

# 钢结构在役涂层的配套性 和再涂性研究

王洪伦, 张东玖, 杨华, 涂齐勇

(西昌卫星发射中心, 四川 西昌 615000)

**摘要:** **目的** 针对某濒海大型钢结构设施表面涂层大面积粉化、失光、变色现象, 研究钢结构在役涂层老化失效后几种面漆重涂的配套性和再涂性。**方法** 进行面漆重涂试验, 完成涂层体系的配套性和再涂性测试, 评价在役涂层重涂后的性能。首先, 将几种典型的钢结构在役防护涂层体系打磨掉老化的面漆后, 作为初始涂层(涂层 A); 然后, 选取在循环盐雾和氙灯老化加速试验中表现较好的涂层面漆作为涂层 B, 将涂层 B 涂敷在涂层 A 上, 制备成新的涂层体系; 最后, 完成涂层配套性和再涂性测试, 分析 30 组涂层配套组合的附着力、压痕长度、杯突试验结果, 提出面漆重涂时的涂层优化配套方案。**结果** 涂层体系再涂后, 所有试验件的涂层拉拔附着力测试均大于 5 MPa, 30 组涂层体系组合中有 9 组(占 30%)再涂涂层压痕长度降低, 杯突试验测试值多在 1.5~4.5 mm。**结论** 涂层体系再涂后, 满足涂装防护涂层附着力的一般要求, 抗压痕性能有所提高, 延展性较好。在进行涂层再涂性和配套性评价时, 应重点考虑附着力满足使用要求, 提高涂层体系涂层的粘结力, 其次才是考虑硬度和延展性。

**关键词:** 在役涂层; 配套性; 再涂性; 面漆重涂; 涂层体系; 附着力

中图分类号: TG174.4

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)11-0126-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.11.017

## Compatibility and Recoatability of In-service Coatings for Steel Structures

WANG Hong-lun, ZHANG Dong-jiu, YANG Hua, TU Qi-yong

(Xichang Satellite Launch Center, Sichuan Xichang 615000, China)

**ABSTRACT:** In view of the phenomenon of the surface coating of a large-scale steel structure facility near the sea, such as powder, loss of light and discoloration, the compatibility and repainting ability of several top coatings after the ageing of the in-service coating for steel structure were studied. The finishing paint repainting test was carried out to complete the test of coating system compatibility and repainting performance, and to evaluate the performance of in-service coating after repainting. First, several typical in-service protective coating systems for steel structures are sanded off the aged topcoat as the initial coating (coating A). Then, the top coat B, which performed well in the accelerated test of cyclic salt spray and xenon lamp, was

收稿日期: 2021-08-07; 修订日期: 2021-12-12

Received: 2021-08-07; Revised: 2021-12-12

作者简介: 王洪伦(1981—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为装备环境适应性。

**Biography:** WANG Hong-lun (1981-), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: equipment environment adaptability.

引文格式: 王洪伦, 张东玖, 杨华, 等. 钢结构在役涂层的配套性和再涂性研究[J]. 装备环境工程, 2022, 19(11): 126-132.

WANG Hong-lun, ZHANG Dong-jiu, YANG Hua, et al. Compatibility and Recoatability of In-service Coatings for Steel Structures[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(11): 126-132.

chosen as coating B. A new coating system was prepared by coating B on coating A. Finally, the test of coating compatibility and recoating property is completed, and the test results of adhesion, indentation length and cupping of 30 coating combinations are analyzed. After repainting, the tensile adhesion of all the samples was more than 5 MPa, and the indentation length of re-coating was decreased in 9 of 30 groups (30%), most of the cupping test values were 1.5~4.5 mm. The coating system can meet the general requirements of coating protective coating adhesion, anti-indentation performance has been improved, the ductility is better after repainting. In the evaluation of coating recoatability and compatibility, the adhesive force should be considered to meet the application requirements, and the adhesive force of the coating system should be improved, and the hardness and ductility should be considered next.

