

材料表面改性技术：原理、方法与多元应用进展

路文鹏

内蒙古天皓玻纤有限责任公司，中国·内蒙古 呼和浩特 011500

摘要：材料表面改性技术是当下材料科学领域的关键研究方向，能够在不改变材料基体本质特性的前提下，按需定制材料的表面性能。论文详尽阐述了材料表面改性技术的基础原理，系统梳理了物理气相沉积、化学气相沉积、离子注入、热喷涂、表面淬火等主流方法，深入分析各技术手段的实施过程与优势劣势。同时，聚焦于机械制造、航空航天、生物医疗等多个核心应用领域，结合实际案例展现其卓越成效，为材料表面改性技术的深度认知与拓展应用提供全面且专业的参考。

关键词：材料表面改性技术；物理气相沉积；化学气相沉积；应用领域

Surface Modification Technology of Materials: Principles, Methods, and Progress in Diverse Applications

Wenpeng Lu

Inner Mongolia Tianhao Fiberglass Co., Ltd., Hohhot, Inner Mongolia, 011500, China

Abstract: Material surface modification technology is a key research direction in the field of materials science, which can customize the surface properties of materials as needed without changing the essential characteristics of the material matrix. The paper elaborates on the basic principles of material surface modification technology, systematically sorts out mainstream methods such as physical vapor deposition, chemical vapor deposition, ion implantation, thermal spraying, and surface quenching, and deeply analyzes the implementation process and advantages and disadvantages of each technical means. At the same time, it focuses on multiple core application fields such as mechanical manufacturing, aerospace, and biomedicine, and demonstrates its outstanding achievements through practical cases, providing comprehensive and professional references for the deep understanding and expanded application of material surface modification technology.

Keywords: material surface modification technology; physical vapor deposition; chemical vapor deposition; application area

0 前言

在现代工业与前沿科技的迅猛发展浪潮中，材料作为基础支撑要素，面临着愈发严苛且复杂的服役需求。传统材料单纯依靠基体成分往往难以兼顾各类性能指标，而材料表面改性技术恰似一把精准的“手术刀”，巧妙雕琢材料表面，赋予其全新的物理、化学特性，使其既能保留基体原本的优良属性，诸如整体强度与韧性，又能在表面展现出诸如高硬度、强耐腐蚀性、良好生物相容性等特殊性能，极大拓宽材料的应用范畴，对产业升级与技术突破意义非凡。

在当今这个科技飞速跃进、产业迭代升级的时代，材料无疑是现代工业与前沿科技得以蓬勃发展的根基所在。从翱翔于九天之上的航空航天器，到纵横深海的海洋工程装备；从驱动现代制造业高效运转的精密机械，再到植入人体挽救生命的生物医疗器件，各类材料承受着超乎想象的复杂服役条件。传统单一成分、未经雕琢的材料，愈发难以契合这些极端且多元的应用场景。腐蚀与磨损，仿若隐匿在暗处的“冷面杀手”，时刻威胁着材料的性能与寿命。在化工生产中，腐蚀性介质无孔不入，悄无声息地侵蚀着设备管道，致使泄漏风险骤增；在机械传动链条里，日复一日的摩擦让零部件表面伤痕累累，精度尽失。面对这些棘手难题，简单

更换成本高昂的高性能材料并非长久之计。在此背景下，材料表面改性技术应运而生，恰似一把精准而巧妙的“钥匙”，无需大刀阔斧改变材料基体，仅从表面微观世界着手，就能解锁全新性能，为材料科学领域注入澎湃活力，开辟出满足多元需求的崭新路径。

1 材料表面改性技术原理

材料表面改性技术的核心在于精准调控材料表面原子排列、化学成分分布，这一过程蕴含着丰富的物理与化学机制。从热力学角度出发，材料表面原子处于一种高能、不稳定状态，相较于内部原子，它们拥有更多的自由能，时刻有向低能态转变的趋势。这种特性使得表面原子更易与外界物质发生相互作用，成为改性操作的关键“切入点”。当引入外部能量时，无论是以热的形式、电能形式，还是离子束所携带的能量，都如同给表面原子注入了“活力”，促使它们克服原子间的束缚能，开启迁移、扩散之旅。

