

DOI: 10.3901/JME.2023.16.072

TC4ELI 钛合金疲劳裂纹路径偏折与寿命提升机制

于培师^{1,2,3} 赵宇翔^{1,2,3} 吴连生^{1,2,3} 卞家坤^{1,2,3} 赵军华^{1,2,3} 郭万林⁴

(1. 江南大学江苏省食品先进制造装备技术重点实验室 无锡 214122;

2. 江苏省微纳增减材制造工程研究中心 无锡 214122;

3. 江南大学机械工程学院 无锡 214122;

4. 南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京 210016)

摘要: 作为深海载人装备结构的优选材料, TC4ELI(Extra-low-interstitial 低间隙元素)钛合金的抗疲劳裂纹扩展性能至关重要。对 TC4ELI 的疲劳裂纹扩展行为进行系统测试与原位观测, 同时选取传统 TC4 钛合金进行对比试验。结果显示, 与 TC4 相比, TC4ELI 具有更高的疲劳裂纹扩展寿命; 同时, 原位观察发现, TC4ELI 的疲劳裂纹扩展存在明显偏折现象, 导致裂纹路径比 TC4 更为曲折。进一步, 综合利用微观表征手段对 TC4ELI 疲劳断口、材料组份、裂纹路径区域微结构进行系统的分析。在此基础上, 利用有限元模拟计算裂纹扩展驱动力随偏折角度的变化规律, 并分析裂纹偏折对 TC4ELI 疲劳扩展寿命的影响机理。研究对 TC4ELI 深海装备结构的损伤容限设计提供了参考。

关键词: TC4ELI 钛合金; 深海装备; 疲劳裂纹; 路径偏折; 寿命提升

中图分类号: TH114

Fatigue Crack Propagation of TC4ELI Titanium Alloy: Path Deflection and Life Enhancement Mechanism

YU Peishi^{1,2,3} ZHAO Yuxiang^{1,2,3} WU Liansheng^{1,2,3} BIAN Jiakun^{1,2,3}

ZHAO Junhua^{1,2,3} GUO Wanlin⁴

(1. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment and Technology,
Jiangnan University, Wuxi 214122;

2. Jiangsu Engineering Research Center of Micro/Nano Additive/Subtractive Materials Manufacturing,
Wuxi 214122;

3. School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122;

4. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract: As the optimal material for deep-sea manned equipment structure, TC4ELI(Extra-low-interstitial) titanium alloy's anti fatigue crack growth performance is crucial. In this work, the fatigue crack growth behavior of TC4ELI is systematically tested and observed in situ, and the traditional TC4 titanium alloy is selected for comparative experiments. The results show that TC4ELI has a higher fatigue crack growth life than TC4; At the same time, in situ observation found that the fatigue crack growth of TC4ELI is obviously deflected, resulting in a more tortuous crack path than TC4. Furthermore, TC4ELI fatigue fracture surface, material composition and microstructure of crack path region were systematically analyzed by means of microscopic characterization. On this basis, the variation of crack growth driving force with deflection angle is calculated by finite element simulation, and the influence mechanism of crack deflection on TC4ELI fatigue growth life is analyzed. This study provides a reference for the damage tolerance design of TC4ELI deep-sea equipment structure.

Key words: TC4ELI titanium alloy; deep-sea equipment; fatigue crack; path deflection; life enhancement

0 前言

随着科学技术的进步,海洋资源逐渐成为世界各大国争相探索的新高地。中国作为能源消费大国,建设海洋强国是我国长期发展的战略目标^[1]。实现深海运载装备的自主研发是建设海洋强国的重要标志,也是实现海洋资源探测的前提。因此,加快海洋装备的高质量发展迫在眉睫^[2]。从“蛟龙号”、“深海勇士”号到“奋斗者”号,我国对深海关键技术与装备不断探索,实现了从无到有、从学习借鉴到自主研发的全面突破^[3],同时也大大促进了深海装备材料制造技术的自主化发展。深海装备材料需要满足强度高、重量轻、耐腐蚀、工艺性好等多种性能要求,目前以 TC4 系列钛合金最为适合^[4]。基于传统 TC4,通过降低间隙元素,得到了强度和韧性匹配度更好的 TC4ELI(extra-low-interstitial 低间隙元素),成为新型深海装备核心壳体的优选材料^[5]。

深海结构在服役工况下承受长期的交变载荷作用。因此,对于深海钛合金在疲劳载荷作用下的裂纹萌生、扩展与断裂行为进行系统的研究,是深海结构损伤容限设计的基础,也是深海装备定寿、确定检修周期的主要依据。针对此问题,国内外学者进行了有益的探索。在裂纹扩展方面:王芳等^[6-7]研究了 TC4ELI 钛合金在多种不同类型载荷下的疲劳裂纹扩展性能;本课题组前期工作中,基于三维断裂理论得到了与厚度和应力比无关的 TC4ELI 裂纹扩展速率模型^[8]。JESUS 等^[9]研究了恒幅疲劳载荷下的 TC4 裂纹扩展和施加过载后的瞬时裂纹加速行为。VANSICKLE 等^[10]研究了 TC4 微观结构差异对疲劳循环中应变积累和裂纹路径的影响。在断裂失效方面:张亚军等^[11]通过试验测得 TC4ELI 钛合金在平面应变下的断裂韧性数值大小,对于该材料结构的失效判断提供了数据支撑。WU 等^[12]研究了微观结构对 TC4 高循环疲劳和断裂行为的影响,评估了不同 α 相百分比的 TC4 材料的疲劳行为。BISWAS 等^[13]利用数值模拟研究了增材制造的 TC4 材料内部孔隙率对不同加载速率下的变形和断裂行为影响。在裂纹扩展的微观机制方面:马英杰等^[14]发现 TC4ELI 钛合金片层组织结构有效降低了裂纹扩展速率。郭萍等^[15-16]研究了片层组织结构的 TC4-DT 钛合金的微观疲劳裂纹扩展行为,发现片层组织结构裂纹尖端存在较大的塑性变形,位错塞

