

高端重卡车桥涂装：干冰清洗与高压混气喷涂实践

孔炜铭

(杜尔涂装系统工程(上海)有限公司, 上海 201799)

摘要: 本文针对高端重卡车桥涂装预处理与喷涂环节, 浅谈机器人自动化集成的干冰清洗与高压混气喷涂工艺的应用实践。通过具体项目实例, 分析了干冰清洗在替代传统水洗工艺中的环保性、高效性优势及其在油脂污染物处理上的局限, 阐述了高压混气喷涂工艺参数优化(喷嘴选型、压力调整、路径规划)对解决高黏度水性工程漆雾化难题、提升上漆率及膜厚均匀性的关键作用。实践表明, 机器人驱动的干冰清洗有效减少了水渍残留与环境风险, 高压混气喷涂显著提升了复杂结构车桥的涂装质量与绿色生产水平, 为重型装备涂装提供了高效环保的解决方案。

关键词: 重卡车桥; 机器人涂装; 干冰清洗; 高压混气喷涂; 水性漆; 喷涂工艺

中图分类号: TQ639 文献标志码: A 文章编号: 1007-9548(2026)03-0023-04

High-end Heavy Truck Axle Coating: Dry Ice Cleaning and High-pressure Gas Mixture Spraying Practice

KONG Wei-ming

(Dürr Coating System Engineering (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 201799, China)

Abstract: This paper focuses on the pre-treatment and spraying processes of the coating for high-end heavy truck axles, and explores the application practice of the robotized integrated dry ice cleaning and high-pressure mixed gas spraying technology. Through specific project examples, it analyzes the environmental friendliness and high efficiency advantages of dry ice cleaning in replacing the traditional water washing process, as well as its limitations in handling oil-based pollutants. It elaborates in detail on the key role of optimizing the parameters of high-pressure mixed gas spraying (nozzle selection, pressure adjustment, path planning) in solving the problem of atomization of high-viscosity water-based engineering paint, improving the painting rate and uniformity of the film thickness. The practice shows that the robot-driven dry ice cleaning effectively reduces water stains and environmental risks, and the high-pressure mixed gas spraying significantly improves the coating quality and green production level of complex-structured truck axles, providing an efficient and environmentally friendly solution for heavy equipment coating.

Key words: heavy truck axle; robot painting; dry ice cleaning; high-pressure gas mixture spraying; water-based paint; spraying process

0 引言

传统工业表面预处理以水洗前处理为主, 虽成本低、易操作, 但存在缺点。前处理水洗依托高压水流与

洗涤剂除污, 除污过程产生有毒废液, 处理复杂且成本高、易污染环境, 残留水分诱发锈蚀、油漆附着失效, 难以达到高洁净度标准。而传统空气喷涂工艺, 弊端显著, 空气喷涂上漆率不足 40%, VOC 排放超标。而高压无气喷涂工艺, 存在涂层不均、漆雾过喷与反弹等缺点。以上均难以兼顾质量、效率与环保合规性。在国家推行制造业绿色智能转型的政策背景下, 干冰清洗与混气喷涂工艺的出现, 分别破解了前处理与后处理的

收稿日期: 2025-12-14

作者简介: 孔炜铭(1997—), 男, 本科, 助理工程师, 主要从事涂装机器人调试应用及汽车涂装工艺开发等工作。E-mail: 334740447@qq.com。

核心痛点,在行业内得到了发展应用。干冰清洗以固态二氧化碳为唯一介质,实现污染物无损剥离,全程无废水及化学残留。混气喷涂工艺则融合空气喷涂的精细雾化与高压无气喷涂的高效率特点,构建起“环保清洗-精细喷涂”体系,为工业表面处理提供了更优的高效环保方案。

本文聚焦干冰清洗与混气喷涂工艺的协同应用,探讨二者技术的现场应用情况、工艺方案调试与优化等,旨在为工业表面处理行业的绿色化、智能化转型提供实践参考,助力制造业突破传统工艺瓶颈,提升核心竞争力。

1 车桥表面预处理:机器人自动化干冰清洗工艺

1.1 工艺原理与核心优势

干冰清洗即利用常压下 $-78.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的固态二氧化碳(干冰)颗粒,低温脆化污染物的同时通过高速冲击工件表面时瞬间升华(由固态转变为气态),体积膨胀产生“微爆炸”效应,有效剥离污染物^[1],其核心优势在于以下几个方面。

