复合电镀工艺融合技术在工业构件中的应用

张双双

（贵州天义电器有限责任公司，贵州 遵义 563000）

摘 要 复合电镀是在镀液中加入不溶性固体颗粒或第二相材料，使颗粒与基质金属共沉积，获得具备耐磨、耐蚀、耐高温性能复合镀层的表面处理技术。本文系统梳理了复合电镀的工艺原理、颗粒体系、共沉积机理，分析了其与热处理、化学镀、物理气相沉积等工艺的融合途径，探讨了工业化推广的技术瓶颈，结合机械传动、化工防腐、航空航天领域的典型应用案例，提出工艺优化策略和多维度质量控制方案，旨在为延长构件服役寿命、推动技术规模化应用提供参考。

关键词 复合电镀；工艺融合；工业构件；耐磨涂层；表面强化

中图分类号：TQ153 **文献标志码**：A **DOI**：10.3969/j.issn.2097-3365.2026.29.022

0 引言

工业构件在机械传动、化工过程和航空航天等领域的服役中，由于摩擦、腐蚀、高温复合载荷的作用，表面失效是造成构件提前报废的主要原因。传统的单一镀层已经不能满足苛刻工况下表面性能的要求。复合电镀技术萌芽于20世纪20年代，1949年实现首个工业化专利应用，主要思想就是把固体颗粒加入镀液中，利用电化学共沉积的方式使它均匀地嵌入金属基体里，形成功能复合镀层。经过几十年的发展，该技术已经从单相颗粒嵌入发展到纳米颗粒分散、多颗粒协同、多工艺叠层融合等前沿方向，除镍基、钴基主流复合镀层以外，镀铜打底、铜+化学镀镍过渡再电镀锡铅合金的复合镀层工艺在电子连接件、精密仪表零件方面实现大批量落地，在工业构件表面强化方面有着广阔的发展前景[1-2]。本文从复合电镀工艺的基本原理入手，对颗粒体系的选择、工艺融合的途径以及典型工业应用进行系统的梳理，分析目前的技术瓶颈和质量控制难点，提出面向实际生产的优化策略，为工业领域推广复合电镀工艺融合技术提供参考。

1 复合电镀工艺原理与颗粒体系

复合电镀的共沉积过程属于电化学和流体力学耦合的复杂体系。古列尔米于1972年提出了两步吸附模型，认为颗粒先通过范德华力在阴极表面弱吸附，再在电场力和表面活化作用下转为强吸附，最后被生长中的金属晶体包覆完成嵌入[3]。该模型预测颗粒共沉积量与镀液浓度、过电位和搅拌强度有关[4]。颗粒体系直接影响镀层的功能。碳化硅硬度高，达HV2 400～2 800，化学稳定性好，是目前应用最广的耐磨增强相，与镍基体形成Ni-SiC镀层后硬度可达HV500～650，耐磨寿命提高3倍～8倍[5]。氧化铝颗粒成本低，与镍、铬基体相容性好，适合于中等磨损工况[6]。聚四氟乙烯摩擦系数很低，一般在0.04～0.10之间，嵌入镍基体可形成自润滑镀层，适合密封件和精密滑动副。金刚石硬度为HV7 000～10 000，主要用作精密工模具和超硬涂层，但是成本较高。

电镀工艺参数对颗粒共沉积量影响很大。电流密度在2 A/dm^2～6 A/dm^{2}之间，共沉积量随着密度的增大而先升后降，存在最佳工艺窗口。机械搅拌或者超声辅助可以保持颗粒悬浮，改善共沉积的均匀性，超声功率一般控制在50 W/L～300 W/L。颗粒粒径和镀层厚度要匹配，粒径过大容易增大表面粗糙度，过小分散控制困难。镀液pH值、温度通过改变颗粒表面电荷和共沉积动力学来影响镀层质量。以Ni-SiC体系为例，在pH值为3.5～4.5的时候，SiC颗粒在酸性条件下带正电，在阴极附近富集，从而提高共沉积量。镀液温度一般控制在45 ℃～65 ℃，升温可以加快离子迁移速度和改善颗粒悬浮性，但是温度过高会加快镀液老化和有机添加剂分解，需要在效率和稳定性之间找到平衡[7]。镀锡铅复合层多采用酸性镀液，工艺参数区别于镍系镀层：体系pH控制1.2～2.5，槽温20 ℃～30 ℃，低温环境能够有效抑制锡铅水解，保证石墨、二氧化硅填料稳定悬浮共沉积；预镀铜工艺常规参数：温

