

DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201903036

Q345 圆钢杆的疲劳破坏模型

王万祯

(宁波大学 土木与环境工程学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为研究结构钢圆杆的疲劳破坏模型,以结构钢的椭圆面断裂模型为开裂判据,由结构钢圆杆疲劳裂纹的裂尖真实应力场,计算出结构钢圆杆疲劳裂纹的失稳扩展面积、稳定扩展面积和稳定扩展长度.基于结构钢疲劳裂纹随加载次数加速扩展的试验事实,假定结构钢圆杆的疲劳裂纹稳定扩展速率是循环加载次数的单调递增幂函数,即双对数坐标系下结构钢圆杆的疲劳裂纹稳定扩展速率和循环加载次数为单调递增线性函数,积分后得到结构钢圆杆的疲劳裂纹稳定扩展长度和疲劳寿命间的函数表达式,导出结构钢圆杆的疲劳破坏模型.建议的结构钢圆杆的疲劳破坏模型表明,结构钢圆杆的疲劳寿命是名义最大应力、相对应力幅、初始裂纹位置和初始裂纹长度的复杂函数,不能简单化为仅是应力幅的函数.对 Q345B 圆钢杆进行了常幅循环应力疲劳试验,结果表明, Q345B 圆钢杆的疲劳寿命随相对应力幅和名义最大应力的增加而降低.根据 Q345B 圆钢杆的疲劳试验结果,标定了其疲劳破坏模型参数,验证了建议的疲劳破坏模型精度.

关键词: 圆钢杆;疲劳破坏模型;疲劳裂纹;稳定扩展;失稳扩展;疲劳寿命

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2019)12-0121-07

Fatigue failure model of Q345 steel round bars

WANG Wanzhen

(School of Civil and Environmental Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China)

Abstract: To study the fatigue failure model of steel round bars, the unstable propagation area, stable propagation area, and stable propagation length of fatigue crack were calculated based on the fracture criterion from an elliptical fracture model of steel and the true stress field at tip of fatigue crack in round bars. On the basis of the facts that fatigue crack propagation accelerated with the numbers of cyclic loading during fatigue tests, it was assumed that the stable propagation rate of fatigue crack and the numbers of cyclic loading of constructional steel round bars comply with a monotonically increasing power function. In other words, the stable propagation rate of fatigue crack and the numbers of cyclic loading of constructional steel round bars are monotonically increasing linear functions in double logarithmic coordinate system. A function expression between the stable propagation length of fatigue crack and the fatigue life of constructional steel round bars (i.e., the fatigue failure model of steel round bars) was derived by integrating the power function between the stable propagation rate of fatigue crack and the numbers of cyclic loading. The proposed fatigue failure model of steel round bars shows that the fatigue life is a complex function of nominal maximum stress, relative stress amplitude, and location and length of initial crack, which cannot be merely simplified as a function of stress amplitude. Fatigue tests under constant amplitude cyclic stress were carried out on Q345B steel round bars. The fatigue test results show that the fatigue life of Q345B steel round bars decreased with the increase of relative stress amplitude and nominal maximum stress. The fatigue model parameters were calibrated and the model accuracy was verified, according to fatigue test results of Q345B steel round bars.

Keywords: constructional steel round bars; fatigue failure model; fatigue crack; stable propagation; unstable propagation; fatigue life

统计表明,包括飞机、车辆、桥梁和吊车梁等在内的金属结构中,约 80%~90% 的破坏与疲劳断裂有关^[1]. 结构钢疲劳破坏是结构钢在反复荷载作用下损伤累积产生初始微裂纹,裂纹反复扩展、闭合,

直至净截面强度不足而瞬间断裂的破坏过程. 一般说来,结构钢的疲劳破坏可分为 3 个阶段:初始微裂纹形成、裂纹稳定扩展和裂纹失稳扩展. 在反复荷载作用下,位错或孔穴运动、聚合导致结构钢晶界或滑移带开裂,或在大尺寸夹杂物或其他缺陷周边因应力集中与结构钢基本相界面分离或夹杂物本身断裂形成初始微裂纹. 初始微裂纹形成后,裂尖形成高度应力集中,即便在名义应力不高于结构钢断裂强度甚至低于屈服强度时,裂尖真实应力场达到结构钢

收稿日期: 2019-03-05

基金项目: 国家自然科学基金(51878360);

浙江省基础公益技术研究计划(LGF18E080007);

宁波市自然科学基金(2017A610309)

作者简介: 王万祯(1974—),男,教授

通信作者: 王万祯, wangwanzhen1975@sina.com

断裂临界值而开裂,在反复荷载作用下,裂纹反复扩展、闭合,即为裂纹稳定扩展阶段.当裂纹稳定扩展到一定长度,试件承载截面面积削弱过多,最后因净截面承载强度不足而瞬间拉裂,为裂纹失稳扩展阶段.疲劳断裂面相应地形成贝纹状的裂纹稳定扩展区和粗糙的裂纹失稳扩展区.

钢结构不存在裂纹形成阶段^[1-2],因钢结构在制作和构造上不可避免地存在缺陷,如焊接结构中存在的氣孔、欠焊、夹渣,非焊接结构中存在的刻痕、分层、凹凸点、轧钢缺陷及冲孔、剪切、氣割处存在的微裂纹等,这些缺陷就是初始裂纹(起裂源).考虑到疲劳裂纹失稳扩展是瞬间断裂的,因此,本文偏于保守地约定结构钢试件的疲劳寿命不计疲劳裂纹失稳扩展阶段的循环加载次数,即:对于有初始裂纹或缺陷的结构钢试件,疲劳裂纹从初始裂纹根部或初始缺陷周边开始稳定扩展阶段的循环加载次数为其疲劳寿命;对于经超声波等检测无初始裂纹或缺陷的结构钢试件,疲劳微裂纹形成阶段和疲劳裂纹稳定扩展阶段的循环加载次数之和为其疲劳寿命.

