

## K417 铸造镍基高温合金热机械疲劳行为的研究 \*

刘 峰 艾素华 王跃臣 张 辉 王中光

(中国科学院金属所材料疲劳与断裂国家重点实验室, 沈阳 110016)

**摘 要** 研究了 K417 合金在 400—850 °C 同相 (IP) 和反相 (OP) 的热机械疲劳 (TMF) 行为, 并且与 850 °C 等温疲劳 (IF) 性能进行了比较. 结果发现: K417 合金 IF 和 TMF 都具有循环硬化特征, IF 的循环硬化能力比 TMF 的要高. 与等温疲劳寿命相比较, 在相同机械应变幅下, TMF 的寿命降低, 而且同相 (IP) 的寿命比反相 (OP) 的寿命更低. SEM 断口及断裂纵向剖面检查发现, 同相 TMF 的沿晶开裂是导致其疲劳寿命比反相 TMF 低的主要原因.

**关键词** 铸造高温合金, 热机械疲劳, 同相, 反相

**中图分类号** TG113.25, TG146.1 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2001)03-0267-05

## THERMO-MECHANICAL FATIGUE BEHAVIOR OF CAST NICKEL-BASED SUPERALLOY K417

LIU Feng, AI Suhua, WANG Yuechen, ZHANG Hui, WANG Zhongguang

State Key Laboratory for Fatigue and Fracture of Materials, Institute of Metal Research, The Chinese Academy of Science, Shenyang 110016

Correspondent: LIU Feng, Tel: (024)23843531-55281, E-mail: liuf20000@163.com

Manuscript received 2000-07-27, in revised form 2000-11-27

**ABSTRACT** The thermo-mechanical fatigue (TMF) behavior of cast nickel-base superalloy K417 was investigated in full reversed total strain control in the temperature range from 400 to 850 °C. Both in-phase (maximum tensile strain at maximum temperature) and out-of-phase (maximum compressive strain at maximum temperature) experiments were conducted. Comparative evaluations were made with existing results of isothermal fatigue (IF) at 850 °C of the same alloy. It is found that TMF and IF cause more cyclic hardening in comparison with static tension at 850 °C. The tendency of IF cyclic hardening is higher than that of TMF. At the same mechanical strain and temperature, TMF shows shorter life as it compared with isothermal fatigue, and the in-phase cyclic life is lower than that of out-of-phase. Observations of fracture surfaces and longitudinal sections by SEM reveal that fatigue cracks of IP initiate at the grain boundaries and propagate intergranularly, and the cracks of OP nucleate within the grain and grow transgranularly.

**KEY WORDS** cast nickel-base superalloy, thermo-mechanical fatigue, in-phase, out-of-phase

航空发动机的涡轮盘和叶片在服役过程中, 常常经历快速启动、稳态运转和快速停车的过程. 其中应力-应变-温度的循环必然产生高应变的低周疲劳, 并导致裂纹萌生、亚临界裂纹扩展和构件最后的断裂. 因此, 需要研究这些结构材料在温度循环条件下的循环应力应变行为. 许多研究表明, 材料的热机械疲劳 (TMF) 寿命比在最高温度下等温疲劳 (IF) 的寿命要低<sup>[1-5]</sup>, 因此研究材料的热机械疲劳行为无论是材料的设计, 还是对其寿命预测更有重要的实际意义.

本文研究了在温度和机械应变联合循环下 K417 高温合金的低周疲劳行为, 并与此材料在等温状态下的低周疲劳研究结果进行了比较.

### 1 实验方法

材料 K417 是一种铸造镍基高温合金, 主要用于制造发动机的涡轮叶片. 它的化学成分和冶炼浇注工艺见参考文献 [6]. 取浇注好的试样毛坯机加工成标距部分为直径 6 mm×18 mm 的双头螺纹热机械疲劳试样.

