

# 夹杂物对 FGH96 合金低周疲劳寿命的影响

冯业飞, 周晓明, 邹金文, 刘春江, 王超渊, 田高峰

(中国航发北京航空材料研究院 先进高温结构材料重点实验室, 北京 100095)

**摘要:** 通过人工植入夹杂物的方法, 制备含不同尺寸  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{SiO}_2$  夹杂物的 FGH96 合金低周疲劳试样, 在  $650\text{ }^\circ\text{C}$  下进行不同应变幅的低周疲劳试验, 对试样断口进行观察、统计分析, 定量研究了夹杂物的尺寸、位置、种类和外加载荷应变幅对低周疲劳寿命的影响, 建立了低周疲劳寿命与夹杂物特性的关系。结果表明, 应变幅为  $0.8\%$  时, 疲劳源区以内部夹杂物为主; 当应变幅为  $0.9\%$  时, 疲劳源区内部夹杂物占比降低, 而表面夹杂物和不含夹杂物的试样表面的占比增大; 当应变幅为  $1.0\%$  和  $1.2\%$  时, 疲劳源区全部为不含夹杂物试样表面; 随应变幅自  $0.8\%$  增至  $1.2\%$ , 源区位置逐渐由内部夹杂物向表面夹杂物、不含夹杂物的试样表面转移。在较低应变幅下, 随夹杂物面积的增大, 低周疲劳寿命降低。在一定夹杂物尺寸范围内,  $\text{SiO}_2$  夹杂物比  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物对低周疲劳寿命危害更大, 其原因在于  $\text{SiO}_2$  夹杂物周围由于  $\gamma'$  相贫化区的存在而产生的粗大晶粒降低了合金的低周疲劳寿命。当不考虑夹杂物面积时, 夹杂物距试样表面距离对低周疲劳寿命的影响无明显规律; 当夹杂物面积相同时, 低周疲劳寿命随夹杂物距试样表面距离的增大而线性增大。其影响相对较小。

**关键词:** FGH96 合金; 夹杂物; 低周疲劳寿命; 定量研究

中图分类号: TG146.1<sup>+</sup>5; TG115.5<sup>+</sup>7

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2021)07-2455-09

粉末高温合金具有成分偏析小、组织均匀和力学性能优异的特点, 目前已经成为制备先进航空发动机涡轮盘的首选材料<sup>[1-4]</sup>。FGH96 合金作为中国第 2 代损伤容限型粉末高温合金, 最高使用温度达  $750\text{ }^\circ\text{C}$ , 是中国当前应用最广泛的涡轮盘材料。然而在采用粉末冶金工艺制备高温合金的过程中, 不可避免地会引入外来非金属夹杂物。非金属夹杂物严重破坏了基体的连续性, 造成局部应力集中, 对粉末高温合金的低周疲劳性能有显著的影响, 大大降低了材料使用的安全性和可靠性<sup>[5-9]</sup>。

由于实际盘件中夹杂物数量较少, 人工植入夹杂物成为研究粉末高温合金中夹杂物的主要方法。Huron 等<sup>[10]</sup>在 Rene 88DT 合金中人工植入了 2 种尺寸范围的 2 种夹杂物。研究表明, 随着夹杂物尺寸的增大, 疲劳寿命降低幅度增加, 有的甚至降低 2 个数量级。Gabb 等<sup>[11]</sup>通过人工植入夹杂的方法研究夹杂物对 P/M U720 合金低周疲劳寿命的影响, 发现了夹杂物的尺寸、密度以及应变幅和应变比对低周疲劳寿命均具有重要影响。Shamblen 等人<sup>[5]</sup>对人工植入夹杂物的 P/M Rene95 合金进行研究, 发现对于相同尺寸的夹杂物, 位于表面比处于内部对材料的 LCF 寿命影响更大, 随着夹杂物尺寸的增大和距表面距离的减小, 其寿命逐渐降低。国为民等<sup>[12]</sup>和邹金文等<sup>[13]</sup>对 FGH95 合金进行研究, 同样发现夹杂物的尺寸和夹杂

物的位置是影响 LCF 的 2 个重要因素。王晓峰等<sup>[14]</sup>通过人工植入的方法在试样芯部、 $0.5R$  处和边缘制备了夹杂物各 1 根的低周疲劳试样, 定性研究了夹杂物位置对低周疲劳寿命的影响; 周晓明<sup>[15]</sup>通过人工植入夹杂物的方法, 研究了夹杂物在 FGH96 合金盘件制备过程中形貌、取向和尺寸的遗传特征, 并在原位拉伸、疲劳过程中研究了夹杂物尺寸和形貌对基体力学行为的影响。Hu 等<sup>[16]</sup>对 FGH96 合金进行了低周疲劳寿命研究, 通过少量试样断口观察研究了夹杂物尺寸、距表面距离、外加条件以及裂纹萌生尺寸等对低周疲劳寿命的影响, 建立了基于贝叶斯方法的概率模型来分析疲劳寿命的波动。杨金龙等<sup>[17]</sup>对 FGH 97 合金进行应力控制的低周疲劳寿命测试, 发现非金属夹杂物对合金低周疲劳寿命影响的临界尺寸为  $80\text{ }\mu\text{m}$ 。Wusatowska-Sarnek 等<sup>[18]</sup>研究了在不同应力状态下夹杂物对 IN100 合金低周疲劳寿命的影响, 建立了夹杂物周围局部塑性应变与低周疲劳寿命的关系式。同时, 刘新灵等<sup>[19-21]</sup>和李振等<sup>[22]</sup>通过有限元数值模拟了不同夹杂物尺寸、形状与缺陷类型和温度对缺陷/基体界面应力-应变分布的影响, 并指出粉末冶金涡轮盘的寿命预测宜采用反映粉末高温合金缺陷特性的寿命预测方法<sup>[23]</sup>。何承群等<sup>[24]</sup>运用无因次分析方法, 探讨了夹杂距合金表面距离  $d$ 、夹杂二维尺寸  $S$  与 FGH95 合金低周疲劳断裂

