

文章编号: 1000-6893(2001) 05-0447-04

2. 25Cr-1Mo 合金钢 400 下表面疲劳短裂纹 群体演化行为研究及计算机模拟

郭 隽¹, 郭成璧², 梁莎莉²

(1. 北京航空航天大学 402 教研室, 北京 100083)

(2. 大连理工大学 动力系内燃机研究所, 辽宁 大连 116023)

COLLECTIVE EVOLUTION STUDY AND NUMERICAL SIMULATION OF SURFACE SHORT FATIGUE CRACKS OF 2. 25Cr-1Mo AT 400

Guo Jun¹, Guo Cheng-bi², LIANG Sha-li²

(1. 4th Dept., Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

(2. Dept. of Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

摘 要: 依据 2. 25Cr-1Mo 合金钢多种条件下表面疲劳短裂纹的实验分析结果, 提出了一种表面随机分布短裂纹群体演化行为模型, 模型计及了材料细观组织的障碍作用及裂纹相互之间的干涉效应。并用该模型对 2. 25Cr-1Mo 材料表面疲劳短裂纹萌生、扩展及合体的全过程进行了数值模拟分析, 结果表明短裂纹统计数据的模拟结果与实验结果基本一致。还对单条短裂纹行为进行了模拟分析。

关键词: 疲劳裂纹; 表面裂纹; 萌生与扩展; 数值模拟

中图分类号: O346.2 **文献标识码:** A

Abstract: The behavior of short cracks charges the damage process of high-temperature fatigue, and the study on short fatigue crack is of great importance. Based on experiment of 2. 25Cr-1Mo material's short cracks' collective evolution behavior, a stochastic physical model was proposed for visualizing the spatial and temporal distribution of stochastic cracks and evaluating the process of fatigue damage according to the characteristics of short cracks' behavior in this paper. The model considered the influence of microstructure and the interaction of short cracks. Not only the statistic feature of short fatigue cracks but also those of single cracks can be obtained by using this model. Simulation results agreed well with those of experiments. Some features of short fatigue cracks were also obtained through the analysis of simulation results.

Key words: short fatigue crack; surface crack; initiation and propagation; numerical simulation

1 表面疲劳短裂纹特征分析

一般地, 不满足线弹性断裂力学(LEFM)有效性条件的裂纹统称为短裂纹^[1]。具体又可分为细观组织短裂纹(Micro-structurally Short Cracks)和物理短裂纹(Physically Small Cracks)^[2]。本文中的短裂纹是指细观组织短裂纹。文中依据多种加载条件下 2. 25Cr-1Mo 材料表面疲劳短裂纹行为特征的分析结果, 提出了一种随机分布表面疲劳短裂纹的数值模型, 并对 2. 25Cr-1Mo 材料表面疲劳短裂纹进行了模拟分析, 依据模拟结果对破坏过程进行逆解析, 从而研究短裂纹的萌生、成长规律。

通过对 2. 25Cr-1Mo 材料多种加载条件下表

面疲劳短裂纹群体演化行为的观测分析, 获得了如下的短裂纹特征^[3]:

(1) 萌生的细观机制 疲劳损伤起因于沿晶短裂纹, 高温可促进晶界滑动, 晶界滑移聚集又会促进晶界孔洞的集结和局部扩散的发生, 而局部扩散又会促进孔洞成长, 因此高温下易于形成沿晶裂纹^[4]。严格来讲, 300~400 对于本文材料还不算是高温, 但事实上它已经表现出了高温疲劳特征。

(2) 裂纹萌生的难易与晶界长度无关 大多裂纹沿与应力轴接近垂直的方向优先萌生与扩展。

(3) 短裂纹的萌生扩展是随机的 许多短裂纹边萌生边扩展, 最后形成主裂纹导致材料断裂。

(4) 与裂纹相邻的晶界由于受裂尖应力集中的作用而容易破坏。

(5) 表面短裂纹在寿命初期就已经萌生了

在寿命前期和中期以裂纹萌生为主要损伤形式,同时伴随着裂纹的扩展长大;寿命后期裂纹扩展及相互之间的合体长大成为裂纹长大的主要因素,表现出较强的裂纹群体干涉行为。

(6) 该材料疲劳断裂对负荷条件有很强的依存性 温度越高,加载应变范围越大,裂纹萌生、扩展得越快,寿命越短。

2 数值模拟模型

(1) 材料细观组织仿真 在模拟短裂纹萌生、扩展之前需要生成用于数值模拟的材料细观结构背景图——二维直晶界组织结构图。金属材料组织结构的构造方法有多种^[5]。本文从物理冶金学角度出发,依据金属凝固过程符合 Monte Carlo 规律^[6],设计了简化的 Monte Carlo 法。短裂纹行为模拟就是在这些二维直晶界组织结构图上进行的。晶界组织图生成的基本步骤简述如下:

①用同一随机数种子给定各晶核(晶粒的形核点)的位置,晶核个数根据实际材料的晶粒面积密度来确定;

②给定各晶核的生成时间 P , P 是因晶核而异的随机数,晶核在时间 P 后生成;

③给定各晶核的生长速率 G ,各晶核生成后以速率 G 向各个方向扩展(G 取为常数);

④当某晶核在扩展过程中遇到其他正在扩展的晶核时,则它在该方向的扩展就停止,形成晶界;

⑤采用逐点识别法来判断晶界三重点的位置(晶界之间的三叉点),剔除不良三重点,同时识别各三重点间的关系,连接相关三重点得到直晶界,并确定各直晶界间的关系,记录晶界及晶界间关系数据于数组中,以备短裂纹模拟时使用。

适当地调整 G 的大小可得到不同晶粒密度的直晶界图。

(2) 短裂纹群体演化行为模型 目前人们提出了各种描述疲劳短裂纹行为的模型及方法^[7~14],本文依据对 2.25Cr-1Mo 材料表面疲劳短裂纹实验观测结果及同行学者大量研究所得的疲劳短裂纹特征,提出了随机分布表面沿晶短裂纹的群体演化行为模型,其基本内容简介如下:

①给定各直晶界 i 以不同的断裂抵抗值 R_i , R_i 为 0 到 1 之间的随机数,它是考虑到材料细观组织性能不均一性的随机数,从而用数值来代表材料细观组织的影响。

晶界几何条件及加载条件有关,可以写成如下形式

$$F_i = C_1 \sigma T \xi_{1i} = F \xi_{1i} \quad (1)$$

其中: C_1 是常数; σ 为加载应力; T 为加载温度; ξ_{1i} 是晶界对裂纹萌生的角度依存系数,随晶界几何形状的不同而不同。同时假定各晶界的 F_i 与 R_i 之间没有相关性。由于 F_i 造成的损伤,各晶界的断裂抵抗值 R_i 在单位循环后相应地减小 F_i 。

③晶界的断裂抵抗值 R_i 变为零时发生断裂,萌生了一个晶界大小的短裂纹。

④裂纹相邻接的晶界 i 由于受到裂纹应力集中作用的影响,使得作用于其上的破坏驱动力增大,此时该晶界所受到的总破坏驱动力设为 D_i :

$$D_i(c_i) = F_i + K_i a_i / 2 \quad (2)$$

$$K_i = C_2 \sigma T \xi_{2i} = K \xi_{2i} \quad (3)$$

式中: K_i 为裂纹扩展驱动力; a_i 为与晶界 i 相邻的裂纹长度; C_2 为常数; σ, T 同上述②中所述; ξ_{2i} 是考虑了裂纹间干涉效应的系数,反映了材料细观组织结构对裂纹扩展的作用。

⑤当裂纹相邻晶界的断裂抵抗值 R_i 减小到零时发生裂纹扩展,扩展了一个晶界大小。

⑥假设在单位循环中当相邻裂纹间距离达到模型中的最小尺寸时发生裂纹合体。实际应用中通常是取步长为多数循环 dN ,为此设定强制裂纹合体条件:当两裂纹尖端距离 x 满足下列条件^[13],且合体后长度大于合体前任一裂纹的长度(考虑到裂纹的方向)时发生合体

$$x < a_1 + a_2 - \sqrt{a_1^2 + a_2^2} \quad (4)$$

式中: a_1, a_2 分别为相邻裂纹的长度。取使得两裂纹间的路径最短的晶界作为合体路径。

⑦当裂纹达到一定的尺寸以后,由于应力缓和作用的影响,在以裂纹尖端为直径的圆形范围内不易发生裂纹萌生或扩展^[14]。

3 结果分析及讨论

(1) 材料组织结构仿真 在短裂纹模拟之前需要先获得材料的细观组织结构图,根据上节材料细观组织仿真算法,可以成功地模拟给定区域上任意晶粒度的金属材料随机多晶体显微结构网格。由于其理论依据是材料冶金学原理,故该算法可以较精确地模拟材料显微结构的几何学特征。

