

# GH742 中 $\gamma'$ 相和 $\gamma$ 基体成分随时效时间和温度的变化规律研究

Dependence of Composition of  $\gamma'$  /  $\gamma$  Phases on Aging Time and Temperature in Superalloy GH 742

李红宇, 宋西平, 王艳丽, 陈国良

(北京科技大学 新金属材料国家重点实验室, 北京 100083)

LI Hong-yu, SONG Xi-ping, WANG Yan-li, CHEN Guo-liang  
(State Key Lab for Advanced Metals and Materials, University of  
Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**摘要:** 利用透射电镜能谱法(TEM-EDX)研究了 GH 742 合金中  $\gamma'$  和  $\gamma$  基体两相成分随温度和时效时间的变化规律。结果表明: 合金在 1050℃ 时效时,  $\gamma'$  相和  $\gamma$  基体的成分在时效初期变化较大, 当时效时间超过 1440min 后,  $\gamma'$  相和  $\gamma$  基体的成份基本稳定。合金在 750~1100℃ 时效时,  $\gamma'$  相和  $\gamma$  基体的成分均随着温度的升高而发生变化, 其中  $\gamma$  基体的成分随温度变化较明显。合金中各元素在  $\gamma'$  和  $\gamma$  两相中的偏析率  $C_{\gamma'}/C_{\gamma}$  变化规律研究表明: Ti, Al, Nb, Ni 等  $\gamma'$  形成元素的偏析率均随着时效温度的升高而降低, 而 Cr, Co, Mo 等  $\gamma$  形成元素的偏析率均随着时效温度的升高而增大。

**关键词:** 高温合金; 相成分; 能谱分析 EDX; 偏析率  $C_{\gamma'}/C_{\gamma}$

**中图分类号:** TG132.3+2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2009)07-0012-04

**Abstract:** The phase composition of  $\gamma'$  phase and  $\gamma$  matrix in GH742 was investigated by energy dispersive of X-ray spectroscopy (EDX) in an analysis transmission electron microscope (TEM-EDX). The dependence of composition of  $\gamma'$  and  $\gamma$  phase on aging time indicates that the composition of  $\gamma'$  and  $\gamma$  phase evolves drastically in short aging time at the temperature of 1050 °C and reaches the equilibrium condition when aging for 1440 min. The dependence of composition of  $\gamma'$  and  $\gamma$  phase on temperature indicates that the composition of  $\gamma'$  and  $\gamma$  phases evolves with the increasing temperature in the range of 750 °C to 1100 °C. The dependence of partitioning ratios  $C_{\gamma'}/C_{\gamma}$  on temperature shows that the partitioning ratios  $C_{\gamma'}/C_{\gamma}$  of  $\gamma'$ -forming elements Ti, Al, Nb, Ni have a decrease and those of  $\gamma$ -forming elements Cr, Co, Mo have an increase with the temperature increasing.

**Key words:** superalloy; phase composition; EDX; partitioning ratios  $C_{\gamma'}/C_{\gamma}$

镍基高温合金是目前先进航空发动机和工业燃气轮机涡轮叶片等热端部件的主要材料, 占发动机用材总重量的一半以上, 其使用温度一般在 650~1100℃ 范围内。合金组织主要由面心立方结构的  $\gamma$  基体和与基体呈共格析出的强化  $\gamma'$  相颗粒组成。合金的强化方式主要是固溶强化和第二相强化。镍基高温合金第二相强化的一个重要方面是共格应力强化, 即与基体呈共格析出的  $\gamma'$  颗粒在阻碍或钉扎位错运动时引起的共格弹性应变在  $\gamma'$  颗粒周围形成高的弹性应力场。合金的共格应力强化效果主要取决于  $\gamma'$  相和  $\gamma$  基体之间的晶格错配度  $\delta$  ( $\delta = \frac{2(a_{\gamma'} - a_{\gamma})}{(a_{\gamma'} + a_{\gamma})}$ )。其中  $\gamma'$  相与  $\gamma$  基体的晶格错配度  $\delta$  越大, 弹性应力场越强, 相应的强化效果也越显著<sup>[1]</sup>。而  $\gamma'$  相与  $\gamma$  基体的晶格错配度  $\delta$

