

# 机械沉积 Cd 镀层的制备及性能研究

侯云波, 王胜民, 赵晓军, 张俊

(昆明理工大学 材料科学与工程学院, 昆明 650093)

**摘要:** **目的** 制备机械沉积 Cd 镀层, 并研究其组织、性能。**方法** 以分析纯超细镉粉作为镉源, 采用机械沉积法并添加复配的活化剂, 在 Q235 基体表面制备了 Cd 镀层。采用扫描电子显微镜 (SEM) 及其自带的能谱仪 (EDS) 分析了镀层的组织形貌和化学成分, 采用 X 射线衍射法 (XRD) 分析了镀层的物相组成, 采用铁试剂法测试分析了镀层的孔隙率, 采用划格划线法测试分析了镀层的结合强度, 采用电化学极化法、中性盐雾加速腐蚀试验和浸泡试验测试分析了镀层的耐蚀性能。**结果** 机械沉积 Cd 镀层是镉粉颗粒通过物理结合形成的阳极性保护镀层, 镀层没有发现贯通性孔隙且和基体之间结合良好。在同为 20  $\mu\text{m}$  厚度的情况下, 机械沉积 Cd 镀层的自腐蚀电位 ( $-743\text{ mV}$ ) 相比机械沉积锌 ( $-1307\text{ mV}$ ) 提高了 500 mV 左右, 自腐蚀电流密度降低了约 2 个数量级, 腐蚀倾向与腐蚀速度显著降低。机械沉积 Cd 镀层中性盐雾试验中, 出现 5% 红锈的时间为 600 h, 相比机械镀锌出现 5% 红锈的时间 (72 h), 延长了 9 倍左右。**结论** 通过机械沉积的方法在 Q235 试样表面制备的镉镀层为阳极性保护镀层, 镀层的耐腐蚀性能相比机械镀锌提高了 9 倍左右, 耐腐蚀性能优异。

**关键词:** 机械沉积; 镉镀层; 活化剂; 粉末; 耐腐蚀性能; 海洋气候

**中图分类号:** TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)09-0218-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.09.024

## Preparation and Properties of Mechanically Deposited Cd Coatings

HOU Yun-bo, WANG Sheng-min, ZHAO Xiao-jun, ZHANG Jun

(School of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**ABSTRACT:** The work aims to prepare mechanically deposited Cd coatings and study their microstructure and properties. The pure superfine cadmium powder was used as the cadmium source to prepare Cd coating on the surface of Q235 by mechanical deposition with activator. The microstructure and chemical composition of the coating were analyzed by scanning electron microscopy (SEM) and own energy dispersive spectroscopy (EDS). The phase composition of the coating was analyzed by X-ray diffraction (XRD). The porosity of the coating was analyzed by the iron reagent method. The bonding strength of the coating was analyzed by the cross-hatch method. The corrosion resistance of the coating was analyzed by electrochemical polarization method, neutral salt spray accelerated corrosion test and immersion test. The mechanically deposited Cd coating was an anodic protective coating formed by cadmium powder particles through physical bonding. No penetrating pores were found in the coating layer and the bonding between the substrate and the coating was good. When the coating was 20  $\mu\text{m}$ , the self-corrosion potential ( $-743\text{ mV}$ ) of mechanically deposited Cd coating was about 500 mV higher than that of mechanically

收稿日期: 2018-11-25; 修订日期: 2019-07-08

Received: 2018-11-25; Revised: 2019-07-08

作者简介: 侯云波 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为金属表面工程。

**Biography:** HOU Yun-bo (1993—), Male, Master, Research focus: metal surface engineering.

通讯作者: 王胜民 (1977—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为金属表面工程。邮箱: wsmkm2000@sina.com

**Corresponding author:** WANG Sheng-min (1977—), Male, Doctor, Professor, Research focus: metal surface engineering. E-mail: wsmkm2000@sina.com

deposited zinc (-1307 mV), and the self-corrosion current density was reduced by about 2 orders of magnitude, which significantly reduced the corrosion tendency and corrosion rate of the coating. Under neutral salt spray conditions, the mechanically deposited Cd coatings showed 5% red embroidery for 600 h. which was about 10 times longer than the time when mechanical galvanizing showed 5% red embroidery (72 h). The cadmium coating prepared on the surface of Q235 by mechanical deposition is an anodic protective coating. The corrosion resistance of the coating is about 10 times higher than that of mechanical galvanizing. The cadmium coating has excellent corrosion resistance.

