

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2024.04.002

碳素钢电镀 Ni/Cr 装饰性镀层性能的研究

朱志远¹, 周琦^{1*}, 徐滨², 王志平²

(1. 沈阳理工大学 环境与化学工程学院, 辽宁 沈阳 110159;

2. 南通德上汽车配件制造有限公司, 江苏 南通 226499)

摘要: 碳素钢上电镀装饰性双层镍套铬的孔隙率、形貌、粗糙度、抗拉强度以及钝化性能决定产品的质量。用贴滤纸法测镀层的孔隙率, 用形状测量激光显微系统测镀层的表面粗糙度和三维形貌, 同时, 测试了镀层的抗拉强度和电化学阻抗谱。结果显示: 60[#]和 55[#]两种碳素钢镀单层半光亮镍后直达基体铁的孔隙率都最多, 平均数为 16.82 个·cm⁻²; 除氢后相对于未除氢的镀铬层, 60[#]钢样品直达基体铁的孔隙率下降了 0.19 个·cm⁻², 而 55[#]钢样品的孔隙率增加了 1.46 个·cm⁻²。60[#]和 55[#]钢的单层镍表面粗糙度最高, 分别为 0.460 μm 和 0.523 μm, 双层镍上镀铬后 60[#]钢样品的表面粗糙度降低了 0.036 μm, 而 55[#]钢样品的表面粗糙度增加了 0.016 μm, 除氢降低了铬镀层的粗糙度。镀铬镀层碳素钢抗拉强度最小, 除氢不仅能提高镀铬后的抗拉强度, 而且增加了 60[#]钢镀层的钝化性能。

关键词: 电镀; 双层镍; 孔隙率

中图分类号: TQ153.1 **文献标识码:** A

Study on the properties of Ni/Cr decorative electroplated deposits on carbon constructional steel

Zhu Zhiyuan¹, Zhou Qi^{1*}, Xu Bin², Wang Zhiping²

(1. School of Environmental and Chemical Engineering, Shenyang University of Technology,

Shenyang 110159, China; 2. Nantong Deshang Auto Parts Manufacturing Co., Ltd.,

Nantong 226499, China)

Abstract: The porosity, morphology, roughness, tensile strength and passivation properties of the decorative double-layer Ni/Cr plated on carbon steel determine the quality of the product. The porosity of the coating was measured by the wetting filter paper method, the surface roughness and three-dimensional morphology of the coating were measured by the laser microscopy system, and the tensile strength and electrochemical impedance spectrum of the coating were tested. The results showed that carbon steels 60[#] and 55[#] had the highest porosity of 16.82 pcs/cm² after being plated with a single layer of semi-bright nickel. Compared to the chrome-plated after hydrogen removal, the porosity of 60[#] steel sample decreased by 0.19 pcs/cm², while the porosity of the 55[#] steel increased by 1.46 pcs/cm². The single-layer nickel surface roughness of 60[#] and 55[#] steel was 0.460 μm and 0.523 μm, respectively. The surface roughness of 60[#] steel sample decreased by 0.036 μm after chrome plating, while the surface roughness of 55[#] steel sample increased by 0.016 μm, hydrogen removal process decreased roughness of chrome plating. The tensile strength of carbon steel after chrome plating is the smallest, and can not only im-

收稿日期: 2023-03-22

修回日期: 2023-09-12

作者简介: 朱志远(1999—), 男, 硕士研究生, email: 2408899727@qq.com

*通信作者: 周琦(1970—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为电镀、涂装、涂料和电化学加工, email: 18909829862@163.com

基金项目: 辽宁省重点研发计划项目(2020JH2/10100011)

prove the tensile strength after chromium plating, but also increase the passivation performance of the plating on 60# steel.

Keywords: electroplating; double layer nickel; porosity

我国电镀行业半光亮镍/全光亮镍组合的双层镍和半光亮镍/高硫镍/光亮镍组合的3层镍应用较多^[1]。电镀多层镍的过程中,可以通过控制各种工艺参数提高镀层的耐腐蚀性能、降低镀层的氢脆,比如:增加镀层的厚度^[2-3]、控制多层镍之间的电位差^[4]、电流密度^[5]、控制晶粒的大小^[6-9]和封闭镍镀层孔隙^[10]等。一般情况,半光亮镍/光亮镍的厚度比控制为2:1,电位差在125 mV时,产品的耐腐蚀性能较好^[11]。小晶粒的镍镀层比大晶粒的镍镀层的击穿电位高、腐蚀速率低,因为粒径小的镍镀层有较高的晶核密度,可以快速形成连续的保护性钝化膜^[12]。邝少林等^[13]提出镀半光亮镍/高硫镍/光亮镍时,高硫镍与半光亮镍电位差为190 mV,高硫镍层与光亮镍的电位差50~60 mV,光亮镍与半光亮镍的电位差为130~180 mV,能保证腐蚀沿横向进行。电镀过程中,阴极氢气的逸出会导致镀层形成氢脆、孔隙等^[14-16]。空气中的腐蚀介质通过镍镀层孔隙与下面的基体碳素钢接触,基体金属碳素钢作为阳极,镀层金属作为阴极,形成一个微电池腐蚀^[17-19]。目前,如何降低碳素钢基体上电镀镍/镍/铬装饰性镀层的孔隙、提高碳钢的抗拉强度、降低镀层的粗糙度等性能,是新兴技术对提升表面处理质量的要求。本文对镀半光亮单层镍、镀半光亮镍/光亮镍双层镍、双层镍上镀铬和之后除氢4种不同镀层组合工艺进行研究,旨在为提高镍/铬装饰性镀层的耐蚀性、提高抗拉强度和降低粗糙度。

