

超高周疲劳寿命预测方法探讨

宋亚南, 徐滨士, 王海斗, 张玉波, 邢志国

(装甲兵工程学院, 北京 100072)

摘要: 分析了金属材料超高周疲劳断口形貌特征, 介绍了基于 Paris 公式的裂纹扩展寿命预测模型和基于位错理论的疲劳裂纹萌生寿命预测模型, 并结合前期有关金属材料超高周疲劳行为的试验数据, 对 2 种预测模型的误差进行分析。结果表明, 基于位错理论的寿命预测模型较为准确; 而基于 Paris 公式的裂纹扩展寿命预测模型, 其预测精度随着疲劳寿命的增加而降低, 即材料组织缺陷萌生成为疲劳裂纹阶段占据疲劳寿命的绝大部分。在此基础上, 提出了超高周疲劳寿命预测的研究方向: 疲劳裂纹的萌生机制, 特别是裂纹源表面萌生和内部萌生的竞争性机制; 建立大样本数据, 结合统计学方法, 以工程构件的服役安全性和可靠性为基础, 精确评价超高周疲劳寿命。

关键词: 超高周疲劳; 寿命预测; 断口形貌; 预测误差

中图分类号: TG115.5⁺7

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)05-1203-06

20 世纪 80 年代以来, 各国学者对多种材料的疲劳性能进行研究^[1-4], 均发现其经过 10^8 次应力循环后仍会发生疲劳断裂现象, 彻底打破传统观点, 逐渐形成了一个新的研究领域——超高周疲劳。随着 21 世纪的到来, 许多高龄化设备的服役寿命达到了无限寿命极限, 继续服役的安全可靠性亟待论证。另外, 在现代工业领域, 许多工程构件的设计要求能够承受高达千兆循环周次的交变载荷, 工程需求促进了超高周疲劳研究的飞速发展。另一方面, 超声技术的应用为材料超高周疲劳研究提供了切实可行的实验方法^[5-7], 其工作频率可达 20 kHz, 解决了常规疲劳试验机工作频率低、试验周期长和试验费用昂贵等缺陷。

材料疲劳寿命的影响因素众多, 精确的预测方法一直都是国内外科研工作者的研究热点和难点^[8-10]。目前, 基于裂纹扩展理论的低高周疲劳寿命预测研究取得了一定的进展, 但其在超高周疲劳寿命范围内的预测精度有待深入探讨。本文分析了金属材料超高周疲劳断口形貌特征, 介绍了基于裂纹扩展模型和位错理论模型两种寿命预测方法, 并结合前期国内外研究数据, 对两种寿命预测方法进行了误差分析。

1 超高周疲劳断口特征

根据对多数材料的断口形貌分析, 可以发现超高周疲劳的断裂裂纹源大部分在材料内部, 极少数也会

发生在试样表面。图 1 给出了超高周疲劳裂纹源萌生于内部和表面的断裂形貌。表面裂纹源断裂形貌与低高周疲劳失效形貌具有相似的特征^[11,12]; 而内部裂纹的疲劳断裂形貌多呈鱼眼特征, 并且鱼眼中心发现材料内部夹杂, 夹杂物周围在光学显微镜下为黑色区域, 此区域在 Murakami^[13]、Shiozawa^[14]、Sakai^[12]、Tanaka^[15]和 Ochi^[16]等人的研究中分别被命名为 ODA (optically dark region)、GBF (granular bright facet)、FGA (fine granular area)、FCT (facet)和 RSA (rough surface area)。大量研究表明, 内部夹杂的深度一般在 20 ~ 200 μm 范围内, 并且与疲劳试验应力幅无直接关系; 夹杂深度与鱼眼直径的比值在 0.5~0.6 之间, 即鱼眼的外缘大多与试样表面相接^[15]。

