

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2019.08.009

一种新型镍基单晶高温合金拉伸性能研究

姜 华¹, 郭媛媛¹, 卢 宇¹, 陈 昊²

(1. 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;
2. 空军装备部驻北京地区第六军事代表室, 北京 100024)

摘要: 研究了一种新型镍基单晶高温合金拉伸性能及断裂模式。采用[001]取向制备拉伸性能试样,以平行于单晶[001]取向作为应力轴方向,采用扫描电镜观察断口形貌。实验结果表明,随着拉伸温度升高,合金的抗拉和屈服强度逐渐升高,并分别在 760 °C 和 850 °C 达到峰值,之后随着温度升高迅速下降。塑性随温度的变化则相反,在 760 °C 塑性指标达到最低值,随后断面收缩率急剧增加,而延伸率在 850 °C 达到峰值后迅速下降。合金的拉伸断裂模式在 980 °C 从准解理断裂转向塑韧性断裂。

关键词: 镍基单晶高温合金; 拉伸性能; 断裂模式

中图分类号: TG131

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2019)08-074-05

Tensile properties of a new nickel-based single crystal superalloy

JIANG Hua¹, GUO Yuanyuan¹, LU Yu¹, CHEN Hao²

(1. Science and Technology on Advanced High Temperature Structural Materials Laboratory, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, P. R. China; 2. The Sixth Military Representative Office of Air Force Equipment Department in Beijing, Beijing 100024, P. R. China)

Abstract: The tensile properties and fracture modes of a new nickel-based single crystal superalloy were investigated. Tensile specimens were prepared from the single-crystal with [001] orientation, whose growth direction was parallel to the loading axis in tension. The fractograph was examined by means of scanning electron microscope. The results show that the tensile and yield strength increased first and then decreased with the test temperature increasing, and they reached the peak values at 760 °C and 850 °C respectively, while the elongation and the area reduction decreased gradually from room temperature to 760 °C and then they increased rapidly at temperatures above 760 °C. At 850 °C, the elongation attained a maximum and then dropped gradually with a rise of temperature up to 960 °C. The deformation mechanism of the alloy was transformed from semi-brittleness into plasticity, which happens at 980 °C.

Keywords: nickel-based single crystal superalloy; tensile property; deformation mechanism

随着航空发动机对推重比以及服役可靠性需求的不断提升,涡轮叶片对材料的综合性能、承温能力等要求也越来越高。镍基单晶高温合金因其较高的承温能力、较高的抗拉/屈服强度、优异的抗氧化和抗腐蚀能力等,成为涡轮叶片的首选材料^[1-6]。

收稿日期: 2019-04-21

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(2184132)。

Supported by Beijing Natural Science Foundation (2184132).

通讯作者: 姜华(1986—),男,硕士,工程师,主要研究方向为铸造高温合金,(E-mail):jianghua621@126.com。

目前,国外应用最广泛的第二代镍基单晶高温合金,以 RenéN5、PWA 1484 和 CMSX-4 为主,国内具有自主知识产权的二代单晶合金仅有 DD6 等少数牌号。因此新型的各具特色的镍基单晶高温合金的研发,对扩大涡轮发动机涡轮叶片选材范围具有重要意义。

作为重要的力学性能表征方式,拉伸性能对高合金化的镍基单晶高温合金的成分有较高的敏感性^[7]。针对某一特定合金,需系统研究其拉伸性能,掌握其拉伸力学性能随温度的变化趋势,以获得其断裂模式随温度的变化规律。

笔者研究了北京航空材料研究院自主研制的一种新型第二代镍基高温合金从室温至 980 °C 范围的拉伸力学性能,对其在不同温度下的断口形貌进行了表征,并进一步分析了其断裂模式随温度的变化规律,为该合金的工程应用提供数据支撑。

1 实验材料及方法

实验选用北京航空材料研究院自主研发的一种新型镍基高温合金,其名义成分见表 1。本研究中采用高速凝固法(HRS)制备 $\phi 15 \times 170$ mm 单晶试棒,选取浇注温度 1 530 °C,抽拉速率 3 mm/min。通过腐蚀检验试棒单晶完整性,选取表面无明显条带和杂晶的试棒。采用 X 射线背散射劳厄法测定单晶取向,选择生长方向与[001]方向的偏离角度小于 10°的单晶试棒进行热处理。选取经完全热处理后,表面无明显再结晶试棒加工成标准试样,用于测定合金拉伸性能。拉伸试验温度参照 DD5、DD6 合金,选用室温、650、760、850、980 °C,分别进行测试。

