

doi: 10.3969/j.issn.2095-0411.2024.03.001

离子氮碳氧三元共渗对 45 钢耐蚀耐磨性能的影响与机理研究

胡 静^{1,2,3}, 梁 硕^{1,3}, 卢阳阳^{1,3}, 王海强^{1,3}, 陈立立⁴, 安旭龙^{1,3}, 魏 伟^{1,3}

(1. 江苏省材料表面科学与技术重点实验室(常州大学), 江苏 常州 213164; 2. 常州大学 怀德学院, 江苏 靖江 214500; 3. 材料科学与工程国家级实验教学示范中心(常州大学), 江苏 常州 213164; 4. 山东宇能机械股份有限公司, 山东 枣庄 277000)

摘要: 研究选择 45 钢为原材料, 分别采用绿色环保离子氮碳氧三元共渗技术 (Plasma oxynitrocarburising, PNCO) 和传统淬火-抛光-淬火技术 (Quench-polish-quench, QPQ) 进行表面改性, 并利用 SEM, XRD, 摩擦磨损试验机, 浸泡腐蚀实验对比分析 2 种方法的改性效果, 包括截面显微组织、表面形貌、物相、耐磨性和耐蚀性。结果表明, PNCO 处理后, 获得了与 QPQ 处理相同的多层次渗层结构, 由表层 1~2 μm 氧化膜及次表层化合物层和有效硬化层构成, 且 PNCO 处理后表面氧化膜成纳米结构, 化合物层比 QPQ 更加致密。同时, PNCO 处理后, 磨损率和腐蚀失重率分别为 1.39 mg/(N·m) 和 0.39%, 耐磨耐蚀性均略优于 QPQ, 为研究绿色高效高性能表面改性技术提供了可行的研究方向。

关键词: 离子氮碳氧三元共渗技术; QPQ 技术; 氧化膜; 耐磨性; 耐蚀性

中图分类号: TG 178

文献标志码: A

文章编号: 2095-0411(2024)03-0001-09

Effect of plasma oxynitrocarburising on corrosion and wear resistance for 45 steel and mechanism analysis

HU Jing^{1,2,3}, LIANG Shuo^{1,3}, LU Yangyang^{1,3}, WANG Haiqiang^{1,3}, CHEN Lili⁴, AN Xulong^{1,3}, WEI Wei^{1,3}

(1. Jiangsu Key Laboratory of Materials Surface Science and Technology, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Huaide College, Changzhou University, Jingjiang 214500, China; 3. National Experimental Demonstration Center for Materials Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 4. Shandong Yuneng Machinery Co., Ltd., Zaozhuang 277000, China)

收稿日期: 2024-01-19。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(21978025); 江苏省第三期优势学科建设资助项目(PAPD-3); 江苏高校品牌专业建设工程资助项目(TAPP-2016); 枣庄市自主创新及成果转化资助计划(2021GH10)。

作者简介: 胡静(1966—), 女, 湖南长沙人, 博士, 教授。E-mail: jinghoo@126.com

引用本文: 胡静, 梁硕, 卢阳阳, 等. 离子氮碳氧三元共渗对 45 钢耐蚀耐磨性能的影响与机理研究[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2024, 36(3): 1-9.

Abstract: To explore an environmental friendly and efficient surface modification technology, PNCO (Plasma oxynitrocarburising) was developed and compared with QPQ (Quench-polish-quench) technology for 45 steel. The cross-sectional microstructures, phase compositions, wear resistance and corrosion resistance were tested and analyzed by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), wear tester and immersion corrosion test. The results show that after PNCO treatment, the same multi-layer structure was obtained as those by QPQ treatment, composed of 1—2 μm oxide layer on the surface and compound layer on the subsurface and effective hardening layer beneath. Meanwhile, nanostructured oxide film with denser compound layer was formed by PNCO treatment. Furthermore, both wear rate and corrosion weight loss rate are slightly lower than QPQ treatment, with wear rate of 1.39 mg/(N · m) and corrosion weight loss rate of 0.39% by PNCO, thus bringing better wear resistance and corrosion resistance than those by QPQ treatment. The study provides a feasible research area for environmentally efficient surface modification technology with excellent corrosion and wear resistance.