2 Paris 裂纹扩展寿命预测方法

传统观点认为疲劳裂纹(表面萌生)在低于 ΔK_{th} 的区域内不发生扩展, 当应力强度因子达到 K_C 时, 材料发生失稳断裂; 而在 $\Delta K_{\text{th}} \sim K_C$ 区域内, 疲劳裂纹的扩展规律满足 Paris 公式^[19], 如图 2 实线所示。但针对材料的超高周疲劳行为, Murakami 等^[13,20]认为, 在低于临界应力强度因子的区域内疲劳裂纹仍会发生扩展, 称之为小裂纹扩展, 并且材料缺陷处的捕氢现象大大加速了小裂纹扩展, 其扩展规律亦满足 Paris 公式; 内部裂纹萌生的扩展规律与之相似, 如图 2 虚线

收稿日期: 2015-05-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2011CB013405); 国家杰出青年科学基金 (51125023)

作者简介: 宋亚南, 男, 1987 年生, 博士生, 装甲兵工程学院装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072, 电话: 010-66718475, E-mail: songyanan001216@163.com

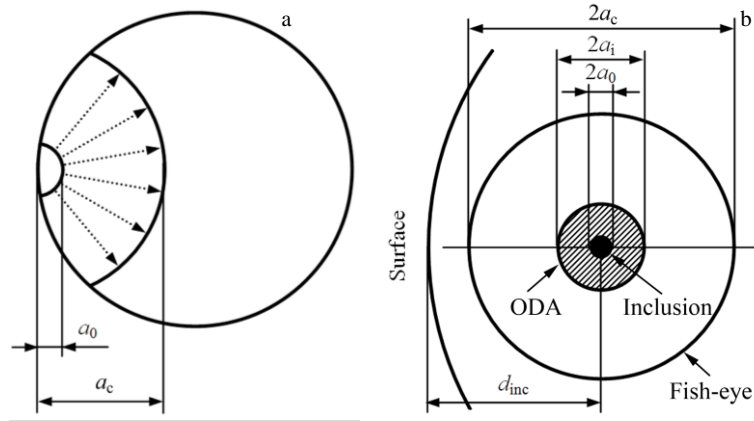


图 1 裂纹表面萌生和内部夹杂萌生的断裂形貌示意图

Fig.1 Schematic illustration of fracture surface with crack initiating at surface (a) and internal inclusion (b)^[17,18]

所示。进一步的研究表明，在相同的裂纹驱动力作用下，小裂纹的扩展速率较长裂纹的扩展速率大^[19]，如图 3 所示，裂纹在长度为 a_i 处由小裂纹过渡为长裂纹，其转折点位于小裂纹扩展门槛值的 x 倍处。当应力比很小 (≈ 0) 时， x 取最大值 3；当应力比较大 (≥ 0.8) 时， x 取 1^[19]。并且，初始缺陷尺寸 a_{int} 比初始裂纹尺寸 a_0 小 3%~10%，而斜率 α 的值远大于 3。根据文献[21-24]，不妨取 $x=3$ ， $\alpha=100$ ， $a_{int}=0.94 a_0$ 。

对于材料内部圆形夹杂裂纹，其断裂失效的疲劳寿命 N_F 为：

$$N_F = \frac{\pi E^2}{2 (\Delta\sigma)^2} \left[1.2 + 26 \sqrt{\frac{a_0}{a_i}} - 27 \sqrt{\frac{a_0}{a_c}} \right] \quad (1)$$

而对于半椭圆形表面裂纹，材料断裂失效的疲劳寿命 N_S 为：

$$N_S = \frac{2 E^2}{\pi (\Delta\sigma)^2} \left[1.2 + 26 \sqrt{\frac{a_0}{a_i}} - 27 \sqrt{\frac{a_0}{a_c}} \right] \quad (2)$$

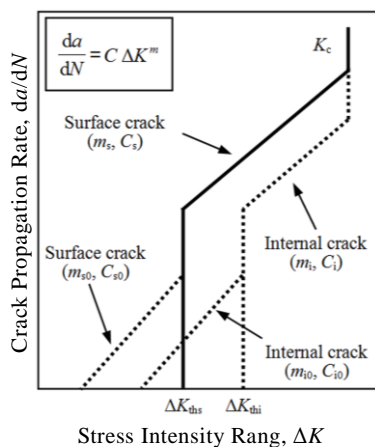


图 2 疲劳裂纹的扩展规律

Fig.2 Fatigue crack propagation law of surface and internal cracks^[17]

