车用缸孔双丝喷涂装备维护体系研究

周华英[1,2] 张贺[1,2] 陆郁[1,2] 王金磊[1,2]

（1.极光湾（宁波）智能科技有限公司 宁波 315300；2.极光湾（义乌）发动机有限公司 义乌 322003）

摘要：以某双丝喷涂装备为对象，从机械结构、关键功能单元及电气控制系统入手，进行系统性技术解析。聚焦装备全生命周期维护，剖析了熔射机、测温仪、送丝装置、驱动器、流量阀及网络模块等核心单元的构造原理、失效形式与改善方法，构建了预防性维护、状态监测、故障诊断与系统改善的维护应用体系。研究表明，从原理到原则，构建“构造解析—维护策略—闭环改善”三位一体的维护体系，是保障新工艺稳定实施、提升设备综合效率的关键路径。

关键词：缸孔双丝喷涂 逆向维护推导 状态监测 熔射单元 装备健康管理

中图分类号：U463.8 **文献标志码：**B **DOI:** 10.19710/J.cnki.1003-8817.20260115

Research on Maintenance System of Dual-Wire Spraying Equipment for Automotive Cylinder Bores

Zhou Huaying[1,2], Zhang He[1,2], Lu Yü[1,2], Wang Jinlei[1,2]

(1.Aurora Bay (Ningbo) Intelligent Technology Co., Ltd., Ningbo 315300 2.Aurora Bay (Yiwu) Engine Co., Ltd., Yiwu 322003)

Abstract: This paper takes a certain twin-wire spraying equipment as the object, starting with the mechanical structure, key functional units, and electrical control system, to conduct a systematic technical analysis. Focusing on the whole life cycle maintenance of the equipment, it analyzes the construction principles, failure modes, and improvement methods of core units such as the melting sprayer, temperature tester, wire feeder, driver, flow valve, and network module. It constructs a maintenance application system for preventive maintenance, condition monitoring, fault diagnosis, and system improvement. The research shows that building a “construction analysis-maintenance strategy-closed-loop improvement” trinity maintenance system from principle to principle is the key path to ensure the stable implementation of new processes and improve the comprehensive efficiency of equipment.

Key words: Cylinder bore twin-wire spraying, Reverse maintenance derivation, Condition monitoring, Thermal spraying unit, Equipment health management

1 前言

随着汽车动力系统向高效化、低碳化转型，无缸套涂层技术已成为内燃机制造体系升级的核心方向。缸孔电弧喷涂技术通过在铝合金缸孔内壁沉积耐磨减摩涂层，实现了结构减重与摩擦优化[1-3]。该技术已实现大规模工业化应用，是非常成熟稳定的工程装备。

研究对象是以数控系统为核心控制的立式加工中心，其特殊之处在于主轴末端安装的不是传统切削刀具，而是电弧喷涂喷枪。该装备垂直伸入气缸体缸孔，执行双丝电弧熔射作业，为后续的精镗、珩磨等工序提供高质量涂层基底。其技术含量体现在高精度多轴联动控制、恒张力送丝、超音速气体雾化、实时温度监控及工业网络通信等方面，属于典型的机电控一体化高端装备。

当然，精密且复杂的设备对维修管理也提出了前所未有的挑战。传统“事后维修”模式已经严

作者简介：周华英（1975—），男，硕士学位，高级工程师，研究方向为机械制造及其自动化。

参考文献引用格式：

周华英，张贺，陆郁，等．车用缸孔双丝喷涂装备维护体系研究[J]．汽车工艺与材料，2026(6)：66-72.

ZHOU H Y, ZHANG H, LU Y, et al. Research on Maintenance System of Dual-Wire Spraying Equipment for Automotive Cylinder Bores[J]. Automobile Technology & Material, 2026(6): 66-72.