Key words: plasma oxynitrocarburising; quench-polish-quench; oxide film; wear resistance; corrosion resistance

化工装备零部件的失效,如腐蚀和磨损等,通常起源于材料的表面或次表面^[1-2]。因此,材料表面抗腐蚀和抗磨损性能对化工装备零部件的服役能力和使用寿命具有决定性的作用。在实际应用中发现,淬火-抛光-淬火(Quench-polish-quench, QPQ)处理是提升化工装备零部件表面耐腐蚀耐磨损性的一个极其重要而有效的途径^[3-6]。普通碳素钢和合金钢经 QPQ 处理后,组织从外到内依次为 Fe_3O_4 的氧化层、化合物层和扩散层,其中 Fe_3O_4 具有高抗蚀性和润滑性,可与高硬度的铁氮化合物协同,提升耐腐蚀耐磨损性能,使得 QPQ 处理后金属的耐腐蚀耐磨损性远远高于硬铬、镀镍等表面改性技术,甚至超越不锈钢和部分镍基合金^[7-11]。不足的是 QPQ 作为一种复合处理技术,关键核心工序盐浴氮碳共渗和盐浴氧化会产生氰酸根离子(CNO^-)及碳酸盐沉渣,涉及环保问题使其推广应用受到制约^[12-14]。

因此,研发一种能够替代 QPQ 处理的绿色环保表面改性技术具有显著的研究和应用价值。在材料表面工程领域,离子渗氮由于工作气压极低,可大大减少欲渗元素气体的含量,且无废气排出,因此对环境无任何污染,被誉为“绿色环保表面改性技术”^[15]。叶雪梅等^[16]研究发现,金属材料经绿色环保离子氮碳共渗处理后可以形成化合物层和扩散层的渗层结构,提高表面的硬度及耐磨性能。但最表面没有形成类似 QPQ 处理获得的氧化膜层,耐蚀性远不及 QPQ 处理的金属材料,且在空气湿度较大的环境下,容易发生腐蚀而失效。刘晗等^[17]、缪跃琼等^[18]研究发现,经绿色环保离子氮氧共渗处理后,可以形成表层氧化膜和次表层化合物层渗层结构,显著提高材料耐蚀性,但由于化合物层脆性较大、表层硬度梯度大,在重载作用下易渗层开裂脱落,其服役性能不及 QPQ 处理的化工装备零件。

基于离子氮碳和离子氮氧共渗各自的特性,研究在离子渗氮时添加微量碳氧源,通过一步工序实现氮碳氧三元共渗,旨在结合离子氮碳和离子氮氧共渗两者优势,达到 QPQ 处理的优良综合改性效果,目标是替代工序复杂、环境污染严重的 QPQ 技术。

1 实验材料及方法

1.1 实验材料

实验材料为 45 钢,其化学成分中 C, Si, Mn, S, P 的质量分数分别为 0.46, 0.17, 0.52,

0.031, 0.032, 其余为 Fe。采用线切割将试样加工成长×宽×高为 10 mm×10 mm×5 mm 的小块, 然后对其进行调质处理: 840 °C 保温 12 min 水冷, 随后在 560 °C 回火 25 min。将调质后的试样用 SiC 砂纸进行逐步打磨, 再使用金相抛光机将试样表面抛光至镜面, 最后置于无水乙醇中用超声波清洗 15 min, 去除表面油污及杂质, 得到洁净的试样表面, 烘干并放入密封袋待用。

1.2 离子氮碳氧三元共渗(PNCO)处理和淬火-抛光-淬火(QPQ)处理

将备好的试样放置在 LD-8CL 型直流等离子体渗氮炉内, 抽真空使炉内气压小于 10 Pa, 然后通入氢气, 设定流量为 0.5 L/min, 对试样表面进行 0.5 h 的溅射加热和清洁处理, 溅射清洁结束关闭氢气, 再通入 98.5% 的氮气和 1.5% 的甲烷, 保持炉内气压为 300 Pa。当温度升至 510 °C 时, 通入空气, 设定流量为 0.3 L/min, 进行 PNCO 处理, 设定时间为 0.5~4 h, 最后关闭所有电源及设备, 试样在离子渗氮炉内冷却到室温, 其工艺图如图 1 (a) 所示。将备好的试样采用 QPQ 技术进行表面处理, 380 °C 预热 0.5 h, 540 °C 盐浴氮碳共渗 4 h, 机械抛光后 400 °C 盐浴 0.25 h 后氧化, 最后清洗干燥, 工艺过程如图 1 (b) 所示。

