Management Science and Engineering 管理科学与工程, 2026, 15(6), 1163-1175
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/mse
https://doi.org/10.12677/mse.2026.156112

Hans汉斯

高压阀门密封面超音速等离子喷涂操作人员量化技能评价体系构建与工程验证

刘广成，吉　莹，陈子龙

江苏省特种设备安全监督检验研究院盐城分院，江苏　盐城

收稿日期：2026年10月6日；录用日期：2026年10月28日；发布日期：2026年11月9日

摘　要

国内热喷涂行业对喷涂作业人员能力考核长期依赖企业内部定性评价，缺少适配高压阀门密封面严苛服役工况的成套量化评价方案，普遍存在重理论、轻实操，考核指标与成品涂层性能脱节，缺乏喷涂故障应急处置考核，工艺可追溯性未纳入人员能力评价等工程痛点。本文依托KJ(Y)202631项目$L_{32}(4^{10})$多因素正交喷涂试验结果，结合项目自研喷涂工艺评定记录模板、实操量化评分细则与理论考核题库，系统辨识超音速等离子喷涂全流程岗位技能要素，构建实操权重60%、理论权重40%的喷涂操作人员量化技能评价体系。该体系划分为设备调试、工艺参数调控、喷涂精度与成品涂层质量控制、故障应急处置四大实操模块，配套标准化闭卷理论考核、全流程工艺归档模板与双重合格判定准则；将设备校准偏差、工艺参数波动、涂层厚度均匀性、涂层缺陷管控、工艺记录时效精度、质量溯源准确率转化为可量化考核指标。通过对20名不同从业年限喷涂人员开展试点考核验证，结果表明：经本评价体系筛选的合格操作人员，可将人为因素诱发的涂层质量缺陷占比控制在5%以内，喷涂批次间涂层性能波动 ≤5%，工艺记录完整率达100%，质量问题溯源准确率 ≥90%。本研究弥补了高压阀门密封面喷涂岗位人员能力量化评价的技术空白，可为阀门制造企业人员技能培训、岗位准入资质管理及行业团体标准编制提供成套工程化技术方案与数据支撑。

关键词

超音速等离子喷涂，高压阀门，密封面涂层，喷涂操作人员，量化技能评价，工艺评定，质量溯源，正交试验

Construction and Engineering Verification of a Quantitative Skill Evaluation System for Supersonic Plasma Spray Operators on Sealing Surfaces of High-Pressure Valves

Guangcheng Liu, Ying Ji, Zilong Chen

文章引用: 刘广成, 吉莹, 陈子龙. 高压阀门密封面超音速等离子喷涂操作人员量化技能评价体系构建与工程验证[J]. 管理科学与工程, 2026, 15(6): 1163-1175. DOI: 10.12677/mse.2026.156112

Yancheng Branch, Jiangsu Special Equipment Safety Supervision and Inspection Research Institute, Yancheng Jiangsu

Received: October 6, 2026; accepted: October 28, 2026; published: November 9, 2026

Abstract

The ability assessment of spray operators in the domestic thermal spray industry has long relied on qualitative, in-house evaluations within enterprises. There is a lack of a comprehensive quantitative evaluation scheme adapted to the demanding service conditions of high-pressure valve sealing surfaces. Prominent engineering pain points prevail, including an overemphasis on theory over hands-on operation, a disconnect between assessment indicators and finished coating performance, the absence of assessments covering spray fault emergency response, and the failure to incorporate process traceability into personnel capability evaluation. Based on the results of the $L_{32}(4^{10})$ multi-factor orthogonal spray test of Project KJ(Y)202631, and combined with the self-developed spray process qualification record template, hands-on quantitative scoring rules, and theoretical examination question bank, this paper systematically identifies the job skill elements throughout the entire spray process and constructs a quantitative skill evaluation system for supersonic plasma spray operators, with hands-on operation weighted at 60% and theory at 40%. The system is divided into four hands-on operation modules—equipment commissioning, process parameter regulation, spray accuracy and finished coating quality control, and fault emergency response—supported by a standardized closed-book theoretical examination, a full-process process archival template, and dual pass criteria. It converts equipment calibration deviation, process parameter fluctuation, coating thickness uniformity, coating defect control, process recording time accuracy, and quality traceability accuracy into quantifiable assessment indicators. Through pilot assessment and verification conducted on 20 spray personnel with different years of experience, the results show that qualified operators selected by this evaluation system can control the proportion of coating quality defects induced by human factors within 5%, keep coating performance fluctuation between spray batches ≤ 5%, achieve a 100% process record completeness rate, and attain a quality problem traceability accuracy ≥ 90%. This study fills the technical gap in quantitative capability evaluation for spray personnel on high-pressure valve sealing surfaces, and can provide a complete set of engineering-ready technical solutions and data support for personnel skill training in valve manufacturing enterprises, post-entry qualification management, and the compilation of industry group standards.

Keywords

Supersonic Plasma Spraying, High-Pressure Valve, Sealing Surface Coating, Spray Operators, Quantitative Skill Evaluation, Process Qualification, Quality Traceability, Orthogonal Test

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 绪论

在石油化工、核电、煤化工等能源化工重大装备系统中，高压阀门是管道系统实现介质通断、压力调节、介质节流的核心特种设备部件。超音速等离子喷涂(Supersonic Plasma Spraying, SAPS)融合等离子弧高温加热与超音速焰流加速双重技术优势，喷涂过程粉末颗粒获得极高飞行动能，沉积形成的 WC-Co 金属陶瓷涂层具备致密度高、结合强度高、硬度高、耐磨耐蚀性能优异等突出优势，现已成为高压阀门

密封面表面强化的主流工艺路线[1] [2]。超音速等离子喷涂属于典型的工艺敏感型制造技术，最终涂层性能是设备状态、喷涂粉末理化性能、正交试验优化得到的成套工艺参数、操作人员实操能力、环境条件多因素耦合共同输出的结果[3] [4]。现有大量研究更多聚焦于设备升级、粉末配方改良、工艺参数正交优化、涂层组织与服役性能表征[5]，往往忽略“人”这一关键变量对最终产品质量的影响。国外热喷涂行业如德国 DVS、美国 ASTM 体系已经建立相对完善的热喷涂操作人员资质考核制度，对设备校准精度、工艺参数波动范围、应急处置流程均设置量化阈值，考核通过颁发从业人员资质证书[6]。但是国外整套考核体系建立在进口高端喷涂设备基础之上，指标严苛，培训考核成本高昂，整套规范直接照搬到国内中小型阀门制造企业会出现无法适配国内 12Cr13、30CrMo 国产阀门基体、国产煤油–氧气超音速等离子喷涂设备的生产现状，因此亟需构建一套本土化、可落地、适配高压阀门密封面特种工况的量化技能评价体系。

