基于正交试验的金刚石钻头胎体配方优化研究

孟 凡，沈立娜*，吴海霞，李 春，赵 义，张建元，刘海龙，梁秋平
（北京探矿工程研究所，北京 100083）

摘要：针对深部复杂地层钻探孕镶金刚石钻头胎体基料、辅料、金刚石匹配机制不明确、多因素协同作用量化不足的问题，选取基料、辅料种类、金刚石浓度和辅料浓度四因素开展$L_9(3^4)$正交试验，研究其对胎体抗冲击韧性和耐磨性的影响，并通过极差分析与方差分析揭示其作用机理。结果表明：基料种类是影响胎体综合性能的最主要因素，其中H1基料在提升抗冲击韧性与耐磨性方面均表现最优，极差分析显示其对两种指标的极差均最大；金刚石浓度、辅料种类及辅料浓度的影响效应相对较小。通过包镶力理论分析揭示，基料对磨粒的包镶能力主导材料性能，单纯提高金刚石浓度因分散单颗颗粒的包镶力而无法显著提升耐磨性。获得两组针对性优化配方：抗冲击韧性最优组合为基料H1＋辅料10% SiC＋60%金刚石，耐磨性最优组合为基料H1＋辅料10%砂＋100%金刚石。研究结果为热压孕镶钻头胎体配方优化提供了数据支撑和理论依据。

关键词：金刚石钻头；孕镶钻头；胎体配方；正交试验；抗冲击韧性；耐磨性；方差分析；钻探工程
中图分类号：P634.4$^+$1　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：2096-9686(2026)06-0026-07

Optimization of diamond bit matrix formula based on orthogonal experiment

MENG Fan, SHEN Lina*, WU Haixia, LI Chun, ZHAO Yi, ZHANG Jianyuan,
LIU Hailong, LIANG Qiuping
(*Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: To address the insufficient understanding of the matching mechanisms among matrix, additives, and diamonds in impregnated diamond bits for drilling in deep complex formations, as well as the lack of quantitative evaluation of their multi-factor coupling effects, an $L_9(3^4)$ orthogonal experiment was conducted. Four factors, namely matrix type, additive type, diamond concentration, and additive concentration, were selected to investigate their effects on the impact toughness and abrasion resistance of the matrix, and the underlying mechanisms were revealed through range analysis and analysis of variance. The results indicate that the matrix type is the primary factor affecting the comprehensive performance of the matrix. Specifically, the H1 matrix exhibits the best performance in enhancing both impact toughness and abrasion resistance, showing the largest range values for both indicators; the effects of diamond concentration, additive type, and additive concentration are relatively minor. Theoretical analysis based on embedding force reveals that the embedding capability of the matrix for abrasive particles dominates material performance; simply increasing diamond concentration fails to significantly improve abrasion resistance because it disperses the embedding force acting on individual particles. Two targeted optimized formulations were obtained: The optimal combination for impact toughness was H1 matrix + 10% SiC additive + 60% diamond, and the optimal combination for abrasion resistance was H1 matrix + 10% quartz sand additive + 100% diamond. The findings provide experimental data and theoretical basis for optimizing the matrix formulation of hot-pressed impregnated

收稿日期：2026-04-21；**修回日期**：2026-07-10　　**DOI**：10.12143/j.ztgc.2026.06.003
基金项目：国家科技重大专项课题(编号：2024ZD1003105)
第一作者：孟凡，男，汉族，1997年生，助理工程师，探矿工程专业，硕士，主要从事金刚石钻头设计工作，北京市房山区良乡工业开发区二期创新路1号(102488)，mfan@mail.cgs.gov.cn。
通信作者：沈立娜，女，汉族，1985年生，正高级工程师，材料科学专业，硕士，主要从事金刚石钻头的优化设计工作，北京市房山区良乡工业开发区二期创新路1号(102488)，shenln@bjiee.com.cn。
引用格式：孟凡，沈立娜，吴海霞，等.基于正交试验的金刚石钻头胎体配方优化研究[J].钻探工程，2026，53(6)：26-32.
MENG Fan, SHEN Lina, WU Haixia, et al. Optimization of diamond bit matrix formula based on orthogonal experiment[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(6): 26-32.

diamond bits.

