

熔盐法制备 Mo_2C 镀层增强金刚石抗压性能机理研究

毛馨悦¹, 孟庆南^{1,2*}, 王思凡¹, 袁牧¹

(1. 自然资源部复杂条件钻采技术重点实验室, 吉林 长春 130026; 2. 吉林大学超硬材料国家重点实验室, 吉林 长春 130026)

摘要: 为提升金刚石单颗粒抗压强度, 改善孕镶金刚石钻头在硬地层的钻进性能, 本文采用熔盐法在金刚石表面制备碳化钼(Mo_2C)镀层, 通过 SEM、XRD 进行微观表征, 测试单颗粒抗压强度, 并利用有限元模拟分析镀层产生的残余热应力及其强化机理。结果表明: 经 1323 K 保温 90 min 后, 金刚石表面形成连续、致密的 Mo_2C 镀层, 平均厚度约 2.38 μm ; 镀层后金刚石的单颗粒抗压强度由 84 N 提高至 156 N, 增幅达 85.71%。有限元模拟显示, 降温过程中因 Mo_2C 与金刚石热膨胀系数差异, 金刚石内部产生约 445.6 MPa 的残余压应力, 该压应力在外部载荷作用下抵消裂纹尖端的拉应力, 抑制裂纹萌生与扩展, 从而显著提高抗压性能。本研究揭示了镀层增强金刚石抗压强度的热应力机制, 为高性能金刚石钻头的设计与制造提供了理论依据和工程参考。

关键词: 孕镶金刚石钻头; 金刚石; Mo_2C 镀层; 熔盐法; 抗压强度; 热应力; 微观表征; 有限元模拟

中图分类号: P634.4⁺1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2026)04-0079-06

Mechanism of enhancing compressive properties of diamond by Mo_2C coating prepared via molten salt method

MAO Xinyue¹, MENG Qingnan^{1,2*}, WANG Sifan¹, YUAN Mu¹

(1. Key Laboratory of Complex Condition Drilling and Exploitation Technology, Ministry of Natural Resources, Changchun Jilin 130026, China; 2. State Key Laboratory of Superhard Materials, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China)

Abstract: To improve the single-grain compressive strength of diamond and enhance the drilling performance of impregnated diamond bits in hard formations, a molybdenum carbide (Mo_2C) coating was prepared on the diamond surface via the molten salt method. Microstructural characterization was conducted using scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD), the single-grain compressive strength was measured, and finite element simulation was employed to analyze the residual thermal stress induced by the coating and its strengthening mechanism. The results indicate that after holding at 1323 K for 90 min, a continuous and dense Mo_2C coating forms on the diamond surface, with an average thickness of approximately 2.38 μm . The single-grain compressive strength of the coated diamond increases from 84 N to 156 N, representing an increment of 85.71%. Finite element simulation reveals that due to the difference in thermal expansion coefficients between Mo_2C and diamond during the cooling process, a residual compressive stress of approximately 445.6 MPa is generated within the diamond. Under external loading, this compressive stress counteracts the tensile stress at the crack tip, inhibiting crack initiation and propagation, thereby significantly improving the compressive performance. This study reveals the thermal stress mechanism for the coating-enhanced compressive strength of diamond, providing a theoretical basis and engineering reference for the design and manufacture of high-performance diamond bits.

Key words: impregnated diamond bit; diamond; Mo_2C coating; molten salt method; compressive strength; thermal stress; microscopic characterization; finite element simulation

收稿日期: 2026-03-31; 修回日期: 2026-05-27 DOI: 10.12143/j.ztgc.2026.04.008

基金项目: 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项课题(编号: 2024ZD1000908)

第一作者: 毛馨悦, 女, 汉族, 1999 年生, 博士研究生, 地质工程专业, 研究方向为金刚石钻头界面改性及性能强化, 吉林省长春市朝阳区西民主大街 938 号, maoxy21@mails.jlu.edu.cn。

通信作者: 孟庆南, 男, 汉族, 1986 年生, 副教授, 博士生导师, 地质工程专业, 博士, 从事钻探用超硬材料与金刚石钻头、耐高温铝合金钻杆等方面的研究工作, 吉林省长春市朝阳区西民主大街 938 号, qingnanmeng@jlu.edu.cn。

引用格式: 毛馨悦, 孟庆南, 王思凡, 等. 熔盐法制备 Mo_2C 镀层增强金刚石抗压性能机理研究[J]. 钻探工程, 2026, 53(4): 79-84.