1)零液体残留:以固态二氧化碳为唯一介质,清洗过程无废水、无化学试剂残留,仅通过干冰升华(瞬间体积膨胀近800倍)产生的微爆效应剥离污染物,升华后完全转化为气体,无废弃物产生,契合“双碳”目标与绿色生产理念,规避了传统水洗的污染隐患。

2)环境友好:干冰多由工业废气回收提纯制备,实现了 CO_2 的资源化再利用。清洗全过程无VOC、有毒

气体等有害物释放,清洗产生的 CO_2 气体直接通过循环风系统排出,无化学污染物产生^[2]。

3)高效节能:工艺链短,仅需干冰储存、增压、控制及喷射单元,占地面积显著小于传统水洗线。

4)低能耗:清洗过程无需额外消耗水资源,也无需废水处理设备的能耗投入,较传统水洗技术降低30%以上的环保处理能耗。利用干冰相变膨胀能量进行清洗,相较水洗工艺依赖大量压缩空气和高温烘干,能耗显著降低^[3]。

1.2 机器人集成与工艺参数

在某高端重卡车桥涂装线生产中,采用工业机器人平台集成干冰清洗应用系统。末端执行器为宽度50 mm的单口干冰喷枪(见图1),负载于机器人手腕法兰。为选择最优方案,对各工艺参数进行验证,结果见表1。

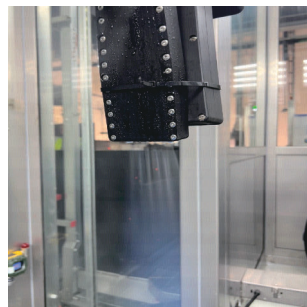


图1 单口干冰喷枪

表1 干冰处理工艺方案选择

参数	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5	方案6	方案7	方案8
干冰出口压力/MPa	6	6	6	6	6	6	6	6
压缩空气出口压力/MPa	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
路径间距/mm	50	50	50	50	50	50	50	50
射枪运动速率/($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	150	200	200	200	250	250	300	300
枪距/mm	150	150	180	200	180	200	180	200
粉尘初始 RFU 均值	1 739	1 946	1 844	1 918	1 780	1 864	1 921	1 753
粉尘一次处理后 RFU 均值	3.7	7.8	10.3	18.5	24.9	31.7	36.2	42.5
油脂初始 RFU 均值	453.4	457.0	420.0	430.4	460.4	440.0	415.2	469.4
油脂一次处理后 RFU 均值	337.0	355.0	351.8	373.8	398.2	410.0	394.0	427.4
油脂二次处理后 RFU 均值	10.60	14.34	15.70	18.94	25.36	51.70	76.34	112.40

注:RFU为相对荧光强度值,反映被测表面清洁度情况,RFU值越大,零件表面的残留污染物含量也越高。

关键参数设定如下:考虑到产品为重卡车桥,包含桥梁、转向节、轮毂、制动器等复杂结构,在清洗处理过程中,枪体四周与产品保持适当的距离,可以减少意外

碰撞的概率。同时为平衡工件清洗处理节拍及清洗质量(处理后 $\text{RFU}\leq 20$),因此选用方案4作为现场实用工艺参数。

1.3 干冰清洗路径规划注意事项

1)机器人在外挂 CO₂ 供给管路时,需对机器人的 4、5、6 轴角度做充分测试及度数极限设定,避免干冰喷枪与机器人本体发生碰撞,编程中杜绝枪头 360° 旋转,防止管路缠绕拉爆。

2)严格按照路径间距进行轨迹规划,对于复杂结构,可以规划横纵交叠多重轨迹进行覆盖,避免少处理、漏处理情况。

3)根据工件结构、受污染情况、干冰出口压力等条件,干冰清洗枪距通常为 100~300 mm。综合考虑生产节拍、清洗效果以及喷枪与工件复杂结构减少碰撞风险等因素,项目设定枪距 200 mm、速率 200 mm/s,可达到清洗质量要求。

1.4 应用效果与问题分析

1)除尘效果显著:对于主要污染物为灰尘颗粒的表面,干冰清洗可将其污染值(荧光法测量 RFU)从接近 2 000 RFU 有效降低至质量标准要求的 20 RFU 以内。

2)油脂处理局限:对于油脂类污染物(测试板初始值为 400~500 RFU),即使降低枪距以及运动速率,单遍处理的污染区域仍难以达标,同时工件的清洗节拍超出范围,无法满足生产的节拍及质量要求。

