

# 一种铸造镍基高温合金显微组织与力学性能研究

焦明木<sup>1</sup>, 宋健民<sup>2</sup>

(1. 邯郸科技职业学院材料系, 河北邯郸 056046; 2. 郑州大学土木工程学院, 河南郑州 450001)

**摘要:** 研究了一种铸造镍基高温合金在25~980 °C温度范围内的拉伸性能和断裂行为。采用SEM对合金的微观组织和断口形貌进行了研究。研究表明: 合金表现出明显的反常现象, 屈服与中温脆性行为。随着拉伸温度的升高, 合金抗拉和屈服强度先缓慢降低再升高, 达到峰值后又快速降低。其中, 合金的抗拉强度在700 °C达到峰值, 屈服强度在800 °C达到峰值, 而合金的伸长率先缓慢降低再快速升高后趋于平缓, 其中, 700 °C时伸长率最低。合金的这种拉伸行为与显微组织有关, 如MC碳化物、 $\gamma'$ 相和 $\gamma/\gamma'$ 共晶组织等。

**关键词:** 铸造镍基合金; 反常屈服行为; 拉伸性能

一种镍基沉淀硬化型等轴晶铸造高温合金, 析出相主要由MC型碳化物、 $M_{23}C_6$ 型碳化物、 $\gamma'$ 相和 $\gamma/\gamma'$ 共晶组织构成, 合金中加入一些高熔点金属元素W、Mo、Nb等元素进行固溶强化和沉淀强化, 并添加B和Zr等微量元素进行晶界强化, 可使该合金具有良好的高温强度和耐腐蚀性能, 主要用于制作一种某燃气轮机发动机双层可倒车涡轮叶片<sup>[1-2]</sup>。该叶片由上、下两个叶片构成, 存在复杂的型腔结构, 对材料的铸造性能和高温性能要求较高。已知, 与其类似的铸造高温合金主要有K446、K452、K445和M963等合金。

针对上述成熟的高温合金材料, 在应用过程中存在反常屈服行为和“中温脆性”现象。已知, 高温拉伸过程中的“中温脆性”现象主要与位错变形机制、 $\gamma'$ 相体积分数、析出相类型和合金化学成分等因素有关<sup>[3-16]</sup>。Yang<sup>[3]</sup>研究了在20~1 000 °C不同温度拉伸下, 镍基K445合金在中高温下表现出异常屈服强度现象主要与 $\gamma'$ 析出相体积分数和化学成分有关。同时, Cui<sup>[4]</sup>研究了在20~1 100 °C不同温度拉伸下, 镍基M951G合金在拉伸变形过程中, 位错主要通过剪切、绕过和以剪切到绕过的形式通过 $\gamma'$ 析出相。谢君<sup>[5-6]</sup>等人研究了含有高W的镍基K416B合金在不同温度下析出相对拉伸断裂方式影响, 在中低温条件下, 裂纹主要沿大尺寸 $M_6C$ 碳化物处萌生与扩展, 而高温拉伸期间, 合金主要以微孔聚集方式沿 $\gamma/\gamma'$ 共晶组织界面发生连接开裂。

为了更好地评价某燃气轮机用合金的最佳使用温度, 本文研究了在室温、600、700、800、900、950、980 °C下的拉伸断裂行为, 为某燃气轮机用合金的应用与发展提供理论依据。

## 1 试验方法

试验采用ZGJL0.5-100-2.5型真空感应炉重熔铸造高温母合金, 化学成分见表1。然后重熔浇注成锥形试棒(两端面直径分别为10 mm和18 mm, 长度为70 mm), 重熔时在1 580 °C精炼5 min, 1 480 °C浇注, 型壳焙烧温度为900 °C, 采用填砂造型方式。试棒经(固溶处理1 160 °C × 3 h空冷+中间处理1 060 °C × 14 h空冷+时效处理850 °C × 16 h空冷)热处理后加工成标距为25 mm, 直径为5 mm的标准拉伸试样,

### 作者简介:

焦明木(1987-), 男, 硕士, 主要研究方向为材料加工工程。电话: 17560358994, E-mail: hdkjxy12345@163.com

中图分类号: TG166.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

05-0621-05

### 基金项目:

2022年河北高校重点科研项目(22B230021)。

### 收稿日期:

2023-11-20 收到初稿,

2024-01-02 收到修订稿。

表1 母合金化学成分  
Table 1 Chemical composition of the ingots

元素	C	Cr	Co	W	Mo	Al	Ti	Nb	Hf	B	Zr	Ni	$w_B/\%$
检测值	0.06	15.8	10.7	5.16	2.0	3.1	4.5	0.2	0.3	0.06	0.2	余量	

