

高速电弧喷涂技术在装备维修与再制造工程领域的研究应用现状

陈永雄, 徐滨士, 许 一, 魏世丞, 刘 燕

(装甲兵工程学院 装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072)

摘 要: 高速电弧喷涂技术是一种优质、高效、低成本的再制造工程关键技术, 综述了高速电弧喷涂技术的发展, 及其分别在汽车发动机再制造、装备钢结构件防腐、火电厂锅炉管道受热面防护领域的研究应用现状, 并展望了高速电弧喷涂技术在维修与再制造工程中的发展趋势。

关键词: 高速电弧喷涂; 再制造工程; 维修; 防腐耐磨; 涂层

中图分类号: TG174

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2006)05⁺-0169-05

Progress in Applying HVAS Technology to Maintenance & Remanufacture Engineering

CHEN Yong-xiong, XU Bin-shi, XU Yi, WEI Shi-chen, LIU Yan

(State Key Laboratory for Remanufacturing, The Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072)

Abstract: The development of High velocity arc Spray (HVAS) technology, a key technology in remanufacture engineering with high quality, efficiency and low cost, was reviewed in this paper, the present status of applying HVAS technology in automobile engine remanufacture, steel structure corrosion resistance, station boiler pipe protection was also summarized, and some remarks on the future development of the technology were put forward.

Key words: high velocity arc spray; remanufacture engineering; maintenance; corrosion and wear resistance; coating

0 引 言

电弧喷涂技术是利用两根连续送进的金属丝之间产生的电弧熔化金属, 采用压缩气流将其雾化并喷射至工作表面形成涂层的一种工艺。高速电弧喷涂技术是在普通电弧喷涂技术基础上发展起来的新技术, 它是利用气体动力学原理, 将高压气体通过特殊设计的喷管加速后作为高速气流来雾化和加速熔融金属, 将雾化粒子高速喷射到工件表面形成致密涂层^[1]。与普通电弧喷涂技术相比, 高速电弧喷涂技术具有沉积效率高、涂层组织致密、电弧稳定性好、通用性强、经济性好等特点, 其作为再制造工程的关键技术之一, 可以赋予零件耐高温、防腐蚀、耐磨损、抗疲劳、防辐射等性能。

高速电弧喷涂材料和设备已取得了较快发展, 研制出了具有防腐蚀、自粘结、耐高温氧化、耐硫化、冲蚀、耐磨损、防滑以及多种复合性能的丝材。与此同时, 开发出了许多新的电弧喷涂设备及技

术。这些电弧喷涂新设备及材料的出现, 提高了喷涂效率, 改善了电弧喷涂涂层的质量, 而且有些技术已在某些领域得到应用, 这对提升机械装备的性能发挥了一定的作用。但是, 与超音速火焰喷涂和等离子喷涂等技术相比, 高速电弧喷涂层与基体的结合强度还相对较低、涂层孔隙率较高。为满足先进再制造工程的需要, 提升再制造产品的性能和寿命, 高速电弧喷涂技术还有待进一步研究。为此, 本文将介绍高速电弧喷涂技术的发展过程, 并综述其在汽车发动机再制造、大型装备钢结构长效防腐、火电厂锅炉管道受热面防护几个重要工程领域的研究应用现状, 进而分析高速电弧喷涂技术的发展趋势。

1 高速电弧喷涂技术的发展历程

电弧喷涂技术由瑞士的M.U.Schoop博士于上世纪20年代提出构思^[2], 起初主要用于装饰。1920年该技术引入日本, 并发明了用交流电弧为热源的喷涂装置, 但没有得到实际推广。后来德国改用直流电源使电弧喷涂有了实用价值。30至40年代, 欧

