



非平面三棱形PDC齿破岩机理研究与现场试验

刘建华 令文学 王恒

Study on Rock Breaking Mechanism and Field Test of Triangular Prismatic PDC Cutters

LIU Jianhua, LING Wenxue, WANG Heng

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2021040>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

非平面PDC切削齿破岩有限元仿真及试验

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

石油钻探技术. 2019, 47(5): 69-73 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019043>

凸脊型非平面齿PDC钻头的研制与现场试验

Development and Field Test of a Non-Planar Cutter PDC Bit with Convex Ridges

石油钻探技术. 2020, 48(2): 49-55 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020035>

双级双速钻井工具设计与现场试验

The Design and Field Testing of Two-Stage and Two-Speed Drilling Tools

石油钻探技术. 2019, 47(1): 59-64 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019010>

超声波高频旋冲钻井技术破岩机理研究

The Rock Breaking Mechanism of Ultrasonic High Frequency Rotary-Percussive Drilling Technology

石油钻探技术. 2018, 46(4): 23-29 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018097>

非均质地层锥形辅助切削齿PDC钻头设计与试验

Design and Test of a New PDC Bit with Tapered Auxiliary Cutter for Heterogeneous Formations

石油钻探技术. 2018, 46(2): 58-62 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018046>

机械式双定位块套管接箍定位器的设计与现场试验

Design and Application of a Mechanical Double-Positioning Block Casing Collar Locator

石油钻探技术. 2018, 46(6): 100-104 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2018136>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2021040

引用格式: 刘建华, 令文学, 王恒. 非平面三棱形 PDC 齿破岩机理研究与现场试验 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(5): 46-50.

LIU Jianhua, LING Wenxue, WANG Heng. Study on rock breaking mechanism and field test of triangular prismatic PDC cutters [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(5): 46-50.

非平面三棱形 PDC 齿破岩机理研究与现场试验

刘建华, 令文学, 王 恒

(中国石化石油工程技术研究院, 北京 102206)

摘 要: 非平面三棱齿的破岩机理不清晰, 导致三棱齿 PDC 钻头达不到预期的破岩效果。为此, 采用有限元法对非平面三棱齿进行数值模拟分析, 分析破岩过程中的各项切削力的变化规律, 研究其破岩机理。数值模拟和刮切试验结果表明, 三棱齿与平面 PDC 齿在破岩过程中的岩石受力状态存在明显的差异, 相同条件下三棱齿切削破碎砂岩时的切向力及切向力的波动幅度均小于常规平面齿。三棱齿 PDC 钻头现场试验表明, 其在研磨性高、冲击性强地层中的破岩效率较高, 抗冲击性能较好。研究表明, 三棱齿主要通过拉剪作用破坏岩石, 切向力和扭矩更小, 抗冲击性和耐磨性更高, 能够提高破岩效率、延长钻头使用寿命。

关键词: 三棱齿; 非平面; 破岩机理; 数值模拟; 切削试验; 现场试验

中图分类号: TE21, TE921⁺.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2021)05-0046-05

Study on Rock Breaking Mechanism and Field Test of Triangular Prismatic PDC Cutters

LIU Jianhua, LING Wenxue, WANG Heng

(Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering, Beijing, 102206, China)

Abstract: The lack of clarity over the rock breaking mechanism of triangular prismatic cutters hinders their effective applications. In view of this, the finite element method was employed to conduct a numerical simulation analysis of triangular prismatic cutters in this study with the aim of clarifying the change rules of various cutter force during rock breaking and revealing the rock breaking mechanism. The results of numerical simulation and scraping experiments suggested that triangular prismatic cutters and planar PDC (polycrystalline diamond compact) cutters demonstrated a distinct difference in the stress on the rocks during breaking. The tangential force and its fluctuation were smaller when a triangular prismatic cutter was used to break sandstone as compared with a conventional planar cutter under the same conditions. The field test of the PDC bit with the triangular prismatic cutters proved a high efficiency in rock breaking and impact resistance in strata with high abrasiveness and strong impact. This study demonstrates that breaking rocks using tension and shear, triangular prismatic cutters can make the tangential force and torque smaller and the impact resistance and abrasion resistance higher. In that way they can enhance the rock breaking efficiency and prolong the service life of bits.