Key words: diamond bit; impregnated diamond bit; matrix formula; orthogonal experiment; impact toughness; abrasion resistance; analysis of variance; drilling engineering

0　引言

随着钻探工程向深部延伸,复杂坚硬地层的施工场景愈发普遍,加之行业对绿色、高效发展及降本增效的需求持续提升,对钻头的性能要求逐步提高。国内外学者已经从钻头结构[1-3]、配方[4-9]及钻进参数等多个维度进行了研究[10-11]。例如,贝克休斯针对强研磨性地层设计的IRev孕镶钻头,钻头结构可以承受更高的钻压,在高转速下磨损也更少[12]。斯伦贝谢的Kinetic孕镶齿,由碳化钨胎体和金刚石颗粒制成,再辅以PDC齿进行剪切破碎,使其在复杂地层中表现优异[13]。刘海龙等[14]对钻头冠部、水力结构、胎体配方进行重新设计,并采用表孕镶结合的方式实现了钻进效率的提升[15]。也有学者开展了主辅料孕镶钻头的研究,发现辅料的添加可显著提高钻进效率[5,16]。可见,钻头钻进效率的提升不仅需要配方、结构等多方面的优化,还需要针对目标地层进行适应性调整。

但目前针对胎体材料适配性的研究存在诸多不足,如对于胎体辅料的研究相对较少,对于添加种类、浓度与常规胎体和金刚石的适配性认识不足,现有研究多聚焦单一因素优化,对基料、金刚石、辅料三者的协同作用量化不足等。基于此,采用正交试验研究基料、金刚石浓度、辅料及辅料浓度四因素的作用,分析其作用机理,为胎体配方优化提供理论依据。

1　试验材料与方法

1.1　试验材料

试验基料选用H1、H2、H3三种胎体材料,均是由钴、镍、铜、铁、钨等元素组成的预合金粉末。金刚石选用型号为SCD280的人造金刚石颗粒,粒度分别为35/40目(425～500 μm)和60/70目(212～250 μm),两种金刚石颗粒的比例为1∶1。大颗粒金刚石有助于提高切入岩石的深度,小颗粒则有助于在钻进过程中维持胎体的自锐性,大小颗粒配合使用可兼顾钻速与钻头寿命。辅料选用石英砂(以下简称砂)、立方氮化硼(cBN)、碳化硅(SiC)三种材料,粒度为50/60目(250～300 μm)和60/70目,混合比例为1∶1。

1.2　试验方法

正交试验是一种高效的多因素试验设计方法,能够从试验因素的全部水平组合中,挑选部分有代表性的水平组合进行试验,通过对这部分试验结果的分析了解全面试验的情况,找出最优的水平组合。试验设置4个因素、3个水平。其中4个因素分别为基料(A)、辅料(B)、金刚石浓度(C)和辅料浓度(D),3个水平分别根据实际工况和各因素的应用范围设定。基料的3个水平分别为H1、H2、H3,辅料的3个水平为砂、cBN、SiC,金刚石浓度的3个水平设置为60%、80%、100%,辅料浓度的3个水平设置为5%、10%、20%。以此为基准,通过正交表设计9组试验(表1)。每组试验通过粉末冶金热压烧结法制备抗冲击韧性试验块(10 mm×10 mm×50 mm)3块,耐磨试验块(Ø13 mm×8 mm)3块。

表1　正交试验设计表

Table 1　Orthogonal design scheme

试验号	基料	辅料	金刚石浓度/%	辅料浓度/%
1	H1	砂	100	10
2	H2	砂	60	5
3	H3	砂	80	20
4	H1	cBN	80	5
5	H2	cBN	100	20
6	H3	cBN	60	10
7	H1	SiC	60	20
8	H2	SiC	80	10
9	H3	SiC	100	5

