DOI:10.11918/202504074

Q690D 高强钢的低周疲劳模型

王万祯

(宁波大学 土木工程与未来城市学院,浙江 宁波 315211)

摘 要:为计算高强钢在高应变幅作用下(如强震)的低周疲劳寿命,将高强钢低周疲劳裂纹萌生与稳定扩展面积的增速描述为循环加载次数的递增幂函数。通过积分低周疲劳裂纹萌生与稳定扩展面积增速方程,推导出统一计算疲劳裂纹萌生与稳定扩展寿命的高强钢的低周疲劳模型。将椭球面断裂模型作为高强钢低周疲劳裂纹失稳扩展判据和裂尖开裂判据,对Q690D高强钢圆杆在不同高应变幅下(±0.5%,±1.5%,±2.0%,±2.5%,±3.0%)的低周疲劳裂纹扩展进行了理论计算和数值模拟,得到Q690D高强钢圆杆在不同高应变幅下的低周疲劳裂纹萌生与稳定扩展面积。建立满足应力边界条件的高强钢低周寿命模型参数和疲劳断裂面上最大疲劳载荷作用下的名义最大正应力及疲劳载荷幅作用下的正应力幅的函数。根据Q690D高强钢圆杆的低周疲劳试验寿命和数值计算的低周疲劳裂纹萌生与稳定扩展面积,标定Q690D高强钢圆杆在不同高应变幅下的低周疲劳寿命计算式。计算结果表明,标定的Q690D高强钢圆杆的低周疲劳寿命计算式的计算误差为-26.1%~-2.7%。

关键词:低周疲劳模型;Q690D高强钢;应变幅;疲劳寿命;椭球面断裂模型

中图分类号:TU391 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2026)10-0108-07

A low-cycle fatigue model of Q690D high-strength steel

Wang Wanzhen

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

Abstract: In order to calculate the low-cycle fatigue life of high-strength steel under high strain amplitudes (such as strong earthquakes), this paper described the rate of the initiation and stable propagation area of a low-cycle fatigue crack in high-strength steel as an increasing power function of the number of cyclic loading cycles. By integrating the accelerated growth equations of the crack initiation area and the stable propagation area under low-cycle fatigue, a low-cycle fatigue model for high-strength steel was derived to uniformly calculate the fatigue crack initiation and stable propagation life. By using an ellipsoidal fracture model as a criterion for unstable propagation of the low-cycle fatigue crack and crack tip cracking in high-strength steel, the propagation of the low-cycle fatigue crack in a round rod made of Q690D high-strength steel under different high strain amplitudes (±0.5%, ±1.5%, ±2.0%, ±2.5%, and ±3.0%) was calculated theoretically and simulated numerically. As a consequence, the initiation and stable propagation areas of the low-cycle fatigue crack in the round rod made of Q690D high-strength steel under different high strain amplitudes were calculated. The paper established a function that satisfies the stress boundary conditions, linking the low-cycle life model parameters of high-strength steel to the nominal maximum normal stress under the maximum fatigue load and the normal stress amplitude under the fatigue load amplitude on the fatigue fracture surface. Based on the low-cycle fatigue test life of the round rod made of Q690D high-strength steel and the numerically calculated crack initiation and stable propagation area under low-cycle fatigue, the low-cycle fatigue life calculation formula for the round rod made of Q690D high-strength steel under different high strain amplitudes was calibrated. The calculation results show that the calculation error of the calibrated low-cycle fatigue life calculation formula for the round rod made of Q690D high-strength steel ranges from -26.1% to -2.7%.

Keywords: low-cycle fatigue model; Q690D high-strength steel; strain amplitude; fatigue life; ellipsoidal fracture model

收稿日期:2025-04-27;**录用日期**:2025-06-09;**网络首发日期**:2025-09-30
网络首发地址:https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20250930.1635.002
基金项目:宁波市公益性科技计划(2023S101);浙江省自然科学基金(LY24E080001)
作者简介:王万祯(1974—),男,博士,教授
通信作者:王万祯,wangwanzhen1975@sina.com

结构采用高强钢时，构件截面可设计得更小、更薄，节省钢材，减轻自重，有利于抗震。在美国 Northridge 强震和日本神户大地震中，钢结构发生严重的低周疲劳破坏，导致巨大的经济损失和人员伤亡。虽然现行标准和规范[1-6]给出了基于性能化的钢结构抗震设计方法，但建议的允许应力幅疲劳验算条款不适用高强钢在强震下的低周疲劳验算。

