

# 表面技术在锅炉一次风机叶片再制造中的应用研究

冯驰<sup>1</sup>, 丁彰雄<sup>1</sup>, 刘正强<sup>2</sup>, 黄宏伟<sup>2</sup>, 史恒惠<sup>2</sup>, 谢潇<sup>1</sup>

(1. 武汉理工大学 能源与动力工程学院, 武汉 430063;

2. 中电投河南电力有限公司技术信息中心, 郑州 450000)

**摘要:** 目的 将表面技术应用于锅炉一次风机叶片的再制造, 以大幅地提高叶片的表面性能和延长其使用寿命。方法 以锅炉一次风机叶片的失效机理为依据, 制定一次风机叶片再制造的主要工艺过程, 采用高速电弧喷涂 (HARC) 工艺制备了四种颗粒增强金属基复合 (MMC) 涂层, 采用干砂冲蚀磨损试验机对涂层的冲蚀磨损性能进行了研究, 对抗冲蚀性能优异的 K99A 和 K99B 涂层进行了孔隙率、显微硬度、金相结构等性能试验。结果 在 30° 和 90° 两种冲蚀角度下, 相比于其他两种涂层, K99A 和 K99B 的冲蚀率较小。K99A 和 K99B 的孔隙率分别为  $(2.99 \pm 0.38)\%$  和  $(4.30 \pm 0.41)\%$ , 显微硬度分别为  $(1110 \pm 190)\text{HV}0.2$  和  $(1160 \pm 206)\text{HV}0.2$ , 综合比较, K99A 涂层具有更好的抗冲蚀磨损性能, 且 K99A 涂层的结合强度  $>42.3\text{ MPa}$ , 满足耐磨涂层要求。结论 采用氩弧焊工艺来修复一次风机叶片, 不仅可以恢复其形状和尺寸, 而且其强度及韧性可以满足使用要求。高速电弧喷涂 K99A 涂层表现出良好的抗冲蚀磨损性能, 较其他三种 MMC 涂层提高了 20% 以上。一次风机叶片再制造费用远低于新叶片费用, 且其耐磨性得到提高, 展现了极大的经济效益。

**关键词:** 表面技术; 一次风机叶片; 失效机理; 再制造; 冲蚀; 涂层

**中图分类号:** TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2016)09-0082-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.09.013

## Application Research of Surface Technology in Primary Fan Blades Remanufacture of Boiler

FENG Chi<sup>1</sup>, DING Zhang-xiong<sup>1</sup>, LIU Zheng-qiang<sup>2</sup>, HUANG Hong-wei<sup>2</sup>, SI Heng-hui<sup>2</sup>, XIE Xiao<sup>1</sup>

(1. School of Energy and Power Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;

2. CPI Henan Power Limited Company Technology and Information Center, Zhengzhou 450000, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To apply surface technology to the remanufacture of primary fan blades of boiler to greatly improve the blades' surface properties and prolong the service life. **Methods** Based on the analysis of the failure mechanisms of primary fan blades, main remanufacturing processes of primary fan blades were developed. Four kinds of particle reinforced metal matrix composited (MMC) coatings were deposited by high velocity arc spraying (HARC). Erosion properties of coatings were studied by dry sand erosion test, followed by porosity, microhardness and microstructure tests of K99A and K99B coatings

收稿日期: 2016-03-15; 修订日期: 2016-03-23

Received: 2016-03-15; Revised: 2016-03-23

作者简介: 冯驰 (1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为表面工程。

**Biography:** FENG Chi (1992—), Male, Master graduate student, Research focus: surface engineering.

通讯作者: 丁彰雄 (1961—), 男, 硕士, 教授, 从事表面工程与再制造的科研与教学工作。

**Corresponding author:** DING Zhang-xiong (1961—), Male, Master, Professor, Research focus: surface engineering and remanufacturing.

