

DD3 单晶合金高温蠕变、疲劳及其交互作用机制

Mechanism of Fatigue and Creep and Fatigue-creep of DD3 Single Crystal Superalloy at Elevated Temperature

赵 萍^{1,2}, 何清华¹, 李 维², 陆 波²

(1 中南大学 机电工程学院, 长沙 410083;

2 中国航空动力机械研究所, 湖南 株洲 412002)

ZHAO Ping^{1,2}, HE Qing-hua¹, LI Wei², LU Bo²

(1 School of Mechanical and Electronic Engineering,

Central South University, Changsha 410083, China;

2 China Aviation Powerplant Research Institute, Zhuzhou 412002, Hunan, China)

摘要: 研究不同温度、不同应力下 DD3 单晶合金不同取向的疲劳、蠕变及疲劳-蠕变交互作用机制。结果表明: 给定的实验条件下, DD3 单晶的疲劳、蠕变及其交互作用均具有明显的各向异性, 均以 [111] 取向的寿命最长, [001] 取向次之, [011] 取向最短, 在相同温度和应力条件下以疲劳时的各向异性程度最为显著; DD3 单晶具有较强的抗蠕变能力和相对较弱的抗疲劳能力, 疲劳-蠕变交互作用中蠕变起主要作用。

关键词: 单晶; 疲劳; 蠕变; 疲劳-蠕变交互作用

中图分类号: TG 142. 73; TG 111. 8 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2010) 08-0001-04

Abstract: Mechanism of fatigue and creep and fatigue-creep of DD3 single crystal was investigated at different temperature with different stress levels along different orientations. The results show that DD3 single crystal has obviously anisotropic for the fatigue and creep and fatigue-creep properties, [111] is the highest, [001] takes second place and [011] is the lowest. The effect of orientation on fatigue is higher than creep and fatigue-creep. DD3 single crystal has good creep properties and relatively weak fatigue properties, creep is primal in fatigue-creep.

Key words: single crystal; fatigue; creep; fatigue-creep

DD3 单晶是第一个成功应用于先进航空发动机涡轮叶片制造的镍基单晶高温合金^[1,2], 有关该合金的疲劳、蠕变及其交互作用等力学性能国内外已开展了大量的研究^[3-9]。但由于航空发动机工作条件和工作环境十分复杂, 有必要针对发动机工作的某些特殊工况进行更深入的实验研究, 进一步完善 DD3 单晶涡轮叶片强度与寿命设计理论, 为解决 DD3 工程应用中的实际问题提供理论依据。

本工作以航空发动机实验载荷谱为依据, 根据发动机工作时单晶叶片的受力、工作环境等特点, 对在不同温度、不同应力下不同取向的 DD3 单晶的疲劳、蠕变和疲劳-蠕变交互作用进行实验, 分析了 DD3 单晶高温合金疲劳、蠕变及其交互作用机制。

1 实验

DD3 单晶试样的几何尺寸如图 1 所示。在试样

加工中, 严格遵循条件一致的原则, 由同一人在同一台机器上按相同标准在西北工业大学工程力学系动力学与结构强度国家专业试验室完成。

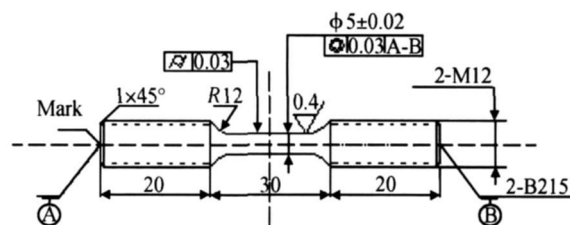


图 1 DD3 单晶实验试样

Fig. 1 Test specimen of DD3 single crystal

实验所用的试验机为 INSTRON8802(位移计为 2632 Series), 温度控制 $\pm 2^\circ\text{C}$, 载荷误差控制不超过 2%。实验环境为空气, 纯疲劳实验标准为 GB3075—82, 纯蠕变实验标准为 GB2039—80, 疲劳-蠕变循环实验标准为 GB3075—82, 疲劳实验的频率为 0.33Hz。