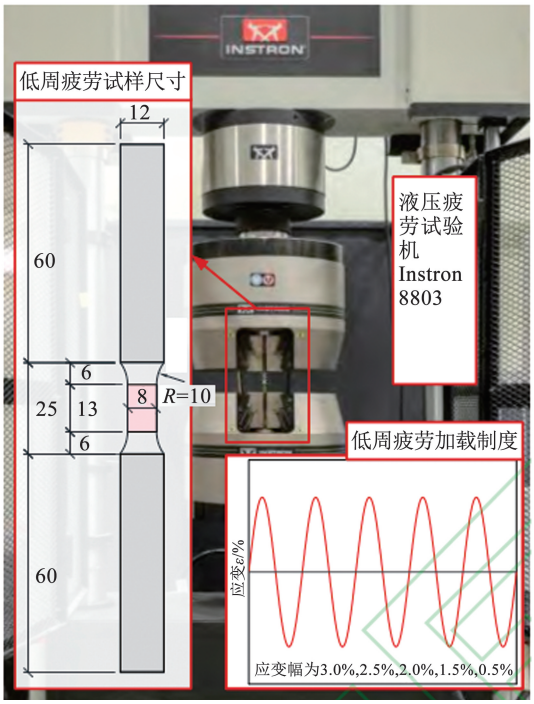
高强钢低周疲劳已引起学者们的广泛关注。Hua 等[7-8]通过试验研究了不同冷却方法下 Q690 高强钢火灾后的抗震能力，提出了预测 Q690 高强钢在不同高温和冷却方法下的超低周疲劳寿命预测方法。Huang 等[9-10]对 Q235 钢和 Q690 高强钢及 T 型焊接接头进行了超低周疲劳试验，提出的一种新的连续损伤力学模型 CLCDM，能较精确地预测 Q235 钢和 Q690 高强钢及 T 型焊接接头的超低周疲劳失效。Liu 等[11]开展了 Q690D 高强度钢在不同腐蚀程度下的高周和低周疲劳试验，建立了不同腐蚀程度下的 Coffin-Manson 关系和 *S-N* 曲线，结果表明，随着腐蚀程度的增加，高周疲劳范围和低周疲劳范围内的疲劳性能都明显恶化。薛暄译等[12]对高温后 Q690 高强钢进行了超低周疲劳试验，发现高温后 Q690 高强钢仍具有良好的耗能能力，其循环应力－应变曲线呈现出饱满的梭形，经历 600 ℃后自然冷却的 Q690 高强钢的疲劳寿命较常温提高了 23.4%。宗亮等[13]开展了 Q690D 高强钢低周疲劳试验，采用标定的 Manson-Coffin 模型预测了低周疲劳寿命。Bartošák 等[14]进行的不同应变幅下 AM316L 不锈钢的轴向和扭转低周疲劳试验显示，循环软化和穿晶开裂是该不锈钢的破坏模式，提出将基于物理信息的神经网络与基于拉伸破坏模式的临界平面方法相结合，较好地预测了 AM316L 不锈钢的低周疲劳寿命。Bhardwaj 和 Shukla[15]利用机器学习和人工神经网络（ANN）使用编译的数据集预测奥氏体不锈钢（AusSS）的低周疲劳寿命，结果表明，ANN 的预测性能优于经典的 Basquin-Coffin-Manson 模型。Baruah 和 Singh[16]基于梯度增强损伤和循环屈服提出的应力－应变滞回循环软化模型较好地描述了低周疲劳裂纹的扩展行为。Mehani 和 Roy[17]采用非线性各向同性和运动硬化组合模型模拟了 304L 不锈钢的低周疲劳行为，捕捉了 304L 不锈钢在整个疲劳寿命期间的循环峰值应力变化，预测了其低周疲劳寿命。Yoo 等[18]采用美日规范和循环孔隙增长收缩模型评估了低合金和不锈钢缺口试样的低周疲劳性能，发现规范给出的弹塑性分析方法是保守的。Park[19]提出了一种预测 SS275 结构钢四点弯曲低周疲劳断裂起始的方法，采用 Hosford-Coulomb（HC）模型的损伤指标框架来表征损伤累积和断裂行为，结果表明，提出的 HC 模型可精确地预测复杂载荷情况下极低疲劳寿命。Shoda 等[20]通过域积分重新定义 *J* 积分幅 ΔJ，用于不锈钢 SUS316 制成的紧凑拉伸试样的超低周疲劳问题分析，研究表明，重新定义的 *J* 积分幅 ΔJ 可以表征超低周疲劳问题中的延性裂纹扩展。González-Zapatero 等[21]采用半衰期循环弹性模量测定和塑性应变幅度评估了双相（DP500/800）钢板（1.6 mm 厚）的低周疲劳性能，发现塑性应变幅度更适合评估双相钢板的低周疲劳行为。Chinara 等[22]进行的铁素体－贝氏体 780 钢的低周疲劳试验发现，该钢材在应变幅度 <0.25% 时表现出循环软化行为，应变幅度 ≥0.35% 工况下发生循环硬化。Collini 和 Pirondi[23]考察了应力三轴性对球墨铸铁低周疲劳性能的影响，结果表明，应力三轴性缩短了疲劳寿命，缺口效应对铸铁疲劳寿命的影响可用微观结构和应力三轴性的综合效应来解释。Tsutsumi 等[24]通过低周疲劳试验和数值模拟考察了焊缝几何形状和不均匀力学性能对低周疲劳性能的影响，发现材料不均匀对焊接接头的低周疲劳有明显影响。

