

# 工程机械大型结构件涂装工艺设计及研究

胡章枝, 周新洁, 蒋刚, 王哲, 徐洪洲

(中机第一设计研究院有限公司, 合肥 230601)

**摘要:** 论述了工程机械大型结构件涂装的影响因素以及涂装工艺设计的最主要的影响因素, 阐述了多种应用的典型工程机械涂装工艺流程, 其核心工艺要素为: 机械抛丸 (Sa2.5 级) 与化学清洗 (油污去除率  $\geq 98\%$ ) 奠定涂层附着力基础; 多层涂层体系组合满足 C3~C5 防腐需求; 智能化设备保障质量一致性。展望了工程机械涂装工艺“少人化、绿色化、智能化”的发展趋势。通过融合精准防腐设计、环保材料应用及智能控制系统, 行业将实现质量提升、成本优化与减排目标的双赢。

**关键词:** 工程机械; 涂装工艺; 绿色化; 智能化

中图分类号: TQ639 文献标志码: A 文章编号: 1007-9548(2025)09-0039-04

## Design and Research of Coating Technology for Large Structural Parts of Construction Machinery

HU Zhang-zhi, ZHOU Xin-jie, JIANG Gang, WANG Zhe, XU Hong-zhou

(First Design and Research Institute Co., Ltd., Hefei 230601, China)

**Abstract:** The discussion covers the influencing factors of coating for large structural components of construction machinery and the primary factors affecting coating process design. It elaborates on various typical coating process flows applied in construction machinery, with core process elements including mechanical shot blasting (Sa2.5 grade) and chemical cleaning (oil removal rate  $\geq 98\%$ ) to lay the foundation for coating adhesion; a multi-layer coating system combination to meet C3 ~ C5 corrosion protection requirements; and intelligent equipment to ensure quality consistency. It also looks forward to the development trend of "less manpower, greening, and intelligentization" coating processes for construction machinery. By integrating precise corrosion protection design, the application of environmentally friendly materials, and intelligent control systems, the industry will achieve a win-win situation of quality improvement, cost optimization, and emission reduction goals.

**Key words:** construction machinery; coating processes; greening; intelligentization

### 0 引言

根据中国工程机械工业协会发布的统计数据, 2023 年我国工程机械行业市场规模已突破 1 万亿元, 全球市场份额占比超 30%。

工程机械的大型结构件 (如车架、臂架等) 通常由钢材或铸件制成, 易受腐蚀和机械损伤。涂装不仅为其提供抗腐蚀保护, 还提升了产品美观和品牌形象。国际

防腐蚀协会指出, 防腐涂层的应用可使钢材寿命延长 2~3 倍, 同时降低设备全生命周期的维护成本。

国家“双碳”政策要求降低工业制造过程中的碳排放, 涂装作为工厂的耗能大户及 VOC 排放的主要来源之一, 亟须绿色转型。基于高质量发展、绿色“双碳”发展战略, 对工程机械大型结构件的涂装工艺进行研究是非常必要的。

### 1 结构件涂装的影响因素

对于结构件的涂装, 为了达到预期的防腐效果, ISO 12944-3:2017<sup>[1]</sup>中明确指出必须从防腐的结构设计和涂装双管齐下, 才能在真正意义上实现防腐目标。

收稿日期: 2024-12-05

作者简介: 胡章枝 (1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事工厂规划及非标设备系统集成工作。E-mail: huhu006@126.com。

涂装工艺的设计需综合考虑大型结构件的材料特性、使用环境等因素,其中最主要的影响因素及影响程度如表 1 所列。

表 1 涂装工艺中的影响因素对防腐性能的影响程度<sup>[2]</sup>

影响因素	影响程度/%
表面处理质量	49
涂装道数和厚度	19
符合要求的涂料品种(同一系列)	5
环境条件	7
涂装方法和技术	20

表面处理是防腐涂装的前提,清理表面氧化皮、锈蚀、焊渣及油污是确保涂层附着力的关键步骤,并需选择合适的涂层系统以满足 C3~C5 环境使用需求。

### 1.1 前处理工艺

前处理主要分为机械处理和化学处理。机械处理采用抛丸或喷砂工艺,达到 GB/T 8923—2011 规定的 Sa2.5 级标准,氧化皮清除率 $\geq 95\%$ ,表面粗糙度控制在 30~75  $\mu\text{m}$  之间。化学处理使用酸洗、脱脂、磷化或硅烷清理工件表面并形成保护膜,要求油污去除率 $\geq 98\%$ 、表面盐分残留 $\leq 20 \text{ mg/m}^2$ 。

