

文章编号:1007-9629(2018)05-0749-06

## 钢筋蚀坑对其疲劳断裂特性的影响

卫 军, 刘 康, 张依如, 梁家熙

(中南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410075)

**摘要:** 基于降载勾线法, 对人工钻孔模拟蚀坑的 3 根 HPB300 钢筋试件开展了疲劳裂纹扩展试验, 并结合 FRANC3D 软件对钢筋疲劳裂纹扩展规律进行了数值分析. 在此基础上, 以不同应力幅值对 12 种尺寸的半椭圆形蚀坑钢筋模型的裂纹扩展过程进行了数值分析. 结果表明: 钢筋裂纹扩展速率前期缓慢增长, 后期迅速增大; 初始裂纹深度较大的钢筋疲劳寿命明显缩短; 初始裂纹深宽比越大的钢筋疲劳寿命越短; 应力幅值增大会使缺陷钢筋疲劳寿命缩短, 并且初始裂纹深宽比越大的钢筋, 其后期裂纹扩展速率增长越快, 疲劳寿命缩短越明显.

**关键词:** 降载勾线法; 蚀坑; 疲劳裂纹扩展; FRANC3D; 数值分析; 疲劳寿命

**中图分类号:** TU375

**文献标志码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1007-9629.2018.05.008

## Effect of Corrosion Pits on Fatigue and Fracture Properties of Steel Bars

WEI Jun, LIU Kang, ZHANG Yiru, LIANG Jiaxi

(School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

**Abstract:** With artificial drilling pits as simulation of corrosion pits of 3 HPB300 steel bars, the fatigue crack growth tests on steel bar specimens were conducted based on beach marking method, and FRANC3D was used to analyze the fatigue crack propagation of steel bars. On this base, the crack growth process of 12 semi-elliptical pits with different sizes was numerically analyzed with different stress amplitudes. The results show that the crack growth rate grows slowly at first, then increases significantly; the fatigue life of the steel bar with larger initial crack depth is notably lowered; the larger the initial crack depth to width ratio is, the shorter the fatigue life of steel bars is; the fatigue life of the rebar decreases with the increase of stress amplitude, and the larger the initial aspect ratio is, the faster the crack propagation rate increases and the shorter the fatigue life is.

**Key words:** beach marking method; corrosion pit; fatigue crack growth; FRANC3D; numerical analysis; fatigue life

混凝土结构在服役过程中会发生钢筋腐蚀, 而且疲劳作用会影响钢筋的腐蚀断裂过程, 因此, 研究钢筋疲劳裂纹形成及扩展规律对正确评估混凝土结构内钢筋的服役寿命是必要的.

近年来, 国内外有人开始采用变幅荷载序列的降载勾线法<sup>[1-2]</sup>进行钢材疲劳裂纹扩展分析. 由于其操作简单, 实用性强, 能够通过人为制造“海滩状花纹”来再现疲劳裂纹扩展全过程, 从而为研究裂纹在

材料深度方向上的扩展速率提供了强有力的工具, 弥补了目前常用测试方法, 如直读法、柔度法、电位法、探伤法、光学法等<sup>[3]</sup>的不足. 据文献报道, 当前降载勾线法多应用于钢板试件的疲劳断裂规律研究. 本文基于降载勾线法, 采用人工钻孔的方式制造钢筋试件的坑蚀缺陷, 对其开展疲劳裂纹扩展试验研究; 同时结合 FRANC3D 软件进行数值分析, 研究蚀坑尺寸及疲劳加载应力幅值对钢筋试件疲劳裂纹

收稿日期: 2017-12-18; 修订日期: 2018-01-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51378501, 51578547)

