

喷丸残余应力及夹杂影响小裂纹仿真概率模型

杨 茂¹, 陆 山¹, 潘 容², 张永刚³, 刘小桃¹, 秦仕勇²

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710129;

2. 中国航发四川燃气涡轮研究院, 成都 610500;

3. 西安航空发动机(集团)有限公司 莱特航空制造技术有限公司, 西安 710018)

摘 要: 提出考虑喷丸残余应力及内部夹杂影响的随机内部小裂纹形核扩展概率模型, 实现构件内部疲劳裂纹萌生过程的仿真。针对高温合金 X, 在开展试验的数据基础上, 识别模型所需的残余应力分布参数、“形核相关”夹杂尺寸分布参数、微观结构相关塑性本构参数及小裂纹形核扩展参数。模型成功预测喷丸等直棒两种主要的形核方式: 残余拉应力平衡层夹杂形核及无残余应力区夹杂形核。与试验对比, 模型预测内部裂纹萌生寿命及其分散精度高, 残余拉应力平衡层预测萌生寿命中值误差为 2%, -3σ 寿命误差为 37%, 无残余应力区预测萌生寿命中值误差为 3%, -3σ 寿命误差为 3%; 此外, 模型仿真的内部裂纹形貌为“鱼眼形”, 贴合试验件断口形貌。

关 键 词: 喷丸; 残余应力; 夹杂; 小裂纹形核扩展; 萌生寿命

中图分类号: V231.95

文献标志码: A

Probabilistic model of small crack simulation considering shot peening residual stress and inclusion influence

YANG Mao¹, LU Shan¹, PAN Rong², ZHANG Yonggang³, LIU Xiaotao¹, QIN Shiyong²

(1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China;

2. Sichuan Gas Turbine Establishment, Aero Engine Corporation of China, Chendu 610500, China;

3. Xi'an Xae Flying Aviation Manufacturing Technology Company Limited,
Xi'an Aero-Engine (Group) Limited, Xi'an 710018, China)

Abstract: A probabilistic model to simulate nucleation and propagation of internal small crack induced by shot peening residual stress and internal inclusion was proposed to realize the simulation of internal fatigue crack initiation process. For superalloy X, parameters of the residual stress distribution, the ‘nucleation-related’ inclusion size distribution, the microstructure-related plastic constitutive model and the small crack nucleation and propagation required by the model were identified based on the experimental data. Two main nucleation patterns of shot peening uniform-cross-section bar specimens were successfully predicted by the proposed model: the inclusion nucleation in residual tensile equilibrium zone and the inclusion nucleation in the zone without residual stress. Compared with the experiment, the proposed model had high accuracy in predicting the internal crack initiation life and its dispersion. The error of predicted median initiation life in residual tensile stress equilibrium zone was 2%, and the error of predicted -3σ initiation life was 37%. The error of predicted median initiation life in the zone without

收稿日期: 2021-10-15

作者简介: 杨茂(1991—), 男, 博士生, 主要从事镍基高温合金疲劳裂纹行为仿真及晶体塑性理论研究。

通信作者: 陆山(1955—), 男, 教授、博士生导师, 博士, 主要从事航空发动机零部件强度、寿命及可靠性研究工作。E-mail: shanlu@nwpu.edu.cn

引用格式: 杨茂, 陆山, 潘容, 等. 喷丸残余应力及夹杂影响小裂纹仿真概率模型[J]. 航空动力学报, 2023, 38(4): 913-920. YANG Mao, LU Shan, PAN Rong, et al. Probabilistic model of small crack simulation considering shot peening residual stress and inclusion influence[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(4): 913-920.

residual stress was 3%, and the error of predicted -3σ initiation life was 3%. In addition, the internal crack morphology simulated by the present model was of ‘fisheye’ shape, which was consistent with the fracture appearance of the specimen.

Keywords: shot peening; residual stress; inclusion; small crack nucleation and propagation; initiation life

作为我国航空工业中应用广泛的表面强化技术^[1], 喷丸通过控制大量弹丸连续高速的撞击构件表面, 在构件表层引入残余压应力以提高构件的疲劳抗性。试验研究表明, 喷丸表面粗糙度较机加表面明显增加^[1-5], 但由于喷丸残余应力作用过于显著, 其表面粗糙度对疲劳性能的削弱作用被抵消, 故一般认为喷丸表面完整性参数中, 残余应力对材料疲劳性能的影响最为显著^[2-4]。高玉魁等^[4]研究了喷丸表面对 FGH97 疲劳性能的影响, 发现表层残余应力的存在显著降低表面裂纹的萌生, 裂纹萌生位置转移至内部。王欣等^[1]研究了不同强度喷丸表面对 FGH96 疲劳性能的影响, 发现大喷丸强度下表层残余压应力大小及作用深度较小喷丸强度时显著, 因此材料疲劳极限的增益相对明显。同样地, 在引入残余应力作用下, 疲劳裂纹萌生于亚表面。在后续的研究中, 王欣等^[5]发现二次喷丸显著增加残余压应力的作用范围, 使构件疲劳寿命进一步提高。通常, 在分析模型中, 残余应力被当作结构的预加载荷叠加至载荷场中, 在此基础上直接改变结构的应力应变, 进而获得残余应力影响下构件疲劳寿命^[6-9]。