与两相晶格常数  $a_{\gamma'}$  和  $a_{\gamma}$  有关<sup>[2]</sup>, 当  $\gamma'$  相与  $\gamma$  基体两相成分微小变化时即可引起两相晶格常数  $a_{\gamma'}$  和  $a_{\gamma}$  的明显变化, 从而引起两相晶格错配度  $\delta$  的变化并导致  $\gamma'$  相强化效果的减弱或  $\gamma'$  相自身的不稳定并最终导致合金性能的下降<sup>[3,4]</sup>。因此, 了解不同温度和时效时间内合金中  $\gamma'$  相和  $\gamma$  基体的元素分布特征, 对进一步研究高温合金的组织, 热处理工艺, 高温力学性能有重要意义。

目前关于高温合金中  $\gamma'$  和  $\gamma$  基体两相成分随温度和时间的变化规律研究表明, 高温合金在不同时效温度后  $\gamma$  基体的成分变化较明显<sup>[5-9]</sup>。而  $\gamma'$  相成分随温度和时间的变化规律研究却出现不同结果。例如, Y. Shimaunuki<sup>[5]</sup>, Ursula Hemmersmeier<sup>[6]</sup> 和 D. Blavete<sup>[7,8]</sup> 等人的实验结果表明, 高温合金在不同温

度时效不同时间后,合金中的  $\gamma'$  相成分发生变化。而 E. H. Van Der Molen<sup>[9]</sup> 等人的研究结果表明合金在不同温度时效不同时间后  $\gamma'$  相成分内几乎没有变化,即  $\gamma'$  相成分不受温度和时效时间的影响。所以,鉴于高温合金中相成分随温度和时间的变化规律研究结果存在分歧,本工作利用透射电镜所附带的能谱仪 (TEM-EDX) 研究了 GH 742 合金中  $\gamma'$  相和  $\gamma$  基体的成分随温度和时间的变化规律。

## 1 实验材料和方法

镍基高温合金 GH 742 是一种高合金化的现代涡轮盘材料。合金中含有大量  $\gamma'$  相形成元素 Ti, Al, Nb 等,其中 Al+Ti 含量达 5.2% (质量分数,下同),合金中  $\gamma'$  相含量可达 35% ~ 39%<sup>[10]</sup>。本实验选用的 GH 742 合金采用真空感应+真空自耗的双联熔炼工艺制备而成,其主要成分如下: Cr 14.15%, Mo 5.03%, Ti 2.59%, Al 2.49%, Nb 2.62%, Co 10.14%, W 0.2%, Fe 0.16%, Ni 为余量。实验首先将合金在 1200℃ 完全固溶 1h 后得到过饱和的  $\gamma$  基体。为研究合金中  $\gamma'$  和  $\gamma$  基体成分随时间的变化规律,将试样在 1050℃ 分别时效 120, 300, 1440, 2880, 4320min 后快速淬火。为研究合金中  $\gamma'$  和  $\gamma$  基体相成分随温度的变化规律,将完全固溶处理后的试样在 750, 850, 950, 1050, 1080, 1100℃ 分别时效一定时间后快速淬火。快速淬火是为了抑制合金在冷却过程中已有  $\gamma'$  相的长大和细小  $\gamma'$  相从过饱和  $\gamma$  基体中的重新析出,从而有效保留不同温度下  $\gamma'$  和  $\gamma$  基体两相的原

始成分。实验中分别选用了氩气,液氮和 15% 冰盐水作为淬火介质,并利用高分辨场发射扫描电镜 (FEG-SEM) 观察了经不同介质淬火后合金中  $\gamma'$  相的析出分布。FEG-SEM 试样的制备采用机械抛光和电解腐蚀的方法,电解腐蚀规范为: 腐蚀液 9gCrO<sub>3</sub> + 90mL H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> + 30mL H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 腐蚀电压 3 ~ 4V, 时间 8 ~ 12s。

