

低温离子渗氮对 16Cr3NiWMoVNb 齿轮钢 摩擦学性能的影响

赵宝奇¹,高凯雄^{2*},张斌²,王欣³,刘广桥^{4*}

(1. 兰州交通大学材料学院,甘肃 兰州 730070; 2. 中国科学院兰州化学物理研究所/材料磨损与防护重点实验室,甘肃 兰州 730070; 3. 中国航发北京航空材料研究院,北京 100084; 4. 兰州城市学院培黎机械工程学院,甘肃 兰州 730070)

摘要: 齿轮作为航空发动机的主要传动部件之一,在服役过程中齿面易发生磨损失效,无法完全满足航空发动机的需求,因此采用表面处理的方法来提高航空齿轮钢磨损性能。对 16Cr3NiWMoVNb 齿轮钢表面进行低温离子渗氮处理,通过扫描电子显微镜、X 射线电子能谱仪等分析了不同电压对其表面组成及结构、硬度、摩擦学和耐腐蚀性能的影响。结果表明:等离子渗氮处理后在 16Cr3NiWMoVNb 齿轮钢表面形成了间隙固溶体,经 900 V 电压渗氮处理后的表面硬度由原来的 269 HV 提高到 325 HV,且渗氮后的样品截面硬度呈现下降的趋势,其磨损率相比原样品降低了近 50%;在质量分数为 3.5% 的 NaCl 溶液中,渗氮后试样的阳极极化曲线呈现出活化溶解、自钝化等特征,经 850 V 电压处理后腐蚀电位由未渗氮的 -726.18 mV 提高至 -410.68 mV,耐腐蚀性能得到显著改善。因此,对航空用齿轮钢,采用低温离子渗氮表面处理的方法可提高其耐磨性和耐腐蚀性。

关键词: 16Cr3NiWMoVNb 齿轮钢;等离子渗氮;表面硬度;摩擦因数;磨损率;腐蚀性能

中图分类号: TG156.8

文献标志码: A

文章编号: 1673-9981(2023)01-0118-07

引文格式: 赵宝奇,高凯雄,张斌,等. 低温离子渗氮对 16Cr3NiWMoVNb 齿轮钢摩擦学性能的影响[J]. 材料研究与应用, 2023,17(1):118-124.

ZHAO Baoqi, GAO Kaixiong, ZHANG Bin, et al. Effect of Low Temperature Ion Nitriding on Tribological Properties of 16Cr3NiWMoVNb Gear Steel[J]. Materials Research and Application, 2023,17(1):118-124.

随着航空事业的不断发展,对航空发动机的要求越来越高,齿轮作为航空发动机的重要传动组成部件之一,要求其具备高的表面硬度、耐磨损等性能^[1]。但航空发动机齿轮在服役过程中存在表面擦伤及咬和等现象,主要原因为高载下产生的磨损失效^[2]。所以,航空齿轮的服役寿命不足成为当下制约高推重比航空发动机性能进一步提升的关键难题之一^[3]。目前,提高航空齿轮服役寿命的方法主要

有表面喷丸强化、离子渗氮、耐磨涂层等^[4]。其中,离子渗氮工艺简单,渗氮后在样品表面形成间隙固溶体或氮化物,使样品具有高硬度、高耐磨、高疲劳强度等优异性能^[5],从而使零件的使用寿命不断地倍增,同时还可以达到良好的节能效果并降低成本,因此被广泛应用。

近年来,科研人员对等离子渗氮进行了广泛研究^[6-10]。Fattah 等^[11]对 AISI4140 钢在 570 和 620 °C

收稿日期: 2022-07-08

基金项目: 国家科技重大专项 (J2019-VII-0015-0155); 国家自然科学基金项目 (51865025); 甘肃省自然科学基金重点项目 (22JR5RA095); 兰州市科技计划项目 (2018-4-32)。

作者简介: 赵宝奇 (1998-), 男, 辽宁葫芦岛人, 硕士, 研究方向为表面改性和等离子注渗, Email: 310616125@qq.com。

通信作者: 高凯雄 (1986-), 男, 河北邯郸人, 博士, 副研究员, 研究方向为固体润滑薄膜结构设计及性能调控、固体超滑材料、材料表面防护技术, Email: kxgao@licp.cas.cn;

刘广桥 (1968-), 男, 甘肃庆阳人, 博士, 教授, 研究方向为块体非晶材料的制备及性能研究、固体润滑材料的制备及摩擦学性能研究, Email: liugq1968@163.com。

