

# 42CrMo4 钢硼氮离子复合渗与离子渗氮对比研究

麻恒<sup>a,b</sup>, 赵晓兵<sup>a,b</sup>, 魏坤霞<sup>a,c</sup>, 罗琪<sup>a,b</sup>, 刘细良<sup>a,c</sup>, 胡静<sup>a,c</sup>

(常州大学 a.江苏省材料表面科学与技术重点实验室 b.怀德学院 c.材料科学与工程国家级实验教学示范中心, 江苏 常州 213164)

**摘要:** **目的** 为了进一步提高 42CrMo4 钢离子渗氮层的硬度, 研发硼氮离子复合渗新技术, 并与离子渗氮层特性进行对比研究。**方法** 在 520 °C、6 h 的相同工艺条件下, 对 42CrMo4 钢分别进行硼氮离子复合渗和离子渗氮处理。利用光学显微镜、XRD、显微硬度计、摩擦磨损测试机和电化学工作站对截面显微组织、物相、截面硬度、耐磨性和耐蚀性进行测试和分析。**结果** 硼氮离子复合渗可显著提高渗氮效率, 在 520 °C、6 h 工艺条件下, 化合物层厚度由 18.78 μm 增加到 29.44 μm, 有效硬化层厚度由 265 μm 增加到 355 μm。同时, 硼氮离子复合渗后在渗层形成了硼铁化合物 FeB 和 Fe<sub>2</sub>B, 显著提高了渗层的硬度和耐磨性; 表面硬度由 750HV0.05 提高至 1 002HV0.05, 耐磨性和耐蚀性明显提高, 磨损率由 3.06 mg/cm<sup>2</sup> 下降到 1.02 mg/cm<sup>2</sup>; 自腐蚀电位由 -648.89 mV 提高至 -494.32 mV。**结论** 与离子渗氮相比, 硼氮离子复合渗具有显著优势, 不仅可以提高离子渗效率, 还可显著提升渗层性能, 包括渗层硬度、耐磨性和耐蚀性。

**关键词:** 42CrMo4 钢; 硼氮离子复合渗; 离子渗氮; 渗层; 耐磨性; 耐蚀性

**中图分类号:** TG178 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)04-0121-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.04.011

## Comparative Study on Plasma Boron-Nitriding and Plasma Nitriding for 42CrMo4 Steel

MA Heng<sup>a,b</sup>, ZHAO Xiao-bing<sup>a,b</sup>, WEI Kun-xia<sup>a,c</sup>, LUO Qi<sup>a,b</sup>, LIU Xi-liang<sup>a,c</sup>, HU Jing<sup>a,c</sup>

(a. Jiangsu Key Laboratory of Materials Surface Science and Technology b. Huaide College c. National Experimental Demonstration Center for Materials Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

**ABSTRACT:** The work aims to develop plasma boron-nitriding (PNB) technology to further improve the hardness of 42CrMo4 steel nitriding layer and comparatively study the properties of plasma nitriding layer. Under the same technological conditions of 520 °C and 6 h, 42CrMo4 steel was treated by plasma boron-nitriding and plasma nitriding, respectively. The cross-sectional microstructures, phase compositions, cross-sectional hardness, wear and corrosion resistance of the nitriding layer was tested

收稿日期: 2021-05-18; 修订日期: 2021-08-30

Received: 2021-05-18; Revised: 2021-08-30

基金项目: 国家自然科学基金(21978025, 51774052); 江苏省优势学科建设项目(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)

作者简介: 麻恒(1995—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为表面工程。

Biography: MA Heng (1995—), Female, Postgraduate, Research focus: surface engineering.

通讯作者: 胡静(1966—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为金属表面改性。

Corresponding author: HU Jing (1966—), Female, Doctor, Professor, Research focus: metal surface modification.

