

引文格式: 史振学, 刘世忠, 赵金乾, 等. 晶体取向对第四代单晶高温合金 DD15 高周疲劳性能的影响[J]. 航空制造技术, 2021, 64(1/2): 51-56, 61.

SHI Zhenxue, LIU Shizhong, ZHAO Jinqian, et al. Effect of crystal orientation on high cycle fatigue properties of fourth generation single crystal superalloy DD15[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(1/2): 51-56, 61.

# 晶体取向对第四代单晶高温合金 DD15 高周疲劳性能的影响\*

史振学, 刘世忠, 赵金乾, 王效光, 李嘉荣

(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]** 在定向炉中分别采用籽晶法制备了 [001]、[011] 和 [111] 3 种不同取向的第四代单晶高温合金 DD15, 在 800℃ 研究了不同取向的高周疲劳性能, 分析了合金不同取向的显微组织、疲劳断口形貌和疲劳断裂组织。结果表明: 在凝固方向横截面上不同取向合金的铸态枝晶和热处理  $\gamma'$  相组织明显不同。合金 800℃ 的高周疲劳性能存在各向异性, 疲劳极限按 [111]、[001]、[011] 取向的顺序降低。不同取向合金的高周疲劳都是沿平面断裂, 断裂平面与试样中心应力轴线的角度不同, 角度按 [011]、[001]、[111] 取向的顺序逐渐减小。不同取向高周疲劳断口特征基本相同, 可见疲劳源区、疲劳扩展区和瞬断区。疲劳裂纹起源于试样表面或亚表面并沿 {111} 平面扩展。扩展区上可见河流状花样和疲劳条带。瞬断区可见撕裂棱和解理台阶特征, 其断裂机制都为类解理断裂。由于试验温度较低, 不同取向疲劳断裂后的  $\gamma'$  相仍保持立方形状。

**关键词:** 单晶高温合金; DD15; 高周疲劳; 晶体取向; 各向异性

**DOI:** 10.16080/j.issn1671-833x.2021.01/02.051



史振学

高级工程师, 博士, 主要从事单晶高温合金及叶片制备研究, 承担两机专项、国防预研、型号研制等 10 多项课题, 发表论文 100 余篇, 其中 SCI、EI 收录 60 多篇。

用于制备航空发动机涡轮叶片的单晶高温合金, 具有单晶材料各向异性的本质特征, 因此其力学性能表现出明显的各向异性<sup>[1-4]</sup>。对不同取向单晶高温合金的拉伸、持久、蠕变性能已进行了大量研究, 但公开文献中单晶高温合金高周疲劳的各向异性的研究较少。Yu 等<sup>[5]</sup>研究表明, 不同取向 SRR99 合金在 700℃ 的高周疲劳极限由高到低依次为 [011]>[111]>[001]。DD6 合金 800℃ 的高周疲劳极限为 [111] 取向最高, 而 [001]、[011] 取向相差不大<sup>[6]</sup>。航空发动机恶劣的服役环境造成涡轮叶片常发生高周疲劳失效<sup>[7-8]</sup>, 导致航空发动机研制周期延长、

成本上涨, 高周疲劳失效已成为航空发动机生产商和顾客重点关注问题<sup>[9]</sup>。单晶合金的高周疲劳性能主要影响因素有合金的显微组织、晶体取向、试验温度和试验应力。单晶叶片形状非常复杂, 服役时承受离心力、热应力、弯扭应力, 局部位置还存在复杂多轴应力<sup>[10]</sup>。因此有必要对单晶合金不同取向的高周疲劳性能进行研究。为满足新一代航空发动机涡轮叶片高承温能力的需求, 北京航空材料研究院研制了第四代单晶高温合金 DD15, 合金具有优异的组织稳定性, 以及良好的拉伸性能、持久性能、蠕变性能和铸造工艺性能, 1100℃/140MPa 的持久性能优于美

\* 基金项目: 国家科技重大专项(2017-VI-0002-0071)。

国的 EPM-102 合金<sup>[11]</sup>。本文研究了 DD15 单晶高温合金不同取向的高周疲劳性能,为合金的工程应用提供试验依据。

### 试样制备和试验方法

试验使用材料为 DD15 合金,合金的化学成分为 Ni-Cr-Co-Mo-W-Ta-Nb-Re-Ru-Al-C,其中 Re 质量分数为 5%, Ru 质量分数为 3%。采用籽晶法在真空熔炉中分别定向凝固制成 [001]、[011] 和 [111] 不同取向的单晶试棒,其抽拉速率控制为 3~5mm/min。用 X 射线劳埃法确定试棒的晶体取向,不同取向的单晶试棒的结晶取向偏离度在 10° 以内。所有单晶试棒进行热处理,工艺如下: 1300℃ /1h +1310℃ /2h +1320℃ /3h +1330℃ /4h +1335℃ /6h, AC+1140℃ /4h, AC+870℃ /32h, AC。热处理后加工成旋转弯曲高周疲劳试样,试样尺寸见图 1。分别在 TMS 型液压伺服疲劳试验机测试 DD15 合金 800℃ 不同取向的旋转弯曲高周疲劳性能,应力比为 -1,波形为正弦波,转速为 5000r/min。为

