

表 2 FGH96 合金的热处理制度

Table 2 Different heat treatments of FGH96 alloy

No.	Heat treatment			
1	1150	, 2 h+540	SB+760	, 18 h AC
2	1150	, 2 h+580	SB+760	, 18 h AC
3	1160	, 2 h+600	+760	SB, 16 h FC to 550 AC
4	1150	, 2 h+600	+760	SB, 16 h FC to 550 AC
5	1160	, 2 h+540	SB+760	, 8 h AC
6	1160	, 2 h+540	SB+760	, 16 h AC
7	1160	, 2 h+540	SB+800	, 8 h AC

Note: SB: salt bath; AC: air cooling; FC: furnace cooling

温度、时效温度和时效时间及保载时间对裂纹扩展速率影响来研究显微组织与裂纹扩展速率之间关系。

2 结果与讨论

2.1 盐浴温度的影响

图 2 为不同盐浴温度的裂纹扩展速率曲线。由图 2a 可见, 孕育期不明显, 且随应力强度因子增大, 裂纹扩展速率稳步增加直至断裂。盐浴温度为 540 的裂纹扩展速率明显高于 580 的裂纹扩展速率。前者的应力强度因子变化范围小于后者, 分别为 17 和 44 MPa·m^{1/2}。在外加载荷相同时, 540 盐浴试样的裂纹萌生期较长(见图 2b), 但裂纹一旦萌生后扩展迅速, 整个断裂寿命较短, 说明材料抗裂纹萌生的能力较好而抗裂纹扩展的能力较差, 而 580 盐浴试样的裂纹萌生期较短而整个断裂寿命较长, 表明材料抗裂纹扩展能力较好。

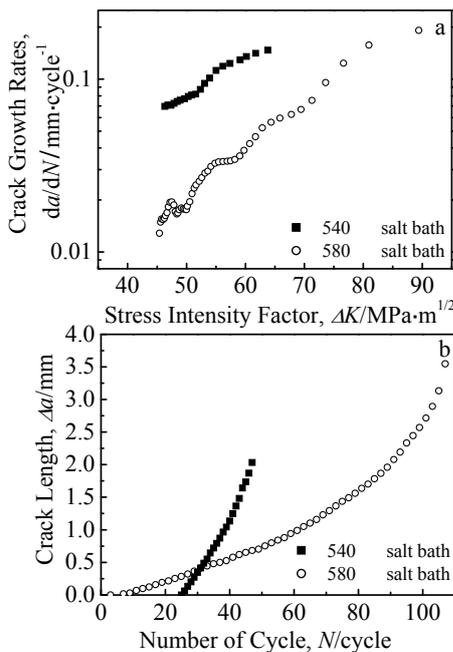


图 2 盐浴温度对裂纹扩展速率的影响

Fig.2 Effect of salt bath temperatures on the crack growth rates (a) and Δa-N curve (b)

2.2 固溶温度的影响

图 3 为固溶温度对裂纹扩展速率的影响。可见, 随着固溶温度的升高, FGH96 合金的裂纹扩展速率降低(图 3a), 且裂纹扩展速率曲线有比较明显的孕育期, 当应力强度因子达到 40 MPa·m^{1/2} 以后裂纹扩展进入稳态扩展区直至断裂。固溶温度升高对应的应力强度因子范围增大, 1160, 2 h 和 1150, 2 h 固溶温度对应的应力强度因子范围分别为 140 和 80 MPa·m^{1/2}。固溶温度升高后对应试样的裂纹长度明显增加(见图 3b), 且 1160, 2 h 固溶温度的断裂周次约为 1150, 2 h 固溶温度的断裂周次的 6 倍。由此可见, 提高固溶温度可明显降低合金的裂纹扩展速率。