1 实验方法

基材分别为55#和60#两种优质碳素结构钢,55#钢的含碳量为0.55%,60#钢的含碳量为0.60%。前处理工艺流程为:研磨→初段电解除油1→超声波除油→初段电解除油2→酸电解除锈→阴极电解→阳极电解→活化1→活化2。电镀工艺参数如表1所示。

4种镀层组合分别为(1)单层镍:基材前处理后镀一层半光亮镍(12~16 μm);(2)双层镍:半光亮镍上镀6~8 μm全光亮镍,半光亮镍与全光亮镍之间的

表1 电镀工艺及参数
Tab.1 Electroplating process and parameters

镀层类型	镀液主组分	添加量/(g·L ⁻¹)	时间/s	温度/℃	pH
半光亮镍	硫酸镍	230~270	720~846	50~60	3.5~4.0
	氯化镍	40~55			
	硼酸	40~55			
全光亮镍	硫酸镍	250~350	600~705	50~60	3.8~4.3
	氯化镍	55~75			
	硼酸	40~60			
镀铬	铬酸	200~250	280~329	30~40	
	硫酸(95%~98%)	0.8~1.5			

电位差控制在120~150 mV之间;(3)双层镍镀铬:在半光亮镍上镀全光亮镍,然后镀铬;(4)除氢:半光亮镍/全光亮镍/镀铬后进行除氢。除氢是室温下放入产品,达到200℃后保温6 h,冷却到室温取出。

用贴滤纸法(GB/T 17721—1999)测不同镀层下的孔隙率,测试溶液为铁氰化钾10 g·L⁻¹,氯化铵30 g·L⁻¹,氯化钠60 g·L⁻¹,试纸上蓝色斑点表示到达铁基材表面的孔隙,以蓝色孔隙率表示(个·cm⁻²),黄色点表示孔隙至镀镍层,以黄色孔隙率表示(个·cm⁻²);用VK-X3000形状测量激光显微系统测不同组合镀层的粗糙度和三维形貌。用YHS-299WJ-100 kN拉力机测不同镀层的拉力值(GB/T 16825—1997),当拉力达到最高峰值时,试验自动停止,屏幕显示试验结果。电化学工作站是江苏东华分析仪器有限公司的DH7000C,采用三电极电化学体系测试,测试溶液为3.5 wt.%的NaCl水溶液,温度是15℃,工作电极是面积为1 cm²的待测样品,辅助电极是铂电极,参比电极是饱和甘汞电极,电化学阻抗谱测试时的电位为5 mV,频率范围为0.01 Hz~100 kHz。

2 结果与讨论

2.1 孔隙率

在55#和60#两种碳素钢基体上依次镀单层镍、双层镍和双层镍镀铬的3种镀层的过程中,两种碳

素钢镀层孔隙率的变化情况一致。图1是4种镀层孔隙率滤纸照片和孔隙率柱状图。图1(a)是55#钢4种镀层孔隙率滤纸照片,从镀层表面直达碳素钢

基体的孔隙斑点为蓝色,从镀层表面直达镍镀层的孔隙斑点为黄色。各镀层孔隙率的平均值见图1(b)。

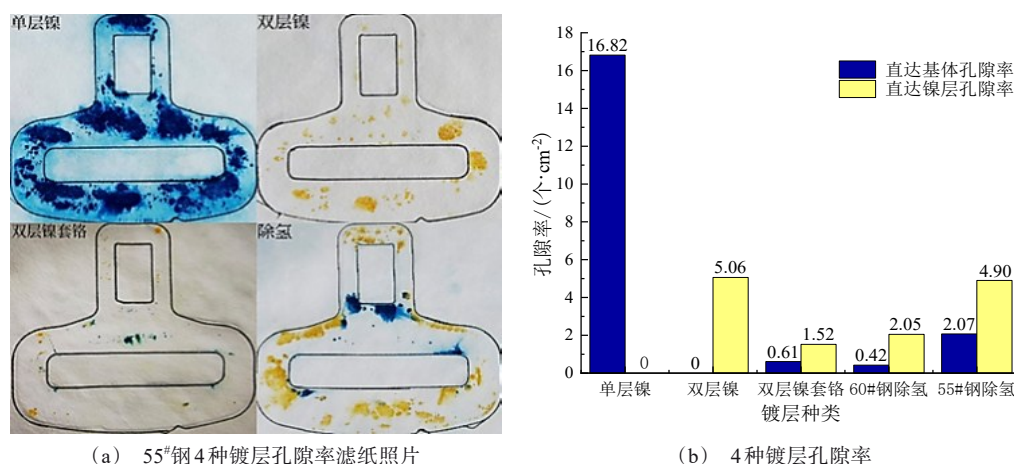


图1 4种镀层孔隙率滤纸照片和孔隙率柱状图

Fig.1 Photos of filter papers and bar charts of porosity of four types of coating

