

# 切削齿型结构对金刚石钻头钻进性能影响的仿真分析

王佳亮<sup>1,2</sup>, 张绍和<sup>1,2</sup>, 周怀发<sup>3</sup>, 杨汉军<sup>2</sup>

(1. 中南大学有色金属成矿预测教育部重点实验室, 湖南长沙 410083; 2. 中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083; 3. 中国石化青岛液化气天然气有限责任公司, 山东青岛 266400)

**摘要:**基于有限元分析软件 ANSYS/LS-DYNA, 建立了孕镶金刚石钻头的三维有限元模型, 研究了钻头切削齿结构对钻进性能的影响并进行现场试验验证, 提出了一种基于 Image-Pro Plus 的应力面积分布对比方式。结果表明:同心环齿型钻头在钻进初期沿旋转方向切削齿前缘出现应力集中现象, 花齿型钻头未出现明显的应力集中; 2种齿型钻头在钻进后期均会不同程度出现内外径边缘靠近水口部位应力集中现象, 易导致钻头内外径部位变相磨损; 花齿型钻头的钻进效率要优于同心环型钻头, 但是钻进寿命有所下降。

**关键词:**LS-DYNA; 孕镶金刚石钻头; 切削齿型结构; 计算机仿真; 碎岩机理

**中图分类号:** P634.4<sup>+1</sup> **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2015)03-0069-07

**Simulation Analysis on the Influence of Cutting Teeth Structure on Drilling Efficiency of Impregnated Diamond bit/WANG Jia-liang<sup>1,2</sup>, ZHANG Shao-he<sup>1,2</sup>, ZHOU Huai-fa<sup>3</sup>, YANG Han-jun<sup>2</sup>** (1. The Ministry of Education Key Laboratory of Non-ferrous Metal Ore Forecast, Changsha Hunan 410083, China; 2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan 410083, China; 3. Qingdao Liquefied Natural Gas Limited Liability Company, Qingdao Shandong 266400, China)

**Abstract:** Three-dimensional finite element model of impregnated diamond bit was established based on finite element analysis software ANSYS/LS-DYNA and the influence of cutting teeth structure on drilling efficiency was analyzed with the field test verification carrying out; a new method for stress area comparison based on Image-Pro Plus was present. The results show that stress concentration appears for concentric ring cutting teeth structure at the front edge of cutting teeth along the rotation direction in initial drilling stage, while non obvious stress concentration appears for saw teeth bit. But different degrees of stress concentration appear at inner and outer diameter edges near the nozzle part for these two kinds of bits in late drilling stage, which may lead to abnormal wear. The saw cutting teeth bits are more efficient than concentric ring ones, but the bit service life is slightly lower.

**Key words:** LS-DYNA; impregnated diamond bit; cutting teeth structure; computer simulation; rock fragmentation mechanism

近年来,我国加大了矿产资源的勘探力度,找矿深度已从过去浅部、中深部转向深部勘探(1000 m以深),以寻找隐伏矿与深部矿的“第二找矿空间”为主要目标<sup>[1-3]</sup>。深孔钻进时常采用绳索取心钻进工艺。由于绳索取心钻头的底唇面积较厚,且受钻具本身结构影响,钻具在孔内是一根完全失稳的压杆,钻压过高则造成钻杆弯曲折断,钻压过低则无法有效钻进<sup>[4]</sup>。因此,如何合理设计切削齿的齿型结构,有效提高绳索取心钻头单位面积上的唇面比压具有非常

重要的现实意义。

本文利用 ANSYS/LS-DYNA 有限元软件对不同切削齿型结构的钻头进行钻进模拟分析,对比了各切削齿的性能特点,并提出了一种基于图像处理技术的应力值分布范围对比方法,以便更好地指导切削齿的齿型设计。

