

化学镀工艺对电线电缆金属屏蔽层性能的影响研究

王春兰

建业电缆集团有限公司，河北石家庄，050000；

摘要：本文针对电线电缆制造中金属屏蔽层性能优化问题，研究了化学镀工艺在提升导电性、耐腐蚀性和机械稳定性方面的应用效果。通过对比不同镀层材料和工艺参数，探讨其对屏蔽层电气性能与环境适应性的影响，结合试验结果对其电阻率、附着力及表面均匀性进行分析。研究表明，合理选择化学镀参数及前处理方式可显著提高金属屏蔽层的综合性能，为电缆产品的高质量发展提供工艺依据和实践参考。

关键词：化学镀；电线电缆；金属屏蔽层；导电性能；耐腐蚀性

DOI：10.69979/3029-2727.25.07.015

引言

现代电力传输与通信技术的迅猛发展，电线电缆的性能要求不断提高，金属屏蔽层作为其结构中关键组成部分，承担着电磁干扰抑制、机械保护及导电功能等多重任务。目前，传统物理镀层工艺在性能一致性和抗腐蚀能力方面存在一定局限，化学镀作为一种无需外加电流的金属沉积方法，具备沉积均匀、附着力强、可控性高等优势，逐渐受到行业关注。本文从化学镀的基本原理出发，系统分析不同工艺对屏蔽层电气与物理性能的影响，旨在为提升电缆产品质量提供技术路径和研究参考。

1 化学镀工艺基础及其在电缆制造中的优势

化学镀工艺是一种在不通电的条件下，通过还原剂还原金属离子，在基体表面生成金属镀层的表面处理技术。其主要特点是镀层厚度均匀性好、基材适应性广、沉积速率可控、镀层致密性强，适合复杂几何结构或高精度要求场景。尤其在电线电缆制造中，化学镀能够有效克服电镀在长线形结构上出现的不均匀沉积问题，提高屏蔽层的整体性能与外观质量。

化学镀在电缆屏蔽层制备中的实际应用，主要集中在镍、铜及其合金镀层的形成，尤其是镍镀层因其良好的抗氧化能力和硬度，成为通信与控制电缆的优选材料。此外，化学镀工艺在处理铝合金、铜合金等非标准金属材料时，能够实现良好的界面结合，拓展了新型导体材料在电缆中的应用范围。

整体而言，化学镀在提升电缆金属屏蔽层导电性、稳定性和使用寿命方面具有显著优势，对推动行业技术升级具有重要意义。

2 影响化学镀效果的关键工艺参数

2.1 前处理工艺对镀层质量的影响

在化学镀过程中，前处理是确保镀层均匀沉积和镀层附着力的关键环节。常见的前处理步骤包括脱脂、酸洗、活化等，每一环节都直接影响镀层的质量。如果前处理不充分，镀层的附着力会显著下降，甚至可能导致镀层起泡、脱落或出现电阻异常等质量问题。特别是对于含油较重或表面氧化严重的导体材料，前处理过程尤为重要。脱脂工艺可以有效去除金属表面油污，确保后续镀层能够均匀附着。酸洗则通过去除金属表面的氧化层和锈蚀物质，暴露出干净的金属基体，为镀层提供更好的附着力。而活化过程则是通过化学反应在金属表面生成一层易于镀层沉积的活性层。若这些前处理步骤不到位，金属表面的油污、氧化物、锈蚀等杂质将妨碍镀层的均匀沉积，导致镀层的性能无法满足要求。因此，优化前处理流程，不仅能显著提升镀层的质量，还能延长镀层的使用寿命，减少在实际应用中的失效风险。通过精确控制前处理工艺参数，可以显著提升化学镀层的可靠性，确保其在高温、潮湿或腐蚀性环境中长期稳定运行。

2.2 沉积温度与反应时间对性能的影响

化学镀反应通常为放热反应，沉积温度和反应时间是决定镀层质量和性能的重要因素。温度波动直接影响镀层的沉积速率和晶粒形貌，因此，在化学镀过程中保持温度的稳定性至关重要。研究表明，在 85℃~95℃ 的温度范围内，镀层的致密度和均匀性通常最佳。这一温度区间能够提供足够的动力推动镀层的均匀沉积，同时保持适当的晶粒细化，从而确保镀层具有良好的力学性

能和导电性能。然而,温度过高时,镀层可能出现层间结构粗糙或裂纹,进而影响材料的整体性能,尤其是在高频电气设备中,层间结构的不均匀性可能导致电气性能的恶化。反应时间同样对镀层的厚度、均匀性和性能有重要影响。沉积时间过短可能导致镀层过薄或沉积不完全,而沉积时间过长则可能造成镀层过厚,增加生产成本。因此,沉积温度和反应时间的合理控制,不仅要考虑镀层的厚度要求,还需要平衡生产效率与成本。通过优化这两个参数,可以在保证镀层质量的前提下,实现更高效的生产过程,确保镀层在实际应用中发挥出最佳性能。

