

结构疲劳长裂纹扩展速率新模型研究^{*}

刘建涛¹, 杜平安¹, 黄明镜², 周 晴¹

(1. 电子科技大学 机械电子工程学院, 成都 610054;

2. 中国燃气涡轮研究院, 四川 江油 621703)

(郭兴明推荐)

摘要: 比较现有疲劳长裂纹扩展速率模型的特点和不足, 基于裂纹扩展钝化复锐理论推导, 提出了广义钝化复锐疲劳长裂纹扩展速率模型(GPLFCPRM), 并推导获得了疲劳长裂纹扩展速率模型通项. 该模型克服了现有疲劳长裂纹扩展速率模型的缺点, 能有效地描述自门槛值到断裂点全过程的裂纹扩展规律, 具有明确的物理含义, 且可反映材料的强度特性、断裂特性和热处理状态等因素对疲劳裂纹扩展速率的影响. 通过 LZ 50 钢、A533-B、AlZnMgCu 0.5 和 0.5Cr 0.5Mo 0.25V 钢疲劳裂纹扩展速率试验, 结果反映该模型与试验结果十分吻合, 且具有更广的通用性和应用推广价值.

关键词: 长疲劳裂纹; 门槛值; 循环应力比; 断裂韧度; 扩展模型

中图分类号: O346.2; TB114.3 **文献标识码:** A

DOI: 10.3879/j.issn.1000-0887.2009.05.004

引 言

随着航空航天、船舶、汽车和建筑等行业的发展, 结构趋于轻型、高速和重载化. 结构常因外部激励或自身质心偏移等因素承受周期振动激励. 因此, 如何预测结构的振动疲劳形成寿命和裂纹扩展寿命, 成为科学研究的重点和亟待解决的关键问题^[1-3].

疲劳断裂理论和模型研究关键主要集中在正确描述长裂纹门槛值附近、疲劳断裂点附近和自启裂到断裂全物理过程的行为上. Paris 模型仅能描述疲劳裂纹稳定扩展过程, 可能因起点与断裂点不准确及扩展速率路径的差异给安全性评价带来巨大误差; Forman 改进了 Paris 模型, 可描述稳定扩展和断裂点附近的裂纹扩展行为, 但可能因自门槛值 ΔK_{th} 到稳定阶段与自稳定阶段后期到疲劳断裂点 $(1-R)K_{IC}$ (R 为循环应力比) 裂纹扩展率规律的描述差异而给出错误的结果; Elber 模型仅能描述自启裂到稳定扩展阶段后期的扩展行为, 可能会因自稳定扩展阶段后期到断裂点扩展速率规律的描述误差而给出错误结论^[4-10]. 赵永翔等^[9]针对上述经验模型的缺点, 建立了新的经验模型, 能够描述自 ΔK_{th} 到断裂点 $(1-R)K_{IC}$ 全物理过程的裂纹扩展, 与试验结果吻合较好. 但模型物理含义不明确, 且不能反映材料特性对疲劳裂纹扩展寿命的影响规律. 张平生等^[11]基于线弹性断裂力学分析和裂纹扩展的钝化复锐模型, 推导

* 收稿日期: 2008-11-10; 修订日期: 2009-03-04

基金项目: “十一五”总装预先研究基金资助项目(YG060101C)

作者简介: 刘建涛(1982-), 男, 石家庄人, 博士(联系人. Tel: +86-28-83206719;

E-mail: jiantaoliu_uestc@163.com).

获得了裂纹扩展速率新模型. 该模型具有明确的物理含义, 且与试验数据吻合得很好. 缺点在于描述门槛值 ΔK_{th} 及附近裂纹扩展速率时, 对所有材料均采用近似线性函数逼近扩展速率曲线, 逼近速度慢, 且与试验结果有偏差.

本文基于上述模型的特点分析和裂纹扩展钝化复锐理论, 提出了广义钝化复锐疲劳长裂纹扩展速率模型. 该模型物理含义明确, 能够描述结构自门槛值 ΔK_{th} 到疲劳断裂点全过程的裂纹扩展规律, 且可反映材料的强度特性、断裂特性和热处理状态等因素对裂纹扩展速率的影响. 通过模型参数调整和简化可退化为 Elber, Forman-Keamey-Engle, 赵永翔和张平生等长裂纹扩展速率模型, 具有更广泛的通用性. 通过与 IZ50 钢、A533-B 和 AlZnMgCu0.5 等材料试验数据对比, 验证了模型的正确性和有效性. 该模型综合了文献[4-6, 9, 11]等模型的优点, 具有很高的理论研究和应用推广价值.