利用具有高空间分辨能力的透射电镜 Tecnai G20 所附带的能谱仪分析测定了合金经不同温度和时间的时效后  $\gamma'$  和  $\gamma$  基体的相成分。为了准确分析小  $\gamma'$  颗粒和  $\gamma$  通道的微区成分,必须保证 TEM 薄样品能谱的空间分辨率,实验中利用了透射电镜附带的扫描附件 (STEM) 所提供的纳米探针模式 (Nanoprobe), 探针的光斑尺寸小于 20nm。为保证能谱测定的精确度,每次能谱采样时间设定为 5 ~ 8min 以获得足够的总计数量,并且每一成分测定结果为 10 个测量点的平均值。TEM-EDX 样品制备采用双喷减薄的方法,双喷液为: 10mL HClO<sub>4</sub> + 25mL C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH + 65C<sub>4</sub>H<sub>9</sub>OH, 双喷电压和温度分别为 25V 和 -30℃。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 淬火介质的确定

图 1 为合金在 1200℃ 固溶 1h 后用氩气,液氮和 15% 冰盐水淬火后的场发射扫描电镜照片。结果表明,在 1200℃ 固溶 1h 后,尺寸为  $\phi 3\text{mm} \times 2\text{mm}$  的试样经 15% 冰盐水淬火后,在过饱和的  $\gamma$  基体中没有观察到冷却过程中  $\gamma'$  颗粒的重新析出。

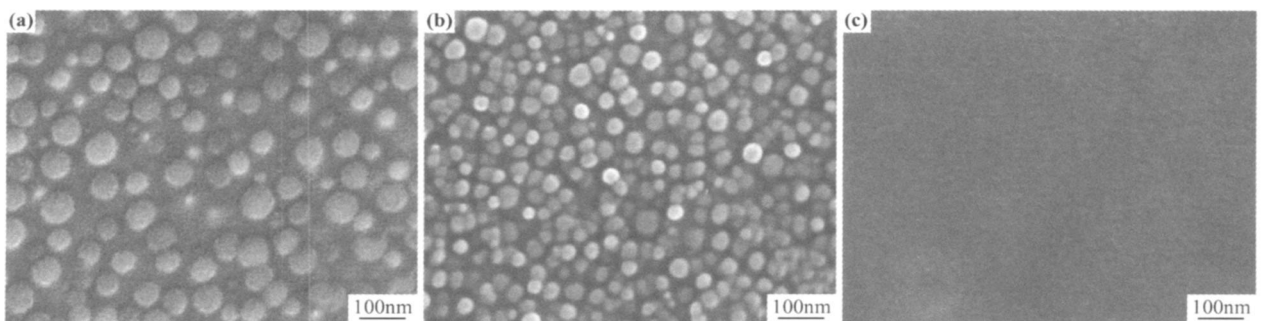


图 1 固溶后经不同介质淬火后合金的组织 (a) 氩气; (b) 液氮; (c) 冰盐水

Fig. 1 Microstructure after solution treatment then quenched by current of argon (a), liquid nitrogen (b) and ice brine (c)

图 2 为合金经 1200℃ × 1h 固溶+ 1050℃ × 4h 时效后用 15% 冰盐水淬火的合金组织照片。结果表明,经 15% 冰盐水淬火后的  $\gamma$  基体中仅存在 1050℃ 时效时所析出的粗大  $\gamma'$  颗粒而没有观察到淬火过程中冷却  $\gamma'$  颗粒的析出。因此确定利用 15% 冰盐水作为淬

火介质可以有效抑制冷却过程中  $\gamma'$  颗粒在  $\gamma$  基体中的重新析出。

$$\text{根据 Newtonian 冷却定律 } \frac{dt}{d\theta} = \frac{hA}{V\rho C_p} (t_1 - t_2)^{[11]}$$

