

文章编号:1000-8055(2012)02-0255-05

高温下 DD6 单晶气冷叶片模拟试样 拉伸性能试验

何爱杰, 李世峰, 罗秋生, 曾 军, 马 健, 吴长波

(中国航空工业集团公司 中国燃气涡轮研究院 涡轮技术研究室, 成都 610500)

摘 要: 通过选晶法制备 DD6 单晶薄壁圆管模拟试样, 对 850 °C 和 980 °C 两种温度下 [001] 晶体取向含与不含气膜孔的薄壁试管进行拉伸性能试验研究. 结果表明: 在 850 °C 条件下, [001] 取向含气膜孔的拉伸性能比 [001] 取向不含气膜孔的拉伸性能降低 10.5%; 在 980 °C 条件下, [001] 取向含气膜孔的拉伸性能与 [001] 取向不含气膜孔的拉伸性能水平相当. 这表明温度越高, 气膜孔对薄壁件拉伸性能的影响越不显著; 但在 980 °C 条件下, [001] 取向通气状态的拉伸强度比不通气状态下的拉伸强度提高 16%. 同时, 发现圆管表面状态及通气状态是影响单晶薄壁试样高温性能的重要因素, 特别是通气状态的存在显著提高了其高温力学性能.

关 键 词: DD6 单晶; 薄壁圆管; 气膜孔; 通气状态; 拉伸性能

中图分类号: V258; TG132.3

文献标志码: A

Experimental investigation on tension behavior of DD6 single crystal thin-walled cylindrical specimen under high temperature

HE Ai-jie, LI Shi-feng, LUO Qiu-sheng, ZENG Jun, MA Jian, WU Chang-bo

(Research Centre of Turbine Technology, China Gas Turbine Establishment,
Aviation Industry Corporation of China, Chengdu 610500, China)

Abstract: The thin-walled simulative specimens of DD6 single crystal superalloy were prepared with selected-crystal method. The tensile properties of thin-walled tube with [001] crystallographic orientations were investigated at 850 °C and 980 °C, and one half of the specimens were plates with film cooling holes. The results show that the [001] orientation tensile properties with film cooling holes are reduced by 10.5% than without film cooling holes at 850 °C, and the [001] orientation tensile properties with film cooling holes correspond with those without film cooling holes at 980 °C. It indicates that when the temperature is higher, the effect to tensile properties is more significant. However, the [001] orientation tensile properties with airing condition are increased by 16% than those without airing condition at 980 °C. Therefore, the surface state and airing condition play a main role to affect the properties of single crystal thin-walled tube. Especially, it is the airing condition that the mechanical properties have obviously improved.

Key words: DD6 single crystal; thin-walled tube; film cooling holes;
airing condition; tensile properties

随着航空发动机性能的不断提高, 涡轮的工作温度也要求不断提高, 这势必促进世界各国争

先恐后研制高效气冷单晶叶片. 单晶气冷叶片是采用单晶高温合金, 基于定向凝固技术发展出的

收稿日期: 2011-04-13; 修订日期: 2011-08-06

作者简介: 何爱杰 (1964—), 男, 四川成都人, 研究员, 硕士, 主要从事航空发动机总体结构设计研究.

通讯作者: 李世峰 (1982—), 男, 甘肃会宁人, 工程师, 博士生, 主要从事航空发动机涡轮结构设计与制造技术.

一种沿叶身方向上完全消除晶界的薄壁件,是航空发动机的核心部件^[1-2]. 目前,DD6 单晶气冷叶片已广泛地应用于航空发动机. DD6 单晶合金是我国自主研制成功的第二代镍基单晶高温合金,其性能水平,特别是承高温能力,是一种航空发动机发展的关键,在一定意义上,也是国家航空工业发展水平的标志^[3-5]. 因此,DD6 单晶高温合金成为目前高推质比、高功质比航空发动机涡轮工作叶片优先考虑选用的材料.