**KEY WORDS:** in-service coating; compatibility; recoatability; top coat reapplied; coating system; adhesion

涂层因其具有材料价格低廉、施工简单、性能良好、装饰性好等优点, 广泛应用于金属表面的防护<sup>[1-3]</sup>。实际服役环境中, 在高温、湿热、光照等各种腐蚀因素的作用下, 涂层会发生降解, 出现粉化、失光、退色、开裂、脱落、起泡等现象, 涂层的物理化学和力学性能引起不可逆的变化, 最终导致涂层的破坏, 则称之为涂层失效<sup>[4-7]</sup>。涂层的失效分为物理失效和化学失效。物理失效是指涂层在服役过程中, 在环境介质和应力的作用下导致涂层溶胀、介质渗入、涂层开裂等涂层使用性能的劣化现象。化学失效是涂层在使用过程中, 在热、光、氧、酸和碱等化学介质作用下, 高分子链发生降解或重新错误交联等化学反应, 引起介质渗入, 涂层开裂、粉化等物理和化学性能劣化的现象<sup>[8-11]</sup>。

某濒南海的大型工程的很多钢架结构、平台、大门等设施设备均采用了涂装防护, 随着时间的推移, 很多在役涂层出现了老化失效现象, 宏观上主要表现为 2 种形式: 一种是涂层开裂、脱落、生锈现象, 很多设施设备的涂层局部或大面积返锈, 涂层从基材到表面明显得到破坏; 另一种是面漆粉化、失光、变色

现象, 主要是体现在处于室外, 长时间遭受强光照辐射的部位。针对 2 种表现形式, 进行防腐重涂时, 为节省成本, 可采取不同的重涂方式。第 1 种腐蚀老化现象, 涂层修复时需要将老化失效涂层全部打磨到基材材料后, 重新按照施工工艺进行涂装; 而第 2 种腐蚀老化现象, 涂层修复时只需要将面漆打磨掉, 重新涂装面漆或涂装连接漆后, 再涂装面漆即可。本文主要针对第 2 种腐蚀老化现象, 开展了主要在役涂层中间漆与新型面漆的配套性和再涂性测试和评价研究, 为大型工程设施设备快速恢复表面外观, 增强涂层的防腐性能提供技术支撑<sup>[12-16]</sup>。

## 1 试验

本研究试验开展的流程如图 1 所示。在涂装试件上进行涂层体系 A 原始涂层的制备, 在现场经过一段时间的暴晒试验, 打磨掉面漆后, 得到含有底漆和中间漆的涂层体系 A。选择耐候性好的涂料作为涂层 B 涂覆在涂层体系 A 上, 制备成新的涂层体系。养护一段时间后, 进行新涂层体系的配套性和再涂性能测试和评价。

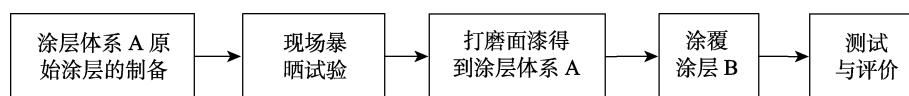


图 1 试验流程

Fig.1 The process of experiment

### 1.1 涂层 A 的制备

选用南海海洋大气环境某濒海大型工程有代表性的碳钢/合金钢结构在役防护涂层体系作为原始涂层(涂层 A), 暴晒试验后, 打磨涂层面漆进行涂层 A 的制备。根据在役涂层使用情况, 选用了 5 种防护效果较好但面漆优先发生涂层失效现象的在役涂层开展试验, 试件基材为 Q345B, 制作时按照 5 种涂层的施工工艺, 在现场采用喷涂的方法逐层施工, 原始涂层体系设计见表 1。为保证涂层的配套性和再涂性评价效果, 本次试验将面漆基本全部打磨掉(实际工

程施工时可允许原面漆部分保留, 只打磨掉失效涂层及表面污染物), 采用 60~80 目的植绒砂纸打磨, 保证试件重涂前的表面粗糙度和清洁度。

### 1.2 涂层 B

涂层 B 根据前期某大型工程涂装防腐工艺检测评估结果进行选择。从现场试验和实验室加速试验中表现良好的涂层体系中, 优选 7 种涂层体系的面漆作为涂层 B。表 2 显示了涂层 B 的主要类型、厚度以及与面漆相关的同等加速试验条件下的评级数据(循环盐雾 1 440 h, 氙灯老化 720 h)。

