

# 金刚石钻进岩石破碎过程及其与规程参数 关系的研究

汤凤林<sup>1,2</sup>, Нескоромных В. В.<sup>3</sup>, 宁伏龙<sup>2</sup>, 段隆臣<sup>2</sup>, Чихоткин В. Ф.<sup>2</sup>

(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.Сибирский Федеральный Университет, Красноярск 660041, Россия)

**摘要:**金刚石钻进是我国的一种主要钻进方法,在地质勘探和油气井钻进中得到了广泛应用。为了提高其技术经济指标,研究金刚石钻进时岩石的应力应变状态、岩石破碎过程及其与规程参数的关系很有必要。俄罗斯钻探工作者在金刚石钻进岩石破碎方面做了大量的试验研究工作,研究了钻进速度与规程参数的优化关系,提出了临界规程参数组合的概念,推荐了保证正常钻进、防止钻头非正常磨损等的措施。值得我国同行们参考。

**关键词:**金刚石钻进;岩石应力应变;岩石破碎过程;岩石预破碎区;钻进规程参数;临界规程参数组合

**中图分类号:**P634 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)10-0043-13

## Research on the rock fragmentation process and its relationship with drilling parameters in diamond drilling

TANG Fenglin<sup>1,2</sup>, NESKOROMNYH V. V.<sup>3</sup>, NING Fulong<sup>2</sup>, DUAN Longchen<sup>2</sup>, CHIKHOTKIN V. F.<sup>2</sup>

(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, City Krasnoearsk 660041, Russia)

**Abstract:** Diamond drilling is one of the main drilling methods in China. It is applied widely in geological exploitation, and oil and gas drilling. In order to improve technical and economical index of the method, research on the stress-strain state of rock to be drilled, the rock fragmentation process and its relationship with drilling parameters is very necessary. Russian drillers have done a lot of relevant work: they studied the optimal relationship between penetration rate and drilling parameters, proposed the concept about the combination of critical drilling parameters, and recommended measures guaranteeing normal drilling and preventing abnormal wear of drill bits, etc., which can provide some reference for the Chinese counterparts.

**Key words:** diamond drilling; stress-strain state of rock to be drilled; rock fragmentation process; rock pre-crushing area; drilling parameters; combination of critical drilling procedure parameters

金刚石钻进在我国许多领域得到了广泛应用,取得了很大成绩<sup>[1-7]</sup>。俄罗斯在这方面也做了不少工作,俄罗斯西伯利亚联邦大学 Нескоромных В. В. 教授等人研究了岩石的应力应变状态和岩石破

碎过程,探讨了钻进速度与规程参数的关系,提出了临界钻进规程的概念,推荐了保证正常钻进、防止钻头非正常磨损的措施,在生产上取得了很好的效果<sup>[8-24]</sup>。这些成果对我国同行有一定参考价值,

收稿日期:2020-11-02; 修回日期:2021-08-16 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.10.006

基金项目:国家自然科学基金面上项目“液压冲击回转作用下热压 WC-CU 基孕镶金刚石钻头的磨损行为研究”(编号:41972327)

作者简介: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,探矿工程专业,主要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,ftang\_wuhan@aliyun.com。

引用格式: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.

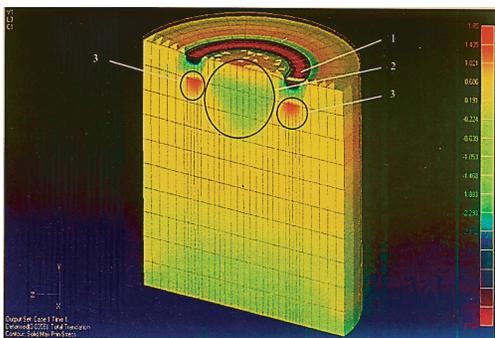
TANG Fenglin, NESKOROMNYH V. V., NING Fulong, et al. Research on the rock fragmentation process and its relationship with drilling parameters in diamond drilling[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(10):43-55.

值得我们关注。

## 1 岩石应力变形状态

为了研究金刚石钻进时的岩石应力状态,使用了计算机模拟程序。在 NASTRAN for Windows 环境中,对在设定岩石物理力学性质的钻孔中钻进时的情况,进行了计算机模拟。主要是研究在钻头静压条件下,均质岩石破碎中的应力分布状况。模拟了钻头上单个金刚石与孔底岩石的接触情况。作用在环状钻头上的载荷为 10000 N。为了模拟孔底情况,在岩样周围设置了固定形式的边界条件。钻进时使用的岩样是花岗岩,其弹性模量 60000 MPa,泊松比 0.23,密度  $2.7 \text{ g/cm}^3$ ,极限许用压应力 160 Pa,极限许用拉应力 10 Pa。试验主要结果如下<sup>[8-9]</sup>。

图 1 示出了钻进时环状孔底岩石中的正应力(压应力和拉应力)的分布情况。压应力为正值,拉应力为负值。从图 1 可见,在形成岩心部位和钻头本身中作用的是拉应力,而在岩石中作用的是压应力。



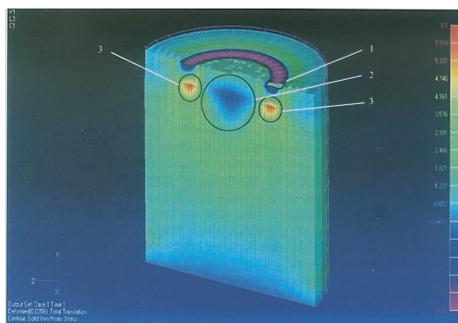
1—钻头端面;2—岩心形成部位的应力带;3—钻头端部下方的应力带

图 1 环状孔底的正应力

Fig.1 Normal stress at the circular bottom

图 2 示出了被钻岩石中的应力分布情况。此时按照 ФОН МИЗЕС 标准(岩石抗压强度、抗拉强度和变形)用的是相当应力。压应力为正值,拉应力为负值。从图 2 可见,在形成岩心部位和钻头本身中作用的是拉应力,而在钻头下方和岩石中作用的是压应力。在施载整个表面上都有变形。

