

腐蚀与防护

# 超声波冷锻与微弧氧化处理铝合金 钻杆的耐腐蚀性能

梁健<sup>1,2</sup>, 李嘉栋<sup>3</sup>, 林冰<sup>3</sup>, 岳文<sup>2</sup>, 王成彪<sup>2</sup>, 尹浩<sup>1</sup>, 唐鉴磊<sup>3</sup>

(1.中国地质科学院勘探技术研究所, 河北 廊坊 065000; 2.中国地质大学(北京) 工程技术学院, 北京 100083; 3.西南石油大学 化学化工学院, 成都 610500)

**摘要:** **目的** 采用超声波冷锻与微弧氧化技术处理形成包裹于铝合金表面的细晶层和微弧氧化膜层用以提高铝合金钻杆的耐腐蚀性能。**方法** 用超声波冷锻技术(Ultrasonic Cold Forging Technology, UCFT)和微弧氧化技术(Micro Arc Oxidation, MAO)处理形成包裹于铝合金表面的细晶层和微弧氧化膜层,从而强化铝合金钻杆材料(2024)。通过模拟铝合金材料在科学超深井“高温-高压-力学-化学”的服役条件,并使用失重法、电化学方法、扫描电子显微镜以及X射线衍射等测试方法,研究了细晶层和微弧氧化膜层对铝合金钻杆腐蚀行为和腐蚀规律的影响。**结果** 通过电化学测试结果可知,经UCFT+MAO处理的铝合金的耐腐蚀性能随着弹性拉应力的增加而逐渐下降。但在300 MPa的弹性拉应力作用下,经UCFT+MAO处理的铝合金仍能维持较低的腐蚀速率( $10^{-2}$  mm/a),并且耐蚀性能仍大于未经UCFT+MAO处理的铝合金。通过失重法和扫描电子显微镜测试结果可知,在100 MPa的弹性拉应力条件下,经UCFT+MAO处理的铝合金的腐蚀速率随试验温度的升高而明显上升,并且表面的腐蚀形貌也变得越来越不平整,凸起程度增加。当试验温度超过125 °C时,经UCFT+MAO处理的铝合金的腐蚀速率随温度的增加而显著上升。通过XRD测试结果可知,在100 MPa的弹性拉应力和不同温度条件下,经UCFT+MAO处理的铝合金表面的化学组成主要以Al和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>为主。**结论** 经UCFT和MAO处理形成的细晶层和微弧氧化膜层能够有效保护铝合金基体,提升铝合金的耐腐蚀性能。

**关键词:** 科学超深井; 铝合金钻杆; 超声波冷锻; 微弧氧化; 腐蚀

**中图分类号:** TG174 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)06-0255-12

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.06.023

## Corrosion Performance of Aluminum Alloy Drill Pipe Treated by Ultrasonic Cold Forging and Micro Arc Oxidation

LIANG Jian<sup>1,2</sup>, LI Jia-dong<sup>3</sup>, LIN Bing<sup>3</sup>, YUE Wen<sup>2</sup>, WANG Cheng-biao<sup>2</sup>, YIN Hao<sup>1</sup>, TANG Jun-lei<sup>3</sup>

(1. Institute of Exploration Techniques, Chinese Academy of Geological Sciences, Hebei Langfang 065000, China;

收稿日期: 2022-02-21; 修订日期: 2022-04-19

Received: 2022-02-21; Revised: 2022-04-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(41772390); 国家重点研发计划项目(2018YFC0603403)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(41772390); the National Key R & D Projects(2018YFC0603403)

作者简介: 梁健(1980—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要研究方向为钻具腐蚀防护。

Biography: LIANG Jian(1980-), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: corrosion protection of drilling tools.

通讯作者: 唐鉴磊(1983—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电化学、腐蚀与防护、表面工程、新能源材料、航空材料。

Corresponding author: TANG Jun-lei(1983-), Male, Doctor, Professor, Research focus: electrochemistry, corrosion and protection, surface engineering, new energy materials, aviation materials.

引文格式: 梁健, 李嘉栋, 林冰, 等. 超声波冷锻与微弧氧化处理铝合金钻杆的耐腐蚀性能[J]. 表面技术, 2022, 51(6): 255-266.

LIANG Jian, LI Jia-dong, LIN Bing, et al. Corrosion Performance of Aluminum Alloy Drill Pipe Treated by Ultrasonic Cold Forging and Micro Arc Oxidation[J]. Surface Technology, 2022, 51(6): 255-266.

2. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

3. College of Chemistry and Chemical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

**ABSTRACT:** To improve the corrosion resistance of aluminum alloy drill pipe, the ultrasonic cold forging and micro-arc oxidation technology are used to form the fine crystal layer of UCFT and micro-arc oxidation film layer wrapped on the aluminum alloy surface. The ultrasonic cold forging technology (UCFT) and micro arc oxidation technology (MAO) are used to form a UCFT fine-grained layer and a micro-arc oxidation film layer wrapped on the surface of the aluminum alloy to strengthen the aluminum alloy drill pipe material (2024). The influence of the UCFT fine-grained layer and the micro-arc oxidation film on the corrosion behavior and corrosion laws of aluminum alloy drill pipes are studied by simulating the service conditions and environment of aluminum alloy materials in the scientific ultra-deep well "high temperature-high pressure-mechanics-chemistry", combined with weightlessness method, electrochemical method, scanning electron microscope, X-ray diffraction and other test methods. According to the electrochemical test results, the corrosion resistance of the surface-treated aluminum alloy gradually decreases with the increasing the elastic tensile stress, but under the action of elastic tensile stress of 300 MPa, the aluminum alloy treated with UCFT+MAO can still maintain a lower corrosion rate ( $10^{-2}$  mm/a), and the corrosion resistance is still greater than that without UCFT+MAO treatment aluminum alloy; According to the test results of weight loss method and scanning electron microscope, it can be seen that under the condition of elastic tensile stress of 100 MPa, the corrosion rate of aluminum alloy treated with UCFT+MAO increases significantly with the gradual increasing the experimental temperature, and the corrosion morphology of the surface becomes more and more uneven, and the degree of protrusion increases. Moreover, when the experimental temperature increases more than 125 °C, the corrosion rate of aluminum alloy treated with UCFT+MAO increases significantly with the increasing temperature. The XRD test results show that under 100 MPa elastic tensile stress and different temperature conditions, the chemical composition of the aluminum alloy surface treated by UCFT+MAO is mainly Al and  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . The fine-grained layer and micro-arc oxide film formed by UCFT and MAO treatment can effectively protect the aluminum alloy matrix and improve the corrosion resistance of the aluminum alloy.

**KEY WORDS:** scientific ultra-deep well; aluminum alloy drill pipe; ultrasonic cold forging technology; micro arc oxidation; corrosion

铝合金钻杆与钢钻杆相比,具有质量小、比强度高、钻进深度大、能耗低等优点,已成为地区钻探、大位移井、定向井、超深井及深部科学钻探钻柱设计的优选方案<sup>[1-5]</sup>,但铝合金与其他金属一样面临着严重的腐蚀问题。在自然条件下,铝合金表面能够形成一层厚约 4 nm 的自然氧化膜,但该膜多孔、不均匀,难以抵抗恶劣环境的腐蚀,容易导致铝合金腐蚀失效<sup>[6-7]</sup>。铝合金钻杆的耐腐蚀性能受到多种条件的制约,主要由内在(成分、组织和相结构)<sup>[8-9]</sup>和外在(产品结构、磨损与应力的状态、离子浓度与酸碱环境以及环境的温度、压力等)<sup>[10-21]</sup>两方面因素共同决定。钻井时低固相、无固相、水基和油基等泥浆体系中含有机和无机添加剂,导致在井内高温高压的作用下,钻井液具有较强的腐蚀性<sup>[22-36]</sup>。此外,钻柱还将承受自重带来的较大的拉伸应力,拉长的晶界为腐蚀提供了通道,并且井壁的摩擦磨损致使腐蚀产物极易被剥离,致使钻杆在复杂的服役工况条件下极易发生腐蚀失效。在“松科二井”铝合金钻杆的使用过程中,发现其产生了不同程度的腐蚀<sup>[8]</sup>,致使钻杆柱承载力降低,加大了井内事故隐患。该批钻杆采用热挤压管材产品,并且在出厂前已通过了铝合金行业通用

的剥落腐蚀试验(GB/T 22639—2008)、腐蚀盐溶液周浸试验(GB/T 19746—2005)等测试。测试结果虽然能较直观地以及定量地反映常温常压条件下铝合金的耐腐蚀性能,但不足的是测试结果并不能完全反映实际钻井工况条件下铝合金钻杆的使用性能。

