

能量输出幅度对电火花沉积 Ni201 修复层 界面行为的影响

赵运才, 刘宗阳, 杨雷雷

(江西理工大学 机电工程学院, 江西 赣州 341000)

摘要: **目的** 获得电火花沉积质量较好的 Ni201 修复层。**方法** 运用电火花沉积技术, 采用 DHD-6000 型电火花沉积设备在 Q235 钢表面制备 Ni201 修复改性层, 利用电子扫描显微镜 (SEM)、能谱仪 (EDS)、X 射线衍射 (XRD) 等检测方法, 研究修复层与基体结合界面的微观结构、元素分布、相组成以及修复层表面残余应力。**结果** Ni201 修复层组织均匀致密, 基体与修复层之间发生元素扩散; 修复层结合界面处主要由 Fe_{10.8}Ni、 γ (Fe, Ni) 固溶体、CoFe_{15.7} 及 Fe 相组成; Ni201 修复层表面残余应力随能量输出幅度的增加而增大, 在 40% 与 45% 能量输出条件下, 残余应力分别为 -38.1, -81.6 MPa, 残余应力较小。**结论** Q235 钢基体与 Ni201 修复层元素相互扩散, 基体与修复层之间形成了冶金结合, Ni201 修复层为冶金结合层。再制造修复设备工艺参数选择是决定修复层质量的关键因素, 能量输出幅度为 40% 的修复层质量优于能量输出幅度为 45%。

关键词: 电火花沉积; 再制造; Q235 钢; 修复层; 界面行为; 残余应力

中图分类号: TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2015)12-0069-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.12.011

Effect of Power Output Amplitude on Interface Behavior of Ni201 Restoration Layer Prepared by Electro-spark Deposition on Q235 Steel

ZHAO Yun-cai, LIU Zong-yang, YANG Lei-lei

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

ABSTRACT: **Objective** To obtain a Ni201 restoration layer with a better quality by electro-spark deposition. **Methods** Using electro-spark deposition technology, Ni201 restoration layer was prepared on Q235 steel surface with the DHD-6000 type electro-spark deposition equipment, the microstructure, chemical elements distribution, phase composition of the bonding interface between the restoration layer and the substrate, and residual stress on the surface of the restoration layer were investigated by means of scanning electron microscopy, energy dispersive spectrometer, and X-ray diffraction. **Results** The microstructure of Ni201 resto-

收稿日期: 2015-08-08; 修订日期: 2015-09-18

Received: 2015-08-08; Revised: 2015-09-18

基金项目: 国家自然科学基金(50965008); 江西省教育厅科技计划项目(GJJ14424)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(50965008) and the Science & Technology Plan Project of Jiangxi Province Education Department (GJJ14424)

作者简介: 赵运才(1964—), 男, 湖南人, 博士, 教授, 主要从事表面工程、再制造工程、摩擦磨损与抗磨技术方面的研究。

Biography: ZHAO Yun-cai (1964—), Male, from Hunan, Ph. D., Professor, Research focus: surface engineering, remanufacture engineering, tribology and wear resistance technology.

ration layer was uniform and dense, and there was interdiffusion of elements between the restoration layer and the substrate, the main phases of the restoration layer bonding interface were composed of Fe_{10.8}Ni, γ (Fe, Ni), CoFe_{15.7} and Fe, the residual stress on the surface of the restoration layer increased with the increase of power output amplitude, the residual stress was -38.1 MPa and -81.6 MPa under the conditions of 40% and 45% energy output, respectively, and the value of residual stress was low.

Conclusion The interdiffusion of elements between the Ni201 restoration layer and the Q235 steel substrate indicated formation of metallurgical bonding between the substrate and the restoration layer, and the Ni201 restoration layer was a metallurgical bonding layer. The key factor for the quality of the restoration layer was determined by the process parameters selection of remanufacturing repair equipment, and the quality of the restoration layer prepared with an energy output amplitude of 40% was better than that prepared with an energy output amplitude of 45%.