作者简介：张双双（1996-），女，本科，助理工程师，研究方向：表面处理（电镀）。

度 25 ℃～ 35 ℃、电流密度 1.0 A/dm^2 ～ 2.5 A/dm^2，薄铜层均匀致密，为后续锡铅复合镀层提供良好基底。

2 复合电镀工艺融合路径与技术现状

复合电镀与后续热处理相结合可以提高镀层的综合性能。200 ℃～ 400 ℃低温退火可以有效地消除沉积内应力，改善镀层和基体的结合力，对厚 Ni-SiC 镀层效果更明显。部分研究者用 500 ℃～ 700 ℃高温扩散退火，使嵌入颗粒和金属基体发生局部界面反应，生成过渡结合层来提高颗粒的把持力，但是要注意高温对基体显微组织的影响。复合电镀和化学镀的叠层复合工艺近些年来受到人们的重视。典型路线是先在基体表面化学镀 Ni-P 打底层，厚度 5 μm～ 10 μm，得到均匀导电基底，再复合电镀沉积功能层 [8]。化学镀打底可以填充基体的微观缺陷，明显改善后续复合镀层的均匀性和孔隙率。另外，复合电镀和物理气相沉积的叠层工艺已经在航空航天领域得到了应用，先用 PVD 沉积 TiN 或者 CrN 硬质薄膜，再复合电镀功能涂层，达到超高硬度和耐蚀性的协同匹配。

镀铜打底 + 锡铅合金复合电镀、镀铜 / 化学镀镍复合中间层 + 锡铅复合电镀是电子构件领域主流融合工艺：第一种工艺为先预镀 3 μm～ 8 μm 薄铜层，铜层填补铸件、压铸基材表面微孔，提升基体导电均匀性，消除基材与锡铅镀层的电偶腐蚀隐患，随后在锡铅镀液中添加石墨、SiO_2 固体颗粒开展复合电镀，颗粒弥散分布于锡铅合金内部，提升镀层抗蠕变与耐磨性能，多用于小型连接器、仪表阀体；第二种采用三层复合结构：基体预镀铜 2 μm～ 5 μm →化学镀 Ni-P 中间层 5 μm～ 10 μm →锡铅颗粒增强复合电镀，致密无孔的 Ni-P 阻隔铜锡互溶，强化防腐能力，表层锡铅复合镀层兼顾可焊性与表面强化效果，大量应用精密电子接插件。但酸性锡铅镀液离子浓度偏高，填料纳米颗粒极易絮凝团聚，普遍采用颗粒表面活性剂预处理、脉冲电镀改善共沉积均匀性。

目前复合电镀所面临的技术问题有四个方面。颗粒团聚控制困难，高离子强度镀液中纳米颗粒容易絮凝，造成共沉积量波动。镀层厚度和颗粒分布均匀性不能同时满足，复杂的构件形面上均匀共沉积仍然是工程难题。多批次工艺重复性不好，由于镀液成分、温度和颗粒粒径的批次不同造成性能数据分散。环保压力不断增大，六价铬电镀受到严格控制，三价铬和无铬替代体系颗粒共沉积性能需要提高；同时锡铅镀层受环保管控逐步推进无铅合金替代研发，成为该细分工艺攻关方向。多颗粒协同复合电镀属于新兴融合方向，在同一个镀液中加入两种以上的功能颗粒，使单一镀层同时具有多种改性效果。典型案例为 Ni-SiC-PTFE 三元复合镀层，SiC 颗粒为硬质耐磨骨架，PTFE 填充硬质相间隙起到固体润滑作用，二者协同可以将摩擦系数降低到 0.10 ～ 0.20 之间，同时保持镀层硬度在 HV450 以上，综合性能优于单一功能镀层。关键问题就是两种颗粒表面电位相差较大，需要分别预处理后再混合加入，用脉冲电流代替直流电流来改善协同嵌入的分布均匀性。

