

DOI:10.11918/202502054

结构钢斜对接焊缝连接的统一多轴疲劳寿命预测

王万祯

(宁波大学 土木工程系, 浙江 宁波 315211)

摘要: 为计算处于复杂应力状态下结构钢焊接连接的多轴疲劳寿命, 对斜对接焊缝连接的多轴疲劳裂纹失稳扩展应力场进行了基于椭球面断裂模型的理论计算, 得到多轴疲劳裂纹萌生与稳定扩展长度和由椭球面断裂模型定义的疲劳破坏面上的最大断裂因子(最大疲劳载荷作用下)及断裂因子幅(疲劳载荷幅作用下)。建立了满足应力边界条件的统一计算疲劳裂纹萌生和稳定扩展寿命的多轴疲劳模型参数和最大断裂因子、断裂因子幅的函数, 综合反映了各应力分量对拉-剪循环应力作用下全熔透斜焊缝十字接头和斜对接焊缝连接多轴疲劳的影响, 推导了拉-剪循环应力作用下全熔透斜焊缝十字接头和斜对接焊缝连接的统一多轴疲劳寿命计算式。计算结果表明, 推导的统一多轴疲劳寿命计算式对 Q345qC 钢全熔透斜焊缝十字接头和 SAE1050 钢斜对接焊缝连接疲劳寿命的计算误差分别为 $-26.8\% \sim -0.2\%$ 和 $-87.1\% \sim 10.2\%$, 现行标准建议的疲劳验算式的计算误差分别为 $-63.5\% \sim -13.3\%$ 和 $-79.2\% \sim 237.33\%$ 。提出的多轴疲劳模型可应用于复杂应力状态下结构钢及其连接的多轴疲劳寿命评估。

关键词: 斜对接焊缝连接; 拉-剪循环应力; 多轴疲劳; 寿命预测; 椭球面断裂模型

中图分类号: U441.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2026)02-0089-08

Unified multi-axial fatigue life prediction of inclined butt-welded joints of constructional steel

WANG Wanzhen

(Department of Civil Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, Zhejiang, China)

Abstract: To calculate the multi-axis fatigue life of structural steel and its welded connections under complex stress conditions, the stress fields on the unstable propagation area of multi-axial fatigue cracks in the inclined butt-welded joint were calculated theoretically based on an ellipsoidal fracture model. The initiation and stable propagation lengths of multi-axial fatigue cracks, as well as the maximum fracture index (under the maximum fatigue load) and the fracture index amplitude (under the fatigue load amplitude) defined by the ellipsoidal fracture model on the fatigue failure area, were calculated. A unified multi-axial fatigue model was established that satisfies the stress boundary conditions and expresses the model parameters, the maximum fracture factor, and the fracture-factor amplitude as functions governing fatigue-crack initiation and steady-state propagation life. The formulation comprehensively accounts for the contributions of individual stress components to multi-axial fatigue of full-penetration oblique cruciform welds and oblique butt weld connections under combined tension-shear cyclic loading. Closed-form unified multi-axial fatigue-life calculation expressions for full-penetration oblique cruciform welds and oblique butt weld connections subjected to tension-shear cyclic stresses are derived. The calculation results show that the calculation errors of the unified multi-axial fatigue life calculation formulas for the multi-axial fatigue life of inclined full-penetration welded cruciform joint of Q345qC steel and butt-welded joint of SAE1050 steel are from -26.8% to -0.2% and -87.1% to 10.2% , respectively. By comparison, the calculation error of the fatigue life formula recommended in the current code are from -63.5% to -13.3% and -79.2% to 237.33% , respectively. The proposed multi-axial fatigue model can be applied to the multi-axial fatigue life assessment of structural steel.

Keywords: inclined butt-welded joint; tensile-shear cyclic stress; multi-axial fatigue; life prediction; ellipsoidal fracture model

收稿日期: 2025-03-05; 录用日期: 2025-03-25; 网络首发日期: 2025-07-10

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20250710.1307.012>

基金项目: 宁波市公益性科技计划(2023S101, 2022S179); 宁波交通运输领域重点支持科技项目(2024-03); 浙江省自然科学基金(LY24E080001)

作者简介: 王万祯(1974—), 男, 教授

通信作者: 王万祯, wangwanzhen1975@sina.com

实际钢结构工程中,焊接节点多处于复杂应力状态,是易发生疲劳破坏的薄弱点。中国现行标准及规范^[1-3]采用名义允许应力幅准则对单轴循环应力状态下钢结构焊接细节进行疲劳验算,不适用多轴应力状态下钢结构焊接节点的疲劳安全验算。

近些年来,金属材料与结构的多轴疲劳问题已引起研究者的普遍关注。Giannella 和 Esposito^[4]对 Ti6246 制成的十字形试样进行了多轴疲劳试验和疲劳裂纹扩展数值模拟,发现当静载荷低于动载荷振幅的 10% ~ 15% 时,疲劳裂纹在初始缺口平面上扩展时没有明显的扭结。Ferriani 等^[5]采用耦合有限断裂力学 (FFM),提出了评估 V 形切口杆在混合模式载荷下高周疲劳强度的方法,通过与多轴疲劳试验比较验证了该方法对半解析疲劳极限预测的精度。Chiocca 等^[6]探索了有效临界平面 (ECP) 方法对承受多轴和非比例载荷的球墨铸铁缺口试样疲劳强度评估的适用性,发现该方法可预测具有多孔缺陷试样的疲劳寿命。Hecht 等^[7]进行了对接焊接空心圆柱体在恒定相移和可变振幅的多轴载荷下的疲劳试验,提出了一种基于多轴计数法和不变等效应力假设的疲劳寿命预测新方法。Maiorana 等^[8]采用 ASTM E1049-85 (2011) 中的雨流计数法和 Miner 损伤累积规则,对承受多轴疲劳载荷的 Polcevera 铁路钢桥进行了基于高周疲劳标准 Crossland、Basquin 和欧洲规范 3、英国标准的疲劳寿命估算,发现欧洲规范 3 和英国标准计算的铁路钢桥的多轴疲劳寿命偏于不安全。Ferreira 等^[9]采用最大方差法和临界平面法确定高周多轴疲劳分析中的最大剪应力振幅,考察了平均应力和相对对疲劳强度预测准确性的影响,提高了计算精度。Jen 等^[10]进行了 SAE 1050 钢斜对接焊缝连接的多轴疲劳试验和数值分析,发现 Findley 临界面疲劳模型对斜对接焊缝连接的多轴疲劳寿命预测精度最高。程琴等^[11-12]、周思柱等^[13]、韩庆华等^[14]、任重等^[15]、刘俭辉等^[16]、甘磊等^[17]和胡鑫等^[18]提出了各种多轴疲劳模型并验证了其精度。刘晖等^[19]通过钢管焊接件的拉伸和扭转疲劳试验发现,疲劳强度随正应力幅与剪应力幅比值的增大而降低。卫星和揭志羽^[20]通过疲劳试验考察了焊缝倾角 (0°、15°、30° 和 45°) 对 Q345qC 钢全熔透斜焊缝十字接头多轴疲劳性能的影响。

