

文章编号: 1001-4888(2017)01-0063-07

气体渗氮对中碳车轴钢疲劳性能的影响^{*}

宫昱滨, 鲁连涛, 张远彬

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 四川成都 610031)

摘要: 为了评估气体渗氮对实际车轴疲劳性能的影响, 对经气体渗氮处理的中碳车轴钢小试样进行了轴向加载疲劳试验。结果表明, 与未处理试样相比, 去除氧化物层及去除氮化物层的渗氮试样疲劳强度逐级提高。未处理试样和去除氧化物层的渗氮试样发生表面破坏, 去除氮化物层的渗氮试样发生内部夹杂破坏。分析阐明了渗氮处理的材料表面层对疲劳性能的影响。另外, 通过与中碳车轴钢渗氮小试样旋转弯曲疲劳试验结果的比较与分析表明, 小试样轴向加载疲劳试验的方法用于评估实际车轴疲劳性能更加准确。

关键词: 中碳车轴钢; 气体渗氮; 车轴; 疲劳强度; 内部夹杂

中图分类号: TG154

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-16-307

0 引言

渗氮处理是在一定温度和一定介质下使氮原子渗入工件表层的化学热处理工艺, 钢铁工件经渗氮处理后, 在工件表面能形成高硬度、高强度、耐磨损和耐腐蚀的表面硬化层, 同时心部保持良好的韧性。由于渗氮工艺还能赋予工件表面残余压应力, 渗氮表面处理工艺也是提高材料抗疲劳性能的一种有效手段^[1]。中碳车轴钢有着良好的导热性^[2]、疲劳缺口敏感度低^[3]和低成本等优点, 被广泛应用于铁路机车车轴。随着我国高速铁路不断发展, 对车轴的抗疲劳性能要求也越来越高^[4-6]。然而, 渗氮处理对车轴疲劳性能影响方面的研究还鲜有报道。

本文作者^[7]通过旋转弯曲试验的方法以直径为 4mm 的小试样研究了渗氮处理工艺对中碳车轴钢 LZ50 疲劳性能的影响, 研究结果表明, 经过渗氮处理的试样疲劳强度得到了提高。但是, 未经处理的试样得到的疲劳强度, 与全尺寸车轴实体试验得到车轴钢的疲劳强度相比提高了 120%^[8]。造成上述结果的原因是试验的尺寸效应。实际车轴的直径大约为 190~200mm, 在 100MPa 弯曲应力下, 应力梯度约为 1MPa/mm; 而直径为 4mm 的小试样, 在 100MPa 弯曲应力下, 应力梯度约为 50MPa/mm。渗氮小试样在旋转弯曲载荷下, 大部分应力都施加在了经强化的表面上。有文献报道^[9], 由旋转弯曲小试样疲劳试验测得 30NiCrMoV12 车轴钢不会发生内部夹杂破坏的现象, 而实际车轴却存在内部破坏的现象。显然, 尺寸效应还对疲劳破坏机制有影响。因此, 旋转弯曲小试样的试验结果不能直接为铁路车轴的表面处理提供参考。但是, 对全尺寸车轴进行疲劳强度试验的成本非常高。

列车服役过程中, 车轴表层材料不断被拉压, 可以近似成受到轴向拉压载荷。轴向拉压疲劳试验的尺寸效应远小于旋转弯曲疲劳试验, 据文献^[10]报道, 轴向拉压疲劳试验试样的直径大于 8mm 尺寸效应便可以忽略。因此, 本文以小试样轴向拉压疲劳试验的研究方法对 LZ50 中碳车轴钢渗氮处理试样和未处理试样的疲劳性能进行了测试, 分析阐明了疲劳试验的尺寸效应以及渗氮层对疲劳寿命的影响。

^{*} 收稿日期: 2016-08-15; 修回日期: 2016-09-20

通讯作者: 鲁连涛(1965—), 男, 研究员。主要研究方向: 机械结构的损伤、疲劳与断裂、摩擦与磨损。Email: luliantao@swjtu.cn

1 试验材料与试验方法

1.1 试验材料

试验材料为 LZ50 中碳车轴钢,化学成分如表 1 所示,力学性能如表 2 所示。车轴轴坯经 860℃ 和 800℃ 两次正火和 570℃ 回火处理。材料的金相组织如图 1 所示,由珠光体和铁素体组成。疲劳试样取自轴坯表层材料,即车轴发生疲劳失效的部分,如图 2 所示。加工成如图 3 所示的疲劳试样,最小断面的直径为 8mm。

