

超音速火焰喷涂镍基合金层的腐蚀失效过程

赵卫民^{1,2}, 王 勇², 薛 锦¹, 吴开源²

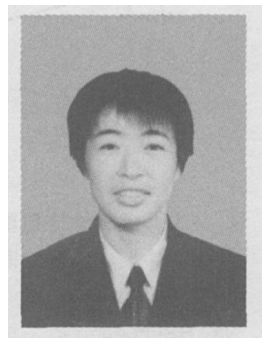
(1. 西安交通大学 材料科学与工程学院, 西安 710049)

2 石油大学 机电工程学院, 山东 东营 257061)

摘 要: 采用超音速火焰喷涂 (HVOF) 方法在低碳钢表面制备 NiCrBSi 合金涂层, 利用交流阻抗法 (EIS) 研究镍基合金层在 3.5% NaCl 溶液中的腐蚀失效过程。由于喷涂层中存在气体, 介质与基底接触前喷涂层的电极电位高于同种材料堆焊层的电位。涂层浸泡初期, 孔隙等缺陷的存在破坏了涂层金属表面吸附层的完整性。随着腐蚀介质在涂层中进行渗透, 腐蚀集中在孔隙等局部区域进行。最后, 介质通过涂层渗达涂层/基底界面, 碳钢作阳极遭受腐蚀。涂层的耐蚀性在浸泡初期急剧降低, 后因腐蚀产物阻塞孔隙等腐蚀通道而有所上升。腐蚀介质接触碳钢基底后, 复合电极的耐蚀性继续下降。

关键词: 镍基合金; 金属涂层; 电化学阻抗谱; 腐蚀; 超音速火焰喷涂

中图分类号: TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2005)01-41-05



赵卫民

0 序 言

随着超音速火焰喷涂 (High velocity oxyfuel HVOF) 设备和工艺的不断发展, 有望生产出耐蚀性接近锻造金属的高质量金属涂层^[1], 因此有必要研究金属喷涂层在水介质环境中的耐蚀性以及腐蚀失效过程。利用腐蚀浸泡试验和极化曲线测试等方法只能停留在腐蚀规律的发现及一般试验现象的解释上, 对腐蚀的失效过程则只能借助于其它研究手段进行推断。电化学阻抗谱 (Electrochemical impedance spectroscopy, EIS) 是研究电极界面电化学特性、揭示腐蚀机理的有效手段, 近年来在涂层研究中得到应用。不过, 研究工作大多围绕有机涂层、陶瓷涂层或金属陶瓷涂层展开, EIS 技术在研究金属涂层方面应用不多, 特别是针对阴极性涂层的研究极为不足。根据目前掌握的资料, 尚无人利用 EIS 技术对金属涂层的腐蚀失效过程进行测试和解译。作者采用 HVOF 在碳钢表面制备 NiCrBSi 耐蚀涂层, 利用 EIS 技术测量涂层—碳钢复合电极在 3.5% NaCl 水溶液中腐蚀电位和 EIS 谱随时间的变化情况, 研究喷涂层腐蚀失效过程, 建立腐蚀体系的物理模型, 分析电化学反应界面随腐蚀时间的延长而变化的规律。

1 试验材料和方法

基体选用 Q235 钢, 尺寸为 45 mm × 30 mm ×

5 mm。喷涂材料的化学成分 (质量分数, %) 为 5.5Cr, 1.5B, 6.0Si, 3.5Fe, 少于 1% 的 C, 余量为 Ni, 粒径 50~76 μm。

碳钢试样首先经丙酮清洗去油和喷砂处理, 然后采用 CH-2000 型 HVOF 系统制备涂层。喷涂参数的氧气工作压力为 0.55 MPa, 流量为 482.5 L/min; 丙烷工作压力为 0.35 MPa, 流量为 33.9 L/min; 氮气的工作压力为 0.4 MPa, 流量为 22 L/min; 喷涂距离固定在 200 mm。涂层厚度为 0.5 mm 左右。待测试表面用水砂纸由粗到细打磨到 800 目, 抛光, 去离子水冲洗干净后丙酮脱脂, 干燥后备用。