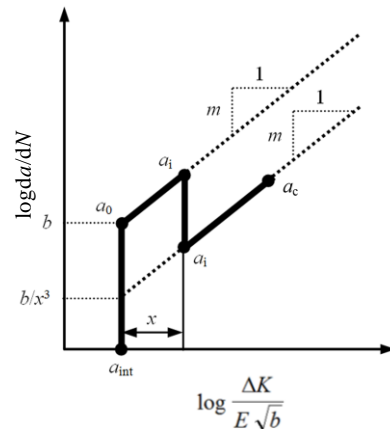


图 3 疲劳小裂纹与长裂纹的扩展行为

Fig.3 Diagram of relative fatigue crack growth behavior for small and long cracks^[15]

3 基于位错模型寿命预测

疲劳断裂的失效过程包括裂纹形核、小裂纹扩展、长裂纹扩展以及失效断裂 4 个阶段，如图 4 所示，各个阶段的精确界定与寿命评估是材料疲劳寿命预测的关键^[25]。大量研究^[26,27]表明，裂纹萌生寿命消耗了材料超高周疲劳全寿命的 90% 以上。因此，疲劳裂纹萌生寿命的精确评估是材料超高周疲劳寿命预测的关键环节。

Tanaka 和 Mura^[28]根据位错理论提出了同质材料或内部夹杂失效的疲劳裂纹萌生寿命模型：

$$N_i = \frac{A W_s}{(\Delta\tau - 2\tau_f)^2} \quad (3)$$

其中， A 是与材料性能和萌生裂纹类型相关的系数^[29]。根据文献[30]，断裂能可由下式计算得到：

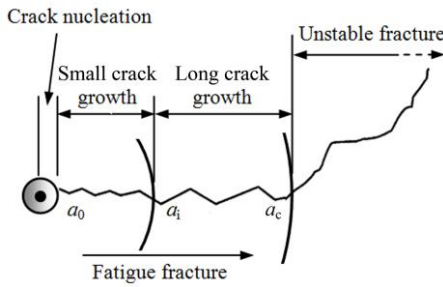


图 4 疲劳裂纹断裂失效过程示意图^[25]

Fig.4 A schematic of the crack path and different phases of the fatigue life^[25]

$$W_s = \frac{\Delta K_{th}^2}{2E} \quad (4)$$

Wang 等^[31]通过理论计算得出疲劳裂纹的萌生寿命公式为：

$$N_i = \frac{9 \times 10^5 G \Delta K_{th}^2}{2E(\Delta\sigma - \sigma_w)^2 a_0} \quad (5)$$

对于此模型，本文近似认为裂纹萌生寿命即为超高周疲劳全寿命。

4 寿命预测验证与对比分析

总结前期试验数据^[12, 32-49]，并对 2 种寿命预测模型的误差进行计算，计算结果在表 1 和表 2 列出。其中， N_{exp} 为试验实际值， N_F 和 N_S 分别采用公式(1)和(2)计算得到， N_i 采用公式(5)计算得到。

对不同寿命阶段的误差计算结果进行分析，如图 5 所示。可以发现，基于位错理论的寿命预测模型较为准确，在超高周甚至高周疲劳寿命区，其误差值基本都在 $\pm 10\%$ 之间，特别对于内部裂纹萌生失效模式以及 2×10^8 循环周次以上的疲劳失效，其预测精度更高；而基于 Paris 公式的裂纹扩展寿命预测模型，其预测误差与疲劳寿命有很大的关系，在高周疲劳阶段，其误差值也都在 $\pm 10\%$ 之间，而在超高周阶段，其误差值都在 -10% 以上，并且预测精度随着疲劳寿命的增加而降低。由此可见，疲劳裂纹萌生过程是超高周疲劳寿命的主要阶段，并且此阶段不满足 Paris 公式。另外，2