对 DD6 单晶合金而言,研究人员长期致力于对其恒温状态下的力学性能、本构关系的研究. 到目前为止,国内对 DD6 单晶高温材料力学行为的研究大都集中在试棒试验水平,除此之外,研究人员曾采用 30CrMnSi 合金,研究温度梯度下薄壁圆管试样的拉伸行为^[6-8],而对温度梯度下薄壁试管的力学行为研究较少. 对于诸如冷却单晶涡轮叶片,在冷却气膜孔附近存在着较大的温度梯度

效应,不仅仅要考虑有无气膜孔,而且要考虑通气状态对其性能的影响^[9-13]. 基于以上认识,为提高航空发动机单晶涡轮叶片工作温度,根据实际受载、工作环境等情况,通过含气膜孔和不含气膜孔的 DD6 单晶薄壁圆管试样高温拉伸试验,研究高温下单晶气冷叶片叶身表面状态与通气状态对其拉伸性能的影响具有重要意义.

1 试验材料与试验方法

1.1 试验材料

试验采用我国第二代镍基单晶高温合金 DD6,在高温度梯度真空定向凝固炉中,通过螺旋法制取 $[001]$ 取向的单晶薄壁圆管试样,样件均采用 X 光衍射法进行晶向检查,其生长方向与 $[001]$ 取向的偏差控制在 10° 以内. DD6 试样毛坯由北京航空材料研究院提供,其化学成分见表 1.

表 1 DD6 单晶高温合金的化学成分(单位:%)
Table 1 Chemical component of DD6 single crystal superalloy (unit:%)

Cr	Co	Mo	W	Al	Ta	Re	Hf
3.8~4.8	8.5~9.0	1.5~2.5	7.0~9.0	5.2~6.2	6.0~8.5	1.6~2.4	≤0.20
C	Ti	Mn	Si	Fe	Nb	P,S	Ni
≤0.04	≤0.10	≤0.20	≤0.20	≤0.30	≤1.0	≤0.001	余量

1.2 试样制备及试验条件

试验采用光滑薄壁圆管试样,经标准制度的热处理后,按照国标尺寸加工成标准圆管拉伸件,并在试验前对试件试验段用特殊工艺消除表面铸瘤或划痕. 试验件分为两类:一类为不含气膜孔的薄壁圆管试样;另一类为含气膜孔的薄壁圆管试样. 含与不含气膜孔的薄壁圆管试样详细几何尺寸示于图 1~图 3.

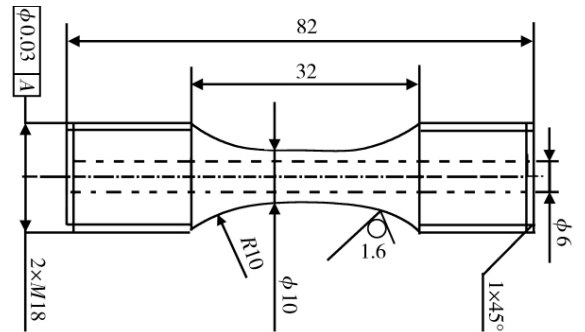


图 1 不含气膜孔薄壁圆管试样尺寸(单位:mm)
Fig. 1 Size of thin-walled specimen without film cooling holes (unit:mm)

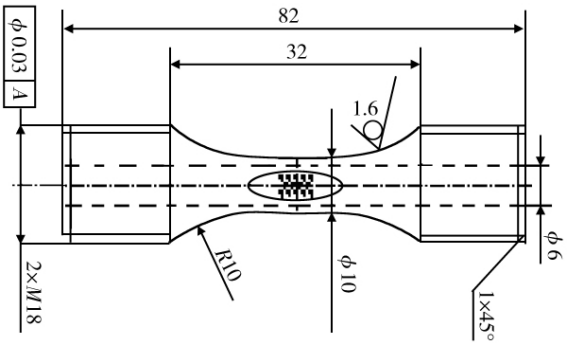


图 2 含气膜孔薄壁圆管试样尺寸(单位:mm)
Fig. 2 Size of thin-walled specimen with film cooling holes (unit:mm)

采用自带电加热炉和保温的 CSS-44100 万能拉伸试验机,分别在 850°C 和 980°C 温度条件下进行拉伸试验,试验环境为空气,在试件的上下端捆绑热电偶控制温度的波动,具体如图 4 所示. 试验前加热试样到达试验温度后保温 30 min,然后开始试验,试验过程中控制温度的精度在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$,控制应变幅范围为 $0.14\%\sim 0.18\%$,加载速率为 $0.105\%/s$.