**KEY WORDS:** mechanical deposited; cadmium plating; activator; corrosion resistance; ocean climate

镉的标准电极电位比铁要负, 镉镀层相对于铁而言是阴极性镀层, 但在高温或海洋性气候环境下, 镉镀层则相对于铁是阳极性保护镀层, 同时镉镀层的焊接性与润滑性良好<sup>[1]</sup>。传统镀镉工艺主要采用电镀镉, 施镀过程易造成环境污染, 镀层易出现氢脆, 工件在 232 °C 以上工作时, 镉原子进入基体会导致工件发生镉脆, 但由于镉镀层具有优异的耐海洋环境腐蚀性能, 所以镀镉目前仍然是船舶、舰艇、飞机起落架用部分钢基零部件的主要防护措施<sup>[2]</sup>, 尤其是应用于海军装备的紧固件、连接件等的表面防护。目前镀镉零件基本还是采用电镀镉工艺, 300M、30CrMnSiNi2A、A-100 等高强度钢螺栓及连接件的电镀镉易出现氢脆、镉脆, 并且镀液复杂、难处理, 易造成环境污染, 严重影响着连接或紧固件的可靠性和使用寿命<sup>[3-6]</sup>。所以, 寻找一种新型绿色环保的镀镉工艺, 以大幅度降低镀镉零件的氢脆和镉脆, 是研究者们急需解决的问题。机械沉积技术是在室温下利用化学吸附和机械碰撞作用, 使金属粉末沉积到基体表面的一种表面防护技术<sup>[7-9]</sup>, 该技术具有无氢脆、镀液易处理、操作简单、绿色环保、低能耗等优点<sup>[10-11]</sup>, 可以完全避免镀镉时产生氢脆和镉脆的危险, 且施镀过程排放液经简单处理即能做到完全循环利用, 实现零排放。

基于此, 本文以高纯镉粉为镉源, 采用机械沉积法在钢铁基体表面制备镉镀层, 并研究镀层的组织结构和性能, 以解决镀镉零件易出现氢脆与镉脆的问题。

## 1 试验

### 1.1 试样制备

试样基材为 29 mm×15 mm×2.3 mm(外径×内径×厚度)的 Q235 圆垫片。制备镉镀层所用镉粉为粒径小于 10 μm 的混合粒径的金属镉粉, 其化学成分见表 1。分析镉粉的 SEM 图像(见图 1)可以发现, 镉粉颗粒呈规则球形, 粒径分布为 1~10 μm 不等, 颗粒圆整、表面平滑, 小粒径的镉粉吸附特征明显。1~2 μm

表 1 镉粉的化学成分

Tab.1 Chemical composition of cadmium powder

wt. %					
Cd	Pb	Zn	Cu	Fe	Unsolvable in nitric acid
99.0	0.02	0.01	0.01	0.003	0.005

粒径以下的镉粉, 呈团簇状吸附在较大粒径镉粉颗粒的表面。

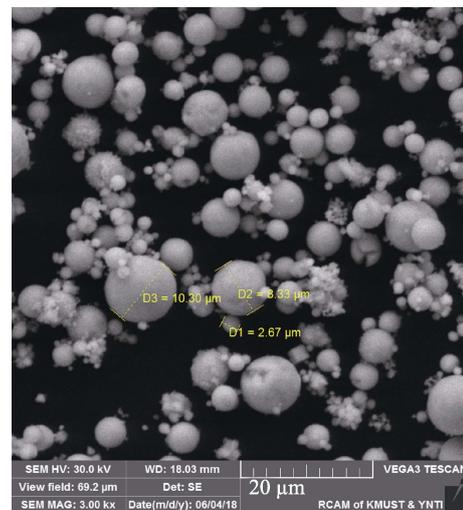


图 1 镉粉的 SEM 形貌

Fig.1 SEM morphology of cadmium powder

采用昆明理工大学研发的 JDX100-II 型机械镀通用设备制备镉镀层, 机械沉积工艺流程如下: 装料(向镀筒中加入适量玻璃珠、水、经预处理的工件)→调节镀液 pH(采用无机酸调节)→建立基层(添加镉粉+亚锡盐)→镀层增厚(添加镉粉+促进剂)→镀层强化→出料分离(镀筒内所有物料倾倒出, 工件与玻璃珠分离)→烘干(120 °C、20 min)。

其中, 预处理为电阻炉加热脱脂和 10%稀盐酸酸洗; 镀层强化是镀层增厚结束后的一个重要步骤, 即镀层增厚完毕时, 向镀筒内添加适量水并继续保持镀筒转动一段时间, 以改善镀层的外观质量。镀层增厚阶段所添加的促进剂由表面活性剂、分散剂和缓蚀剂等组成, 具有促进镉粉沉积的复配物<sup>[12]</sup>。

