

# 热处理制度对 K417G 铸造高温合金组织和性能的影响

谢秋峰<sup>1, 2</sup>, 熊家帅<sup>1, 2</sup>, 代淑荣<sup>2</sup>, 王晓慧<sup>2</sup>, 陈兴福<sup>1, 2</sup>, 吴剑涛<sup>1, 2</sup>, 朱小平<sup>1, 2</sup>

(1. 北京钢研高纳科技股份有限公司, 北京 100081; 2. 河北钢研德凯科技有限公司, 河北保定 071000)

**摘要:** 对K417G合金经过“1 080 °C/4 h, AC+870 °C/12 h, AC”固溶+时效热处理后的显微组织、性能进行了研究。结果表明, 与铸态相比, 经“1 080 °C/4 h, AC”固溶处理后, 铸态部分 $\gamma$ '相已经溶解, 并且初生 $\gamma$ '相附近聚集着尺寸更小的二次 $\gamma$ '相颗粒; 室温抗拉强度和塑性提高, 而900 °C抗拉强度变化不大, 塑性指标却明显降低。再经“870 °C/12 h, AC”时效处理后,  $\gamma$ '相呈现为规则的立方形, 二次 $\gamma$ '相有所长大, 尺寸约为20~100 nm; 900 °C塑性指标有一定提升, 其他力学性能与铸态相比变化不明显。

**关键词:** K417G; 热处理; 显微组织; 力学性能

K417G合金是在 K417合金基础上发展而来的镍基铸造高温合金, 其具有密度小、塑性好、中温强度高、组织稳定性高、铸造工艺优良等优点<sup>[1]</sup>。K417G在国内应用范围广、成熟度高、价格便宜, 广泛应用于燃气涡轮叶片、导向叶片、整体叶盘及其他高温部件, 可在950 °C长期使用<sup>[2]</sup>。采用K417G合金生产的零件使用状态通常为铸态<sup>[3-5]</sup>。由于铸造工艺不同, 零件尺寸厚度不同, 加之镍基铸造高温合金凝固期间容易形成成分偏析, 最终得到的显微组织形貌差别较大, 力学性能波动较大, 美国相似牌号合金IN100多为热处理状态使用, 而国内对K417G合金的热处理研究很少, 为此, 本研究开展了K417G合金的热处理研究, 探讨热处理对合金组织和性能的影响, 以期改善K417G合金的显微组织和力学性能。

## 1 试验材料与方法

本研究采用ZG-1.5L型真空感应炉熔炼K417G母合金, 其合金主要化学成分如表1所示, 然后采用熔模铸造法, 在ZG-0.01L型真空感应炉中重熔母合金后, 在1 420~1 440 °C温度范围内浇注 $\Phi 5$  mm标准成形试棒(灯笼型模组, 硅溶胶型壳), 试棒尺寸如图1所示。

表1 K417G合金的化学成分

Table 1 The chemical compositions of K4169 alloy

$w_B/\%$

C	Co	Cr	Mo	Al	Ti	V	B	Zr	Mn	Si	P	S	Fe	Ni
0.18	10.18	8.99	3.03	5.28	4.55	0.76	0.017	0.069	0.000 6	0.014	<0.000 5	0.002	0.073	余量

作者简介:

谢秋峰(1985-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为铸造高温合金及其精铸工艺。电话: 13436716391, E-mail: xie\_qiufeng@126.com

中图分类号: TG249

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)02-0150-04

收稿日期:

2023-10-29 收到初稿,  
2023-12-22 收到修订稿。

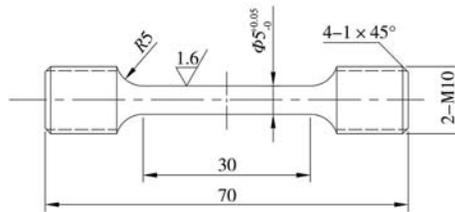


图1 标准试棒尺寸图

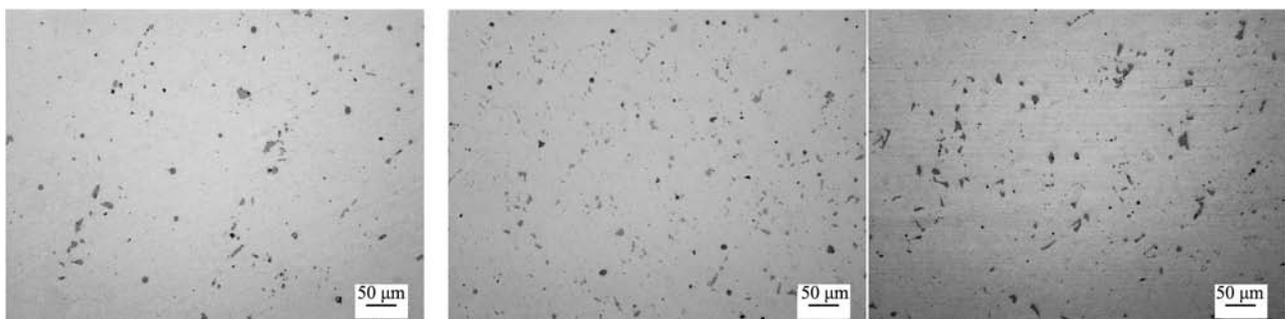
Fig. 1 Dimensional drawing of tensile test bar

本试验参照国外IN100合金、IN731合金、Rene100合金资料<sup>[6-7]</sup>，研究固溶（1 080 °C/4 h，AC）+时效（870 °C/12 h，AC）热处理对K417G合金组织和性能的影响。分析K417G合金铸态、固溶态、固溶+时效态下的显微组织，并测试分析三种状态的试样的室温和高温拉伸性能。不同状态下显微组织的观察采用OLYMPUS GX71光学显微镜， $\gamma'$ 相的观察采用ZEISS-SUPRA55场发射扫描电子显微镜进行，采用电解腐蚀法对试样进行腐蚀，电解腐蚀剂为：16 g  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ +10 mL  $\text{H}_2\text{SO}_4$ +170 mL  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ，电压：5~6 V，电流密度：0.5 A/cm<sup>2</sup>，时间：10~20 s。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 不同状态下碳化物的形貌观察

图2为K417G合金铸态与热处理后的碳化物形貌照片，从图中可以看出，三种状态下的碳化物形貌无明显差别，大都为块状或颗粒状，经固溶（1 080 °C/4 h，AC）处理后，碳化物尺寸变小，数量增多，再经时效（870 °C/12 h，AC）处理后又变得跟铸态差别不大，但有的碳化物形态为细长条状，经能谱分析，该碳化物多为MC型碳化物。



