

DOI:10.11784/tdxbz202407015

EH36 钢变幅疲劳载荷下裂纹扩展行为和机理研究

徐连勇^{1,2}, 黄金超¹, 赵雷^{1,2}

(1. 天津大学材料科学与工程学院, 天津 300350; 2. 天津市现代连接技术重点实验室, 天津 300350)

摘要: 针对海洋平台服役过程中时常遭遇到随机海况和复杂载荷作用的情况, 设计对海洋平台用钢 EH36 钢进行变幅疲劳载荷下疲劳裂纹扩展行为试验, 研究了变幅疲劳载荷作用下 EH36 钢疲劳裂纹扩展行为和机理。采用柔度法测量变幅疲劳载荷作用下的裂纹扩展速率, 并用数字图像相关(DIC)分析了变幅疲劳载荷施加前后裂纹尖端塑性区尺寸变化。采用 SEM 分析了不同形式变幅载荷作用区域的断口形貌特征, 用裂纹尖端塑性区尺寸变化和对应断口形貌特征解释了变幅疲劳载荷作用下的裂纹扩展行为和内在机理。结果表明: 单次拉伸过载能降低疲劳裂纹扩展速率, 延长疲劳寿命; 单次压缩过载能短暂加速疲劳裂纹扩展速率, 对疲劳寿命影响不大; 不同顺序拉伸和压缩过载与单次拉伸过载现象保持一致, 均能降低疲劳裂纹扩展速率, 延长疲劳寿命, 但拉压过载的先后施加顺序会显著影响疲劳裂纹扩展的迟滞效应。分析结果表明: 拉伸过载过程增大裂纹尖端塑性区, 并钝化裂纹尖端, 从而使疲劳裂纹扩展速率降低; 压缩过载过程减小裂纹尖端塑性区, 并使裂纹尖端尖锐, 从而使疲劳裂纹扩展速率加速; 不同顺序拉伸和压缩过载是两种作用效果的结合。试验结果能很好地描述变幅疲劳载荷下的裂纹扩展行为并给出内在机理解释, 为海洋平台在复杂载荷环境下服役所造成的疲劳损伤提供理论依据和实用价值。

关键词: 疲劳裂纹扩展速率; 变幅疲劳载荷; 数字图像相关; 塑性区; 断口分析

中图分类号: TG405

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2025)06-0567-09

Crack Growth Behavior and Mechanism Under Variable Amplitude Fatigue Load in EH36 Steel

Xu Lianyong^{1,2}, Huang Jinchao¹, Zhao Lei^{1,2}

(1. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, Tianjin 300350, China)

Abstract: Given the random sea conditions and complex loads often encountered by offshore platforms, the fatigue crack growth behavior of EH36 steel used in these platforms was tested under variable amplitude fatigue loads. This study aimed to investigate the behavior and mechanisms of fatigue crack growth in EH36 steel under variable amplitude fatigue loads. The flexibility method was used to measure the crack growth rate under variable amplitude fatigue loads. Digital image correlation (DIC) was used to analyze changes in the plastic zone size at the crack tip before and after applying variable amplitude fatigue loads. Scanning electron microscopy (SEM) was used to examine the fracture morphology characteristics under different variable amplitude fatigue load forms. These analyses helped explain the crack growth behaviors and intrinsic mechanisms under variable amplitude fatigue loads. The results indicate that a single tensile overload reduces the fatigue crack growth rate and prolongs fatigue life. Conversely, a single compressive overload transiently accelerates the fatigue crack growth rate with minimal effect on fatigue life. Different sequences of tensile and compressive overloads mimic the effects of a single tensile overload, reducing the fatigue crack growth rate and prolonging fatigue life. However, the successive order of tensile and compressive overloads significantly affects the hysteresis effect on crack growth. The analysis results show that tensile overload increases the

收稿日期: 2024-07-24; 修回日期: 2024-09-15.

作者简介: 徐连勇(1975—), 男, 博士, 教授, xulianyong@tju.edu.cn.

通信作者: 赵雷, zhaolei85@tju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52025052, 52075374).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52025052, No. 52075374).

plastic zone at the crack tip, blunting it and reducing the fatigue crack growth rate. The compressive overload process reduces the plastic zone at the crack tip, sharpening it and accelerating the fatigue crack growth rate. Different sequences of tensile and compressive overloads combine these effects. These findings effectively describe crack growth behavior under variable amplitude fatigue loads and provide an explanation of the underlying mechanisms. This research offers a theoretical basis and practical insights into managing fatigue damage in offshore platforms operating under complex loading environments.

Keywords: fatigue crack growth rate; variable amplitude fatigue load; digital image correlation(DIC); plastic zone; fracture analysis

随着社会经济的不断发展,人类对化石能源的需求不断增大,海洋中存在着大量的化石能源,海洋平台是海洋资源开发必不可少的大型装备^[1].海洋平台在服役过程中遭受着海浪冲击、大型机器启停等自然载荷的交互作用,疲劳问题不可避免,并日益突出^[2-4].海洋平台结构件在疲劳载荷往复循环后,会萌生疲劳裂纹,疲劳裂纹的萌生和扩展不仅会导致水密性破坏而使储备浮力不足,还会导致结构完整性破坏而使极限承载能力降低^[5].因此,对海洋平台结构用钢进行疲劳性能测试十分必要,这包括对其疲劳裂纹扩展行为的充分测试,特别是要考虑到海洋平台结构件所遭受的随机海况和变幅疲劳载荷^[3,5].

大量试验表明,变幅疲劳载荷会对结构件的疲劳裂纹扩展行为造成重要影响^[6-9].Tu等^[10]对高强钢 AH36 进行了单次拉伸过载的疲劳裂纹扩展试验,试验结果表明,拉伸过载的施加导致疲劳裂纹扩展速率降低,且拉伸过载比越大,裂纹扩展迟滞效应越明显.当进行到 2.5 倍的拉伸过载时,裂纹几乎停止了.Kalnaus等^[11-12]对 AL6XN 和 304L 不锈钢进行了压缩过载的疲劳裂纹扩展试验,发现施加压缩过载会使裂纹扩展曲线出现一个短暂的加速.Liang等^[7]对 S355J2W+N 钢进行不同顺序的拉伸和压缩过载的疲劳裂纹扩展试验,结果表明,施加不同顺序过载与施加单次拉伸过载对疲劳裂纹扩展的影响相同,但拉压过载的先后施加顺序对疲劳裂纹的迟滞效应有显著影响.变幅疲劳载荷对结构件的疲劳裂纹扩展行为产生的影响与不同形式变幅疲劳载荷施加后裂纹尖端变形密切相关.