### 1.2 试验方法

采用 Philip XL370 型扫描电镜及其配备的能谱仪, 观察分析镀层的表面和界面形貌、组织结构及化学成分。

采用 X 射线衍射仪(XRD)对镀层进行物相分析, 测试参数为: X 射线管压 30 kV, 电流 30 mA, Cu 靶 K $\alpha$  辐射, 测定范围 10°~100°。

采用铁试剂试验法测试分析镀层的孔隙率,测试溶液的配制及操作按标准 GB/T 17721-1999 执行<sup>[13]</sup>。

采用划线划格法测试分析镀层的结合强度,操作及评判按 GB/T 5270—2005 执行<sup>[14]</sup>。

采用上海辰华仪器公司生产的 CHI760C 型电化学工作站测量分析镀层的电化学极化特征。试验采用经典的三电极体系,工作电极为试样,辅助电极为铂电极,参比电极为饱和甘汞电极。测试电解液为 5% 的氯化钠溶液,试样测试面积为  $1\text{ cm}^2$ ,采用动电位扫描,扫描范围 $-900\sim 500\text{ mV}$ ,扫描速度  $60\text{ mV/min}$ ,交流阻抗的测量振幅为  $10\text{ mV}$ ,频率范围为  $10^{-2}\sim 10^5\text{ Hz}$ 。

采用北京雅士林试验设备有限公司生产的 YWX/Q-150 型盐雾腐蚀试验箱对试样进行加速腐蚀,试验操作按 GB/T 10125—2012/ISO9227: 2006 执行<sup>[15]</sup>,试验箱内温度为  $36\text{ }^\circ\text{C}$ ,沉积量为  $1.6\text{ mL/h}$ 。

## 2 结果及分析

### 2.1 镀层的组织结构

镀层的外观形貌如图 2 所示,由图可知,与机械镀锌层对比(同等镀层厚度情况下裸视观察),机械沉积镉镀层表面更加平整、光亮,表面的金属光泽性更加显著,用普通钢笔在镀层表面写字时更加流畅,而机械镀锌镀层表面呈现半光亮色。这可能是由于金属镉的硬度比锌的硬度稍低,机械沉积过程中,由于滚筒的转动带动筒内的玻璃珠、工件发生频繁的碰撞和摩擦,促使镀层表面的镉粉发生致密化,甚至变形而板结在一起,形成平整、光滑的表面。图 3 为镉镀层表面的 SEM 形貌。可以发现,镀层表面由镉粉颗粒堆积镶嵌而成,但镉粉在表面的分布不均匀。由于金属镉的塑性较好,镀层表面较多的区域不仅存在镉粉构成的致密板块(如图 3a 中的白色箭头所指);也

存在镉粉欠致密分布区域(如图 3 中的黑色箭头所指),此区域的 SEM 观察发现镉粉并未结合成致密的板块,但镀层表面整体仍具有足够的平整性和光度,说明镉粉在镀层中并非是简单的罗列、堆积。镀层表面的高倍 SEM 观察发现(图 3b),镀层表面镉粉发生了塑性变形,镉粉颗粒由原来规则的球形变为椭球形,甚至扁化,有的在发生扁化的同时又板结为一个整体,这极大地减少了镀层中的空隙,降低了腐蚀介质侵入基体的可能性,使镉镀层的防腐性能增强,并且也使镀层与基体之间的结合力增强。镉镀层表面的成分面扫描结果见图 4,由图 4 可以得出,镀层主体由镉元素组成。少量的锡元素存在是因为强化阶段添加少量锡盐所导致;C、O 的存在是因为镀层在空气中放置时,镀层表面与大气发生轻微的反应所致。

镉镀层截面的 SEM 形貌如图 5 所示,从图中可以看出,镉镀层与铁基体之间存在明显的界面,结合良好,没有裂纹、分离等缺陷。镀层中存在的黑色区域(图 5 中 1、2)是由于试样在研磨过程中镀层脱落所致。镀层截面线扫描结果见图 6,从镀层表面到界面,随着扫描距离的增加,Cd、Sn 元素强度一直



图 2 机械沉积镀层的外观  
Fig.2 Appearance of mechanically deposited coating:  
a) Cd coating; b) Zn coating