引文格式: 麻恒, 赵晓兵, 魏坤霞, 等. 42CrMo4 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 Heng, ZHAO Xiao-bing, WEI Kun-xia, et al. Comparative Study on Plasma Boron-Nitriding and Plasma Nitriding for 42CrMo4 Steel[J]. Surface Technology, 2022, 51(4): 121-126.

and analyzed by optical microscope, XRD, microhardness tester and wear tester and electrochemical workstation. PNB significantly increased the nitriding efficiency. Under the technological conditions of 520 °C and 6 h, the thickness of compound layer and effective hardening layer increased from 18.78  $\mu\text{m}$  to 29.44  $\mu\text{m}$ , and 265  $\mu\text{m}$  to 355  $\mu\text{m}$ , respectively. Meanwhile, FeB and Fe<sub>2</sub>B were formed in the surface layer after plasma boron-nitriding, which significantly improved the hardness and wear resistance of nitriding layer. The surface hardness increased from 750HV0.05 to 1 002HV0.05, and both wear and corrosion resistance were obviously enhanced. The wear rate was decreased from 3.06 mg/cm<sup>2</sup> to 1.02 mg/cm<sup>2</sup>, and the self-corrosion potential was increased from -648.89 mV to -494.32 mV. Compared with plasma nitriding, plasma boron-nitriding has obvious advantages, which can not only improve the efficiency of plasma nitriding, but also significantly improve the properties of the nitriding layer, including hardness, wear resistance and corrosion resistance.

**KEY WORDS:** 42CrMo4 steel; plasma boron-nitriding; plasma nitriding; nitriding layer; wear resistance; corrosion resistance

离子渗氮是一种应用广泛的表面改性技术,其具有清洁、高效、无污染等显著优势<sup>[1-3]</sup>。由于离子渗氮后渗层硬度会受到基材的影响,基材中合金元素含量越低,表层硬度越低<sup>[4-7]</sup>,因此碳素钢和低合金钢经离子渗氮后,表层硬度很难超过 750HV 的技术要求。

文中针对产学研合作单位遇到的技术难题提出了创新解决方案,具体技术难题为:采用现有离子渗氮技术对 42CrMo4 柴油机连杆盖进行表面改性,无法满足用户提出的严苛技术要求(表面硬度大于 800HV,芯部具有良好韧性,硬度为 280~330HV,有效硬化层深度不小于 0.2 mm)。柴油机连杆盖外形结构如图 1 所示。



图 1 柴油机连杆盖  
Fig.1 Diesel engine linkage rod cover

渗硼后,硼化物层具有硬度高、耐磨性高、抗腐蚀、耐高温氧化等优良性能<sup>[8-10]</sup>。普通碳素钢和合金钢渗硼后表层硬度可高达 1 500~2 000HV,由此显著提高了零件的耐磨性和使用寿命<sup>[11-14]</sup>。由于常用的固体渗硼所需温度高达 1 000 °C 左右,且保温时间长,导致工件变形大,因此固体渗硼技术存在能耗大、效率低、工件尺寸精度难以保障等不足<sup>[15-18]</sup>。

基于笔者课题组已研发的复合渗技术(包括软氮化、氮氧共渗、钛氮复合渗等)具有比单一元素离子渗氮更加优越的性能<sup>[19-21]</sup>。结合离子渗氮和渗硼各自的特点,文中提出将硼化物引入离子渗氮层,达到扬长避短、提高离子渗层硬度及其他性能的创新思路。

为此,通过在离子渗氮时添加微量硼,探索研究硼氮离子复合渗技术,并与离子渗氮渗层特性进行对比研究,发现硼氮离子复合渗比离子渗氮具有显著优势,不仅可以提高离子渗效率,还可显著提升渗层性

能(包括渗层硬度、耐磨性和耐蚀性)。

## 1 实验

实验材料为调质态 42CrMo4 钢,其化学成分(质量分数)包括 C(0.39%)、Si(0.28%)、Mo(0.21%)、Mn(0.77%)、Cr(0.89%),其余为 Fe,基体硬度为 320HV0.05。采用线切割将试样加工成 10 mm×10 mm×5 mm,并采用 180<sup>#</sup>—2000<sup>#</sup>的砂纸逐步进行打磨,然后将样品放在无水乙醇中,并用超声波清洗 10 min,以去除油污和杂质,取出吹干后放入密封袋中待用。