KEY WORDS: electro-spark deposition; remanufacture; Q235 steel; restoration layer; interface behavior; residual stress

电火花沉积(Electro-Spark Deposition, ESD)作为重要的表面强化修复技术,对受损机械零部件的修复及再制造具有重要意义,其实质是一种微弧焊接工艺^[1],与电刷度、激光熔覆和热喷涂等表面强化技术相比,电火花沉积具有对基体热输入低、沉积层结合强度高、工艺特点以及成本低、修复效率高等优势,广泛应用于航空航天、医疗、矿山、汽车、模具等领域^[2-3]。

随着表面工程领域的不断发展,电火花沉积已经成为再制造领域中一项重要的表面技术。国内外许多学者对电火花沉积修复层的微观组织及力学性能等方面进行了研究^[4-10],王燕等^[11]研究了 Q235 钢电火花堆焊 DH-50 镍基焊丝接头的行为。然而,但在不同电火花沉积参数条件下,对 Q235 钢表面沉积修复层与其结合界面行为的影响研究较少。本文对不同能量输出幅度(输出能量百分比)条件下修复层的界面行为进行研究,分析修复层与基体的结合情况、微观组织成分,并对比分析不同沉积参数下修复层界面的残余应力大小。以期电火花沉积技术在再制造领域的实际应用与推广提供理论依据。

1 实验

实验以纯 Ni201 为电极材料,主要化学成分(以质量分数计)为: Ni+Co 99.9%, Si 0.03%, C 0.01%, Fe 0.04%, Cu 0.01%, Mn 0.002%。以 Q235 钢为基体,利用 DHD-6000 型电火花沉积设备,在氩气保护环境下制备 Ni201 修复层。沉积设备主要参数如下:功率 3 kW,输出频率 40 ~ 1200 Hz,弧比(微弧放电时间长短的百分比)、输出幅度和转速 0% ~ 100% 连续可调。沉积基体尺寸为 50 mm×50 mm×10 mm。先用 400 目砂纸将基体待沉积面的氧化层去除,再用丙酮溶液对基体进行清洗去污并风干,弧比为 35% ~ 40%,其余参数见表 1,沉积时电极伸出沉积枪的长度

为 10 mm。

表 1 沉积工艺参数

Tab. 1 Processing parameters for deposition

Number	Frequency / Hz	Power output /%	Arc rate /%	Rotational speed/ (r·min ⁻¹)	Gas-flow rate/ (L·min ⁻¹)
1	1000	40	35 ~ 40	900	6
2	1000	45	35 ~ 40	900	6

基体 Q235 钢的化学组成(以质量分数计)为: C 0.14% ~ 0.22%, Mn 0.30% ~ 0.65%, Si 0.30%, S 0.05%, P 0.045%, Cr 0.03%, Ni 0.03%, Cu 0.03%。据国际焊接学会推荐的碳当量公式^[12]计算,得 Q235 钢的碳当量小于 0.40%,基体 Q235 钢淬硬性较小,焊接性能良好,不需预热处理。

修复层制备完成后,利用线切割将被修复基体制成 10 mm×10 mm×10 mm 的检测试样,对残余应力检测试样不做抛磨处理,以避免抛磨过程对修复层残余应力产生影响。待残余应力检测完毕后,依次分别用 800 目,1500 目,3000 目的砂纸和金相抛光机将检测试样横截面抛光成光亮的镜面。用于金相组织观察的试样,基体 Q235 钢部分用 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀, Ni201 修复层部分用王水腐蚀。

采用 MLA650F 型扫描电子显微镜,对修复层与基体结合界面的显微形貌和组织结构进行观察分析。结合能谱仪(EDX)分析修复层元素分布情况,修复层物相成分以及表面残余应力均采用 Empyrean 型 X 射线衍射仪进行检测分析^[13]。

2 结果与讨论

2.1 修复层界面组织分析

图 1 为基体 Q235 钢的金相组织。图中显示组织

中主要分布着片状铁素体和珠光体,由于放大倍数较小(20 \times),珠光体呈现一团黑色。图2中修复层为呈板条状的铸态组织,是沉积过程中形成的熔化微区在冷却时形成的柱状晶组织,主要沿着温度梯度降低的方向生长,其中含有少量夹杂和细小弥散的析出相。

