

# 3.5%NaCl 中阴极极化下 A537 钢间歇 超载疲劳断口分析\*

魏学军 李劲 刘素娥 柯伟

(中国科学院金属腐蚀与防护研究所, 金属腐蚀与防护国家重点实验室, 沈阳 110015)

**摘要** 测量了 A537 钢在 3.5%NaCl 中阴极极化条件和不同间歇超载发生频率下的疲劳裂纹扩展曲线, 并利用扫描电子显微镜对腐蚀疲劳断口进行了观察. 结果表明: 超载对裂纹扩展速率及断口特征的影响取决于超载发生频率. 当超载发生频率  $OCR=10^{-1}$ ,  $10^{-2}$  时, 间歇超载加速裂纹扩展, 腐蚀疲劳断口只存在解理、沿晶等一般脆性特征; 当  $OCR=10^{-3}$ ,  $2 \times 10^{-4}$ ,  $10^{-4}$  时, 间歇超载对裂纹扩展存在阻滞效应. A537 钢断口上能观察到铁素体、珠光体两种组织, 且阻滞效应越大, 两种组织越清晰. 分析表明, 这种断口形态的形成是氢在组织界面附近大量富集而使界面强度降低, 铁素体、珠光体以不同方式开裂的结果.

**关键词** 微观断口, 超载, 腐蚀疲劳

**中图法分类号** TG172, TB302, TB304

## ANALYSIS OF FATIGUE FRACTURE WITH CYCLIC OVERLOADING FOR A537 STEEL IN 3.5%NaCl SOLUTION AT AN APPLIED CATHODIC POTENTIAL

WEI Xuejun, LI Jin, LIU Su'e, KE Wei

State Key Laboratory of Corrosion and Protection, Institute of Corrosion and Protection of Metals, The Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110015

Correspondent: WEI Xuejun, Tel: (024)9893537

Manuscript received 1997-07-30, in revised form 1997-09-29

**ABSTRACT** The fatigue crack propagation rate has been measured for A537 steel in 3.5%NaCl solution at an applied cathodic potential of  $-1400\text{mV}(\text{SCE})$  under different cyclic overload occurrence ratio(OCR). The fracture surface characteristics have been analyzed by SEM. When  $OCR=10^{-1}$  and  $10^{-2}$ , the crack growth was accelerated and some brittle characteristics such as cleavage and intergranular cracking were observed on the fracture surface. However, for  $OCR=10^{-3}$ ,  $2 \times 10^{-4}$  and  $10^{-4}$ , the crack growth was retarded, and the pearlite morphology appeared on the fracture. The difference of cracking models between ferrite and pearlite in A537 steel could be the enrichment of hydrogen atoms at the interphase of ferrite and cementite.

**KEY WORDS** fracture surface, overload, corrosion fatigue

\* 国家自然科学基金资助项目 59671057

收到初稿日期: 1997-07-30, 收到修改稿日期: 1997-09-29

腐蚀疲劳断口形态能反应材料本身和外界的应力、腐蚀介质等因素交互作用的本质<sup>[1,2]</sup>,是腐蚀疲劳断裂机理研究的最直接的根据. 本文对 A537 钢在 3.5%NaCl 溶液中阴极极化条件下不同间歇超载发生频率的腐蚀疲劳断口进行了观察, 发现了 A537 钢中铁素体和珠光体的不同断裂特征, 并结合间歇超载裂纹扩展曲线, 对氢脆条件下两种组织断裂的微观过程进行了分析.

## 1 实验方法

实验用 A537 钢的化学成分(质量分数, %)为: C 0.13, Mn 1.48, P 0.012, S 0.005, Si 0.46, Mo 0.016, Cr 0.004, Ni 0.18, Cu 0.17, V 0.05. 单边缺口试样取于正火态热轧板的轧制方向, 沿轧向的抗拉强度和屈服强度分别为 559 和 373 MPa, 延伸率为 32.8%. A537 钢由铁素体和珠光体两种组织构成, 珠光体条带状组织沿轧向排列<sup>[3]</sup>. 试样尺寸为 250 mm×36 mm×5 mm. 实验在微机控制电液伺服疲劳机上进行, 采用直流电位降法对裂纹长度进行测量, 测量结果自动记录到计算机里<sup>[4]</sup>. 根据裂纹长度与循环周次的关系, 采用七点拟合法计算裂纹扩展速率. 加载波型为三角波, 应力比  $R$  为 0, 常幅载荷频率为 0.5 Hz, 超载频率为 0.1 Hz. 定义超载发生频率 OCR 为  $1/N_{CA}^*$ ,  $N_{CA}^*$  为相邻超载间的常幅疲劳载荷循环数(图 1), 超载比为:  $\eta = \Delta K_{OL} / \Delta K$ , 其中  $\Delta K_{OL}$  和  $\Delta K$  分别为超载及常幅载荷所对应的应力强度因子范围. 本实验中  $\eta$  选为 1.8.

