

## 疲劳裂纹扩展对高强钢电化学性能的影响

张慧霞, 程文华, 邓春龙, 王均涛

(中国船舶重工集团公司第七二五研究所 海洋腐蚀与防护重点实验室, 山东 青岛 266101)

**摘要:** 采用线性极化、电化学交流阻抗等方法,研究了施加疲劳载荷前后高强钢在质量分数为3.5%的NaCl溶液中的电化学行为。结果表明,施加疲劳载荷后,开路电位变化值在裂纹扩展过程中经历先负移后稳定最后稍有正移,由线性极化和交流阻抗拟合得到的极化电阻都呈先增大后减小的趋势。

**关键词:** 高强钢; 疲劳裂纹扩展; 线性极化; 交流阻抗

**中图分类号:** TB304      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2011)01-0057-04

## Study of Corrosion Fatigue Crack Propagation Behavior of High-strength Steel by Electrochemical Method

ZHANG Hui-xia, CHENG Wen-hua, DENG Chun-long, WANG Jun-tao

(Key Laboratory of Marine Corrosion and Protection, Luoyang Ship Materials Research Institute, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** Electrochemical behavior of high-strength steel under fatigue load in 3.5% NaCl solution was studied with linear polarization (LP) and AC electrochemical impedance spectroscopy (EIS) methods. The results showed that open circuit potential first decreased and then stabilized and increased a little finally during corrosion fatigue crack propagation process; polarization resistance obtained using LP and EIS both increased first and then decreased.

**Key words:** high-strength steel; fatigue crack propagation; linear polarization; EIS

低合金高强钢具有强度高、比重小和易焊接等优良的机械性能,以及较好的耐海水腐蚀性能,广泛应用于海洋工程和船舶制造等方面。然而,高强钢在交变载荷作用下易发生腐蚀疲劳破坏,会造成极大的经济损失。在腐蚀介质作用下,高强钢的疲劳寿命主要由疲劳裂纹的扩展所控制,因此腐蚀疲

劳裂纹扩展规律的研究是预测其疲劳寿命的关键。高强钢腐蚀疲劳裂纹扩展机制可分为阳极溶解型和氢致开裂型<sup>[1-5]</sup>,裂纹内金属的溶解和氢原子的产生是环境介质促进裂纹扩展的主要原因。近年来,通过裂纹内的电化学反应过程来研究高强钢在腐蚀介质中的疲劳裂纹扩展行为成为热点。

收稿日期: 2010-06-24

作者简介: 张慧霞(1981—),女,河南郑州人,硕士,工程师,研究方向为金属材料的海洋腐蚀。

Turnbull<sup>[6]</sup>用冷冻技术研究发现,裂纹不扩展时裂纹尖端pH为5~6,裂纹扩展且 $\Delta K=9.5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ 时,pH为4。Turnbull,Zhou等<sup>[7]</sup>采用复合微电极技术测量裂纹尖端的pH值。沈承金<sup>[8]</sup>采用微铈电极体系对裂纹尖端微区的电化学反应进行研究,建立了裂尖电位与裂尖pH值之间的变化关系。笔者采用传统的三电极电化学体系,易于实现高强钢腐蚀疲劳裂纹扩展过程中电化学性能的测试,通过施加疲劳载荷前后高强钢电化学性能的变化,研究高强钢在3.5%(质量分数,后同)NaCl溶液中的腐蚀疲劳裂纹扩展行为。

## 1 试验方法

试验材料:厚度为16 mm的低合金高强钢板材,抗拉强度约900 MPa。按照GB/T 6398-2000《金属材料疲劳裂纹扩展速率试验方法》将试验材料沿轧向加工成3点弯曲试样,尺寸为14 mm×28 mm×150 mm,单边线切割的缺口尺寸为5.8 mm,如图1所示。



图1 腐蚀疲劳试样尺寸

Fig. 1 Dimensions of the specimen for corrosion fatigue test

采用美国MTS810电液伺服疲劳试验机预制裂纹,载荷为8.5 kN,加载频率为10 Hz,载荷比 $R=0$ ,预制裂纹长度为1.5 mm。然后将预制裂纹试样在3.5%NaCl溶液中浸泡2 d,待其电位稳定后,进行疲劳裂纹扩展试验。裂纹扩展试验的控制方式为载荷控制,波形为正弦波,应力比为0.1,加载频率为1 Hz。

采用Solartron公司的SI1287恒电位仪和1260锁相放大器监测裂纹扩展过程的开路电位变化,每0.5 h进行线性极化和电化学交流阻抗测试。电解池为三电极体系,试样为工作电极,暴露面积为 $4.0 \text{ cm}^2$ ,参比电极为饱和甘汞电极(SCE),辅助电极为铂片电极,电解液为3.5%NaCl溶液,试验温度为室温。

