

磁控溅射钼涂层对碳材料结构及耐腐蚀性能影响

刘尚 何世文*

湖南工业大学材料科学与工程学院, 湖南 株洲 412007

摘要: 碳材料凭借低密度、高比强度、优异的耐高温与导电导热性能, 在航空航天、能源存储、化工防腐等高端领域应用前景广阔。但其表面易氧化、耐酸碱腐蚀性能薄弱的缺陷, 严重限制了实际服役寿命与应用范围。磁控溅射技术作为高效、低温、涂层质量优异的物理气相沉积方法, 可在碳材料表面制备致密均匀的钼涂层, 实现其耐腐蚀性能的协同提升。本研究综述该钼涂层的制备原理与工艺特点, 分析涂层沉积对碳材料表面形貌、晶体结构、界面结合状态的影响, 探讨其调控碳材料耐腐蚀性能的作用机制, 结合研究现状指出存在的问题与解决策略, 为该改性技术的产业化应用与技术创新提供理论支撑与实践参考。

关键词: 磁控溅射; 钼涂层; 碳材料结构; 耐腐蚀性能; 界面改性

0 引言

碳材料涵盖石墨、碳纤维、碳/碳复合材料等类型, 凭借独特微观结构与优异理化特性, 在航空发动机热端部件、燃料电池电极等极端服役环境中发挥不可替代作用。随着高端装备向高温、高压、强腐蚀方向升级, 碳材料耐腐蚀性能不足成为制约其应用的核心瓶颈, 在酸碱、高温氧化、熔融盐等环境中易发生氧化、溶解或剥离, 缩短服役周期并带来安全隐患。表面涂层改性是最经济有效的提升路径, 钼作为高熔点、高化学惰性难熔金属, 其涂层可形成致密防护屏障; 磁控溅射技术具有沉积温度低、涂层致密均匀等优势, 可解决界面结合薄弱等问题。当前相关研究存在局限性, 本文聚焦磁控溅射钼涂层对碳材料结构及耐腐蚀性能的影响, 梳理关联、探讨关键问题, 为碳材料高性能改性提供新视角, 推动其规模化应用。

1 磁控溅射钼涂层的制备原理与工艺特点

1.1 磁控溅射钼涂层制备原理

磁控溅射技术基于气体放电产生的等离子体与靶材相互作用, 通过离子轰击使靶材原子逸出并沉积在基体表面形成涂层, 其核心原理是利用磁场约束等离子体, 提高离子轰击效率与涂层沉积速率, 同时降低沉积温度, 避免高温对碳材料基体结构造成损伤^[1]。钼涂层的磁控溅射制备过程中, 以高纯钼为靶材, 氩气作为溅射气体, 通过射频或直流电源激发产生等离子体, 氩离子在电场与磁场的共同作用下高速轰击钼靶表面, 使钼原子脱离靶材表面并以原子级形式沉积在碳材料基体表面, 经过成核、生长过程形成连续致密的钼涂层。

1.2 磁控溅射钼涂层工艺特点

磁控溅射制备钼涂层的工艺特点与其技术优势密切相关, 低温沉积特性可有效避免碳材料在高温下发生石墨化转变或结构氧化, 保障基体原有优异性能不受破坏。涂层沉积过程中, 通过调控溅射功率、气体压力、沉积时间、基体偏压等工艺参数, 可实现钼涂层厚度、致密性、晶粒尺寸等结构参数的精准调控, 满足不同服役环境对涂层性能的需求^[2]。相较于等离子喷涂、化学气相沉积等传统方法, 磁控溅射制备的钼涂层与碳材料基体结合紧密, 无明显界面缺陷, 涂层表面平整光滑、孔隙率低, 可有效阻挡腐蚀介质的渗透, 为提升碳材料耐腐蚀性能奠定结构基础。