which exhibited better erosion resistance. **Results** At the erosion angle of  $30^\circ$  and  $90^\circ$ , the erosion rate of K99A and K99B coatings was smaller than that of the other two coatings. The porosity of K99A and K99B coatings were  $(2.99 \pm 0.38)\%$  and  $(4.30 \pm 0.41)\%$ , and the microhardness of them were  $(1110 \pm 190)\text{HV}0.2$  and  $(1160 \pm 206)\text{HV}0.2$ . By comprehensive comparison, K99A coating exhibited better erosion wear resistance. And the adhesive strength of K99A coating was greater than  $42.3\text{ MPa}$  that met the requirements of wear-resistant coatings. **Conclusion** Argon arc welding is used to repair primary fan blades, which can not only restore their shape and size but also make their strength and toughness meet the service requirements of blades. The K99A coating deposited by HARC possesses the excellent erosion resistance, 20% better compared with the other. the remanufacturing cost of primary fan blades is far lower than that of the new ones, and the wear resistance of the blades after remanufacturing is improved with great economic benefits.

**KEY WORDS:** surface technology; primary fan blades; failure mechanisms; remanufacture; erosion; coatings

目前, 火力发电仍是我国电力供应的主要方式, 全国总发电量的 80% 来自于火力发电。一次风机是火电厂锅炉的重要辅机之一, 主要起着干燥和输送煤粉的作用, 提供了制粉系统的干燥通风量和磨煤通风量。一次风机的安全运行将直接影响整台机组的安全、可靠、经济运行。由于单机发电容量逐渐增大, 为确保机组经济、安全地运行, 对风机的结构、性能和运行调节的要求更加严格。

由于一次风经过的环节多, 风道阻力大, 所以要求一次风压高, 风机多采用两级动叶可调轴流, 因而空气中的颗粒物会使叶片磨损且相较于送风机更加严重。风机叶片磨损后不仅会使风机的工作效率下降, 而且会引起振动加剧, 这样很容易导致风机损坏, 使机组的安全运行受到影响, 风机叶片需要及时更换<sup>[1-3]</sup>。由于风机叶片价格昂贵, 由此产生巨大的经济损失。

再制造工程的指导思想是产品全寿命周期理论, 它的目标是提升废旧产品性能, 始终奉行优质、节能、高效、节材、环保的准则, 运用先进技术和产业化生产的方法, 去修复及改造废旧产品的一系列技术手段或工程活动的总称, 在一次风机叶片再制造中可得到广泛的应用。目前在风机叶片的再制造中, 表面技术由于具有工艺灵活、涂层材料和涂层厚度选择范围广、生产效率高等特点, 使其得到大量的应用<sup>[4-9]</sup>。本文在对一次风机叶片失效机理进行分析的基础上, 介绍有关叶片再制造主要工艺过程, 并阐述采用高速电弧喷涂 (HARC) 技术强化叶片时涂层制备方法和涂层材料的选择问题。

## 1 一次风机叶片的失效机理

一次风机入口即为自然环境中的空气, 理论上

空气质量要远远优于烟气。目前从节能的角度考虑, 一次风机叶片采用铝合金制造, 一般未采用防磨处理。然而在实际工作中, 一次风机周边紧邻磨煤机、电除尘等大型设备, 尤其是磨煤机在运行一段时间后, 由于磨损带来的漏粉现象频繁发生, 而电除尘设备也会出现漏灰情况, 因此一次风机入口空气质量差是造成叶片磨损的主要原因。其次, 系统设计有热风再循环, 当冬季环境温度低时, 为避免锅炉尾部受热面的低温腐蚀问题, 经过空预器的一部分热风重新送回风机入口, 其出口热风不可避免地要将烟气中的灰尘带走一部分, 这就导致冬季热风再循环使用时, 一次风机入口空气中必然含有大量灰粒, 从而加剧叶片的磨损。另外, 一次风机为两级动叶可调式, 风压高, 空气中相同颗粒的杂质对叶片的磨损更严重。

