

# 多级金刚石单晶孕镶柱耐磨试验研究

吴海霞<sup>1</sup>, 沈立娜<sup>1</sup>, 李春<sup>1</sup>, 赵义<sup>1</sup>, 张德龙<sup>1</sup>, 于金平<sup>2</sup>

(1. 北京探矿工程研究所, 北京 100083; 2. 中国石油集团工程技术研究院有限公司, 北京 102200)

**摘要:** 本文以金刚石单晶孕镶柱为研究对象, 为了确定不同金刚石参数下孕镶柱的耐磨性能, 设计了多级金刚石单晶孕镶柱的耐磨性对比试验。通过试验初步得到如下结论: 以20/25+35/40+60/70三级目数级配的金刚石孕镶柱磨耗比数值相对较高, 双倒角结构的设计能够将金刚石孕镶柱的耐磨性提高3倍左右。将该孕镶柱作为副齿镶嵌在 $\varnothing 152$  mm和 $\varnothing 215.9$  mm复合片全面钻头上, 分别进行了2支钻头的钻进测试, 得到了钻头钻进效率较快, 磨损极其轻微结论。本文研究的孕镶柱在工程上具有较大应用潜力, 期望为钻探工具材料设计和选择提供参考。

**关键词:** 孕镶柱; 金刚石单晶; 磨耗比; 副齿; 钻头

**中图分类号:** P634.4; TE921 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)02-0111-06

## Experimental study on wear resistance of multi-level diamond single crystal impregnated columns

WU Haixia<sup>1</sup>, SHEN Lina<sup>1</sup>, LI Chun<sup>1</sup>, ZHAO Yi<sup>1</sup>, ZHANG Delong<sup>1</sup>, YU Jinping<sup>2</sup>

(1. Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China; 2. CNPC Engineering Technology R&D Company Limited, Beijing 102200, China)

**Abstract:** This paper focuses on the diamond single crystal impregnated columns. To determine the wear resistance of impregnated column under different diamond parameters, a comparative wear resistance test for multi-level diamond single crystal impregnated pillars is designed. The preliminary conclusion obtained through experiments is that the wear ratio is relatively high when the diamond impregnated columns are graded with three mesh sizes of 20/25+35/40+60/70, and the design of a double chamfer structure can improve the wear resistance of diamond impregnated columns by about three times. The impregnated pillar was used as a secondary tooth inlay in  $\varnothing 152$ mm and  $\varnothing 215.9$ mm compound non-coring bit, and drilling tests were conducted on both bits. Which has a higher drilling efficiency and extremely slight weariness. The impregnated column studied in this article has great potential for engineering applications and is expected to provide reference for the design and selection of drilling tool materials.

**Key words:** impregnated columns; diamond single crystal; wear ratio; secondary teeth; bit

### 0 引言

随着常规油气及非常规油气勘探开发不断向地球深部发展, 钻井难度大、周期长等问题突显。深井、超深井地层复杂, 岩石坚硬、研磨性强, 地层

可钻性差, 导致钻井机械钻速很低。因此, 迫切需要研发更加高效的新型钻头。近年来, 越来越多的研究人员相继开展了新型钻头的研究, 如PDC异型齿钻头、PDC+孕镶复合钻头、混合钻头等<sup>[1-7]</sup>, 均使

收稿日期: 2024-05-08; 修回日期: 2024-12-15 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.02.015

基金项目: 北京探矿工程研究所立项目“高效冲击回转钻头”(编号: SL202303); 中国石油天然气集团有限公司关键核心技术攻关项目“万米超深层油气资源钻探关键技术与装备研究”(编号: 2022ZG06)

第一作者: 吴海霞, 女, 汉族, 1986年生, 高级工程师, 地质工程专业, 硕士, 长期从事金刚石钻头及钻具的优化设计工作, 北京市房山区良乡工业开发区二期创新路1号(102488), whaixia@mail.cgs.gov.cn。

通信作者: 沈立娜, 女, 汉族, 1985年生, 高级工程师, 从事金刚石钻头及钻具的优化设计工作, 北京市房山区良乡工业开发区二期创新路1号(102488), slns@foxmail.com。

引用格式: 吴海霞, 沈立娜, 李春, 等. 多级金刚石单晶孕镶柱耐磨试验研究[J]. 钻探工程, 2025, 52(2): 111-116.

