

文章编号:1008-1542(2019)04-0344-07

doi:10.7535/hbkd.2019yx04008

中合金铬钼渗氮轴承钢旋转弯曲疲劳性能研究

尉念伦^{1,2}, 孙世清^{1,2}

(1.河北科技大学材料科学与工程学院,河北石家庄 050018;2.河北省材料近净成形技术重点实验室,河北石家庄 050018)

摘要:为了研究化学热处理对大型轴承疲劳性能的影响规律,对中合金铬钼轴承钢进行离子渗氮处理和旋转弯曲疲劳(RBF)试验。以双真空熔炼(VIM+VAR)的中合金铬钼轴承钢作为实验材料,分析经调质处理(930℃+550℃)后的组织和经离子渗氮后的相组成,分析经过旋转弯曲疲劳试验后断口形貌及裂纹萌生机理,构建表面缺陷与疲劳断裂机理之间的关系。实验结果表明:实验钢经过调质处理后组织为回火索氏体,主要析出M₂C型和M₃C型碳化物;渗氮后渗氮层中化合物层主要由CrN和Fe₄N(γ' 相)组成,厚度约为16μm,其不利于基体的疲劳性能提升;实验钢渗氮后的RBF极限为947MPa,较未渗氮试样旋转弯曲疲劳极限提升19.4%;渗氮层中化合物层始裂及非金属夹杂物始裂为主要的两种起裂方式,化合物层和表层粗糙度对渗氮后实验钢的疲劳寿命影响较大。研究结果可为提高中合金铬钼轴承钢的疲劳性能提供实验及理论依据。

关键词:黑色金属及其合金;渗氮轴承钢;旋转弯曲疲劳;起裂;表面粗糙度

中图分类号:TG156.8⁺2 文献标志码:A

Rotating bending fatigue properties of medium alloy Cr and Mo nitriding bearing steel

YU Nianlun^{1,2}, SUN Shiqing^{1,2}

(1.School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China; 2. Hebei Key Laboratory of Material Near-Net Forming Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

Abstract: In order to study the influence of chemical heat treatment on the fatigue performance of large bearings, plasma nitriding and rotating bending fatigue test are conducted for the medium alloy Cr and Mo nitriding bearing steel. The middle alloy Cr and Mo bearing steel with double vacuum melting is used as the experimental material to analysis the microstructure after hardening and tempering (930℃+550℃) and the phase after plasma nitriding. The fatigue morphology and the mechanism of crack initiation after the test are analyzed. The relationship between surface defects and fatigue fracture mechanism is established. The results of experimental show that the microstructure of the test steel after hardening and tempering is tempered sorbite, M₂C and M₃C is the mainly precipitations. After nitriding, the compound layers in the nitriding layers are mainly composed of γ' phase (Fe₄N) and CrN and the thickness is about 16 μm, which is not conducive to improve the performance of

收稿日期:2019-01-10;修回日期:2019-03-22;责任编辑:陈书欣

基金项目:国家自然科学基金(51774108);河北科技大学校立基金(2016PT24)

第一作者简介:尉念伦(1995—),男,河北石家庄人,硕士研究生,主要从事金属材料工程方面的研究。

通信作者:孙世清教授。E-mail:hbkdssq@126.com

尉念伦,孙世清.中合金铬钼渗氮轴承钢旋转弯曲疲劳性能研究[J].河北科技大学学报,2019,40(4):344-350.

YU Nianlun, SUN Shiqing. Rotating bending fatigue properties of medium alloy Cr and Mo nitriding bearing steel[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2019, 40(4): 344-350.

matrix fatigue. The RBF limit of the experimental steel after nitriding is 947 MPa, which is 19.4% higher than the RBF limit of the non-nitriding sample. The cracking of compound layer in the nitrided layer and the cracking of non-metallic inclusions are the two main ways of cracking. The compound layer and surface roughness have great influence on the fatigue life of test steel after nitriding. The results provide experimental and theoretical basis for improving the fatigue performance of medium alloy Cr and Mo nitriding bearing steel.