收稿日期: 2006-08-02; 修回日期: 2006-09-20

作者简介: 陈永雄(1978-), 男(汉), 湖北浠水人, 博士研究生。

洲在电弧喷涂设备和工艺上取得进步,工业部门开始用电弧喷涂钢丝修复机械零件,喷涂Al、Zn作为防护涂层。50至60年代,世界各国对电弧喷涂技术的关注越来越多,如1963年在马德里举行的第三届金属会议关于电弧喷涂的论文涉及到了钢的电弧喷涂、电弧喷涂技术的发展、电弧喷涂的工艺规律性等方面。70年代的研究主要侧重于Zn、Al防腐涂层。人们发现使用电弧喷涂得到的Al涂层质量比火焰喷涂好且成本低^[3]。70年代末,粉芯丝材的出现给电弧喷涂带来了生机,世界各国对电弧喷涂的研发应用大大加强。粉芯丝材既克服了高合金成分带来的难以拔丝的困难,同时还使一些不导电的颗粒材料在电弧喷涂上得以应用。80至90年代,电弧喷涂设备得到迅速发展与更新,朝向精密化和自动化的方向发展,使涂层质量得到进一步提高,应用范围也越来越广泛,电弧喷涂又重新得到了各工业领域的重视。如仅在1998年召开的第15届国际热喷涂会议的参展商品中,电弧喷涂设备及产品占30%以上。

我国在50年代初从前苏联引进该技术,60年代初我国研制成功封闭喷嘴固定式喷枪,主要用于旧件的修复。之后,由于设备材料等方面的限制,一直到80年代初,中国的电弧喷涂技术一直停留在原有水平,并被认为是一种“高效率,低质量”的技术。80年代后期,大型钢结构腐蚀、磨损防护的潜在市场又推动了电弧喷涂的应用和发展,国内许多单位加快了对电弧喷涂技术与设备的研发。

高速电弧喷涂技术自90年代以来,取得了较快的发展,主要集中在加速装置、基础理论和新型材料等方面。与此同时,伴随着加速技术的引入,又涌现出了许多新的电弧喷涂技术,如高速脉冲电弧喷涂^[4]、超声电弧喷涂技术^[5]、复合超音速电弧喷涂(Sonarc)^[6]、燃烧电弧喷涂(ComARC)^[7]、真空电弧喷涂^[8]、等离子转移电弧喷涂(PTWA)^[9]及单丝电弧喷涂^[10]等新技术。这些电弧喷涂新技术的出现,不仅提高了喷涂效率,而且进一步改善了电弧喷涂涂层的质量。

2 高速电弧喷涂技术在发动机再制造中的研究应用进展

发动机是汽车的心脏,其性能的恢复在汽车再制造过程中举足轻重。汽车发动机再制造既不是一

般的发动机制造,也非普通的发动机大修,而是一个全新的概念。它是把旧发动机视为“毛坯”,按照严格的技术要求,采用专门的加工设备和生产工艺,分门别类地对发动机上的每个零部件进行全面调试和加工,使性能达到新发动机的标准要求,整机检测合格后才能喷涂包装出厂。与大修相比,发动机再制造具有高质量、高性能、大批量的优点,且更换快捷,而费用相差无几。发动机再制造技术在国外已有50多年的历史,从技术标准、生产工艺、加工设备、供应销售到售后服务,建立了完整的体系和足够的规模。美国和欧洲有发动机再制造协会,通用、福特、大众、雷诺等都有自己的发动机再制造厂。在北美,有近万家工厂生产再制造发动机,每年产量超过300万台。在国内,车辆再制造的研究应用尚处于起步阶段。在济南、上海已经建立了汽车发动机的再制造生产线,具备了一定的再制造能力,北京昊兰汽车修理厂也正在建设汽车发动机再制造生产线,并与全军装备维修表面工程研究中心合作开展表面工程技术在汽车发动机再制造中的应用研究^[11]。