## 1 建模过程与求解

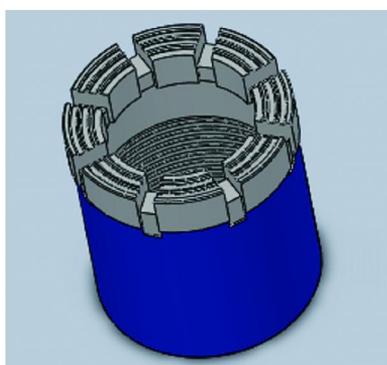
### 1.1 建立模型

收稿日期:2014-10-06; 修回日期:2015-01-12

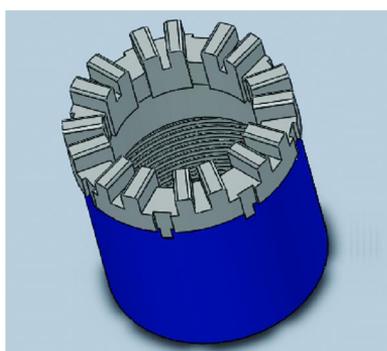
基金项目:国家自然科学基金“盾构刀群与岩土耦合作用机理及应用研究”(编号:51074180)

作者简介:王佳亮,男,汉族,1986年生,博士研究生,从事超硬材料及制品的科研工作,湖南省长沙市中南大学地学楼 112,40850979@qq.com; 张绍和,男,汉族,1967年生,教授,博士生导师,zhangshaohe@163.com。

利用 SOLIDWORK 3D 绘图软件绘制 3 维实体模型并生成 X-T 格式文件,导入 ANSYS/LS-DYNA 进行下一步处理。为了避免由于螺纹部分产生应力集中,影响运算时间,本次设计对模型进行了简化,不绘制螺纹部分。钻头的尺寸为:外径 75 mm,内径 49 mm,高度 80 mm。本次设计选用的切削齿型结构分别为径向同心环齿型及花齿型。径向同心环齿型切削齿结构由于其径向同心环齿的存在,有利于提高钻头的钻进稳定性,是一种广谱性的齿型设计方案<sup>[5]</sup>。花齿型切削齿结构,由于其复杂的唇面形状,有利于提高唇面比压及残留岩粉,提高钻头的钻进效率,在坚硬“打滑”地层钻进中使用广泛<sup>[6]</sup>。在 ANSYS/LS-DYNA 中直接建立岩石模型,岩石尺寸为 120 mm × 120 mm × 40 mm。定义钻齿与岩石的初始接触距离为 0.1 mm。模型效果如图 1 所示。



(a) 同心环齿型



(b) 花齿型

图 1 钻头模型效果图

## 1.2 设置材料属性

本次模拟分析中设置钻头钢体部分为刚性体模型(\*MAT\_RIGID),钻头钢体参数为:密度 3890 kg/m<sup>3</sup>;弹性模量 0.35E10 MPa;泊松比 0.26。定义有限元模型时,刚硬的元件可有效减少运算的时间,提高运算结果的精度。刚体模型中全部节点的自由度都与质量中心相耦合,自由度数量为 6 个,不随节点数

量的增加而增多<sup>[7]</sup>。需要输入的材料参数有:弹性模量 EX、密度 DENS、泊松比 NUXY。钻头切削齿的本构模型为各向同性(Isotropic)弹性模型(\*MAT-E-LASTIC),钻头切削齿参数为:密度 3520 kg/m<sup>3</sup>;弹性模量 0.105E10 MPa;泊松比 0.2。岩石采用 H-J-C 模型,模型参数如表 1 所示。该模型主要应用于大变形、高应变率下的岩石模拟<sup>[5]</sup>。在 LS-DYNA 3D 中 H-J-C 模型的定义方式为:\*MATJOHNSO;N\_HOLMGUIST\_CON-CRE,材料编号为 111<sup>[8]</sup>。对 H-J-C 模型添加关键字 \*MAT\_ADD\_EROSION 实现岩石失效应变设定。本次岩石塑性失效应变设定为 0.06。

表 1 花岗岩 H-J-C 模型材料参数

$\rho_0/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$G/\text{Pa}$	$A$	$B$	$C$	$N$	$f_c/\text{Pa}$
2700	1.054E11	0.79	1.6	0.007	0.61	1.8E8
$T/\text{Pa}$	$E/\text{Pa}$	$EF_{\min}$	$SF_{\max}$	$P_{\text{crush}}/\text{Pa}$	$\mu_{\text{crush}}$	$P_{\text{lock}}/\text{Pa}$
E6	7E10	0.01	7	1.6E7	0.001	8E8
$\mu_{\text{lock}}$	$D_1$	$D_2$	$K_1/\text{Pa}$	$K_2/\text{Pa}$	$K_3/\text{Pa}$	
0.1	0.04	1	8.5E10	-1.71E11	2.08E11	

