

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2026.05.007

## 基于 Q235A 镀锌低碳钢钝化处理的电镀设备防腐应用

孙华克<sup>1</sup>, 毛志刚<sup>1</sup>, 梁思达<sup>2</sup>

(1. 河南省工业学校 机电工程系, 河南 郑州 450011; 2. 濮阳技师学院 电气工程系, 河南 濮阳 457000)

**摘要:** 针对 Q235A 镀锌低碳钢在电镀设备中的防腐需求, 进行钝化处理工艺优化及应用性能研究。以 Q235A 低碳钢板为基材, 采用电镀锌工艺制备 8~10  $\mu\text{m}$  镀层, 经碱性除油、盐酸除锈、硫酸活化前处理后, 通过酸性氯化钾镀锌体系获得镀层。采用单因素变量法及正交实验, 研究重铬酸钾浓度、钝化温度、时间、pH 值对钝化膜性能的影响。最优工艺为: 重铬酸钾 15 g/L、温度 30  $^{\circ}\text{C}$ 、时间 7 min、pH=2.0, 此时膜层粗糙度为 0.24  $\mu\text{m}$ , 膜厚 2.3  $\mu\text{m}$ , 盐雾白锈时间达 130 h, 结合力无脱落。工艺验证显示, 处理后滚筒支架盐雾白锈时间从 40 h 提升至 150 h, 现场使用 6 个月白锈面积小于 5%。经济效益分析表明, 年综合成本下降了 20%。

**关键词:** Q235A 低碳钢; 镀锌工艺; 钝化处理; 耐腐蚀性能

**中图分类号:** TQ050.9; TG174.4 **文献标志码:** A

## Anticorrosion application of electroplating equipment based on passivation treatment of Q235A galvanized low-carbon steel

SUN Huake<sup>1</sup>, MAO Zhigang<sup>1</sup>, LIANG Sida<sup>2</sup>

(1. Department of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Industrial School, Zhengzhou 450011; 2. Department of Electrical Engineering, Puyang College of Technicians, Puyang 457000)

**Abstract:** The passivation treatment process was optimized and its application performance was examined to meet the anti-corrosion needs for Q235A galvanized low-carbon steel in electroplating equipment. An electro-galvanizing procedure was used to prepare an 8~10  $\mu\text{m}$  coating on Q235A low-carbon steel plate. The coating was obtained through an acidic potassium chloride galvanizing technique following pretreatment involving alkaline degreasing, hydrochloric acid rust removal, and sulfuric acid activation treatments. A single-factor variable method and orthogonal experiments were used to examine the effects of potassium dichromate concentration, passivation temperature, time, and pH on the performance of the passivation layer. The optimal process is as follows: potassium dichromate 15 g/L, temperature 30  $^{\circ}\text{C}$ , time 7 min, pH 2.0. At this time, roughness of the film layer is 0.24  $\mu\text{m}$ , film thickness is 2.3  $\mu\text{m}$ , white salt spray rust resistance reaches 130 h, and there is no peeling of the adhesion. Process validation shows that the salt spray white rust resistance of the treated roller bracket increases from 40 h to 150 h, with less than 5% after 6 months of on-site use. According to economic benefit analysis, the annual comprehensive cost is 20% reduction.

**Keywords:** Q235A low-carbon steel; galvanizing process; passivation treatment; corrosion resistance

收稿日期: 2025-05-07 修回日期: 2025-09-24

作者简介: 孙华克(1973—), 女, 本科, 高级讲师, 研究方向为机械工程, e-mail: sunhuake1973@163.com

通信作者: 毛志刚(1970—), 男, 本科, 正高级讲师, 研究方向为材料工程, e-mail: Jwchdd2@126.com

基金项目: 河南省教育科学规划一般课题(2025YB0646, 2023YBJ0654)

引用信息: 孙华克, 毛志刚, 梁思达. 基于 Q235A 镀锌低碳钢钝化处理的电镀设备防腐应用[J]. 电镀与精饰, 2026, 48(5): 45-52, 104.

SUN Huake, MAO Zhigang, LIANG Sida. Anticorrosion application of electroplating equipment based on passivation treatment of Q235A galvanized low-carbon steel[J]. Plating and Finishing, 2026, 48(5): 45-52, 104.