积是裂纹萌生的诱因。LI 等^[17]通过研究 TC4 和 TC11 钛合金的疲劳性能,发现层状组织由于更粗糙的片层尺寸和初始晶粒,增强了抗裂纹扩展的能力。针对裂纹偏折问题:WANG 等^[18]在激光熔融 Ti-55511 合金的疲劳裂纹扩展试验中,也发现了明显的裂纹分支现象。断口的微观观察表明,有序分布的条状带对二次裂纹的萌生和微裂纹的合并起着重要作用,次表面次生裂纹的扩展导致了试件表面明显的裂纹分支。ZENG 等^[19]研究表明裂纹尖端前的非弹性局部变形耗散了能量并使材料变韧,这种集中变形可能是固体中的塑形局部化造成的。针对损伤容限设计等方面,于培师等^[20]总结了基于离面约束因子的线弹性、弹塑性和蠕变三维尖场的三参数理论模型,对准确预测三维结构的疲劳寿命奠定了理论基础。

上述研究为 TC4ELI 钛合金的疲劳裂纹速率提供了数据支撑,同时初步揭示了微观组织结构对裂纹扩展路径的影响。然而,现有关于 TC4ELI 钛合金疲劳裂纹的研究,路径偏折对疲劳扩展寿命的影响依然停留在定性认识层面,同时,裂尖偏折角对扩展驱动力的影响尚缺乏定量分析。因此,在 TC4ELI 材料评定与结构损伤容限设计方面,仍需进一步对裂纹路径偏折与寿命提升机制进行定量描述与分析。

在前期工作的基础上^[8],本文选取深海载人舱用 TC4ELI 作为研究对象,对含穿透裂纹的钛合金试样展开疲劳裂纹扩展试验研究,并基于显微镜对其裂纹扩展路径进行实时表征。进一步,利用白光干涉、金相分析、扫描电镜、能谱仪等手段对钛合金的微观组织结构和成分进行了系统分析与表征。同时,对不同裂纹偏折角对裂纹尖端驱动力的影响进行了定量分析。最后,通过 ABAQUS 有限元软件与 Zencrack 程序建立了偏折裂纹的扩展模型,并对不同裂纹偏折角对裂纹尖端驱动力的影响进行了定量分析。不仅跨尺度地阐述了深海用 TC4ELI 从宏观到微观的疲劳裂纹扩展寿命提升的内因,还定量描述了裂纹偏折对材料疲劳裂纹扩展的影响,为深海 TC4ELI 的损伤容限设计和使用提供了数据支撑和理论基础。

1 裂纹扩展试验

1.1 试验流程

为了保证试样设计的准确性和实用性,试样的

设计主要参考 GB/T 6398—2017: 金属材料 疲劳试验 疲劳裂纹扩展方法、ISO 12108 “Metallic materials- Fatigue testing-Fatigue crack growth method” 等规范标准设计含裂纹的钛合金裂纹扩展试样。选用单边缺口(Single edge notched test-piece, SENT)类型, 典型的试样尺寸和试件如图 1 所示。

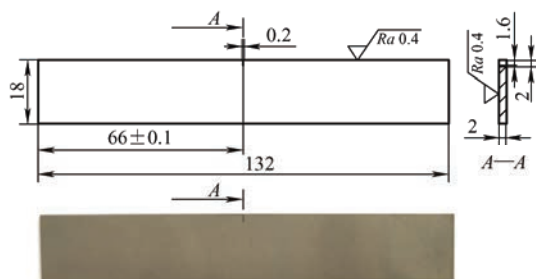


图1 裂纹扩展试验试样(mm)

疲劳裂纹扩展试验同样在 MTS Landmark 370.10 试验机上进行(图 2a), 试验机最大载荷为 100 kN, 载荷精度为 0.01 kN。疲劳裂纹扩展试验如图 2b 所示, 为了更清晰地实时观测裂纹扩展长度(图 2b), 在试件表面喷涂一层白漆, 同时利用菲林尺和数码显微镜来观测裂纹长度。疲劳裂纹扩展试验加载频率为 6 Hz, 采用正弦波形加载。首先, 对试件进行预制裂纹, 此时的载荷大小略大于正式试验的载荷。当裂纹预制至 3 mm 时开始记录裂纹长度 a 随循环次数 N 的变化关系。为了研究厚度和应力比对裂纹扩展性能的影响, 通过对比 TC4 钛合金和 TC4ELI 钛合金的裂纹扩展路径分析两者裂纹扩展路径对寿命的影响。

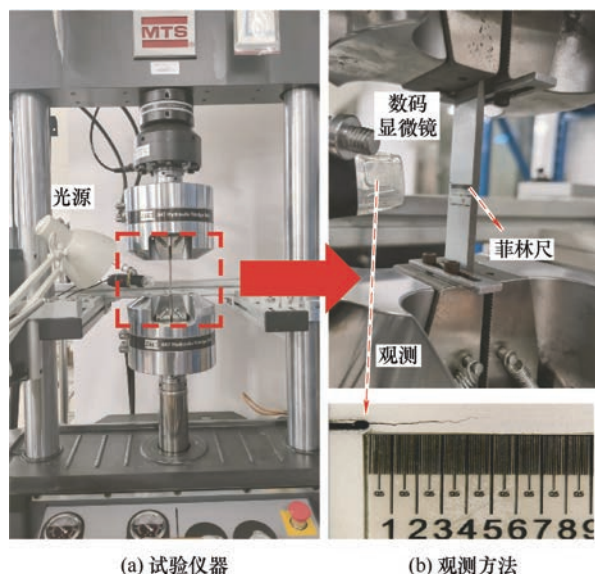


图2 疲劳裂纹扩展试验

1.2 疲劳裂纹扩展结果对比

通过测试两种钛合金的力学行为, 发现两者在

拉伸下得出的力学性能接近。而对于裂纹扩展性能的对比如图 3 所示。

从图 3a 中可以看出, 通过对比 TC4ELI 钛合金和 TC4 钛合金的真实疲劳裂纹扩展速率曲线, 当裂纹尖端有效应力强度因子 ΔK_{eff} 较小时, TC4ELI 钛合金的疲劳裂纹扩展速率相对较慢。而随着 ΔK_{eff} 的逐渐增大, TC4ELI 钛合金的裂纹扩展速率大于 TC4 钛合金。从图 3b 中可得出, 在厚度和应力比相同的条件下, 扩展相同长度的裂纹时 TC4ELI 钛合金比 TC4 钛合金需要更多次的循环加载, 具有更长的疲劳裂纹扩展寿命。因此, 相对于传统的 TC4 钛合金, TC4ELI 钛合金的抗疲劳裂纹扩展性能更优。

