

4130X 钢 I - II 复合型疲劳裂纹 扩展行为研究

晁龙¹, 秦晨¹, 陈凡², 曹文红², 黄国明², 夏明², 周昌玉¹, 贺小华^{1*}

(1. 南京工业大学机械与动力工程学院, 江苏 南京 211816; 2. 浙江蓝能氢能科技股份有限公司, 浙江 绍兴 312369)

摘要: 为探究 4130X 钢 I - II 复合型疲劳裂纹扩展规律, 采用紧凑拉伸剪切(CTS)试样, 开展不同加载角度、应力比下的试验及有限元分析(FEM)。结果表明: 裂纹扩展路径不受应力比 R 的影响, 随加载角度 β 的增大产生较大的偏转角度, 起裂扩展角符合最大周向应力(MTS)准则; 疲劳裂纹扩展速率(FCGR)随应力比 R 的增大而增大, 随着加载角度 β 的增加而降低; 裂纹尖端的塑性区形态会随加载角度而发生变化, 塑性应变能在扩展过程中逐渐累积; 断口形貌特征表明, 应力比 R 和加载角度 β 会对断口处的疲劳辉纹以及二次裂纹产生明显的影响。

关键词: 4130X 钢; I - II 复合型裂纹; 应力比; 加载角; 裂纹扩展速率

中图分类号: TF76, TG142

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2025)03-0195-10

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2025.03.027

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



与作者互动
听语音
聊科研

Investigation on fatigue crack growth behavior of mixed mode I - II crack in 4130X steel

CHAO Long¹, QIN Chen¹, CHEN Fan², CAO Wenhong², HUANG Guoming², XIA Ming²,
ZHOU Changyu¹, HE Xiaohua^{1*}

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, Jiangsu, China; 2. Zhejiang Rein Gas Equipment Co., Ltd., Shaoxing 312369, Zhejiang, China)

Abstract: To investigate the behavior of mixed mode I-II fatigue crack growth in 4130X steel, Compact Tension Shear (CTS) specimens were used to conduct experimental methods and Finite Element Method (FEM) at diverse load ratios and loading angles. The results indicate that the fatigue crack growth path is not influenced by the load ratio (R), but a significant deflection angle occurs with an increase in the loading angle (β). The crack growth angles are consistent with the Maximum Tangential Stress (MTS) criterion. The fatigue crack growth rate (FCGR) shows an increasing trend as load ratio (R) increases, but decreases with an increase of the loading angle (β). With the increment of the loading angle, the morphology of the monotonic plastic zone at the crack tip varies, and the plastic strain energy is accumulated gradually. Fracture morphology analysis reveals that the load ratio (R) and loading angle (β) have a significant impact on the fatigue striations and secondary cracks at the fracture surface.

Key words: 4130X steel, mixed mode I-II crack, load ratio, loading angle, fatigue crack growth rate

收稿日期: 2024-07-16

基金项目: 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(院级)(JXSS-029)。

作者简介: 晁龙, 2000 年出生, 男, 安徽宿州人, 硕士研究生, 主要从事过程设备结构与强度方面的研究, E-mail: chaolong0106@163.com; *通讯作者: 贺小华, 1965 年出生, 女, 教授, 主要从事过程设备结构强度及结构完整性研究工作, E-mail: xh_he@njtech.edu.cn。

0 引言

工业气体是工业生产不可或缺的基础原材料产品,因其应用领域广泛,在经济发展中有极为重要的地位。高压无缝气瓶凭借安全性能高、成本低、占地少以及较好的结构性能广泛应用于工业气体的存储和运输领域^[1]。4130X 钢是中碳高强度钢,具有出色的抗拉性能、抗屈服性能以及其优秀的延展性,是存储和运输工业气体设备的重要制造材料^[2]。4130X 钢气瓶经过相关的热处理、加工成型以及压缩气体充放后,可能会产生疲劳载荷下的裂纹扩展,导致储存和运输过程中气体泄漏或发生爆炸。研究气瓶的疲劳裂纹扩展行为至关重要。许多工程中疲劳裂纹表现为复合型裂纹^[3],因此研究 4130X 钢 I-II 复合型疲劳裂纹扩展规律具有重要意义。

当前,已有许多学者对 I-II 复合型疲劳裂纹扩展规律进行了一般性研究^[4-15]。LUO^[4]在研究 TC4-DT 钛合金 CTS 试样 I-II 复合型疲劳裂纹扩展规律时,通过高速摄像装置获取裂纹长度。刘小刚^[5]通过电子显微镜追踪裂纹扩展,获取裂纹长度。因此可以通过图像法获得 I-II 复合型疲劳裂纹扩展长度的可靠数据。疲劳裂纹扩展行为研究对工程实际结构损伤容限评估和设计至关重要,应力强度因子可以作为评估裂纹扩展速率的主要因素之一^[6]。RICHARD 等^[7]引入等效应力强度因子来描述 I-II 复合型疲劳裂纹扩展行为。SANDER^[8]提出一种新型的等效应力强度因子用于描述加载角度对 I-II 复合型疲劳裂纹扩展速率的影响。LIU^[9]在工业纯钛的 I-II 复合型疲劳裂纹扩展行为研究中提出一种新的有效应力强度因子,该因子可以反映 K_I 和 K_{II} 的贡献度。对于不同加载角度下疲劳裂纹扩展,扩展路径和速率对裂纹寿命有较大的影响,而裂纹扩展速率直接受扩展路径影响,裂纹扩展路径对于复合型疲劳裂纹扩展行为研究有重要意义^[10]。当前, I-II 复合型裂纹存在不同的断裂准则。江波^[11]结合试验与有限元计算研究中碳车轮钢 I-II 复合型疲劳裂纹扩展方向,发现最大周向应力(MTS)准则可以很好地预测 I-II 复合型裂纹的疲劳扩展方向。赵翔^[12]利用 ABAQUS 研究含中心斜裂纹 2024 铝合金板裂纹扩展角度和路径,验证了有限元计算方法的准确性。董蕙茹等^[13]对 LC4CS 铝合金对称 CTS 试样进行 I-II 复合型疲劳断裂试验,发现 MTS 准则能够很好地预测不同厚度试样的裂纹起裂方向。马世骧^[14]对 7005 铝合金 CTS 试样进行复合型疲劳断裂试验,发现疲劳裂纹扩展速率随加

载角度的增大而降低。ZHANG^[15]结合试验、有限元法对工业纯钛 CTS 试样进行研究,发现裂纹扩展规律收到加载角度和应力比的显著影响。

目前 4130X 钢材料 I-II 复合型加载下的性能研究较少,其疲劳裂纹扩展行为应得到重视。笔者基于 4130X 钢 CTS 试样开展不同应力比下的 I-II 复合型疲劳裂纹扩展试验,并通过有限元分析计算不同加载角度下的应力强度因子。在此基础上探究不同应力比 R 及加载角度 β 下的裂纹扩展行为规律。