目前,虽然学者们对结构钢多轴疲劳开展了较广泛研究,但对复杂应力状态下的结构钢焊接节点的疲劳寿命预测还远不成熟。本文对斜对接焊缝连接的多轴疲劳裂纹萌生与稳定扩展长度、疲劳破坏面上的最大断裂因子 (最大疲劳载荷作用下) 及断裂因子幅 (疲劳载荷幅作用下) 进行了基于椭球面

断裂模型^[21]的理论计算,构建了满足应力边界条件的统一疲劳模型参数^[22]和最大断裂因子、断裂因子幅的函数,推导了拉-剪循环应力作用下斜对接焊缝连接的统一多轴疲劳模型。对文献 [10, 20] 进行的 Q345qC 钢全熔透斜焊缝十字接头和 SAE1050 钢斜对接焊缝连接疲劳试验进行了多轴疲劳寿命计算,对比评价了推导的统一多轴疲劳模型和标准 [1] 建议的疲劳验算式的精度。

1 斜对接焊缝连接的多轴疲劳寿命

1.1 Q345qC 钢全熔透斜焊缝十字接头的疲劳寿命

文献 [20] 进行的 Q345qC 钢全熔透斜焊缝十字接头疲劳试验结果显示 (图 1、2, 试件端部施加轴拉疲劳载荷: $P_{\max} = 142.2 \text{ kN}$ 、 $P_{\min} = 14.2 \text{ kN}$), 疲劳裂纹萌生于承受拉-剪复合循环应力作用的斜焊缝端部,沿斜焊缝长度扩展,疲劳断裂于斜焊缝截面。斜焊缝端部有几何变化和应力集中,又是焊缝起落弧点,焊接缺陷多,疲劳裂纹对应力集中和缺陷敏感。试验结果显示, Q345qC 钢全熔透斜焊缝十字接头的试验疲劳寿命离散性较大,同参数组试件的试验疲劳寿命相差较大,但仍表现出疲劳寿命随斜焊缝与板宽方向夹角的增大而提高的定性规律。

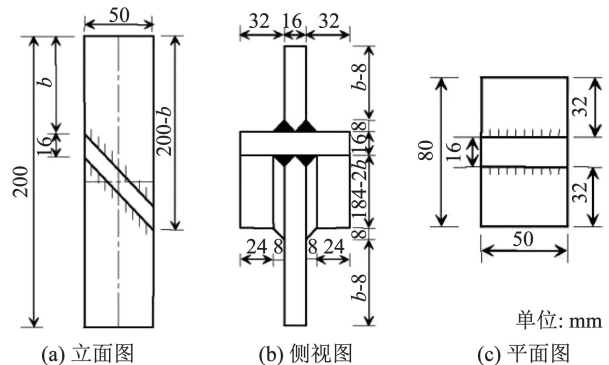


图 1 Q345qC 钢全熔透斜焊缝十字接头疲劳试验试件几何尺寸^[20]

Fig. 1 Geometric dimensions of fatigue test specimens for Q345qC full-penetration oblique cruciform welds^[20]

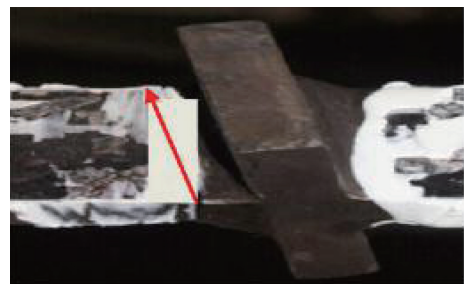


图 2 Q345qC 钢全熔透斜焊缝十字接头疲劳试验中裂纹萌生和扩展^[20]

Fig. 2 Crack initiation and propagation in fatigue tests of Q345qC full-penetration oblique cruciform welds^[20]

表1为文献[20]进行的Q345qC钢全熔透斜焊缝十字接头的疲劳试验结果,其中 $\Delta\sigma_w$ 和 $\Delta\tau_w$ 分别为斜焊缝承受的名义正应力幅和剪应力幅; $N_{f,ti}$ 、 $N_{f,t}$ 和 $N_{f,s}$ 分别为各试件的试验疲劳寿命、同参数组试件的平均疲劳寿命和按标准[1]建议的疲劳验算

式(1)计算的疲劳寿命; e_{s-1} 为式(1)的计算误差。

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

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

表1 Q345qC钢全熔透斜焊缝十字接头的疲劳试验结果^[20]

Tab.1 Fatigue test results for Q345qC full-penetration oblique cruciform welds^[20]