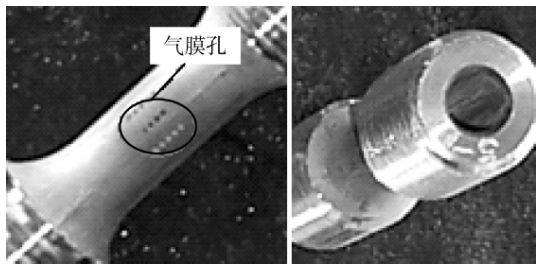


图 3 含气膜孔薄壁圆管试样
Fig. 3 Thin-walled simulative specimen with film cooling holes

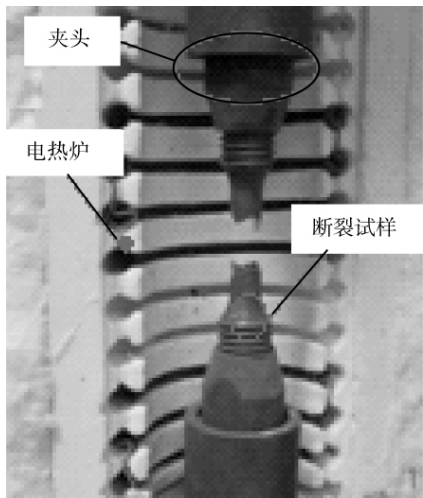


图 4 电加热炉
Fig. 4 Furnace with electrical heated

2 试验结果和讨论

2.1 不含气膜孔薄壁圆管试样热拉伸性能分析

在 850℃ 和 980℃ 温度下,[001]取向 DD6 单晶不含气膜孔薄壁圆管的极限强度如表 1 所示.对比可看出,850℃ 时[001]取向 DD6 单晶不含气膜孔薄壁圆管极限强度达到最高值 1 094.5 MPa,而在 980℃ 时极限强度大大降低,这说明 DD6 单晶高温合金性能有明显的温度效应.

表 2 [001]取向单晶薄壁圆管试样单向拉伸试验结果
Table 2 Result of [001] single crystal thin-walled specimen after tensile testing

序号	气膜孔	温度/℃	内径/mm	极限强度/MPa
1	无	850	6	1 094.5
2	无	980	6	750.6
3	是	850	6	980.7
4	是	980	6	743.5

[001]取向 DD6 单晶不含气膜孔薄壁圆管在 850℃ 和 980℃ 时的拉伸曲线如图 5、图 6 所示,从图中可以看出,所得真实拉伸曲线可以分为两类.第一类为动态再结晶型:即应力达到峰值应力后应力下降至稳定态值保持不变,如图 5 这一现象较为明显,峰值应力的出现是动态再结晶的结果.另一类为动态回复型:当加工硬化和动态回复基本达到平衡状态,应力的上升部分基本消失应力趋向恒定值,如图 6 所示的真应力-位移曲线.

