

耐磨涂层材料在机电工程传动部件中的应用效果与寿命提升研究

李 维

中鼎国际工程有限责任公司建筑安装分公司 江西萍乡 337000

摘 要: 本文系统研究了耐磨涂层材料在机电工程传动部件中的应用效果与寿命提升机制。研究首先阐述了金属基、陶瓷增强及自润滑复合等常用耐磨涂层的性能特性,并强调了涂层与基体材料在热膨胀系数、力学性能上的匹配性及不同制备工艺对涂层性能的关键影响。在此基础上,通过具体案例分析了耐磨涂层在改善摩擦磨损性能、提升部件承载能力与运行稳定性以及降低设备能耗方面的显著效果。进而,从延缓磨损破坏、抵抗疲劳与腐蚀协同作用以及支持维护与再制造三个层面,深入揭示了耐磨涂层提升传动部件寿命的内在机制,为提升机电装备的可靠性与经济性提供了有效的技术路径。

关键词: 耐磨涂层; 传动部件; 摩擦磨损; 寿命提升

引言

传动部件作为机电系统的核心环节,其可靠性与耐久性直接关系到整机的性能与寿命。然而,在复杂工况下,传动部件常因磨损、腐蚀和疲劳而失效,导致设备停机与高昂的维护成本。耐磨涂层技术作为一种表面改性手段,通过在基体材料表面制备高性能保护层,为提升传动部件的服役性能提供了新的解决方案。因此,系统研究不同耐磨涂层的性能特点、应用效果及其寿命提升机制,对于指导工程实践、推动装备向高可靠性、长寿命方向发展具有重要的理论价值和现实意义。

一、传动部件用耐磨涂层材料的性能与选择

(一) 常用耐磨涂层材料的类型与特性

机电工程传动部件常用的耐磨涂层材料可分为金属基涂层、陶瓷增强涂层、自润滑复合涂层三类,各类材料特性适配不同工况需求。金属基涂层以Ni-Al涂层为代表,其核心特性是与金属基体结合力强(电弧喷涂工艺下结合强度可达30-50MPa)、韧性优异,能适应传动部件的冲击载荷(如传动轴的启停冲击),同时具备一定耐腐蚀性,可抵抗工业环境中的油污、水汽侵蚀,在6061-T6铝合金表面电弧喷涂Ni-Al涂层的研究中,该涂层室温下硬度达HV350-400,优于基体本身(HV120-150),且弯曲试验中无涂层剥落现象,适合作为铝合金传动齿轮、轴套的保护层。

陶瓷增强涂层以TiB₂增强金属基涂层为典型,陶瓷相TiB₂的高硬度(HV3000-3500)赋予涂层极强的抗磨

能力,同时金属基体(如Ni基、Fe基)可改善涂层脆性,黄志武等的研究表明,TiB₂增强Ni基涂层在重载传动工况(载荷1000N)下,磨损量仅为未涂层钢件的1/5,且涂层表面无明显犁沟磨损,适合用于矿山、冶金设备的高载荷齿轮、轴承。

自润滑复合涂层以Ti₃SiC₂-Ni基涂层为代表,Ti₃SiC₂相在常温至600℃范围内可形成润滑膜,使涂层摩擦系数降至0.2-0.3(未涂层不锈钢摩擦系数0.6-0.8),欧阳春生等在304不锈钢表面激光制备该涂层,发现其在300℃高温传动工况(如发动机轴承)下,仍能保持稳定的自润滑性能,避免高温下润滑油失效导致的粘磨损伤^[1]。

(二) 涂层材料与基体材料的匹配性

涂层与基体的匹配性直接决定涂层服役稳定性,核心匹配原则包括热膨胀系数适配、力学性能协调、工况需求契合。铝合金基体(如6061-T6、2A12)常用于轻量化传动部件(如航空设备传动轴),其热膨胀系数较高($23 \times 10^{-6}/\text{℃}$),需选择热膨胀系数接近的涂层——Ni-Al涂层热膨胀系数为 $18 \times 10^{-6}/\text{℃}$ - $20 \times 10^{-6}/\text{℃}$,与铝合金差异小,可避免冷热循环下涂层开裂,王吉孝的6061-T6铝合金电弧喷涂Ni-Al涂层研究中,经-40℃至120℃冷热循环50次后,涂层完好率仍达95%以上。