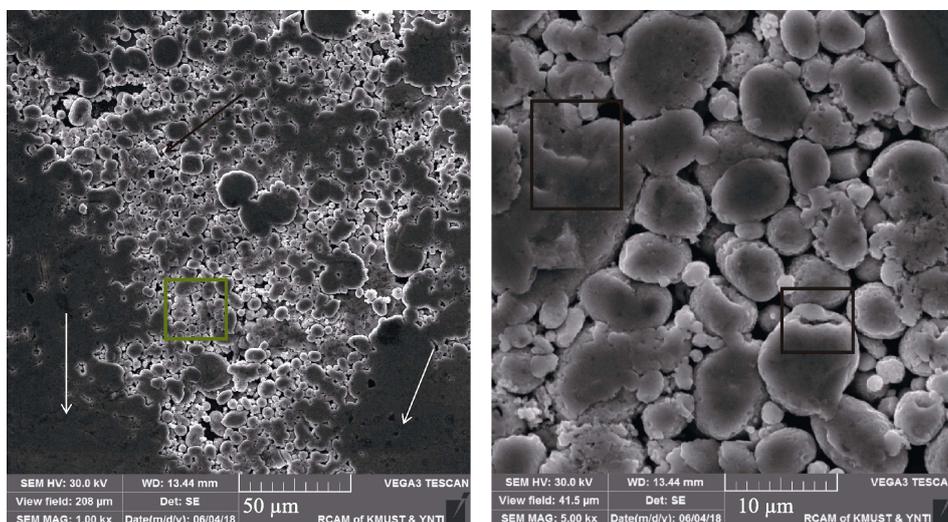


图 3 镉镀层表面形貌  
Fig.3 Surface morphology of the cadmium coating

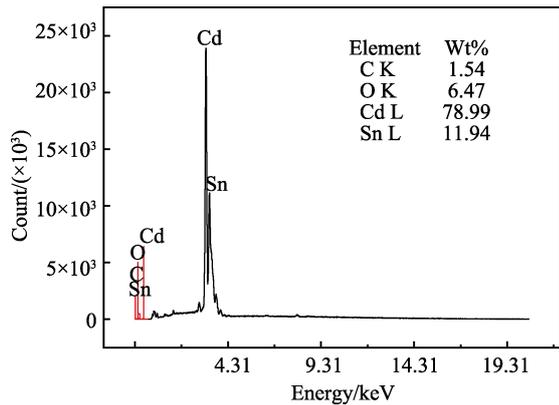


图 4 镀层表面的元素组成  
Fig.4 Elemental composition on coating surface

处于高低起伏的状态，Cd 元素的强度在降低，而 Sn 元素的强度在升高，Cd 元素强度降到最低时，Sn 元素的强度恰好上升到最高。扫描距离大概每增加 5 μm，这种现象就发生一次，这可能与加料强度有关。施镀

时，镀层每增加 5~10 μm，就往镀筒中添加镉粉与促进剂，而促进剂中含有亚锡盐，就会发生式（1）反应，生成的 Sn 单质附着在镉粉颗粒表面，扫描电镜的电子束打在 Sn 上，致使 Cd 元素强度降低，Sn 元素强度升高，在界面处发生 Cd、Sn 陡降，Fe 元素的陡升，说明在界面处不存在 Cd、Sn、Fe 的化合物。



机械镀镉镀层的 XRD 衍射图谱如图 7 所示，可以发现，镀层由金属镉和少量的金属锡组成，镀层中没有发现 Cd、Sn、Fe 之间的化合物或固溶体。镉的衍射峰比较尖锐，峰形较窄，说明镉镀层的结晶度好，没有非晶物质的形成。少量的锡单质存在是因为在施镀过程中发生了式（2）反应，生成的 Sn 单质还原沉积在镉粉颗粒表面，且连接两个镉粉藻团起到类似“粘合剂”的作用，并且使得镀层的空隙进一步降低，有利于提高镀层的致密度。