现代工业领域，电镀机器设备作为金属表面处理的核心装备，长期服役于酸碱腐蚀、湿热交变等严苛环境，面临着严峻的腐蚀防护挑战<sup>[1]</sup>。Q235A低碳钢因成本低廉、加工性能优异，成为电镀设备结构件的常用基材，但其耐蚀性不足，需通过表面防护技术提升使用寿命<sup>[2]</sup>。电镀锌工艺因能形成兼具机械保护与电化学保护的锌镀层，成为Q235A钢防腐的主流手段之一。但镀锌层在长期服役中易被腐蚀介质侵蚀，出现白锈甚至红锈，导致设备结构失效<sup>[3]</sup>。钝化处理作为镀锌工艺的关键后处理工序，可通过在锌层表面形成稳定的钝化膜进一步提升耐蚀性<sup>[4]</sup>。然而，传统铬酸盐钝化工艺因六价铬的毒性和环境危害，面临环保法规的严格限制，而无铬钝化工艺普遍存在膜层结合力弱、耐蚀性不足或工艺稳定性差等问题，尤其在电镀设备动态工况下，膜层易剥落失效，难以满足实际应用需求<sup>[5]</sup>。此外，传统铬酸盐钝化膜厚度通常较薄。研究表明，在含成膜促进剂(如甘油、有机胺)的复合体系中，通过调控反应时间和pH值可形成较厚的钝化膜。当钝化液中含甘油时，其羟基可与Cr<sup>3+</sup>形成配位键，延缓膜层溶解，增加膜厚，且耐蚀性随厚度增加显著提升<sup>[6]</sup>。

近年来，国内外学者围绕镀锌层钝化工艺开展了大量研究，主要聚焦于无铬钝化体系的开发，如有机聚合物钝化、钛/锆盐钝化等。但这些工艺在工业应用中仍存在耐蚀性能与传统铬酸盐钝化差距显著、成膜机制复杂和难以精准调控等问题<sup>[7]</sup>。针对电镀设备复杂服役环境下钝化膜结合力与耐蚀性协同优化的研究，现有工艺参数多基于静态腐蚀测试确定，缺乏对动态工况下膜层失效机制的系统分析<sup>[8]</sup>。开发一种环保、高效且适用于电镀设备实际工况的钝化工艺，实现钝化膜致密性、耐蚀性与结合力的综合提升，成为当前该领域亟待解决的关键技术难题<sup>[9-10]</sup>。

基于Q235A镀锌低碳钢钝化处理的电镀机器设备防腐方法，本文突破传统单因素研究局限，通过单因素实验筛选关键参数并结合正交实验揭示因素交互作用，解决传统工艺中耐蚀性提升伴随结合力下降的矛盾。针对电镀设备动态工况需求，引入振动和冲击测试来验证膜层的稳定性。在无铬钝化耐蚀性不足、结合力弱的现状下，通过优化低浓度铬酸盐体系，在降低环境风险的同时提升耐蚀性能。

## 1 实验

### 1.1 实验原料

实验基材选用Q235A低碳钢板，材料规格为100 mm×50 mm×2 mm，鞍钢集团生产，其化学成分(质量分数)符合GB/T 700—2006标准：C≤0.22%、Si≤0.35%、Mn≤1.40%、P≤0.045%、S≤0.050%。镀锌层采用电镀锌工艺制备，镀层厚度控制在8~10 μm，镀层中铝含量为(0.35±0.05)%。实验前使用无水乙醇擦拭表面，确保表面清洁度满足GB/T 9286—1998标准要求<sup>[11-12]</sup>。实验所用化学药品见表1，使用前经0.45 μm微孔滤膜过滤。

表1 实验药品

Tab.1 Laboratory drugs

试剂	纯度规格	供应商
NaOH	≥96%	国药集团
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	≥99.8%	阿拉丁试剂
Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ·12H <sub>2</sub> O	≥98%	麦克林试剂
HCl	36%~38%	西陇科学
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	98%	西陇科学
HNO <sub>3</sub>	65%~68%	西陇科学
K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	≥99.8%	西陇科学
NaF	≥98%	西陇科学
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub>	≥99.5%	西陇科学
OP-10 乳化剂	化学纯	天津科密欧

### 1.2 实验设备

实验设备及仪器见表2，均经过计量校准并满足标准要求。

表2 实验设备及仪器

Tab.2 Experimental equipments and instruments

设备名称	型号	技术参数
恒温水浴锅	HH-6	控温范围室温-100 ℃，精度±1 ℃
电动搅拌器	JJ-1	转速 0~2 000 r/min，无级调速
pH 计	PHS-3C	测量范围 0~14，精度±0.01
盐雾试验箱	YWX/Q-150	容积 150 L，温度(35±2) ℃，盐雾浓度 5%，喷雾压力 100~150 kPa，盐雾沉降率 125~250 mL/(m <sup>2</sup> ·h)
粗糙度仪	TR200	分辨率 0.001 μm，测量范围 0.025~12.5 μm，精度±10%
膜厚仪	CM8820	测量范围 0~50 μm，精度±1%
划格仪	QFH	刀片间距 1 mm，划格深度至基材

### 1.3 电镀处理

#### 1.3.1 前处理工艺

(1) 碱性除油: 将基材浸入由NaOH(30 g/L)、Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>(20 g/L)、Na<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>·12H<sub>2</sub>O(15 g/L)和OP-10(5 g/L)组成的除油液中, 60 °C下搅拌处理10 min, 去除表面的动植物油及矿物油, 除油后用去离子水冲洗至中性。

