ\text{C}$; t ——岩石表层温度, $^\circ\text{C}$; τ ——破碎载荷的施载时间, s ; τ_0 ——固体中原子振动周期, 为 $10^{-12} \sim 10^{-13} \text{ s}$ 。

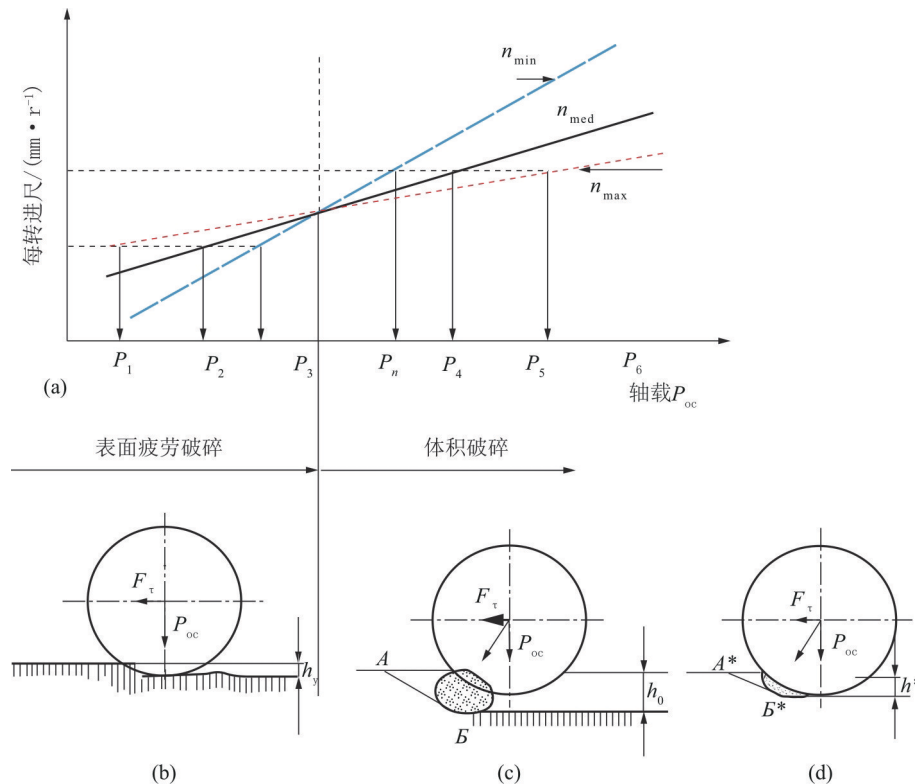
2.2 岩石破碎过程与钻进规程参数的关系^[6,13,16-17]

岩石破碎过程往往是以该过程中的钻进(岩石破碎)速度及其变化情况表示的。钻进速度可以用钻头每转进尺(mm/r)或机械钻速(m/h)表示。

钻头每转进尺与钻进规程参数的关系见图3。

从图3(a)可见, 如果轴载增加, 则不论钻头转速如何, 钻头每转进尺的数值都是增加的, 在岩石表面疲劳破碎阶段和体积破碎阶段都是如此。

钻头每转进尺与钻头转速的关系比较复杂。在表面疲劳破碎阶段, 如果轴载不能足以产生体积破



(a) 钻头每转进尺与钻进规程参数的关系; (b) 岩石表面疲劳破碎示意; (c) 低转速下岩石体积破碎过程示意; (d) 高转速下岩石体积破碎过程示意

图3 钻头每转进尺与钻进规程参数的关系及岩石破碎示意

Fig.3 The relationship between drill penetration per revolution and drilling specification parameters and the rock breaking scheme

碎,则转速高时的每转进尺 h_y 数值大是其特点。随着转速的降低,在轴载($P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow P_3$)增加时,每转进尺 h_y 的数值趋于相等。其原因在于在岩石疲劳破碎过程中,切削具多次重复循环施载而使岩石中产生大量的裂隙并使其发展,导致岩石强度和硬度降低。可见,当切削具载荷不能足以切入岩石时,如果采用高的钻头转速,则这种施载方式可能比较有效。

当施加的轴载 P_n 到达一定数值时,此时的轴载足以使切削具切入岩石,所以,破碎岩石变成体积破碎方式。但是,体积破碎时,钻头每转进尺的高值是在较低钻头转速($n, r/min$)下取得的,钻头每转进尺的数值是随钻头转速的增加而降低的。形成这种机制的原因是,在形成破碎穴时,岩石沿着孔底表面(AB 线)被切削具剪切下来。如果切削具移动速度(公式(1)中的 V_p)等于 AB (见图3c)方向上形成岩石分离裂隙的速度(公式(1)中的 V_T),则岩石破碎情况下是最优的。而在高转速时,切削具前面岩石分离裂隙的形成速度 V_T 小于切削具移动速度 V_p ,切削具承受的岩石阻力增大,犹如“漂浮”起来,即切削具切入岩石深度降低了(见图3d)。切削具“漂

