

超硬聚晶金刚石磨损性能及其应用研究

李锦程^{1, 2} 赵东鹏^{1, 3}

1. 河南四方达超硬材料股份有限公司 河南郑州 450000

2. 河南理工大学 河南焦作 454000

3. 燕山大学 河北秦皇岛 066004

摘要: 超级硬质多晶金刚石材料 (UHPCD) 是通过将金刚石粉末与化学气相沉积出的金刚石结构材料, 在极端温高压环境中生产的创新型超级硬材料。研究这类材质在多样化工作环境中的摩擦学行为, 能够为其在工业制造领域的运用奠定科学依据。本篇论文旨在探讨超级硬质多晶金刚石材料在钻探应用过程中的耐磨性及其磨耗机制, 进而分析该材料在钻头实际制造中的综合性能。

关键词: 超硬聚晶金刚石; 摩擦学性能; 钻头

引言

新兴的超硬功能性材料因展现出卓越的机械特性, 在日常生活、先进制造、医疗行业、地学探索、冶金业以及国家防务工业等多个领域扮演着极为关键的角色。目前被广泛应用的超硬材料主要有金刚石与立方氮化硼两种。然而, 聚结金刚石的热稳定性相对较弱, 而立方氮化硼的硬度相较之下稍有不足, 这些问题都限制了它们的使用范围。当前超硬材料研究界重点关注开发性能更加卓越的新型材料。目前, 已经成功合成了具备优良热稳定性和极高硬度的超硬多晶金刚石材料, 被视为潜力巨大的材料。然而, 针对该多晶金刚石材料在各类使用环境中的表现, 相关研究报道尚显不足。

一、超硬聚晶金刚石介绍

天然 Ia 型单晶体金刚石作为一类超级硬质材料, 内部构成的微观晶相差异导致其努氏硬度介于 56 至 108 GPa。黄等科学家在《自然》期刊上公布了他们创制的纳米孪晶体金刚石及其性能鉴定, 显示出 175 至 203 GPa 的异常高硬度, 此项研究成果指明了合成新型高硬度材料的新途径。尽管这样, 这类金刚石的工业应用仍待时日。常规的高温高压工艺生成的多晶金刚石硬度普遍落在 50 至 70 GPa 区间, 少数实验室报道称通过特殊

工艺可使聚结金刚石 (PCD) 的硬度达到 90 GPa, 但能超过 100 GPa 的案例寥寥可数。对于超硬材料的应用工况来说, 材料的耐磨性与其硬度有着直接关系, 一般而言硬度越高则材料的耐磨性能越好。聚晶金刚石作为广泛应用的超硬材料之一, 提升其耐磨性能是很有必要的, 但是目前的研究表明直接提升聚晶金刚石材料的硬度难度较大, 且尚无工业化应用的可能。

在众多超硬物质中, 通过化学气相沉积法制成的金刚石, 其展现的各项性质较为接近聚晶品质的金刚石。化学气相沉积 (CVD) 技术生产的金刚石, 具备比通常聚晶金刚石更高的硬度, 硬度值介于 60 至 100 吉帕之间。它在热稳定性方面也表现得相当出色, 能够承受高达 820℃ 的初始氧化温度, 这一数值远超普通聚晶金刚石的 700℃ 起始氧化温度。尽管如此, CVD 金刚石的韧性较低, 其断裂韧性仅为聚晶金刚石的一半, 甚至大大低于自然形成的单晶金刚石。另外, CVD 金刚石的生产过程较为繁琐, 其生产成本高于其他合成金刚石, 而且难以加工成大型块状物, 这几个方面都制约了 CVD 金刚石材料的使用范畴。

乌克兰超硬材料研究所的 Shulzhenko 等利用两面顶液压设备研究制备出了一种新型超硬材料, 即超硬聚晶金刚石材料。本文介绍了一种新型超级硬质材料, 通过高温高压烧结以及化学气相沉积两种工艺相结合而制成, 该材料使用化学气相沉积法生成的金刚石粉带和金刚石粉末作原料, 并以硅元素为粘合剂, 在对顶式压机中进行高温高压处理, 形成以外围的多晶金刚石为骨架, 中心

作者简介: 李锦程 (1991.09-), 男, 汉, 籍贯: 河南省三门峡市灵宝市, 学历: 本科, 职称: 无, 主要研究方向: 超硬材料及制品聚晶金刚石复合片。

含有CVD金刚石的复合结构。研究表明,该材料的CVD金刚石核心区域的硬度高达140吉帕,远超传统CVD金刚石的77吉帕硬度。同时,通过比较实验发现,这种超硬多晶金刚石(UHPCD)磨削花岗岩的性能是标准多晶金刚石(PCD)的14倍,显著提升了耐磨性。