采用经典三电极体系, 以铂铈合金为辅助电极, 饱和 Ag/AgCl 电极为参比电极。腐蚀介质为 3.5% NaCl 水溶液, 用恒温水浴控制在 30 °C ± 1 °C。试样暴露面积 1 cm²。EIS 测量采用 M283 恒电位仪与 M1025 频率响应仪 (PARC 产品), 用 Power suite 软件进行数据采集。EIS 在开路下测试完成, 电位振幅为 10 mV。浸泡初期频率范围 100 kHz~5 MHz, 中后期频率扫描范围 100 kHz~1 MHz, 通过 Zsimpwin version 2.00 软件进行图谱分析和等效电路拟合。

2 试验结果与分析

2.1 涂层电极的腐蚀电位变化特点

将覆盖在碳钢基底上的镍基涂层与 3.5% NaCl 溶液接触, 其腐蚀电位随时间的变化情况见图 1。

电极电位与腐蚀介质接触初期迅速下降, 在 -350 mV 左右趋于平缓, 随后随时间延长进一步下降。

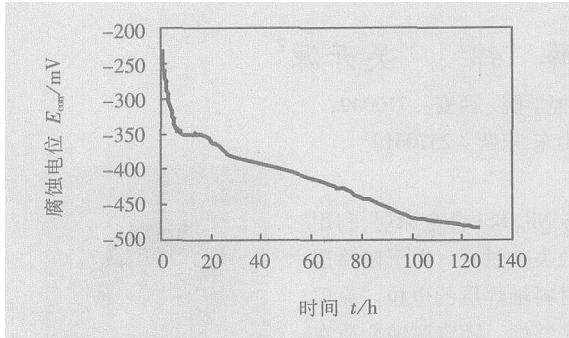


图 1 NCBS 涂层包覆钢在 3.5% NaCl 溶液中腐蚀电位随时间的变化关系
Fig 1 Relationship of corrosion potential of steel coated by NCBS coating in 3.5% NaCl solution with time

喷涂层接触腐蚀介质初期的腐蚀电位高于同种材料堆焊层的电位(相同条件下 7 次测试结果在 $-337 \sim -354\text{ mV}$ 之间), 分析是涂层内存在大量气体引起的。文献 [2] 研究喷涂层动态残余应力时, 通过甘油扩散气体搜集试验证实涂层中确实含有大量来自喷涂燃流的气体。气体对金属/介质界面双电层结构的影响见图 2。电极电位的高低由离子双电层结构两侧的电荷密度决定, 对于负电性金属, 双电层两侧的电荷密度越大, 相应电极的电位越低。存在气体的涂层局部, 由于接触气体膜的部位金属离子不能发生水解进入溶液, 导致此位置的电荷密度减小, 连带整体涂层金属的电位升高。涂层中的气体是随着腐蚀介质在涂层中的渗透逐渐溶解到介质中, 气体含量减少, 其对涂层电位的影响下降, 涂层电位降低。当电极电位低于同种材料致密金属的电位而继续下降时, 则是由于腐蚀电位低的碳钢金属(电位 $-650 \sim -700\text{ mV}$)开始参与电化学反应的结果。

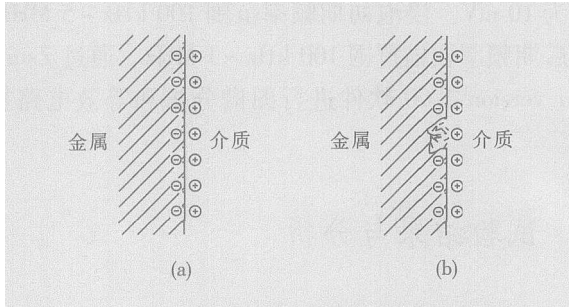


图 2 负电性金属电极与介质间的离子双电层结构
Fig 2 Electrochemical double layer at interface between electrode and its surrounding electrolyte