表面工程技术是提高铝合金材料耐腐蚀性能的关键,是铝合金材料保护的研究重点。目前,微弧氧化技术是工业上广泛应用的保护方法,是在阳极氧化技术基础上发展起来的一种表面处理工艺。微弧氧化技术处理形成的陶瓷氧化膜致密性良好、结合力高,耐腐蚀性、耐磨性、抗高温性能优异,且易操控、精度高、成本低、无污染、不易脱落,其厚度可至数百微米<sup>[25-28]</sup>。王艳秋等<sup>[26]</sup>对 7075 铝合金微弧氧化膜层进行了摩擦和腐蚀性能的测试,结果显示,制备的微弧氧化膜层与铝合金基体和硬质阳极氧化膜层相比,磨损性能分别提高了 400 倍和 50 倍,并且其耐盐雾试验达到了 2 000 h 以上。Lei 等<sup>[27]</sup>采用微弧氧化技术在 2024 铝合金上制备了厚度为 7  $\mu\text{m}$  的氧化膜,该膜层致密且均匀,降低了自腐蚀电位和自腐蚀电流密度,并且膜层表面的微孔直径小于 5  $\mu\text{m}$ 。文中同时给出了微弧氧化膜的腐蚀过程,即薄膜的有效阻挡—腐蚀介质渗

入薄膜—腐蚀介质与基底接触—加速腐蚀发生。梁健等<sup>[28]</sup>选用微弧氧化技术对铝合金钻杆材料进行了表面处理, 结果显示, 包覆微弧氧化涂层的试样与未经 UCFT+MAO 处理的试样相比, 失重差较小, 腐蚀电位与腐蚀电流平稳, 且未发生大面积点蚀。面对科学超深井复杂的服役条件, 是否可以考虑在对铝合金表面进行微弧氧化处理前进行适当的表面预处理, 以求最大限度地提高铝合金钻杆的耐腐蚀性能和改善材料的表面性能。徐滨士等<sup>[29]</sup>提出“纳米表面工程”概念, 纳米表面处理技术为材料强化提供了最新的技术手段, 提升并改善了传统表面工程技术, 并赋予表面全新的功能体系, 效果显著。纳米复合技术可有效提高微弧氧化陶瓷层的致密性, 处理后的孔径集中在 0.4 μm, 孔隙率为 6.5%, 表现出良好的热震性及抗腐蚀性等<sup>[30-32]</sup>。鉴于钻杆采用耐热铝合金材料, 加之自身的高导热性以及服役条件的特殊性, 即钻井液循环致使铝合金钻杆自身温度远低于井底温度(原始地层温度与动态循环温度温差为 65~75 ℃)<sup>[33]</sup>, 推测用超声波冷锻技术和微弧氧化技术可发挥一定的强化作用。

本文选用超声波冷锻技术和微弧氧化技术对 2024 铝合金钻杆材料进行表面强化处理, 构建“高

温—高压—力学—化学”多因素作用下的钻柱服役条件, 利用失重试验法、电化学方法、扫描电子显微镜以及 X 射线衍射等方法, 分析 UCFT+MAO 处理的铝合金在服役环境下的腐蚀行为和腐蚀规律。

1 试验

1.1 试样的制备

试验材料选用超深井及深部钻探用的耐热铝合金钻杆材料, 合金牌号为 2024-T6 状态。该合金的化学成分见表 1。铝合金的前处理流程为: 利用线切割机将样品切割成 70 mm×20 mm×1.5 mm 的试样, 对其进行磨光和机械抛光后, 在丙酮溶液和无水乙醇中分别超声清洗 15 min 后, 干燥待用。

对试样进行超声表面滚压加工, 加工参数为: 频率 200 kHz, 振幅 30 μm, 载荷 300 N, 转速 200 r/min, 进给速度 0.02 mm/r, 冲击次数 30 000。经超声波冷锻加工后, 进行微弧氧化涂层的制备, 微弧氧化的电解质溶液为 5 g/L Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> + 0.5 g/L KOH, 制备温度为 20 ℃, 阴极材料为 316L 不锈钢, 电流密度为 5 A/dm<sup>2</sup>, 频率为 500 Hz, 制备时间为 1 h。

表 1 2024 铝合金的化学成分  
Tab.1 The chemical composition of 2024 aluminum alloy

wt. %									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Others	Al
0.50	0.50	3.80-4.90	0.30-0.90	1.20-1.80	0.10	0.25	0.15	0.15	Reminder

1.2 试验装置与测试方法

1.2.1 应力腐蚀评价

在常温、常压试验环境下对经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样施加不同的弹性拉应力, 从而研究包覆细晶层和微弧氧化膜层的铝合金试样在不同弹性拉应力作用下的耐蚀性能变化。采用四点弯曲的应力加载装置(如图 1 所示), 四梁柱作为施力点, 试样置于梁柱之间, 通过调节外侧 2 个梁柱长度对试样施加作用力。使铝合金试样向上弯曲凸起一定的位移量, 从而使试样中间区域出现应力集中并达到试验所需的 100、200、300 MPa 的弹性拉应力, 以对应不同井深处钻柱所受的自重拉应力, 用以进行腐蚀评价试验。最大应力分布于 2 个内支点之间, 该区域应力处处相同且均匀分布。从内支点到外支点, 试样所受应力呈线性下降, 直至为 0。两内支点间的最大弹性应力计算, 见公式(1), 弹性拉应力与屈服应力之间的关系见公式(2)。当超出屈服强度(2024 铝合金为 325 MPa)时, 挠度与应力之间为非线性关系。应力与挠度的关系如图 2 所示。

$$\sigma_{\max} = \frac{12Ety}{3H^2 - 4A^2}$$
(1)

$$Y = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{0.2}} \times 100\%$$
(2)

式中:  $E$  为材料的弹性模量, MPa;  $t$  为试样厚度, mm;  $y$  为试样最大挠度, mm;  $H$  为两外支点间的距离, mm;  $A$  为内外支点间的距离, mm;  $Y$  为屈服程度, %;  $\sigma_{\max}$  为最大弹性应力, MPa;  $\sigma_{0.2}$  为材料屈服极限, MPa。

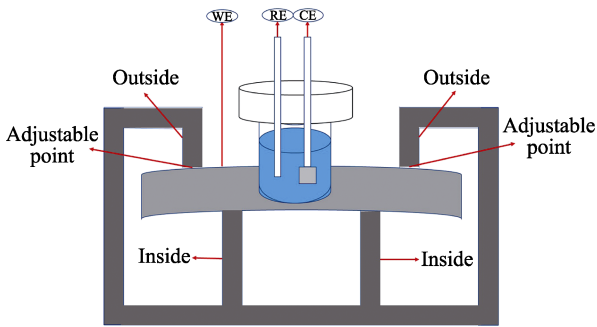


图 1 弯曲应力加载装置  
Fig.1 Bending stress loading device

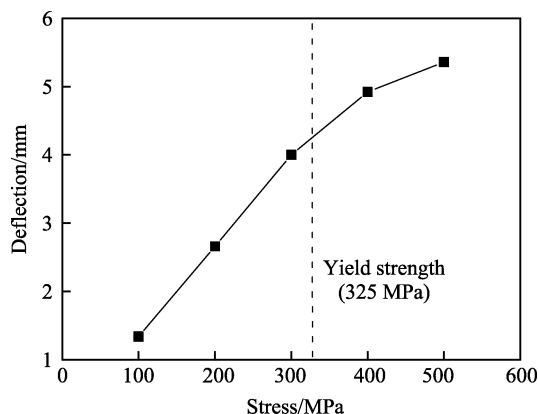


图2 应力与挠度的关系  
Fig.2 Relationship between stress and deflection

### 1.2.2 高温高压腐蚀评价

通过采用高温高压釜装置(如图3所示)构建“高温-高压”工况环境,将加载好特定应力的试样放置于高温高压釜内,根据钻柱某一位置在钻进过程中深度和液柱压力的变化,设置温度、压力控制所需的试验条件,温度为62.5~187.5℃,压力为3.0~9.0 MPa。腐蚀评价溶液采用3.5% NaCl溶液,模拟盐水泥浆。

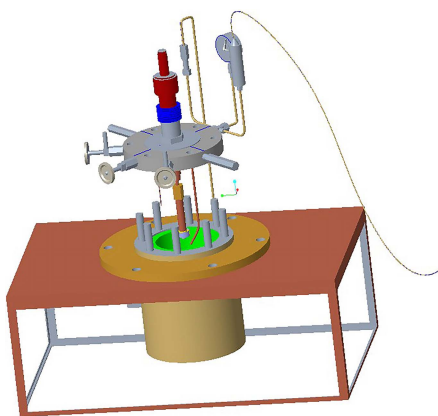


图3 高温高压釜  
Fig.3 High temperature autoclave

### 1.2.3 电化学测试法

电化学测试是在20℃的室温下进行,电解质为3.5% NaCl溶液。采用三电极测试体系,铝合金或表面处理后的铝合金试样为工作电极,饱和甘汞电极( $E=0.242\text{ V}$ , vs. SCE)作为参比电极,铂电极为辅助电极。电化学测量使用武汉科斯特仪器有限公司CS350电化学系统。电化学测试包括开路电位(OCP)、交流阻抗(EIS)、线性极化(LPR)、动电位极化(PC)等电化学测试方法,用以研究常温环境中不同弹性应力条件下铝合金及表面处理后铝合金试样的腐蚀行为。在电化学测试过程中,首先进行开路电位测试,采样间隔时间为1 s,采样频率为5 Hz,测试时间为3 600 s。交流阻抗测试(EIS)的频率为 $10^5\sim 10^{-2}\text{ Hz}$ ,激励信号幅值为10 mV。线性极化测试