1 现有长裂纹扩展速率模型及特点

早期的疲劳长裂纹扩展速率模型主要包括 Paris-Erdogan 模型^[4]、Forman-Keamey-Engle 模型^[5]和 Elber 模型^[6], 表达式依次为

$$\frac{da}{dN} = D \Delta K^m, \quad (1)$$

$$\frac{da}{dN} = D \frac{\Delta K^m}{(1-R)K_{IC} - \Delta K}, \quad (2)$$

$$\frac{da}{dN} = D(\Delta K - \Delta K_{op})^m, \quad (3)$$

式中 D , m 为材料常数, R 为循环应力比, ΔK_{op} 为裂纹张开应力强度因子.

分析上述模型可知: Paris-Erdogan 模型只能描述疲劳长裂纹稳定扩展阶段的扩展规律; Forman-Keamey-Engle 模型将裂纹扩展规律单向拓展到高 ΔK 区, 仅可描述稳定阶段和断裂点附近的扩展规律; Elber 模型将裂纹扩展规律单向拓展至门槛值附近, 仅可描述门槛值附近和稳定阶段的扩展规律. 基于 Paris-Erdogan, Forman-Keamey-Engle 和 Elber 等裂纹扩展速率模型, 杨冰等^[12]发展了 Elber 型扩展速率方程:

$$\frac{da}{dN} = D_1(\Delta K - \Delta K_{th})^{m_1}, \quad (4)$$

式中 D_1 和 m_1 为材料常数. 上述模型不能正确描述循环应力比 R 的影响和疲劳断裂点 $(1-R)K_{IC}$ 处的裂纹扩展规律.

一系列工作^[4-12]表明, 门槛值 ΔK_{th} 附近、高 ΔK 区域和疲劳断裂点附近, 裂纹扩展与疲劳循环应力比 R 紧密相关. 赵永翔等^[9]依据上述经验公式, 并考虑循环应力比的影响, 提出新经验模型

$$\frac{da}{dN} = \frac{D_2}{(1-R)K_{IC} - \Delta K} \left[\frac{2(\Delta K - \Delta K_{th})}{1-R} \right]^{m_2}, \quad (5)$$

式中 D_2 和 m_2 为材料常数; K_{IC} 为材料当量断裂韧度.

模型(5)考虑了门槛值 ΔK_{th} 、疲劳断裂点 $(1-R)K_{IC}$ 和循环应力比 R 等因素的影响, 更准确地描述了整个裂纹扩展过程的规律. 但该模型依据经验模型提出, 无确切物理含义, 且无法反映材料特性(疲劳极限、屈服强度、断裂韧度等)的影响.

张平生等^[11]依据疲劳裂纹扩展的钝化复锐理论推导了裂纹扩展速率模型

$$\frac{da}{dN} = \frac{4\alpha}{\pi \sigma_{s, cyclic}^2 (1-R)} \left[\frac{\sigma_{s, cyclic}}{E \epsilon_{t, cyclic}} \right]^{1+n_{g, clic}} (\Delta K^2 - \Delta K_{th, R}^2) \left[1 + \frac{\Delta K}{K_{IC} - K_{max}} \right], \quad (6)$$

式中 α 为与材料无关的系数, $\sigma_{s, cyclic}$ 为周期载荷作用下材料屈服强度, $\epsilon_{f, cyclic}$ 为周期载荷作用下结构实际断裂应变, E 为材料弹性模量, n_{cyclic} 为周期载荷下的应变硬化指数, K_{max} 为周期载荷作用下应力强度因子最大值, $\Delta K_{th, R}$ 为对应应力比 R 的材料门槛值.

其余参数同上. 鉴于周期性能参量数据很少提供, 通常用单轴加载下的静强度参量代替^[11].

模型(6)有明确的物理含义, 同时能够描述疲劳裂纹扩展整个过程的规律性, 但在描述门槛值 ΔK_{th} 附近时, 采用近似线性函数逼近扩展速率曲线, 逼近速度慢, 且与试验结果有偏差.

2 基于裂纹扩展钝化复锐理论的广义钝化

复锐疲劳长裂纹扩展速率模型研究

鉴于 Paris-Erdogan 模型、Forman-Kearney-Engle 模型、Elber 模型和赵永翔模型等均基于经验提出, 无明确的物理含义, 且无法反映材料特性对裂纹扩展速率的影响; 张平生等提出的长裂纹扩展速率模型在描述门槛值附近时, 逼近速度慢, 与试验结果有差异的特点. 本文提出了广义钝化复锐疲劳长裂纹扩展速率模型.

2.1 广义钝化复锐疲劳长裂纹扩展速率模型研究

疲劳长裂纹扩展钝化复锐模型扩展过程见图 1 ($R = 0$).