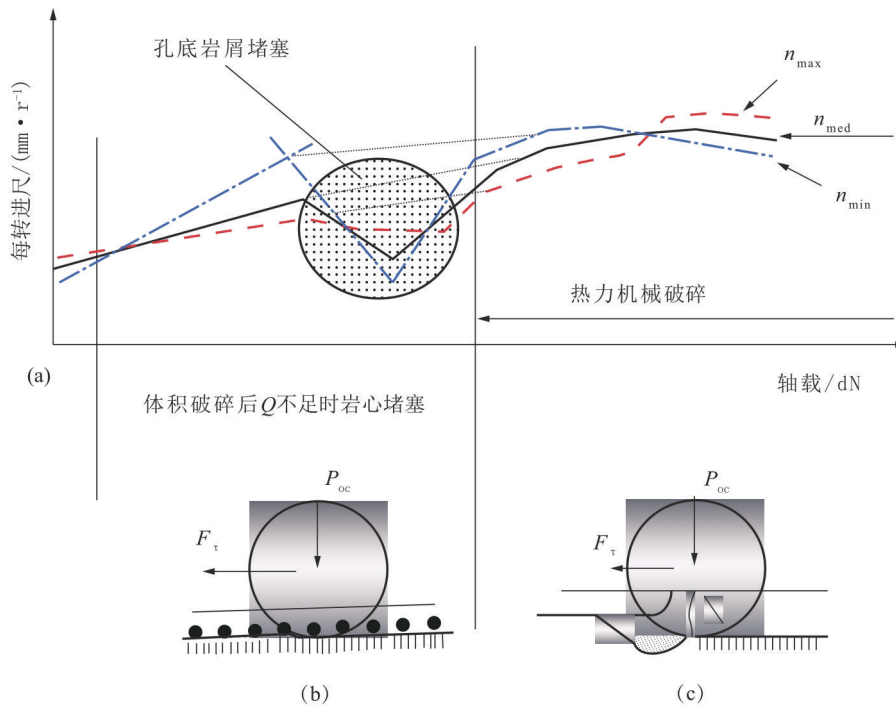
浮”时,应该减小分离裂隙 A^*B^* 长度,以便切削具移动速度重新等于分离裂隙 AB 形成的速度。

岩石体积破碎时,如果转速增加,可以通过增加轴载(P_4, P_5, P_6)办法,来使每转进尺 h_0 相近(图3a)。所以,为了保持合理的钻头每转进尺,随着钻头转速的增加,应该增加钻头轴载。

岩石体积破碎时,破碎效果良好。为此需要净化孔底岩屑,保持轴载和转速的合理组合,以便岩石分裂裂隙 AB (图3c)形成速度与切削具移动速度相应,即岩石压缩核中的应力,在剪应力和拉应力的作用下,足以剪切掉切削具前面的岩石。

孔底岩屑堵塞时,如果供给的冲洗液量不足,则岩石破碎条件恶化。在这种情况下,如果岩石体积破碎所需轴载足够充分的话,则可以看到与表面疲劳破碎类似的破碎方式,钻头切削具重复破碎岩屑垫,不能产生有效破碎岩石的应力。在这种情况下,钻头每转进尺与转速的关系,将与表面疲劳破碎方式类似,钻头每转进尺在较高钻头转速(n_{max})时达到高值(见图4a,b)^[13,16-17]。

但是,如果轴载过大,则会出现复杂的热力机械



(a) 钻头每转进尺与规程参数的关系; (b) 孔底岩屑堵塞时岩石体积破碎示意; (c) 热力机械破碎示意

图4 钻头每转进尺与规程参数的关系及孔底岩屑堵塞时岩石破碎示意

Fig.4 Relationship between drill penetration per revolution and specification parameters and schematic diagram of rock breaking when rock cuttings are blocked at hole bottom

破碎岩石的方式(图4c),此时钻头热力强度降低,导致钻头损坏。所以,为了避免钻头熔化损坏、甚至烧钻,应该停止钻进,采取相应措施。

3 PDC钻头破碎岩石过程及其与钻进规程参数的优化关系^[6,13,16-17]

PDC切削具钻进时,金刚石是破碎岩石的硬质点。从大类上来说,PDC切削具钻进应该属于金刚石钻进范畴。

俄罗斯西伯利亚联邦大学 Нескоромных В.В. 教授和吉林大学刘宝昌教授(在俄发表文章的中国作者)等,对PDC复合片钻头破碎岩石过程及其与钻进规程参数的优化关系进行了研究,取得了一定的成果。

