

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20171108001

不同渗氮温度下 38CrMoAl 钢低氮氢比无白亮层离子渗氮

陈 尧¹, 纪庆新¹, 魏坤霞^{1,2}, 胡 静^{1,2}

(1. 常州大学 材料科学与工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 常州大学 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: 为提高变速器锥盘使用寿命, 以锥盘用 38CrMoAl 钢为研究材料, 采用不同渗氮温度低氮氢比离子渗氮进行表面改性。利用光学显微镜、X 射线衍射仪、显微硬度计、摩擦磨损试验机对渗氮后的 38CrMoAl 钢显微组织、物相、硬度、渗层脆性及耐磨性进行了测试和分析。结果表明: 38CrMoAl 钢经 520 ℃, $N_2 : H_2 = 1 : 4$ 和 540 ℃, $N_2 : H_2 = 1 : 5$ 离子渗氮后表层无白亮层生成, XRD 分析表明表层无 γ' -Fe₄N 相, 说明离子渗氮时通过改变渗氮温度和氮氢比可以避免白亮层生成, 只形成渗氮扩散层。研究还发现, 渗氮层的脆性显著降低, 韧性和耐磨性提高, 为促进无白亮层离子渗氮技术更好地应用于变速器锥盘的表面改性提供了参考。

关键词: 38CrMoAl 钢; 离子渗氮; 氮氢比; 渗氮温度; 白亮层

中图分类号: TG156.82

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2018)02-0023-06

Plasma Nitriding Without White Layer for 38CrMoAl Steel with Lower Ratio of N_2 to H_2 Under Different Temperature

CHEN Yao¹, JI Qing-xin¹, WEI Kun-xia^{1,2}, HU Jing^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, Jiangsu; 2. National Experimental Demonstration Center for Materials Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, Jiangsu)

Abstract: To enhance the service-life of the variable transmission's cone disc, a type of commonly used material, 38CrMoAl steel, was selected as the testing material. Plasma nitriding with lower ratio of N_2 to H_2 at different temperature was used for surface modification. The treated samples were characterized by optical microscopy (OM), X-ray diffraction (XRD), microhardness tester and wear tester. The results show that no white layer is formed by plasma nitriding at 520 ℃, $N_2 : H_2 = 1 : 4$ and 540 ℃, $N_2 : H_2 = 1 : 5$, and the XRD confirms that there exists no γ' -Fe₄N phase in the surface layer, which means that only nitriding diffusion layer can be formed by changing the temperature and the nitrogen hydrogen ratio. Meanwhile, it is found that the brittleness of the nitriding layer is decreased and the toughness is improved comparing with those in conventional plasma nitriding. Therefore, the research can be taken as important guidelines in surface modification for variable transmission's cone disc.

Keywords: 38CrMoAl steel; plasma nitriding; N_2 to H_2 ratio; nitriding temperature; white layer

收稿日期: 2017-11-08; 修回日期: 2018-03-22

网络出版日期: 2018-03-27 15:32; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20180327.1532.002.html>

通讯作者: 胡静(1966—), 女(汉), 教授, 博士; 研究方向: 金属材料表面改性; **E-mail:** jinghoo@126.com

基金项目: 国家自然科学基金(51774052); 江苏高校品牌专业建设工程资助项目(TAPP); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYZZ16-0246)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51774052), Top-notch Academic Program Projects of Jiangsu Higher Education Institutions (TAPP) and Postgraduate Research & Practice Innovation Program of Jiangsu Province (KYZZ16-0246)

引文格式: 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.

0 引言

锥盘是变速器传动装置的重要零件,改善锥盘性能可以提升变速器整体性能,从而提高汽车操控驾驶舒适性、稳定性和燃油经济性等^[1-2]。工业生产中 38CrMoAl 钢为锥盘常用材料。由于锥盘在工作过程中会受到链条销轴的啮合冲击力与摩擦作用,通常需要对其进行表面改性处理以获得较高的表面硬度、强度和耐磨性^[3-4]。