Keywords: black metal and its alloys seepage; nitrided bearing steel; rotating bending fatigue; cracking; surface roughness

轴承作为机械设备中重要的零部件,普遍应用在交通运输、航空航天、机械制备等领域^[1-3]。轴承的失效形式有很多种,经统计发现主要的失效形式为疲劳失效^[4-5]。RBF 试验是指试样承受弯矩的同时旋转一定周期 N 后断裂失效。实验证明,RBF 性能能够很好地反映出材料的疲劳性能^[6-8]。由于轴承的工作条件比较恶劣,其表面易受到周期性冲击,加之与轴的相互摩擦以及受到起润滑作用的介质腐蚀等,因此生产出来的轴承表面应兼有较高的抗磨损性、高硬度、良好的耐蚀性和抗疲劳性等。研究人员发现,通过渗氮技术能够很好地提高轴承钢的耐蚀性、抗疲劳性^[9-13]。

中合金轴承钢大多应用在轴承制造中的原因,是其表面经过渗氮后具备优异的耐磨性、抗疲劳性,基体内部有良好的强韧性匹配,并且价格低廉^[14-18]。中合金轴承钢渗氮后还可以通过冷处理来提高材料性能^[19]。本文主要研究中合金铬钼轴承钢渗氮后的旋转弯曲疲劳性能,观察疲劳断口和分析微裂纹萌生机理,并建立表面缺陷与疲劳断裂机理之间的关系。

1 实验材料及方法

采用经过 VIM+VAR 的中合金铬钼轴承钢为实验原料,其化学成分如表 1 所示。

表 1 中合金铬钼轴承钢的化学成分

Tab.1 Chemical composition of the the middle alloy Cr and Mo bearing steel

							%	
$w(C)$	$w(Mo)$	$w(Cr)$	$w(V)$	$w(Si)$	$w(Mn)$	$w(S)$	$w(P)$	
0.37	1.2	3.4	0.34	0.31	0.59	≤ 0.005	≤ 0.008	

取 $\Phi 15$ mm 棒料,加工为 RBF 试样坯料,进行调质处理,工艺为 $930\text{ }^{\circ}\text{C} \times 1\text{ h} + \text{OQ}$ (油淬) + $550\text{ }^{\circ}\text{C} \times 2\text{ h} + \text{AC}$ (空冷)。之后将试样精加工为规定的圆柱形试样,截面最小为 $\Phi 6$ mm。采用 IPSEN 真空离子渗氮炉进行渗氮, NH_3 作为渗氮剂,渗氮工艺为四段式气体渗氮,第 1 步先在 $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保温 13 h;第 2 步进行强渗,将氮势降低为 2,保温 15 h;第 3 步继续降低氮势,保温 10 h,此步目的是防止氮势过高、渗氮时间过长,在渗氮层内部出现粗大的脉状组织;第 4 步进行退氮处理,时间为 13 h,其目的与第 3 步相同。采用 PQ1-6 型悬臂梁型 RBF Test 机,四点加载,转速 $V=5\ 000\text{ r/min}$,应力比 $R=-1$ 。试样断裂或循环周次 $N=10^7$ 即终止试验。利用升降法绘制疲劳升降图、成组法绘制 S-N 曲线。利用扫描电镜(SEM)观察断口形貌,利用 OLS4100 型激光共聚焦显微镜(LEXT)测量机加工表面沟槽深度,对裂纹萌生机理进行分析并构建表面缺陷同疲劳破坏机理之间的关系。

2 实验结果及分析

2.1 实验钢的组织与性能

经调质处理后实验钢组织为回火索氏体,呈板条状。实验钢析出碳化物的强化相主要为 M_2C 和 M_3C ,经过透射标定后,确定实验钢中长条状碳化物为 M_3C ,其结果如图 1 所示。

经过渗氮处理后,测得有效渗氮层深度为 $400\ \mu\text{m}$,硬度分布较为均匀,化合物层的深度约为 $16\ \mu\text{m}$,主要由 CrN 和 Fe_4N (γ' 相)组成,如图 2 所示。利用显微硬度计测得化合物层硬度高达 $1\ 000\text{ HV}$ 。由于化合物层硬度较高,当受到外加压应力或冲击载荷时容易开裂,因此在生产中均要去掉化合物层。

