

文章编号: 1000-8055(2005) 06-0951-07

基于缺陷概率特点的粉末冶金材料 寿命预测概率模型

魏大盛, 杨晓光, 王延荣

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘要: 粉末冶金材料由于其制造工艺的特点, 强度和寿命对微缺陷(夹杂、气孔、表面划伤)十分敏感, 导致了粉末冶金材料的破坏具有较大的分散性, 使得寿命预测更为困难。本文根据国内粉末材料中缺陷的分布特点, 基于文献[7~9]中概率断裂分析的思路, 对原有方法进行了修正和推广, 重新给出了缺陷在表面、亚表面以及内部时的定义及缺陷在这些不同位置时出现概率断裂的确定方法, 建立了一个可考虑缺陷形状、大小、位置等分布特征的粉末冶金材料寿命预测概率模型, 并基于此计算了不同尺寸缺陷位于不同位置时材料的失效概率及总失效概率。分析表明: 所给出的方法可以很好的表征国内工艺条件下粉末冶金材料缺陷的概率特征对强度寿命的影响, 方法是有效的。

关键词: 航空、航天推进系统; 粉末冶金; 缺陷; 临界尺寸; 概率

中图分类号: TB303

文献标识码: A

A Probabilistic Model for Prediction of Life Based on Probabilistic Character of Defects in PM Alloys

WEI Da-sheng, YANG Xiao-guang, WANG Yan-rong

(School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Due to manufacturing characteristic, the strength and life of powder metallurgy alloy are sensitive to micro defects, such as nonmetallic inclusion, pores, and nicks on the surface. A distinct character of failure of this kind of material is scatter, which makes life prediction more difficult. In this paper, based on the defect populations of domestic PM alloy and some probability failure methods established in reference [7~9], definition of the probability for the presence of a defect inside the surface, sub-surface and internal region is given first, and then a probabilistic model is set up, which can calculate the failure probability caused by defects having different shapes and different sizes, being in different regions, and also can calculate the total failure probability. It is concluded that the method can describe the effect of probabilistic character of defects on the strength and life of PM alloy, and it is proved to be valid.

Key words: aerospace propulsion system; powder metallurgy; defects; critical size; probabilistic

收稿日期: 2004- 11- 29; 修订日期: 2005- 05- 23

作者简介: 魏大盛(1978-), 男, 黑龙江宁安人, 北京航空航天大学能源与动力工程学院博士生, 主要从事发动机结构、振动及疲劳方面的研究。

高温粉末冶金材料由于其高温性能优于常规的铸造高温合金材料, 目前已成为新一代航空发动机涡轮盘、轴主要使用的材料。第一代粉末材料以 Rene-95 为代表, 是当前涡轮盘 650℃ 使用条件下强度最好的一种材料; 第二代粉末材料以 Rene-88DT、N18 为代表, 适当降低材料强度的同时提高了韧性, 满足了损伤容限设计思想的要求; 目前我国以第一代粉末材料 FGH95 的研制和应用为主。

粉末冶金材料由于其制造工艺的特点, 使得其强度和寿命对微缺陷(夹杂、气孔、表面划伤)十分敏感, 大量粉末材料的低周疲劳试验结果表明, 疲劳裂纹通常起始于材料表面或内部一些随机分布的缺陷, 例如气孔和夹杂。这使得粉末材料的低周疲劳寿命分散性极大, 寿命预测较为困难。Bernstein 采用频率分离法、Ostesgren 法、SRP 法以及损伤率法对 Rene-95 的疲劳试验数据进行拟合后发现, 4 种方法均不能使结果处于 2 倍分散带以内, 最大甚至达到 18 倍^[1]。Hy zak 以及 Bernstein 紧接着较为系统地研究了粉末合金材料 AF-115 和 AF2-1DA 中的缺陷对于疲劳寿命的影响, 可见人们此时已经注意到了粉末高温合金低周疲劳失效机制的特殊性, 但仍然未给出较为合适的寿命预测方法^[2], 之后一段时期的研究集中在短裂纹的扩展特性上^[3~5]。直到 90 年代初期, Brückner-Foit^[6]和 Bussac^[7,8]较早采用了概率方法分别对粉末材料 U dimet 700 及 N18 进行了寿命的评估, 提出了粉末材料寿命预测的新方法。近年来, 越来越多的国外学者基于概率模型对粉末材料的破坏进行建模和分析^[9~11]。在国内, 钢铁研究总院、北京航空材料研究院等对 FGH95 的制造工艺、微观组织结构等方面进行了较为深入的研究, 而对粉末冶金材料的破坏研究还较多的基于传统的寿命分析方法, 利用概率方法进行研究的还不多。西工大的吕文林等人针对粉末材料微缺陷的特点进行了粉末盘的裂纹扩展失效分析^[12,13], 其工作具有一定的开创性, 另外南航的高德平、宋迎东等人在粉末材料的概率分析方面也进行了一些相关研究^[14,15]。