3.1 岩石破碎过程受力分析

PDC切削具钻进时,轴载 P 和扭矩切力 F_p 在形成合力 R 的方向上对岩石施加作用。俄罗斯专家和史密斯公司的研究表明,在距复合片中心线 $0.8r$ (半径)处,切削具磨损最严重,说明此处的破碎阻力最大(见图5)。切削具钻进受力分析时,要考虑破碎岩石的作用力,也要考虑岩石中的应力(反力),要考虑切削具前面已经破碎岩石的阻力,也要考虑切削具转动时和介质(冲洗液)的阻力。

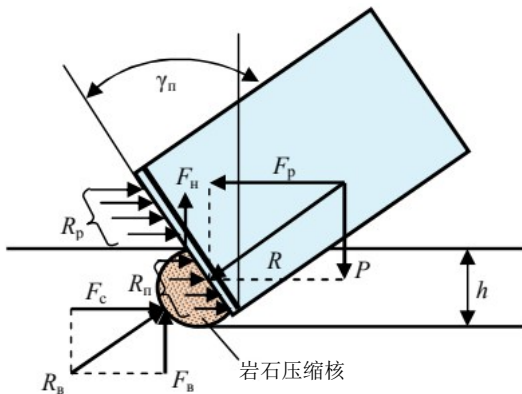


图5 PDC切削剪切破碎岩石时的受力分析

Fig.5 Force analyses of rock cutting-shearing by PDC

岩石切削剪切破碎时的反力(碎岩阻力) R_B 的方向与合力 R 的方向相反,与切削具端面成 90° 角度。

$$R_B = \sigma_{ck} S_{ck} K \quad (5)$$

式中: σ_{ck} ——岩石剪切强度极限,Pa; S_{ck} ——切削具前面剪切面积, m^2 ;K——考虑切削具线性速度提高

时岩石阻力增加的系数

$$S_{ck} = 0.5 \sqrt{dh} \frac{h}{\sin \gamma_{ck}} \quad (6)$$

式中: d ——切削具直径,m; h ——切削具切入岩石深度,m; γ_{ck} ——切削具前面剪切岩石角度, $(^\circ)$ 。

则(5)式可改写为:

$$R_B = \frac{\sigma_{ck} K \pi h^{\frac{3}{2}} \sqrt{d}}{2 \sin \gamma_{ck}} \quad (7)$$

考虑切削具移动速度和介质密度的介质阻力 R_p 为:

$$R_p = 0.5 V_p^2 \rho_c S c_c \quad (8)$$

式中: V_p ——切削具移动速度,m/s; ρ_c ——把从破碎区和破碎岩石中流出冲洗液的密度考虑在内的介质重量, N/m^3 ;S——切削具或其投影的面积, m^2 ;c_c——切削具形状系数(平面切削具为1,凸圆形切削具为0.5,圆弧形切削具为1.5)。

所以,沿着孔底回转的PDC切削具的总阻力为 $R_B + R_p$ 。

3.2 岩石破碎过程与规程参数关系

为了研究PDC钻头钻进时岩石破碎过程与钻进规程参数的关系,俄罗斯科研人员在实验室条件下,用直径76.2 mm、镶有6个直径10 mm PDC的钻头,在钻进大理岩时进行了试验。研究了钻进技术指标(机械钻速 V_0 、每转钻头进尺 h_0 、钻进功率 N_0 和单位进尺能耗量 N_0/V_0)与钻进规程参数的关系^[13,16-19]。

他们利用二水平、全因子试验设计方法进行了实验室试验。根据试验资料建立了这几个技术指标与钻进过程参数(钻压 P_{oc} 、转速 n 和冲洗液量 Q)关系的数学模型。由于冲洗液性能和数量都能满足试验要求,故在此只讨论下面这几个技术参数与钻头轴载、钻头转速的关系。

机械钻速:

$$V_0 = 5.84 + 4.53 P_{oc} + 3.15 n + 2.4 P_{oc} n \quad (9)$$

钻头每转进尺:

$$h_0 = 0.82 + 0.63 P_{oc} - 0.07 n - 0.05 P_{oc} n \quad (10)$$

钻进功率消耗:

$$N_0 = 10.04 + 8.38 P_{oc} + 3.66 n + 2.53 P_{oc} n \quad (11)$$

单位进尺能耗量:

$$\frac{N_0}{V_0} = 1.8 + 0.3 P_{oc} - 0.25 n - 0.306 P_{oc} n \quad (12)$$

图6是利用镶有6个直径为10 mm PDC的钻头钻进大理岩时,机械钻速 V_6 (m/h)与钻头轴载(dN)、钻头转速 n (r/min)的关系图。

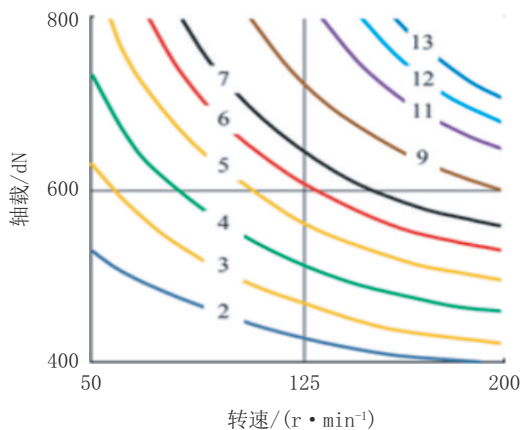


图6 机械钻速 V_6 与钻头轴载、钻头转速的关系
Fig.6 The relationship between the mechanical drilling rate V_6 figure and the bit shaft load and the bit speed