讨论与拉伸性能的关系,加工 3 根拉伸性能试样,测试合金 800℃ 的拉伸性能。采用 LEICA 光学显微镜、S4800 扫描电镜研究不同取向合金的显微组织、断口形貌和断裂组织。

### 结果与分析

#### 1 合金组织

图 2 为与晶体生长方向垂直剖面合金的枝晶结构形貌,可见, [001] 取向枝晶呈“十”字形状,一次枝晶干为 [001] 方向,二次枝晶臂的长度相当,分布较均匀,为 [100] 方向或者 [010] 方向。[011] 取向枝晶排成直线,二次枝晶臂的长度差别较大,呈不均匀分布。[111] 取向枝晶不规则,二次枝晶臂之间有 60° 的夹角。单晶合金在定向凝固过程中,枝晶生长的择优取向为 [001] 方向。当合金为 [001] 取向时,枝晶择优生长方向与热流方向平行,定向凝固后一次枝晶干平行排列,二次枝晶臂垂直于热流方向,相变潜热失热较慢,造成 [001] 取向合金具有较短的二次枝晶臂,其臂端也颇为粗大。当合金为 [011] 取向时,沿热流 45° 的方向

为枝晶择优生长方向,二次枝晶臂中任何一个都可能通过不断分支而成为一次枝晶干,因而二次枝晶臂相互交错<sup>[12]</sup>。当合金为 [111] 取向时,3 个方向的枝晶与热流方向具有相同的夹角,都有可能通过分支生长成为一次枝晶干,因而凝固成类似“笼状”的枝晶形貌<sup>[13]</sup>。因此枝晶生长与热流方向的差异导致枝晶结构的不同。

图 3 为与晶体生长方向垂直剖面的热处理组织。当合金为 [001] 取向时,垂直生长方向的剖面为 (001) 面,因此  $\gamma'$  相的形状近似正方形;当合金为 [011] 取向时,垂直生长方向的剖面为 (011) 面,所以  $\gamma'$  相的形状为矩形;当合金为 [111] 取向时,垂直生长方向的剖面为 (111) 面,  $\gamma'$  相的形状为多边形。不同的剖面导致  $\gamma'$  相的形状差异。

#### 2 高周疲劳性能

图 4 (a)、(b)、(c) 分别为合金在 800℃ [001]、[011]、[111] 取向的高周疲劳 S-N 曲线,其中箭头表示试样在某应力水平下的循环次数达到 10<sup>7</sup> 周次未发生断裂。由图 4 可以看出,3 种取向试样随着加载应力

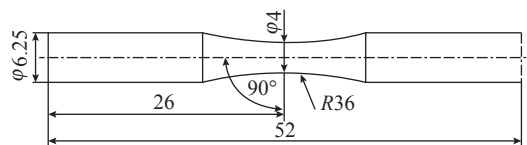
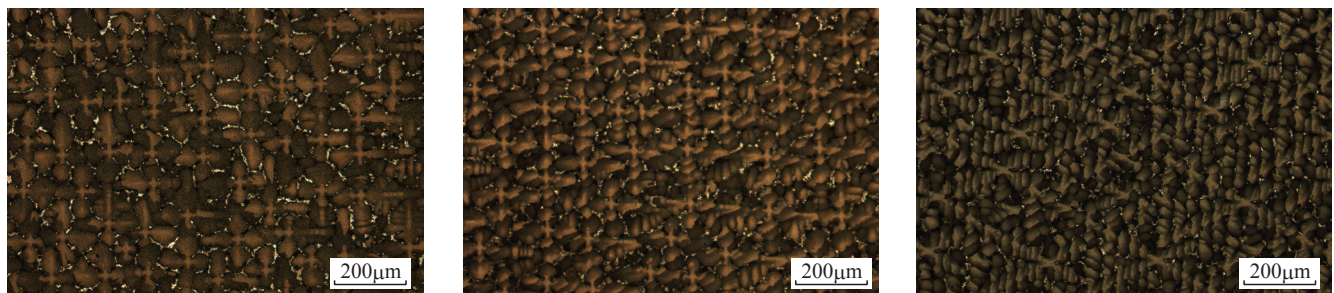