收稿日期: 2020-08-04

作者简介: 冯业飞, 男, 1985 年生, 博士, 高工, 中国航发北京航空材料研究院先进高温结构材料重点实验室, 北京 100095, 电话: 010-62498271, E-mail: yefeifeng0226@126.com

周次  $N_f$  之间的关系。

各国的研究都表明，夹杂物的尺寸、位置以及外加条件对低周疲劳性能具有重要影响。虽然形成了一定的规律和统计数据，但针对 FGH96 合金中夹杂物特性与疲劳寿命的定量关系的研究仍然相对较少，尤其是不同应变幅条件下的疲劳性能研究。同时，缺乏针对夹杂物种类对合金低周疲劳寿命影响进行深入分析研究。

对粉末高温合金中夹杂物解剖分析的实践表明，非金属夹杂物主要为  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ，同时， $\text{Al}_2\text{O}_3$  是非金属夹杂物与界面机械结合的典型代表， $\text{SiO}_2$  是非金属夹杂物与界面发生化学反应的典型代表<sup>[25]</sup>，本实验通过人工植入的方法，制备含不同尺寸  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物的低周疲劳试样，通过进行不同应变幅的低周疲劳试验，对断口进行观察、统计分析，定量研究夹杂物的尺寸、位置、种类和应变幅对低周疲劳寿命的影响，建立低周疲劳寿命与夹杂物特性的定量关系式，为提高航空发动机涡轮盘使用的安全性和可靠性提供技术和数据支撑。

## 1 实验

采用 FGH96 合金为研究对象，化学成分如表 1 所示。向粒径  $\leq 63 \mu\text{m}$  的 FGH96 合金粉末中以 750 个/kg 的比例分别人工植入 28  $\mu\text{m}$  至 150  $\mu\text{m}$  尺寸范围内的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{SiO}_2$  夹杂物，混合均匀后在真空条件下装入包套(包套直径为 350 mm、高度 500 mm)，然后进行热等静压，挤压比为 6:1 的热挤压(挤压棒材直径为 120 mm)和变形量为 75% 的等温锻造(饼坯直径为 240 mm、高度为 75 mm)；同时，为了保证测试试样组织的一致性，从饼坯等同位置弦向切取  $\Phi 12.5 \text{ mm} \times 91 \text{ mm}$  的低周疲劳试棒，试棒进行热处理后按照图 1 进行低周疲劳试样加工；

试棒热处理制度为：固溶温度 1150  $^\circ\text{C}$ ，保温 2 h 后出炉空冷，时效处理温度为 760  $^\circ\text{C}$ ，保温 10 h 后炉冷。

采用 MTS-370.10 液压伺服疲劳试验机进行低周疲劳试验。试验温度为 650  $^\circ\text{C}$ ，试验频率为 0.33 Hz，三角波，应变比为  $R=0.05$ ，应变幅分别为 0.8%、0.9%、1.0% 和 1.2%。总计测试 119 根，具体测试方案见表 2。用体式显微镜对疲劳试样断口进行宏观观察；采用配备能谱仪(EDS)和电子背散射衍射(EBSD)的 LEO Gemini 1525 场发射扫描电镜(SEM)对断口处夹杂物的形貌、化学成分、大小、距试样表面距离、断口微观形貌以及  $\gamma'$  相、晶粒取向和晶界进行表征。

夹杂物特性的定量描述分别采用  $S$  和  $L$  表示夹杂物的面积和夹杂物距试样表面的距离，夹杂物的长轴和短轴分别为  $a$  和  $b$ ， $S=ab$ ，如图 2 所示。

## 2 结果及讨论

### 2.1 不同应变幅下低周疲劳断口观察与分析

当应变幅为 0.8% 时，如表 3 所示，71 根植入  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{SiO}_2$  夹杂物的低周疲劳试样中，疲劳源区为内部夹杂物、表面夹杂物和试样表面的数量分别为 42 根、12 根和 17 根，内部夹杂物占比 59%，是低周疲劳断裂的主要源区；当应变幅为 0.9% 时，24 根植入  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{SiO}_2$  夹杂物的低周疲劳试样中，疲劳源区为内部夹杂物、表面夹杂物和试样表面的数量分别为 7 根、8 根和 9 根，内部夹杂物占比降低，表面夹杂物和试样表面占比增多；当应变幅为 1.0% 和 1.2% 时，疲劳源区均在试样表面，且疲劳源区均不含夹杂物，夹杂物对低周疲劳寿命几乎无影响。随应变幅从 0.8% 逐渐增至 1.0% 和 1.2%，疲劳源区逐渐由内部夹杂物向表面夹杂物、不含夹杂物的试样表面转变，如图 3 所示。

表 1 FGH96 合金化学成分

Table 1 Chemical composition of FGH96 alloy ( $\omega/\%$ )

Cr	Co	W	Mo	Nb	Al	Ti	B	Zr	C	Fe	Ni
16	13	4	4	0.7	2.1	3.7	0.015	0.05	0.05	$\leq 0.05$	Bal.

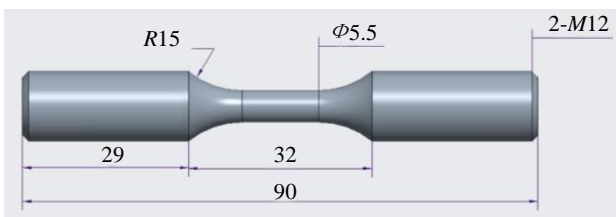


图 1 低周疲劳试样的几何图形

Fig.1 Geometry of the specimen used in low cycle fatigue test

表 2 低周疲劳测试方案

Table 2 Scheme of LCF tests

Type of inclusions	Experimental conditions	Sample numbers of different strain amplitude ( $\Delta\varepsilon=\Delta\varepsilon_{\max}-\Delta\varepsilon_{\min}$ )			
		0.8%	0.9%	1.0%	1.2%
$\text{Al}_2\text{O}_3$	$T=650 \text{ }^\circ\text{C}$ ; Strain ratio, $R_e=0.05$ ; $f=0.33 \text{ Hz}$ ; Triangle wave	34	10	6	6
$\text{SiO}_2$		37	14	6	6
Total		71	24	12	12

