

PDC钻头激光熔覆性能增强技术研究

高九华^{1,2}, 高嘉懿², 陈开朗³

¹煤炭科学研究总院, 北京

²贵州天地聚能机电设备技术有限公司, 贵州 六盘水

³六盘水职业技术学院, 贵州 六盘水

收稿日期: 2022年1月29日; 录用日期: 2022年3月7日; 发布日期: 2022年3月14日

摘要

本文针对PDC钻头在复杂地质条件中容易出现的崩齿、断齿等问题, 提出采用激光熔覆技术在PDC材料表面非唇口区熔覆羊角型复合涂层来改变PDC切削齿表面的残余应力分布, 有效消除钻头工作过程中显微裂纹的产生, 同时通过改变切削齿的表面几何受力条件来缓冲冲击载荷, 提高钻齿抗冲击性能。试验结果表明, 经激光熔覆处理之后的PDC钻头的寿命提高达50%以上。

关键词

PDC钻头, 激光熔覆, 预应力, 冲击载荷

Research on Laser Cladding Performance Enhancement Technology of PDC Bits

Jiuhua Gao^{1,2}, Jiayi Gao², Kailang Chen³

¹China Coal Research Institute, Beijing

²Guizhou Tiandijuneng Electromechanical Equipment Technology Co., Ltd., Liupanshui Guizhou

³Liupanshui Vocational and Technical College, Liupanshui Guizhou

Received: Jan. 29th, 2022; accepted: Mar. 7th, 2022; published: Mar. 14th, 2022

Abstract

Tooth breakage and collapse often occur in the working process of PDC bit in complicated geological condition, this paper put forward a method that cladding claw type composite coating by laser cladding in PDC surface to change the residual stress distribution on the surface of the PDC, it effectively eliminates bit microscopic cracks produced in the process of work, at the same time, by

changing the surface of the bit geometrical stress conditions to cushion the impact load, improves drill tooth shock resistance. The test results show that the life of PDC bit increased by more than 50% after laser cladding treatment.

Keywords

PDC Bit, Laser Cladding, Prestress, Impulse Load

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

PDC (Polycrystalline Diamond Compact, 聚晶金刚石复合片)材料强度高、硬度高、耐磨性好,由其制成的 PDC 钻头具有高钻速、长进尺、钻进效率高的优点,平均钻进速度达到 35~40 m/h,钻头进尺可超过 1000 m,被广泛应用于石油和地质钻井施工[1]。但是,PDC 钻头易于产生微裂纹,抗冲击性能差。钻头工作时切削齿承受巨大的法向和切向压力,与岩石摩擦后可产生高达 700℃的局部高温,由此产生的温度梯度会在聚晶金刚石颗粒间产生很大的热应力。在冷却不足的情况下,热应力与脉冲载荷共同作用会在金刚石薄层表面萌生微裂纹,这些微裂纹经积累与迁移,在受到大冲击载荷时会迅速扩展造成切削齿崩齿或断裂。据统计,70%钻头失效是由于切削齿的断裂及破损造成的[2] [3] [4]。

为了增强 PDC 钻头的抗冲击性能,本文提出了采用激光熔覆技术在钻头表面非唇口区熔覆羊角型复合涂层的方法。

激光熔覆技术是指以不同的填料方式在被涂覆基体表面上放置选择的涂层材料,经激光辐照使之和基体表面一薄层同时熔化,并快速凝固后形成稀释度极低并与基体材料成冶金结合的表面涂层,从而显著改善基体材料表面的耐磨、耐蚀、耐热、抗氧化及电器特性等的工艺方法。张洁楠,张盛楠通过激光熔覆 TiC/金刚石粉末在低碳钢表面改性研究得出,以低碳钢 Q235 作为基底材料,在 TiC + 1.5%的金刚石粉末作为熔覆层下,能最大限度地提升熔覆层的硬度与抗磨能力,且在磨损的过程中,由于金刚石粉末能够自动地填补磨损表面中的微小缝隙而不会形成磨粒而刮损表面,从而提高覆层的耐摩擦性[5]。曹妙聪等研究得出金刚石表面激光熔覆 Cu-金刚石超硬涂层硬度得到明显的提升,双层结构涂层获得更优的磨削性能,同时显著提高涂层的磨损寿命[6]。

2. PDC 钻头激光熔覆增强机理

目前,改进 PDC 钻头抗冲击性的主要措施有:改变切削齿表面形状(如锥形齿、脊式和倒角齿等)、改善金刚石层与基体间过渡层的抗冲击性能等[7]。通过激光熔覆的方法,在 PDC 切削齿表层微晶金刚石表面制备一定的残余压应力,使其能够减少因受剪切和冲击而产生裂纹的几率,增加钻头的抗冲击性能。

激光熔覆属局部快速加热和冷却过程的能量高度集中,局部加热特性在基底上产生极不均匀温度场,基底和覆层两种材料的物理特性存在较大差异,这种温度场的畸变会更大。PDC 复合层的金刚石材料自身导热性能好,热膨胀系数低,与熔覆层间的温度梯度很大。在熔覆层凝固收缩时受到基底的刚性约束,熔覆层对 PDC 表面有强烈的横向和纵向挤压作用,最终表现在 PDC 表面形成很大的压应力[8]。