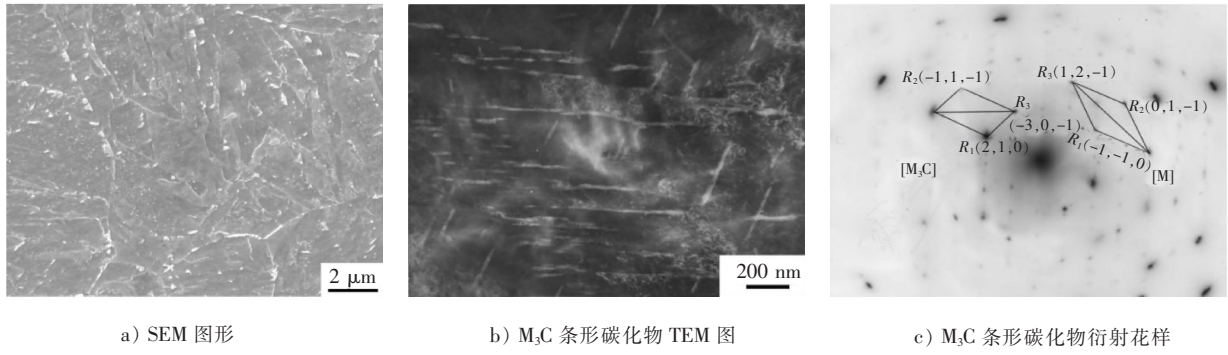


图 1 调质处理后的组织

Fig.1 Microstructure of the steel after conditioning treatment

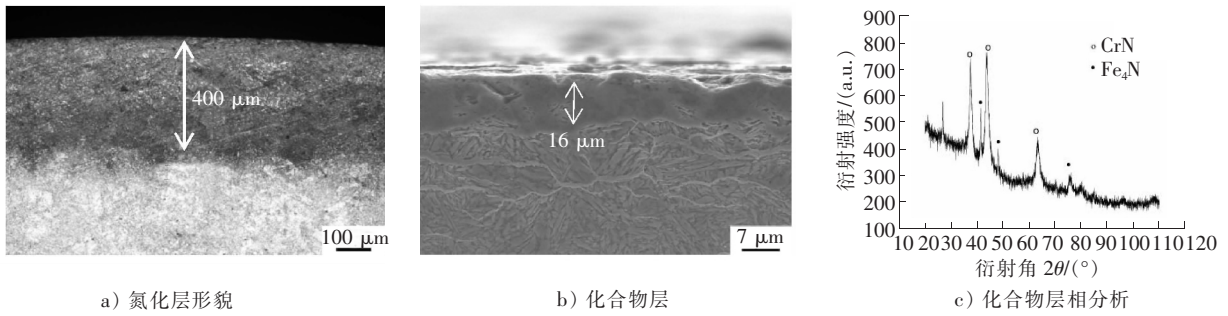


图 2 氮化层及化合物层形貌和相

Fig.2 Morphology and phase of nitride layers and compound layers

2.2 实验钢的疲劳升降图及 S-N 曲线

疲劳升降图如图 3 a) 所示, S-N 曲线如图 3 b) 所示。终止循环次数为 10^7 周次, 应力增量 $\Delta\sigma$ 为 40 MPa, 实验钢在 $>1\ 000$ MPa 时全部断裂。通过观察 S-N 曲线发现渗氮后试样分布梯度广, 离散度较大, 其置信度为 50%, 测得中合金铬钼轴承钢渗氮后的 RBF 极限为 947 MPa。按照同样的测试方法测得未渗氮的中合金铬钼轴承钢的 RBF 极限为 793 MPa, 通过对比可知, 经过渗氮处理后试样的 RBF 极限增加了 154 MPa, 提升了 19.4%。结果表明, 中合金铬钼轴承钢的 RBF 极限可通过表面渗氮提升。