将 42CrMo4 钢样品放入离子渗氮炉中,先采用预氧化处理活化表面,预氧化温度为 300 °C,时间为 30 min。预氧化结束后分别进行相同工艺条件(520 °C, 6 h)硼氮离子复合渗处理和离子渗氮处理。通过在试样周围均匀摆放直径约为 3 mm 的颗粒状硼铁,进行硼氮离子复合渗处理。硼氮离子复合处理时每炉放置 4 个相同尺寸(10 mm×10 mm×5 mm)试样,每炉硼铁的添加量为 1.6 g。

经硼氮离子复合处理后,采用 DMI-3000M 型光学显微镜观察截面显微组织。采用 D/max-2500 型 X 射线衍射仪测试物相组成,使用 Cu-K $\alpha$  射线,波长  $\lambda=0.154$  nm,扫描速度设为 5 (°)/min,步宽设定为 0.02°, 2 $\theta$  选定为 20°~100°。采用 HXD-1000TMC 型维氏显微硬度计,条件为加载载荷 0.5 N、加载时间 15 s,测量截面显微硬度,同时采用维氏硬度计对试样渗层韧性进行测试。采用 MMV-1A 多功能材料摩擦行为测试仪测量耐磨性。对磨材料为 GCr15 钢球,直径为 5 mm,转速为 250 r/min,加载载荷为 4 N,对磨时间为 16 min。耐磨性测试结束后,使用金相显微镜观察试样表面磨痕形貌,并使用 Origin 软件作出摩擦磨损系数曲线,采用 MST-5000 电子天平测量摩擦磨损前后失重的数据。采用 TD7300 型电化学测试系统在 NaCl(3.5%)溶液中进行,测量硼氮离子复合处理后的试样在室温下的极化曲线,参比电极为饱和甘汞电极(SCE),辅助电极为 Pt 电极,扫描速度为 2.5 mV/s。

## 2 结果及分析

### 2.1 渗层的截面显微组织

42CrMo4 钢在相同工艺参数下离子渗氮和硼氮离子复合渗后的截面显微组织见图 2, 可以看出, 离子渗氮处理后的化合物层厚度为  $18.78\ \mu\text{m}$ , 而经硼氮离子复合渗处理后, 试样的化合物层厚度得到显著增加, 且化合物层中出现锯齿状垂直楔入基体, 化合物层的厚度增加到  $29.44\ \mu\text{m}$ , 相较于离子渗氮处理的化合物层厚度增加了 57%。

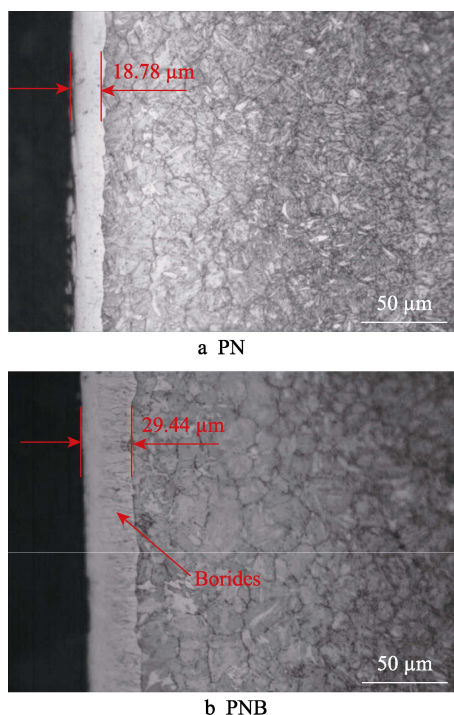


图 2 42CrMo4 钢在相同工艺参数下离子渗氮和硼氮离子复合渗显微组织对比

Fig.2 Comparison of microstructures of 42CrMo4 steel after PN and PNB under the same technological parameters

### 2.2 渗层物相分析

42CrMo4 钢在相同工艺参数下离子渗氮和硼氮离子复合渗处理后的 X 射线衍射图谱见图 3。从图 3 可见, 硼氮离子复合渗与离子渗氮一样, 渗层中都含有  $\gamma'\text{-Fe}_4\text{N}$  相。同时, 硼氮离子复合渗处理后渗层中新增了 FeB 和  $\text{Fe}_2\text{B}$ ,  $\gamma'\text{-Fe}_4\text{N}$  相衍射峰强度明显降低, 富氮相  $\varepsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$  衍射峰消失。

