电弧喷涂长效防腐技术在桥梁工程中的应用

安云岐[1,2]，晁兵[2]，李承宇[1]，王会阳[1]

（1.中国矿业大学，徐州 221008；
2.江苏中矿大正表面工程技术有限公司，徐州 221008）

摘　要：介绍了电弧喷涂长效防腐技术在国内外桥梁工程上的应用情况，对其防护材料及施工工装的最新研发成果及实践应用效果作了总结。针对新形势下我国桥梁行业的发展需求，指出了电弧喷涂长效防腐技术当前面临的关键技术问题及发展方向。

关键词：电弧喷涂；长效防腐；桥梁
中图分类号：TG174.442　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1674-7127（2011）04-0006-05

Application of Arc Spraying Technology for Long-term Anti-corrosion in Bridge Engineering

AN Yun-qi[1,2]，CHAO Bing[2]，LI Cheng-yu[1]，WANG Hui-yang[1]
(1. China university of mining and technology，Xuzhou 221008；
2. Jiangsu CUMT Da zheng surface Engineering Technology Co. Ltd，Xuzhou 221008)

Abstract: The application of arc spraying for long-term anti-corrosion technology on the bridge engineering at home and abroad is introduced, and the latest research results and practical application effects of protective materials and construction equipment are summarized. Considering the needs of the development of the bridge industry in our country under the new situation，the paper points out the key technical problems and the development direction of arc spraying technology for long-term anti-corrosion.

Keywords: Arc spraying；Long-term anti-corrosion；Bridge

1 概述

目前钢结构表面长效防腐技术主要是重防腐蚀涂料涂层技术和电弧喷涂复合涂层技术两种，均可用于设计寿命 50a 以上桥梁工程的腐蚀防护，在国内外桥梁工程上均有大量的应用实例，其中重防腐蚀涂料涂层技术首期免维护寿命一般设计为 10～15a[1]，目前已有设计 20a 的工程实例（如香港昂船洲大桥、美国新奥克兰海湾大桥）；电弧喷涂复合涂层技术首期免维护寿命一般设计为 20a 以上[2]，如果复合涂层表面的氟碳面漆、硅氧烷面漆质量能实现厂家保证的 20a 防护寿命，根据国际公认理论测算[3]，电弧喷涂复合涂层技术首期免维护寿命将能达到 30a 以上，甚至达到 50a。

笔者于 2009 年起组织对浙沪、武汉、广东等地区的 32 座桥梁工程进行了走访，其中重防腐涂层体系首期维护寿命达到 10a 以上的 5 座（最长 13a），金属复合涂层体系的桥梁均未进行首期维护（武汉军山长江公路大桥已运行 10a）[4]。表 1 列出了国外金属复合涂层体系防护桥梁 25a 以上免维护的工程实例[5]。

作者简介：安云岐（1963-），男（汉族），籍贯山东莱州，教授，董事长. Email：chaobing1989@163.com

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

首次维护寿命是从初始涂覆时刻算起，到原始涂层的保护性能下降到必须对其进行维修才能维持其对基体的保护作用的时刻为止的间隔时间。国际上公认，防护寿命要求 20a 以上时优先选择电弧喷涂长效防腐技术[2]。可靠的长效防护不仅显著减少了桥梁维修次数，保证工程安全顺畅运行，还能维护成本，减轻维修施工对环境的不良影响，在桥梁工程全寿命期内将产生十分突出的经济与社会效益。

2 电弧喷涂长效防腐技术研究进展

2.1 新材料技术

2.1.1 金属线材

目前市场上喷涂线材有丝材和芯材两类，现有电弧喷涂长效防腐技术主要以丝材为主。

用于防腐的主要丝材产品有 Zn（99.99%）、Al（99.5%）、ZnAl15，目前 AlMg5、Ac 铝的使用范围和应用量也在不断扩大。为提高现有丝材及其涂层的防护能力，不少研究院所和企事业单位开展了新型丝材的研究，如稀土铝镁丝材、铝镁锌丝材，并取得了积极进展。

表 1 国外早期钢桥梁热喷涂长效防腐蚀 25a 以上 * 应用实例

Table1 Application examples of thermal spray for a long- term anti- corrosion over 25a * of the foreign steel bridge