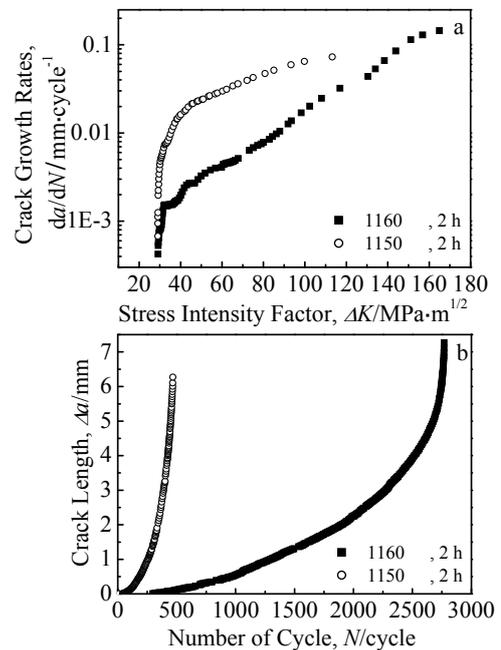


图 3 固溶温度对裂纹扩展速率影响

Fig.3 Effect of solid solution temperature on the crack growth rates (a) and Δa-N curve (b)

2.3 时效温度和保载时间的影响

图 4 为时效温度对裂纹扩展速率的影响。可见, 不同保载时间及不同时效温度的裂纹扩展速率曲线存在着明显的孕育期(图 4a); 提高时效温度, 加速合金的裂纹扩展速率, 并增加对应的应力强度因子范围。同时, 时效温度升高可增加试样的裂纹长度和断裂周次。

同时, 保载时间对裂纹扩展速率也有一定的影响。不同时效温度下, 保载 90 s 的裂纹扩展速率高于保载 5 s 的裂纹扩展速率。800 时效 8 h 保载 5 s 和 760 时效 8 h 保载 90 s 的裂纹长度与周期关系变化几乎一致, 且裂纹扩展速率曲线变化不大。

2.4 时效时间和保载时间的影响

图 5 为时效时间对裂纹扩展速率的影响。可见,

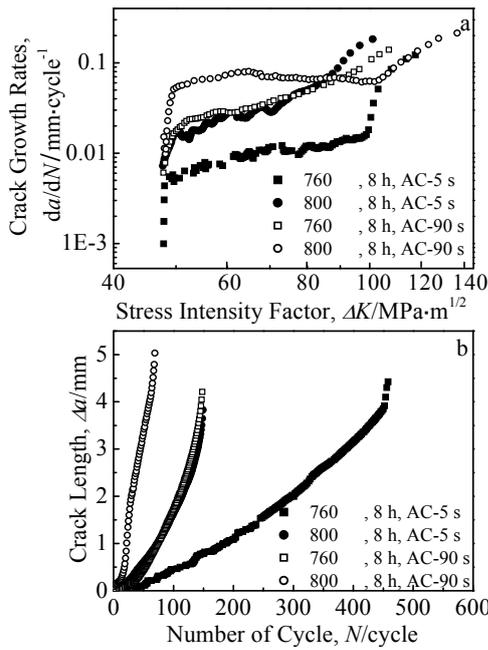


图 4 时效温度对裂纹扩展速率的影响

Fig.4 Effect of aging temperatures on the crack growth rates (a) and $\Delta a-N$ curve (b)

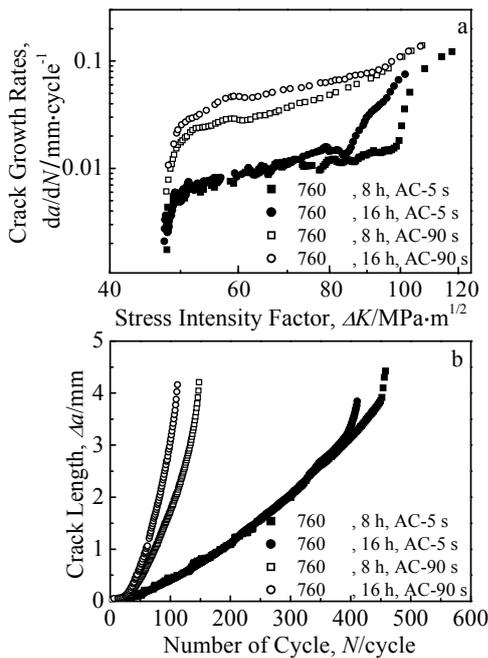


图 5 时效时间对裂纹扩展速率的影响

Fig.5 Effect of aging time on the crack growth rates (a) and $\Delta a-N$ curve (b)