1.3　试验过程

采用粉末冶金热压烧结法制备试样。首先,将经过计算的基料、不同浓度的金刚石及不同种类和浓度的辅料,按试验设计的比例进行混合。将均匀混合的粉末放入石墨模具中,烧结过程以400 ℃/min的速度升温至400 ℃,再以100 ℃/min的速度升温至830 ℃,烧结压力20 MPa,保温时间240 s,保压以400 ℃/min的速度冷却至420 ℃,随后出炉,室温冷却。完全冷却后将模具内材料取出,制得试

验块。

1.3.1 抗冲击韧性测试

试验块的抗冲击韧性通过30～60 J摆锤式冲击试验机测得。抗冲击韧性a_K计算如下：

$$a_K = A_K / S \tag{1}$$

式中：A_K——冲击功；S——试样受力处的横截面积。

1.3.2 耐磨性测试

将耐磨试验块固定在磨床上，使试验块与80目粒度的碳化硅陶瓷平行砂轮相互摩擦，得到砂轮的磨耗量M_s和试验块的磨耗量M_j之比（即$E=M_s/M_j$），二者的比值为该试验块的磨耗比E，E越大，表明在同等工况下样品自身磨损越小，而标准磨料（砂轮）磨损越大，即样品的耐磨性越好。

2 试验结果

将试验结果进行计算后，取每组试验的抗冲击韧性、磨耗比平均值，结果见表2。

表2 正交试验结果

Table 2 Results of orthogonal experiment

试验号	抗冲击韧性/(J·cm^{-2})	磨耗比
1	3.950	35399.09
2	1.600	0.94
3	1.450	19648.39
4	3.450	8631.47
5	0.900	7917.17
6	2.475	10842.78
7	4.975	14865.26
8	1.450	3.51
9	2.375	11787.35

3 抗冲击韧性和耐磨性分析

3.1 抗冲击韧性分析

在分析抗冲击韧性时，先分别求出每个因素各个水平下的指标总和K_{ij}和每个因素各个水平下的指标平均值k_{ij}。以基料（因素）为例，当基料为H1时，参与计算的抗冲击韧性值来自试验1、4、7，即$K_{11}=3.950+4.975+3.450=12.375$ J/cm^2，$k_{11}=K_{11}/3=4.125$ J/cm^2。同理，计算其他因素和水平，结果见图1。

然后，采用极差分析法来确定各因素对试验指标的影响程度，极差R通过计算每个因素不同水平

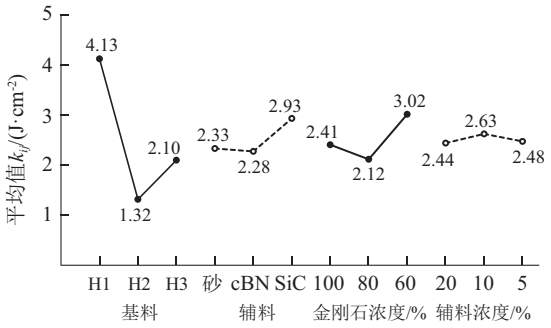

图1 抗冲击韧性试验结果

Fig.1 Impact toughness test results

平均值中的最大值减去最小值得到。例如，对于基料（因素j=1）的极差$R_1=k_{11}-k_{21}=4.125-1.317=2.808$。同理，按照同样的方法计算金刚石浓度、辅料和辅料浓度的极差R，计算结果如表3所示。为了验证各因素对试验指标影响的显著性，进行了方差分析，计算结果如表4所示。

表3的极差R反映的是因素水平波动时，试验指标的变化幅度，即极差越大，说明该因素对试验指标的影响越大。因此，本试验中各因素对影响抗冲击韧性的主次关系为基料R_1＞金刚石浓度R_3＞辅料R_2＞辅料浓度R_4。

上述4因素的极差对比中，基料的极差R_1数值最高，说明基料在抗冲击韧性方面影响最大。结合表4的方差分析结果，基料的显著性指标$P<0.05$，亦可证明基料为最大影响因素。将三种不同的基料分开来看（参见表1、表2），以H1作为基料的配方都表现出较高的抗冲击韧性（抗冲击韧性值位列9组试验的前3）。相比之下H3的抗冲击韧性中等（位列排序的4、5、7位），H2的抗冲击韧性最低（位列排序的6、8、9位）。基料3个水平的排序清晰，差异明显，具有直观的大小关系，一是说明基料在决定材料抗冲击韧性方面起到关键作用，二是说明了H1在抗冲击韧性方面对比H2、H3具有明显优势。