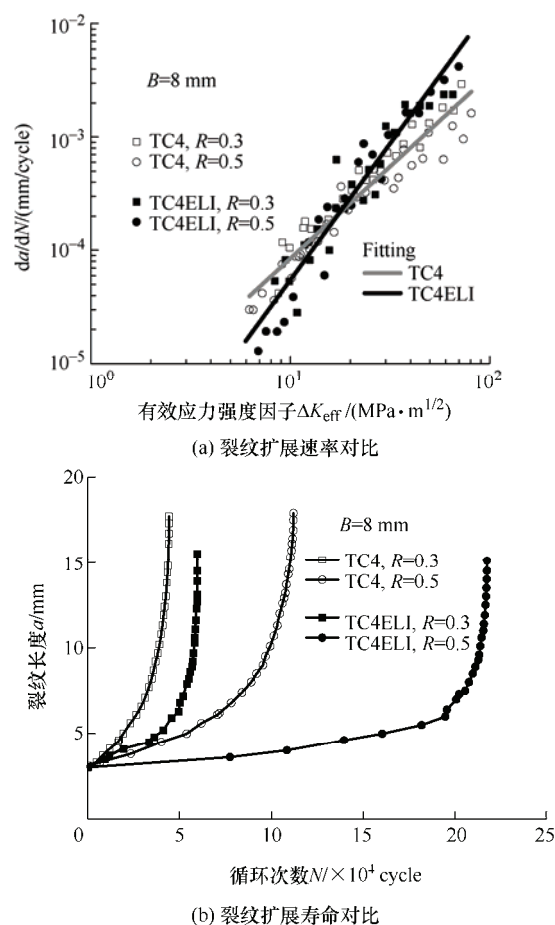
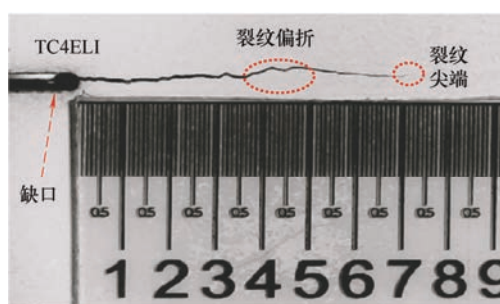


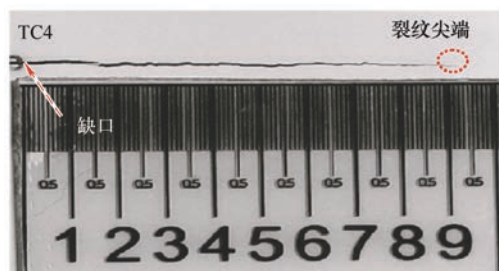
图3 两种钛合金疲劳裂纹扩展性能对比

1.3 扩展路径对比

与此同时, 试验发现两种钛合金的疲劳裂纹扩展路径有着明显的区别。在 TC4ELI 钛合金裂纹扩展过程中(图 4a), 裂纹会出现偏折, 裂纹路径较为曲折。而对于 TC4 钛合金(图 4b), 裂纹路径相对比较平直。裂纹偏折可能是导致 TC4ELI 钛合金抗疲劳裂纹扩展性能优于 TC4 钛合金的原因之一。



(a) TC4ELI 钛合金裂纹扩展路径



(b) TC4 钛合金裂纹扩展路径

图 4 两种钛合金裂纹扩展路径

选取两种钛合金在稳态扩展阶段的断口表面局部横截面积($0.55 \text{ mm} \times 0.44 \text{ mm}$)作为研究对象,利用白光干涉仪对二者进行形貌表征如图 5 所示。图中颜色代表形貌的波动程度,可以看出相对于 TC4 钛合金,TC4ELI 钛合金表面波动起伏更为明显。进一步,通过测定该区域的粗糙度发现,TC4 钛合金的粗糙度 R_a 值为 $8.8 \mu\text{m}$,而 TC4ELI 钛合金的粗糙度 R_a 值达到了 $18.2 \mu\text{m}$ 。在裂纹扩展过程中上下裂纹面张开闭合循环往复,表面越粗糙则会增强裂纹闭合效果从而阻碍了裂纹扩展。因此,从三维断口形貌中也可得出,TC4ELI 钛合金具有优异的抗疲劳裂纹扩展性能。

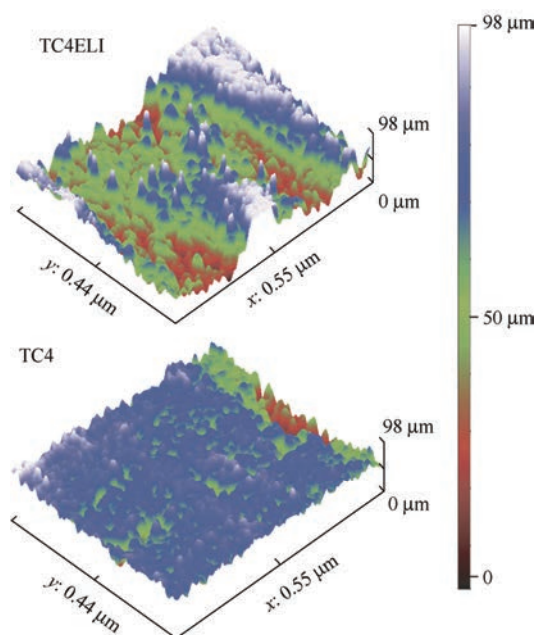
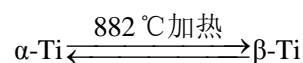


图 5 两种钛合金三维断口形貌

2 微观组织结构表征与分析

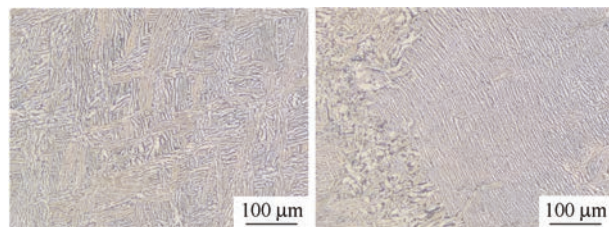
2.1 微观组织结构

作为能够发生同素异构转变的材料,钛拥有两种同素异构体 α -Ti 和 β -Ti。两者的转变方式如下

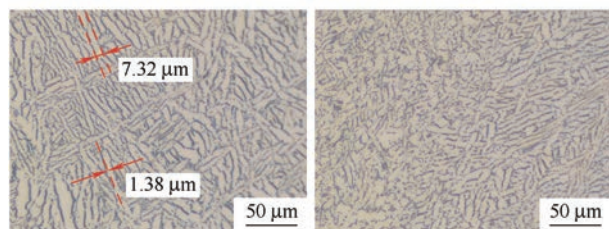


本文研究的 TC4(Ti-6Al-4V) 钛合金以及 TC4ELI(Ti-6Al-4V Extra-Low-Interstitial) 钛合金均为典型的中强度 $\alpha+\beta$ 型钛合金,其成分中同时含有常见的 α 稳定元素铝 Al 以及 β 稳定元素钒 V。钛合金的性能是由其微观组织结构决定,根据晶内 α 相的不同形状, $\alpha+\beta$ 型钛合金的显微结构大致可以划分为四类,即等轴、网篮、双态以及片层组织。然而,对于具有不同微观组织结构的钛合金,其断裂韧性、蠕变强度、抗缺口敏感性以及疲劳性能均有较大区别。因此,从微观入手揭示 TC4ELI 微观组织结构对疲劳裂纹扩展偏折的影响是必要的。

