

高温时效对 K447A 合金显微组织及力学性能的影响

张楚博, 吴文津, 盖其东, 胡聘聘, 李研佳, 郭峰伟, 谷怀鹏, 任晓冬, 汤鑫

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

摘要: 为增大K447A合金中 γ' 相尺寸以及体积分数, 并使碳化物均匀分布, 在热处理过程中加入高温时效处理, 研究了高温时效对K447A合金显微组织及性能的影响。结果表明, 经过高温时效的K447A合金晶粒内及晶界上碳化物周围形成一层 γ' 相, 能减缓裂缝沿碳化物界面破裂及生长的速率。高温时效处理可以有效提高合金的中温、高温持久寿命及伸长率。

关键词: 高温时效; K447A合金; 显微组织; 力学性能

随着燃气涡轮发动机进气口温度的不断提高, 对热端部件材料的高温性能要求也不断提高。K447A合金具有良好的铸造性能、高温强度以及耐热腐蚀性能^[1], 用于制备1 040 °C以下工作的燃气涡轮发动机涡轮叶片和导向叶片、整体叶盘、整体导向器等关键热端部件^[2-4]。在研究过程中发现, 普通热处理后 γ' 相较小, 碳化物粗大并在晶界上成条带状析出, 导致K447A合金760 °C持久寿命与伸长率偏低, 这将会影响合金铸件的使用安全性, 为了进一步增大 γ' 相尺寸以及体积分数, 并且使碳化物均匀分布, 所以在本研究热处理过程中加入高温时效处理, 并观察高温时效处理对K447A合金显微组织及性能的影响。

1 试验方法

试验用K447A母合金在500 kg真空感应炉中熔炼(VIM), 浇注成 $\Phi 80$ mm的合金锭, 化学成分见表1。然后采用表面细化壳型, 在细晶炉上重熔浇注成等轴晶试棒, 壳型预热温度为950 °C, 浇注温度为1 460 °C。分别选1 185 °C、1 210 °C与1 230 °C三个固溶温度, 试棒分别进行普通热处理与增加高温时效的热处理, 在力学性能试样机上测试760 °C/724 MPa、980 °C/200 MPa持久性能及室温拉伸性能, 取四根试样测试数据。热处理后试棒截取金相试样, 利用光学显微镜(OM)、扫描电子显微镜(SEM)表征合金的显微组织形貌, 采用能谱仪(EDS)分析相成分, 采用Image-Pro软件统计 γ' 相的尺寸和体积分数, 相同样品取3~5张照片。

2 结果分析与讨论

2.1 高温时效对力学性能的影响

表2是高温时效处理后K447A合金的拉伸性能。从表中可以看出, 与普通热处理相比, 加了高温时效处理的K447A合金的 $R_{p0.2}$ 和 R_m 有所下降, 但 A_5 提高较大。固溶温度1 185~1 230 °C的普通热处理和加了高温时效的K447A合金都满足合金技术标准的力学性能要求。

表3是高温时效处理后K447A合金的持久性能。从表中可以看出, 与普通热处理相比, 加了高温时效处理的K447A合金的760 °C/724 MPa持久寿命和断面伸长率大大提高。1 230 °C/2 h, AC+870 °C/20 h, AC处理合金的中温性能未达到合金技术标准

作者简介:

张楚博(1991-), 男, 工程师, 硕士, 主要研究方向为高温合金材料及其铸造工艺研究。E-mail: 1720011577@qq.com

通讯作者:

吴文津, 男, 助理工程师, 硕士。电话: 19801133385, E-mail: brent_woo@163.com

中图分类号: TG132.32

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)09-0913-06

收稿日期:

2020-06-16 收到初稿,
2020-06-29 收到修订稿。

所要求的性能,加了高温时效处理后,合金760 °C/724 MPa的持久寿命达到了92 h。与此同时,经过高温时效处理后,合金的980 °C/200 MPa持久寿命和断面伸长率也有所提高,但高温时效处理对980 °C/200 MPa性能的提高没有760 °C/724 MPa性能提高得明显。固溶温度1 185~1 230 °C及加了高温时效的K447A满足合金技术标准的力学性能要求。