温度下进行了离子渗氮和氮碳共渗的两种对比实验,结果证明碳原子的存在会促进表面下 ϵ -Fe₂-3N 相的形成,使氮碳共渗层的性能高于渗氮层,但氮碳共渗会形成富碳区,阻碍原子的扩散,从而导致表面层较薄。Bell 等^[12-13]分析了奥氏体不锈钢在低温(420 ℃)等离子渗氮下的腐蚀、摩擦磨损和疲劳性能,并提出了新型活性屏等离子渗氮技术,证明了这种新技术可以处理低合金钢、工具钢和不锈钢等,而有些金属材料(如航空用齿轮钢 16Cr3NiWMoVNb)回火温度低,高温离子渗氮会对基底性能产生退化,固需要采用低温($T \leq 300$ ℃)渗氮技术。

表 1 16Cr3NiWMoVNb 钢的化学成分

Table 1 Chemical compositions of the 16Cr3NiWMoVNb steel used in this study

元素	C	Mn	Si	Ni	Cr	W	V	Mo	Nb	S	P	Cu	Fe
含量 w/%	0.16	0.500	0.750	1.250	2.800	1.200	0.450	0.500	0.150	0.005	0.009	0.050	余量

1.2 试验方法

采用线切割技术,将试样切割成 15 mm × 15 mm × 3 mm 的块状。首先,对块状样品进行超声处理 20 min,以除去表面杂质。然后,将试样装入特制的离子渗氮炉内,在机械泵和分子泵的加持下抽真空至 1×10^{-3} Pa,同时设定温度参数,离子渗氮处理工艺参数确定基材温度为 300 ℃,其中气氛组成为 N₂ 与 Ar^[15](保持气体体积为 1:3),渗氮炉内压强维持在 60 Pa 左右,渗氮时间 8 h,在 800、850 和 900 V 下进行等离子渗氮并观察其变化情况。

1.3 分析方法

1.3.1 结构

为观察样品表面的组织及结构,采用扫描电子显微镜(SEM, Apreo S, FEI, 美国)在 1000 倍下对齿轮钢样品及渗氮后的表面进行观察,通过 X 射线电子能谱仪(D8Discover25, 德国)运用 120sstep-v500-5-110teotheta 程序对表面组织进行物相分析。

1.3.2 力学性能

测量金属表面强化最直观的方法就是表面硬度的改变,表面的成分决定了硬度分布,而表面渗层的硬度分布又对材料表面疲劳、磨损等性能有重要的影响,更关乎到齿轮钢的性能和寿命。因此,采用显微维氏硬度计(MH-5-VM 显微硬度仪,中国),在载力为 2.5 kg 下测量表面渗氮层的维氏硬度及断层边缘到心部的维氏硬度。

1.3.3 摩擦学性能

用真空气氛可控摩擦试验机(UMT-3, 美国)对原样品及渗氮试样进行滑动摩擦试验,通过三维表面轮廓仪(MicroXAM-800, KLA-Tencor, 美国)及公式计算磨损率。摩擦试验温度为 20 ℃、相对湿度

本文用 16Cr3NiWMoVNb 齿轮钢做基材,采用低温渗氮技术对其表面进行处理,研究了不同电压对表面结构、形貌及硬度、摩擦学性能、腐蚀性能的影响,为航空发动机的高寿命运行提供了技术支撑。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验的材料为 16Cr3NiWMoVNb 钢,其主要成分列于表 1。

为 30%—50%、摩擦时间为 1300 s、载荷为 5 N, 回转半径为 2 mm,对磨副为直径 6 mm 的 440c 钢球。

磨损率计算公式 $W = \frac{V}{F_N \times L}$,其中 W 代表磨损率、 V 代表磨损量、 F_N 代表载荷大小、 L 代表滑动距离。

1.3.4 腐蚀性能

通过电化学工作站(Autolab 三型,瑞士万通),采用动电位极化测试方法,在 3.5% 的 NaCl 溶液、OCP 开路电位 10 min 的条件下测试了原样品及渗氮样品的腐蚀性能。