图1(b)中直达碳素钢的孔隙率:双层镍的孔隙率都低于单层镍,镀单层半光亮镍试样的渗透到碳素钢基体的孔隙斑点比较大且多,而在镀全光亮镍后直通到基体的孔隙率大幅下降,说明在镀完全光亮镍后镀层厚度的增加可以封闭大量的孔隙;镀铬后蓝色孔隙率上升,是因为镀铬电流效率极低,通常情况下只有13%~18%,在镀铬过程中会进行以下3个反应,如反应式(1)~反应式(3),其中析氢反应式(2)占据70%以上的电流^[20],阴极大量析氢,氢气从碳素钢和金属铬镀层界面的析出及渗入到碳素钢晶格内,增加了直通到碳素钢基体的孔隙。

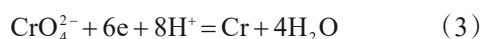
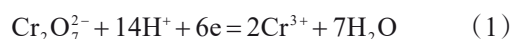


图1(b)中直达镀层镍的孔隙率情况:单层镍的黄色孔隙率为0,即单层镍的钝化膜浸泡孔隙率腐蚀液10 min时,不易被氯化钠腐蚀,没有黄色斑点出现,双层镍即半光亮镍上镀光亮镍后出现了明显的黄色斑点,即全光亮镍孔隙率显著高于单层镍,说明全光亮镍层的钝化膜比半光亮镍层的孔隙更大。镀铬后黄色孔隙率基本下降,说明镀铬层比较致密的时候对金属镍的腐蚀有阻挡作用。

除氢后60#钢的直达基体孔隙率减少了0.19个·cm⁻²,直达镍层的孔隙率增加0.53个·cm⁻²,

说明60#钢试样渗氢量较少,逸出的氢气体积较小,而且在除氢过程中镀层经历了高温烘烤,导致孔隙周围镀层晶粒收缩重排,封闭了部分直通基体的孔隙率,因此有一部分直通到铁的孔隙在200℃的高温下6 h后收缩消失,见图1(b)的60#钢除氢;除氢后55#钢的直达基体和直达镍层的孔隙率分别增加了1.46个·cm⁻²和3.38个·cm⁻²,说明55#钢的渗氢量较高,在电镀过程中镀层底部聚集氢气较多,在除氢过程中有较大体积氢气排出,较大体积的氢气溢出,破坏了镍镀层的钝化膜甚至镍镀层,增加了直通到镍和直通到基体的孔隙率,见图1(b)的55#钢除氢。

2.2 三维形貌

图2是55#钢和60#钢的表面三维形貌图。比较4种不同镀层三维形貌的纵坐标的高度最大值,单层镍的纵坐标最大值都高于双层镍的,除氢都低于镀铬。观察图2(a)和图2(b)单层镍的三维形貌图,整个平面有许多细微的凹坑和凸起,而双层镍、双层镍镀铬和除氢的镀层的整个平面不存在细微凸起和细微凹坑,表面相对平整。图2(g)和图2(h)是对半光亮镍/全光亮镍/铬镀层进行除氢之后的三维形貌图,相对于图2(e)和图2(f)的双层镍镀铬的三维形貌图,整个平面的红色面积减小,高度差缩小,这是因为除氢过程中镀层或基体金属晶格中的氢气受热体积膨胀,排出氢气,导致镀层的体积变小,凸起降低,