在UHPCD的生产过程中,Shulzhenko团队所采纳的制备技术主要是双面顶式的高温高压合成方法,相比之下,国内生产更倾向于使用六面顶式的高温高压合成技术,这两种合成法在操作机理上存在显著的差异。Meng等研究者基于双面顶合成UHPCD的经验,探索出通过六面顶设备制备UHPCD的新流程,并对生成物的热稳定性进行分析。研究成果显示,采用六面顶合成法得到的UHPCD的初始氧化起始温度能够达到750℃,在暴露于空气中时,其热分解的重量损失,相较于传统的PCD材料而言,明显降低。

二、超硬聚晶金刚石制备及磨损性能分析

集成晶体金刚石因其卓越的机械特性与耐磨能力,在高端精密加工及极端使用环境中倍受青睐。此外,设计出的超级硬质集成晶体金刚石复合体,需具备超越传统集成晶体金刚石的硬度以实现更高级的耐磨效果,这应对了日益苛刻的工业使用需求,为标准集成晶体金刚石性能不足的情景开辟了新的材料选择。鉴于此,本节研究了这种超硬集成晶体金刚石在模仿硬岩钻探环境下的性能,旨在提供这一材料在地球钻探层面的应用的科学依据与实验数据。特定的耐磨试验成果展示如下。

如图1所展示,UHPCD与PCD在车床加工花岗岩时的不同旋转速度带来的耗损率均未超过0.5毫克/公里,可以观察到,在四种不同的试验条件下,这两种材质所展现出的耗损率均低于该值。此一发现与Shulzhenko等人关于植入CVD金刚石的超硬材料耐磨性研究所得出的

结论相吻合,其研究指出该种超硬材料的耗损率大约为0.6毫克/公里。在本次实验中,UHPCD材质在旋转速度为400转/分钟时呈现出最高的耗损率,即0.25毫克/公里,而PCD材质同样在此转速下达到其耗损率的顶点,为0.46毫克/公里。

依据图1所述的实验数据观察得出,在多种转速水平下进行的测试里,UHPCD的损耗率大致是PCD的二分之一,由此说明UHPCD的抗磨程度显著高于PCD。试验结果还显示,UHPCD和PCD的磨损率并未随转速的变化而产生显著的关联,这暗示在该试验中转速水平非决定性因素。尽管转速上升,两型材质的磨损率显示出相仿的趋向,与Belmonte M等人的研究成果并不吻合。这一差异现象的主要原因,可能是因为花岗岩本身属性的不均匀所致。构成花岗岩的多样矿质物质汇聚而成,形成了一种质地极为不均匀以及结构杂乱无章的固态集合。这其中蕴含了诸如石英、云母、钾质长石、钠质长石等成分。而UHPCD抗磨损的特性明显得益于PCD,这主要是因为嵌入了CVD制成的金刚石。

三、超硬聚晶金刚石钻头设计制造及其应用

超强硬度的多晶金刚石材质展现出卓越耐磨属性,被广泛应用于对材料强度和使用量要求苛刻的地质勘察与开采行业。鉴于多晶金刚石的几乎无与伦比的硬度及耐磨性,特制了专门适配硬质和滑动岩层的多晶金刚石钻头。将此类钻头投入携带相同属性岩层的实际作业环境中,对比分析该钻头与传统未掺杂钻头在相同作业条件下的表现,以此来凸显多晶金刚石钻头的工作效能及其在地质勘查方面的广泛应用前景。

鉴于钻头在地表之下的深层作业,其运行环境极为恶劣且无法被直接监控,因而偶尔出现钻头未能充分发挥效用的情况也是情有可原的,并不完全是钻头品质所能左右。在施加一定的钻压下,钻头负责对井底岩石进行粉碎、打磨、取样直至达到预定的钻探深度,同时通过泥浆把打碎的岩屑和岩粉带至地面。针对探井过程中井底环境的不确定性,不仅岩层的性质千变万化,地质状况亦有诸多不可预期如意外遭遇地下水层。这些变数极大程度上提高了钻头作业的难度。这反映在钻进效率的明显下降与泥浆泵压力的激增。除了钻头的作用,导致泥浆泵压力攀升的地下原因还有很多,比如钻遇较松软地层造成钻头过度切削进而缩小水口,亦或是遇到有害物质侵入使泥浆的密度增高。同时,井壁坍塌这种较为严重且带来巨大损失的事件,也是可能引发泵压突升