2 试验结果及分析

2.1 原样品及渗氮后样品 XRD 分析

图 1 为 16Cr3NiWMoVNb 齿轮钢表面的 XRD 图谱。从图 1 可以看出,试样渗氮前后衍射峰的位置

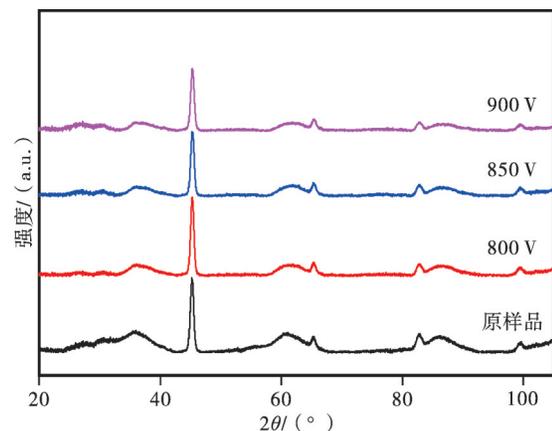


图 1 16Cr3NiWMoVNb 齿轮钢渗氮前后 XRD 图谱
Figure 1 XRD patterns of 16Cr3NiWMoVNb gear steel before and after nitriding process

置向右略有偏移。这是由于形成了间隙固溶体,而导致了衍射峰整体向大角度衍射角偏移;未引起晶体结构的变化,是由于有N原子掺杂到表面,排列到空位原子处,从而使渗氮后表面主要发生晶格畸变。

2.2 原样品及渗氮后样品SEM形貌及分析

为了更好的观察渗氮对样品表面的影响,用扫描电子显微镜对渗氮样品的表面微观组织进行观察^[17]。图2为16Cr3NiWMoVNb齿轮钢在不同电压下渗氮后的表面SEM。从图2可见:在不同电压下试样表面有许多小孔,说明表面渗氮层产生了一

些疏松的小颗粒^[18];经800、850和900 V后的渗氮表面与原样品相比相对光滑,随着电压的升高,表面更加平滑。这证明了渗氮层的厚度与电压有关,渗氮层的形成是氮在16Cr3NiWMoVNb齿轮钢表面非稳态地扩散,氮原子从气相到固相中扩散,在试样表面先达到平衡并生成一定厚度的渗氮层,而致密的渗层会阻碍氮原子的进一步轰击,离子的动能需超过表面一定的扩散能才能进一步轰击到更深的位置,因其动能是随着渗氮实验电压的不断增加而增大,因此使得渗氮层的深度增加,从而使渗层不断增厚^[19]。

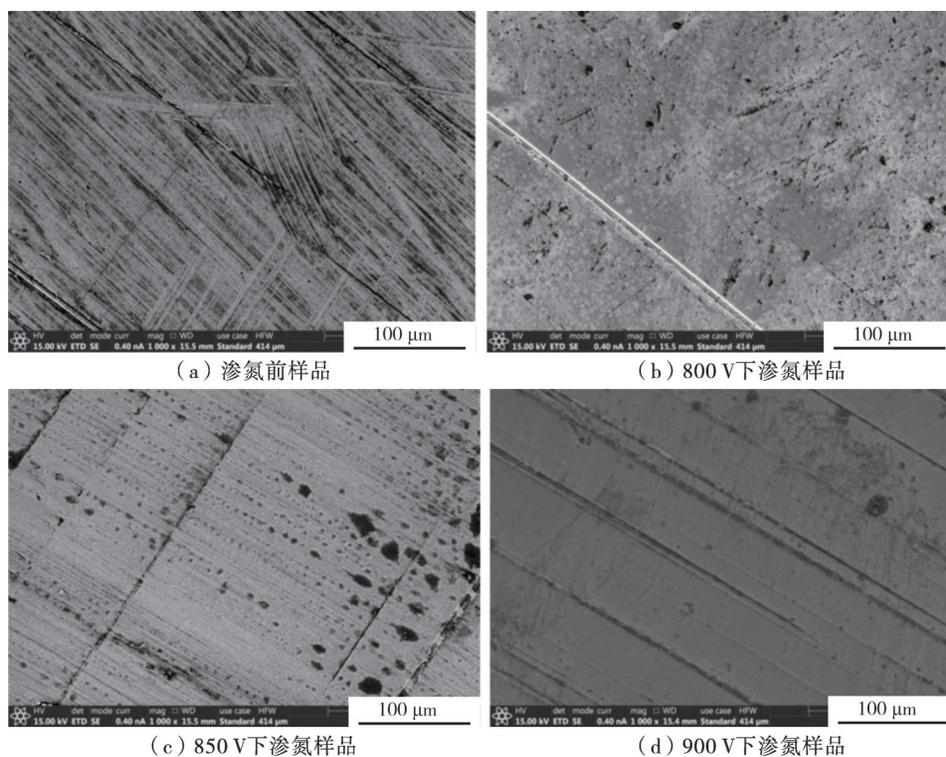


图2 16Cr3NiWMoVNb齿轮钢渗氮前后表面形貌图

Figure 2 Surface topography of 16Cr3NiWMoVNb gear steel before and after nitriding