重影响产线的开动率和质量稳定性。维护形式须从“事后维修”向“系统性预防保障”转变。这不仅要求维护人员理解装备的机械结构,更需掌握其电气原理、自动化网络及核心“特种装置”的机理。本文以该设备为案例,深入剖析其装备构造与电气控制系统,系统探讨维护策略、故障诊断方法及性能改善,以期为同类高端制造装备的科学维护提供技术方案。

2　车用缸孔喷涂装备构造原理解析

车用缸孔喷涂装备本质上是一台具备电弧喷涂功能的立式加工中心。其工艺位置处于缸孔粗化(燕尾槽加工)之后、精镗与珩磨之前,专门执行双丝电弧熔射沉积涂层。该装备由高刚性床身、工件定位托盘系统、双丝电弧熔射单元、气路与负压除尘系统、数控控制系统等组成,体现了一体化集成式高精度缸孔涂层成型装备布局。

双丝电弧喷涂装备的工作原理为:在2根金属丝材之间施加直流电,丝材末端产生电弧持续熔化;同时通入高压氮气作为过程气体,将熔融金属液滴分离、精细雾化并加速,喷射至气缸孔内壁;微小飞溅金属液在冷的表面迅速凝固,不断堆积,就形成了紧密的涂层。

设备由高刚性床身、工件定位托盘系统、双丝电弧熔射单元、气路与负压除尘系统、数控控制系统组成,结合前后序设备,体现一体化集成式高精度缸孔涂层成型装备布局。装备的核心构造可分解为机床本体、核心工艺功能单元和辅助及自动化系统3大模块。

双丝电弧喷涂装备由5大功能模块构成:

a. 机械本体。包含高刚性床身、多轴驱动及工件交换台;

b. 熔射执行单元。含燃烧器、喷枪、电弧发生及旋转分配部件;

c. 送丝系统。由丝库、送丝电机、编码器、导丝管及碳刷组件组成;

d. 气路与除尘系统。负责高纯氮气供给、流量调节及金属粉尘抽排;

e. 电气控制系统。以数控系统为核心,集成PLC、伺服驱动器、工业网络及各类传感器。各模块协同完成缸孔内壁涂层沉积,其中熔射执行单元与送丝系统是故障高发区,也是预防性维护的重点对象。

2.1　高刚性机床本体

装备基础为高阻尼铸铁整体床身,其优异振动阻尼特性可有效抑制高压气体喷射、熔滴高速撞击产生的高频振动,确保熔射轨迹稳定,是涂层均匀性的物理保障。设备有7个伺服轴和2个变频轴:X轴驱动工作台水平移动,Z轴控制工作台升降进给,C轴为主轴旋转轴;ZP轴实现交换工作台的垂直升降,CP轴驱动交换工作台的水平旋转;ZW轴负责丝库的升降,CW轴控制丝库的旋转,2套独立变频器分别驱动双丝送丝电机。通过工件交换台和丝库交换台的巧妙设计,实现了快速换料与连续供丝,有效满足发动机机加线高产能、快节拍的生产要求。

2.2　核心工艺功能单元

2.2.1 双丝电弧熔射单元

双丝电弧熔射单元是装备的核心工艺单元,也是故障高发、维护难度最大的区域。从焊接学角度,双丝电弧熔射本质上是2个消耗性电极之间的电弧放电过程,涉及复杂的物理化学变化,其物质形态演变可归纳为表1所示5个阶段。

表1　物质形态演变

阶段	起始形态	作用过程	最终形态	关键变化
丝材输入	固态铁碳合金丝(ϕ1.6~2.4)	恒张力送丝机构输送	固态丝材连续供给	机械输送
电弧熔化	固态丝材端部	电弧加热(2 000 ℃)	液态熔滴(1 500~2 000 ℃)	固→液相变,熔化潜热吸收
氮气雾化	连续液态金属	高压氮气剪切破碎	微米级熔滴群(10~100 μm)	液滴分散,表面积剧增
飞行沉积	高速飞行熔滴	与氮气/环境热交换	半凝固状态撞击基体	热传递,表面氧化控制
凝固成型	撞击基体的熔滴	快速凝固(10^5~10^6 K/s)	0.3 mm多孔钢结构	液→固型变,晶粒组织细化

