

材料科学与工程中的材料表面改性技术

陈 艺

中铁二十一局集团第五工程有限公司 甘肃 兰州 730000

摘要: 材料表面改性技术通过物理、化学或机械方法改变材料表面成分、结构及形貌,显著提升其耐磨、耐腐蚀、抗疲劳等性能。主要方法包括物理气相沉积、化学气相沉积、激光处理、离子注入及复合改性技术等。该技术广泛应用于航空航天、汽车制造、电子信息、生物医学等领域,可延长材料使用寿命、降低成本并推动高端装备研发。当前正朝着智能化、绿色化、多功能集成及跨学科融合方向发展。

关键词: 材料科学与工程; 材料表面; 改性技术

引言: 在材料科学与工程领域,材料表面性能对整体使用效能起着决定性作用。随着工业发展,对材料在极端环境下的适应性、功能多样性及服役寿命提出更高要求。材料表面改性技术作为突破材料性能瓶颈的关键手段,通过精准调控表面成分、结构与形貌,可赋予材料耐磨、耐蚀、抗菌、自清洁等特殊功能,成为提升材料综合性能、推动高端装备制造与新兴产业发展的核心支撑技术。

1 材料表面改性的理论基础

1.1 表面与界面科学基础

(1) 表面能是材料表面分子与内部分子受力差异产生的能量,表面分子因缺少相邻分子的束缚,具有更高的活性和能量,是表面改性能够实现的根本前提,表面能越高,材料表面越易与改性剂发生相互作用。(2) 表面张力是表面能的宏观体现,反映了材料表面收缩至最小面积的趋势,表面张力的直接大小直接影响改性剂在材料表面的润湿、铺展效果,决定改性层的均匀性。(3) 界面结合机制是改性层与基体牢固结合的关键,主要包括机械结合、化学结合和物理结合,实际改性过程中多为多种结合方式协同作用,保障改性效果的稳定性。

1.2 表面改性对材料性能的影响机制

(1) 力学性能方面,通过表面改性可显著提升材料表面硬度和耐磨性,减少材料表面磨损、变形,延长材料使用寿命,尤其适用于机械零部件等易损耗产品。(2) 化学性能方面,改性层可形成致密的防护屏障,隔绝外界腐蚀性介质与基体的接触,降低腐蚀反应发生率,大幅提升材料的耐腐蚀性,拓宽材料在恶劣环境中的应用范围。(3) 物理性能方面,可针对性调节材料的导电性和光学性能,如通过改性使绝缘材料获得导电能力,或改变材料表面的光学反射、透射特性,满足电子、光学等领域的特殊需求^[1]。

1.3 表面改性技术的设计原则

(1) 改性层与基体的匹配性,确保改性层与基体在成分、结构、热膨胀系数等方面适配,避免因结合力不足导致改性层脱落、开裂。(2) 工艺参数优化,通过调整改性过程中的温度、时间、改性剂浓度等参数,实现改性效果的最优化,减少工艺波动对改性质量的影响。(3) 经济性与环保性,在保证改性效果的前提下,优先选择低成本、低能耗的工艺和环保型改性剂,降低生产损耗和环境污染,符合绿色制造发展需求。

2 材料科学与工程中的材料表面改性技术的主要方法

2.1 物理改性技术

(1) 离子注入: 原理是利用高能离子束轰击材料表面,使离子注入表层晶格并形成固溶体或化合物,改变表面结构;关键工艺参数包括离子能量(通常为几十keV至几MeV)和注入剂量(决定离子在表层的浓度分布);应用案例广泛,在半导体领域可实现掺杂改性,优化器件导电性能,在金属表面强化中可提升钢、钛合金等材料的硬度和耐磨性,延长零部件使用寿命。(2) 物理气相沉积(PVD): 核心是在真空环境中,将改性材料以气相形式沉积到基体表面形成薄膜,主要分为蒸发镀和溅射镀;蒸发镀通过加热使镀料蒸发成气相,冷却后沉积成膜,工艺简单、成本低;溅射镀利用高能粒子轰击镀料靶材,使靶材原子溅射并沉积成膜,薄膜结合力更强;应用领域集中在刀具涂层(如TiN涂层提升刀具切削性能)和装饰涂层(如不锈钢表面TiC涂层,兼具美观与防腐)^[2]。(3) 激光表面处理: 以高能激光为热源,对材料表面进行局部改性,主要包括激光熔覆、激光冲击强化和微纳结构制备;激光熔覆将合金粉末与基体表面熔化结合,形成高性能涂层;激光冲击强化通过激光诱导的冲击波使表面产生残余压应力,提升疲劳强度;微纳结构制备可在表面形成特定微纳形貌,实现特殊功能。