镀层晶粒更加致密,因此除氢后镀层的表面形貌起伏降低;除氢后,图 2(g)比图 2(h)凸起的面积较多,但凹坑的面积较少。

总之,镀单层镍的状态下,工件的表面最不平

整,在镀双层镍后表面平整度有比较大的改善,说明全光镍相对于半光镍有较好的整平作用,而在除氢后的表面不平整度相对双层镍套铬后又有所降低。

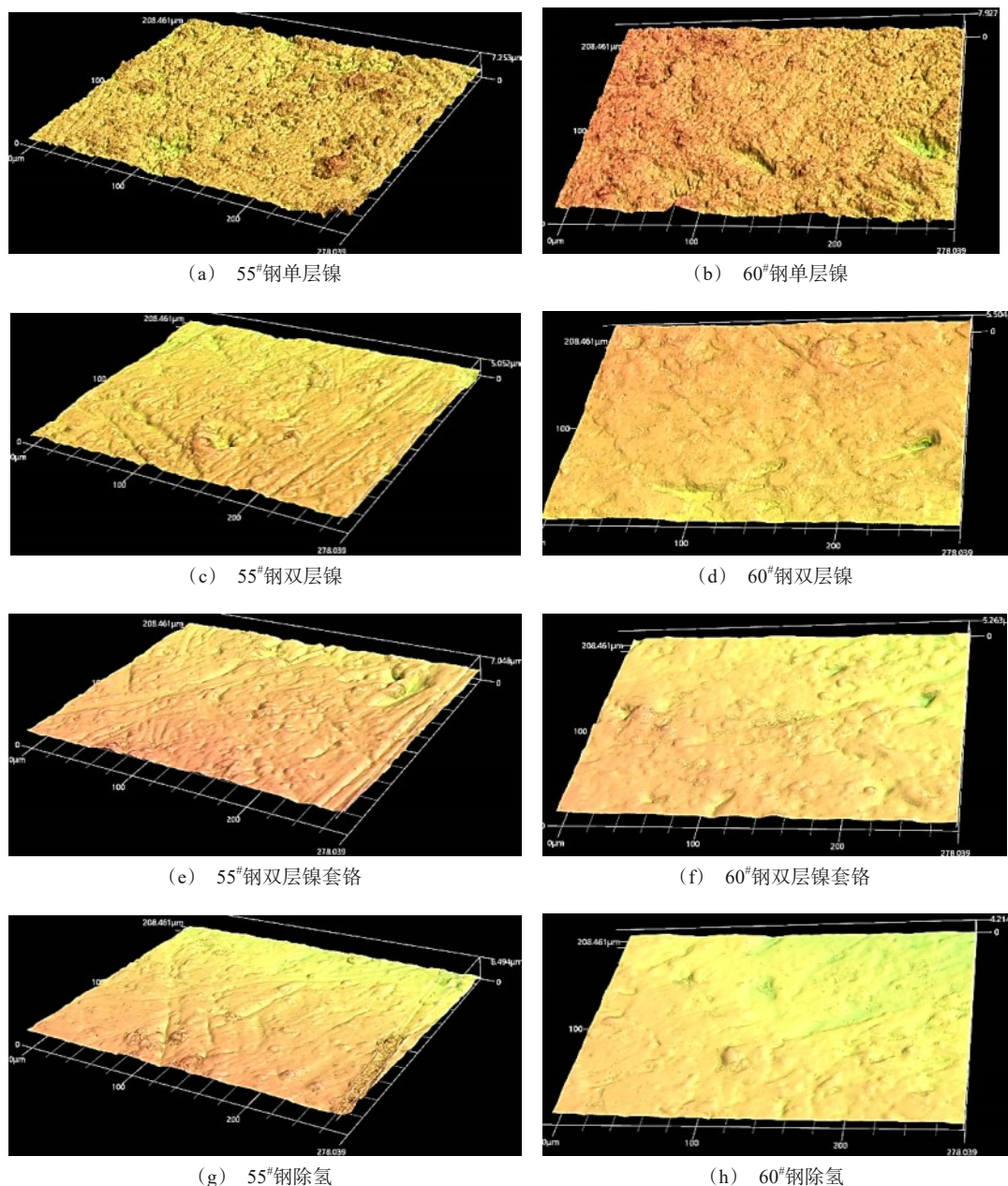


图 2 55#钢和 60#钢 4 种镀层的表面三维形貌图

Fig.2 Three-dimensional surface morphology of four-type coatings on 55# steel and 60# steel

2.3 镀层表面粗糙度

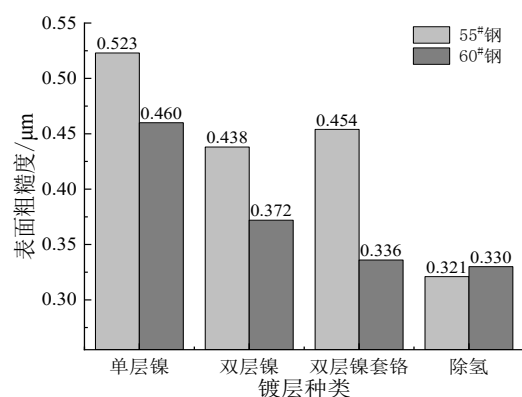
图 3 是 4 种镀层的表面粗糙度图。图 3(a)是 55#钢和 60#钢分别进行了 3 组测试计算的平均表面粗

糙度柱状图。图 3(a)显示,镀单一半光亮镍后产品的粗糙度最高,在镀双层镍后产品的粗糙度有所下降,而双层镍套铬的试样的粗糙度出现两种情况,

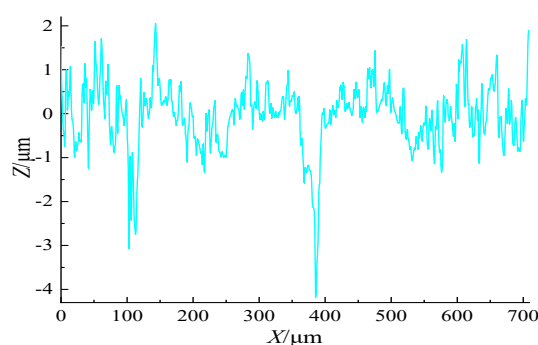
60#钢的3组实验在镀铬后粗糙度下降;另外55#钢的3组在镀铬后产品的粗糙度有略微上升;除氢后产品的粗糙度最小。