通过EDAX能谱仪分析了表面元素含量,其结果列于表2。由表2可知:Fe的能量值最高,N的能量值最低;原样品中N原子占比在1.10%左右,800

V下N原子占比在7.42%左右,850 V下N原子占比在9.09%左右,900 V下N原子占比在9.63%左右,印证了随着电压的不断增加,动能不断增加,使得N原子更好地轰击到靶材表面,表面N原子的含量不断增加。

表2 16Cr3NiWMoVNb钢渗氮前后的组成成分
Table 2 Chemical compositions of the 16Cr3Ni-WMoVNb steel before and after nitriding

原子百分 数/%	原试样	渗氮后		
		800 V	850 V	900 V
N	1.10	7.42	9.09	9.63
O	6.76	20.06	23.97	30.34
Fe	92.14	72.52	66.94	60.03

2.3 显微维氏硬度

采用维氏硬度计,对渗氮截面进行硬度测试,依次从前表层处到截面中心再到后表层打点,结果如图3所示。从图3可见:原样品维氏硬度的变化不大,在280—290 HV之间;而800、850和900 V的样品随着深度的增加氮浓度不断降低,渗氮后断面硬

度呈现接近表面处高而中心部分低的趋势;所有渗氮的样品的正反表面硬度均得到了提高,在距离表面 50 μm 处的硬度最高,其中 800 V 渗氮样品为 320 HV、850 V 渗氮样品为 325 HV、900 V 渗氮样品为 370 HV,随着从正表面越来越靠近样品截面中心硬

