

# 陶瓷空心微球对孕镶金刚石钻头胎体性能的影响研究

陈 西<sup>1</sup>, 沈立娜<sup>2</sup>, 杨甘生<sup>1</sup>, 阮海龙<sup>2</sup>, 陈容清<sup>3</sup>, 孙祺斌<sup>1</sup>

(1.中国地质大学(北京),北京 100083; 2.北京探矿工程研究所,北京 100083;  
3.大庆钻探工程公司钻井三公司,黑龙江 大庆 163000)

**摘要:**针对深井钻进中,钻头受高温环境影响,钻头胎体性能显著下降的技术难题,研究了空心球种类、空心球目数、空心球添加量等对热压烧结金刚石钻头胎体常温及高温力学性能的影响。结果表明:在胎体基体内添加空心球,宜添加 3540 目数的钇稳定的氧化锆空心球;当钇稳定的氧化锆空心球的添加量为 10% 时,胎体的综合性能达到最佳,冲击韧性和抗弯强度也达到最大值,分别为 3 J/cm<sup>2</sup> 和 903.75 MPa。添加适量空心球的胎体复合材料,由于球形孔隙结构的存在,使得胎体表面粗糙度得到增强,提高了金刚石钻头的胎体出刃性能、高温下的力学性能。

**关键词:**深部钻探;金刚石钻头;空心微球;胎体性能

**中图分类号:**P634.4<sup>+</sup>1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2020)04-0101-05

## Effect of ceramic hollow microspheres on the performance of impregnated diamond bits

CHEN Xi<sup>1</sup>, SHEN Lina<sup>2</sup>, YANG Gansheng<sup>1</sup>, RUAN Hailong<sup>2</sup>, CHEN Rongqing<sup>3</sup>, SUN Qibin<sup>1</sup>

(1.China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2.Beijing Exploration Engineering Institute, Beijing 100083, China;

3.No.3 Drilling Company of Daqing Drilling Engineering Corporation, Daqing Heilongjiang 163000, China)

**Abstract:** In view of the technical problem that performance of the drill bit carcass decreases significantly due to the high temperature environment in drilling of deep wells, studies were conducted on the effect of the type of hollow spheres, the number of hollow spheres, and the adding amount of hollow spheres on the mechanical properties of the hot-pressed sintered diamond drill bit at ambient temperature and high temperature. The results showed that the 3540 mesh yttrium-stabilized zirconia hollow spheres were suitable to be added in the matrix of the carcass, and when the addition amount of yttrium-stabilized zirconia hollow spheres was 10%, the overall performance of the carcass reached the best. The impact toughness and flexural strength also reached their maximum values of 3J/cm<sup>2</sup> and 903.75MPa, respectively. Addition of an appropriate amount of hollow spheres to the carcass composite will enhance the surface roughness of the carcass, and improve the cutting performance of the diamond carcass and the mechanical properties at high temperatures due to presence of the spherical pore structure.

**Key words:** deep drilling; diamond drill bit; hollow microsphere; performance of the carcass

## 0 引言

随着地质勘探向非常规能源勘探、深部钻探等方向发展,坚硬“打滑”地层、深孔钻进能力差、效率低等诸多问题不断涌现。金刚石钻头以其独特的优势已经成为提高深部钻探效率的重要手段之一,其

性能的优劣,尤其是钻进效率和使用寿命,直接影响取样效果、质量和成本。钻进坚硬“打滑”地层时,金刚石的出刃情况直接影响钻进效率,而对于深井钻探,高温钻进条件对钻头性能有着更高的要求。本文选择在胎体中添加空心微球,通过设计三因素四

收稿日期:2020-02-04 DOI:10.12143/j.tkgc.2020.04.015

基金项目:国家重点研发计划项目“5000 米智能地质钻探技术装备研发及应用示范”课题四“小口径高效系列钻具研究”(编号:2018YFC0603404)

作者简介:陈西,男,汉族,1996 年生,硕士研究生在读,地质工程专业,北京市海淀区学院路 29 号,2575056503@qq.com。

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,shenln@bjiee.com.cn。

引用格式: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.

