

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2026.4204

# 均匀化处理对 GH4706 合金组织及力学性能的影响

徐焯玲<sup>1</sup>, 段然<sup>2</sup>, 王冲<sup>3</sup>, 黄嘉良<sup>1</sup>, 侯翔益<sup>1</sup>, 廉心桐<sup>1,4</sup>, 黄烁<sup>2</sup>

(1. 上海大学材料科学与工程学院, 上海 200444 2. 北京钢研高纳科技股份有限公司, 北京 100081 3. 东北大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110004 4. 上海大学(浙江)高端装备基础件材料研究院, 浙江 嘉兴 314100)

**摘要:** 在 GH4706 合金铸锭的凝固过程中, 存在元素偏析、碳化物及 Laves 相等析出相, 影响合金热塑性和热加工性, 从而影响后续锻造, 须通过适当的均匀化处理有效消除元素偏析和有害析出相。本文利用金相显微镜、扫描电镜、能谱分析、JMatPro 软件等方法, 分析 GH4706 合金铸锭心部、 $R/2$  ( $R$  为半径) 和边缘的组织差异性及其溶质元素偏析规律, 均匀化处理过程中的微观组织演变规律以及对拉伸性能的影响。研究表明, GH4706 合金的基体为  $\gamma$  相, 主要析出相为  $\eta$  相、Laves 相、 $\gamma+\gamma'$  共晶组织、 $M(C, N)$ , 合金中的主要正偏析元素为 Ti、Ni、Nb, 负偏析元素为 Cr、Fe。采取  $1\ 160\ ^\circ\text{C}\times 10\ \text{h}+1\ 190\ ^\circ\text{C}\times 30\ \text{h}$  的均匀化工艺, 可有效消除原始铸态枝晶、Cr、Ni、Nb、Ti 等元素偏析, 达到合适的均匀效果。均匀化处理后, GH4706 合金的塑性在  $600\ ^\circ\text{C}$  时比均匀化前提高了 154%, 但在  $800\ ^\circ\text{C}$  时出现了中温脆性。

**关键词:** GH4706 合金; 铸态组织; 偏析; 均匀化; 拉伸性能

中图分类号: TG113.25

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2026)02-0169-07

## Effect of Homogenization Treatment on the Microstructure and Mechanical Properties of GH4706 Alloy

XU Yeling<sup>1</sup>, DUAN Ran<sup>2</sup>, WANG Chong<sup>3</sup>, HUANG Jialiang<sup>1</sup>, HOU Xiangyi<sup>1</sup>,  
LIAN Xintong<sup>1,4</sup>, HUANG Shuo<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China; 2. Gaona Aero Material Co., Ltd., Beijing 100081, China; 3. School of Materials Science and Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 4. Zhejiang Institute of Advanced Materials, SHU, Jiaxing 314100, China)

**Abstract:** During the solidification process of GH4706 alloy ingots, element segregation and precipitation phases affect the thermoplasticity and hot workability of the alloy, thereby affecting subsequent forging. Proper homogenization treatment is necessary to eliminate element segregation and harmful precipitation phases. Differences in the microstructure and element segregation at different positions (center,  $R/2$  and edge) of the GH4706 alloy ingot were observed via metallographic microscopy, SEM, EDS and JMatPro software. Then, the microstructure evolution during homogenization treatment and its effects on tensile properties were analysed. Research has shown that the matrix of the GH4706 alloy is the  $\gamma$  phase, and the main precipitated phases are the  $\eta$  phase,  $\gamma+\gamma'$  eutectic phase, Laves phase, and  $M(C, N)$  phase. The main positive segregation elements in the alloy are Ti, Ni, and Nb, and the negative segregation elements are Cr and Fe. The original as-cast dendrites and the segregation of Cr, Ni, Nb, and Ti can be effectively eliminated after a homogenization treatment of  $1\ 160\ ^\circ\text{C}\times 10\ \text{h}+1\ 190\ ^\circ\text{C}\times 30\ \text{h}$ , thus achieving a suitable uniformity effect. Moreover, the plasticity of the GH4706 alloy at  $600\ ^\circ\text{C}$  increases by 154% after homogenization, but intermediate-temperature brittleness (ITB) appears at  $800\ ^\circ\text{C}$ .

**Key words:** GH4706 alloy; as-cast microstructure; segregation; homogenization; tensile property

收稿日期: 2024-10-17

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3705104)

作者简介: 徐焯玲, 1999 年生, 硕士生. 研究方向为高温合金组织性能调控. Email: xuyeling@shu.edu.cn

通信作者: 廉心桐, 1989 年生, 博士, 副研究员. 研究方向为高温合金组织性能调控及稀土合金化机理与应用.

