

# 金刚石排列模式对钻进时效的影响

章文姣<sup>1</sup>, 曲艳东<sup>1</sup>, 孔祥清<sup>1</sup>, 杨凯华<sup>2</sup>

1. 辽宁工业大学土木建筑工程学院, 锦州 121001

2. 中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074

**摘要** 研究金刚石宏观排列模式与金刚石钻头碎岩的时效关系, 不仅有助于设计有序排列金刚石钻头, 而且有利于更好地理解金刚石有序排列下岩石的破碎机理。本文应用 ANSYS-LSDYNA 有限元软件对 3 种不同金刚石排列模式(弧形排列、均匀排列和射线排列)的平底孕镶金刚石钻头进行孔底碎岩模拟研究, 考察金刚石的排列模式对其钻进时效的影响, 并对采用钎焊法试制的 3 种有序排列金刚石钻头进行室内钻进试验。研究表明, 3 种钻头的钻进时效由高到低分别为弧形排列、均匀排列和射线排列钻头, 室内钻进试验结果与数值模拟结果吻合较好。

**关键词** 金刚石钻头; 钻进时效; 弧形排列; 射线排列; 均匀排列

**中图分类号** TG713<sup>+</sup>.1, TD80

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.11.011

## Effects of diamond arrangement on drilling performance

ZHANG Wenjiao<sup>1</sup>, QU Yandong<sup>1</sup>, KONG Xiangqing<sup>1</sup>, YANG Kaihua<sup>2</sup>

1. School of Civil and Architectural Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China

2. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract** The study of the relationship between diamond macro arrangement in drill bit and drilling performance is helpful for the design of orderly arranged diamond drill bit as well as for getting better understanding of fracture mechanism of the rock. ANSYS-LSDYNA was used to simulate the rock drilling using flat impregnated diamond drill bit with three kinds of diamond arrangements, namely curved arrangement, ray arrangement and uniform arrangement. The effects of diamond arrangement on the drilling performance were observed. Indoor drilling tests were conducted on the brazed diamond drill bits with the aforementioned structures. The results showed that drill bits with curved arrangement of diamond had the best performance, followed by that with uniform arrangement of diamond, and finally that with ray arrangement. The results of indoor drilling tests are in perfect accord with those from numerical simulation.

**Keywords** diamond drill bit; drilling performance; curved arrangement; ray arrangement; uniform arrangement

随着国内外石油等能源及矿产资源的勘探不断向更深推进, 对具有良好抗冲击性和耐磨性的金刚石钻头的寿命和时效的要求越来越高<sup>[1,2]</sup>。金刚石是钻头直接破碎岩石的刀具。金刚石钻头在不同的工作部位、工作环境下, 金刚石所受到的力也不同。钻头边刃部位金刚石工作环境最恶劣, 底刃部位次之, 侧刃部位相对较好。在实际钻进过程中, 边刃部位金刚石最容易因疲劳过度而损耗, 使得钻头的唇面变为弧形, 钻头出现内外径磨损过快的现象, 将导致钻孔越来越小, 影响钻进质量。钻头用工业金刚石的粒度较小(等效直

径为 0.15~0.6 mm)。为提高金刚石钻头的使用寿命, 改善其钻进时效性, 国内外众多研究者采用了不同的技术手段, 如胎体配方研制<sup>[3,4]</sup>、烧结工艺改进<sup>[5]</sup>、钻头结构设计<sup>[6]</sup>、高质量的金钢石颗粒选用等, 并在金刚石粒度、浓度、金刚石与胎体的结合程度等方面展开一系列研究<sup>[7-9]</sup>, 取得了一定的研究成果。

近年来, 有序排列技术成功用于浓度小于 30% 的低浓度金刚石工具(锯片、磨轮和绳锯等)制造中, 大大提高了金刚石工具的性能, 降低了工具的制造成本<sup>[10]</sup>。科研人员期望将

收稿日期: 2015-01-15; 修回日期: 2015-04-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(11302093, 113020094); 辽宁省教育厅科学技术研究基金项目(L2013253)

