

小角度晶界对单晶高温合金 DD6 拉伸性能的影响

Effects of Low Angle Grain Boundaries on Tensile Properties of Single Crystal Superalloy DD6

赵金乾, 李嘉荣, 刘世忠, 袁海龙

(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, YUAN Hai-long

(National Key Laboratory of Advanced High Temperature Structural

Materials, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 采用两个籽晶制备了第二代单晶高温合金 DD6 小角度晶界试样, 在 800, 850, 900, 950 °C 的条件下, 进行了拉伸实验研究。结果表明: 小角度晶界对合金伸长率有显著影响; 在 850 °C, 小角度晶界试样具有最大的伸长率; 高于 850 °C, 随着温度的升高小角度晶界试样伸长率具有明显下降倾向。小角度晶界对合金抗拉强度的影响较小; 除角度大于约 9° 的小角度晶界外, 相同实验温度条件下小角度晶界试样的抗拉强度大致相当。随着温度的升高和晶界角度的增大, 小角度晶界强度降低而成为相对较为薄弱部位, 从而导致拉伸性能的降低。

关键词: 单晶高温合金; DD6; 小角度晶界; 拉伸性能

中图分类号: TG132.3 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2008)08-0073-04

Abstract: At 800, 850, 900 °C and 950 °C, effects of Low Angle grain Boundaries (LABs) on the tensile properties of the second generation single crystal superalloy DD6 were investigated, and the test specimens were prepared by using two seeds. LABs had more influence on the elongation of the alloy. At 850 °C, the elongation of the alloy with LABs was the highest, and the decreasing tendency of elongation was obvious with temperature increasing at the temperature higher than 850 °C. The effect of LABs on the strength was less, and the strengths were comparative with each other at the condition of the same temperature except the specimen with the misorientation higher than about 9°. Decrease in tensile property results from that the strength of LABs decreased with temperature or misorientation increasing so that the LABs became a weak link.

Key words: single crystal superalloy; DD6; low angle grain boundary; tensile property

目前大量采用单晶高温合金研制与生产先进航空发动机涡轮工作叶片。由于叶片形状和凝固过程的复杂性等原因, 在单晶叶片中难以完全避免小角度晶界缺陷^[1,2]。在实际的应用中, 单晶高温合金叶片允许存在小于一定角度的小角度晶界^[2]。晶界具有较高的自由能, 并且晶界成分及原子结合强度与晶内存在差别^[3]。一般情况下, 随着温度的升高, 晶界强度下降速率大于晶内强度下降速率; 从而导致在较高温度下, 具有小角度晶界的单晶高温合金拉伸强度相对较低。所以, 研究小角度晶界对单晶高温合金拉伸性能的影响具有重要意义。

1 实验方案

利用两个籽晶制备小角度晶界试板, 试板尺寸为

15 mm × 80 mm × 120 mm。试板中的小角度晶界通过两个籽晶控制, 本实验中籽晶的[001]取向与试板的纵向相平行, 利用籽晶绕着[001]相对旋转一定角度获得小角度晶界, 如图 1 所示。为了便于研究将晶界角度 θ 按 $0^\circ \leq \theta < 3^\circ$, $3^\circ \leq \theta < 6^\circ$, $6^\circ \leq \theta < 9^\circ$, $9^\circ \leq \theta < 12^\circ$ 进行分析讨论, 并分别依次标记为 XS, S, M, L。

浇注好的试板按照第二代单晶高温合金 DD6 的标准热处理制度进行热处理。沿横向采用线切割将试板切割成条状, 并机械加工成圆形标准拉伸实验试样。分别在 800, 850, 900, 950 °C 温度条件下, 进行了高温拉伸实验。