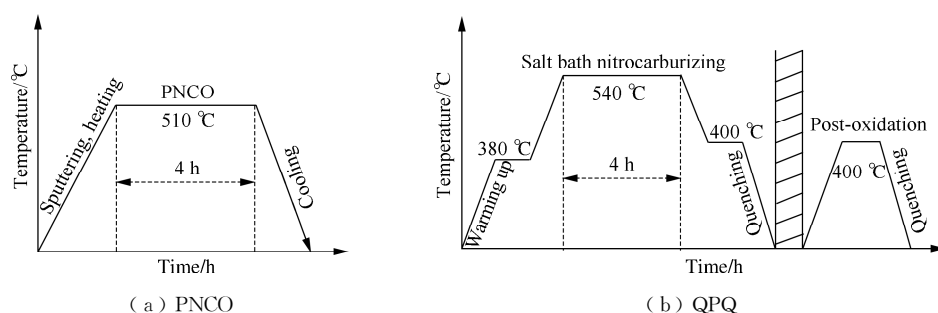


图1 工艺流程图

Fig.1 Process flow diagram

1.3 组织及性能表征

1) 截面显微组织及表面形貌

将不同方法处理好的试样用 SiC 砂纸进行逐步打磨, 使用金相抛光机抛光至表面光亮, 再用 4% 的硝酸酒精腐蚀处理并清洗吹干。使用 JSM-IT100 扫描电子显微镜对试样表面及截面进行微观分析。

2) 物相组成

使用 D/max-2500 型 X 射线衍射仪检测物相组成, 其射线为 Cu-K α 射线, 波长为 $\lambda=0.154$ nm, 设定扫描速度为 5 (°)/min, 步宽为 0.02°, 2θ 为 20°~100°。

3) 耐磨性

首先使用 MST-5000 电子天平称量试样, 然后使用 MMV-1A 多功能材料摩擦行为测试仪检测耐磨性能, 选用 GCr15 为对磨材料, 直径为 5 mm。设定转速为 250 r/min, 加载载荷为 400 g, 对磨时间为 20 min, 实时记录摩擦系数。对磨结束后, 称量试样质量, 对比分析摩擦磨损前后的失重数据。再使用金相显微镜观察试样表面磨痕形貌, 并使用 origin 软件绘制摩擦磨损系数曲线。

4) 耐蚀性

按照化学浸泡法常用溶液成分及实验条件, 将不同方法处理好的试样在质量分数为 10% NaCl 溶

液中浸泡 30 min 后观察表面腐蚀形貌。在质量分数为 5% FeCl_3 溶液中浸泡 48 h 后使用 MST-5000 电子天平测量腐蚀前后失重数据。

2 实验结果与讨论

2.1 截面显微组织和表面形貌对比分析

图 2 为不同方法处理后的 45 钢试样截面显微组织和表面形貌。从图 2 (a) 和图 2 (b) 中可以看出, 两种方法处理后都形成了多层次渗层结构。由图 2 (c) 和图 2 (d) 可知, 最表层形成了一层薄的氧化层, 即由表层 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 氧化膜及次表层化合物层和扩散层构成多层次渗层结构。同时对比发现, PNCO 处理后表面氧化物颗粒细小, 达到纳米级别, 且化合物层更加致密, 可能源于 PNCO 处理温度低于 QPQ; 由此可以推断, PNCO 处理后的零部件表层获得的综合性能可能优于 QPQ 处理。

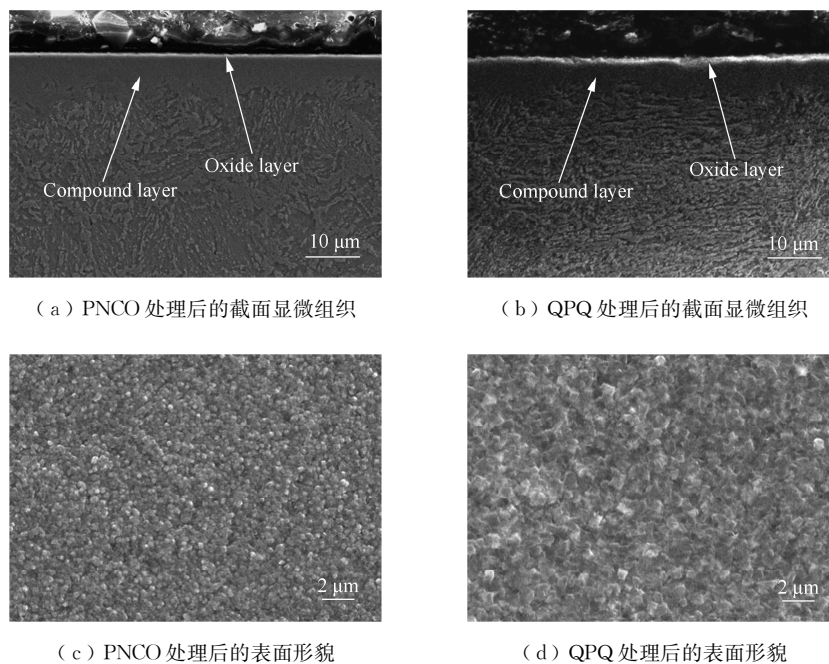


图 2 不同方法处理后 45 钢试样截面组织和表面形貌

Fig.2 Cross-sectional microstructure and the surface morphology of 45 steel treated by different methods