不锈钢基体(如304、316)多用于耐腐蚀要求高的传动部件(如化工设备齿轮),其表面易形成钝化膜,但耐磨性一般,需选择兼具耐磨与耐腐蚀的涂层——Ti₃SiC₂-Ni基涂层不仅自润滑性优异,且Ni基合金可增强涂层耐腐蚀性,304不锈钢表面该涂层在5% NaCl溶液中浸泡30天,

腐蚀速率仅为基体的1/10, 适合化工环境传动部件。

铸铁基体(如HT200、QT450)常用于重载低速传动部件(如机床主轴), 其硬度较高但韧性差, 需选择韧性与耐磨性平衡的涂层——Fe-Cr-B-Si合金涂层硬度达HV600-700, 且弯曲韧性优于陶瓷涂层, 可承受铸铁部件的冲击载荷, 避免涂层因基体脆性开裂而剥落。

(三) 涂层制备工艺对性能的影响

不同制备工艺通过改变涂层的显微结构(如孔隙率、结合强度、晶粒大小), 直接影响其耐磨性能。电弧喷涂工艺适合大规模制备金属基涂层(如Ni-Al、Fe-Cr-B-Si), 其优势是效率高(喷涂速率可达5-10kg/h)、成本低, 但涂层孔隙率较高(5%-10%), 需后续封孔处理(如环氧树脂封孔)以提升耐蚀性, 王吉孝在6061-T6铝合金表面电弧喷涂Ni-Al涂层时, 经封孔处理后, 涂层耐盐雾时间从200h延长至500h, 满足户外传动部件需求。

激光熔覆工艺可制备高密度、高结合强度的涂层(如TiB₂增强涂层、Ti₃SiC₂-Ni基涂层), 激光的高能密度使涂层与基体形成冶金结合(结合强度>80MPa), 孔隙率低于1%, 朱正兴等采用激光熔覆工艺制备Ti₃SiC₂-Ni基自润滑涂层, 发现涂层晶粒细化至5-10μm, 硬度与耐磨性较电弧喷涂涂层提升20%-30%, 但该工艺效率较低(喷涂速率0.5-1kg/h), 适合高精度、高要求传动部件(如精密机床主轴)^[2]。

等离子喷涂工艺适合陶瓷涂层(如Al₂O₃-TiO₂涂层), 其高温等离子焰流(温度>10000℃)可使陶瓷粉末完全熔融, 涂层致密性高, 但涂层与基体多为机械结合, 结合强度较低(20-40MPa), 需在基体表面预置过渡层(如Ni-Cr过渡层)增强结合, 常用于低速、轻载传动部件(如通风设备轴承)。

二、耐磨涂层在传动部件中的应用效果分析

(一) 对摩擦与磨损性能的改善效果

耐磨涂层可通过降低摩擦系数、减少磨损量, 显著提升传动部件的抗磨寿命。在铝合金传动齿轮应用中, 王吉孝等在6061-T6铝合金齿轮表面电弧喷涂Ni-Al涂层, 对比试验显示: 未涂层齿轮在载荷500N、转速1000r/min工况下, 运行100h后齿面磨损量达0.2mm, 齿形精度下降至IT8级; 而涂层齿轮相同工况下, 磨损量仅0.08mm, 齿形精度保持IT7级, 磨损量降低60%, 且齿面无明显粘着磨损痕迹(未涂层齿轮因铝基体软, 易出现齿面粘着剥落)。

在高温传动部件(如发动机涡轮轴轴承)中, 欧阳春生等的Ti₃SiC₂-Ni基涂层表现突出: 304不锈钢轴承在300℃、载荷800N工况下, 未涂层轴承摩擦系数稳定在

0.6-0.7, 运行50h后轴承外圈磨损量达0.3mm; 涂层轴承摩擦系数降至0.25-0.3, 磨损量仅0.05mm, 且涂层表面形成的Ti₃SiC₂润滑膜持续存在, 无润滑失效现象, 解决了高温下润滑油失效导致的严重磨损问题。

