

关于利用系统论方法设计金刚石钻头的分析研究

汤凤林, Чихоткин А. В., 段隆臣, 潘秉锁, 谭松成, Чихоткин В. Ф.

(中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:地质钻探工程是个复杂的系统工程,金刚石钻头设计是个复杂的系统。俄罗斯技术科学博士 Скоромных В. В. 教授等使用系统论方法设计镶金刚石钻头,以机械钻速为目标函数,以钻头切入岩石深度为切入点,建立了相关的数学模型,编制了程序,进行了计算机模拟,可以比较直观地看到金刚石在孔底的工作情况和钻头破碎岩石的过程,对于深入研究孔底岩石破碎过程机理和判断金刚石钻头设计的合理性及其对钻探技术经济指标的作用,具有一定的实际意义。

关键词:地质钻探工程;金刚石钻头;系统论;计算机模拟;岩石破碎过程;技术经济指标

中图分类号:P634.4⁺1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)01-0013-07

Analytical research on design of diamond drill bits with the system theory approach

TANG Fenglin, CHIKHOTKIN A. B., DUAN Longchen,
PAN Bingsuo, TAN Songcheng, CHIKHOTKIN B. F.

(Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: Geological drilling engineering is a complicated system engineering and design of diamond bits is a complicated system. Russian Doctor of technical sciences and Professor Skoromnyh V.V. and others have designed surface set diamond drill bits using the system theory approach, where the mechanical penetration rate is taken as the objective function with the cutting depth of the drill bit as a cut-in point to build the mathematical model, and develop the program to perform computer modeling. The modeling results allow the working situation of the diamonds in the bottom hole and rock fragmentation process to be seen more directly, which have some practical significance for in-depth research on the mechanism of rock fragmentation process and assessment of the rationality of the diamond bit design, and their influence on the technical and economical index of drilling.

Key words: geological drilling engineering; diamond drill bit; system theory; computer modeling; rock fragmentation process; technical and economical indexes

1 概述

从大的方面讲,系统论方法是指把研究对象放在一个系统中,用系统论的观点去研究社会经济活动,从整体出发,从系统与要素、要素与要素、结构与功能、系统与周围环境之间的相互关系、相互作用和相互制约中,对之进行考察和辩证分析,以达到最优处理问题的一种研究方法。整体化、模型化和最优

化是系统论方法的 3 项重要原则。系统论也有人称之为控制论。

运用系统论方法,首先要根据构成系统的各个要素之间固有的联系、结构和功能,研究系统的总目标以及实现总目标的各种方案,并且加以定量化、形式化,建立起数学模型,对系统的实际情况进行模拟,掌握数据和积累资料,然后根据这些资料对各种

收稿日期:2019-03-31 DOI:10.12143/j.tkgc.2020.01.003

基金项目:国家自然科学基金面上项目“基于张力环试验的热压钻头 WC-Cu 基胎体对金刚石把持力的定量研究”(编号:41672364,2017—2020)

作者简介:汤凤林,男,汉族,1933 年生,教授,博士生导师,俄罗斯工程院院士,俄罗斯自然科学院院士,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,fltang_wuhan@aliyun.com。

引用格式:汤凤林,Чихоткин А.В.,段隆臣,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, CHIKHOTKIN A.B., DUAN Longchen, et al. Analytical research on design of diamond drill bits with the system theory approach[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(1):13—19.

方案进行比较和筛选,选出能使系统在整体上达到最优化目标的方案^[1-2]。

钻头是钻进破碎岩石的主要工具,钻头的设计、生产、使用和管理都很重要,无论是在地质钻探中,还是在石油钻井中都是如此。“工欲善其事,必先利其器”。所以要首先考虑钻头问题。我国在钻头的研发方面做了大量的工作,俄罗斯钻探工作者也在地质钻探和石油钻井钻头的设计、改进、使用、管理方面取得了很大的成绩^[3-20]。

金刚石钻进过程是一个非常复杂的过程,其中牵扯到力学、水力学和热力学等方面的问题。为了研究孔底金刚石钻进破碎岩石的过程,必须把每个金刚石切削具看成是处于一个统一的并且是彼此相关系统中的一个组成部分及其与孔底岩石的相互作用问题。