影响一次风机叶片失效的因素较多, 主要包括: 煤灰的浓度及温度、叶片材质及制造工艺、风机叶片开度、冲蚀角度与冲蚀时间等。由于风机叶片开度较小, 气流在动叶片处产生急速变向, 叶片易产生小冲角局部冲蚀磨损。冲蚀角度的影响因素很多, 变化范围较大, 动叶片冲蚀磨损的显著特点就在于此, 叶片的前缘最容易产生大角度冲蚀磨损, 而动叶片绝大部分部位的冲蚀角度比较小, 叶片大部分的磨损在小角度冲蚀磨损的范围内。冲蚀时间取决于动叶片位置, 动叶片前缘始终处于冲蚀状态, 冲蚀时间最长, 总体而言, 冲蚀时间较长的是压力面, 冲蚀时间较短的是吸力面, 随着冲蚀时间的延长, 冲蚀磨损变严重。

图 1 为一次风机叶片磨损后的状态, 由此可见, 叶片磨损最严重的部位已经变成豁口状 (局部磨穿), 较严重部位则磨成薄刃状, 其他一些部位的表面则磨出一道道微细沟槽。



图 1 一次风机叶片磨损后的状态  
Fig.1 Worn state of primary fan blades



图 2 补焊后的一次风机叶片  
Fig.2 Primary fan blades after repair welding

## 2 一次风机叶片的再制造工艺

再制造具有在不改变叶片物理形态和本体材料的情况下,充分吸纳各种制造和表面先进技术,使叶片性能得到回复与提升的特性。

一次风机叶片再制造时,其主要工艺过程为:1)叶片清洗及除垢;2)检测叶片的磨损状况,确定叶片不同部位的修复及防磨处理方案;3)制作叶片样板;4)对叶片基体磨损严重部分进行补焊;5)按样板修磨补焊层;6)对叶片进行二次补焊;7)按样板对叶片进行二次精修;8)补焊叶片的探伤;9)喷砂处理。采用棕刚玉对叶片表面进行压力式喷砂,其目的是对叶片进行粗化处理,提高涂层与基体的结合强度;10)喷涂。针对叶片不同部位制备不同厚度的耐磨涂层;11)涂层后处理。

叶片补焊在风机叶片再制造过程中是最重要的一部分工作,其目的是恢复叶片的几何及尺寸精度,保证一次风机在运行过程中有足够的出力。在补焊叶片时,要求焊层有足够的韧性、强度和与基体的结合强度,不允许焊层出现裂纹、夹渣、气孔等缺陷,同时由于一次风机叶片比较薄,在焊接过程中应避免其产生变形和烧损。由于氩弧焊具有焊缝成型好、缺陷比较少,焊缝质量高且美观,焊接效率高,热影响区窄,焊件应力、变形与裂纹倾向小等优点,因此叶片的补焊选用氩弧焊堆焊铝合金工艺,尺寸修复后的一次风机叶片如图 2 所示。

通过对一次风机叶片进行再制造,不仅让叶片的几何尺寸及形状得以恢复,同时对叶片的表面性能有很大的提升,延长了叶片的使用寿命,降低了叶片成本,因此具有显著的经济效益。

## 3 涂层设计及涂层性能试验

### 3.1 涂层材料的选择

目前,一次风机叶片防磨涂层材料主要有 Fe 基、Ni 基及金属陶瓷等。虽然 Fe 基材料性能一般,但在喷涂过程中可以使叶片不发生变形。镍基材料的种类主要有 Ni 基自熔性合金和镍基碳化钨合金,可以通过高速火焰喷涂、等离子喷涂或火焰喷熔的方法进行喷涂<sup>[10-11]</sup>。

由于颗粒增强金属基复合材料(MMC)被成功研制且电弧喷涂工艺不断进步,电弧喷涂方法越来越多地用来制备颗粒增强金属基复合(MMC)耐磨涂层。颗粒增强金属基复合材料是由塑性相与陶瓷硬质相组成的粉芯丝材,它是一种高硬度且耐磨的电弧喷涂材料。MMC 粉芯中的放热元素,在喷涂过程中会发生放热反应,使涂层与基体的结合加强,同时也加强了涂层本身的凝聚性。

虽然高速电弧喷涂 MMC 涂层的性能比 HVOF 喷涂的 WC 涂层差,但是采用高速电弧喷涂 MMC 涂层的成本低且性价比高。综合考虑经济性、可操作性,电弧喷涂的应用前景广阔。采用高速电弧喷涂技术喷涂 MMC 耐磨防磨涂层,在国内电厂的风机叶片上已得到推广应用,并取得了较好的经济效益。

