

文章编号:1674-8190(2019)04-445-11

# 铸件中显微孔洞特征及其对疲劳寿命影响的研究进展

姜文<sup>1</sup>,姚卫星<sup>1,2</sup>,王英玉<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室,南京 210016)

(2. 南京航空航天大学 飞行器先进设计技术国防重点学科实验室,南京 210016)

**摘要:** 铸件在铸造过程中会不可避免地产生显微孔洞,严重降低了铸件疲劳寿命。本文综述铸件中显微孔洞特征(尺寸、形状和空间分布)对疲劳寿命的影响,包括显微孔洞类型,孔洞特征分布规律,孔洞最大尺寸预测方法和含孔洞材料疲劳寿命预测方法;通过对疲劳寿命预测模型的回顾,发现目前含显微孔洞铸件疲劳寿命预测方法还不成熟;展望了显微孔洞特征对疲劳寿命影响的研究。提出未来应该依靠先进光源开展原位疲劳实验或者分子动力学仿真来研究孔洞疲劳失效微观机理,建立考虑不同显微孔洞特征参数,以及不同孔洞间相互影响的疲劳寿命定量预测模型。

**关键词:** 铸件;显微孔洞;特征分布规律;尺寸预测;疲劳寿命

中图分类号: V215.5<sup>+</sup>5; TG146.2 文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2019.04.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Research Progress of Microporosity Characteristics in Casting and Their Effects on Fatigue Life

Jiang Wen<sup>1</sup>, Yao Weixing<sup>1,2</sup>, Wang Yingyu<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

(2. Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense-advanced Design Technology of Flight Vehicle, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Microporosities in casting alloys cannot be avoided in the casting process, which reduces the fatigue life of structure greatly. The current progress of microporosity characteristics(size, shape and position) in casting alloys and their effects on fatigue life is reviewed and prospected, including the types of porosities, distribution rules of porosity characteristics, and prediction method of maximum porosity size and the fatigue life prediction method of castings containing porosities. Through reviewing the fatigue life prediction model, it is concluded that the current fatigue life prediction method of casting is not yet mature. The future research of this field is prospected. The future research should rely on advanced light sources to perform in-situ fatigue experiments or molecular dynamics simulations to study the microscopic mechanism of fatigue failure, and a quantitative prediction model for fatigue life considering different characteristics of porosities and the interaction between them should be established.

**Key words:** casting; microporosity; characteristics distribution rule; size prediction; fatigue life

收稿日期:2018-11-22; 修回日期:2018-12-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51875276);航空科学基金(2017ZF52073);国家科技重大专项(2017-VI-0003-0073)

通信作者:姚卫星, wxyao@nuaa.edu.cn

引用格式:姜文,姚卫星,王英玉. 铸件中显微孔洞特征及其对疲劳寿命影响的研究进展[J]. 航空工程进展, 2019, 10(4): 445-455,486.

Jiang Wen, Yao Weixing, Wang Yingyu. Research progress of microporosity characteristics in casting and their effects on fatigue life[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(4): 445-455,486. (in Chinese)

## 0 引言

以镍基高温合金和高质量铸造铝合金为代表的高端铸造合金是航空发动机、燃气轮机以及汽车发动机制造的基础,在航空航天、汽车等领域应用广泛<sup>[1-2]</sup>,但是在服役过程中往往承受交变载荷和高温作用,产生循环塑性变形累积而导致疲劳失效<sup>[3]</sup>。疲劳失效裂纹往往萌生于孔洞处,并在孔洞处有较大的裂纹扩展速率<sup>[4]</sup>,使得孔洞缺陷成为制约其疲劳寿命的关键因素之一。随着铸造技术的提高,宏观孔洞已经能够基本消除,但是依旧无法避免枝晶间显微孔洞的产生<sup>[5-6]</sup>。这些显微孔洞尺寸范围通常在几微米至几百微米之间,形状较为复杂,它们的存在破坏了基体的连续性,在变形过程中造成应力集中,成为疲劳失效的裂纹源头,严重降低了结构疲劳寿命<sup>[7]</sup>。

近年来,国内外也有一些关于铸件中显微孔洞方面的综述。例如,侯延辉等<sup>[8]</sup>综述了铸造气孔物理模型的研究进展;张杰等<sup>[9]</sup>综述了铸件中孔洞缺陷对裂纹萌生和裂纹扩展的影响;康茂东等<sup>[10]</sup>综述了铸件中显微疏松缺陷的表征方法及其对疲劳

性能的影响;P. D. Lee 等<sup>[11]</sup>综述了铸造铝合金中显微孔洞物理模型;A. R. Adamane 等<sup>[12]</sup>综述了合金液注入参数对显微孔洞形成及铸件拉伸性能的影响。目前相关综述主要集中在显微孔洞形成模型和试验表征,关于微孔洞对疲劳性能影响的综述较少,尤其缺乏不同显微孔洞特征参数(例如孔洞尺寸、孔洞外貌、空间分布、体积分数等)对疲劳寿命定量影响的综述。

本文主要以镍基高温合金和铸造铝合金为例综述铸件中显微孔洞的类型及特征,显微孔洞特征参数的分布规律,显微孔洞最大尺寸预测方法,以及考虑不同显微孔洞特征的铸件疲劳寿命预测方法,并对显微孔洞特征对疲劳寿命影响的研究进行展望。

## 1 显微孔洞的类型及特征

显微孔洞类型如图 1 所示,显微孔洞按照其形成时间的先后可以归结于三种:合金凝固过程中产生的铸态微孔;固溶热处理过程中产生的固溶微孔;以及服役过程中产生的蠕变微孔<sup>[13-15]</sup>。

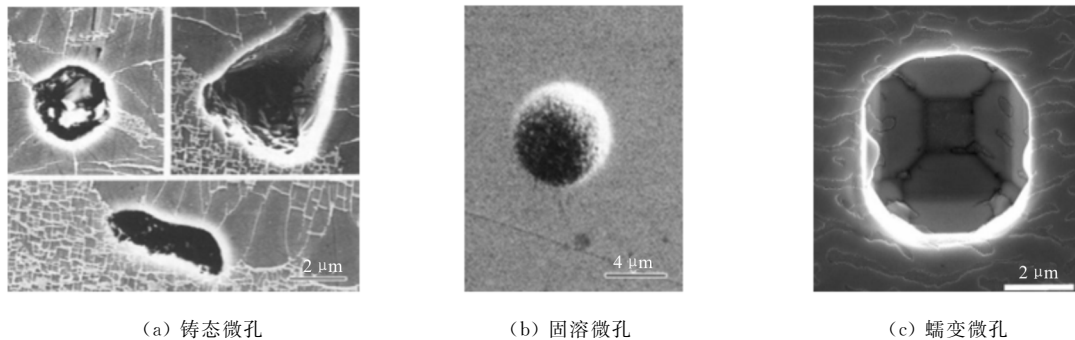


图 1 显微孔洞类型

Fig. 1 Types of microporosities

### 1.1 铸态微孔

铸态微孔按照形成机理的不同可以分为缩松、缩孔和气孔三类<sup>[16-18]</sup>。缩松的形成原因是元素偏析造成合金液局部凝固成密闭空间,空间内合金液收缩后得不到补充。缩孔的形成原因是一次枝晶的生长阻碍了合金液向枝晶间流动,枝晶间合金液凝固后得不到补充。气孔又可以分为析出性气孔、倾入性气孔和反应性气孔,形成的原因分别是合金

