

一种基于能量耗散的对焊接头疲劳寿命快速预测模型

魏巍^{1,2,3}, 孙杨^{2,3}, 赵兴明¹, 陈明华¹, 邹丽^{2,3}, 杨鑫华^{2,3}

(1. 辽宁工业大学, 锦州, 121001; 2. 大连交通大学, 大连, 116028;
3. 辽宁省轨道交通装备焊接与可靠性重点实验室, 大连, 116028)

摘要: 通过引入 ISV(internal state variable) 本构模型中的 α 和 β 变量, 建立了一种与对焊接头高周疲劳滞弹性和非弹性行为相关的能量耗散模型, 并定义了两个特征应力幅, 即标志着可恢复滞弹性和不可恢复非弹性行为开始形成的关键应力幅 σ_{c0} 和 σ_{c1} (疲劳极限); 借助该能量耗散模型, 研究了不同应力幅下的对焊接头能量耗散响应情况, 发现能量耗散在疲劳极限附近呈现从线性响应到非线性响应的过渡; 在此基础上, 考虑到当应力幅高于疲劳极限时, 全寿命周期的能量耗散存在临界值, 结合与损伤相关的非弹性耗散, 研发了一种基于损伤累积的疲劳寿命预测模型, 并对接头的疲劳寿命进行了快速预测. 结果表明, 经预测数据和试验数据拟合的中值 S-N 曲线一致程度较好, 从而证明了模型可用于实现对焊接头的疲劳寿命快速、精确预测.

创新点: (1) 通过引入 ISV 模型中的 α 和 β 变量, 建立了一种新的能量耗散模型.

(2) 定义了两个与疲劳过程微结构运动相关的特征应力幅.

(3) 建立了一种考虑损伤累积效应的疲劳寿命预测模型.

关键词: ISV 模型; 能量耗散; 疲劳寿命; S-N 曲线

中图分类号: TG 405 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20220929005

0 序言

焊接是轨道车辆关键结构连接的主要工艺, 作为一种新型熔化焊方法, 激光填丝焊因具有变形小、焊缝成形好、缺陷少以及接头力学性能高等优点, 近年来已备受车体结构焊接的青睐^[1-2]. Q310NQL2-Q345NQR2 耐候钢激光焊对接接头作为轨道车辆部分关键结构连接常用的接头形式, 其在服役运行过程中经常承受复杂的动态载荷, 进而引发突然性的疲劳断裂, 因此其服役过程的疲劳失效一直是领域内关注的重点问题.

目前焊接接头的抗疲劳设计重点关注接头的疲劳极限和疲劳寿命评估^[3-4], 传统的疲劳极限评估方法主要为升降法, 而疲劳寿命评估则较多采用成

组法完成, 这些方法不仅历时长、成本高^[5-11], 而且结果往往依赖于经验性的数据统计, 因而在很大程度上限制了产品性能测试的速度以及研发效率的提升. 疲劳实际上是材料内微观结构在循环载荷状态下朝着损伤累积和失效方向逐渐演化的过程, 这一过程表现为耗散能的持续释放, 同时伴随着热力学的温升响应变化^[12]. 随着热像技术发展的日趋成熟, 使得借助红外热像仪精确获取疲劳过程的三阶段温升响应成为可能, 进而为构建物理意义更为明确的能量耗散模型奠定基础.

国内外学者以能量耗散为基础做了大量的疲劳研究工作, Fan 等人^[13-14]以 Q235 钢为研究对象, 建立了一种可实现快速预测宏微观疲劳行为的能量耗散模型, 基于此模型测定了 Q235 钢高周疲劳过程的能量耗散, 并与其损伤变量建立了函数关系, 进而对其疲劳极限进行了快速评估; Teng 等人^[15]结合 RVE(representative volume element) 模型, 进一步优化了 Fan 等人建立的能量耗散模型, 并对 SAE 1045 钢的宏微观疲劳行为进行了快速预测评估; Yang 等人^[16-17]进一步研发了与微结构运动相关的能量耗散模型, 该模型将滞弹性和非弹性

收稿日期: 2022-09-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51875072 和 52005071); 辽宁省高等学校国境外留学项目 (2018LNGXGJWPY-YB012); 辽宁省自然科学基金项目资助项目 (MS-2021-319); 辽宁省教育厅基本科研项目青年项目 (LJKQZ20222271); 辽宁工业大学博士科研启动基金 (XB2022001).