2.2 高温时效对碳化物的影响

碳化物是等轴晶铸造高温合金重要的晶界强化相^[5-7],K447A合金铸态组织中的碳化物为汉字状或长条状的MC碳化物,不均匀地分布在晶粒内或晶界上,经EDS分析,其主要成分为HfC、TaC,含少量W及Ti,如图1所示。

图2为高温时效后K447A合金碳化物形貌。从图中

表1 K447A合金的化学成分
Table 1 Chemical composition of K447A alloy

C	Cr	Co	W	Mo	Ta	Al	Ti	Hf	B	Zr	Ni	$w_B / \%$
0.15	8.4	10.2	10.0	0.7	3.0	5.5	1.0	1.5	0.015	0.05	余量	

表2 高温时效对K447A合金室温拉伸性能的影响
Table 2 Effect of high temperature aging on room temperature tensile properties of K447A alloy

热处理制度	固溶温度/°C	高温时效温度/°C	$R_{p0.2} / \text{MPa}$	R_m / MPa	$A_5 / \%$
1 185 °C/2 h, AC+870 °C/20 h, AC	1 185		955	1 124	8.2
1 210 °C/2 h, AC+870 °C/20 h, AC	1 210		896	1 087	8.3
1 230 °C/2 h, AC+870 °C/20 h, AC	1 230		929	1 110	8.4
1 185 °C/2 h, AC+1 100 °C/4 h, AC +870 °C/20 h, AC	1 185	1 100	845	1 068	10.6
1 210 °C/2 h, AC+1 100 °C/4h, AC +870 °C/20 h, AC	1 210	1 100	844	1 071	11.0
1 230 °C/2 h, AC+1 100 °C/4 h, AC +870 °C/20 h, AC	1 230	1 100	880	1 091	10.5
技术标准要求			≥ 735	≥ 980	≥ 4

表3 高温时效对K447A合金持久性能的影响
Table 3 Effect of high temperature aging on stress rupture properties of K447A alloy

热处理制度	固溶温度/°C	高温时效温度/°C	760 °C/724 MPa		980 °C/200 MPa	
			持久寿命/h	$A_5 / \%$	持久寿命/h	$A_5 / \%$
1 185 °C/2 h, AC+870 °C/20 h, AC	1 185		115	5.7	82	8.3
1 210 °C/2 h, AC+870 °C/20 h, AC	1 210		38	4.2	69	6.4
1 230 °C/2 h, AC+870 °C/20 h, AC	1 230		13	2.3	109	5.5
1 185 °C/2 h, AC+1 100 °C/4 h, AC +870 °C/20 h, AC	1 185	1 100	141	5.5	107	6.8
1 210 °C/2 h, AC+1 100 °C/4 h, AC +870 °C/20 h, AC	1 210	1 100	88	5.1	82	10.3
1 230 °C/2 h, AC+1 100 °C/4 h, AC +870 °C/20 h, AC	1 230	1 100	92	2.9	96	9.2
技术标准要求			≥ 23	≥ 2	≥ 25	≥ 4

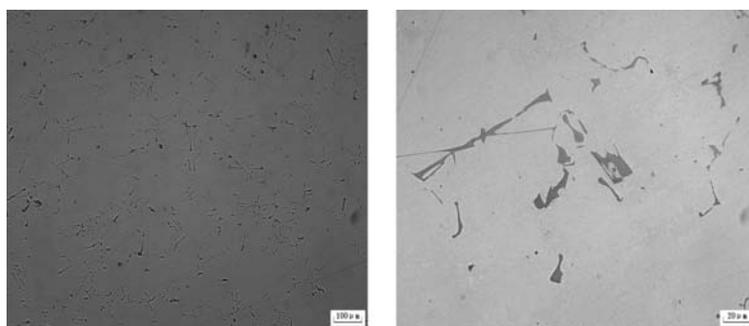


图1 K447A合金铸态中的碳化物形貌
Fig. 1 Morphology of carbides in as-cast K447A alloy

可以看出, 经过1 185 °C热处理后的碳化物仍为粗大的骨架状, 但经过高温时效处理合金的碳化物周围形成了一层 γ' 包覆膜, 而普通热处理合金的碳化物则没有 γ' 包覆膜。