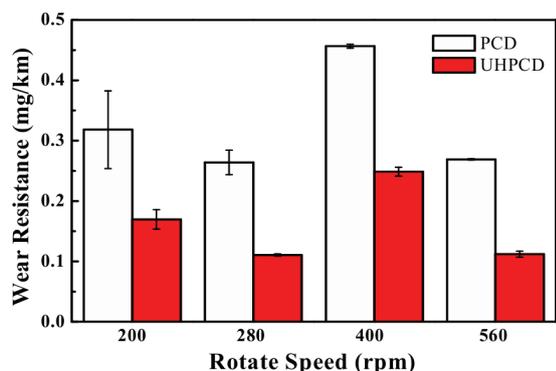


图1 不同转速下UHPCD和PCD材料的平均耐磨性

的因素之一。

因此，在泥浆泵的压力增长至某个水平或出现异常升高的情况下，为了确保勘探工作能够平稳进行以及保护钻具等设备的安全，举行提钻检视无疑是最佳的策略。提取钻头之后，不管其是否被耗尽，它通常不会被再次使用，除非钻头下部仍有较厚的作业层，此时可用于较浅层的钻探作业。多数钻头能够得到充分利用，这说明设计和制作的钻头，特别是高硬度的人造金刚石钻头，在生产上是合理和有价值的。

在 6762K6 井与 240/2k813 井这两个井眼中展开了某项生产实验，它们都坐落于前陈矿区内，且两者地理位置邻近，钻探过程所应用的技术手段一致。实验中所采集的 (a)、(b) 样本代表了两类典型的岩石核心，而 (c)、(d) 样本分别来自不同的井。岩心中，白色代表钠长石，红色表示钾长石，透明部分为石英，黑色部分则是云母。这类岩石的钻透性能较好，其可钻性可评为 9 到 12 级。招远地区的生产实验场所其地质条件概括上满足硬质难以钻探的地层特点，而在钻头实际运用时，所遇地质环境具有相似之处。

经过加入 UHPCD 材质和 PCD 材质的钻头相较于未经过任何材质增强的原钻头在耐用性上有显著提高。考虑岩层的复杂性与地质的不确定因素，通过分析钻进深度的数据不难看出，蕴含超硬聚晶金刚石的 UHPCD 材质钻头较其他两者展现出更优越的使用寿命。相比 PCD 材料，UHPCD 的添加能在更大程度上延长钻头的有效作业时间。

UHPCD 与 PCD 两种材料在性能上的主要差异体现在更优越的耐磨性和自锐能力。与 PCD 相比，耐磨性更强的 UHPCD 能显著延长地质钻头的使用期限。同时，鉴于 UHPCD 卓越的自锐性特点，我们可以断定它也能有效提高钻探速率（亦即：增进钻探效率）。再者，UHPCD 在钻头应用方面的实验成功，也使得 CVD 金刚石的使用领域得以扩展。

结论

本文分析了新一代抗磨强度极高的超硬聚晶金刚石材质的摩擦性质和可能的应用范畴。探究此种材料在钻探作业中的耐磨损表现和损耗原理，并评估了该材料在微观层面上的摩擦学表征，同时考查了其在钻头生产过程中的实际性能情况。

参考文献

- [1] 王凯, 徐亮, 王新永, 裴天河, 魏金花, 钟扬, 闫卫东, 王松, 金恩泽, 李军平, 赵国龙, 年智文. 聚晶金刚石刀具低温冷却铣削 SiC/SiC 复合材料磨损试验研究 [J]. 机械制造与自动化, 2024, 53 (03): 32-36.
- [2] 赵思壮. 聚晶金刚石钻齿耐磨性和抗冲击性测试及失效机理研究 [D]. 太原科技大学, 2024.
- [3] 沙小花, 李金彦, 周波, 岳文. 不同湿度环境下镀钛金刚石烧结聚晶金刚石的摩擦学性能 [J]. 中国表面工程, 2023, 36 (06): 79-89.
- [4] 杨克斌. 路面铣刨机专用聚晶金刚石截齿头的研究与制备 [J]. 设备管理与维修, 2023, (14): 126-128.
- [5] 曾勇谋, 刘莹, 曹宇, 吕智. 人造金刚石精密刀具钎焊工艺及切削磨损研究 [J]. 超硬材料工程, 2023, 35 (03): 16-20.
- [6] 张春义. 纳米聚晶金刚石微尺度刀具的锗基片辅助聚焦离子束加工研究 [D]. 燕山大学, 2023.
- [7] 蒋盟. 聚晶金刚石电火花加工工艺及机理研究 [D]. 山东理工大学, 2023.
- [8] 张哲辉, 海琴. 铁含量对聚晶金刚石性能的影响 [J]. 杨凌职业技术学院学报, 2022, 21 (03): 1-3+10.
- [9] 鲍东升, 罗登银, 曲春雨, 郭心宇, 邵天宇. 耐冲蚀耐腐蚀硬质合金泥浆脉冲发生器转子及其制备方法 [J]. 现代制造技术与装备, 2022, 58 (05): 112-114.
- [10] 葛冬生. 聚晶金刚石 (PCD) 模芯冷压金属微成型机理及实验研究 [D]. 华南理工大学, 2022.