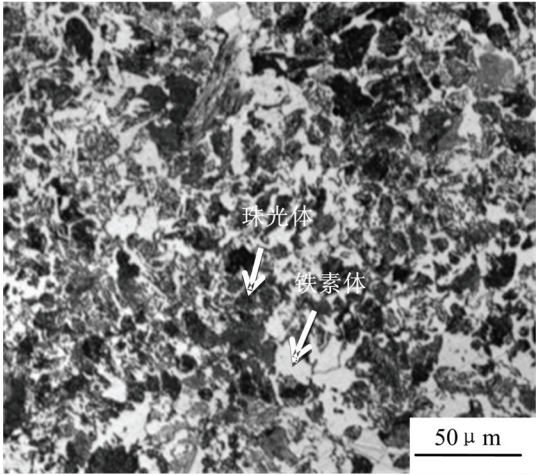


图 1 LZ50 金相组织

Fig. 1 Microstructure observations of LZ50

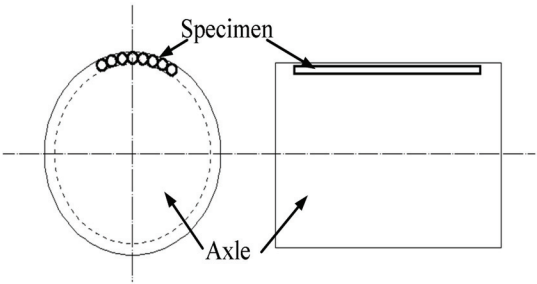


图 2 试样取样示意图

Fig. 2 Schematic diagrams of specimen location and orientation relative to the axle

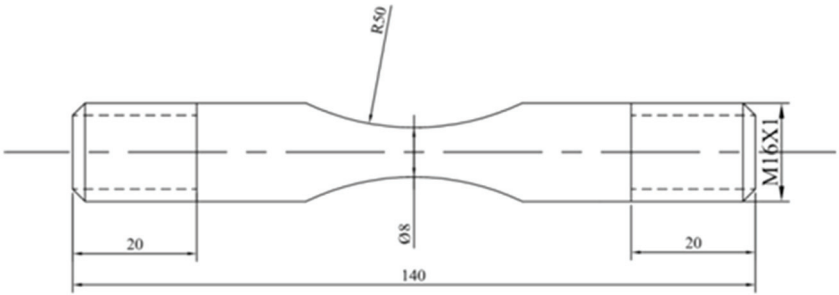


图 3 试样尺寸图(单位:mm)

Fig. 3 Specimen shape and dimensions for axial loading fatigue tests (unit: mm)

表 1 LZ50 化学成分(w%)
Tab. 1 The chemical composition (w%)

C	S	P	Cr	Ni	Mn	Si	Cu
0.47	0.007	0.014	0.02	0.028	0.78	0.26	0.15

表 2 LZ50 力学性能
Tab. 2 The mechanical properties

杨氏模量 (GPa)	屈服强度 (MPa)	循环屈服强度 (MPa)	拉伸强度 (MPa)	延伸率 (%)	维氏硬度 HV _{0.1}
210	330	313	629	24.4	220

1.2 渗氮处理

气体渗氮处理是将加工好的试样放入渗氮炉中吊起,在气压 0.11MPa 的 NH_3 、 O_2 和有机气体的混合物($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ 、 H_2O 、 N_2)环境下,加热至 570°C ,保温,空冷。材料经渗氮处理后的金相组织如图 4 所示,在材料表层由表及里依次形成了氧化物层、氮化物层和氮固溶层。黑色氧化物层由疏松的 Fe_3O_4 和 Fe_2O_3 组成,厚度大约为 $5\text{ }\mu\text{m}$,氧化物层的强度较低,一旦破裂将引起疲劳破坏,故试验前所有试样均经 2000 号砂纸打磨抛光去掉氧化物层;在氧化物层下方的白亮层是氮化物层,由于其不易被腐蚀的特性,故呈现白亮色,厚度约为 $30\text{ }\mu\text{m}$;在氮化物层下方的是氮固溶层,是氮原子固溶到 Fe 晶体中形成的固溶体,氮固溶层的厚度不能直接从金相照片中获得。为了研究不同渗层组织对材料疲劳性能的影响,将一部分试样的氮化物层打磨掉。为了叙述的方便,将渗氮处理的试样称为 GN,去除氧化物层的渗氮试样称为 GNPO,去除氮化物层的渗氮试样称为 GNPC。GNPO 表层为氮化物层,GNPC 表层为氮固溶层。