裂纹尖端变形引起的裂纹闭合理论目前广泛地用来解释过载后的裂纹扩展行为.Elber^[13]首先提出了裂纹闭合的概念,并利用塑性诱发裂纹闭合的理论来解释过载后的裂纹扩展行为.Wang等^[5]对 AH36 钢进行了单次拉伸过载下的疲劳裂纹扩展实验,采用数字图像相关(DIC)技术研究了应变分布和循环疲劳特性的演变过程,结果表明,拉伸过载后裂纹尖端会提前闭合.He等^[14]采用实验、数值和理论相结合

的方法,系统研究了 Q345 钢单次拉伸过载后的疲劳裂纹扩展行为.结果表明,残余塑性楔在过载位置前后发生不连续闭合,限制了裂纹尖端的应力应变范围,从而延缓了裂纹的扩展.Zhang等^[15]研究了拉伸过载对 2205 双相不锈钢疲劳裂纹行为,采用中子衍射技术测量了裂纹尖端残余应力,并用有限元法模拟了残余应力,结果表明,拉伸过载后裂纹尖端在卸载时存在压应力集中.

目前国内外学者的研究主要集中在单次拉伸过载后裂纹尖端塑性区的裂纹闭合效应对疲劳裂纹扩展行为的影响,对其他形式的变幅疲劳载荷造成的裂纹尖端塑性区变化研究较少.笔者以 EH36 钢为研究对象,开展 EH36 钢不同形式变幅疲劳下的疲劳裂纹扩展试验,得到 EH36 钢变幅疲劳下的疲劳裂纹扩展速率曲线和 $a-N$ 曲线;采用 DIC 技术定量分析不同形式变幅疲劳载荷作用前后裂纹尖端塑性区变化,用塑性区的变化来揭示不同形式变幅载荷对疲劳裂纹扩展行为造成影响的内在机理;采用超景深光学显微镜和扫描电镜观察不同形式变幅疲劳载荷断裂后的断口形貌,进一步分析变幅疲劳载荷对疲劳裂纹扩展行为产生影响的内在机理.

1 试验

1.1 试样

试验选用 20 mm 厚的 EH36 轧制钢板,钢的化学成分如表 1 所示,EH36 钢是海洋钻井平台最广泛使用的材料^[1,16-17].试样采用紧凑拉伸(CT)试样,裂纹扩展方向与轧制方向垂直.根据 ASTM E647-15 标准^[18],紧凑拉伸试样的尺寸细节如图 1(a)所示.

表 1 EH36 钢化学成分

Tab.1 Chemical composition of EH36 steel

W _C	W _{Si}	W _{Mn}	W _P	W _S	W _{Nb}	W _{Al}	W _V	W _{Fe}
0.16	0.6	1.44	0.012	0.006	0.032	0.032	0.034	余量

1.2 试验方法

用砂纸将 CT 试样打磨 400 目,并用记号笔在试

样的机加工缺口顶端(前沿)2.5 mm 处画上标记. 预制疲劳裂纹试验采用高频疲劳试验机(GPS100), 将裂纹预制到标记处, 以确保正式试验裂纹尖端保持尖锐. 疲劳裂纹扩展试验采用电液伺服疲劳试验机(SDZ-0100), 试验在室温进行, 疲劳载荷应力比 $R = 0.1$, 最大载荷 $P_{\max, BL} = 10 \text{ kN}$, 载荷波形为正弦波, 加载频率为 $f = 10 \text{ Hz}$. 试验设计探究不同拉伸过载比 ($R_{OL} = P_{\max, OL}/P_{\max, BL} = 1.25, 1.50, 1.75$)、不同压缩过载比 ($R_{UL} = P_{\min, UL}/P_{\max, BL} = -0.25, -0.50, -0.75$) 和不同顺序过载 ($R_{OL} = 1.75, R_{UL} = -0.75$ 和 $R_{UL} = -0.75, R_{OL} = 1.75$) 对疲劳裂纹扩展的影响, 具体试验参数见表 2. 采用柔度法记录裂纹长度, 当裂纹长度 $a = 16 \text{ mm}$ 时, 对相应的试样施加变幅疲劳载荷, 常幅和变幅疲劳载荷的示意如图 1(b) ~ (f) 所示.

用砂纸将 CT 试样打磨 400 目, 并用黑白涂料均匀喷涂在试样表面. 采用高频疲劳试验机(GPS100)

进行 DIC 分析, 分析前将 CT 试样预制至 $a = 16 \text{ mm}$. 分析设计探究常幅疲劳载荷(CAL)、单次拉伸过载(OL)、单次压缩过载(UL)、先拉伸过载后压缩过载(OL-UL)和先压缩过载后拉伸过载(UL-OL)作用前后裂纹尖端应变变化. 以零载荷为基准, 变幅疲劳载荷施加前的平均载荷点为起点, 施加后的平均载荷点为终点. 拍摄并分析在各变幅载荷周期内的过载平均载荷点 A、B、C 处的裂纹尖端应变场, 特征载荷点如图 1(b) ~ (f) 所示. 将应变大于 0.2% 的区域视为裂纹尖端塑性区^[17,19], 分析各变幅载荷施加前后裂纹尖端塑性区变化.

将不同形式变幅疲劳载荷作用后的疲劳断裂的试样拉断, 并将疲劳断口试样用除锈剂超声清洗 20 min 去除断口上的氧化物. 采用超景深光学显微镜(ZEISS Smart Zoom 5)分析不同断口的宏观形貌; 采用扫描电镜(Sigma 300)分析不同断口的微观形貌.