电位范围为 $-0.01\sim 0.01\text{ V}$ (vs. OCP),扫描速率为1 mV/s,采样频率为2 Hz,测量时间为20 s。采用塔菲尔法拟合线性极化曲线获得极化电阻( $R_p$ ),判断细晶层和微弧氧化膜层的防护性能。动电位极化测试的测试电位为 $-0.2\sim 1.5\text{ V}$ (vs. OCP),扫描速率为0.5 mV/s,采样频率为1 Hz。采用塔菲尔拟合法拟合动电位极化曲线得到自腐蚀电流密度( $J_{\text{corr}}$ )以及腐蚀速率( $v_{\text{CR}}$ ),判断试样表面的腐蚀程度和耐蚀性能。

### 1.2.4 失重法

在不同温度(62.5~187.5℃)、不同压力(3~9 MPa)的条件下,将经UCFT+MAO处理的铝合金试样施加100 MPa的弹性拉应力并置于高温高压釜3.5% NaCl溶液中,浸泡腐蚀24 h后取出,计算腐蚀速率,并观察腐蚀形貌。

### 1.2.5 扫描电子显微镜测试(SEM)

利用扫描电子显微镜测试观察不同温度以及不同弹性拉应力条件下铝合金试样的腐蚀形貌。扫描电子显微镜观察时放大倍数为1 500倍。腐蚀试验条件通过选择线性增加的试验温度,分别为75、100、125、150℃,从而研究100 MPa弹性拉应力作用下试验温度线性增加对铝合金试样腐蚀形貌的影响。此外,通过选择线性增加的弹性拉应力,分别为60、80、100 MPa,从而研究试验温度不变的条件下弹性拉应力线性增加对铝合金腐蚀形貌的影响。

### 1.2.6 X射线衍射测试(XRD)

利用X射线衍射测试观察铝合金试样在腐蚀之后表面的物质组成。腐蚀试验条件通过选择线性增加的试验温度,分别为75、100、125、150℃,从而研究弹性拉应力不变的条件下试验温度线性增加对铝合金试样表面物质组成的影响。

## 2 结果及分析

### 2.1 常温条件下铝合金试样在弹性拉应力作用下的耐腐蚀性能分析

开路电位作为金属材料电化学腐蚀的基本参数之一,能够对材料的耐蚀行为进行评价。前人的研究报道可以说明,随着开路电位的增加,材料的耐蚀性能提升<sup>[37-41]</sup>。图4是常温和弹性拉应力条件下铝合金试样的开路电位。从图4a可以看出,当监测时间达到1 h时,不同条件下铝合金试样的开路电位处于稳定状态。从图4b监测时间为1 h时的开路电位变化趋势可以看出,在无应力条件下,未经UCFT+MAO处理的铝合金试样在1 h时的开路电位为 $-0.747\text{ V}$ (vs. SCE)。而经UCFT+MAO处理的铝合金试样的开路电位为 $-0.688\text{ V}$ (vs. SCE),相比于未经UCFT+MAO处理的铝合金试样,开路电位上升了0.059 V



(vs. SCE)。这是由于 UCFT+MAO 处理的铝合金试样表面形成了具有保护性能的细晶层和微弧氧化膜层, 隔绝了腐蚀介质与铝合金基体之间的接触, 使铝合金基体受到了保护, 进而使试样的开路电位提升。当施加的弹性拉应力从 0 MPa 线性增加至 300 MPa 时, 经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样的开路电位从  $-0.688\text{ V}$  (vs. SCE) 线性下降至  $-0.737\text{ V}$  (vs. SCE) 且线性下降的斜率为  $-0.016$ 。这表明弹性拉应力的增加会降低细晶层和微弧氧化膜层的稳定性和致密性, 使得细晶层和微弧氧化膜层对铝合金基体的保护能力下降。而随着弹性应力的增加, 经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样的开路电位线性下降, 这表明弹性拉应力会导致 UCFT+MAO 处理的铝合金试样的耐蚀性能下降。此外, 当施加的弹性拉应力增至 300 MPa 时, 经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样的开路电位为  $-0.737\text{ V}$  (SCE), 依然大于未经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样的开路电位。这表明虽然弹性拉应力导致 UCFT+MAO 处理的铝合金试样的耐蚀性下降, 但细晶层和微弧氧化膜层仍对铝合金试样有一定的保护作用。

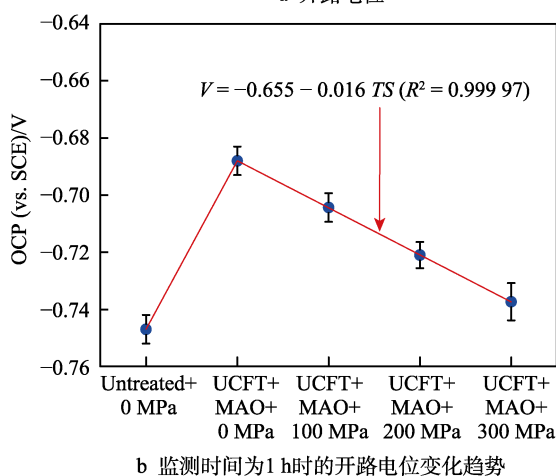
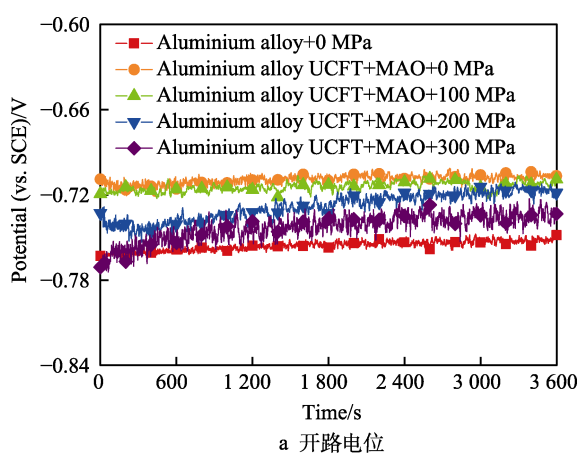


图 4 常温和弹性拉应力条件下铝合金试样的开路电位  
Fig.4 The open circuit potential diagram of aluminum alloy samples under elastic tensile stress at room temperature:  
a) open circuit potential; b) change trend of open circuit potential when the monitoring time is 1 h

图 6 是常温和弹性拉应力作用下铝合金试样的交流阻抗。由图 6a 可以看出, 铝合金试样的交流阻抗均表现为单一的容抗弧。通过比较容抗弧半径的大小, 可以判断试样表面的耐蚀能力<sup>[42]</sup>。一般而言, 交流阻抗的容抗弧半径越大, 表明该条件下材料的耐蚀性越好<sup>[35-36]</sup>。为了更好地进行交流阻抗分析, 采用图 5 所示的等效电路图对交流阻抗进行拟合。其中,  $R_s$  为溶液电阻,  $R_f$  是细晶层和微弧氧化膜层的电阻,  $Q_f$  与细晶层和微弧氧化膜层的电容有关,  $R_t$  为电荷传递电阻,  $Q_{dl}$  与双电层电容有关<sup>[43-44]</sup>;  $R_{ct}$  是电荷转移电阻, 代表电极表面电化学反应的阻力, 能够体现材料耐蚀性的强弱<sup>[45]</sup>。结果显示, 相比于经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样, 未经 UCFT+MAO 处理的铝合金

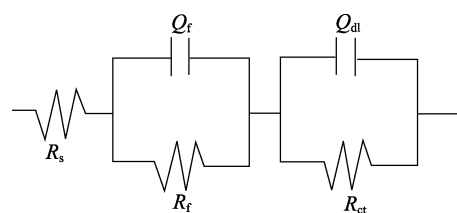


图 5 等效电路图

Fig.5 Equivalent electrical circuit diagram

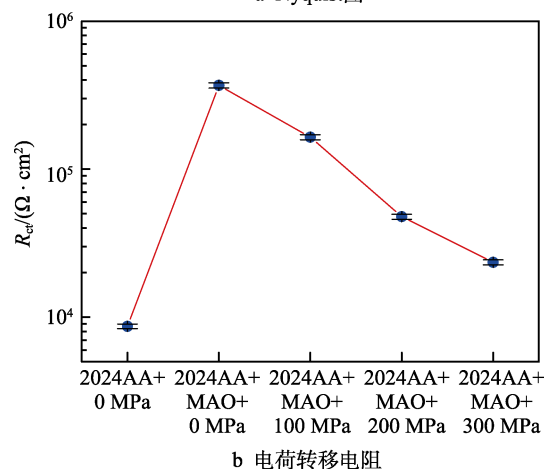
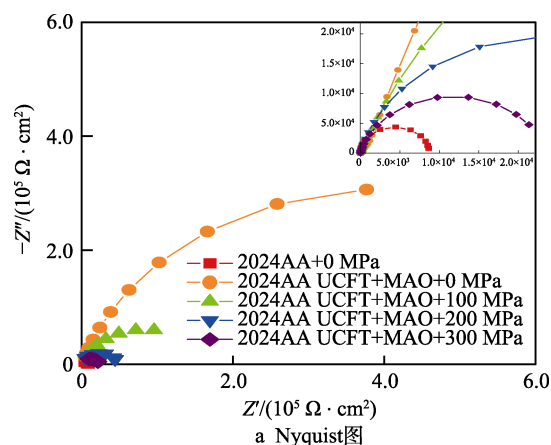