基于上述工程现实需求，本文依托 KJ(Y)202631 科技项目，该项目在 $L_{32}(4^{10})$正交试验设计的基础上，系统研究煤油流量、煤油压力、氧气流量、氧气压力、枪距、送粉克数、送粉转速、载气流量、燃烧室压力、载气压力共 10 项工艺参数对 12Cr13、30CrMo 基体 WC-Co 涂层结合强度、硬度、耐磨、耐腐蚀、微观组织的耦合影响；同步编制完成《超音速等离子喷涂在高压阀门密封面涂层喷涂工艺评定规范记录模板》、喷涂操作人员实操量化考核评分表、两套完整理论考核试卷。本文以该项目全部研究产出为基础，系统辨识喷涂全流程岗位关键技能要素，构建“实操 60%＋ 理论 40%”的量化技能评价体系，开展试点考核验证，明确体系实施路径、局限性与优化方向，为热喷涂行业操作人员规范化管理提供理论依据与成套工具文件。

2. 超音速等离子喷涂岗位全流程作业环节与关键技能要素辨识

高压阀门密封面超音速等离子喷涂不是单一的“喷枪喷涂”动作，是一套包含前期准备、设备调试、材料核查、喷涂实施、过程监控、故障处置、后处理、性能检测、记录归档、质量问题溯源的完整工艺链条[7]。涂层质量缺陷可能产生于链条中任意一个人为操作失误。本文结合 KJ(Y)202631 项目 $L_{32}(4^{10})$正交试验完整实施流程，同时结合《超音速等离子喷涂在高压阀门密封面涂层喷涂工艺评定规范记录模板》的各个表单，把完整作业流程拆解为 7 大一级作业阶段，识别每个阶段对应的操作人员必须具备的技能要素，为后续考核模块设计提供事实依据。

2.1. 阶段一：作业前期准备阶段

作业前期准备阶段是喷涂正式开工之前的全部工作，很多质量隐患起源于准备阶段工作疏漏，该阶段容易被忽略。该阶段操作人员的工作内容包含：接收技术任务书、理解阀门工况需求(介质类型、温度、压力等级，如核电高温高压水、石化腐蚀油气、煤化工高磨损介质)；阅读理解工艺文件(正交试验得到的工艺参数窗口、基体预处理技术要求、粉末技术条件)；基体来料核查(12Cr13/30CrMo 基体材质、尺寸、基体表面状态)；喷涂粉末入库验收(WC-Co 粉末的粒度分布、成分、受潮情况)；工艺气体(Ar、H_2、煤油、氧气)质量与压力检查；基体预处理作业：喷砂粗化、有机溶剂超声波除油、烘干；作业环境确认(环境温度、湿度，喷涂间粉尘、通风、防爆条件)；检测设备(拉伸试验机、维氏硬度计、盐雾箱、SEM、渗透探伤设备)校准证书有效性核查[8]。

2.2. 阶段二：设备调试与校准阶段

设备调试与校准是正式喷涂前的核心实操环节，也是本项目实操考核第一个核心模块。本项目正交试验中 10 项关键设备参数(煤油流量、煤油压力、氧气流量、氧气压力、枪距、送粉克数、送粉转速、载

气流量、燃烧室压力、载气压力)全部依赖调试环节设置到位[9]。该阶段作业内容：等离子枪拆装与校准，喷枪喷嘴、电极磨损检查；等离子枪枪距(喷涂距离)校准；各管路气体流量、压力零点标定；送粉系统调试，送粉转速标定，检查送粉管路是否堵塞；冷却水路系统检查；安全联锁装置有效性确认；全部辅助检测设备核查校准状态；调试完成后开展小试试喷，观察焰流状态、粉末送粉状态，确认无异常后方进入正式喷涂。

2.3. 阶段三：工艺参数设定与喷涂实施阶段

该阶段是涂层成型的核心过程，也是人为因素影响最大的环节。作业内容：根据工艺评定文件设置全套 10 项工艺参数；确认基体装夹定位；设定喷枪移动速度、喷枪喷射角度、涂层搭接率；启动喷涂作业；喷涂全过程持续监控各项工艺参数；按照工艺评定模板要求记录参数，记录时间精度 ≤1min；喷涂过程出现参数漂移、送粉堵塞、弧压异常、气体压力波动时及时识别，执行停机、故障排查处置；分层喷涂过程监控涂层的状态；喷涂结束后试样妥善转运，避免涂层磕碰损伤。

2.4. 阶段四：现场故障应急处置阶段

故障应急处置贯穿设备调试、喷涂实施全流程，并非独立分割的工序，因此本评价体系将故障处置作为情景化考核嵌入设备调试、喷涂实施模块，而不是单独设置一张试卷大题。超音速等离子喷涂生产现场高频典型故障包含：① 送粉管路粉末堵塞/半堵塞；② 等离子弧压异常升高、弧光闪烁、电弧不稳定；③ 煤油、氧气、氩气气体管路泄漏，压力骤升/骤降；④ 冷却水路漏水；⑤ 粉末团聚造成送粉脉动；⑥喷嘴电极快速烧蚀。

2.5. 阶段五：喷涂后试样后处理与试样流转阶段

喷涂结束并不代表作业完成。该阶段工作包含：喷涂完成之后试样的去应力退火后处理；喷涂试样防护转运，防止涂层磕碰划伤；试样编号标识(试样编号必须与工艺记录一一对应)；按照工艺评定要求准备平行试样，安排后续的结合强度、硬度、往复磨损、中性盐雾、SEM 微观、渗透探伤检测；试样、工艺记录、检测委托单三者关联，避免试样混样错样。

2.6. 阶段六：涂层性能检测配合与结果判读阶段

喷涂操作人员不一定是专职检测人员，但是必须能够读懂本项目全套检测标准，能够配合检测人员完成试样送检，并且可以初步判读涂层检测结果。作业内容：熟悉 GB/T8642-2002 结合强度测试、GB/T4340.1-2024 维氏硬度、ASTMG133-22 往复磨损、GB/T10125-2021 中性盐雾、GB/T18851.1-2024 渗透探伤标准；看懂检测报告各项指标；能够区分“涂层合格、轻微缺陷、严重失效”；当检测结果出现不合格时，可以结合自己的喷涂过程记录，参与开展初步根因分析，区分是操作因素、材料因素还是设备因素[10] [11]。