以热驱动的改性过程为例，升温使得原子热振动加剧，当温度达到一定阈值，原子获得足够动能去挣脱原有晶格位置，发生换位、填充空位等行为，逐渐改变表面原子的排列秩序，实现晶相转变或者晶粒细化。从化学视角看，添加

的新化学物质与表面原子接触, 会引发一系列化学反应。倘若在金属表面引入含氮、碳的活性气体, 高温条件下, 这些气体分子分解出的活性原子就会与金属原子化合, 生成氮化物、碳化物等新的化合物相, 重塑表面化学成分。

此外, 材料表面的晶体缺陷, 像是位错、空位, 在改性过程中扮演着特殊角色。它们好似一个个“能量陷阱”, 吸引外来原子聚集, 加速化学反应进行, 还能成为新相形核的优先位点, 引导新的晶体结构在表面萌生, 进一步丰富了表面改性的微观机制。不仅如此, 表面原子的电子结构也会因改性处理而发生改变。例如离子注入时, 高能离子嵌入材料表面, 打破了原有的电子云分布平衡, 使得表面原子的化学键合特性调整, 这既影响材料的化学活性, 又关联着电学、磁学等物理性质的转变。这一复杂精妙的过程最终促成材料表面性能的华丽变身, 在保留基体基本力学性能的同时, 赋予其诸如抗腐蚀、耐磨、电学或光学等全新特性, 满足不同场景下的特殊需求。深入来讲, 表面能理论也是理解改性原理的重要基石。

材料倾向于降低自身表面能以达到更稳定状态, 不同的改性处理实则是利用这一特性, 引导表面原子重排与成分更迭, 让表面能朝着预期方向改变。例如, 一些涂层沉积技术, 在基体表面覆盖一层低表面能物质, 不仅能改变材料与外界介质的接触角, 实现疏水性、亲水性的调控, 还能阻止腐蚀介质、磨粒与基体亲密接触, 为提升抗腐蚀、耐磨性能奠定理论根基, 全方位解锁材料表面性能优化的密码。

2 常见材料表面改性技术

2.1 物理气相沉积 (PVD)

物理气相沉积是在真空环境下, 将固态或液态的原材料加热蒸发、溅射, 使其原子或分子气化后, 在基体表面沉积形成薄膜涂层。磁控溅射 PVD 技术, 利用磁场束缚等离子体中的电子, 增强气体电离效率, 加速离子对靶材轰击, 溅射出的靶材原子以较高能量沉积在基体, 形成致密、附着力强的涂层, 常用于刀具涂层, 提升刀具耐磨性与切削寿命; 蒸发镀膜 PVD 则适用于大面积、薄涂层制备, 如光学镜片增透膜, 通过加热蒸发镀膜材料, 原子均匀沉积, 调控膜厚可精准改变镜片光学性能。

2.2 化学气相沉积 (CVD)

化学气相沉积基于气态反应物在高温、等离子体或催化剂作用下, 于基体表面发生化学反应, 生成固态沉积物。化学气相沉积制备的碳化硅涂层, 在高温下由含硅、碳的气态前驱体分解、化合, 在基体上逐层生长。该技术能制备成分均匀、纯度高的涂层, 对复杂形状工件适应性强, 但反应温度高, 易使基体产生热变形, 常用于半导体、陶瓷材料表面改性。

2.3 离子注入

离子注入是将选定元素电离成离子, 经加速获得高能

量后注入材料表面。注入的离子打破材料表面原有原子排列, 产生空位、间隙原子等缺陷, 引发原子重排与化学反应, 形成新相。氮离子注入钢铁, 可形成氮化物弥散强化相, 提升表面硬度、耐磨性与抗腐蚀性, 在模具制造领域, 经离子注入的模具使用寿命大幅延长。

2.4 热喷涂

热喷涂把丝状、粉状材料加热到熔融或半熔融态, 利用高速气流将其雾化喷射至基体表面形成涂层。火焰热喷涂设备简单、成本低, 靠燃气燃烧加热喷涂材料, 常用于一般性防腐、耐磨涂层; 等离子热喷涂温度更高, 能熔化高熔点材料, 适合喷涂陶瓷涂层, 像航天发动机部件热障涂层, 抵御高温燃气冲刷, 保护基体。