表 1 涂层 A 的主要类型及特点  
Tab.1 Main types and characteristics of coating A

编号	原在役涂层	涂层 A		涂料品牌
		涂层类型	特点	
1	锌铝合金 (≥150 μm) + 环氧封闭漆 (≥50 μm) + 环氧云铁中间漆 (≥120 μm) + 脂肪族聚氨酯面漆 (≥40 μm) + 室温固化氟碳面漆 (≥40 μm)	锌铝合金 (≥150 μm) + 环氧封闭漆 (≥50 μm) + 环氧云铁中间漆 (≥120 μm)	原涂层打磨至环氧中间漆, 该中间漆是以云母氧化铁为颜料的双组份厚浆型环氧树脂漆。	阿克苏国际
2	Interzone 954 底漆 (400 μm) + Interzone 990 面漆 (50 μm)	Interzone 954 底漆 (400 μm)	原涂层打磨至 Interzone 954 漆层, 该漆层为双组份改性环氧屏蔽性涂料。	阿克苏国际
3	环氧富锌底漆 (60~80 μm) + 环氧云铁中间漆 (120~150 μm) + 氟碳面漆 (≥80 μm)	环氧富锌底漆 (60~80 μm) + 环氧云铁中间漆 (120~150 μm)	打磨至环氧中间漆, 该中间漆是以云母氧化铁为颜料的双组份厚浆型环氧树脂漆。	中涂化工
4	SigmaCover280 通用环氧底漆 (80 μm) + SigmaCover410 通用环氧中间漆 (120 μm) + SigmaDur 2800 氟碳面漆 (60 μm)	SigmaCover280 通用环氧底漆 (80 μm) + SigmaCover410 通用环氧中间漆 (120 μm)	打磨至环氧中间漆, 该漆层为双组份高固态聚酰胺固化环氧厚浆漆, 含云母氧化铁成分。	PPG
5	无溶剂焊缝专用渗透底漆 (160 μm) + 环氧防腐阻隔中间漆 (100 μm) + 氟碳面漆 (80 μm)	无溶剂焊缝专用渗透底漆 (160 μm) + 环氧防腐阻隔中间漆 (100 μm)	打磨至环氧中间漆, 该漆层是由石墨烯增强的耐化学的厚浆中间漆。	银亿

表 2 涂层 B 的主要类型和特点  
Tab.2 Main types and characteristics of coating B

编号	涂料品牌	涂层/涂料类型	漆膜厚度/μm	循环盐雾试验				氙灯老化试验		
				失光	变色	粉化	长霉	失光	变色	粉化
1	阿克苏国际	室温固化氟碳面漆/双组份高性能氟碳涂料	80	0	2	0	0	2	0	0
2	阿克苏国际	聚氨酯面漆/双组份丙烯酸聚氨酯涂料	50	0	1	0	0	1	0	1
3	中涂化工	氟碳面漆/双组份氟碳树脂面漆	80	0	0	0	0	1	0	0
4	PPG	氟碳面漆/双组份高固态大气干燥自干型氟碳面漆	60	0	1	0	0	0	0	0
5	银亿	氟碳面漆/常温固化的双组份氟碳涂料	80	0	1	0	0	0	0	0
6	航天三丰	天冬聚脲高耐候面漆/天冬聚脲树脂与颜填料及功能性助剂制备而成的双组份涂料	120	0	0	0	0	0	0	0
7	中航百慕	石墨烯改性易洁氟碳面漆/高性能石墨烯和 FEVE 氟树脂为基料制备而成的双组份氟碳涂料	80	0	1	0	0	1	1	0

### 1.3 新涂层体系制备

涂层 A 和涂层 B 配合, 制备成新的涂层体系, 涂层 A 和涂层 B 进行重涂施工的组合方法如图 2 所示。5 种涂层 A、7 种涂层 B 按照涂层组合共制备 30 种试验件 (本文主要研究涂层配套性及再涂性, 原涂层体系不制备)。每种组合制作试验件 3 个, 其中, Q345B 底材试样 2 块, 外形尺寸为 100 mm×50 mm×3 mm; 马口铁板底材试样 1 块, 外形尺寸为 120 mm×50 mm×0.28 mm, 马口铁板底材用于杯突试验。