修复层与基体结合界面的宏观形貌如图3所示。

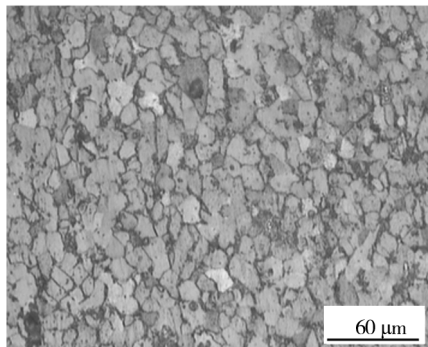


图1 基体组织(20 \times)

Fig. 1 Substrate structure

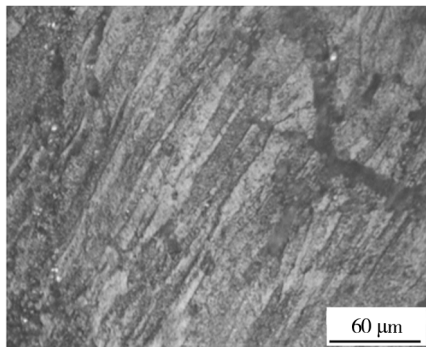


图2 修复层组织(20 \times)

Fig. 2 Restoration layer structure

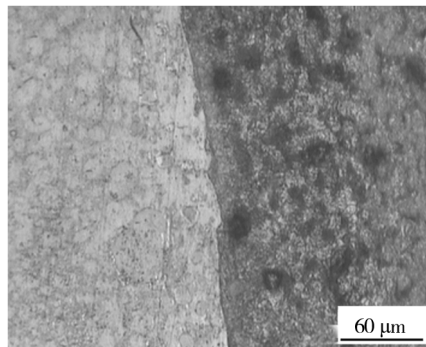
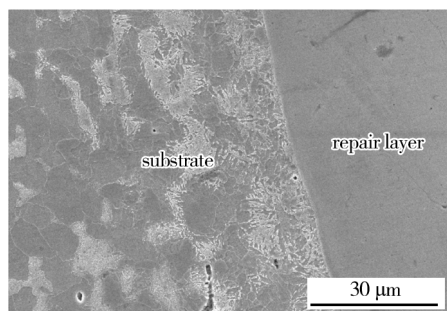


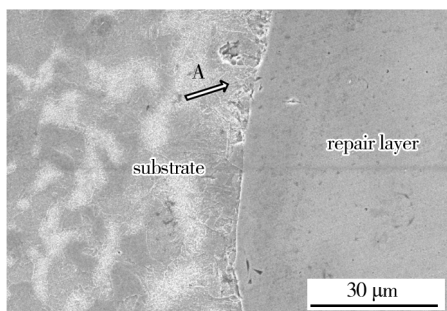
图3 结合界面宏观形貌

Fig. 3 Macroscopic morphology of the bonding interface

图4为能量输出幅度取值40%与45%时,在电子扫描显微镜下放大4000倍的界面形貌图。图4a中基体与修复层结合状况良好,图4b结合界面的熔合线处出现部分沉积缺陷,如图4b中区域A所示。从图4中可以看出,基体与修复层结合紧密,修复层组织均匀,结构致密,没有产生明显影响结合性能的裂纹和孔洞,基体与修复层实现了结合强度较高的冶金结合。



a 输出幅度40%



b 输出幅度45%

图4 修复层界面形貌

Fig. 4 Interface morphology of the restoration layer

修复层与基体之间存在一条清晰而又结合紧密的熔合线,由于沉积过程中微小熔区内微弧脉冲放电能量不均匀,导致熔合线并非理想的直线。结合处没有出现缝隙等明显修复缺陷,基体一侧分布着一些黑色团状物质,这是由于在沉积过程中析出的碳化物,经腐蚀过度变黑所致。

能量输出幅度为45%时,结合界面熔合线附近部分区域出现如图4b区域A所示微观沉积缺陷,此处缺陷的产生与综合反映焊接工艺参数的线能量大小(即微弧放电对单位长度焊缝输入的能量大小)有关^[14]。

由于电火花沉积实质是一种微弧焊接工艺,当能量输出幅度提高时,沉积过程中线能量随之增加,微熔池内高温持续时间得到延长,致使晶粒粗化,脆化倾向增大,导致A处缺陷的产生。因此,为避免修复层中出现过多类似A处的微观缺陷,控制沉积过程中能量的输出幅度显得尤为重要。

