钢结构防腐涂层配套体系及应用实例

柳维成、郑铁英、计春艳
（大连振邦氟涂料股份有限公司，大连 116036）

摘要 防腐涂层配套体系选择的正确与否直接影响配套涂层的防护寿命，许多涂层配套体系选择的失误，而导致金属结构和构筑物遭到严重的腐蚀。本文的目的是在总结前人的施工经验，并结合笔者的工作实践针对不同腐蚀环境下的钢结构提出有代表性的涂层配套体系及相关的注意事项，供有关方面参考。

1 配套体系的选择

由于腐蚀环境的差异，涂层配套体系的选择也有所不同，在总结目前国内钢结构所采用的防腐涂层的基础上，提出如下几种有代表性的防腐涂层配套体系：

表 1：钢结构防腐涂层配套体系

涂装体系	涂料（涂层名称）	每道干膜厚度 μm	涂装道数	总干膜厚度 μm		适用范围
1	环氧富锌底漆（或水性无机富锌底漆）	40	2	80	190	适用于气候干燥、腐蚀环境较轻地区的钢结构防腐。
	环氧云铁中涂漆	40	1	40		
	灰铝粉石墨醇酸面漆	35	2	70		
2	环氧富锌底漆	40	2	80	240～280	适用于沿海及化工大气环境中的钢结构防腐。
	环氧云铁中涂漆	80～100	1	80～100		
	氯化橡胶面漆	40～50	2	80～100		
3	环氧富锌底漆	40	2	80	240～260	适用于桥梁、石油化工、海洋等环境的钢结构防腐。
	环氧云铁中涂漆	80～100	1	80～100		
	脂肪族聚氨酯面漆	40	2	80		
4	无机硅酸富锌底漆	70～75	1	70～75	255～285	适用于桥梁、石油化工、海洋等环境的钢结构防腐。
	环氧封闭漆	25～30	1	25～30		
	环氧云铁中涂漆	80～100	1	80～100		
	脂肪族聚氨酯面漆	40	2	80		
5	环氧富锌底漆	40	2	80	220～250	适用于海洋、化工、桥梁等腐蚀环境恶劣地区钢结构防腐。
	环氧云铁中涂漆	80～100	1	80～100		
	氯碳面漆	30～35	2	60～70		
6	无机硅酸富锌底漆	70～75	1	70～75	235～275	适用于海洋、化工、桥梁等腐蚀环境恶劣地区钢结构防腐
	环氧封闭漆	25～30	1	25～30		
	环氧云铁中涂漆	80～100	1	80～100		
	氯碳面漆	30～35	2	60～70		
7	电弧喷铝	180～200	1	180～200	365～410	适用于腐蚀环境十分恶劣的地区钢结构防腐。
	环氧封闭漆	25～30	1	25～30		
	环氧云铁中涂漆	80～100	1	80～100		
	脂肪族巨氨酯面漆	40	2	80		
8	电弧喷铝	180～200	1	180～200	345～400	适用于腐蚀环境十分恶劣的地区钢结构防腐。
	环氧封闭漆	25～30	1	25～30		
	环氧云铁中涂漆	80～100	1	80～100		
	氯碳面漆	30～35	2	60～70		
9	环氧富锌底漆	75	1	75	195～225	适用于腐蚀环境恶劣地区钢结构防腐，目前使用量不大。
	丙烯酸聚硅氧烷面漆	120～150	1	120～150		

