

◀ 钻井完井 ▶

doi:10.11911/syztjs.2022026

引用格式: 陈炼, 宋朝晖, 王新东, 等. 单牙轮钻头楔形牙齿偏转角优化方法 [J]. 石油钻探技术, 2023, 51(1): 57-61.

CHEN Lian, SONG Zhaohui, WANG Xindong, et al. Optimization methodology for tooth deflection angles of single-cone bit with wedge-shaped teeth [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(1): 57-61.

单牙轮钻头楔形牙齿偏转角优化方法

陈 炼^{1,2}, 宋朝晖³, 王新东³, 张武涛³, 谢正森³, 粟籽华¹

(1. 西南石油大学机电工程学院, 四川成都 610500; 2. 西南石油大学博士后科研流动站, 四川成都 610500; 3. 中国石油集团西部钻探工程有限公司工程技术研究院, 新疆乌鲁木齐 830046)

摘 要: 为了解牙齿偏转角对单牙轮钻头破岩效率的影响, 获得最优的牙齿偏转角, 结合单牙轮钻头的运动特性和牙齿的工作特点, 采用数值分析方法进行了楔形牙齿刮切破岩模拟, 并建立了单牙轮钻头楔形牙齿偏转角优化方法, 同时开展了不同楔形牙齿偏转角单牙轮钻头的破岩试验。数值分析表明: 刮切破岩过程中, 单牙轮钻头楔形牙齿的工作面和刮切体积在不断变化; 楔形牙齿偏转角优化方法能准确、快速地计算楔形牙齿刮切体积, 找出最优的偏转角; 优化计算发现楔形牙齿的最优偏转角都在 90° 附近。破岩试验结果验证了楔形牙齿偏转角优化方法的可行性和计算结果的准确性。研究表明, 利用单牙轮楔形牙齿偏转角优化方法, 可以求得单牙轮钻头楔形牙齿的最优偏转角, 可以为单牙轮钻头布置楔形牙齿提供指导。

关键词: 单牙轮钻头; 牙齿偏转角; 优化; 破岩效率; 数值分析方法; 实验室试验

中图分类号: TE921⁺.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2023)01-0057-05

Optimization Methodology for Tooth Deflection Angles of Single-Cone Bit with Wedge-Shaped Teeth

CHEN Lian^{1,2}, SONG Zhaohui³, WANG Xindong³, ZHANG Wutao³, XIE Zhengsen³, SU Zihua¹

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610500, China; 2. Postdoctoral Research Mobile Station of Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610500, China; 3. Engineering Technology Research Institute, CNPC Xibu Drilling Engineering Company, Limited, Urumqi, Xinjiang, 830046, China)

Abstract: To investigate the influence of tooth deflection angles on the rock-cutting efficiency of single-cone bits and obtain the optimal tooth deflection angle as well, rock scraping of wedge-shaped teeth was simulated by a numerical analysis method according to the motion characteristics of single-cone bits and the working performance of the teeth. An optimization methodology for the tooth deflection angles of single-cone bits with wedge-shaped teeth was developed, and rock-cutting tests were carried out on single-cone bits with different tooth deflection angles. The numerical analysis results showed that the working face and scraping volume of the wedge-shaped teeth of the single-cone bits kept changing during scraping rock. The proposed optimization methodology for tooth deflection angles could calculate the scraping volume of the wedge-shaped teeth and obtained the optimal tooth deflection angles accurately and rapidly. The optimizing calculation revealed that the optimal tooth deflection angles were all around 90°. The rock-cutting test results verified the feasibility of the proposed optimization methodology for tooth deflection angles and the accuracy of its calculation results. The research results demonstrated that the proposed optimization methodology for tooth deflection angles of single-cone bit with wedge-shaped teeth can be applied to obtain the optimal tooth deflection angles of the wedge-shaped teeth and direct their distribution on single-cone bits.