(V: 试样体积, h: 热传导系数, A: 试样表面积,  $\rho$ : 材料

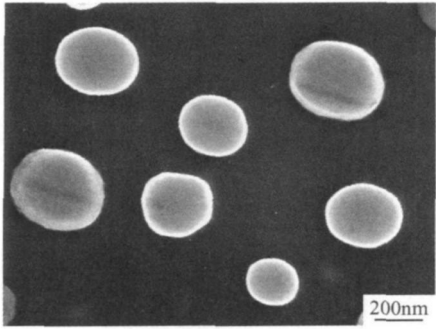


图 2 1200 °C × 1h+ 1050 °C × 4h+ 冰盐水淬火后的合金组织  
Fig. 2 Microstructure of sample quenched by ice brine after 1200 °C × 1h+ 1050 °C × 4h

密度,  $t_1$ ,  $t_2$ : 试样的初始和最终温度,  $C_p$ : 比热容)。可以计算得出, 当尺寸为  $\phi 3\text{mm} \times 2\text{mm}$  的合金试样从 1200 °C 和 1050 °C 淬入冰盐水时, 冷速分别为 57660 K/min 和 48780 K/min, 其中冰盐水的热传导系数  $h$  取 2700 W/m<sup>2</sup>K<sup>[12]</sup>。这一计算值与 Kusabiraki K 等人<sup>[13]</sup> 提出的抑制高温合金中  $\gamma'$  颗粒形核的最小临界

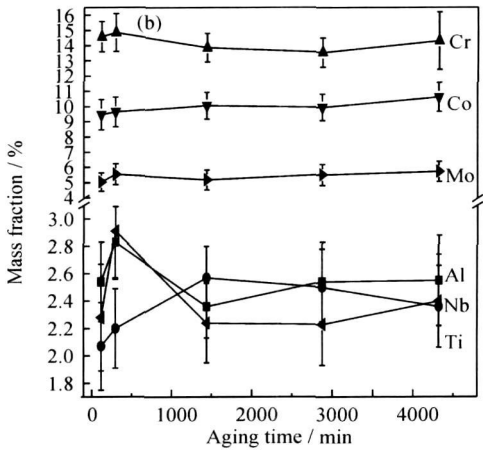
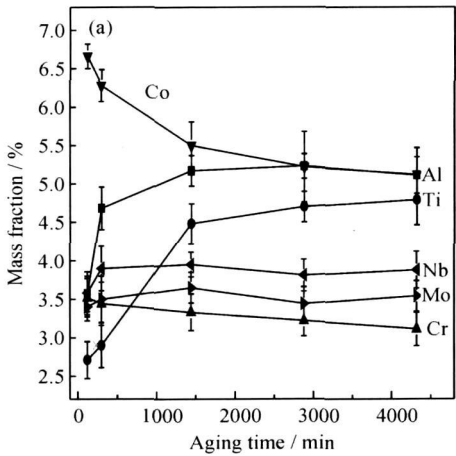


图 3 合金中  $\gamma'/\gamma$  相成分随时效时间的变化规律,  $T=1050\text{ °C}$  (a)  $\gamma'$  相; (b)  $\gamma$  基体  
Fig. 3 Dependence of composition of  $\gamma'/\gamma$  phases on aging time at 1050 °C (a)  $\gamma'$  phase; (b)  $\gamma$  matrix