离子渗氮技术由于污染小、效率高、易操作等优点成为常用的表面改性方法^[5-7]。但是,工厂目前采用普通离子渗氮(540 ℃、 $N_2:H_2=1:3$)方法处理后的 38CrMoAl 锥盘表面有一层硬而脆的白亮层,在与链条销轴的啮合过程中容易开裂进而脱落,降低了变速器的耐久性和可靠性,影响其使用寿命与传动效率^[8]。氮化白亮层主要是由 γ' -Fe₄N 和 ϵ -Fe₂₋₃N 相中的一相或两相组成^[9],有研究报道指出其生成需要一定的热力学条件^[10-11],在较低温度下进行离子渗氮可有效控制白亮层的生成。但是,38CrMoAl 锥盘采用低温离子渗氮后表面硬度较低,渗层较浅。此外,还可通过调节渗氮气氛中氮氢比来控制白亮层的生成。

文中提出通过在锥盘常用渗氮温度下降低氮氢比,使锥盘经离子渗氮后表面无白亮层生成,只形成性能优良的扩散层,改善 38CrMoAl 钢变速器锥盘表面硬度和耐磨性,从而实现提高变速器耐久性和可靠性的显著效果。

1 材料与方法

选用锥盘常用的 38CrMoAl 钢作为试验材料,其各元素的质量分数分别为:0.35%~0.42% C; 1.35%~1.65% Cr; 0.15%~0.25% Mo; 0.30%~0.60% Mn; 0.70%~1.10% Al,余量为 Fe。利用线切割将试样加工成 10 mm×10 mm×5 mm 的大小,再对其进行调质处理(调质工艺:930 ℃油淬,600 ℃回火)。将调质处理后的试样依次用 6.5~61 μm(240~2 000 目)的 SiC 砂纸进行研磨抛光,最后置于无水乙醇中进行超声波清洗,并吹干待用。

采用 LD-8CL 型直流等离子体渗氮炉对制备好的试样进行渗氮处理,将炉压抽至 15 Pa 左右,通入氢气溅射 30 min(有加热、清洁试样表面的作用);当温度升至设定数值时,同时通入一定

比例的 N_2 和 H_2 进行离子渗氮。设定离子渗氮温度分别为 520、540 和 560 ℃, N_2 和 H_2 的比例分别为 1:3、1:4、1:5,保温 6 h,炉压保持 450 Pa。达到保温时间后,关闭渗氮炉,试样炉冷至室温。

试样渗层横截面组织、物相分别采用金相显微镜和 X 射线衍射仪进行观察及分析;利用维氏显微硬度计对横截面硬度梯度进行测量,加载载荷 50 g,加载时间 15 s,测量 5 次后取平均值;分别采用 50 g 和 200 g 的载荷对渗氮后试样进行表面脆性分析;利用摩擦磨损试验机测量试样耐磨性,加载载荷 200 g,转速 200 r/min,对磨时间 30 min,旋转半径 2 mm,选用半径 2 mm 的 GCr15 小钢球作为对磨球,试验在室温下进行。

2 结果与分析

2.1 渗层的显微组织及相结构

图 1 为 38CrMoAl 钢经不同工艺离子渗氮 6 h 后的显微组织图。从图 1(a)(d)(g) 可以看出,38CrMoAl 钢经 $N_2:H_2=1:3$ 不同温度离子渗氮后都会产生白亮层,且其厚度随着渗氮温度的升高而增加。当 $N_2:H_2=1:4$ 、 $N_2:H_2=1:5$ 时,较常规离子渗氮($N_2:H_2=1:3$),38CrMoAl 钢经不同温度离子渗氮后无白亮层或厚度减薄,由此说明可以通过调控渗氮气氛中氮含量来控制白亮层的生成。从图 1(c)(f)(g) 可以看出,当 $N_2:H_2=1:5$ 时,38CrMoAl 钢经 520 ℃和 540 ℃离子渗氮后都无白亮层生成,经 560 ℃离子渗氮后生成较薄白亮层,说明当氮含量一定时,可通过降低渗氮温度控制试样表面白亮层的生成。同时,对比图 1(e)(f) 可以看出,在较高温度下降低氮氢比也可获得无白亮层工艺。

图 2 为 38CrMoAl 钢经不同工艺离子渗氮 6 h 后 XRD 衍射图。从图中可以看出,38CrMoAl 钢离子渗氮后都出现了 CrN 和 AlN 衍射峰。当离子渗氮温度为 540 ℃时,38CrMoAl 钢经 $N_2:H_2=1:3$ 和 $N_2:H_2=1:4$ 渗氮后,渗层中都检测到 γ' -Fe₄N 相的衍射峰。而经 520 ℃, $N_2:H_2=1:4$ 和 540 ℃, $N_2:H_2=1:5$ 离子渗氮后, γ' -Fe₄N 相的衍射峰消失,只形成 α 相和合金渗氮物,即无白亮层生成,只形成了渗氮扩散层。当升高渗氮温度至 560 ℃时,在较低含氮量($N_2:H_2=1:5$)

