

DOI: 10.11973/jxgccl202308009

高产气井油管用 13Cr-L80 钢的腐蚀疲劳裂纹扩展行为

柳 军¹, 李 强¹, 余 雷², 罗 杰¹, 唐 凯², 任国辉²

(1. 西南石油大学机电工程学院, 成都 610500;

2. 中国石油测井有限公司西南分公司, 重庆 400212)

摘要: 用复合磷酸盐完井液对取自 13Cr-L80 钢油管的紧凑拉伸试样进行预腐蚀处理, 再进行疲劳裂纹扩展试验, 通过分析疲劳裂纹扩展区形貌, 研究了应力比(0.05~0.25)、加载载荷(10~14 kN)和载荷频率(0.6~1.8 Hz)对腐蚀疲劳裂纹扩展行为的影响。结果表明: 随应力比增大, 疲劳裂纹扩展区二次裂纹数量增多, 13Cr-L80 钢的裂纹扩展速率增大; 随加载载荷增大, 疲劳裂纹扩展区二次裂纹数量减少, 裂纹扩展速率减小; 载荷频率越高, 疲劳裂纹扩展区二次裂纹数量越少, 但裂纹尖端应变速率增大, 裂尖变形更充分, 导致裂纹扩展加快, 试验中止时的循环次数减少。

关键词: 13Cr-L80 钢油管; 复合磷酸盐完井液; 腐蚀疲劳; 裂纹扩展试验

中图分类号: TG142.71

文献标志码: A

文章编号: 1000-3738(2023)08-0052-07

Corrosion Fatigue Crack Growth Behavior of 13Cr-L80 Steel for High-Production Gas Well Tubing

LIU Jun¹, LI Qiang¹, YU Lei², LUO Jie¹, TANG Kai², REN Guohui²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. Southwest Branch of CNPC (China) Logging Co., Ltd., Chongqing 400212, China)

Abstract: Compact tensile specimens taken from 13Cr-L80 steel tubing were pre-corroded with composite phosphate completion fluid, and then was subjected to fatigue crack growth tests. By analyzing morphology of the fatigue crack growth zone, the effects of stress ratio (0.05—0.25), load (10—14 kN) and load frequency (0.6—1.8 Hz) on the corrosion fatigue crack growth behavior were studied. The results show that with increasing stress ratio, the number of secondary cracks in the fatigue crack growth zone increased, and the crack growth rate of 13Cr-L80 steel was improved. With increasing load, the number of secondary cracks in the fatigue crack growth zone decreased, and the crack growth rate was reduced. The higher the load frequency, the smaller the number of secondary cracks in the fatigue crack growth zone; but the strain rate at crack tips increased, and the crack tip deformation was more sufficient, leading to the fast crack growth, and the smaller number of cycles at test termination.

Key words: 13Cr-L80 steel tubing; composite phosphate completion fluid; corrosion fatigue; crack growth test

0 引言

为了平衡地层的压力、降低对储层的损害、保持井中各性能稳定, 国内外通常在高产气井完井作业

过程中使用具有高密度和保护性能的复合磷酸盐完井液^[1], 这使得油管处于复合磷酸盐完井液的腐蚀环境中; 同时, 油管还会受到环空内外压力、弯曲、扭转等多种载荷作用。在腐蚀与交变载荷的耦合作用下, 油管表面会萌生裂纹并扩展, 最终导致油管断裂, 造成重大的经济损失^[2-3]。

1963 年, 研究者对不同金属材料开展了大量试验研究, 提出了预测疲劳寿命的 Paris 公式, 建立了

收稿日期: 2022-04-08; 修订日期: 2023-04-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51875489); 四川省重点研发计划项目(2022YFQ0034)

作者简介: 柳军(1980—), 男, 广西柳州人, 教授, 博士

应力强度因子幅和裂纹扩展速率的关系,为疲劳断裂问题开辟了主要的研究途径^[4-10]。在近期研究中,袁玲^[11]发现 13Cr 和 P110 钢在氯酸盐完井液中的腐蚀速率远高于在甲酸盐中。梁秀娟等^[12]在不同浓度盐酸腐蚀液中、不同循环应力下对 30CrNi2MoV 钢进行腐蚀疲劳试验,发现循环应力对腐蚀疲劳裂纹的影响比盐酸腐蚀液浓度的影响更大。郑祥隆等^[13]研究发现,腐蚀程度的增大会导致疲劳极限下降,但对高应力范围的疲劳寿命影响不大,而变幅值疲劳寿命对门槛值的变化比较敏感。王庆雷等^[14]和王恒等^[15]研究发现,随着应力比的增大,E690 高强度钢的疲劳裂纹扩展速率也相应增大,而疲劳裂纹扩展门槛值减小。范镒等^[16]研究发现,载荷频率越低,奥氏体不锈钢在海水环境中的腐蚀疲劳裂纹扩展越快。

