DOI: 10.3901/JME.2020.16.033

拉扭应力幅比对 LZ50 钢短裂纹行为的影响*

杨冰 代胜 廖贞 孟飞 肖守讷 阳光武 朱涛

(西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都 610031)

摘要: 在保持等效应力幅一致的前提下, 开展 LZ50 钢在 7 种不同拉扭应力幅比(λ)载荷作用下的疲劳短裂纹复型试验。结果表明, 拉扭应力幅比的变化未改变短裂纹萌生与扩展总体规律。裂纹均萌生于铁素体晶粒内部或晶界处, 在微观短裂纹阶段受铁素体晶界和珠光体带状结构边界阻碍, 扩展速率出现两次较明显下降; 进入物理短裂纹阶段后, 微观结构对裂纹扩展影响减弱, 扩展速率持续上升。同时, 随着拉扭应力幅比减小, 相同短裂纹尺度下的扩展速率下降, 断裂面与试样轴向的夹角逐渐减小, 裂纹由单源萌生逐渐过渡为多源萌生, 试样疲劳寿命呈增加趋势。此外, 通过构建拉扭应力幅比—寿命曲线方程, 证明相同等效应力幅条件下, 轴向拉压载荷对材料的疲劳损伤贡献大于扭转载荷, 且随着拉扭应力幅比的减小, 试样疲劳寿命提高的程度不断增强。

关键词: 疲劳短裂纹; 拉扭载荷; 应力幅比; LZ50 钢

中图分类号: O346

Influence of Tension-torsion Stress Amplitude Ratio on Short Fatigue Crack Behaviour of LZ50 Steel

YANG Bing DAI Sheng LIAO Zhen MENG Fei XIAO Shoune

YANG Guangwu ZHU Tao

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031)

Abstract: Short fatigue crack replica tests of LZ50 axle steel were carried out under seven different tension-torsion stress ratios, λ , at the same equivalent stress amplitude. The results show that, the change of tension-torsion stress ratio does not change the general trend of the short fatigue crack initiation and growth. The short fatigue cracks mostly initiate in the inner or at the boundary of the ferrite grains. At the microstructurally short crack(MSC) stage, there are two obvious drops of crack growth rate due to the inhibition of ferrite grain boundary and pearlite banded structure, while at the physically short crack(PSC) stage, the microstructure of the material has a less effect on crack growth and the growth rate increases continuously. Meanwhile, with the decrease of the stress amplitude ratio, both the crack growth rate at the same crack size and the angle between the fatigue fracture surface and the specimen axial direction gradually decrease. The initiation of the crack transforms from a single-crack-source mode to a multi-crack-source mode, and the fatigue life is increasing. Furthermore, by constructing a stress amplitude ratio and fatigue life curve equation, it is proved that with the same equivalent stress amplitude, the axial tensile-compression load contributes more to the fatigue damage of the material than the torsion load. As the stress amplitude ratio decreases, the increasing trend of the fatigue life increases.

Key words: short fatigue crack; tension-torsion load; stress amplitude ratio; LZ50 steel

0 前言

机械零部件在服役过程中, 可能发生疲劳断裂失效, 并由此引发事故。已有大量研究表明, 在金

属及其结构件的疲劳失效过程中, 裂纹尺度较小的萌生和扩展阶段往往占据主导地位^[1-2]。研究疲劳短裂纹行为并掌握其规律性, 对指导结构的寿命预测与安全性评价有重要意义, 而载荷形式对裂纹萌生与扩展规律的影响, 是研究重点之一。其中, 载荷形式的不同, 可能导致材料或结构的疲劳短裂纹行为产生差异, 即便是同一种载荷形式, 其具体构成比重的变化也能使裂纹萌生和扩展过程发生变化。

* 国家自然科学基金(51675446)和牵引动力国家重点实验室自主课题(2019TPL-13)资助项目。20191211 收到初稿, 20200323 收到修改稿