液中溶解的气体析出,型膜高温下产生气体倾入到合金液中,合金液中析氢等反应产生气体。

铸态微孔的平均直径在  $3\ \mu\text{m}$  左右,75%的铸态微孔的尺寸小于  $4\ \mu\text{m}$ ,只有个别铸态微孔直径超过  $10\ \mu\text{m}$ <sup>[14]</sup>。不同类型的铸态微孔外貌和空间分布差异较大,缩松一般产生于沿重力方向的枝晶间,以长条状疏松通道出现;缩孔主要产生于枝晶间两相共晶组织附近,主要呈现不规则的长条形和三角形<sup>[17]</sup>;析出性气孔在气体含量较低时为多角

形状,在气体含量较高时为近球形,倾入性气孔外形一般为梨形,梨尖指向气体倾入方向<sup>[16,18]</sup>。铸态微孔的内壁粗糙不平,数量约占所有显微孔洞的 80%,由于铸造工艺的提高,合金中气体含量控制的很低,铸态微孔绝大多数是缩松和缩孔缺陷<sup>[19]</sup>。

### 1.2 固溶微孔

为了使铸材内部组织均匀,获得良好的力学性能,必须对铸材进行固溶热处理,这一过程中会形成固溶微孔。固溶微孔的形成原因目前主要认为是基于 Kirkendall 效应不平衡扩散产生的空穴聚集<sup>[14]</sup>。固溶微孔的直径主要在 5~30 μm 之间,平均直径在 8 μm 左右,外貌多为球形或者近球形,内壁相对平整光滑<sup>[13-14]</sup>。空间分布上远离自由表面固溶微孔的体积分数降低,固溶微孔的数量约占所有显微孔洞的 10%<sup>[5]</sup>。

### 1.3 蠕变微孔

蠕变微孔的形成原因是材料在服役过程中承受蠕变载荷产生大应变,蠕变应力、蠕变时间以及蠕变温度均会影响蠕变微孔的尺寸和数量<sup>[20]</sup>。蠕变微孔的直径主要在 2.5~30 μm 之间,平均直径在 10 μm 左右。在蠕变时间较短时蠕变微孔的外貌为近球形,随着蠕变时间增加蠕变微孔的外貌逐渐向立方体转化,蠕变微孔的数量约占显微孔洞数量的 10%<sup>[13]</sup>。

## 2 显微孔洞特征参数分布规律

很多学者通过小尺寸试验件,采用定量金相法<sup>[22]</sup>、X 射线断层扫描<sup>[23-26]</sup>以及同步辐射光源<sup>[15-17,27]</sup>研究了铸件中显微孔洞的特征,本节通过文献中的试验数据,总结出铸造合金中显微孔洞特征参数的分布规律。

### 2.1 尺寸特征分布规律

显微孔洞的尺寸  $d$  指与孔洞面积相等圆或体积相等球的直径,目前普遍认为铸造合金中显微孔洞尺寸服从对数正态分布<sup>[28-31]</sup>,对文献[13]中四种标准热处理后镍基单晶高温合金显微孔洞尺寸分布试验数据进行对数正态分布拟合,如图 2 所示,其中  $p$  为概率密度, $\mu$  为均值, $\sigma$  为标准差, $R^2$  为拟合相关系数。

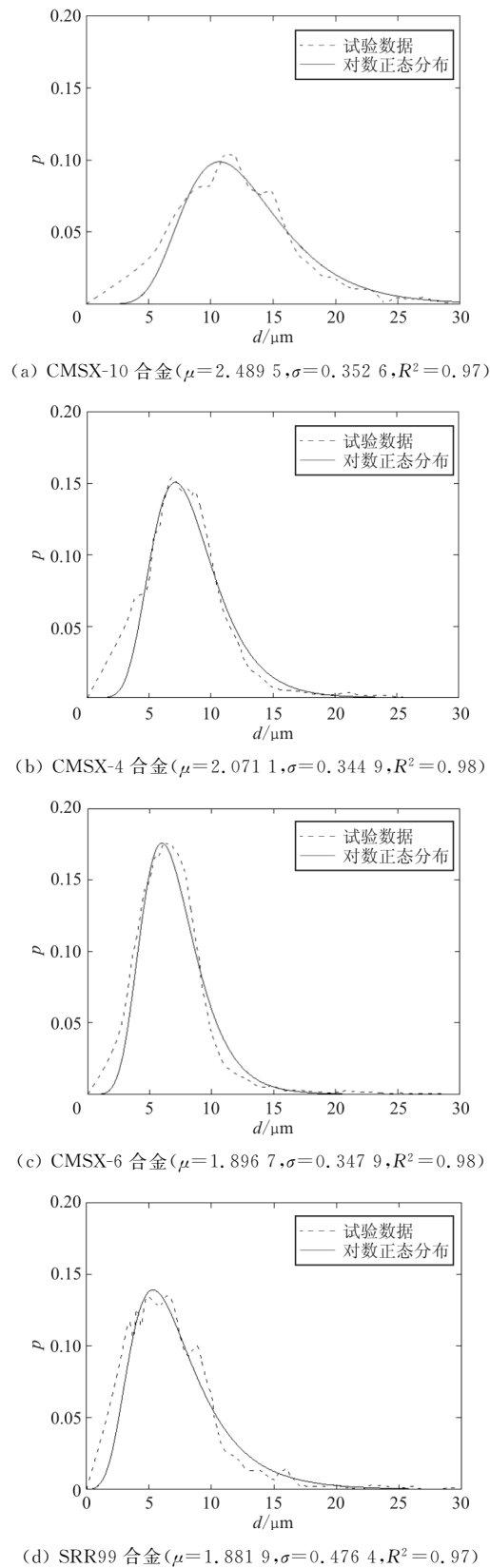
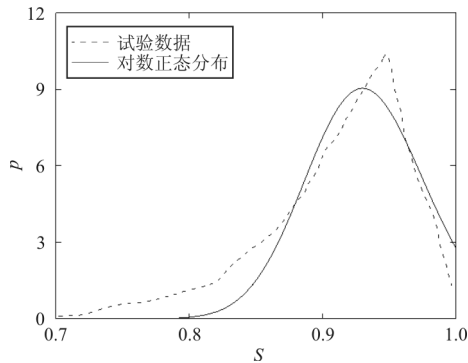


图 2 显微孔洞尺寸对数正态分布拟合结果  
Fig. 2 The lognormal distribution fitting results of microporosity size

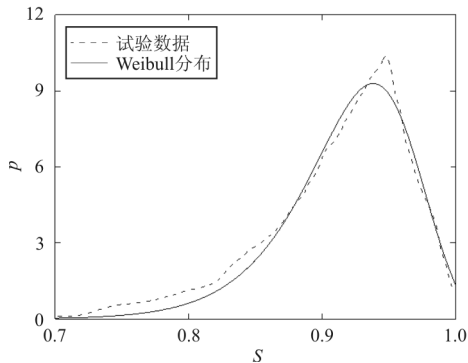
从图 2 可以看出:拟合曲线相关系数均较高,并且试验曲线在孔洞尺寸较大时与对数正态分布拟合曲线重合度更高,因此对数正态分布可以很好地描述显微孔洞尺寸分布规律。