因此, 本文将基于文献[7~9]提出的概率破坏模型思想, 针对国内粉末冶金工艺水平下材料的缺陷分布特点, 通过对缺陷形状、大小和位置及其与破坏的关联分析和假设, 对原概率破坏模型进行修正和推广, 建立一种适用于国内粉末材料缺陷特点的寿命预测概率模型。文献[7, 8, 14,

15] 侧重于分析缺陷本身的特征(尺寸、数量等)同失效之间的关系, 与试验条件的关联不紧密; 假设了缺陷为球形; 没有考虑亚表面缺陷, 本文将针对这几点进行改进。首先, 从概率断裂力学的角度出发, 将缺陷的形状、尺寸同微裂纹扩展相结合, 使模型的物理意义更为明确, 可以同试验条件(温度、载荷等)很好的关联; 其次, 着重研究了亚表面缺陷, 给出了亚表面缺陷存在时疲劳寿命、失效概率的计算方法, 发现亚表面缺陷对材料疲劳性能的影响有时比表面缺陷更为显著; 再次, 将缺陷视为片层状, 既反映了缺陷的各向异性特点, 又更接近我国粉末材料中缺陷的真实形状, 模型还可以计算椭圆形、尖角等各种缺陷形状, 并且能够考虑多轴应力状态下, 缺陷对复合型裂纹扩展影响的情况。

1 寿命预测概率模型的建立

从断裂力学角度, 可以认为材料中存在的一个尺寸为 a_0 的缺陷是裂纹扩展的初始尺寸, 因此可由 Paris 公式计算含有尺寸为 a_0 的缺陷时的材料寿命:

$$N_0 = \int_0^c \frac{da}{C(\Delta K)^m} \quad (1)$$

式中: C 和 m 为材料常数; ΔK 为缺陷处的应力强度因子范围; a 为材料缺陷的临界尺寸。

不难看出, 循环数 N_0 实际上就是含缺陷材料的剩余寿命, 当存在的缺陷尺寸大于 a_0 时, 材料将在 N_0 次循环之前失效, 在这里不妨将 a_0 定义为达到临界循环数 N_0 时的临界缺陷尺寸。确定尺寸大于 a_0 的缺陷在材料中存在的概率就是建立寿命预测概率模型的出发点, 这就是文献[7]的主要思想; 但它只考虑了表面缺陷, 并且认为缺陷是呈现各向同性的球形。下面将就这两点针对国内粉末冶金工艺下材料缺陷的特点进行模型修正。

首先根据文献[16, 17], 发现国内粉末冶金工艺条件下的材料典型的缺陷为非金属陶瓷夹杂, 对疲劳性能的影响较大。非金属夹杂通常为片层状, 片层的法向与盘的轴向十分接近, 这与粉末材料的热等静压成型过程有关。鉴于此并考虑到分析的简便性, 将任意形状的非金属夹杂片层按照面积大小等效为片状的圆形或半圆形(针对表面缺陷), 这样就涉及到了片层与外载的方向问题, 需要考虑两种情况: 一是外载与片层法向一致的情况, 二是外载与片层法向垂直的情况。我们选取

第一种情况作为重点进行研究,因为此状态最危险,并且 SEM 观察得到的多是断口(断口方向的法向通常与外载方向一致)上的夹杂面积。以下的推导均基于此种缺陷特点。其次,建模分析时对于缺陷在不同位置时引起不同的破坏概率均应予以考虑,文献[7]中认为表面缺陷最危险,只对表面缺陷进行了概率分析,但当内部缺陷达到一定的尺寸时对材料性能的影响同样是不可忽视的。此外在确定了采用圆形、半圆形的缺陷形式进行分析的基础上,本文还给出了新的亚表面位置的定义。在这些假定的基础上,建立破坏概率分析模型或方法,其步骤为:(1)根据国内粉末材料的实际情况给出夹杂尺寸同数量的函数关系;(2)在表面、亚表面、内部几个不同位置处计算缺陷临界尺寸;(3)计算缺陷在不同位置出现的概率,进而得到缺陷引起失效的概率。