图 6 常温和弹性拉应力作用下铝合金试样的交流阻抗  
Fig.6 AC impedance diagrams of aluminum alloy specimens under elastic tensile stresses at room temperature:  
a) Nyquist diagram; b) charge transfer resistance

试样的容抗弧半径最小,  $R_{ct}$  值最低, 耐蚀性能最差。这表明细晶层和微弧氧化膜层能够有效地保护铝合金基体, 提高了铝合金试样的耐蚀性能。当施加的弹性拉应力从 0 MPa 增加至 300 MPa, 经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样的容抗弧半径逐渐减小,  $R_{ct}$  值逐渐降低, 耐蚀性能逐渐变差。这表明弹性拉应力的增加会使细晶层和微弧氧化膜层对铝合金基体的保护性能下降, 降低了 UCFT+MAO 处理的铝合金试样的耐蚀性能。此外, 当施加的弹性拉应力增至 300 MPa 时, 经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样的容抗弧半径仍大于未经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样的容抗弧半径。这也表明相比于未经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样, 细晶层和微弧氧化膜层在弹性应力的影响下对铝合金基体仍能保持较好的防护性能, 这与开路电位的结果一致。该分析结果与铝合金试样的开路电位分析结果一致。

图 7 是常温和弹性拉应力作用下铝合金试样的极化电阻 ( $R_p$ ) 曲线。结果显示, 相比于经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样, 未经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样的  $R_p$  值最小, 耐蚀性最差。这表明细晶层和微弧氧化涂层能够有效增大腐蚀反应电阻, 从而抑制腐蚀反应的发生, 为铝合金基体提供较好的保护。当施加的弹性拉应力从 0 MPa 增加至 300 MPa, 经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样的  $R_p$  逐渐减小, 耐蚀性能逐渐下降。这表明弹性拉应力的增加会对细晶层和微弧氧化膜层产生破坏作用, 导致细晶层和微弧氧化膜层对腐蚀介质的屏蔽作用下降, 从而降低了经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样的耐蚀性能。此外, 当施加的弹性拉应力增至 300 MPa 时, 经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样的  $R_p$  仍大于未经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样的  $R_p$ 。这表明包覆细晶层和微弧氧化膜层的铝合金试样在弹性应力的影响下仍能保持较好的耐蚀性能。该分析结果与铝合金试样的开路电位和交流阻抗分析结果一致。

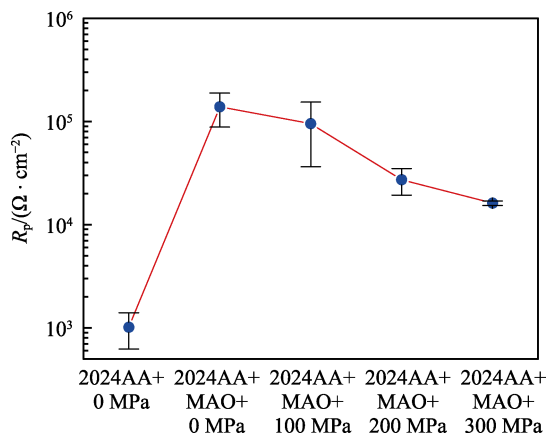


图 7 常温和弹性拉应力作用下铝合金试样的极化电阻  
Fig.7 Polarization resistance diagrams of aluminum alloy specimens under elastic tensile stresses at room temperature

图 8 是常温和弹性拉应力作用下铝合金试样的动电位极化曲线。可以看出, 极化曲线由阳极极化区和阴极极化区组成, 阳极极化曲线整体表现为活化溶解状态, 未表现出钝化特征。当极化曲线阴极区存在明显的极限扩散电流密度, 表明材料在相应的腐蚀环境中受氧去极化控制<sup>[46-47]</sup>。前人的研究报道可以说明, 极限扩散电流密度能够反映材料的耐蚀性能<sup>[48-50]</sup>。从动电位极化曲线中的阴极极化区可以看出, 经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样的极限扩散电流密度明显小于未经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样的极限扩散电流密度。这表明细晶层和微弧氧化膜层能够抑制电极表面的电极反应, 并可以有效阻挡腐蚀介质和溶解氧向铝合金基体扩散, 从而抑制腐蚀的发生。当施加的弹性拉应力从 0 MPa 增加至 300 MPa 时, 经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样的极限扩散电流密度逐渐下降。这表明弹性拉应力的增加会促进细晶层和微弧氧化膜层表面的电极反应, 导致细晶层和微弧氧化膜层对铝合金基体的保护性能下降, 腐蚀介质和溶解氧更容易向铝合金基体扩散, 从而降低了经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样的耐蚀性能。

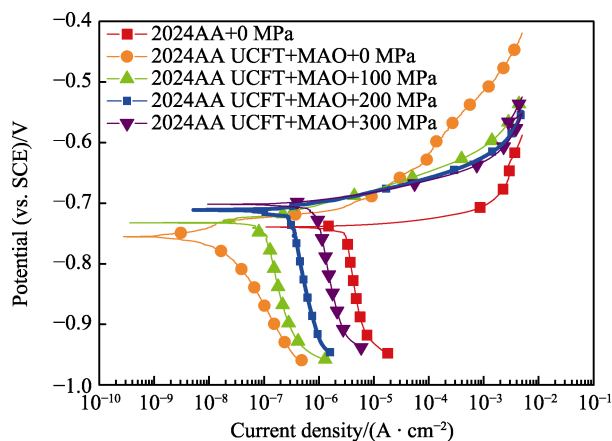


图 8 常温和弹性拉应力作用下铝合金试样的动电位极化曲线

Fig.8 Potential polarization curves of aluminum alloy specimens under elastic tensile stress at room temperature

常温和弹性拉应力作用下铝合金试样的动电位极化曲线拟合获得了铝合金试样的自腐蚀电流密度 ( $J_{corr}$ ) 和腐蚀速率的变化趋势如图 9 所示。结果显示, 经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样的  $J_{corr}$  以及腐蚀速率明显小于未经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样的  $J_{corr}$  以及腐蚀速率。这表明细晶层和微弧氧化膜层能够抑制电极表面的腐蚀反应速率, 隔绝腐蚀介质对铝合金基体的侵蚀。当施加的弹性拉应力从 0 MPa 增加至 300 MPa 时, 经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样的  $J_{corr}$  以及腐蚀速率逐渐增加。这表明弹性拉应力的增加会损伤铝合金表面细晶层和微弧氧化膜层, 导致对铝合金基体的保护性能下降, 使铝合金基体的腐

蚀速率增加, 耐蚀性能下降。此外, 当施加的弹性拉应力增至 300 MPa 时, 经过表面处理的铝合金试样的  $J_{\text{corr}}$  以及腐蚀速率依然小于未经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样的  $J_{\text{corr}}$  以及腐蚀速率。这表明细晶层和微弧氧化膜层虽然在弹性拉应力的影响下会受到损伤, 但相比于未经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样, 细晶层和微弧氧化膜层在弹性拉应力的影响下仍能保持较好的腐蚀抑制能力。该分析结果与交流阻抗、极化电阻的分析结果一致。

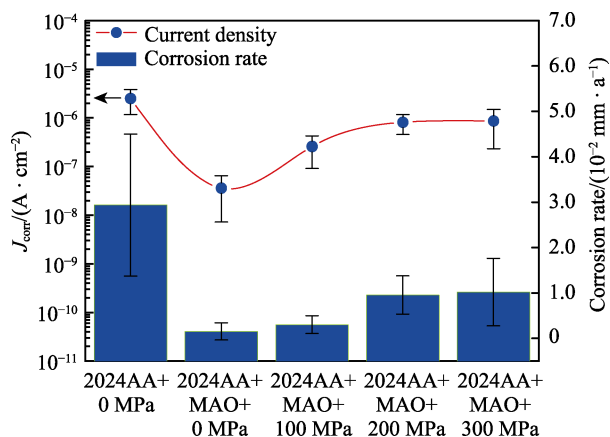


图 9 常温和弹性拉应力作用下铝合金试样的自腐蚀电流密度和腐蚀速率的变化趋势

Fig.9 Change trend graph of self-corrosion current density and corrosion rate of aluminum alloy specimens under elastic tensile stress at room temperature

