

第二代单晶高温合金 DD6 的横向拉伸性能

Transverse Tensile Properties of Second Generation

Single Crystal Superalloy DD6

赵金乾, 李嘉荣, 刘世忠, 韩 梅

(北京航空材料研究院 先进高温结构材料国防科技重点实验室, 北京 100095)

ZHAO Jin-qian, LI Jia-rong, LIU Shi-zhong, HAN Mei

(National Key Laboratory of Advanced High Temperature Structural Materials, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 在 800~950 的条件下, 研究了第二代单晶高温合金 DD6 的横向拉伸性能。结果表明: 随着温度的升高, 横向拉伸强度下降, 横向伸长率先增加然后明显下降; 与合金的纵向性能即[001]取向性能相比, 在较高温度下横向伸长率明显小于纵向伸长率; 随着温度的升高, 沿枝晶界面易于形成显微裂纹, 导致塑性降低。

关键词: 单晶高温合金; DD6; 枝晶界; 横向拉伸性能

中图分类号: TG132.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2007)12-0012-03

Abstract: At 800-950 °C, the transverse tensile properties of the second generation single crystal superalloy DD6 were investigated. The results show that the transverse ultimate tensile strength decreases with temperature increasing. The transverse elongation increases first, then markedly decreases with temperatures increasing, and at higher temperatures the transverse elongation is clearly less than the longitudinal elongation. It is considered that the microcracks are apt to form on the dendritic interfaces with temperature increasing, as leads to plasticity decreasing

Key words: single crystal superalloy; DD6; dendritic interface; transverse tensile property

单晶高温合金已广泛用于航空发动机涡轮叶片^[1, 2]。在实际单晶高温合金叶片的凝固过程中, 界面的生长方式为枝晶生长。凝固过程中凝固界面散热基本上是一维单向散热, 这决定了固相枝晶的一次枝晶发达。合金的组织是由带有不发达二次枝晶的一次枝晶干沿热流方向(纵向)平行排列组成。枝晶界面两侧晶体的取向一致, 不具有结构突变的界面性质, 但是由于凝固过程为非平衡相变, 枝晶本身具有成分偏析, 即使经过高温固溶热处理也不能完全消除这种成分偏析^[3], 因此在单晶高温合金中存在着沿纵向平行排列的一次枝晶界面。由于组织决定性能, 所以单晶高温合金组织的方向性决定了单晶高温合金的拉伸性能也具有方向性。

本工作对第二代单晶高温合金 DD6 的中等温度范围内的拉伸性能及断口断裂特征进行了研究, 发现横向拉伸性能不同于[001]取向。

1 实验方法

采用第二代单晶高温合金 DD6 制备平板状[001]

取向单晶试样, 试板尺寸为 15mm × 80mm × 120mm。按照第二代单晶高温合金 DD6 的热处理制度, 1290 °C/1h + 1300 °C/2h + 1315 °C/4h, AC + 1120 °C/4h, AC + 870 °C/32h, AC, 对试板进行热处理。采用线切割的方式沿横向将试板切割成条状, 并将条状试样机械加工成圆形标准拉伸实验试样。切割后条状试样采用 X 射线背反射劳厄方法测量取向, 晶体的[001]取向与试板的纵向偏离小于 10°。在同一试板上截取实验试样, 这保证了试样的组织状态具有较好的一致性。分别在 800, 850, 900, 950 °C 条件下, 进行了拉伸实验。

在 KMnO₄ + NaOH 水溶液中对断裂后的试样煮沸 20min, 然后在草酸溶液中煮沸 5min^[4], 以去除断口表面的氧化腐蚀产物。采用扫描电镜对断口及断裂后的试样纵向进行了观察。

2 实验结果

按照 HB5195 进行了拉伸实验, 实验结果如表 1 所示。拉伸性能随温度变化的关系如图 1 所示。可以

看出,在实验条件下,随着温度的升高,合金拉伸强度降低。在 850 的条件下,合金具有最大的伸长率。实验温度从 800 升高到 850 ,伸长率上升;温度高于 850 ,随着温度的升高伸长率下降。温度高于 850 时拉伸强度下降的速率也增大,拉伸性能明显下降。总的来说,合金的拉伸变形伸长率较高,均大于 10% ,说明合金的拉伸塑性较好。