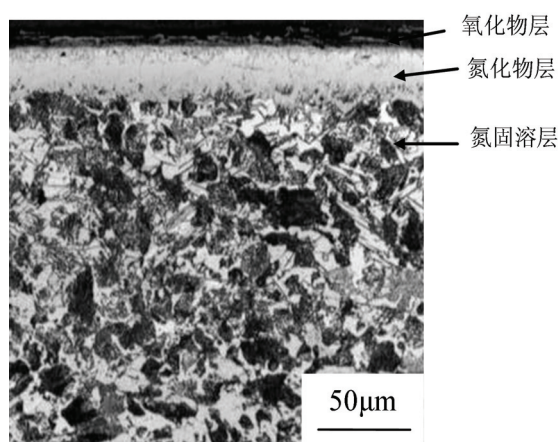


图 4 LZ50 渗氮处理后金相组织

Fig. 4 Microstructure observations of GN specimen

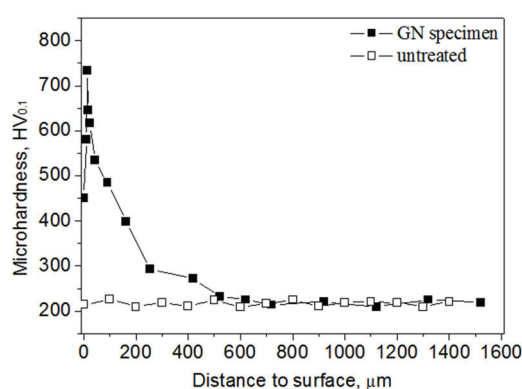


图 5 试样表层维氏硬度分布

Fig. 5 Surface microhardness distributions

1.3 表面层硬度分布

图 5 为渗氮处理试样(GN specimen)和未处理试样(untreated)表面层的维氏硬度分布。由图可知,渗氮处理试样表面硬度得到了提高。最表层的氧化物层的硬度较低,约为 HV450,氮化物层的硬度最高,硬度峰值达到 HV733,而心部材料(未处理材料)的硬度约为 HV220。渗层的深度约为 $400\text{ }\mu\text{m}$ 。

1.4 表面层残余应力分布

通过对试样表面进行电解研磨,逐次去除试样表面氧化物层、氮化物层与氮固溶层,利用 X 射线测得渗氮试样轴向残余应力沿深度方向的分布,如图 6 所示。表层分布着残余压应力,表层的残余压应力为 -250 MPa ,最大残余压应力为 -510 MPa 。心部分布着残余拉应力。残余压应力的分布深度与硬度测试得到的硬化层深度基本一致。

1.5 疲劳试验

轴向加载疲劳试验使用 Rumul 25N 高频疲劳试验机,在室温空气下进行,应力比 $R=-1$,频率为 90 Hz ,目标循环数设为 10^7 循环周次。试样折断后,使用扫描电镜(SEM)对断口进行观察分析。