2.3  $\gamma'/\gamma$  相成分随温度的变化规律

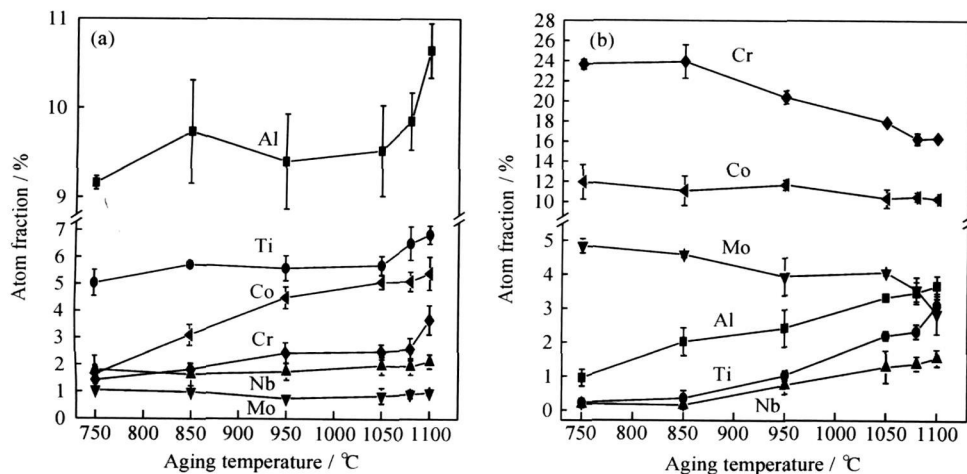
图 4 为合金在 750, 850, 950, 1050, 1080, 1100 °C 分别时效 1440 min 后测得的  $\gamma'$  和  $\gamma$  基体相成分随温度的变化规律。结果表明, 随着温度的变化,  $\gamma'$  相和  $\gamma$  基体中各合金元素的含量发生了变化。其中 Al, Ti, Nb 等  $\gamma'$  相形成元素在  $\gamma'$  相和  $\gamma$  基体中的含量均随着温度的升高而增加。在  $\gamma'$  相中, Al, Ti, Nb 的含量分别增加了 1.1% (原子分数, 下同), 1.8%, 2.0%, 在  $\gamma$  基体中分别增加了 2.97%, 3.0%, 1.4%。并且 Cr, Co, Mo 等非  $\gamma'$  相形成元素含量在  $\gamma'$  相中随温度升高分别增加了 2.2%, 3.8%, 0.9%, 而在  $\gamma$  基体中 Cr,

冷速 10<sup>4</sup> K/min 相一致。  
2.2  $\gamma'/\gamma$  相成分随时间的变化规律

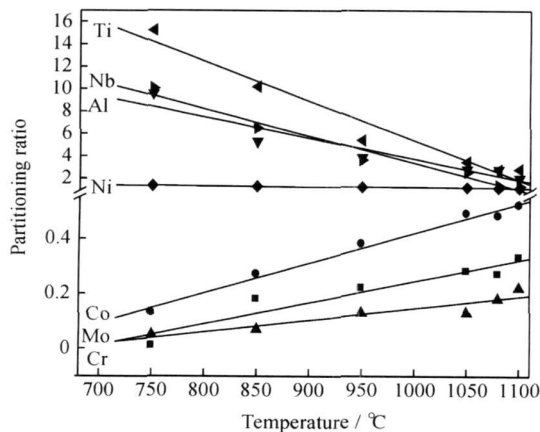
图 3 为合金在 1050 °C 分别时效 120, 300, 1440, 2880, 4320 min 后, 合金中各元素在  $\gamma'$  相和  $\gamma$  基体中的分布随时间的变化规律。结果表明, 合金在 1050 °C 时效时, 当时效时间少于 1440 min 时  $\gamma'$  和  $\gamma$  两相成分变化较大, 其中  $\gamma'$  相中的 Al, Ti, Nb 等  $\gamma'$  相形成元素含量随时间延长迅速增加而  $\gamma$  形成元素 Co 的含量迅速减小, Cr 和 Mo 元素含量变化不明显。在  $\gamma$  基体中  $\gamma'$  形成元素 Al, Ti, Nb 在短时间时效时, 其含量变化较大而  $\gamma$  形成元素的含量变化幅度较小。当时效时间超过 1440 min 后,  $\gamma'$  相和  $\gamma$  基体两相成分随时间延长而基本保持不变。由  $\gamma'$  相析出特点而知, 合金在时效初期, 过饱和  $\gamma$  基体中  $\gamma'$  相的大量析出和已析出  $\gamma'$  相的迅速长大使得  $\gamma'$  和  $\gamma$  两相成分变化明显。当时效一定时间后,  $\gamma'$  颗粒的析出和长大均趋于稳定, 各合金元素在  $\gamma'$  和  $\gamma$  相之间的扩散也随之趋于稳定, 因此两相成分随时效时间的延长基本保持不变。