Key words: single-cone bit; tooth deflection angle; optimization; rock-cutting efficiency; numerical analysis method; laboratory test

收稿日期: 2021-12-25; 改回日期: 2022-11-08。

作者简介: 陈炼 (1981—), 男, 湖北大冶人, 2003 年毕业于武汉科技大学机械设计及自动化专业, 2009 年获西南石油大学机械电子工程专业硕士学位, 2019 年获西南交通大学机械设计及理论专业博士学位, 副研究员, 硕士生导师, 主要研究方向为钻井岩石破碎学、钻头与提速工具。E-mail: chenlian8121@sina.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目“动静复合单牙轮钻头破岩机理及设计理论研究”(编号: 51304168)和中国博士后科学基金(编号: 2021M693909)联合资助。

单牙轮钻头是油气钻井的主要破岩工具之一,特别是在深部井段的小井眼钻进中发挥着重要的作用^[1-2]。钻头的使用寿命和机械钻速是钻井作业中人们最为关心的2个指标,而钻头的破岩效率决定机械钻速^[3-6]。为了提高单牙轮钻头的破岩效率,研究人员开展了大量研究工作^[7-8],发现单牙轮钻头的结构^[9-14]、齿型^[15-17]、布齿方式^[18]等对钻头破岩效率均有直接影响。单牙轮钻头主要以刮切方式破岩,单牙轮钻头多采用楔形牙齿,楔形牙齿在牙轮上的偏转角直接影响牙齿的刮切面积^[15]和刮切体积,从而影响钻头的井底覆盖率、破岩效率和机械钻速。因此,优化牙齿偏转角对提高单牙轮钻头的破岩效率有重要意义。为此,笔者采用数值分析方法建立了牙齿刮切体积计算模型,形成了单牙轮钻头楔形牙齿偏转角优化方法,并通过不同偏转角楔形牙齿单牙轮钻头的破岩试验验证了该方法的准确性,以期单牙轮钻头布齿提供依据。

1 单牙轮钻头的运动形式及工作原理

单牙轮钻头的轮头速比一般都小于1^[19-21]。钻头在井底工作时,既有钻头体绕钻头轴线的转动和沿轴线的进给运动,也有牙轮绕自身轴线的自转运动,牙齿的运动是这3种运动的合成,在钻头体的旋转带动下牙轮的自转速度较慢,牙齿压入(切入)岩石后在井底滑移刮切一段距离再切出井底^[22]。单牙轮钻头主要通过牙齿的刮切来破碎岩石,牙轮上不同位置的牙齿在井底划出一条条相互交错的网状破碎带^[12],牙齿在井底刮切的体积决定了钻头的破岩效率。每个自转周期内,牙轮上的每颗牙齿在井底刮切的距离一般是一定的,因此,牙齿的齿型、大小、牙齿的偏转角和吃入深度将决定其刮切体积。在牙齿的齿型、大小确定,钻头进给量一定时,选择合适的偏转角能增大牙齿刮切体积,从而提高钻头的破岩效率。

2 单牙轮钻头的牙齿工作面

单牙轮钻头在井底工作时,牙轮上的触底齿相对井底岩石有较长滑移刮切距离的同时,还有空间转动^[19-20]。图1所示为牙轮上某颗牙齿从切入到切出岩石过程中,牙齿在井底刮切时各个瞬间的位置。为便于观察,图1采用了非对称几何形状的半圆柱齿。从图1可以看出,刮切过程中,牙齿的运动

