

# 离子后氧化对渗氮层结构与性能的调控

倪嘉<sup>1</sup>, 麻恒<sup>1</sup>, 于民华<sup>1,2</sup>, 胡静<sup>1,3\*</sup>, 安旭龙<sup>1,3</sup>, 魏坤霞<sup>1,3</sup>

(1.常州大学 a.江苏省材料表面科学与技术重点实验室 b.材料科学与工程国家级  
实验教学示范中心, 江苏 常州 213164; 2.江苏双良锅炉有限公司, 江苏 江阴 214444;  
3.常州大学 怀德学院, 江苏 靖江 214500)

**摘要:** **目的** 调控离子渗氮层的结构和性能, 获得少无化合物层且满足需求厚度的有效硬化层, 同时具有良好的韧性和耐蚀性的离子渗层。**方法** 将 42CrMo4 钢在温度 500 °C 下离子渗氮 5 h 后, 再进行不同工艺条件下的后氧化处理。通过调整后氧化的实验参数, 探索它们对渗氮层结构和性能的影响规律。使用金相显微镜、XRD 衍射仪、维氏显微硬度计及电化学工作站分析截面渗层结构、物相、硬度、韧性和耐蚀性。**结果** 在相同的离子渗氮条件 (500 °C, 5 h) 下, 随着后氧化的温度和时间改变, 离子渗氮形成的化合物层逐渐分解, 化合层的厚度逐渐减小, 可由 9.41 μm 减薄至 3.62 μm; 经离子渗氮+后氧化处理后, 形成的有效硬化层的厚度和表面硬度相较于常规离子渗氮有所提高, 其中有效硬化层的厚度由 300 μm 增至 378 μm, 截面最高硬度由 765HV0.05 增至 825HV0.05; 渗层表面形成由 Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 组成的氧化膜, 提高了其耐蚀性, 自腐蚀电位由 -658.72 mV 提升至 -429.23 mV。**结论** 42CrMo4 钢经过离子渗氮及后氧化处理后, 化合物层显著减薄, 有效硬化层显著增厚, 且截面硬度、韧性和耐蚀性等指标均得到改善, 在后氧化工艺参数为 400 °C、2 h 时获得了最优的综合性能, 包括硬度、韧性、耐蚀性。

**关键词:** 42CrMo4 钢; 离子渗氮; 离子后氧化; 硬度; 韧性; 耐蚀性

**中图分类号:** TG156.8 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)17-0170-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.17.015

## Regulation of Structure and Properties of Nitriding Layer by Post Plasma Oxidation

NI Jia<sup>1</sup>, MA Heng<sup>1</sup>, YU Minhua<sup>1,2</sup>, HU Jing<sup>1,3\*</sup>, AN Xulong<sup>1,3</sup>, WEI Kunxia<sup>1,3</sup>

(1. a. Jiangsu Key Laboratory of Materials Surface Science and Technology, b. National Experimental Demonstration Center for Materials Science and Engineering, Changzhou University, Jiangsu Changzhou 213164, China; 2. Jiangsu Shuangliang Boiler Co., Ltd., Jiangsu Jiangyin 214444, China; 3. Huaide College, Changzhou University, Jiangsu Jingjiang 214500, China)

**ABSTRACT:** Plasma nitriding is an environment-friendly and efficient surface modification technology. A nitrided layer composed of a compound layer on the top surface and a diffusion layer beneath can be formed on the surface of the sample

收稿日期: 2023-08-24; 修订日期: 2024-01-08

**Received:** 2023-08-24; **Revised:** 2024-01-08

**基金项目:** 国家自然科学基金 (21978025, 51774052); 江苏省第三期优势学科建设项目 (PAPD-3); 江苏高校品牌专业建设工程资助项目 (TAPP)

**Fund:** National Natural Science Foundation of China (21978025, 51774052); Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions (PAPD-3); Top-notch Academic Program Projects of Jiangsu Higher Education Institutions (TAPP)

**引文格式:** 倪嘉, 麻恒, 于民华, 等. 离子后氧化对渗氮层结构与性能的调控[J]. 表面技术, 2024, 53(17): 170-175.

NI Jia, MA Heng, YU Minhua, et al. Regulation of Structure and Properties of Nitriding Layer by Post Plasma Oxidation[J]. Surface Technology, 2024, 53(17): 170-175.