由于对结构钢疲劳裂纹的形成、扩展以至断裂这一过程的极限状态及有关影响因素的研究还不足,现行《钢结构设计标准》^[3]采用允许应力法和应力幅准则计算钢结构的疲劳寿命,前规范《钢结构设计规范》^[4]则采用最大应力准则验算钢结构的疲劳破坏.当前,结构钢的疲劳破坏虽然积累了丰富的试验资料,也能通过计算预估疲劳寿命,但仍较多地依赖经验,理论上并未真正解决^[2].

本文以结构钢的椭圆面断裂模型为开裂判据,基于结构钢疲劳裂纹随加载次数加速扩展的试验事实,假定结构钢圆杆的疲劳裂纹稳定扩展速率是循环加载次数的单调递增幂函数,由结构钢圆杆疲劳裂纹的裂尖真实应力场,推导出结构钢圆杆的疲劳破坏模型.对 Q345B 圆钢杆进行了疲劳试验,考察了相对应力幅和名义最大应力对其疲劳寿命的影响规律,标定了 Q345B 圆钢杆的疲劳破坏模型参数,验证了建议的结构钢圆杆的疲劳破坏模型精度.

1 结构钢圆杆的疲劳破坏模型

1.1 疲劳裂纹失稳扩展面积

为计算结构钢圆杆的疲劳裂纹失稳扩展面积 A_n ,需选用能描述结构钢在复杂应力状态下的断裂判据,并求解裂尖真实应力场.王万祯^[5]建议的结构钢椭圆面断裂模型及耦联的椭圆面屈服模型分别为:

$$(\sigma_{\text{seq}}/r)^2 + (\sigma_m/q)^2 = 3\tau_y^2, \tag{1}$$

$$\sigma_{\text{seq}}^2 + (\sigma_m/q)^2 = 3\tau_y^2. \tag{2}$$

式中: $q = \frac{\sqrt{2}(1+\mu)}{3(1-2\mu)}$, $\sqrt{3}\tau_y = \frac{\sqrt{1+9q^2}}{3q}f_y$, 参数

$r = \tau_f/\tau_y$, 且可由式 $\frac{f_u}{f_y} \approx \frac{f_t}{f_y} = \frac{r\sqrt{1+9q^2}}{\sqrt{r^2+9q^2}}$ 近似量化;

σ_{seq} 、 σ_m 、 τ_y 、 τ_f 、 f_y 、 f_u 、 f_t 和 μ 分别为 Mises 等效应力、平均应力、剪切屈服强度、剪切断裂强度、单向拉伸屈服强度、单向拉伸极限强度、单向拉伸断裂强度和泊松比.

王万祯等^[6]对刻槽圆钢杆的研究表明,尖锐刻槽根部的应力场接近固接约束状态,即: $\sigma_2 = \mu\sigma_1$, $\sigma_3 = \mu\sigma_1$.把结构钢圆杆的疲劳裂纹看作无限尖锐刻槽,裂尖处于固接约束应力状态,疲劳裂纹失稳扩展时裂尖真实应力场计算如下:

$$\sigma_1 = P_{\text{max}}/A_n = \sigma_{\text{max}} \cdot A/A_n, \tag{3}$$

$$\sigma_2 = \sigma_3 = \mu\sigma_1, \tag{4}$$

$$\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 = (1 + 2\mu)\sigma_{\text{max}} \cdot A/3A_n, \tag{5}$$

$$\sigma_{\text{seq}} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} = (1 - \mu)\sigma_{\text{max}} \cdot A/A_n. \tag{6}$$

式(3)~(6)中: σ_1 、 σ_2 、 σ_3 分别为第一、第二、第三主应力, σ_{max} 和 P_{max} 分别为疲劳试验名义最大应力和名义最大载荷.

将式(3)~(6)计算的疲劳裂纹裂尖应力场代入式(1)建议的结构钢椭圆面断裂模型,得

$$A_n = \frac{\sqrt{9q^2(1-\mu)^2 + (1+2\mu)^2r^2} \cdot \sigma_{\text{max}}A}{3\sqrt{3}qr \cdot \tau_y}. \tag{7}$$

1.2 疲劳裂纹稳定扩展长度

由式(7)求得结构钢圆杆的疲劳裂纹失稳扩展面积 A_n ,则包含初始裂纹或缺陷尺寸 a_0 效应的疲劳裂纹稳定扩展面积 $A_f = A - A_n$.

图 1 结构钢圆杆疲劳裂纹扩展示意图中, e 为起裂点距圆杆边缘的距离, $0 \leq e \leq D/2$.为叙述简洁,本文约定:当 $e=0$ 时,为边缘裂纹;当 $0 < e < D/2$ 时,为内部裂纹;当 $e=D/2$ 时,为中心裂纹.