电弧热输入决定丝材熔化速率和熔滴温度，其核心工程公式如下：

$$Q = I^2 \cdot R \cdot t \tag{1}$$

式中：Q为热能功，I为熔焊电流，R为电弧回路等效电阻，t为熔焊时间。

作为工艺控制点，熔焊电流I波动直接影响热输入稳定性。通过焊机取样电流传感器实时监控电流波动，确保焊接电弧能量，保证质量。

根据标准AWS B2.5/B2.5M:2021《Specification for Measurement of Welding Power Source Output for Calculation of Welding Procedure Heat Input》，有效热输入公式如下：

$$H_{\text{eff}} = \eta \cdot U \cdot I/v \tag{2}$$

式中：H_{eff}为单位长度有效热输入，η为热效率系数（双丝电弧喷涂取0.70~0.85），U为电弧电压，I为焊接电流，v为喷枪移动速度。

该公式源于电弧焊接热输入理论。喷涂颗粒温度可达2 000 ℃，远超铁碳合金熔点（约1 500 ℃），确保丝材充分熔化和雾化[2]。

工艺控制点：电弧电压U与喷枪速度v同时作用决定涂层厚度均匀性。通过计算机数字控制（Computer Numerical Control，CNC）多轴联动保证喷枪移动速度恒定，电压由焊机模块闭环调节。

根据能量守恒，描述焊丝熔化速度与电弧能量输入关系的焊丝熔化平衡模型如下：

$$v_w = \frac{\eta_m \cdot U \cdot I}{\rho \cdot A_w \cdot \left(H_m + C_p \cdot \Delta T\right)} \tag{3}$$

式中：v_w为焊丝熔速，η_m为熔化效率（0.85~0.95），ρ为丝材密度，A_w为丝材横截面积，H_m为熔化潜热，C_p为比热容。

维持送丝速度与电弧能量的匹配是涂层厚度均匀性的根本保障，送丝速度波动超过±10%会导致电弧不稳定和涂层缺陷。

作为工艺控制点，送丝速度v_w与焊接电流I需实时跟随与恒张力送丝装置配合送丝编码器形成闭环，抑制丝材阻力波动。

高压氮气将熔融金属雾化为微米级液滴，熔滴运动规律由牛顿第二定律描述：

$$\frac{\mathrm{d}v_d}{\mathrm{d}t} = \frac{3}{4} \cdot \frac{\rho_g}{\rho_d} \cdot \frac{C_D}{d} \cdot \left(u_g - v_d\right)^2 \tag{4}$$

式中：v_d为熔滴速度，u_g为气流速度，ρ_g为氮气密度，ρ_d为熔滴密度，C_D为拖曳系数（与雷诺数相关），d为熔滴直径。该数学模型源于气体动力学和二相流流体力学理论[3]。

作为工艺控制点，气流速度u_g越快，雾化颗粒越细，熔滴打出去也越有力。为了保证喷口达到超音速，必须靠氮气流量阀来精确调节滞止压力。

喷管出口气流速度（一维等熵流动）：

$$u_0 = \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma - 1} \cdot R \cdot T_0 \left[1 - \left(\frac{P_e}{P_0}\right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}}\right]} \tag{5}$$

式中：γ为氮气比热容比（一般取1.4），R为气体常数，T_0为滞止温度，P_0为滞止压力，P_e为出口压力。

作为工艺控制点，滞止压力P_0是控制气流速度的关键。压力波动≤±0.02 MPa，通过压力传感器实时反馈至可编程逻辑控制器（Programmable Logic Controller，PLC），控制比例阀，达到稳定的气流速度。

双丝电弧熔射单元主要由以下部件组成：气体旋转分配器、线盘库、送丝机托架、旋转驱动装置、滑环传送器、送丝装置及燃烧器。旋转单元上装有2个线盘，借助双送丝机构退绕线材，并通过送丝装置向燃烧器输送。送丝驱动装置，配有编码器实时监测线速，形成闭环速度控制。氮气流量控制装置包含主、次气体流量控制器，配有压力开关及模拟输出端，在喷涂过程中维持恒定氮气流量，补偿抽吸装置及多机并联影响。燃烧器接口采用球应力夹紧、气动解锁，便于快速更换。自动线材库更换装置位于平台层面，实现与主时间同步的线盘装卸，减少停机时间。滑环传送器用于信号电流及高强度电流的传输。以及吸尘系统、带适配器更换装置的装卸工位、夹具上的工件、点火检验漏斗等辅助单元。生产中需定期清理粉尘、检查编码器信号、润滑传动部件，并备份驱动参数及流量控制器配置。