\*通信作者 (Corresponding author)

treated by plasma nitriding, thus improving the performance of the sample. However, since the compound layer is hard and brittle, it has a strong tendency to crack while being subject to severe and heavy load, such as heavy load gears and impact molds. Therefore, it is necessary to avoid thicker compound layers for components that suffer severe impact and heavy load wear in order to prevent premature failure. At present, most factories use grinding to reduce the thickness of the compound layer, but this method has obvious disadvantage because it is difficult to control the grinding amount. Therefore, in order to obtain the required thickness of the effective hardened layer with fewer compound layers, it is crucial to find a technique to regulate the structure of the plasma nitriding layer, which has significant scientific research and application value. The work aims to explore and develop a novel method to regulate the structure of the plasma nitriding layer. The method was used to conduct post oxidation after plasma nitriding. The whole process was consisted of the following two steps: firstly, 42CrMo4 steel was subject to plasma nitriding at 500 °C for 5 hours and secondly, post oxidation was carried out at different temperatures for different time. The effect of the post oxidation temperature and time on the structure of the plasma nitriding layer was systematically investigated and the related mechanism was analyzed. The optical microscope, X-ray diffractometer, Vickers microhardness tester, and electrochemical workstation were used to examine and assess the microstructures, phase composition, hardness, toughness, and corrosion resistance of the nitriding layer. After the same plasma nitriding conditions of 500 °C for 5 hours, it was found that with the change of the post oxidation temperature and time, the compound layer formed by plasma nitriding gradually decomposed, and the thickness of the compound layer decreased from 9.41 μm to a minimum value of 3.62 μm. Meanwhile, the thickness of effective hardened layer and surface hardness after post oxidation were higher than that only by plasma nitriding without post oxidation. The thickness of effective hardened layer increased from 300 μm to a maximum value of 378 μm, and the sectional hardness increased from 765HV0.05 to 825HV0.05. An oxide film composed of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> was formed on the surface of the compound layer, and the self-corrosion potential increased from -658.72 mV to -429.23 mV, which could prove that the corrosion resistance was improved. In all, after post oxidation treatment, the thickness of compound layer decreases significantly, while the thickness of effective hardened layer increases. At the same time, post oxidation can improve the hardness, toughness and corrosion resistance of 42CrMo4 steel. The maximum hardness and the best toughness and corrosion resistance are obtained by post oxidation at 400 °C for 2 hours.

**KEY WORDS:** 42CrMo4 steel; plasma nitriding; post plasma oxidation; hardness; toughness; corrosion resistance

在实际使用过程中, 零部件发生的失效大多由环境磨损、腐蚀、疲劳等因素对材料表面的侵蚀所致。为了解决这些问题, 满足各种使用条件下金属材料表面的性能需求, 人们探索研发了各类表面改性技术<sup>[1-5]</sup>。

离子渗氮是一种清洁、高效、无污染的表面改性技术<sup>[6-10]</sup>, 经过离子渗氮处理后的工件, 其表面会形成一定厚度的白亮的高硬度化合物层, 但在服役条件为冲击或重载的环境下, 过厚的化合物层因脆性大, 易发生局部开裂乃至脱落等情况<sup>[11-15]</sup>, 使得零部件失效。目前, 有一种减少白亮层厚度的方法是通过磨削加工, 但无法控制磨削量或工件硬度过大难以磨削<sup>[16-18]</sup>; 另一种方法是通过调整离子渗氮的工艺参数, 形成薄的化合物层, 但该方法得到的有效硬化层厚度通常较薄, 其表面硬度较低, 因而耐磨性较差, 使得氮化层难以满足长服役寿命要求<sup>[19-21]</sup>。

为此, 研发一种调控离子渗氮层结构的方法具有显著的科学研究和应用价值, 即获得少无化合物层(白亮层)且具有需求厚度的有效硬化层的渗层结构, 达到提高离子渗氮层其他性能要求的前提下, 显著降低或避免因脆性白亮层较厚带来的早期失效。

笔者所在课题组前期探索研究发现, 离子后氧化

对离子渗氮层结构有一定调控作用, 这里通过调整温度和时间参数, 对先经离子渗氮处理后的 42CrMo4 钢再进行氧化处理<sup>[22-23]</sup>。氧化气源采用普通空气, 工艺成本较低, 操作方便。系统研究后氧化对离子渗氮层结构的调控效果及影响规律, 并探讨后氧化对离子渗氮层结构与性能调控的作用机理, 旨在获得少无脆性化合物层(白亮层)且具有需求厚度有效硬化层的渗层结构, 可为后氧化技术在实际产品的工程应用提供实验和理论依据。