WU Haixia, SHEN Lina, LI Chun, et al. Experimental study on wear resistance of multi-level diamond single crystal impregnated columns[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(2): 111-116.

用了孕镶柱作为钻头切削齿。由于孕镶柱中包含大量金刚石单晶,在针对较硬岩石时凭借其特殊的破岩机理和“自锐性”,在高硬度、强研磨性的难钻进地层中具有独特的优势<sup>[8-9]</sup>。同时,孕镶切削齿通过胎体配方和制造工艺的不断优化,在深部极坚硬地层钻进过程中,配合涡轮钻具使用可实现超长的钻头寿命和较高的机械钻速,这是PDC钻头和牙轮钻头无法相比的,综合效益更加显著<sup>[10-11]</sup>。本文通过烧结多种多级金刚石单晶级配孕镶柱,并在室内测得每组孕镶柱的磨耗比,深入探究金刚石参数对孕镶柱耐磨性能的影响规律。

## 1 实验方法

### 1.1 原料

孕镶柱胎体粉末选用预合金粉末,粉末粒度为1~2 μm,金刚石选用天然金刚石和人造金刚石两种类型,人造金刚石选用黄河旋风HSD90级别,目数从10目到60/70目。

### 1.2 烧结

将预合金粉末与金刚石按设计方案进行配置,采用等静压高强度致密石墨模具,通过RYJ-2000型热压机进行热压烧结成型。烧结温度800℃,保温时间5 min,空气中自然冷却。烧结试样尺寸如图1所示,试样直径 $D$ 为13.4 mm,高度 $H$ 为8 mm,每组设计烧结3块试样。

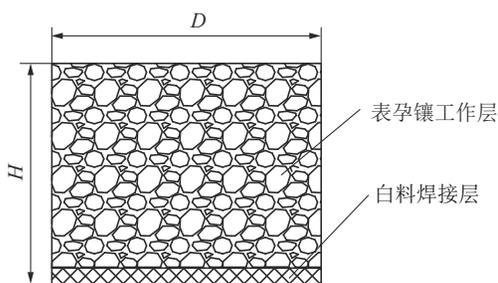


图1 孕镶柱示意

Fig.1 Diagram of the impregnated column

### 1.3 实验数据获取

根据《聚晶金刚石磨耗比测定方法》(JB/T 3235—2013),测量各组设计的试样的磨耗比值。

### 1.4 实验方案设计

使用同一种预合金粉末烧结的孕镶柱,影响其耐磨性的主要因素是金刚石参数,所以据此设计了12组对比实验,如表1所示。

表1 金刚石孕镶柱实验方案设计

组号	表镶目数	孕镶目数	金刚石浓度/%
1	10/12	20/25+35/40+60/70	100
2	10/12	20/25+35/40+60/70	90
3	10/12	20/25+35/40+60/70	80
4	10/12(天然)	20/25+35/40+60/70	90
5	10/12	35/40+60/70	90
6	10/12	20/25+35/40	90
7	10/12	20/25+60/70	90
8	无	20/25(天然)	90
9	无	20/25	90
10	无	35/40	90
11	无	60/70	90
12	10/12	20/25+35/40+60/70	90

注:未说明天然的金金刚石均为人造金刚石,12号为双倒角结构。

## 2 磨耗试验结果与讨论

图2为烧结后的12组孕镶柱试样,除R-12试样为双倒角结构外,其余均为常规圆柱试样,无倒角,通过试验得到各组试样的磨耗比值如表2所示。

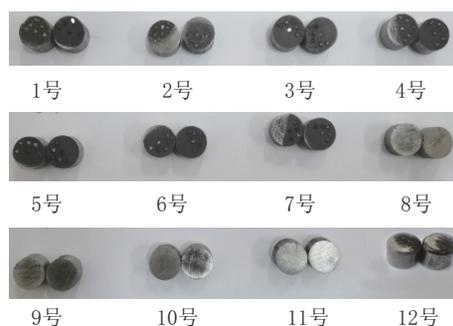


图2 孕镶柱耐磨性测试试样

Fig.2 Test samples of impregnated columns for wear resistance

由表2中可知,12组孕镶柱磨耗比值中有7组数据在10000以上,但和常规复合片的磨耗比20000左右的数值相比仍有较大差距。

### 2.1 金刚石浓度的影响

图3是80%~100%不同孕镶金刚石浓度的孕镶柱磨耗比试验数据柱状图。

观察图3并对比表2中数据可知,金刚石浓度(制品浓度)越高,金刚石孕镶柱耐磨性就越高,这一点与国内多个研究保持一致<sup>[12-15]</sup>。100%浓度的多

