

[文章编号] 1004- 0609(2002)S1- 0200- 06

经镍磷化学镀处理的 40Cr 钢低周疲劳 损伤的在线跟踪监测^①

吴维青

(福州大学 中心实验室, 福州 350002)

[摘 要] 用系统分析的方法, 在线跟踪观察了 40Cr 钢 Ni-P 化学镀层及化学镀层经晶化处理后的试样疲劳损伤过程。实验结果表明: 系统分析的方法能够敏感地跟踪疲劳损伤过程; 金属材料表面 Ni-P 化学镀层状态, 影响材料疲劳损伤的过程和形式, 使材料的疲劳寿命下降 50% 以上。

[关键词] Ni-P 化学镀; 系统分析; 疲劳损伤

[中图分类号] TG 111.8

[文献标识码] A

近年来, 人们利用电子显微镜等微观观察手段对材料的疲劳损伤从细、微观上进行了大量的研究, 形成了疲劳损伤微观机制理论, 并选择了各种损伤变量来描述材料微观疲劳损伤与宏观变形之间的关系^[1], 建立了有关模型和临界准则。这些研究基本上都选取材料内部最普遍、最典型的细、微观结构为研究单元, 其结果对疲劳损伤理论的建立与发展起了很大的作用。而在疲劳研究手段上人们则不断利用新的分析测试工具(如表面分析仪), 以尝试各种宏、微观联系的手段。然而, 许多工程实际中的疲劳断裂问题, 往往需要更加有效的、可行的宏观分析和测量手段进行数值度量 and 描述。

现代信号处理及系统分析技术的发展, 使其能够对各种动态信号进行多尺度分析, 实现实时、频域高分辨率的局部定位。该技术拥有数学显微镜的美誉^[2], 也正是它能够对人们所关心的微弱动态信号进行提取和分析。基于此, 可利用系统分析的方法将材料的动态应变、受力等的宏观信号的细微变化结合相应材料组织的微观演化进行分析, 提取出材料的损伤参数、监测损伤过程。

大量试验表明, 疲劳过程是一种复杂的过程, 金属的表面状态对疲劳寿命的影响尤其显著, 为研究这种影响, 对疲劳过程的瞬时损伤进行实时监测也就有实际意义。本文作者以系统分析理论为基础, 以试验材料为对象, 收集、分析和处理相关的资料和数据, 建立相应的数学模型; 并把数学模型

的计算结果与实际数据相比较, 不断用相关误差对已建数学模型进行修正, 从而得到分析误差最小的数学模型。在该数学模型中, 提取研究材料的特征参数, 观察材料状态如何随特征参数的变动而变化, 对试验材料的低周疲劳损伤进行评估和预测。该方法的物理意义明确, 各种应变、位移、受力等动态信号可直接获取, 根据实际信号建立的数学模型误差很小, 计算速度快, 且便于实现在线跟踪测量, 可作为材料疲劳损伤过程的实验研究和工程实际监测应用^[3]。

1 试验材料及方法

在系统分析方法中, 把研究对象作为一个独立的系统, 外界对系统的作用称为对系统的激励, 系统在外界作用下产生的反应, 被称为系统的响应。激励与响应间有着直接的关系, 这种关系可用数学方程来描述, 该数学方程称为传递函数。

在本试验中, 研究系统为三点弯曲疲劳受力试样, 用 INSTRON 1342 的信号发生器产生正弦动态信号, 由电液伺服系统将该动态信号转化成载荷循环加载于试样, 这种动态载荷就是对系统的激励。试样因受力弯曲变形而在试样中点处产生一定的挠度(即系统的响应), 相应的动态挠度信号可由 INSTRON 1342 试验机的位移传感器输出。随着试样疲劳损伤的产生和发展, 试验表明在相同的循环载

① [基金项目] 福州大学科技发展基金资助项目 [收稿日期] 2001- 12- 11; [修订日期] 2002- 01- 05
[作者简介] 吴维青(1962-), 男, 副研究员, 硕士。