表 1 不同温度的 DD6 横向拉伸性能

Table 1 Transverse tensile properties of DD6 at different temperatures

Temperature/	σ_b / MPa	δ / %
800	1154	22.6
850	1121	26.0
900	1010	20.6
950	905	13.7

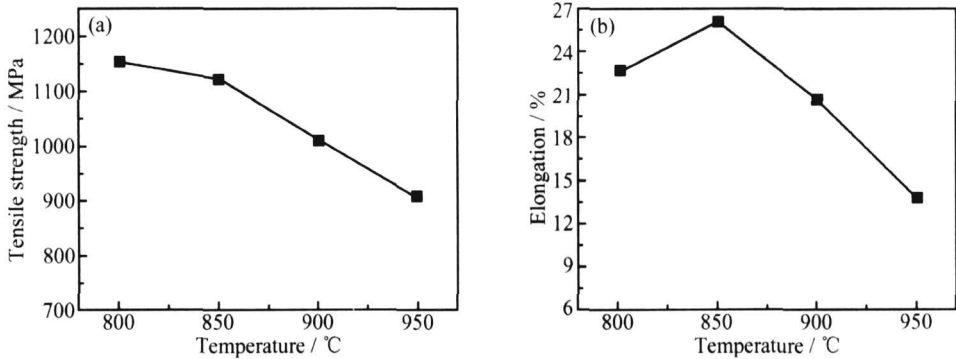


图 1 DD6 横向拉伸性能与温度关系 (a) 强度; (b) 伸长率

Fig 1 Relations between the transverse tensile properties of DD6 and temperatures (a) strength; (b) elongation

断口的宏观形貌及断裂试样纵向形貌如图 2 所示,可以看出在实验温度下断口均有小平面存在。随着实验温度的升高,断口的表面积有增加的趋势。断口附近试样没有明显的缩颈。在 800 和 850 的条件下,断口平面与试样拉伸轴线夹角约为 40°,整个断口几乎由一个平面占据。在 900 和 950 的条件下,试样的断口存在有多个小平面。在 950 的条件下,试样断口上出现了沿凝固方向分布的枝晶形貌特征。

3 分析与讨论

3.1 断裂性质

在较大放大倍数下,可以看到拉伸断裂后的试样断口平面部分存在河流花样,如图 3 所示。断口的断裂机制为解理断裂。经过腐蚀处理后,断口附近具有明显的滑移带存在,断口平面平行于滑移面,如图 4 所示。解理面与滑移面为同一晶面,即{ 111 } 晶面。在某

