

镍基单晶合金 DD3 切口圆棒试样的蠕变响应有限元分析

Study on Creep Response of Nickel-base Single Crystal Circular Notched Specimens

于庆民, 邵小军, 岳珠峰

(西北工业大学工程力学系, 西安 710072)

YU Qing-min, SHAO Xiao-jun, YUE Zhu-feng

(Department of Engineering Mechanics,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

摘要: 针对切口圆棒试样, 利用有限元方法模拟了国产镍基单晶合金 DD3 [001] 取向的蠕变性能。计算结果表明: 切口半径对应力分布有显著的影响, 切口半径越大, 蠕变应力越大; 切口深度对蠕变性能的影响不大; 切口半径对持久寿命的影响作用非常大, 切口半径越小, 持久寿命越大。在所研究范围内, 切口对试样持久寿命的强化作用, 得到他人试验的验证。

关键词: 镍基单晶合金; 切口圆棒试样; 蠕变响应; 数值模拟

中图分类号: TG115 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2005) 02-0041-03

Abstract: Seven U-type and V-type circular notched specimens of nickel-base single crystal DD3 had been creep numerical simulated under tensile orientation [001] and 950 °C with the software MARC. These finite element models are capable of representing complex stress state. The durability life-times including circular notch and smooth specimens were investigated based on the maximum shear stress amplitude. The results show that the notch size has strong influence on stress distributions and lifetime. The resolved shear stresses increase with the increasing of notch radii. For the same net-section stress, the notched specimens have a longer lifetime than the smooth specimen. This result confirms to P. Lukas' research.

Key words: nickel-base single crystal alloy; circular notched specimen; creep response; numerical simulation

镍基单晶合金具有卓越的高温力学性能, 现在已被用作先进涡轮发动机的叶片材料。相对于传统多晶和定向合金, 镍基单晶合金表现为晶体各向异性。因没有晶界, 蠕变性能成为单晶涡轮叶片考核的主要性能^[1, 2]。由于涡轮叶片形状复杂, 要承受多轴应力、离心力、接触应力以及极大的温度梯度, 往往处于复杂的应力状态。对多轴应力部位的强度评定, 需要借助材料的切口效应。迄今为止, 针对切口试样已做了大量工作^[3-10]。Sugimoto^[4], Kakehi^[5]等分别研究了单晶切口平板试样拉伸蠕变, 得出一致的结论: 切口平板的蠕变应力与拉伸方向和平板法向的晶体取向都有关。Basoalto 等人^[6]利用切口处的复杂应力状态对单晶合金的寿命进行了预测。Lukas 等人^[7]研究了 CMSX-4 单晶光滑和切口试样不同取向的蠕变性能, 研究表明切口试样的蠕变寿命大于光滑试样, 即切口具有强化作用, 其分析采用有限元软件 ANSYS,

数值计算时没有采用晶体塑性理论。

本研究采用有限元方法对国产镍基单晶合金 DD3 切口圆棒试样 [001] 取向的蠕变响应进行了数值模拟, 一方面研究不同切口试样的蠕变应力分布, 另一方面分析切口形式对蠕变持久强度的影响。

1 有限元模型建立和网格划分

采用如图 1 所示的“U”型和“V”型切口圆棒试样, 其中: a 为切口部位截面的半径; b 为圆棒试样半径; c 为切口深度; R 为切口半径; 对于“V”型切口还有一个参量 α 。所有切口试样的参数值见表 1。

利用有限元软件 PATRAN 建立试样的三维有限元模型。图 2 为切口试样的三维有限元模型, 采用的单元类型为三维 8 节点等参元。在切口截面处施加沿 Y 向的位移约束, 圆棒截面上施加沿 X, Z 方向的位移

约束和沿 Y 向的拉伸载荷, 载荷的大小使切口截面处的应力 (名义应力) 为 100MPa。所有模型的约束条件和加载方式都是相同的。

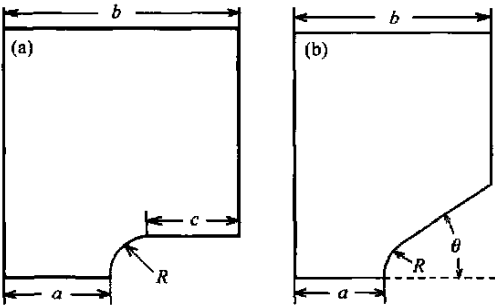


图 1 切口圆棒试样形式
(a) “U”型切口; (b) “V”型切口

Fig. 1 Notch geometry (a) “U”type; (b) “V”type

表 1 试样的几何参数

Table 1 Geometry parameters of the notched specimens

Specimen	a / mm	b / mm	c / mm	R / mm	l / (°)
Notch 1	2.5	5.5	0	3	-
Notch 2	2.5	4.5	0	2	-
Notch 3	2.5	3.5	0	1	-
Notch 4	2.5	5.5	2	1	-
Notch 5	2.5	4.5	1	1	-
Notch 6	2.5	5.5	-	2	60
Notch 7	2.5	5.5	-	1	30

