

# 固溶处理对 K423A 合金显微组织与力学性能的影响

张楚博, 张 勇, 张丽辉

(中国航发北京航空材料研究院, 北京 100095)

**摘要:** 研究了固溶处理对K423A合金组织以及力学性能的影响。采用热力学计算软件JMatPro对K423A合金中相的稳定性及体积百分比进行计算。借助扫描电镜对铸态以及固溶态合金进行显微组织观察, 使用扫描电镜附带的能谱仪对铸态以及固溶态合金的显微组织进行成分分析。碳化物与 $\gamma'$ 相的尺寸以及体积分数使用Image-Pro Plus软件进行统计分析。对铸态以及固溶态的合金进行室温拉伸、850 °C/325 MPa持久以及室温硬度测试。结果表明: 固溶后 $\gamma'$ 相呈不规则的形貌, 弥散的分布在 $\gamma$ 基体中。固溶态合金中碳化物的形态发生变化, 由原来的多数长条状逐渐变为以块状为主, 碳化物尺寸变得细小。铸态与固溶态具有相同的抗拉强度, 铸态的屈服强度更高, 但伸长率偏低。在850 °C/325 MPa条件下, 铸态合金具有较高的持久寿命, 固溶态合金有更好的塑性。

**关键词:** 镍基高温合金; K423A; 固溶处理; 显微组织; 力学性能

K423A合金是在K423合金的基础上研制的专用于导向器叶片的镍基铸造高温合金。与K423合金相比, 该合金降低了Cr、Co、Mo等元素的含量, 提高了B的含量, 降低了合金固溶体的过饱和度, 改善其组织稳定性。合金具有良好的抗氧化性能及抗热疲劳性能, 而且铸造性能和焊接性能良好, 使用温度最高可达1 000 °C, 可广泛应用于在950 °C以下工作的燃气轮机的空心、实心导向叶片和整铸导向器等<sup>[1-3]</sup>。

由于铸造高温合金的特征是枝晶凝固偏析, 即 $\gamma'$ 相和元素成分在枝晶干和枝晶间分布不均匀, 因而降低合金性能并使性能不稳定<sup>[4]</sup>。黄乾尧等人通过研究固溶处理的冷却速度对K423A合金组织和性能的影响揭示了固溶速度对合金 $\gamma'$ 相以及室温拉伸、850 °C/325 MPa持久以及室温冲击的影响。此外由于高温合金铸件需要进行后续机加工, 机加工的难易程度可以用硬度作为判定标准, 目前对于固溶对K423A合金碳化物、晶界以及硬度的影响鲜有报道。

本文针对K423A合金, 对比了铸态以及固溶态合金的力学性能与显微组织, 对于后期机加工的难易程度以及合金最终使用状态的确定提供了系统支撑。

## 1 试验材料及方法

试验用K423A母合金在500 kg真空感应炉中熔炼(VIM), 然后浇注成 $\Phi 90$  mm的合金锭, 化学成分见表1。再将合金锭放入真空感应炉中重熔后浇入表面细化壳型铸成等轴晶试棒。壳型预热温度为 $X$  °C, 浇注温度为 $Y$  °C。浇注后对部分试棒进行热处理, 热处理制度为: 1 190 °C/45 min, 随后以3~4 °C/min速度冷却到1 000 °C, 再空

表1 K423A合金的化学成分  
Table 1 Chemical composition of K423A alloy

	C	Cr	Co	Mo	Ti	Al	B	Ni
$w_B$ /%	0.15	14.75	8.85	7.55	3.6	4.15	0.01	余

### 作者简介:

张楚博(1991-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事高温合金铸造工艺的研究工作。电话: 010-62498318, E-mail: 1720011577@qq.com

