

# 旋挖钻机碎岩计算方式的分析探讨

贾学强, 张继光, 罗延严, 耿倩斌, 邱红臣

(徐州徐工基础工程机械有限公司, 江苏 徐州 221001)

**摘要:**结合外载碎岩基本现象,对旋挖碎岩基本过程进行分析,得出其在回转钻进情况下的螺旋破碎的碎岩形式。然后根据岩石破碎时的压入条件,以单个截齿为研究模型,得出轴向压力的理论计算公式,继而参考库伦纳维的内摩擦理论,得出了切削力的理论计算公式。根据不同钻具形式,将单个截齿的计算公式扩展,得到了旋挖钻机压力和扭矩参数的计算公式。将轴向力与切削力计算公式中在特定工况下的影响因子简化,得出了旋挖钻机钻进过程中进尺速度与切削力的理论关系。最后利用LS-DYNA动态分析软件模拟了单个截齿在不同侵深条件下的切削力变化曲线,并将曲线与同等工况下理论计算的曲线进行对比,得出单个截齿的入岩参数理论计算公式。可为入岩旋挖钻机设计提供参考。

**关键词:**旋挖钻机;入岩参数;截齿;切削力;侵深;数值模拟;LS-DYNA

**中图分类号:**P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2017)06-0023-05

**Discussion about Calculation Methods of Rock Fracturing by Rotary Drill/JIA Xue-qiang, ZHANG Ji-guang, LUO Yan-yan, GENG Qian-bin, QIU Hong-chen** (Xuzhou Xugong Foundation Construction Machinery Co. Ltd., Xuzhou Jiangsu 221001, China)

**Abstract:** Combining with basic phenomenon in rock fracturing by external load, the analysis is made on the process of crushing rock by rotary drilling to get the helical breaking form. Based on the conditions of pressing into the rocks and selecting a single cutting pick as calculation model, the theoretical formula of axial pressure is obtained; then with the reference of Coulomb-Navier internal friction theory, the theoretical calculation formula of cutting force is obtained. According to different types of drilling tool, the calculation formula of single cutting teeth is extended, the formulas for calculating the pressure and torque parameters of rotary drilling rig are obtained. The influence factors under specific conditions in the axial force and cutting force calculation formulas are simplified, the theoretical relationship between drilling penetration rate and cutting force in rotary drilling process is obtained. Finally, by dynamic analysis software LS-DYNA, change curve of cutting force of single pick in different drilled depth is simulated, and the comparison is made on the simulated curve and the theoretical calculated curve under the same condition to get the theoretical calculation formula for cracking parameters of single pick, which can be reference for the design of rotary drilling rig.

**Key words:** rotary drilling rig; parameters of rock cracking; pick; cutting force; penetration depth; numerical simulation; LS-DYNA

## 0 引言

从20世纪80年代,旋挖钻机被引进国内算起的30多年里,旋挖钻机大部分时间的施工对象都是土层,但是最近几年,越来越多的旋挖入岩要求被提出,而为了适应这一趋势,各主机厂家将钻机的性能参数设计的越来越大,推出入岩性能大幅提升的大型旋挖钻机,但是在这一过程中,凸显了一个重要问题:虽然设备制造技术在不断提高,但是在近几年里旋挖入岩的相关研究却没有得到充分发展,设备所提供的性能参数并不能代表最高效、最节能环保的入岩参数,长此以往,必将影响行业的良性发展。本

文将从岩石破碎的相关理论出发,结合旋挖钻机碎岩的特点,利用数值模拟手段,对旋挖钻机碎岩参数进行分析研究。

## 1 旋挖碎岩

### 1.1 外载碎岩基本现象

利用工具来碎岩,基本上有2个过程,先是侵入岩石,然后才产生其周围岩石的大块崩落。因此在碎岩过程中,明确工具侵入岩石的现象,是研究机械方法碎岩的一个基本过程。通过压头静力侵入岩石的试验,可以观察到压入侵深不随载荷增长而正比

收稿日期:2016-07-19; 修回日期:2016-12-13

作者简介:贾学强,男,汉族,1991年生,勘查技术与工程专业,从事旋挖钻机施工工法研究工作,江苏省徐州市经济开发区驮蓝山路36号,761660802@qq.com。