2 实验结果

在同一试板上截取同一晶界角度的试样, 这样保

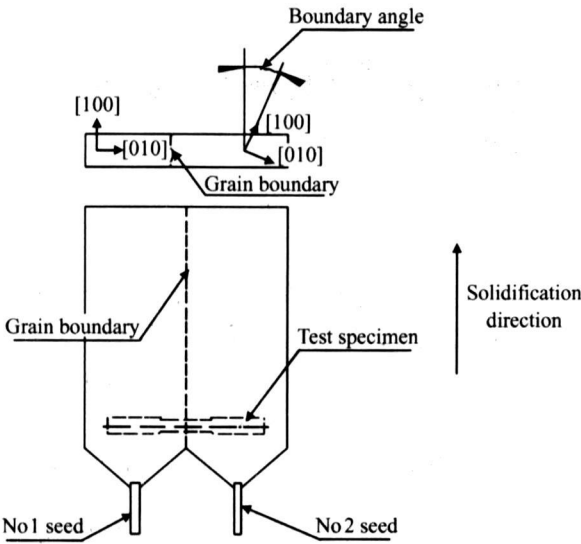


图 1 小角度晶界试样制备示意图
Fig. 1 Schematic diagram of the sample with low angle boundary

证了试样的组织状态具有一致性, 减小了由于制备试样的偶然性造成的不同试样组织间的差别所导致的实验结果分散。实验结果如表 1 所示。

图 2 为小角度晶界试样的抗拉强度和伸长率与温度的关系曲线。小角度晶界对抗拉强度的影响较小, 除 L 试样外, 小角度晶界的抗拉强度大致相当, 尤其在 800℃ 的温度条件下抗拉强度没有降低; 在 850, 900, 950℃ 的温度条件下, XS 的抗拉强稍高。小角度晶界对伸长率具有明显的影响, 在 850℃ 的温度条件下, 小角度晶界具有最大的伸长率, 高于 850℃ 小角度晶界的伸长率明显下降。

3 分析与讨论

在 800℃ 温度条件下, 小角度晶界的拉伸断口形貌, 如图 3 所示。可以看出, 断裂基本沿晶体学平面,

表 1 具有小角度晶界的 DD6 合金拉伸性能
Table 1 Tensile properties of DD6 with low angle boundaries

Specimen	Temperature/ °C							
	800		850		900		950	
	σ_b / MPa	δ_5 / %	σ_b / MPa	δ_5 / %	σ_b / MPa	δ_5 / %	σ_b / MPa	δ_5 / %
XS	1154	22.6	1121	26	1010	20.6	904	17.5
S	1176	15.7	1066	18.8	919	14.0	851	14.8
M	1223	15.5	1013	17.4	937	8.2	849	6.0
L	1194	16.8	1031	13.6	829	1.4	689	1.5

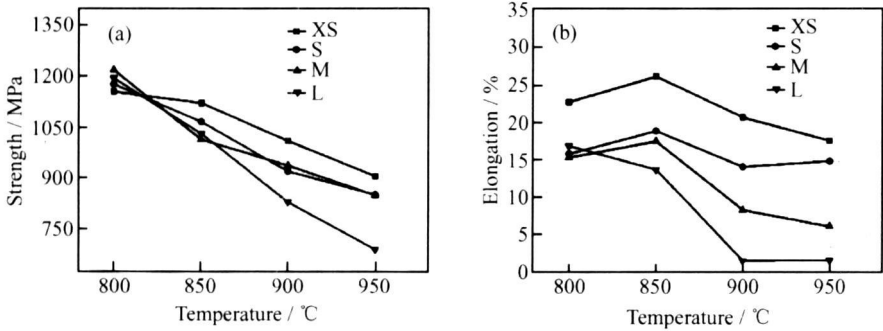


图 2 具有小角度晶界 DD6 合金的拉伸性能与温度关系曲线 (a) 强度; (b) 伸长率
Fig. 2 Relation between temperature and tensile properties of DD6 with LABs (a) strength; (b) elongation

类似于解理断裂。不同角度的晶界试样断口均未发现沿晶断裂特征, 这表明在 800℃ 温度条件下小角度晶界强度与合金强度基本一致, 相对于枝晶本身小角度晶界强度没有明显降低。然而, 晶界角度较大的 S, M, L 试样的伸长率低于晶界角度很小的 XS 晶界试样, 说明尽管断口没有显示小角度晶界对断裂产生明

显影响, 然而小角度晶界已经对拉伸变形过程产生明显作用。

通常, 在较低温度下, 晶界的结合强度大于晶粒本身的强度。当温度高于等强温度时, 晶界的强度低于晶粒的强度^[4]。在单晶高温合金叶片中, 由于整个零件由一个晶粒组成, 通常的晶粒概念已不适用。单晶