测试室温和600、700、800、900、950℃和980℃高温拉伸性能。沿拉伸试样断口中间采用线切割获得纵剖面，经镶嵌、打磨、抛光和腐蚀后观察组织。试样腐蚀剂为20 g  $\text{CuSO}_4$ +100 mL  $\text{HCl}$ +5 mL  $\text{H}_2\text{SO}_4$ +80 mL  $\text{H}_2\text{O}$ 。采用型号为FEI-Apreo-S场发射高分辨扫描电镜观察显微组织及断口纵剖面。

## 2 试验结果

### 2.1 显微组织

图1为某燃气轮机用合金经标准热处理后扫描照片。由图1a背散射照片可知，显微组织由菊状 $\gamma/\gamma'$ 共

晶组织和随机分布在晶界内和枝晶处长条状和块状的析出相。根据图1c~d EDS能谱分析表明，枝晶间和晶界处分布的析出相为MC型碳化物，其中，M主要为Ti、W和（或）Mo。同时，由图1b可知，基体上存在初生长方体 $\gamma'$ 颗粒和次生球状 $\gamma'$ 颗粒。

### 2.2 拉伸性能

图2为某燃气轮机用合金在不同拉伸温度下的试验结果。由图2a和b可知，合金的强度随温度的升高先缓慢降低后再升高又快速降低。由图2a可知，在25~700℃之间，随着温度的升高，合金抗拉强度在