图 3 示出了金刚石钻进中岩石和钻头接触时,岩石中的剪应力分布情况。从图 3 可见,钻头端部下方的剪应力最大,而在形成岩心的部位,剪应力很

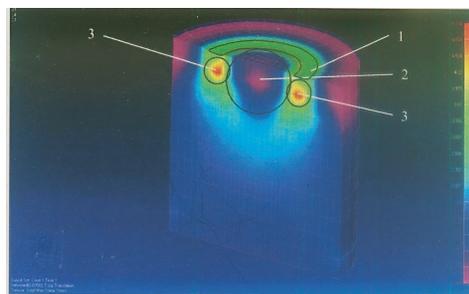


1—钻头端面;2—岩心形成部位的应力带;3—钻头端部下方的应力带

图 2 环状孔底应力分布

Fig.2 Stress distribution at the circular bottom

小。正是这种应力分布形式,保证了获得高质量岩心并保护完好的最优条件。



1—钻头端面;2—岩心形成部位的应力带;3—钻头端部下方的应力带

图 3 环状孔底的剪应力

Fig.3 Shearing stress at the circular bottom

图 4 示出了金刚石钻进中岩石与钻头接触时的岩石变形过程。从图 4 可见,钻头端部下岩石变形最大,而在岩心形成部位变形不大。

图 5 示出了模拟钻进层状岩石时相当应力的分布情况。从图 5 可见,这种岩石中的应力与均质岩

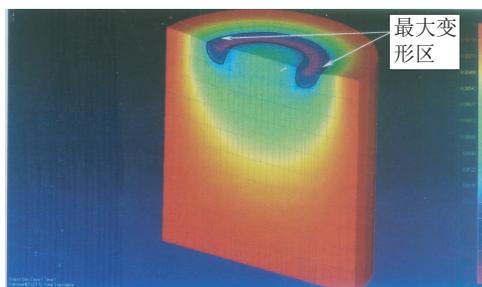
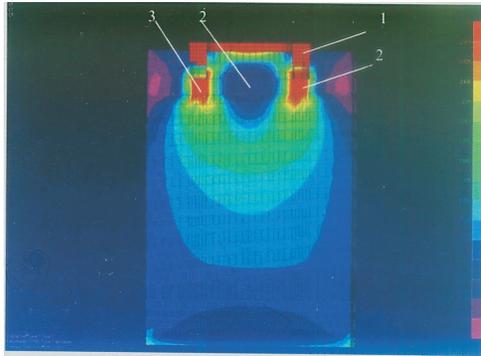


图 4 环状孔底岩石变形过程分析

Fig.4 Analysis of rock deformation process at the circular bottom

石中有所不同, 主要表现为应力集中和钻头下方应力带形状情况有所不同。



1—碎岩工具; 2—岩心形成部位的应力带; 3—碎岩工具下方的应力带

图 5 模拟钻进层状岩石时相当应力的分布情况

Fig.5 Distribution of equivalent stress in modelling drilling bedded rock

## 2 岩石破碎过程

### 2.1 岩石破碎的 3 种方式

根据压模试验结果得知, 按破碎特点和钻进效果, 岩石破碎有 3 种方式, 见图 6<sup>[4-5]</sup>。

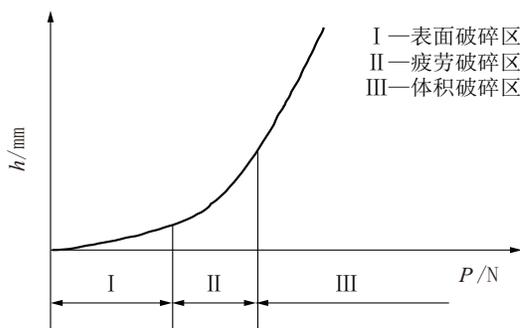


图 6 岩石的不同破碎变形方式

Fig.6 Different modes of rock fragmentation and deformation

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, 钻孔进尺  $h$  很慢。这种破碎方式称为岩石表面研磨, 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, 使岩石晶间破

坏, 岩石结构间缺陷发展, 特别是孔底受多次载荷影响产生的疲劳裂隙更加发展, 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, 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。

如果切削具上的轴向载荷继续增加, 达到切削具可以有效切入岩石, 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或等于岩石硬度。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 钻头切入岩石深度

我们可以以钻头切入岩石深度为切入点, 讨论金刚石钻进时的岩石破碎过程<sup>[8-9]</sup>。

如图 7 所示, 金刚石钻进时, 在轴载  $P$  和扭矩切力  $F$  作用下, 在合力  $R$  的方向上形成压缩核  $AMB$ , 在压缩核顶端与孔底表面上形成使岩石产生分离的裂隙  $aM$ 。

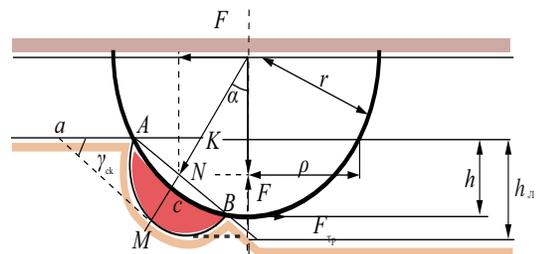


图 7 金刚石破碎岩石过程示意

Fig.7 Rock fragmentation process by diamond

机械钻速  $V_M$  可按下式计算:

$$V_M = 60h_{\pi}\omega n_p$$

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

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;  $\lambda$ ——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<sup>3</sup>;  $\sigma$ ——岩石压缩核中的应力, N/cm<sup>2</sup>;  $\omega$ ——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;  $h$ 、 $h_{\pi}$ ——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:

$$\sigma = \frac{R}{S_{CK}} = \frac{4R}{\pi dh} \quad (2)$$

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 $h_n$ ，可以表示为：

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

式中： $\alpha$ ——合力 $R$ 和轴载 $P$ 的夹角； $d$ ——金刚石直径。

金刚石切入岩石深度 $h$ 为：

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

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； $\epsilon$ ——岩石破碎时岩石变形的相对变形量（长度）； $\alpha_n$ ——岩石热膨胀系数，mm/°C； $t$ ——岩石表层温度，°C； $\tau$ ——破碎载荷的施载时间，s； $\tau_0$ ——固体中原子振动周期， $10^{-12} \sim 10^{-13}$  s。

从式(4)可见，如果轴载 $P$ 和切力 $F$ 增加、岩石裂隙大小 $2l$ 增加、岩石表层温度 $t$ （岩石温度提高，岩石强度降低）增加、破碎载荷作用时间 $\tau$ 增加，则金刚石切入岩石深度 $h$ 增加。如果金刚石直径 $d$ 增

加、岩石弹性模量 $E$ 增加（弹性模量增加通常与岩石硬度增加成比例，可使岩石变形在不破坏连续性条件下大为增加，即提高了岩石的塑性），则金刚石切入岩石深度 $h$ 降低。

如图7和式(3)、式(4)所示，对于不同岩石和不同破碎岩石方式来说，岩石破碎裂隙深度 $h_n$ 和金刚石切入岩石深度 $h$ 是不同的，二者的差别是很大的。

### 2.3 岩石预破碎区

在岩石破碎过程中，在排除岩屑的同时，在孔底空间内形成一个微裂隙系统发育的弱岩层，这个岩层称为预破碎区。从加速岩石破碎过程和降低碎岩能耗量观点来看，这个预破碎区非常重要。

碎岩切削具的破碎载荷均匀地向岩石各个方向施加而产生的应力和变形，是产生这个预破碎区的主要原因。

乌克兰科学院超硬材料研究所利用荧光探测方法，对这个预破碎区的规律性进行过研究。该项研究是用孕镶金刚石钻头进行的。钻进用不同轴载，记录钻头每转的进尺。钻进后用具有高度润湿和穿透能力的荧光液体，对孔底预破碎区进行了处理。根据荧光液体的亮度来确定预破碎区裂隙扩展的范围<sup>[8]</sup>。

钻进花岗岩—斑岩、辉长岩和石英砂岩时形成的破碎区深度如表1所示。

表1 预破碎区研究结果

Table 1 Results from study on the pre-crushing zone

| 轴载/dN | 预破碎区深度 $H_s$ /m |      |      | 钻头每转进尺 $h$ /mm |        |        | $H_s/h$ |      |      |
|-------|-----------------|------|------|----------------|--------|--------|---------|------|------|
|       | 花岗岩-斑岩          | 辉长岩  | 石英砂岩 | 花岗岩-斑岩         | 辉长岩    | 石英砂岩   | 花岗岩-斑岩  | 辉长岩  | 石英砂岩 |
| 250   | 1.8             | 0.18 | 1.2  | 0.024          | 0.0175 | 0.0075 | 75      | 10.2 | 160  |
| 500   | 2.5             | 0.35 | 1.65 | 0.039          | 0.0335 | 0.0125 | 64      | 10.4 | 132  |
| 750   | 2.85            | 0.4  | 1.87 | 0.051          | 0.039  | 0.0185 | 56      | 10.2 | 101  |
| 1000  | 3               | 0.51 | 2.1  | 0.056          | 0.055  | 0.0215 | 53      | 9.2  | 97   |
| 1250  | 3.1             | 0.55 | 2.1  |                | 0.0645 | 0.024  |         | 8.5  | 87   |

