

# 钢桥梁电弧喷涂纳米封闭复合涂层体系设计

易春龙<sup>1</sup>, 沈旺<sup>2</sup>, 童育强<sup>3</sup>, 刘国彬<sup>1</sup>, 于旭东<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学江苏中矿大正表面工程技术有限公司, 江苏徐州 221008; 2. 浙江省舟山连岛工程建设指挥部, 浙江舟山 316000; 3. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100088)

**[摘要]** 为了解决大型桥梁钢箱梁的长效防腐蚀问题,以浙江舟山连岛工程西堠门大桥防腐蚀工程为依托,结合电弧喷涂防腐蚀技术和纳米改性封闭涂层技术,提出了电弧喷涂纳米封闭复合涂层体系的设计思路,对比了电弧喷涂长效防腐传统方案与创新设计方案,对不同腐蚀环境下推荐设计采用不同的电弧喷涂金属涂层材料,对比分析了纳米封闭涂层与普通环氧底层的技术指标,简述了电弧喷涂纳米封闭复合涂层施工各工序的质量要求和检测方法。

**[关键词]** 电弧喷涂;复合涂层;纳米材料;钢桥梁;防腐蚀

**[中图分类号]** U44 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2010)07-0053-04

## 1 前言

电弧喷涂防腐蚀复合涂层技术作为钢桥梁长效防腐的有效方法,得到世界上大多数国家的认可<sup>[1-3]</sup>。电弧喷涂层与金属基体具有优良的涂层结合力,将金属基体和腐蚀介质完全隔离,并具有牺牲自己保护钢铁基体的阴极保护作用。电弧喷涂层经过和有机封闭涂层的配套使用后不但具有长久的耐腐蚀寿命,而且具有维护方便、维护周期长、维修期间环境污染小、维修费用低廉等优势。

对于电弧喷涂锌、铝及其合金等阳极性防腐蚀涂层,尽管对钢铁基体具有牺牲阳极的电化学保护作用,一定孔隙的存在不会造成大的危害,但涂层本身要消耗,会降低涂层的防腐蚀寿命,因此应选择适当的封闭涂料对金属喷涂层进行封闭处理。金属喷涂层的孔隙和粗糙表面为封闭涂层提供了良好的结合面。良好的封闭涂层可以渗透到金属喷涂层的孔隙中,将涂层孔隙封闭住,并在金属喷涂层表面形成一种隔离保护层,阻止腐蚀介质的渗透,不仅钢基体不被腐蚀,同时也保护了金属喷涂层,所以明显延长

了金属喷涂层的防腐蚀寿命<sup>[4]</sup>。

在用电弧喷涂技术解决具体工程问题时,首先要进行涂层设计,涂层设计的主要内容包括,明确工程的腐蚀环境和防护要求、基材表面处理方法和等级要求、合理选用电弧喷涂涂层材料及涂层厚度、选择封闭涂层材料及涂层厚度、确定电弧喷涂工艺参数及涂层质量指标等<sup>[4]</sup>。合理的涂层设计来源于预先了解要防护工件的工作环境、环境影响因素、涂层设计使用寿命、施工的难易程度、初期涂装投资成本、涂层维护周期及经济性等,这些都是涂层设计者要综合考虑的因素。合理的涂层设计可以获得经济而有效的防护效果。

对于大型钢桥梁,在立项之初就应考虑桥梁的耐久性,要求做到百年大计,以保证防腐蚀涂层与设计寿命同步。笔者等以主跨达到1 650 m的世界上首座特大跨径分体式钢箱梁悬索桥浙江西堠门大桥的防腐工程为依托,在前期大量钢桥梁电弧喷涂复合涂层体系施工和应用的基础上,结合电弧喷涂防腐蚀技术和纳米材料科技,提出了电弧喷涂纳米封闭复合涂层体系的设计思路,