在一次风机叶片表面强化处理时,涂层材料和表面技术的选择受诸多因素的影响,如叶片的形状和尺寸、材质及制造方式、原表面强化方法、仿形堆焊方法与材料、磨损部位及程度、风机工况、制造成本等。根据一次风机叶片的失效机理和不同涂层材料的特性,本研究中选用了四种 MMC 粉芯丝材,其参数如表 1 所示。

表 1 四种 MMC 粉芯丝材的参数  
Tab.1 Parameters of four kinds of MMC cored wire

Powder No.	Main chemical components	Diameter/mm	Adhesive strength/MPa	Coatings hardness(HV <sub>0.1</sub> )
K90	FeBNiSiCRe	2.0	≥50	810~1260
K99A	FeCrNiBSiCRe	2.0	≥50	910~1290
K99B	FeCrNiBSiCRe/B <sub>4</sub> C	2.0	≥50	960~1360
L88A	FeCrNiAlMo/TiB <sub>2</sub> ·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.0	≥50	920~1310

3.2 制备工艺的选择

对风机叶片的防护可以采用多种热喷涂工艺，如等离子喷涂、超音速火焰喷涂和电弧喷涂等。其中电弧喷涂具有喷涂效率高、涂层制备成本低等优点，但其缺点是涂层的性能一般。近几年，随着高速电弧喷涂工艺的发展，喷涂涂层的质量有了显著提高，该技术应用也愈来愈广泛。高速电弧喷涂技术的显著特点是喷涂粒子的飞行速度快，涂层结合强度高、孔隙率低，喷涂效率高及喷涂成本低，使得工件表面具有优异的耐磨、耐腐及耐高温等性能<sup>[12-16]</sup>。因此，本研究中选择高速电弧喷涂 MMC 陶瓷粉芯丝材的方法制备了铁基金属陶瓷复合涂层。

3.3 涂层的冲蚀磨损性能

喷涂层的冲蚀磨损性能主要取决于喷涂工艺、涂层材料、涂层的组织结构和力学性能等因素，它直接决定风机叶片的使用寿命。高速电弧喷涂四种粉末颗粒增强金属基复合芯粉丝材制备的涂层，在 30°和 90°两种冲蚀角度下的冲蚀率见图 3，可以看出，K99A 涂层在 30°和 90°两种冲蚀角度下都表现出优良的抗冲蚀性能，这说明 K99A 涂层在低角度微切削和高角度冲蚀疲劳磨损的情况下，都具有优良的抗冲蚀性能。

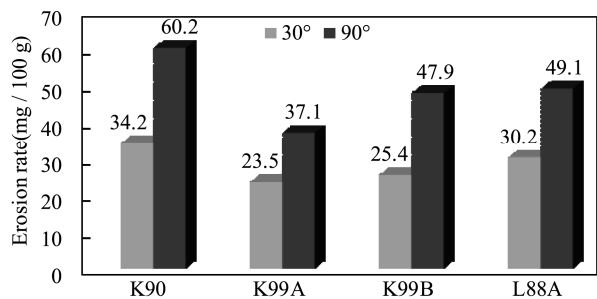


图 3 HARC 制备的 MMC 涂层的冲蚀率  
Fig.3 Erosion rate of MMC coatings by HARC

3.4 涂层的组织结构

图 4 为高速电弧喷涂（HARC）制备的抗冲蚀性能优良的 K99A 与 K99B 涂层的横截面组织形貌，可以看到涂层呈波浪状，且具有典型的层状结构特征，涂层结构较致密。采用图像法测量的 K99A 与 K99B 涂层孔隙率分别为 (2.99±0.38)% 和 (4.30±0.41)%，虽然它们都满足电弧喷涂层孔隙率小于 5%的要求，但 K99A 涂层具有更低的孔隙率。