## 2.2 形状特征分布规律

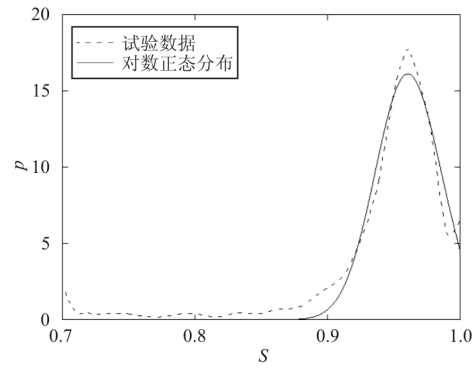
显微孔洞的形状一般采用圆整度  $S$  表示,其中  $S=6\sqrt{\pi}(V/\sqrt{A^3})$ ,圆整度越接近 1 说明显微孔洞外形更接近球形。对文献[13]中标准热处理后两种镍基单晶高温合金显微孔洞形状分布试验数据进行拟合,拟合结果如图 3 所示,其中  $\mu$  和  $\sigma$  为对数正态分布的均值和标准差, $\lambda$  和  $k$  为 Weibull 分布的比例参数和形状参数, $R^2$  为拟合相关系数。结果显示,对于 CMSX-10 合金 Weibull 分布的拟合效果明显优于对数正态分布的拟合效果;而对于 CMSX-4 合金对数正态分布的拟合效果与 Weibull 的拟合效果分布相近,所以可以认为显微孔洞形状分布服从 Weibull 分布。



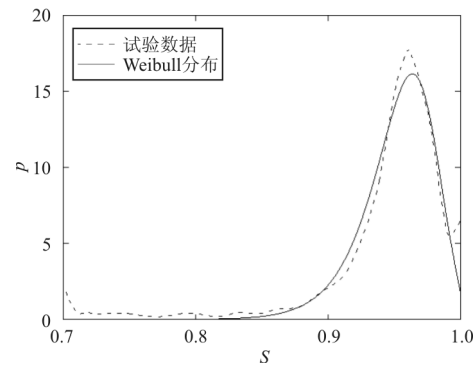
(a) CMSX-10 合金对数正态分布拟合结果  
( $\mu=0.0704, \sigma=0.0470, R^2=0.94$ )



(b) CMSX-10 合金 Weibull 分布拟合结果  
( $\lambda=4.384, k=23.95, R^2=0.99$ )



(c) CMSX-4 合金对数正态分布拟合结果  
( $\mu=0.0397, \sigma=0.0251, R^2=0.97$ )



(d) CMSX-4 合金 Weibull 分布拟合结果  
( $\lambda=4.814, k=43.77, R^2=0.97$ )

图 3 显微孔洞形状分布拟合结果

Fig. 3 The fitting results of microporosity shape distribution

## 2.3 空间特征分布规律

显微孔洞的空间分布可以分为试验件凝固方向分布和厚度方向分布,为方便比较不同尺寸试件中空间分布规律,将孔洞与自由表面的距离除以所在方向上最大试件尺寸得到相对距离。冯广召等<sup>[32]</sup>研究了不同抽拉速率下 DZ125 合金凝固方向孔洞面积分数分布规律,如图 4 所示,结果表明远离浇口的部分孔洞分布相对均匀,但靠近浇口的部分孔洞面积分数明显升高,万谦<sup>[26]</sup>在铸造铝合金中也发现了同样的规律。喻程等<sup>[16]</sup>研究了铝合金厚度方向孔洞数量分布规律,如图 5 所示,发现孔洞数量在试件表面分布有一定波动,远离自由表面孔洞数量缓慢增多,但在靠近试验件中心后孔洞数量迅速降低,作者认为显微孔洞空间特征可以用多

项式函数拟合。

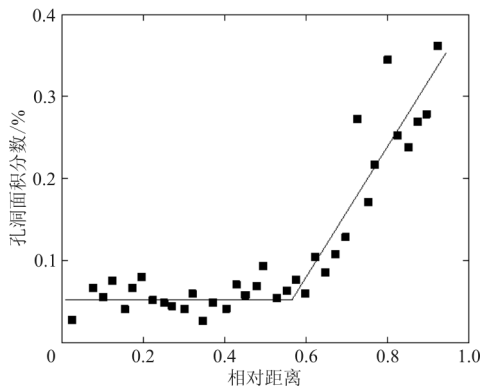


图 4 凝固方向孔洞面积分数分布

Fig. 4 Area fraction distribution of microporosity in the solidification direction

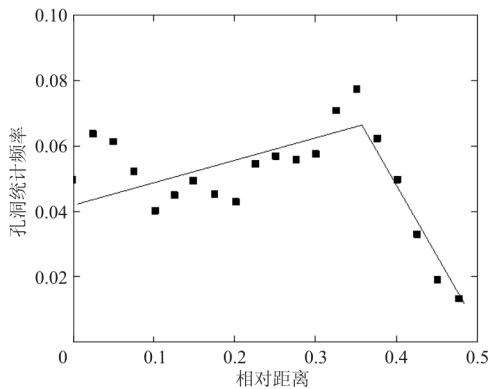


图 5 厚度方向孔洞数量分布

Fig. 5 Quantity distribution of microporosity in the thickness direction

### 2.4 大尺寸显微孔洞特征参数间的联系

铸件表面或者近表面尺寸较大的孔洞往往对疲劳失效影响很大<sup>[33-35]</sup>,这些尺寸较大的显微孔洞,其尺寸、形状和空间分布之间存在一定的联系。为了比较不同材料、不同尺寸试件中较大尺寸显微孔洞特征参数间的联系,需将孔洞尺寸除以试件中最大孔洞尺寸得到相对尺寸。文献[16,23,36]中相对尺寸大于 0.5 的显微孔洞圆整度分布数据如图 6 所示,结果表明试件中尺寸越大的显微孔洞圆整度也较低,大尺寸显微孔洞的尺寸和圆整度近似线性关系。文献[16,17,36]中相对尺寸大于 0.5 的显微孔洞厚度方向空间分布数据如图 7 所示,结果表明尺寸较大的显微孔洞倾向于出现在距离自

由表面较远的地方,并且最大孔洞往往在距离自由表面相对距离为 0.1 的地方聚集。因此尺寸特征尤其最大尺寸可以作为显微孔洞的典型特征来评估铸件的疲劳寿命。

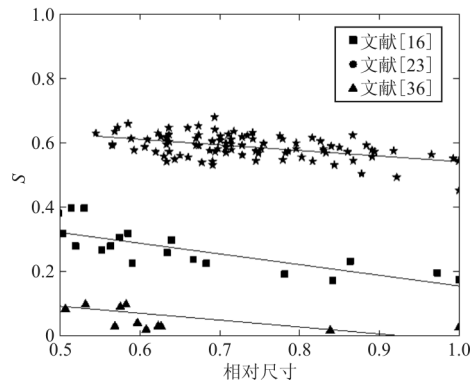


图 6 大尺寸孔洞尺寸与形状分布规律

Fig. 6 Distribution pattern of large-size microporosity between size and shape

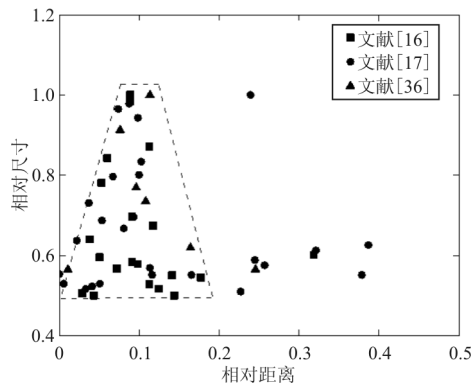


图 7 大尺寸孔洞尺寸与空间的分布规律

Fig. 7 Distribution pattern of large-size microporosity between size and location