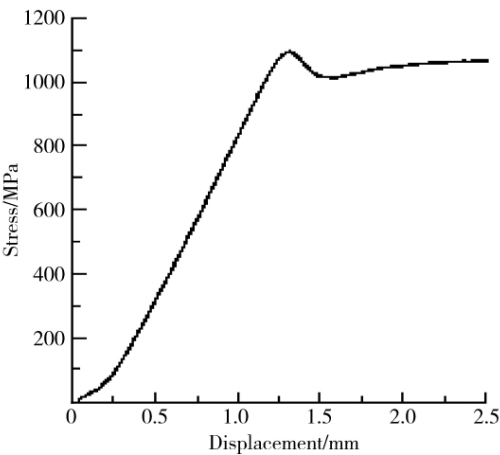


图 5 不含气膜孔薄壁圆管 850℃ 的拉伸曲线
Fig. 5 Tensile curve without film cooling holes at 850℃

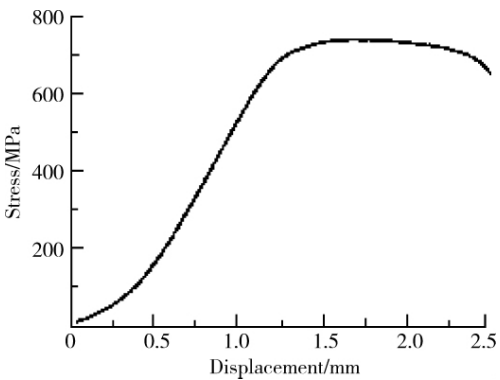


图 6 不含气膜孔薄壁圆管 980℃ 的拉伸曲线
Fig. 6 Tensile curve without film cooling holes at 980℃

发生上述现象的原因是加工硬化效应和动态回复及动态再结晶软化机制综合作用的结果.变形初始阶段,一方面位错增殖带来的位错密度急剧增加,结果使应力值随着变形量的增加而迅速增加,即发生明显的加工硬化现象;当变形量达到某一临界应变时,试样内发生动态再结晶,位错密度开始减小,应力上升的速率减小并逐渐达到峰

值,变形过程中的动态再结晶所引起的软化作用逐渐起到决定性作用,当加工硬化过程与动态再结晶的软化过程达到动态平衡时,应力值降低至某一稳态值.另一方面在变形过程中位错通过交滑移运动,使异号位错相互抵消,当位错重新排列发展到一定程度时,形成了清晰的亚晶界,这种结构上的变化使得材料软化,从而使加工硬化速度逐渐减弱,反映在真实拉伸曲线上,就是随着变形量的增加,曲线变化的斜率越来越小.

2.2 含气膜孔薄壁圆管试样热拉伸性能分析

为提高航空发动机单晶涡轮叶片工作温度,根据实际工况条件,研究气膜冷却孔对叶片材料性能的影响具有重要意义.为此本组试验中采用[001]取向 DD6 单晶含气膜孔薄壁圆管进行 850℃ 和 980℃ 温度下拉伸试验,其极限强度如表 1 所示.试验中发现[001]取向试样 850℃ 下极限强度较低,与不含气膜孔试样试验结果相比,在 850℃ 温度下的极限强度降低了 10.5%,在 980℃ 温度下的极限强度降低了 0.9%,与同温度下不含气膜孔薄壁件的性能基本相同.由此看来,在热变形过程中,温度越低,气膜孔对薄壁件性能的影响越显著;相反,温度越高,气膜孔对薄壁件性能的影响越不显著,这更能说明气膜冷却孔对航空发动机工作叶片的重要性.

图 7、图 8 给出了[001]晶体取向的含气膜孔薄壁圆管试样在 850℃ 和 980℃ 时的拉伸曲线.从图中可以看出,[001]取向含气膜孔试样不同温度下的应力差别较显著,但与不含气膜孔试样一致的是,850℃ 温度下的极限强度要高于 980℃ 温度下的极限强度.与不含气膜孔薄壁圆管试样试验结果相比,在 850℃ 时,带气膜孔、内径为 6 mm