Co, Mo 的含量随温度升高分别降低了 7.7%, 2.6%, 1.5%。并且合金中  $\gamma$  基体的相成分随温度升高变化明显, 这可能是由于较高温度时效时, 部分  $\gamma'$  相重新回溶入  $\gamma$  基体从而引起  $\gamma$  基体中 Al, Ti, Nb 等  $\gamma'$  相形成元素含量增加, Cr, Co, Mo 等  $\gamma$  相偏析元素含量降低。

2.4 合金元素偏析率  $C_\gamma/C_\gamma$  随温度的变化规律  
图 5 为合金中各元素在  $\gamma'$  和  $\gamma$  两相中的偏析率  $C_\gamma/C_\gamma$  随温度的变化规律。由图可见, 各元素在  $\gamma'$  相和  $\gamma$  基体中的偏析系数均随温度的升高而发生变化。其中偏析率大于 1 的  $\gamma'$  形成元素 Ti, Al, Nb, Ni 的偏

图4 不同温度时效后合金中的  $\gamma'$  相和  $\gamma$  基体成分 (a)  $\gamma'$  相; (b)  $\gamma$  基体Fig. 4 Dependence of composition of  $\gamma' / \gamma$  phases on temperature (a)  $\gamma'$  phase; (b)  $\gamma$  matrix

析率随着温度升高而降低, 偏析率  $C_{\gamma'} / C_{\gamma}$  小于 1 的 Cr, Co, Mo 等非  $\gamma'$  形成元素的偏析率随着温度的升高而增大。并且在 1100 °C 时, 大多元素的偏析率值接近 1。由此可见, 各元素在合金中作用的确不同, 其中偏析率  $C_{\gamma'} / C_{\gamma}$  小于 1 的 Cr, Co, Mo 等元素对合金主要是固溶强化作用, 而偏析率大于 1 的 Ti, Al, Nb 等元素主要起第二相强化作用。并且随着温度的升高, 合金元素扩散变得容易以及合金基体析出的  $\gamma'$  相较少, 从而使合金元素的偏析率逐渐接近 1。

图5 不同温度下合金元素在  $\gamma' / \gamma$  相中的偏析率Fig. 5 Dependence of partitioning ratios  $C_{\gamma'} / C_{\gamma}$  on temperature

### 3 结论

(1) 利用 15% (质量分数) 冰盐水作为淬火介质能够有效抑制合金在高温冷却过程中冷却  $\gamma'$  相从过饱和  $\gamma$  基体中的重新析出。

(2) 当合金在 1050 °C 时效不同时间, 合金中  $\gamma'$  相

和  $\gamma$  基体两相成分在时效早期变化剧烈。当时效时间达到 1440 min 后,  $\gamma'$  和  $\gamma$  基体两相成分趋于稳定。

(3) 当合金在 750~1100 °C 时效时, 合金中  $\gamma'$  相和  $\gamma$  基体中的 Al, Ti, Nb 等  $\gamma'$  相形成元素含量均随温度的升高而增加。Cr, Co, Mo 等非  $\gamma'$  相形成元素含量在  $\gamma'$  相中随温度升高而增加但在  $\gamma$  基体中却随温度升高而降低。并且合金中  $\gamma$  基体的成份随温度升高变化明显。

(4) 当合金在 750~1100 °C 时效时, Ti, Al, Nb, Ni 等  $\gamma'$  形成元素的偏析率  $C_{\gamma'} / C_{\gamma}$  随温度的升高而降低。而 Cr, Co, Mo 等非  $\gamma'$  形成元素的偏析率  $C_{\gamma'} / C_{\gamma}$  随温度的升高而增大。