关键技能要素：掌握涂层各项指标合格阈值(结合强度 ≥60 MPa，孔隙率 ≤2%，涂层厚度偏差 ≤±3 μm，批次性能波动 ≤5%等)；可以读懂检测报告；具备工艺–性能联动分析的基础能力，不是只负责喷，看不懂检测结果。常见短板：大量操作人员只会做喷涂，完全看不懂检测报告；检测报告给出涂层结合强度不达标，无法回忆喷涂过程参数记录，无法参与根因分析，全部工作推给技术人员。

2.7. 阶段七：质量问题溯源、记录归档阶段

该阶段是特种设备零部件喷涂工艺评定闭环的最后一环，也是现有绝大多数企业考核完全忽略的模块。作业内容：全部设备校准记录、材料验收记录、喷涂过程参数记录表、故障处置记录、涂层检测报

告、试样图片资料统一整理归档；当涂层出现质量缺陷，启动质量溯源流程，查阅全套归档记录，定位缺陷发生环节，质量问题溯源准确率 ≥ 90%；形成问题处理记录，记录问题编号、现象、溯源分析、处置措施、处置结果，填写工艺评定记录模板的“质量追溯与问题处理记录”表单；根据质量问题，总结操作改进点，形成经验反馈。

2.8. 岗位技能要素汇总分类

将上述 7 大作业阶段的全部技能要素，进一步归纳为两大考核维度：实操技能维度(占总分 60%)、理论知识维度(占总分 40%)，为后续评价体系框架设计提供输入。

1) 实操技能维度(60 分)，分为四大模块：模块 M1 设备调试与校准(15 分)：对应阶段二；包含喷枪校准、气体调节、辅助设备核查；故障情景(设备调试阶段故障)嵌入本模块；模块 M2 工艺参数控制与过程记录(20 分)：对应阶段三；参数设定精度、喷涂过程参数稳定性、工艺记录及时性(记录时间精度 ≤ 1 min)；喷涂过程故障情景嵌入本模块；模块 M3 喷涂精度与成品涂层质量控制(25 分)：对应阶段三、五、六；涂层厚度均匀性、外观缺陷控制、不同工况工艺适配能力；本模块将喷涂试样的实测涂层性能纳入评分，实现操作–成品质量闭环；模块 M4 全流程质量溯源归档(作为扣分项嵌入全部实操模块)：对应阶段七，记录表单填写完整性、故障处置记录、质量溯源分析能力。

2) 理论知识维度(40 分)，对应的知识板块：板块 K1 超音速等离子喷涂基础原理；等离子弧产生、粉末加热–熔融–沉积机理；$L_{32}(4^{10})$正交试验基本概念，多参数耦合交互机理；板块 K2 高压阀门密封面工况知识：PFF65-140 闸板阀门−46℃~180℃、14~140 MPa 服役条件；核电、石化、煤化工三类典型工况对涂层性能差异化需求；密封面失效模式；板块 K3 工艺参数知识：煤油流量、氧气流量、送粉转速、枪距、载气系统共 10 项参数各自对涂层结合强度、硬度、孔隙率、耐磨耐蚀的影响，参数之间耦合交互关系；板块 K4 材料与基体知识：12Cr13、30CrMo 基体材料特性；WC-Co 喷涂粉末性能指标；基体预处理原理；板块 K5 检测与标准体系：GB/T8642-2002、GB/T4340.1-2024、GB/T10125-2021、ASTMG133-22、GB/T18851.1-2024 标准；各项涂层合格指标；板块 K6 设备安全、故障应急处置：H_2、煤油易燃易爆介质安全；各类喷涂故障识别、标准处置流程；个体防护；板块 K7 工艺评定与质量溯源：工艺评定全流程要求，工艺记录时间精度要求，批次性能波动指标，质量溯源流程。

3. 量化技能评价体系总体框架与模块详细设计

3.1. 评价体系设计总体原则

结合特种设备焊工考核制度、德国 DVS 喷涂人员考核经验，同时结合国内阀门制造企业现实条件，本评价体系设计遵循 6 项基本原则[12]-[14]：

(1) 实操导向原则：高压阀门密封面超音速等离子喷涂属于实操特种岗位，避免“重理论、轻实操”。设置实操权重 60%，理论权重 40%；并且设置实操、理论各自最低合格分数线，即使总分达标，如果实操达不到最低分依旧判定考核不合格，杜绝“纸上谈兵”。

(2) 量化可测原则：尽量全部考核条目转化为可以仪器测量、可以客观记录的量化指标，最大程度降低评委主观定性打分。例如“等离子枪校准偏差 ≤2 mm”，直接用卡尺测量得到数值，而不是评委主观判断“校准比较规范”。所有扣分都对应可观测客观事实。

(3) 闭环评价原则：评价链条为：理论笔试→现场实操(设备调试–喷涂–故障情景处置–填写工艺评定记录模板)→喷涂制备考核试样→试样开展全套涂层性能检测→综合全部结果给出考核结论。喷涂后的涂层实测性能是实操得分的重要依据，不能只看操作动作。

(4) 情景化故障处置原则：故障应急处置不单独出一张试卷，而是在实操考核中人为设置故障情景(送

粉半堵塞、弧压异常、气体压力波动)，观察操作人员现场识别、停机、排查、处置、记录的完整流程，更贴合真实生产。

(5) 工况适配原则：考核不能只让操作人员机械背诵一组最优参数；考核需要设置不同阀门工况任务，考察操作人员能否根据介质、温度、压力条件，从正交试验得到的工艺窗口中选择适配的参数组合，考察对工艺－工况－性能耦合逻辑的理解。

(6) 可追溯归档原则：把工艺评定记录模板完整填写、故障记录、质量溯源分析全部纳入考核内容；全部考核原始资料(打分表、理论试卷、工艺评定记录、涂层检测报告)统一归档，作为人员上岗、复评、质量事故复盘的档案资料。

3.2. 评价体系总体架构与合格判定规则

3.2.1. 分值权重

总分 100 分：① 实操考核：60 分(占比 60%)；② 理论闭卷考试：40 分(占比 40%)。

实操 60 分内部模块分配：M1 模块：设备调试(15 分)；M2 模块：工艺参数控制与过程记录(20 分)；M3 模块：喷涂精度与成品涂层质量控制(25 分)；故障应急处置、质量溯源归档不单独分配独立大题分值，作为扣分项嵌入 M1、M2、M3 全部实操环节，出现故障处置错误、记录缺失直接在对应模块扣减分数。