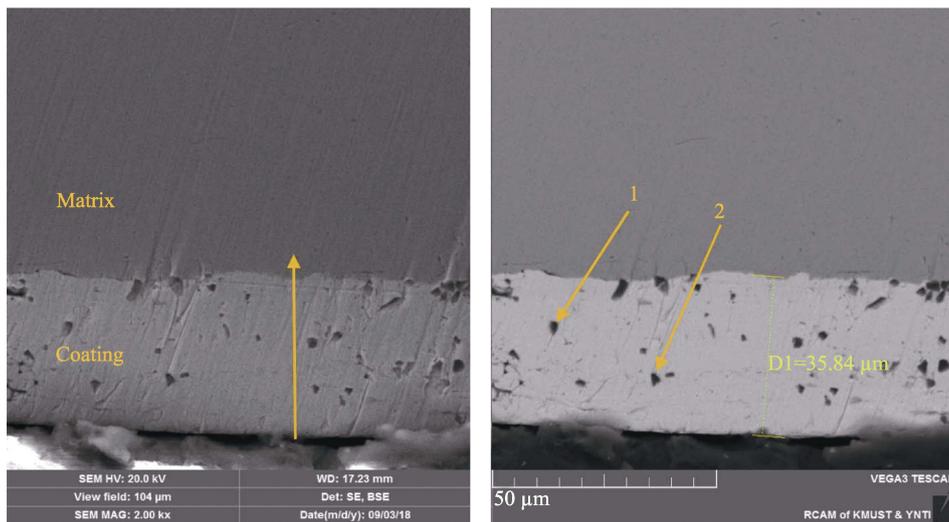


图 5 镀层截面 SEM 照片  
Fig.5 SEM of the cross section of the coating

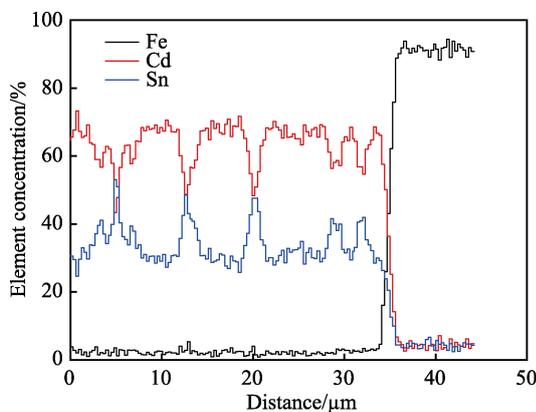


图 6 镀层截面线扫描结果  
Fig.6 Line scan results of coating section

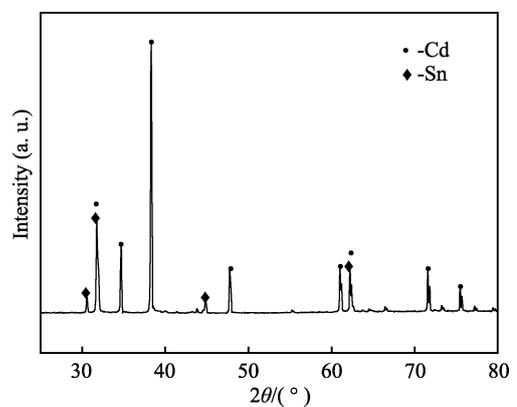


图 7 镀层的 XRD 衍射图谱  
Fig.7 XRD spectrum of the coating

## 2.2 镀层的孔隙率

铁试剂法测试镉镀层的孔隙率时,滤纸表面未发现蓝色斑点,说明机械镀镉层不存在从镀层贯穿到基体的通孔。机械镀层通常认为是由金属颗粒密集堆积构成的多孔致密体,基于晶体学和晶体结构的相关基础分析,镀层的致密性要低于相同材质的块体材料。而机械镀镉层孔隙率检测未发现蓝色斑点可能原因是:构成镀层的镉粉为粒径 1~10 μm 不等的混合镉粉,镀层中小粒径镉粉填充在大粒径镉粉之间的空隙处;另外,由于镉粉颗粒在施镀过程中发生了塑性变形,促使镉粉颗粒之间的空隙受到挤压。这些均使得镀层的致密度提高,从而避免了镀层中贯穿性孔隙的形成,阻碍了外界腐蚀介质的浸入,明显延长了穿透性腐蚀介质从镀层表面到达基体的路径(如图 8 所示),所以铁试剂法测试溶液根本不能到达基体。

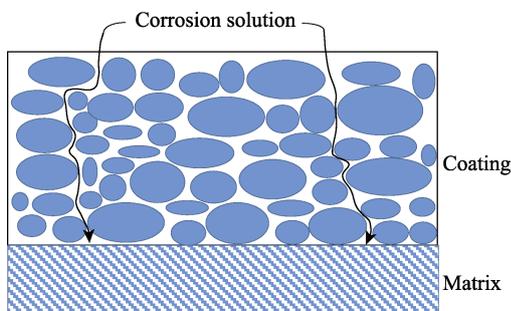


图 8 镀层结构示意图

Fig.8 Schematic diagram of the coating structure

## 2.3 镀层的结合强度

机械镀镉层的结合强度测试见图 9,从图中可以看出,划痕处镉镀层未见脱落,两条划痕交叉的地方镉镀层也未见脱落,说明镉镀层与基体的结合强度良好,可以达到对防腐镀层结合强度的要求。



图 9 镉镀层划格试验

Fig.9 Cross-cut experiment of the cadmium coating

## 2.4 镀层的耐腐蚀性能

图 10 为机械镀镉层、机械镀锌层和 Q235 钢的极化曲线,通过塔菲尔直线段外推法得到的拟合数据

见表 2。分析图 10 和表 2 可以发现,在 5%氯化钠溶液中,机械镀镉层自腐蚀电位为-743 mV,机械镀锌层自腐蚀电位为-1307 mV,而 Q235 钢的自腐蚀电位为-600 mV,说明镉镀层和镀锌层相对于基体 Q235 钢均为阳极性保护镀层,镉镀层自腐蚀电位比镀锌层提高了 560 mV 左右,镉镀层的电位更正,与基体形成的微电池电动势较小,腐蚀驱动力较小,所以镉镀层在 5%的氯化钠溶液中不容易失去电子,腐蚀的倾向性较小。镉镀层的腐蚀电流密度(0.001 92 mA/cm<sup>2</sup>)比镀锌层(0.146 55 mA/cm<sup>2</sup>)小得多,说明镉镀层在电解质中溶解速度小,耐腐蚀性能优异。