2.2 PNCO 处理时间对截面及表面形貌的影响

图 3 为 PNCO 处理不同时间后截面组织和表面形貌的 SEM 图。可以看出, 随 PNCO 处理时间的延长, 化合物层厚度增加, 最外层形成的氧化膜厚度一直在 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 且保持纳米颗粒形貌, 即 PNCO 处理过程中氧化膜厚度和形貌保持动态平衡。这可能源于 PNCO 处理过程中, 氧化膜同时发生氧化和还原反应, 从而使 PNCO 处理结束后表层依然保留厚度为 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 的氧化膜。

虽然 PNCO 和 QPQ 处理后表层都形成了相似的多层次渗层结构, 但两种处理技术多层次渗层形成的机理不同。QPQ 处理包括盐浴氮碳共渗和盐浴后氧化两个主要步骤, 因此, 表层氧化膜是通过盐浴后氧化形成的^[19-20]。与 QPQ 不同, PNCO 处理为单一工序, 没有后续氧化步骤, 因此表层氧化膜是通过 PNCO 处理过程中氧化膜动态形成的。

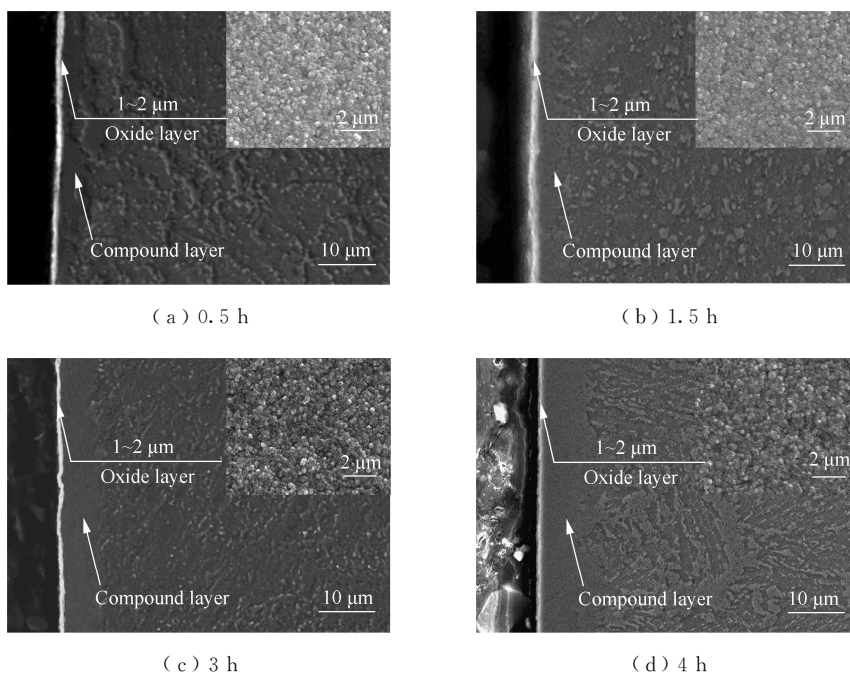


图3 45钢试样经不同时间PNCO处理后截面组织和表面形貌的SEM图

Fig.3 SEM images of cross-sectional structure and surface morphology of 45 steel samples treated with PNCO at different times

2.3 渗层物相分析

图4为45钢试样不同方法处理后的X射线衍射图。可以看出,经PNCO和QPQ处理后,渗层都形成了 ϵ -Fe₂₋₃N相、 γ' -Fe₄N相、Fe₃C相及少量Fe₂O₃相和以Fe₃O₄为主的氧化物相,与图2所示的多层次渗层对应。

