

# 第二代单晶高温合金 DD6 长期时效后的拉伸性能

Tensile Properties of Second Generation Single Crystal Superalloy

DD6 After Long Term Aging at High Temperature

金海鹏, 李嘉荣

(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)

JIN Hai-peng, LI Jia-rong

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

**摘要:** 研究了第二代单晶高温合金 DD6 长期时效后的拉伸性能。结果表明: 980℃ 长期时效后, [001] 取向 DD6 合金 760℃ 条件下保持了良好的高温拉伸性能; 时效 1000h, 抗拉强度仍然大于 1000MPa, 屈服强度接近 900MPa;  $\gamma'$  相的变化对 DD6 合金 760℃ 条件下的拉伸性能没有明显影响。

**关键词:** 单晶高温合金; DD6; 长期时效; 拉伸性能

中图分类号: TG132.3<sup>+</sup>2; TG113.25 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2007)03-0022-02

**Abstract:** The investigations of tensile properties of the second generation single crystal superalloy DD6 after long term aging at elevated temperature were presented. The results indicate that DD6 alloy with [001] orientation has excellent tensile properties at 760℃ after longterm aging at 980℃. Tensile strength exceeds 1000MPa and yield strength is near 900MPa after aging for 1000 hours. The effects of grown  $\gamma'$  phases on tensile properties of DD6 at 760℃ are not obvious.

**Key words:** single crystal superalloy; DD6; long term aging; tensile property

单晶高温合金及其涡轮叶片作为 20 世纪 80 年代以来航空发动机的重大关键技术之一, 已经被广泛地应用到先进航空发动机上<sup>[1,2]</sup>。DD6 合金作为国内自主研发的第二代镍基单晶高温合金, 具有高温强度高、综合性能及铸造工艺性能好等优点。与国外广泛应用的第二代单晶高温合金相比, DD6 的拉伸性能、持久性能、抗氧化性能及耐热腐蚀性能等达到甚至部分超过其水平, 且因其含铍量低而具有低成本的优势<sup>[3,4]</sup>。最近的研究表明<sup>[5]</sup>, DD6 的蠕变性能明显优于第二代单晶高温合金 CMSX-4。

单晶高温合金在实际服役过程中性能的稳定性是非常重要的。长期时效作为一种实验手段, 在一定程度上能够模拟高温合金实际服役过程中的温度状态, 可以探讨合金组织与性能变化规律, 为可靠使用合金提供依据。本工作对 [001] 取向 DD6 合金 980℃ 长期时效后的拉伸性能进行了研究。

## 1 实验材料和方法

采用纯净的原材料在真空感应熔炼炉中用高温高

真空工艺熔制母合金, 在高温梯度真空感应定向凝固炉中, 采用螺旋选晶法制备 [001] 取向单晶试棒。用 X 射线劳厄背散射方法测定单晶试棒的结晶取向, 单晶合金试棒 [001] 结晶取向与主应力轴方向偏离不大于 10°, 然后对试棒进行热处理, 标准热处理制度为:

1290℃ × 1h + 1300℃ × 2h + 1315℃ × 4h, A. C. + 1120℃ × 4h, A. C. + 870℃ × 32h, A. C.

使用高温时效热处理炉在 980℃ 条件下分别进行 100, 200, 300, 400, 600, 800, 1000h 的时效热处理。将单晶试棒按要求机械加工成力学性能试样, 在 760℃ 条件下测试 DD6 合金的拉伸性能。

## 2 实验结果及讨论

表 1 列出标准热处理条件下 [001] 取向 DD6 合金 760℃ 的拉伸性能, 表 2 列出标准热处理条件下 980℃ 长期时效后 [001] 取向 DD6 合金 760℃ 的拉伸性能。

