

硬岩超高胎体偏心齿钻头的研制及应用

阮海龙¹, 沈立娜^{*1}, 胡远彪², 贾美玲¹, 吴海霞¹, 李春¹

(1.北京探矿工程研究所,北京 100083; 2.中国地质大学(北京),北京 100083)

摘要:本文针对硬地层钻头寿命短、钻进效率低等问题,研制了一种新型超高胎体偏心齿钻头。该钻头通过条状或类条状设计提高了单齿工作压力;偏心布齿设计改善了钻进过程中钻头的切削齿受力状态,不但提高了钻头的强度,而且使得排浆更加通畅;扭面后支撑结构保证了钻头具有最高可至30 mm的超高胎体工作层。在钻头的制造工艺上,将无压烧结、热压烧结与二次镶焊3种工艺进行了有机结合,钻头金刚石热损伤小、钻头胎体强度高,保径优势明显,为深部硬地层高效长寿命钻进提供了技术支撑。

关键词:超高胎体;偏心齿;无压烧结;热压烧结;金刚石钻头

中图分类号:P634.4⁺¹ **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)03-0056-05

Development and application of ultrahigh matrix eccentric-cutter bits for deep hard rock

RUAN Hailong¹, SHEN Lina^{*1}, HU Yuanbiao², JIA Meiling¹, WU Haixia¹, LI Chun¹

(1.Beijing Institute of Exploration Engineering, Beijing 100083, China;

2.China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In view of the problems with impregnated diamond bits in deep hard formation such as short service life, low drilling efficiency, a new type of ultrahigh matrix eccentric-cutter impregnate bit was developed. The working pressure of each impregnated cutter is improved through strip or quasi strip design. The eccentric cutter distribution design improves the cutter stress state during the drilling process, which not only improves the working strength of the bit, but also provides a more smooth mud circulation. The supporting structure ensures that the bit has an ultrahigh matrix working height, which is up to 30mm. The combination of pressureless sintering, hot pressing sintering and secondary inlay welding is carried out. The diamond bit has lower thermal damage, high strength and good gauge protection, which provides technical support for deep hard rock drilling.

Key words: ultrahigh matrix; eccentric cutter; pressureless sintering; hot pressing sintering; diamond bit

0 引言

随着钻探技术的进步和人类对矿产资源的渴求,地球深部矿产资源勘探已成为全球找矿的重要方向。在小口径地质勘探领域,绳索取心钻进得到了广泛应用,由于这种方法不需要将钻杆提升到孔

外,所以极大地减少了起下钻具的时间,在深部钻探领域优势更加明显,而钻头寿命和机械钻速是影响绳索取心钻进效率的重要因素^[1-5]。深部地层坚硬复杂,钻头极易磨损或难以进尺,为了提高钻头的机械钻速,很多学者对金刚石钻头胎体进行了研

收稿日期:2020-11-13; 修回日期:2021-01-28 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.03.007

基金项目:国家重点研发计划资助项目“多金属矿岩心钻探关键技术装备联合研发及示范”(编号:2016YFE0202200)

作者简介:阮海龙,男,汉族,1984年生,高级工程师,地质工程专业,硕士,长期从事深地深海碎岩及取心器具的研究工作,北京市房山区良乡工业开发区二期创新路1号(102488),dbksda@163.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(102488),491833745@qq.com。

引用格式:阮海龙,沈立娜,胡远彪,等.硬岩超高胎体偏心齿钻头的研制及应用[J].钻探工程,2021,48(3):56-60.

RUAN Hailong, SHEN Lina, HU Yuanbiao, et al. Development and application of ultrahigh matrix eccentric-cutter bits for deep hard rock[J]. Drilling Engineering, 2021, 48(3):56-60.

究,如王佳亮等^[6]将SiC、棕刚玉和合金钢丸作为胎体耐磨性弱化颗粒添加至胎体中并研究了胎体磨损机制;郭庆清等^[7]研究了不同胎体弱化颗粒材质对钻头胎体结构、力学性能和摩擦磨损行为的影响;庞丰等^[8]研究了造孔剂对金刚石钻头胎体性能的影响等。这些针对坚硬致密地层的胎体改进机制,在一定程度上牺牲了胎体的耐磨性或强度^[9-11],从而影响了钻头的使用寿命,刘宝昌等^[12]研究了CVD金刚石条对孕镶金刚石钻头的强化作用,可提高坚硬地层的钻进效率和寿命,可结合地层情况借鉴参考。除改善胎体配方外,赵涛^[13]从钻头的切削结构入手,采用齿轮钻头结构增加单齿工作比压来提高机械钻速,然而这种钻头结构受胎高和强度的限制,条状齿工作层很快磨平而导致钻头无法继续发挥高效钻进作用。因此,本文针对深部坚硬地层钻头寿命短、进尺效率低等问题,开展了超高胎体偏心齿金刚石钻头的研制。