种预测模型对表面裂纹萌生和内部裂纹萌生 2 种失效模式呈现一致的变化规律，可见疲劳断裂失效过程在高周疲劳阶段和超高周疲劳阶段是相似的。

图 6 给出了材料初始裂纹尺寸对两种模型预测误差的影响规律。可以发现，基于位错理论的寿命预测模型，其预测误差基本没有明显变化；对于裂纹扩展寿命预测模型，当 $a_0 > 10 \mu\text{m}$ 时，其预测误差基本没有太大变化；而当 $a_0 < 10 \mu\text{m}$ 时，其预测精度很差。这是由于材料内部小缺陷萌生成为疲劳裂纹的过程占据疲劳寿命的绝大部分，Paris 公式不再适用。

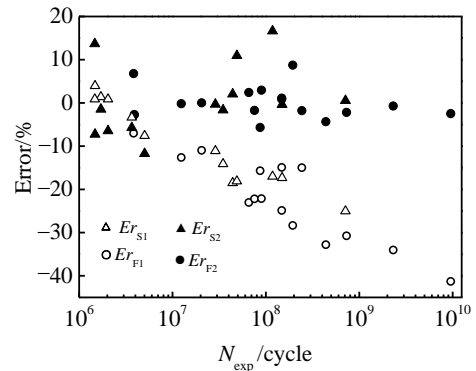


图 5 2 种模型在不同疲劳寿命阶段的预测误差

Fig.5 Prediction errors of the two modes in high cycle fatigue range and very high cycle fatigue range

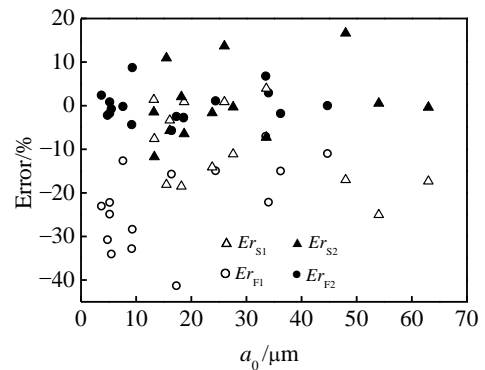


图 6 2 种模型的预测误差与初始裂纹尺寸的关系

Fig.6 Relationship between prediction errors of the two modes and initial crack sizes

表 1 材料内部裂纹萌生失效模式的疲劳寿命预测误差分析

Table 1 Error analysis of fatigue life estimation with internal inclusion

$\Delta\sigma$	N_{exp}	a_0	a_i	a_c	N_F	ΔK_{th}^a	σ_w	N_i	$Er_{F1}^b/\%$	$Er_{F2}^c/\%$
JIS SUJ2 ($E=204.8 \text{ GPa}$) ($G=78.8 \text{ GPa}$), $R=-1$, $f=50 \text{ Hz}$, $H_v=7.73 \text{ GPa}$ (Ref. [12])										
900	1.94×10^8	9.3	19.7	95.6	8.66×10^5	6.3	873^d	1.03×10^9	-28.36	8.75
50CrV4 ($E=206.0 \text{ GPa}$) ($G=79.8 \text{ GPa}$), $R=-1$, $f=20 \text{ kHz}$, $H_v=5.19 \text{ GPa}$ (Ref. [32])										
800	6.56×10^7	3.7	19.0	370.0^e	1.04×10^6	3.3	729^d	1.01×10^8	-23.03	2.42
740	1.48×10^8	5.2	21.6	520.0^e	1.37×10^6	3.7	688^d	1.74×10^8	-24.88	0.86