在表3、表4中，金刚石浓度的极差（$R_3=0.900$ J/cm^2）低于基料的极差（$R_1=2.808$ J/cm^2），且在方差分析中显示为“不显著”。但这并不意味着可以随意调整金刚石浓度，尤其是在以金刚石为主要材料的钻头中，金刚石浓度过高时（通常浓度大于120%），钻头使用寿命反而降低[17]。因为增加金刚石浓度意味着降低了基料的比例，影响测试胎体的硬度、耐磨性、抗弯强度等指标[18]。但试验1（H1＋

表3　抗冲击韧性试验数值分析

Table 3　Numerical analysis for impact toughness tests

序号	i水平j因素	抗冲击韧性/(J·cm^{-2})			K_{ij}/(J·cm^{-2})	k_{ij}/(J·cm^{-2})	$R_j(k_{max}-k_{min})$/(J·cm^{-2})
		值1	值2	值3			
1	基料H1	3.950	3.450	4.975	12.375	4.125	
2	基料H2	1.600	0.900	1.450	3.950	1.317	2.808
3	基料H3	1.450	2.475	2.375	6.300	2.100	
4	辅料砂	3.950	1.600	1.450	7.000	2.333	
5	辅料cBN	3.450	0.900	2.475	6.825	2.275	0.658
6	辅料SiC	4.975	1.450	2.375	8.800	2.933	
7	金刚石浓度100%	3.950	0.900	2.375	7.225	2.408	
8	金刚石浓度80%	1.450	3.450	1.450	6.350	2.117	0.900
9	金刚石浓度60%	1.600	2.475	4.975	9.050	3.017	
10	辅料浓度20%	1.450	0.900	4.975	7.325	2.442	
11	辅料浓度10%	3.950	2.475	1.450	7.875	2.625	0.183
12	辅料浓度5%	1.600	3.450	2.375	7.425	2.475	

表4　抗冲击韧性试验方差分析

Table 4　Analysis of variance for impact toughness tests

方差来源	偏差平方和/(J·cm^{-2})^2	自由度	均方/(J·cm^{-2})^2	F值	$F_{0.05}(2,2)$	显著性
基料(A)	12.6010	2	6.3005	32.28	19.0	显著
辅料(B)	0.4635	2	0.2318	1.19	19.0	不显著
金刚石浓度(C)	1.2652	2	0.6326	3.24	19.0	不显著
误差(e)	0.3904	2	0.1952			
总误差	14.7201	8				

注:误差项为合并辅料浓度(不显著因素)与原误差项计算得到,确保自由度有效;$F_{0.05}(2,2)=19.0$为$\alpha=0.05$显著性水平下的临界值。

100%金刚石+10%砂)得到的抗冲击韧性平均值依然为3.95,在9组试验中较高,说明在基料韧性足够高的条件下,可适当提高金刚石浓度。

辅料与辅料浓度的极差($R_2=0.658$ J/cm^2,$R_4=0.183$ J/cm^2)低、方差显示为"不显著",是因为在试验配比中,辅料本身就占比最小。综上所述,结合表3数据,得到抗冲击韧性最优试验方案为基料H1、辅料SiC、金刚石浓度60%、辅料浓度10%。

3.2　耐磨性分析

与抗冲击韧性分析相同,同样计算每个因素各个水平下的指标平均值k_{ij}(图2),并进行极差和方差分析,结果如表5、表6所示。

通过表5的耐磨试验分析可知,试验中各因素对影响耐磨性的主次关系为基料R_1>金刚石浓度R_3>辅料R_2>辅料浓度R_4。其中以基料的极差R_1最大,说明基料在这个试验中是决定耐磨性的最主