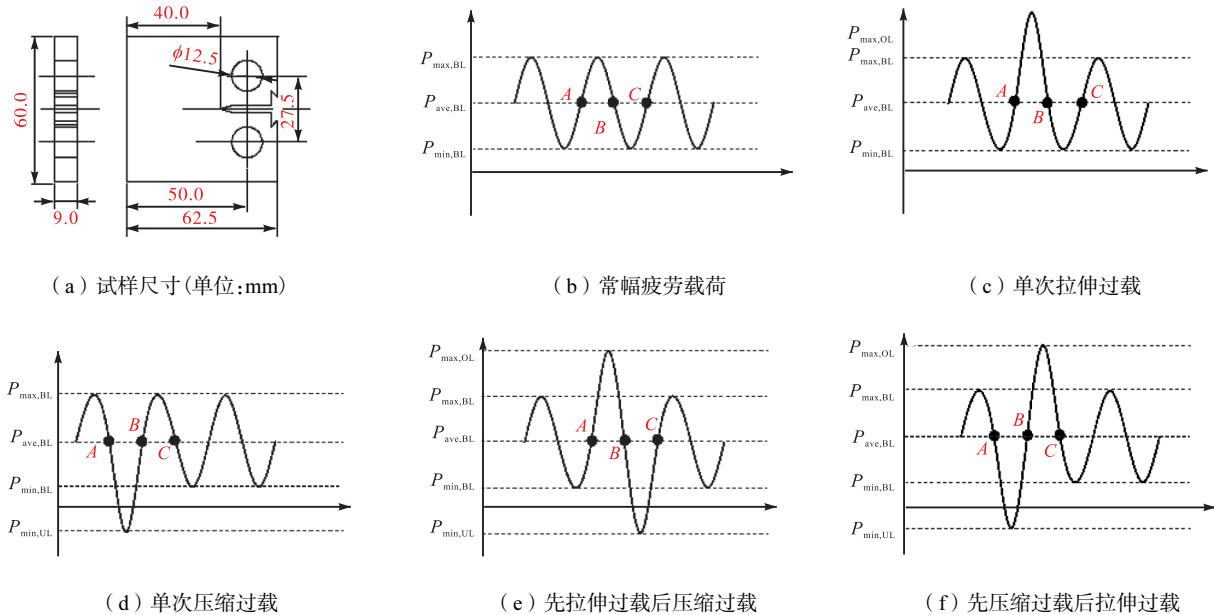


图 1 试样尺寸和载荷波形示意

Fig.1 Schematic diagram of specimen dimensions and load waveforms

表 2 疲劳裂纹扩展试验参数

Tab.2 Test parameters of fatigue crack growth

试样编号	R	$P_{\max, BL}/\text{kN}$	$P_{\min, BL}/\text{kN}$	$P_{\max, OL}/\text{kN}$	$P_{\min, UL}/\text{kN}$	R_{OL}	R_{UL}
CAL-1	0.1	10	1				
OL-1	0.1	10	1	12.5		1.25	
OL-2	0.1	10	1	15.0		1.50	
OL-3	0.1	10	1	17.5		1.75	
UL-1	0.1	10	1		-2.5		-0.25
UL-2	0.1	10	1		-5.0		-0.50
UL-3	0.1	10	1		-7.5		-0.75
OL-UL-1	0.1	10	1	17.5	-7.5	1.75	-0.75
UL-OL-1	0.1	10	1	17.5	-7.5	1.75	-0.75

2 结果分析

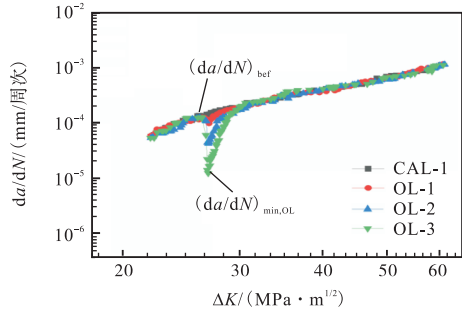
2.1 疲劳裂纹扩展测试结果

2.1.1 单次拉伸过载测试结果

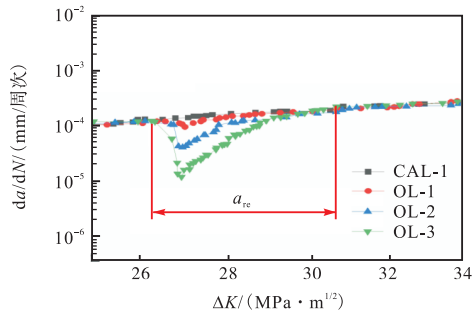
不同拉伸过载比下的单次拉伸过载的疲劳裂纹扩展速率(da/dN)曲线以及 $a-N$ 曲线如图 2 所示. 图中: a_{re} 定义为迟滞区域尺寸^[6]; N_{OL} 表示单次拉伸过载时过载点到结束的循环次数.

为了定量分析不同拉伸过载比下疲劳裂纹扩展行为, 从疲劳裂纹扩展速率曲线和 $a-N$ 曲线中提取了

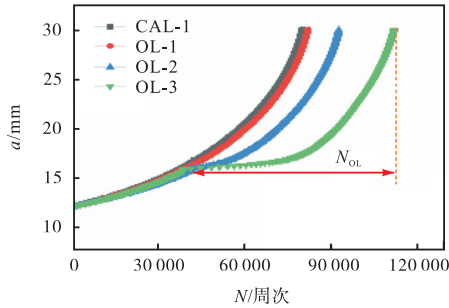
一些特征参数,如表 3 所示. 表中: $(da/dN)_{bef}$ 和 $(da/dN)_{min,OL}$ 分别表示过载前的裂纹扩展速率和过载后的最小裂纹扩展速率; $\delta_{da/dN}$ 为迟滞系数, $\delta_{da/dN} = (da/dN)_{min,OL} / (da/dN)_{bef}$.



(a) 疲劳裂纹扩展速率曲线



(b) 图(a)局部放大



(c) a-N 曲线

图 2 单次拉伸过载的疲劳裂纹扩展速率曲线和 a-N 曲线

Fig.2 Fatigue crack growth rate curves and a-N curves under a single tensile overload

表 3 单次拉伸过载下疲劳裂纹扩展特征参数

Tab.3 Characteristic parameters of fatigue crack growth under a single tensile overload

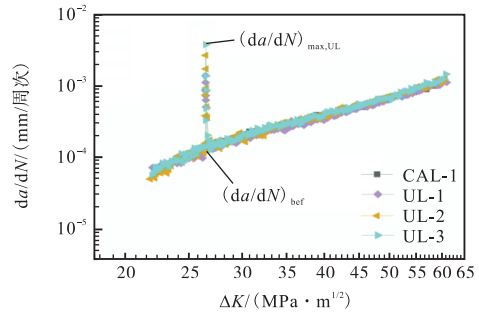
试样编号	R_{OL}	$P_{max,OL}/kN$	$(da/dN)_{bef}/(mm/周次)$	$(da/dN)_{min,OL}/(mm/周次)$	$\delta_{da/dN}$	$N_{OL}/周次$	a_{re}/mm
CAL-1			1.52×10^{-4}			44 159	
OL-1	1.25	12.5	1.30×10^{-4}	1.03×10^{-4}	0.79	45 027	0.70
OL-2	1.50	15.0	1.31×10^{-4}	4.45×10^{-5}	0.34	52 035	1.66
OL-3	1.75	17.5	1.48×10^{-4}	1.30×10^{-5}	0.09	73 907	2.64