表2 孕镶柱磨耗比值统计

Table 2 Statistical data on the wear ratio of impregnated columns

组号	磨耗比值	备注
1	23376.59	1308圆柱
2	15202.60	1308圆柱
3	14887.41	1308圆柱
4	82218.92	1308圆柱
5	8740.30	1308圆柱
6	11153.32	1308圆柱
7	7588.82	1308圆柱
8	4843.94	1308圆柱
9	16802.24	1308圆柱
10	15898.19	1308圆柱
11	1625.76	1308圆柱
12	62750.93	1308双倒角柱

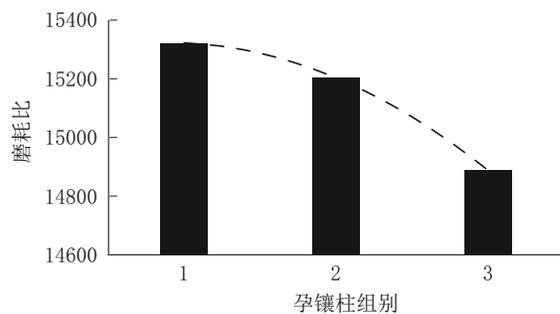


图3 1~3号孕镶柱磨耗比柱状图

Fig.3 Wear ratio of No.1~3 impregnated columns

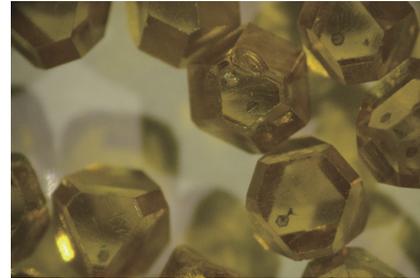
级人造金刚石孕镶柱磨耗比达23376.59。主要是由于金刚石浓度越高,孕镶柱内的硬磨料点越多,孕镶柱整体耐磨性越高。但100%浓度金刚石容易引起孕镶柱抗冲击和抗弯强度的降低,因此后续试样金刚石浓度均选用90%的制品浓度作为基础参考。

## 2.2 金刚石种类的影响

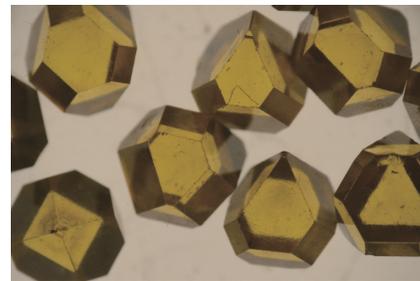
### 2.2.1 表镶金刚石种类的影响

将表2中同样浓度的天然金刚石孕镶柱和人造金刚石孕镶柱磨耗比数据(即2号与4号)进行对比,可以得出,添加10/12目表镶天然金刚石的孕镶柱磨耗比数值是表镶人造金刚石孕镶柱的5.4倍。由此可见,表镶天然大颗粒金刚石对于提高金刚石孕镶柱的耐磨性有十分重要的作用。而人造大颗粒金刚石由于其颗粒较大时内部气泡、杂质含量无法得到有效控制,导致其综合性能不甚理想,如图4所示,10/12目大颗粒人造金刚石内部明显有灰黑

色结核和部分杂质,而35/40目人造金刚石晶型完整,内部几乎无杂质。



(a)10/12目, 20×



(b)35/40目, 36×

图4 金刚石单晶形貌

Fig.4 Morphology of diamond single crystal

### 2.2.2 孕镶金刚石种类的影响

对比表2中8和9号磨耗比数据可以得到,在相同浓度和目数的条件下,20/25目人造金刚石磨耗比数值是相同目数天然金刚石的4倍左右。可见,孕镶小颗粒的天然金刚石并不能起到较好的耐磨增强效果,这与小颗粒天然金刚石外形极不规则有很大关系。