荷作用下试样将产生不断变化的宏观动态响应, 由系统建立起来的数学方程(传递函数)中的系统参数将跟随着发生相应的变化。建立材料的响应方程(传递函数), 并提取敏感的系统变化参数, 跟踪材料疲劳的整个过程。建立数学方程及路线, 如图 1 所示。

这里传递函数微分性方程组(1), (2)构建如下^[4]:

$$\ddot{u} + 2\omega\dot{u} + \alpha\omega^2 + (1 - \alpha)\omega^2z = f(t) \quad (1)$$

$$\dot{z} = A\dot{u} - \beta|\dot{u}|^k|z|^{n-1} - \gamma|\dot{u}|z|^2 \quad (2)$$

这里 u 为试样受力点的位移, 试样的弹、塑性变形对受力点的位移均有贡献, ω 为外作用力循环频率, $f(t)$ 为外作用力, γ 为材料指数(相同材料基本保持不变), 特征参数 A 在疲劳循环时发生显著变化。在该方程组的计算中, 外作用力 $f(t)$ 由 INSTRON1342 信号发生器产生、由力传感器输出, 试样受力点的位移 u 的动态信号由 INSTRON1342 的位移传感器输出, 两信号通过 A/D 转换器采样转换成数字信号, 由方程组(1)、(2)进行求解, 得到特征参数 A 值。

试验材料 1[#] 为 Cr40 热轧态圆钢, 通过刨、磨机械加工成 70 mm × 10 mm × 10 mm 的矩形试样, 并对其进行电解抛光去除应力, 经拉伸试验并处理后的材料基本力学性能参数为: 抗拉强度 1 100 MPa, 延伸率为 15%。

试验材料 2[#] 为以试验材料 1[#] 作基体材料, 在其表面覆以化学镀, 镀液成分为^[5]: 硫酸镍 25 g/L, 次磷酸钠 20 g/L, 醋酸钠 14 mol/L, 络合剂适量, 镀

液温度为 90 ℃, pH 值 4.5, 施镀 2 h, 镀层厚度 30 μm。

2[#] 与 3[#] 材料在相同条件施镀后, 再进行 400 ℃和 1 h 空热处理, 随炉冷却, 得到晶化镀层^[6]。

三点弯曲疲劳试验在 INSTRON1342 疲劳试验机上进行, 跨距为 50 mm, 载荷采用正弦方式循环变化, 为便于比较, 载荷变化范围均为 1.5~ 15.0 kN, 应力比 $R = 0.1$, 变化频率为 5 Hz。在试验过程中, 通过与 INSTRON1342 疲劳试验机相连的计算机系统, 在线计算 A 值, 并绘出 A 值走势图。图 2 所示为材料 1[#] (基体材料) A 值的变化图。

2 结果及讨论

从 A 值图的分段线性拟合直线的斜率变化情况, 可将整个疲劳过程分为 3 个部分, 通过大量的试验, 在 I 区与 II 区的交界点区域, 观察到了微小裂纹, 因此可以认为 I 区为裂纹萌生前疲劳损伤 A 的值变化走势, II 区为裂纹萌生并扩展的 A 值走势。I, II 区分别代表了疲劳损伤过程中的裂纹萌生与扩展阶段, A 值的走势由快速下降转变为平缓下降; 而在疲劳循环的 III 区则出现与此前不同的上升过程, 疲劳损伤的过程是材料塑性耗竭的过程^[7], 文献[8]观察描述了裂纹萌生过程对应的材料微观组织变化。在 III 区 A 值出现与 I, II 区不同的走势, 因此可认为材料在 III 区出现了塑性耗竭、快速断裂的过程。对该试样的微观断口观察, 整个断口也基本分为 3 部分, 即裂纹萌生、裂纹扩展、

