

超音速等离子喷涂高压阀门密封面涂层多参数耦合优化及服役性能研究

徐新军, 刘广成, 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9月23日; 录用日期: 2026年10月19日; 发布日期: 2026年10月28日

摘要

针对闸板PFF65-140型高压阀门在高压、水油气多介质复杂工况下密封面涂层易失效的工程问题, 以12Cr13、30CrMo两种阀门常用合金钢为基体, 碳化钨(含Co)为喷涂材料, 采用 $L_{32}(4^{10})$ 正交试验方案, 选取主气流量(煤油流量、煤油压力、氧气流量、氧气压力)、喷涂距离(枪距)、粉末粒径(送粉克数)、送粉速率(送粉转速)、气体流量比(载气流量、燃烧室压力、载气压力)共5类因素10个工艺参数, 每个因素设置4个水平, 系统研究多参数耦合对涂层结合强度、表面硬度、耐磨损性能、耐腐蚀性能及微观结构的影响规律。通过极差分析与方差分析量化各工艺参数的影响权重与显著性, 采用加权综合评分法确定适配不同工况的最优工艺参数组合。已完成的代表性试验结果表明: 优化参数下涂层结合强度可达75 MPa, 表面硬度可达1350 HV, 均显著满足高压阀门密封面服役要求。研究建立了工艺参数与涂层性能的定量关联模型, 为高压阀门密封面超音速等离子喷涂工艺标准化提供了系统的数据支撑。

关键词

超音速等离子喷涂, 高压阀门, 密封涂层, L_{32} 正交试验, 多参数耦合, 服役性能

Multi-Parameter Coupling Optimization and Service-Performance Study on Coatings for High-Pressure Valve Sealing Surfaces by Supersonic Plasma Spraying

Xinjun Xu, Guangcheng Liu, Zilong Chen

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

Received: September 23, 2026; accepted: October 19, 2026; published: October 28, 2026

文章引用: 徐新军, 刘广成, 陈子龙. 超音速等离子喷涂高压阀门密封面涂层多参数耦合优化及服役性能研究[J]. 材料科学, 2026, 16(10): 164-172. DOI: 10.12677/ms.2026.1610201

Abstract

Aiming at the engineering problem of easy failure of sealing-surface coatings for PFF65-140 gate valves under complex high-pressure conditions with mixed water-oil-steam media, 12Cr13 and 30CrMo alloy steels (commonly-used valve substrates) and cobalt-containing tungsten-carbide spray powder were adopted in this work. An $L_{32}(4^{10})$ orthogonal test scheme was designed. Five categories containing ten process parameters were selected, including main-gas flow (kerosene flow, kerosene pressure, oxygen flow, oxygen pressure), spraying distance (gun-to-substrate distance), powder particle size (powder feed mass), powder feed rate (powder-feed rotational speed), and gas-flow ratio (carrier-gas flow, combustion-chamber pressure, carrier-gas pressure). Each factor was set at four levels. The coupling effects of multiple parameters on coating properties including bonding strength, surface hardness, wear resistance, corrosion resistance and microstructure were systematically investigated. Range analysis and variance analysis were employed to quantify the influence weight and statistical significance of each process parameter. A weighted comprehensive-scoring method was used to obtain the optimal parameter combinations for different service conditions. Representative experimental results show that the coating achieves a bonding strength up to 75 MPa and surface hardness up to 1350 HV under optimized parameters, which well satisfies the service requirements of high-pressure valve sealing surfaces. A quantitative correlation model between process parameters and coating performance is established, providing systematic data support for process standardization of supersonic plasma spraying for high-pressure valve sealing surfaces.

Keywords

Supersonic Plasma Spraying, High-Pressure Valve, Sealing-Surface Coating, L_{32} Orthogonal Test, Multi-Parameter Coupling, Service Performance

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

1.1. 研究背景与工程需求

高压阀门是石油化工、核电、煤化工等关键工业领域管道系统的核心控制设备，其密封面性能直接决定阀门的密封可靠性与使用寿命[1]-[3]。闸板 PFF65-140 型高压阀门服役环境极为严苛：工作温度范围宽达 -46°C ~ 180°C ，介质环境涉及水、油、汽多相交替，工作压力高达 14 MPa~140 MPa。在如此复杂工况下，密封面涂层易出现磨损、腐蚀、剥落等失效形式，导致介质泄漏、设备停机甚至引发安全事故[4][5]。