方向、牙齿与岩石的接触面(曲面)均在不断变化。因此,对于楔形牙齿,其在井底的刮切宽度也将不断变化。

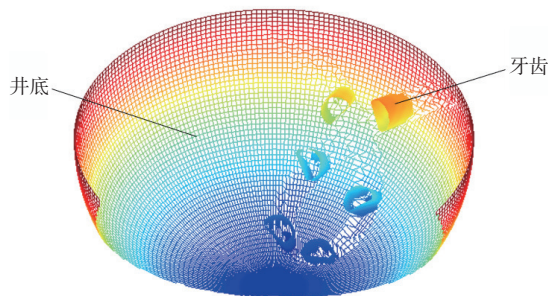


图1 牙齿刮切过程

Fig.1 Tooth scraping process

图2所示为钻头在一定进给量下,牙轮上某颗牙齿(楔形牙齿)在井底刮切后留下的刮痕。由图2可知,钻头进给量虽不变,但刮切过程中牙齿的刮切深度和宽度都在不断变化。

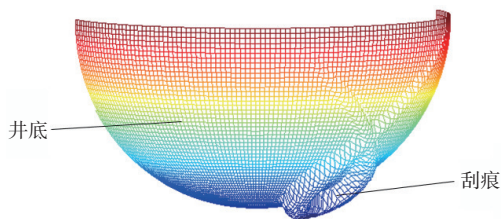


图2 牙齿刮切痕迹

Fig.2 Tooth scraping marks

由上述分析可知,单牙轮钻头的牙齿在井底刮切破岩过程中,其工作面(与岩石的接触曲面)是不断变化的(包括接触方位和吃入深度)。因此,牙齿的刮切体积也在不断变化。无论是楔形牙齿还是锥形牙齿或球形牙齿,刮切体积都会不断变化。

3 牙齿偏转角优化方法

牙齿偏转角主要针对楔形牙齿而言。单牙轮钻头的牙轮上存在牙齿始终与井底接触的永远接触区,牙齿间断性地进入井底刮切岩石的轮换接触区和永不接触区^[21-23]。永不接触区域不起造底作用,该区域上的牙齿在此不作讨论。为增加刮切面积,提高破岩效率,并使牙齿易于吃入地层,单牙轮钻头一般选用楔形牙齿;为增加耐磨性,牙尖永远接触区也会采用球头牙齿。牙齿的齿顶线与由牙轮轴线和该齿齿根中心所确定平面之间的夹角 α 即为牙齿的偏转角,如图3所示。

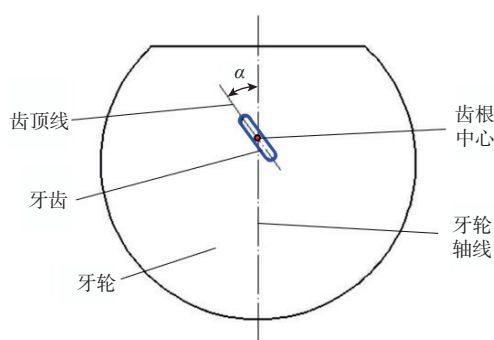


图 3 楔形牙齿的偏转角

Fig.3 Deflection angle of wedge-shaped tooth

为提高破岩效率,人们总希望牙齿刮切岩石时齿顶线与牙齿运动方向垂直,以使刮切面积最大,从而增大刮切破岩体积。这对单牙轮钻头来说是无法做到的,因为单牙轮钻头的牙齿刮切岩石时其工作面不断变化,无法保持齿顶线始终与刮切方向垂直。但总可以找到一个最佳的偏转角 α ,使牙齿刮切岩石时的刮切体积最大。

3.1 基本假设

为便于计算和可实施,优化计算过程中做以下基本假设:1)轮头速比恒定,取定值(常数);2)牙齿刮切岩石只有塑性破碎,无侧崩。

3.2 偏转角优化方法

合适的牙齿偏转角能明显增大牙齿刮切体积,提高破岩效率和机械钻速。单牙轮钻头的牙轮为一回旋体,牙轮体同一纬度上牙齿的运动状态和刮痕形状相同,只是相位不同。因此,纬度相同的牙齿其偏转角相同;不同纬度上牙齿的运动形式和刮切痕迹不同,其最优偏转角也会不同。