1.1 缺陷临界尺寸的确定

材料中不同位置处的临界缺陷尺寸 a_0 并不相同,因为裂纹的形状、边界效应的影响导致了应力强度因子范围的不同,致使临界循环数 N_0 的临界缺陷尺寸不同。由公式(1)可以看出确定缺陷临界尺寸其实就是已知 N_0 ,求积分下限 a_0 。首先,按半圆形裂纹^[18]计算表面缺陷的临界尺寸:

$$K_{Imax} = 1.21 \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \sigma \cdot \pi a_0 =$$
$$0.771 \cdot \sigma \cdot \pi a_0 \quad (2)$$

其中: a_0 为半圆裂纹半径, σ 为垂直于裂纹面的远端应力。

其次,确定亚表面、内部位置以及相应的缺陷临界尺寸,此时缺陷按圆形裂纹处理。关于亚表面的位置,大量文献中均有论述及各自的标准^[7,8]。这里我们通过对一些数据(表1)的分析,并结合近边裂纹公式^[18],选择 $h_0 = 2/3a_0$ (h_0 为裂纹前缘到表面的最近距离, a_0 为圆裂纹半径)作为亚表面同内部的边界,同时按圆形裂纹^[18]计算亚表面、内部缺陷的临界尺寸:

$$K_I = F \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \sigma \cdot \pi a_0 \quad (3)$$

其中: a_0 为圆裂纹半径, F 为反映边界效应的系数,亚表面位置取 $F = 1.18^{[9,18]}$;内部取 $F = 1$ 。分别将公式(2)、(3)代入公式(1)就可以计算出表面、亚表面及内部缺陷的临界尺寸。

根据表1的试验结果以及相关的材料常数^[9],采用公式(1)~(3)进行确定性的寿命分析,

计算结果见图1。可以看出当缺陷位于表面和内部

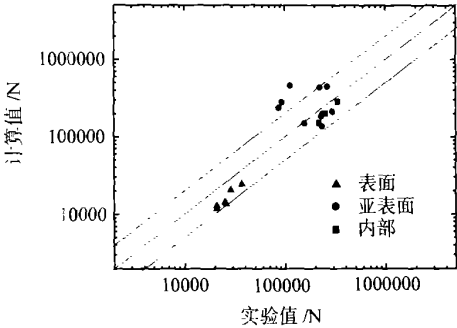


图1 试验寿命与计算寿命的对比
Fig.1 Test life vs predicted life

部时,计算结果与试验结果吻合较好,缺陷位于亚表面时,几个计算点已超出了2倍分散带,这是因为亚表面位置处缺陷的应力强度因子随位置的不同而不同,只按公式(3)计算存在一定的误差。图2的横坐标为缺陷的等效半径同到表面距离的比值(a/h),纵坐标为缺陷位于亚表面位置时的寿

表1 疲劳试验数据
Table 1 Data of fatigue test

	$S/\mu\text{m}^2$	$d/\mu\text{m}$	N
$\Delta\sigma=$ 1 080 MPa $R=0.1$	820	0	29 000
	370	0	37 000
	1 260	10	87 000
	2 830	57	113 000
$\Delta\sigma=$ 1 050 MPa $R=0$	3 920	17	230 000
	3 260	67	265 000
	1 380	14	92 700
	4 180	102	223 000
	4 100	0	25 300
	7240	50	156 000
	—	—	23 600
	17 000	> 2 000	217 000
	14 100	> 2 000	252 000
	10 200	84	233 000
	9 010	0	20 800
	6 280	0	20 900
	10 620	> 2 000	333 000
	9 760	100	298 000
	14 070	695	237 000
	4 980	0	26 000