疲劳实验是在 MTS810 热机械疲劳试验机上进行的, 采用总应变控制的三角波加载, 大气环境, 感应线圈加热, 温度范围 400—850 °C. 加载周期为 200 s, 采用压缩空气冷却, 分别测试了在不同应变幅下同相 (IP, 即最

\* 国家重点基础研究发展规划资助项目 G19990650

收到初稿日期: 2000-07-27, 收到修改稿日期: 2000-11-27

作者简介: 刘 峰, 男, 1971 年生, 博士生

大拉伸应变对应最高温度)和反相(OP,最大压缩应变对应最高温度)的疲劳性能,样品加载至断裂,或拉应力降至最大应力的1/4后卸载,总应变 $\Delta\epsilon_t$ ,热应变 $\Delta\epsilon_{th}$ 和机械应变 $\Delta\epsilon_m$ 存在如下关系

$$\Delta\epsilon_t = \Delta\epsilon_{th} + \Delta\epsilon_m \quad (1)$$

热应变 $\Delta\epsilon_{th}$ 是实验开始前在零载荷控制下,进行400—850℃温度循环,测得样品的应变随温度循环的变化。此外,机械应变 $\Delta\epsilon_m$ 由弹性应变 $\Delta\epsilon_e$ 和非弹性应变 $\Delta\epsilon_p$ 两部分组成,有如下关系式

$$\Delta\epsilon_m = \Delta\epsilon_e + \Delta\epsilon_p \quad (2)$$

式(1)和式(2)的实验参数分别通过实验测量和计算而得到。最后,对典型实验条件下破坏样品的断口和纵向剖面在Cambridge S-360扫描电镜下进行观察。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 TMF的循环应力响应

K417合金同相(IP)和反相(OP)条件下,热机械疲劳(TMf)性能的测试结果如表1和表2所示,表中 $N_f$ 为断裂寿命,两种相位情况下典型的滞后回线如图1,由图1可见,两种滞后回线都有明显的不对称性。在IP状态下,当达到拉伸最大控制应变范围时,温度也升至最高,卸载时,温度随之降低;在达到压缩最大应变范围时,温度也降至最低;因为高温时材料抵抗形变的阻力要小,导致最大拉伸应力 $\sigma_{max}$ 小于最大压缩应力 $\sigma_{min}$ ,结果在IP时,样品受到一个压缩的平均应力 $\sigma_m$ ,同理,在OP状态下,最大拉伸应力 $\sigma_{max}$ 大于最大压缩应力 $\sigma_{min}$ ,样品受到一个拉伸的平均应力 $\sigma_m$ (见表1,2)。

图2表明在IP和OP状态下,K417合金的TMf循环应力响应曲线,由图可见,IP时,高温半周,除了

表1 同相(IP)热机械疲劳实验结果  
Table 1 Summary of TMF under in-phase

$\Delta\epsilon_t/2$	$N_f$	$\Delta\epsilon_m/2$	$\Delta\epsilon_p/2$	$\sigma_{max}$ , MPa	$\sigma_{min}$ , MPa	$\sigma_m$ , MPa	$\Delta\sigma/2$ , MPa
0.006	1573	0.00150	0.000180	154.9	-279.8	-62.4	217.5
0.007	183	0.00244	0.000263	192.4	-631.0	-219.3	411.7
0.008	89	0.00380	0.000857	379.0	-757.6	-224.2	568.3
0.010	28	0.00576	0.00220	514.9	-820.0	-152.6	667.4
0.012	8	0.00784	0.00347	646.5	-877.6	-115.5	762.0

表2 反相(OP)热机械疲劳实验结果  
Table 2 Summary of TMF under out-of-phase

$\Delta\epsilon_t/2$	$N_f$	$\Delta\epsilon_m/2$	$\Delta\epsilon_p/2$	$\sigma_{max}$ , MPa	$\sigma_{min}$ , MPa	$\sigma_m$ , MPa	$\Delta\sigma/2$ , MPa
0.0021	1140	0.0024	0.000065	742.0	-112.5	314.8	427.2
0.0011	284	0.0034	0.0005	758.7	-309.9	224.4	534.3
0.001	128	0.0055	0.00094	820.6	-601.2	109.7	710.9
0.002	74	0.0065	0.001905	831.2	-658.9	86.2	745.0
0.003	19	0.0076	0.00361	841.5	-663.1	89.2	752.3

