

关于 PDC 钻头低温氮、磁化综合处理的试验研究

汤凤林^{1,2}, 沈中华², 段隆臣¹, 彭 莉², ЧИХОТКИН В.Ф.¹

(1.中国地质大学(武汉),湖北 武汉 430074; 2.无锡钻探工具厂有限公司,江苏 无锡 214174)

摘要:复合片钻头在石油钻井和地质钻探中,得到了广泛应用,取得了很好的技术经济效果。但是,在深孔钻进中,特别是在复杂地层,诸如软硬互层、裂隙互层和研磨性地层中钻进时,机械钻速下降,钻头进尺降低,影响了其进一步推广和使用。如何提高钻头的使用性能,即提高钻头的强度(硬度)和耐磨性,以解决上述问题是一个非常重要的课题。在提高钻头使用性能方面,对其进行低温液态氮处理、磁化处理的综合处理方法是一种很有效的方法。俄罗斯专家进行的理论研究和生产实践证明,使用这种综合方法可以有效提高钻头的使用性能。

关键词:复合片钻头;复杂地层钻进;低温液态氮处理;磁化处理;钻头使用性能

中图分类号:P634.4⁺1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2019)02-0080-06

Experimental research on integrative treatment of PDC drill bit with cryogenic nitrogen and magnetization

TANG Fenglin^{1,2}, SHEN Zhonghua², DUAN Longchen¹, PENG Li², CHIKHOTKIN V.F.¹

(1.China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China;

2.Wuxi Drilling Tools Factory Co., Ltd., Wuxi Jiangsu 214174, China)

Abstract: In petroleum and geological exploration drilling, PDC bits have been widely used with good technical and economical results. But in deep drilling, particularly in complicated formations, such as soft-hard alternate formation, fractured formation, abrasive formation, the penetration rate of PDC bits is slow and the bit life is reduced; thus hindering its further promotion and use. How to increase the performance of the bit, i.e. its strength (hardness) and abrasiveness to resolve above mentioned problems is a very important issue. The integrative treatment of PDC bit with cryogenic nitrogen and magnetization is a simple and effective method to increase the performance of the bit. Results of theoretic study and field practices done by Russian specialists show that the bit performance can be increased effectively with the above treatment method.

Key words: PDC bit; drilling in complicated formations; cryogenic nitrogen treatment; magnetization; bit performance

0 引言

20 世纪 80 年代,PDC 研制成功,进入钻井领域,并从石油钻井很快地打进了地质钻探工程。此后,复合片钻头(又称 PDC 钻头)研究日趋成熟,钻进工艺日臻完善,引起了钻探界的高度重视。复合片钻头的特点是属于切削剪切型钻头,适用的地层范围比较宽,切削具的出刃比较大,钻进效率高,耐冲击性能好,复合片耐磨性能好,钻头寿命长,可以取得很好的技术经济指标,因此,得到了国际钻探界

的认可^[1-10]。

但是,PDC 钻头在可钻性 7~8 级岩石,特别是在软硬互层、裂隙互层和研磨性地层中钻进时,机械钻速降低、钻头寿命缩短,直接影响了这种钻头的技术经济指标和推广使用。因此,如何提高钻头的使用性能,即提高钻头的强度(硬度)和耐磨性,以便在上述地层中钻进时发挥 PDC 钻头的优势,是个很迫切的问题。俄罗斯南方国立技术大学石油天然气钻井和地球物理教研室的教授们对此进行了深入的研究,提出了按所用能源类型进行分类的提高钻头性

收稿日期:2018-07-02 DOI:10.12143/j.tkgc.2019.02.015

基金项目:江苏省江苏双创团队资助项目(编号:苏人才办[2014]27 号)

作者简介:汤凤林,男,汉族,1933 年生,教授,博士生导师,俄罗斯工程院院士,俄罗斯自然科学院院士,国际矿产资源科学院院士,探矿工程专家,主要从事探矿工程方面的教学和科研工作,湖北省武汉市鲁磨路 388 号,fltang_wuhan@aliyun.com。

引用格式:汤凤林,沈中华,段隆臣,等.关于 PDC 钻头低温氮、磁化综合处理的试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2019,46(2):80-85.