2.2.2 过程监控与精密测量

工件测温仪基于红外辐射原理非接触测量缸孔壁温，核心组件包括镜头、滤光片、探测器和信号处理单元。镜头的光学性能主要看测量距离和

光斑大小的比值。喷涂过程中,测温仪会随时把温度数据传回控制系统。镜头易受粉尘、烟雾污染,可采用气体吹扫减缓。常见问题还有环境光干扰及探测器镜片磨损老化。维护须每班清洁镜头,定期标定,更换时保证安装角度与原始(测距与光斑尺寸)一致。

2.2.3　涂层厚度理论模型

基于喷涂过程的体积守恒原理,可建立涂层厚度与工艺参数之间的理论关系,为质量控制提供定量依据。

预计沉积材料体积计算简化后:

$$V_d = \frac{500\pi d_w^2 v_w L_a}{v_t} \tag{6}$$

式中:V_d为预计沉积材料体积,d_w为丝材直径,v_w为送丝速度,L_a为缸孔深度,v_t为熔射进给速度。该公式假设双丝熔化金属100%沉积于缸孔内壁。

缸孔内壁展开表面积计算如下:

$$A_s = \pi \cdot D_b \cdot L_b \tag{7}$$

式中:A_s为缸孔内壁展开表面积,D_b为缸孔直径,L_b为用于面积计算的缸孔深度,通常L_a=L_b。

理论涂层厚度计算如下:

$$h = \frac{V_d}{A_s} \times 1\,000 \tag{8}$$

将V_d和A_s代入式中,且L_a=L_b时,可得:

$$h = \frac{500\,000 \cdot d_w^2 \cdot v_w}{v_t \cdot D_b} \tag{9}$$

式中:h为理论涂层厚度。h与熔射沉积效率系数η_d有关,η_d通常取70%~90%。缸孔属于桶状模型,靠近中心时喷涂面积减少,通常也会产生过喷,可按10%~20%预估。因此实际厚度与过喷也有关系,工程师需将计算结果与实际光学测量或金相测厚值对比,标定经验修正系数。综合考虑沉积效率和过喷工况,实际涂层厚度h_0为:

$$h_0 = \lambda \cdot \eta_d \cdot h \tag{10}$$

式中:λ为综合修正系数,需要考虑过喷因素后由现场试验确定具体数值。这套模型能帮助判断哪些参数对涂层厚度影响最大,比如送丝速度、Z轴进给速度、基于该模型,送丝速度、Z轴进给速度、丝材直径及缸孔直径等关键参数对涂层厚度的影响得以量化,为生产过程监控与工艺参数优化提供了明确的理论依据。

2.3　辅助及自动化系统

2.3.1　气路供给与粉尘抽排系统

熔射过程需要高纯氮气作为保护气和雾化气,同时需要强力除尘系统移除金属粉尘[2-3]。氮气流量阀为控制气体流量的执行机构,通过现场总线与控制系统相连。常见故障包括阀芯卡滞、喷头磨损、总线通信中断。更换后须重新进行现场总线站号设定及参数配置;氮气流量阀门提供风速校准设置。

为保证稳定雾化和最小氧化,氮气流量需与送丝速度、丝材直径匹配,氮气流量匹配公式如下:

$$Q_{\text{gas,min}} = k \cdot \frac{\dot{m}_{\text{wire}}}{\rho_{\text{g}}} \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^n \tag{11}$$

式中:$Q_{\text{gas,min}}$为最小雾化气体积流量;$\dot{m}_{\text{wire}}$为总送丝速度;ρ_{g}为氮气密度,在喷涂工况(高压、室温)下通常取1.15~1.25 kg/m^3;d为丝材直径;D为喷口直径;k为经验系数,氮气取0.8~1.2;n为指数,取1.5~2.0。工程推荐气丝比15~25 m^3/kg,喷涂效率大于80%。

工艺中需要关注,气丝比值偏低会恶化雾化效果,偏高则导致熔滴过冷。通过流量计依据工况反馈调节阀门开度,需将气丝比稳定在设定区间,从而保障喷涂质量的稳定性。

2.3.2　工业通信网络

装备接入车间级工业网络(Profinet)的网关,路由器模块:该交换机构建分层工业网络:上层Profinet连接控制面板、手持单元及制造执行系统(Manufacturing Execution System, MES),下层显示端口线(Dispaly Port,DP)总线串联驱动、输入/输出(Input/Output,IO)等现场设备。构成多端口交换与电位隔离实现协议无缝衔接,保障送丝、气控、测温等单元的实时协同与数据安全。失效与改善:常见故障包括电源损坏、端口浪涌击穿、配置丢失。更换时须记录并重配网际协议(Internet Protocol,IP)地址、子网掩码、网关及安全策略。建议预留预配置备用模块实现快速替换。