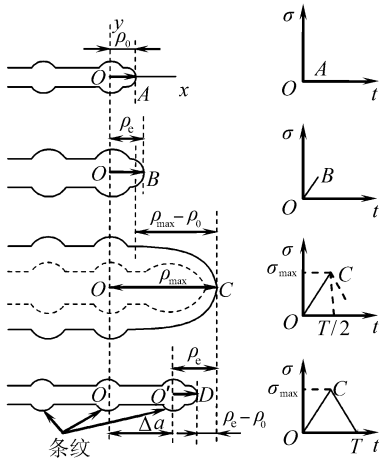


图 1 疲劳裂纹扩展的钝化复锐模型^[11] ($R = 0$)

扩展过程描述如下:

① $t = 0$ 时刻, 原始裂纹顶端曲率半径设为 ρ_0 , 裂纹顶点位置为 A , 载荷大小为 0;

② $0 < t < T/2$, 随着应力 σ 上升, 裂纹顶端先弹性张开和钝化达到 ρ_e (材料常数: 加载过程中, 弹性钝化到塑性钝化的临界值);

③ $t = T/2$ 时刻, 应力 σ 上升至最大值 σ_{max} , 裂纹达到最大钝化 ρ_{max} ;

加载的 $T/2$ 时间内, 裂纹钝化过程保持焦点 O 不变, 裂纹顶端向前总的扩展量

$$AC = \rho_{max} - \rho_0; \quad (7)$$

④ $T/2 < t \leq T$, 应力逐渐下降, 由于裂纹顶端区域塑性残留张应变的影响, 弹性区向塑性区施加反向压应力, 产生闭合效应. 且单调塑性区内会出现一个较小的反转塑性区. 反转塑性区内, 裂纹顶端又发生了与拉伸时反向的弹塑性变形, 并导致裂纹顶端复锐.

通常大气环境中, 裂纹顶端复锐时, 多余的自由表面不能全部消失, 从而形成条纹痕迹, 见图 1. 裂纹一周内的实际扩展量

$$\Delta a = (\rho_{max} - \rho_0) - (\rho_e - \rho_0) = \rho_{max} - \rho_e. \quad (8)$$

试验表明: 一个条纹由一个应力循环产生; 但一个应力循环不一定能产生一个条纹. 特别是门槛值附近裂纹扩展速率 $da/dN \sim 10^{-8}$ mm/cycle (远小于晶格常数), 此时裂纹前沿扩展与条纹产生是非同步过程. 依据式(1)~(5)形式, 考虑使用以下方式将 Δa 与 da/dN 对应起来:

$$\frac{da}{dN} = D(\rho_{max} - \rho_e)^m. \quad (9)$$

若 $R \neq 0$, 裂纹顶端卸载不能复锐到 ρ_e 值, 采用等效钝化临界值 $\rho_{e, eff}$ 代替, 即

$$\frac{da}{dN} = D(\rho_{\max} - \rho_{e, \text{eff}})^m \quad (10)$$

因为 $R = 0$ 时, $\rho_{e, \text{eff}} = \rho_e$; $R = 1$ 时, $\rho_{e, \text{eff}} = \rho_{\max}$. 故 $\rho_{e, \text{eff}}$ 可近似认为

$$\rho_{e, \text{eff}} = \rho_e + R(\rho_{\max} - \rho_e). \quad (11)$$

不考虑压应力对裂纹扩展的贡献, 式(11)带入式(10)得裂纹扩展速率表达式

$$\frac{da}{dN} = D[(1-R)(\rho_{\max} - \rho_e)]^m. \quad (12)$$

文献[11]采用断裂单元模型确定的钝化最大曲率半径为

$$\rho_{\max} = \frac{4K_{\max}^2}{\pi \sigma_{s, \text{cyclic}}^{1+n_{\text{cyclic}}} (E \mathcal{E}_{f, \text{cyclic}})^{(1+n_{\text{cyclic}})}}. \quad (13)$$

弹、塑性钝化转变的临界值 ρ_e 可采用塑性钝化的无限减小逼近求解

$$\rho_e = \lim_{(K_{\max})_{\text{th}, 0} \rightarrow 0} \rho_{\max} = \lim_{(K_{\max})_{\text{th}, 0} \rightarrow 0} \frac{4K_{\max}^2}{\pi \sigma_{s, \text{cyclic}}^{1+n_{\text{cyclic}}} (E \mathcal{E}_{f, \text{cyclic}})^{(1+n_{\text{cyclic}})}}. \quad (14)$$