2 2 ES 图谱及其阻抗模型

复合电极与 3.5% NaCl 介质接触立即测试获得的 ES 谱见图 3。Nyquist 图上具有两个容抗环, 即金属与腐蚀介质间含有两个反应界面。腐蚀介质不可能在极短的时间内通过孔隙率较低的 HVOF 喷涂层与碳钢基底接触。Li C^[3] 等人研究处于 0.5 N NaCl 中的低碳钢/TN 两相间存在 Ti 中间层的复合电极时发现, 浸泡初期的 ES 谱也存在两个容抗环, 认为是 TN 涂层和 Ti 中间层的钝化膜分别与腐蚀介质接触引起的。钝化膜是与镀层金属完全不同的相, 钝化膜与腐蚀介质的接触界面是导致产生另一容抗环的解释是合理的。将涂层与酸化 3.5% NaCl 溶液 ($\text{pH}=3$) 以及 1 N NaOH 溶液接触, 立即测试获得的 ES 谱中只有一个容抗环, 说明涂层金属与介质间只有一个反应界面。作者发现, NCBS 涂层处于 3.5% NaCl 水溶液中表面只能形成吸附型钝化膜, 而相同涂层在酸性介质中表面处于活性溶解状态, 在碱性介质中表面有独立成相的致密表面钝化膜^[4]。可以认为, 处于 3.5% NaCl 溶液中的喷涂层表面膜的不完整性是导致涂层金属与溶液的界面上出现两个次级界面的原因。加热重熔喷涂层, 获得的堆焊层放入 3.5% NaCl 水溶液中测得的 Nyquist 图上只有一个容抗环, 说明镍基喷涂层与腐蚀介质接触后发生的第二个界面反应完全是由于喷涂层特有的组织特征引起的。扁平颗粒间的间隙、夹杂、孔隙等破坏了涂层金属表面的平整性, 具有组织缺陷的涂层表面较难形成氧或含氧粒子的吸附层, 这些位置金属的电位低于其它位置的涂层电位, 出现选择性腐蚀。

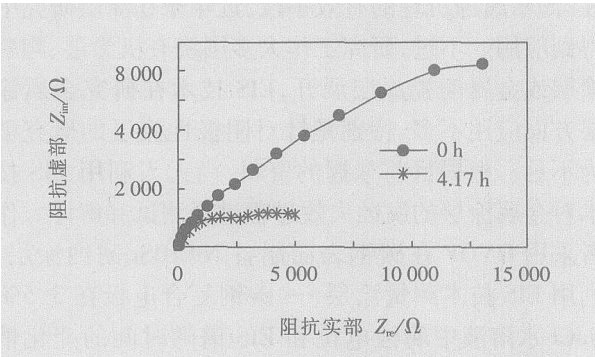


图 3 涂层与 3.5% NaCl 溶液接触获得的 Nyquist 图
Fig 3 Nyquist plots of coating in 3.5% NaCl solution

随时间延长, 电极与 3.5% NaCl 水溶液接触体系的 ES 谱上两个容抗环的特征越加明显(图 3), 而电极与酸化的 3.5% NaCl 水溶液接触体系的 ES 谱上容抗环也由一个变成两个。高频时, 电流均匀分布在测试面上, 高频峰反映出涂层金属的整

体特征;低频时,电流集中在局部进行,反映出局部腐蚀的效果。考虑到此阶段电极电位高于同种材料致密金属的电位,作者认为腐蚀介质并没有渗达基底,低频环反映出涂层中发生了较为明显的局部腐蚀。假设涂层金属用 M 表示,孔隙为现成的腐蚀坑。涂层局部腐蚀机理可用闭塞电池原理来解释(见图 4)。涂层金属与 3.5% NaCl 水溶液接触,发生电化学腐蚀生成的部分腐蚀产物会沉积在孔口处,阻碍外界氧气进入孔内以及孔内溶液物质的扩散,孔内外构成浓差电池,孔内作阳极遭受腐蚀,而孔外附近的金属表面上发生阴极氧还原,不受腐蚀。此种情况类似于致密金属发生局部腐蚀的情况,Annergren^[5]等人在利用 EIS 技术研究 Fe-Cr 合金点蚀起始和发展的过程时发现点蚀生长期具有双弧特征。因此,涂层金属的腐蚀集中在孔隙内进行是导致腐蚀体系 EIS 谱产生双弧的原因。由于腐蚀集中在孔隙处进行,因此孔隙内表面金属的界面反应电阻决定涂层的耐蚀抗力。