图 1 示出 980℃ 长期时效后 DD6 合金的抗拉强度和屈服强度随时效时间的变化图, 图 2 示出伸长率随时效时间的变化图。

表 1 DD6 合金标准热处理条件下 760℃ 拉伸性能

Table 1 Tensile properties of DD6 alloy in standard heat treatment at 760℃

Temperatur e/℃	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	$\delta_5$ /%	$\psi$ /%
760	1239.5	1007	8.5	9.45

表 2 DD6 合金 980℃ 长期时效后 760℃ 拉伸性能

Table 2 Tensile properties of DD6 alloy at 760℃ after long term aging at 980℃

Aging tim e/h	$\sigma_b$ /MPa	$\sigma_{p0.2}$ /MPa	$\delta_5$ /%	$\psi$ /%
100	1207	984	13.9	13.6
200	1262	986	14.7	15.4
300	1140	953	14.8	17.2
400	1214	963	11.5	13.3
600	1213	958	9.8	11.2
800	1078	898	9.8	14.0
1000	1044	893	11.0	16.0

Note: Measured data in the table are means of two specimens.

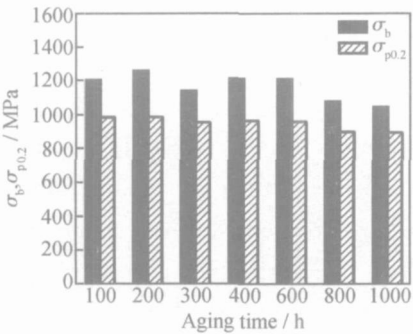


图 1 980℃ 长期时效对 DD6 合金 760℃ 抗拉强度和屈服强度的影响

Fig. 1 Effects of long term aging at 980℃ on ultimate tensile strength and yield strength at 760℃ of DD6 alloy

由图 1 可以看出: [001] 取向 DD6 合金 980℃ 长期时效后, 760℃ 抗拉强度  $\sigma_b$  在长期时效过程中比较稳定; 对比标准热处理的 DD6 合金 760℃ 拉伸性能, 高温长期时效对 DD6 合金的抗拉强度  $\sigma_b$  的影响较小; 时效 800h 和时效 1000h, 抗拉强度  $\sigma_b$  有一定程度的下降; 时效 1000h, 抗拉强度  $\sigma_b$  值仍然大于 1000MPa。980℃ 长期时效过程中, 屈服强度  $\sigma_{p0.2}$  有良好的稳定性, 时效时间对屈服强度  $\sigma_{p0.2}$  影响较小; 时效 1000h, 屈服强度  $\sigma_{p0.2}$  仍接近 900MPa。

由图 2 可以看出: [001] 取向 DD6 合金 980℃ 长期时效 100~ 300h, 伸长率基本稳定; 时效 300~ 800h, 伸长率逐渐下降; 长期时效 1000h 后的伸长率仍然超过 10%。

材料的组织决定着材料的性能。高温合金的拉伸性能主要受合金的成分和  $\gamma'$  相尺寸控制<sup>[6]</sup>。对于

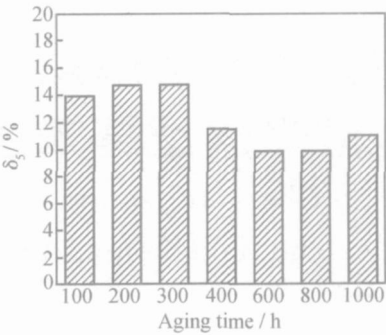


图 2 980℃ 长期时效对 DD6 合金 760℃ 伸长率的影响  
Fig. 2 Effects of long term aging at 980℃ on elongation at 760℃ of DD6 alloy

DD6 单晶合金, 消除了晶界这一高温下的薄弱环节, 少含甚至不含晶界强化元素, 并且合金中含有较多的 W, Mo, Ta, Re 等难熔元素, 显著提高了材料的高温热强性和塑性。[001] 取向 DD6 合金 980℃ 长期时效后的拉伸断裂(001) 面的显微组织如图 3 所示。由图可以看出: 随着时效时间的延长, 强化相  $\gamma'$  逐渐长大, 但立方化程度没有明显改变。长大粗化的  $\gamma'$  相对合金的强化作用没有明显的削弱, 使合金在长期时效后拉伸性能保持了较高的水平。

