

综述·专论

高速电弧喷涂在工程机械零部件再制造领域中的应用现状

田浩亮^{1,2}, 魏世丞², 陈永雄², 刘毅², 童辉², 徐滨士²

(1. 北京航空航天大学 材料科学与工程学院, 北京 100037;

2. 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] 在分析工程机械典型零部件失效模式的基础上, 介绍了几种高性能电弧喷涂涂层的性能和应用背景, 综述了高速电弧喷涂在防腐、采油装备、抽油泵柱塞、电站锅炉设备及汽车发动机等几个重要工程领域的研究应用现状, 进而展望了高速电弧喷涂技术在工程机械零部件再制造产业的发展趋势, 对再制造工程在工程机械产业中推广有一定的指导意义。

[关键词] 再制造工程; 高速电弧喷涂; 维修; 涂层

[中图分类号] TG174.442

[文献标识码] A

[文章编号] 1001-3660(2013)03-0099-04

Application Status of High Velocity Arc Spraying Technology in Remanufacturing Construction Machinery Parts

TIAN Hao-liang^{1,2}, WEI Shi-cheng², CHEN Yong-xiong², LIU Yi², TONG Hui², XU Bin-shi²

(1. School of Material Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100037, China;

2. National Key Laboratory for Remanufacturing, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China)

[Abstract] Based on the analysis of the typical construction machinery parts failure mode, the properties of the arc spray coating and the application background were introduced. The application status of high velocity arc spraying developed in anti-corrosion oil equipment, pump plungers, boiler equipment and automobile engine and several other construction machinery parts fields were overviewed. Furthermore, the prospect of the high velocity arc spraying technology using remanufacturing in construction machinery parts was also analyzed in detail. It may be have the important guidance in remanufacturing developed in repair of construction machinery parts.

[Key words] remanufacturing engineering; high velocity arc spraying; maintenance; coatings

机械设备的故障往往是由于个别零件的失效造成的, 而零件失效基本是由局部表面损伤造成的。再制造工程技术可以对废旧零件进行表面强化或修复, 并且再制造产品的性能不低于新品, 而机械设备可以重组得到再次使用, 减少了大量的原材料消耗, 节省了制造时间^[1]。机器人自动化高速电弧喷涂技术是先进再制造技术之一^[2], 与普通电弧喷涂技术相比, 它喷涂效率更高, 喷涂层性能优异; 与等离子喷涂技术相比, 它的设备价格仅为 1/5, 操作成本仅为 1/9^[3]。为此, 本文介绍了几种新型高性能涂层体系的性能特征, 并综述了高速电弧喷涂在几个重要工程领域的研究应用现状。

1 工程机械零部件磨损失效分析

磨损、腐蚀和断裂是材料失效的三种主要形式, 其中磨损引起的设备损坏约占 70% ~ 80%, 全球每年因零部件磨损失效导致设备报废而造成的经济损失达数亿元^[4]。磨损大体上分为磨粒磨损、疲劳磨损、腐蚀磨损三种。磨粒磨损按照摩擦表面所承受的应力和冲击力的大小, 又分为三种形式^[5]: 凿屑式磨损, 如挖掘机的斗齿、碎石机锤头、采煤机铲板底部的磨损 (图 1a); 碾碎式磨损, 如石料破碎机颚板、轧碎机滚筒、采煤机

[收稿日期] 2012-12-20; **[修回日期]** 2013-02-01

[基金项目] 国家 973 课题 (2011CB013403); 国家自然科学基金项目 (51105377, 50971132); 国家科技支持课题 (2011BAF11B07)

[作者简介] 田浩亮 (1986—), 男, 陕西渭南人, 博士生, 主要研究方向为热喷涂技术与再制造工程。

爬爪的磨损(图 1b);疲劳磨损,如泵站曲轴轴颈的磨损(图 1c)。粘着磨损失效如图 2 和图 3 所示的推土

机或挖掘机链轮中销排和链轮的磨损,腐蚀磨损失效则如图 4 所示的混凝土泵车砼缸内壁锈蚀。



a 铲板底部



b 爬爪



c 泵站曲轴

图 1 连续采煤机各部位的磨损^[6]