喷丸处理后, 构件表层一定深度被引入可观的残余压应力, 在其作用下表面综合载荷明显降低, 表面裂纹萌生可能性降低, 因此疲劳裂纹倾向于在内部夹杂处萌生。Almaraz^[10]借助简化的疲劳 I 型椭圆夹杂理论模型获得基体最大应力, 将该应力代入应力寿命模型, 并基于 3 种不同的夹杂尺寸定义方式提出了相应的考虑夹杂影响的预测高强钢疲劳寿命的应力寿命模型。Wei 等^[11]将夹杂等效为内部初始圆形裂纹, 借助 Paris 公式及试验拟合的夹杂尺寸与最终寿命之间的关系, 将夹杂尺寸修正入应力寿命模型中, 提出考虑夹杂尺寸影响的寿命模型, 模型预测结果与试验吻合良好。Laz 等^[12-13]对 2024-T3 铝缺口薄板试件进行了疲劳试验, 在大量试验断口的基础上识别裂纹“形核相关”夹杂的尺寸分布规律, 而后将此类夹杂尺寸特征作为初始裂纹利用 FASTRAN II 软件分析裂纹的从夹杂处形核后至断裂对应的寿

命。在试验获得的夹杂尺寸分散性数据基础上, 他们还拓展研究了其对疲劳寿命分散性的影响。

现阶段, 随着观测水平的提升, 材料微观结构随机性对疲劳寿命及其分散的影响持续引发关注, 同时, 更接近物理本质的微观结构相关寿命模型被提出并不断完善^[14]。考虑到喷丸作用使疲劳裂纹萌生位置内移, 本文在前人微观结构相关小裂纹形核模型^[14]基础上, 进一步拓展提出考虑喷丸残余应力及内部夹杂影响的随机内部小裂纹形核扩展模型, 在此基础上仿真内部裂纹的萌生过程。以某新型高温合金双性能盘材(下文简称“高温合金 X”)为研究对象, 在轮毂区域取样共计 30 件等直棒试件, 并设计: ① 3 件率相关拉伸循环试验; ② 2 件表面残余应力测量试验; ③ 25 件高温疲劳试验。其中, 除①中试件为精车外, 其余试件在半精车成型后表面经轮盘常用喷丸工艺喷丸处理。此外, ③中试验完成后对疲劳试件断口进行分析并随机选择 7 件送扫描电子显微镜(SEM)分析断口微观特征。基于试验识别模型所需参数, 并基于轮毂区域取样喷丸等直棒试件高温疲劳试验寿命、断口数据对模型进行校核。

1 内部小裂纹形核扩展概率模型

1.1 随机内部小裂纹形核扩展模型

基于晶体塑性本构, 考虑多晶体中各晶粒互相影响作用及多晶体-晶粒层面虚功平衡, Yang 等^[14]提出了多晶体局部自洽塑性(PLSCP)模型, 可高效地仿真精度满足寿命分析需求的晶粒微观内变量。进一步, 他们又提出考虑微观结构随机性(晶粒尺寸、取向等)影响的小裂纹形核模型仿真小裂纹的形核过程^[14]。在该模型基础上, 本文提出考虑微观结构影响的随机内部小裂纹形核扩展模型, 仿真构件宏观裂纹萌生过程及萌生寿命。

考虑到在萌生阶段, 裂纹的扩展沿最大主应力梯度方向^[15], 本文假设萌生阶段宏观裂纹在最大主应力梯度平面上投影为非重叠面, 如图 1 所示。将投影面展开, 则宏观裂纹可等效为最大主应力面承载面积的缺失。实际上, 在萌生初期,

裂纹会受到材料微观结构的影响, 真实形貌必然波动且不规则^[16]。本文忽略真实裂纹的空间波动, 但计入微观结构对裂纹萌生过程各阶段寿命的影响。定义构件危险体积内关于最大主应力梯度面对称厚度为小裂纹形核模型^[14]特征尺寸 d , 直径为 d_0 (限定 $d_0 \geq 3l_c$, l_c 为宏观萌生裂纹尺寸, 以避免模型边界效应影响) 的圆盘体积作为等效萌生体积 Ω_c , 并将 Ω_c 按 d 特征尺寸细分为子块。由于 Ω_c 内包含宏观投影裂纹, 故危险体积内裂纹的形核扩展可进一步等效为其等效萌生体积内子块的连续断裂。对 Ω_c 内各子块随机生成材料微观结构, 并利用微观结构影响小裂纹形核模型计算子块小裂纹形核寿命以计入微观结构的影响。这样, 在仿真宏观裂纹形貌的同时可获得真实裂纹对应的寿命。

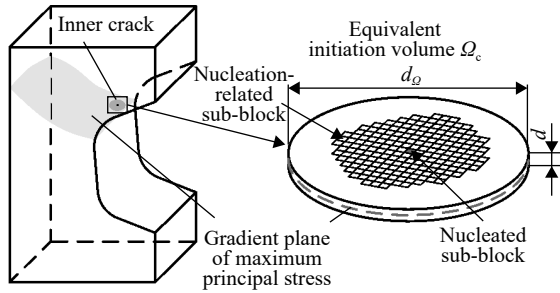


图1 内部裂纹在最大主应力梯度平面的投影及等效

Fig. 1 Projection and equivalence of an inner crack on the maximum principal stress gradient plane