TANG Fenglin, SHEN Zhonghua, DUAN Longchen, et al. Experimental research on integrative treatment of PDC drill bit with cryogenic nitrogen and magnetization[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2019,46(2):80-85.

能的分类图(见图 1)^[7]。

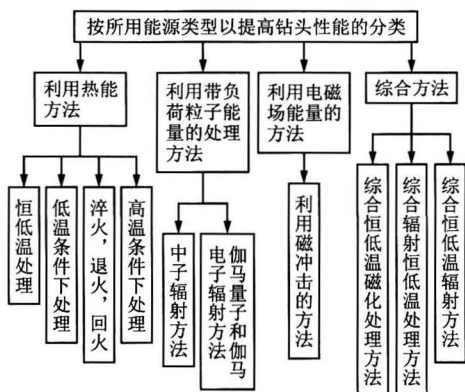


图 1 按所用能源类型以提高钻头性能的分类

Fig.1 Classification chart for improving bit performance according to the type of energy used

从图 1 可知,提高钻头使用性能的方法很多,但是俄罗斯钻探人员经过分析研究讨论认为,其中的钻头恒低温、磁化综合处理方法是一种比较好的方法^[7-21]。

1 恒低温、磁化综合处理方法

这种方法系指把室内 20℃ 左右的试验用钻头放入 -196℃ 的低温液态氮中,经过 15 min,取出后恢复到 20℃,然后在 3200~4000 奥斯特(磁场强度单位,1 奥斯特=79.6 A/m)的永久磁铁磁场中对其进行磁化处理 15 min,取出后供研究和钻探使用。

此综合方法亦可称之为低温淬火、磁化回火的处理方法。

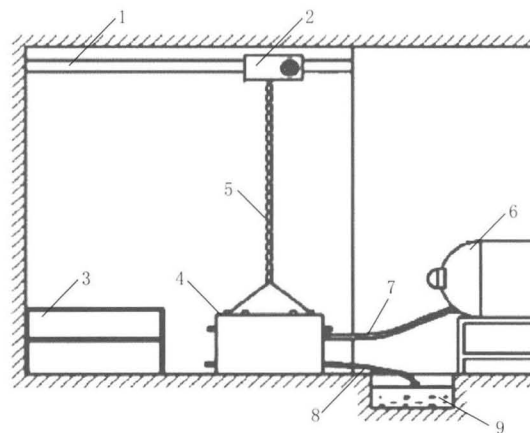
1.1 低温处理

1.1.1 低温处理装置

设计出了低温处理装置(见图 2)^[7]。这种装置包括:低温液态氮容器 4,提升装置 2,工作台 3 和运输用液态氮罐 6。低温液态氮容器 4 容积为 0.1 m³,用双层钢板制成,中间隔热材料为松孔塑料。通过隔热软管 7 从液态氮罐 6 向低温液态氮容器 4 供给液态氮。处理结束后,剩下的液态氮通过软管 8 流入放出池 9。利用运输用液态氮罐 ИТК-5/0.25 或容积为 25~50 L 的液态氮罐(见图 3)把液态氮运往处理钻头地点。

1.1.2 低温处理工艺

把拟处理的钻头用水溶液或石油溶液清洗去污,水溶液的温度应该不低于 50℃。清洗去污后烘干。清洗去污后的钻头,安装在钻头架上,钻头的温度



1—电葫芦横梁;2—电葫芦(提升装置);3—工作台;4—低温液态氮容器;5—链条;6—运输用液态氮罐 ИТК-5/0.25;7、8—压入隔热软管和放出隔热软管;9—放出池

图 2 低温处理钻头的装置示意

Fig.2 Device of cryogenic treatment bit



图 3 液态氮容器罐

Fig.3 Liquid nitrogen tank

应该不高于周围的温度。从容积 50 dm³ 的 АСД-50 型液态氮罐中注入液态氮,不少于液态氮罐体积的 70%。在液态氮罐内壁冷却(液态氮停止沸腾)后,把钻头下入低温液态氮容器内,进行冷却处理。把液态氮加到完全盖过钻头为止,然后用隔热盖子盖上恒低温液态氮罐。在液态氮停止强烈沸腾后,处理钻头 10~15 min。此时,钻头应该全被液态氮覆盖。必要时,可以向低温液态氮罐再加注液态氮。把被处理的钻头用提升装置提出来,使其温度升到周围环境的温度,然后安放到工作台上,把钻头卸下来以供下一步分析或钻探使用。如果低温液态氮罐中的液态氮含氧量 > 30%,可以继续使用。