3　电气控制系统原理与功能实现

该设备采用先进数控系统为基础,配备提升

工艺单元，通过PLC逻辑控制协调各轴运动、工艺参数和辅助功能。

3.1 多轴联动与轨迹控制

核心控制难点在于熔射过程中喷枪旋转（*C*轴）与轴向进给（*Z*轴）的同步，确保螺旋下降的熔射轨迹在缸孔内壁形成均匀覆盖。控制系统同时协调送丝速度、缸孔上下移动速度、电弧电流/电压，形成闭环工艺参数群。

3.2 工艺参数的实时监控与闭环

该装备电气系统内置多种特殊传感器、智能伺服执行器，以CNC的控制形式，进行实时采集和控制。维护人员应理解机床、驱动及工艺等参数修改的授权级别及其对设备行为的影响程度。任何未经评估的参数调整均可能诱发设备故障或质量缺陷，因此必须建立严格变更管理流程[4]。

3.3 运动系统与位置控制

*X*轴、*Z*轴伺服电机采用高精度绝对值编码器，更换后须执行：机械安装→编码器安装→各轴原点设置→参照原点位置说明校准绝对零点。原点设置错误可能导致燃烧器与工件碰撞的严重事故。

4 装备维护体系的构建与应用

基于对装备构造剖析和工艺深度理解，构建科学系统的维护应用体系。核心单元关键部件的识别，有赖于工程技术人员对其失效模式进行针对性分析，并结合维修维护履历的系统梳理，归纳出各部件的推荐更换周期。在故障发生前实施定周期维护，是构建设备检修体系的基础，具体内容见表2。将维护工作与工艺质量、生产效率紧密结合，形成闭环管理[4]。

表2 核心单元关键维护要素一览表

核心单元	主要失效形式	推荐维护周期	关键维护操作与改善方法
送丝装置与送丝编码器	送丝轮磨损打滑、导丝管堵塞、编码器信号漂移	季度清理/半年校验	拆卸清理积碳，检查压紧力；更换编码器时注意防静电，做好标定
送丝电机驱动器	IGBT击穿、电源模块损坏、散热风扇失效	月度状态检查/年度更换	备份驱动器参数，更换新驱动器后导入备份参数
焊机模块	功率模块过热烧毁、控制板粉尘短路、内部电容击穿	月度风扇检查/季度热成像	清理散热风道，加装过滤网；更换前后执行参数备份与导入
工件测温仪	镜头污染、精度漂移、环境光干扰	班次清洁/半年校准	专用镜头纸清洁；更换时恢复原状态；定期校准补偿；
氮气流量阀	阀芯卡滞、定位器失效、总线通信中断	月度总线状态检查/年度校准	更换后执行现场总线站号设定及参数恢复（BELIMO需恢复开度-流量特性曲线）
路由器模块	电源损坏、端口浪涌击穿、配置丢失	月度指示灯检查/年度更换	更换前记录IP地址及网络配置，预留预配置备用模块实现快速替换

4.1 预防性维护策略与周期规划

机械部件方面，定期检查主轴（喷枪旋转轴）振动、温度及集电器信号，按计划更换传动皮带并校准张紧力；清洁*X*/*Z*轴防护罩、导轨丝杠及送丝机构，补充适量润滑脂，保证润滑的同时也要避免油脂进入熔射单元。熔射单元需每季度拆卸清理送丝装置，每月检查喷嘴磨损，每半年校验送丝编码器零点。电气与网络方面，定期查看路由器状态指示灯，用热成像仪监测焊机模块及驱动器温度，定期备份数控系统数据，确保数字资产安全。

