

S-03 钢渗氮面点蚀机理与钝化工艺优化

许维超, 王 迎, 叶 晖

(西安航天发动机有限公司, 陕西 西安 710100)

摘 要: 针对 S-03 钢(022Cr12Ni10MoTi) 渗氮后表面出现点腐蚀现象, 进行深入机理分析, 发现渗氮后表面生成 CrN, 造成渗氮表面贫 Cr, 不能形成致密完整的钝化膜, 导致材料耐蚀性能降低, 易发生点蚀。并对原有磷酸体系钝化工艺进行改进优化, 提出了复合钝化工艺。利用循环极化、电化学阻抗谱(EIS)等技术手段, 研究了复合钝化后 S-03 钢渗氮表面的腐蚀行为, 并与未钝化和磷酸体系钝化进行对比。结果表明, 经复合钝化处理的 S-03 钢渗氮表面点蚀电位 E_b 最高, 腐蚀速率最小, 且钝化膜修复能力最强。说明复合钝化工艺能在 S-03 渗氮表面形成 $x\text{Cr}_2\text{O}_3 \cdot y\text{CrOOH}$ 稳定的非晶态氧化膜, 增强了表面抗点蚀能力, 其耐蚀性能要远高于磷酸体系钝化和未钝化表面。同时复合钝化工艺可有效提高 S-03 钢渗氮表面钝化膜厚度, 增强钝化膜修复能力。

关键词: S-03 钢渗氮; 点蚀; 复合钝化; 钝化膜; 耐蚀性能

中图分类号: V463 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374(2020)01-0102-07

Pitting mechanism and passivation process optimization of nitriding surface of S-03 steel

XU Weichao, WANG Ying, YE Hui

(Xi'an Space Engine Company Limited, Xi'an 710100, China)

Abstract: The mechanism of pitting corrosion on nitriding surface of S-03 steel(022Cr12Ni10MoTi) was analyzed, CrN was found on the nitriding surface which caused poor Cr. So the dense and complete passivation film didn't form, which caused the corrosion resistance of material to decrease and prone to corrosion. The passivation process of phosphoric acid system was optimized, and then the compound passivation process was proposed. By cyclic polarization curves and electrochemical impedance spectroscopy (EIS), the corrosion behavior of compound passivated S-03 steel nitriding surface was studied, and compared with non passivation and the passivation process of phosphoric acid system. The results show that the pitting potential of S-03 steel with compound passivation treatment is the largest, and the corrosion rate is lowest, and the passivation film has the strongest repairing ability. It indicates that the compound passivation process can form a stable amorphous oxide film $x\text{Cr}_2\text{O}_3 \cdot y\text{CrOOH}$ which improves the pitting corrosion resistance, and its corrosion resistance is much higher than that of the passivation process of phosphoric acid system and unpassivated surface. Meanwhile the compound passivation process can effectively improve the thickness of passivation film for nitriding surface of S-03 steel and enhance the repair-

ring ability of passivation film.

Keywords: nitriding of S-03 steel; corrosive pitting; compound passivation; passivation film; corrosion resistance

0 引言

S-03 钢(022Cr12Ni10MoTi)以其优良的低温性能及机械性能,被广泛应用于液体火箭发动机的阀门零部件中。为进一步提高 S-03 钢工作表面硬度,改善表层组织的力学性能,工厂对部分 S-03 钢零件采取了局部渗氮处理。经渗氮处理的零件在后续加工、周转及储存过程中均出现大量点状腐蚀,主要集中在渗氮表面。为提高 S-03 钢渗氮表面耐蚀性能,工厂采用磷酸体系钝化处理,使其表面生成 Fe、Cr 的氧化物、氢氧化物,来抵抗外部环境侵蚀,经钝化处理后,点蚀现象有所降低,但仍有较多点蚀发生,造成大量产品返修、报废。