1 试验方法

试验采用 4130X 钢为研究对象,进行 I-II 复合型疲劳裂纹扩展试验,材料化学成分如表 1 所示。

表 1 4130X 钢化学成分
Table 1 Chemical composition of 4130X steel %

C	Mn	Si	Cr	Mo	S	P	Ni	Cu
0.345	0.877 5	0.352 75	0.997 5	0.165 5	0.000 975	0.009 4	0.018	0.024

试验基于改进的 CTS 夹具系统,采用厚度为 15 mm,宽度为 50 mm,初始裂纹长度为 25 mm 的 CTS(Compact-Tensile-Shear)紧凑拉伸剪切试样进行试验,预制裂纹长度约 1.5 mm,试样尺寸如图 1 所示。试验中,通过调整销子固定位置来获得不同加载角度。在 MTS809-100KN 伺服机液压系统进行试验。通过数字图像处理系统(DIC)实时测量和记录疲劳裂纹扩展长度和路径,如图 2 所示。DIC 相机拍摄精度为 0.02 mm/pixel。试验在常温环境下进行,最大载荷 $P_{\max}=3.67$ kN 保持恒定,应力比 R 在 0.1 到 0.5 变化,采用三角波(Ramp),频率为 2 Hz。试验方案如表 2 所示。

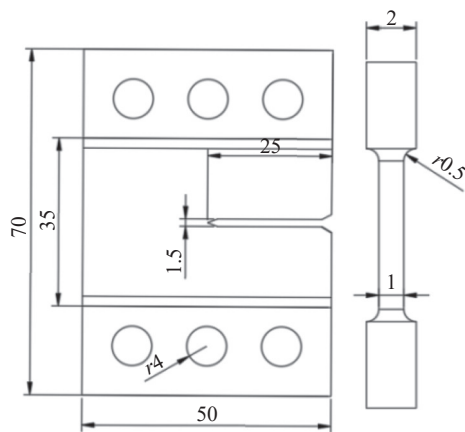


图 1 CTS 试样尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Schematic drawing of the CTS specimen

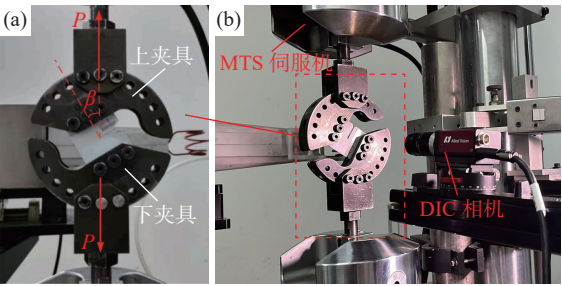


图 2 CTS 系统及测量装置
Fig. 2 CTS system and test device

2 有限元方法

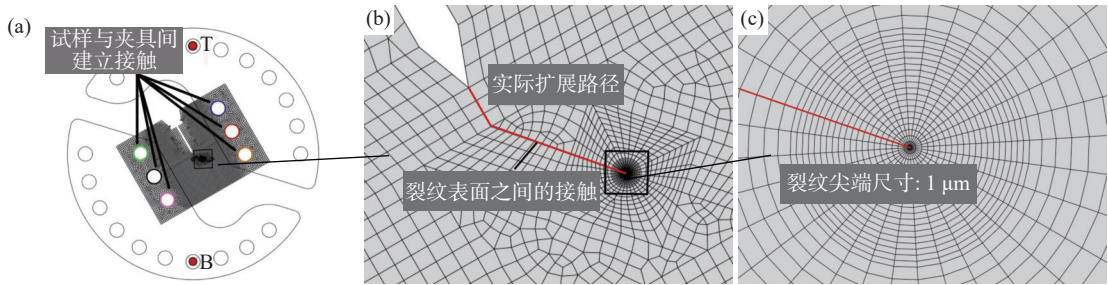
2.1 应力强度因子

采用有限元软件 ABAQUS, 对 CTS 试样进行计算分析, 获得应力强度因子。通过建立不同裂纹

长度和加载角度下的有限元模型, 裂纹尖端采用四点平面应变折减单元(CPE4R)。同时根据试验获得的裂纹扩展轨迹计算裂纹扩展后的应力强度因子, 如图 3 所示。

表 2 4130X 钢 I - II 复合型疲劳裂纹扩展试验方案
Table 2 FCG of 4130X steel for mixed mode I - II loading test program

NO.	加载角度 $\beta/(^{\circ})$	最大载荷 $P_{\max}/\text{kN}$	应力比 R
1	0	3.67	0.1
2			0.3
3			0.5
4			0.1
5	30		0.3
6			0.5
7			0.1
8	60		0.3
9			0.5



(a) CTS 模型; (b) 裂纹路径设置; (c) 裂尖网格
图 3 CTS 系统
Fig. 3 System of CTS

根据试验加载情况设置边界条件, 如图 3(a) 所示。上刚性销 T 处固定约束, 下刚性销 B 处施加载荷, 载荷的施加角度由销 T 和销 B 的位置进行决定。WANG^[16] 指出当单元长度小于 0.05 mm 时, 有限元计算结果与裂纹尖端网格尺寸无关。裂纹尖端网格尺寸设为 1 μm , 可以准确地描述裂尖行为, 如图 3(c) 所示。

通过有限元法求解的应力强度因子 K_{I} 、 K_{II} 结果与 ZHANG^[17] 的结果进行比较, 如表 3。从表 3 中可以发现二者结果较为吻合。

表 3 应力强度因子解的比较
Table 3 Comparison of solutions for stress intensity factors

加载角度 $\beta/(^{\circ})$	文献解 ^{[17] / (MPa·m^{1/2})}		本文有限元解 / (MPa·m ^{1/2})		相对误差 / %	
	K_{I}	K_{II}	K_{I}	K_{II}	K_{I}	K_{II}
0	26.08	0	25.91	0	0.65	0
30	26.60	-5.36	26.21	-5.44	-1.46	1.49
60	28.91	-17.81	28.41	-18.19	-1.72	2.1

2.2 循环本构模型

材料循环塑性行为采用 Chaboche 模型^[18], 该模

型是一种能有效精确模拟疲劳裂纹尖端循环力学行为的材料本构模型, 能够对非线性运动学和各向同性硬化规律进行数值模拟, 并获取裂纹尖端循环力学性能的相关数据。裂纹尖端采用结合各向同性和运动硬化的 Chaboche 模型模拟裂纹尖端的应力应变循环响应。材料模型参数如表 4 所示。其中 C_k 和 γ_k 是随动强化参量, 材料的屈服强度表示为 σ_s , 等效塑性应变时的等效屈服应力表示为 σ_0 。4130X 钢等效应力随等效塑性应变的演化规律如图 4。

表 4 4130X 钢 Chaboche 模型的材料性质
Table 4 Material properties of 4130X steel for Chaboche model

Σ_s/MPa	σ_0/MPa	C_1/MPa	γ_1	C_2/MPa	γ_2
715	650	162 000	1 800	80 500	230

3 结果分析

3.1 疲劳裂纹扩展路径

图 5(a) 为预制的 I 型裂纹, 图 5(b) 为在加载角 β 时疲劳裂纹扩展路径示意。I 型应力强度因子 K_{I} 为拉伸驱动力, II 型应力强度因子为剪切型驱

