

DOI:10.11784/tdxbz202412004

基于 DIC 的疲劳裂纹张开载荷影响因素研究

龚宝明^{1,2}, 刘昊^{1,2}, 张文强^{1,2}, 邓彩艳^{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: 疲劳裂纹闭合效应对结构疲劳寿命预测精确度有重要影响, 如何确定疲劳裂纹扩展时张开载荷的变化规律是疲劳研究的重要课题之一. 针对 DH36 钢, 使用数字图像相关 (DIC) 技术获得裂纹尖端位移场, 通过全场位移拟合法得到了不同裂纹长度的三点弯曲 (SENB) 试样的裂纹尖端有效张开载荷, 分析了影响拟合效果的因素, 并获得张开载荷随裂纹长度和表面减薄的变化关系. 最终通过裂纹扩展速率试验验证了全场位移拟合法所确定张开载荷的准确性. 结果表明: DH36 钢的疲劳裂纹张开载荷随裂纹长度的增加而增大, 表面减薄试样的张开载荷显著低于未减薄试样.

关键词: 裂纹闭合; 疲劳裂纹张开载荷; 数字图像相关; 疲劳裂纹扩展速率

中图分类号: O348.1; O346.1

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2025)06-0576-07

Study on the Influencing Factors of Fatigue Crack Opening Loads Based on DIC

Gong Baoming^{1,2}, Liu Hao^{1,2}, Zhang Wenqiang^{1,2}, Deng Caiyan^{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: The fatigue crack closure effect significantly affects the accuracy of structural fatigue life predictions. Understanding how tensile load variations occur during fatigue crack growth is an important topic in fatigue research. This study focused on DH36 steel and employed digital image correlation (DIC) to examine the crack tip displacement field. Using the full-field displacement fitting method, the effective crack tip opening loads were determined for three-point bending (single-edge notched bending, SENB) specimens with different crack lengths. The factors affecting the fitting accuracy were analyzed, and the relationship between the opening load, crack length, and surface thinning was established. The accuracy of the opening loads determined by the full-field displacement fitting method was further validated through crack growth rate tests. The results show that the fatigue crack opening load of DH36 steel increases with increasing crack length. Surface-thinned specimens exhibit significantly lower opening loads compared with unthinned specimens.

Keywords: crack closure; fatigue crack opening load; digital image correlation (DIC); fatigue crack growth rate

疲劳裂纹闭合的概念是由 Elber^[1]首次提出, 研究表明在单个疲劳加载周期内, 裂纹尖端上下表面在拉伸载荷作用下出现接触现象, 即裂纹闭合. 该理论认为在循环载荷作用下, 裂纹尖端发生塑性变形, 而在塑性区外的材料只发生弹性变形. 裂纹扩展过程中裂纹尖端穿过塑性区, 在裂纹尖端后方留下塑性变形

区 (塑性尾迹区); 在卸载过程中, 发生弹性变形的材料开始恢复变形, 对塑性尾迹区形成压应力, 导致裂纹面提前闭合. 因此, 在单个疲劳周期内, 裂纹在载荷达到 F_{op} 或 K_{op} 时开始张开, 在卸载阶段载荷减小到 F_{cl} 或 K_{cl} 时裂纹闭合. 同时, 塑性诱导裂纹闭合理论表明, 裂纹面在未完全张开之前, 外加载荷对裂纹

收稿日期: 2024-12-05; 修回日期: 2024-12-31.

作者简介: 龚宝明 (1983—), 男, 博士, 副教授, gong_bm@tju.edu.cn.

通信作者: 刘昊, liuhao1455@tju.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52375376).

Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52375376).

扩展没有贡献。

近 50 多年来, 诸多学者开展了多种研究裂纹闭合的手段, 如柔度法、数字图像相关 (digital image correlation, DIC) 技术和云纹干涉法等, Nowell 等^[2]分别采用云纹干涉法和 DIC 技术研究了疲劳裂纹闭合行为, 对比分析了两种方法的特点, 其中云纹干涉法的精度高但技术复杂, 而 DIC 技术的精度适中且技术简单. Masuda 等^[3]研究了试样厚度对 A7075-T6 合金塑性诱发疲劳裂纹闭合的影响, 发现随着试样厚度的降低, 闭合效应增强. Gonzáles 等^[4]用 DIC 技术确定 4340 不锈钢圆盘状紧凑拉伸试样过载前后的位移场和应变场, 发现在过载后裂纹扩展出现延迟, 且从 DIC 分析中可提取试样的应力强度因子、J 积分和裂纹张开载荷等, 发现过载后的裂纹张开载荷几乎消失. Rabbolini 等^[5]采用 DIC 技术研究短裂纹低周疲劳裂纹扩展时的裂纹闭合效应, 对比试验与 Newman 模型的结果, 发现在应力比 $R = -1.0$ 时拟合效果较好, $R = 0.5$ 时拟合效果较差. Beretta 等^[6]研究 Haynes 230 高温合金的疲劳裂纹扩展行为, 基于 DIC 技术延伸出了全场位移拟合法和虚拟引伸计法, 发现 DIC 技术可成功捕捉裂纹闭合效应. Carroll 等^[7]使用 3 种方法研究疲劳裂纹张开载荷, 分别是张开位移法、柔度法、全场有效 K 法, 并对比了不同方法所得张开载荷的差异, 发现柔度法所测张开载荷最小, 全场有效 K 法最大。