2.2 化学改性技术

(1) 化学气相沉积 (CVD): 反应机理是利用气态反应物在高温、低压等条件下发生分解、化合反应, 在基体表面沉积形成薄膜; 其制备的薄膜具有纯度高、致密性好、与基体结合牢固的特性, 典型应用如金刚石涂层, 可显著提升刀具、模具的硬度和耐磨性。(2) 电化学沉积: 包括电镀和化学镀两种方式, 电镀利用电解原理, 使金属离子在阴极 (基体) 表面还原沉积成膜; 化学镀无需外接电源, 通过溶液中化学反应使金属离子沉积成膜, 如镍磷合金镀层, 具有优异的耐腐蚀性和耐磨性, 广泛应用于机械、电子领域。(3) 溶胶-凝胶法: 以金属醇盐等为前驱体, 通过水解、缩聚反应形成溶胶, 再经干燥、烧结在基体表面形成薄膜; 该方法工艺温和、可制备多元复合涂层, 常用于制备功能化涂层, 如疏水表面涂层, 可实现防水、防污功能, 应用于建筑、电子器件等领域。

2.3 复合改性技术

(1) 等离子体辅助改性: 以等离子体为媒介, 结合沉积、注入等作用实现改性, 主要包括等离子体喷涂和等离子体浸没离子注入; 等离子体喷涂将粉末材料熔化后高速喷涂到基体表面, 形成耐磨、防腐涂层; 等离子体浸没离子注入可实现大面积、均匀改性, 提升材料表面硬度和耐腐蚀性。(2) 微弧氧化 (MAO): 陶瓷涂层形成机制是利用等离子体放电使基体表面金属与电解质溶液发生化学反应, 形成致密的陶瓷氧化层; 该技术主要应用于镁合金防腐, 镁合金经微弧氧化处理后, 表面陶瓷层可有效隔绝腐蚀介质, 大幅提升其耐腐蚀性, 拓展镁合金在航空、汽车领域的应用。(3) 表面机械研磨处理 (SMAT): 通过高能研磨颗粒对材料表面进行冲击、碾压, 使表面形成纳米化表层, 改变表层晶粒尺寸和缺陷结构; 该技术可显著提升材料的表面硬度、韧性和疲劳强度, 适用于金属材料的表面强化^[3]。

2.4 新兴技术

(1) 3D打印表面功能化: 将增材制造 (3D打印) 与表面改性技术相结合, 在3D打印成型过程中同步实现表面改性, 或对打印成品进行后续改性处理, 既保留3D打印的定制化优势, 又提升产品表面性能, 适用于复杂结构零部件的一体化制备与改性。(2) 仿生表面改性: 借鉴生物体表的特殊结构与功能, 进行自清洁、超疏水等表面的设计与制备, 如模仿荷叶表面微纳结构制备超疏水涂层, 可实现防水、防污、自清洁功能, 广泛应用于医疗器械、建筑外墙、电子设备等领域, 具有广阔的应用前景。

3 材料科学与工程中的材料表面改性技术的典型应用

3.1 航空航天领域

(1) 涡轮叶片热障涂层: 航空发动机涡轮叶片长期处于1000°C以上高温环境, 通过等离子体喷涂、电子束物理气相沉积等技术, 在叶片表面制备氧化锆基热障涂层, 可有效隔绝高温热源, 降低叶片基体温度, 减少高温氧化和热腐蚀, 同时提升叶片的耐高温疲劳性能, 保障发动机长期稳定运行, 是航空发动机核心零部件的关键改性工艺。(2) 轻质合金表面强化: 航空航天器追求轻量化以降低能耗, 铝合金、镁合金等轻质合金广泛应用, 但存在硬度低、耐磨性差的缺陷, 通过阳极氧化、微弧氧化、离子注入等改性技术, 在合金表面形成致密强化层或硬质涂层, 显著提升其表面硬度、耐磨性和耐腐蚀性, 既保留轻质优势, 又满足机身结构件、连接件的力学性能要求。

3.2 生物医学领域

(1) 钛合金表面生物活性涂层: 钛合金因力学性能接近人体骨骼、生物相容性良好, 广泛用于人工关节、种植牙等植入物, 但表面生物活性不足, 通过溶胶-凝胶法、等离子体喷涂等技术, 在其表面制备羟基磷灰石涂层, 羟基磷灰石成分与人体骨骼矿物质相似, 可促进骨骼细胞黏附、增殖, 实现植入物与人体骨骼的牢固结合, 减少植入物松动、脱落的风险。(2) 抗菌表面改性: 医用植入物 (如导管、人工心脏瓣膜) 易滋生细菌引发感染, 通过表面接枝抗菌基团、沉积抗菌薄膜 (如银系涂层) 等改性技术, 可赋予材料长效抗菌性能, 抑制细菌吸附和繁殖, 降低术后感染发生率, 提升医用材料的临床应用安全性^[4]。

3.3 汽车工业领域

(1) 发动机零件耐磨涂层: 发动机活塞、曲轴、凸轮轴等零件长期处于高速摩擦、高温高压环境, 易出现磨损失效, 通过物理气相沉积、激光熔覆等技术, 在零件表面制备TiN、WC等耐磨涂层, 可显著降低表面摩擦系数, 提升耐磨性和抗咬合能力, 延长发动机零件使用寿命, 减少维修成本。(2) 车身防腐处理: 汽车车身长期暴露在大气、雨水等腐蚀环境中, 易发生锈蚀, 通过电镀、电泳涂装、化学转化膜等改性技术, 在车身表面形成致密的防腐涂层, 隔绝空气、水分等腐蚀介质与基体接触, 有效延缓车身锈蚀, 提升汽车外观耐久性和使用寿命。