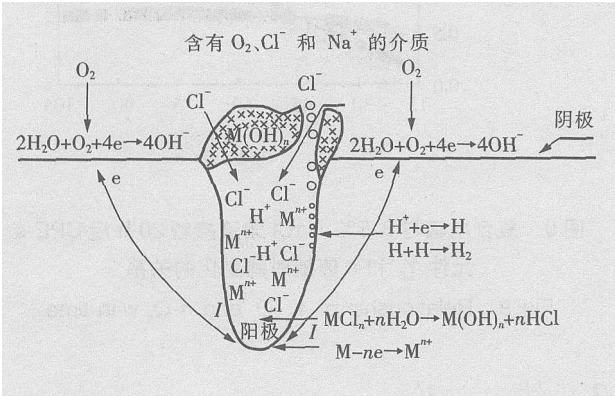


图 4 涂层金属中孔隙处发生优先腐蚀的机理
Fig 4 Electrochemical mechanism of preferential corrosion of porosity in metallic coating

复合电极与 3.5% NaCl 水溶液接触,涂层腐蚀期间体系的等效电路见图 5。图 5 中, RE 代表参比电极, WE 代表工作电极, R_1 代表溶液电阻, $CPE - c$ (c 代表涂层)和 R_c 并联代表涂层表面电荷传递过程, R_{1p} 代表孔隙内溶液电阻, $CPE - a$ (a 代表阳极)和 R_i 并联代表缺陷处金属的电荷传递过程。由于腐蚀集中在缺陷处进行,涂层表面其它金属作阴极受到保护,可忽略涂层金属表面的腐蚀,认为其电阻 R_c 无穷大,则图 4 可进行简化(实线部分)。等效电路中的 CPE (Constant phase element 常相角复合元件)用导纳和 n 定义为 $Y=Y_0(j\omega)^n$, $n=0$ 时代表电阻, $n=1$ 时代表电容。 n 越接近 1,材料和介质界面处的电容反应越强。

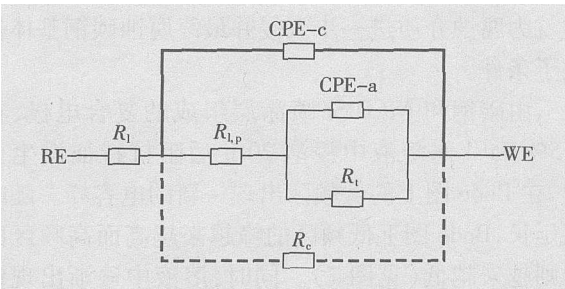


图 5 NCBS 涂层包覆钢与 3.5% NaCl 溶液相接触体系的等效电路

Fig 5 Equivalent circuit for total impedance of coating /solution interface

按照图 5 所示的模型拟合获得的孔隙内金属 / 介质界面反应电阻随时间的变化情况示于图 6。对比图 1 可以看出,涂层电位迅速下降的时间段内反映涂层耐蚀抗力的反应电阻值也迅速下降,而在电位相对稳定的时间段内,耐蚀抗力首先继续下降(速度缓慢),然后升高。电位稳定阶段反应电阻值的变化,是由孔隙内阻碍传质作用的物质的存在情况决定的。由于涂层腐蚀的阳极反应产物 M^{n+} 在孔隙内部,而阴极反应产物 OH^- 在涂层表面,因此孔隙内部的 M^{n+} 需迁移到孔隙外与 OH^- 反应形成氢氧化物,重金属氢氧化物的溶解度一般比较低,则在涂层表面可见到肉眼可见的腐蚀产物(主要为镍的氢氧化物)。不过,孔隙空间狭小,传质困难,由外向内的迁移比 M^{n+} 由内向外容易,因此就有部分的金属离子与氯离子结合生成氯化物,氯化物发生水解,结果在孔隙内形成氢氧化物腐蚀产物,阻碍腐蚀性物质在孔隙内的传输。随着水解产物的增多,腐蚀性物质在孔隙内的扩散难度加大,孔隙内金属的腐蚀速度减小,而反映孔隙内金属腐蚀抗力的反应电阻加大。不过,固体腐蚀产物并没有将孔隙完全阻塞,因为相应阶段的 Nyquist 图上仍有两个半圆。