理论闭卷考试卷面满分设置为 100 分，考试结束之后按照 0.4 权重折算为本体系的 40 分。例如理论试卷考生得到 80 分，折算后 $=80\times0.4=32$ 分计入总分。理论试卷设置三大题型：单项选择题、多项选择题、判断题。

3.2.2. 双重合格判定规则(核心制度设计)

设计逻辑：本岗位是实操特种岗位，实操必须达标；同时该工艺属于多参数耦合的复杂工艺，操作人员不能完全不懂基础理论、标准、安全、溯源知识，因此理论同样设置最低门槛。考核合格必须同时满足下面三个条件，缺一不可：1) 考核总分数 ≥ 70 分；2) 实操考核原始得分 ≥ 36 分(实操总分 60 分，实操最低合格线为 60%，防止理论高分但是实操完全不合格)；3) 理论折算后得分 ≥ 24 分(理论总分 40 分，理论最低合格线 60%，防止完全没有理论基础只凭手工经验上岗)。只要任意一条不满足，本次考核判定不合格。

3.3. 实操考核各模块详细量化评分细则

模块 M1：设备调试模块(15 分)，包含三个子项：等离子枪校准(5 分)、气体流量调节(5 分)、辅助设备核查(5 分)；本模块实操考核情景设置故障：喷枪喷嘴轻微磨损、气体压力小幅异常。

M1-1 等离子枪校准(5 分)

考核内容：操作人员完成等离子枪拆装、磨损件检查、枪距(喷涂距离)校准。评分标准：等离子枪枪距校准偏差 ≤ 2 mm，完整按照流程完成检查与校准得满分 5 分。扣分细则：1) 枪距校准实测偏差每超出 0.5 mm，扣 1 分；2) 未检查喷嘴、电极磨损直接开展校准，扣 2 分；3) 完全没有执行枪距校准步骤，直接进入喷涂，本小项 5 分全部扣除；4) 情景故障处置扣分项：考核设置喷嘴轻微磨损故障；操作人员没有识别磨损直接投入使用，额外扣 2 分(从本模块总分扣，最低扣至 0 分，不出现负分)。

M1-2 气体流量调节(5 分)

考核内容：煤油、氧气、Ar/H_2 各路气体流量、压力调节，记录调节响应时间。评分标准：气体流量调节精度偏差 $\leq \pm 0.5$ L/min；参数调节响应时间 ≤ 30 s，调节操作规范得满分 5 分。扣分细则：1) 气体流量实测偏差每超出 0.1 L/min 扣 1 分；2) 调节响应时间超过 30 s，扣 2 分；3) 出现气体调节完成之后没有确认仪表稳定就读数，扣 1 分；4) 情景故障：设置气体压力小幅波动故障；操作人员没有识别压力

异常直接进入下一步，扣 2 分。

M1-3 辅助设备核查(5 分)

考核内容：核查拉伸试验机、维氏硬度计、盐雾试验箱、渗透探伤设备校准有效期；核查喷涂配套工装、冷却系统状态；填写设备检查记录。评分标准：全部设备核查到位，记录完整得满分 5 分。扣分细则：1) 漏检查一台关键检测设备，扣 1 分；2) 发现设备已经超出校准有效期仍然继续使用，扣 2 分；3)只做检查，不在工艺评定记录模板填写记录，扣 2 分。

模块 M2：工艺参数控制与过程记录模块(20 分)，分为三个子项：关键参数设定精度(10 分)、喷涂过程参数稳定性(6 分)、参数记录及时性(4 分)；本模块嵌入喷涂过程情景故障：送粉管路半堵塞、等离子弧压异常波动。

M2-1 关键参数设定精度(10 分)

考核内容：操作人员根据给定的阀门工况条件，从 L_{32} 正交试验工艺窗口，选择对应的全套 10 项工艺参数，完成设备参数输入设定。10 项参数：煤油流量、煤油压力、氧气流量、氧气压力、枪距、送粉克数、送粉转速、载气流量、燃烧室压力、载气压力。评分标准：全部参数设定均处于工艺允许偏差范围内，工况工艺选型正确，得满分 10 分。扣分细则：1) 任意一项参数设定值超出正交试验工艺允许偏差范围，本项扣 3 分；2) 参数数值输入错误，每一项扣 2 分；3) 工况适配选型错误(例如给强腐蚀介质工况选用侧重高磨损、耐蚀不足的参数窗口)，本小项直接扣 5 分。

M2-2 喷涂过程参数稳定性(6 分)

考核内容：正式喷涂全过程连续记录 10 项工艺参数，监控喷涂过程参数漂移。合格判定基准：喷涂过程各项工艺参数波动不超过本项目工艺评定给定允许偏差；同一试样喷涂过程，参数超差波动累计不超过 2 次。评分标准：喷涂全过程参数波动全部在允许范围之内，无异常漂移得满分 6 分。扣分细则：1) 喷涂过程单次参数波动超出允许偏差，扣 1 分；2) 同一个试样喷涂过程，参数超差累计 $\geq$3 次，本小项扣 5 分；3) 情景故障扣分项：考核设置送粉半堵塞、弧压闪烁故障；操作人员未能识别异常继续喷涂，每发生一类故障处置失误，扣 2 分；故障识别、及时停机、排查、记录完整不扣分。

M2-3 参数记录及时性(4 分)

考核内容：操作人员在喷涂作业过程，同步填写工艺评定记录模板的“工艺实施阶段参数记录表”；记录时间精度要求 $\leq$1 min；喷涂过程发生参数调整、故障事件必须即时记录，不允许事后批量补记。评分标准：全部关键参数记录完整，时间精度 $\leq$1 min，故障、参数变更即时记录，得满分 4 分。扣分细则：1) 记录时间延迟 $>$ 1 min，每一处扣 1 分；2) 漏记一组关键工艺参数，扣 2 分；3) 喷涂过程发生故障、参数调整，没有即时记录，事后补记，本小项全部 4 分扣除。

模块 M3：喷涂精度与成品涂层质量控制模块(25 分)，三个子项：涂层厚度均匀性(10 分)、涂层外观质量控制(5 分)、工况适配与涂层综合性能预判(10 分)。本模块是“操作–成品性能闭环”的核心，考核制备的试样必须送第三方检测机构开展全套涂层性能检测，检测结果直接参与打分，而不是仅看喷枪动作。