考虑裂纹尖端疲劳损伤由塑性累积损伤产生, 取 $K_{\max} \approx (K_{\max})_{\text{th}, 0}$, 带入式(14)得

$$\rho_e = \frac{4(K_{\max})_{\text{th}, 0}^2}{\pi \sigma_{s, \text{cyclic}}^{1+n_{\text{cyclic}}} (E \mathcal{E}_{f, \text{cyclic}})^{(1+n_{\text{cyclic}})}}, \quad (15)$$

式中 $(K_{\max})_{\text{th}, 0}$ 表示 $R = 0$ 时,

$$K_{\max} \xrightarrow{\text{趋近}} K_{\text{th}}. \quad (16)$$

通常认为^[11]

$$\Delta K_{\text{th}, R} = (1-R)^r \Delta K_{\text{th}, 0}, \quad (17)$$

式中, r 反映了不同循环应力比对门槛值与 $R = 0$ 时门槛值的映射关系, 介于 0.5~1.0.

当 $R = 0$ 时, 有下式成立:

$$(K_{\max})_{\text{th}, 0} = \Delta K_{\text{th}, 0}. \quad (18)$$

联立式(15)、(16)和(17)可得 ρ_e 为

$$\rho_e = \frac{4K_{\text{th}, R}^2}{\pi \sigma_{s, \text{cyclic}}^{1+n_{\text{cyclic}}} (E \mathcal{E}_{f, \text{cyclic}})^{(1+n_{\text{cyclic}})} (1-R)^{2r}}. \quad (19)$$

结合式(12)、(13)和(19), 取 $r = 1.0$, 且考虑裂纹扩展第 III 阶段静断机制加速裂纹扩展效应, 提出广义钝化复锐疲劳长裂纹扩展速率模型

$$\frac{da}{dN} = D \left[\frac{4(\Delta K^2 - \Delta K_{\text{th}, R}^2)}{\pi(1-R)\sigma_{s, \text{cyclic}}^2} \left(\frac{\sigma_{s, \text{cyclic}}}{E \mathcal{E}_{f, \text{cyclic}}} \right)^{1+n_{\text{cyclic}}} \right]^m \left[1 + \frac{\Delta K}{K_{\text{IC}} - K_{\max}} \right]. \quad (20)$$

2.2 疲劳长裂纹扩展速率模型对比分析

结构中存在中心或边界裂纹时, 应力强度因子表达形式可表示为

$$K = F(\alpha) \cdot S_g \cdot G(a), \quad (21)$$

式中 $F(\alpha)$ 为形状系数, 与裂纹和结构形状有关; S_g 为裂纹尖端附近应力大小; $G(a)$ 为裂纹长度的函数.

由式(21)可知

$$K_{\text{I}} \propto S_g, \quad (22)$$

故循环应力比 R 可表示为

$$R = \frac{S_{g, \text{min}}}{S_{g, \text{max}}} = \frac{K_{\text{min}}}{K_{\text{max}}}. \quad (23)$$

又因应力强度因子范围可表示为

$$\Delta K_R = K_{\max, R} - K_{\min, R}, \quad (24)$$

$$K_{\max, R} = \frac{\Delta K_R}{1 - R}. \quad (25)$$

将式(24)和(25)分别带入模型(5)、(6)和(20)化简得

$$\frac{da}{dN} = D_2 \left(\frac{2}{1 - R} \right)^{m_2} \frac{(\Delta K - \Delta K_{th})^{m_2}}{(1 - R)K_{IC} - \Delta K}, \quad (5)'$$

$$\frac{da}{dN} = \frac{[(1 - R)K_{IC} - R\Delta K] / [\Delta K + \Delta K_{th, R}]}{1 - R} \times \frac{4\alpha}{\pi\sigma_{s, cyclic}^2} \left[\frac{\sigma_{s, cyclic}}{E\epsilon_{t, cyclic}} \right]^{H + n_{cyclic}} \frac{[\Delta K - \Delta K_{th, R}]}{[(1 - R)K_{IC} - \Delta K]}, \quad (6)'$$

$$\frac{da}{dN} = D \left[\frac{4}{\pi\sigma_{s, cyclic}^2} \left(\frac{\sigma_{s, cyclic}}{E\epsilon_{t, cyclic}} \right)^{H + n_{cyclic}} \right]^m \times \left(\frac{\Delta K + \Delta K_{th, R}}{1 - R} \right)^m \frac{(\Delta K - \Delta K_{th, R})^m}{(1 - R)K_{IC} - \Delta K} [(1 - R)K_{IC} - R\Delta K]. \quad (20)'$$

比较上述 3 个模型可知:

1) 若要满足门槛值 ΔK_{th} 和疲劳断裂点 $(1 - R)K_{IC}$ 处裂纹扩展规律, 则模型必然包含通项

$$\frac{(\Delta K - \Delta K_{th, R})^{k_1}}{[(1 - R)K_{IC} - \Delta K]^{k_2}}, \quad (26)$$

式中 k_1 和 k_2 为幂指数, 分别反映模型趋近于门槛值和疲劳断裂点的裂纹扩展速率方式和快慢.