高速电弧喷涂技术作为先进的表面工程技术,能够实现对汽车发动机关键零部件的再制造。目前采用高速电弧喷涂技术修复的主要零部件有发动机缸体、缸盖、曲轴等零件。如缸体主轴承孔,在工作状态下承受交变应力及瞬间冲击,容易导致主轴承孔变形。在发动机缺油的情况下出现烧瓦、抱轴时则会导致缸体主轴承孔严重划伤,济南复强动力有限公司采用高速电弧喷涂1Cr18Ni9Ti不锈钢涂层的办法修复;本实验室试验研究了高速电弧喷涂1Cr18Ni9Ti不锈钢和Al丝材形成1Cr18Ni9Ti-Al伪合金涂层的改进工艺方法;东北林业大学机械厂曾采用电弧喷涂Ni-Al丝材作打底层加16号镀锌铁丝作工作层的方法修复,取得一定的效果^[12, 13];汽车发动机曲轴,在工作过程中,由于润滑油的老化而生成的各种有机酸,以及燃烧废气溶入润滑油而生成的无机酸,使其处于腐蚀性的磨损状态之中。有文献报道采用电弧喷涂3Cr13+80#钢丝制备复合涂层的工艺修复中型汽车发动机的曲轴,能满足在腐蚀磨损条件下的使用要求,延长了发动机曲轴的使用寿命^[14]。

3 高速电弧喷涂技术在装备防腐工程中的研究进展

热喷涂技术是装备长效防腐工程领域的主要技术之一。早期国内外应用较广泛的是采用火焰喷涂或电弧喷涂技术制备 Zn 涂层和 Al 涂层, 后来人们发现热喷涂 Zn-Al 合金涂层兼备了 Zn 涂层的牺牲阳极的阴极保护作用和 Al 涂层的钝化保护作用, 且降低了氧化烧损和 ZnO 烟雾对人体的危害, 提高了涂层的沉积效率, 使其钢结构件的耐蚀寿命进一步延长。电弧喷涂技术制备 Zn-Al 合金涂层在大型钢结构零件防腐方面有其独特的优势, 其成本低、效率高、节能、节材, 而且施工方便、工艺简单, 且涂层的孔隙率和结合强度等性能比火焰喷涂有明显的提高, 已成为装备钢结构长效防腐的首选工艺, 其技术原理和涂层的防腐性能及机理也成为了目前的一大研究热点, 具有极其广阔的前景。

十几年来, 人们已对 Zn-Al 涂层的成分进行了大量的研究, 国内外已研制出各种类型的 Zn-Al 涂层, 如复合涂层、复合粉末合金涂层、亚合金涂层及合金丝涂层等。早在 20 世纪 50 年代, 日本的 Robert M. Kain 等人曾制备了 Al 的质量含量从 10% 到 90% 之间变化的一系列 Zn-Al 复合粉末和 Zn-Al 合金粉末, 并用火焰喷涂技术制备了其涂层, 经过了 34 年的海洋大气暴露试验显示, 高 Al 含量 Zn-Al 合金涂层表现出了优异的耐蚀性能^[15]。日本腐蚀控制协会热喷涂专业委员会曾利用火焰喷涂技术对碳钢表面喷涂 Zn-13Al ($w_t\%$) 合金线材, 并对比 Zn、Al 热喷涂涂层经历 10 年的海洋暴露试验发现, 经封闭处理的 Zn-13Al 合金涂层显示出了优良的耐蚀性能^[16]。国内李守本等人也曾制备了 Al 含量分别为 15%、22%、30% 和 55% 的 Zn-Al 合金丝涂层, 电化学实验研究发现, Al 的加入对 Zn-Al 合金的电位影响较大, 随着 Al 含量的增加, 极化电位向正方向移动; 涂层的阳极极化试验时, 表现出了钝化现象, 且电极表面出现白色腐蚀产物^[17]。

在二十世纪六七十年代, Zn-Al 合金丝材喷涂主要集中在 Zn-15Al($w_t\%$)合金上, 因为当 Al 含量大于 15% 时, 由于脆性金属间的化合物形成导致合金丝的加工非常困难, 影响了其发展应用。当用一根 Zn 丝和一根 Al 丝进行电弧喷涂时, 通过调节两根丝的进给速度或采用不同直径的丝材, 可以制备出不同 Al 含量的 Zn-Al “伪”合金涂层。如有资料报道^[18], 通过不同直径的 Zn、Al 丝材搭配, 制备出了 Al 含量分别为 14%、26%、27% 和 34% 4 种