本文利用金相磨机对 TC4、TC4ELI 钛合金进行磨抛、清洗、腐蚀处理后,通过光学显微镜观察到二者的金相组织如图 6、图 7 所示。



(a) 低倍数下 TC4ELI 钛合金金相组织



(b) 高倍数下 TC4ELI 钛合金金相组织

图 6 光学显微镜不同倍数下 TC4ELI 钛合金的金相组织

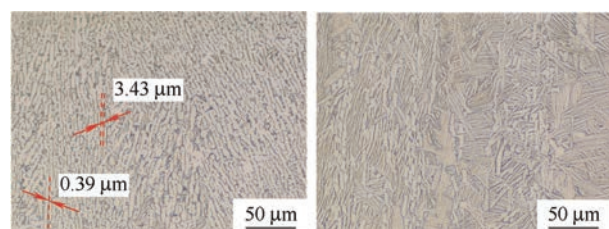


图 7 光学显微镜下 TC4 钛合金不同位置的金相组织

图 6 为光学显微镜下的 TC4ELI 的金相组织。

由图 6a 可以看出, TC4ELI 钛合金的微观组织为片层组织结构, α/β 相形成尺寸较大的“束集”, 且在“束集”中存在平行关系。同时可以看出, 在一些区域这种“束集”堆积效果较为突出, 由于各“束集”取向不同而形成明显的界面, 可称作为晶界。从图 6b 中可以得出, 进一步放大观察发现, 图中白色相特征厚度为 $7.32\ \mu\text{m}$, 而黑色相的特征厚度为 $1.38\ \mu\text{m}$ 。黑白两相仍需后续 EDS 试验加以分析。

图 7 为光学显微镜下的 TC4 的金相组织。通过观察发现, 测试的 TC4 钛合金微观组织为图 7 所示的层状组织, 在光学显微镜下, 白色相的特征厚度为 $3.43\ \mu\text{m}$, 黑色相的特征厚度为 $0.39\ \mu\text{m}$ 。与此同时, 局部区域会出现如图 7 所示的层状交错组织。与 TC4ELI 钛合金相比, TC4 钛合金微观组织中未发现存在如图 6a 的较大晶界, 其微观组织结构也相对较小。因此, 晶界的存在可能是导致裂纹偏折的原因之一。

2.2 SEM 分析

为了更清晰了解两者的组织结构, 在扫描电子显微镜(Scanning electron microscope, SEM)下分析金相组织。在 500 倍和 1000 倍的放大倍数下, TC4ELI 钛合金的金相组织结构如图 8 所示。在 SEM 下, 金相组织更为清晰, 可以明显看出 α/β 相棱角分明。

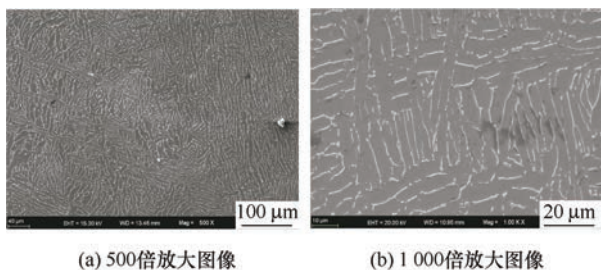


图 8 SEM 下 TC4ELI 钛合金的金相组织

传统 TC4 钛合金在扫描电子显微镜下的微观结构, 如图 9 所示。从图中可以看出, 类似于图 7, TC4 钛合金中层状组织结构呈现局部的交错状态, 但是对于大部分区域, 其微观组织为较为规则的层状结构(图 7a)。

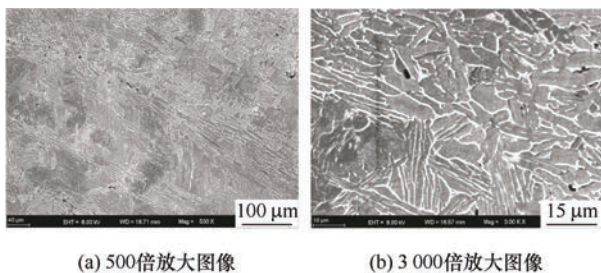


图 9 SEM 下 TC4 钛合金的金相组织

2.3 EDS 分析

合金元素钒 V 作为 β 稳定元素, 因此元素 V 能够降低 β 转变温度从而扩大 β 相区。所以, β 相中元素 V 的含量应高于 α 相。利用扫描电镜下的能谱仪(Energy dispersive spectrometer, EDS)功能模块对两相成分分析, 即可确定光学显微镜下明暗两相金相组织与 α/β 相的对应关系, 定性比较两相的 V 元素含量来判断 α/β 相。

如图 10 所示, 当放大 1000 倍时准确取到两相位置, 进行 EDS “点扫”操作。随后根据能谱点扫出的峰形图, 定性分析节点 1(图 10a)和节点 2(图 10b)的典型元素(Ti、Al、V)含量, 如表 1、表 2 所示。经过软件分析得出, 节点 1 的 V 元素质量百分数为 5.05%, 而节点 2 的 V 元素质量百分数为 11.39%。对于两点的 V 元素原子百分数, 节点 1 和节点 2 数值大小分别为 4.48% 和 10.33%, 具体其他典型元素含量如表 1 以及表 2 所示。因此, 节点 2 的 V 元素含量高于节点 1, 经过重复多点扫描均有类似趋势。所以, 经分析可得出, 节点 1 位置为 α 相, 节点 2 位置为 β 相。即在光学显微镜(OM)下(图 6), 白色相(明相)为 α 相, 而黑色相(暗相)代表 β 相。