图1 旋转弯曲高周疲劳试样尺寸(mm)

Fig.1 Schematic diagram of specimens for rotary bending HCF tests (mm)



(a) [001]

(b) [011]

(c) [111]

图2 不同取向合金的铸态枝晶结构

Fig.2 Dendrite structures of alloy with different orientation

减小,高周疲劳寿命增加,不同取向合金的高周疲劳极限按 [111]、[001]、[011] 取向的顺序降低。

根据 Basquin 方程<sup>[14]</sup>,材料的高周疲劳  $S-N$  曲线方程为:

$$\Delta\sigma/2 = \sigma_a = \sigma'_f(2N_f)^b \quad (1)$$

式中,  $\sigma_a$  是高周疲劳的应力值,  $\sigma'_f$  是高周疲劳的强度系数,  $N_f$  是高周疲劳的循环周次,  $b$  为高周疲劳的 Basquin 指数。由高周疲劳寿命与疲劳应力的拟合曲线,获得了不同取向合金的高周疲劳极限和  $S-N$  曲线方程,如表 1 所示。根据  $S-N$  曲线方

程可以获得不同取向不同应力下的疲劳寿命,为设计人员评估涡轮叶片寿命提供依据。

### 3 疲劳断口

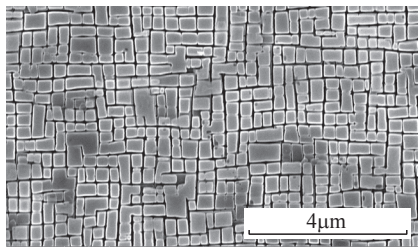
合金 800 °C 不同取向合金的高

周疲劳断裂试样见图 5。可以看出,不同取向合金的高周疲劳都是沿平面断裂,断裂平面与试样中心应力轴线的角度不同,角度按 [011]、[001]、[111] 取向的顺序逐渐减小,

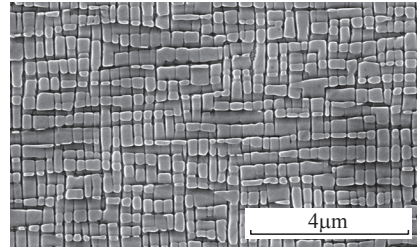
表1 不同取向合金高周疲劳极限和S-N曲线

Table 1 High cycle fatigue limit of alloy with different orientation

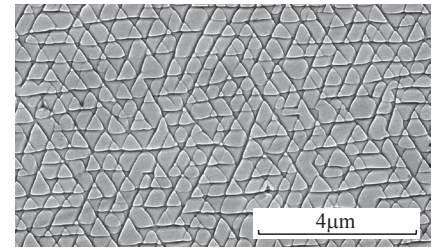
Sample	High cycle fatigue limit/MPa	Equation
[001]	426	$\sigma_a = 1315.9(2N_f)^{-0.067}$
[011]	399	$\sigma_a = 848.8(2N_f)^{-0.045}$
[111]	434	$\sigma_a = 973.3(2N_f)^{-0.048}$



(a) [001]



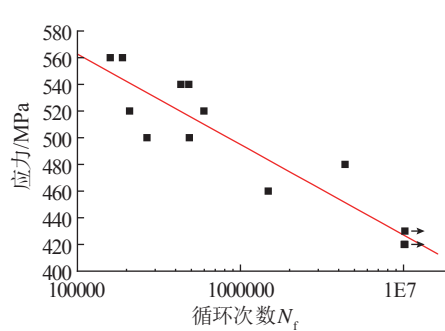
(b) [011]



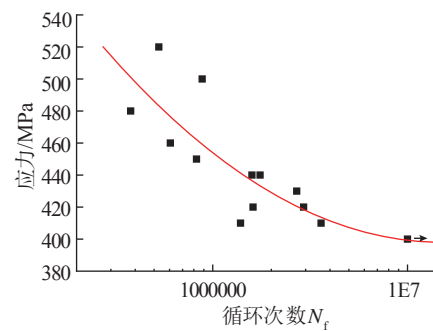
(c) [111]

图3 不同取向合金的热处理组织

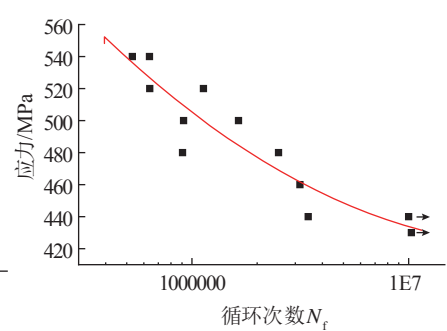
Fig.3 Microstructure of heat treatment of alloy with different orientation