图3(b)是60#钢的单层镍表面轮廓曲线图。从图3(b)看出,镀单层镍的表面的凸起高度高于 $1\mu\text{m}$ 的波峰共10个,凹陷的深度低于 $1\mu\text{m}$ 的波谷共11个,表面微观起伏最大,与图3(c)、(d)、(e)相比,有宏观的起伏外还有及其细微的微观起伏。从图3

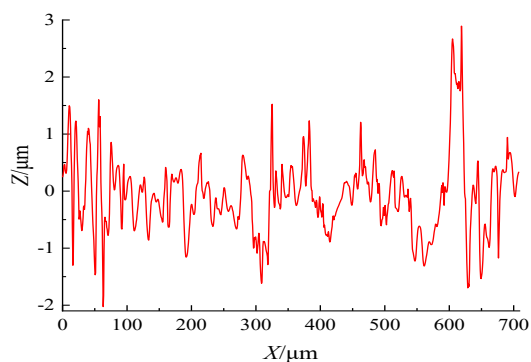
(c)看出,镀双层镍的表面凸起高于 $1\mu\text{m}$ 的波峰有9个,凹陷的深度低于 $1\mu\text{m}$ 的波谷11个,表面凸起和凹陷起伏较为剧烈。从图3(d)和图3(e)看出,双层镍镀铬和除氢后表面的波峰高于 $1\mu\text{m}$ 的和波谷低于 $1\mu\text{m}$ 的都是5个。图3(b)、3(c)、3(d)表面起伏都超过 $2\mu\text{m}$ 。而图3(e)除氢的表面起伏都低于 $2\mu\text{m}$,相对其他3个镀层起伏坐标最低,平整状态最好,粗糙度最低。



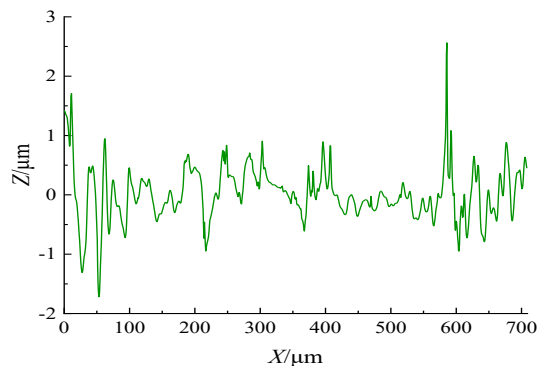
(a) 表面粗糙度



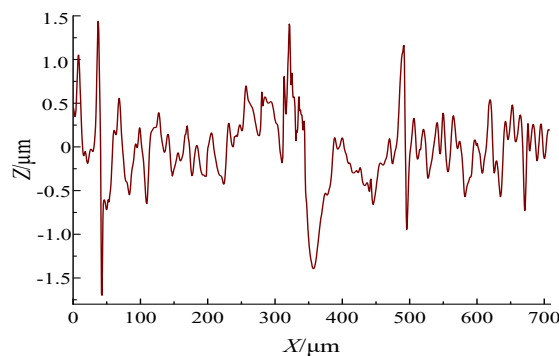
(b) 60#钢单层镍表面轮廓曲线图



(c) 60#钢双层镍表面轮廓曲线图



(d) 60#钢双层镍镀铬表面轮廓曲线图



(e) 60#钢除氢表面轮廓曲线图

图3 4种镀层的表面粗糙度图

Fig.3 The surface roughness chart of the four types of coatings

2.4 镀层抗拉强度

图 4 是两种钢材不同镀层的抗拉强度 R_m , 所有试样都被拉断, 双层镍的抗拉强度高于单层半光亮镍, 这是因为双层镍是在单层镍的基础上镀的, 增加了镍镀层的厚度, 说明在单层镍上镀光亮镍, 能略微提高产品的抗拉强度。在双层镍上电镀金属铬后, 抗拉强度降低, 说明镀铬降低了产品的抗拉强度, 是因为镀铬会使碳素结构钢产生氢脆, 在镀铬的过程中阴极产品上有大量的氢气析出, 氢原子或者氢气渗入钢的晶格中, 极大地造成结构钢的脆性, 因此镀铬后碳素结构钢的抗拉强度比较小; 在后续的除氢工序可以解决碳素结构钢在上一步镀铬产生的氢脆问题。