如图 2(a) 所示,在常幅加载阶段,疲劳裂纹扩展速率和应力强度因子(ΔK)在双对数坐标下呈线性关系. 当施加拉伸过载时,疲劳裂纹扩展速率急剧下

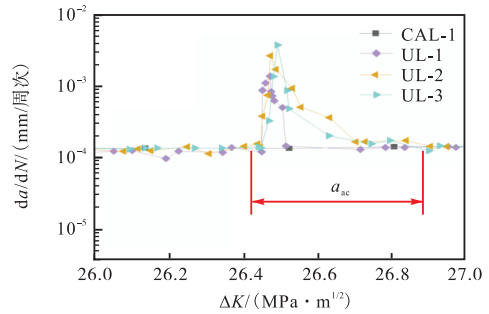
降,然后逐渐增加,缓慢恢复到线性状态. 从表 3 中延迟系数 $\delta_{da/dN}$ 可以看出,疲劳裂纹速率的变化程度与拉伸过载比密切相关. 拉伸过载比越大,疲劳裂纹扩展速率迟滞效应越明显;当 R_{OL} 为 1.25、1.50、1.75 时,对应的疲劳裂纹扩展速率分别衰减为过载前的裂纹扩展速率的 79%、34%、9%. 同时,如图 2(c) 的 a-N 曲线所示,当施加拉伸过载时,疲劳寿命显著增加,在 a-N 曲线中形成一个明显的平台区域. 从表 3 中的 N_{OL} 可以看出,疲劳寿命的增加程度同样与过载比密切相关,当 R_{OL} 为 1.25、1.50、1.75 时,对应的 N_{OL} 分别增加至常幅疲劳载荷 N_{OL} 的 102%、117%、167%. 上述现象与裂纹尖端变形行为密切相关.

2.1.2 单次压缩过载测试结果

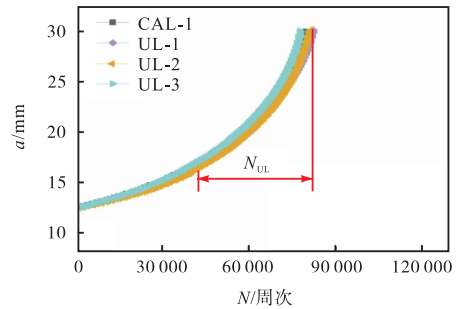
不同压缩过载比下的单次压缩过载的疲劳裂纹扩展速率曲线以及 a-N 曲线如图 3 所示. 图中:



(a) 疲劳裂纹扩展速率曲线



(b) 图(a)局部放大



(c) a-N 曲线

图 3 单次压缩过载的疲劳裂纹扩展速率曲线和 a-N 曲线
Fig.3 Fatigue crack growth rate curves and a-N curves under a single compressive overload

a_{ac} 定义为加速区域尺寸^[6]; N_{UL} 表示单次压缩过载时过载点到结束的循环次数.

为了定量分析不同压缩过载比下裂纹扩展行为, 从疲劳裂纹扩展速率曲线和 $a-N$ 曲线中提取了一些特征参数, 如表 4 所示. 表中: $(da/dN)_{max,UL}$ 表示过载后的最大裂纹扩展速率; $\eta_{da/dN}$ 为加速系数, $\eta_{da/dN} = (da/dN)_{max,UL} / (da/dN)_{bef}$.

如图 3(a) 所示, 在常幅加载阶段, 疲劳裂纹扩展速率和应力强度因子在双对数坐标下仍呈线性关系. 当施加压缩过载时, 疲劳裂纹扩展速率瞬间增大, 然后迅速恢复到线性状态. 从表 4 中加速系数 $\eta_{da/dN}$ 可以看出, 疲劳裂纹扩展速率的变化程度与压缩过载比密切相关. 压缩过载比越大, 裂纹扩展速率加速效应越明显; 当 R_{UL} 为 -0.25、-0.50、-0.75 时, 对应的疲劳裂纹扩展速率分别增加至过载前的裂纹扩展速率的 11.18 倍、18.51 倍、26.81 倍. 同时, 如图 3(c) 的 $a-N$ 曲线所示, 由于压缩过载 a_{ac} 极小, 压缩过载对后续疲劳寿命几乎没有影响, 这可以通过不同压缩过载比的 N_{UL} 与常幅疲劳载荷下的 N_{UL} 基本保持一致反映出来, 如表 4 所示. 上述现象与裂纹尖端变形行为密切相关.

表 4 单次压缩过载下疲劳裂纹扩展特征参数

Tab.4 Characteristic parameters of fatigue crack growth under a single compressive overload

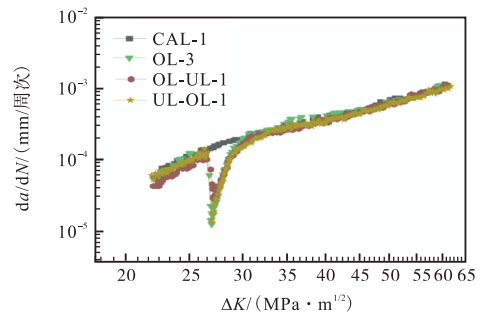
试样编号	R_{UL}	$P_{min,UL}/kN$	$(da/dN)_{bef}/(mm/周次)$	$(da/dN)_{max,UL}/(mm/周次)$	$\eta_{da/dN}$	$N_{UL}/周次$	a_{ac}/mm
CAL-1			1.52×10^{-4}			44 159	
UL-1	-0.25	-2.5	1.27×10^{-4}	1.42×10^{-3}	11.18	45 096	0.04
UL-2	-0.50	-5.0	1.48×10^{-4}	2.74×10^{-3}	18.51	42 325	0.17
UL-3	-0.75	-7.5	1.44×10^{-4}	3.86×10^{-3}	26.81	42 173	0.25

2.1.3 不同顺序下拉伸和压缩过载测试结果

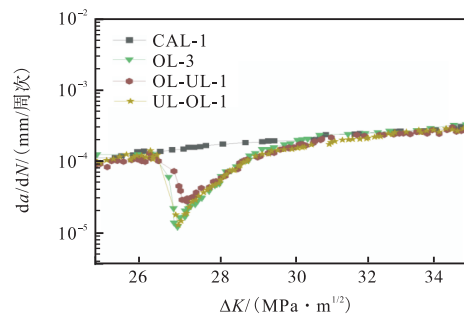
不同顺序下拉伸和压缩过载的疲劳裂纹扩展速率曲线以及 $a-N$ 曲线如图 4 所示. 为定量分析, 从裂纹扩展曲线和 $a-N$ 曲线中提取了一些特征参数, 如表 5 所示.