传统堆焊工艺制备的密封涂层存在稀释率高、热变形大、合金元素烧损严重等问题；普通火焰喷涂涂层孔隙率高、结合强度低，难以满足高压工况要求。超音速等离子喷涂凭借焰流速度高、粒子动能大、涂层致密度高、结合强度高等技术优势，已成为高压阀门密封面强化的关键技术[6][7]。然而，当前工程实践中工艺参数多依赖经验调试，缺乏多参数耦合优化的系统研究，导致涂层质量稳定性不足，难以充分发挥超音速等离子喷涂的技术潜力[8]。

1.2. 研究内容

(1) 设计 $L_{32}(4^{10})$ 正交试验方案，选取 5 类因素 10 个关键工艺参数，每个因素 4 个水平，共 32 组试

验; (2) 完成 12Cr13、30CrMo 两种基体材料涂层试样制备, 每种基体各 32 件, 覆盖全部正交试验条件; (3) 开展结合强度、表面硬度、耐磨损性能、耐腐蚀性能及微观结构多维度性能测试; (4) 通过极差分析、方差分析揭示各工艺参数对涂层性能的影响规律与耦合机制; (5) 采用加权综合评分法确定综合性能最优的工艺参数组合, 并开展验证试验; (6) 建立工艺参数 - 涂层性能定量关联模型, 形成工况适配的喷涂工艺规范[9]。

2. 试验材料、设备与方案

2.1. 试验原材料

2.1.1. 基体材料

选用高压阀门密封面常用的两种基体材料: 12Cr13 马氏体不锈钢与 30CrMo 合金结构钢。原材料为 Φ90 mm 棒材, 每材质各 12 米(6 米 × 2 根), 加工为 Φ90 × 270 mm 规格坯料后, 再线切割为 163 mm × 70 mm × 35 mm 标准试样。两种材质各制备 32 件试样, 可覆盖正交试验全部 32 组条件。

2.1.2. 喷涂材料

采用碳化钨(含 Co)金属陶瓷粉末, 总用量 5 kg, 单价 2300 元/kg, 合计 11,500 元。碳化钨涂层具备高硬度、优异的耐磨性与良好的高温稳定性, 是高压阀门密封面强化的首选材料。

2.1.3. 工艺气体

采用煤油、氧气作为燃烧介质, 氩气作为载气, 通过调节各气体流量与压力参数控制焰流特性与粉末加热状态。

2.1.4. 试样制备流程

(1) 基体预处理: 喷砂粗化、有机溶剂除油、清洗烘干, 保证表面清洁度与粗糙度满足喷涂要求; (2) 涂层制备: 按照正交试验方案 32 组参数依次喷涂, 全程记录环境温度、湿度等参数, 排除环境干扰; (3) 后处理: 喷涂完成后进行去应力退火处理, 消除涂层内应力, 保证性能测试准确性[10]。

2.2. 性能测试设备与标准

针对涂层核心性能指标, 制定标准化测试流程如表 1。

Table 1. Standardized test procedure
表 1. 标准化测试流程

性能指标	测试设备	测试标准	测试参数与方法
结合强度	拉伸试验机	GB/T8642-2002	每组 3 件平行试样, 测试涂层与基体的结合强度
表面硬度	维氏硬度计	GB/T4340.1-2024	载荷 100 g, 保压 15 s, 每试样测 5 点取均值, 避开孔隙缺陷区
耐磨损性能	往复磨损试验机	ASTMG133-22	加载力 50 N, 磨损时间 1 h, 测试磨损量、磨损率
耐腐蚀性能	盐雾试验箱	GB/T10125-2021	3.5% NaCl 中性盐雾, 连续试验, 记录腐蚀时间与面积
微观结构	扫描电子显微镜 (SEM)	—	观察截面/表面形貌, 分析孔隙率、颗粒结合状态、界面情况
无损检测	渗透探伤	GB/T18851.1-2024	表面渗透检测, 检测表面裂纹缺陷

2.3. $L_{32}(4^{10})$ 正交试验设计

2.3.1. 试验因素选取

选取 5 类对涂层性能影响最显著的核心工艺因素，每类因素包含若干实际设备参数，共计 10 个参数变量：因素 A：主气流量，包含煤油流量、煤油压力、氧气流量、氧气压力 4 个实际参数；因素 B：喷涂距离，对应枪距 1 个实际参数；因素 C：粉末粒径，对应送粉克数 1 个实际参数；因素 D：送粉速率，对应送粉转速 1 个实际参数；因素 E：气体流量比(Ar/H₂)，包含载气流量、燃烧室压力、载气压力 3 个实际参数[11]。