## 1 试验

试验所用材料为调质态 42CrMo4 钢, 其化学成分(用质量分数计): C 0.43%, Si 0.28%, Mn 0.76%, Cr 1.0%, Mo 0.21%, 其余成分为 Fe, 基体硬度为 320HV0.05。通过线切割, 将试样尺寸加工为 15 mm×15 mm×10 mm, 之后使用 180#~2000#的砂纸在磨样机上进行打磨与抛光, 然后清洗烘干, 放入密封袋备用。

将 42CrMo4 钢试样放入离子渗氮炉中进行离子渗氮处理, 温度为 500 °C, 时间为 5 h, 之后直接保留在离子渗氮炉中进行后氧化处理, 设置 3 组温度

(350、400、450 ℃)、3 组时间 (1、2、4 h)。

在处理结束后,使用 SG-51 型号的金相显微镜观察试样的截面形貌。利用 D/max 2500 型 XRD 衍射仪分析试样物相, Cu-K $\alpha$  为所使用射线, 其波长  $\lambda$  为  $1.54\times 10^{-10}$  m, 设置扫描速度、步宽分别为 0.2 (°)/min、0.02°, 选择  $2\theta$  范围为 20°~90°。使用型号为 HVS-30 的维氏硬度计, 设置载荷量为 50 g, 保荷时间为 15 s, 测试试样的截面硬度; 调整载荷量为 1 000 g, 加载时间为 15 s, 对试样进行脆性测试。通过金相显微镜观察试样表面压痕的开裂状况, 确定脆性级别。使用 CS350 型电化学工作站测试耐蚀性, 采用质量分数为 3.5%的 NaCl 溶液作为腐蚀介质, 设置扫描电位为 -0.1~0.5 V, 设置扫描速率为 2 mV/s。得到测试结果后, 采用软件 CS studio 分析拟合数据, 得到腐蚀电位、腐蚀电流、腐蚀速率, 再利用软件分析实验数据并作图。

2 结果及分析

2.1 截面显微组织及白亮层厚度

分别经过离子渗氮 (500 ℃, 5 h), 以及离子渗氮 (500 ℃, 5 h)+不同后氧化温度及时间处理后的截面显微组织如图 1 所示。从图 1 可看出, 只经渗氮处理的试样化合物层 (工程上通常称为白亮层) 的厚度为 9.41  $\mu\text{m}$ , 经离子渗氮+后氧化处理的试样, 其化合物层厚度随着后氧化温度和时间变化逐渐减薄, 最薄厚度为 3.62  $\mu\text{m}$ 。原因可能是在后氧化过程中, 氧离子不断轰击表面, 使白亮层中部分氮原子、铁原子获得能量, 并从氮化物中分解出来, 扩散到基体中, 或是聚集在氮氧化物界面附近, 剩余的铁原

子与氧结合, 生成了氧化铁膜, 并附在表面。

2.2 有效硬化层厚度分析

有效硬化层厚度指从零件表面到高于基体硬度 50HV 处的垂直距离。试样经过离子渗氮 (500 ℃, 5 h), 以及离子渗氮 (500 ℃, 5 h)+不同后氧化温度与时间处理的截面硬度曲线如图 2 所示。根据有效硬化层定义, 可从图 2 得到对应条件下的有效硬化层厚度。经过离子渗氮处理的试样, 其截面最高硬度为 765HV0.05, 有效硬化层厚度为 300  $\mu\text{m}$ 。试样经渗氮处理后再进行氧化处理, 截面硬度和有效硬化层厚度均增加, 截面硬度最高为 825HV0.05, 有效硬化层厚度为 378  $\mu\text{m}$ 。可见, 通过后氧化, 一方面减薄了白亮层的厚度 (图 1), 另一方面使得有效硬化层的厚度略有提升; 在一定程度上提高了表层的显微硬度。这主要是因随着后氧化处理的进行, 铁氮相发生分解, 分解后的氮原子一部分向基体扩散, 从而进一步提高其固溶强化效果; 后氧化温度过高或后氧化时间过长, 均会导致铁氮相及合金氮化物粗化, 使得渗层的显微硬度降低。将 42CrMo4 钢经渗氮及氧化处理后的渗层特性进行总结, 见表 1。