1.1.3 恒低温处理结果

经过低温处理后,由于 WC 和 Co 的热膨胀系数不同,钴或其它粘结剂在碳化物包裹体边界上的

塑性变形形成表面硬化,使硬合金和复合材料的细粒结晶结构发生变化,在钻头表面上形成一个高硬度、高耐磨性、高抗腐蚀性、高接触韧性和高抗弯疲劳强度的硬化层。同时,已经确定,在此情况下没有发现金刚石层有脱离现象,钎焊层也保持完好(见图4)^[7]。

低温处理产生的热(冷)冲击给钻头材料应力状态带来的变化,主要是因为形成了压应力。由于有压应力存在,复合片在嵌镶窝中的固定,不仅是由于其连接力,而且周围金属的压持力也起了作用,所以这也是钻头进尺提高的一个因素。

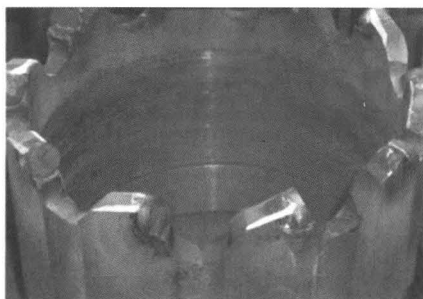


图4 液态氮处理后的钻头

Fig.4 The bit treated with liquid nitrogen

1.2 磁化处理

图5是钻头在磁场强度为320 kA/m的永久磁铁中进行磁化的示意图^[7]。钻头上有4个永久磁铁,每转一圈有两次磁化(充磁和去磁)过程。磁化过程中,电动力学的力将使钻头结构晶体更加密集有序,降低了其内应力,使其结构变得最优,犹如经受了“螺旋式压缩”。这是由于钻头在磁场中移动时,在磁场方向上循环的微电子产生的磁矩呈定向排列所致。

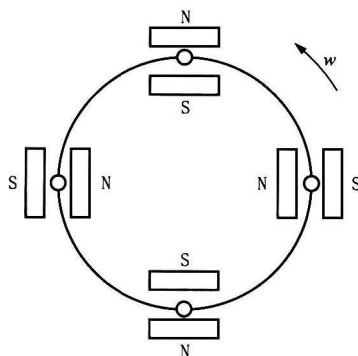
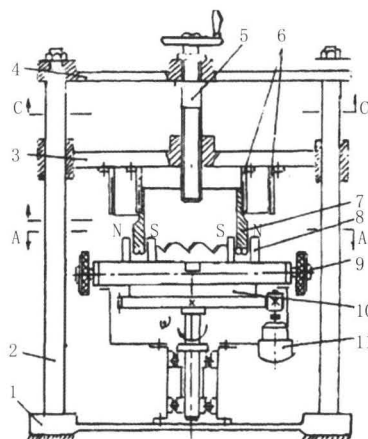


图5 钻头磁化(充磁、去磁)示意

Fig.5 Bit magnetization (magnetization and demagnetization)

建立了试验台。用回转的磁场处理钻头用的试验台见图6,图7为在试验台上安装的钻头。



1—支座;2—导向杆;3—活动横梁;4—带螺杆的不动横梁;5—钻头给进螺杆;6—把钻头安装在试验台上用的带有螺纹的套;7—钻头;8—N和S磁铁;9—把磁铁移动到不同直径钻头用螺杆;10—转动的工作台;11—工作台驱动装置