3)噪声与稳定性考量:在工作站出入口完全开放的状态下,干冰清洗过程在站外监测到 80~90 dB 的噪声,且高压气流对工件会产生推力导致工件发生轻微晃动,对工件清洗的精度有一定影响。

因此后续进一步优化工作以及其他新产线干冰清洗工作站设计时需着重考虑以下问题。

1)工件在输送链上的稳固性:以双链条替代单链条,防止受干冰高压冲击时产生晃动。

2)工作站内设置适当的隔音封闭:如出入口设置隔音帘,有效降低噪声外泄,保护人员健康。

3)充分考虑需要处理的工件及产线节拍要求:如果是油脂污染为主的工件,其清洗工作节拍应当满足工件至少做两遍的清洗,以满足工件的预处理质量要求。

2 车桥表面涂装:机器人高压混气喷涂工艺实践

2.1 机器人系统与设备

高压混气喷涂结合了空气喷涂与无气喷涂的优点,不仅能够处理高黏度涂料,还能实现优异的雾化效果,显著提升涂装效率与漆膜质量。在应用中,涂料雾化液滴细微而且分布均匀,近年来得以研发推广应用^[4]。

现场采用工业机器人平台,搭载高压混气喷枪,负责车桥底漆和色漆的自动化喷涂。

2.2 喷嘴选型与参数优化

相较于应用于家用汽车的水性油漆 80~120 mPa·s 的施工黏度,本项目使用水性工程油漆,其较高的施工黏度(170~200 mPa·s)在雾化上具有一定挑战^[5]。由此进行关键参数调试与喷嘴选型测试,结果见表 2。

表 2 关键参数调试与喷嘴选型

参数	方案 1	方案 2
喷嘴	315	413
口径	0.38	0.33
扇幅空气(0.2 MPa)/(L·min ⁻¹)	120	120
辅助雾化空气(0.01 MPa)/(L·min ⁻¹)	20	20
油漆供给压力/MPa	7	10
喷涂速度/(mm·s ⁻¹)	400	400
漆膜质量	雾化不良, 表面毛糙	细腻均匀, 雾化效果优

1)方案 1 问题分析:提高油漆压力可改善雾化。根据流量公式 $Q_2=Q_1\sqrt{(P_2/P_1)}$,其中 Q_2 为新压力下的流量, P_2 为新设定的油漆压力, Q_1 为 10 MPa 下的标准流量, P_1 为 10 MPa。提高油漆压力导致吐出量增大^[6],为维持膜厚,需将机器人速度提升至 900 mm/s,显著加剧机器人电机负荷同时在姿态转换时由于速度及加速度的大幅变化,导致喷涂不均匀情况。

2)方案 2 优化机理:经过多轮方案测试验证,综合考虑产品结构、膜厚等质量要求,决定采用更大角度、更小口径的 413 喷嘴,配合更高的油管压力,实现更精细的雾化效果^[7],同时允许机器人以更低、更稳定的速度运行。

2.3 仿形规划策略

仿形规划是保障漆膜均匀性、提升上漆率、减少过喷的核心技术环节。车桥包含桥梁、转向节、轮毂、制动器等复杂结构,存在大量平面、曲面、凹凸腔体及边角区域,对机器人喷涂轨迹的精准性要求极高。在枪距采用 250 mm 的基础上,由于高压混气喷枪单位时间出漆量相对固定,为确保漆膜均匀性,仿形规划至关重要^[8]。

1)连续均匀表面:对于连续均匀的表面,可以采用单一的横向或纵向喷涂路径,严格保持 50% 叠枪率和固定路径间距^[9],有利于提升涂膜的均匀性。

2)非连续结构(凸台/凹槽):对于非连续面或复杂结构,难以通过一道喷涂实现覆盖。为实现漆膜覆盖,保证被涂表面的防腐性能,需要采用横纵交叠路径,多角度多道覆盖喷涂。同时通过调整机器人平台下的喷

涂速度、路径间距及精准设置开关枪的时间、位置,优化局部区域的膜厚均匀性以及外观质量。

2.4 油漆管路清洗管理

在日常的生产使用中,从高黏高固含水性低温工程漆的特性考虑,由于油漆暴露在空气中极易干固化,对于油漆管路清洗也总结了一定的经验。

1) 杜绝空气吹扫:应用在轿车的普通水性高温漆可用空气顶出机器人残留油漆;而应用于工程机械的低温水性漆,基于其易干固的特性,应避免油漆暴露在空气中,以免油漆在管路或喷嘴内结块导致出口堵塞^[9]。