2.3 渗层 XRD 物相分析

经过离子渗氮 (500 ℃, 5 h), 以及离子渗氮 (500 ℃, 5 h)+不同后氧化温度与时间处理后试样的 XRD 图谱如图 3 所示。从图 3 可见, 经过离子渗氮处理后, 主要的衍射峰有  $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N、 $\epsilon$ -Fe<sub>2-3</sub>N 相; 经过离子渗氮+后氧化处理后, 主要的衍射峰又增加了 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 相, 同时  $\gamma'$ -Fe<sub>4</sub>N、 $\epsilon$ -Fe<sub>2-3</sub>N 相<sup>[24-26]</sup>的衍射峰明显降低。

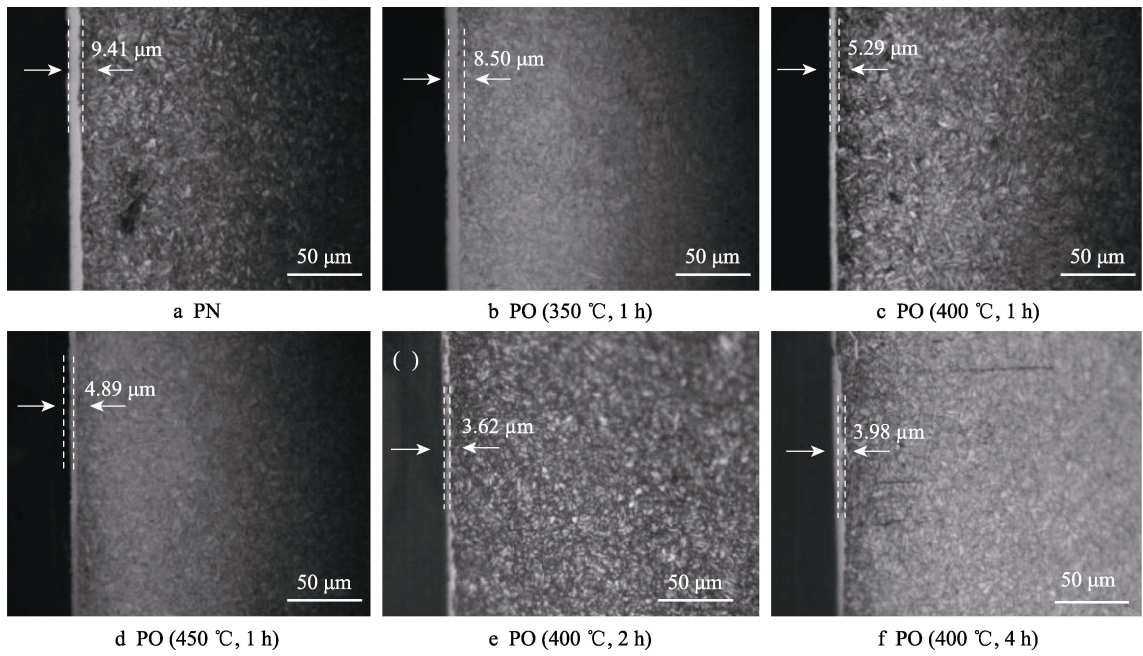


图 1 离子渗氮及不同条件后氧化处理试样的截面显微组织  
Fig.1 Sectional microstructure of samples treated by plasma nitriding and post oxidation under different conditions

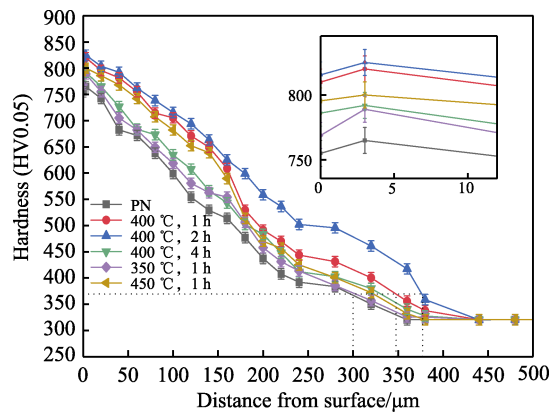


图 2 经离子渗氮及不同氧化温度、时间处理后试样的截面硬度  
Fig.2 Sectional hardness of samples treated by plasma nitriding and post oxidation at different temperatures for different time