注:数据来自参考文献[9], S 为缺陷面积, d 为缺陷到表面的距离, N 为试验循环数。

命,从拟合结果可以看出当 $a/h = 1.5$ 时,寿命有最小值,因此我们将 $h = 2/3a$ 作为亚表面和内部的边界。

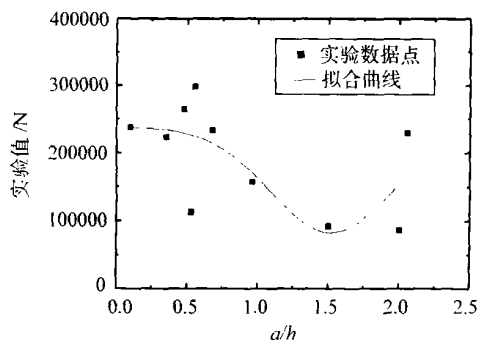


图 2 亚表面位置的界定

Fig. 2 Definition of sub-surface location

1.2 表面缺陷引起失效的概率

表面缺陷是指缺陷被表面切割,其极限状态是同表面相切,图 3 中的缺陷 2 即处于表面位置,缺陷 1、3 反映了表面区缺陷的极限位置;缺陷 4 处于亚表面位置,而缺陷 3、5 是亚表面缺陷的极限位置;缺陷 6 则为内部缺陷。

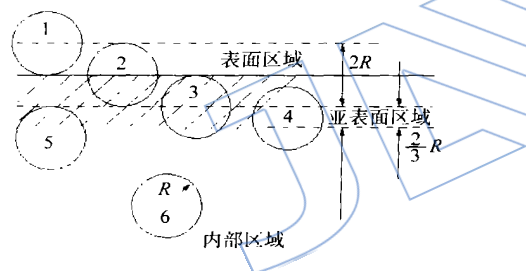


图 3 表面、亚表面以及内部位置示意图

Fig. 3 Location of surface, sub-surface and interior

设圆心在某一特定区域 V_s 出现的概率为 p , 圆心可能出现的总区域为 V , 则有 $p = V_s/V$, 显然此定义式认为圆心在体积 V 中的出现规律呈现均匀分布的特点。因此,对于半径为 a_i 的圆形片状夹杂在表面区域出现的概率可以定义为:

$$p_{\text{sur}} = \frac{V_{\text{sur}}}{V_{\text{tot}}} = \frac{S \cdot 2a}{V + S \cdot a} \quad (4)$$

其中: V_{sur} 为圆心可能出现在表面区位置的体积, V_{tot} 为圆心可能出现位置的总体积, S 为材料的表面积, V 为材料体积。

图 4 中缺陷 1 为表面基准缺陷,半径为 $a_{0\text{sur}}$, 为循环数 N_0 的表面缺陷临界尺寸。在这里认为只要表面缺陷的面积大于基准半圆缺陷的面积 $\pi a_{0\text{sur}}^2/2$, 材料就将在 N_0 次循环之前失效。缺陷 2

尺寸较大,较小的拱高 h 就可以满足面积大于 $\pi a_{0\text{sur}}^2/2$ 的条件;缺陷 3 的尺寸较小,需要较大的拱高。当然,如果缺陷 3 的尺寸进一步减小,整个

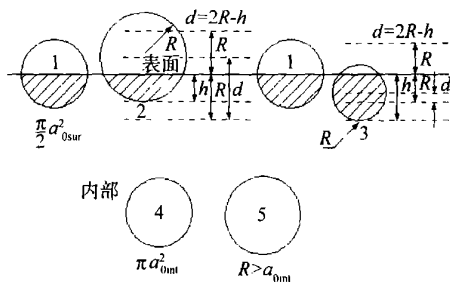


图 4 缺陷引起失效的示意图

Fig. 4 Failure caused by defects

面积都小于 $\pi a_{0\text{sur}}^2/2$, 这样的缺陷不会造成材料在 N_0 次循环之前失效。图 4 中还可以看出,缺陷 2 或 3 的圆心只要在 d 区域出现,就能够满足缺陷为表面缺陷,并且面积大于 $\pi a_{0\text{sur}}^2/2$ 。因此,半径为 a_i 的缺陷,其面积大于 $\pi a_{0\text{sur}}^2/2$ 且出现在表面的概率可以写为:

当 $\pi a_i^2 > \pi a_{0\text{sur}}^2/2$ 时:

$$p_{\text{sur}} = \frac{V_{\text{sur}}}{V_{\text{tot}}} = \frac{S \cdot (2a_i - h_i)}{V + S \cdot a_i} \quad (5)$$

