

# 喷丸对 DD3 单晶高温合金高周疲劳性能的影响

## The Effect of Shot-Peening on the High-Cycle Fatigue Properties of Single Crystal Superalloy DD3

杨素玲 吴仲棠 (北京航空材料研究院)

Yang Suling Wu Zhongtang (Institute of Aeronautical Materials, Beijing)

**[摘要]** 对两种取向的 DD3 单晶高温合金进行了高周疲劳性能试验。结果表明: [111] 取向的疲劳极限在喷丸后降低, 而 [011] 取向的疲劳极限则有所提高。

**关键词** 喷丸 DD3 单晶高温合金 取向 高周疲劳性能

**[Abstract]** This paper describes the high cycle fatigue properties of the two orientations of single crystal superalloy DD3. The results showed that after shot-peening, the properties of [111] orientation was lowered, and the properties of [011] orientation was raised.

**Keywords** shot-peening DD3 single crystal superalloy orientation high cycle fatigue properties

### 1 前言

由我国自行研制的第一代单晶高温合金 DD3 主要用作发动机的涡轮叶片。作为高温合金涡轮叶片, 一般需要承受复杂的应力。除温度变化引起的热应力外, 还有恒定的离心力和热燃气喷射而产生的高频振动力。高温高周疲劳能较好地模仿后两种应力。对于单晶高温合金, 抗高温高周疲劳能力将大大提高。因为高周疲劳裂纹源总是发生在晶体材料的不连续处, 包括疏松, 夹杂和晶界等, 与普通铸造和定向合金相比, 单晶合金疏松和夹杂物很少, 且不存在晶界, 故疲劳强度极限明显提高<sup>[1]</sup>。文献 [2] 表明, DD3 单晶合金的高周疲劳强度极限比 DZ4 合金高 95 MPa, 比 DZ22 合金高 40 MPa。对于多晶以及定向单晶合金来讲, 喷丸对合金的性能有一定的提高, 而对单晶合金性能的影响则没有过报导。本工作就喷丸对单晶合金高周疲劳性能所产生的影响作了初步的探索研究。

### 2 试验方法

本试验所使用的合金成分为: 0.006C-9.5Cr-5.0Co-5.2W-3.8Mo-5.9Al-2.1Ti-余 Ni。DD3 合金锭在 IS65V8 真空感应炉中熔铸, 采用籽晶法在我国自行研制的真空高温梯度炉 ZGD1 中冶炼 35 mm × 15 mm × 180 mm 的 [011] 及 [111] 板坯, 按 1250 / 4h, AC + 870 / 32h, AC 工艺进行热处理, 热处理后的试样按图 1 加工成高周疲劳试棒。加工好后在自制气动式喷丸

机上进行表面喷丸。喷丸后的试样在 E 型悬臂旋转弯曲疲劳试验机上做高周疲劳试验。试验温度为 700 , 应力比为  $R = -1$ , 频率为 83 Hz。

疲劳试样的断口用体视显微镜及 JSM-35 扫描电镜观察, 试样表层的组织用 JSM-35 扫描电镜观察。

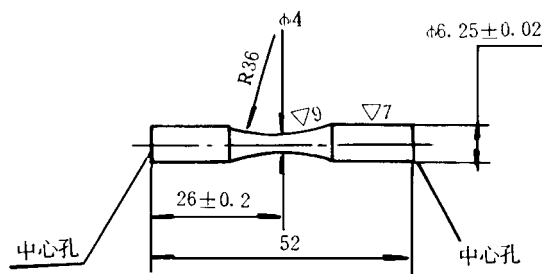


图1 试验用高周疲劳试样加工图

Fig. 1 Drawing of high cycle fatigue specimen

### 3 试验结果及讨论

#### 3.1 两种取向的高周疲劳性能

[011] 及 [111] 取向试样的在喷丸前后疲劳极限的数值对比如图 2 所示。从图上可以看出: 喷丸后的试样, [111] 取向的疲劳极限比喷丸前低, 而 [011] 取向的试样喷丸后的疲劳极限则有所提高。

