

# 旋转冲击钻井破岩理论与技术研究

王勇, 倪红坚\*, 王瑞和, 刘书斌, 张恒, 王鹏

(中国石油大学(华东)石油工程学院, 山东青岛, 266580, Email: nihj@upc.edu.cn)

**摘要:** 近些年, 新型旋冲钻井工具不断涌现, 破岩效率进一步提高, 旋冲钻井技术已得到广泛应用。本研究综述了国内外旋冲钻井破岩数值模拟的数学模型和破岩技术方法, 总结了各数学模型之间的异同及各技术方法的贡献与不足。现有理论及技术已较好地指导了旋冲钻井技术的发展, 但也存在一些问题, 本研究并从工具设计和现场工况的角度对旋冲钻井破岩理论发展提出了展望。

**关键词:** 旋转冲击; 钻井; 破岩; 效率

## 1 引言

旋转冲击钻井技术在实际生产中的应用越来越广泛, 主要在旋转冲击钻井工具设计、钻头设计、钻进参数优选等方面。但旋转冲击破岩的内在机理未能被准确揭示, 导致旋转冲击破岩机理发展落后于其实际应用。因此深入研究旋转冲击破岩理论并充分发挥旋转冲击破岩的特点和优势对于旋转冲击破岩技术的发展和具有重要的实际意义。

## 2 旋转冲击钻井破岩理论

岩石结构的复杂性是岩石在动、静载荷下体现出的不同性质的根本原因。现在有很多数值工具帮助我们理解岩石在不同载荷下破碎机理。

岩石的行为和破坏准则目前已经有了大量研究成果。Han 等<sup>[1]</sup>将冲击钻井过程定义为四步。后来 Hustrulid 等<sup>[2]</sup>进一步发展了冲击钻井理论, 利用应力波传播理论解释了冲击钻井。Hustrulid<sup>[2]</sup>和 Chiang 等<sup>[3]</sup>认为应力波由冲锤活塞和钻头产生, 并传播到了钻头-岩石界面上。应力波携带的能量主要用于岩石破碎, 少部分能量被岩石所反射。Hustrulid 等<sup>[2]</sup>还提到传播到岩石的能量只是从最初的两个入射波得来。在前人的基础上, Maurer<sup>[4]</sup>将冲击钻井中岩石在冲击载荷的作用下破碎过程定义成五部分: 表面不规则挤压; 弹性变形; 钻头下岩石破裂区形成; 沿裂缝形成岩屑; 力或能量消耗完重复该过程。

Han 等<sup>[5-7]</sup>对旋转钻井与旋转冲击钻井的研究成果进行了分析。旋转钻井岩石破碎是由钻压钻头旋转共同引起的。钻头在钻压作用下压入岩石，钻头旋转产生螺旋状切削。旋冲钻井中冲击工具在钻头运行方向上产生瞬间高幅值冲击力。当冲击力达到岩石的抗压强度，岩石就会破坏，沿切齿边界形成一个楔形破碎区。