当 $\pi a_i^2 < \pi a_{0\text{sur}}^2/2$ 时:

$$p_{\text{sur}} = 0 \quad (6)$$

其中,拱高 $h_i = 2 \cdot a_i \sin^2 \frac{\theta}{4}$, θ 由:

$$S_i = \pi a_{0\text{sur}}^2 = \frac{1}{2} \cdot a_i^2 (\theta - \sin \theta)$$

求出。

设半径为 a_i 的缺陷数目为 n_i , 那么至少有一个面积大于 $\pi a_{0\text{sur}}^2/2$ 的缺陷出现在表面的概率为:

$$P(n_i \geq 1) = 1 - P(n_i = 0) =$$

$$1 - (1 - p_{\text{sur}})^{n_i} \quad (7)$$

材料中存在不同尺寸的缺陷,如果失效不会发生在 N_0 次循环以前,那么就不能有面积大于 $\pi a_{0\text{sur}}^2/2$ 的缺陷出现在表面,则有:

$$P(N < N_0) =$$

$$1 - \prod_{\pi a_i^2 > \pi a_{0\text{sur}}^2/2} (1 - p_{\text{sur}})^{n_i} \quad (8)$$

其中: $P(N < N_0)$ 为 N_0 次循环之前失效的概率。

1.3 亚表面和内部缺陷引起失效的概率

只要半径大于临界尺寸的缺陷出现在亚表面区,那么材料就将在亚表面区的临界循环数之前失效,对于内部区域也同样考虑。例如图 4 中的缺

陷 4 为内部基准缺陷,半径为 a_{0int} , 为循环数 N_0 的内部缺陷临界尺寸,当缺陷 5 在内部出现时材料将在 N_0 次循环之前失效。半径为 a_i 的圆形片状夹杂在亚表面区域出现的概率可以定义为:

$$p_{subi} = \frac{V_{subi}}{V_{tot}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{S \cdot 2a_i}{V + S \cdot a_i} \tag{9}$$

在内部区域出现的概率定义为:

$$p_{inti} = \frac{V_{inti}}{V_{tot}} = \frac{V_{tot} - V_{suri} - V_{subi}}{V + S \cdot a} \tag{10}$$

参考公式(8),亚表面和内部缺陷引起失效的概率可统一写为:

$$P(N < N_0) = 1 - \prod_{\pi a_i^2 > \pi a_0^2} (1 - p_i)^{n_i} \tag{11}$$

其中: 缺陷在亚表面时 $p_i = p_{subi}$, $a_0 = a_{0sub}$; 缺陷在内部时 $p_i = p_{inti}$, $a_0 = a_{0int}$; a_{0sub} 和 a_{0int} 分别为循环数 N_0 的亚表面缺陷临界尺寸和内部缺陷临界尺寸。

1.4 总体失效概率

上面分别给出了由表面缺陷、亚表面缺陷以及内部缺陷引起失效的概率分析方法。材料失效不会发生在 N_0 次循环以前, 则表面、亚表面和内部这 3 种失效机制均不会在 N_0 次循环之前引起失效, 与此等价的条件就是: 不能有面积大于 $\pi a_{0sur}^2/2$ 的缺陷出现在表面, 不能有面积大于 πa_{0sub}^2 的缺陷出现在亚表面, 也不能有面积大于 πa_{0int}^2 的缺陷出现在内部, 由此可以得到:

$$1 - P_t(N < N_0) = P_{sur}(a_i > a_{0sub}) \cdot P_{sub}(a_i > a_{0sub}) \cdot P_{int}(a_i > a_{0int}) \tag{12a}$$

$$1 - P_t(N < N_0) = \prod_{\pi a_i^2 > \pi a_{0sur}^2/2} P_{sur}(n_i = 0) \cdot \prod_{\pi a_i^2 > \pi a_{0sub}^2/2} P_{sub}(n_i = 0) \cdot \prod_{\pi a_i^2 > \pi a_{0int}^2/2} P_{int}(n_i = 0) \tag{12b}$$

$$P_t(N < N_0) = 1 - [1 - P_{sur}(N < N_0)] \cdot [1 - P_{sub}(N < N_0)] \cdot [1 - P_{int}(N < N_0)] \tag{12c}$$

其中: $P_t(N < N_0)$ 为 N_0 次循环之前失效的概率, $P(a_i > a_0)$ 为在某一区域大于临界尺寸的缺陷出现的概率,角标 t, sur, sub, int 分别代表总体、表面、亚表面和内部。