目前,有关油管腐蚀疲劳裂纹扩展研究主要使用的是酸性腐蚀环境,在碱性腐蚀环境下的研究还

表 1 13Cr-L80 钢的化学成分

Table 1 Chemical composition of 13Cr-L80 steel

元素	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Ti	Al
质量分数/%	0.22	0.48	0.53	0.02	0.001	12.88	2.17	0.04	0.05	0.02

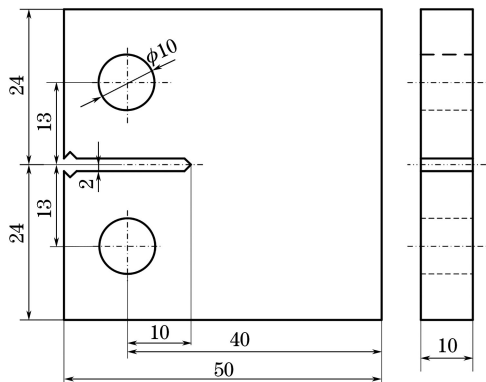


图 1 CT 试样的形状和尺寸

Fig. 1 Shape and size of CT specimen

为模拟真实的腐蚀环境,采用现场用的完井液作为腐蚀介质,完井液组成(体积分数)为 $\text{H}_2\text{O} + 0.2\%\text{NaOH} + 0.3\%\text{硫代硫酸盐}(\text{PF-OSY}) + 3\%\text{JLB 缓蚀剂} + \text{K}_4\text{P}_2\text{O}_7$,在配制好其他组分后,通过加入 $\text{K}_4\text{P}_2\text{O}_7$ 将完井液密度控制在 $1\,400\,\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。将 CT 试样裂纹待扩展区浸泡在腐蚀介质中进行预腐蚀^[22],腐蚀时间为 30 d。腐蚀完成后取出试样,使用吹风机吹干试样(表面残存腐蚀介质),再安装在 MTS 809 型电液伺服拉扭疲劳机上进行疲劳裂纹扩展试验。

当温度一定时,应力比、加载载荷和载荷频率

相对较少,特别是在复合磷酸盐完井液腐蚀环境中的研究尚未见报道。随着我国南海高产气井的大力开发,在复合磷酸盐完井液与交变载荷的共同作用下,油管萌生裂纹并扩展失效的案例急剧增多^[17],造成的经济损失也急速增加。为此,作者开展了高产气井油管用 13Cr-L80 钢的腐蚀疲劳裂纹扩展行为研究,分析了在复合磷酸盐完井液腐蚀环境中应力比、加载载荷以及载荷频率对其腐蚀疲劳特性的影响规律。

1 试样制备与试验方法

试验材料取自南海西部高产气井现场尚未使用的 13Cr-L80 钢油管, 油管规格为 $4\frac{1}{2}$ " , 化学成分见表 1, 屈服强度和抗拉强度分别为 599.6 MPa 和 771.15 MPa, 硬度为 263.1 HV。根据 GB/T 6398—2017 在油管上取样, 加工成如图 1 所示的紧凑拉伸 (CT) 试样, 预制裂纹长度为 23 mm^[18-21]。

对试样腐蚀疲劳行为的影响最大。根据前期试验结果^[23],计算得到服役时高产气井油管的振动频率在 0.6~1.8 Hz,加载载荷在 10~14 kN,应力比在 0.05~0.25。为此,设置如下疲劳裂纹扩展试验参数:应力比分别为 0.05,0.10,0.15,0.20,0.25,加载载荷为 10 kN,载荷频率为 2.0 Hz;应力比为 0.10,加载载荷分别为 10,11,12,13,14 kN,载荷频率为 2.0 Hz;应力比为 0.10,加载载荷为 11 kN,载荷频率分别为 0.6,0.9,1.2,1.5,1.8 Hz(将振动频率作为输入参数设定为试验的载荷频率)。当疲劳裂纹长度达到 35 mm 或裂纹扩展速率连续 3 次超过 $0.01 \text{ mm} \cdot \text{周次}^{-1}$ 时结束试验。使用 FEI Quanta 450 FEG 型环境扫描电子显微镜(SEM)对试样断面的疲劳裂纹扩展区进行表面形貌分析。

通过试验可得到应力循环次数、裂纹长度及应力强度因子等参数。应力强度因子幅 ΔK 反映的是裂纹顶端附近区域内各点的应力强弱程度, 为一个循环内应力强度因子最大与最小值之差, 其计算公式为

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} = (P_{\max} - P_{\min}) \frac{1}{BW^{1/2}} g\left(\frac{a}{W}\right) \quad (1)$$

$$g\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{(2+\alpha)(0.886+4.64\alpha-13.32\alpha^2+14.72\alpha^3-5.6\alpha^4)}{(1-\alpha)^{3/2}} \quad (2)$$