由于单牙轮钻头牙齿运动的复杂性,采用常规几何图解法或解析法均难以计算牙齿的刮切体积。因此,笔者采用数值分析方法进行计算。

1)将牙齿和井底均数字化,分别用有限个离散点来代替,如图 1 所示。离散后的井底由离散点之间围成的微元(网格面)组成,每一微元的面积为 S_i 。

2)在给定的钻头进给量下,用离散后的牙齿刮切离散后的井底,被牙齿刮切后的井底由新的离散点(坐标)代替,形成井底刮痕。

3)计算刮切体积。将刮痕内新的离散点与对应的原井底离散点作对比,计算两点距离,即刮切深度 h_i ,则微元刮切体积为 $V_i=S_i h_i$;那么,钻头旋转时牙轮自转一周(即一个刮切轮回),牙齿刮切总体积为:

$$V_j = \sum_{i=1}^n V_i = \sum_{i=1}^n S_i h_i \quad (1)$$

式中: V_j 为牙齿刮切总体积, mm^3 ; V_i 为微元刮切体积, mm^3 ; n 为刮痕内离散点数量; S_i 为每一微元的面积, mm^2 ; h_i 为刮切深度, mm 。

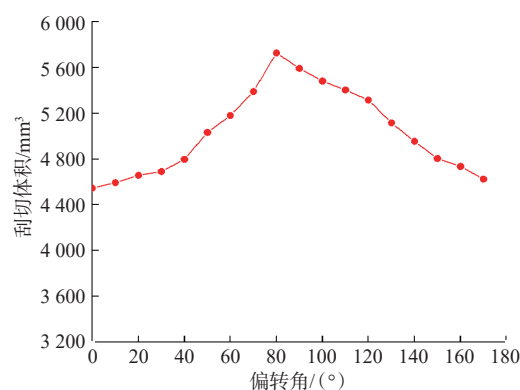
保持钻头进给量不变,改变牙齿的偏转角,分别重新计算不同偏转角下的刮切体积,对比不同偏转角下的 V_j ,找出其中的最大值,则最大值对应的偏转角即为牙齿最优偏转角。

为方便使用,根据上述计算原理,编制了单牙轮钻头楔形牙齿偏转角优化计算程序。

4 优化算例

笔者利用牙齿偏转角优化程序优化了 $\phi 117.5 \text{ mm}$ 单牙轮钻头牙齿的偏转角。 $\phi 117.5 \text{ mm}$ 单牙轮钻头的外径为 117.5 mm ,牙轮轴倾角 β 为 40° ,5 圈齿分别分布在牙轮体不同纬度位置上,牙齿均为 $\phi 12.0 \text{ mm}$ 的楔形牙齿,各齿圈至牙轮底平面距离分别为 $90.42, 76.71, 59.88, 38.45$ 和 17.29 mm 。由于楔形牙齿为对称齿型,偏转角为 α 和偏转角为 $\alpha+180^\circ$ 的效果相同,因此只需将 0° 至 180° 范围内的偏转角作计算对比即可。为减小计算量,可先取较大的偏转角增量,粗略找出较佳的偏转角,然后缩小偏转角增量和角度计算范围,再找出最优偏转角。

轮头速比为 0.73 ,钻头进给量为 5.0 mm ,计算该钻头第 3 齿圈的某齿偏转角为 $0^\circ, 10^\circ, \dots, 170^\circ$ (偏转角增大步长为 10°) 时,其在一个刮切轮回内的刮切体积,结果见图 4。从图 4 可以看出:该齿刮切体积先随偏转角增大而增大,后随偏转角增大而减小;在偏转角为 80° 时,该齿的刮切体积达到最大,为 5728.8 mm^3 。

图 4 不同偏转角楔形牙齿的刮切体积 (偏转角步长 10°)Fig.4 Scraping volume of wedge-shaped teeth with different deflection angles (with a deflection angle step of 10°)

将偏转角增大步长缩小至 1° , 计算该钻头第 3 齿圈的某齿偏转角为 $70^\circ, 71^\circ, \dots, 89^\circ$ 时, 其在一个刮切轮回内的刮切体积, 结果见图 5。由图 5 可知, 偏转角为 81° 时, 该齿的刮切体积最大, 为 $5\,749.3\text{ mm}^3$, 则该钻头第 3 齿圈牙齿的最优偏转角为 81° 。