增加,而是存在一种跃进式侵入现象,这种现象对于脆性岩石更加明显<sup>[1]</sup>。

## 1.2 旋挖碎岩过程

旋挖钻进可划归为硬质合金回转钻进工艺。钻进时,钻头切削具在轴向压力(钻具自重以及动力头压力)的作用下压入岩石,在回转水平力(扭矩)的作用下沿孔底剪切破碎岩石。钻具在旋转过程中,不断向下侵入,因此在轴向力和水平力的共同作用下,导致孔底岩石以螺旋层形式连续被破碎<sup>[2]</sup>。在剪切碎岩过程中,通常是通过若干次小剪切的积累,来实现切削具与岩石的大面积接触,从而实现较大体积的岩石剪崩。

## 2 入岩参数分析

通过对旋挖钻机碎岩过程的分析,入岩参数主要为轴向压力和水平切削力,反映在旋挖钻机上就是钻机加压力和钻机扭矩2个参数。下面以单个截齿的入岩模型为例,来分析两者之间的关系。

### 2.1 截齿轴向力

在轴向压入条件下,截齿要压入岩石形成破溃坑,则单位接触面积上产生的压力,必须达到或者超过岩石的单轴抗压强度<sup>[3]</sup>。即满足以下公式:

$$F_y \geq S\sigma \quad (1)$$

式中: $F_y$ ——单个截齿所加轴向压力; $S$ ——截齿硬质合金头侵入一定深度后与岩石接触面在水平面的投影面积; $\sigma$ ——岩石的单轴抗压强度。

式(1)中需要确定的参数主要为 $S$ ,即不同侵入深度下的投影面积,该参数可结合图1所示的参数得出计算公式:

$$S_y = \frac{\pi d^2}{4} \quad (2)$$

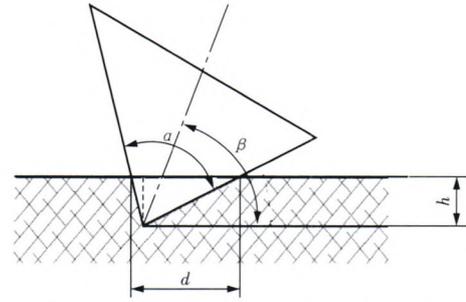
$$d = h \left[ \tan\left(\frac{\alpha + \pi}{2} - \beta\right) + \tan\left(\frac{\alpha - \pi}{2} + \beta\right) \right] \quad (3)$$

将上述参数代入式(1),可得:

$$F_y = \left\{ h \left[ \tan\left(\frac{\alpha + \pi}{2} - \beta\right) + \tan\left(\frac{\alpha - \pi}{2} + \beta\right) \right] \right\}^2 \pi \cdot \frac{\sigma}{4} \quad (4)$$

据该公式可知,轴向压力的大小受截齿安装角度、截齿锥角、岩石强度以及侵入深度有关。对于一特定钻头在某一地层施工时,影响轴向压力大小的就是单次侵入深度因素。

根据上述公式,在截齿轴向压力确定的情况下,



$\alpha$ —截齿硬质合金头锥顶角; $\beta$ —截齿安装角度; $d$ —截齿硬质合金头水平投影直径; $h$ —侵入深度

图1 截齿硬质合金头压入岩石计算模型

可以计算出硬质合金头的单次理论侵入深度:

$$h = \frac{2 \sqrt{\frac{F_y}{\pi \sigma}}}{\tan\left(\frac{\alpha + \pi}{2} - \beta\right) + \tan\left(\frac{\alpha - \pi}{2} + \beta\right)} \quad (5)$$

这里需要注意的一点是,式(5)可以用来大致估算侵入深度,并不能反映实际破碎时载荷与侵入的跃进式侵入关系。

### 2.2 切削力

根据库伦纳维尔理论:固体介质材料(包括岩石在内)破坏时,在其破坏面上的抗剪强度等于介质的内聚力(或称之为内连力)与作用在该面上的内摩擦力之和<sup>[4]</sup>。在截齿切削岩石形成大剪崩的过程中,其必须克服如图2所示的面积 $abb'$ (锥面 $abcd$ 的投影)、侧面积分别为 $abc'$ 和 $ab'c$ 产生的岩石抗剪切阻力和破坏面上的摩擦力<sup>[4]</sup>。