续表 1

54SiCrV6 ($E=208.7$ GPa) ($G=80.8$ GPa), $R=-1, f=20$ kHz, $H_v=5.15$ GPa (Refs. [32, 33])										
825	1.24×10^7	7.6	17.4	760.0°	1.58×10^6	4.2	642^d	1.20×10^7	-12.62	-0.18
775	7.56×10^7	5.2	19.7	520.0°	1.35×10^6	3.7	684^d	5.52×10^7	-22.19	-1.74
725	7.31×10^8	4.8	22.2	480.0°	1.38×10^6	3.6	693^d	4.66×10^8	-30.74	-2.20
SAF 2507 ($E=200.0$ GPa) ($G=77.0$ GPa), $R=0, f=150$ Hz, $H_v=3.09$ GPa (Ref. [34])										
325	1.48×10^8	24.4	60.5	2440.0°	8.93×10^6	4.2	299^d	1.82×10^8	-14.93	1.10
305	2.43×10^8	36.2	53.4	3620.0°	1.43×10^7	4.8	280^d	1.72×10^8	-14.99	-1.78
JIS SCM435 ($E=195.0$ GPa) ($G=75.5$ GPa), $R=-1, f=1000$ Hz, $H_v=5.62$ GPa (Ref. [35])										
704	3.90×10^6	18.6	24.8	1860.0°	2.53×10^6	6.1	340	2.59×10^6	-2.84	-2.69
448	8.68×10^7	16.4	33.9	1640.0°	4.94×10^6	5.8	340	3.07×10^7	-15.69	-5.68
0.46% carbon steel ($E=210.0$ GPa) ($G=82.7$ GPa), $R=-1, f=80$ Hz, $H_v=6.55$ GPa (Ref. [36])										
666	3.83×10^6	33.5	61.1^f	170.0^g	1.32×10^6	8.4	480	1.07×10^7	-7.02	6.79
608	2.05×10^7	44.7	73.3^f	1783.3^g	3.23×10^6	9.2	480	2.06×10^7	-10.98	0.02
529	8.97×10^7	34.0	96.9^f	233.3^g	1.56×10^6	8.4	480	1.54×10^8	-22.13	2.94
SAE 8620 ($E=204.8$ GPa) ($G=79.4$ GPa), $f=20$ kHz, $R=-1, H_v=3.02$ GPa (Ref. [37])										
310	4.39×10^8	9.2	133.0^f	133.0	6.42×10^5	3.0	280	1.85×10^8	-32.80	-4.34
290	2.31×10^9	5.5	257.8^f	423.0	1.50×10^6	2.5	280	1.98×10^9	-34.03	-0.72
285	9.55×10^9	17.3	183^f	183.0	7.24×10^5	3.7	280	5.40×10^9	-41.29	-2.48

$a^{[49]}: \Delta K_{th} = 2.77 \times 10^{-3} (100H_v + 120) (\sqrt{\pi} a_0)^{1/3};$

$g: a_c = d_{inc} / 0.6;$

$b: Er_{F1} = 100\% (\log N_F - \log N_{exp}) / \log N_{exp};$

$c: Er_{F2} = 100\% (\log N_i - \log N_{exp}) / \log N_{exp};$

$d^{[36]}: \sigma_w = 1.56 [(1-R)/2]^{0.226 + H_v \times 10^{-4}} (100H_v + 120) / (\sqrt{\pi} a_0)^{1/6};$

$e: a_c = 100 a_0;$

$f^{[32]}: \text{令 } B = 620 \times 10^6 / (\Delta \sigma^2 \sigma_y^{0.532}), \text{ 若 } a_0 \leq B \leq a_c, \text{ 则 } a_i = B, \text{ 若 } B \leq a_0, \text{ 则 } a_i = a_0, \text{ 若 } B \geq a_c, \text{ 则 } a_i = a_c$