#### 3.2 [011] 及 [111] 取向试样的断口特征

##### 3.2.1 [011] 取向试样的断口特征

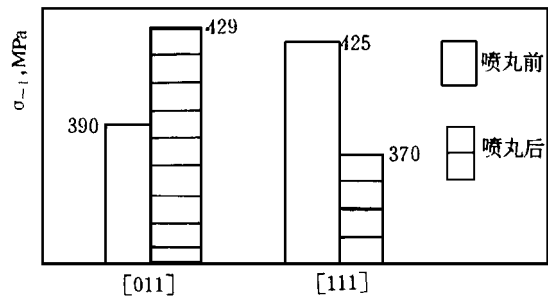


图2 [011] 及 [111] 取向喷丸前后的疲劳极限值对比图

Fig. 2 A comparison of fatigue limits of [011] and [111] orientation specimen before and after shot peening

众所周知, 疲劳源是疲劳破坏的起点。从 [011] 取向的断口形貌来看: 喷丸前, 疲劳源不是单一的, 分布

在表层, 如图3a。而喷丸后的试样, 其裂纹源很明显, 在试样的表面, 且是唯一的, 如图3b。

由于喷丸前的 [011] 试样表面有多个裂纹源, 于是形成了多个裂纹扩展区, 加速了疲劳失效, 使疲劳极限降低。

3.2.2 [111] 取向试样的断口特征

[111] 取向的高周疲劳强度极限在喷丸后下降的幅度较大。喷丸前后的断口形貌有较大的区别。喷丸前的试样, 其断口的疲劳源很明显, 为单一疲劳源, 断口形状为正断型, 如图4a。而经过喷丸后的试样, 其疲劳断口为剪切型, 如图4b 所示。疲劳源为非单一疲劳源。故喷丸后的试样在疲劳试验过程中易失效, 从而降低了合金的疲劳性能。

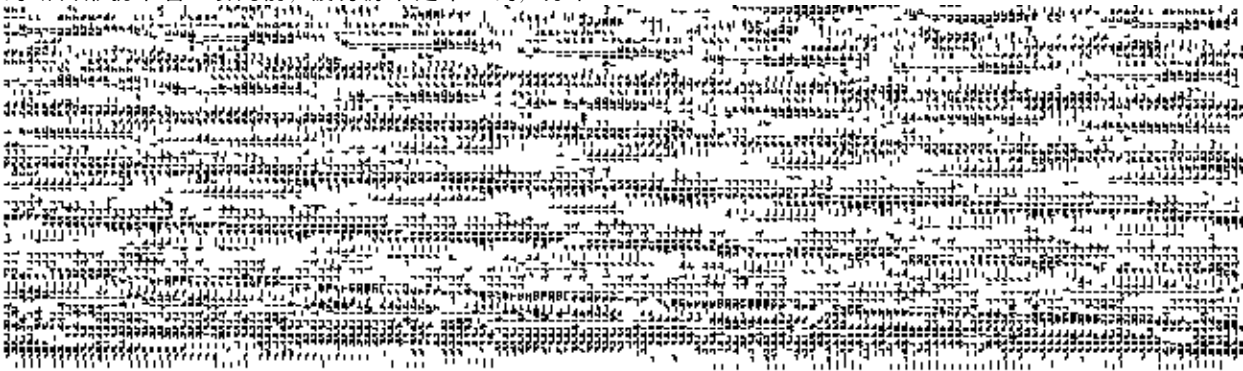


图3 [011] 取向喷丸前后试样的断口形貌 15 × (a) 喷丸前; (b) 喷丸后

Fig.3 Fracture surface of [011] orientation of specimen before shot peening (a) and after shot peening (b)



图4 [111] 取向喷丸前后试样的断口形貌 (a) 喷丸前 ×15; (b) 喷丸后 ×10

Fig.4 Fracture surface of [111] orientation of specimen before shot peening (a) and after shot peening