目前在疲劳及断裂试验中, 单边缺口三点弯曲 (SENB) 试样的应用较为广泛, 其与紧凑拉伸 (CT) 试样的加载形式及应力状态均有所区别, 现在已有的 DIC 试验研究大多基于 CT 试样, 且采用全场位移拟合法测量张开载荷以及对影响张开载荷的因素研究较少. 因此, 本文通过研究 DH36 钢的 SENB 试样的疲劳裂纹张开载荷, 使用 DIC 技术探索材料在疲劳裂纹扩展过程中塑性诱发的裂纹闭合行为, 深入研究不同因素对疲劳裂纹张开载荷的影响。

1 试验原理

1.1 数字图像相关技术

DIC 是通过使用由单个相机拍摄的一系列连续表面图像进行 2D 测量或由两个或多个相机进行 3D 测量来获得全场位移^[8]. DIC 测量的本质是通过比较在不同加载阶段获得的材料表面的两个数字图像来实现的. 在 DIC 方法进行相关的过程, 首先将参考图像和目标图像细分为包含几个子集的小正方形区域, 该区域中心点即为所感兴趣的像素点, 然后利用相关

函数在参考图像和目标图像中进行子集的区域匹配. 因此, 试样表面必须具有高对比度的散斑, 通常在试样表面喷白漆后喷涂黑漆来获得随机散斑. 通过找到目标图像中所有子集的位置, 就可以确定每个子集的位移, 进而得到位移场。

1.2 Williams 位移场

裂纹尖端前方的位移场可表示为无穷级数^[9-10]. 在不同裂纹模式条件下, 位移场如下:

$$u = \frac{K_I}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left(\kappa - 1 + 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} \right) + \frac{K_{II}}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left(\kappa + 1 + 2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \right) + \frac{T}{8\mu} r(\kappa + 1) \cos \theta + X - Rr \sin \theta \quad (1)$$

$$v = \frac{K_I}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left(\kappa + 1 - 2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \right) + \frac{K_{II}}{2\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left(\kappa - 1 - 2 \cos^2 \frac{\theta}{2} \right) + \frac{T}{8\mu} r(\kappa - 3) \sin \theta + Y + Rr \cos \theta \quad (2)$$

式中: u 和 v 分别为水平位移和垂直位移; μ 为剪切模量; 平面应力状态下 $\kappa = (3 - \nu)/(1 + \nu)$, 平面应变状态下 $\kappa = 3 - 4\nu$, ν 为泊松比; r 和 θ 分别为极坐标中位移场某点距裂纹尖端的距离和角度; X 和 Y 表示不同方向刚体位移; R 用于补偿刚体旋转; K_I 和 K_{II} 分别为 I 型和 II 型的应力强度因子; T 表示 T 应力^[11]. 本文只讨论单轴拉伸条件下的 I 型加载, 即 $K_{II} = 0$ 。

2 张开载荷测量试验

2.1 试验材料及设备

试验采用 SENB 试样, 材料的力学性能见表 1。

表 1 DH36 钢力学性能

Tab.1 Mechanical properties of DH36 steel

屈服强度 $R_{0.2}/\text{MPa}$	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 $A/\%$	弹性模量 E/GPa
383	532	38	203

试验设备及试样形式如图 1 所示, 三点弯曲试验的支座间距 L 等于 4 倍试样宽度 W , DIC 设备主要由硬件与软件两部分组成, 硬件部分即为 CCD 工业相机及其配套设备, 软件部分由图像采集系统及分析处理系统 VIC-3D 构成, 试验机为力试 LF7255 电液伺服疲劳试验机, 采用 MTS 的 COD 规测量裂纹嘴张开位移。