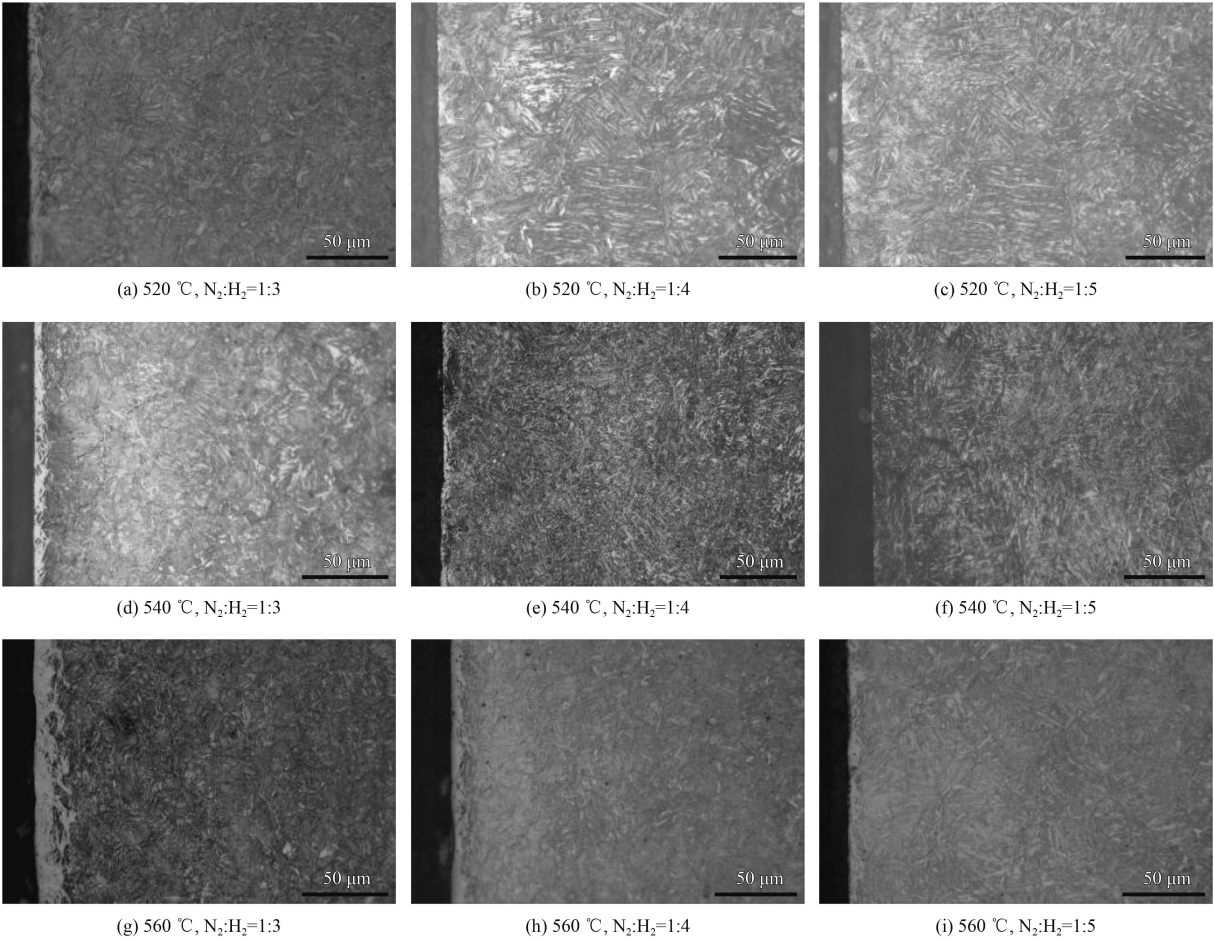


图 1 38CrMoAl 钢经不同工艺参数离子渗氮处理后的显微组织

Fig.1 Cross sectional microstructure of 38CrMoAl steel after plasma nitriding under different conditions