试件编号	$\alpha / (^\circ)$	$\Delta\sigma_w / \text{MPa}$	$\Delta\tau_w / \text{MPa}$	$N_{f,ti}$	$N_{f,t}$	$N_{f,s}$	$e_{s-1} / \%$	$N_{f,s} / N_{f,t}$
T0-1	0	160.0	0	411 000				
T0-2	0	160.0	0	320 000	411 000	356 000	-13.3	0.87
T0-3	0	160.0	0	502 000				
T15-1	15	149.3	40.0	406 000				
T15-2	15	149.3	40.0	516 000	516 000	356 000	-30.9	0.69
T15-3	15	149.3	40.0	626 000				
T30-1	30	120.0	69.3	627 000				
T30-2	30	120.0	69.3	567 000	660 000	356 000	-46.0	0.54
T30-3	30	120.0	69.3	687 000				
T45-1	45	80.0	80.0	977 000				
T45-2	45	80.0	80.0	866 000	977 000	176 000	-63.5	0.37
T45-3	45	80.0	80.0	1 088 000				

需要说明的是,由于文献[20]未进行Q345qC钢全熔透斜焊缝十字接头疲劳断口电镜扫描,无法根据疲劳断口形貌分析其疲劳破坏模式。本文仅从斜焊缝同时承受法向和切向循环应力粗略地判断Q345qC钢全熔透斜焊缝十字接头为多轴疲劳破坏模式。标准[1]没有全熔透斜焊缝十字接头的多轴疲劳寿命计算条款, $N_{f,s}$ 是按标准[1]中的坡口直焊缝十字接头($Z6; C_z = 1.46 \times 10^{12}, \beta_z = 3$)计算的疲劳寿命。表1的计算结果显示,标准[1]建议的疲劳寿命验算式(1)对Q345qC钢全熔透斜焊缝十字接头疲劳寿命的计算误差为-63.5% ~ -13.3%,计算误差随斜焊缝与板宽方向夹角的增加而增加,计算结果过于保守,说明标准[1]建议的疲劳寿命计算式(1)只适用于计算单轴循环应力作用下的Q345qC钢全熔透直焊缝十字接头的疲劳寿命,不适用于拉-剪复合循环应力作用下全熔透斜焊缝十字接头的疲劳寿命计算。

1.2 SAE1050钢斜对接焊缝连接的疲劳寿命

文献[10]对图3所示的SAE1050钢斜对接焊缝连接(AWS ER70S-6焊条,直径1mm)进行了正弦波加载疲劳试验,应力比 $R = 0.1$ 。疲劳试验结果显示(图4),疲劳裂纹萌生于斜焊缝端部,沿斜焊缝长度扩展,疲劳断裂于斜焊缝截面。

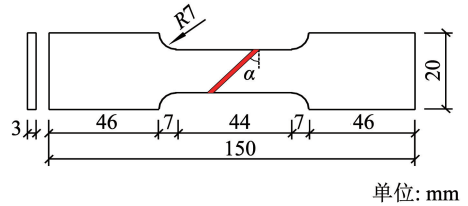


图3 SAE1050钢斜对接焊缝连接疲劳试验试件^[10]

Fig.3 Fatigue test specimens for SAE1050 oblique butt-weld connections^[10]

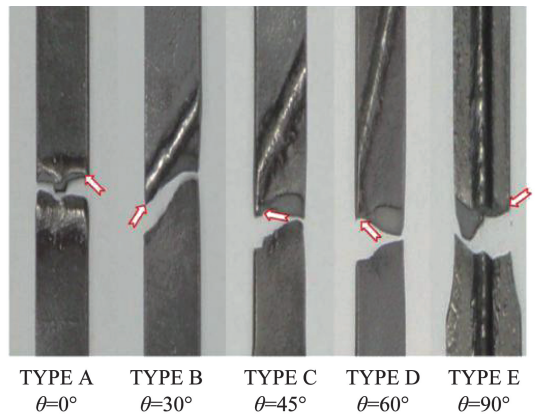


图4 SAE1050钢斜对接焊缝连接疲劳破坏照片^[10]

Fig.4 Photographs of fatigue failures in SAE1050 oblique butt-weld connections^[10]

表2为文献[10]进行的SAE1050钢斜对接焊缝连接的疲劳试验结果,其中 σ_{\max} 和 $\Delta\sigma$ 分别为母材中间平行段截面上的名义最大正应力和正应力

幅; $N_{f,t}$ 和 $N_{f,s}$ 分别为同参数 3 个试件的试验疲劳寿命平均值; 同样需要说明的是, 标准 [1] 没有斜对接焊缝连接的疲劳寿命计算条款, $N_{f,s}$ 是按标准 [1] 中

横向受力直对接焊缝连接 (焊缝余高未打磨, Z_4 ; $C_z = 2.81 \times 10^{12}$, $\beta_z = 3$) 计算的疲劳寿命; e_{s-1} 为式 (1) 的计算误差。

表 2 SAE1050 钢斜对接焊缝连接的疲劳试验结果^[10]

Tab. 2 Fatigue test results of the butt-welded joints of SAE1050 steel^[10]

试件编号	$\alpha / (^\circ)$	$\sigma_{\max} / \text{MPa}$	$\Delta\sigma / \text{MPa}$	$N_{f,t}$	$N_{f,s}$	$e_{s-1} / \%$	$N_{f,s} / N_{f,t}$
A1	0	350.0	315.0	26 656	89 903	237.3	3.37
A2	0	275.0	247.5	73 280	186 473	154.5	2.54
A3	0	200.0	180.0	406 571	481 824	18.5	1.19
B1	30	350.0	315.0	33 837	89 903	165.7	2.66
B2	30	300.0	270.0	103 031	142 763	38.6	1.39
B3	30	225.0	202.5	689 530	338 401	-50.9	0.49
C1	45	350.0	315.0	112 741	89 903	-20.3	0.80
C2	45	300.0	270.0	579 350	142 763	-75.4	0.25
C3	45	275.0	247.5	892 839	185 345	-79.2	0.21
D1	60	350.0	315.0	55 051	89 903	63.3	1.63
D2	60	300.0	270.0	149 479	142 763	-4.5	0.96
D3	60	250.0	225.0	213 319	246 694	15.6	1.16