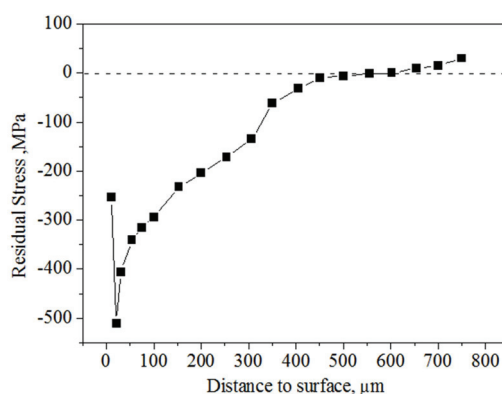


图 6 渗氮试样表层残余应力分布

Fig. 6 Distribution of residual stress at the GN specimen surface

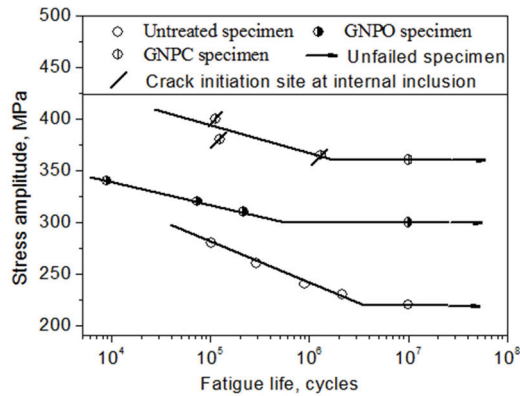


图 7 轴向加载疲劳试验 S—N 曲线

Fig. 7 The S—N curve of the test with the LZ50 steel under axial loading

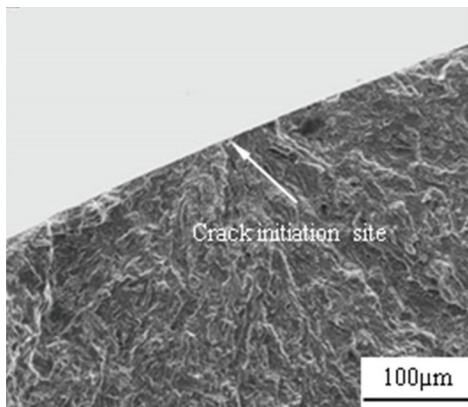
2 试验结果

2.1 S—N 曲线

轴向加载疲劳试验获得的 S—N 曲线(应力—寿命曲线)如图 7 所示,图中给出了未处理试样、GNPO 试样和 GNPC 试样的试验结果。未处理试样的 10^7 周次疲劳强度为 220MPa;去除氧化物层的 GNPO 试样 10^7 周次疲劳强度为 300MPa,比未处理试样疲劳强度提高了 36%;去除氮化物层的 GNPC 试样 10^7 周次疲劳强度为 360MPa,比未处理试样疲劳强度提高了 64%。另外,标有斜线的试样代表疲劳裂纹从内部萌生导致破坏的试样。

2.2 断口观察

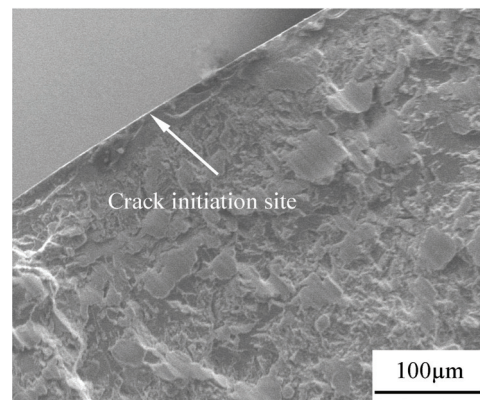
由所有试样的断口 SEM 观察可知,未处理试样和 GNPO 试样均是由表面萌生裂纹引起的破坏,如图 8、图 9 所示;而 GNPC 试样是由内部夹杂位置萌生裂纹引起的破坏,如图 10 所示。



$\sigma_a = 280\text{MPa}$, $N_f = 1.01 \times 10^5$ cycles

图 8 未处理试样断口 SEM 观察

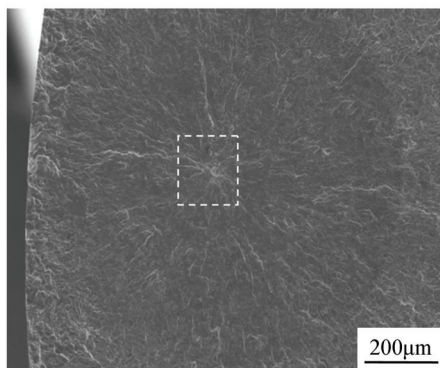
Fig. 8 SEM observation of untreated specimen



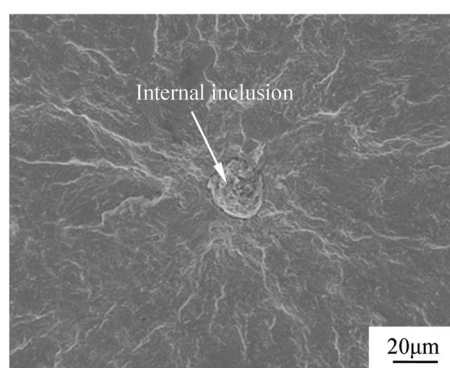
$\sigma_a = 320\text{MPa}$, $N_f = 7.37 \times 10^4$ cycles