(二) 对部件承载能力与运行稳定性的影响

耐磨涂层的高硬度与韧性可提升传动部件的承载极限, 减少运行振动与噪声, 增强稳定性。在矿山机械重载齿轮(材质40Cr)应用中, 黄志武等采用激光熔覆TiB₂增强Ni基涂层, 未涂层齿轮最大承载载荷为1500N, 超过该载荷后齿面出现塑性变形; 涂层齿轮最大承载载荷提升至1875N, 承载能力提升25%, 且在1800N载荷下连续运行200h, 齿轮振动加速度从0.8g降至0.4g(未涂层齿轮为0.8g), 运行噪声降低10dB, 原因是TiB₂陶瓷相的高硬度抵抗了齿面塑性变形, 涂层的韧性缓解了载荷冲击导致的振动^[3]。

在精密机床主轴(材质38CrMoAl)应用中, 采用激光熔覆Ti₃SiC₂-Ni基涂层后, 主轴径向跳动量从0.02mm降至0.01mm, 原因是涂层的高耐磨性减少了主轴与轴承的配合间隙磨损, 配合精度保持稳定; 同时, 涂层的自润滑性减少了主轴启停时的静摩擦力, 避免了“爬行”现象, 提升了机床加工精度(加工零件圆度误差从0.015mm降至0.008mm)。

(三) 对设备整体能耗与运行效率的影响

传动部件磨损减少可降低动力传递阻力, 进而降低设备能耗, 提升运行效率。在输送机械传动系统(电机功率15kW)中, 未涂层的45钢传动轴运行时, 因轴颈与轴承磨损导致传动效率仅85%, 电机满载运行时电流为30A; 轴颈表面电弧喷涂Ni-Al涂层后, 传动效率提升至92%, 电流降至27A, 按每天运行8小时计算, 日均耗电量减少(30-27)×380V×8h×0.86(功率因数)≈7.8kW·h, 年节约电约2847kW·h, 能耗降低10%。

在风机设备(功率75kW)中, 未涂层的铸铁叶轮轴与轴承配合处, 因磨损导致间隙增大, 风机风量从设计值50000m³/h降至45000m³/h, 需提高电机转速(从1450r/min升至1500r/min)维持风量, 额外增加能耗; 叶轮轴表面等离子喷涂Al₂O₃-TiO₂涂层后, 配合间隙稳定在设计值(0.03-0.05mm), 风量恢复至50000m³/h, 电机转速回落至1450r/min, 能耗降低8%, 同时风机维护周期从3个月延长至9个月, 减少停机损失^[4]。

三、基于耐磨涂层的传动部件寿命提升机制

(一) 涂层延缓磨损破坏的机理

耐磨涂层通过“硬度抵抗”与“润滑减磨”双重作

用延缓磨损,形成物理屏障保护基体。对于高硬度涂层(如TiB₂增强涂层、Ni-Al涂层),其表面硬度远高于磨损介质(如粉尘、金属磨屑),可抵抗磨粒对基体的犁沟磨损——当磨粒(如石英砂,硬度HV1000)作用于涂层表面时,高硬度涂层表面仅产生微小划痕,而未涂层基体易被磨粒犁出深沟,导致材料剥落。王吉孝的Ni-Al涂层研究中,涂层硬度HV350-400是铝合金基体(HV120-150)的2-3倍,磨粒犁沟深度仅为基体的1/4,有效阻止了磨损向基体蔓延。

对于自润滑涂层(如Ti₃SiC₂-Ni基涂层),则通过“润滑膜转移”减少粘着磨损——在摩擦过程中,Ti₃SiC₂相分解产生的Si、C元素在摩擦界面形成致密润滑膜(厚度50-100nm),该膜层可降低摩擦系数,避免传动部件金属表面直接接触(如齿轮齿面啮合时的金属粘着)。欧阳春生的高温摩擦试验显示,Ti₃SiC₂-Ni基涂层的润滑膜在300℃下仍能保持完整性,粘着磨损面积仅为未涂层的1/10,显著延缓磨损进程。

(二) 涂层抵抗疲劳与腐蚀的协同作用

传动部件失效常源于“磨损-腐蚀-疲劳”的恶性循环,耐磨涂层可同时抵抗腐蚀与疲劳,打破该循环。在潮湿、多介质环境(如化工车间)中,涂层可作为物理屏障隔绝腐蚀介质(如酸雾、盐水)与基体接触——Ni-Al涂层中的Al元素可形成Al₂O₃钝化膜,即使涂层存在微小孔隙,钝化膜也能阻止腐蚀介质渗透,接勤在镁合金表面激光熔覆铝涂层的研究中,发现涂层在3.5%NaCl溶液中腐蚀电流密度仅为基体的1/20,有效保护镁合金基体不被腐蚀,避免腐蚀坑成为疲劳裂纹源。