Key words: triangular prismatic cutter; non-planar; rock breaking mechanism; numerical simulation; cutting experiment; field test

近年来, 我国油气钻探发展迅速, 钻井过程中遇到的地层情况也越发复杂, 常规平面齿钻头钻速慢、抗冲性差和使用寿命短等问题逐渐突出^[1]。为提高钻头的破岩能力、延长其使用寿命, 提高钻井效率,

降低钻井成本, 研制了多种非平面 PDC 切削齿^[2-5], 包括 Stinger 圆锥齿^[6-8]、屋脊齿^[9]等, 可以提高 PDC 钻头的力学性能及其在特定地层的机械钻速。

2017 年, 国内研制了三棱形 PDC 切削齿(简称

收稿日期: 2020-10-14; 改回日期: 2021-08-31。

作者简介: 刘建华(1982—), 山东潍坊人, 2005 年毕业于山东理工大学电子信息工程专业, 2008 年获中国石油大学(华东)信号与信息处理专业硕士学位, 高级工程师, 主要从事钻井工艺优化设计、超深水平井钻井技术研究与技术服务工作。E-mail: 873649134@qq.com。

基金项目: 国家科技重大专项“海相碳酸盐岩超深油气井关键工程技术”(编号: 2017ZX05005-005)和中国石化重大科技项目“特深层油气勘探开发工程关键技术与装备”(编号: P17049)资助。

三棱齿)^[10], 其耐磨性能比常规的平面 PDC 齿提高 58.6%, 抗疲劳冲击性能提高 95.7%, 磨削载荷平均降低 41.9%, 其力学性能远远优于平面 PDC 切削齿。但三棱齿的金刚石工作表面具有特有的脊形结构, 使其破岩机理和适用地层与常规平面齿有所不同^[11]。对三棱齿破岩机理认识不清楚, 导致钻头设计方案不合理, 不但影响钻进效果, 还会造成切削齿磨损过快、折断和金刚石脱落等问题, 导致钻井成本升高。为此, 笔者采用数值模拟方法分析三棱齿破岩时的岩石应力和洛德角, 并在室内试验进行单齿切削试验, 探究三棱齿破岩时的各向切削力变化规律, 结合现场试验对非平面三棱齿的实际应用效果进行分析和研究, 探索其破岩机理和破岩特点, 为非平面齿钻头设计提供理论依据。

1 三棱齿破岩机理

三棱齿的三视图见图 1, 其中脊背长度 $L=3.0$ mm, 脊背倾角 $\gamma=3^\circ$, 脊背夹角 $\psi=156^\circ$, 直径 $D=15.88$ mm, 高度 $H=13.0$ mm, 齿边缘倒角 $C=0.4$ mm, 三棱齿的脊背处倒角均设置为 1.0 mm。在此基础上, 采用有限元软件, 建立 PDC 切削齿破岩过程的有限元模型。选取武胜砂岩的力学性质参数作为岩石本构材料参数, 密度为 2.54 g/cm³, 弹性模量为 11.54 GPa, 泊松比为 0.062 MPa, 抗拉强度为 4.346 MPa, 抗剪强度为 13.56 MPa, 抗压强度为 67.548 MPa, 内摩擦角 38.03° , 并根据圣维南原理, 设定岩石模型尺寸为 170 mm $\times$ 50 mm $\times$ 25 mm, 岩石四周及底面边界自由度设置为 0; 三棱齿金刚石材料密度为 15.4 g/cm³, 弹性模量为 890 GPa, 泊松比为 0.077^[12]。