2 配套体系确定的依据：

1．腐蚀环境的划分：ISO12944 将大气环境分类为六大类，即 C1 很低，C2 低，C3 中度，C4

为高度，C5-I 极高（工业大气），C5-M 极高（海洋）。

表 2：腐蚀环境的划分

腐蚀类别	材料损失（第一年暴露后）				典型环境
	低碳钢		锌		
	质量损失/g.㎡-2	厚度损失/μm	质量损失/g.㎡-2	厚度损失/μm	
C1 很低	≤10	≤1.3	≤0.7	≤0.1	
C2 低	10－200	1．3－25	0．7－5	0．1－0．7	大气污染较低，大部分是乡村地带
C3 中	200－400	25－50	5-15	0．7-2．1	城市和工业大气，中等的二氧化硫污染，低盐度沿海区域
C4 高	400-650	50-80	15-30	2.1-4.2	高盐度的工业区和沿海区域
C5-I 很高（工业）	650-1500	80-200	30-60	4.2-8.4	高盐度和恶劣大气的工业区
C5-M 很高（海洋）	650-1500	80-200	30-60	4.2-8.4	高盐度的沿海和近岸地带

2．腐蚀环境，使用寿命和涂膜厚度的关系：

根据 ISO12944 的规定，涂料系统的耐久性分三个范围：低(LOW)2-5 年，中(MEDIUM)5-15 年，高(HIGH)>15 年，对于涂膜厚度的规定，也是根据腐蚀环境及使用寿命来确定。

表 3：腐蚀环境，使用寿命和涂膜厚度的关系

腐蚀环境	使用寿命	干膜厚度/μm
C2	低 中 高	80 150 200
C3	低 中 高	120 160 200
C4	低 中 高	160 200 240 （含锌粉），280（不含锌粉）
C5-I，C5-M	低 中 高	200 280 320

3．钢结构防腐配套方案制定的原则：应用 ISO12944 进行涂装设计指导，基本可以分成如下几个步骤：

确定钢结构的腐蚀环境；

确定保护钢结构的期望年限；

确定涂料品种和漆膜厚度；

不同的油漆公司，针对 ISO12944 均有适合本公司的产品配套来供用户选择。下表是根据 ISO12944 所制定的涂层配套保护系列。

表 4：ISO12944 涂层保护系列实例

腐蚀环境		涂料类型	涂层系统	干膜厚度/μm	备注
C1	L	环氧树脂	厚浆型环氧漆	80	
	M H	醇酸树脂	醇酸底漆 醇酸面漆	40 40	
C2	L	醇酸树脂	醇酸底漆 醇酸面漆	40 40	

	M	醇酸树脂	醇酸底漆 醇酸面漆	80（40X2） 40	厚浆型底漆可以一道成膜。
	H	环氧/聚氨酯	厚浆型环氧底漆 脂肪族聚氨酯面漆	100 60	大于 15 年的方案最好使用环氧系统。
C3	L	醇酸树脂	醇酸底漆 醇酸面漆	80（40X2）40	厚浆型底漆可以一道成膜。
		环氧树脂	厚浆型 环氧底漆	120	无需装饰性要求时可选用此方案。
	M	醇酸树脂	醇酸底漆 醇酸面漆	80（40X2） 80（40X2）	厚浆型底/面漆可以一道成膜。
		环氧树脂	厚浆型环氧底漆	150	无需装饰性要求时可选用此方案。
	H	环氧/聚氨酯	厚浆型环氧底漆 脂肪族聚氨酯面漆	150 50	大于 15 年的方案最好使用环氧系统。
C4	M	环氧磷酸锌/环氧中间漆/聚氨酯	环氧磷酸锌底漆 环氧中间漆 脂肪族聚氨酯面漆	50 100 50	环氧中间漆通常选用云母氧化铁型。
	H	富锌/环氧/聚氨酯	环氧富锌底漆 环氧中间漆 脂肪族聚氨酯面漆	50 140 50	底漆也可适当加厚到 80μm，中间漆适当减薄到 110-120μm 如果使用无机锌，厚度通常要求 75-80μm
		环氧磷酸锌/环氧中间漆/聚氨酯	环氧磷酸锌底漆 环氧中间漆 脂肪族聚氨酯面漆	50 150 80（40X2）	如果不使用富锌底漆，总膜厚应增加到 280μm。
C5I，C5M	M	富锌/环氧/聚氨酯	环氧/无机富锌底漆 环氧中间漆 脂肪族聚氨酯面漆	80 150 50	在 C5 环境中，底漆必须使用富锌的底漆
	H	富锌/环氧/聚氨酯	环氧/无机富锌底漆 环氧中间漆 脂肪族聚氨酯面漆	80 150 80（40x2）	厚浆型聚氨酯面漆可以一道成膜；厚浆型环氧中间漆可以增加到 180μm，而面漆减至 50μm
	H	富锌底漆 聚硅氧烷	环氧/无机富锌底漆 丙烯酸聚硅氧烷涂料	80 120	该方案是特例，在漆膜的厚度没有遵循 ISO12944 的要求，有着同样的耐蚀性能