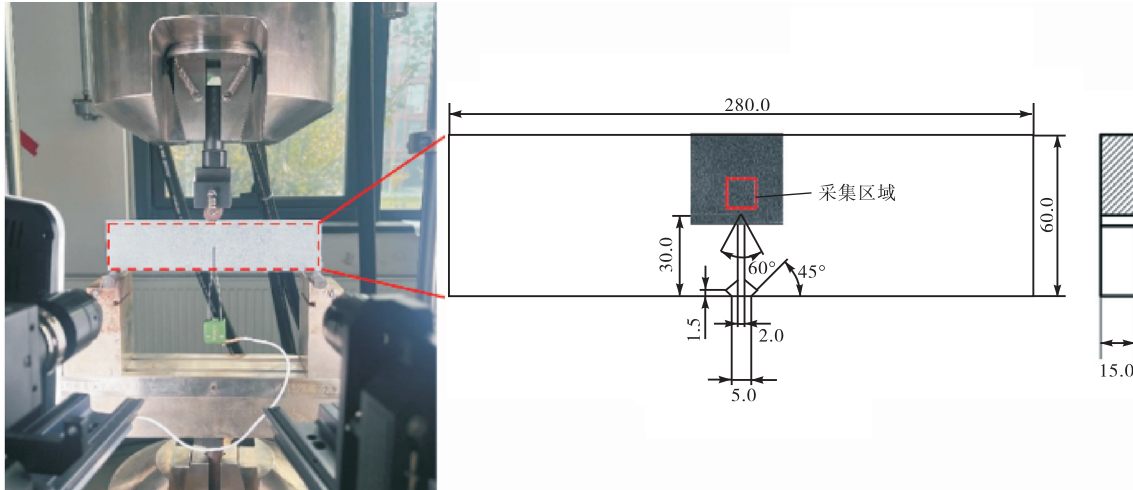


图 1 试验设备及试样形式(单位: mm)

Fig.1 Test equipment and specimen form (unit: mm)

试样正面制备散斑, 缺口处安装 COD 规. 预制疲劳裂纹采用正弦波恒幅加载, 频率为 10 Hz, 最大载荷为 $F = 7000\text{ N}$, 应力比为 $R = 0.1$, 机械加工缺口长度 a_m 为 30.0 mm, 疲劳裂纹长度 a 为 1.0 mm、3.0 mm、5.0 mm, 总裂纹长度 $a_0 = a_m + a$. 通过对 DH36 钢 15.0 mm 厚的试样两侧各铣去 2.0 mm 得到一组 11.0 mm 厚的试样. 此外还制备了一个 a_m 为 34.8 mm、 a 为 0.2 mm 的试样用来做对比. 试样编号见表 2, 分为 A、B 两个系列.

表 2 试样尺寸及编号

Tab.2 Specimen size and number

试样编号	试样厚度 B/mm	机械加工缺口 a_m/mm	疲劳裂纹长度 a/mm	总裂纹长度 a_0/mm	a_0/W
A1	15.0	30.0	1.0	31.0	0.517
A2	15.0	30.0	3.0	33.0	0.550
A3	15.0	30.0	5.0	35.0	0.583
A4	15.0	34.8	0.2	35.0	0.583
B1	11.0	30.0	1.0	31.0	0.517
B2	11.0	30.0	3.0	33.0	0.550
B3	11.0	30.0	5.0	35.0	0.583

很大的影响, 常用的裂纹尖端确定方法有显微观察法、柔度法、全场位移数据拟合法等, 显微观察法和柔度法的测量精度有限, 全场位移数据拟合法的计算量极大. 因此, 本文采用 Shuai 等^[12]提出的位移差拟合法.

通过定义一个数值函数 $D(x)$ 来表示沿裂纹线对称的两条直线之间的垂直位移差, $D(x)$ 的变化范围与直线的长度一致. 在图 2(a) 中, Line 3 上的点 A_0 和 Line 1 上的点 A_1 有相同的偏角 θ . 由式(1)和(2)可知, 在相同挠度的情况下, 垂直位移与 \sqrt{r} 成正比. 因此, 数值函数之间的关系可以表示为

$$\frac{D_1\left(\frac{x}{d_1}\right)}{\sqrt{d_1}} = \frac{D_0\left(\frac{x}{d_0}\right)}{\sqrt{d_0}} \quad (3)$$

在试验中裂纹尖端坐标一般不在 $(0, 0)$ 点, 假设实际裂纹尖端的横坐标为 x_0 , 则两条直线之间的垂直位移差可表示为

$$D_1(x) = \sqrt{\frac{d_1}{d_0}} D_0\left(\frac{d_1}{d_0}(x - x_0)\right) \quad (4)$$