国家	桥梁名称	应用时间	桥梁类型	环境
瑞典	布罗斯桥	1967 年	公路桥	工业大气
	艾尔夫堡桥	1966 年		海洋/工业大气
挪威	龙贝格桥	1960 年	公路桥	工业大气
	卡姆桑德桥	1955 年	公路桥	工业大气
日本	关门桥	1974 年	公路桥	海洋/工业大气
丹麦	文布大桥	1950 年	铁路桥	海洋大气
	维尔桑德桥	1951 ~ 1956 年	铁路桥	海洋大气
	瓦尔比桥	1954 ~ 1960 年	铁路桥	过江，潮湿
美国	费城 Ridge Avenue 桥	1937 年	公路桥	工业大气
	康韦河桥	1965 年		过江，潮湿
英国	南威尔士桥	1968	公路桥	海洋大气
	门奈大桥	1969 年	公路桥	海洋大气
法国	麦特罗波桥	1971 年	城市高架桥	城市大气
	波尔多桥	1967 年		海洋大气

* ：①以上应用实例均取得 25a 无维修，并仍在继续使用；②本文仅摘录部分内容。

研究人员也对上述丝材及其双丝组合制得金属涂层的防护机理作了深入研究，并取得新成果。董立先等人对纯铝涂层、锌铝伪合金涂层的动态腐蚀试验表明[6]，在缺氧环境下 Al 能够发挥出较好的阴极保护作用，纯铝涂层耐蚀性能优于锌铝伪合金涂层；陈长江、李秉忠对锌铝伪合金涂层电化学机理研究表明[7]，抗腐蚀性能优劣顺序为纯铝层、锌铝伪合金、纯锌层；李秉忠等人 2000h 盐雾实验结果表明[8]，锌铝伪合金涂层的结合强度和耐蚀性能均优于 ZnAl15 合金涂层，接近纯铝涂层；萧以德等人的研究则表明[9]，ZnAl15 合金涂层的耐蚀性接近 Al 涂层而明显优于 Zn 涂层。陈国虞等人则依据日本阿克铁诺（Arc Techno）公司 Zn45%/Al55%试样的 16000h 盐雾试验结果研究说明锌铝伪合金涂层的耐蚀性能优于现有的纯铝层、锌铝合金层以及纯锌层[10]。美国焊接学会热喷涂委员会 19a 的现场挂片试验表明[11]，厚度 0.08～0.15mm 的铝涂层，不论是否封孔都能保证钢铁基体在海水、严酷的工业大气及海洋大气中 19a 不腐蚀；要保证钢铁基体在严酷的工业大气和海洋大气中 19a 不腐蚀，不经封孔处理的喷锌涂层厚度至少为 0.23mm，在海水中锌涂层厚度至少 0.3mm；经过封孔处理锌涂层的厚度减至 0.08～0.15mm，也可达到上述防腐效果。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

综合多方研究结果[12-14]，在盐雾、海洋环境及酸雨下，常规 Al、Zn、ZnAl15、Al+Zn (伪合金) 四种丝材的电弧喷涂涂层，虽然其耐蚀性综合评价存在一定争议，但国内外一致公认的是，电弧喷涂长效防护技术的防腐年限明显高于重防腐涂料涂层技术。

2.1.2 封闭涂料

电弧喷涂金属涂层最早采用喷刷低粘度的乙烯树脂、硝基涂料、醋酸共聚物、苯酚树脂、改性醇酸树脂、酚醛树脂、改进型环氧树脂等液体封闭剂进行封闭 ;技术人员在环氧底漆的基础上进行改进用作封闭涂料，效果得到了一定提高。

目前国内只有少数厂家研究开发了电弧喷涂金属涂层专用封闭涂料，中矿大正公司的纳米改性环氧封闭涂料是一种专用于热喷涂锌、铝及其合金涂层封孔的封闭产品，该技术获得了国家十一五科技支撑计划项目的支持[15]。利用纳米粒子具有的表面效应、小尺寸效应、量子尺寸效应、宏观量子效应等特殊性质，对传统封闭涂料进行改性，提高了涂层封闭性能 (渗透性、屏蔽性、耐蚀性) ，涂料中纳米相粒度小于 100nm，可以很好地渗入到金属喷涂层的孔隙中并封住孔隙，具有高渗透性、高附着力和高耐蚀性。