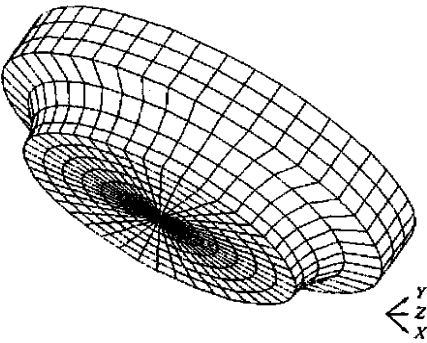


图 2 切口试样三维有限元模型

Fig. 2 3-D FE model of notched specimen

计算有限元程序为 MARC, 单晶蠕变本构关系通过用户子程序 CRPLAW 输入。程序中蠕变本构关系采用晶体滑移模型为:

$$\dot{\epsilon} = A (\sigma)^n \quad (1)$$

式中: $\dot{\epsilon}$ 为滑移系蠕变分切应变率; A 和 n 为蠕变模型参数。试验证明, [001] 取向为十二面体滑移系开动^[11], 相应的蠕变参数通过对文献 [11] 中 [001] 取向 950 的参数进行拟合得到 $A = 5.9926 \times 10^{-20}$, $n = 7.635$ 。

2 有限元分析结果和讨论

2.1 蠕变应力

图 3 为蠕变轴向应力随时间变化的曲线, 图 4 为蠕变等效应力随时间的变化曲线。切口根部的点位于 X 轴正半轴上。从图中可以看出, 加载后最大应力位于切口截面的边缘处, 最小应力在截面的中心。由于试样各部分互相制约, 短时间内应力进行重新分布, 边缘处发生松弛, 应力降低, 中心处应力增加。试样在经过应力重新分布以后, 很快进入稳定阶段, 此后应力基本不再随时间变化。比较试样 1- 3 的应力分布可以看到, 在进入稳态后, 试样 1 的等效应力最大, 试样 3 的最小, 并且试样 3 的等效应力有降低的趋势, 表明切口半径对应力分布有显著的影响, 切口半径越大, 等效应力越大, 试样 6 和试样 7 的等效应力分布也说明了这一点。试样 3- 5 的等效应力分布差别不大, 表明切口深度对蠕变性能的影响不大。图 5 为试样 1 计算结束时切口截面的应力分布图。

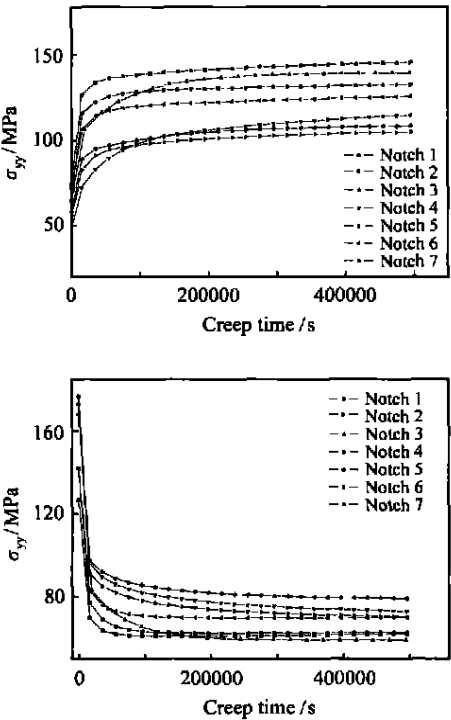


图 3 蠕变轴向应力-时间曲线

(a) 切口截面中心; (b) 切口根部

Fig. 3 Axial creep stress σ_{yy} vs creep time
(a) the center of the notch plane; (b) the notch root

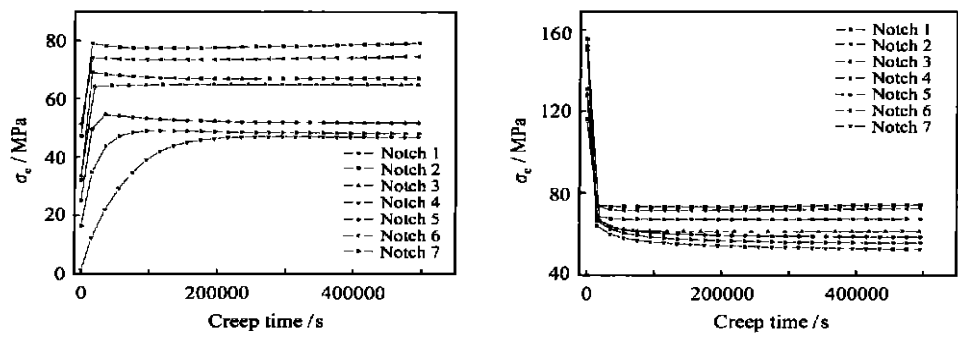


图 4 蠕变等效应力-时间曲线 (a) 切口截面中心; (b) 切口根部
Fig. 4 Equivalent creep stress σ_e vs creep time (a) the center of the notch plane; (b) the notch root