2.2 裂纹尖端位置确定

裂纹尖端位置的确定对后续位移场拟合结果有

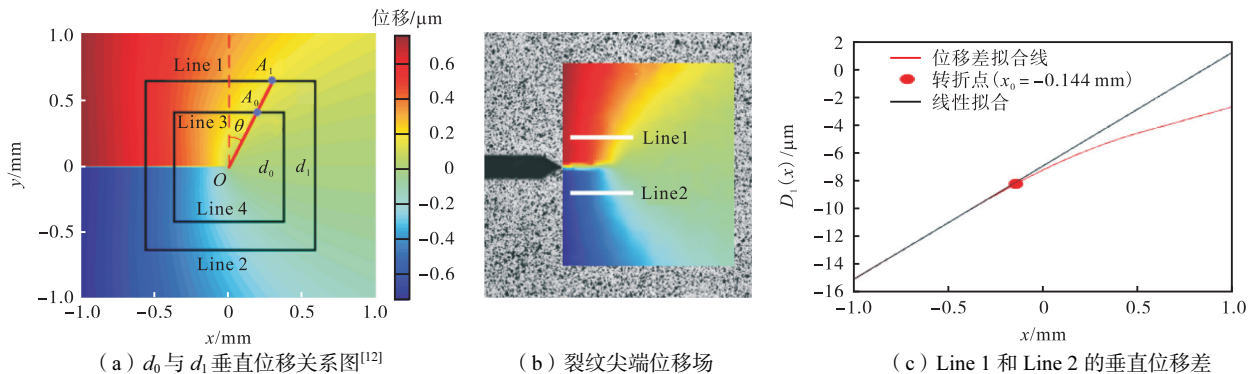


图 2 裂纹尖端位置确定方法

Fig.2 Crack tip location determination method

本文用式(4)拟合图 2(b)中 Line 1 和 Line 2 的垂直位移差,所解得 x_0 即为裂纹尖端的横坐标,由于裂缝附近的高梯度应变以及成像过程和环境变化会带来位移噪声^[13],因此需要采用正则化多项式平滑(RPS)方法更精确地计算高梯度应变场,并引入 Tikhonov 正则化来降低噪声^[14],如图 2(c)所示,转折点即为 x_0 .

2.3 全场位移拟合法

拟合区域的位置和大小对裂纹尖端应力强度因子 K 的影响较大, Mokhtarishirazabad 等^[15]的研究表明拟合区域包含裂纹尖端后一部分区域可以提高拟合结果的准确性,拟合区域应在 K 主导区内.

本文分别使用 1、2、6、8 阶的 Williams 级数进行拟合,图 3 为拟合结果,表 3 为对应应力强度因子 K ,可以看到 6 阶和 8 阶仅有不到 2% 的误差,因此不再采用更高阶,而选择 8 阶作为拟合项数.

SENB 试样理论应力强度因子 K 计算式^[16]为

$$K = \frac{S}{W} \cdot \frac{F}{(BB_N W)^{0.5}} \cdot g_1 \left(\frac{a_0}{W} \right) \quad (5)$$

式中: S 为跨距; W 为试样宽度; F 为载荷; B 为试样厚度(无侧槽试样的 B_N 等于 B); $g_1 \left(\frac{a_0}{W} \right)$ 为不同 a_0/W 对应的常量,可通过查阅 ISO 12135:2021 的附录 B 得到.

