

孕镶金刚石钻头设计与制造新技术回顾与展望

张绍和, 孔祥旺*, 孙平贺, 曹 函, 张鑫鑫, 吴冬宇, 刘磊磊, 荣令龙

(中南大学地球科学与信息物理学院, 湖南长沙 410083)

摘要:高性能孕镶金刚石钻头的研制是钻探工程尤其是深部坚硬地层提高钻探效率、降低钻探成本的关键手段之一。本文从钻头胎体、结构和制造工艺3方面综述了孕镶金刚石钻头设计与制造的新技术, 针对钻头胎体设计, 介绍了胎体对金刚石把持力的调控研究, 特别是胎体强化和胎体弱化这2大方向, 并阐述了胎体自润滑钻头的设计机理; 从唇面结构和水路系统的设计等方面论述了孕镶金刚石钻头结构设计的新思路; 讨论了典型孕镶金刚石钻头设计技术, 分析了钻头制造工艺现存的问题, 并认为未来采用3D打印制造复杂结构孕镶金刚石钻头具有广阔的应用前景。对及时了解和掌握国内外孕镶金刚石钻头设计与制造技术和理论的最新进展, 加快高性能孕镶金刚石钻头的研发具有重要意义。

关键词:孕镶金刚石钻头; 胎体; 唇面结构; 水路系统; 制造工艺; 3D打印

中图分类号: P634.4; TE921 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2023)S1-0001-12

Review and prospect of new technologies for design and manufacture of impregnated diamond bits

ZHANG Shaoh, KONG Xiangwang*, SUN Pinghe, CAO Han,

ZHANG Xinxin, WU Dongyu, LIU Leilei, RONG Linglong

(School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha Hunan 410083, China)

Abstract: The development of high performance impregnated diamond bits is a key tool to the development of drilling industry, which is especially important to improve the drilling efficiency and reduce the drilling cost in deep and complex formation. This paper reviews the new theories and technologies in designing and manufacturing impregnated diamond bits, and discusses the matrix, structure and manufacturing process in details. The study of the regulation of the diamond holding force by the matrix, such as the two major directions of strengthening matrix and weakening matrix, and the design mechanism of the matrix self-lubricating drill bit were introduced in detail for the design of the drill bit carcass. Next, new ideas in the design of the structure of the impregnated diamond bit were discussed, mainly concerning the design of the lip structure and the waterway system. Meanwhile, typical impregnated diamond bit design techniques were discussed, and the existing problems in the manufacturing process of pregnant diamond bits were discussed, and the application of 3D printing for the manufacture of complex structure pregnant diamond drill bits was considered to be promising in the future. It is important to keep abreast of the latest advances in the design and manufacturing technology and theory of pregnant diamond bits in order to accelerate the research and development of high performance impregnated diamond bits.

Key words: impregnated diamond drill bit; matrix; lip structure; waterway system; manufacturing process; 3D printing

收稿日期: 2023-07-05 DOI: 10.12143/j.ztgc.2023.S1.001

基金项目: 国家重点研发计划项目“金刚石超硬复合材料制品增材制造技术与应用研究”(编号: 2021YFB3701804); 湖南省自然科学基金面上项目“基于岩石压入-刻划强度定量表征的钻头参数设计智能化研究”(编号: 2022JJ30709)

第一作者: 张绍和, 男, 汉族, 1967年生, 教授, 博士生导师, 地质工程专业, 主要从事岩土钻掘工程理论与技术、地质工程智能设计与制造等研究工作, 湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号, zhangsh@csu.edu.cn。

通信作者: 孔祥旺, 男, 汉族, 1998年生, 博士研究生, 地质工程专业, 主要从事3D打印金刚石碎岩工具的相关研究, 湖南省长沙市岳麓区麓山南路932号, xiangwangkong@163.com。

引用格式: 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 Shaoh, 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.

0 引言

孕镶金刚石钻头是最具代表性、应用范围最广泛的钻头之一,具有抗冲击、耐磨损、成本低廉等特点。在钻进坚硬致密的强研磨性地层时,相比PDC钻头和牙轮钻头等,孕镶金刚石钻头能够保持较高的工作效率并获得较好的技术经济效果,是中硬—坚硬及深部坚硬岩层钻探时广泛采用的钻头^[1]。孕镶金刚石钻头的工作层由金刚石颗粒和金属/金属合金粉末胎体组成,这些金刚石颗粒随机地分布在金属胎体中,其中金刚石颗粒主要起切削作用,而金属胎体提供保持力以牢固地把持金刚石颗粒,避免金刚石颗粒过早脱落^[2]。这也就要求金属胎体的磨损损失应与金刚石颗粒损失相协调,以保证金刚石颗粒的出露,从而发挥孕镶金刚石钻头的高效自锐性^[3]。由于钻头工作时要靠金属胎体的损耗不断暴露金刚石颗粒以对岩石进行切削,在此过程中钻头会受到严重的磨料磨损,而且由于金刚石颗粒的出露面积较小,切削载荷分布在不同切削块上,有效切削面积较小,从而使单个金刚石载荷保持在较低的水平,导致其钻进速度要低于PDC钻头和牙轮钻头^[4]。此外,钻头切削过程中产生的大量碎屑会通过钻井液排出,这可能会使钻头胎体受到冲蚀磨损,导致金刚石颗粒在出刃或磨损较小的情况下就因胎体的磨损而脱落。因此对孕镶金刚石钻头而言,不仅要求其能够保持高效工作,同时还要具有足够的耐磨性以提高其使用寿命^[5],这对孕镶金刚石的设计与制造提出了更高的要求。

孕镶金刚石钻头的设计与制造是一项较为复杂的工作,钻头的性能(寿命、效率)与胎体成分和性能、钻头结构以及制造工艺等因素之间存在复杂的关系,只有各个环节相互配合,才能充分挖掘出钻头的潜力,提高钻头寿命和效率^[6]。因此,为提高孕镶金刚石的工作效率和使用寿命,学者们主要从以下几方面展开了研究:

(1)提高胎体对金刚石的包镶能力。孕镶金刚石钻头效率的提高主要是通过金刚石颗粒的高出刃实现的,所以为保证金刚石在出刃量较大时不会脱落或不易脱落,就必须提高胎体对金刚石的把持强度。

(2)提高胎体强度。在高效率钻进过程中,金刚石颗粒出刃后会承受较大的作用力,金刚石反作用于胎体上的力也很大,这就要求胎体能够承受相应的作用力同时保证不产生大变形,否则金刚石颗

粒容易胎体上脱落,钻头就无法实现高效率工作。

(3)胎体润滑。当钻进地层研磨性较弱时,钻头与地层会相互磨损,在长时间的工作下产生大量的摩擦热,金刚石容易受到热损伤而提前失效,从而加速胎体的磨损,通过在胎体中加入固体润滑剂,可以赋予钻头自润滑特性,降低摩擦系数,减少摩擦热释放。

(4)优化钻头唇面结构。由于金刚石颗粒较小,传统平端钻头唇面中金刚石压入岩石的深度很小,导致钻头只能通过表面磨损破碎的方式碎岩,这使得钻进效率较低;另一方面,由于碎岩效率低,产生的岩屑量较小无法高效磨损钻头胎体,导致金刚石无法及时出刃。而通过改变钻头唇面结构,减少钻头唇面与岩层之间的接触面积,增大钻头唇面的比压,形成体积破碎将大大增加钻头的碎岩效率。