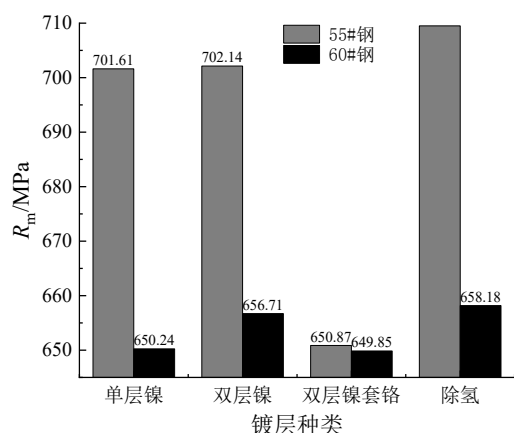


图 4 4 种镀层的抗拉强度

Fig.4 The tensile strength chart of the four types of coatings

2.5 镀层钝化性能

图 5(a) 和图 5(b) 分别是 55# 钢和 60# 钢 4 种镀层的电化学极化曲线, 图 5(c) 和图 5(d) 是 60# 钢阻抗谱。钝化能力是相对于镀层表面的金属而言的, 金属镍和铬都具有钝化性能, 除了图 5(a) 的阳极极化曲线的除氢镀层没有钝化区域出现, 其他的阳极极化曲线都有钝化区域。图 5(a) 致钝电位从低电位到高电位依次为: 双层镍套铬、单层镍、双层镍, 图 5(b) 中最负的也是双层镍镀铬, 其次是除氢的, 双层镍和单层镍的致钝电位较正, 说明铬镀层的致钝能力最强, 致钝能力较弱的是双层镍和单层镍。图 5(b) 60# 钢维钝区域最窄的是单层镍镀层, 其次是双层镍, 除氢和镀铬的维钝区域较宽; 除氢维钝区域电流密度较小; 其次较小的是双层镍套铬; 双层镍镀层维钝电流密度最高, 说明光亮镍在腐蚀介质中不容

易钝化, 腐蚀速度较大。黄色孔隙率和维钝电流密度说明全光亮镍的钝化效果差于单层镍的。图 5(a) 55# 钢的除氢没有出现钝化区域, 是因为其析氢较严重, 除氢后孔隙率上升, 见图 1(a) 和图 1(b), 说明 55# 钢除氢镀层的耐蚀性不如 60# 钢。

图 5(c) Nyquist 图说明, 单层镍的曲线为半圆形, 说明单层镍发生腐蚀的时候, 腐蚀过程为失去电子的电化学步骤控制; 双层镍的曲线高频为半圆形, 低频为直线, 双层镍为电化学步骤和扩散步骤的混合控制; 而双层镍套铬和除氢的镀层的曲线均为直线, 说明它们在盐水中发生腐蚀的时候均为腐蚀介质的扩散控制。

图 5(d) 是单层镍、双层镍、双层镍上套铬和除氢 4 种镀层的 Bode 图, 从低频阻抗值看, 除氢的最高, 说明 60# 钢除氢后的钝化膜阻碍电化学腐蚀的电子流通的能力最强, 样品表面的镍镀层和铬镀层生成了致密氧化膜; 排第二的是镀双层镍套铬; 排第三的是镀单层镍的; 最差的是镀双层镍的, 说明光亮镍的钝化性能弱于半光亮镍, 也弱于金属铬。阻抗谱阻抗值显现的是电流通过时镀层对腐蚀介质中电子流通的阻碍作用, 阻碍作用源于金属镍和金属铬产生的钝化膜。在 200 °C 除氢后, 镍镀层表面产生了致密的氧化膜 $\text{NiO}^{[21-22]}$, 这层致密的氧化膜覆盖和包裹镀层表面, 形成了一道“保护屏障”, 因此其耐腐蚀性能有所提高。铬的水合氧化物构成为: Cr_2O_3 、 $\text{Cr}(\text{OH})_3$ 、 $\text{CrOOH} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{Cr}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ 、 CrO_3 等^[23], 除氢后铬的水合氧化物转变成铬的氧化物, 同时镀铬表面钝化膜主要由 Cr_2O_3 和 $\text{Cr}(\text{OH})_3$ 组成^[24]。随着对钢表面镀铬除氢温度和保温时间的增加, 镀层晶粒变大, 表面氧化程度加剧, 耐蚀性能显著增强^[25]。镀层的耐腐蚀性能和阻抗值是不同的两个指标, 阻抗值反应的是镀层的钝化性能, 耐腐蚀性能是孔隙率和阻抗值的综合表现。从半光亮镍电镀后经过一步水洗直接电镀全光亮镍, 半光亮镍镀层处于活化状态电镀光亮镍而非钝化状态电镀光亮镍, 二者融为一体。全光亮镍有含硫的初级添加剂、次级光亮剂和辅助光亮剂, 半光亮镍一般只含不含硫的次级光亮剂没有初级光亮剂。全光亮镍镀层中含有硫化镍, 硫化镍电位低, 硫化镍导致金属镍不易钝化, 直达镍的孔隙较多, 所以 60# 钢双层镍的阻抗值低于单层镍。

