

文章编号: 0451-0712(2006)02-0035-05

中图分类号: U445.73

文献标识码: B

大型钢结构表面热喷涂防腐技术的现状与进展

程军胜¹, 赵杰², 孟辉³

(1. 北京科技大学新金属材料国家重点实验室 北京市 100083;

2. 开封市公路管理局 开封市 475003; 3. 北京工业大学材料学院 北京市 100022)

摘要: 通过对大型钢结构各种防腐方法的机理及优缺点的比较, 介绍了热喷涂长效防腐技术的优势, 以及在国内外的应用。从喷涂材料的扩展和涂层结构的改造两个方面总结了钢结构表面热喷涂防腐技术的新进展。

关键词: 大型钢结构; 防腐; 热喷涂

1 钢结构腐蚀特点及危害

钢铁具有优越的机械性能, 且其性能可长时间保持稳定, 所以工业用的各种机械等都采用钢铁作为主材料。同样在交通领域, 钢桥等大型钢结构具有跨越能力大、强度高、建设速度快、施工期限短等特点。特别是近年来, 随着国家基础设施建设速度的加快, 大型钢结构桥梁不断涌现。修建一座跨江或跨海的特大型钢桥, 使用钢材的数量一般都在万 t 甚至 10 万 t 以上。

但是钢铁材料在工业大气中的暴露, 与海水江

水的接触必会导致表面的腐蚀。而腐蚀、应力腐蚀和腐蚀疲劳是使这种特大型钢桥构件退出工作、寿命降低的重要原因之一。在 20 世纪 20~30 年代欧洲和北美发达国家建造的一些钢桥, 因当时防腐技术不能提供长久的腐蚀保护, 使得这些钢桥投入运营后腐蚀严重, 即使进行定期的刷油漆维护也不能获得满意的保护, 只得将这些钢桥降级使用或续建第二座桥, 造成巨大的经济损失。据报道武汉长江大桥每年投入维护费 100 多万元, 但仍远远不够。腐蚀不仅浪费了大量的人力物力, 也大大缩短了桥梁的使用年限。

收稿日期: 2005-09-01

而力筋屈服后, 很明显, 在相同荷载作用下, 内嵌梁中板条承担的力要明显比外贴板要大, 其强度利用率提高了, 且板条较窄的加固梁 N2 跨中板条应变要大于 N1 板条中应变, 即 N2 板条粘结效果更好, 承担的荷载更大。

5 结论

(1) 试验证明, 嵌入式 CFRP 板条加固是一种非常有效的结构加固方法, 具有广阔的发展前景;

(2) 内嵌 CFRP 板条加固效果要略优于外贴加固, 且不易出现锚固长度及剥离破坏;

(3) 加固梁相同时, 较窄的 CFRP 条带利用率更高, 延性更好;

(4) 嵌入式加固方法施工简便快捷, 可在不影响结构正常使用的前提下施工, 防火性能好, 可较充分地发挥 CFRP 材料的性能, 是一种加固效果比较理

想的方法。

参考文献:

- [1] CECS146: 2003. 碳纤维片材加固混凝土结构技术规范[S].
- [2] 岳清瑞, 李庆伟, 杨勇新. 纤维增强复合材料嵌入式加固技术[J]. 工业建筑, 2004, 34(4).
- [3] Rizka Ila S, Hassan T. Effectiveness of CFRP for Strengthening Concrete Bridges [J]. Journal of Structural Engineering International, 2002, (3).
- [4] Taljs ten B, Cordin H. Concrete Structures Strengthened with Near-Surface Mounted Reinforcement of CFRP[J]. Advances in Structural Engineering, 2002, 6(3).
- [5] Alkrdaji T, Nanni A, Chen G, Barker M. Upgrading the Transportation Infrastructure: Solid RC Decks Strengthened with CFRP[J]. Concrete International, 1999, 21(10).