行为的分界点作为疲劳极限预测的特征点,实现了 FV520B 钢疲劳极限的快速预测;Guo 等人^[18-20]基于一维热传导方程,推导了一种新的能量耗散计算方法,该方法以平均温升为基础参量,可最大程度上减小计算误差,为发展精确的能量耗散计算模型奠定了基础。然而上述相关模型依赖的基础参量为第二阶段的温升增量,该参量往往需要大量的时间测得;此外上述研究主要针对非焊接金属材料展开,对于非均质焊接接头疲劳研究虽有涉及^[5-11,21-23],但其能量耗散模型尚未与疲劳过程的微结构行为建立紧密联系。

为了实现快速、精确的焊接接头疲劳性能评估,以 Q310NQL2-Q345NQR2 激光焊对接接头为研究对象,以第一阶段的初始温升斜率为基础,结合 ISV 模型,以期建立一种与焊接接头高周疲劳过程微结构运动联系紧密的能量耗散模型,进而为实现从能量耗散角度出发快速评估疲劳性能奠定基础。

1 基于 ISV 理论的本构模型

从热力学的角度来讲, Hemholtz 自由能是状态函数,其值可以通过获取当前的状态变量计算得到,考虑在热弹性范围内, Hemholtz 自由能有如下定义^[24],即

$$\psi = \psi(\varepsilon, T) \quad (1)$$

式中: ψ 为自由能; ε 和 T 分别为应变张量和绝对温度,是决定状态函数的观测状态变量。从式 (1) 可以看出,在弹性尺度内,当 ε 和 T 两个观测状态变量 (observable state variable, OSV) 确定时,其相关状态函数的值也随之确定。当材料的变形行为更为复杂时,即其变形存在不完全弹性的情况,例如滞弹性和微塑性,往往必须扩展内部状态变量 (ISV) 实现独立定义现有的热力学状态函数^[24]。

疲劳是一个伴随着温升演化的不可逆热力学过程,为精确描述疲劳过程中的热力学状态变化,实现对包含非弹性的力学行为表征,这里引入 α 和 β 两个 ISV 变量,因此式 (1) 可以表示为^[24]

$$\psi(T, \varepsilon, \alpha, \beta) = u - Ts \quad (2)$$

式中: T , ε , u 和 s 分别为绝对温度、应变张量、内能以及熵流,此外 ISV 变量 α 代表着与可恢复微结构运动相关的滞弹性行为,例如应力驱动的原子振荡和晶界处的内摩擦,而变量 β 则表示不可恢复微结

构运动相关的微塑性行为,进而引起材料内部的损伤 (图 1), 这里 α 和 β 可以定义为

$$\begin{cases} \alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_m) \\ \beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_j, \dots, \beta_n) \end{cases} \quad (3)$$

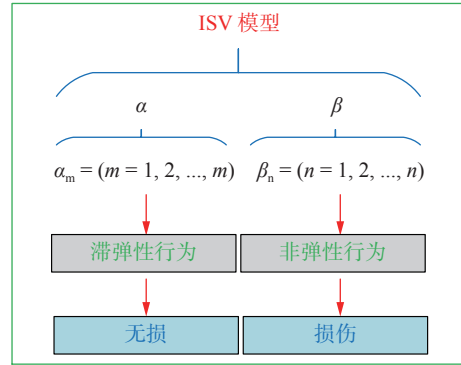


图 1 ISV 模型示意图

Fig. 1 Schematic of internal state variable (ISV) model

2 能量耗散模型

根据热力学第一定律,疲劳过程的热平衡方程可以表示为^[19]

$$\rho C \dot{T} + \text{div} J_q = d_1 + \theta_{\text{the}} + \theta_{\text{inc}} + r_e \quad (4)$$

式中: ρ 和 C 分别为焊缝材料密度和比热; J_q 为热流; d_1 , θ_{the} , θ_{inc} 和 r_e 分别表示为

$$d_1 = \left(\sigma - \rho \frac{\partial \psi}{\partial \varepsilon} \right) \cdot \varepsilon - \rho \frac{\partial \psi}{\partial \alpha} \cdot \alpha - \rho \frac{\partial \psi}{\partial \beta} \cdot \beta \quad (5)$$

$$\theta_{\text{the}} = \rho T \frac{\partial^2 \psi}{\partial T \partial \varepsilon} \cdot \varepsilon \quad (6)$$

$$\theta_{\text{ic}} = \rho T \frac{\partial^2 \psi}{\partial T \partial \alpha} \cdot \alpha \quad (7)$$

根据文献 [24], 可以推导得到

$$\sigma = \rho \frac{\partial \psi}{\partial \varepsilon} \quad (8)$$

将式 (8) 代入式 (5), d_1 可以表示为

$$d_1 = -\rho \frac{\partial \psi}{\partial \alpha} \cdot \alpha - \rho \frac{\partial \psi}{\partial \beta} \cdot \beta \quad (9)$$