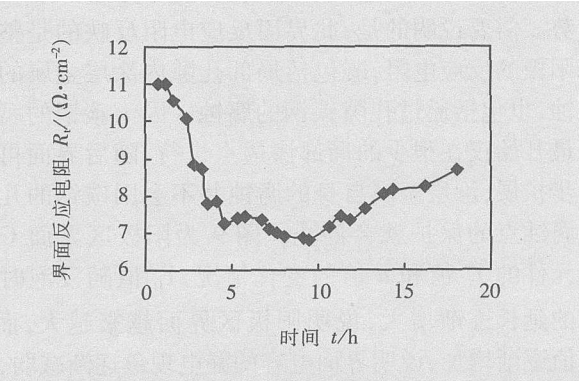


图 6 介质与基底接触前涂层 / 介质界面反应电阻与时间的关系

Fig 6 R_i time behavior of mild steel coated by NCBS coating in 3.5% NaCl

这就为腐蚀介质进一步入侵并最终腐蚀碳钢基体提供了条件。

由碳钢和 Ni-Cr-Si 喷涂层组成的复合电极, 在 3.5% NaCl 水溶液中浸泡 20 h 后阻抗特征发生变化, 在 Bode 图上的低频区出现一新的电容峰。随时间延长, Bode 图上低频区的峰越来越高而高频区的峰则越来越低 (见图 7)。同时, 溶液中逐渐出现铁的红色腐蚀产物。这说明, 腐蚀介质已经通过涂层到达碳钢基底。在 Bode 相图上, 高频峰对应涂层金属与介质的界面, 而低频峰反映碳钢与介质的界面。由于碳钢的自腐蚀电位要比镍基喷涂层的低很多, 因此介质对复合电极的腐蚀主要集中在通过孔隙对碳钢的腐蚀上。

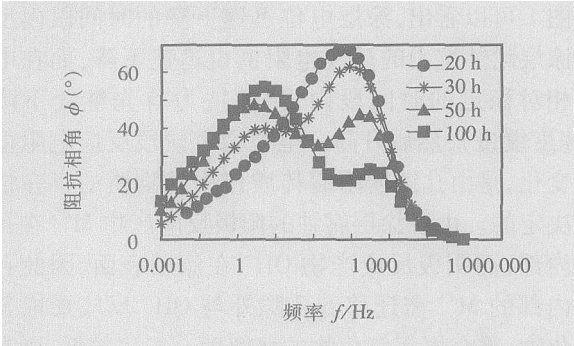


图 7 涂层包覆钢与溶液接触 20 h 后获得的 EIS 图
Fig 7 Bode plots of EIS data obtained from steel coated by coating at different times of exposure to solution

对此阶段内获得的 EIS 数据进行模拟得到的等效电路模型见图 5。总的电化学界面可分成两个次化学界面, CPE - c 和 R_{dp} 并联代替涂层的介电性能, CPE - a 和 R_i 并联描述孔隙处涂层/钢界面的电荷传递过程。按照图 5 所示的模型拟合获得的涂层/钢界面的界面反应电阻随时间的变化情况见图 8。界面反应电阻随浸泡时间的延长呈稳定下降的趋势。需要说明的是, 此界面反应电阻反映的是整体阳极的反应电阻, 既包括局部孔隙内涂层金属的腐蚀, 也包括通过孔隙碳钢的腐蚀。因为碳钢的腐蚀最开始仅在很少的局部渗透点进行, 随后界面再逐步扩展, 涂层金属自身的腐蚀并不会因碳钢的几个腐蚀点的保护就会停止。图 9 为阳极区界面 CPE 元件的 Y_0 值和 n 值的变化情况, Y_0 值随浸泡时间的延长逐渐增大, 说明阳极区界面越来越大, 而 n 值逐渐增加, 说明界面电容的漏电现象逐渐减弱, 有理由相信无孔隙、平整规则的碳钢界面所占比例越来越大。此阶段复合电极的反应电阻随时间的延长而减小是由于碳钢在界面反应中所占的比例越来越大引起的。当然, 碳钢/溶液界面的电化学反应面积直接决定于腐蚀介质在涂层中的渗透过程。