## 1.3 网格划分

模拟过程中元件的单元类型选用 SOLID164 八节点六面体实体单元,该单元可以选择单点积分(需要沙漏控制,对在变形问题十分有效)、完全积分(求解慢,但无沙漏)两种算法<sup>[9]</sup>。钻头钢体部分采用六面体扫略网格划分,如前所述刚体的运算与节点的数量无关,划分的网格较粗。钻头切削齿部分形状不规则,采用自由四面体网格划分方法。岩石选用扫略(六面体)网格划分方式,在与钻头接触部位网格划分细腻、均匀,控制网格的大小为 0.001 mm。四周的网格间隙较大,是因为对计算结果影响较小,并能减少单元的数加快求解的速度。模型网格划分如图 2 所示。

## 1.4 定义接触类型与求解

本次设计选择的接触类型为 LS-DYNA 中的自动侵蚀接触,关键字是 \*CONTACT-ERODING-SURFACE\_TO-SURFACE。设置静摩擦系数和动摩擦系数分别为 0.35 和 0.25。根据实际岩石钻进的情况,需对岩石底部施加固定约束,对岩石四个侧面施加非反射边界条件设置。钻头为轴向压力加载,且两种齿型钻头的钻进参数设定均相同。根据现场经验设定钻压 13 kN,转速为 750 r/min,且固定

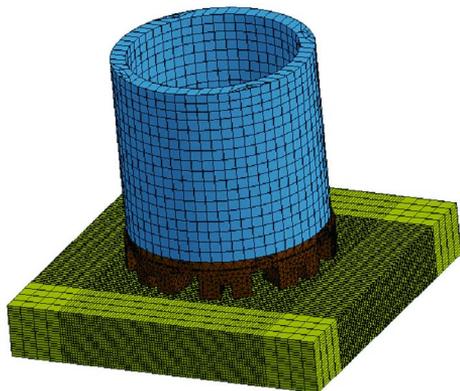


图 2 LS-DYNA 模型网格划分

转动方向为顺时针旋转,使其仅绕 Z 轴转动。钻头在钻进过程中,当岩石达到定义的失效应变时,岩石上节点连接的单元就相互分离,从而模拟岩石的破碎现象。在定义相关关键字后,调用 LS-DYNA 求解器进行求解。

## 2 结果分析

采用 LSTC 公司专门针对 LS-DYNA 求解器开发的 LS-PREPOST 后处理器和 MEDIA CYBERNETICS 公司开发的 Image-Pro Plus(IPP) 图像处理

分析软件共同分析本次数值模拟的计算结果文件<sup>[10]</sup>。LS-PREPOST 后处理器提供了诸如计算结果图形、动画显示、结果数据图等分析功能。Image-Pro Plus(IPP) 图像处理分析软件在医学图像领域应用广泛,拥有强大的图像参数测量与分析功能<sup>[11]</sup>。

### 2.1 同心环齿型钻头应力分析

同心环齿型钻头在钻进的过程中,沿旋转方向切削齿的前缘易产生应力集中,如图 3(a)所示。同心环齿型钻头应力分布范围较广,表明在与岩石接触初期,钻头切削齿受力均匀,钻进比较平稳,径向稳定性较好。如图 3(b)所示,在整个碎岩的过程中,同心环齿型钻头应力均分布于同心环齿的齿尖上。环齿齿尖受力较大,有利于齿尖刻入岩石,使岩石表面产生微裂隙,提高钻进效率。但是,齿尖在钻进过程中所受应力与齿尖的磨损成正比,过大的应力值易加快齿尖的磨损。此外,随着钻进时间的延长,同心环齿型钻头在钻进的过程中出现靠近内径处应力较大的现象,如图 3(c)所示。在生产过程中可采用分层装料的方式,对靠近内径附近胎体的耐磨损性能进行补强<sup>[12]</sup>。