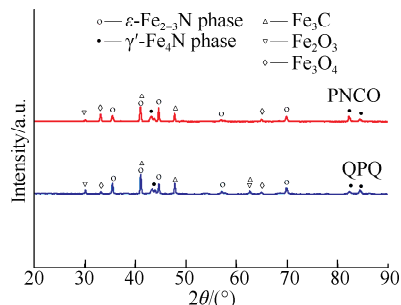


图4 45钢试样不同方法处理后X射线衍射谱

Fig.4 X-ray diffraction patterns of 45 steel treated by different methods

2.4 耐磨性分析

图5为45钢试样不同方法处理后的磨痕形貌、磨损率以及与表面硬度的关系。从图5中可以看出,未处理试样表面的磨痕轨迹较深且较宽,PNCO处理试样表面磨痕轨迹比未处理试样明显变浅且变窄,与QPQ处理效果相近。同时,未处理试样表面的磨损率为9.47 mg/(N·m),PNCO处理试样表面磨损率为1.39 mg/(N·m),QPQ处理试样磨损率为1.42 mg/(N·m)。因此,可以发现45钢试样PNCO处理后耐磨性达到QPQ处理同级别,且略优于QPQ处理。

2.5 耐蚀性分析

图6为45钢试样不同方法处理后的腐蚀形貌与腐蚀失重率关系。从图6(a)中可以看出,在质量分数为10% NaCl溶液中浸泡30 min后试样表面的腐蚀形貌,未经任何处理的试样表面有大量明显蚀坑,而经PNCO处理后试样表面未见蚀坑痕迹,表面形貌与QPQ处理相近(图6(b)和图6(c))。为了进一步比较耐蚀性,将45钢试样不同方法处理后在质量分数为5% FeCl₃溶液中浸泡48 h,计算出平均腐蚀失重率,如图6(d)所示。从图6(d)中可以看出,未经任何处理的试样

腐蚀失重率为 2.1%，PNCO 处理试样的腐蚀失重率为 0.39%，QPQ 处理试样的腐蚀失重率为 0.40%。因此 PNCO 处理后耐蚀性达到 QPQ 处理级别，且略优于 QPQ。

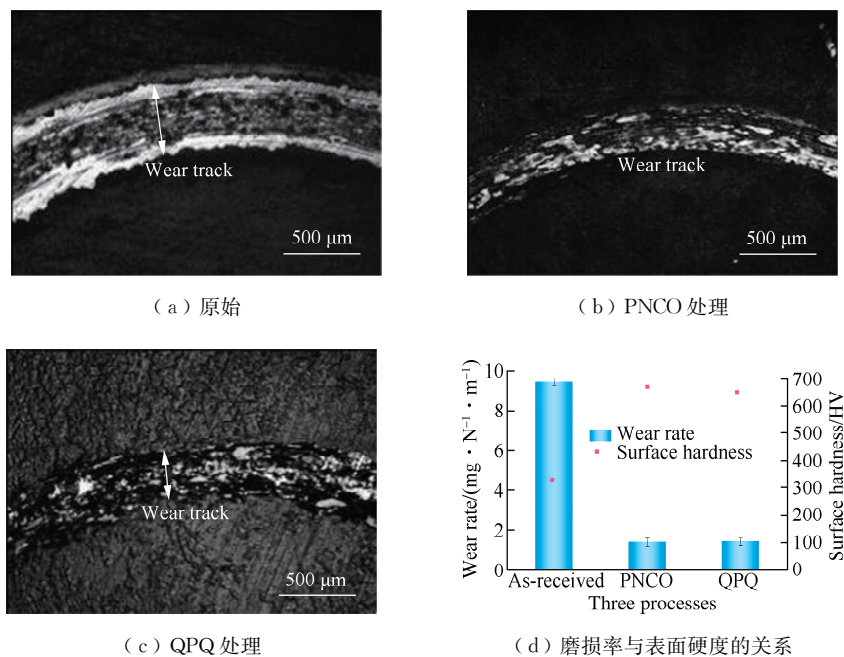


图 5 45 钢试样不同方法处理后的磨痕形貌、磨损率以及与表面硬度的关系

Fig.5 Morphology of wear mark of 45 steel samples as-received and treated by different methods