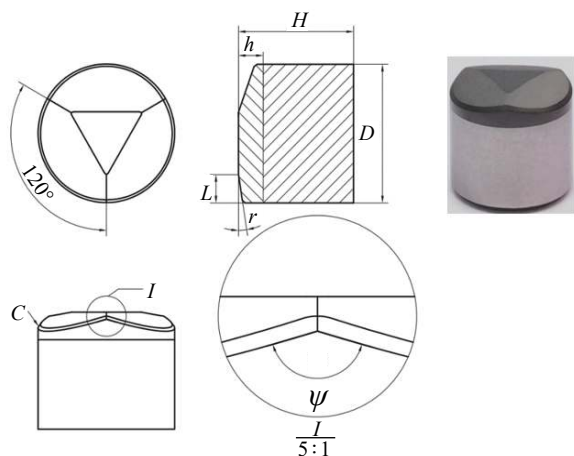


图 1 三棱齿三视图

Fig.1 Three-view drawing of a triangular prismatic cutter

三棱齿网格划分采用六面体网格, 并使用减缩积分方法, 结果如图 2 所示。岩石本构关系选用 D-P 准则, 并定义了硬化特征; 选用 shear damage 破坏准则, 并设置损伤演化系数。将 PDC 切削齿绕钻头轴线的旋转切削简化为直线切削运动。为了计算方便快捷, 切削齿视为刚体, 忽略钻井液及温度的影响。

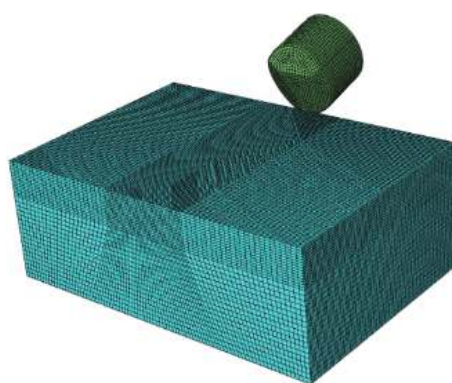


图 2 三棱齿切削破岩有限元模型

Fig.2 Finite element model of rock cutting by a triangular prismatic cutter

相同切削参数下, 隐去切削齿后, 常规平面齿与三棱齿切削岩石时岩石应力状态如图 3 和图 4 所示。数值模拟结果表明, 非平面 PDC 齿与常规平面齿破岩过程存在明显差别。常规平面齿切削岩石时, 在切削齿边沿处存在较大的应力集中区域, 说明其主要利用金刚石齿刃边沿接触岩石产生的应力集中破碎岩石; 而三棱齿破碎岩石时, 产生的应力集中区域主要分布于棱脊区域, 即岩石与三棱齿脊背接触部分, 说明三棱齿主要通过金刚石的脊形结构接触岩石产生较大的点载荷, 产生小范围破碎吃入岩石。

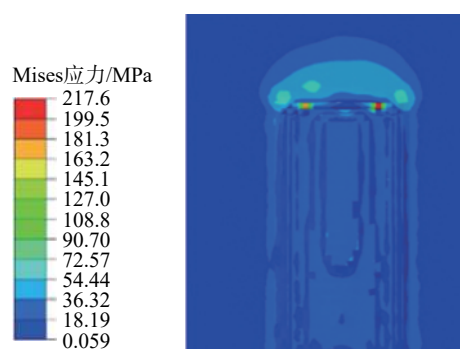


图 3 常规平面齿中岩石 Mises 应力云图

Fig.3 Cloud map of Mises stress on rocks cut by a conventional planar cutter

为了更准确和直观地比较三棱齿与常规平面齿破岩机理的差异, 从数值模拟结果中提取切削瞬时岩石网格的三向主应力, 得到各个网格的受力状

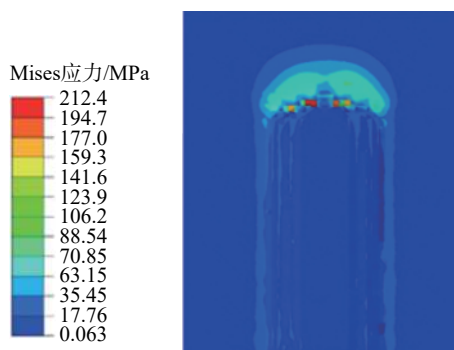


图4 三棱齿中岩石 Mises 应力云图

Fig. 4 Cloud map of Mises stress on rocks cut by a triangular prismatic cutter

态。岩石单元的应力提取位置如图5所示,以切削齿工作面前即将发生等效塑性应变岩石网格为第一排,间隔提取3排岩石网格的主应力数值。图5中1、2号网格为切削齿工作面上靠近切削齿中心处岩石,5、6号网格为靠近切削齿齿刃处岩石。