动力。由图5可知, K_I 垂直于裂纹扩展方向, K_{II} 方向与裂纹扩展方向平行。在 I-II 复合型疲劳裂纹扩展中, 疲劳裂纹扩展路径将由 K_I - K_{II} 共同作用。

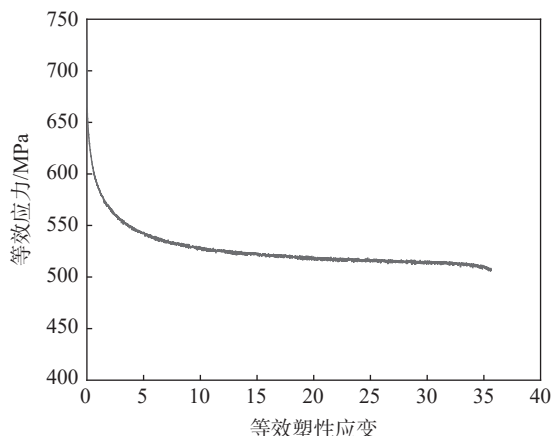


图4 等效应力与等效塑性应变关系

Fig. 4 Relationship between equivalent yield stress and equivalent plastic strain

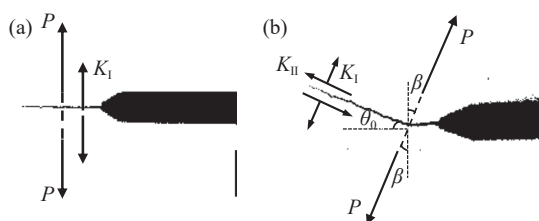
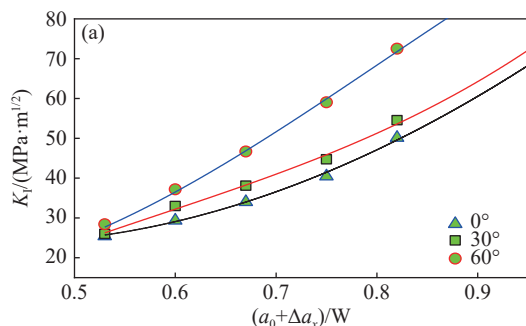


图5 I-II复合型疲劳裂纹扩展路径示意

Fig. 5 Schematic diagram of FCG path for mixed mode I-II crack

疲劳裂纹扩展路径的研究在 I-II 复合型裂纹结构的安全性评价中具有重要意义^[19]。图6为不同应力比 R 及加载角度 β 下裂纹扩展路径对比。图6中 Δa_x 和 Δa_y 分别为预制裂纹方向和法向投影方向的裂纹长度, 实线表示所有加载条件下的裂纹扩展路径。由图6可以看出不同应力比 R 下 I-II 复合型 FCG 路径几乎重合, 可以表明不同加载角度 β 下,



(a) K_I ; (b) K_{II}

图7 不同裂纹长度及加载角度下的应力强度因子

Fig. 7 SIF at diverse loading angle under different length of crack

图8展示了 $\beta=30^\circ$ 、 60° 加载情况下 K_{II} 在疲劳裂纹扩展过程中的贡献度。不同角度下, K_{II} 都随着

FCG 路径几乎不受 R 的影响。但可以明显看出, FCG 路径的偏转方向随加载角度的增大也开始变大。

基于线弹性断裂力学理论, 应力强度因子是 FCGR 的重要表征参数, 它是裂纹尖端应力水平的量化表达, 也为裂纹提供扩展的驱动力。 K_I 值的增大会导致裂纹尖端应力集中增大, 裂纹扩展的驱动力也逐渐增大。而 K_{II} 值的增大会与 K_I 竞争主导地位, 导致裂纹从张开型逐渐转变为张开型与剪切型相互竞争, 剪切型断裂失效机制对裂纹扩展的影响开始逐渐增大。

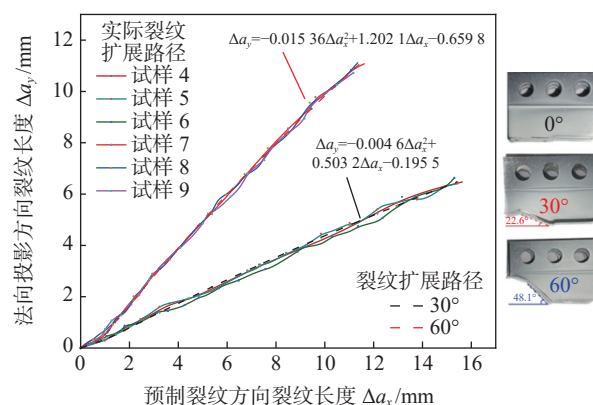
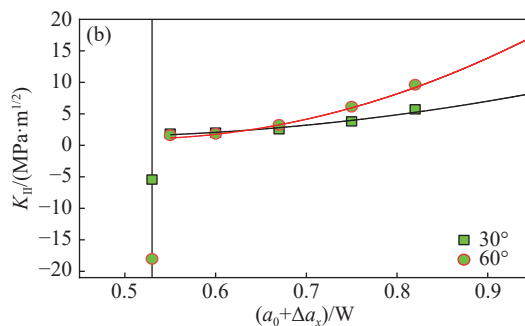


图6 不同应力比及加载角度下的裂纹扩展路径

Fig. 6 FCG path diagram at different loading angles and load ratios

基于有限元计算结果, 绘制不同裂纹长度及加载角度下 K_I 及 K_{II} 关系曲线, 如图7所示, 拟合结果如表5所示。由图7可知, K_I 随裂纹长度增长逐渐增大, 说明 FCGR 的增加是由于裂纹扩展驱动力的增大。在相同的 Δa_x 下, 随着加载角度 β 的增大, K_I 也在逐渐增大。这是由于加载角度 β 的变化, 实际裂纹长度也会变化。而当疲劳载荷施加方向改变后, 初始的 K_{II} 值为负^[17], 随后随着裂纹的继续扩展, K_{II} 始终为正值。