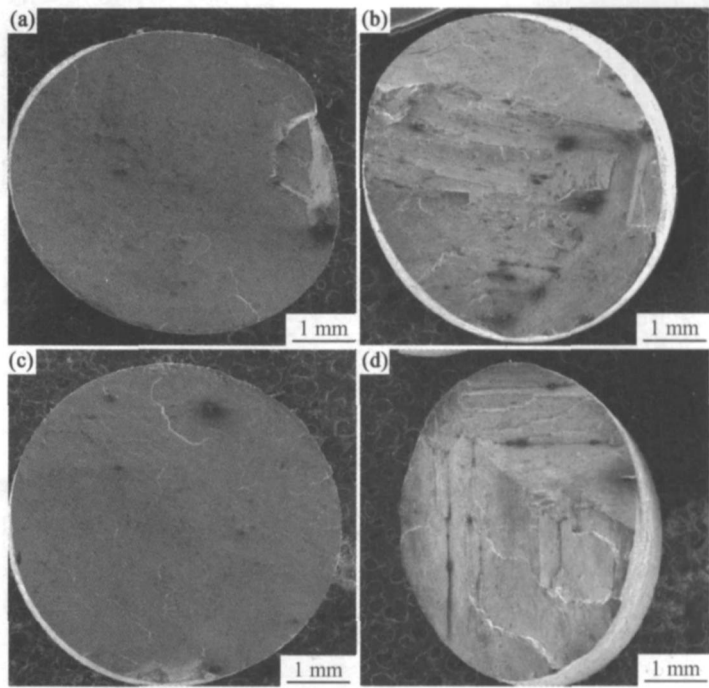


图 3 800℃温度条件下小角度晶界试样断口形貌 (a) XS; (b) S; (c) M; (d) L
Fig. 3 Photographs of the fracture surface of the specimens with LABs at 800℃
(a) XS; (b) S; (c) M; (d) L

高温合金中存在的小角度晶界应该属于通常所指的亚晶界^[5]。尽管如此,单晶合金中的小角度晶界作为具有取向差别部分之间的界面仍旧属于晶界。当温度高于等强温度时,小角度晶界成为薄弱部位,引起应变的集中,这将导致合金性能的明显降低。

在 950℃的条件下,XS 晶界的强度与塑性已经明显降低,从断口上能够观察到枝晶形貌即沿晶界开裂的特征,见图 4 所示。从枝晶界面上可以看到不规则的凹坑存在,这明显是显微缩松。枝晶间为枝晶最后凝固部位,通常情况下凝固过程中产生显微缩松^[6-8]。断口表面显微缩松的存在说明了沿界开裂的存在。随

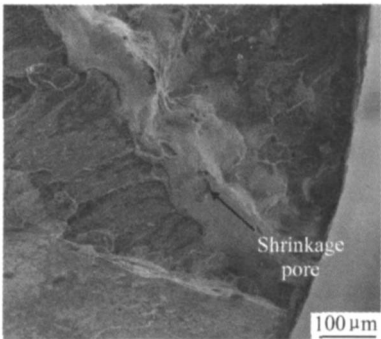


图 4 950℃ 温度条件下 XS 晶界试样拉伸断口的沿晶特征
Fig. 4 Photograph of the intergranular fracture surface of the SX specimen at 950℃

着晶界角度的增大,沿晶断裂的特征明显增加,如图 5 所示。

单晶高温合金在拉伸过程中,形变强化的程度较低,这应该是小角度晶界试样抗拉强度大致相当的缘故。图 6 为 XS 晶界试样 950℃的应力/应变曲线局部图。在拉伸实验过程中,产生明显的屈服后停止曲线的记录,因而所观察到的曲线只是拉伸过程中的一部分。曲线表明:在塑性变形过程中,随着塑性应变的增加,强度的增加量较小。因此,塑性较大的 S 晶界抗拉强度与塑性较小的 M 晶界的抗拉强度之间差别并不十分明显。

4 结论

- (1) 在 800, 850, 900, 950℃的温度条件下,当晶界角度小于约 9°时,小角度晶界对 DD6 合金抗拉强度的影响较小,不同晶界角度的小角度晶界的抗拉强度大致相当。
- (2) 除晶界角度大于约 9°的以外,在 850℃的温度条件下,小角度晶界试样具有最大的伸长率。在 850~ 950℃的温度范围内,随着温度的升高,小角度晶界试样的伸长率具有降低的趋势;在相同的温度下,随着晶界角度的增加,小角度晶界的伸长率明显减小。