图6 用回转的磁场处理钻头用试验台

Fig.6 Test-bed for the bit managed with rotary magnetic field

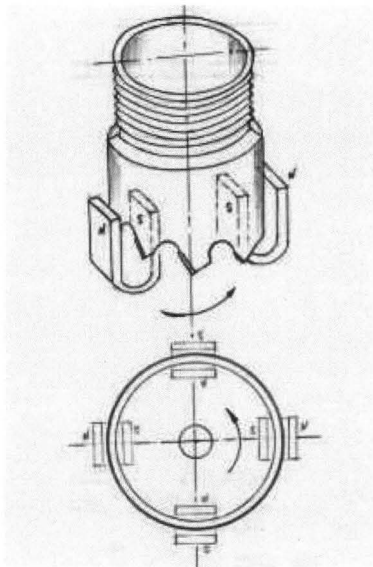


图7 在试验台上安装的钻头

Fig.7 The bit installed on the test-bed

1.3 综合处理结果

1.3.1 钻头硬度测量结果

永久磁铁 60 r/min 回转,磁化处理 15 min 条件下得到的钻头硬度(钻头体合金钢 XTC-A: 1.5% Cr, 97.9% Fe, 0.3%~0.6% C; 钎焊层 ИСР-45: 45% Ag, 31% Cu, 20% Zn, 4% Pb)试验结果见表1。

从表1可见,经过综合处理后,钻头体、复合片底座和钎焊层的硬度分别提高了30%、3%和22%,而金刚石层的硬度没有变化。测量是在俄罗斯南方国立技术大学的纳米技术和新材料测试中心用洛氏

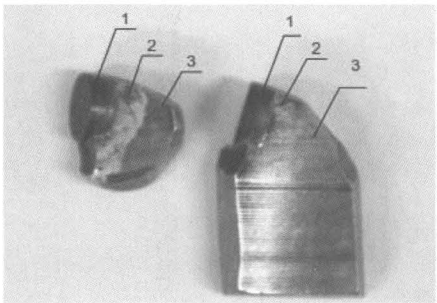
表 1 低温、磁化综合处理前、后测量的钻头硬度结果
Table 1 Hardness measured before and after cryogenic and magnetization treatment

序号	钻头类型	永久磁铁 强度/ (kA·m ⁻¹)	硬度 HRA							
			处 理 前				处 理 后			
			钻头体钢材 XГСА	复合片底座 BK-20	钎焊层 ΠСР-45	金刚 石层	钻头体钢材 XГСА	复合片底座 BK-20	钎焊层 ΠСР-45	金刚 石层
1	Ø93 mm 复合片	320	58.1	89.0	57.5	96.0	75.6	91.5	70.1	96.0
2	Ø112 mm 复合片	320	58.0	89.0	57.5	96.0	75.6	91.5	70.1	96.0
3	Ø151 mm 复合片	320	58.0	89.0	57.5	96.0	75.5	91.5	70.0	96.0
4	Ø225 mm 复合片	320	58.0	89.0	57.5	96.0	75.1	91.4	70.0	96.0

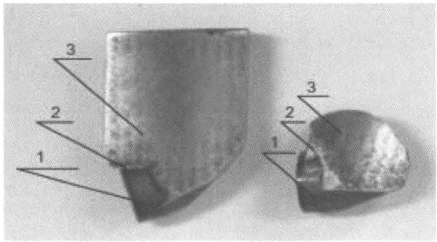
硬度计测得的。值得注意的是,当重复磁化,即充磁、去磁超过 60 个循环以上时,钻头硬度不再增大,这一点值得进一步研究。

1.3.2 钎焊层的 X 射线结构分析

钎焊层 X 射线结构分析是用扫描电子显微镜 QUANTA-200 进行的。为此,准备了专门样品,即从钻头上切割下来一块带有 PDC 的扇形块(见图 8),在室温下置入低温液态氮 15 min,提出来,室内停留 15 min,下入强度为 320 kA/m 的磁场中进行磁化处理。取出后,进行测量分析^[7]。



(a) 一个扇形块



(b) 另一个扇形块

1—复合片;2—钎焊层 ΠСР-45;3—钻头体(XГСА 合金钢)
图 8 X 射线分析结构用的钻头扇形块

Fig.8 Drill sector block for structural analysis by X-ray

用 QUANTA 电子显微镜对钎焊层 X 射线结构分析结果表明,采用低温、磁化综合方法时,合金中的微裂隙成长速度降低了,似乎微裂隙发生“磁渗碳”了,所以复合片在钻头体上固定的质量提高了。