目前，对高强钢的低周疲劳寿命预测还没有形成共识。本研究将低周疲劳裂纹萌生与稳定扩展面积的增速描述为循环加载次数的递增幂函数，积分推导出低周疲劳模型。对文献[13]开展的 Q690D 高强钢低周疲劳试验进行了基于椭球面断裂模型[25]的疲劳裂纹萌生与稳定扩展面积理论计算，构建了满足应力边界条件的低周疲劳模型参数和疲劳断裂面上名义最大正应力及正应力幅的函数，标定了其低周疲劳寿命计算式。通过与 Q690D 高强钢的低周疲劳试验寿命对比，评价了标定的低周疲劳寿命计算式的精度。

1　Q690D 高强钢的低周疲劳寿命

文献[13]对图 1 所示的 Q690D 高强钢圆杆进行了低周疲劳试验，循环应力波形为正弦波，应力比 $\rho = -1$。疲劳试验结果显示，低周疲劳裂纹萌生于 Q690D 高强钢圆杆中间平行段表面，沿横截面扩展，最终疲劳断裂于中间平行段横截面。

表 1 为文献[13]进行的 Q690D 高强钢圆杆低周疲劳试验结果，其中，$N_{f,t}$ 和 $N_{f,s}$ 分别为试验疲劳寿命和按文献[1]建议的允许应力幅高周疲劳验算式（1）计算得到的疲劳寿命（Z1：$C_z = 1\ 920 \times 10^{12}$，$\beta_z = 4$）；$e_{s-t}$ 为式（1）的计算误差。



单位:mm

图 1 Q690D 高强钢圆杆低周疲劳试验[13]

Fig. 1 Low-cycle fatigue tests on round rod made of Q690D high-strength steel [13]

$$\Delta\sigma \leqslant [\Delta\sigma] = (C_z/N_f)^{1/\beta_z} \tag{1}$$

式中:$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$,$\sigma_{max}$ 和 σ_{min} 分别为名义最大应力和名义最小应力,MPa;N_f 为疲劳寿命;C_z 和 β_z 为试件形状参数,均为无量纲数。

表 1 显示,Q690D 高强钢圆杆的低周疲劳寿命随 σ_{max} 和 $\Delta\sigma$ 的减小快速增加。文献[1]建议的疲劳寿命验算式(1)对 Q690D 高强钢圆杆低周疲劳寿命的计算误差为 -71.75% ~305.6%,计算结果对大部分工况非常不安全。

2 低周疲劳模型

疲劳裂纹随循环加载次数的增加加速扩展是众多疲劳试验得出的共识,随着循环加载次数增加,疲劳裂纹持续扩展,承载面积减小,真实应力增加,疲劳裂纹扩展面积加速累积,直至剩余面积不足以承载最大疲劳载荷而瞬断。文献[25]根据疲劳裂纹随循环加载次数加速扩展的试验事实,假设疲劳裂纹扩展长度是循环加载次数的递增幂函数,推导出以疲劳稳定裂纹扩展长度为参数的疲劳寿命计算模型。需要说明的是,疲劳破坏的物理机制是疲劳损伤累积,剩余刚度或剩余强度常用作疲劳损伤累积的度量指标,剩余面积(疲劳断裂总面积减去疲劳裂纹萌生与稳定扩展面积)是计算剩余刚度或剩余强度的基本参数。

表 1 Q690D 高强钢圆杆的低周疲劳试验结果[13]

Tab. 1 Low-cycle fatigue test results of round rods made of Q690D high-strength steel[13]

试件编号	循环应变 $\varepsilon/2$/%	σ_{max}/MPa	σ_{min}/MPa	$\Delta\sigma$/MPa	$N_{f,t}$	$N_{f,s}$	e_{s-t}/%
S1	3.0	737.51	-737.51	1 475.02	100	406	305.6
S2	2.5	728.95	-728.95	1 457.90	150	425	183.3
S3	2.0	701.98	-701.98	1 403.96	238	494	107.6
S4	1.5	681.78	-681.78	1 363.56	448	555	24.0
S5	0.5	557.44	-557.44	1 114.88	4 387	1 243	-71.7

为此,参考文献[25]假设疲劳裂纹扩展长度是循环加载次数的递增幂函数,假设疲劳裂纹萌生与稳定扩展面积的增速为循环加载次数的递增幂函数,即

$$v_A = b \times N^c \tag{2}$$

式中:加载次数 N 和试件形状参数 c 均为无量纲数;v_A 为疲劳裂纹萌生与稳定扩展面积增加速率,mm^2/次。$N=1$ 时,由式(2)得 $v_A = b$,则参数 b 为循环加载次数 $N=1$ 时的疲劳裂纹萌生面积,mm^2。