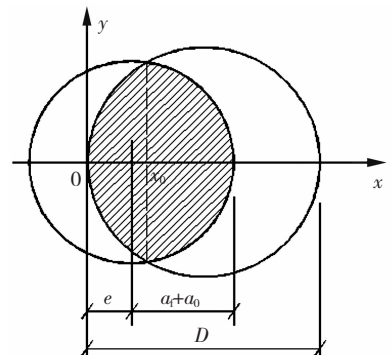


图 1 结构钢圆杆的疲劳裂纹扩展示意

Fig. 1 Sketch of fatigue crack propagation of round bar made from constructional steel

假设疲劳裂纹稳定扩展阶段以起裂点为中心向四周呈辐射状扩展,可解得包含初始裂纹或缺陷尺寸 a_0 效应的疲劳裂纹稳定扩展面积 A_f 和疲劳裂纹稳定扩展长度 a_f 间的函数关系,求得疲劳裂纹稳定扩展长度 a_f .

当 $0 \leq e < D/2$ 时,解得疲劳裂纹扩展圆与杆件截面圆交点坐标 $x_0 = \frac{(a_f + a_0)^2 - e^2}{D - 2e}$,则疲劳裂纹稳定扩展面积(牛顿-莱布尼兹积分公式)为

$$\begin{aligned} A_f &= A - A_n = 2 \int_0^{x_0} \sqrt{\frac{D^2}{4} - (x - \frac{D}{2})^2} dx + \\ &2 \int_{x_0}^{a_f + a_0 + e} \sqrt{(a_f + a_0)^2 - (x - e)^2} dx = \\ &(x_0 - \frac{D}{2}) \sqrt{x_0 D - x_0^2} + \frac{\pi D^2}{8} + \frac{\pi(a_f + a_0)^2}{2} - \\ &(x_0 - e) \sqrt{(a_f + a_0)^2 - (x_0 - e)^2} + \\ &\frac{D^2}{4} \arcsin \frac{2x_0 - D}{D} - (a_f + a_0)^2 \arcsin \frac{x_0 - e}{a_f + a_0}. \end{aligned} \tag{8}$$

特别地,当 $e \geq a_f + a_0$ 或 $e = D/2$ 时

$$A_f = A - A_n = \pi(a_f + a_0)^2. \tag{9}$$

1.3 疲劳裂纹扩展速率方程和疲劳寿命

疲劳裂纹扩展速率是决定结构钢疲劳寿命的关键因素,受到广泛研究^[7-11].

Paris - Erdogan 模型^[7]定量描述了结构钢的疲劳裂纹扩展速率;Forman 等^[8]建议的疲劳裂纹扩展速率方程考虑了高 ΔK 范围内的应力比效应;Elber^[9]提出了考虑裂纹张开效应的疲劳裂纹扩展速率方程.

赵永翔等^[10]指出,Paris - Erdogan 模型^[7]不能表征门槛值 ΔK_{th} 和断裂韧度 ΔK_{Ic} 附近的疲劳裂纹扩展规律,Forman 等^[8]建议的疲劳裂纹扩展速率方程不能表征门槛值 ΔK_{th} 附近的疲劳裂纹扩展规律,Elber^[9]提出的疲劳裂纹扩展速率方程不能表征高应力强度因子范围的疲劳裂纹扩展规律.

以往建议的结构钢疲劳裂纹扩展模型^[7-11],多是基于断裂力学原理(如应力强度因子、COD 理论和 J 积分等)建立的,适用于含初始裂纹或缺陷的结构钢试件,模型参数强烈敏感于初始裂纹尺寸及形状.《钢结构工程施工质量验收规范》^[12]明确规定,按一级和二级质量检测的钢结构及焊缝不得存在裂纹等缺陷.因此,应用以往建议的结构钢疲劳裂纹扩展模型时,需引入人为设定的初始裂纹(或缺陷)尺寸 a_0 ,与《钢结构工程施工质量验收规范》^[12]对钢结构质量的要求不符,且人为设定的初始裂纹尺寸

具有很大的不确定性.

图 2 为含初始裂纹的 WNQ570 桥梁钢的疲劳试验结果^[13],可见,结构钢的疲劳裂纹稳定扩展长度增速随加载次数逐渐增大.在疲劳裂纹稳定扩展阶段,随着裂纹扩展,试件净截面面积减小,裂尖真实应力增加,裂纹加速扩展,即第 N 次循环加载时的裂纹扩展长度大于第 $(N - 1)$ 次循环加载.疲劳裂纹失稳扩展本质上也是裂纹扩展过快以致最后一次循环加载中裂纹瞬间穿透试件剩余截面的破坏过程.

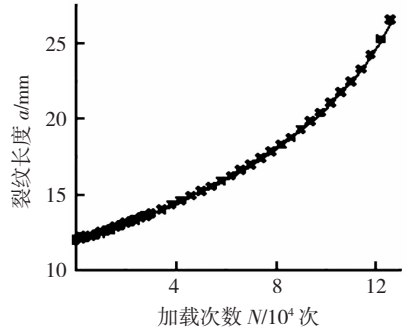


图 2 WNQ570 钢的疲劳试验结果

Fig. 2 Fatigue test results of WNQ570 steel

本文根据唯象理论假定结构钢圆杆的疲劳裂纹稳定扩展速率 v_a (包括疲劳裂纹形成阶段)是循环加载次数 N 的单调递增幂函数,即

$$v_a = b \cdot N^c + d. \tag{10}$$

由初始条件 $v_a|_{N=0} = 0$,得 $d = 0$.