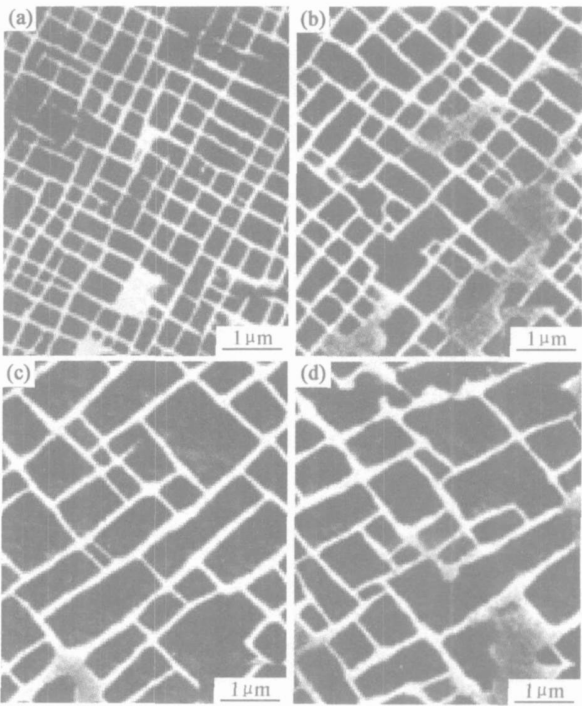


图 3 980℃ 长期时效后 DD6 合金 760℃ 拉伸断裂试样显微组织  
(a) 标准热处理; (b) 200h 时效; (c) 600h 时效; (d) 1000h 时效  
Fig. 3 Micrographs of the tensile rupture specimens of DD6 alloy at 760℃ after long term aging at 980℃  
(a) standard heat treatment; (b) aged for 200h; (c) aged for 600h; (d) aged for 1000h

(下转第 52 页)

集, 有大量的位错、孔洞等缺陷, 且晶界两侧的晶粒取向不同, 都有利于阻碍位错从一个晶粒向另一个晶粒运动, 从而提高合金的室温强度; 高温下晶界上的原子扩散比晶内剧烈得多, 从而表现出晶界的强度明显低于晶粒的强度, 因此晶界成了高温断裂的策源地。这就充分解释了该合金断口形貌的变化: 较低温度下断裂是穿过晶粒内部(穿晶断裂), 形成纤维絮状物和典型的韧窝特征; 在高温下则是沿晶界断裂(晶间断裂)为主, 冰糖状沿晶断裂形貌逐渐明显。合金由穿晶断裂机制向沿晶断裂机制转变的温度点在 300℃附近。

### 3 结论

(1) 在高温拉伸条件下, Al-Mg-Sc 超塑合金从 250℃开始表现出超塑性, 在 250~500℃区间内均具有一定的超塑性。

(2) 根据 Al-Mg-Sc 系合金热处理强化特点, Al-Mg-Sc 超塑合金在超塑设备允许的前提下尽可能选择较低的成形温度, 从而保障超塑成形件的使用性能。在 300~400℃区间内超塑成形时设备载荷较低, 成形后制件使用性能较好, 工程化应用可选择使用。

(3) Al-Mg-Sc 超塑合金高温拉伸时, 断裂机制由穿晶断裂向沿晶断裂转变的温度点在 300℃附近。这说明在此温度以下晶粒强度低于晶界强度, 在此温度以上晶粒强度高于晶界强度。

#### 参考文献

[1] 丁桦, 张凯峰. 材料超塑性研究的现状与发展[J]. 中国有色金属

学报, 2004, (7): 1059-1067.