(a) [001]



(b) [011]



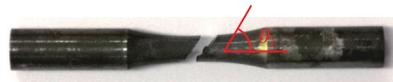
(c) [111]

图4 不同取向合金的高周疲劳寿命曲线

Fig.4 High cycle fatigue life curves of alloy with different orientation



(a) [001]



(b) [011]



(c) [111]

图5 不同取向的合金高周疲劳断裂试样

Fig.5 High cycle fatigue fracture samples of alloy with different orientation

即  $\theta_2 > \theta_1 > \theta_3$ , 断裂平面的面积按 [011]、[001]、[111] 取向的顺序逐渐增加。

合金 800°C [001]、[011]、[111] 取向的高周疲劳断口分别见图 6、图 7 和图 8。可以看出,不同取向合金的高周疲劳断口特征基本相同,断口有平面组成,断口上可见疲劳源区、疲劳扩展区和瞬断区。由单晶高温合

金中温八面体滑移变形机制可知,断口平面都为 {111} 面<sup>[15]</sup>,不同取向合金的高周疲劳断裂机制为类解理断裂,与中温下其他单晶高温合金的疲劳断裂机制相同<sup>[16-17]</sup>。旋转弯曲疲劳时,其应力分布是外层大、中心小,因而疲劳裂纹一般起源于试样表面的氧化皮或亚表面的显微疏松这些容易引起应力集中的位置,见图 6

(b)、7(b)、8(b)。疲劳裂纹形成后沿 {111} 平面扩展,扩展区上可见河流状花样特征,疲劳稳定扩展区上可见疲劳条带,见图 6(c)、7(c)、8(c)。通过疲劳条带的特征可得出裂纹的扩展方向,其中箭头所指方向即为疲劳裂纹扩展方向。随着疲劳试验的进行,合金有效承载到达极限,疲劳试样突然发生断裂,瞬断区上形成了撕裂棱和解理台阶特征,见图 6(d)、7(d)、8(d)。由于不同取向解理 {111} 面与试样中心应力轴线的角度不同,对比看出,解理台阶的高度按 [111]、[001]、[011] 取向的顺序逐渐减小。

#### 4 断裂后组织

不同取向合金疲劳断裂后纵剖面形貌如图 9 所示。由低倍图可以看出,试样虽然经过了完全热处理和疲劳试验,仍然可以看出不同取向合金具有完全不同的枝晶结构特征。从低倍图可以直观看出合金疲劳断裂过程,不同取向合金的疲劳裂纹沿 {111} 面扩展并断裂,是典型的类解理断裂特征。由高倍图可以看出,试样疲劳断裂后,不同取向合金的  $\gamma'$  相仍保持原来的立方体形状。由于高周疲劳试验温度较低,  $\gamma'$  相与  $\gamma$  基体的共格关系保持不变,  $\gamma'/\gamma$  界面的错配度没有彻底释放,同时合金元素的扩散较慢,因此合金的  $\gamma'$  相未发生高温下的合并长大或者筏排化特征<sup>[18]</sup>。

#### 讨论

由以上试验结果可以看出, DD15 合金在 800°C 的高周疲劳存在各向异性,这是单晶材料各向异性的本质特征决定的。

DD15 合金的  $\gamma$  基体具有面心立方结构,而  $\gamma'$  相同属面心立方超结构。在 800°C 中温试验条件下,不同取向合金均通过 {111} <110> 八面体滑移系进行塑性变形, [001]、[011]、[111] 取向的滑移系数量为 8、4、6、