M3-1 涂层厚度均匀性(10 分)

考核内容：考核试样密封面至少取 3 个测点，测试涂层厚度；合格指标：涂层厚度偏差 $\leq \pm 3$ μm；同批次 3 个平行试样厚度性能波动 $\leq$ 5%。评分标准：厚度偏差 $\leq \pm 3$ μm，批次间波动 $\leq$ 5%得满分 10 分。扣分细则：1) 涂层厚度实测偏差每超出 1 μm 扣 2 分；2) 同一批次平行试样厚度波动 $>$ 5%，直接扣 5 分。

M3-2 涂层外观质量(5 分)

考核内容：喷涂完成之后试样开展外观目视 + 着色渗透探伤 GB/T18851.1-2024 检测；考核指标：涂层无起皮、剥落、表面裂纹、开口针孔等有害缺陷；涂层总孔隙率 ≤2%。评分标准：渗透探伤无有害缺陷，孔隙率 ≤ 2%，得满分 5 分。扣分细则：1) 渗透探伤发现 1 处起皮或者裂纹缺陷，扣 3 分；出现 2 处及以上本小项 5 分全部扣除；2) 涂层孔隙率 ＞2%，本小项直接扣 5 分。

M3-3 工况适配性与涂层综合性能预判(10 分)

考核内容：给操作人员提供明确的阀门工况任务，例如：工况 A：核电高温高压水介质，优先保障结合强度与抗热震；工况 B：石化含 H_2S 腐蚀性油气工况，优先控制开口孔隙，保障耐蚀；工况 C：煤化工含固体颗粒介质，优先保障硬度与耐磨性能。操作人员完成工艺参数选型喷涂之后，要求结合工艺，预判本次制备试样的结合强度、硬度、耐蚀性能的大致水平；后续对比实验室实测涂层性能结果，评判预判准确度。评分标准：工艺选型与工况匹配，涂层性能预判结果与实测结果基本吻合，得满分 10 分。扣分细则：1) 工况－工艺选型错误，扣 5 分；2) 涂层关键性能预判和实测结果严重偏离，扣 3 分；3) 附加硬性否决条件：若考核试样实测出现结合强度 ＜60 MPa，无论前面操作动作打分多高，M3 模块本大项直接扣除 10 分。(工程逻辑：高压阀门密封涂层结合强度 60 MPa 是最低门槛，试样直接不达标，说明操作人员实操产出的产品不能满足工程最低底线，不能给高分)。

实操模块总体扣分项补充(贯穿全部 M1~M3)：质量溯源归档能力。在全部实操完成之后，操作人员需要完整填写《超音速等离子喷涂在高压阀门密封面涂层喷涂工艺评定规范记录模板》全套表单，包含基本信息、设备校准记录、材料验收记录、工艺实施记录、故障处理记录、性能检测记录、质量追溯与问题处理记录。扣分项：1)全套模板表单有重要表单未填写，每次扣 3 分，总分从实操模块总分中扣减，实操最低 0 分；2)发生模拟故障，但是没有在质量追溯问题处理记录表完整记录问题编号、现象、溯源分析、处理措施、处理结果，每一次故障事件扣 2 分。

3.4. 理论闭卷考核模块详细设计

理论考试卷面满分 100 分，折算为本评价体系的 40 分权重；考试时间 90 分钟；题型分布：单项选择题 60 题(每题 1 分，60 分)；多项选择题 20 题(每题 1 分，20 分)；判断题 20 题(每题 1 分，20 分)；合计 100 分。

理论考试命题七大知识板块与分值分配

1) 板块 K1：超音速等离子喷涂基础原理，正交试验 $L_{32}(4^{10})$、多参数耦合机理，单选 12 题，多选 4 题，判断 4 题，合计 20 分；2) 板块 K2：高压阀门密封面工况知识(PFF65-140 闸板阀门，−46℃~180℃、14~140 MPa，核电/石化/煤化工工况差异、密封面失效模式)，单选 12 题，多选 4 题，判断 4 题，合计 20 分；3) 板块 K3：工艺 10 项参数对涂层性能的影响、参数耦合交互规律，单选 10 题，多选 3 题，判断 3 题，合计 16 分；4) 板块 K4：基体(12Cr13、30CrMo)、WC-Co 喷涂粉末、基体预处理知识，单选 8 题，多选 2 题，判断 2 题，合计 12 分；5) 板块 K5：相关标准(GB/T8642-2002、GB/T4340.1-2024、GB/T10125-2021、ASTMG133-22、GB/T18851.1-2024)、涂层各项性能合格指标，单选 8 题，多选 3 题，判断 3 题，合计 14 分；6) 板块 K6：喷涂设备安全、易燃易爆介质防护、各类故障识别与应急处置流程，单选 8 题，多选 2 题，判断 2 题，合计 12 分；7) 板块 K7：工艺评定、工艺记录时间精度、批次性能波动、质量溯源闭环管理，单选 2 题，多选 2 题，判断 2 题，合计 6 分。

3.5. 考核组织与评委资质要求

为保障考核结果公平可靠，本评价体系对考核组织、评委设置明确要求：1) 评委人数：实操考核评

委不少于 2 人；至少 1 名评委具备热喷涂工艺高级工程师职称，至少 1 名评委具备特种设备检验/工艺评定相关工作经验；不允许单人独立完成全部实操打分。2) 实操考核的设备、粉末、基体试样必须与企业实际生产条件保持一致，不能使用专门“优化过的试验设备”做考核，保证考核结果能够映射真实生产能力。3) 实操考核的基体、粉末、工艺材料应当和企业量产使用物料保持一致；考核试样基体优先选用工程实际 12Cr13、30CrMo 阀门基体坯料。4) 实操考核必须设置至少 2 个故障情景(例如送粉半堵塞、弧压异常、气体压力波动)，不能全程设备完全平稳无异常。5) 考核制备的试样必须委托具备 CMA 资质第三方检测机构完成全套涂层检测，检测报告作为考核档案核心附件，不允许企业内部自测作为唯一判定依据，降低自测带来人为偏差。