式中: $K_{\max}$, $K_{\min}$ 分别为最大和最小应力强度因子; $P_{\max}$, $P_{\min}$ 分别为施加在试样两端的最大和最小载荷; B 为试样厚度; a 为裂纹长度; W 为试样宽度; α 为裂纹长度与试样宽度的比值, 即 $\alpha = a/W$ 。

裂纹扩展速率 $\frac{da}{dN}$ 与应力强度因子幅 ΔK 之间的关系可由 Paris 公式得到, 即

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (3)$$

式中: N 为载荷循环次数; C , m 均为材料常数。

2 试验结果与讨论

2.1 断口宏观形貌

在不同条件下进行疲劳裂纹扩展试验后, 所有试样的断口宏观形貌相似。由图 2 可见, 疲劳裂纹扩展试验后, 试样断口中有 3 个明显不同的区域, 依次为预制裂纹区、疲劳裂纹扩展区和塑性断裂区。采用电子显微镜对试样断口的疲劳裂纹扩展区进行形貌分析, 从而探索不同影响因素下 13Cr-L80 油管钢的腐蚀疲劳裂纹扩展行为。

2.2 应力比对腐蚀疲劳裂纹扩展行为的影响

由图 3 可见: 不同应力比下试样的疲劳裂纹扩展区均有明显的疲劳条带和二次裂纹, 疲劳条带呈相互

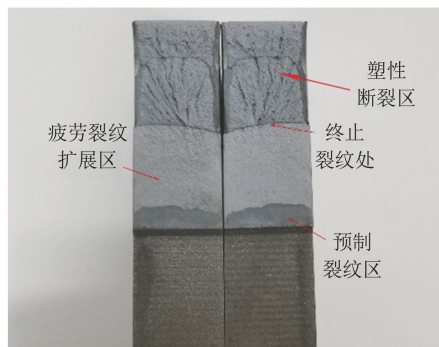


图 2 疲劳裂纹扩展试验后试样的断口宏观形貌

Fig. 2 Macroscopic fracture morphology of specimen after fatigue crack growth test

平行的沟槽状, 这是最典型的疲劳断口微观特征^[24]; 随着应力比增加, 二次裂纹数量呈现增多的趋势。根据断裂力学的基本原理^[25], 二次裂纹能够松弛裂纹尖端塑性变形区的局部应力, 消耗裂纹扩展的能量, 阻碍裂纹扩展进程。

由图 4 可见, 随着应力比增大, 试样的应力强度因子幅最大值减小。应力比越大, 试样受到的平均应力越大, 其断裂所需的临界应力强度因子越低, 使得应力强度因子幅最大值越小; 同时试样疲劳裂纹扩展区的二次裂纹数量增多, 消耗了裂纹扩展的能量, 导致应力强度因子幅最大值减小。但是应力比增大后,

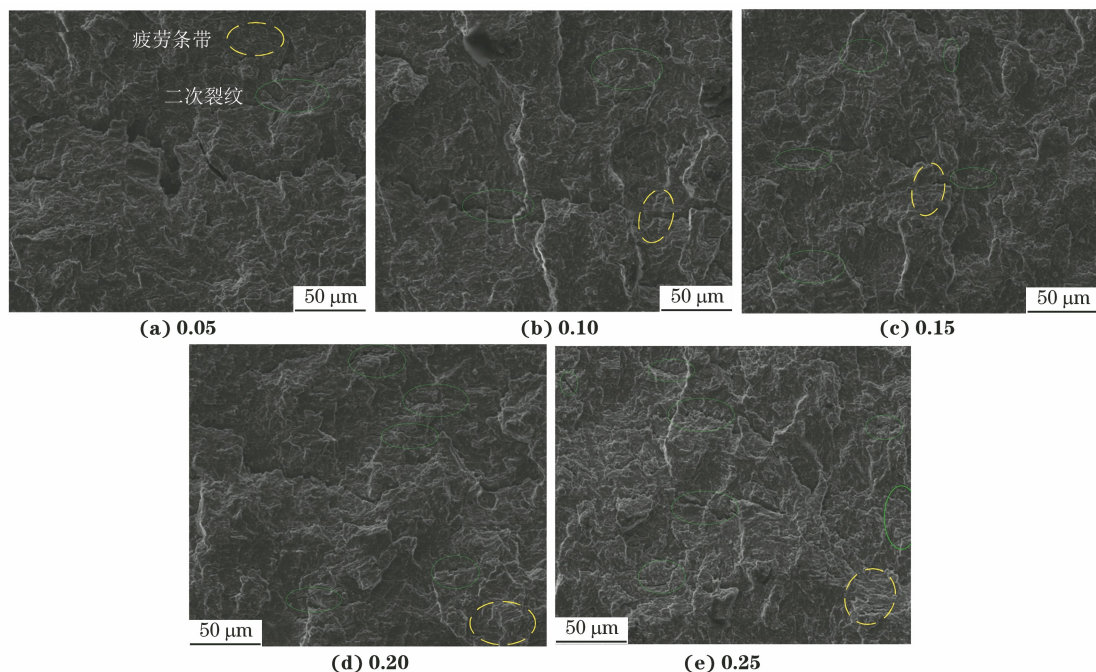


图 3 不同应力比下试样疲劳裂纹扩展区的 SEM 形貌 (载荷 10 kN, 载荷频率 2.0 Hz)