- [2] 柏振海, 罗兵辉. 钪在铝及铝合金中的作用[J]. 材料导报, 2003, 17(7): 6-9.
- [3] NIEH T G, HSIUNG L M, WADSWORTH J. High strain rate superplasticity in a continuously recrystallized Al-6% Mg-0.3% Sc alloy[J]. Acta mater, 1998, 46(8): 2789-2800.
- [4] SHOGO KOMURA, PATRICK B. BERBON. High strain rate superplasticity in an Al-Mg alloy containing scandium[J]. Scripta Materialia, 1998, 38(12): 1851-1856.
- [5] 潘青林. Al-Mg-Sc 和 Al-Mg-Se-Zr 合金的性能与组织结构研究[D]. 长沙: 中南大学, 1996.
- [6] LEE S, UTSUNOMIYA A. Influence of scandium and zirconium on grain stability and superplastic ductilities in ultrafine-grained Al-Mg alloys[J]. Acta materialia, 2002, 50: 553-564.
- [7] BAED H, GHOSH A K. Cavity formation and early growth in a superplastic Al-Mg alloy[J]. Acta materialia, 2002, 50: 511-523.
- [8] DOUGHERTY L M, ROBERSON I M, VETRANO J S. Direct observation of the behavior of grain boundaries during continuous dynamic recrystallization in an Al-4Mg-0.3Sc alloy[J]. Acta Materialia, 2003, 51: 4367-4378.
- [9] DAVYDOV V G, ROSTOVA T D. Scientific principles of making an alloying addition of scandium to aluminum alloys[J]. Materials Science and Engineering, 2000, A280: 30-36.
- [10] LWAMURA S, NAKAYAMA M. Coherency between Al<sub>3</sub>Sc precipitate and the matrix in Al alloys containing Sc[J]. Materials Science Forum, 2002, 396-402: 1151-1156.

收稿日期: 2005-05-25; 修订日期: 2006-05-20

作者简介: 谢优华(1977-), 男, 硕士, 现主要从事高性能铝合金及工程应用研究. 联系地址: 北京市 81 信箱 2 分箱(100095)。

(上接第 23 页)

### 3 结论

(1) 980℃长期时效的 DD6 合金 760℃拉伸性能保持良好。

(2) 980℃长期时效的 DD6 合金 760℃的拉伸强度和屈服强度均比较稳定; 时效 1000h 抗拉强度仍然大于 1000MPa, 屈服强度接近 900MPa。

(3) 980℃长期时效 1000h,  $\gamma'$  发生长大, 但长大的  $\gamma'$  相对 DD6 合金 760℃条件下的拉伸性能没有明显影响。

#### 参考文献

- [1] 陈荣章. 单晶高温合金的发展现状[J]. 材料工程, 1995, (8): 3-12.
- [2] ERICKSON G L. The development and application of CMSX-10

[A]. KISSINGER R D, DEYE D J, ANTON D L, et al. Superalloys 1996[C]. Pennsylvania: Warrendale, 1996. 35-44.

- [3] 李嘉荣, 钟振纲, 唐定中, 等. 低成本第二代单晶高温合金 DD6[J]. 金属学报, 1999, (增刊 2): S266-S269.
- [4] LI J R, ZHONG Z G, TANG D Z, et al. A low cost second generation single crystal superalloy DD6[A]. POLLOCK T M, KISSINGER R D, BOWMAN R R, et al. Superalloys 2000[C]. Pennsylvania: Warrendale, 2000. 777-783.
- [5] 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.
- [6] 西姆斯 C T, 斯特劳夫 N S, 黑格尔 W C. 高温合金[M]. 赵杰译. 大连: 大连理工大学出版社, 1992.

收稿日期: 2006-04-04; 修订日期: 2006-08-30

作者简介: 金海鹏(1980-), 男, 博士研究生, 主要从事单晶高温合金研究. 联系地址: 北京市 81 信箱 1 分箱(100095)。