Email: xtlian@shu.edu.cn

引用格式: 徐焯玲, 段然, 王冲, 黄嘉良, 侯翔益, 廉心桐, 黄烁. 均匀化处理对 GH4706 合金组织及力学性能的影响[J]. 铸造技术, 2026, 47(2): 169-175.

XU Y L, DUAN R, WANG C, HUANG J L, HOU X Y, LIAN X T, HUANG S. Effect of homogenization treatment on the microstructure and mechanical properties of GH4706 alloy[J]. Foundry Technology, 2026, 47(2): 169-175.

GH4706 合金是一种通过  $\gamma'$  相  $Ni_3(Al, Ti)$  和  $\gamma''$  相  $Ni_3Nb$  进行沉淀强化的 Ni-Fe-Cr 基高温合金, 由 GH4169 合金去除 Mo、Co、减少 Cr、Ni、Nb 及增加 Fe 和 Ti 衍生而来<sup>[1-2]</sup>, 具有低成本、低偏析、热加工性能优异等特点<sup>[3-5]</sup>。GH4706 合金具备在 650 °C 以下长期服役的特性, 相比耐热钢具备更高的承温能力, 已成功应用于重型燃气轮机的大尺寸涡轮盘锻件制备<sup>[6-9]</sup>。

涡轮盘作为发动机燃烧室的核心部件, 起着至关重要的作用<sup>[10-14]</sup>。我国于 2010 年成立了国家 700 °C 超超临界燃煤发电技术创新联盟<sup>[15]</sup>。“两机专项”的实施更是将重型燃气轮机的研制提升至国家战略层面, 国内相关厂家均在寻求 650 °C 超超临界发电机组的突破。国外相关厂家已生产出大尺寸及超大尺寸的高温合金涡轮盘, 如 GE 公司 F/H 级燃气轮机涡轮盘<sup>[16]</sup>等。目前, 世界上最大的 GH4706 合金锻造涡轮盘重 10 t, 直径超过 2 000 mm, 厚度超过 400 mm, 可以作为 650 °C 超超临界发电机组用大锻件的候选材料, 但其在大型化方面仍面临挑战<sup>[17-20]</sup>。虽然粉末冶金能解决先进涡轮盘制备难加工问题, 但从结合生产效率和成本控制方面考虑, 铸锻工艺仍具备突出优势<sup>[21]</sup>。目前, 我国已具备各类涡轮盘用难变形高温合金产品的规模化生产能力, 然而在实际产业化进程中, 仍面临热加工成材率偏低、工艺稳定性不足、合金坯料易产生开裂缺陷等关键技术难题, 制约了该类合金产品的高效高质应用。

在 GH4706 合金的冶炼凝固过程中, 存在显著的元素偏析及析出相, 其中, 高 Nb 含量易使合金在原始铸锭的凝固过程中形成 Laves 相等低熔点相, 影响后续锻造, 须通过适当的均匀化处理消除元素偏析, 提高热塑性和热加工性能<sup>[22-24]</sup>。因此, 本文选取 GH4706 合金铸锭, 观察其心部、R/2 (R 为半径) 和边缘的组织差异性, 随后采用均匀化处理, 并对均匀化前后的试样均开展不同条件下的高温拉伸试验, 探究均匀化处理对 GH4706 合金铸锭组织及高温力学性能的影响规律, 以期 GH4706 合金涡轮盘的组织 and 性能调控提供有利的数据支撑, 促进涡轮盘用高温合金工艺制备水平的提高。

## 1 实验材料与方法

实验所用合金为高温合金 GH4706, 主要化学成分见表 1。采用三联冶炼工艺(真空感应熔炼+电渣重熔+真空电弧重熔)制备铸锭, 铸锭尺寸  $\phi 1\ 050\ mm$ 。对铸锭的心部、R/2 以及边缘进行线切割取样, 取样位置及尺寸见图 1, 进行铸态组织分析

表1 GH4706合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of the GH4706 alloy

(mass fraction/%)

C	B	P	Ti	Al	Nb	Cr	Fe	Ni
0.01	0.003	0.007	1.66	0.29	2.92	16.1	37.1	Bal.