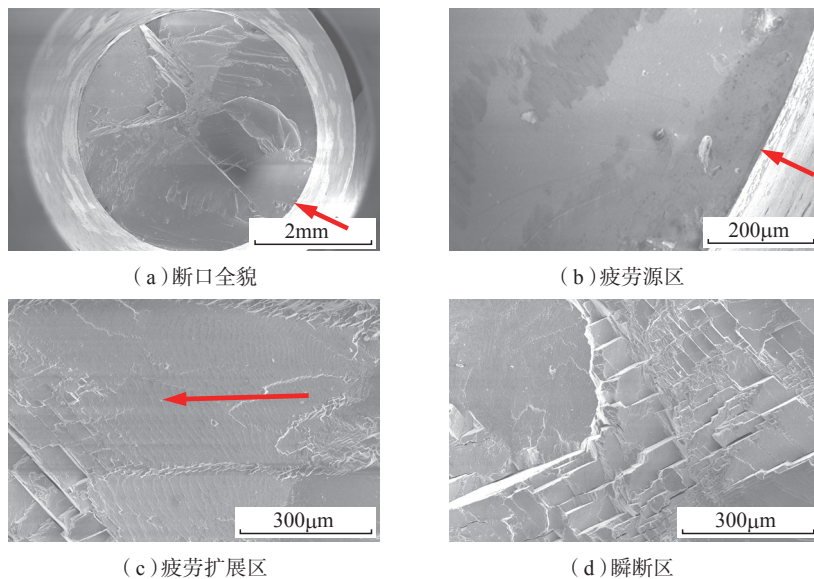


图 6 [001] 取向的合金高周疲劳断口 ( $\sigma_a=480\text{MPa}$ ,  $N_f=4.38 \times 10^6$ )  
Fig.6 High cycle fatigue fracture surfaces of alloy with [001] orientation

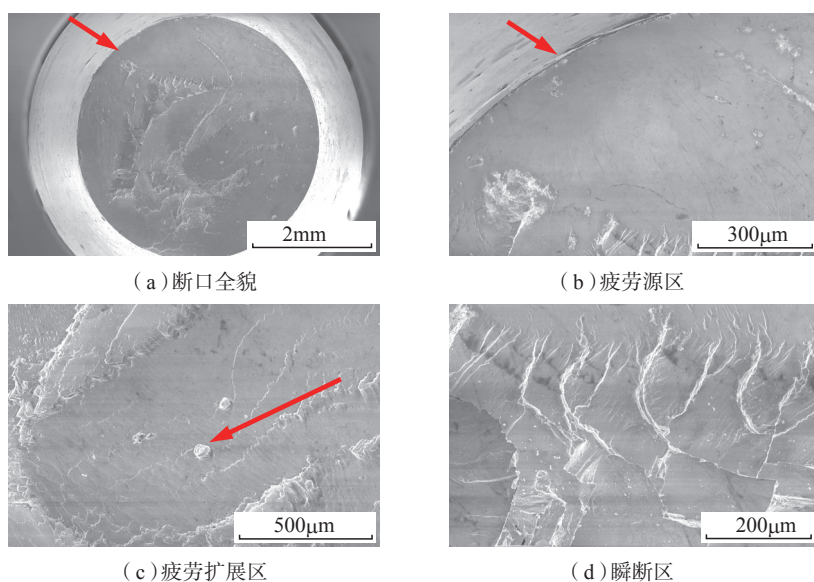


图 7 [011]取向的合金高周疲劳断口 ( $\sigma_a=440\text{MPa}$ ,  $N_f=1.75 \times 10^6$ )  
Fig.7 High cycle fatigue fracture surfaces of alloy with [011] orientation

滑移系的 Schmid 因子分别为 0.41、0.41、0.27<sup>[19]</sup>。[001] 取向滑移系最多,其 Schmid 因子较高,合金由多滑移方式进行变形,具有较高的抗变形能力,滑移系开动需要较高的分切应力,因而具有较高的高周疲劳极限。

[011] 取向具有最少的滑移系,其 Schmid 因子较高,不同方向的滑移系交截可能性最小,抗塑性变形的阻力最低,因而具有最低的疲劳极限。[111] 取向滑移系较多,变形协调性较好,各滑移系交截可能性较高,其

Schmid 因子也较低,滑移系开动需要较低的分切应力,因而具有最高的高周疲劳极限。

由图 5 看出,不同取向合金的高周疲劳断裂平面与试样中心应力轴线的角度按 [011]、[001]、[111] 取向的顺序逐渐增加,其面积按 [011]、[001]、[111] 取向的顺序逐渐增加。角度越小,断裂平面离试样中心最小面积的横截面越远,而自身扩展面积越大,试样越不容易发生断裂,如图 5 显示 [111] 取向试样最后断裂位置为试样较粗的位置。

综合以上原因,中温条件下,DD15 合金 [111] 取向的高周疲劳极限最大, [001] 取向次之, [011] 取向最小。

## 结论

在与晶体生长方向垂直剖面上, [001] 取向 DD15 合金铸态枝晶呈“十”字形, [011]、[111] 取向枝晶呈不均匀分布,热处理后 [001] 取向  $\gamma'$  相近似正方形, [011] 取向  $\gamma'$  相为