## 3 显微孔洞最大尺寸预测方法

对于大尺寸铸件,采用试验方法观测显微孔洞最大尺寸很难实现,因此常常在大尺寸铸件表面随机选择  $N$  个面积很小的区域  $S_0$ ,收集相关统计量,采用统计方法预测大尺寸铸件中显微孔洞的最大尺寸。常用的预测方法有三种:对数正态分布外推法<sup>[37]</sup>,极大值分布法<sup>[38-40]</sup>和广义 Pareto 分布法<sup>[41-42]</sup>。

### 3.1 对数正态分布外推法

对数正态分布外推法假设铸件中显微孔洞尺

寸  $x$  服从对数正态分布,如图 8 所示( $\sqrt{s_{N,j}}$  为统计尺寸),需要统计每一个区域中所有显微孔洞的尺寸信息,采用最大似然估计法估计标准差  $\sigma$  和平均值  $\mu$ 。定义体积  $V$  中最大显微孔洞尺寸为  $x_V$ ,单位体积中的显微孔洞数量为  $N_V$ ,显微孔洞尺寸不

超过  $x$  的累积概率密度为  $P(x)$ ,如果认为最大尺寸只会在体积  $V$  中出现一次,则应该满足  $N_V V(1 - P(x_V)) = 1$ ,从而可以得到  $x_V$  的估计值,其中  $\phi$  为标准正态分布函数。

$$x_V = \exp\{\mu + \sigma\phi^{-1}(1 - (N_V V)^{-1})\} \quad (1)$$

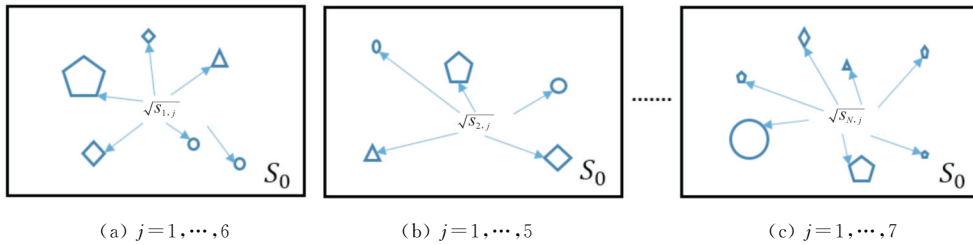


图 8 对数正态分布外推法统计量

Fig. 8 Statistics of log-norm distribution extrapolation method

从式(1)可以看出:随着铸件体积的增大,预测值及置信区间均增大,与实际不相符。此外对数正态分布外推法需要统计大量显微孔洞尺寸的信息来获得拟合度较好的对数正态分布函数,这在实际操作中有两大难度<sup>[43]</sup>:一是尺寸很小的显微孔洞受仪器的限制无法被观测到;二是数量较少的大尺寸显微孔洞对分布函数影响较大,结果稳定性不高。

### 3.2 极大值分布法

极大值分布法假设显微孔洞尺寸服从特定分布,其极大值服从 Gumbel 分布即 I 型极大值分布,如图 9 所示,只需要统计每一区域中显微孔洞尺寸的最大值,然后采用最大似然估计方法估计形状参数  $\alpha$  和位置参数  $\lambda$ 。定义体积  $V$  中显微孔洞最大尺

寸为  $x_V$ ,对于全部体积为  $V$ ,检测体积为  $V_0$  的铸件,其回溯周期  $T = V/V_0 = VN / (S_0 \sum \sqrt{s_{\max,i}})$ ,则有  $x_V$  的估计值为

$$x_V = -\alpha \ln\{-\ln[(T-1)/T]\} + \lambda \quad (2)$$

采用最大似然估计法进行参数估计结果准确但计算量大,因此 Murakami 等<sup>[44]</sup>提出了一种工程做法。将统计的最大值  $\sqrt{s_{\max}}$  按照大小重新排序  $\sqrt{s_{\max,i}} \leq \dots \leq \sqrt{s_{\max,k}} \leq \dots \leq \sqrt{s_{\max,N}}$ ,从而  $z_k = \sqrt{s_{\max,k}}$  是极大值的累积概率为  $P(y_k) = k/(N+1)$ ,通过  $z_k$  和  $y_k$  拟合直线

$$\sqrt{s_{\max}} = \alpha y + \lambda \quad (3)$$

再将  $y = -\ln\{-\ln[(T-1)/T]\}$  代入式(3)即可得到  $x_V$  的估计。

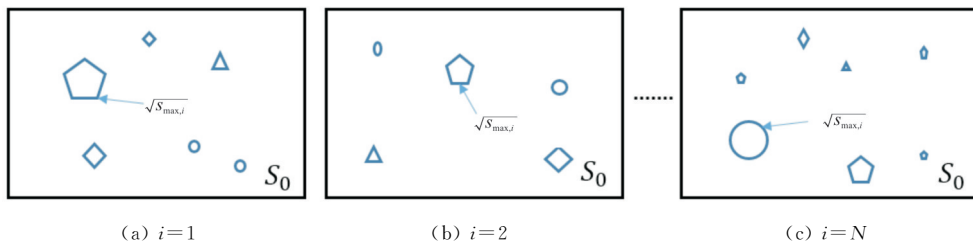


图 9 极大值分布法统计量

Fig. 9 Statistics of maximum distribution method

从式(2)~式(3)可以看出:随着铸件体积的增大,极大值分布法得到的显微孔洞尺寸极大值预测值及置信区间线性增大,与实际不符。但是极大值分布法只需要统计每一个区域中的尺寸最大值,避免了尺寸较小观察不到的情况,减少了样本统计工作量。

### 3.3 广义 Pareto 分布法

广义 Pareto 分布法假设显微孔洞尺寸服从特定分布,其中大于一定阈值值的显微孔洞尺寸  $x$  服从广义 Pareto 分布,该分布有三个参数,尺寸阈值  $\mu$ ,尺度参数  $\sigma$  和形状参数  $\xi$ ,如图 10 所示。

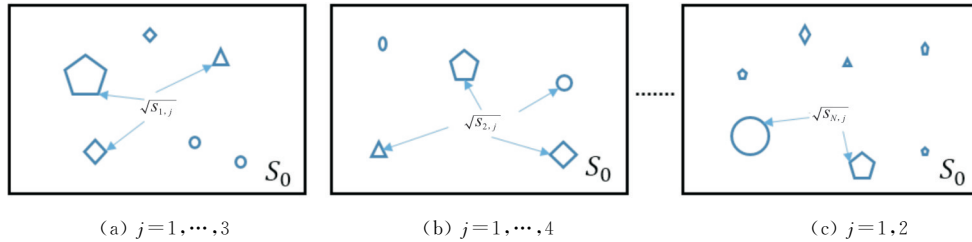


图 10 广义 Pareto 法统计量

Fig. 10 Statistics of generalized Pareto distribution method

该方法需要统计每一区域中尺寸大于  $\mu$  的显微孔洞尺寸信息,工程上常采用作图法确定参数,选择不同的阈值  $\mu_k$ ,求出超过  $\mu_k$  的所有尺寸的平均值  $x_k$ ,做  $\mu_k - x_k$  散点图如图 11 所示,找出线性较好的一段进行拟合,线性段开始的值即阈值  $\mu$ ,对于光学显微镜该值一般为  $3 \mu\text{m}$ <sup>[41]</sup>,再由拟合直线的斜率  $\xi/(1-\xi)$  和截距  $\sigma/(1-\xi)$  求得参数  $\sigma$  和  $\xi$  的估计值。精确度要求较高时可以采用最大似然估计法求解三个参数的估计值,但是计算量较大。