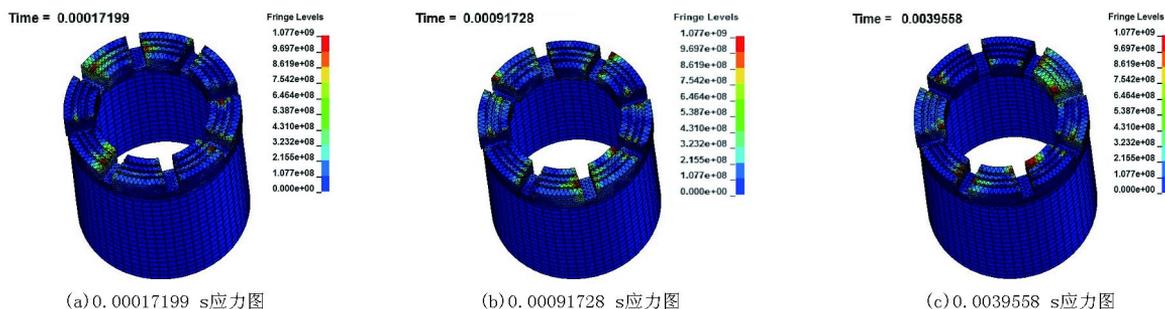


图 3 同心环齿钻头应力图

### 2.2 花齿型钻头应力分析

花齿型钻头在钻进的过程中,如图 4(a)所示,在相同时间步长内,钻齿唇面应力分布范围大于同心环齿型钻头,且应力值较为均匀,钻进初期没有出现明显的切削齿边缘应力值过大的现象。由于钻头独特的齿型设计,减小了钻齿与岩石的接触唇面,提高了钻头唇面的钻进比压,有利于提高碎岩效率。此外,花齿型设计,增加了唇面的过水面积,有利于钻头唇面金刚石的冷却,提高单颗粒金刚石的利用率<sup>[13-14]</sup>。如图 4(b)所示,整个钻头在钻进的过程中,应力值大小和范围分布均匀,无明显的异动现

象。说明相比于同心环齿型钻头,花齿钻头更易于保持钻进效率的稳定性。在钻进的后期,如图 4(c)所示,花齿钻头与同心环齿型钻头类似,出现了钻头外径边缘处应力集中的现象。由于花齿型设计导致钻头的胎体变窄,钻齿的抗弯强度相比于同心环齿钻头要低。

### 2.3 钻进效率对比分析

2 种齿型钻头的 Z 方向位移时间历程曲线如图 5 所示。从图中可以看出,在钻进过程中,钻头在 Z 方向上的位移均产生了不同程度的跳动,花齿型钻头的曲线跳动幅度相比于同心环齿钻头要均匀。