3 复合电镀工艺融合技术在工业构件中的应用案例分析

机械传动件是复合电镀工业应用最广的领域。以齿轮、轴承座为代表的 Ni-SiC 复合镀层典型工艺为氨基磺酸镍镀液，SiC 颗粒粒径 3 μm～ 5 μm，浓度 50 g/L，电流密度 4 A/dm^2，温度 55 ℃，采用机械搅拌和超声辅助相结合的方式。所得镀层显微硬度为 HV580 ～ 620，比纯镍镀层高约 80%，销盘摩擦磨损试验中磨损量是纯镍镀层的 1/5 ～ 1/8。经 Ni-SiC 镀层处理的减速器从动齿轮，在连续运转工况下寿命比未处理件提高 2 倍～ 4 倍。

化工行业的腐蚀磨损工况十分恶劣，对镀层的耐蚀性以及减摩性能都有一定的要求。Ni-PTFE 复合镀层是将 PTFE 颗粒嵌入表面形成自润滑界面，颗粒粒径为 1 μm～ 3 μm，体积分数为 15% ～ 25%，摩擦系数降到 0.08 ～ 0.15，镍基体起腐蚀防护作用 [9]。典型应用有搅拌釜叶片、泵体衬套和阀门密封面。盐雾试验结果表明，25 μm 厚的 Ni-PTFE 镀层在中性盐雾环境中可以耐受 500 h 以上。

航空航天领域用 Co-Cr_3C_2 复合镀层制造涡轮叶片阻尼台、燃烧室关键紧固件等高温耐磨部件 [10]。钴基体有良好的高温强度和抗氧化性，Cr_3C_2 颗粒硬度 HV1 300 ～ 1 500，粒径 5 μm～ 10 μm，在 800 ℃以上仍然保持稳定。高温摩擦磨损试验表明，Co-Cr_3C_2 镀层在 700 ℃时磨损率比纯钴镀层低 60%，氧化增重速率低 40%，可以满足航空发动机核心热端部件的使用要求。

4 复合电镀工艺优化策略与质量控制

颗粒预处理是抑制团聚、提高共沉积均匀性的基础。微米级 SiC、Al_2O_3 颗粒推荐流程为酸洗活化、碱液润湿、超声分散 300 W 持续 30 min、加入分散剂十二烷基硫酸钠或聚乙烯吡咯烷酮 0.5 g/L ～ 2 g/L，最后补入镀液。纳米级颗粒还要进行表面改性，用硅烷偶联剂包覆可以增强颗粒和金属离子之间的静电作

用，防止团聚。PTFE颗粒表面能很低，必须先用阳离子表面活性剂预处理才能保证悬浮稳定性；锡铅体系所用石墨、二氧化硅颗粒采用弱酸浸泡+阴离子分散剂预处理，适配酸性锡铅镀液，预镀铜前工件需要除油、微蚀活化，保障铜层与基体结合牢靠。

镀层性能表征要创建多维评价体系。硬度检测用维氏显微硬度计，载荷25 gf～100 gf，每个样品不少于10个测点取均值。结合力评价采用划痕法Scratch Test，临界载荷Lc2≥20 N为合格。耐磨性用销盘式或者往复磨损试验机在规定的载荷和行程下测定磨损体积或者质量损失。耐腐蚀性按照《人造气氛腐蚀试验 盐雾试验》（GB/T 10125-2021）执行中性盐雾试验[11]，该标准等同于《盐雾（雾）装置操作标准规程》（ASTM B117-19）[12]，考察镀层出现腐蚀点的时间节点。孔隙率用铁试剂点滴法或者电化学交流阻抗谱EIS来评价；锡铅复合镀层额外增加可焊性测试，采用润湿平衡法检验钎焊适配性能，铜底层重点检测孔隙率与结合强度。