4. 评价体系配套标准化工具文件编制

依托 KJ(Y)202631 项目全部产出，本评价体系不是单纯一套打分规则，而是配套完整可直接复制使用的工具文件包，全部文件均已经完成编制，包含：文件 1：《超音速等离子喷涂高压阀门密封面涂层喷涂技能量化考核评分表》(实操打分原始记录)；文件 2：《超音速等离子喷涂高压阀门密封面涂层喷涂工艺评定规范记录模板》(完整归档表单)；文件 3：《理论模拟试卷(第一套)》(单选 + 多选 + 判断 + 参考答案)；文件 4：《理论模拟试卷(第二套)》(单选 + 多选 + 判断 + 参考答案)；文件 5：《超音速等离子喷涂操作人员量化技能评价体系实施细则》(组织流程、评委资质、补考复评、档案归档、试样要求)。

4.1. 文件 1：实操量化考核评分表(核心实操打分表单)

表单包含：考核编号、考核日期、被考核人姓名、单位、考核工况任务说明、评委签字；M1 设备调试 15 分、M2 工艺参数控制 20 分、M3 喷涂精度与成品质量 25 分；故障处置扣分项、记录归档扣分项；实操总分；实操是否达到 ≥ 36 分门槛；理论卷面得分、折算后理论得分、是否 ≥ 24 分；总分；最终考核结论(合格/不合格)；补考记录栏。表单每一个打分项均预留实测数据填写位置，优先填写实测数值，再填写扣分数值，避免只写分数没有原始证据。例如枪距校准偏差，表格先填写实测 2.8 mm，再填写扣 1 分，而不是直接写扣 1 分。

4.2. 文件 2：喷涂工艺评定规范记录模板(本项目原有成果，纳入考核体系归档文件)

模板完整章节：第一章基本信息表(项目名称、评定对象阀门规格、工况介质压力、基体材料、喷涂材料、实施单位、评定周期、记录人联系方式)；第二章工艺准备阶段记录：2.1 设备检查记录表(设备名称、校准项目、校准标准、校准结果、校准日期、备注)，包含超音速等离子喷涂系统、拉伸试验机、维氏硬度计、往复磨损试验机、盐雾试验箱、SEM；2.2 材料验收记录表：喷涂粉末、基体材料、保护气体；记录规格参数、检验项目、检验结果、检验日期；第三章工艺实施阶段参数记录表；记录时间精确到分钟，记录时间、工艺参数设定值、实际监测值、允许偏差、达标情况、异常情况及处理；包含主气流量、喷涂距离、粉末粒径、送粉速率、Ar/H_2 气体流量比、喷枪移动速度、枪校准偏差、喷枪角度；备注栏明确：每 15 分钟记录一次关键参数，参数调整即时记录，超差详细记录处理；第四章工艺验证阶段性能检测记录；4.1 涂层性能检测结果表：检测项目(结合强度、硬度、磨损、盐雾、涂层厚度、孔隙率等)，检测方法、合格标准、3 个平行试样测试结果、平均值、批次波动值、达标情况；4.2 不同批次性能对比记录表，至少记录 3 个批次，统计批次间性能波动；第五章质量追溯与问题处理记录表；问题编号、问题描述(发生时间、现象)、涉及参数/环节、溯源分析过程、溯源准确率、处理措施、处理结果(已解决/未解决)、记录人；指标要求质量问题溯源准确率 ≥90%；第六章签字确认页：编制人、审核人、批准人签字、日期；模板末尾的总说明：本模板随工艺评定全流程实时填写，数据真实完整，无相关填“无”；全部附件(检测报告、校准证书、质量证明文件)随模板一并归档。

4.3. 文件 3、文件 4：两套理论模拟试卷(第一套正式考核卷，第二套培训模拟卷)

两套试卷题型结构完全一致：单选 60 题、多选 20 题、判断 20 题，满分 100 分，考试 90 分钟；每套试卷附带完整参考答案。试卷命题来源：KJ(Y)202631 项目 $L_{32}(4^{10})$正交试验研究成果、GB/T、ASTM、DL/T 相关标准、高压阀门密封面工况、喷涂故障应急处置、工艺评定与质量溯源。两套试卷可以实现：① 第一套用于正式闭卷考核；② 第二套用于企业内部上岗之前培训模拟测试，培训阶段先做第二套模拟卷，找出知识薄弱点，针对性培训之后再参加正式考核，降低正式考核的不合格率。(本文附件完整附上两套试卷全文)

4.4. 文件 5：评价体系实施细则

实施细则是整套评价体系的管理性文件，主要包含：1) 评价体系适用范围：本体系适用于煤油－氧气型超音速等离子喷涂，12Cr13/30CrMo 基体，WC-Co 金属陶瓷涂层，高压阀门密封面喷涂岗位操作人员的能力评价；同时说明本体系的适用边界：若更换完全不同喷涂设备体系、喷涂粉末体系，需要对评分阈值、题库做适应性修订，不可直接全盘照搬。2) 考核前准备工作：试样、设备、粉末、气体、第三方检测机构、评委、故障情景设置；3) 实操考核完整实施步骤；4) 理论闭卷考试考场纪律；5) 评分与分数统计流程；6) 合格判定、补考、复评制度；7) 全套档案归档清单与保存期限；8) 评价结果应用建议：考核合格人员方可上岗从事高压阀门密封面喷涂作业；不合格人员不得上岗；复评触发条件(2~3 年定期复评、批量质量事故专项复评)；9) 局限性说明：本评价体系评价人的操作能力，不能替代设备验收、粉末入厂检验、成品涂层出厂检测；人员考核合格只是质量管控链条的一环，不能等同于产品质量 100%合格。

5. 试点考核实施与结果分析

5.1. 试点考核总体方案

为验证本套量化技能评价体系的可执行性、合理性，依托项目合作阀门制造企业，组织 20 名在岗超音速等离子喷涂操作人员开展试点考核。

5.1.1. 试点人员样本信息

20 名被考核人员按照从业年限分为三组：A 组：新上岗人员，从业 0~1 年，7 人；B 组：中等经验人员，从业 1~3 年，8 人；C 组：资深骨干人员，从业 ≥3 年，5 人。全部人员均在岗从事高压阀门密封面超音速等离子喷涂岗位，日常使用国产煤油－氧气超音速等离子喷涂设备，喷涂基体 12Cr13、30CrMo，喷涂粉末 WC-Co，与 KJ(Y)202631 项目试验条件保持一致。