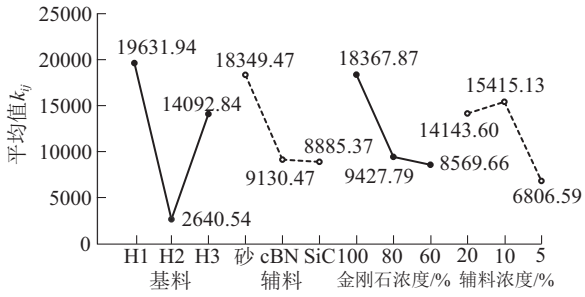

图2　耐磨试验结果

Fig.2　Abrasion test results

要因素,且以H1为基料的配方磨耗比最高(指标平均值$k_{11}=19631.94$),高于另外两种基料,说明基料为H1的试验块耐磨性最好。

在表5中,金刚石浓度的极差($R_3=9798.21$)低于基料的极差($R_1=16991.40$),且表6方差分析中金刚石浓度的F值($F=1.36$)小于标准值($F_{0.05}(2,2)$

表5 耐磨试验数值分析

Table 5 Numerical analysis for abrasion tests

序号	i水平j因素	磨耗比			K_{ij}	k_{ij}	$R_j(k_{max}-k_{min})$
		值1	值2	值3			
1	基料H1	35399.09	8631.47	14865.26	58895.82	19631.94	
2	基料H2	0.94	7917.17	3.51	7921.61	2640.54	16991.40
3	基料H3	19648.39	10842.78	11787.35	42278.52	14092.84	
4	辅料砂	35399.09	0.94	19648.39	55048.42	18349.47	
5	辅料cBN	8631.47	7917.17	10842.78	27391.41	9130.47	9464.09
6	辅料SiC	14865.26	3.51	11787.35	26656.12	8885.38	
7	金刚石浓度100%	35399.09	7917.17	11787.35	55103.61	18367.87	
8	金刚石浓度80%	19648.39	8631.47	3.51	28283.37	9427.79	9798.21
9	金刚石浓度60%	0.94	10842.78	14865.26	25708.97	8569.66	
10	辅料浓度20%	19648.39	7917.17	14865.26	42430.81	14143.60	
11	辅料浓度10%	35399.09	10842.78	3.51	46245.38	15415.13	8608.54
12	辅料浓度5%	0.94	8631.47	11787.35	20419.76	6806.59	

表6 耐磨试验方差分析

Table 6 Analysis of variance for abrasion tests

变异来源	偏差平方和	自由度	均方	F值	$F_{0.05}(2,2)$	显著性
基料(A)	450544425.2	2	225272212.62	3.48	19.0	不显著
辅料(B)	174619041.2	2	87309520.61	1.35	19.0	不显著
金刚石浓度(C)	176666165.3	2	88333082.66	1.36	19.0	不显著
误差(e)	129555303.7	2	64777651.83			
总误差	931385625.1	8				

注:误差项为合并辅料浓度(不显著因素)与原误差项计算得到,确保自由度有效;$F_{0.05}(2,2)=19.0$为$\alpha=0.05$显著性水平下的临界值。

=19),说明金刚石浓度变化对材料的耐磨性没有显著影响。虽然金刚石浓度的增加理论上会提高钻头的磨削效率,但在耐磨性测试中,过高的浓度若缺乏足够的胎体包镶力支撑,反而可能导致耐磨性下降。金刚石浓度增加可能使得基料不能提供良好的包镶能力,导致金刚石过早脱落,无法充分发挥磨削作用[19-20],反而降低材料的耐磨性。本试验中,基料对金刚石的包镶如图3所示(颗粒近似为球形)。

图中包镶力P:

$$P=\left[(\Delta L)AE\right]/D \tag{2}$$

式中:ΔL——胎体收缩量;A——颗粒横截面积;E——胎体的弹性模量;D——颗粒粒径。

由式(2)可知,同一胎体的包镶能力仅受被包镶颗粒大小影响[21]。若将金刚石和辅料简化为球形颗粒,以钨铜合金胎体为例[22](弹性模量约232×10^3 MPa,收缩量1.864×10^{-3} mm),结合球形最大横截面积A和粒径D的关系(式3),计算出试验中各尺寸颗粒的包镶力如表7所示。

