

水平定向钻进坚硬地层孕镶金刚石钻头的 研究与应用

胡立^{1,2,3}, 李俊萍^{1,2*}, 唐治建³

(1. 中国地质科学院探矿工艺研究所, 四川 成都 611734; 2. 中国地质调查局智能钻探技术创新中心, 四川 成都 611734;
3. 成都华建地质工程科技有限公司, 四川 成都 611734)

摘要: 针对水平定向钻进坚硬地层效率低的问题, 通过利用FeCoCu预合金胎体的硬脆性以及硬质颗粒碳化硅弱化胎体的特点, 提高钻头的自锐性。采用分层结构设计, 将高、低耐磨性胎体层沿钻头径向方向交替排布, 其中高、低耐磨性胎体层厚度分别为2.5~3.5 mm和1.0~1.5 mm, 可实现高、低耐磨性胎体层同步磨损, 提高钻进效率。将FeCoCu预合金胎体和分层式胎体结构相结合, 研制的孕镶金刚石钻头成功应用于水平定向钻进勘察工程坚硬钾长花岗岩地层, 平均机械钻速0.8~1.5 m/h, 钻头使用寿命为30~40 m。与普通同心圆尖齿钻头相比, 机械钻速提高约1倍, 寿命提高30%以上。

关键词: 水平定向钻进; 坚硬地层; 孕镶金刚石钻头; 分层结构; FeCoCu预合金; 机械钻速; 工程勘察

中图分类号: P634.4⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2024)06-0085-06

Development and application of impregnated diamond bit for horizontal directional drilling in hard formation

HU Li^{1,2,3}, LI Junping^{1,2*}, TANG Zhijian³

(1. Institute of Exploration Technology, CAGS, Chengdu Sichuan 611734, China;

2. Intelligent Drilling Technology Innovation Center, China Geological Survey, Chengdu Sichuan 611734, China;

3. Chengdu Huajian Geological Engineering Technology Co., Ltd., Chengdu Sichuan 611734, China)

Abstract: Aiming at the low efficiency of horizontal directional drilling in hard formation, the self-sharpness of the bit was improved by the hard brittleness of FeCoCu pre-alloy matrix and the hard silicon carbide particle to weaken the matrix. The layered structure design is used to alternate the high and low wear resistance layers along the radial direction of the bit. The thickness of low wear resistance and high wear resistance were designed to be 1.0~1.5mm and 2.5~3.5mm respectively, to realize simultaneous wear of high wear resistance layers and low wear resistance layers and improve drilling efficiency. The bits have been successfully applied to horizontal directional drilling in hard potassium feldspar granite formation, using the combination of FeCoCu pre-alloy matrix and stratified matrix structure, with the average ROP of 0.8~1.5m/h and the drilling life of 30~40m. Compared with the ordinary concentric sharp tooth bit, the ROP has been increased by about double, and the drilling life has been increased by more than 30%.

Key words: horizontal directional drilling; hard formation; impregnated diamond bit; layered structure; FeCoCu pre-alloy; rate of penetration; engineering investigation

收稿日期: 2024-03-20; 修回日期: 2024-06-03 DOI: 10.12143/j.ztgc.2024.06.010

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“地质矿产勘查技术方法升级与应用”(编号: DD20243535)

第一作者: 胡立, 男, 汉族, 1977年生, 工程师, 长期从事金刚石工具研究与设计工作, 四川省成都市郫都区港华路139号, 85378102@qq.com。

通信作者: 李俊萍, 女, 汉族, 1986年生, 高级工程师, 长期从事金刚石工具设计与研发工作, 四川省成都市郫都区港华路139号, lijunping_xp@163.com。

引用格式: 胡立, 李俊萍, 唐治建. 水平定向钻进坚硬地层孕镶金刚石钻头的研究与应用[J]. 钻探工程, 2024, 51(6): 85-90.

HU Li, LI Junping, TANG Zhijian. Development and application of impregnated diamond bit for horizontal directional drilling in hard formation[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(6): 85-90.