表 2 显示, SAE1050 钢斜对接焊缝连接的疲劳寿命随斜焊缝与板宽方向夹角的增大而提高, 但同参数试件的疲劳寿命离散性较大。标准 [1] 建议的疲劳寿命验算式 (1) 对 SAE1050 钢斜对接焊缝连接疲劳寿命的计算误差为 -79.2% ~ 237.33%, 对半数以上试件的疲劳寿命计算结果偏于不安全, 计算误差较大的试件 A1、A2、B1 和 D1, 计算疲劳寿命分别是试验值的 3.37 倍、2.54 倍、2.66 倍和 1.63 倍, 计算结果非常不安全。

2 统一疲劳模型和椭球面断裂模型

2.1 统一疲劳模型

为描述疲劳裂纹随循环加载次数加速扩展的试验现象, 王万祯^[22] 提出了式 (2) 所示的疲劳裂纹形成与稳定扩展速率方程, 积分导出了式 (3) 建议的统一疲劳模型。

$$v_a = b \times N^c \quad (2)$$

$$N_f = (a_f / \xi)^{1/\eta} \quad (3)$$

式中: N 和 N_f 分别为加载次数和疲劳寿命; c 和 η 为试件形状参数, 均为无量纲数字; v_a 和 b 分别为疲劳裂纹萌生与稳定扩展速率和特征速率, 量纲均为 mm; a_f 和 ξ 分别为疲劳裂纹萌生与稳定扩展长度和特征长度, 量纲均为 mm。式 (2) 等式两端量纲均为 mm, 式 (3) 等式两端均为无量纲数字。

需要指出的是, 式 (3) 建议的统一疲劳模型是基于单条疲劳裂纹扩展速率方程积分推导出的, 因

此, 仅适用于单条疲劳裂纹工况下的疲劳寿命计算, 不适用多条疲劳裂纹同时扩展工况的疲劳寿命计算。

2.2 椭球面断裂模型

王万祯^[23] 假设三向均张拉应力下结构钢断裂强度和屈服强度相等, 提出的椭球面断裂模型为

$$(\sigma_{\text{seq}}/r)^2 + (\sigma_m/q)^2 = 3\tau_y^2 \quad (4)$$

式中: $q = \frac{\sqrt{2}(1+\mu)}{3(1-2\mu)}$, $\sqrt{3}\tau_y = \frac{\sqrt{1+9q^2}}{3q}f_y$, $r = \tau_t/\tau_y$; 等效应力 σ_{seq} 和静水应力 σ_m 由计算获得, 剪切屈服强度 τ_y 、剪切断裂强度 τ_t 和泊松比 μ 通过试验测定。

众所周知, 包括拉-剪应力状态在内的任何复杂应力状态都可由三向主应力 σ_1 、 σ_2 和 σ_3 等效描述, 因此, 式 (4) 建议的椭球面断裂模型完整地描述了复杂应力状态下各应力分量对结构钢断裂的影响。

需要说明的是, 式 (4) 建议的椭球面断裂模型仅适用于拉、压强度近似相等的各向同性金属材料, 不适用拉、压强度明显不等的各向异性材料。

3 斜对接焊缝连接的多轴疲劳寿命计算

3.1 疲劳裂纹萌生与稳定扩展长度计算

拉-剪复合循环应力下斜对接焊缝疲劳裂纹的扩展速率是斜对接焊缝连接多轴疲劳寿命计算的关键。由于拉应力和剪应力对疲劳裂纹扩展速率存在复杂的耦合作用, 不能将拉应力和剪应力对疲劳裂纹扩展速率的单独影响进行简单地线性叠加。本文认为, 斜对接焊缝连接裂尖的拉-剪复合应力场达

到式(4) 建议的椭球面断裂模型, 裂尖开裂, 并沿式(4) 计算的最大拉-剪复合应力场方向扩展。随着裂纹扩展, 斜对接焊缝承载面积减小, 裂尖拉-剪复合应力增大, 裂纹加速扩展, 直至斜对接焊缝剩余面积不足以承载最大疲劳载荷 P_{\max} , 最终疲劳断裂。

图 5 为斜对接焊缝在最大疲劳载荷 P_{\max} 作用下的疲劳断裂受力模型, 其中, 斜对接焊缝的疲劳断裂面积 $A_w = 50 \times 16 / \cos \alpha$, α 为斜焊缝与板宽方向的夹角。由图 5 可以看出, 斜对接焊缝为拉-剪复合循环应力作用下的多轴疲劳破坏模式。

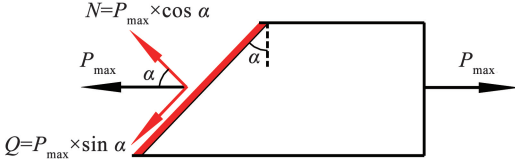


图 5 斜对接焊缝的疲劳断裂力学模型

Fig. 5 Fatigue fracture model of inclined butt weld

设疲劳裂纹失稳扩展断裂面积(最大荷载作用下斜对接焊缝的净截面强度拉断面积)为 A_{wn} , 则疲劳裂纹失稳扩展断裂面的应力场计算如下:

$$N = P_{\max} \times \cos \alpha \quad (5)$$

$$Q = P_{\max} \times \sin \alpha \quad (6)$$

$$\sigma_{x, \max} = N / A_{wn} = P_{\max} \cos \alpha / A_{wn} \quad (7)$$

$$\tau_{xy, \max} = Q / A_{wn} = P_{\max} \sin \alpha / A_{wn} \quad (8)$$

$$\sigma_{m, \max} = \sigma_{x, \max} / 3 = P_{\max} \cos \alpha / (3A_{wn}) \quad (9)$$

$$\sigma_{\text{seq}, \max} = \sqrt{\sigma_{x, \max}^2 + 3\tau_{xy, \max}^2} = \frac{\sqrt{1 + 2\sin^2 \alpha} \cdot P_{\max}}{A_{wn}} \quad (10)$$

将式(9)、(10)代入式(4), 得斜对接焊缝的多轴疲劳裂纹失稳扩展面积:

$$A_{wn} = \frac{\sqrt{9q^2(1 + 2\sin^2 \alpha) + r^2 \cos^2 \alpha} \times P_{\max}}{3\sqrt{3}qr \cdot \tau_y} \quad (11)$$