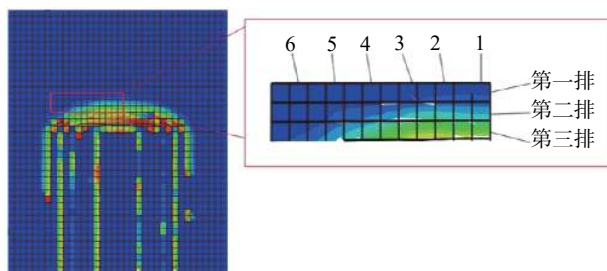


图5 岩石单元的应力提取位置示意

Fig.5 Stress extraction location of rock element

通过提取得到的主应力数据,计算得出每处网格洛德角 θ_σ 大小。岩石力学中的洛德角,可以反映岩石的受力状态形式,即3个主应力分量之间的比例关系,因此通过计算每个岩石网格的洛德角,能够得到切削齿切削破碎岩石时切削齿工作前端区域的岩石受力状态,进而分析三棱齿与常规平面齿破岩时的差异。

根据岩土弹塑性力学,洛德角的计算公式为^[13]:

$$\tan \theta_\sigma = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad -30^\circ \leq \theta_\sigma \leq 30^\circ \quad (1)$$

式中: θ_σ 为洛德角, ($^\circ$); σ_1 , σ_2 和 σ_3 分别为第一主应力、第二主应力和第三主应力, MPa。

$\theta_\sigma = -30^\circ$ 时,表示岩石单纯受拉; $\theta_\sigma = 0^\circ$ 时,表示岩石单纯受剪; $\theta_\sigma = 30^\circ$ 时,表示岩石单纯受压; $-30^\circ \leq \theta_\sigma \leq 0^\circ$ 时,表示岩石为拉伸剪切受力状态; $0^\circ \leq \theta_\sigma \leq 30^\circ$ 时,表示岩石为压缩剪切受力状态。

同样,提取三棱齿和常规平面齿的三向主应力,计算得到洛德角的变化情况(见图6和图7)。从图6

和图7可以看出,2种切削齿的第一排网格为将要出现塑性变形的网格,其 θ_σ 均较大,岩石表现为明显受压状态,说明与切削齿工作面接触的岩石主要受到压缩和压剪作用开始产生塑性变形。