Fig. 3 SEM morphology of fatigue crack growth zone of specimens under different stress ratios (10 kN load, 2.0 Hz load frequency)

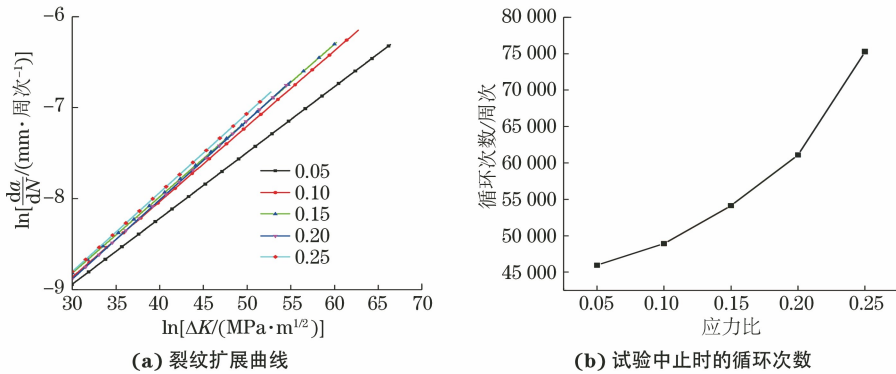


图 4 不同应力比下试样的裂纹扩展曲线及试验中止时的循环次数 (载荷 10 kN, 载荷频率 2.0 Hz)
Fig. 4 Crack growth curves (a) and number of cycles at test termination (b) of specimens under different stress ratios (10 kN load, 2.0 Hz load frequency)

交变载荷周期内裂纹张开时间占比增加,“闭合效应”相应减弱,导致裂纹开始扩展的门槛值降低,从而提高了裂纹扩展速率。随着应力比的增加,试验中止时的循环次数逐渐增加,这是因为高应力比降低了应力强度因子幅最大值,即在裂纹扩展阶段,应力强度因子处于较低水平,而裂纹扩展速率与应力强度因子幅存在正相关关系,因此裂纹扩展速率也处于较低水平。

2.3 加载载荷对腐蚀疲劳裂纹扩展行为的影响

由图 5 可见:不同加载载荷下试样的疲劳裂纹扩展区都存在二次裂纹,二次裂纹数量随加载载荷增大呈现减少的趋势;随着加载载荷增大,疲劳裂纹扩展区的沿晶断裂形貌中逐渐出现韧窝等塑性断裂

特征。其原因是加载载荷增大使得裂纹待扩展区产生明显的宏观塑性变形,塑性变形区在随后的裂纹扩展过程中形成了韧窝等断裂特征。

在加载载荷为 14 kN 下,试样未达到裂纹扩展试验的终止条件就发生塑性断裂,所以未测得应力强度因子幅最大值。由图 6 可见,随着加载载荷的增大,应力强度因子幅最大值和最小值呈现上升趋势。其原因是加载载荷增大,应力强度因子幅增大,裂纹扩展需要克服的裂尖塑性变形区的能量增大,导致裂纹扩展速率减小。若载荷过大(14 kN),应力循环中最小应力强度因子大于张开应力($K_{min} > K_{op}$),“闭合效应”消失,裂纹在整个应力加载过程中都处于张开状态,裂纹扩展速率快速增大。