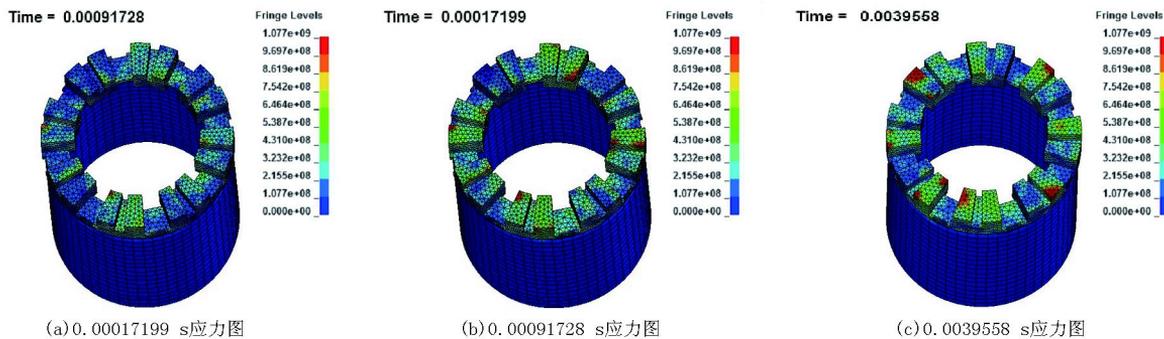


图4 花齿型钻头应力图

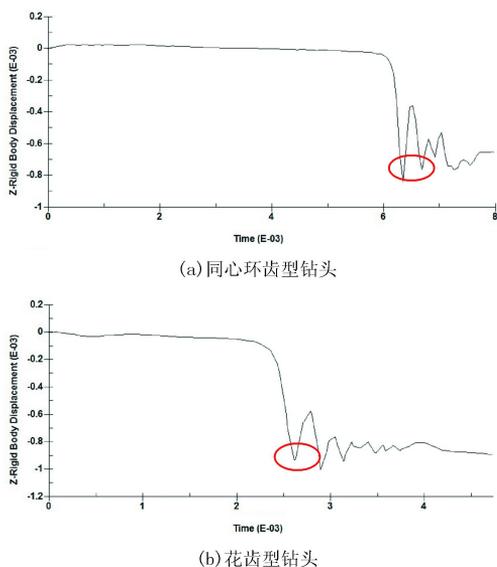


图5 不同齿型钻头Z向位移时间历程曲线

曲线跳动幅度越小代表进尺过程越平稳,越有利于保持高效钻进。

由于受计算机本身运算性能的影响,本次模型计算的时间均较短。同心环齿型钻头为0.008 s,花齿型钻头为0.0047352 s。在如此短的时间内,Z方向产生的位移是瞬时位移,不能完全等同于钻头的有效进尺,将Z方向位移值作为进尺快慢的对比标准既不复合现场实际也不科学。因此将沿Z方向首次出现大位移下降的时间点作为间接评判钻齿钻进效率的标准。即出现大位移下降的时间点越早,则越有利于钻进效率的提高。如图5所示,同心环齿型钻头 and 花齿型钻头出现大位移下降的时间点,分别为0.006347 s和0.0025647 s。花齿型钻头的首次大位移下降时间点较同心环齿型钻头提前了0.0037823 s。因此,初步预测花齿型钻头钻进效率要高于同心环齿型。

通过分析同一时间步长内的岩石所受应力情况

同样可以间接预测钻头的钻进效率。本文提出了一种基于图像处理技术的应力值分布范围对比方法。借助医学领域广泛使用的Image-Pro Plus(IPP)图像处理分析软件,可以准确测量出应力图中某一颜色所占面积,通过对比应力图中不同颜色面积的大小可以半定量出岩石表面不同应力值的分布范围和分布数量,能够有效预测岩石破碎趋势。

该方法的优点在于:(1)通过直观的图像过滤显示方式能够定性分析应力值的分布趋势和范围,预测岩石表面的受力情况,为钻头齿型设计提供参考;(2)通过像素点的统计方式实现了不同应力值分布面积的半量化,为进一步对比数据分析提供了数值依据。以上优点是目目前LS-PREPOST后处理软件自带分析方法所不具备的,在钻头数值模拟分析中具有一定的推广性和实用性,一定程度上弥补了现有分析手段的不足。测量面积的具体方法为:在Image-Pro Plus 6.0中选择count and measure objects选项,单击select colors按钮进行取色,单击count按钮进行面积计算。在view菜单中的statistics选项查看计算结果,计算结果以像素点为单位,本次图片的参数均为:水平分辨率96 dpi,垂直分辨率96 dpi,位深度24。

图6、图7为不同齿型钻头在0.00017199 s时的岩石应力分布图。表2为应力面积像素点统计结果。图8为不同齿型钻头岩石表面不同应力值面积对比图。由图8可以看出:采用花齿型钻头碎岩的岩石表面1.5E8、1.05E8、6.0E7 Pa应力值分布面积分别较同心环齿型钻头岩石表面提高了144%、14%和39%。由此可以得出结论:花齿型钻头岩石表面高应力值分布范围较同心环齿型钻头有了显著提高,利于岩石的体积破碎。但是,岩石表面应力过高同样也预示了钻头切削齿相应部位承受的应力