表 1 试样经离子渗氮及不同氧化温度与时间处理的渗层特性  
Tab.1 Layer characteristics of samples treated by plasma nitriding and post oxidation at different temperatures for different time

Treatment process	Compound layer/ $\mu\text{m}$	Effective harden layer/ $\mu\text{m}$	Maximum hardness (HV0.05)
PN (without PO)	9.41	300	765
PN+PO (350 $^{\circ}\text{C}$ , 1 h)	8.50	323	789
PN+PO (400 $^{\circ}\text{C}$ , 1 h)	5.29	347	820
PN+PO (450 $^{\circ}\text{C}$ , 1 h)	4.89	331	796
PN+PO (400 $^{\circ}\text{C}$ , 2 h)	3.62	378	825
PN+PO (400 $^{\circ}\text{C}$ , 4 h)	5.06	340	792

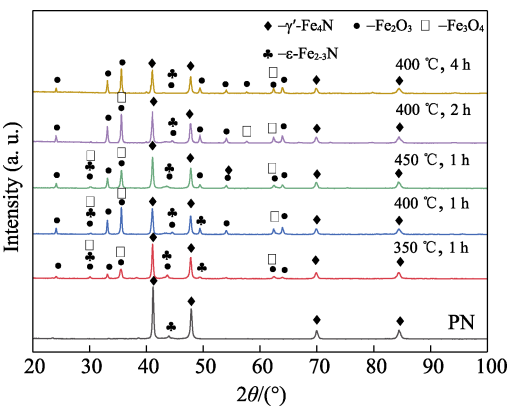


图 3 离子渗氮及不同条件后氧化处理试样的 XRD 图谱  
Fig.3 XRD patterns of samples treated by plasma nitriding and post oxidation under different conditions

2.4 韧性分析

依据离子渗氮国家标准（GB/T 11354—2005）<sup>[27]</sup>，离子渗氮工艺的设计原则是在保证基体组织的前提下，在零部件表层形成综合性能良好的渗氮层；通过对比压痕可以判断试样表面硬度的大小，压痕越小，则其表面硬度越大；同时可以观察试样的维氏硬度压痕状态，以确定其脆性级别。渗氮层脆性级别按维氏硬度压痕边角开裂程度可分为 5 级，最高级别为 5 级，最低级别为 1 级，级别越高，表明压痕边角的开裂情况越严重，即渗氮层脆性越大、韧性越低。经离子渗氮及不同条件后氧化处理后试样的压痕如图 4 所示，可见，只经离子渗氮处理的试样的表面压痕周围出现了较为严重的开裂现象，脆性等级为 4 级；经离子渗氮+不同温度后氧化处理后，试样的表面压痕开裂程度均有所改善，当后氧化温度为 400  $^{\circ}\text{C}$ 、后氧化时