各实验所加载荷谱如图 2 所示。实验结果如表 1 所示, 试样编号含实验类型 (A 为纯疲劳实验, B 为疲劳-蠕变交互作用实验, C 为纯蠕变实验)、晶体取向、温度和应力, 如 A-001-980-300 表示晶体取向为 [001] 在温度 980℃、应力 300MPa 下进行的纯疲劳实验, 表 1 中疲劳和疲劳-蠕变交互作用的循环周次都折合成了以小时为单位的时间, 以便进行比较。

表 1 DD3 单晶合金蠕变、疲劳及其交互作用实验结果

Table 1 Creep and fatigue and fatigue-creep experimental results for DD3 single crystal superalloy

No	t/h	No	t/h	No	t/h
A-001-980-300	34.98	B-001-980-300	27.91	G-001-980-300	31
A-011-980-300	20.8	B-011-980-300	26.09	G-011-980-300	28
A-111-980-300	64.96	B-111-980-300	66.02	G-111-980-300	68
A-001-900-350	29.95	B-001-900-350	166.07	G-001-900-350	162
A-011-900-350	10.28	B-011-900-350	116.04	G-011-900-350	121
A-111-900-350	46.63	B-111-900-350	244.09	G-111-900-350	252
A-001-760-730	72.3	B-001-760-730	402.16	G-001-760-730	425
A-011-760-730	26.04	B-011-760-730	156.07	G-011-760-730	164
A-111-760-730	103.43	B-111-760-730	482.18	G-111-760-730	504

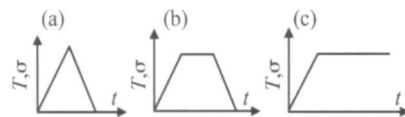


图 2 实验载荷谱 (a) 纯低周疲劳; (b) 疲劳-蠕变交互作用; (c) 纯蠕变

Fig. 2 Test loading (a) low cycle fatigue; (b) fatigue-creep; (c) creep

2 结果与分析

2.1 蠕变曲线

图 3 为三种不同温度、不同应力条件下不同取向 DD3 合金的蠕变曲线。可以看出: 在不同条件

状态下的 DD3 合金均具有蠕变各向异性, [111] 取向的寿命最长, [001] 取向次之, [011] 取向最短, 而且蠕变曲线都有明显的第二阶段和第三阶段。有关 DD3 单晶合金蠕变性能的详细描述已在文献 [6] 中说明。

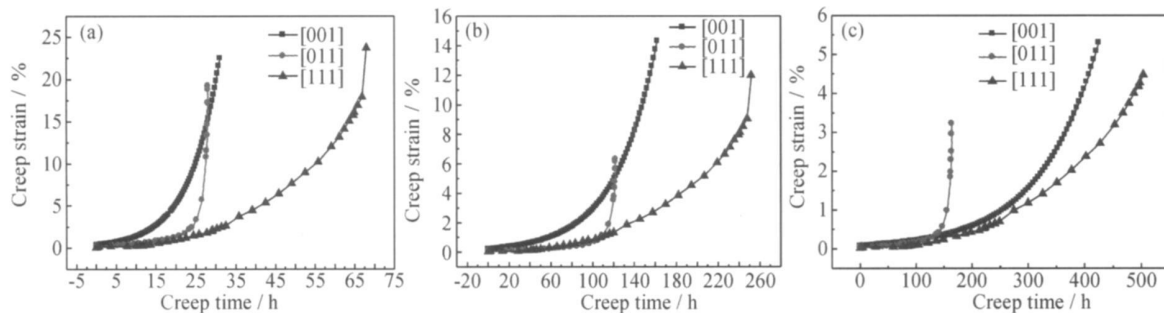


图 3 不同温度和应力条件下 DD3 合金蠕变曲线 (a) 980℃/300MPa; (b) 900℃/350MPa; (c) 760℃/730MPa

Fig. 3 Creep curves of DD3 single crystal superalloy at different temperatures with different stress levels (a) 980℃/300MPa; (b) 900℃/350MPa; (c) 760℃/730MPa

2.2 低周疲劳

表 1 中的数据表明, 取向对疲劳寿命的影响非常大, [111] 为寿命最长的取向, 然后依次为 [001] 和 [011]。已有的很多研究表明取向对低周疲劳寿命的影响主要是取向间的弹性模量差异造成的。图 4 为 DD3 单晶合金疲劳断口 SEM 形貌。可以看出: DD3 单晶合金的 LCF (Low Cycle Fatigue) 断口呈多源开裂, 裂纹萌生于试样表面及其组织中的孔洞、空穴和微