基于构件主应力梯度面上应力分布可获得循环加载过程中各子块的应力, 进而基于小裂纹形核模型可获得等效萌生体积内任一子块的小裂纹形核寿命。设等效萌生体积内各子块初始形核寿命为集合 $\{N\}^1$, 则 Ω_c 的小裂纹形核寿命 $N^{0 \rightarrow d}$ 定义为抽样集合 $\{N\}^1$ 的 $1/n$ 分位数, 即

$$N^{0 \rightarrow d} = \{N\}_{1/n}^1 \quad (1)$$

同时各子块损伤量集合 $\{D\} = N^{0 \rightarrow d} / \{N\}_{1/n}^1$ 。

当某个子块形核完成后, 本文用如下关系描述已形核子块的应力转移:

$$\begin{cases} S = S_0 (S_{ci}/S_0 - k_s r^{n'/2}), & r \leq R_s \\ S = S_0 k_e r^{-1/2}, & r > R_s \end{cases} \quad (2)$$

其中 S_0 为所有涉及子块的初始平均载荷; S_{ci} 为考虑材料塑性时已形核子块周围应力上限; r 为未形核子块距已形核子块簇边界的距离与已形核子块簇等效裂纹半长之比; n' 为系数; k_e 、 k_s 分别为弹性、塑性衰减系数; R_s 为弹塑性分界点, 与 S_0 及屈服应

力 σ_s 之间满足 $S_0 k_e R_s^{-1/2} = \sigma_s$ 。限定转移后未形核子块应力和与所涉及子块初始应力和相等, 并限定转移载荷场在弹塑性分界点连续可导, 即可获得上式中各参数。

注意到基于本文的等效规则, 小裂纹扩展为非连续的过程, 于是, 本文按照等比面积扩展序列函数 $f(k) = k^2$ 进行扩展, 即等效裂纹长度 $a = kd$ 时, Ω_c 中有 k^2 个子块完成形核, 而当裂纹由 $kd-d$ 扩展至 kd 时需完成形核的子块数为 $f(k) - f(k-1)$ 。考虑已形核子块的影响, 按照应力转移规则可获得 Ω_c 内考虑已形成裂纹影响的未形核子块的当前载荷。在当前载荷基础上, 考虑到载荷不应影响子块的材料特性, 本文按照等概率的方式生成当前应力下的子块寿命, 即新生成子块寿命的排序与初始形核寿命排序相同。遍历所有应力改变的未形核子块即可获得新的形核寿命集合 $\{N\}^k$ 。在此基础上, $a = kd-d$ 扩展寿命集合 $\{N^p\}$ 取为

$$\{N^p\} = \{N\}^k (1 - \{D\}) \quad (3)$$

进而, 裂纹由 $kd-d$ 扩展至 kd 所需寿命增量为

$$N^{(k-1)d \rightarrow kd} = \{N^p\}_{f(k)/n} \quad (4)$$

而各子块损伤增量 $\{\Delta D\}$ 为 $N^{(k-1)d \rightarrow kd} / \{N\}^k$ 。至 Ω_c 中相邻形核子块等效裂纹长度达到宏观裂纹萌生尺度, 对应寿命累加即为宏观裂纹萌生寿命。

1.2 考虑残余应力及夹杂作用的模型修正

本文将残余应力作为初始载荷场, 并考虑其作用按如下方式修正子块载荷(应力):

$$S_{\max}^{\text{rs}} = S_{\max}^0 + \sigma_{\text{rs}} \quad (5)$$

$$R^{\text{rs}} = \frac{S_{\max}^0 R^0 + \sigma_{\text{rs}}}{S_{\max}^{\text{rs}}} \quad (6)$$

其中 $S_{\max}^0$ 、 R^0 及 $S_{\max}^{\text{rs}}$ 、 R^{rs} 为残余应力 σ_{rs} 修正前后表面子块峰值应力及应力比。在此基础上, 考虑喷丸残余应力对小裂纹形核扩展的影响。

由于其制备工艺的特殊性, 粉末冶金高温合金内部允许存在一定数量/尺寸夹杂, 且基于已有的试验研究^[17], 此类夹杂往往为粉末材料疲劳寿命薄弱点。考虑到夹杂存在对材料疲劳性能的削弱, 本文提出如下含夹杂子块形核寿命模型:

$$N_i = N_0 [d_{\text{gn}} / (d_{\text{gn}} + \xi)]^{\frac{1}{2\alpha'}} \quad (7)$$

其中 N_i 及 N_0 分别为有、无夹杂作用时子块形核寿命; d_{gn} 为子块内部平均晶粒尺寸; ξ 为夹杂尺寸; α' 为夹杂影响指数。当夹杂尺寸大于形核子块尺寸

时,存在多个受夹杂影响子块,考虑到夹杂的脆性,本文认为所有受当前夹杂影响的子块中有一个形核,则所用受影响子块均形核。故当夹杂尺寸较大时,形核后裂纹尺度或大于形核子块尺度。

1.3 考虑体积效应的模型修正

对真实构件,定义其可能产生疲劳裂纹的大应力区为危险体积,且通常情况下该体积远大于宏观裂纹萌生尺寸,即危险体积内可能会存在多条萌生裂纹,而构件危险体积萌生寿命应取最先出现的萌生裂纹对应的寿命。一方面,由于危险体积内夹杂的存在,其附近材料受影响而相对于无夹杂区域较早完成小裂纹形核,后续承载面积的缺失会使周围子块形核寿命同步降低,进而倾向于较早完成宏观裂纹的萌生;另一方面,即使不考虑夹杂作用,由于微观材质的差异,最先形核小裂纹倾向出现在危险体积内微观结构最薄弱点或区域,同样由于承载面积的缺失,周围子块形核寿命降低,宏观裂纹也倾向于在此处最先萌生。基于此,本文假设:“最先形核裂纹最先宏观萌生”,即最先形核的小裂纹最先扩展形成宏观萌生裂纹。