3. 实验方法

针对 PDC 切削齿, 具体措施是在聚晶金刚石层表面制备两道激光熔覆层(图 1), 熔道避开切削齿工作时与岩石的直接接触区, 在其两侧呈羊角势从切削齿表面一直延伸到钻头胎体。该工序的优点是不影响切削齿的工作特性, 也不影响粉渣的排除。为了实现熔覆层与金刚石基底的有效冶金结合, 同时不对基底造成明显损伤, 在熔覆层与基底间设置了厚度不超过 $100\ \mu\text{m}$ 的过渡层, 材质为低熔点的 AgCuTi 钎料(熔点 $630^\circ\text{C}\sim 690^\circ\text{C}$)。图 2 是针对 PDC 切削齿的激光熔覆横截面示意图。

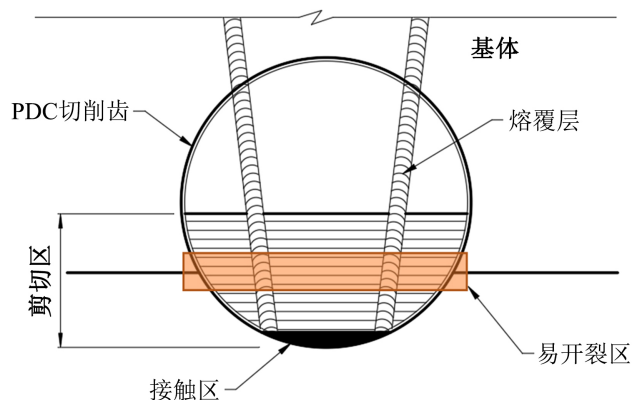


Figure 1. Diagram of laser cladding position on PDC bit

图 1. PDC 切削齿的激光熔覆位置示意图

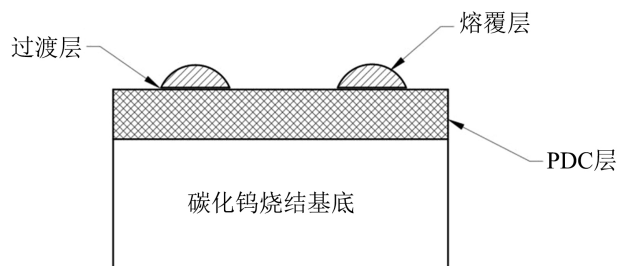


Figure 2. Diagram of laser cladding cross section of PDC bit

图 2. PDC 切削齿的激光熔覆横截面示意图

实验中, 熔覆设备采用 IPG 公司光纤激光器结合六轴机械手, 激光熔覆工艺参数为激光功率 $3\ \text{kW}$, 激光能量密度为 $1.2\sim 1.5 \times 10^4\ \text{W}/\text{cm}^2$, 扫描速度为 $0.8\ \text{m}/\text{min}$, 同轴送粉, 氩气保护, 气流量为 $10\ \text{L}/\text{min}$ 。熔覆前用丙酮清洗聚晶金刚石表面并吹干。

熔覆层原料采用混有碳化钨的 Ni/WC 复合粉末, 粉末合金成分如表 1 所示。熔覆层不仅具有高的硬度, 而且有高的耐磨性、红硬性和一定的韧性。选取 AgCuTi 低温钎料作为 PDC 切削齿表面的聚晶金刚石与熔覆层之间的过渡层材料。

Table 1. Composition of laser cladding powder (wt%)

表 1. 熔覆粉末合金成分(wt%)

C	Cr	B	Si	Fe	WC
0.6~1.0	14~17	2.5~4.5	3~4.5	≤15	15~20

熔覆样品经线切割、打磨抛光和腐蚀后制成金相分析试样。用 PMG-3 金相显微镜观测熔覆层的组织形貌。采用 Proto-LXRD 射线残余应力分析系统对熔覆层的表面残余应力进行测试。

4. 实验结果与分析

图 3 为的激光熔覆组织金相照片，从图 3 中可以看出当激光能量的输入控制在较低水平时，加入的 WC 颗粒分布比较均匀，颗粒边缘熔解较少且和镍基体结合良好，其直径大约在 100 μm 左右。激光输入线能量控制在较低水平时，熔覆层和基体实现冶金结合的同时对聚晶金刚石的影响极小，这归因于激光能量的高度可控及快速加热和冷却特性。

在光学显微镜下，熔覆层显微组织可分为三个部分：熔覆层、界面结合区和基材区。熔覆层合金区的组织特征为典型的镍基合金基底和碳化钨颗粒镶嵌特征，镍基合金组织呈大小不一的树枝晶，熔覆层内的 WC 颗粒分布比较均匀，颗粒边缘熔解较少且和镍基体结合良好。在熔覆层与基材的结合界面，有一层很亮的窄带，为沿基材表面生长的平面晶组织，是过渡区组织。基于金刚石材质本身具有的优良导热性，且过渡层材料熔点低(小于 700 $^{\circ}\text{C}$)，PDC 表面聚晶金刚石层组织未发生明显变化。对熔覆层界面处的表面残余应力进行测试，残余应力大小为 $314.1 \pm 19.5 \text{ MPa}$ ，此值在 PDC 表面产生的预置压应力可有效对抗显微裂纹的萌生。另外，熔道凸起对冲击载荷所产生缓冲作用也可有效防止崩齿、断齿等现象的发生。