### 2.3 渗层表面及截面硬度分析

42CrMo4 钢在相同工艺参数下离子渗氮和硼氮离子复合渗的截面显微硬度曲线见图 4, 可以看出, 硼氮离子复合渗试样表面硬度显著增加, 不同深度截

面显微硬度也都不同程度地提高, 有效硬化层逐渐增厚; 表面硬度由  $750\text{HV}0.05$  提高至  $1\ 002\text{HV}0.05$ , 且硬度梯度较为平缓, 有效硬化层厚度由离子渗氮的  $265\ \mu\text{m}$  增加到  $355\ \mu\text{m}$ 。由此可以说明, 与离子渗氮相比, 硼氮离子复合渗不仅提高了截面硬度, 也增加了有效硬化层厚度。

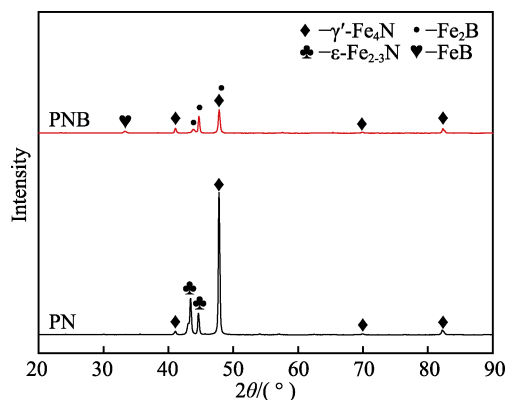


图 3 42CrMo4 钢在相同工艺参数下离子渗氮和硼氮离子复合渗 XRD 谱对比

Fig.3 Comparison of X-ray diffraction patterns of 42CrMo4 steel after PN and PNB under the same technological parameters

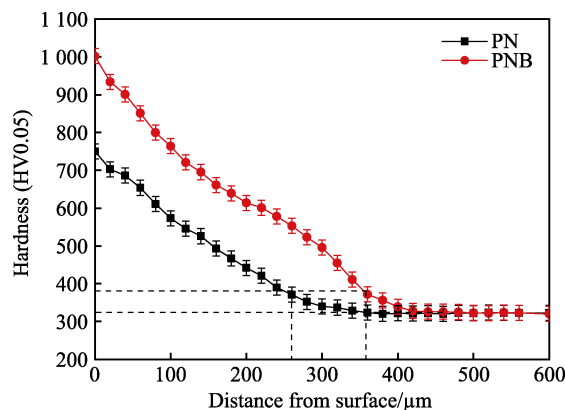


图 4 42CrMo4 钢在相同工艺参数下离子渗氮和硼氮离子复合渗截面显微硬度对比

Fig.4 Comparison of cross-sectional micro-hardness of 42CrMo4 steel after PN and PNB under the same technological parameters

### 2.4 耐磨性分析

42CrMo4 钢在相同工艺参数下离子渗氮和硼氮离子复合渗复合处理后的磨痕形貌对比见图 5。从图 5 中可以看出, 离子渗氮处理后试样表面出现了较深且较宽的磨损轨迹, 而硼氮离子复合渗处理试样磨损轨迹较浅且较窄, 表面的磨损和破碎痕迹减少。同时, 从图 6 可以看出, 试样表面的磨损量显著降低, 离子渗氮处理后试样的磨损率为  $3.06\ \text{mg}/\text{cm}^2$ , 而硼氮离子复合渗处理后磨损率为  $1.02\ \text{mg}/\text{cm}^2$ 。