材料的晶粒密度 n_v (在 1mm^2 面积上的晶粒数目) 根据国标 GB6394-86《金属平均晶粒度测

定法》中的面积法计算。本文所用的试验材料为 2. 25Cr-1Mo 合金钢, 对 2. 25Cr-1Mo 材料金相组织照片进行计算分析得 $n_a = 5000$ 。模型中的晶粒生长速度 G 则需要多次进行试算来获得, 最终得 $G = 0.003$ 。图 1 就是用此参数模拟所得的材料直晶界结构图与实验结果的对照, 其中各图形的面积均为 $0.2\text{mm} \times 0.14\text{mm}$ 。对晶界数据的进一步分析也表明, 数值模拟结果与实际相符合, 图 2 为直晶界长度分布及晶界角度分布的模拟值与实验值的对照, 其中直晶界角度是指晶界与应力轴垂直方向的夹角。

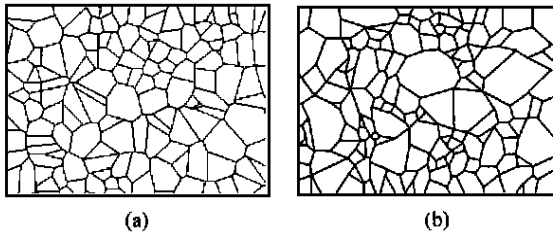


图 1 2. 25Cr-1Mo 材料细观组织模拟结果与实验结果的对比

(a) 直晶界模拟图 ($G = 0.003$); (b) 实验照片的直线近似图

Fig. 1 Straight grain boundary diagram of 2. 25Cr-1Mo material

(a) Simulation results ($G = 0.003$); (b) Experiment results

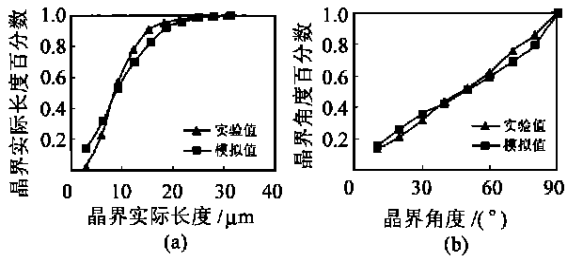


图 2 直晶界模拟结果与实验结果的对比

(a) 晶界实际长度分布曲线; (b) 晶界角度分布曲线

Fig. 2 Comparison between simulation results and experiment results of straight grain boundary

(a) Length distribution; (b) Angle distribution

(2) 短裂纹群体行为模拟分析 本文所用试样为直径 8mm 、标距 25mm 的光滑试棒, 在试样工作段处作一个大小为 $12\text{mm} \times 4\text{mm}$ 的小平面, 以便进行裂纹观测。试验前对试件进行研磨和化学抛光, 除去表面细小的加工损伤, 以避免裂纹在应力集中部位优先产生。疲劳实验是在具有高频加热装置的电气、油压伺服式试验机 (MTS810) 上进行的。本文对下列实验条件的短裂纹进行模拟分析: 在大气中, 温度 400°C , 加载应变范围 $\Delta\epsilon = 0.6\%$, 控制应变, 应变波形为三角形对称波形。在本实验条件下试件呈典型的表面裂纹型断

裂。采取中断实验和复膜技术相结合的方法, 获得了不同循环次数下的试样观测小平面上一定范围内的短裂纹形态。观测范围为 2 倍的 $1.56\text{mm} \times 1.14\text{mm}$, 取其中沿应力轴垂直方向投影长度在 $28.5\mu\text{m}$ 以上的裂纹为研究对象 (注: 这里的裂纹长度是指沿应力轴垂直方向的投影长度)。