## 2.1 旋转冲击破岩理论研究

旋转冲击破岩数值研究方法主要有有限元法、离散元法和有限差分法。

### 2.1.1 有限元法

有限元法的求解有显式方法与隐式方法之分，其中显式求解方法更适合破岩这一类的非线性、大变形问题。

Chiang 等<sup>[8]</sup>基于 C++语言建立了有限元旋冲破岩模型，并利用该方法指导了旋冲钻井工具设计。该模型以二维线弹性损伤单元<sup>[9]</sup>模拟花岗岩，利用 gap 单元<sup>[3]</sup>作为接触单元，Mohr 准则为失效准则。但由于模型过于简单，该模型还不能精确模拟旋冲钻井。Saksala.T<sup>[10]</sup>利用黏塑性损伤单元模拟岩石，Drucker-Prager 准则作为岩石失效准则建立了三维有限元模型，模拟了 Multiple Button 钻头旋冲破岩。该模型以数值解的形式解释了岩石侧向破裂发生于卸载过程中。Sazidy MS<sup>[11]</sup>以黏弹塑性模型模拟岩石模拟了旋冲钻进过程，并利用已发表的实验结果<sup>[1]</sup>验证模拟的正确性。祝效华等<sup>[12]</sup>利用 LS-DYNA 建立空气冲旋钻井活塞-钻头-岩石相互作用系统模型，仿真模型中岩石采用 H-J-C 动态本构。其利用该模型研究了空气旋冲钻井，临界冲击功及临界钻压与井深和岩性密切相关，随着井深和岩石硬度增加，临界冲击功和临界钻压都有逐渐减小。祝效华等<sup>[13]</sup>采用 Drucker-Prager 准则作为岩石的本构关系，塑性应变作为岩石破碎的失效判据建立了模型，并利用该模型研究了旋冲破岩过程。研究发现高频扭转冲击钻进硬地层时拉应力与压应力区域交叉出现且以拉应力为主，较以压应力为主的常规钻进可大幅提高钻头的机械钻速。朱海燕等<sup>[14]</sup>将岩石看做理想弹塑性材料，在静态本构模型的基础上，考虑应变率强化效应和损伤软化效应对其进行修正，从而建立了岩石的动态本构模型。研究表明：拉应力破碎是岩石破碎的主要形式，剪切应力、压应力破碎次之；岩石的破碎主要发生在岩石的拉应力失效阶段和卸载后的静压-旋转剪切破岩阶段。

切削齿与岩石的相互作用是依靠两者之间的接触模型实现的，因此接触模型是否准确是求解结果是否准确的关键问题，而离散元法在接触模型方面有优势。因此离散元法是旋冲破岩数值模拟的一个重要发展方向。

### 2.1.2 离散元法

离散单元法将材料定义为离散介质，无需像有限元法一样建立复杂的本构关系模拟介质（例如岩石）内部的非连续特性。离散元法可以更好的接触本构定律模拟大部分的岩石行为。切齿切削岩石这样的外部接触，离散元法可以将其处理为如内部粒子之间一样的内部接触，无需建立新的模型模拟切齿与岩石的接触

Akbari<sup>[15-16]</sup>等利用离散元软件 PFC，利用实验测试的参数建立了符合岩石微观属性的离散元模型。研究表明，振动载荷可以显著提高钻速，但是随着井底压力的升高提速效果

减弱。如不考虑振动载荷，钻速随井底压力的增加线型降低。

### 2.1.3 有限差分方法

Han, Bruno<sup>[1, 5-6, 17-18]</sup>等利用有限差分软件模拟了冲击钻井。其利用 Mohr-Coulomb 应变软化本构模型模拟岩石，利用 Rayleigh 阻尼特性消除振荡能，利用损伤/失效算法模拟岩石循环载荷下的强度变化。

目前 FLAC 是较常用的有限差分软件。FLAC 最大的优势在于利用其内植与软件内部的编程语言功能通过输入变量和方程控制模型，并且用户可以获得和任何模型数据和更改模型节点。

## 2.2 旋转冲击破岩实验研究

国内外很多学者对旋转冲击破岩实验方面进行了大量的尝试，取得了一些有益的结论。

赵伏军等<sup>[19]</sup>通过中南大学研制的一台动静耦合破岩实验机进行了动静耦合破岩实验，该实验中冲击力垂直于切削方向。研究发现冲击载荷可以显著降低切削力，增加切削深度，且冲击载荷更适用于硬岩。合理选取动静载荷的比值，可使破岩比能达到最小，从而使岩石破碎效果最佳。

赵金昌等<sup>[20-22]</sup>研究了高温高压下冲击钻孔破岩实验。实验表明坚硬的花岗岩类岩石在不超过 150℃左右的低温下，旋转冲击破碎方式能有效的破碎岩石，在高温时旋转冲击方式效率较低。在高围压状态下，随着温度升高，花岗岩的强度逐渐降低，冲击旋转钻进速度随之增大，破岩比能降低，而且钻压和冲击功存在最优比例关系。但该实验冲击频率较低，对于冲击频率相对较高的情况并不适合。

