

现代化工

无铬钝化液的使用工艺参数优化及工业化应用前景

黄显士

浙江万众新材料有限公司 325024

【摘要】随着环保法规对传统铬酸盐钝化液的限制日益严格，无铬钝化液成为金属表面处理领域的重要发展方向。本论文聚焦无铬钝化液使用工艺参数优化及工业化应用前景，通过系统研究工艺参数对钝化效果的影响，设计并开展优化实验。实验结果表明，在特定温度区间、合理的钝化时间及适宜的溶液浓度下，无铬钝化膜的耐腐蚀性、膜层质量等性能显著提升。同时，深入分析无铬钝化液的市场需求、技术发展趋势，探讨当前工业化应用面临的成本、性能等挑战及应对策略，为无铬钝化液的大规模推广应用提供理论与实践依据，展望其在未来金属表面处理领域广阔的发展前景。

【关键词】无铬钝化液；工艺参数优化；工业化应用；耐腐蚀性；发展前景

Optimization of process parameters and industrial application prospect of chromium free passivation solution

Huang Xianshi

Zhejiang Wan Zhong New Material Co., LTD. 325024

【Abstract】As environmental regulations increasingly restrict traditional chromate passivates, chromium-free passivates have become an important direction for the development of metal surface treatment. This paper focuses on optimizing process parameters and exploring industrial application prospects for chromium-free passivates. Through systematic research into the impact of process parameters on passivation effects, design and optimization experiments were conducted. The experimental results show that under specific temperature ranges, reasonable passivation times, and appropriate solution concentrations, the corrosion resistance and film quality of chromium-free passivation films are significantly improved. Additionally, this paper delves into the market demand for chromium-free passivates and technical trends, discussing the challenges and strategies for current industrial applications in terms of cost and performance. It provides theoretical and practical support for the large-scale promotion and application of chromium-free passivates, and looks forward to their broad development prospects in the future field of metal surface treatment

【Key words】chromium-free passivation solution; process parameter optimization; industrial application; corrosion resistance; development prospect

引言

随着全球环保意识的不断增强以及对可持续发展的日益重视，铬酸盐钝化液的严重弊端逐渐凸显。六价铬作为一种强致癌物质，对人体健康和生态环境构成了巨大威胁。在铬酸盐钝化液的生产、使用以及后续含铬废料处理等各个环节中，六价铬都有可能通过空气、水和土壤等途径进入生态系统，进而对人类健康造成危害。长期接触六价铬会引发呼吸系统疾病、皮肤过敏甚至癌症等严重健康问题，对从事相关行业的工作人员以及周边居民的生命安全构成了直接威胁。在生态环境方面，含铬废水若未经有效处理直接排放，会导致水体和土壤的污染，影响水生动植物的生存，破坏土壤结构和肥力，对整个生态平衡产生深远的负面影响。

基于铬酸盐钝化液的这些危害，许多国家和地区纷纷出台了严格的环保法规和指令，对六价铬的使用和排放进行了极为严格的限制。在这样的背景下，研发和应用无铬钝化液，

以替代传统的铬酸盐钝化液，已成为金属表面处理行业实现可持续发展的必然选择。

无铬钝化液不仅能够满足日益严格的环保要求，有效减少对环境的污染和对人体健康的危害，还在推动金属表面处理行业的技术进步和产业升级方面发挥着重要作用。随着科学技术的不断发展，各种新型的无铬钝化技术和产品不断涌现，如钼酸盐钝化、锆酸盐钝化、硅酸盐钝化以及有机-无机复合钝化等。这些无铬钝化液通过创新的配方设计和独特的成膜机制，在提高金属耐腐蚀性、附着力、耐热性等性能方面取得了显著进展，部分产品甚至能够达到或超越铬酸盐钝化液的性能水平。无铬钝化液的应用还为金属表面处理行业带来了新的发展机遇，促进了相关产业的创新和发展，推动了整个行业向绿色、环保、可持续的方向转型。