式中: $-\rho \frac{\partial \psi}{\partial \alpha}$ 和 $-\rho \frac{\partial \psi}{\partial \beta}$ 为与内部变量 α 和 β 相关的热力学共轭矢量,其被认为是驱动材料内部达到热力学平衡状态的非平衡力,这里将其分别定义为 A 和 B , 得到

$$d_1 = A \cdot \alpha + B \cdot \beta \quad (10)$$

式中: α 和 β 为与微结构运动相关的内变量变化率,通常被视为广义热力学通量,由非平衡力 A 和

B 决定. 这里出于简化目的, 假设广义热力学通量 α 和 β 与非平衡力 A 和 B 之间的关系服从线性或比例关系, 这个假设对于正在经历高周疲劳过程的材料来说是非常合理的, 因为其仅是在平衡状态附近波动, 即接近一个准静态平衡过程^[25], 即

$$\begin{cases} \alpha = m_{an} A \\ \beta = m_{in} B \end{cases} \quad (11)$$

式中: m_{an} 和 m_{in} 是独立于热力学通量和非平衡驱动力的材料常数. 将式 (11) 带入式 (10), 得到

$$d_1 = m_{an} \|A\|^2 + m_{in} \|B\|^2 \quad (12)$$

式中: $\|\cdot\|$ 表示矢量的欧几里得范数. 从式 (12) 可以看出, d_1 由两部分组成, 即一部分由滞弹性引导的能量耗散 d_{an} (不构成损伤), 而另外一部分则是与非弹性行为相关的能量耗散 (引起疲劳损伤增加) d_{in} , 式 (12) 变形为

$$d_1 = d_{an} + d_{in} = m_{an} \|A\|^2 + m_{in} \|B\|^2 \quad (13)$$

对于疲劳过程来说, 与材料微结构运动相关的非平衡力 A 和 B 与外加载荷以及频率有关, 因此这里假设 $\|A\|^2$ 和 $\|B\|^2$ 与应力幅和频率有如下关系, 即

$$\begin{cases} \|A\|^2 = [u_{an}(\sigma_a - \sigma_{c0})][H(\sigma_a - \sigma_{c0})] \\ \|B\|^2 = (u_{in}\sigma_a^k f)[H(\sigma_a - \sigma_{c1})] \end{cases} \quad (14)$$

式中: $H(x)$ 为海维赛德阶跃函数 (heaviside step function), 即当 $x \geq 0$ 时, $H(x)=1$, 当 $x < 0$ 时, $H(x)=0$; k 为幂指数; u_{an} 和 u_{in} 为比例系数; σ_{c0} 和 σ_{c1} 为与材料微结构运动状态相关的两个特征应力幅值; σ_a 为应力幅. 将式 (14) 代入式 (13), 得到

$$d_1 = \begin{cases} d_{an} = [F_{an}(\sigma_a - \sigma_{c0})], & \sigma_{c0} < \sigma_a < \sigma_{c1} \\ d_{an} + d_{in} = [F_{an}(\sigma_a - \sigma_{c0})] + F_{in}\sigma_a^k, & \sigma_{c1} < \sigma_a \end{cases} \quad (15)$$

式中: $F_{an} (= m_{an} u_{an} f)$, $F_{in} (= m_{in} u_{in} f)$, k , σ_{c0} 以及 σ_{c1} 可以通过试验测定.

3 疲劳寿命预测模型

3.1 能量耗散响应

疲劳过程的温升进程由 3 个阶段组成^[5], 分别为初始加载的温度迅速增加阶段 (I)、热产和热耗散实现平衡的稳定温升阶段 (II) 以及因裂纹扩展引起的温升陡然变化阶段 (III), 如图 2 所示.

对于高周疲劳过程, 其某一应力水平下的能量耗散计算式为^[26]

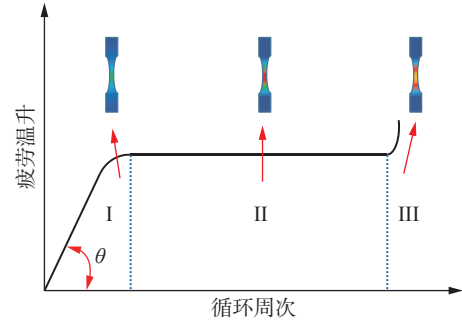


图 2 典型的疲劳温升进程示意图

Fig. 2 Schematic of the typical temperature rise process

$$d_1 = \rho C \frac{dT}{dt} \Big|_{t=t_0} \quad (16)$$

式中: $\frac{dT}{dt}$ 为温度变化率; t_0 为初始加载时间.

如第 2 节所述, 高周疲劳过程的机械能耗散主要由滞弹性和非弹性行为引起^[19], 其中当应力幅小于焊接接头的疲劳极限时, 其微结构运动主要为可恢复的滞弹性行为, 例如轻微的原子振荡或内摩擦, 不构成损伤累积; 而当应力幅高于焊接接头的疲劳极限时, 其微结构运动主要为不可恢复的非弹性行为, 例如微塑性, 构成接头内部的损伤^[5]. 基于此, 将疲劳过程中对接接头在不同应力幅水平下微结构运动的分界点定义为疲劳极限, 具有明确的物理意义.