(5)优化钻头水路系统。孕镶金刚石钻头通常采用的金刚石粒度较小,钻头工作时金刚石的出刃高度很低,冲洗液通过岩石工作面和胎体唇面之间的间隙来冷却金刚石和胎体是相当困难的,岩屑的排出和唇面的冷却需要依赖钻头的水口和水槽。因此,要在保证胎体强度的前提下合理设计水口,以保证冲洗液对钻头及时进行冷却和排屑。

本文将主要基于孕镶金刚石钻头的胎体设计、结构设计及制造工艺3方面的研究成果与新技术展开讨论,为孕镶金刚石钻头的设计与制造提供参考。

1 孕镶金刚石钻头胎体设计

1.1 胎体对金刚石把持力的调控研究

钻头胎体对金刚石把持力的调控是研制高性能金刚石钻头的关键技术,这决定了金刚石钻头的切削效率和使用寿命。钻头胎体性能调控研究包括胎体强化和胎体弱化两方面。

1.1.1 胎体强化

高效率孕镶金刚石钻头是通过金刚石的高出刃来实现高效钻进的,这就要求钻头胎体对金刚石有很好的包镶能力,胎体和金刚石颗粒界面结合强度不足,则会导致金刚石颗粒过早脱落。许多研究均表明,金刚石过早失效是限制金刚石钻头性能的主要问题之一^[7]。胎体对金刚石颗粒的把持受胎体特性、界面结合强度以及金刚石特性的影响,因此为强化胎体的性能,通常在胎体中加入强碳化物形成元素、增强材料和对金刚石表面进行金属化处理。

许多研究学者通过添加一些合金与金刚石中存

在的碳反应,在基体和金刚石之间以金属碳化物元素的形式形成化学结合,从而在金刚石之间建立牢固的结合^[8]。强碳化物形成元素,如钴、铬、铁、钛等元素,这些金属元素对碳具有很强的原子键合亲和力,可以加强金属胎体与金刚石界面的结合。孙洪义等^[9]研究发现在传统孕镶金刚石钻头胎体配方中加入适量的Fe、W、Cr等强碳化物形成元素,可以有效改善胎体与金刚石之间的粘结强度。Loginov等^[10]发现在Fe-Co-Ni金属胎体中加入少量的Ti可以明显提升胎体与金刚石颗粒间的结合效果。强碳化物形成元素虽然对金刚石有良好的浸润,但它们极易引起金刚石的石墨化,所以这些纯金属不宜单独作为胎体的粘结材料来使用。Chen等^[11]则选用环保、廉价的玄武岩纤维作为WC基金刚石复合材料的增强相,研究了玄武岩纤维对WC基金刚石复合材料结构和强度的影响,发现在WC基金刚石复合材料中加入适量的玄武岩纤维可显著提高胎体对金刚石的润湿性及金刚石复合材料的强度,降低复合材料的生产成本。Sidorenko等^[12]发现添加多壁碳纳米管(MWCNT)可以提高Fe-Cu粘合剂的硬度、强度和形变,并提高孕镶金刚石工具的切削速度。Han等^[13]在Fe-Cu基胎体中添加2wt%纳米VN后,发现胎体的抗弯强度和洛氏硬度分别提高了25%和20%。Dai等^[14]通过粉末冶金制备了纳米NbC增强的孕镶金刚石复合材料以提高钻头的使用寿命,分析了纳米NbC对金属胎体物理力学性能的影响,包括相对密度、硬度、弯曲强度和耐磨性,发现添加适量的纳米NbC可以明显改善胎体的力学性能,并且钻头的寿命也随着纳米NbC的添加而得到提升,这主要是由于纳米NbC改善了金属结合剂和金刚石之间结合,减少了胎体内部的孔隙和裂纹,从而提高了金属胎体对金刚石颗粒的把持强度。

金刚石是典型的共价键晶体,具有较高的化学惰性。孕镶金刚石钻头胎体通常由金属粉末组成,金刚石与一般的金属之间都有较高的界面能,不能被这些材料浸润和黏结,因此它与金属胎体之间界面结合力较差,仅靠机械镶嵌力将金刚石镶嵌在胎体中^[15]。在使用过程中金刚石颗粒由于结合强度较低很容易脱落、流失,剩下光滑的胎体,使钻头失去切削能力。同时,金刚石在高温条件下容易出现石墨化现象。因此,一些学者研究了金刚石表面镀膜技术,通过对金刚石表面镀膜其他材料,使其具有

特殊的理化性能,从而达到以下目的^[16-18]:(1)提高金属胎体对金刚石的把持强度,镀层材料可以在两种材料间起到结合桥的作用,将金刚石与金属胎体牢固结合在一起。(2)提高金刚石颗粒的强度,镀层可以起到补强、增韧的作用。金刚石表面缺陷如微裂纹、微小空洞可通过充填碳化物膜得到弥补,从而提高强度。(3)降低石墨化概率,在高温烧结和切削工作时,镀层可以起到隔离金刚石,使之不发生或减弱石墨化的作用。研究表明,通过对金刚石表面进行镀层是一种有效的方法,不仅可以保护金刚石不与基体直接接触,还可以通过化学键合改善金刚石与基体之间的界面。

De Oliveira等^[19]通过拉曼光谱分析证实,对于在900℃下烧结的金刚石-Cu-Fe复合材料,Ti涂层成功地避免了金刚石的石墨化。Sun等^[20]研究了B₄C镀层防止石墨化的能力,同时分析了金刚石和WC-Fe-Ni胎体之间的界面结构对抗弯强度和磨损行为的影响,发现B₄C镀层溶解并分散在Fe和Ni基体中,形成Fe-Ni-BC固溶体,与相同温度下烧结的未涂层金刚石样品相比,具有更好的界面结合、更高的密度和更好的机械性能,并且金刚石表面的B₄C镀层降低了烧结温度要求。

1.1.2 胎体弱化

在金刚石工具的制造和研究工作中通常会研究如何强化胎体的力学性能及其对金刚石的把持强度,以期提高工具的使用寿命。宋月清等^[21]率先提出了金刚石工具胎体“弱化”的概念,弱化的意义是使胎体材料的性能降低或变弱,相对于结构材料的强化而言,胎体材料的弱化意味着作为金刚石工具中包镶及支撑金刚石工作的胎体材料的性能不是越高越好。孕镶金刚石钻头在坚硬致密弱研磨性地层中钻进时,由于地层的研磨性较弱,钻头胎体的磨损速率较慢,从而导致金刚石颗粒不易出刃,钻进效率极低甚至“打滑”。因此在保证钻头的胎体强度能够符合使用要求的情况下,采取合适的方法弱化胎体的耐磨性将有助于金刚石颗粒的出刃,提高钻头的钻进效率。庞丰等^[22]为解决钻头在弱研磨性地层钻进效率低下的问题,提出在胎体中添加造孔剂以降低胎体耐磨性的方法,研究结果表明通过加入造孔剂可以提高胎体底唇面表面的粗糙度,从而降低胎体对金刚石的把持强度,提高金刚石的出刃效果和碎岩效率。王佳亮等^[23]分别将SiC、棕刚玉和合

金钢丸添加至胎体中,研究了3种硬质磨粒对胎体耐磨性弱化的效果,发现添加适量的硬质磨粒能够提高钻头的钻进时效,还可减少钻进打滑现象,而且相比于其他两种硬质磨粒,SiC颗粒对胎体的力学性能影响较明显,更适合作为胎体耐磨性弱化材料。