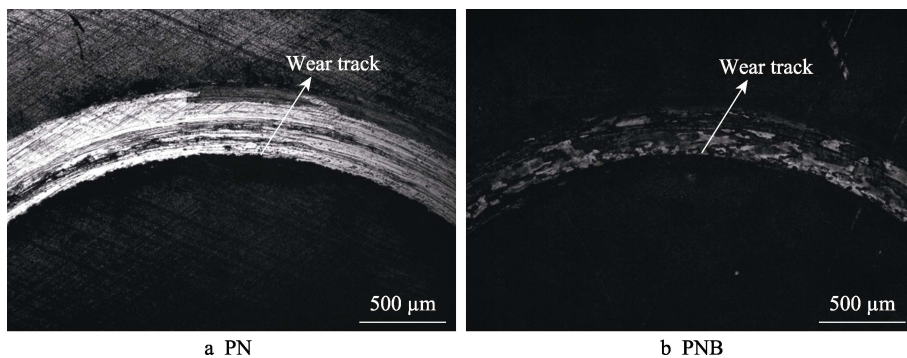


图5 42CrMo4 钢在相同工艺参数下离子渗氮和硼氮离子复合渗磨痕的形貌对比

Fig.5 Comparison of morphology of wear marks of 42CrMo4 steel after PN and PNB under the same technological parameters

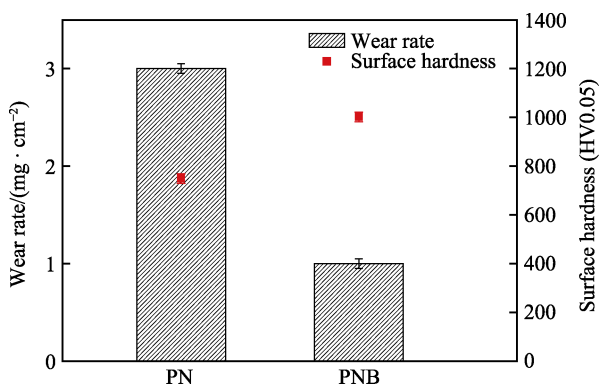


图6 42CrMo4 钢在相同工艺参数下离子渗氮与硼氮离子复合渗试样磨损损失重对比

Fig.6 Comparison of wear rate of samples after PN and PNB under the same technological parameters

42CrMo4 钢在相同工艺参数下离子渗氮和硼氮离子复合渗处理后的摩擦因数对比见图7,可以看出,离子渗氮处理后试样表面的摩擦因数较大,约为0.63,而经硼氮离子复合渗处理后试样表面的摩擦因数较小,约为0.35,且摩擦因数曲线较为平稳。结合图5和图6可知,硼氮离子复合渗处理后能显著提高试样渗层的耐磨性。

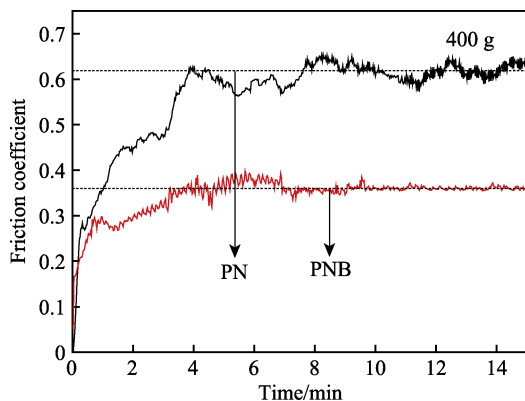


图7 42CrMo4 钢相同工艺参数下离子渗氮和硼氮离子复合渗试样摩擦因数对比

Fig.7 Comparison of friction coefficient of 42CrMo4 steel after PN and PNB under the same technological parameters

## 2.5 复合渗层电化学腐蚀性能分析

42CrMo4 钢在相同工艺参数下离子渗氮和硼氮离子复合渗处理后的动电位极化曲线见图8。结合表1可以得出,离子渗氮处理后的自腐蚀电位为-648.89 mV,自腐蚀电流密度为  $2.582 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ ,而经硼氮离子复合渗处理后,对应的自腐蚀电位显著增加,为-494.32 mV,自腐蚀电流密度显著降低,为  $1.023 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。由此得出,经硼氮离子复合渗处理后的渗层其耐蚀性大大提高。

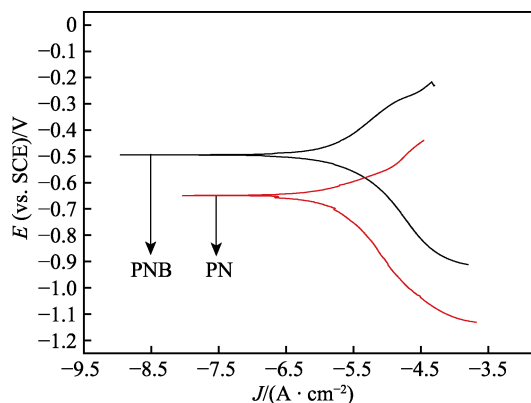


图8 42CrMo4 钢在相同工艺参数下离子渗氮和硼氮离子复合渗试样动电位极化曲线对比

Fig.8 Comparison of dynamic polarization curves of 42CrMo4 steel after PN and PNB under the same technological parameters