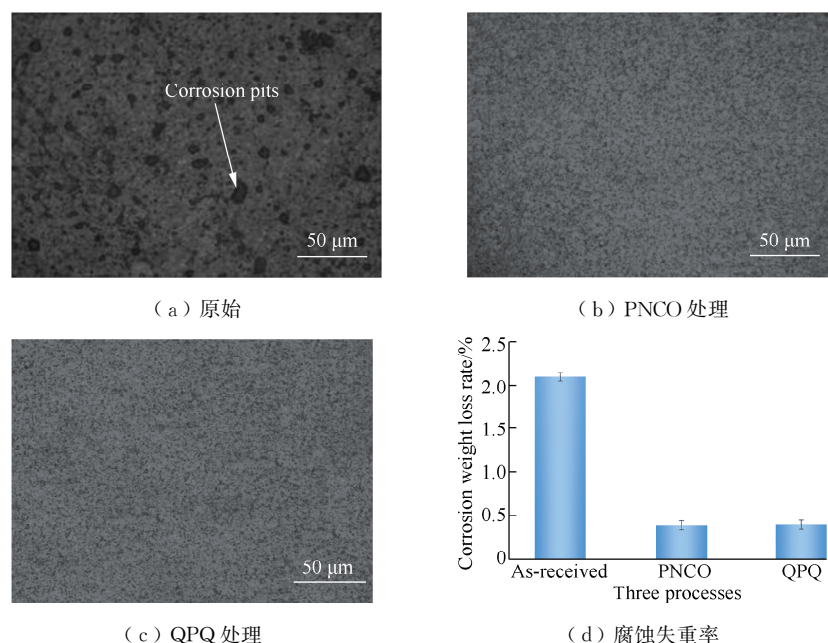


图 6 45 钢试样不同方法处理后的腐蚀形貌与腐蚀失重率的关系

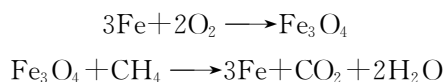
Fig.6 Relationship between corrosion morphology and corrosion weight loss rate of 45 steel samples treated with different methods

2.6 分析与讨论

综合实验结果可知，PNCO 处理不仅绿色环保，还可以构筑与 QPQ 处理相同的多层次渗层结

构,同时渗层具有十分优异的耐磨损和耐腐蚀性能。

继续研究多层次渗层形成以及对性能的影响机理。基于氧原子与铁的亲和力远大于碳氮与铁的亲和力,PNCO处理过程中,表层优先形成纳米结构 Fe_3O_4 氧化膜,该纳米氧化膜易被活性氢和氮/碳原子还原,从而加速表层化合物层形成,有效提高离子共渗效率^[21-29]。在合适的工艺条件下,氧化膜形成速度与被活性氮/碳原子还原速度达到平衡,由此实现表层 Fe_3O_4 氧化膜厚度及形貌的动态平衡,从而使表层氧化膜一直维持在相同厚度和相似形貌^[30-32]。表层氧化膜的形成和还原化学方程式为^[33-36]:



合适的工艺条件下,氧化膜形成和还原分解达到平衡,从而使氧化膜厚度和形貌保持动态平衡。为进一步理解 PNCO 工艺流程及机理,建立了氧化膜动态平衡及对离子渗效率影响机理模型,如图7所示。

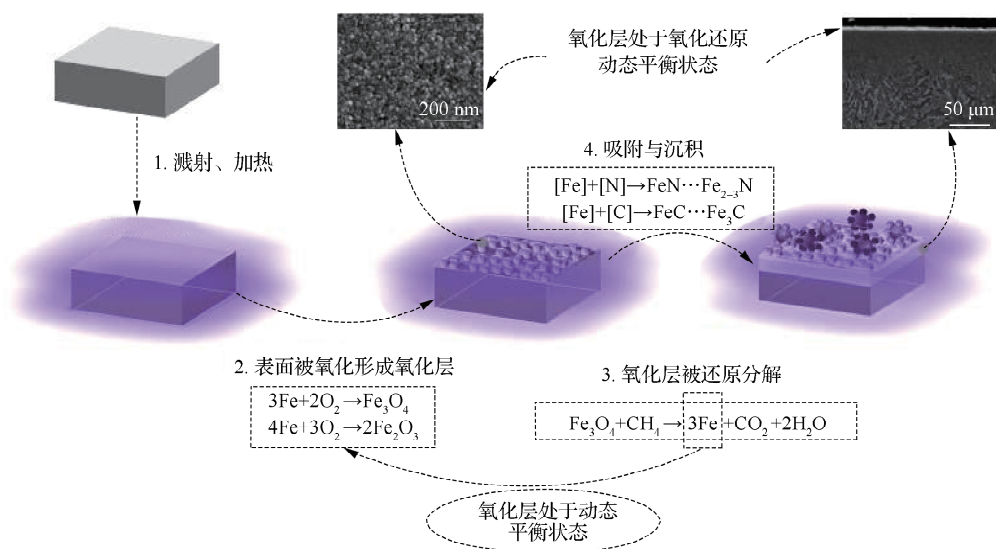


图7 PNCO 工艺流程及机理

Fig.7 Process flow and mechanism of PNCO

由图7可知,具有纳米结构的 Fe_3O_4 氧化膜被还原分解时,形成的活性铁原子与被溅射出的活性氮/碳原子形成铁氮/碳化合物^[37],促进次表层化合物快速形成,从而使 PNCO 处理比传统离子渗氮具有更高的效率。