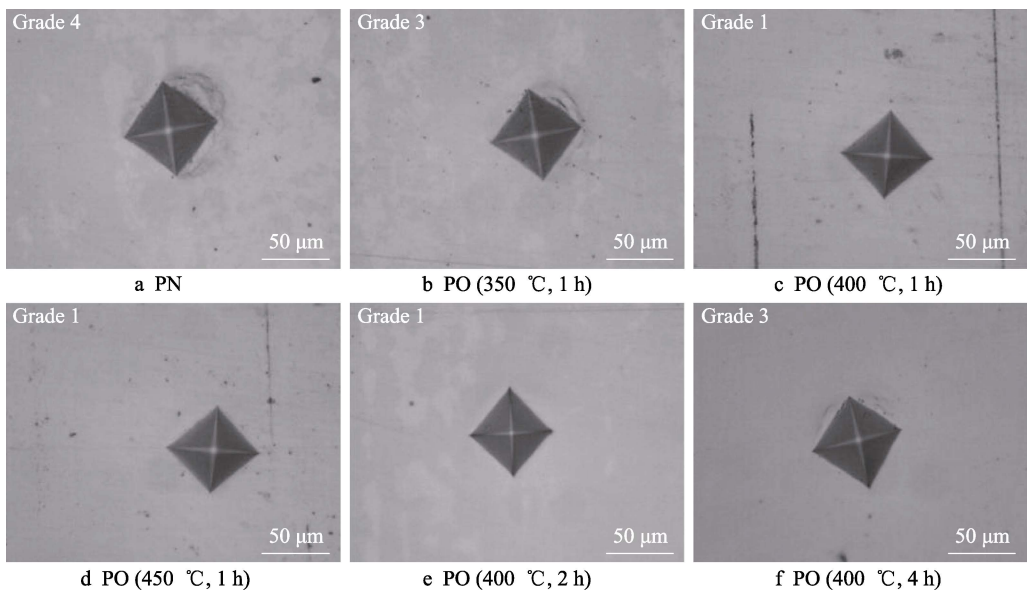


图 4 离子渗氮及不同条件后氧化处理试样的压痕  
Fig.4 Morphology of surface indentation of samples treated by plasma nitriding and post oxidation under different conditions



间为 2 h 时,在试样表面压痕周围未见开裂现象,脆性等级为 1 级。由此可以得出结论,经离子渗氮+后氧化处理后试样的韧性得到提升,且韧性的提升与后氧化密切相关。当后氧化温度为 400 ℃、后氧化时间为 2 h 时,试样的脆性等级最低、韧性最高。这主要是因在该后氧化条件下,表层硬脆白亮层的厚度最薄,同时试样的表面压痕面积小于常规离子渗氮试样的表面压痕面积,说明后氧化在提升试样韧性的同时也提高了其截面硬度,此结论与图 2 的结果一致。

2.5 耐蚀性分析

经过离子渗氮(500 ℃,5 h),以及离子渗氮(500 ℃,5 h)+不同氧化温度与时间处理后试样的极化曲线如图 5 所示。经渗氮后不同氧化温度与时间处理拟合出的电化学参数见表 2。从图 5、表 2 的数据可知,离子渗氮试样的自腐蚀电位为-658.72 mV,自腐蚀电流为 $1.201\,0\times 10^{-5}\text{ A/cm}^2$ ;离子渗氮+后氧化处理后试样的自腐蚀电位均有所提高,其中当后氧化温度为 400 ℃、后氧化时间为 2 h 时,其自腐蚀电位最大,为-429.23 mV。对比可知,离子渗氮试样采用

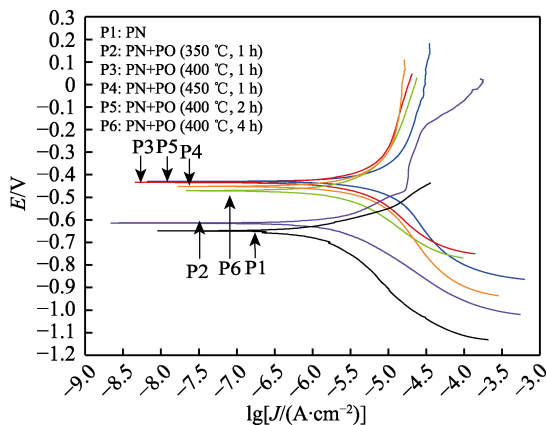


图 5 离子渗氮及不同氧化温度与时间处理的动电位极化曲线  
Fig.5 Potentiodynamic polarization of samples treated by plasma nitriding and oxidation at different temperature for different time

表 2 离子渗氮及不同氧化温度与时间处理拟合出的电化学参数

Tab.2 Fitting electrochemical parameters of samples treated by plasma nitriding and oxidation at different temperature for different time

Sample treatment process	Corrosion resistance	
	$E_{corr}/\text{mV}$	$J_{corr}/(10^{-6}\text{ A}\cdot\text{cm}^{-2})$
P1: PN (without PO)	-658.72	12.010
P2: PN+PO (350 ℃, 1 h)	-628.12	10.197
P3: PN+PO (400 ℃, 1 h)	-433.98	3.896 6
P4: PN+PO (450 ℃, 1 h)	-455.79	4.246 3
P5: PN+PO (400 ℃, 2 h)	-429.23	1.050 8
P6: PN+PO (400 ℃, 4 h)	-470.57	6.404 0