## 2.2 弹性拉应力条件下的腐蚀失重测试

在施加一定弹性拉应力 (100 MPa) 下进行了腐蚀浸泡试验, 采用失重法计算得到了经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样在 62.5~187.5 °C 的溶液中浸泡 24 h 后的腐蚀速率, 如图 10 所示。可以看出, 在 100 MPa 弹性拉应力的作用下, 经 UCFT+MAO 处理的铝合金的腐蚀速率随着试验温度的增加而逐渐增大<sup>[51]</sup>。这表明温度的增加会降低铝合金表面细晶层和微弧氧化膜层的稳定性和致密性, 使膜层受损程度增加。腐蚀介质更容易通过膜层的受损处与铝合金基体直接接触, 加速铝合金基体的腐蚀, 从而使铝合金试样的耐蚀性能下降<sup>[52]</sup>。当试验温度从 62.5 °C 增加至 125.0 °C 时, 在 100 MPa 的弹性拉应力作用下经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样的腐蚀速率从 2.164 mm/a 线性增加至 3.067 mm/a, 且线性增长斜率为 0.013, 腐蚀速率增长较为缓慢。这表明, 当试验温度为 62.5~125.0 °C 时, 温度对包覆细晶层和微弧氧化膜层的铝合金试样的腐蚀速率影响较小, 该温度区间内 UCFT+MAO 处理的铝合金试样的腐蚀程度较低; 而当试验温度从 125.0 °C 增加至 187.5 °C 时, 在 100 MPa 的弹性拉应力作用下, 经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样的腐蚀速率从 3.076 mm/a 增至 8.299 mm/a, 且线性增长斜率为 0.084, 腐蚀速率显著上升。这表明当试验温度

为 125.0~187.5 °C 时, 温度的增大导致包覆细晶层和微弧氧化膜层的铝合金试样的腐蚀速率快速增大, 进而导致 UCFT+MAO 处理的铝合金试样的耐蚀性能变差, 腐蚀程度迅速增大。此外, 在不同温度的影响下, 100 MPa 弹性拉应力对包覆细晶层和微弧氧化膜层的铝合金试样的耐蚀性能同样存在较大的影响。通过结合 2.1 节常温条件下铝合金试样在弹性拉应力作用下的耐腐蚀性能分析可以得出, 100 MPa 的弹性拉应力会降低细晶层和微弧氧化膜层的防护性能, 从而降低膜层对铝合金基体的保护能力, 导致铝合金试样的耐蚀性能下降。因此, 应力和温度的协同作用会促进铝合金试样的腐蚀速率进一步增大。

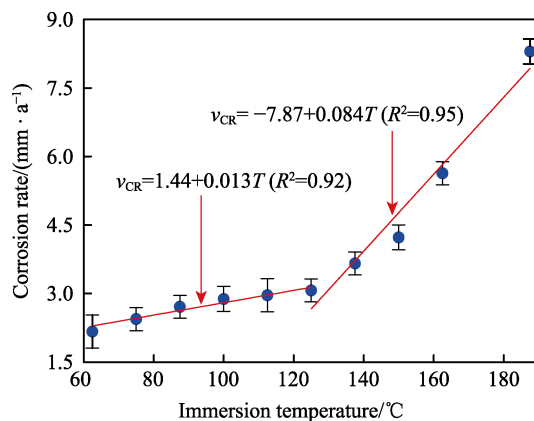


图 10 100 MPa 弹性拉应力以及不同温度条件下铝合金试样的腐蚀速率变化趋势

Fig.10 The change trend graph of the corrosion rate of aluminum alloy specimens under 100 MPa elastic tensile stress condition and under different temperature conditions

## 2.3 弹性拉应力条件下铝合金试样在不同温度和压力作用下的腐蚀机理

图 11 是弹性应力为 100 MPa 条件下经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样在不同温度溶液中浸泡 24 h 的 XRD 图谱。可以看出, 弹性应力为 100 MPa 以及不同温度条件下, 经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样表面的细晶层和微弧氧化膜层的物质主要由 Al 和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  组成。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  是一种致密的氧化物, 具有较强的防护性能<sup>[53]</sup>。这表明细晶层和微弧氧化膜层有助于提高铝合金试样的耐蚀性能。

图 12 是 100 MPa 弹性应力条件下经 UCFT+MAO 处理的铝合金在不同温度溶液中浸泡 24 h 的表面形貌。从图 12 可以看出, 当弹性拉应力为 100 MPa 以及试验温度为 75 °C 时, 经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样的表面发生凸起并呈现沟壑状形貌, 并存在大量的孔隙。这可能是由于微弧放电发生在铝合金表面, 形成密集的放电通道, 在每一个通道中 Al 经过高温氧化形成熔融  $\text{Al}_2\text{O}_3$  并从放电通道涌出, 在放电通道周围形成圆饼状的陶瓷层, 放电通道则变成一个细小的孔<sup>[54]</sup>; 当弹性应力为 100 MPa 以及试验温



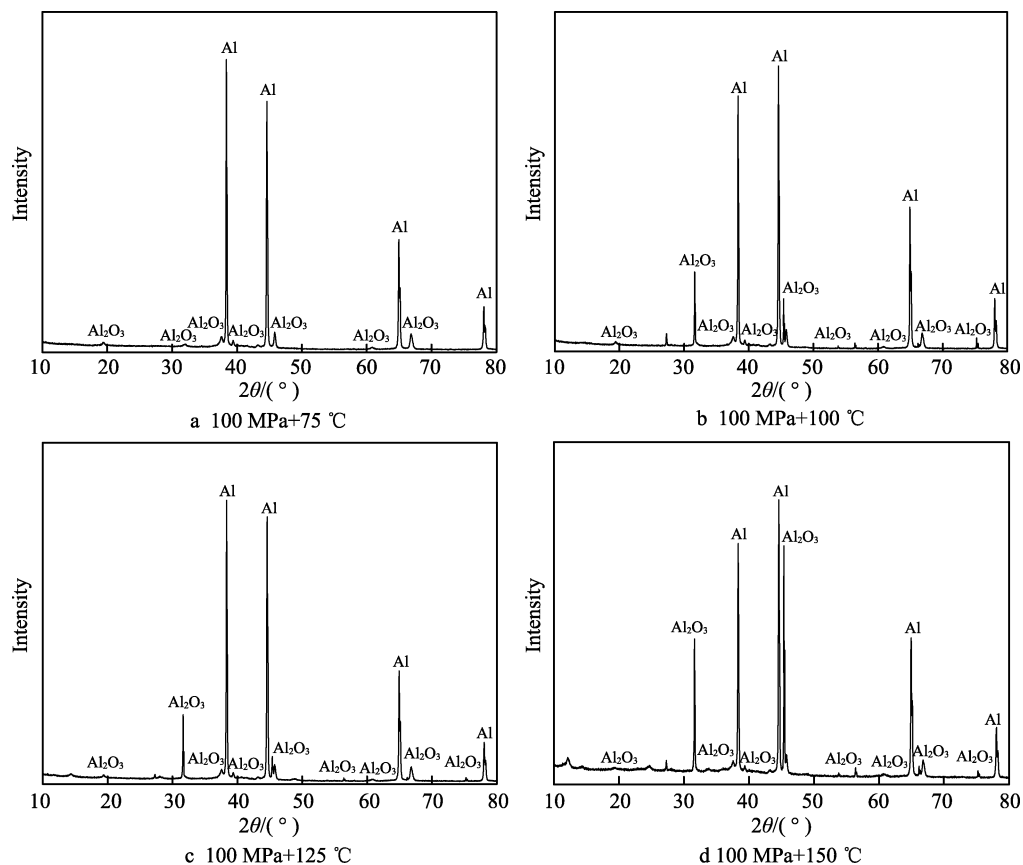


图 11 100 MPa 弹性拉应力条件下经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样在不同温度溶液中浸泡 24 h 的 XRD 图谱

Fig.11 XRD patterns of surface-treated aluminum alloy specimens immersed in solutions at different temperatures for 24 h under elastic tensile stress of 100 MPa

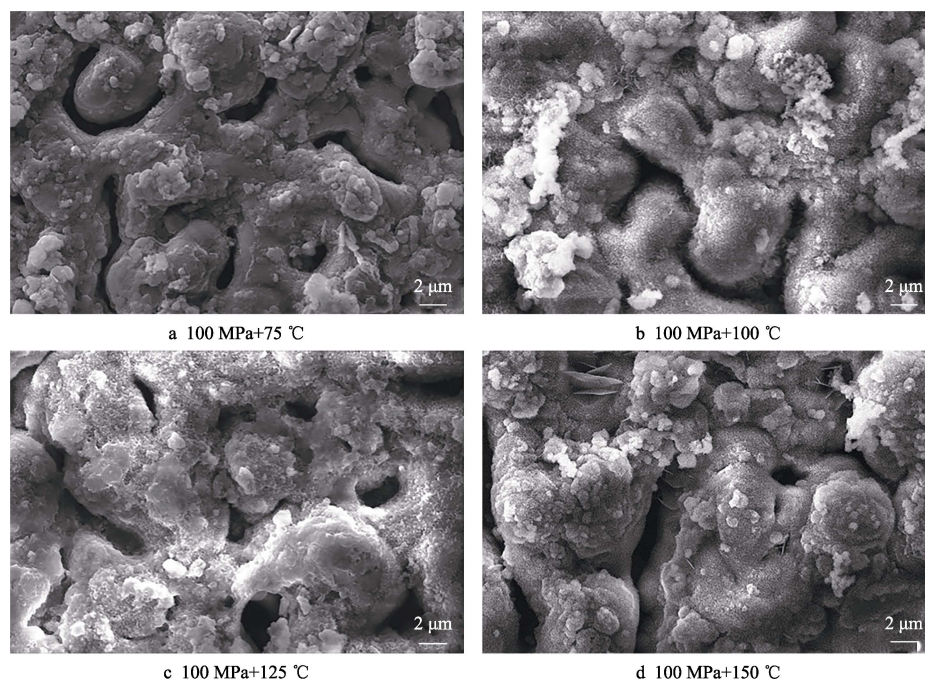


图 12 100 MPa 弹性拉应力条件下经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样在不同温度溶液中浸泡 24 h 的表面腐蚀形貌