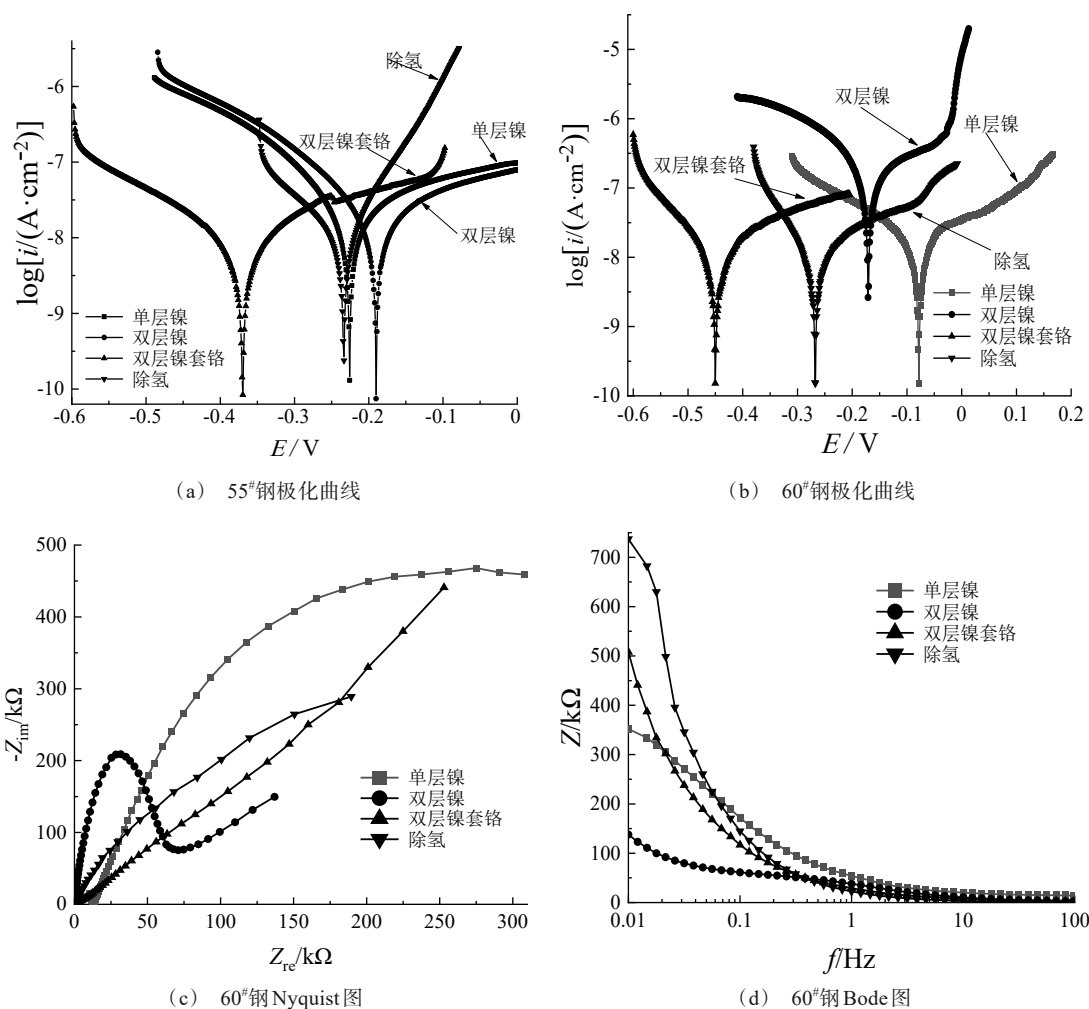


图5 4种镀层的电化学测试图

Fig.5 Electrochemical test chart of four types of coatings

3 结论

(1)直达基体碳素结构钢的孔隙率:表面电镀单层半光亮镍最多,半光亮镍上电镀全光亮镍后孔隙率消失,双层镍镀铬后,直达基体孔隙率略微增加到 $0.61 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-2}$,除氢后60#钢样品相对于双层镍套铬的孔隙率降低了 $0.19 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-2}$,55#钢样品相对于双层镍套铬的孔隙率增加了 $1.46 \text{ 个} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。

(2)60#和55#钢上镀单一半光亮镍产品的粗糙度最高,分别为 $0.460 \mu\text{m}$ 和 $0.523 \mu\text{m}$,全光镍相对于半光镍有较好的整平作用,双层镍套铬后60#钢样品的 R_a 降低了 $0.036 \mu\text{m}$,而55#钢样品的 R_a 增加了 $0.016 \mu\text{m}$,双层镍套铬除氢后的 R_a 最小,分别为 $0.330 \mu\text{m}$ 和 $0.321 \mu\text{m}$ 。

(3)优质碳素结构钢表面电镀铬后的抗拉强度降低,除氢工序可以消除结构钢的氢脆,全光亮镍电镀对结构钢的抗拉强度影响比较小。

(4)60#钢除氢后的镀层钝化能力比55#钢强,其单层半光亮镍的钝化性能强于双层镍的全光亮镍。综合性能最佳的镀层组合为半光亮镍/全光亮镍/镀铬后进行除氢。

参考文献

- [1] 王宗雄, 彭海泉, 王超, 等. 多层镀镍工艺及相关配方[J]. 电镀与涂饰, 2015, 34(16): 940-952.
- [2] 袁诗璞. 几种多层电镀工艺的讨论[J]. 电镀与涂饰, 2013, 32(6): 13-15.
- [3] 王瑞祥. 适用于摩托车零件的多层镍电镀工艺[J]. 电镀与涂饰, 1995(3): 12-15.