闫铁等<sup>[23]</sup>进行了高频谐波振动冲击破岩试验分析。实验发现岩石刚度、阻尼、临界力与机械钻速呈反比，动态激振力与机械钻速呈正比，激励频率与岩石固有频率越接近，机械钻速越大；机械钻速随着钻压、转速的增加而增加。但该实验通过岩石共振降低岩石破碎强度从而达到破岩提速效果，与旋转冲击破岩提速有本质区别。

Li Heng 等<sup>[24-25]</sup>利用“振动辅助旋转破岩系统”研究了钻压振动频率、幅值对破岩效率的影响。研究表明：振动幅值的增加能显著提高钻速，且比转速对钻速的影响更为显著；在钻压与转速一定的情况下振幅存在一个最优值，当振幅大于该值后钻速降低。但该实验没有考虑水力因素的影响。

Yusuf 等<sup>[26]</sup>进一步进一步研究发现，低钻压时的冲击力最优频率为 65Hz，高钻压时最优频率为 55Hz。但该试验台的振动是通过岩心实现的，而且岩心非常笨重。当振动频率过高时，相同的激振力使岩心的产生的振动幅值就会非常微弱，这将直接影响实验结果。

现有实验对旋冲钻进过程进行了很大简化，没有考虑到钻柱对钻压和扭矩的影响，忽略了井底岩石应力状态对钻进的影响。在进一步的实验中，这些因素需要着重考虑。

### 3 旋转冲击钻井技术研究

石油旋转冲击钻井是在常规旋转钻井的基础上施加轴向或者切向冲击力的钻井方法，其核心是液动或机械冲击工具。国内许多石油钻井科研院所、高校及公司对液动冲击器进行了研究，研制了多种石油钻井用液动冲击器，并入井进行了试验，试验结果显示有良好的经济效益。但是到目前为止，除了国外几家公司的旋冲钻井工具得到较为广泛的应用外，国内有关旋转冲击钻井技术在石油钻井中应用尚处于原理研究与试验阶段，还没有大规模推广应用的相关工具。下面介绍国内外主要的几种旋转冲击钻井工具。

沈建中等研制了 YSC-178 液动式射流冲击器，其工作原理为：利用流体流经射流原件的喷嘴时的附壁效应推动活塞与冲锤上行积蓄能量，下行释放能量撞击钻子完成一次冲击，如此往复实现对钻头的冲击<sup>[27]</sup>。

中国石油大学（华东）倪红坚教授研制了自激振荡式旋转冲击钻井工具。钻井液流经自激振荡腔产生压力脉动，一方面压力脉动通过钻头连接短节对钻头施加波动钻压；另一方面造成井底压力波动，增加井底水功率，利于岩屑清理。该工具合理利用井底水力能量增强钻头冲击力，优化井底流场，改善岩石受力状况，达到提高机械钻速的目标。该工具在胜利油田、新疆油田等进行了大量实验，效果显著<sup>[28-30]</sup>。

TorkBuster 扭力冲击器是美国阿特拉公司自主研发的专利产品，是一种纯机械动力工具。它巧妙地将钻井液的流体能量转换成扭向的、高频的(每分钟 750~1500 次)、均匀稳定的机械冲击能量，并直接传递给 PDC 钻头，这就使钻头不需要等待积蓄足够的扭力能量就可以切削地层。TorkBuster 提供的扭向冲击力很大程度上抑制了钻头的黏滑振动，显著提高了机械钻速。