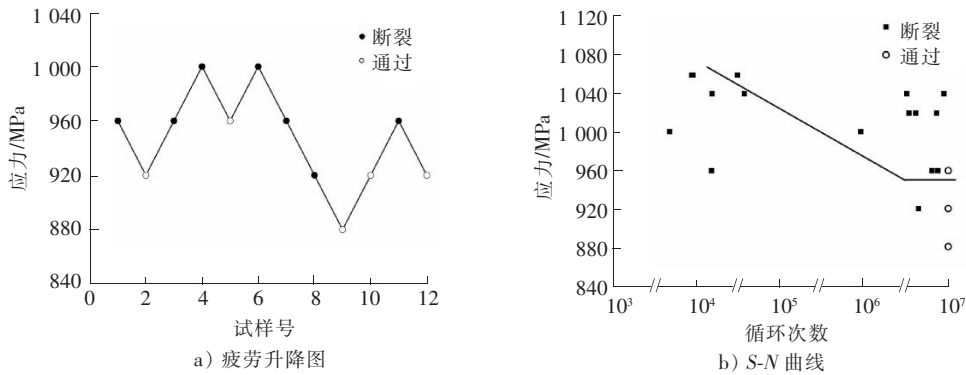


图 3 中合金铬钼渗氮轴承钢旋弯疲劳升降图和 S-N 曲线

Fig.3 Fatigue up-down graph and S-N curve of medium alloy Cr and Mo nitriding bearing steel

2.3 旋转弯曲疲劳断口观察

经过 RBF 试验后, 观察断口可知在试样的表层与基体内部的非金属夹杂物处均存在疲劳裂纹起裂, 且疲劳断口均由 3 个区域组成, 分别为 I 区(疲劳源区)、II 区(裂纹扩展区)和 III 区(瞬断区), 如图 4 所示。观

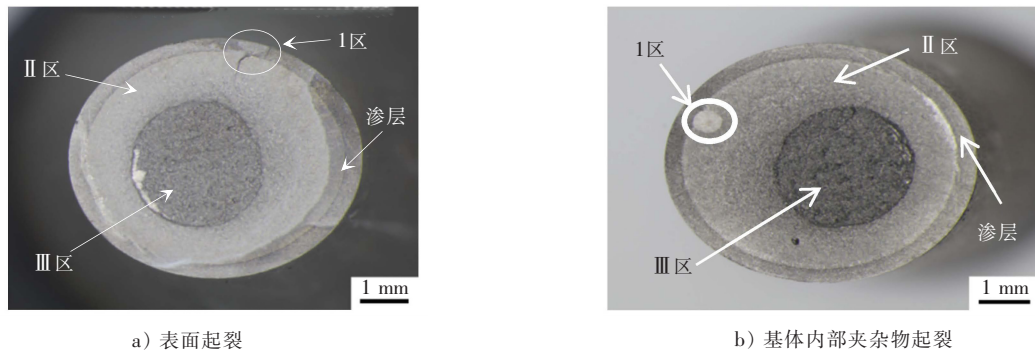


图 4 旋转弯曲疲劳断口形貌

Fig.4 Morphology of rotational fatigue fracture

察 2 个断口发现Ⅲ区均位于断口心部且面积较小,这表明试样在整个疲劳失效过程中,裂纹的萌生和扩展阶段占据绝大部分时间,裂纹一旦成核即沿渗氮层进行扩展,形成环形裂纹后向内扩展,因此Ⅲ区均在断口心部。

经统计,断裂试样发现表面起裂试样与夹杂物起裂试样分别占断裂试样的 47.3%和 52.7%,在夹杂物起裂试样中,基体中非金属夹杂物起裂约占 12.5%,如图 5 所示。通过能谱分析可知基体内部的非金属夹杂物为圆形的 Ca-Si-Al 复合夹杂物。