第一作者: 卫 军(1957—), 男, 河南新乡人, 中南大学教授, 博士生导师, 博士. E-mail: junewei@163.com

扩展和断裂的影响,以期为钢筋混凝土结构耐久性及剩余寿命的评估提供试验与理论依据。

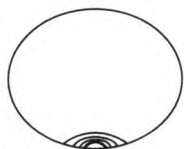
## 1 降载勾线法原理

根据疲劳裂纹扩展速率  $da/dN$  ( $a$  为裂纹深度,  $N$  为疲劳循环次数) 与应力强度因子幅值  $\Delta K$  之间的关系, 可将材料的疲劳裂纹扩展分为 3 个阶段: 第 I 阶段(裂纹不扩展阶段)、第 II 阶段(裂纹临界扩展阶段)以及第 III 阶段(裂纹快速扩展阶段)。第 I 阶段疲劳裂纹基本不扩展, 第 III 阶段裂纹快速扩展并导致材料失稳断裂, 这 2 个阶段仅占材料疲劳寿命极少部分。第 II 阶段是材料疲劳裂纹扩展的主要阶段, 此阶段  $da/dN$  与  $\Delta K$  成对数线性关系, 它是决定材料疲劳裂纹扩展寿命的主要阶段。

降载勾线法通过合理设计疲劳加载序列, 改变裂纹前沿应力大小及应力状态, 导致裂纹的扩展速率和方向发生变化, 进而在断口上留下塑性变形痕迹<sup>[4]</sup>, 这样既能清晰展示疲劳断口的裂纹扩展形貌, 又能跟踪再现疲劳裂纹扩展的第 II 阶段。塑性变形痕迹即为肉眼可见的疲劳弧线, 通过图像处理技术, 可以对这些疲劳弧线进行尺寸测量。钢筋断面及图像拟合结果如图 1 所示。疲劳弧线沿构件截面的深度和宽度就是加载至该循环次数范围时的疲劳裂纹深度  $a$  和裂纹宽度  $2c$ 。得到对应疲劳弧线下循环次数后, 基于裂纹尺寸和疲劳加载周期的关系, 可得到裂纹扩展速率  $da/dN$ , 依据的计算式如下:



(a) Section map of steel bar



(b) Schematic of image fitting result of a steel bar

图 1 钢筋断面及图像拟合结果示意图

Fig. 1 Sketch of steel bar section and image fitting result

$$\frac{da}{dN} = \frac{a_{i+1} - a_i}{N_{i+1} - N_i} \quad (1)$$

式中:  $i$  为疲劳弧线编号。

对于第 II 阶段  $da/dN$  的关系, 通常采用线弹性断裂力学 Paris 公式<sup>[5]</sup>描述:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (2)$$

式中:  $C$  和  $m$  为材料的裂纹扩展参数; 根据大量试验结果, 应力强度因子幅值可表示为  $\Delta K = f \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$ , 其中  $f$  为构件几何尺寸与裂纹尺寸的参数,  $\Delta \sigma$  为裂纹处应力幅值。

通过试验, 得到疲劳裂纹扩展速率  $da/dN$  与应力强度因子幅值  $\Delta K$ , 再由 Paris 公式得到裂纹扩展参数并运用于数值模拟分析, 即可研究钢筋疲劳裂纹扩展规律。

## 2 试验和数值分析过程

### 2.1 试验过程

#### 2.1.1 试件的材料参数

试件采用钢筋混凝土用热轧光圆钢筋 HPB300, 其直径  $d$  为 16 mm, 化学组成及力学性能如表 1、2 所示。

表 1 钢筋的化学组成  
Table 1 Chemical composition of steel bar  $w/\%$

| C     | Mn    | Si    | P     | S     |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.200 | 1.260 | 0.330 | 0.023 | 0.039 |

表 2 钢筋的力学性能  
Table 2 Mechanical properties of steel bar

| Yield strength<br>( $\sigma_s$ )/MPa |     | Tensile strength<br>( $\sigma_b$ )/MPa |     | Elongation/% |      |
|--------------------------------------|-----|----------------------------------------|-----|--------------|------|
| 1st                                  | 2nd | 1st                                    | 2nd | 1st          | 2nd  |
| 411                                  | 419 | 562                                    | 568 | 17.8         | 20.3 |

