

潜孔锤钻头PDC球形切削齿失效分析

赵洪晨^{1,2}, 孟德忠^{1,2*}, 徐良¹, 叶宏宇³, 岳文^{1,2}

(1. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京)郑州研究院, 河南 郑州 450001; 3. 新源泰利能源科技(北京)有限公司, 北京 102402)

摘要: 空气潜孔锤钻井技术作为地热资源勘探与开发的关键技术之一, 其效率和效果在很大程度上取决于潜孔锤钻头的性能, 尤其是PDC球形切削齿的质量和寿命。针对目前空气潜孔锤钻头钻进中切削齿出现断裂、脱落以及磨损严重导致的钻进效率低、使用寿命短等问题, 本文对PDC球形切削齿进行宏观和微观分析, 探究其失效原因和失效机理, 并针对性地提出相应改善措施。研究结果显示: PDC球形切削齿的主要失效形式为齿的断裂、磨损及脱落。切削齿失效的主要原因是由于冲击破岩过程中切削齿同时受到切向冲击压缩和法向拉伸应力而造成损伤, 同时切削齿材料本身的性能较差、金刚石层与硬质合金基体两相结合强度不高也是失效的重要原因。为了提高PDC球形切削齿的性能和使用寿命, 可以通过优化钻井参数和调整外部作业条件来减轻切削齿的应力负担。此外, 对PDC球形切削齿的材料配方、结构设计和制造工艺进行创新和改进, 也是提升其抗冲击能力和耐磨性的有效途径。通过这些综合性能的改进措施, 可有效提升PDC球形切削齿的可靠性, 进而提高潜孔锤钻井的作业效率和钻头寿命。

关键词: 空气潜孔锤钻井; 潜孔锤钻头; PDC; 球形齿; 失效分析

中图分类号: P634.4⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)03-0117-09

Failure analysis of PDC spherical cutter for DTH hammer bits

ZHAO Hongchen^{1,2}, MENG Dezhong^{1,2*}, XU Liang¹, YE Hongyu³, YUE Wen^{1,2}

(1. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 2. Zhengzhou Institute, China University of Geosciences, Zhengzhou Henan 450001, China; 3. Xinyuan Taili Energy Technology (Beijing) Co., Ltd., Beijing 102402, China)

Abstract: As one of the key technologies in the exploration and development of geothermal resources, the efficiency and effect of DTH hammer drilling largely depend on the performance of the drill bit, especially the quality and life of PDC spherical cutters. In response to the current issues such as low drilling efficiency and short service life due to the breakage, detachment, and severe wear of cutters in air-assisted percussive drill bits. This paper conducts a macroscopic and microscopic analysis of the PDC spherical cutter, investigates the causes of failure and the failure mechanisms, and proposes targeted measures for improvement. The results show that the main failure modes of PDC spherical cutters are tooth fracture, wear and fall off. The main reason for the failure of the cutter is that the cutter is damaged by tangential impact compression and normal tensile stress at the same time, and the poor performance of the cutter materials themselves, and the combination strength of the diamond layer and the cemented carbide matrix are also important reasons for the failure. In order to improve the performance and service life of PDC spherical cutters, the stress burden of the cutters can be reduced by optimizing drilling parameters and adjusting external operating conditions. In addition, innovation and improvement of the material formulation, structural design and manufacturing process of

收稿日期: 2024-07-26; 修回日期: 2024-10-01 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.03.015

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 42302351, U23A2025); 河南省自然科学基金项目(编号: 242300421152, 232300421139); 中央高校基本业务费项目(编号: 2-9-2023-205)

第一作者: 赵洪晨, 男, 满族, 1994年生, 博士研究生, 地质资源与地质工程专业, 研究方向为聚晶金刚石复合片, 北京市海淀区学院路29号, 474947347@qq.com。

通信作者: 孟德忠, 男, 汉族, 1988年生, 副教授, 博士生导师, 博士, 主要从事金刚石钻具的相关研究工作, 北京市海淀区学院路29号, meng@cugb.edu.cn。

引用格式: 赵洪晨, 孟德忠, 徐良, 等. 潜孔锤钻头PDC球形切削齿失效分析[J]. 钻探工程, 2025, 52(3): 117-125.

ZHAO Hongchen, MENG Dezhong, XU Liang, et al. Failure analysis of PDC spherical cutter for DTH hammer bits[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(3): 117-125.

PDC spherical cutters is also an effective way to improve its impact resistance and wear resistance. Through these comprehensive performance improvement methods, the reliability of PDC spherical cutters can be effectively improved, thus improving the operational efficiency of downhole drilling and the service life of the bit.

Key words: air DTH hammer drilling; down-the-hole hammer bit; polycrystalline diamond compact (PDC); spherical tooth; failure analysis

0 引言

地热资源作为五大非碳基能源之一,是一种绿色可持续发展能源,具有成本低廉、利用系数高、绿色环保、应用广泛等众多优点,得到了世界各国的广泛关注和大力发展。截至2021年底,我国地热供暖(制冷)能力达到13.3亿 m^2 ,地热直接利用规模居世界首位^[1]。钻井是地热资源勘探开发的必要手段,其中钻头作为钻探机具的排头兵,具有举足轻重的作用。在地热资源钻采中,空气潜孔锤钻井技术通过使用压缩空气作为循环介质,显著提升了机械钻速,有效加快了钻井进度并提升了作业效率^[2-3]。同时,由于减少了钻头消耗并缩短了建井周期,空气潜孔锤钻进还有助于节约钻井成本。此外,空气潜孔锤钻井过程始终保持井内为负压状态,减少对含水层的损害,同时破碎的岩屑会被空气由环空从井眼带出,相当于边钻进边洗井,能够避免钻进过程中钻井液泄漏而引起地层水污染或堵塞的问题,兼顾了环保效益和经济效益,较其它钻井技术具有明显的优势^[4-7]。

