

# 表面富铬化处理对不锈钢表面性能影响

欧志东<sup>1</sup>, 刘永良<sup>1</sup>, 汪洋<sup>1</sup>, 邓洪达<sup>2</sup>, 刘建<sup>1</sup>, 罗均<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中石油西南油气田分公司川东北气矿, 四川 达州

<sup>2</sup>重庆科技大学冶金与动力工程学院, 重庆

收稿日期: 2024年12月22日; 录用日期: 2025年1月15日; 发布日期: 2025年1月22日

## 摘要

目的: 本文通过优化富铬化处理液成分浓度, 在304不锈钢表面制备亚光、硬度和耐点蚀性能优良的薄膜。方法: 本文选择柠檬酸( $C_6H_8O_7$ )、低浓度磷酸( $H_3PO_4$ )和双氧水( $H_2O_2$ )作为基础溶液组份, 采用阳极氧化法处理304不锈钢表面, 以表面薄膜的亚光度、粗糙度和硬度作为性能指标探究最佳亚光处理304不锈钢溶液配方; 结合动电位扫描和SEM技术比较用最佳溶液配方处理前后不锈钢的耐点蚀性能差异。结果: 在工艺条件温度70°C和氧化时间1 h条件下, 最佳阳极氧化溶液配方为28 g·L<sup>-1</sup>  $H_3PO_4$ 、20 g·L<sup>-1</sup>  $C_6H_8O_7$ 、200 g·L<sup>-1</sup>  $H_2O_2$ 。磷酸和柠檬酸对亚光度、粗糙度和硬度影响明显; 双氧水对亚光度和粗糙度影响小, 但对硬度影响明显。采用最佳配方亚光处理液处理304不锈钢后, 不锈钢的亚光度为10.6%, 粗糙度增加了2.87倍, 硬度增加为1.1倍, 点蚀电位明显正移, 表面点蚀孔径明显减小。结论: 亚光处理使304不锈钢表面呈亚光; 表面硬度未下降; 耐点蚀性明显提高。

## 关键词

亚光, 不锈钢, 阳极氧化, 磷酸, 柠檬酸, 双氧水

# Anodization Treatment of 304 Stainless Steel Effect on Surface Properties

Zhidong Ou<sup>1</sup>, Yongliang Liu<sup>1</sup>, Yang Wang<sup>1</sup>, Hongda Deng<sup>2</sup>, Jian Liu<sup>1</sup>, Jun Luo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Northeast Sichuan Gas Field, PetroChina Southwest Oil and Gas Field Company, Dazhou Sichuan

<sup>2</sup>School of Metallurgy and Power Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Dec. 22<sup>nd</sup>, 2024; accepted: Jan. 15<sup>th</sup>, 2025; published: Jan. 22<sup>nd</sup>, 2025

## Abstract

**Purpose:** It is aimed to obtain outstanding surface properties of film formed on 304 stainless steel,

**文章引用:** 欧志东, 刘永良, 汪洋, 邓洪达, 刘建, 罗均. 表面富铬化处理对不锈钢表面性能影响[J]. 材料化学前沿, 2025, 13(1): 58-65. DOI: 10.12677/amc.2025.131008

such as matte surface, hardness, pitting resistance by optimizing the concentration of composing in the matte surface treating solution. **Methods:** In this paper critic acid ( $C_6H_8O_7$ ) and lower phosphoric acid ( $H_3PO_4$ ) and hydrogen peroxide ( $H_2O_2$ ) are concerned as the basic solution components, and the surface of 304 stainless steel was treated by anodic oxidation method. The optimal solution concentration of matte surface treatment on 304 stainless steel was obtained by the change of the contents of  $H_3PO_4$ ,  $C_6H_8O_7$ , and  $H_2O_2$  according to matte degree, roughness and hardness of post-surface treated stainless steel. Potentiodynamic technology and SEM were applied to compare pitting corrosion resistance of the stainless steel with and without matte surface treated in the solution with optimal solution composition. **Results:** The results show that the optimal solution is composed of  $28\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}H_3PO_4$ ,  $20\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}C_6H_8O_7$ ,  $200\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}H_2O_2$  at  $70^\circ\text{C}$  for 1 h. Phosphoric acid and critical acid tremendously effect on matte degree, roughness and hardness. Hydrogen peroxide slightly affects matter and roughness, but tremendously effect on hardness. After treating the optimal solution, the stainless steel showed the matte degree of 10.6%, roughness of 0.23, hardness of  $236\text{ HV}_{0.2}$ , and pitting protection potential of  $0.686\text{ V}_{\text{AgCl}/\text{Ag}}$ . **Conclusions:** Matte surface anodization in such optimal solution made the stainless steel with matte surface and even with silvery white metallic luster, with no decrease of hardness, and the tremendous increase of pitting corrosion resistance.