中图分类号: TG132.3<sup>+</sup>2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

01-0044-05

### 收稿日期:

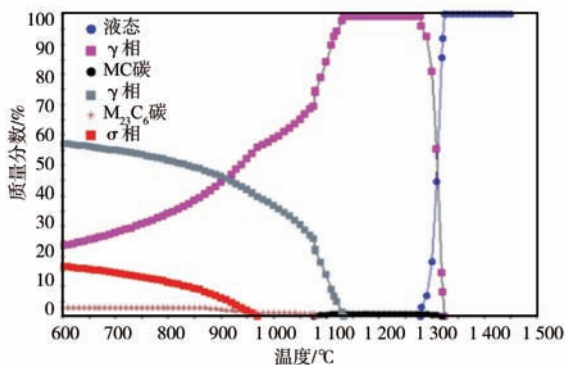
2023-06-02 收到初稿,

2023-08-09 收到修订稿。

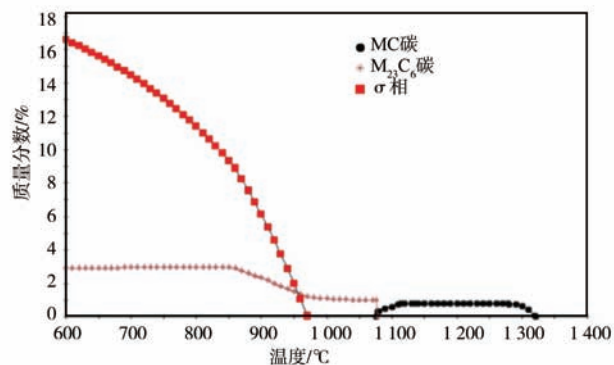
冷到室温。将热处理后的试棒加工成性能试样。

为了预测合金中相的稳定性以及体积百分比,使用热力学计算软件JMatPro进行模拟。为了更精确地研究显微组织的变化,使用扫描电子显微镜(SEM)对样品进行观察。SEM配备了能量色散X射线光谱仪(EDS)对所观察的显微组织进行成分分析。使用Image-Pro Plus软件对碳化物、 $\gamma'$ 相的尺寸以及体积分数进行统计分析。

拉伸测试按照HB 5143的规定在23℃(室温)进行测试。持久测试按照HB 5150规范进行850℃/325 MPa测试。拉伸以及持久数据均为3根试样的平均值。室温洛氏硬度(HRC)检测按照HB 5172规范进行。



(a) 计算相图



(b) 计算相图局部放大

图1 热力学计算相图

Fig. 1 Thermodynamic calculation phase diagram

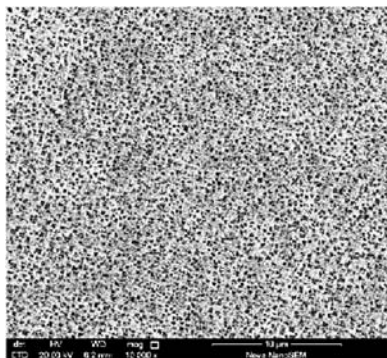
## 2.2 固溶对 $\gamma'$ 相的影响

K423A合金铸态组织中的 $\gamma'$ 相主要呈规则的立方形颗粒弥散分布在 $\gamma$ 基体中如图2a所示, $\gamma'$ 相以及 $\gamma$ 相都为面心立方的结构, $\gamma'$ 相在 $\gamma$ 相上共格析出,在合金中起到第二相强化的作用,本研究中铸态合金中 $\gamma'$ 相平均尺寸约为0.3  $\mu\text{m}$ ,体积分数为44%。

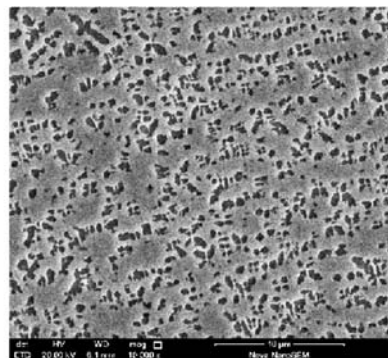
图2b为固溶后的K423A合金的显微组织照片, $\gamma'$ 相呈不规则的形貌,弥散分布在 $\gamma$ 基体中,本研究中

固溶态合金中 $\gamma'$ 相平均尺寸约为0.97  $\mu\text{m}$ ,体积分数为26%。与K423A铸态组织相比, $\gamma'$ 相尺寸明显变大,体积分数相对变少。可见,在本试验条件下的固溶处理能显著改变合金中 $\gamma'$ 相的尺寸和分布,使合金中 $\gamma'$ 相尺寸变得粗大,体积分数减少。

固溶处理后, $\gamma'$ 相的形态和尺寸之所以发生了明显的变化。一般认为 $\gamma'$ 相形态变化受错配度影响,方形 $\gamma'$ 与 $\gamma$ 基体的相界面为位错型或部分位错型,球形