2.3 金属离子浓度与还原剂配比的调控

金属离子浓度和还原剂的配比在化学镀过程中起着决定性作用,直接影响镀层的成分比例、沉积速率以及镀层的完整性。金属离子浓度控制着镀层中金属成分的比例,浓度过低时可能导致沉积不完全或镀层薄弱,无法满足使用要求;浓度过高时,可能导致镀层不均匀,甚至出现沉积过快,形成不规则的镀层结构。同样,还原剂的种类和浓度对反应的速度和镀层的质量也起着关键作用。还原剂能够还原金属离子,使其沉积到基材上,不同种类和浓度的还原剂会影响沉积反应的速度和均匀性。过量的还原剂会导致沉积反应过快,产生不均匀的镀层,甚至可能导致镀层内的缺陷,影响其物理性能。保持 pH 值的稳定性也是确保化学镀反应稳定进行的重要条件,pH 值过高或过低都会改变金属离子和还原剂的活性,导致沉积反应不稳定。因此,合理控制金属离子浓度、还原剂配比和 pH 值,不仅能够保证镀层的均匀性和致密度,还能确保镀层的高质量和长寿命。这种精细化的调控能够广泛应用于电子、通信、电力等行业中的高性能金属镀层需求。

3 化学镀层在性能方面的表现分析

3.1 电导率与接触电阻测试

化学镀层在电缆及其他电子组件的制造中,起到至关重要的作用,尤其是在电导率和接触电阻方面。电导率是衡量导体材料能否有效传输电流的关键性能指标,而接触电阻则决定了不同接触点之间的电流传输效率。化学镀层,尤其是在厚度均匀和结构连续的条件下,能够显著降低电缆屏蔽层的整体电阻值,确保信号传输过程中更低的能量损耗,尤其对于高频信号传输的要求尤为重要。为进一步评估化学镀层的导电性能,采用四探

针法测量了不同化学镀工艺处理样品的电导性。实验结果表明,镀层的含镍量和致密度是影响其电导性的重要因素。含镍量较高且致密度大的镀层表现出更优异的电导性能,这表明镍元素能够有效增强镀层的导电性。此外,镀层的结构连续性对电导性也起着重要作用。结构连续且致密的镀层能有效抑制高频信号损耗,减少信号在传输过程中的衰减,尤其是在高频电缆和微波传输系统中至关重要。因此,在进行化学镀工艺设计时,优化镀层的组成成分和工艺参数,以提高镀层的电导性,将对提高电缆和电子元件的整体性能起到关键作用。

3.2 耐腐蚀性与抗氧化能力评估

电缆屏蔽层的耐腐蚀性和抗氧化能力是其长期稳定运行的重要保障。尤其是在湿气或腐蚀性环境中,电缆的金属材料容易发生氧化或腐蚀,从而影响其电性能,甚至导致电缆的故障。因此,确保电缆屏蔽层具备足够的抗腐蚀能力,能够有效延长电缆的使用寿命。为了评估不同镀层样本的抗腐蚀性能,采用中性盐雾试验对化学镀镍层进行了 48 小时的暴露测试。结果表明,化学镀镍层在 48 小时盐雾条件下未出现明显的腐蚀痕迹,且相较于普通铜层,化学镀镍层展示了更强的抗腐蚀性能。这是因为镀镍层能够形成一层致密且均匀的保护膜,有效阻止了氧气和水分的渗透,从而减缓了金属的腐蚀进程。此外,镀镍层在防止氧化方面具有独特的优势,它能够有效减少表面氧化层的形成,并提高镀层的抗氧化性,尤其在高湿度环境中表现突出。这种耐腐蚀性能的提升对于电缆在潮湿或腐蚀性环境中的使用至关重要,能有效防止屏蔽层的性能衰减和使用寿命的缩短。因此,在电缆的设计和生产过程中,选择合适的化学镀工艺和材料,尤其是采用高质量的镀镍层,可以大大增强电缆在恶劣环境下的可靠性和稳定性,保障其长期稳定运行。

3.3 机械附着力与柔韧性检验

在化学镀过程中,良好的附着力是确保镀层稳定性和长期使用性能的基础。镀层的附着力直接影响到电缆的机械性能、柔韧性和使用寿命。为评估化学镀层的附着力,通常通过剥离试验和弯折测试来检验镀层与基材之间的结合力和耐久性。研究发现,前处理工艺的充分与否、沉积温度的控制、以及反应时间的掌握对镀层附着力有着重要影响。在充分的前处理下,如脱脂、酸洗、活化等步骤,能够有效去除金属表面的氧化物和油污,