Zn-Al “伪”合金涂层, 盐雾腐蚀试验和电化学实验发现, 高 Al 含量的 Zn-Al “伪”合金涂层表现出了优良的耐腐蚀性能。这种涂层的缺陷在于丝材直径或进给速度不同, 导致雾化不均匀, 粒子直径波动较大, 因而涂层的成分也很不均匀, 影响了涂层的性能。

粉芯丝材的出现很大程度上解决了 Zn-Al 合金丝材拉拔难的问题。Zn-Al 合金粉芯丝材通常采用 Zn 作外皮、Al 作填充粉末的方式制备, 也可以采用 Zn-Al 合金作外皮以提高丝材的硬度。到目前为止, 用火焰喷涂或电弧喷涂粉芯丝材制备 Zn-Al 合金涂层已进行了相当多的研究, 如本实验室研制了 Zn-15~30Al ($w_t\%$) 粉芯丝材^[19], 中冶集团冶金总院焊接研究所研制出 Zn-45Al ($w_t\%$) 粉芯丝材, 喷涂试验表明, Zn-Al 合金涂层的耐蚀性能是纯 Zn 涂层的 6~7 倍。

近几年的研究表明, 向 Zn-Al 合金中加入适量的其它元素能显著改善喷涂层的耐蚀性能, 目前出现的这类热喷涂合金材料有 Zn-Al-RE 合金、Zn-Al-Si 合金以及 Zn-Al-Mg 合金、Zn-Al-Mg-RE 合金等, 其中以 Zn-Al-Mg 系列合金最为突出。Zn-Al-Mg 合金涂层在海洋环境下具有比 Zn-Al 涂层更优异的耐腐蚀性能。早期的 Zn-Al-Mg 合金材料, 当含 Mg 量大于 0.5% 后, 合金将变硬变脆而难于制成丝材。有资料表明, 利用“伪”合金和包芯丝材技术向涂层中添加 0.7 $w_t\%$ ~1.4 $w_t\%$ 的 Mg 后, 涂层的抗红锈能力是纯 Zn 或纯 Al 涂层的 4 倍, 但成本高、工艺复杂。关于热喷涂高 Mg 含量的 Zn-Al 基合金涂层的研制目前正处于起步阶段, 还未见大规模的工业应用。

4 高速电弧喷涂技术在电厂锅炉管道防护中的研究应用进展

用于火力发电的锅炉管道, 包括水冷壁管、过热器管、再热器管和省煤器管(简称锅炉“四管”), 因长期工作在高温、飞灰冲刷的恶劣环境中, 且燃烧产物 Na_2SO_4 、 K_2SO_4 等沉积于管壁表面, 使管道同时受到氧化、冲蚀磨损和熔盐热腐蚀等多重破坏, 严重的会产生泄漏和爆管事故, 由此造成的损失巨大。据统计, 因锅炉受热面故障而非计划停机的占发电厂非计划停机的 40%~50%, 而 350MW 机组每停机 1 天造成的损失折合人民币为 60 万元。因

此不断寻求避免锅炉受热面产生故障的方法,传统的保护方法有采用保护带、使用护瓦、堆焊、使用高铬合金作为外层的复合管。但以上几种方法,都存在一定的问题,不能从根本上解决锅炉“四管”的磨损、腐蚀问题。而热喷涂技术的发展,为锅炉的安全长时运行提供了可能,深受许多先进工业国家的重视。美、英、瑞士、日等国从六十年代就开始研究把热喷涂技术应用于水冷壁管的预保护。