随着我国经济的发展,西部地区铁路建设规模逐年加大,高海拔、高烈度地震区的大埋深超长铁路隧道越来越多。例如,川藏铁路雅安至林芝段,分布有72座隧道,其中最长隧道超40 km,埋深超过1000 m的隧道段长610 km^[1-2]。

川藏铁路沿线有着显著的地形高差、活动的板块构造、频发的山地灾害和敏感的生态环境^[3-4]。面对如此复杂的自然条件,传统的竖向深孔取心勘察在隧道建设中无法大范围开展。通过近几年的工程实践应用,水平定向钻探技术已经实现线状式勘察,与传统的施工技术相比,可大幅降低成本,更有利于验证隧道沿线地质情况。水平定向勘察施工技术在西部地区川藏铁路勘察、引大济岷等国家重点工程中的应用越来越广。但是,在多个水平孔施工过程中,常钻遇坚硬致密地层,甚至出现新钻头钻进0.2~1 m后不再进尺的现象,很大程度上影响了勘察进度,降低了钻进效率。

针对水平定向钻进坚硬地层效率低的问题,通过现场岩心的收集与分析,以提高孕镶金刚石钻头本身破碎岩石的能力作为突破点,提高钻头胎体配方与地层的适应性,同时配合合理的钻头结构,从多方面解决钻头与坚硬地层的适应性问题,提高钻头的自锐性与锋利性,为同类工程提供参考。

1 水平定向钻进坚硬地层难点分析

(1)水平钻进工艺特点。水平定向钻进勘察技术是将传统的取心技术与水平定向技术结合,适用于常规垂直钻孔方法难以实施的深埋长隧道、地下空间等线性勘察工程,可揭露钻探范围内岩性特征、不良地质和水文地质等情况。与垂直孔相比,水平定向钻进存在孔底加压难、孔壁摩阻大等问题^[5],水平孔钻具受到的摩擦阻力和扭矩大幅提高,动力消耗大幅增加,施加在金刚石钻头唇面上的压力和转速均有一定的局限性,从而对金刚石钻头本身出刃效果、自锐性等性能提出了更高的要求。

(2)坚硬地层特征。对岩心的薄片分析和压入硬度试验发现,常见的坚硬地层具有岩石硬度高、造岩矿物颗粒细、结构致密等特点。在钻进过程中产生的岩粉颗粒细,对钻头胎体的磨损轻微,失效的金刚石难以脱落,降低了金刚石颗粒的有效出刃,钻进过程中无法产生有效的岩石破碎,导致钻头进尺缓慢或不进尺。

(3)钻头与地层的适配性。坚硬“打滑”地层用孕镶金刚石钻头的研发一直是重要的研究方向^[6],在垂孔钻进过程中也存在钻头与坚硬“打滑”地层的适应性问题,主要采用的解决方法^[7]为人工投砂磨钻头法,同时也可通过对金刚石钻头胎体、结构等的改变提高钻头与地层的适应能力,如低硬度软胎体钻头、主辅磨料钻头、仿生钻头^[8]、异形唇面结构钻头等。在水平孔中,传统的人工投砂方式无法实现,只能通过对钻头胎体性能和结构的研究,提高钻头与地层的适应性和自锐性,实现高效钻进。

2 水平孔钻进坚硬地层孕镶金刚石钻头的设计

影响孕镶金刚石钻头性能的因素主要有3个方面:胎体性能、金刚石参数和钻头结构。胎体合金过高的硬度与耐磨性导致胎体难以磨损,金刚石难以出露;与地层不相匹配的金刚石参数影响金刚石的有效出刃,包括金刚石出刃高度、失效形式等;常规的钻头结构,钻头唇面与孔底接触面积大、孔底全面积破碎方式等进一步降低钻进性能,导致钻头在坚硬、致密地层中出现不进尺、打滑等现象。因此,结合钻头胎体配方、分层结构等参数,对金刚石钻头进行了设计与试验。