作者简介: 章文姣, 博士, 研究方向为岩土钻掘材料与机具的设计制造, 电子信箱: zhangwenjiao850321@163.com

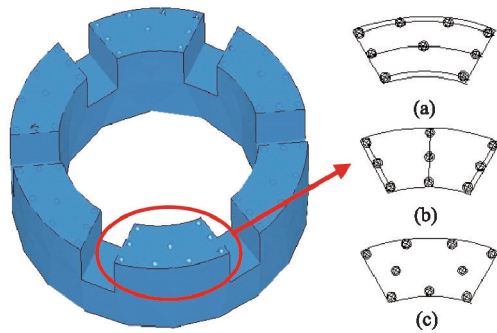
引用格式: 章文姣, 曲艳东, 孔祥清, 等. 金刚石排列模式对钻进时效的影响[J]. 科技导报, 2015, 33(11): 63-68.

有序排列技术应用于高浓度(>60%)金刚石钻头制造中,以便依据钻头在孔底的工作环境来设计不同的金刚石浓度。例如,在钻头的内外径特别是边刃部位设计高浓度、高品质的细颗粒金刚石,而在底唇面中间部位设计低浓度金刚石。为此,对如何制造有序排列金刚石钻头已经进行了大量的试验和理论研究<sup>[11-14]</sup>。然而,该领域尚处于起步阶段,还有许多问题亟待解决,如非光滑结构各个参数对钻头性能的影响以及不同形式的非光滑表面对钻头性能影响的机理,钻头中金刚石的有序排列形式对钻头钻进时效和碎岩机理的影响等。随着计算机仿真技术的发展,基于有限元法的数值模拟技术结合试验分析方法逐渐在金刚石钻头研究中得以广泛应用,并获得了一些研究成果<sup>[15-17]</sup>,但目前为止,鲜有关于金刚石排列模式与钻进时效关系的有限元仿真优化研究。基于此,本文拟采用数值模拟和实验验证相结合的方法,研究金刚石的有序排列形式对金刚石钻头钻进时效和碎岩机理的影响,以提高金刚石钻头的碎岩效率和使用寿命。

## 1 数值模拟

### 1.1 有限元模型

由于模具制造的复杂性,现有的有序排列孕镶金刚石钻头中,钻头唇面的形状大多为平底型(图1),且钻头内金刚石为均匀排列,很显然,这种金刚石排列方式并不十分合理。借鉴表镶金刚石钻头的设计经验,钻头唇面上金刚石的排列方式可设计为同心圆圆弧排列、射线排列、均匀排列等,如图1(a)、(b)、(c)所示。



(a) 钻头唇面金刚石弧形排列;(b) 射线排列;(c) 均匀排列

图1 钻头唇面及金刚石排列形式

Fig. 1 Crown surface and diamond arrangement of the drill bit

为检验各种排列对金刚石钻头碎岩时效的影响,本文拟模拟尺寸为 $\Phi 56.5/38$  mm(外径为56.5 mm,内径为38 mm)的平底孕镶金刚石钻头,钻头具有6个7 mm宽的水口。钻头每个切削齿上的金刚石数量很多(130颗以上),金刚石颗粒太细,划分网格时则需划分较细的网格,计算量非常大。对细颗粒的金刚石进行了建模,但模拟发现,金刚石粒径对岩石破碎时间有一定的影响,但3种排列方式对碎岩时间的变化规律并无明显影响。因此,为了兼顾计算精度和计算量,将

钻头唇面金刚石排列模型进行简化,即将金刚石颗粒放大,假设其直径( $d$ )为1.5 mm,金刚石为球形,3种排列模型平面见图1(a)、(b)、(c)所示,其中射线排列和均匀排列的金刚石钻头模型中,内径、外径和中间弧线的3颗金刚石都不在同一弧线上。

假设金刚石出刃高度相同,为 $d/2$ (0.75 mm),初始状态时,金刚石与岩石相切。钻进岩石为花岗岩,岩石尺寸为200 mm×200 mm×10 mm,如图2所示。根据钻头钻进的实际情况,需对钻头进行旋转时的方向约束,对岩石进行固定约束和无反射边界条件设置。假设冷却条件良好,对钻头进行 $z$ 方向(轴向力 $F=10$  kN)加载和旋转速度( $n=1000$  r/min,内径处线速度为2.0 m/s,外径处线速度为3.0 m/s)的加载。