## 2 结果与讨论

### 2.1 高强钢在3.5%NaCl溶液中的腐蚀疲劳裂纹扩展行为

图2为高强钢在3.5%NaCl溶液中的疲劳裂纹长度、疲劳裂纹扩展速率 $\frac{da}{dN}$ 以及应力强度因子幅值 $\Delta K$ 随循环次数的变化曲线,可以看出:在循环次数小于55 000次时,高强钢的 $\frac{da}{dN}$ 仅仅增长了0.000 25 mm/r;循环次数大于55 000次, $\frac{da}{dN}$ 迅速从0.000 5 mm/r增长到0.006 mm/r; $\Delta K$ 随着循环次数的增加逐渐增大,循环次数大于40 000次之后, $\Delta K-N$ 曲线斜率增大明显,且随着循环次数增加,曲线斜率增大,最后趋近 $90^\circ$ 。其原因是随着循环次数的增加,裂纹尖端应力集中程度增加。

### 2.2 高强钢腐蚀疲劳裂纹扩展过程中电位的变化规律

施加疲劳载荷前后高强钢在3.5%NaCl溶液中的开路电位变化值随试验时间的变化曲线如图3所示。

由图3可明显看出,未加疲劳载荷时高强钢试样的开路电位几乎没有变化,表明其开路电位在稳定值附近。加载疲劳载荷高强钢试样在腐蚀疲劳裂纹扩展过程中的开路电位快速负移,负移的速度随时间逐渐减小。在50 000 s后开始正移,这与50 000次循环载荷之后 $\frac{da}{dN}$ 迅速增大的规律相吻合,表明

$\frac{da}{dN}$ 的迅速增大导致了试样开路电位的正移。

### 2.3 高强钢腐蚀疲劳裂纹扩展过程中的极化电阻

图4是疲劳载荷加载前后高强钢在3.5%NaCl溶液中线性极化电阻 $R_p$ 随试验时间 $t$ 的变化曲线。可以看出,随着腐蚀疲劳裂纹的扩展, $R_p$ 值逐渐增大;裂纹扩展后期, $R_p$ 值开始逐渐减小;快断裂时, $R_p$ 值迅速减小。总之,随着腐蚀疲劳扩展试验的进行,线性极化电阻 $R_p$ 整体上呈现先逐渐增大后快速减小的