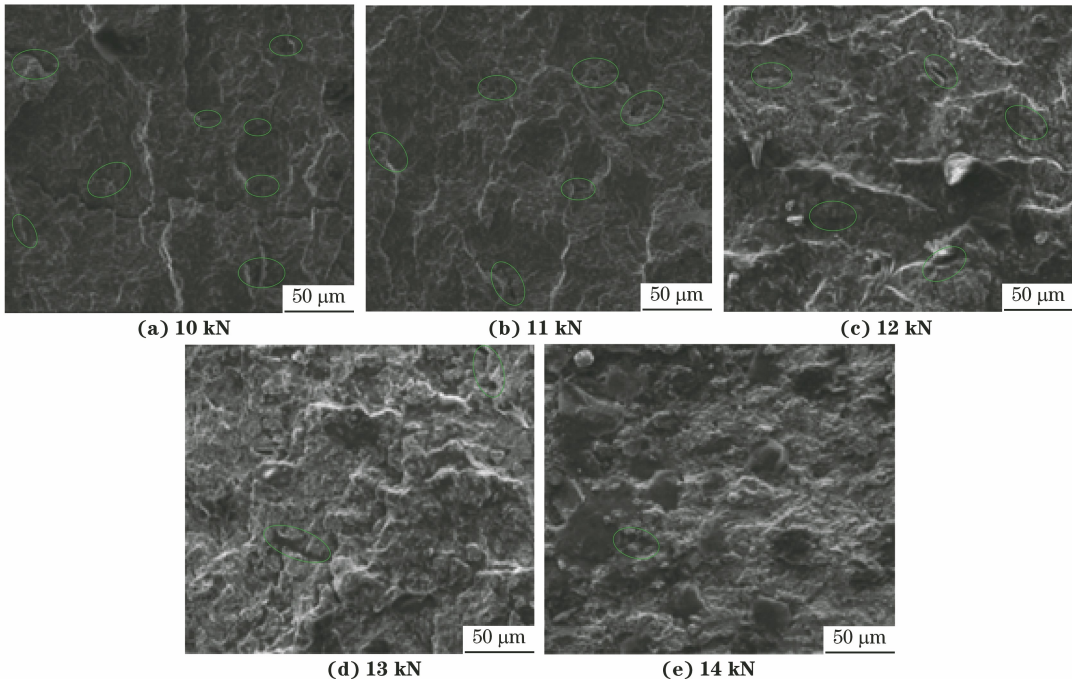


图 5 不同加载载荷下试样疲劳裂纹扩展区的 SEM 形貌 (应力比 0.10, 载荷频率 2.0 Hz)

Fig. 5 SEM morphology of fatigue crack growth zone of specimens under different loads (0.10 stress ratio, 2.0 Hz load frequency)

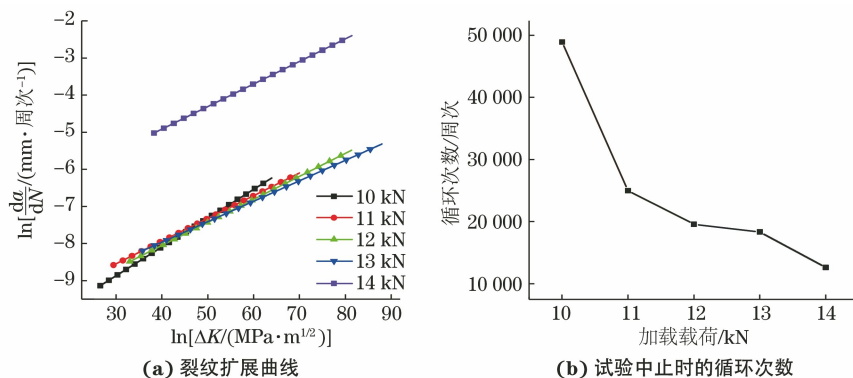


图 6 不同加载载荷下试样的裂纹扩展曲线及试验中止时的循环次数(应力比 0.10, 载荷频率 2.0 Hz)

Fig. 6 Crack growth curves (a) and number of cycles at test termination (b) of specimens under different loads (0.10 stress ratio, 2.0 Hz load frequency)