1.2 胎体自润滑

在深部地层钻进过程中,钻头唇面与岩石界面之间容易产生大量摩擦热,钻头容易出现热损伤和过快磨损的问题,由于金刚石颗粒较小,钻井液难以通过钻头表面,不能直接带走摩擦热,容易引起加剧钻头温度升高。潘秉锁等^[24]提出赋予孕镶金刚石钻头自润滑特性,使得钻头能够在工作中不借助外加润滑介质,进行自主润滑,从而降低摩擦系数,减少摩擦热释放。石墨、二硫化钼和二硫化钨都是具有层状固体结构的材料,这是好的固体润滑剂的典型特征。谢兰兰等^[25]将不同类型的石墨分别添加到钻头胎体中以降低摩擦系数和热量,发现随着石墨含量的增加,胎体的硬度、抗弯强度和摩擦系数逐渐降低。同时,胎体的磨损量先减后增,工作层金刚石寿命逐渐增加。随着石墨粒度的减小,胎体的抗弯强度和摩擦系数逐渐降低,而硬度、胎体磨损量以及工作层金刚石的寿命均逐渐增加。Li等^[26]研究了CaF₂和hBN两种固体润滑剂对孕镶金刚石钻头胎体的力学和磨损性能的影响,发现随着固体润滑剂浓度的提高,胎体力学性能总体上有所降低,但添加CaF₂的胎体力学性能降幅要小于添加hBN的胎体。Tan等^[27]将不同浓度的MoS₂和WS₂添加到热压WC基孕镶金刚石钻头胎体中,发现两种材料可以降低胎体中孔隙的大小和数量,使得胎体更加致密,但同时也增大了胎体的脆性。虽然两种材料对WC基胎体的机械、磨损和摩擦性能的影响相似,但WS₂获得了比MoS₂更好的自润滑性能。

2 孕镶金刚石钻头结构设计

对于孕镶金刚石钻头来说唇面和水口的结构都影响着钻头的寿命以及效率。异形唇面结构可以降低钻头底唇面和孔底岩石之间的接触面积,增加了钻头的碎岩自由面,有利于提高钻头的钻进效率,水路系统的设计则可以有效提高钻头的冷却效果并及时排除孔底的岩粉。

2.1 唇面结构设计

常规唇面结构的孕镶金刚石钻头在坚硬致密岩

层中钻进时,钻头唇面上出刃的金刚石切入岩石的深度较浅,所以在回转机作用下金刚石主要以磨削、刻划的方式破碎岩石,而要获得较高的进尺,就要增加钻头的转速,但钻头的回转速度有限,无法有效解决钻头钻进速度慢的问题。而且当金刚石以磨削和刻划方式碎岩时,产生的岩屑颗粒较细,不利于金刚石出刃,容易出现钻头“打滑”甚至不进尺现象。但通过设计合适的金刚石钻头唇面结构使岩石发生较大的体积破碎,可以大幅提高孕镶金刚石钻头的钻进速率。孙吉伟^[28]在保证钻头体强度的条件下,为了能在较低钻压和较低扭矩下让岩石产生体积破碎,设计了一种掏槽式超前齿结构与低位齿结构相结合的孕镶金刚石钻头,采用掏槽式超前齿结构的主要目的是:(1)增大钻头比压;(2)增加钻头稳定性;(3)释放部分岩石压力,掏槽式超前齿结构与岩石的配合示意图如图1所示。为了实现体积破碎,掏槽式超前齿结构需要和低位齿结构相互配合,即超前齿结构首先在岩石上钻出岩脊,然后低位齿在钻压作用下使岩脊发生体积破碎,为了保证低位齿不发生断裂而且能使岩石发生体积破碎,低位齿上的压头部分设计为球形。

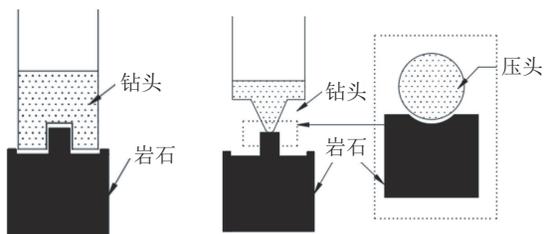


图1 掏槽式超前齿结构与岩石配合示意

Wu等^[29]设计了一种栅格状孕镶金刚石钻头(如图2所示),在工作时,栅格单元可以像许多锋利的刀片一样压入岩石中。穿透地层后,在与岩石的界面上产生一定直径的凹槽,并在两个相邻网格块的间隙中形成岩脊,随着钻头的旋转振动和冲击作用,岩脊会自动断裂,形成大范围的体积破坏,可以大幅提升钻头的碎岩效率。

高科^[30]认为常规的孕镶金刚石钻头的唇面结构通常为易加工制作的平底面,虽然在钻进时能不断出刃与自锐以保证其使用寿命,但在钻进坚硬岩层时容易出现钻进效率较低的问题。于是将硬质合金钻头宏观非光滑与孕镶金刚石钻头的微观非光滑

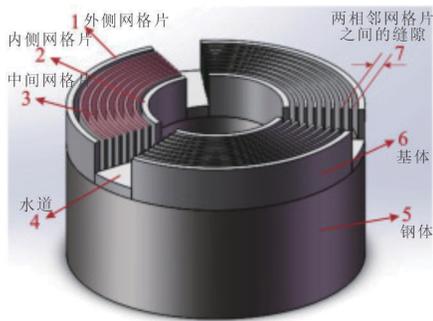


图2 具有网格状胎体的孕镶金刚石钻头

结合起来,模拟生物表面非光滑的特性研制了一种新型孕镶金刚石仿生钻头。何龙飞^[31]利用相似原理在孕镶金刚石钻头结构上进行改进,把沟槽型生物非光滑表面形态应用到孕镶金刚石钻头底唇面上,设计一种沟槽型非光滑的钻头表面形态,研制出了沟槽型孕镶仿生金刚石钻头,并通过试验证明比普通孕镶金刚石钻头具有更高的钻进效率和寿命。李梦等^[32]遵循仿生学结构相似原理,以土壤动物的爪趾为仿生原型,结合常规钻头异型唇面提高钻进效率和高胎体提高工作寿命的结构设计思想,设计了高胎体仿生爪趾齿孕镶金刚石钻头,同步提高了钻头的钻进速度和工作寿命。Wang等^[33]受蜥蜴非光滑表面效应的启发,研究设计并制作了具有自再生功能的仿生凹形孕镶金刚石钻头(如图3所示),仿生单元体分两排呈环形等间距排布于仿生孕镶金刚石钻头表面,在仿生单元中填充石墨合成树脂的软材料,以确保在磨损过程中可以连续形成凹形非光滑表面,仿生凹坑可以增加孕镶金刚石钻头和岩石之间的空间,以减少或避免岩屑造成的堵塞,并且可以进一步捕获未及时脱落的岩屑颗粒。

高科等^[34]针对孕镶金刚石钻头齿间相互独立,在坚硬地层中钻进极易产生打滑和单齿受力太大导

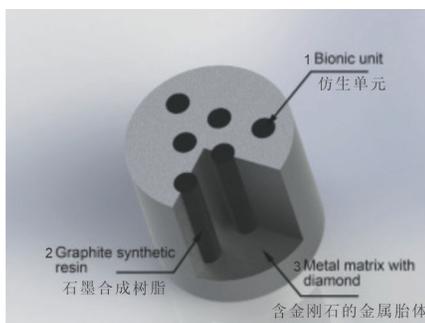


图3 具有自再生功能的仿生凹形孕镶金刚石钻头

致钻头损坏的难题,引入仿生爪趾结构原理和自补偿理念,研制了仿生自补偿一体式高胎体孕镶金刚石取心钻头(如图4所示),通过内外环齿间加强筋结构提高钻头的整体性,将钻头的切削齿单元从“单兵作战”变成“群体作战”,避免了高胎体钻头因胎体过高而导致的弯折掉块情况。