### 1.2 涂层设计

为实现优异的防腐性能和机械性能,常采用多层涂装体系:底漆+中间漆(若有)+面漆,底粉+面粉等。

喷漆方式采用无气喷涂或混气喷涂,喷粉采用静电喷涂。

### 1.3 涂层固化

涂层固化采用热风循环、燃气红外或电红外等方式,固化时间达到涂料厂家规定的完全固化条件。

### 1.4 涂装检测

零部件涂层需满足表 2 所列指标要求。

表 2 零部件涂层指标要求

项目	标准	检查方式
漆膜外观	光滑平整,无明显缺陷	目视
膜厚	100~120 $\mu\text{m}$	GB/T 1764
附着力	0 级	GB/T 9286
光泽度(60°)	$\geq 85\%$	GB/T 9754
色差	符合标准板, $\Delta E \leq 0.8$ , 无肉眼可见色差和变化	GB/T 9761
耐盐雾性	1 000 h,划痕单侧锈蚀宽度 $\leq 2 \text{ mm}$ , 距离划痕 10 mm 外的其余板面无起泡、 不生锈、不脱落	GB/T 1771 GB/T 1766
抗流挂(湿膜)	底漆 $\geq 125 \mu\text{m}$ ,面漆 $\geq 100 \mu\text{m}$	GB/T 9264
闪锈抑制性	(23 $\pm$ 3) °C、24 h 后漆膜表面无锈点	HG/T 4759

其他常规指标(如漆膜硬度、耐老化等)按照各公司涂装工艺要求执行,此处只列出和工艺设计相关的质量要求。

## 2 典型涂装工艺流程

根据我公司近几年完成的系统集成产线工作,典型的涂装工艺流程分为下列几种。

### 2.1 水性漆 2C2B 涂装工艺

上件→抛丸→补喷→清理→检查→预脱脂(喷淋)→脱脂(喷淋)→水洗(喷淋)→纯水洗 1(喷淋)→硅烷(浸渍)→纯水洗 2(喷淋)→纯水洗 3(喷淋)→吹水→水分烘干→强冷→检查屏蔽→喷底漆(7 轴机器人+人工补)→闪干→底漆烘干→强冷→刮腻子→腻子点烘→腻子打磨→擦净/屏蔽→喷面漆(7 轴机器人+人工补)→闪干→热风循环+燃气红外面漆烘干→强冷→检查/修饰→(离线修补)→空中缓存→下件至装配。

### 2.2 水性漆 2C1B 涂装工艺

上件→抛丸→补喷→清理→检查→预脱脂(喷淋)→脱脂(喷淋)→水洗(喷淋)→纯水洗 1(喷淋)→硅烷(喷淋)→纯水洗 2(喷淋)→纯水洗 3(喷淋)→吹水→水分烘干→强冷→刮腻子→腻子点烘→腻子打磨→擦净/屏蔽→预热→喷底漆(7 轴机器人+人工补)→闪干→喷面漆(人工先补+7 轴机器人后喷)→闪干→热风循环+燃气红外面漆烘干→强冷→检查/修饰→(离线修补)→空中缓存→下件至装配。

### 2.3 粉末 2C1B 涂装工艺

上件→抛丸→清理→检查→预脱脂(喷淋)→脱脂(喷淋)→水洗(喷淋)→纯水洗 1(喷淋)→硅烷(喷淋)→纯水洗 2(喷淋)→纯水洗 3(喷淋)→吹水→水分烘干→强冷→刮腻子→腻子点烘→腻子打磨→擦净/屏蔽/打胶→自动喷底粉→人工补粉→自动喷面粉→人工补粉→电红外+热风循环粉末固化→强冷→检查/修饰→(离线修补)→空中缓存→下件至装配。

### 2.4 电泳+水性漆 2C2B 涂装工艺

上件→抛丸→清理→检查→预脱脂(喷淋)→脱脂(喷淋)→水洗(喷淋)→纯水洗 1(喷淋)→纯水洗 2(浸+喷)→硅烷(浸)→纯水洗 3(浸+喷)→纯水洗 4(浸+喷)→电泳(浸)→UF1(浸+喷)→UF2(浸+喷)→纯水洗 5(浸+喷)→吹水→燃气红外+热风循环电泳烘干→强冷→喷面漆(人工)→闪干→燃气红外+热风循环油漆烘干→强冷→下件至装配。

### 2.5 电泳+粉末+清漆 3C3B 工艺

上件→抛丸→清理→检查→预脱脂(浸)→脱脂(浸)→水洗(浸)→纯水洗 1(浸)→硅烷(浸)→纯水洗 2(浸+喷)→纯水洗 3(浸+喷)→电泳(浸)→UF1(浸+

喷)→UF2(浸+喷)→纯水洗4(浸+喷)→吹水→热风循环电泳烘干→强冷→自动喷粉→人工补粉→燃气红外+热风循环粉末固化→强冷→检查/打磨/擦净→喷清漆(人工)→热风循环油漆烘干→强冷→下件入库。