3.3 两种取向的试样喷丸后的表层残余应力特征

3.3.1 [011] 取向试样喷丸后表层残余应力特征

在高周疲劳试验中早就发现, 疲劳损伤仅限于试件的表层, 远离金属的表层不受损伤, 如果在试验过程中定期地切除试件的表层, 则总疲劳寿命会提高很多<sup>[3]</sup>。

因此, 研究 DD3 合金喷丸前后试样表层的特点至关重要。DD3 单晶合金的组织为两相组织, 由 及 组成。经 X 光测定: [011] 试样喷丸后的表面残余应力为负值, 即压应力。资料 [4] 表明: 零件表面有一层均匀的残余压应力能提高材料的疲劳极限。因此, [011] 取向的试

样喷丸后性能得到了一定的提高。

3.3.2 [111] 取向试样喷丸后表层残余应力特征

[111] 取向的试样喷丸后的表面残余应力与 [011] 取向的试样存在着本质上的不同。经 X 光测定：[111] 取向喷丸后的表层残余应力为正值，即拉应力。从文献[4]中可知，试件中表面残余拉应力对疲劳性能会产生不利的影响。因此，[111] 取向的试样喷丸后的疲劳极限值会降低。

4 结论

(1) DD3 单晶高温合金的高周疲劳试样经喷丸后，取向不同，则性能变化趋势也不尽相同。[111] 取向的试样喷丸后疲劳极限有所下降，而 [011] 取向的试样喷丸后的疲劳极限则有所提高。

(2) 造成 DD3 合金的高周疲劳性能数据随不同取向而变化趋势不同的原因主要是因为喷丸前后试样的

表层残余应力不同。[011] 取向的残余应力为压应力，提高了疲劳极限；[111] 取向的残余应力为拉应力，降低了疲劳极限。

(3) 从试验结果可知，对单晶合金来讲，与其它等轴晶和定向柱状晶不同，喷丸并不能达到使任何取向的疲劳强度极限都提高的目的。

参考文献

1 J. H. Zhang. Fatigue and Fracture Behavior of A Single Crystal Superalloy. Materials for Advanced Power Engineering, Part , 1223 ~ 1230  
2 吴仲棠等. DD3 单晶合金研究报告. 41  
3 北京理化检验联合会, 北京航空航天大学. 金属材料的疲劳. 1984, 7  
4 王仁智. 喷丸强化的综合效应理论. 北京航空材料研究院. 第八届学术年会论文集, 1991, 5

\* \* \* \* \*

第四届先进材料技术研讨会  
在九江召开

中国航空学会材料工程专业分会于1997年10月13日至17日在江西九江召开了“第四届先进材料技术研讨会”。会议交流了我国“八五”先进材料技术及其工程化应用成果和“九五”开始取得的新进展，并探讨下世纪初我国先进材料的发展前景。

出席会议的代表有中国航空学会学术工作委员会主任、材料工程分会名誉主任委员、中科院院士颜鸣皋教授，中国科学院金属研究所郭建亭研究员，北京钢铁研究总院杨锦炎研究员，北京航空航天大学代表李树杰教授，航空基金委员会胡元凯等共68名。会议交流论文来自国内主要从事新型材料研究的中国科学院、高等院校、工业部门的科研院所以及生产部门的公司企业共34个单位。

本次会议论文含有我国新近研究的先进材料最新研究进展、工程应用状况及其先进成形工艺技术、性

能表征及测试技术等方面的研究现状，其中，在先进纳米晶金属间化合物材料，金属基复合材料及其先进的成形工艺，高温结构陶瓷及其复合材料、铁电陶瓷材料以及计算机模拟技术在先进材料研制中的应用等方面，均有较大的突破，反映了我国近期在先进材料技术领域所取得的最新成果和达到的研究水平。其中一些综合性论文对我国新材料跨世纪发展战略提出了有独特见解的观点和建议，对指导我国先进材料的研究，“九五”计划的实施，规划2010年的发展目标和方向都具有重要参考价值。

通过这次学术交流与研讨，对繁荣我国航空材料科学和先进材料技术发展及其应用，建立中国航空材料体系，对促进航空工业发展作出了新的贡献。

(李)