(2) HCl除锈: 采用体积分数15%的HCl溶液室温浸泡5 min, 溶解基材表面铁锈, 除锈后立即用流动水冲洗, 防止酸液残留<sup>[13]</sup>。

(3) H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>活化: 在体积分数为5%的H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液中活化3 min, 去除表面氧化膜并粗化表面, 提高电镀层附着力, 活化后用3级去离子水清洗<sup>[14]</sup>。

#### 1.3.2 氯化钾镀锌工艺

采用酸性氯化钾镀锌体系, 镀液组成见表3。工艺参数为: pH=4.5~5.5(用HCl调节), 温度25~35 °C, 电流密度1.0~2.0 A·dm<sup>-2</sup>, 电镀时间20 min。以纯锌板(纯度≥99.99%)为阳极, 基材为阴极, 极距50 mm, 电镀过程中以200 r/min速率持续搅拌, 确保镀液均匀<sup>[15]</sup>。

表3 镀液组成

Tab.3 Composition of plating solution

组分	浓度/(g·L <sup>-1</sup> )	作用
KCl	200	导电盐, 维持镀液导电性
ZnCl <sub>2</sub>	70	主盐, 提供 Zn <sup>2+</sup> 离子
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	30	缓冲剂, 稳定镀液酸碱度
添加剂	10	改善镀层外观及结晶形态

电镀后首先进行3级水洗: 自来水冲洗2 min→去离子水超声清洗5 min→纯水洗3 min; 然后出光处理: 在含HNO<sub>3</sub>(50 mL/L)和NaF(5 g/L)的出光液中室温浸泡1 min, 去除镀层表面氧化膜; 最后60 °C烘箱干燥10 min, 控制表面含水率<0.1%。

#### 1.4 钝化处理工艺

采用单因素变量法设计实验, 考察K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>浓度(5~25 g/L)、钝化温度(20~60 °C)、钝化时间(1~9 min)、溶液pH值(1.5~3.5)对钝化效果的影响, 每个因素设置5个水平, 每组实验重复3次。钝化液由主成膜剂K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>(15 g/L)、氧化剂HNO<sub>3</sub>(5 mL/L)、氟化物活化剂NaF(3 g/L)、成膜促进剂甘油(10 mL/L)组成, 用去离子水定容至1 L, 用0.1 mol/L NaOH/HNO<sub>3</sub>溶液调节pH值。实验方案见表4, 各因素独立变化时, 其他条件固定为: K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 15 g/L、温度40 °C、时间5 min、pH=2.5。钝化过程中, 将电

镀后的基材完全浸入钝化液中, 保持液面高于样品2 cm, 处理后用去离子水快速冲洗, 室温晾干。

实际应用中, 钝化废液采用“还原-沉淀法”处理。加入Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>将六价铬还原为三价铬, 调节pH至8~9生成Cr(OH)<sub>3</sub>沉淀, 经压滤后清液中六价铬浓度≤0.3 mg/L(满足GB 21900—2008标准), 沉淀物按危废规范处置, 实现铬酸盐的“低消耗-可处理-达标排放”。

表4 钝化处理工艺实验方案

Tab.4 Experimental scheme of passivation treatment process

因素	水平1	水平2	水平3	水平4	水平5
K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> 浓度/(g·L <sup>-1</sup> )	5	10	15	20	25
钝化温度/°C	20	30	40	50	60
钝化时间/min	1	3	5	7	9
溶液pH值	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5

### 1.5 钝化效果测试方法

#### 1.5.1 外观质量评价

参照GB/T 13911—2020《金属镀覆和化学处理覆层表征方法》, 用10倍放大镜观察钝化膜颜色、均匀性及缺陷, 优质膜层应呈连续彩虹色, 无漏镀、斑点和起皮等缺陷<sup>[16]</sup>。

#### 1.5.2 表面性能测试

粗糙度(R<sub>a</sub>)测量: 使用TR200型粗糙度仪, 沿样品长度方向等距测量5点, 取平均值, 测量精度±10%<sup>[17]</sup>。膜厚(T)测试: 使用CM8820型膜厚仪在样品中心及4角测量5点, 取平均值, 分辨率0.1 μm。

#### 1.5.3 耐蚀性能测试

中性盐雾试验: 按GB/T 10125—2021, 将样品45°倾斜放置于盐雾箱, 用5% NaCl溶液(pH=6.5~7.2)连续喷雾, 记录首次出现白锈(ZnO)和红锈(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)的时间, 平行测试3件样品, 取中值<sup>[17]</sup>。

硫酸铜滴定试验: 依据GB/T 5267.4—2017, 配制含CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O 210 g/L、HCl 10 mL/L、NaCl 40 g/L的滴定液, 用0.1 mL滴定管向样品表面滴加上述硫酸铜滴定液, 记录滴液处出现红色金属铜沉积的时间, 时间越长耐蚀性越好<sup>[18]</sup>。