- [4] 吴双成. 多层镍电位差减小的原因和控制[J]. 电镀与涂饰, 2020, 39(19): 1324-1327.
- [5] Pathak S, Guinard M, Vernooij G M, et al. Influence of lower current densities on the residual stress and structure of thick nickel electrodeposits[J]. Surface & Coatings Technology, 2011, 205: 3651-3657.
- [6] Nasirpour F, Sanaeian M R, Samardak A S, et al. An investigation on the effect of surface morphology and crystalline texture on corrosion behavior, structural and magnetic properties of electrodeposited nanocrystalline nickel films[J]. Applied Surface Science, 2014, 292(C): 795-805.
- [7] Cheng W, Ge W, Yang Q, et al. Study on the corrosion properties of nanocrystalline nickel electrodeposited by reverse pulse current[J]. Applied Surface Science, 2013, 276: 604-608.
- [8] Qin L Y, Lian J S, Jiang Q. Effect of grain size on corrosion behavior of electrodeposited bulk nanocrystalline Ni [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(1): 82-89.
- [9] Gu C D, Lian J S, He J T, et al. High corrosion-resistance nanocrystalline Ni coating on AZ91D magnesium alloy[J]. Surface & Coatings Technology, 2005, 200(18): 5413-5418.
- [10] 曹鑫帅, 陈云瑞, 白亚慧, 等. 封闭工艺对薄镍耐蚀性的影响[J]. 电镀与精饰, 2021, 43(10): 36-40.
- [11] 周永令, 李金学. 双层镍工艺在我厂的应用[J]. 电镀与精饰, 1987(3): 3 5-37.
- [12] Rofagha R, Langer R, El-Sherik A M, et al. A comparison of the corrosion behaviour of nanocrystalline and normal crystalline nickel[J]. MRS Proceedings, 1991, 238: 751-751.
- [13] 邝少林, 范小平, 杨暖辉, 等. 高耐蚀性多层镍体系及其在摩托车上的应用(I)—多层镍电镀工艺[J]. 电镀与涂饰, 1995(3): 8-11.
- [14] Edigaryan A A, Lubnin E N, Lyakhov B F, et al. Hydrogen content in chromium and multilayer nickel-chromium coatings deposited by periodic current[J]. Protection of Metals, 2003, 39(5): 405-410.
- [15] Macnaughtan D J, Hothersall A W. The causes and prevention of pitting in electrodeposited nickel[J]. Transactions of the IMF, 2017, 4(1): 9-24.
- [16] 赵金航, 陈文举. 影响镀铬层孔隙率的因素和解决措施[J]. 新技术新工艺, 2021(10): 41-43.
- [17] Brenska J A, Lapinski J, Pletcher D, et al. Porosity of nickel electrodeposits on mild steel using electrochemical impedance spectroscopy[J]. Transactions of the IMF, 2012, 90(3): 156-160.
- [18] Wang D G, Li F H, Shi Y, et al. Optimization of the preparation parameters of high-strength nickel layers by electrodeposition on mild steel substrates[J]. Materials, 2021, 14(18): 5461-5461.
- [19] Yu Z M, Zhu Y K, Niu Y S, et al. Preparation and adhesion performance of multilayered Ni coatings deposited by ultrasonic-assisted electroplating[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2013, 27(2): 136-142.
- [20] 关山, 张琦, 吴隽贤, 等. 有机添加剂对镀铬阴极过程动力学的的影响[J]. 电镀与环保, 2000(5): 6-8.
- [21] 常季, 陈吉, 黄澳. 热处理对 Ni-P 镀层耐硫酸露点腐蚀性能的影响[J]. 金属热处理, 2017, 42(2): 175-179.
- [22] 贾卫平, 姚井龙, 雍帆. 热处理对 Ni-TiN 纳米复合镀层结构和性能的影响[J]. 表面技术, 2017, 46(7): 110-116.
- [23] 殷丽燕. 采用电化学方法测量镀铬板表面金属铬和氧化铬的研究[J]. 辽宁科技学院学报, 2014, 16(4): 30-32.
- [24] 李秀军, 韦晓, 薛彦鹏. 镀铬板表面初始腐蚀机制的研究[J]. 电镀与涂饰, 2021, 40(5): 369-376.
- [25] 王心悦, 王吉会, 高志明, 等. 热处理对电沉积纳米晶铬镀层微观结构及耐蚀性的影响[J]. 表面技术, 2019, 48(12): 59-67.