1 钻头的研制

1.1 胎体配方

在金刚石品级不高的情况下,对于坚硬地层尤其是坚硬致密“打滑”地层,孕镶钻头通常选用较软的胎体。然而,随着我国人造金刚石品级以及金刚石包镶技术的不断提高,选用相对较硬的胎体(HRC20~40)可提高深部硬岩金刚石钻头的寿命。为此,选用混入0.8%稀土的Fe基预合金粉末,粒度为2~10 μm,胎体硬度HRC23~25,抗弯强度1123 MPa,抗冲击韧性约6 J/cm²^[14-15]。

1.2 金刚石的优选

选用高品级中等偏细粒度人造金刚石单晶,即40/45、50/60、60/70混合。因为随着单晶粒度的增大,晶体包裹体含量增大,晶格畸变导致单晶不规则生长的趋势增加;偏细粒度金刚石单晶晶形更加完整、杂质含量更低,在相同品级的单晶中,偏细粒度金刚石单晶具有更优良的性能指标^[10]。有数据显示,对于坚硬岩石,较小粒度金刚石更有利于钻进^[16-17]。然而为了避免过细粒度造成出刃不足,将中等粒度与偏细粒度金刚石单晶进行混合配料。为了获得较高的单粒金刚石钻压,根据地层硬度和研磨性,金刚石浓度可在70%~90%进行调整。为了提高钻头寿命,可根据地层情况在钻头切削齿唇面适当添加表镶金刚石颗粒。

1.3 超高胎体偏心齿结构设计

1.3.1 偏心齿设计

为了提高金刚石钻头单齿工作压力,引入偏心条状齿结构,对于小直径地质取心钻头,直接将钻头设计为偏心条状,如图1(a)所示。当钻头内外尺寸相差较大时,可设计偏心类条状扇形切削齿,以满足内外径同步磨损需求,如图1(b)所示。条状或偏心类条状扇形齿设计可以提高单齿工作压力,从而有利于坚硬地层快速切削钻进,此外,偏心齿设计改善了钻头切削齿的工作受力状态,不但提高了钻头的工作强度,而且使得排浆更加通畅。

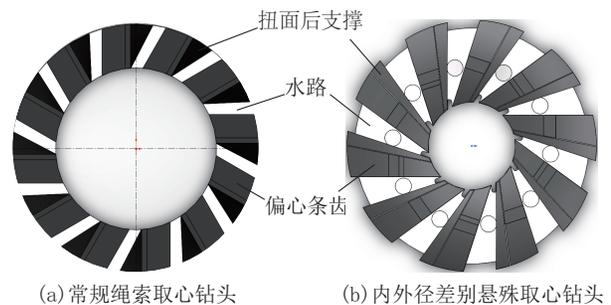


图1 偏心齿平面布置示意

Fig.1 Plan layout of the eccentric cutters

1.3.2 扭面后支撑设计

为了提高钻头胎体的工作高度,专门设计了金刚石胎块扭面过渡后支撑结构,通过无压烧结类似风机叶轮状后支撑结构(如图2所示),一方面有利于钻头排浆,另一方面保证钻头在钻进过程中的扭转强度和耐冲击性能。图3为 $\varnothing 215$ mm/ $\varnothing 75$ mm取心钻头在200 r/min旋转速度、静压力条件下所模拟的水力流场。由图中可见,在钻头旋转过程中,液流以0.68699 L/s的体积流量自行排出。可见,偏心布齿配合扭面后支撑设计起到了一定的“自排屑”效果。该后支撑结构的高度略低于胎体工作层,从而合理有效地为金刚石主切削胎块提供支撑强度,提高了钻头的使用寿命。钻头主切削胎块高度根据钻头规格和地层情况设计,考虑到胎体结合强度,工作层最高设计为30 mm。此外,在后支撑体内部孕镶一定浓度的金刚石,内外径两侧贴有保径金刚石聚晶,以此辅助切削,加强内外保径。