Fig.12 Surface corrosion morphology of surface-treated aluminum alloy specimens immersed in solutions at different temperatures for 24 h under elastic tensile stress of 100 MPa



度为 100 °C 时,经 UCFT+MAO 处理的铝合金表面腐蚀程度加剧,沟壑状形貌发生变化,部分区域凸起程度加剧;当弹性应力为 100 MPa 以及试验温度为 125 °C 时,经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样表面的腐蚀程度进一步加剧,表面部分区域的凸起程度进一步加剧而变得不平整,孔隙结构也发生了明显变化,沟壑状形貌也发生了进一步变化;当弹性应力为 100 MPa 以及试验温度为 150 °C 时,经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样表面的整体凸起程度显著加剧而变得更加不平整,孔隙减少并且结构发生进一步变化,表面腐蚀程度显著加剧。此外,通过结合弹性拉应力条件下铝合金试样在不同温度和应力作用下的腐蚀行为分析结果,可以发现随着温度的升高,包覆细晶层和微弧氧化膜层的铝合金试样的腐蚀速率增大。因此,两者的分析结论可以很好地相互印证。

图 13 是不同弹性拉应力条件下经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样在 150 °C 溶液中浸泡 24 h 的表面腐蚀形貌。从图 13 可以看出,当试验温度为 150 °C 以及弹性拉应力为 60 MPa 时,经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样表面发生凸起呈现沟壑状形貌;当试验温度为 150 °C 以及弹性拉应力为 80 MPa 时,经 UCFT+MAO 处理的铝合金表面腐蚀程度加剧,部分区域的凸起程度加剧;当试验温度为 150 °C 以及弹性拉应力为 100 MPa 时,经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样表面的整体凸起程度显著加剧而变得更加不平整,表面腐蚀程度显著加剧。通过结合常温条件下铝合金试样在弹性拉应力作用下的耐腐蚀性能结果,可以发现弹性拉应力的增加会降低细晶层和微弧氧化膜层对铝合金基体的防护性能,从而导致铝合金试样的腐蚀程度加剧。因此,两者的分析结论可以很好地相互印证。

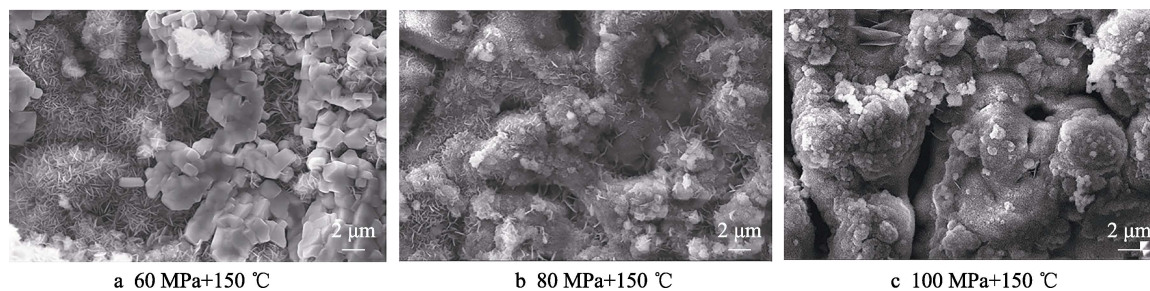


图 13 不同弹性拉应力条件下经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样在 150 °C 溶液中浸泡 24 h 的表面腐蚀形貌  
Fig.13 Surface corrosion morphology of surface-treated aluminum alloy specimens immersed in a solution of 150 °C for 24 h under different elastic tensile stress conditions

### 3 结论

1) 常温条件下电化学测试结果表明,经 UCFT+MAO 处理的铝合金相较于未经 UCFT+MAO 处理的铝合金,开路电位增加,交流阻抗电容圆弧半径增大,极化电阻增加,自腐蚀电流密度和腐蚀速率减小,耐蚀能力增加,铝合金表面的细晶层和微弧氧化膜层能够有效保护基体。

2) 随着弹性拉应力的增加,经 UCFT+MAO 处理的铝合金的交流阻抗电容弧半径逐渐减小,极化电阻下降,自腐蚀电流密度增大,高温高压腐蚀失重试验测得的腐蚀速率增大,耐蚀能力下降,说明弹性拉应力会导致铝合金表面的细晶层和微弧氧化膜层对铝合金基体的保护能力减弱。但在 300 MPa 作用下,仍能维持较低的腐蚀速率 ( $10^{-2}$  mm/a)。

3) 从铝合金试样的腐蚀形貌可以看出,在弹性应力作用下,经 UCFT+MAO 处理的铝合金试样的腐蚀情况逐渐加剧,表面凸起程度增加而变得不平整,孔隙和沟壑状形貌发生了变化,这主要是因为  $Al_2O_3$  微弧氧化膜层和细晶层在应力下被加剧破坏所致。

### 参考文献:

- [1] 吕拴录, 骆发前, 周杰, 等. 铝合金钻杆在塔里木油田推广应用前景分析[J]. 石油钻探技术, 2009, 37(3): 74-77.  
LV Shuan-lu, LUO Fa-qian, ZHOU Jie, et al. Prospects of Aluminum Alloy Drill Pipe in Tarim Oilfield[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2009, 37(3): 74-77.
- [2] GELFGAT M Y, BASOVICH V S. Aluminum vs. Steel: Preventing Drill String Buckling When Drilling Horizontally[J]. Oil & Gas Eurasia, 2007(6): 32-38.
- [3] 鄢泰宁, 薛维, 卢春华. 铝合金钻杆的优越性及其在地探深孔中的应用前景[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2010, 37(2): 27-29.  
YAN Tai-ning, XUE Wei, LU Chun-hua. Superiorities of Aluminum Alloy Drilling Pipe and Its Application Prospects in Deep Holes for Geological Exploration[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2010, 37(2): 27-29.
- [4] 梁健, 彭莉, 孙建华, 等. 地质钻探铝合金钻杆材料研制及室内试验研究[J]. 地质与勘探, 2011, 47(2): 304-308.  
LIANG Jian, PENG Li, SUN Jian-hua, et al. Develop-