### 参考文献

- [1] SIMS C T, STOLOFF N S, HAGEL W C. Superalloy II [M]. John Wiley & Sons Inc, 1987. 97- 131.
- [2] WATANABA R, KUNO T. Alloy design of nickel-base precipitation hardened superalloys [J]. J Iron Steel Inst Jan, 1976, 16: 437- 446.
- [3] MISIMA Y, OCHIAI S, SUZUKI T. Lattice parameters of Ni, Ni3Al and Ni3Ge solid solutions with additions of transition and B-subgroup elements [J]. Acta Metall, 1985, 33: 1161- 1169.
- [4] MICHELL R J, PREUSS M, HARDY M C, et al. Influence of composition and cooling rate on constrained and unconstrained lattice parameters in advanced polycrystalline nickel-base superalloy [J]. Mater Sci Eng, 2006, A423: 282- 291.
- [5] SHIMANUKI Y, MASUI M, DOI H. The variation with aging condition of the composition of phase in a Ni-base superalloy UD4-MET520 [J]. Scripta Metall, 1976, 10: 805- 808.
- [6] URSULA HEMMERSMEIER, MONIKA FELLER-KNIEPMEIER. Element distribution in the macro- and microstructure of nickel base superalloy CMSX-4 [J]. Mater Sci Eng, 1998, A248: 87- 97.

(下转第 22 页)

层完全为  $Ta_2O_5$ , 并有电畴结构出现, 表层以下的致密覆盖层为 TaC 微粉被氧化烧蚀后  $Ta_2O_5$  和残余 TaC 微粉的致密混合物; 过渡层中 TaC 微粉烧蚀氧化程度较轻, 为  $Ta_2O_5$  和 TaC 的非致密混合物。

### 参考文献

- [1] CHOURY J J. Carbon-Carbon Materials for Nozzles of Solid Propellant Rocket Motors [R]. AIAA Paper No76-609, 1976, 76.
- [2] LAUB B. Thermochemical Ablation of Tantalum Carbide Loaded Carbon-Carbons [R]. AIAA-80-1476, 1980.
- [3] NANCY J S, JAMES A D, NATHAN S J, et al. Materials for Engine Applications Above 3000 °C—an Overview [R]. NASA Technical Memorandum 100169, 1987, 5.
- [4] 苏君明. C/C 喉衬材料的研究和发展 [A]. 第 18 届炭-石墨材料学术会论文集 [C]. 西安: 电工技术学会炭-石墨材料专业委员会, 2000. 198-208.
- [5] 崔红, 苏君明, 李瑞珍, 等. 添加难熔金属碳化物提高 C/C 复合材料抗烧蚀性能的研究 [J]. 西北工业大学学报, 2000, 18(4): 669-673.
- [6] 阎志巧, 熊翔, 肖鹏, 等. 液相浸渍 C/C 复合材料反应生成 TaC 的形貌及其形成机制 [J]. 无机材料学报, 2005, 20(5): 1195-1200.
- [7] 阎志巧, 熊翔, 肖鹏, 等. Ta 有机溶液热处理转变生产 TaC 的过程 [J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(10): 1538-1543.
- [8] 相华. 化学液相浸渍法制备 C/G-TaC 复合材料及其烧蚀性能研究 [D]. 西安: 西北工业大学硕士学位论文, 2006.
- [9] XIANG H, XU Y D, ZHANG L T, et al. Synthesis and microstructure of tantalum carbide and carbon composite by liquid precursor route [J]. Scripta Materialia, 2006, 55(4): 339-342.
- [10] 李江鸿, 张宏波, 熊翔, 等. 含钽树脂先驱体转变生成 TaC 的过程研究 [J]. 无机材料学报, 2007, 22(5): 973-978.
- [11] 陈招科, 熊翔, 李国栋, 等. 工艺参数对 CVI-TaC 沉积速率的影响 [J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(2): 2047-2053.
- [12] 赵磊. 添加碳化钽炭/炭复合材料的制备及其性能研究 [D]. 长沙: 中南大学硕士学位论文, 2007.
- [13] NASLAIN R. Design, preparation and properties of non-oxide CMCs for application in engines and nuclear reactors: an overview [J]. Compos Sci Technol, 2004, 64: 155-170.
- [14] JAMET J, DAMANGE D, LOUBEAU J. Nouveaux matériaux composites alumina-alumine rupture fortement dissipative et leur preparation [P]. Fr Patent: 2526785. 1983.
- [15] LANGE F F, LAM D C C, SUDRE O, et al. Powder processing of ceramic matrix composites [J]. Mater Sci Eng A, 1991, 144: 143-152.
- [16] LANGE F F, TU W C, EVANS A G. Processing of damage tolerant, oxidation-resistant ceramic matrix composites by a precursor infiltration and pyrolysis method [J]. Mater Sci Eng A, 1995, 195: 145-150.
- [17] SIM S M, KERANS R J. Slurry infiltration of 3-D woven composites [J]. Ceram Eng Sci Proc, 1992, 13: 632-641.
- [18] MOORE MAH T, KELLER K A. 3D composite fabrication through matrix slurry pressure infiltration [J]. Ceram Eng Sci Proc, 1994, 15(4): 113-120.
- [19] SUZUKI K, NAKANO K. Structure and characterization of SiC matrix composite via slurry and pulse CVI Joint process [J]. Ceram Eng Sci Proc, 1997, 18(3): 427-433.
- [20] 郑文伟, 陈朝辉, 姚俊涛. 碳纤维编织物中引入 SiC 微粉的超声工艺研究 [J]. 材料工程, 2004, (3): 31-34.
- [21] 郑文伟, 陈朝辉, 姚俊涛. 碳纤维编织物中真空浸渍引入 SiC 微粉的工艺研究 [J]. 航空材料学报, 2005, 25(2): 55-58.
- [22] 刘建军, 苏君明, 陈长乐. 炭/炭复合材料烧蚀性能影响因素分析 [J]. 炭素, 2003, (2): 15-19.
- [23] 方东红, 李瑞珍, 郝志彪. 大型整体毡炭/炭复合材料的密度分布及影响 [J]. 碳素, 2004, (3): 28-32.
- [24] 殷庆瑞, 祝炳和. 功能陶瓷的显微结构、性能与制备技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005. 15-21, 89-92, 125-131.
- [25] 季凌飞, 蒋毅坚. 激光烧结氧化钽基功能陶瓷 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006. 10-14.