#### 1.5.4 结合力测试

采用划格法(GB/T 9286—1998), 使用QFH型划格仪划出1 mm×1 mm方格(10×10阵列), 深度至基材。粘贴3M 610胶带(粘合力5 N/cm), 以60°角迅速撕下, 按ISO 2409标准评级, 0级为结合力最佳(无脱落), 5级为最差(脱落面积>65%)<sup>[19-20]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 钝化工艺对镀锌层表面性能的影响

$K_2Cr_2O_7$ 浓度对钝化膜的影响结果如图1所示。图1(a)中,随着 $K_2Cr_2O_7$ 浓度的增加,钝化膜的粗糙度先减小后增加,当 $K_2Cr_2O_7$ 浓度为15 g/L时粗糙度最小,平均值为0.25  $\mu m$ 。图1(b)中,膜厚则随浓度增加线性增长,但25 g/L时膜厚增加伴随粗糙度上升。 $K_2Cr_2O_7$ 浓度较低时,有助于形成致密的钝化膜,减少粗糙度。当浓度增加到一定程度,钝化膜厚度增加,但过高浓度会使膜层结构变得疏松,粗糙度上升。

温度对膜层粗糙度和膜厚的影响如图2所示。

由图2(a)可见,随着钝化温度的增加,膜粗糙度呈先减小后增加的趋势,30  $^{\circ}C$ 时膜层颜色均匀、粗糙度最低(0.26  $\mu m$ )。图2(b)中,膜厚随着钝化温度的增加呈现先增加后减小的趋势。钝化温度为20、30和60  $^{\circ}C$ 时,膜厚均值分别为1.5、2.2和1.3  $\mu m$ 。在较低温度下,钝化反应速率较慢,形成的膜层较薄且不够致密,导致粗糙度较高;随着温度升高,反应速率加快,有助于形成更均匀、致密的膜层,降低粗糙度;当温度过高时,会引起膜层结构的破坏或过度生长,导致粗糙度再次增加。