4．ISO12944 的说明：

1988 年，国际标准化组织 ISO 推出了 ISO12944，这是一个全球防腐蚀技术人员期待已久的公用标准。ISO12944 是国际标准化组织为那些从事涂料防腐蚀工作的业主，设计生产企业等汇编的标准，该标准已通过了欧洲委员会的批准认可。所以它实际上取代了一些国家的标准，如英国的 BS5493，德国的 DIN55928 等。ISO12944 共分八个部分，其中第二部分（腐蚀环境的分类）和第五部分（防护涂料系统）对我们从事涂料推广和施工人员很有用，如前面所述。

3 典型的配套实例

（1）杭州湾跨海大桥

涂装部位	涂料名称	道数	干膜厚，μm
钢箱梁，风嘴，钢锚箱外表面	电弧喷铝		200
	环氧封闭漆	2	50
	环氧云铁中间漆	1	50
	氟碳面漆	1	40
	氟碳面漆	1	40
	环氧富锌车间底漆	1	30
	环氧富锌底漆	1	80
	环氧厚浆漆	1	125

	环氧面漆	1	25
钢箱梁内部（布置除湿系统）	环氧富锌车间底漆	1	30
	改性环氧耐磨漆	1	125
桥面	氯化橡胶漆	1	30
检查小车	无机富锌底漆（或无机磷酸盐富锌底漆）	2	80
	环氧封闭漆	1	50
	环氧云铁中间漆	1	100
	氟碳面漆	2	70

（2）奥运鸟巢钢构工程

涂装部位	涂料名称	道数	干膜厚度，μm
钢构外表面	无机硅酸富锌底漆	1	75
	环氧封闭漆	1	25-30
	环氧云铁中间漆	1	100
	氟碳金属漆	1	25
	氟碳清漆	1	25

（3）海虹涂料优化的桥梁配套体系

表 1：聚氨酯面漆的配套体系

序号	涂层	涂料名称	干膜厚度/μm
1	车间底漆	硅酸锌车间底漆	20
2	底漆	无机富锌底漆	75
3	封闭漆	环氧封闭漆	25
4	中层漆	环氧云铁漆	120
5	面漆	聚氨酯面漆	50
6	面漆	聚氨酯面漆	50
总计	（20μm 车间底漆不计入总干膜厚度）		320

表 2：聚硅氧烷配套体系

序号	涂层	产品名称	干膜厚度/μm
1	车间底漆	硅酸锌车间底漆	20
2	底漆	无机富锌底漆	80
3	中间漆	环氧云铁中间漆	100
4	面漆	聚硅氧烷面漆	80
5	面漆	聚硅氧烷面漆	80
总计	20μm 车间底漆不计入总干膜厚度		340

（4）日本典型重防腐涂装体系

工序	涂料名称	使用量/g·m-2	膜厚/μm	涂装间隔
一次表面处理	钢板喷砂到 SIS Sa2.5	—	—	—
车间底漆	无机富锌底漆	200	20	—
二次表面处理	构件喷砂到 SIS Sa2.5	—	—	—
第一层	厚膜型无机富锌底漆	700	75	1~6 个月
第二层	雾喷涂层	160	—	2 天内