裂纹扩展而逐渐增大。 K_{II} 的贡献度在 $\beta=30^\circ$ 时较低, 增长幅度有限, 此时 K_{II} 对 FCG 行为的影响可能只

是控制裂纹扩展方向, 对 FCGR 影响较小。 K_{II} 在 $\beta=60^\circ$ 时增长幅度明显, 表明 K_{II} 对 FCG 的影响可能

不仅仅控制裂纹扩展方向, 而且对 FCGR 有显著的影响。

表 5 K_I 与 K_{II} 拟合结果
Table 5 Fitting results of K_I and K_{II}

β	$K_I/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$	$K_{II}/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$
	$K = \frac{F}{BW^{1/2}} \cdot f(a_n), \quad a_n = (a_0 + \Delta a_x) / W$	$K = \frac{F}{BW^{1/2}} \cdot f(a_n), \quad a_n = (a_0 + \Delta a_x) / W$
0°	$K = \frac{(2 + a_n) \cdot (0.23284 + 0.4316 \cdot a_n - 1.35665 \cdot a_n^2 + 0.98098 \cdot a_n^3 - 0.28705 \cdot a_n^4)}{(1 - a_n)^{1.5}}$	$K = 0$
30°	$f(a_n) = 80.043 \cdot a_n^3 - 156.7076 \cdot a_n^2 + 106.461 \cdot a_n - 22.738$	$f(a_n) = -8.16 \cdot a_n^3 + 20.96 \cdot a_n^2 - 15.62 \cdot a_n + 3.79$
60°	$f(a_n) = 25.485 \cdot a_n^3 - 42.541 \cdot a_n^2 + 31.325 \cdot a_n - 6.71$	$f(a_n) = -29.80 \cdot a_n^3 + 72.18 \cdot a_n^2 - 54.53 \cdot a_n + 13.23$

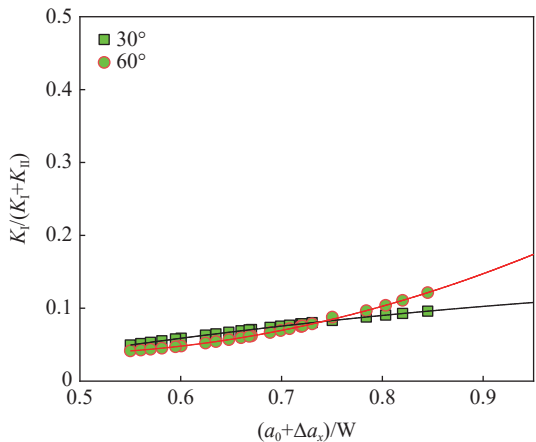


图 8 不同加载角度下 K_{II} 的占比
Fig. 8 Percentage of K_{II} at different loading angles

3.2 I - II 复合型裂纹起裂角与扩展角度

当前有各种断裂准则可用于复合型疲劳裂纹扩展起裂角的预测, 文献 [20] 对现有的断裂准则进行了总结。复合型疲劳载荷下裂纹扩展试验尚未标准化, 因此断裂准则的选择对于 I - II 复合型疲劳裂纹扩展研究具有重要意义 [21]。

ERDOGON [22] 基于最大周向应力 (MTS) 准则提出了裂纹起裂角计算公式, 如式 (1) 所示。

$$\theta_0 = 2 \arctan \left(\frac{1 \pm \sqrt{1 + 8 \left(\frac{K_{II}}{K_I} \right)^2}}{4 \frac{K_{II}}{K_I}} \right) \quad (1)$$

这里的预测角相对于初始裂纹表面, $\theta_0=0$ 表示裂纹沿着 I 型裂纹方向扩展。

表 6 为通过图 6 曲线进行求导得到不同加载角度下的扩展角度的表达式。

由图 9 可知, 最大周向应力准则预测的起裂角与试验结果进行比对, 较为吻合。说明对于不同加载角度下裂纹起裂角预测, MTS 准则依旧适用。

表 6 不同加载角度下 θ 表达式
Table 6 Expression for θ under different loading angles

加载角 $\beta/(\circ)$	$\theta/(\circ)$
30	$\theta = \arctan(-0.0092 \times \Delta a_x + 0.5032)$
60	$\theta = \arctan(-0.03072 \times \Delta a_x + 1.2021)$

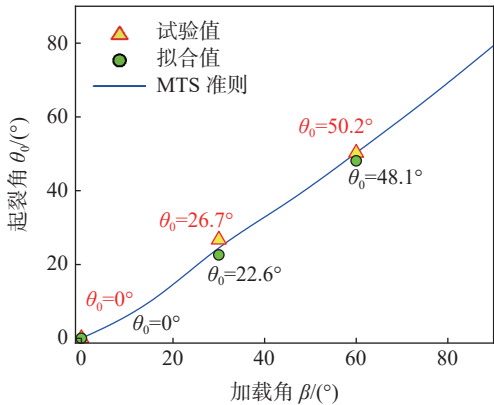


图 9 裂纹起裂角的试验值与拟合值、MTS 准则预测值
Fig. 9 Comparison of measured crack initiation angle with the fitting value and the predicted value by MTS criterion

3.3 疲劳裂纹扩展速率

图 10 是基于试验数据得到不同应力比 R 下 0° 、 30° 和 60° 的 $\Delta a-N$ 曲线。可以发现无论应力比为 0.1、0.3 还是 0.5, 随着加载角 β 的增大, 疲劳裂纹扩展寿命逐渐增加。而当加载角 β 相同时, 疲劳裂纹扩展寿命随应力比的增大而增大。

为了评估 I - II 复合型疲劳裂纹扩展速率, 需要同时考虑 K_I 分量和 K_{II} 分量的影响, 此时引入等效应力强度因子幅值 ΔK_{eq} 。Tanaka 公式广泛用于等效应力强度因子 ΔK_{eq} 的计算 [23], 如式 (2) 所示。

$$K_{eq} = \sqrt[0.25]{K_I^4 + 8K_{II}^4} \quad (2)$$

利用有限元计算获得不同加载角度以及裂纹长度下的 ΔK_{eq} , 并基于试验数据计算出不同裂纹长度下对应的 da/dN , 绘制不同加载角度 β 下的 $da/dN-\Delta K_{eq}$ 曲线。