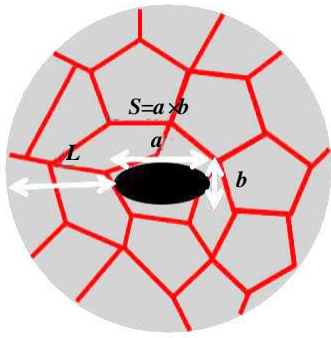


图 2 夹杂物特征参数

Fig. 2 Characteristics parameters of inclusion

表 3 不同应变幅下疲劳源区位置分布数量统计

Table 3 Statistics of location distribution of fatigue source area at different strain amplitudes

Location of fatigue source	Strain amplitude			
	0.8%	0.9%	1.0%	1.2%
Internal inclusions	42	7	0	0
Surface inclusions	12	8	0	0
Surface of sample	17	9	12	12

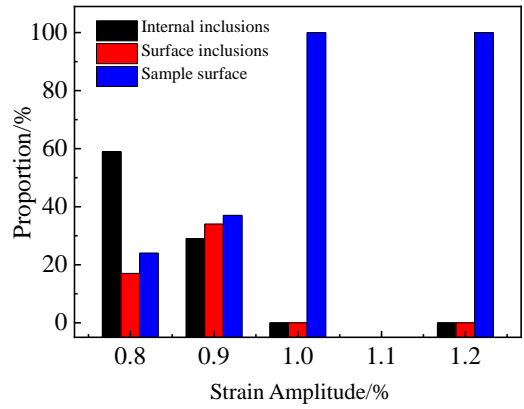


图 3 不同应变幅下 3 种疲劳源区占比图

Fig.3 Proportion of three kinds of fatigue sources at different strain amplitudes

当应变幅较低时，疲劳源区分布于试样表面和内部，试样断口宏观形貌如图 4 所示。图 5 是含  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{SiO}_2$  夹杂物的低周疲劳断口 SEM 照片。由图 5a, 5b 可见，疲劳源区数量全部为 1 个， $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物为疲劳裂纹源，当夹杂物尺寸较小时，夹杂物由孤立的完整颗粒组成；由图 5c, 5d 可见， $\text{SiO}_2$  夹杂物为疲劳裂纹源，且疲劳源区数量仅为 1 个，夹杂物呈长条、絮状分布于断口处。

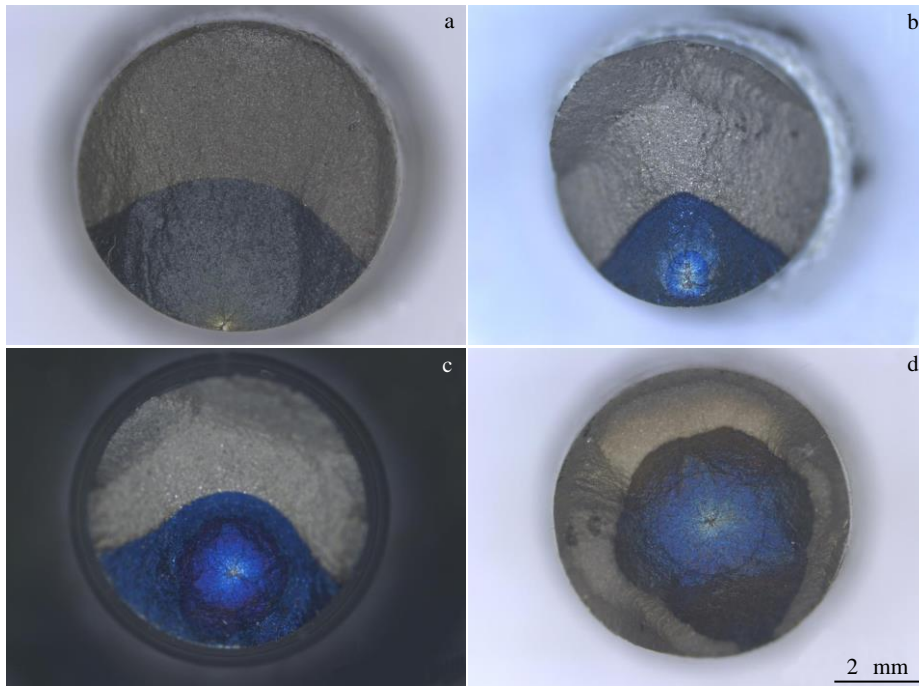


图 4 应变幅较低时低周疲劳断口宏观形貌照片

Fig.4 Macromorphologies of low cycle fatigue fracture at the lower strain amplitudes: (a) surface fatigue source; (b~d) internal fatigue source

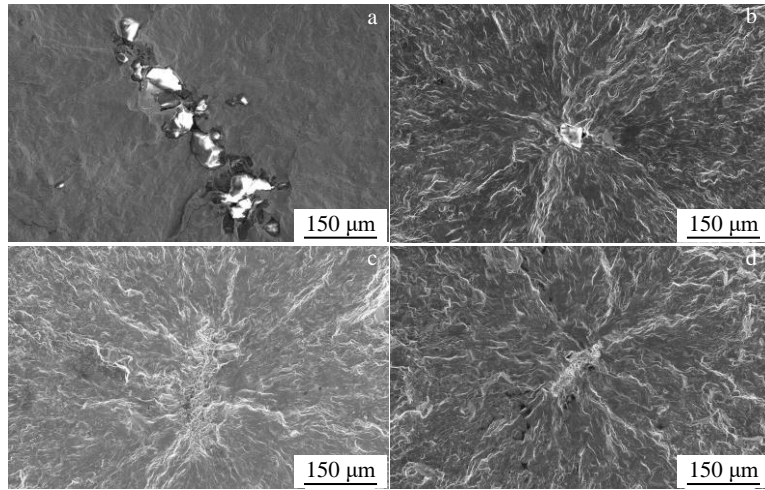


图 5 应变幅较低时低周疲劳断口 SEM 照片

Fig.5 SEM images of low cycle fatigue fracture at the lower strain amplitudes: (a, b) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; (c, d) SiO<sub>2</sub>