度呈现逐渐下降又逐渐增高的趋势,而这是由于样品反面也被渗氮导致,表明渗氮的过程对样品正反面均起到作用,因此出现了两边的硬度比中心部位硬度高的结果。

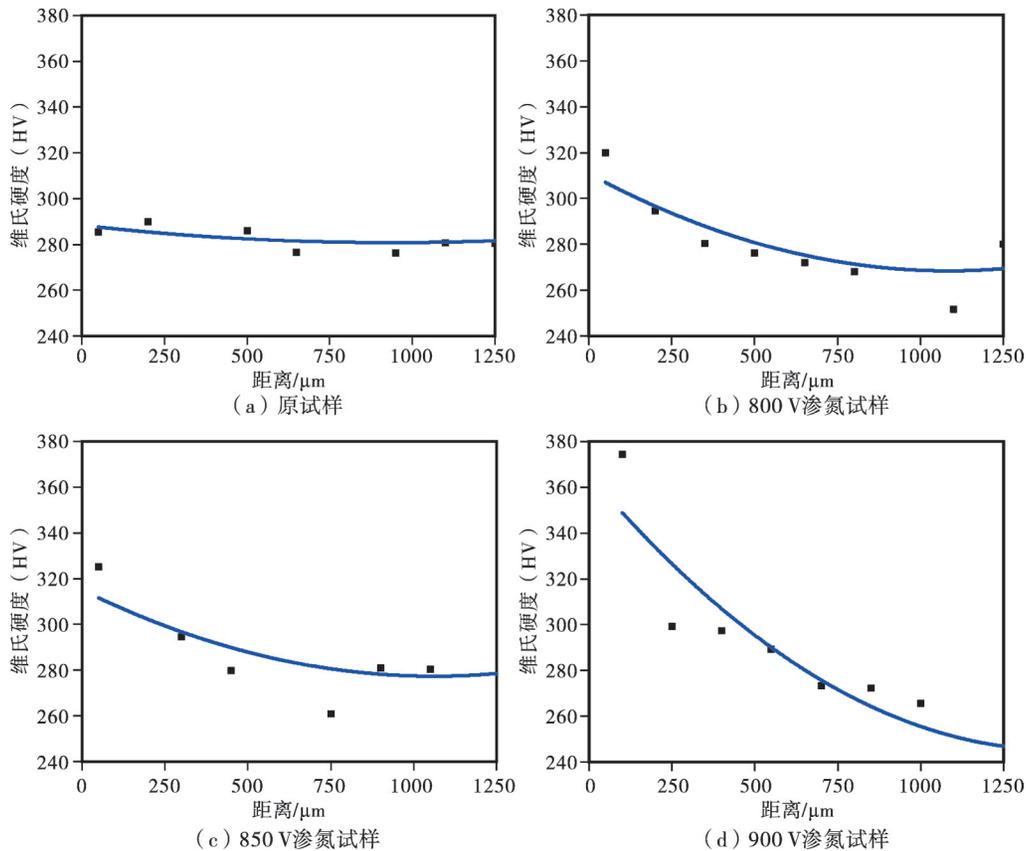


图 3 16Cr3NiWMoVNb 齿轮钢渗氮前后断面维氏硬度

Figure 3 Vickers hardness of the cross-section of the 16Cr3NiWMoVNb gear steel before and after nitriding

离子注渗对钢的硬度提高有很大的作用,尤其表面硬度。对渗氮前后样品的表面不同位置各取 2 点,通过计算得到平均维氏硬度,其结果列于表 3。由表 3 可知,原样品的表面硬度在 (269 ± 24) HV,渗氮后样品表面的维氏硬度随着电压不断增加而不断提升,在 900 V 时达到了 (325 ± 21) HV。

表 3 16Cr3NiWMoVNb 钢渗氮前后表面维氏硬度

Table 3 Surface Vickers hardness of the 16Cr3NiWMoVNb steel before and after nitriding

试样	维氏硬度(HV)
原试样	269 ± 24
800 V 渗氮试样	305 ± 10
850 V 渗氮试样	314 ± 15
900 V 渗氮试样	325 ± 21

因此,氮的渗入可以有效增强基底表面硬度,并且会随着电压的增加,离子能量增大,渗氮效果逐步提升。

2.4 摩擦学性能

图 4 为 16Cr3NiWMoVNb 齿轮钢渗氮前与不同电压下渗氮后的摩擦系数。从图 4 可以看出:200 s 之前原样品的摩擦系数陡然上升,然后稳步从 0.66 上升到 0.72;800、900 V 下的渗氮样品的摩擦系数与原样品相比略有增长,但在 200 s 之后稳步在 0.73 左右,这与原样品稳定之后的摩擦系数相差无几;但 850 V 电压下渗氮后样品的摩擦系数在 400 s 稳定后相比于原样品更低,约 0.62 左右。整体来看,渗氮之后的样品对于摩擦系数的影响不大。

采用表面三维轮廓仪对试样进行磨损性能分

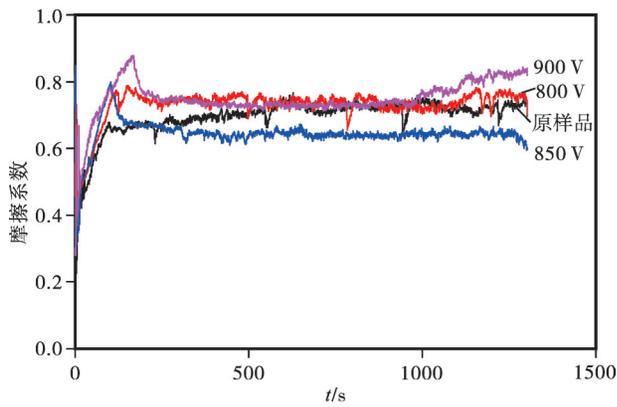


图4 16Cr3NiWMoVNb 齿轮钢渗氮前后摩擦系数
Figure 4 Friction coefficients of the 16Cr3NiWMoVNb gear steel before and after nitriding

析,图5为16Cr3NiWMoVNb 齿轮钢在渗氮前后时的磨痕曲线图。从图5可见:在温度为20℃、相对湿度为30%-50%、摩擦时间为1300s、载荷为5N的条件下,原样品磨痕宽度约0.7mm左右、磨痕深度约24.7μm;当渗氮后,800V的磨痕宽度约0.55mm左右、磨痕深度约14.9μm,850V的磨痕宽度约0.5mm左右、磨痕深度约16.7μm,900V的磨痕宽度约0.75mm左右、磨痕深度较浅约10.2μm。由此可以判断,磨损为磨粒磨损,主要是在摩擦对副作用下的犁削和微切削,表面层(渗氮层)的磨损随着时间的增加而增大。所以,在不断的对磨作用下,表面层中的重复加工使磨损变得更加严重,导致了表面层的塑性去除及表面疲劳断裂。