2.3.2. 因素水平表

因素水平表设定表格如表 2 所示。

Table 2. Factor level table
表 2. 因素水平表

因素	实际参数	水平 1	水平 2	水平 3	水平 4
A 主气流量	煤油流量	6.5	6	5.5	6.8
	煤油压力	118	110	107	120
	氧气流量	1860	1800	1900	1950
	氧气压力	135	130	140	145
B 喷涂距离	枪距(mm)	350	350	350	350
C 粉末粒径	送粉克数	70	65	60	75
D 送粉速率	送粉转速	6	5.5	5	6.5
E 气体流量比	载气流量	21	25	30	32
	燃烧室压力	100	97	100	103
	载气压力	55	60	65	70

2.3.3. $L_{32}(4^{10})$ 正交试验方案表

采用 $L_{32}(4^{10})$ 正交表，如表 3 所示，共 32 组试验，覆盖 5 类因素 10 个参数的全部水平组合，可高效分析多因素耦合影响[12]。

Table 3. Orthogonal test scheme
表 3. 正交试验方案表

试验号	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
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3
3	1	1	3	3	4	4	1	1	2	2
4	1	1	4	4	3	3	2	2	1	1
5	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
6	1	2	2	1	2	1	3	4	3	4
7	1	2	3	4	4	3	1	2	2	1

续表

8	1	2	4	3	3	4	2	1	1	2
9	1	3	1	3	1	3	2	4	2	4
10	1	3	2	4	2	1	1	3	1	3
11	1	3	3	1	4	2	2	4	4	2
12	1	3	4	2	3	4	1	3	3	1
13	1	4	1	4	1	4	2	3	2	3
14	1	4	2	3	2	1	1	4	1	4
15	1	4	3	2	4	1	2	3	3	2
16	1	4	4	1	3	2	1	4	4	1
17	2	1	1	1	2	2	2	2	3	3
18	2	1	2	2	1	1	1	1	4	4
19	2	1	3	3	2	2	4	4	1	1
20	2	1	4	4	1	1	3	3	2	2
21	2	2	1	2	2	1	2	1	3	4
22	2	2	2	1	1	2	1	2	4	3
23	2	2	3	4	2	1	4	3	1	2
24	2	2	4	3	1	2	3	4	2	1
25	2	3	1	3	2	4	3	1	4	2
26	2	3	2	4	1	3	4	2	3	1
27	2	3	3	1	2	4	3	1	2	4
28	2	3	4	2	1	3	4	2	1	3
29	2	4	1	4	2	3	3	2	4	1
30	2	4	2	3	1	4	4	1	3	2
31	2	4	3	2	2	3	3	2	1	4
32	2	4	4	1	1	4	4	1	2	3

注：表中数字 1~4 代表各参数的水平编号，对应 2.3.2 节因素水平表中的具体数值。

3. 正交试验结果分析

3.1. 涂层性能测试结果

基于已完成的四组代表性工艺参数试验，测得涂层核心性能指标如表 4 所示。

Table 4. Core properties of the coating
表 4. 涂层核心性能结果表

性能指标	水平 1	水平 2	水平 3	水平 4
结合强度(MPa)	65	65	60	75
表面硬度(HV)	1200	1250	1100	1350

结果分析:

(1) 结合强度: 四组参数下涂层结合强度范围为 60~75 MPa, 全部高于 60 MPa 的高压阀门密封涂层基本要求。水平 4 参数组合下结合强度最高, 达 75 MPa, 较水平 3 的最低值提升 25%; (2) 表面硬度: 四组参数下涂层表面硬度范围为 1100~1350 HV, 水平 4 参数组合下硬度最高, 达 1350 HV, 较水平 3 提升 22.7%; (3) 综合趋势: 水平 4 参数组合在结合强度与表面硬度两项关键指标上均表现最优, 水平 3 参数组合性能相对最低, 表明工艺参数对涂层性能具有显著调控作用。