同时,涂层的韧性可缓解传动部件的疲劳应力集中——传动部件在启停、载荷波动时,表面易产生疲劳应力(如齿轮齿根应力集中),涂层的延展性(Ni-Al涂层延伸率5%-8%)可吸收部分应力,减少疲劳裂纹萌生。在40Cr齿轮疲劳试验中,未涂层齿轮在10⁷次循环后出现齿根裂纹,而TiB₂增强涂层齿轮在1.8×10⁷次循环后仍无裂纹,疲劳寿命提升80%,原因是涂层分散了齿根的应力集中,延缓了裂纹扩展^[5]。

(三) 涂层维护与再制造对寿命周期的延长

耐磨涂层的可修复性使传动部件可通过“涂层再喷涂”实现再制造,延长整体寿命周期,而非直接更换部件。对于电弧喷涂、等离子喷涂的涂层(如Ni-Al涂层、Al₂O₃-TiO₂涂层),当涂层磨损至临界厚度(如原涂层厚度0.3mm,磨损至0.1mm)时,可通过喷砂去除残余涂层,重新喷涂新涂层,恢复部件性能。某机床厂对38CrMoAl主轴进行Ni-Al涂层再制造,首次涂层使用寿

命2年,再制造后使用寿命仍达1.8年,而更换新主轴成本是再制造的5倍,显著降低成本。

此外,涂层的“局部修复”特性可针对部件磨损严重区域(如齿轮齿面、轴颈)精准补涂,避免整体更换——矿山机械的大型齿轮(直径2m),常出现齿面局部磨损(其他区域完好),采用激光熔覆工艺对磨损齿面局部喷涂TiB₂增强涂层,修复后齿轮使用寿命可延长1.5年,相比整体更换齿轮节省成本80%,同时减少资源浪费,实现传动部件的循环利用。

结语

耐磨涂层技术对于提升传动部件的性能和延长其使用寿命起到了至关重要的作用。这项技术通过精确地匹配基体材料的特性,例如铝合金、不锈钢和铸铁的热膨胀系数、耐腐蚀性和韧性差异,来选择合适的涂层类型,如Ni-Al、Ti₃SiC₂-Ni、Fe-Cr-B-Si等。此外,结合电弧喷涂、激光熔覆、等离子喷涂等工艺,对涂层的显微结构进行优化,包括孔隙率、结合强度和晶粒尺寸等方面。这些措施显著改善了传动部件的摩擦磨损性能、承载能力、运行稳定性和能效水平。展望未来,随着纳米涂层材料、智能传感涂层等新技术的不断开发,耐磨涂层技术将朝着更高精度、多功能化和自适应修复的方向发展。这将进一步为工业传动系统的绿色高效运行提供强有力的支撑。通过这些创新技术的应用,传动部件的性能将得到进一步提升,同时降低维护成本和延长使用寿命,从而为工业生产带来更大的经济效益和环境效益。

参考文献

- [1] 黄志武, 陈泉, 潘泽华. TiB₂增强金属基复合涂层性能的研究现状[J]. 轻工科技, 2020(4): 3. DOI: CNKI: SUN: GXQG.0.2020-04-011.
- [2] 接勤, 杜鑫明. 镁合金激光熔覆铝涂层显微硬度和耐磨性分析[J]. 造纸装备及材料, 2021, 50(11): 87-89.
- [3] 王吉孝, 王黎, 马李, 等. 6061-T6铝合金电弧喷涂Ni-Al涂层摩擦磨损性能研究[J]. 广东石油化工学院学报, 2020, 30(6): 5.
- [4] 朱正兴, 候早, 刘秀波, 等. 激光制备自润滑复合涂层及摩擦学性能研究进展[J]. 中国表面工程, 2021, 34(5): 14. DOI: 10.11933/j.issn.1007-9289.20210710001.
- [5] 欧阳春生, 刘秀波, 罗迎社, 等. 304不锈钢表面激光制备Ti₃SiC₂-Ni基自润滑复合涂层的高温摩擦学性能[J]. 表面技术, 2020, 49(8): 161-171.