空气潜孔锤钻井技术的工作原理是利用空气压缩机将高压气体通过钻具传递给气动潜孔锤,气动潜孔锤将高压气体能量转化为间歇性的脉冲力,带动潜孔锤钻头对岩石进行高频率的冲击回转破岩,同时空气将岩屑携带返回地上^[8-9]。在钻进工作过程中,潜孔锤钻头依靠钻头端面的球齿破碎岩石,因此,空气潜孔锤钻井技术对球齿的力学性能要求十分严格。

传统的潜孔锤钻头主要以硬质合金齿为主,潜孔锤钻头在使用过程中不仅要承受冲击载荷,还要承受来自钻进对象的磨损。硬质合金的耐磨性相对较低,在钻进比较坚硬、研磨性强的岩层时,由于硬质合金球齿不耐磨,随着钻头的使用,球齿的磨损逐渐加大,出刃逐渐降低,导致钻进速度也随之降低;另一方面,由于磨损过快而使得钻头亦过早报废,频繁地起下钻也降低了纯钻进的时间,影响了总体工作效率,增加了钻进成本。与硬质合金

球齿相比,PDC球齿具有高强度、高硬度和高耐磨性等优异的机械力学性能。然而,在钻进极坚硬地层时,由于井下工作环境极其恶劣,PDC球齿除了承受与地层的高冲击力作用外,还承受与地层的摩擦力作用,以及钻头端面冲洗介质和未被冲洗介质带走的碎岩颗粒对球齿的摩擦力作用,如图1所示。由此可见,应用于潜孔锤钻头的PDC球齿的耐磨性和抗冲击性直接影响了潜孔锤钻头的使用寿命和使用范围。深入探究其失效机制对于提高潜孔锤钻头的综合性能以及延长使用寿命有着显著的实用价值。

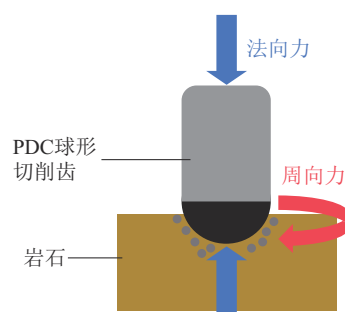


图1 潜孔锤钻头切削齿的受力情况

Fig.1 The force conditions of the drill bit cutter

长期以来,人们对切削齿的失效问题进行了广泛的研究,并提出了多种损伤和断裂机理模型。李国安等^[10]研究了PDC钻头的失效类型,提出了一种防止PDC钻头早期失效的设计、材料制造和使用方法。Zhang等^[11]观察了PDC切削齿的宏观和微观形貌,并对其失效原理进行了研究,探讨了界面结构对PDC切削齿抗冲击性能的影响,得到了界面面积与抗冲击能之间的函数关系。Pryhorovska等^[12]建立了PDC钻头切削齿切削岩石过程的有限元模型,模拟了不同形状的PDC钻头切削齿对岩石的直线和圆切削过程。李树盛等^[13]通过理论计算和分析,为PDC切削齿工作角度提供了明确的定义,并推导出前倾角和侧倾角的精确计算方法。进一步探讨了结构参数如何影响这些角度,为PDC切削齿的设计提供了理论支持。王镇全等^[14]采用了有限

元数值模拟技术,模拟了不同切削角度的切削齿与岩石的相互作用,揭示了切削角度与岩石破碎效果之间的相互关系,并分析如何通过调整切削角度来优化破岩效果。谭卓英等^[15]对边齿的受力情况进行了系统研究,对切削齿的失效问题进行了深入分析,确定了钻头齿孔容易失效的部位;此外,该团队还进行了关于钻头体和球齿的疲劳特性的理论分析工作,最终得出了钻头齿孔喇叭口状磨损现象形成的根本原因。Kong等^[16]建立了常规PDC切削齿和多面PDC强化切削齿的有限元模型,并通过仿真分析了失效原因。以上的研究对于PDC平面齿的失效进行了较为全面的研究,其中部分结果可以用于借鉴解决潜孔锤钻头PDC球齿的失效问题。

潜孔锤钻头PDC球形切削齿方面,黄志强等^[17]针对空气潜孔锤钻头钻进中切削齿频繁断裂、脱落及磨损严重等问题,分析了潜孔锤切削齿的失效机理,采用了纳米改进技术,在硬质合金中掺杂纳米 Al_2O_3 制备出的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{WC-Co}$ 纳米/微米复合材料,对其性能、组织结构进行分析,并就其耐磨性、耐冲击性进行实验研究,结果表明复合材料的耐磨性和耐冲击性得到了大幅提高。冯一璟等^[18]使用大型软件CAD/CAE/CFD软件研究了钻进过程钻头牙齿的实时动态受力情况、钻头的破岩机理、钻头结构参数及钻进过程流场特性,优化设计出满足空气锤钻井配套的高效破岩、长寿命的潜孔锤钻头,大大缩短了研发周期。杨达等^[19]采用ABAQUS软件对单个球齿冲击岩石的过程进行了数值模拟,并进行了冲锤自由落体冲击实验,分析球齿在不同冲击功条件下的碎岩机理、破碎面积的变化规律。杨合等^[20]利用ABAQUS对不同冲击载荷下FGQ-600型大直径潜孔锤跟管钻头进行模拟及强度分析,结果表明钻头应力随冲击功增大而增加。杨秋明等^[21]运用ABAQUS软件建立了球齿碎岩仿真模型,对比分析球齿在不同钻进参数下冲击切削碎岩过程中的破碎比功、侵入深度、破碎范围与应力影响范围等曲线,优选了钻进参数和布齿。