#### 2.1.2 钢筋试件及模拟蚀坑尺寸

钢筋试件总长 450 mm, 疲劳试验机夹具夹在距试件两端各 100 mm 的位置, 钢筋自由段长度  $l$  为 250 mm。采用人工钻孔方法模拟钢筋在腐蚀环境下的点蚀蚀坑, 蚀坑位置位于钢筋中点处, 如图 2 所示。共设计 3 根钢筋试件, 钢筋编号及蚀坑尺寸如表 3 所示。

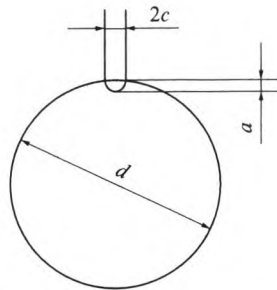


图 2 钢筋钻孔截面示意图

Fig. 2 Schematic diagram of steel bar drilling section

表3 钢筋试件模拟蚀坑尺寸表  
Table 3 Simulated corrosion pit size of steel bar

| Code | $a/\text{mm}$ | $2c/\text{mm}$ | $a/2c$ |
|------|---------------|----------------|--------|
| T-1  | 1.03          | 2.45           | 0.42   |
| T-2  | 1.38          | 3.94           | 0.35   |
| T-3  | 2.67          | 6.02           | 0.44   |

### 2.1.3 加载制度及试验结果

加载系统采用 CSS-280S-750 型电液伺服动静万能试验机系统. 试验采用轴向等幅力控制循环加载, 试验波形为等幅的正弦曲线, 施加的力沿试件的纵轴方向, 并通过每一试件横截面的轴向; 试验温度控制在  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 加载频率为  $15\text{ Hz}$ .

试验基于降载勾线法理论, 采用周期性降载的疲劳制度, 将 1 个降载循环周期分为基准荷载和标记荷载<sup>[6]</sup> 2 个模块. 标记荷载模块和基准荷载模块的应力比分别设定为 0.5 和 0.2, 对应的应力幅值为  $160\text{ MPa}$ . 经过测试调整后, 将基准荷载和标记荷载循环次数分成前期、后期两部分. 加载前期, 基准荷载模块加载 10 万次, 标记荷载模块加载 4 万次, 循环 4 组; 加载后期由于疲劳裂纹扩展速率急剧增大, 为了在断口上获得更多的疲劳弧线, 将循环周期调整为: 基准荷载模块加载 4 万次, 标记荷载模块加载 2 万次.

由于 T-3 钢筋试件迅速断裂, 无法勾勒出疲劳弧线, 最终主要针对 T-1, T-2 钢筋试件进行分析研究.

### 2.2 数值模拟分析

在 ANSYS 中建立 HPB300 钢筋实体模型, 模型单元类型选择 3D10 节点四面体单元 SOLID92, 该单元每个节点具有  $X, Y, Z$  3 个方向的自由度. 网格划分单位  $1\text{ mm}$ . 网格划分后, 在钢筋一端表面所有节点施加  $U_x, U_y, U_z$  3 个方向约束, 另一端施加  $U_x, U_y$  2 个方向约束, 并施加面荷载. 钢筋材料参数如表 4 所示, 表中的  $E$  为弹性模量,  $\nu$  为泊松比.

表4 钢筋材料参数  
Table 4 Material parameters of steel bar

| $d/\text{mm}$ | $l/\text{mm}$ | $\sigma_s/\text{MPa}$ | $\sigma_b/\text{MPa}$ | $E/\text{MPa}$    | $\nu$ |
|---------------|---------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|-------|
| 16            | 250           | 415                   | 564                   | $2.1 \times 10^5$ | 0.3   |

将 15 根钢筋模型分为 T, A, B 3 组, T 组是试验对比组. 取 T, A 组疲劳试验最大应力水平为  $200\text{ MPa}$ , 最小应力水平为  $40\text{ MPa}$ ; B 组疲劳试验最大应力水平为  $250\text{ MPa}$ , 最小应力水平为  $50\text{ MPa}$ . 在每组钢筋中点位置设计半椭圆形初始裂纹来模拟钢筋坑蚀缺陷, 具体分组编号和初始裂纹形状参数如表 5 所示.