**[收稿日期]** 2010-05-07

**[基金项目]** 国家科技支撑计划资助项目(2008BAG07B04)

**[作者简介]** 易春龙(1974-),男,湖南衡阳市人,高级工程师,博士,研究方向为电弧喷涂技术设备和纳米防腐蚀涂料;

E-mail: elong21@163.com

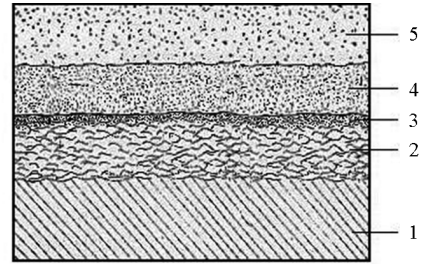
以供业内人士探讨。

## 2 涂层体系总体设计

电弧喷涂纳米封闭复合涂层体系是由电弧喷涂阳极性金属涂层和纳米改性防腐涂料封闭涂层(底层+中间层+面层)组合在一起的防护涂层体系,其结构如图1所示。纳米封闭底层主要起封孔作用,与金属喷涂层有良好的相容性,能充分渗透并填充金属喷涂层的孔隙并附着良好。封闭中间层是封闭和隔离层,耐蚀性好。封闭面层对腐蚀环境有适应性,能耐腐蚀和耐大气老化。根据国际公认的最佳协同效应,这种复合涂层体系的防腐寿命是单一阳极性金属涂层与单一防腐涂料涂层之和的1.5~2.3倍。

电弧喷涂复合涂层体系在不同环境下的防护性能有差异,这不仅取决于金属喷涂层的种类和涂层厚度,还取决于封闭涂料对环境的适应性。设计人

员要根据具体工程的实际情况来选择不同的复合涂层体系。为区别于传统电弧喷涂长效防腐方案,笔者为桥梁钢结构长效防腐设计的典型方案(50年寿命)如表1所示。



1—钢铁基体; 2—金属喷涂层; 3—纳米封闭底层; 4—封闭中间层; 5—封闭面层

图1 电弧喷涂纳米封闭复合涂层体系结构示意图

Fig. 1 Coating structure of arc spraying and nano sealer coatings system

表1 电弧喷涂长效防腐传统方案与创新设计方案的对比

Table 1 Comparison of traditional arc spraying composite coatings and newly designed coatings

涂层体系	传统方案		设计方案		备注
涂层设计	涂装材料	涂装厚度	涂装材料	涂装厚度	创新方案的优点说明
表面处理	磨料/喷砂除锈	Sa3级, Rz25~100 μm	磨料/喷砂除锈	Sa级, Rz25~100 μm	对清洁度和粗糙度要求一致
金属喷涂层	Zn, Al及合金	120~200 μm	Zn, Al及合金	120~200 μm	对涂层材料和厚度要求一致
封闭底层	环氧底漆	20~40 μm	纳米改性环氧封闭漆	0~20 μm	渗透性更好、附着力更高、耐蚀性更优
封闭中间层	环氧云铁中间漆	80~120 μm	环氧云铁中间漆	60~100 μm	
封闭面层	聚氨酯面漆	80 μm	丙烯酸聚氨酯面漆	80 μm	
涂层总厚度		≥300 μm		≥260 μm	薄的涂层厚度仍可满足防腐寿命要求

## 3 电弧喷涂金属涂层材料的选择

电弧喷涂金属涂层材料的选择必须满足涂层使用功能特性的基本要求。对室外钢铁结构(如桥梁钢结构)20年以上的长寿命防腐而言,推荐Zn, Al及其合金喷涂层,再根据具体的使用环境条件和其他要求进一步进行涂层体系的细化设计<sup>[5,6]</sup>。表2列出了不同涂层功能特性和腐蚀环境下推荐的电弧喷涂涂层材料。