包含初始缺陷效应的斜对接焊缝的多轴疲劳裂纹萌生与稳定扩展面积:

$$A_f = A_w - A_{wn} \quad (12)$$

式中: A_w 为斜对接焊缝的截面面积, $A_w = l_w \times t_w$; l_w 为斜对接焊缝的长度, $l_w = w_s / \cos \alpha$, w_s 为板宽; t_w 为斜对接焊缝的厚度。

根据文献[10, 20] 进行的 Q345qC 钢全熔透斜焊缝十字接头和 SAE1050 钢斜对接焊缝连接的疲劳试验结果, 疲劳裂纹起始于斜对接焊缝端部, 沿斜焊接长度扩展。得斜对接焊缝的多轴疲劳裂纹萌生与稳定扩展长度:

$$a_f = A_f / t_w - a_0 \quad (13)$$

式中 a_0 为初始缺陷尺寸。

3.2 Q345qC 钢全熔透斜焊缝十字接头的统一多轴疲劳寿命计算

疲劳裂纹萌生和稳定扩展长度 a_f 的计算需要焊缝的拉伸屈服强度、拉伸断裂强度和泊松比等材性参数, 但文献[20] 未进行 Q345qC 钢全熔透焊缝材性试验, 本文采用文献[23] 进行的 Q345qC 钢对接焊缝材性试验数据: 屈服强度 $f_y = 449.94 \text{ MPa}$, 极限强度 $f_u = 600.62 \text{ MPa}$, 泊松比 $\mu = 0.27$ 。则 Q345qC 钢十字接头全熔透斜焊缝的椭球面断裂模型参数量化为 $q \approx 1.30$, $\tau_y \approx 268.16 \text{ MPa}$, $r \approx 1.37$ 。

按式(13) 计算的 Q345qC 钢全熔透斜焊缝十字接头的多轴疲劳裂纹萌生与稳定扩展长度 a_f (取 $a_0 = 0$) 列于表 3, 表中其他参数的定义和计算见下文。

表 3 Q345qC 钢全熔透斜焊缝十字接头的统一疲劳模型参数标定

Tab. 3 Calibrated parameters of unified fatigue model for inclined full-penetration welded cruciform joints of Q345qC steel

试件编号	$N_{f,t}$	a_f / mm	$I_{f, \max}$	ΔI_f	$k / 10^{-2} \text{ mm}$	η	s	$k_{0.977} / 10^{-2} \text{ mm}$	$N_{f,c}$	$e_{c-t} / \%$
T0	411 000	35.20	0.296	0.266	4.24	0.68	0.054	5.03	387 839	-5.6
T15	516 000	36.16	0.301	0.271	4.24	0.68	0.054	5.03	377 908	-26.8
T30	660 000	40.12	0.305	0.275	4.24	0.68	0.054	5.03	421 447	-0.3
T45	977 000	50.66	0.283	0.255	4.24	0.68	0.054	5.03	772 358	-0.2

参照式(9) 和式(10), $\Delta P = P_{\max} - P_{\min}$ 作用下 Q345qC 钢全熔透斜焊缝十字接头疲劳断裂面上的平均应力和 Mises 等效应力分别为

$$\Delta \sigma_m = \Delta P \times \cos \alpha / (3A_w) \quad (14)$$

$$\Delta \sigma_{\text{seq}} = \frac{\sqrt{1 + 2\sin^2 \alpha} \cdot \Delta P}{A_w} \quad (15)$$

由式(4) 建议的椭球面断裂模型定义 P_{\max} 和 ΔP 作用下 Q345qC 钢全熔透斜焊缝十字接头疲劳

断裂面上的最大断裂因子 $I_{f, \max}$ 和断裂因子幅 ΔI_f :

$$I_{f, \max} = \sqrt{(\sigma_{\text{seq}, \max} / r)^2 + (\sigma_{m, \max} / q)^2} / (\sqrt{3} \tau_y) \quad (16)$$

$$\Delta I_f = \sqrt{(\Delta \sigma_{\text{seq}} / r)^2 + (\Delta \sigma_m / q)^2} / (\sqrt{3} \tau_y) \quad (17)$$

式(4) 建议的椭球面断裂模型完整地描述了各应力分量对复杂应力状态下结构钢及焊接接头断裂的影响, 因此, 由式(16)、(17) 计算的断裂因子 $I_{f, \max}$ 和断裂因子幅 ΔI_f 综合考虑了各应力分量及幅值对全熔透斜焊缝十字接头多轴疲劳寿命的影响。

将式(9)、(10)代入式(16),式(14)、(15)代入式(17),得 P_{\max} 和 ΔP 作用下 Q345qC 钢全熔透斜焊缝十字接头疲劳断裂面上的最大断裂因子 $I_{f,\max}$ 和断裂因子幅 ΔI_f 。

$$I_{f,\max} = \frac{\sqrt{9q^2(1+2\sin^2\alpha)+r^2\cos^2\alpha} \times P_{\max}}{3\sqrt{3}qrA_f\tau_y} \quad (18)$$

$$\Delta I_f = \frac{\sqrt{9q^2(1+2\sin^2\alpha)+r^2\cos^2\alpha} \times \Delta P}{3\sqrt{3}qrA_f\tau_y} \quad (19)$$

将式(3)建议的统一疲劳寿命计算模型中参数 ξ 描述为最大断裂因子 $I_{f,\max}$ 和断裂因子幅 ΔI_f 的函数,该函数应满足以下应力边界条件。

①当 $I_{f,\max} = 1$ 时,为 P_{\max} 作用下静力拉断, $N_f = 0$;由式(3): $I_{f,\max} = 1$ 时, $\xi = \infty$ 。

②当 $I_{f,\max} = 0$ 时,零应力工况, $N_f = \infty$;由式(3): $I_{f,\max} = 0$ 时, $\xi = 0$ 。

③当 $\Delta I_f = 0$ 时,静力加载工况, $N_f = \infty$;由式(3): $\Delta I_f = 0$ 时, $\xi = 0$ 。