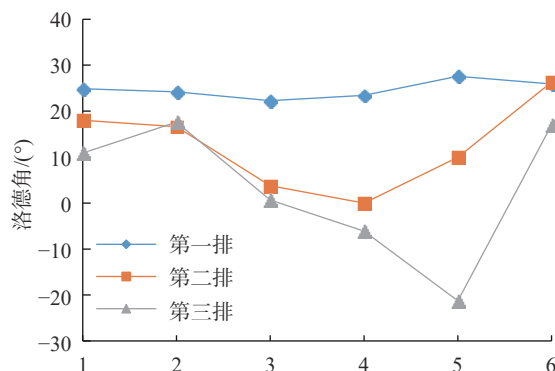


图6 常规平面齿洛德角变化规律

Fig.6 Change rule of Lode angle of a conventional planar cutter

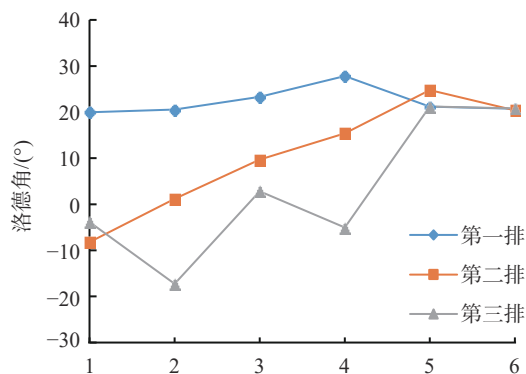


图7 三棱齿洛德角变化规律

Fig.7 Change rule of Lode angle of a triangular prismatic cutter

常规平面齿与三棱齿的第二排和第三排网格的受力状态存在明显差异,图6的3—5号网格 θ_σ 偏小;图7的1—3号网格 θ_σ 偏小。这说明岩石进入塑性变形阶段后,与常规平面齿的边沿齿刃附近接触的岩石出现明显剪切和拉伸受力状态,靠近齿中心处岩石仍主要表现为压缩受力状态;而三棱齿在靠近齿中心区域的岩石出现明显的剪切和拉剪受力状态。以上研究表明,常规平面齿边沿的齿刃使岩石产生明显的剪切作用;三棱齿的脊形结构使靠近齿中心处岩石产生明显的剪切和拉剪作用,进而使岩石进入拉剪受力状态的区域增大。

从图3和图4的数值模拟结果中提取切削齿的切向力,得到切向力随时间变化的规律(见图8)。从图8可以看出,三棱齿的切向力波动幅度明显小于常规平面齿。同时,根据切向力均值,计算得到

相同吃入深度、不同角度下切削齿破碎比功(见图 9 和图 10)。从图 9 和图 10 可以看出,前倾角较大时,三棱齿的破碎比功低于常规平面齿;存在一定侧转角时,三棱齿的破碎比功也低于常规平面齿。

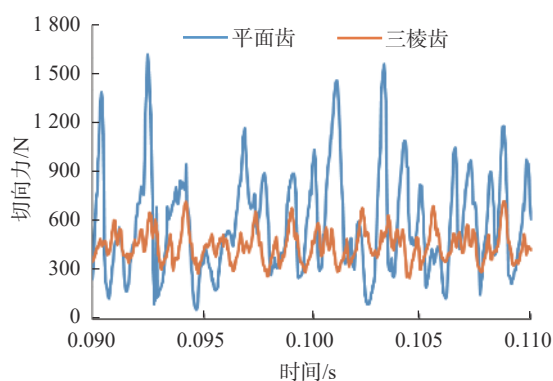


图 8 切向力随时间变化的规律

Fig.8 Change rule of tangential force with time

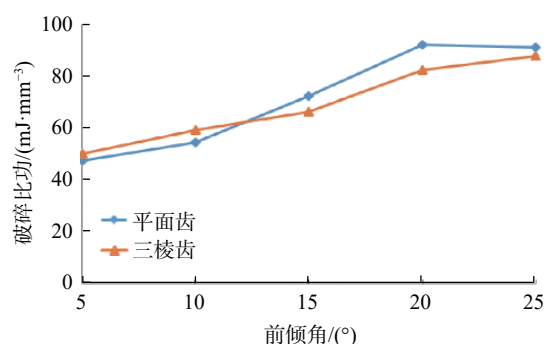


图 9 破碎比功随前倾角变化的规律

Fig.9 Change rule of the crushing work ratio with the rake angle

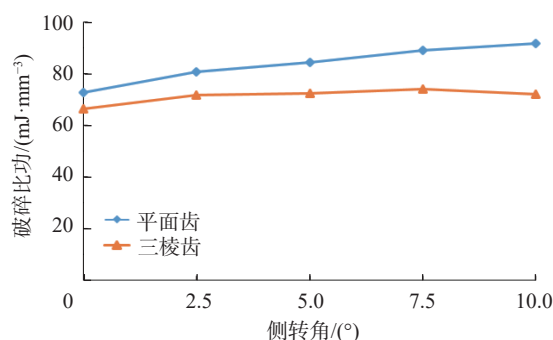


图 10 破碎比功随侧转角变化规律

Fig.10 Change rule of the crushing work ratio with the side rake angle

2 刮切试验研究

为了验证数值模拟结果的可靠性,同时了解三棱齿的破岩过程,采用牛头刨床试验机进行单齿直

线刮切试验。试验条件与直线切削数值模拟的条件一致,切削齿直径均为 15.9 mm,岩石选用表面平整的 300 mm×250 mm×250 mm 武胜砂岩。切削齿与齿座钎焊固定后安装在刨床刀柄上,并预设不同的切削齿角度、切削深度,采用牛头刨床为刀柄提供直线运动的动力,实现切削齿直线破碎岩石。