裂纹等微观缺陷部位。由于微观缺陷会产生局部的应力集中, 当应力集中到足以使滑移系开动滑移时, 就会在局部产生塑性变形, 微裂纹由此产生。裂纹扩展时, 断口呈现有小平面特征, 有时还可发现条带和台阶状花样特征, 台阶的横向与裂纹扩展方向垂直。LCF 条件下, 断口的这些特征表明, DD3 单晶的变形是沿最大切应力方向以单滑移方式进行的。

此外在较高温度时, 温度和应力的变化对三寿命

的影响也不完全相同, 当实验条件从 980℃/300MPa 变化到 900℃/350MPa 时, 三种晶体取向的 LCF 寿命都减少, 而疲劳-蠕变和蠕变寿命却是增加的。由此,

DD3 单晶合金有较强的蠕变抗力和相对较弱的疲劳抗力以及晶体取向对寿命的影响也在本实验中都得到了证实。

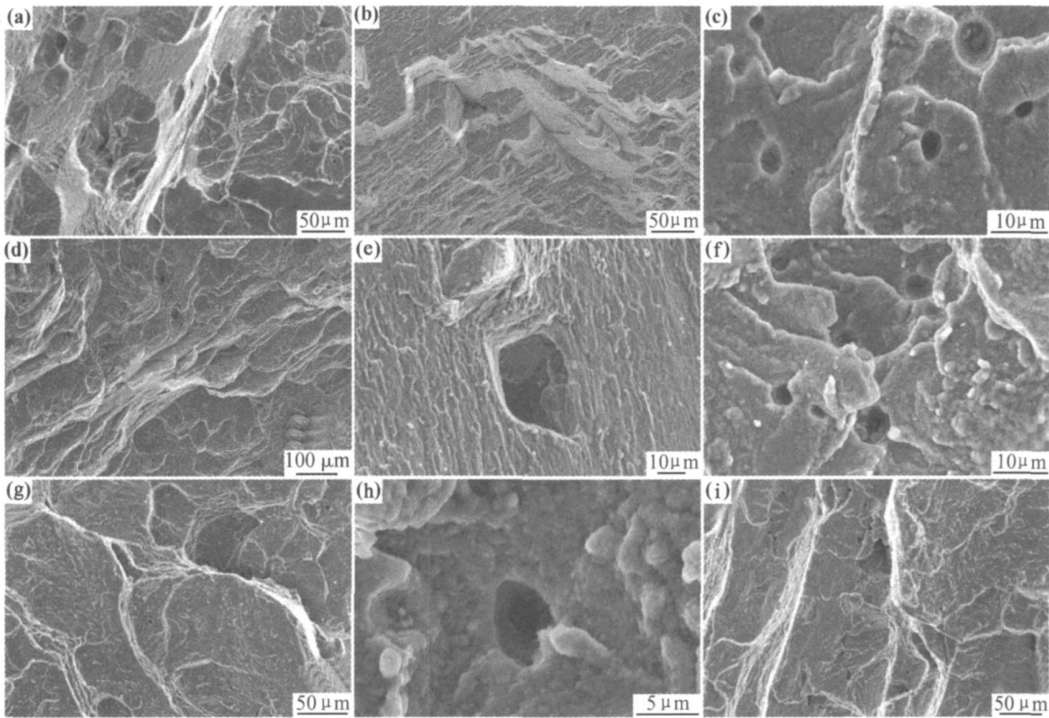


图 4 DD3 单晶合金疲劳断口 SEM 照片

(a) A-001-980-300; (b) A-011-980-300; (c) A-111-980-300; (d) A-001-900-350; (e) A-011-900-350; (f) A-111-900-350;
(g) A-001-760-730; (h) A-011-760-730; (i) A-111-760-730

Fig. 4 SEM pictures for the fracture surfaces of fatigue of DD3 single crystal superalloy