在 PDC 切削齿表面采用激光熔覆两道羊角形覆层，优化切削齿结构，在钻进施工过程中，产生的预置压应力能有效克服切削齿在工作过程中产生的脉动拉应力，同时凸起的熔覆层在 PDC 钻头使用中的提高了抗冲击力。

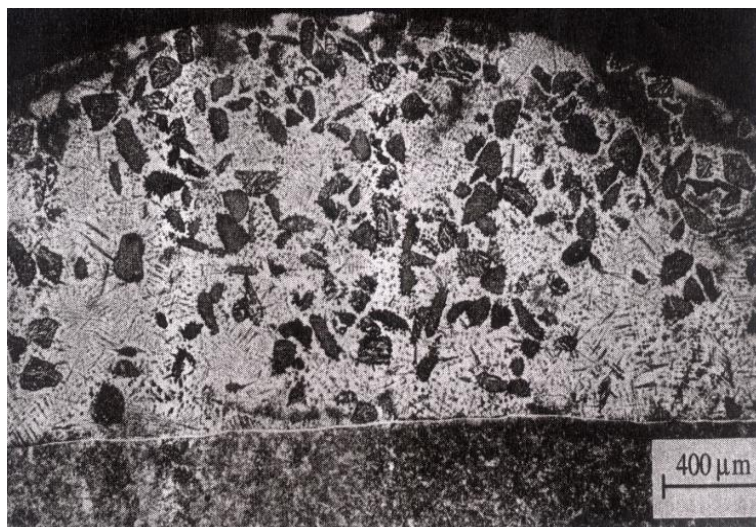


Figure 3. Metallographic structure of Ni/WC cladding layer
图 3. Ni/WC 熔覆层的金相组织照片

2020 年 5 月至 8 月，采用激光增强技术制备的 PDC 钻头在重庆松藻煤矿进行了瓦斯抽采现场测试，穿层钻孔位置为中央回风大巷。测试 PDC 钻头数量为 3 只，直径为 94 mm，对于松藻矿区海陆交替相沉积煤层的复杂结构，3 只钻头分别钻进了 434 m、409 m、462 m，平均寿命 435 m，而原来使用的钻头平均寿命为 283 m，相较之下新钻头寿命提高 53.7%。结果表明，激光增强技术制备的 PDC 钻头使用寿命提高达 50% 以上。

5. 结论

1) PDC 切削齿表面热应力的存在加上冲击载荷导致的开裂是 PDC 切削齿的主要破坏方式之一, 因此以改善切削齿表面残余应力状态可有效防止崩齿、断齿等现象的发生。

2) 在 PDC 切削齿表面采用激光熔覆两道羊角形覆层, 优化 PDC 切削齿结构, 产生的预置压应力能有效克服切削齿在工作过程中产生的脉动拉应力, 同时凸起的熔覆层在 PDC 钻头使用中提高了抗冲击力。

3) AgCuTi 低温钎料作为过渡层材料, Ni/WC 粉末作为熔覆层材料, 经激光熔覆工艺在 PDC 切削齿表面制备的激光熔覆层, 预置的压应力很好地保护了切削齿工作过程中受到的冲击载荷, 经实验验证, 该技术可使 PDC 钻头使用寿命提高达 50% 以上。

基金项目

项目: 山西省科技重大专项资助项目, 项目名称: 大口径内排渣深孔泄压定向钻机与钻抽一体化技术研发, 编号: 20201101010;

项目: 贵州省六盘水市科技重大专项资助项目, 名称: 高压气体脉动蠕变预裂增透瓦斯抽采技术技术研究, 编号: 52020202009125。

参考文献

- [1] 朱恒银, 王强, 杨展, 等. 深部地质钻探金刚石钻头研究与应用[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2014.
- [2] 高明洋, 张凯, 周琴, 等. 高温硬地层钻进中 PDC 钻头切削齿磨损研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(10): 185-189.
- [3] 汤凤林, 沈中华, 段隆臣, 等. 基于稳态碎岩方式的 PDC 钻头设计分析研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(1): 73-78.
- [4] 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): 66-68.
- [5] 张洁楠, 张盛楠. 激光熔覆 TiC/金刚石粉末在低碳钢表面改性中的应用研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(12): 164-167.
- [6] 曹妙聪, 徐强, 朱勤文. 金刚石表面激光熔覆 Cu-金刚石超硬涂层的组织及摩擦性能[J]. 真空科学与技术学报, 2020, 40(7): 614-618.
- [7] 亓智勇. PDC 钻头切削齿磨损分析[J]. 科技信息, 2012(1): 247-248.
- [8] 曹俊, 卢海飞, 鲁金忠, 等. WC 对激光熔覆热作模具的组织 and 磨损性能的影响[J]. 中国激光, 2019, 46(7): 7.