当应力强度因子小于 $85 MPa\cdot m^{1/2}$ 时,在 760 °C 时效 8 和 16 h 的裂纹扩展速率曲线几乎一致;当应力强度因子大于 $85 MPa\cdot m^{1/2}$ 后,两曲线的区别稍微增加。而 760 °C 时效 8 和 16 h 保载 90 s 的裂纹扩展速率曲线也较接近。可见,在一定时效温度下,增加时效时间对合金的裂纹扩展速率变化不明显。另外,增加时效时

间对应力强度因子范围和试样的断裂长度的改变不大。同样,在一定时效温度下增加时效时间,保载 90 s 的裂纹扩展速率高于保载 5 s 的裂纹扩展速率。

3 讨论

为了对比相同应力强度因子下各种影响因素对裂纹扩展速率的影响程度,定义裂纹扩展速率增加倍数为同一条件下裂纹扩展速率的比值,通过比较该比值的大小,分析各种影响因素对裂纹扩展速率的贡献程度。表 3 为稳态扩展区当 $\Delta K=60 MPa\cdot m^{1/2}$ 时不同热处理 FGH96 合金的裂纹扩展速率及对应的增加倍数。

对比表 3 中的裂纹扩展速率增加倍数可知,不同固溶温度的影响比值最大为 6.81,而盐浴温度的比值为 3.19。由此可见,在本试验条件下,固溶温度对裂纹扩展速率的影响最明显,而盐浴温度对其也有较大的影响。时效温度和时效时间的平均裂纹扩展速率增加倍数分别为 2.91 和 1.45,说明时效温度对裂纹扩展速率的影响大于时效时间,而两者的影响程度低于固溶温度和盐浴温度。因此,可以通过合理调整热处理制度来降低合金的裂纹扩展速率。另外,保载时间对裂纹扩展速率也有一定的影响,在本试验条件下 FGH96 合金保载 90 s 的试样裂纹扩展速率一般高于保载 5 s 的裂纹扩展速率。在保载过程中伴随蠕变和氧化作用,并增加裂纹扩展速率。但随着时效温度的升高,保载时间的影响逐渐变小。

表 3 $\Delta K=60 MPa\cdot m^{1/2}$ 时不同热处理 FGH96 合金的裂纹扩展速率及对应的增加倍数

Table 3 The crack growth rate and corresponding increasing multiples at $\Delta K=60 MPa\cdot m^{1/2}$ after different heat treatments

Effect factor	Heat treatment	da/dN ($mm\cdot cycle^{-1}$)	Increasing multiple
Salt bath temperature	540	13.52×10^{-2}	3.19
	580	4.23×10^{-2}	
Solid solution temperature	1150, 2 h	29.83×10^{-3}	6.81
	1160, 2 h	4.38×10^{-3}	
Aging temperature	800, 8 h-90 s	7.58×10^{-2}	2.69
	760, 8 h-90 s	2.82×10^{-2}	
	800, 8 h-5 s	22.82×10^{-3}	
	760, 8 h-5 s	7.26×10^{-3}	
Aging time	760, 16 h-90 s	4.66×10^{-2}	1.65
	760, 8 h-90 s	2.82×10^{-2}	
	760, 16 h-5 s	8.85×10^{-3}	
	760, 8 h-5 s	7.26×10^{-3}	
Holding time	760, 8 h-90 s	28.22×10^{-3}	3.89
	760, 8 h-5 s	7.26×10^{-3}	
	800, 8 h-90 s	7.58×10^{-2}	
	800, 8 h-5 s	2.28×10^{-2}	