按 1.1 节制备涂层 A 后, 按涂层 B 的施工工艺喷涂在涂层 A 上, 得到新配套涂层体系试验件。涂层 B 厚度按照表 2 进行施工, 施工时控制厚度为设计厚度的 90%~150%, 施工过程无溶胀、咬底、渗色、起皱等缺陷。涂装后的涂层样板, 养护时间超过 7 d 后, 再开展检测评价。

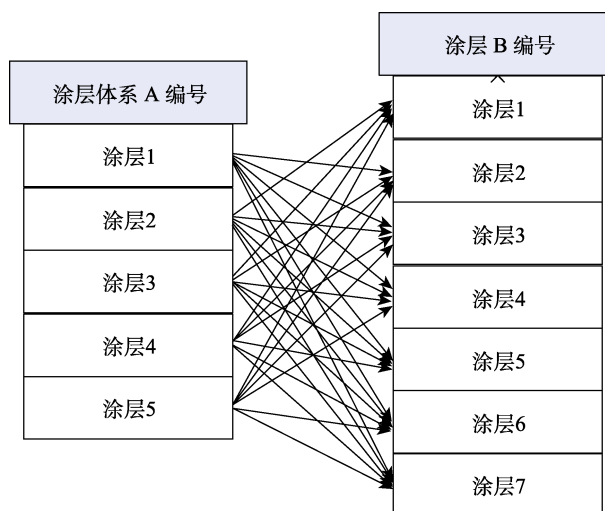


图 2 新涂层体系组合

Fig.2 Schematic diagram of new coating system combination

## 2 涂层体系的检测评价

### 2.1 检测方法

参照 GB/T 34681—2017《色漆和清漆涂料配套性和再涂性的测定》的规定开展附着力、杯突和压痕试验。由于此次参加检测的样板涂层厚度大, 本研究中采用拉拔法进行附着力测试。为了更好地检测每道涂层间的附着力, 参照 GB/T 5210—2006 的规定, 使用 MTS 拉力试验机, 采用拉拔法进行附着力测试<sup>[17]</sup>; 参照 GB/T 9275—2008/ISO 2815 的规定, 使用 BGD 510 型巴克霍尔兹压痕试验仪进行巴克霍尔兹压痕试验<sup>[18]</sup>; 参照 GB/T 9753—2007/ISO 1520 的规定, 使用 760N 型杯突试验仪进行杯突试验<sup>[19]</sup>; 参照

GB/T13452.2—2008 的规定, 使用 MINITest600FN2 涂层测厚仪进行涂层厚度的测定<sup>[20]</sup>。

### 2.2 检测结果

涂层体系配套性和再涂性试验各项测试的测定结果见表 3, 其中涂层组合以涂层 A-涂层 B 命名。例如, 1 号涂层 A 涂覆 2 号涂层 B, 涂层组合为 1-2。

## 3 结果分析

### 3.1 附着力

从表 3 中拉拔测试值和涂层破坏形式来看, 不同涂层 A 与涂层 B 配合后呈现不同的特性:

表 3 涂层体系配套性和再涂性试验结果

Tab.3 Test results of compatibility and recoating of coating system

涂层组合	附着力/MPa		压痕试验/mm	杯突试验/mm	备注
	拉拔值	破坏方式			
1-2	5.8	底漆内聚破坏	0.9	2.4	1 号涂层 A 原始涂层附着力为 6.1 MPa, 压痕长度为 1.0 mm
1-3	5.2	底漆内聚破坏	1.6	3.0	
1-4	5.7	底漆内聚破坏	0.9	2.1	
1-5	6.9	底漆内聚破坏	1.7	3.1	
1-6	5.1	底漆内聚破坏	1.3	2.6	
1-7	5.8	底漆内聚破坏	1.3	3.2	
2-1	10.7	涂层与底材间破坏	1.1	2.1	
2-3	14.0	涂层与底材间破坏	1.5	2.3	
2-4	17.6	涂层与底材间破坏	1.0	1.8	
2-5	10.5	涂层与底材间破坏	1.8	2.6	
2-6	12.8	面漆内聚破坏	1.0	1.5	
2-7	11.6	胶粘剂内聚破坏	0.9	1.6	
3-1	16.8	底漆内聚破坏	1.1	2.8	3 号涂层 A 原始涂层附着力 14.0 MPa, 压痕长度为 1.4 mm
3-2	14.4	底漆内聚破坏	1.0	2.1	
3-4	15.2	底漆内聚破坏	1.6	1.9	
3-5	8.4	面漆与中间漆间破坏	1.9	2.5	
3-6	9.4	面漆内聚破坏	1.4	2.0	
3-7	10.4	中间漆与底漆间破坏	1.7	2.2	
4-1	16.4	面漆内聚破坏	1.6	4.3	
4-2	11.6	涂层与底材间破坏	1.0	5.4	
4-3	10.4	中间漆内聚破坏	1.4	4.1	
4-5	11.4	中间漆内聚破坏	2.0	3.3	
4-6	8.4	面漆内聚破坏	1.4	5.1	
4-7	11.1	中间漆内聚破坏	1.6	2.4	
5-1	13.8	中间漆内聚破坏	1.2	1.6	5 号涂层 A 原始涂层附着力 9.9 MPa, 压痕长度为 0.9 mm
5-2	8.9	中间漆内聚破坏	0.8	1.8	
5-3	7.5	中间漆内聚破坏	1.1	1.6	
5-4	8.3	底漆内聚破坏	0.6	1.6	
5-6	8.4	中间漆内聚破坏	0.8	1.8	
5-7	7.8	中间漆内聚破坏	1.5	2.2	

1) 1 号涂层 A 和其他 6 种重涂面漆的组合, 拉拔破坏形式均是底漆内聚破坏, 且拉拔值较一致。这说明试件重涂面漆与涂层 A 环氧云铁中间漆层的

结合均较好, 层间粘合力的弱点在于环氧封闭底漆的强度。

2) 2 号涂层 A 和其他 6 种重涂面漆的组合, 拉

拔破坏形式主要是涂层与底材间破坏,且拉拔值较高。虽然2号涂层A与6号涂层B组合发生面漆内聚破坏,但拉拔力已达到12.8 MPa。这说明2号涂层A环氧屏蔽漆层与其他6种重涂面漆层间结合力非常优异。

3) 3号涂层A和其他6种重涂面漆的组合,拉拔破坏形式主要是底漆内聚破坏或底漆/中间漆层间破坏,但是3-5组合为面漆与中间漆间破坏,3-6组合为面漆内聚破坏,且这2种组合拉拔值相对较低。这说明环氧云铁中间漆层与个别氟碳面漆层间结合力,天冬聚脲高耐候面漆涂层本身结合力相对较弱。

4) 4号涂层A和其他6种重涂面漆的组合,拉拔破坏呈现多种形式,但总体来看,4-6组合为面漆内聚破坏,且拉拔值低于其他组合,天冬聚脲高耐候面漆涂层本身结合力较差。

5) 5号涂层A和其他6种重涂面漆的组合,拉拔破坏基本呈现中间漆内聚破坏,无面漆/中间漆或面漆内聚破坏形式,6种组合总体配套性较好。

从表3可以看出,在涂层体系的配套性和重涂性试验中,所有试验件的涂层拉拔附着力测试均大于5 MPa,满足涂装防护涂层附着力的一般要求,说明所选新面漆涂层与旧涂层之间的附着力较好。表3中,附着力值低于10 MPa的涂层,基本是因为涂层A原涂层层间或本身结合力相对较低。天冬聚脲高耐候面漆附着力相对较低,可能的原因是由于漆膜相对较厚,影响了涂层内结合力。另外,相同种类的中间漆与面漆结合,层间结合力不同,可能是由于不同品牌涂料成分略有不同,造成结合力有所差别。