2 计算结果及分析

对于所建立的模型而言,我们只要获得缺陷数量及尺寸的分布规律(如式 13)以及粉末材料

裂纹扩展试验的材料常数就可以采用本模型进行寿命预测。

$$N_i = f(a_i) \tag{13}$$

其中: N_i 代表半径为 a_i 的缺陷个数。

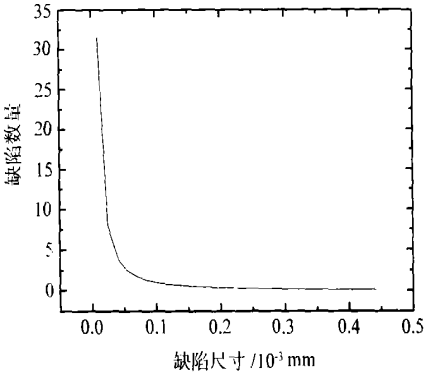


图 5 缺陷尺寸和数量的关系

Fig.5 Number of defects as function of size of defects

公式(14)用来模拟粉末材料中缺陷的分布, 见图 5。该式在一定程度上能够客观地反映粉末材料中缺陷的分布, 当然此分布形式与实际缺陷分布存在差异, 较为准确的描述缺陷的分布依赖于大量的统计结果以及无损检测技术的精度。

$$N_i = 1\,000 \cdot a_i^{-1.5} \tag{14}$$

计算采用圆柱形标准试件, 工作部分的参考尺寸为 $\Phi 6.35\text{ mm} \times 32\text{ mm}$ 。依据 1 节中给出的方法, 计算结果见图 6~图 11。

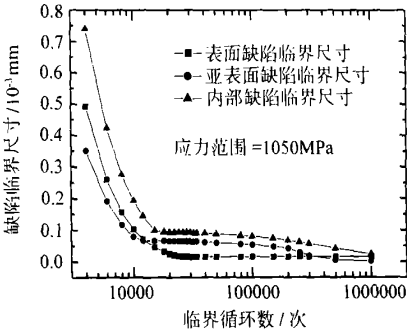


图 6 临界尺寸和临界循环数的关系

Fig.6 Critical size as function of critical number of cycles

图 6 给出了临界尺寸和临界循环数的关系曲线, 这是联系概率模型与试验条件的重要步骤。

图 7~图 9 分别给出了不同应力范围下表面、亚表面以及内部缺陷引起失效的概率, 在相同失效概率下, 应力范围的降低使临界循环数增加。由图 7 的计算结果可以看出当循环数达到一定值

时失效概率不再增加,而是保持不变,这是因为在计算时给出了一个表面裂纹扩展的应力强度因子的门槛值 ΔK_{th} ,对应有一个临界尺寸的门槛值 a_{th} ,正是它的存在导致了上述情况的发生。如果不给出门槛值,失效概率将继续增加但幅度很小,这是因为极小的缺陷对失效概率的贡献已经相当小。图 8、图 9 的计算结果中存在一些“平台”,例如图 8 中的 AB 段, AB 段实际上代表了临界尺寸的一段区间。造成“平台”的原因是按公式(14)给出的缺陷尺寸分布时,其中不包含与 AB 段中临界尺寸较为接近的缺陷。图 9 中可以看出,内部缺陷在一定循环数以后,将导致失效概率迅速增加,失效概率趋近于 1。这易于理解,内部区域较大,缺陷出现的概率较大,试验的最终结果就是失效,因此失效概率趋近于 1。

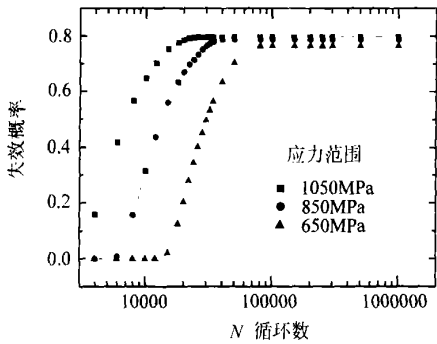


图 7 表面缺陷引起失效的概率

Fig. 7 Failure probability caused by surface defects

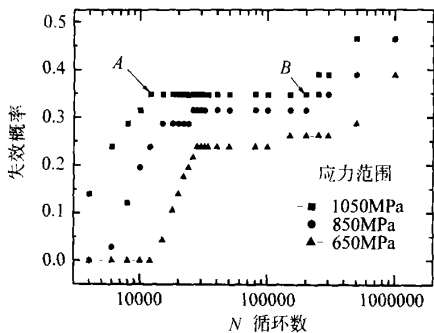


图 8 亚表面缺陷引起失效的概率

Fig. 8 Failure probability caused by sub-surface defects

图 10 给出了应力范围 1 050 MPa 下的失效概率,以便于分析相同应力范围下的失效,可以看出内部缺陷失效概率线同表面、亚表面失效线均有交点,说明了在低循环条件下,失效易发生在表面或亚表面;而在高循环条件下,失效易发生在内

