

承荷探测电缆铠装钢丝热涂防锈脂工艺的探讨

孙如全

江苏华能电缆股份有限公司 江苏高邮 225699

DOI:10.12238/ems.v7i6.13835

[摘要] 承荷探测电缆铠装钢丝的防锈处理是保障电缆在复杂工况下稳定运行的关键。热涂防锈脂工艺以其独特的防护优势,成为当前行业的主流技术。本文围绕该工艺展开系统研究,深入分析防锈脂作用机制与热涂过程物理化学变化,探究温度、钢丝表面状态及配方等核心影响因素。结合实际生产案例与多维度性能检测数据,对比不同工艺效果,剖析现存问题。通过设备升级、配方优化等改进策略,显著提升防锈效果与生产效益,为该工艺的进一步发展与应用提供详实的理论与实践依据。

[关键词] 承荷探测电缆; 铠装钢丝; 热涂防锈脂工艺; 工艺优化

1. 热涂防锈脂工艺核心机理

1.1 防锈脂多元防护体系解析

防锈脂的防护性能源于其多元成分协同构建的防护体系。基础油作为体系骨架,为其他添加剂提供分散载体,其黏度与流动性直接影响防锈脂的涂覆效果。例如,在低温环境下,采用低凝点合成基础油,可确保防锈脂在 -20°C 仍保持良好流动性,实现均匀涂覆。缓蚀剂是体系的核心防护成分,其分子结构中的极性基团能定向吸附于钢丝表面,形成纳米级保护膜。含氮杂环缓蚀剂在酸性环境中,可使钢丝腐蚀速率降低90%以上。抗氧化剂则有效抑制高温热涂过程中的氧化反应,延长防锈脂使用寿命。实验表明,添加复合抗氧化剂后,防锈脂的氧化诱导期从4小时提升至8小时。

1.2 热涂过程动态变化机制

热涂防锈脂过程是一个复杂的动态变化过程。当铠装钢丝浸入 $120-130^{\circ}\text{C}$ 的熔融防锈脂槽时,脂体迅速润湿钢丝表面,凭借高温下的良好流动性填充表面微观孔隙。随着钢丝牵引出脂槽,在风冷与环境散热作用下,防锈脂温度快速下降,30秒内从 100°C 降至 40°C ,逐渐凝固形成连续防护膜。这一过程中,缓蚀剂与钢丝表面发生化学反应,形成 $\text{Fe}-\text{N}$ 、 $\text{Fe}-\text{S}$ 等化学键,增强膜层附着力。通过扫描电镜观察发现,热涂后钢丝表面防护膜的孔隙率仅为5%,远低于冷涂工艺的15%,有效阻隔了腐蚀介质的侵入。

1.3 工艺对比优势与应用场景

相较于冷涂、电镀等防锈工艺,热涂防锈脂工艺在防护性能与适用性上优势显著。在膜层均匀性方面,热涂工艺可使防锈膜厚度误差控制在 $\pm 3\%$,而冷涂工艺误差达 $\pm 10\%$ 。在复杂结构防护上,热涂工艺能完全渗透至钢丝绞合缝隙,形成全包裹防护。以海洋石油平台探测电缆为例,采用热涂防锈脂工艺的铠装钢丝,在盐雾环境下使用5年后,锈蚀面积占比仅2%,而采用电镀工艺的钢丝在3年后锈蚀面积已超15%。这种优异的防护性能,使其在深海、高盐、潮湿等极端环境的电缆防护中得到广泛应用。

2. 工艺关键影响因素深度探究

2.1 温度参数的精准调控要点

在热涂防锈脂工艺中,温度如同掌控全局的“指挥棒”,其细微变化都会在防锈膜质量与生产效率上产生连锁反应。防锈脂的熔化温度与滴点密切相关,需精准控制在滴点以上 $10-20^{\circ}\text{C}$ 区间,这是确保脂体流动性的关键。当熔化温度低于 120°C 时,分子间作用力增强,脂体黏度急剧上升,在涂覆过程中难以均匀铺展,经实际生产统计,此时漏涂率高达15%,部分钢丝表面无法形成完整防护膜。而温度一旦超过 140°C ,防锈脂中的缓蚀剂成分会因高温发生分解,某型号缓蚀剂在 150°C 下持续加热1小时,分解率可达30%,直接削弱防锈性能。涂覆温度同样不容忽视。在 105°C 的适宜涂覆

温度下,防锈脂分子活性适中,能够充分与钢丝表面的微小凸起和孔隙结合,形成的防锈膜附着力经测试达到 5.2 N/mm^2 ;当温度降至 80°C 时,脂体流动性变差,难以完全浸润钢丝表面,附着力骤降至 3.1 N/mm^2 。

2.2 钢丝表面预处理技术剖析

钢丝表面状态是防锈脂附着的根基,预处理工艺直接决定了最终的防护效果。“碱洗-酸洗-超声波清洗”组合工艺通过层层递进的方式,深度清洁钢丝表面。碱洗环节利用氢氧化钠等碱性溶液,可有效溶解钢丝表面的动植物油脂;酸洗则使用盐酸或硫酸,去除铁锈等金属氧化物;最后的超声波清洗利用高频振动产生的空化效应,将残留杂质从细微孔隙中剥离,最终使表面清洁度达到Sa2.5级,即肉眼可见的金属光泽,且残留污渍面积不超过5%。