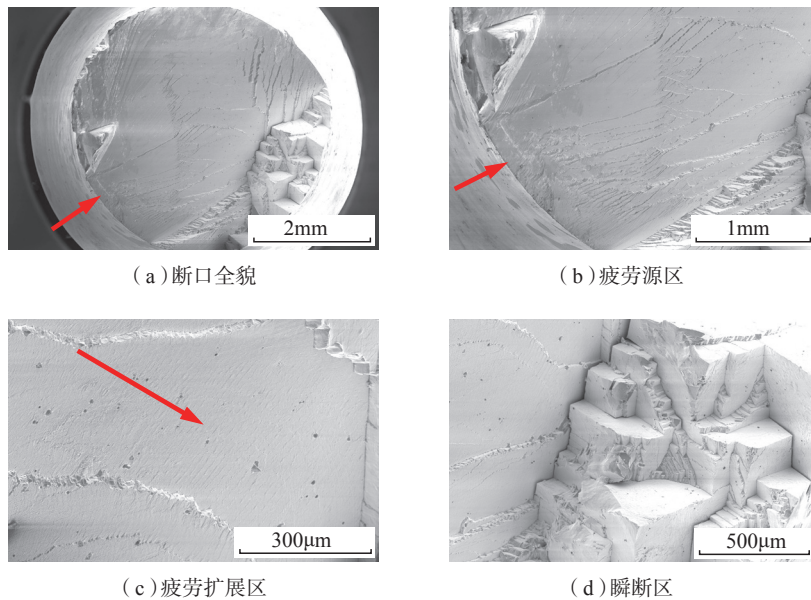


图8 [111]取向的合金高周疲劳断口 ( $\sigma_a=500\text{MPa}$ ,  $N_f=1.64 \times 10^6$ )

Fig.8 High cycle fatigue fracture surfaces of the alloy with [111] orientation

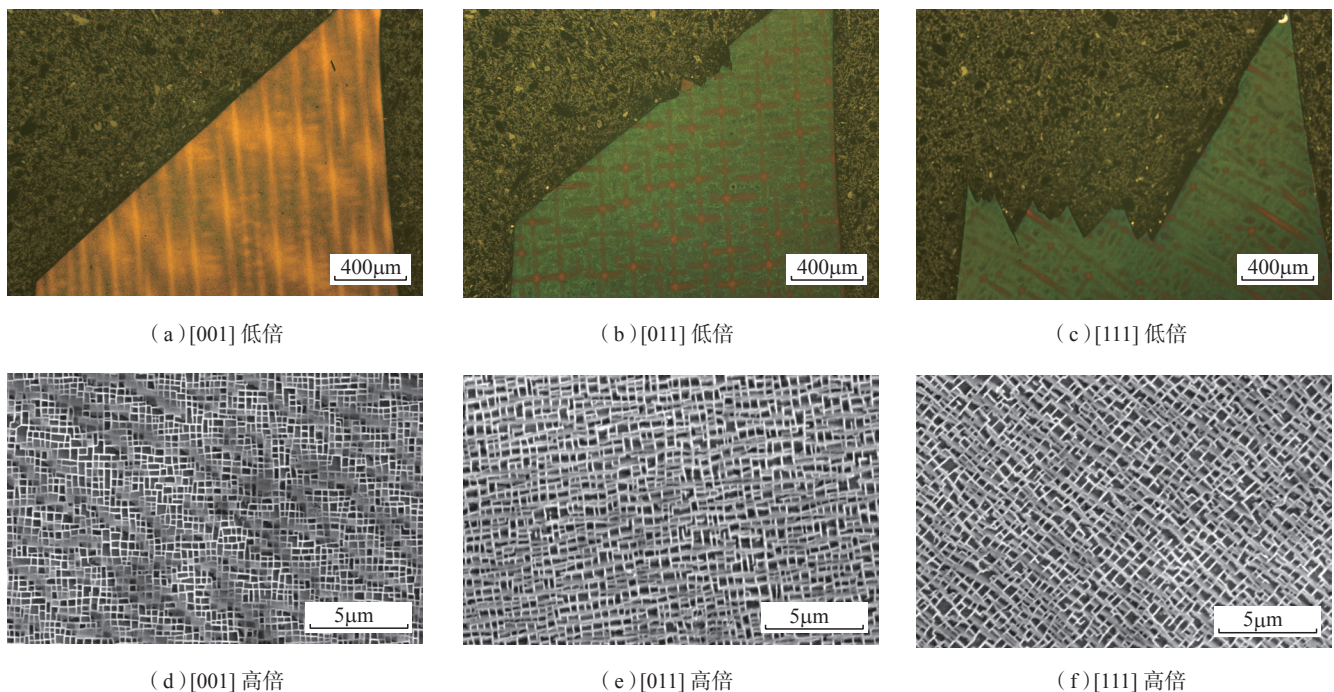


图9 不同取向合金试样疲劳断裂后纵剖面组织

Fig.9 Longitudinal section microstructures of fatigue ruptured specimen with different orientation