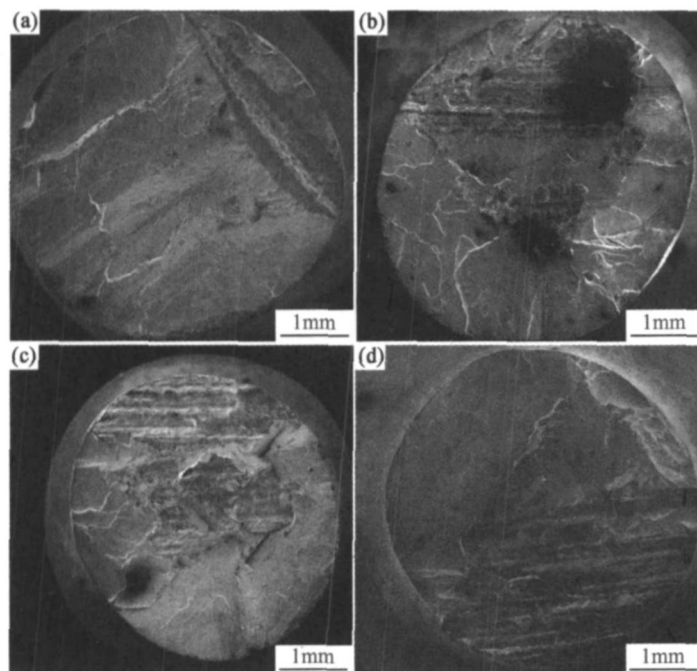


图 5 950℃条件下小角度晶界试样断口形貌 (a) XS; (b) S; (c) M; (d) L

Fig. 5 Photographs of the fracture surface of the specimens with LABs at 950℃

(a) XS; (b) S; (c) M; (d) L

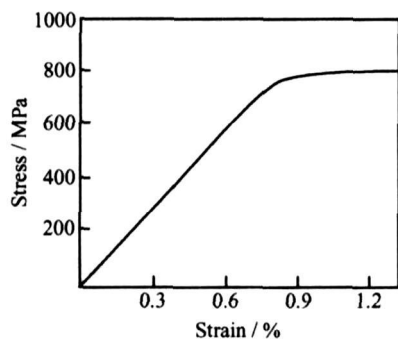


图 6 XS 晶界试样 950℃应力/应变局部曲线

Fig. 6 Partial curve between the stress and strain of the specimen with XS at 950℃

参考文献

- [1] POLLOCK T M, MURPHY W H, GOLDMAN E H. Grain defect formation during directional solidification of nickel base single crystals [A]. ANTOLOICH S D, STUSRUD R W, MACKAY R A, et al. Superalloys 1992 [C]. Warrendale, PA: TMS, 1992. 125- 134.
- [2] KONTER M, KATSE, HOFMANN N. A novel casting process for single crystal gas turbine components [A]. POLLOCK T M, KISSINGER R D, BOWMAN R R, et al. Superalloys 2000[C]. Warrendale, PA: TMS, 2000. 189- 200.

- [3] DONALD J SIEGEL, HAMILTON J C. Computational study of carbon segregation and diffusion within a nickel grain boundary [J]. Acta Materialia, 2005, 53: 87- 96.
- [4] 葛庭燧, 冯端. 金属物理学 [M]. 第三卷, 北京: 科学出版社, 1999.
- [5] BRUCKNER U, EPISHIN A, LINK T. The influence of the dendritic structure on the γ/γ' -lattice misfit in the single-crystal nickel-base superalloy CMSX-4 [J]. Materials Science and Engineering A, 1998, 247: 23- 31.
- [6] LIU L R, JIN T, ZHAO N R, et al. Microstructural evolution of a single crystal nickel-base superalloy during thermal exposure [J]. Materials Letters, 2003, 57: 4540- 4546.
- [7] CHEN Q Z, KONG Y H, JONES C N. Porosity reduction by minor additions in RR2086 superalloy [J]. Scripta Materialia, 2004, 51: 155- 160.
- [8] GOLDSCHMIDT D, PAUL U, SAHM. Porosity clusters and recrystallization in single-crystal components [A]. ANTOLOICH S D, STUSRUD R W, MACKAY R A, et al. Superalloys 1992 [C]. Warrendale, PA: TMS, 1992. 155- 164.

收稿日期: 2008-01-14; 修订日期: 2008-05-05

作者简介: 赵金乾(1973—), 男, 博士, 从事单晶高温合金研究, 联系地址: 北京市 81 信箱 1 分箱(100095)。E-mail: zhao_j_q@126.com