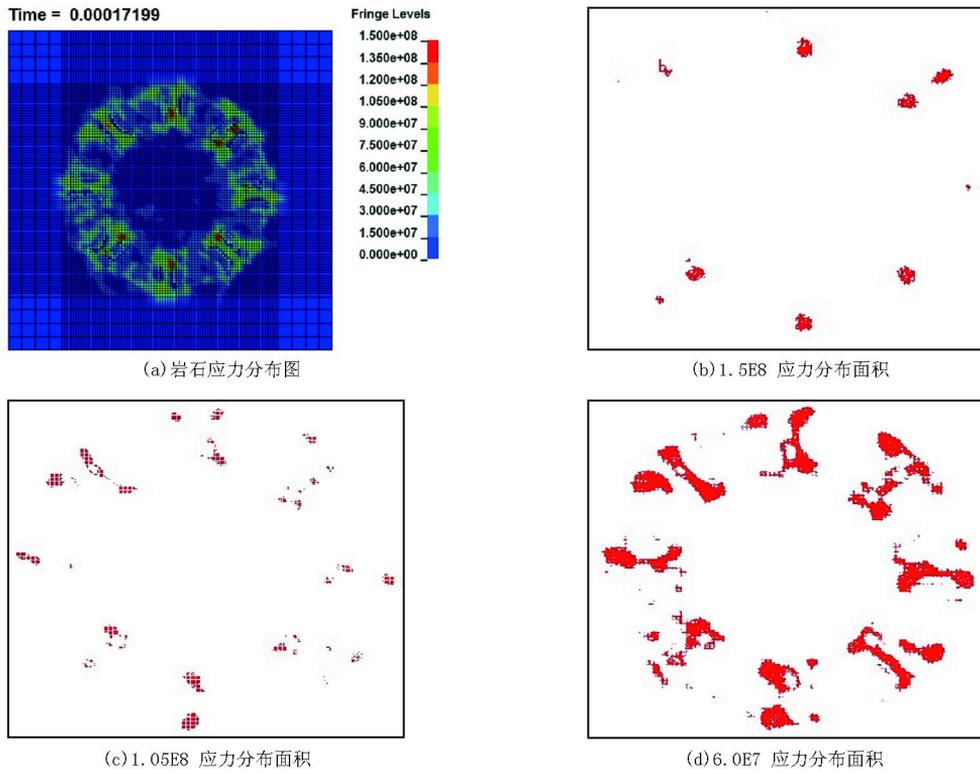


图 6 同心环齿型钻头应力分布图

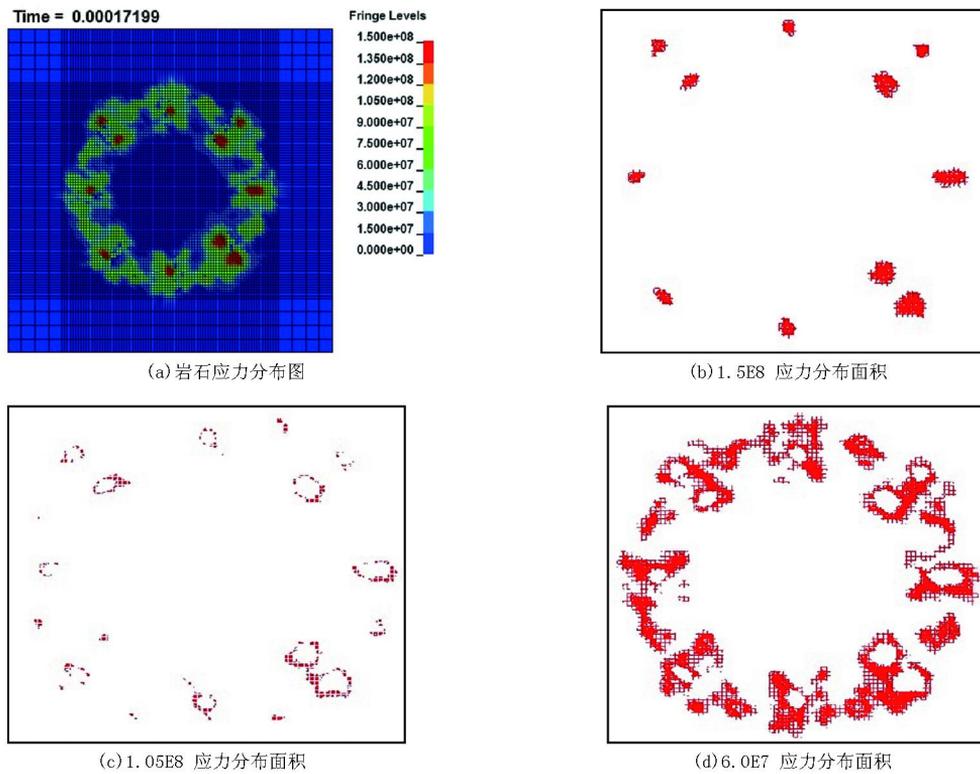


图 7 花齿型钻头应力分布图

过高,容易加速切削齿的磨损。同心环齿钻头的钻 加均匀。  
进效率低于花齿型钻头,但是在钻进过程中,磨损更

表2 不同齿型钻头所受应力面积像素

应力值名称	1.5E8 Pa	1.05E8 Pa	6.0E7 Pa
同心环齿型钻头	811	616	7347
花齿型钻头	1986	705	10256

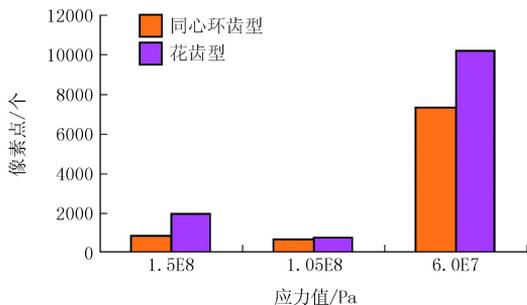


图8 不同齿型钻头岩石应力对比图

图9为2种不同齿型钻头破碎岩石的体积变化曲线。其每一时间步长岩石破碎体积的计算方式为:调用LS-PREPOST中MISC选项,选择View modle info选项,通过查看solid elements deleted选项,获取单位时间步长内岩石失效的单元个数。通过elements tool选项中的measure工具,测量岩石单元格的尺寸,本模型与钻头接触部分岩石单元格尺寸为 $0.001\text{ mm} \times 0.001\text{ mm} \times 0.001\text{ mm}$ 。由此计算出单位时间步长内总共失效的单元体积,即为岩石的破碎体积。如图9所示,花齿型钻头岩石的破碎体积和破碎趋势远高于同心环齿钻头。