MAO Xinyue, MENG Qingnan, WANG Sifan, et al. Mechanism of enhancing compressive properties of diamond by Mo_2C coating prepared via molten salt method[J]. Drilling Engineering, 2026, 53(4): 79-84.

0 引言

随着20世纪50年代人造金刚石技术的突破,金刚石工具被应用到越来越多的领域,其制造业在欧美等发达国家先后实现产业化并迅速发展。近年来,金刚石工具在硬脆材料加工、矿山开采、石材加工、建筑施工等诸多领域得到了广泛的应用,这对拓宽金刚石工具应用范围、促进行业发展起到了决定性作用^[1-2]。

孕镶金刚石钻头是一种由细小颗粒的金刚石与金属黏结剂组成的复合烧结体,分布在胎体中的金刚石由金属基体黏结而固定。孕镶钻头孔底碎岩过程的特点是以唇面上多而小的硬质点(金刚石)对岩石进行刻划、磨削,并随着硬质点的逐渐磨损、消失及胎体的不断磨耗,新的硬质点又裸露出来参加工作,这种自磨出刃的过程称为“自锐”。在钻进过程中,如果没有足够的钻压,胎体不能超前金刚石磨损消耗并让磨钝的金刚石自行脱落,无法完成“自锐”,会大大影响孕镶金刚石钻头的性能,出现钻头打滑,无法进尺,钻速极大下降^[3]。然而,在高强度钻压下,孕镶金刚石钻头底唇面也承受着巨大的孔底冲击,这对金刚石的抗压强度也提出了更高的要求。

为了提高金刚石颗粒的抗压强度,目前工业中通常采用电镀或化学镀的方法在金刚石表面镀金属镍(Ni)、钛(Ti)、铬(Cr)等及其化合物。刘小磐等^[4]采用溶胶-凝胶法在金刚石表面涂覆了铝-硅-硼氧化物涂层,金刚石单颗粒抗压强度提高约22.75%。张向红等^[5]利用镀铬金刚石和铝硼硅玻璃制备复合材料,研究发现经烧结后无镀层金刚石单颗粒抗压强度大幅度下降,而镀层金刚石抗压强度变化很小,说明Cr镀层对金刚石颗粒起到了很好的保护作用。此外,在目前的金刚石材料行业中,金刚石表面镀层的加工费为0.05~0.3元/ct(1 ct=0.2 g),在整个钻头的制造成本中占比很低。而在我国地质钻探中采用具有高效率、长寿命等特点的金刚石钻头将钻探速度提高30%,工程成本可以大幅降低^[6]。因此,通过镀膜手段来提高金刚石的抗压强度进而提高孕镶金刚石钻头的钻进效率和使用寿命具有优异的工程实用性和经济性。

现有研究表明,不同类型的镀层增强金刚石单晶颗粒的抗压强度的情况是普遍存在的。汤凤林等^[7]发现镀Ti-Cr、Ni-W-B、Ni-Fe-B金刚石的抗

压强度均高于无镀层金刚石。但是,这3种镀层对金刚石抗压强度提高的比例各有不同,镀层提高金刚石抗压强度的机理尚不明确。高温制备的镀层随金刚石一同冷却至室温,二者热膨胀系数差异较大,进而产生热应力^[8-9]。

采用熔盐法在金刚石表面镀覆碳化钼(Mo_2C)镀层,并进行SEM、XRD等微观表征,对单颗粒金刚石抗压强度进行测量,以期提高金刚石抗压性能。同时,通过有限元模拟的方式计算 Mo_2C 镀层对金刚石产生的热应力,以探究 Mo_2C 镀层提高金刚石抗压强度的机理。