表5 钢筋模型编号及初始裂纹形状参数表  
Table 5 Model code and initial crack shape parameters of steel bars

| Code   | $a/2c$ | $a/\text{mm}$ | $2c/\text{mm}$ | $a/d$ |
|--------|--------|---------------|----------------|-------|
| T-1    | 0.42   | 1.03          | 2.45           | 0.064 |
| T-2    | 0.35   | 1.38          | 3.94           | 0.086 |
| T-3    | 0.44   | 2.67          | 6.02           | 0.167 |
| AI-1   | 0.40   | 1.0           | 2.50           | 0.063 |
| AI-2   | 0.40   | 2.0           | 5.00           | 0.125 |
| AII-1  | 0.35   | 1.0           | 2.86           | 0.063 |
| AII-2  | 0.35   | 2.0           | 5.72           | 0.125 |
| AIII-1 | 0.30   | 1.0           | 3.33           | 0.063 |
| AIII-2 | 0.30   | 2.0           | 6.66           | 0.125 |
| BI-1   | 0.40   | 1.0           | 2.50           | 0.063 |
| BI-2   | 0.40   | 2.0           | 5.00           | 0.125 |
| BII-1  | 0.35   | 1.0           | 2.86           | 0.063 |
| BII-2  | 0.35   | 2.0           | 5.72           | 0.125 |
| BIII-1 | 0.30   | 1.0           | 3.33           | 0.063 |
| BIII-2 | 0.30   | 2.0           | 6.66           | 0.125 |

进入 FRANC3D 软件操作界面, 导入钢筋有限元模型, 并进行初始裂纹的植入, 然后进行裂纹扩展分析. 在完成裂纹扩展分析后, 进行疲劳寿命估算, 得到不同蚀坑尺寸影响下, 钢筋在疲劳裂纹扩展过程中, 各循环次数下所对应的裂纹深度  $a$  和应力强度因子幅值  $\Delta K$ .

## 3 结果分析

### 3.1 试验结果及分析

T-1, T-2 钢筋试件裂纹深度  $a$  和裂纹宽度  $2c$  随疲劳循环次数  $N$  的变化曲线如图 3 所示. 一种观点认为, 半椭圆形表面裂纹在扩展过程中的形状基本保持不变, 即  $a/c$  为定值<sup>[7-8]</sup>. 而从图 1 和图 3 可以发现, T-1, T-2 钢筋试件在裂纹扩展过程中的前缘形状基本上是一系列曲率半径和曲率中心不断变化的圆弧线. 在扩展初期, 裂纹扩展速率缓慢增长, 裂纹尺寸  $a$  与  $2c$  几乎以不变的比例增加, 在此过程中弧线曲率基本保持不变, 持续时间很短; 随后, 裂纹扩展速率迅速增大, 裂纹沿宽度方向的扩展快于沿深度方向的扩展, 弧线曲率不断减小, 趋于平坦.

T-1, T-2 钢筋试件疲劳裂纹扩展曲线如图 4 所示. 基于 Newman-Raju 理论<sup>[9]</sup>, 并通过 Origin 拟合钢筋疲劳裂纹扩展曲线, 两者的拟合直线表达式分别为:  $\lg(da/dN) = -12.34 + 2.69\lg(\Delta K)$  和  $\lg(da/dN) = -11.89 + 2.56\lg(\Delta K)$ , 调整表达式为:  $da/dN = 4.571 \times 10^{-13} (\Delta K)^{2.69}$  和  $da/dN = 1.288 \times 10^{-12} (\Delta K)^{2.56}$ .