试验时进行 3 次重复刮切,计算单次刮切的切向力平均值,选择最接近 3 次刮切总切向力平均值的试验数据,通过数据采集系统,得到前倾角 15°、切削深度 1.5 mm 时常规平面齿与三棱齿切向力的变化情况(见图 11,图中虚线为切向力均值)。

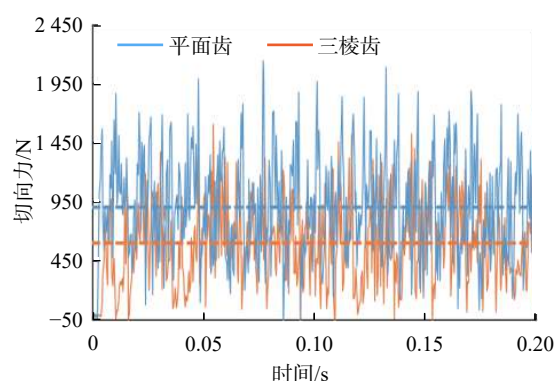


图 11 三棱齿与常规平面齿切向力对比

Fig.11 Comparison of tangential force between triangular prismatic cutter and planar cutter

从图 11 可以看出,在同一切削参数下,常规平面齿的切向力均值大于三棱齿。切削全过程切向力变化的标准差计算结果表明,三棱齿切向力标准差为 349.09 N,常规平面齿切向力标准差为 439.53 N,在相同条件下,三棱齿切削破碎砂岩所需的切向力及切向力波动幅度均小于常规平面齿,即三棱齿破碎岩石时受到的振动冲击小;且随着前倾角和侧转角增大,三棱齿的切向力及其波动幅度均有所增大。

对比试验结果与数值模拟结果发现,数值模拟结果与试验结果的误差率均小于 15%,验证了数值模拟结果的可靠性。试验结果和数值模拟结果表明,三棱齿在切削岩石的过程中受到的切削力和切削力波动幅度均小于常规平面齿,可以推测三棱齿在实际施工条件下比常规平面齿的工作寿命更长。

3 三棱齿 PDC 钻头现场试验

为验证数值模拟和室内试验的结论,在辽河油

田进行了现场试验。辽河油区地层环境复杂,地层可钻性差,尤其是中生界以灰色厚层块状花岗质角砾岩为主,棱角状砾石含量一般大于50%,砾石成分以花岗质岩块为主,矿物为单颗粒石英、碱性长石和斜长石,岩性致密,研磨性高,冲击性强,极大地威胁切削齿和钻头的工作效率和寿命。

综合考虑三棱齿的耐磨抗冲性、拉剪破岩作用和切削力波动幅度较小的特点,在该地区某井进行了常规PDC钻头和三棱齿钻头同井对比试验。首先采用常规PDC钻头钻进,钻进井段3 839~4 057 m;随后钻头从角砾岩地层进入潜山混合花岗岩地层,地层的研磨性和冲击性增强,机械钻速降低,无法继续钻进,于是采用三棱齿钻头钻进,三棱齿钻头能够正常钻进,最终完成4 057~4 235 m井段的钻进,平均机械钻速5.93 m/h。

由试验结果可以看出,三棱齿钻头的工作地层主要是混合花岗岩地层,环境更加复杂与恶劣,但仍然能保证较大的进尺和较快的机械钻速,而常规PDC钻头在该地层无法顺利钻进,说明三棱齿比常规平面齿更加适用于钻进冲击大、研磨性强的混合花岗岩地层。三棱齿钻头出井后,三棱齿大多为正常的磨损失效,未出现明显的冲击破坏,说明三棱齿在花岗岩中表现出较强的抗冲击性能,这与数值模拟和室内试验的结论相符合,也表明三棱齿能够延长钻头的使用寿命。