要比极大值分布法复杂。

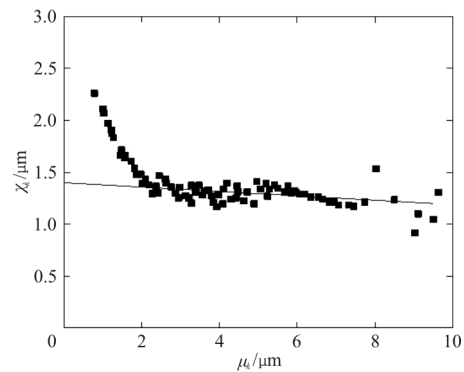


图 11 广义 Pareto 法参数图解法

Fig. 11 Graphic method of generalized Pareto distribution parameters

假设体积  $V$  的铸件中最大显微孔洞尺寸为  $x_V$ ,  $N_V(\mu)$  表示体积  $V$  中尺寸超过阈值  $\mu$  的显微孔洞数量,则可以得到显微孔洞最大尺寸预测值。

$$x_V = \mu - \frac{\sigma}{\xi} \{1 - [N_V(\mu)V]^\xi\} \quad (4)$$

形状参数  $\xi$  对广义 Pareto 分布法的参数估计,尺寸预测值及其置信区间宽度影响很大<sup>[42]</sup>,如果形状参数  $\xi < 0$ ,则最大尺寸预测值存在上限  $x_V = -\mu - \sigma/\xi$ ,更符合实际情况。一般情况下广义 Pareto 法的预测结果比极大值分布法小,但置信区间比极大值分布法宽。当  $\xi \approx 0$ ,广义 Pareto 分布法和极大值分布法的估计值相近,其他情况下广义 Pareto 分布法的估计结果优于极大值分布法<sup>[45]</sup>。但是该方法在确定阈值时比较麻烦,需要统计的数据也比极大值分布法多,在实际操作中

## 4 含显微孔洞铸件疲劳寿命预测方法

铸件中显微孔洞缺陷对疲劳寿命影响较大,研究发现疲劳失效裂纹优先在表面或者近表面显微孔洞处萌生,在内部显微孔洞萌生裂纹时往往孔洞尺寸较大。同时孔洞的形状和位置会影响裂纹的扩展方向和扩展速度,在载荷循环初期内部和表面孔洞的裂纹扩展速度相差不大,但随着循环进行,差异越来越大,最终表现为由表面或者近表面孔洞引起疲劳失效。很多学者研究了显微孔洞特征参数与疲劳寿命之间的关系,本节按照显微孔洞特征进行

分类,介绍了考虑不同特征的铸件疲劳寿命预测方法。

#### 4.1 考虑尺寸特征的铸件疲劳寿命预测方法

显微孔洞尺寸特征尤其最大尺寸可以作为典型特征来评估铸件的疲劳寿命,但是只有尺寸大于一定临界值的显微孔洞,才会对疲劳寿命产生影响。宋哲等<sup>[17]</sup>认为 7020 铝合金中临界尺寸为  $30\ \mu\text{m}$ ,Buffiere 等<sup>[23]</sup>认为 Al-Si7-Mg0.3 铸造铝合金中临界尺寸为  $50\ \mu\text{m}$ 。

Y. Murakami<sup>[44]</sup>最早将孔洞在垂直于载荷方向上最大投影面积的开方等效成孔洞的尺寸,较为方便地构建了孔洞尺寸特征与疲劳寿命的关系。Yi J Z 等<sup>[46]</sup>将孔洞尺寸当成初始裂纹长度  $a_0$ ,通过 Paris 公式预测了含孔洞 A356-T6 铝合金的疲劳寿命。随后 Yi J Z 等<sup>[29]</sup>认为 Paris 公式针对长裂纹提出,不适合显微孔洞这样的小裂纹,应该采用基于微观组织结构的位错模型计算裂纹萌生寿命  $N_i$ ,采用小裂纹扩展公式计算裂纹扩展寿命  $N_p$ ,则疲劳寿命  $N_f = N_i + N_p$ ,预测结果与试验结果吻合较好。 $N_i$  与  $N_p$  的计算公式如式(5)~式(6)所示,其中,  $C_0, \alpha, \beta$  和  $k_0$  为材料参数;  $k_s$  与微孔洞等效尺寸有关;  $\lambda_2$  为二次枝晶臂宽度;  $\sigma_a$  为应力幅值;  $\sigma_Y$  为材料屈服应力;  $C, s$  和  $t$  为经验参数。

$$N_i = \frac{C_0}{\lambda_2} \left[ \frac{1}{k_s \sigma_a} \left( k_0 + \frac{\alpha}{\sqrt{\lambda_2}} \right) \right]^{\frac{2}{\beta}} \quad (5)$$

$$N_p = C \left( \epsilon_{\max} \frac{\sigma_a}{\sigma_Y} \right)^{-s} (a_0^{-t+1} - a_f^{-t+1}) \quad (6)$$

M. Murat<sup>[37]</sup>利用图 12 中 A356-T6 铝合金试验数据,假设孔洞尺寸服从对数正态分布,建立了失效裂纹萌生处孔洞尺寸与疲劳寿命的统计模型,如式(7)所示,该模型计算值与试验值的吻合度高于对数正态分布和 Weibull 分布的结果。其中,  $\lambda$  和  $\delta$  为孔洞尺寸对数正态分布参数;  $B, N_i$  和  $m$  为拟合参数。

$$P(N_f) = 1 - \exp \left\{ - \exp \left[ \frac{\lambda}{\delta} - \frac{2}{\delta \sqrt{\pi}} \left( \frac{N_f - N_i}{B \sigma_a^{-m}} \right)^{2/(2-m)} \right] \right\} \quad (7)$$

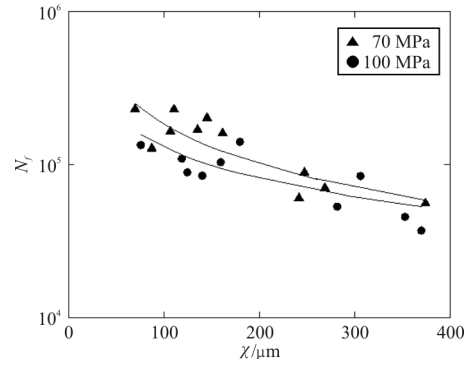


图 12 不同应力幅值下最大孔洞尺寸与疲劳寿命关系  
Fig. 12 The relation between the maximum porosity size and fatigue life under different stress amplitudes

#### 4.2 考虑形状特征的铸件疲劳寿命预测方法

张心响<sup>[47]</sup>通过有限元分析法研究了扁椭球型孔洞椭圆度(长轴与短轴之比)对铸造铝合金疲劳寿命的影响,结果如图 13 所示,表明孔洞椭圆度与疲劳寿命服从指数分布,椭圆度越大疲劳寿命越低。