部。在 1 050 MPa 的试验条件下,表面缺陷引起失效到内部缺陷引起失效的转化区域的循环数大约在 5 000~8 000 之间,当应力范围降低时,此区域将向 X 轴的正向移动。

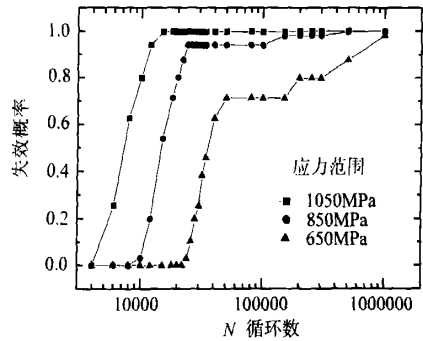


图 9 内部缺陷引起失效的概率

Fig. 9 Failure probability caused by internal defects

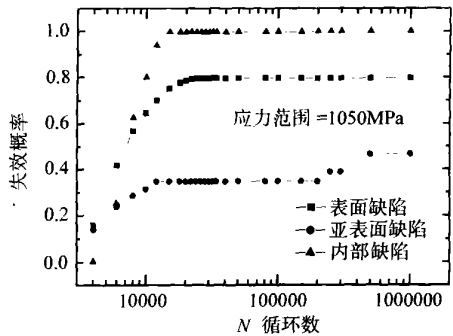


图 10 应力范围 1 050 MPa 下的失效概率

Fig. 10 Failure probability under stress range of 1 050 MPa

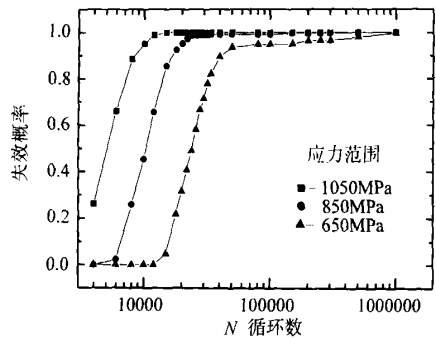


图 11 总失效概率

Fig. 11 Total failure probability

图 11 为公式(12c)计算得出的总失效概率,与图 9 比较可知,内部缺陷引起的失效概率在总失效概率中所占比例较大,尤其在高循环区域;在低循环区域,表面、亚表面缺陷引起的失效概率所占的比例则较大。

3 结 论

根据计算结果及分析可以得出以下结论：

(1) 所建立起的粉末冶金材料寿命或破坏概率预测分析模型较好的表征了材料缺陷所引起的破坏概率；方法以裂纹扩展公式作为纽带，可以同试验条件较好的相互关联；将缺陷的分布特征引入概率破坏模型，使得模型同时可以考察缺陷的尺寸、位置、数量以及形状对失效概率的影响。

(2) 低循环条件下，失效易发生在表面或亚表面；而在高循环条件下，失效易发生在内部。这同许多文献[2, 15] 的研究结果是一致的。

(3) 粉末合金是一种高强度低韧性的材料，结构和工艺特点决定了对小缺陷十分敏感的特性，材料的裂纹扩展寿命将成为寿命的主要部分，因此粉末材料的寿命预测无论是确定性的还是概率性的，都必须从微缺陷入手。粉末材料中的小缺陷在当前的工艺手段下还无法完全消除，小缺陷的随机性使得寿命预测更为困难，因此基于概率断裂力学的寿命预测概率方法对于确定性定寿方法而言是一个极好的完善。

目前，本文对粉末冶金材料的断裂概率分析，所作的假设和采用的数据，只为了说明模型的有效性。实际的工程应用，需要大量的试验，涉及寿命实验、材料缺陷的检测和裂纹扩展的参数。同以往对粉末材料破坏的研究相比，本文提出的概率模型有以下优点：其一，更有利于反映粉末材料破坏的特点，即对小缺陷的敏感性引起的接近脆性的断裂；其二，模型还可以反映出不同工艺条件下缺陷尺寸、形状、数量等的概率分布特点对于破坏的影响。当然也存在一些不足：在分析亚表面缺陷时，寿命预测的分散带最大达到了 4 倍，关于亚表面位置的界定仍需深入研究，一些相关的定义尚需适当修改；另外，为了便于分析将缺陷假定为圆形及半圆形，同实际情况存在较大差别，这也是进一步研究中有待改进的地方。

参考文献：

[1] Bernstein H L. An Evaluation of Four Current Models to Predict the Creep-Fatigue Interaction in Rene 95[R]. *AFML-TR- 79- 4075*, 1979.