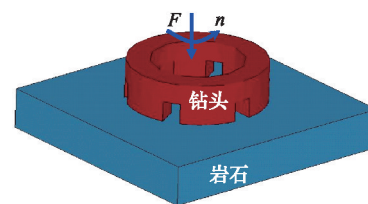


图2 钻头工作示意

Fig. 2 Working schematic of the drill bit

本文重点研究岩石破碎的快慢,因此,对岩石的网格划分较密,共划分250000个单元。金刚石与钻头钢体为刚体,网格划分较粗,共划分16811个单元。

### 1.2 金刚石钻头材料属性及岩石破碎机理

模型建立时,金刚石与岩石的单元类型选用3D-164实体单元。在材料属性方面,实际孕镶金刚石钻头中,胎体与金刚石是两种不同的物质,不同胎体对金刚石的包镶能力以及它本身抵抗岩粉的磨损能力都有所不同。本文重点考察金刚石排列模式对岩石破碎的影响,并不关注金刚石与胎体间相互作用以及岩粉对胎体的磨损。因此,模拟中假设金刚石与胎体牢固连接,即在任一时刻,钻头表面的金刚石排列形状都呈现为设计的3种方式。考虑到胎体并不参与岩石破碎,为了增加材料的统一性,将金刚石与胎体的材料参数设为相同。由于金刚石的硬度和弹性模量远大于岩石的硬度和弹性模量,因此金刚石的材料模型选用\*MAT-RIGID本构模型,金刚石参数<sup>[18]</sup>:直径为1.5 mm;密度为3520 kg/m<sup>3</sup>;弹性模量为1050 GPa;抗压强度为8857 MPa;硬度为70000 MPa;泊松比为0.2。

模拟钻进用岩石为花岗岩。综合考虑钻头切削岩石时,在钻压和扭矩作用下,花岗岩会经历弹性变形、塑性变形、脆性断裂3个阶段,本文选用适合描述工程和地质材料在大应变、高应变率下的非线性变形及断裂特性的H-J-C模型。该模型考虑了高静水压力、高应变率和材料的损伤效应,采用3段式状态方程描述压力与体积应变的关系,能很好地模拟脆性材料损伤断裂规律。H-J-C强度模型以特征化等效应力进行描述<sup>[19,20]</sup>,表达式为

$$\sigma^* = [A(1-D) + BP^{*N}](1 + C \ln \varepsilon^*) \quad (1)$$

式中,  $\sigma^* = \sigma/f_c^*$  为特征化等效应力 ( $\sigma^* \leq S_{max}$ ,  $S_{max}$  为材料所能达到的最大特征化等效应力),  $\sigma$  为实际等效应力,  $f_c^*$  为准静态单轴抗压强度;  $P^* = p/f_c^*$ , 为特征化压力, 其中  $p$  为单元内的静水压力;  $\varepsilon^* = \varepsilon/\varepsilon_0$  为特征化应变率,  $\varepsilon$  为实际应变率,  $\varepsilon_0$  为参考应变率;  $C$  为应变率影响参数,  $A$ 、 $B$ 、 $N$ 、 $S_{max}$  统称为极限面参数, 其中  $A$  为特征化黏性强度系数,  $B$  为特征化压力硬度系数,  $N$  为压力硬化指数。

损伤因子  $D$  ( $0 \leq D \leq 1$ ), 由塑性应变累积而成, 包括等效塑性应变和塑性体积应变:

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p + \Delta \mu_p}{\varepsilon_p^f + \mu_p^f} \quad (2)$$

式中,  $\varepsilon_p^f + \mu_p^f = D_1(p' + T')^{D_2} \geq EF_{min}$  为常压下材料断裂时的塑性应变;  $\Delta \varepsilon_p^f + \Delta \mu_p^f$  为当前积分步下的塑性应变;  $\Delta \varepsilon_p$ 、 $\Delta \mu_p$  为一个计算循环内单元的等效塑性应变增量和体积应变增量;  $p'$  与  $T'$  为规范化压力与材料所能承受的规范化最大拉伸静水压力;  $D_1$  与  $D_2$  为损伤常数;  $EF_{min}$  为材料断裂时的最小塑性应变, 用来控制拉伸应力波导致材料脆性开裂。