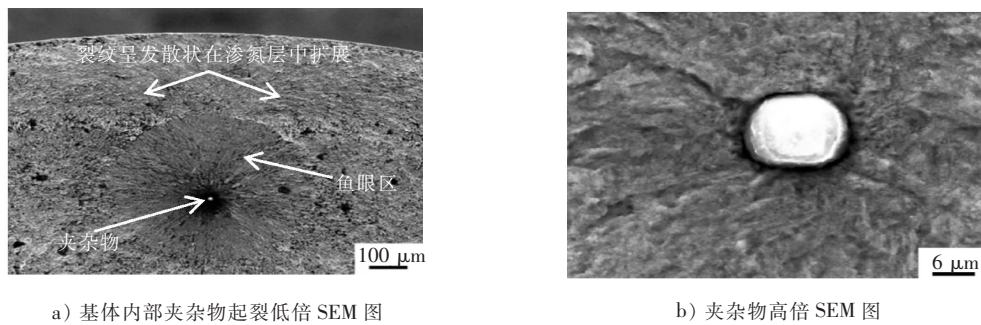


图 5 基体内部夹杂物形貌

Fig.5 Morphology of inclusions in the matrix

观察 $N > 10^6$ 试样的断口发现,其渗氮层表面比较平整,在基体内部没有出现鱼眼区。通过高倍 SEM 观察发现,在渗氮层中出现夹杂物,经过能谱分析确定夹杂物为 Cr-Ti 复合夹杂物和 Ca-Si-Al 复合夹杂物,并且在夹杂物周围也没有出现鱼眼区,如图 6 所示。推测其起裂方式为渗氮层中非金属夹杂物起裂。

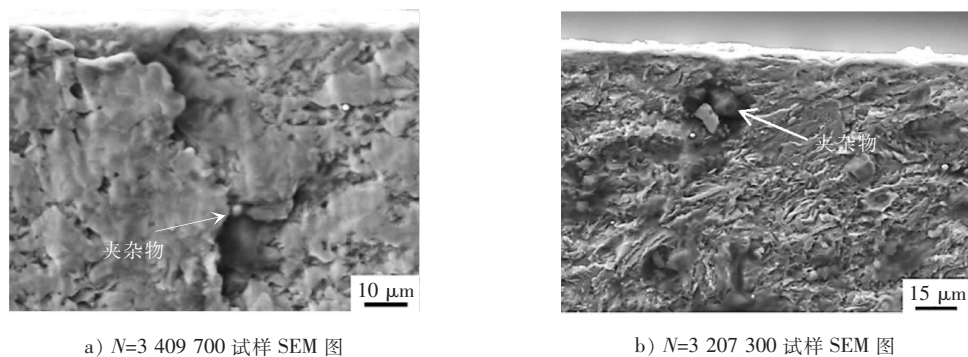


图 6 渗氮层中夹杂物形貌

Fig.6 Morphology of inclusions in nitriding layer

当出现基体内部夹杂物起裂时,裂纹的萌生及扩展速率很小,原因是渗氮层的硬度大以及渗氮层附加残余压应力会抑制其扩展。裂纹尖端扩展速率与 N 成正比,当裂纹扩展到渗氮层时,由于渗层的硬度极大,塑性相对较差,会导致裂纹沿着渗氮层环呈发散状扩展,如图 5 a) 所示。

观察表面起裂的试样发现存在两种起裂方式,表面化合物层起裂和表面缺陷起裂,如图 7 所示。这两种起裂的 N 均小于基体内部夹杂物起裂试样。其中表面缺陷起裂的 N 不足 10^5 ,这说明表面缺陷对于试样的疲劳寿命影响较大。