点蚀是局部腐蚀最广泛和隐蔽的形式之一,它存在于许多自然和工业环境当中。同均匀腐蚀相比,点蚀的金属损失非常少,但其破坏性和危险性却要大得多,点蚀可以作为裂纹源,在应力作用下导致应力腐蚀破裂,引起设备和管道过早破坏,甚至发生灾难性事故^[1-4]。因此研究点蚀机理,并采取合理钝化工艺进行预防和减缓点蚀,对于节约成本、实现资源可持续利用等具有长远意义。

本文就 S-03 钢渗氮表面点蚀的产生及生长机理进行了深入分析,对磷酸体系钝化工艺进行了优化,提出复合钝化工艺,并评价了其钝化膜耐蚀性能。

1 试验研究

1.1 试件制备

选用渗氮处理后的 S-03 钢试片,具体尺寸为 50 mm×10 mm×10 mm,化学成分见表 1。试片先经化学除油将表面清洗干净,再进行化学钝化,最后依次用去离子水、无水乙醇清洗,吹干。

1.2 试验参数

磷酸体系钝化:在 H₃PO₄(40~60 g/L)和 CrO₃(150~200 g/L)的混合溶液中钝化,钝化时间 10~15 min,钝化温度 45~50 ℃。

表 1 S-03 钢主要合金成分
Tab. 1 Main alloy components of S-03 steel

元素	Cr/%	Ni/%	Mo/%	Ti/%	Fe
成分	11.5~12.5	9.0~10.3	0.5~0.8	0.15~0.25	余量

复合钝化:首先在 5~10 g/L 的 Na₂CO₃ 溶液中,50~60 ℃ 温度下预钝化 10~15 min,然后去离子水洗净,再进行磷酸体系钝化。

1.3 试件检测

试验完成后对试件进行了形貌分析、电化学测试、中性盐雾试验。

采用 Quanta-650 型扫描电子显微镜对 S-03 钢渗氮表面点蚀形貌和化学成分进行分析,加速电压为 20 kV。

电化学测试采用三电极体系,以渗氮处理的 S-03 试块为工作电极,以铂电极为辅助电极,饱和甘汞电极为参比电极,在 3.5% 的 NaCl 溶液中利用 Reference 3000™ 电化学工作站测量工作电极的循环极化曲线(扫描速率为 5 mV/s)和电化学阻抗谱(测量频率为 100 kHz~0.01 Hz),来评价渗氮表面耐蚀性能。

按 GB/T 10125—2012《人造气氛腐蚀试验 盐雾试验》进行中性盐雾试验,整个试验周期内,隔一定时间开箱检查并记录现象,通过比较腐蚀程度检查钝化膜完整性来评价耐蚀性能。

2 点蚀机理分析

2.1 形貌分析

从图 1(a)看出,只在渗氮表面的个别点或局部区域出现一些麻点或腐蚀小孔,而其余部分不腐蚀或者腐蚀很轻微,这是典型的点蚀形貌。点蚀通常发生在易钝化金属或合金表面,是一种隐蔽性强、破坏性大的局部腐蚀形式。从表面上看,点蚀坑大多会被腐蚀产物所覆盖,呈闭口形式,如图 1(b)所示,但也有少量成开口式。

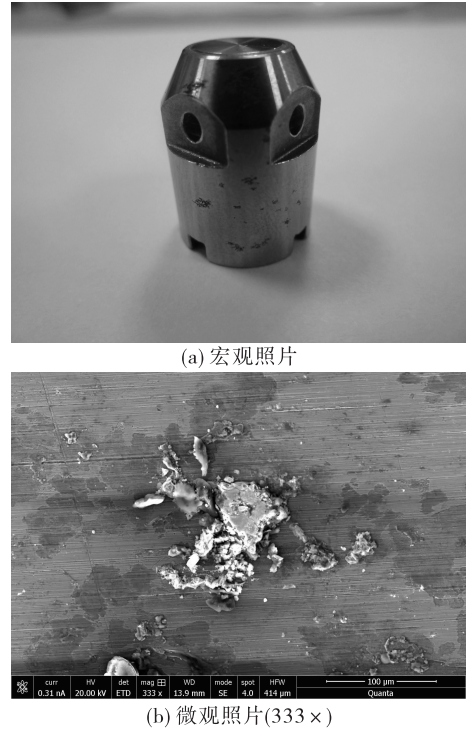


图 1 S-03 钢渗氮产品表面腐蚀形貌
Fig. 1 Surface corrosion morphology of nitriding products for S-03 steel