图 4(a) 和 (c) 可以看出, 无论是先拉伸过载后压缩过载, 还是先压缩过载后拉伸过载, 对疲劳裂纹扩展行为的影响均与单次拉伸过载保持一致. 从表 5 中延迟系数 $\delta_{da/dN}$ 可以看出, 先拉伸过载后压缩过载和先压缩过载后拉伸过载, 对应的疲劳裂纹扩展速率

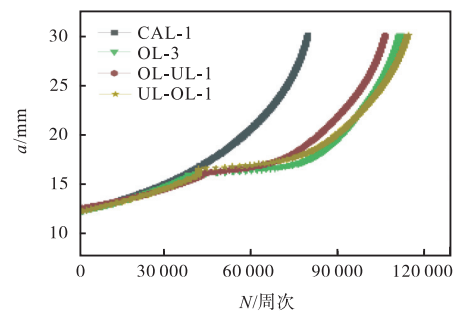
分别衰减为过载前的裂纹扩展速率的 23%、11%; 从表 5 中的 N_{OL} 可以看出, 先拉伸过载后压缩过载和先压缩过载后拉伸过载, 对应的 N_{OL} 分别增加至常幅疲劳载荷 N_{OL} 的 146%、168%. 由这两个特征参数变化可以得出, 先压缩过载后拉伸过载与相同拉伸过载比下的单次拉伸过载对疲劳裂纹扩展行为的影响基本一致; 而先拉伸过载后压缩过载对比相同拉伸过载比下的单次拉伸过载, 裂纹扩展速率衰减率由 9% 增加到 23%, 后续循环寿命也由 167% 衰减至 146%, 疲



(a) 疲劳裂纹扩展速率曲线



(b) 图(a)局部放大



(c) a-N 曲线

图 4 不同顺序过载疲劳裂纹扩展速率曲线和 a-N 曲线
Fig.4 Fatigue crack growth rate curves and a-N curves under different sequential overloads

表 5 不同顺序过载下疲劳裂纹扩展特征参数

Tab.5 Characteristic parameters of fatigue crack growth under different sequential overloads

试样编号	R	$P_{max,OL}/kN$	$P_{min,UL}/kN$	$(da/dN)_{bef}/(mm/周次)$	$(da/dN)_{min,OL}/(mm/周次)$	$\delta_{da/dN}$	$N_{OL}/周次$	a_{re}/mm
CAL-1	0.1			1.52×10^{-4}			44 159	
OL-3	0.1	17.5		1.48×10^{-4}	1.30×10^{-5}	0.09	73 907	2.64
OL-UL-1	0.1	17.5	-7.5	1.22×10^{-4}	2.91×10^{-5}	0.23	64 492	2.34
UL-OL-1	0.1	17.5	-7.5	1.26×10^{-4}	1.38×10^{-5}	0.11	74 388	2.70

劳裂纹扩展迟滞效应得到明显削弱. 上述现象与裂纹尖端变形行为密切相关.

2.2 DIC 分析

大量试验表明, 施加拉伸过载后疲劳裂纹继续扩展存在显著的裂纹闭合效应. 裂纹闭合效应指在一个卸载周期, 裂纹扩展上下面在载荷未降至 $P_{min,BL}$ 时提前闭合, 使得有效应力强度因子 ΔK_{eff} 小于施加的应力强度因子 ΔK , 从而导致疲劳裂纹扩展速率降低. 当载荷从 $P_{max,BL}$ 降到 $P_{min,BL}$ 的卸载阶段, 裂纹尖端塑性区会阻碍周围弹性材料的弹性回复, 从而使塑性区内有残余压应力, 导致裂纹提前闭合. 拉伸过载导致显著裂纹闭合效应本质上是过载过程使裂纹尖端塑性区尺寸增大, 疲劳裂纹扩展行为与裂纹尖端塑性区尺寸密切相关. 裂纹尖端塑性区尺寸指的是裂纹尖端前沿由于应力集中发生塑性变形的区域. 为探究不同形式变幅疲劳载荷对疲劳裂纹扩展行为影响的内在机理, 用 DIC 技术分析不同形式变幅疲劳载荷下裂纹尖端塑性区尺寸变化.

图 5 为不同形式常幅和变幅疲劳施加前后特征载荷点下垂垂直于裂纹尖端方向的 DIC 分析图, 为了定量分析不同形式变幅载荷作用前后裂纹尖端塑性

区变化情况, 将应变大于 0.20% 的区域视为裂纹尖端塑性区, 用 image J 软件测量图中塑性区尺寸, 如表 6 所示. 其中 S_A 、 S_B 、 S_C 分别表示在点 A、B、C 下塑性区尺寸, D_{AB} 表示为载荷点 B 相对于载荷点 A 的塑性区尺寸变化倍数, D_{BC} 表示为载荷点 C 相对于载荷点 B 的塑性区尺寸变化倍数, D_{AC} 表示为载荷点 C 相对于载荷点 A 的塑性区尺寸变化倍数, 即 $D_{AB} = S_B/S_A$ 、 $D_{BC} = S_C/S_B$ 、 $D_{AC} = S_C/S_A$.

表 6 裂纹尖端塑性区尺寸

Tab.6 Dimensions of the plastic zone at the crack tip

试样编号	S_A/mm^2	S_B/mm^2	S_C/mm^2	D_{AB}	D_{BC}	D_{AC}
CAL-1	0.747	0.827	0.743	1.11	0.89	0.99
OL-3	0.793	3.562	3.282	4.49	0.92	4.14
UL-3	0.845	0.338	0.699	0.40	2.07	0.83
UL-OL-1	0.781	0.347	3.585	0.44	10.33	4.59
OL-UL-1	0.972	4.196	2.765	4.32	0.66	2.84

图 5(a) 为常幅载荷循环下裂纹尖端的 DIC 分析图. 从表 6 中对应的数据可以得出, 从点 A 到点 B 的加载阶段, 裂纹尖端塑性区尺寸略微增加, 增加至原有尺寸的 1.11 倍; 从点 B 到点 C 的卸载阶段, 裂纹尖端塑性区尺寸略微减小, 减小原有尺寸的 10%; 从点 A 到点 C, 裂纹尖端塑性区尺寸基本保持不变, 为原有塑性区尺寸的 99%. 总体来看, 由于裂纹尖端塑性区尺寸在常幅疲劳载荷作用下保持不变, 因此对应的疲劳裂纹扩展速率也保持稳定.