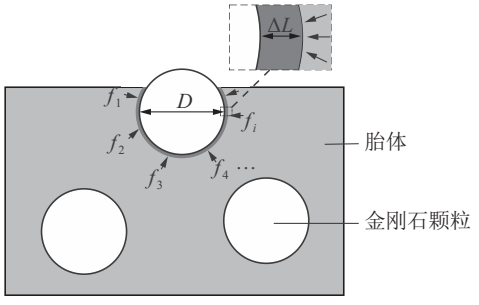

图3 金刚石包镶示意

Fig.3 Schematic of embedded diamond

$$A=\pi\left(D/2\right)^2 \tag{3}$$

由表7可见,金刚石浓度并未改变胎体本身的包镶能力。金刚石浓度的提升仅增加了磨粒的数

表7　同胎体下各颗粒的包镶力

Table 7　Embedding force of each particle under the same matrix

种类	颗粒粒度/目	最大横截面积/mm²	颗粒粒径/mm	包镶力/N
金刚石	35/40	0.15	0.45	144.15
金刚石	60/70	0.04	0.23	75.21
辅料	50/60	0.06	0.27	96.10
辅料	60/70	0.04	0.23	75.21

量,而金刚石浓度过高时,单位体积内颗粒数量增多,胎体用于包镶单个金刚石的有效作用面积被分散,可能削弱每个金刚石颗粒实际获得的包镶力。因此,单纯提高金刚石浓度并不能显著提升材料的耐磨性。

辅料(极差R_2=9464.09)及其浓度(R_4=8608.54)在试验中同样对耐磨性没有显著影响(F=1.35<19)。这是因为试验得到的磨耗比表示试验块的"耐磨能力",而非通常用来评判钻头的"切削/磨削效率"。辅料在钻头性能方面发挥着与金刚石相似的磨削作用,结合前人相关研究[21-25]分析,钻头中的辅料一方面对金刚石切削破碎的岩粉进行二次破碎,从而提升了钻头整体磨削能力;另一方面,由于胎体对不同颗粒的包镶差异(通常金刚石大于辅料)会导致钻进中辅料提前脱落,使钻头表面粗糙,因此更利于钻头发挥磨削作用。除此之外,辅料作为超硬材料,脱落后混杂在破碎岩粉中,加剧对胎体的磨损,进而辅助未脱落的金刚石出刃。可见,加入辅料之后,钻头的钻进效率可以得到提升。值得注意的是,"辅料可使钻进效率提升"这个结论与表6中得到的"辅料对耐磨性的影响不显著"并不冲突。试验数据表明,辅料的加入虽未有效改变材料自身的耐磨性能,却能有效增强其磨削破碎能力。

尽管耐磨试验的结果显示辅料及其浓度对材料的耐磨性影响无明显规律,但砂相对于其他辅料在某些组合中表现出更高的磨耗比(如配合基料H1和H3)。说明存在针对耐磨性的最优配方组合。综上,通过表5中各因素的磨耗比极差值的大小排序,结合试验分析,得到耐磨性最优试验方案为基料H1、辅料砂、金刚石浓度100%、辅料浓度10%。

4　结论

通过4因素3水平的正交试验,对钻头材料的配方进行了研究,深入分析了基料、辅料、金刚石浓度和辅料浓度对材料抗冲击韧性和耐磨性的影响。结果表明,基料种类是影响胎体材料综合性能的最主要因素,金刚石浓度、辅料及辅料浓度对材料性能的影响均未达到显著水平。其中基料H1在提升材料抗冲击韧性与耐磨性方面均表现出明显优势,能够为金刚石及辅料颗粒提供更稳定的包镶作用,避免磨粒过早脱落,保证材料综合性能。金刚石浓度提升无法显著增强材料耐磨性。辅料主要是提升磨削效率,对耐磨性整体影响不显著,但在特定基料(如H1、H3)中,砂作为辅料时可在一定程度上提升耐磨性。

