

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.11911/syztjs.2019043

非平面 PDC 切削齿破岩有限元仿真及试验

谢 晗¹, 况雨春¹, 秦 超²

(1. 西南石油大学机电工程学院, 四川成都 610500; 2. 成都海锐能源科技有限公司, 四川成都 610500)

摘 要: 为了指导 PDC 钻头设计, 对三棱形和斧形 PDC 切削齿、常规平面 PDC 切削齿的破岩性能进行了研究。利用有限元软件建立了 PDC 切削齿直线切削岩石和垂直压入岩石的三维有限元模型, 模拟了相同布齿角度下、不同形状 PDC 切削齿垂直压入岩石和不同切削深度直线切削均质岩石及非均质岩石的过程, 发现不同形状 PDC 切削齿的破岩过程存在明显差异。与常规平面 PDC 切削齿相比, 三棱形 PDC 切削齿更易压入地层形成破碎坑; 三棱形和斧形 PDC 切削齿破碎均质砂岩时所需的切削力较小, 岩石产生的预破碎区域更大, 破碎非均质岩石时的切向力波动幅度小, 更易破碎岩石。根据模拟结果, 设计研制了三棱形切削齿 PDC 钻头, 并在钻进混合花岗岩地层时获得较好的效果。研究表明, 有限元模拟可为 PDC 钻头设计提供参考。

关键词: PDC 钻头; 切削齿; 切削力; 有限元法; 岩石破碎; 数值模拟

中图分类号: TE921⁺.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2019)05-0069-05

The Finite Element Simulation and Test of Rock Breaking by Non-Planar PDC Cutting Cutter

XIE Han¹, KUANG Yuchun¹, QIN Chao²

(1. School of Electrical and Mechanical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610500, China;
2. Chengdu Hairui Energy Technology Co. Ltd., Chengdu, Sichuan, 610500, China)

Abstract: In order to provide references for PDC bit design, the rock breaking performance of triangular prism, axe-shaped and the conventional planar PDC cutting cutter was studied. 3D finite element models of vertical press-in and linear cutting into rocks were established by using finite element software, which simulated the processes of vertical press-in by cutters with the same tooth arrangement angle, and linear cutting of homogeneous/heterogeneous rocks with different cutting depths. It is found that there are significant differences in rock breaking, depending of the shape of the cutters, which can be quite different shapes. Compared with the conventional planar PDC cutters, triangular prism PDC cutters are more easily pressed into the formation to form a crushed pit. When breaking homogeneous sandstone, triangular prism and axe-shaped PDC cutters require less cutting force, and they establish a uniform contact with the rock, resulting in creating a larger pre-crushing area of the rock. For breaking heterogeneous rocks, the tangential force fluctuation of the triangular prism and axe-shaped PDC cutters is small, and it is more easily to break the rocks. According to the simulation results, the test of mixed granite stratum drilling with PDC bit with triangular prism cutters was conducted, and the test results showed that the finite element simulation could provide references for the design of a PDC bit.

Key words: PDC bit; cutter; cutting force; finite element method; rock breaking; numerical simulation

近年来, 随着聚晶金刚石切削齿加工工艺的不断提高, PDC 切削齿的金刚石层表面不再局限于二维平面结构, 开始向多维发展, 出现了三棱形齿、斧形齿^[1]等各种新型非平面 PDC 切削齿。室内试验结果显示, 非平面 PDC 切削齿较平面 PDC 切削齿更耐磨^[2-5], 但其表面是多维的, 破碎岩石的过程与常规平面 PDC 切削齿相比可能存在明显差异。目前, 国内外针对非平面 PDC 切削齿破岩的相关研究还较少。因此, 为了给优化 PDC 钻头设计提供参考, 笔者利用有

限元软件, 建立了切削齿直线切削和垂直压入岩石的有限元模型, 计算了常规平面、三棱形和斧形 PDC 切削齿直线切削岩石和垂直压入岩石的切削力和接触应力, 分析了 3 种切削齿的破岩性能, 并进行了三棱形切削齿 PDC 钻头钻进混合花岗岩地层的试验。

收稿日期: 2018-06-29; 改回日期: 2019-02-20。

作者简介: 谢晗 (1992—), 男, 四川达州人, 2015 年毕业于成都大学车辆工程专业, 在读硕士研究生, 主要研究方向为岩石破碎与钻头设计。E-mail: 527108732@qq.com。