表1 离子渗氮和硼氮离子复合渗对渗层耐蚀性的影响  
Tab.1 Effect of PN and PNB on corrosion resistance

Sample treatment process	Corrosion resistance	
	$E_{\text{corr}}/\text{mV}$	$J_{\text{corr}}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$
PN	-648.89	2.582
PNB	-494.32	1.023

## 2.6 机理分析讨论

综合上述研究结果可知,在  $520^\circ\text{C}$ 、6 h 的相同工艺条件下,硼氮离子复合渗处理可显著提高渗氮效

率,提高渗层性能,包括硬度、耐磨性和耐蚀性。具体对比情况如表 2 所示。

由表 2 可见,相同工艺条件下,在硼氮离子复合渗过程中,化合物层厚度由离子渗氮处理的 18.78 μm 增加到 29.44 μm,产生这种显著提高渗速效果的可能原因如下:在硼氮离子复合渗处理前,对试样进行了预氧化处理,使得试样表层形成一定厚度的铁氧化

物;铁氧化物的存在使基体产生了大量的孔洞等缺陷<sup>[22-23]</sup>,为氮、硼原子的扩散提供了有利通道;氮的原子半径相对较小,而硼的原子半径较大,故氮的扩散能力比硼大,因此活性氮原子优先渗入,形成了 Fe<sub>4</sub>N,使试样表面晶格畸变、位错密度增加,进一步加速了硼原子的吸附过程,并使反应扩散增强<sup>[24-25]</sup>,从而加快了渗层的形成。

表 2 硼氮离子复合渗离子渗氮渗层特性对比  
Tab.2 Comparative study on the characteristics of PN and PNB layer

Characteristics of treated layer		PN	PNB	PNB vs. PN
Compound layer thickness/μm		18.78	29.44	57%↑
Effective hardened layer thickness/μm		265	355	35%↑
Surface hardness (HV0.05)		750	1 002	35%↑
Wear resistace	Wear rate/(mg·cm <sup>-2</sup> )	3.06	1.02	67%↓
	Friction coefficients	0.63	0.35	45%↓
Corrosion resistace	E <sub>corr</sub> /mV	-648.89	-494.32	25%↑
	J <sub>corr</sub> /(μA·cm <sup>-2</sup> )	2.582	1.023	61%↓
Main phases of nitriding layer		Fe <sub>2-3</sub> N, Fe <sub>4</sub> N	Fe <sub>4</sub> N, FeB, Fe <sub>2</sub> B	Added new FeB, Fe <sub>2</sub> B

Note: PN—plasma nitriding; PNB—plasma boron-nitriding; Treating parameters, 520 ℃, 6 h.

经硼氮离子复合渗处理后,其试样表面硬度由离子渗氮的 750HV0.05 提高至 1 002HV0.05,同时,试样的耐磨性大大提高。原因是添加硼离子渗氮后,渗层中形成了高硬度 FeB 和 Fe<sub>2</sub>B 硼铁化合物,均匀分布的硼铁化合物对渗层起到了第二相强化作用,使表面硬度和耐磨性显著提高<sup>[26-27]</sup>。

综上可知,添加微量硼进行硼氮离子复合渗处理可以快速获得具有表面硬度、耐磨耐蚀性都高于离子渗氮的渗层组织,具有重要的工程应用价值。

3 结语

在 520 ℃、6 h 的相同工艺条件下,对 42CrMo4 钢进行了硼氮离子复合渗处理,并与离子渗氮进行了对比,得出如下结论。

1) 硼氮离子复合渗处理比离子渗氮效率显著提高,化合物层厚度由 18.78 μm 增加到 29.44 μm,有效扩散层厚度由 265 μm 增加到 355 μm。同时,经硼氮离子复合渗处理后,渗层中形成了硼铁化合物 FeB 和 Fe<sub>2</sub>B。