1.3 涂层制备的关键辅助技术

磁控溅射技术可实现多元素共溅射与复合涂层制备, 通过在钼涂层中掺杂其他耐腐蚀元素或与其他涂层形成多层复合结构, 进一步优化涂层的耐腐蚀性能与界面相容性。针对碳材料表面惰性强、涂层附着力不足的问题, 可通过预处理工艺(如等离子刻蚀、砂纸打磨)活化碳材料表面, 增加表面粗糙度与活性基团, 促进钼原子在基体表面的成核与生长, 提升涂层与基体的界面结合强度, 避免涂层在腐蚀环境中发生剥离失效。

2 磁控溅射钼涂层对碳材料结构的影响

2.1 对碳材料表面形貌的影响

碳材料表面形貌在钼涂层沉积后发生明显改变, 原始碳材料表面存在一定的孔隙与缺陷, 经过磁控溅射沉积后, 钼涂层可均匀覆盖在基体表面, 填补表面孔隙与缺陷, 使表面粗糙度降低、平整度提升。涂层的表面形貌受溅射工

艺参数影响显著,适宜的溅射功率与气体压力可使钽原子均匀沉积,形成致密、连续的涂层表面;若工艺参数不当,会导致涂层表面出现晶粒粗大、孔隙增多或裂纹等缺陷,影响涂层的防护效果。同时,离子轰击过程会使碳材料表面发生轻微刻蚀,形成微小的凹凸结构,这种结构可增加涂层与基体的接触面积,促进钽原子与碳原子的相互作用,提升界面结合强度。

2.2 对碳材料晶体结构的影响

磁控溅射钽涂层的沉积会对碳材料的晶体结构产生一定调控作用,碳材料的晶体结构以 sp^2 杂化的石墨结构为主,部分碳材料(如金刚石)存在 sp^3 杂化结构。在涂层沉积过程中,高能氩离子轰击碳材料表面,会使部分 sp^2 杂化的碳原子发生杂化状态转变,形成少量 sp^3 杂化结构,这种结构转变可提升碳材料表面的硬度与耐磨性,同时增强与钽涂层的界面相容性。此外,钽涂层的晶粒尺寸与结晶度会随沉积工艺参数变化,晶粒细化可增加涂层的致密性,减少腐蚀介质渗透的通道,而涂层与基体界面处会形成薄的过渡层,过渡层中存在钽与碳的相互扩散,形成碳化物相,进一步强化界面结合,避免界面剥离。

2.3 对碳材料界面结合状态的影响

界面结合状态是影响钽涂层防护性能的关键因素,磁控溅射技术可通过优化工艺参数,实现涂层与碳材料基体的紧密结合。预处理后的碳材料表面活性增强,钽原子沉积时可与碳原子形成牢固的化学键结合,同时离子轰击产生的晶格畸变会促进钽原子向碳材料基体扩散,形成扩散层,减少界面缺陷。若预处理不充分或工艺参数不合理,涂层与基体界面会存在间隙或杂质,导致界面结合强度降低,在腐蚀环境中,腐蚀介质易从界面渗透,引发涂层剥离与基体腐蚀。

3 磁控溅射钽涂层对碳材料耐腐蚀性能的影响及作用机制

磁控溅射钽涂层对碳材料耐腐蚀性能的提升效果显著,其核心作用机制是通过在碳材料表面形成致密的防护屏障,隔绝腐蚀介质与基体接触,同时利用钽自身优异的化学惰性,抑制腐蚀反应的发生,结合涂层与基体的界面协同作用,实现碳材料耐腐蚀性能的长效提升。