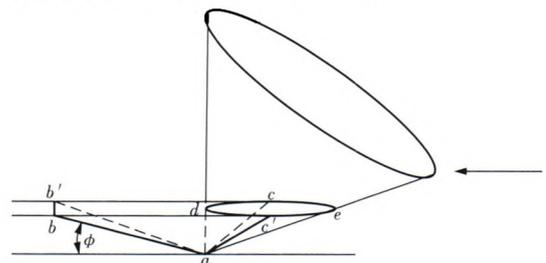


图2 硬质合金头水平切削模型

如图2所示,三角形 $abb'$ 、 $abc'$ 和 $ab'c$ 的面积 $S_1$ 、 $S_2$ 以及 $S_3$ ,可分别用以下公式计算:

$$S_1 = \frac{dh}{2 \sin \phi} \quad (6)$$

$$S_2 = S_3 = \frac{h}{2} \left( \frac{d}{2} + \frac{h}{\tan \phi} \right) \quad (7)$$

再考虑到破坏面上的内摩擦力,则所需克服的总阻力 $F_1$ 为:

$$F_1 = (S_1 + 2S_2) \sigma_0 + (F_x - F_y f) f_1 \sin \phi \quad (8)$$

式中: $\sigma_0$ ——岩石抗剪强度; $f$ ——切削具与岩石摩擦系数; $f_1$ ——岩石内摩擦系数。

形成剪切时,切削具的有效外载  $F_1$  如下式所示:

$$F_1 = (F_x - F_y f) \cos \varphi \quad (9)$$

当所施加外载  $F_1$  满足切削阻力要求时,即可形成剪切,因此可求得切削力  $F_x$ :

$$(F_x - F_y f) \cos \varphi = (S_1 + 2S_2) \tau + (F_x - F_y) f_1 \sin \varphi$$

$$F_x = \frac{2F_y \tau (\gamma \tan \varphi + \gamma \sin \varphi \tan \varphi + 2 \sin \varphi) - \gamma^2 \pi \sigma \sin \varphi \tan \varphi (F_y f f_1 \sin \varphi - F_y f \cos \varphi)}{\gamma^2 \pi \sigma \sin \varphi \tan \varphi (\cos \varphi - f_1 \sin \varphi)} \quad (12)$$

由式(12)可知,剪崩所需切削力  $F_x$  的大小与施加压力  $F_y$ , 岩石参数  $\sigma f f_1$  及  $\varphi$  有关。

### 2.3 压力扭矩参数计算

对于安装多个截齿的旋挖钻头而言,钻进过程中所需设备施加在钻头的压力扭矩大小,可分别按下述公式计算。

#### 2.3.1 加压力计算公式

钻机所需加压力的大小,可视为钻头单个截齿轴向压力的累加,其计算方式为:

$$F = m F_y \quad (13)$$

式中: $m$ ——钻头底部截齿数量。

#### 2.3.2 扭矩计算公式

钻机施加在钻头上的扭矩,为钻头单个截齿切削力围绕钻头中心的力矩和,考虑到截齿筒钻与截齿捞砂斗布齿方式的差异。

##### (1) 截齿筒钻

$$T = \frac{F_x m D}{2} \quad (14)$$

式中: $T$ ——扭矩,  $N \cdot m$ ;  $m$ ——钻头底部截齿数量;  $D$ ——钻头直径,  $m$ 。

##### (2) 截齿捞砂斗

由于截齿捞砂斗截齿布置间距几乎一样,并且底板两侧上的截齿布局呈左右互补状态,因此其扭矩可用下式计算:

$$T = F_x t \sum_{i=1}^m i \quad (15)$$

式中: $T$ ——扭矩,  $N \cdot m$ ;  $F_x$ ——切削力大小,  $N$ ;  $t$ ——截线间距,  $m$ ;  $m$ ——截齿数量;  $i$ ——截齿序号。

由于切削力与轴向压力成正比关系,因此轴向施加压力越大,所需扭矩也就越大。

$$F_x = \frac{(S_1 + 2S_2) \sigma - F_y f f_1 \sin \varphi + F_y f \cos \varphi}{\cos \varphi - f_1 \sin \varphi} = \frac{(S_1 + 2S_2) \sigma}{\cos \varphi - f_1 \sin \varphi} + F_y f \quad (10)$$

式中: $\varphi$ ——岩石的内摩擦角。

设:

$$\gamma = \tan\left(\frac{\alpha + \pi}{2} - \beta\right) + \tan\left(\frac{\alpha - \pi}{2} + \beta\right) \quad (11)$$