2.2 修复层界面元素分布

能量输出幅度为40%与45%的元素能谱线扫描结果如图5所示,其中线扫描长度为41。图中显示在两种不同能量输出幅度下,基体中的Fe元素与电极Ni201中的Ni和Co两种主要元素均发生了相互扩散现象,由基体到修复层,Fe元素含量逐渐降低,Ni元素含量逐渐增加,说明两者扩散的主要方向不同,Fe是从基体向修复层扩散,而Ni是由修复层向基体扩散。从线扫描结果曲线可以看出,图5b所示Fe元素在修复层中的含量比图5a修复层所含Fe元素的量高,由于能量输出幅度增大,熔池温度随之升高,单次沉积熔化基体的量增加,促使基体与电极材料融合较为充分。因此,这两种不同参数下制备的修复层中Fe元素的含量有所不同,但含量差别不明显(约10%左右)。这是由于修复层为多道沉积叠加而成,

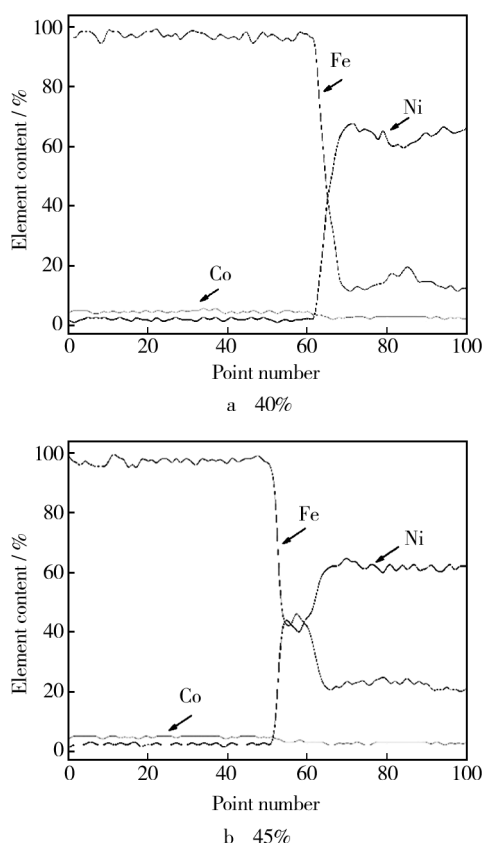


图5 结合界面元素线扫描结果

Fig.5 Element line-scanning analysis results of the bonding interface

第二道修复层是在第一道的基础上形成,电极材料与基体材料没有进行直接接触;在第二道沉积过程中,高温熔池内的金属以电极材料和第一道修复层为主。因此,Fe和Co分别在修复层和基体中的含量均不高。图5b显示Fe和Ni元素的线扫描曲线在熔合线靠近修复层一侧出现了一段狭小的缓冲平台,表明在修复层与基体结合界面处存在一个元素融合的过渡区,与图5a对比可知,输出幅度为40%的过渡区更加窄小,可能与沉积过程中能量输出大小有关。

鉴于以上对元素线扫描结果的定量分析,下面仅对能量输出幅度为45%时的元素面分布进行定性分析,元素面分布结果如图6所示。结果显示Fe、Ni、Co元素在修复层界面处整体分布均匀,元素含量过渡层次分明,与线扫描结果相一致。从图6c可以看出,Ni元素在基体区域的含量急剧减少,由于沉积过程中产生的高温使沉积点处的基体处于熔融状态,当旋转电极与基体接触时,部分液态基体金属附着凝固在电极表面形成一层包裹层,阻碍了电极元素与基体元素的融合扩散,导致元素Ni的含量由修复层到基体急剧减少。Co元素在界面处分布均匀,含量变化不明显,因为沉积过程中作为溶质的Co金属半径(0.125 nm)与溶剂Fe金属半径(0.126 nm)接近,两者易于产生置换固溶体,因此在基体与修复层中都分布着一定含