对喷丸试件,其表层存在一定深度的残余应力作用,典型的喷丸残余应力沿深度分布如图 2 所示,分为残余压应力区、拉应力平衡区及无残余应力区域。基于残余应力深度分布规律,本文将构件危险体积分为 3 层(区):残余压应力层(A 区)、拉应力平衡层(B 区)及无残余应力区(C 区),同时将各层残余应力在主应力梯度平面上平均。通常,残余压应力作用较为显著,喷丸试件裂纹萌生位置内移,因此本文重点分析 B 区和 C 区形核。将各层危险体积按小裂纹形核模型尺寸细分子块,按照式(5)修正各层子块应力并计算其形核寿命,各层所有子块形核寿命最小值即为最小形核寿命。利用文中第 1.1 节小裂纹形核扩展模型计算后续小裂纹扩展至宏观萌生裂纹的扩展寿命。整个危险区最小萌生(形核加扩展)寿命既为构件宏观萌生(初始)寿命。

在危险体积内夹杂尺寸及密度分布参数已知,的情况下,可生成危险体积内夹杂个数、对应位置及尺寸,进而可生成等量的夹杂相关子块。根据夹杂位置获得子块载荷及对应位置残余应力可进一步获得其形核寿命,然后基于式(6)计算对应夹杂影响下子块形核寿命。危险体积内所有夹杂相关子块形核寿命最小值即为考虑体积效应下夹

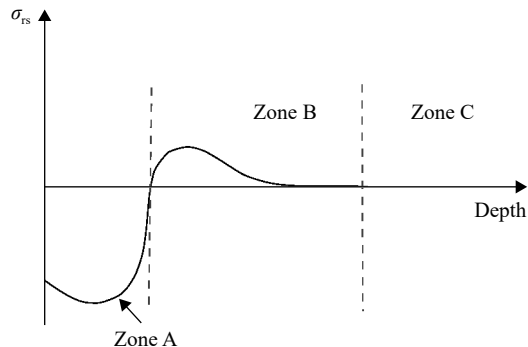


图 2 典型喷丸残余应力分布及分层

Fig. 2 Typical distribution of shot peening residual stress and its stratification

杂相关最小形核寿命。实际上,本文试验条件下难以获得一定体积内夹杂的分布参数,而“形核相关”夹杂(定义为裂纹从其形核并扩展直至断裂对应的夹杂)因其可直接基于断口信息获得而引发本文关注。此外,在大量试验数据基础上,“形核相关”夹杂与构件最小形核寿命对应夹杂一致。基于本文 7 件喷丸等直棒试件疲劳断口 SEM 分析识别起裂点夹杂边界,获得等直棒危险体积内“形核相关”夹杂尺寸分布如图 3 所示,其中夹杂当量直径(定义如图 3 中 d_i 所示)范围为 30~274 μm ,平均尺寸为 81 μm 。基于该分布,并认为“形核相关”夹杂在等直棒危险体积内任意位置出现概率相同,利用均匀分布随机生成其位置,进而基于文中第 1.1 节和第 1.2 节计算获得夹杂影响下等直棒危险体积萌生寿命。

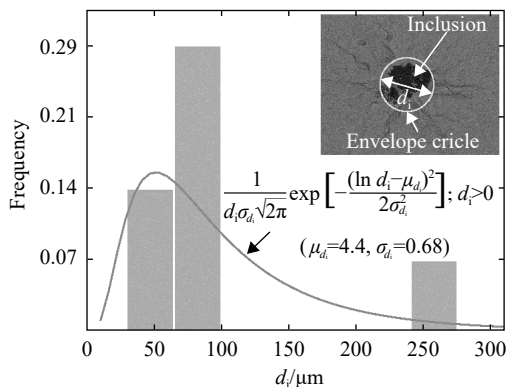


图 3 “形核相关”夹杂尺寸定义及统计

Fig. 3 Definition and statistics of sizes of nucleation-related inclusions

2 模型参数识别及验证

2.1 喷丸表层残余应力分布及分层

仿真^[7]及试验测量的高温合金 X 涡轮盘常用喷丸参数范围处理等直棒表层典型残余应力分布

如图4所示。注意到试验测量残余应力分布中拉应力不明显,徐瑞瑞^[7]分析残余应力剥层测量过程,认为腐蚀剥层去除了表层的残余压应力区域进而导致需平衡的拉应力也减小,若残余压应力区域全被腐蚀,则拉应力平衡区同样消失。考虑到这些,徐瑞瑞^[7]在仿真喷丸残余应力场基础上,用生死单元法模拟残余应力测量过程腐蚀剥层使残余应力场变化的过程,使剥层后残余应力场与试验测量值吻合,进而可获得“真实”喷丸残余应力分布。剥层后残余应力分布与试验测量贴合良好,证明本文仿真残余应力场的有效性。喷丸残余应力在载荷循环时会发生松弛,表现在随着循环数的增加,峰值压应力及拉应力都会减小,且加载峰值应力越大,松弛越明显^[7,18]。基于徐瑞瑞^[7]的同材同载荷的仿真研究,本文取松弛稳定残余应力为初始残余应力的20%,供后续寿命仿真中使用。基于残余应力测量分析结果,对等直棒:A区为表层深度为0~0.12 mm区域且平均压应力为 $-0.222\sigma_s$,B区为深度范围为0.12~0.88 mm区域且平均拉应力为 $0.036\sigma_s$,C区为距表层深度范围大于0.88 mm区域。