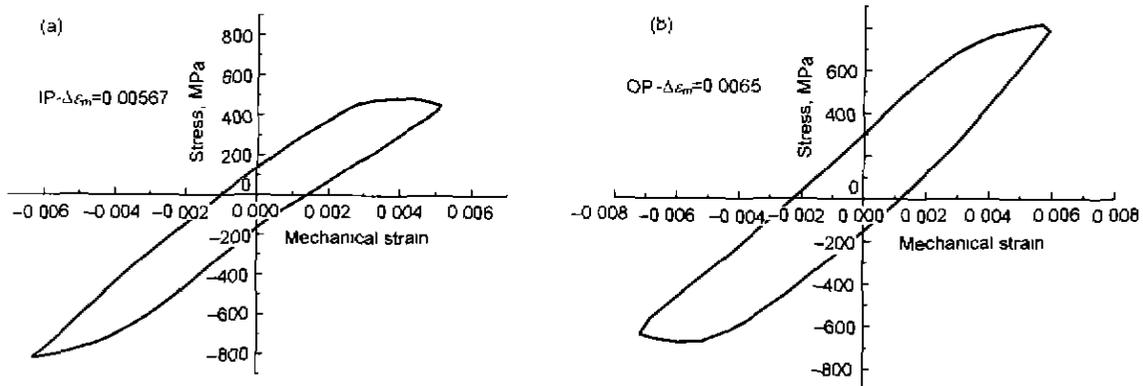


图1 典型滞后回线

Fig.1 Typical hysteresis loop of TMF, under in-phase (a) and out-of-phase (b)

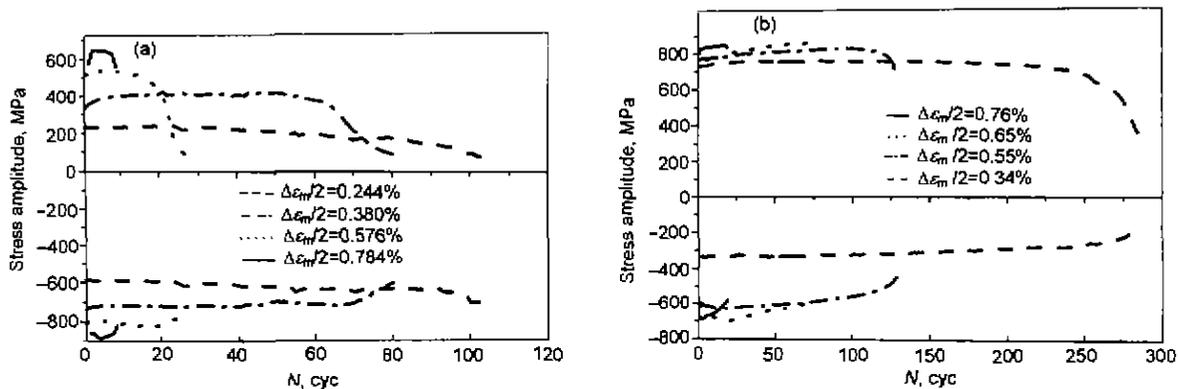


图 2 K417 合金的 TMF 循环应力响应曲线  
 Fig.2 Cycle stress response curves of TMF under IP (a) and OP (b) of K417 alloy

$\Delta\epsilon_m/2 \leq 0.0024$  表现为循环稳定以外, 其它各应变幅均表现为起始硬化, 饱和, 然后软化至断裂. 而低温半周, 观察到缓慢软化, 或起始软化, 然后硬化, 再软化至断裂. OP 时, 在低温半周, 除了当  $\Delta\epsilon_m/2=0.0065$  表现起始软化外, 其它均为起始硬化, 饱和或缓慢硬化至断裂. 在高温半周, 当  $\Delta\epsilon_m/2=0.0034$  时, 为缓慢软化至断裂, 而其它应变幅为起始硬化, 然后软化至断裂. 总之, 除了最低应变幅之外, 在高温半周, 无论是 IP 还是 OP, 基本表现为起始循环硬化. 在低温半周, IP 开始是循环软化, 而 OP 大部分是循环硬化. 众所周知, 镍基高温合金的循环硬化行为主要归因于形变时位错切割沉淀相受到阻碍, 而 K417 的 TMF 实验结果显示, 无论是 IP 还是 OP, 在高温半周基本上是循环硬化, 这就意味着在高温半周尽管存在着蠕变的作用, 但是并没完全抵消位错运动受阻所引起的硬化现象.