图 6 为高应变幅下低周疲劳断口 SEM 照片。当应变幅为 1.0% 和 1.2% 时，疲劳源区均在试样表面，且均不含夹杂物，如图 6b, 6d 所示；在高应变幅下，疲劳源数量均不止 1 个，且随着应变幅的增大，疲劳源数量逐渐增多，如图 6a, 6c 所示。

FGH96 合金在疲劳加载过程中，内部晶粒组织完整，可以相互协调，不容易产生应力集中。而试样表面处，受机加工影响晶粒组织不完整，位错滑移容易停留在表面处并产生聚集，试样表面较内部组织容易引起应力集中，尤其是在高温下，表面氧化会加速试样表面疲劳损

伤，正常合金低周疲劳源区均位于试样表面。当合金内部有夹杂物时，由于夹杂物与合金的弹性模量、塑性变形和膨胀系数等均不匹配，容易在夹杂物周围产生应力集中，从而成为疲劳裂纹源。在低应变幅下，夹杂物周围产生的应力集中大于试样表面产生的应力集中，故疲劳源均发生在夹杂物处，如图 7a；在高应变幅下，表面处产生的应力集中以及氧化带来的损伤大于内部夹杂物对合金的危害，表面处会优先成为疲劳源区，而且随着应变幅的增大，表面处更多的位置会到达疲劳断裂所需的应力，故疲劳源区数量会增多，如图 7b。

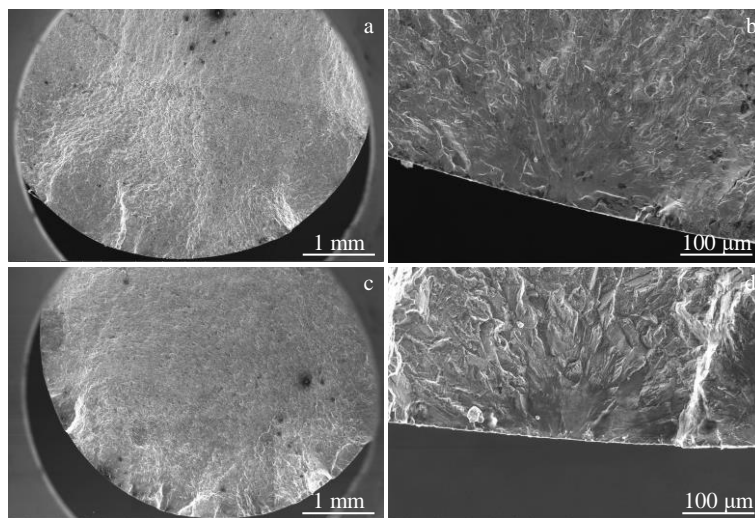


图 6 高应变幅下低周疲劳断口 SEM 照片

Fig.6 SEM images of low cycle fatigue fracture at high strain amplitudes of 1.0% (a, b) and 1.2% (c,d)

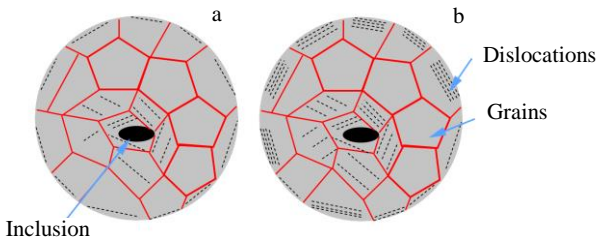


图 7 不同应变幅试样应力集中示意图

Fig.7 Schematic diagrams of stress concentration of specimen at low strain amplitude (a) and high strain amplitude (b)

### 2.2 夹杂物尺寸对低周疲劳寿命的影响

当应变幅为 0.8% 时, 将所有内部 SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物的面积与低周疲劳寿命进行统计分析, 在不考虑夹杂物距试样表面距离 *L* 的情况下, 采用 origin 软件作图并进行非线性公式拟合, 如图 8 所示。内部 SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物的面积 *S* 与低周疲劳寿命 *N<sub>f</sub>* 呈指数关系, 关系式为  $N_f=2689S^{0.58}$ ,  $R^2=0.88$ , 拟合度较高。由图 8 可见, 随着内部 SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物面积的逐渐增大, 低周疲劳寿命逐渐降低; 当夹杂物面积  $S \leq 0.0016 \text{ mm}^2$ , 即夹杂物尺寸小于  $40 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$  时, 夹杂物面积对低周疲劳寿命影响较小; 当夹杂物面积在  $0.0016 \text{ mm}^2 \leq S \leq 0.1 \text{ mm}^2$  时, 夹杂物面积对低周疲劳寿命比较敏感; 当夹杂物面积大于  $0.1 \text{ mm}^2$ , 即夹杂物尺寸大于  $316 \mu\text{m} \times 316 \mu\text{m}$  时, 夹杂物面积对低周疲劳寿命影响趋于稳定。

在不考虑夹杂物距试样表面距离 *L* 的情况下, 夹杂物尺寸大小决定了低周疲劳寿命的高低, 表明了夹杂物尺寸对低周疲劳寿命的影响占主导作用。

图 9 为应变幅为 0.8% 时含内部 SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物试样的预测寿命与试验寿命关系图。由图 9 可见, 所

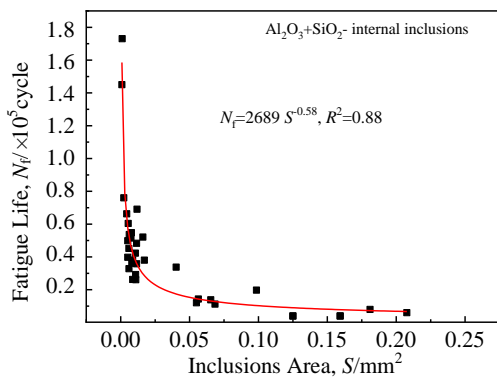


图 8 低周疲劳寿命与内部夹杂物面积的关系

Fig.8 Relationship between the low cycle fatigue life and the area of internal inclusions