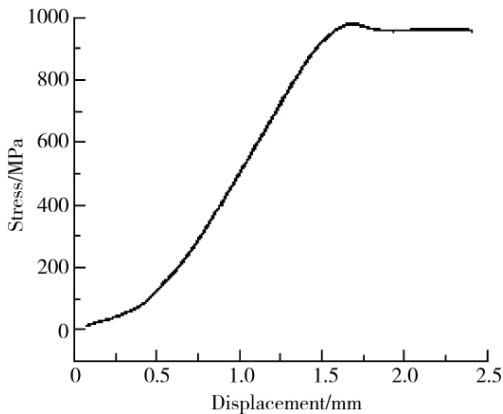


图 7 含气膜孔薄壁圆管 850℃ 的拉伸曲线
Fig. 7 Tensile curve with film cooling holes at 850℃

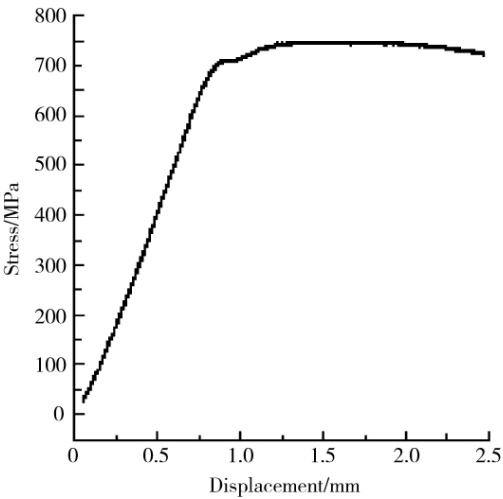


图 8 含气膜孔薄壁圆管 980℃ 的拉伸曲线
Fig. 8 Tensile curve with film cooling holes at 980℃

的试样的极限强度比无气膜孔、内径为 6 mm 的试样的极限强度要低 114 MPa,相差较大;在 980℃ 时,两者的极限强度相当.由此看来,气膜孔的存在显著降低了试样中温态的力学性能,使应力达到峰值的所对应的应变增量增大,而对高温态的力学性能的影响不大,但应力达到峰值的所对应的应变增量减小了,说明高温条件下动态回复及动态再结晶软化机制起主导作用的结果.

2.3 通气状态对薄壁圆管拉伸性能的影响

采用位移加载,以速率 1 mm/min,入口冷却空气温度为 20℃,流量为 1.27 m³/h,圆管外壁温度为恒定 980℃,对内径为 7 mm 不含气膜孔的薄壁圆管进行单向拉伸试验,表 3 给出了通气与不通气状态下单晶薄壁圆管试样拉伸试验结果,其相应的拉伸曲线如图 9 所示.

表 3 [001]取向单晶薄壁圆管试样单向拉伸试验结果
Table 3 Result of [001] single crystal thin-walled specimen after tensile testing

序号	通气状态	温度/℃	空气流量/(m ³ /h)	内径/mm	极限强度/MPa
1	是	980	1.27	7	872.15
2	否	980	无	7	731.60

从图 9 中可看出,980℃ 温度下[001]取向通气薄壁圆管的极限强度比不通气状态的极限强度提高 16%.这是因为在通气状态下,冷却叶片内壁和外壁之间沿着壁厚方向存在一个较大的温度梯度.正是由于这个温度梯度,引起了薄壁圆管内外壁间形成显明的应力梯度,进而造成温度梯度

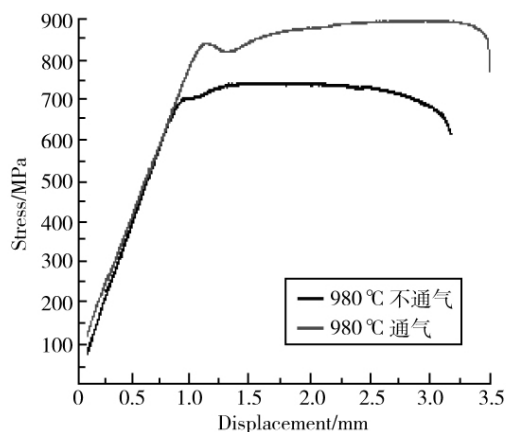


图9 通气与不通气状态下薄壁圆管试样的拉伸曲线

Fig. 9 Tensile curve of thin-walled specimen under the condition of airing and unairing

下的平均应力远大于恒定最高温度下的应力,最终导致在通气状态下薄壁圆管的极限强度大大提高.再比较表2和表3可以看出,同条件下内径为6 mm的薄壁管的极限强度为750 MPa,内径为7 mm的薄壁管的极限强度为731 MPa,说明温度梯度下的平均应力略大于恒定最高温度下的应力.由此更说明在温度梯度下,冷却空气的存在明显提高了材料的抗拉性能.

3 结 论

1) 试验发现在850℃条件下,[001]取向含气膜孔的拉伸性能比[001]取向不含气膜孔的拉伸性能低10.5%;但在980℃条件下,[001]取向含气膜孔的拉伸性能与[001]取向不含气膜孔的拉伸性能水平相当.这表明温度越高,气膜孔对薄壁件拉伸性能的影响越不显著.