图 5(b) 为单次拉伸过载下裂纹尖端的 DIC 分析图. 从表 6 对应的数据可以得出, 从点 A 到点 B 的拉伸过载阶段, 裂纹尖端塑性区尺寸显著增加, 增加至原有尺寸的 4.49 倍; 从点 B 到点 C 的卸载阶段, 裂纹尖端塑性区尺寸略微减小, 减小原有尺寸的 8%; 从点 A 到点 C, 裂纹尖端塑性区尺寸显著增加, 为原有塑性区尺寸的 4.14 倍. 总体来看, 由于裂纹尖端塑性区尺寸在单次拉伸过载作用下显著增加, 导致疲劳裂纹后续扩展裂纹闭合效应显著增强. 因此单次拉伸过载作用下的疲劳裂纹扩展速率显著降低, 出现迟滞现象.

图 5(c) 为单次压缩过载下裂纹尖端的 DIC 分析图. 从表 6 对应的数据可以得出, 从点 A 到点 B 的压缩过载阶段, 裂纹尖端塑性区尺寸显著减小, 减小为原有尺寸的 40%; 从点 B 到点 C 的加载阶段, 裂纹尖端塑性区尺寸显著恢复, 增加至原有尺寸的 2.07 倍; 从点 A 到点 C, 裂纹尖端塑性区尺寸略微减小, 减小至原有尺寸的 83%. 总体来看, 由于裂纹尖端塑性区尺寸在压缩过载阶段显著减小, 且后续加载过程又极大恢复裂纹尖端塑性区尺寸, 导致疲劳裂纹后续

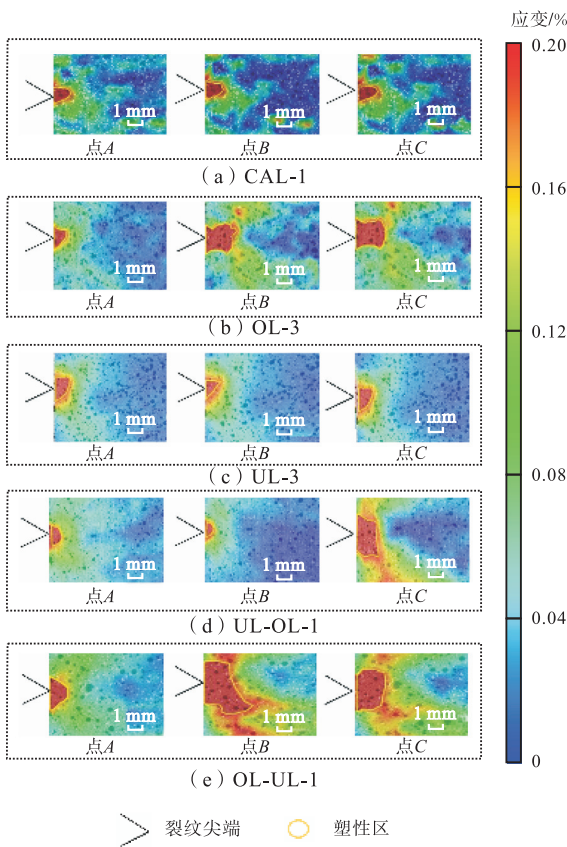


图 5 裂纹尖端 DIC 分析
Fig.5 DIC analysis of the crack tip

扩展裂纹闭合效应短暂削弱. 因此单次压缩过载作用下的疲劳裂纹扩展速率迅速增大, 但作用范围极小.

图 5(d) 为先压缩过载后拉伸过载下裂纹尖端的 DIC 分析图. 从表 6 对应的数据可以得出, 从点 A 到点 B 的压缩过载阶段, 裂纹尖端塑性区尺寸显著减小, 减小原有尺寸的 56%; 从点 B 到点 C 的拉伸过载阶段, 裂纹尖端塑性区尺寸显著增加, 增加至原有尺寸的 10.33 倍; 从点 A 到点 C, 裂纹尖端塑性区尺寸显著增加, 为原有塑性区尺寸的 4.59 倍. 总体来看, 对于整个变幅疲劳载荷过程, 裂纹尖端塑性区尺寸变化主要来源于后进行的拉伸过载阶段, 裂纹尖端塑性区尺寸显著增加, 导致疲劳裂纹后续扩展裂纹闭合效应显著增强. 因此先压缩过载后拉伸过载这种变幅疲劳载荷对疲劳裂纹扩展行为的影响与相同拉伸过载比下的单次拉伸过载极为相似.

图 5(e) 为先拉伸过载后压缩过载下裂纹尖端的 DIC 分析图. 从表 6 对应的数据可以得出, 从点 A 到点 B 的拉伸过载阶段, 裂纹尖端塑性区尺寸显著增加, 增加至原有尺寸的 4.32 倍; 从点 B 到点 C 的压缩过载阶段, 裂纹尖端塑性区尺寸显著减小, 减小为原有尺寸的 66%; 从点 A 到点 C, 裂纹尖端塑性区尺寸显著增加, 为原有塑性区尺寸的 2.84 倍. 总体来看, 对于整个变幅疲劳载荷过程, 拉伸过载阶段和压缩过载阶段对裂纹尖端塑性区尺寸造成的影响都是显著的, 正是由于后进行的压缩过载显著减小了裂纹尖端塑性区尺寸, 导致单次拉伸过载造成的裂纹闭合效应得到削弱. 因此先拉伸过载后压缩过载下对疲劳裂纹扩展行为的影响对比相同拉伸过载比下的单次拉伸过载迟滞效应也得到削弱.

2.3 断口分析

试样疲劳断口形貌特征反映了试样疲劳断裂过程中裂纹扩展行为, 通过分析疲劳试样断口形貌特征研究不同形式变幅载荷对疲劳裂纹扩展行为产生影响的内在机理.