2.1 胎体配方设计

在孕镶金刚石钻头中,常采用碳化钨基作为骨架材料,添加663青铜粉末作为粘结材料,通过Ni、Co、Mn、Fe等金属元素调节钻头的性能。由于碳化钨的耐磨性高,这种设计体系更适用于中—强研磨性的地层。当钻进坚硬、“打滑”地层时,单纯依靠降低碳化钨骨架材料,增加低硬度、低耐磨性的青铜粉等粘接材料的含量,实现胎体硬度和耐磨性的降低,对坚硬弱研磨性地层的适应性并不理想。随着青铜粉的增加,胎体的脆硬性降低,易导致胎体合金的变形,反而不利于钻进性能的提高。

在金刚石工具行业,对铁基预合金粉末进行了大量的研究与应用^[9-12]。与传统的碳化钨基单质粉末配方相比,铁基预合金配方体系的烧结温度低,胎体组织均匀性高,胎体的耐磨性较差,对金刚石的包镶能力好,具有较高的切割效率。通过提高胎体合金的硬脆性,提高胎体摩擦系数,加快胎体在弱研磨性地层中的超前磨损,促进金刚石出刃,在一定程度上改善了金刚石的自锐性能,进而提高对坚硬弱研磨性地层的适应性。

铁基预合金粉主要作为代钴合金,包括 FeCo-Cu、FeNiCo 等合金粉末,具有单质 Co 类似的性能,并大幅降低 Co 的使用量,提高胎体对金刚石的包镶能力,广泛应用于地质金刚石钻头的研制中^[13-15]。

因此,为了代替传统的钴基配方,以 FeCoCu 预合金粉末(如图 1a 所示)作为主要成分,含量为 60%~80%,以 663Cu 合金粉作为粘结材料配合微调。663Cu 合金粉作为胎体低熔点合金,其主要目的是降低烧结温度,填充胎体孔隙,促进合金颗粒之间的烧结,提高致密性和合金化程度。通过调整 FeCoCu 和 663Cu 含量的变化,进行胎体硬度和耐磨性的调整,提高胎体合金的硬脆性,改善钻头自锐性,提高胎体对金刚石的支撑能力。

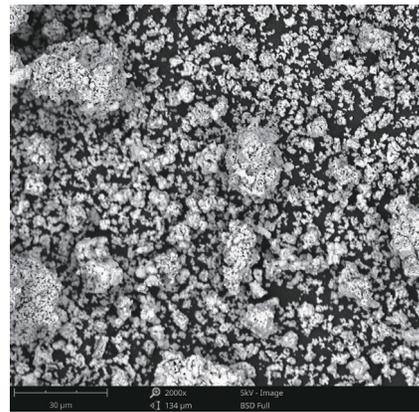
同时,通过添加 2% 硬质颗粒碳化硅(如图 1b 所示),起到弱化胎体的作用。由于硬质颗粒碳化硅本身具有较强的硬度和耐磨性,但其与胎体结合力较差,在钻进过程中容易脱落,一方面,脱落坑数量的增加,提高胎体唇面的粗糙度,另一方面脱落的硬质颗粒通过磨粒磨损,在孔底进一步磨损胎体,加快金刚石的出刃,增强钻头的自锐性。

2.2 分层结构设计

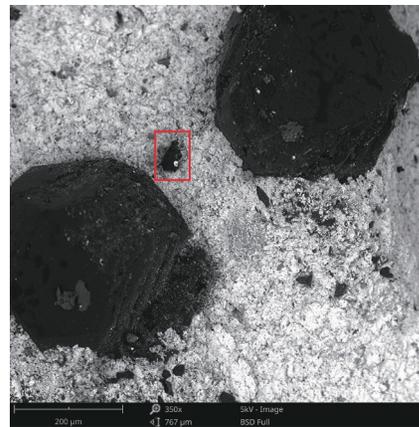
在常规的钻头结构设计中,钻头唇面主要采用同心圆尖齿型,新钻头接触孔底的面积小,有利于快速出刃。但随着尖齿的磨完,与平底钻头无异,对钻进效率无实质性提升。在坚硬地层钻进中,使用较多的是齿轮钻头和梯形齿钻头,其实质减少了钻头唇面接触孔底的面积,提高作用于单粒金刚石上的外压力,进而达到提高钻进效率的目的。但钻头胎体近于均质状态,对坚硬地层的钻进效率提高不大。