1 实验材料与方法

1.1 碳化钼镀层金刚石的制备

常用的金刚石表面镀层方法主要分为物理镀覆和化学镀覆,其中典型的物理镀覆方法有电镀、真空蒸发镀、磁控溅射法,化学镀覆方法有溶液镀、化学气相沉积、熔盐和粉末烧结等。与其他方法相比,熔盐法不仅可以获得较为完整、连续、致密的镀层,且镀层与金刚石之间存在牢固的化学结合。此外,该方法操作简单、对设备要求低且成本较低,是一种高性价比的镀覆工艺。因此,本文采用熔盐法进行金刚石表面镀层的制备。所选金刚石样品为高品级HSD90型金刚石颗粒,粒径为70/80目(212~180 μm)。使用钼粉(10 μm ,纯度99.5%)、氯化钠(纯度99.5%)和氯化钾(纯度99.5%)的混合物作为原料^[10],在真空管式炉中制备镀层,各物质含量见表1。同时,为了便于测量镀层在金刚石表面的厚度,在混合物中加入3根无取向化学气相沉积(CVD)金刚石片(1 mm×1 mm×5 mm),在相同镀覆工艺下在其表面制备 Mo_2C 镀层。在课题组之前的研究中^[11],已经证实利用无取向CVD片替代金刚石颗粒进行镀层厚度测量的准确性。在持续通入稳定的氩气流的气氛下,混合物在1323 K加热并保温90 min,保温完毕后随炉冷却至室温。经熔化、超声波清洗、过滤、干燥和筛分后,得到了干净的 Mo_2C 镀层金刚石和CVD金刚石片。

1.2 样品表征及测试

利用DH-2700BH型X射线衍射仪(XRD)在Cu射线下对金刚石进行物相分析,测试角度范围为30°~80°,步宽角度0.02°,测试时间0.8 s,管电压30 kV,管电流40 mA。通过S-4800型扫描电子显微

表 1 金刚石镀 Mo ₂ C 镀层原料参数			
Table 1 Raw material parameters for Mo ₂ C coating on diamond			
金刚石质量/g	钼粉质量/g	无水氯化钠质量/g	无水氯化钾质量/g
12	9.68	19.12	24.32

镜(SEM)研究了金刚石颗粒的微观结构,电压为5.0 kV。

采用DKY-2型金刚石单颗粒抗压强度测定仪,分别对有碳化钼镀层的金刚石与同批次无镀层的金刚石进行抗压强度测试。两组金刚石颗粒各随机取40粒测试其抗压强度,根据《超硬磨料 人造金刚石技术规范》(JB/T 7989—2023),测试40粒人造金刚石

的抗压强度并求平均值,然后舍去数据中>平均值2倍和<平均值0.5倍的数据,再对剩下的数据取平均值,最终得到该组金刚石的抗压强度数值。

1.3 残余热应力计算

本研究采用有限元方法(FEM)模拟金刚石颗粒在镀层结构中的冷却过程,分析其热应力分布特征。模拟过程中,初始温度设置为1323 K,施加自然对流冷却边界条件,对流系数取25 W/(m²·K),环境温度设为298 K;结构边界条件包括平面应变约束和对称性约束,模拟中仅固定金刚石中心,界面约束条件为绑定约束。分析步骤采用瞬态热-结构耦合方法,时间步长自动调整,最终获得镀层金刚石热应力模拟结果。各层材料的热物理与力学参数见表2。

表 2 金刚石和 Mo ₂ C 的热物理与力学参数						
Table 2 Thermophysical and mechanical parameters of diamond and Mo ₂ C						
材 料	密度/(kg·m ⁻³)	热膨胀系数/°C ⁻¹	弹性模量/GPa	泊松比	导热系数/(W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)	比热容/(J·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)
金刚石 ^[12]	3520	2.5×10 ⁻⁶	890	0.07	543	400
Mo ₂ C ^[13-14]	9000	7.8×10 ⁻⁶	310	0.28	21	347