旋冲钻井工具冲击力可分为刚性冲击和柔性冲击。由于刚性冲击载荷峰值很高，常规钻头很难与其配合使用，而产生柔性冲击载荷的工具则可以与常规钻头配合使用。

### 4 结论与展望

由于岩石的复杂性和地层条件的不可预测性，在理论分析和实验研究方面揭示旋冲钻进机理存在较大困难。现有旋冲钻井破岩理论研究对破岩过程进行很大的简化，如忽略钻头黏滑、钻压波动、地层压力等，无法体现旋冲钻井的实际状况，因而研究结果无法准确预测实际钻速。在旋冲钻井破岩理论进一步研究过程中，需要注意以下几个方面：①切齿与岩石接触模型的精度；②钻柱近钻头部分对钻头运动状态的影响；③井底压力、岩性、岩石应力状态等对旋冲破岩的影响；④实验与数值模拟相结合。

近 10 年来，地质工程、岩土工程在岩石力学数值分析方法、岩石非线性理论、岩石断裂与损伤、裂纹扩展机制、岩石动力响应等方面成为研究的重点和热点，也取得了众多研

究成果<sup>[31]</sup>。这些研究成果和研究方法可以用来指导旋冲钻井破岩理论的发展。随着旋冲钻井破岩过程和机理被逐渐揭示，旋冲钻井技术必将得到进一步发展，石油钻井成本将会进一步降低。

## 参 考 文 献

- 1 HAN G, BRUNO M S. Percussion drilling: From lab tests to dynamic modeling [M]. International Oil & Gas Conference and Exhibition in China. Society of Petroleum Engineers. 2006: ARMA 13-440.
- 2 HUSTRULID W A, FAIRHURST C. A theoretical and experimental study of the percussive drilling of rock part I—theory of percussive drilling [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1971, 8(4): 311-33.
- 3 CHIANG L, ELIAS D. Modeling impact in down-the-hole rock drilling [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(4): 599-613.
- 4 MAURER W. The state of rock mechanics knowledge in drilling [M]. The 8th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS). American Rock Mechanics Association. 1966: ARMA 66-0355.
- 5 HAN G, BRUNO M, LAO K. Percussion drilling in oil industry: review and rock failure modelling [M]. The AADE national technical conference and exhibition, April. 2005: AADE-05-NTCE-59.
- 6 HAN G, BRUNO M, DUSSEAUULT M B. Dynamically modelling rock failure in percussion drilling [M]. Alaska Rocks 2005, The 40th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS). American Rock Mechanics Association. 2005: ARMA/USRMS 05-819.
- 7 BRUNO M S. Fundamental Research on Percussion Drilling: Improved rock mechanics analysis, advanced simulation technology, and full-scale laboratory investigations [M]. Terralog Technologies Inc. 2005: DE-FC26-03NT41999.
- 8 CHIANG L E, ELIAS D A. A 3D FEM methodology for simulating the impact in rock-drilling hammers [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(5): 701-11.
- 9 WANG J-K, LEHNHOFF T. Bit penetration into rock—a finite element study [M]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts. Elsevier. 1976: 11-6.
- 10 SAKSALA T. 3D Numerical Simulation of Rock Fracture Due to Multiple Button Bit In Percussive Drilling [M]. ISRM International Symposium-EUROCK 2012. International Society for Rock Mechanics. 2012.
- 11 SAZIDY M S. Modeling and Validation of Percussive Drilling Performance in a Simulated Visco-Elasto-Plastic Rock Medium [D], 2011.
- 12 ZHU X, LUO H, JIA Y. Numerical analysis of air hammer bit drilling based on rock fatigue model [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(4): 3337-41.
- 13 ZHU X-H, TANG L-P, TONG H. Rock breaking mechanism of a high frequency torsional impact drilling [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(20): 75-8,109.