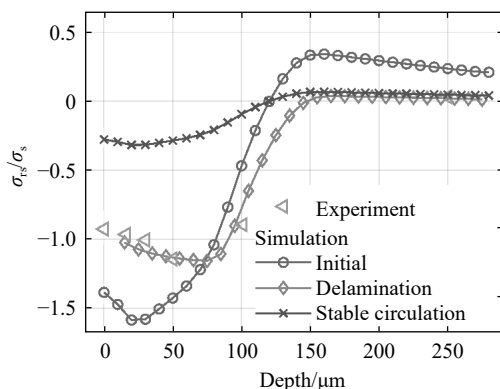


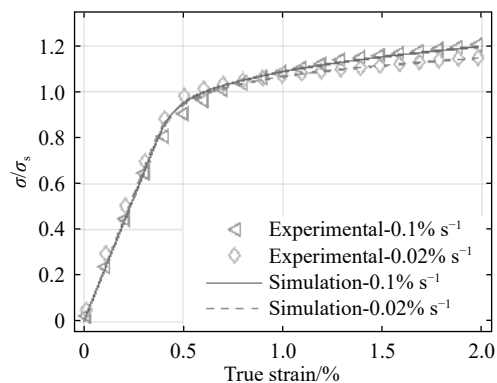
图4 喷丸等直棒试件残余应力沿深度分布

Fig. 4 Residual stress distribution along depth of shot peening uniform-cross-section bar

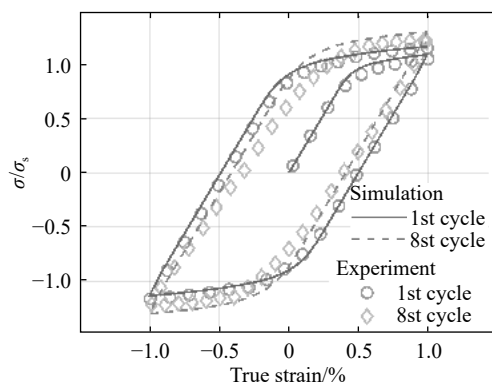
2.2 PLSCP 模型参数识别

由文献[14]可知,PLSCP模型需借助目标材料的微观结构统计参数(晶粒尺寸、取向分布参数等)完成建模,而后基于材料率相关拉伸、循环试验曲线识别材料晶粒级的弹性及晶体滑移相关塑性参数^[19]。本文主要研究高温合金X涡轮盘轮毂区域的材料特性,借助金相观测确定其晶粒尺寸分布符合对数正态分布,其中平均晶粒尺寸为 $8\mu\text{m}$ 。在此基础上,结合应变控制单轴拉伸及循环加载应力应变曲线,本文采用遗传算法对

PLSCP模型的参数进行优化,设计变量即为模型参数,目标函数取仿真应力应变曲线与试验曲线的残差平方和最小。优化时,考虑到晶粒尺寸随机性对材料宏观应力应变曲线影响较小^[14],本构计算立方体子块模型取为取样区域平均晶粒尺寸的6倍且忽略晶粒的尺寸差异。优化获得高温合金X在给定温度的PLSCP模型弹性参数:弹性模量 $C_{11}=1.46E$, $C_{12}=1.04E$, $C_{44}=0.93E$;塑性参数为:参考切应变率 $\dot{\gamma}_0=1\text{ s}^{-1}$,率相关幂指数 $m=0.02$,直接硬化系数 $h_0=2.64\sigma_s$,动态回复系数 $r_D=0.16\sigma_s$,滑移相关系数 $q=1$,初始滑移阻力 $\kappa_{s,0}=0.48\sigma_s$,稳定滑移阻力 $\kappa_{s,s}=0.60\sigma_s$ 。以上各参数中, E 及 σ_s 为给定温度下材料的弹性模量及屈服应力。优化后的应力应变曲线与试验曲线贴合良好,如图5所示。



(a) 不同应变率单轴拉伸



(b) 峰值应变为1%,应变比为-1,应变率为 0.1 s^{-1} ,循环加载

图5 等直棒应变控制应力应变响应仿真与试验对比
Fig. 5 Comparison between simulated and experimental stress-strain responses of the uniform-cross-section bar under the strain-controlled tests

2.3 微裂纹形核、扩展模型参数识别

参考涡轮盘初始工程裂纹的尺寸定义^[15],并兼顾等直棒应力特征及计算效率,本文取等直棒宏观裂纹萌生长度 $l_c=0.38\text{ mm}$,进而取等效萌生