用于描述单元内的静水压力 ( $p$ ) 和体积应变 ( $\mu$ ) 二者关系的状态方程分为 3 段, 如图 3 所示。

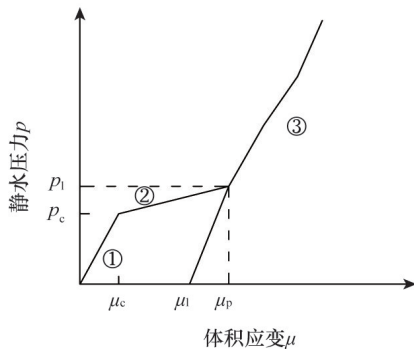


图3 H-J-C模型的状态方程

Fig. 3 State equation of H-J-C model

第 1 阶段, 当  $p < p_c$  时, 静水压力和体积应变呈线性关系, 即  $p = K\mu$ 。其中,  $p_c$  为岩石弹性极限时的静水压力, 此时对应的岩石体应变为  $\mu_c$ ;  $K$  为岩石的体积模量,  $K = 2G(1 + \nu)/(3 - 6\nu)$ ,  $G$  为岩石的剪切模量,  $\nu$  为岩石的泊松比。

第 2 阶段, 当  $p_c \leq p \leq p_i$  时, 材料内的空洞逐渐被压缩从而产生塑性变形, 加载和卸载方程分别为:  $p = (\mu - \mu_c)(p_i - p_c)/(\mu_p - \mu_c) + p_c$ ,  $p = p_0 - [(1-F)K + FK_1](\mu_0 - \mu)$ 。其中,  $p_i$  为压实静水压力, 此时对应的岩石体应变为  $\mu_p$ ;  $p_0$  为卸载前的静水压力, 此时对应的体积应变为  $\mu_0$ ;  $F$  为卸载比例系数,  $F = (\mu_0 - \mu_c)/(\mu_p - \mu_c)$ ;  $K_1$  为压力常数。

第 3 阶段为无气孔压实区, 这一阶段材料已完全破碎, 加载和卸载方程分别为:  $p = K\bar{\mu} + K_2\bar{\mu}^2 + K_3\bar{\mu}^3$ ;  $p = K\bar{\mu}$ 。其中,  $\bar{\mu} = (\mu - \mu_i)/(1 + \mu_i)$  为修正后的体积应变,  $\mu_i$  为压实极限时的体积应变,  $K_1$ 、 $K_2$  和  $K_3$  为压力常数。

模拟所需要的花岗岩的 H-J-C 本构模型参数见表 1<sup>[19]</sup>。

表 1 花岗岩 H-J-C 模型材料参数

Table 1 Material parameters of granite H-J-C model

参数名称	数值	参数名称	数值
$\rho_0 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2600	$S_{max}$	7
$G / \text{Pa}$	$1.054 \times 10^{11}$	$P_c / \text{Pa}$	$1.6 \times 10^7$
$A$	0.79	$\mu_c$	0.001
$B$	1.6	$P_i / \text{Pa}$	$8 \times 10^8$
$C$	0.007	$\mu_i$	0.1
$N$	0.61	$D_1$	0.04
$f_c^* / \text{Pa}$	$1.8 \times 10^8$	$D_2$	1
$T / \text{Pa}$	$4 \times 10^6$	$K_1 / \text{Pa}$	$8.5 \times 10^{10}$
$E / \text{Pa}$	$7 \times 10^{10}$	$K_2 / \text{Pa}$	$-1.71 \times 10^{11}$
$EF_{min}$	0.01	$K_3 / \text{Pa}$	$2.08 \times 10^{11}$
$\nu$	0.22		

金刚石钻头在钻进过程中, 金刚石与岩石不断发生接触, 相对于岩石来讲, 金刚石硬度比岩石大得多, 因此, 可将金刚石看作为刚体, 而岩石为柔性体, 即两者之间的接触为刚体和柔体的面接触。由于金刚石不断地切削岩石, 当岩石达到破坏强度后, 发生脱落, 即失效, 其余未失效的岩石继续与金刚石发生接触, 因此, 本文模拟所采用的接触类型为 ANSYS-LS-DYNA 中的侵蚀接触 (ESTS)。