## Keywords

Matte, Stainless Steel, Anodization, Phosphoric Acid, Critic Acid, Hydrogen Peroxide

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

奥氏体不锈钢具有优异耐蚀性的优点, 已被应用到石油天然气站场设备中。奥氏体不锈钢是一类含有 Cr、Ni、Mo、Ti、Cu 和其它元素的铁基合金, 其中 Cr 为主要合金元素, 其含量至少 12.5 wt.%。合金中 Cr 与来自环境中氧原子反应生成致密钝化膜层, 其厚度约 10 个分子层厚。钝化膜由氧化铬和氧化铁组成, 其中氧化铁含量为 10~55 wt.% [1]。钝化膜中氧化铁含量越低, 钝化层的耐化学性越好。在站场设备中 304 不锈钢设备被要求加工成亚光, 以避免户外光照射设备引发光污染, 甚至引发站场安全事故。目前常采用亚光处理技术是将 304 不锈钢加工成表面呈亚光且具有均匀的银白色金属光泽。企业大多数选择机械方法 (如拉丝、喷砂) [2] [3]和化学研磨[4]技术处理不锈钢。但机械法会出现亚光不均匀或金属光泽性偏暗的问题。与机械法相比, 化学法既能保证金属亚光, 又有一定金属光泽性和耐蚀性[5]。化学法常选择盐酸、硝酸、氢氟酸、硫酸等[6]强酸和有毒物质(如氢氟酸)作为酸侵蚀剂处理不锈钢。

因为氢氟酸和硝酸的毒性, 目前研究开发环保表面处理技术成为了研究热点, 如含高浓度硫酸和添加剂的无硝酸白化处理工艺[7], 含  $H_2O_2$  高浓度  $H_2SO_4$  溶液钝化处理工艺[8]。因高浓度硫酸强氧化性和危险性, 屈战民[3]选择含高浓度 HCl、 $H_3PO_4$  和 HAc 复合溶液化学研磨不锈钢, 发现零件表面横向条纹值粗糙度为  $0.6\sim 0.8\ \mu\text{m}$ , 纵向条纹粗糙度为  $0.7\sim 0.9\ \mu\text{m}$ , 且零件表面反射率为 75%, 与其他化学方法相比, 亚光效果明显。但酸中处理后不锈钢表面硬度下降明显[9]。为了避免使用强酸, 目前已开发出含柠檬酸环保型处理液[10], 该化学处理液能提高 316L 和 304 不锈钢耐点蚀性能, 但反应速度低, 且不具有亚光效果。

从目前的研究看出, 兼具不锈钢亚光、硬度和耐点蚀综合性能的环保型亚光处理液成了研究的空白。磷酸和柠檬酸对铁离子络合能力强于铬离子, 不但保证不锈钢表面亚光效果, 而且因表面氧化膜中铬含

量提高从而提高表面膜硬度和耐蚀性能,更为重要的是在表面处理行业中磷酸和柠檬酸都属于环保型成分。因此,本文选择较环保的柠檬酸( $C_6H_8O_7$ )、低浓度磷酸( $H_3PO_4$ )和双氧水( $H_2O_2$ )作为基础溶液,以亚光度、粗糙度和硬度作为物理指标研究最佳溶液配方;同时分析亚光处理前后不锈钢耐点蚀性能的变化,最终获得一种低浓度、不含强酸和氢氟酸的环保型亚光处理液,达到不锈钢亚光、硬度和耐点蚀性能俱佳的要求。

## 2. 试验材料与方法

### 2.1. 试验材料

试验中所用的材料为 304 不锈钢,其化学成分含量(wt%)为:  $C \leq 0.08$ 、 $Si \leq 1.00$ 、 $Mn \leq 2.00$ 、 $P \leq 0.05$ 、 $S \leq 0.03$ 、 $Cr 18.00 \sim 20.00$ 、 $Ni 8.25 \sim 12.5$ 。将不锈钢加工成  $100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$  试样。

### 2.2. 试验方法

将试样在  $70^\circ\text{C}$  除油液( $64 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NaOH}$ ,  $20 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} \text{ Na}_2\text{CO}_3$ ,  $10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} \text{ Na}_2\text{SiO}_3$ ,  $50 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} \text{ Na}_3\text{PO}_4$ )中浸泡 5 min。将除油后试样在超声波的去离子水中浸泡 5 min。用无水乙醇浸泡试样 10 s,然后吹干试样表面。

配置含  $10 \sim 50 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} \text{ H}_3\text{PO}_4$ 、 $10 \sim 30 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} \text{ C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ 、 $100 \sim 300 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} \text{ H}_2\text{O}_2$  亚光处理液,溶液加热升温至  $70^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ ,在  $1.4 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$  条件下富铬化处理 1 h。氧化后用去离子水冲洗试样,并采用以上除油工序后处理步骤处理试样。