2) 硼氮离子复合渗处理后表面硬度由 750HV0.05 提高至 1 002HV0.05。同时,相同层深处对应的截面硬度都显著提高。

3) 硼氮离子复合渗显著改善了离子渗氮试样的耐磨性。硼氮离子复合渗试样磨痕较浅、较窄,磨损率由 3.06 mg/cm<sup>2</sup> 降低到 1.02 mg/cm<sup>2</sup>;摩擦因数由 0.63 降低到 0.35。

4) 硼氮离子复合渗显著改善了离子渗氮试样的耐蚀性。硼氮离子复合渗自腐蚀电位由-648.89 mV 提高至-494.32 mV,自腐蚀电流密度由 2.582 μA/cm<sup>2</sup> 减

小到 1.023 μA/cm<sup>2</sup>。  
5) 42CrMo4 柴油机连杆盖经硼氮离子复合渗后,各项组织性能指标都满足技术要求。

参考文献:

[1] 张利,王洪顺,孟庆华,等. 45 钢气体低温氮硼复合共渗研究[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2008, 25(2): 25-26.  
ZHANG Li, WANG Hong-shun, MENG Qing-hua, et al. Study on Binary N-B Co-Penetration Character of No.45 Steel in Lower Temperature Condition[J]. Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 2008, 25(2): 25-26.

[2] 杨浩鹏,吴晓春. H13 钢低温固体渗硼及其热熔损性能的研究[J]. 上海金属, 2019, 41(4): 23-28.  
YANG Hao-peng, WU Xiao-chun. Study on the Low-Temperature Pack Boriding and Erosion Property of H13 Steel[J]. Shanghai Metals, 2019, 41(4): 23-28.

[3] 梁文萍,徐重,缪强,等. Ti<sub>2</sub>AlNbO 相合金双层辉光等离子渗 Mo 摩擦性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(11): 1826-1829.  
LIANG Wen-ping, XU Chong, MIAO Qiang, et al. Tribological Behaviors of Ti<sub>2</sub>AlNb Orthorhombic Alloy Molybdenized by Double Glow Plasma Surface[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2006, 35(11): 1826-1829.

[4] TANG Lei, JIA Wei-ju, HU Jing. An Enhanced Rapid Plasma Nitriding by Laser Shock Peening[J]. Materials Letters, 2018, 231: 91-93.