### 3.2 压痕试验结果

从表3可以看出,在涂层体系的配套性和重涂性试验中,涂层体系再涂后压痕与原涂层压痕相比,压痕长度有所变化,30组涂层体系组合中有9组(占30%)再涂涂层压痕长度降低,抗压痕性能有所提高。这表明再涂后涂层硬度有所增加,1组合压痕长度与再涂前持平,20组抗压痕性能有所降低。分析可知:

1) 从压痕长度来看,1号涂层A采用1-2或1-4组合,2号涂层A采用2-7组合,3号涂层A采用3-2组合,4号涂层A采用4-2组合,5号涂层A采用5-4

组合,可使再涂后的新涂层抗压痕性能最好。

2) 压痕长度与面漆种类关系很大,同种面漆涂覆在不同涂层A上,压痕长度变化趋势基本一致。例如,2号涂层B涂覆到涂层A后,压痕长度与原涂层体系相比,均有不同程度的降低。

3) 压痕长度与同种面漆的厚度有较大的关系,厚度越小,压痕长度越短。例如,4号涂层B涂覆到涂层A后,压痕长度与1、3、5号涂层B相比,压痕长度要短得多。

### 3.3 杯突试验结果

从表3还可以看出,杯突试验测试值多在1.5~4.5 mm,分析可知:

1) 从试验结果来看,5种在役涂层中,1号涂层A采用1-7组合,2号涂层A采用2-5组合,3号涂层A采用3-1组合,4号涂层A采用4-2或4-6组合,5号涂层A采用5-7组合,再涂后涂层的延展性较好。

2) 国内少数汽车厂家针对汽车涂层的杯突试验合格评判企业标准中,杯突试验测试值5 mm为合格。此时由于汽车涂层通常在100 μm左右,而此次进行杯突试验的涂层体系厚度均超过300 μm,涂层厚度增加导致漆膜的延展性必然明显下降。

3) 对于不同厚度的涂层体系,可分段设置合格标准。例如,涂层厚度为120 μm时,杯突试验测试值≥5 mm为合格;而300 μm≤涂层厚度≤400 μm时,杯突试验测试值≥1.5 mm为合格。

### 3.4 综合分析

本文研究的涂层体系均用于濒海高温、高湿、高盐雾、强光照环境下设施设备的表面防护,旨在提高面漆耐候性能,增强其在该环境下得抗粉化、失光、变色能力及整体涂层体系的防护能力。因此,在进行涂层再涂性和配套性评价时,应参照防护性涂层标准,重点考虑附着力满足使用要求,提高涂层体系涂层的粘结力<sup>[21]</sup>,其次才是考虑硬度和延展性。

结合表2中面漆的加速试验数据,综合分析新配套涂层的性能,重点考虑涂层结合力以及面漆抗粉化、变色、失光能力,涂层面漆修复时配套建议见表4。

表4 在役涂层面漆修复配套建议  
Tab.4 Suggestions for coating paint repair

编号	涂层 A (在役涂层部分)		涂层 B (面漆)	说明
	涂层体系	涂料品牌		
1	锌铝合金 (≥150 μm)+环氧 封闭漆 (≥50 μm)+环氧云铁 中间漆 (≥120 μm)	阿克苏国际	天冬聚脲高耐候面漆 (80 μm)	选用标准:附着力合格,粉 化评级 0, 变色评级+失光 评级≤1; 天冬聚脲高耐候面漆建议 涂装厚度 80μm, 以增强漆 膜内结合力
			银亿氟碳面漆 (80 μm)	
			中涂化工氟碳面漆 (80 μm)	
			PPG 氟碳面漆 (60 μm)	
2	Interzone 954 底漆 (400 μm)	阿克苏国际	天冬聚脲高耐候面漆 (80 μm)	
			银亿氟碳面漆 (80 μm)	

续表 4 在役涂层面漆修复配套建议  
Tab.4 Suggestions for coating paint repair (continued)