国内外围绕载荷构成对金属材料疲劳性能影响,尤其是拉压和扭转这两种较易同时存在的载荷比重变化的影响,已开展一系列研究。

FOLETTI 等^[3-4]在针对 30NiCrMoV12 钢的试验中,采用应变幅控制,对纯拉、纯扭和拉扭组合载荷形式下短裂纹行为进行统计研究,结果表明裂纹扩展随载荷形式的不同呈现出不同的速率。LOPEZ-CRESPO 等^[5-6]研究了管状低碳钢试样在不同轴向应变和扭转应变组合情况下的裂纹萌生和扩展规律,发现疲劳裂纹扩展速率曲线波动与微观结构密切相关,并随着扭转应变分量的增加而衰减,进一步证明不同大小的扭转载荷分量和拉压载荷分量对裂纹萌生和扩展行为的影响很大。YANG 等^[7]通过仿真分析,研究了非比例循环拉扭复合载荷作用下 AlMg4.5Mn 铝合金和 S460N 钢带缺口薄壁空心圆柱体的裂纹扩展行为,在裂纹路径行为分析中观察到了从拉伸到剪切的断裂模式转变,但未能获得裂纹路径的具体转变规律。王炜哲等^[8]在保持轴向拉压载荷恒定的情况下,开展了不同扭转载荷幅对 12%Cr 钢薄壁圆筒构件寿命影响的研究,结果表明当变形相同时,随着扭转应变幅的增加,构件损伤度增加,拉扭应变幅值的变化直接影响试件疲劳寿命。刘世民等^[9]针对 LY12 铝合金的拉扭复合载荷疲劳行为,开展了包括单轴载荷、纯扭以及拉扭复合等加载条件下的试验,结果表明该材料在纯扭加载时的寿命最长、90° 相位差拉扭复合加载时的寿命最短,寿命差异最高达到 35 倍之多,说明载荷形式对疲劳寿命影响很大。刘波^[10]在对 2A12 铝合金的拉扭复合载荷下的疲劳失效研究中,保持除拉扭应力幅比之外的其他参量相同,在等效应力相同的前提下给定不同拉扭应力幅比,研究了该参数对试样疲劳寿命、疲劳断面与试样主轴夹角的影响,认为拉扭载荷分量的变化能显著改变 2A12 铝合金的抗疲劳性能。杨冰等^[11-13]开展了轴向拉压、旋转弯曲、纯扭、拉扭组合等不同载荷形式下的 LZ50 车轴钢短裂纹复型试验,验证了载荷形式变化对疲劳短裂纹行为的影响。

上述研究结果表明,载荷形式及其构成的改变,会使同一材料表现出不同的抗疲劳性能,并在疲劳寿命、裂纹萌生与扩展过程、断裂模式上得到体现。然而,现有从短裂纹行为角度开展的拉扭复合载荷试验研究还不够充分。车轴是车辆走行部关键部件,服役过程中承受着不同载荷形式及其组合作用,研究相关材料在复杂载荷及其构成变化条件下的短裂纹行为,有助于更合理地开展车轴设计和安全性评价工作。本

文以我国用量较大的车轴材料 LZ50 钢为对象,在前期相关工作基础上,通过开展相同等效应力幅和不同拉扭应力幅比下的短裂纹复型试验,研究应力幅比对 LZ50 钢短裂纹萌生和扩展行为的影响,总结其规律性。

1 材料和试验

1.1 材料和试样

试验试样取材于图 1 所示 LZ50 钢制造的 RE2B 车轴实轴,其热处理条件如下:860 °C 保温 2.5 h 正火,800 °C 保温 2.5 h 正火,570 °C 保温 1.5 h 回火。材料的主要化学成分和力学性能如表 1 和表 2 所示。沿车轴轴向进行取样,加工为图 2 所示光滑漏斗形试样。为便于复型试验开展,试样中部圆弧段抛光至镜面效果。

图 1 LZ50 钢车轴实轴

图 2 试样尺寸(mm)

表 1 LZ50 钢主要化学成分的质量分数 %

元素	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Al	P
质量分数	0.47	0.26	0.78	0.02	0.028	0.15	0.021	<0.014

表 2 LZ50 钢力学性能

弹性模量 /MPa	屈服强度 σ_s /MPa	抗拉强度 σ_b /MPa	伸长率 δ_5 (%)	断面收缩率 ψ (%)	冲击韧度 α_k /(J·cm ²)
209 000	342	674	24	42	44

利用 OLYMPUS-OSL4100 激光共聚焦显微镜对材料进行了金相观测,结果如图 3 所示,可见 LZ50 钢的金相组织包括铁素体和片层状珠光体,并具有带状组织结构特征。铁素体的大小和取向、带状组织结构的间距分布具有较大分散性,其中铁素