(a) 铸态



(b) 固溶态

图2 固溶对K423A合金 $\gamma'$ 形貌的影响

Fig. 2 Effect of solution treatment on  $\gamma'$  phase of K423A alloy

$\gamma'$ 与 $\gamma$ 基体的相界面则为共格型,且共格应力随错配度增大而增高<sup>[5-6]</sup>,所以当合金中错配度小时 $\gamma'$ 相就为球形,当错配度大时 $\gamma'$ 相就呈方形。

1 190 °C对于K423A合金来说是非完全固溶处理温度,这与热力学计算结果不一致,这是因为,K423A合金中一些微量元素导致。固溶处理后 $\gamma'$ 相未完全溶入到基体中,在随后的冷却过程中未溶入到基体中的 $\gamma'$ 相长大。

### 2.3 固溶处理对碳化物的影响

碳化物相一般为密排六方或面心立方结构,碳原子一般位于八面体的间隙处,合金中碳元素的含量一般在0.05%~0.2%,虽然它的含量较少,但能显著影响合金的组织稳定性。

图3a为背散射下铸态K423A合金局部枝晶图,经EDS能谱分析知,黑色长条以及块状形貌的为MC(富含Ti、Mo)碳化物如图3c,白色块状碳化物为 $M_{23}C_6$ (富含Cr、Mo),碳化物总的体积分数为2.6%。

图3b为固溶处理后的合金碳化物组织图,与铸态的合金组织相比(如图3a),固溶态合金中碳化物的形态发生变化,碳化物形态由原来的长条状为主逐渐变为块状为主,碳化物尺寸变得细小,总体积分数减少到1.5%。这说明固溶处理后碳化物逐渐分解,使得合金强度降低。