体积特征尺寸 $d_Q = 3l_c$, 同时, 兼顾计算效率及微裂纹的独立性, 本文取小裂纹形核计算子块的尺寸为4.5倍的平均晶粒尺寸。这样, 本文微观模型所需的计算子块总数为788, 宏观裂纹萌生时需完成形核的相邻子块数为88。由文献[14]可知, 小裂纹形核模型需确定的参数包括: 微裂纹孕育材料常数 α_g 和 c 、扩展材料常数 A_{FS} 及多轴表征参数 k^* , 其中 c 及 k^* 可参考相近合金取为 $c=2$, $k^*=0.5$ [20]。通常情况下, A_{FS} 需通过微裂纹初期扩展数据拟合获得, 试验难度较大。McDowell[20]假设在屈服载荷下, 微裂纹的形核寿命与其扩展到相邻晶粒的寿命相当, 由此可由 α_g 计算 A_{FS} 。相同的假设已应用在其他相似合金的疲劳微裂纹寿命计算中[14,20], 故本文沿用该假设, 进而小裂纹形核模型仅需标定参数 α_g 。此外, 对应本文夹杂形核的情况还需确定夹杂影响指数 α' 。在试验寿命及断口分析数据基础上, 统计形核位置在C区试件疲劳寿命, 而后对参数进行多次迭代优化, 使模型预测无残余应力层萌生寿命中值及分布与试验贴合。最终标定高温合金X小裂纹形核模型参数为 $\alpha_g=0.350 \mu\text{m} \cdot \text{cycle}$, $A_{FS}=0.108 \times 10^{-4} (\mu\text{m} \cdot \text{MPa} \cdot \text{cycle})^{-1}$, 夹杂影响指数 $\alpha'=0.55$ 。

3 喷丸残余应力及夹杂对裂纹萌生影响分析

3.1 内部小裂纹形核分析

采用标定的模型参数, 利用随机内部裂纹形核模型, 在与等直棒试件疲劳试验相同载荷谱(峰值应力为 $1.1\sigma_s$ 、应力比为 -0.184)条件下随机抽样100次获得无夹杂影响时喷丸试件B区($\sigma_{rs} > 0$)及C区($\sigma_{rs} = 0$)材质薄弱点形核寿命分布如图6所示。对比可知, 无夹杂影响时, C区的危险

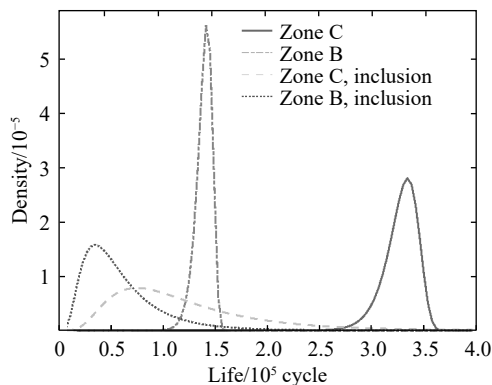


图6 喷丸等直棒不同区域形核寿命分布仿真

Fig. 6 Simulated nucleation life distributions in different zones of shot peening uniform-cross-section bar

点形核寿命远大于B区, 喷丸试件形核于C区的概率较小。在内部生成尺寸及位置随机的夹杂, 抽样获得(除表层外)内部夹杂影响形核寿命分布如图6所示。可见, 在夹杂作用下, 内部两区形核寿命均显著降低且分布存在重叠。注意到此时B区材质薄弱点、夹杂影响及其与C区夹杂影响形核寿命分布互有重叠, 故模型预测喷丸等直棒试件有3种可能的形核位置: B区材质薄弱点、B区夹杂、C区夹杂。

3.2 内部小裂纹扩展分析

含夹杂小裂纹扩展至0.76 mm过程中裂纹长度随总寿命变化5次随机抽样结果(C1~C5)如图7所示。可见, 在夹杂影响下, 形核寿命有显著的分散性, 导致总萌生寿命分散性也同样显著。作为对比, 无夹杂小裂纹形核后扩展随机抽样结果也在图7中给出。可见, 无夹杂形核小裂纹长度普遍小于夹杂主控形核小裂纹长度, 且形核寿命明显变长。随着裂纹长度的增加, 裂纹扩展速率不断变大。此外, 由于模型计入了局部微观结构随机性的影响, 5次抽样过程中小裂纹扩展速率有明显差异。5次抽样中, 裂纹扩至0.38 mm前寿命占比为86%~97%, 表明识别模型参数时本文选择0.38 mm作为等直棒的宏观裂纹萌生尺寸的合理性。5次抽样仿真宏观裂纹萌生形貌均为“鱼眼形”, 以第3次抽样结果(图7中C3)为例, 其萌生裂纹形貌如图8(a)所示。裂纹从内部夹杂形核后向周围等速扩展, 与图8(b)所示试验断口相似, 证明了所提模型的正确性。

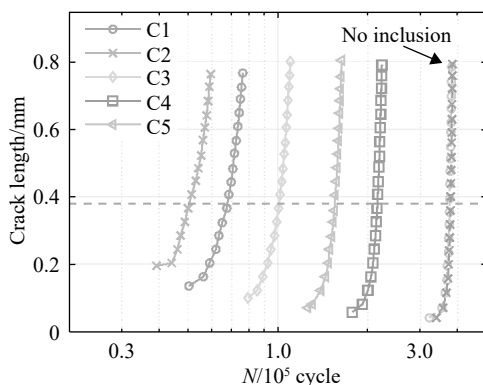


图7 喷丸等直棒C区小裂纹扩展过程抽样

Fig. 7 Sampling of small crack propagation in zone C of shot peening uniform-cross-section bar