图 6 为施加了 2.5 倍拉伸过载后疲劳断裂宏观断口截面图. 从图中可以观察到, 施加拉伸过载位置试样侧面出现明显凹陷, 这与 DIC 分析中拉伸过载作用后塑性区显著增大对应. 在裂纹扩展的断口上下面, 施加拉伸过载的位置有明显撕裂, 形成了明显的台阶形貌. 疲劳断口宏观形貌显示, 在疲劳裂纹扩展过程中, 施加拉伸过载会钝化裂纹尖端, 从而阻碍疲劳裂纹扩展; 同时, 裂纹尖端前沿的塑性区尺寸的增大也使后续疲劳裂纹扩展遭受的裂纹闭合效应增强, 阻碍后续的疲劳裂纹扩展. 拉伸过载作用后裂纹

尖端钝化和后续裂纹闭合效应增强共同导致了疲劳裂纹扩展速率出现迟滞现象.

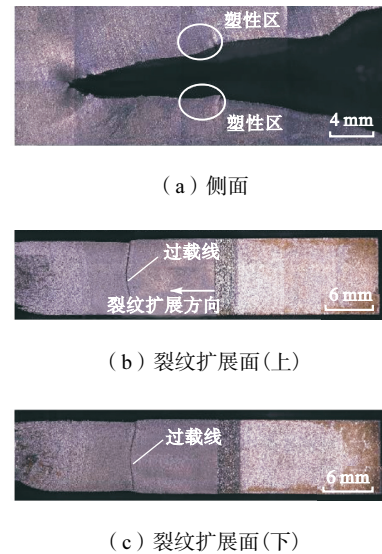


图 6 宏观断口分析图 ($P_{\max,OL} = 35 \text{ kN}$)

Fig.6 Macroscopic fracture analysis ($P_{\max,OL} = 35 \text{ kN}$)

图 7 为不同形式变幅疲劳载荷下过载区域在 SEM 显微镜下的微观表征图. 为了定量分析不同形式变幅疲劳载荷作用下裂纹尖端钝化程度, 用 image J 软件测量过载线的台阶高度, 如表 7 所示.

图 7(a) 为单次拉伸过载下过载区域的显微表征图, 过载位置显示为台阶形貌, 与 2.5 倍拉伸过载比下宏观断口保持一致, 台阶高度为 $6.08 \mu\text{m}$, 如表 7 所示. 图 7(b) 为单次压缩过载下过载区域的显微表征图, 过载位置无明显撕裂痕迹. 图 7(c) 为先压缩过载后拉伸过载下过载区域显微表征图, 过载位置显示为台阶形貌, 台阶高度为 $5.84 \mu\text{m}$, 如表 7 所示. 图 7(d) 为先拉伸过载后压缩过载下过载区域显微表征图, 过载位置显示为台阶形貌, 台阶高度为 $3.19 \mu\text{m}$, 如表 7 所示. 从表 7 中的数据可以得出, 先压缩过载后拉伸过载的台阶高度与相同拉伸过载比下单次拉伸过载接近, 说明两种变幅疲劳载荷造成的裂纹尖端钝化程度相似; 而先拉伸过载和压缩过载的台阶高度明显低于相同拉伸过载比下单次拉伸过载, 说明后进行的压缩过载减缓了裂纹尖端的钝化程度. 总体而言, 拉伸过载就是钝化裂纹尖端的过程, 压缩过载则是锐化裂纹尖端的过程. 对于本就尖锐的裂纹尖端, 施加拉伸过载会拉开并钝化裂纹尖端, 而施加压缩过载裂纹尖端仍会保持尖锐. 对于已经钝化的裂纹尖端, 施加压缩过载能显著降低裂纹尖端钝化程度.

2.4 过载机理分析

根据 DIC 分析和断口分析, 变幅疲劳载荷对疲

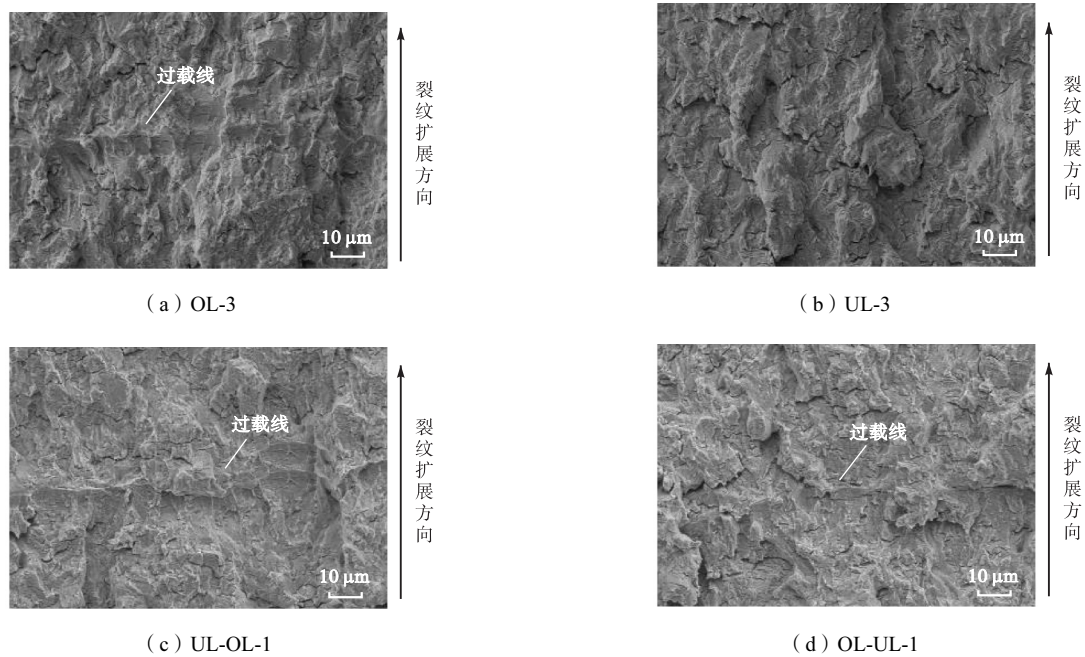


图 7 SEM 微观断口分析图

Fig.7 SEM microscopic fracture analysis

表 7 过载线台阶高度

Tab.7 Overload line step heights

试样编号	台阶高度/ μm
OL-3	6.08
UL-OL-1	5.84
OL-UL-1	3.19

劳裂纹扩展行为产生影响是裂纹尖端变形导致的。图 8 为变幅疲劳载荷作用下裂纹尖端变形示意。如图 8 所示,拉伸过载使裂纹尖端钝化,并使裂纹尖端

塑性区尺寸显著增大;压缩过载使裂纹尖端锐化,并使裂纹尖端塑性区尺寸显著减小;不同顺序拉伸和压缩过载是两种作用效果的结合。裂纹尖端的钝化和塑性区尺寸增大都阻碍后续疲劳裂纹扩展,从而导致了拉伸过载后疲劳裂纹扩展速率降低,产生迟滞现象;裂纹尖端的锐化和塑性区尺寸减小都促进后续疲劳裂纹扩展,从而导致了压缩过载后疲劳裂纹扩展速率短暂加速或迟滞现象减弱。