有的试验数据全部落在  $\pm 2$  倍分散带以内, 该公式预测的寿命与试验寿命偏差较小, 能够很好地预测含夹杂物试样的低周疲劳寿命。

在应变幅为 0.8% 时, 对表面 SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物的面积和试样低周疲劳寿命进行统计分析, 如图 10 所示。表面 SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物面积 *S* 与低周疲劳寿命 *N<sub>f</sub>* 也呈指数关系, 关系式为  $N_f=9.44S^{1.189}$ ,  $R^2=0.71$ , 拟合度较好。表面夹杂物与内部夹杂物呈现相似的规律, 随着夹杂物面积的逐渐增大, 低周疲劳寿命逐渐降低。

图 11 为应变幅为 0.8% 时含表面 SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物试样的预测寿命与试验寿命关系图。由图可见, 所有的试验数据全部落在  $\pm 3$  倍分散带以内; 相对内部夹杂物, 表面夹杂物分散性较大, 主要是因为表面夹杂物影响因素较多。

### 2.3 夹杂物种类对低周疲劳寿命的影响

当应变幅为 0.8% 时, 在不考虑夹杂物距试样表面距

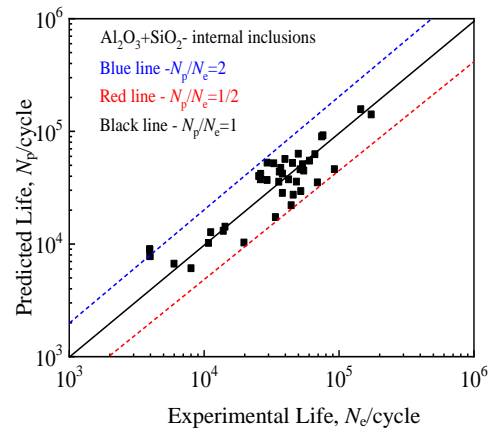


图 9 含内部夹杂物试样的预测寿命与试验寿命关系

Fig.9 Relationship between the predicted life and the experimental life of the specimen containing internal inclusions

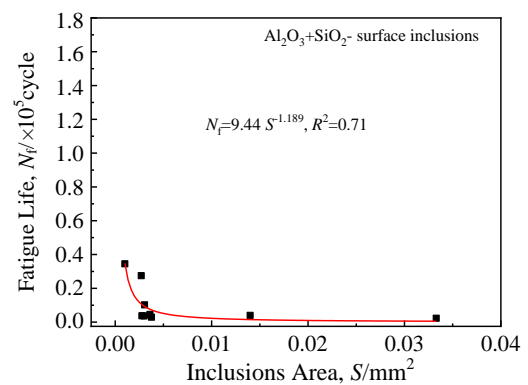


图 10 低周疲劳寿命与表面夹杂物面积的关系

Fig.10 Relationship between the low cycle fatigue life and the area of surface inclusions

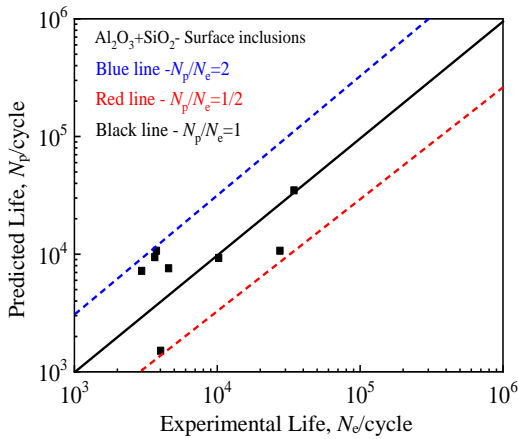


图 11 含表面夹杂物试样的预测寿命与试验寿命关系  
Fig.11 Relationship between the predicted life and the experimental life of the specimen containing surface inclusions

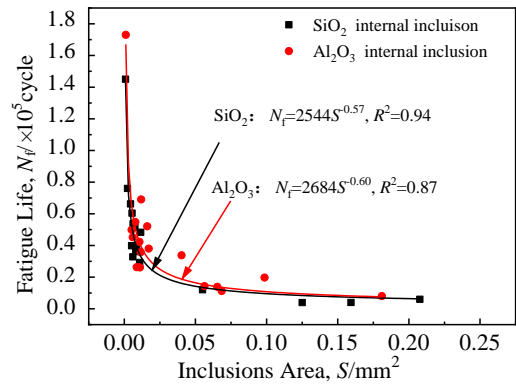


图 12 低周疲劳寿命与内部 SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物面积的关系  
Fig.12 Relationship between the low cycle fatigue life and the area of internal SiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> inclusions

离  $L$  的情况下，分别将内部 SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物的面积与低周疲劳寿命进行统计分析，采用 origin 软件作图并进行非线性公式拟合，如图 12 所示。随着 SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物面积的增大，低周疲劳寿命均呈减小的趋势；当夹杂物面积  $S \leq 0.0016 \text{ mm}^2$  时，2 种夹杂物对低周疲劳寿命均影响较小，当夹杂物面积在  $0.0016 \text{ mm}^2 \leq S \leq 0.1 \text{ mm}^2$  时，在  $S$  相同的情况下，含 SiO<sub>2</sub> 夹杂物的疲劳寿命低于含 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物的疲劳寿命，当  $S$  进一步增大时，2 种夹杂物对低周疲劳寿命的影响相当。

SiO<sub>2</sub> 夹杂物在热等静压(HIP)过程中，与基体发生界面反应，消耗合金中的 Ti 和 Al 元素，形成内部 TiO<sub>2</sub>、外