4.2 基于状态监测的精准维护

针对关键部件实施在线或离线状态监测，主要手段包括：

a. 振动分析。在关键轴承座和主轴上安装加速度传感器，定期采集振动信号进行频谱分析；

b. 热成像检测。定期扫描电气柜、焊机模块、驱动器等关键电气元件，异常发热点往往是接触不良、过载或元件老化的前兆。工艺参数趋势监控：持续监控关键工艺参数稳定性，如电弧电压均方根值缓慢上升可能预示焊机模块性能下降或喷嘴磨损加剧；

c. 工艺参数趋势监控。持续监控关键工艺参数稳定性，如电弧电压均方根值缓慢上升可能预示焊机模块性能下降或喷嘴磨损加剧。

4.3　典型故障诊断与排除实践

结合现场维修记录与报警日志,归纳出以下典型故障案例:

a. 电弧监控报警,电流低于最小值。诊断发现:在喷涂过程中监控电路小于100 A,检查焊机输出电压正常,测量回路发现电阻值偏大,检查电刷回路,发现碳刷偏磨接触不良,出现焊瘤。解决方案:每月清洁碳刷,到期更换碳刷;

b. 气体流量异常导致喷涂中断。生产中氮气流量监控报警,程序自动中断。检查发现,氮气流量剧烈波动,超出允许范围。诊断确认流量控制阀开度-流量特性曲线漂移,且比例-积分-微分(Proportional Integral Derivative,PID)参数失配。解决方案为更换控制阀、执行站号设定与参数标定。处理后流量恢复稳定。

4.4　预防性维护实施案例及效果对比

以送丝装置为例,该单元包含送丝轮、导丝管、压紧机构及编码器。原维护策略为“每半年清理一次,出现送丝不畅或电弧波动时再检修”。在实际运行中,该方式导致送丝阻力波动频繁,电弧电流标准差由正常值±70 A下降至±20 A,涂层厚度均匀性提升。

调整方案如下。将清理周期缩短至每季度一次,并增加2项预防操作:每月测量送丝轮压紧力,标准值为(120±5) N;每2周用压缩空气吹扫导丝管内壁积碳。同时建立送丝电机负载电流的日监控台账,设定预警阈值(连续3天负载电流超过额定值12%即触发维护)。

实施效果如下。连续运行4个月后统计,送丝装置引发的电弧中断故障由改进前的每月2~3次降至0.5次,下降78%;因送丝阻力波动导致的涂层厚度超差批次由每季度4批降至1批。送丝电机驱动器负载电流的上升速率由改进前的每月增长15%降至每月增长4%,编码器信号漂移现象未再出现。表3所示为改进前后的关键指标对比。

表3　送丝装置预防性维护实施前后效果对比

事件指标	改进前(事后维修)	改进后(预防性维护)
每月电弧中断预报警次数/次	2.3	0.5
涂层厚度超差批次(每季度)/批	4	1
送丝电机负载电流月波动范围/%	15	4
编码器信号漂移报警次数(半年)/次	3	0

该案例表明,将维护动作前移、细化状态监测指标,可有效降低核心单元的突发故障率,验证了预防性维护策略在双丝喷涂装备上的适用性。

5　基于维护的装备性能改善实践

5.1　针对薄弱环节的工程化改进

通过故障履历与质量数据分析发现,原排气系统气流速度偏低(不足10 m/s),导致粉尘二次附着引发涂层夹杂、气孔等缺陷,且存在火灾隐患。通过升级管路、设定最小排气流量并优化参数,将气流速度提升至12 m/s。改进后,涂层缺陷率下降70%,积尘状况显著改善。

5.2　基于数据驱动的维护策略优化

针对氮气流量控制阀,通过采集其开度指令与实际流量反馈的历史数据,发现运行超过8个月后,同一开度下的实际流量值较初始标定值偏低约6%,且响应滞后时间从0.2 s增至0.5 s。该趋势表明阀芯磨损或定位器特性发生漂移。根据这一规律,将流量阀的预防性校准周期从原定的12个月缩短至8个月,并增加每季度一次的开度-流量特性现场比对。实施后,因流量波动导致的喷涂中断事故由每年4次降至1次,气丝比控制在目标区间的比例由86%提升至95%。