对式(2)积分得

$$A_{ip} = N_f^{c+1} \times b/(c+1) \tag{3}$$

式中 N_f 为疲劳寿命。

定义低周疲劳裂纹萌生与稳定扩展特征面积 $\zeta = b/(c+1)$ 及试件形状参数 $\eta = c+1$,得统一计算疲劳裂纹萌生与稳定扩展寿命的低周疲劳模型:

$$N_f = (A_{ip}/\zeta)^{1/\eta} \tag{4}$$

式(4)等式两端均为无量纲数。

3 Q690D 高强钢圆杆的低周疲劳寿命计算

3.1 理论计算低周疲劳裂纹萌生与稳定扩展面积

Q690D 高强钢圆杆低周疲劳裂纹萌生与稳定扩展面积的计算需要高强钢断裂判据,文献[26]假设金属材料在三向等拉应力下的断裂强度和屈服强度近似相等,提出的椭球面断裂模型为

$$(\sigma_{seq}/r)^2 + (\sigma_m/q)^2 = 3\tau_y^2 \tag{5}$$

式中:$q = \dfrac{\sqrt{2}(1+\mu)}{3(1-2\mu)}$,$\sqrt{3}\,\tau_y = \dfrac{\sqrt{1+9q^2}}{3q} f_y$,$r = \tau_f/\tau_y$;$\sigma_{seq}$ 和 σ_m 分别为等效应力和静水应力,τ_y、τ_f 和 μ 分别为剪切屈服强度、剪切断裂强度和泊松比。

众所周知，任何复杂应力状态都可由等效应力 σ_{seq} 和静水应力 σ_m 等效描述，因此，式(5)建议的椭球面断裂模型完整地考虑了各应力分量对结构钢断裂的影响，并用于 Q345 圆钢杆、460C 钢缺口板、460C 钢不等宽对接焊缝连接、Q460C 对接焊十字接头、Q460D 钢角焊十字接头和 Q355B 钢缺口板的疲劳裂纹失稳扩展判据和裂尖开裂判据[25,27－31]。

Q690D 高强钢圆杆疲劳裂纹失稳扩展面上沿杆长方向的应力 $\sigma_1 = P_{max}/A_n = \sigma_{max} \times A/A_n$，其中，$P_{max}$、$A$ 和 A_n 分别为最大疲劳载荷、低周疲劳断裂面积和低周疲劳裂纹失稳扩展面积。

假设疲劳裂纹失稳扩展面上径向和环向均处于固结约束，则低周疲劳裂纹失稳扩展面上沿径向和环向的应力为 $\sigma_2 \approx \sigma_3 \approx \mu\sigma_1$。

疲劳裂纹失稳扩展面上的静水应力和 Mises 等效应力分别为

$$\sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3 = (1 + 2\mu)\sigma_{max} \times A/(3A_n) \tag{6}$$

$$\sigma_{seq} = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} = (1 - \mu)\sigma_{max} \times A/A_n \tag{7}$$

将式(6)、(7)代入式(5)，得低周疲劳裂纹失稳扩展面积和萌生与稳定扩展面积分别为

$$A_n = \frac{\sqrt{9q^2(1-\mu)^2 + (1+2\mu)^2 r^2}\,\sigma_{max} A}{3\sqrt{3}\,q r \tau_y} \tag{8}$$

$$A_{ip,t} = A - A_n \tag{9}$$

需要说明的是，式(8)、(9)计算的 Q690D 高强钢圆杆的低周疲劳裂纹失稳扩展面积和萌生与稳定扩展面积只是理论估算值，是作为数值模拟疲劳裂纹萌生与稳定扩展面积初值，精确的低周疲劳裂纹萌生与稳定扩展面积需要采用扩展有限元计算，详见 3.2 节。文献[25,27－31]按和式(8)、(9)类似的方法分别计算了 Q345 圆钢杆、460C 钢缺口板、460C 钢不等宽对接焊缝连接、Q460C 对接焊十字接头、Q460D 钢角焊十字接头和 Q355B 钢缺口板的疲劳裂纹失稳扩展面积和萌生与稳定扩展面积。

采用式(6)～(9)计算 Q690D 高强钢圆杆的疲劳裂纹萌生与稳定扩展面积时，材性参数取自图 2 所示文献[13]进行的 Q690D 高强钢材性试验结果，其中，泊松比 $\mu \approx 0.29$。则 Q690D 高强钢的椭球面断裂模型参数计算为 $q \approx 1.45$，$\tau_y \approx 466.28$ MPa，$r \approx 1.07$。

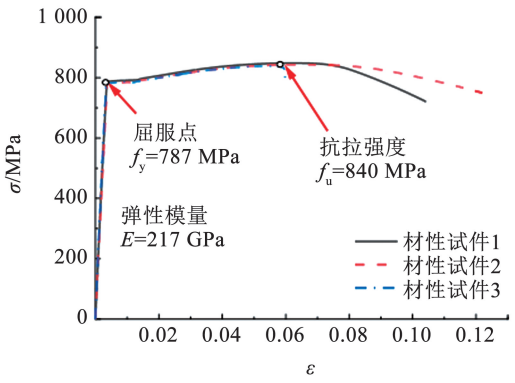
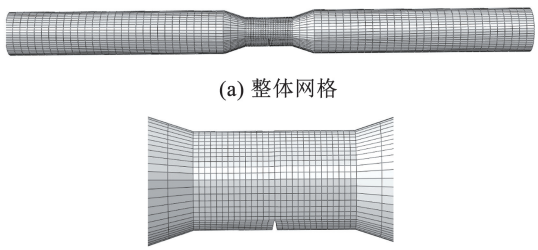


