

复合电沉积技术制备涂层的生产过程自动化探讨

卢石磊

青岛理工大学复杂网络与可视化研究所

摘要: 利用电沉积技术制备涂层过程存在生产能力低、周期长以及精度低的问题。本文提出并探讨了一种生产过程自动化方案，旨在减少人工参与，提高生产效率。

关键词: 电沉积技术；生产过程自动化；生产效率

Abstract: The process of preparing corrosion-resistant coatings using electrodeposition technology has problems of low production capacity, long cycle time, and low accuracy. This paper proposes and explores the automation scheme for the production process of electrodeposition technology to prepare corrosion-resistant coatings, aiming to reduce manual participation and improve production efficiency.

Keywords: electrodeposition technology; production process automation; production efficiency; coating quality

一、绪论

在现代工业制造中，涂层是一种广泛使用的表面处理技术，可以改善材料表面的防腐、耐磨、耐热、导电、导热等性能。电沉积技术作为一种常用的涂层制备技术，可制备多种体系的力学性能优良的非晶合金涂层，其原理是通过将金属离子还原并沉积到金属表面上，形成一种均匀、致密的金属膜，以提高材料的物理和化学性能。但是在利用电沉积技术进行涂层的制备过程中，需要大量人工干预，控制参数、转运流程，操作复杂^[1]。存在劳动强度大、涂层质量不稳定、影响身体健康的问题。因此，自动化生产成为了制备高质量涂层、提高涂层制备效率的重要途径。

本文旨在探讨电沉积技术制备涂层的生产过程自动化的优势和关键技术，并根据相关文献和实践数据对其进行了分析，以期电沉积技术在现代制造中的广泛应用提供借鉴和参考^[2]。

二、复合电沉积技术制备涂层的基本原理与工艺过程

电沉积技术是一种利用电化学原理低温制备金属复合材料的技术。其基本原理是利用含有扩散元素离子的水溶液体系，在合适的温度范围内，以石墨或需要扩散的金属为阳极，待沉积材料为阴极，在直流或脉冲电流的作用下将有机物或无机物中的金属离子，通过调解电解参数，实现扩散金属在阴极基体上沉积的目的^[3]。

复合电沉积是在传统的电解沉积原理基础上，将惰性粒子（如陶瓷微粒）均匀分散在电解液中，施加电压使这些微粒沉积在正在生长的金属层中，从而将微粒独特的物理及化学性能赋予金属涂层，获得具备优于原涂层的硬度、耐磨性、耐蚀性和润湿性等性能的金属基复合材料沉积层^[4]。

青岛理工大学和青岛博特利特种装备有限公司经过多年潜心研究和技术攻关，成功地研发了“复合电沉积扩散法”（即电沉积扩散法结合复合电沉积法）

制备非晶金属基陶瓷复合涂层及相关装备。利用该套装备，已经成功制备出具有优异耐磨、耐蚀且硬度高的涂层，并在钢铁厂轧钢设备、石油企业抽油设备以及农机厂耕种设备中得到应用。