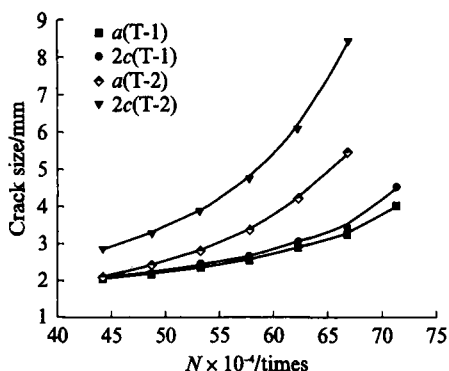


图3 钢筋裂纹深度和宽度随疲劳循环次数的变化  
Fig. 3 Depth and width of cracks changing with number of fatigue cycles

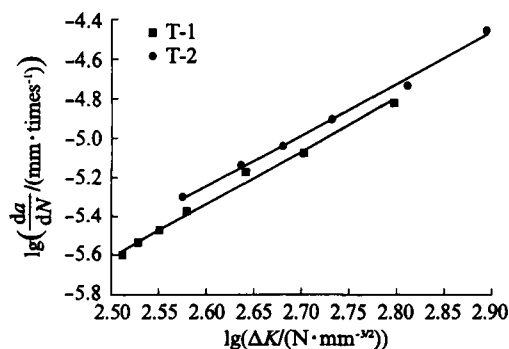


图4 钢筋试件疲劳裂纹扩展曲线  
Fig. 4 Fatigue crack growth curves of steel bars

由此可知, T-1 试件的裂纹扩展参数为:  $C = 4.571 \times 10^{-13}$ ,  $m = 2.69$ ; T-2 试件的裂纹扩展参数为:  $C = 1.288 \times 10^{-12}$ ,  $m = 2.56$ . 对于钢材的裂纹扩展参数  $C$  和  $m$ , 国际焊接学会 (IIW) 在 1998 年通过大量试验数据统计分析, 建议取  $C = 1.832 \times 10^{-13}$ ,  $m = 3.00^{[10]}$ . 显然, 本文试验数据与之较为吻合, 落在允许误差范围之内, 因此采用降载勾线法设计的变幅荷载序列对构件裂纹扩展的影响可以忽略不计. 裂纹扩展参数  $C$  和  $m$  的大小与材料性能及微观组织结构、荷载频率、平均应力、环境、加载方式、应力状态和试验温度等有关, 而 T-1, T-2 钢筋试件的裂纹扩展参数存在差异, 说明初始蚀坑深度的大小, 即钢筋锈蚀程度的大小, 对裂纹扩展参数  $C$  和  $m$  会有一定影响. 本试验所得  $m$  值均低于 3.00, 说明与无缺陷钢筋相比, 初始蚀坑缺陷的存在改变了钢筋裂尖的应力场; 当裂纹开始扩展后, 蚀坑对钢筋裂尖的钝化作用削弱, 可以认为蚀坑根部材料显微结构的定量测量参数有下降趋势.

### 3.2 数值模拟与试验结果对比分析

图 5 为钢筋裂纹深度随疲劳循环次数的变化曲线模拟值与试验值对比图; 图 6 为钢筋应力强度因子幅值随裂纹深度的变化曲线模拟值与试验值对比图.

幅值随裂纹深度的变化曲线模拟值与试验值对比图. 由图 5 可知, 试验值和模拟值均表明钢筋的前期裂纹扩展速率缓慢增长, 后期则迅速增大, 裂纹迅速扩展至断裂; 图 6 表明模拟过程与试验过程中所得到的应力强度因子幅值随裂纹深度变化的规律基本相符, 即随着裂纹深度的扩展, 钢筋应力强度因子幅值基本呈线性增长. 表明应用 FRANC3D 软件对带蚀坑缺陷的钢筋进行裂纹扩展规律模拟分析是可行的.