体等效直径平均值约为 $19\ \mu\text{m}$, 带状结构间距范围在 $80\sim 200\ \mu\text{m}$ 。

(a) $\times 100$ 倍

(b) $\times 1\ 000$ 倍

图 3 车轴钢金相组织

1.2 拉扭疲劳复型试验

疲劳复型试验在图 4 所示 MTS 809 拉扭疲劳试验机上开展。为比较不同拉扭应力幅比对材料短裂纹行为的影响, 保持所有试样承受的等效应力幅均为 $340\ \text{MPa}$, 其定义为^[10]

$$\sigma_{\text{eq}} = \sqrt{\sigma_{\alpha}^2 + 3\tau_{\alpha}^2} \quad (1)$$

式中, σ_{α} 为拉压应力幅值, τ_{α} 为扭转应力幅值。定义拉压应力幅值与扭转应力幅值之比为拉扭应力幅比 λ , 即 $\lambda = \sigma_{\alpha} / \tau_{\alpha}$ 。

试验时, 拉压载荷和扭转载荷应力比均为 -1 , 相位差为 90° , 采用正弦波载荷控制方式进行加载, 试验频率 $5\ \text{Hz}$ 。表 3 给出了试验涉及的 7 种不同拉扭应力幅比加载路径具体参数。

试验过程中, 在事先确定的循环周次停机, 利用复型法采用醋酸纤维膜采集试样表面裂纹信息。试验完成后, 利用激光共聚焦显微镜观测复型膜, 获取包括尺度、角度等在内的裂纹萌生与

扩展信息。

图 4 MTS809 电液伺服拉扭疲劳试验机

表 3 7 种不同拉扭应力幅比加载路径

路径	拉压 应力幅 $\sigma_{\alpha}/\text{MPa}$	扭转应力幅 τ_{α}/MPa	拉扭应力 幅比 λ	拉压 载荷 F/N	扭矩 $T/(\text{N}\cdot\text{m})$
AT1	340	0	∞	9 613	0
AT2	294	98	3.00	8 313	4.16
AT3	236	141	1.67	6 673	5.98
AT4	170	170	1.00	4 807	7.21
AT5	111	185	0.60	3 138	7.85
AT6	64	192	0.33	1 810	8.14
AT7	0	196	0	0	8.33

2 复型试验结果

本文基于有效短裂纹准则^[14], 对 LZ50 钢的短裂纹行为进行描述。为便于比较拉扭应力幅比变化对短裂纹萌生和扩展的影响, 分别以拉压应力幅占主导的路径 AT2(拉扭应力幅比为 3.00)和扭转应力幅占主导的路径 AT6(拉扭应力幅比为 0.33)下的典型试样为例, 对短裂纹复型试验结果进行描述。涉及到的复型图中, 上下方向为试样轴向, 字母 C 代表有效短裂纹, 它们最终合并成为导致试样断裂的主导有效短裂纹(Dominant effective short fatigue crack, DESFC); 字母 F 代表非有效短裂纹, 它们最终未与 DESFC 合并。

2.1 路径 AT2 下典型试样分析

该路径下拉扭应力幅比为 3.00, 试样以承受拉压载荷为主。以试样 AT2-3 为例, 对该试样共复型 19 次, 总寿命 $N=50\ 609$ 周次, 图 5 给出了该试样部分短裂纹复型图。由图可知, 在 $N=0$ 周次时(图 5a),

试验尚未开始加载, 试样表面未观察到任何裂纹, 只可见表面金相组织, 即铁素体(白)和片层状珠光体(黑)。试验开始加载后, 在 $N=1\ 000$ 周次时(图 5b), 已可观察到铁素体 A 晶内萌生的裂纹 C1、C2, 以及晶界裂纹 C3、F1、F2。继续加载到 $N=5\ 000$ 周次时(图 5c), 在不断的损伤累积下, C1 与 C2 已经扩展并合并, 形成新的 C1, 其余原有裂纹由于能量不足以及晶界的阻碍, 被束缚在晶粒尺度范围内,

扩展不太明显。与此同时, 该时刻出现了新萌生的晶内裂纹 C5、C6、C7、F3 和晶界裂纹 C4、F4、F5。当 $N=10\ 000$ 周次时(图 5d), C1 左裂尖扩展缓慢, 而右裂尖已与 C5 合并为新裂纹 C1。该时刻新萌生裂纹 C8、C9、F6。随着循环数的增加, 在 $N=20\ 000$ 周次时(图 5e), C 系列有效短裂纹已经合并成为主导有效短裂纹 C1, 其主导地位已完