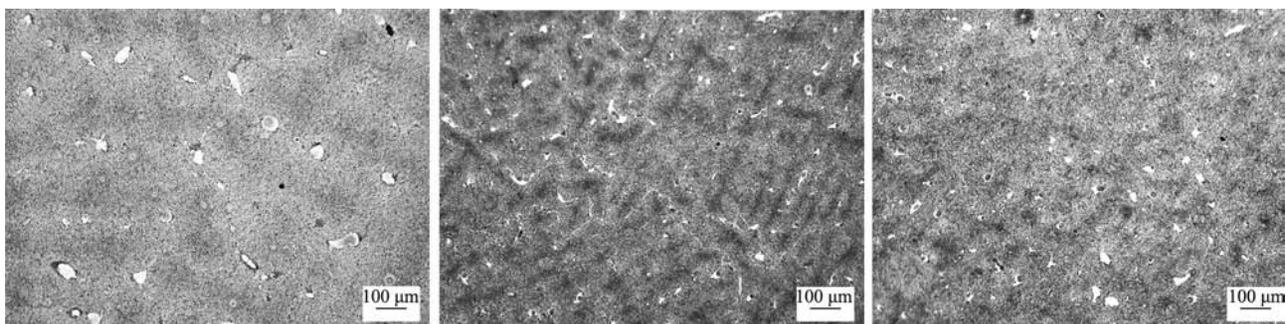
(a) 铸态

(b) 1 080 °C/4 h, AC

(c) 1 080 °C/4 h, AC+870 °C/12 h, AC

图2 K417G合金铸态与热处理后的碳化物对比照片

Fig. 2 Carbide morphology of K417G alloy as cast and after heat treatment



(a) 铸态

(b) 1 080 °C/4 h, AC

(c) 1 080 °C/4 h, AC+870 °C/12 h, AC

图3 K417G合金铸态与热处理后的显微组织对比照片

Fig. 3 Optical microstructure of K417G alloy as cast and after heat treatment

### 2.2 不同状态下显微组织的观察

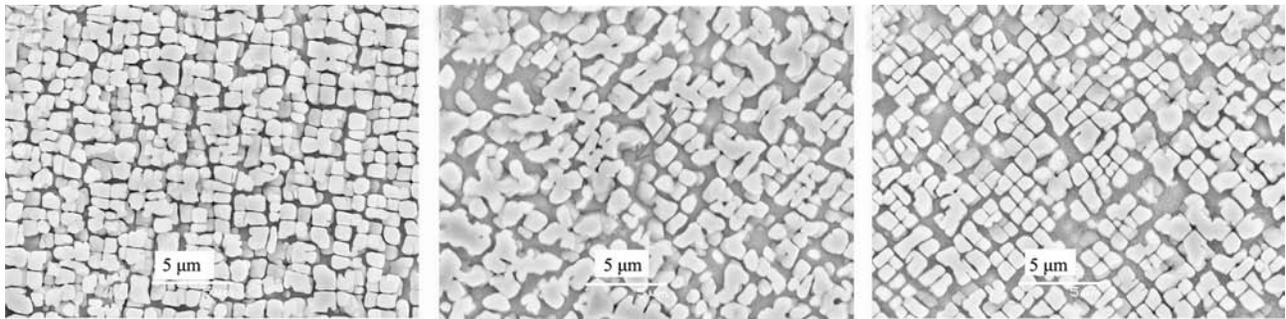
图3为K417G合金铸态与“固溶+时效”热处理后的光学显微组织照片，从图中可以看出，铸态组织中枝晶间析出的白色“ $\gamma+\gamma'$ ”共晶尺寸较大；经固溶、时效处理后，单个共晶组织尺寸变小，数量变多，可能是经过热处理后，局部组织偏析程度降低所致。

### 2.3 不同状态下 $\gamma'$ 相的形貌观察

图4为K417G合金铸态与“固溶+时效”热处理后的 $\gamma'$ 相形貌照片，从图中可以看出，经固溶（1 080 °C/4 h，AC）处理后，铸态部分 $\gamma'$ 相仅部分溶解，在更高的倍数下观察，可以观察到初生 $\gamma'$ 相附近聚集着尺寸更小的二次 $\gamma'$ 相颗粒，如图4b中箭头所示，这可能是由于固溶温度低，初生 $\gamma'$ 相溶解较少，固溶析出的二次 $\gamma'$ 相来不及长大的原因；再经时效（870 °C/12 h，AC）处理后， $\gamma'$ 相呈现为规则的立方形，同时，在同样的倍数下，可见细小的二次 $\gamma'$ 相。这些尺寸细小的 $\gamma'$ 相尺寸约为20~100 nm，说明二次 $\gamma'$ 相在时效过程中有所长大。

### 2.4 不同状态下力学性能结果分析

对不同状态下的K417G合金试样的力学性能进行



(a) 铸态

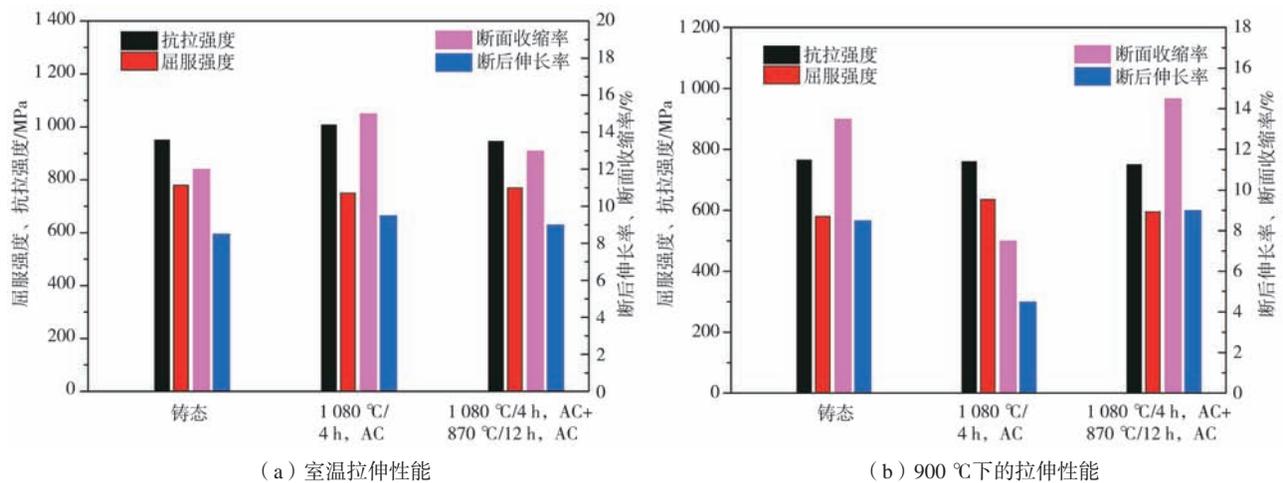
(b) 1080 °C/4 h, AC

(c) 1080 °C/4 h, AC+870 °C/12 h, AC

图4 K417G合金铸态与热处理后  $\gamma'$  相对比照片Fig. 4 Morphologies of  $\gamma'$  Phase in K417G alloy as cast and after heat treatment