在 3.5%NaCl 溶液中  $-1400\text{mV(SCE)}$  阴极电位下, 分别测量了不同 OCR 下的裂纹扩展曲线. 指出了该条件下最大阻滞效应所对应的 OCR 值. 实验结束后将试样迅速拉断, 经清洗、干燥后, 用 FEG XL-30 扫描电子显微镜观察其断口.

## 2 实验结果

实验测得阴极极化条件下不同超载发生频率 OCR 所对应的裂纹扩展  $da/dN-\Delta K$  关系曲线如图 2 所示, 其中  $\Delta K$  为常幅载荷所对应的应力强度因子幅. 从图中可以看到, 当  $\text{OCR}=2 \times 10^{-4}$  的情况下, 裂纹扩展最慢, 间歇超载对裂纹扩展产生了最大的阻滞效应;  $\text{OCR}=10^{-3}, 10^{-4}$  时, 虽然间歇超载也存在阻

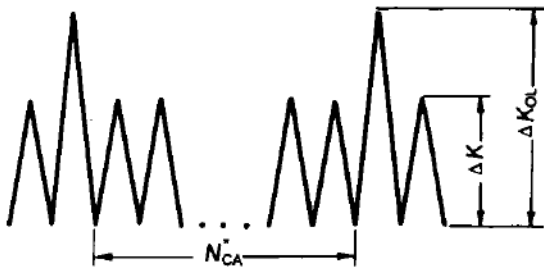


图 1 间歇超载参数的定义

Fig.1 Definition of parameters of cyclic overload

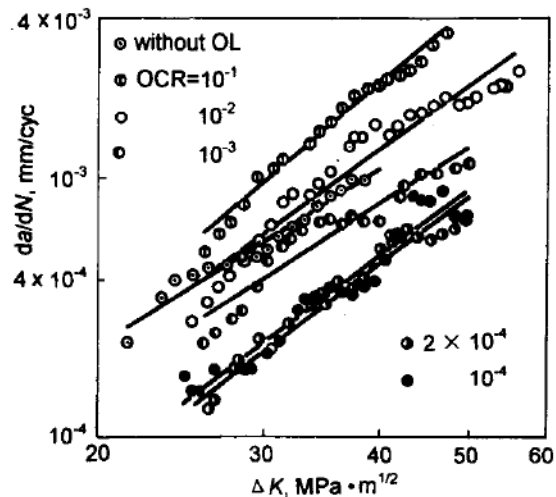


图 2 阴极极化条件下不同 OCR 所对应的疲劳裂纹扩展曲线

Fig.2 Curves of crack growth rate at different OCR under cathodic potential

滞效应,但都比  $OCR=2 \times 10^{-4}$  时小。 $OCR=10^{-1}, 10^{-2}$  的间歇超载对裂纹扩展存在负的阻滞效应。断口观察的结果表明:常幅及  $OCR=10^{-1}, 10^{-2}$  的间歇超载腐蚀疲劳断口上,只存在解理、沿晶等一般氢脆断口特征(图 3)。而在  $OCR=10^{-3}, 2 \times 10^{-4}$  和  $10^{-4}$  情况下,能观察到铁素体、珠光体组织(图 4)。且在相同的  $\Delta K$  下,当  $OCR=2 \times 10^{-4}$  时,断口上的两种组织最清晰。将图 4b 放大,可以看到铁素体晶粒以沿晶或解理方式开裂(图 4d),珠光体成相互平行的条带状均匀分布,珠光体-铁素体界面存在大量二次裂纹。将珠光体进一步放大,可以看到珠光体中渗碳体片状组织结构(图 5)。图 5b 是片状组织放大 20000 倍的照片,珠光体中铁素体、渗碳体体积比近于 3:1,这与金相分析的结果一致<sup>[5]</sup>。从图 5b 还可以看出,渗碳体片层之间的铁素体部分在断裂前发生较大的塑性变形,在断口上形成了一条条铁素体塑性形变“沟”,这是渗碳体片受切应力作用发生弯曲的痕迹。