3 结 论

对45钢进行了创新绿色环保 PNCO 处理,探索了 PNCO 过程中氧化膜动态平衡及其对离子渗效率和性能的影响机理,并与 QPQ 技术进行了对比,得出结论:

1) PNCO 处理后,获得了与 QPQ 处理相同的多层次渗层结构,由表层 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 氧化膜及次表层化合物层和有效硬化层构成,且 PNCO 处理后表面氧化膜形成纳米结构,化合物层比 QPQ 处理后的更加致密。

2) PNCO 处理获得的多层次渗层结构与 QPQ 处理的形成机理不同,QPQ 处理获得的氧化膜是通过盐浴后氧化形成的,PNCO 处理获得的氧化膜是通过共渗过程动态形成的。

3) PNCO 处理过程中,表层 Fe_3O_4 氧化膜的动态还原分解促进了次表层化合物层的形成,从而

显著提高了离子渗的效率。

4) PNCO 处理显著改善了 45 钢试样的耐磨耐蚀性, 磨损率和腐蚀失重率都略低于 QPQ 处理, 即 PNCO 处理后的 45 钢试样耐磨耐蚀性略优于 QPQ 处理后的试样。因此, PNCO 可以替代传统的 QPQ 技术, 实现对钢铁材料的绿色高效高性能化表面改性。

参考文献:

- [1] ZHANG Z X, LI X Y, DONG H S. Plasma-nitriding and characterization of FeAl40 iron aluminide[J]. *Acta Materialia*, 2015, 86: 341-351.
- [2] 胡飞, 刘利国, 陈未来, 等. AISI440C 不锈钢 QPQ 盐浴复合表面处理及其耐磨性研究[J]. *热加工工艺*, 2021, 50(18): 107-110.
- [3] BELLAS L, CASTRO G, MERA L, et al. Effect of carbonitriding in a salt bath by a QPQ scheme on stainless steel 321 microstructure and service properties[J]. *Metal Science and Heat Treatment*, 2016, 58(5): 369-375.
- [4] 张乐, 张津, 余强, 等. 氧化膜对 $14\text{Cr}_{12}\text{Ni}_2\text{WMoVNb}$ 钢 QPQ 渗层的室温摩擦磨损和腐蚀性能的影响[J]. *工程科学学报*, 2017, 39(7): 1047-1054.
- [5] 韩瑞鹏, 罗德福, 石晓刚, 等. QPQ 工艺温度对 GH901 合金渗氮层组织性能的影响[J]. *金属热处理*, 2018, 43(10): 197-201.
- [6] LI Y, WANG L, ZHANG D D, et al. Influence of bias voltage on the formation and properties of iron-based nitrides produced by plasma nitriding[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2010, 497(1/2): 285-289.
- [7] 张煜, 姜丽艳, 徐庆龙, 等. 超高速激光熔覆镍基 WC 涂层的显微结构与耐磨性能[J]. *金属学报*, 2020, 56(11): 1530-1540.
- [8] 蔡伟, 魏国方, 孟凡娜, 等. QPQ 盐浴复合处理时间对 304 不锈钢耐磨性的影响[J]. *材料热处理学报*, 2013, 34(1): 153-156.
- [9] ZHOU Z S, DAI M Y, SHEN Z Y, et al. Effect of D. C. electric field on salt bath nitriding for 35 steel and kinetics analysis[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 623: 261-265.
- [10] 沈志远, 吴文莉, 胡建军, 等. QPQ 复合盐浴处理中渗氮温度对 35 钢渗层形貌和表面性能的影响[J]. *常州大学学报(自然科学版)*, 2012, 24(3): 1-4.
- [11] 王文昌, 谢春洋, 孔德军. 激光淬火对 Cr_{12}MoV 钢渗硼层摩擦与磨损性能的影响[J]. *常州大学学报(自然科学版)*, 2015, 27(4): 47-52.
- [12] 卢世静, 孙斐, 缪小吉, 等. 离子渗氮和固溶复合处理制备深层含氮奥氏体不锈钢[J]. *表面技术*, 2018, 47(10): 180-185.
- [13] JACQUET P, COUDERT J B, LOURDIN P. How different steel grades react to a salt bath nitrocarburizing and post-oxidation process: influence of alloying elements[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2011, 205(16): 4064-4067.
- [14] LIU Y J, SUN Y F, ZHANG W L, et al. Effect of QPQ nitriding parameters on properties of pearlite ductile cast iron[J]. *International Journal of Metalcasting*, 2020, 14(2): 556-563.
- [15] WU K, LIU G Q, WANG L, et al. Research on new rapid and deep plasma nitriding techniques of AISI 420 martensitic stainless steel[J]. *Vacuum*, 2010, 84(6): 870-875.
- [16] 叶雪梅, 武计强, 朱永利, 等. 丙烷浓度对 45 钢离子碳氮共渗的影响[J]. *真空科学与技术学报*, 2015, 35(5): 580-583.
- [17] 刘晗, 杨星梅, 潘太军, 等. 45 钢离子氮氧共渗与离子渗氮动力学对比研究[J]. *材料热处理学报*, 2016, 37(2): 208-211, 234.
- [18] 缪跃琼, 林晨, 高玉新, 等. 304 不锈钢低温离子渗氮及氮碳共渗处理[J]. *表面技术*, 2015, 44(8): 61-64, 102.