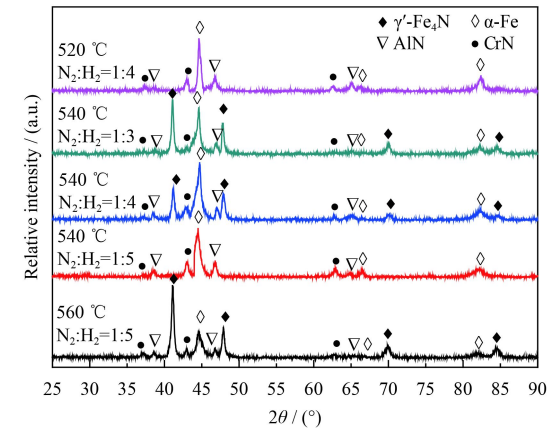


图 2 38CrMoAl 钢经不同工艺参数离子渗氮后 XRD 图谱

Fig.2 XRD patterns of 38CrMoAl steel after plasma nitriding under different conditions

离子渗氮后, γ' -Fe₄N 相衍射峰重新出现, 即试样渗层表面有白亮层生成。

2.2 渗层的硬度

图 3 为 38CrMoAl 钢经不同工艺离子渗氮的

横截面硬度。从图中可以看出, 38CrMoAl 钢经离子渗氮处理后表面硬度明显提高。在所选择的试验条件中, 温度为 540 °C, N₂ : H₂=1 : 5 离子渗氮后, 38CrMoAl 钢表面硬度最高, 这是因为该工艺条件渗氮处理后, 试样表面形成了较厚的扩散层, 扩散层中弥散分布的合金氮化物使其具有较

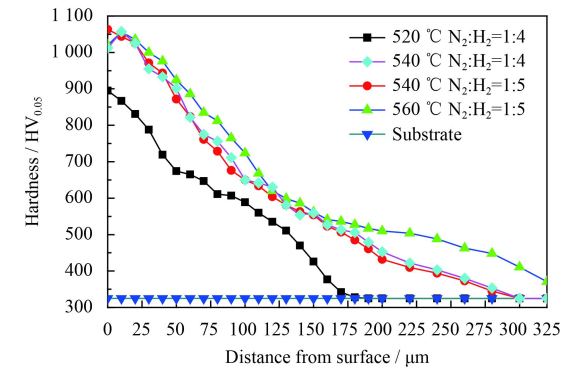


图 3 38CrMoAl 钢经不同工艺参数离子渗氮的横截面硬度

Fig.3 Cross section microhardness of 38CrMoAl steel after plasma nitriding under different conditions

高硬度。而在较高温度 560 ℃ 渗氮处理后试样，因为渗氮温度高引起氮化物聚集长大，降低了渗氮层表面硬度。同时可见，较低温度 520 ℃ 离子渗氮虽然不形成白亮层，但表面硬度和相应层深的截面硬度都明显低于其它温度离子渗氮。由此可知，温度为 540 ℃， $N_2:H_2=1:5$ 离子渗氮后，38CrMoAl 钢在不生成白亮层的前提下能获得较高的表面硬度。

2.3 渗层的脆性

图 4 为 38CrMoAl 钢经不同工艺离子渗氮后

试样表面在不同载荷下压痕的显微形貌。从图中可以看出，38CrMoAl 试样经 540 ℃、 $N_2:H_2=1:4$ 和 560 ℃、 $N_2:H_2=1:5$ 离子渗氮后，在较小的载荷下压痕周围都出现了严重的开裂，且载荷越大压痕开裂越明显。而从图 (b) 可以看出，经 540 ℃、 $N_2:H_2=1:5$ 离子渗氮的试样即使在较大载荷下，压痕周围无裂纹存在。这是因为经 540 ℃、 $N_2:H_2=1:5$ 离子渗氮的试样表面无脆性白亮层生成，表现出更好的韧性，锥盘质量提高。