4 结论与建议

1)三棱齿工作表面特有的脊形结构,使其主要通过脊形结构产生点载荷和拉剪作用破坏岩石,能够减小切削齿受到的冲击,从而提高钻头的抗冲击能力,延长钻头的使用寿命,提高破岩效率。

2)三棱齿刮切破岩时的切向力及切向力波动幅度更小,对降低钻头破碎脆硬性岩石时的振动非常有利,同时可降低钻头的黏滑现象,提高钻头造斜能力。

3)现场试验表明,三棱齿布置于刀翼鼻部和肩部的PDC钻头,在冲击性强的混合花岗岩中仍具有较高的机械钻速,即三棱齿适用于钻进冲击性强、研磨性高的地层。

4)影响切削齿切削效果的实际因素较多,如温度、吃入岩石深度等都会对三棱齿的破岩机理和效率造成影响,建议今后应继续结合上述因素进行深入研究。

参考文献

References

- [1] 彭齐,周英操,周波,等.凸脊型非平面齿PDC钻头的研制与现场试验[J].石油钻探技术,2020,48(2):49-55.
PENG Qi, ZHOU Yingcao, ZHOU Bo, et al. Development and field test of a non-planar cutter PDC bit with convex ridges[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2020, 48(2): 49-55.
- [2] 汪为涛.非均质地层锥形辅助切削齿PDC钻头设计与试验[J].石油钻探技术,2018,46(2):58-62.
WANG Weitao. Design and test of a new PDC bit with tapered auxiliary cutter for heterogeneous formations[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2018, 46(2): 58-62.
- [3] HEMPTON R, COPELAND C, COX G, et al. Innovative conical diamond element bits drill back-to-back tight curves in one run, improving economics while reducing risk in Avalon shale play, New Mexico[R]. SPE 175534, 2015.
- [4] GERMAN V, PAK M, AZAR M, et al. Conical diamond element bit sets new performance benchmarks drilling extremely hard carbonate/Chert Formations, Perm Region Russia[R]. SPE 173144, 2015.
- [5] 胡思成,管志川,路保平,等.锥形齿旋冲及扭冲的破岩过程与破岩效率分析[J].石油钻探技术,2021,49(3):87-93.
HU Sicheng, GUAN Zhichuan, LU Baoping, et al. Rock breaking process and efficiency analysis of conical cutting teeth under rotary and torsional impact[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(3): 87-93.
- [6] 王春华.非平面齿钻头在大庆徐深区块营城组的应用[J].西部探矿工程,2019,31(10):98-99,102.
WANG Chunhua. Application of non planar tooth bit in Yingcheng Formation of Xushen Block in Daqing[J]. West-China Exploration Engineering, 2019, 31(10): 98-99,102.
- [7] AZAR M, WHITE A, VELVALURI S, et al. Middle East hard/abrasive formation challenge: reducing PDC cutter volume at bit center increases ROP/drilling efficiency[R]. SPE 166755, 2013.
- [8] AZAR M, WHITE A, SEGAL S, et al. Pointing towards improved PDC bit performance: innovative conical shaped polycrystalline diamond element achieves higher ROP and total footage[R]. SPE 163521, 2013.
- [9] CRANE D, ZHANG Y H, 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.
- [10] 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 surfaces for oil drilling[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2017, 37(6): 49-52.
- [11] 谢晗,况雨春,秦超.非平面PDC切削齿破岩有限元仿真及试验[J].石油钻探技术,2019,47(5):69-73.
XIE Han, KUANG Yuchun, QIN Chao. The finite element simulation and test of rock breaking by non-planar PDC cutting cutter[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2019, 47(5): 69-73.
- [12] 徐根,陈枫,马春德,等.PDC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 PCD's Young's modulus and Poisson's ratio[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(2): 63-65.
- [13] 郑颖人,孔亮.岩土弹塑性力学[M].北京:中国建筑工业出版社,2010:22-26.
ZHENG Yingren, KONG Liang. Geotechnical plastic mechanics[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010: 22-26.