第三层	厚膜型环氧底漆	500	100	1天~1个月
第四层	厚膜型环氧底漆	500	100	1~3个月
第五层	氟树脂中涂漆	170	30	1~7天
第六层	氟树脂面漆	140	20~30	—

4 配套施工注意事项

对上述列举的配套体系，在施工涂装时提出如下注意事项：

(1)、在涂装有机或无机富锌底漆时，金属表面必须进行喷砂处理，使之达到Sa2.5级以上，粗糙度达到Rz=40~75。

(2)、有机或无机富锌底漆的涂装要求在被涂基面喷砂后4小时内完成，否则涂膜质量下降。

(3)、无机硅酸富锌底漆的锌粉含量通常很高，而且锌粉为球状，当与低拉伸强度的主剂正硅酸乙酯相配合时，因为溶剂是挥发速度较快的醇类，涂料的收缩率增大，当涂膜厚度超过150μm甚至产生流挂时，漆膜会产生龟裂，通常控制干膜厚在70~80μm。

(4)、无机硅酸富锌涂料需要湿气来帮助固化，如果相对湿度低于60%时，固化会很慢，在20℃和相对湿度65~75%时固化约需3天，在低温和低湿度环境下，固化时间会延长。相对湿度最好保持在65%以上，最低温度可低至-10℃。喷洒清水可以解决低湿度的固化问题，在施工后4——5小时后可以喷洒清水，保持涂层表面湿润以帮助固化的完成。无机富锌涂膜固化的检测，标准的方法是MEK甲乙酮测试法。根据SATM4752，白色棉布蘸上MEK试剂，来回擦试50次，如果没有或者仅有很轻微变色，说明固化已经完成。

(5)、为了确保富锌涂料中锌粉同钢铁能紧密结合而起到导电和牺牲阳极作用，对于富锌涂料中锌粉含量占干膜总质量的百分比，美国钢结构涂装协会（SSPC）SSPC Paint-20中规定：无机富锌涂料不少于74%，有机富锌涂料不少于77%。而有机富锌涂料中锌粉含量之所以偏高，是由于其导电性较无机富锌涂料差所致。因此用户在选择富锌涂料时，对锌粉含量要充分注意。

(6)、富锌类涂料对钢铁表面的处理要求很严格，喷砂必须达到ISO Sa2.5以上，对于简单处理的表面，富锌底漆将毫无意义。即使表面很小的锈蚀也会阻止电位接触，使富锌底漆起不到阴极保护作用，因此尽量不在手工处理的表达面上涂刷富锌涂料。

(7)、由于无机硅酸锌底漆中富含锌粉，其成膜后孔隙率较大，当直接在基中涂复厚浆型涂料时，就会使孔隙中的空气空透涂膜逸出，造成针孔现象。为此采用渗透力强的环氧类封闭漆薄喷25~30μm，迫使空气逸出。