式(10)简化为

$$v_a = b \cdot N^c. \tag{11}$$

即双对数坐标系下疲劳裂纹扩展速率 v_a 是循环加载次数 N 的单调递增线性函数:

$$\log v_a = c \cdot \log N + \log b. \tag{12}$$

对式(12)积分,得疲劳裂纹稳定扩展长度:

$$a_f = \frac{b}{c + 1} \cdot N_f^{c+1}. \tag{13}$$

式中: N_f 为疲劳裂纹形成和稳定扩展阶段的循环加载总次数,即疲劳寿命.

令 $\xi = \frac{b}{c + 1}$ 、 $\eta = c + 1$,式(13)简化为

$$a_f = \xi \cdot N_f^\eta. \tag{14}$$

由式(14)得结构钢圆杆的疲劳破坏模型:

$$N_f = \left(\frac{a_f}{\xi}\right)^{\frac{1}{\eta}}. \tag{15}$$

式中:参数 ξ 、 η 是试件类别和相对应力幅 $R_A = (\sigma_{max} - \sigma_{min})/\sigma_{max}$ 的函数,由疲劳试验数据拟合标定; a_f 由式(8)~(9)计算, $A_f = A - A_n$, A_n 由式(7)计算.

式(7)~(9)、(15)和图 1 表明,其他条件(材质、几何形状、荷载参数等)相同的试件,其全截面

面积 A 和疲劳裂纹失稳扩展面积 A_n 相同,进而疲劳裂纹稳定扩展面积 A_f 也相同. 单向扩展模式的边缘裂纹($e=0$),其疲劳裂纹稳定扩展长度 a_f 和疲劳寿命 N_f 大于双向扩展模式的内部裂纹($0 < e < D/2$)和中心裂纹($e = D/2$). 初始裂纹位置参数 e 和初始裂纹长度 a_0 越大的试件,疲劳裂纹扩展长度 a_f 和疲劳寿命 N_f 越小. 初始裂纹位置和初始裂纹长度取决于材质缺陷位置和缺陷大小,同批次试件的材质缺陷大小相差不大,但缺陷位置是随机分布的. 随机分布的初始缺陷位置不同,导致其他参数相同的试件的疲劳寿命不同,较好解释了结构钢疲劳试验数据离散性大的试验结果^[13],不能简单地完全归因于试验误差.

式(15)建议的结构钢圆杆的疲劳破坏模型较好地解释了下述疲劳试验现象^[1]:1)构件的名义最大应力较小时,疲劳裂纹稳定扩展区面积占比大;反之,疲劳裂纹稳定扩展区面积占比小. 构件的名义最大应力小,试件发生净截面强度不足而拉断(裂纹失稳扩展)面积 A_n 占比小,疲劳裂纹稳定扩展区面积占比大.2)疲劳裂纹稳定扩展区断面光滑,且愈近裂源愈光滑. 疲劳裂纹扩展速率是循环加载次数的单调增函数,愈靠近裂源区,疲劳裂纹扩展愈缓慢,循环加载磨合次数愈多,断面愈光滑.

2 Q345 圆钢杆疲劳试验

2.1 材性试验

为确定式(1)建议的结构钢椭球面断裂模型参数(f_y , f_u 和 μ 等)和 Q345B 圆钢杆疲劳试验加载参数($\sigma_{\max}$ 和 $\sigma_{\min}$),疲劳试验前需进行材性试验.

按照《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》^[14]的规定,制作了与疲劳试验试件同批次的 Q345B 钢材性试件 3 根. 材性试验测得其泊松比 $\mu=0.272$,弹性模量 $E=2.09 \times 10^6$ MPa,工程应力强度值和真实应力强度值列于表 1,前者用于计算疲劳试验加载参数,因疲劳载荷是按试件原始截面计算的,后者用于计算疲劳裂纹失稳扩展面积 A_n ,因式(1)建议的结构钢椭球面断裂模型是基于裂尖真实应力场计算的.

计算得式(1)建议的 Q345B 钢椭球面断裂模型参数,即式(7)计算疲劳裂纹失稳扩展面积所用参数: $q = \frac{\sqrt{2}(1+\mu)}{3(1-2\mu)} \approx 1.31, \sqrt{3} \tau_y = \frac{\sqrt{1+9q^2}}{3q} f_y \approx 365.12$ MPa,参数 r 由 $\frac{f_u}{f_y} \approx \frac{r \sqrt{1+9q^2}}{\sqrt{r^2+9q^2}}$ 近似量化为 $r \approx 2.03$.

表 1 Q345B 钢材性试验结果

Tab. 1 Test results of Q345B steel's mechanical properties

MPa			
应力类型	下屈服强度 f_{yh}	上屈服强度 f_{yu}	极限强度 f_u
工程应力	349.76	407.49	525.77
真应力	353.84	408.27	658.98

2.2 疲劳试验试件设计

根据《金属材料疲劳试验轴向力控制方法》^[15]对疲劳试验试样要求,加工了图 3 和表 2 所示的 Q345B 圆钢杆疲劳试验试件,两端部 55 mm 范围内刻制螺纹,以便和内设丝扣的疲劳试验机套筒夹头固接,图 4 为部分试件照片. 参照《钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备》^[16]取样要求,圆钢杆疲劳试验试件由直径为 35 mm 的 Q345B 圆钢机械加工而成,经检查,试件外观无微裂纹等加工缺陷.

疲劳试验设备为 QBG-400 高频疲劳试验机(图 5),由主机系统、控制系统和数据输出系统组成. 疲劳试验的交变荷载波形为正弦等幅交变荷载,加载频率约为 107.7 Hz.