3.4 电子信息领域

(1) 半导体表面钝化: 半导体芯片表面存在缺陷和悬挂键, 易导致载流子复合, 影响芯片性能, 通过化学气相沉积、等离子体钝化等技术, 在半导体表面制备

SiO₂、SiN等钝化涂层,可有效减少表面缺陷,抑制载流子复合,提升半导体器件的稳定性、导电性和使用寿命,是半导体制造中的核心工艺之一。(2) 柔性电子器件表面功能化: 柔性电子(如柔性显示屏、柔性传感器)需具备良好的柔韧性和功能稳定性,通过表面接枝、涂层改性等技术,对柔性基底表面进行功能化处理,可赋予其导电、透光、防水等性能,同时保障柔性器件在弯曲、折叠过程中性能稳定,推动柔性电子器件的产业化应用^[5]。

3.5 能源领域

(1) 燃料电池电极表面改性: 燃料电池电极的催化活性和导电性直接影响电池性能,通过贵金属纳米颗粒负载、表面掺杂等改性技术,可提升电极催化活性,降低反应内阻,同时增强电极的稳定性和抗中毒能力,延长燃料电池使用寿命。(2) 太阳能电池减反射涂层: 太阳能电池表面的光反射会降低光吸收效率,通过溶胶-凝胶法、物理气相沉积等技术,在电池表面制备减反射涂层,可减少光的反射损失,提高光吸收效率,进而提升太阳能电池的光电转换效率,推动太阳能发电技术的普及。

4 材料科学与工程中的材料表面改性技术的挑战与未来趋势

4.1 当前挑战

(1) 改性层与基体的结合强度、工艺成本与规模化生产存在突出矛盾。高性能改性层(如致密陶瓷涂层、多元复合涂层)需复杂工艺及高精度设备,致使成本居高不下,难以适配大规模工业化生产;同时部分改性技术无法兼顾结合强度与生产效率,要么结合强度不足导致改性层易脱落开裂,要么生产流程繁琐,无法满足批量生产时效,制约技术普及。(2) 复杂形状零件的均匀改性与环保型工艺开发面临困境。工业中大量零部件具有复杂曲面、镂空等特殊结构,现有多数改性技术难以实现表面均匀改性,易出现局部效果差、性能差异大的问题;传统化学改性工艺使用有毒有害试剂,产生的废液废气污染环境,不符合绿色制造理念,而环保型工艺开发滞后,且部分存在性能不足、成本偏高的缺陷。

4.2 未来发展方向

(1) 智能化改性技术成为重要发展方向,重点发展

原位监测与自适应工艺: 借助大数据、人工智能、传感器等技术,实现改性过程中温度、压力、涂层厚度等关键参数的实时原位监测,及时反馈工艺偏差并自动调整,提升改性质量的稳定性;开发自适应改性工艺,可根据零件材质、形状和性能需求,自动匹配最优工艺参数,实现个性化、精准化改性,同时提高生产效率。(2) 绿色表面工程持续推进,聚焦无污染工艺与资源循环利用: 大力研发无氰电镀、水性涂层、等离子体绿色改性等无污染工艺,替代传统高污染、高能耗技术,降低生产过程中的环境负荷;推动改性材料、废旧涂层的回收再利用,构建资源循环利用体系,兼顾环保性与经济性。(3) 多尺度/多功能集成表面设计成为核心热点,如开发同时具备耐磨与自修复功能的复合涂层,既能抵御外界摩擦损耗,又能在涂层出现微小破损时实现自主修复,延长材料使用寿命;同时,聚焦多尺度结构调控,实现微观、介观、宏观尺度的协同设计,赋予材料表面耐磨、防腐、抗菌、自清洁等多种功能,满足高端装备的多元化需求。

结束语

材料表面改性技术作为材料科学与工程领域的关键突破口,通过多学科交叉融合与创新,持续推动着材料性能的极限拓展与应用场景的深化拓展。面向未来,随着智能化改性装备、绿色无污染工艺及多功能集成表面设计的突破,该技术将在高端装备制造、新能源开发、生物医疗等领域发挥不可替代的作用,为解决全球资源环境挑战、实现可持续发展提供强有力的材料技术支撑。

参考文献

- [1]李果,张晓国.减压塔内件材料表面改性工业应用实践[J].石油化工设备技术,2023,44(06):53-56.
- [2]刘镜波,张义萍.脉冲激光改性碳纤维复合材料及其金属化研究[J].表面技术,2024,53(11):228-232.
- [3]邵彦谋,郭晋昌.化工材料钛合金表面热氧化改性研究现状及展望[J].当代化工研究,2023,(21):21-23.
- [4]迟彦萧,杨宇轩.黄铁矿及其改性复合材料在水污染处理中的应用[J].化学进展,2023,35(10):154-158.
- [5]陈昕,田玉轩.表面活性剂改性吸附材料在水处理中的研究进展[J].化工新型材料,2024,52(03):52-59.