图 2 为不锈钢点蚀坑截面示意图。点蚀坑口直径一般小于深度,大小通常在数十微米到数百微米不等,且点蚀坑形貌呈现口小腔大的特征^[5-6](图 2)。点蚀通常集中在一个小区域,深度惊人,容易引起设备穿孔,诱发应力腐蚀裂纹,因此点蚀对于金属材料尤其是不锈钢具有很强的破坏性^[7-8]。

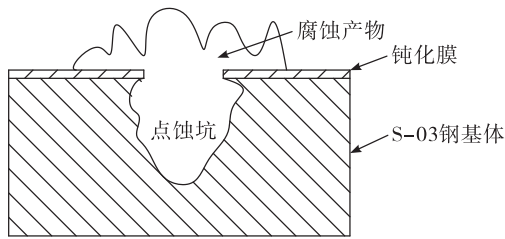


图 2 不锈钢点蚀坑截面示意图
Fig. 2 Schematic diagram of stainless steel pitting pit section

不锈钢点蚀是在特定的腐蚀介质中发生的,通常发生在有卤素阴离子的溶液中,其中以氯化物侵蚀性最强。当侵蚀性阴离子达到某一浓度时就会穿过破损的钝化膜直接与金属基体接触,引起金属

表面的微区溶解而产生点蚀^[9-10]。

利用扫描电镜对图 1(b)中点蚀部位堆叠的腐蚀产物进行了能谱分析,并与正常部位成分进行对比,如表 2 所示。从表 2 看出,点腐蚀产物中主要元素为 Fe 和 O,由此断定腐蚀产物主要成分为铁的氧化物。而腐蚀产物中 Cr、Ni 元素含量较低且远低于正常部位,由此说明点蚀对 Fe 元素的腐蚀更加敏感。与正常部位相比,腐蚀产物中有 Cl 元素存在,表明 Cl^- 作为侵蚀性阴离子导致的渗氮表面点蚀。

表 2 渗氮面正常部位与腐蚀产物成分对比
Tab. 2 Comparison of normal parts and corrosion products of nitriding surface 单位: %

元素	Fe	Cr	Ni	O	Cl
正常部位	78.3	12.0	9.7	—	—
腐蚀部位	58.0	1.4	5.9	33.6	1.0

2.2 机理分析

渗氮处理是在特定条件下使氮原子以扩散形式进入基体内部,与基体中各合金元素形成氮化物,从而改变材料性能。氮原子与 S-03 钢中各金属元素都有一定的结合能力,而与 Cr 结合强度远远大于与其他元素,可形成硬度高、稳定性好的氮化铬(如 CrN),并弥散分布在渗层中,在一定程度上引起 Cr 元素的偏析,产生贫 Cr 区^[11]。因贫 Cr 区中 Cr 含量降低,不能形成致密完整的钝化膜,降低材料耐蚀性能,进而发生点蚀。

点蚀的形成过程主要经过两个阶段,即点蚀产生与生长过程^[12-13]。下面对两个阶段的机理展开讨论,如图 3 所示。

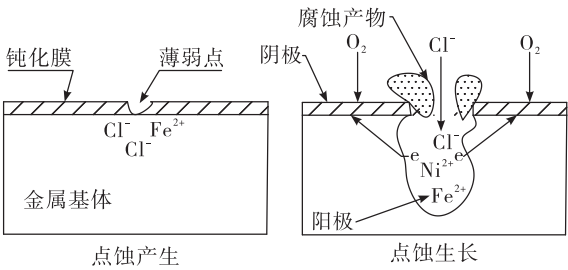


图 3 不锈钢点蚀产生与生长示意图
Fig. 3 Schematic diagram of pitting corrosion and growth of stainless steel