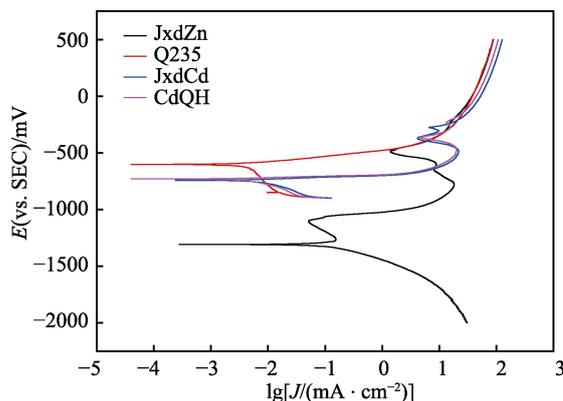


图 10 几种材料的极化曲线图

Fig.10 Polarization plot of several materials

表 2 电化学测试结果

Tab.2 Electrochemical test results

	$E_{\text{corr}}/\text{mV}$	$J_{\text{corr}}/(\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2})$
Q235	-601	0.007 69
Zn coating	-1307	0.146 55
Cd coating	-743	0.001 92
Cd coating intensify	-732	0.000 96

图 11、12 为机械镀镉层与机械镀锌层的交流阻抗 Nyquist 图,表 3 为使用软件 ZsimpWin 根据图 13 所示的电路图拟合得到的数据, $R_s$  代表溶液电阻, $R_1$

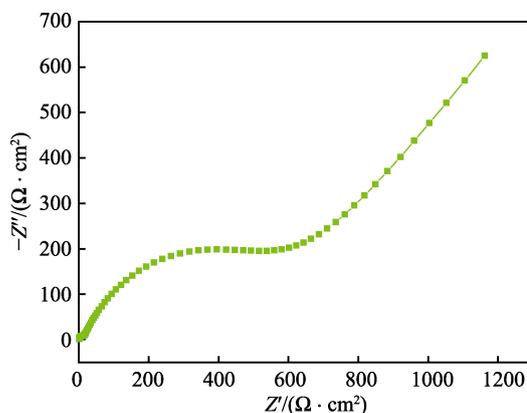


图 11 锌镀层 EIS 交流阻抗测试

Fig.11 Electrochemical impedance spectroscopy of zinc coating

代表镀层电阻,  $R_2$  代表电荷转移电阻,  $C$  代表双电层电容,  $Q$  为常相位角元件,  $W$  为有限扩散层阻抗。从图中可以看出, 镉镀层与锌镀层在低频段均出现了 Warburg 阻抗<sup>[16]</sup>, 其反映了浓度和扩散对电极反应的影响, 很可能是由于镀层表面的离子扩散引起的。镉镀层的阻抗弧要更靠上且弧半径更长, 结合拟合得到的数据, 镉镀层的电荷转移电阻  $R_2$  为 60.6  $\Omega$ , 而锌镀层的电荷转移电阻  $R_2$  只有 11.29  $\Omega$ 。说明在 5% 的氯化钠溶液中, 镉镀层发生腐蚀要困难得多, 而锌镀层则较容易发生腐蚀, 即镉镀层的耐蚀性要大大优于锌镀层。

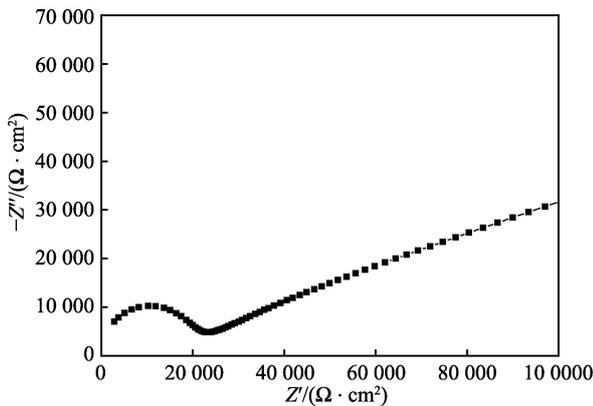


图 12 镉镀层 EIS 交流阻抗测试  
Fig.12 Electrochemical impedance spectroscopy of cadmium coating