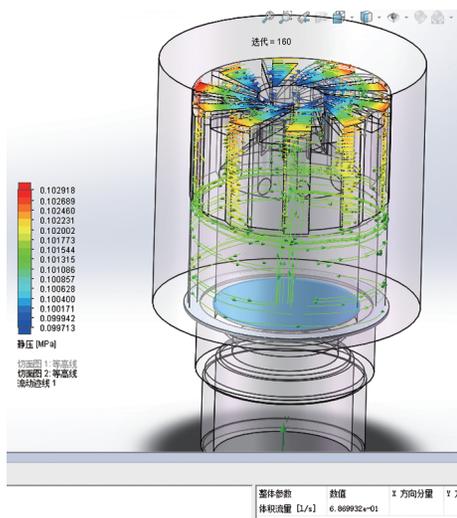
1.4 钻头的加工制造

金刚石的制造方法主要包括热压烧结、无压烧结和二次镶焊技术。热压法具有胎体性能可调、烧



图2 无压烧结基体

Fig.2 Pressureless sintering matrix

图3 $\text{O}215\text{ mm}/\text{O}75\text{ mm}$ 取心钻头静压旋转水力流场Fig.3 Hydraulic flow field of the $\text{O}215\text{ mm}/\text{O}75\text{ mm}$ coring bit at hydro-static rotation

结时间短、温度低从而利于保护金刚石的特点,但由于烧结过程的压力因素,对于胎体形状复杂、厚度和高度相差悬殊的钻头,可能出现胎体密度不均,乃至难以制造。无压法借助于适当的振动使骨架粉末达到预定密度,因此利于制造形状复杂、尺寸相差悬殊的钻头。由于制造过程中无需加压,底刃和保径金刚石、聚晶等都不会产生错位,因而钻头尺寸精确,外形美观。但烧结温度一般比热压高得多,对金刚石热损伤和熔融金属对金刚石的腐蚀较为严重^[5]。二次镶焊技术是将胎体切削齿单独烧制,再焊接到钻头基体上。由于烧结温度更低(可至 $780\text{ }^{\circ}\text{C}$),能够有效降低金刚石热损伤。近些年,金刚石钻头二次镶焊技术有了较大发展,从烧制模具设计、焊接层材料选择、焊接工艺技术上都有了较大突破^[18]。为了充分发挥各种制造工艺的优势,超高胎体偏心齿金刚石钻头将三者进行了有机的结

合。其中主切削胎块采用热压法烧结,烧结温度 $810\text{ }^{\circ}\text{C}$,保温 4 min 。由于热压胎块体积受限难以加强钻头内外保径,而扭面后支撑结构比较复杂,因此,将钢体和骨架粉末进行无压浸渍高温烧结,获得具有金刚石聚晶加强保径及扭面后支撑结构的金刚石钻头基体。最后,通过二次镶焊技术将金刚石主切削胎块与钻头基体进行低温焊接,焊接温度 $720\sim 750\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。钻头成品如图4所示。



图4 超高胎体偏心齿钻头成品

Fig.4 Finished product of the ultrahigh matrix eccentric-cutter bit

2 钻头野外试验结果

2.1 山东平度山旺-上马台矿区现场应用情况

所研制的超高胎体偏心齿金刚石钻头在山东平度山旺-上马台矿区示范工程试验28ZK6钻孔进行了现场应用,钻头规格为 $\text{O}122\text{ mm}/\text{O}63.6\text{ mm}$,配合双壁钻杆钻进,主要钻进7~10级地层,地层破碎,且存在漏失井段,现场岩心如图5所示,钻头使用后出井情况见图6,钻头使用情况统计见表1。

28ZK6钻孔首次采用了P口径钻杆(反循环双壁钻杆的外管)+H口径内管总成的绳索取心工艺,



图5 28ZK6钻孔岩心

Fig.5 Cores from 28ZK6 hole



(a) 超高胎体偏心齿钻头 (b) 钢体偏心齿钻头

图6 28ZK6钻孔用 $\text{O}122\text{ mm}/\text{O}63.6\text{ mm}$ 厚壁取心钻头出井照
Fig.6 $\text{O}122\text{ mm}/\text{O}63.6\text{ mm}$ coring bit after use at 28ZK6 hole

由表1数据可以看出,特殊设计的保径加强超高胎体偏心齿金刚石钻头能够保证高效长寿命钻进,钻头单只进尺194.65 m,平均机械钻速3.47 m/h,而未采用保径加强的钢体式偏心齿取心钻头进尺仅有38.4 m,即发生保径先期磨损。因此对于坚硬破碎地层,采用保径加强的超高胎体偏心齿金刚石取心钻头能够发挥高效长寿命的钻进效果。