采用光泽度仪(WGG-60 上海精密仪器仪表有限公司)测量亚光处理前后试样光泽度,在试样不同位置测量 5 次光泽度值,利用公式 1 计算试样亚光度,其中  $\gamma$  指亚光度; $\varepsilon^0$  指未阳极氧化不锈钢光泽度; $\varepsilon$  指阳极氧化不锈钢光泽度。

$$\gamma = \frac{\varepsilon^0 - \varepsilon}{\varepsilon^0} \quad (1)$$

采用粗糙度仪(NDT120 北京凯达科仪科技有限公司)测量阳极氧化亚光处理前后粗糙度变化,控制参数为  $\lambda_c = 0.8 \text{ mm} \times 3$ ,  $\text{RAN} = \pm 40 \text{ }\mu\text{m}$ ;在试样表面不同位置测量 5 次粗糙度。采用数显显微硬度计(HVS-1000 北京时代山峰科技有限公司)测量阳极氧化亚光处理前后试样表面硬度,加载载荷为  $0.2 \text{ kg}$ ,在试样表面不同位置测量 5 个硬度值。采用日立 S-3700N 型扫描电子显微镜对试样进行微观形貌观察。

采用电化学工作站(P4000 AMETEK)分别监测未处理不锈钢试样、阳极氧化亚光处理不锈钢试样的阳极极化曲线,分析其耐点蚀性能。不锈钢试样作为工作电极,Pt 片作为辅助电极,AgCl/Ag 作为参比电极( $3.5 \text{ M KCl}$ )。测试介质为  $3.5 \text{ wt}\% \text{ NaCl}$  溶液。初始电位相对于开路电位  $-0.5 \text{ V}$ ,最终电位相对于孔蚀电位  $+0.25 \text{ V}$ ,扫描速率  $1 \text{ mV/s}$ 。阳极极化曲线上对应电流密度为  $100 \text{ }\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$  电位中最正电位为孔蚀电位。