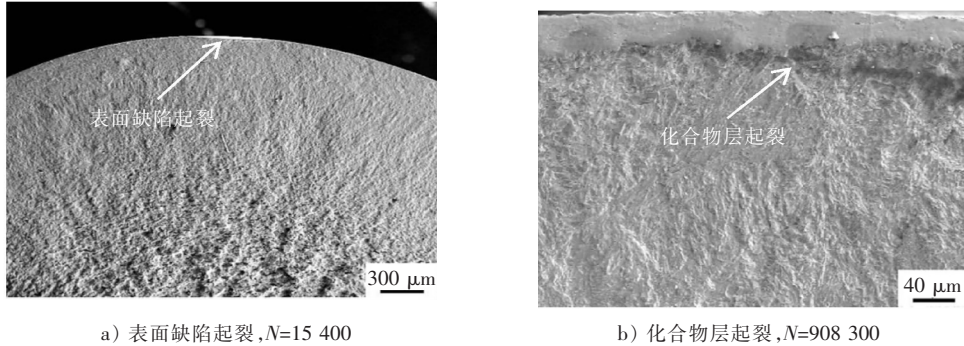


图 7 表面起裂 SEM 形貌
Fig.7 SEM morphology of surface cracking

2.4 疲劳裂纹萌生

中合金铬钼渗氮轴承钢 RBF 试样在进行精加工时,一方面会出现表面粗糙度过大的状况,另一方面会出现缺口和沟槽。这两种情况都会对试样疲劳破坏产生影响。文献[20]在夹杂物面积参数 $\sqrt{area_s}$ 中引入了表面缺口和沟槽,以此来显示表面粗糙度对高周疲劳的影响。文献[21]在 BF, R10, R16, R19 四种不同粗糙度下对 JIS-SNCM439 高强钢的疲劳极限进行测试发现,当表面沟槽平均深度 a 等于平均粗糙度 R_a 时有较小误差。利用 LEXT 测得未经过 RBF 试验的渗氮轴承钢表面沟槽平均深度 $a = R_a = 0.476 \mu\text{m}$,平均峰间距 $2b = 18.057 \mu\text{m}$,如图 8 所示。

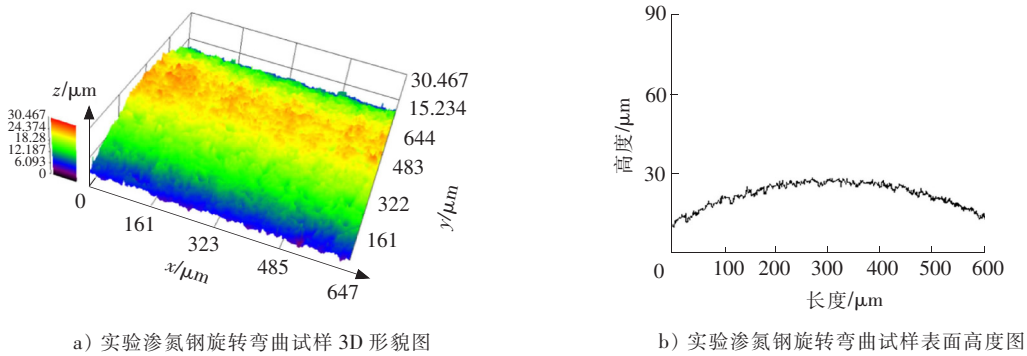


图 8 中合金铬钼渗氮轴承钢旋转弯曲试样表面形貌
Fig.8 Surface topography of medium alloy Cr and Mo nitriding bearing steel

根据等效缺陷尺寸 $\sqrt{area_s}$ 得出

$$\frac{\sqrt{area_s}}{2b} = 2.97\left(\frac{a}{2b}\right) - 3.51\left(\frac{a}{2b}\right)^2 - 9.74\left(\frac{a}{2b}\right)^3, \left(\frac{a}{2b}\right) \leq 0.195,$$

先计算出 $a/2b = 0.026$, 然后得到 $\frac{\sqrt{area_s}}{2b} = 0.075$, 最终 $\sqrt{area_s} = 1.35 \mu\text{m}$ 。由渗氮层表面起裂临界应力强度因子计算公式:

$$\Delta K_{(粗糙度)} = 0.65\sigma \times \sqrt{\pi \times \sqrt{area_s}}。$$

得到 $\Delta K = 1.34 \times 10^{-3} \sigma$ (σ 单位为 MPa, $\sqrt{area_s}$ 单位为 m, ΔK 单位为 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$)。根据 S-N 曲线可知,