编号	涂层 A (在役涂层部分)		涂层 B (面漆)	说明
	涂层体系	涂料品牌		
2	Interzone 954 底漆 (400 μm)	阿克苏国际	中涂化工氟碳面漆 (80 μm) PPG 氟碳面漆 (60 μm)	
3	环氧富锌底漆 (60~80 μm) + 环氧云铁中间漆 (120~150 μm)	中涂 化工	中涂化工氟碳面漆 (80 μm) 银亿氟碳面漆 (80 μm) 天冬聚脲高耐候面漆 (80 μm) PPG 氟碳面漆 (60 μm)	选用标准: 附着力合格, 粉化评级 0, 变色评级+失光评级 ≤ 1;
4	Sigmacover280 通用环氧底漆 (80 μm) + Sigmacover410 通用环氧中间漆 (120 μm)	PPG	PPG 氟碳面漆 (60 μm) 银亿氟碳面漆 (80 μm) 中涂化工氟碳面漆 (80 μm) 天冬聚脲高耐候面漆 (80 μm)	天冬聚脲高耐候面漆建议涂装厚度 80 μm, 以增强漆膜内结合力
5	无溶剂焊缝专用渗透底漆 (160 μm) + 环氧防腐阻隔中间漆 (100 μm)	银亿	银亿氟碳面漆 (80 μm) 天冬聚脲高耐候面漆 (80 μm) 中涂化工氟碳面漆 (80 μm) PPG 氟碳面漆 (60 μm)	

## 4 结语

针对濒海钢架结构涂层面漆大面积粉化、失光、变色现象, 只去除旧面漆后重涂新面漆的施工工艺来修复设施设备的防腐性能, 既能降低成本, 又能缩短工期。

1) 通过某大型工程 5 种常用在役涂层 30 组涂层组合的配套性及再涂性研究, 提出了濒海环境在役涂层面漆修复时的涂层配套方案, 可为大型钢结构工程面漆的重涂防腐施工提供重要参考和技术支撑。

2) 在涂层配套性及再涂性试验与评价中, 施工过程不能出现咬底、渗色等涂层相容性不良的缺陷, 施工后重点测试涂层间结合力。由于施工工艺和涂料品牌的影响, 涂层结合力有较大不同, 但附着力均应满足工艺要求。

3) 本试验是在常用成熟的涂层上进行, 压痕试验与杯突试验结果与原涂层相差不大, 只是参考因素。对于其他特殊用途的新型涂层配套试验, 例如汽车涂层, 压痕试验与杯突试验仍是重要参考因素。

### 参考文献:

- [1] 曹备, 高瑾, 朱蕴辉. 防腐蚀监理工程师应用手册[M]. 北京: 中国石化出版社, 2011: 225-226.  
CAO Bei, GAO Jin, ZHU Yun-hui. Application manual of corrosion prevention supervision engineer[M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2011: 225-226.
- [2] 韩恩厚, 陈建敏, 宿彦京. 海洋工程材料和结构的腐蚀与防护[M]. 北京: 化学工业出版社, 2017: 169-171.
- [3] 洪敏, 王善林, 陈宜, 等. 低压等离子喷涂技术及研究现状[J]. 精密成形工程, 2020, 12(3): 146-153.  
HONG Min, WANG Shan-lin, CHEN Yi, et al. Low-Pressure Plasma Spraying Technology and Its Research Status[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12(3): 146-153.
- [4] HINDER S J, LOWE C, MAXTED J T, et al. Intercoat Adhesion Failure in a Multilayer Organic Coating System: An X-Ray Photoelectron Spectroscopy Study[J]. Progress in Organic Coatings, 2005, 54(1): 20-27.
- [5] SUMON T A, LYON S B, SCANTLEBURY J D. Failure of Aluminium Metal Spray/Organic Duplex Coating Systems on Structural Steel[J]. Corrosion Engineering, Science and Technology, 2013, 48(7): 552-557.
- [6] XU Yuan-ming, RAN Jun-shuang, CHEN Hao. Kohonen Neural Network Classification for Failure Process of Metallic Organic Coating in Corrosion Environment[J]. Metals, 2017, 7(4): 147.
- [7] 徐永祥, 严川伟, 高延敏, 等. 大气环境中涂层下金属的腐蚀和涂层的失效[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2002, 22(4): 249-256.  
XU Yong-xiang, YAN Chuan-wei, GAO Yan-min, et al. Underfilm Corrosion of Metals and Failure of Organic Coatings in Atmosphere[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2002, 22(4): 249-256.
- [8] ZHANG Xian-cheng, XU Bin-shi, WANG Hai-dou, et al.