可推算出切削力计算式如下:

### 3 入岩参数确定

在分析入岩参数的方法之前,首先需要明确以下2个公式,即进行入岩参数研究的目的,无非是为了获得最大的进尺速度:

$$v = \frac{nh}{60} \quad (16)$$

$$P = \frac{nT}{9550} \quad (17)$$

式中: $v$ ——钻机的进尺速度,  $m/s$ ;  $n$ ——动力头转速,  $r/min$ ;  $h$ ——单次侵入深度,  $m$ ;  $P$ ——动力头输入功率,  $kW$ ;  $T$ ——动力头输出扭矩,  $N \cdot m$ 。

由于式(16)、式(17)中单次侵入深度  $h$ 、扭矩  $T$  都与轴向压力成正比,而转速  $n$  则是与轴向压力成反比,因此在某一特定工况下(设备、钻具以及岩石均被明确),进尺速度只与轴向压力有关。通过对以上关系公式简化,进尺速度公式可用下式表示:

$$v = \frac{\varepsilon}{\sqrt{F_y}} \quad (18)$$

式(18)中, $\varepsilon$ 是与设备、钻具以及岩石性质有关的系数,在特定工况下可视为常数,因此由该公式可知,进尺速度与轴向压力成反比关系,即轴向压力越小,钻进速度越大。虽然轴向压力越小越好,但是实际应用时,需要考虑小侵深、高转速情况下钻具的磨损情况,并且,受设备因素的限制,转速大小也有一定的范围限制。

综上所述,关于入岩参数的确定,主要是轴向压力参数的确定,从理论上讲,将转速  $n$  在可用范围内取最大值,即可得到一个最小轴向压力,但是该种状态下进尺速度与钻具磨损的关系,还需要通过实验来综合评估。

#### 4 数值模拟

利用显性动力学软件 ANSYS/LS - DYNA,对单个截齿模拟碎岩过程进行模拟,得出岩石破碎过程中截齿的受力特性,并与理论条件下的计算数值进行分析验证。

##### 4.1 材料参数

在本次模拟过程中,主要是为了得出截齿的受力情况(磨损破坏情况不考虑),并且截齿材料的刚度相对于岩土而言很大,因此可将截齿设置为刚体,关键字为 \* MAT\_RIGID;岩土材料模型选用可反映大应变、高速应变速率和高静水压力的模型——HJC(HOLMQUIST\_JOHNSON - CONCERTE)岩土本构模型,由于该材料模型在软件中无法设置,需要在关键字文件中重新设置,岩土材料模型设置2种,分别用于模拟抗压强度为48 MPa的岩石,2种材料模型参数如下。

截齿刚体材料参数:密度 $\rho$ 为7800 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量为210 GPa,泊松比为0.3。

HJC材料参数<sup>[5]</sup>:密度 $\rho$ 为2400 kg/m<sup>3</sup>;剪切模量 $G$ 为14.86 GPa;内聚力强度 $A$ 是给定静水压力下完全断裂强度与无损伤强度的比值,为0.79;压力强化系数 $B$ 为1.60,压力硬化系数 $N$ 为0.61, $B$ 和 $N$ 由参考应变率下材料断裂强度决定;应变率敏感系数 $C$ 为0.007;静态抗压强度 $f_c'$ 为48.0 MPa;混凝土的最大拉伸强度 $T$ 为4 MPa;应变率 $\epsilon_0$ 为1.0 s<sup>-1</sup>;混凝土破碎的最小塑性应变 $\epsilon_{c_{min}}$ 为0.01;混凝土所能够达到的归一化最大强度 $S_{max}$ 为7.0;混凝土材料空隙开始闭合和空隙全部闭合时的临界压力 $P_{crush}$ 、 $P_{lock}$ 分别为16.0和800 MPa;体积应变 $\mu_{crush}$ 、 $\mu_{lock}$ 分别为0.0078和0.1; $D_1$ 和 $D_2$ 为混凝土的损伤常数;弹性体积模量 $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$ 分别为85.0、-171.0、208.0 GPa;失效类型 $f_s$ 为-1。

##### 4.2 有限元模型

本次模拟选用的截齿模型,为旋挖入岩施工常用的“305022”牌号的截齿。模拟过程中,为降低计算时间,将截齿模型中的倒角、圆角以及一些小的细节简化,其他尺寸按实际进行建模,截齿安装角度为60°,锥角为72°;岩土模型尺寸选择为环形(便于截齿做圆周运动)。