基金项目: 国家自然科学基金 (50672076)

收稿日期: 2008-04-01; 修订日期: 2008-08-10

作者简介: 谢翀博 (1977—), 男, 工程师, 硕士研究生, 主要从事料浆浸渗法制备 3D C/SiC-TaC 抗烧蚀复合材料的研究, 联系地址: 西北工业大学 547 信箱 (710072), E-mail: npux cb@163.com

(上接第 15 页)

- [7] CHAMBRELAND S, BLAVETE D, BOUET M. Atom-probe investigation of the early stages of decomposition in a nickel-base superalloy [J]. Journal De Physique, 1987, 48: 361-367.
- [8] DUVAL S, CHAMBRELAND S, CARON P, et al. Phase composition and chemical order in the single crystal nickel base superalloy MC2 [J]. Acta Metall, 1994, 42: 185-194.
- [9] VAN DER MOLEN E H, OBLAK J M, KREDGE O H. Control of  $\gamma'$  particle size and volume fraction in the high temperature superalloy Udimet700 [J]. Met Trans, 1971, 2: 1627-1633.
- [10] 中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册第二卷 [M]. 第 2 版. 北京: 中国标准出版社, 2004. 482.
- [11] REINHARDT SCHUHMAN JR. Metallurgical Engineering, Vol. 1 Engineering Principles [M]. Addison-Wesley Press, 1952. 276.

- [12] SHIN J S, BAE J S, KIM H J, et al. Ordering-disordering phenomena and micro-hardness characteristics of B2 phase in Fe (5%-6.5%) Si alloys [J]. Mater Sci Eng, 2005, A407: 282-290.
- [13] KUSABIRAKI K, ZHANG X M, OOKA T. The growth of  $\gamma'$  precipitates in a 53Ni-20Co-15Cr superalloy [J]. Iron Steel Inst Jan Int, 1995, 35: 1115-1120.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50471097)

收稿日期: 2008-06-30; 修订日期: 2008-10-15

作者简介: 李红宇 (1973—), 女, 博士生, 现主要从事高温合金方面的研究, 联系地址: 北京科技大学新金属材料国家重点实验室 (100083), E-mail: lihongyu97@126.com