2.2.1 点蚀产生

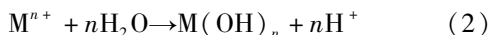
Cl^- 作为侵蚀离子,其半径小,具有极强的穿透性,易从钝化膜的薄弱点穿透钝化膜,迁移到金属/氧化物界面,促进了金属的腐蚀性溶解和钝化膜的局部破坏。被破坏的钝化膜导电性增强,可以加速离子的运输和传递,使膜更易溶解。由于金属离子持续不断地由金属/钝化膜界面向钝化膜/溶液界面扩散,会在钝化膜和金属界面产生空位,当空位尺寸达到一定值时则钝化膜就会发生破裂,导致点蚀坑产生。

2.2.2 点蚀生长

点蚀坑形成后,凹坑内金属处于局部活化状态,作为阳极;凹坑外大片表面仍处于钝化状态,作为阴极。于是点蚀坑内外构成了小阳极-大阴极的原电池,使点蚀加速进行。点蚀生长的初级阶段,点蚀坑内发生金属阳极 $\text{Fe}, \text{Cr}, \text{Ni}$ 的溶解,具体反应为



点蚀进入稳定生长期后,因凹坑内的金属阳离子浓度不断增大,导致 Cl^- 富集到凹坑内。同时凹坑内的 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}, \text{Cr}^{3+}$ 等金属离子水解使孔内溶液酸化



酸化的结果使凹坑内表面金属的再钝化电位升高;另外凹坑内离子浓度较高,导电性提高^[14-15]。以上条件使得孔内处于活化状态,而在凹坑周围由于阴极反应促进表面钝化,抑制了周围金属的腐蚀,最后发展成为口小腔大的点蚀坑形貌(图2)。

3 结果与讨论

3.1 循环极化曲线分析

循环极化曲线可有效评价 S-03 钢渗氮表面的点蚀敏感性和钝化能力。通过循环极化曲线可以得到金属点蚀电位 E_b 、点蚀保护电位 E_p 。点蚀电位 E_b 越正,耐点蚀能力越强,反之越弱;点蚀保护电位 E_p 越正,钝化能力越强,反之越弱; E_p 和 E_b 值越接近,则表明金属钝化膜的修复能力越强。

图4为 S-03 钢渗氮表面经不同钝化处理的循环极化曲线。表3是图4中 a, b, c 3 条极化曲线的极化参数。从表3看出,点蚀电位 E_b 大小为 $c > a > b$,说明经复合钝化处理的表面耐点蚀性能最强,出

现点蚀倾向最小。保护电位 E_p 大小为 $c > b > a$,结合表3中 $(E_b - E_p)$ 值大小,发现经过钝化处理表面的钝化能力均有所提高,其中复合钝化处理后金属钝化膜修复能力最强。

由此得出,经复合钝化处理的表面耐点蚀性能最强,且修复能力最好。

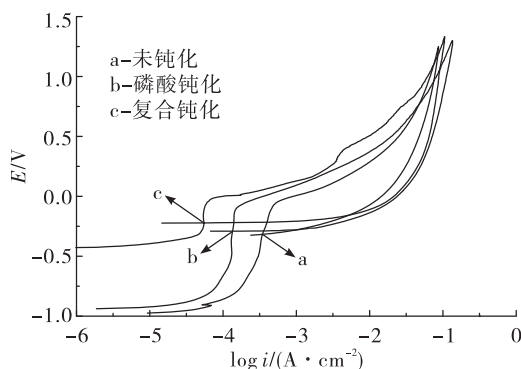


图4 S-03 钢渗氮面经不同钝化处理的循环极化曲线

Fig. 4 Cyclic polarization curves of nitriding surface of S-03 steel treated by different passivation treatments