现有强化研究和失效分析多针对PDC钻头平面切削齿,针对球形切削齿的研究相对较少,而空气潜孔锤钻井技术在工作过程中同时对钻头施加一定的轴向动力(钻压)和回转动力(扭矩),潜孔锤钻头PDC球齿在冲击和旋转切削共同作用下破碎岩石,与传统PDC切削齿的工作形式存在本质上的

区别。潜孔锤钻头球形齿的失效形式与常规PDC切削齿存在较大差异且相关研究开展较少。鉴于此,对潜孔锤钻头PDC球齿进行深入的失效分析显得尤为必要。这项研究将专注于揭示PDC球齿失效的原因、失效的内在机制,以及影响其性能的各种因素,可以为提升PDC球齿的耐磨性、抗冲击韧性和其他综合性能提供科学依据和实际指导。

1 潜孔锤钻头的整体失效分析

为了进一步了解PDC球齿在现场的运用,探索钻头的失效机理,我们对某地热温泉井项目所使用的潜孔锤钻头进行了调研和分析。根据现场采集数据和对潜孔锤钻头的工作原理分析,潜孔锤钻头的主要失效形式是切削齿的冲击磨损和断裂,并伴有少量金刚石层和切削齿的脱落。如图2所示,冲击磨损主要发生在钻头顶部的切削齿上,而断裂和剥落主要发生在钻头边缘的切削齿上。



图2 潜孔锤钻头切削齿的总体失效情况

Fig.2 The overall failure of the drill bit cutter

基于对上述项目所使用的潜孔锤钻头进行统计分析和实地调查结果显示,潜孔锤PDC钻头的失效模式主要表现为切削齿的机械磨损和断裂,而PDC球形切削齿剥落和整体掉落很少发生。具体来说,机械磨损主要发生在钻头顶部的切削齿,断裂和剥落则多发生在钻头边缘的切削齿^[22]。如图3所示,切削齿的剥落和掉齿仅占5.5%和3.6%,意味着大多数切削齿在正常使用过程中不会出现这类情况;而切削齿的机械磨损最为常见,达到了52.7%;断裂现象占比38.2%;这对钻速和破岩效率

造成了严重的不利影响。

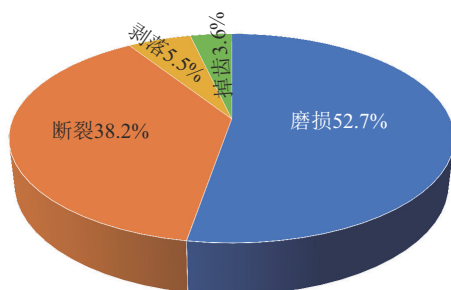


图3 PDC切削齿不同失效形式占比

Fig.3 Proportion of different failure forms of PDC cutters

2 PDC球形切削齿的主要失效形式

2.1 PDC球形切削齿的机械磨损

机械磨损是切削齿最常见的失效之一,通常包括正常磨损和异常磨损。正常磨损是不可避免的钻井损耗,表现为微观和宏观的磨损,但没有明显的破损或断裂。异常磨损通常是由于操作不当或瞬时冲击造成的,表现为切削齿的剥离和破碎^[16]。在钻压和转矩的作用下,钻头以剪切的方式切削岩层,而切削齿则直接与地层相互作用并产生显著的磨损,导致破岩效率大幅降低。当切削齿严重磨损时,则可能会对钻头整体结构产生影响,最终可能导致钻头报废。

在破岩过程中,岩屑位于PDC切削齿和岩石的两个接触面上。当接触应力达到并超过磨粒的抗压强度阈值时,切削齿的韧性组分将经历塑性变形和疲劳过程,而硬度较高的组分则可能因压力作用而发生破碎。这种相互作用导致切削齿表面出现磨损现象。切削齿的磨损主要集中在潜孔锤钻头边缘部位的切削齿上,金刚石层和硬质合金基体也会在摩擦过程中形成磨损平面(如图4所示)。

当钻进作业开始时,钻头突然受到高转速的影响而产生强烈的冲击,并且钻头在进尺过程中需要



图4 PDC切削齿磨粒磨损表面形貌

Fig.4 PDC cutter wear surface morphology

施加一定的力才能克服岩石阻力并深入其中。此时,切削齿主要承受着冲击的作用,之后切削齿会逐步进入到稳定磨损的状态。一旦金刚石层刃口开始磨损,切削齿和岩石之间就会从线接触变为面接触,这种变化导致了摩擦力和切削阻力不断增加。当遇到颗粒较细、岩性软的均匀岩层时,由于接触应力作用,磨粒会在摩擦表面上进行相对运动,如图5所示,由于聚晶金刚石的刚度高于磨料颗粒的刚度,金刚石层表面只存在一些与切削方向一致的微小划痕^[23]。