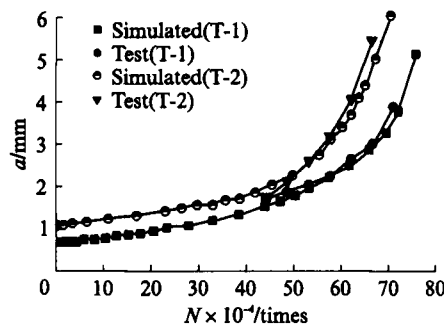


图5 钢筋裂纹深度随疲劳循环次数的变化曲线模拟值与试验值对比

Fig. 5 Comparison of test and simulated values of steel crack depth changing with number of fatigue cycles

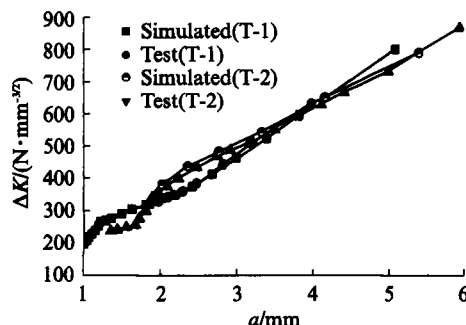


图6 钢筋应力强度因子幅值随裂纹深度的变化曲线模拟值与试验值对比

Fig. 6 Comparison of test and simulated values of stress intensity amplitude of steel bar with the variation of crack depth

### 3.3 蚀坑尺寸对钢筋疲劳断裂影响的模拟分析

#### 3.3.1 钢筋裂纹深度随疲劳循环次数的变化

图 7 为 A, B 2 组钢筋试件裂纹深度随疲劳循环次数的变化曲线. 由图 7 可见, 初始蚀坑深度为 2 mm 的钢筋, 其裂纹扩展最大深度高于初始蚀坑深度为 1 mm 的钢筋, 疲劳寿命也明显缩短; 随着蚀坑深宽比的减小, 裂纹扩展速率无论是在前期缓慢增长阶段还是在后期迅速扩展阶段均有所降低; A, B 2 组试件的初始蚀坑深度相同时, 随应力水平增大, 锈蚀钢筋疲劳寿命明显降低.

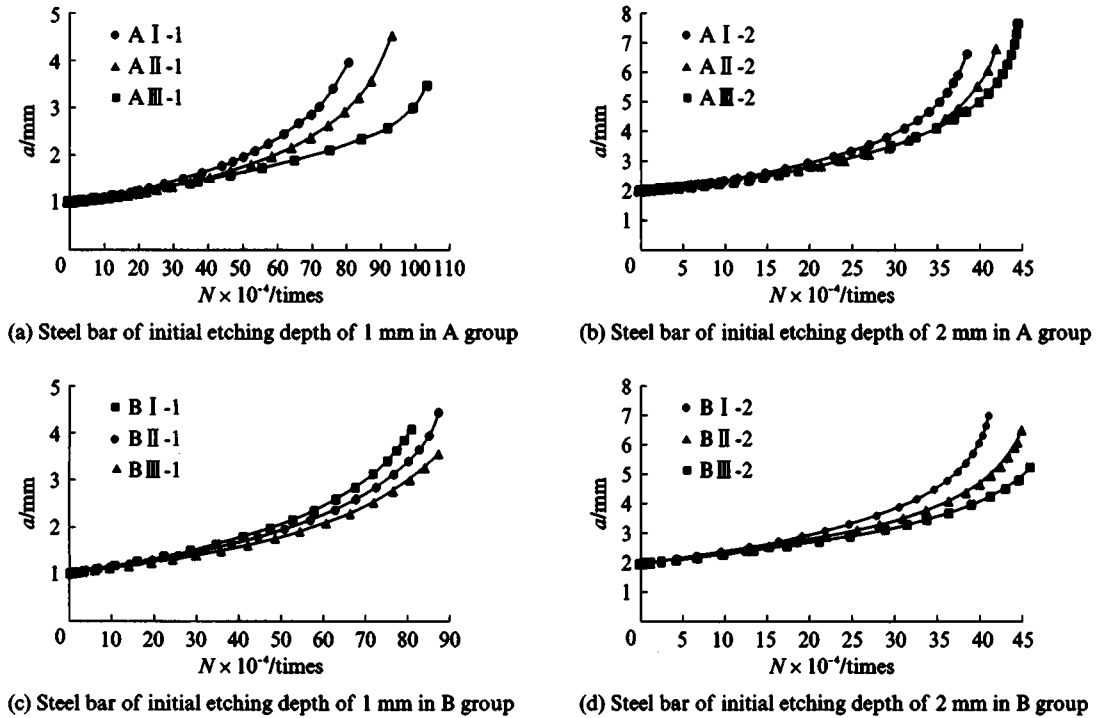


图 7 裂纹深度随疲劳循环次数的变化曲线  
Fig. 7 Curves of the crack depth changing with the number of fatigue cycles