金刚石颗粒及其表面镀层的简化模型及网格划分如图1所示,镀层金刚石颗粒近似为球形,图中展示的二维模型是过球心剖切球体,得到标准圆形截面,以此截面代表球体整体结构特征。取金刚石颗粒直径D=196 μm(70/80目金刚石颗粒粒径的平均值),镀层为金刚石表面的薄膜,镀层厚度为2.38 μm。

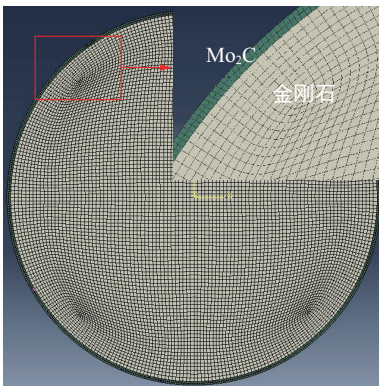


图1 简化模型及网格划分

Fig.1 Simplified model and mesh generation

所示。根据标准PDF卡片#06-0675,可以很容易地识别位于43.9°、75.3°的衍射峰为金刚石。通过与标准PDF卡片#35-0787对比,出现在34.4°、38.0°、39.4°、52.1°、61.5°、69.6°、74.6°、75.5°的衍射峰,分别对应了Mo₂C的(100)、(002)、(101)、(102)、(110)、(103)、(112)、(201)面,这证明了Mo₂C镀层的生成。Mo粉和金刚石颗粒在1323 K加热的条件下,Mo粉和金刚石之间可能发生的反应见式(1)、式(2)。

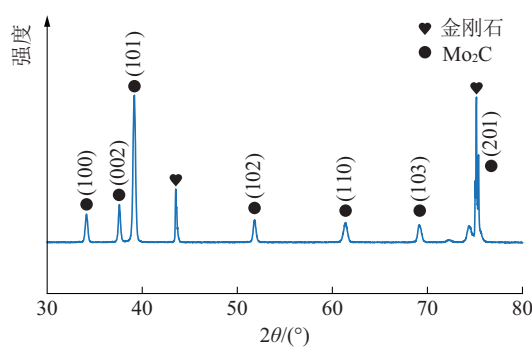
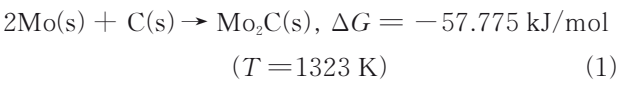


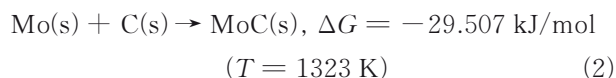
图2 镀层金刚石颗粒XRD图

Fig.2 XRD pattern of coated diamond particles

2 Mo₂C 镀层金刚石的表征与测试

Mo₂C 镀层金刚石颗粒的XRD物相分析如图2





式(1)反应的吉布斯自由能为 -57.775 kJ/mol , 低于式(2)反应的 -29.507 kJ/mol , 意味着式(1)反应更易实现, 因此XRD衍射峰仅出现 Mo_2C 峰, 而未见其他物相。

无镀层与 Mo_2C 镀层金刚石颗粒如图3所示。图3(a)为无镀层金刚石颗粒表面形貌, 可以观察到其棱角清晰完整, 表面有些许划痕, 属正常现象。而由图3(b)可以很明显地观察到, 金刚石各个晶面均被覆盖了一层致密的镀层, 镀层总体均匀性较好且没有裂纹、起泡、缺失等现象, 镀层后的金刚石仍能保持原有形状。 Mo_2C 镀层CVD金刚石片的断口截面如图4所示, 可以测出镀层的厚度大约为 $2.38 \mu\text{m}$ 。