水平实验,烧结不同胎体配方试样,测试其强度、硬度、摩擦磨损性能、高温条件下的抗冲击韧性以及试样断口表面粗糙度等手段,研究了添加空心球对胎体常温性能的影响及作用机制,初步探讨了其对胎体高温性能的影响<sup>[1-8]</sup>。

## 1 试验方法

### 1.1 原料

Fe基预合金粉末粒度为 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ ;空心球选取氧化铝、钙稳定的氧化锆、钇稳定的氧化锆,目数分别为1820、2530、3540、6080目。空心球的添加量分别为体积含量的5%、10%、15%、20%。通过三因素(空心球种类、目数、含量)四水平实验,综合考虑胎体材料的力学性能、表面粗糙度以及孔隙率,初步筛选出试样,进而进行摩擦磨损实验以及高温下的抗冲击韧性实验。实验试样参数见表1。

表1 不同空心球添加量的试样参数  
Table 1 Parameters of specimens with different hollow sphere additions

胎体编号	A 种类编号	B 空心球含量/wt%	C 目数	密度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$
R1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5	1820	8.63
R2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10	2530	8.26
R3	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15	3540	7.89
R4	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20	6080	7.52
R5	ZrYO	10	3540	8.38
R6	ZrYO	5	6080	8.69
R7	ZrYO	20	1820	7.76
R8	ZrYO	15	2530	8.07
R9	ZrCaO	15	6080	8.07
R10	ZrCaO	20	3540	7.76
R11	ZrCaO	5	2530	8.69
R12	ZrCaO	10	1820	8.38
R13	无	0	0	9.00

### 1.2 混料

将粉末材料按照一定的配比用高精度天平或台秤等称取,之后将粉末倒入坩埚充分搅拌,将材料装入石墨模具。

### 1.3 烧结

热压烧结:使用RYJ-2000型热压机进行热压烧结,试样的烧结温度统一控制在830℃进行烧结,保温4 min后自然冷却。

### 1.4 试验方法

分别测定胎体材料的硬度(HR-150A型洛氏硬度机)、抗冲击韧性(JB6型抗冲击韧性测定仪)和

抗弯强度(WDW-100型微机万能试验机),分析添加空心球对胎体力学性能的影响。观察分析空心球添加前后,金刚石与胎体材料的界面结合状态以及微观组织结构。选取各组试样中,断口较为平整的试样,测定胎体断口表面粗糙度。

利用马弗炉对所烧结的试样进行加热,将试样加热到700℃,利用红外线测温仪实时测定摆放在JB6型抗冲击韧性仪上的胎体试样温度,测定各组试样在100、150、200、250、300℃时的冲击韧性,分析空心球的添加对胎体高温时力学性能的影响。

测定综合性能优异的试样的磨损量、磨损率以及磨损长度(ML-100型磨粒磨损试验机),分析添加空心球后,胎体试样磨损性能的变化。

利用激光共聚焦扫描显微镜测定胎体材料断口粗糙度,从各组测定冲击韧性后的胎体材料中,选取断口平整度相似的试样,测定表面粗糙度<sup>[8-25]</sup>。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 添加空心球对硬度的影响

添加不同种类、目数、体积含量的空心球对胎体材料硬度的影响见图1。

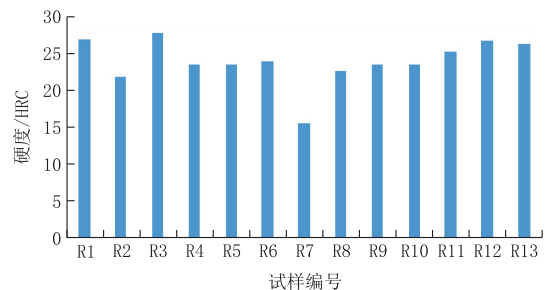


图1 添加空心球对胎体硬度的影响  
Fig.1 Effect of adding hollow spheres on carcass hardness

根据图1可知,添加空心球对胎体材料硬度的影响不大,由于空心球的存在,硬度取点会有一定偏差。整体来看,添加空心球使胎体硬度下降。这是由于空心微球硬度较小,影响了胎体的整体硬度。

### 2.2 添加空心球对冲击韧性的影响

添加不同种类、目数、体积含量的空心球对胎体材料抗冲击韧性的影响见图2。

根据图2可知,添加空心球对胎体抗冲击韧性有较大影响,空心球含量越多,粒径越大,胎体抗冲击韧性越低。如试样R3、R4、R7、R8、R10等,而反之则胎体抗冲击韧性较高,如试样R1、R6、R11。这是由于添加空心球破坏了预合金粉末的连续性,从