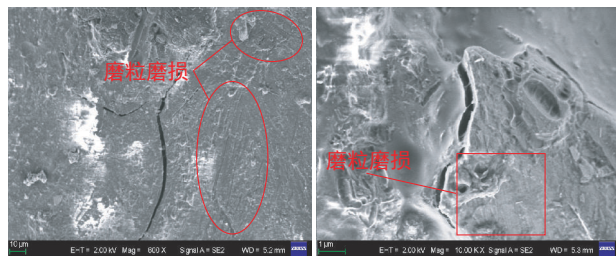


图5 PDC切削齿金刚石层磨粒磨损SEM图像

Fig.5 SEM diamond wear image of PDC cutter

冲蚀磨损也被认为是导致切削齿性能下降的主导因素之一,它对切削齿的耐久性有着显著的影响。在钻井过程中,潜孔锤钻头的喷嘴会将高速空气引入井底,辅助切削齿破除岩石并清除岩屑。当高压气流抵达井底时,会携带着许多细小的岩屑并以特定的方向和速率冲击切削齿,从而对其进行冲蚀。当高压空气在钻头底面逆向流动时,遇到切削齿阻碍就会产生绕流和漩涡效应,携带的岩屑会进一步加剧材料的磨损。如图6所示,冲蚀导致切削齿材料表面形成鱼鳞状的冲蚀坑,数个不规则尺寸的冲蚀坑相互连接成若干段较短沟槽,导致冲蚀效应不断积累,形成多个角度的折面与弧形,最终形成一个较大的凸起,同时沟槽也会加深,加速材料的损失。因此,冲蚀磨损同样可以引起球形齿的微观损伤,同时,这种损伤也将为材料的快速失效提供原始的裂纹源,加速球形齿整体失效。

综上,钻头切削齿磨损主要有磨粒磨损和冲蚀磨损两种情况。针对以上失效形式,通过提高PDC切削齿的硬度能够改善其耐磨特性,通常通过调整粉末配比、优化材料配方、采用适当的高温高压工艺来实现。此外,影响冲蚀磨损的因素还包括岩屑及材料磨粒的大小、形状、入射角度、速度、温度和

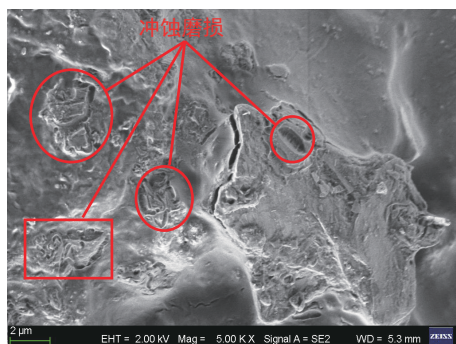


图6 PDC切削齿冲蚀磨损SEM图像

Fig.6 SEM erosion wear image of PDC cutter

环境介质以及被冲蚀的材料本身的性能^[24-25]。为了减少冲蚀磨损的影响,可通过合理地设计和布置钻头喷嘴的角度和位置,改变冲击的角度,并降低入射粒子的速度。

2.2 PDC球形切削齿的断裂

在潜孔锤钻头钻进过程中,钻头上不同位置的切削齿都会与岩石直接接触,但外侧切削齿更直接地面对岩层的冲击,承受了最大的冲击力,通常更容易发生断齿现象。同时,潜孔锤钻头在工作时可能会同时受到法向和周向冲击的影响。法向冲击通常是由钻头的推进力造成的,而周向冲击则可能由钻头旋转时与岩石的摩擦产生。尽管在法向冲击的情况下,理论上外侧齿和内侧齿受到的冲击力应该是相同的,但外侧切削齿由于更接近岩石表面,可能会承受更多的周向冲击,这增加了它们断裂的风险。此外,外侧切削齿在钻头旋转过程中可能会受到更多的磨损,进一步增加了它们断裂的可能性。一旦该处断齿,其他切削齿就会受到不平衡的冲击,从而加速钻头的失效,是一种比较严重且普遍的失效形式。当钻进硬地层时,钻头会受到交变的切向冲击压缩和法向拉伸应力的作用,当这些应力累积到一定的强度之后,切削齿会萌生裂纹并形成微碎片,最终导致金刚石层和硬质合金基体的破碎和局部剥落(如图7所示)。此外,在钻进坚硬的岩层过程中,黏滑振动会导致切削齿受到突然且较大的瞬时冲击,从而导致切削齿的剥落、折断甚至碎裂^[26]。

切削齿的冲击剥落失效主要分为金刚石层的剥落和硬质合金基体的断裂。金刚石层的冲击剥落表现为金刚石沿着切削方向形成微尺度的剥落坑,如图8所示,多个大小不一的片状剥落坑进一步



图7 PDC切削齿的断裂及金刚石层剥落

Fig.7 Fracture of PDC cutter and diamond layer spalling

相互联通形成沟槽,在反复冲击下,沟槽变得更深、更宽、更长,并与其他沟槽相互作用,造成金刚石层大面积的冲击剥落。较大的冲击力使材料剥落表面产生不均匀的局部滑移。随着加载循环次数的增加,滑移带不断加宽。当加宽至一定程度时,由于位错的塞积和交错,挤出脊和侵入沟会出现,从而导致应力集中。经过一定循环后,就会产生显微裂纹^[27],裂纹一般起源于金刚石剥落断口面上,并向纵深发展,形成新的微片状剥落。