为此,金刚石钻进过程和金刚石钻头设计宜按如下次序进行研究:(1)在分析钻头破碎岩石过程的基础上,筛选出可以用作研究原始资料中权重最大的因素;(2)确定被筛选出的因素对钻头几何参数和性能影响的权重;(3)确定出表示钻头使用具体条件下,钻进过程输出参数(目标函数)的最优值。

钻探工程生产中,钻探设备、钻头、钻进工艺、操作技术和施工管理都很重要,缺一不可。但是,就破碎岩石来说,钻头是主要钻进工具。俄罗斯专家、西伯利亚联邦大学教授 Скоромных В. В. 博士提出的金刚石钻头设计思路是:根据钻头设计的原始条件(所钻岩石性质、金刚石性能、胎体性能和驱动功率)和钻进规程(轴载、转速、冲洗液量),使用系统论方法,将钻头设计看成是一个系统,从岩石破碎原理过程出发,以钻头破碎岩层深度(厚度)为切入点来设计钻头参数(扇形块个数、扇形块宽度、水口宽度、金刚石数量、扇形块内金刚石间距、金刚石排列形式等),以得到最优的钻进过程输出参数^[21,23]。

设计金刚石钻头时,可以分成3个模块(见图1):第Ⅰ个模块是钻头工作条件的原始资料(如所钻岩石性质、所用金刚石性能、胎体性能和驱动功率等)和钻进规程(轴载、转速、冲洗液量),第Ⅱ个模块是需要研究设计的内容(如扇形块个数和宽度、水口宽度、金刚石数量、扇形块内金刚石间距、金刚石排列形式等),第Ⅲ个模块是钻进过程的输出参数。输出参数也可称之为目标函数,对于地质钻探工程来说,目标函数可以是钻探技术经济指标,如机械钻

速、钻头进尺、每米钻探成本以及孔底钻头的温度等,因为孔底钻头的温度,除了在钻进破碎岩石过程中升高外,也与地热增温率(地球深度每33 m增加1℃)有关。为了便于讨论,我们可取机械钻速和孔底钻头温度作为目标函数^[21]。

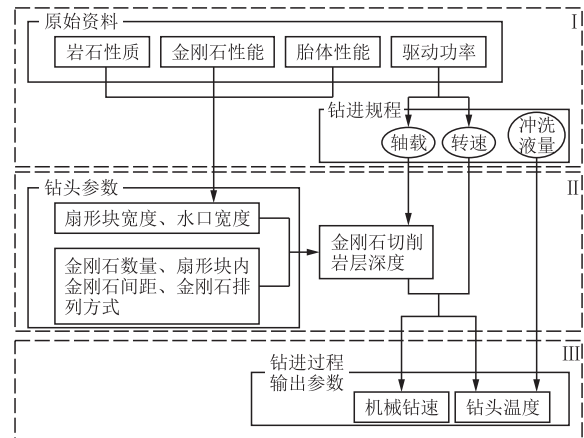


图1 系统论法设计金刚石钻头框图

Fig.1 Block diagram of designing the diamond drill bit with the system theory approach

2 机械钻速与钻头切入岩石深度

我们可以以钻头切入岩石深度为切入点,把机械钻速作为钻头设计的目标函数来进行分析和讨论。首先讨论金刚石钻进时的机械钻速和钻头切入岩石深度问题。

如图2所示,金刚石钻进时,在轴载 P 和扭矩切力 F 作用下,在破碎岩石的过程中,在合力 R 的方向上形成压缩核 AMB ,在压缩挤核顶端与孔底表面上形成使岩石产生分离的裂隙 aM 。

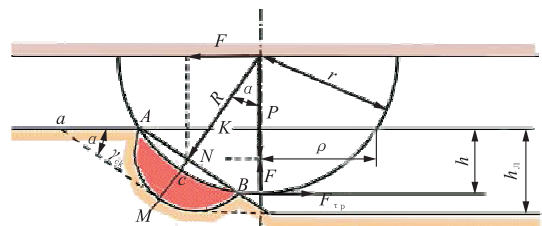


图2 金刚石破碎岩石过程示意图

Fig.2 Rock fragmentation process by diamond

机械钻速 V_M 与很多因素有关,可用下式表示^[21]:

$$V_M = 60 h_{\text{JL}} \omega n_P$$

$$V_M = 60 \frac{V_T}{V_P \lambda C_r} \sigma \omega n_P = 60 \frac{V_T}{V_P \lambda C_r} \sigma \omega \frac{n_0 h}{h_{\text{JL}}} \quad (1)$$

