

影响。研究表明：裂纹张开位移、裂纹尖端塑性区以及裂纹尖端最大塑性功与晶体取向密切相关；在给定位移边界条件下，硬取向晶粒中裂纹张开位移和最大塑性功均大于软取向的值，表明硬取向中裂纹易扩展；塑性变形在大角度晶界处塞积，表明大角度晶界对裂纹扩展有一定的阻碍作用。

关键词：裂纹；晶体塑性；有限元；晶体取向

中图分类号：TG146 文献标识码：A

## 金属材料超高周疲劳行为的 Monte-Carlo 模拟

雷铮强, 洪友士, 谢季佳, 赵爱国

(中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100190)

基于 Tanaka-Mura 的微观位错模型并结合结构可靠性及灵敏度的统计理论, 采用 MATLAB 自编程序对金属材料 S-N 曲线的分散特性进行了 Monte-Carlo 模拟分析, 并对比了 SUJ2 钢的旋转弯曲疲劳实验数据, 最后根据结构可靠性灵敏度理论分析了超高周疲劳失效概率的各影响因素的敏感性。

在光学显微镜下, 超高周疲劳断口呈现“鱼眼”状特殊形貌, 且“鱼眼”中往往包含作为裂纹源的非金属夹杂物, 这是金属材料超高周疲劳裂纹萌生的典型特征。作为超高周疲劳裂纹源的夹杂可位于材料表面也可以在材料内部, 对断口的断裂力学分析表明疲劳裂纹萌生寿命占据了金属材料超高周疲劳寿命的绝大部分。人们围绕疲劳裂纹萌生提出了一系列机理来试图解释超高周疲劳现象, 主要有两个方面: 定性方面有氢脆模型、球形碳化物弥散分离模型等; 定量方面有局部随机不可逆循环滑移模型、基于疲劳裂纹起源的 D\* 模型、Tanaka-Mura 模型等。这些定性解释存在其局限性, 很难推广到其他材料或加载条件, 同时也难以定量估算这种微观机制所占消耗的疲劳寿命。而 Tanaka-Mura 模型不仅从微观机理上做出合理的解释还可以估算疲劳裂纹萌生寿命, 从调研的情况来看, 该模型是研究超高周疲劳机理的比较好的选择。其基本思想是: 在疲劳过程中, 最大切应力下位错塞积在某个滑移面上, 当载荷反向时, 位错是沿着不同的路径运动, 并认为在相邻的两个层中位错的运动是不可逆的。该过程将导致出现位错净塞积, 并产生位错能的累积, 随着循环载荷的不断进行, 总的位错能达到一定值时导致材料开裂。本文忽略疲劳裂纹扩展寿命, 依据 Tanaka 和 Mura 提出的疲劳裂纹沿夹杂界面萌生寿命估计公式对超高周疲劳寿命进行统计分析。

用 Tanaka-Mura 模型构造极限状态方程:

$$g(X) = \frac{4G(G+G_i)h^2}{G_i(h+l)^2 a_i} \times \frac{W_s}{(\Delta\tau - 2k)^2} - N$$

其中  $X$  是由三个随机变量: 局部应力、位错运动阻力、夹杂尺寸所组成的向量。对于旋转弯曲疲劳, 试样截面正应力随着半径线性变化, 并且在试样表面达到最大值, 从目前的实验数据来看, 作为疲劳裂纹起源的夹杂离表面深度最大达 250 微米, 多数在 200 微米以内, 相对于试样截面半径是个小量, 所以夹杂处应力接近最大载荷, 并且考虑到球形夹杂所引起应力集中系数大约为 1.1, 假设夹杂处局部应力服从均值为应力载荷的正态分布, 变异系数为 0.1。位错运动阻力大小取决于运动的位错与晶粒障碍之间的相互作用, Tanaka 本人也指出变异系数在 0.3 到 0.7 之间的两参数的 Weibull 分布适合被用来描述实际材料中位错运动阻力的分布。不同金属材料的位错运动阻力有很大区别, 本文根据材料超高周疲劳强度极限推得位错运动阻力均值, 并取变异系数为 0.3。实验已经证明超高周疲劳裂纹一般在较大夹杂处萌生, 但是材料中夹杂的大小是随机的, 在数值模拟分析中也必须考虑到这种随机性的影响。Murakami 用  $\sqrt{\text{area}}$  模型来描述各种形状夹杂的特征尺寸, 并预测材料的疲劳强度取得了较好的结果。夹杂大小主要受材料加工过程的影响, 对 GCr15 钢切片的夹杂尺寸统计实验表明其服从正态分布, 变异系数为 0.3。