1.4 钻头对比试验钻进结果

对综合处理和未经液态氮处理钻头进行了钻进

对比试验。

选取了 4 对钻头,其中一半是综合处理,即经过低温液态氮处理(15 min)和磁化综合处理的钻头,另一半是未经低温液态氮处理,仅单纯进行磁化处理的钻头,在野外条件下,对可钻性 8 级岩石进行了钻进试验,结果见表 2^[7]。

从表 2 可见,综合处理的钻头与单纯磁化处理钻头相比,钻头进尺提高了近 70%,机械钻速提高了 38%,可见综合处理的效果要比单一磁化处理的效果好得多。

表 2 钻头对比试验结果对比
Table 2 Bit contrast test results

钻头类型	HRA 硬度		钻头 进尺/ m	平均机械 钻速/ (m·h ⁻¹)
	钻头体钢材 XГСА	复合片底座 BK-20		
磁化处理钻头	60.0	89.0	78.5	11.0
综合处理钻头	68.3	91.0	133.4	15.4
磁化处理钻头	60.0	89.0	77.9	11.1
综合处理钻头	68.4	91.3	131.6	15.3
磁化处理钻头	60.0	89.0	78.1	11.2
综合处理钻头	68.3	91.6	132.5	15.5
磁化处理钻头	60.0	89.0	77.7	10.8
综合处理钻头	68.2	91.0	132.1	15.1

对经过低温液态氮综合处理的和未经处理的钻头进行了野外钻进对比试验。试验是用直径 112 mm 钻头、钻进可钻性 7 级砂岩、400 m 深度时进行的。所用钻机是 CKБ-4 型,水泵是 HB-32 型和低固相聚合物冲洗液。钻头对比试验结果见表 3^[7]。

表 3 表明,经过低温液态氮和磁化(磁场强度为 4000 奥斯特)综合处理与未经综合处理的钻头相比,由于钻头体、钎焊层、碳化钨底座和金刚石层结晶结构发生了变化,所以提高了移位的密度和钻头的硬度和耐磨性,总体上使钻头进尺提高了 22.2%,说明这种综合处理方法是行之有效的^[7-21]。

表3 处理后的钻头和未经处理的钻头对比钻进试验结果

Table 3 Test results of cryogenic liquid nitrogen treated bit and untreated bit

序号	钻头类型	液态氮(196℃)处理时间/min	永久磁铁磁场作用时间/min	永久磁铁磁场强度/奥斯特	钻头进尺/m	进尺增加/m
1	未经处理钻头				127.2	
	经过处理钻头	10	10	3000	151.9	24.7
2	未经处理钻头				128.1	
	经过处理钻头	12	12	3000	153.2	25.1
3	未经处理钻头				129.7	
	经过处理钻头	13	13	4000	151.9	25.4
4	未经处理钻头				130.0	
	经过处理钻头	14	14	3000	155.6	25.6
5	未经处理钻头				130.1	
	经过处理钻头	15	15	3000	156.0	25.9
6	未经处理钻头				128.2	
	经过处理钻头	18	16	3000	154.2	26.0
7	未经处理钻头				129.1	
	经过处理钻头	17	17	4000	155.2	26.1
8	未经处理钻头				129.6	
	经过处理钻头	15	15	3500	156.3	26.7
9	未经处理钻头				130.3	
	经过处理钻头	15	15	4000	159.7	29.4
10	未经处理钻头				128.0	
	经过处理钻头	15	15	4500	155.0	27.0
11	未经处理钻头				129.8	
	经过处理钻头	16	16	4500	158.3	28.5
12	未经处理钻头				130.1	
	经过处理钻头	18	18	4000	158.1	28.0

2 分析与讨论

(1)PDC 钻头在可钻性 7~8 级岩石,特别是在软硬互层、裂隙互层和研磨性地层中钻进时,机械钻速降低、钻头寿命缩短,直接影响了这种钻头的技术经济指标和推广使用。俄罗斯南方国立技术大学石油天然气钻井和地球物理教研室的教授们对此进行了深入的研究,提出了按所用能源类型进行分类的提高钻头性能的分类图。在这个分类图中,很有前景并正在进行研究的是对钻头进行低温液态氮处理、磁化处理的综合处理方法。