1 PDC 切削齿有限元模型

利用有限元软件建立 PDC 钻头切削齿直线切削岩石及垂直压入岩石的有限元模型。

1.1 切削齿直线切削岩石模型

根据常见砂岩、灰岩的岩石参数,模拟 PDC 切削齿切削均质砂岩、软硬交错岩石和含砾砂岩 3 种岩石的过程。

将 PDC 切削齿绕钻头轴线的旋转切削,简化为直线切削运动^[6-8],直线切削模型如图 1 所示,设定直线切削速度为 300 mm/s。图 2 为非均质岩石模型,图 2 中的绿色网格材料为砂岩,青色网格材料为灰岩。将 PDC 切削齿视为刚体,其截面直径 16 mm,斧形 PDC 切削齿脊背夹角为 156°,三棱形 PDC 切削齿脊背夹角为 157°,脊背线长 3 mm,斜度 8°。为了缩短计算时间,设定 PDC 切削齿切削前角为 15°,侧转角为 0°。

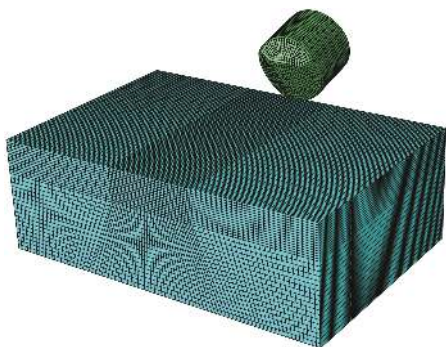


图 1 单 PDC 切削齿直线切削岩石的模型

Fig. 1 Model of single PDC cutting cutter linear cutting into rock

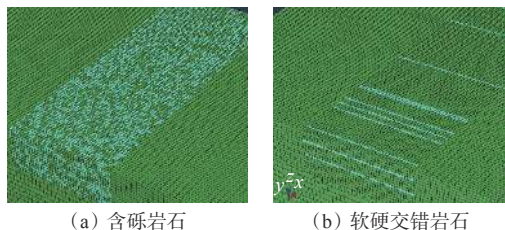


图 2 非均质岩石模型

Fig. 2 Model of heterogeneous rock

根据圣维南原理,设定岩石模型尺寸为 170 mm×50 mm×25 mm,岩石四周及底面边界自由度设置为 0。选用六面体网格,并采用减缩积分法划分网格。岩石本构关系选用 D-P 准则,并定义了硬化特征^[9]。由于 PDC 切削齿破岩过程中以剪切破岩为主,所

以根据 shear damage 准则判断岩石是否被破坏,并设置损伤演化系数。有限元模型主要材料的物性参数^[10-11]见表 1。

表 1 有限元模型中主要材料的物性参数

Table 1 Parameters of main materials in the finite element model

材料	密度/ (g·cm ⁻³)	弹性模量/ GPa	泊松比	内摩擦角/ (°)	抗压强度/ MPa
PDC层	3.54	890.0	0.077		
硬质合金	15.00	579.0	0.220		
砂岩	2.54	12.8	0.200	34.45	30.5
灰岩	2.70	31.2	0.171	43.26	105.0

岩石与切削齿的接触是非线性、相对变形差异悬殊的过程,所以岩石的接触面应选择整个岩石模型的节点集,避免出现切削齿只破碎岩石模型表面,却直接穿透内部的情况。在 interaction 中建立基于岩石网格节点集与切削齿网格“接触对”的接触形式,采用弹性滑移的罚函数公式,切向摩擦因数取 0.4,接触面的接触关系采用“硬接触”公式。

1.2 切削齿垂直压入岩石模型

设置 PDC 切削齿的压入速度为 1.0 mm/s,前角为 15°。岩石模型为直径 100 mm、高 80 mm 的圆柱体。岩石压入模型如图 3 所示。其他参数取值与直线切削岩石模型相同。



图 3 单 PDC 切削齿垂直压入岩石的模型

Fig. 3 Model of single PDC cutting cutter vertical feeding into rock

2 有限元模拟结果分析

2.1 切削齿垂直压入岩石模拟结果分析

图 4 为常规平面和三棱形 PDC 切削齿垂直压入岩石产生破碎坑时的 Mises 应力分布模拟结果。由图 4 可以看出,三棱形 PDC 切削齿垂直压入岩石产生的 Mises 应力更集中。