3.1 对酸碱腐蚀环境的防护作用

在酸碱腐蚀环境中,原始碳材料表面易与酸碱溶液发生反应,导致表面氧化、溶解,形成大量孔隙与缺陷,腐蚀介质持续渗透会进一步破坏材料内部结构。磁控溅射钽涂层具有优

异的化学惰性,不与大多数酸碱溶液发生反应,其致密的结构可有效阻挡酸碱溶液、离子等腐蚀介质的渗透,避免腐蚀介质与碳材料基体接触,从而抑制腐蚀反应的发生。同时,钽涂层的孔隙率极低,可减少腐蚀介质的渗透通道,进一步提升防护效果,经过钽涂层改性后的碳材料,在酸碱溶液中浸泡后表面无明显腐蚀痕迹,结构完整性得到有效保障。

3.2 对高温氧化环境的防护作用

在高温氧化环境中,碳材料在高温下易与氧气发生反应,生成二氧化碳或一氧化碳,导致材料失重、结构破坏^[3]。钽涂层在高温下可形成致密的氧化膜,这种氧化膜具有良好的热稳定性,可有效阻挡氧气与碳材料基体接触,抑制碳材料的氧化反应。同时,钽涂层的热膨胀系数与碳材料相近,可减少高温环境下因热膨胀不匹配产生的热应力,避免涂层开裂脱落,保障高温环境下的防护稳定性。此外,涂层与基体界面处的过渡层可缓解热应力,进一步提升涂层的高温防护性能,使碳材料能够在更高温度的氧化环境中稳定服役。

3.3 对熔融盐腐蚀环境的防护作用

在熔融盐腐蚀环境中,传统碳材料易被熔融盐侵蚀,导致表面剥落、性能退化,而磁控溅射钽涂层可有效抵御熔融盐的侵蚀,其致密结构可阻挡熔融盐的渗透,同时钽与熔融盐的反应活性极低,不会发生明显的腐蚀反应。涂层与基体的紧密结合可避免熔融盐从界面渗透,防止界面腐蚀与涂层剥离,从而保障碳材料在熔融盐环境中的结构完整性与性能稳定性。

3.4 涂层结构参数对耐腐蚀性能的调控作用

磁控溅射钽涂层对碳材料耐腐蚀性能的提升,还与涂层的结构参数密切相关。涂层厚度不足会导致防护不充分,腐蚀介质易渗透;涂层过厚则会增加内应力,导致涂层开裂。适宜的涂层厚度可实现防护性能与结构稳定性的协同提升,而晶粒细化可增加涂层的致密性,减少孔隙与缺陷,进一步增强防护效果。界面结合强度的提升可避免涂层在腐蚀环境中发生剥离,确保防护屏障的连续性,从而实现碳材料耐腐蚀性能的长效提升。

4 当前研究存在的问题与解决策略

4.1 当前研究存在的主要问题

磁控溅射钽涂层虽能有效提升碳材料耐腐蚀性能,但仍存在诸多问题限制其产业化应用。工艺参数优化缺乏系统性,不同碳材料改性工艺差异大,难以形成标准化流程,导致涂层性能稳定性不足。涂层与碳材料基体界面结合强

度有待提升,长期极端腐蚀环境下易出现开裂、剥离等失效现象,影响防护寿命。此外,钽涂层制备成本较高,大规模生产中靶材利用率低、沉积效率不足,增加成本压力;单一钽涂层在多介质协同腐蚀、高温高压等复杂环境中防护性能不足,无法满足多样化服役需求。

4.2 解决问题的策略

4.2.1 工艺调控:建立数字化标准化制备体系

引入机器学习与数值模拟技术,解析溅射功率、气体压力、基体偏压等关键工艺参数与钽涂层微观结构、宏观性能的量化关联,明确各参数对涂层质量的影响规律。基于解析结果建立大数据驱动的工艺调控模型,针对石墨、碳/碳复合材料等不同类型碳材料基体,制定个性化、可复制的标准化制备流程,从源头规避工艺参数不合理导致的涂层缺陷,有效保障钽涂层性能的稳定性与一致性,为磁控溅射钽涂层改性碳材料技术的产业化应用奠定坚实的工艺基础,助力该技术实现规模化落地。