桥梁钢结构的腐蚀防护日渐成为人们关注的课题。只有在设计建造的同时,进行卓有成效的防腐,才能确保钢桥的长久寿命。

2 钢结构防腐发展历程

显然,要使钢铁材料在所处的各种环境中能保持长时间的稳定和工作寿命,必须对钢结构材料表面进行各种防腐处理。欧美国家钢结构的防腐技术发展始于20世纪初,起初主要为油漆防腐和重防腐涂料防腐。随后热浸锌防腐、火焰喷涂防腐、电弧喷涂防腐相继出现。英国是应用热喷涂防腐技术最早的国家之一。在1939年首次采用热喷涂锌涂层方法保护新建的威尔士Menai海峡大桥的钢链和部分钢结构。喷涂的锌涂层厚度为0.125 mm,油漆封孔。15年后检查锌涂层基本完好,钢铁基体被很好地保护,无需任何维修。热喷涂技术初期大多为喷涂锌,现在电弧喷涂铝日渐成为防腐发展的趋势。对环境污染严重的含重金属涂装底漆和大量有机挥发物的重防腐涂料不再使用。

到目前为止,我国钢桥防腐仍集中采用刷油漆防腐。建国50年来,钢桥防腐技术的变化也主要集中在对油漆的种类进行调整。如20世纪50~60年代钢桥梁防腐采用红丹防锈漆加云铁醇酸面漆的铅系环境污染涂料,并一直主导着我国钢桥的防腐。随着大型钢桥的建设,其防腐问题开始突出,铅系涂装体系的防腐耐久性差和维护费用高昂的缺点日渐显现,80年代开发了重防腐涂料,经过对底、中、面漆的配套使用,使钢桥的防腐寿命有较大提高,90年代国外重防腐同类涂料开始涌入国内市场。重防腐涂料仅能提供钢桥10年左右的防腐寿命,10年后必然面临巨大的防腐维护费用,这在欧洲已被事实所证实。

2.1 油漆防腐

油漆防腐具有美丽的外观,简单的涂装工艺,多年来一直被广泛采用。随着涂装工艺的发展,重防腐涂装成为钢桥防腐的主流。在重防腐涂料中,防腐涂装工艺由底漆、中间漆和面漆组成的多层涂装体系;油漆品种均为环氧(无机)富锌底漆、环氧云母氧化铁中间漆和环氧聚氨酯或环氧各色面漆或氯化橡胶面漆等组成。其作用机理为:屏蔽作用,油漆涂层将钢铁与腐蚀环境机械隔离开;钝化缓蚀作用,油漆涂装体系中,第一道车间底漆对钢铁有钝化缓蚀作用,增加油漆层附着力,防腐作用很微弱;阴极保护作

用,防腐底漆中如添加锌粉(如富锌底漆),对钢铁提供阴极保护。

油漆对钢桥提供的腐蚀保护以机械屏蔽的隔离防护为主,油漆涂层的老化、粉化使这种隔离作用减弱或失去作用;起阴极保护作用的锌粉是靠油漆中的有机物粘合才能与钢铁相结合,随着有机物的裂解、老化,使锌粉无法与钢铁相结合,这样阴极保护作用自然消失。其次,油漆涂层本身有无数微针孔,长期处在盐雾、潮湿环境下,氯离子、水分子等会透过针孔腐蚀基体金属,在油漆层与基体金属交界处钢铁腐蚀产物体积聚膨胀,导致油漆层剥落,腐蚀便沿着油漆层剥落后四周迅速扩展,导致整个防腐体系失效。

随着防腐技术的发展,人类生存环境的不断恶化,涂料对环境的污染性逐渐被人们认识,目前发达国家在钢桥上已不再大面积使用重防腐涂料。此外,如果我们在新建钢桥中继续使用有机重防腐涂料进行防腐,那么10年后我们将面对的是庞大的钢桥防腐维护费用,严重时甚至会影响桥梁的安全性。采用重防腐涂料防腐的钢桥,最多在建设后10年就需要进行例行维护,除去浮锈和旧油漆,这不仅影响交通正常运行,同时维护的效果也不可能达到建设初期水平,还消耗大量涂料,旧油漆重金属颜料也会污染环境,甚至还要专门成立一支钢桥防腐养护队伍。因此每座钢桥都不得不为此支付一笔相当数量的维护费用,这种开支还不是一次性的,而是以后每隔3~5年就得进行一次。