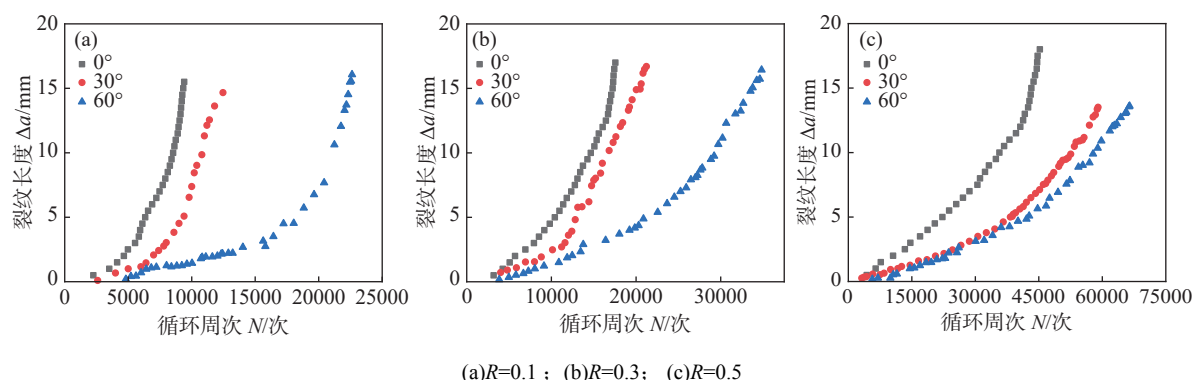
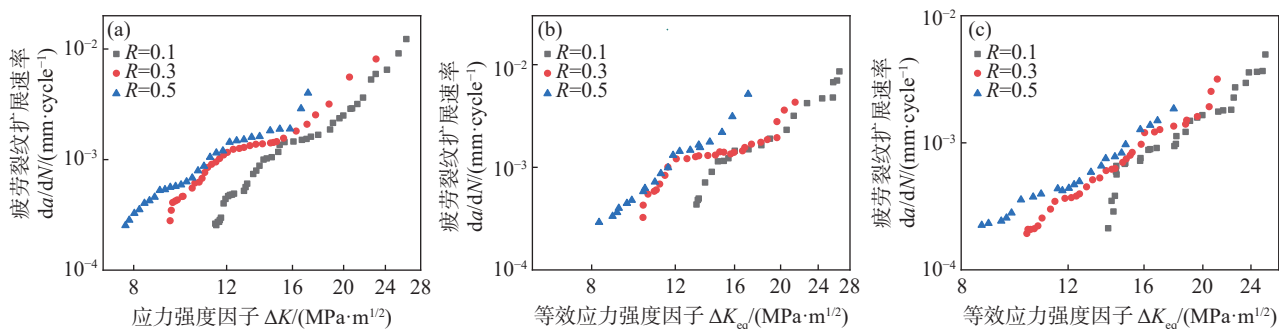
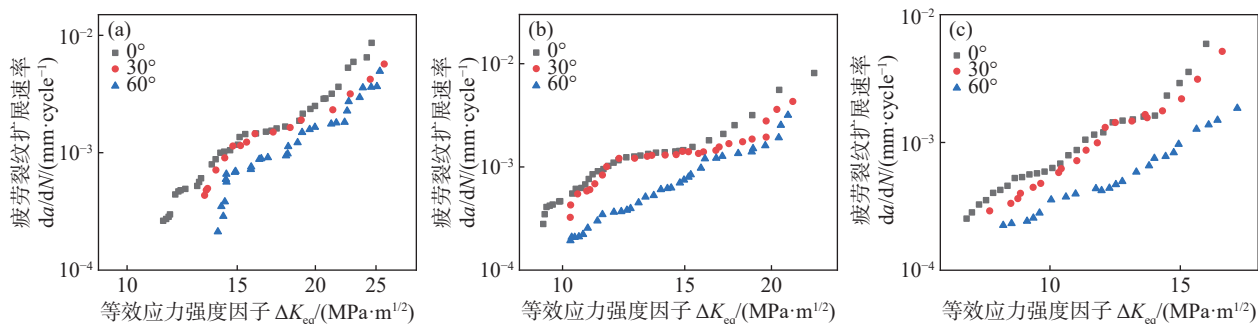
(a) $R=0.1$; (b) $R=0.3$; (c) $R=0.5$ 图 10 不同应力比及加载角度下 $\Delta a-N$ 曲线Fig. 10 $\Delta a-N$ curves at different loading angles and different ratios

图 11 给出了各个加载角度的不同应力比 R 下的 $da/dN-\Delta K_{eq}$ 曲线。可以发现,当加载角度相同时,FCGR 随应力比 R 增加而增大。由此可见疲劳裂纹扩展速率和 R 的关系紧密相关,而与 R 相关的 ΔK_{eq} 是疲劳裂纹扩展的驱动力。

图 12 展示了同一应力比不同加载角下的 da/dN

$dN-\Delta K_{eq}$ 曲线。总体而言,同一应力比 R 下,疲劳裂纹扩展速率随加载角度 β 的增大而降低。具体而言, $\beta=0^\circ$ 、 30° 的疲劳裂纹扩展速率相近, $\beta=60^\circ$ 的疲劳裂纹扩展速率较低。以上情况说明在 $\beta=60^\circ$ 时, K_{II} 对 FCG 的影响较大,不仅仅控制裂纹扩展方向,而且对 FCGR 有显著的影响,此处与 3.1 节结论相似。

(a) $\beta=0^\circ$; (b) $\beta=30^\circ$; (c) $\beta=60^\circ$ 图 11 不同应力比下 $da/dN-\Delta K_{eq}$ 关系曲线Fig. 11 $da/dN-\Delta K_{eq}$ diagram at different load ratios(a) $R=0.1$; (b) $R=0.3$; (c) $R=0.5$ 图 12 不同加载角度下 $da/dN-\Delta K_{eq}$ 关系曲线Fig. 12 $da/dN-\Delta K_{eq}$ diagram at different loading angles

3.4 裂纹尖端应力-应变迟滞回线

图 13 为不同应力比及加载角度下裂纹尖端 $1\mu m$ 处的应力-应变迟滞回线。值得注意的是在经过疲劳循环之后,应力应变迟滞回线发生明显的变化。

由图 13(a) 可见,在同一加载角度不同应力比下,应力应变迟滞回线有所不同。随着应力比的增大,应力幅值减小,累积的拉伸应变能逐渐降低,迟滞回线彼此靠近。这说明高应力比下,需要的裂纹