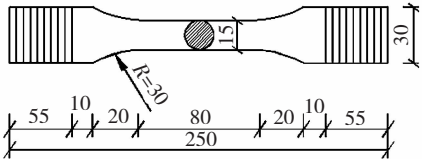


图 3 Q345B 圆钢杆的几何尺寸

Fig. 3 Geometric dimension of Q345B steel round bars



图 4 Q345B 圆钢杆照片

Fig. 4 Photo of Q345B steel round bars

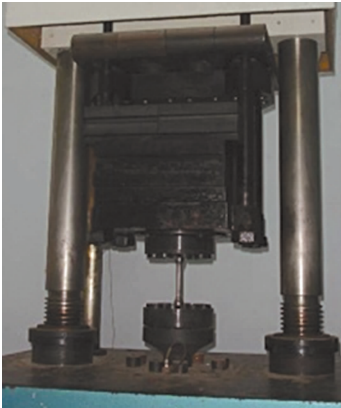


图 5 疲劳试验照片

Fig. 5 Photo of fatigue test

表 2 疲劳试验加载参数
Tab. 2 Loading parameters of fatigue test

组别	试件编号	A/mm^2	$\sigma_{\max}/\text{MPa}$	$\sigma_{\max}/f_y$	$\sigma_{\min}/\text{MPa}$	$\sigma_{\min}/f_y$	$\Delta\sigma/\text{MPa}$	$\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$	R_A
I	SP1	177.30	314.78	0.90	-94.43	-0.270	409.21	-0.3	1.3
I	SP2	177.54	297.30	0.85	-89.19	-0.255	386.49	-0.3	1.3
I	SP3	177.30	279.81	0.80	-83.94	-0.240	363.75	-0.3	1.3
I	SP4	178.37	262.32	0.75	-78.70	-0.225	341.02	-0.3	1.3
I	SP5	177.42	244.83	0.70	-73.45	-0.210	318.28	-0.3	1.3
II	SP6	177.66	297.30	0.85	-118.92	-0.340	416.22	-0.4	1.4
II	SP7	176.95	279.81	0.80	-111.92	-0.320	391.73	-0.4	1.4
II	SP8	177.30	262.32	0.75	-104.93	-0.300	367.25	-0.4	1.4
II	SP9	177.30	244.83	0.70	-97.93	-0.280	342.76	-0.4	1.4
II	SP10	177.42	227.34	0.65	-90.94	-0.260	318.28	-0.4	1.4
III	SP11	177.30	279.81	0.80	-139.90	-0.400	419.71	-0.5	1.5
III	SP12	175.66	262.32	0.75	-131.16	-0.375	393.48	-0.5	1.5
III	SP13	177.42	244.83	0.70	-122.42	-0.350	367.25	-0.5	1.5
III	SP14	176.42	227.34	0.65	-113.67	-0.325	341.01	-0.5	1.5
III	SP15	177.78	209.86	0.60	-104.93	-0.300	314.79	-0.5	1.5

2.3 疲劳试验结果

图 6 为 Q345B 圆钢杆的疲劳试验破坏照片,宏观疲劳断口位于过渡圆弧末端与中间平行段交界处,疲劳裂纹起始于交界处外表面.过渡圆弧末端虽相切于平行段,但交界处外形尺寸有变化,造成轻微应力集中,边缘应力幅值略大于心部,应力状态较中间平行段不利.

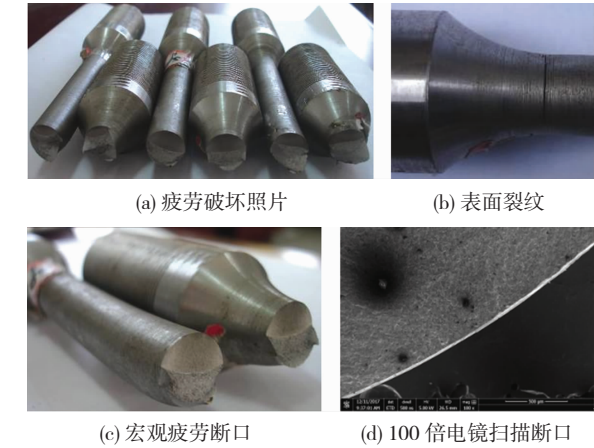


图 6 Q345B 圆钢杆的疲劳试验破坏照片

Fig. 6 Fatigue test photos of Q345B steel round bars

图 6(c) 所示的宏观疲劳断口清晰地分为裂纹稳定扩展区(垂直于轴向的光滑断面)和裂纹失稳扩展区(粗糙的纤维状拉断区),二者交界线为外凸于裂纹失稳扩展区的圆弧,证明了疲劳裂纹是以起裂点为中心向四周呈放射状扩展.在疲劳裂纹稳定扩展区,愈靠近裂源,裂纹纹理愈细密,断口愈光滑,说明愈靠近裂源,疲劳裂纹扩展愈缓慢,循环加载次数愈多,证明了前文关于疲劳裂纹扩展速率是循环加载次数单调递增幂函数的假定合理性.

图 6(d) 所示的疲劳断口电镜扫描照片显示,疲劳裂纹起源于靠近试件表面的夹杂物周边,该处材料和几何不连续,存在应力集中,说明初始疲劳裂纹

对应力集中非常敏感.

表 3 汇总的各试件疲劳寿命试验值 $N_{f,t}$ 显示, Q345B 圆钢杆的疲劳寿命虽有一定离散度,但仍呈现出明显的规律:当相对应力幅 R_A 相同时,疲劳寿命随名义最大应力 $\sigma_{\max}$ 的降低而增加,如试件 SP1 ~ SP5、SP6 ~ SP10、SP11 ~ SP15;当名义最大应力 $\sigma_{\max}$ 相同时,疲劳寿命随相对应力幅 R_A 的降低而增加,如试件 SP5、SP9、SP13.