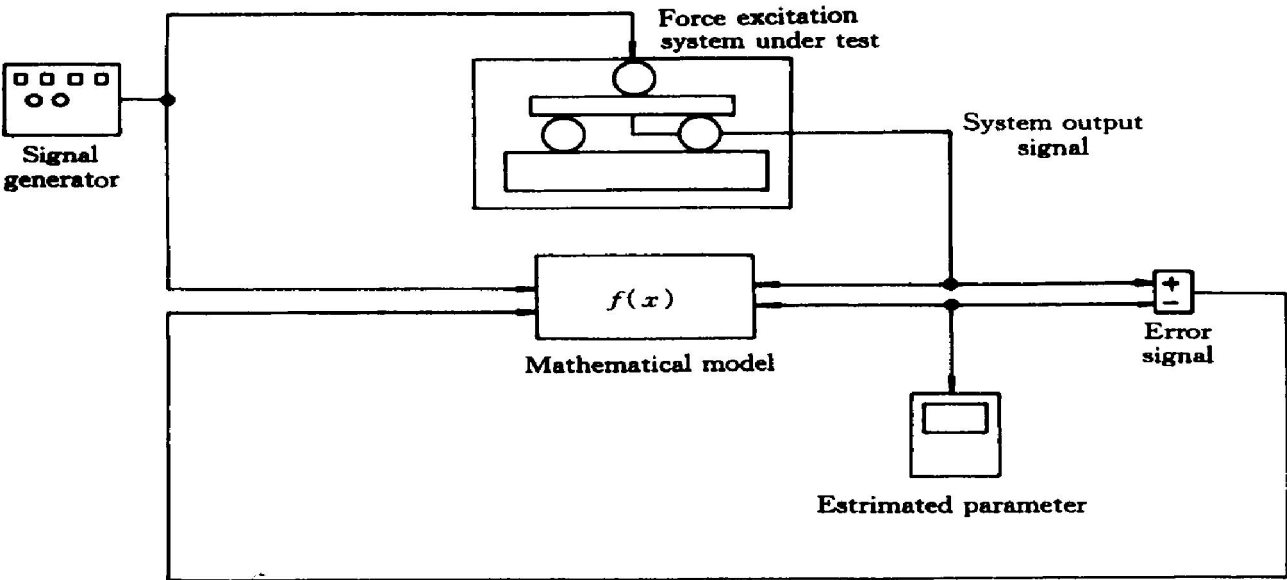


图 1 传递函数建模技术线路图

Fig. 1 Schematic diagram of mathematical model set-up

快速断裂 3 过程, 如图 3 所示。

图 4 所示为 Cr40 钢经 NiP 化学镀(材料 2[#])后疲劳循环过程中 A 值实时计算结果, 它与 Cr40 钢(材料 1[#])的 A 值走势基本相同, 也可分为 3 个区域, 所不同的是 I 区明显缩短, A 值在 4790 周内从 1 下降为 0.977, 而材料 1[#] 则在 12770 周内从 1 下降为 0.977, 这与 NiP 镀层的脆性易萌生疲劳裂纹而使萌生裂纹的时间缩短有直接的关系。图 5 为材料 2[#] 的疲劳断口电镜照片, 其疲劳损伤的 3 个分区域明显可见, 与 A 值变化图的基本吻合。文献 [9] 认为化学镀钢件的疲劳破坏首先从镀层表面开始, 镀层疲劳破坏后形成裂纹穿透到基体表面, 最终导致疲劳断裂, 疲劳寿命约下降 50%。