电弧喷涂Zn, Al及其合金均能适用于大多数腐蚀环境。一般来说,喷锌层适用于pH 6~11的弱碱性环境和乡村大气环境,喷铝层用于pH 4~8的弱酸性环境、海洋大气环境和城市工业大气(含有SO<sub>2</sub>)环境,喷锌铝合金适用于pH 6~8的中性大气环境<sup>[7]</sup>。喷铝层同喷锌层相比还有以下一些优点:

表2 不同腐蚀环境下电弧喷涂涂层材料推荐

Table 2 Recommendation of arc spraying coating material under different application

涂层功能特性	腐蚀环境或作用	电弧喷涂涂层材料
耐大气腐蚀涂层	海洋大气环境	Al, ZnAl15, AlMg5等
	和缓的大气环境	Zn, ZnAl15等
	恶劣的大气环境	Al, ZnAl15, AlMg5等
耐水浸渍腐蚀涂层	淡水浸渍环境	Zn, ZnAl15等
	海水浸渍环境	Al, AlMg5等
耐化学腐蚀涂层	酸、碱、盐等	Pb, 18-8 不锈钢、Al等

1) 喷铝涂层的外层在空气中容易形成稳定的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>膜,即使遭受破损也极易恢复。Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>膜具有高度的致密性和耐蚀性,为涂层表面提供纯惰性的保护。喷锌层在空气中可形成ZnO但较难形成稳定的Zn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,锌层的寿命通常与其厚度成正比,所以在一定寿命要求下,喷锌层的厚度要大于喷铝层的

厚度。

2)有电解质存在时,Zn,Al 都能提供牺牲阳极保护作用,而 Al 的电化学容量为  $2.98 \text{ A} \cdot \text{h/g}$ ,Zn 的电化学容量只有  $0.82 \text{ A} \cdot \text{h/g}$ ,因此 Al 的阴极保护作用更好。

鉴于电弧喷铝涂层在海洋大气和工业大气环境下具有无可比拟的优势,国外标准和应用实例均表明在海洋大气和工业大气环境下喷铝涂层可以长久有效地保护钢铁。因此,对于海洋大气环境下的西堍门大桥,笔者等推荐的电弧喷涂材料为纯铝 ( $\geq 99.6\%$ ),喷铝涂层设计厚度为  $160 \sim 200 \mu\text{m}$ 。

#### 4 纳米封闭涂料底中面层的设计

根据电弧喷涂层对封闭和配套涂层的要求,结合各种涂料的特性和桥梁涂装经验,笔者等设计和推荐采用纳米改性环氧封闭漆<sup>[8]</sup>(取代传统环氧底漆)作为封闭底涂层,环氧云铁中间漆作为封闭中间层,丙烯酸聚氨酯面漆作为封闭面层,作为配套的纳米封闭涂层体系,与普通防腐涂料的主要技术指标对比如表 3 所示。

表 3 纳米封闭涂层与普通防腐底层的技术指标对比

Table 3 Technical parameter comparison of nano sealer and common anti-corrosion epoxy primer

性能项目	传统环氧底漆	纳米改性环氧封闭
漆细度/ $\mu\text{m}$	$\leq 60$	$\leq 30$
干燥时间	表干/h 实干/h	$\leq 4$ $\leq 24$
弯曲性能/mm	$\leq 2$	$\leq 2$
耐冲击性/cm	50	50
附着力	划圈法/级 拉开法/MPa	1 $\geq 10$
耐盐水性 (3% NaCl)	168 h 漆膜不起泡、不剥落、无锈蚀	960 h 漆膜不起泡、不剥落、无锈蚀
耐碱性 (5% NaOH)	240 h 涂层无异常	960 h 涂层无异常