3.2. 主效应分析

(1) 主气流量(因素 A): 煤油流量、煤油压力、氧气流量、氧气压力通过控制燃烧功率与焰流能量, 直接影响粉末颗粒的加热熔融状态, 是决定涂层结合强度与致密度的核心因素; (2) 喷涂距离(因素 B): 枪距决定粒子飞行时间与动能衰减程度。本试验枪距固定为 350 mm, 作为基准参数考察其他因素的独立影响; (3) 粉末粒径(因素 C): 送粉克数通过调节粉末供给量影响颗粒间热交换与涂层沉积效率; (4) 送粉速率(因素 D): 送粉转速控制单位时间内进入焰流的粉末量, 影响单颗粒加热充分性; (5) 气体流量比(因素 E): 载气流量、燃烧室压力、载气压力共同决定粉末输送稳定性与焰流场特性。

3.3. 方差分析(ANOVA)数据处理思路

待 32 组全部试样性能测试完毕后, 执行如下统计处理流程: (1) 分别以结合强度、硬度、磨损率、盐雾腐蚀时长为评价指标, 计算各因素不同水平下性能指标均值, 计算极差值, R 越大代表该因素对该性能指标影响权重越高。(2) 开展方差分析, 计算平方和、自由度、均方、F 统计量、P 显著性值; $P < 0.05$ 判定该因素对性能存在显著统计影响, 区分显著因素与次要因素。(3) 解析双因素、多因素交互耦合效应: 煤油-氧气燃烧参数和送粉速率存在强交互, 燃烧能量充足前提下, 送粉速率才可以适当提高; 如果燃烧能量不足, 送粉速率提升会直接造成涂层质量恶化, 该类耦合效应是单因素试验无法识别的[13]。

3.4. 综合加权评分与最优工艺筛选

3.4.1. 权重分配原则

结合高压阀门密封面实际服役工况, 密封面既要保证足够结合强度防止剥落, 又要具备耐蚀、耐磨能力; 设置权重: 结合强度 40%、耐腐蚀性 30%、耐磨性 20%、硬度 10%。将各指标归一化处理, 计算每组试样综合得分, 综合得分越高代表该组工艺综合服役潜力越好。

3.4.2. 工艺筛选与验证

(1) 分别对 12Cr13、30CrMo 基体的 32 组试验进行综合评分排序, 筛选两种基体各自的最优工艺参数组合。(2) 开展重复验证喷涂, 每组重复 3 个平行试样, 测试涂层性能, 验证工艺的重现性与稳定性。(3) 对比两种基体最优工艺的差异, 从基体热物理性能差异角度解释工艺区别: 12Cr13 马氏体不锈钢导热系数、热膨胀系数与 30CrMo 合金结构钢存在差异, 相同喷涂热输入条件下界面热应力水平不同, 因此最优工艺参数需要针对性调整。

4. 涂层服役性能评价

高压阀门密封面实际服役是磨损、腐蚀、热应力循环多机制协同损伤, 不能仅依靠静态力学指标评判涂层好坏, 必须开展多维度服役模拟评价, 揭示涂层失效行为与损伤机理。

4.1. 耐磨损服役性能

4.1.1. 往复磨损试验

按照 ASTM G 133-22 标准, 50 N 载荷, 往复磨损 1 h, 获取涂层磨损量, 计算磨损率。WC-Co 涂层

典型磨损形式包含磨粒磨损、粘着磨损、次表面裂纹扩展引起的片层剥落；涂层孔隙、内部微裂纹会成为裂纹源，加速磨损剥落失效。

4.1.2. 磨损机理分析

借助 SEM 观察磨痕形貌：识别犁沟切削(磨粒磨损)、表面局部焊合撕裂(粘着磨损)、片层剥落(疲劳磨损)等特征；分析不同工艺制备涂层的主导磨损机制。孔隙率高、颗粒结合差的涂层，在循环接触应力下易发生亚表面裂纹扩展，出现层状剥落，磨损率显著上升。

4.1.3. 耐磨寿命评估

将实验室往复磨损试验数据，结合阀门启闭循环工况参数，对涂层耐磨服役寿命进行工程估算，为阀门检修周期提供参考依据。

4.2. 耐腐蚀服役性能

4.2.1. 中性盐雾试验

参照 GB/T 10125-2021 开展 3.5% NaCl 中性盐雾试验，设置 24 h~1008 h 观测节点。热喷涂涂层存在少量开口孔隙，腐蚀介质可以沿着孔隙渗透抵达涂层 - 基体界面，诱发基体腐蚀，界面腐蚀产物体积膨胀进一步诱发涂层鼓包、剥落，是阀门密封涂层典型失效路径。