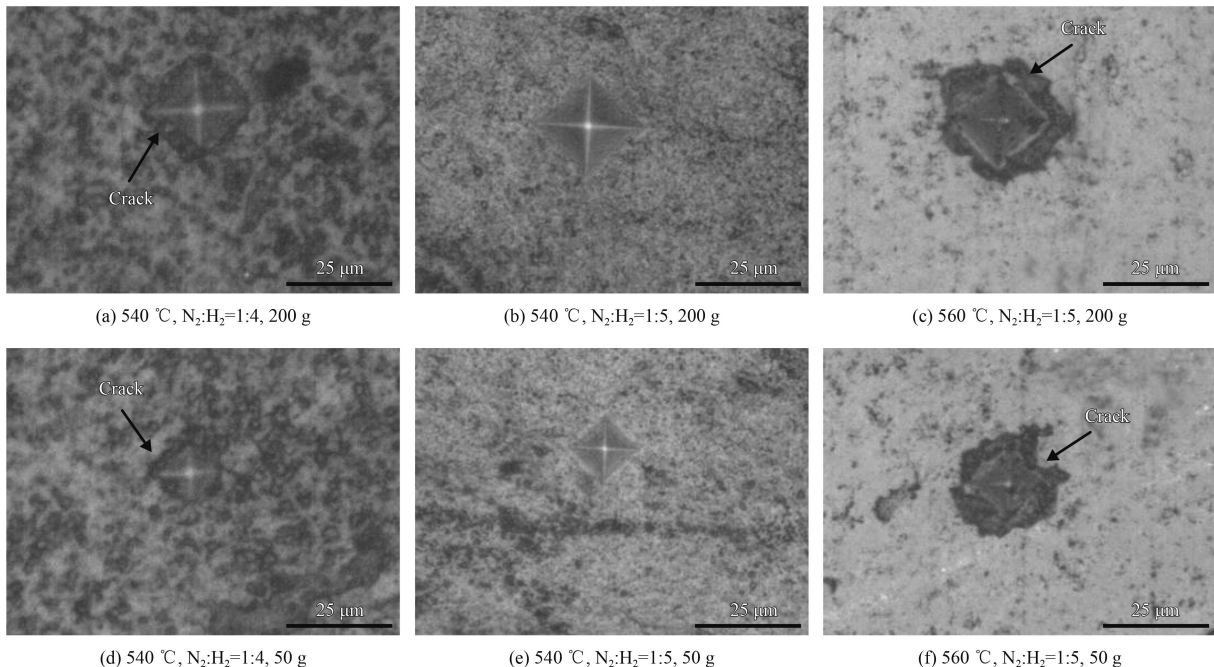


图 4 38CrMoAl 钢经不同工艺参数离子渗氮后在不同载荷下的压痕形貌

Fig.4 Indentation morphologies of 38CrMoAl steel after plasma nitriding under different conditions

2.4 渗层的耐磨性

图 5 和图 6 为 38CrMoAl 钢不同工艺离子渗氮后摩擦因数及对应磨痕表面的显微形貌。从图 5 可以看出，38CrMoAl 钢经 540 ℃、 $N_2:H_2=1:5$ 离子渗氮后平均摩擦因数最小。从图 6(b) 可以看出，试样的磨痕表面几乎没有粘着物且磨损坑较窄，对比图 6(a)(c) 可以看出，试样经 540 ℃、 $N_2:H_2=1:4$ 和 560 ℃、 $N_2:H_2=1:5$ 离子渗氮后试样的磨痕表面出现了大量的粘着物与破碎物，且磨损坑较宽。这是因为经过这两种工艺处理后的试样表面都存在白亮层，白亮层在较大载荷下发生破碎，破碎的白亮层来不及脱落而形成细小的磨粒，加剧磨球和试样之间的磨损。而经

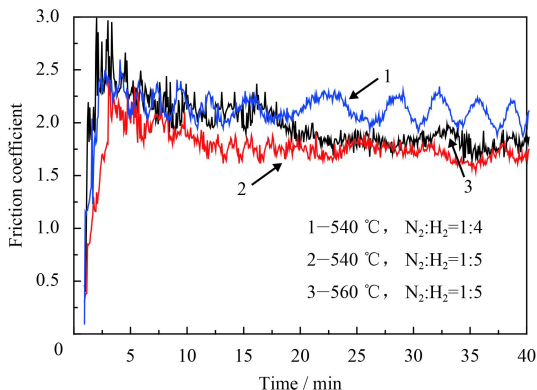


图 5 38CrMoAl 钢经不同工艺参数离子渗氮后的摩擦因数
Fig.5 Friction coefficient of 38CrMoAl steel after plasma nitriding under different conditions

