循环频率对 CMSX —3 单晶合金高温疲劳行为的影响 *

王纪安
(承德石油高等专科学校 承德 067000)
于永泗
(大连理工大学 大连 116023)
J. Zrnik
(科西策技术大学 斯洛伐克共和国)

文 摘 利用 MTS 材料试验系统和光学金相、SEM、TEM 等分析手段研究了镍基单晶高温合金 CMSX —3 的高温疲劳行为,重点探讨了循环频率对这种行为的影响。结果表明,循环频率的增加会导致合金高温疲劳寿命的下降及不同的变形机制。

关键词 单晶合金,高温疲劳,循环频率

Effect of Cyclic Frequency on High Temperature Fatigue Behaviour of CMSX-3 Nickel-Based Single Crystal Superalloy

Wang Ji'an
(Chengde Petroleum College Chengde 067000)
Yu Yongsi
(Dalian University of Technology Dalian 116023)
J. Zrnik
(Slovakia, TU Kosice)

Abstract The high temperature fatigue behaviour and the effect of cyclic frequency on the behaviour of CMSX-3 Nickel-based single crystal superalloy are investigated by MTS machine, metallograph, SEM and TEM. The results show that the increase of cyclic frequency would decrease high temperature fatigue lifetime of the alloy and result in different deformation mechanism.

Key words Single crystal superalloy, High temperature fatigue, Cyclic frequency

1 前言

对燃气涡轮叶片而言,它所处的工作环境有两个显著特点:一是温度高,二是受力复杂。为了提高发动机的效率,必须不断提高涡轮燃气进口温度,因此,叶片本身的工作温度也大为提高。与此同时,叶片在工作中既承受气动力与离心力的作用,也承受

收稿日期:2000 - 06 - 02;修回日期:2000 - 08 - 01
* 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室开放基金资助项目
王纪安,1960 年出生,教授,主要从事镍基高温合金的研究工作

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

燃气流的高速脉冲及由涡轮盘的高速旋转产生的振动应力的作用,从而导致叶片在高温下的疲劳。在对 CMSX—3 单晶合金的微观组织等进行分析的基础上[1~3],主要研究了镍基单晶高温合金 CMSX—3 的高温疲劳行为,并重点考查了循环频率对这种行为的影响。

2 实验

材料为 CMSX—3 镍基单晶高温合金。采用定向凝固选晶法制成棒状单晶试样。试样成分如表 1 所示。

表 1 CMSX—3 化学成分

Tab. 1 Chemical composition of CMSX-3

%(质量分数)

Cr	Co	Mo	W	Al	Ti	Ta	Hf	Ni
8.0	4.0	0.5	9.0	5.7	0.7	5.7	0.1	余量

单晶位向采用 X 射线劳埃法测定,取向为<001>各试样偏离夹角不大于 7°。

实验在 MTS810 材料试验系统上进行,利用系统中的 Testware-SX 控制软件设定实验方案和自动采集数据。实验载荷谱如图 1 所示。采用拉—拉轴向载荷控制方式。试验温度 $T = 900$ ℃,疲劳载荷峰值 $\sigma_H = 420$ MPa,疲劳载荷谷值 $\sigma_L = 380$ MPa。循环频率分别为 1 Hz 和 100 Hz。