表 3 中, $N_{f,s}$ 为按《钢结构设计标准》^[3] 建议的疲劳寿命计算式计算的各试件的疲劳寿命,相对试验值的误差 $\varepsilon_{s-t} = \frac{N_{f,s} - N_{f,t}}{N_{f,t}} \times 100\%$,按 1 类构件取值: $C = 1\ 940 \times 10^{12}$ 、 $\beta = 4$. 可见,《钢结构设计标准》^[3] 建议的疲劳寿命计算式,对于 $R_A = 1.3$ 和 $\sigma_{\max} = 0.7f_y$ 、 $R_A = 1.4$ 和 $\sigma_{\max} = 0.65f_y$ 、 $R_A = 1.5$ 和 $\sigma_{\max} = 0.65f_y$ 、 $R_A = 1.5$ 和 $\sigma_{\max} = 0.6f_y$ 的荷载工况,计算偏于不安全,误差 ε_{s-t} 分别为 7.3%、18.5%、6.6% 和 34.3%;对于其他荷载工况,计算过于保守,误差 $\varepsilon_{s-t} = -56.4\% \sim -4.9\%$.

本文建议的结构钢圆杆的疲劳破坏模型认为,名义最大应力 $\sigma_{\max}$ 决定了疲劳裂纹失稳扩展面积 A_n 和稳定扩展面积 A_t ,其和初始裂纹位置参数 e 、初始裂纹长度 a_0 决定了疲劳裂纹扩展长度 a_t ;疲劳裂纹扩展速率 v_a 取决于相对应力幅 R_A ;可由疲劳裂纹扩展长度 a_t 和扩展速率 v_a 计算的疲劳寿命 N_f 则是名义最大应力 $\sigma_{\max}$ 、相对应力幅 R_A 、初始裂纹位置参数 e 和初始裂纹长度 a_0 的函数.

《钢结构设计标准》^[3] 建议的结构钢疲劳寿命计算式,假定结构钢母材光滑试件的疲劳寿命仅是应力幅 $\Delta\sigma = \sigma_{\max} - 0.7\sigma_{\min}$ 的函数,和名义最大应力 $\sigma_{\max}$ 、相对应力幅 R_A 、初始裂纹位置参数 e 和初始裂纹长度 a_0 无关,过于简化.

表 3 疲劳试验结果和参数标定

Tab. 3 Fatigue tests results and parameters calibration

试件 编号	$N_{f,t}/$ 万次	$N_{f,s}/$ 万次	$\varepsilon_{s-t}/$ %	$A_n/$ mm^2	$A_f/$ mm^2	$a_f/$ mm	η	$\log \xi$	$\log \xi_m$	s	$\xi_{0.95}/$ 10^{-8}	$N_{f,c}/$ 万次	$\varepsilon_{c-t}/$ %
SP1	21.13	9.22	-56.4	84.0	93.5	8.3	1.625	-7.695	-7.696	0.005	1.977	20.44	-3.3
SP2	21.28	11.59	-45.6	79.3	98.1	8.7	1.625	-7.695	-7.696	0.005	1.977	21.03	-1.2
SP3	22.29	14.76	-33.8	74.4	102.4	9.1	1.625	-7.695	-7.696	0.005	1.977	21.62	-3.0
SP4	23.29	19.11	-17.9	69.9	107.4	9.6	1.625	-7.695	-7.696	0.005	1.977	22.35	-4.1
SP5	23.48	25.19	7.3	65.7	112.7	10.1	1.625	-7.695	-7.696	0.005	1.977	23.08	-1.7
SP6	19.83	9.25	-53.4	79.1	97.9	8.7	1.622	-7.585	-7.601	0.007	2.449	19.07	-3.8
SP7	19.97	11.79	-41.0	74.7	102.9	9.1	1.622	-7.585	-7.601	0.007	2.449	19.65	-1.6
SP8	20.95	15.26	-27.2	70.2	107.7	9.6	1.622	-7.585	-7.601	0.007	2.449	20.31	-3.0
SP9	21.15	20.11	-4.9	65.5	112.4	10.1	1.622	-7.585	-7.601	0.007	2.449	20.94	-1.0
SP10	22.83	27.05	18.5	60.7	116.9	10.9	1.622	-7.585	-7.601	0.007	2.449	21.97	-3.8
SP11	18.98	9.53	-49.8	74.6	102.7	9.1	1.620	-7.536	-7.567	0.010	2.672	17.99	-5.2
SP12	19.24	12.34	-35.6	69.3	106.4	9.5	1.620	-7.536	-7.567	0.010	2.672	18.49	-3.9
SP13	19.51	16.26	-16.7	65.3	112.1	10.2	1.620	-7.536	-7.567	0.010	2.672	19.24	-1.4
SP14	20.52	21.86	6.6	60.4	116.3	10.9	1.620	-7.536	-7.567	0.010	2.672	20.05	-2.3
SP15	22.41	30.11	34.3	56.1	121.7	11.9	1.620	-7.536	-7.567	0.010	2.672	21.19	-5.5

3 疲劳破坏模型参数标定

由式(7)计算各试件的疲劳裂纹失稳扩展面积 A_n ,则疲劳裂纹稳定扩展面积 $A_f=A-A_n$, A 为试件全截面面积(见表2).采用牛顿-拉斐逊迭代方法按式(8)解得疲劳裂纹稳定扩展长度 a_f ,其中,初始裂纹(起裂点)位置参数 $e=0$ (疲劳裂纹起源于试件表面).各试件的参数 A_n 、 A_f 和 a_f 的计算结果列于表3.