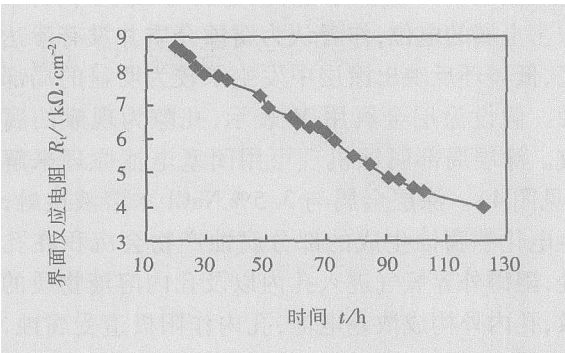


图 8 复合电极与 3.5% NaCl 溶液接触 20 h 后界面反应电阻随时间的变化关系
Fig 8 R_i time behavior of mild steel coated by Ni-Cr-Si coating in 3.5% NaCl solution

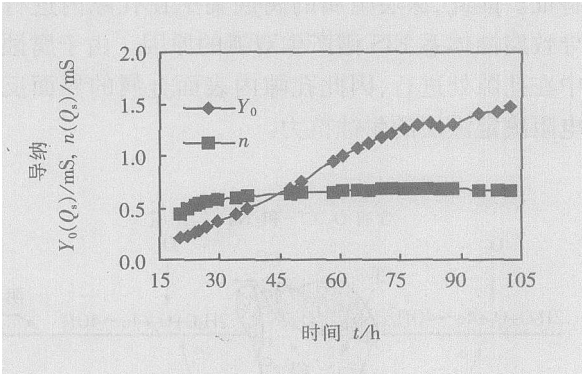


图 9 复合电极与 3.5% NaCl 溶液接触 20 h 后 CPE 元件 Y_0 和 n 值随时间变化的关系
Fig 9 Relationship of Y_0 , Q_s and n , Q_s with time

3 结 论

- (1) 涂层中的气体对涂层电位有重要影响, 随腐蚀介质在涂层的渗透, 气体不断溶解到腐蚀介质中, 涂层的电位逐渐下降并最终稳定在同种材料堆焊层所对应的电位。只有碳钢基底参与腐蚀反应, 复合电极的电位才会继续下降。
- (2) 腐蚀介质通过渗透到达涂层/碳钢界面需要一定时间。喷涂有镍基涂层的碳钢电极与 3.5% NaCl 溶液接触初期, 孔隙等缺陷的存在破坏了涂层金属表面吸附层的完整性, 阴、阳极区较为明显。随着浸泡时间的延长, 腐蚀介质在涂层中进行渗透, 腐蚀集中在孔隙等局部区域进行, 当介质通过涂层到达涂层/基体界面时碳钢基体作阳极遭受腐蚀。
- (3) 涂层的耐蚀性在浸泡初期急剧降低, 后因腐蚀产物阻塞孔隙等腐蚀通道而有所上升。腐蚀介质接触碳钢基底后, 复合电极的耐蚀性继续下降。

[下转第 48 页]

过程的描述,二者缺一不可。同一个工件的示教点文件即.p文件和运动描述文件即.s文件必须同时具备,并具有相同的文件名。变位机运动控制程序解释器将位置示教点的信息文件和运动控制程序的信息文件链接后,形成运动参数,转变成计算机内部指令执行后实现变位机的编程运动,完成工件变位。

3 应用实例

针对几种典型工件,通过对变位机的示教和再现,编制了相应的焊接变位程序,对示教再现系统进行了测试,并由CLOOS ROMAT76弧焊机器人施焊,完成了焊接试验,整个系统运行良好。其中比较典型的焊接构件为天水长城开关厂提供的某型开关柜的框架。开关柜框架是制造开关柜的重要部件,由冲裁成型的三块不同形状冷轧板焊接而成,共有14条焊缝,传统工艺为机器人每焊一条焊缝,然后由人工变位,再焊下一条焊缝。定位精度较差,工人劳动强度大,生产效率低。现在通过示教再现编程,可以由数控焊接变位机对工件进行自动变位,14条焊缝机器人可一次焊完,开关柜框架焊接过程如图2所示。该系统定位准确,焊缝质量稳定,效率高,并且价格便宜。经测试各项指标和性能满足开关柜生产的质量要求。