2.4 载荷频率对腐蚀疲劳裂纹扩展行为的影响

由图 7 可见:当载荷频率在 0.6~0.9 Hz 时,疲劳裂纹扩展区的二次裂纹数量较多,随后随着载荷

频率增大,二次裂纹数量逐渐减少;当载荷频率为 1.8 Hz 时,疲劳裂纹拓展区未出现明显的二次裂纹,疲劳条带比较明显。

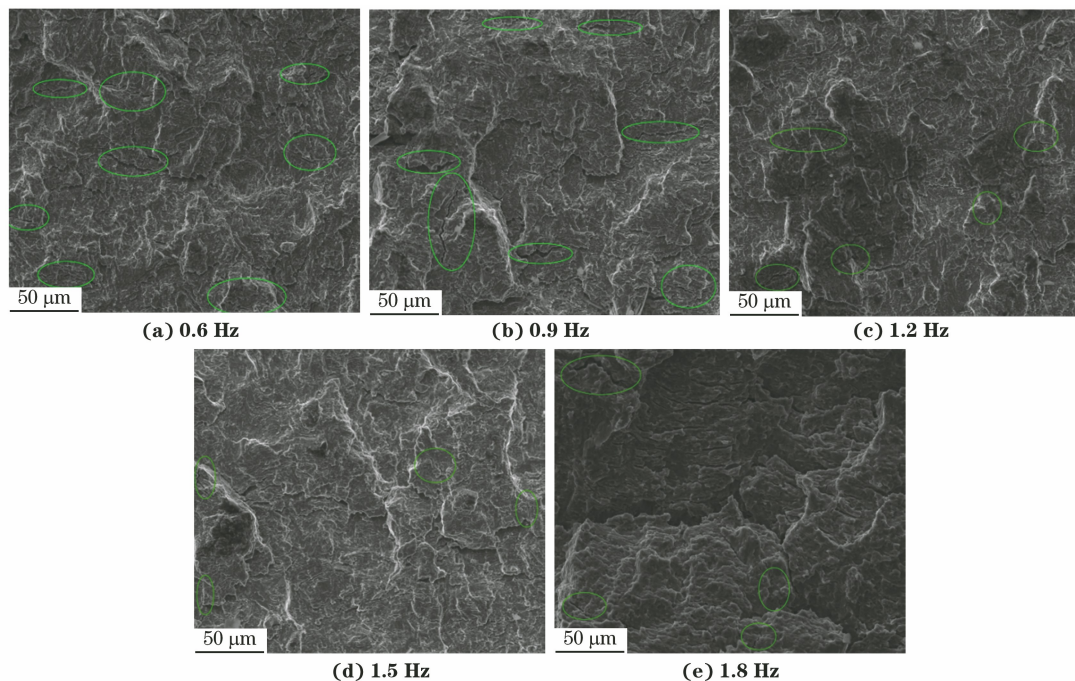


图 7 不同载荷频率下试样疲劳裂纹扩展区的 SEM 形貌(应力比 0.10, 载荷 11 kN)

Fig. 7 SEM morphology of fatigue crack growth zone of specimens under different load frequencies (0.10 stress ratio, 11 kN load)

由图 8 可见,随着载荷频率增加,裂纹扩展速率不断增大,试验中止时的循环次数不断减少。其原因是裂纹尖端应变速率加快,导致裂尖变形更加充分,加快了裂纹扩展速率^[26],使得试验中止时的循环次数减少。

3 结 论

(1) 随着应力比增大,13Cr-L80 钢的应力强度因子幅最大值减小,但疲劳裂纹扩展区上的二次裂

纹数量增加,腐蚀疲劳裂纹扩展速率增大,试验中止时的循环次数增加。

(2) 随着加载载荷增大,疲劳裂纹扩展区上的二次裂纹数量减少,腐蚀疲劳裂纹扩展速率减小,试验中止时的循环次数减少。

(3) 随着载荷频率增大,疲劳裂纹扩展区上的二次裂纹数量减少,但裂纹尖端应变速率加快,裂尖变形更充分导致腐蚀疲劳裂纹扩展速率增大,试验中止时的循环次数减少。

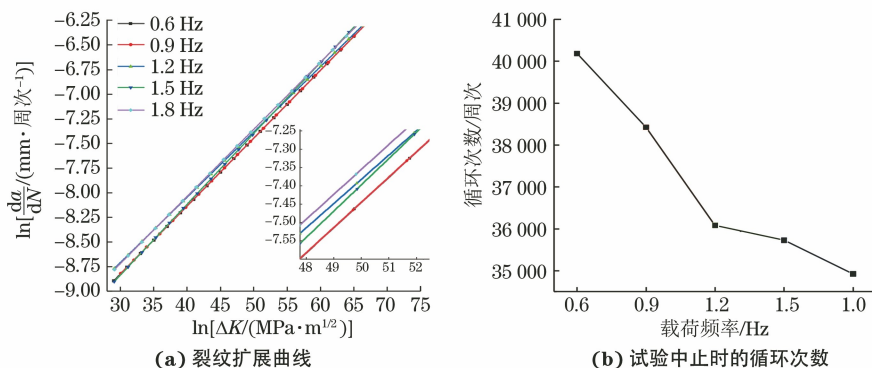


图 8 不同载荷频率下试样的裂纹扩展曲线及试验中止时的循环次数(应力比 0.10, 载荷 11 kN)

Fig. 8 Crack growth curves (a) and number of cycles at test termination (b) of specimens under different load frequencies (0.10 stress ratio, 11 kN load)

参考文献:

- [1] 吕祥鸿,刘乐乐,李健,等.高 pH 值完井液中钛合金管材的腐蚀行为研究[J].稀有金属材料与工程,2020,49(7):2326-2332.
LYU X H, LIU L L, LI J, et al. Corrosion behavior of titanium alloy in high pH value completion fluid [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49(7): 2326-2332.
- [2] 陈瑾闻.酸性环境中油井管钢裂纹扩展特性研究[D].西安:西安石油大学,2017.
CHEN J W. The research on crack propagation of oil tubing in acidic environment[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2017.
- [3] 王文涛.金属材料腐蚀疲劳研究现状[J].轻工科技,2015,31(2):33-34.
WANG W T. Research status of corrosion fatigue of metal materials[J]. Light Industry Science and Technology, 2015, 31(2): 33-34.
- [4] PARIS P, ERDOGAN F. A critical analysis of crack propagation laws[J]. Journal of Basic Engineering, 1963, 85(4): 528-533.
- [5] DONAHUE R J, CLARK H M, ATANMO P, et al. Crack opening displacement and the rate of fatigue crack growth[J]. International Journal of Fracture Mechanics, 1972, 8(2): 209-219.
- [6] FORMAN R G, KEARNEY V E, ENGLE R M. Numerical analysis of crack propagation in cyclic-loaded structures[J]. Journal of Basic Engineering, 1967, 89(3): 459-463.
- [7] MCEVILY A J, GROEGER J. On the threshold for fatigue crack growth[M]//Advances in Research on the Strength and Fracture of Materials. Amsterdam: Elsevier, 1978: 1293-1298.
- [8] CUI W C. A state-of-the-art review on fatigue life prediction methods for metal structures[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2002, 7(1): 43-56.
- [9] ADEIPE O, BRENNAN F, KOLIOS A. Corrosion fatigue load frequency sensitivity analysis [J]. Marine Structures, 2015, 42: 115-136.
- [10] HUANG Y F, YE X B, HU B R, et al. Equivalent crack size model for pre-corrosion fatigue life prediction of aluminum alloy 7075-T6[J]. International Journal of Fatigue, 2016, 88: 217-226.
- [11] 袁玲.气井完井管柱在完井液中断裂风险的防控技术[J].化学工程与装备,2020(2):221-222.
YUAN L. Prevention and control technology of fracture risk of gas well completion string in completion fluid[J]. Chemical Engineering & Equipment, 2020(2): 221-222.
- [12] 梁秀娟,嵇海旭.30CrNi2MoV 钢的腐蚀疲劳裂纹萌生与扩展行为研究[J].热加工工艺,2020,49(14):55-57.
LIANG X J, JI H X. Research on corrosion fatigue crack initiation and propagation behavior of 30CrNi2MoV steel[J]. Hot Working Technology, 2020, 49(14): 55-57.
- [13] 郑祥隆,谢旭,李晓章,等.钢丝裂纹扩展估算模型及其在预腐蚀疲劳寿命计算中的应用[J].土木工程学报,2017,50(3):101-107.
ZHENG X L, XIE X, LI X Z, et al. Estimation model for steel wire crack propagation and its application in calculation of pre-corrosion fatigue life[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(3): 101-107.
- [14] 王庆雷,李德才.疲劳裂纹扩展影响因素研究综述[J].机械工程师,2011(8):5-8.
WANG Q L, LI D C. Review of research on the influencing factors on fatigue crack growth[J]. Mechanical Engineer, 2011(8): 5-8.
- [15] 王恒,刘肖,倪广县.应力比对 E690 高强钢腐蚀疲劳裂纹扩展影响的试验研究[J].热加工工艺,2019,48(10):79-82.
WANG H, LIU X, NI G X. Experimental study on influence of stress ratio on corrosion fatigue crack propagation of E690 high strength steel[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(10): 79-82.
- [16] 范镓,苏豪展,陈凯,等.奥氏体不锈钢在海水环境中的腐蚀疲劳裂纹扩展行为[J].腐蚀与防护,2020,41(7):67-74.
FAN Y, SU H Z, CHEN K, et al. Corrosion fatigue crack growth behavior of austenitic stainless steels in seawater environment[J]. Corrosion & Protection, 2020, 41(7): 67-74.
- [17] 王鹏,王新虎,韩礼红,等.高温高压井油管完井液导致应力腐蚀开裂分析[J].金属热处理,2015,40(增刊 1):191-194.