部 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和  $\gamma$  基体复合夹杂物<sup>[26]</sup>，降低合金中  $\gamma'$  相含量；当 SiO<sub>2</sub> 夹杂物尺寸为 30  $\mu\text{m}$  时，复合夹杂物中  $\gamma$  基体伴随的  $\gamma'$  相足以为提供 Ti、Al 元素完成置换反应，夹杂物周围  $\gamma'$  相形貌和尺寸与基体正常组织相同，如图 13a, 13b 所示；当夹杂物尺寸为 60  $\mu\text{m}$  时，需要更多的 Ti、Al 元素参与反应，需要消耗周围基体合金中的 Ti、Al 元素来弥补反应所需，冷却后夹杂物周围出现  $\gamma'$  相贫化区，如图 13c, 13d 所示。热等静压过程使得尺寸较大的 SiO<sub>2</sub> 夹杂物周围产生了  $\gamma'$  相贫化区，在后续热挤压以及等温锻造过程中，该  $\gamma'$  相贫化区会遗传存在，从而在过固溶热处理过程中，该区域  $\gamma'$  相会优先于正常合金中  $\gamma'$  相溶解，使得钉扎晶粒生长的阻力优先消除，SiO<sub>2</sub> 夹杂物周围的晶粒会优先生长，形成粗大晶粒，如图 14 所示，SiO<sub>2</sub>

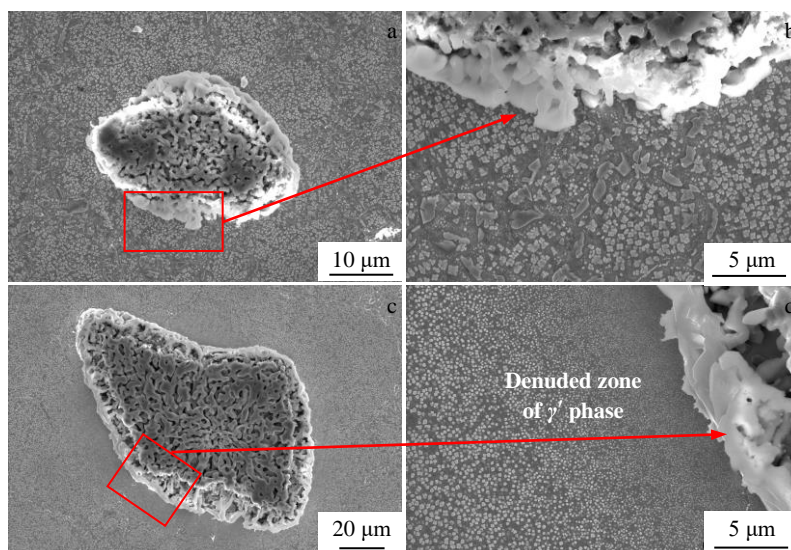


图 13 HIP 态试样中不同尺寸 SiO<sub>2</sub> 夹杂物周围基体中的  $\gamma'$  相的形貌  
Fig.13 Morphologies of  $\gamma'$  phase around SiO<sub>2</sub> inclusions with sizes of 30  $\mu\text{m}$  (a, b) and 60  $\mu\text{m}$  (c, d) in HIPed specimen

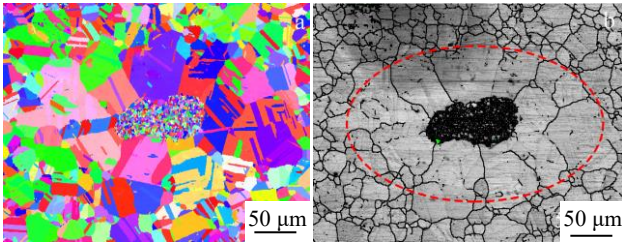


图 14 含 SiO<sub>2</sub> 夹杂物的热处理态 FGH96 合金 EBSD 照片

Fig.14 EBSD images of heat treated FGH96 alloy containing SiO<sub>2</sub> inclusions

夹杂物周围的晶粒尺寸远大于基体合金的正常晶粒尺寸。

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物与合金基体为机械结合，不发生任何界面反应，不存在  $\gamma'$  相贫化区，夹杂物周围的晶粒组织与正常合金晶粒组织相同，如图 15 所示。

当夹杂物面积  $\leq 0.0016 \text{ mm}^2$  时，夹杂物周围产生的应力集中相对较小，同时，SiO<sub>2</sub> 夹杂物周围不产生  $\gamma'$  相贫化区和粗大晶粒，故 2 种夹杂物对低周疲劳寿命均影响较小。当夹杂物尺寸在  $0.0016 \text{ mm}^2 \leq S \leq 0.1 \text{ mm}^2$  时，与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物相比，SiO<sub>2</sub> 夹杂物周围会产生粗大晶粒，从而加剧疲劳裂纹萌生和扩展，降低疲劳寿命。在夹杂物尺寸相同的情况下，SiO<sub>2</sub> 夹杂物对合金疲劳寿命危害更大。当夹杂物尺寸进一步增大时，Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物与合金是机械结合，容易产生更多尖角接触，尖角处产生的损伤与 SiO<sub>2</sub> 夹杂物周围粗大晶粒产生的损伤相当，从而对低周疲劳寿命产生的影响相当。

### 2.4 夹杂物位置对低周疲劳寿命的影响

图 16 为试样低周疲劳寿命与表面夹杂物和内部夹杂物的面积的关系图。由图 16 可见，当应变幅为 0.8% 时，含内部夹杂物和表面夹杂物试样的低周疲劳寿命均随夹杂物面积增大而降低，在横、纵坐标取对数的情况下，表面与内部夹杂物面积均与低周疲劳寿命表现出很

好的线性变化规律；同时，在表面夹杂物与内部夹杂物面积相等的情况下，含表面夹杂物的低周疲劳寿命远远低于含内部夹杂物的低周疲劳寿命，两者差距随夹杂物面积增大而增大。

当应变幅为 0.8% 时，在不考虑夹杂物面积的情况下，将内部 SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物距试样表面的距离  $L$  与低周疲劳寿命  $N_f$  进行统计分析，如图 17 所示。 $L$  与低周疲劳寿命  $N_f$  之间无明显规律，仅仅改变  $L$  的大小，无法反映低周疲劳寿命的变化规律，表明了内部夹杂物距试样表面距离  $L$  对低周疲劳寿命影响相对较小。当夹杂物面积相同时，低周疲劳寿命  $N_f$  与  $L$  呈线性关系，随  $L$  的增大而增大，如图 18 所示， $L$  变化而产生的低周疲劳寿命波动基本在  $\pm 2$  倍分散带以内，因此  $L$  对低周疲劳寿命的影响相对较小。