喷砂工艺对钢丝表面粗糙度的塑造起着关键作用。采用 $0.3-0.5\text{ mm}$ 粒径棕刚玉砂,在 0.5 MPa 喷射压力下,高速砂粒撞击钢丝表面,形成无数微小凹坑和凸起。经激光共聚焦显微镜测量,此时钢丝表面粗糙度 R_a 值可达 $6.3\text{ }\mu\text{m}$,这种微观结构大幅增加了钢丝与防锈脂的接触面积,经拉拔试验验证,附着力相比未处理钢丝提升了40%。值得注意的是,预处理后的钢丝会迅速发生氧化,若2小时内未完成热涂,表面形成的氧化膜会使附着力下降25%左右,严重影响防锈效果。

2.3 防锈脂配方优化路径探索

防锈脂配方的优化是一个多成分协同作用的复杂过程。基础油作为配方的“骨架”,其性能需与工作环境高度适配。在高温环境下,PAO合成基础油凭借180的高黏度指数脱颖而出,相比黏度指数仅100的矿物油,在 150°C 高温持续工作24小时后,PAO合成基础油的黏度保持率为85%,而矿物油仅为50%,确保了防锈脂在高温下的流动性和涂覆性能。

缓蚀剂的复配能产生“ $1+1>2$ ”的协同效应。将苯并三氮唑与十二烷基胺按特定比例混合,前者通过 π 电子云与金属表面形成化学吸附,后者则通过长碳链在表面形成疏水层。在中性盐雾试验中,采用该复配缓蚀剂的防锈脂,防锈时间从240小时延长至500小时,防护能力显著提升。抗氧化剂的添加量需精准把控,当复合抗氧化剂添加量为1.5%时,能够有效捕捉自由基,使防锈脂的氧化诱导期长达8小时;一旦超过2%,抗氧化剂分子间会发生交联反应,导致脂体硬化,涂覆时出现拉丝、堆积等问题,严重影响工艺实施。

3. 工艺应用实践与效果评估

3.1 典型生产案例实证分析

某大型电缆企业在生产深海探测电缆时,采用热涂防锈脂工艺。生产中,将防锈脂熔化温度控制在 125°C ,涂覆温度 105°C ,钢丝表面经喷砂处理至 $R_a\ 6.3\text{ }\mu\text{m}$,使用优化后

的防锈脂配方（PAO 基础油 + 复合缓蚀剂 + 1.5% 抗氧化剂）。经此工艺处理的电缆，在南海某钻井平台连续使用 4 年，期间进行三次定期检测，铠装钢丝锈蚀面积占比始终低于 1%，信号传输稳定性达 99.8%，而之前采用传统工艺的电缆平均使用寿命仅 2 年，有效降低了设备更换成本与作业中断风险。

3.2 多维度性能检测数据对比

为全面评估热涂防锈脂工艺效果，对处理后的铠装钢丝进行多项性能检测，并与冷涂工艺对比，具体数据如下：

表 1 多维度性能检测数据对比表

检测项目	热涂防锈脂工艺	冷涂工艺
盐雾试验防锈时间（h）	500	200
湿热试验防锈时间（d）	70	25
附着力（N/mm ² ）	5.2	3.0
膜层孔隙率（%）	5	15
高温稳定性（150℃，24h）	无明显硬化	硬化开裂

从数据可见，热涂工艺在各项性能指标上均显著优于冷涂工艺，有效提升了铠装钢丝的防护性能。

3.3 实际应用痛点与挑战

尽管热涂防锈脂工艺效果良好，但在实际应用中仍面临诸多问题。防锈脂在高温下挥发损耗严重，生产 1000 米电缆约损耗防锈脂 5kg，增加了生产成本。部分脂体在长期高温使用后出现结焦现象，导致涂覆设备清理频率从每周 1 次增加至每周 3 次，降低生产效率。不同规格电缆生产切换时，工艺参数调整复杂，若调整不当，会使防锈膜厚度偏差超 ±10%，影响防护效果。

4. 工艺优化创新与改进方案

4.1 智能化设备升级改造方案

在热涂防锈脂工艺的实际生产中，工艺参数控制的精度直接影响着铠装钢丝的防锈质量与生产效率。为攻克这一难题，对热涂设备进行智能化升级势在必行。此次升级引入 PLC（可编程逻辑控制器）控制系统作为核心“大脑”，该系统具备强大的逻辑运算与数据处理能力，能够高效整合温度、流量、速度等多参数传感器采集到的实时数据。

温度传感器采用高精度铂电阻温度传感器，其测量精度可达 ±0.1℃，能够实时、准确地监测防锈脂槽内的温度变化。一旦检测到防锈脂温度偏离设定值 ±1℃，PLC 控制系统便会依据预设的控制算法，自动调节加热功率。通过 PID（比例 - 积分 - 微分）调节技术，使温度快速、稳定地回归到设定值，避免因温度波动导致的防锈膜厚度不均和防护性能下降问题。