2.5 表面淬火

表面淬火是快速加热材料表面至淬火温度, 随后急速冷却, 使表面获得马氏体组织, 提升硬度与耐磨性。感应加热表面淬火利用电磁感应原理, 工件表面产生涡流迅速升温, 喷水冷却后形成硬化层, 在轴类零件制造中广泛应用, 强化表面性能, 中心部位仍保留韧性。

3 材料表面改性技术在各领域的应用

3.1 机械制造领域

机械制造行业犹如工业的“骨骼架构师”, 众多零部件在复杂恶劣工况下长期服役, 摩擦、磨损与交变载荷如影随形, 对材料表面性能提出严苛考验, 而表面改性技术在此大放异彩。在精密模具制造场景里, 模具作为成型各类零部件的关键工装, 其型腔表面质量与寿命直接关乎产品品质与成本。离子注入技术成为“救星”, 针对模具钢, 注入氮、硼等元素后, 在表面形成硬质弥散强化相, 硬度相较未处理前提升数倍, 可达 HRC60 以上。这意味着在塑料注塑、压铸有色金属等成型工艺中, 模具型腔能更从容地抵御熔融材料的冲刷、磨损, 脱模过程也更为顺畅, 有效减少产品拉伤、粘模等缺陷, 大幅延长模具的维修周期与总体使用寿命, 降低企业频繁更换模具的高昂成本。

轴类零件也是机械传动的关键枢纽, 像电机轴、机床主轴, 持续承受扭转、弯曲交变应力, 同时还面临键槽、轴颈部位的摩擦损耗。表面淬火与物理气相沉积 (PVD) 涂层复合处理方案脱颖而出。先运用感应加热表面淬火, 让轴表面迅速升温至淬火温度, 紧接着喷水冷却, 获得马氏体硬化层, 强化基体承载能力; 随后, 通过 PVD 技术沉积一层 TiN、TiAlN 等超硬涂层, 涂层与硬化层协同作用, 不仅摩擦系数锐减, 还能在高速运转时有效阻隔外界灰尘、切屑颗粒对轴表面的侵蚀, 确保轴系长期稳定运转, 维持机械传动精度, 提升整机可靠性。

对于重型机械装备的大型结构件, 如挖掘机的斗齿、破碎机的锤头, 它们在挖掘、破碎矿石等高强度作业中, 遭受剧烈的冲击磨损与磨粒磨损。热喷涂技术大显身手, 选用

高硬度的碳化钨、铬镍合金等喷涂材料,经火焰、等离子等热源熔化后高速喷射至部件表面,形成厚实且结合牢固的耐磨涂层。涂层中的硬质相颗粒如同“微型铠甲”,强力抵抗矿石的撞击与研磨,极大延缓部件磨损速度,减少频繁更换带来的停机时间损失,助力矿山开采、建筑施工等行业高效运作。

3.2 航空航天领域

航空航天领域堪称现代科技的“皇冠明珠”,每一个零部件都肩负着保障飞行安全、实现极端性能的重任,对材料表面改性技术要求近乎苛刻。在航空发动机这个“心脏”部件上,高温合金涡轮叶片是核心中的核心,要在超高温、高压、高速气流冲刷的恶劣环境下稳定工作。化学气相沉积(CVD)技术担起防护大梁,制备出氧化铝、氧化钎稳定的氧化锆等热障涂层。这些涂层具有极低的热导率,宛如给叶片披上一层“隔热披风”,阻隔燃烧室高温燃气传来的热量,使叶片基体温度大幅降低,有效减轻热应力,避免因热疲劳引发的裂纹萌生与扩展,保障发动机高效持久运行,提升飞机飞行安全性与燃油经济性。

