

# Q1624球齿冲击破岩机理研究

纪昌桂 张 强 杨钧杰 张宇航 段晨伟 长江大学机械工程学院

**【摘要】**为解决轴扭冲击器破岩效率问题，提出了轴扭冲击钻井破岩新技术，并对该技术的破岩机理进行研究。根据江钻公司生产的Q1624齿，用PRO/E建立齿和岩石的三维模型，对模型进行前处理。采用LS-DYNA非线性有限元软件建立齿和岩石的三维模型，模拟球齿冲击破岩的过程，描述岩石的冲击破坏特性以及破坏程度，找到球齿的应力应变时程（应力波）关系、球齿压入岩石深度、破碎体积等。模拟结果表明，双向冲击方式相对于单一冲击方式破岩效率提高，且与齿倾角密切相关，当倾角在 $25^{\circ}$ 至 $35^{\circ}$ 时，破岩效率最高，为轴扭冲击器破岩提供参考。

**【关键词】**球齿冲击；破岩；LS-DYNA非线性有限元

**【DOI】**10.12316/j.issn.1674-0831.2022.03.026

扭力冲击辅助破岩是在旋转钻井时，在钻头与岩石的接触面上施加静压力（钻压），同时，在钻头上施加高频冲击扭矩进行辅助破岩的技术。2002年，加拿大联合金刚石公司（United Diamond）和阿特拉公司（Ulterra）合作研发一种纯机械扭力冲击器（Tork Buster）。2006年，哈里伯顿研发了扭力冲击装置，这种装置由砧座、冲击块、叶轮、涡轮头等部分组成。2012年，基于弹塑性力学和岩石力学，祝效华、汤历平等开展高频扭转冲击钻进的减振与提速机理研究。2013年，周燕等联合中石化集团公司研制了SLTIDT型钻井提速工具。现场试验表明，这种工具与UD型PDC钻头配合使用，不仅缩短钻井周期，而且还能够稳定钻进过程，延长钻具寿命。2014年，王红波、董丽丽等采用ANSYS/LS-DYNA软件对UD型PDC钻头有扭转冲击及无扭转冲击钻进两种情况进行了仿真分析，得出了两种方式岩层的破坏图形。基于以上研究，本课题通过对Q1624球齿冲击破岩机理研究，显著提高钻头牙齿吃入岩石的深度和钻进速度，降低钻具应力波动，减少钻具的失效。

## 一、钻齿有限元模型的建立

选用江钻生产的Q1624齿，用PRO/E建立齿和岩石的三维装配模型，运用Ansys对模型进行前处理。用三维Lagrange法进行分析。选用三维20节点的高阶结构实体SOLID186单元，使用自由网格和映射网格划分方法，分别球齿和岩石进行网格划分，共划分82362个单元，图1为球齿-岩石互作用有限元模型。球齿材料采用YG8硬质合金，处理为\*MAT ELASTIC，线弹性/理想弹塑性材料。岩石材料为花岗岩，处理为\*MAT ISOTROPIC ELASTIC FAILURE，一种塑性应变失效模型，具体参数见下表1。为了更好的模拟球齿对岩石的冲击效果，岩石采用映射网格划分，球齿在与岩石直接作用区域进行网

格加密。齿与岩石之间的接触采用\*CONTACT ERODING SURFACE TO SURFACE接触算法，同时定义了球齿与岩石之间的静态和动态摩擦系数。采用LS-DYNA非线性有限元软件建立齿和岩石的三维模型，模拟球齿冲击破岩的过程。

表1 球齿和岩石材料的相关参数

球齿硬质合金参数	密度	弹性模量	泊松比		
	14.5E-3	0.588	0.22		
花岗岩参数	密度	剪切模量	塑性硬化模量	体积模量	破裂压力
	2.68E-3	0.0286	0.0467	0.016	2E-4

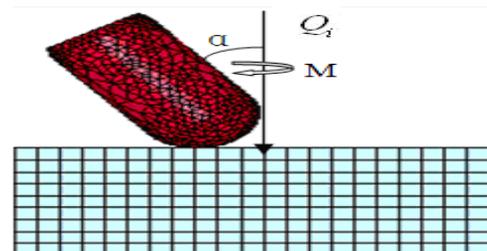


图1 球齿-岩石互作用有限元模型

## 二、不同倾角球齿冲击破岩机理研究

对球齿施加的相同冲击载荷，且球齿的角速度为0。用A、B、C、D、E、F、G分别是代表A( $0^{\circ}$  即垂直冲击)、B( $20^{\circ}$ )、C( $25^{\circ}$ )、D( $30^{\circ}$ )、E( $35^{\circ}$ )、F( $40^{\circ}$ )、G( $45^{\circ}$ )倾角下的齿的特性曲线。