### 2.3 金刚石目数的影响

9~11号为相同浓度下,不同目数的孕镶柱磨耗比数据,如图5所示。

根据表2中相关数据可以得出,当金刚石目数

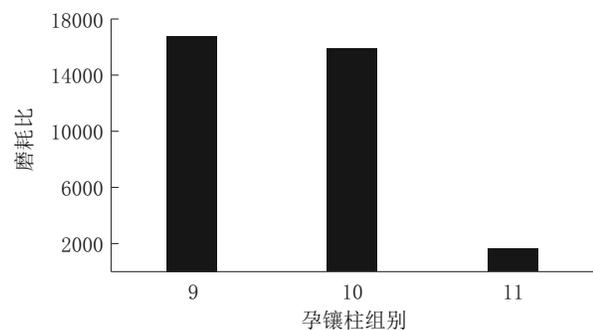


图5 9~11号孕镶柱磨耗比柱状图

Fig.5 Wear ratio of No.9~11 impregnated columns

在40目以粗(35/40和20/25目)时,磨耗比相对较高。而当金刚石目数更高即金刚石细于60目,在相同浓度条件下,金刚石孕镶柱的耐磨性急剧下降,仅有20/25目孕镶柱磨耗比的1/10左右。由此可见,当金刚石颗粒过小,孕镶柱磨损时,小颗粒的金刚石脱落较多,因此无法对孕镶柱耐磨性起到较好增强效果。

表2中2、5~7号试样的孕镶柱磨耗比是表镶人造大颗粒与多种目数金刚石孕镶的级配组合,其中2号为3种目数级配组合,5~7号为2种目数级配组合。

观察表2中上述4组数据可以得到,3种目数级配的金金刚石孕镶柱的磨耗比数值为15202.6,较2种目数级配组合的孕镶柱磨耗比值高出近2倍,说明3种目数组组合更能够充填孕镶柱胎体内部,形成更多出露的硬质点,从而增强孕镶柱整体的耐磨性。

#### 2.4 双倒角结构的影响

双倒角结构如图6所示。在金刚石孕镶柱边缘上方添加 $30^\circ$ 和 $80^\circ$ 两种角度的倒角,提前预制双倒角结构,并在倒角斜面上定位贴表镶金刚石。

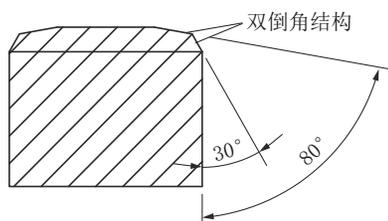


图6 双倒角金刚石孕镶柱

Fig.6 Double chamfered diamond impregnated column

对比表2中2号与12号磨耗比数据,结合图6可知,双倒角结构的设计,将孕镶柱磨耗比比值从15202.60提升至62750.93,提升幅度约3倍。可见双倒角结构增加了孕镶柱对金刚石的包镶稳定性,可以有效提高孕镶柱的耐磨性。

### 3 钻进试验及分析

结合上述孕镶柱的耐磨性试验研究结果,采用4号组合孕镶柱作为副齿镶嵌在全面钻头PDC尾部后衬(布齿示意图见图7)钻头的碎岩过程示意图如图8所示,由刀翼前端复合片先切入地层,切入后孕镶柱与地层接触,限制了复合片的切入深度,起到磨削地层和保护复合片的作用。据此研制出孕镶柱加强型复合钻头,如图9所示。