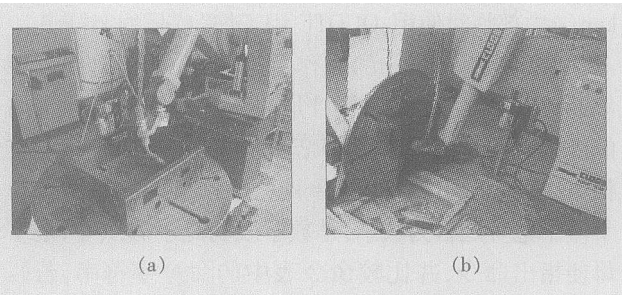


图 2 焊接试验

Fig 2 Welding experiments

对系统试验研究表明,数控焊接变位机示教控制系统及其指令系统所述软硬件结构设计合理,工作可靠,可用于工程机械、汽车、机车制造、开关柜等行业中焊接结构件的生产,提高了焊接系统对不同工件的适应能力,有较高的实际应用价值。

4 结 论

- (1) 针对数控焊接变位机设计实现了其示教再现控制系统,提供了多种示教方式,尤其是采用了带液晶显示的示教盒,可以用中文显示相应的信息,极大地方便了操作者,提高了人机交互性能。
- (2) 设计的数控焊接变位机示教再现指令系统通过对示教点的描述实现变位机的运动过程描述,使得数控变位机的编程过程简单化,应用范围也更加灵活。

参考文献

[1] Shi Yu, Fan Ding, Wang Zheng. Design and implementation of control system for numerically controlled welding positioner [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2003, 24(4): 21-24
石 玦, 樊 丁, 王 政. 高精度数控焊接变位机控制系统设计与实现 [J]. 焊接学报, 2003, 24(4): 21-24

[2] Wang Zheng, Qiao Jisen, Fan Ding, et al. Investigation of influential factors on moving accuracy of welding positioner [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2003, 24(3): 61-64
王 政, 乔及森, 樊 丁, 等. 数控焊接变位机运动精度的影响因素 [J]. 焊接学报, 2003, 24(3): 61-64

[3] Fan Ding, Zhou Wankun, Tan Weinong. Tow mode intelligent coordinating control of position for the welding positioner [J]. China Welding, 1998, 7(1): 47-52

[4] 王士元. C高级应用程序设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994

作者简介: 石 玦男, 1973年3月出生, 讲师, 博士研究生。研究方向为人工智能、机电一体化和弧焊过程控制。参加或主持省部级及国家自然科学基金项目4项, 发表论文20余篇。

Email: shiyu@hit.cn

[上接第 44 页]

参考文献:

[1] Edris H, Mccarney D G, Sturgeon A J M. Microstructural characterization of high velocity oxy fuel sprayed coatings of inconel 625 [J]. Journal of Materials Science, 1997, 32(4): 863-872

[2] 王志平. 超音速火焰喷涂技术特性分析及涂层性能及测试实验方法的研究 [D]. 哈尔滨: 机械科学研究院哈尔滨焊接研究所, 2000. 89-90.

[3] Liu G, Bi Q, Mathews A. EIS comparison on corrosion performance of PVD TiN and CrN coated mild steel in 0.5N NaCl aqueous solution [J]. Corrosion Science, 2001, 43: 1953-1961.

[4] Zhao Weinong, Wang Yong, Han Tao, et al. Electrochemical eval-

uation of corrosion resistance of NiCrBSi coatings deposited by HVOF [J]. Surface and Coating Technology, 2004, 183(1): 118-125

[5] Annengren J, Zou F, Thierry D. Application of localized electrochemical techniques to study kinetics of initiation and propagation during pit growth [J]. Electrochimica Acta, 1999, 44: 4383-4393.

作者简介: 赵卫民, 女, 1970年出生, 讲师, 博士研究生。主要从事焊接工艺、表面工程及腐蚀防护方面的教学与科研工作。获国家发明奖1项, 省部级奖3项, 出版教材1部, 发表论文20余篇。

Email: zhaowm@mail.hdpu.edu.cn

(Ni-Fe), γ -Ni₃W₂C, Mn₃₁S₁₂, Cr₂₃C₆, Cr₇C₃, Cr-Ni-B-Ni₂B etc. Wear resistance and hardness of the surface increased evidently.