表 2 材料表面裂纹萌生失效模式的疲劳寿命预测误差分析

Table 2 Error analysis of fatigue life estimation with surface initiation

$\Delta \sigma$	N_{exp}	a_0	a_i	a_c	N_s	ΔK_{th}^a	σ_w^d	N_i	$Er_{S1}^b/\%$	$Er_{S2}^c/\%$
JIS SUJ2 ($E=204.8$ GPa) ($G=78.8$ GPa), $R=-1, f=27\sim 100$ Hz, $H_v=7.00$ GPa (Ref. [38])										
763	4.41×10^7	18.2	45.3	1820.0°	1.70×10^6	8.6	657	6.31×10^8	-18.51	2.03
722	4.89×10^7	15.5	35.5	1550.0°	1.98×10^6	8.2	675	3.38×10^8	-18.11	10.92
SAE 8620 ($E=204.8$ GPa) ($G=79.4$ GPa), $f=20$ kHz, $R=-1, H_v=3.02$ GPa (Ref. [37])										
295	1.18×10^8	48.0	249.1^f	970	5.00×10^6	6.1	288	2.59×10^9	-17.01	16.62
305	1.49×10^8	63.0	233.0^f	1030	5.69×10^6	6.7	275	1.38×10^8	-17.35	-0.39
295	7.12×10^8	54.0	249.1^f	682	4.32×10^6	6.4	282	7.95×10^8	-25.04	0.54
D38MSV5S ($E=208.3$ GPa) ($G=80.7$ GPa), $f=20$ kHz, $R=-1, H_v=2.46$ GPa (Refs. [37, 39])										
341	2.88×10^7	27.6	175.0^f	1131	4.28×10^6	4.4	274	2.72×10^7	-11.10	-0.33
351	3.48×10^7	23.8	165.2^f	544	3.00×10^6	4.2	281	2.61×10^7	-14.12	-1.66
D38MSV5S ($E=208.3$ GPa) ($G=80.7$ GPa), $f=20$ kHz, $R=0.1, H_v=2.46$ GPa (Refs. [37, 39])										
650	1.48×10^6	33.6	48.2^f	523	2.59×10^6	4.7	182	5.26×10^5	3.95	-7.28
550	1.71×10^6	13.2	67.3^f	795	2.08×10^6	3.5	212	1.38×10^6	1.37	-1.48
620	2.04×10^6	18.7	52.9^f	1040	2.31×10^6	3.9	200	7.97×10^5	0.86	-6.47
515	3.66×10^6	16.1	76.7^f	575	2.21×10^6	3.7	205	1.54×10^6	-3.34	-5.73
650	5.02×10^6	13.3	48.2^f	357	1.56×10^6	3.5	212	8.20×10^5	-7.59	-11.75
100C6 martensitic steel ($E=210.0$ GPa) ($G=81.3$ GPa), $f=30$ Hz, $R=-1, H_v=7.78$ GPa (Ref. [37])										
950	1.47×10^6	26.0	26.0^f	612	1.66×10^6	10.6	678	1.02×10^7	0.86	13.67

$a^{[48]}: \Delta K_{th} = 3.3 \times 10^{-3} (100H_v + 120) (\sqrt{\pi} a_0)^{1/3};$

$b: Er_{S1} = 100\% (\log N_s - \log N_{exp}) / \log N_{exp};$

$c: Er_{S2} = 100\% (\log N_i - \log N_{exp}) / \log N_{exp};$

$d^{[36]}: \sigma_w = 1.43 [(1-R)/2]^{0.226 + H_v \times 10^{-4}} (100H_v + 120) / (\sqrt{\pi} a_0)^{1/6};$

$e: a_c = 100 a_0;$

$f^{[32]}: \text{令 } B = 620 \times 10^6 / (\Delta \sigma^2 \sigma_y^{0.532}), \text{ 若 } a_0 \leq B \leq a_c, \text{ 则 } a_i = B, \text{ 若 } B \leq a_0, \text{ 则 } a_i = a_0, \text{ 若 } B \geq a_c, \text{ 则 } a_i = a_c$

Nomenclature

a_c	Radius of a fish-eye area (μm)	a_i	Radius of an ODA area (μm)
a_0	Radius of an initial crack (μm)	a_{int}	Size of an inclusion or defect (μm)
d_{inc}	Depth of an inclusion or defect (μm)	E	Elasticity modulus (GPa)
W_S	Fracture energy for material	H_v	Vickers' hardness (GPa)
G	Shear modulus (GPa)	σ_y	Yield strength for material (MPa)
b	Burgers vector	σ_w	Fatigue limit for infinite life (MPa)
$\Delta\sigma$	Applied fatigue stress amplitude (MPa)	f	Load frequency (Hz)
R	Stress ratio	τ_f	Frictional stress (MPa)

5 结 语

目前, 对材料超高周疲劳寿命的预测方法主要基于两种模型: Paris 裂纹扩展理论和疲劳裂纹萌生寿命理论。总结前期有关金属材料超高周疲劳行为的试验数据, 对比分析了 2 种寿命预测模型的预测误差, 基于位错理论的寿命预测模型较为准确; 而基于 Paris 公式的裂纹扩展寿命预测模型, 其预测精度随着疲劳寿命的增加而降低。因此, 可以认为疲劳裂纹的萌生寿命是超高周疲劳全寿命的主要部分。进一步研究疲劳裂纹的萌生机制, 特别是明确裂纹源表面萌生和内部萌生的竞争性机制, 对准确预测超高周疲劳寿命起到至关重要的作用。