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(如岩石结构缺乏等)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 ; ω ——钻头转速, r/min ; n_p ——切削线上的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)中的:

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

式中: R ——扭矩切力 F 和轴载 P 的合力; S_{CM} ——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:

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

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), mm ; 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 $10^{-13} \sim 10^{-12} \text{ s}$ 。

从式(4)可见, 如果轴载 P 和切力 F 增加、岩石裂隙 $2l$ (a 是岩石晶格常数)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 τ (τ_0 为固体中原子振动周期, $10^{-13} \sim 10^{-12} \text{ s}$) 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。

2.1 金刚石移动线速度 V_p 和形成分离岩石的裂隙 aM 的速度 V_T 应该同步

从图 2 可见, 为了使金刚石碎岩工具能够顺利钻进到给定深度, 保证设计的机械钻速和正常钻进, 应该使金刚石移动线速度 V_p 和形成分离岩石的裂隙 aM 的速度 V_T 同步。

破碎岩石深度一定时, 如果增加轴载 P 、岩石分

离裂隙速度 V_T 增加、岩石压缩核应力 σ 增加, 则金刚石切削具移动速度 V_p 增加。如果岩石破碎阻力增加、岩石刚度 C_r 、决定阻止 V_T 增加的各个参数的系数 λ 增加, 则金刚石切削具移动速度 V_p 降低。在岩石破碎深度一定时, 金刚石切入岩石深度 h 和金刚石颗粒直径 d 也是限制金刚石切削具移动速度 V_p 的因素。

如果裂隙成长速度 V_T 小于金刚石切削具移动速度 V_p , 则会由于金刚石切削具移动遇到的阻力增加, 而使金刚石切削具切入岩石深度 h 降低、孔底破碎岩石裂隙深度 h_n 降低, 导致 aM 距离缩短和沿着 aM 线形成裂隙的时间缩短。

如果裂隙成长速度 V_T 大于金刚石切削具移动速度 V_p , 即 $V_T/V_p > 1$, 则破碎岩石所需应力不足, 金刚石切入深度 h 变浅, 每转钻进时形成裂隙的深度变浅, 导致机械转速降低。

为使 V_p 和 V_T 同步, 必须增大金刚石切削具前面岩石压缩核内的机械应力, 这可以通过增加钻头的轴载来达到。如果功率给定, 利用降低钻头转速来增加轴载, 虽然也可保持岩石破碎深度不变, 每转进尺不变, 但是机械钻速降低了, 因为机械钻速与钻头转速成正比。

2.2 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

如图 2 和公式(3)、公式(4)所示, 对于不同岩石和破碎岩石方式不同来说, 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。

实验研究表明:

(1)在塑性大、硬度小的岩石中钻进时, 钻头通常是以切削剪切方式破碎岩石的, 大的切削具应该具有大的尖锐切削面, 以便在岩石中形成足够大的切削剪切应力。小的切削具(粒度小于 100 粒/克拉)由于其颗粒小、因而与岩石接触面积小, 可在岩石中产生大的应力, 可以在中等硬度岩石、硬岩和非常坚硬岩石中实施切削剪切。切削剪切方式破碎岩石时, 金刚石切入深度 h 与破碎裂隙深度 h_n 相等或相近, 对于中等硬度岩石和小切削具钻头来说, 金刚石切入深度 h 与破碎裂隙深度 h_n 几乎相等, 即 $h_n/h \approx 1$ 。

(2)使用抛光大颗粒金刚石钻头钻进时, 钻头以压碎挤压方式破碎岩石, 此时 $h_n/h > 1$, 有时可以高达 5 倍。

2.3 切力 F 增加, h_n 变浅

破碎岩石所需扭矩切力等于破碎岩石所需切力和摩擦力之和^[23]:

$$F = \frac{\pi(h + 0.25\sqrt{dh})^2 n_p}{2\text{tg}\gamma_{ck}} \sigma_{ck} + P_{oc} f \quad (5)$$

式中: h ——金刚石切入岩石深度; n_p ——有效金刚石颗粒数; σ_{ck} ——岩石抗剪切强度; γ_{ck} ——岩石破碎剪切角度(见图2); P_{oc} ——轴载; f ——金刚石颗粒与岩石接触时的摩擦系数。