## 2 仿真结果与分析

根据模型和分析求解步骤, 采用 LS-Prepost 查看 3 种不同排列形式的金刚石钻头在同等钻进条件下破碎岩石的快慢, 即网格脱落的快慢。以开始出现网格脱落 (岩石破碎坑出现)、出现第 2 层脱落以及钻穿给定岩石层 (厚 10 mm) 的时间和对应的应力值来对比钻进时效。鉴于篇幅有限, 仅给出弧形排列金刚石钻头在不同时间步下的岩石脱落状态及应力云图, 如图 4 所示。图 4(a) 为钻头未旋转时的示意图; 图 4(b) 为开始出现网格脱落的时间步及应力云图; 图 4(c) 为第 1 层完全脱落后, 开始出现第 2 层岩块脱落时的时间步及应力云图; 图 4(d) 为在 1.6 s 的时间步下, 岩块的脱落状态及应力云图。

将 3 种钻头 (弧形排列、均匀排列、射线排列) 在不同时间步下岩石的脱落状态及应力云图所展示的内容总结如表 2 所示。由表 2 可知, 在钻进初期, 均匀排列的金刚石钻头钻进时效稍高于弧形排列金刚石钻头, 但在后续的钻进中, 却不如弧形排列金刚石钻头, 而射线排列金刚石钻头的钻进时效远低于弧形排列和均匀排列金刚石钻头。观察钻进初期岩石应力云图发现, 弧形排列和均匀排列钻头在达到脱落前 1 时间步时, 岩石表面出现较为均匀的应力较大值区 (黄色区域), 表明此时岩石表面大部分区域已经达到应力极限状态,

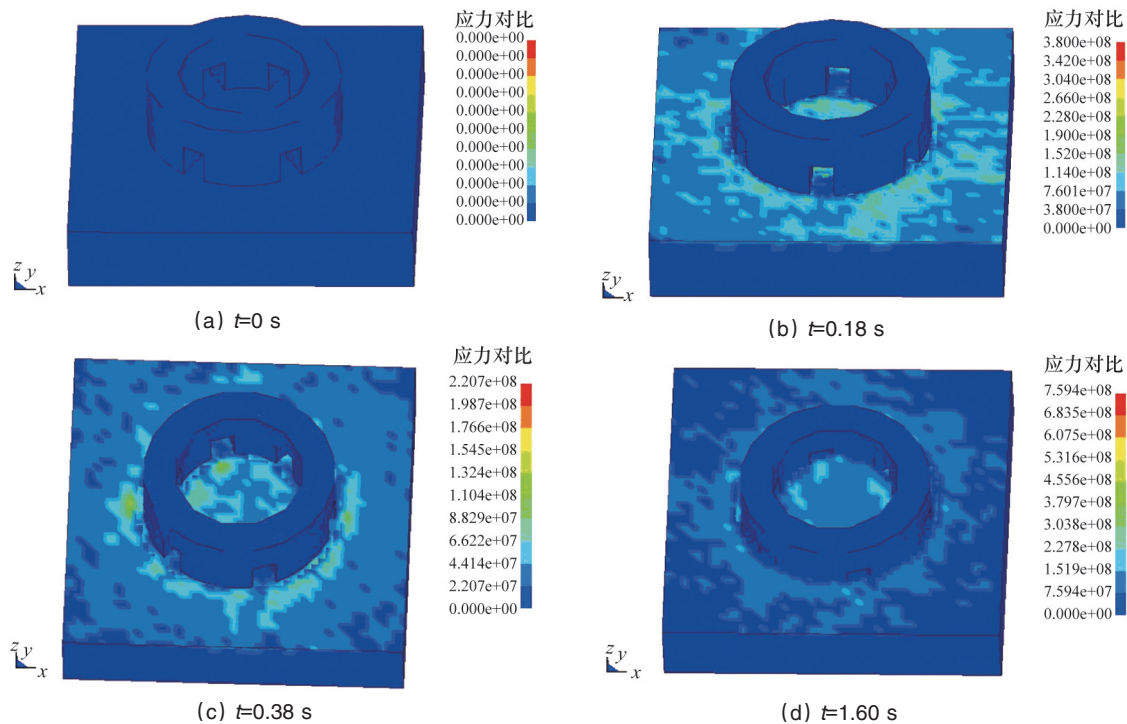


图4 弧形排列金刚石钻头在不同时间步下的岩石脱落情况及应力云图

Fig. 4 Rock broken and stress states of the drill bit with curved arrangement at different times