在对组织的观察过程中并未发现在计算相图中出现的TCP相,表明固溶处理并不能使K423A合金生成TCP相,合金组织相对稳定。

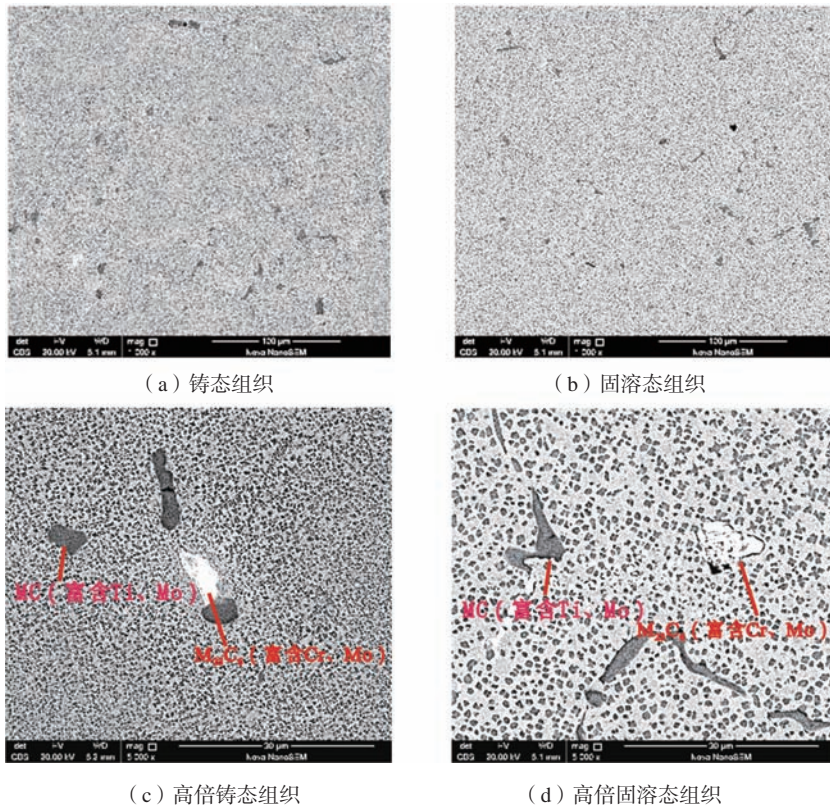


图3 固溶处理对K423A合金碳化物形貌的影响

Fig. 3 Effect of solution treatment on carbides phase of K423A alloy

### 2.4 固溶处理对晶界的影响

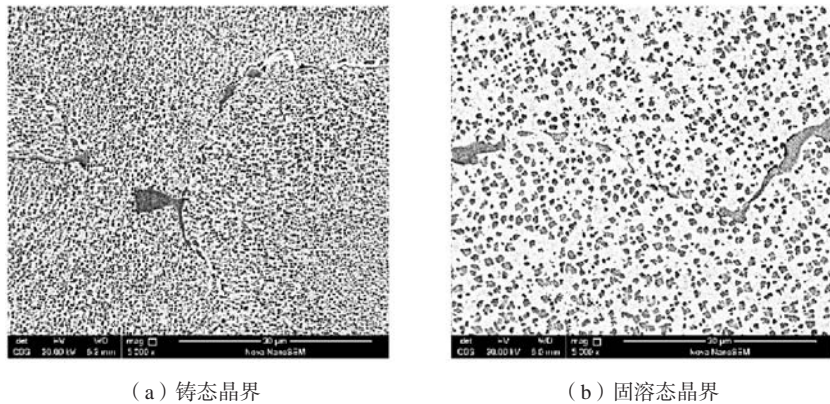
图4a是K423A合金铸态晶界形貌,从图中可以看出,铸态晶界上有大量长条状MC以及 $M_{23}C_6$ 碳化物存在。

图4b是固溶处理后K423A合金晶界形貌。从图4中可以看出,经过固溶处理的K423A合金晶界仍有长条状碳化物存在。固溶处理后合金晶界上的 $M_{23}C_6$ 碳化物为不连续的块状碳化物,晶界处不连续分布的 $M_{23}C_6$ 块

状碳化物是合金在固溶处理时碳化物部分溶入基体导致的。

### 2.5 固溶处理对力学性能的影响

在试验条件下,固溶处理对合金的室温抗拉强度无明显影响,略微降低了屈服强度,但大大提升了塑性。这是因为固溶处理后, $\gamma'$ 相体积分数显著减小,同时未完全固溶的 $\gamma'$ 相在固溶冷却过程中长大,相对



(a) 铸态晶界

(b) 固溶态晶界

图4 固溶对K423A合金晶界形貌的影响

Fig. 4 Effect of solution treatment on Grain boundary of K423A alloy

于铸态 $\gamma'$ 相其临界尺寸差的更远,因此降低了K423A合金强度从而提升了合金的塑性。

碳化物较脆容易开裂,对合金的塑性不利。固溶处理改变了K423A合金组织中碳化物的含量以及形貌,使碳化物多数呈块状和颗粒状,降低了对合金基体的影响,从而提升了室温拉伸的塑性。同时固溶处理后,部分 $M_{23}C_6$ 碳化物发生分解,也导致合金强度下降。

表2 固溶对K423A合金室温拉伸性能的影响

Table 2 Effect of solution treatment on room temperature tensile properties of K4123A alloy

合金状态	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
铸态	1 057 (1 030~1 090)	900 (896~904)	5.87 (5.8~5.9)
固溶态	1 052 (1 041~1 065)	843 (842~843)	12.67 (12.2~13.2)
合金技术标准要求	$\geq 850$	$\geq 750$	$\geq 3$

合金在850 °C/325 MPa条件下的持久性能数据见表3,在850 °C/325 MPa条件下,铸态合金具有较高的持久寿命,固溶态合金有更好的塑性。

表3 固溶对K423A合金持久性能的影响

Table 3 Effect of solution treatment on stress rupture properties of K423A alloy

合金状态	850 °C/325 MPa		
	时间/h	伸长率/%	断面收缩率/%
铸态	149.5 (128~172)	5.55 (4.4~6.2)	8.88 (6.3~12.4)
固溶态	87.5 (82~92)	10.63 (8.4~13.4)	13.58 (9.9~15.7)
合金技术标准要求	$\geq 32$	$\geq 3$	-

在850 °C/325 MPa条件下,固溶态合金的持久寿命低于铸态合金的持久寿命。这是因为固溶后,合金中

碳化物的形态发生变化,由原来的以长条状碳化物为主变为以块状碳化物为主,碳化物体积分数减少,这是由于碳化物发生分解,使碳化物易与基体界面剥离和开裂,成为合金组织中的薄弱区域,对持久性能不利。块状碳化物在枝晶间以及晶界析出能够起到强化合金的作用,提升了枝晶间强度,使得持久性能得到提升。