2.2 循环应力 - 应变曲线

图 3 给出 K417 合金 400—850 ℃ TMF 和 850 ℃ 等温疲劳 (IF) 的循环应力 - 应变曲线. 由图发现, 在拉伸半周, IP 的饱和应力要小于 850 ℃ 等温时的应力, 而 OP 的饱和应力比 IF 的大. 在压缩半周, IP 的饱和应力要比 OP 的大. 这与温度和应变的交互作用有关. 在拉伸半周, IP 对应的是最高温度, 而 OP 对应的是最低温度. 而压缩半周正好相反. 由于高温时, 原子的热激活行为使其材料的形变抗力降低, 因此, 产生同样应变所需应力要比低温时小. 所以在相同应变幅下, 拉伸半周 IP 的饱和应力比 OP 的低, 压缩半周正相反.

图 4 为 400—850 ℃ TMF, 850 ℃ IF 和静态拉伸的应力 - 应变曲线. 此图清楚地揭示, K417 合金与静态行为相比, 无论是 TMF, 还是 IF 都呈现循环硬化特征. IF 的循环硬化程度要比 TMF 高. 对于 TMF 而言, OP 比 IP 的硬化趋势更明显一些.

2.3 热机械疲劳的断裂寿命

图 5 表明在 400—850 ℃ 左图内的 TMF 和 850 ℃

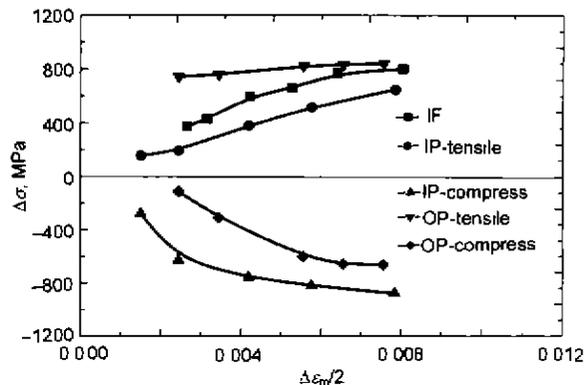


图 3 TMF 和 850 ℃ 等温疲劳 (IF) 循环应力 - 应变曲线  
 Fig.3 Cycle stress-strain curves of TMF and isothermal fatigue at 850 ℃

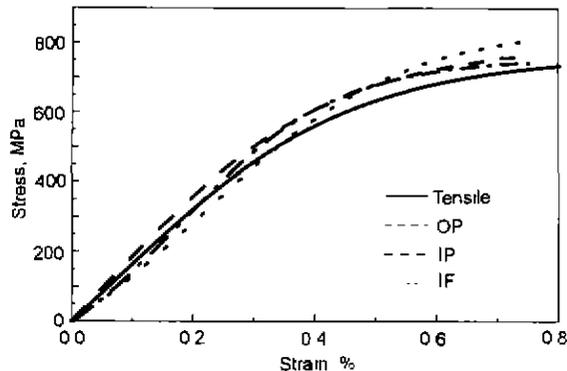


图 4 400—850 ℃ TMF, 等温疲劳 (IF) 循环和静态拉伸应力 - 应变曲线  
 Fig.4 Stress-strain curves of TMF, isothermal fatigue at 850 ℃ and static tension

等温疲劳 (IF) 时, 机械应变与断裂寿命之间的关系. 从图 5 可见, 无论是在拉伸还是在压缩半周, 在相同应变幅下, OP 的寿命要比 IP 的长, 而 IF 的寿命比 TMF 的长. 这说明温度的交替变化将导致疲劳性能的进一步恶化; 而 IP 在拉伸半周蠕变分量的增加导致它的 TMF 寿命比 OP 的 TMF 寿命低. 对于高温合金, 较低温度的形