观察不同固溶温度下 FGH96 合金裂纹扩展前期的宏观断口形貌 (图 6) 发现, 主要以脆性沿晶断裂为主, 并有少量撕裂岭和二次裂纹, 增加固溶温度可增大晶粒尺寸^[5], 降低环境对晶界的有害作用。从图 6 中可间接看出, 提高固溶温度 10 , 晶粒有长大趋势, 因此, 不同固溶温度下裂纹扩展速率的明显差异可能源于晶粒度大小的不同。

图 7 为不同盐浴温度下 FGH96 合金的 γ' 相析出特征。可见, 580 盐浴的 γ' 相尺寸大于 540 盐浴的 γ'

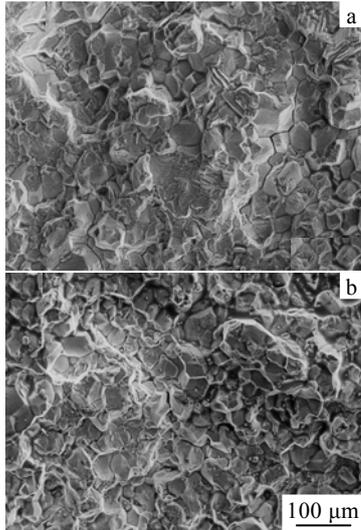


图 6 不同固溶温度下裂纹扩展前期的断口形貌

Fig.6 Fractographs after different solution temperatures 1160 (a) and 1150 (b) at early stage of crack growth

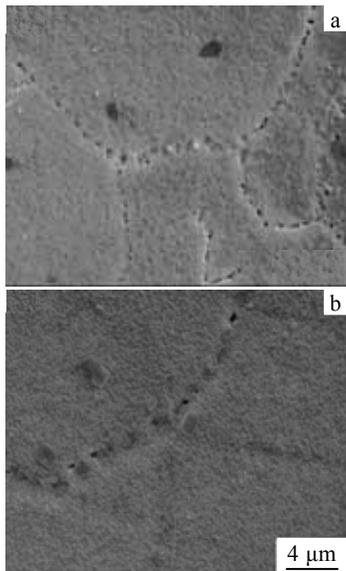


图 7 不同盐浴温度的显微组织

Fig.7 Microstructures after salt-bath temperature: (a) 540 and (b) 580

相尺寸。研究表明^[6], 随着冷却速率的降低, γ' 相体积分数增加, 析出密度降低, 蠕变和抗断裂性能下降^[7]。较慢的冷却速率有利于冷却过程中 γ' 相的长大, 使位错绕过沉淀相, 导致弯曲滑移, 产生均匀切变, 降低了裂纹扩展速率, 从而可以更好地容纳疲劳损伤^[8,9]。因此, 提高盐浴温度相当于降低冷却速率, γ' 相尺寸增大, 降低了裂纹扩展速率, 材料的抗拉强度随冷却速率的降低而下降^[6]。可以推断, γ' 相尺寸大小将存在一个最佳范围以平衡裂纹扩展速率与强度之间的关系。如何通过合理地控制冷却速率获得较好的抗裂纹扩展能力和综合性能还需进一步研究。

另外, 随着时效温度从 760 增加到 800 时, 显微组织中细小三次 γ' 相尺寸和数量的变化并不明显, 但晶界碳化物的析出量增加 (如图 8 所示), 却加速了 FGH96 合金的裂纹扩展速率。另外, 在一定时效温度下, 随着时效时间的延长, 三次细小 γ' 相析出数量增加^[7], 但由于其体积分数较小, 所以三次 γ' 相数量变化对裂纹扩展速率的影响不大。对比发现, 时效温度对 FGH96 合金的裂纹扩展速率的影响大于时效时间。

由上述分析可以得出, 不同的热处理制度主要影响 FGH96 合金的晶粒度和 γ' 析出相的大小和数量。基体晶粒尺寸增大, 二次 γ' 相数量增加且尺寸增大、形状趋于田字形, 有利于降低裂纹扩展速率。因此应该合理地调整热处理制度, 尽管强度可能有所降低, 但达到强度和裂纹扩展速率的最佳性能配合也是高温合金强韧化的一个方面。