合金硬度主要由强化相 $\gamma'$ 相以及碳化物的析出数量决定,强化相数量越多,合金的硬度值越高<sup>[7]</sup>。固溶后 $\gamma'$ 相以及碳化物体积分数减少,从而使得固溶后硬度下降。

表4 固溶对K423A合金硬度性能的影响

Table 4 Effect of solution treatment on hardness properties of K423A alloy

合金状态	室温硬度HRC
铸态	40.8 (40.7~41.1)
固溶态	38.7 (38.3~39.2)
合金技术标准要求	-

### 3 结论

(1) 固溶后 $\gamma'$ 相呈不规则的形貌,弥散的分布在 $\gamma$ 基体中, $\gamma'$ 相平均尺寸约为0.97  $\mu\text{m}$ ,体积分数为26%;固溶态合金中碳化物的形态发生变化,原来的存在多数长条状逐渐变为以块状为主,碳化物尺寸变得细小,体积分数减少到1.5%;在对组织的观察过程中并未发现在计算相图中出现的TCP相,表明固溶处理并不能使K423A合金生成TCP相,合金组织相对稳定。

(2) 经过固溶处理的K423A合金晶界仍有长条状碳化物存在。固溶后合金晶界的 $M_{23}C_6$ 碳化物为不连续的块状碳化物,晶界处不连续分布的 $M_{23}C_6$ 块状碳化物是合金在固溶处理时碳化物溶入基体导致的。

(3) 室温拉伸, 铸态与固溶态具有相同的抗拉强度, 铸态的屈服强度更高, 但伸长率偏低; 在850 °C/325 MPa条件下, 铸态合金具有较高的持久寿命, 固溶

态合金有更好的塑性; 固溶后  $\gamma'$  相以及碳化物体积分数减少, 从而使得固溶后硬度下降。

#### 参考文献:

- [1] 钢铁研究总院. 发动机用K423A合金研制及应用研究 [R]. 1992
- [2] 工程材料实用手册编委会. 工程材料实用手册 [M]. 2版. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [3] 陈兴福, 李俊涛, 吴剑涛, 等. 铸造工艺对K423A合金力学性能的影响 [J]. 钢铁研究学报, 2006, (18): 51-55.
- [4] 黄乾尧, 师燕渝. K423A铸造高温合金的固溶处理 [J]. 钢铁研究学报, 2003 (15): 192-195.
- [5] 郭建亭. 高温合金材料学: 上册 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [6] 王明罡, 田素贵, 于兴福, 等. Re及温度对单晶镍基合金晶格常数及错配度的影响 [J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39 (2): 268-272.
- [7] 孙艳容. 不同热处理制度对 Inconel 718 合金组织和性能的影响 [D]. 成都: 西南石油大学, 2018.

---

## Effect of Solid Solution Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of K423A Alloy

ZHANG Chu-bo, ZHANG Yong, ZHANG Li-hui  
(AECC Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

#### Abstract:

The effect of solution treatment on the microstructure and mechanical properties of K423A alloy was studied. The phase stability and volume percentage of K423A alloy were calculated by JMatPro. The microstructure of the as-cast and solid-solution alloys was observed by scanning electron microscope, and the composition of the as-cast and solid-solution alloys was analyzed by energy spectrum attached to scanning electron microscope. The size and volume fraction of carbide and  $\gamma'$  phase were statistically analyzed using Image-Pro Plus software. Tensile test at room temperature, 850 °C /325 MPa durability and hardness test at room temperature were performed on the as-cast and solid-solution alloys. The results show that the  $\gamma'$  phase has irregular morphology and disperses in  $\gamma$  matrix after solid solution. The morphology of carbides in the solid solution alloy changes gradually from most of the original long strips to bulk, and the size of carbides becomes small. The tensile strength of the as-cast state is the same as that of the solid-solution state, the yield strength of the as-cast state is higher, but the elongation is lower. Under the condition of 850 °C /325 MPa, the as-cast alloy has a higher durability life, and the solid-solution alloy has better plasticity.

#### Key words:

nickel based high-temperature alloy; K423A; solid solution treatment; microstructure; mechanical property