图 2　Q690D 钢材性试验结果[13]

Fig. 2　Material test results of Q690D steel [13]

3.2　数值计算低周疲劳裂纹萌生与稳定扩展面积

图 3 为采用 Abaqus 软件中的八节点线性缩减积分三维实体单元 C3D8R 建立的试件 S1 的有限元模型，共划分 13 094 个单元和 25 287 个节点，经网格敏感性分析，确定裂纹区加密单元尺寸为0.1～0.2 mm。将理论计算的疲劳裂纹萌生与稳定扩展面积作为初值植入数值模型中，即在 Q690D 钢圆杆中间平行段一侧周线上植入横截面积为 $A_{ip,t}$ 的圆弧形裂纹。采用 Abaqus 软件中的随动强化本构模型模拟 Q690D 高强钢圆杆在循环疲劳载荷下的反应，材性参数取自文献[13]的 Q690D 高强钢材性试验数据。以式(5)建议的椭球面断裂模型作为疲劳裂纹裂尖开裂判据，采用扩展有限元模拟疲劳裂纹开裂。加载和边界约束同文献[13]进行的 Q690D 高强钢圆杆低周疲劳试验，即一端固定、另一端施加疲劳载荷。



(a) 整体网格

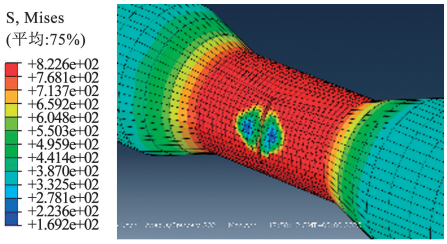
(b) 疲劳裂纹区网格

图 3　试件 S1 的有限元模型

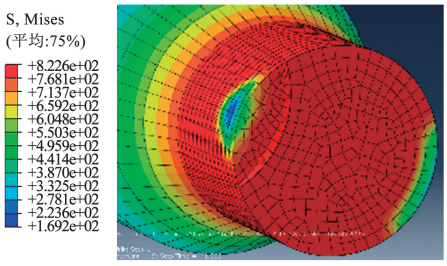
Fig. 3　Finite element model of specimen S1

文献[13]进行的 Q690D 钢低周疲劳试验结果中没有展示疲劳载荷－位移滞回曲线，无法进行数值模拟结果和疲劳试验结果的对比验证分析。本研究的数值模拟方法参考文献[27－31]对 460C 钢缺口板、460C 钢不等宽对接焊缝连接、Q460C 对接焊十字接头、Q460D 钢角焊十字接头和 Q355B 钢缺口板的疲劳裂纹扩展数值模拟，该数值模拟方法的精度得到了疲劳试验的验证。

数值计算的试件 S1 疲劳裂纹失稳扩展面上的等效应力云图(图 4)显示,裂尖形成高度应力集中,裂尖的等效应力远大于对侧外周线。



(a) 整体等效应力场

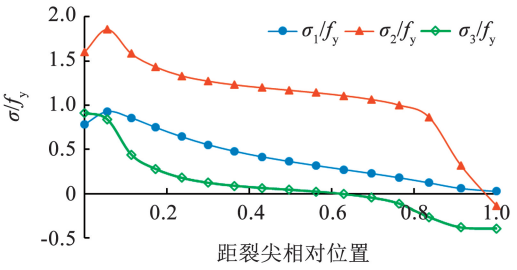


(b) 疲劳裂纹失稳扩展面上的等效应力场

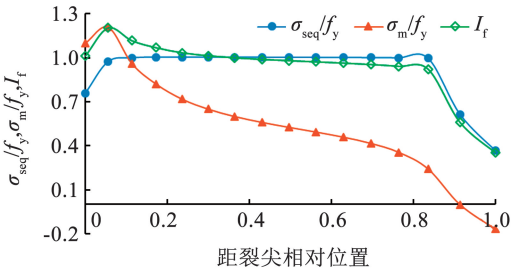
图 4 数值计算的试件 S1 的等效应力场

Fig. 4 Numerically calculated equivalent stress field of specimen S1

图 5 为数值计算的试件 S1 疲劳裂纹失稳扩展面上中间裂尖到对侧圆周线路径上的应力场,横坐标 0、1 分别表示裂尖和对侧圆周线,由式(5)计算断裂指数 $I_f = \sqrt{(\sigma_{seq}/r)^2 + (\sigma_m/q)^2}/(\sqrt{3}\tau_y)$。可以看出,从对侧圆周线到裂尖,三向主应力 σ_1、σ_2、σ_3 和静水应力 σ_m 与断裂指数 I_f 均急剧增加,裂尖区在径向和环向的约束应力均较高,裂尖形成高度应力集中。断裂指数 I_f 分布显示,靠近裂尖 80% 的区域已接近开裂,考虑到裂尖开裂的应力释放效应,裂纹失稳扩展面即将瞬断。