一、无铬钝化液使用工艺参数优化

1.1 工艺参数对钝化效果的影响

1.1.1 温度的影响

温度在无铬钝化液的反应过程中扮演着极为关键的角色,它对钝化膜的形成速率、结构以及性能都有着显著的影响。从化学反应动力学的角度来看,温度的升高会增加分子的动能,使反应物分子之间的有效碰撞频率增大,从而加快化学反应速率。在无铬钝化过程中,这意味着钝化液中的成分与金属表面的反应速度加快,能够在更短的时间内形成钝化膜。

1.1.2 时间的影响

钝化时间是影响钝化膜完整性和耐腐蚀性的另一个重要因素,它与钝化膜的形成过程密切相关。在钝化初期,当金属与无铬钝化液接触时,钝化液中的活性成分迅速与金属表面发生反应,开始形成钝化膜的初始层。此时,钝化膜的厚度较薄,对金属的保护作用相对较弱。随着钝化时间的延长,钝化反应持续进行,钝化膜不断生长和加厚。在这个过程中,钝化膜中的各种成分逐渐相互作用,形成更加稳定和致密的结构,从而提高了钝化膜对金属的保护能力。

1.1.3 浓度的影响

钝化液浓度是决定钝化膜性能的关键因素之一,它与钝化膜的质量、结构和耐腐蚀性之间存在着密切的关系。钝化液中的有效成分浓度直接影响着钝化反应的速率和程度,进而影响钝化膜的形成和性能。

1.2 工艺参数优化实验设计

为了全面探究钝化温度、时间、pH 值以及钝化液浓度等工艺参数对钝化膜性能的影响,并确定最佳的工艺参数组合,本实验采用正交试验设计方法。正交试验设计是一种高效的多因素实验设计方法,它能够通过合理地安排实验,在较少的实验次数下获取全面的信息,找出各因素对实验指标的影响规律。

根据前期的预实验和相关文献研究,确定各工艺参数的取值范围。钝化温度设定为 30° C、40° C、50° C 三个水平,这是因为在这个温度范围内,无铬钝化液的反应活性适中,既能够保证一定的反应速率,又不至于因温度过高导致成分分解或膜层质量下降;钝化时间设置为 3min、5min、7min 三个水平,以研究不同反应时间对钝化膜形成和性能的影响;pH 值分别控制在 4.0、5.0、6.0,通过调节 pH 值来改变钝化液的酸碱性,进而影响钝化反应的进行;钝化液浓度设定为 5g/L、10g/L、15g/L 三个水平,以探究不同浓度下钝化液中有效成分对钝化膜性能的作用。

按照 L₉(3⁴)正交表进行实验设计,共安排 9 组实验,每组实验重复 3 次,以提高实验结果的可靠性和准确性。在每组实验中,固定其他因素不变,仅改变一个因素的水平,然后对钝化膜的各项性能指标进行测试和分析。通过对实验数据的综合分析,确定各因素对钝化膜耐腐蚀性、附着力、硬度等性能影响的主次顺序,以及各因素的最佳水平组合,从而实现无铬钝化液工艺参数的优化。

1.3 实验结果与分析

通过综合分析各工艺参数对钝化膜性能的影响,确定了

最佳的工艺参数范围。在钝化温度为 40 - 50° C、钝化时间为 5 - 7min、pH 值为 4.0 - 5.0、钝化液浓度为 10 - 15g/L 的范围内,能够获得综合性能较为优异的钝化膜。在该参数范围内,钝化膜具有较长的耐盐雾腐蚀时间、较高的腐蚀电位、较低的腐蚀电流密度、较大的电荷转移电阻以及良好的附着力,能够有效地保护金属基体,提高金属的耐腐蚀性。