HAN En-hou, CHEN Jian-min, SU Yan-jing. Corrosion and Protection for Marine, Offshore and Coastal Structures[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2017: 169-171.

- Failure Behavior of Protective Organic Coatings under Corrosive Conditions[C]//International Conference on Surface Engineering. [s. l.]: Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2004
- [9] 骆晨, 孙志华, 汤智慧, 等. 防护性有机涂层失效研究的发展趋势[J]. 装备环境工程, 2017, 14(8): 50-54.  
LUO Chen, SUN Zhi-hua, TANG Zhi-hui, et al. Development Trend of the Research on Failure Analysis of Protective Organic Coatings[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(8): 50-54.
- [10] 张华, 陈智勇. 有机涂层户外失效分析及对策[J]. 环境技术, 2011, 32(1): 25-28.  
ZHANG Hua, CHEN Zhi-yong. Analysis and Countermeasures of Organic Coatings in Outdoors Failure[J]. Environmental Technology, 2011, 32(1): 25-28.
- [11] 王洪伦, 钟文安, 朴世杰. 南海海洋大气环境金属表面涂层失效试验研究[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(增刊 2): 213-215.  
WANG Hong-lun, ZHONG Wen-an, PIAO Shi-jie. The Test Research on Coating Failure of Metal Surface at the South China Sea Marine Atmosphere Environment[J]. Corrosion & protection, 2015, 36(Supplement 2): 213-215.
- [12] GB/T 34681—2017, 色漆和清漆 涂料配套性和再涂性的测定[S].  
GB/T 34681—2017, Paints and Varnishes—Determination of the Overcoatability and Recoatability of a Coating[S].
- [13] 马翔宇, 王君. 桥梁钢箱梁外表面常用涂装配套体系性能研究[J]. 中国涂料, 2012, 27(11): 55-61.  
MA Xiang-yu, WANG Jun. Study on Coating Systems Performances for Outer Surface of Steel Box Girder[J]. China Coatings, 2012, 27(11): 55-61.
- [14] HOSHIKAWA Y, ONOKI T, AKAO M, et al. Blood Compatibility and Tissue Responsiveness on Simple and Durable Methylsiloxane Coating[J]. Materials Science and Engineering: C, 2012, 32(6): 1627-1631.
- [15] 陈凯锋. 船舶涂料重涂性能测试方法简析[J]. 上海涂料, 2008, 46(7): 31-33.  
CHEN Kai-feng. Brief Analysis of Testing Methods for Repainting Performance of Marine Coatings[J]. Shanghai Coatings, 2008, 46(7): 31-33.
- [16] 陈凯锋, 孙祖信, 张东亚. 可复涂聚氨酯涂料与旧涂层的配套性研究[J]. 材料开发与应用, 2008, 23(6): 58-60.  
CHEN Kai-feng, SUN Zu-xin, ZHANG Dong-ya. Research of Matching Performance of Recoatable Polyurethane Finish and Old Coat Film[J]. Development and Application of Materials, 2008, 23(6): 58-60.
- [17] GB/T 5210—2006, 色漆和清漆拉开法附着力试验: [S].  
GB/T 5210—2006, Paints and Varnishes—Pull-off Test for Adhesion[S].
- [18] GB/T 9275—2008, 色漆和清漆 巴克霍尔兹压痕试验 [S].  
GB/T 9275—2008, Paint and Varnishes—Buchholz Indentation Test[S].
- [19] GB/T 9753—2007, 色漆和清漆 杯突试验[S].  
GB/T 9753—2007, Paints and Varnishes—Cupping Test[S].
- [20] GB/T13452.2—2008, 色漆和清漆涂层厚度的测定[S].  
GB/T13452.2—2008, Paints and Varnishes—Determination of Film Thickness[S].
- [21] JT/T 722—2008, 公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件 [S].  
JT/T 722—2008, Specifications of Protective Coating for Highway Bridge Steel Structure[S].

责任编辑: 刘世忠