- WANG P, WANG X H, HAN L H, et al. Completion fluid induced stress corrosion cracking in HPHT well tubing[J]. Heat Treatment of Metals, 2015, 40(S1): 191-194.
- [18] 卞宏友, 翟泉星, 李英, 等. 激光沉积修复 GH738 高温合金的组织与拉伸性能[J]. 中国激光, 2017, 44(10): 1002003.
- BIAN H Y, ZHAI Q X, LI Y, et al. Microstructure and tensile properties of laser deposition repair GH738 superalloy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(10): 1002003.
- [19] 宋威振. 预置应力对铝合金疲劳裂纹扩展性能影响规律的研究[D]. 西安: 长安大学, 2018.
- SONG W Z. Research on effect of pre-stress on fatigue crack growth behavior of Al-alloy[D]. Xi'an: Chang'an University, 2018.
- [20] 翟战江, 彭云, 刘涛, 等. 应力比对 25Cr2Ni2MoV 钢疲劳裂纹扩展门槛值的影响[J]. 物理测试, 2019, 37(1): 9-13.
- ZHAI Z J, PENG Y, LIU T, et al. Effect of stress ratio on fatigue crack propagation threshold value of 25Cr2Ni2MoV steel[J]. Physics Examination and Testing, 2019, 37(1): 9-13.
- [21] 李树肖, 李时磊, 王西涛, 等. 热老化对核电厂一回路管道失效概率的影响[J]. 核动力工程, 2013, 34(6): 138-142.
- LI S X, LI S L, WANG X T, et al. Effect of thermal aging on failure probability of a nuclear primary pipe[J]. Nuclear Power Engineering, 2013, 34(6): 138-142.
- [22] 徐文志. 气田封隔液高温高压条件下 CO₂ 腐蚀研究[J]. 长江大学学报(自科版), 2015, 12(31): 37-40.
- XU W Z. The CO₂ corrosion packing fluid for gas fields at HTHP[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2015, 12(31): 37-40.
- [23] LIU J, GUO X Q, WANG G R, et al. Bi-nonlinear vibration model of tubing string in oil & gas well and its experimental verification[J]. Applied Mathematical Modelling, 2020, 81: 50-69.
- [24] 冯诚诚. Ti-TiN-Zr-ZrN 多层膜残余应力及疲劳性能的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- FENG C C. Study on residual stress and fatigue properties of Ti-TiN-Zr-ZrN multilayer coatings[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [25] 程靳, 赵树山. 断裂力学[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- CHENG J, ZHAO S S. Fracture mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2006.
- [26] 果冲. 不同腐蚀条件下 4130X 材料疲劳裂纹扩展速率研究及寿命预测[D]. 北京: 北京工业大学, 2020.
- GUO C. Research on fatigue crack growth rate and life prediction of 4130X material under different corrosion conditions[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2020.
- (上接第 7 页)
- [46] 曹宇鹏, 王帅, 施卫东, 等. 激光冲击对 E690 高强钢激光熔覆修复微观组织的影响[J]. 光子学报, 2021, 50(4): 99-109.
- CAO Y P, WANG S, SHI W D, et al. Effect of laser shock on microstructure of the repair layer of E690 high strength steel by laser cladding[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(4): 99-109.
- [47] 万天一. 激光熔凝-激光冲击-石墨化退火灰铸铁组织及性能研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2020.
- WAN T Y. Study on microstructure and properties of gray cast Iron after laser surface melting-laser shock processing-graphitization annealing[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020.
- [48] 余金水. 高频微锻造对激光成形 304 不锈钢试件力学性能的影响[D]. 衡阳: 南华大学, 2012.
- YU J S. Influence of high-frequency micro-forging on mechanical properties of 304 stainless steel specimens by laser rapid forming[D]. Hengyang: University of South China, 2012.
- [49] 鲁耀钟, 雷卫宁, 任维彬, 等. 激光熔覆 Inconel718 合金裂纹分析及裂纹控制研究[J]. 表面技术, 2020, 49(9): 233-243.
- LU Y Z, LEI W N, REN W B, et al. Crack analysis and control of laser cladding Inconel718 alloy[J]. Surface Technology, 2020, 49(9): 233-243.
- [50] LIU Z, SONG K, GAO B, et al. Microstructure and mechanical properties of Al₂O₃/ZrO₂ directionally solidified eutectic ceramic prepared by laser 3D printing[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2016, 32(4): 320-325.
- [51] 周圣丰, 曾晓雁, 胡乾午, 等. 激光-感应复合熔覆 Ni 基 WC 复合层的工艺研究[J]. 激光技术, 2009, 33(2): 124-126.
- ZHOU S F, ZENG X Y, HU Q W, et al. Process study of Ni-based WC composite coatings by means of laser-induction hybrid cladding[J]. Laser Technology, 2009, 33(2): 124-126.
- [52] LU Y Z, HUANG G K, WANG Y Z, et al. Crack-free Fe-based amorphous coating synthesized by laser cladding[J]. Materials Letters, 2018, 210: 46-50.
- [53] ZHANG Z L, ZHAO Y, SHAN J G, et al. The role of shot peening on liquation cracking in laser cladding of K447A nickel superalloy powders over its non-weldable cast structure[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 823: 141678.
- [54] 黄海博, 孙文磊, 黄勇. 超高速激光熔覆 Fe 基非晶合金单道工艺分析[J]. 表面技术, 2022, 51(7): 410-419.
- HUANG H B, SUN W L, HUANG Y. Analysis on the process of single track Fe based amorphous alloy during ultra high speed laser cladding[J]. Surface Technology, 2022, 51(7): 410-419.
- [55] 张煜, 姜丽艳, 徐庆龙, 等. 超高速激光熔覆镍基 WC 涂层的显微结构与耐磨性能[J]. 金属学报, 2020, 56(11): 1530-1540.
- ZHANG Y, LOU L Y, XU Q L, et al. Microstructure and wear resistance of Ni-based WC coating by ultra-high speed laser cladding[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(11): 1530-1540.