表3 3 条循环极化曲线的极化参数

Tab. 3 Polarization parameters of three circular polarization curves

曲线	E_b/V	E_p/V	$(E_b - E_p)/\text{V}$
a	-0.055	-0.317	0.262
b	-0.069	-0.286	0.217
c	-0.015	-0.214	0.199

3.2 电化学阻抗谱分析

本文选用等效电路(见图5),对 S-03 钢渗氮表面钝化膜的电化学阻抗谱进行拟合。其中: R_s 为溶液的电阻; R_{ct} 为电荷转移电阻; Q 为双电层常相位角元件; W 为 Warburg 阻抗。

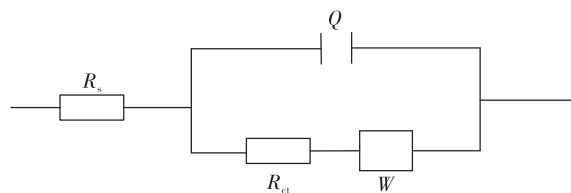


图5 等效电路图

Fig. 5 Equivalent circuit diagram

图6为 S-03 钢渗氮后未钝化表面的电化学阻抗谱拟合效果图。从图中看出,实测数据与拟合数

据基本重合,说明该等效电路能够准确有效地模拟 S-03 渗氮表面钝化膜状态。

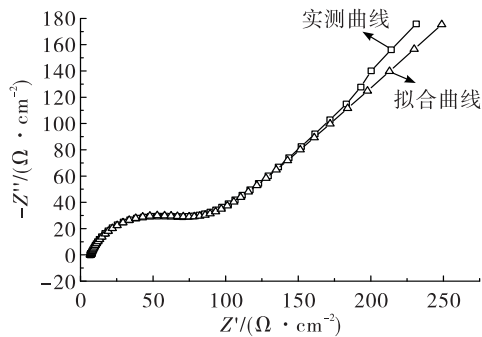


图 6 电化学阻抗谱拟合图

Fig. 6 EIS fitting diagram

图 7 为 S-03 钢渗氮面经不同钝化处理的电化学阻抗谱图。从图中看到,3 条阻抗谱图均是由 1 个高频端的小容抗弧和 1 条斜线组成。容抗弧表示电化学反应,其半径代表反应阻力,在容抗弧之后出现的倾斜角为 $\pi/4$ 的斜线是典型的 Warburg 阻抗,是由扩散过程引起的。

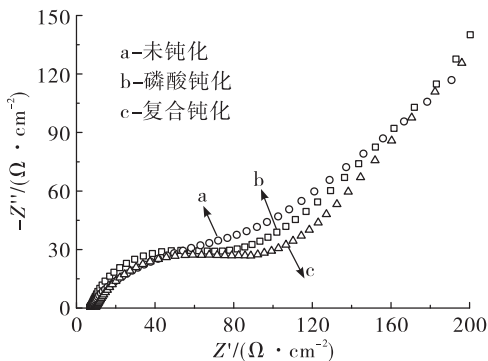


图 7 S-03 钢渗氮面经不同钝化处理的 Nyquist 图

Fig. 7 Nyquist diagram of nitriding surface of S-03 steel treated by different passivation treatments

表 4 是图 7 中 3 条 Nyquist 曲线的拟合数据。其中,电荷转移电阻 R_{ct} 代表电荷在钝化膜内转移时的阻力大小,它可以反映腐蚀速率的大小,其值越大,腐蚀速率越小。从表 4 数据得出, R_{ct} 值大小为 $c > b > a$,说明经过复合钝化的表面腐蚀速率最小,耐蚀性能最强,其次是磷酸体系钝化,最后是未钝化。