图 9 GNPO 试样断口 SEM 观察

Fig. 9 SEM observation of GNPO specimen



(a) “鱼眼”特征



(b) 内部夹杂物

$\sigma_a = 365\text{MPa}$, $N_f = 1.3 \times 10^6$ cycles

图 10 GNPC 试样断口 SEM 观察

Fig. 10 SEM observation of GNPC specimen

3 讨论

3.1 轴向加载疲劳试验

试样在一定应力水平下,超过最大应力 90% 以上的区域定义为危险体积。通常,疲劳裂纹萌生在危险体积内的薄弱区域。在相同的应力水平下,试样的危险体积越大,处于高应力的体积越大,存在缺陷或薄弱处的可能性越大,材料的抗疲劳能力因此下降,这正是尺寸效应。当危险体积达到一个临界值后,尺寸效应便会消失,据文献^[10]报道,轴向加载疲劳试验和旋转弯曲疲劳试验试样的临界尺寸分别为 8mm 和 100mm。

图 11 是旋转弯曲疲劳试验和轴向加载疲劳试验的结果比较,旋转弯曲试验结果是本文作者先前的研究结果^[7]。图中 RB 代表旋转弯曲疲劳试验结果,AL 代表轴向加载疲劳试验结果。由图可知,无论是未处理试样、去除氧化物层试样、去除氮化物层试样,由旋转弯曲疲劳试验测得的疲劳强度远远高于轴向加载疲劳试验测得的结果。轴向加载试验测得的未处理试样的疲劳强度约为 220MPa,与整体车轴疲劳试验测得的结果^[2]几乎相等。旋转弯曲疲劳试样的高应力区域在试样外表层,经计算危险体积 V_1 为 5.2mm^3 ;轴向加载疲劳试验试样的高应力区域在最小截面处,经计算危险体积 V_2 为 416mm^3 , V_2 是 V_1 的 80 倍。

试样经渗氮处理后,表层材料得到强化的同时引入了残余压应力。对于旋转弯曲疲劳试验,由于试样尺寸小,应力梯度大,几乎全部高应力全都施加在了试样表层。由旋转弯曲疲劳试验测得的渗氮处理试样疲劳强度得到了大程度的提升。而轴向加载疲劳试验试样最大应力处于最小截面,不存在应力梯度,所以,由轴向加载疲劳试验测得渗氮处理试样疲劳强度的提升程度并没有旋转弯曲疲劳试验得到的结果大。当然,随着旋转弯曲试样尺寸的增加,试样应力梯度减小,得到渗氮处理试样的强化程度也会随之减小,当试样尺寸足够大时(可以忽略尺寸效应),由两种疲劳试验方法测得的渗氮处理对疲劳强度的提升程度将达到一致。实际车轴的直径大约为 190~200mm,应力梯度小,尺寸效应可以忽略,而处于车轴高应力区的表层材料相当于不断受到轴向拉压载荷。可见,用小试样疲劳试验评估渗氮处理工艺对整体车轴疲劳性能的影响,轴向加载疲劳试验的方法更加准确。

从图中 RB-GNPC 和 AL-GNPC 的试验结果还可以得到,当危险体积增加,疲劳裂纹萌生位置会从内部晶粒处向内部夹杂处转移。可以推测,实体车轴经渗氮表面处理强化后,疲劳裂纹会从材料内部夹杂物位置萌生。

3.2 渗层对疲劳性能的影响

由图 7 可知,氮固溶层作为表面层的 GNPC 试样比氮化物层作为表面层的 GNPO 疲劳强度高。材料经渗氮处理后,随着氮原子向材料内部的扩散,材料的硬度以及杨氏模量随渗层深度的增加有了显著的改变。氮化物层的杨氏模量大约为 $270\sim 250\text{GPa}$ ^[11,12],随着渗层深度的增加,杨氏模量在氮固溶层逐渐减小,直到内部的基体材料杨氏模量稳定在 210GPa 。由图 5 的硬度分布可知,氮化物层、氮固溶层到内部材料的硬度逐渐降低。当试样受到轴向疲劳载荷时,分布在最小截面的应变是一致的,但是,由于渗层的存在以及残余应力的引入导致分布在截面的合应力分布发生了变化。