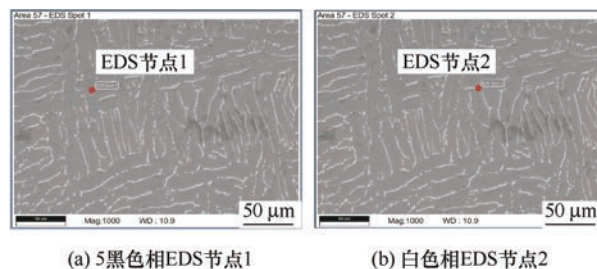


图 10 TC4ELI 钛合金两相 EDS 试验

表 1 TC4ELI 钛合金中节点 1 典型元素含量

元素	质量分数(%)	原子分数(%)
Al K	8.01	13.42
Ti K	86.95	82.11
V K	5.05	4.48

表 2 TC4ELI 钛合金中节点 2 典型元素含量

元素	质量分数(%)	原子分数(%)
Al K	5.48	9.39
Ti K	83.14	80.28
V K	11.39	10.33

通过光学显微镜、SEM、EDS 两相成分分析, 确定了钛合金在光学显微镜下明暗两相与 α/β 相的对应关系, 为后续的微观分析奠定了一定基础。

3 裂纹扩展路径微观表征与分析

3.1 扩展路径曲折原因分析

通过分析上述两种钛合金的金相微观组织结构发现, 相对于 TC4 钛合金, TC4ELI 钛合金片层组织“束集”效果较为明显且会形成较大晶界。然而, 晶界对于裂纹扩展路径的作用尚未明确。通过对比猜想, 晶界的存在可能会导致裂纹偏折。为了验证该假设, 本文选取裂纹扩展一定长度但未完全断裂的 TC4ELI 钛合金试样进行磨抛金相分析。

抛光后的表面形貌如图 11 所示。在裂纹扩展路径的 a 点处以及 b 点处, 裂纹均发生较大的偏折, 经测量 a 点处裂纹偏离水平方向约为 45° 。与此同时, 在 c 点处裂纹也存在较小的偏折。

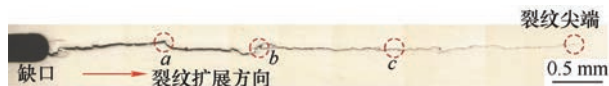


图 11 抛光后 TC4ELI 试样表面形貌图

选取 a 、 b 、 c 三点作为主要研究对象。通过表面腐蚀观察金相组织结构对于裂纹偏折的影响, a 点处的具体微观组织如图 12 所示。其中图 12a 和图 12b 均代表 a 点区域附近位置的金相组织结构(b 、 c 点相同)。从图中可以看出, 裂纹扩展方向与 α/β 相的取向相互平行。同时, 当裂纹扩展遇到晶界时, 裂纹会发生偏折从而导致裂纹扩展路径曲折。

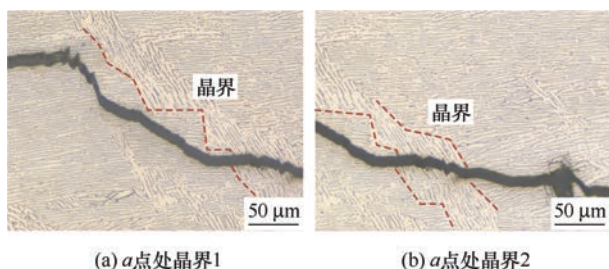


图 12 a 点处微观组织形貌

裂纹扩展路径上 b 点位置的微观结构如图 13 所示, 其中图 13a 和图 13b 均表示 b 点附近的微观组织。可得出与 a 点处相似的结论。如图 13a 所示, 裂纹在晶界处发生了偏折。从图 13b 可以看出, 此时晶界处发生了断裂, 可能是该处的晶界较为薄弱, 容易被破坏。因此, 由于晶界相对较弱引发的沿晶断裂会造成裂纹出现一定的偏折。

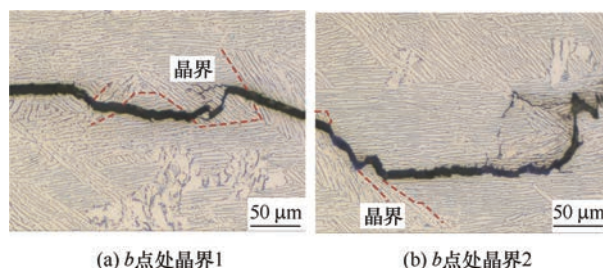


图 13 b 点处微观组织形貌

对裂纹路径上的 c 点附近位置进行金相观察分析, 如图 14 所示。

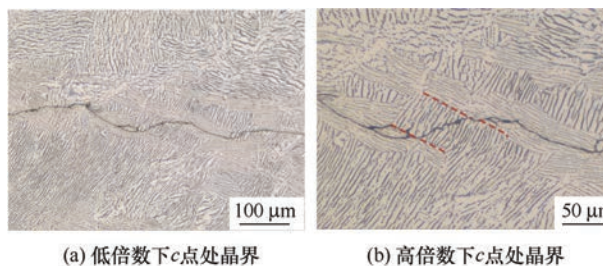


图 14 c 点处微观组织形貌

从图 14 中可得出, 即便是宏观上裂纹表现出轻微的偏折现象, 对应的也与微观组织结构有关。从 14a 可以看出, 裂纹路径与 α/β 相的取向有着密切的关系。在更高的放大倍数下观察, 如图 14b 所示, 当 α/β 相形成小的“束集”, 由于相邻“束集”之间的取向不同而形成界面。当裂纹扩展至该界面时, 裂纹会发生偏折且偏折方向与 α/β 相的生长方向一致。因此, 从上述分析可以初步得出, 由于晶界或者界面的作用, 裂纹会产生偏折, 且偏折方向与 α/β 相生长方向密切相关。

通过对比分析图 11 中 a 、 b 、 c 各点处的微观组织结构, 发现裂纹扩展路径上的微观组织结构并非呈现规律分布, 局部 α/β 相形成的“束集”大小存在明显区别。但是, 当裂纹发生扩展时, 裂纹扩展路径与裂纹尖端局部的微观组织结构密切相关。由于微观组织结构分布的不规律性, 造成了裂纹扩展偏折角度的不一致(a 点和 c 点处), 同时也增加了裂纹偏折的更多可能结果。

3.2 次生裂纹影响

选取其他疲劳试验后已断裂的 TC4ELI 钛合金试样作为研究对象, 并对试样表面进行了金相分析试验, 如图 15 所示。在光学显微镜下观察发现, 除主裂纹外, TC4ELI 钛合金试样在疲劳裂纹扩展过程中会出现二次裂纹, 即次生裂纹。