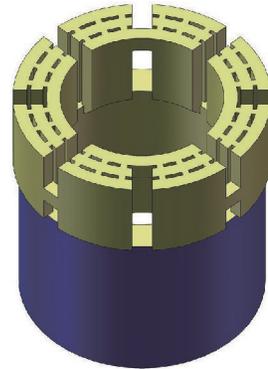


图4 仿生自补偿一体式高胎体孕镶金刚石取心钻头^[40]

2.2 水路系统设计

孕镶金刚石钻头由于采用的金刚石粒度较细,因此钻头工作唇面上金刚石出刃很小,冲洗液通过岩石工作面和胎体唇面之间的间隙来冷却金刚石和胎体是相当困难的。岩屑的排出和冷却金刚石与胎体主要是通过钻头的水口和水槽,与表镶金刚石钻头相比,在钻头直径相同的条件下,孕镶金刚石钻头的水路具有水口多、水槽和水口较深的特点,以保证钻头上的金刚石得到良好的冷却效果。刘宝昌等^[35]研究了水口数量对孕镶金刚石钻头工作唇面的冷却效果,通过数值模拟和试验研究了钻头孔底流场与温度场,分析了底唇面温度与水口数量的关系,发现钻头孔底温度场呈层状分布,同时发现水口数量过多将导致单个水口的钻井液流量小,降低单个水口处的热传导效率,冷却效果差、钻头磨损严重。常思等^[36]通过对钻头水口、摩擦元件的尺寸计算,钻头胎体、结构的设计,制造了一种新型热-机碎岩孕镶金刚石钻头,并与常规六水口钻头和三水口钻头开展了室内钻进试验对比,结果表明与六水口钻头和三水口钻头相比,热-机碎岩钻头加入摩擦元件后能够因摩擦生热而使岩石产生弱化作用,钻头钻速提高,在相同钻井液流量下最高可比六水口钻头的机械钻速高33.3%。汤凤林等^[37]认为现用金刚石孕镶钻头多为扇形块大小相等、水口大小相等

的钻头,使用这种钻头不能降低异向各性岩石中钻进时钻孔弯曲的情况,考虑到深孔钻进时,许多情况下多数岩石是各向异性的,所以保持钻孔设计方向不变非常重要,于是设计了一种新型KIT钻头(如图5所示),发现这种新型钻头比水口大小不变的标准钻头的技术指标更优。

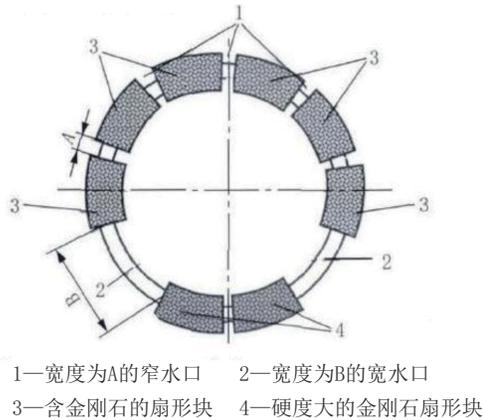


图5 水口大小变化钻头(KIT)唇面结构

李春等^[38]设计了一种硬岩长寿命钻头(如图6所示),在钻头胎体扇形块的中部加底喷眼,并将底喷眼与底水路和外水路相连通,使单个孕镶块形似字母U,这种U形块相对于普通扇形块可以减小钻头唇面的面积,提高钻进速度,同时还能够增加过水面积,从而保证过水的通畅,以及对钻头唇面进行冷却,该钻头在硬岩中钻进时,相比普通钻头,其使用寿命提高了50%、钻进效率提高了40%~50%。

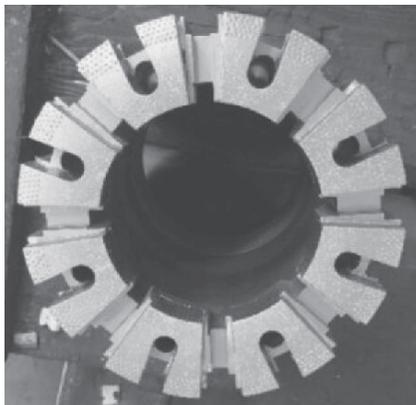


图6 硬岩长寿命钻头

3 典型孕镶金刚石钻头设计技术

3.1 高效率孕镶金刚石钻头

孕镶金刚石钻头的工作机理是通过金刚石切削

破碎岩石进行的,张绍和等^[39]研究认为要使孕镶金刚石钻头有较高的效率,必须保证金刚石的出刃量较高。同时高效率对钻头胎体的性能也有较高的要求。

高效率孕镶金刚石钻头的高效率是通过金刚石的高出刃来实现的,这就要求钻头的胎体对金刚石要有很好的包镶能力,只有具有强包镶能力的胎体,才可保证金刚石在出刃量较大时不会和不易脱落。在设计高效率孕镶金刚石钻头的胎体时,为了提高包镶能力,改善胎体性能,可在胎体中加入一定适量的钴金属成分。另一方面使用表面镀覆金属的金刚石(如表面镀钛等),也可起到提高钻头胎体对金刚石的包镶能力的目的。上述手段均有利于孕镶金刚石钻头实现高效率钻进。

高效率孕镶金刚石钻头还要有高强度(抗变形能力)的胎体,因为高效率来源于金刚石的高出刃和高的线速度,高的线速度使作用于金刚石颗粒上的力很大,这样一来使金刚石切削破碎岩石的作用力也很大。根据作用力与反作用力原理,则金刚石反作用于胎体上的力也很大。这就要求钻头胎体能够承受金刚石给予的大作用力而不产生变形,否则金刚石容易脱落,钻头就不可能实现高效率工作。因而在设计高效率孕镶金刚石钻头时,不宜选用抗变形能力差(如脆性很大)的钻头胎体配方。

高效率孕镶金刚石钻头也要求钻头胎体有较好的高温硬度即红硬性。正如前述,钻头的高效率是由金刚石的高出刃和高的线速度带来的,这样其必然会导致钻头胎体的工作温度很高。若钻头胎体的红硬性设计不理想,钻头在不高的工作温度下就引起胎体软化,这样使胎体十分容易磨损,抗变形能力减弱,从而将严重影响金刚石切削岩石的能力和效率,使金刚石稍有出刃就脱落或缩径,这种钻头则肯定不可能有高的时效。

钻头胎体的强耐磨能力也是决定孕镶金刚石钻头能否拥有高效率的重要条件之一。孕镶金刚石钻头在进行高时效切削岩石时,产生的岩粉量必然很大,大量的岩粉冲蚀研磨胎体,使钻头胎体容易被迅速磨损,也会导致金刚石在出刃不大或磨损不大的情况下,因胎体的磨损而脱落,这样同样也不可能给金刚石钻头带来高效率。为解决该问题用通常的增加骨架成分碳化钨的方法是行不通的,这是由于一方面随着胎体配方中骨架成分碳化钨的增加,钻头

所要求的烧结温度也必然会随之增加,使钻头胎体的脆性增大,导致钻头胎体抵抗震动、碰撞等的能力减弱,当钻头遇到硬而大的如石英粒等时,容易使钻头胎体成块状裂脱。解决该问题采用的合理方法是:在钻头胎体配方中加入适量的低强度差质量的细颗粒金刚石作为辅磨料,用它们来增强钻头胎体的耐磨能力。相对于整个钻头来说,在胎体中颗粒度较粗、质量较好、起切削岩石作用的金刚石是主磨料。辅磨料金刚石一般来说不起切削岩石作用。