从表1可见，预破碎区的深度比钻头每转进尺大得多，这个差别在脆性岩石中是很大的，在比较塑性的辉长岩中很小。这个深度在轴载250~750 dN范围内增加很快，但在轴载继续增加时，增加不大。

为了研究预破碎区，选取了弹脆性粗粒玄武岩和弹塑性的各向异性熔结凝灰岩，对用金刚石表镶钻头钻得的岩样做成了薄片，供Polam-111显微镜的反射光观察使用。根据显微镜和照片放大计算的

结果，得出了预破碎区的厚度。

图8是粗粒玄武岩岩样预破碎区的照片。从图8可见，预破碎区由2部分组成：非常破碎部分和裂隙弱化部分，边界用虚线表示。非常破碎部分的厚度为0.17 mm，裂隙弱化部分的厚度为1.7 mm。可以看出，预破碎区的形状和孔底形状相近。

图9是弹塑性各向异性熔结凝灰岩预破碎区的照片。在图9中，预破碎区也由2部分组成：非常破

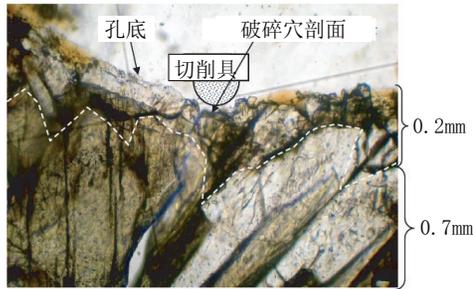
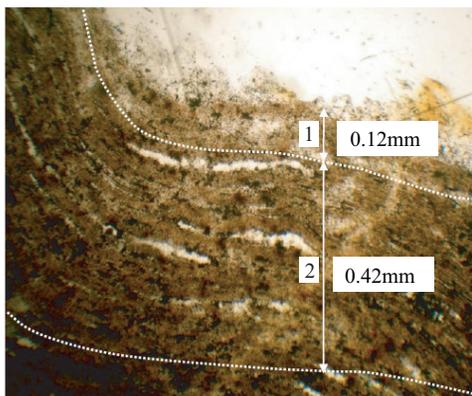


图8 粗粒玄武岩预破碎区照片  
Fig.8 Photo of the pre-crushing zone  
in coarse grain basalt

碎部分和塑性变形部分。非常破碎部分是压碎的和松散的部分,位于距孔底0.12 mm的深度。塑性变形部分包括孔底部分和孔壁部分,此部分的厚度为0.42 mm。



1—岩石破碎部分;2—塑性变形部分  
图9 弹塑性各向异性熔结凝灰岩预破碎区照片  
Fig.9 Photo of the pre-crushing zone in elastic and  
plastic anisotropic sintered tuff

所用岩样是用轴载600 dN、转速150 r/min和乳化液作为冲洗液进行钻进试验的。

根据试验结果可以看出:

(1)预破碎区的大小随着钻头轴载的增加而增加,随转速的增加而少许减少。

(2)在弹脆性粗粒玄武岩中,破碎区中的岩石呈非常破碎裂隙形式,而且裂隙是在矿物颗粒间发展的,脆性结晶矿物也是被破碎的。

(3)在塑性熔结凝灰岩中,预破碎区是以松散、破碎的岩石形式出现的,没有形成明显的裂隙。

(4)各向异性岩石中的裂隙,主要是沿着层面、

片理面形成。

预破碎区是钻进工艺作用的结果,这种工艺作用可以钻进时在岩石中形成预破碎区,使孔底表面岩石弱化,降低岩石破碎的能耗量,对于提高钻进效果具有积极意义。

### 3 岩石破碎过程与钻进规程参数的关系

岩石破碎过程往往是以该过程中钻进(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。现据所用资料的原始形式,分别讨论如下<sup>[8-24]</sup>。

#### 3.1 钻头每转进尺与钻进规程参数的关系

在金刚石钻进工艺的研究工作和实际建议中,常常把钻头每转进尺 $h_{06}$ 看成是可以控制钻进工艺过程的指标,即:

$$h_{06} = \frac{V_M}{n} \quad (5)$$

式中: $h_{06}$ ——钻头每转进尺,mm/r; $V_M$ ——机械钻速,mm/min; $n$ ——钻头转速,r/min。

这是一个综合性指标,可以用它来间接研究和评价孔底钻进的物理过程,诸如岩石对切削具切入的反应、钻头的工作情况以及岩石物理力学性质和钻头切削具磨损情况变化的条件下,钻进规程参数(轴载、钻头转速、冲洗液量)的作用问题等。所以,可以利用钻头每转进尺 $h_{06}$ 的大小来确定最优钻进规程。

最优钻头每转进尺指的是,在金刚石切削具不产生抛光、在最小轴载作用下的钻头每转破碎岩石进尺的数值,当轴载哪怕少许增加上述数值时,金刚石切削具就会过度切入岩石、本身破坏,做无用功。

最优钻头每转进尺的数值,与金刚石切削具的尺寸、岩石物理力学性质和钻进规程参数有关。全俄勘探技术研究所通过试验确定,表镶金刚石钻头的最优每转进尺是金刚石直径 $d$ 的2.5%~10%,即 $h_{06}=(0.025\sim 0.1)d^{[8-9]}$ 。

最优每转进尺与粒度 $Z$ (粒/ct)(1 ct=0.2 g,下同)的关系为:

$$h_{06} = (0.122 - 0.488)Z^{-\frac{1}{3}} \quad (6)$$

单粒金刚石的许用轴载为:

$$P_a = (3.0 - 5.3)(2.86Z^{-2.27} + 0.24Z^{-0.67}) \quad (7)$$

钻头的轴载值为:

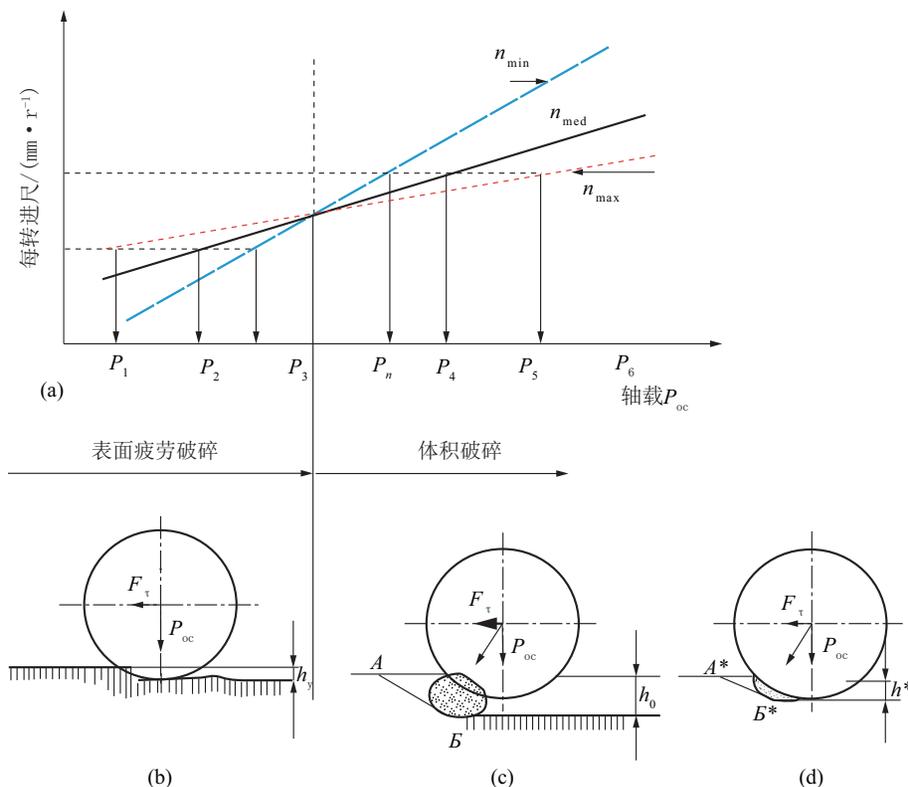
$$P_{oc} = P_a ZM \quad (8)$$

式中： $M$ ——底刃金刚石质量， $ct$ 。

金刚石表镶钻头钻进时，推荐的最优单粒金刚石切入值为 $h=0.001\sim 0.008\text{ mm/r}$ 。 $h<0.001\text{ mm/r}$ 时，金刚石抛光。 $h>0.008\text{ mm/r}$ 时，金刚石切削

具严重磨损。

图10给出了钻头每转进尺与钻进规程参数的关系，以及说明了岩石表面疲劳破碎和体积破碎的过程<sup>[8-9]</sup>。



(a) 钻头每转进尺与钻进规程参数的关系；(b) 表面疲劳破碎过程；(c) 体积破碎过程；(d) 体积破碎过程

图10 钻头每转进尺与钻进规程参数的关系以及岩石破碎过程示意

Fig.10 Drill bit penetration per revolution vs drilling parameters

从图10(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。

钻头每转进尺与转速的关系比较复杂。在表面疲劳破碎阶段(图10b)，如果轴载不能足以产生体积破碎，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，在轴载增加( $P_1\rightarrow P_2\rightarrow P_3$ )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，因此是岩石强度和硬度降低所致。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 $P_n$ 足以使切削具切入岩石，所以破碎岩石变成体积

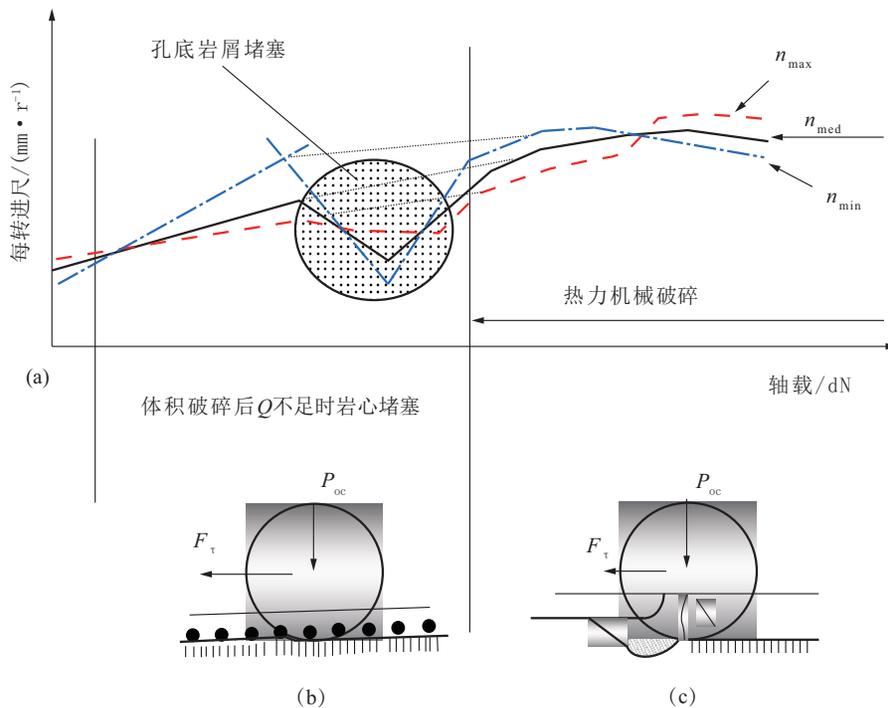
破碎方式。但是，体积破碎时，钻头每转进尺的高值是在较低钻头转速( $n_{min}$ )情况下取得的，钻头每转进尺的数值是随钻头转速的增加而降低的。形成这种机制的原因是，在形成破碎穴时，岩石沿着孔底表面( $AB$ 线)被切削具剪切下来。如果切削具移动速度( $V_p$ )等于 $AB$ (见图10c)方向上形成岩石分离裂隙的速度( $V_T$ )，则岩石破碎情况是最优的。而在高转速时，切削具前面岩石分离裂隙的形成速度 $V_T$ 小于切削具移动速度 $V_p$ ，切削具承受的岩石阻力增大，犹如“漂浮”起来，即切削具切入岩石深度降低了(见图10d)。切削具“漂浮”时，应该减小分离裂隙 $A^*B^*$ 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10

a)。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,可能出现破碎非常有效的情况。为此需要完全净化孔底岩屑,保持轴载和转速的合理组合,以便岩石分裂裂隙 $AB$ (图10c)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11a、11b)<sup>[8-9]</sup>。



(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;(c)热力机械破碎

图11 钻头每转进尺与规程参数的关系以及孔底岩屑堵塞时岩石破碎示意

Fig.11 Drill bit penetration per revolution vs drilling parameters(a),volumeric fragmentation when cuttings is blocked up at bottom(b), and thermo-mechanical fragmentation (c)

但是,如果轴载过大,则会出现复杂的热力机械破碎岩石的方式(图11c),此时钻头热力强度降低,导致钻头损坏。首先是金刚石切削具损坏(折裂、崩刃)和磨损。开始阶段,由于转速高,切削具磨损快,所以钻头每转进尺降低。后来,由于胎体金属磨损严重、切削具金刚石出刃大,转速提高导致钻速增加。这是由于孔底被钻头胎体磨损产物呈“金属化”而使摩擦力和钻头回转阻力减小引起的。此时容易发出虚假信号,给人造成错觉,认为每转进尺增加了,似乎钻头孔底工作条件良好,会给选择最优钻进规程参数带来困难。

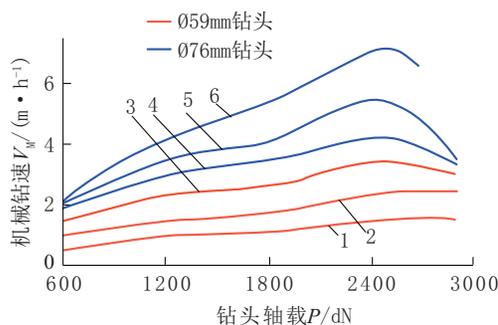
可见,由于热力机械破碎时,胎体损坏和金刚石

露出而使金刚石切削具严重受损,此时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。

### 3.2 机械钻速与钻进规程参数的合理组合

如果钻进规程参数配合合理,则金刚石钻进可以获得很高的技术经济指标<sup>[8-24]</sup>。图12上示出了直径59 mm和76 mm孕镶金刚石钻头机械钻速与轴载的关系曲线。从图12可见,机械钻速随钻头转速的提高而增加,而且在轴载2400 dN时达到最大值。