矩形, [111] 取向  $\gamma'$  相的形状为多边形。

DD15 合金 800℃ 的高周疲劳性能存在各向异性, 疲劳极限按 [111]、[001]、[011] 取向的顺序降低。

不同取向合金的高周疲劳都是沿平面断裂, 断裂平面与试样中心应力轴线的角度不同, 角度按 [011]、[001]、[111] 取向的顺序逐渐减小。

不同取向高周疲劳断口特征基本相同, 可见疲劳源区、疲劳扩展区和瞬断区。疲劳裂纹起源于试样表面的氧化皮或亚表面的显微疏松, 疲劳裂纹形成后沿 {111} 平面扩展, 扩展区上可见河流状花样和疲劳条带。瞬断区可见撕裂棱和解理台阶特征, 其断裂机制都为类解理断裂。

由于温度较低,  $\gamma'$  相未发生合并长大或者筏排化, 不同取向疲劳断裂后的  $\gamma'$  相仍保持立方形状。

### 参考文献

[1] SHAH D M, DUHL D N. The effect of orientation, temperature and gamma prime size on the yield strength of a single crystal nickel base superalloy[C]//Superalloys 1984 (Fifth International Symposium). Warrendale, TMS, 1984: 105-114.

[2] DALAL R P, THOMAS C R, DARDI L E. The effect of crystallographic orientation on the physical and mechanical properties of an investment cast single crystal nickel-base superalloy[C]//Superalloys 1984 (Fifth International Symposium). Warrendale: TMS, 1984: 185-197.

[3] HAN G M, YANG Y H, YU J J, et al. Temperature dependence of anisotropic stress-rupture properties of nickel-based single crystal superalloy SRR99[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition), 2011, 21(8): 1717-1721.

[4] LI Y F, WANG L, ZHANG G, et al. Anisotropic stress rupture properties of a 3rd-generation nickel-based single-crystal superalloy at 1100 °C /150 MPa[J]. Acta Metallurgica

Sinica (English Letters), 2020, 33(3): 446-458.

[5] YU J J, SUN Y L, SUN X F, et al. Anisotropy of high cycle fatigue behavior of a Ni-base single crystal superalloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 566: 90-95.

[6] 中国金属学会高温材料分会. 中国高温合金手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2012: 549-564.

High Temperature Materials Branch of China Metal Society. China superalloy manual [M]. Beijing: Standards Press of China, 2012: 549-564.

[7] WRIGHT P K, JAIN M, CAMERON D. High cycle fatigue in a single crystal superalloy: Time dependence at elevated temperature[C]//Superalloys 2004 (Tenth International Symposium). Pennsylvania: TMS, 2004: 657-666.

[8] LUKÁŠ P, KUNZ L, SVOBODA M. High cycle fatigue of superalloy single crystals at high mean stress[J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 387-389: 505-510.

[9] 谢洪吉, 李嘉荣, 韩梅. 应力比对单晶高温合金高周疲劳行为的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47(11): 3381-3386.

XIE Hongji, LI Jiarong, HAN Mei. Effect of stress ratio on high cycle fatigue behavior of a single crystal superalloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(11): 3381-3386.

[10] MULLER S, ROSLER J, SOMMER C, et al. The influence of load ratio, temperature, orientation and hold time on fatigue crack growth of CMSX-4[C]//Superalloys 2000 (Ninth International Symposium). Warrendale: TMS, 2000: 347-355.

[11] 刘世忠, 史振学, 李嘉荣. 第四代单晶高温合金 DD15[C]//第十四届中国高温合金年会论文集. 黄石: 冶金工业出版社, 2019: 459-462.

LIU Shizhong, SHI Zhenxue, LI Jiarong. The fourth generation single crystal superalloy DD15[C]//The 14th annual high temperature superalloy conference. Huangshi: Metallurgical Industry Press, 2019: 459-462.

[12] 王效光, 李嘉荣, 喻健, 等. DD9 单晶高温合金拉伸性能各向异性[J]. 金属学报, 2015, 51(10): 1253-1260.

WANG Xiaoguang, LI Jiarong, YU Jian, et al. Tensile anisotropy of single crystal superalloy DD9[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51(10): 1253-1260.

[13] 张龙飞, 燕平, 赵京晨, 等. 凝固方向对单晶高温合金枝晶组织的影响[J]. 材料工程, 2011, 39(6): 67-71, 76.

ZHANG Longfei, YAN Ping, ZHAO Jingchen, et al. Influence of the solidification directions on dendritic structures in a single crystal superalloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2011, 39(6): 67-71, 76.