Fig. 1 Wear parts of continuous miner



图 2 销排的磨损

Fig. 2 Worn out of pin



图 3 链轮的磨损

Fig. 3 Worn out of chain gear

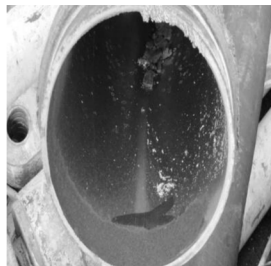


图 4 混凝土泵车砼缸内壁

Fig. 4 Concrete cylinder liner of concret pump

2 高性能电弧喷涂材料

2.1 高耐磨性铁基复合涂层

常见的电弧喷涂丝材主要有 Fe 基和 Ni 基两大类。Fe 基喷涂丝材包括碳钢和低合金丝(如 10Mn 或 80MnSi)、奥氏体型(如 316 型)、马氏体型(如 3Cr13 型)、Fe-Mn 系不锈钢丝材^[7]和 Fe-Al 基陶瓷强化相金属间化合物粉芯丝材^[8-9]等。Fe-Al 粉芯丝材中加入 Al_2O_3 陶瓷颗粒,制备的 FeAl/ Al_2O_3 复合涂层可有效地改善铁铝金属间化合物涂层的室温脆性^[10],主要用作电厂锅炉管道受热面、汽轮机叶片等高温腐蚀/磨损环境下服役的零部件的防护涂层。

Ni 基喷涂粉芯丝材制备的涂层具有高硬度和良好的耐磨性,且耐腐蚀性能和抗高温疲劳性能都优于 Fe 基喷涂丝材。文献[11]报道了采用电弧喷涂粉芯丝材在低碳钢表面制备含 TiB_2 陶瓷的 Ni(Cr)- TiB_2 , Ni(Cr) TiB_2/Al_2O_3 , 304L- TiB_2 和 304L- TiB_2/Al_2O_3 涂层,实验结果表明, Ni(Cr)- TiB_2 和 304L- TiB_2 涂层磨损量约为低碳钢基体的 1/5,其原因是 TiB_2 陶瓷相具有高的硬度、良好的抗氧化性和高温强度等特性,且与合金相结合良好,所形成的网状结构起到了“骨架”支撑作用。这些涂层在锅炉和工具材料的表面防护上具有一定的应用潜力。文献[12]中将金属镍包覆 Cr_3C_2 陶瓷粉体用作高速电弧喷涂 FeNiCr/ Cr_3C_2 粉芯材料增强相,与

FeNiCr/ Cr_3C_2 涂层相比, FeNiCr/Ni 包 Cr_3C_2 涂层的氧化物含量和孔隙率明显减少,层间结合更为紧密,并且 Ni 在涂层中的分散更均匀,游离的碳含量也更低,涂层的断裂韧性和耐磨性都得到了提高,这归因于 Ni 包覆 Cr_3C_2 粉体增加了涂层层间的接触,提高了层间的结合强度。陈永雄等人^[13]为了改善喷涂 1Cr18Ni9Ti 不锈钢涂层的脆性,研究了 1Cr18Ni9Ti-Al 防腐耐磨伪合金组合涂层,伪合金涂层中, Al 层与不锈钢层交错沉积,形成了“软、硬相交错叠加”特征的组织结构,降低了涂层中氧化物的含量,涂层内部的微裂纹和残余应力也显著降低,耐磨性能提高了 5%。

2.2 非晶/纳米晶复合涂层

利用高速电弧喷涂技术制备非晶纳米晶涂层是对非晶纳米晶合金制备技术的新拓展,也是对传统电弧喷涂技术的革新。美国 TAFA 公司和 Nanosteel 公司近两年开发出了 95MXC, 110MXC, 140MXC 等 FeCrBSi 系列粉芯丝材,可用于汽车、航天等工业领域^[14]。Borisova 等人^[15]用电弧喷涂技术成功制备了 Fe-B-RE 非晶涂层,显著提高了涂层的性能,说明非晶材料将会成为喷涂防腐抗磨涂层领域一种极具发展潜力的材料。Branagan 等人^[16]利用电弧喷涂技术制备了 Fe-Cr-B-Si-Mo-W-C-Mn 非晶纳米晶涂层,涂层中弥散分布的硼化物和碳化物大大提高了涂层的硬度和耐磨性能,同时涂层具有较高的结合强度和抗冲击性能。胡为锋等人^[17]利用电弧喷涂技术将不锈钢非晶态高耐