如图3所示,当切削具前面的阻力 F 增加时,剪切分力增加, $F \rightarrow F_1$, 且 $F_1 > F$, 会导致合力和轴载间的夹角 α 变大, 压缩核向上移动, 破碎裂隙深度变浅, 金刚石前面的分离岩石的裂隙长度 aM (见图2)变短。

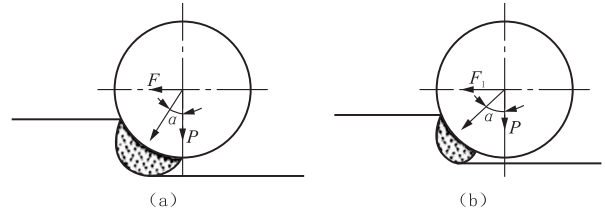


图3 切力 F 变化时岩石破碎过程示意图

Fig.3 Rock fragmentation process at changing shear forces

2.4 切入岩石深度 h 与金刚石在钻头上布置的关系

钻头上使用的金刚石形状、大小和位置,在岩石破碎过程中起着重要作用。

现以成批生产的表镶金刚石钻头为例(见图4),讨论如下:

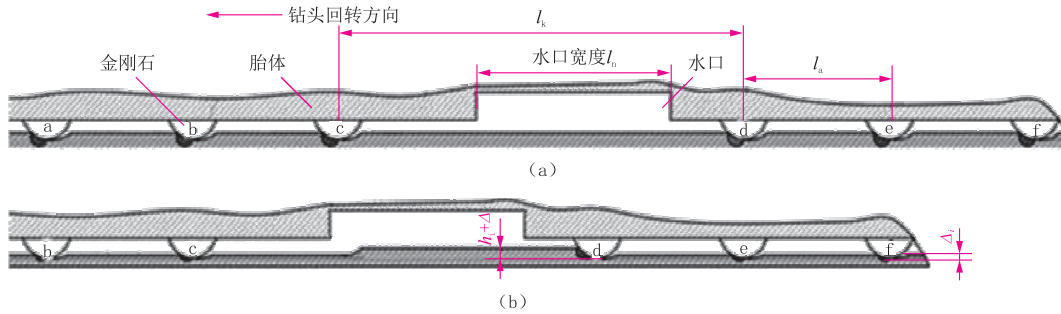


图4 金刚石与岩石相互作用示意图

Fig.4 Diamond and rock interaction

金刚石在切削线上的排列是不均匀的,两个相邻扇形块金刚石间的距离 l_k 大于扇形块内金刚石间的距离 l_a ($l_k > l_a$) 见图4(a)和4(b)。这是由于钻头结构特点(有扇形块和水口)决定的。在一条切削线上,扇形块内金刚石间的距离 l_a (见图4a)小于两个相邻扇形块间金刚石的距离 l_k 。金刚石 c 和 d 之间的距离大于金刚石 d 和 e 、 e 和 f 间的距离,见图4(b)。在钻头静压破碎岩石时,所有金刚石切入岩石的深度 h 都是一样的,所有金刚石形成的压缩核都是相同的。压缩核位置的性质,取决于钻头上所镶金刚石的形状和被破碎岩石的类型。

在静载的作用下,所有金刚石的切入值均为 Δ_i , 在轴载不变情况下,所有金刚石切入岩石的面积不变(见图4a),故:

$$\Delta_i = \left(1 - \frac{n_1}{n_a}\right) h \quad (6)$$

式中: n_1 ——金刚石在第一个径向排上的数量; n_a ——钻头上金刚石总的数量。

但是,当钻头转动一个角度,使切削线上第二个和后面的金刚石到达前面金刚石的位置(金刚石 b 到达金刚石 a 位置,金刚石 $c \rightarrow$ 金刚石 b 位置, $e \rightarrow d$, $f \rightarrow e$)时,则作用到金刚石上的阻力发生了才重新分配的变化。

此时,第一排金刚石 d (见图4b)切入岩石可以达到最大值 $h_{\max}$:

$$h_{\max} = h \left[1 + \sum_{i=1}^m \left(1 - \frac{n_1}{n_a} \right)^i \right] \quad (7)$$