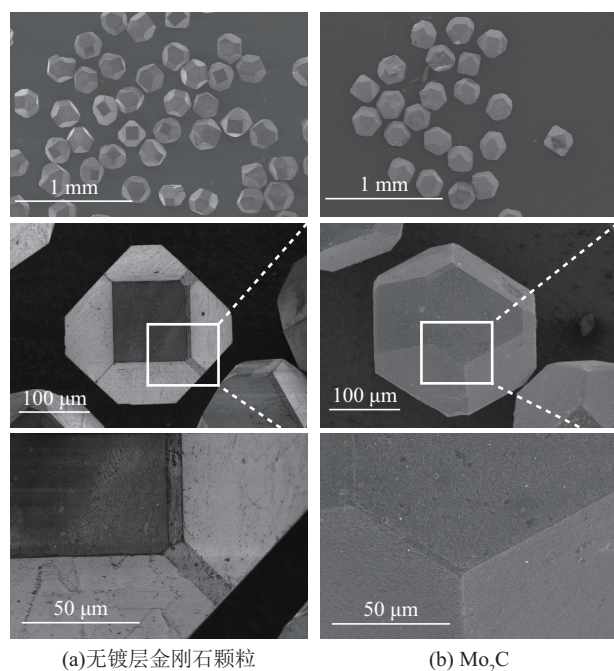


图3 金刚石颗粒SEM图

Fig.3 SEM images of diamond particles

随机选取40粒无镀层和 Mo_2C 镀层的单颗粒金刚石, 其抗压强度分布如图5所示。由图5(a)可以看出, 无镀层金刚石的单颗粒抗压强度为 $38 \sim 180 \text{ N}$, 主要集中分布在 $50 \sim 100 \text{ N}$, 舍去 $>$ 平均值2倍和 $<$ 平均值0.5倍的数据后, 余下金刚石平均单颗粒抗压强度为 84 N 。相比之下, 图5(b)中, Mo_2C 镀层后金刚石单颗粒抗压强度较分散, 但整体数据值有明显的提高, 最小值为 50 N , 最大可达 420 N , 经数据

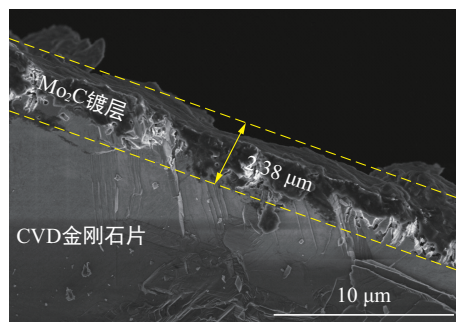


图4 Mo_2C 镀层CVD金刚石片断口截面SEM图

Fig.4 SEM image of fracture surface of CVD diamond beam with Mo_2C coating

处理后余下金刚石平均单颗粒抗压强度为 156 N , 较无镀层单颗粒金刚石抗压强度提高了 85.71% 。

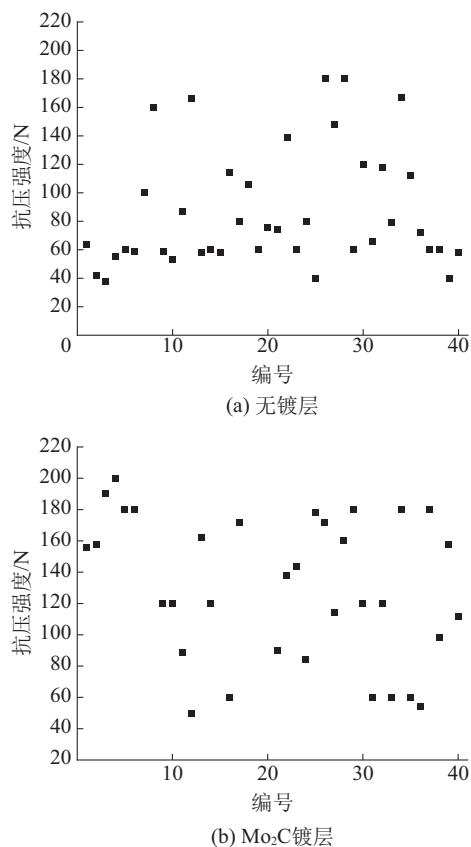


图5 金刚石的抗压强度分布

Fig.5 Distribution of compressive strength of diamond

造成这种现象的普遍原因是单晶金刚石具有各向异性, 其不同晶面及不同方向上的性能有较大差异。例如, (100) 面相较于其他晶面具有更高的抗压力、腐蚀和热退化能力, 而 (111) 面易发生解理, 且该面的任何方向都不易磨。因此, 各表面性质不