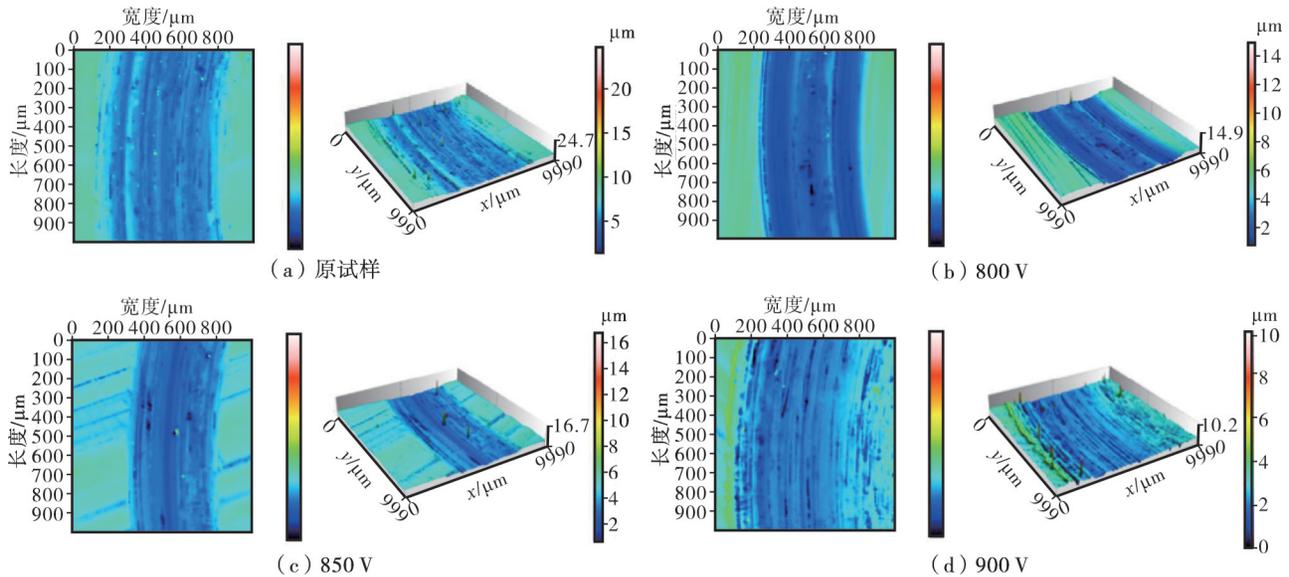


图5 16Cr3NiWMoVNb 齿轮钢渗氮前后三维轮廓图
Figure 5 Three-dimensional profiles of the 16Cr3NiWMoVNb gear steel before and after nitriding

通过磨损率公式计算得到磨损率,其计算结果列于表4,其中磨损体积是通过软件计算后取平均值而得出的结果。由表4可知,原样品的磨损率最大,而800、850和900V的渗氮样品的磨损率相较于原样品均有所降低,说明渗氮在表面形成了一层

保护膜,该膜层起到了一定的抗磨作用,从而使渗氮试样的耐磨性明显得到改善。

2.5 腐蚀性能

通过动电位极化,测试研究了渗氮样品前后的电化学腐蚀。腐蚀电位越低,腐蚀电流密度越小,说明腐蚀性能更加优异。图6为16Cr3NiWMoVNb 齿轮钢在渗氮前后时的极化曲线,表5为16Cr3NiWMoVNb 钢渗氮前后腐蚀电位。通过对图6和表5分析得出:在浓度为3.5%的NaCl溶液、OCP开路电位10min的条件下,原试样的极化曲线呈现活化溶解的特性,其腐蚀电位为-726.18mV、腐蚀电流密度为1204.4nA·cm⁻²;渗氮后试样的极化曲线呈现活化溶解、自钝化等特征^[20],800V渗氮试样的腐蚀电

表4 16Cr3NiWMoVNb 钢渗氮前后磨损率

Table 4 Wear rates of the 16Cr3NiWMoVNb steel before and after nitriding

试样	磨损率/($\times 10^{-8} \text{ mm}^3 \cdot \text{N}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$)
原试样	6.203
800 V 渗氮试样	4.375
850 V 渗氮试样	2.975
900 V 渗氮试样	2.849