计算机模拟结果表明,在金刚石切入岩石的过程中,由于两个相邻扇形块金刚石间的距离 l_k 大于扇形块内金刚石间的距离 l_a , 所以扇形块第一排金刚石破碎岩石的深度可能比第二排及其以后排金刚石破碎岩石深度大(甚至可达一倍多)。由于金刚石切入深度的变化,钻头唇部下面压缩核的位置也要发生变化。切入深度大的金刚石,岩石破碎效果更好一些。如果金刚石 d 到达前面的金刚石 c 时,作用到此金刚石上的切力由于其破碎前面岩石阻力

(通过每个 l_a 距离时)而周期性地增加,则金刚石除了可能遭受冲击损伤外,其结果是岩石压缩核可能向上移动。如果钻头回转 l_k 距离时,在第一个金刚石前面不能形成岩石分离的裂隙,则破碎岩石的效果是不好的。所以在设计钻头结构时,必须考虑金刚石在切削线上的分布问题。两个相邻扇形块金刚石间的距离 l_k 过大,扇形块内金刚石间距差别过大,会导致其金刚石由于布置不够合理而损伤和金刚石钻头使用不够充分。如果钻头切削线上的所有金刚石上布置尽量合理($l_k = l_a$),则钻头上所有金刚石承受的载荷是均匀的,切入岩石深度更加合理,破碎岩石效果更好。高度等于两个扇形块径向宽度的短金刚石钻头(见图 5),可以满足这个条件^[22]。

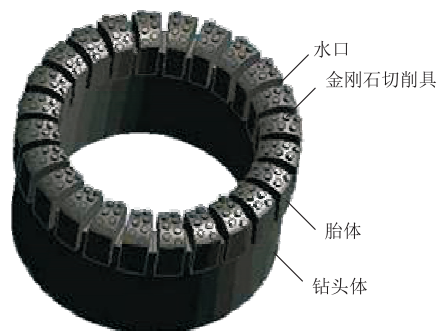


图 5 表镶短金刚石钻头

Fig.5 Short surface set diamond bit

3 模拟金刚石切入岩石深度 h 的数学模型和计算机程序

根据上述讨论,以机械钻速为目标函数,以金刚石切入岩石深度 h 为切入点,建立了相关的数学模型,见式(4),用 Delphi 语言编制了一个计算机程序,进行了计算机模拟。计算机模拟是指要建立研究对象的数学模型,并在计算机上加以体现和试验。研究对象包括各种类型的系统,该系统模型是指借助有关概念、变量、规则、逻辑关系、数学表达式、图形和表格等对系统的描述。把这种数学模型转换成对应的计算机上可执行的程序,给出系统参数、初始状态和环境条件等输入数据后,可在计算机上进行运算得出结果,并提供各种直观形式的输出结果^[21,23]。

运行利用上述数学模型编制的计算机程序,可以绘出钻孔孔底的剖面图,红色垂直线表示金刚石在孔底的位置(见图 6)^[21]。

运行这个程序可以记录在钻进过程中,任何时间点上的金刚石切入值,并在屏幕上以不同的颜色显示出该时的岩石破碎深度 h 的数值,可以直观地看到金刚石的位置对其切入深度的影响。拖动鼠标可以看到此时任何一颗金刚石切入岩石的深度(见图 7)^[21]。

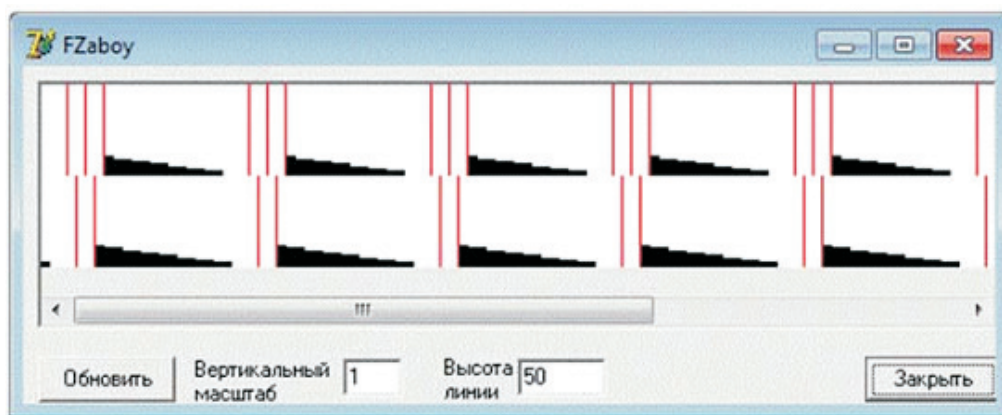


图 6 钻孔孔底横断面剖面图(红色垂直线表示金刚石的位置)