扩展驱动力小, 裂纹起裂也更轻松。从图 13(b) 发现, 同一应力比不同加载角度下, 应力应变迟滞回线随加载角度向右偏移, 迟滞回线宽度也逐渐增大, 代

表此时 FCG 需要更多的驱动力, 起裂也就越困难。上述分析表明, II 型剪切分量以及应力比对裂纹尖端变形有着重要影响。

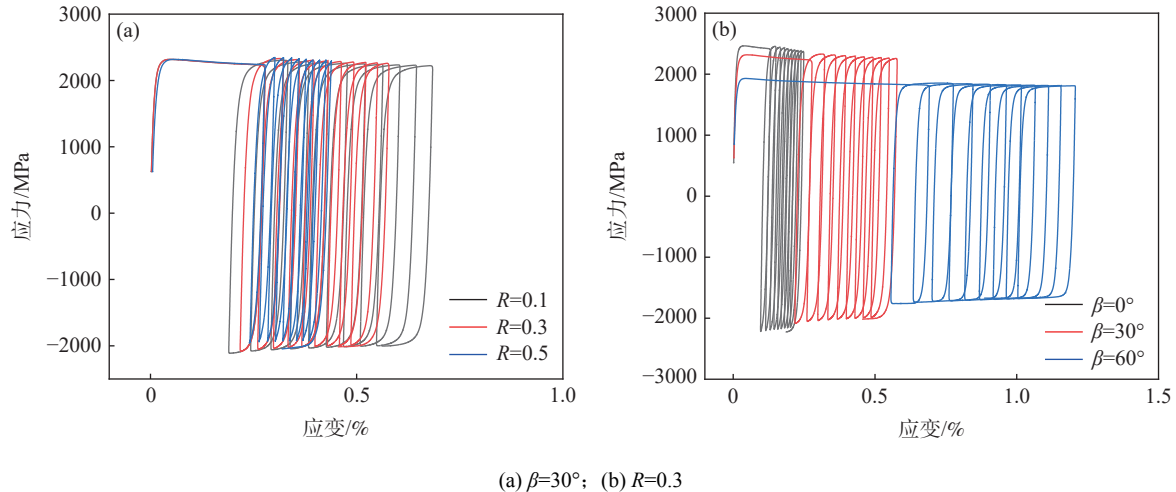


图 13 裂纹尖端应力-应变迟滞回线
Fig. 13 Cyclic stress-strain curves at crack tip

3.5 裂纹尖端塑性区及应力场演化

图 14 展示了应力比 $R=0.1$ 下不同加载角度、不同裂纹扩展长度下单调塑性区的形貌。黑色箭头为载荷施加方向, 红色虚线为裂纹扩展方向, 蓝色为预制裂纹方向。从图中可以发现不同加载条件下单调塑性区形状皆呈现为蝴蝶状, 并且随着裂纹扩展单调塑性区尺寸显著增大。 $\beta=30^\circ$ 时单调塑性区的形貌与 $\beta=0^\circ$ 时的形貌相似, 呈近似对称的蝴蝶状。而 $\beta=60^\circ$ 时, 单调塑性区形貌转变成非对称的蝴蝶状。随加载角度 β 的增大, 单调塑性区逐渐偏离 I 型裂纹扩展方向, 证明随 β 增大, 起裂角也逐渐增大, 裂纹起裂对能量的需求也就更大, 起裂也就越困难。

图 15 展示了 $R=0.1$ 下不同加载角度下的裂纹尖端 Von Mises 应力场演化。从图中可以发现 Von Mises 应力场在不同加载角度下的形态演化与单调塑性区规律相似, 随着 β 的增大, 两者皆由对称向不对称转变, 并且裂纹扩展方向偏离 I 型裂纹方向。

3.6 等效塑性应变演化

图 16 为不同加载角度下 FCG 过程中裂纹尖端 $1\ \mu\text{m}$ 处等效塑性应变 (EPS) 的变化过程。图 16(a) 描述了 $\beta=30^\circ$ 不同应力比下的 EPS 演化。图中可以发现, EPS 随着应力比 R 的增大而减小, 结合图 13 的迟滞回线可以推断, 高应力比导致裂尖附近的应力幅减小。图 16(b) 描述了 $R=0.3$ 下不同加载角度的 EPS 演化。各加载角度下的 EPS 随着循环加载不断积累, 且呈现出相同的趋势。说明此时裂纹尖端的塑性变形以及疲劳损伤不断累积。加载角度越大, 裂纹扩展需要更大的驱动力。说明应力比以及加载角度对疲劳裂纹扩展影响较大。

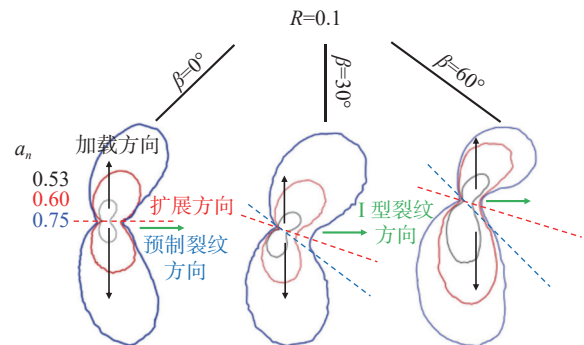


图 14 $R=0.1$ 下不同加载角度下裂尖单调塑性区形态及演化
Fig. 14 Morphology of monotonic plastic zones under various β at $R=0.1$

3.7 裂纹断口形貌分析

对稳态扩展区的疲劳裂纹扩展微观机制的观察可以给出有关疲劳裂纹扩展规律的信息^[24]。因此采用扫描电子显微镜 (SEM, JSM-6380 LA) 对不同加载条件下 4130X 钢 I-II 复合型疲劳裂纹断口表面形貌进行扫描分析, 揭示复合型疲劳裂纹扩展过程中的扩展机理。

图 17 为应力比 $R=0.1$ 下 I-II 复合型 FCG 试验裂纹稳定扩展阶段断口的微观形貌图。从图中可以发现, 二次裂纹宽度随 β 增大而逐渐减小。并且随着加载角度增大, 疲劳辉纹的排列方向由单一转变为多向, 不再像 0° 时朝着一个方向。而这种现象会导致裂纹扩展时需要更多的驱动力, 这部分是由于随 β 增加时 II 型剪切分量在整体驱动力的占比逐渐增大引起的。

图 18 描述了 $\beta=0^\circ$ 、 $\beta=60^\circ$ 在应力比 $R=0.1$ 、 $R=0.5$ 下的疲劳裂纹扩展微观断口形貌图。

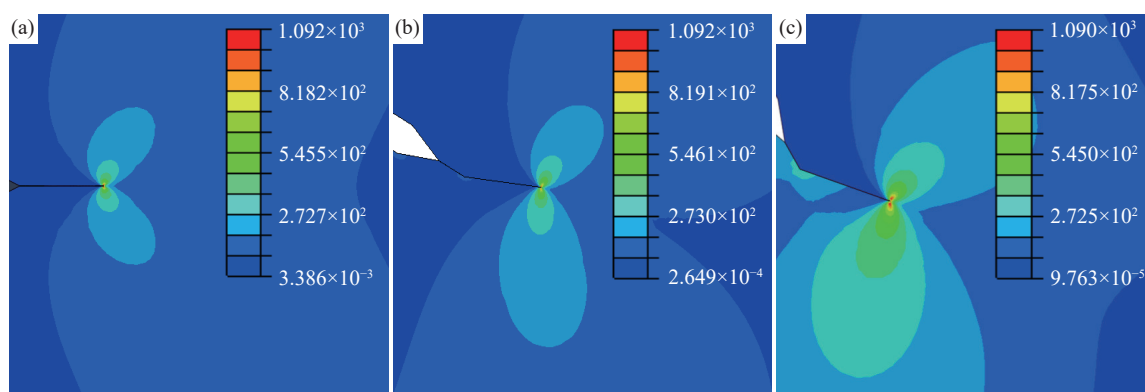
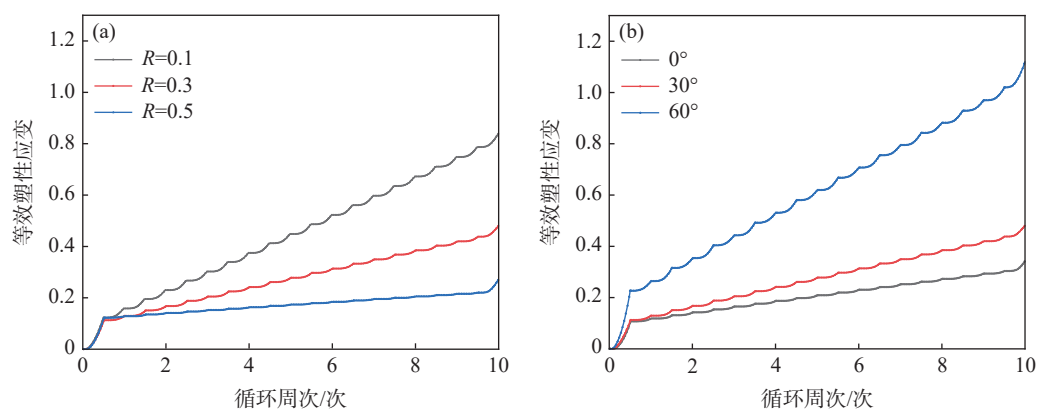
(a) $\beta=0^\circ$; (b) $\beta=30^\circ$; (c) $\beta=60^\circ$ 图 15 $R=0.1$ 下不同加载角度下 Von Mises 应力场演化Fig. 15 The Evolution of Von Mises stress field at different loading angles of $R=0.1$ (a) $\beta=30^\circ$; (b) $R=0.3$