三、无铬钝化液工业化应用前景分析

3.1 市场需求分析

行业发展趋势为无铬钝化液创造了广阔的市场空间。随着制造业的高端化、智能化发展,对金属材料的表面性能要求越来越高。无铬钝化液不仅能够满足环保要求,还在提升金属表面性能方面具有独特优势。在汽车制造行业,为了提高汽车的整体质量和安全性,对车身零部件的耐腐蚀性和表面硬度提出了更高的要求。无铬钝化液能够在金属表面形成一层致密的保护膜,有效提高零部件的耐腐蚀性和耐磨性,延长汽车的使用寿命。随着新能源汽车产业的快速发展,对电池电极材料、电机外壳等金属部件的表面处理要求也日益严格。无铬钝化液可以满足这些特殊要求,同时不会对环境造成污染,因此在新能源汽车领域具有巨大的市场潜力。在航空航天、电子信息等高科技行业,对金属材料的表面性能和可靠性要求极高,无铬钝化液的高性能和环保特性使其成为这些行业的理想选择。

3.2 技术发展趋势

在成分优化方面,未来无铬钝化液将朝着多元复合的方向发展。单一成分的无铬钝化液往往在某些性能上存在局限性,而通过将多种成分进行复合,可以充分发挥各成分的优势,实现性能的协同提升。将钼酸盐与稀土金属盐复合,钼酸盐能够在金属表面形成一层具有一定耐腐蚀性的膜层,而稀土金属盐则可以利用其独特的电子结构和化学性质,增强钝化膜的抗氧化性和自修复性能。这种复合体系能够使钝化膜在复杂的环境下保持更好的稳定性和防护性能。

在工艺改进方面,智能化和自动化将成为重要的发展趋势。随着工业 4.0 和智能制造理念的不断推进,无铬钝化工艺将逐渐实现智能化控制。通过传感器实时监测钝化过程中的温度、pH 值、钝化液浓度等关键参数,并将这些数据传输到控制系统中。控制系统根据预设的算法和模型,自动调整工艺参数,确保钝化过程始终在最佳条件下进行。

3.3 面临的挑战与应对策略

3.3.1 挑战分析

尽管无铬钝化液在环保和性能方面展现出诸多优势,且具有广阔的工业化应用前景,但在实际推广和应用过程中,仍面临着一系列严峻的挑战。

成本问题是阻碍无铬钝化液大规模应用的重要因素之一。无铬钝化液的生产成本普遍较高,这主要源于其原材料和生产工艺的特性。许多无铬钝化液中使用的关键成分,如稀土金属盐、高性能有机缓蚀剂以及一些特殊的添加剂,其

本身的价格就相对昂贵。稀土金属的提取和精炼过程复杂,导致稀土金属盐的成本居高不下。

性能方面,虽然无铬钝化液在不断发展进步,但与传统铬酸盐钝化液相比,在某些性能上仍存在一定差距。在耐腐蚀性方面,部分无铬钝化液形成的钝化膜在极端环境下的防护性能不如铬酸盐钝化膜。在高温、高湿且含有强腐蚀性介质的环境中,一些无铬钝化膜可能会出现腐蚀加速、膜层破损等问题,无法像铬酸盐钝化膜那样长时间有效地保护金属基体。

技术成熟度也是一个不容忽视的问题。目前,无铬钝化技术仍处于不断发展和完善的阶段,其稳定性和可靠性还需要进一步提高。不同厂家生产的无铬钝化液质量参差不齐,这给用户在选择和使用过程中带来了困扰。由于无铬钝化液的配方和生产工艺较为复杂,一些小型企业可能缺乏专业的研发和生产能力,导致产品质量不稳定。

3.3.2 应对策略

针对无铬钝化液面临的诸多挑战,需要从多个方面采取有效的应对策略,以推动其在工业化应用中的进一步发展。

为降低成本,一方面可通过优化原材料采购渠道来实现。企业可以与原材料供应商建立长期稳定的合作关系,通过批量采购、签订长期合同等方式,争取更优惠的价格。对于稀土金属盐等关键原材料,企业可以联合其他使用企业,共同组成采购联盟,增强在采购市场上的议价能力,从而降低原材料采购成本。企业还可以积极探索原材料的替代方案。研究开发使用成本较低但性能相近的原材料来部分或全部替代价格昂贵的成分。寻找价格相对较低的有机缓蚀剂替代品,或者探索新型的无机材料来替代部分稀土金属盐,在保证钝化液性能的前提下,降低生产成本。