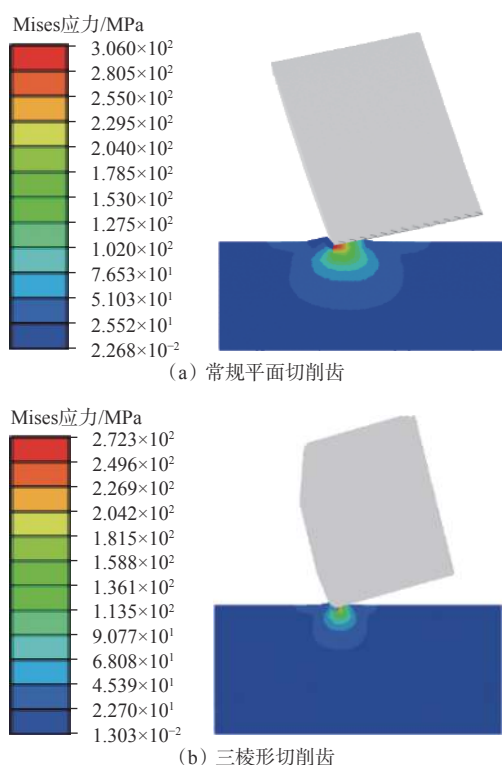


图 4 常规平面和三棱形 PDC 切削齿垂直压入岩石时的 Mises 应力分布

Fig. 4 Stress distribution while vertical feeding into rock by conventional planar and triangular prism PDC cutter

模拟常规平面、斧形及三棱形 PDC 切削齿垂直压入岩石轴向力随时间的变化, 结果见图 5。由图 5 可以看出: 轴向力出现峰值, 说明切削齿持续压入岩石时, 轴向力不断增大, 当其达到峰值时, 岩石出现第一次大体积破碎; 切削齿刃边的岩石达到屈服极限时失去联结力形成岩屑, 致使轴向力迅速降低; 三棱形 PDC 切削齿使岩石产生第一次体积破碎所需轴向力明显小于常规平面和斧形 PDC 切削齿, 其更易压入岩石产生破碎坑, 能在更小的钻压条件下吃入并破碎岩石, 适用于硬地层。

2.2 切削齿直线切削岩石模拟结果分析

模拟常规平面、斧形及三棱形 PDC 切削齿直线切削均质砂岩时的剪应力, 结果见图 6。由图 6 可以看出, 非平面 PDC 切削齿直线切削岩石时, 产生的剪应力更大。也就是说, 非平面切削齿能使岩石产生更大的预破碎区域, 对于脆性岩石而言会引起更大的体积破碎。

常规平面和三棱形 PDC 切削齿吃入均质砂岩时的 Cpress 接触应力云图见图 7。由图 7 可以看出: Cpress 接触应力只在岩石与切削齿相互作用的区域产生, 而在其他区域的 Cpress 接触应力为零; 常规平

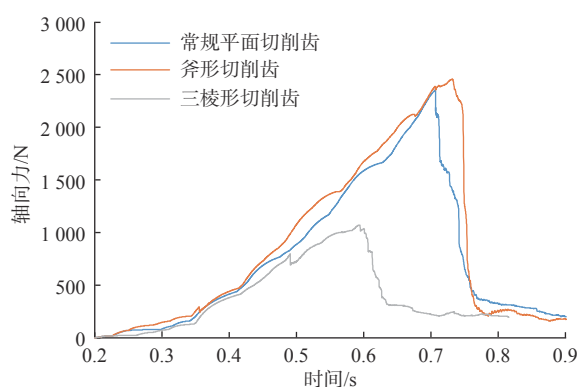


图 5 不同形状 PDC 切削齿垂直压入岩石时轴向力随时间变化的曲线

Fig. 5 Curves of vertical pressure/rock axial force varies with time while cutting rock with different shapes of PDC cutters