### 3 未来发展趋势

未来发展趋势主要体现在工艺、设备及管理手段上的少人化、绿色化、智能化。

#### 3.1 少人化:工业自动化与机器人技术

自动化技术通过减少人工操作,提高生产线的效率和稳定性。自动化技术的应用还体现在质量控制上,通过精密的传感器和机器视觉系统,可以实时监控产品质量,确保每一件产品都符合高标准。

人形机器人技术进步也为未来工厂带来了更多的应用可能。Figure AI 发布第二代人形机器人 Figure 02,并宣布机器人已经进入宝马车厂打工;优必选发布的新一代工业人形机器人 Walker S1 已进入比亚迪等汽车工厂实训,并首次实现了与 L4 级无人物流车、无人叉车、工业移动机器人和智能制造管理系统协同作业。

#### 3.2 绿色化:可持续发展与环境保护

##### 3.2.1 节能减排技术的应用

通过改进工艺流程和设备,减少能源浪费。例如喷漆室采用干式纸盒回收取代原有的湿式喷漆室并搭配 100% 循环风工艺,循环风无需经过除湿即可再次利用,并削减了废气排放量以及水泵和废水的处理,大大地节省了能源。

工业生产中对可再生能源的利用也是绿色化的重要组成部分,如太阳能、风能等清洁能源的使用。例如采用电红外取代原有的燃气红外,在碳排放上有较大的削减。

能源管理系统的智能化,通过实时监控和数据分析,优化能源使用效率。

##### 3.2.2 循环经济与废物管理

废物管理是绿色化的重要组成部分,通过分类回收和再利用,可以减少废物对环境的影响,同时也为企业节省了成本。例如采用抛丸清洁微球技术,自动添加至抛丸丸料内,可对抛丸丸料进行清洁,确保丸料的清洁度,使得钢板表面含油量大大降低,并延长了钢丸的使用寿命;另有水性漆的回收技术以及工件加热后冷却过程的余热回收再利用技术,可大大降低企业的运行成本。

#### 3.3 智能化:“工业 4.0”与智能制造

##### 3.3.1 物联网技术在涂装中的应用

智能化是涂装发展的新趋势,物联网技术的应用

使得涂装设备能够相互连接,实现数据的实时传输和分析。

##### 1) 物联网技术在涂装线上的核心应用场景

设备状态监控与预测性维护:在喷涂机器人、输送链、烘房、空调系统、泵、压缩机等关键设备上安装传感器(振动、温度、电流、压力等),实时采集运行数据。

工艺参数实时监控与优化:在喷房、烘房、前处理槽等关键工艺区域部署传感器,实时监测温湿度、风速、压力、槽液参数(pH、电导率、浓度)、油漆黏度、漆膜厚度、固化温度曲线等。