近年来,国内对分层式钻头研究较多,采用插入铜片、不锈钢片和钢模压片等制作工艺,实现钻头胎体的分层目的。在分层胎体中,设计为含金刚石的高耐磨性胎体层和不含金刚石(或少量金刚石)的低耐磨性胎体层在钻头径向方向相互交错(见图 2),形成真正意义上的同心圆环状结构,钻头一直保持这种结构直到全部工作层耗尽。因此,减少了钻头工作层与孔底岩石的接触面积,在钻压不变的情况下,钻头单位面积上能够获得较大的钻进压力,使金刚石能够实现体积方式破碎岩石。

在钻进过程中,孔底地层形成与同心圆尖齿结构相吻合的同心圆岩脊,利用破碎穴的效应和钻具



(a) 预合金粉末



(b) 添加碳化硅

图 1 FeCoCu 预合金粉末与胎体组织照片

Fig.1 Photos of FeCoCu pre-alloyed powder and matrix

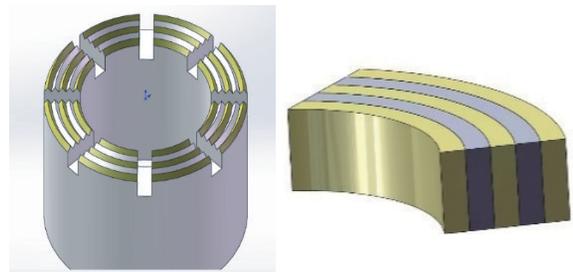


图 2 胎体分层结构示意图

Fig.2 Hierarchical structure diagram

的径向和轴向振动,以机械方式破碎岩脊。这种机械方式破碎的岩石颗粒较大,对钻头胎体具有反向磨蚀能力,进一步促进金刚石的出刃,有利于提高钻进效率。

在分层钻头制造工艺中,采用冷压机通过钢模,分别压制出高耐磨胎体薄层和低耐磨胎体薄层,在石墨模具中交错组装,粘结保径聚晶,装入粘接粉末和钢体,采用自动中频烧结机烧结,烧结温

度为 950 ℃, 烧结压力 15 MPa, 保温时间 4 min, 研制的分层结构钻头如图 3 所示。

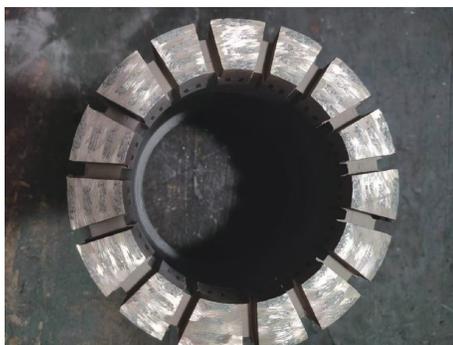


图3 分层式结构钻头(PQ)
Fig.3 Layered bit(PQ)

3 现场应用与分析

3.1 现场应用

四川省天全县境内某隧道水平泄水孔和引大济岷工程水平定向孔, 钻遇的地层均为花岗岩(如图 4 所示), 主要矿物由钾长石、石英和斜长石等组成, 中细粒结构, 可钻性等级 8~9 级, 地层研磨性弱。采用 PQ 规格钻头钻进, 前期使用多种低硬度软胎体钻头 HRC-5~10, 钻头结构包括同心圆尖齿、齿轮等, 钻头在进尺 0.2~1 m 之后, 均出现不进尺现象, 频繁起、下钻敲磨钻头唇面或更换钻头, 严