图7是钻头每转进尺 h_{06} (mm/r)与钻头轴载、钻头转速的关系图。

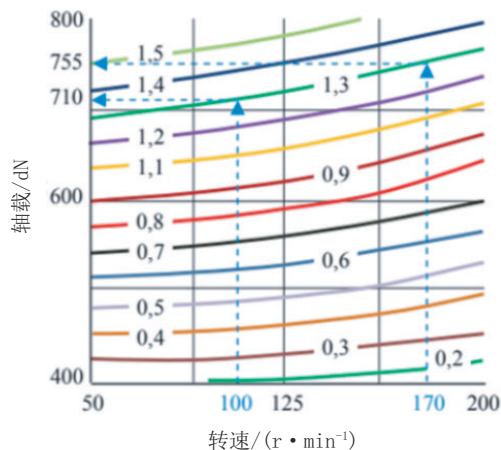
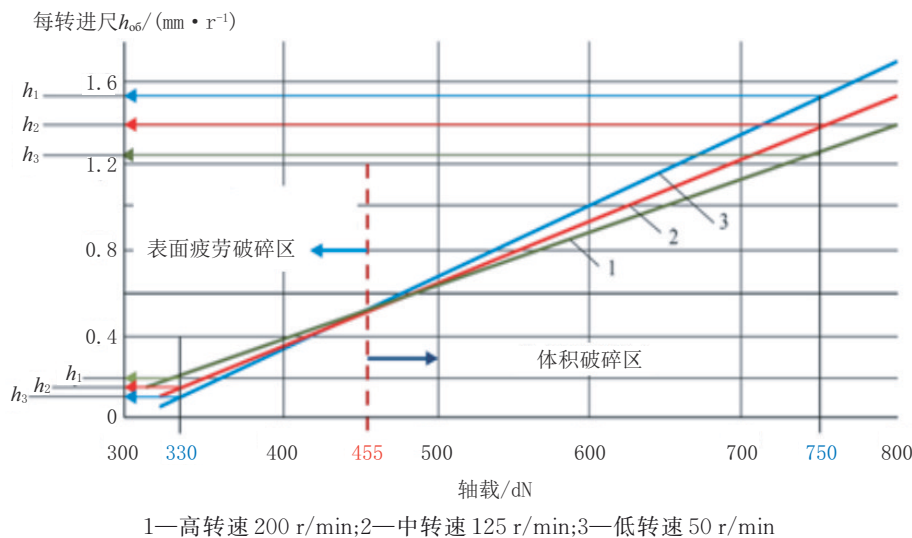


图7 钻头每转进尺 h_{06} 与钻头轴载、钻头转速的关系
Fig.7 The relationship between the bit footage per revolution h_{06} , the bit shaft load and the bit speed

12)最优值考虑在内,则最为有效的钻头每转进尺 h_{06} 是1.3~1.4 mm/r。此时可以得到最高的机械钻速(钻头转速由100 r/min提高到170 r/min,钻头轴载从710 dN提高到755 dN时,则机械钻速为7.8 m/h到13.3 m/h),见图6。

从图7可见,如果把单位进尺能耗量(见公式

图8是不同钻头转速时,钻头每转进尺 h_{06} (mm/r)与钻头轴载的关系图。



1—高转速 200 r/min;2—中转速 125 r/min;3—低转速 50 r/min
图8 不同钻头转速时,钻头每转进尺 h_{06} 与钻头轴载的关系
Fig.8 The relationship between h_{06} per bit revolution and shaft load of the bit at different bit speeds

从图8可见,钻头轴载为455 dN时,钻头每转进尺 h_{06} (mm/r)出现转折点。这个轴载把岩石破碎过程分成了岩石表面疲劳破碎部分(455 dN以前)和体积破碎部分(455 dN以后)。

岩石破碎方式以及钻头每转进尺与钻头转速的关系为:

(1)岩石表面疲劳破碎时,轴载数值(岩石应力)不足以产生体积破碎,最大钻头每转进尺 h_1 在钻头

转速最大(200 r/min)时出现,最小钻头每转进尺 h_3 在钻头转速最小(50 r/min)时出现。

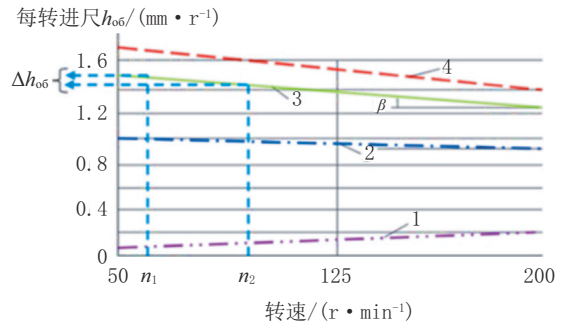
(2)岩石体积破碎时与此相反,最大钻头每转进尺 h_1 在钻头转速最小(50 r/min)时出现,而最小钻头每转进尺 h_3 在钻头转速最大(200 r/min)时出现。

图9表示岩石表面疲劳破碎、轴载 330 dN时,钻头每转进尺 h_{06} (mm/r)与钻头转速的关系,以及岩石体积破碎、轴载 600、700、800 dN时,钻头每转进尺 h_{06} (mm/r)与钻头转速的关系。

从图9可见,岩石表面疲劳破碎(图9中的曲线1)时,钻头每转进尺随着钻头转速的增加而增加。而在体积破碎时,例如图9中的2、3、4曲线,钻头每转进尺随着钻头转速的增加而降低,说明随着切削剪切线速度的增加,来自岩石和介质的阻力增加了。当轴载及与其相应的切入岩石深度增加时,岩石切削剪切速度减慢。速度减慢系数 K 可以用 β 角表示:

$$K = \tan\beta = \frac{\Delta h_6}{\Delta n} \quad (13)$$

式中: Δh_6 ——钻头转速提高(例如从 n_1 提高到 n_2)时的钻头每转进尺降低值; Δn ——钻头转速提高的区



1—330 dN;2—600 dN;3—700 dN;4—800 dN

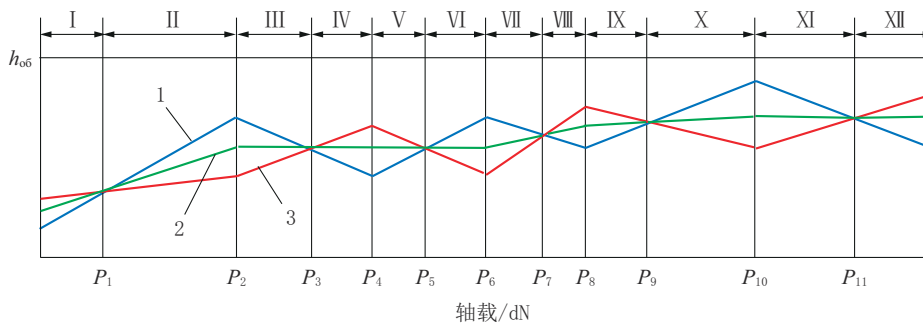
图9 不同轴载时钻头每转进尺 h_{06} 与钻头转速的关系

Fig.9 The relationship between h_{06} per revolution of drill bit and bit speed under different coaxial load

间,例如从 n_1 提高到 n_2 (见图9)。

3.3 岩石破碎过程的控制和规程参数的调整^[16-17]

PDC钻头钻进过程中,岩石发生体积破碎是最理想的钻进效果。但是,在钻进过程中,甚至在一个回次中,常常可能遇到岩石可钻性级别发生变化,钻头产生磨损,产生岩屑的数量发生变化,孔底净化条件恶化,导致体积破碎状态变化,体积破碎变成表面疲劳破碎。岩石破碎方式发生变化的情况见图10。



1—钻头低速钻进;2—钻头中速钻进;3—钻头高速钻进;I—表面疲劳破碎;II—体积破碎;III—回到表面疲劳破碎,可能是由于岩石硬度增加、孔底堵塞、钻头磨损、冲洗液对钻头的压力引起的;IV—表面疲劳破碎,可能是由于岩石硬度增加、孔底堵塞、钻头磨损、冲洗液对钻头的压力引起的;V—回到体积破碎;VI—新水平轴载引起的体积破碎;VII、VIII——重复 III~IV 状态;IX、X—回到体积破碎和新水平轴载的体积破碎;XI、XII—轴载非常大时,钻头热力机械破坏,如同 III~IV 状态

图10 使用不同阶段钻头每转进尺 h_{06} 变化与轴载、转速的关系

Fig.10 Dependence of change of bit penetration per revolution h_{06} from weight on bit and its rotary speed at different stages of bit working