Key words: plasma-arc surfacing; nickel-based composite powder; microstructure; hardness; wear resistance

Corrosion failure process of Ni-Cr-B-Si coatings deposited by high velocity oxyfuel ZHAO Wei-min^{1,2}, WANG Yong², XUE Jin¹, WU Kai-yuan² (1. School of Material Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. School of Mechanical and Electrical Engineering University of Petroleum Dongying 257061, Shandong, China). p41-44, 48

Abstract: The Ni-Cr-B-Si alloy powder was sprayed to a steel substrate using high velocity oxyfuel (HVOF) and the corrosion failure process of the coating in 3.5% NaCl aqueous solution was investigated using electrochemical impedance spectroscopy. Preferential corrosion happened in the corrosion process of steel coated by HVOF coating. Firstly, because the defects such as porosities were harmful to the uniformity of electrochemical behavior and local corrosion occurred in these spots. And then the steel substrate was preferentially corroded after the solution penetrated into the interface between the coating and the steel. The corrosion resistance of the coating fell sharply at the early stage and then increased because corrosion products had blocked some corrosion paths. The corrosion resistance of the steel substrate coated by Ni-Cr-B-Si coating fell continuously after the steel taking part in the electrochemical reaction.

Key words: nickel alloy; metallic coating; electrochemical impedance spectroscopy; corrosion; high velocity oxyfuel

Teaching and playback control system for numerical controlled welding positioner SHI Yu-FAN Ding WANG Zheng CHEN Jian-hong (State Key Lab of Advanced Non-ferrous Materials Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China). p45-48

Abstract: The designed and experimental process of the teaching and playback control system of numerical controlled (NC) welding positioner is narrated. Three teaching devices: teaching-box, joy-stick and computer keyboard were fulfilled with industry control computer and single chip and a set of control command system of NC welding positioner was also designed, including program command track description command and I/O communicating command. The teaching and playback process of NC welding positioner was executed as follows. Firstly, the co-ordinates of all welding positions obtained by teaching devices mentioned above were recorded in the computer. Secondly, relationship and sequence of each teaching point is described by command system. Finally, computer explained the command and controlled movement of NC welding positioner. Using such teaching and playback system, the NC welding positioner could be associated with the welding robot or other auto-welding equipment, therefore, a flexible welding process upon various metallic components could be realized. The experimental results showed a good effect.

Key words: numerically controlled welding positioner; teach

ing; playback

Computer-aided optimizing design of discharge circuit for a capacitor stored energy spot welding machine

WANG Min SHENG Jing-zhi LEI Ming (School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China). p49-52

Abstract: Based on simplifying for resistance-inductance-capacitance discharge circuit of a capacitor stored energy spot welding machine, discharge circuit mathematical model was set up and the discharge current curve was simulated by the aid of computer. The influence of inductance and capacitance on the shape of the discharge current curve, peak value current and time of the discharge was studied systematically in order to guide the design of discharge circuit.

Keywords: capacitor stored energy spot welding; welding current curve; computer-aided design

Finite element simulation of limit pressure pipeline with cracks using critical crack-tip-opening-angle LI Hong-ke ZHANG Yan-hua (Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China). p53-57

Abstract: The limit pressure of pipeline with cracks is one of the important aspects in structure integrity assessment. We used finite element method crack tip opening angle (CTOA) as the parameter to investigate the applicability of critical CTOA in pipeline limit pressure modeling which containing longitudinal penetrating crack. Here the critical CTOA was used as the critical failure rule of the pipe. Factors affecting numerical results were also studied. Then a predictive model was established based on these results and compared with other models. From the analysis we could conclude that critical CTOA could be used to model penetrating crack in pipelines as long as the finite element model and element size were properly chosen. When the crack was small, the known formula would heavily underestimate pipe carrying capacity. But for large cracks, they might give overestimated results and lead to safety problems for pipes.

Key words: gas pipeline; penetrating crack; critical crack tip opening angle; limit pressure

Characteristics of welding bead of laser welded 20% SiC/6061 aluminum matrix composites HUANG Yong-pan LIDao-huo (Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China). p58-60

Abstract: The exterior and interior characteristics of welding bead of laser welded 20% SiC/6061 aluminum matrix composites were studied. Laser welded the bead of aluminum matrix composites was narrow and the ratio of penetration and width was great. The welding bead could be divided into three parts: the center melt reaction section and melt unreacted section and heat affected section. Many A14C3 platelets were created in the center melt reaction section and made the welding bead brittle and easy to be ruptured.

Key words: laser welding; aluminum matrix composites; weld