图 5 试样 AT2-3 短裂纹萌生扩展过程

全确定,此时测量 C1 长度为 $83.6\ \mu\text{m}$ 。在随后的循环加载中,裂纹突破珠光体带状结构障碍,DESFC 开始快速扩展,直至试样断裂失效。

图 6 给出了试样 AT2-5 的主导有效短裂纹尺度随寿命分数变化的情况;图 7、8 分别给出了主导有效短裂纹扩展速率随裂纹尺度和寿命分数的变化情况。分析图 6 可知,DESFC 尺度在整个载荷循环中是不断增长的,在寿命分数 $f=0.7$ 以前增长较缓,之后则迅速增长。分析图 7、8 裂纹扩展速率的关系可得,随着裂纹尺度的增加,

图 6 试样 AT2-3 的 DESFC 尺度与寿命分数关系

图 7 试样 AT2-3 的 DESFC 扩展速率与 DESFC 尺度关系

图 8 试样 AT2-3 的 DESFC 扩展速率与寿命分数关系

DESFC 扩展速率出现了两次明显降速,对应的 DESFC 尺度分别为 $15\ \mu\text{m}$ 和 $93.5\ \mu\text{m}$,寿命分数分别为 0.06 和 0.49,与图 5b~5c 时刻及图 5e 时刻对应,反映了铁素体晶界和带状结构这两种特征微观结构对裂纹扩展的阻碍。

2.2 路径 AT6 下典型试样分析

该路径下拉扭应力幅比为 0.33,试样以承受扭转载荷为主。以试样 AT6-2 为例,对该试样共复型 21 次,总寿命 $N=327\ 955$ 周次,图 9 给出了该试样部分短裂纹复型图。由图可知,在 $N=0$ 周次时(图 9a),试验尚未开始加载,试样表面同样未观察到任何裂纹。试验开始加载后,在 $N=5\ 000$ 周次时(图 9b),已可观察到铁素体 H 晶内萌生的裂纹 C1、C2,以及晶界裂纹 C3、C4、C5,同时,非 ESFCs 方面,可观察到新萌生的晶内裂纹 F1、F2、F3。继续加载到 $N=25\ 000$ 周次时(图 9c),在不断的损伤累积下,C1 下裂尖扩展至铁素体 H 下方晶界边缘,而 C1 上裂尖则沿晶粒 H 晶界扩展,C3 左右两侧均有较大扩展,C4 与 C5 已经扩展合并,形成新的 C6,且与 C3 有合并趋势,其余原有裂纹由于能量不足以及晶界的阻碍,被束缚在晶粒尺度范围内,扩展不太明显。与此同时,该时刻出现了新萌生的多条裂纹。当 $N=50\ 000$ 周次时(图 9d),C1 上裂尖扩展至靠近 C7,下裂尖扩展至靠近 C2,C3 已与 C6 合并为新裂纹 C3,该时刻新萌生裂纹 C12、C13。随着循环数的增加,在 $N=125\ 000$ 周次时(图 9e),C 系列有效短裂纹已经合并成为主导有效短裂纹 C1,其主导地位已完全确定,此时测量 C1 长度为 $114.2\ \mu\text{m}$ 。在随后的循环加载中,裂纹突破珠光体带状结构障碍,DESFC 开始持续快速扩展,直至试样断裂。

图 10 给出了试样 AT6-2 的主导有效短裂纹尺度随寿命分数变化的情况;图 11、12 分别给出了主导有效短裂纹扩展速率随裂纹尺度和寿命分数的变化情况。分析图 10 可知,DESFC 尺度在整个载荷循环中是不断增长的,在寿命分数 $f=0.6$ 以前增长较缓,在 $f=0.6\sim 0.8$ 时,DESFC 尺度增长有所加快,在 $f=0.8$ 之后则迅速增长。分析图 11、图 12 裂纹扩展速率的关系可得,随着裂纹尺度的增加,DESFC 扩展速率出现了两次明显降速,对应的 DESFC 尺度分别为 $33.5\ \mu\text{m}$ 和 $114.2\ \mu\text{m}$,寿命分数分别为 0.15 和 0.38,与图 9b~9c 时刻及图 9e 时刻对应,反映了铁素体晶界和带状结构这两种特征微观结构对裂纹扩展的阻碍。