钝化时间对钝化膜的影响结果如图3所示。由图可见,5 min时膜层外观最佳,平均粗糙度最低

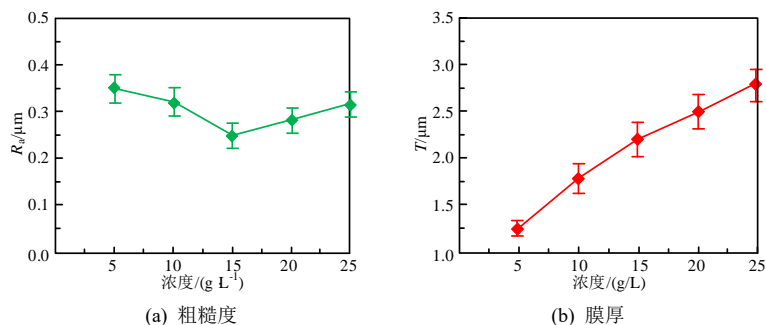


图1  $K_2Cr_2O_7$ 浓度对钝化膜的影响

Fig.1 Influence of  $K_2Cr_2O_7$  concentration on passivation film

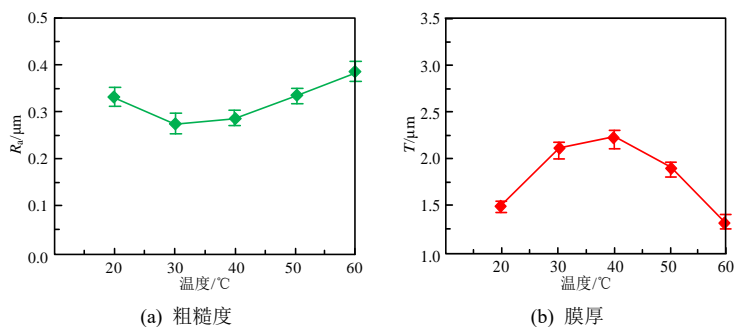


图2 温度对膜层粗糙度和膜厚的影响

Fig.2 Influence of temperature on roughness and thickness of the film layer

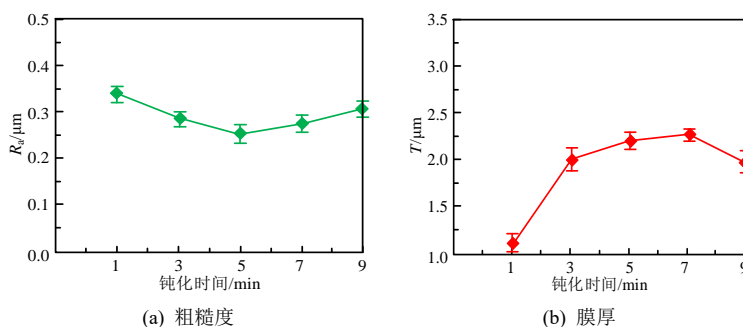


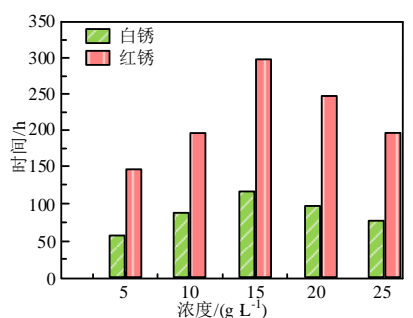
图3 钝化时间对钝化膜的影响

Fig.3 Influence of passivation time on passivation film

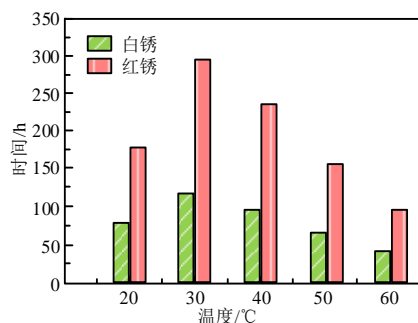
(0.25  $\mu\text{m}$ )。时间过短(1 min)导致膜层未完全形成,膜层无法提供充分的保护作用。时间过长(9 min)则因膜层过度溶解出现褐色斑块,粗糙度上升至0.31  $\mu\text{m}$ 。这是由于在过长的钝化时间内,钝化液与基底材料发生了过度反应,导致膜层结构被破坏。当钝化时间为5 min时,膜层的外观最佳,粗糙度最低,此时钝化膜已经完全形成,能够有效保护基底材料不受腐蚀。

## 2.2 耐蚀性能对比

不同 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 浓度和温度下的耐蚀数据如图4所示。由图4(a)可见, $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 浓度为15 g/L时,首次白锈时间为120 h,红锈时间为300 h,显著优于其它浓度。 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 浓度过低(5 g/L)时,因膜层薄(1.2  $\mu\text{m}$ )导致防护不足,过高(25 g/L)则因膜层缺陷加速腐蚀。图4(b)可知,30  $^\circ\text{C}$ 时耐蚀性最佳,60  $^\circ\text{C}$ 下膜层结构破坏,白锈时间缩短至45 h。高温导致膜层稳定性降低,从而加速了腐蚀过程。



(a) 不同  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  浓度的耐蚀数据



(b) 不同温度的耐蚀数据

图4 不同  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  浓度和温度下的耐蚀数据

Fig.4 Corrosion resistance data at different  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  concentration and temperature

硫酸铜滴定试验结果如表5所示。pH为2.5时滴定时间最长,达85 s,表明膜层的耐电化学腐蚀能力最强。pH值偏离2.5时,酸性(pH=1.5)或碱性(pH=3.5)条件均导致滴定时间缩短,这与钝化膜中 $\text{Cr}^{3+}/\text{Cr}^{6+}$ 比例变化有关,中性环境下膜层化学稳定性最佳。

表5 硫酸铜滴定试验结果

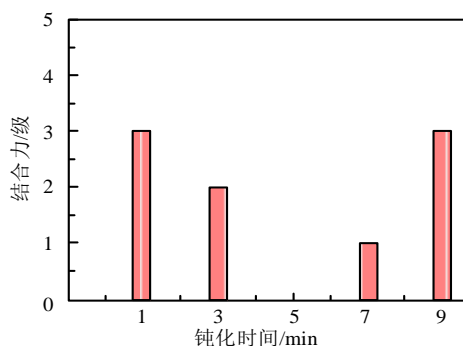
Tab.5 Titration test results of copper sulfate

pH 值	滴定时间/s	腐蚀现象
1.5	50	10 s 后出现微小红点
2.0	70	20 s 后出现红点
2.5	85	30 s 后出现淡红点
3.0	75	25 s 后出现红点
3.5	55	15 s 后出现红点

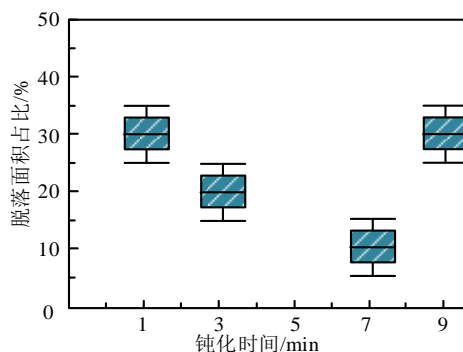
## 2.3 结合力与工况适应性

不同钝化时间下的结合力测试结果如图5所示。图中结果表明,钝化时间对结合力的影响呈U型规律,5 min为最优钝化时长,此时膜层固化充分、内应力平衡,结合力最佳。若时间过短,膜层未完全形成,与基材结合不牢固。若时间过长,膜层过度生长导致内应力累积,脆性增加,结合力大幅下降。