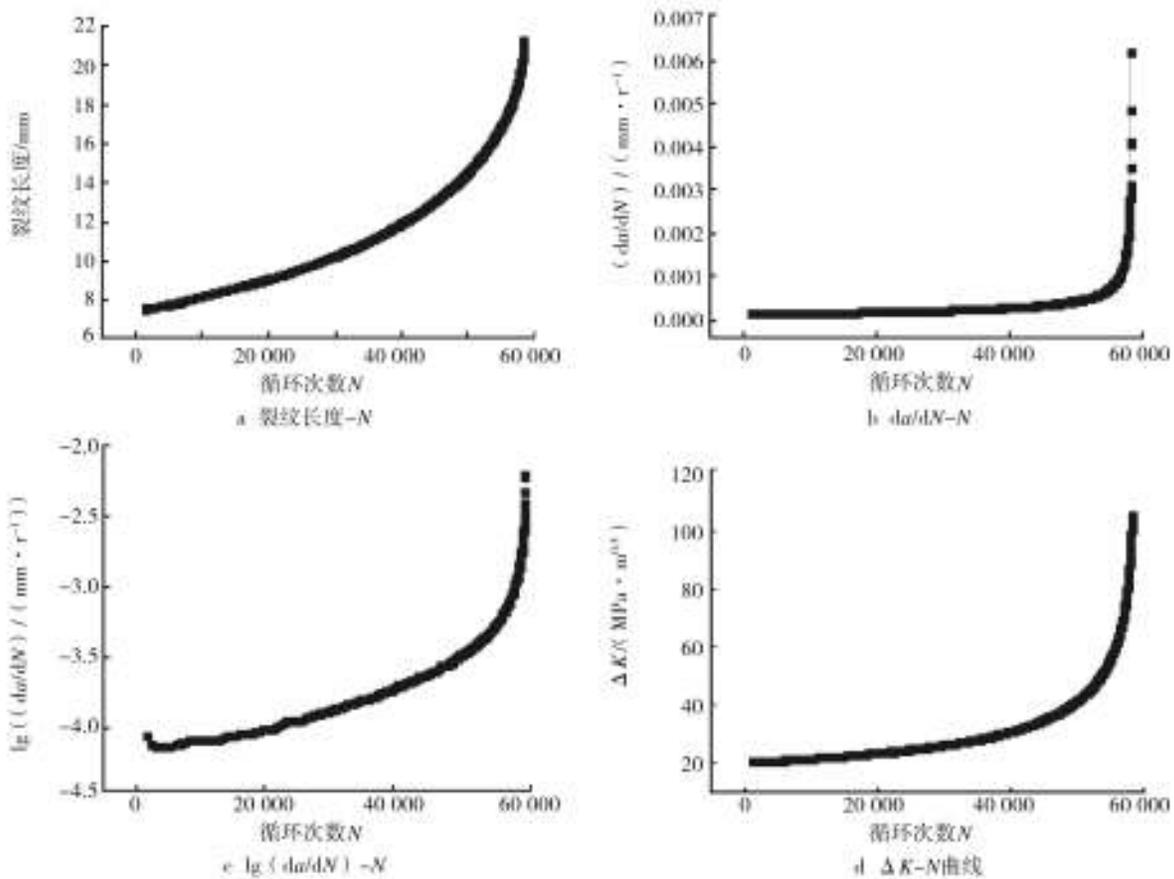


图2 高强钢在3.5%NaCl溶液中疲劳裂纹扩展过程

Fig. 2 High-strength steel fatigue crack propagation process in 3.5%NaCl solution

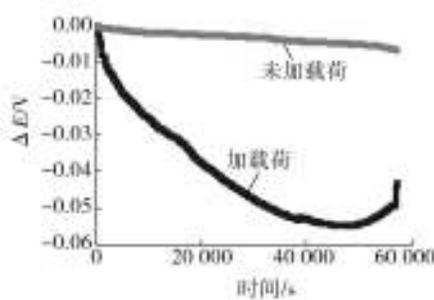


图3 施加疲劳载荷前后高强钢在3.5%NaCl溶液中的  $\Delta E_{corr}-t$  曲线

Fig. 3  $\Delta E_{corr}-t$  curves of high-strength steel in 3.5% NaCl solution with and without fatigue loading

趋势,整个过程中  $R_p$  值在  $220 \sim 290 \Omega/\text{cm}^2$  之间。但是对于未加疲劳载荷的高强钢,  $R_p$  值在  $1350 \sim 1600 \Omega/\text{cm}^2$  之间,且整体上呈逐渐增大的趋势。比较可知,疲劳载荷使高强钢的线性极化电阻减小了  $1/3$ , 且使线性极化电阻在疲劳后期快速减小。对比  $\frac{da}{dN}$  和  $\Delta K$  的变化规律可知,在疲劳裂纹扩展后期,由于

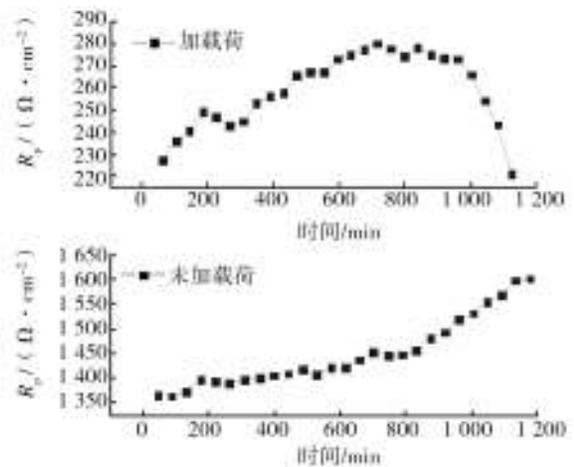


图4 疲劳载荷加载前后高强钢在3.5%NaCl溶液中的  $R_p-t$  曲线

Fig. 4  $R_p-t$  curves of high-strength steel in 3.5%NaCl solution with and without fatigue loading