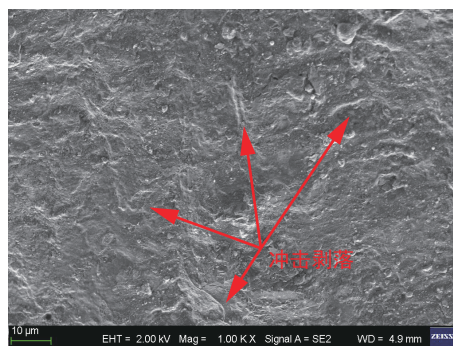


图8 PDC切削齿金刚石层冲击剥落SEM图像

Fig.8 SEM image of impact spalling diamond layer of PDC cutter

PDC切削齿硬质合金层基体的冲击剥落微观形貌主要涉及到结合相的塑性变形和碳化钨(WC)颗粒的剥落和破碎,微裂纹的形成是一个复杂过程,既包括沿晶界扩展的沿晶断裂,也包括穿过晶

粒内部的穿晶断裂^[28-29]。冲击作用下,黏结剂钴(Co)与WC颗粒之间的位错产生应力集中,进而导致黏结剂与WC颗粒之间因异步变形而脱黏^[30];这种脱黏会在晶体颗粒之间形成晶格空位,进而发展为孔隙,并相互连接形成微裂纹,当裂纹在晶粒内部扩展时,会导致穿晶断裂的发生。但是当晶界处的应力集中得不到缓解,并且应力峰值超过晶界的承受强度时,就会在晶界处产生开裂^[11](如图9所示)。从图9可以看出,球形齿出现了裂纹边缘WC颗粒凸起、颗粒磨损变圆滑、晶粒分布不均以及孔隙和孔洞等特征,这表明裂纹主要沿着强度较弱的黏结相Co扩展,由于缺乏黏结相的有效支撑,Wc颗粒发生剥落。而随着切削齿对其内部微裂纹敏感性的增加,其断裂韧性降低,从而不可避免地影响切削齿的抗冲击性。从裂纹的萌生机制来看,任何能够增强晶界强度、提高晶粒纯度和细化晶粒尺寸的因素都有助于抑制晶界裂纹的形成,从而提高材料的整体强度。此外在图中还可以明显地看到有亮白色的黏结剂断续分布,局部区域有团块状Co出现,这种PDC层中的Co富集会影PDC的耐热性。因此,优化黏结剂的分布和晶粒尺寸,以及提高晶界的强度,对于提升PDC切削齿的性能至关重要。

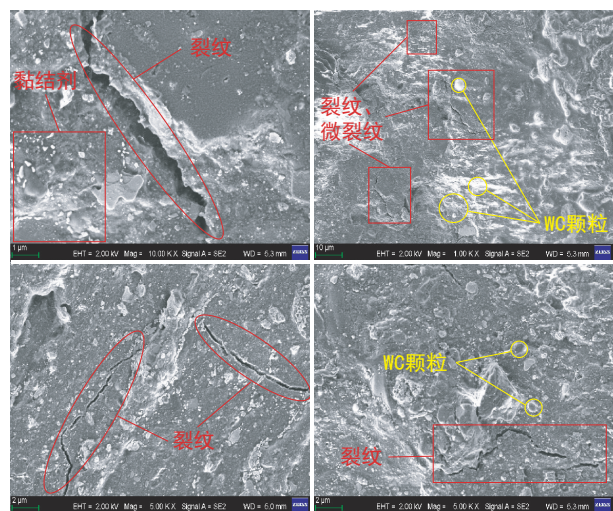


图9 PDC切削齿冲击断裂SEM图像

Fig.9 SEM impact fracture image of PDC cutter

2.3 崩齿

在强烈的冲击作用下,切削齿内部的相邻孔洞会连接形成微裂纹,并且这些微裂纹会不断扩展和

分支,在剪切力的作用下很容易发生大面积整体断裂,这种现象被称为崩齿,这也是PDC切削齿断裂中最严重的一种失效形式(如图10所示)。如果裂纹扩展到金刚石层和硬质合金层之间的结合界面,就会影响到金刚石层与硬质合金层之间的黏合力,从而导致金刚石层脱落。如果裂纹出现在硬质合金齿柱侧面或齿根部位,再加上齿根部位承受的剪切力很大,就容易导致整个切削齿的整体断裂。崩齿产生的碎齿会在井底滞留,在钻进过程中会对新齿造成破坏。同时,在操作过程中出现突然钻进、钻速不稳定时,整个钻压会加在首先与地层接触的切削齿上,导致这些切削齿承受过大负荷而发生断裂或碎裂。因此,提高切削齿本身的性能,通过改进材料和工艺来增强其耐冲击和抗断裂的特性;维持稳定的钻压和钻速,以减少对切削齿的不利影响;及时清除井底碎齿和杂物等,避免它们对新切削齿的破坏,都可以有效减少切削齿折断或碎裂,提高钻井作业的效率 and 安全性。



图10 PDC切削齿的崩齿

Fig.10 Breakage of PDC cutter

3 失效机理

为了进一步分析各种失效形式的机理,本研究对失效的潜孔PDC钻头进行取样,并对PDC切削齿断裂面(如图11所示部位)的元素分布、物相组成、碳键结合状态等进行了详细表征与分析。



图11 所测试PDC球形切削齿样品

Fig.11 Sample of PDC spherical cutter tested

3.1 EDS能谱分析

对失效PDC切削齿选区进行元素分析,如图12所示,除碳元素以外,EDS能谱中出现了钴和氧元素峰,说明切削齿采用Co作为黏结剂,同时观察到钴氧化物的特征信息,表明钴相在切削齿工作过程中发生了氧化析出,说明切削齿中的黏结剂发生氧化影响了金刚石层和硬质合金层的结合强度,这也是导致切削齿失效的原因之一。