高效率孕镶金刚石钻头要求用高强度粗颗粒金刚石,以保证金刚石能有大的出刃量,增大每颗金刚石单次切削岩石的切削量,即切削效率。当然若金刚石的粒度过粗,当金刚石钻头钻进一段时间后,金刚石的尖部一旦被磨平,金刚石与岩石的接触面积增大,降低了金刚石刻取岩石的单位面积压力,减少了金刚石每次切入岩石的深度,从而降低钻头的时效。

孕镶金刚石钻头中浓度设计是否合理是钻头能否取得高效率的关键因素之一。常规钻头一般设计的金刚石浓度为25%(100%体积制),如此高主磨料的金刚石钻头不可能产生高效率。因为孕镶金刚石钻头的时效一方面取决于钻头线速度的快慢;另一方面又受制于作用在钻头胎体上单颗金刚石的平均压力。若没有作用于钻头胎体上单颗金刚石的大压力,会导致金刚石切入岩石的深度较小,降低金刚石切削岩石的单次效率,无法实现钻进的高效率。

3.2 大口径孕镶金刚石钻头

由于大口径热压孕镶金刚石钻头的生产难度大,技术含量高,材料用量多,相应其成本也较高,从而导致其销售价格昂贵。故此用户在选择和使用大口径热压孕镶金刚石钻头时,对寿命的要求是摆在首位的。因而在设计制造和生产大口径孕镶金刚石钻头时,保证钻头寿命较长是第一位考虑的问题。但是大口径孕镶金刚石钻头的直径很大,由于钻探设备等原因,会使作用于钻井孔底钻头单位面积上的压力极小,若钻头配方设计不当,不仅不能实现长寿命的目标,还有可能导致钻头钻进时根本不进尺,出现钻头打滑现象。故此,在设计大口径热压孕镶金刚石钻头配方时,如何合理解决钻头寿命和避免出现钻头打滑这一对矛盾是其研究的难点^[39]。

孕镶金刚石钻头的工作机理是通过金刚石切削破碎岩石来进行的,要使孕镶金刚石钻头能有效切

削破碎岩石,必须保证金刚石有一定的出刃量。同时为了达到大口径孕镶金刚石钻头具有较长寿命的目的,还要求钻头胎体具有理想的包镶能力和较好的耐磨性。

为了保证大口径孕镶金刚石钻头在使用过程中始终能正常进尺,防止出现钻头打滑现象,必须保证钻头胎体工作表面始终有金刚石出刃,这就要求钻头胎体在具有较好包镶能力和耐磨能力的同时,能使胎体与金刚石同步磨损。假若钻头胎体超前于金刚石磨损(偏快),将导致钻头寿命太短,这正是用户所不愿看到的和生产制造商要极力避免出现的情况;另一方面,假若钻头胎体磨损滞后于金刚石的磨损,即钻头胎体的包镶能力和耐磨能力过强,将使金刚石无法出刃,不能有效切削岩石,出现钻头不进尺情况。

大口径孕镶金刚石钻头在正常钻进过程中,钻机转速一般较低,但作用于钻头唇面工作层的线速度却很高。如当钻机转速为175 r/min时, $\varnothing 280/250$ mm钻头唇面外径位置处的线速度为: $V_d = n\pi D = 2.56$ m/s,而 $\varnothing 60/41.5$ mm钻头在钻机转速为890 r/min时,钻头唇面外径位置处的线速度才为: $V_x = n\pi d = 2.79$ m/s。这么高的钻头线速度,就要求大口径孕镶金刚石钻头的胎体要有高的强度(抗变形能力),因为高的线速度使作用于金刚石颗粒上的切削力很大,根据力的传递原理,金刚石反作用于胎体上的力也很大。这就要求钻头胎体能够承受金刚石给予的大作用力而不产生变形,否则金刚石容易脱落,钻头就不可能有很长的寿命。

在设计大口径热压孕镶金刚石钻头时,必须保证钻头胎体有较好的高温硬度即红硬性。有人误认为,对于大口径热压孕镶金刚石钻头,由于钻进时钻机给予钻头的转速较低,钻头胎体产生的温度也不会很高。而实际上,钻头胎体的温度是由其高的线速度带来的,大口径孕镶金刚石钻头低转速钻进和小口径孕镶金刚石钻头高转速钻进时情况一样,尽管转速高低不同,但线速度均较大,因而钻头胎体的温度均很高。若设计的钻头胎体的红硬性不理想,钻头在不高的工作温度下就引起胎体软化,这样将严重影响金刚石切削岩石的能力,使金刚石稍有出刃就脱落,这种钻头则肯定不可能有长的寿命。

大口径热压孕镶金刚石钻头要求要用高强度粗颗粒金刚石,以保证金刚石能有大的出刃量和好的

耐磨能力,不至于出现钻头不进尺现象。另外,高强度的粗颗粒金刚石在高的线速度下,本身不容易碎裂。同时,大口径孕镶金刚石钻头在使用时,钻压一般不大,而在相同金刚石浓度条件下,粗颗粒金刚石的粒数比细颗粒金刚石的粒数少,这有利于增加钻进时作用于单颗金刚石上的平均压力。当然若金刚石的粒度过粗,金刚石的工作尖部一旦被磨平,使金刚石与岩石的接触面积增大,相反降低了金刚石刻取岩石的单位面积压力,减少了金刚石每次切削岩石的深度,从而降低钻头时效,甚至有可能使金刚石不能实现正常的新旧交替,使钻头出现不进尺现象。

大口径孕镶金刚石钻头中金刚石浓度设计得是否合理,是决定钻头能否达到理想使用效果的关键因素之一。常规钻头一般设计的金刚石体积浓度为25%(100%体积制),如此高的金刚石浓度对于大口径孕镶金刚石钻头来说肯定是不适宜的,因为大口径孕镶金刚石钻头在实际使用时,钻压一般不大,如何增大作用于钻头胎体工作表面单颗金刚石的压力,是设计大口径孕镶金刚石钻头要着重考虑的问题。解决该问题一方面可采用粗颗粒金刚石的办法,另一方面在保证钻头有一定较长寿命的前提下,可以适当降低金刚石的浓度。

3.3 弱包镶孕镶金刚石钻头

钻头在钻进极坚硬地层时,出现钻头打滑现象,许多人认为造成这一现象的原因是金刚石不能出刃,钻头胎体过硬而造成的,于是想方设法降低钻头胎体的硬度和耐磨性,这样一来导致走向另一极端,即钻头钻进极坚硬地层时能产生进尺,但钻头寿命极低。事实上,钻头在钻进极坚硬地层时,由于岩石对金刚石的磨损过快,而岩石对钻头胎体的磨损却相对较慢,这样钻头在钻进极短的时间内,岩石磨损金刚石就导致金刚石表面出现一个小的平面(如图7所示)。这些小平面大大增加了金刚石与岩石的接触面积,从而降低了岩石与金刚石之间的单位面积上的接触压力。当金刚石施于岩石表面上的压力小于极坚硬地层的抗压强度时,金刚石就不能有效地破碎岩石,这时钻头钻进岩石就不进尺,出现打滑现象。钻进极坚硬地层时,当钻头出现打滑现象后,钻头胎体表面被磨钝的金刚石既不能有效地破碎岩石,也不能从钻头胎体表面自行脱落,这是由于这些被磨钝的金刚石上端被胎体包裹,下端与岩石形成吻合的面接触(如图8所示),此时金刚石实际上处

于接近二向受力状态,故而有极强的抗压能力,要想压碎金刚石十分困难,要想让其脱落更不容易。因为钻头产生不进尺后,钻头与岩石的接触面不产生岩粉,没有岩粉导致钻头胎体不被磨损,从而胎体包镶着的金刚石就不能出露或脱落^[39]。