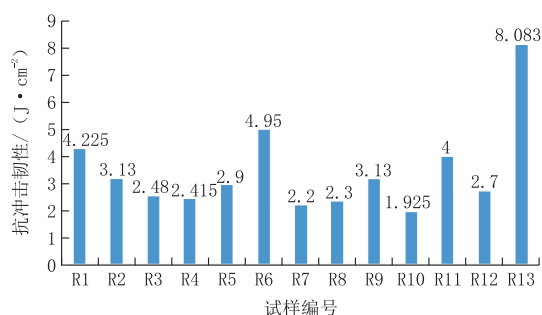


图 2 添加空心球对胎体抗冲击韧性的影响

Fig.2 Effect of hollow spheres on impact toughness of the carcass

而导致烧结成型的胎体块冲击韧性下降,金刚石钻头胎体通常要求冲击韧性 $\geq 3 \text{ J/cm}^2$ ,考虑到测量偏差,我们将  $2.7 \text{ J/cm}^2$  以上的试样组初选备用,即初步选取 R1、R2、R5、R6、R9、R11、R12 进行后续实验。

### 2.3 添加空心球对抗弯强度的影响

添加不同种类、目数、体积含量的空心球对胎体材料抗弯强度的影响见图 3。

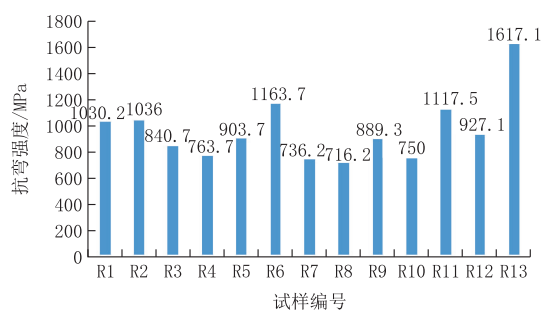


图 3 添加空心球对胎体抗弯强度的影响

Fig.3 Effect of adding hollow spheres on the bending strength of the carcass

根据图 3 可知,添加空心球对胎体材料抗弯强度有较大影响,其变化趋势基本与抗冲击韧性类似,即添加的空心球含量越多,抗弯强度降低得越多,添加的空心球粒径越小,胎体材料抗弯强度越好。其中试样 R6、R11 的抗弯强度性能较好,添加的空心球含量均为 5%,目数分别为 6080、2530。

综合考虑各个配方的力学性能,且考虑到当空心球添加量过小、添加的空心球粒较金刚石粒径相差过多时,对金刚石出刃改善较为有限。选择 R2、R5、R6、R9、R11 进一步开展了高温冲击实验。

### 2.4 各配方胎体材料在高温条件下的抗冲击韧性

添加空心球对胎体高温条件下抗冲击韧性的影响见图 4、图 5。

根据图 4 可知,R13 基料试样在常温~150℃抗冲击韧性提高,150~200℃降低,200~250℃基

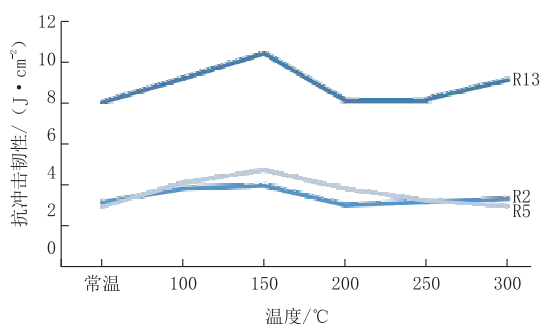


图 4 添加空心球对胎体高温条件下抗冲击韧性的影响(1)

Fig.4 Effect of hollow spheres on impact toughness under high temperature conditions (1)

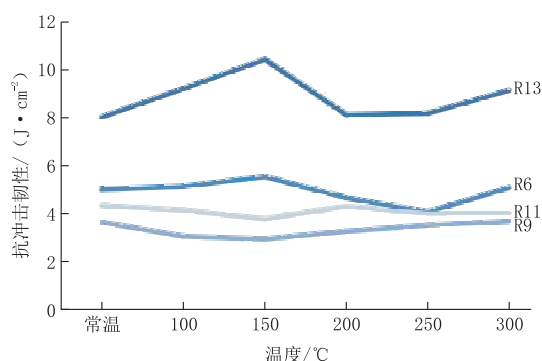


图 5 添加空心球对胎体高温条件下抗冲击韧性的影响(2)