5.1.2. 试点考核内容

全部 20 名被考核人员，完整执行本评价体系全部流程：1) 理论闭卷考试：使用第一套正式考核试卷，90 分钟闭卷；2) 实操考核：实操考核设置任务：石化工况高压阀门密封面喷涂任务，介质含 H_2S 油气，工况压力等级 25 MPa，要求操作人员自主选择适配工艺窗口；实操考核设置两处情景故障：① 喷涂中途送粉管路半堵塞；② 等离子弧压异常闪烁；评委按照 M1-M3 量化打分表逐项记录实测数值；被考核人必须完整填写全套《工艺评定规范记录模板》；3) 每位被考核人员实操考核制备 3 件平行考核试样(12Cr13 基体)；试样统一送具备 CMA 资质第三方检测机构，开展全套检测：涂层结合强度 GB/T8642-2002、维氏硬度 GB/T4340.1-2024、往复磨损 ASTMG133-22、中性盐雾 GB/T10125-2021、SEM 微观、渗透探伤 GB/T18851.1-2024；4) 采集全部原始数据：理论试卷得分、实操各模块得分、工艺记录填写质量、故障处置得分、试样各项涂层性能检测报告；5) 统计指标：人员考核通过率；不同工龄组别得分差异；

人为因素造成涂层缺陷占比；批次涂层性能波动；工艺记录完整率；质量溯源分析准确率；同时统计操作人员高频失分点，识别行业共性能力短板。

5.2. 试点考核结果统计

5.2.1. 整体考核通过率

20 名试点人员，按照本体系三项同时满足的合格判定规则(总分 ≥70，实操 ≥36，理论 ≥24)：初次考核直接合格人数：11 人，初次通过率 55%；初次不合格 9 人，其中：A 组新员工 7 人全部初次不合格；B 组中等经验 8 人中 4 人不合格；C 组 5 名资深骨干全部初次考核合格。不合格 9 人里面，有 6 人属于实操得分不足 36 分(实操门槛未通过)；2 人属于理论折算分数不足 24 分；1 人总分虽然超过 70，但是实操分数未达 36 分，触发双重门槛规则判定不合格。该结果验证：如果只看总分，会把部分理论尚可、实操能力严重不足的人员误判合格；本体系设置实操、理论各自最低分数线的双重门槛是完全必要的。9 名初次不合格人员参加一次补考；补考之后又有 4 人达到全部三项合格条件；最终 20 人总计合格 15 人，总体最终合格率 75%；仍然 5 人补考之后依旧不达标，判定本期考核不通过，建议企业开展专项岗位培训之后再参加下一轮考核。

5.2.2. 合格人员对应的涂层质量统计

将最终考核合格的 15 名人员的考核试样涂层检测结果汇总统计：1) 人为因素引发涂层缺陷占比：考核试样中，由操作因素造成起皮、裂纹、厚度超差、结合强度不足等缺陷占比 4.2%，实现本项目指标要求人为因素涂层缺陷占比 ≤ 5%；2) 涂层批次间性能波动：合格操作人员制备试样，同批次涂层性能波动平均值 4.1%，满足 ≤5%的工艺评定指标；3) 工艺记录完整率：全部合格人员填写的工艺评定记录模板完整率 100%；关键工艺记录时间精度全部满足 ≤1 min 要求；故障事件均做到即时记录，无事后大面积补记现象；4) 质量溯源准确率：在考核设置的两处故障情景完成质量溯源分析，合格人员溯源分析平均准确率 92.3%，满足本项目 ≥90%的指标；5) 涂层关键性能：合格人员制备的全部考核试样，涂层结合强度全部 ≥60 MPa，平均 68.7 MPa；涂层硬度 ≥1100 HV；渗透探伤未发现有害裂纹、开口针孔；涂层总孔隙率 ≤2%。

与之对比：初次考核不合格 9 名人员的试样统计：人为因素缺陷占比 18.6%；批次涂层性能平均波动 8.7%；工艺记录完整率只有 44%；大量存在记录事后补记；部分试样出现结合强度低于 60 MPa 的情况。

试点数据充分证明：本套量化评价体系筛选出的合格人员，对应的涂层实物质量指标明显优于不合格人员，体系可以有效区分操作人员真实岗位能力，考核结果和最终涂层产品质量具备良好的一致性，避免“考核高分，产品质量差”的失效评价。

5.2.3. 各模块失分统计，识别行业共性能力短板

统计 20 名被考核人员全部扣分点，归纳出现频率最高的短板，为后续企业定向培训提供依据：(1) 实操 M2 模块(工艺参数控制与过程记录)是失分最高模块，高频失分点：① 喷涂过程遇到故障情景(送粉半堵塞、弧压异常闪烁)，部分人员不能第一时间识别故障征兆，继续强行喷涂；该问题在新员工、部分中等经验员工非常突出；② 工艺记录不重视，喷涂过程忙于操作，参数记录延后，考核结束之后再统一补填记录，违反记录时间精度 ≤1 min 的硬性要求；很多现场操作人员存在“重喷涂干活，轻记录归档”的固有习惯；③ 多参数耦合工况适配能力不足：拿到石化含 H_2S 强腐蚀工况任务，仍然直接套用高磨损煤化工工况的参数窗口，只记住一组“最优参数”，不理解参数－工况－性能的耦合逻辑，这暴露了很多操作人员培训只背参数表，没有理解正交试验揭示的多因素交互机理。(2) M1 设备调试模块高频失分：

等离子枪校准工作流于形式，简单目测枪距，没有采用量具实测，枪距校准偏差超标；部分人员不检查喷嘴电极磨损状态直接上机。(3) M3 喷涂精度与成品质量模块失分：喷枪移动速度不稳定，造成涂层厚度偏差超标；部分操作人员只关注外观目视，没有建立“渗透探伤、孔隙率、结合强度等实验室检测结果才是涂层合格的最终判据”的理念，以为肉眼看着光滑即涂层合格。(4) 理论试卷高频错题集中板块：故障应急处置题目、工艺评定质量溯源题目、多参数耦合正交试验理解类题目。大量人员单参数记忆尚可，但是遇到多因素交互的综合选择题错误率很高；故障处置选择题错误率很高；说明传统培训大量讲授原理和单参数，故障处置、质量溯源、多参数耦合逻辑培训严重不足。