2.1.3 高耐候面漆

目前涂料领域研究开发重点是高性能 (高耐久性、高装饰性、高防护性) 和良好的施工性能 (低 VOC) 的面漆产品，氟碳涂料、聚硅氧烷涂料都取得了良好的开发应用效果[1]。在桥梁工程领域，对于涂料的装饰、防腐蚀等各方面性能的要求越来越高，氟碳面漆以其优异的耐蚀耐候性能正不断挤占传统聚氨酯面漆市场份额，不仅迅速进占了桥梁钢筋混凝土表面防护市场，也在桥梁钢结构长效防护上占有了一席之地，其与电弧喷涂金属涂层、纳米封闭涂层等配套形成的复合涂层新体系具有明显的竞争优势。

2.2 工装技术

2.2.1 前处理工装

桥梁工程尤其是大型、特大型桥梁工程，都存在涂装面积大、工期紧、任务重、质量要求高的特点，桥面施工更有施工环境不可控、环保要求严格的因素影响。现有离心式抛砂 (丸) 设备难以满足钢箱梁桥面喷抛处理的施工技术要求，成套处理设备国内主要依靠进口，由于进口设备价格高也无法保证随要随到，国内有实力的大型涂装公司吸收国际上同类先进设备的设计技术，研发了具有自主知识产权的前处理工装，如行走式自动回收抛丸机、回收式无尘抛丸机[16-17]，并在工程上获得了成功应用，如阳逻长江大桥、荆岳长江大桥、金塘大桥等。

2.2.2 大功率电弧喷枪

在我国，电弧喷涂技术起步较晚，但发展很快，已研制出高速和超音速电弧喷涂设备以及丝材、芯材共喷复合涂层设备，推动了我国电弧喷涂技术的进步。中矿大正公司利用空气动力学和流体力学的有机结合，设计了二进二出的二次雾化气流，对熔化的金属熔滴进行雾化，利用扁平形喷嘴设计，将喷涂束流由放射圆锥束变为放射扇形椭圆束，有效拉宽喷涂宽度，热喷涂单次喷涂幅宽达到 140mm，工效提高 3 倍，满足了桥梁工程高质量、短工期的工程施工要求[18]。

2.2.3 自动化喷涂工装

随着电弧喷涂设备及工艺的不断发展完善，我国的电弧喷涂自动化技术也有较大突破，中矿大正公司于 2001 年在国内率先设计了采用机械化自动喷涂系统[19]，可实现沿长、宽两方向自动进行喷涂施工，喷涂效果不受桥面局部坡度影响，该设备最先在武汉军山大桥钢箱梁外表面防腐施工中获得应用，随后在武汉军山长江大桥、武汉阳逻长江大桥、舟山连岛工程等钢桥面的喷涂施工中，设备运行可靠，涂层质量稳定，全桥桥面防腐蚀涂装工期大大缩短。目前该系统经过十年的改进完善，已具备批量生产的能力。

3 国内桥梁工程上的应用

3.1 喷锌类工程实例 (见表 2)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2 喷锌类桥梁工程实例

Table 2 Bridge engineering examples of spraying zinc

建设年份	桥名/部位		采用工艺	桥梁类型
2001–2002	武汉军山大桥	钢箱梁桥面	电弧喷涂锌、120～180μm+沥青混凝土	斜拉桥
2007–2009	重庆鱼嘴长江大桥	钢箱梁外表面	电弧喷涂锌铝双丝、≥120μm+涂料涂层	悬索桥
2007–2011	湖南矮寨大桥	加劲梁外表面	电弧喷涂锌铝双丝、≥120μm+涂料涂层	悬索桥
2008–2010	青岛海湾大桥	钢箱梁外表面	电弧喷涂锌铝合金、≥120μm+涂料涂层	斜拉桥
2008–2012	嘉绍跨江大桥	钢箱梁外表面	电弧喷涂锌铝合金、≥150μm+涂料涂层	斜拉桥