2) 当 $\Delta K \rightarrow \Delta K_{th}$ 时, 模型(1)和(2)无法正确描述裂纹的真实扩展过程; 模型(6)' 的裂纹扩展速率 da/dN 对所有材料均以近似线性趋近门槛值 ΔK_{th} , 逼近速度慢, 且与试验结果有偏差; 模型(3)、(4)、(5)' 和(20)' 则以幂函数方式趋近门槛值, 与实际情况相符, 但模型(3)和(4)无法反应 R 的影响.

当 $\Delta K \rightarrow (1 - R)K_{IC}$ 时, 模型(1)、(3)和(4)无法正确描述裂纹的真实扩展规律; 模型(2)、(5)'、(6)' 和(20)' 符合裂纹扩展第 II 阶段静断机制加速裂纹扩展效应.

3) 模型(1)~(4)和(5)' 基于经验模型开发, 与部分试验结果吻合很好, 但无明确的物理含义, 且无法体现材料特性和断裂韧性等参数对裂纹扩展各阶段的影响.

4) 本文提出的广义钝化复锐疲劳长裂纹扩展速率模型(GPLFCPRM, (20)') 综合了现有各模型的优点, 具有明确的物理含义, 能够描述自门槛值至疲劳断裂点整个裂纹扩展的规律, 能够反映材料强度和断裂特性、热处理状态等对裂纹扩展速率的影响规律, 具有广泛的理论研究和应用推广价值.

5) 当 $m = 1, D = \alpha$ 时, GPLFCPR 模型退化为张平生提出的疲劳长裂纹扩展速率模型; $m = m_2$ 时, 该模型趋近于赵永翔等提出的疲劳长裂纹扩展速率模型; 通过参数简化和合并, 模型可退化为模型(1)~(4). 该模型具有钝化复锐模型的物理含义, 克服了模型(1)~(6)的不足.

6) 鉴于脆性材料和韧性材料受载过程相同, 裂纹扩展过程相似, 故 GPLFCPR 模型的建立过程同样适用于脆性材料疲劳裂纹扩展速率模型的建立. 同时, GPLFCPR 模型基于钝化复锐理论建立, 符合结构疲劳长裂纹扩展速率的实际规律, 为应变增量理论、Rice 定性理论、滑移线理论和连续分布位错理论等的疲劳裂纹扩展模型建立提供参考.

3 模型的试验验证与分析

选用公开发表的几种结构钢和铝合金等韧性材料的疲劳裂纹扩展试验数据, 对广义钝化

复锐疲劳长裂纹扩展速率模型进行验证, 材料的特性数据见表 1(换算为统一单位). 试验均在室温下进行, 有关试样的形状、(平面应力或应变) 状态和几何参数等见参考文献[9, 11, 13].

表 1 材料参数及其特性数据表

材料参数	材料名称及状态							
	供应态					正火回火态	淬火回火态	
	A 533- B ^[13]		AlZnMgCu0.5 ^[11]	$\frac{1}{2}$ Cr $\frac{1}{2}$ Mo $\frac{1}{4}$ V 钢 ^[11]		LZ 50 ^[9]	$\frac{1}{2}$ Cr $\frac{1}{2}$ Mo $\frac{1}{4}$ V 钢 ^[11]	
R	0.1	0.5	0	0.2	0.4	0	0.2	
$\Delta K_{th}/(MN \cdot m^{-3/2})$	8.02	4.84	2.214	9.0	7.0	77.77	9.0	
$K_{I0}/(MN \cdot m^{-3/2})$	109.91	63.25		104	104	1341.06	165	
E/GPa	206.89	80.2		230		209.75	230	
ν	0.33	0.33		0.33		0.31	0.33	
σ_s/MPa	476	465		422		329.94	834	
σ_b/MPa	552	/		600		628.96	1000	
n	0.2145	0.087		0.2145		0.1702	0.1702	
ϵ_f	1.16	0.0924		0.35		0.5433	0.23	

表 2 广义钝化复锐裂纹扩展速率模型参数表

材料名称	状态	R	D	m
LZ50	正火回火态	0	0.03	1.08
A 533- B 钢	供应态	0.1	0.009	1.08
		0.5	0.009	1.08
AlZnMgCu0.5	供应态	0	0.009	1.08
		0.2	0.0015	1.08
0.5Cr 0.5Mo 0.25V 钢	供应态	0.4	0.0015	1.08
	淬火回火态	0.2	3×10^{-8}	1.08