同的金刚石颗粒在受外加静载时,金刚石内部较容易产生裂纹和裂隙,导致其抵抗破碎能力较低。而金刚石表面镀层后,其表面被机械包裹一层“保护膜”,阻断金刚石表面裂纹源,增加了金刚石抵抗外界荷载的能力。随着镀层保温时间的增加,镀层对金刚石表面包裹越来越完整,封锁裂纹源的效果越来越好,因此,金刚石抗压强度具有显著提高。

3 金刚石抗压强度有限元模拟

Mo_2C 镀层金刚石在降温过程中产生残余热应力的有限元模拟结果如图6所示。在降温过程中,由于镀层和金刚石颗粒的热膨胀性差异,金刚石颗粒受到了最高-445.6 MPa的热应力,其中金刚石内部整体所受热应力均为负值,镀层所受热应力均为正值,所以金刚石内部残余热应力为镀层对金刚石产生的压应力。

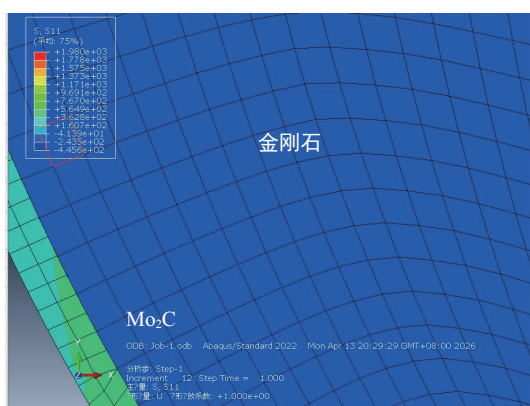


图6 有限元模拟结果

Fig.6 Results of finite element simulation

此外,研究表明,在裂纹表面及尖端区域残余压应力会抵消部分外加拉应力,降低裂纹尖端的有效应力强度因子 K_{eff} ,使裂纹扩展驱动力减小,从而抑制裂纹萌生与扩展,提高疲劳寿命和断裂韧性^[15]。本研究中,抗压强度测试的过程是在金刚石颗粒上施加单轴正压力,使金刚石内部产生裂纹,裂纹尖端受拉应力作用并扩展,直至金刚石颗粒破碎。而由于镀层产生的残余热压应力使得金刚石在各方向上均受到压力作用,在金刚石受压断裂的过程中,抵消裂纹尖端拉应力,从根源上阻碍裂纹产生与扩展,提升抗压性能。这一机制很好地解释了镀层金刚石的抗压强度明显优于无镀层金刚石的实验结果。

大量研究表明,金属镀层,如Ti镀层^[16-18]、Cr镀层^[19-20]、Ni镀层^[21],金属碳化物镀层,如TiC镀层^[22-23]、VC镀层^[24],以及其他金属化合物的镀层,如Mo-B-C镀层^[25]、铝-硅-硼氧化物涂层^[4],均有效提高了金刚石的抗压强度,这些金属镀层均与金刚石存在明显的热膨胀系数差异,会在生成后产生残余热应力。而 B_4C 镀层与金刚石没有明显的热膨胀系数差异,也就不会产生明显的残余热应力。研究也表明, B_4C 镀层^[26]并未提高金刚石的抗压强度。这验证了镀层对金刚石产生压应力,抑制金刚石单轴受压时的裂纹扩展,进而提高了金刚石的抗压强度的结论。

4 结论

本文采用熔盐法在金刚石表面成功镀覆 Mo_2C 镀层,并对比了镀层前后金刚石表面形貌、生长情况和单颗粒抗压强度。镀层经90 min保温后,金刚石表面被镀层完全覆盖,镀层致密且均匀,平均厚度约为2.38 μm 。镀层后金刚石单颗粒抗压强度为156 N,较无镀层金刚石提高了85.71%,显著提高了金刚石的抗压性能。

参考文献(References):