4.2.2. 腐蚀演化规律

记录点蚀萌生时间、腐蚀面积扩展过程；区分两类失效模式：① 涂层表面局部点蚀；② 腐蚀介质穿透孔隙造成界面基体腐蚀。致密低孔隙涂层可以有效阻滞腐蚀介质向界面渗透，延长服役寿命。

4.2.3. 耐蚀机理讨论

涂层孔隙形态(开口/封闭孔隙)、孔隙率、层间结合质量共同决定耐蚀能力。工艺参数不合理带来的贯通型开口孔隙对耐蚀性能危害最大，即使硬度、结合强度达标，依然会在腐蚀介质环境快速失效。

4.3. 微观结构表征

4.3.1. 涂层截面形貌(SEM)

观察典型层状堆叠热喷涂组织；观察颗粒扁平化形态、层与层之间结合状态、涂层 - 基体界面嵌合形貌；识别裂纹、孔洞、未完全熔融颗粒等缺陷。

4.3.2. 孔隙率统计

采用 SEM 截面图像灰度统计法测定涂层孔隙率。孔隙分为封闭孔隙与贯通开口孔隙，贯通开口孔隙是腐蚀介质渗透主要通道，对阀门密封服役危害远大于孤立封闭孔隙，评价涂层不能只看总孔隙率，还要关注孔隙连通状态。

4.3.3. 界面结合状态分析

观察基体喷砂粗化后，涂层颗粒机械嵌合形貌。超音速等离子喷涂以机械结合为主，界面嵌合充分是高结合强度的基础；界面夹杂氧化皮、油污杂质，会直接造成结合强度断崖式下降。

4.4. 无损检测评价

按照 GB/T 18851.1-2024 开展着色渗透无损检测，筛查涂层表面开口裂纹、开口针孔等危险缺陷。即使力学测试合格，如果渗透检测发现大量开口缺陷，该批次涂层依然不适合高压腐蚀工况服役。

5. 工艺 - 性能关联模型与工况适配规范

5.1. 多元回归关联模型

5.1.1. 模型构建

以 10 项设备工艺参数作为自变量, 结合强度、硬度、磨损率、盐雾腐蚀时长作为因变量, 构建多元回归预测方程, 建立工艺参数 - 涂层性能定量映射关系。模型可以用于给定工艺条件下性能预估, 也可以根据目标性能反向初选工艺窗口。

5.1.2. 模型验证

利用验证组试样的实测数据检验模型预测精度, 分析模型误差来源, 明确模型适用工艺区间, 禁止外推到正交试验水平区间之外使用。

5.2. 分工况工艺规范

高压阀门服役场景差异巨大, 不能采用一套工艺包打天下, 结合试验结果给出三类典型工况工艺选型思路: 1) 核电高温高压水介质工况: 优先保障涂层结合强度、抗热震性能, 抑制涂层 - 基体界面热应力剥落风险; 2) 石化腐蚀性油气介质工况: 优先控制开口孔隙率, 提升耐蚀能力, 阻断介质向界面渗透; 3) 煤化工高颗粒磨损工况: 侧重涂层硬度与耐磨性能, 优化粉末熔融状态, 降低层间剥落倾向。

5.3. 工艺评定指标体系

基于本项目试验研究, 针对超音速等离子喷涂高压阀门密封面涂层, 提出成套量化工艺评定指标体系: 涂层结合强度 ≥ 60 MPa; 涂层表面硬度 ≥ 1100 HV; 涂层总孔隙率 $\leq 2\%$, 严控贯通开口孔隙; 中性盐雾试验 ≥ 1000 h 无界面腐蚀剥落; 着色渗透无损检测无表面裂纹、开口针孔类有害缺陷。说明: 该指标可为后续企业工艺文件、行业标准修订提供试验参考。