按前述假设,式(15)建议的结构钢圆杆的疲劳破坏模型中,参数 ξ 、 η 是相对应力幅 R_A 的函数,即相对应力幅 R_A 相同的试件,参数 ξ 、 η 相同,则参数 ξ 、 η 可由相对应力幅 R_A 相同的同组试件的疲劳试验结果拟合标定.

将式(15)建议的结构钢圆杆的疲劳破坏模型改写为双对数坐标,并取 $a_0=0$ (疲劳试验前检查,试件表面无微裂纹等缺陷),得

$$\log N_f = \frac{1}{\eta} \log a_f - \frac{1}{\eta} \log \xi. \tag{16}$$

对表3中各组试件的疲劳寿命试验值 $N_{f,t}$ 和疲劳裂纹稳定扩展长度 a_f 按式(16)的拟合结果见图7,标定的参数 ξ 、 η 列于表3.参数 η 随相对应力幅 R_A 变化不大, $\eta=1.620\sim1.625$,平均值 $\eta_m=1.622$.参数 ξ 敏感于相对应力幅 R_A ,随相对应力幅 R_A 的增加而增加.

取 $\eta=1.622$,将式(16)减去各试件1.645倍的标准差 s ,得式(17).对表3中各试件疲劳寿命试验值 $N_{f,t}$ 和疲劳裂纹稳定扩展长度 a_f 按式(17)重新拟合,得95%保证率的Q345B圆钢杆的疲劳破坏模型参数 $\xi_{0.95}$,列于表3.

$$\log N_f = \frac{1}{\eta} \log a_f + \frac{1}{\eta} \log \xi_{0.95} - 1.645 s. \tag{17}$$

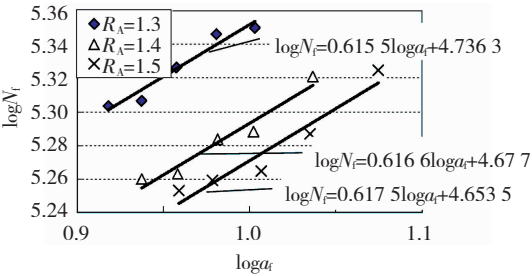


图 7 疲劳裂纹稳定扩展长度和疲劳寿命的拟合函数

Fig. 7 Fitting functions of stable propagation length of fatigue crack and fatigue life

参考刘艳萍等^[17]对结构钢疲劳裂纹扩展行为的研究结果,假设疲劳破坏模型参数 $\xi_{0.95}$ 是相对应力幅 R_A 的幂函数,即

$$\xi_{0.95} = u \cdot R_A^v + w. \tag{18}$$

当相对应力幅 $R_A=0$ 时,为单调静载情况,试件的疲劳寿命 $N_f=\infty$,由式(15)得 $\xi_{0.95}=0$,即

$$\xi_{0.95} \mid_{R_A=0} = 0$$

代入式(18)得 $w=0$.则式(18)简化为

$$\xi_{0.95} = u \cdot R_A^v. \tag{19}$$

将式(19)建议的疲劳破坏模型参数 $\xi_{0.95}$ 和相对应力幅 R_A 的幂函数改写为双对数坐标,得

$$\log \xi_{0.95} = v \cdot \log R_A + \log u. \tag{20}$$

对表3所列的各组试件的疲劳破坏模型参数 $\xi_{0.95}$ 和相对应力幅 R_A 按式(20)拟合(图8),得:

$$\log \xi_{0.95} = 2.116 \times \log R_A - 7.937, \tag{21}$$

$$\xi_{0.95} = 1.156 \times 10^{-8} \times R_A^{2.116}. \tag{22}$$

将式(22)标定的参数 $\xi_{0.95}$ 代入式(15)建议的结构钢圆杆的疲劳破坏模型,并取参数 $\eta=1.622$,Q345圆钢杆的疲劳破坏模型量化为

$$N_f = \left(\frac{a_f}{1.156 \times 10^{-8} \times R_A^{2.116}} \right)^{\frac{1}{1.622}}. \tag{23}$$

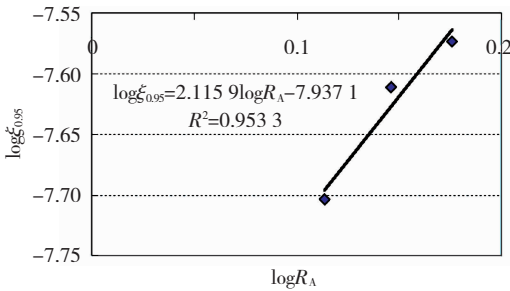


图 8 参数 $\xi_{0.95}$ 和相对应力幅 R_A 的拟合函数

Fig. 8 Fitting functions of fatigue failure model parameter $\xi_{0.95}$ and relative stress amplitude R_A

按式(23)计算的各试件的疲劳寿命 $N_{f,c}$ 和相对试验值的误差 ε_{c-1} 列于表 3 中,其中,各试件的相对应力幅参数 R_A 和疲劳裂纹稳定扩展长度 a_f 分别取自表 2 和表 3 中数据,且取 $a_0 = 0$. 可见,式(23)计算的各试件的疲劳寿命略偏于保守,误差为 $-5.5\% \sim -1.0\%$.