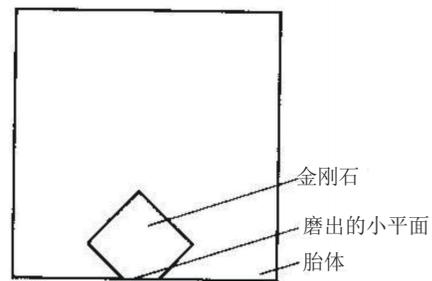


图7 金刚石钝化示意

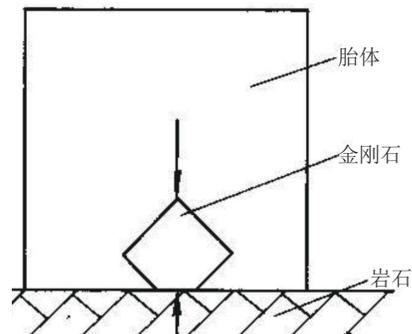


图8 磨钝金刚石受力状态

钻头出现不进尺打滑现象后,磨钝的金刚石在钻头胎体内已成为障碍,为了不使磨钝的金刚石在钻头胎体内及孔底做无用功(不刻取和破碎岩石),只有设法使其尽快脱落,以能使下一颗新的完好的金刚石能尽快出来刻取和破碎岩石。基于这一点,利用弱包镶手段来设计极坚硬地层钻头能够解决钻头打滑问题。弱包镶防打滑钻头的设计方法是:先在金刚石表面用机械方法裹上一层碳化钨粉末,然后将处理过后的金刚石与胎体粉末均匀混合,再进行装模烧结。这样处理后的钻头由于在胎体与金刚石之间有一层没有粘结特性的碳化钨粉末(如图9所示),从而减弱了胎体对金刚石的包镶能力,使钻头在胎体磨损不大的情况下,金刚石就会从胎体中自行脱落下来,从而实现金刚石的换层。其工作过程原理如图10所示。

在设计制造这种弱包镶防打滑孕镶金刚石钻头

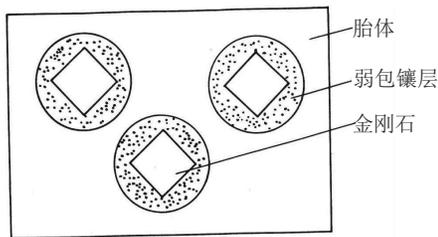


图9 弱包镶金刚石钻头结构示意图

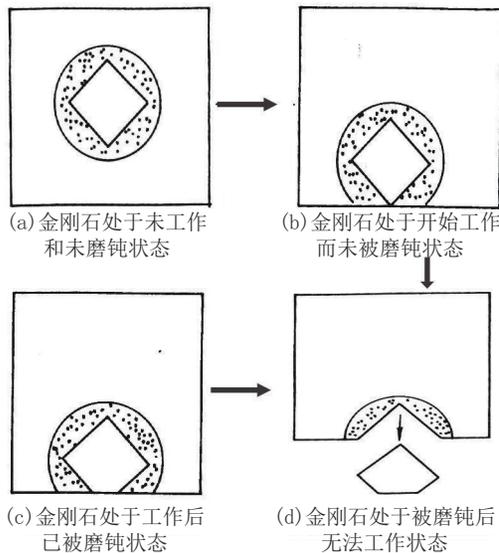


图10 弱包镶钻头工作原理

时,其关键点在于要根据岩石对金刚石的磨损能力来选择合适的弱包镶程度,只有当金刚石工作到一定程度,即不能有效刻取和破碎岩石时,才能让其脱落。若金刚石脱落过早,降低了金刚石的利用率,造成浪费;若金刚石脱落过迟,钻头又会出现不进尺,达不到设计弱包镶的目的。弱包镶防打滑钻头的金刚石脱落快慢是通过金刚石表面包裹的碳化钨弱包镶粉末层的厚度来控制的,碳化钨弱包镶粉末层越厚,则金刚石的脱落速度就越快;反之,金刚石的脱落速度就越慢。

3.4 强弱混镶金刚石钻头

强、弱混镶钻头的设计思想打破从钻头的结构形状、胎体的软硬性能、金刚石浓度和密度来改善钻头性能的常规思想,结合普通金刚石钻头与普通弱包镶钻头的优点,在钻头工作层中选用两种质地不同的金刚石或者其他磨料(如图11所示),改善钻头性能,确保钻头工作层中的主要工作材料在极坚硬致密岩层钻进中适时地出刃,破碎岩石,从而提高钻头寿命和钻进时效^[40]。

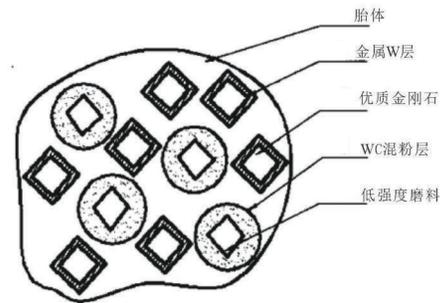


图11 强弱混镶钻头工作层结构

该钻头工作层中工作材料为:(1)强包镶材料—高强度优质金刚石。这种金刚石单颗粒抗压强度大,耐磨损,切削岩石能力强。再使用真空镀工艺在金刚石表面沉积强碳化物形成元素—金属W,在高温烧结钻头时将金刚石与氧气和胎体材料隔开,使金刚石不受氧气的氧化和胎体材料的侵蚀,降低金刚石的损耗。同时,该金属层还能提高金刚石与胎体材料的结合力,实现金刚石在胎体材料中的强包镶。该强包镶金刚石碎岩能力强,为钻头工作层的主要切削材料,工作时间长,能提高钻头寿命。(2)弱包镶材料—低强度金刚石或其他磨料。在这种磨料的表面先化学沉积一层NiWP合金薄层,改善金刚石的表面润湿性能,使WC混合粉很容易就能包裹在磨料的表面,从而实现低强度金刚石或其他磨料在胎体材料中的弱包镶。弱包镶后的低强度金刚石或者其他的磨料与胎体材料的结合力小,易脱落到底孔底,主要用于钻头的自锐。这样,在钻进时,钻头中的两种工作材料适时出露,两种磨料对彼此起了相互补强的作用,从而解决了钻头的钻进时效与钻头寿命之间的矛盾,使该种钻头具有高的时效和高的寿命,满足生产要求。

4 孕镶金刚石钻头制造技术

制造技术是影响孕镶金刚石钻头性能的另一个重要因素。孕镶金刚石钻头的制造方法主要可以归纳为以下几种:热压烧结法、强化热压烧结法、激光焊接法以及增材制造法。每一种孕镶金刚石钻头的制造方法都有其优势,制造出的孕镶金刚石钻头各具特色,但不同的制造方法都有不同的制造工艺参数,必须与优化配合的胎体材料体系相结合,才能得到良好效果。

4.1 传统制造工艺

目前热压烧结法是制造孕镶金刚石钻头的主流方法。该方法通常是将设计好的钻头配方材料置于石墨模具中,通过加热使胎体中金属混合料收缩、软化,当接近塑性流动状态时,施加压力使胎体致密化,牢固地包裹住金刚石颗粒,最后将钢体与胎体牢固地接合成一体得到钻头实体。因此为保证钻头的使用性能,必须选择合适的烧结工艺,对于不同的钻头胎体配方,相应最优的烧结工艺均会有所不同,若烧结工艺设计不当则会直接影响钻头烧结后的性能。如温度过高会对金刚石造成热损伤,影响钻头质量,增加能耗和成本。温度过低会导致烧结合金化程度不足,钻头整体密实度较低,胎体内部微观组织结构不均匀,影响钻头的使用性能。