为了从宏观热力学角度量化微观尺度内的接头微结构运动行为, 在第 1 节里引入了 ISV 内变量理论, 并分别定义了与滞弹性和非弹性相关的内变量 α 和 β , 进而推导得到了高周疲劳过程的能量耗散计算表达式. 结合第 2 节建立的能量耗散模型, 疲劳过程中不同应力幅水平下的能量耗散响应示意图如图 3 所示.

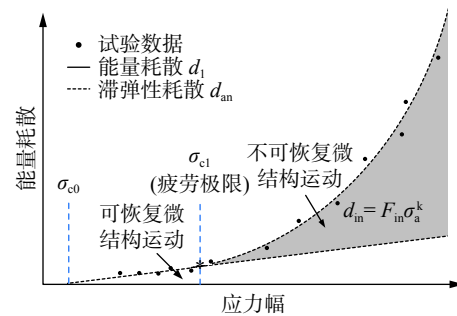


图 3 不同应力幅水平下的能量耗散响应

Fig. 3 Energy dissipation response under different stress amplitude levels

3.2 基于损伤累积的疲劳寿命预测模型

如第 1 节所述, ISV 里的内变量 β 与引导疲劳

损伤累积的不可恢复微结构运动相关, 而该疲劳损伤的演化正由内部非平衡力 \mathbf{B} 驱动, 并在宏观尺度上表现为非弹性耗散 d_{in} , 因此非弹性耗散 d_{in} 可被视为有效的疲劳损伤指标. 基于此可建立相应的累积损伤评估模型, 即

$$D = \frac{NF_{in}\sigma_a^k}{\bar{E}_c} [H(\sigma_a - \sigma_{cl})]$$

(17)

式中: D 为损伤参数; N 为与损伤参量 D 对应的疲劳寿命; \bar{E}_c 为能量耗散临界值, 其值可以通过试验测定. 对于一个原始试样来说, 其损伤值 D 可认为是 0, 当载荷逐渐循环直至疲劳断裂出时, $D=1$, 因此式 (17) 变形为

$$N_f = \frac{\bar{E}_c}{F_{in}\sigma_a^k} \left[H^{-1}(\sigma_a - \sigma_{cl}) \right]$$

(18)

式中: $H^{-1}(x)$ 为海维赛德阶跃函数的倒数, 即当 $x \geq 0$ 时, $H^{-1}(x)=1$, 而当 $x < 0$ 时, $H^{-1}(x)=\infty$. 这里需要注意的是, 当 $\sigma_a < \sigma_{cl}$ 时, 认为对接接头试样拥有无限寿命, 因此依据提出的模型, 关键应力幅 σ_{cl} 实际上可以被认为是材料内部可恢复和不可恢复微结构运动的分界应力幅, 即 σ_{cl} 等于疲劳极限 σ_f .

通过监测试样焊缝中心的温升增量, 建立能量耗散模型, 进而结合式 (18) 即可实现 Q310NQL2-Q345NQR2 激光焊对接接头的疲劳寿命快速预测.

表 1 Q310NQL2 和 Q345NQR2 耐候钢以及 ER50-G 焊丝主要化学成分

Table 1 Main chemical composition of Q310NQL2, Q345NQR2 weathering steel, and ER50-G filler wire

材料	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Ni	Ti	Fe
Q310NQL2	≤0.12	0.25 ~ 0.75	0.20 ~ 0.50	0.06 ~ 0.12	≤0.02	0.25 ~ 0.50	0.30 ~ 1.25	0.12 ~ 0.65	—	余量
Q345NQR2	≤0.12	0.25 ~ 0.75	≤1.0	0.06 ~ 0.15	≤0.02	0.25 ~ 0.50	0.30 ~ 1.25	0.12 ~ 0.65	—	余量
ER50-G	≤0.10	≤0.60	0.90 ~ 1.30	≤0.025	≤0.02	0.20 ~ 0.50	0.30 ~ 0.90	0.20 ~ 0.60	—	余量

表 2 Q310NQL2 和 Q345NQR2 耐候钢以及 ER50-G 焊丝力学性能

Table 2 Mechanical propertie parameters of Q310NQL2, Q345NQR2 weathering steel, and ER50-G filler wire

材料	屈服强度 R_{el}/MPa	抗拉强度 R_m/MPa	断后伸长率 $A(\%)$
Q310NQL2	≥310	480 ~ 670	≥22
Q345NQR2	≥345	490 ~ 675	≥22
ER-50G	≥400	≥500	≥22

4.2 疲劳试验与热像测试

根据国家标准 GB/T 3075—2008《金属材料

4 试验方法

4.1 试验材料

采用激光填丝焊对 2.5 mm 板厚的 Q310NQL2 耐候钢和 4 mm 板厚的 Q345NQR2 耐候钢进行焊接, 激光器功率为 6 kW 的光纤激光器, 焊丝为 ER50-G, 送丝设备选用数字化送丝结构. 焊接过程中, 填充焊丝位于激光之前, 激光与试板垂线的夹角为 10°, 保护气体为氩气, 坡口形式为 I 形 (全焊透), 激光焊接过程示意图如图 4 所示. Q310NQL2 耐候钢、Q345NQR2 耐候钢、ER50-G 焊丝的化学成分以及力学性能见表 1 和表 2 所示. Q310NQL2-Q345NQR2 激光焊对接接头尺寸如图 5 所示.