从图 15 可以看出, 次生裂纹方向与主裂纹之间具有一定角度, 次生裂纹在扩展过程中甚至会出现裂纹分岔的现象。由于扩展能量不足, 次生裂纹在

扩展一定长度后会停止,因此可以看出有次生裂纹尖端生成。与上述主裂纹的扩展机制类似,次生裂纹在扩展过程中遇到晶界时会出现明显的偏折。因此,次生裂纹的扩展路径也进一步证实了晶界的存在会使疲劳裂纹扩展路径变得曲折。与此同时,次生裂纹不仅会改变裂纹局部应力状态,降低主裂纹的驱动力,还会释放主裂纹尖端的应变能。所以,次生裂纹能够增加 TC4ELI 钛合金试样疲劳裂纹扩展寿命。

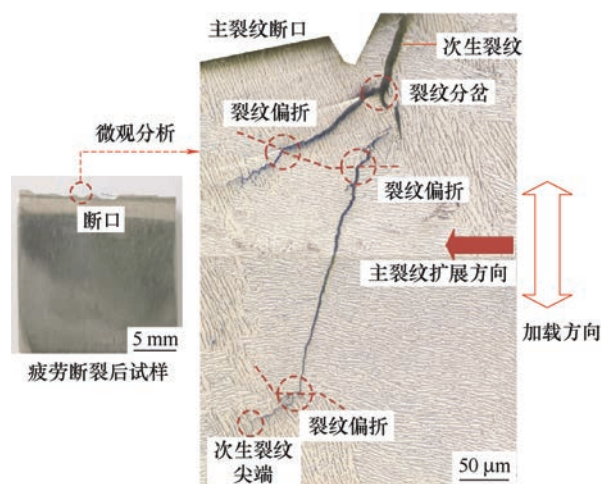


图 15 TC4ELI 钛合金疲劳试验中的次生裂纹

4 路径曲折对裂尖驱动力的影响分析

4.1 有限元模型

基于试验测得的裂纹扩展性能参数,对 TC4ELI 钛合金进行疲劳裂纹扩展有限元模拟。含穿透直裂纹的疲劳裂纹扩展模型示意图如图 16 所示,其基本尺寸和试验保持一致。在有限元软件 ABAQUS 中建立完整的结构模型,并导入到 Zencrack GUI 软件中。随后通过 Zencrack GUI 中的 Crack-block 功能,将裂纹尖端单元网格替换为软件中内置的标准裂纹块。裂纹块型号采用 S04_t35×1 类型,其中 S 表示标准裂纹块(Standard),04 为裂纹块编号,t 表示裂纹类型为穿透裂纹(Through crack),35 表示 Crack-block 裂纹块单元共有 35 个,1 则表示含有 1 个节点。以裂纹面为分离面可以看出,裂纹穿透了整个模型,且生成了初始裂纹面,初始裂纹长度为 3 mm,裂纹将会沿着如图所示的裂纹扩展方向进行扩展。裂纹前沿 1/4 节点奇异性如图 16 裂纹前沿所示。当裂纹块预置完成后,裂纹块附近节点网格会随之松弛调整以防止网格畸变。同时当裂纹扩展时,裂纹前沿节点位置会不断更新,裂纹区域的网格也将会 Crack-block 的移

动而改变,此目的是降低局部区域网格的畸变程度,保证了网格质量同时提高了计算精度。模拟中的边界条件与试验保持一致,对一端完全约束,另一端施加载荷并调整应力比等。

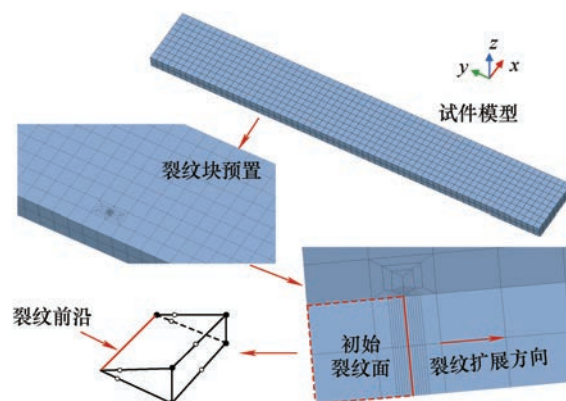


图 16 穿透直裂纹有限元模型示意图

从磨抛后的 TC4ELI 钛合金表面可以看出(图 11),晶界使裂纹在扩展过程中发生了多次偏折。通过测量图 11 中 a 点位置的偏折角度,发现裂纹偏折方向与水平方向呈 45° 。与此同时,对其他位置的偏折角度进行测量,得出其余偏折角度均处于 0° 至 50° 范围内,简化后的裂纹偏折模型如图 17 所示。

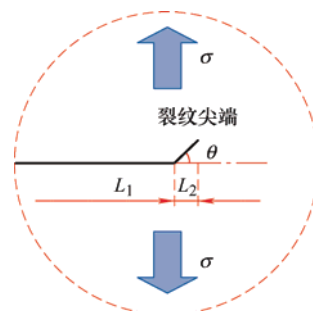


图 17 裂纹偏折模型

从图 17 中可以得出,裂纹在平直扩展了 L_1 长度时开始发生偏折,偏折角度为 θ ,且偏折长度的水平投影距离为 L_2 。对于图 11 中的 a 点,经测量各参数的具体数值分别如下: $L_1=3.6$ mm, $L_2=0.24$ mm, $\theta=45^\circ$ 。为了分析裂纹偏折后的裂纹尖端应力场的变化趋势,本文基于试验模型建立了偏折角度为 45° 时的三维有限元模型。在 Zencrack 中采用静态裂纹分析方法进行裂纹尖端应力应变场分析,并选取裂纹尖端附近区域作为主要研究对象,如图 18 所示。从图中可以看出,Zencrack 软件利用 Crack-block 技术方法,对偏折后的裂纹尖端单元进行裂纹块替换。在裂纹块周围,节点单元的松弛有效避免了网格畸变。进一步,通过将网格隐藏后可以更清晰地看出裂尖有明显的应力集中。