综上,通过试验对比分析,得到了两套针对性优化配方:在抗冲击韧性方面,以基料H1、辅料SiC、金刚石浓度60%、辅料浓度10%为最优组合,在耐磨性方面,以基料H1、辅料砂、金刚石浓度100%、辅料浓度10%为最优组合。两组配方仅为本研究试验条件下的相对最优方案,其中各组分配比仅为本试验范围内的相对最优值,仅反映性能变化趋势,后续可围绕最优浓度范围开展细化研究。研究结果可为热压钻头胎体的配方优化提供参考,对提升钻头工程应用性能具有实际指导意义。

参考文献(References):

[1] Garcia-Gavito D, Azar J J. Proper nozzle location, bit profile, and cutter arrangement affect PDC-bit performance significantly [J]. SPE Drilling & Completion, 1994,9(3):167-175.

[2] 侯庆勇.国外钻头新技术[J].石油机械,2006,34(4):74-75.
HOU Qingyong. New drilling technologies from abroad[J]. China Petroleum Machinery, 2006,34(4):74-75.

[3] 杨展,谭松成,杨凯华,等.基于有限元分析的组合式金刚石钻头磨损规律与设计研究[J].煤田地质与勘探,2023,51(9):164-170.
YANG Zhan, TAN Songcheng, YANG Kaihua, et al. Wear law and design of assembling diamond bit based on finite element analysis [J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51 (9): 164-170.

[4] 常思,刘宝昌,戴文昊,等.多元纳米颗粒强化WC-青铜基金刚石钻头胎体材料[J].金刚石与磨料磨具工程,2022,42(3):317-324.
CHANG Si, LIU Baochang, DAI Wenhao, et al. Properties of WC-bronze based matrix material for diamond bit reinforced by multielement nanoparticles[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2022,42(3):317-324.

[5] 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(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(11):57-59.

[6] 徐强,刘一波,徐良,等.利用配方均匀设计优化金刚石钻头的胎体配方[J].金刚石与磨料磨具工程,2016,36(4):49-53.
XU Qiang, LIU Yibo, XU Liang, et al. Optimizing diamond drill bit formula using uniform design[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2016,36(4):49-53.

[7] 汪洪民,潘秉锁,刘海声,等.青海野马泉矿区钻头胎体配方设计研究[J].中国锰业,2020,38(3):101-103,109.
WANG Hongmin, PAN Bingsuo, LIU Haisheng, et al. A research on formulation design of bit matrix in Yemaquan, Qinghai Province[J]. China's Manganese Industry, 2020, 38(3): 101-103,109.

[8] 杨雪嘉,韦秀洁,潘秉锁.耐高温电镀镍锰合金胎体金刚石钻头的钻进性能研究[J].钻探工程,2024,51(4):46-53.
YANG Xuejia, WEI Xiujie, PAN Bingsuo. Study on drilling performance of heat-resisting electroplated diamond bit with Ni-Mn alloy matrix[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(4): 46-53.

[9] 沈立娜,郭长江,阮海龙,等.新型自出刃多孔胎体孕镶金刚石钻头的研究[C]//第十八届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会.哈尔滨:中国地质学会探矿工程专业委员会,2015:726-730.
SHEN Lina, GUO Changjiang, RUAN Hailong, et al. Study on a new type of self-exposing porous matrix impregnated diamond bit[C]//The 18th Annual Academic Exchange Meeting on Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling). Harbin: Professional Committee of Exploration Engineering, Geological Society of China, 2015:726-730.

[10] 揣金乐,柳贵德,吕新全,等.提高钻探效率的钻头与材料选择分析[J/OL].中文科技期刊数据库(引文版),2024(8):54-57.
CHUAI Jinle, LIU Guide, LV Xinquan, et al. Analysis on drill bit and material selection for improving drilling efficiency [J/OL]. Engineering Technology(Citation Edition), 2024(8): 54-57.