Fig.5 Effect of hollow spheres on impact toughness under high temperature conditions (2)

本保持不变,250~300℃又有一定程度的提高。R2 和 R5 试样分别是添加量为 10%、目数为 2530 的氧化铝空心球和添加量为 10%、目数为 3540 钇稳定的氧化锆空心球的胎体材料。可知 R2 和 R5 试样在常温~150℃抗冲击韧性提高,其中 R5 抗冲击韧性提高幅度、150℃时的抗冲击韧性性能都高于 R2,150~300℃R5 的抗冲击韧性性能相对缓慢的降低,200~300℃性能降低的速度有一定的减缓。R2 在 150~200℃的抗冲击韧性较快下降,在 200~300℃之间缓慢提高。其中 R5 的抗冲击韧性在 150~250℃之间都大于  $3 \text{ J/cm}^2$ ,基本符合钻头的生产要求。

观察图 5 可知,R6 是添加量为 5%、目数为 6080 的钇稳定的氧化锆空心球的胎体材料,R6 在常温~100℃抗弯强度较小幅度增长,在 100~150℃较快增长。在 150~250℃之间抗冲击韧性较大幅度降低,250~300℃较大幅度增长。R6 抗冲击韧性随温度的变化规律基本和原始配方、R2、R5 相似。

### 2.5 添加空心微球对表面粗糙度的影响

R5、R13 的表面粗糙度显微照片见图 6、图 7。



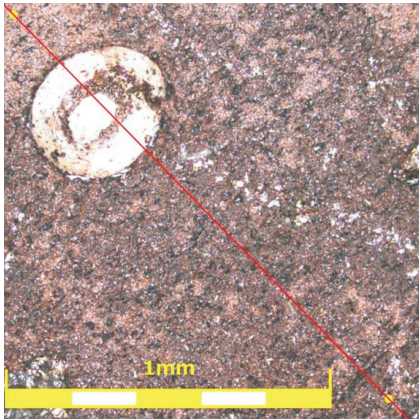


图6 R5表面粗糙度显微照片

Fig.6 R5 surface roughness photomicrograph

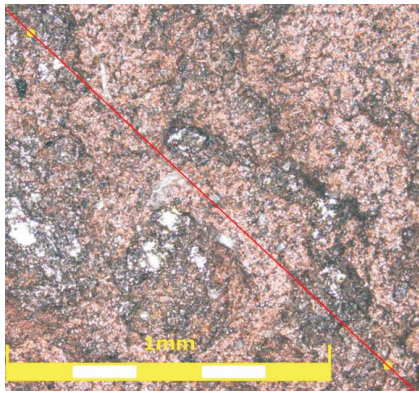


图7 R13表面粗糙度显微照片

Fig.7 R13 surface roughness photomicrograph

由图6、图7可知,添加空心球对胎体表面粗糙度有一定影响。R2、R5、R6、R9、R11的线粗糙度分别为31.425、25.189、12.678、9.624、17.776,胎体断口表面粗糙度和添加空心球的粒径大小、添加量正相关。添加空心球提高了胎体表面粗糙度,有利于钻进效率的提高。

## 2.6 添加空心球对胎体摩擦磨损性能的影响

R5配方的胎体常温综合力学性能优异,高温力学性能基本满足钻头生产要求。根据之前的研究,R5添加空心球的含量和粒径大小,和目的地层的金刚石粒径相匹配,理论上能够得到较好的出刃效果。R5的表面粗糙度较其他配方也比较优异。

因此,最后选取试样R5和原始配方试样进行摩擦磨损实验,R13的磨损量为0.04271g,磨损率为 $5.72 \times 10^{-6}$ ,磨损长度为0.6cm。R5的磨损量为0.0384g,磨损率为 $5.19 \times 10^{-6}$ ,磨损长度为0.9cm。

从磨损率、磨损量看R5试样的磨损性能较原始配方是降低的,但是R5试样的磨损长度明显比

原始配方长,证明R5试样在同样的时间、同等载荷时,磨损掉的体积大于原始配方,可以加快金刚石钻头胎体的消耗,加速金刚石的出刃,更有利于金刚石钻头的钻进过程。

## 3 结论

(1)添加目数为3540、添加量为10%的钇稳定的氧化锆空心球能够在保证综合力学性能满足钻头需求的情况下,提高金刚石出刃能力,有利于钻头钻进坚硬“打滑”地层。

(2)添加目数为3540、添加量为10%的钇稳定的氧化锆空心球的胎体在100~250℃条件下的冲击韧性较室温条件下的冲击韧性有一定程度的提高,对进行深井、超深井钻进有一定积极作用。