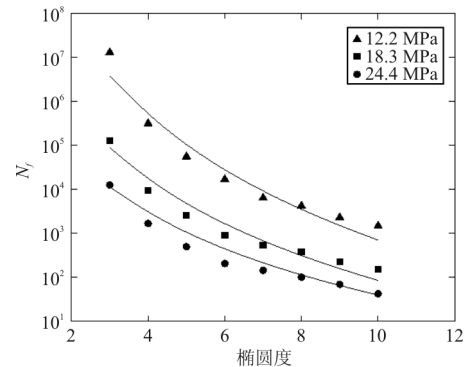


图 13 不同应力幅值下孔洞形状与疲劳寿命关系  
Fig. 13 The relation between the maximum porosity shape and fatigue life under different stress amplitudes

K. M. Beckermann 等<sup>[48]</sup>提出了一种考虑显微疏松形状的 8630 铸钢疲劳寿命计算公式,如式(8)所示,其中,  $A$  和  $n$  为材料常数;  $a, a_0$  和  $a_f$  分别为裂纹长度,显微疏松尺寸和裂纹断裂长度;  $\sigma_{\max}$  和  $F$  分别为最大应力和孔洞圆整度。但该方法不适用于含有较大尺寸复杂形貌的显微疏松缺陷铸件疲劳寿命的预测。

$$N_f = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{A (\sigma_{\max} \sqrt{\pi a F})^n} \quad (8)$$



### 4.3 考虑空间特征的铸件疲劳寿命预测方法

Vanderesse 等<sup>[36]</sup>通过试验研究了铸造铝合金中失效裂纹萌生处显微孔洞位置与疲劳寿命之间的关系,结果如图 14 所示,表明失效孔洞距离自由表面越远,疲劳寿命越长。很多学者提出在孔洞尺寸前乘以一个形状因子表明孔洞位置对疲劳寿命的影响,Murakami<sup>[49]</sup>建议表面孔洞形状因子取 0.65,近表面孔洞形状因子取 0.5。

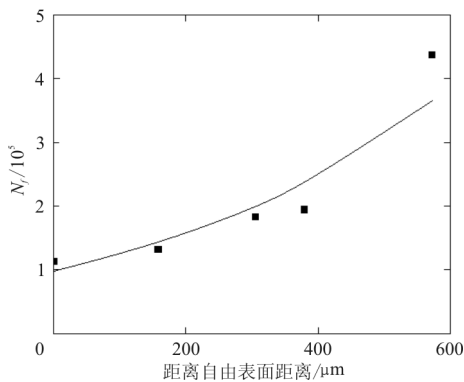


图 14 失效裂纹萌生处孔洞位置与疲劳寿命关系  
(应力比  $R = -1$ )

Fig. 14 The relation between the failure porosity location and fatigue life(stress ratio  $R = -1$ )

Gao Y X 等<sup>[50]</sup>通过有限元分析方法分析了 A356-T6 铝合金中显微孔洞与自由表面距离对疲劳寿命的影响,发现靠近表面的显微孔洞应力集中更严重,并提出了缺陷敏感因子  $k_g$  相关的疲劳寿命定量预测模型,预测结果与试验结果吻合较好。其中,  $k_g = \sqrt{k_\sigma k_\epsilon}$  为孔洞边应力集中系数和应变集中系数的算数平均值,  $\alpha$ ,  $\sigma'_f$  和  $b$  为材料常数;  $k_0$ ,  $k_1$  和  $k_2$  为应力—应变集中系数,与显微孔洞的位置有关;  $d_0$  和  $d_e$  分别为试验件直径和显微孔洞尺寸;  $\sigma'_f$  为远场名义应力。

$$N_f = \frac{1}{2} \left\{ \left[ 1 + \alpha \left( k_0 + k_1 \frac{d_e}{d_0} + k_2 \left( \frac{d_3}{d_0} \right)^2 - 1 \right) \right] \frac{\sigma_a^\infty}{\sigma'_f} \right\} \quad (9)$$

## 5 结束语

为数众多的显微孔洞为显微缩松和缩孔,它们具有不规则的三维形貌,内壁粗糙不平整,会引起

较大的应力集中,对疲劳寿命的影响更为显著。未来应该进一步明确缩松和缩孔形成的机制,制定相关工艺标准控制其数量和质量,指导铸件的工艺设计。

显微孔洞尺寸特征的分布规律较好地服从对数正态分布,形状特征的分布规律服从 Weibull 分布,空间特征的分布规律较为复杂。后续研究应该收集显微孔洞尺寸特征、形状特征和空间特征的试验数据,构建孔洞特征参数的多维分布模型,综合评定显微孔洞不同特征参数分布对疲劳寿命的影响。

显微孔洞尺寸特征尤其最大尺寸可以作为典型特征来评估铸件的疲劳寿命,显微孔洞最大尺寸的预测方法中广义 Pareto 分布的预测结果优于极大值分布法。未来应该进一步研究含孔洞材料疲劳寿命预测模型,明确不同材料显微孔洞临界尺寸,使得最大尺寸的预测结果有明确比较对象,指导铸件的结构设计。

含显微孔洞铸件的疲劳寿命预测模型还不成熟,目前研究主要集中在实验定性和宏观唯象模型,已有的定量预测模型主要关注的是简单载荷下显微孔洞的尺寸特征,复杂载荷下考虑形状和空间特征、以及孔洞间相互影响的疲劳寿命预测方法研究较少。后续应该研究显微孔洞在多轴和高温等复杂载荷下考虑不同显微孔洞特征参数、以及不同孔洞间相互影响的疲劳寿命定量预测模型。

孔洞导致疲劳失效相关机理的研究主要集中在简单载荷下孔洞处裂纹萌生和扩展,一般认为疲劳失效裂纹优先在表面或者近表面孔洞处萌生,孔洞的形状和位置会影响裂纹的扩展方向和扩展速度。复杂载荷下孔洞导致疲劳失效的机理研究还较少,比如镍基单晶高温合金的疲劳失效机理强烈依赖温度,取向偏离、加载频率等,此时微孔洞的疲劳失效机理有待进一步研究。未来可以依靠先进光源展开原位疲劳实验或者分子动力学仿真来研究复杂载荷下孔洞疲劳失效的微观机理。

## 参考文献

- [1] Conley J G, Huang J, Asada J, et al. Modeling the effects of cooling rate, hydrogen content, grain refiner and modifier on microporosity formation in Al A356 alloys[J]. Mate-