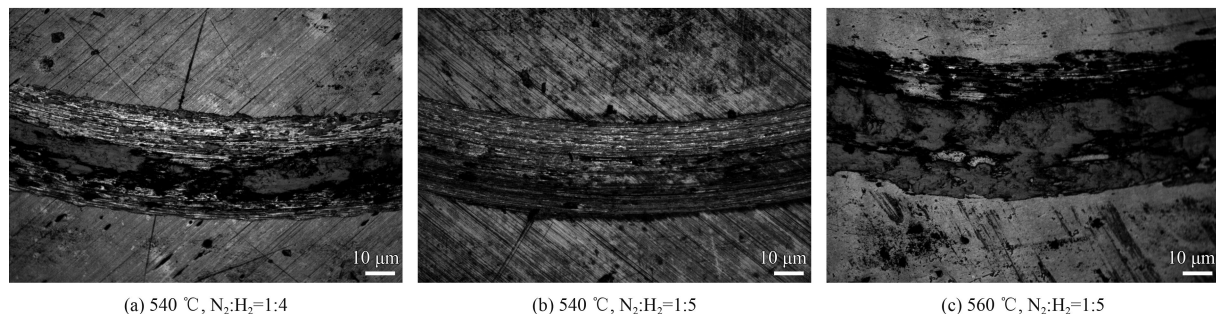


图6 38CrMoAl钢经不同工艺参数离子渗氮后的表面磨损形貌

Fig.6 Micrographs of wear tracks on 38CrMoAl steel after plasma nitriding under different condition

540 °C、 $N_2 : H_2 = 1 : 5$ 离子渗氮后的试样磨痕表面没有粘着物且磨损坑较窄,耐磨性提高。

3 分析与讨论

渗氮材料在特定温度下都存在生成白亮层(γ' -Fe₄N 或 ϵ -Fe₂₋₃N 相)的最低氮势,即临界氮势^[11-12],临界氮势值取决于渗氮温度及基材种类。当材料一定时,渗氮温度越高,形成白亮层的临界氮势越低,当渗氮气氛的氮势超过这个临界值时就会形成白亮层。同时,提高气氛中氢气含量,可以有效还原氮化物,抑制白亮层的形成^[11]。结合图1可知,在渗氮温度为540 °C时,较低氮势($N_2 : H_2 = 1 : 5$)离子渗氮6 h后,无白亮层生成。结合图2,该工艺条件下无 γ' -Fe₄N相和 ϵ -Fe₂₋₃N相生成。

因此,试验和生产中可通过调节渗氮气氛的氮氢比实现氮势的调节,从而可根据产品组织性能设计要求达到对是否需要形成白亮层的有效控制。在较高温度下渗氮,渗氮速率高,但需要降低气氛中含氮量,使其低于该温度下产生白亮层的临界氮势,避免生成白亮层,只形成具有优良性能的扩散层。研究发现,38CrMoAl钢520 °C和540 °C离子渗氮的临界氮氢比分别为1:4和1:5,560 °C的临界氮氢比低于1:5,课题组将进一步开展不同离子渗氮温度对应临界氮氢比的系统性研究。

4 结论

(1) 通过调节渗氮温度或氮氢比可控制白亮层的生成,当渗氮温度或 $N_2 : H_2$ 逐渐降低时,白亮层逐渐消失。

(2) 38CrMoAl钢经不同渗氮温度,不同氮氢比离子渗氮处理后渗层均有CrN相和AlN相生

成,这是扩散层硬度高的主要原因。经540 °C、 $N_2 : H_2 = 1 : 5$ 离子渗氮工艺处理后无 γ' -Fe₄N相,表面不存在白亮层,只形成了渗氮扩散层;

(3) 38CrMoAl钢经渗氮温度为540 °C, $N_2 : H_2 = 1 : 5$ 离子渗氮后能在不生成白亮层的前提下获得较高的表面硬度;在试验载荷下,表面压痕周围均无裂纹出现,具有较好的韧性,且耐磨性得到明显提高。