钻头转速提高时,金刚石切入岩石深度下降,相应的岩石破碎穴深度也下降了。这首先是因为变形



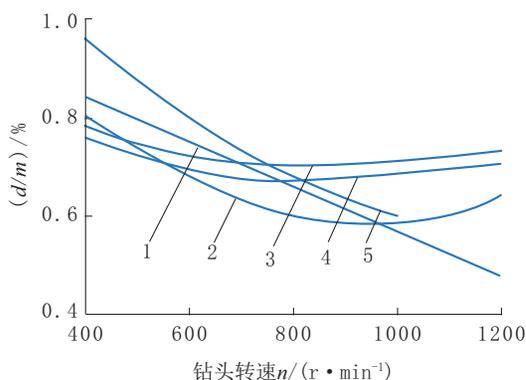
1—200 r/min; 2—400 r/min; 3—600 r/min; 4—800 r/min; 5—1000 r/min; 6—1200 r/min

图 12 不同转速时机械钻速与轴载的关系曲线

Fig.12 Mechanical penetration rate vs weight on bit at different rpm

发育的时间减少了,岩石中破碎合应力降低了,与之相应地切削具切入岩石深度变浅了。由于岩石中破碎合应力降低了,所以岩石切削剪切阻力和压碎阻力增大了,切削具切入岩石深度变浅了。

图 13 给出了转速和轴载对机械钻速增幅的影响以及与转速增加的对比资料。



1—600 dN; 2—1200 dN; 3—1800 dN; 4—2400 dN; 5—3000 dN

图 13 不同轴载条件下钻头机械钻速增幅  $d$  和钻头转速增幅  $m$  之比 ( $d/m$ ) 与钻头转速  $n$  的关系曲线

Fig.13 Ratio of penetration rate increase rate  $d$  to rpm increase rate  $m$  ( $d/m$ ) at different weight on bit

根据图 13 可以确定,机械钻速随着转速的提高而提高,但是随着转速的提高(由 200 r/min 提高到 1200 r/min),机械钻速的增幅降低了(由 0.95~0.7 降到 0.7~0.5)。同时,随着转速的提高,机械钻速在硬岩中的增幅比较岩低。

图 13 中曲线表明,随着钻头转速的增加,机械

钻速的增幅  $d/m$  在最小轴载 600 dN 和最大轴载 3000 dN 时最小。在第一种情况下,显然是由于轴载不能形成体积破碎所致,在第二种情况下,是由于轴载太大,导致孔底形成岩屑堵塞所致。

从图 13 可见,在轴载 1800、2400 dN 和转速 800 r/min 时,机械钻速增幅开始超过转速增幅,这就说明这些参数组合,即轴载 1800~2400 dN 和转速 800~1200 r/min 组合是最优的参数组合。这组参数组合与岩石体积破碎的最优条件符合,在最优条件中,这 2 个主要参数是非常重要的。

可见,保证机械钻速最高的钻头最优轴载,都与每一个钻头的转速相呼应。通常的做法是:转速增加时,增加轴载来提高碎岩应力(这种碎岩应力在钻头切削具移动速度增加时是降低的)。但是,轴载不变,转速增加到极限值时,则机械钻速下降,金刚石钻头端面会出现严重的微裂隙和金刚石钻头胎体抛光。为了防止开始的抛光过程,应该少许提高钻头轴载,然后再提高转速,增加冲洗液量。可以通过这些步骤来确定转速和轴载的最优配合。

钻头极限转速  $n_{np}$  根据极限许用功率  $N_{np}$  确定:

$$n_{np} = \frac{5 \times 10^4 N_{np}}{D_B P_{oc}} \quad (9)$$

式中:  $D_B$ ——钻头直径, m;  $P_{oc}$ ——轴载, N。

表 2 为全俄勘探技术研究所提出了金刚石钻头钻进不同硬度岩石用的轴载和转速配合资料<sup>[8-9]</sup>。

应该指出的是,表中所列资料为平均值,没有考虑钻头胎体中的金刚石浓度。

轴载值可以用下式计算:

$$P_{oc} = \varphi_0 P_{uf} f_a \times 10^5 \quad (10)$$

式中:  $\varphi_0$ ——考虑金刚石与孔底接触面积变化的系数,  $\varphi_0 = 0.17 \sim 0.25$ , 最小值于岩石抗压强度  $P_{ur} > 3.5$  GPa 时使用, 最大值于  $P_{ur} < 1.5$  GPa 时使用;  $f_a$ ——底刃金刚石与岩石接触的总面积,  $m^2$ 。

金刚石的轴载应该随着岩石硬度的增加和底刃金刚石浓度的增加而增加。

式(10)是针对新钻头开始钻进时计算的。随着钻头磨合、岩石破碎区增大和孔底岩屑的增多,在提高转速和冲洗液量的同时,应该增加轴载。当机械钻速开始下降(孕镶钻头下降慢、表镶钻头下降快,因为后者镶有大颗粒金刚石,大颗粒与岩石接触面积随着磨损而增加快)时,一般应该开始增加轴载。所以,应该随着底刃金刚石与岩石接触面积的增加

表 2 金刚石钻头钻进不同硬度岩石用的轴载和转速  
Table 2 Weight on bit and rpm for diamond drilling in different hardness rock

| 岩石可<br>钻性等<br>级 | 岩石抗压<br>强度/GPa | 底刃金刚石<br>粒度/(粒·ct <sup>-1</sup> ) | 轴载/dN      | N <sub>sp</sub> /kW       |       |       | n <sub>sp</sub> /(r·min <sup>-1</sup> ) |           |           |
|-----------------|----------------|-----------------------------------|------------|---------------------------|-------|-------|---|-----------|-----------|
|                 |                |                                   |            | 水量/(L·min <sup>-1</sup> ) |       |       | 水量/(L·min <sup>-1</sup> )               |           |           |
|                 |                |                                   |            | 30                        | 50    | 70    | 30                                      | 50        | 70        |
| 6~7             | 1~2.5          | 10~20                             | 400~800/   | 26/24                     | 33/27 | 39/31 | 400~1400/                               | 400~1800/ | 400~2100/ |
|                 |                |                                   | 500~1000   |                           |       |       | 350~1100                                | 350~1250  | 350~1450  |
| 8~9             | 2.5~4          | 20~30/<br>40~50                   | 600~1200/  | 16/19                     | 20/21 | 23/24 | 300~1100/                               | 300~1300/ | 300~1500/ |
|                 |                |                                   | 800~1300   |                           |       |       | 250~1050                                | 250~1150  | 250~1350  |
|                 |                |                                   |            | 12/13                     | 14/15 | 16/17 | 200~1400/                               | 200~1700/ | 200~2000/ |
| 9~11            | 4~5.5          | 120~150/<br>150~400               | 800~1300/  | 7/8                       | 8/8   | 9/11  | 450~550/                                | 450~650/  | 450~750/  |
|                 |                |                                   | 1200~1700  |                           |       |       | 400~500                                 | 400~550   | 400~600   |
|                 |                |                                   |            | 11/14                     | 13/15 | 15/17 | 500~600/                                | 500~750/  | 500~850/  |
|                 |                |                                   |            |                           |       |       | 500~550                                 | 500~600   | 500~700   |
| 11~12           | 5.5~7          | 400~800/<br>800~1200              | 1200~1200/ | 27/37                     | 33/41 | 38/48 | 750~1300/                               | 750~1000/ | 750~1900/ |
|                 |                |                                   | 1500~2300  |                           |       |       | 800~1200                                | 800~1350  | 800~1600  |
|                 |                |                                   |            | 39/55                     | 48/61 | 56/70 | 800~1600/                               | 800~1900/ | 800~2200/ |
|                 |                |                                   |            |                           |       |       | 1000~1500                               | 1000~1700 | 1000~1900 |