2.2 热浸镀锌防腐

钢桥的护栏、扶梯及拼装式小型钢桥梁采用热浸锌防腐,热浸镀锌层一般无法超过80 μm 厚度,在一般工业大气环境下可以提供10年左右的有效保护。热浸锌防腐工艺需要将工件浸入熔融的金属锌镀槽中,受镀槽容积所限,不能对较大尺寸的钢桥部件进行防腐施工。其次,不能到现场进行热浸锌防腐,只能在固定的工厂施工,势必造成大量的往返运输费用。再次,热浸镀锌层碰伤后,自身无法进行修复。因此采用热浸锌方法对钢桥全面防腐有很大的局限性。

3 热喷涂防腐

热喷涂技术是利用热源对金属、非金属、陶瓷等喷涂材料进行加热,将熔融的粒子雾化、喷射并沉积到基材表面上,形成特殊表面涂层的方法。喷涂使用

的热源主要有三种:一是电弧热源;二是等离子热源;三是燃气热源。并由此把热喷涂分为电弧喷涂、等离子喷涂和火焰喷涂,用于防腐领域的主要有火焰喷涂和电弧喷涂。近年来,热喷涂防腐技术在我国得到推广应用,如:葛洲坝二期工程、黄河龙羊峡水电站工程;南京长江大桥、运河大桥部分钢结构采用了喷锌或喷铝防腐工艺。

热喷涂技术与其他防腐工艺相比,金属表面前期处理工艺基本相同,热喷涂表面处理要求略高。采用火焰线材或电弧线材对钢铁喷涂锌或铝,再对涂层加以封孔处理后,在一般腐蚀环境下涂层有效期可达30年以上,较一般油漆防腐涂层寿命长5~10倍。实用效果表明,采用热喷涂锌及铝进行金属表面多种环境下的防腐效果是显著的。

与热浸镀锌工艺相比较,钢结构表面防腐采用热喷涂技术具有以下特点:不受热浸槽本身尺寸的限制,设计方便灵活,施工也更为方便;被喷涂工件不变形,确保了工件的自身精度和安装精度;热浸镀锌工件会产生相应的变形,其校正工作困难,甚至会使工件报废;热喷涂涂层厚度均匀可控;热浸镀锌的镀层厚度不均;喷涂与基材结合力好;热浸镀锌工艺因酸洗和中和不净等原因会造成镀层翘皮或漏镀现象;喷涂在有条件的地方可以现场施工,减少了构件运输中造成的损伤,且节约了时间与费用。

热喷涂技术使用设备较多,工艺要求严,工程造价高,但按防腐寿命平均25年计算,防腐寿命内循环费用远低于其他防腐方法的费用。而且热喷涂工艺对环境污染小,是一种环保型产业。随着热喷涂工艺成本的降低,热喷涂技术正逐渐被更多的人接受。

3.1 热喷涂的分类

热喷涂方法大体分为火焰喷涂法、电弧喷涂法、爆炸喷涂法、超音速喷涂法、等离子喷涂法和激光喷涂法等。其中应用于大型钢结构腐蚀防护主要有电弧喷涂和火焰喷涂。

火焰喷涂是采用可燃性气体的燃烧作为热源,将金属线材或粉末熔融、雾化,吹喷于基体表面的方法。在欧洲及北美,钢桥梁早期热喷涂防腐为氧、乙炔火焰喷涂,取得很好的防腐效果。我国于1965年曾在南京长江大桥钢板纵梁上盖板采用火焰喷锌加耐磨漆方式进行防腐,13年后检查效果良好。但火焰喷涂生产效率低,严重制约钢桥的加工工期,因此仅对钢桥长期积水、阴暗面和主要受力构件进行喷涂防腐。若对整个大桥采用氧、乙炔火焰喷涂防腐可