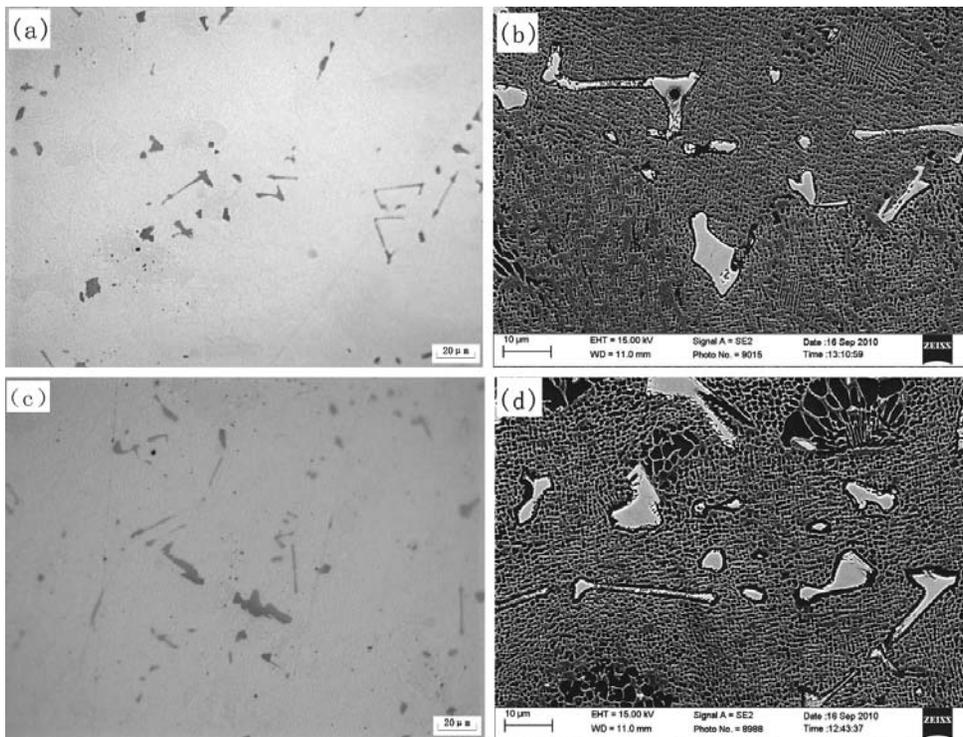
2.3 高温时效对共晶相的影响

K447A合金铸态组织中在枝晶间及晶界上存在大量葵花状 $\gamma-\gamma'$ 共晶组织, 共晶组织由 γ 相基体与长条状或块状 γ' 相以层状间隔排列而成, 如图3所示。

图4是高温时效处理后K447A合金的共晶相形貌,

从图中可以看出, 经过1 185 °C热处理后, $\gamma-\gamma'$ 共晶数量减少, 心部的网格显著减少, 共晶特征趋于不明显, $\gamma-\gamma'$ 共晶相上形成很多细小的碳化物, 这是由于热处理过程中合金中富Hf的 $\gamma-\gamma'$ 共晶释放出来的Hf与基体中残存的碳化物或MC分解释放出的碳相结合的结果, 反应式近似为: $\gamma'(\text{Hf}) + \gamma(\text{C}) = \text{MC}_2 + \gamma$ 。

与普通热处理相比, 加了高温时效处理的合金中 $\gamma-\gamma'$ 共晶相上的细小碳化物相数量更多。这是由于加了高温时效后, 合金有足够的时间进行上述反应, 因此合金中 $\gamma-\gamma'$ 共晶相上的细小碳化物相数量也就更多。