- 14 ZHU H, LIU Q, DENG J, et al. Rock-breaking mechanism of rotary-percussive drilling [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2012, 20(4): 622-31.
- 15 AKBARI B, BUTT S, MUNASWAMY K, et al. Dynamic Single PDC Cutter Rock Drilling Modeling and Simulations Focusing on Rate of Penetration Using Distinct Element Method [M]. 45th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association. 2011: ARMA 11-379.
- 16 AKBARI B. Polycrystalline Diamond Compact Bit-Rock Interaction [D]; Japan Association for Earthquake Engineering, 2011.
- 17 BRUNO M, HAN G, HONEGER C. Advanced simulation technology for combined percussion and rotary drilling and cuttings transport [J]. *Gas Tips (Winter 2005)*, 2005, 5-8.
- 18 HAN G, BRUNO M, GRANT T. Lab investigations of percussion drilling: from single impact to full scale fluid hammer [M]. *Golden Rocks 2006, The 41st US Symposium on Rock Mechanics (USRMS)*. American Rock Mechanics Association. 2006: ARMA/USRMS 06-962.
- 19 ZHAO F. Theoretical and experimental research on rock fragmentation under coupling dynamic and static loads [D]; Changsha: Central South University, 2004.
- 20 ZHAO J, YI L, ZHAO Y. Study on impact grinding law of granite under the conditions of high temperature and high pressure [J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(6): 904-9.
- 21 ZHAO J, ZHAO Y, LI Y. Percussive rotary drilling law of granite under high temperature and high pressure [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(6): 856-60.
- 22 ZHAO J, WAN Z, LI Y, et al. Research on granite cutting and breaking test under conditions of high temperature and high pressure [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 7(14): 32-8.
- 23 SIQI L, TIE Y, WEI L. Mechanism experimental study of rock breaking assisted with high frequency harmonic vibration and impactation [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2015, 39(4): 85-91.
- 24 LI H, BUTT S, MUNASWAMY K, et al. Experimental investigation of bit vibration on rotary drilling penetration rate [M]. 44th US Rock Mechanics Symposium and 5th US-Canada Rock Mechanics Symposium. American Rock Mechanics Association. 2010: ARMA 10-426
- 25 LI H. Experimental Investigation of the Rate of Penetration of Vibration Assisted Rotary Drilling [D]; Memorial University of Newfoundland, 2011.
- 26 YUSUF B O. The effects of varying vibration frequency and power on efficiency in vibration assisted rotary drilling [D]; Memorial University of Newfoundland, 2011.
- 27 SHEN J, HE Q, WEI Z. The application of Model YSC-178 hydraulic jet hammer in rotary percussion drilling [J]. 2011, 39(6): 52-4.
- 28 LEI P, NI H, WANG R. Performance analysis and optimization for hydraulic components of self-oscillating rotary impact drilling tool [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, 19(32): 175-80,98.
- 29 LEI P, NI H, WANG R. Research on the large eddy simulation of the hydraulic components in self-oscillating rotary percussion drilling tools [J]. *Energy Education Science and Technology Part A*:

- Energy Science and Research, 2014, 32(3): 2095-16.
- 30 LEI P, WANG R, NI H. ROP increasing Principle and Application of Self-excited Oscillation Rotary Percussion Drilling tool [M]. The 4th IEEE Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Shanghai, China. 2012.
- 31 SHE S, DONG L. Statistics and analysis of academic publications for development of rock mechanics in china [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(3): 442-64.

## **Present situation and prospect of rotary percussion drilling technology**

WANG Yong, NI Hong-jian, WANG Rui-he, LIU Shu-bin, ZHANG Heng ,WANG Peng

(School of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, P. R. China,

Email: [nihj@upc.edu.cn](mailto:nihj@upc.edu.cn))

**Abstract:** In recent years, with more and more new type of rotary percussion drilling tools, the rock breaking efficiency have increased a lot. Rotary percussion drilling technology has been one of the most widely used technologies. The mathematical model of numerical simulation and experiment methods of rotary percussion drilling is summarized in this paper. The similarities and differences between various mathematical models and experimental methods is analyzing. We find that the development of drilling technology well is guided well by the existing theoretical research. But the problems is also found in the numerical simulation and experiment. At last, in the view of tool design and field conditions, the theory development prospect of rock breaking theory of rotary percussion drilling is put forward.

**Key words:** rotary percussion; drilling; rock breaking; efficiency