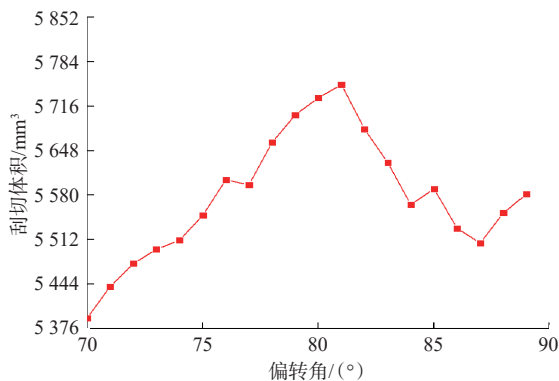


图 5 不同偏转角楔形牙齿的刮切体积 (偏转角步长 1°)
Fig.5 Scraping volume of wedge-shaped teeth with different deflection angles(with a deflection angle step of 1°)

同理, 计算出该钻头第 1 齿圈、第 2 齿圈、第 4 齿圈和第 5 齿圈牙齿的最佳偏转角分别为 $101^\circ, 88^\circ, 97^\circ$ 和 100° 。

改变钻头的几何参数, 利用优化程序优化若干不同参数 (如轴倾角不同) 单牙轮钻头牙齿的偏转角, 发现牙齿的最优偏转角都在 $79^\circ \sim 103^\circ$, 即 90° 附近。

5 试验验证

为检验单牙轮钻头楔形牙齿偏转角优化方法, 研制了不同楔形牙齿偏转角的单牙轮钻头破岩试验装置, 进行不同牙齿偏转角单牙轮钻头破岩试验。笔者选用 3 只 $\phi 152.4\text{ mm}$ 单牙轮钻头进行破岩试验, 1 只是牙齿偏转角为 0° 的常规单牙轮钻头, 另 2 只的牙齿偏转角分别为 45° 和 90° , 但布齿密度相同。试验用岩石选用灰岩, 其基本力学参数: 单轴抗压强度 67.55 MPa , 抗剪强度 13.56 MPa , 内摩擦角 38.03° , 硬度 $1\,013.4\text{ MPa}$ 。单牙轮钻头钻进灰岩时的转速为 30 r/min 。3 只单牙轮钻头钻进灰岩时的机械钻速与钻压的关系如图 6 所示。由图 6 可知: 3 只单牙轮钻头的机械钻速均随钻压增大呈近似线性增加; 机械钻速随牙齿偏转角增大而升高, 牙齿偏转角为 90° 时的机械钻速最高, 比偏转角为 45° 时高约 6%, 比偏转角为 0° 时高约 15%。

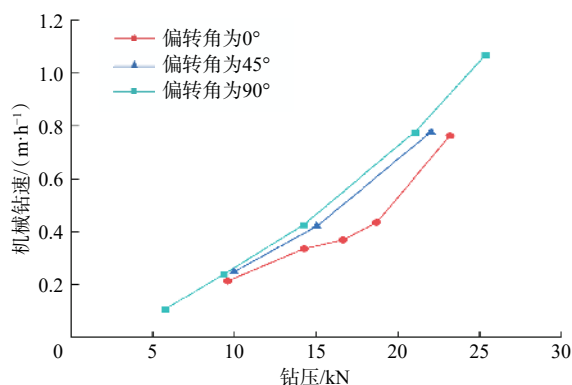


图 6 不同牙齿偏转角单牙轮钻头机械钻速与钻压的关系
Fig.6 Relationship between rate of penetration and weight-on-bit of single-cone bits with different tooth deflection angles

室内破岩试验结果与理论计算结果趋势相同, 验证了优化方法的可行性和优化结果的准确性。优化结果和试验结果表明, 0° 偏转角并不是最优的布齿角度, 牙齿最优的偏转角在 90° 左右, 该偏转角下单牙轮钻头的破岩效率最高。

6 结 论

1) 结合单牙轮钻头的运动特性和牙齿的工作特点, 采用数值分析方法展现了单牙轮钻头牙齿刮切井底的接触破岩过程, 楔形牙齿工作面是不断变化的 (包括接触方位和刮切深度的变化), 牙齿的刮切体积也在不断变化。