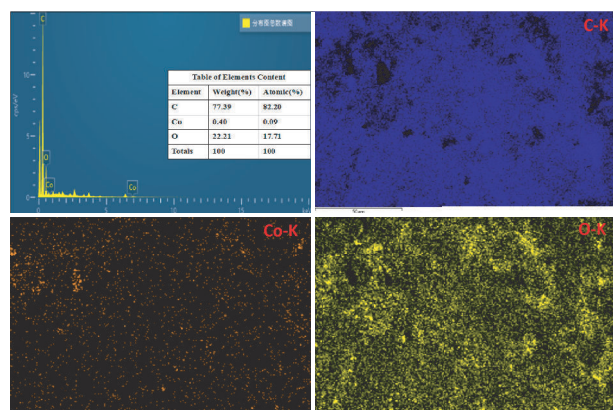


图12 失效切削齿的EDS能谱图

Fig.12 EDS spectra of the failed cutter

3.2 X射线衍射分析

图13为对潜孔锤钻头PDC切削齿磨损面进行X射线衍射分析得到的图谱。图谱中出现了密排六方晶体WC的三强特征峰,说明切削齿表面磨损较为严重,部分金刚石层已脱落,露出碳化钨硬质合金基体部分。在EDS分析中,可以观察到CoO的存在,但在X射线衍射图谱中未探测到CoO的特征峰,可能的原因是WC所占体积较大,而CoO信号较弱。此外,由于X射线衍射分析的光束直径较大,无法精确定位到精细的局部,因此在X射线衍射图中未观察到石墨衍射峰。

3.3 拉曼光谱分析

为了探究PDC切削齿磨损表面的碳结构变化,对其开展了拉曼光谱测试。结果表明,在波长范围 $1360\sim 1600\text{ cm}^{-1}$ 之间存在的峰对应无序的D峰和G峰^[31],如图14所示。这些峰表明材料中存在非晶碳材料,这是由于在 SP^3 向 SP^2 转化过程中金刚石材料发生石墨化现象。PDC切削齿中的金刚石颗粒在石墨化后,会转变为硬度较低的石墨结构,导致切削齿整体的硬度和耐磨性显著下降。同时,由于

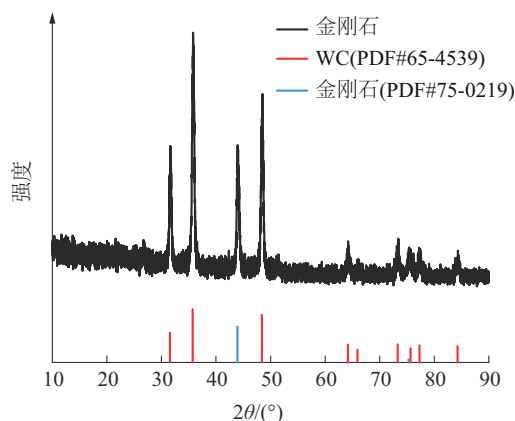


图13 失效切削齿的X射线衍射图谱

Fig.13 X-ray diffraction pattern of the failed cutter

石墨化过程中体积的变化,可能会在PDC中产生内部应力,增加裂纹的形成风险,从而影响切削齿的整体强度和耐久性。

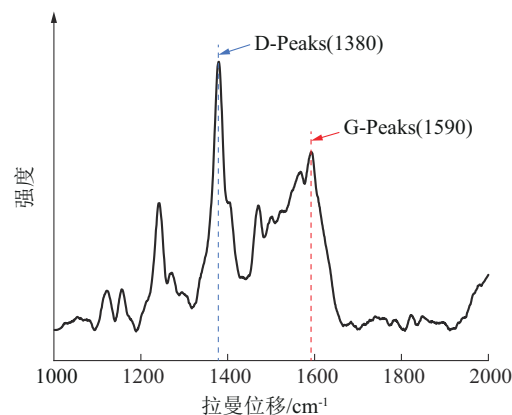


图14 失效切削齿的拉曼图谱

Fig.14 Raman diagram of failure cutter

4 切削齿优化建议

针对以上PDC球形切削齿失效问题,可从制备工艺和钻井作业方法等多个角度实施一系列优化与改进措施,提升PDC的性能,延长其使用寿命,并降低失效风险。在制备工艺方面,对切削齿的设计和配方以及烧结工艺进行优化增强PDC的耐磨性与抗冲击性;优化生产过程中产生的残余应力以减少微观裂纹;使用真空还原处理和慢降温慢降压退火工艺,有效降低氧含量,减少热残余应力,从而延长使用寿命;设计合理的几何形状,以提高切削效率并减少磨损;采用多层结构设计,以提高PDC球形切削齿的承载能力和抗冲击性能。钻井作业方

面,控制钻井过程中的钻压等工程参数以避免PDC球形切削齿断裂或脱落;控制机械钻速及钻头回次进尺,使岩石破碎在尽量多的时间内处于体积破碎状态,提高钻井效率并降低对PDC球形切削齿的损耗^[32];定期检查和维修易损的边齿等。钻头设计方面,合理布置PDC球形切削齿的排列方式,有利于提高机械钻速,在井底形成紊流状态,有效排除井底岩屑^[33]。通过这些措施,可以显著提高PDC球形切削齿的性能和耐用性。

5 结论与建议

本文针对潜孔锤钻头失效球形切削齿进行了宏观和微观分析,探究了其失效原因和失效机理,得到以下结论:

(1)对潜孔锤钻头PDC球形切削齿的失效分析表明,PDC球形切削齿的失效形式包括:磨损、断裂和脱落;钻头顶部的切削齿主要受垂直方向的力,易冲击磨损;边缘外侧的切削齿起主要刮削作用,受力复杂,易断裂和脱落。

(2)最严重的失效形式是切削齿的脱落,它直接导致潜孔锤钻头丧失切削能力。其次是切削齿的断裂,会导致钻孔效率降低、减少使用寿命。

(3)在钻进过程中,来自井下的冲击和切削岩石的磨损是导致切削齿失效的主要原因之一。此外,切削齿材料的强度不足,金刚石层与硬质合金基体结合能力较弱也是影响钻头钻进效率和使用寿命的主导因素。

(4)在钻头的使用过程中,部分金刚石石墨化导致切削齿硬度、耐磨性和韧性下降,加速裂纹形成。同时,钻相氧化减弱了金刚石层与硬质合金层的结合力,并影响了切削齿的耐热性。

(5)针对PDC球形切削齿的失效问题,可以从切削齿材料配方、高温高压合成块体的设计制造及钻进作业方法等多个方面采取措施。另一方面,也可以通过调整钻井参数和外部条件来实现平稳钻进,从而减少因振动、蹩钻或跳钻而产生的突然冲击。

参考文献(References):

[1] 同坪卉.我国地热产业持续高质量发展[N].中国石化报,2023-09-18(002).
YAN Pinghui. China's geothermal industry continues to achieve high-quality development[N]. Sinopec News, 2023-09-18(002).

[2] 石荆京,张海林,苏园园,等.空气潜孔锤钻进技术在舜皇山基岩地热深井的应用[J].钻探工程,2021,48(10):36-42.
SHI Jingjing, ZHANG Hailin, SU Yuanyuan, et al. Application of air DTH hammer drilling technology in deep bedrock geothermal well in the Shunhuang Mountain[J]. Drilling Engineering, 2021,48(10):36-42.

[3] 顾小勇,邵烽.岩土工程边坡治理锚固技术探析[J].世界有色金属,2020(11):140-141.
GU Xiaoyong, SHAO Feng. Discussion on anchoring technology of geotechnical engineering slope treatment[J]. World Non-ferrous Metals, 2020(11):140-141.

[4] 翟应虎,李祖光,张旭.空气钻井的技术难点剖析及发展前景展望[J].天然气工业,2009,29(5):67-69.
ZHAI Yinghu, LI Zuguang, ZHANG Xu. Technical difficulties and research prospects of air drilling[J]. Natural Gas Industry, 2009,29(5):67-69.

[5] 宋永志.潜孔锤定向钻进可行性研究[J].化工设计通讯,2019,45(7):159,200.
SONG Yongzhi. Feasibility study on directional drilling of down-the-hole hammer[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2019,45(7):159,200.

[6] 梅献忠,黄军,张亚运,等.气动潜孔锤与螺旋钻机组合技术在复杂地层中的应用[J].地基处理,2020,2(3):255-259.
MEI Xianzhong, HUANG Jun, ZHANG Yayun, et al. Application of the combined technology of the pneumatic DTH hammer and auger drill in complex strata[J]. Journal of Ground Improvement, 2020,2(3):255-259.

[7] Shi Y L, He S, Li C H. Impact Characteristics of a Bidirectional Pneumatic DTH Hammer for Unconsolidated Formations[J]. Applied Science, 2023, 13(21):11797.

[8] 雪彦宏,马江.空气潜孔锤+气举反循环组合钻井技术在地热资源勘查中的应用[J].科学技术创新,2022(31):66-69.
XUE Yanhong, MA Jiang. Application of combined drilling technology of air DTH hammer+Gas lift reverse circulation for geothermal resources[J]. Scientific and Technological Innovation Information, 2022(31):66-69.

[9] 林永江.空气潜孔锤钻井技术在水泥地层钻井工程中的应用[J].低碳世界,2017(2):51-52.
LIN Yongjiang. The application of air hammer drilling technology in granite stratum drilling engineering [J]. Low Carbon World, 2017(2):51-52.

[10] 李国安,宋全胜.聚晶金刚石复合片(PDC)钻头的失效分析[J].华中科技大学学报(自然科学版),2002,30(1):62-64.
LI Guoan, SONG Quansheng. SONG quansheng. The analysis of failure of PDC well bits[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2002,30(1):62-64.

[11] Zhang F X, Lu Y J, Xie D, et al. Experimental study on the impact resistance of interface structure to PDC cutting tooth[J]. Engineering Failure Analysis, 2022,140:106503.

[12] Pryhorovska T O, Chaplinskiy S S, Kudriavtsev I O. Finite element modelling of rock mass cutting by cutters for PDC drill bits [J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(6):888-892.

[13] 李树盛,马德坤,侯季康.PDC切削齿工作角度的精确计算与分析[J].西南石油学院学报,1996,18(4):67-72.