选用 1% HF + 33% HNO₃ + 33% CH₃COOH + 33% H₂O(体积分数)溶液对金相样品进行腐蚀。采用 OM(型号:DM4000M,厂家:徕卡)和 SEM(型号:NANO SEM 450,厂家:FEI)进行低倍和高倍组织形貌观察。

表 1 合金的名义成分(以质量分数表示)

Table 1 Nominal compositions of a new single-crystal superalloy

									%
$w(\text{Ni})$	$w(\text{Cr})$	$w(\text{Ta})$	$w(\text{W})$	$w(\text{Co})$	$w(\text{Mo})$	$w(\text{Re})$	$w(\text{Nb})$	$w(\text{C})$	$w(\text{Hf})$
68.29	4.00	7.00	7.00	8.00	2.00	3.00	0.50	0.01	0.20

2 实验结果

2.1 拉伸力学性能

图 1 为合金在室温、650、760、850、980 °C 的拉伸性能随温度的变化趋势。从图 1(a)可以看出,随着测试温度增加,合金的屈服强度和抗拉强度均先升高再降低。室温下,屈服强度和抗拉强度分别为 946、1 005 MPa;760 °C 时,抗拉强度达到最大值 1 209 MPa;850 °C 时,屈服强度达到峰值 1 066 MPa;随着温度继续升高,980 °C 下屈服强度和抗拉强度分别降低至 696、803 MPa。延伸率和断面收缩率在 760 °C 均达到最小值,分别为 9.06%、15.2%;在 850 °C,延伸率达到峰值 30.96%;当温度高于 760 °C 时,断面收缩率随温度升高递增,见图 1(b)。

2.2 拉伸断口形貌

图 2 为合金从室温到 980 °C 下的断口形貌。可以看出,从室温到 850 °C,拉伸试样无明显缩颈,在 980 °C 下拉伸试样发生明显缩颈。图 2(a)和(b)显示,室温下合金断口呈椭圆形,由多个小平面组成,具有大量的类解理台阶,存在典型的河流状花样;760 °C 下,断口为楔形,平面上形成较大解理台阶。此外,通过对室温及 760 °C 下断口纵剖面进行观察,近断口处均无二次裂纹(图 2(e)和(f))。可见,该温度段合金断裂机制为准解理断裂。