钢丝牵引速度的稳定同样关键。速度传感器采用光电编码器，可精确测量钢丝的牵引速度。当钢丝牵引速度波动超过 5% 时，PLC 控制系统会迅速作出反应，自动调整涂覆时间。通过调节牵引电机的转速和涂覆辊的运转频率，确保在不同速度下，防锈脂都能均匀、稳定地涂覆在钢丝表面。

4.2 新型环保防锈脂研发实践

针对防锈脂在高温下挥发损耗严重以及结焦的问题，新型环保防锈脂的研发成为关键突破点。研发团队以绿色环保、高性能为目标，对防锈脂的成分进行了全面革新。

在基础油的选择上，选用生物基基础油替代部分矿物油。生物基基础油源于可再生的植物资源，具有优异的环境友好性，其挥发性相比矿物油降低了 30%，生物降解率可达 60%。在保证基础油润滑性能的同时，有效减少了生产过程中因挥发产生的环境污染和成本浪费。

为提升防护性能，添加了新型纳米级缓蚀剂。该缓蚀剂粒径仅为 50nm，能够轻松渗透到钢丝表面的纳米级孔隙中，

形成更致密、更稳定的保护膜。通过分子动力学模拟实验发现，纳米级缓蚀剂分子与钢丝表面的结合能比传统缓蚀剂提高了 30%，使防护性能提升了 20%。在盐雾试验中，采用新型缓蚀剂的防锈脂，其防护时间比传统配方延长了 100 小时。

抗氧化体系的优化是研发的另一重点。采用受阻酚与亚磷酸酯复配的方式，充分发挥两者的协同抗氧化作用。受阻酚能够捕获自由基，中断氧化链反应；亚磷酸酯则可以分解氧化过程中产生的过氧化物。通过大量的实验筛选和配比优化，确定了最佳的复配比例。经测试，新型防锈脂在 130℃ 高温下连续使用 100 小时，挥发量减少了 40%，结焦现象基本消除，有效延长了防锈脂的使用寿命和设备的清理周期。

4.3 工艺参数智能管理体系构建

建立基于大数据的工艺参数智能管理体系是实现热涂防锈脂工艺精准化、高效化生产的重要举措。该体系以海量的生产数据为基础，借助机器学习算法挖掘工艺参数与防护效果之间的潜在关系。

通过传感器网络和数据采集系统，全面收集不同规格电缆、不同使用环境下的生产数据，包括温度、流量、速度、钢丝材质、防锈脂配方等关键参数，以及对应的产品性能检测数据，如盐雾试验结果、附着力测试数据等。这些数据经过清洗、整理后，存储在专用的数据库中，形成庞大的生产数据资源库。

利用机器学习中的回归分析、神经网络等算法，对数据进行深入分析。通过构建工艺参数与防护效果的数学模型，找出影响防锈效果的关键因素和参数之间的最佳匹配关系。当生产新规格电缆时，系统会根据输入的电缆规格、使用环境等信息，自动推荐最优的工艺参数组合。

在生产过程中，系统持续监测实时检测数据，并与预设参数进行对比。一旦发现数据偏离，便会根据模型预测结果，自动调整工艺参数。例如，当检测到钢丝表面温度异常升高时，系统会结合历史数据和模型分析，判断可能是加热装置故障或钢丝牵引速度过慢导致，进而自动调整加热功率和牵引速度。通过该体系，工艺参数调整时间从平均 2 小时大幅缩短至 20 分钟，不同规格电缆生产切换时的防锈膜厚度偏差控制在 ±3% 以内，显著提高了生产效率与产品质量稳定性，为企业实现智能化、精益化生产奠定了坚实基础。

5. 结论

热涂防锈脂工艺在承荷探测电缆铠装钢丝防锈处理中展现出强大的技术优势，通过对工艺机理的深入研究、关键影响因素的精准把控以及优化改进方案的实施，有效提升了防锈效果与生产效益。实际应用案例与检测数据表明，优化后的工艺在防护性能上远超传统工艺，显著延长电缆使用寿命。面对应用中的痛点，智能化设备升级、环保型脂体研发和智能管理体系构建等创新方案，为工艺的持续发展提供了有效路径。未来，随着技术的不断进步，热涂防锈脂工艺将在承荷探测电缆领域发挥更大作用，为能源勘探等行业的发展提供更可靠的技术保障。

[参考文献]

[1]陈宇, 赵刚. 防锈脂配方优化及其在电缆铠装中的防护性能提升 [J]. 化工新型材料, 2021, 49 (5): 210-214.
[2]刘辉, 孙丽. 热涂防锈脂工艺温度参数对电缆铠装钢丝防护质量的影响规律 [J]. 机械工程材料, 2018, 42 (10): 75-79.

作者简介：孙如全（1974.02—）男，工程师，从事特种电缆检验检测，江苏华能电缆股份有限公司质检科检验员。