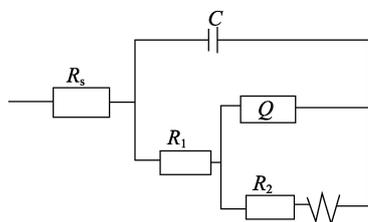


图 13 用于拟合阻抗的电路图  
Fig.13 Equivalent circuit used for fitting of the impedance spectra

表 3 镉镀层与锌镀层的极化电阻  
Tab.3 Polarization resistance of cadmium coating and zinc coating

Sample	$R_s/\Omega$	$R_1/\Omega$	$R_2/\Omega$
Cd	0.0021	19 120	60.6
Zn	0.2264	596.3	11.29

用钢制刀在试样表面划出十字交叉划痕(一次划到基体), 并放入 5% 的分析纯氯化钠溶液中(在室温下), 经过 250 h 的浸泡试验后, 可以观察到试样表面在氯离子的腐蚀下, 只出现了镉镀层的减薄, 在划格区域与未划格区域均没有出现红锈(如图 14)。这也说明了在 5% 的氯化钠溶液中, 镉镀层相对于铁基体为阳极性镀层, 与电化学测试得到的结果相同。在此条件下发生腐蚀时, 镉镀层先腐蚀, 待镉镀层腐蚀

完后, 铁基体才发生腐蚀, 即使镉镀层表面出现划痕、漏镀、裂缝等缺陷, 镉镀层对铁基体仍能起到良好的保护性作用。



图 14 划格试样在 5% 的氯化钠溶液中浸泡 250 h  
Fig.14 Cross-cut sample immersed in 5% sodium chloride solution for 250 h

中性盐雾加速腐蚀试验结果见图 15、表 4。机械镀镉试样(20  $\mu\text{m}$ ) 出现 5% 的红锈时间为 600 h, 机械镀锌试样(20  $\mu\text{m}$ ) 出现 5% 的红锈时间为 72 h。可以得出在中性盐雾试验条件下, 机械镀镉层的防腐性能约为机械镀锌层的 9 倍, 这与电化学测试的结果相符合。



图 15 机械镀镉与机械镀锌试样的盐雾试验结果  
Fig.15 Salt spray test results of mechanical cadmium plating and mechanical galvanizing

表 4 中性盐雾试验结果  
Tab.4 Results of neutral salt spray experiment

Category	White rust time/h	5% red rust time/h
Cadmium plating(20 $\mu\text{m}$ )	200	600
Zinc plating(20 $\mu\text{m}$ )	36	72

### 3 结论

1) 采用机械沉积的方法在 Q235 试样表面制备了镉镀层。镀层是由镉粉颗粒通过物理化学作用紧密堆叠在一起, 并且存在微孔的结构。镀层由单质镉与少量的锡组成, 不存在两者的化合物。

2) 机械镀镉层孔隙率测试结果为 0, 镉镀层与基体之间的结合强度良好。

(下转第 229 页)

- LI Shui-qing, MI Liang, DING Yi, et al. The effect of nickle on porosity and corrosion resistance of chromium oxide coating[J]. Surface technology, 2011, 40(3): 8-10.
- [12] 糜亮, 李水清, 丁毅, 等. 碳钢表面等离子喷涂  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  涂层及其耐腐蚀性能[J]. 腐蚀与保护, 2011(2): 113-115.
- MI Liang, LI Shui-qing, DING Yi, et al. Corrosion resistance of plasma sprayed  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  coating on carbon steel[J]. Corrosion & protection, 2011(2): 113-115.
- [13] YANG Kai, FENG Jing-wei, ZHOU Xia-ming, et al. Microstructural characterization and strengthening-toughening mechanism of plasma-sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-Cr}_2\text{O}_3$  composite coatings[J]. Journal of thermal spray technology, 2012, 21(5): 1011-1024.
- [14] ZAVAREH Mitra Akhtari, MOHAMMED Sarhan Ahmed Aly Diaa, RAZAK Bushroa Binti Abd, et al. Plasma thermal spray of ceramic oxide coating on carbon steel with enhanced wear and corrosion resistance for oil and gas applications[J]. Ceramics international, 2014, 40(9): 14267-14277.
- [15] ZAVAREH Mitra Akhtari, MOHAMMED Sarhan Ahmed Aly Diaa, ZADEH Ramin karim, et al. Analysis of corrosion protection behavior of  $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-TiO}_2$  oxide ceramic coating on carbon steel pipes for petroleum industry[J]. Ceramics international, 2017, 44(6): 568.
- [16] 任伟. 等离子喷涂  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  涂层的显微硬度及耐磨性能研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(22): 178-180.
- REN Wei. Research on microhardness and wear resistance of plasma sprayed  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  coating[J]. Hot working technology, 2017, 46(22): 178-180.
- [17] 何艳玲, 王引真, 王维东.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  陶瓷涂层耐蚀性的研究[J]. 石油工程建设, 2000, 26(2): 6-8.
- HE Yan-ling, WANG Yin-zhen, WANG Wei-dong. An investigation on the corrosion resistance properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  ceramic sprayed coatings[J]. Petroleum engineering construction, 2000, 26(2): 6-8.