2) 单牙轮钻头的楔形牙齿存在最优的偏转角, 使牙齿刮切岩石时的总刮切体积最大。通过数值分析发现单牙轮钻头楔形牙齿的最佳偏转角在 $79^\circ \sim 103^\circ$, 即 90° 附近。不同牙齿偏转角单牙轮钻头的破岩试验验证了优化结果的准确性, 90° 偏转角单牙轮钻头的破岩效率明显比 0° 偏转角单牙轮钻头高。

3) 建立了一种单牙轮钻头楔形牙齿偏转角优化方法, 并通过破岩试验进行了验证, 该方法具有一定的合理性和可行性, 能为单牙轮钻头楔形牙齿分布优化提供参考, 对提高单牙轮钻头的破岩效率有明显的现实意义。

参 考 文 献

References

- [1] 吴修国, 何启贤, 范志勇, 等. $\phi 118\text{ mm}$ 单牙轮钻头在中原油田的应用[J]. 石油钻采工艺, 2000, 22(6): 31-34.
WU Xiuguo, HE Qixian, FAN Zhiyong, et al. The application of $\phi 118\text{ mm}$ zublin bit in Zhongyuan Oilfield[J]. Oil Drilling & Pro-

- duction Technology, 2000, 22(6): 31–34.
- [2] 余志清, 张进双. 单牙轮钻头的发展前景研究 [J]. 断块油气田, 1998, 5(6): 48–51.
- YU Zhiqing, ZHANG Jinshuang. A bright prospect in mono cone bit[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 1998, 5(6): 48–51.
- [3] 吴泽兵, 席凯凯, 赵海超, 等. 仿生 PDC 齿旋转破岩时的温度场和破岩特性模拟研究 [J]. 石油钻探技术, 2022, 50(2): 71–77.
- WU Zebing, XI Kaikai, ZHAO Haichao, et al. Simulation study on temperature field and rock breaking characteristics of the bionic PDC cutter in rotating state[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(2): 71–77.
- [4] 邹德永, 陈雅辉, 赵方圆, 等. 斧形 PDC 齿破岩规律数值模拟研究 [J]. 特种油气藏, 2021, 28(6): 137–143.
- ZOU Deyong, CHEN Yahui, ZHAO Fangyuan, et al. Study on rock breaking rules of axe-shaped PDC cutter with numerical simulation[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2021, 28(6): 137–143.
- [5] 吴泽兵, 席凯凯, 王杰, 等. 可伸缩式 PDC-孕镶金刚石耦合仿生智能钻头的破岩仿真 [J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(4): 474–482.
- WU Zebing, XI Kaikai, WANG Jie, et al. Rock breaking simulation of flexible PDC-impregnated diamond coupling bionic intelligent bit[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2021, 43(4): 474–482.
- [6] 胡思成, 管志川, 路保平, 等. 锥形齿旋转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.
- [7] 杨迎新, 张文卫, 李斌, 等. 牙齿破岩效率的评价及牙齿优选探讨 [J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(1): 110–113.
- YANG Yingxin, ZHANG Wenwei, LI Bin, et al. Effect evaluation on insert penetration to rock and optimization of insert shape[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(1): 110–113.
- [8] 杨迎新, 况雨春, 陈炼, 等. 油气钻井破岩技术新进展及发展方向 [C]//第十届石油钻井院所长会议论文集编委会. 第十届石油钻井院所长会议论文集. 北京: 石油工业出版社, 2010: 154–160.
- YANG Yingxin, KUANG Yuchun, CHEN Lian, et al. New progress and development direction of rock breaking technology in oil and gas drilling [C]//Editorial committee of the 10th conference of directors of petroleum drilling institute. Proceedings of the 10th meeting of directors of petroleum drilling institute. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010: 154 – 160.
- [9] 邓嵘, 侯凯, 李孟华, 等. 混合式单牙轮钻头破岩性能研究 [J]. 工程设计学报, 2018, 25(3): 262–269.