验证对2种不同齿型钻头钻进效率预测结果的正确性,即:花齿型钻进效率要优于同心环齿型钻头。由于本次数值模拟工作受计算机运行能力的影响,计算时间较短,故本次模拟工作无法模拟钻头切削齿的磨损情况,因此无法预测不同齿型钻头的使用寿命。切削齿型结构对钻头寿命的影响通过现场试验阶段进行研究。

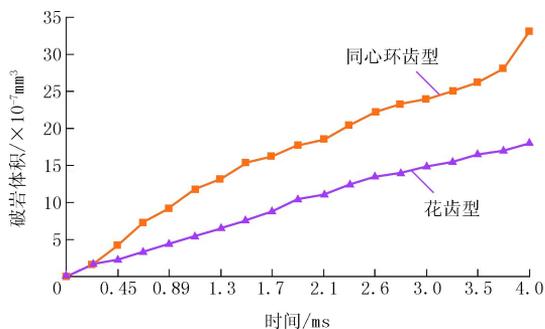


图9 不同齿型钻头碎岩体积图

### 3 齿型结构对使用寿命的影响

制作了2种齿型的钻头(如图10所示)进行现场试验。试验地点位于江西萍乡某矿区,主要地层为硅化大理岩,硅化强,坚硬,平均厚度25 m左右。岩石硬度可钻性级别为9级,研磨性中等至较强,压入硬度为 $400 \sim 550\text{ kg/mm}^2$ 。钻进参数如下:钻压13 kN,转速750 r/min,泵量36 L/min。



(a) 同心环齿型钻头



(b) 花齿型钻头

图10 钻头实物图

根据标准和经验,确定钻头设计参数如下:钻头外径75 mm,内径49 mm,胎体硬度HRC20,金刚石浓度100%,粒径 $355 \sim 450\text{ }\mu\text{m}$ ,水口数8个。

钻头钻进结果如表3所示。

表3 钻头试验结果

钻头类型	累计进尺/m	回次数	平均钻速/( $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$ )
同心环齿型	40.4	16	0.51
花齿型	35.5	12	0.74