构建满足上述边界条件的 ξ 和 $I_{f,\max}$ 、 ΔI_f 的函数:

$$\xi = k \times \frac{I_{f,\max} \times \Delta I_f}{1 - I_{f,\max}} \quad (20)$$

式中系数 k 由试验标定。

将式(20)代入式(3)建议的统一疲劳模型,得 Q345qC 钢全熔透斜焊缝十字接头的统一多轴疲劳寿命计算式:

$$N_f = \left(\frac{a_f}{k \times \frac{I_{f,\max} \times \Delta I_f}{1 - I_{f,\max}}} \right)^{1/\eta} \quad (21)$$

或

$$\lg N_f = \frac{1}{\eta} \left[\lg a_f - \lg \left(\frac{I_{f,\max} \times \Delta I_f}{1 - I_{f,\max}} \right) \right] - \frac{1}{\eta} \lg k \quad (22)$$

对表 2 中各试件的试验疲劳寿命 $N_{f,i}$ 、疲劳裂纹萌生与稳定扩展长度 a_f 、 $I_{f,\max}$ 和 ΔI_f 按式(22)拟合,结果见图 6。Q345qC 钢全熔透斜焊缝十字接头的多轴疲劳寿命计算式为

$$\lg N_f = 1.47 \times \left[\lg a_f - \lg \left(\frac{I_{f,\max} \times \Delta I_f}{1 - I_{f,\max}} \right) \right] + 2.02 \quad (23)$$

表 4 SAE1050 钢斜对接焊缝连接的统一疲劳模型参数标定

Tab. 4 Calibrated parameters of unified fatigue model for inclined butt-welded joints of SAE1050 steel

试件编号	$N_{f,i}$	a_f/mm	$I_{f,\max}$	ΔI_f	$k/10^{-7}\text{mm}$	η	s	$k_{0.977}/10^{-6}\text{mm}$	$N_{f,c}$	$e_{c-i}/\%$
A1	26 656	0.97	0.48	0.43	9.35	1.33	0.18	2.75	29 373	10.2
A2	73 280	1.16	0.38	0.34	9.35	1.33	0.18	2.75	55 543	-24.2
A3	406 571	1.36	0.28	0.25	9.35	1.33	0.18	2.75	113 086	-72.2
B1	33 837	1.07	0.50	0.45	9.35	1.33	0.18	2.75	28 796	-14.9
B2	103 031	1.23	0.43	0.39	9.35	1.33	0.18	2.75	44 526	-56.8
B3	689 530	1.46	0.32	0.29	9.35	1.33	0.18	2.75	89 191	-87.1

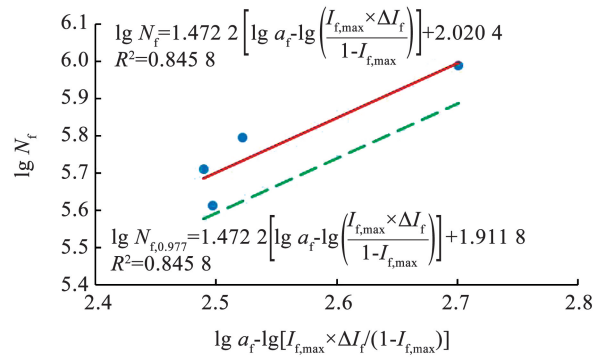


图 6 Q345qC 钢全熔透斜焊缝十字接头的 $N_{f,i}$ 和 a_f 、 $I_{f,\max}$ 、 ΔI_f 的拟合函数

Fig. 6 Fitting functions of $N_{f,i}$ and a_f , $I_{f,\max}$, ΔI_f for inclined full-penetration welded cruciform joints of Q345qC steel

式(23)减去计算疲劳寿命的 2 倍标准差 s ,得安全概率为 97.7% 的 Q345qC 钢全熔透斜焊缝十字接头的多轴疲劳寿命计算式:

$$\lg N_f = 1.47 \times \left[\lg a_f - \lg \left(\frac{I_{f,\max} \times \Delta I_f}{1 - I_{f,\max}} \right) \right] + 1.91 \quad (24)$$

由式(24)标定 $k_{0.977} = 5.03 \times 10^{-2}$,连同式(24)计算的疲劳寿命 $N_{f,c}$ 及计算误差 $e_{c-i} = (N_{f,c} - N_{f,i}) / N_{f,i}$,列于表 3。表 3 的计算结果显示,式(24)对 Q345qC 钢全熔透斜焊缝十字接头多轴疲劳寿命的计算误差为 -26.8% ~ -0.2%。由于文献[20]测得的 Q345qC 钢全熔透斜焊缝十字接头疲劳寿命离散性大,式(24)对试件 T15 的疲劳寿命计算误差稍大。

3.3 SAE1050 钢斜对接焊缝连接的统一多轴疲劳寿命计算

文献[10]测得的 SAE1050 钢斜对接焊缝连接的屈服强度 $f_y = 655$ MPa,极限强度 $f_u = 725$ MPa,泊松比 $\mu = 0.29$ 。SAE1050 钢斜对接焊缝连接的椭球面断裂模型参数量化为 $q \approx 1.45$, $\tau_y \approx 672.14$ MPa, $r \approx 1.11$ 。

按式(13)计算的 SAE1050 钢斜对接焊缝连接的多轴疲劳裂纹萌生与稳定扩展长度 a_f (取 $a_0 = 0$) 列于表 4。

表 4(续)

试件编号	$N_{f,t}$	a_f/mm	$I_{f,max}$	ΔI_f	$k/10^{-7}mm$	η	s	$k_{0,977}/10^{-6}mm$	$N_{f,c}$	$e_{c-t}/\%$
C1	112 741	1.40	0.47	0.42	9.35	1.33	0.18	2.75	40 826	-0.6
C2	579 350	1.58	0.40	0.36	9.35	1.33	0.18	2.75	61 660	-0.9
C3	892 839	1.67	0.37	0.33	9.35	1.33	0.18	2.75	76 342	-0.9
D1	55 051	2.36	0.37	0.33	9.35	1.33	0.18	2.75	98 772	0.8
D2	149 479	2.56	0.32	0.29	9.35	1.33	0.18	2.75	140 662	-0.1
D3	213 319	2.76	0.26	0.24	9.35	1.33	0.18	2.75	207 096	0.0