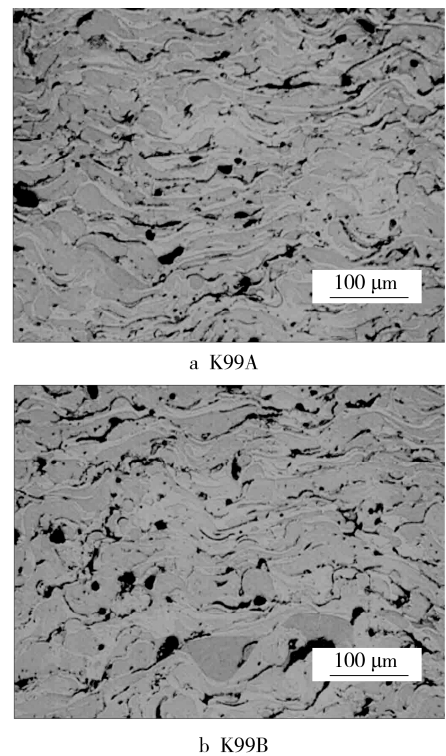


图 4 HARC 制备的 MMC 涂层的横截面组织结构  
Fig.4 Cross-sectional micrographs of MMC coatings by HARC

3.5 涂层显微硬度

显微硬度采用 HVS-1000 数显显微硬度计测试，载荷 200 g，压头保持 15 s。本次试验选取了涂层金相不同层面上的 10 个点进行测量，求出每



个涂层的平均显微硬度值。K99A 和 K99B 涂层的显微硬度分别为  $(1110 \pm 190)HV_{0.2}$  和  $(1160 \pm 206)HV_{0.2}$ , 两种高速电弧喷涂的 MMC 涂层平均显微硬度都高于  $1100HV_{0.2}$ , 且 K99B 涂层的显微硬度值略高于 K99A 涂层。

### 3.6 涂层的结合强度

涂层的拉伸结合强度试验参照 GBT 8642—2012 标准, 在 WE-300B 液压式万能试验机上进行。拉伸试样基体材质为铝合金, 尺寸是  $\phi 25 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ , 采用 TS811 型粘接剂粘接试样结合面。K99A 涂层的结合强度结果如表 2 所示。

表 2 K99A 涂层的结合强度  
Tab.2 Adhesive strength of K99A coating

Coating No.	Fracture load/kN	Fracture mode	Adhesive strength/MPa
1	23.39	Coating fracture	47.7
2	21.17	Coating fracture	43.2
3	20.71	Coating fracture	42.3
4	22.05	Coating fracture	45.0

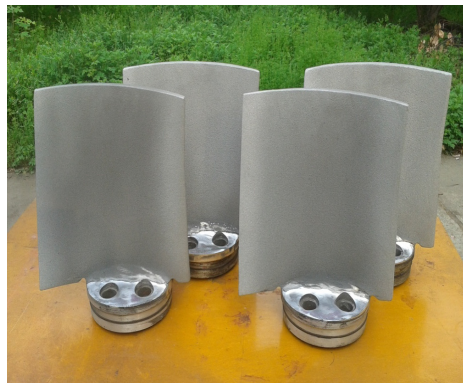
高速电弧喷涂 K99A 涂层的结合强度  $> 42.3 \text{ MPa}$ , 虽然低于喷涂材料生产厂家给出的试验值 ( $> 55 \text{ MPa}$ ), 这主要是基体材料不同所致, 但仍达到防磨涂层对涂层结合强度的要求 ( $\geq 20 \text{ MPa}$ )。

## 4 一次风机叶片耐磨涂层的制备与使用

### 4.1 一次风机叶片耐磨涂层的制备

在以上试验的基础上, 采用 HARC 工艺对一组开封电厂的一次风机叶片制备了 MMC 耐磨涂层, 进行装机试验。基体材料为铝合金, 叶片尺寸为  $210 \text{ mm} \times 220 \text{ mm}$ , 喷涂材料为 K99A 丝材 ( $\text{FeCrNiBSiCr}$ ), 涂层厚度为  $0.5 \sim 1.2 \text{ mm}$  (平均  $0.8 \text{ mm}$ ), 喷涂参数: 喷涂电压  $32 \sim 34 \text{ V}$ , 喷涂电流  $280 \sim 300 \text{ A}$ , 空气压力  $0.55 \sim 0.60 \text{ MPa}$ , 喷涂距离  $220 \sim 250 \text{ mm}$ 。