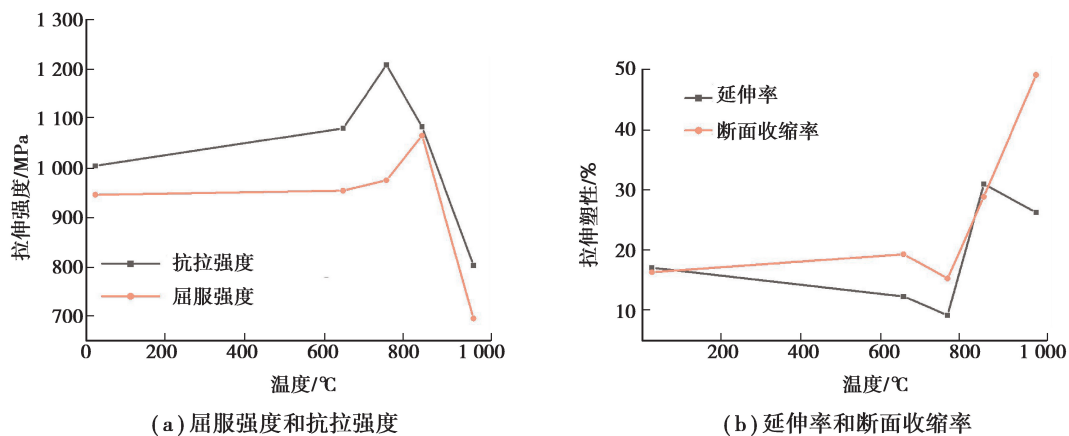


图 1 合金拉伸性能随温度变化规律

Fig. 1 Temperature-dependent tensile properties of the alloy

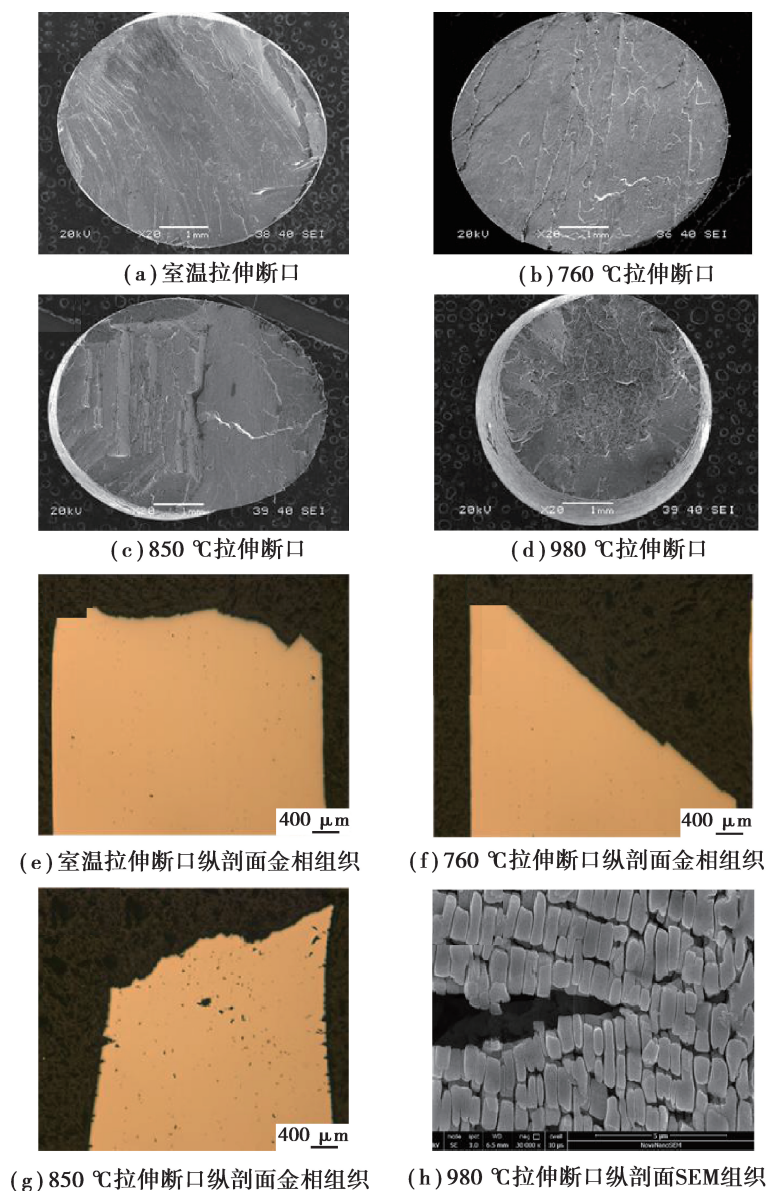


图 2 合金拉伸断口形貌

Fig. 2 Fractographs of the specimens in the tensile tests at different temperatures

图 2(c)显示 850 °C 下的拉伸断口由两部分组成,分别显示类解理台阶和韧窝、撕裂棱,表明该温度下断裂机制为韧窝-准解理复合断裂。图 2(d)显示合金在 980 °C 下断口中心区域出现韧窝形貌,在断口的边缘区域仍然存在解理平面。图 2(g)(h)也显示合金近断口处中心区域存在大量沿与应力轴垂直方向扩展的二次裂纹,二次裂纹的扩展优先通过切割 γ' 相进行。表明在该温度下,合金的断裂模式发生了从准解理断裂向塑韧性断裂的转变^[8-10]。

3 分析讨论

γ' 相是镍基高温合金主要的强化相,具有反常高温强化特征,即随着温度升高,其强度先增加后降低^[11-12]。在中温下, γ' 强度很高,而且位错切入 γ' 要消耗大量能量,从而造成中温条件下拉伸合金强度最高。