超高周疲劳寿命的试验数据受到载荷谱、试验环境、材料微观组织等诸多因素影响, 这也是疲劳试验数据较为分散的主要原因。因此, 超高周疲劳寿命的精确预测不仅涉及金属材料科学、材料力学、振动力学、疲劳理论、断裂力学等多门学科, 还应建立大样本数据, 结合先进的统计学方法, 充分考虑工程构件在服役过程中的安全性和可靠性。

参考文献 References

- [1] Naito T, Asami K, Kikuchi M. *Metall Mater Trans A*[J], 1984, 15: 1431
- [2] Bathias C. *Fatigue Fract Eng M*[J], 1999, 22: 559
- [3] Pyttel B, Schwerdt D, Berger C. *Int J Fatigue*[J], 2011, 33: 49
- [4] Wang Q Y, Berard J Y, Dubarre A *et al.* *Fatigue Fract Eng M* [J], 1999, 22: 667
- [5] Bathias C. *Int J Fatigue*[J], 2006, 28: 1438
- [6] Mayer H. *Int J Fatigue*[J], 2006, 28: 1446
- [7] George T J, Seidt J, Shen M H H *et al.* *Int J Fatigue*[J], 2004, 26: 477
- [8] Li Ting(李 婷), Ma Yan(马 雁). *Rare Metal Mat Eng*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(5): 1075
- [9] Sun Cai(孙 才), Huang Zewen(黄泽文). *Rare Metal Mat Eng* (稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(3): 589
- [10] Ozaltun H, Shen M H H, George T *et al.* *Exp Mech*[J], 2011, 51: 707
- [11] Zhong Shen(钟 申), Zheng Ziqiao(郑子樵), Zhong Liping(钟俐萍) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals* (中国有色金属学报)[J], 2012, 22(10): 2734
- [12] Sakai T, Sato Y, Oguma N. *Fatigue Fract Eng M*[J], 2002, 25: 765
- [13] Murakami Y, Nomoto T, Ueda T *et al.* *Fatigue Fract Eng M* [J], 2000, 23: 893
- [14] Shiozawa K, Lu L, Ishihara S. *Fatigue Fract Eng M*[J], 2001, 24: 781
- [15] Tanaka K, Akiniwa Y. *Fatigue Fract Eng M*[J], 2002, 25: 775
- [16] Ochi Y, Matsumura T, Masaki K *et al.* *Fatigue Fract Eng M* [J], 2002, 25: 823
- [17] Akiniwa Y, Miyamoto N, Tsuru H *et al.* *Int J Fatigue*[J], 2006, 28: 1555
- [18] Shiozawa K, Murai M, Shimatani Y *et al.* *Int J Fatigue*[J], 2010, 32: 541
- [19] Kuroshima Y, Ikeda T, Harada M *et al.* *Trans Japan Soc Mech Eng*[J], 1998, 64: 2536
- [20] Murakami Y, Nomoto T, Ueda T *et al.* *Fatigue Fract Eng M* [J], 2000, 23: 903
- [21] Paris P C, Tada H, Donald J K. *Int J Fatigue*[J], 1999, 21: 35
- [22] Hertzberg R W, Pecorini T J. *Int J Fracture*[J], 1993, 15: 509
- [23] Hertzberg R W. *Mater Sci Eng A*[J], 1995, 190: 25
- [24] Marines-Garcia I, Paris P C, Tada H *et al.* *Mater Sci Eng A* [J], 2007, 468-470: 120
- [25] Wang Q Y, Berard J Y, Rathery S *et al.* *Fatigue Fract Eng M* [J], 1999, 22: 673
- [26] Marines-Garcia I, Paris P C, Tada H *et al.* *Eng Fract Mech*[J], 2008, 75: 1657
- [27] Shiozawa K, Morii Y, Nishino S *et al.* *Int J Fracture*[J], 2006, 28: 1521