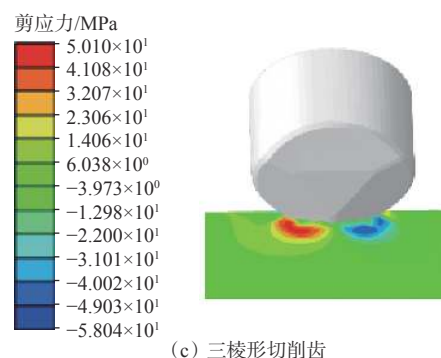
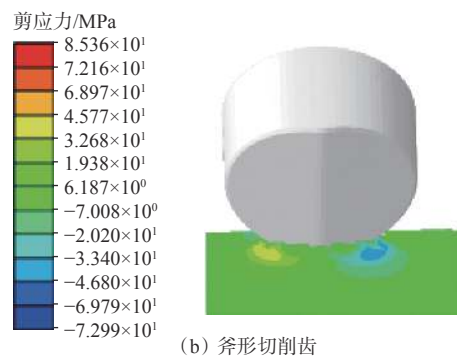
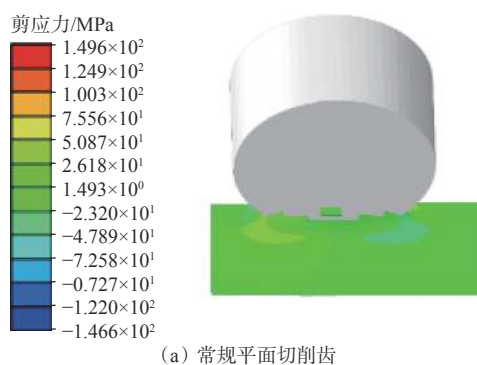


图 6 不同形状 PDC 切削齿直线切削均质砂岩时的剪应力分布
Fig. 6 Shear stress distribution during linear cutting homogeneous sandstone with different shapes of cutters

面 PDC 切削齿接触区域主要集中于齿边沿,而非平面 PDC 切削齿接触区域更大、且 Cpress 接触应力更均匀。

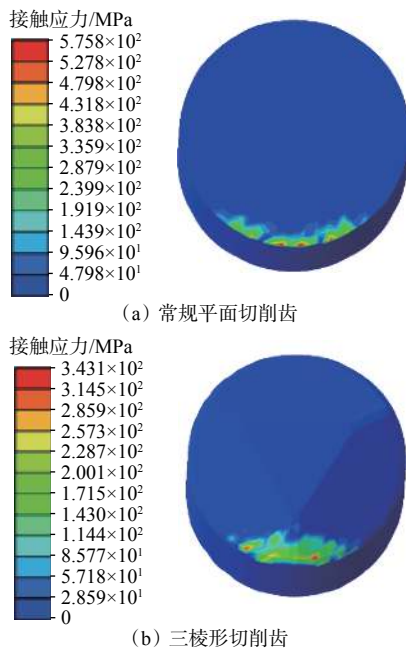


图 7 常规平面和三棱形 PDC 切削齿的接触应力分布
Fig. 7 Contact stress distribution of conventional planar and triangular prism PDC cutters

根据不同形状 PDC 切削齿切削力随时间变化的数据,计算不同形状 PDC 切削齿切削均质砂岩时的平均切削力。其计算方法为:设定历史输出为每个固定时间间隔输出数据,提取切削齿三向切削力历史输出数据,并求取平均值,最后求三向切削力平均值的合力。常规平面、斧形及三棱形 PDC 切削齿切削均质砂岩时,不同切削深度下破岩所需的平均切削力如图 8 所示。由图 8 可以看出,直线切削均质砂岩时,非平面 PDC 切削齿破岩所需的切削力更小,随切削深度增大,差异愈明显。破岩所需的切削力越小,要求钻机提供的扭矩、钻压越小,越有利于造斜段和水平段的钻进。同时,扭矩较小,也可以降低钻具发生粘滑的概率。

常规平面、斧形及三棱形 PDC 切削齿切削软硬交错岩石和含砾岩石时,在相同切削深度下切向力随时间变化关系曲线如图 9 所示。由图 9 可以得出,切向力随时间波动剧烈并出现多处峰值,且非平面 PDC 切削齿的切向力波动幅度明显小于常规平面 PDC 切削齿。切向力波动的原因主要是,切削齿在破岩过程中遇到硬质成分时,切向力迅速升高,当达到岩石屈服极限后岩石崩碎断裂,然后切向力迅速降低。

常规平面、斧形及三棱形 PDC 切削齿切削非均质岩石时的破碎比功如图 10 所示。由图 10 可以看出,

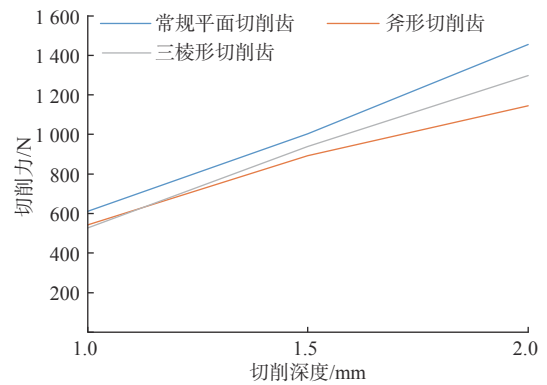


图 8 不同形状 PDC 切削齿切削均质砂岩时不同切削深度下的平均切削力

Fig. 8 Average cutting force at different cuttings depths for different shaped PDC cutters while cutting homogeneous sandstone