4.2.2 界面强化:提升涂层与基体结合耐久性

深入探究钽涂层与碳材料的界面结合机制,明确界面缺陷产生的核心诱因。通过研发新型复合界面层或纳米级 Ta-C 过渡层,实现钽涂层与碳基体的原子级化学键合,显著强化界面结合力,减少界面间隙与缺陷^[4]。同时采用梯度涂层设计,优化涂层内部应力分布,有效缓解钽与碳材料热膨胀系数不匹配带来的热应力,抑制涂层在长期服役过程中的开裂、剥离等失效现象,大幅提升涂层与基体结合的耐久性,为钽涂层防护性能的长效发挥提供坚实保障,助力该改性技术的稳定应用。

4.2.3 成本优化:降低产业化应用成本压力

开发钽基多元复合涂层,通过掺杂钼、钨

等低成本耐腐金属,在严格保障涂层耐腐蚀性能不降低的前提下,大幅减少稀有金属钽的使用量,有效降低原材料采购成本。研发高效磁控溅射设备与靶材回收技术,优化溅射功率、气体压力等工艺参数提升沉积效率,通过靶材回收再利用提高资源利用率、减少浪费,从原材料与制备工艺两方面同步优化,有效降低产业化应用综合成本,为磁控溅射钽涂层改性碳材料技术的规模化落地扫清成本障碍。

4.2.4 性能提升:优化复杂环境防护能力

通过在钽涂层中掺杂稀土元素或耐腐金属,精准调控涂层微观结构,细化晶粒、降低孔隙率,显著增强其抗腐蚀、抗高温能力,有效弥补单一钽涂层的防护短板。同时采用多层复合涂层设计,结合不同涂层的性能优势构建协同防护体系,大幅提升涂层在复杂极端环境中的稳定性与耐久性,可有效抵御多介质协同侵蚀与高温高压损伤,全面适配不同服役场景的防护需求,为该改性技术的广泛应用提供性能保障。

5 结语

磁控溅射技术可在碳材料表面制备致密均匀、附着力强的钽涂层,通过调控涂层结构实现碳材料结构与耐腐蚀性能的协同提升。钽涂层能改变碳材料表面形貌、晶体结构及界面结合状态,填补基体缺陷、强化界面结合,通过形成致密防护屏障隔绝腐蚀介质,依托钽的化学惰性与热稳定性,有效提升碳材料在酸碱、高温氧化、熔融盐等环境中的服役性能。当前该改性技术仍存在工艺优化不足、界面结合强度不够、制备成本较高等问题,限制产业化应用。通过数字化工艺调控、界面改性强化等针对性策略,可进一步提升性能、降低成本,推动其规模化应用,该技术为碳材料高性能化提供有效路径,具有重要理论意义与实用价值。

参考文献:

- [1] 赵凡,项燕雄,邹长伟,等.磁控溅射镀膜技术在(Cr,Ti,Al)N涂层上的应用[J].真空,2024,61(04):22-29.
- [2] 刘铭悦,黄志全,张习羽,等.非平衡磁控溅射CrTiAlN涂层的制备及空蚀性能研究[J].表面技术,2023,52(10):367-375.
- [3] 王智玉,周浩.温度对建筑用316L钢磁控溅射AlTiCrN涂层组织和热腐蚀的影响[J].真空科学与技术学报,2020,40(11):1029-1033.
- [4] 黄彪,张而耕,周琼,等.石墨靶溅射时间对Ta-C涂层性能的影响[J].陶瓷学报,2019,40(03):318-324.

作者简介:刘尚(2000.12—),男,汉族,辽宁铁岭人,硕士研究生在读,研究方向:粉体材料。

通讯作者:何世文(1975.04—),男,汉族,江西省萍乡人,博士,副教授,研究方向:粉体材料。

项目信息:湖南省自然科学基金项目《碳化钨微观缺陷对超细WC-Co体系中WC晶粒生长活性的影响研究》,项目编号:2020JJ6069。