## 3. 结果与分析

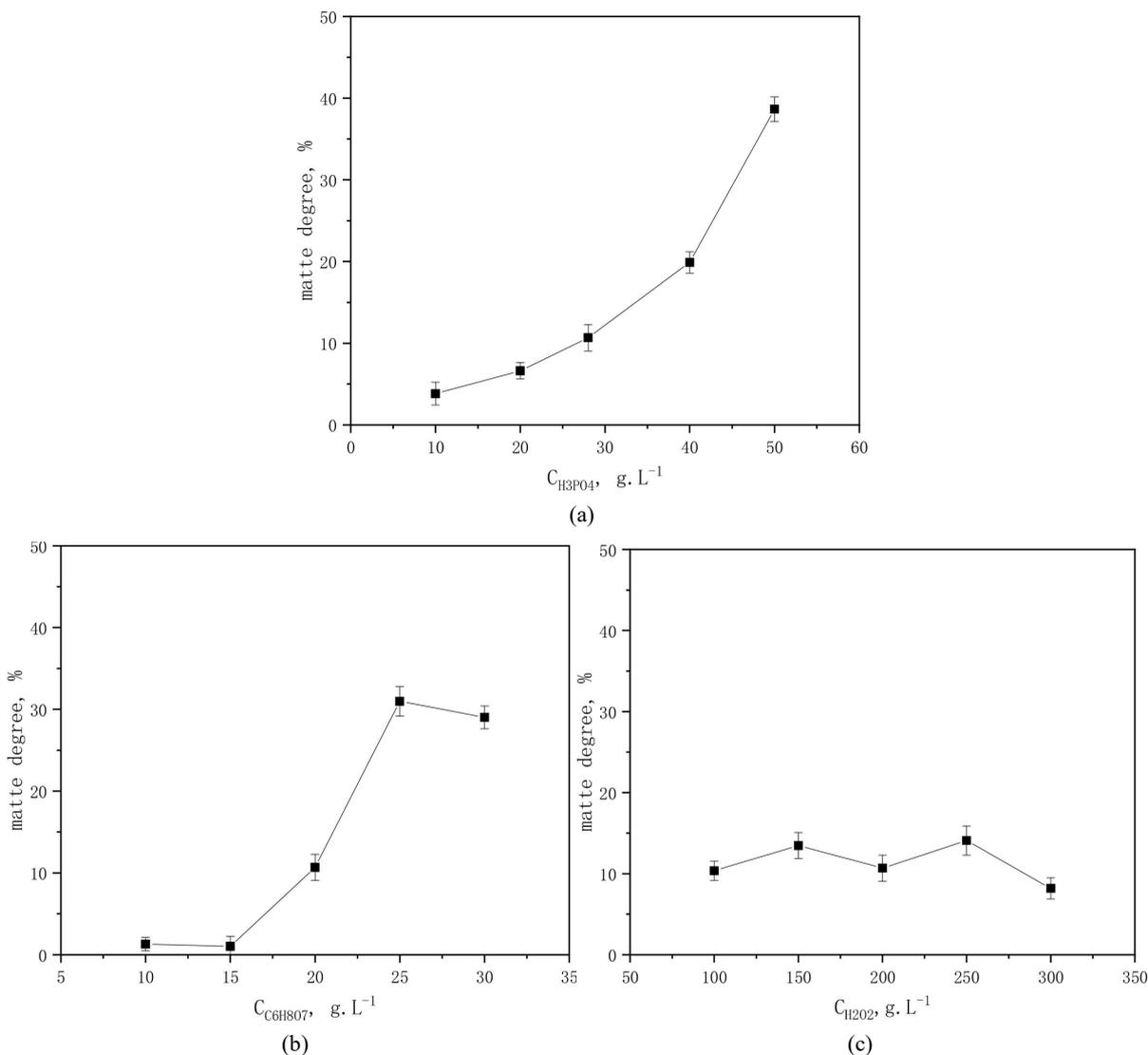
### 3.1. 光泽度

在  $H_2O_2 200 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $C_6H_8O_7 20 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $T = 70^\circ\text{C}$ ,  $t = 1 \text{ h}$  的条件下,光泽度随磷酸、柠檬酸和双氧水的浓度变化如图 1 所示。与未亚光处理的不锈钢光泽度(96.5)相比,304 不锈钢具有亚光效果。由图 1(a)可知,在磷酸浓度从  $10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  增加到  $50 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,亚光度上升。在磷酸浓度为  $20 \sim 30 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  时不锈钢表面呈亚光,且呈金属银白色光泽。当浓度高于  $30 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  时,不锈钢表面虽然呈亚光,但金属表面色泽偏暗。

由图 1(b)可知,在柠檬酸浓度从  $10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  到  $30 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  时,不锈钢亚光度呈上升趋势,不锈钢表面呈亚光。观察发现在柠檬酸浓度低于  $10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  左右时,不锈钢表面不具有明显亚光。在柠檬酸浓度在  $10 \sim 20$

$\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$  左右时, 不锈钢表面不但呈亚光, 且呈金属银白色光泽。在柠檬酸浓度高于  $20\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  左右时, 不锈钢表面虽然呈亚光, 但金属表面不呈银白色光泽。

由图 1(c)可知, 在过氧化氢浓度为  $100\sim 300\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 其亚光度在  $8\%\sim 14\%$  之间波动。随着过氧化氢浓度的增加, 光泽度变化小, 表明过氧化氢对亚光度影响小。



**Figure 1.** Effects of solution composites on matte degree of 304 stainless steel

**图 1.** 溶液成分浓度对 304 不锈钢亚光度影响

### 3.2. 粗糙度

在  $\text{H}_2\text{O}_2$   $200\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$   $20\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $T = 70^\circ\text{C}$ ,  $t = 1\text{ h}$  的条件下, 粗糙度随磷酸、柠檬酸和双氧水的浓度变化如图 2 所示。与未亚光处理的不锈钢粗糙度( $0.08\text{ }\mu\text{m}$ )相比, 亚光处理后 304 不锈钢粗糙度明显增加。由图 2(a)可知, 当磷酸浓度在  $10\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  到  $20\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 304 未喷砂不锈钢表面粗糙度随磷酸浓度的增加呈上升趋势; 当磷酸浓度在  $20\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  到  $40\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 304 未喷砂不锈钢表面粗糙度随磷酸浓度的增加变化趋势; 当磷酸浓度在  $40\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  到  $50\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  时, 304 未喷砂不锈钢表面粗糙度随磷酸浓度的增加急剧上升。

由图 2(b)可知,当柠檬酸浓度在  $10 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  到  $25 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  时,304 未喷砂不锈钢表面粗糙度随柠檬酸浓度的增加呈上升趋势,且上升速度越来越慢;当柠檬酸浓度在  $25 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  到  $30 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  时,随柠檬酸浓度增加 304 未喷砂不锈钢表面粗糙度下降。

由图 2(c)可知,当过氧化氢浓度在  $100 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  到  $300 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  时,304 不锈钢表面粗糙度在  $0.20\sim 0.23 \mu\text{m}$  范围波动。过氧化氢的浓度对不锈钢表面粗糙度影响小。