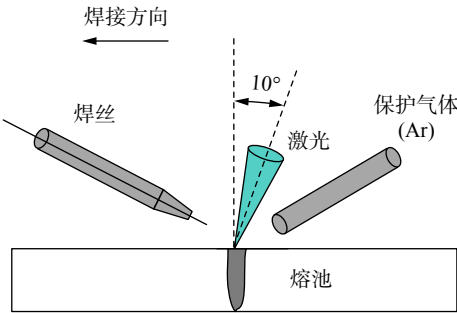


图 4 激光填丝焊示意图

Fig. 4 Schematic of laser welding with filler wire

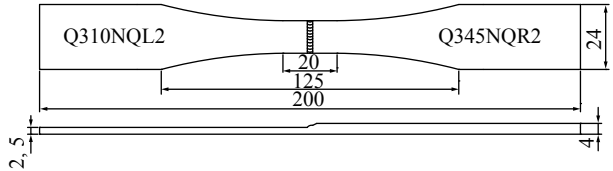


图 5 Q310NQL2-Q345NQR2 对接接头尺寸 (mm)

Fig. 5 Dimension of Q310NQL2-Q345NQR2 butt joint

疲劳试验 轴向力控制方法》在 PLG-100 型疲劳试验机上对 Q310NQL2-Q345NQR2 对接接头进行疲劳测试 (图 6), 试验频率为 106 Hz, 载荷形式采用单轴、正弦变化的动态载荷, 应力比 ($R=\sigma_{min}/\sigma_{max}$) 取 0.1. 选用 Fluke Ti450 红外热像仪对焊缝中心疲

劳过程的温升响应进行全程监测, 其采集图像的频率为 9 Hz. 疲劳试验热像测试具体试验步骤如下.

(1) 借助热像仪监测对接接头焊缝中心在不同应力幅水平下 ($\sigma_a=99.5\sim 171$ MPa) 的初始阶段温升斜率, 结合式 (16) 计算不同应力幅水平的能量耗散.

(2) 结合建立的能量耗散模型, 计算得到不同应力幅下的能量耗散响应, 进而测定 F_{an} , F_{in} , k , σ_{c0} 以及 σ_{c1} (疲劳极限) 等参数.

(3) 进行恒幅疲劳测试获取能量耗散临界值 \bar{E}_c .

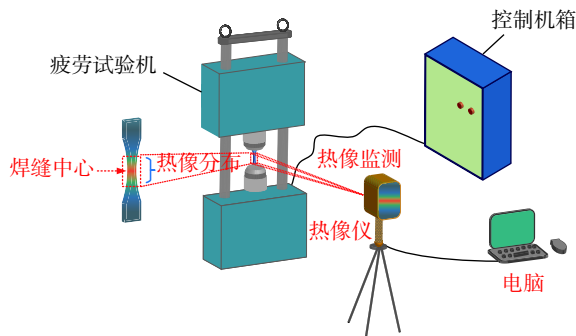


图 6 热像测试与疲劳试验系统

Fig. 6 System of thermographic monitor and fatigue test

5 试验结果

5.1 不同应力幅下的能量耗散响应分析

根据第 2 节建立的能量耗散模型, 结合式 (16) 计算了不同应力幅下的能量耗散值, 如图 7 所示. 结合式 (15), 采用最小二乘法对试验数据实现了较好的拟合, 并对 σ_{c0} , σ_{c1} , F_{an} , F_{in} 以及 k 等参数进行了确定 (表 3).

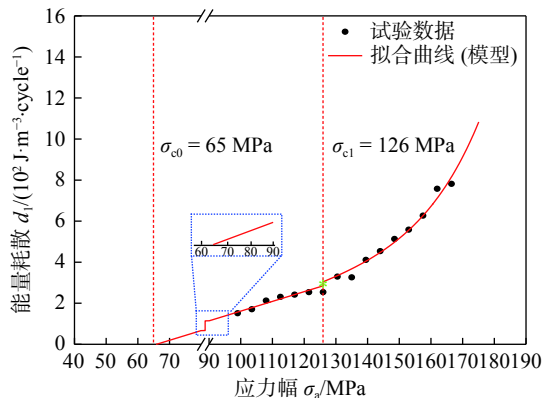


图 7 Q310NQL2-Q345NQR2 对接接头在不同应力幅下的能量耗散响应

Fig. 7 Energy dissipation response of Q310NQL2-Q345NQR2 butt joints under different stress amplitudes