在提高性能方面,深入开展技术研发是核心。科研机构和企业应加强合作,加大对无铬钝化液技术的研发投入,深入研究钝化液的成分和工艺对钝化膜性能的影响机制,通过优化配方和工艺,提高钝化膜的综合性能。通过调整有机缓蚀剂和无机金属盐的比例,开发新型的复合钝化体系,充分发挥各成分的协同作用,提高钝化膜的耐腐蚀性、附着力和硬度等性能。建立完善的质量控制体系也至关重要。生产企业应制定严格的质量标准和检测流程,对无铬钝化液的生产过程进行全程监控,确保产品质量的稳定性和一致性。

为提升技术成熟度,加强技术研发合作是关键举措。科

研机构、高校和企业应建立紧密的合作关系,整合各方资源,共同开展无铬钝化技术的研发和创新。科研机构 and 高校在基础研究方面具有优势,可以深入研究无铬钝化的作用机理、成膜过程等基础理论问题,为技术创新提供理论支持。企业则在实际应用和生产方面具有丰富的经验,能够将科研成果快速转化为实际产品,并根据市场需求反馈,推动技术的进一步改进和完善。通过产学研合作,加速技术的研发和推广应用,提高无铬钝化技术的成熟度和稳定性。加强技术培训和人才培养也是必不可少的。企业应定期组织员工参加无铬钝化技术的培训课程,提高员工对无铬钝化工艺的理解和操作技能,确保生产过程的稳定运行。高校和职业院校可以开设相关专业和课程,培养专门的无铬钝化技术人才,为行业的发展提供人才支持。

四、结论

本研究围绕无铬钝化液展开了全面且深入的探索,在工艺参数优化和工业化应用前景分析方面取得了一系列具有重要意义的成果。

通过正交试验设计和对大量实验数据的深入分析,确定了以钼酸盐和有机缓蚀剂复合的无铬钝化液的最佳工艺参数范围。在钝化温度为 $40-50^{\circ}\text{C}$ 、钝化时间为 $5-7\text{min}$ 、 pH 值为 $4.0-5.0$ 、钝化液浓度为 $10-15\text{g/L}$ 的条件下,能够获得综合性能较为优异的钝化膜。在此参数范围内制备的钝化膜,在耐盐雾腐蚀时间、腐蚀电位、腐蚀电流密度、电荷转移电阻以及附着力等关键性能指标上表现出色,能够有效地保护金属基体,显著提高金属的耐腐蚀性。

研究也发现无铬钝化液工业化推广仍面临挑战。一方面,原材料成本较高导致产品价格缺乏竞争力,限制了其大规模应用;另一方面,部分特殊环境下的耐腐蚀性能与传统铬酸盐钝化液仍存在差距。未来研究需聚焦新型环保原料开发与复合配方优化,进一步降低成本并提升性能;同时,加强产学研合作,完善无铬钝化技术标准体系,推动行业规范化发展。随着环保政策的持续收紧与技术创新的深入推进,无铬钝化液凭借其绿色环保优势,必将在金属表面处理领域占据主导地位,为工业可持续发展提供有力支撑。

参考文献

- [1]张峰,李勇,赵静.钼酸盐体系无铬钝化液的优化及性能研究[J].表面技术,2021,50(7):120-127.
- [2]刘敏.稀土盐基无铬钝化液的制备及其在铝合金表面的应用[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2022.
- [3]王涛,陈立波,周明.硅烷-钛盐复合无铬钝化液的制备与性能[J].材料保护,2023,56(4):85-91.
- [4]朱晓东,吴昊,李华.无铬钝化液在汽车零部件表面处理中的应用[J].电镀与涂饰,2024,43(12):902-908.
- [5]陈建军,杨丽,黄伟.温度与时间对无铬钝化膜层性能的影响规律研究[J].表面工程与再制造,2023,23(3):32-38.