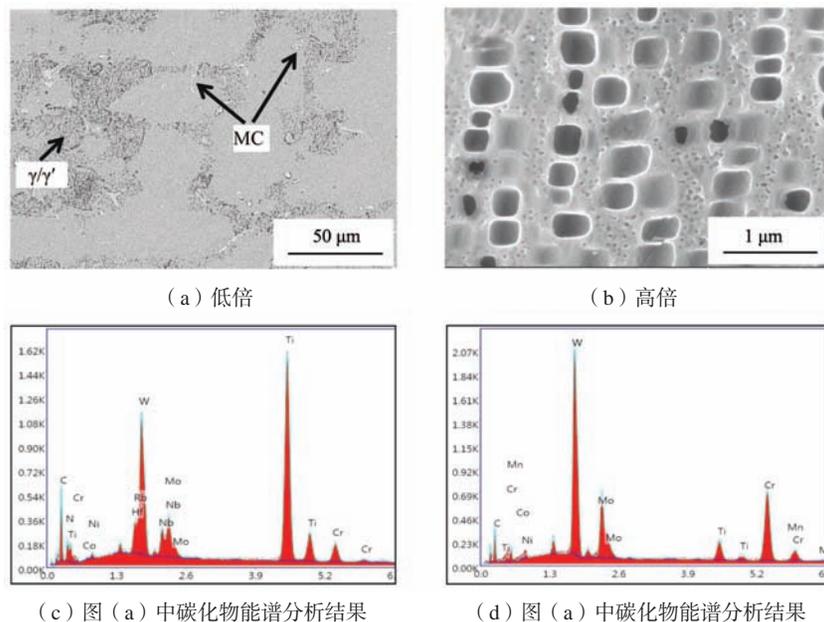


图1 合金组织形貌

Fig. 1 The microstructure of alloy

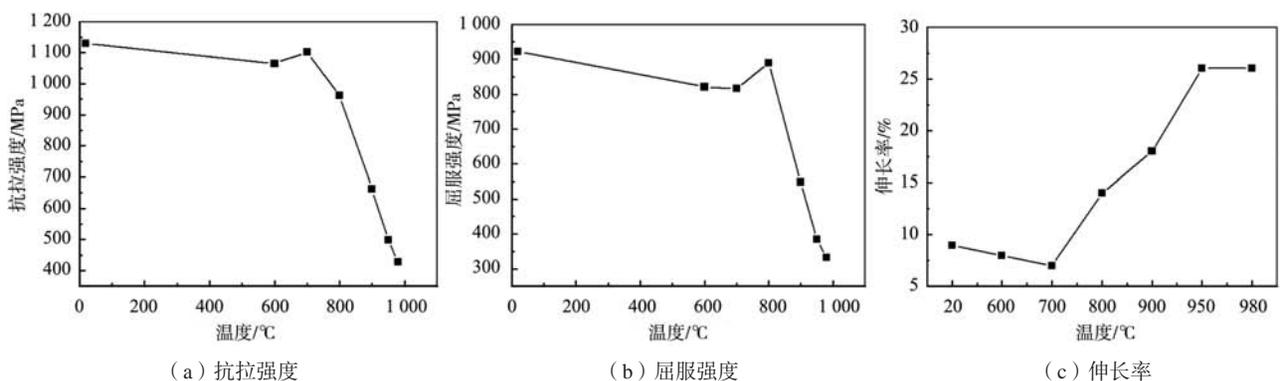


图2 合金在不同温度下拉伸试验结果

Fig. 2 The tensile test results of alloys at different temperatures

600 °C处于谷底,在700 °C时处于谷峰,随着温度的进一步升高,合金的抗拉强度快速下降。同理,由图2b可知,合金的屈服强度变化趋势与抗拉强度存在一定差异性,随着温度的升高,屈服强度在700 °C时处于谷底,800 °C时处于谷峰,随着温度的进一步升高,合金的抗拉强度快速下降。由图2c可知,随着温度的升高,合金在25~980 °C之间伸长率先缓慢降低再快速升高,700 °C时伸长率处于谷底。

### 2.3 断口形貌

图3是某燃气轮机用合金在不同温度下拉伸断口纵剖面形貌。由图2a可知,在室温下,断口纵剖面存在二次裂纹,其主要分布在长条状MC碳化物和菊状 $\gamma/\gamma'$

$\gamma'$ 共晶组织与基体界面处。已知, $\gamma/\gamma'$ 共晶为弱性相,MC碳化物为脆性相。在室温下,裂纹沿着条状碳化物和 $\gamma/\gamma'$ 共晶组织扩展。由图2b可知,在600 °C拉伸下,断口纵剖面存在二次裂纹,裂纹主要是沿着条状碳化物和 $\gamma/\gamma'$ 共晶相扩展。

由图2c-d可知,随着试验温度的升高,在800 °C和900 °C情况下,断口纵剖面存在二次裂纹数量减少。晶粒、MC碳化物和菊状 $\gamma/\gamma'$ 共晶组织沿受力方向发生形变。变形过程中,长条状的MC型碳化物破碎,形成细小的二次裂纹。拉伸过程中,裂纹首先沿着长条状MC型碳化物扩展,然后沿着二次枝晶或穿过枝晶进行扩展。

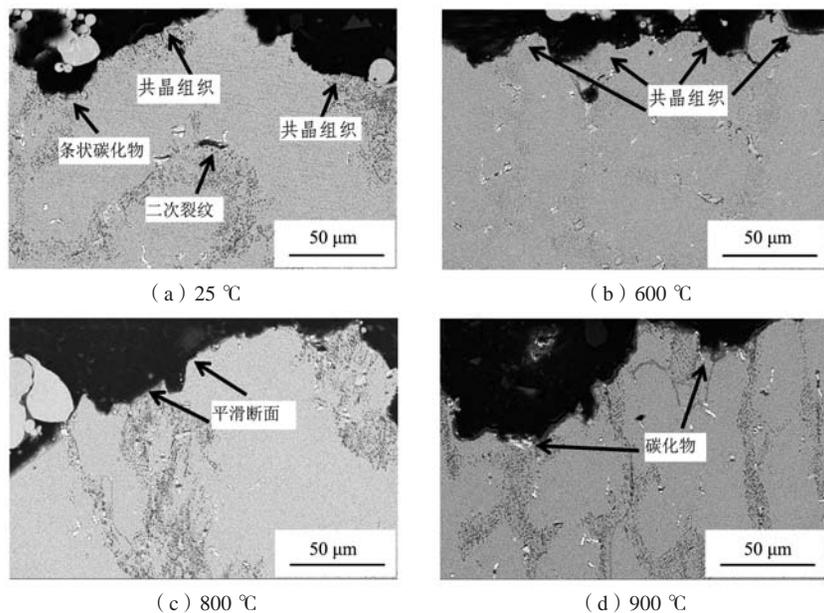


图3 合金在不同温度下拉伸断口纵剖面形貌

Fig. 3 The longitudinal section morphology of the tensile fracture of alloy at different temperatures

## 3 讨论

根据图1可知,某燃气轮机用合金经过热处理后,显微组织由菊状 $\gamma/\gamma'$ 共晶组织和随机分布在晶界内和枝晶处长条状和块状的MC型碳化物。同时,基体上存在初生长方体 $\gamma'$ 颗粒和次生球状 $\gamma'$ 颗粒。由图2拉伸温度对合金力学性能的影响结果可知:随着拉伸温度的升高,合金抗拉和屈服强度先缓慢降低再升高达到峰值后又快速降低。其中,合金的抗拉强度在700 °C达到峰值,屈服强度在800 °C达到峰值,而伸长率先缓慢降低再快速升高后趋于平缓,其中,合金在700 °C发生“中温脆性”现象,即该温度下合金的塑性最小。

