

# 液态烃球罐 ZARE 稀土合金层修复性防腐匹配性技术说明

大连天凡防腐工程有限公司 技术部

## 一、修复必要性及损伤范围分析

### 1. 修复面积统计

- 检验打磨损伤：焊缝两侧 300mm 范围（占内壁面积约 16%）
- 罐底踩踏损伤：宏观破坏面积达 20%
- 总修复面积占比：30%-35%（基于 5 年内检验周期测算）

### 2. 损伤机理

- 涂层剥离后形成“小阳极（母材）-大阴极（ZARE 涂层）”电偶腐蚀体系，局部腐蚀速率可超 0.5mm/a（API 581 模型验证）
- 暴露母材在湿 H<sub>2</sub>S 环境中（H<sub>2</sub>S 分压 > 0.0003MPa）易引发 SSCC 及氢致开裂（HIC）

## 二、ZARE 涂层技术特性及失效机理

### 1. 涂层构成与工艺

- 成分：Zn-Al-In-Mg-RE（La/Ce/Pr 等稀土）合金
- 工艺参数：电弧喷涂（5000℃雾化+350m/s 喷射速度）
- 结构特性：300-400 μm 致密堆积层，硬度 HV 43.5

### 2. 防护机制

#### 牺牲阳极

- 优先腐蚀释放电子
- 腐蚀电流密度 **0.001A/cm<sup>2</sup>**

#### 化学捕获

- 硫化物/氯化物固定
- H<sub>2</sub>S 吸附率 > 92%

#### 氢阻隔

- 渗透系数
- 氢扩散系数  **$2.1 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$**

效应类型

作用机理

实测效能

### 3. 涂层寿命特征

- 有效防护期：5年内无新增 SSCC 裂纹（云南石化 2018-2023 年跟踪数据）
- 失效标志：厚度膨胀 > 20%（如 250  $\mu\text{m}$   $\rightarrow$  300  $\mu\text{m}$ ），需整体修复

## 三、异种金属涂层匹配性分析

### 1. 电化学性能对比

丝材材质 指标	铁基金属	ZARE	Zn 涂层	Al 涂层
硬度 (HV)	130	43.5	22.9	41.2
腐蚀电位 (V)	-0.6	-1.30	-1.38	-1.16
腐蚀电流 (A/cm <sup>2</sup> )	0.001	100	150	10

- 电位差限制：Zn/Al 与 ZARE 电位差 > 0.1V，引发逆向电偶腐蚀
- 电流密度冲突：喷锌电流密度为 ZARE 的 15 万倍，加速局部溶解

### 2. 硬度匹配性

- 临界附着条件：基材硬度/涂层硬度  $\leq 1.5$
- 实测比值：
  - ZARE/Zn =  $43.5/22.9 \approx 1.90 (>1.5)$   $\rightarrow$  附着力不足
  - ZARE/Al =  $43.5/41.2 \approx 1.06 (<1.5)$   $\rightarrow$  但电化学失配

### 3. 界面结合缺陷

- 异种金属晶格失配度 > 8%（XRD 分析结果），导致界面微裂纹
- 热膨胀系数差异（ZARE:  $23 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  vs Al:  $24 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）引发热应力剥离

## 四、ZARE 修复工艺标准

### 1. 预处理要求

- 喷砂处理：达 Sa2.5 级（表面粗糙度 40-70  $\mu\text{m}$ ）
- 缺陷修复：JIS Z3315 YF502 焊材补焊（S/P 含量  $\leq 0.005\%$ ）

### 2. 喷涂参数控制

- 涂层厚度：300  $\pm$  20  $\mu\text{m}$ ，单点 < 250  $\mu\text{m}$  需补喷
- 层间温度：80-120  $^{\circ}\text{C}$ ，超限需冷却处理
- 后固化：180  $^{\circ}\text{C} \times 2\text{h}$ ，温升速率  $\leq 5^{\circ}\text{C}/\text{min}$

## 五、修复后评估与监控

### 1. 质量判定标准

- 必修复区域：所有打磨暴露母材（100%覆盖）
- 选择性修复：厚度增幅>20%或存在龟裂/剥离区域

### 2. 监测方案

- 氢通量监测：6点阵列氢探针（ASME PCC-2标准），阈值 50mL/cm<sup>2</sup>·d
- 检验周期：首检 12 个月，后续每 24 个月 HIC 测试（NACE TM0284）

## 六、结论建议

1. 技术唯一性：ZARE 是唯一满足电化学匹配、硬度适配及长期 SSCC 防护的修复技术。
2. 强制措施：修复工程需严格执行工艺参数，并建立氢监测-水质分析-厚度检测三位一体防护体系。
3. 经济性：ZARE 修复 10 年成本仅为传统涂层的 45%，且可避免 5000 万级事故损失。

（附：电弧喷涂工艺曲线图/氢渗透率测试报告/晶格匹配度分析数据）

注：本说明基于 API 581、NACE MR0175 及中石化 SEI 技术规范编制，适用于湿 H<sub>2</sub>S 环境液态烃球罐修复决策。

大连天凡防腐工程有限公司 技术部

咨询电话：0411-82302585

邮箱：zare88@126.com

大连天凡  
DALIAN TIANFAN