- rials Science & Engineering A, 2000, 285(1): 49-55.
- [2] 赵萍, 何清华, 李维, 等. 单晶切口试样低周疲劳特性研究[J]. 航空动力学报, 2010, 25(11): 2632-2636.  
Zhao Ping, He Qinghua, Li Wei, et al. Study on low cycle fatigue characteristic of single crystal notched specimens[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(11): 2632-2636. (in Chinese)
- [3] 施惠基, 马显锋, 于涛. 高温结构材料的蠕变和疲劳研究的一些新进展[J]. 固体力学学报, 2010, 31(6): 696-715.  
Shi Huiji, Ma Xianfeng, Yu Tao. Some new progresses on the research of creep and fatigue behaviors of high temperature structural materials[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2010, 31(6): 696-715. (in Chinese)
- [4] 高斯峰, 肖俊峰, 南晴, 等. 镍基单晶高温合金疏松缺陷研究[J]. 热加工工艺, 2016, 25(19): 70-72.  
Gao Sifeng, Xiao Junfeng, Nan Qing, et al. Study on porosity of nickel-based crystal superalloys[J]. Hot Working Technology, 2016, 25(19): 70-72. (in Chinese)
- [5] Anton D L, Giamei A F. Porosity distribution and growth during homogenization in single crystals of a nickel-base superalloy[J]. Materials Science & Engineering, 1985, 76(1/2): 173-180.
- [6] 李相伟, 王莉, 刘心刚, 等. HRS 和 LMC 工艺对第三代镍基单晶高温合金 DD33 中显微孔洞的影响[J]. 材料研究学报, 2014, 28(9): 656-662.  
Li Xiangwei, Wang Li, Liu Xingang, et al. Microporosity reduction by liquid cooling process of a single crystal nickel based superalloy [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2014, 28(9): 656-662. (in Chinese)
- [7] Le Graverend J, Cormier J, Kruch S, et al. Microstructural parameters controlling high-temperature creep life of the nickel-base single-crystal superalloy MC2[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2012, 43(11): 3988-3997.
- [8] 侯延辉, 成志强, 柳葆生, 等. 铸造气孔物理模型研究进展[J]. 材料导报, 2008, 22(3): 111-114.  
Hou Yanhui, Cheng Zhiqiang, Liu Baosheng, et al. Research progress in physical model of casting porosity[J]. Materials Review, 2008, 22(3): 111-114. (in Chinese)
- [9] 张杰, 陈继志, 冯刚宪. 铸件中孔洞缺陷对疲劳性能影响的研究进展[J]. 材料开发与应用, 2011, 10(5): 83-87.  
Zhang Jie, Chen Jizhi, Feng Gangxian. Research progress of effect of porosity on the fatigue behavior in the cast alloy [J]. Development and Application of Materials, 2011, 10(5): 83-87. (in Chinese)
- [10] 康茂东, 王俊, 高海燕, 等. 铸件显微疏松缺陷特征及其对疲劳性能影响研究进展[J]. 铸造技术, 2016, 37(9): 1919-1923.  
Kang Maodong, Wang Jun, Gao Haiyan, et al. Research progress of morphology characterization of microporosity defects and its effects on fatigue properties of casting[J]. Foundry Technology, 2016, 37(9): 1919-1923. (in Chinese)
- [11] Lee P D, Chirazi A, See D. Modeling microporosity in aluminum-silicon alloys; a review[J]. Journal of Light Metals, 2001, 1(1): 15-30.
- [12] Adamane A R, Arnberg L, Fiorese E, et al. Influence of injection parameters on the porosity and tensile properties of high-pressure die cast Al-Si alloys; a review[J]. International Journal of Metalcasting, 2015, 9(1): 43-53.
- [13] Link T, Zabler S, Epishin A, et al. Synchrotron tomography of porosity in single-crystal nickel-base superalloys [J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 425(1/2): 47-54.
- [14] 石倩颖, 李相辉, 郑运荣, 等. HRS 和 LMC 工艺制备的两种镍基单晶高温合金铸态及固溶微孔的形成[J]. 金属学报, 2012, 48(10): 1237-1247.  
Shi Qianying, Li Xianghui, Zheng Yunrong, et al. Formation of solidification and homogenisation micropores in two single crystal superalloys produced by HRS and LMC processes[J]. Acta Metall, 2012, 48(10): 1237-1247. (in Chinese)
- [15] Epishin A, Nolze G, Svetlov I, et al. Mechanism of porosity growth during homogenisation in single crystal nickel-based superalloys[J]. International Journal of Materials Research, 2013, 104(8): 776-783.
- [16] 喻程, 吴圣川, 胡雅楠, 等. 铝合金熔焊微气孔的三维同步辐射 X 射线成像[J]. 金属学报, 2015, 51(2): 159-168.  
Yu Cheng, Wu Shengchuan, Hu Ya'nan, et al. Three-dimensional imaging of gas pores in fusion welded Al alloys by synchrotron radiation X-ray microtomography [J]. Acta Metall, 2015, 51(2): 159-168. (in Chinese)
- [17] 宋哲, 吴圣川, 胡雅楠, 等. 冶金型气孔对熔化焊接 7020 铝合金疲劳行为的影响[J]. 金属学报, 2018, 54(8): 1131-1140.  
Song Zhe, Wu Shengchuan, Hu Ya'nan, et al. The influence of metallurgical pores on fatigue behaviors of fusion welded AA7020 joints [J]. Acta Metall, 2018, 54(8): 1131-1140. (in Chinese)
- [18] 梁向锋. 镍基单晶空心涡轮叶片的凝固行为、微观结构与性能研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.  
Liang Xiangfeng. Research on solidification behavior, microstructure and properties of nickel-based single crystal hollow turbine blades[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2017. (in Chinese)
- [19] Lecomte-Beckers J. Study of microporosity formation in nickel-base superalloys [J]. Metallurgical & Materials Transactions A, 1988, 19(9): 2341-2348.
- [20] Komenda J, Henderson P J. Growth of pores during the creep of a single crystal nickel-base superalloy[J]. Scripta Materialia, 1997, 37(11): 1821-1826.
- [21] 莫德锋, 何国求, 胡正飞, 等. 孔洞对铸造铝合金疲劳性能的影响[J]. 材料工程, 2010(7): 92-96.  
Mo Defeng, He Guoqiu, Hu Zhengfei, et al. Effect of porosity on fatigue property in aluminum cast alloys[J]. Jour-