表 3 能量耗散模型参数

Table 3 Parameters of energy dissipation model

σ_{c0}	σ_{c1}	F_{an}	F_{in}	k
65	126	4.7×10^{-2}	8.20×10^{-23}	10.18

从图 7 中可以看出, 随着应力水平的增加, 能量耗散值随之增加, 且在第一类关键应力 ($\sigma_{c0}=65$ MPa) 和第二类关键应力 ($\sigma_{c1}=126$ MPa, 即疲劳极限) 之间, 其能量耗散与应力幅的依赖程度几乎是线性的; 而当应力幅值超过第二类关键应力 σ_{c1} 时, 其不同应力幅下的能量耗散响应关系呈现为非线性趋势, 这与前述模型所述一致 (图 3). 结合建立的能量耗散模型 (式 (15)) 对试验数据拟合, 拟合的决策系数 R^2 为 0.97, 这表明能量耗散模型与试验数据的一致性较高, 这种较高的一致性源于两种不同的微结构演化机制, 如 3.1 节所述, 当应力幅等级介于 σ_{c0} 和 σ_{c1} 之间, 其微结构运动主要为可恢复的滞弹性行为, 例如轻微的原子振荡或内摩擦, 因此在该阶段其能量耗散的响应几乎是线性的; 而当应力幅等级高于 σ_{c1} (即疲劳极限) 时, 由于不可逆微塑性行为的出现, 且占该阶段微结构运动的绝大部分, 使得其能量耗散响应急剧增加, 且呈现为非线性的特点.

$$d_1 = \begin{cases} d_{an} = [0.047(\sigma_a - 65)], & 65 < \sigma_a < 126 \\ d_{an} + d_{in} = [0.047(\sigma_a - 65)] + 8.20 \times 10^{-23} \sigma_a^{10.18}, & \sigma_a > 126 \end{cases} \quad (19)$$

5.2 基于能量耗散的疲劳寿命预测

如 3.3 节所述, 疲劳过程中的能量耗散存在临界值 \bar{E}_c , 因此结合图 3 和式 (19), 对应力幅为 148.5 MPa 下与不可逆微结构运动相关的能量耗散临界值进行了计算, 可确定 \bar{E}_c 为 1.35×10^5 J/m³. 从图 8 中可以看出, 试样的不可逆能量耗散值基本分布在平均值加减一个标准差的范围内, 这表明该临界值几乎是一个常数, 与文献报道的结果一致^[17].

基于试验测定的能量耗散临界值 \bar{E}_c , 结合 3.3 节建立能量耗散模型 (式 (18)) 对 Q310NQL2-Q345NQR2 对接接头的疲劳寿命进行了快速预测, 如图 9 所示, 拟合方法为最小二乘法. 从图 9 中可以看出, 两条拟合 S-N 曲线非常接近, 其中经预测数据拟合的 S-N 曲线斜率和截距为 -10.18 和 27.22, 而经试验数据拟合的 S-N 曲线的斜率和截距为 -10.78 和 28.52, 其相对误差值分别为 5.54% 和 4.77%, 均小于 10%, 从而验证了提出模型具有

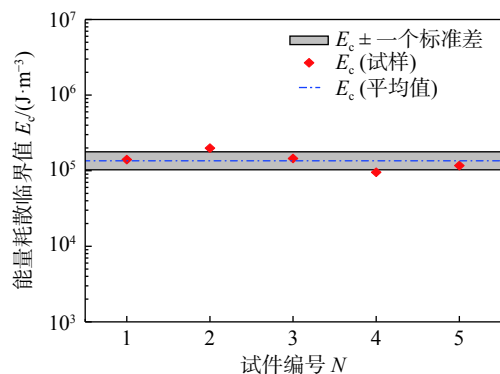


图8 应力幅为 148.5 MPa 下的对接接头高周疲劳能量耗散及其平均值

Fig. 8 Energy dissipation and its mean value of butt joints with the stress amplitude equals 148.5 MPa

较高的精度。因此在试样有限的情况下, 结合建立的能量耗散模型, 获取其不同应力等级下的能量耗散响应情况, 继而可实现 Q310NQL2-Q345NQR2 对接接头的疲劳寿命快速预测评估。值得指出的是, 尽管该模型对于 Q310NQL2-Q345NQR2 对接接头的疲劳性能具有较好的预测能力, 但是其对于其它类型接头的适用性还需要在接下来的工作中进一步验证。