[14] ASTM. ASTM standard E606, vol.03.01, ASTM[S]. Philadelphia, PA, 1996.

[15] WAN J S, YUE Z F. A low-cycle fatigue life model of nickel-based single crystal superalloys under multiaxial stress state[J]. Materials Science and Engineering: A, 2005, 392(1-2): 145-149.

[16] WASSON A J, FUCHS G E. The effect of carbide morphologies on elevated temperature tensile and fatigue behavior of a modified single crystal Ni-base superalloy[C]//Superalloys 2008 (Eleventh International Symposium). Pennsylvania: TMS, 2008: 489-497.

[17] SHI Z X, LI J R, LIU S Z, et al. High cycle fatigue behavior of the second generation single crystal superalloy DD6[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(5): 998-1003.

[18] SHI Z X, LIU S Z, LI J R. Rejuvenation heat treatment of the second generation single crystal superalloy DD6[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2015, 28(10): 1278-1285.

[19] 张龙飞, 燕平, 赵京晨, 等. DD407 单晶高温合金 760℃ 拉伸性能的各向异性[J]. 钢铁研究学报, 2011, 23(12): 54-59.

ZHANG Longfei, YAN Ping, ZHAO Jingchen, et al. Tensile anisotropy of Ni base single crystal superalloy DD407 at 760°C [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2011, 23(12): 54-59.

通讯作者: 史振学, E-mail: shizhenxue@126.com。

(下转第61页)

Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2017, 38(7): 168–170.

[14] 范强, 牛永吉. GH625 合金研制  
总结[R]. 北京: 北京北冶功能材料有限公司,

2007.  
FAN Qiang, NIU Yongji. The research  
and development of GH625 alloy[R]. Beijing:  
Beijing Beiye Functional Materials Corporation,

2007.

通讯作者: 牛永吉, E-mail: niuyongji@163.  
com.

## Study on Processing Characteristics of Superalloy GH141

NIU Yongji<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhiwei<sup>2</sup>, AN Ning<sup>2</sup>, GAO Yang<sup>2</sup>

(1. School of Material Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;  
2. Beijing Beiye Functional Materials Corporation, Beijing 100192, China)

**[ABSTRACT]** In this paper, the cold work hardening characteristics, static recrystallization characteristics and the effect of heat treatment on the hardness and microstructure of GH141 nickel-based deformation superalloy had been studied. The results show that the solution temperature of GH141 alloy must be above 1060°C. The cooling speed has a significant effect on the hardness, and the effect of water-cooling softening is obviously better than air cooling, which shows that precipitation hardening covers the softening effect of heat treatment during cooling. It needs to be heated above 1050°C for  $\gamma'$  large-scale dissolution. The recrystallization of the cold deformed alloy can be completed at 1050°C, and the grain coarsening will occur above 1120°C.

**Keywords:** Superalloy GH141; Recrystallization; Processing characteristics; Cold working; Hot treatment

(责编 大漠)

(上接第56页)

## Effect of Crystal Orientation on High Cycle Fatigue Properties of Fourth Generation Single Crystal Superalloy DD15

SHI Zhenxue, LIU Shizhong, ZHAO Jinqian, WANG Xiaoguang, LI Jiarong

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

**[ABSTRACT]** The fourth generation single crystal superalloy DD15 with [001], [011] and [111] orientations was cast using seed method in the directionally solidified furnace. The high cycle fatigue properties of the alloy with different orientation were investigated at 800°C. The microstructure, fracture surface and fatigue ruptured microstructure of the alloy with different orientation were studied. The results show that the alloy with different orientation has obviously various as-cast dendritic structure and heat treated  $\gamma'$  phase on the section perpendicular to the solidified direction. The high cycle fatigue properties of alloy at 800°C has anisotropy and fatigue limit of the alloy decreases with the sequence of [111], [001] and [011] orientation. The high cycle fatigue of alloy with different orientation breaks along the plane. The angle between the fracture plane and the stress axis of the sample is different and decreases with the sequence of [011], [001] and [111] orientation. The high cycle fatigue fracture characteristics are basically the same. Fatigue source zone, crack propagation zone and transient fracture zone can be seen on the fracture surface of the alloy with different orientation. The fatigue crack initiated at or near the surface and propagated along  $\{111\}$  planes. The river pattern and fatigue striation can be seen in the crack propagation zone. The cleavage step and tear ridge can be seen in the transient fracture zone. The fracture mechanism is all quasi-cleavage fracture. The  $\gamma'$  phase morphology still maintained cubic after fracture because of lower test temperature.

**Keywords:** Single crystal superalloy; DD15; High cycle fatigue; Crystal orientation; Anisotropy

(责编 一元)