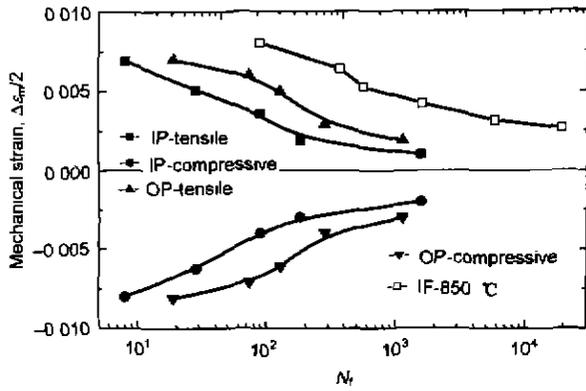
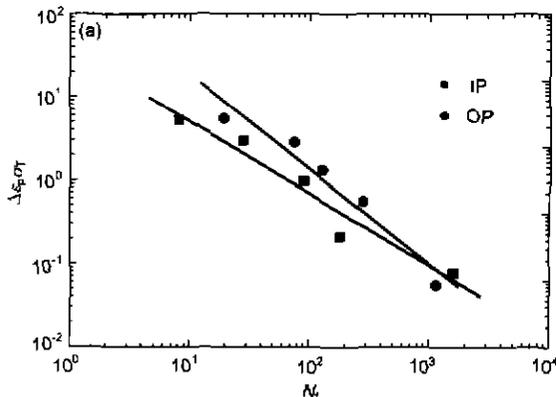


图5 TMF 和 850 °C 等温疲劳 (IF) 机械应变 - 寿命关系曲线  
Fig.5 Mechanical strain ( $\Delta\epsilon_m/2$ ) vs life ( $N_f$ ) curves of TMF and isothermal fatigue at 850 °C

变主要在基体当中, 当达到临界位错密度时, 导致基体破坏; 在较高温度时, 加上氧化作用增加了环境的侵蚀, 损伤容易累积在晶界处, 将有氧化物的剥落<sup>[7]</sup>. 这可由裂纹萌生的观察得到证实.

此外, 根据由 Ostergren<sup>[8]</sup> 以及 Coffin-Manson<sup>[9]</sup> 提出的两种方法进行了 K417 合金 TMF 的寿命预测. Ostergren 方法表示如下

$$C = N_f^\beta \nu^{\beta(K-1)} \Delta\epsilon_p \sigma_T \quad (3)$$



其中:  $C, \beta, K$  是材料常数,  $N_f$  为断裂寿命,  $\nu$  为频率,  $\Delta\epsilon_p$  为塑性应变范围,  $\sigma_T$  为循环最大应力. 由于实验采用的周期是不变的, 因此频率项为常数, 可以并入常数项  $C$  中, 然后由实验数据拟合得到  $\beta$  和  $C$ .

图 6a 给出了根据 Ostergren 方程 (3) 拟合的 K417 合金的 IP 和 OP 热机械疲劳的实验结果. 下面给出了 Coffin-Manson 塑性应变幅与发生破坏的载荷反向次数之间的表达式, 即

$$\frac{\Delta\epsilon_p}{2} = \epsilon'_f (2N_f)^c \quad (4)$$

其中  $\epsilon'_f$  是疲劳延性系数,  $c$  是疲劳延性指数. 图 6b 给出了用式 (4) 拟合的同相和反相两种 TMF 的实验结果. 为了验证两种方法的准确性, 给出了两种方法的二倍线和实验点之间的关系, 分别表示在图 7a, b 中. 由此图可见, 对于 Ostergren 方法预测结果, 实验点基本上在二倍线之内, 而对于 Coffin-Manson 方法预测结果, 有的实验点跑出了二倍线范围. 由此可见, 对于 K417 铸造镍基高温合金, 用能量法比单纯用塑性应变幅来预测 TMF 的断裂寿命更好一些.