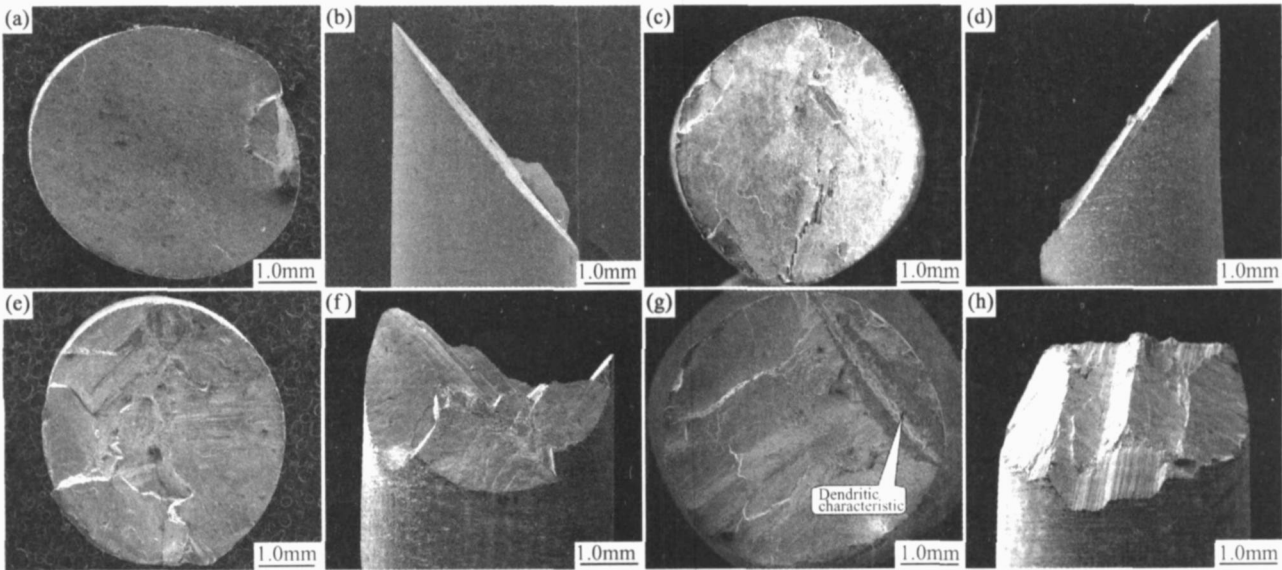


图 2 DD6 横向拉伸断口形貌

(a), (b) 800 ; (c), (d) 850 ; (e), (f) 900 ; (g), (h) 950

Fig 2 Transverse tensile fractographs of DD6 (a), (b) 800 ; (c), (d) 850 ; (e), (f) 900 ; (g), (h) 950

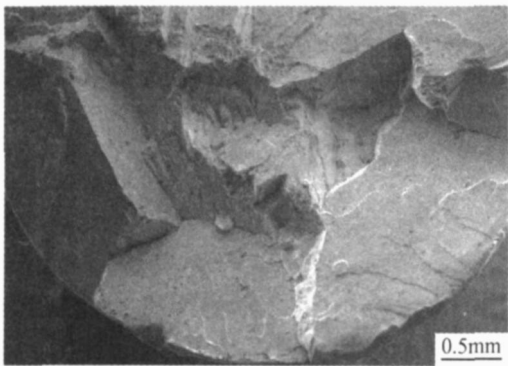


图 3 850 断口解理的河流花样

Fig 3 River pattern on the cleavage fracture surface at 850

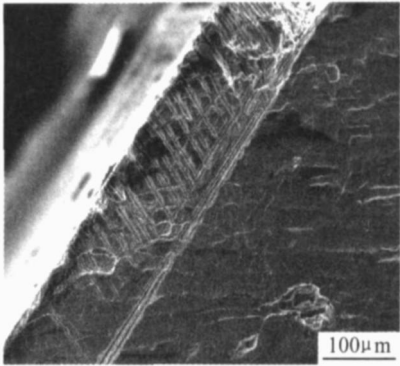


图 4 850 断口附近的滑移带

Fig 4 Slip band near fracture at 850

些单晶高温合金的拉伸断裂断口中,观察到了{111}解理断裂面的存在^[5],疲劳断口中沿{111}晶面断裂^[6]。解理断裂表明了断口的断裂机制,并不能说明合金拉伸过程中塑性变形量的大小。对于一些合金,在一定条件下,经过大量的塑性变形也能出现解理断裂^[7]。

图5为950 时较大放大倍数下的断口局部形

貌,可以发现类似枝晶的表面上存在有凹坑。单晶高温合金中的这种凹坑为显微缩松。显微缩松应该位于枝晶的最后凝固部位。断口上显微缩松的存在,表明沿凝固方向分布的类似枝晶的形貌为枝晶界面。这说明发生了枝晶界面的断裂。在950 的条件下,枝晶界面的强度已经明显降低。从较高温度下首先出现枝晶界面断裂来看,可以认为枝晶界面易于产生应变的集中,诱发显微裂纹的形成。由于合金