腐蚀粉芯丝材应用到循环流化床锅炉“四管”中,涂层的相对耐磨性为常用 3Cr13 喷涂层的 10 倍以上,为 20 钢的 21 倍以上,并具有很高的结合强度($>55\text{ MPa}$),硬度值 $>65\text{ HRC}$,抗热震性能好($800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 热震 20 次,涂层完好),已经应用到中国石油独山子石化公司 5 台锅炉中,受热面喷涂 2200 m^2 。卢兰志等人^[18]在粉芯丝材中添加了镍稀土,并利用电弧喷涂技术成功制备了 FeCrMoCBSi 非晶合金涂层,镍稀土的添加有效促进了涂层中非晶相的形成,涂层非晶含量高达 76.5%,组织结构更加致密,平均显微硬度高达 $1506\text{ HV}0.1$,耐冲蚀性能较好。胡江等人^[19]采用新型高耐蚀耐磨非晶纳米晶复合涂层材料,对紫荆关一级水电站水轮机转轮进行了抗磨蚀试验研究,有效延长了转轮的使用寿命,降低了电站的运行成本,增加了效益。程江波等人^[20]利用高速电弧喷涂技术成功制备了高性能、低成本的 FeCrBSiNb 非晶纳米晶涂层,40~60 nm 的球形纳米晶粒弥散在非晶母相中,非晶含量超过 60%,涂层具有低氧化物、高硬度、高结合强度的特点,且具有优异的耐磨性能,在干摩擦条件下,耐磨性能为 3Cr13 喷涂层的 2.6 倍。梁秀兵等人^[21]开发的 FeAlNbB 金属间化合物非晶纳米晶涂层主要由 10~30 nm 的纳米晶相和非晶相组成,涂层结合强度大于 50 MPa,且耐磨性能优异,已经成功应用于机械轴类零件的耐磨损与尺寸恢复等再制造领域中。

3 高速电弧喷涂技术在主要工业领域中的应用

目前,许多石油石化行业中使用的柱塞泵存在极为严重的磨损和腐蚀问题,使用寿命仅 40 天左右,吴树章等人^[22]利用高速电弧喷涂技术对胜利油田和中原油田的 6 根抽油杆进行了表面防腐处理,喷涂材料为 316 不锈钢,然后再喷涂一层环氧树脂涂层,再制造后的抽油杆于 2001 年分别送到胜利油田东辛采油厂和中原油田采油三厂进行矿场试验,累计工作时间超过 219 天,没有发生断杆事故。汪润军等人^[23]将大功率高速电弧喷涂技术应用到电厂风机叶轮修复、钢厂转炉烟道表面抗高温冲蚀防护、小松挖掘机电轴轴颈尺寸恢复和锅炉四管耐磨防腐等行业中,部分技术已经在工厂得到实际应用推广,使用效果较好。锅炉水冷壁减薄造成的突发性爆管事故对电厂安全、稳定发电的危害十分严重。靳春光等人^[24]研制了一种 Ni-Cr-B-Si/WC 复合丝,并利用电弧喷涂技术对锅炉水冷壁管内壁进行了防护,涂层厚度可达 2 mm,结合强度大于 52 MPa,能耐 $1256\text{ }^{\circ}\text{C}$ 高温,耐腐蚀性能是 Ni-Cr/

WC 涂层的 1.5 倍,大大提高了水冷壁管的抗高温氧化和硫气腐蚀性能。烘缸是造纸机的常用部件,由于腐蚀和磨损严重,通常半年就需磨缸。杨建桥等人^[25]利用高速电弧喷涂 Cr25Ni20 不锈钢对烘缸表面进行了修复,修复后的烘缸连续使用 2 年,仍然处于良好状态。线材轧机的铸铁轧辊因轴颈极易磨损,常发生断辊事故。王月华^[26]在轧辊表面电弧喷涂高耐磨性 7Cr13 涂层,修复后的铸铁轧辊再次投入使用后,几乎无脱落或起泡现象,其维修费用仅相当于重购费用的 40%,可以有效降低使用单位的生产成本。油田大多数储罐在运行时受到内外腐蚀介质的作用,会发生腐蚀,主要原因是存在沉淀物和氯化盐(如 MgCl_2 , NaCl 及 CaCl_2)的油水混合物以及 H_2S , Cl^- 和硫酸盐还原菌等。李万春等人^[27]利用高速电弧喷涂技术喷涂 Zn-Al 涂层对储罐内表面进行了防腐处理,经过现场应用,取得了很好的效果。