Fig.6 Cross section of the hole bottom(Red vertical lines mean diamond locations)

运行这个程序可以看到金刚石破碎岩石深度 h_i 与钻头回转转数 N_0 的关系,看到金刚石在孔底移动的轨迹(见图 8)^[21]。

4 讨论和建议

根据上述研究,可做下述讨论和建议。

(1)系统论方法是根据构成系统的各个要素之间固有的联系、结构和功能,研究系统的总目标以及实现总目标的各种方案,并且加以定量化、形式化,建立数学模型,对系统的实际情况进行模拟,对各种方案进行比较和筛选,选出能使系统在整体上达到最优化目标的方案。系统论实际上也是控制论。地

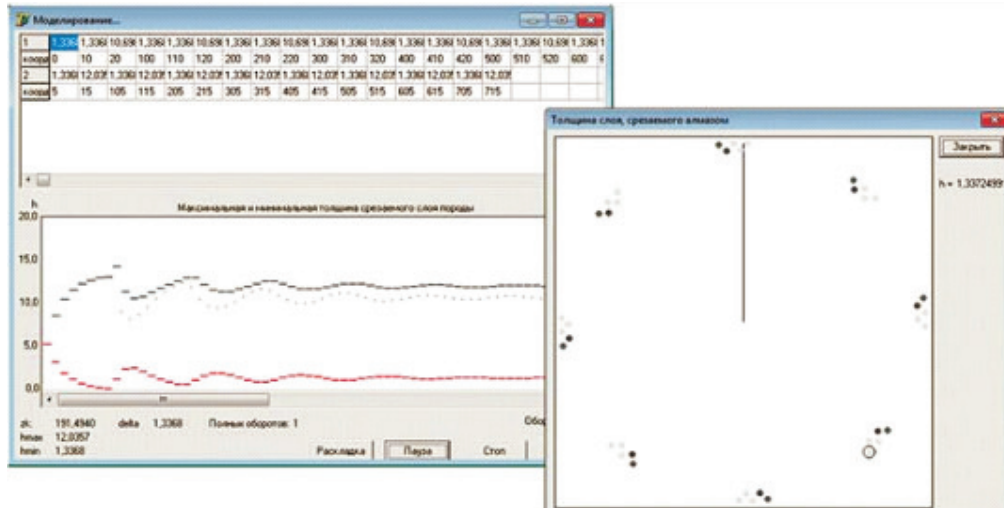
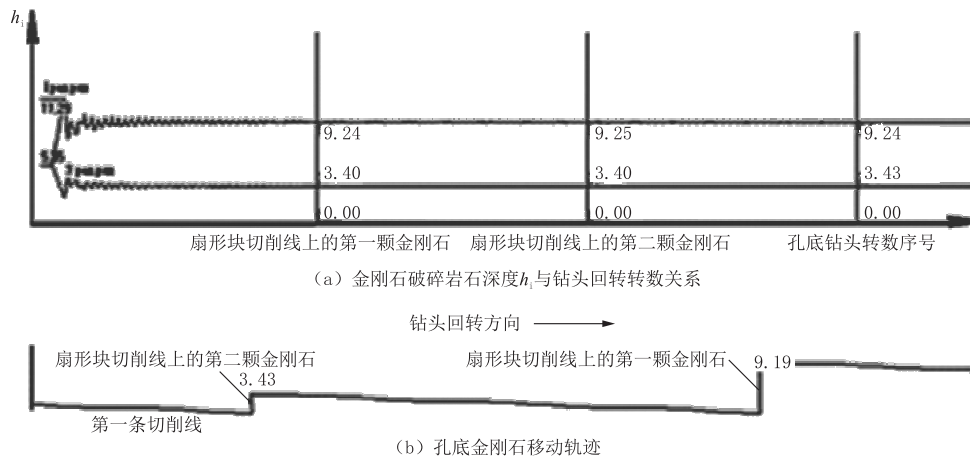