- [28] Tanaka K, Mura T. *J Appl Mech*[J], 1981, 48: 97
(物理学报)[J], 1981, 30: 761
- [29] Zhou R S, Cheng H S, Mura T. *J Tribol*[J], 1989, 111: 605
- [30] Anderson T L. *Fracture Mechanics, Fundamental and Application*[M]. Boca Raton, FL: CRC Press, 1991
- [31] Wang Q Y, Bathias C, Kawagoishi N *et al. Int J Fatigue*[J], 2002, 24: 1269
- [32] Yang Z G, Li S X, Liu Y B *et al. Int J Fatigue*[J], 2008, 30: 1016
- [33] Guo Ping(郭萍), Zhao Yongqing(赵永庆), Hong Quan(洪权) *et al. Rare Metal Mat Eng*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(6): 1479
- [34] Chai G C. *Int J Fatigue*[J], 2006, 28: 1611
- [35] Murakami Y, Matsunaga H. *Int J Fatigue*[J], 2006, 28: 1509
- [36] Murakami Y, Takada M, Toriyama T. *Int J Fatigue*[J], 1998, 16: 661
- [37] Marines-Garcia I, Paris P C, Tada H *et al. Int J Fatigue*[J], 2007, 29: 2072
- [38] Murakami Y, Yokoyama N N, Nagata J. *Fatigue Fract Eng M* [J], 2002, 25: 735
- [39] Marines-Garcia I, Galvan-Montiel D, Bathias C. *Arab J Sci Eng*[J], 2007, 33: 237
- [40] Zhang Hongtu(张宏图), Zhe Xiaoli(折晓黎). *Acta Phys Sin* (物理学报)[J], 1981, 30: 761
- [41] Chapetti M D. *Int J Fatigue*[J], 2011, 33: 833
- [42] Masaki N, Keiro T, Hisatake I *et al. Int J Fatigue*[J], 2010, 32: 475
- [43] Wang Xishu(王习术), Liang Feng(梁锋), Zeng Yanping(曾燕屏) *et al. Acta Metall Sin*(金属学报)[J], 2005, 41(12): 1272
- [44] Zhang J W, Lu L T, Shiozawa K *et al. Int J Fatigue*[J], 2011; 33: 880
- [45] Liu Y B, Li S X, Li Y D *et al. Mater Sci Eng A*[J], 2011, 528: 935
- [46] Bayraktar E, Marines-Garcias I, Bathias C. *Int J Fatigue*[J], 2006, 28: 1590
- [47] Cui W C, Huang X P. *Acta Metall Sin-Engl*[J], 2003, 16: 342
- [48] Liu Y B, Yang Z G, Li Y D *et al. Mater Sci Eng A*[J], 2008, 497: 408
- [49] Yang Z G, Li S X, Li Y D *et al. Mater Sci Eng A*[J], 2010, 527: 559

Life Prediction Models in very High Cycle Fatigue Regime

Song Yanan, Xu Binshi, Wang Haidou, Zhang Yubo, Xing Zhiguo

(Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract: The characteristics of fracture surface in very high cycle fatigue regime were analyzed. The fatigue lifetime prediction models based on crack growth and dislocation theory were introduced. On the basis of the numerical data of previous researches on very high cycle fatigue, the prediction errors of the two modes were analyzed. The results indicate that the model based on dislocation theory has better prediction ability. The prediction accuracy based on crack growth decreases with the increment of fatigue lifetime, i.e. the fatigue crack initiation consumes the main fraction of total life. Finally, some possible and prospective topics of future researches on fatigue lifetime prediction in very high cycle fatigue regime are proposed: the competing failure mechanism of surface/internal fatigue fracture modes. The lifetime in very high cycle fatigue regime could be predicted based on statistical methods by establishing large samples data and service safety of engineering components.

Key words: very high cycle fatigue; lifetime prediction; fracture surface; prediction error

Corresponding author: Wang Haidou, Ph. D., Professor, National Key Laboratory for Remanufacturing, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, P. R. China, Tel: 0086-10-66718475, E-mail: wanghaidou@aliyun.com