(8)、对于手工打磨的表面，建议采用环氧稳定型的带锈底漆，厚度为40~50μm，其效果要比磷化底漆好。

(9)、对于涂无机硅酸锌底漆的复合涂层进行修补，对修补处经过表面处理后，其底漆应选择环氧富锌底漆，因无机富锌底漆与要修补边缘的有机涂层附着力差。

(10)、对于在镀锌件表面以及有机或无机富锌底漆表面上不能直接涂复油性涂料、酚醛涂料、醇酸涂料、环氧酯涂料，否则极易与锌产生皂化反应，导致涂层脱落。

5 今后发展趋势

综观目前国内外钢结构配套体系，可以发现聚氨酯，聚有机硅氧烷，氟碳这三种配套体系具有典型的代表意义。现将这些配套体系所采用的底漆，中间漆，面漆介绍如下：

（1） 底漆：目前主要采用有机富锌底漆（环氧富锌底漆）和无机富锌底漆（水性无机富锌底漆，醇溶性无机富锌底漆，无机磷酸盐富锌底漆）。现将各种底漆的性能比较如下：

表 1：富锌涂层在中性盐雾试验后的电化学保护性能

序号	富锌涂层类型	1500h 中性盐雾试验后划伤处外观变化
1	环氧富锌涂层	划伤处大量出现红锈，经 300~400h 后，距划伤边缘 1~3mm 距离内涂层起泡、脱层。
2	醇溶性无机硅酸盐类富锌涂层	划伤处无红锈，划痕周边涂层基本完整、无起泡、脱落等缺陷。
3	水溶性无机硅酸盐富锌涂层	划伤处个别体系有红锈，划痕周边涂层基本上无起泡、脱层等缺陷，但未损伤涂层部分出现小鼓泡。
4	无机磷酸盐富锌涂层	划伤处无红锈，周边涂层完好。

表 2：按 DOD-P-24648 规定进行电化学保护性测试结果

序号	富锌涂层类型	未涂复涂层的钢裸露部位出现红锈时间（d）
1	环氧富锌涂层	1
2	水性硅酸盐富锌涂层	>40
3	无机磷酸盐富锌涂层	>40

试验表明，环氧富锌底漆做复合体系的底涂层，其电化学保护性不理想，而醇溶性和水性无机硅酸盐富锌以及无机磷酸盐富锌底漆却显现出优良的电化学保护性能。环氧富锌底漆与无机富锌底漆相比，虽然防护性能差些，但由于对底面有较好的附着力，以及对基面处理相对宽松些，因此在钢结构的防护中同样也获得了广泛应用。

（2）封闭漆：在无机富锌底漆和电弧喷铝，喷锌的表面上，由于涂层孔隙率大，其上一定要涂封闭漆。目前我公司的产品型号是 ZB-06-29 环氧封闭漆。对不同的基面，应选择不同的封闭漆：

1．混凝土基面：主要是环氧清漆，其作用是封闭毛细孔，粘住混凝土的表面尘，增强混凝土表面层的强度，为后道漆的施工提供足够强的基础。其它还有丙烯酸封闭漆。

2．无机硅酸锌基面：由于无基硅酸锌涂膜孔隙率大，如用厚浆型涂料直接涂复时，易形成针孔，解决的办法就是采用渗透力强的环氧封闭漆，薄喷 25-30μm，迫使空气逸出，这种封闭漆通常也可用后道的环氧中间漆稀释到一定的浓度后进行喷涂。

3．金属喷涂层基面：对于喷锌，喷铝层的基面，可以采用无机硅酸锌表面的环氧封闭漆，也可以采用后道漆薄雾层喷涂法，环氧云铁中间漆是常用品种。

4．旧漆膜基面：旧漆膜翻新时，要考虑新旧涂层的相容性。如果新涂层对旧涂层有咬底的可能时，可以使用封闭漆对旧涂层进行封闭，然后再涂全新的涂层。使用最多的是厚浆型改性环氧漆（MASTIC Epoxy ），这种涂料溶剂含量低，有表面容忍性，对于一般的表面处理可以接受，可以厚膜施工，多数是铝粉型可以直接在钢铁表面作为底漆施工，或作为重涂用漆。国际一些著名的重防腐涂料公司都有相应的产品。例如佐敦的 jotamactic87，国际油漆的 Itergard 670HS，亚美隆的 Amerlock 400，老人牌涂料的 45880 等都是相类似的产品。

（3）中间漆：环氧云铁防锈漆既可以作底漆使用，但更多是做富锌底漆的中间漆使用。由于云母氧化铁鳞片状的互相叠合，有效的限制了腐蚀介质的渗透，同时，片状颜料还能使表面粗糙，有利与底面漆的结合。而且云铁没有最大的涂装间隔，特别适用于施工期长的大型钢结构防腐。它是富锌底漆上优先推荐使用的中间漆。环氧厚浆型涂料，涂膜厚度高，一次可施工 150-300μm，既可作防锈漆，也可作中间漆，甚至可作内壁的防腐面漆用。