(a) σ_1/f_y, σ_2/f_y, σ_3/f_y的分布



(b) σ_{seq}/f_y,σ_m/f_y,I_f的分布

图 5 数值计算的试件 S1 疲劳裂纹失稳扩展面上的应力场

Fig. 5 Numerically calculated stress fields on unstable propagation area of fatigue cracks in specimen S1

最终数值计算的 Q690D 高强钢圆杆各试件的低周疲劳裂纹萌生与稳定扩展面积 A_{ip} 列于表 2。

表 2 Q690D 高强钢圆杆的低周疲劳模型参数标定

Tab. 2 Calibrated parameters of low-cycle fatigue model for round rods made of Q690D high-strength steel

试件编号	$N_{f,t}$	A_{ip}/mm^2	k/mm^2	η	s	$k_{0.977}$/mm^2	$N_{f,c}$	e_{s-t}/%
S1	100	6.13	0.020	0.69	0.038	0.022	85	−15.0
S2	150	6.65	0.020	0.69	0.038	0.022	111	−26.1
S3	238	8.26	0.020	0.69	0.038	0.022	232	−2.7
S4	448	9.47	0.020	0.69	0.038	0.022	374	−16.5
S5	4 387	16.91	0.020	0.69	0.038	0.022	3 577	−18.5

3.3 Q690D 高强钢圆杆的低周疲劳寿命计算

Q690D 高强钢圆杆低周疲劳破坏的本质是循环加载下的断裂问题,为更直观地表示疲劳应力 σ_{max} 和 $\Delta\sigma$ 相对断裂强度的百分比,将 σ_{max} 和 $\Delta\sigma$ 修改为 σ_{max}/f_f 和 $\Delta\sigma/f_f$,其中,f_f 为断裂强度。Q690D 高强钢单向拉伸达到极限强度 f_u 后发生颈缩,断裂强度 f_f 不易测得。考虑到 Q690D 高强钢达到极限强度之后的力学性能工程意义不大,略偏保守地取 $f_f \approx f_u$。

如前所述,Q690D 高强钢圆杆的低周疲劳寿命随循环应变幅(名义最大应力 σ_{max} 和应力幅 $\Delta\sigma$)的增大而降低。参照文献[1],名义最大应力 σ_{max} 和应力幅 $\Delta\sigma$ 对非焊接母材的高周疲劳寿命均有影响,推测名义最大应力 σ_{max} 和应力幅 $\Delta\sigma$ 对 Q690D 高强钢圆杆的低周疲劳寿命均有影响。式(4)建议的低周疲劳模型中,η 为试件形状参数,则 ζ 应是 σ_{max}、$\Delta\sigma$ 的函数,即 $\zeta = f(\sigma_{max}, \Delta\sigma)$,该函数应满足下述应力边界:

1)当 $\sigma_{max} = 0$ 时,$N_f = \infty$。由式(4),$N_f = \infty$ 时,$\zeta = 0$。

2）当 $\sigma_{max}=f_u$ 时，$N_f=0$。由式（4），$N_f=0$ 时，$\zeta=\infty$。

3）当 $\Delta\sigma=0$ 时，$N_f=\infty$。由式（4），$N_f=\infty$ 时，$\zeta=0$。

构建满足上述应力边界条件的 ζ 和 σ_{max}/f_u、$\Delta\sigma/f_u$ 的函数：

$$\zeta=k\times\frac{\sigma_{max}}{f_u}\times\frac{\Delta\sigma}{f_u-\sigma_{max}} \tag{10}$$

式中系数 k 由疲劳试验数据标定。

将式（10）代入式（4），得 Q690D 高强钢圆杆的低周疲劳寿命计算式：

$$N_f=\left[\frac{A_{ip}f_u(f_u-\sigma_{max})}{k\sigma_{max}\Delta\sigma}\right]^{\frac{1}{\eta}} \tag{11}$$

或

$$\eta\lg N_f=\lg\frac{A_{ip}f_u(f_u-\sigma_{max})}{\sigma_{max}\Delta\sigma}-\lg k \tag{12}$$

对表 2 中各试件的试验疲劳寿命 $N_{f,t}$、疲劳裂纹萌生与稳定扩展面积 A_{ip}、σ_{max}/f_u 和 $\Delta\sigma/f_u$ 按式（13）拟合，结果见图 6 中红线。

Q690D 高强钢圆杆的低周疲劳寿命计算式为

$$\lg N_f=1.445\lg\frac{A_{ip}f_u(f_u-\sigma_{max})}{\sigma_{max}\Delta\sigma}+2.459\ 1 \tag{13}$$