(a)、(b) 1 185 °C/2 h, AC+870 °C/20 h, AC; (c)、(d) 1 185 °C/2 h, AC+1 100 °C/4 h, AC+870 °C/20 h, AC

图2 高温时效对K447A合金碳化物形貌的影响

Fig. 2 Effect of high temperature aging on morphologies of carbides in K447A alloy

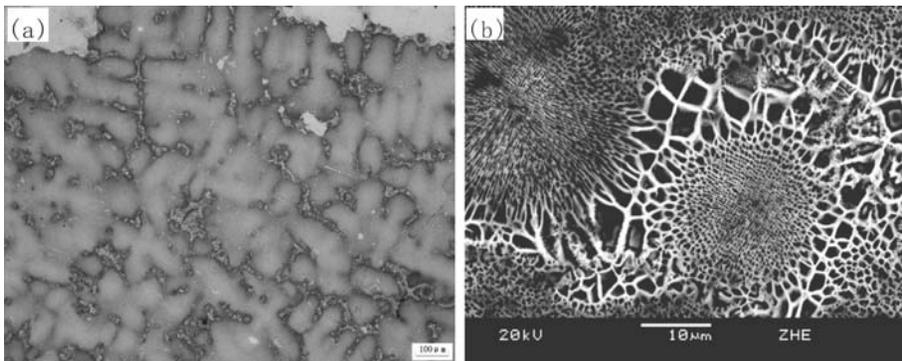
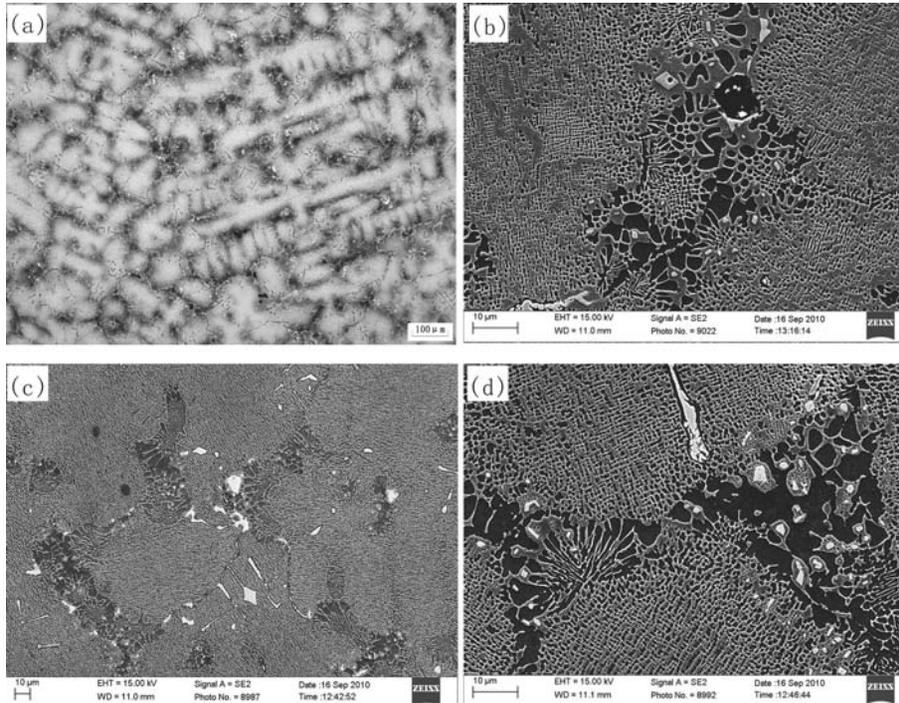


图3 K447A合金铸态组织中的共晶相形貌

Fig. 3 $\gamma-\gamma'$ eutectic morphologies of as-cast K447A alloy



(a)、(b) 1 185 °C/2 h, AC+870 °C/20 h, AC; (c)、(d) 1 185 °C/2 h, AC+100 °C/4 h, AC+870 °C/20 h, AC