工艺过程控制应使用统计过程控制的方法。对电流密度、镀液温度、pH值、颗粒浓度等重要的参数设置控制图，用±2σ为预警线、±3σ为控制线来实现在线监控和异常报警。工艺窗口设计以参数优化实验为依据，给各个关键参数设定了合理的容差范围，电流密度±0.3 A/dm^2、温度±2 ℃、pH±0.2，并建立了颗粒浓度定期补充制度，保证镀液长期稳定运行。镀液长效维护对批次间工艺稳定起决定性作用。建议建立镀液全寿命档案，记录每批颗粒补充量、主盐浓度分析值、添加剂耗用量和产品检验结果，定期用Hull槽试验评价镀液状态。当颗粒共沉积量减少超过10%或者镀层硬度波动超过±50 HV的时候，启动镀液调整程序，依次检查颗粒悬浮状态、pH值、主盐浓度和有机添加剂含量，按照优先级逐项排查并补加。废旧镀液无害化处理要符合《电镀污染物排放标准》（GB 21900-2008）等电镀污染物排放标准，重金属离子经沉淀或者膜分离处理后达标排放；含铅锡铅废液需单独收集、专用工艺回收铅锡，预镀铜废液分类处置，实现重金属资源化回收。

5 结束语

通过梳理复合电镀工艺融合技术在工业构件领域的应用现状可知：依托颗粒种类、粒径与工艺参数的协同调节，复合电镀可实现镀层硬度、耐磨性、自润滑性及高温性能的定向强化，综合性能相较于传统单一镀层有显著提升，多工艺融合的技术路径也为制备超高性能复合镀层提供了可行的工程方案；但颗粒团聚控制难度大、工艺稳定性不足仍是限制其规模化工业化推广的核心瓶颈，需从颗粒预处理、镀液体系调控、工艺在线监测三个方面协同攻关突破。未来，发挥纳米颗粒细化强化与弥散强化优势的纳米复合电镀、适配行业环保合规要求的无氰无铬低氨氮绿色镀液开发，以及依托传感器网络、大数据与机器学习实现工艺参数自适应优化的智能化升级，将是复合电镀技术的重点发展方向，将进一步推动该技术在高端工业构件领域的应用拓展。

参考文献：

[1] Walsh F C, Ponce de Leon C. 金属基复合涂层电沉积包含颗粒在金属层中的综述:一项成熟且多样化的技术[J]. 金属精加工研究所汇刊,2014,92(02):83-98.
[2] Loh C T J, Wells R G A, Walsh F C. 金属沉积物中含有纳米颗粒的复合涂层电沉积[J]. 表面与涂层技术,2006,201(1-2):371-383.
[3] Guglielmi N. 电解槽中惰性颗粒沉积动力学[J]. 电化学学会杂志,1972,119(08):1009-1012.
[4] Wang J, Qian Y, Lü J. 耦合电絮凝-集成固定膜活性污泥法处理低碳氮比养殖废水[J]. 环境技术与创新,2026(42):104913.
[5] 李长春,姜新华,肖祥定,等. Ni-P-WC和Ni-P-SiC复合镀层的耐磨和耐蚀性能比较[J]. 材料保护,2021,54(09):59-62.
[6] Bond A, Timig D. 镀液组成和pH对氧化铝颗粒与镍电共沉积的影响[J]. 表面与涂层技术,2007,201(16-17):7092-7099.
[7] Javali G, Hamar K, Joshi B, 等. 添加剂存在下制备的Ni-SiC复合涂层的微观结构和电化学分析[J]. 材料快报,2014(126):228-231.
[8] Luo H, Leach M, Ben Nai'an Y, 等. 化学镀Ni-P/纳米WC复合涂层的开发及其性能研究[J]. 表面与涂层技术,2015(277):99-106.
[9] 李孝坤,闫凯,刘忻. 工艺参数对钕铁硼化学镀Ni-Mo-P/PTFE复合镀层耐蚀性的影响[J]. 电镀与精饰,2022,44(03):35-39.
[10] 孟令东,张庆,朱晓莹,等. 电流密度对喷射电沉积Co-Ni-Cr_3C_2复合镀层组织及性能的影响[J]. 表面技术,2020,49(05):191-199.
[11] 全国钢标准化技术委员会. 人造气氛腐蚀试验 盐雾试验(GB/T 10125-2021)[S]. 北京:中国标准出版社,2021.
[12] ASTM国际. 盐雾(雾)装置操作标准规程(ASTM B117-19)[S]. 西康舍霍肯:ASTM国际,2019.