对表 4 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长度 a_f 、 $I_{f,max}$ 和 ΔI_f 按式 (22) 拟合,结果见图 7。得 SAE1050 钢斜对接焊缝连接的多轴疲劳寿命计算式:

$$\lg N_f = 0.75 \times \left[\lg a_f - \lg \left(\frac{I_{f,max} \times \Delta I_f}{1 - I_{f,max}} \right) \right] + 4.54 \quad (25)$$

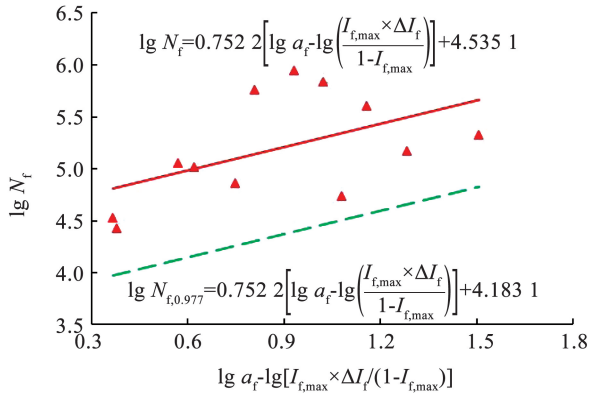


图 7 SAE1050 钢斜对接焊缝连接的 $N_{f,t}$ 和 a_f 、 $I_{f,max}$ 、 ΔI_f 拟合函数

Fig. 7 Fitting functions of $N_{f,t}$ and a_f , $I_{f,max}$, ΔI_f for inclined butt-welded joints of SAE1050 steel

由式 (25) 标定参数 $k = 9.35 \times 10^{-7}$ 、 $\eta = 1.33$, 连同标准差 $s = 0.18$, 列于表 4。

同理,得安全概率为 97.7% 的 SAE1050 钢斜对接焊缝连接的统一多轴疲劳寿命计算式:

$$\lg N_f = 0.75 \times \left[\lg a_f - \lg \left(\frac{I_{f,max} \times \Delta I_f}{1 - I_{f,max}} \right) \right] + 4.18 \quad (26)$$

由式 (26) 标定 $k_{0,977} = 2.75 \times 10^{-6}$, 连同式 (26) 计算的疲劳寿命 $N_{f,c}$ 及计算误差 $e_{c-t} = (N_{f,c} - N_{f,t}) / N_{f,t}$ 列于表 4。可以看出,式 (26) 对 SAE1050 钢斜对接焊缝连接多轴疲劳寿命的计算误差为 -87.1% ~ 10.2%。由于文献 [10] 测得的 SAE1050 钢斜对接焊缝连接的疲劳寿命离散性大,式 (26) 对试件 A3、B2、B3 的多轴疲劳寿命计算误差偏大,过于保守。

本文提出的多轴疲劳寿命计算框架,考虑了复杂应力状态下各应力分量对多轴疲劳寿命的耦合影响,具有较好的一般性和普适性,可推广应用于复杂应

力状态下钢试件及其焊缝连接的多轴疲劳寿命计算。

4 结 论

1) 现行标准建议的允许应力幅疲劳验算式对 Q345qC 钢全熔透斜焊接十字接头疲劳寿命的计算误差为 -63.5% ~ -13.3%, 计算误差随斜焊缝与板宽方向夹角的增加而增加,计算结果过于保守。现行标准建议的允许应力幅疲劳验算式,不适用全熔透斜焊缝十字接头的多轴疲劳寿命计算。

2) 现行标准建议的允许应力幅疲劳验算式对 SAE1050 钢斜对接焊缝连接疲劳寿命的计算误差为 -79.2% ~ 237.33%, 对半数以上试件的疲劳寿命计算结果偏于不安全。

3) 推导的斜对接焊缝连接的统一多轴疲劳寿命计算式对 Q345qC 钢全熔透斜焊接十字接头和 SAE1050 钢斜对接焊缝连接疲劳寿命的计算误差分别为 -26.8% ~ -0.2% 和 -87.1% ~ 10.2%。

参考文献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准:GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017
Ministry of Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of steel structures; GB 50017—2017[S]. Beijing: Architecture Industrial Press of China, 2017

[2] 中国中铁大桥勘测设计院集团有限公司. 铁路桥梁钢结构设计规范: TB 10091—2017[S]. 北京: 中国铁道出版社有限公司, 2017
China Railway Major Bridge Reconnaissance & Design Institute Co., Ltd. Code for design on steel structure of railway bridge; TB 10091—2017[S]. Beijing: China Railway Publishing House Co., Ltd, 2017

[3] 中交公路规划设计院有限公司. 公路钢结构桥梁设计规范: JTG D64—2015[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015
CCCC Highway Consultants Co., Ltd. Specification for design of highway steel bridge structures; JTG D64—2015[S]. Beijing: China Communication Press Co., Ltd, 2015

[4] GIANNELLA V, ESPOSITO R. Multi-axial fatigue numerical crack propagation in cruciform specimens [J]. Procedia Structural Integrity, 2018, 12: 499. DOI: 10.1016/j.prostr.2018.11.068

[5] FERRIAN F, CAMPAGNOLO A, SAPORA A. A finite fracture mechanics approach to estimate the fatigue strength of V-notched bars under multiaxial loading[J]. International Journal of Fatigue, 2024,