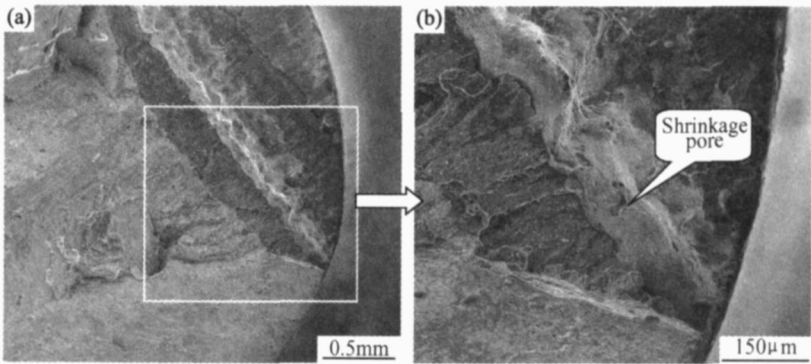


图 5 较大放大倍数下 950 拉伸断口形貌 (a) 断口形貌; (b) 图 a 的局部放大

Fig 5 Fractographs at higher magnification at 950 (a) fractograph; (b) enlargement of fig a

承受局部塑性变形的能力较小,显微裂纹尖端的应力集中通过塑性变形释放的能力较差,导致合金横向塑性下降。

3 2 断裂塑性

随着温度的升高,晶粒和晶界的强度下降,而且晶界强度下降的速度较大,在某个温度之上,晶界的强度要小于晶粒的强度。在单晶高温合金中,可以不考虑晶界的存在,然而单晶高温合金凝固过程中界面的生长方式为枝晶生长,决定了合金中存在有枝晶界面。可以推断枝晶界面的强度在较高温度的条件下,将小于枝晶干本身的强度,枝晶界面的存在使得合金在垂直于界面的方向上的塑性降低。这表现为:在温度高于850 后,DD6 合金横向拉伸的伸长率随着温度的

升高而下降;850 时伸长率为26%,900 时伸长率为20.6%,950 时伸长率下降至13.7%。然而,[001]取向(纵向)DD6 合金的伸长率基本不变,850 时伸长率为27%,980 时伸长率为29%^[8]。

4 结论

- (1) 在800,850,900,950 的条件下,随着温度的升高,第二代单晶高温合金DD6 的横向拉伸强度下降。
- (2) 在850 以上时,合金横向伸长率明显小于[001]取向。

(下转第20页)

以清晰地观察到指向裂纹源的辐射状标记。随后裂纹进入稳态扩展区,此区域断口相当平坦,扩展平面垂直于加载方向,无论哪一种晶体取向的试样断口特征均是如此。在高倍显微镜下(500 倍)能清晰地看到疲劳条带(图 9c),并伴随有二次裂纹的产生。由于受到高温环境的影响,断口表面覆盖有一层严重的氧化皮,疲劳条带呈现树枝状结晶形貌。图 9d 展示了疲劳裂纹向快速扩展区的过渡,在裂纹快速扩展区疲劳特征不是很明显,断口由许多光滑的小平面解理台阶组成。宏观上观测裂纹快速扩展区(图 9a 右侧)呈现人字形标志,中间夹有一个小的纤维区,显然是由于高速撕裂造成。

3 结论

(1) 镍基单晶合金的裂纹扩展行为受晶体取向、应力条件与环境温度之间复杂的相互作用所支配。温度较低时单向拉伸试样裂纹扩展路径与加载方向成斜角,呈现 Z 字形外观;而温度较高时蠕变及疲劳试样裂纹扩展路径与加载方向垂直。

(2) 温度对单晶体各向异性程度及断裂形式影响较大;随着温度升高,单晶体不同晶体取向的各向异性形状减弱,断裂形式逐渐由脆性断裂转变为韧性断裂。

(3) 不同滑移系的开动是导致裂纹扩展的主要因素。蠕变试样断口存在大量韧窝,其断裂机理为孔洞聚集。疲劳裂纹启裂于试样切口表面,裂纹尖端的交变滑移导致裂纹扩展,最终的过载区显示为解理断裂。蠕变条件裂纹扩展更敏感于疲劳损伤。