(上接第 223 页)

3) 在 5% 的氯化钠溶液中, 镉镀层相对于 Q235 基体属于阳极性保护镀层, 通过电化学试验以及中性盐雾试验, 得出镉镀层耐腐蚀性能优异。

#### 参考文献:

- [1] HUTTUNEN-SAAIRIVIRTA E, KORPINIEMI H, KUOKKALA V T, et al. Corrosion of cadmium plating by runway de-icing chemicals: Study of surface phenomena and comparison of corrosion tests[J]. Surface and coatings technology, 2013, 232: 101-115.
- [2] ZHU Li-qun, LI Min-wei, LIU Hui-cong. Research of accelerated corrosion test of zinc cadmium coating on high-strength steel[J]. Acta aeronautica et astronautica sinica, 2006, 27(2): 341-346.
- [3] TULEUSHEV Y Z, VOLODIN V N, ZHAKANBAEV E A. Tantalum-cadmium film coatings: Preparation, phase, composition and structure[J]. Physics of metals and metallurgy, 2015, 116(1): 56-62.
- [4] MOHAN K S, RAVI K V, SHASHI K M E, et al. Mechanical characterization and fracture toughness of electroplated cadmium coating of Al-Zn alloy, T6[C]// International conference on functional materials. [s. l.]: AIP conference proceedings, 2017: 176-180.
- [5] 刘强, 林乃明, 沙春鹏, 等. 钢铁材料电镀镉的研究现状[J]. 表面技术, 2017, 46(1): 146-156.
- LIU Qiang, LIN Nai-ming, SHA Chun-peng, et al. Recent developments in cadmium electroplating of iron and steel materials[J]. Surface technology, 2017, 46(1): 146-156.
- [6] 翟秀静. 重金属冶金学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2011: 209-211.
- ZHAI Xiu-jing. Metallurgy of heavy metals[M]. Beijing: Metallurgical industry press, 2011: 209-211.
- [7] NARUSCH M J. Dry impact plating technology[J]. Metal finish, 1990, 88(7): 15-18.
- [8] MARJORICE H S, KIM B G. Composition and process for mechanical plating of nickel-containing coatings on metal substrates: US, 5587006[P]. 1996-12-24.
- [9] BARTLETT I, LONG E, ROWAN A, et al. Mechanical plating of zinc alloys: US, 0182337(A1)[P]. 2002-12-05.
- [10] GORDON M Allison. Mechanical plating[J]. Metal finish guidebook, 2001, 99(1A): 399-402.
- [11] COCH L G, SATOW A. Process for plating adherent co-deposit of aluminum, zinc, and tin onto metallic substrates, and apparatus: US, 4880132[P]. 1989-11-14.
- [12] 王胜民, 何明奕, 刘丽, 等. 机械镀锌沉积机理的研究[J]. 材料科学与工艺, 2008, 16(4): 535-538.
- WANG Sheng-min, HE Ming-yi, LIU Li, et al. Mechanism of mechanical deposition in mechanical plating[J]. Materials science and technology, 2008, 16(4): 535-538.
- [13] GB/T 17721—1999, 金属覆盖层孔隙率实验 铁试剂实验[S].
- GB/T 17721—1999, Porosity test of metal coating—iron reagent experiment[S].
- [14] GB/T 5270—2005/ISO2819: 1980, 金属基体上的金属覆盖层电沉积和化学沉积层附着强度实验方法评述[S].
- GB/T 5270—2005/ISO2819: 1980, Review of experimental methods for adhesion strength of electrodeposited and chemically deposited coatings on metal substrates[S].
- [15] GB/T 10125—2012/ISO9227: 2006, 人造气氛腐蚀实验盐雾实验[S].
- GB/T 10125—2012/ISO9227: 2006, Artificial atmosphere corrosion test salt spray experiment[S].
- [16] 刘鹏, 王旭东, 蔡健平, 等. A100 钢低氢脆刷镀镉镀层海洋环境腐蚀行为研究[J]. 材料工程, 2012(6): 54-58.
- LIU Peng, WANG Xu-dong, CAI Jian-ping, et al. Corrosion behaviour of low hydrogen brittleness brush plating cadmium on A100 steel in marine environment[J]. Journal of materials engineering, 2012(6): 54-58.