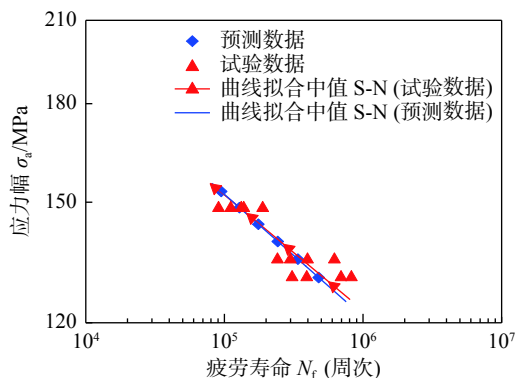


图9 经预测数据和试验数据拟合的中值 S-N 曲线对比
Fig. 9 Comparison of the median S-N curve fitted by the predicted and tested data

6 结论

(1) 结合 ISV 理论的本构模型, 提出了一种新的基于能量耗散理论的对接接头高周疲劳寿命快速预测模型。

(2) 模型引入了两个关键应力幅, 并将其与可恢复微结构运动 (滞弹性) 和不可恢复微结构运动 (非弹性) 开始形成的关键应力幅 σ_{c0} 和 σ_{c1} (疲劳极限) 建立了紧密关系, 阐明了疲劳过程中的微结构

运动的物理意义。

(3) 基于建立的疲劳寿命预测模型, 对 Q310NQL2-Q345NQR2 对接接头的疲劳进行了快速预测, 并借助预测数据对其 S-N 曲线进行了拟合, 结果表明, 经预测数据和试验数据拟合的中值 S-N 曲线非常接近, 其斜率和截距误差仅为 5.54% 和 4.77%, 从而验证了提出模型的有效性。

参考文献

- [1] 郭丽娟, 田慧, 李洋, 等. 大角度激光填丝双面焊碳钢车体 T 形接头工艺及性能研究 [J]. 焊接, 2017(12): 56 – 60.
Guo Lijuan, Tian Hui, Li Yang, *et al.* Investigation on technology and performance of T joint of carbon steel welded by large tilt angle laser welding with filler wire from double sides[J]. Welding & Joining, 2017(12): 56 – 60.
- [2] 李洋, 郭丽娟, 刘东军, 等. 激光填丝焊碳钢车体不等厚对接接头疲劳性能 [J]. 电焊机, 2018, 48(5): 31 – 33.
Li Yang, Guo Lijuan, Liu Dongjun, *et al.* Fatigue properties of different thickness butt joints of carbon steel body with laser fillet welding[J]. Electric Welding Machine, 2018, 48(5): 31 – 33.
- [3] 格尔内 (英). 焊接结构的疲劳 [M]. 周殿群, 译. 北京: 机械工业出版社, 1988.
Gurney T. Fatigue of welded structure[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1979.
- [4] 郭广平, 丁传富. 航空材料力学性能检测 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
Guo Guangping, Ding Chuanfu. Mechanical testing of aeronautical materials[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2017.
- [5] Wei W, Li C, Sun Y, *et al.* Investigation of the self-heating of Q460 butt joints and an S-N curve modeling method based on infrared thermographic data for high-cycle fatigue[J]. Metals, 2021, 11(2): 232.
- [6] 魏巍, 孙屹博, 杨光, 等. 基于能量耗散的 Q460 焊接接头疲劳强度评估 [J]. 焊接学报, 2021, 42(4): 49 – 55.
Wei Wei, Sun Yibo, Yang Guang, *et al.* Fatigue strength evaluation of Q460 weld joints based on energy dissipation[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(4): 49 – 55.
- [7] Huang J, Garnier C, Pastor M, *et al.* Investigation of self-heating and life prediction in CFRP laminates under cyclic shear loading condition based on the infrared thermographic data[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2020, 229: 106971.
- [8] Jia X, Zhu P, Guan K, *et al.* Fatigue evaluation method based on fracture fatigue entropy and its application on spot welded joints[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2022, 275: 108820.
- [9] 孙杨, 刘亚良, 李赫, 等. 基于红外热像法的 SUS301L-Q235B 异种材料点焊接头疲劳强度快速评定 [J]. 焊接学报, 2020, 41(1): 61 – 66.
Sun Yang, Liu Yaliang, Li He, *et al.* Rapid fatigue limit prediction of SUS301L-Q235B dissimilar materials spot-welded joint based on infrared thermography[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2020, 41(1): 61 – 66.