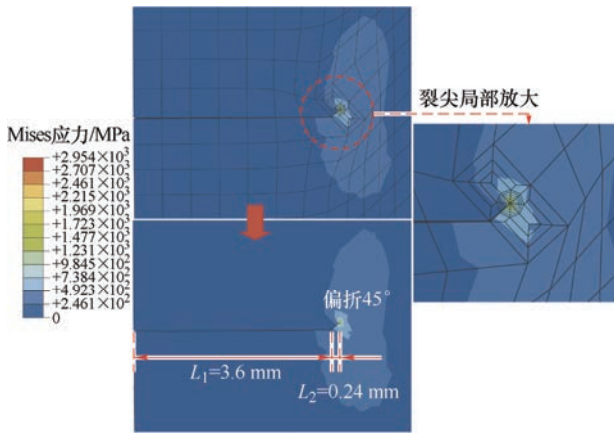


图 18 裂纹偏折有限元模型

4.2 扩展驱动力分析

根据试验结果发现,在裂纹偏折扩展一定长度后会改变扩展方向,新的裂纹依旧沿着水平方向扩展。然而,在疲劳裂纹扩展试验过程中,裂纹偏折角度是随机产生且无法人为控制的。通过有限元模拟,才可以准确地计算出裂纹偏折条件下应力强度因子幅值的大小,定量描述不同裂纹偏折角度对裂纹尖端应力强度因子的影响。图 19 为有限元模拟得到的应力强度因子和文献数据^[21]的对比。由于文献中偏折裂纹较短时的数据相对不完善,我们选取 $l/a=2$ 时的数据作为对比。由图可看出 Zencrack 有限元模拟具有较好的置信度。

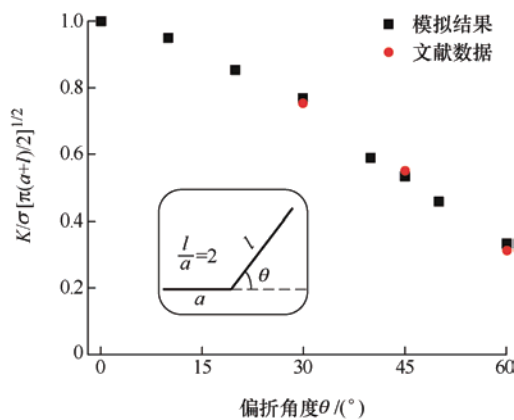


图 19 有限元模拟和文献数据的对比

为了研究偏折角度对于裂纹扩展驱动力的影响,本文选取偏折角度分别为 0° 、 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 45° 以及 50° 时作为模拟研究对象。为了尽可能贴近真实试验结果,模型与图 18 中类似,其中 $L_1=3.6\text{ mm}$, $L_2=0.24\text{ mm}$ 且保持不变,仅裂纹偏折角度 θ 发生改变。与此同时,通过理论计算得出了裂纹未发生偏折时(即 $\theta=0^\circ$ 时)裂纹尖端的应力强度因子作为结果对比,多种偏折角度下的模拟结果如图 20 所示。从图中可以看出,随着裂纹偏折角度 θ

从 0° 逐渐增大到 50° , 裂纹尖端 ΔK 数值大小从 $18.6\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 减小到 $16.7\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, 降低了 10.2%。此外,当偏折角度为 0° 时,理论与有限元模拟得出的应力强度因子幅值大小吻合较好。裂纹尖端应力强度因子作为裂纹扩展的主要驱动力,其数值的降低必然会影响裂纹扩展的能力,从而使得疲劳裂纹扩展速率降低、疲劳裂纹扩展寿命增加。

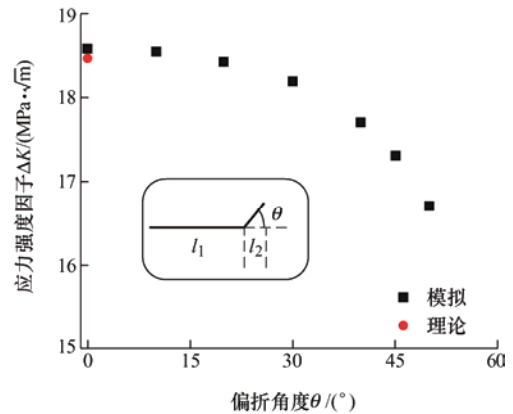


图 20 偏折角度对裂纹尖端应力强度因子的影响

通过模拟验证了裂纹偏折提高了 TC4ELI 钛合金的抗疲劳裂纹扩展性能。这对深海用 TC4ELI 钛合金在服役使用和材料制备方面都提供了新的数据支撑。在材料的服役使用方面,该偏折有利于提高裂纹扩展寿命,对结构损伤容限设计和检修定寿提供了新的数据支撑。而在材料制备方面,可以通过适当增加微观结构中的晶界与相界,实现对材料疲劳寿命的提高,增加其服役年限。

5 结论

本文针对深海用 TC4ELI 钛合金与普通 TC4 钛合金的疲劳裂纹扩展寿命差异较大的现象进行了系统性分析研究。通过光学显微镜、白光干涉仪、SEM、EDS 表征及有限元模拟等手段,从宏观到微观跨尺度地揭示了 TC4ELI 的疲劳裂纹扩展路径曲折的内因,全文总结如下。

(1) 相对于 TC4 钛合金,TC4ELI 钛合金断口形貌起伏较大。进一步对其断口粗糙度进行测量,分析发现 TC4ELI 钛合金断口更粗糙。断口粗糙度的大小影响了裂纹闭合效应,进而会导致 TC4ELI 钛合金疲劳裂纹扩展寿命增加。

(2) TC4ELI 钛合金具有 TC4 钛合金没有的“束集”片状微观组织,且存在较大的晶界。当裂纹扩展至晶界或者相界时,裂纹会发生偏折且偏折角度与 α/β 相的取向相关。裂纹路径偏折以及二次裂纹

提高了 TC4ELI 钛合金的抗疲劳裂纹扩展性能。

(3) 对不同裂纹偏折角度的试样进行了有限元模拟,发现裂纹偏折会降低裂纹尖端扩展驱动力。在 $0\sim 50^\circ$ 范围内,随着偏折角度的增大,裂纹尖端驱动力将随之下降。