我国的汽车工业发展快速,若报废汽车能通过再制造技术形成再生产品,就能创造巨大的经济效益。汽车发动机缸体主轴承孔及连杆轴承座孔等部位常因磨损而造成尺寸超差和严重划伤,白金元等人^[28]采用电弧喷涂技术对发动机缸体主轴承孔进行喷涂,喷涂的材料为 1Cr18Ni9Ti 和 Al,喷涂后在基体上形成了 1Cr18Ni9Ti-Al 复合涂层。曲轴也是发动机中价值较高的零件之一,轴颈磨损是其失效的主要形式。梁秀兵等人^[29]利用高速电弧喷涂对废旧曲轴进行了再制造,喷涂材料为 FeAlNbB 非晶纳米晶复合涂层,再制造成本仅为制造一根新品曲轴的 12.5%,可节能 90% 以上,应用前景广阔。

4 高速电弧喷涂技术在工程机械行业中的应用展望

随着国家加大基础设施的建设,需要大量的工程机械重载车辆,一些重要零部件局部磨损后进行再制造,既可以提高机械设备的使用寿命,又可以降低企业成本,具有极高的推广价值^[30]。搅拌料斗采用 16Mn 整体加厚,底部寿命也只有 $60\text{ }000\text{ m}^3$ 左右;混凝土搅拌车螺旋叶片采用 5 mm 的 16MnCu 材料制作,有效使用寿命一般在 2~3 年左右,而若高速电弧喷涂 1Cr18Ni9Ti 或 2Cr13,可使 4 mm 16Mn 材料制作的螺旋叶片寿命达到 5 年以上;进料斗和滑料槽主体采用 3 mm 的 16Mn 制作,内加 4 mm 的 16Mn 耐磨层,以便于更换,这种结构使用寿命在 1 年左右,若对 3 mm 的 16Mn 制作料斗料槽进行高速电弧喷涂 1Cr18Ni9Ti, 2Cr13 或者 3Cr13,寿命可达 3 年以上。

5 结语

高速电弧喷涂再制造修复零部件的使用寿命与涂层性能相关,“伪合金”涂层、非晶-纳米晶体系涂层、包覆陶瓷相的复合涂层可以提高再制造产品的耐磨性及使用寿命。该技术具有低成本、工艺灵活、效率高的优势,目前已广泛应用于众多工业机械关键零件的再制造,能够提高废品的利用率。工程机械设备使用工况恶劣,关键零部件报废失效造成经济损失及资源浪费,采用高速电弧喷涂技术对高附加值的零部件进行再制造修复具有很大意义。

在资源短缺、能源紧张的情况下,再制造工程在国家经济中占据的地位将越来越显著,未来将向着多种技术复合处理、制备功能梯度涂层、更加环保节能的方向发展。

[参 考 文 献]