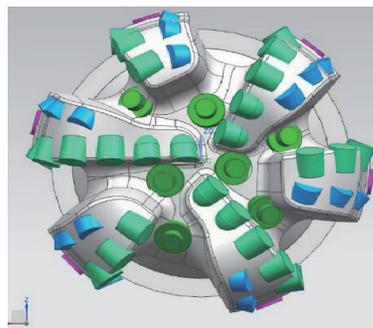


图7 布齿示意

Fig.7 Schematic diagram of teeth arrangement

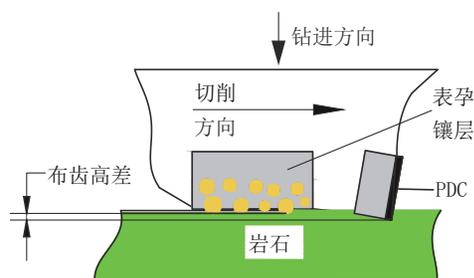


图8 复合钻头碎岩示意

Fig.8 Compound bit crushing the rock



(a) 常规1308复合片+孕镶柱复合结构0152mm全面钻头



(b) 1308奔驰齿+孕镶柱复合结构0215.9mm全面钻头

图9 孕镶柱加强型复合钻头

Fig.9 impregnated column reinforced compound bit

应用 $\varnothing 152$  mm 常规 1308 复合片+孕镶柱复合结构的全面钻头在砂岩块体进行了台架钻进试验,试验结果显示该常规复合片+孕镶柱加强型复合钻头在钻压 40 kN、转速 20~40 r/min 的钻进参数条件下,钻进砂岩试块,10 min 进尺 2 m,所钻岩屑大小均匀,颗粒尺寸 6~15 mm(图 10),钻头切削前端 PDC 和胎体整体磨损极其轻微。



图 10 试验用砂岩块和钻出的岩屑  
Fig.10 Test sandstone blocks and drilled cuttings

应用 1308 奔驰齿+孕镶柱复合结构的 $\varnothing 215.9$  mm 全面钻头在花岗岩体中进行了钻进试验(图 11),试验结果显示该奔驰齿+孕镶柱加强型复合钻头在钻压 10 kN、转速 300 r/min 的条件下,共钻进了 3 m,通过钻进参数的调整,最终实现了平均机械钻速 3 m/h。钻头出井照片见图 12,钻头切削前端 PDC 没有磨损,后排孕镶柱有轻微磨损。



图 11 钻进试验现场情况  
Fig.11 Drilling test site situation



图 12 钻头出井后照片  
Fig.12 Photos of drill bit after drilling

根据上述的两次钻进试验可知,复合钻头在砂岩体中钻进的平均机械速度可达到 12 m/h,在花岗岩中平均机械钻速可达到 3 m/h;钻进试验结束后,观察钻头可发现其前端复合片没有磨损,后衬孕镶柱有轻微磨损,可见复合片+孕镶柱的切削结构起到了很高的岩石破碎作用,同时布齿低于复合片的孕镶柱有磨损,复合片却没有磨损,说明后衬孕镶柱对前排复合片起到一定的保护作用。