5.3. 本评价体系对比传统定性考核的优势分析

结合试点考核采集的数据，对比传统企业定性考核模式，本量化评价体系具备五点突出优势：(1) 考核结果与涂层实物质量强相关，解决“考核与生产两张皮”。传统考核主要看操作动作、理论试卷，和最终喷涂试样的实测涂层性能关联性弱；本体系将第三方 CMA 机构涂层检测结果纳入实操评分，考核输出的合格人员，对应的试样涂层缺陷率、批次波动全部满足工艺评定指标，实现人－工艺－产品质量闭环。(2) 双重合格门槛规则，规避“偏科人员”误判合格。试点样本中出现 2 名人员理论考试分数很高，但是实操试样出现结合强度不合格，如果只看总分，会判定合格；但是本体系设置实操 ≥36 分硬性门槛，将该类人员判定不合格，避免把懂理论但是动手能力不足的人员放行上岗，贴合特种工艺岗位现实风险。(3) 情景化故障处置考核，补齐传统理想工况考核盲区。传统考核设备一切平稳，看不到操作人员遇到异常的真实处置水平；本考核人为设置送粉堵塞、弧压异常故障，试点发现超过一半新员工不能正确处置；如果没有该考核环节，这些人员上岗之后遇到真实故障，会带来批量试样报废甚至安全风险。(4) 把工艺可追溯、质量溯源能力纳入考核，适配特种设备阀门的合规管理需求。传统考核几乎完全忽略记录归档能力；本体系将全套工艺评定模板填写质量作为扣分项，倒逼操作人员建立“喷涂作业，记录与喷涂同等重要”的质量意识，试点合格人员工艺记录完整率达到 100%，对企业后续 TSG 特种设备体系审核、质量事故溯源都具备现实价值。(5) 全部指标量化，降低评委主观偏差，考核可复现，可推广复制。传统定性考核“操作较规范”这类描述，不同评委打分差异巨大；本体系每一项扣分都有实测数值(枪距偏差多少、厚度偏差多少、记录延迟时间)，不同评委之间打分一致性显著提升；整套配套文件包(打分表、两套试卷、工艺评定归档模板、实施细则)可以完整输出给其他阀门企业，其他单位只需要少量适配设备阈值即可落地，不需要从零开发全套考核资料。

5.4. 试点发现本体系现存待优化点

通过试点考核，同时发现本评价体系部分可以迭代优化的地方，为后续版本修订提供依据：1) 本次试点样本量 20 人，样本规模有限；后续需要扩大试点，联合多家阀门制造企业，采集更多操作人员考核数据，对各模块分值权重、部分扣分阈值做统计学优化；2) 本体系当前是面向煤油－氧气超音速等离子喷涂、WC-Co 涂层、12Cr13/30CrMo 基体；如果企业使用 HVOF 超音速火焰喷涂、铁基非晶涂层、其他基体，不能直接照搬全部阈值，需要修订评分细则与题库；3) 本次实操考核故障情景设置 2 类故障，后续可以扩充故障情景库，增加冷却水路漏水、气源压力突变等更多故障案例；4) 当前考核是实验室条件下的标准试样；下一步可以探索增加“阀门实体零件小批量喷涂”作为拓展考核项目，进一步缩小实验室考核与工厂真实产品之间的差距。

6. 结论

本文针对高压阀门密封面超音速等离子喷涂岗位现有考核方式定性化、重理论轻实操、与成品涂层质量脱节、缺失故障处置与质量溯源考核等行业痛点，依托 KJ(Y)202631 项目 $L_{32}(4^{10})$正交试验成果，结

合工艺评定归档模板、实操评分细则、两套理论试卷，构建了实操 60%、理论 40%的操作人员量化技能评价体系。体系划分设备调试、工艺参数控制、喷涂精度与成品质量控制三大实操模块，将故障处置、工艺记录溯源以情景扣分项嵌入全流程，设置总分、实操、理论三重合格判定门槛，把枪距偏差、涂层厚度波动、记录时间精度、溯源准确率转化为可度量考核指标。通过 20 名不同工龄人员试点验证表明：经本体系考核合格人员，人为因素引发涂层缺陷占比可控制在 5%以内，批次涂层性能波动 ≤5%，工艺记录完整率 100%，质量溯源准确率 ≥90%，考核结果与涂层实物质量具备良好一致性。本体系补齐了热喷涂特种岗位量化评价短板，配套形成可直接落地的工具文件包，可为阀门企业人员上岗培训、内部资质管理以及后续行业团体标准编制提供技术支撑。同时本体系仍存在试点样本有限、故障情景库有待扩充等不足，后续应联合多家企业扩大样本量，进一步优化考核阈值，并探索增加阀门实体工件喷涂拓展考核项目。

基金项目

江苏省特检院 2026 年度科技计划项目(KJ(Y)202631)。

参考文献

[1] 邓茂林, 梁东辉, 罗庚. 高温阀门设计的关键技术要点探究[C]//中国机械工业质量管理协会. 技术创新与品牌发展研讨会暨论文评审会论文集. 北京: 中国机械工业质量管理协会, 2026: 594-597.

[2] 胡智敏. 高温航空阀用电磁机构优化设计[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2021.

[3] 李春刚, 李博. 超音速火焰喷涂工艺及涂层质量控制[J]. 新技术新工艺, 2014(9): 114-116.

[4] 康政. 大吨位水电活门铸钢件生产制造技术研究[J]. 铸造工程, 2026, 50(S1): 6-9.

[5] 陈志聪. 碳化钨复合涂层的制备技术及其耐磨耐蚀性的研究进展[J]. 腐蚀与防护, 2024, 45(4): 1-9.

[6] 石宇颢, 郭继亮, 刘利, 等. 钢结构智能喷涂产线设计与关键技术研究[J]. 建筑技术, 2026, 57(20): 2442-2447.

[7] 甘奥. 石油行业涂装工艺评定体系标准化应用研究[J]. 广州化工, 2026, 54(10): 187-190.

[8] 卢俊文. 面向航空器关重件再制造的激光增材工艺与缺陷研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2025.

[9] 杨佳晖. 热喷涂工装设计及其实践应用[J]. 现代制造技术与装备, 2024, 60(6): 143-145.

[10] GB/T 19824-2026 热喷涂热喷涂操作人员考核要求[S]. 北京: 中国标准出版社, 2026.

[11] GB/T 8642-2002 热喷涂抗拉结合强度的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.

[12] Huber, R., Ohliger-Volmer, A., 张清华. 关于热喷涂从业人员教育培训和资格认证前所未有的重要性和需求度认识[J]. 热喷涂技术, 2014, 6(4): 49-54+48.

[13] 戴亮, 鞠逸凡, 付正强, 等. 卡塔尔 NFPS EPC2 项目烟管框架热喷铝防腐施工技术研究[J]. 现代涂料与涂装, 2026, 29(7): 44-48.

[14] 高俊国, 叶雷, 袁文明. 特种工艺标准技术要素及内涵浅析[J]. 航空标准化与质量, 2025(4): 5-9.