2) 纯水顶漆清洗:只允许使用纯水将管路内残存油漆完全顶出。清洗完成后,纯水在管路内保持约 0.05 MPa 的压力,防止管路内残留油漆干燥结块。

3) 非换色不清洗策略:项目验证表明,在不涉及换色的情况下,喷涂机器人内部油漆管路可保持带漆状态长达 7 d 而不会发生堵塞,复产前随着预喷涂测试排出管道内不参与系统循环的油漆,长时间沉淀一定程度上导致油漆物理性质的变化,最终影响喷涂质量。此策略可显著减少清洗频率,降低废弃油漆处理成本。

3 结语

本研究通过高端重卡车桥涂装线的实际项目应用,验证了机器人自动化集成干冰清洗与高压混气喷涂工艺的显著优势。

1) 干冰清洗:成功替代传统水洗,彻底解决复杂结构水渍残留问题,实现“零废水、零残留、低能耗”的绿色预处理,尤其适用于灰尘污染物的高效清除。针对油脂污染和噪声问题,针对性优化工艺参数(如拉近枪距、降低速度、增加遍数)和工作站设计(加强封闭与工件固定)。

2) 高压混气喷涂:有效解决了高黏度水性工程漆在车桥复杂结构上的雾化、上漆率及膜厚均匀性难题。通过喷嘴选型(如 413 喷嘴)与关键参数(油漆压力、机器人速度)的优化匹配,显著提升了漆膜质量和工艺稳定性。科学的仿形规划(连续面单一方向、非连续面纵横交叠)和创新的管路管理策略(纯水清洗、非换色带漆存放)保障了生产效率和成本控制。

上述工艺体系的推广价值主要体现在以下 3 个方面。

1) 技术价值:简述了“机器人平台下的干冰清洗-高压混气喷涂”的协同工艺体系,为重型装备涂装的绿色智能转型提供了可参考的技术方案;

2) 经济价值:相较于传统涂装工艺,大幅减少了水洗-烘干工艺处理所需的占地面积,废水处理成本以

及烘房能耗均得到明显降低;

3) 环保价值:在预处理工艺中,可以实现废水及有毒气体的零排放,契合国家“双碳”目标与绿色制造政策要求,为工业涂装行业的污染治理提供了新思路。

综上所述,干冰清洗与混气喷涂工艺的协同应用,不仅是传统表面处理工艺的绿色替代路径,更能为制造业高质量转型提供技术支撑,对推动工业领域“双碳”目标实现、提升产业核心竞争力具有重要现实意义。机器人驱动平台下的干冰清洗与高压混气喷涂工艺,为高端重卡车桥以及其他复杂工业装备如工程机械、轨道交通装备等提供了高效、优质、环保的涂装解决方案,符合国家推进绿色制造和智能制造的产业升级方向^[11]。

参考文献:

- [1] 郑建林,王友涛,栗娜娜,等.干冰射流技术清洗航空发动机积炭[J].航空动力,2022(1):72-74.
- [2] 锡洪鹏,李志良,曹繁云,等.浅谈干冰清洗技术在汽车制造中的应用[J].现代涂料与涂装,2017(11):50-51.
- [3] 孙加波,刘江涛,张英.浅谈涂装车间节能降耗——精细化管理生产方式降低水电气能耗[J].汽车实用技术,2019(24):179-183.
- [4] 李斌.混气喷涂工艺研究与应用[J].内燃机与配件,2020(16):106-107.
- [5] 王杨,万洁芸,孙世靖,等.大客车的水性漆喷涂研究[J].现代涂料与涂装,2016(8):46-48.
- [6] 杨东伟,高宾,刘宏生,等.施工工艺对水性工业涂料混气喷涂效果的影响[J].现代涂料与涂装,2022(10):18-20.
- [7] 于伟,江丽,刘赛.工程机械水性涂料工艺研究及应用分析[J].现代涂料与涂装,2020(4):7-10.
- [8] 黄波,吕超,李健.汽车涂装机器人全新车型仿形调试及常见问题研究[J].现代涂料与涂装,2020(7):35-37.
- [9] 刘世强.机器人喷涂仿形技术及汽车喷涂工艺的优化[J].内燃机与配件,2024(19):62-64.
- [10] 李健巍,李东波,张忠强.水性漆混气喷涂技术在发动机涂装领域的研究与应用[J].中国设备工程,2022(S2):335-336.
- [11] 田简.工业涂装行业挥发性有机物污染治理现状及对策建议[J].天津化工,2023(6):4-6.