图 5a 为采用高速电弧喷涂在一次风机叶片上制备 MMC 涂层, 图 5b 为喷涂了 MMC 耐磨涂层后的一组一次风机叶片。



a 一次风机叶片上 HARC 喷涂



b 喷涂 MMC 涂层后的叶片

图 5 一次风机叶片上 HARC 喷涂 MMC 涂层  
Fig.5 MMC coating sprayed on primary fan blades by HARC

### 4.2 耐磨涂层风机叶片的装机使用

将制备了 MMC 耐磨涂层的一次风机叶片于 2014 年 4 月装机使用, 到目前为止使用效果良好, 工作正常。同种工况下未采用 MMC 耐磨涂层的叶片因部分基体已磨掉无法工作已于 2015 年 6 月报废。使用结果及分析表明: 表面具有 HARC 制备的 MMC 涂层的一次风机叶片的使用寿命可望提高 2 倍以上。

## 5 结论

1) 采用氩弧焊工艺修复失效的一次风机叶片, 不仅可以恢复叶片的形状和尺寸, 而且可以使其强度和韧性满足要求。

2) 在一次风机叶片上采用高速电弧喷涂的 MMC 涂层的结合强度大于  $42 \text{ MPa}$ , 涂层孔隙率小于 3%。

3) 高速电弧喷涂的 MMC 涂层的平均显微硬度高于  $1100HV_{0.2}$ , 具有优良的抗冲蚀磨损性能。

4) 在一次风机铝合金叶片的再制造中, 采用

高速电弧喷涂 MMC 耐磨涂层对其表面进行强化处理能大幅提高叶片的使用寿命。

5) 一次风机叶片再制造费用远低于新叶片费用, 且其耐磨性得到大幅提高, 表现出优良的技术经济性能。

## 参考文献

- [1] 冯宗田, 曹磊, 蔺晶. 轴流式一次风机喘振的控制与预防[J]. 中国电力, 2011, 44(6): 22—25.  
FENG Zong-tian, CAO Lei, LIN Jing. Control and Prevention of Surge in Axial Primary Air Fan[J]. Electric Power, 2011, 44(6): 22—25.
- [2] 范毅, 丁彰雄, 张云乾. 纳米 WC/12Co 涂层在轴流式引风机叶片防磨上的研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2006, 39(3): 135—139.  
FAN Yi, DING Zhang-xiong, ZHANG Yun-qian. Study on WC/12Co Nanostructured Coatings in Erosion Resistance of Axial-flow Induced Draft Fan's Blade[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2006, 39(3): 135—139.
- [3] 赵辉, 刘兵, 丁彰雄, 等. 燃煤锅炉轴流式引风机叶片耐磨涂层的应用研究[J]. 中国电力, 2007, 40(3): 23—27.  
ZHAO Hui, LIU Bing, DING Zhang-xiong, et al. Application Research on the Anti-wear Coatings of Axial-Flow ID Fan Blades for Coal-Fired Boiler[J]. Electric Power, 2007, 40(3): 23—27.
- [4] 丁彰雄, 赵先银, 曾志龙. 燃煤锅炉引风机叶片再制造应用研究[J]. 中国电力, 2010, 43(7): 48—52.  
DING Zhang-xiong, ZHAO Xian-yin, ZENG Zhi-long. Application Study of Induced Draft Fan Blades Remanufacturing in Coal-Fired Boiler[J]. Electric Power, 2010, 43(7): 48—52.
- [5] 徐滨士. 舰船装备再制造防腐蚀技术研究及应用[J]. 中国材料进展, 2014, 33(7): 405—413.  
XU Bin-shi. Research and Application of Anti-Corrosion Remanufacture on Ship Equipment[J]. Materials China, 2014, 33(7): 405—413.
- [6] 谭立光, 姚书典, 李爱军. 再制造工程技术在冶金工业中的应用[J]. 冶金装备, 2013(208): 122—125.  
TAN Li-guang, YAO Shu-dian, LI Ai-jun. Application of Remanufacture Engineering Technology in Metallurgical Industry[J]. Metallurgical Equipment, 2013(208): 122—125.
- [7] 谭俊, 陈建敏, 刘敏, 等. 面向绿色制造与再制造的表面工程[J]. 机械工程学, 2011, 47(20): 95—103.  
TAN Jun, CHEN Jian-min, LIU Min, et al. Surface Engineering towards Green Manufacturing and Remanufacturing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(20): 95—103.