表 4 Nyquist 图拟合数据

Tab. 4 Fitting data of Nyquist diagram

曲线	$R_{ct}/(\Omega \cdot \text{cm}^{-2})$	$Y_0/(\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{S}^n)$	n
a	72.80	6.04×10^{-4}	0.791
b	80.31	3.74×10^{-4}	0.712
c	86.11	2.14×10^{-4}	0.699

另外,根据表 4 中的拟合参数 Y_0 , R_{ct} 和 n , 计算钝化膜的电容

$$C = (Y_0 \cdot R_{ct})^n / R_{ct} \quad (3)$$

若将 S-03 钢渗氮表面形成的钝化膜近似看做平行板间电容器,那么电容器的平行板间距离就可以近似看做钝化膜的厚度 d ,即

$$d = \epsilon \epsilon_0 A / C \quad (4)$$

式中: ϵ 为钝膜的介电常数; ϵ_0 为真空介电常数, A 为试样表面面积, cm^2 [16-17]。

结合式(3)和式(4),可以计算 3 种钝化条件下钝化膜的理论厚度,具体如表 5 所示。

表 5 3 种钝化膜厚度理论值

Tab. 5 Theoretical values of three passive film thickness

钝化方式	未钝化	磷酸体系钝化	复合钝化
膜厚度	$861 \epsilon \epsilon_0$	$974 \epsilon \epsilon_0$	$1\,404 \epsilon \epsilon_0$

从表 5 数据看出,3 种钝化膜的厚度大小为复合钝化 > 磷酸体系钝化 > 未钝化,说明复合钝化工艺具有较强钝化能力,可有效提高钝化膜厚度,增强钝化膜对基体保护作用,一定程度上提高了 S-03 钢渗氮表面耐蚀性能。

3.3 盐雾试验分析

依据航天标准《不锈钢酸洗和化学钝化技术条件》(QJ 467—88) 要求,钝化膜完整性试验,按《人造气氛腐蚀试验 盐雾试验》中性盐雾试验方法进行,时间 2 h,试验后目视检查是否有特等黑色金属受腐蚀的迹象。

2#未钝化、5#磷酸体系钝化、9#复合钝化试件同时进行了中性盐雾试验,2 h 后对试件进行了外观检查,发现 5#、9#试件表面无明显变化,2#试件表面有少量锈蚀痕迹,说明磷酸体系钝化、复合钝化均能在 S-03 钢渗氮表面形成完整的钝化膜,未钝化自

然状态下 S-03 钢渗氮表面无法形成完整致密的钝化膜。

图 8 为 3 种钝化处理试件 24 h 中性盐雾试验的结果,2 张图片分别代表试件盐雾试验的 2 个受试面。从试验结果看出,2#未钝化试件锈蚀最为严重,锈点最多;5#磷酸体系钝化试件效果稍好,出现锈点较多;9#复合钝化试件表面锈蚀程度最轻,只出现个别锈点,钝化效果最好,与电化学测试结果一致。

通过电化学测试及盐雾试验结果表明,优化后的复合钝化工艺能有效提高渗氮表面耐蚀性能,降低点蚀现象发生。

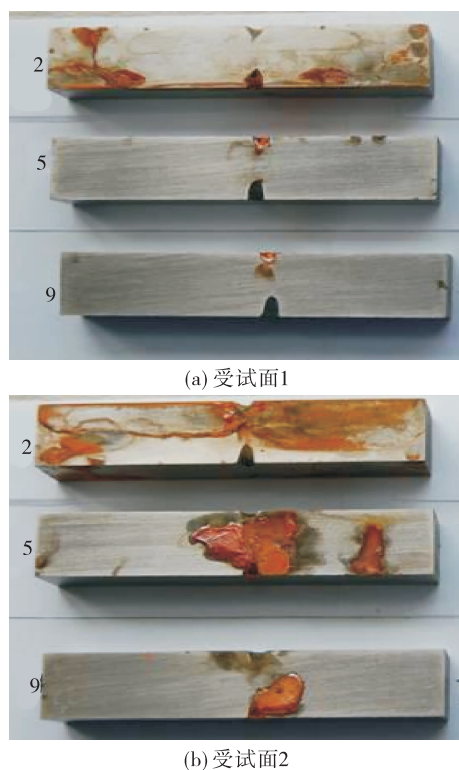


图 8 不同钝化处理试件中性盐雾试验 24 h 结果

Fig. 8 Results of neutral salt spray test for 24 hours in different passivation treatment samples