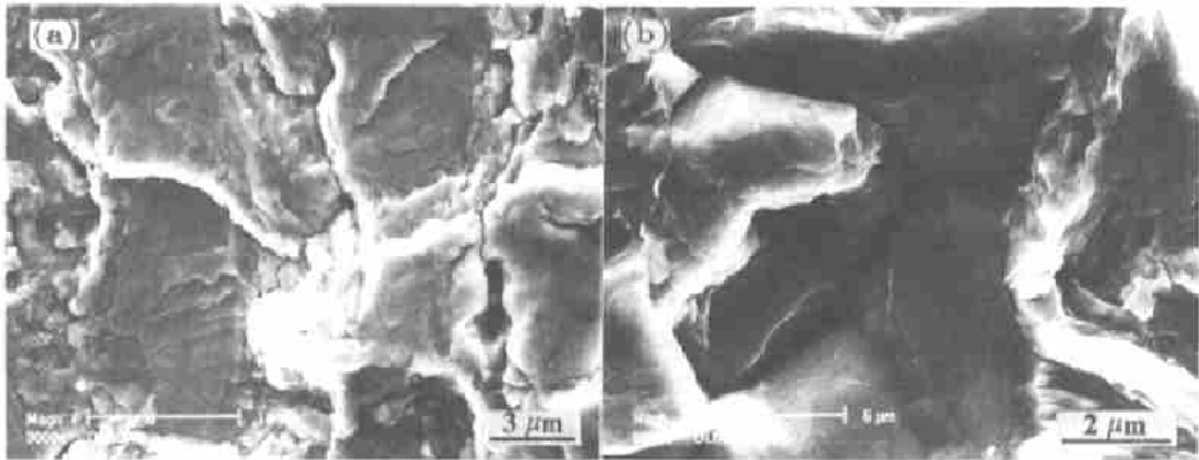


图 3 常幅及  $OCR=10^{-1}, 10^{-2}$  的间歇超载腐蚀疲劳断口上的断口特征

Fig.3 Fracture characteristics for cleavage (a) and intergranular cracking (b) under constant corrosion fatigue and cyclic overload with  $OCR=10^{-1}, 10^{-2}$

### 3 讨 论

A537 钢中珠光体条带状组织沿轧向排列,与加载方向平行。铁素体-珠光体界面原子排列紊乱,疲劳过程中大量位错在界面附近塞积,造成了氢的大量富集,降低了界面强度,在疲劳循环应力作用下,晶面局部开裂,形成二次裂纹(图 4d)。界面强度降低导致铁素体-珠光体两种组织结合能下降,因此  $OCR=10^{-3}, 2 \times 10^{-4}, 10^{-4}$  的间歇超载腐蚀疲劳裂纹扩展过程中,铁素体和珠光体各自以不同方式开裂,在断口上可以看到图 4 所示的两种组织形貌。

在上述条件下, A537 钢中铁素体晶粒以解理或沿晶方式开裂,但珠光体的开裂过程比较复杂。同样由于珠光体中渗碳体-铁素体两相界面原子排列紊乱,疲劳过程中大量位错在界面附近塞积,造成了氢的大量富集,两相界面强度降低,在疲劳循环应力作用下,珠光体中渗碳体与铁素体分离,出现图 5a 所示的片状组织结构。另外,在切应力较大,渗碳体-铁素体结合相对较紧密的区域,珠光体的断裂从渗碳体片开始。在外力作用下,珠光体周围铁素体晶粒或珠光体内的铁素体部分产生滑移带,对渗碳体片产生切变应力作用。由于渗碳体较脆,在切变应

力作用下, 渗碳体发生断裂, 切变区穿过相邻的铁素体, 使相邻的渗碳体片发生断裂, 并形成空洞. 随着空洞的聚合长大, 最终整个珠光体断裂. 其整个断裂过程和断裂机制如图 6 所示. 断裂过程中铁素体发生了较大的塑性形变 (图 5b), 而这种形变被限制在渗碳体片层间, 所以断口