“复合电沉积法”制备涂层的生产设备如图 1 所示。



图 1 “复合电沉积法”制备涂层的生产线

与之对应的工艺流程图如图 2 所示。

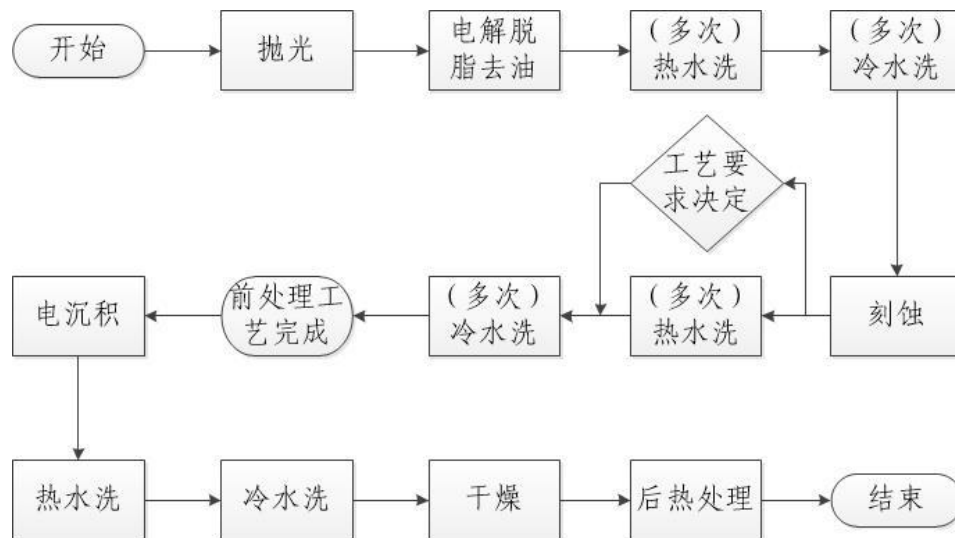


图 2 “复合电沉积法”涂层制备工艺

该工艺流程包含了电沉积过程中的前处理、沉积过程以及后处理过程三个部分。

1) 工件表面清洗

目标工件在进行涂层作业之前，需要经过严格的表面清洗工作，确保表面清洁，流程为：原料金属工件→抛光→电解脱脂→（多次）热水洗→（多次）冷水洗→刻蚀→（多次）热水洗（工艺要求决定）→（多次）冷水洗→前处理工艺完成。

2) 电沉积工艺

“复合电沉积法”涂层制备工艺的核心环节之一为电沉积过程：前处理工艺→电沉积→热水洗→冷水洗→完成产品。

3) 陶瓷复合材料涂层后热处理工艺

在涂层形成后必须采取纯水清洗、干燥以及后热处理。通过对工件进行热处理降低涂层的脆性以及孔隙率、提高涂层与基材的结合强度以及涂层硬度，实现涂层材料的耐蚀及耐磨性能。

综上所述为复合电沉积技术制备涂层的全部工艺过程，需要通过精确控制电沉积过程的电流密度、电解液成分浓度、pH值和温度等工艺参数，才能制备出具有高耐蚀以及高耐磨性能的非晶合金涂层。因此需要花费大量人力不间断地监测和控制过程参数，确保得到合格的涂层产品。

基于自动化控制的高效性和稳定性，可以实现复合电沉积过程参数的精准控制，既可以解放大量人力，又可以提高生产效率，降低生产成本。

三、自动化生产流程设计

自动化生产是一种使用计算机控制系统、传感器和机械臂或驱动器等设备对生产流程进行自动控制和操作的生产方式。利用高效的控制系统将传感器采集到的生产数据汇聚到计算机中，根据设定的参数阈值，触发机械臂或驱动器进行下一步操作，不仅可以实现生产过程的精准控制，还可以大量减少生产过程的人为参与，节省人力投入的同时，提升生产效率。只需要少量的操控人员，即可使生产自动进行^[5]。

目前应用的控制系统主要有可编辑程序逻辑控制器（PLC）和集散控制系统（DCS）两种，其中DCS综合了计算机技术、系统控制技术、网络通讯技术和多媒体技术，将过程控制级和过程监控级进行组合，可以完成复杂的逻辑运算，特别是对一些温度、压力、流量等模拟信号的采集和处理全部实现自动化和模块化，具有分散控制、集中操作、分级处理、配置灵活和组态方便的特点^[6]。

传感器是自动化控制系统的重要组成部分，能够实现涂层制备过程中的实时监控。通过传感器，实时监控复合电沉积过程中的的电流密度、沉积液成分浓度、PH值及沉积液温度等关键参数，并将各项参数回传至计算机控制系统，根据设定的参数阈值，为控制系统做出下一步操作，提供依据。例如，沉积液成分浓度变化，及时进行调整，保证涂层制备过程的质量^[7]。

自动化生产中应用最为广泛的自动化机械装置即为机械臂，首先工业机械臂可以按照控制系统的操作指令，模仿人类的手臂活动操控机械构件，改变构件的位姿，完成作业动作。其次，机械臂技术的快速发展，配合精准的定位系统，其灵活性甚至远超人工操作，在工业生产中已经得到普及，所以机械臂的应用是生

产效率提高和产品质量控制的有效手段，因此具有巨大的经济效益和应用潜力。目前，机械臂已经广泛应用于汽车零件制造、食品生产以及 3D 打印等领域。[3]