设定疲劳寿命  $N$ , 采用 Monte-Carlo 方法可以得到在给定位移周次下极限状态方程  $g(X) < 0$  的概

率,即得到该条件下材料的疲劳失效概率。分别改变 N、应力载荷大小由此模拟得出不同应力水平下的疲劳失效概率曲线和 S-N 曲线的分散特性。通过引入量纲一的可靠性灵敏度因子:

$$S_{\mu} = \frac{\partial P_f / P_f}{\partial \mu_i / \sigma_i}, S_{\sigma} = \frac{\partial P_f / P_f}{\partial \sigma_i / \sigma_i}$$

可分析材料超高周疲劳行为对微结构的敏感性。从以上两个因子的正负号可以判断各随机变量的均值和标准差对疲劳失效概率的影响趋势,并可以定量地比较各随机变量的分布参数对该失效概率影响程度的大小。主要结论如下:

- (1) 在相同寿命条件下,高应力对应的失效概率大。失效概率统计分析结果与 SUJ2 钢的旋转弯曲实验数据统计结果趋于一致,说明基于 Monte-Carlo 模拟的可靠性分析方法对于疲劳失效概率分析问题是基本合理的。另外,由于 Tanaka-Mura 模型本身成立的条件限制,较低应力水平下,在相对较小的概率上材料均能达到无限寿命。
- (2) S-N 曲线的分散程度随着载荷应力的增大而降低,材料的平均疲劳寿命随着载荷的降低而增大。同一应力水平下,疲劳寿命可以跨越 2 到 3 个量级。
- (3) 各随机变量的均值以及变异性对疲劳失效的概率有影响。疲劳失效的概率对微结构敏感,其敏感程度从大到小依次为:位错运动阻力、局部应力、夹杂尺寸。敏感性分析结果可对材料微结构对超高周疲劳行为的影响实验提供设计参考。

关键词:超高周疲劳, S-N 分散特性, Tanaka-Mura 模型, Monte-Carlo 模拟

## 飞机结构初步优化设计中考虑损伤容限要求的方法研究

李珊山 常亮 丁惠良 段世慧  
中航工业飞机强度研究所 710065

本文研究并提出了一种在飞机初步设计阶段考虑损伤容限要求的方法。用许用应力形式表征损伤容限约束,将基于损伤容限理论的剩余强度和疲劳寿命要求作为一个新的设计约束,用于初步设计阶段的结构优化设计。通过有限元分析的 Global/Local 分析,在整体优化设计中进行局部详细分析,考虑局部疲劳需求。用裂纹扩展分析程序 AFGROW 进行疲劳裂纹增长分析,再根据疲劳寿命要求确定一个新的强度准则—设计约束。在结构优化程序 COMPASS 中引入所建立的损伤容限约束进行结构尺寸设计,同时考虑损伤容限要求和其他结构强度要求,确定损伤容限关键构件的尺寸。研究表明,飞机中的某些部位,例如下翼面根部蒙皮等区域,在初步设计中可能受控于损伤容限约束,有必要在飞机初步设计中引入并考虑这种设计要求,得出可信的设计。

## 微粒子喷丸车轴钢疲劳性能分析

鲁连涛 张继旺  
(西南交通大学牵引动力国家重点实验室 成都 610031)

由于处理工艺的便利性和低成本的特点,喷丸处理被广泛用于提高机械结构的疲劳强度。其对机械结构疲劳强度的提高主要得益于材料表面的压缩残余应力对表面裂纹萌生的抑制和裂纹扩展的减缓。然而,一些文献报道喷丸赋予材料表面的压缩残余应力在疲劳过程中常常发生松弛现象。研究发现,残余应力的松弛主要发生在疲劳过程的初期,是由于加载的压缩应力与压缩残余应力的总