由式（13）标定 Q690D 高强钢圆杆的低周疲劳参数 k、η，连同标准差 s 列于表 2。

式（13）减去计算低周疲劳寿命的 2 倍标准差 s，得安全概率为 97.7% 的 Q690D 高强钢圆杆的低周疲劳寿命计算式（图 6 中绿虚线）：

$$\lg N_f=1.445\lg\frac{A_{ip}f_u(f_u-\sigma_{max})}{\sigma_{max}\Delta\sigma}+2.383 \tag{14}$$

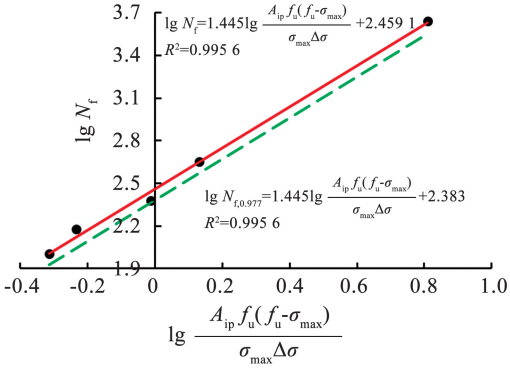


图 6　Q690D 高强钢圆杆的 $N_{f,t}$ 和 A_{ip}、σ_{max}、$\Delta\sigma$ 的拟合函数

Fig. 6　Fitting functions of $N_{f,t}$ and A_{ip}, σ_{max}, and $\Delta\sigma$ for round rod made of Q690D high-strength steel

由式（14）标定的低周疲劳参数 $k_{0.977}$、计算的 Q690D 高强钢圆杆的低周疲劳寿命 $N_{f,c}$ 及计算误差 e_{c-t} 列于表 2。式（14）对 Q690D 高强钢圆杆低周疲劳寿命的计算误差为 -26.1% ~ -2.7%，计算结果安全，计算精度高于现行文献[1]建议的允许应力幅高周疲劳验算式（1）。

4　结　论

将低周疲劳裂纹萌生与稳定扩展面积的增速描述为循环加载次数的递增幂函数，积分推导了统一计算疲劳裂纹萌生与稳定扩展寿命的低周疲劳模型。对 Q690D 高强钢圆杆的低周疲劳裂纹萌生与稳定扩展进行了基于椭球面断裂模型的理论计算和数值模拟，建立了满足应力边界条件的低周疲劳模型参数和疲劳断裂面上名义最大正应力及正应力幅的函数，标定了 Q690D 高强钢圆杆的低周疲劳寿命计算式。对比评价了标定的低周疲劳寿命计算式的精度。得到以下结论：

1）推导的低周疲劳模型以疲劳裂纹萌生与稳定扩展面积作为低周疲劳寿命计算参数，考虑了名义最大应力和应力幅的影响，摒弃了裂尖小范围屈服、大范围屈服和全截面屈服的限定性假设，具有较好的普适性，有望推广应用于裂尖小范围屈服的低周疲劳、裂尖大范围屈服的低周疲劳和全截面屈服的超低周疲劳的疲劳寿命计算。

2）推导的低周疲劳寿命计算式对 Q690D 高强钢圆杆低周疲劳寿命的计算误差为 -26.1% ~ -2.7%，计算结果偏于安全。

3）推导的低周疲劳模型应用于高强钢构件抗震设计思路：由低周疲劳模型计算高强钢构件在某地震等级下的低周疲劳寿命（循环次数）；根据高强钢构件在该地震等级下的载荷 - 位移滞回曲线和循环次数计算耗散的地震能，按能量法进行高强钢构件抗震设计。

参考文献

[1] GB 50017—2017 钢结构设计标准[S]
GB 50017—2017 Standard for design of steel structures[S]
[2] TB 10091—2017 铁路桥梁钢结构设计规范[S]
TB 10091—2017 Code for design on steel structure of railway bridge [S]
[3] JTG D64—2015 公路钢结构桥梁设计规范[S]
JTG D64—2015 Specification for design of highway steel bridge structures[S]
[4] ANSI/AISC360-22 Specification for structural steel buildings[S]
[5] EN 1993-1-9：2025 Eurocode 3：design of steel structures-Part 1-9：fatigue[S]
[6] IIW-1823-07 Recommendations for fatigue design of welded joints and components[S]
[7] Hua Jianmin, Wang Fei, Xue Xuanyi, et al. Post-fire ultra-low cycle fatigue properties of high-strength steel via different cooling methods[J]. Thin-Walled Structures, 2023, 183: 110406
[8] Hua Jianmin, Wang Fei, Xue Xuanyi, et al. Ultra-low cycle fatigue performance of Q690 high-strength steel after exposure to elevated

temperatures[J]. Journal of Building Engineering, 2022, 57: 104832

[9] Huang Xuewei, Yuan Yilin, Zhao Jun, et al. Comparative study on ultra-low-cycle-fatigue behavior of Q235 normal-steel and Q690 high-strength steel[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2022, 194: 107308

[10] Huang Xuewei, Li, Ruiqun, Zhang Xiangcheng, et al. Ultra low cycle fatigue behavior of Q690 high-strength steel welded T-stub joints: experiments and fracture prediction analysis[J]. Thin-Walled Structures, 2023, 191: 111054