- LI Shusheng, MA Dekun, HOU Jikang. Precise calculation and analysis of working angles of PDC cutters[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 1996, 18(4): 67-72.
- [14] 王镇全, 周悦琚. PDC钻头切削齿切削角度对破岩效果影响规律的研究[J]. 煤矿机械, 2009, 30(8): 49-51.
- WANG Zhenquan, ZHOU Yuehui. Study on rock breaking regulation in optimizing cutting angle of PDC bit[J]. Coal Mine Machinery, 2009, 30(8): 49-51.
- [15] 谭卓英, 赖海辉. 球齿钻(钎)头边齿失效问题分析[J]. 凿岩机械气动工具, 1990, 16(3): 17-24.
- TAN Zhuoying, LAI Haihui. Failure analysis of side teeth of ball tooth drill (bit) head[J]. Rock Drilling Machinery & Pneumatic Tools, 1990, 16(3): 17-24.
- [16] Kong C Y, Liang Z, Zhang D. Failure analysis and optimum structure design of PDC cutter[J]. Mechanics, 2017, 23(4): 567-573.
- [17] 黄志强, 沈岳, 卜艳, 等. 空气冲旋钻头牙齿失效分析与新材料实验研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2010, 32(4): 175-178.
- HUANG Zhiqiang, SHEN Yue, BU Yan, et al. Analysis on the failure of air-flush rotary-percussive drilling bit teeth and experimental study on new materials[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2010, 32(4): 175-178.
- [18] 冯一璟, 张来斌, 梁伟, 等. 潜孔钻头研究现状及展望[J]. 长江大学学报(自科版), 2015, 12(25): 38-41.
- FENG Yijing, ZHANG Laibin, LIANG Wei, et al. The research status and expectation of DTH drill bit[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2015, 12(25): 38-41.
- [19] 杨达, 陈宝义, 曹宏宇, 等. 基于冲击载荷的硬质合金球齿碎岩机理研究[J]. 钻探工程, 2022, 49(1): 142-152.
- YANG Da, CHEN Baoyi, CAO Hongyu, et al. Study on rock fragmentation mechanism of carbide spherical teeth based on impact load[J]. Drilling Engineering, 2022, 49(1): 142-152.
- [20] 杨合, 戚波, 曹品鲁, 等. FGQ-600型潜孔锤钻头冲击应力作用下强度可靠性分析[J]. 钻探工程, 2023, 50(1): 115-124.
- YANG He, QI Bo, CAO Pinlu, et al. Strength analysis of FGQ-600 type DTH hammer drill bit used for casing while drilling[J]. Drilling Engineering, 2023, 50(1): 115-124.
- [21] 杨秋明, 周兢, 王瑜, 等. 基于ABAQUS的气动潜孔锤球齿碎岩及布齿优化[J]. 钻探工程, 2024, 51(1): 40-50.
- YANG Qiuming, ZHOU Jing, WANG Yu, et al. Pneumatic DTH hammer tooth crushing and optimization of teeth arrangement based on ABAQUS[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(1): 40-50.
- [22] 张富晓, 黄志强, 周已. PDC钻头切削齿失效分析[J]. 石油矿场机械, 2015, 44(9): 44-49.
- ZHANG Fuxiao, HUANG Zhiqiang, ZHOU Yi. Failure analysis of PDC bit cutter[J]. Oil Field Equipment, 2015, 44(9): 44-49.
- [23] Fan Y T, Huang Z Q, Gao D L, et al. Experimental study of an $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{WC-Co}$ nanocomposite based on a failure analysis of hammer bit[J]. Engineering Failure Analysis, 2011, 18(5): 1351-1358.
- [24] 孙家枢. 金属的磨损[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1992.
- SUN Jiashu. Wear of Metals[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1992.
- [25] 邵荷生. 摩擦与磨损[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1992.
- SHAO Hesheng. Friction and Wear[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1992.
- [26] 张辉, 蔡文军, 吴仲华. PDC钻头防失速工具在复杂地层中的应用[J]. 石油矿场机械, 2014, 43(6): 45-48.
- ZHANG Hui, CAI Wenjun, WU Zhonghua. Application of the PDC bit antistall tool in drilling difficult formations[J]. Oil Field Equipment, 2014, 43(6): 45-48.
- [27] 束德林. 工程材料力学性能[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- SHU Delin. Mechanical Properties of Engineering Materials [M]. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [28] Peng Q, Zhou Y C, Yu J Q, et al. Study on rock breaking efficiency of special shaped cutters[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, 983(1): 012089.
- [29] McNamara D, Carolan D, Alveen P, et al. The influence of microstructure on the fracture statistics of polycrystalline diamond and polycrystalline cubic Boron nitride[J]. Ceramics International, 2014, 40(8 Part A): 11543-11549.
- [30] Zhou Y, Huang Z Q, Zhang F X, et al. Experimental study of WC-Co cemented carbide air impact rotary drill teeth based on failure analysis[J]. Engineering Failure Analysis, 2014, 36: 186-198.
- [31] 刘瑶瑶. 热损伤聚晶金刚石真空摩擦学性能及其机理研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2018.
- LIU Yaoyao. Tribological properties and mechanism of thermal damaged polycrystalline diamond under vacuum conditions[D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2018.
- [32] 汤凤林, 赵荣欣, Нескоромных В. В., 等. PDC钻头钻进岩石破碎过程及其与钻进规程参数关系的分析研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(1): 5-14.
- TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, NESKOROMNYH V. V., et al. Analytical research on the rock fragmentation process and its relationship with drilling parameters in PDC bit drilling[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(1): 5-14.
- [33] 汤凤林, 赵荣欣, Чихоткин В. Ф., 等. 关于PDC钻头设计的分析研究[J]. 钻探工程, 2024, 51(2): 15-22.
- TANG Fenglin, ZHAO Rongxin, CHIKHOTKIN V. F., et al. Analytical research on designing of PDC drill bit[J]. Drilling Engineering, 2024, 51(2): 15-22.

(编辑 王跃伟)