3.2 喷铝类工程实例（见表 3）

表 3 喷铝类桥梁工程实例

Table 3 Bridge engineering examples of spraying aluminum

建设年份	桥名/部位		采用工艺	桥梁类型
1999-2001	京珠高速公路武汉军山长江公路大桥	钢箱梁外表面	电弧喷铝、≥180μm+涂料涂层	斜拉桥
2001-2003	舟山市大陆连岛工程桃夭门大桥	钢箱梁外表面	电弧喷铝、≥200μm+涂料涂层	斜拉桥
2005-2008	武汉阳逻长江公路大桥	钢箱梁外表面	电弧喷铝、≥180μm+涂料涂层	悬索桥
2006-2009	西堠门大桥	钢箱梁外表面 拼接缝检修道端板外表面	电弧喷铝、≥200μm+涂料涂层 电弧喷铝、≥300μm+涂料涂层	悬索桥
2006-2008	杭州湾跨海大桥	钢箱梁外表面	电弧喷铝、≥200μm+涂料涂层	斜拉桥
2008-2010	荆岳长江公路大桥	钢箱梁、桥面系钢结构外表面	电弧喷铝、≥180μm+涂料涂层	斜拉桥
2008-2013	厦漳跨海大桥	钢箱梁外表面	电弧喷铝、≥200μm+涂料涂层	斜拉桥

到目前为止，国内采用电弧喷涂长效防腐技术防护的大型桥梁工程已接近百座，实际调研表明钢箱梁表面复合涂层防护效果良好[4]。

4 电弧喷涂长效防护技术存在的问题

4.1 可靠性问题

虽然国际上已有众多桥梁工程实例证明了电弧喷涂长效防腐技术首期维护寿命超过了 25a，个别甚至达到了 40a，但国内暂时还未有如此长使用时间的桥梁工程实例，由于面漆的防护寿命一般设计为 10～15a，虽然目前一些厂家对产品（如氟碳面漆、聚硅氧烷面漆）做出了质量 20a 甚至 25a 的质量担保，但业内专家仍对此表示质疑，认为涂料涂层会很快出现失光、粉化、起泡、开裂等问题，难以实现 20a 以上的首期防护寿命。

根据 ISO12944 表述，首期维护寿命是指涂层 95%以上区域的锈蚀等级不大于 ISO 4628 规定的 Ri2 级且无气泡、剥落和开裂现象的使用年限，实验室研究结果以及国际上工程实例证明，与电弧喷涂金属涂层相结合的涂料涂层，即使是暴露在阳光照射下，其耐蚀性都有显著提高，短期内（≤ 20a）电弧喷涂金属复合涂层表面根本不会出现 Ri2 锈蚀等级。虽然如此，随着设计寿命 120a 甚至 150a 特大型桥梁工程的不断出现，如何进一步提高电弧喷涂复合涂层长效防腐技术的可靠性、安全性，仍需要我们进行持续深入的研究。

4.2 维护技术

实现桥梁工程设计寿命 50a、100a 甚至 120a、150a 的目标，仅仅依靠初期涂装技术是显然不够的。现有国内外相关技术标准已对桥梁工程的涂装维修做出了详细、全面的规定，但现场维护还存在诸多技术问题迫切需要解决，如日常检查手段、养护前处理工艺技术、大修涂装技术和成套设备、养护质量控制技术等，尤其是电弧喷涂长效防腐技术，其检查、维养技术与常规的涂料重防腐技术有本质不同，这些问题都需要技术人员结合现场进行长期的探索求解。

4.3 环保问题

电弧喷涂长效防腐技术不仅带有重防腐涂层技术的环境污染问题，自身还有一定的粉尘、噪声

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

等污染问题，虽然场内施工可以很好地控制，达到环保规定要求，但在桥址现场尤其是桥梁运营后养护、大修施工的开放环境下，很难控制。目前全世界都极其重视环境保护，倡导低碳环保理念，而许多大型桥梁工程横跨海洋、山川或城市干道，对环保要求更加严格，桥梁工程防腐施工急需研发更多环保型的防腐新材料、技术工艺和施工工装，需要我们为我国的桥梁事业做出更大的贡献。

5 展望

改革开放以来，我国的交通行业尤其是桥梁工程建造业取得了突飞猛进的发展，取得了令世界瞩目的成就。我国桥梁工程建造水平、桥梁防腐及施工技术已达到国际先进水平，在不少方面（包括电弧喷涂技术研究及应用）甚至已达到世界领先水平，我国的涂装施工企业在国际桥梁防腐市场上已逐渐占有一席之地。因此深入研究和推广应用电弧喷涂长效防腐技术必将为我国的交通发展、桥梁安全经济运营做出新的贡献，也能为世界桥梁事业的发展尽到应有的责任。

参考文献

[1] 李运德，张亮，姜小刚，等.现代桥梁钢结构防腐涂层体系设计[J].电镀与涂饰，2011，30（1）：57-62.