3.3 喷丸试件萌生寿命主控机理分析

采用标定的模型参数, 利用随机内部小裂纹形核扩展模型对轮毂取样等直棒萌生寿命进行随

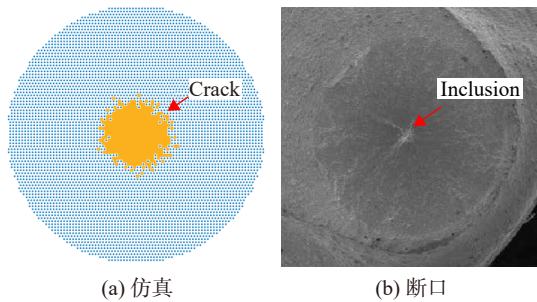


图8 萌生区裂纹样貌对比

Fig. 8 Comparison of crack appearances in initiation zone

机抽样, 其中限定计算终止时宏观裂纹长度为 0.38 mm。100 次随机抽样仿真, B 区材质薄弱点形核、B 区夹杂形核、C 区夹杂形核对应的宏观萌生寿命分布如图 9 所示。总体上 3 种形核模式宏观萌生寿命由短到长排序为: B 区夹杂形核、C 区夹杂形核、B 区材料薄弱点形核; 同层夹杂形核后扩展寿命小于材料薄弱点形核扩展寿命。与图 6 对比可知, 扩展寿命的增加使喷丸试件从 B 区薄弱材料处萌生裂纹的概率进一步降低, 故喷丸试件倾向于从 B 区和 C 区“形核相关”夹杂处萌生, 与试验观测现象相符。综合 3 种形核模式, 并考虑“形核相关”夹杂出现位置的随机性, 等直棒内部综合最小萌生寿命分布如图 9 中“global minimum”所示, 可见混合形核模式下, 萌生寿命分散性较大。在百次随机抽样中, 主要形核模式 B 区夹杂形核与 C 区夹杂形核比例为 36 : 61, 与试验断口分析获得的比例 6 : 12 较为接近。

根据疲劳试验断口分析区分试验寿命数据中 B 区夹杂形核及 C 区夹杂形核, 其经验分布与模型仿真结果对比如图 10 所示, 可见两者吻合良好。以对数正态分布拟合疲劳寿命分布参数并与

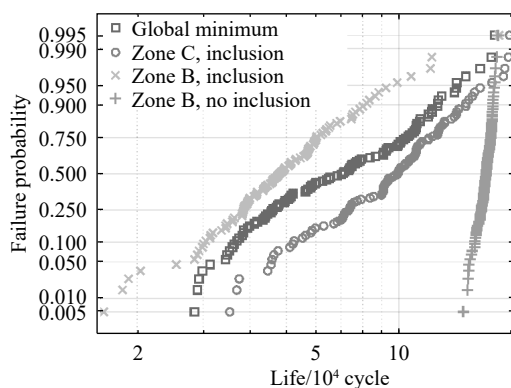


图9 喷丸等直棒不同形核模式仿真宏观萌生寿命抽样分布

Fig. 9 Sampling of initiation life distribution with different nucleation patterns of shot peening uniform-cross-section bars

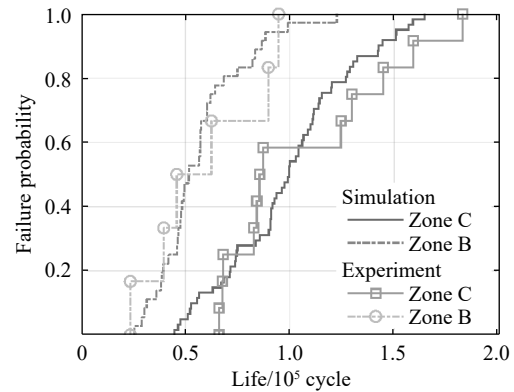


图10 喷丸等直棒不同形核模式仿真萌生寿命分布与试验对比

Fig. 10 Comparison between simulated and experimental initiation life with different nucleation patterns of shot peening uniform-cross-section bars

仿真结果对比可知, B 区夹杂形核萌生均值寿命误差为 2%, -3σ 寿命误差为 37%; C 区夹杂形核萌生均值寿命误差为 3%, -3σ 寿命误差为 3%。由此可见, 本文模型对残余应力及夹杂作用下等直棒萌生寿命及分散性预测有较高的精度。

4 结 论

本文在微观结构相关小裂纹形核扩展模型基础上, 针对喷丸构件提出考虑喷丸残余应力及随机内部夹杂的内部小裂纹形核扩展概率模型。以某新型高温合金双性能盘材为研究对象, 设计试验对模型所需残余应力分布、“形核相关”夹杂尺寸分布及 PLSCP 模型参数进行识别, 在此基础上仿真分析了喷丸残余应力及内部夹杂对试件内部疲劳裂纹萌生规律的影响机理, 获得以下结论:

1) 模型预测喷丸试件内部裂纹萌生寿命及其分散与试验贴合良好, 拉应力平衡层预测萌生寿命与对于试验数据对比中值寿命误差为 2%, -3σ 寿命误差为 37%; 无残余应力层预测萌生寿命与对于试验数据对比中值寿命误差为 3%, -3σ 寿命误差为 3%。此外, 模型仿真内部裂纹为“鱼眼形”, 与试验断口分析结果吻合。

2) 喷丸等直棒试件存在 3 种内部形核模式, 拉应力平衡层材质薄弱点形核、拉应力平衡层夹杂形核及无残余应力层夹杂形核; 3 种形核模式中, 材质薄弱点小裂纹形核寿命及后续的扩展寿命均较长, 因此萌生寿命偏长, 全局萌生寿命主要由夹杂相关形核控制, 拉应力平衡层夹杂形核与无残余应力层夹杂形核在百次随机抽样中比例为 36 : 61, 与试验断口分析结果 6 : 12 相符。