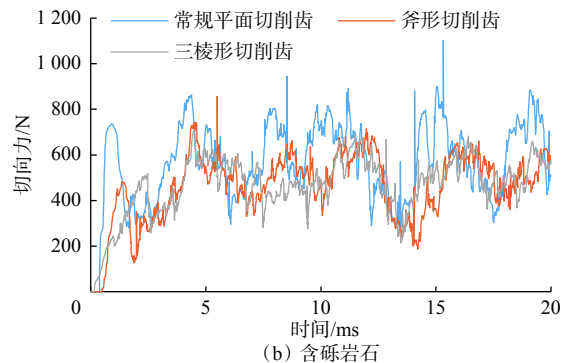
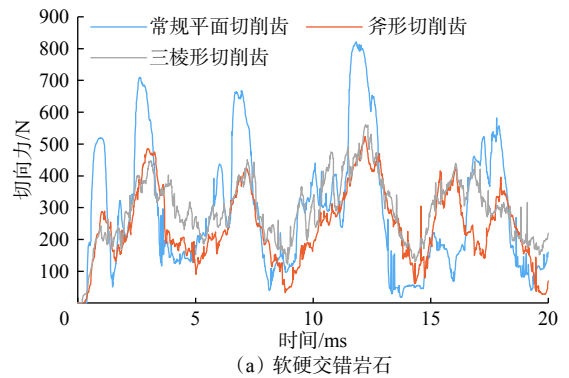


图 9 不同形状 PDC 切削齿切削非均质岩石时切向力随时间变化的曲线

Fig. 9 Curve in which tangential force varies with time for different shaped PDC cutters while cutting heterogeneous rocks

非平面 PDC 切削齿的破碎比功小于常规平面 PDC 切削齿,且斧形 PDC 切削齿所需的破碎比功最小。

分析有限元模拟结果得知:三棱形 PDC 切削齿更易吃入地层形成破碎坑;非平面 PDC 切削齿的切削力及其波动幅度更小,与岩石接触更均匀,有利于降低振动和出现粘滑现象的概率;非平面 PDC 切削齿的破碎区域更大,更易形成较大的破碎体积,降

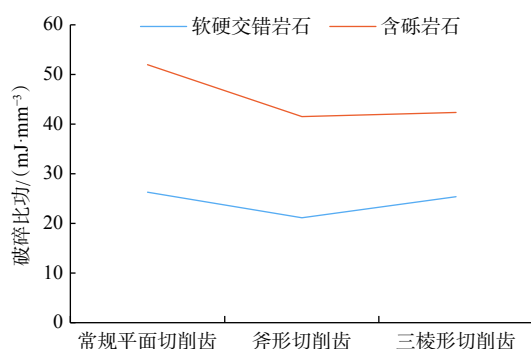


图 10 不同形状 PDC 切削齿切削非均质岩石时的破碎比功

Fig. 10 Breaking specific work of different shaped PDC cutters while cutting heterogeneous rocks

低岩石断裂对切削齿的冲击;在非均质地层中非平面 PDC 切削齿能更轻松地破碎岩石。结合有限元分析及试验结果^[11]可知,斧形 PDC 切削齿的攻击性更强,三棱形 PDC 切削齿更耐磨。

3 非平面齿 PDC 钻头现场试验

某井采用常规 PDC 钻头钻至井深 3 979.00 m 时,因泵压升高起钻,发现钻头肩部出现严重环切。取心发现,该井深处地层岩性由角砾岩变为混合花岗岩,石英含量 50%~60%,地层研磨性高,可钻性差。为了避免钻头过快失效和快速钻穿该段地层,根据上文的有限元模拟结果,设计应用了肩部安装有三棱形 PDC 切削齿的 PDC 钻头。钻井参数:转速 40~50 r/min,排量 18 L/s,泵压 18~19 MPa,钻压 400~900 kN。该钻头总进尺 71.00 m,平均机械钻速 1.92 m/h,钻时曲线如图 11 所示(图中 3 986.00~3 988.00 m 井段钻时出现峰值,为取心钻头钻进时间)。可见三棱形齿 PDC 钻头能在混合花岗岩地层钻进,并能长时间保持稳定的机械钻速。最后,因钻速变慢起钻,钻头出井后发现为正常失效。