图 6 所示为材料 3[#], 亦即 Cr40 钢经 NiP 化学镀后再经晶化处理、镀层已完全转化为非晶态并由

镍的固溶体及聚集长大的组成^[6], 试样的疲劳循环过程 A 值实时计算结果。其 A 值的变化情况与材料 1[#]、材料 2[#] 试样的不尽相同, 只可分为两个区域, 因为 I 区基本消失, A 值在疲劳循环的一开始(一千周内)就走平。这是 NiP 化学镀晶化处理层的高脆性且与基体的结合力进一步增强的直接结果, 镀层极易萌生疲劳裂纹, 因与基体材料的结合力比非晶态的镀层强, 疲劳裂纹直接向基体扩展^[6], 晶化镀层开裂并直接有效透到基体, 其作用相当于预制了疲劳裂纹, 从而使疲劳寿命大为缩短, 疲劳寿命约下降 70%。从材料 3[#] 的疲劳断口电镜照片中, 已观察不到明显的裂纹萌生区域, 如图 7 所示, 材料 3[#] 的 A 值变化图与微观观察也基本吻合。

由此可见, 用信号分析的方法, 可敏感地跟踪

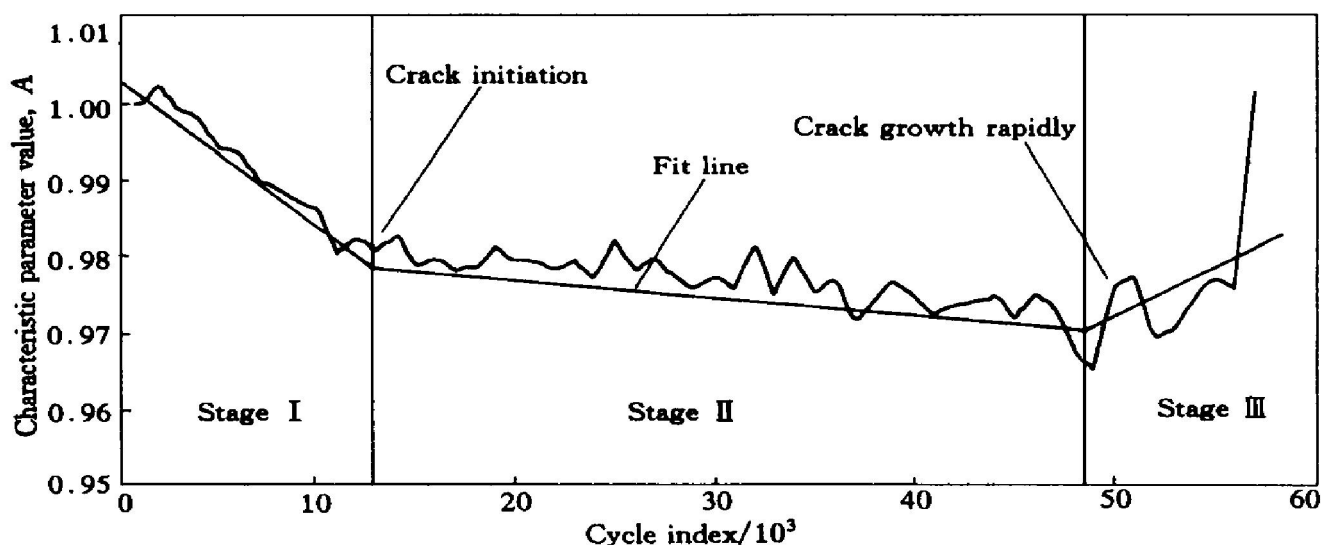


图 2 40Cr 钢(材料 1[#])在疲劳循环过程中 A 值的变化