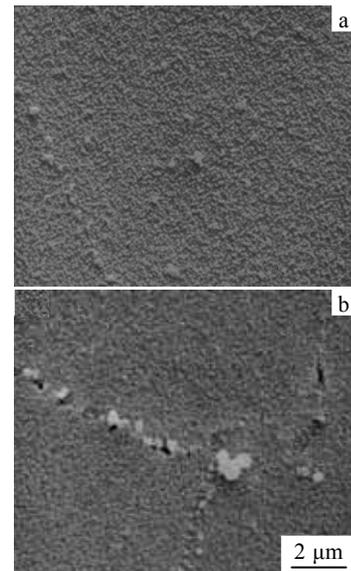


图 8 不同时效温度下保温 8 h FGH96 合金的显微组织

Fig.8 Microstructures of FGH96 alloys at different aging temperatures: (a) 760 and (b) 800

4 结 论

1) 提高固溶温度和盐浴温度可降低 FGH96 合金的裂纹扩展速率,其固溶温度对裂纹扩展速率的作用程度大于盐浴温度。

2) 降低时效温度和缩短时效时间也可延缓合金的裂纹扩展速率,但时效温度对裂纹扩展速率的影响大于时效时间的影响。

3) 增加保载时间可加速合金的裂纹扩展速率,但保载时间的影响随着时效温度的升高而减小。

参考文献 References

- [1] Telesman J, Kantzos P, Gayda J *et al.* *Superalloys 2004*[C].
Champion: The TMS High Temperature Alloys Committee, 2004: 215
- [2] John Schirra J, Paul Reynolds L. *Superalloys 2004*[C].
Champion: The TMS High Temperature Alloys Committee, 2004: 341
- [3] Zhang Ying(张 莹), Zhang Yiwen(张义文), Tao Yu(陶 宇).
Journal of Iron and Steel Research(钢铁研究学报)[J], 2006, 18: 58
- [4] Li Xiao(李 晓), Guo Weimin(国为民), Dong Jianxin(董建新),
et al. *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2001, 37(5): 1059
- [5] Guo Weimin(国为民), Dong Jianxin(董建新), Wu Jiantao(吴剑涛)
et al. *Journal of Iron and Steel Research*(钢铁研究学报)[J], 2005(1): 59
- [6] Jian Mao, Keh-Minn Chang, Wanhong Yang *et al.* *Materials Science and Engineering*[J], 2002, A332: 318
- [7] Bhowal P R, Wright E F, Raymond E L. *Metallurgical Transaction A*[J], 1990, (21): 1709
- [8] Bussac A D E *et al.* *Fatigue Fracture Engineering Mater Structure*[J], 1993(16): 861
- [9] Aghaie-Khafri M, Hajjavady M. *Materials Science and Engineering A*[J], 2008, 487: 388

Influence of Heat Treatments on Crack Propagation Rates of FGH96 P/M Superalloys

Wang Pu¹, Dong Jianxin¹, Zhang Yiwen², Xie Xishan¹

(1. University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

(2. Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: Crack propagation rates of FGH96 P/M superalloys with different heat treatments were tested and compared under fatigue/creep interaction at 650 °C in air. Influence of heat treatments on the crack propagation rates of FGH96 P/M superalloys was investigated. The results indicate that the crack propagation rates were decreased when increasing the solid solution temperature or salt bath temperature; the effect of solid solution temperature was greater than that of salt bath temperature. Lower aging temperature and shorter aging time also delayed the crack propagation rates; the effect of the aging temperature was greater than that of the aging time. In addition, the crack propagation rates were increased with the dwelling time prolonging, and its effect decreased with the aging temperature increasing.

Key words: FGH96 PM superalloy; crack propagation rate; heat treatment

Corresponding author: Wang Pu, Candidate for Ph. D., High Temperature Materials Research Group, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, P. R. China, Tel: 0086-10-62332884, E-mail: wangpu8212@yahoo.com.cn