2.4 TMF 裂纹萌生和断裂特征

由 TMF 破坏样品的断口和纵向剖面金相组织的

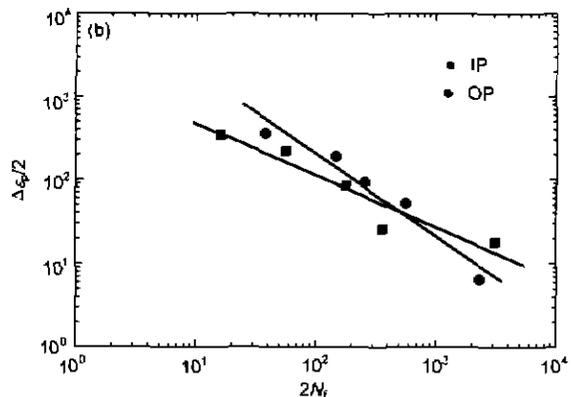


图6 K417 合金 TMF 的 Ostergren 和 Coffin-Manson 曲线  
Fig.6 Ostergren (a) and Coffin-Manson (b) curves of TMF for K417 alloy

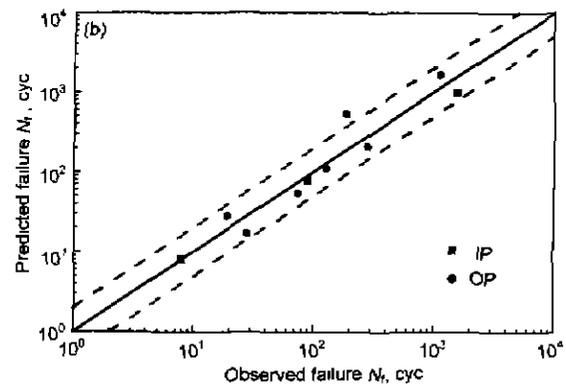
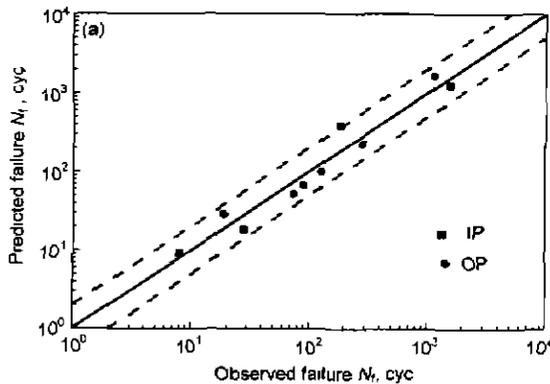


图7 用 Ostergren 和 Coffin-Manson 方程预测与实测寿命的比较  
Fig.7 Comparison of the observed life with that predicted by Ostergren (a) and Coffin-Manson (b) methods

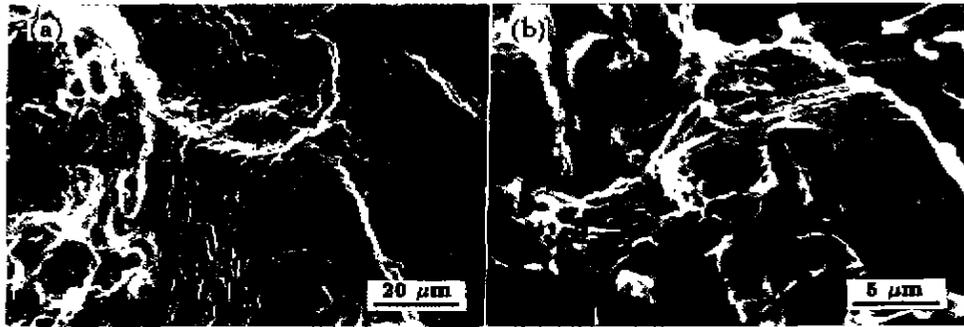


图 8 TMF 断口疲劳条纹形貌

Fig.8 Morphologies of fatigue striations on fracture surface of TMF for  $\Delta\epsilon_m=0.55\%$  (a) and  $\Delta\epsilon_m=0.76\%$  (b)