此次试验施加应力幅为 960, 1 000, 1 019, 1 039, 1 058 MPa 五级应力梯度, 分别计算出 ΔK , 如表 2 所示。

表 2 不同应力梯度下表面粗糙度起裂所需最小应力强度因子

Tab.2 Minimum stress intensity factor required for surface roughness cracking under different stress gradients

应力/MPa	960	1 000	1 019	1 039	1 058
$\Delta K / (\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$	1.29	1.34	1.37	1.39	1.42

利用相同的测试方法测得未渗氮试样的表面沟槽平均深度 $a = R_a = 0.558 \mu\text{m} > 0.476 \mu\text{m}$ 。经分析后发现, 当未渗氮旋转弯曲试样的加载应力明显小于渗氮试样时, 其 ΔK 均大于渗氮试样。由相分析图谱可知, 渗氮试样化合物层为 $\text{CrN} + \text{Fe}_4\text{N}$, 其硬度高达 1 000 HV。由于化合物层的杨氏模量和扩散层的杨氏模量不同, 当渗氮试样处于循环应力下时, 裂纹很容易在表面化合物层萌生, 且试样 ΔK 较小, 极易超过临界值而使裂纹迅速扩展到渗氮层, 因此渗氮试样寿命跨度较大, 故生产中应尽量去除化合物层以提高轴承的使用寿命。

3 结 语

1) 中合金铬钼轴承钢经过调质处理后组织为板条状回火索氏体, 析出的长条状碳化物为 M_3C 。

2) 中合金铬钼轴承钢渗氮前旋转弯曲疲劳极限为 793 MPa, 渗氮后高达 947 MPa, 提升了 19.4%。表面渗氮处理可显著提高中合金铬钼轴承钢的疲劳性能。

3) 渗氮层表面起裂临界应力强度因子 $\Delta K = 1.34 \times 10^{-3} \sigma$, 当化合物层存在时, 由于其较高的硬度导致试样疲劳寿命下降, 因此在进行表面渗氮处理时应控制化合物层的形成或在机加工过程中去除化合物层, 将有利于试样疲劳寿命的提高。

4) 对于中合金铬钼渗氮轴承钢中非金属夹杂物引起的失效问题研究不足, 以后主要对该方面展开研究。另外由于渗氮后会出现化合物层影响疲劳性能, 需探索新的渗氮工艺来减薄甚至消除化合物层。

参考文献/References:

- [1] WANG Liqin, LI Yunfeng. Boundary for aviation bearing accelerated life test based on quasi-dynamic analysis[J]. Tribology International, 2017, 116: 414-421.
- [2] DING Jianming. Fault detection of a wheelset bearing in a high-speed train using the shock-response convolutional sparse-coding technique [J]. Measurement, 2018, 117: 108-124.
- [3] XU Haifeng, YU Feng, WANG Chang, et al. Comparison of microstructure and property of high chromium bearing steel with and without nitrogen addition[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2017, 24(2): 206-213.
- [4] 车晓健, 杨卯生, 唐海燕, 等. 高性能 GCr15 轴承钢中夹杂物控制与疲劳性能[J]. 钢铁, 2018, 53(5): 76-85.
CHE Xiaojian, YANG Maosheng, TANG Haiyan, et al. Inclusion control and fatigue performance in high performance GCr15 bearing steel[J]. Iron and Steel, 2018, 53(5): 76-85.
- [5] 李守新. 高强度钢超高周疲劳性能[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.
- [6] GUAN Jian, WANG Liqin, ZHANG Zhiqiang, et al. Fatigue crack nucleation and propagation at clustered metallic carbides in M50 bearing steel[J]. Tribology International, 2018, 119: 165-174.
- [7] HANNEMANN R, KÖSTER P, SANDER M. Investigations on crack propagation in wheelset axles under rotating bending and mixed mode loading[J]. Procedia Structural Integrity, 2017, 5: 861-868.
- [8] 李林涛, 任耘, 杨卯生. 0.30C-Cr-W 渗氮轴承钢的高周疲劳性能研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(16): 35-38.
LI Lintao, REN Yun, YANG Maosheng. Study on high-cycle fatigue properties of 0.30C-Cr-W nitrided bearing steel[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(16): 35-38.
- [9] 邢海生. 奥氏体不锈钢的低温液体渗氮耐蚀强化工艺研究[D]. 北京: 机械科学研究总院, 2011.
XING Haisheng. Research on Corrosion-resistant Hardening Process Under Liquid Nitriding for Austenitic Stainless Steel[D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology, 2011.
- [10] 杨剑群, 刘勇, 叶铸玉, 等. 2Cr13 钢的表面气体渗氮处理[J]. 金属热处理, 2009, 34(7): 16-18.
YANG Jianqun, LIU Yong, YE Zhuyu, et al. Surface nitriding for 2Cr13 steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2009, 34(7): 16-18.