岩石破碎过程可以通过孔底遥测系统控制,也可以用计算机软件系统 APS 控制。图11示出了以设定的最优钻头每转进尺 h_{06} 为准则,控制和调整规

程参数的计算机程序控制的截图。

从图11可见,设定的最优钻头每转进尺为 h_{06} (点红线)。在第 I 阶段,钻头转速从 n_1 增到 n_{12} , 钻

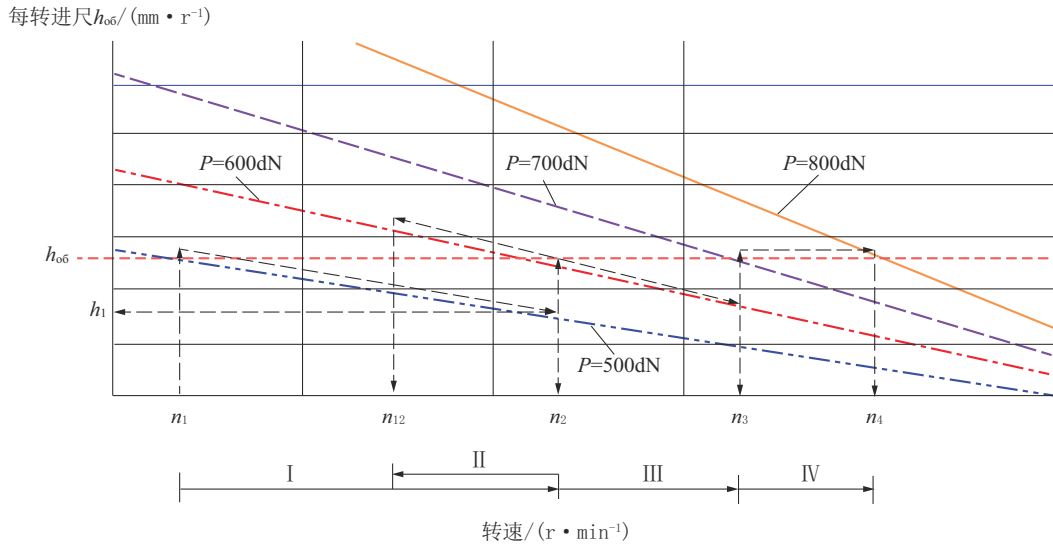


图 11 根据设定的最优钻头每转进尺 h_{06} 标准调整钻进规程参数的程序控制图

Fig.11 Screenshot of the program, adjusting drilling parameters according to the optimal bit penetration per revolution h_{06}

头轴载没有变化(500 dN)。此时,由于钻头回转时被破碎岩石的阻力和介质的阻力增加,致使钻头每转进尺下降, h_{06} 降为 h_1 , 因此,机械钻速 V_M 下降了。为了改变这种情况,转到第 II 阶段,钻头转速由 n_{12} 转到 n_2 , 然后,依次分别转到第 III 阶段 n_3 (钻头转速由 n_2 转到 n_3) 和第 IV 阶段 n_4 (钻头转速由 n_3 转到 n_4), 要求钻头轴载分别增加到 600、700、800 dN, 则可以保证钻头转速增加时,机械钻速可以稳步增加。

结合实验室试验资料(参见图 6), 可以看到钻头轴载和钻头转速改变时,钻头每转进尺变化的情况。根据上述试验资料可知,如果以单位进尺能耗量 N_6/V_6 (见式 12) 最低为评价标准,则最为有效的钻头每转进尺 h_{06} 是 1.3~1.4 mm/r, 此时可以得到最高的机械钻速。例如,我们取钻头高效每转进尺 h_{06} 为 1.3 mm/r, 如果把钻头转速由 100 r/min 提高到 170 r/min, 把钻头轴载从 710 dN 提高到 755 dN, 则机械钻速可以从 7.8 m/h 提高到 13.3 m/h (参见图 6 和图 7)。

4 分析、讨论与建议

(1) 钻探的目的是要破碎岩石, 打出钻孔。破碎岩石的方式有表面破碎、疲劳破碎和体积破碎, 体积破碎效果最好。我们应该争取在钻进过程中实现体积破碎。

(2) 由于孔内地层、岩石可钻性、钻探设备工具

和钻进工艺的变化, 以及施工人员技能的不同, 在钻进过程中破碎岩石方式是变化的, 甚至是交替的, 不可能经常处于体积破碎状态。我们应该采取措施, 使孔内岩石破碎在尽量多的时间内处于体积破碎状态。

(3) 岩石破碎效果常用机械钻速、钻头进尺、功率消耗和每米钻探成本来衡量。近年来, 又提出用钻头每转进尺和单位进尺(体积)能耗量来评价。钻头每转进尺是针对金刚石钻头转速比较高来考虑的, 如果把钻头单位进尺的能耗量最低作为准则考虑进来, 则更全面和更科学。

