

doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2010.02.023

## 自动化高速电弧喷涂技术再制造发动机曲轴\*

梁秀兵, 陈永雄, 白金元, 刘 燕, 徐滨士

(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:** 研究开发了基于六自由度关节式机器人的自动化高速电弧喷涂系统。采用新研制的 FeAlNbB 喷涂粉芯丝材, 设计优化了发动机曲轴轴颈的再制造自动化喷涂工艺, 在实验室条件下测试了涂层的组织及性能, 在工厂进行的批量应用效果表明, 曲轴主轴颈和连杆轴颈均可实现一次性自动化喷涂, 再制造的零件质量稳定, 节能、节材及环保效果显著, 应用前景广阔。

**关键词:** 自动化; 电弧喷涂; 再制造; 曲轴; 金属间化合物涂层

中图分类号: TG174.442

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2010)02-0112-05

### An Automatic High Velocity Arc Spraying Technology Applied to Remanufacture Engine Crankshaft

LIANG Xiu-bing, CHEN Yong-xiong, BAI Jin-yuan, LIU Yan, XU Bin-shi

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

**Abstract:** A 6R robot-based automatic high velocity arc spraying system was developed in this study. The remanufacturing process of engine crankshaft was designed based on the newly developed automatic spraying system and the FeAlNbB cored wire. The microstructure and properties of the coating prepared were investigated in lab. The results of industrial application in engine cylinder bodies shows that, both of the main shaft manetons and the crank manetons of the crankshaft can be deposited of coating in only one procedure using the developed automatic spraying technology, and a reliable quality of the remanufactured part was obtained. Furthermore, this technology has several advantages such as energy and material saving, and environmental protection, a wide application foreground for this technology is therefore performed.

**Key words:** automation; arc spraying; remanufacturing; crankshaft; intermetallic coating

### 0 引 言

高速电弧喷涂是以电弧为热源, 将熔化的金属丝材用高速气流雾化, 喷射到工件表面形成涂层的一种工艺<sup>[1-2]</sup>, 与其它热喷涂技术相比, 高速电弧喷涂技术具有沉积效率高、能耗低、经济性好、涂层组织致密等特点, 尤其是用在再制造与快速成形领域<sup>[3]</sup>。传统电弧喷涂是通过人工操作, 控制精度低, 且作业环境恶劣, 很大程度上影响了涂层质量, 限制了该技术的发展。为此, 国内外开始了以操作机或机器人等为载体的自动化喷涂技术的研究, 并取得了一定的进展<sup>[4,5]</sup>。自动化电弧喷涂技术提升了涂

层质量和效率的同时, 伴随高性能新型喷涂材料的发展, 该技术的应用领域也得到了拓展, 例如, 电弧喷涂由过去仅能喷涂约 2 mm 以下的薄涂层, 发展到可以喷涂成形约 10~20 mm 厚的金属零件<sup>[6]</sup>; 过去仅能以手工作业方式在小范围内进行个别零件的表面修复, 发展到采用自动化喷涂生产线进行装备关键零部件的规模化再制造。

曲轴是重载装备车辆发动机中价值较高的零件之一, 重量约为发动机的 10%, 成本约为整机的 10%~20%, 所以曲轴的报废将大大降低发动机的再制造附加值。曲轴工作时承受着周期性的气体压力、往复惯性力和离心力的作用, 同时还承受着拉、压、弯、扭等周期交变应力作用和扭转振动。曲轴轴颈磨损是其失效的主要形式, 主轴颈与连杆轴颈的磨损都是不均匀的。基于这些工况分析, 认为电

收稿日期: 2010-02-15; 修回日期: 2010-03-22

基金项目: \*国家“863”计划项目(2009AA03Z342); 国家自然科学基金项目(50735006, 50905185); 中波政府科技合作重点项目(2009DFA52150)

作者简介: 梁秀兵(1974—), 男(汉), 山东烟台人, 副研究员、博士。

弧喷涂高性能涂层可实现曲轴的再制造, 该技术有极大的推广应用空间。为此, 研究开发了基于六自由度关节式机器人的自动化高速电弧喷涂系统, 优化设计了发动机曲轴主轴颈和连杆轴颈的再制造自动化喷涂材料及工艺, 并在实验室条件下测试了涂层的组织及性能, 最后进行了批量的生产, 并分析了该技术的应用经济性。

## 1 机器人自动化高速电弧喷涂系统的开发

曲轴作为发动机的重要部件, 再制造批量大, 由于曲轴连杆轴颈与主轴颈不同心, 很难在一道工序下在主轴颈和连杆轴颈表面喷涂沉积质量可靠、厚度均匀的涂层, 因此, 如果采用自动化电弧喷涂技术进行再制造, 对设备的操作灵活性及运动精度的要求非常高。