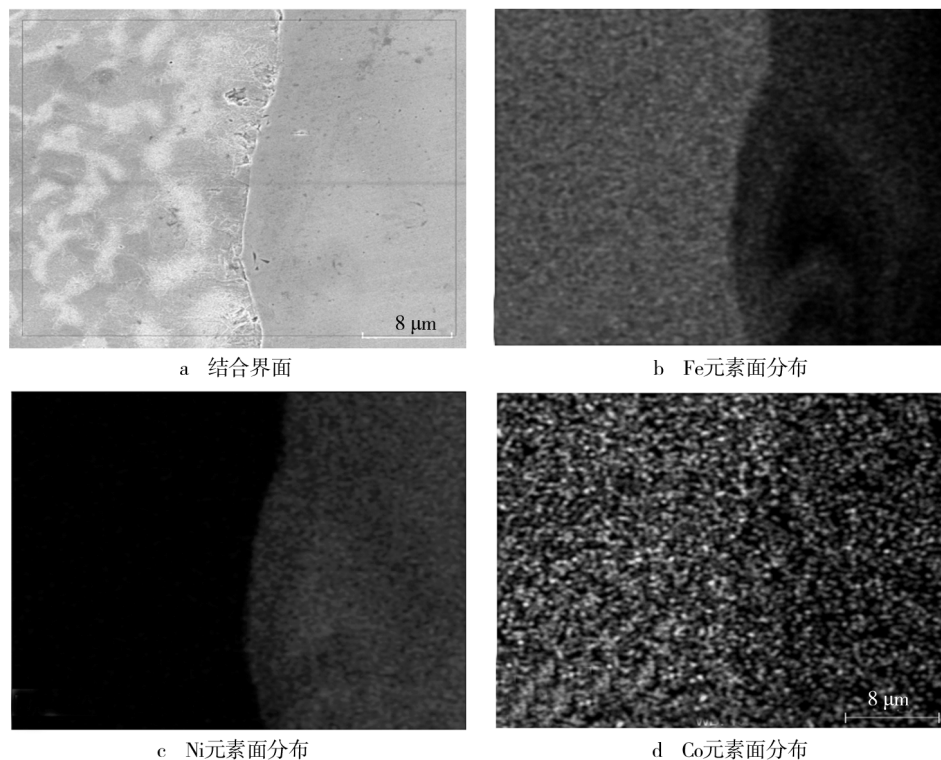


图6 结合界面元素分布图

Fig.6 EDX element distribution of the bonding interface

量的 Co 元素,同时产生固溶强化作用,有利于提高修复层强度。

2.3 物相分析

对 Ni201 修复层与基体的结合界面进行 X 射线衍射分析,如图 7 所示。可以判断,修复层与基体结合界面处主要由铁镍合金 Fe10.8Ni、 γ (Fe, Ni) 固溶体、CoFe15.7 及 Fe 相组成。新相的形成说明电火花沉积修复层不是电极材料在基体上的简单涂覆,而是两者进行化学冶金融合的过程。

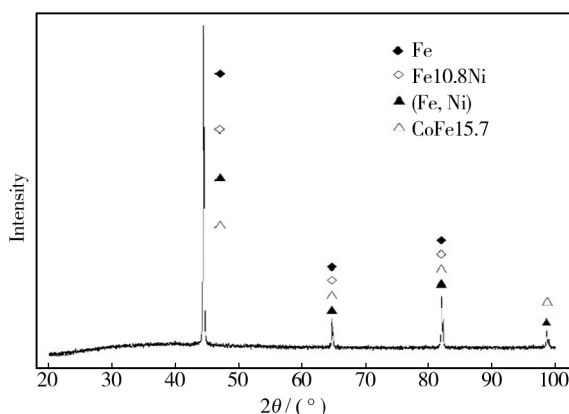


图7 修复层结合界面 XRD 衍射图

Fig.7 X-ray diffraction pattern of the restoration layer bonding interface

2.4 残余应力分析

图 8 是利用 Empyrean 型 X 衍射仪对修复层表面残余应力的检测结果。从图中可以直观看出,能量输出幅度为 40% 时,残余应力为 -38.1 MPa,当输出幅度增加到 45% 时,残余应力为 -81.6 MPa,负号表明残余应力均为压应力,修复层压应力的形成可能与熔化过程中,受热膨胀受限所产生的不均匀压缩塑性变形在冷却阶段未被因收缩产生的拉伸应力完全卸载,以及沉积过程中旋转电极与基体高频撞击有关。残余应力随着能量输出幅度的提高而增大,说明修复层残余应力大小受能量输出幅度的直接影响,由于能量输出的增加,使得微弧放电对单位长度修复层输入的热量增加,提升了沉积最高温度,致使沉积区域与基体未受热部分的温度梯度变大,快速升温与冷却的过程最终导致修复层残余应力增大。