注:(1)表中带“/”数据为“Ø59 mm 钻头资料/Ø76 mm 钻头资料”;(2)底刃金刚石粒度为 10~20 粒/ct 的数据中,由于底刃金刚石含量高,所以 Ø59 mm 钻头的极限功率 N<sub>sp</sub> 高于 Ø76 mm 钻头的极限功率;(3)1 ct=0.2 g,下同;(4)钻进裂隙岩石时,列于该表中的钻头转速应该降低 25%~30%

而加大金刚石钻头的轴载:表镶钻头增加 1~1.2 倍,孕镶钻头增加 30%。

图 14 是金刚石钻进时轴载对钻进规程影响关系图,给出了钻头转速 700~800 r/min 时 O2И3 孕镶钻头机械钻速 V<sub>M</sub>、钻头磨损 G 与钻头单位轴载的关系曲线。

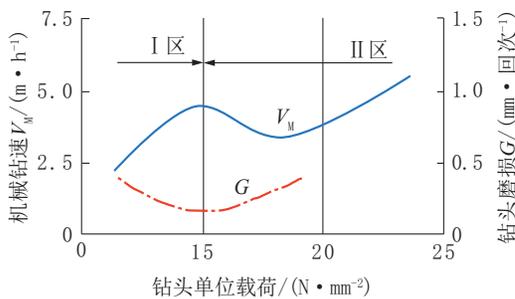


图 14 钻头机械钻速、磨损与单位轴载的关系曲线

Fig.14 Penetration rate and bit wear vs specific weight on bit

分析图 14 曲线可见,在钻头单位轴载 15 N/mm<sup>2</sup>时,机械钻速最大,钻头磨损最小。继续增加钻头轴载时,机械钻速开始减小,然后增加,同时金

石耗量增加。目测钻头磨损性质可见,高轴载(图 14 中 II 区)时,金刚石上有裂纹和崩刃,而在 I 区的规程参数时,胎体没有明显磨损,金刚石没有损坏。

为了研究转速和轴载乘积对钻头磨损的影响,图 15 给出了用轴载和转速乘积等于一个定值 P<sub>oc</sub>n=const 关系式表达的金刚石磨损的资料。分析图 15 可见,使用 A 区规程参数进行钻进的钻头,没有异常磨损,使用 B 区规程参数进行钻进的钻头,所有金刚石都有损伤,而使用 C 区规程参数进行钻进的钻头,有的金刚石有异常磨损,有的没有异常磨损,是个过渡区。

对比图 14 和图 15 可见,图 15 中的 A 区与图 14 中 I 区相应,而图 15 中 B 区与图 14 中 II 区相应。C 区的存在说明钻头制作质量不同和有随机因素的影响。

金刚石钻进时,除了轴载和转速外,供给孔底的冲洗液量是个很重要的参数,因为冲洗液不紧要排除孔底岩屑,还要冷却钻头。钻头水路冲洗液流动速度是保证金刚石钻头有必要冷却程度的主要因素。同时,增加钻头水路冲洗液流动速度有助于提

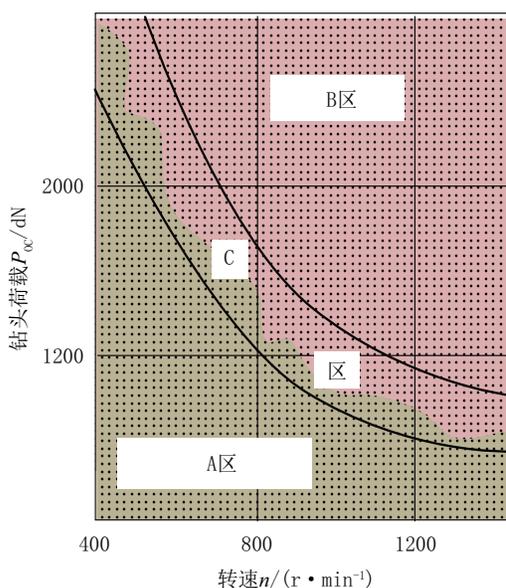


图 15 钻头磨损与轴载和转速的乘积( $P_{oc}n$ )的关系曲线

Fig.15 Drill bit wear vs product of weight on bit  $P_{oc}$  times rpm  $n(P_{oc}n)$

高机械钻速。

增加钻头水路冲洗液流动速度,可以采取以下途径:增加冲洗液量;冲洗液量低时增加水口数量、减小水口尺寸;改变水口特征和研发冲洗液液流加速剂。后两种途径是比较有前景的,因为其特点是供给冲洗液的能量消耗少,冲洗液流对钻孔和岩心的侵蚀作用小。同时,水口多可以保证钻头胎体冷却均匀。

考虑到 $\varnothing 59$  mm和 $\varnothing 76$  mm钻头的水口数量,建议使用的冲洗液量分别为15~40 L/min和15~55 L/min。

随着胎体的磨损,特别是孕镶钻头胎体的磨损,水口高度也在减小,冲洗液流动速度增加。冲洗液流动速度可按式计算:

$$V_n = \frac{Q}{k_K b_K b_K} \quad (11)$$

式中: $k_K$ ——钻头水口数量; $b_K$ ——水口宽度; $b_K$ ——水口初始高度。

如果推荐的钻头水口流动速度为7~10 m/s,水口高度减小,则冲洗液流量也应随钻头磨损而成比例减小。如果冲洗液量不随水口面积的减小而减小,则在钻头上产生压力降,即产生水力阻力,钻头产生水力回流。如果降低冲洗液量,则岩屑净化和钻头冷却条件没有恶化,而且能耗量减小了,钻进效

率提高了。所以,在设计金刚石钻进孔底供给冲洗液量时,这一点需要加以考虑。

全俄勘探技术研究所伊尔库茨克分所进行的研究结果表明,可以把金刚石钻头水口形状和钻探效率联系起来。研究确定,水口形状成对数曲线形、入口部分与钻头回转方向反向,与钻头端面成 $96^\circ$ 的水口形状是水口的最优形状,这种曲线水口形状见图16,这是前苏联发明技术,苏联证书号为a.c.CCCP, No1355686<sup>[8-9]</sup>。

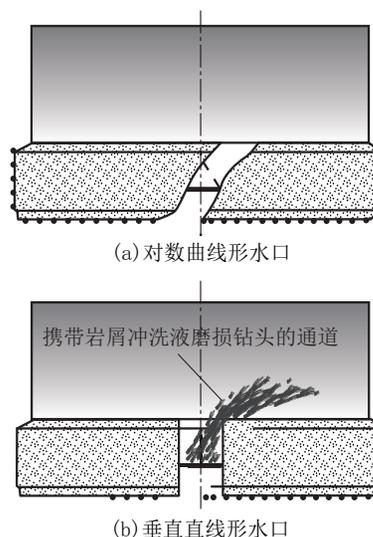


图 16 不同形状水口金刚石钻头

Fig.16 Diamond bits with logarithm curve waterway (a), and vertical line waterway (b)