优化工艺后氧化处理后,其耐蚀性大幅提升。耐蚀性提高的原因:在后氧化过程中,表面形成了以高耐蚀性  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  为主的氧化膜,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的化学稳定性较高,能有效阻止腐蚀介质与基体的直接接触,因而提高了零部件的耐蚀性。同时,经 400 ℃、2 h 后氧化处理后,表面形成的氧化膜中的  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  占比较高,因此其耐蚀性最佳,此结果与图 3 的结果一致。

3 结论

针对 42CrMo4 钢先进行相同工艺条件(500 ℃,5 h)离子渗氮后,紧接着进行不同工艺条件的离子后氧化处理,得出如下主要结论。

1) 后氧化对 42CrMo4 钢的离子渗氮层结构具有调控作用。通过调节后氧化温度和时间,白亮层的厚度逐渐减小,由 9.41  $\mu\text{m}$  减薄至 3.62  $\mu\text{m}$ ;有效硬化层厚度也明显增加,由 300  $\mu\text{m}$  提高至 378  $\mu\text{m}$ 。

2) 后氧化对 42CrMo4 钢的渗层性能具有调控作用,后氧化试样的渗层韧性、硬度、耐蚀性均提高。其中,当后氧化温度为 400 ℃、后氧化时间为 2 h 时,其综合性能最佳,硬度(825HV0.05)最大;试样表面脆性等级最低,为 1 级,韧性最好;自腐蚀电位最高,为-429.23 mV。

3) 42CrMo4 钢离子渗氮试样经后氧化处理后,其表面氧化层主要由  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  组成。在后氧化温度为 400 ℃、时间为 2 h 时,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  与  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  的比值最大,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  最多,其耐蚀性最佳;  $\gamma\text{'-Fe}_4\text{N}$ 、 $\varepsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$  的衍射峰明显降低,白亮层减薄,韧性最佳。

参考文献:

[1] PENG T T, DAI M Y, CAI W, et al. The Enhancement Effect of Salt Bath Preoxidation on Salt Bath Nitriding for AISI 1045 Steel[J]. Applied Surface Science, 2019, 484: 610-615.

[2] 唐磊, 陈尧, 彭甜甜, 等. H13 热冲压模具无化合物层抗冲击抗热疲劳离子渗氮技术研究与应用[J]. 表面技术, 2018, 47(11): 48-53.

TANG L, CHEN Y, PENG T T, et al. Study and Application of Non-Compound Layer Plasma Nitriding with Impact and Thermal Fatigue Resistance for H13 Hot Stamping Die Steel[J]. Surface Technology, 2018, 47(11): 48-53.

[3] SONG L, GU X M, SUN F, et al. Reduced Internal Oxidation by a Rapid Carburizing Technology Enhanced by Pre-Oxidation for 18CrNiMo7-6 Gear Steel[J]. Vacuum, 2019, 160: 210-212.

[4] 陈尧, 纪庆新, 魏坤霞, 等. 不同渗氮温度下 38CrMoAl 钢低氮氢比无白亮层离子渗氮[J]. 中国表面工程, 2018, 31(2): 23-28.