[2] Hyzak J M. The Effect of Defects on the Fatigue Crack Initiation Process in Two P/M Superalloys[R]. *AFML- TR- 80 - 4063, Air Force Materials Laboratory, Wright- Patterson AFB, Ohio*, 1980.

[3] Gayda J, Gabb T P, Miner R V. Fatigue Crack Propagation of

Nickel-Base Superalloys at 650°C[R]. *NA SA- TM- 87150*, 1985.

[4] Pelloux R M, Romanoski G R, Feng J. Study of the Fatigue Behavior of Short Cracks in Nickel-Based Superalloys[R]. *AFOSR- TR- 86- 0224*, 1986.

[5] Pelloux R M. Study of the Fatigue Behavior of Small Cracks in Nickel-Based Superalloys[R]. *AFOSR- TR- 88- 0457*, 1988.

[6] Brückner-Foit A. Prediction of the Lifetime Distribution of High-Strength Components Subjected to Fatigue Loading[J]. *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, 1993, 16(8): 891 ~ 908.

[7] Bussac A de, Lautridou J C. A Probabilistic Model for Prediction of LCF Surface Crack Initiation in PM Alloys[J]. *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.*, 1993, 16(8): 861 ~ 874.

[8] Bussac A de. Prediction of the Competition between Surface and Internal Fatigue Crack Initiation in PM Alloys[J]. *Fatigue Fract. Engng Mater. Struct.*, 1994, 17(11): 1319 ~ 1325.

[9] Grison J, Remy L. Fatigue Failure Probability in a Powder Metallurgy Ni-Base Superalloy[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1997, 57(1): 41 ~ 55.

[10] Timothy P Gabb. Assessments of Low Cycle Fatigue Behavior of Powder Metallurgy Alloy U720[J]. *Fatigue and Fracture Mechanics*, 2000, 31: 110 ~ 127.

[11] Luo J. A Probabilistic Methodology for Fatigue Life Prediction[J]. *Acta Materialia*, 2003, 51: 3537 ~ 3550.

[12] 徐凌志, 吕文林. 粉末冶金涡轮盘裂纹扩展失效概率分析[J]. 机械科学与技术, 2000, 19(2): 210 ~ 212. .
XU Ling-Zhi, Lü Wen-lin. Crack Growth Failure Probability of PM Turbine Disk[J]. *Mechanical Science and Technology*, 2000, 19(2): 210 ~ 212.

[13] 徐凌志, 吕文林. 粉末冶金盘中夹杂位置随机性的裂纹扩展失效概率分析方法[J]. 机械科学与技术, 2001, 20(3): 440 ~ 443.
XU Ling-Zhi, Lü Wen-lin. A Method for Analyzing Crack Growth Failure Probability Considering the Randomness of Inclusions' Position of PM Turbine Disk[J]. *Mechanical Science and Technology*, 2001, 20(3): 440 ~ 443.

[14] 高德平, 宋迎东. 粉末高温合金低周疲劳寿命预测的理论模型[A]. 第十届航空发动机结构强度振动会议论文集[C]. 安徽: 歙县, 2000.

[15] 宋迎东, 高德平. 基于夹杂物分布的粉末冶金盘疲劳定寿的概率方法[J]. 航空发动机, 1998, (2): 49 ~ 52.

[16] 邹金文, 汪武祥. 粉末高温合金中夹杂物特性及其质量控制[J]. 材料科学与工艺, 1999, 7: 7 ~ 11.
ZOU Jin-wen, WANG Wu-xiang. Characteristic And Quality Control of Inclusions of P/M Superalloy[J]. *Material Science & Technology*, 1999, 7: 7 ~ 11.

[17] 国为民, 吴剑涛, 张凤戈, 等. FGH95 镍基高温合金粉末中的夹杂及其对合金疲劳性能的影响[J]. 粉末冶金工业, 2000, 10(3): 23 ~ 28.
GUO Wei-min, WU Jian-tao, ZHANG Feng-ge, et al. Inclusion in Powder of Nickel Base Superalloy FGH95 and the Effect on LCF of the Superalloy[J]. *Powder Metallurgy Industry*, 2000, 10(3): 23 ~ 28.

[18] 中国航空研究院. 应力强度因子手册(增订版)[M]. 北京: 科学出版社, 1981.