3.4 钝化机理分析

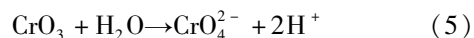
以上分析得出,复合钝化的 S-03 钢渗氮表面耐蚀性能远超磷酸体系钝化表面,下面就两种钝化工艺机理展开讨论。

3.4.1 磷酸体系钝化

磷酸体系为磷酸 + 铬酐混合物,其中磷酸电离

出的磷酸根及磷酸氢根离子具有很强的配合能力,能选择性与金属离子形成可溶性络合物,造成基体中 Fe 及 Fe 的氧化物会优先溶解,从而造成表面 Cr 元素富集,CrO₃ 具有强氧化性,与基体中富集的 Cr 反应形成致密的以 CrOOH 为主的富铬膜。

另外,CrO₃除了作为氧化剂以外,还可与水反应生成 CrO₄²⁻,具体反应为



CrO₄²⁻可在钝化膜/溶液界面吸附并进入靠近界面的钝化膜表层,从而在膜表层形成离子选择性屏蔽层,可排斥介质中侵蚀性阴离子,一定程度上增强钝化膜耐蚀性能^[18-20]。

3.4.2 复合钝化体系

复合钝化是先进行碳酸钠溶液预钝化,在金属表面形成了基体/Cr₂O₃/Fe₂O₃结构的双层钝化膜,然后浸入到磷酸体系溶液中,外层的 Fe₂O₃ 优先溶解,内部裸露的金属继续发生 Fe 溶解及 Cr 氧化反应,最终形成了内层以 CrOOH 为主,外层以 Cr₂O₃ 为主的双层富铬氧化物。

双层富铬钝化膜较厚,且更为致密,一定程度上增加了 Cl⁻ 等侵蚀性阴离子的穿透难度,对基体起到很好的隔绝屏蔽作用。同时双层富铬钝化膜表层吸附的 CrO₄²⁻ 增多,形成的离子选择性屏蔽层更强,增大了钝化膜对 Cl⁻ 等侵蚀性阴离子的排斥作用。

另外,有资料表明^[21-22]不同形态的铬氧化物共存有利于形成多种构型的混合氧化物 $x\text{CrOOH} \cdot y\text{Cr}_2\text{O}_3$,这种混合氧化物结构被认为类似于无机高聚合物大分子,具有长程无序性和短程有序性,能够增加钝化膜结构灵活性,形成稳定的非晶态氧化阻挡层,可大幅提高金属表面耐蚀性能。

此外,稳定的非晶态氧化膜可减少微观结构的敏感点,减少 Cl⁻ 等侵蚀性阴离子的突破点,增强表面抗点蚀能力,与循环极化分析结果一致。

4 优化效果

本文所述的复合钝化工艺已应用于多个型号产品中,加工产品累积达 400 余件,在后续存贮及使用过程中点蚀现象大幅降低,性能稳定,耐蚀性能

良好。另外,采用该技术加工的产品已经顺利通过地面试车及飞行考核。

5 结 论

1) S-03 钢渗氮后表面形成贫 Cr 区,导致自然状态下生成的钝化膜不够完整、致密,表面存在薄弱点容易被腐蚀性介质侵蚀,极易发生点蚀。

2) 复合钝化工艺可在 S-03 钢渗氮表面形成 $x\text{CrOOH} \cdot y\text{Cr}_2\text{O}_3$ 稳定的非晶态氧化膜,增强表面抗点蚀能力,其耐蚀性能要远高于磷酸体系钝化和未钝化表面。