重影响了施工效率。



(a) 水平泄水孔的岩心



(b) 引大济岷工程水平孔的岩心

图4 水平孔花岗岩岩心

Fig.4 Horizontal borehole core of granite formation

如表 1 所示后期采用 FeCoCu 预合金胎体-分层结构孕镶金刚石钻头, 胎体硬度为 HRC0~5, 添加 2% 硬质颗粒碳化硅, 金刚石浓度为 60%, 金刚石配颗粒比为 45/50 目: 50/60 目=7:3。平均机械钻速 0.8~1.5 m/h, 钻头使用寿命为 30~40 m。与现场使用的普通同心圆尖齿钻头相比, 机械钻速提高约 1 倍, 寿命提高 30% 以上。

表1 钻头使用情况统计

Table 1 Statistics of drill bits usage

钻孔名称	钻进地层	钻头规格	钻头结构	胎体硬度/HRC	总进尺/m	机械钻速/(m·h ⁻¹)	钻头使用寿命/m
水平泄水孔	钾长花岗岩	PQ	分层钻头	0~5	260	0.8~1.3	30.2
		PQ	同心圆尖齿	5~10	132	0.2~0.5	18.4*
引大济岷工程 水平孔	钾长花岗岩	PQ	分层钻头	0~5	88	1.0~1.2	35.0
		PQ	同心圆尖齿	5~10	57	0.5~0.8	26.6*
		HQ	分层钻头	0~5	302	1.2~1.5	40.0

*: 同心圆尖齿钻头进尺 0.2~1 m 之后, 均出现钻头不进尺现象, 需要提钻打磨钻头唇面。

3.2 钻头应用分析

3.2.1 FeCoCu 预合金胎体耦合硬质颗粒加快金刚石出刃效率

通过 FeCoCu 预合金粉末与 663Cu 含量的调节, 随着胎体中铜合金总量的增多, 胎体金属中的孔隙率减少, 胎体合金化程度提高, 可实现胎体硬度和耐磨性大幅降低, 提高与坚硬地层的适应性。

同时, FeCoCu 预合金粉末中铜元素的添加, 可

减少低熔点铜锡合金的使用量, 避免低熔点金属过多导致的胎体变形、金刚石难出刃等缺陷。如图 5 所示, 磨损后的胎体唇面中金刚石在旋转方向的背后出现蝌蚪状的胎体支撑, 胎体合金对金刚石包镶牢固, 金刚石出露高度得以保证, 金刚石的碎岩作用得到了充分的发挥。

胎体组织中的硬质颗粒在钻进坚硬地层中也发挥着十分重要的作用。硬质颗粒与胎体结合力

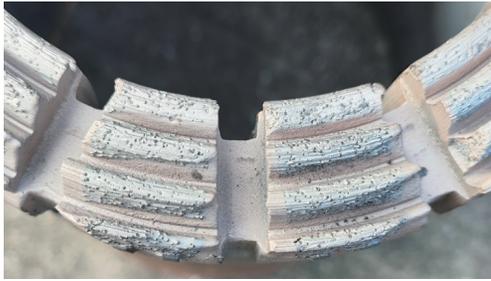


图5 钻头唇面
Fig.5 Lip of bit

差,在钻进过程中不但易脱落,而且与硬质颗粒接触的失效金刚石在胎体中的包镶能力也大幅减弱,易于脱落,促进金刚石的新陈代谢,更有利于钻进。在磨损后的试验钻头唇面,出现一定量的金刚石脱落坑(见图5),即磨平、破碎失去碎岩功能的金刚石不断脱落,新金刚石不断出露,保证在钻进过程中金刚石能有效刻取岩石,实现持续钻进。

3.2.2 分层结构提高碎岩效率

在分层钻头的设计中,关键点在于高耐磨性胎体层和低耐磨性胎体层结构参数的合理设置,其决定了钻头的钻进效率和使用寿命。因此,为了同时兼顾钻头实现正常钻进,并具有较高的使用寿命,应根据地层特征适当调整分层结构参数。