- [19] 雷临苹, 叶宏, 崔文语. QPQ处理后 H13 钢的组织与性能[J]. 金属热处理, 2018, 43(5): 124-127.
- [20] 潘虹吉, 罗德福, 陈朔怡. 氮碳氧复合处理(QPQ)对 MPS700A 钢组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(4): 83-87.
- [21] YE X M, WU J Q, ZHU Y L, et al. A study of the effect of propane addition on plasma nitrocarburizing for AISI 1045 steel[J]. Vacuum, 2014, 110: 74-77.
- [22] WU J Q, LIU H, LI J C, et al. Comparative study of plasma oxynitriding and plasma nitriding for AISI 4140 steel [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 680: 642-645.
- [23] MIAO B, LI J C, LIU H, et al. Kinetics comparison between plasma oxynitriding and plasma nitriding and the application for AISI 1045 steel[J]. Surface Engineering, 2018, 34(2): 146-150.
- [24] WANG B, LIU B, ZHANG X D, et al. Enhancing heavy load wear resistance of AISI 4140 steel through the formation of a severely deformed compound-free nitrided surface layer[J]. Surface and Coatings Technology, 2018, 356: 89-95.
- [25] 李景才, 孙斐, 王树凯, 等. 离子渗氮前预氧化催渗作用及机理[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(7): 182-186, 192.
- [26] 张希平, 王美由, 高中楠, 等. 氮碳共渗+后氧化复合处理的应用研究[J]. 金属热处理, 2017, 42(7): 107-111.
- [27] 杨海欧, 尚旭亮, 王理林, 等. 单相 CoCrFeNi 高熵合金的组成元素对其在 NaCl 溶液中的耐蚀性能的影响[J]. 金属学报, 2018, 54(6): 905-910.
- [28] 谢飞, 叶雪梅, 程健, 等. 工模具钢的一种节能高效表面渗硼技术[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2012, 24(2): 1-4.
- [29] 郑亚旭, 王福明, 王延露, 等. 20CrMnTi 齿轮钢表面渗氮后的氧化处理工艺[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(9): 190-195.
- [30] 武计强, 李景才, 魏伟, 等. 离子后氧化对 42CrMo 钢渗氮组织与耐蚀性的影响及机理分析[J]. 真空科学与技术学报, 2015, 35(5): 575-579.
- [31] TANG L, SUN F, MIAO X J, et al. Evolution of pre-oxide layer during subsequent plasma nitriding[J]. Vacuum, 2018, 152: 337-339.
- [32] LIU H, LI J C, CHAI Y T, et al. Kinetics and enhancement mechanism of plasma oxynitriding for AISI 1045 steel [J]. Surface and Coatings Technology, 2016, 302: 22-26.
- [33] 缪斌, 刘晗, 范琪, 等. 42CrMo 钢离子氮碳氧多元共渗及动力学分析[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(8): 184-188.
- [34] 刘保国, 林玥, 张世宏. 离子氮化高速钢沉积钨类金刚石薄膜的摩擦磨损性能研究[J]. 表面技术, 2016, 45(6): 119-124.
- [35] 武计强, 李虎, 李景才, 等. 42CrMo 钢的空气离子后氧化[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(3): 78-82.
- [36] 彭甜甜, 林超林, 陈尧, 等. 离子渗氮化合物层物相调控对耐磨性的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(8): 172-177.
- [37] YANG Y, DAI X Z, YANG X R, et al. First-principles analysis on the role of rare-earth doping in affecting nitrogen adsorption and diffusion at Fe surface towards clarified catalytic diffusion mechanism in nitriding[J]. Acta Materialia, 2020, 196: 347-354.

(责任编辑:李艳)