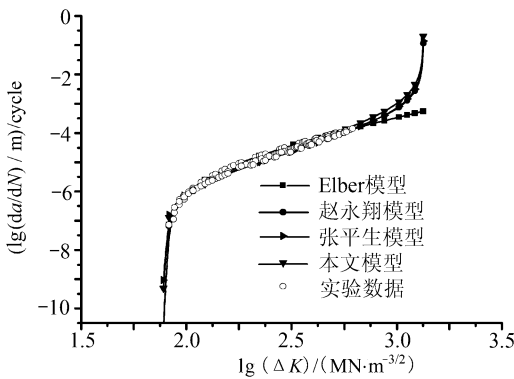


图 2 LZ50 钢 ($R = 0$) 裂纹扩展速率模型

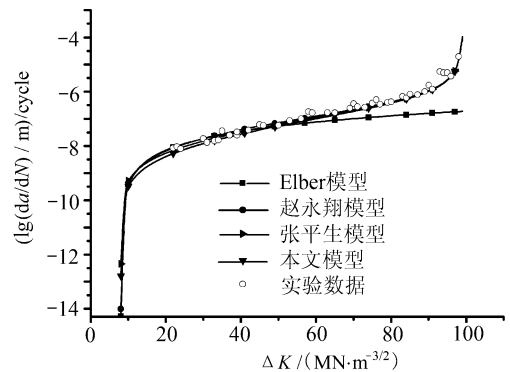


图 3 A 533-B 钢 ($R = 0.1$) 裂纹扩展速率模型

表 1 中, 缺少的应变硬化指数 n 根据弯曲极限强度经验公式计算得到. 根据表 1 材料参数和试验结果^[9, 11, 13] 绘制各裂纹扩展速率模型曲线见图 2~ 图 8, GPLFCPR 模型参数见表 2.

综合分析上述数据和曲线:

1) 比较图 2~ 图 8 的试验数据和模型曲线可知, Elber 模型仅可描述门槛值及附近和稳定

扩展阶段的裂纹扩展过程,在断裂点附近与实际情况偏差很大;赵永翔模型、张平生模型和GPLFCPR模型均可描述裂纹扩展的整个过程.裂纹扩展3个阶段的试验和模型预测数据吻合较好,说明GPLFCPR模型是完全正确和有效的.