- [10] Chao J, Weimin L, Jian F, *et al.* Thermal fatigue behavior of copper/stainless steel explosive welding joint[J]. *China Welding*, 2021, 30(4): 25 – 29.
- [11] Zhang L, Liu X, Wu S, *et al.* Rapid determination of fatigue life based on temperature evolution[J]. *International Journal of Fatigue*, 2013, 54(9): 1 – 6.
- [12] 郭杏林, 王晓钢. 疲劳热像法研究综述 [J]. *力学进展*, 2009, 39(2): 217 – 227.
Guo Xingling, Wang Xiaogang. Overview on the thermographic method for fatigue research[J]. *Advances In Mechanics*, 2009, 39(2): 217 – 227.
- [13] Fan J, Zhao Y, Guo X. A unifying energy approach for high cycle fatigue behavior evaluation[J]. *Mechanics of Materials*, 2018, 120(5): 15 – 25.
- [14] 樊俊铃. 基于能量耗散的 Q235 钢高周疲劳性能评估 [J]. *机械工程学报*, 2018, 54(6): 1 – 9.
Fan Junling. High cycle fatigue behavior evaluation of Q235 steel based on energy dissipation[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(6): 1 – 9.
- [15] Teng Z, Wu H, Boller C, *et al.* A unified fatigue life calculation based on intrinsic thermal dissipation and microplasticity evolution[J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 131: 105370.
- [16] Yang W, Guo Q, Fan J, *et al.* Effect of aging temperature on energy dissipation and high-cycle fatigue properties of FV520B stainless steel[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2021, 242: 107464.
- [17] Yang W, Guo X, Guo Q, *et al.* Rapid evaluation for high-cycle fatigue reliability of metallic materials through quantitative thermography methodology[J]. *International Journal of Fatigue*, 2019, 124: 461 – 472.
- [18] Guo Q, Zairi F, Yang W. Evaluation of intrinsic dissipation based on self-heating effect in high-cycle metal fatigue[J]. *International Journal of Fatigue*, 2020, 139: 105653.
- [19] Guo Q, Guo X. Research on high-cycle fatigue behavior of FV520B stainless steel based on intrinsic dissipation[J]. *Materials & Design*, 2016, 90: 248 – 255.
- [20] Guo Q, Guo X, Fan J, *et al.* An energy method for rapid evaluation of high-cycle fatigue parameters based on intrinsic dissipation[J]. *International Journal of Fatigue*, 2015, 80: 136 – 144.
- [21] Zhang H, Wu G, Yan Z, *et al.* An experimental analysis of fatigue behavior of AZ31B magnesium alloy welded joint based on infrared thermography[J]. *Materials and Design*, 2014, 55: 785 – 791.
- [22] 郭少飞, 刘雪松, 张红霞, 等. 基于能量耗散的 AZ31B 镁合金接头疲劳极限快速评估 [J]. *焊接学报*, 2020, 41(12): 38 – 43.
Guo Shaofei, Liu Xuesong, Zhang Hongxia, *et al.* Rapid evaluation of fatigue limit of AZ31B magnesium alloy joints based on energy dissipation[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2020, 41(12): 38 – 43.
- [23] Liu Y, Sun Y, Sun Y, *et al.* Rapid fatigue life prediction for spot-welded joint of SUS301 L-DLT stainless steel and Q235B carbon steel based on energy dissipation[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, 10(11): 1 – 11.
- [24] Mark F, Douglas J. Historical review of internal state variable theory for inelasticity[J]. *International Journal of Plasticity*, 2010, 26(9): 1310 – 1334.
- [25] Rice J R. Inelastic constitutive relations for solids: An internal-variable theory and its application to metal plasticity[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1971, 19(6): 433 – 455.
- [26] Nourian-Avval A, Khonsari M. Rapid prediction of fatigue life based on thermodynamic entropy generation[J]. *International Journal of Fatigue*, 2021, 145: 106105.

第一作者: 魏巍, 博士; 主要研究方向为焊接结构疲劳可靠性评估; Email: ouyangweirui1995@163.com.

通信作者: 杨鑫华, 博士, 教授, 博士研究生导师; Email: yangxh@djtu.edu.cn.

(编辑: 郑红)

[上接第 90 页]

- [10] 蔡建鹏, 叶延洪, 张彦杰, 等. 坡口形式对 Q345/SUS304 异种钢对接接头残余应力和变形的影响 [J]. *机械工程学报*, 2015, 51(10): 55 – 61.
Cai Jianpeng, Ye Yanhong, Zhang Yanjie, *et al.* Effect of groove form on residual stress and deformation of butt joint of Q345/SUS304 dissimilar steel[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(10): 55 – 61.
- [11] Rong Y M, Xu J J, Lei T, *et al.* Magnetism aided mitigation of deformation and residual stress in dissimilar joint 316L with EH36[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 259: 23 – 32.
- [12] Li R, Yuan X J, Zhang H B, *et al.* Effect of axial magnetic field on TIG welding-brazing of AA6061 aluminum alloy to HSLA350 steel[J]. *Journal of Materials Research and Technology-Jmr & T*, 2021, 12: 882 – 893.
- [13] Yan F, Wang X W, Chai F, *et al.* Improvement of microstructure and performance for steel/Al welds produced by magnetic field assisted laser welding[J]. *Optics and Laser Technology*, 2019, 113: 164 – 170.

第一作者: 岳建锋, 博士, 教授; 主要从事焊接自动化和数值模拟方面的科研和教学工作; Email: billyue@163.com.

(编辑: 郑红)