(3)添加空心球的胎体,胎体硬度降低,有利于胎体材料磨损,进而提高金刚石出刃效果,提高金刚石钻头钻进效率。

(4)添加目数为3540、添加量为10%的钇稳定的氧化锆空心球的胎体,胎体磨损体积较原始配方的胎体提高50%,有利于提高钻头胎体磨损体积,优化金刚石出刃效果。

(5)高温条件下,胎体的抗冲击韧性并不是随温度升高而降低,有些配方的胎体在一定温度区间的抗冲击韧性甚至会提高。

(6)300℃的高温对金刚石钻头胎体抗冲击性能的影响不是很显著,R5胎体的抗冲击韧性受300℃高温的影响较小。

(7)胎体断口表面粗糙度和添加空心球的粒径、含量正相关。

## 参考文献(References):

- [1] 贾美玲,欧阳志勇,马秀民,等.深孔钻探金刚石钻头技术研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2010,37(12):71-73.  
JIA Meiling, OUYANG Zhiyong, MA Xiumin, et al. Study on diamond bit for deep hole drilling technology[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010,37(12):71-73.
- [2] 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.  
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.
- [3] 沈立娜,阮海龙,李春,等.坚硬致密“打滑”地层新型自锐金刚石钻头的研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(11):57-59.  
SHEN Lina, RUAN Hailong, LI Chun, et al. Study on a new