4 结 论

以结构钢的椭圆面断裂模型为判据,假设结构钢疲劳裂纹稳定扩展速率是循环加载次数的单调递增幂函数,从理论上推导了结构钢圆杆的疲劳破坏模型. 对 Q345 圆钢杆进行了疲劳试验,考察了相对应力幅和名义最大应力对其疲劳寿命的影响规律,标定了建议的结构钢圆杆的疲劳破坏模型参数. 所得结论如下:

1) 建议的结构钢圆杆的疲劳破坏模型表明,结构钢圆杆的疲劳寿命 N_f 是名义最大应力 $\sigma_{\max}$ 、相对应力幅 R_A 、初始裂纹位置参数 e 和初始裂纹长度 a_0 的复杂函数,不能简单化为仅是应力幅 $\Delta\sigma$ 的函数.

2) Q345 圆钢杆的疲劳寿命随名义最大应力 $\sigma_{\max}$ 和相对应力幅 R_A 的降低而增加.

3) 量化的结构钢圆杆的疲劳破坏模型,对预测 Q345B 圆钢杆的疲劳寿命略偏于保守,误差为 $-5.5\% \sim -1.0\%$.

参考文献

[1] 陈绍蕃,顾强. 钢结构(上册)钢结构基础[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2003: 306
CHEN Shaofan, GU Qiang. Steel structures (Volume I): Basic theory of steel structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003: 306

[2] 沈祖炎,陈扬曦,陈以一. 钢结构基本原理[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005: 29
SHEN Zuyan, CHEN Yangji, CHEN Yiyi. Basic principle of steel structures [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2005: 29

[3] 钢结构设计标准:GB 50017—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017
Standard for design of steel structures: GB 50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2017

[4] 钢结构设计规范:TJ 17—74[S]. 北京:中国建筑工业出版社,1975
Code for design of steel structures: TJ 17—74 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1975

[5] 王万祯. 结构钢开裂准则及断裂试验分析[J]. 工程力学, 2008, 26(5): 27
WANG Wanzhen. Crack criterion and fracture tests of structural steel[J]. Engineering Mechanics, 2008, 26(5): 27

[6] 王万祯,顾强,孙玉萍. 延性金属在应力三轴空间的裂纹形成准则[J]. 建筑结构, 2007, 37(6): 71
WANG Wanzhen, GU Qiang, SUN Yuping. Crack formation criterion of ductile metal in stress triaxiality space [J]. Building Structure, 2007, 37(6): 71. DOI: 10. 19701/j. jzjg. 2007. 06. 024

[7] PARIS P C, ERDOGAN F. A critical analysis of crack growth laws [J]. Journal of Basic Engineering, 1963, 85(3): 528

[8] FORMAN R G, KEARNEY V E, ENGLE R M. Numerical analysis of crack propagation in cyclic-loaded structure[J]. Journal of Basic Engineering, 1967, 89(3): 459

[9] ELBER W. The significance of fatigue crack closure [C]//Damage tolerate in aircraft structures, ASTM STP 486. Philadelphia: American Society for Testing and Material, 1971: 230

[10] 赵永翔,杨冰,张卫华. 一种疲劳长裂纹扩展率新模型[J]. 机械工程学报, 2006, 42(11): 120
ZHAO Yongxiang, YANG Bing, ZHANG Weihua. New model for long fatigue crack growth rate [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(11): 120

[11] 罗斌,林琳,钟诗胜. 一种结合 UKF 的疲劳结构剩余寿命预测方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(7): 38
LUO Bin, LIN Lin, ZHONG Shisheng. Remaining useful life prediction based on UKF for aircraft structure with fatigue crack [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(7): 38. DOI: 10. 11918/j. issn. 0367-6234. 201709020

[12] 钢结构工程施工质量验收规范:GB 50205—2001[S]. 北京:中国标准出版社,2002
Code for acceptance of construction quality of steel structures: GB 50205—2001 [S]. Beijing: China Standards Press, 2002

[13] 施刚,张兴建. 高强度钢材 Q460C 及其焊缝的疲劳性能试验研究[J]. 建筑结构, 2014, 44(17): 1
SHI Gang, ZHANG Jianxing. Fatigue performance test study on high strength steel Q460C and its welded connection [J]. Building Structure, 2014, 44(17): 1. DOI: 10. 19701/j. jzjg. 2014. 17. 001

[14] 金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法:GB/T 228. 1—2010 [S]. 北京:中国计划出版社,2010
Metallic materials—tensile testing—part 1: Method of test at room temperature: GB/T 228. 1—2010 [S]. Beijing: China Planning Press, 2010

[15] 金属材料疲劳试验轴向力控制方法:GB/T 3075—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2009
Metallic materials fatigue testing axial force controlled method: GB/T 3075—2008 [S]. Beijing: China Standards Press, 2009

[16] 钢及钢产品力学性能试验取样位置及试样制备:GB/T 2975—1998[S]. 北京:中国标准出版社,1998
Steel and steel products-location and preparation of test piece for mechanical testing: GB/T 2975—1998 [S]. Beijing: China Standards Press, 1998

[17] 刘艳萍,陈传尧,李建兵,等. 14MnNbq 焊接桥梁钢的疲劳裂纹扩展行为研究[J]. 工程力学, 2008, 25(4): 209
LIU Yanping, CHEN Chuanyao, LI Jianbing, et al. Fatigue crack growth behavior for the welded heat-affected zone of 14MnNbq bridge steel [J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(4): 209