表2 岩石脱落状况及应力值对比

Table 2 Rock crushing conditions and stress values

	脱落前1 时间步/s	开始出现脱落		出现第2层厚脱落		穿透时间/s
		时间步/s	最大应力值/MPa	时间步/s	最大应力值/MPa	
弧形排列	0.16	0.18	380.0	0.38	220.7	1.60
均匀排列	0.14	0.16	327.8	0.42	242.1	2.20
射线排列	0.30	0.32	494.4	0.54	248.8	2.80

岩石即将出现大面积的脱落;而在相同时间内,射线排列的金刚石钻头钻进后的岩层中,黄色区域较少,即此时岩石表面只出现局部应力极限状态。岩层出现第1次脱落后,弧形排列金刚石钻头钻进后的岩石表面应力值大于均匀排列,表明这一层岩石脱落后,第2层岩石也将更快地发生脱落,由出现第2层脱落的时间得到了印证。射线排列金刚石钻头钻进时,岩石发生脱落的时间远滞后于弧形排列和均匀排列,但由应力值可看出,岩石发生脱落后,岩石表面应力值仍较大,将会较快地发生下一层脱落。最终,在时间步为1.6 s时,弧形排列钻头已经钻穿给定岩层,而其余两种钻头尚未钻穿。

由此可以推断,在给定的模型中,弧形排列金刚石钻头的钻进效率优于均匀排列和射线排列,而射线排列钻头的钻进时效最差。结合钻头旋转运动的规律解释其原因为,弧形排列的金刚石与钻头的旋转运动轨迹相同,同一弧线上,金刚石的运动轨迹一样,在岩石未脱落前,前一颗金刚石在轴向力和旋转力的作用下压入并切削岩石,金刚石运动过的

周围岩石将产生裂隙,同一切削齿上的下一颗金刚石运动至此,只需较小的力便可使得这些裂隙进一步扩展,形成较大的裂隙,直至岩石发生体积破碎。而均匀排列与射线排列的金刚石钻头,钻头运动时,每一颗金刚石运动的轨迹都不一样,每一颗金刚石都按照自己的运动轨迹先压入岩石,在下一个切削齿同一位置处的金刚石到达其位置时才能进行第2次破碎岩石,即岩石需要先发生一次浅层的面积破碎后,下一层再逐渐发生面积破碎。因此,均匀排列与射线排列的金刚石钻头其破碎岩石效率低于弧形排列金刚石钻头。

在实际钻进中,这种效果可能会更明显,因为在钻进时,钻杆与孔壁之间具有一定的间隙,钻杆在旋转的同时,还会产生一定幅度的横向摆动,而岩层的抗拉强度较低,弧形排列金刚石钻头钻进时,相邻径向上的两列金刚石刻取岩石后,中间的岩脊也具有一定的裂隙,钻杆的横向摆动以及钻井液的冲击作用都会促进岩脊的断裂,使之发生较大的体积破碎。

此外,岩石破碎的速率还与金刚石的分布密度相关,在

钻头外径方向,钻头旋转一圈,岩石破碎的体积要比钻头内径方向多,因此,在外径方向上应相应增加经金刚石的颗粒数。文中射线排列模式的金刚石钻头,内外径方向金刚石颗粒数都相等,必然导致其钻进效率会较低,模拟结果也正是如此。