在前期试验中(如表2所示),将1号钻头的高、低耐磨性胎体层厚度分别设计为2.5 mm和2.7 mm,高、低耐磨性胎体层厚度比值 <1 ,高耐磨性胎体层刻取岩石的面积相对小,可有效提高钻头钻进时效。但由于孔底产生的岩脊因强度高,导致低耐磨性胎体层的异常磨损,甚至出现钻头拉槽、高耐磨胎体层断裂等非正常损坏现象(如图6所示)。

表2 分层结构参数与钻头性能对比表

Table 2 Comparison table of layered structure parameters and bit performance

钻头 编号	高耐磨性胎体		低耐磨性胎体		钻头 寿命/ m	平均机 械钻速/ ($m \cdot h^{-1}$)
	厚度/ mm	层数/ 层	厚度/ mm	层数/ 层		
1	2.5	4	2.7	3	8.8	1.6
2	3.4	4	1.5	3	30	0.9

根据出现的异常磨损情况,2号钻头的高、低耐磨性胎体层厚度分别调整为3.4 mm和1.5 mm,高、低耐磨性胎体层厚度比值 >2 ,即适当降低低耐磨



(a) 崩齿后的钻头



(b) 正常出刃的钻头

图6 不同磨损状态的钻头

Fig.6 Bits in different wear states

性胎体层的厚度,增加高耐磨性胎体层厚度,可实现环形沟槽底唇面的形成,从而保证正常钻进情况下,使钻头的有效寿命也大幅提高。

根据前期试验结果,在后期钻头的设计中,低耐磨性胎体层厚度为1.0~1.5 mm,高耐磨性胎体层厚度为2.5~3.5 mm,以减少形成的岩脊厚度,降低岩脊强度和破碎后的岩石颗粒尺寸,减少岩粉对钻头胎体的过度磨损。同时,在钻进过程中出现环形沟槽,产生的岩脊在钻具振动等作用下破碎,不会快速磨损低耐磨性胎体层,实现高耐磨性胎体层和低耐磨性胎体层同步磨损,保证了胎体的整体强度,未出现崩齿现象,保持持续正常钻进。实现了钻头在具有较高钻进时效的同时,并具有较长钻进寿命的目标,减少了因钻头寿命过短而频繁提下大钻的次数。

4 结论

(1)采用FeCoCu预合金胎体添加碳化硅硬质颗粒,与分层式胎体结构相结合,改善了钻头的自锐性,成功应用于水平定向钻进坚硬地层,平均机械钻速0.8~1.5 m/h,钻头使用寿命为30~40 m。

与普通同心圆尖齿钻头相比,机械钻速提高约1倍,寿命提高30%以上。

(2)通过调节高、低耐磨性胎体层厚度等结构参数,可优化分层结构金刚石钻头的钻进效率和使用寿命。建议低耐磨性胎体层厚度为1.0~1.5 mm,高耐磨性胎体层厚度为2.5~3.5 mm,可实现胎体层同步磨损。

(3)分层结构钻头在水平定向钻进坚硬地层中具有明显优势,但推广应用还需要进一步深入研究,包括各层胎体金刚石浓度、粒度参数以及各层胎体耐磨性对钻进效率和钻头使用寿命的影响等。

参考文献(References):