[2] 赵清泊，李敏风.桥梁钢结构防腐蚀涂层配套和涂层使用寿命[J].电镀与涂饰，2010，29（8）：65-68.

[3] 安云岐，陈阶亮，洪伟等.海洋环境钢桥梁电弧喷铝复合涂层体系防护寿命预测[J]. 有色金属（冶炼部分），2006（Z1）：80-82.

[4] 沈思科，白书亚，田云生，等.防护涂料在桥梁工程上的应用探讨[J].中国涂料，2010，12：61-64.

[5] 任必年.公路钢桥腐蚀与防护[M].北京：人民交通出版社，2002：66-67.

[6] 董立先，王勇，李学胜.电弧喷铝及铝 - 锌涂层在动态腐蚀介质中的耐蚀性研究[J].石油大学学报（自然科学版），2003，27（3）：77-79，83.

[7] 陈长江，李秉忠.电弧喷涂 Zn-Al 伪合金涂层电化学腐蚀性能研究[J].航海工程，2009，38（6）：102-104.

[8] 李秉忠，王昌辉，董志红，等.电弧喷涂 Zn-Al 伪合金涂层耐蚀性能研究 [J].材料保护，2008，41（4）：31-32.

[9] 萧以德，付志勇，朱鹏，等.热喷涂锌 - 铝合金涂层对钢结构防护性能研究[J].热喷涂技术，2010，2（2）：19-25.

[10] 陈国虞，张政权，陆宗林.能与桥梁同寿命的钢结构防腐层（系统）[C]// 中国公路学会桥梁和结构工程分会 2006 年全国桥梁学术会议论文集，北京：中国公路学会，2006：912-918.

[11] Bland J，AWS C.Corrosion tests of flame-sprayed coated steel 19-year report [R]. Miami, FL: American Welding Society，1974：4-7.

[12] 田云生，晁兵，白书亚，等.阳极金属热喷涂涂层耐久性研究进展[J].施工技术，2010 增刊：459-463.

[13] Garland P O，Eggen T G. Thermal sprayed aluminum coatings in seawater with and without cathodic proection [R]. London: European Federation of Corrosion Societies，1993. [14] Kain R M，Baker E A. Marine atmospheric corrosion museum report on the performance of thermal spray coatings on steel [R]. Philadelphia: American Society of Testing Materials，1987.

[15] 易春龙，张胜利，陈卫国.纳米改性环氧封闭漆的研制及在西堠门大桥的应用[J].公路，2009（1）：54-59.

[16] 都昌林，易春龙.钢桥面无尘喷砂除锈设备及施工工艺[J].工程机械与维修，2008，1：108-109.

[17] 镇江蓝舶工程科技有限公司. 行走式自动回收抛丸机[P]. CN201346743，2009-11-18.

[18] 沈承金，孙智，易春龙.钢桥面二次雾化电弧喷涂防腐蚀设备和技术的研究[J].中国腐蚀与防护学报，2004，24（2）：125-127.

[19] 白金元，徐滨士，许一，等.自动化电弧喷涂技术的研究应用现状[J].中国表面工程，2006，19（5）：267-270.

（上接第 5 页）

7. KRSSEL T，BACH F W，HANNOVER D，et al. Inner centrifugal projection coating-a novel coating process [C]// Proceedings of the International Thermal Spray Conference，ITSC2002，Germany，2002：534-538.

8. 李剑锋，周霞明，丁传贤. 等离子喷涂 Cr_3C_2-NiCr 涂层的气孔率统计分析[J]. 航空材料学报，2000，20（1）：33-39.

9. Zhang X C，Xu B S，Xuan F Z，et al. Statistical analyses of porosity variations in plasma-sprayed Ni-based coatings [J].Journal of Alloys and Compounds，2009，467：501-508.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net