- nal of Materials Engineering, 2010(7): 92-96. (in Chinese)
- [22] Roskosz S, Adamiec J. Methodology of quantitative evaluation of porosity, dendrite arm spacing and grain size in directionally solidified blades made of CMSX-6 nickel alloy [J]. *Materials Characterization*, 2009, 60(10): 1120-1126.
- [23] Buffiere J, Savelli S, Jouneau P, et al. Experimental study of porosity and its relation to fatigue mechanisms of model Al-Si7-Mg0.3 cast Al alloys[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2001, 316(1): 115-126.
- [24] Weiler J P, Wood J T, Klassen R J, et al. Relationship between internal porosity and fracture strength of die-cast magnesium AM60B alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2005, 395(1/2): 315-322.
- [25] Nicoletto G, Konečná R, Fintova S. Characterization of microshrinkage casting defects of Al-Si alloys by X-ray computed tomography and metallography[J]. *International Journal of Fatigue*, 2012, 41: 39-46.
- [26] 万谦. 铝合金压铸件微观孔洞的三维特征及其对疲劳性能的影响[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.  
Wan Qian. Research on porosity characterization and its effect on fatigue behavior of aluminum die casting [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [27] Luetje M, Wicke M, Bacaicoa I, et al. 3D characterization of fatigue damage mechanisms in a cast aluminum alloy using X-ray tomography[J]. *International Journal of Fatigue*, 2017, 103: 363-370.
- [28] Yi J Z, Lee P D, Lindley T C, et al. Statistical modeling of microstructure and defect population effects on the fatigue performance of cast A356-T6 automotive components[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 432(1/2): 59-68.
- [29] Zhu X, Yi J Z, Jones J W, et al. A probabilistic model of fatigue strength controlled by porosity population in a 319-Type cast aluminum alloy: Part I. model development[J]. *Metallurgical & Materials Transactions A*, 2007, 38(5): 1111-1122.
- [30] Li P, Lee P D, Majjer D M, et al. Quantification of the interaction within defect populations on fatigue behavior in an aluminum alloy[J]. *Acta Materialia*, 2009, 57(12): 3539-3548.
- [31] González R, González A, Talamantes-Silva J, et al. Fatigue of an aluminum cast alloy used in the manufacture of automotive engine blocks[J]. *International Journal of Fatigue*, 2013, 54: 118-126.
- [32] 冯广召, 沈军, 邹敏佳, 等. 抽拉速度对高温合金 DZ125 定向凝固中缩松的影响[J]. *铸造*, 2009, 58(5): 427-430.  
Feng Guangzhao, Shen Jun, Zou Minjia, et al. Influence of withdrawal rate on the micro-porosity of super-alloy DZ125 in directional solidification[J]. *Foundry*, 2009, 58(5): 427-430. (in Chinese)
- [33] Liu Y, Yu J J, Xu Y, et al. High cycle fatigue behavior of a single crystal superalloy at elevated temperatures[J]. *Materials Science & Engineering A*, 2007, 454(16): 357-366.
- [34] Chen Y, Zhang K, Huang J, et al. Characterization of heat affected zone liquation cracking in laser additive manufacturing of Inconel 718[J]. *Materials & Design*, 2016, 90: 586-594.
- [35] Liu Y, Kang M, Wu Y, et al. Effects of microporosity and precipitates on the cracking behavior in polycrystalline superalloy Inconel 718[J]. *Materials Characterization*, 2017, 132: 175-186.
- [36] Vanderesse N, Maire É, Chabod A, et al. Microtomographic study and finite element analysis of the porosity harmfulness in a cast aluminium alloy[J]. *International Journal of Fatigue*, 2011, 33(12): 1514-1525.
- [37] Tiryakioğlu M. On the relationship between statistical distributions of defect size and fatigue life in 7050-T7451 thick plate and A356-T6 castings[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2009, 520(1/2): 114-120.
- [38] Le V, Morel F, Bellett D, et al. Microstructural-based analysis and modelling of the fatigue behavior of cast Al-Si alloys[J]. *Procedia Engineering*, 2015, 133: 562-575.
- [39] Romano S, Beretta S, Cova M. Quality control of cast iron: extreme value statistics applied to CT measurements [J]. *Procedia Structural Integrity*, 2017, 7: 275-282.
- [40] Kuchariková L, Tillová E, Uhrčík M, et al. Porosity formation and fatigue properties of Al-Si-Cu cast alloy[C]// MATEC Web of Conferences. [S.l. : s. n.]. 2018: 7003.
- [41] Shi G, Atkinson H V, Sellars C M, et al. Application of the Generalized Pareto Distribution to the estimation of the size of the maximum inclusion in clean steels[J]. *Acta Materialia*, 1999, 47(5): 1455-1468.
- [42] Shi G, Atkinson H V, Sellars C M, et al. Computer simulation of the estimation of the maximum inclusion size in clean steels by the generalized Pareto distribution method [J]. *Acta Materialia*, 2001, 49(10): 1813-1820.
- [43] Atkinson H V, Shi G. Characterization of inclusions in clean steels: a review including the statistics of extremes methods[J]. *Progress in Materials Science*, 2003, 48(5): 457-520.
- [44] Murakami Y. *Metal fatigue*[M]. The Boulevard, Langford Lane Kidlington, Oxford OX5 1GB, UK: Elsevier, 2002.
- [45] Anderson C W, Shi G, Atkinson H V, et al. Interrelationship between statistical methods for estimating the size of the maximum inclusion in clean steels[J]. *Acta Materialia*, 2003, 51(8): 2331-2343.
- [46] Yi J Z, Gao Y X, Lee P D, et al. Scatter in fatigue life due to effects of porosity in cast A356-T6 aluminum-silicon alloys[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2003, 34(9): 1879-1890.
- [47] 张心响. 椭球形微孔洞对疲劳裂纹萌生影响的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2013. (下转第 486 页)

- [17] 苏福, 王小念, 皮军明, 等. 干扰走廊对地面警戒雷达干扰效果仿真分析[J]. 火控雷达技术, 2007, 36(3): 57-60.  
Su Fu, Wang Xiaonian, Pi Junming, et al. Simulation and analysis of jamming effect of jamming corridor on ground surveillance radar [J]. Fire Control Radar Technology, 2007, 36(3): 57-60. (in Chinese)
- [18] 王洪讯, 卢楠, 李项军, 等. 有源无源复合干扰机理与效能分析[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(6): 43-46.  
Wang Hongxun, Lu Nan, Li Xiangjun, et al. Analysis of mechanism and effectiveness of active and passive compound interference[J]. Fire Control and Command Control, 2012, 37(6): 43-46. (in Chinese)
- [19] 王洪讯, 王星, 王红卫. 地空复合箔条走廊干扰机理和效能分析[J]. 现代防御技术, 2012, 40(5): 145-149.  
Wang Hongxun, Wang Xing, Wang Hongwei. Interference

mechanism and effectiveness analysis of ground air composite chaff corridor[J]. Modern Defense Technology, 2012, 40(5): 145-149. (in Chinese)

#### 作者简介:

邱时代(1993—),男,硕士研究生。主要研究方向:空域与流量管理。

姚登凯(1965—),男,硕士,教授。主要研究方向:空域与流量管理。

赵顾颢(1986—),男,博士,讲师。主要研究方向:空域与流量管理。

(编辑:马文静)

#### (上接第 455 页)

Zhang Xinxiang. Research of ellipsoidal micropore for fatigue crack initiation[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2013. (in Chinese)

- [48] Sigl K M, Hardin R A, Stephens R I, et al. Fatigue of 8630 cast steel in the presence of porosity[J]. International Journal of Cast Metals Research, 2013, 17(3): 130-146.
- [49] Murakami Y. Material defects as the basis of fatigue design [J]. International Journal of Fatigue, 2012, 41(1): 2-10.
- [50] Gao Y X, Yi J Z, Lee P D, et al. The effect of porosity on the fatigue life of cast aluminum-silicon alloys[J]. Fracture of Engineering Materials and Structures, 2004, 27(7): 559-570.

#### 作者简介:

姜文(1992—),男,博士研究生。主要研究方向:含孔洞镍基单晶疲劳寿命评估。

姚卫星(1957—),男,博士,教授,博导。主要研究方向:飞行器结构疲劳、断裂、优化设计。

王英玉(1977—),女,博士,副教授。主要研究方向:多轴疲劳寿命预测。

(编辑:丛艳娟)

#### (上接第 461 页)

Liu Chengcheng, Li Jie, Li Xin, et al. Improved design and analysis on aerodynamics for a propeller-driven long-endurance UAV[J]. Flight Dynamics, 2012, 30(3): 209-212. (in Chinese)

- [8] Smith A M O. High lift aerodynamics[J]. Journal of Aircraft, 1975, 12(6): 501-530.
- [9] Wentz W H, Ostowari C. Additional flow field studies of the GA(W)-1 airfoil with 30-percent flower flap including slot-GAP variations and cove shape modifications[R]. NASA CR-3687, 1983.
- [10] 董斌斌. 二维襟翼缝道外形的气动优化设计研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.  
Dong Binbin. Design and optimization of two-element airfoil [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011. (in Chinese)
- [11] Catalano P, Amato M. An evaluation of RANS turbulence modeling for aerodynamic applications[J]. Aerospace Sci-

ence and Technology, 2003, 7(7): 493-509.

- [12] Rumsey C L, Ying S X. Prediction of high lift: review of present CFD capability[J]. Progress in Aerospace Science, 2002, 38(2): 145-180.

#### 作者简介:

李建华(1977—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:无人机总体和气动布局设计。

李锋(1961—),男,博士,研究员。主要研究方向:空气动力学,无人机总体设计。

李茂强(1984—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:无人机总体设计。

包晓翔(1990—),男,硕士,工程师。主要研究方向:无人机气动和隐身设计。

(编辑:马文静)