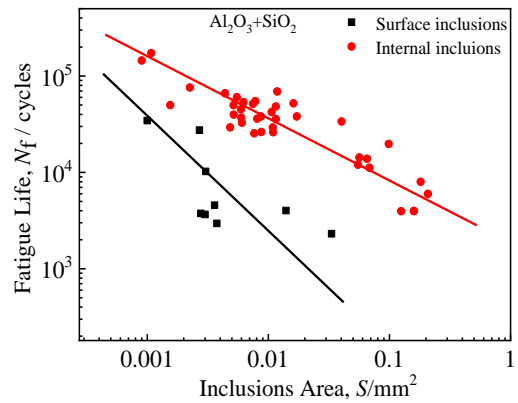


图 16 低周疲劳寿命与表面夹杂物和内部夹杂物的面积的关系

Fig.16 Relationship between the low cycle fatigue life and the area of surface, internal inclusions

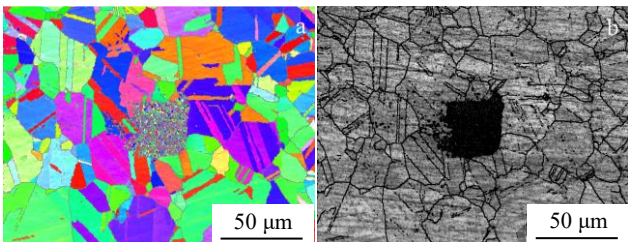


图 15 含 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂物的热处理态 FGH96 合金 EBSD 照片

Fig.15 EBSD images of heat treated FGH96 alloy containing Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> inclusions

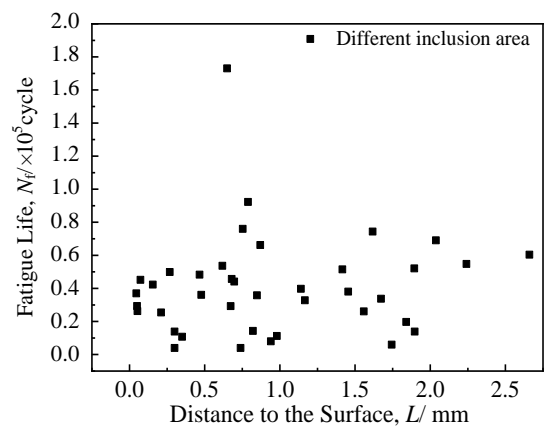


图 17 低周疲劳寿命与夹杂物距试样表面的距离  $L$  的关系

Fig.17 Relationship between the low cycle fatigue life and the distance from inclusion to surface of the specimen

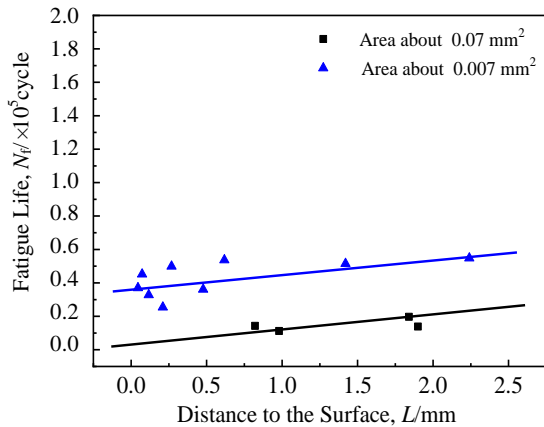


图 18 低周疲劳寿命与特定尺寸夹杂物其  $L$  的关系

Fig.18 Relationship between the low cycle fatigue life and the distance under fixed inclusions area

### 3 结 论

1) 当应变幅为 0.8% 时, 疲劳源区为以内部夹杂物为主; 当应变幅为 0.9% 时, 疲劳源区内部夹杂物的占比降低, 而为表面夹杂物和不含夹杂物的试样表面的占比增大; 当应变幅为 1.0% 和 1.2% 时, 疲劳源区全部为不含夹杂物的试样表面; 随应变幅自 0.8% 逐渐增至 1.2%, 疲劳源区位置逐渐由内部夹杂物向表面夹杂物、不含夹杂物的试样表面转移。

2) 在应变幅为 0.8% 时, 内部夹杂物面积与低周疲劳寿命的定量关系式为:  $N_f = 2689S^{-0.58}$ ,  $R^2 = 0.88$ , 试验寿命全部在  $\pm 2$  倍分散带内; 表面夹杂物面积与低周疲劳寿命的定量关系式为:  $N_f = 9.44S^{-1.189}$ ,  $R^2 = 0.71$ , 试验寿命均在  $\pm 3$  倍分散带内; 夹杂物面积是影响合金低周疲劳寿命的主要因素。

3) 应变幅为 0.8% 时, 对于内部夹杂物, 其面积在  $0.0016 \text{ mm}^2 \leq S \leq 0.1 \text{ mm}^2$  时,  $\text{SiO}_2$  夹杂物比  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物对合金疲劳寿命的危害更大, 其原因在于  $\text{SiO}_2$  夹杂物周围产生粗大晶粒, 从而降低合金低周疲劳寿命。

4) 在应变幅为 0.8% 下, 当  $S$  相同时, 夹杂物距试样表面距离  $L$  与  $N_f$  呈线性关系, 且  $L$  变化而产生的低周疲劳寿命波动基本在  $\pm 2$  倍分散带以内,  $L$  对合金  $N_f$  影响相对较小。

#### 参考文献 References

[1] Zou Jinwen(邹金文), Wang Wuxiang(汪武祥). *Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2006, 26(3): 244  
 [2] Chen Huanming(陈焕铭), Hu Benfu(胡本芙), Zhang Yiwen(张义文) et al. *Journal of Materials Reports*(材料导报)[J], 2002, 16(11): 17