(4) 钻头每转进尺是个非常重要的评价钻进效果的技术指标, 已被钻探界公认。但不是越高越好, 有一个最优值。这个最优值与钻进规程参数密切相关。乌克兰超硬材料研究所科研人员提出了临界钻进规程的概念, 即当轴载 P 和转速 n 的乘积 Pn 达到一定数值时, 切削具温度急剧上升、钻头磨损明显加剧, 冲洗液量 Q 再大也无济于事, 这说明已经到了临界规程状态^[5]。他们在花岗岩中进行钻进试验时, 获得了胎体温度、钻头磨损与轴载 P 、转速 n 乘积 Pn 关系的资料, 表明正常钻进规程状态时, 功率和切削具温度随着轴载和转速的提高而稳步提高。但当 Pn 乘积值达到 $(61.1 \pm 3.8) \times 10^2 \text{ kN} \cdot \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 切削具温度由平缓的 100~200 °C 急剧增加到 600~700 °C, 耗用功率由 2~3 kW 增加到 6 kW, 说明此时

已经到了临界状态了。所以,应该采取措施,避免钻进过程处于临界状态。

这个临界状态 Pn 乘积值,可以通过实验室试验确定,也可在现场通过观察工况确定,如根据功率表数值变化和柴油机(如使用)声音、废气颜色等判断。

(5)临界规程是条警戒线,超过这条警戒线就会出现事故。但是,在物理上,轴载和转速的乘积等于功率,功率越大,破碎岩石效果越好,因此,这个乘积不能太小,即 Pn 不能超过临界规程,又不能太大,否则影响钻进效果,最好小于临界规程,又接近临界规程。

对于每种岩石来说,临界规程轴载 P 和转速 n 的乘积 Pn 都是个常数范围,如等于 $(61.1 \pm 3.8) \times 10^2 \text{ kN} \cdot \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$,在数学上是一组双曲线。在这组双曲线上,轴载和转速可有各种组合,即大轴载和小转速组合,或小轴载和大转速组合,等等。采取哪种组合好,宜根据所钻岩石性质、钻探设备条件和施工人员技术水平以及对孔内工况认识程度来确定。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 汤凤林,赵荣欣,周欣,等.井底参数新型检测手段设计研究[J].钻探工程,2023,50(2):1-7.
TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, ZHOU Xin, et al. Research on designing of a new inspect and measure means for bottom hole parameters[J]. Drilling Engineering, 2023,50(2):1-7.
- [3] 汤凤林, Нескоромных В. В., 赵荣欣,等.深井钻进时井底钻头造斜导向系统的分析与建议[J].钻探工程,2022,49(6):54-61.
TANG Fenglin, NESKOROMNYH V. V., ZHAO Rongxin, et al. Analysis and suggestion about the downhole bit steering system for deep drilling[J]. Drilling Engineering, 2022,49(6):54-61.
- [4] 汤凤林,赵荣欣,周欣,等.俄罗斯油气智能井钻采技术系统分析[J].钻探工程,2022,49(4):8-13.
TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, ZHOU Xin, et al. Analysis of the drilling and production technology system of oil and gas intellectual wells in Russia[J]. Drilling Engineering, 2022,49(4):8-13.
- [5] 汤凤林,赵荣欣,周欣,等.受控定向孔钻进用自动导航系统的分析研究[J].钻探工程,2022,49(2):67-76.
TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, ZHOU Xin, et al. An automatic navigation system used for controlled directional drilling [J]. Drilling Engineering, 2022,49(2):67-76.
- [6] 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, NECKOROMNYH V. V., NING Fulong, et al. Research on the rock fragmentation process and its relationship with drilling parameters in diamond drilling[J]. Drilling Engineering, 2021,48(10):43-55.
- [7] 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.
- [8] 汤凤林,段隆臣,ЧИХОТКИН В. Ф.,等.关于利用系统论方法设计金刚石钻头的分析研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(1):13-19.
TANG Fenglin, DUAN Longchen, CHIKHOTKIN V. F., et al. Analytical research on design of diamond drill bit with system theory approach[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(1):13-19.
- [9] 朱恒银,王强,杨展,等.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 Hengyang, WANG Qiang, YANG Zhan, et al. Research and Application of Diamond Bit for Deep Geological Drilling [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2014.
- [10] 朱恒银,王强,杨凯华,等.深部岩心钻探技术与管理[M].北京:地质出版社,2014.
ZHU Hengyin, WANG Qiang, YANG Kaihua, et al. Deep Core Drilling Technology and Management [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.
- [11] 汤凤林,沈中华,段隆臣,等.深部各向异性硬岩钻进用新型金刚石钻头试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(4):74-79.
TANG Fenglin, SHEN Zhonghua, DUAN Longchen, et al. Experimental research on new type diamond bit for drilling in deep hard anisotropic rocks[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(4):74-79.
- [12] 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.
- [13] В. В. Нескоромных, М. С. Попова, А. Е. Головченко, П. Г. Петенёв, Лиу Баочан. Методика управления процессом бурения и экспериментальные исследования сил сопротивления при бурении долотами с резцами PDC [J]. Записки Горного Института, 2020, Т. 245:539-546.
- [14] Третьяк А. А., Борисов К. А. Классификация поломок пласти PDC, вызываемых забойными вибрациями при бурении скважин[C]//Результаты исследований-2020: Материалы 5-