会出现防腐施工效率与工期的矛盾,喷涂层长久附着有效与涂层结合力的矛盾等,因此国内没有大面积采用火焰喷涂进行钢桥防腐的例子。

电弧喷涂防腐原理是利用电弧喷涂设备,对两根带电的金属丝(如锌、铝等)进行加热、熔融、雾化,喷涂形成防腐涂层。电弧喷涂同火焰喷涂相比,由于采用了电能代替气体燃烧,大大提高了工作效率和工作安全性,特别是电弧喷涂机械化设备的出现,电弧喷涂技术已完全可以满足桥梁建设工期的需要,且电弧温度远高于火焰,涂层结合力也远大于火焰喷涂,因此涂层质量也完全可以满足长效防腐的需要。美国由于人工费用高,使用电弧喷涂防腐施工的费用甚至低于重防腐油漆。经过几十年的考验证明,热喷涂技术是钢结构长效防腐的最好方法,这个结论已经得到世界许多国家的政府部门和工程界的认可。

3.2 热喷涂防腐机理

在钢铁表面喷锌、铝涂层,这种涂层叫阳极性涂层。它是靠这种涂层牺牲阳极来实现其保护效果。一是保护层(锌、铝)的电位比基体金属足够的负;二是保护层自身的抗蚀稳定性。根据资料介绍,锌涂层在沿海工业大气里的年腐蚀速率只有 $4\mu\text{m}$ 左右,而铝的年腐蚀速率在海水中也只有 $1\sim 2\mu\text{m}$,这是因为锌、铝涂层具有对钢结构表面有一定的保护性缘故,如在锌铝涂层表面再进行二度封闭处理,组成复合保护层则更加提高涂层的抗腐蚀能力,大大减缓了腐蚀速度,达到长效防腐之效果。

3.3 热喷涂涂层材料

钢结构喷涂材料主要是锌、铝及其合金(例如85%Zn-15%Al合金),三者在人工海水中的电极电位依次为 $1\ 050\text{ mV}(\text{SCE})$ 、 $850\text{ mV}(\text{SCE})$ 和 $1\ 000\text{ mV}(\text{SCE})$ 。用三种材料制备的金属涂层各有其特点。其中,锌涂层,阴极保护作用突出,但耐腐蚀性不如铝;铝涂层耐腐蚀性很好,但阴极保护效果不如锌。锌-铝合金涂层,其电化高性能在静特性方面与锌相似,电位接近锌;在动特性方面与铝相似,腐蚀速率与铝相近,其综合性能优于锌和铝涂层。

Zn-Al合金涂层既具有纯锌涂层对钢铁基体有效的阳极保护且对裂纹和点腐蚀不敏感的特点,又因涂层中含有足够的铝,能够形成完整的 Al_2O_3 保护膜而耐环境腐蚀,而且减轻了喷涂层与基体界面处的“底锈”缺陷,减少了喷涂过程中产生的有害的ZnO烟雾量,尤其适用于海水及工业大气环境中

的钢结构腐蚀。Zn-Al 合金涂层在各种大气、淡水及海水环境下均具有良好的耐腐蚀性能,其耐蚀性是纯锌涂层的 6~7 倍,寿命是纯铝涂层的 1.5 倍,是替代锌和铝涂层的极有发展前途的耐蚀金属涂层。

4 钢结构表面热喷涂防腐技术的新进展

随着热喷涂技术在桥梁等大型钢结构上的应用,越来越多的研究开始关注于如何能够更加充分发挥热喷涂技术的优势,进一步提高涂层对于基体材料的防腐保护性能。目前的众多研究可以主要归纳于喷涂材料的扩展和涂层结构的改造。