关节式机器人的动作空间、运动速度范围都很大, 运动姿态控制灵活, 且技术成熟, 是自动化电弧喷涂主体设备的首选<sup>[7]</sup>。针对应用要求, 研究设计的自动化电弧喷涂系统由高性能电弧喷涂设备、MOTOMAN HP20型机器人自动化控制系统和质量控制系统等部分组成, 其总体结构的设计如图1所示, 机器人末端手臂通过专用夹具与高速电弧喷涂枪相连。为保证可靠送丝, 将送丝机固定在机器人附件臂上(如图2所示), 使送丝距离缩短到0.9~1.2 m的范围内, 减小了送丝阻力, 而且, 改善了管线的布置, 结构紧凑, 避免喷涂设备与机器人之间的干涉。曲轴喷涂工件固定在1自由度变位机(工作台)上, 采用集成的中央控制系统实现自动化喷涂的所有控制操作, 包括机器人与变位机的运动、喷涂电源与送丝机的起停、电压与电流的调节等控制, 另外, 该控制器还备用喷涂过程实时反

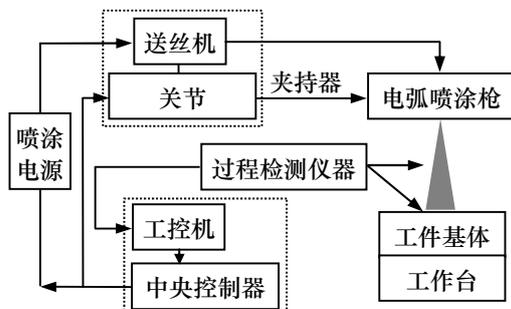


图1 机器人高速电弧喷涂系统结构示意图

Fig.1 Schematic set-up of the robot-based automatic high velocity arc spraying system



图2 机器人自动化高速电弧喷涂系统主体部分

Fig.2 Photo of the main part of the robot-based automatic high velocity arc spraying system

馈控制的数字量接口, 如外加一些质量监控设备, 例如SprayWatch-2i型热喷涂监测系统、红外热像仪等, 可对电弧喷涂飞行粒子的状态、涂层表面的温度场进行实时测量, 实现自动化系统的最优控制。

## 2 曲轴再制造的喷涂材料与工艺

### 2.1 喷涂材料及涂层表征

根据曲轴的工作条件, 分析认为修复曲轴轴颈磨损部位的喷涂层应具备较好的结合强度及适宜的硬度等。过高的涂层硬度会加大后续加工的难度, 同时也会加速对偶件(轴套)的磨损, 涂层硬度过低则会降低再制造的曲轴的使用寿命。为此, 本文在选择设计喷涂材料时主要依据这两项性能指标, 制备并研究开发出了Fe-Al基复合涂层。首先优化设计出制备该复合涂层的FeAlNbB粉芯丝材, 即丝材外皮使用低碳钢带, 里面填充由合金粉末组成的混合粉末, 使用多功能粉芯丝材成型机拉拔成直径为 $\phi 2$  mm的粉芯丝材。

使用研制的FeAlNbB粉芯丝材, 并结合新开发的机器人自动化高速电弧喷涂系统制备涂层。在实验室条件下分析表征了涂层的组织特征与常规力学性能。图3为使用Quant 200型扫描电子显微镜观察到的涂层SEM结果, 可以看出, 涂层与基体结合良好, 界面处没有裂纹产生, 涂层呈明显的层状结构。

图4为涂层的TEM检测结果, 表明涂层中不同区域含有组成为AlFe<sub>2</sub>B<sub>2</sub>非晶相(图4a)、AlB<sub>2</sub>非晶相及与FeAl多晶复合晶相(图4b)、FeAl和Fe<sub>3</sub>Al微晶相(图4c)。在喷涂过程中, 熔融液态

粒子的瞬间凝固速率约为 $10^5 \sim 10^7$  K/s, 这为铁基非晶相的形成提供了有利的条件。另一方面, FeAlNbB粉芯丝材的成分设计满足了Inoue提出的具有高玻璃形成能力的非晶合金三大经验原则, 具有较强的非晶形成能力<sup>[8]</sup>。而且, 涂层中形成的FeAl系金属间化合物相进一步改善了涂层的结构及力学性能, 使涂层由非晶相及金属间化合物多相混杂组成, 充分发挥各自的优势。