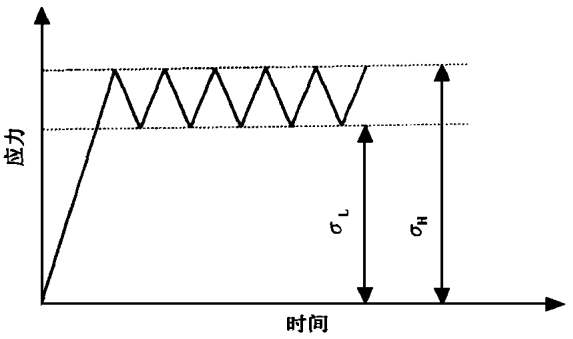


图 1 试验载荷谱

Fig. 1 Load curve of test

3 结果与讨论

3.1 高温疲劳性能

实验测得的 CMSX—3 高温疲劳性能曲线如图 2 所示。从曲线可以发现,随循环频率的增加,疲劳寿命明显降低,变形量加大。

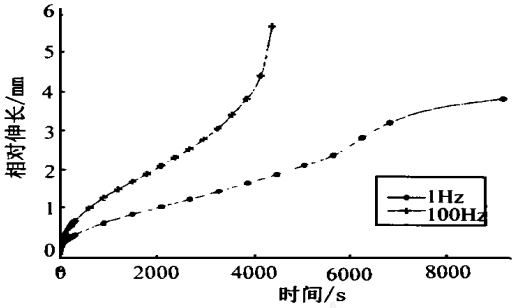


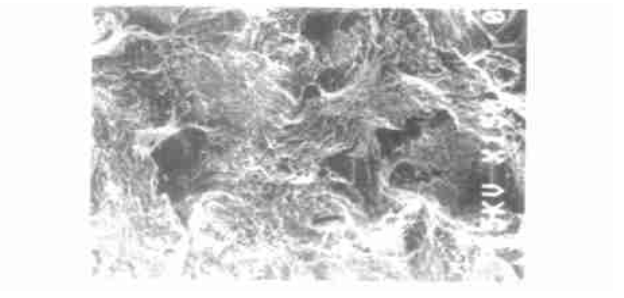
图 2 CMSX—3 高温疲劳性能曲线

Fig. 2 Fatigue performance curve of CMSX-3 at high temperature

3.2 断口扫描分析

两种不同循环频率条件下的典型断口如图 3 所示。可以发现循环频率的增加使单晶合金的变形有从疲劳断裂向蠕变断裂过渡的情形。

(a) 1 Hz



(b) 100 Hz

图 3 CMSX—3 疲劳断口形貌 200 ×

Fig. 3 Fatigue fracture morphology of CMSX-3 200 ×

垂直断口面沿试样轴向将试样切开,对剖开断口的侧面在未浸蚀状态下进行观察,发现无论是循环频率为 1 Hz 的,还是 100 Hz 的试样都存在垂直于外力方向的裂纹与二次裂纹。采用 $HCl + HNO_3$ (3∶1) 浸蚀剂浸蚀后,得到其断口剖开面金相形貌,见图 4(a)。观察发现,与未经疲劳试验的试样内部形貌

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

相比较[1],疲劳试验后,试样内部的共晶物已沿外力方向拉长,裂纹起始于共晶物内或共晶物边缘。图4(b)为断口剖开面的SEM形貌,SEM分析可清楚地看到裂纹的形核部位,可见共晶物内部及边缘是试样的薄弱区且循环频率越高越易诱发裂纹的发生与扩展。

(a) 金相形貌 200 ×

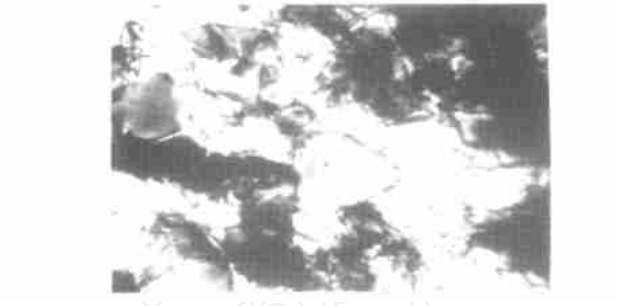
(b) SEM形貌 700 ×

图4 断口剖开面组织形貌

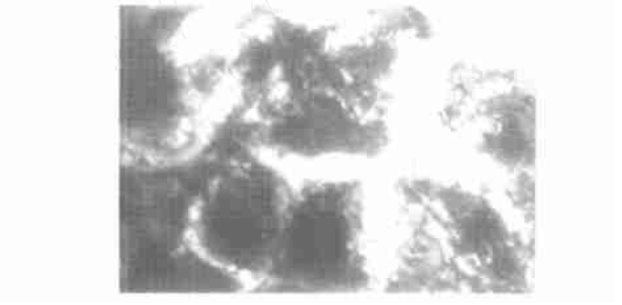
Fig. 4 Structure morphology of fracture section plane

3.3 TEM分析

对断口剖开试样制取电镜薄膜,观察变形组织与位错形态,见图5。两种条件下γ′相均未发生变形。其中循环频率为1 Hz的试样位错大多分布在基体中,构成高密度位错网,γ′相中只见极少的位错。而当循环频率增加到100 Hz后,γ′相中则存在较高的位错密度,基体中也有大量的网状位错存在,反映出频率变化后,变形机制也发生了很大变化。Dupeux等对高温合金的类似情况做出了相应的解释[4,5]。从本试验所观察到的情况可以看出,在高温低频疲劳过程中,位错很难进入γ′相,而只能在基体中运动,或沿γ′相表面攀移、缠接、聚集。在单晶合金的变形过程中,这种位错组态形成了新的强化,使其后运动到γ′相表面的位错更无法进入γ′相,这种变形强化机制有利于提高单晶合金的疲劳寿命和变形抗力。与此不同的是,高温高频疲劳则发现位错成对运动并切入γ′相中,引起高频疲劳寿命的明显下降。



(a) 1 Hz



(b) 100 Hz

图5 断口附近的位错组态 8 500 ×

Fig. 5 Dislocation configuration near fracture 8 500 ×

4 结论

(1)循环频率的增加导致CMSX—3合金高温疲劳寿命下降。

(2)疲劳裂纹主要起始于共晶物内部或其边缘,且循环频率越高越易诱发裂纹的发生与扩展。

(3)循环频率的变化引起CMSX—3合金不同的变形机制。

参考文献

1 王纪安,于永泗,ZRNIKJ,ZITNANSKYM. CMSX—3单晶合金的微观组织研究. 材料科学与工艺,1997;5(3):5～7

2 王纪安,于永泗,ZRNIKJ. 镍基单晶高温合金的铸态偏析与消除. 机械工程材料,1997;21(1):37～39

3 王纪安,于永泗,ZRNIKJ. 预时效处理对镍基单晶合金组织与性能的影响. 宇航材料工艺,1997;27(2):33～36

4 Dupeux M, Henriet J, Ignat M. Tensile stress relaxation behaviour of Ni-based superalloy single crystals between 973 and 1273K. Acta. Metall, 1987;35(9):2 203～2 212

5 张静华等. 镍基单晶高温合金的强化特点. 材料科学进展,1990;4(5):392

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net