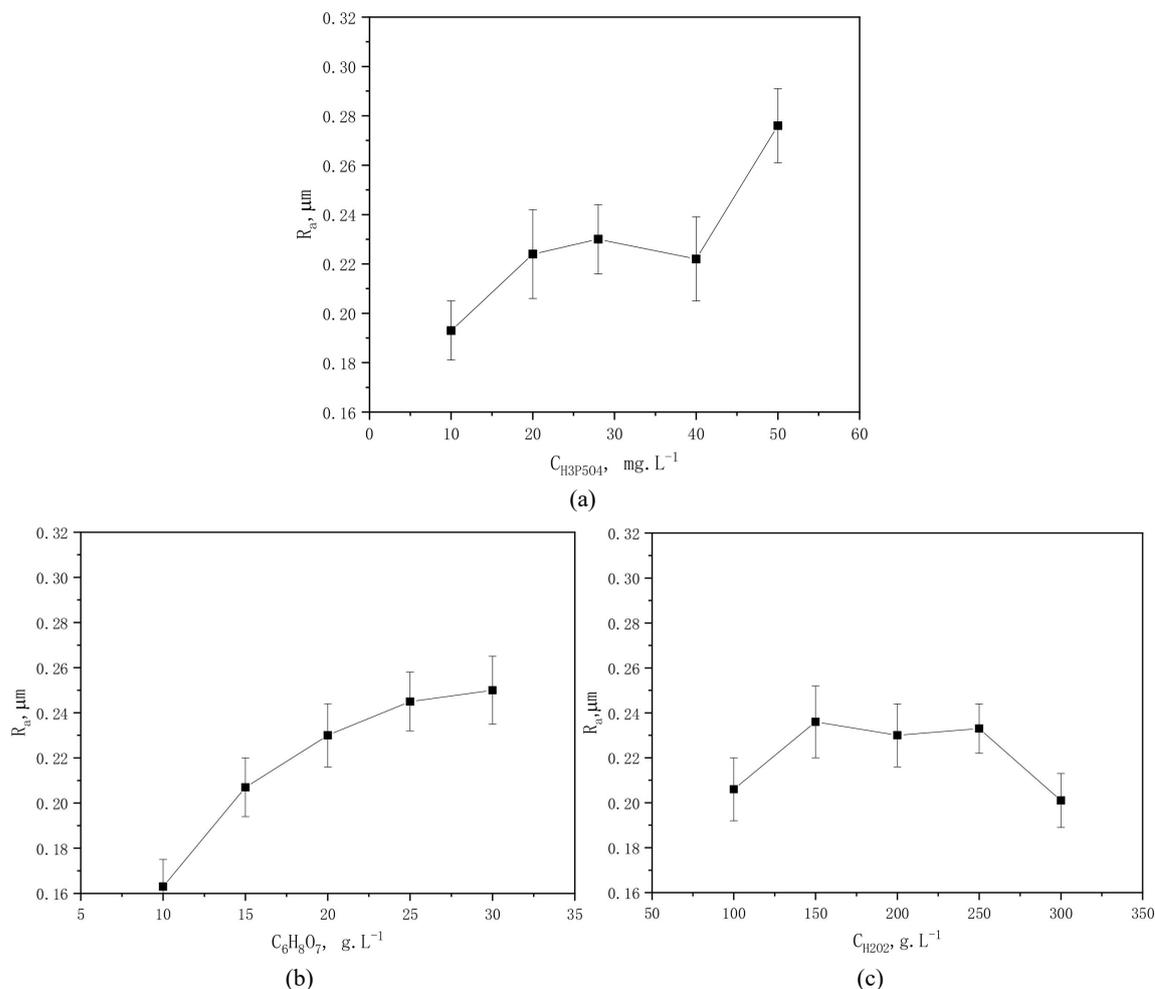


Figure 2. Effects of solution composites on roughness of 304 stainless steel

图 2. 溶液成分浓度对 304 不锈钢粗糙度影响

### 3.3. 硬度

在  $\text{H}_2\text{O}_2$   $200 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$   $20 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $T = 70^\circ\text{C}$ ,  $t = 1 \text{ h}$  的条件下,硬度随磷酸量的关系如图 3 所示。与未亚光处理的不锈钢硬度( $233 \text{ HV}_{0.2}$ )相比,在低浓度和高浓度溶液中经过亚光处理后 304 不锈钢硬度下降,但在  $28 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} \text{ H}_3\text{PO}_4$ 、 $20 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} \text{ C}_6\text{H}_8\text{O}_7$  和  $200 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} \text{ H}_2\text{O}_2$  条件下不锈钢硬度( $236 \text{ HV}_{0.2}$ )接近。

由图 3(a)可知,在磷酸浓度低于  $20 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  时,304 不锈钢表面硬度变化小;磷酸浓度在  $20 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  到  $28 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  时,硬度随磷酸浓度的增加而急剧增加;但磷酸浓度高于  $28 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  时,304 不锈钢表面硬度随磷酸浓度的增加而下降。由图可以看出,当磷酸浓度为  $28 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  时,304 不锈钢表面硬度出现极大值。随着柠檬酸含量提高,溶解速度增加,表面形成富集铬化合物,硬度提高;柠檬酸含量增加相应增加溶液的酸度,

相应降低氧化膜稳定性，硬度下降。

由图 3(b)可知，在柠檬酸浓度低于  $20 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  时，304 不锈钢表面硬度随柠檬酸浓度增加而增加；在柠檬酸为  $20 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  到  $30 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  时，不锈钢表面硬度随柠檬酸浓度增加而下降。由图可知，在柠檬酸浓度为  $28 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  时，304 不锈钢表面硬度值最大。