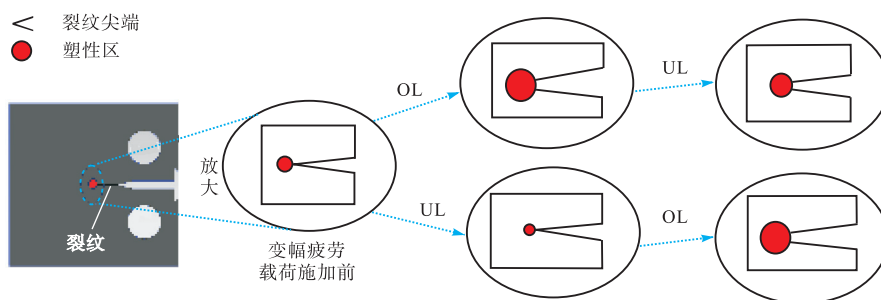


图 8 变幅疲劳载荷作用下裂纹尖端变形示意

Fig.8 Schematic of crack tip deformation under variable amplitude fatigue loads

3 结 论

(1) 变幅疲劳载荷对疲劳裂纹扩展行为具有显著影响。单次拉伸过载使疲劳裂纹扩展速率降低,延长疲劳寿命;单次压缩过载使疲劳裂纹扩展速率短暂加速,几乎不影响疲劳寿命;不同顺序过载会与单次

拉伸过载试验现象保持一致,但拉压过载施加顺序会显著影响到裂纹扩展迟滞效应。

(2) 疲劳裂纹扩展行为与裂纹尖端塑性区尺寸密切相关。裂纹尖端塑性区尺寸的增大和缩小导致后续裂纹尖端闭合效应的强弱,从而影响后续疲劳裂纹扩展速率。DIC 分析结果表明,拉伸过载显著增加塑性区尺寸,压缩过载显著减小塑性区尺寸,不同顺

序过载是两者作用机理的结合。

(3) 疲劳裂纹扩展行为与裂纹尖端状态同样密切相关。断口分析表明,拉伸过载钝化裂纹尖端,压缩过载锐化裂纹尖端,不同顺序过载是两者作用机理的结合。

参考文献:

- [1] Su M L, Yang S Y, Xu L Y, et al. Investigation of corrosion behavior, tensile and cyclic fracture mechanism of EH36 steel welded joints[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 27: 2007-2019.
- [2] He W T, Xie L T, Wang S Q, et al. Fatigue characterization analysis of a submerged fishing farm platform through spectral-based fracture mechanics[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 264: 112351.
- [3] Wu B, Wei Q Q, Li X, et al. A four-dimensional digital twin framework for fatigue damage assessment of semi-submersible platforms and practical application[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 301: 117273.
- [4] He W T, Xie L J, Wang S Q, et al. Preliminary assessment of the mooring fatigue performance of a semi-submersible platform in time-domain utilizing fracture mechanics-based approach[J]. *Applied Ocean Research*, 2022, 129: 103407.
- [5] Wang C Z, Wang S Q, Xie L J, et al. Fatigue crack growth behavior of marine steel under variable amplitude loading-combining DIC technique and SEM observation [J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 170: 107508.
- [6] Liang H, Zhan R, Wang D P, et al. Effect of crack-tip deformation on fatigue crack growth: A comparative study under overload/underload conditions[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2022, 118: 103268.
- [7] Liang H, Wang D P, Deng C Y, et al. Fatigue crack growth acceleration in S355 steel under a single and periodic underload[J]. *International Journal of Fatigue*, 2022, 158: 106744.
- [8] Wang S C, Yang B, Zhou S W, et al. Effect of stress ratio and overload on mixed-mode crack propagation behaviour of EA4T steel[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2024, 306: 110210.
- [9] Kumar R, Mursaleen M, Harmain G A. Effects of multiple overloads and high-low sequence loading on the fatigue crack propagation of AZ31B magnesium alloy [J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2024, 133: 104563.
- [10] Tu W J, Yue J X, Xie H, et al. Fatigue crack propagation behavior of high-strength steel under variable amplitude loading[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2021, 247: 107642.
- [11] Kalnaus S, Fan F, Jiang Y, et al. An experimental investigation of fatigue crack growth of stainless steel 304L[J]. *International Journal of Fatigue*, 2009, 31(5): 840-849.
- [12] Kalnaus S, Fan F, Vasudevan A K, et al. An experimental investigation on fatigue crack growth of AL6XN stainless steel[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, 75(8): 2002-2019.
- [13] Elber W. Fatigue crack closure under cyclic tension[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1970, 2(1): 37-45.
- [14] He W T, Wang C X, Deng J L, et al. Effect of single tensile overload on fatigue crack growth behavior based on plastically dissipated energy and critical distance theory[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 223: 106744.
- [15] Zhang W Y, Jiang W C, Li H J, et al. Effect of tensile overload on fatigue crack behavior of 2205 duplex stainless steel: Experiment and finite element simulation [J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, 128: 105199.
- [16] Su M L, Xu L Y, Peng C T, et al. Fatigue short crack growth, model and EBSD characterization of marine steel welding joint[J]. *International Journal of Fatigue*, 2022, 156: 1066689.
- [17] Su M L, Hu C C, Xu L Y, et al. Fatigue short crack growth: Overload-induced acceleration/retardation behavior[J]. *International Journal of Fatigue*, 2023, 175: 107772.
- [18] ASTM E647-15 Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates[S]. USA: American Society of Testing Materials, 2015.
- [19] González G L G, González J A O, Freire J L F. Characterization of discontinuous crack closure behavior after the application of a single overload cycle[J]. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2021, 114: 103028.

(责任编辑:田 军)