不同pH值下的结合力测试结果如表6所示。结合力随pH值变化呈对称V形规律,pH=2.5是结合力最优的临界值。极端pH值会破坏膜层与基材的界面键合,诱发微裂纹,导致结合力骤降。



(a) 结合力等级测试结果



(b) 脱落面积占比

图5 不同钝化时间下的结合力测试结果

Fig.5 Test results of adhesion under different passivation time

表 6 不同 pH 值下的结合力测试结果

Tab.6 Test results of binding force at different pH values

pH 值	结合力等级	典型失效模式
1.5	3	沿划格边缘成片脱落
2.0	1	个别方格角部脱落
2.5	0	无脱落
3.0	1	方格边缘轻微脱落
3.5	3	大面积膜层剥离

### 2.4 钝化处理工艺正交实验结果

基于单因素实验结果,筛选出 $K_2Cr_2O_7$ 浓度、钝化温度、钝化时间、溶液pH值为关键影响因素。为系统优化工艺,采用 $L^9(3^4)$ 正交表设计实验(4因素,3水平),覆盖单因素实验的最优区间,综合考察因素交互作用对粗糙度、膜厚、盐雾白锈时间、结合力等级的影响。正交实验因素与水平设定如表7所示。

表 7 正交实验因素与水平设定

Tab.7 Factors and levels for the orthogonal experimental design

因素	水平 1	水平 2	水平 3
$K_2Cr_2O_7$ 浓度/( $g \cdot L^{-1}$ )	10	15	20
钝化温度/ $^{\circ}C$	20	30	40
钝化时间/min	3	5	7
溶液 pH 值	2.0	2.5	3.0

表 8 钝化处理工艺正交实验结果

Tab.8 Orthogonal experimental results of passivation treatment process

实验号	浓度/ ( $g \cdot L^{-1}$ )	温度/ $^{\circ}C$	时间/ min	pH 值	粗糙度/ $\mu m$	膜厚/ $\mu m$	盐雾白锈时间/ h	结合力等级
1	10	20	3	2.0	0.30	1.8	80	2
2	10	30	5	2.5	0.26	2.1	110	0
3	10	40	7	3.0	0.32	1.9	90	1
4	15	20	5	3.0	0.25	2.2	120	0
5	15	30	7	2.0	0.24	2.3	130	0
6	15	40	3	2.5	0.27	2.0	115	1
7	20	20	7	2.5	0.28	2.4	100	1
8	20	30	3	3.0	0.29	2.1	105	1
9	20	40	5	2.0	0.31	2.0	95	2

### 2.5 电镀机器设备防腐应用研究

为验证Q235A镀锌低碳钢钝化处理后的应用效果,选取电镀生产线中的滚筒支架(Q235A镀锌件)进行工艺验证,结果见表9。最佳工艺处理件的盐雾寿命较未处理件提升3倍,现场使用6个月后才出现轻微局部白锈,而未处理件3个月即因红锈导致结构失效。

钝化处理正交实验结果如表8所示。由表8可知,5号的综合性能最优,其钝化膜粗糙度低至 $0.24 \mu m$ ,膜厚达 $2.3 \mu m$ ,盐雾白锈时间达130 h,结合力等级为0级(无脱落),各项指标均为实验组中最佳。 $K_2Cr_2O_7$ 浓度为15 g/L时,盐雾白锈时间普遍超过115 h,显著优于10 g/L和20 g/L浓度组。温度 $30^{\circ}C$ 时,膜层耐蚀性与结合力表现更优,其中5号和2号的盐雾时间分别达130和110 h,结合力均为0级。钝化时间5~7 min、pH=2.0~2.5时,膜层结合力等级多为0~1级,显示出更稳定的界面结合性能。

研究采用的钝化体系为 $K_2Cr_2O_7$ -NaF-甘油复合体系,其中甘油作为成膜促进剂可显著改善膜层均匀性并促进成膜反应充分进行。同时正交实验优化的工艺参数处于成膜反应的高效区间,较高的 $K_2Cr_2O_7$ 浓度为膜层提供充足的 $Cr^{3+}/Cr^{6+}$ 源,较长的钝化时间确保反应充分进行,弱酸性环境抑制膜层溶解,共同促成了较厚钝化膜的形成。此外,前处理工艺确保镀锌层表面无氧化膜和油污残留,为钝化反应提供了洁净的基底,进一步促进了膜层均匀生长。正交实验筛选的最优工艺参数为: $K_2Cr_2O_7$ 浓度15 g/L、温度 $30^{\circ}C$ 、时间7 min、pH值2.0。

动态工况结合力表现通过振动台模拟设备运行振动(10~200 Hz, 2 g加速度)和冲击(50 J能量)测试,结果如表10所示。未处理件在振动10 min后膜层开始剥落,冲击后出现裂纹;而处理件经2 h振动和3次冲击后仍保持膜层完整,表明结合力满足设备动态工况要求。