Fig. 2 Characteristic parameter value (A) of 40Cr steel vs fatigue cycle

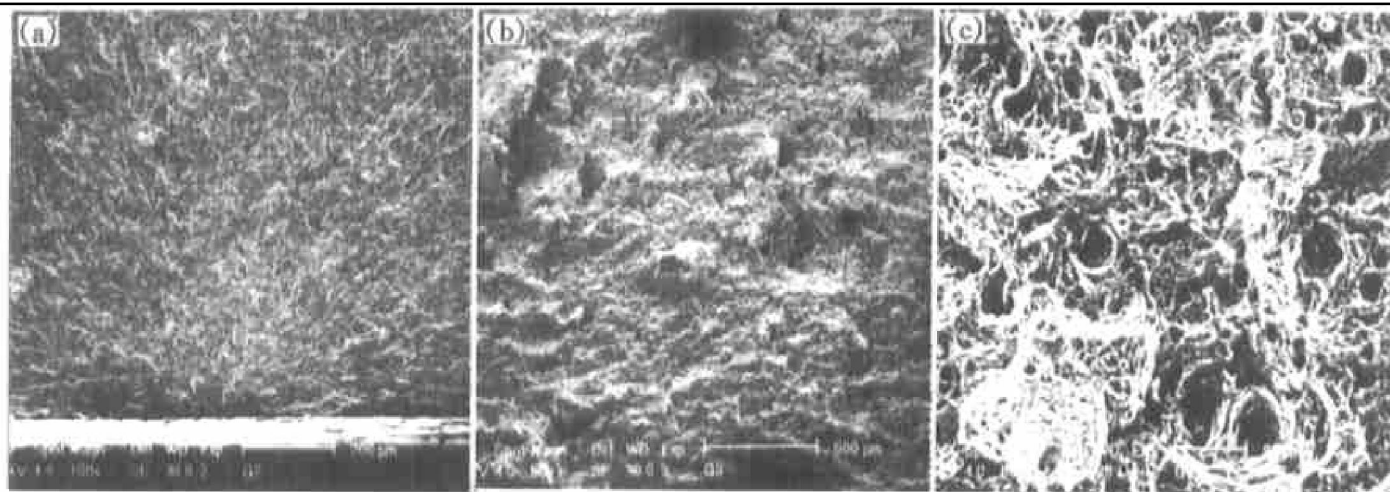


图 3 40 钢的三点弯曲疲劳断口

Fig. 3 Fracture surface of 40Cr steel in three-point-bending fatigue test

(a) —Crack initiation area; (b) —Crack propagation area; (c) —Fracture area

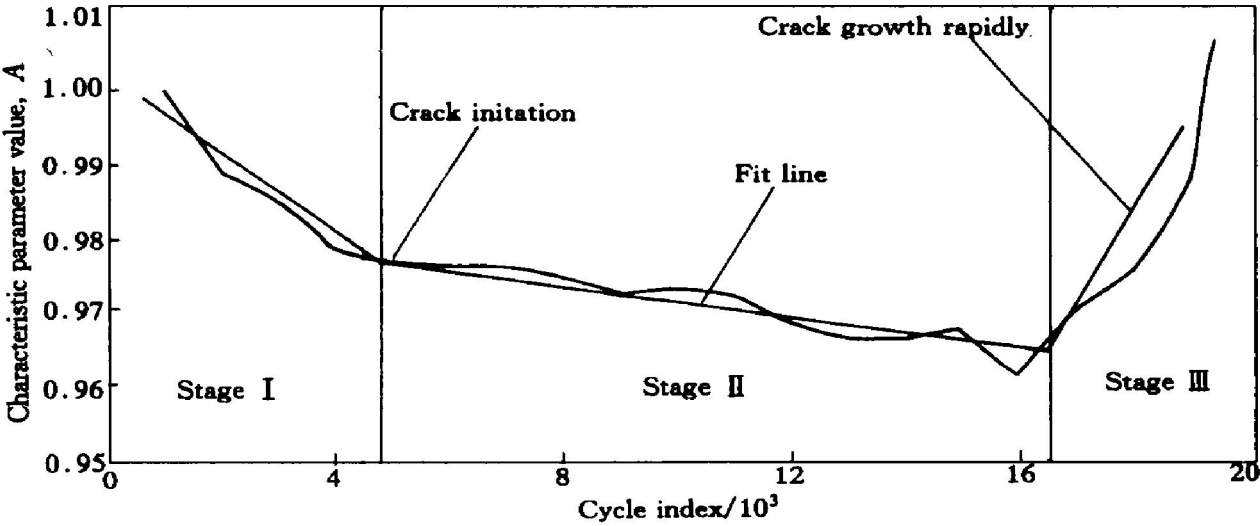


图 4 经 Ni-P 化学镀处理的 40Cr 钢疲劳过程 A 值变化图

Fig. 4 Characteristic parameter value (A) test results of 40Cr steel with electroless Ni-P coating