- ment of the Aluminum Alloy Drill Rod and Laboratory Tests[J]. *Geology and Exploration*, 2011, 47(2): 304-308.
- [5] MAURER W C. Development of Aluminum Drill Pipe in Russia[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 1999, 98: 40128.
- [6] GODARD H P, JEPSON W B, BOTHWELL M R, et al. *The Corrosion of Light Metals*[M]. New York: John Wiley & Sons, 1967.
- [7] MAHENDRU P, LECTURER S. Protective Treatment of Aluminium and Its Alloys[J]. *Global Journal of Research in Engineering*, 2011, 11(3): 10-14.
- [8] 梁健, 顾艳红, 岳文, 等. 科学超深井钻探铝合金钻杆的腐蚀失效分析[J]. *探矿工程(岩土钻掘工程)*, 2017, 44(2): 60-66.  
LIANG Jian, GU Yan-hong, YUE Wen, et al. Analysis on Corrosion Failure of Aluminum Alloy Drill Pipe for Scientific Ultra-Deep Well Drilling[J]. *Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling)*, 2017, 44(2): 60-66.
- [9] FOVET Y, POURREYRON L, GAL J Y. Corrosion by Galvanic Coupling between Carbon Fiber Posts and Different Alloys[J]. *Dental Materials*, 2000, 16(5): 364-373.
- [10] SUBRAMANIAN G, PALRAJ S, PALANICHAMY S. Galvanic Corrosion Behaviour of Aluminium 3004 and Copper in Tropical Marine Atmosphere[J]. *Journal of Marine Science and Application*, 2014, 13(2): 230-236.
- [11] FASUBA O A, YEROKHIN A, MATTHEWS A, et al. Corrosion Behaviour and Galvanic Coupling with Steel of Al-Based Coating Alternatives to Electroplated Cadmium[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2013, 141(1): 128-137.
- [12] IWABUCHI A, SONODA T, YASHIRO H, et al. Application of Potential Pulse Method to the Corrosion Behavior of the Fresh Surface Formed by Scratching and Sliding in Corrosive Wear[J]. *Wear*, 1999, 225-229: 181-189.
- [13] SONG R G, DIETZEL W, ZHANG B J, et al. Stress Corrosion Cracking and Hydrogen Embrittlement of an Al-Zn-Mg-Cu Alloy[J]. *Acta Materialia*, 2004, 52(16): 4727-4743.
- [14] PARKINS R N. The Theory of Stress Corrosion Cracking in Alloys[J]. *British Corrosion Journal*, 1972, 7(4): 151.
- [15] KELLY D J, ROBINSON M J. Influence of Heat Treatment and Grain Shape on Exfoliation Corrosion of Al-Li Alloy 8090[J]. *Corrosion*, 1993, 49(10): 787-795.
- [16] ROBINSON M J, JACKSON N C. Exfoliation Corrosion of High Strength Al-Cu-Mg Alloys: Effect of Grain Structure[J]. *British Corrosion Journal*, 1999, 34(1): 45-49.
- [17] SZKLARSKA-SMIALOWSKA Z. Pitting Corrosion of Aluminum[J]. *Corrosion Science*, 1999, 41(9): 1743-1767.
- [18] FOLEY R T. Localized Corrosion of Aluminum Alloys—A Review[J]. *Corrosion*, 1986, 42(5): 277-288.
- [19] ARMSTRONG R D, BRAHAM V J. The Mechanism of Aluminium Corrosion in Alkaline Solutions[J]. *Corrosion Science*, 1996, 38(9): 1463-1471.
- [20] MOON S M, PYUN S I. The Formation and Dissolution of Anodic Oxide Films on Pure Aluminium in Alkaline Solution[J]. *Electrochimica Acta*, 1999, 44(14): 2445-2454.
- [21] BERNARD J, CHATENET M, DALARD F. Understanding Aluminum Behaviour in Aqueous Alkaline Solution Using Coupled Techniques: Part I. Rotating Ring-Disk Study[J]. *Electrochimica Acta*, 2006, 52(1): 86-93.
- [22] ROWLANDS J C J M C. *Seawater Corrosion Handbook* [M]. New Jersey: Noyes Data Corporation, 1979.
- [23] FU CHUNJUAN, LIU YUXING, YU MEI, et al. Effect of Cerium Acetate Doping on Corrosion Behavior of Sol-Gel Coatings on 2A12 Aluminum Alloy[J]. *International Journal of Electrochemical Science*, 2015, 10(3): 2014-2025.
- [24] BECCARIA A M, POGGI G. Influence of Hydrostatic Pressure on Pitting of Aluminium in Sea Water[J]. *British Corrosion Journal*, 1985, 20(4): 183-186.
- [25] 王虹斌, 方志刚, 蒋百灵. 微弧氧化技术及其在海洋环境中的应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.  
WANG Hong-bin, FANG Zhi-gang, JIANG Bai-ling. *Microarc Oxidation Technology and Its Applications in Sea Environments*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.
- [26] 王艳秋, 王岳, 陈派明, 等. 7075 铝合金微弧氧化涂层的组织结构与耐蚀耐磨性能[J]. *金属学报*, 2011, 47(4): 455-461.  
WANG Yan-qiu, WANG Yue, CHEN Pai-ming, et al. Microstructure, Corrosion and Wear Resistances of Microarc Oxidation Coating on Al Alloy 7075[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2011, 47(4): 455-461.
- [27] WEN Lei, WANG Ya-ming, ZHOU Yu, et al. Corrosion Evaluation of Microarc Oxidation Coatings Formed on 2024 Aluminium Alloy[J]. *Corrosion Science*, 2010, 52(8): 2687-2696.
- [28] 梁健, 顾艳红, 杨远航, 等. 微弧氧化处理对铝合金钻杆与钢接头电偶腐蚀行为的影响[J]. *材料保护*, 2018, 51(6): 110-114, 130.  
LIANG Jian, GU Yan-hong, YANG Yuan-hang, et al. Effects of Micro-Arc Oxidation Treatment on Galvanic Corrosion Behavior between Aluminum Alloy Drill Pipe and Steel Joints[J]. *Materials Protection*, 2018, 51(6): 110-114, 130.
- [29] 徐滨士, 刘世参, 梁秀兵. 纳米表面工程的进展与展望[J]. *机械工程学报*, 2003, 39(10): 21-26.  
XU Bin-shi, LIU Shi-can, LIANG Xiu-bing. Progress and Prospect of Nano-Materials Surface Engineering[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2003, 39(10): 21-26.
- [30] MA Shi-ning, SUO Xiang-bo, QIU Ji. Fabrication of N-SiO<sub>2</sub> Reinforced Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composite Coatings on 7A52 Aluminium Alloy by Micro-Arc Oxidation[J]. *Advanced Materials Research*, 2010, 97-101: 1463-1466.
- [31] 索相波, 马世宁, 邱骥, 等. 纳米 SiO<sub>2</sub> 复合处理对 7A52 铝合金微弧氧化陶瓷层孔隙率及性能的影响[J]. *航空材料学报*, 2009, 29(6): 66-69.  
SUO Xiang-bo, MA Shi-ning, QIU Ji, et al. Improvement

- of Surface Porosity and Properties of MAO Ceramic Coatings by Incorporation of SiO<sub>2</sub> Nanoparticles[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2009, 29(6): 66-69.
- [32] GU Yan-hong, MA Hui-juan, YUE Wen, et al. Microstructure and Corrosion Model of MAO Coating on Nano Grained AA2024 Pretreated by Ultrasonic Cold Forging Technology[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 681: 120-127.
- [33] 梁健, 李鑫森, 王汉宝, 等. 连续循环系统在科学超深井中的需求分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2015, 42(4): 1-5.  
LIANG Jian, LI Xin-miao, WANG Han-bao, et al. Requirement Analysis on Continuous Circulation System for Scientific Ultra-Deep Drilling[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2015, 42(4): 1-5.
- [34] 张凯, 李迪凡, 文邦伟, 等. 基于岸基与远洋移动平台的 7B04 铝合金腐蚀行为比较研究[J]. 表面技术, 2021, 50(1): 405-412.  
ZHANG Kai, LI Di-fan, WEN Bang-wei, et al. Comparative Research on Corrosion Behaviors of 7B04 Aluminium Alloy on the Ocean-going Ship Platform and Offshore Platform[J]. Surface Technology, 2021, 50(1): 405-412.
- [35] LIU Jing, ZHANG Tao, MENG Guo-zhe, et al. Effect of Pitting Nucleation on Critical Pitting Temperature of 316L Stainless Steel by Nitric Acid Passivation[J]. Corrosion Science, 2015, 91: 232-244.
- [36] NINGSHEN S, MUDALI U K, AMARENDRA G, et al. Hydrogen Effects on the Passive Film Formation and Pitting Susceptibility of Nitrogen Containing Type 316L Stainless Steels[J]. Corrosion Science, 2006, 48(5): 1106-1121.
- [37] 冯驰, 黄运华, 申玉芳, 等. 不同表面状态对 6061 铝合金耐蚀性能的影响研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(4): 100-104, 128.  
FENG Chi, HUANG Yun-hua, SHEN Yu-fang, et al. Effect of Surface Status on the Corrosion Resistance of 6061 Aluminum Alloy[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(4): 100-104, 128.
- [38] 曹京宜, 张寒露, 程文华, 等. 采用电化学测试方法评价防污涂层对铝合金耐蚀性能的影响[J]. 材料开发与应用, 2008, 23(3): 1-6, 15.  
CAO Jing-yi, ZHANG Han-lu, CHENG Wen-hua, et al. An Evaluation on Effect of Antifouling Paint on Corrosion Resistance of Aluminum Alloy by Electrochemistry Test[J]. Development and Application of Materials, 2008, 23(3): 1-6, 15.
- [39] 曾彦玮. 在模拟质子交换膜燃料电池环境下铝合金双极板耐蚀性能研究[D]. 上海: 上海电力大学, 2020.  
ZENG Yan-wei. Research on Corrosion Resistance of Aluminum Alloy Bipolar Plate in Simulated Proton Exchange Membrane Fuel Cell Environment[D]. Shanghai: Shanghai Electric Power University, 2020.
- [40] SEFER B, VIRTANEN S. Electrochemical and Corrosion Study of As-Cast Ni<sub>x</sub>Al<sub>y</sub> Intermetallic Alloys: Influence of Alloy Composition and Electrolyte pH[J]. Corrosion Science, 2019, 154: 287-304.
- [41] 龚健民. 金属表面硅烷膜的制备及耐蚀性能研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2009.  
GONG Jian-min. Preparation of Silane Films on the Surface of Metal and Study on Corrosion Protection[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2009.
- [42] LUO Hong, ZOU Shi-wen, CHEN Y H, et al. Influence of Carbon on the Corrosion Behaviour of Interstitial Equiatomic CoCrFeMnNi High-Entropy Alloys in a Chlorinated Concrete Solution[J]. Corrosion Science, 2020, 163: 108287.
- [43] 胡明涛, 鞠鹏飞, 左禹, 等. 模拟海洋大气环境下铝合金表面锌黄环氧底漆/丙烯酸聚氨酯面漆涂层体系失效过程研究[J]. 表面技术, 2018, 47(5): 57-62.  
HU Ming-tao, JU Peng-fei, ZUO Yu, et al. Failure Process of Zinc Yellow Epoxy/Acrylic Polyurethane Composite Coating for Aluminum Alloy under Simulated Marine Environment[J]. Surface Technology, 2018, 47(5): 57-62.
- [44] 叶作彦, 刘道新, 李重阳, 等. 封闭对铝合金微弧氧化膜在酸性溶液中耐蚀性的影响[J]. 无机材料学报, 2015, 30(6): 627-632.  
YE Zuo-yan, LIU Dao-xin, LI Chong-yang, et al. Effect of Sealing Treatments on the Corrosion Behavior of Micro-Arc Oxidation Coating on Aluminum Alloy in Acid NaCl Solution[J]. Journal of Inorganic Materials, 2015, 30(6): 627-632.
- [45] YU Liu-si, TANG Jun-lei, WANG Hu, et al. Corrosion Behavior of Bulk (Zr<sub>58</sub>Nb<sub>3</sub>Cu<sub>16</sub>Ni<sub>13</sub>Al<sub>10</sub>)<sub>100-x</sub>Y<sub>x</sub> ( $x = 0, 0.5, 2.5$  at.%) Metallic Glasses in Sulfuric Acid[J]. Corrosion Science, 2019, 150: 42-53.
- [46] 赵麦群, 雷阿丽. 金属的腐蚀与防护[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.  
ZHAO Mai-qun, LEI A-li. Corrosion and Protection of Metals[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.
- [47] 龚鹏, 张光旭, 杨超, 等. pH 对 Q235B 钢在船舶尾气脱硫液中电化学腐蚀行为的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(12): 181-186.  
GONG Peng, ZHANG Guang-xu, YANG Chao, et al. Influence of pH on the Electrochemical Corrosion Behavior of Q235B Steel in Ship Exhaust Desulfurizing Liquid[J]. Surface Technology, 2018, 47(12): 181-186.
- [48] 梁平. 2024 铝合金表面化学镀镍工艺研究[J]. 铸造技术, 2011, 32(1): 97-99.  
LIANG Ping. Study on the Process of Electroless Plating Nickel for 2024 Aluminum Alloy[J]. Foundry Technology, 2011, 32(1): 97-99.
- [49] 李海祥, 李相波, 孙明先, 等. 冷喷涂 Zn-50Al 复合涂层在海水中的耐蚀性能[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2010, 30(1): 62-66.  
LI Hai-xiang, LI Xiang-bo, SUN Ming-xian, et al. Corrosion Resistance of Cold-Sprayed Zn-50Al Coatings in Seawater[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2010, 30(1): 62-66.
- [50] 林翠, 肖志阳. 碳钢在 NaCl 薄液膜下的电化学腐蚀行