参考文献:

- [1] 杜楠,田文明,赵晴,等. 304 不锈钢在 3.5% NaCl 溶液中的点蚀动力学及机理[J]. 金属学报, 2012, 48(7): 807-814.
- [2] 霍玉龙. 不锈钢点蚀的电化学噪声行为研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2013.
- [3] 李元松. $0\text{Cr}_{15}\text{Ni}_5\text{Cu}_3\text{Nb}$ 不锈钢在 Cl^- 介质中的点蚀行为及防护[D]. 扬州:扬州大学, 2013.
- [4] 黄世新,杜楠,赵晴,等. Fe^{3+} 水解及其对 304 不锈钢点蚀行为的影响[J]. 腐蚀与防护, 2016, 37(6): 453-456.
- [5] 刘道新. 材料的腐蚀与防护[M]. 西安:西北工业大学出版社, 2006.
- [6] 黎雪松,龚敏,郑兴文. 2205 双相不锈钢在卤水溶液中腐蚀初探[J]. 全面腐蚀控制, 2015, 29(3): 57-61.
- [7] 黄世新. 304 不锈钢在蚀孔模拟溶液中的腐蚀行为研究[D]. 南昌:南昌航空大学, 2016.
- [8] 王竹. 奥氏体不锈钢在 H_2S 环境下的腐蚀行为与钝化膜演化研究[D]. 北京:北京科技大学, 2018.
- [9] 叶超. 304 不锈钢点蚀行为的电化学研究[D]. 南昌:南昌航空大学, 2014.
- [10] 吴浩,徐桂芳,严羽,等. 新型高氮低镍奥氏体不锈钢的点蚀性能[J]. 金属热处理, 2015, 40(12): 11-16.
- [11] 程海英,何安平,李永虎. S-03 钢渗氮层裂纹分析与控制[J]. 火箭推进, 2012, 38(3): 59-64.
- CHENG H Y, HE A P, LI Y H. Analysis and control of crack in nitrated layer of S-03 steel[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2012, 38(3): 59-64.
- [12] 石林,郑志军,高岩. 不锈钢的点蚀机理及研究方法[J]. 材料导报, 2015, 29(23): 79-85.
- [13] 潘莹,张三平,周建龙,等. 金属材料点蚀形核过程研究进展[J]. 装备环境工程, 2010, 7(4): 67-70.
- [14] 王昊,林雪. 不锈钢表面酸洗钝化与电抛光[J]. 电镀与环保, 2018, 38(1): 46-48.
- [15] 肖稳. 不锈钢化学钝化及硅烷处理的耐蚀性研究[D]. 北京:机械科学研究总院, 2017.
- [16] 徐海嵩. 316L 不锈钢再钝化行为规律及其钝化膜稳定性研究[D]. 北京:北京科技大学, 2016.
- [17] 权琳琳,王迎. S-130 不锈钢表面钝化工艺及其性能[J]. 火箭推进, 2019, 45(3): 64-68.
- QUAN L L, WANG Y. Study on surface passivation process and properties of S-130 stainless steel[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2019, 45(3): 64-68.
- [18] 马李洋,丁毅,马立群,等. 316L 不锈钢柠檬酸钝化工艺及其耐点蚀性能研究[J]. 表面技术, 2007, 36(2): 39-41.
- [19] 张微啸,李成涛,陈建军,等. 304L 不锈钢在硼酸水溶液中的腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(1): 68-71.
- [20] 徐一慧,孔令真,路伟,等. 304 不锈钢在硝酸环境中的腐蚀电化学行为[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(10): 905-909.
- [21] 胡融刚,林昌健. 电化学改性不锈钢钝化膜的 XPS/SERS 研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2000, 20(3): 35-40.
- [22] 詹中伟,孙志华,汤智慧. 化学钝化对 S280 超高强度不锈钢综合性能的影响[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(8): 742-747.