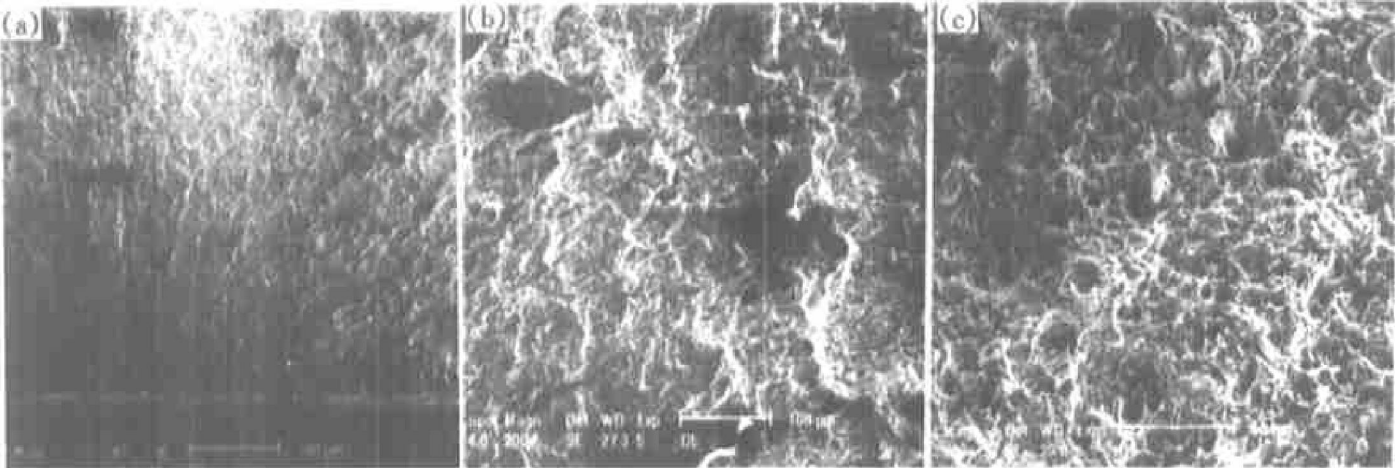


图 5 经化学镀处理的 40Cr 钢试样三点弯曲疲劳断口

Fig. 5 Fracture morphologies of 40Cr steel with electroless Ni-P coating in three-point-bending fatigue test