#### 5 各工序的质量要求

电弧喷涂纳米封闭复合涂层的制备工艺过程包括表面处理、电弧喷涂和涂料涂装,各工序的质量要求见表 4。

#### 6 结语

1)电弧喷涂复合涂层体系在不同环境下的防

表 4 各工序的质量要求

Table 4 Quality requirement of coating procedure

工序名称	检测项目	质量要求	检测方法或标准
表面处理	表面清洁度	Sa3 级	比较样块,GB 8923
	表面粗糙度	Rz 25 ~ 100 $\mu\text{m}$	粗糙度仪,GB 11373
电弧喷涂		均匀致密,无漏	
	喷铝层外观	喷和附着不牢的涂层	目视法,GB/T 9793
	喷铝层厚度	160 ~ 200 $\mu\text{m}$	测厚仪,GB 11374
封闭涂装	外观	颜色均匀,	
		无漏涂、无流挂、无起泡	目视法
	涂膜厚度	达到设计要求	测厚仪,GB/T 1764
	涂膜附着力	$\geq 10 \text{ MPa}$	拉开法,GB/T 5210

护性能有差异,这不仅取决于金属喷涂层的种类和涂层厚度,还取决于封闭涂料对环境的适应性。设计人员要根据具体工程的实际情况来选择不同的复合涂层体系。

2)由于纳米改性环氧封闭漆对电弧喷涂层具有渗透性好、附着力高、耐蚀性优的特点,电弧喷涂纳米封闭复合涂层体系特别适合作为大型桥梁钢结构的高效防腐设计。

#### 参考文献

- [1] Yi Chunlong, An Yunqi, Shen Yatan, et al. Recent ten years applications of arc-spraying technology for corrosion protection of steel bridges in China[A]. Beijing: The 16<sup>th</sup> International Corrosion Conference[C]. 2005. P-18-C-67
- [2] Kuroda S, Takemoto M. Ten year interim report of thermal sprayed Zn, Al and Zn-Al coatings exposed to marine corrosion by Japan Association of Corrosion Control[A]. The International Thermal Spray Conference (ITSC 2000)[C]. Canada:Montreal, 2000
- [3] Marantz David R, Marantz Daniel R. State of the arc spray technology[A]. Bernechi F F, Hernecki T F. Thermal Spray Research and Applications[C]. USA: ASM International, 1991. 113-118
- [4] 易春龙. 电弧喷涂技术[M]. 北京:化学工业出版社,2006
- [5] 高荣发. 热喷涂[M]. 北京:化学工业出版社,1992
- [6] BS 5493: 1977. Code of practice for protective coating of iron and steel structures against corrosion. Britain. [S].
- [7] Norsok Standard M501: 1997. Surface preparation and protective coating. Norway. [S].
- [8] 易春龙,张胜利,陈卫国. 纳米改性环氧封闭漆的研制及在西堍门大桥的应用[J]. 公路,2009,(01):54-59

# Design of arc spraying nano sealing composite coatings system for steel bridge

Yi Chunlong<sup>1</sup> , Shen Wang<sup>2</sup> , Tong Yuqiang<sup>3</sup> ,  
Liu Guobin<sup>1</sup> , Yu Xudong<sup>2</sup>

(1. China University of Mining and Technology, Jiangsu CUMT Dazheng Surface Engineering Technology Co. ,Ltd. , Xuzhou, Jiangsu 221008, China; 2. Zhejiang Provincial Construction Headquarters of Zhoushan Islands Link Project, Zhoushan, Zhejiang 316000, China; 3. CCCC Highway Consultants Co. ,Ltd. , Beijing 100088, China)

[ **Abstract** ] In order to solve the long-term corrosion problem for large-scale steel box girder bridges, this paper relies on Zhejiang Zhoushan Xihoumen Bridge, combining with arc spraying anti-corrosive coating technology and nano-modified sealing coating, the arc spraying nano sealing composite coating system was designed, comparing the conventional arc spraying composite coating system and innovative design solutions of arc spraying nano sealing composite coating system. Different arc spraying metal coating materials were recommended for different corrosive environments. The technical parameter comparison of nano sealer and common anti-corrosion epoxy primer were analyzed comparatively. Quality requirements and testing methods of arc spraying nano sealing composite coating system coating procedure arc briefly introduced.

[ **Key words** ] arc spraying; composite coating; nano-material; steel bridge; anti-corrosion