图4 高温时效对K447A合金碳化物形貌的影响

Fig. 4 Effect of high temperature aging on γ - γ' eutectic morphologies of K447A alloy

2.4 高温时效对晶界的影响

图5是K447A合金铸态晶界形貌。从图中可以看出，铸态晶界上有大量条带状MC碳化物存在。

图6是高温时效处理后K447A合金的晶界形貌。从图中可以看出，经过1 185 °C普通热处理处理的K447A合金晶界仍有条带状碳化物存在。加了高温时效的合金晶界为不连续的颗粒状碳化物，晶界处不连续分布的颗粒状碳化物是合金在时效处理时产生的，经EDS定性分析后属于高Cr含量的 Cr_{23}C_6 型碳化物。且经过高温时效处理的合金中碳化物周围形成了一层 γ' 包覆膜，而普通热处理试样中碳化物则没有 γ' 包覆膜。

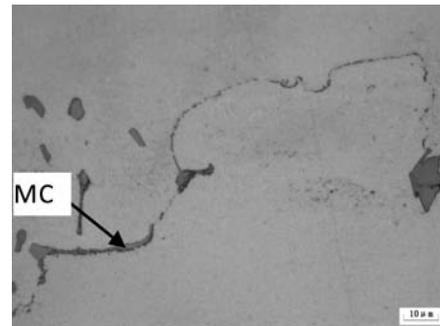
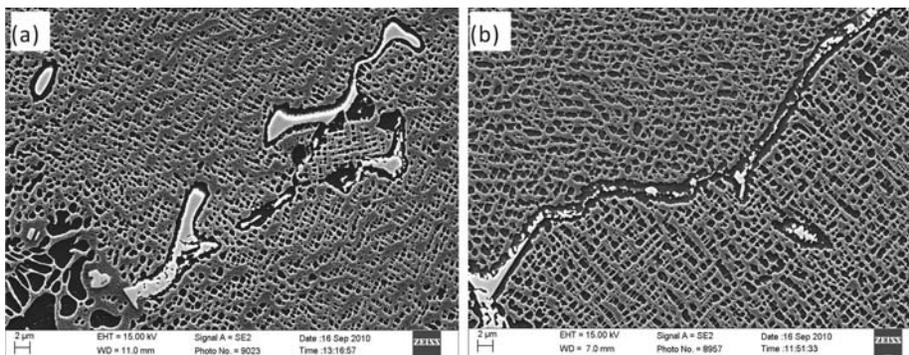


图5 K447A合金铸态晶界形貌

Fig. 5 Grain boundary of as-cast K447A



(a)、(b) 1 185 °C/2 h, AC+870 °C/20 h, AC; (c)、(d) 1 185 °C/2 h, AC+100 °C/4 h, AC+870 °C/20 h, AC

图6 高温时效对K447A合金晶界形貌的影响

Fig. 6 Effect of high temperature aging on grain boundary of K447A alloy

2.5 高温时效对 γ' 相的影响

图7是K447A合金铸态 γ' 相形貌。从图中可以看出, γ' 相为不规则立方体形貌。

图8是高温时效处理后K447A合金的 γ' 形貌。与铸态相比, 经过热处理后合金中 γ' 相体积分数有所提高, 形成了大、小两种尺寸的 γ' 相, 提高了合金的高温强度。与普通热处理(粗大 γ' 相的尺寸为 $0.38 \sim 1.02 \mu\text{m}$, γ' 体积分数为 $48\% \pm 1.3\%$) 相比, 加了高温时效的合金 γ' 相有所粗化, 粗大 γ' 相的尺寸为 $0.43 \sim 1.41 \mu\text{m}$, γ' 体积分数为 $52\% \pm 2.1\%$, 细小 γ' 相的体积分数有所增加。