疲劳载荷循环加载次数的增加,裂纹尖端应力集中程度增大,裂纹尖端塑性降低,裂纹附近已经不能够形成稳定的氧化物膜,同时裂纹的快速增长也导致

试样的有效横截面积减小,因此极化电阻在裂纹扩展后期迅速下降。

### 2.4 高强度钢腐蚀疲劳裂纹扩展过程中的交流阻抗

疲劳载荷加载前后高强度钢在 3.5%NaCl 溶液中的电化学交流阻抗谱如图 5 所示,可以看出,疲劳载荷加载前后高强度钢在 3.5%NaCl 溶液中的电化学交流阻抗谱均只有 1 个时间常数,通过软件拟合其等效电路都符合  $R_p(RQ)$  复合原件的变化规律。其中电荷转移电阻  $R_p$  随时间变化规律如图 6 所示,可以看出,在 3.5%NaCl 溶液中,随浸泡时间的延长,高强度钢的电荷转移电阻逐渐增大,  $R_p$  值在 1 625 ~ 1 725  $\Omega/cm^2$  之间。施加疲劳载荷后,随试验时间的延长,电荷转移电阻先增加后减小,  $R_p$  值在 250 ~ 350  $\Omega/cm^2$  之间。这表明疲劳载荷使得电荷转移电阻减小到原来的 1/6 还多,且在裂纹扩展后期迅速减小,这些规律与线性极化电阻的规律一致,进一步说明循环载荷使裂纹附近电化学活性增加,不能够形成稳定的氧化物膜。

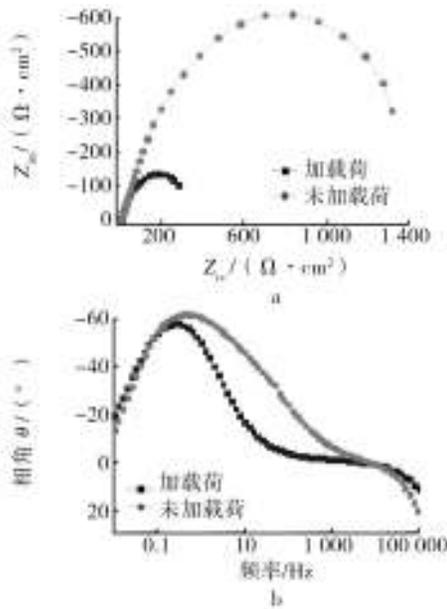


图 5 疲劳载荷加载前后高强度钢在 3.5%NaCl 溶液中的电化学交流阻抗谱

Fig. 5 EIS plots of high-strength steel in 3.5% NaCl solution with and without fatigue loading

## 3 结论

1) 施加疲劳载荷后,开路电位变化值在裂纹扩

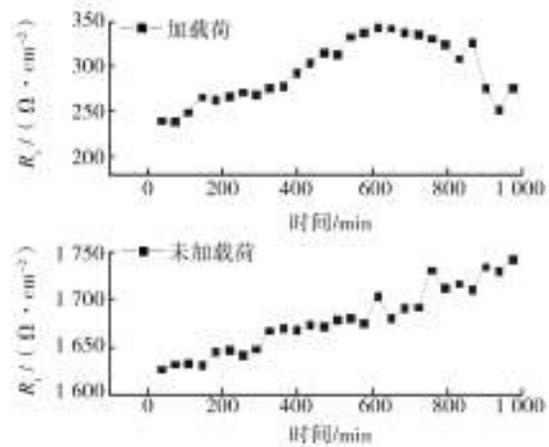


图 6 疲劳载荷加载前后高强度钢在 3.5%NaCl 溶液中的  $R_p-t$  曲线  
Fig. 6  $R_p-t$  curves of high-strength steel in 3.5% NaCl solution with and without fatigue loading

展过程中经历先负移、后稳定、最后稍有正移。

2) 疲劳载荷使高强度钢疲劳裂纹附近的电化学活性增强,局部耐腐蚀性能下降,极化电阻减小。

### 参考文献:

- [1] 王荣. 金属材料的腐蚀疲劳[M]. 西安:西北工业大学出版社,2001:26—27.
- [2] 姜建华. 飞机结构腐蚀疲劳裂纹增长的研究[D]. 南京:南京航空航天大学,1994:61—63.
- [3] 黄淑菊. 金属腐蚀与防护[M]. 西安:西安交通大学出版社,1988:154—155.
- [4] MASUDA H, MATSUOKA S. The Role of Corrosion in Fatigue Propagation for Structural Alloys in 3% NaCl Solution [J]. Corrosion Science, 1988, 28(5): 433—447.
- [5] 韩恩厚. 腐蚀疲劳裂纹扩展规律与机理[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1991(3): 15—17.
- [6] TURNBULL A. The Solution Composition and Electrode Potential in Pits, Crevices and Cracks[J]. Corrosion Science, 1983, 23(8): 833—870.
- [7] TURNBULL A, ZHOU S, HINDS G. Stress Corrosion Cracking of Steam Turbine Disc Steel Measurement of the Crack-tip Potential[J]. Corrosion Science, 2004, 46(2): 193—211.
- [8] 沈承金. 腐蚀疲劳裂纹尖端电化学行为的研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1991, 3(3): 16—18.