图 12 是表面层为氮化物层的 GNPO 试样最小截面的受力定性分析示意图(以疲劳极限 300MPa 为例)。在试样上施加名义应力 300MPa,由于杨氏模量由表及里逐渐减小,在最小截面上的真实应力

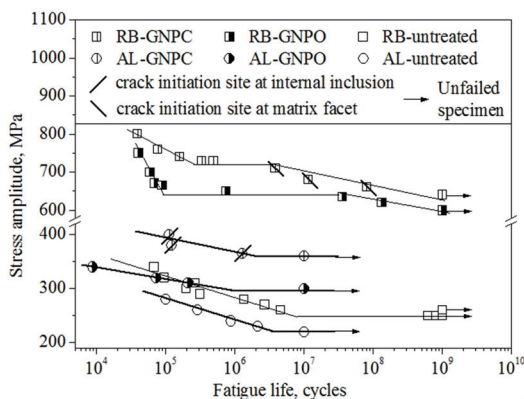


图 11 旋转弯曲疲劳试验与轴向加载疲劳试验的结果比较

Fig. 11 The S—N curves of LZ50 steel under rotating bending and axial loading

分布也是由表及里逐渐减小,表面层真实应力大于 300MPa,内部真实应力小于 300MPa。真实应力与残余应力叠加便是实际作用在最小截面的合应力。由于氮化物层的杨氏模量远大于氮固溶层和基体材料,所以氮化物层承受了非常高的合应力,相对地,氮固溶层和内部基体材料承受的合应力较小。与氮固溶层和基体材料相比,尽管通过氮化物的形成以及氮原子的固溶作用使得材料的强度得到了提高,表面的氮化物层成为了材料的薄弱区域,当合应力超过了氮化物层的强度,疲劳裂纹便会在表面萌生。随着名义应力的增加,表面氮化物层合应力的增加程度会大于内部,最后试样会在表面发生疲劳破坏,疲劳寿命降低。这也可以解释图 7 中 GNPO 试样 S—N 曲线倾斜部分的斜率小于 GNPC 试样和未处理试样这一现象。

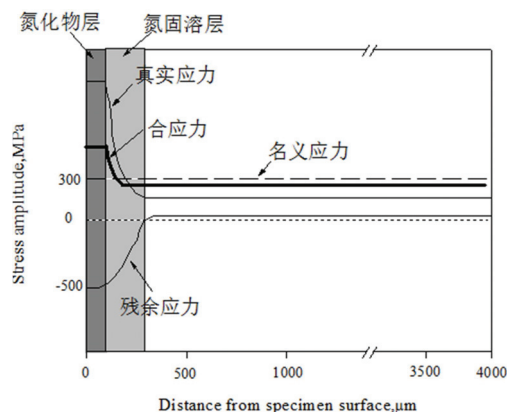


图 12 GNPO 试样受力定性分析示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the net stress distribution for qualitative analysis in GNPO specimen

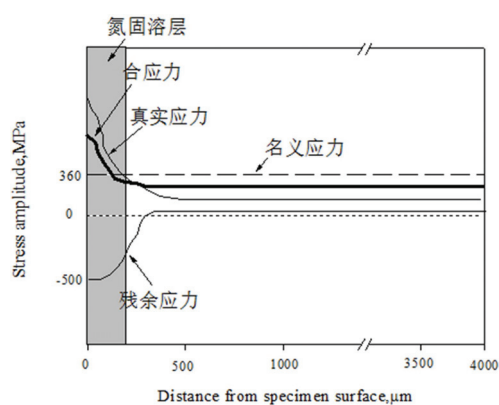


图 13 GNPC 试样受力定性分析示意图

Fig. 13 Schematic diagram of the net stress distribution for qualitative analysis in GNPC specimen

图 13 是表面层为氮固溶层的 GNPC 试样最小截面的受力定性分析示意图(以疲劳极限 360MPa 为例)。在试样上施加名义应力 360MPa,与氮化物层不同,氮固溶层的杨氏模量与硬度是均匀过渡到内部基体材料的,所以在表层严重的应力集中现象消失。氮固溶层中的氮铁化合物、氮铁原子固溶物的存在使材料的硬度与强度得到了提升。此时,内部的基体材料成为了薄弱区域。当名义应力增加,合应力超过内部材料的强度,疲劳裂纹便会从内部萌生,最后从内部发生破坏。