由于微机内存及计算速度的限制, 每次模拟的面积取为 $0.9\text{mm} \times 0.4\text{mm}$, 进行了 10 倍于此的模拟, 取平均值作为最后的模拟结果。

利用上述方法, 并根据实际试件的裂纹面积密度 n_p 及裂纹平均半长 a_m 的观测结果进行试算, 最终确定上述实验条件下的模型参数 F 与 K 值分别为 $F = 1.2 \times 10^{-4}$, $K = 2.4 \times 10^{-1}$ 。利用该值的模拟结果与实验结果对照如图 3, 其中各模拟图是多次模拟结果叠加后按实验照片尺寸截取所得, 以便于与实验结果相对照, 即各图形面积均为 $1.56\text{mm} \times 1.14\text{mm}$ 。由于受篇幅限制, 这里只给出了部分图示。由图 3 可知本模型基本上真实地反映了实际疲劳表面短裂纹萌生、扩展及合体的全过程。对模拟结果进一步地分析表明: 模拟所得的试件表面上裂纹面积密度 n_p 、裂纹平均长度 a_m 以及它们随循环次数的变化规律均与实测结果相符合, 见图 4, 其中 N 为循环次数, N_f 为试件疲劳寿命。其中裂纹密度模拟值同实验值相比, 在

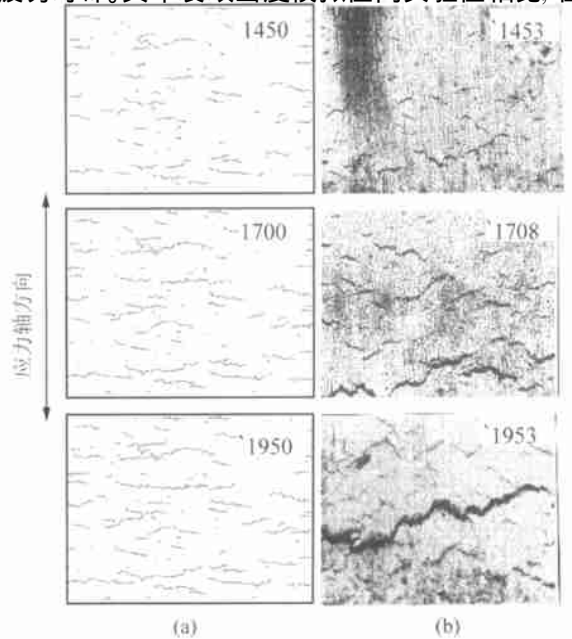


图 3 短裂纹形态模拟结果与实验结果的对比

(a) 模拟结果; (b) 实验结果

Fig. 3 Short crack patterns on specimen observation surface

(a) Simulation results; (b) Experiment results

寿命后期下降得不很显著,这是由于每次模拟的面积比较小,裂纹数目相对较少,合体现象较少的缘故。如果能在大型机上作计算,取较大的模拟范围将会得到更为理想的模拟结果。该模型还可以描述单条裂纹的发生发展过程,因此可以得到各裂纹的扩展速率、长度变化等情况,图5就是一组对单条裂纹的分析曲线。从图5(a)中可以看出短裂纹扩展速率呈现出较大的分散性;图5(b)是裂纹长度变化曲线,图中只给出了几条较长裂纹的变化情况,其他大部分裂纹扩展一段时间后停留,只有少数几条裂纹顺利长大,材料的最终失效就是由少数的一条或几条主裂纹的成长引起的。这些均与众多有关短裂纹的实验结果相一致。

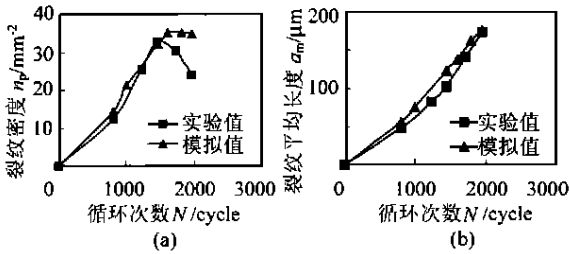


图4 短裂纹的模拟结果与实验结果的对比如
(a) 裂纹密度随循环次数的变化;
(b) 裂纹平均长度随循环次数的变化

Fig. 4 Comparison between simulation results and experiment results of short cracks
(a) Change of crack density with cycles;
(b) Change of crack mean length with cycles