参考文献

- [1] 尹泽勇,岳珠峰,杨治国,等. 各向异性单晶合金结构强度与寿命[M]. 北京:国防工业出版社, 2002. 12.
- [2] 何玉怀, 苏彬. 中国航空发动机涡轮叶片用材料力学性能状况分析[J]. 航空发动机, 2005, 3(12): 51– 54.
- [3] 张卫方, 李运菊, 赵爱国, 等. 定向凝固合金叶片裂纹与断裂综合分析[J]. 航空材料学报, 2003, 23(增刊): 127– 131.
- [4] YUE Z F, LU Z Z, ZHENG C Q. Fracture behavior of a nickel-base single crystal superalloy as predicted by the strain energy density criterion [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 1997, 26: 89– 104.
- [5] RICE J R. Tensile crack tip fields in elastic-ideally plastic crystals [J]. Mechanics of Materials, 1987, 6 (11): 317– 335.
- [6] FLOURIOT S, FOREST S, CAILLETAUD G, et al. Strain localization at the crack tip in single crystal CT specimens under monotonous loading: 3D finite element analyses and application to nickel-base superalloys [J]. International Journal of Fracture, 2003, 124(12): 43– 77.
- [7] MARCHAL N, FLOURIOT S, FOREST S, et al. Crack tip

stress-strain fields in single crystal nickel-base superalloys at high temperature under cyclic loadings [J]. Computational Materials Science, 2006, 37 (13): 42– 50.

- [8] 单智伟,杨继红,刘路. 单晶 Ni_3Al 裂纹扩展的 TEM 原位观察[J]. 金属学报, 2000, 36(3): 262– 267.
- [9] 刘丽荣,金涛,赵乃仁,等. 一种 Ni 基单晶高温合金 [001] 方向的持久性能与断裂行为[J]. 金属学报, 2000, 36(3): 262– 267.
- [10] 王开国,李嘉荣,刘世忠,等. DD6 单晶高温合金 760 的蠕变性能研究 [J]. 材料工程, 2004, (5): 7– 11.

基金项目: 国家自然科学基金(10472094, 50375124); 国家航空基金(03B53003, 02C53011); 西北工业大学研究生创业种子基金(Z200620)

收稿日期: 2007-03-30; 修订日期: 2007-06-22

作者简介: 温志勋(1982–), 男, 博士生, 主要从事镍基单晶材料力学性能研究, 联系地址: 西北工业大学 410 信箱(710072)。

(上接第 14 页)

(3) 在 950 横向拉伸条件下, 裂纹易于沿着枝晶界面产生, 塑性明显降低。

参考文献

- [1] KOBAYASHI T, KOIZUMI Y, HARADA H, et al. Development of a third generation DS superalloy[A]. POLLOCK T M, KISSINGER R D, BOWMAN R R, et al. Superalloy 2000[C]. Warrendale, PA: TMS, 2000. 323– 328.
- [2] FU CHS G E. Advanced Materials and Processes for Gas Turbines [M]. Warrendale, PA: TMS, 2003. 91– 100.
- [3] ALEXANDER EPISHIN, THOMAS LINK, UDO BRCKER, et al. Effects of segregation in nickel-based superalloys: dendritic stress[A]. KENNETH A, GREEN, TRESA M POLLOCK, et al. Superalloys 2004[C]. Warrendale, PA: TMS, 2004. 537– 543.
- [4] 苏锡九, 陈英. 金属材料断口分析及图谱[M]. 北京: 科学出版社, 1991. 22– 24.
- [5] EBRAHIMI F, YANEVICH J, DELUCA D P. Deformation and fracture of the PWA 1472 superalloy single crystal[J]. Acta Mater, 2000, 48: 469– 479.
- [6] SENGUPTA A. Kinetics of gamma prime precipitation and fatigue crack growth behavior of a single crystal nickel-based superalloy[D]. USA Dissertation: Wayne State University, 1994.
- [7] 曾祥华. 宏观断口学及显微断口学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990. 5– 20.
- [8] 李嘉荣, 刘世忠. 第二代单晶高温合金 DD6 的拉伸性能[J]. 钢铁研究学报, 2003, 15 (7): 272– 275.

收稿日期: 2007-04-20; 修订日期: 2007-06-29

作者简介: 赵金乾(1973–), 男, 博士生, 从事单晶高温合金材料研究, 联系地址: 北京 81 信箱 1 分箱(100095)。