(a) —Crack initiation area; (b) —Crack propagation area; (c) —Fracture area

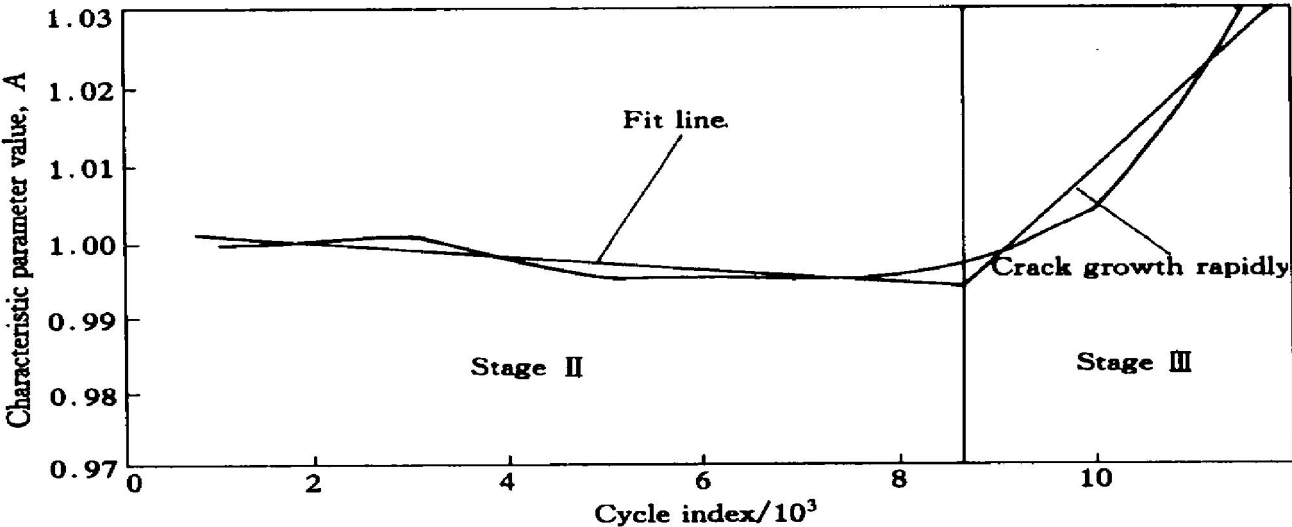


图 6 40Cr 钢经 Ni-P 化学镀再经晶化处理试样的疲劳过程 A 值变化图

Fig. 6 Characteristic parameter value (A) test results of 40Cr steel with electroless Ni-P coating and by heat treatment at 400 °C

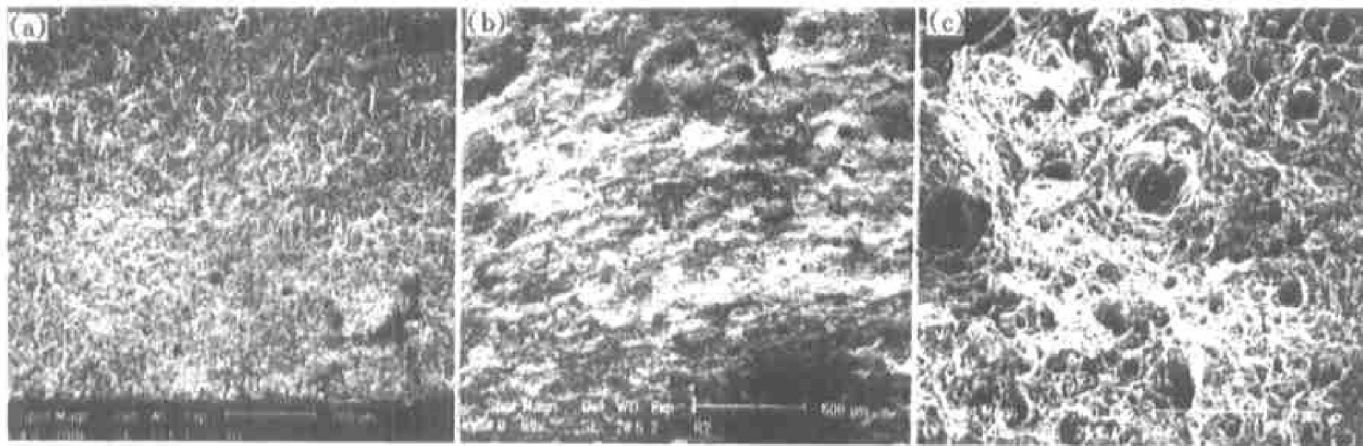


图 7 经化学镀并晶化处理的 40Cr 试样三点弯曲疲劳断口形貌

Fig. 7 Fracture morphologies of 40Cr steel with electroless Ni-P coating and by heat treatment at 400 °C in three-point-bending fatigue test
(a) —Crack initiation area; (b) —Crack extending area; (c) —Break area

各种状态下的试样疲劳损伤过程, 为疲劳损伤过程的实验分析, 提供了一种可供新的选择的手段, 为疲劳损伤理论的实际应用打下基础。对使用化学镀处理的工件, 其镀层对疲劳强度的影响应有充分的估计^[10]。

[REFERENCES]