(a) A-001-980-300; (b) A-011-980-300; (c) A-111-980-300; (d) A-001-900-350; (e) A-011-900-350; (f) A-111-900-350;
(g) A-001-760-730; (h) A-011-760-730; (i) A-111-760-730

2.3 疲劳-蠕变交互作用

DD3 单晶的蠕变-疲劳交互作用的各向异性显著性也可从表 1 中的数据得知, 而且 DD3 单晶合金的疲劳-蠕变寿命值介于疲劳和蠕变寿命之间且更接近于蠕变寿命值。这是因为疲劳-蠕变交互作用实验中的保载时间达 2h, 蠕变在交互作用中起主要作用, 而疲劳对寿命的影响很小。由此可以推断, 单晶合金在疲劳-蠕变交互作用下可能发生三种断裂机制。在交变应力(疲劳应力)较大而平均应力(蠕变应力)较小时, 单晶的空穴化程度小, 其破坏主要由疲劳裂纹的形核和扩展所致, 其断口应和纯疲劳断裂类似; 在交变应力较小而平均应力相对较大时, 单晶内部的空穴化成核和空穴通过相互连接长大导致材料的破坏, 其断口应和纯蠕变的情况类似; 当交变应力和平均应力相当时, 单晶表面成核的疲劳裂纹和内部空穴交互作用, 内部形成的空穴也可以作为疲劳源形成疲劳裂纹而扩展, 此时交变应力和平均应力的相对少量的变化都可能导

致材料损伤形式的复杂变化。

图 5 的疲劳-蠕变交互作用断口图表明: 在疲劳-蠕变交互作用条件下, 断口表面台阶花样特征不明显, 因塑性撕裂而出现的韧窝却比较明显。另外, 该条件下的显微组织中尚有一定数量的微孔, 这可能是蠕变-疲劳过程中蠕变累积损伤造成的。

此外, 从表 1 的数据还可以看出: 从实验条件 980℃/300MPa, 900℃/350MPa 到 900℃/730MPa, 各向异性程度即[111]取向的最大值与[011]取向的最小值的比值, 疲劳时为 3.12, 4.54 和 3.97, 蠕变时为 2.43, 2.08 和 3.07, 疲劳-蠕变交互作用时为 2.53, 2.1 和 3.09, 因此三种状态下以疲劳的各向异性程度最为显著, 疲劳-蠕变交互作用时次之, 蠕变时最小, 而且不同温度条件 DD3 合金的各向异性程度也不尽相同, 对于蠕变和疲劳-蠕变交互作用状态温度较低时各向异性显著, 温度升高各向异性程度减少, 而疲劳的这种差别不明显。