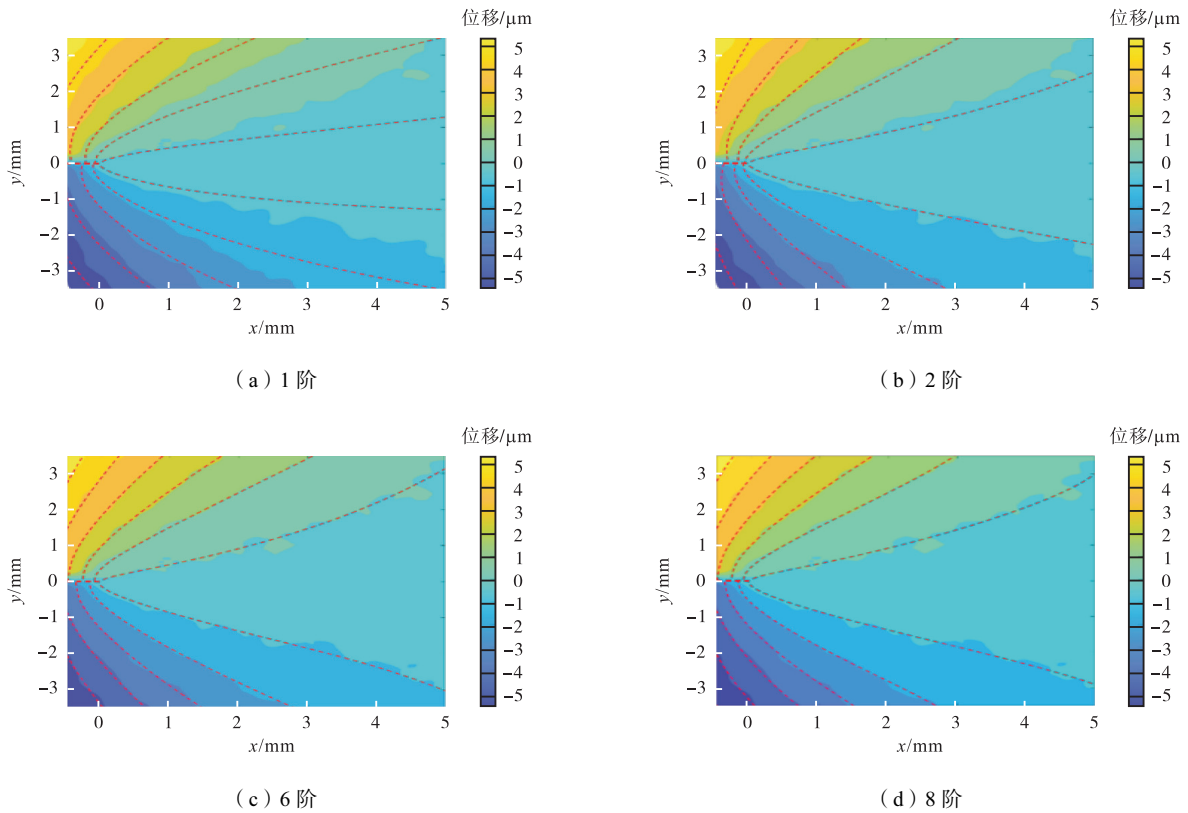


图 3 不同阶数下 Williams 的拟合效果

Fig.3 Effect of Williams' fit at different orders

表 3 不同阶数下的应力强度因子 K

Tab.3 Stress intensity factor K at different orders

阶数	$K/(\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2})$
1	20.55
2	24.45
6	16.09
8	15.84

本文采用 Williams 级数拟合裂纹尖端位移场,得到应力强度因子 K -载荷 F 曲线,如图 4 所示,其平行段与理论计算公式所得理论值之差即为 K_{op} ,使裂纹张开的有效应力强度因子范围为 ΔK_{eff} ,表达式为

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op} \quad (6)$$

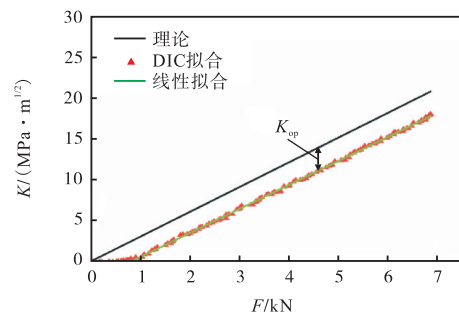


图 4 应力强度因子 K -载荷 F 曲线

Fig.4 Stress intensity factor of K - load F curve

3 试验结果与分析

3.1 不同因素对张开载荷的影响

3.1.1 裂纹长度的影响

图 5 为试样 A 系列拟合结果,由图 5(e)可以看出 K_{op} 随着疲劳裂纹长度的增大而增大,这是因为随着裂纹变长,塑性区域面积变大^[17],区域内材料面外

流动更多,叠加效应明显,导致更强的闭合效应.但在达到一定长度之后张开载荷趋于稳定,这是因为此时裂纹已经由疲劳短裂纹发展成长裂纹^[18].

图 5 中(c)和(d)为总裂纹长度 a_0 相同(35 mm)、疲劳裂纹长度 a 不同(5.0 mm 和 0.2 mm)的试样 A3 和 A4 的拟合结果,可以看出在总裂纹长度相同的条件下,张开载荷仍然与疲劳裂纹长度显著相关,因此认为疲劳裂纹的长度对张开载荷有重要影响.