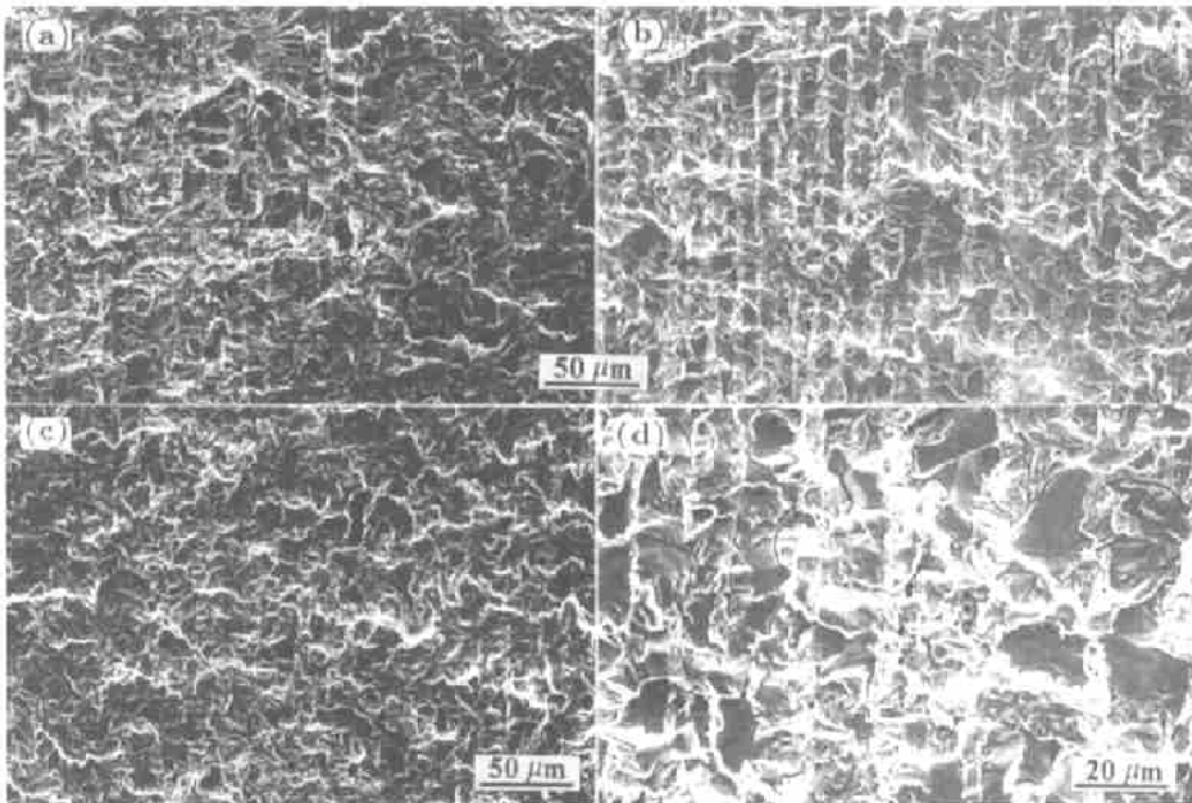


图 4 腐蚀疲劳断口上的铁素体、珠光体两相组织

Fig.4 SEM morphologies of ferrite and pearlite on corrosion fatigue fracture  
(a)  $OCR=10^{-3}$  (b)  $OCR=2 \times 10^{-4}$  (c)  $OCR=10^{-4}$  (d) enlargement of Fig.4b

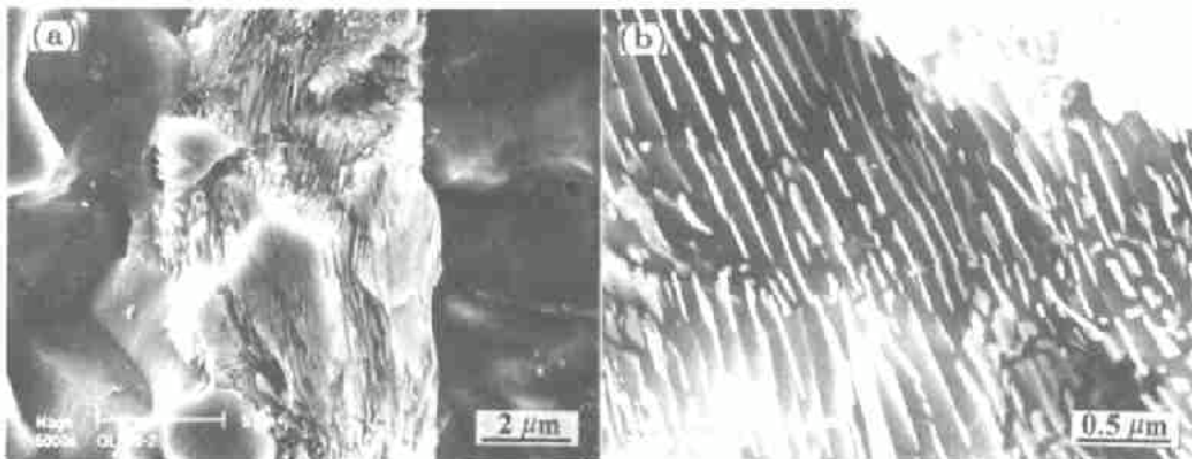


图 5 断口上珠光体的显微组织结构

Fig.5 Microstructure of pearlite on the fracture surface (a) and its magnified image (b)