叶宏煜等^[41]通过前期的试验发现,提高热压烧结时的温度和压力,钻头胎体的硬度和耐磨性明显提高,于是研究了一种强化热压方法制造孕镶金刚石钻头,同时设计与之相适应的胎体材料体系,突破多年来的习惯思维和制造钻头的工艺参数。强化热压方法是普通热压方法的发展,强化热压方法必须配合优选的超细预合金材料作胎体材料体系,在强化热压作用下,预合金粉之间以及预合金粉与金刚石之间可以实现高温、加压下的交互作用和有效融合,使胎体材料中孔隙进一步圆化,孔隙度进一步缩小,有效加速了金刚石钻头胎体致密化进程,使得钻头胎体的力学性能得到大幅度提升。

热压烧结法需要使用结构复杂的组合烧结石墨模具,而激光焊接法是先独立冷压钻头齿再进行热压烧结,然后将钻头齿与基体焊接,这种方法的优势是可以充分发挥激光发生器的作用,能产生高能量密度激光束,使得焊接层的局部达到“深熔焊接”的状态,令焊缝狭窄平滑牢固,热影响区小,其焊接强度远远高于高频焊接的强度,而且还可免除采用组合模烧结的工艺^[42]。但激光焊接钻头的壁厚较薄,一般低于5 mm,对焊接层粉有十分严格的要求,这也是目前激光焊接工艺在地质钻头生产中不能推广的主要原因^[43]。

4.2 增材制造工艺

与传统制造工艺相比,增材制造技术为复杂结构孕镶金刚石钻头的制造提供了更高的设计自由度。目前,金属材料的增材制造技术的研究相对较为成熟,如选择性激光烧结(SLS),直接金属沉积

(DMD),形状金属沉积(SMD),电子束熔化和等离子沉积制造^[44-46]。在金属材料增材制造的基础上,Rahmani等^[47]提出了3D打印轴向功能梯度晶格结构金刚石复合材料,利用SLM结合SPS技术制造出底部为致密金属区,梯度夹层填充 Ti_6Al_4V ——金刚石复合材料和顶部含镀镍金刚石的硬质复合材料,具有更高的硬度、耐磨性。而且通过有限元模拟,发现通过打印得到的梯度功能晶格结构能够使试样内部的应力分布更加均匀,这意味着这种结构在钻井或采矿领域可得到较好的应用,提高钻头工作时的抗冲击性。然而,使用这类技术生产金属基金刚石复合材料需要高昂的生产成本,不利于产品的产业化。更重要的是采用高能束对含金刚石的金属材料进行烧结时,由于高能束会产生高热量从而导致金刚石颗粒容易出现热损伤,影响金刚石工具的使用性能。近年来,基于挤出成型原理的增材制造方法逐渐受到大量研究学者的关注。该工艺的原理是将丝状或颗粒状热熔性材料通过加热块熔化,通过挤压从喷嘴中挤出并按照切片模型设定的路径逐层沉积在打印平台之上,最后堆叠成一个三维实体。相比于其它几类3D打印技术,熔融沉积成型工艺(FDM)在金属基金刚石复合材料的制造上有如下特点:(1)不会造成金刚石的热损伤。EBM、SLS、SLM和LENS等技术主要是通过激光束或电子束选择性地熔化并烧结粉末材料,而激光束或电子束产生的高温会导致金刚石石墨化,严重影响金刚石复合材料的综合性能。而熔融沉积成型技术完全不会对金刚石带来热损伤的问题。(2)环保且经济。FDM打印机的价格低廉,远低于高能束类打印设备,对于普通中小型企业有非常强大的吸引力,而且打印机的能耗低,符合当前低碳发展理念。(3)具备产业化潜力。工业化生产中采用多台FFF打印机构建智能化流水线打印生坯,后经规模化脱脂和烧结工艺,得到性能高度一致的产品。

张绍和等^[48]通过研究FDMS工艺在超薄金刚石锯片制造中的应用,发现在选择合适的材料时,采用该工艺能够制造出精度极高、性能优良的金刚石超薄片,而且具备批量生产性能相对一致产品的能力。Su等^[49]则研究了FDMS制造超薄金刚石锯片的具体工艺流程与参数,并在同样条件下采用粉末热压烧结工艺制备的测试试样的相对密度、硬度、抗弯强度等性能进行了对比分析。结果表明,在选择

恰当的烧结工艺时,两种工艺所制试样的物理和力学性能相差不大,即FDMS制造出的超薄金刚石锯片的物理和力学性能能够满足正常使用的要求。研究同时也表明FDMS在批量化生产制造金刚石工具中有着独特的、无可比拟的优势,能够以相对低的成本有效提高生产效率。Kong等^[50]开发了用于熔丝制造金刚石工具的金属基金刚石复合丝材,并利用制备的材料打印得到了超薄金刚石切片生坯,经过脱脂和烧结等后处理工艺得到了烧结密度和厚度分别为95.2%和0.33 mm的超薄切片。详细的工艺流程如图12所示。这些研究均表明FDMS技术已经能够应用在金属基金刚石工具的制造中,未来可以进一步将FDMS技术应用到孕镶金刚石钻头的设计中,以实现高效率复杂结构孕镶金刚石钻头的制造。

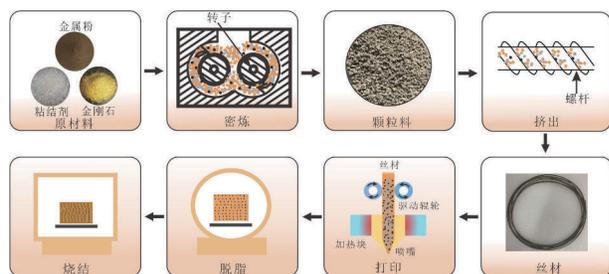


图12 熔丝制造金刚石工具的基本流程

5 发展展望

随着国家能源及科学钻探向地球深部进军,钻头的工作环境变得愈加复杂,传统孕镶金刚石钻头存在寿命短,效率低和能耗大等技术难题。因此,创新孕镶金刚石钻头的设计与制造理念,提升钻头的使用寿命和工作效率,是推动孕镶金刚石钻头升级的重要研究方向。未来孕镶金刚石钻头可以从以下几方面展开深入研究:

(1)坚硬地层用孕镶金刚石钻头研发。提高孕镶金刚石钻头在硬地层、复杂地层的适应性能,可从胎体配方设计和钻头唇面结构优化设计方面展开研究,在保证胎体强度的前提下提高金刚石的出刃高度,并通过唇面结构优化设计提高单位面积上的比压,增加金刚石压入岩石的深度,形成相对大的体积破碎。

(2)多功能碎岩孕镶金刚石钻头的研发。如融合PDC和孕镶金刚石切削结构等现有技术,对钻头

切削元件进行优化布置,设计一种新型高效的混合钻头,以适应深部复杂地层的钻进。

(3)升级孕镶金刚石钻头的制备工艺。传统制造工艺难以实现复杂结构孕镶金刚石钻头的制造,利用3D打印技术独特的优势可以实现钻头结构的自由设计及制造。

参考文献:

- [1] Liu W, Gao D. Study on the anti-wear performance of diamond impregnated drill bits [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2021,99:105577.
- [2] 张绍和. 金刚石与金刚石工具[M]. 长沙:南大学出版社,2005:40-52.
- [3] Glowka D A, Schafer D M. Program plan for the development of advanced synthetic-diamond drill bits for hard-rock drilling[R]. Sandia National Labs, Albuquerque, NM (United States), 1993.
- [4] Zaczyn K A, Cooper G A. Investigation of diamond-impregnated drill bit wear while drilling under Earth and Mars conditions[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2004,109:E7S10.
- [5] Liu W, Gao D. Study on the anti-wear performance of diamond impregnated drill bits [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2021,99:105577.
- [6] 张绍和,鲁凡. 孕镶金刚石钻头参数设计规律研究[C]//第四届郑州国际超硬材料及制品研讨会论文集.2003:128-134.
- [7] Xu J, Sheikh A H, Xu C. Interfacial failure modelling of diamond bits made of particulate composites[J]. Composite structures, 2016,155:145-159.
- [8] Levin E, Gutmanas E Y. Solid-state bonding of diamond to Ni-chrome and Co-20wt% Waloys[J]. Journal of materials science letters, 1990,9(6):726-730.
- [9] 孙洪义,刘树华. 孕镶人造金刚石钻头反应性胎体的研究[J]. 西部探矿工程,2000(4):113.
- [10] Loginov P A, Sidorenko D A, Shvyndina N V, et al. Effect of Ti andTiH₂ doping on mechanical and adhesive properties of Fe-Co-Ni binder to diamond in cutting tools[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2019,79:69-78.
- [11] Chen C, Liu X, Zhou F, et al. Effect of basalt fiber on the microstructure and holding strength of sintered WC-based diamond composite[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2021,99:105600.
- [12] Sidorenko D, Mishnaevsky JR L, Levashov E, et al. Carbon nanotube reinforced metal binder for diamond cutting tools[J]. Materials & Design, 2015,83:536-544.
- [13] Han Y, Zhang S, Bai R, et al. Effect of nano-vanadium nitride on microstructure and properties of sintered Fe-Cu-based diamond composites[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2020,91:105256.
- [14] Dai W, Yue B, Chang S, et al. Mechanical properties and microstructural characteristics of WC-bronze-based impregnated diamond composite reinforced by nano-NbC[J]. Tribology In-

- ternational, 2022, 174:107777.
- [15] 沈伟丽. 金刚石颗粒化学镀 Ni-P 合金及其性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- [16] Mechnik V A, Bondarenko N A, Kuzin n O, et al. Influence of the addition of vanadium nitride on the structure and specifications of a diamond-(Fe-Cu-Ni-Sn) composite system[J]. Journal of Friction and Wear, 2018, 39:108-113.
- [17] 方啸虎, 邓福铭, 郑日升, 等. 现代超硬材料与制品[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2011: 480-481.
- [18] Chang R, Zang J, Wang Y, et al. Preparation of the gradient Mo layers on diamond grits by spark plasma sintering and their effect on Fe-based matrix diamond composites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 695:70-75.
- [19] Deoliveira L J, Cabral S C, Filgueira M. Study hot pressed Fe-diamond composites graphitization[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2012, 35:228-234.
- [20] Sun Y, Wu J, He L, et al. Influence of B4C coating on graphitization for diamond/WC-Fe-Ni composite[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2020, 88:105208.
- [21] 宋月清, 甘长炎, 夏志华, 等. 金刚石工具胎体性能的弱化问题研究[J]. 人工晶体学报, 1998(4):66-70.
- [22] 庞丰, 段隆臣, 童牧, 等. 钻进打滑地层时造孔剂对镶金刚石钻头性能的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2014, 19(5):790-796.
- [23] 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.
- [24] 潘秉锁, 方小红, 杨凯华. 自润滑孕镶金刚石钻头胎体材料初步研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2009, 36(1):76-78.
- [25] 谢兰兰, 潘秉锁, 段隆臣. 石墨粒度对自润滑孕镶金刚石钻头性能的影响[J]. 地质科技情报, 2014, 33(3):181-184.
- [26] Li C, Duan L, Tan S, et al. Effect of CaF₂ and hBN on the mechanical and tribological properties of Fe-based impregnated diamond bit matrix[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2018, 75:118-125.
- [27] Tan S, Zhang W, Duan L, et al. Effects of MoS₂ and WS₂ on the matrix performance of WC based impregnated diamond bit[J]. Tribology International, 2019, 131:174-183.
- [28] 孙吉伟. 适用于坚硬致密地层的孕镶金刚石钻头唇面结构设计[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- [29] Wu J, Zhang S, Liu L, 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.
- [30] 高科. 孕镶金刚石仿生钻头的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
- [31] 何龙飞. 可再生沟槽式仿生金刚石钻头的试验研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
- [32] 李梦, 苏义脑, 孙友宏, 等. 高胎体仿生异型齿孕镶金刚石钻头[J]. 吉林大学学报(工学版), 2016, 46(5):1540-1545.
- [33] Wang Z, Zhang Z, Sun Y, et al. Wear behavior of bionic impregnated diamond bits[J]. Tribology International, 2016, 94: 217-222.
- [34] 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.
- [35] 刘宝昌, 曹鑫, 计胜利, 等. 孔底流场和温度场数值模拟与试验研究——以取心孕镶金刚石钻头为例[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2018, 38(5):33-38.
- [36] 常思, 刘宝昌, 韩哲, 等. 热-机碎岩孕镶金刚石钻头的设计及试验研究[J]. 钻探工程, 2022, 49(2):77-84.
- [37] 汤凤林, 沈中华, 段隆臣, 等. 深部各向异性硬岩钻进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.
- [38] 李春, 沈立娜. “松科二井”用硬岩长寿命钻头的设计与应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(2):56-60.
- [39] 张绍和. 金刚石钻头设计与制造新理论新技术[M]. 武汉: 中国地质大学(武汉)出版社, 2001, 7.
- [40] 罗爱云, 王伟雄, 段隆臣. 强、弱混镶新型金刚石钻头的研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2003, 134(2):48-50.
- [41] 叶宏煜, 谭松成, 杨展, 等. 强化热压烧结孕镶金刚石钻头试验研究[J]. 超硬材料工程, 2021, 33(1):1-6.
- [42] 谢志刚, 王智慧, 罗文来. 深孔金刚石地质钻头设计制造技术综述[J]. 超硬材料工程, 2013, 25(5):33-36.
- [43] 侯家祥, 程文耿. 金刚石地质钻头制造工艺新技术的应用与发展[J]. 超硬材料工程, 2012, 24(3):5-9.
- [44] Esmacher O, Hurst M, Regmi G, et al. Selective laser sintering of metallic oxide powder mixtures for bi/tri-metallic-oxide formation[J]. Materials Letters, 2021, 286: 129215.
- [45] Agyapong J, Czekanski A, Boakye-Yiadom S. Effect of heat treatment on microstructural evolution and properties of cemented carbides (WC-17Co) reinforced with 3% volume hexagonal-boron nitride (h-BN) and processed by selective laser sintering (SLS)[J]. Materials Characterization, 2021, 174:110968.
- [46] Schur R, Ghods S, Wisdom C, et al. Mechanical anisotropy and its evolution with powder reuse in Electron Beam Melting AM of Ti6Al4V[J]. Materials & Design, 2021, 200:109450.
- [47] Rahmani R, Brojan M, Antonov M, et al. Perspectives of metal-diamond composites additive manufacturing using SLM-SPS and other techniques for increased wear-impact resistance[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2020, 88:105192.
- [48] 张绍和, 苏舟, 刘磊磊, 等. SLS和FDMS制造超薄金刚石锯片对比研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2021, 41(1):38-43.
- [49] Su Z, Zhang S, Liu L, et al. Microstructure and performance characterization of Co-based diamond composites fabricated via fused deposition molding and sintering[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 871:159569.
- [50] Kong X, Su Z, He T, et al. Development and properties evaluation of diamond-containing metal composites for fused filament fabrication of diamond tool[J]. Diamond and Related Materials, 2022, 130:109423.

(编辑 王文)