能源管理与优化:在空压机、烘房加热器、空调机组、照明系统等能耗设备上安装智能电表、流量计、温度传感器。

物料管理与追踪:在油漆、溶剂、化学品储罐上安装液位传感器;使用 RFID 或二维码追踪油漆桶、工件流转。

质量监控与自动化检验:集成在线漆膜测厚仪、光泽度仪、色差仪、表面缺陷视觉检测系统(机器视觉)等,并将检测数据实时上传至物联网平台。

环境、健康与安全:部署可燃气体探测器、VOC 浓度监测仪、通风系统状态传感器、消防设备状态监测、人员定位系统(在特定区域)。

生产调度与过程可视化:物联网平台集成 MES 数据,实时显示生产线状态(设备运行/停机/故障)、工件位置、订单进度、关键绩效指标。

##### 2) 实施物联网带来的主要优势

显著提升质量:过程稳定性增强,缺陷率降低,质量一致性提高。

大幅提高效率:设备利用率提升,减少停机时间,优化生产节拍。

有效降低成本:节约能源、减少油漆/溶剂浪费、降低维护成本、减少废品返工。

增强可追溯性:实现物料、工艺参数、质量数据的全过程精确追溯。

提升安全性:强化对危险因素的监控和预警,保障人员和环境安全。

优化决策:基于实时数据和分析进行更科学、更及时的生产管理决策。

促进可持续性:降低能耗和资源消耗,减少 VOC 排放和废物产生。

##### 3) 未来的发展趋势

AI/ML 深度集成:利用人工智能和机器学习进行更精准的预测性维护、工艺参数优化、质量缺陷预测和根本原因分析。

数字孪生:构建涂装生产线的高保真虚拟模型,用于模拟、预测、优化和培训。

边缘计算:在靠近数据源的地方进行实时数据处理和分析,减少延迟和带宽需求。

5G应用:利用5G网络的高带宽、低延迟、大连接特性,支持更多传感器和更复杂的应用(如高清机器视觉、AR远程协助)。

云平台深化:利用云计算的强大算力和存储能力,进行更复杂的大数据分析和模型训练。

### 3.3.2 大数据分析在涂装智能制造中的作用

大数据分析是涂装智能制造从“自动化”迈向“智能化”的核心动力。它不再是简单的数据记录和展示,而是通过深度挖掘数据价值,实现对涂装全过程的精准感知、智能预测、优化决策和自主控制。它能显著提升质量稳定性、降低成本、提高效率、保障安全合规,并推动持续的工艺创新。

成功部署大数据分析能力,将成为涂装企业在激烈竞争中保持领先优势的关键战略举措。它让涂装过程从“经验驱动”真正转变为“数据驱动”和“知识驱动”。

#### 1) 深度工艺优化与质量控制

分析历史与实时工艺参数(温湿度、风速、膜厚、固化曲线、油漆参数等)、设备状态、环境数据、物料批次与最终涂层质量(光泽、色差、附着力、缺陷率)之间的复杂关系,找出影响质量的关键因子及其最佳控制区间。

预测性质量管控:基于分析模型,预测在当前工艺条件下工件可能出现的质量缺陷(如橘皮、流挂、颗粒、缩孔等),并在缺陷实际发生前发出预警或自动调整工艺参数进行干预,实现“制造即检验”。

配方优化:分析不同油漆配方、稀释比例、施工参数与最终性能、成本、VOC排放的关系,辅助开发或优化更高效、环保、经济的涂装方案。

#### 2) 高级预测性维护与设备健康管理

超越阈值报警:结合设备运行数据(振动、温度、电流、压力、能耗等)和维修历史,运用机器学习模型识别微妙的异常模式,预测设备剩余使用寿命(RUL)和潜在故障类型,实现真正的“预测性”而非简单的“预防性”维护。

优化维护策略:分析设备故障模式、维修成本、备件消耗和停机损失,优化维护计划(时机、内容、备件准备),最大化设备可用性,降低综合维护成本。

设备性能退化分析:监测关键设备(如喷枪、泵、机器人、烘炉)的性能指标随时间的变化趋势,评估其效率退化情况,指导大修或更换决策。

#### 3) 精益能源管理与碳足迹优化

能耗模式识别:分析空压机、烘房、空调系统等耗电大户在不同工况(生产负荷、环境温湿度、产品类型)下的能耗模式,识别低效运行区间和浪费点。

动态能效优化:基于预测模型(如订单排程、天气预报),动态优化烘房升温/保温曲线、新风/回风比例、空压机群控策略等,实现按需供能,最大化能源利用率。

碳足迹核算与减排:精确计算涂装过程的能耗、物料消耗(尤其VOC)对应的碳排放,分析减排潜力点,支撑企业可持续发展目标。

#### 4) 精准物料管理与成本控制

油漆利用率优化:结合工件形状、膜厚要求、机器人路径、过喷数据,分析油漆实际利用率低的原因(如枪距、雾化压力、喷幅重叠不当),优化喷涂参数和路径,减少过喷浪费。

需求预测与库存优化:基于生产计划、历史消耗数据和市场预测,更精准地预测油漆、溶剂、化学品等物料的需求,实现安全库存最小化,降低资金占用和过期风险。

成本动因分析:精确核算不同产品、不同颜色、不同批次的实际涂装成本(包含材料、能源、人工、设备折旧、返工等),识别成本高的环节和原因,为定价和降本提供依据。

#### 5) 智能生产调度与资源优化

动态排产优化:考虑设备状态(可用性、效率)、订单优先级、换色时间、物料齐套性、能耗约束等多种因素,利用优化算法生成更高效、更柔性的生产排程,减少等待时间,提高设备综合效率(OEE)。

供应链协同:结合上游来料信息和下游需求变化,优化涂装车间的生产节奏,提升供应链整体响应速度。

## 4 结语

工程机械大型结构件的涂装工艺研究既是技术升级的重要方向,也是推动行业实现可持续发展的关键路径,需以“精准防腐”为质量核心、“数据智能”为控制大脑、“绿色循环”为可持续基础,通过采用智能化设备、环保材料和节能技术,行业可显著提升涂装质量,降低成本,并达到节能减排目标。

### 参考文献:

- [1] ISO 12944-3:2017 色漆和清漆-防护涂料体系对钢结构的防腐蚀保护 第3部分:设计内容[S].
- [2] 高瑾,米琪.防腐蚀涂料与涂装[M].北京:中国石化出版社,2007:221.