### 1. 不同倾角球齿冲击破岩的破碎体积

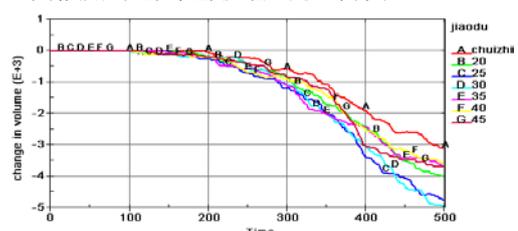


图2 不同倾角冲击岩石体积破碎曲线

图2是不同倾角冲击岩石体积破碎曲线。横坐标为时间，单位为 $\mu\text{s}$ ，纵坐标为岩石破碎体积，单位为 $\text{mm}^3$ 。从图中可以看出：只有钻压单独作用的初始阶段，没有

发生体积破碎，岩石只发生弹性变形。此时，如果停止加载，岩石会马上恢复到初始状态。0° 和20°、25°、30° 倾角的体积破碎曲线波动较小，35°、40°、45° 倾角曲线的波动较大，破碎体积波动较易引起球齿的振动，球齿振动，则易造成井斜，因此设计应选择较小的倾角以减小球齿振动，提高井身质量。斜向冲击比垂直冲击最先发生体积破碎，不同倾角体积破碎量的关系是： $-5e+3 > 30^\circ > 25^\circ > 20^\circ > 45^\circ = 35^\circ > 40^\circ > 0^\circ$ ，可知边齿的体积破碎量要显著高于中心齿，故在布齿时，为了提高破岩效率，应尽量选择最合理的边齿倾角。

### 2. 不同倾角球齿冲击破岩的破碎深度

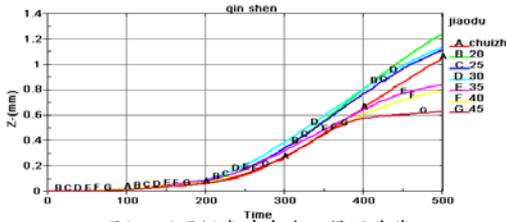
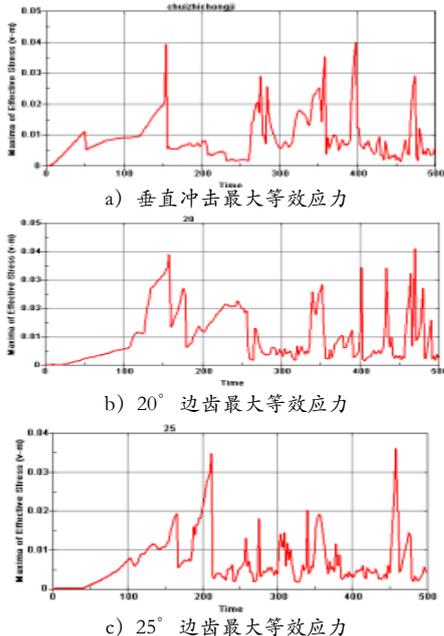


图3 不同倾角冲击岩石侵深曲线

图3是不同倾角冲击岩石侵深曲线，横坐标为时间，单位为 $\mu s$ ，纵坐标为侵入深度，单位为mm。从图中可以看出：在初始阶段，侵入比较平缓，岩石主要发生弹塑性变形，随着冲击载荷的增加，岩石发生体积破碎，侵深曲线的斜率开始增大，随着冲击载荷作用的完成，侵入深度又开始放缓，直到结束。不同倾角时边齿的侵入深度不同，不同倾角的侵深为： $20^\circ > 30^\circ > 25^\circ > 0^\circ > 35^\circ > 40^\circ > 45^\circ$ ，20° 冲击时，侵入深度最大，45° 冲击时，侵入深度最小。从侵深曲线的斜率可以看出，侵入速度呈“小—大—小”的过程，即起始和结束阶段侵入较慢，中间阶段侵入较快。