由图 3(c)可知，在过氧化氢浓度低于  $200 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  时，304 不锈钢表面硬度随过氧化氢浓度的增加呈加速上升的趋势；当过氧化氢浓度高于  $200 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  时，硬度随过氧化氢浓度的增加呈减速下降的趋势。由图 3 可知，当过氧化氢浓度为  $200 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$  左右时，304 不锈钢经阳极氧化后表面硬度最大。

### 3.4. 耐蚀性

选择最佳溶液配方  $28 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} \text{ H}_3\text{PO}_4$ 、 $20 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} \text{ C}_6\text{H}_8\text{O}_7$  和  $200 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} \text{ H}_2\text{O}_2$  条件下对不锈钢亚光阳极氧化处理，比较亚光处理前后不锈钢耐蚀性变化。图 4 分别是未阳极氧化不锈钢和亚光最优条件下阳极氧化不锈钢的阳极极化曲线。由极化曲线可看出，与未亚光处理不锈钢相比，腐蚀电位更正，稳定钝化范围更宽，在相同极化电位下，极化电流密度更小。阳极氧化不锈钢点蚀电位( $0.686 \text{ V}_{\text{AgCl/Ag}}$ )比未阳极氧化不锈钢点蚀电位( $0.298 \text{ V}_{\text{AgCl/Ag}}$ )更正，表明阳极氧化提高不锈钢耐点蚀能力。经过在 3.5% NaCl 溶液中阳极极化测试后采用 SEM 观察不锈钢试样表面孔蚀程度见图 5 所示。由 SEM 图可看出，未阳极氧化不锈钢孔蚀明显，最大孔直径约  $30 \mu\text{m}$ ，孔内堆积腐蚀产物(图 5(a))。经过阳极氧化后不锈钢表面也出现孔蚀(图 5(b))，孔径约  $0.5\sim 3.0 \mu\text{m}$ ；孔蚀主要出现在晶界腐蚀。

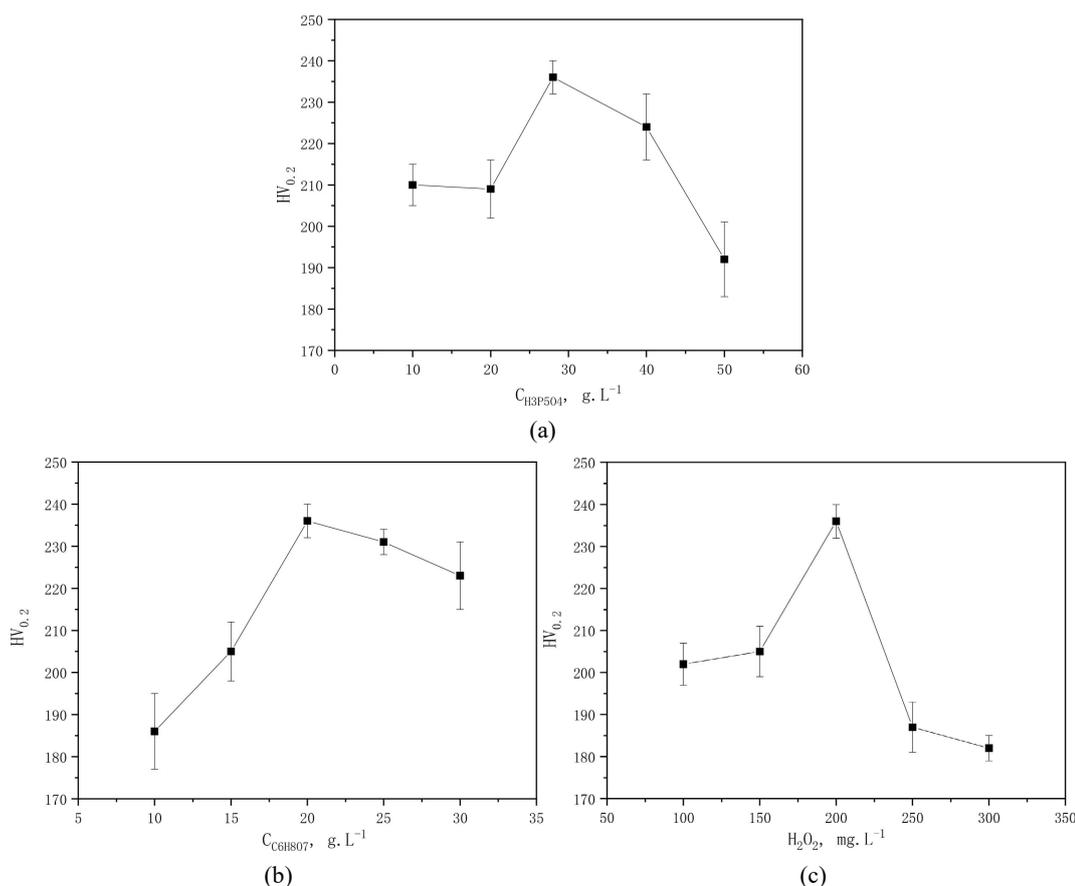
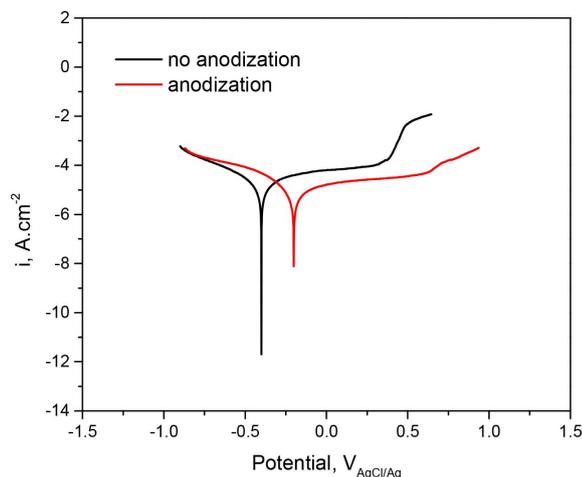