## 2.2 涂层的力学性能及耐磨损性能

实验测试了FeAlNbB复合涂层的常规力学性能, 得到该涂层的平均显微硬度为 $451 \text{ HV}_{0.1}$ , 结合

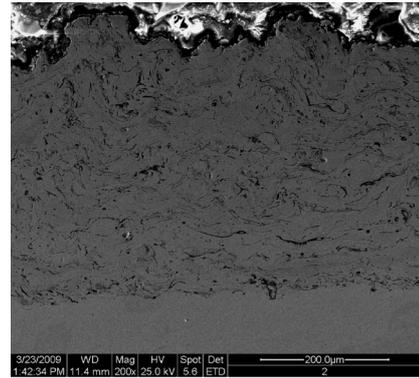


图3 Fe-Al复合涂层/基体界面形貌(SEM)

Fig. 3 SEM photo of the intersection of the substrate and Fe-Al composite coating

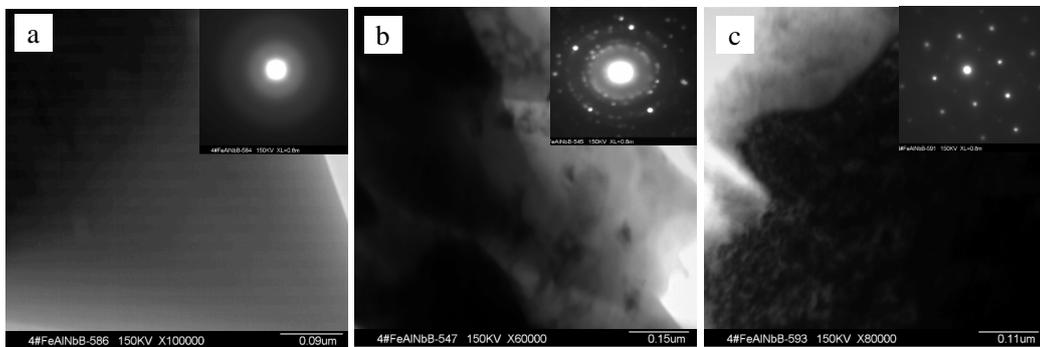


图4 FeAlNbB复合涂层TEM和SAED表征结果

Fig.4 TEM and SAED results of the FeAlNbB composite coating

强度达51 MPa。斯太尔汽车发动机67系列曲轴材料为精锻45钢, 根据该材料特点, 分析认为再制造喷涂层较适宜的硬度为 $380 \sim 450 \text{ HV}_{0.1}$ 。所制备的FeAlNbB复合涂层的硬度接近该范围值的上限, 且涂层具有较高的结合强度, 涂层中微量孔隙有储存机油的作用, 因此适合该类型曲轴的再制造。

采用德国产的SRV-IV微动摩擦磨损试验机测试了FeAl系涂层在油润滑条件下的摩擦磨损性能。试验条件为: 载荷50 N、频率30 Hz、振幅1.5 mm、试验温度 $150^\circ\text{C}$ 、聚四稀汀PAO40基础油、对偶件为 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 陶瓷球。图5是FeAl涂层和FeAlNbB复合涂层的摩擦因数的变化曲线 (FeAl涂层为喷涂含27% Al的粉芯丝材制备而成)。可以看出, 在室温下, 两种涂层的摩擦因数在摩擦初期剧烈抖动, 且FeAl涂层尤其明显, 在磨损后期两种涂层的摩擦因数均趋向稳定, 在 $0.1 \sim 0.13$ 范围内变化, 但是, 比较两种涂层的磨损率发现, FeAlNbB涂层的磨损率明显低于FeAl涂层。该条件下的试验结果对于分析涂层曲轴在交变应力作用下的磨损规律有较好的指导意义。

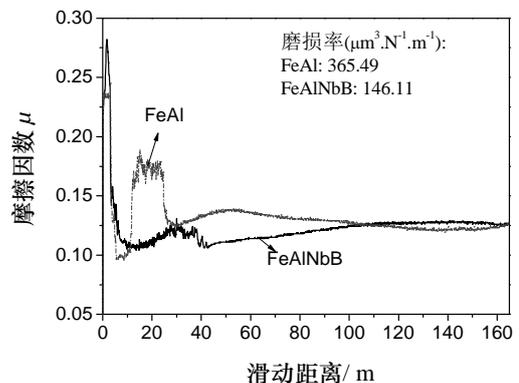


图5 FeAl系涂层在 $150^\circ\text{C}$ 条件下的摩擦因数及磨损率  
Fig. 5 Coefficient and wear rate of the FeAl coatings tested under  $150^\circ\text{C}$