图 16 不同应力比及加载角度下裂尖等效塑性应变曲线

Fig. 16 Equivalent plastic strain curve of crack tip under different load ratios and loading angles

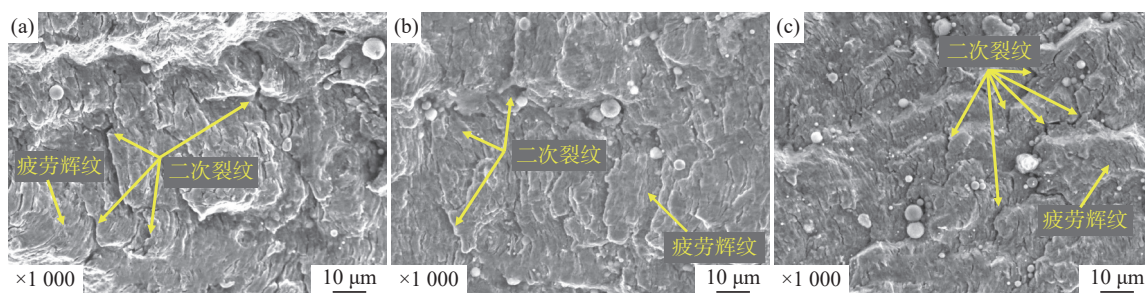
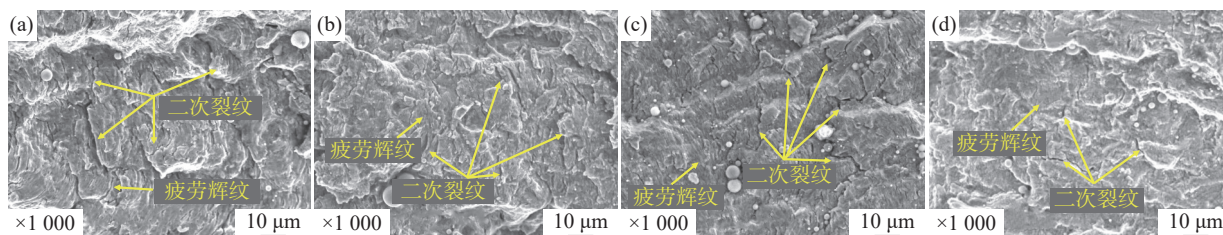
(a) 0° ; (b) 30° ; (c) 60° 图 17 应力比 $R=0.1$ 时不同加载角度下的裂纹断口形貌Fig. 17 Fracture morphology diagram under different loading angles at $R=0.1$ (a) $R=0.1, \beta=0^\circ$; (b) $R=0.5, \beta=0^\circ$; (c) $R=0.1, \beta=60^\circ$; (d) $R=0.5, \beta=60^\circ$

图 18 同一加载角度不同应力比下裂纹断口形貌

Fig. 18 Fracture morphology diagram under different load ratios at the same loading angle

从图 18 中可以发现随着应力比的提高, 不同加载角度下的疲劳辉纹密度逐渐降低, 并且二次裂纹数量逐渐降低。这说明在高应力比的情况下, 想要获得同样的裂纹扩展速率需要更少的驱动力, 即 FCGR 更高。

4 结论

1) 试验表明最大周向应力准则适用于不同加载角度下的疲劳裂纹起裂角的预测。I - II 复合型疲劳裂纹扩展路径不会随着应力比的变化而改变, 但起裂角会随着 β 的增大而增大。

2) I - II 复合型疲劳裂纹扩展速率随着应力比的增大而增大, 说明高应力比下疲劳裂纹扩展只需要较低的驱动力。当加载角度 β 增大时, 裂纹扩展

速率逐渐降低。 $\beta=60^\circ$ 时, 疲劳裂纹扩展速率下降, 说明应力强度因子 K_{II} 不仅控制路径, 同时对疲劳裂纹扩展速率也有明显的影响。

3) 裂纹尖端应力-应变迟滞回线、应力分布以及等效塑性应变演化等表明, 随着裂纹扩展, 等效塑性应变逐渐积累, 单调塑性区尺寸显著增大。并随着加载角度的增大, 单调塑性区形貌由对称转变为不对称。

4) 从裂纹稳定扩展阶段的微观形貌中发现, 随着应力比 R 的提高, 疲劳辉纹密度降低, 并且二次裂纹宽度在降低。随着加载角度 β 的增加, 二次裂纹数量增加, 疲劳辉纹的方向由无序转变为有序, 裂纹扩展需要更大的驱动力, 疲劳裂纹扩展速率也随之降低。

参考文献

- [1] LI J, BO K, HUANG Q H, *et al.* Development trend and challenges of high-pressure hydrogen transportable pressure vessel[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2022, 43(3): 20-26.
(李军, 薄柯, 黄强华, 等. 高压氢气储运移动式压力容器发展趋势与挑战[J]. 太阳能学报, 2022, 43(3): 20-26.)
- [2] NIBUR K A, MARCHI C S, SOMERDAY B P. Fracture and fatigue tolerant steel pressure vessels for gaseous hydrogen. In: ASME PVP, 2010: 18-22.
- [3] DING F, ZHAO T W, JIANG Y. A study of fatigue crack growth with changing loading direction[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2006, 74(13): 2014-2029.
- [4] LUO P F, WANG C H. An experimental study on the elastic-plastic fracture in aductile material under mixed-mode loading[J]. Strain, 2008, 44(3): 8.
- [5] LIU X G, ZHU X L, GUO H D. Experimental and simulation study on I - II mixed-mode fatigue crack growth of TC4-DTelded joint[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2020, 40(2): 61-69.
(刘小刚, 朱笑林, 郭海丁. TC4-DT 焊接接头 I - II 复合型疲劳裂纹扩展实验及模拟研究[J]. 航空材料学报, 2020, 40(2): 61-69.)
- [6] QIAN J, FATEMI A. Mixed mode fatigue crack growth: a literature survey[J]. Engineering fracture mechanics, 1996, 55(6): 969-990.
- [7] RICHARD HA, SCHRAMM B, SCHIRMEISEN N. Cracks on mixed mode loading-theories, experiments, simulations[J]. International journal of fatigue, 2014, 62: 93-103.
- [8] SANDER M, RICHARD H. Experimental and numerical investigations on the influence of the loading direction on the fatigue crack growth[J]. Int J Fatigue, 2006, 28: 583-591.
- [9] LIU J Y, WEN J, ZHAO J Y, *et al.* Fatigue crack growth behavior of CP-Ti cruciform specimens with mixed mode I-II crack under biaxial loading[J]. Materials, 2022, 15(5): 1926-1926.
- [10] LI Y F, TAO H L, GAO Q, *et al.* Parametric simulation method for 3-D non-planar crack propagation[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(12): 2888-2895.
(李宇飞, 陶海亮, 高庆, 等. 三维平面裂纹扩展参数化模拟方法[J]. 航空动力学报, 2017, 32(12): 2888-2895.)
- [11] JIANG B, CHEN G, ZHAO H, *et al.* Fatigue propagation behavior of mixed mode crack in wheel steel[J]. Iron and Steel, 2018, 53(12): 100-104.
(江波, 陈刚, 赵海. 中碳车轮钢复合型裂纹疲劳扩展行为[J]. 钢铁, 2018, 53(12): 100-104.)
- [12] ZHAO X, NIE K, ZHU T, *et al.* An equivalent model of mixed-mode crack to predict the fatigue growth characteristics[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2018, 39(3): 296-304.
(赵翔, 聂凯, 朱涛, 等. 描述复合型疲劳裂纹扩展路径的等效模型[J]. 固体力学学报, 2018, 39(3): 296-304.)
- [13] DONG H R, GUO W L, XU F. Numerical analysis of three-dimensional I / II mixed-mode elastic-plastic fracture of aeronautical structural aluminum alloy[J]. Journal of Mechanical Strength, 2003, 25(2): 222-226.
(董蕙茹, 郭万林, 徐绯. LC4CS 铝合金三维复合型断裂的试验研究[J]. 机械强度, 2003, 25(2): 222-226.)
- [14] Ma S X, HU H. The mixed-mode propagation of fatigue crack in CTS specimen[J]. Chinese Journal of Theoretical and