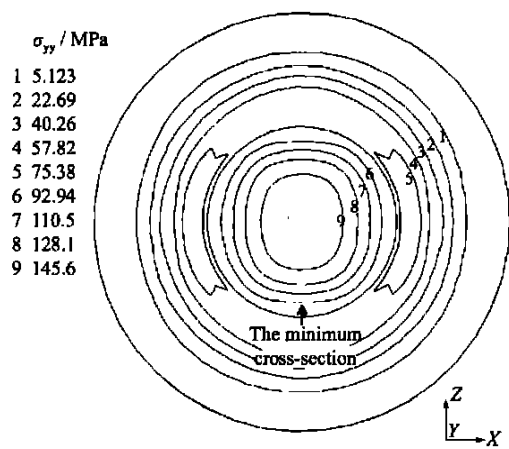


图 5 试样 1 切口截面的应力等值线图
Fig. 5 Contour lines of axis stress σ_{yy} in the notch plane for notch 1

2.2 蠕变持久寿命

试验结果表明, 对于某一取向的蠕变试样, 其持久寿命可以表示成分切应力的指数函数^[12]:

$$t_f = A^{-N} \tag{2}$$

式中, A 和 N 为系数, 该形式对任何取向都成立。根据晶体滑移理论和蠕变持久的一般规律, 常用以下蠕变持久寿命的计算公式:

$$t_c = B \frac{n_c}{\sigma_{\max}} \tag{3}$$

式中: t_c 为蠕变持久寿命, σ_{\max} 为最大分切应力; B , n_c 为系数。十二面体滑移系族的 B , n_c 与应力主轴的取向有关。本研究采用如下的经验公式计算试样的持久寿命^[13]:

$$t_f = 2.76 \times 10^7 \frac{1}{\sigma_{\text{oct2max}}^{2.147}} \tag{4}$$

其中: t_f 为持久寿命; σ_{oct2max} 为十二面体滑移系的最

大分切应力。不同切口试样的持久寿命见表 2, 其中的 σ_{oct2max} 为蠕变计算结束时的值。

从表 2 可以看出, 切口的形状对蠕变持久寿命有显著的影响, 随着切口半径 R 的增加, 持久寿命降低。试样 3 的持久寿命在所有试样中是最高的, 约为试样 1 的 2.58 倍; 试样 7 的持久寿命约为试样 6 的 1.33 倍。由此可见切口半径对持久寿命的影响作用非常大, 切口半径越小, 持久寿命越大。切口的持久寿命均大于光滑圆棒, 这与文献 [7] 的结果是一致的。

表 2 切口试样的持久寿命
Table 2 Creep rupture life of notched specimens

Specimen	Notch 1	Notch 2	Notch 3	Notch 4	Notch 5	Notch 6	Notch 7	Smooth bar
$\sigma_{\text{oct2max}} / \text{MPa}$	43.37	37.88	27.87	31.26	36.05	37.75	33.09	47.14
t_f / h	8431	11274	21787	17028	12538	11357	15070	7049

3 结论

- (1) 切口半径对应力分布有显著的影响, 切口半径越大, 等效应力越大; 切口深度对蠕变性能的影响不大。
- (2) 切口半径对持久寿命的影响作用非常大, 切口半径越小, 持久寿命越大。
- (3) 切口试样的蠕变寿命大于光滑试样, 即切口具有强化作用。

参考文献

[1] 田素贵, 周惠华, 张静华, 等. 一种单晶镍基合金的高温蠕变损伤 [J]. 金属学报, 1998, 34 (1): 57- 62.
[2] 魏朋义, 杨治国, 程晓鸣, 等. DD3 单晶高温合金拉伸蠕变各向异性 [J]. 航空材料学报, 1999, 19 (3): 8- 12.