位为 -442.18 mV 、腐蚀电流密度为 $552.98\text{ nA}\cdot\text{cm}^{-2}$, 850 V 的腐蚀电位为 -410.68 mV 、腐蚀电流密度为 $338.02\text{ nA}\cdot\text{cm}^{-2}$, 900 V 的腐蚀电位为 -437.48 mV 、腐蚀电流密度为 $482.12\text{ nA}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。结果表明,渗氮后试样的耐腐蚀性得到明显改善。

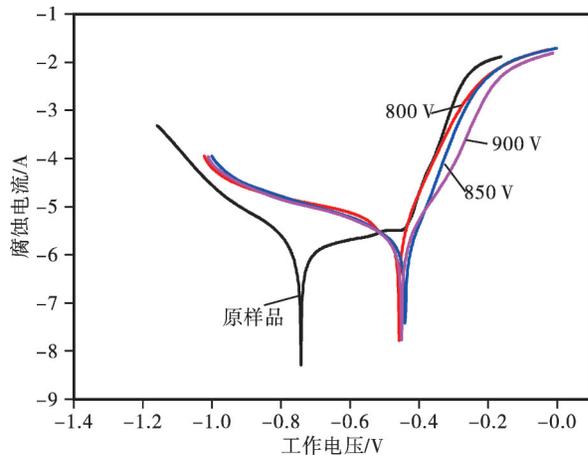


图 6 16Cr3NiWMoVNb 齿轮钢渗氮前后极化曲线图

Figure 6 Polarization curves of the 16Cr3NiWMoVNb gear steel before and after nitriding

表 5 16Cr3NiWMoVNb 钢渗氮前后腐蚀电位

Table 5 Corrosion potentials of the 16Cr3NiWMoVNb steel before and after nitriding

试样	电流密度/($\text{nA}\cdot\text{cm}^{-2}$)
原试样	1 204.40
800 V 渗氮试样	552.98
850 V 渗氮试样	338.02
900 V 渗氮试样	482.12

3 结论

对 16Cr3NiWMoVNb 齿轮钢进行不同电压(800、850、900 V)下的低温离子渗氮试验。

(1)通过 XRD 结果分析发现,渗氮试样的衍射峰的位置较原试样的略微偏移,表明形成了间隙固溶体;通过 SEM 观察到,渗氮后试样表面出现许多微米且疏松的小孔。

(2)通过 EDAX 得出,渗氮试样表面 N 元素的含量随着电压的升高在不断增加,并且试样表面硬度也随之提高,经 900 V 渗氮处理后的样品表面硬度由原来的 269 HV 提高到 325 HV,提高了近 20%,而截面硬度呈现出下降的趋势。

(3)与基材相比,整体上渗氮 16Cr3NiWMoVNb 齿轮钢的摩擦系数与原样品略有降低,

这是由于渗氮层的存在使得表面薄膜更稳定。通过三维表面轮廓仪观察发现,当达到一定电压时,渗氮试样的磨损率显著降低,经 900 V 渗氮处理后的试样比原试样降低了近 50%,因此渗氮处理后试样的摩擦磨损性能均有所改善。

(4)在浓度为 3.5% 的 NaCl 溶液中,16Cr3NiWMoVNb 齿轮钢的阳极极化曲线呈现活化溶解特征,而渗氮后试样的阳极极化曲线呈现出活化溶解、自钝化等特征。腐蚀电位由未渗氮的 -726.18 mV 提高至 850 V 电压下的 -410.68 mV ,表明渗氮试样的耐腐蚀性能得到显著改善。

参考文献:

- [1] 赵振业. 航空高性能齿轮钢的研究与发展[J]. 航空材料学报, 2000, 20(3):148-157.
- [2] IZCILER M, TABUR M. Abrasive wear behavior of different case depth gas carburized AISI 8620 gear steel [J]. Wear, 2006, 260(1): 90-98.
- [3] 王松, 夏云志, 于兴福, 等. 冷处理对 8Cr4Mo4V 轴承钢尺寸稳定性的影响[J]. 金属热处理, 2018, 43(5): 5.
- [4] HUG E, THIBAUT S, CHATEIGNER D, et al. Nitriding aluminum alloys by N-multicharged ions implantation: Correlation between surface strengthening and microstructure modifications [J]. Surface & Coatings Technology, 2012, 206(24): 5028-5035.
- [5] 慕芷涵, 陈炜. 3.5NiCrMoV 钢的离子渗氮[J]. 热处理, 2020, 35(6): 46-48.
- [6] TIAN S. Several dies heat treatment technology improvement and surface modification [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2012, 36(1):1004-2539.
- [7] LEFÈVRE L, BELMONTE T, CZERWIEC T, et al. Measurements of the loss probability of nitrogen atoms versus temperature on aluminium [J]. Materials Science Forum, 1998, 287-288: 397-400.
- [8] MA S G, GUO Y Y, ZHOU Y, et al. Low-temperature plasma nitriding and plasma nitrocarburising of AISI304 stainless steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2011, 36(4): 31-34.
- [9] 李杨, 徐久军, 王亮, 等. 42CrMo 钢表面纳米化对离子渗氮的影响[J]. 中国表面工程, 2010, 23(3): 60-63.
- [10] NAGATSUKA K, NISHIMOTO A, AKAMATSU K. Surface hardening of duplex stainless steel by low temperature active screen plasma nitriding [J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 205: S295-S299.
- [11] FATTAH M, MAHBOUBI F. Comparison of ferritic and austenitic plasma nitriding and nitrocarburizing behavior of AISI4140 low alloy steel [J]. Materials and Design, 2010, 31(8): 3915-3921.