- type self-sharpening diamond bit for drilling in hard-compact-slipping formation[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2014,41(11):57-59.
- [4] 李芄.硬岩钻进用预合金粉末金刚石钻头胎体性能的研究[D].长春:吉林大学,2018.  
LI Peng. Study on properties of prealloyed diamond bit matrix for hard rock drilling[D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [5] 谭松成,段隆臣,叶雪峰,等.硬岩钻进用石油钻头研究现状及发展趋势[J].*地质与勘探*,2013,49(2):373-378.  
TAN Songcheng, DUAN Longchen, YE Xuefeng, et al. Current status and tendency of research on oil bits for hard rock drilling[J]. *Geology and Exploration*, 2013,49(2):373-378.
- [6] 沈立娜.新型自出刃多孔胎体孕镶金刚石钻头的研究[C]//中国地质学会探矿工程专业委员会.第十八届全国探矿工程(岩土钻掘工程)技术学术交流年会论文集,2015:726-730.  
SHEN Lina. Research on a new type of impregnated diamond drill bit with self-blade exposure porous matrix[C]//Mineral Engineering Committee, Geological Society of China. Special for the Eighteenth National Exploration Engineering (Drilling and Tunneling) Academic Conferences, 2015:726-730.
- [7] 叶兰肃,南青民,刘建福.浅谈控制热压孕镶金刚石钻头质量的几方面措施[J].*地质装备*,2010,11(6):26-28.  
YE Lansu, NAN Qingmin, LIU Jianfu. Several measures to control the quality of hot-pressed impregnated diamond drill bits[J]. *Equipment for Geological Engineering*, 2010,11(6):26-28.
- [8] 叶纪超,沈立娜,杨甘生,等.金刚石压入岩石全过程研究[J].*金刚石与磨料磨具工程*,2018,38(5):17-20,27.  
YE Jichao, SHEN Lina, YANG Gansheng, et al. Experimental study on the whole process of diamond indenting rock[J]. *Diamonds & Abrasives Engineering*, 2018,38(5):17-20,27.
- [9] 张艺媛.电镀金刚石钻头胎体性能及钻头钻进性能定量研究[D].武汉:中国地质大学,2018.  
ZHANG Yiyuan. Quantitative study on the matrix materials properties and drilling performances of electroplated diamond bit[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2018.
- [10] 吴海东.高温条件下金刚石钻头钻进实验研究[D].长春:吉林大学,2017.  
WU Haidong. Experimental research on diamond bit drilling under high temperature[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [11] 汤凤林,沈中华,段隆臣,等.关于提高金刚石钻头胎体工作能力的试验研究[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2017,44(10):55-60.  
TANG Fenglin, SHEN Zhonghua, DUAN Longchen, et al. Experimental research on improving service performance of diamond bit matrix[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling Engineering)*, 2017,44(10):55-60.
- [12] 张巨川,段隆臣,石浩,等.干摩擦条件下钻头胎体与花岗岩摩擦特性的试验研究[J].*金刚石与磨料磨具工程*,2010,30(4):49-53.  
ZHANG Juchuan, DUAN Longchen, SHI Hao, et al. Experimental study on friction characteristics of hot-pressing matrix versus granite under dry sliding conditions[J]. *Diamonds & Abrasives Engineering*, 2010,30(4):49-53.
- [13] 张绍和,鲁凡,杨凯华.金刚石钻头性能量化表示研究[J].*探矿工程*,2002(1):58-60.  
ZHANG Shaohu, LU Fan, YANG Kaihua. Study on the quantitative presentation of the properties of diamond bits[J]. *Exploration Engineering*, 2002(1):58-60.
- [14] 段玉哲,沈建荣.金刚石钻头胎体性能的检测[J].*探矿工程*, 1990(2):26,25.  
DUAN Yuzhe, SHEN Jianrong. Testing of carcass performance of diamond bits[J]. *Exploration Engineering*, 1990(2):26,25.
- [15] 李子章,邓伟,杨凯华.热压铁基孕镶金刚石钻头的试验研究[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2008,35(7):94-96.  
LI Zizhang, DENG Wei, YANG Kaihua. Experiment study on hot-pressing iron-based impregnated diamond drilling bit [J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2008,35(7):94-96.
- [16] 赵尔信.细粒金刚石及钻头胎体性能的测定方法[J].*探矿工程*,1979(6):53-54.  
ZHAO Erxin. Determination of the properties of fine-grained diamond and drill bit carcass[J]. *Exploration Engineering*, 1979(6):53-54.
- [17] 叶纪超.稀土氧化钇对金刚石钻头胎体性能的影响[D].北京:中国地质大学(北京),2019.  
YE Jichao. The effect of rare earth yttrium oxide on the properties of diamond bit matrix[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.
- [18] 阮海龙,纪卫军,沈立娜,等.针对复杂地层金刚石钻头的改进与应用[J].*探矿工程(岩土钻掘工程)*,2010,37(1):67-69.  
RUAN Hailong, JI Weijun, SHEN Lina, et al. Improvement and application of diamond bit for drilling in complex formation[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2010,37(1):67-69.
- [19] Mingming He, Ning Li, Jiwei Zhu, et al. Advanced prediction for field strength parameters of rock using drilling operational data from impregnated diamond bit[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020,187:106847.
- [20] Jingjing Wu, Shaohu Zhang, Leilei Liu, et al. Rock breaking characteristics of a 3D printing grid-matrix impregnated diamond bit[J]. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2020,89:105212.
- [21] Lanlan Xie, Liyi Chen, Xiaolin Huang. Effect of Graphite Addition on Impregnated Diamond Bit Properties[J]. *Journal of Superhard Materials*, 2019,41(4):237-246.
- [22] 王佳亮,张绍和.坚硬致密弱研磨性地层孕镶金刚石钻头性能优化[J].*煤田地质与勘探*,2016,44(6):159-163.  
WANG Jialiang, ZHANG Shaohu. Performance optimization of diamond-impregnated bit for extra-hard and strong-abrasive rocks [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2016,44(6):159-163.
- [23] 程敏.小口径孕镶金刚石钻头的研制与现场试验[J].*中国石油石化*,2017(4):90-91.  
CHENG Min. Development and field test of small caliber impregnated diamond bit[J]. *China Petrochem*, 2017(4):90-91.
- [24] 关舒伟.新型孕镶金刚石钻头研制及试验[J].*石油钻探技术*, 2015,43(4):129-132.  
GUAN Shuwei. Development and testing of a new type of diamond-impregnated bits[J]. *Petroleum Drilling Technology*, 2015,43(4):129-132.
- [25] 袁军,邹德永,钟洪娇,等.适合于研磨性硬地层的新型孕镶金刚石钻头优化设计试验研究[J].*科学技术与工程*,2016,16(4):16-21.  
YUAN Jun, ZOU Deyong, ZHONG Hongjiao, et al. Experimental research on optimization design of a new impregnated diamond bits suitable for abrasive formation [J]. *Science Technology and Engineering*, 2016,16(4):16-21.