（4）面漆：在钢结构的防护中，脂肪族的聚氨酯，聚有机硅氧烷，氟碳漆是目前最有代表意义的三种面漆。

1．聚氨酯面漆：聚氨酯涂料又称聚氨基甲酸酯涂料。根据美国材料试验协会（ASTM）的划分，聚氨酯涂料可以分为五类：即改性聚氨酯涂料（ASTM-1），湿固化聚氨酯涂料（ASTM-2），封闭型聚氨酯涂料（ASTM-3），催化型聚氨酯涂料（ASTM-4），羟基固化型聚氨

酯涂料（ASTM-5）。其中以羟基固化型聚氨酯涂料在现代防腐中获得了广泛的应用。以含羟基的丙烯酸树脂和脂肪族异氰酯的缩二脲（HDI）反应所形成的漆膜，在外用防护中获得广泛应用。该种漆膜具有优良的耐候，耐蚀，保色，装饰性能。与聚有机硅氧烷，氟碳涂料相比，虽然防护寿命低些，一般为 5-8 年，但因价格较便宜，因此，在现代钢结构防腐中占主导地位。

2. 聚有机硅氧烷：目前欧洲和美国研制成功新型的聚硅氧烷涂料，第一代产品是环氧改性的聚硅氧烷涂料，第二代产品是丙烯酸改性的聚硅氧烷涂料。由于涂料中含有 SI-O 键，这种化学键由于不受阳光和紫外线作用，因此该种涂料具有优良的耐候性和防腐耐温性能。

美国 AMERON 公司生产的环氧聚硅氧烷涂料（PSX 700），其固体含量达 90%，VOC 仅为 120g/L，双组分的贮存寿命，即 A，B 组份混合后的使用时间（21 度）长达 5 小时，一道漆膜厚度为 75-175μm，可以省去中间漆，直接涂在底漆上，可以无气喷涂，也可以刷涂和辊涂；表干和实干（21 度）分别为 3h 和 6.5 h；经佛罗里达曝晒试验表明，单道 DFT100μm 的环氧聚硅氧烷涂料的耐晒性能大大高于环氧/脂肪族聚氨酯 2 道涂层，即 DFT 为（100+75μm）系统。该涂层对无机底材和钢材有着超强的润湿，渗透和附着力。在喷砂的钢铁表面，用拉开法测试其附着力可达 190Kg/Cm2，而环氧涂料通常只能达到 50-75Kg，耐磨性也高于传统的环氧涂料。由于很低的表面张力，能与大多数底材，底漆，旧涂层很好的相容，与有机或无机富锌底漆也有很好的相容性。由于分子结构中不含异氰酸酯，因此是环保型涂料。国际涂料公司研究表明，用丙烯酸改性的第二代聚硅氧烷涂料，对钢材和有机涂层有很好的附着力，漆膜柔韧性好，而且具有很好的耐酸耐溶剂性能，可以进行低温低湿固化。户外耐候性能是脂肪族聚氨酯的 3-4 倍，5000 小时的 QUVA 试验表明，可以保持 95%的光泽度，而聚氨酯涂料在 3000 小时只保留了 40%的光泽。由此可见，聚有机硅氧烷涂料是一种很有发展前途的涂料，但目前在我国应用案例很少，随着时间的推移必将成为钢结构防腐的主要品种之一，也是氟碳漆的主要竞争对手。

6 参考文献

1、装备环境工程 2004.2.61-62；

2、大连振邦氟涂料股份有限公司：万洲铁路长江大桥涂装体系及施工工艺报告；

3、日本旭硝子公司产品说明书；

4、庞启财，防腐蚀涂料涂装和质量控制，北京，化学工业出版社，2004