#### 4 结论

通过对多级金刚石单晶孕镶柱的耐磨性研究,分析了金刚石参数对孕镶柱磨耗比的影响,进而得到最优的参数配方,并由此进行了实钻试验,验证了试验结果。

(1) 金刚石浓度越高,金刚石孕镶柱耐磨性越高。表镶大颗粒天然金刚石可较大幅度提高孕镶柱的耐磨性,其磨耗比数值是相同目数人造金刚石的 5.4 倍。

(2) 以 20/25+35/40+60/70 三级目数级配的金金刚石孕镶柱的磨耗比数值较两级目数级配更高。

(3) 双倒角结构的设计,能够将金刚石孕镶柱的耐磨性提高约 3 倍。

(4) 由复合片与孕镶柱加强型的复合片全面钻头在砂岩和花岗岩的钻进中,平均机械钻速均较快,且后排的孕镶柱对前排复合片有一定的保护作用。

#### 参考文献(References):

[1] 刘维,高德利.PDC 钻头研究现状与发展趋势[J].前瞻科技,

- 2023,2(2):168-178.
- LIU Wei, GAO Deli. Research status and development trends of polycrystalline diamond compact bits[J]. Science and Technology Foresight, 2023,2(2):168-178.
- [2] 刘伟吉,阳飞龙,董洪铎,等.异形PDC齿混合切削破碎花岗岩特性研究[J].工程力学,2023,40(3):245-256.
- LIU Weiji, YANG Feilong, DONG Hongduo, et al. Investigate on the mixed-cutting of specially-shaped PDC cutters in granite[J]. Engineering Mechanics, 2023,40(3):245-256.
- [3] 罗鸣,朱海燕,刘清友,等.一种适用于超高温超高压塑性泥岩的V形齿PDC钻头[J].天然气工业,2021,41(4):97-106.
- LUO Ming, ZHU Haiyan, LIU Qingyou, et al. A V-cutter PDC bit suitable for ultra-HTHP plastic mudstones[J]. Natural Gas Industry, 2021,41(4):97-106.
- [4] 徐良,刘一波,孙延龙,等.油气钻井极硬岩层钻头用孕镶齿研究[J].粉末冶金工业,2021,31(4):105-109.
- XU Liang, LIU Yibo, SUN Yanlong, et al. Study on impregnated teeth for bits in extremely hard rock formation of oil and gas drilling [J]. Powder Metallurgy Industry, 2021, 31 (4) : 105-109.
- [5] 沈立娜,贾美玲,蔡家品,等.金刚石钻头高效破岩技术新进展[J].金刚石与磨料磨具工程,2022,42(6):662-666.
- SHEN Lina, JIA Meiling, CAI Jiapin, et al. New development of efficient rock breaking technology with diamond bit[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2022,42(6):662-666.
- [6] 姚长江.钢体钻头冠部参数化设计和数控加工工艺研究[J].西部探矿工程,2021,33(9):45-46,49.
- YAO Changjiang. Research on parameterized design and CNC machining technology of the crown of steel drill bits[J]. West-China Exploration Engineering, 2021,33(9):45-46,49.
- [7] 陈西,沈立娜,杨甘生,等.陶瓷空心微球对孕镶金刚石钻头胎体性能的影响研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2020,47(4):101-105.
- CHEN Xi, SHEN Lina, YANG Gansheng, et al. Effect of ceramic hollow microspheres on the performance of impregnated diamond bits[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020,47(4):101-105.
- [8] 吴海霞,蔡家品,沈立娜,等.钻井利器之“金刚石钻头”[J].钻探工程,2023,50(2):155-158.
- WU Haixia, CAI Jiapin, SHEN Lina, et al. The story of a drilling weapon: Diamond bit [J]. Drilling Engineering, 2023, 50 (2):155-158.
- [9] 林敏,李维均,宋东东,等.孕镶齿切削效率数值模拟及实验研究[J].地下空间与工程学报,2018,14(6):1558-1563.
- LIN Min, LI Weijun, SONG Dongdong, et al. Simulation and experimental research on cutting efficiency of the impregnated teeth[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2018,14(6):1558-1563.
- [10] 吴海霞,沈立娜,李春,等.博孜区块新型表孕镶金刚石全面钻头的研究与应用[J].钻探工程,2021,48(3):101-105.
- WU Haixia, SHEN Lina, LI Chun, et al. Research and application of the new surface impregnated diamond bit in the Bozi Block[J]. Drilling Engineering, 2021,48(3):101-105.
- [11] 蔡家品,贾美玲,沈立娜,等.难钻进地层金刚石钻头的现状和发展趋势[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(2):67-73,91.
- CAI Jiapin, JIA Meiling, SHEN Lina, et al. Present situation of diamond bit used in difficult drilling formations and the development trend[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(2):67-73,91.
- [12] 代锋,曾桂元,李林,等.元坝高研磨性地层提速提效集成钻井技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2018,45(4):27-30.
- DAI Feng, ZENG Guiyuan, LI Lin, et al. Efficient drilling technology for high abrasive formation in Yuanba region [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2018,45(4):27-30.
- [13] 徐城凯.孕镶金刚石钻头磨损规律及模型研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2018.
- XU Chengkai. Research on the wear regularity and model of impregnated diamond bits[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2018.
- [14] 赵洪山,彭焱,关舒伟.致密砂岩地层孕镶金刚石钻头的研制及应用[J].石油机械,2020,48(7):25-29,36.
- ZHAO Hongshan, PENG Ye, GUAN Shuwei. Development and application of the impregnated diamond bit used in tight sandstone formation[J]. China Petroleum Machinery, 2020,48(7):25-29,36.
- [15] 潘晓毅,谢德龙,林峰,等.单一粒度金刚石对Fe-Cu基钻头钻进性能的影响[J].金刚石与磨料磨具工程,2018,38(6):39-43.
- PAN Xiaoyi, XIE Delong, LIN Feng, et al. Effect of single size diamond on drilling performance of the Fe-Cu-based bit [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2018,38(6):39-43.

(编辑 王文)