针对“中温脆性”现象,研究表明:除了化学成分<sup>[7-8]</sup>、热处理方式<sup>[16]</sup>影响因素外,还与 $\gamma'$ 相体积分数<sup>[112]</sup>、析出相等因素有关<sup>[13]</sup>。其中,位错对 $\gamma'$ 相变形

机制是影响合金“中温脆性”的主要因素<sup>[3-16]</sup>。在低温拉伸变形过程中,位错主要以切割的方式切过 $\gamma'$ 相。在高温拉伸情况下,合金中位错密度增大,在 $\gamma$ 基体中高密度位错纠缠形成滑移带,位错主要以绕过的方式切过 $\gamma'$ 相<sup>[9]</sup>。

由图3可知,在室温拉伸下,裂纹优先在 $\gamma/\gamma'$ 共晶组织和MC型碳化物与基体交界处形成。原因在于:拉伸变形过程中,基体中 $\gamma/\gamma'$ 共晶为弱性相,MC碳化物为脆性相,两者在高应力下都倾向于断裂形成微裂纹,这些微裂纹相互连接形成裂纹,并沿着晶界和二次枝晶间进行扩展,最终导致试棒断裂<sup>[9-10]</sup>。同时,在25 °C拉伸下,拉伸温度较低,试棒中位错形成较少且难以滑动,主要以切过 $\gamma'$ 相方式移动<sup>[7, 12]</sup>。因此,试棒在室温拉伸下的强度较高。

由图2a可知:在25~600 ℃时,合金的抗拉强度随着温度的升高而降低,在600~700 ℃时,合金的抗拉强度随着温度的升高而升高,进一步提高拉伸温度,抗拉强度快速降低。由图3b可知,在600 ℃拉伸下,裂纹优先在 $\gamma/\gamma'$ 共晶组织和MC型碳化物与基体交界处形成。同时,随着拉伸温度的升高,合金基体中 $\gamma$ 相的强度降低, $\gamma'$ 相的强度升高<sup>[3-4]</sup>,导致合金在25~600 ℃时拉伸时,基体中 $\gamma$ 相的强度降低是造成合金的抗拉强度降低的主要原因。

同时,由图3c可知,在700 ℃时,断口表面晶界沿着拉伸方向发生迁移变形,且裂纹源不在 $\gamma/\gamma'$ 共晶组织和MC型碳化物与基体交界处形成。说明合金在700 ℃温度较高,拉伸过程中在 $\gamma$ 基体通道中形成高密度的位错并纠缠在一起以及形成不同滑移体系位错<sup>[7]</sup>,使合金中的位错大量堆积,当沿晶界的应力超过其承载能力时,晶界会发生迁移变形<sup>[13]</sup>,导致合金不均匀变形产生显著的局域应变,使合金的抗拉强度提高,塑性降低<sup>[7]</sup>。随着拉伸温度的升高,在700~980 ℃之间拉伸时,位错快速绕过 $\gamma'$ 相,导致合金抗拉强度快速降低,塑性快速升高。

同时,由图2b可知:合金的屈服强度与抗拉强度变化曲线类似,但是,不同点在于屈服强度的最大值

和最小值的发生温度比抗拉强度提高100 ℃。已知影响合金屈服强度的主要因素是 $\gamma'$ 相,且在拉伸温度升高时,基体中 $\gamma$ 相的强度降低和 $\gamma'$ 相的强度升高两者之间强度互相抵消。同时,研究表明<sup>[14-15]</sup>:合金中加入W、Ta等元素能够提高 $\gamma'$ 相的屈服强度。该合金中含有5.16%的W、2.0%的Mo和0.3%的Hf元素,这些元素会增强 $\gamma'$ 相的强度。因此,使合金的屈服强度在室温~700 ℃之间降低,700~800 ℃之间升高,然后又快速降低。

## 4 结论

(1) 某燃气轮机用合金经过标准热处理后显微组织由菊状 $\gamma/\gamma'$ 共晶组织和随机分布在晶界内和枝晶处长条状和块状的MC型碳化物。同时,基体上存在初生长方体 $\gamma$ 颗粒和次生球状 $\gamma'$ 颗粒。