5.3　维护与质量改善的联动

主要工序流程为:机械粗化→加热曲轴箱→双丝电弧熔射→缸孔双丝电弧熔射→精镗→珩磨→光学终检。如图1所示,光学测量系统作为流程终点,其检测数据应定期反馈给产品质量技术团队[5]。在此基础上构建“工艺执行—装备保障—检测评价—分析改善”闭环控制机制。由该设备工艺执行层、装备精度保障层、光学检测评价层、数

据分析反馈层、参数优化修正层组成，形成全流程质量持续改善闭环。

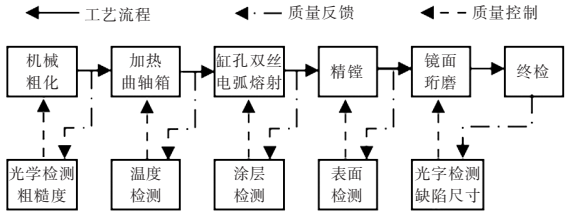


图1 缸孔电弧喷涂工艺流程

实施六西格玛方法论（Define、Measure、Analyze、Improve、Control，DMAIC）维护改善项目，运用六西格玛方法论将维护工作作为改善项目实施[4]。针对“涂层针孔缺陷率超标”，分析原因包括气体纯度、环境湿度、除尘效果、丝材质量等。维护团队检查气路过滤器有效性、抽气阀负压值、车间温湿度控制设备，通过系统分析找到根本原因，实施改进措施并通过统计过程控制（Statistical Process Control，SPC）控制图监控效果。

6 结论

本研究通过对装备核心工艺公式的系统梳理与分析，揭示了从原理推导维护要点的通用路径。焦耳热公式表明电流平方对热输入起主导作用，电流波动超±2%将导致熔滴尺寸不均。有效热输入公式揭示了电压、电流与喷枪速度的耦合关系，需定期校准送丝同步性及导电碳刷接触电阻。焊丝熔化平衡模型中，送丝速度与电流的实时匹配依赖于恒张力送丝装置及编码器的无漂移反馈，故须定期清洁编码器、润滑传动单元并校验信号电流。熔滴运动方程与喷管出口气流速度公式共同说明，雾化气流速度及滞止压力是控制熔滴细化的关键，衍生出氮气流量阀定期标定、总线参数备份及气路过滤器维护。涂层厚度相关公式建立了工艺参数与质量指标的定量桥梁，强调送丝速度、进给速度、丝径、缸径的匹配关系，需通过光学检测数据闭环修正经验系数与沉积效率。氮气流量匹配公式明确了气丝比的重要性，要求定期检查喷口磨损及质量流量计零点漂移。

上述分析表明，从工程公式的变量敏感性出发，可逆向识别关键部件（编码器、送丝装置、流量阀、喷嘴等）的失效模式，进而制定针对性维护周期与操作规范。这一“原理→公式→变量→部件→维护”的逆向推导方法，为复杂特种装备维护体系构建提供了可复用范式，实现了从通用物理规律到具体设备保全原则的跨越。

运用该方法解析光学终检机（全360°成像及珩磨附着力评价）的维修维护，同样取得良好效果，设备误判与微停现象几乎完全消除。由此反推设备设计初衷：每日清洁镜头元器件，驱动电柜保持冷却恒温，气源压力稳定以确保测量工作台气悬浮正常，同时保证消音器有效、运动轴润滑到位、定期清洁传感器等。这些实践验证了逆向推导方法的普适性，表明其同样可推广至其他复杂工艺装备的维护分析中，具有广泛的工程应用价值。

参考文献：

[1] 黄勇，季强，何勇，刘瑶. 无缸套全铝合金气缸体缸孔内壁涂层的制备及性能研究[J]. 汽车工艺与材料，2019(7): 37-43.

[2] 李明，赵华. 汽油机铝合金缸孔等离子喷涂摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报，2022，42(3): 456-464.

[3] 朱子新，梁秀兵，徐滨士，杜则裕. 高速电弧喷涂熔滴速度的数值模拟及试验[J]. 焊接学报，2002(1): 5-8.

[4] 赵一鸣，周涛. DMAIC方法在喷涂设备维护中的探索与实践[J]. 设备管理与维修，2023(8): 22-25.

[5] 孙国栋，刘文. 内腔表面三维形貌光学测量技术及进展(特邀)[J]. 中国光学，2025，18(1): 1-12.

AT&M