4.1 喷涂材料的扩展

选择耐蚀性能好的涂层材料是提高涂层耐蚀能力的一种重要方法。有资料表明,在加入 0.7%~5% 的 Mg 后,Zn-Al-Mg 合金涂层在盐雾腐蚀环境下耐蚀性比 Zn-Al 涂层提高了 4 倍,Mg 的影响被认为是合金化添加剂进入 Al 中,且在不同的喷涂阶段它以液态或固溶态存在。喷涂期间可能发生两个不同的过程,即镁的蒸发损失和优先形成尖晶石氧化物而不是氧化生成氧化铝薄膜。Al-Mg 薄膜也有阻塞孔隙的自封闭能力,这样也就阻止了对钢基体的侵蚀。这种涂层在美国、英国等国家已经开始应用,但目前在国内仅有少数单位致力于研究 Al-Mg 或 Al-Mg-Re 涂层,并未见有关 Mg 对热喷涂 Zn-Al 涂层耐蚀性影响的报道。在喷涂丝材制备工艺方面,目前电弧喷涂 Zn-Al 材料多为实芯丝材。但当 Al 量大于 16% 或 Mg 含量大于 0.5% 后,Zn-Al 合金硬且脆难于拉拔制成丝材。包芯合金丝材的制备是较好的方法,并发现“伪”合金涂层的防腐性能与传统的合金涂层相似,其双相显微弥散是很重要的,这对今后研究工作的开展有指导作用。

Zn-Ni 合金是典型的电镀材料,具有优越的耐腐蚀性和经济性,并在电镀中取代了传统的毒性较大的镀铬材料。将它用于电弧喷涂防腐涂层材料尚少见报道。最近有研究报道,采用电弧喷涂 Zn-Ni 合金材料,合理控制合金中镍最佳含量在 7%,能够达到在不增加脆性的条件下,将使材料的耐蚀性得到很大的提高,高于纯镍涂层。经中性盐雾腐蚀试验结果表明,随镍含量的增加,耐蚀性强的 γ 相增多。同时腐蚀产物的结构形态也发生变化,由 ZnO 变化为 $ZnCl_2 \cdot 4Zn(OH)_2$,腐蚀膜变薄,溶解度下降,面致密度与稳定性增加,达到阻止腐蚀进一步扩展的目的。此外也有研究提出,粉芯线材中加入稀

土也能够使涂层的耐磨性、耐蚀性均有所提高。

4.2 涂层结构的改造

每一种喷涂材料具备自身的特点优势,如果能够对涂层结构进行改造,将几种涂层材料逐层地喷涂于基体表面,将会使之同时具备多种优异性能,这就是复合涂层技术。复合涂层是海船、桥梁等钢结构的长效保护新方法,有很好的综合效益。通过优选热喷涂金属材料 and 封孔涂料,制备可靠的复合涂层,采取严格的施工工艺和工序,就一定能在长效保护上取得显著效果。

新型复合涂层中,阶梯涂层是在水利钢结构部件防腐技术中应用较多的一项新技术。随着国家南水北调工程的实施,水工钢结构的使用将会迅速增加,研究开发一种新型的水工钢结构防腐技术,对降低工程造价、延长工程寿命十分重要。而热喷涂不锈钢涂层具有耐磨损及保护周期长等特点;锌涂层不仅具有覆盖、耐腐蚀作用,更重要的是具有阴极保护功能(原电池原理)。为此,将上述两种金属涂层各有优势互补,在同一工件基体上叠加喷涂,先用锌涂层作为底层,再用不锈钢涂层作为面层,最终形成热喷涂阶梯涂层,热喷涂金属阶梯涂层防腐技术,涂层耐磨损,外观整洁,覆盖均匀、密实,保护周期长,防腐性能好,抗破坏性强,不需组织二次施工,显著降低了工程寿命周期成本。2002 年在国家重点工程淮河入海水道滨海枢纽立交地涵水工钢结构防腐中应用了该技术,结果表明达到了既经济,又满意的防腐效果。

5 结语

近年来国家大力投资交通设施建设,桥梁等大型钢结构建设相继开工。为了保证在所处的各种自然环境中能保持长时间的稳定和工作寿命,必须对新建钢结构材料表面进行各种防腐处理。热喷涂金属涂层由于具有优良的防腐性能和环境适应性,受到桥梁工程师们的关注。我国在近年来,热喷涂防腐技术得到了进一步完善,大大提高了涂层质量和生产效率,降低了生产成本,已广泛用于钢结构构件的长效防腐。同时应当看到,由于多方面的原因,我国热喷涂防腐技术的应用还落后于西方发达国家。但是现在,人们的环保意识逐渐增强,对大型、重要钢铁结构件长效防腐意义有了新认识,提出了更高的要求。因此我们必须虚心汲取发达国家的先进技术经验,加强在这个领域的研究与开发,这必将产生巨