一般情况下,修复层与基体的结合强度大小不超过 100 MPa^[15]。修复层表面残余应力虽然受到能量输出幅度增加的影响而增大,但始终都在修复层与基体结合强度范围之内,这与材料的热力学性能有关。

由于电火花沉积过程中可以使沉积区域的温度瞬间达到 8000 ~ 25000 °C,材料的屈服强度会因温度的升高而降低,当温度升高到一定程度时,材料会发生屈服以抵消受到的应力。因此,电火花沉积的 Ni201 修复层表面的残余应力不会太大,修复层制备完成后也无需进行任何热处理,同时,残余压应力的存在有助于提高修复层的抗疲劳强度。

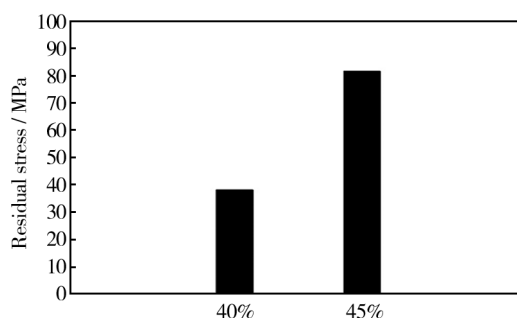


图8 修复层表面残余应力

Fig.8 Residual stress on the surface of the restoration layer

3 结论

1) 能量输出幅度分别为 40% 和 45% 时,修复层组织均匀,结构致密,在结合界面处发生元素相互扩散现象,说明电火花沉积的 Ni201 修复层与基体 Q235 钢实现了结合强度较高的冶金结合。输出幅度为 40% 时,结合界面熔合线处光滑均匀,无结合缺陷;输出幅度为 45% 时,熔合线附近有部分沉积缺陷产生,前者较后者结合良好。

2) 在修复层界面处检测到 Fe10.8Ni、 γ (Fe, Ni) 固溶体、CoFe15.7 等新相的存在,表明电极材料与基体材料发生了冶金化学融合反应,修复层为冶金结合层。

3) 受能量输出幅度的影响,在 40% 与 45% 输出幅度下的修复层表面残余应力分别为 -38.1 MPa 和 -81.6 MPa,且为压应力,对修复层的抗疲劳强度会产生有利影响。综合以上分析,Q235 钢表面电火花沉积 Ni201 修复层的综合质量在能量输出幅度取值 40% 时较好。

参考文献

- [1] 李占明,朱有利,孙晓峰,等. 电火花沉积技术的研究与应用进展[J]. 热加工工艺,2013,42(24):32—36.
LI Zhan-ming, ZHU You-li, SUN Xiao-feng, et al. Develop-