经济效益对比分析数据见图6。假设每年处理

表9 滚筒支架工艺验证结果

**Tab.9 Process verification results of the roller support**

处理件及标准	盐雾白锈时间/h	盐雾红锈时间/h	现场使用6个月生锈面积
未处理件	40	100	红锈面积>50%
最佳工艺处理件	150	350	白锈面积<5%
标准要求	≥100 (GB/T 13912)	≥200	无基材腐蚀

表10 动态工况结合力表现测试结果

**Tab.10 Test results of adhesion performance under dynamic working conditions**

试样	振动测试(10 min)	冲击测试(50 J)	疲劳循环(1 000次)
未处理件	划格处膜层脱落	冲击点裂纹	边缘膜层剥离
最佳工艺处理件	无脱落	无可见缺陷	膜层完整

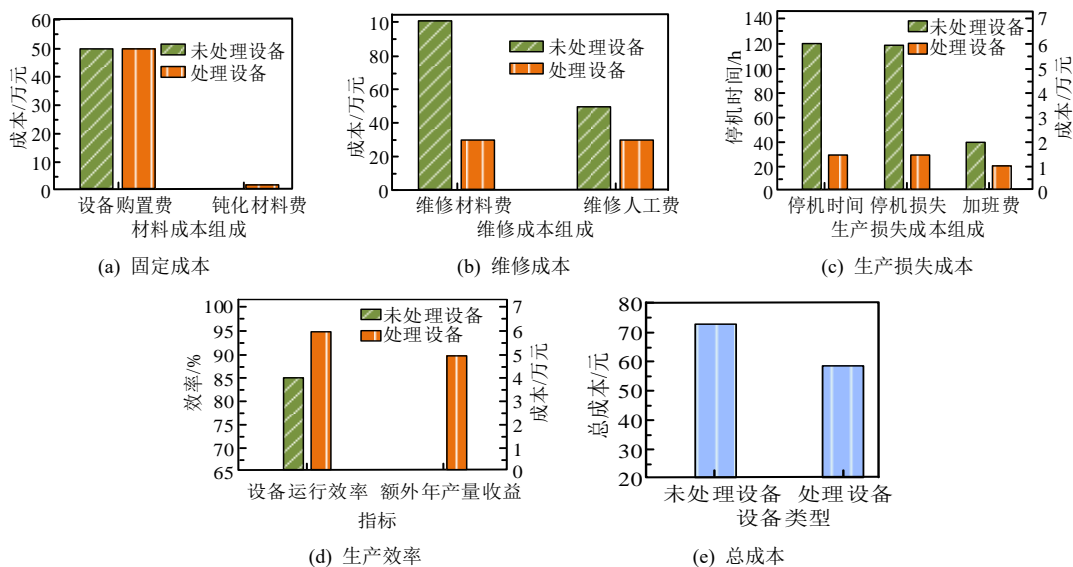


图6 经济效益对比分析

Fig.6 Comparative analysis of economic benefits

10 000 件设备部件,钝化工艺增加材料成本2 元/件,年投入2 万元。未处理设备因腐蚀需高频维修,维修材料费占比67%(10 万元),人工占比33%(5 万元)。处理后设备腐蚀速率降低,维修成本同比下降70%和40%。按生产线产值500 元/h计算,未处理设备年停机120 h,处理后降至30 h。钝化后设备故障率下降,运行效率从85%提升至95%,年产能利用率提高,带来额外收益5 万元。前6个月材料成本1万元,回收期约为6个月。以上结果表明,通过钝化处理,设备年综合成本下降20%,且新增材料成本可在6个月内通过节约的维护成本和生产损失回收,同时带来生产效率提升的额外收益。

### 2.6 与传统铬酸盐钝化工艺对比

为了验证所提方法的优势,将其与传统铬酸盐钝化工艺进行比较,如表11所示。传统铬酸盐钝化工艺中,  $K_2Cr_2O_7$ 浓度通常较高(多为20~50 g/L),过量铬酸盐不仅增加成本,更导致废液中六价铬含

量超标(GB 21900-2008六价铬排放限值 $\leq 0.5$  mg/L)。通过单因素与正交实验优化,最优 $K_2Cr_2O_7$ 浓度为15 g/L,较传统工艺降低25%~70%,从源头减少了铬酸盐的使用量及后续废液处理压力,废液处理成本降低90%以上。通过精准调控钝化温度、时间和pH值,促进铬酸盐与锌层的反应更充分,减少未反应铬酸盐残留,膜层铬含量较低,减少了设备运行过程中的迁移污染。实验表明,该工艺下钝化液中未反应的六价铬浓度 $\leq 0.8$  g/L,远低于传统工艺中3~5 g/L残留量,降低了废液处理难度。