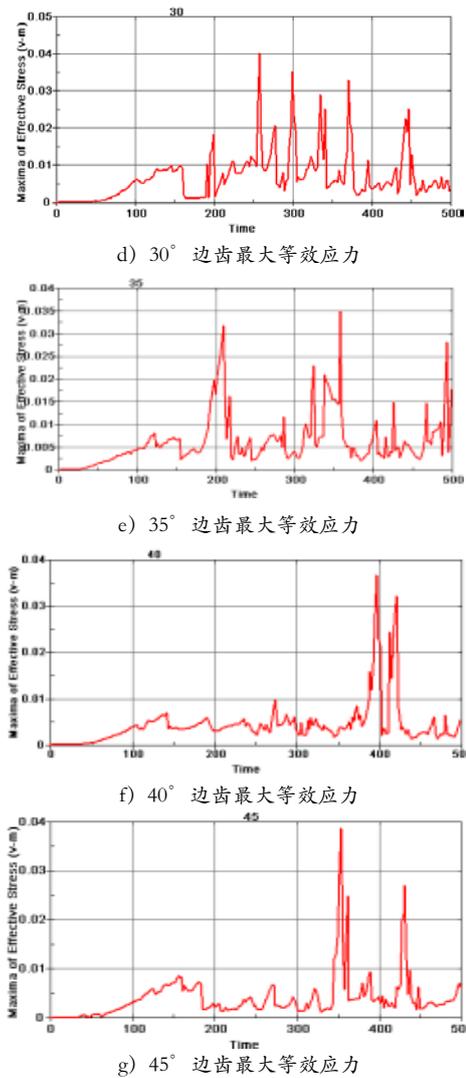
### 3. 不同倾角球齿冲击破岩的最大等效应力



a) 垂直冲击最大等效应力

b) 20° 边齿最大等效应力

c) 25° 边齿最大等效应力



d) 30° 边齿最大等效应力

e) 35° 边齿最大等效应力

f) 40° 边齿最大等效应力

g) 45° 边齿最大等效应力

图4 不同倾角齿尖单元最大等效应力

图4是不同倾角齿尖单元最大等效应力曲线。横坐标为时间，单位为 $\mu s$ ，纵坐标为Mises应力，单位为E12Pa。从图中可以看出：边齿和中心齿齿尖单元的最大等效应力曲线波动都比较大，整体上中心齿的应力波峰比边齿出现的早。不同倾角时，齿尖单元的应力波波峰的幅值和幅值出现时间以及波形均不相同。球齿倾角为0°、20°、25°、30°、35°、40°、45°时，最大波峰分别出现在400、465、455、255、355、400和350 $\mu s$ ，对应的齿尖最大等效应力分别为：0.04、0.042、0.0365、0.04、0.035、0.037、0.038。可见，35° 倾角时，最大等效应力最小，20° 倾角时，最大等效应力最大。

球齿冲击破碎岩石的过程为：在齿接触岩石后极短的时间内，只有钻压作用在钻头上，并没有对岩石造成大的损坏，岩石只发生轻微的弹塑性变形，这时如果停止加载，变形马上还会恢复。随着时间推移，冲击载荷持续增加，岩石与齿尖接触的区域应力高度集中，产生压缩弹性变形的接触面被压入，接触的岩石被压实，形

成密实核。在250 μs时，冲击载荷达到最大，表面岩石受到极大的冲击波压力，表面岩石部分被压碎，并出现放射性裂纹，这时岩石仍然保持一定的承载能力。应力波以接触面为中心向外传播，接触面下端岩石内部出现微小裂隙。随着岩石损伤的发展，岩石表面裂纹和内部裂隙相互贯通，岩石开始成块破裂，并形成破碎坑。冲击载荷逐渐减小，齿面凿入变缓，接着又恢复到只有钻压单独作用的初始状态，一个双向冲击破岩过程结束。

### 三、不同倾角球齿双向冲击破岩机理研究

#### 1.不同倾角球齿冲击和双向冲击破岩的破碎体积

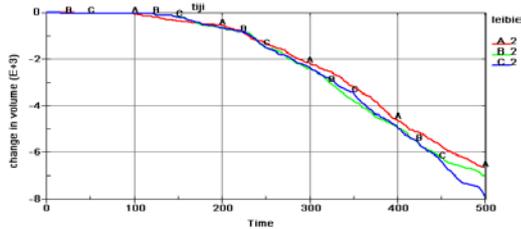


图5 不同倾角冲击和双向冲击破岩体积破碎曲线

A、B和C代表三个外形相同的球齿，其轴线距钻头中心距离相同。在A上只施加垂直冲击载荷，在B上施加垂直冲击载荷和一固定的角速度，C为在35° 倾斜角度的基础上垂直冲击并旋转。A、B和C上所施加的冲击载荷相同，B和C的角速度相同。