### 3 金刚石钻头钻进试验

为了进一步验证数值模拟结果,试制了3种排列方式(径向射线排列、同心圆弧形排列及均匀排列)的钎焊热压金刚石钻头(图5),并对其进行钻进试验。

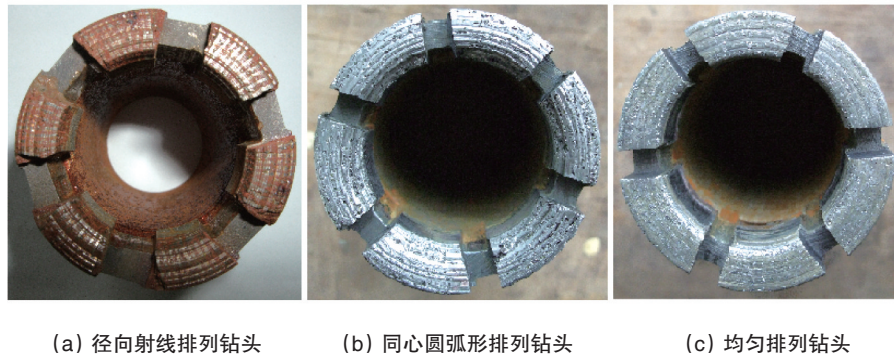


图5 室内钻进试验钻头钻进磨损的外部形貌

Fig. 5 Topographies of drill bits after indoor drilling tests

钻头尺寸为 $\Phi 56.5/38$  mm,全部采用40/50目的金刚石。钻机采用衡阳探矿机械厂生产的150-II钻机(图6),钻进参数:钻压为4.5 kN,转速为456 r/min(内径处线速度为0.9 m/s,外径处线速度为1.35 m/s),采用自来水管供水冷却,钻井液量约12 L/min。钻进岩样为中~细粒含黑云母二长花岗岩,属于中等至强研磨性岩石,岩石可钻性级别为VIII级,属于硬岩,钻进进尺为12 m。



图6 室内钻进试验台

Fig. 6 Test bench of indoor drilling

经统计,3种金刚石钻头(金刚石为径向射线排列、同心圆弧形排列和均匀排列)的室内钻进时效分别为1.81、2.67和2.58 m/h。3种钻头的钻进时效都高于常规无序孕镶金刚石钻头钻进同等硬度岩层的钻进时效(1.5 m/h),可见,有序排列孕镶金刚石钻头可明显提高钻头的钻进时效。此外,3种结构的钻头中,同心圆弧形排列的钻进时效明显高于射线排列钻头,稍高于平面均匀排列钻头,与模拟结果一致。

需要说明的是,最先对弧形排列钻头进行了试验,由于

开刃用岩样表面不平整(图7),使得钻头开孔定位较难,钻头的内径在开孔过程中受到严重的冲击与磨损,钻头出现了偏磨。针对此情况,设法稳定和整平开孔岩样后,明显改善了钻头的性能,在后续的统一排列钻头和射线排列钻头开刃时防止了偏磨出现。



图7 钻头开刃用岩样

Fig. 7 Rock sample for diamond protrusion of the drill bit

### 4 结论

基于大型有限元软件ANSYS-LSDYNA,并结合岩石破碎机理建立了金刚石钻进过程平底钻头的钻进碎岩模型,对3种常见排列模式(径向射线排列、同心圆弧形排列及均匀排列)的金刚石钻头钻进碎岩过程进行了数值模拟。结果表明,钻头内金刚石的排列次序对钻头的钻进时效有着重要的影响,3种钻头的钻进时效由高到低分别为:弧形排列、均匀排列和射线排列钻头。为了进一步验证数值模拟结果,制作了3种排列方式下的钎焊热压金刚石钻头并对其进行了钻进