参 考 文 献

- [1] “中国工程科技 2035 发展战略研究”海洋领域课题组. 中国海洋工程科技 2035 发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2017, 19(1): 108-117.
Marine Research Group of “2035 Development Strategy Study of China Engineering Science and Technology”. Development strategy for China’s marine engineering science and technology to 2035[J]. Strategic Study of Chinese Academy of Engineering, 2017, 19(1): 108-117.
- [2] 吴有生, 曾晓光, 徐晓丽, 等. 海洋运载装备技术与产业发展研究[J]. 中国工程科学, 2020, 22(6): 10-18.
WU Yousheng, ZENG Xiaoguang, XU Xiaoli, et al. Technology and industry development of marine transportation equipment[J]. Strategic Study of Chinese Academy of Engineering, 2020, 22(6): 10-18.
- [3] 中国科学院为中国载人深潜科技创新树立了典范——从“蛟龙”、“深海勇士”到“奋斗者”[J]. 科技促进发展, 2020, 16(12): 1482-1483.
The Chinese Academy of Sciences has set a model for China’s manned deep-sea technological innovation: From “Jiaolong” to “Deep-sea warrior” to “Striver”[J]. Science & Technology for Development, 2020, 16(12): 1482-1483.
- [4] 夏申琳, 王刚, 杨晓, 等. 钛及钛合金在船舶中的应用[J]. 金属加工(冷加工), 2016(19): 40-41.
XIA Shenlin, WANG Gang, YANG Xiao, et al. Application of titanium and titanium alloys to ships[J]. Metal Working(Metal Cutting), 2016(19): 40-41.
- [5] 冯雅奇, 贾栓孝, 王伟琪, 等. 深潜器载人舱用 TC4ELI 钛合金半球壳的研制[J]. 钛工业进展, 2016, 33(1): 19-22.
FENG Yaqi, JIA Shuanxiao, WANG Weiqi, et al. Development of TC4 ELI titanium alloy hemisphere shell for manned submersible[J]. Titanium Industry Progress, 2016, 33(1): 19-22.
- [6] 王芳, 王莹莹, 崔维成. 高强度钛合金深潜器载人舱在三种不同类型载荷下的裂纹扩展预报[J]. 船舶力学, 2016, 20(6): 999-1009.
WANG Fang, WANG Yingying, CUI Weicheng. Prediction of crack growth rates of a high strength titanium alloy for deep sea pressure hull under three loading patterns[J]. Journal of Ship Mechanics, 2016, 20(6): 999-1009.
- [7] 王莹莹, 王芳, 崔维成. 基于统一的疲劳寿命预报方法(UFLP)的深潜器载人舱疲劳可靠性分析[J]. 船舶力学, 2016, 20(3): 335-347.
WANG Yingying, WANG Fang, CUI Weicheng. Fatigue reliability analysis for the manned cabin of deep manned submersibles based on the unified fatigue life prediction method[J]. Journal of Ship Mechanics, 2016, 20(3): 335-347.
- [8] 吴连生, 于培师, 韦朋余, 等. 基于三维理论的 TC4ELI 钛合金疲劳裂纹扩展研究[J]. 船舶力学, 2022, 26(9): 1354-1362.
WU Liansheng, YU Peishi, WEI Pengyu, et al. Study on fatigue crack growth of TC4ELI titanium alloy based on three-dimensional theory[J]. Journal of Ship Mechanics, 2022, 26(9): 1354-1362.
- [9] JESUS J S, BORREGO L P, FERREIRA J A M, et al. Fatigue crack growth behaviour in Ti6Al4V alloy specimens produced by selective laser melting[J]. International Journal of Fracture, 2020(123-133): 223.
- [10] VANSICKLE R, FOEHRING D, CHEW H B, et al. Microstructure effects on fatigue crack growth in additively manufactured Ti-6Al-4V[J]. Materials Science and Engineering: A, 2020, 795: 139993.
- [11] 张亚军, 吕逸帆. TC4ELI 合金的断裂韧性试验研究[J]. 材料开发与应用, 2012, 27(2): 14-17.
ZHANG Yajun, LÜ Yifan. Study on fracture toughness test of TC4ELI alloy[J]. Development and Application of Materials, 2012, 27(2): 14-17.
- [12] WU Z, KOU H, TANG L, et al. Microstructural effects on the high-cycle fatigue and fracture behaviors of Ti-6Al-4V alloy[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 235: 107129.
- [13] BISWAS N, DING J L. Numerical study of the deformation and fracture behavior of porous Ti6Al4V alloy under static and dynamic loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 82: 89-102.
- [14] 马英杰, 刘建荣, 雷家峰, 等. TC4ELI 合金疲劳裂纹尖端塑性区对裂纹扩展的影响[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(10): 1789-1794.
MA Yingjie, LIU Jianrong, LEI Jiafeng, et al. Influence of fatigue crack tip plastic zone on crack propagation behavior in TC4ELI alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(10): 1789-1794.
- [15] 郭萍. TC4-DT 钛合金不同片层结构疲劳裂纹扩展行为

- 研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2015, 44(2): 277-281.
- GUO Ping. Fatigue crack growth behavior in TC4-DT titanium alloy with different lamellar microstructures[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2015, 44(2): 277-281.
- [16] 郭萍, 赵永庆, 洪权, 等. TC4-DT 钛合金疲劳裂纹扩展的微观机制[J]. 材料导报, 2019, 33(20): 3448-3451.
- GUO Ping, ZHAO Yongqing, HONG Quan, et al. Microscopic mechanism of fatigue crack propagation in TC4-DT titanium alloy[J]. Materials Review, 2019, 33(20): 3448-3451.
- [17] LI W, LI M, SUN R, et al. Faceted crack induced failure behavior and micro-crack growth based strength evaluation of titanium alloys under very high cycle fatigue[J]. International Journal of Fatigue, 2020, 131: 105369.
- [18] WANG K, BAO R, ZHANG T, et al. Fatigue crack branching in laser melting deposited Ti-55511 alloy[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 124: 217-226.
- [19] ZENG X, WEI Y. The effective fracture strength and fracture toughness of solids with energy dissipation confined to localized strips[J]. International Journal of Plasticity, 2019, 120: 47-63.
- [20] 于培师, 赵军华, 郭万林. 三维损伤容限设计: 离面约束理论与疲劳断裂准则[J]. 机械工程学报, 2021, 57(16): 87-105.
- YU Peishi, ZHAO Junhua, GUO Wanlin, et al. Three-dimensional damage tolerance design: Out-of-plane constraint theory and fatigue/fracture criteria[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(16): 87-105.
- [21] LIU Z E, WEI Y. An analytical solution to the stress fields of kinked cracks[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2021, 156: 104619.
-
- 作者简介: 于培师, 男, 1982 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为疲劳与断裂力学、直书写 3D 打印传感器技术。
E-mail: ypsnuaa@163.com
- 赵军华(通信作者), 男, 1979 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为宏微纳结构力学性能的跨尺度理论、试验及数值模拟。
E-mail: junhua.zhao@163.com
- 郭万林, 男, 1960 年出生, 博士, 教授, 中国科学院院士。主要研究方向为三维断裂力学、纳尺度物理力学。
E-mail: wlguo@nuaa.edu.cn