(a) $N=0$ 周次

(b) $N=5\,000$ 周次

(c) $N=25\,000$ 周次

(d) $N=50\,000$ 周次

(e) $N=125\ 000$ 周次

图 9 试样 AT6-2 短裂纹萌生扩展过程

图 10 试样 AT6-2 的 DESFC 尺度与寿命分数关系

图 11 试样 AT6-2 的 DESFC 扩展速率与 DESFC 尺度关系

图 12 试样 AT6-2 的 DESFC 扩展速率与寿命分数关系

3 拉扭应力幅比影响分析

3.1 DESFC 扩展速率

在相同等效应力下, 对比分析不同拉扭应力幅比下的短裂纹扩展行为, 图 13 给出了 7 种加载路径下试样 DESFC 扩展速率随裂纹尺度的变化。

由图 13 可知, 不同拉扭应力幅比下, DESFC

扩展速率变化趋势大体一致, 均出现两次较为明显的降速现象。随着拉压应力幅的减小和扭转应力幅的增加, 裂纹扩展速率曲线由 AT1 至 AT7 呈现逐步下移的趋势, 即拉扭应力幅比的降低, 导致相同裂纹尺度下的扩展速率下降。

图 13 7 种加载路径下试样 DESFC 扩展速率与尺度关系

可采用平面二向应力状态^[15]分析裂纹扩展速率的这种变化。对于圆棒漏斗形试样, 随着拉扭应力幅比的减小, 试样最小截面上正应力幅值不断减小, 切应力幅值不断增加。如图 14 所示, 选取最小截面上单元体二向应力状态进行分析。

图 14 单元体应力状态分析图

单元体的应力关系为^[15]

$$\begin{cases} \sigma_{\max} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \\ \sigma_{\min} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)简化为

$$\sigma_{\max} = \frac{\sigma^*}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma^*}{2}\right)^2 + (\tau^*)^2} \quad (3)$$

式中, $\sigma_{\max}$ 为最大主应力, σ^* 、 τ^* 分别为斜截面的正应力与切应力。

由式(3)可知, 随着拉扭应力幅比 $\sigma_\alpha / \tau_\alpha$ 的减小, 斜截面的 σ^* / τ^* 也减小, 导致最大主应力不断减小; 非比例路径虽然有所不同, 但在弹性阶

段内满足正应力、切应力线性叠加条件, 因此具有和比例路径下拉扭应力幅比 $\sigma_\alpha / \tau_\alpha$ 的减小使得最大主应力不断减小的相同趋势。裂纹的扩展是在最大主应力的驱动下进行的, 其值的减小导致了裂纹扩展速率的下降。因此, 尽管等效应力幅一致, 随着加载路径从 AT1 逐步转变至 AT7, 裂纹扩展速率曲线呈现出整体下降趋势。

3.2 断口形貌

各加载路径典型试样宏观断口形貌如图 15 所示, 定义断裂面与试样轴向之间的夹角为 α' , 将测量结果列于表 4, 可见, 随着应力幅比的减小, 夹角 α' 不断减小。

图 15 7 种加载路径下试样断裂情况

(a) AT1-1

(b) AT2-3

利用平面应力状态解析法对此现象进行解释, 假设从试样内某点取出一单元体, 该单元体的应力状态如图 14 所示, 且该单元体的应力有如下关系^[15]

$$\frac{d\sigma^*}{d\alpha} = -2 \left[\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\alpha + \tau_{xy} \cos 2\alpha \right] \quad (4)$$

$$\tan 2\alpha = -\frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (5)$$

式中, σ^* 、 τ^* 分别为斜截面的正应力与切应力, α 为斜截面的外法线与 x 轴的夹角。

文献[15]指出, 当 $\alpha = \alpha_0$, 使得式(4)中 $\frac{d\sigma^*}{d\alpha} = 0$

时, 恰好有满足式(5)的 α_0 使得 τ^* 为零, 即在切应力为零的平面上有最大正应力。本文所研究对象为 LZ50 钢漏斗形实心圆棒试样, 在拉扭载荷作用下, 最终断裂面应在最大正应力所在平面上。在相同等效应力下, 拉扭应力幅比的减小将导致 α_0 增加, 即在纯拉状态时, α_0 接近于 0° , 断裂面为垂直于轴向的最小横截面; 在纯扭状态时, α_0 接近于 45° , 断裂面为与轴向呈 45° 的截面; 在拉扭状态时, 随着扭转应力幅比例的增加, α_0 从 0° 逐渐增加到 45° , 夹角 α' 也相应地从 90° 逐渐减小到 45° 。即断裂面与试样轴向间的角度随拉扭应力幅比的减小而减小, 与试验结果一致。