[11] 王英,高明洋,张凯,等.速度对金刚石钻头碎岩过程响应的影响[J].自动化应用,2024,65(10):197-201.
WANG Ying, GAO Mingyang, ZHANG Kai, et al. Influence of speed on the response of diamond drill bits to rock breaking process[J]. Automation Application, 2024,65(10):197-201.

[12] 郭先敏,侯芳.国外钻井装备与技术新进展[J].石油机械,2016,44(7):20-26.
GUO Xianmin, HOU Fang. Foreign drilling equipment and technology progress[J]. China Petroleum Machinery, 2016,44(7):20-26.

[13] 王照智.仿生耦合孕镶金刚石钻头耐磨增效机理研究[D].长春:吉林大学,2017.
WANG Zhaozhi. Study on the mechanism of wear resistance and efficiency increase of bionic coupling impregnated diamond bit[D]. Changchun: Jilin University, 2017.

[14] 刘海龙,沈立娜,刘协鲁,等.NR826M孕镶全面金刚石钻头在元坝气田的应用[J].地质装备,2018,19(1):42-44.
LIU Hailong, SHEN Lina, LIU Xielu, et al. Application of NR826M impregnated diamond bit in Yuanba Gas Field[J]. Equipment for Geotechnical Engineering, 2018,19(1):42-44.

[15] 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.

[16] 沈立娜,路杙,尹建民,等.坚硬地层NBS高效孕镶金刚石钻头的研究与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2017,44(1):84-86,92.
SHEN Lina, LU Yi, YIN Jianmin, et al. Study and application of high efficiency NBS impregnated bit for hard formation [J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2017,44(1):84-86,92.

[17] 高玉彬,陈洋.钻进坚硬致密岩层的金刚石钻头试验研究[J].超硬材料工程,2021,33(3):1-6.
GAO Yubin, CHEN Yang. Experimental study of diamond bit for drilling hard and compact rock[J]. Superhard Material Engineering, 2021,33(3):1-6.

[18] Bai R, Zhang S H, Han Y, et al. Effect of CL192 pre-alloyed powder on matrix properties of impregnated diamond bit[J]. Diamond and Related Materials, 2020,107:107878.

[19] Mostofi M, Richard T, Franca L, et al. Wear response of impregnated diamond bits[J]. Wear, 2018,410/411:34-42.

[20] 王双喜,刘雪敬,耿彪,等.金属结合剂金刚石磨具的研究进展[J].金刚石与磨料磨具工程,2006(4):71-75.
WANG Shuangxi, LIU Xuejing, GENG Biao, et al. Development of metal bonded diamond abrasive tools[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2006(4):71-75.

[21] 王佳亮,韦文杰,张绍和,等.硬脆性辅料对孕镶金刚石钻头钻进性能的影响机制[J].煤田地质与勘探,2019,47(1):200-205,210.
WANG Jialiang, WEI Wenjie, ZHANG Shaohe, et al. Influence mechanism of hard brittle abrasive on the drilling performance of impregnated diamond bit[J]. Coal Geology & Exploration, 2019,47(1):200-205,210.

[22] 赵尔信.金刚石钻头某些参数的计算方法[J].探矿工程,1981(2):60-62.
Zhao Erxin. Calculation methods for certain parameters of diamond bits[J]. Exploration Engineering, 1981(2):60-62.

[23] 张绍和,杨凯华.主辅磨料双切削作用金刚石钻头研究[J].地质与勘探,2001,37(5):88-90.
ZHANG Shaohe, YANG Kaihua. Research into the diamond bit of twofold grinding by using primary and assist abrasive[J]. Geology and Exploration, 2001,37(5):88-90.

[24] 王佳亮,张绍和.硬质磨粒对孕镶金刚石钻头胎体磨损性能的影响[J].中国有色金属学报,2017,27(9):1872-1878.
WANG Jialiang, ZHANG Shaohe. Effects of hard abrasive particles on matrix wear resistance of diamond impregnated bit[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2017,27(9):1872-1878.

[25] Wang J L, Zhang S H. A new diamond bit for extra-hard, compact and nonabrasive rock formation[J]. Journal of Central South University, 2015,22(4):1456-1462.

(编辑 王跃伟)