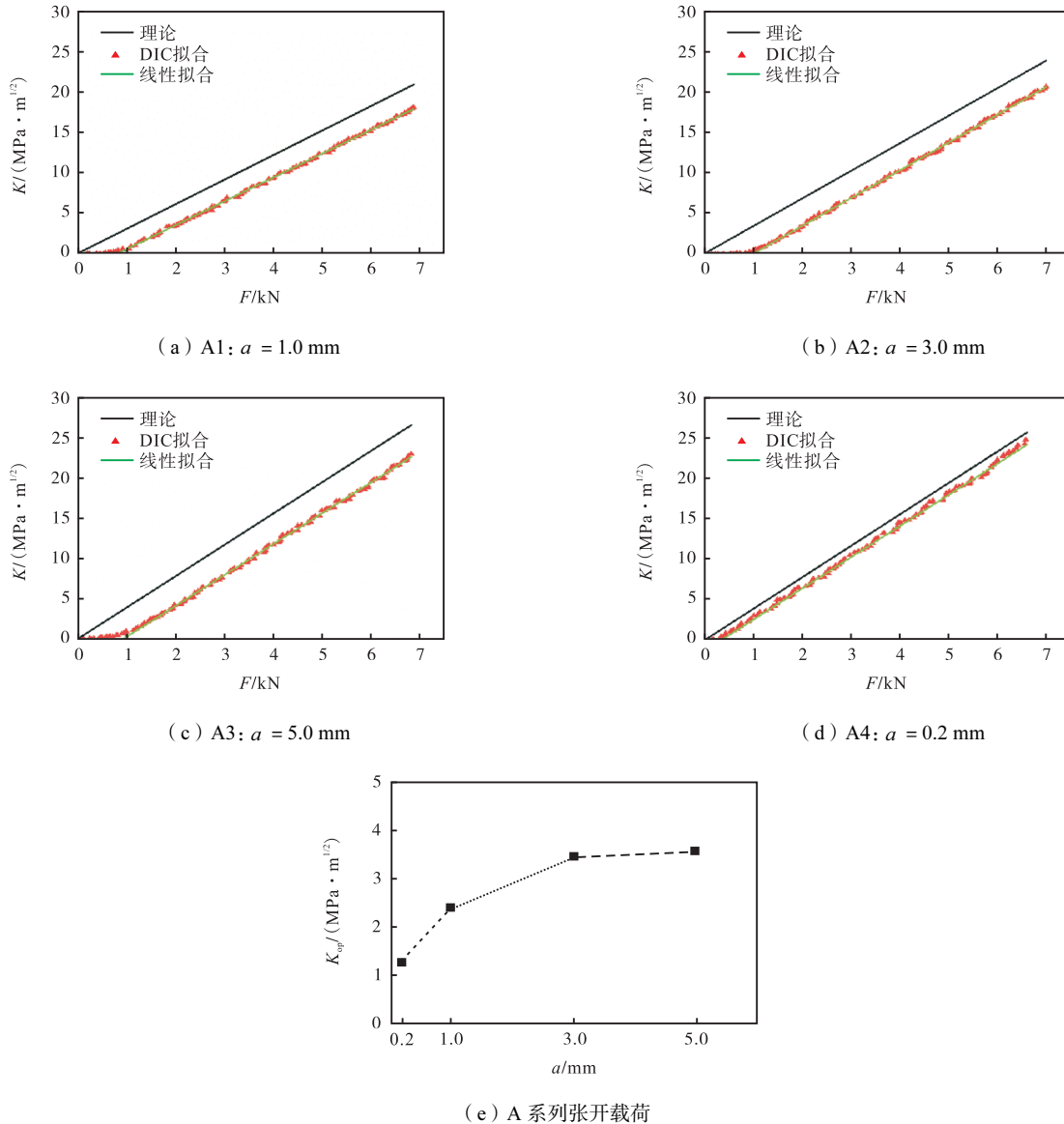


图 5 试样 A 系列拟合结果

Fig.5 Specimen A series fitting results

3.1.2 表面减薄的影响

图 6 为试样 B 系列拟合结果,由图 6(a) ~ (c)可以看出减薄后的 DH36 试样的张开载荷随疲劳裂纹长度的增加而增加,图 6(d)可以看出两侧表面各减薄 2.0 mm 厚的 B 系列与对应疲劳裂纹长度的 A 系列相比张开载荷明显降低.原因是试样减薄前近表面

的平面应力区域会在预制疲劳裂纹过程中产生相对于内部平面应变区域更大的塑性尾迹区,具有更强烈的闭合效应,减薄之后该部分被去除,且之后试样不再进行疲劳加载,只进行一次单向加载.因此虽然减薄后的试样近表面处依然处于平面应力状态,但是影响闭合效应的塑性尾迹区缩小,导致塑性诱导裂纹闭