- 193; 108745. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2024.108745
- [6] CHIOCCA A, PEDRANZ M, ZANINI F, et al. Application of the effective critical plane approach for the fatigue assessment of ductile cast iron under multiaxial and non-proportional loading conditions [J]. *International Journal of Fatigue*, 2025, 192: 108716. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2024.108716
- [7] HECHT M, FASS M, BAUER N M, et al. Capability of different multiaxial fatigue evaluation approaches on adhesively butt-bonded hollow cylinders under multiaxial loading with variable amplitudes [J]. *International Journal of Fatigue*, 2025, 191: 108699. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2024.108699
- [8] MAIORANA E, ALOISIO A, TASSE V, et al. Prediction of fatigue life of a bolted joint in railway steel arch bridge using multiaxial fatigue criteria [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2024, 166: 108908. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2024.108908
- [9] FERREIRA J L A, DIAS J N, LIMA F M, et al. Evaluation of the accuracy and efficiency of the modified maximum variance method for multiaxial fatigue analysis under constant amplitude loading [J]. *International Journal of Fatigue*, 2024, 188: 108537. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2024.108537
- [10] JEN Yiming, CHANG Liyen, FANG Chaofeng. Assessing the fatigue life of butt-welded joints under oblique loading by using local approaches [J]. *International Journal of Fatigue*, 2008, 30: 603. DOI:10.1016/j.ijfatigue.2007.05.011
- [11] 程琴, 高建雄, 袁逸萍, 等. 考虑附加强化效应的金属材料多轴低周疲劳寿命预测模型 [J]. *机械强度*, 2024, 46(5): 1200
- CHENG Qing, GAO Jianxiong, YUAN Yiping, et al. Multiaxial low cycle fatigue life prediction of the metal material considering additional strengthening effect [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2024, 46(5): 1200. DOI:10.16579/j.issn.1001.9669.2024.05.023
- [12] 程琴, 高建雄, 袁逸萍, 等. 考虑附加损伤和缺口效应的缺口件多轴疲劳寿命预测模型 [J]. *中国机械工程*, 2024, 35(7): 1194
- CHENG Qing, GAO Jianxiong, YUAN Yiping, et al. A multiaxial fatigue life prediction model for notched parts considering additional damage and notch effect [J]. *China Mechanical Engineering*, 2024, 35(7): 1194. DOI:10.3936/j.issn.1004-132X.2024.07.007
- [13] 周思柱, 李林, 曾云. 基于损伤参量梯度的缺口件多轴疲劳寿命预测 [J]. *机械设计与研究*, 2024, 40(5): 44
- ZHOU Sizhu, LI Lin, ZENG Yun. Multiaxial fatigue life prediction of notched parts based on damage parameter gradient [J]. *Machine Design and Research*, 2024, 40(5): 44. DOI:10.13952/j.cnki.jofmdr.2024.0195
- [14] 韩庆华, 李洋, 芦燕, 等. 管板焊接节点多轴疲劳性能及寿命预测方法 [J]. *建筑结构学报*, 2023, 44(8): 234
- HAN Qinghua, LI Yang, LU Yan, et al. Multiaxial fatigue behavior and life prediction of tube-flange welded joints [J]. *Journal of Building Structures*, 2023, 44(8): 234. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2022.B103
- [15] 任重, 秦仙蓉, 张氢, 等. 一种新的多轴疲劳寿命预测模型及其应用 [J]. *机械强度*, 2023, 45(3): 723
- REN Zhong, QIN Xianrong, ZHANG Qing, et al. A new multiaxial fatigue life prediction model and its application [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2023, 45(3): 723. DOI:10.16579/j.issn.1001.9669.2023.030
- [16] 刘俭辉, 张子阳, 资绒, 等. 缺口件多轴疲劳寿命预估新方法 [J]. *固体力学学报*, 2023, 44(3): 406
- LIU Jianhui, ZHANG Ziyang, ZI Rong, et al. New method for multiaxial fatigue life evaluation of notched specimens [J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2023, 44(3): 406. DOI:10.19636/j.cnki.cjasm42-1250/o3.2023.010
- [17] 甘磊, 吴昊, 仲政. 基于能量法的多轴疲劳寿命预测方法 [J]. *固体力学学报*, 2019, 40(3): 260
- GAN Lei, WU Hao, ZHONG Zheng. Fatigue life prediction under multiaxial loading using energy-based models [J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2019, 40(3): 260. DOI:10.19636/j.cnki.cjasm42-1250/o3.2019.007
- [18] 胡鑫, 严仁军, 谌伟, 等. 基于缺口应力法 IIW 多轴疲劳准则分析 [J]. *焊接学报*, 2019, 40(7): 77
- HU Xin, YAN Renjun, SHEN Wei, et al. Research on IIW multiaxial fatigue criterion based on notch stress approach [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(7): 77. DOI:10.12073/j.hjxb.2019400185
- [19] 刘晖, 陈世超, 周飘. Q345 钢管焊接件的高周疲劳性能及多轴疲劳寿命预测 [J]. *工业建筑*, 2021, 51(2): 166
- LIU Hui, CHEN Shichao, ZHOU Piao. High-cycle fatigue performance and multiaxial fatigue life prediction for welded steel pipes of Q345 [J]. *Industrial Construction*, 2021, 51(2): 166. DOI:10.13204/j.gyjzG201906200004
- [20] 卫星, 揭志羽. 拉-剪应力场下全熔透十字型焊接节点疲劳寿命评估 [J]. *西南交通大学学报*, 2017, 52(6): 1061
- WEI Xing, JIE Zhiyu. Fatigue life assessment of full-penetration cruciform welded joints under tensile shear cyclic stress [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2017, 52(6): 1061. DOI:10.3969/j.issn.0258-2724.2017.06.004
- [21] 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
- [22] 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 of Technology*, 2019, 51(12): 58. DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201903036
- [23] 杨熠奕, 马小平, 苏三庆, 等. 低周疲劳下对接焊缝累积塑性损伤的金属磁记忆表征研究 [J]. *材料科学与工艺*, 2024, 32(6): 87
- YANG Yiyi, MA Xiaoping, SU Sanqing, et al. Research on characterization of cumulative plastic damage in butt weld under low cycle fatigue using metal magnetic memory [J]. *Materials Science and Technology*, 2024, 32(6): 87. DOI:10.11951/j.issn.1005-0299.20230040