[3] Wang Wuxiang(汪武祥), He Feng(何峰), Zou Jinwen(邹金文). *Journal of Aviation Engineering & Maintenance*(航空工程与维修)[J], 2002, 6: 26  
 [4] Sun Jian(孙兼), Zou Jinwen(邹金文), Liu Peiying(刘培英). *Journal of Aviation Engineering & Maintenance*(航空工程与维修)[J], 2001(1): 28  
 [5] Shamblen C E, Chang D R. *Journal of Metallurgical Transaction B*[J], 1985, 16: 775  
 [6] Pate S J, Elliott I C. *Proceeding of the Seventh International Symposium on Superalloys*[C]. Warrendale: TMS, 1992: 13  
 [7] Laitinen A, Hanninen H. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials & Structures*[J], 1996, 19: 1045  
 [8] De Bussac A. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials & Structures*[J], 1994, 17(11): 1319  
 [9] Zhao Y S, Zhang J, Song F Y. *Progress in Natural Science: Materials International*[J], 2020, 30: 371  
 [10] Huron E S, Roth P G. *Proceedings of the Eighth International Symposium on Superalloys*[C]. Warrendale: TMS, 1996: 359  
 [11] Gabb T P, Telesman J, Kantzos P T et al. *NASA Technical Reports ARL-TR-2804*[R]. Cleveland: NASA Glenn Research Center, 2002  
 [12] Guo Weimin(国为民), Wu Jiantao(吴剑涛), Zhang Fengge(张凤戈) et al. *Journal of Powder Metallurgy Industry*(粉末冶金工业)[J], 2000, 10(3): 23  
 [13] Zou Jinwen(邹金文), Wang Wuxiang(汪武祥). *Journal of Material Science and Technology*(材料科学与工艺)[J], 1999, 7: 201  
 [14] Wang Xiaofeng(王晓峰), Yang Jie(杨杰), Zou Jinwen(邹金文). *Journal of Powder Metallurgy Technology*(粉末冶金技术)[J], 2019, 37(4): 264  
 [15] Zhou Xiaoming(周晓明). *Thesis for Doctorate*(博士论文)[D]. Beijing: Beijing Institute of Aeronautical Materials, 2006  
 [16] Hu D Y, Wang T, Ma Q H. *International Journal of Fatigue*[J], 2019, 118: 237  
 [17] Yang Jinlong(杨金龙), Zhu Xiaomin(朱晓闽), Xiong Jiangying(熊江英) et al. *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2020, 49(5): 1614  
 [18] Wusatowska-Sarnek A M, Bhowal P, Gynther D et al. *Journal of Materials Science Forum*[J], 2007, 539: 2960  
 [19] Liu Xinling(刘新灵), Hu Chunyan(胡春燕), Wang Tianyu(王天宇). *Journal of Fatigue Analysis and Prevention*(失效分析与预防)[J], 2018, 13(2): 91  
 [20] Liu Xinling(刘新灵), Tao Chunhu(陶春虎), Wang Tianyu(王天宇). *Journal of Materials Reports*(材料导报)[J], 2019, 33(S1): 436  
 [21] Liu Xinling(刘新灵), Tao Chunhu(陶春虎), Wang Tianyu(王天



- 宇). *Transactions of Materials and Heat Treatment*(材料热处理学报)[J], 2019, 40(4): 136
- [22] Li Zhen(李 振), Li Zhinong(李志农), Liu Xinling(刘新灵) *et al. Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2019, 48(20): 53
- [23] Liu Xinling(刘新灵), Tao Chunhu(陶春虎). *Journal of Fatigue Analysis and Prevention*(失效分析与预防)[J], 2011, 6(2): 124
- [24] He Chengqun(何承群), Yu Quanmao(余泉茂), Hu Benfu(胡苯芙). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2001, 37(3): 247
- [25] Zhou Xiaoming(周晓明), Wang Wuyang(汪武祥), Yang Hongtao(杨洪涛) *et al. Journal of Aeronautical Materials*(航空材料学报)[J], 2005, 25(4): 1
- [26] Feng Yefei(冯业飞), Zhou Xiaoming(周晓明), Zou Jinwen(邹金文) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2019, 55(11): 143

## Effect of Inclusions on Low Cycle Fatigue Lifetime and Life Prediction in Powder Metallurgy Superalloy FGH96

Feng Yefei, Zhou Xiaoming, Zou Jinwen, Liu Chunjiang, Wang Chaoyuan, Tian Gaofeng

(Science and Technology on Advanced High Temperature Structural Materials Laboratory, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

**Abstract:** By implanting  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{SiO}_2$  inclusions artificially, the low cycle fatigue (LCF) samples containing different sizes of inclusions were prepared. LCF tests with different strain amplitudes were carried out at 650 °C. By observing and analyzing statistically the fracture of samples, the effect of size, location, type of inclusions and strain amplitude on the LCF lifetime were studied, and the relationship between LCF lifetime and inclusion characteristics was constructed. The results show that the fatigue source areas are mainly internal inclusions when the strain amplitude is 0.8%; the internal inclusions decrease, the surface inclusions and sample surface without inclusions increase when the strain amplitude is 0.9%; and the inclusions greatly reduce the LCF lifetime. When the strain amplitude is 1.0% or 1.2%, the fatigue source areas have no inclusions. Moreover, with the increase of strain amplitude, the locations of fatigue source are transferred from internal inclusions to surface inclusions and sample surface without inclusions gradually. With the increase of inclusions area, the LCF lifetime decreases at low strain amplitude of 0.8%. The effect of  $\text{SiO}_2$  inclusions on the LCF lifetime is more detrimental than that  $\text{Al}_2\text{O}_3$  inclusions when the inclusion area is within a certain range. The reason is that the coarse grains around  $\text{SiO}_2$  inclusions due to the existence of  $\gamma'$  denuded zone reduce the LCF lifetime of the alloy. The effect of the distance from inclusions to the surface ( $L$ ) on the LCF lifetime has no obvious rules when the inclusion area is not considered. With the increase of  $L$ , the LCF lifetime increases linearly when the inclusion area is fixed.

**Key words:** FGH96 superalloy; inclusions; low cycle fatigue lifetime; quantitative research

---

Corresponding author: Zou Jinwen, Ph. D., Professor, Science and Technology on Advanced High Temperature Structural Materials Laboratory, AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, P. R. China, Tel: 0086-10-62498271, E-mail: jt670315@sina.com