工艺性能对比结果如表12所示。与传统铬酸盐钝化工艺相比,优化工艺在核心性能与经济性上均展现显著优势。传统铬酸盐钝化工艺在耐蚀性、结合力以及成本回收等方面存在提升空间。优化工艺的盐雾耐蚀时长得到大幅提升,可更持久地抵御盐雾侵蚀,其结合力等级更高,界面稳定性显著增强。且在设备振动工况下,经动态冲击后的耐蚀性表现

表 11 工艺环保优势比较结果

Tab.11 Comparison results of environmental protection advantages of the process

工艺类型	K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> 浓度/(g•L <sup>-1</sup> )	废液六价铬残留/(g•L <sup>-1</sup> )	膜层铬含量	工艺稳定性
传统钝化工艺	20~50	3~5	较高(易脱落导致二次污染)	参数粗放, 易过量添加
优化工艺	15	≤0.8	较低(结合力 0 级, 无脱落)	正交优化参数, 精准可控

表 12 工艺性能对比结果

Tab.12 Comparison results of process performance

工艺对比	盐雾白锈时间/h	结合力等级	动态冲击后耐腐蚀性	成本回收期/月
传统钝化工艺	80~100 h	1~2 级(局部脱落)	白锈面积>20%	12~18
优化工艺	130~150 h	0 级(无脱落)	无可见缺陷	6

优异, 无可见腐蚀缺陷。此外, 其成本回收期明显缩短, 经济效益更为突出。

### 3 结论

(1) 通过单因素与正交实验, 确定了Q235A镀锌钢最优钝化工艺为: K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>浓度15 g/L、温度30 ℃、时间7 min、pH=2.0。在此条件下, 粗糙度低至0.24 μm, 膜厚2.3 μm, 盐雾白锈时间长达130 h, 结合力等级为0级, 滚筒支架的盐雾白锈时间从40 h提升至150 h。

(2) 最优工艺处理的试样耐蚀性优异, 硫酸铜滴定时间达85 s。钝化膜中优化Cr<sup>3+</sup>/Cr<sup>6+</sup>比例, 形成了连续致密的氧化物保护膜, 有效阻隔了腐蚀介质。同时, 膜层与基材结合力强(0级), 在经历2 h振动及3次50 J冲击后仍无脱落或裂纹。

(3) 优化工艺的K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>用量较传统工艺降低25%~70%, 废液六价铬残留及处理成本大幅下降。盐雾白锈时间提升30%~50%, 动态冲击后无缺陷。成本回收期缩短至6个月, 实现了环保、性能与经济效益的协同提升。

### 参考文献

- [1] 袁忠大, 刘傲天, 张小锋, 等. 基于机器视觉的飞机电镀部件曲表面无损检测[J]. 电镀与涂饰, 2024, 43(7): 43-50.
- [2] 刘雨薇, 顾天真, 王振尧, 等. Q235 和 Q450NQR1 在中国南沙海洋大气环境中暴晒 34 个月后的腐蚀行为[J]. 金属学报, 2022, 58(12): 1623-1632.
- [3] KOBAYASHI H, TAKEDA G, KATOH S I K. Coating weight reduction technology in gas wiping of hot-dip galvanizing on steel strip[J]. ISIJ International, 2024, 64(11): 1716-1722.
- [4] 陈明. 电泳涂装前铝合金阳极氧化及无镍钝化工艺研究[J]. 涂料工业, 2025, 55(5): 60-65, 71.
- [5] 李海丰. 铜及其合金无铬钝化研究现状与展望[J]. 电镀与精饰, 2022, 44(7): 55-60.
- [6] MAEDA M, LI X, OOI A, et al. Passivation mechanism of galvanized steel rebar in fresh concrete[J]. ISIJ International, 2020, 60(2): 337-345.
- [7] MALI C, RAI A K, LAM S P A K.. Numerical analysis of uneven coating near steel strip edges in continuous hot-dip galvanizing[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2023, 50(9): 1181-1194.
- [8] 管忠春, 赵庆虚, 潘艳芝, 等. 钢铁热镀锌层虫胶-无机盐复合钝化膜处理及耐蚀性研究[J]. 电镀与涂饰, 2021, 40(17): 1359-1363.
- [9] WAN H J, MENG X Z, CAO F H. Sulfide and hydrogen bond networks in the electric double layer: key factors for titanium passivation film stability[J]. Langmuir, 2025, 41(1): 719-728.
- [10] 邵蓉, 黎敏, 刘永壮, 等. 锌铝镁镀层不同表面处理体系成分分析及耐蚀性研究[J]. 表面技术, 2023, 52(9): 253-264.
- [11] 肖革, 杨晓波, 向可友, 等. 电镀锌及热浸镀锌钢板磷化工艺新进展[J]. 电镀与精饰, 2021, 43(9): 31-38.
- [12] 刘贺晨, 肖斯瑶, 张铭嘉, 等. 蒙脱土改性聚脲复合电