高速电弧喷涂技术因其具有高效率、低成本、操作灵活等特点,而且喷涂质量已取得了明显的进步,是在对锅炉管道进行防护治理的热喷涂技术中最有应用前景的技术。早在20世纪80年代,美国的TAFE公司就开发出了电弧喷涂45CT涂层防护技术,防护涂层使用5年以后仍然完好,9年之后,基本上无磨损、腐蚀和剥落,已在美国、欧洲国家广泛应用。45CT系55%Ni、43%Cr、2%Ti高合金,价格昂贵,加工困难,不适合我国国情。全军装备维修表面工程研究中心根据治理效果好、经济性好、材料国产化、效率高、适合电站条件等原则,发展电弧喷涂技术及材料。于20世纪90年代研究开发了新型高Cr-Ni合金(SL30)、Fe-Cr-Ni及Fe-Cr-Al等系列合金涂层,并通过试验将这些涂层的性能与45CT涂层的性能进行了全面对比,研究结果发现,研制的高Cr-Ni合金丝材获得的涂层腐蚀动力学性能与45CT丝材制得的涂层性能接近,涂层在650℃下具有优异的抗氧化腐蚀性能,性能基本上达到了45CT丝材的指标,而其成本大大降低。这种丝材的电弧喷涂层,已经应用于天津大港电厂和邯郸电厂等锅炉水冷壁管道的防腐,防腐蚀效果明显。

在前期研究Ni-Cr合金热腐蚀防护涂层的基础上,本实验室在材料制备与成形一体化技术的思想指导下,又开发出了Fe-Al系列的粉芯丝材。由于Fe-Al金属间化合物具有优良的抗氧化和抗硫化性能、在多种介质中的抗腐蚀性能,同时具有较高的高温强度、低密度、以及低成本等特点,是抗热腐蚀的理想涂层^[20]。通过不同温度下的冲蚀试验、涂盐热腐蚀试验以及高温滑动磨损试验研究发现,研制的Fe-Al/WC和Fe-Al/Cr₃C₂两种粉芯丝材,所制备的高速电弧喷涂层在不同的环境下均表现出了优良的耐热腐蚀性能。而且,通过多种实验分析手段,深入研究了Fe-Al金属间化合物复合涂层的高温耐蚀机理。

5 展 望

高速电弧喷涂技术已经历了多年的发展并逐渐被市场所认可,在再制造工程领域已得到初步的应用,但为了进一步提升再制造产品的性能和寿命,拓展应用范围,高速电弧喷涂技术的发展还有待深入。因此,建议今后高速电弧喷涂技术的研究重点应在以下几个方面:

(1) 开发应用自动化和智能化高速电弧喷涂系统。再制造工程是废旧装备高技术维修的产业化,因此,目前普遍使用的人工喷涂作业手段与未来的高度产业化生产相差甚远,国内虽然有单位已展开了操作机和机器人自动电弧喷涂系统方面的研究,但技术稳定性不高,还不能投入到大规模生产中去,迫切需要加快自动化甚至智能化的电弧喷涂技术研究的步伐,以提高生产效率和质量,改善作业环境。

(2) 继续深入基础理论研究,揭示高速电弧喷涂形成过程的内部机理。从金属熔化形成粒子到粒子沉积于基体这一整个电弧喷涂过程仅在几毫秒内完成,时间之短而经历的变化之多,使得对高速电弧喷涂原理的研究变得复杂。若能将此过程的机理完全明了,则对精确控制涂层的质量和性能是至关重要的。

(3) 研究更高性能的新材料、设备及技术。新型喷涂材料和设备一直是非常有活力的研究方向,如新型体系设计的复合材料、纳米材料、非晶材料,在设备方面有在电弧喷涂技术基础上外加气体、超声、电磁及环境保护等作用的新型喷涂技术等。

(4) 加强在高速电弧喷涂技术可产业化生产、关键零部件上的推广应用研究,拓展应用范围。目前许多研究成果还仅停留在实验室阶段,许多高速电弧喷涂技术的规范化程度不高,质量控制体系不全面。应加强推广应用研究,规范管理,促进技术转化,推动再制造业的发展。

参考文献:

- [1] 徐滨士,梁秀兵,马世宁,等. 新型高速电弧喷涂枪的开发研究[J]. 中国表面工程. 1998, 11(3):16-19.
- [2] Schoop M U. A New Process for the Production of Metallic Coatings [J]. Chem. Met. Eng. 1920, (8): 404-406.