大的经济效益和社会效益。可以说这项技术在我国
的普及应用,定会造福国人。

参考文献:

- [1] Fischer K P, Thomason W H, Rosbrook T. Performance History of Thermal Sprayed Aluminum Coatings in Offshore Service [J]. Material Performance, 1995, 34 (4).
- [2] Bailey J C, Porter F C, Round M. Metal Spraying of Zinc and Aluminum in the United Kingdom [J]. Thermal Spraying, 1989, (2).
- [3] 秦志强, 黄勇, 谢学军. 热喷涂技术在腐蚀与防护领域的研究及应用[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2003, 15(1).
- [4] 陈阶亮. 桥梁钢结构防腐技术探析[J]. 钢结构, 2002, 17(5).
- [5] 高荣发. 热喷涂[M]. 北京: 化学工业出版社, 1991.
- [6] Fischer K P, Thomason W H, Finnegan J E. Electrochemical performance of flame-sprayed aluminum coatings on steel in seawater [J]. Materials Performance, 1987, 26 (9).
- [7] 公茂秀, 王玉集, 周光辉. 锌、铝喷涂层的耐腐蚀性能研究[J]. 材料保护, 1991, (2).
- [8] 潘应君, 张恒, 黄宁, 高松超, 徐峰. 热喷涂 Zn-15 % Al 合金的耐蚀性研究[J]. 腐蚀与防护, 2002, 23(12).
- [9] 黄宁, 朱逊, 谷栋超, 邓世均, 程旭东. 热喷涂 Zn-Al 合金涂层复合钢板防腐性能研究[J]. 武汉钢铁学院学报, 1995, 18(1).
- [10] 全红焯, 刘泽昊, 王岳. ZnNi 合金用作热喷涂防腐涂层材料[J]. 材料保护, 2002, 33(2).
- [11] Arsenault B. Zinc-Nickel coating for improved adherence and corrosion resistance [J]. Surface and Coating Technology, 1989, (37).
- [12] 贺定勇, 闫玉芹, 蒋建敏. 耐磨耐蚀型热喷涂粉芯线材的研究[J]. 材料保护, 1999, (12).
- [13] 陈永臻, 朱晓苏, 朱晓琴. 水工钢结构件热喷涂锌——不锈钢阶梯涂层工艺及应用[J]. 腐蚀与防护, 2003, 24(6).
- [14] Xu B S, Zhu S, Liu S C. Applications of the Latest Thermal Spraying Technology in China [A]. Processing of ITSC' 95. Kobe Japan; A. Ohmori, 1995.

Status and Progress in Thermal Spraying Technique for Corrosion Protection of Large Steel Structures

CHENG Jun-sheng¹, ZHAO Jie², MENG Hui³

(1. State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China;

2. Kaifeng Municipal Highway Management Bureau, Kaifeng 475003, China;

3. College of Materials Science Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: By comparing the mechanisms, merits and demerits of various corrosion protection methods of large steel structures, the advantages and the applications over the world of the thermal spraying technique are introduced. The new progress in thermal spraying technique for corrosion protection of large steel structures is summarized at two aspects: expanding the spraying materials kind and rebuilding the coating construction.

Key words: large steel structure; corrosion protection; thermal spraying

宁夏乡乡通沥青路村村通公路

2005 年岁末宁夏交通喜事连连,随着西部大通道福(州)银(川)高速公路同心至固原段的建成通车,宁夏实现了所有市县 1 h 上高速公路的建设目标。同时,自治区最后一个未通沥青路的乡——同心县马高庄乡和最后一个未通公路的建制村——同心县田老庄乡锁家岔村,也实现了通沥青路和通公路。至此,宁夏全区 188 个乡镇全部通了沥青路,全区 2 627 个建制村全部通上了公路。

到 2005 年年底,宁夏全区公路通车里程已达 13 067 km,其中高速公路通车里程达到 670 km,实现了全自治区所有市县 1 h 上高速公路、所有乡镇通沥青路、所有建制村通公路的三大目标。