(2) 随着拉伸温度的升高,合金抗拉和屈服强度先缓慢降低再升高达到峰值后又快速降低。其中,合金的抗拉强度在700 ℃达到峰值,屈服强度在800 ℃达到峰值,而伸长率先缓慢降低再快速升高后趋于平缓,合金在700 ℃发生“中温脆性”现象,即该温度下合金的塑性最小。

### 参考文献:

- [1] 郭建亭. 高温合金材料学 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [2] 陈阳, 吴树森, 刘龙飞, 等. 一种铸造镍基高温合金的氧化行为 [J]. 铸造, 2014, 63 (1): 62-66.
- [3] YANG G X, XU Y F, JIANG L, et al. High temperature tensile properties and fracture behavior of cast nickel-base K445 superalloy [J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2011, 21: 418-425.
- [4] CUI L Q, SU H H, YU J J, et al. Temperature dependence of tensile properties and deformation behaviors of nickel-base superalloy M951G [J]. Materials Science & Engineering A, 2017, 696: 323-330.
- [5] 谢君, 于金江, 孙晓峰, 等. 温度对高W含量K416B镍基合金拉伸行为的影响 [J]. 金属学报, 2015, 51 (8): 943-950.
- [6] ZHOU T J, DING H S, MA X P, et al. Effect of precipitates on high-temperature tensile strength of a high W-content cast Ni-based superalloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 797: 486-496.
- [7] SEYED A S, SAID N, MIHAIELAI, et al. Tensile deformation mechanisms at different temperatures in the Ni-base superalloy GTD-111 [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004: 1900-1904.
- [8] TIAN C G, HAN GM, CUI CY, et al. Effects of Co content on tensile properties and deformation behaviors of Ni based disk superalloys at different temperatures [J]. Mater Design, 2015, 88: 123-131.
- [9] WANG X G, LIU J L, JIN T, et al. Tensile behaviors and deformation mechanisms of a nickel-base single crystal superalloy at different temperatures [J]. Materials Science & Engineering A, 2014, 598: 154-161.
- [10] 胡颖涛, 荀淑玲, 王道红, 等. 铸造试棒形状对K417G镍基高温合金组织及持久性能的影响 [J]. 铸造, 2020, 69 (7): 679-684.
- [11] 刘子禹, 仇凤江, 荀淑玲, 等. 精炼及浇注温度对K417G镍基高温合金组织及持久性能的影响 [J]. 铸造, 2021, 70 (12): 1417-1422.
- [12] BETTGE D, OSTERLE W, ZIEBS J. Temperature dependence of yield strength and elongation of the nickel-base superalloy IN 738LC and the corresponding microstructural evolution [J]. Z Metallkd, 1995, 86: 190-197.
- [13] DU B N, SHENG L Y, HUA Z Y, et al. Investigation on the microstructure and tensile behavior of a Ni-based IN792 superalloy [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2018, 10 (2): 1-8.

- [14] DU B N, HUA Z Y, SHENG L Y, et al. Tensile, creep behavior and microstructure evolution of an as-cast Ni-based K417G polycrystalline superalloy [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2018, 37 ( 10 ) : 1805–1816.
- [15] SHENG L Y, YANG F, GUO J T, et al. Anomalous yield and intermediate temperature brittleness behaviors of directionally solidified nickel-based superalloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24 ( 3 ) : 673–681.
- [16] HE L Z, ZHENG Q, SUN X F, et al. Low ductility at intermediate temperature of Ni-base superalloy M963 [J]. Materials Science and Engineering A, 2004, 380 ( 1–2 ) : 340–348.

---

## Research on Microstructure and Mechanical Properties of Casting Nickel Base Superalloy

JIAO Ming-mu<sup>1</sup>, SONG Jian-min<sup>2</sup>

(1. Handan Vocational College of Science and Technology, Handan 056046, Hebei, China; 2. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China)

### Abstract:

The tensile properties and fracture behavior of a cast nickel-based superalloy in the temperature range of 25–980 °C were studied. The microstructure and fracture morphology of the alloy were studied by SEM. The results show that the alloy exhibits obvious abnormal yield and medium temperature brittle behavior. As the tensile temperature increases, the alloy's tensile and yield strength first slowly decrease, then increase to a peak, and then rapidly decrease. Among them, the tensile strength of the alloy reaches its peak at 700 °C, and the yield strength reaches its peak at 800 °C. The elongation of the alloy first slowly decreases and then rapidly increases and then tends to be flat. Among them, the elongation is the lowest at 700 °C. The tensile behavior of the alloy is related to the microstructure of the alloy, such as MC carbide,  $\gamma'$  phase and  $\gamma/\gamma'$  eutectic.

### Key words:

nickel-based superalloy; anomalous yield strength; tensile properties