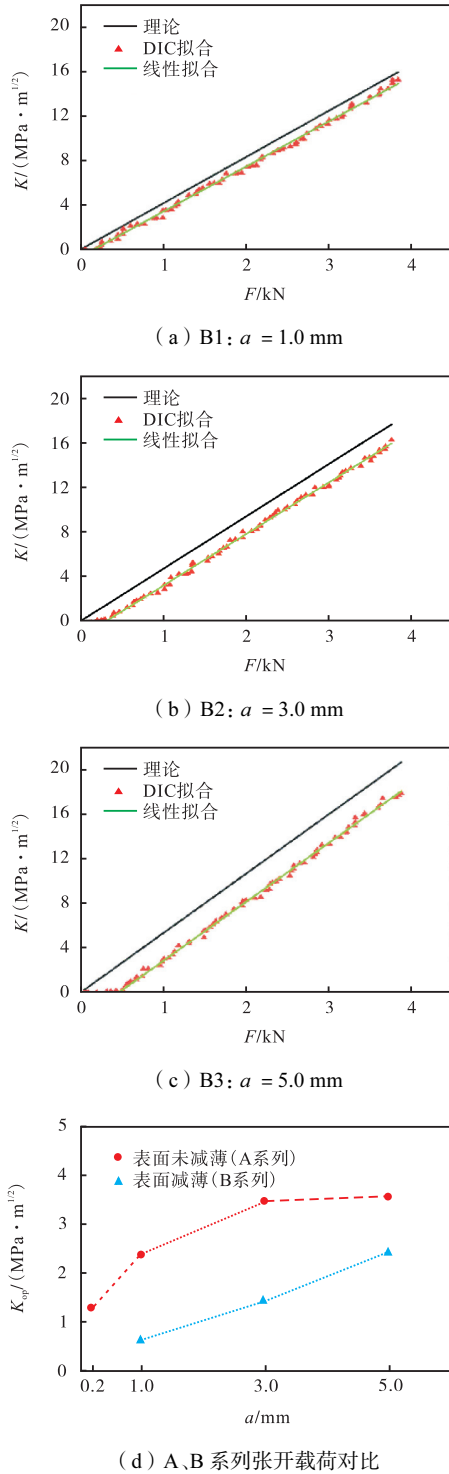


图6 试样B系列拟合结果
Fig.6 Specimen B series fitting results

合效应减弱,进而降低张开载荷。

3.2 疲劳裂纹扩展速率试验验证

图7为A系列试样的疲劳裂纹扩展速率曲线,结果表明疲劳裂纹张开载荷会影响裂纹扩展速率,随着疲劳裂纹长度增加,张开载荷增大,导致裂纹扩展速率减小,如图7(a)所示。基于裂纹闭合理论和式(6)计算考虑裂纹闭合效应的有效应力强度因子范围

ΔK_{eff} ,得到的裂纹扩展速率曲线如图7(b)所示,可以明显发现由疲劳裂纹张开载荷引起的疲劳裂纹扩展速率之间差异消失,表明了全场位移法拟合所得到的疲劳裂纹张开载荷是准确的。

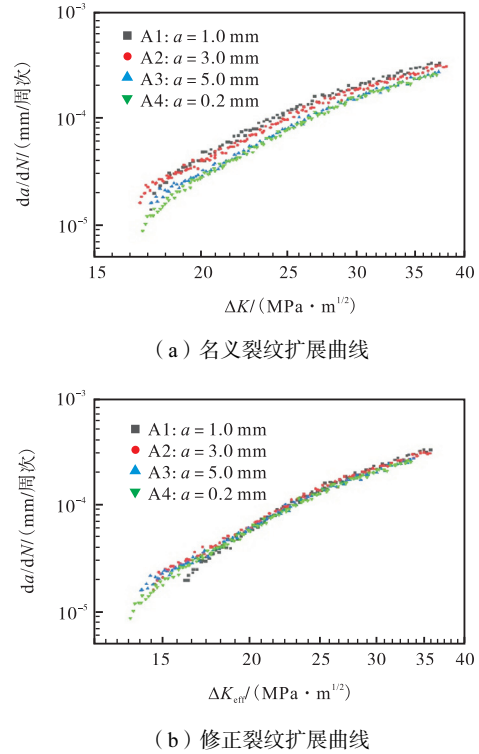


图7 疲劳裂纹扩展速率曲线
Fig.7 Fatigue crack growth rate curves

4 结论

(1) 利用 DIC 技术与 Williams 级数拟合计算得到的疲劳裂纹张开应力强度因子 K_{op} 的拟合斜率与理论斜率误差均在 3% 以内,并通过疲劳裂纹扩展速率试验验证了 K_{op} 的准确性。