图 16 给出了利用扫描电镜观察的各路径典型试样宏观断口形貌, 可以看出, 随着拉扭应力幅比的减小, 断口逐渐变得不平整, 由单裂纹源发展为多裂纹源, 且扭转应力幅越大, 多裂纹源形貌体现得越明显。这是由于随着扭转应力幅的增加, 切应力的作用越来越大, 试验过程中垂直于轴向的裂纹面间相互摩擦与挤压程度加大, 即由切应力所引起的剪切磨损加大, 导致断口不平整。

图 16 七组试样的宏观断口形貌

3.3 寿命对比分析

表 4 和图 17 给出了 7 种加载路径下试样的疲劳寿命试验结果。总的来说, 在等效应力幅相同的条件下, 随着拉扭应力幅比的减小, 疲劳寿命呈现增加趋势。其中, AT7 纯扭转加载路径下疲劳寿命较 AT6 路径的降低应该是由于试验的分散性造成的, 因为文献[16]中提到, 随着拉扭应力幅比的减小, 试验的分散性逐渐增大, 而纯扭转的分散性最大。观察数据分布, 采用一元二次方程对应力幅比—疲劳寿命关系进行拟合, 式(6)给出了相应的曲线方程

$$\lambda = 3.7 \times 10^{-11} N^2 - 2.415 \times 10^{-5} N + 4.1187 \quad (6)$$

式中, λ 为拉扭应力幅比, N 为疲劳寿命。

表 4 试样断裂角度及疲劳寿命统计

路径	拉扭应力幅比 λ	试样编号	角度 $\alpha/(^{\circ})$	疲劳寿命 $N/\text{周次}$
AT1	∞	AT1-1	85	15 945
AT2	3.00	AT2-3	80	50 609
AT3	1.67	AT3-1	75	127 077
AT4	1.00	AT4-1	72	171 076
AT5	0.60	AT5-1	62	252 840
AT6	0.33	AT6-2	51	327 955
AT7	0	AT7-1	38	301 705

拉扭应力幅比较大时, 寿命随其减小而增加的

幅度相对平缓,但随着拉扭应力幅比的进一步减小,寿命增大显著。可以推断,轴向拉压载荷对疲劳损伤的影响作用大于扭转载荷,表现为随着轴向拉压应力幅的减小和扭转切应力幅的增加,疲劳寿命增加的趋势不断加大。

图 17 应力幅比与疲劳寿命关系

4 结论

本文对相同等效应力幅下拉扭应力幅比对 LZ50 钢疲劳短裂纹行为的影响进行了试验研究,可得出如下结论。

(1) 在拉扭载荷作用下,无论是轴向拉压载荷为主,还是扭转载荷为主, LZ50 钢的疲劳短裂纹行为规律总体相似,即裂纹多萌生于铁素体晶粒内部或晶界,随后短裂纹开始扩展,并受材料微观组织的强烈影响,在突破珠光体带状结构约束前,裂纹扩展速率出现两次较为明显的下降,随后持续增大,直至试样断裂。

(2) 随着拉扭应力幅比的减小,试样内部单元体所受最大主应力减小,导致在相同裂纹尺度下 DESFC 扩展速率呈现下降的趋势。

(3) 断口分析表明,随着拉扭应力幅比的减小,断面与试样轴向之间的夹角不断减小,裂纹由单源萌生逐渐过渡为多源萌生。

(4) 随着拉扭应力幅比的减小,疲劳寿命总体呈增加趋势,构建的拉扭应力幅比-寿命曲线方程对试验数据有良好的拟合效果。

参 考 文 献

- [1] 洪友士,方飏. 疲劳短裂纹萌生及发展的细观过程和理论[J]. 力学进展, 1993, 23(4): 468-486.
HONG Youshi, FANG Biao. Microscope process and

description for the initiation and propagation of short fatigue cracks[J]. Advances in Mechanics, 1993, 23(4): 468-486.