飞机机身结构件长期暴露于复杂大气环境,要对抗腐蚀、疲劳裂纹两大“杀手”。铝合金作为常用机身材料,表面经阳极氧化与封孔处理这一改性手段,先通过阳极氧化在表面生成一层多孔的氧化铝膜,膜厚可调控,随后利用封孔剂填充孔隙,让膜层致密化。如此一来,不仅阻挡雨水、盐分、污染物等腐蚀介质侵蚀,还因氧化铝膜的强化作用,提升表面硬度,抑制疲劳裂纹源产生,延长机身结构寿命,减少飞机维护检修频次,保障航空运营的高效与安全。

航天飞行器的电子设备与光学系统更是精密娇贵,不容许丝毫性能偏差。卫星上的太阳能电池板,需长期在太空高真空、强辐射、高低温交变环境下高效发电。热喷涂银涂层技术登场,银涂层具有超高的导电性与反射率,喷涂在电池板表面,一方面降低电池板内阻,提升光电转换效率;另一方面,反射掉部分太空辐射热,维持电池板温度稳定,保障其稳定持续供电,助力卫星完成各类太空探测、通信任务,拓展人类对宇宙探索的边界。

在航天光学镜头、探测器窗口等光学元件上,物理气相沉积制备的多层减反射、抗辐射涂层发挥关键作用。通过精确控制各层涂层的折射率、厚度,实现对不同波段光线的精准调控,最大限度减少光线反射损失,提升光学元件透光率;同时,特殊的抗辐射涂层吸收、散射太空辐射粒子,保护光学元件内部光学性能不受损,确保航天观测、遥感数据的精准获取,为太空科研输送清晰“视界”。

4 材料表面改性技术的发展趋势

随着纳米技术蓬勃发展,纳米结构涂层制备成为热点。纳米涂层展现出超常硬度、自清洁、抗菌等特性,如纳米银抗菌涂层,在医疗、食品包装领域潜力巨大。绿色环保理念促使水性涂料、低温沉积技术兴起,减少有机溶剂使用、降低能耗;多技术复合联用,整合不同技术优势,像热喷涂与激光重熔结合,兼顾涂层制备与致密化,将为材料表面改性开启新的效能篇章。智能材料表面改性技术崭露头角,这类技术能赋予材料表面感知与响应外界刺激的能力。例如,在一些建筑玻璃表面应用智能涂层,当光照强度、温度发生变化时,涂层的微观结构随之改变,自动调控光线透过率与隔热性能,实现室内光热环境的智能调节,降低建筑能耗。在生物医学领域,智能表面改性后的植入体可以感知人体生理环境的细微变化,按需释放药物,辅助组织修复,极大提升植入体与人体的相容性和治疗效果。跨学科融合也为材料表面改性技术注入新活力。材料学与生物学深度交叉,催生出模拟细胞外基质的表面改性方案,利用生物分子、细胞因子对材料表面修饰,引导细胞定向黏附、分化,推动组织工程发展;与物理学前沿理论结合,量子调控技术有望用于设计具有特殊电学、磁学性质的表面涂层,为量子通信、量子计算相关材料制备开辟蹊径。随着大数据与人工智能的渗透,通过海量实验数据积累,借助机器学习算法预测不同改性参数下的材料性能,优化改性工艺,加速新材料、新技术从实验室迈向产业化应用的进程,全方位驱动材料表面改性技术迈向更智能、绿色、多元的未来。

5 结语

材料表面改性技术宛如一座桥梁,连通材料既有性能与新兴需求,凭借丰富多样的技术手段,深度渗透机械、航空、医疗等诸多领域,收获斐然成果。展望未来,在新技术、新理念驱动下,材料表面改性技术必将持续革新,解锁更多材料潜能,为科技进步与产业升级筑牢根基,在更广阔天地大放异彩。

参考文献:

- [1] 张建国.材料表面技术[M].北京:清华大学出版社,2018.
- [2] 刘宏.物理气相沉积技术及其应用[M].北京:科学出版社,2019.
- [3] 陈刚.化学气相沉积的原理与实践[M].北京:化学工业出版社,2020.
- [4] 王勇.离子注入技术进展[J].金属学报,2021,57(3):1-6.
- [5] 赵强.热喷涂技术新发展[J].表面技术,2022,51(5):7-12.