- [8] 丁彰雄, 胡一鸣, 赵辉. 脱硫循环泵关键零件再制造技术及涂层应用研究[J]. 热喷涂技术, 2013, 5(3): 8—14.  
DING Zhang-xiong, HU Yi-ming, ZHAO Hui. Research on Remanufacturing Technology and Coatings Application of Desulfurization Recycle Pump's Key Components[J]. Thermal Spray Technology, 2013, 5(3): 8—14.
- [9] 彭广, 岳文辉, 胡志远. 面向工程机械再制造的表面工程技术及其应用[J]. 装备制造技术, 2014, (7): 196—198.  
PENG Guang, YUE Wen-hui, HU Zhi-yuan. Application of Surface Engineering Technology in Construction Machinery Remanufacturing[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2014, (7): 196—198.
- [10] 刘燕, 陈永雄, 梁秀兵, 等. 基于高速电弧喷涂技术的耐磨涂层的研究进展[J]. 材料导报, 2010, 24: 44—46.  
LIU Yan, CHEN Yong-xiong, LIANG Xiu-bing, et al. Anti-wear Coatings Based on High Velocity Arc Spraying Technology[J]. Materials Review, 2010, 24: 44—46.
- [11] 赵辉, 王群, 丁彰雄, 等. 高速电弧喷涂 LX88A 涂层的抗磨粒磨损性能[J]. 电镀与涂饰, 2008, 27(5): 51—53.  
ZHAO Hui, WANG Qun, DING Zhang-xiong, et al. Abrasive Wear Resistance of LX88A Coating Prepared by High Velocity Arc Spraying[J]. Electroplating & Finishing, 2008, 27(5): 51—53.
- [12] 郭立峰, 胡华勇, 郝晓军. 高速电弧喷涂技术在电厂风机叶轮上的应用研究[J]. 河北电力技术, 2001, 20(3): 41—42.  
GUO Li-feng, HU Hua-yong, HAO Xiao-jun. A Study on Application of High Speed Arc Spraying Technology on Blower Impeller in Power Plant[J]. Hebei Electric Power Technology, 2001, 20(3): 41—42.
- [13] 梁国, 李壮志, 颜飞, 等. 电弧喷涂技术应用研究进展[J]. 新技术新工艺, 2015, (2): 129—132.  
LIANG Guo, LI Zhuang-zhi, YAN Fei, et al. Research and Application of Progress of Arc Spraying[J]. New Technology & New Process, 2015, (2): 129—132.
- [14] 石天佐. 高速电弧喷涂技术在电站锅炉防护中的应用[J]. 广州化工, 2013, 41(8): 42—44.  
SHI Tian-zuo. Application of High Velocity Electric Arc Spray on Power Plant Boiler[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2013, 41(8): 42—44.
- [15] 郭保军, 王向前. 热喷涂技术在引风机叶片防护领域上的应用[J]. 企业技术开发, 2009, 28: 59—60.  
GUO Bao-jun, WANG Xiang-qian. Fan Thermal Spray Technology in the Fields of Protection, the Application of Blade[J]. Technological Development of Enterprise, 2009, 28: 59—60.
- [16] 宋斌, 陈铭, 陈利修. 喷砂预处理工艺对涂层结合强度的影响[J]. 机械设计与研究, 2013, 29(3): 70—72.  
SONG Bin, CHEN Ming, CHEN Li-xiu. The Impact of Sandblasting Preprocessing on Bonding Strength of High Velocity Arc Spraying Coating[J]. Machine Design and Research, 2013, 29(3): 70—72.