- 为[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(4): 316-320.
- LIN Cui, XIAO Zhi-yang. Electrochemical Corrosion Behavior of Carbon Steel under Thin Electrolyte Layer Containing NaCl[J]. Corrosion & Protection, 2014, 35(4): 316-320.
- [51] 范汇吉, 孙虎元, 孙立娟, 等. 电解液的浓度和温度对铝空气电池负极性能的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2012, 24(2): 149-152.
- FAN Hui-ji, SUN Hu-yuan, SUN Li-juan, et al. Effects of Chloride Ion Concentration and Temperature on Anode Performance of Aluminum/Air Batteries[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2012, 24(2): 149-152.
- [52] QU Yao, YANG Chao-lin, JIN Xiao-yue, et al. High Temperature Steam Corrosion of Microarc Oxidation Coatings on 6061 Aluminum Alloy at 300 °C/3 MPa Steam[J]. Surface Review and Letters, 2021, 28(1): 2050030.
- [53] 任保轶, 高艳慧, 舒燕, 等. 溶胶-凝胶法制备  $\text{Al}_2\text{O}_3$  涂层及其对  $\text{Ti6Al4V}$  基合金的高温氧化防护性能[J]. 稀有金属与硬质合金, 2010, 38(4): 24-27, 32.
- REN Bao-yi, GAO Yan-hui, SHU Yan, et al.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Coating Prepared by Sol-Gel Process and Its High-Temperature Oxidation Protective Performance for  $\text{Ti6Al4V}$ -Based Alloy[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2010, 38(4): 24-27, 32.
- [54] 赵坚, 刘伟, 陈小明, 等. 等离子喷涂和微弧氧化  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$  复合陶瓷层的微观结构及性能对比[J]. 电镀与涂饰, 2020, 39(22): 1540-1544.
- ZHAO Jian, LIU Wei, CHEN Xiao-ming, et al. Comparative Study on Microstructure and Properties of  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$  Composite Ceramic Coatings Prepared by Plasma Spraying and Micro-Arc Oxidation[J]. Electroplating & Finishing, 2020, 39(22): 1540-1544.
- 责任编辑: 万长清

(上接第 220 页)

- [21] 郝负洪, 邢永明, 杨诗婷, 等. 风沙环境下钢结构涂层的冲蚀磨损力学性能研究[J]. 应用力学学报, 2013, 30(3): 350-355, 473.
- HAO Yun-hong, XING Yong-ming, YANG Shi-ting, et al. The Erosion-Wear Mechanical Properties of the Coating of Steel Structure Subject to Sandstorm[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2013, 30(3): 350-355, 473.
- [22] 郝负洪, 邢永明. 风沙环境下钢结构涂层侵蚀力学行为与损伤评价研究[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- HAO Yun-hong, XING Yong-ming. Research on the Corrosion Mechanical Behavior and Damage Evaluation of Steel Structure Coatings under Wind and Sand Environment [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017.
- [23] 赵富康, 蔺鹏臻, 颜维毅, 等. 钢箱-混凝土组合桥梁防腐涂层的疲劳应力分析[J]. 涂料工业, 2020, 50(10): 7-14.
- ZHAO Fu-kang, LIN Peng-zhen, YAN Wei-yi, et al. Fatigue Stress Analysis of Anti-Corrosion Coatings on Steel Box-Concrete Composite Beam Bridge[J]. Paint & Coatings Industry, 2020, 50(10): 7-14.
- [24] 李凯崇, 蒋富强, 薛春晓, 等. 兰新铁路十三间房段的戈壁风沙流特征分析[J]. 铁道工程学报, 2010, 27(3): 15-18.
- LI Kai-chong, JIANG Fu-qiang, XUE Chun-xiao, et al. Analysis of the Characteristics of Gobi Sand-Driving Wind in Shisanjianfang Section of Lanzhou-Xinjiang Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2010, 27(3): 15-18.
- 责任编辑: 万长清

(上接第 247 页)

- [29] ABDULLAH S A, SAHDAN M Z, NAYAN N, et al. Neutron Beam Interaction with Rutile  $\text{TiO}_2$  Single Crystal (111): Raman and XPS Study on  $\text{Ti}^{3+}$ -Oxygen Vacancy Formation[J]. Materials Letters, 2020, 263: 127143.
- [30] QIN Zi-yu, OUYANG Chao, ZHANG Jian, et al. 2D  $\text{WS}_2$  Nanosheets with  $\text{TiO}_2$  Quantum Dots Decoration for High-Performance Ammonia Gas Sensing at Room Temperature[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2017, 253: 1034-1042.
- [31] SPALVINS T. Frictional and Morphological Properties of Au-MoS<sub>2</sub> Films Sputtered from a Compact Target[J]. Thin Solid Films, 1984, 118(3): 375-384.
- [32] ZABINSKI J S, FLORKEY J E, WALCK S D, et al. Friction Properties of  $\text{WS}_2$ /Graphite Fluoride Thin Films Grown by Pulsed Laser Deposition[J]. Surface and Coatings Technology, 1995, 76-77: 400-406.
- [33] MURATORE C, VOEVODIN A A. Chameleon Coatings: Adaptive Surfaces to Reduce Friction and Wear in Extreme Environments[J]. Annual Review of Materials Research, 2009, 39: 297-324.
- [34] 孔良桂, 徐书生, 郝俊英. 射频非平衡磁控溅射  $\text{WS}_2$  薄膜的结构及其摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2015, 35(4): 386-392.
- KONG Liang-gui, XU Shu-sheng, HAO Jun-ying. Structural and Tribological Properties of  $\text{WS}_2$  Films Deposited by Radio Frequency Unbalanced Magnetron Sputtering[J]. Tribology, 2015, 35(4): 386-392.
- [35] ZHANG Xiao-long, QIAO Li, CHAI Li-qiang, et al. Structural, Mechanical and Tribological Properties of Mo-S-N Solid Lubricant Films[J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 296: 185-191.
- [36] POLCAR T, GUSTAVSSON F, THERSLEFF T, et al. Complex Frictional Analysis of Self-Lubricant W-S-C/Cr Coating[J]. Faraday Discussions, 2012, 156: 383-401.
- 责任编辑: 万长清