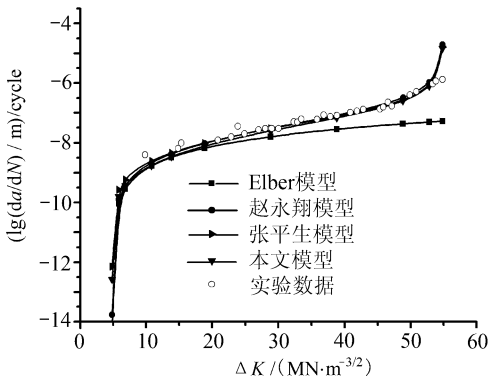


图4 A533-B钢 ($R = 0.5$) 裂纹扩展速率模型

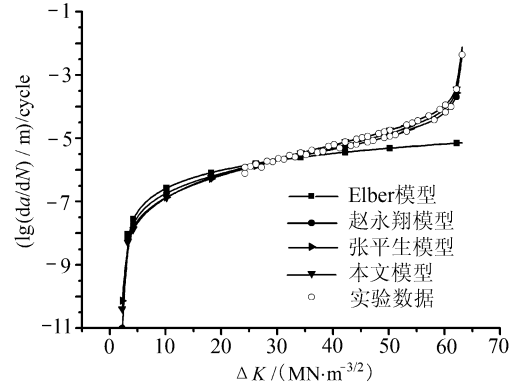


图5 AZnMgCu 0.5合金 ($R = 0$) 裂纹扩展速率模型

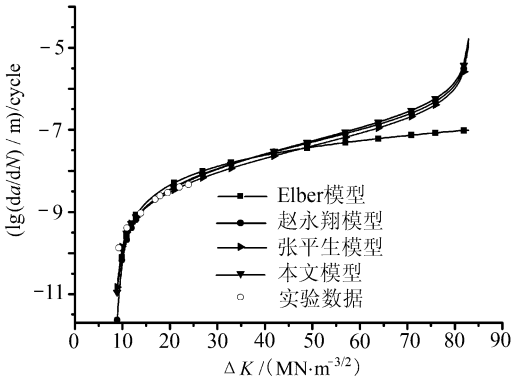


图6 0.5Cr 0.5Mo 0.25V钢供应态 ($R = 0.2$) 裂纹扩展速率模型

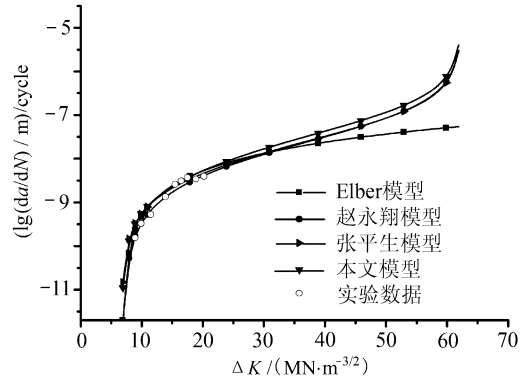


图7 0.5Cr 0.5Mo 0.25V钢供应态 ($R = 0.4$) 裂纹扩展速率模型

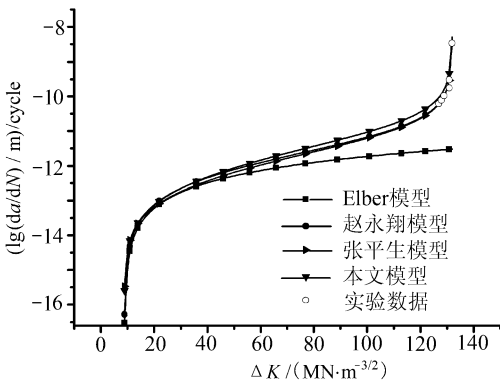


图8 0.5Cr 0.5Mo 0.25V钢淬火回火态 ($R = 0.2$) 裂纹扩展速率模型

2) 各模型描述门槛值及附近裂纹扩展速率时,与理论分析的结果一致.张平生模型以近似线性方式趋近门槛值,逼近速度最慢;Elber和赵永翔等模型则以指数模型趋近门槛值,更接近于试验结果,见图2、图6和图7;由式(20)'可知,GPLFCPR模型通过调节指数 m 大小,不仅影响模型趋近门槛值的快慢,同时,反映材料的强度和断裂特性的影响,可获得更好的逼近效果,使模型结果与试验数据更为吻合.

3) 比较数据表2的参数 m 和 D 可知,GPLFCPR模型在预测韧性材料疲劳裂纹扩展速率时,指数项可取常值.只需测定参数 D ,即可实现

门槛值和断裂韧性相近材料和结构裂纹扩展速率的估算,对于焊接结构疲劳裂纹扩展速率

估算和寿命预测有很高的应用价值.

4) GPLFCPR 模型可直观地展现出整个裂纹扩展过程的速率规律, 通过代入材料基本参数即可获得结构近似的疲劳裂纹扩展速率变化规律, 为疲劳试验设计和测试设计提供参考和指导, 可提高疲劳试验成功率, 降低试验成本.

5) GPLFCPR 模型具有明确的物理含义, 通过调节参数值可退化为现有各裂纹扩展速率模型, 能够反映材料强度和断裂特性、热处理状态等对裂纹扩展速率的影响, 是一种具有理论基础的通用型疲劳长裂纹扩展速率模型.

4 结 论

结构疲劳失效已成为各行业亟待解决的问题, 如何有效地估算结构的疲劳寿命和大型构件的裂纹扩展寿命具有重要意义^[14-16]. 本文提出了广义钝化复锐疲劳裂纹扩展速率模型描述疲劳裂纹扩展整个过程的规律性. 该模型具有以下特点:

1) 综合了现有疲劳裂纹扩展速率模型的优点, 具有明确物理含义, GPLFCPR 模型能够有效地描述自长裂纹门槛值 (ΔK_{th}) 至结构断裂的全物理过程, 且反映了材料强度和断裂特性、热处理状态等对裂纹扩展速率的影响.

2) 通过 GPLFCPR 模型和材料的常用力学性能参数可估算结构疲劳裂纹扩展规律和特点, 具有模型系数提取简单和容易获取的优点.

3) 通过多项试验结果对比, GPLFCPR 模型适宜于描述较广的合金系和结构钢多种热处理状态的疲劳裂纹扩展速率的整个过程. 模型能够反映材料的特性参数、断裂韧度对裂纹扩展过程的影响规律, 为最佳疲劳抗力的选取和设计提供的指导思路.

4) GPLFCPR 模型基于线弹性断裂力学和裂纹扩展的塑性钝化复锐模型开发, 能有效描述弹性和小范围塑性结构的疲劳裂纹扩展的整个过程和规律性, 为应变增量理论、Rice 定性理论、滑移线理论和连续分布位错理论等的疲劳裂纹扩展模型建立提供参考. 对于全屈服裂纹扩展问题, GPLFCPR 模型需进行修正或参数调整.