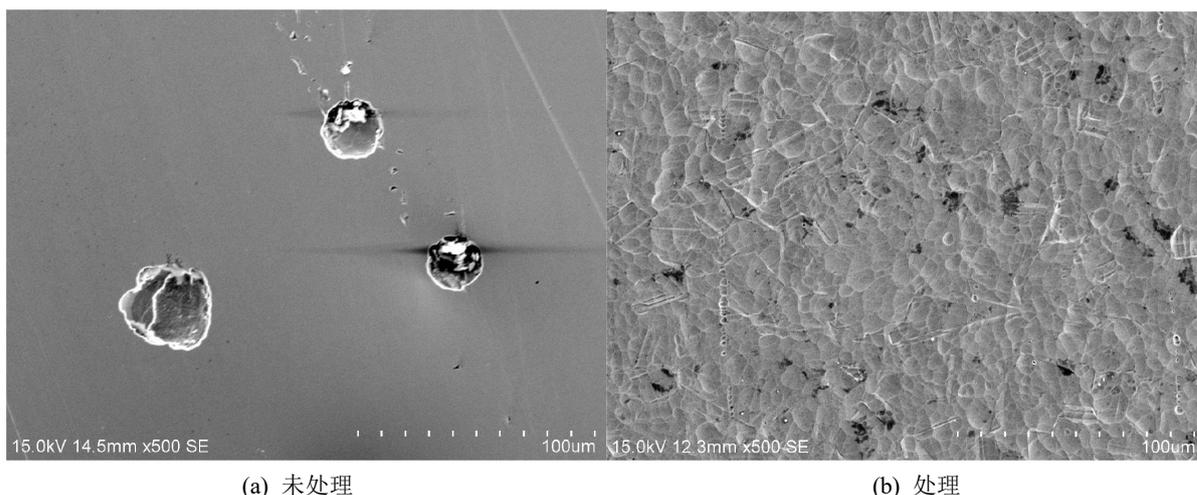
Figure 3. Effects of solution composites on hardness of 304 stainless steel

图 3. 溶液成分浓度对 304 不锈钢硬度影响



**Figure 4.** Polarization curves of stainless steel with and without treatment

**图 4.** 处理前后试样极化曲线



**Figure 5.** Pitting of stainless steel with and without treatment after anodic polarization

**图 5.** 处理前后试样阳极极化测试后孔蚀形貌

#### 4. 讨论

不锈钢通过外加阳极电流加速溶解,不断产生的金属离子  $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Cr}^{3+}$  和  $\text{Ni}^{2+}$  进入溶液。金属离子与水反应生成铁、铬和镍的氧化物或氢氧化物[11]。不锈钢经过阳极氧化后,因溶解表面失去光泽,呈亚光。不锈钢表面的亚光效果,主要取决于表面形态(见图 5(b)),即与表面粗糙度密切相关,表面粗糙度越高,光泽度越低,越不反光[12][13]。但粗糙度越低,金属表面明显偏暗,不具有银白色金属光泽。因此,必须控制光泽度和粗糙度在合理范围内。由本文结果发现不锈钢经过阳极氧化后亚光度的值在约 10%,粗糙度在  $0.23 \mu\text{m}$  左右时,表面不但呈现亚光且具有明显金属银白色光泽。

为了控制不锈钢亚光效果,除了控制工艺参数(如时间、温度等)外,更为重要的是控制亚光溶液成分和浓度。亚光溶液中磷酸是一种中强酸,主要起黏度调节、降低溶液酸度和在不锈钢零件基体上形成稳定耐蚀的磷酸盐氧化膜作用[4]。阳极氧化后,不锈钢表面出现亚光;随着磷酸浓度提高,溶液粘度增加,离子传质减缓,从而不锈钢溶解速度降低,表面光泽度下降,表面硬度提高,同时在一定光泽度范围内