- [1] 赵银燕, 姜节胜, 周 利. 表面塑性损伤的描述及其微观机理分析[J]. 机械强度, 1999, 21(3): 221–224.
ZHAO Yin-yan, JIANG Jie-sheng, ZHOU Li. Description and micromechanism analysis of surface plastic damage [J]. Journal of Mechanical Strength, 1999, 21(3): 221–224.
- [2] 赵松年. 子波变换与子波分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 1996.
ZHAO Song-nian. Wavelet Transform and Wavelet analysis [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 1996.
- [3] Glisson T H. 系统分析导论[M]. 丁钟琦, 译. 长沙: 湖南大学出版社, 1987. 1– 10.
Glisson T H. Introduction to System Analysis [M]. DIN Zhong-qi transl. Changsha: Hunan University Press, 1987. 1– 10.
- [4] 付丽强, 林 桐, 吴维青. 神经网络在材料低周疲劳寿命预测中的应用[J]. 福州大学学报, 2001, 29(5): 57– 60.
FU Li-qiang, LIN Tong, WU Wei-qing. Application of nervous neural in prediction of fatigue cyclic life of material [J]. Journal of Fuzhou University, 2001, 29(5): 57–60.
- [5] 安茂忠, 杨哲龙, 徐雪峰, 等. 化学镀 Ni-P 合金中无机盐加速剂的影响[J]. 中国有色金属学报, 1993, 9(1): 155– 158.
AN Mao-zhong, YANG Zhe-long, XU Xue-feng, et al. Effect of inorganic accelerants on electroless Ni-P alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1993, 9(1): 155– 158.
- [6] 于 媛, 徐桂英, 黄 虹. 化学镀合金层组织结构与性能的研究[J]. 辽宁师范大学学报, 1998, 21(1): 58– 61.
YU Yuan, XU Gui-ying, HUANG Hong. Study for structure and behavior of electroless plating alloy coating [J]. Journal of Liaoning Normal University, 1998, 21(1): 58– 61.
- [7] 王双柱. 金属疲劳[M]. 福州: 福建科学技术出版社, 1985. 100– 105.
WAN Shuang-zhu. Metal Fatigue [M]. Fuzhou: Fujian Science and Technology Press, 1985. 100– 105.
- [8] 周 昆, 李云卿. Al-Zr-Mg-Cu 合金应变疲劳行为及位错结构演变[J]. 中国有色金属学报, 1997, 7(4): 79– 83.
ZHOU Kun, LI Yun-qing. Strain fatigue behavior and dislocation structure evolution of Al-Zr-Mg-Cu alloy [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1997, 7(4): 79– 83.
- [9] 张永忠, 吴宜勇, 姚 枚. 镍磷化学镀层对 30CrMo 钢疲劳性能的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1995, 7(4): 350– 361.
ZHANG Yong-zhong, WU Yi-yong, YAO Mei. Influence of Ni-P electroless plating to fatigue behavior of 30CrMo steel [J]. Corrosion Science And Protection Technology, 1995, 7(4): 350– 361.

- [10] 陈 枫, 孙宗颀, Zaremba K. 高强度钢压剪疲劳裂纹扩展的实验研究[J]. 中国有色金属学报, 1999, 9 (1): 193– 196.
CHEN Feng, SUN Zong-qi, Zaremba K. Experimental

investigation for fatigue crack propagation under the action of compress shear stress of high strength steel [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1999, 9 (1): 193– 196.

Measurement of fatigue damage on electroless Ni-P coating of 40Cr steel

WU Weiqing

(Laboratory Center, Fuzhou University, Fuzhou 350002, China)

[Abstract] A calculation model of fatigue damage is proposed using system analysis method. Three-point-bending fatigue test was applied to investigate fatigue damage parameter of electroless Ni-P coated 40Cr steel. The result reveals that the system analysis method is effective, the fatigue strength of the plated steel decreases by 50% and more.

[Key words] system analysis; electroless Ni-P coating; fatigue damage

(编辑 朱忠国)