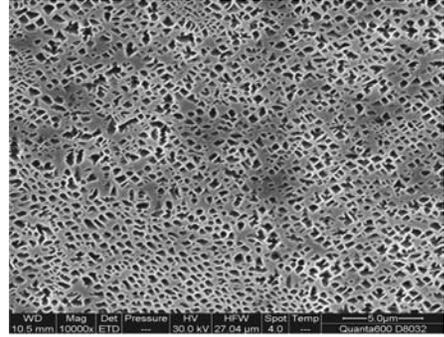
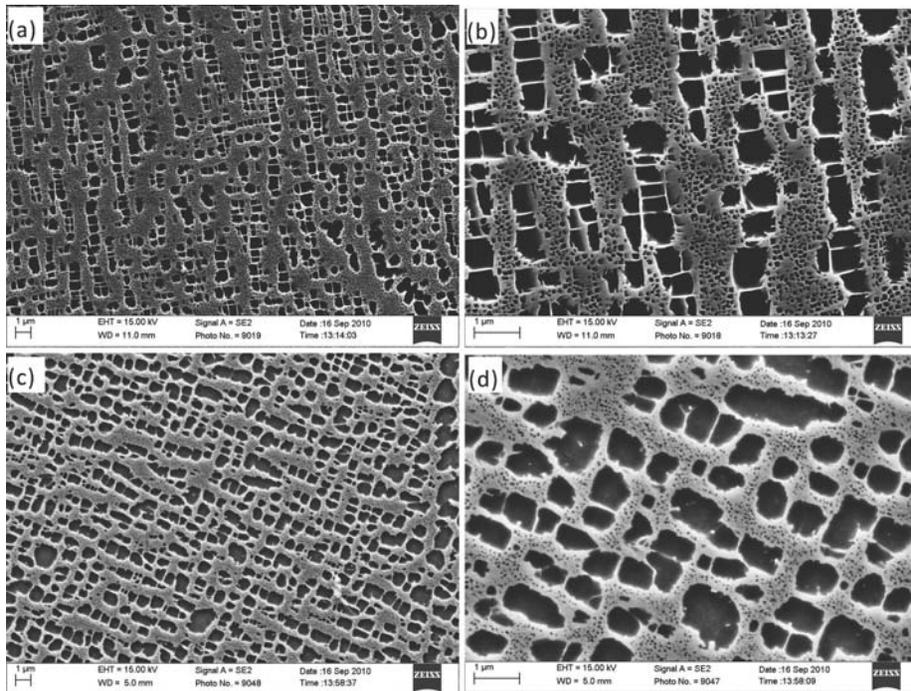


图7 K447A合金铸态 γ' 相形貌

Fig. 7 γ' phase of as-cast K447A alloy



(a)、(b) 1185 °C/2 h, AC+870 °C/20 h, AC; (c)、(d) 1185 °C/2 h, AC+1100 °C/4 h, AC+870 °C/20 h, AC

图8 高温时效处理对K447A合金 γ' 形貌的影响

Fig. 8 Effect of high temperature aging on γ' phase of K447A alloy

3 分析与讨论

K447A合金是过饱和度高的合金, 固溶处理后冷却过程中, 晶粒内粗大的初生 γ' 相溶入基体而形成过饱和的固溶体。在高温时效处理时, 晶界析出的 $M_{23}C_6$ 碳化物是属于Cr含量较高的 $Cr_{23}C_6$, γ' 在 $Cr_{23}C_6$ 碳化物界面上不均匀析出, 在 $Cr_{23}C_6$ 碳化物的周围形成一层 γ' 相包覆膜, 在经过低温时效处理时, $Cr_{23}C_6$ 碳化物的析出颗粒数量增多, 包覆 $Cr_{23}C_6$ 碳化物的 γ' 膜变厚。晶界上大量析出 $Cr_{23}C_6$ 会消耗掉大部分的Cr, 形成一个Cr贫乏区。此外, 晶界为缺陷聚集区, 晶界处的扩散速率远高于晶粒内, 因为合金中Cr大量消耗, 造成Al、Ti含量提高, 使晶界上 γ' 相的富集, 形成 γ' 相包