从表3可看出:2种钻头的参数设计方案均与该地层岩性特征适合,体现出其本来的寿命和机械钻速;花齿钻头的平均寿命较同心环齿型钻头有所降低,但是平均机械钻速较同心环齿型钻头提高了45%。从现场试验中得出结论:同心环齿型钻头适用于常规地层,花齿型钻头适用于不过分追求使用

寿命,强调钻进效率的复杂地层。

#### 4 结论

(1)在相同钻进参数条件下,同心环齿型钻头在钻进初期沿旋转方向切削齿前缘的应力值较大,出现应力集中现象;花齿型钻头未出现明显的应力集中。所有的钻头齿型在钻进的后期均会不同程度出现内外径边缘靠近水口部位应力集中现象且应力值较大,易导致钻头发生内外径部位变相磨损,造成钻头提前报废。

(2)提出了沿 Z 方向首次出现大位移下降的时间点作为间接评判钻齿钻进效率的标准。通过对比得出花齿型钻头的首次大位移下降时间点较同心环齿型钻头提前了 0.0037823 s。初步预测花齿型钻头钻进效率优于同心环齿型。

(3)提出了一种基于图像处理技术的应力值分布范围对比方法。通过对比在 0.00017199 s 时的岩石应力分布图中 1.5E8、1.05E8、6.0E7 Pa 应力值分布面积,发现花齿型钻头岩石表面应力值较同心环齿型钻头分别提高了 144%、14% 和 39%。对比了不同齿型钻头岩石破碎的体积,花齿型钻头岩石的破碎体积和破碎趋势远高于同心环齿钻头。

(4)通过现场钻进试验,测试切削齿结构对使用寿命的影响,同心环齿型钻头磨损均匀,适用于常规地层,花齿型钻头钻进效率较同心环齿型钻头提高了 45%,但是使用寿命较同心环齿型钻头要低,适用于钻进不过分追求使用寿命,强调钻进效率的复杂地层。

#### 参考文献:

- [1] 朱恒银,蔡正水,王强.深部钻探技术方法的研究与应用[J].地质装备,2013,14(6):26-31.
- [2] 朱江龙,刘跃进.我国深孔钻探装备的发展与展望[J].地质装备,2013,14(6):9-14.
- [3] 赵国君.地质岩心深部钻探发展浅析[J].中国国土资源经济,2013,26(11):57-59.
- [4] 杨凯华,潘秉锁.金刚石地质钻头的现状与发展[J].超硬材料工程,2009,2(2):43-46.
- [5] 孙秀梅,王建兴,刘建福,等.深孔钻进金刚石钻头的研制[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(8):79-84.
- [6] 赵广伟,杨革,梁广华.深孔绳索取心金刚石钻头性能参数探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(5):75-79.
- [7] 杨道合.科学超深钻井过程中碎岩方法与孕镶金刚石取心钻头的预研究[D].湖北武汉:中国地质大学,2012.
- [8] 章文娇.钎焊-热压多层有序排列金刚石钻头研究[D].湖北武汉:中国地质大学,2012.
- [9] Arriaga A, Pagaldai R. Impact testing and simulation of a polypropylene component. Correlation with strain rate sensitive constitutive models in ANSYS and LS - DYNA [J]. Polymer Testing, 2010, 29(2): 170 - 180.
- [10] Elmarakbi A M, Hu N, Fukunaga H. Finite element simulation of delamination growth in composite materials using LS - DYNA [J]. Composites Science and Technology, 2009, 69(14): 2383 - 2391.
- [11] Blatt R J, Clark A N, Courtney J, et al. Automated quantitative analysis of angiogenesis in the rat aorta model using Image - Pro Plus 4.1 [J]. Computer methods and programs in biomedicine, 2004, 75(1): 75 - 79.
- [12] 谭松成,段隆臣.热压孕镶金刚石钻头偏磨的影响因素分析[J].粉末冶金材料科学与工程,2013,18(4):609-614.
- [13] 王传留,孙友宏.仿生耦合孕镶金刚石钻头的试验及碎岩机理分析[J].中南大学学报,2011,42(5):1321-1325.
- [14] Tan S, Fang X, Yang K, et al. A new composite impregnated diamond bit for extra - hard, compact, and nonabrasive rock formation [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2014, 43: 186 - 192.