- DENG Rong, HOU Kai, LI Menghua, et al. Research on rock breaking performance of hybrid single cone bit[J]. Journal of Engineering Design, 2018, 25(3): 262–269.
- [10] 安美. 异形单牙轮钻头牙齿载荷数值模拟与实验验证 [D]. 成都: 西南石油大学, 2015.
- AN Mei. Numerical simulation and experimental verification of tooth load of special-shaped single cone bit[D]. Chengdu: Southwest Petroleum University, 2015.
- [11] LIU Qingyou, HU Qin. A new slimhole drill bit[R]. SPE 102380, 2006.
- [12] HU Qin, LIU Qingyou. A new disc one-cone bit[R]. SPE 102381, 2006.
- [13] 邓嵘, 敖建章, 杨松, 等. 异形单牙轮钻头破岩仿真及齿形选择 [J]. 石油机械, 2014, 42(12): 11–16.
- DENG Rong, AO Jianzhang, YANG Song, et al. Rock breaking simulation and tooth shape selection of special-shaped single cone bit[J]. China Petroleum Machinery, 2014, 42(12): 11–16.
- [14] CHEN Yinghua. Experimental study of rock-breaking with an off-set single cone bit[J]. Petroleum Science, 2008, 5(2): 179–182.
- [15] 邓嵘, 杨世良, 喻开安. 单牙轮钻头齿面结构设计探讨 [J]. 石油机械, 1994, 22(6): 1–6.
- DENG Rong, YANG Shiliang, YU Kaian. Design of cutting structure of mono-cone roller bit[J]. China Petroleum Machinery, 1994, 22(6): 1–6.
- [16] 赵彦, 张福润, 郭炜. 影响单牙轮钻头切削效率的原因分析 [J]. 西南石油学院学报, 2003, 25(2): 69–71.
- ZHAO Yan, ZHANG Furun, GUO Wei. Analysis of the causes affecting the cutting efficiency of single cone bit[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2003, 25(2): 69–71.
- [17] 贾相健. 单牙轮钻头齿形研究 [D]. 大庆: 东北石油大学, 2018.
- JIA Xiangjian. Research on tooth of single cone bit[D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2018.
- [18] 喻开安, 邓嵘, 杨世良. 单牙轮钻头布齿方案的综合评价 [J]. 石油机械, 1995, 23(11): 13–18.
- YU Kaian, DENG Rong, YANG Shiliang. Comprehensive evaluation of teeth arrangement of mono-cone bit[J]. China Petroleum Machinery, 1995, 23(11): 13–18.
- [19] 邓嵘, 杨世良, 喻开安. 单牙轮钻头研究 [J]. 西南石油学院学报, 1995, 17(1): 96–100.
- DENG Rong, YANG Shiliang, YU Kaian. Study of single spherical roller bit[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 1995, 17(1): 96–100.
- [20] 喻开安, 邓嵘, 杨世良. 单牙轮钻头传动比测试与分析 [J]. 石油机械, 1995, 23(6): 14–17.
- YU Kaian, DENG Rong, YANG Shiliang. Test and analysis of transmission ratio of mono-cone bit[J]. China Petroleum Machinery, 1995, 23(6): 14–17.
- [21] 陈炼. 旋转齿单牙轮 PDC 钻头破岩机理及设计方法研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- CHEN Lian. Study on rock breaking mechanism and design method of rotary tooth single cone PDC bit[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [22] 陈炼, 杨迎新, 林敏, 等. 一种复合式单牙轮钻头: CN102022084A [P]. 2011-04-20.
- CHEN Lian, YANG Yingxin, LIN min, et al. A composite single cone bit: CN102022084A[P]. 2011-04-20.
- [23] 喻开安, 马德坤. 单牙轮钻头布齿面工作分析 [J]. 石油机械, 1995, 23(5): 39–43.
- YU Kaian, MA Dekun. Analysis of working conditions of teeth on mono-cone bits[J]. China Petroleum Machinery, 1995, 23(5): 39–43.