CHEN Y, JI Q X, WEI K X, et al. Plasma Nitriding

- without White Layer for 38CrMoAl Steel with Lower Ratio of  $N_2$  to  $H_2$  under Different Temperature[J]. *China Surface Engineering*, 2018, 31(2): 23-28.
- [5] MIAO B, SONG L, CHAI Y T, et al. The Effect of Sand Blasting Pretreatment on Plasma Nitriding[J]. *Vacuum*, 2017, 136: 46-50.
- [6] LI J C, YANG X M, WANG S K, et al. A Rapid D C Plasma Nitriding Technology Catalyzed by Pre-Oxidation for AISI4140 Steel[J]. *Materials Letters*, 2014, 116: 199-202.
- [7] LI Y, WANG L, ZHANG D D, et al. Improvement of Corrosion Resistance of Nitrided Low Alloy Steel by Plasma Post-Oxidation[J]. *Applied Surface Science*, 2010, 256(13): 4149-4152.
- [8] 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.
- [9] PENG T T, LIN C L, CHEN Y, et al. Effect of Phase Regulation of Plasma Nitriding Compound Layer on Wear Resistance[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(8): 172-177.
- [9] 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.
- LU S J, SUN F, MIAO X J, et al. Preparation for Deep Nitriding Austenitic Stainless Steel by Complex Treatment of Plasma Nitriding and Solid Solution[J]. *Surface Technology*, 2018, 47(10): 180-185.
- [10] TANG L, SUN F, MIAO X J, et al. Evolution of Pre-Oxide Layer during Subsequent Plasma Nitriding[J]. *Vacuum*, 2018, 152: 337-339.
- [11] LU Y Y, LI D, MA H, et al. Enhanced Plasma Nitriding Efficiency and Properties by Severe Plastic Deformation Pretreatment for 316L Austenitic Stainless Steel[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 15: 1742-1746.
- [12] YAN M F, CHEN B F, LI B. Microstructure and Mechanical Properties from an Attractive Combination of Plasma Nitriding and Secondary Hardening of M50 Steel[J]. *Applied Surface Science*, 2018, 455: 1-7.
- [13] 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.
- [14] LIU H, LI J C, CHAI Y T, et al. A Novel Plasma Oxynitriding by Using Plain Air for AISI 1045 Steel[J]. *Vacuum*, 2015, 121: 18-21.
- [15] SAEED A, KHAN A W, JAN F, et al. Optimization Study of Pulsed DC Nitrogen-Hydrogen Plasma in the Presence of an Active Screen Cage[J]. *Plasma Science and Technology*, 2014, 16(5): 460-464.
- [16] MA H, WEI K X, ZHAO X B, et al. Performance Enhancement by Novel Plasma Boron-Nitriding for 42CrMo<sub>4</sub> Steel[J]. *Materials Letters*, 2021, 304: 130709.
- [17] NISHIMOTO A, NAGATSUKA K, NARITA R, et al. Effect of the Distance between Screen and Sample on Active Screen Plasma Nitriding Properties[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2010, 205: S365-S368.
- [18] 麻恒, 赵晓兵, 魏坤霞, 等. 42CrMo<sub>4</sub> 钢硼氮离子复合渗与离子渗氮对比研究[J]. *表面技术*, 2022, 51(4): 121-126.
- MA H, ZHAO X B, WEI K X, et al. Comparative Study on Plasma Boron-Nitriding and Plasma Nitriding for 42CrMo<sub>4</sub> Steel[J]. *Surface Technology*, 2022, 51(4): 121-126.
- [19] TANG L, JIA W J, HU J. An Enhanced Rapid Plasma Nitriding by Laser Shock Peening[J]. *Materials Letters*, 2018, 231: 91-93.
- [20] GATEY A M, HOSMANI S S, FIGUEROA C A, et al. Role of Surface Mechanical Attrition Treatment and Chemical Etching on Plasma Nitriding Behavior of AISI 304L Steel[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2016, 304: 413-424.
- [21] PENG T T, ZHAO X B, CHEN Y, et al. Improvement of Stamping Performance of H13 Steel by Compound-Layer Free Plasma Nitriding[J]. *Surface Engineering*, 2020, 36(5): 492-497.
- [22] ABEDI H R, SALEHI M, YAZDKHASTI M, et al. Effect of High Temperature Post-Oxidizing on Tribological and Corrosion Behavior of Plasma Nitrided AISI 316 Austenitic Stainless Steel[J]. *Vacuum*, 2010, 85(3): 443-447.
- [23] KARIMZADEH N, MOGHADDAM E G, MIRJANI M, et al. The Effect of Gas Mixture of Post-Oxidation on Structure and Corrosion Behavior of Plasma Nitrided AISI 316 Stainless Steel[J]. *Applied Surface Science*, 2013, 283: 584-589.
- [24] 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.
- [25] LU S J, ZHAO X B, WANG S K, et al. Performance Enhancement by Plasma Nitriding at Low Gas Pressure for 304 Austenitic Stainless Steel[J]. *Vacuum*, 2017, 145: 334-339.
- [26] 陈尧, 宋磊, 张宸恺, 等. 38CrMoAl 液压柱塞无白亮层低温离子渗氮工艺研究[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(22): 81-86.
- CHEN Y, SONG L, ZHANG C K, et al. Lower Temperature Plasma Nitriding without White Layer for 38CrMoAl Hydraulic Plunger[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(22): 81-86.
- [27] 中国国家标准化管理委员会. 钢铁零件渗氮层深度测定和金相组织检验: GB/T 11354—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- Standardization Administration of the People's Republic of China. Determination of Nitrided Case Depth and Metallographic Microstructure Examination for Steel and Iron Parts: GB/T 11354—2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005.