高温合金的变形机制主要为滑移,由于合金基体原子密排面上的密排方向在滑移时所需能量最小,因此镍基单晶合金的滑移系为 $\{111\}\langle 011\rangle$,包括八面体和六面体滑移系。图 3(a)中,760 °C 时试样纵剖面组织存在明显的滑移迹线,与 $[001]$ 方向夹角约为 45°,由晶体学理论可以判定断裂面为合金 γ 基体的 $\{111\}$ 滑移面。即合金在中低温下,由于热激活作用较微弱,基体中产生的位错少,不容易发生缠结,且 γ' 强度较高,位错不容易切入,将转移到相邻的另一个 $\{111\}$ 面上继续滑移,直至断裂,形成解理台阶^[13]。同时,合金变形过程中四面体和八面体系的位错相互作用启动,产生位错运动障碍,加上大量层错的出现,使得交滑移的进行困难,导致变形极度不均匀,形成局部塑性变形,促进了局部滑移并导致了滑移面减聚,使得 760 °C 下出现塑性低谷^[14-17]。

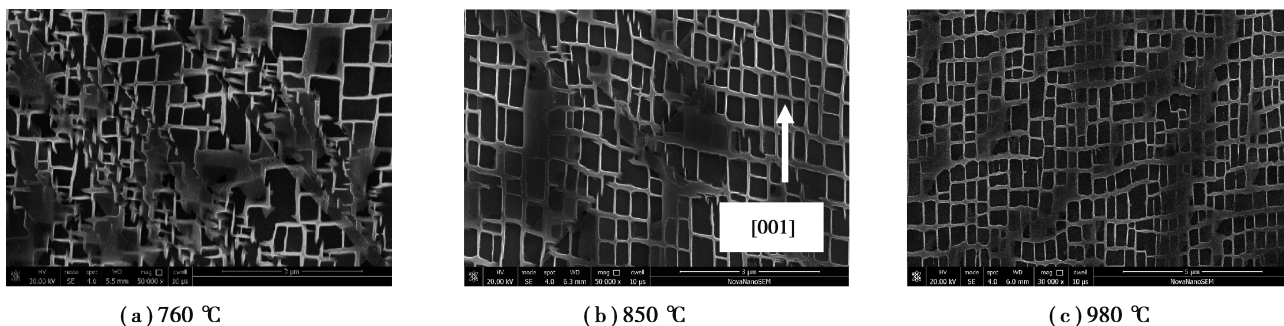


图 3 合金拉伸试样断口附近纵截面显微组织

Fig. 3 Longitudinal section microstructures of the tested alloy

随着温度升高,合金热激活作用加强,变形过程中八面体和六面体滑移系同时开动,如图 3(b)所示,在 850 °C 下,存在沿 2 个不同取向的滑移迹线,表明 2 个不同滑移系同时开动。在 980 °C 下,合金沿 $[001]$ 应力方向产生塑性变形, γ' 相则沿应力轴方向伸长(图 3(c)),由于拉伸试样局部形变滞后于整体变形,使局部变形加剧,从而产生颈缩,同时,由于高温变形中的回复速率加快,裂纹尖端形成的应力集中得到松弛,使类解理断裂倾向显著弱化,而合金呈现明显的韧窝断裂特征。

4 结 论

笔者通过对合金在室温至 980 °C 范围内的拉伸性能进行测试,研究了温度对单晶合金拉伸性能、断裂模式的影响规律,得到以下结论:

- 1) 合金屈服强度的峰值温度为 850 °C,峰值温度以上,屈服强度迅速下降,原因在于 γ' 相部分溶解,而在室温至 760 °C,屈服强度基本保持稳定。
- 2) 合金的塑性指标在 760 °C 达到最低值,宏观断口及显微组织分析表明,中温塑性低谷是由局部塑性变形集中引起的滑移面解聚所致。
- 3) 合金的拉伸断裂模式从室温到 760 °C 表现为准解理断裂,850 °C 时表现为韧窝-准解理复合断裂,随着温度升高,向塑韧性断裂转变,转变温度为 980 °C。

参考文献:

- [1] 陈德厚, 吴仲棠. 单晶涡轮叶片的发展[J]. 航空制造工程, 1990 (3): 14-16.
CHEN Dehou, WU Zhongtang. Development of single-crystal turbine blade [J]. Aviation Engineering & Maintenance, 1990 (3): 14-16. (in Chinese)
- [2] 陈荣章. 单晶涡轮叶片合金及其精铸技术的发展[J]. 航空科学技术, 1993, 4(6): 12-15.
CHEN Rongzhang. Development of single crystal turbine blade alloy and its precise casting technology[J]. Aeronautical Science and Technology, 1993, 4(6): 12-15. (in Chinese)
- [3] Pollock T M, Tin S. Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: chemistry, microstructure and properties[J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22(2): 361-374.
- [4] 梁春华, 李晓欣. 先进材料在战斗机发动机上的应用与研究趋势[J]. 航空材料学报, 2012, 32(6): 32-36.
LIANG Chunhua, LI Xiaoxin. Application and development trend of advanced materials for fighter engine[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2012, 32(6): 32-36. (in Chinese)
- [5] Zhao Y S, Liu C G, Guo Y Y, et al. Influence of minor boron on the microstructures of a second generation Ni-based single crystal superalloy[J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2018, 28(4): 483-488.
- [6] Wen Z X, Pei H Q, Yang H, et al. A combined CP theory and TCD for predicting fatigue lifetime in single-crystal superalloy plates with film cooling holes[J]. International Journal of Fatigue, 2018, 111: 243-255.
- [7] 刘丽荣, 祖国庆, 李晓宇, 等. Ru 对单晶高温合金拉伸性能的影响[J]. 材料工程, 2012, 40(6): 76-79.
LIU Lirong, ZU Guoqing, LI Xiaoyu, et al. Effect of Ru on the tensile property in single crystal superalloys[J]. Journal of Materials Engineering, 2012, 40(6): 76-79. (in Chinese)
- [8] Wen Z X, Zhang D X, Li S W, et al. Anisotropic creep damage and fracture mechanism of nickel-base single crystal superalloy under multiaxial stress[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 692: 301-312.
- [9] Liu J L, Yu J J, Jin T, et al. Influence of temperature on tensile behavior and deformation mechanism of Re-containing single crystal superalloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(7): 1518-1523.
- [10] Wang X G, Liu J L, Jin T, et al. Tensile behaviors and deformation mechanisms of a nickel-base single crystal superalloy at different temperatures[J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 598: 154-161.
- [11] 黄乾乞, 李汉康, 陈国良等. 高温合金[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
HUANG Qianqi, LI Hankang, CHEN Guoliang, et al. Superalloys [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2000. (in Chinese)
- [12] Pope D P, Ezz S S. Mechanical properties of Ni₃Al and nickel-base alloys with high volume fraction of γ [J]. International Metals Reviews, 1984, 29(1): 136-167.
- [13] 李嘉荣, 史振学, 袁海龙, 等. 单晶高温合金 DD6 拉伸性能各向异性[J]. 材料工程, 2008, 36(12): 6-10.
LI Jiarong, SHI Zhenxue, YUAN Hailong, et al. Tensile anisotropy of single crystal superalloy DD6[J]. Journal of Materials Engineering, 2008, 36(12): 6-10. (in Chinese)
- [14] He L Z, Zheng Q, Sun X F, et al. Low ductility at intermediate temperature of Ni-base superalloy M963[J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 380(1/2): 340-348.
- [15] Copley S M, Kear B H. A dynamic theory of coherent precipitation hardening with application to nickel-base superalloys[J]. Transactions of AIME, 1967 (239): 984-992.
- [16] Scheunemann-Frerker G, Gabrisch H, Feller-Kniepmeier M. Dislocation microstructure in a single-crystal nickel-based superalloy after tensile testing at 823 K in the [001] direction[J]. Philosophical Magazine A, 1992, 65(6): 1353-1368.
- [17] Jensen R R, Tien J K. Temperature and strain rate dependence of stress-strain behavior in a nickel-base superalloy[J]. Metallurgical Transactions A, 1985, 16(6): 1049-1068.

(编辑 罗 敏)