图5是不同倾角的齿的体积破碎曲线。横坐标为时间，单位为mm<sup>3</sup>，纵坐标为体积破碎量，单位为μs。由图中可见：在100 μs之前，岩石没有发生体积破碎，说明岩石主要发生弹塑性变形，冲击应力还没有达到岩石的屈服极限。C2和B2的体积破碎曲线在250 μs之前基本重合，而后两者开始分离，曲线出现了两次相交，出现这种情况的原因是由于垂直双向冲击破岩和斜向冲击破岩的机理不同导致的。C2、B2和A2在220 μs时，三者的体积破碎量相同。在250 μs时，C2和B2的体积破碎量都出现突然增大，在破岩快结束时，两者的破岩速度都开始放缓。C2在350 μs时出现体积破碎量突然增大。在破岩快结束时，A2和B2的破岩速度都比较平缓，C2又出现了一次体积破碎量增大。A2、B2、C2三者的体积破碎量大小关系为：C2>B2>A2>-6e3。

#### 2.不同倾角球齿冲击和双向冲击破岩的破碎深度

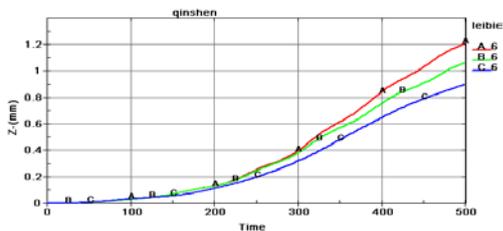


图6 不同倾角冲击和双向冲击破岩侵深曲线

图6是不同倾角冲击和双向冲击破岩侵深曲线。横

坐标为时间，单位为μs，纵坐标为侵入深度，单位为mm。从图中可以看出：

B6和A6的侵深曲线在250 μs之前基本重合，而后两者开始分离，B6和C6的侵深曲线在约130 μs之前基本重合，而后两者开始分离，冲击比双向冲击破岩的侵入深度大，垂直双向冲击破岩比倾斜双向冲击破岩的侵入深度要大。可见，对钻头施加一定的角速度后，钻头的侵入深度会略有减小，边齿的侵入深度比中心齿略有减小。在50 μs之前，侵入深度为0，说明在只有钻压的作用下，岩石的弹性变形比较微弱。侵深曲线的起始和结束阶段都比较平缓，这是由于这两个阶段钻头上的载荷较小，中间阶段侵深曲线的斜率较大，侵速较大，说明侵入深度主要是在中间阶段完成的。

#### 3.不同的倾角球齿冲击和双向冲击破岩的最大等效应力

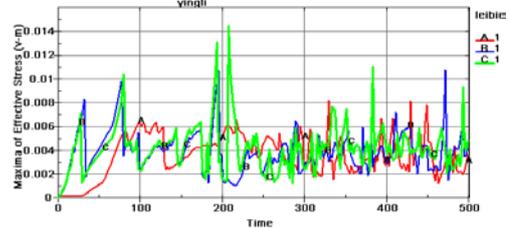


图7 不同倾角冲击和双向冲击破岩齿尖最大等效应力曲线

图7是不同倾角冲击和双向冲击破岩齿尖最大等效应力曲线。横坐标为时间，单位为μs，纵坐标为Mises应力，单位为E12Pa。从图中可以看出：C1和B1的齿尖最大等效应力曲线在约180 μs之前基本重合。A1、B1和C1的齿尖最大等效应力关系为A1<B1<C1。B1和A1的最大等效应力均出现在250 μs之前即最大冲击载荷之前。三者的齿尖最大等效应力曲线无论是在波形上还是幅值上都有很大的差别。A1的齿尖最大等效应力一直比较平稳，B1和C1的最大等效应力波动比较大，说明双向冲击破岩比单纯的冲击破岩对齿尖的伤害要大，边齿比中心齿的伤害要大。

### 四、总结

当倾角在25° 至35° 时，球齿的体积破碎量大，侵入深度较大，等效应力较小，破岩效率较高；在250 μs时，破岩体积显著增大。此结论可指导轴扭冲击器冲击力和冲击扭矩匹配钻头的选型。

### 参考文献：

[1]王红波，董丽丽，廖大林，等.扭转冲击对PDC钻头钻进效果影响的仿真模拟分析[J].金刚石与磨料磨具工程，2014，34（05）：39-41.

通讯作者：张强。