试验。钻进时效的测量统计结果表明,室内钻进试验结果与仿真结果一致。该研究成果可为金刚石钻头的设计与制造提供一定的参考依据。

### 参考文献 (References)

- [1] Dykstra M W, Schneider B V, Mota J. A systematic approach to performance drilling in hard rock environments[C]//SPE/IADC Drilling Conference and Exhibition. USA: Society of Petroleum Engineers, 2011: 344-359.
- [2] 史晓亮, 刘晓阳, 段隆臣, 等. 新型打滑地层钻头的研究[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2004, 34(3): 484-486.  
Shi Xiaoliang, Liu Xiaoyang, Duan Longchen, et al. Research on a new type of drilling bit in the slipping formation[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2004, 34(3): 484-486.
- [3] Konstanty J S, Tyrala D. Wear mechanism of iron-base diamond-impregnated tool composites[J]. Wear, 2013, 303(1): 533-540.
- [4] Li W, Zhan J, Wang S, et al. Characterizations and mechanical properties of impregnated diamond segment using Cu-Fe-Co metal matrix[J]. Rare Metals, 2012, 31(1): 81-87.
- [5] 刘全心, 方小红, 刘青. 热压烧结金刚石钻头工程勘探钻进时效的试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(12): 54-57.  
Liu Quanxin, Fang Xiaohong, Liu Qing. Experimental research on the drilling efficiency of hot pressing sintering diamond drill bits in engineering exploration[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013, 40(12): 54-57.
- [6] 蒋青光, 张绍和, 陈平, 等. 新型优质孕镶金刚石钻头研制[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2009, 29(6): 12-16.  
Jiang Qingguang, Zhang Shaohu, Chen Ping, et al. Development of new type and high quality impregnated diamond bits[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2009, 29(6): 12-16.
- [7] Umanskii V P, Bugaev A A, Evdokimov V A, et al. Effect of the adhesion, concentration, size, and quality of diamond grains on the strength and wear resistance of samples modeling an impregnated layer of diamond crown bits[J]. Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 2011, 50(7-8): 557-563.
- [8] 潘秉锁, 史冬梅. 金刚石粒度对孕镶金刚石钻头性能的影响[J]. 煤田地质与勘探, 2002, 30(3): 62-64.  
Pan Bingsuo, Shi Dongmei. Effect of diamond size on the performance of impregnated diamond bit[J]. Coal Geology & Exploration, 2002, 30(3): 62-64.
- [9] Konstanty J, Romanski A. New nanocrystalline matrix materials for sintered diamond tools[J]. Materials Sciences and Applications, 2012, 3(11): 779-783.
- [10] Sung J C, Sung M. The brazing of diamond[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2009, 27(2): 382-393.
- [11] 章文姣, 段隆臣, 叶宏煜, 等. 孕镶金刚石钻头中有序排列参数的确定[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2010, 30(5): 21-25.  
Zhang Wenjiao, Duan Longchen, Ye Hongyu, et al. The Determination of parameters for ordered arrangement of diamonds in impregnated diamond bit[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2010, 30(5): 21-25.
- [12] 邓伟, 李子章, 胡立. 金刚石定位排布钻头设计[J]. 探矿工程: 岩土钻掘工程, 2011, 38(6): 62-64.  
Deng Wei, Li Zizhang, Hu Li. Design of drill bits with diamond positioning arrangement[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2011, 38(6): 62-64.
- [13] Lockwood G T. Diamond impregnated bits using a novel cutting structure: US, 7866419[P]. 2011-01-11.
- [14] Sung C M. Brazed diamond tools and methods for making the same: US, 8104464[P]. 2012-01-31.
- [15] 张林中. 金刚石切削岩石的模拟[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2008.  
Zhang Linzhong. The simulation of cutting rocks by diamond[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2008.
- [16] Chen Y, Liu Z Y, Duan L C. Simulation on hydraulic performance of two kinds of coring diamond bits with different crown[J]. Advanced Materials Research, 2012, 497: 350-355.
- [17] Hanson J M, Spencer R W, Hoffmann O J M, et al. Drill bit body rubbing simulation: US, 671647[P]. 2012-11-08.
- [18] 郭绍什, 冯德强, 杨凯华. 钻探手册[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1993: 135.  
Guo Shaoshi, Feng Deqiang, Yang Kaihua. Drilling manual[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1993: 135.
- [19] Homquist T J, Johnson G R, Cook W H. A computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates, and high pressure[C]//Proceedings 14th International Symposium on Ballistics. Quebec, Canada: 1993: 1-10.
- [20] 方秦, 孔祥振, 吴昊, 等. 岩石 Holmquist-Johnson-Cook 模型参数的确定方法[J]. 工程力学, 2013, 3(31): 197-204.  
Fang Qin, Kong Xiangzhen, Wu Hao, et al. Definition of Holmquist-Johnson-Cook constitutive model parameters of rock[J]. Engineering Mechanics, 2013, 3(31): 197-204.

(编辑 陈华姣)

### 《科技导报》“综述文章”栏目征稿

“综述文章”栏目发表对当前自然科学有关学科领域的研究热点、前沿分支发展现状及动向的评述性文章。要求在所属学科领域从事比较深入研究的一线科研人员在研读相当数量文献资料的基础上,全面、深入、系统地论述该领域的问题,并对所综述的内容进行归纳、分析、评价,以反映作者的观点和见解。在线投稿: www.kjdb.org。