- [1] 田四明,王伟,巩江峰.中国铁路隧道发展与展望(含截至2020年底中国铁路隧道统计数据)[J].隧道建设(中英文),2021,41(2):308-325.
TIAN Siming, WANG Wei, GONG Jiangfeng. Development and prospect of railway tunnels in China (Including statistics of railway tunnels in China by the end of 2020)[J]. Tunnel Construction, 2021,41(2):308-325.
- [2] 陈湘生,徐志豪,包小华,等.中国隧道建设面临的若干挑战与技术突破[J].中国公路学报,2020,33(12):1-14.
CHEN Xiangsheng, XU Zhihao, BAO Xiaohua, et al. Challenges and technological breakthroughs in tunnel construction in China[J]. China Journal of Highway and Transport, 2020,33(12):1-14.
- [3] 麻朗朗,李田周,李宏智,等.孜拉山1888 m无垂深超长水平孔钻进关键技术[J].钻探工程,2023,50(6):92-98.
MA Langlang, LI Tianzhou, LI Hongzhi, et al. Key techniques for drilling a 1888m ultralong horizontal hole with zero TVD tolerance in Zila Mountain[J]. Drilling Engineering, 2023,50(6):92-98.
- [4] 陈云龙,刘耿仁,蔡家品,等.长距离水平定向孔取芯技术应用——以天山胜利隧道水平定向孔地质勘察为例[J].隧道建设(中英文),2023,43(S1):298-303.
CHEN Yunlong, LIU Gengren, CAI Jiapin, et al. Application of long-distance horizontal directional borehole coring technology: a case study of geological investigation of Tianshan Shengli tunnel[J]. Tunnel Construction, 2023,43(S1):298-303.
- [5] 周梦迪,刘欢,韩丽丽,等.用于工程勘察的水平定向钻探技术探讨[J].钻探工程,2023,50(2):135-142.
ZHOU Mengdi, LIU Huan, HAN Lili, et al. Discussion on the horizontal directional drilling technology for engineering investigation[J]. Drilling Engineering, 2023,50(2):135-142..
- [6] 张绍和,孔祥旺,孙平贺,等.孕镶金刚石钻头设计与制造新技术回顾与展望[J].钻探工程,2023,50(S1):1-12.
ZHANG Shaohe, KONG Xiangwang, SUN Pinghe, et al. Review and prospect of new technologies for design and manufacture of impregnated diamond bits [J]. Drilling Engineering, 2023,50(S1):1-12.
- [7] 高科,王金龙,赵研,等.仿生自补偿一体式高胎体孕镶金刚石取心钻头研究[J].钻探工程,2022,49(1):16-24.
GAO Ke, WANG Jinlong, ZHAO Yan, et al. Bionic self-compensating integrated high-matrix impregnated diamond coring bit[J]. Drilling Engineering, 2022,49(1):16-24.
- [8] 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.
- [9] 张健琼,杨志威,刘一波.预合金粉末对金刚石石材锯片性能的影响[J].超硬材料工程,2021,33(2):13-17.
ZHANG Jianqiong, YANG Zhiwei, LIU Yibo. Impact of pre-alloyed powder on diamond saw blade performance [J]. Superhard Material Engineering, 2021,33(2):13-17.
- [10] 刘志环,张绍和.Co质量分数对FeCuCo预合金粉烧结与力学性能的影响[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(12):2958-2968.
LIU Zhihuan, ZHANG Shaohe. Effect of Co content on sintering and mechanical properties of FeCuCo pre-alloyed powders [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019,50(12):2958-2968.
- [11] 莫松林,周天盛,唐兰艳,等.铁铜类预合金粉末应用于热压金刚石钻头的试验研究[J].超硬材料工程,2017,29(3):28-30.
MO Songlin, ZHOU Tiansheng, TANG Lanyan, et al. Experimental study of the application of Iron Copper pre-alloyed powder in hot pressing diamond bit [J]. Superhard Material Engineering, 2017,29(3):28-30.
- [12] 康鑫,段隆臣,刘卫卫,等.孕镶金刚石钻头钻进花岗岩岩屑特性室内试验研究[J].金刚石与磨料磨具工程,2023,43(1):23-28.
KANG Xin, DUAN Longchen, LIU Weiwei, et al. Experimental study on rock cutting characteristics of granite broken by impregnated diamond bit [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2023,43(1):23-28.
- [13] 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.
- [14] 李俊萍,胡立.FeCoCu预合金粉末含量和烧结温度对碳化钨基钻头性能的影响[J].金刚石与磨料磨具工程,2023,43(1):29-34.
LI Junping, HU Li. Effect of content of FeCoCu pre-alloy powder and sintering temperature on performance of Tungsten carbide drill bit [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2023,43(1):29-34.
- [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.

(编辑 荐华)