### 3.3.2 初始缺陷尺寸对疲劳寿命的影响

蚀坑钢筋疲劳寿命的缩短,与蚀坑附近的应力集中现象密不可分。综上结果分析,随着蚀坑深度和宽度的增加,蚀坑附近的应力集中越来越明显。在相同条件下,截面尺寸的突变越明显,其应力变化程度越大。对于蚀坑而言,在初始裂纹深度相同的情况下,初始裂纹宽度越小,深宽比越大,则初始缺陷平缓程度越低,蚀坑处的应力集中越显著,导致钢筋的疲劳寿命缩短越明显,如图 8 所示。

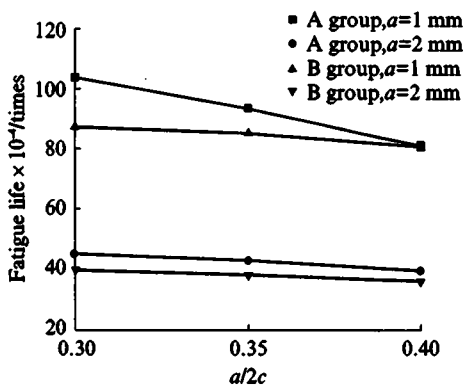


图 8 初始裂纹深宽比对钢筋疲劳寿命的影响  
Fig. 8 Effect of initial crack aspect ratio on fatigue life of steel bars

## 4 结论

(1)钢筋裂纹扩展过程中的前缘形状基本上是

一系列曲率半径和曲率中心不断变化的圆弧线。在扩展初期,裂纹扩展速率缓慢增长,裂纹深度  $a$  与裂纹宽度  $2c$  几乎以不变的比例增加,在此过程中弧线曲率基本保持不变,持续时间很短;随后,裂纹扩展速率迅速增大,裂纹沿宽度方向的扩展要快于沿深度方向的扩展,弧线曲率不断减小,趋于平坦;试验值与模拟值对比分析表明,随着裂纹扩展的不断深入,裂纹深度增大,应力强度因子幅值  $\Delta K$  基本呈线性递增。

(2)应用 FRANC3D 软件进行疲劳裂纹扩展模拟分析的结果表明,随着钢筋初始裂纹深宽比增大,钢筋疲劳裂纹扩展前期速率变化不大,但中后期扩展速率明显提高,且后期扩展速率提升显著,钢筋疲劳寿命也相应缩短;应力水平增大会使缺陷钢筋疲劳寿命缩短,并且初始裂纹深宽比越大,疲劳寿命缩短越明显。

### 参考文献:

- [1] SCHIJVE J. Fatigue of structures and materials[M]. [S. l.], Springer Science Business Media, 2009: 51-54.
- [2] VERREMAN Y, NIE B. Early development of fatigue cracking at manual fillet welds[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2010, 19(6): 669-681.
- [3] 张利娟, 张亚军, 高灵清. 表面裂纹长度的测量方法[J]. 材料开发与应用, 2009, 24(5): 75-79.

(下转第 760 页)

- [6] 张国永,王立,刘亚辉,等. 烧结复合保温砌块热工性能数值模拟研究[J]. 新型建筑材料,2016(11):39-41.  
ZHANG Guoyong, WANG Li, LIU Yahui, et al. Numerical simulation on thermal property of fired composited insulation block[J]. New Building Materials, 2016(11):39-41. (in Chinese)
- [7] 石亦平,周玉蓉. ABAQUS有限元分析实例详解[M]. 北京:机械工业出版社,2006:1-63.  
SHI Yiping, ZHOU Yurong. Detailed solution of ABAQUS finite element analysis examples[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2006:1-63. (in Chinese)
- [8] 张万仓,金立虎,张文涛. 混凝土空心砌块与混凝土砖实用手册[M]. 北京:中国建材出版社,2007:226-231.  
ZHANG Wancang, JIN Lihu, ZHANG Wentao. Practical handbook for concrete hollow block and concrete brick[M]. Beijing: China Building Materials Press, 2007:226-231. (in Chinese)