对数曲线形水口金刚石钻头在钻头体和胎体中,可以形成曲线形通道(图16a),有利于排除岩屑,比直通式水口(图16b)长,有利于冷却胎体。在索斯诺地质生产公司使用长曲线水口钻头时,钻探效率和钻头寿命均提高了30%左右,说明这种长的对数曲线形状水口钻头的研发是成功的。

### 3.3 极限钻进规程与规程参数调节

乌克兰超硬材料研究所钻探科研人员提出了极限钻进规程的概念,即当轴载 $P$ 和转速 $n$ 的乘积( $Pn$ )达到一定数值时,胎体温度急剧上升,钻头磨损明显加剧,冲洗液量 $Q$ 再大也无济于事,说明已经到了临界规程状态<sup>[2-5]</sup>。他们利用人造金刚石钻头(粒度为200~400  $\mu\text{m}$ )在花岗岩中进行钻进试验,获得了胎体温度、钻头磨损与轴载 $P$ 和转速 $n$ 乘积( $Pn$ )关系的资料,见图17。

图17关系曲线表明,正常钻进规程状态时,功

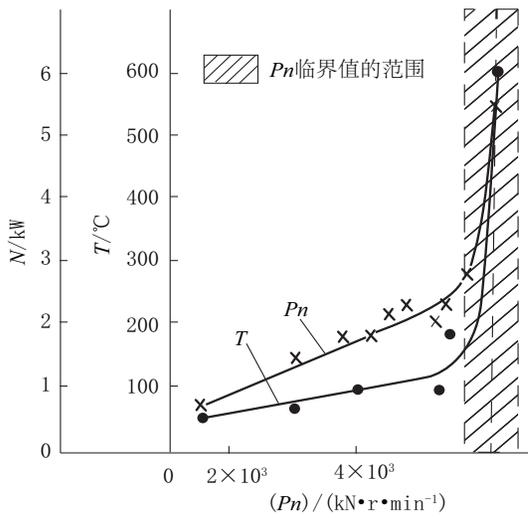


图 17 钻进时钻头胎体温度  $T$  和功率消耗量  $N$  与钻压转速乘积 ( $Pn$ ) 的关系曲线

Fig.17 Drill bit matrix temperature  $T$ , power consumption  $N$  vs WOB speed product ( $Pn$ ) during drilling

率和胎体温度随着轴载和转速的提高而稳步提高。但当 ( $Pn$ ) 值达到  $(61.1 \pm 3.8) 10^2 \text{ kN} \cdot \text{r} / \text{min}$  时, 胎体温度由平缓的  $100 \sim 200 \text{ }^\circ\text{C}$  急剧增加到  $600 \sim 700 \text{ }^\circ\text{C}$ , 耗用功率由  $2 \sim 3 \text{ kW}$  增加到  $6 \text{ kW}$ , 说明此时已经到了临界状态。

图 18 示出了钻头磨损 (用单位体积破碎功的磨损量  $w$  表示) 与  $PV$  (线速度) 乘积的关系曲线。该曲线表明, 当  $PV$  达到一定数量时钻头磨损量急剧增加, 实验室条件下如此, 野外条件下更为明显。

图 19 曲线表明, 当正常钻进规程条件下, 胎体温度随  $Q$  的增加基本稳定在  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  以内, 但到  $P=12000 \text{ N}$  和  $n=1015 \text{ r} / \text{min}$  (临界规程) 时, 胎体温度达到  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  以上, 而且增加冲洗液量已经不起作用了。

对于给定的岩石来说, 临界规程参数  $Pn$  乘积是一个常数 (范围), 可以通过实验室确定, 也可在生产条件下通过研究确定。在数学上  $F=Pn$  是一组双曲线, 见图 20。在这组曲线上, 轴载和转速可以有不同组合, 例如可以取较大轴载  $P_1$  和较小转速  $n_1$  的组合 (点 1), 也可以取较小轴载  $P_2$  和较大转速  $n_2$  的组合 (点 2), 以此类推, 可以根据所钻具体岩石性质和设备能力选定, 以便得到好的钻进效果。只要其乘积小于临界值范围, 就可以保持在正常钻进范围内。当然, 所用  $Pn$  乘积也不能太小, 否则机械钻速可能就太低了, 功率利用也不充分。为此, 应该采用

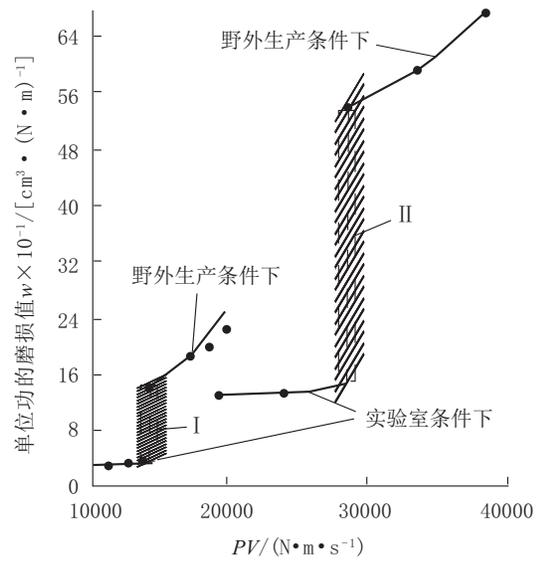
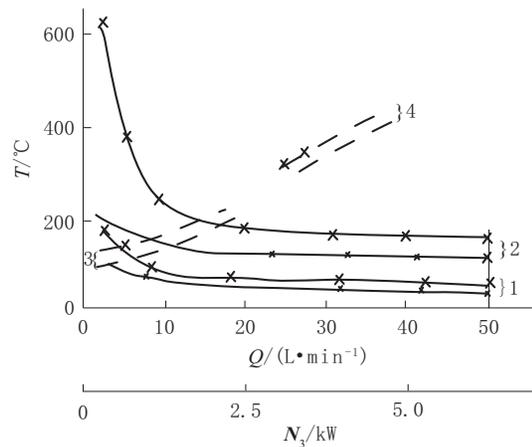


图 18 钻头磨损  $w$  与  $PV$  乘积的关系曲线

Fig.18 Drill bit wear vs product of weight on bit times rpm (linear)  $PV$



1— $N=1 \text{ kW}$ ; 2— $N=2 \text{ kW}$ ; 3— $P=8000 \text{ N}$ ,  $n=699 \text{ r} / \text{min}$ ; 4— $P=12000 \text{ N}$ ,  $n=1015 \text{ r} / \text{min}$