(2)钻头低温液态氮处理方法的机理是:经过低温处理后,由于 WC 和 Co 的热膨胀系数不同,钴或其它粘结剂在碳化物包裹体边界的塑性变形形成表面硬化,使硬合金和复合材料的细粒结晶结构发生变化,在钻头表面上形成一个高硬度、高耐磨性、高抗腐蚀性、高接触韧性和高抗弯疲劳强度的硬化层。同时,在此情况下没有发现金刚石层有脱层的现象,

钎焊层也保持完好。

(3)钻头磁化处理的机理是:钻头上有 4 个永久磁铁,每转一圈有两次磁化(充磁和去磁)过程。磁化过程中,电动力学的力将使钻头结构晶体更加密集有序,降低了其内应力,使其结构变得最优,犹如经受了“螺旋式压缩”。这是由于钻头在磁场中移动时,在磁场方向上循环的微电子产生的磁矩呈定向排列所致,因而钻头强度(硬度)和耐磨性提高了。

(4)虽然低温液态氮处理和磁化处理钻头都可以提高钻头的性能(硬度和耐磨性),但是把这两个处理方法综合进行效果更好,可以得到更好地提高钻头的使用性能,提高了钻头的机械钻速和进尺,解决了复合片钻头钻进复杂地层遇到的难题,有利于复合片钻头的发展和进一步推广使用。俄罗斯南方国立技术大学石油天然气钻井和地球物理教研室专家进行的实验室和野外生产试验结果证实了这一点^[7-21]。

参考文献(References):

- [1] 王强,朱恒银,杨凯华.深部钻探金刚石钻头设计思路[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(5):84-87.
WANG Qiang, ZHU Hengyin, YANG Kaihua. Design idea of diamond bit in deep hole drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(5): 84-87.
- [2] 朱恒银,王强,杨凯华,等.深部岩心钻探技术与管理[M].北京:地质出版社,2014.
ZHU Hengyin, WANG Qiang, YANG Kaihua, et al. Deep core drilling technology and management[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.
- [3] 段隆臣,潘秉锁,方小红.金刚石工具的设计与制造[M].湖北武汉:中国地质大学出版社,2012.
DUAN Longchen, PAN Bingsuo, FANG Xiaohong. Design and manufacture of diamond tools[M]. Wuhan Hubei: China University of Geosciences Press, 2012.
- [4] 汤凤林, A. Г. 加里宁,段隆臣.岩心钻探学[M].湖北武汉:中国地质大学出版社,2009.
TANG Fenglin, A. G. Gallining, DUAN Longchen. Core drilling[M]. Wuhan Hubei: China University of Geosciences Press, 2009.
- [5] 汤凤林,沈中华,段隆臣,等.深部各向异性硬岩钻进用新型金刚石钻头试验研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(4):74-79.
TANG Fenglin, SHEN Zhonghua, DUAN Longchen, et al. Experimental research on new type diamond bit for drilling in deep hard anisotropic rocks[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(4): 74-79.
- [6] 汤凤林,沈中华,段隆臣,等.关于切削型多节式刮刀钻头的分析研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(6):88-92.