2) 试验发现980℃条件下,[001]取向DD6单晶薄壁圆管通气状态的拉伸强度比不通气状态下的拉伸强度高16%;表明冷却空气的存在,使薄壁试样在温度梯度下的性能明显得到提高.

3) 试样表面状态及通气状态是影响单晶薄壁圆管高温性能的重要因素,特别是通气状态的存在显著提高了其高温力学性能.

参考文献:

- [1] Cetel A D, Duhl D N. Second generation nickel base single crystal super alloy[R]. TMS Paper 88-GT-244, 1988.
- [2] Gell M, Duhl D N, Giamei A F. The development of single crystal superalloy turbine blade[R]. Champion, PA, United States; Superalloys, 1980; 205-214.
- [3] Harris K, Erickson G L, Sikkenga S L, et al. Development

of the rhenium containing superalloys CMSX24 and CM186LC for single crystal blade and directionally solidified vane applications in advanced turbine engines [R]. ASME Paper 92-GT-306, 1992.

- [4] 史振学, 李嘉荣, 刘世忠, 等. DD6 单晶高温合金横向拉伸性能及其断裂行为[J]. 航空材料学报, 2009, 29(2): 101-104.
SHI Zhenxue, LI Jiarong, LIU Shizhong, et al. Transverse tensile properties and fracture behaviour of DD6 single crystal superalloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2009, 29(2): 101-104. (in Chinese)
- [5] LI J R, Zhong Z G, Tang D Z, et al. A low cost second generation single crystal superalloy DD6[C]// Pollock T M, Kissinger R D, Bowman R R, et al. Superalloys. Warrendale; TMS, 2000; 777-783.
- [6] Shah Q H, Homma H. Fracture criterion of materials subjected to temperature gradient [J]. Int. J. Pressure Vessels and Piping, 1995, 62(10): 59-68.
- [7] Hou N X, Wen Z X, Yue Z F. Tensile and fatigue behavior of thin-walled cylindrical specimens under tempera gradient condition[J]. Journal of Materials Science, 2007, 43(6): 1933-1938.
- [8] Liu L R, Jin T, Zhao N R, et al. Formation of carbides and their effects on the stress rupture of a Ni-base single crystal superalloy [J]. Materials Science and Engineering, 2003, 36(26): 191-197.
- [9] 卿华, 江和甫, 温卫东. DD6 单晶合金循环蠕变性能研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2007, 20(3): 51-56.
QING Hua, JIANG Hefu, WEN Weidong. Study on fatigue-creep properties of DD6 Ni-base single crystal superalloy[J]. Gas Turbine Experiment Reserch, 2007 20(3): 51-56. (in Chinese)
- [10] 李嘉荣, 刘世忠, 王开国. 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.
LIA Jiarong, LIU Shizhong, WANG Kaiguo. Tensile behavior of second generation single crystal superalloy DD6 [J]. Journal of Iron and Steel Reserch, 2003, 15(7): 272-275. (in Chinese)
- [11] Lall C, Chin S, Pope D P. The orientation and temperature dependence of Yield stress of Ni₃(Al, Nb) single crystals [J]. Metallurgical and Materials Transaction A, 1988, 10(9): 1323-1332.
- [12] 赵金乾, 李嘉荣, 刘世忠, 等. 第二代单晶高温合金 DD6 的横向拉伸性能[J]. 材料工程, 2007, 12(7): 12-14.
ZHAO Jinqian, LI Jiarong, LIU Shizhong, et al. Transverse tensile properties of second generation single crystal superalloy DD6[J]. Journal of Materials Engineering, 2007, 12(7): 12-14. (in Chinese)
- [13] 李影, 苏彬, 吴学仁. DD6 单晶高温合金的低周疲劳寿命估算[J]. 航空材料学报, 2001, 21(2): 22-25.
LI Ying, SU Bin, WU Xuerwen. Lowcycle fatigue behavior of DD6 single crystal[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2001, 21(2): 22-25. (in Chinese)