- [1] 谢吉,甄春刚,覃光明,等.金刚石镀覆及热处理在金刚石工具中的应用[J].超硬材料工程,2020,32(3):1-7.
XIE Ji, ZHEN Chungang, QIN Guangming, et al. Application of diamond coating and heattreatment on diamond tools [J]. Superhard Material Engineering, 2020,32(3):1-7.
- [2] 吴盼琨,于清.粉末冶金铁基金刚石胎体材料的表面分析[J].功能材料,1994(4):370-375.
WU Yikun, YU Qing. Surface analysis of powder metallurgy iron-based matrix materials of diamond tools [J]. Journal of Functional Materials, 1994(4):370-375.
- [3] 鄢泰宁.岩土钻掘工艺学[M].长沙:中南大学出版社,2014.
YAN Taining. Geotechnical Drilling and Tunneling Technology [M]. Changsha: Central South University Press, 2014.
- [4] 刘小磐,万众,钱琦,等.溶胶-凝胶法在金刚石表面涂覆铝-硅-硼氧化物涂层的研究[J].超硬材料工程,2011,23(1):5-8.
LIU Xiaopan, WAN Zhong, QIAN Qi, et al. Coating with $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-B}_2\text{O}_3$ film on diamond surface in sol-gel method [J]. Superhard Material Engineering, 2011,23(1):5-8.
- [5] 张向红,王艳辉,臧建兵,等.Cr镀层对金刚石/铝硼硅玻璃复合材料中金刚石氧化反应的抑制研究[J].金刚石与磨料磨具工程,2022,42(2):169-173.
ZHANG Xianghong, WANG Yanhui, ZANG Jianbin, et al. Research on Cr coating layer inhibiting oxidation of diamond in diamond/Al-borosilicate glass composites [J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2022,42(2):169-173.
- [6] 赵尔信.金刚石钻头的发展趋势[J].超硬材料工程,2015(1):