- TANG Fenglin, SHEN Zhonghua, DUAN Longchen, et al. Analytical research on cutting type multitier wing bit[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017, 44(6): 88—92.
- [7] Третьяк А. А. Теоретическое обоснование, разработка конструктивных параметров и технологии бурения скважин коронками, армированными алмазно — твердосплавными пластинами[D]. ЮРГТУ, Новочеркасск, 2017.
- [8] Кубасов В. В. Повышение эффективности бурения геологоразведочных скважин в твердых породах путем модернизации матриц алмазного породоразрушающего инструмента[D]. Московский государственный геологоразведочный университет, 2015.
- [9] Третьяк А. А. Разработка современных конструкций коронок, армированных алмазно — твердосплавными пластинами и технология их использования [D]. ЮРГТУ, Новочеркасск, 2012.
- [10] Скоромных В. В. и др. Разработка и экспериментальные исследования особенностей работы алмазной коронки для бурения в твердых анизотропных породах[J]. Известия Томского политехнического университета, 2015, 326(4): 30—40.
- [11] Кубасов В. В., Будюков Ю. Е., Спирин В. И. Повышение работоспособности алмазных коронок криогенной обработки[C]// Приоритетные направления развития науки и технологий: тезисы докладов V III научно — технической конференции Тула : Изд. — ство «Инновационные технологии», 2013: 45—50.
- [12] Кубасов В. В., Будюков Ю. Е., Спирин В. И. Выбор матричных композиций для алмазного породоразрушающего инструмента [C]// Приоритетные направления развития науки и технологий: тезисы докладов V III научно — технической конференции Тула : Изд. — ство «Инновационные технологии», 2014: 11—16.
- [13] Кубасов В. В. Новые технологии повышения эффективности работы алмазного породоразрушающего инструмента[J]. Горный информационно — аналитический бюллетень, 2014, 10: 383—387.
- [14] Кубасов В. В. Исследование износа алмазных коронок[J]. Горный информационно — аналитический бюллетень (научно — аналитический журнал), 2015, 4: 6—11.
- [15] Третьяк А. А. и др. Определение рациональных значений рабочих углов армирующих элементов буровых коронок режущего типа[J]. Neftegaz, 2016, (10): 29—33.
- [16] Третьяк А. А. и др. Буровые коронки армированные алмазно — твердосплавными пластинами [M]. Новочеркасск: Издательство «Политехник», 2015.
- [17] Третьяк А. А. и др. Конструкция буровых коронок армированных алмазно — твердосплавными пластинами с учетом схемы разрушения забоя скважины[J]. Строительство нефтяных и газовых скважин на море и суше, 2015, (6): 9—12.
- [18] Третьяк А. А. и др. Режущая часть долота PDC: оптимизация геометрических параметров[J]. Oil and Gas Journal, 2015, (5): 50—53.
- [19] Кубасов В. В. Повышение эффективности бурения геологоразведочных скважин в твердых породах путем модернизации матриц алмазного породоразрушающего инструмента[D]. МГГРУ, Москва, 2015.
- [20] Кубасов В. В. и др. Новые технологии повышения работоспособности алмазного породоразрушающего инструмента[J]. Экономика XXI века, инновации, инвестиции, образование, 2013, (5): 50—53.
- [21] Третьяк А. А. Технология бурения скважин коронками, армированными алмазно — твердосплавными пластинами [M]. Издательство «Политехник», Новочеркасск, 2016.

(编辑 王建华)

(上接第 74 页)

- [10] 张鹏, 周德源. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的护栏冲击模拟分析精度研究[J]. 振动与冲击, 2008, 27(4): 147—152, 163. ZHANG Peng, ZHOU Deyuan. Accuracy analysis of a guard-rail impact simulation based on ANSYS/LS-DYNA[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(4): 147—152, 163.
- [11] 吴冬宇, 彭视明, 殷琨, 等. 基于 LS-DYNA 的射流式冲击器冲锤结构[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(10): 1441—1445. WU Dongyu, PENG Jianming, YIN Kun, et al. Hammer structure of liquid-jet hammer based on LS-DYNA[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2016, 37(10): 1441—1445.
- [12] 张峰峰, 殷福新. 基于 LS-DYNA 刚性钢框架受撞击整体性能的有限元分析[J]. 中国新技术新产品, 2009, (18): 21. ZHANG Fengfeng, YIN Fuxin. Finite element analysis of the rigid steel frame overall performance subjected to impact based on LS-DYNA[J]. China New Technology and Products, 2009, (18): 21.
- [13] 祝昭丹. 啄木鸟头颅结构抗冲击力学机理[D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2015. ZHU Zhaodan. The mechanical principle of anti-shock of woodpecker head under dynamic impact[D]. Dalian Liaoning: Dalian University of Technology, 2015.
- [14] 纪天坤, 孙强, 杨冬冬, 等. 新型射流式元件结构设计与试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(6): 52—55. JI Tiankun, SUN Qiang, YANG Dongdong, et al. Structure design of new bi-stable fluidic amplifier for liquid-jet hammer[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2016, 43(6): 52—55.
- [15] 杜小军, 蒋荣庆. 大直径潜孔锤冲击能量传递模拟试验研究[J]. 探矿工程, 1996, (6): 4—7. DU Xiaojun, JIANG Rongqing. Simulation experiment on percussive energy transfer of large diameter DTH hammer[J]. Exploration Engineering, 1996, (6): 4—7.

(编辑 王建华)