参考文献

- [1] 吴光强,孙贤安.汽车无级变速器技术和应用的发展综述[J].同济大学学报(自然科学版),2009,37(12):1642-1647.
WU G Q, SUN X A. Development survey of automobile continuously variable transmission technique and application aspects[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2009, 37(12): 1642-1647 (in Chinese).
- [2] 官忠范.液压传动系统[M].北京:机械工业出版社,1996.
GUAN Z F. Hydraulic transmission system[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1996 (in Chinese).
- [3] 田晋跃,于英.车辆静液压传动特性研究[J].农业机械学报,2002,33(4):32-34.
TIAN J Y, YU Y. Research on performance of hydrostatic transmissions of vehicles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(4): 32-34 (in Chinese).
- [4] 刘修骥.车辆传动系统分析[M].北京:国防工业出版社,1998.
LIU X J. Vehicle transmission system analysis[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1998 (in Chinese).
- [5] 浦前帅.新型滚销链式无级变速传动系统啮合机理及动力学特性研究[D].吉林:吉林大学,2013.
PU Q S. Research on meshing mechanism and dynamic characteristics of new rocker-pin joint chain continuously variable transmission(CVT)[D]. Jilin: Jilin University, 2013 (in Chinese).

[6] 齐宝森, 王忠诚, 李玉婕. 化学热处理技术及应用实例[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.

QI B S, WANG Z C, LI Y J. Chemical heat treatment technology and application examples[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014 (in Chinese).

[7] 缪斌, 李景才, 孙泉, 等. 离子氮碳共渗与离子渗氮复合处理对 45 钢组织与性能的影响[J]. 中国表面工程, 2016, 29(4): 30-34.

MIU B, JI J C, SUN Q, et al. Effects of complex treatment of plasma nitrocarburizing and plasma nitriding on microstructure and properties of 45 steel[J]. China Surface Engineering, 2016, 29(4): 30-34 (in Chinese).

[8] 潘邻. 化学热处理应用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

PAN L. Chemical heat treatment and applied technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004 (in Chinese).

[9] 周上祺, 候琼, 任勤. 38CrMoAl 钢离子渗氮微观结构的研究[J]. 金属热处理, 2002, 27(10): 10-12.

ZHOU S Q, HOU Q, REN Q. Microstructure of ion nitriding layer in 38CrMoAl steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2002, 27(10): 10-12 (in Chinese).

[10] MICHALSKI J, BURDYNski K, WACH P. Nitrogen availability of nitriding atmosphere in controlled gas nitriding processes[J]. Archives of Metallurgy and Materials, 2015, 60(2): 747-754.

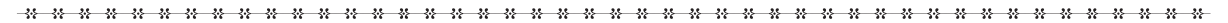
[11] 雷声, 黄己立, 苏广柱. 临界氮势控制及影响因素[J]. 安徽大学学报 (自科版), 2004, 28(2): 54-58.

LEI S, HUANG J L, SU G Z. The control of critical nitrogen potential and its influencing factors[J]. Journal of Anhui University Natural Science Edition, 2004, 28(2): 54-58 (in Chinese).

[12] 左时燕, 周伟, 况勋, 等. 模具氮化及软氮化白亮层的控制[J]. 模具制造, 2015, 15(1): 76-80.

ZUO S Y, ZHOU W, KUANG X, et al. Control die nitriding and soft nitriding white bright layer[J]. Die & Mould Manufacture, 2015, 15(1): 76-80 (in Chinese).

(责任编辑: 王文宇)



• 本刊讯 •

2018 中国再制造大会暨再制造展览会将在广州举行

2018 年 10 月 25—27 日, 由再制造技术国家重点实验室和中国机械工程学会再制造工程分会共同主办、京津冀再制造产业技术研究院承办的 2018 中国再制造大会暨再制造展览会将在广州召开。

此次会议作为国内再制造领域的品牌学术会议, 以“面向中国制造 2025 的高端智能再制造创新与发展”为主旨, 将邀请国家发改委、工信部、科技部、国家自然科学基金委等领导参会解读再制造产业发展的最新政策法规; 邀请国内再制造领域权威专家、再制造企业代表交流再制造领域最新研究成果, 探讨再制造领域创新热点问题, 分析再制造产业发展形势。会议同时将组织中国再制造展览会, 展示最新技术、装备与产品, 搭建再制造产业发展的交流平台。

会议将围绕“再制造政策法规与市场认知、再制造关键技术与质量控制、传统领域再制造产业发展及高端智能再制造产业发展等主题开展交流及征稿。会议出版论文集, 《中国表面工程》等 EI 杂志选取参会代表的优秀论文进行刊登。摘要截止日期: 2018 年 4 月 31 日; 全文截止日期: 2018 年 8 月 15 日。正式代表注册费为 1800 元, 学生代表 1200 元。

(本刊编辑部 供稿)