## (上接第738页)

- [7] LEE Y, YI S T, KIM M S, et al. Evaluation of a basic creep model with respect to autogenous shrinkage[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(7):1268-1278.
- [8] JI G M, KANSTAD T, BJØNTEGAARD Ø, et al. Tensile and compressive creep deformations of hardening concrete containing mineral additives[J]. Materials and Structures, 2013, 46(7):1167-1182.
- [9] RUETZ W. The two different physical mechanisms of creep in concrete[M]. Climate Change Impact on Livestock: Adaptation and Mitigation. India: Springer India, 1965:123-138.
- [10] UMEHARA H, UEHARA T, IISAKA T. Effect of creep in concrete at early age on thermal stresses[C]//SPRINGENSCHMID R. Thermal Cracking in Concrete at Early Ages, Proceeding of the RILEM International Symposium. London: E & FN Spon, 1994: 79-86.
- [11] WU Shengxing, HUANG Donghui, LIN Fengbao, et al. Estimation of cracking risk of concrete at early age based on thermal stress analysis[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2011, 105(1):171-186.
- [12] 杨杨,吴炎平,李鹏,等. 加载龄期和养护温度对高性能混凝土早期拉伸徐变的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2010(4): 10-14.  
YANG Yang, WU Yanping, LI Peng, et al. Influence of loading age and curing temperature on early-age tensile creep of high performance concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2010(4):10-14. (in Chinese)
- [13] 惠荣炎,黄国兴,易冰若. 混凝土的徐变[M]. 北京:中国铁道出版社,1988:42-45.  
HUI Rongyan, HUANG Guoxing, YI Ruobing. Creep of concrete[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1988:42-45. (in Chinese)
- [14] BISSONNETTE B, PIGEON M. Tensile creep at early age of ordinary silica fume and fibre reinforced concrete[J]. Cement and concrete research, 1995, 25(5):1075-1085.
- [15] NEVILLE A M. Properties of concrete[M]. 5th ed. London: Pearson Education Limited, 2011:464-501.

## (上接第753页)

- ZHANG Lijuan, ZHANG Yajun, GAO Lingqing. Review on measurement methods of surface crack length[J]. Development and Application of Materials, 2009, 24(5):75-79. (in Chinese)
- [4] 钟群鹏,赵子华. 断口学[M]. 北京:高等教育出版社,2006: 270-273.  
ZHONG Qunpeng, ZHAO Zihua. Fractography[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006:270-273. (in Chinese)
- [5] PARIS P, ERDOGAN F. A critical analysis of crack propagation laws[J]. Journal of Basic Engineering, 1963, 85(4): 528-534.
- [6] MASTUOKA S, TANAKA K. The influence of sheet thickness on delayed retardation phenomena in fatigue crack growth in HT80 steel and A5083 aluminum alloy[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1980, 13(2):293-306.
- [7] 崔振源. 表面裂纹理论及其应用[M]. 西安:西北工业大学出版社,1987.  
CUI Zhenyuan. The theory of surface crack and its application [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnic University Press, 1987. (in Chinese)
- [8] 冯贤桂. 天然气管道的疲劳可靠寿命计算[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2002, 25(7):133-136.  
FENG Xiangui. Calculation of fatigue reliable life of natural gas pipeline[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science), 2002, 25(7):133-136. (in Chinese)
- [9] JCN J, RAJU I S. An empirical stress-intensity factor equation for the surface crack[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1981, 15(1):185-192.
- [10] HSE. Background to new fatigue guidance for steel joints and connections in offshore structures, O/S technical report OTH 92 390[R]. London: Health and Safety Executive, 1995.