- [1] 徐滨士. 装备再制造工程的理论与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [2] 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.
- [3] 朱子新. 高速电弧喷涂 FeAl/WC 涂层形成机理及高温磨损特性[D]. 天津: 天津大学, 2002.
- [4] 邓守军, 孙乐民, 张永振. 磨损机理的变迁与现状[J]. 机械研究与应用, 2004, 17(6): 10—12.
- [5] 屈晓斌, 陈建敏, 周惠娣, 等. 材料的磨损失效及其预防研究现状与发展趋势[J]. 摩擦学学报, 1999, 19(2): 187—192.
- [6] 张剑华. 采煤设备维修应用表面工程技术的研究与实践[J]. 煤炭学报, 2011, 36(S1): 172—176.
- [7] FUKUMOTO M. The Current Status of Thermal Spraying in Asia[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2008, 17(1): 6—9.
- [8] XU B S, ZHANG W, XU W P. Influence of Oxides on High Velocity Arc Sprayed Fe₂Al/Cr₃C₂ Composite Coatings[J]. Journal of Central South University of Technology, 2005, 12(3): 259—261.
- [9] ZHU Z X, XU B S, MA S N, et al. Study on Microstructure and Properties of High Velocity Arc Sprayed Fe₃Al Intermetallic Coating[J]. China Welding, 2002(1): 1—4.
- [10] DUMITRESCU L, MAURY F. Al₂O₃ Coatings on Stainless Steel from Al Metal-organic Chemical Vapor Deposition and Thermal Treatments[J]. Surface and Coatings Technology, 2000(125): 419—423.
- [11] FANG J J, LI Z X, SHI Y W. Microstructure and Properties of TiB₂-containing Coatings Prepared by Arc Spraying[J]. Applied Surface Science, 2008(254): 3849—3858.
- [12] 罗来马, 刘少光, 俞佳, 等. 高速电弧喷涂 FeNiCr/Ni 包覆 Cr₃C₂ 涂层组织和性能的研究[J]. 功能材料, 2009, 40(8): 1285—1287.
- [13] CHEN Y X, XU B S, LIU Y, et al. Structure and Sliding Wear Behavior of 321 Stainless Steel/Al Composite Coating Deposited by High Velocity Arc Spraying Technique[J]. Transaction Nonferrous Metallic Social China, 2008, 18(3): 603—609.
- [14] GEORGIEVA P, THORPE R, YANSKI A, et al. An Innovation Turnover for the Wire Arc Spraying Technology[J]. Advanced Material Process, 2006, 8: 68—72.
- [15] BORISOVA A L, MITZ I V, PATON E O, et al. Arc Sprayed Coatings of Ferroalloy-base Flux-cored Wires[C]//Thermal Spray—Surface Engineering via Applied Research: Proceedings of the 1st International Thermal Spray Conference, 2000: 705—708. (余不详)
- [16] BRANAGAN D J, BREITSAMETER M, MEACHAN M B E, et al. High-performance Nanoscale Composite Coatings for Boiler Applications[J]. Journal of Thermal Spraying Technology, 2005, 14(2): 196—204.
- [17] 胡为锋, 葛爽, 王鑫. 非晶态耐磨粉芯丝材在循环流化床锅炉“四管”中的应用[C]//第十届中国热喷涂研讨会论文集. 北京: 中国机械工程学会, 2007: 114—117.
- [18] 卢兰志, 魏琪, 李辉, 等. 镍稀土对 FeCrMoCBSi 系非晶合金涂层性能的影响[J]. 中国表面工程, 2010, 23(3): 51—55.
- [19] 胡江, 刘文举, 周昊, 等. 高耐蚀耐磨非晶纳米晶复合涂层在水轮机转轮上的应用[J]. 中国水能及电气化, 2011, 78(7): 44—47.
- [20] CHENG J B, LIANG X B, XU B S, et al. Characterization of Mechanical Properties of FeCrBSiMnNbY Metallic Glass Coatings[J]. Journal of Material Science, 2009, 44: 3356—3363.
- [21] 梁秀兵, 白金元, 程江波, 等. 电弧喷涂非晶纳米晶复合涂层材料的研究[J]. 热喷涂技术, 2009(2): 23—26.
- [22] 吴树章, 吴则中, 翟中军, 等. 材料表面工程技术在抽油杆生产上的应用[J]. 石油矿场机械, 2006, 35(8): 87—91.
- [23] 汪瑞军, 张天剑, 徐林, 等. 大功率高速电弧喷涂层性能及其应用[J]. 焊接, 2004(4): 27—30.
- [24] 靳春光, 吕震, 杨德良, 等. 电弧超音速喷涂技术在锅炉水冷壁防护上的应用[J]. 山东冶金, 2006, 28(4): 83—84.
- [25] 杨建桥, 段素霞, 杨保兴, 等. 高速电弧喷涂技术在造纸烘缸中的应用[J]. 中国造纸, 2008, 27(1): 74—75.
- [26] 王月华. 高速电弧喷涂技术在铸铁轧辊修复中的应用[J]. 广西轻工业, 2009(2): 39—45.
- [27] 李万春, 赵玉鹏, 李景全. 热喷涂防护技术在河南油田原油储罐中的应用[J]. 油气田地面工程, 2010, 29(7): 88—89.
- [28] 白金元, 徐滨士, 梁秀兵, 等. 自动化喷涂 1Cr18Ni9Ti-Al 复合涂层在废旧发动机缸体再制造中的应用[J]. 中国表面工程, 2007, 20(6): 40—43.
- [29] 梁秀兵, 陈永雄, 白金元, 等. 自动化高速电弧喷涂技术再制造发动机曲轴[J]. 中国表面工程, 2010, 23(2): 112—116.
- [30] 魏安平. 热喷涂技术在专用车生产中的应用分析[J]. 专用汽车, 2004(4): 35—37.