- ой Национальной конференции профессорско – преподавательского состава и научных работников ЮРГПУ (НПИ)–Новочеркасск, 2020:252–254.
- [15] Нескоромных В. В., Попова М. С., Баочанг Л. Влияние среды прибойной зоны скважины на эффективность разрушения горной породы резцом PDC [J]. Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. Россия, г.Красноярск, 2021(9): 119–127.
- [16] Нескоромных В. В., Попова М. С., Чихоткин А. В. Методика проектирования долот с резами 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.
- [17] Нескоромных В. В. и др. Алгоритм управления системой алмазного бурения [J]. Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов. Россия, г.Красноярск, 2022(11):114–126.
- [18] Нескоромных В. В., Попова М. С. Разработка методики управления процессом бурения на основе комплексного анализа критериев [J]. Записки Горного Института, 2019, Т, 240:701 – 710.
- [19] Нескоромных В. В., Попова М. С., Баочанг Л. Разрушение горных пород при бурении скважин алмазным буровым инструментом [М]. Красноярск, Россия, Сибирский федеральный университет, 2020.
- [20] Нескоромных В. В., Попова М. С., Харитонов А. Ю. Влияние сил сопротивления на глубину резания – скалывания горной породы алмазным резцом [J]. Известия Томского политехнического университета. Инженеринг георесурсов, 2020, Т, 331,(10): 40 – 48.
- [21] А. Я. Третьяк, В. В. Попов, А. Н. Гроссу, К. А. Борисов/ Инновационные подходы к конструированию Высокоэффективного породоразрушающего инструмента [J]. Горный информационно – аналитический бюллетень, 2017(8):225–230.
- [22] Кубасов В. В. Повышение эффективности бурения геологоразведочных скважин в твердых породах путем модернизации матриц алмазного породоразрушающего инструмента [D]. Московский государственный геологоразведочный университет, 2015.
- [23] Г. П. Богатырева и др. Оценка перспективности структурирования металломатричных алмазных буровых коронок наноалмазами [С]//Сборник научных трудов, Киев, 2011:97–102.
- [24] Скоромных В. В. и др. Разработка и экспериментальные исследования особенностей работы алмазной коронки для бурения в твердых анизотропных породах [J]. Известия Томского политехнического университета, 2015, 326(4):30–40.
- [25] Будюков Ю. Е. Кубасов В. В., Спирин В. И. Характер износа алмазной коронки [С]//Приоритетные направления развития науки и технологий: тезисы докладов X V II научно-технической конференции Тула. Изд.-ство, Инновационные технологии, 2015:89–92.
- [26] Кубасов В. В. Исследование износа алмазных коронок [J]. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-аналитический журнал), 2015,4:6–11.
- [27] Третьяк А. А. Теоретическое обоснование, разработка конструктивных параметров и технологии бурения скважин коронками, армированными алмазно-твердосплавными пластинами [D]. Юргту, Новочеркасск, 2017.
- [28] Третьяк А. А. Разработка современных конструкций коронок, армированных алмазно-твердосплавными пластинами и технология их использования [D]. Юргту, Новочеркасск, 2012.
- [29] Третьяк А. А. и др. Буровые коронки армированные алмазно-твердосплавными пластинами [М]. Новочеркасск: Издательство «Политехник», 2015.
- [30] Третьяк А. А. и др. Конструкция буровых коронок армированных алмазно-твердосплавными пластинами с учетом схемы разрушения забоя скважины [J]. Строительство нефтяных и газовых скважин на море и суше, 2015(6):9–12.
- [31] Кубасов В. В. и др. Новые технологии повышения работоспособности алмазного породоразрушающего инструмента [J]. Экономика X X I века. инновации, инвестиции, образование, 2013(5):50–53.
- [32] Третьяк А. А. Технология бурения скважин коронками, армированными алмазно-твердосплавными пластинами [М]. Издательство Политехник, Новочеркасск, 2016.
- [33] В. В. Скоромных, М. С. Попова. Разработка алмазного инструмента с применением данных компьютерного моделирования и результатов системных исследований [J]. Инженер-нефтяник, 2018(3):18–23.
- [34] Каракозов А. А., Попова М. С., Парфенок С. Н. и др. Исследование и разработка конструкции однослойной буровой коронки с синтетическими монокристаллами алмаза [С]//Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент-техника и технология его изготовления и применения-Киев, 2014:73–79.