2.2 合川001-74-H3水平井现场应用情况

合川001-74-H3井位于四川省广安市武胜县,属于合川须三底界构造西端的一口水平井,设计井深3957 m。为落实储层物性、含气饱和度等储量参

数,设计在须家河二段进行保压取心,获取地层资料。须家河组地层岩石抗压强度平均达到157 MPa,最高达到350 MPa,岩石可钻性达7级以上,地层研磨性5~6级,地层压力系数高,属于高压、强研磨坚硬地层^[19-20]。根据地层特点,研制的超高胎体表孕镶偏心齿金刚石钻头在该地层应用,最终累计保压取心3筒,保压成功率100%,钻头进尺5.35 m,出井新度85%,实现了国内首次水平井保压取心^[21],出井后的钻头如图7所示。



图7 合川001-74-H3井用超高胎体偏心齿钻头出井照
Fig.7 Ultrahigh matrix eccentric cutter bit for Hechuan 001-74-H3 well

表1 28ZK6钻孔取心钻头使用情况统计

Table 1 Performance of the coring bit in 28ZK6 hole

| 序号 | 钻头规格名称 | 使用井段/ m | 岩石 可钻性 | 机械钻速/ ($\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$) | 进尺/ m | 备注 |
|----|-------------------------------------------------------------|-------------|-----------|-------------------------------------------|----------|--------------------------|
| 1 | $\text{O}122\text{ mm}/\text{O}63.6\text{ mm}$ 超高胎体偏心齿钻头 | 29.85~224.5 | 7~10级 | 3.47 | 194.65 | 后支撑体辅助切削且加强内外保径 |
| 2 | $\text{O}122\text{ mm}/\text{O}63.6\text{ mm}$ 钢体偏心齿钻头 | 224.5~262.9 | 7~10级 | 2.47 | 38.4 | 无辅助切削齿及内外加强保径,导致内外保径先期磨损 |

3 结论

(1)研制的新型偏心齿钻头通过偏心布齿、扭面后支撑等结构优化设计,改善了井底钻头工作状态,可提高坚硬地层的钻进效率。

(2)超高胎体工作层、后支撑辅助切削以及加强型内外保径等设计保证了偏心齿钻头在钻进坚硬地层时具有较高的使用寿命。

(3)所研制的偏心齿钻头无论在小口径钻探还是在直径取心钻探领域均体现了高效长寿命工作特点,为助力我国能源勘探开发提供了参考。

参考文献(References):

- [1] 《中国地质》编辑部.世界超深井简介[J].中国地质,2019,46(3):672.
Editorial Office of Geology in China. A brief introduction to ultradeep wells in the world [J]. Geology in China, 2019, 46(3):672.
- [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] 王大勋,刘洪,韩松,等.深部岩石力学与深井钻井技术研究