为镀层的均匀沉积提供良好的基础。温度控制方面,如果镀层沉积温度过高或过低,可能导致镀层表面产生裂纹或不均匀沉积,从而降低附着力。在适当的温度和反应条件下,镀层与基材之间能够形成紧密的结合力,从而确保镀层在电缆使用过程中的机械稳定性和柔韧性。测试结果表明,在前处理充分且温度控制得当的情况下,镀层与基材之间的结合力强,不易剥落,能够承受弯曲、拉伸等复杂的机械变形,而不会对镀层造成损害。这种优良的附着力和柔韧性,确保了电缆在弯曲、扭转等复杂工作环境中的稳定性和可靠性。对于需要高机械强度和柔韧性的电缆产品,尤其是在数据传输、汽车电缆和航空电缆等领域,镀层的附着力和柔韧性是确保其长期安全运行的核心因素。因此,通过优化化学镀工艺和材料选择,可以显著提升电缆镀层的综合性能,满足高端应用场景对电缆的严苛要求。

4 不同化学镀材料的性能对比研究

4.1 化学镀镍与镀铜工艺对比

在电气性能方面,镀铜层的导电性略优于镍层,但耐腐蚀性与耐磨性远不及镍层。因此,在高电流但环境温和的应用中,可优先考虑镀铜工艺;而在高湿度、高腐蚀环境下,化学镀镍具有更高的稳定性与使用寿命,适合重工业和户外线路电缆。

4.2 合金化镀层性能表现

将两种金属元素共同沉积形成合金镀层,如镍-磷合金、镍-钨合金,能兼顾导电性与机械强度。实验表明,适当调整合金比例可获得电阻低、结构致密、耐高温性能优异的屏蔽层,尤其适用于复杂工况下的特种电缆产品制造。

4.3 复合镀层工艺的应用前景

近年来,复合化学镀技术逐步应用于电缆制造领域,采用多层结构(如内镀铜、外镀镍)提升整体性能。此类工艺结合了不同金属的优势,形成多功能屏蔽层结构,具有优良的屏蔽效果、电气稳定性和环境适应性,是未来电缆屏蔽层发展的重要方向之一。

5 化学镀工艺在实际制造中的优化策略

在电缆制造实践中推广化学镀工艺,需要从材料选择、工艺流程标准化和环保要求等多个方面进行系统优

化。首先,在材料选择方面应兼顾性能与成本,选用合适的基体金属与镀液配方。其次,制定规范的操作流程,确保各环节参数稳定可控,避免人为因素导致工艺波动。再者,加强废液回收与处理措施,实现绿色制造,减少对环境的影响。

此外,推动自动化与智能控制技术的融合,能够有效提升化学镀工艺的稳定性 and 生产效率。随着智能化技术的进步,传统的化学镀工艺正在逐步向自动化、精确化方向发展。通过引入在线监测和反馈调节系统,可以对镀液的浓度、温度、pH值等关键参数进行实时监控和自动调节,确保这些工艺参数始终保持在最佳状态。这样一来,不仅可以有效避免因人为操作不当引起的参数波动,还能通过实时调整保持镀层质量的一致性,减少生产过程中的不良品率。此外,智能控制系统还能够通过数据采集和分析,对生产过程中的每一环节进行优化,进一步提升产品的一致性和成品率,确保每一批次电缆都符合高质量标准。

6 结论

化学镀工艺在电线电缆金属屏蔽层性能提升方面展现出显著优势。通过系统研究发现,合理控制工艺参数可有效提高导电性、耐腐蚀性与附着强度,不仅优化了电缆的电气性能,也增强了其在复杂环境中的稳定性。未来,随着新型合金与复合镀层技术的发展,化学镀将在特种电缆制造领域发挥更大作用。建议行业在实际应用中进一步推动智能化、绿色化转型,构建高效、安全、可持续的工艺体系。

参考文献

- [1] 李强,吴志勇. 化学镀镍技术在电缆导体屏蔽层中的应用研究[J]. 电线电缆,2021(03):45-48.
- [2] 张红梅,刘建. 化学镀铜层在高频电缆中的性能比较分析[J]. 材料导报,2020(08):122-125.
- [3] 王立军,胡晓云. 不同镀层对电缆屏蔽效能的影响研究[J]. 电工技术学报,2019(11):89-94.
- [4] 赵晨光,陈志伟. 复合化学镀在电缆金属层制造中的实践探索[J]. 现代电力,2022(06):71-74.
- [5] 刘思远,徐志国. 镀镍与合金镀层在工业电缆中的性能对比研究[J]. 表面技术,2023(05):133-137.