上可以看到珠光体中的一条条平行的铁素体塑性形变沟, 渗碳体片明显有受切应力作用发生弯曲的痕迹. 这一断裂机制解释了虽然珠光体周围铁素体晶粒发生的是脆性开裂, 而珠光体内铁素体部分产生的是塑性开裂的断口观察结果.

-1400 mV(SCE) 阴极电位下 A537 钢腐蚀疲劳裂纹扩展由氢脆机制控制. 间歇超载过程中  $OCR=2 \times 10^{-4}$  时, 裂纹扩展具有最大的阻滞效应, 裂纹扩展最慢. 由于氢传输过程对时间的依赖性, 氢在界面附近富集的浓度最大, 对珠光体 - 铁素体界面结合力降低幅度也最大. 因此, 在相同的  $\Delta K$  下, 断口上的两种组织也比  $OCR=10^{-3}, 10^{-4}$  条件下的结果更清晰. 在  $OCR=10^{-1}, 10^{-2}$  及常幅疲劳裂纹扩展过程中, 裂纹扩展较快, 铁素体 - 珠光体界面附近氢浓度很小, 氢对两种组织界面结合力影响较小, 在疲劳断裂过程中, 珠光体 - 铁素体紧密结合并以相同的方式开裂, 在断口上看不到两种组织的特征形貌.

## 4 结 论

(1) A537 钢在阴极极化条件下, 间歇超载对裂纹扩展速率及断口特征的影响取决于超载发生频率.  $OCR=10^{-1}, 10^{-2}$  的间歇超载加速腐蚀疲劳裂纹扩展, 其断口与常幅腐蚀疲劳相似, 显示解理、沿晶等一般脆性特征; 在  $OCR=10^{-3}, 2 \times 10^{-4}, 10^{-4}$  条件下, 间歇超载对裂纹扩展产生阻滞效应, 腐蚀疲劳断口上能观察到珠光体条带状组织.

(2) 超载阻滞效应越大, 铁素体 - 珠光体两种组织越清晰. 珠光体周围铁素体晶粒发生的是脆性开裂, 而珠光体内铁素体部分产生的是塑性开裂.

(3) A537 钢在阴极电位下, 疲劳裂纹扩展过程由氢扩散控制, 当裂纹扩展较慢时, 氢在珠光体 - 铁素体界面大量富集, 大大降低了两相界面强度, 使铁素体、珠光体以不同方式开裂.

## 参 考 文 献

- 1 Beachem C D. *Met Trans*, 1972; 3A: 437
- 2 Banerji S K. *Met Trans*, 1978; 9A: 237
- 3 王俭秋. 中国科学院金属腐蚀与防护研究所博士论文. 1995  
(Wang J Q. *Doctor Thesis, Institute of Corrosion and Protection of Metals*, 1995)
- 4 魏学军, 李 劲, 柯 伟. 材料研究学报, 1996; 6: 608  
(Wei X J, Li J, Ke W. *Chn J Mater Res*, 1996; 6: 608)
- 5 李 晋, 任金城. 结构钢金相图谱, 北京: 机械工业出版社, 1985  
(Li J, Ren J C. *Metallograph Diagrams for Structural Steels*, Beijing: Mechanical Industry Press, 1995)

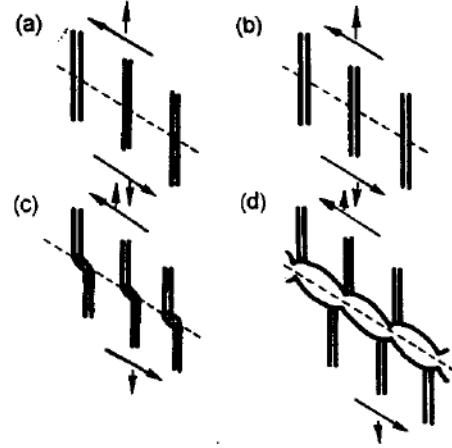


图 6 珠光体断裂过程示意图  
Fig.6 Scheme of pearlite cracking process  
(a) film of cementite cracking, (b) shearing field cross nearby ferrite, (c) and (d) generation and connection of hole to form plastic ditch