- [J]. 钻采工艺, 2006(3):6-10.
- WANG Daxun, LIU Hong, HAN Song, et al. Deep rock mechanics and deep or ultra-deep well drilling technology[J]. Drilling & Production Technology, 2006(3):6-10.
- [4] 张金昌, 刘秀美. 13000 m 科学超深井钻探技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2014, 41(9):1-6.
- ZHANG Jinchang, LIU Xiumei. 13000m Drilling technology of super-depth scientific drilling-well[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2014, 41(9):1-6.
- [5] 刘广志, 等. 金刚石钻探手册[M]. 北京:地质出版社, 1991.
- LIU Guangzhi, et al. Diamond drilling handbook[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991.
- [6] 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 Shaohu. 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.
- [7] 郭庆清, 王佳亮, 张绍和. 胎体弱化颗粒材质对 WC 基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, 2015, 25(9):2531-2535.
- GUO Qingqing, WANG Jialiang, ZHANG Shaohu. Effects of matrix weaken particle material on matrix wear resistance of diamond bit based on WC[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(9):2531-2535.
- [8] 庞丰, 段隆臣, 童牧, 等. 钻进打滑地层时造孔剂对孕镶金刚石钻头性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2014(5):124-130.
- PANG Feng, DUAN Longchen, TONG Mu, et al. Effect of pore-forming agent on drilling performance of impregnated diamond bits for slipping formation[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2014(5):124-130.
- [9] 孙义生, 王军, 杨文彬. 深部“打滑”地层绳索取心孕镶金刚石钻头的设计探讨[J]. 吉林地质, 2012, 31(4):130-132.
- SUN Yisheng, WANG Jun, YANG Wenbin. Design of wire-line coring impregnated diamond bit for drilling slipping formation[J]. Jilin Geology, 2012, 31(4):130-132.
- [10] 毕克勇, 郑守本. “打滑层”的钻头设计与钻进工艺探讨[J]. 工业金刚石, 2003(6):9-11.
- BI Keyong, ZHENG Shouben. Discussion on bit design and drilling technology or drilling slipping formation[J]. Industrial Diamond, 2003(6):9-11.
- [11] 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.
- [12] 刘宝昌, 孙友宏, 佟金, 等. CVD 金刚石条强化孕镶金刚石钻头的试验研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2009(6):24-27.
- LIU Baochang, SUN Youhong, TONG Jin, et al. Experimental study of diamond impregnated drilling bit enhanced with CVD diamond pins[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2009(6):24-27.
- [13] 赵涛. 孕镶金刚石齿轮钻头在蒙库铁矿地区的应用[J]. 西部探矿工程, 2018, 30(10):77-79, 81.
- ZHAO Tao. Application of impregnated diamond gear bits in Mengku Iron Mine[J]. West-China Exploration Engineering, 2018, 30(10):77-79, 81.
- [14] 叶继超, 沈立娜, 阮海龙, 等. 金刚石钻头胎体添加稀土氧化钇的方法及影响研究[C]//中国地质学会探矿工程专业委员会. 第二十届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集. 北京:地质出版社, 2019:464-469.
- YE Jichao, SHEN Lina, RUAN Hailong, et al. Method and effect of adding yttrium oxide to diamond bit matrix[C]// Mineral Engineering Committee, Geological Society of China. Special for the Twentieth National Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling) Academic Conference. Beijing: Geological Publishing House, 2019:464-469.
- [15] 沈立娜, 阮海龙, 吴海霞, 等. 稀土 La 添加量对预合金铁基胎体性能的影响[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(4):69-71.
- SHEN Lina, RUAN Hailong, WU Haixia, et al. Influence of La addition on the properties of pre-alloyed Fe-based matrix material[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2012, 39(4):69-71.
- [16] 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):21-24, 31.
- YE Jichao, SHEN Lina, YANG Gansheng, et al. Experimental study on the whole process of diamond indenting rock[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2018, 38(5):21-24, 31.
- [17] 孙吉伟, 沈立娜, 杨甘生, 等. 孕镶金刚石钻头的局部体积破碎研究[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(5):232-238.
- SUN Jiwei, SHEN Lina, YANG Gansheng, et al. Study on local volume breakage of diamond impregnated bit[J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(5):232-238.
- [18] 贾美玲. 金刚石钻头制造新技术探讨[J]. 探矿工程, 2001(S1):256-257.
- JIA Meiling. Discussion on new manufacturing technology of diamond bit[J]. Exploration Engineering, 2001(S1):256-257.
- [19] 胡大梁, 严焱诚, 李群生, 等. 混合钻头在元坝须家河组高研磨性地层的应用[J]. 钻采工艺, 2013, 36(6):8-12.
- HU Daliang, YAN Yancheng, LI Qunsheng, et al. Application of hybrid bit in high abrasive formation of Xujiahe Formation in Yuanba[J]. Drilling & Production Technology, 2013, 36(6):8-12.
- [20] 刘强, 贺明敏, 黄媚. 川中须家河组牙轮-PDC 混合钻头钻井提速实践[J]. 钻采工艺, 2016, 39(6):7-10.
- LIU Qiang, HE Mingmin, HUANG Mei. Cone-PDC hybrid bit used to drill Xujiahe in central Sichuan to improve ROP[J]. Drilling & Production Technology, 2016, 39(6):7-10.
- [21] 苏洋, 王明伟. 国内首次, 长城初战, 水平井保压取心成功啦! [EB/OL]. [2021-01-28]. <https://new.qq.com/rain/a/20200728a0din200>, 2020-07-28/.
- SU Yang, WANG Mingwei. For the first time in China, the Great Wall' first battle, the pressure maintaining coring of horizontal wells is successful [EB/OL]. [2021-01-28]. <https://new.qq.com/rain/a/20200728a0din200>, 2020-07-28/.

(编辑 荐华)