4 结论

(1) 材料经渗氮处理后,表面由表及里依次形成氧化物层、氮化物层以及氮固溶层。利用轴向加载疲劳试验的方法,去除表面氧化物层的试样比未经渗氮处理的试样疲劳强度提高了 36%;去除表面氮化物层的试样比未经渗氮处理的试样疲劳强度提高了 64%。由此可见,由渗氮处理形成的氮固溶层抗疲劳性能最强。

(2) 在小试样轴向加载疲劳试样中,未经渗氮处理的试样从表面萌生裂纹发生破坏;去除表面氧化物层的渗氮试样从表面萌生裂纹发生破坏;去除表面氮化物层的渗氮试样从内部夹杂萌生裂纹发生破坏,并伴有“鱼眼”特征。

(3) 与小试样旋转弯曲试验相比,小试样轴向加载疲劳试验结果能更准确地评估气体渗氮对整体车轴疲劳性能的影响。

参考文献:

- [1] Limodin N, Verreman Y. Fatigue strength improvement of a 4140 steel by gas nitriding: Influence of notch severity[J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 435-436:460—467.
- [2] Peet M, Hasan H, Bhadeshia H. Prediction of thermal conductivity of steel[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 54(11-12):2602—2608.

- [3] Yu M, DuQuesnay D, Topper T. Notch fatigue behaviour of SAE1045 steel[J]. International Journal of Fatigue, 1988, 10(2):109—116.
- [4] Schütz W. A history of fatigue[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1996, 54(2):263—300.
- [5] Hirakawa K, Toyama K, Kubota M. The analysis and prevention of failure in railway axles[J]. International Journal of Fatigue, 1998, 20(2):135—144.
- [6] Makino T, Kato T, Hirakawa K. Review of the fatigue damage tolerance of high-speed railway axles in Japan[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2011, 78(5):810—825.
- [7] Zhang J W, Lu L T, Shizawa K, et al. Effects of nitrocarburizing on fatigue property of medium carbon steel in very high cycle regime[J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 528(22-23):7060—7067.
- [8] Zhao Y X, Yang B, Liu H. Probabilistic fatigue limits for the material specimens and the railway vehicle's realistic axle of LZ50 steel[J]. Journal of the China Railway Society, 2005, 27(3):40—44.
- [9] Beretta S, Ghidini A, Lombardo F. Fracture mechanics and scale effects in the fatigue of railway axles[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2005, 72(2):195—208.
- [10] Hisashi O. Second progress-report on size effect of specimen on fatigue strength of steels[J]. JSME, 1961, 64: 263—268.
- [11] Asgari M, Barnoush A, Johnsen R, et al. Small-scale structural and mechanical characterization of the nitrided layer in martensitic steel[J]. Tribology International, 2013, 61:109—115.
- [12] Kumar A, Bhushan B. Nanomechanical, nanotribological and macrotribological characterization of hard coatings and surface treatment of H-13 steel[J]. Tribology International, 2015, 81:149—158.

Effect of Gas Nitriding on Fatigue Performance of Medium Carbon Axle Steel

GONG Yu-bin, LU Lian-tao, ZHANG Yuan-bin

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to evaluate the effect of gas nitriding treatment on fatigue performance of full-scale axle, axial loading fatigue experiment was carried out with small specimen of medium carbon axle steel treated by gas nitriding. Results show that comparing with untreated specimen, after removal of oxide layer and compound layer, the fatigue strength of gas nitriding treated specimen is improved step by step. For untreated specimen and gas nitriding treated specimen after removal of oxide layer, fracture occurs on specimen surface, but for the gas nitriding treated specimen after removal of compound layer, fracture occurs in internal inclusion. The effect of material surface layer of gas nitriding treated specimen on the fatigue performance was analyzed. In addition, comparing with the results of rotating bending fatigue experiment for small specimen made of medium carbon axle steel, it is indicated that for validation of fatigue performance of full-size actual axle, the axial loading fatigue experiment for small specimen is more accurate.

Keywords: medium carbon axle steel; gas nitriding; axle; fatigue strength; internal inclusion