裂纹长度。DM02, K21 合金经不同周期热循环后缺口尖端的裂纹长度示于表 4 中, 结果表明, DM02 合金的热疲劳性能明显优于 K21 合金的, 其疲劳寿命是 K21 合金的 2~5 倍。

表 3 DM02 合金及 K21 合金高温持久性能
Table 3 High temperature stress rupture properties of alloy DM02 and K21

Alloy	Temperature and stress	/h
DM02	1050 /147MPa	10.5
		9.0
	1100 /70MPa	56.7
		57.5
K21	1090 /72.56MPa	46.8
	1100 /70MPa	39.8

表 4 DM02, K21 合金热疲劳实验缺口尖端裂纹长度
Table 4 Crack length at the tip of notch of thermal fatigue specimens of alloys DM02 and K21

Alloy	Crack length at the tip of notch/mm					
	5 times	10 times	20 times	50 times	80 times	100 times
DM02	0	—	0.43	1.65	—	4.76
	0	—	0.39	1.17	—	5.04
	—	—	0.49	2	2.89	3.43
	—	—	0.42	1.35	2.1	2.95
K21	0.54	0.81	4.5	—		
	—	—	—	4.28		
	—	—	—	3.7		

3 结论

DM02 的 1050~1100 拉伸、压缩强度均比 K21 合金高, 1050 拉伸屈服强度达到 485MPa, 1050 压缩屈服强度达 700MPa, 1100 持久性能比 K21 合金高约 40%, 1050 冷热疲劳寿命是 K21 合金的 2~5 倍, 1050 /100h 静态抗氧化性能优于 K21 合金, 达到完全抗氧化级, 是适用于 1050~1100 大气下使用的模具材料, 其使用温度比 K21 合金高约 50 。

参考文献

[1] DAVID F. Forging aerospace components [J]. Advanced Materials & Processes, 1999, 3: 33.

[2] 曾汉民. 高技术新材料要览 [M]. 北京: 中国科学技术出版社. 1993. 203.

[3] 李青, 韩雅芳, 肖程波. 等温锻造用模具材料的同内外研究发展状况 [J]. 材料导报, 2004, 18 (4): 9~ 11.

[4] 崔健. P/M Rene 95 合金等温变形与 STMP 工艺研究 [D]. 北

京: 北京航空材料研究院, 1995.

基金项目: 国家 “863 ” 计划 (2002AA331140); 航空科学基金资助项目 (02G21001)

收稿日期: 2004-09-28; 修订日期: 2004-11-28

作者简介: 肖程波 (1970-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事铸造高温合金和金属间化合物的研究, 联系地址: 北京航空材料研究院 1 分箱 (100095)。

* * * * *

(上接第 43 页)

[3] TABUCHI MASA AKI, ADACHI TAKESHI, YOKOBORI JR A, et al. Evaluation of creep crack growth properties using circular notched specimens [J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2003, 80 (7~ 8): 417~ 425.

[4] SUGIMOTO K , SAKAKI T , HORIE T , et al . Plastic anisotropy and notch - tensile creep strength of superalloy single crystals [A] . Pineridge Press Ltd: Proceedings of the Second International Conference on Creep and Fracture of Engineering Materials and Structures [C] . Swansea Wales: 1984. 371~ 382.

[5] KAKEHI KOJI . Effect of plastic anisotropy on the creep strength of single crystals of a nickel-based superalloy [J] . Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science, 2000, V31A (2): 421~ 430.

[6] BASOALTO H C, ARDAKANI M, GHOSH R N, et al. Multi-axial lifetime predictions of single-crystal superalloys: use of reference stresses [J] . Materials and Manufacturing Processes, 2002, 17 (4): 519~ 528.

[7] LUKAS P, PRECLIK P, CADEK J. Notch effects on creep behaviour of CMSX-4 superalloy single crystals [J] . Materials Science and Engineering A, 2001, 298: 84~ 89.

[8] MERAH N. Notch-strengthening phenomenon under creep-fatigue loading conditions [J] . Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME, 2000, 122 (1): 15~ 21.

[9] JOHN REJI, BU CHANAN DENNIS J, ZAWADA LARRY P. Creep deformation and rupture behavior of a notched oxide/oxide Nextel 720/ AS composite [J] . Ceramic Engineering and Science Proceedings, 2000, 21 (3): 567~ 574.

[10] YUE Z F, LU Z Z, WANG X M. A numerical study of damage development and creep life in circular notched specimens during creep [J] . Mat At High Temp, 2002, 19: 147~ 152.

[11] 成晓鸣, 尹泽勇, 陈兆靖. DD3 单晶合金蠕变参数的确定 [J]. 机械强度, 2000, 22 (3): 197~ 199.

[12] 岳珠峰, 吕震宙. 双剪切试样在镍基单晶合金蠕变变形损伤和寿命研究中的应用 [J] . 金属学报, 2002, 38 (8): 809~ 813.

[13] 万建松. 基于有限变形晶体滑移理论的单晶力学行为及应用研究 [D] . 西安: 西北工业大学, 2003.

基金项目: 国家自然科学基金 (50005016, 50375124); 航空科学基金 (02C53011, 03B53003); 教育部留学回国人员基金

收稿日期: 2004-03-23; 修订日期: 2004-08-12

作者简介: 于庆民 (1975-), 男, 硕士研究生, 主要从事先进材料的力学性能研究, 联系地址: 西安西北工业大学工程力学系 (710072)。