- ment in Research and Application of Electro-spark Deposition Technology [J]. Hot Working Technology, 2013, 42 (24):32—36.
- [2] 田亮,刘振英,罗宇,等. 面向再制造的硬面堆焊技术研究现状和展望[J]. 电焊机,2015,45(2):11—18.
TIAN Liang, LIU Zhen-ying, LUO Yu, et al. Status and Development Prospects of Hardfacing Technology for Remanufacturing[J]. Electric Welding Machine, 2015, 45(2):11—18.
- [3] 董晨竹,邢斌赛,郝杰,等. 电火花沉积 Fe 基涂层的组织及耐磨性能[J]. 表面技术,2013,42(2):37—39.
DONG Chen-zhu, XING Bin-sai, HAO Jie, et al. Microstructure and Wear Properties of Fe-based Coating Prepared by Electrospark Deposition [J]. Surface Technology, 2013, 42 (2):37—39.
- [4] 孙凯伟,于华,吴公一,等. TA2 表面电火花沉积 NiCr 涂层的界面行为[J]. 焊接技术,2015,44(4):10—12.
SUN Kai-wei, YU Hua, WU Gong-yi, et al. Interface Behavior of NiCr Coating on TA2 Produced by Electrospark Deposition [J]. Welding Technology, 2015, 44(4):10—12.
- [5] ZHAO Yan-ping, GONG Jian-ming, WANG Yan-fei, et al. Effect of Start/Stop Position Distribution on Residual Stresses in Multi-pass Welded 12Cr1MoV/P91 Dissimilar Pipe [J]. International Journal of Steel Structures, 2014, 14(3):539—546.
- [6] 王建升,王华昆,钟毅,等. H13 钢电火花沉积层组织结构的研究[J]. 中国表面工程,2003,16(6):27—30.
WANG Jian-sheng, WANG Hua-kun, ZHONG Yi, et al. Microstructure of Electron-spark Deposited Coating on H13 Steel [J]. China Surface Engineering, 2003, 16(6):27—30.
- [7] GAO Yu-xin, ZHAO Cheng. Microstructure and Properties of Electrospark Deposition Coating on Die Steel [J]. Advanced Materials Research, 2011, 294:188—191.
- [8] 郝越峰,曹明让,曹一龙. 一种 45 钢表面电火花沉积 WC 层的新方法[J]. 表面技术,2014,43(4):97—100.
HAO Yue-feng, CAO Ming-rang, CAO Yi-long. A New Method of Depositing WC Alloying by EDM Technology on the Surface of 45 Steel [J]. Surface Technology, 2014, 43 (4):97—100.
- [9] YU Hua, SHI Hong-xin, WANG Yao-li, et al. NiCr Alloy Coating Deposited on the Surface of 35CrMo Steel by the Electrospark Process [J]. Materials Science Forum, 2008, 575/578:827—832.
- [10] EBRAHIMNIA M, MALEK GHAINI F, XIE Y J, et al. Microstructural Characteristics of the Built up Layer of a Precipitation Hardened Nickel Based Superalloy by Electro-spark Deposition [J]. Surface and Coatings Technology, 2014, 258:515—523.
- [11] 王燕,张富巨. Q235 钢电火花堆焊接头行为研究[J]. 电焊机,2014,44(3):122—125.
WANG Yan, ZHANG Fu-ju. Research on the Joint Behavior of Electro-spark Deposition on Q235 Steel [J]. Electric Welding Machine, 2014, 44(3):122—125.
- [12] 斯重遥. 焊接手册 [M]. 北京:机械工业出版社,1992.
SI Zhong-yao. Welding Handbook [M]. Beijing: China Machine Press, 1992.
- [13] 王召煜,李国禄,王海斗,等. 超音速等离子喷涂 FeCrBSi 涂层组织和残余应力分析[J]. 材料热处理学报,2012,33(1):146—149.
WANG Zhao-yu, LI Guo-lu, WANG Hai-dou, et al. Analysis of Microstructure and Residual Stresses in Supersonic Plasma Sprayed FeCrBSi Coatings [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2012, 33(1):146—149.
- [14] 徐滨士,朱绍华. 表面工程的理论与技术 [M]. 北京:国防工业出版社,2010.
XU Bin-shi, ZHU Shao-hua. The Theory of Surface Engineering and Technology [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2010.
- [15] 靳磊,周国栋,姜春竹,等. 镁合金防腐涂层微观形貌及残余应力研究[J]. 材料热处理学报,2015,7(1):50—55.
JIN Lei, ZHOU Guo-dong, JIANG Chun-zhu, et al. Research on the Morphology and Residual Stress of Magnesium Alloy Anti-corrosion Coatings [J]. Thermal Spray Technology, 2015, 7(1):50—55.

(上接第 61 页)

- CHEN Xiao-dong, YANG Rui, JIAO Wei-jie, et al. Applied Research of Fluorocarbon Corrosion Inhibitor in High Water Oilfield [J]. Applied Chemical Industry, 2010, 39(8):1159—1166.
- [15] 席先锋,朱洁玉,顾永红,等. 4 种新型氟碳表面活性剂 [J]. 精细化工,2005,22(增刊):67—69.
XI Xian-feng, ZHU Jie-yu, GU Yong-hong, et al. Four New Type of Fluorocarbon Surfactant [J]. Fine Chemicals, 2005, 22(Suppl):67—69.