覆膜, γ' 膜形成后不断吞并周围 γ' 而逐渐增厚, 形成连续的包覆膜。形成于碳化物周围的 γ' 包覆膜, 具有延缓裂缝形成及生长的作用。

晶粒内骨架形MC碳化物在合金凝固期间逐渐长大, 也会在碳化物周围形成一个Ta、Hf及W贫乏区, 造成 γ' 相形成元素如Al、Ti及Ni元素的含量提高, 会在碳化物周围形成一层 γ' 膜。经过高温时效处理后碳化物周围 γ' 包覆膜变厚, 这层 γ' 包覆着骨架形碳化物, 增强了碳化物的界面结合力, 具有保护碳化物界面的作用。

K447A合金晶界上或晶粒内骨架形脆性的MC碳化物是造成持久寿命、伸长率偏低的主要原因。在高温

时效处理时大量析出 γ' 相,且 γ' 相充分成长,使得经过高温时效处理的K447A合金 γ' 相发生相粗化,因此室温拉伸强度有所降低。碳化物周围形成了 γ' 相包覆膜,并且在晶界为不连续的颗粒状,这些变化延迟了裂缝的形成,使得伸长率明显提高。经过高温时效处理后晶粒内及晶界上碳化物周围形成的 γ' 相包覆膜,减缓裂缝沿碳化物界面破裂及生长的速率,钝化了碳化物与基体的界面,因此高温时效处理可以有效提高合金的中温、高温持久寿命及伸长率。

4 结论

(1) 经高温时效的K447A合金晶粒内及晶界上碳化物周围形成的一层 γ' 相包覆膜,可减缓裂缝沿碳化物界面形成及生长。

(2) 加了高温时效处理的合金中 $\gamma-\gamma'$ 共晶相上的细小碳化物相数量更多。并且合金 γ' 相有所粗化,细小 γ' 相的体积分数也有所增加。

(3) 加入高温时效可以有效提高K447A合金的中、高温持久寿命及伸长率。

参考文献:

- [1] 李爱兰, 汤鑫, 曹腊梅, 等. 固溶温度对K447A合金显微组织及性能的影响 [J]. 钢铁研究学报, 2011 (s2): 423-426.
- [2] 郑运荣, 张德堂. 高温合金与钢的彩色金相研究 [M]. 北京: 国防出版社, 1997: 149-150.
- [3] 汤鑫, 曹腊梅, 李爱兰, 等. 高温合金整体叶轮铸造技术的研究进展 [J]. 航空材料学报, 2005, 25 (3): 57-62.
- [4] 汤鑫, 曹腊梅, 盖其东, 等. 高温合金双性能整体叶盘铸造技术 [J]. 航空材料学报, 2006, 26 (3): 93-98.
- [5] 杨富民, 孙晓峰, 康煜平, 等. K40S合金高温时效过程中二次碳化物的沉淀析出行为 [J]. 金属学报, 2001, 37 (3): 253-257.
- [6] JANUSZ S, AGNIESZKA S, JANUSZ R, et al. Selection of methods for etching carbides in MAR-M509 cobalt-base superalloy and acquisition of their images [J]. Materials Characterization, 2006, 56: 325-335.
- [7] YAN J X, ZHENG Q, SUN X F, et al. Relative stability of carbides and their effects on the properties of K465 superalloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 429: 341-347.

Effects of High Temperature Aging on Microstructure and Mechanical Properties of K447A Superalloy

ZHANG Chu-bo, WU Wen-jin, GAI Qi-dong, HU Pin-pin, LI Yan-jia, GUO Feng-wei, GU Huai-peng, REN Xiao-dong, TANG Xin
(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

Abstract:

In order to increase the size and volume fraction of γ' phase in K447A alloy and make carbides distribute uniformly, the effect of high temperature aging on the microstructure and properties of K447A alloy was studied. The results show that a layer of γ' phase is formed in the grains and around the carbides on the grain boundary of K447A alloy after high temperature aging, which can slow down the fracture and growth rate of cracks along the carbide interface. High temperature aging treatment can effectively improve the rupture life and elongation of the alloy at medium and high temperatures.

Key words:

high temperature aging; K447A superalloy; microstructure; mechanical properties