上述模型的建立借助于PROE软件建立,通过IGES格式导入LS - DYNA,截齿和岩土模型均使用Solid164单元类型,模拟过程采用Lagrange算法。

对截齿采用自由划分,由于硬质合金头是与岩石接触部位,因此对该部位进行网格加密,最终划分单元数为5149;对岩土模型采用映射划分,最终划分单元数为144000。

##### 4.3 边界条件与载荷施加

为了反映岩石破碎真实情况,利用有限尺寸单元体模拟无限大的岩体施工环境,在岩土模型除开挖面以外的其他面上施加非反射边界条件,并在底面施加全约束,限制位移。截齿与岩体模型接触类型设置为侵蚀面面接触,并通过设置关键字\* MAT\_ADD\_EROSION来模拟截齿对岩石的破碎过程,设置失效准则为最大主应变和最大剪应变失效。

对于模型载荷,施加的是沿 $Y$ 轴向下的速度和绕 $Y$ 轴旋转的转动载荷。这里需要注意的是,模拟刚体施加绕任意轴旋转状态时,需提前设置好刚体转动惯量。转动载荷模拟动力头转速为15 r/min的状态,即转速 $n$ 设置为0.0015 rad/ms。为了在有限的时间里,能使截齿达到足够深的位置,将速度载荷放大,将其速度设置为0.06 mm/ms(由于原始速度较小,即使放大很多倍,其增加的能量也有限)。然后,约束截齿其他方向的平动和旋转自由度。

##### 4.4 求解控制

求解时间设置为150 ms。在侵蚀接触过程中,由于模型结构变形过大,有限元网格会发生严重畸变,数值计算难度增加,并且可能导致侵蚀接触失效,出现沙漏(零能)模式。为避免该种情况,通常采用沙漏粘性阻尼算法,通过调整沙漏阻尼系数来控制沙漏变形<sup>[6]</sup>,本文该系数设置为0.1。

##### 4.5 结果分析

在切削角为60°的情况下,不同侵深条件下截齿各方向受力曲线见图3。

由于模型模拟的是截齿圆周运动轨迹, $X$ 、 $Z$ 方向的受力可视为切削力的分力,因此 $XZ$ 方向合力即为切削力,通过上述各方向曲线,可以得出以下分析:

(1)无论是竖向侵入,还是水平切削,截齿碎岩时,在其各受力方向都是呈现出跃进式破碎现象。

(2)随着侵入深度的增加,各方向受力都呈现整体上升的趋势,但是在上升过程中,受力一直呈现波动状态。

(3)在切削过程中,每一次大剪切之前都要进行若干小剪切,导致受力曲线经过几次攀升,才可以达到一个新的大值。

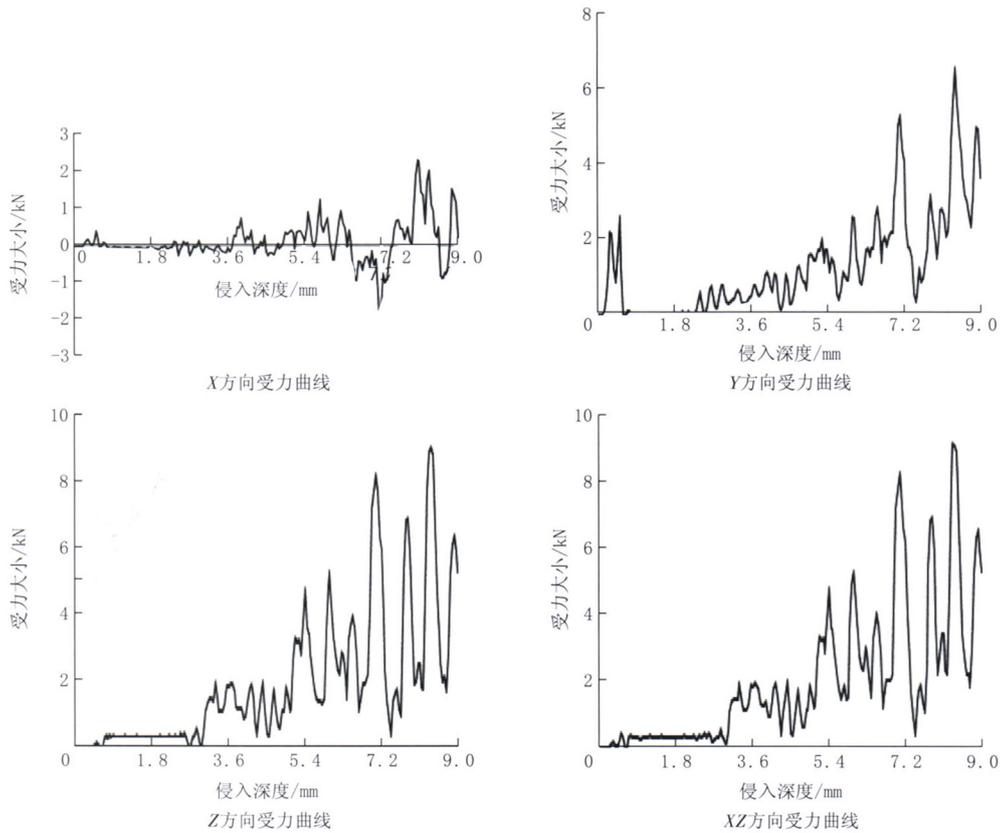


图 3 截齿各方向受力随侵入深度变化值

(4)在截齿侵深 0.8 ~ 2.3 mm 范围内,各方向受力都呈现出比较平稳的曲线,这可看做是跃进侵入开始时,产生的单次侵入深度即为 1.5 mm。

### 5 理论计算验证

依据上文提供的计算公式,以模拟时应用的同等工况,通过计算来对比理论数据和模拟数据的差异。根据公式计算出的不同侵深条件下的轴向压力与切削力如表 3 所示,将上述数据与模拟数据对比,可得到如图 4 所示的曲线。

表 3 轴向压力与切削力随侵深变化

侵入深度/ mm	轴向压力/ kN	切削力/ kN	侵入深度/ mm	轴向压力/ kN	切削力/ kN
1	0.21	0.12	6	7.50	4.28
2	0.83	0.48	7	10.21	5.83
3	1.87	1.07	8	13.30	7.61
4	3.33	1.90	9	16.87	9.63
5	5.21	2.97			

从切削力的对比曲线可以发现理论计算的曲线随侵深波动,数值呈正比增加,但是与波动变化的模拟数值相比,两者整体相差不大;轴向压力方面,

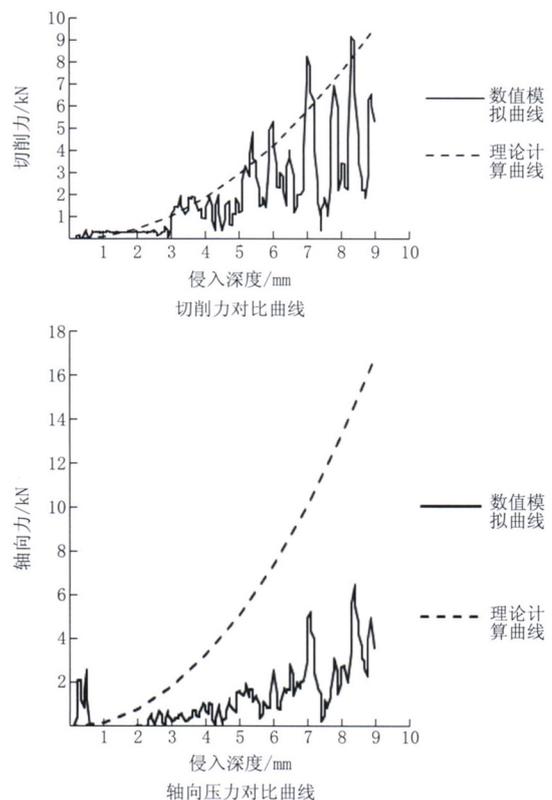


图 4 对比曲线图 (下转第 32 页)

如下:根据矿煤层条件、地质结构特点,采用 $\varnothing 73$  mm的螺旋高强钻杆加接保直组合稳定钻具配备复合片钻头进行钻进2个近水平孔深孔,孔深分别是210和240 m。历经6天的现场试验,完成了2个试验钻孔的施工,其中117号试验钻孔孔深210 m、终孔直径94 mm;118号试验钻孔孔深240 m、终孔直径94 mm,8 h平均时效60 m,在钻进过程中,钻机运转正常。工业性试验验证了ZDY4000LS型煤矿用履带式全液压坑道钻机的钻进、行走和辅助功能等性能,检验了液压系统的性能及可靠性。