(2) 对于 DH36 钢, K_{op} 随着疲劳裂纹长度增加而增大,在裂纹长度达到 3.0 mm 后基本趋于稳定,原因是此时裂纹已经由疲劳短裂纹发展成张开载荷稳定的长裂纹。

(3) 与厚度为 15.0 mm 的试样相比,两侧表面各减薄 2.0 mm 后的试样的 K_{op} 均明显减小,原因是试样减薄前近表面的平面应力区域会在预制疲劳裂纹过程中产生相对于内部平面应变区域更大的塑性尾迹区,去除该部分之后塑性尾迹区缩小,导致塑性诱导裂纹闭合效应减弱,进而降低张开载荷。

参考文献:

[1] Elber W. Fatigue crack closure under cyclic tension[J].

- Engineering Fracture Mechanics, 1970, 2(1): 37-45.
- [2] Nowell D, Paynter R J H, de Matos P F P. Optical methods for measurement of fatigue crack closure: Moiré interferometry and digital image correlation[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2010, 33(12): 778-790.
- [3] Masuda K, Ishihara S, Oguma N. Effect of specimen thickness and stress intensity factor range on plasticity-induced fatigue crack closure in A7075-T6 alloy[J]. Materials, 2021, 14(3): 664.
- [4] Gonzáles G L G, González J A O, Castro J T P, et al. DIC analysis for crack closure investigations during fatigue crack growth following overloads[C]//International Digital Imaging Correlation Society: Proceedings of the First Annual Conference. Cham, Switzerland, 2017: 151-156.
- [5] Rabbolini S, Beretta S, Foletti S. Fatigue crack growth in low cycle fatigue: An analysis of crack closure based on image correlation[J]. Procedia Structural Integrity, 2016, 1: 158-165.
- [6] Beretta S, Rabbolini S, Di Bello A, et al. Multi-scale crack closure measurements with digital image correlation on Haynes 230[J]. Frattura ed Integrità Strutturale, 2015, 9(33): 174-182.
- [7] Carroll J, Efstathiou C, Lambros J, et al. Investigation of fatigue crack closure using multiscale image correlation experiments[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2009, 76(15): 2384-2398.
- [8] Gonzáles G L G, González J A O, Castro J T P, et al. A J-integral approach using digital image correlation for evaluating stress intensity factors in fatigue cracks with closure effects[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2017, 90: 14-21.
- [9] Kojouri A S, Rikae H K, Kalteremidou K A, et al. Experimental evaluation of J-integral in elastic and elastic-plastic polymers by means of digital image correlation and higher-order eigenfields under mode-I[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 291: 109534.
- [10] Lammens B, Portemont G, Berthe J, et al. Determining singular and non-singular Williams' expansion terms from full-field measurements: Consideration of structural effects on fracture behavior[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2024, 130: 104304.
- [11] Feng M Y, Zhou X G, Zhang Y B, et al. Theoretical and experimental study considering the influence of T-stress on the fracture behavior of compression-shear crack[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2022, 2022(1): 2706896.
- [12] Shuai J G, Zhao J Q, Lei L P. Simple crack tip and stress intensity factor determination method for model I crack using digital image correlation[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2022, 122: 103621.
- [13] Bornert M, Brémand F, Doumalin P, et al. Assessment of digital image correlation measurement errors: Methodology and results[J]. Experimental Mechanics, 2009, 49: 353-370.
- [14] Li X, Fang G, Zhao J Q, et al. A practical and effective regularized polynomial smoothing (RPS) method for high-gradient strain field measurement in digital image correlation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 121: 215-226.
- [15] Mokhtarishirazabad M, Lopez-Crespo P, Moreno B, et al. Evaluation of crack-tip fields from DIC data: A parametric study[J]. International Journal of Fatigue, 2016, 89: 11-19.
- [16] ISO 12135: 2021 Metallic Materials—Unified Method of Test for the Determination of Quasistatic Fracture Toughness[S]. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2021.
- [17] 魏占江. CJP 模型参数确定及其对 EA4T 车轴钢裂纹闭合效应的表征研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
Wei Zhanjiang. CJP Model Parameterization and Its Characterization of Crack Closure Effect on EA4T Axle Steel[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021 (in Chinese).
- [18] Tanaka K, Akiniwa Y. Short fatigue-crack growth from crack-like defects under completely reversed loading predicted based on cyclic R-curve[J]. Materials, 2024, 17(18): 4484.

(责任编辑: 田 军)