图 3 机械臂精确完成零件抓取动作

机械臂不仅在精准度和速度上具有优势，而且可以抓取质量大、形状复杂、温度异常（温度高/低于常温）等具有复杂特性的构件，而且可以在狭小、高处、有害气体或者高爆等人为因素不可及的环境中作业。因此，在现代工业生产中得到了广泛应用。

在复合电沉积工艺中，构件需要反复地在酸性溶液和热水中进行清洗，甚至在后处理环节中需要进行高温处理，因此，机械臂在复合电沉积工艺中的应用，可以轻松解决上述问题，实现复合电沉积过程的自动化生产。图 4 为自动化生产工艺流程图。

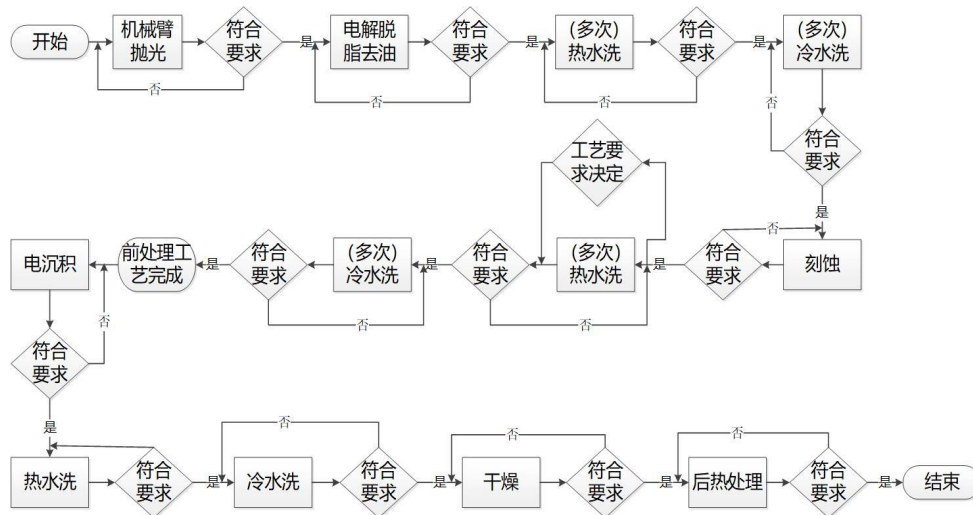


图 4 复合电沉积制备图层自动化生产工艺流程图

相较于自动化生产改进之前，在每一个生产环节之后增加了一个判断逻辑，即控制系统需要根据设定的阈值，判断上一个环节是否都完成，如果符合生产要求则进行下一环节生产，如果不符合，则继续进行上一环节生产。每一个环节均由

机械臂完成，生产过程中不需要人为因素参与，只需要控制人员，在生产开始之前，通过控制终端将各个环节的参数阈值设置正确即可。实现生产过程的自动化，在节约人力成本的同时，还提高了生产效率和产品质量。

五、结论

本文探讨了复合电沉积技术制备涂层的生产过程自动化技术的优势及关键技术。将自动化控制技术与复合电沉积涂层制备工艺结合，可以高效率、高质量、低成本的进行涂层制备，为复合电沉积技术在现代制造中的广泛应用提供借鉴和参考。

参考文献

- [1] 刘兴权. 电沉积技术与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.
- [2] 王成. 涂层镀锌网自动化生产线的设计与开发[D]. 湖北: 湘潭大学, 2016.
- [3] 曹玉鹏, 戴志强, 刘建涛, 等. 金属基复合材料研究进展及展望[J]. 铸造技术, 2017, 38(10): 2319-2322.
- [4] 吴明. 电化学沉积技术的原理与应用[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2020.
- [5] 陈文豪. 自动化涂层制备技术的研究[D]. 广东: 广东工业大学, 2017.
- [6] 刘科均. 浅谈人工智能技术在化工生产自动化控制系统中的应用[J]. 石化技术, 2022, 29(06): 261-263.
- [7] Feng B, Zhang F, Liu M, et al. Fabrication of anti-corrosion coatings with the improved tribological performance via pulse electrodeposition[J]. Journal of Molecular Liquids, 2022, 353:116031.
- [8] 杨乾熙. 基于机械臂的工业生产自动化现状分析[J]. 内燃机与配件, 2020, 319(19): 68-69.