## 2.3 自动化高速电弧喷涂工艺

优化设计了自动化喷涂发动机曲轴的工艺。首先, 对喷涂运行的路径和喷涂的工艺进行规划设计。采用示教再现方式对机器人运行路径进行规划设计。示教再现方式先在待喷涂零件上选定一些关键点, 在示教模式下将喷枪移动按顺序移动至这些

关键点处,并调节好姿态,机器人便可按照设定的插补方式沿着关键点运动并连成轨迹,在合适的位置输入喷涂作业命令后,机器人便可以在再现模式下完成喷涂的自动化作业。

采用的路径编程方案是以变位机装夹曲轴,实现机器人和变位机间的联动,即机器人末端手臂装夹喷枪,喷枪的运动姿态根据变位机带动曲轴的转动而改变。当喷涂主轴颈时,由于主轴颈和变位机转动轴同心,喷枪的运动轨迹为直线平移;当喷涂连杆轴颈时,由于不同心,喷枪的运动轨迹变为椭圆,且随连杆的转动,喷枪始终垂直于轴颈的表面均匀喷涂。程序调试完毕后,进行喷涂试验,设计主要工艺参量如表1所示。图6为机器人自动化喷涂发动机曲轴过程照片。结果发现,喷涂很稳定,而且涂层比较均匀,未发现过热现象,轴颈中间和边缘的涂层厚度波动较小,喷涂后的曲轴照片如图7所示。



图6 机器人自动化喷涂发动机曲轴过程照片

Fig.6 Photo of the deposition process on the engine crankshaft of the automatic spraying system

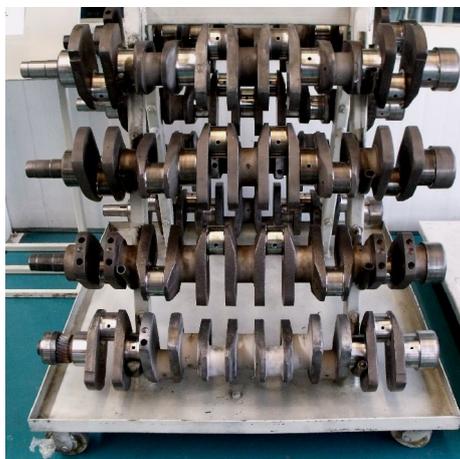


图7 喷涂后的曲轴照片

Fig.7 Photo of the as-sprayed crankshaft

表1 编程设计参量

Table 1 Processing parameters for off-line programming

喷涂电压/V	喷涂电流/A	气体压力/MPa	喷涂距离/mm	喷涂角/°	移动枪速/m·s <sup>-1</sup>
36	140	0.7	200	90	0.2

制备完涂层之后,还需要进行磨削加工。观察涂层加工性能,以及加工后涂层的质量情况,保证加工后曲轴各方面指标达到要求。

### 3 试用效果与经济性分析

使用上述自动化高速电弧喷涂技术在中国重汽济南复强动力有限公司对斯太尔某型曲轴进行了应用考核,共进行了350余根曲轴的喷涂再制造,至目前应用效果良好。针对工厂的应用情况,初步预算结果如表2所示,可见整个再制造过程所需的费用约350元/根,再制造成本仅为制造一根新品曲轴的12.5%,所需的喷涂金属丝材不到新品曲轴重量的3%。而且,喷涂再制造技术的节能效果在90%以上,喷涂产生的灰尘通过专门设计的水幕除尘设备过滤后,不污染环境,因此,该技术的节能、节材及环保效果非常明显,应用前景广阔。

表2 自动化喷涂再制造单件曲轴经济性评估

Table 2 Economical estimate of automatic spray remanufacturing for a crankshaft

项目	材料	耗材/kg	成本/元
曲轴毛坯	精锻45钢	128	1500
曲轴新品	精锻45钢	103	2800
再制造喷涂材料 <sup>a)</sup>	FeAlNbB 粉芯丝材	2.7	135
再制造加工费 <sup>b)</sup>			215

注:<sup>a)</sup> 再制造喷涂材料的消耗按所有轴颈都需喷涂计算;

<sup>b)</sup> 再制造加工费用包含废旧曲轴的拆解清洗、检测校正、喷砂预处理、自动化电弧喷涂、磨削后加工等工序产生的费用(含人工、水、电、气的费用等)。