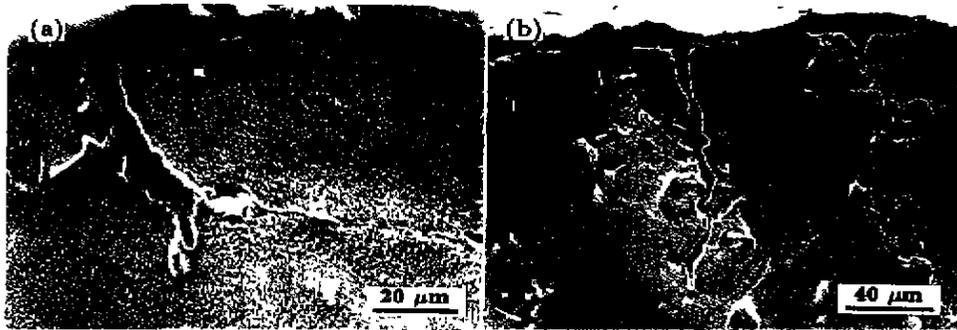


图 9 K417 合金 TMF 裂纹萌生形貌

Fig.9 Morphologies of TMF crack initiation on longitudinal section of K417 alloy under IP (a) and OP (b)

SEM 观察发现, K417 合金的 TMF 断裂有如下几个特征: a) 无论是 IP 还是 OP, 热机械疲劳的失效是多源断裂; b) 断裂源起始于表面或亚表面上铸造孔洞、疏松、碳化物和晶界, 或其上形成的氧化物处; c) 随应变幅的升高, 即断裂寿命的减少, 首先, 疲劳条纹的可见度减弱; 其次, 由韧性条纹向脆性条纹过渡(比较图 8a, b); d) 在 IP 状态下, 看到疲劳裂纹萌生于表面晶界处, 并且沿着晶界由表面  $\gamma'$  贫化区向基体内部扩展, 在样品内部也观察到晶界的开裂; 对于 OP 状态裂纹也由表面  $\gamma'$  贫化区向基体内部扩展, 而大部分在晶内(比较图 9a, b), 这可以证实 IP 的蠕变分量比 OP 大, 从而导致热机械疲劳寿命的进一步的降低。

### 3 结论

(1) K417 合金在 400–850 °C 下 TMF 循环应力响应特征是, 除了的低应变幅呈现循环稳定之外, 在高温半周, 无论是 IP 还是 OP, 均表现为起始循环硬化; 在低温半周, IP 是开始循环软化, OP 是循环硬化, 其后全部是循环饱和, 或缓慢硬、软化至断裂。

(2) 与单向拉伸相比, K417 的 TMF 和 IF 均表现为循环硬化, 且 IF 的硬化程度高于 TMF。

(3) 在相同的机械应变幅下, TMF 寿命比 IF 的低, 而且 IP 的寿命比 OP 的还要低, 对于 K417 合金, 用

Ostergren 能量方法比单纯用 Coffin–Manson 塑性应变幅方法, 来预测 TMF 的断裂寿命更好一些。

(4) TMF 的断裂源起始于样品表面或亚表面的铸造孔洞、疏松、碳化物和晶界或形成的氧化物处, 其次, 随应变幅升高, 疲劳条纹由韧性向脆性转变; 最后, IP 状态的疲劳裂纹常萌生于样品表面  $\gamma'$  贫化区的晶界处, 并沿晶界向内部扩展, 而 OP 态也萌生于  $\gamma'$  贫化区, 但通常在晶内, 这可能是导致 IP 寿命比 OP 低的原因。

### 参考文献

- [1] Vassen E, Remy L. *Mater Sci Eng*, 1994; 184A: 1
- [2] Henderson P J. *Scr Metal Mater*, 1996; 24: 1839
- [3] Marchionni M. *Proc Conf Fatigue '93, May, 5–7, 1993, Montreal, Canada*, 1993; 3: 933
- [4] Barmgartner T, Hurta S, Bothe K, Gerold V. *Proc Conf Fatigue '90, July, 15–20, 1990, in Honolulu Hawaii*, 1990; 3: 1699
- [5] Guedon J Y, Honnorat Y. *ASTM, STP, 1186*, 1993; 157
- [6] Yan M G. *Handbook of engineering material*. Beijing: China Standard Press, 1982; 2: 647  
(颜鸣皋. 工程材料实用手册. 北京: 中国标准出版社, 1982; 2: 647)
- [7] Antolovich S D, Lin C, Baur B. *Metall Trans*, 1981, 12(A): 437
- [8] Ostergren W J. *J Testing Evaluation*, 1976; 4: 327
- [9] Suresh S. *Fatigue of Materials(second Edition)*, Cambridge: Cambridge Press, 1998: 138