- 52-59.
- ZHAO Erxin. Development trend of diamond drill bit[J]. Super-hard Material Engineering, 2015(1):52-59.
- [7] 汤凤林,杨凯华,段隆臣. 金刚石表面金属化(镀膜)的试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2000(5):14-16,24.
- TANG Fenglin, YANG Kaihua, DUAN Longchen. Experimental research on diamond surface metallization (plating)[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2000(5):14-16,24.
- [8] 郑君,樊涛,窦斌,等. 二氧化碳爆破储层改造近炮孔处岩石性质变化及温度分布规律研究[J]. 钻探工程,2022,49(3):13-22.
- ZHENG Jun, FAN Tao, DOU Bin, et al. Rock property change and temperature distribution near blasting holes in carbon dioxide blasting reservoir treatment[J]. Drilling Engineering, 2022,49(3):13-22.
- [9] 王艳梅,刘宝林,王瑜,等. 温度变化对花岗岩井壁稳定性的影响[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(9):14-19.
- WANG Yanmei, LIU Baolin, WANG Yu, et al. The impact of temperature on the granite wall stability[J]. Exploration Engineering(Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2013,40(9):14-19.
- [10] Mao X Y, Meng Q N, Yuan M, et al. Wear performance of the Fe-Ni-WC-based impregnated diamond bit with Mo₂C-coated diamonds: effect of the interface layer[J]. Wear, 2023, 522: 204683.
- [11] Mao X Y, Meng Q N, Yuan M, et al. Mo₂C interface layer: effect on the interface strength and cutting performance of diamond/Fe-Ni-WC composites[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023,25:2029-2039.
- [12] 王悦,张凯,李其州,等. 超高速下单粒金刚石与岩石相互作用响应的研究[J]. 钻探工程,2023,50(3):21-29.
- WANG Yue, ZHANG Kai, LI Qizhou, et al. Research on the response of single diamond particles and rock interaction at ultra-high speed[J]. Drilling Engineering, 2023,50(3):21-29.
- [13] Ma S D, Zhao N Q, Shi C S, et al. Mo₂C coating on diamond: different effects on thermal conductivity of diamond/Al and diamond/Cu composites[J]. Applied Surface Science, 2017,402:372-383.
- [14] Fan Q, Hou H J, Yang J H. Effect of pressures on the structural, electronic, optical, elastic, dynamical properties and thermal properties of Mo₂C: a study explored by theoretical simulation[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2024,119:106522.
- [15] 徐向阳,时慧一,樊林放. 考虑喷丸残余应力的齿根裂纹扩展计算方法[J]. 中南大学学报(自然科学版),2025,56(3):932-940.
- XU Xiangyang, SHI Huiyi, FAN Linfang. Calculation method of root crack propagation considering residual stress of shot peening[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2025,56(3):932-940.
- [16] 赵玉成,邹芹,闫宁,等. 真空微蒸发镀膜工艺参数对镀层质量及金刚石性能的影响[J]. 金刚石与磨料磨具工程,2006(5):17-19,27.
- ZHAO Yucheng, ZOU Qin, YAN Ning, et al. Effects of vacuum slowly vapor deposition parameters on coating quality and diamond properties[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2006(5):17-19,27.
- [17] 王超. 镀覆金刚石的结构、性能及其磨具的失效机制研究[D]. 广州:广东工业大学,2014.
- WANG Chao. Research of coated-diamond structure, properties and its abrasives failure mechanism[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2014.
- [18] 罗雯,揭晓华,蒙云开,等. 热处理对金刚石颗粒表面钛包覆层组织与性能的影响[J]. 金刚石与磨料磨具工程,2012,32(4):27-30,36.
- LUO Wen, JIE Xiaohua, MENG Yunkai, et al. Effect of heat treatment on the structure and properties of Ti coating deposited on the surface of diamond grains[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2012,32(4):27-30,36.
- [19] 柯明月. 金刚石颗粒表面镀覆铬包覆层的研究[D]. 广州:广东工业大学,2013.
- KE Mingyue. Researches of Cr coating deposited on the surface of diamond grains[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2013.
- [20] 柯明月,揭晓华,蒙云开,等. 镀铬金刚石在金属结合剂金刚石工具中的应用[J]. 热加工工艺,2013,42(12):147-150.
- KE Mingyue, JIE Xiaohua, MENG Yunkai, et al. Application of Cr-coated diamond in diamond tools bonded with metal[J]. Hot Working Technology, 2013,42(12):147-150.
- [21] 项东,贾立群. 金刚石化学镀 Ni-W-P 金属薄膜研究[J]. 重庆建筑,2010,9(1):I0001.
- XIANG Dong, JIA Liqun. Study on electroless Ni-W-P metal film on diamond[J]. Chongqing Architecture, 2010,9(1):I0001.
- [22] 罗雯. 金刚石颗粒表面镀覆碳化钛包覆层的研究[D]. 广州:广东工业大学,2013.
- LUO Wen. Research on TiC coating deposited on the surface of diamond grains[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2013.
- [23] 罗雯,揭晓华,蒙云开,等. 双阴极等离子溅射沉积 TiC 薄膜对金刚石工具性能的影响[J]. 中国表面工程,2012,25(5):26-30.
- LUO Wen, XiaohuaJIE, MENG Yunkai, et al. Effects of TiC coating prepared by ion sputtering with double cathodes on properties of diamond tools[J]. China Surface Engineering, 2012,25(5):26-30.
- [24] Wang X Q, Tu J B, Liu B C. Enhancement of mechanical and thermal properties of diamond particles via vanadium carbide coatings[J]. Diamond and Related Materials, 2024, 148: 111510.
- [25] Mao X Y, Meng Q N, Wang S F, et al. Oxidation mechanism and high-temperature strength of Mo-B-C-coated diamonds in the 700°C—1200 °C temperature range[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2024,33:7829-7841.
- [26] 张绪良. Cr-B-C 镀层金刚石铁基复合材料及其地质钻头研究[D]. 长春:吉林大学,2021.
- ZHANG Xuliang. Investigation of Cr-B-C Coating on Fe/diamond composites and geological drilling bit[D]. Changchun: Jilin University, 2021.