4 结 论

1)有限元模拟结果表明:非平面 PDC 切削齿与岩石接触更平稳,三棱形 PDC 切削齿更易轻松吃入地层;非平面 PDC 切削齿破碎岩石的切削力及切削力波动幅度均比常规平面 PDC 切削齿小,能有效控制粘滑振动;钻进非均质地层时,非平面齿 PDC 钻头能更轻松破碎岩石,且能避免产生较大冲击载荷。

2)非平面 PDC 切削齿为快速穿越复杂难钻地层、

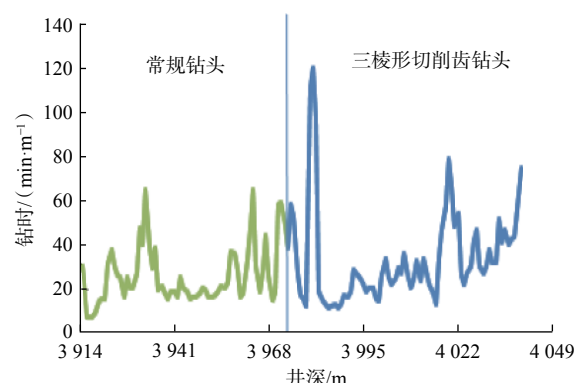


图 11 不同井深下的钻时

Fig. 11 Drilling time at different well depths

缩短钻井周期和降低钻井成本,提供了新的技术方案。由于非平面 PDC 切削齿的金刚石层是多维结构,其破岩过程与常规平面 PDC 切削齿有明显区别。为使非平面 PDC 切削齿的破岩效果达到最佳,应对其布齿角度、金刚石层倒角和脊背斜度等进行深入研究。

参 考 文 献

References

- [1] 许利辉, 毕泗义. 国外 PDC 切削齿研究进展 [J]. 石油机械, 2017, 45(2): 35-40.
XU Lihui, BI Siyi. Overseas researchs on PDC cutters[J]. China Petroleum Machinery, 2017, 45(2): 35-40.
- [2] CRANE D, ZHANG Youhe, DOUGLAS C, et al. Innovative PDC cutter with elongated ridge combines shear and crush action to improve PDC bit performance traditional PDC cutter technologies[R]. SPE 183984, 2017.
- [3] BILGESU I, SUNAL O, TULU I B, et al. Modeling rock and drill cutter behavior[R]. ARMA-08-342, 2008.
- [4] TULU I B, HEASLEY K A. Calibration of 3D cutter-rock model with single cutter tests[R]. ARMA-09-160, 2009.
- [5] RICHARD T, COUDYZER C, DESMETTE S. Influence of groove geometry and cutter inclination in rock cutting[R]. ARMA-10-429, 2010.
- [6] DETOURNAY E, RICHARD T, SHEPHERD M. Drilling response of drag bits: theory and experiment[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(8): 1347-1360.
- [7] ZHOU Y, JAIME M C, GAMWO I K. Modeling groove cutting in rocks using finite elements[R]. ARMA-11-209, 2011.
- [8] MARTINEZ I R, FONTOURA S, INOUE N, et al. Simulation of single cutter experiments in evaporites through finite element method[R]. SPE 163504, 2013.
- [9] 邓敏凯, 伍开松, 胡伟. PDC 钻头切削齿破岩仿真与试验分析 [J]. 石油机械, 2014, 42(1): 10-13.
DENG Minkai, WU Kaisong, HU Wei. Rock-breaking simulation and experimental analysis of PDC bit cutter[J]. China Petroleum Machinery, 2014, 42(1): 10-13.
- [10] 徐根, 陈枫, 马春德, 等. PCD 弹性模量、泊松比的测试实验研究 [J]. 石油钻探技术, 2009, 37(2): 63-65.
XU Gen, CHEN Feng, MA Chunde, et al. Lab test of PDC's Young modulus and Poisson's ratio[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(2): 63-65.
- [11] 赵东鹏, 马姗姗, 牛同健, 等. 石油钻探用非平面聚晶金刚石复合片的开发 [J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2017, 37(6): 49-52.
ZHAO Dongpeng, MA Shanshan, NIU Tongjian, et al. Research of polycrystalline diamond compact having non-planar surface for oil drilling[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2017, 37(6): 49-52.