- [12] BELL T. Study of the active screen plasma nitriding [J]. 材料热处理学报, 2004, 25(5): 330-333.
- [13] BELL T. Low temperature plasma nitriding and carburising of austenitic stainless steel for combined wear, corrosion and fatigue properties [C]// Contributions of Surface Engineering to Modern Manufacturing and Remanufacturing-Proceedings of the 3rd International Conference on Surface Engineering. 2002.
- [14] WANG H, WANG B, WANG Z, et al. Optimizing the low-pressure carburizing process of 16Cr3NiWMoVNbE gear steel [J]. Materials Science and Technology, 2019, 35(7): 1218-1227.
- [15] 李景阳, 王文波, 秦林, 等. TD3钛合金离子渗氮层的摩擦磨损性能[J]. 金属热处理, 2021, 46(9): 4.
- [16] LAI Z, BAI C, SUN L, et al. Tribology dependence of annealed a-C: H films in dry air and methanol environments [J]. ACS Omega, 2022, 7(9): 7472-7480.
- [17] 钟厉, 王帅峰, 门昕皓, 等. 38CrMoAl钢钛催渗等离子氮化工艺研究[J]. 表面技术, 2021, 50(12): 8.
- [18] 张号, 李长生, 苟州, 等. 低温离子氮碳共渗温度对AerMet100钢摩擦学性能的影响[J]. 金属热处理, 2021, 46(5): 180-185.
- [19] 李永康, 赵亚晴, 邵明昊, 等. TC4钛合金离子渗氮层的微观结构和性能[J]. 热处理, 2021, 36(5): 5.
- [20] FLIS J, KUCZYNSKA M. Effect of low-temperature plasma nitriding on corrosion of 304l stainless steel in sulfate and chloride solutions [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2004, 151(11): B573.

Effect of Low Temperature Ion Nitriding on Tribological Properties of 16Cr3NiWMoVNb Gear Steel

ZHAO Baoqi¹, GAO Kaixiong^{2*}, ZHANG Bin², WANG Xin³, LIU Guangqiao^{4*}

(1. School of Materials, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Lanzhou Institute of Chemical Physics/Key Laboratory of Material Wear and Protection, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730070, China; 3. AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing, 100084, China; 4. Peili School of Mechanical Engineering, Lanzhou City University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: As one of the main transmission parts in aero-engine, gear is prone to wear and failure in service, which can not fully meet the needs of the next generation aero-engine. Therefore, surface treatment is usually used to improve the wear performance of gear steel. In this study, the 16Cr3NiWMoVNb gear steel was treated by ion nitriding at low temperature. The effects of different voltages on its surface compositions, structures, hardness, tribology and corrosion resistance were systematically analyzed by scanning electron microscope and X-ray electron spectroscopy. The results showed that the interstitial solid solution was formed on the surface of 16Cr3NiWMoVNb gear steel after plasma nitriding. The surface hardness of increased from 269 HV to 325 HV after 900 V nitriding, and its wear rate decreased by nearly 50% compared with that of the original sample. After 850 V nitriding treatment, the corrosion potential increased from -726.18 mV to -410.68 mV, and the corrosion resistance was significantly improved. Thus, low temperature ion nitriding is a potential method to improve the wear and corrosion resistance of the gear steel.

Keywords: 16Cr3NiWMoVNb gear steel; plasma nitriding; surface hardness; friction factor; wear rate; corrosion performance

(学术编辑: 孙文)