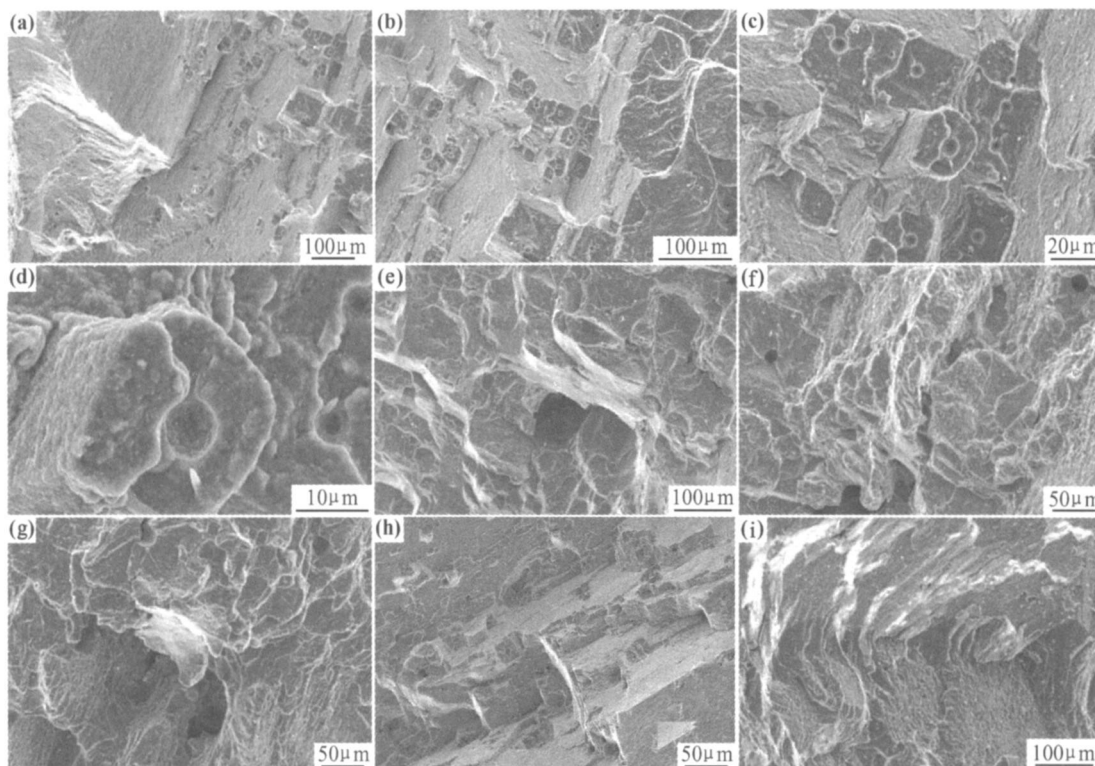


图 5 疲劳蠕变交互作用断口 SEM 照片

(a) B-001-980-300; (b) B-011-980-300; (c) B-111-980-300; (d) B-001-900-350; (e) B-011-900-350; (f) B-111-900-350;
(g) B-001-760-730; (h) B-011-760-730; (i) B-111-760-730

Fig. 5 SEM pictures for the fracture surfaces of fatigue-creep interaction

(a) B-001-980-300; (b) B-011-980-300; (c) B-111-980-300; (d) B-001-900-350; (e) B-011-900-350; (f) B-111-900-350;
(g) B-001-760-730; (h) B-011-760-730; (i) B-111-760-730

3 结论

(1) DD3 单晶合金的疲劳、蠕变及其疲劳-蠕变交互作用都具有显著的各向异性, 三种状态下均以 [111] 取向的寿命最长, [001] 取向次之, [011] 取向的寿命最短, 在相同温度和应力条件下以疲劳时的各向异性程度最为显著。

(2) DD3 单晶具有较强的抗蠕变能力和相对较弱的抗疲劳能力, 疲劳-蠕变交互作用中蠕变起主要作用。

参考文献

- [1] 吴仲棠, 陈德厚, 钟振刚. DD3 单晶涡轮叶片合金[J]. 航空材料, 1987, (5): 1-5.
- [2] 吴仲棠, 温仲元, 陈德厚. DD3 单晶合金的成分设计和试验研究[J]. 金属学报, 1987, 23: 171-178.
- [3] 陈吉平, 丁智平, 尹泽勇, 等. DD3 镍基单晶合金低周疲劳寿命研究[J]. 机械工程材料, 2006, 30(4): 9-12.

- [4] 魏朋义, 杨治国, 成晓明, 等. DD3 单晶高温合金拉伸蠕变各向异性[J]. 航空材料学报, 1999, 19(3): 7-12.
- [5] 成晓明, 尹泽勇, 陈兆靖. DD3 单晶合金蠕变参数的确定[J]. 机械强度, 2000, 22(3): 197-199.
- [6] 赵萍, 杨治国, 何清华. DD3 单晶合金蠕变性能的试验研究[J]. 材料工程, 2009, (4): 10-13.
- [7] 韩梅, 骆宇时. DD3 单晶高温合金的高温蠕变断裂行为[J]. 失效分析与预防, 2008, (3): 28-31.
- [8] 万建松, 岳珠峰. 镍基单晶 DD3 涡轮叶片蠕变寿命晶向相关性分析[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2004, 17(2): 18-22.
- [9] 岳珠峰, 陶仙德, 尹泽勇, 等. 一种镍基单晶超合金高温低周疲劳的晶体取向性模型[J]. 应用数学和力学, 2000, 21(4): 373-381.

收稿日期: 2009-03-14; 修订日期: 2010-04-06

作者简介: 赵萍(1978—), 女, 博士研究生, 研究方向为单晶材料的性能、力学行为应用及研究, 联系地址: 湖南省株洲市 215 信箱四分箱(412002), E-mail: xtzhaoqing@126.com