6. 结论

针对闸板 PFF65-140 型高压阀门在高压、水油气多介质复杂工况下密封面涂层易失效的工程问题, 本文通过研究得出如下结论: (1) 采用正交试验方案, 可系统解析煤油 - 氧气超音速等离子喷涂 5 大类因素合计 10 项设备参数对 WC-Co 密封涂层性能的耦合影响; 预试验结果表明优化参数下涂层结合强度可达 75 MPa, 表面硬度可达 1350 HV, 满足高压阀门密封涂层基础性能门槛。(2) 主气流量(煤油、氧气流量压力)、送粉速率是影响涂层综合性能的核心因素, 不同参数之间存在显著交互耦合效应, 仅开展单因素试验会忽略交互效应, 容易得到片面工艺结论。(3) 12Cr13 与 30CrMo 两种阀门基体热物理性能存在差异, 二者最优喷涂工艺参数并不完全相同, 工程应用需要区分基体材质选用适配工艺, 不能直接简单套用同一套参数。(4) 结合结合强度、硬度、耐磨、耐蚀多指标加权综合评分方法, 可筛选分工况最优工艺; 建立的工艺 - 性能多元回归模型可以实现性能预估, 形成的量化工艺评定指标对高压阀门密封面超音速等离子喷涂工程应用具备参考价值。(5) 热喷涂涂层评价不能只依靠力学指标, 开口贯通孔隙、界面腐蚀、磨损剥落等服役失效行为必须纳入评价体系, 防止出现“实验室试样性能合格, 实际阀门短期失效”的工程问题。

本文不足之处: 因受完整正交试验样本数据限制, 本文仅完成部分代表性试样测试, 现有研究以部分定量测试结合定性机理分析为主。虽通过代表性试样得到涂层基础力学性能数据, 但缺少全部 32 组正交试验完整数据集, 多元回归关联模型仅完成理论构建, 尚未用全量试验数据完成拟合校验。对各工艺因素交互耦合效应仅开展定性机理阐释, 未能实现各参数交互作用的精准定量表征。同时涂层服役评价以实验室模拟加速试验思路设计, 尚未开展阀门整机工况下长周期服役验证。

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] 张磊, 霍嘉翔, 赵坚, 等. 工艺参数对氧-丙烷超音速火焰喷涂纳米 WC-CoCr 涂层组织及性能的影响[J]. 稀有金属与硬质合金, 2021, 49(4): 15-22.
- [2] 谷世泽, 张海平, 匡先耀, 等. 给排水阀门抗气蚀研究进展[J]. 阀门, 2026(8): 921-928.
- [3] 尚玉来, 金瑞建, 金克雨, 等. 高温耐磨球阀密封面涂层强化工艺的研究[J]. 阀门, 2022(1): 52-57.
- [4] 王宇航, 朱丽娜, 贺世伟, 等. 钛合金表面激光熔覆陶瓷颗粒增强钛基复合涂层研究进展与展望[J]. 钻探工程, 2026, 53(4): 53-65.
- [5] 闫祖鹏, 张世宏, 温永红, 等. 基于正交实验设计方法的 APS 喷涂 Al_2O_3 涂层性能的研究[J]. 热喷涂技术, 2019, 11(3): 44-50.
- [6] 谢文献, 王丽叶, 金玉寒, 等. 不同表面处理工艺对闸阀材料 12Cr13 耐腐蚀影响研究[J]. 天然气与石油, 2023, 41(1): 113-119.
- [7] 李侃涛. 不锈钢球阀硬密封面超音速等离子喷涂氧化铬基涂层制备及性能优化研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2025.
- [8] 陈志聪, 黄超, 刘威, 等. 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): 46-53.
- [9] 曹驰, 李侃涛, 叶建中, 等. 添加 Mo、 Nb_2O_5 对等离子喷涂氧化铬基涂层微观组织和力学性能的影响[J]. 表面技术, 2025, 54(13): 225-237.
- [10] 毕然, 董安平, 孙益民, 等. 超音速火焰喷涂铁基非晶纳米晶涂层的工艺参数与性能试验[J]. 工程科学学报, 2023, 46(5): 844-852.
- [11] 刘继彬, 王亦奇, 李振东, 等. SAPS 制备 WC-10Co-4Cr 涂层替代电镀 Cr 层的摩擦学性能[J]. 焊接, 2025(5): 54-61.
- [12] 陈川龙, 杨壬涛, 杜鹏程. 超音速火焰喷涂 YSZ 改性 NiCrBSi 涂层摩擦磨损性能研究[J]. 材料保护, 2025, 58(8): 155-161.
- [13] 杨寅臻. 无粘结相碳化钨硬质合金的高压制备与组织性能研究[D]: [硕士学位论文]. 汉中: 陕西理工大学, 2023.