- [3] Shashkov A N. Comparative Investigations of the Properties of Electric Arc and Flame Sprayed Metal Coatings [J]. *Advanced Materials & Processes*. 1993, 3.
- [4] Kincaid R W, Witherspoon F D. High Velocity Pulsed Wire-arc Spray [C]. *Proceedings of the 16th ITSC*. Montreal, Canada, 2000:663-668.
- [5] 杜敬磊, 吴敏生, 张雁军. 电弧超声对改善电弧喷涂雾化效果的研究 [J]. *材料保护*. 2002, 35(11):1-2.
- [6] Steffens H D, Nassenstein K, Keller S, et al. The Sonarc Process: Combining the Advantages of Arc and HVOF Spraying [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*. 1994, 3(4):398-403.
- [7] Wang X D, Zhang D, E.Pfender, et al. Effect of Nitrogen Atomizing Gas on Coating Properties in Wire Arc Spraying [C]. *Proceedings of the 14th ITSC*. Kobe, Japan, 1995:1209-1214.
- [8] Steffens H D, Wewel M. Recent Development in Vacuum Arc Spraying [C]. *Proceedings of the 2th NTSC*. Cincinnati, 1988:33-37.
- [9] Edrisy A, Perry T, Cheng Y T, et al. The Effect of Humidity on the Sliding Wear of Plasma Transfer Wire Arc Thermal Sprayed Low Carbon Steel Coatings [J]. *Surface and Coatings technology*. 2001,146-147:571-577.
- [10] Carison R R, Heberlein J V R, Hussary N, et al. High Definition Single-Wire-Arc-Spray [C]. *Proceedings of the 16th ITSC*. Montreal, Canada, 2000:709-716.
- [11] 刘谦, 戴庆荣. 汽车发动机再制造发展现状及其关键技术 [J]. *设备管理与维修*, 2003(2): 9-10
- [12] 邢忠, 姜爱良, 谢建军, 等. 汽车发动机再制造效益分析及表面工程技术的应用 [J]. *中国表面工程*. 2004, 17(4):1-5, 9.
- [13] 孙彦臣, 李少岩. 发动机主轴承及连杆轴承座孔的修复方法 [J]. *汽车技术*. 2001, (2):41-42.
- [14] 储江伟, 贾茹. 金属电弧喷涂 1Cr13+80#钢丝涂层摩擦性能的研究与应用 [J]. *中国表面工程*, 1999, 12(3):19-21
- [15] Robert M Kain, Earl A Baker. Marine Atmospheric Corrosion Museum Report on the Performance of Thermal Spray Coatings on Steel [C]. *Testing of Metallic and Inorganic Coatings*. Chicago, Illinois, USA, 1987:211-234.
- [16] 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 [C]. *Proceedings of the 15th International Thermal Spraying Conference*. Nice, France, 1998:1017-1024.
- [17] 李守本, 王瑞雪, 姚平. 锌铝合金丝及其热喷涂涂层的电化学特征 [J]. *材料开发与应用*. 1989, 6: 18-23, 17.
- [18] Lester T, Kingerley D J, Harris S J. Thermally Sprayed Composite Coatings for Enhanced Corrosion Protection of Steel Structures [C]. *Proceedings of the 15th International Thermal Spraying Conference*. Nice, France, 1998:49-55
- [19] Liu Yan, Zhu Zi-xin, Chen Yong-xiong, et al. Electrochemical Corrosion Behavior of Arc Sprayed Zn-Al Coatings [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2004, 14(Special 2):443-445
- [20] Zhu Zi-Xin, Liu Yan, Xu Bin-Shi, et al. Effect of microstructure on wear behavior of iron aluminide based coatings[J]. *Transaction of Materials and Heat Treatment*. 2004, 25(5):938-941
-
- 作者地址: 北京丰台区杜家坎21号 100072
装甲兵工程学院 装备再制造技术国防科技重点实验室
Tel: (010)66718541 E-mail:famon1599@163.com