[11] Liu Heng, Zong Liang, Xu Kelong, et al. Experimental investigation on fatigue performance of corroded Q690D high-strength steel[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2025, 227: 109405

[12] 薛暄译, 王斐, 石宇, 等. 火灾后 Q690 高强钢超低周疲劳性能研究[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(6): 119
Xue Xuanyi, Wang Fei, Shi Yu, et al. Study on post-fire ultra-low cycle fatigue properties of Q690 high strength steel post fire[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(6): 119. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2022.0631

[13] 宗亮, 刘衡, 崔瑶. Q690D 高强钢低周疲劳性能及损伤演化规律研究[J]. 工程力学, 2025
Zong Liang, Liu Heng, Cui Yao. Investigation on low cycle fatigue behavior and damage evolution of Q690D high strength steel[J]. Engineering Mechanics, 2025

[14] Bartošák M, Halamka J, Beránek L, et al. Using physics-informed neural networks to predict the lifetime of laser powder bed fusion processed 316L stainless steel under multiaxial low-cycle fatigue loading[J]. International Journal of Fatigue, 2025, 190: 108608

[15] Bhardwaj H K, Shukla M. Low-cycle fatigue life prediction of austenitic stainless steel alloys: a data-driven approach with identification of key features[J]. International Journal of Fatigue, 2024, 187: 108454

[16] Baruah S, Singh I V. Low-cycle fatigue simulation of ductile materials using elasto-plastic gradient damage approach[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2024, 276: 109370

[17] Mehani N, Roy S C. Modified isotropic and kinematic hardening equations for 304L SS under low cycle fatigue[J]. Computational Materials Science, 2024, 240: 112999

[18] Yoo K C, Song H S, Lee J M, et al. Application of various low cycle fatigue evaluation rules to notched compact tension specimen test data[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2024, 209: 105151

[19] Park S J. Application of ductile fracture model for the prediction of low cycle fatigue in structural steel[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2023, 289: 109469

[20] Shoda K, Arai K, Nakamura S, et al. Application of redefined J-integral range ΔJ for ultra-low cycle fatigue problems with large magnitude of elastic-plastic deformation[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2023, 126: 103938

[21] Gonzalez-Zapatero W F, Rosado-Carrasco J G, Amariz R R. Low cycle fatigue properties assessment and damage influence on DP 500/800 steel sheet[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 23: 2231

[22] Chinara M, Jayabalan B, Bhattacharya B. Low cycle fatigue behaviour study of a nano precipitate strengthened ferrite-bainite 780 steel[J]. International Journal of Fatigue, 2023, 167: 107294

[23] Collini L, Pirondi A. Microstructural, multilevel simulation of notch effect in ferritic ductile cast iron under low cycle fatigue[J]. International Journal of Fatigue, 2022, 162: 106993

[24] Tsutsumi S, Fincato R, Luo P J. Effects of weld geometry and HAZ property on low-cycle fatigue behavior of welded joint[J]. International Journal of Fatigue, 2022, 156: 106683

[25] 王万祯. Q345 圆钢杆的疲劳破坏模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(12): 58
Wang Wanzhen. Fatigue failure model of Q345 steel round bars[J]. Journal of Harbin Institute Technology, 2019, 51(12): 58. DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201903036

[26] 王万祯. 结构钢开裂准则及断裂试验分析[J]. 工程力学, 2008, 25(5): 27
Wang Wanzhen. Cracking criteria and fracture test analysis of structural steel[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(5): 27

[27] 王万祯. 460C 钢缺口板的疲劳裂纹萌生寿命计算模型和疲劳寿命计算[J]. 材料导报, 2024, 38(4): 23010056
Wang Wanzhen. Calculation model of fatigue crack initiation life and total fatigue life calculation of Q460C steel notched plates[J]. Materials Reports, 2024, 38(4): 23010056. DOI: 10.11896/cldb.23010056

[28] Wang Wanzhen, Shi Weizhuo, Guo Hongchao, et al. Unified fatigue life calculation of Q460C steel butt welded joints with unequal widths considering fatigue crack initiation and stable propagation[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2025, 37(2): 04024521. DOI: 10.1061/JMCEE7.MTENG-18315

[29] Wang Wang, Jie Zhiyu, Yu Guoji, et al. Unified fatigue life calculation of Q460C steel fillet weld cruciform joints considering fatigue crack initiation and propagation[J]. Advanced Steel Construction, 2024, 20(3): 222. DOI: 10.18057/IJASC.2024.20.3.2

[30] Wang Wanzhen, Shi Weizhuo, Li Bo, et al. High-cycle fatigue life assessment of welded cruciform joints of Q460D steel[J]. Structures, 2023, 57(9): 105163. DOI: 10.1016/j.istruc.2023.105163

[31] Wang Feng, Yue Junwen, Wang Wanzhen, et al. Unified fatigue life calculation of Q355B-16mm steel notched plates considering crack initiation[J]. Construction and Building Materials, 2024, 437: 136972. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.136972

(编辑 刘 彤)