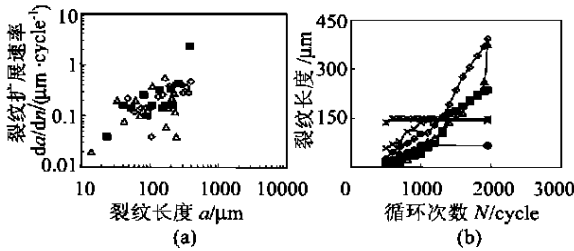


图5 对模拟结果的单条短裂纹分析结果
(a) 裂纹扩展速率与长度的关系;
(b) 主/次裂纹长度与循环次数的关系

Fig. 5 Analyzing results of single crack through simulation
(a) Change of crack propagation rate with length;
(b) Change of several single crack length with cycles

参 考 文 献

[1] 乔宇, 洪友士. 短裂纹群体行为及疲劳寿命预测[J]. 力学进展, 1997, 27(4): 489- 503.
[2] 洪友士, 方彪. 疲劳短裂纹萌生和发展的微观过程和理论

[J]. 力学进展, 1993, 23(4): 468- 485.
[3] 郭隽. 高温疲劳表面短裂纹群体演化行为研究及数值模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2000.
[4] Suh C M, Lee J J, Kang Y G. Fatigue micro-cracks in type 304 stainless steel at elevated temperature[J]. Fatigue Fract Engng Mater Struct, 1990, 13(5): 487- 496.
[5] 赵要武, 孙素, 杨庆雄. 金属材料计算微观力学网格自动生成[J]. 计算力学学报, 1998, 15(4): 490- 494.
[6] 陈礼清, 刘燕声, 梁志德. 晶粒长大机制的计算机模拟[J]. 东北大学学报, 1994, 15(3): 286- 289.
[7] Angelova D, Akid R. A note on modelling short fatigue crack behaviour[J]. Fatigue Fract Engng mater struct, 1998, 21: 771- 779.
[8] Navarro A, de Los Rios E R. A model for short fatigue crack propagation with an interpretation of the short-long crack transition[J]. Fatigue Fract Engng Mater Struct, 1987, 10(2): 169- 186.
[9] 藤山一成, 冈部永年, 村上格, 等. 超合金の高温低サイクル疲労き裂長さ分布統計情報に基づく合損傷シミュレーション解析[A]. 第30回高温強度記念シンポジウム前刷集[C]. 1992. 54- 58.
[10] 高庆, 黄正中, 戴振羽, 等. 低周疲劳随机损伤过程的有限元模拟[J]. 固体力学学报, 1997, 18(1): 58- 64.
[11] 郭隽, 郑长江, 郭成璧, 等. 耐热钢高温蠕变疲劳内部微裂纹的数值模拟[J]. 大连理工大学学报, 2000, 40(2): 140- 143.
[12] 周玮生. 耐热钢の高温クリープ疲労における内部微小き裂の生・成長と消滅に関する研究[D]. 日本: 日本京都大学, 1995.
[13] Hong Youshi, Gu ZiYan, Fang Biao, et al. Collective evolution characteristics and computer simulation of short fatigue cracks[J]. Phil Mag A, 1997, 75(6): 1517- 1531.
[14] 多田直哉, 北村隆行, 大谷隆一. 三次元粒界破壊抵抗分布モデルによるクリープ疲労微小き裂のモンテカルロ・シミュレーション[A]. 日本機械学会論文集[A]. 1990, 56(524): 708- 714.

作者简介:



郭隽(1972-), 女, 2000年毕业于大连理工大学动力系, 获工学博士学位, 主要从事材料高温疲劳短裂纹的实验研究与数值模拟。现于北京航空航天大学航空宇航推进理论与工程博士后流动站从事博士后研究工作。E-mail: guojun@ns.ngl.buaa.edu.cn

郭成璧(1930-) 男, 大连理工大学动力系教授, 1954年毕业于大连工学院轮机专业, 1983-1984年赴日本京都大学进修。主要从事金属材料及构件的高温疲劳断裂研究。联系电话: (0411) 4708246

梁莎莉(1950-) 女, 大连理工大学动力系高级工程师, 主要从事疲劳强度问题的研究。

(责任编辑: 李铁柏)