了检测，主要进行了室温拉伸和900 °C拉伸试验，结果如图5所示。从图5中可以看出，与铸态相比，经“1080 °C/4 h, AC”固溶处理后，室温抗拉强度提高，塑性提高，但屈服强度降低；而900 °C拉伸抗拉强度变化不大，屈服强度有较大提高，塑性指标却明

显降低。再经“870 °C/12 h, AC”时效处理后，室温抗拉强度与铸态的相当，900 °C抗拉强度低于铸态值20 MPa，室温、900 °C塑性指标与铸态相比略有提高。



(a) 室温拉伸性能

(b) 900 °C下的拉伸性能

图5 热处理对K417G合金拉伸性能的影响

Fig. 5 The effect of heat treatment on the tensile properties of K417G Alloy

### 3 结论

K417G合金经固溶(1080 °C/4 h, AC)+时效(870 °C/12 h, AC)热处理后，显微组织得到了改

善， $\gamma'$ 相呈现为规则的立方形，并且析出了较多的细小二次 $\gamma'$ 相；900 °C高温拉伸断面收缩率由13.3%提升至14.5%，其他力学性能与铸态相当。

**参考文献:**

- [1] 《中国航空材料手册》编写委员会. 中国航空材料手册 (第2版) [M]. 第2卷. 北京: 中国标准出版社, 2002: 599-609.
- [2] 李佳佳, 何爱杰, 钟燕, 等. K417G 涡轮整体叶盘叶片裂纹原因分析与验证 [J]. 燃气涡轮试验与研究, 2017, 30 (4): 28-33.
- [3] 王晓轩, 国振兴, 于兴福, 等. 浇注温度对K417G合金组织及力学性能的影响 [J]. 铸造, 2014, 63 (9): 924-928.
- [4] 徐岩, 郭宁仁, 卢德忠. K417G 铸造高温合金的尺寸效应对组织和性能的影响 [J]. 金属学报, 1999, 35 (12): 1249-1252.
- [5] 马亚芹, 于兴福, 孙文儒. K417G合金  $\gamma + \gamma'$  共晶初熔特性及影响因素研究 [J]. 铸造, 2014, 63 (2): 185-189.
- [6] JAFARIA, ABBASI S M, RAHIMI A, et al. The effects of solution treatment on the microstructure of the cast Ni-based IN100 superalloy [J]. Metallurgical & Materials Engineering, 2015, 21 (3): 167-182.
- [7] MARTIN Heilmaier, UTJE Leetz, BERND Reppich. Order strengthening in the cast nickel-based superalloy IN 100 at room temperature [J]. Materials Science & Engineering A, 2001, 319: 375-378.

---

## Influence of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of K417G Superalloy

XIE Qiu-feng<sup>1,2</sup>, XIONG Jia-shuai<sup>1,2</sup>, DAI Shu-rong<sup>2</sup>, WANG Xiao-hui<sup>2</sup>, CHEN Xing-fu<sup>1,2</sup>, WU Jian-tao<sup>1,2</sup>, ZHU Xiao-Ping<sup>1,2</sup>

(1. Beijing CISRI-Gaona Materials & Technology Co., Ltd., Beijing 100081, China; 2. Dekai Intelligent Casting Co., Ltd., Baoding 071000, Hebei, China)

**Abstract:**

The microstructure and properties of K417G alloy after solution+aging heat treatment at 1 080 °C /4 h, AC+870 °C /12 h, AC were studied. The results show that the secondary  $\gamma'$  phase is precipitated in K417G after solution treatment, its tensile strength and plasticity at room temperature increases, but the plasticity property in high temperature decrease apparently. After aging at 870 °C for 12 h, the  $\gamma'$  phase became regular cubic shape, the size of the secondary  $\gamma'$  phase particles tend to increase, up to 20-100 nm. Its plasticity property at 900 °C has improved, and other properties are equivalent with room temperature.

**Key words:**

K417G; heat treatment; microstructure; mechanical properties