[参 考 文 献]

- [1] Chiewanichakorn M, Aref A J, Alampalli S. Dynamic and fatigue response of a truss bridge with fiber reinforced polymer deck[J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29(8): 1475- 1489.
- [2] Wang B, Siegmund T. A numerical analysis of constraint effects in fatigue crack growth by use of an irreversible cohesive zone model[J]. International Journal of Fracture, 2005, 132(2): 175- 196.
- [3] Patankar R, Qu R. Validation of the state- space model of fatigue crack growth in ductile alloys under variable- amplitude load via comparison of the crack- opening stress data[J]. International Journal of Fracture, 2005, 131(4): 337- 349.
- [4] Paris P, Erdogan F. A critical analysis of crack growth laws[J]. J Basic Eng, 1963, 85(3): 528- 534.
- [5] Forman R G, Kearney V E, Engle R M. Numerical analysis of crack propagation in cyclic- loaded structure[J]. J Basic Eng, 1967, 89(3): 459- 464.
- [6] Elber W. The significance of fatigue crack closure[A]. In: Damage Tolerate in Aircraft Structures [C]. ASTM STP486, Philadelphia: American Society for Testing and Material, 1971, 230- 242.
- [7] Richards C E, Lindley T C. The influence of stress intensity and microstructure on fatigue crack propagation in ferritic materials[J]. Eng Fract Mech, 1972, 4(7): 951- 978.
- [8] 赵永翔, 何朝明, 杨冰, 等. LZ50 车轴钢疲劳长裂纹扩展的概率模型[J]. 应用数学和力学, 2005, 26(8): 997- 1002.

- [9] 赵永翔, 杨冰, 张卫华. 一种疲劳长裂纹扩展速率新模型[J]. 机械工程学报, 2006, 42(11): 120– 124.
- [10] Ekwaro- Osire S, Khandaker M P H, Gautam K, et al. Effect of reference loading and crack configuration on the stress intensity factors in weight function method[J]. International Journal of Fracture, 2006, 139(3/4): 553– 560.
- [11] 张平生, 胡志忠, 蔡和平, 等. 一种疲劳裂纹扩展速率 da/dN 的表达式[J]. 西安交通大学学报, 1982, 16(1): 33– 42.
- [12] 杨冰, 赵永翔, 梁红琴, 等. 基于 Elber 型方程的随机疲劳长裂纹扩展概率模型[J]. 工程力学, 2005, 22(5): 99– 104.
- [13] Paris P C, Bucei R J, Wessel E T, et al. Extensive study of low fatigue crack growth rates in A533 and A508 steel[A]. In: Stress Analysis and Growth of Cracks, Proceedings of the 1971 National Symposium on Fracture Mechanics —Part 1[C]. ASTM, STP, 513. ASTM International, 1972, 141– 176.
- [14] Morais A B, Pereira A B. Interlaminar fracture of multidirectional glass/epoxy laminates under mixed – mode I + II loading[J]. Mechanics of Composite Materials, 2007, 43(3): 233– 244.
- [15] Martin V, Jaffre J, Roberts J E. Modeling fractures and barriers as interfaces for flow in porous media [J]. SIAM J Sci Comput, 2005, 26(5): 1667– 1691.
- [16] Savruk M P, Osechko M P, Parasyuk V E. Deformation fracture criterion for bodies with v- notches under the conditions of longitudinal shear[J]. Material Science, 2007, 43(1): 46– 52.

Research on New Model of Long Fatigue Crack Propagation Rates for Structures

LIU Jian- tao¹, DU Ping- an¹, HUANG Ming- jing², ZHOU Qing¹

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering,

University of Electronic Science and Technology of China,

Chengdu 610054, P. R. China;

2. China Gas Turbine Establishment, Jianyou, Sichuan 621703, P. R. China)

Abstract: By comparison of the characteristics of existing models for long fatigue crack propagation rates, a new model called generalized passivation– lancet model for long fatigue crack propagation rates (GPLFCPR) and the general formula for characterizing the process of crack growth rates were put forward based on the deduction of passivation– lancet theory. The GPLFCPR model overcomes the disadvantages of the existing models and could describe the rules of whole fatigue crack growth process from the cracking threshold to the critical fracturing point effectively with explicit physical meaning and also reflects the influence of material characteristics, such as strength parameters, fracture parameters and heat treatment, etc. Experimental results, testing with IZ50 steel, AlZnMgCu 0.5, 0.5Cr 0.5Mo 0.25V steel and so on, are used to verify the new model, which show great consistency. The GPLFCPR model owns much value for theoretical research and practical applications.

Key words: long fatigue crack; threshold; cyclic stress ratio; fracture roughness; propagation model