### 4 结论

(1) 根据发动机曲轴再制造对电弧喷涂的设备与工艺要求,开发了基于六自由度关节式机器人的自动化高速电弧喷涂系统。自动化控制系统除了灵活控制喷枪的各种运动外,还可以对电弧喷涂电源、送丝机构以及高压空气进行一体化自动控制,进而可实现电弧喷涂的机器人全自动化作业。

(2) 研制开发的 FeAlNbB 复合涂层中, 含有 AlFe<sub>2</sub>B<sub>2</sub> 非晶相、AlB<sub>2</sub> 非晶相以及 Fe-Al 金属间化合物相等多相组织, 这种多相混杂的结构使涂层具有较高的结合强度、适宜的硬度, 以及优异的耐摩擦磨损性能。

(3) 采用设计机器人自动化高速电弧喷涂工艺对发动机曲轴进行喷涂再制造的结果显示, 机器人自动化喷涂系统操作灵活, 控制精度高, 曲轴主轴颈和连杆轴颈均可实现一次性喷涂作业, 再制造的零件质量稳定, 该技术的节能、节材及环保效果非常明显, 在机械金属零件的再制造领域具有广阔应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 徐滨士, 刘世参, 张伟, 等. 绿色再制造工程及其在我国主要机电装备领域产业化应用的前景[J]. 中国表面工程, 2006, 19(5): 17-21.
- [2] 徐滨士, 马世宁, 刘世参. 表面工程的应用和再制造工程 [J]. 材料保护, 2000, 33(1): 1-4.
- [3] 陈永雄, 徐滨士, 许一. 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 [J]. 中国表面工程, 2006, 19(5): 169-173.
- [4] 张海鸥, 郭明亮, 王桂兰. 等离子熔射快速制模中机器人运动轨迹生成方法及实践 [J]. 机械科学与技术, 2005, 24(10): 1135-1137.
- [5] 朱东波. 基于 RP 技术的板料成形模具快速制造系统研究 [D]. 西安交通大学机械工程学院, 2001.
- [6] Grant P S, Duncan S R, Roche A, et al. Scientific, technological, and economic aspects of rapid tooling by electric arc spraying forming [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2006, 15(4): 796-801.
- [7] Xu Binshi, Liang Xiubing, Chen Yongxiong, et al. Development of automatic high velocity arc spraying process and new coating materials [C]. The 4th Asian Thermal Spray Conference, 2009, 10, Xi'an, China.
- [8] Georgieva P, Thorpe R, Yanskie A, et al. Nanocomposite materials: an innovative turnover for the wire arc spraying technology [J]. Advanced Materials & processes, 2006(8): 68-69.

作者地址: 北京市丰台区杜家坎 21 号 100072  
Tel: (010)66718475  
E-mail: liangxiubing@yahoo.com.cn

#### •本刊讯•

### 徐滨士院士教学、科研文选》出版

由装甲兵工程学院编辑整理的《徐滨士院士教学、科研文选》(以下简称《文选》), 2010年4月已由化学工业出版社出版发行。

《文选》共选录了88篇有代表性的文稿, 其中中文56篇, 英文32篇。这些文稿是从几十年来徐滨士院士在国内外学术期刊上发表的学术论文, 在国际、国内、军内重要会议上发表的会议论文, 在不同出版物刊登的特邀文章, 以及在不同场合发言时的讲话稿等1000余篇文稿里精心挑选出来的, 文稿的时间跨度近30年(1982~2010年), 并按维修工程、表面工程、再制造工程、装备综合保障技术、教学改革与人才培养、科研思维等六个方面进行了分类。《文选》以他对学科的宏观思维、整体布局及顶层设计方面的文稿为主, 以专业技术方面的文稿为辅。《文选》的前部还收录了徐滨士院士近60年(1953~2010年)中有代表性的珍贵工作照和生活照52张。

徐滨士院士的教学、科研思路有一条清晰的主脉络可以把握, 那就是: 以提升装备保障能力为宗旨, 以装备维修为主线, 以创新为灵魂, 以学科建设为龙头, 坚持“教学改革与科学研究”相结合、“开放交流与自主创新”相结合、“基础研究与技术应用”相结合, 运用“系统、交叉、复合、综合”的方法, 推动、创立了具有中国特色的维修工程、表面工程和再制造工程的理论与技术体系。

《文选》的编辑出版, 有利于更好地梳理徐滨士院士在教学、科研方面的成果, 把握徐滨士院士在学科创新上的发展脉络, 探讨徐滨士院士学术思想的灵魂与真谛, 供相关专业的教学科研人员学习借鉴; 更有利于培养锻炼青年学者的科学素质, 增强青年学者的荣誉感与责任心, 加快青年学者的成才步伐。

(王海斗供稿)