图7 计算机模拟窗口界面图

Fig.7 Program window interface of computer modeling



(b) 孔底金刚石移动轨迹

图8 计算机模拟结果

Fig.8 Results of computer modeling

质钻探工程是个复杂的系统工程,所用钻头也是个复杂的系统。用系统论思路来设计金刚石钻头,可以得到最优化目标的方案,得到最好的钻头使用性能和最好的钻探技术经济指标。目前国内钻头设计中使用这种设计思路不多,建议扩大试验加以使用。

(2)机械钻速是钻探工程的主要技术经济指标之一,用其作为钻头设计的目标函数是合适的。机械钻速与钻头切入岩石深度紧密相关,以金刚石切入岩石深度为切入点,建立数学模型,进行计算机模拟,可以比较直观地看到金刚石切削具在孔底工作的状况和破碎孔底岩石的过程,对于深入了解岩石破碎过程的机理、金刚石在孔底的工作情况和检验金刚石钻头设计是否合理,具有重要实际意义。

(3)设计钻头时,应该考虑金刚石在切削线上的

分布情况。如果有的金刚石间距很大,有的很小,差别很大,则会导致金刚石因布置不够合理、负担不均匀而造成的金刚石无谓损伤和金刚石钻头使用不够充分。如果钻头一条切削线上的金刚石布置合理,金刚石间距尽量相等($l_k = l_a$),则钻头上金刚石承受的载荷才会是均匀的,可以提高钻头的等强度和等耐磨性,钻进破碎岩石效果会更好,钻头进尺会更多,技术经济指标会更高。高度等于两个扇形块径向宽度的短金刚石钻头,可以满足这个条件。这个研究试验结果具有重要的实际意义,应该重视,建议进行研究、加以验证和确认。

参考文献(References):

- [1] 魏宏森.系统论[M].北京:世界图书出版公司,2009.

- WEI Hongsen. System theory[M]. Beijing: World Publishing Corporation, 2009.
- [2] 黄志坚. 工程概论——系统论在工程技术中的应用[M]. 北京: 北京大学出版社, 2010.
- HUANG Zhijian. Introduction to Engineering—System theory and its application in engineering and technology[M]. Beijing: Peking University Press, 2010.
- [3] 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 Hengyin, WANG Qiang, YANG Zhan, et al. Research and application of diamond bits in deep geological drilling[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2014.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 汤凤林, A. G. 加里宁, 段隆臣. 岩心钻探学[M]. 湖北武汉: 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.
- [7] 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.
- [8] 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 multitierwing bit[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(6): 88—92.
- [9] 库巴索夫 В. В. 提高钻探效率的地质工程方法[M]. 莫斯科: 地质出版社, 2015.
- Кубасов В. В. Повышение эффективности бурения геологоразведочных скважин в твердых породах путем модернизации матриц алмазного породоразрушающего инструмента[D]. Московский государственный геологоразведочный университет, 2015.
- [10] Г. П. Богатырева и др. Оценка перспективности структурирования металломатричных алмазных буровых коронок наноматериалами[C]// Сборник научных трудов, Киев, 2011: 97—102.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Кубасов В. В. Исследование износа алмазных коронок [J]. Горный информационно — аналитический бюллетень (научно — аналитический журнал), 2015, 4: 6—11.
- [15] Третьяк А. А. Теоретическое обоснование, разработка конструктивных параметров и технологии бурения скважин коронками, армированными алмазно — твердосплавными пластинами [D]. ЮРГТУ, Новочеркасск, 2017.
- [16] Третьяк А. А. Разработка современных конструкций коронок, армированных алмазно — твердосплавными пластинами и технология их использования [D]. ЮРГТУ, Новочеркасск, 2012.
- [17] Третьяк А. А. и др. Буровые коронки армированные алмазно — твердосплавными пластинами [M]. Новочеркасск: Издательство «Политехник», 2015.
- [18] 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.
- [19] Кубасов В. В. и др. Новые технологии повышения работоспособности алмазного породоразрушающего инструмента [J]. «Экономика XXI века. инновации, инвестиции, образование», 2013(5): 50—53.
- [20] Третьяк А. А. Технология бурения скважин коронками, армированными алмазно — твердосплавными пластинами [M]. Издательство «Политехник», Новочеркасск, 2016.
- [21] 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.
- [22] Каракозов А. А., Попова М. С., Парфенов 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.
- [23] 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 王建华)