[5] 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 Lei, CHEN Yao, PENG Tian-tian, 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.
- [6] BHADRAIAH D, NOUVEAU C, VEERASWAMI B, et al. Plasma Based Nitriding of Tool Steel for the Enhancement of Hardness[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 46: 940-943.
- [7] 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.
- [8] LI Jing-cai, YANG Xing-mei, WANG Shu-kai, et al. A Rapid DC Plasma Nitriding Technology Catalyzed by Pre-Oxidation for AISI4140 Steel[J]. *Materials Letters*, 2014, 116: 199-202.
- [9] 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.  
LI Jing-cai, SUN Fei, WANG Shu-kai, et al. Catalysis Effect and Mechanism of Pre-Oxidation on Direct Current Plasma Nitriding[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2014, 35(7): 182-186.
- [10] KOLLECK R, VEIT R, MERKLEIN M, et al. Investigation on Induction Heating for Hot Stamping of Boron Alloyed Steels[J]. *CIRP Annals*, 2009, 58(1): 275-278.
- [11] YE Xue-mei, WU Ji-qiang, ZHU Yong-li, et al. A Study of the Effect of Propane Addition on Plasma Nitrocarburizing for AISI 1045 Steel[J]. *Vacuum*, 2014, 110: 74-77.
- [12] LIU Han, LI Jing-cai, CHAI Ya-ting, et al. A Novel Plasma Oxynitriding by Using Plain Air for AISI 1045 Steel[J]. *Vacuum*, 2015, 121: 18-21.
- [13] 毛长军, 魏坤霞, 刘细良, 等. 微量钛对离子渗氮渗层特性及性能的影响[J]. *中国表面工程*, 2020, 33(1): 34-38.  
MAO Chang-jun, WEI Kun-xia, LIU Xi-liang, et al. Effects of Trace Titanium on Characteristics and Properties of Plasma Nitriding Layer[J]. *China Surface Engineering*, 2020, 33(1): 34-38.
- [14] TANG Lei, MAO Chang-jun, JIA Wei-ju, et al. The Effect of Novel Composite Pretreatment on Performances of Plasma Nitrided Layer[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(5): 9531-9536.
- [15] KERTSCHER R, BRUNATTO S F. On the Kinetics of Nitride and Diffusion Layer Growth in Niobium Plasma Nitriding[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 401: 126220.
- [16] LI Yang, WANG Liang, SHEN Lie, et al. Plasma Nitriding of 42CrMo Low Alloy Steels at Anodic or Cathodic Potentials[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2010, 204(15): 2337-2342.
- [17] 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 Yao, SONG Lei, ZHANG Chen-kai, et al. Lower Temperature Plasma Nitriding without White Layer for 38CrMoAl Hydraulic Plunger[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(22): 81-86.
- [18] 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 Shi-jing, SUN Fei, MIAO Xiao-ji, 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.
- [19] ORTIZ-DOMÍNGUEZ M, KEDDAM M, ELIAS-SPINOSA M, et al. Characterization and Boriding Kinetics of AISI T1 Steel[J]. *Metallurgical Research & Technology*, 2018, 116(1): 102.
- [20] 刘保国, 林玥, 张世宏. 离子氮化高速钢沉积掺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.  
LIU Bao-guo, LIN Yue, ZHANG Shi-hong. Friction and Wear Properties of W Doped Diamond-Like Carbon Film on the Ion Nitriding HSS Substrate[J]. *Surface Technology*, 2016, 45(6): 119-124.
- [21] KOVAC H, HACISALIHOĞLU İ, YETİM A F, et al. Effects of Shot Peening Pre-Treatment and Plasma Nitriding Parameters on the Structural, Mechanical and Tribological Properties of AISI 4140 Low-Alloy Steel[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 358: 256-265.
- [22] DA SILVA SAVONOV G, CAMARINHA M G G, ROCHA L O, et al. Study of the Influence of the RRA Thermal Treatment and Plasma Nitriding on Corrosion Behavior of 7075-T6 Aluminum Alloy[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 374: 736-744.
- [23] 刘建睿, 严宏志, 李算, 等. 离子渗氮工艺参数对 4Cr<sub>5</sub>MoSiV 钢表层组织与性能的影响[J]. *表面技术*, 2019, 48(8): 199-205.  
LIU Jian-rui, YAN Hong-zhi, LI Suan, et al. Effect of Ion Nitriding Process Parameters on Surface Properties of 4Cr<sub>5</sub>MoSiV Steel[J]. *Surface Technology*, 2019, 48(8): 199-205.
- [24] ORDOÑEZ M F C, AMORIM C L G, KRINDGES I, et al. Microstructure and Micro-Abrasive Wear of Sintered Yttria-Containing 316L Stainless Steel Treated by Plasma Nitriding[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2019, 374: 700-712.
- [25] 钟厉, 马晨阳, 韩西, 等. 40Cr 钢循环离子渗氮工艺及渗层硬度研究[J]. *表面技术*, 2017, 46(2): 154-158.  
ZHONG Li, MA Chen-yang, HAN Xi, et al. Study on Surface Circular Plasma Nitriding Technology and Nitrided Layer Hardness of 40Cr Steel[J]. *Surface Technology*, 2017, 46(2): 154-158.
- [26] BASU A, MAJUMDAR J D, ALPHONSA J, et al. Corrosion Resistance Improvement of High Carbon Low Alloy Steel by Plasma Nitriding[J]. *Materials Letters*, 2008, 62(17/18): 3117-3120.
- [27] 刘元福, 陈吉, 孙彦伟, 等. 表面离子渗氮对 SS304 耐蚀性的研究[J]. *表面技术*, 2016, 45(11): 93-98.  
LIU Yuan-fu, CHEN Ji, SUN Yan-wei, et al. Effects of Surface Ion Nitriding on the Corrosion Resistance of SS304[J]. *Surface Technology*, 2016, 45(11): 93-98.

责任编辑: 彭颖