- Applied Mechanics, 2006, 38(5): 698-704.
(马世骧, 胡泓. CTS 试件中复合型疲劳裂纹扩展[J]. 力学学报, 2006, 38(5): 698-704.)
- [15] ZHANG P, ZHOU C Y, XIE L Q, *et al.* Numerical investigation of mechanical behavior of crack tip under mode I and I-II mixed mode fatigue loading at negative load ratios. Theor Appl Fract Mech, 2020, 108: 102673.
- [16] WANG Q, LIU X, WANG W. Mixed mode fatigue crack growth behavior of Ni-Cr-Mo-V high strength steel weldments[J]. Int J Fatigue, 2017, 102: 79-91.
- [17] ZHANG P, XIE L Q, ZHOU C Y, *et al.* Experimental and numerical investigation on fatigue crack growth behavior of commercial pure titanium under I-II mixed mode loading at negative load ratios[J]. Int J Fatigue, 2020, 138: 105700.
- [18] Chaboche J L. Time-independent constitutive theories for cyclic plasticity[J]. Int J Plast, 1986, 2: 149-188.
- [19] SONG Y Q, LI X S, LI M. I - II mixed-mode fatigue crack propagation of A7085 aluminum alloy and its numerical simulation[J]. Chinese Journal of Engineering, 2018, 40(12): 1510-1517.
(宋彦琦, 李向上, 李名. A7085 铝合金 I - II 复合型疲劳裂纹扩展及其数值模拟[J]. 工程科学学报, 2018, 40(12): 1510-1517.)
- [20] ROZUMEK D, MACHA E. A survey of failure criteria and parameters in mixed-mode fatigue crack growth[J]. Mater Sci, 2009, 45: 190-210.
- [21] SHAHANI A R, TABATABAEI S A. Effect of T-stress on the fracture of a four-point bend specimen[J]. Mater Design, 2009, 30: 2630-2635.
- [22] ERDOGA F. On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear[J]. J Basic Eng Trans ASME, 1963, 85.
- [23] TANAKA K. Fatigue crack propagation from a crack inclined to the cyclic tensile axis[J]. Eng Fract Mech, 1974, 6: 493-507.
- [24] RICARDS C E, LINDLEY T C. The influence of stress intensity and microstructure on fatigue crack propagation in ferritic materials[J]. Eng Fract Mech, 1972, 4: 951-978.

编辑 邓淑惠

(上接第 173 页)

- [6] ZHANG Y. High-entropy materials[J]. Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2019, 2: 215-232.
- [7] MIAHRA R S, HARIDAS R S, AGRAWAL P. High entropy alloys – tunability of deformation mechanisms through integration of compositional and microstructural domains[J]. Materials Science and Engineering: A, 2021, 812: 141085.
- [8] ZHANG Y, ZUO T T, TANG Z, *et al.* Microstructures and properties of high-entropy alloys[J]. Progress in Materials Science, 2014, 61: 1-93.
- [9] YEH J. Alloy design strategies and future trends in high-entropy alloys[J]. JOM, 2013, 65(12): 1759-1771.
- [10] TSAI K Y, TSAI M H, YEH J W. Sluggish diffusion in Co-Cr-Fe-Mn-Ni high-entropy alloys[J]. Acta Materialia, 2013, 61(13): 4887-4897.
- [11] SLONE C E, MIAO J, GEORGE E P, *et al.* Achieving ultra-high strength and ductility in equiatomic CrCoNi with partially recrystallized microstructures[J]. Acta Materialia, 2019, 165: 496-507.
- [12] WU Z, BEI H, PHARR G M, *et al.* Temperature dependence of the mechanical properties of equiatomic solid solution alloys with face-centered cubic crystal structures[J]. Acta Materialia, 2014, 81: 428.
- [13] SONG Li Y, WANG Y F, WANG M S, *et al.* Microstructure and mechanical behavior of CrCoNi medium entropy alloys in 1000 MPa grade[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2020, 40(4): 62-70.
(宋凌云, 王艳飞, 王明赛, 等. 1000 MPa 级 CrCoNi 中熵合金的微观组织和力学行为[J]. 航空材料学报, 2020, 40(4): 62-70.)
- [14] PRAVEEN S, BAE J W, ASGHARI Rad P, *et al.* Ultra-high tensile strength nanocrystalline CoCrNi equiatomic medium entropy alloy processed by high-pressure torsion[J]. Materials Science and Engineering: A, 2018, 735: 394-397.
- [15] SCHNEIDER M, GEORGE E P, MANESCAU T J, *et al.* Analysis of strengthening due to grain boundaries and annealing twin boundaries in the CrCoNi medium-entropy alloy[J]. International Journal of Plasticity, 2020, 124: 155-169.
- [16] LIANG Y, YANG X, MING K. *et al.* In situ observation of transmission and reflection of dislocations at twin boundary in CoCrNi alloys[J]. Science China Technological Sciences volume, 2021, 64: 407-413.
- [17] LAPLANCHE G, KOSTKA A, REINHART C, *et al.* Reasons for the superior mechanical properties of medium-entropy CrCoNi compared to high-entropy CrMnFeCoNi[J]. Acta Materialia, 2017, 128: 292-303.

编辑 唐肖