## 5 结语

针对煤矿瓦斯抽放钻孔需求及现有履带式钻机存在的问题,研制了ZDY4000LS型煤矿用履带式全液压坑道钻机,该钻机整机宽度小,可以在中小巷道工作;钻机行走方便,爬坡能力强;自带液压支柱固定方便,可以适合不同巷道高度;钻机自带回转液压马达,调角方便。生产试验表明,该钻机具有良好的可靠性和操控性,搬迁移位、调角及顶固方便快捷,操作系统操作简单,联动可靠。该钻机的研制成功,

提高了煤矿井下瓦斯抽放钻机的整体技术水平,提升了煤矿井下瓦斯抽采的经济效益和社会效益。可用于瓦斯事故应急救援、瓦斯抽放等煤矿安全技术领域。

## 参考文献:

- [1] 石智军,胡少韵,姚宁平,等.煤矿井下瓦斯抽采(放)钻孔施工新技术[M].北京:煤炭工业出版社,2008.
- [2] 煤炭工业部安全司.中国煤矿瓦斯抽放技术与管理[M].北京:煤炭工业出版社,1996.
- [3] 张铁岗.矿井瓦斯综合治理技术[M].北京:煤炭工业出版社,2001.
- [4] 韩广德.中国煤炭工业钻探工程学[M].北京:煤炭工业出版社,2000.
- [5] 冯德强.钻机设计[M].湖北武汉:中国地质大学出版社,1993.
- [6] MT/T 356—2005,煤矿井下安全工程钻机[S].
- [7] MT/T 790—2006,煤矿坑道勘探用钻机[S].
- [8] 胡海峰,陆惠明.ZDY4000BL型液压钻机履带行走液压系统的设计[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(5):39-41.
- [9] 雷天觉.新编液压工程手册[M].北京:机械工业出版社,1998.
- [10] 王向荣.全液压工程钻机的几种调速方案[J].地质装备,2002,(3):28-30.

(上接第27页)

由于模拟加载的速度载荷并不能真实反映轴向压力的变化,导致两者数值差异过大,应以计算数值为准。

通过上述验证分析,通过理论计算的数值可作为选择入岩参数设计的参考。

## 6 结论

(1)结合碎岩理论,分析了旋挖钻机入岩的基本过程,轴向压力压入是产生回转剪切的前提条件。

(2)分析确定影响入岩参数的因素——截齿安装角度、锥顶角、岩石参数以及侵入深度等等,并提出了压力扭矩参数的理论计算方法。

(3)利用ANSYS/LS-DYNA显性动力学软件对不同侵深条件下的受力进行模拟,并对不同侵深下的受力曲线进行分析。

(4)以数值模拟的同等条件下,利用推导出的理论计算公式,得出切削力和轴向压力的计算与模拟对比曲线,得出理论公式应用的可行性。

(5)由于模拟的是单个截齿的受力状态,组合截齿状态下各截齿的相互影响情况,还有待进一步研究分析。

(6)在设计旋挖钻机时,应注意加压力与扭矩等入岩参数的匹配,大的加压力是产生破碎侵入的关键,而扭矩则是大侵深下旋转剪切的前提。

## 参考文献:

- [1] 徐小荷,余静.岩石破碎学[M].北京:煤炭工业出版社,1984.
- [2] 鄢泰宁,孙友宏,彭振斌,等.岩土钻掘工程学[M].湖北武汉:中国地质大学出版社,2001.
- [3] 李田军.PDC钻头破碎岩石的力学分析与机理研究[D].湖北武汉:中国地质大学(武汉),2012.
- [4] 张祖培,刘宝昌.碎岩工程学[M].北京:地质出版社,2004.
- [5] 巫绪涛,李耀,李和平.混凝土HJC本构模型参数的研究[J].应用力学学报,2010,27(2):340-344.
- [6] 薛静.盘形滚刀切削力影响因素及滚刀刃形优化设计研究[D].湖南长沙:中南大学,2010.
- [7] 赵伏军,谢世勇,潘建忠,等.动静组合载荷作用下岩石破碎数值模拟及试验研究[J].2011,33(8):1290-1295.
- [8] 黎中银,夏柏如,吴方晓.旋挖钻机高效入岩机理及其工程应用[J].中国公路学报,2009,22(3):121-126.