图 19 钻头胎体温度  $T$  与冲洗液量  $Q$  的关系曲线

Fig.19 Drill bit matrix temperature  $T$  vs drilling fluid flow rate  $Q$

的规程参数  $Pn$  乘积值位于靠近临界规程的位置上。此外, 还要使用能够保证正常钻进的冲洗液量  $Q$ 。

#### 4 认识、讨论与建议

根据上述资料及分析, 提出以下认识、讨论和建议。

(1) 钻进时为了有效地破碎岩石, 需要了解所钻岩石的应力变形状态。在岩石破碎过程中, 有不同破碎岩石方式, 其中体积破碎方式效果最好, 故在钻

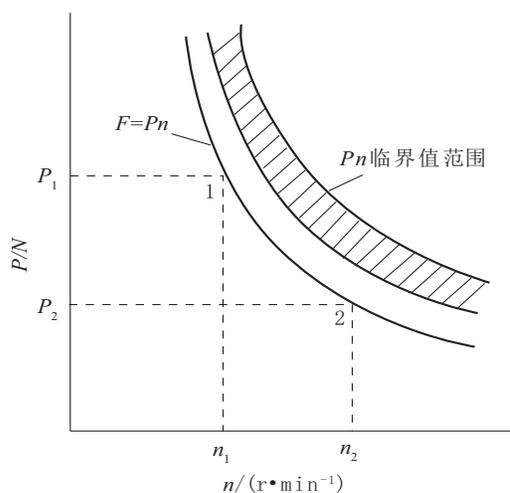


图20 规程参数的调整原理

Fig.20 Principle of adjusting drilling parameters

探工程中为了提高技术经济指标,应该采取措施,使岩石处于体积破碎状态。试验研究确定,在岩石破碎中有预破碎区存在,有利于认识和了解岩石破碎过程。

(2)钻进速度是钻探工程的主要技术指标,常常用机械钻速  $V_M$  表示(m/h),也可用钻头每转进尺  $h_{ob}$ (mm/r)表示。钻进速度与规程参数轴载  $P$ 、钻头转速  $n$  和冲洗液量  $Q$  有关,更与后者的合理组合有关。因此,应该对这种组合进行研究。

(3)在规程参数中,轴载是最重要的规程参数,只有这个参数(单位轴载)达到或超过岩石硬度时才能切入岩石,进行破碎。钻头转速是第二个重要参数,其重要性视岩石性质而定,在弱研磨性岩石中,它是很重要的,钻进效果几乎与其成正比;但在研磨性坚硬岩石中钻进时,高转速会使钻头摩擦磨损严重,直接影响钻进效果,故不宜太高。第三个参数是冲洗液量,对保证排除岩屑和冷却钻头非常重要,应予以充分保证。

(4)在规程参数调节和优化中,轴载和转速的乘积  $Pn$  是决定性限制因素。我们从物理学知道,力和速度的乘积就是功率。在钻探工程上,这个功率指的主要就是动力机(电动机或柴油机等)的功率。为了安全起见,所用  $Pn$  不能超过动力机的许用功率。但是为了充分利用动力机功率,提高钻探效率,  $Pn$  又不宜太小,即所用  $Pn$  曲线应该贴近动力机许用功率曲线。

(5)一般情况下,钻进速度随轴载和转速的提高

而增加,故在钻探施工中,为了提高钻速,可以使用尽量大的轴载和转速,但是不能超过临界规程范围。是否到达临界规程范围,可以通过钻机上功率表的变化或柴油机声响、冒黑烟等情况判断,一旦出现异常,应该立即采取措施,调节参数,加以解决。但是,在尽量大的  $Pn$  乘积中,对于每一种岩石来说,轴载和转速都有一个最优参数组合,究竟是采取大轴载、小转速、适当水量,还是小轴载、大转速、充足水量组合,宜根据所钻岩石性质和钻进中的实际工况决定,目标是钻探效率高、钻孔质量好。在正常钻进范围内,要保证冲洗液量足额优质,到达临界规程后冲洗液量就“爱莫能助”了。

我国的金刚石钻进在许多领域得到了广泛应用,取得了很大成绩。如果我们能够进一步研究金刚石钻进的理论,进一步总结金刚石钻进的经验,例如我们在20世纪80年代总结出来的“轻压、快转、充足水量”的经验,再把国外的经验消化、吸收,引进为我所用,我们就一定能够做出更大的贡献。

#### 参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] 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 Hengying, WANG Qiang, YANG Zhan, et al. Research and Application of Diamond Bit for Deep Geological Drilling [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2014.
- [3] 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.
- [4] 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,2012.  
DUAN Longchen, PAN Bingsuo, FANG Xiaohong. Design and Manufacture of Diamond Tools [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2012.
- [5] 汤凤林, A. Г. 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, A.G. Gallining, DUAN Longchen. Core Drilling [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2009.

- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] Нескоромных В. В. Искривление скважин в анизотропных ГОРНЫХ породах[M]. Россия, Красноярск, Издательство СФУ, 2017.
- [9] Нескоромных В. В. Разрушение горных пород при проведении геологоразведочных работ[M]. Россия, Красноярск, Издательство СФУ, 2015.
- [10] Кубасов В. В. Повышение эффективности бурения геологоразведочных скважин в твердых породах путем модернизации матриц алмазного породоразрушающего инструмента [D]. Московский государственный геологоразведочный университет, 2015.
- [11] Г. П. Богатырева и др. Оценка перспективности структурирования металломатричных алмазных буровых коронок наноалмазами[C]. Сборник научных трудов, Киев, 2011:97-102.
- [12] Скоромных В. В. дри. Разработка и экспериментальные исследования особенностей работы алмазной коронки для бурения в твердых анизотропных породах [J]. Известия Томского политехнического университета, 2015, 326(4):30-40.
- [13] Кубасов В. В., Будюков Ю. Е., Спирин В. И. Повышение работоспособности алмазных коронок криогенной обработки [C]. Приоритетные направления развития науки и технологий: тезисы докладов V III научно-технической конференции Тула. Изд.-ство, Инновационные технологии, 2013:45-50.
- [14] Будюков Ю. Е., Кубасов В. В., Спирин В. И. Характер износа алмазной коронки [C]. Приоритетные направления развития науки и технологий: тезисы докладов X V II научно-технической конференции Тула. Изд.-ство, Инновационные технологии, 2015:89-92.
- [15] Кубасов В. В. Исследование износа алмазных коронок [J]. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-аналитический журнал), 2015, 4:6-11.
- [16] Третьяк А. А. Теоретическое обоснование, разработка конструктивных параметров и технологии бурения скважин коронками, армированными алмазно-твердосплавными пластинами [D]. ЮРГТУ, Новочеркасск, 2017.
- [17] Третьяк А. А. Разработка современных конструкций коронок, армированных алмазно-твердосплавными пластинами и технология их использования [D]. ЮРГТУ, Новочеркасск, 2012.
- [18] Третьяк А. А. и др. Буровые коронки армированные алмазно-твердосплавными пластинами [M]. Новочеркасск: Издательство «Политехник», 2015.
- [19] 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.
- [20] Кубасов В. В. дри. Новые технологии повышения работоспособности алмазного породоразрушающего инструмента [J]. Экономика X X I века. инновации, инвестиции, образование, 2013(5):50-53.
- [21] Третьяк А. А. Технология бурения скважин коронками, армированными алмазно-твердосплавными пластинами [M]. Издательство Политехник, Новочеркасск, 2016.
- [22] 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.
- [23] Каракозов А. А., Попова М. С., Парфенок С. Н. и др. Исследование и разработка конструкции однослойной буровой коронки с синтетическими монокристаллами алмаза [C]. Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент-техника и технология его изготовления и применения-Киев, 2014:73-79.
- [24] Нескоромных В. В., Попова М. С. Основа системного подхода к проектированию бурового инструмента [J]. Строительство нефтяных и газовых скважин на море и суше, 2018(8):26-31.

(编辑 李艺)