表面呈现金属银白色光泽;当磷酸浓度进一步提高,溶液酸度对不锈钢溶解速度影响大于粘度对其影响,导致不锈钢的溶解速度增加,相应表面越粗糙,越暗,表面硬度越低。柠檬酸是一种有机酸,通过优先选择性地与金属离子 Fe 及 Fe 氧化物形成络合物,从而减少表面 Fe 原子含量,形成表面 Cr 元素富集现象[10]。随着柠檬酸含量提高,溶解速度增加,粗糙度增加,不锈钢表面光泽度下降;同时随着柠檬酸含量提高,表面形成富集铬化合物,硬度提高,但同时增加溶液的酸度,相应降低氧化膜稳定性,硬度下降,因此柠檬酸浓度对硬度影响存在临界值。

过氧化氢具有强氧化性,与基体中富集的 Cr 反应形成致密的以  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  为主的钝化膜,提高不锈钢阳极氧化后表面硬度。同时过氧化氢参与阴极还原反应,相应增强金属阳极溶解速率,形成氢化物含量富集的钝化膜[14]。因此,随过氧化氢浓度增加,粗糙度增加,光泽度下降。当加入过氧化氢时,因为氧化铬产生提高不锈钢硬度;当进一步提高过氧化氢浓度,因为钝化膜中富集的氢氧化物降低不锈钢硬度。

由于磷酸和柠檬酸有助于不锈钢阳极氧化产生富铬层,而过氧化氢有助于铬转化为氧化铬,因此共同提高了不锈钢的耐点蚀性能。

## 5. 结论

- 1) 在电流密度  $0.14 \text{ A}\cdot\text{dm}^{-2}$ , 温度  $70^\circ\text{C}$ , 时间 1 h 条件下, 304 不锈钢亚光处理最佳溶液配方为:  $28 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} \text{ H}_3\text{PO}_4$ 、 $200 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} \text{ H}_2\text{O}_2$ 、 $20 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1} \text{ C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ ;
- 2) 磷酸和柠檬酸明显影响不锈钢亚光度、粗糙度和硬度;
- 3) 过氧化氢明显影响不锈钢表面硬度,但对粗糙度和亚光度影响小;
- 4) 亚光电化学处理使不锈钢表面呈亚光和金属银白色光泽,明显提高表面粗糙度、硬度和不锈钢耐点蚀性能。

## 参考文献

- [1] Boehme, O. and Piesslinger-Schweiger, S. (2015) Method for the Surface Treatment of Stainless Steel.
- [2] 屈战民. 喷砂不锈钢工件哑光工艺[J]. 电镀与涂饰, 2007, 36(8): 49-50.
- [3] 张明亮, 王学成, 徐海坤. 不锈钢管件表面处理方法[P]. 中国专利, 1967039A. 2007.
- [4] 屈战民. 电子枪不锈钢元件表面化学研磨哑光工艺的研究[J]. 材料保护, 2005, 38(4): 62-64.
- [5] 郝云. 不锈钢表面处理技术应用及发展[J]. 甘肃冶金, 2008, 30(1): 52-53.
- [6] ASTM (2006) A Standard Practice for Cleaning, Descaling, and Passivation of Stainless Steel Parts, Equipment, and Systems.
- [7] 罗耀宗, 蒋勇. 不锈钢无硝酸白化处理工艺[J]. 电镀与环保, 1994, 14(6): 27-28.
- [8] Yue, Y., Liu, C., Asselin, E., Shi, P. and Jiang, M. (2018) Kinetics of Passive Film Growth on 304 Stainless Steel in  $\text{H}_2\text{SO}_4$  Pickling Solution under Chemical Oxidation. *Corrosion*, **74**, 705-714. <https://doi.org/10.5006/2680>
- [9] 王扬亚, 赵程. 奥氏体不锈钢低温渗碳硬化处理后的化学亮化处理[J]. 表面技术, 2016, 45(1): 106-110.
- [10] 刘凤, 史永娟, 任伊宾, 等. 柠檬酸钝化对 316L 不锈钢耐蚀性能的影响[J]. 腐蚀科学与技术, 2013, 25(1): 35-38.
- [11] Piao, T. and Park, S. (1997) Spectroelectrochemical Studies of Passivation and Transpassive Breakdown Reactions of Stainless Steel. *Journal of the Electrochemical Society*, **144**, 3371-3377. <https://doi.org/10.1149/1.1838021>
- [12] 张波, 朱益盈, 吴军, 等. SUS304 不锈钢表面光泽度的影响因素分析及控制[J]. 宝钢技术, 2014(3): 69-73.
- [13] 王梅丰, 魏红阳, 陈东初, 等. 表面粗糙度对硝酸钝化 304 不锈钢点蚀行为影响[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(12): 1156-1161.
- [14] Pan, J., Thierry, D. and Leygraf, C. (1994) Electrochemical and XPS Studies of Titanium for Biomaterial Applications with Respect to the Effect of Hydrogen Peroxide. *Journal of Biomedical Materials Research*, **28**, 113-122. <https://doi.org/10.1002/jbm.820280115>