- [11] 龙发进, 周祎, 康光宇, 等. 离子渗氮新技术的研究现状[J]. 热加工工艺, 2007, 36(6):61-64.
LONG Fajin, ZHOU Yi, KANG Guangyu, et al. Review of recently developed plasma nitriding technologies[J]. Metal Hotworking Technology, 2007, 36(6):61-64.
- [12] 陈立奇, 何如俊, 朱文明. 离子渗氮技术简介[J]. 热处理技术与装备, 2011, 32(3):12-14.
CHEN Liqi, HE Rujun, ZHU Wenming. Brief introduction of plasma nitriding[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2011, 32(3):12-14.
- [13] ISSARTEL C, BUSSCAIL H, CAUDRON E, et al. Influence of nitridation on the oxidation of a 304 steel at 800 °C [J]. Corrosion Science, 2004, 46(9):2191-2201.
- [14] 房双强, 陈茂涛, 张进. 调质预处理对 32Cr3Mo1V 钢渗氮层的影响[J]. 金属热处理, 2016, 41(4):146-149.
FANG Shuangqiang, CHEN Maotao, ZHANG Jin. Effect of quenching and tempering process on 32Cr3Mo1V steel nitriding layer[J]. Heat Treatment of Metals, 2016, 41(4): 146-149.
- [15] 陈尧, 宋磊, 张宸恺, 等. 离子渗氮工艺对液压柱塞用 38CrMoAl 钢组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2016, 41(11): 190-193.
CHENG Yao, SONG Lei, ZHANG Chenkai, et al. Effect of plasma nitriding process on microstructure and properties of 38CrMoAl steel for hydraulic plunger[J]. Heat Treatment of Metals, 2016, 41(11): 190-193.
- [16] 田野, 王毛球, 李金许, 等. 新型渗氮钢的力学性能及渗氮特性[J]. 材料热处理学报, 2008, 29(3):122-125.
TIAN Ye, WANG Maoqiu, LI Jinxu, et al. Mechanical properties and nitriding characteristics of novel nitriding steels[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2008, 29(3):122-125.
- [17] 李昭昆, 雷建中, 徐海峰, 等. 国内外轴承钢的现状与发展趋势[J]. 钢铁研究学报, 2016, 28(3):1-12.
LI Zhaokun, LEI Jianzhong, XU Haifeng, et al. Current status and development trend of bearing steel in China and abroad[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2016, 28(3):1-12.
- [18] WANG Bo, LIU Bin, ZHANG Xiaodan, 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(1):89-95.
- [19] 孙世清, 梁文瑞, 张楠. 9Cr5MoV 钢的磁性分析与深冷处理[J]. 河北科技大学学报, 2013, 34(1):75-79.
SUN Shiqing, LIANG Wenrui, ZHANG Nan. Magnetic analysis and deep cryogenic treatment of 9Cr5MoV steel[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2013, 34(1):75-79.
- [20] MURAKAMI Y. Effects of small defects and nonmetallic inclusions on the fatigue strength of metals[J]. JSME International Journal, 1989, 32(2):167-180.
- [21] ITOGA H, TOKAJI K, NAKAJIMA M, et al. Effect of surface roughness on step-wise S-N characteristics in high strength steel[J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25(5):379-385.