- [2] YANG Bing, DUAN Hao, WU Shengchuan, et al. Damage tolerance assessment of a brake unit bracket for high speed railway welded bogie frames [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2019, 32(4): 194-204.
- [3] FOLETTI S, COREA F, RABBOLINI S, et al. Short cracks growth in low cycle fatigue under multiaxial in-phase loading[J]. International Journal of Fatigue, 2018, 107: 49-59.
- [4] FOLETTI S, BERETTA S, BERTOZZI F, et al. Experiments on crack propagation and threshold at defects in press-fits of railway axles[J]. ScienceDirect, 2017, 7: 19-22.
- [5] LOPEZ-CRESPO P, MORENO B, LOPEZ-MORENO A, et al. Characterization of crack-tip fields in biaxial fatigue based on high-magnification image correlation and electro-spray technique[J]. International Journal of Fatigue, 2015, 71: 17-25.
- [6] LOPEZ-CRESPO P, GARCIA-GONZALEZ A, MORENO B, et al. Some observations on short fatigue cracks under biaxial fatigue[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2015, 80: 96-103.
- [7] YANG Ying, VORMWALD M. Fatigue crack growth simulation under cyclic non-proportional mixed mode loading[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 102: 37-47.
- [8] 王炜哲, 蒋浦宁, 张军辉, 等. 非比例拉扭组合循环加载下扭转载荷幅对构件应力影响的数值分析[C]//中国动力工程学会透平专业委员会 2010 年学术研讨会论文集, 2010: 191-194.
WANG Weizhe, JIANG Puning, ZHANG Junhui, et al. Numerical analysis of the influence of the torsion strain amplitude on the stress of the component under tension-torsion non-proportional cycle loading[C]// Proceedings of the 2010 Symposium of the Turbine Professional Committee of the Chinese Society of Power Engineering, 2010: 191-194.
- [9] 刘世民, 艾素华, 王中光. LY12 铝合金的拉扭复合加载疲劳[J]. 航空材料学报, 2006, 26(5): 96-100.
LIU Shimin, AI Suhua, WANG Zhongguang. Fatigue behavior of LY12 aluminum alloy under combined tension and torsion loading[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2006, 26(5): 96-100.
- [10] 刘波. 拉扭复合受力条件下金属材料的失效研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2016.

- LIU Bo. The fatigue research of metal materials under tension-torsion composite forces[D]. Tianjin : Civil Aviation University of China, 2016.
- [11] 杨冰, 廖贞, 马佰全, 等. 两种加载频率下 LZ50 车轴钢疲劳短裂纹行为对比[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(6): 46-55.
- YANG Bing, LIAO Zhen, MA Baiquan, et al. Comparison of short fatigue crack behaviors for LZ50 axle steel under two loading frequencies[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2017, 17(6): 46-55.
- [12] YANG Bing, DAI Sheng, WU Yayun, et al. Short fatigue crack behavior of LZ50 axle steel under rotating-bending cyclic loading[J]. Strength of Materials, 2018, 50(1): 193-202.
- [13] YANG Bing, LIAO Zhen, DAI Sheng, et al. Short fatigue crack behavior of carbon structural steel under tension-torsion loading[J]. International Journal of Modern Physics B, 2018, 33: 1-6.
- [14] ZHAO Yongxiang, GAO Qing, WANG Jinnuo. Interaction and evolution of short fatigue cracks[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2001, 22(6): 459-467.
- [15] 孙训方. 材料力学(I) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- SUN Xunfang. Mechanics of materials (I) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.
- [16] 时新红, 张建宇, 鲍蕊, 等. 比例加载下应力幅比对 2A12-T4 疲劳寿命的影响[J]. 北京航空航天大学学报, 2010, 36(8): 965-968.
- SHI Xinhong, ZHANG Jianyu, BAO Rui, et al. Effect of stress amplitude on high-cycle fatigue life of 2A12-T4 aluminum alloy under proportional loading[J]. Journal of Beihang University of Aeronautics and Astronautics, 2010, 36(8): 965-968.
-
- 作者简介: 杨冰, 男, 1979 年出生, 博士, 研究员, 博士研究生导师。主要研究方向为结构强度理论与可靠性、材料疲劳与断裂。
E-mail: yb@swjtu.edu.cn