参考文献:

- [1] 王欣, 胡云峰, 王晓峰, 等. 喷丸强化对FGH96粉末高温合金疲劳性能应力集中系数敏感性的影响[J]. 航空制造技术, 2017(13): 48-53.
WANG Xin, HU Yunfeng, WANG Xiaofeng, et al. Effect of shot peening on fatigue performance stress-concentration sensitivity of FGH96 power metallurgy superalloy[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017(13): 48-53. (in Chinese)
- [2] GAO Y K, WU X R. Experimental investigation and fatigue life prediction for 7475-T7351 aluminum alloy with and without shot peening-induced residual stresses[J]. *Acta Materialia*, 2011, 59(9): 3737-3747.
- [3] GAO Y K, LI X B, YANG Q X, et al. Influence of surface integrity on fatigue strength of 40CrNi2Si2MoVA steel[J]. *Materials Letters*, 2007, 61(2): 466-469.
- [4] 高玉魁, 仲政, 雷力明. 激光冲击强化和喷丸强化对FGH97高温合金疲劳性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(5): 1230-1234.
GAO Yukui, ZHONG Zheng, LEI Liming. Influence of laser peening and shot peening on fatigue properties of FGH97 superalloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2016, 45(5): 1230-1234. (in Chinese)
- [5] 王欣, 陈星, 王晓峰, 等. 表面完整性对FGH96粉末合金高温低循环疲劳性能的影响研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(1): 269-278.
WANG Xin, CHEN Xing, WANG Xiaofeng, et al. Effect of surface integrity on high-temperature low-cycle fatigue of FGH96 power metallurgy superalloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2019, 48(1): 269-278. (in Chinese)
- [6] 冉刚, 乙晓伟, 张仕朝, 等. 基于双参数寿命模型的抗疲劳制造结果参量分析方法[J]. 航空材料学报, 2017, 37(6): 68-74.
RAN Gang, YI Xiaowei, ZHANG Shichao, et al. A new analysis method using influencing factors of anti-fatigue manufacture based on fatigue life double-parameter model[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2017, 37(6): 68-74. (in Chinese)
- [7] 徐瑞瑞. 某高温合金喷丸表面状态和疲劳寿命建模仿真及试验研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2021.
XU Ruirui. Modeling and simulation and experimental research on surface state and fatigue life after shot peening of some superalloy [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2021. (in Chinese)
- [8] GUAGLIANO M, VERGANI L. An approach for prediction of fatigue strength of shot peened components[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2004, 71(4): 501-512.
- [9] SEMARI Z, AID A, BENHAMENA A, et al. Effect of residual stresses induced by cold expansion on the crack growth in 6082 aluminum alloy[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2013, 99(1): 159-168.
- [10] ALMARAZ G M D. Prediction of very high cycle fatigue failure for high strength steels, based on the inclusion geometrical properties[J]. *Mechanics of Materials*, 2008, 40(8): 636-640.
- [11] WEI L, DENG H, LIU P. Interior fracture mechanism analysis and fatigue life prediction of surface-hardened gear steel under axial loading[J]. *Materials*, 2016, 9(10): 843-856.
- [12] LAZ P J, HILLBERRY B M. Fatigue life prediction from inclusion initiated cracks[J]. *International Journal of Fatigue*, 1998, 20(4): 263-270.
- [13] LAZ P J, CRAIG B A, HILLBERRY B M. A probabilistic total fatigue life model incorporating material inhomogeneities, stress level and fracture mechanics[J]. *International Journal of Fatigue*, 2001, 23(1): 119-127.
- [14] YANG M, LU S. A microstructure-based homogenization model for predicting the low-cycle fatigue initiation life of GH4169 superalloy[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures*, 2021, 44(6): 1546-1561.
- [15] 牟园伟, 陆山. 基于材料微观特性的涡轮盘疲劳裂纹萌生寿命数值仿真[J]. 航空学报, 2013, 34(2): 282-290.
MU Yuanwei, LU Shan. Numerical simulation of fatigue-crack-initiation life for turbine disk based on material microcosmic characteristics[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(2): 282-290. (in Chinese)
- [16] KING A, LUDWIG W, HERBIG M, et al. Three-dimensional in situ observations of short fatigue crack growth in magnesium[J]. *Acta Materialia*, 2011, 59(17): 6761-6771.
- [17] 冯业飞, 周晓明, 邹金文, 等. 夹杂物对FGH96合金低周疲劳寿命的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(7): 2455-2463.
FENG Yefei, ZHOU Xiaoming, ZOU Jinwen, et al. Effect of inclusions on low cycle fatigue lifetime and life prediction in powder metallurgy superalloy FGH96[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2021, 50(7): 2455-2463. (in Chinese)
- [18] MEGUID S A, SHAGAL G, STRANART J C. Finite element modelling of shot-peening residual stresses[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 92/93: 401-404.
- [19] MARIN E B. On the formulation of a crystal plasticity model[R]. Livermore, CA, US: Sandia National Laboratories, SAND2006-4170, 2006.
- [20] MCDOWELL D L. Simulation-based strategies for microstructure-sensitive fatigue modeling[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2007, 468/469/470: 4-14.

(编辑: 陈越)