和均匀化处理, 均匀化工艺如图 2 所示。采用蔡司 Axio Imager. M2m 金相显微镜和 FEI Apreo 2S HiVac 场发射扫描电子显微镜对铸态试样和均匀化后试样进行微观组织观察, 表征面为 10 mm×12 mm 面(图 1 中阴影面)。使用 JMatPro 软件计算 GH4706 合金的热力学平衡相图, 并生成该合金非平衡凝固过程元素再分配规律。在铸锭的心部、R/2 以及边缘进行取样, 并根据 GB 6397-86《金属拉伸试验试样》加工制备成拉伸试样。使用 Instron 5982 万能静态试验机对均匀化前、后的拉伸试样进行高温拉伸试验, 温度分别为 600、800、1 050 及 1 100 °C, 每个测试项目的平行试样为 2 支。

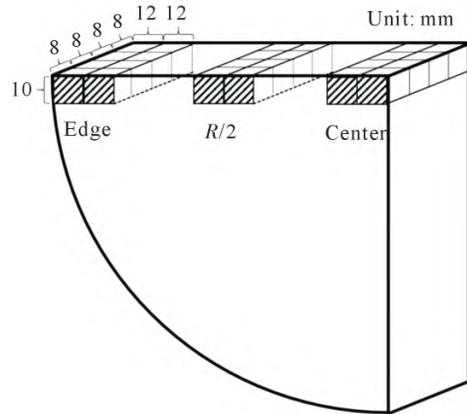


图 1 铸锭取样位置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the sampling position for the as-cast ingot

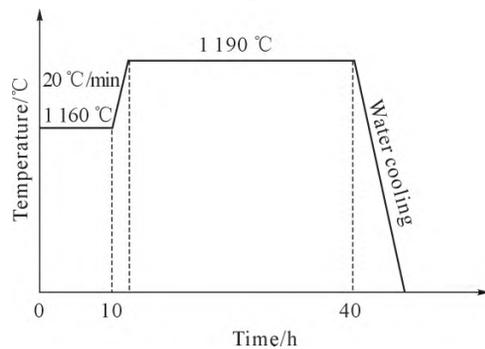


图 2 均匀化工艺曲线

Fig.2 Heating curve of the homogenization process

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 GH4706 合金铸态组织及元素偏析规律

#### 2.1.1 GH4706 合金热力学平衡相图和凝固动力学计算

图 3 为 GH4706 合金的热力学平衡相图。计算

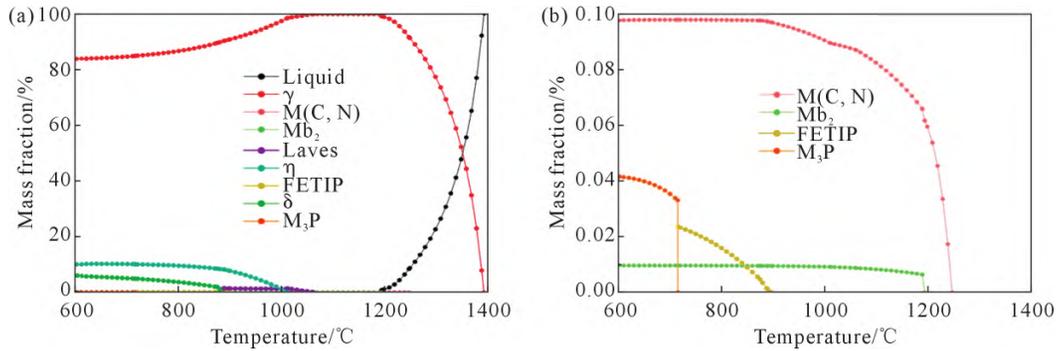


图 3 GH4706 合金平衡相图:(a) 性质图;(b) 局部放大图

Fig.3 Equilibrium phase diagram of the GH4706 alloy: (a) property diagram; (b) partially enlarged diagram

结果表明, GH4706 合金基体为  $\gamma$  相, 平衡析出相主要由  $\eta$  相、 $\delta$  相、Laves 相、M(C, N) 组成。合金初熔温度为 1 190  $^{\circ}\text{C}$ , 终熔温度为 1 394  $^{\circ}\text{C}$ , 凝固温度范围为 204  $^{\circ}\text{C}$ 。从液相开始首先凝固结晶出  $\gamma$  相, 当温度降低到 1 248  $^{\circ}\text{C}$  时, M(C, N) 析出, 温度继续降低到 1 062  $^{\circ}\text{C}$  时, Laves 相析出,  $\eta$  相在温度降低到 1 012  $^{\circ}\text{C}$  时析出, 温度继续降低到 887  $^{\circ}\text{C}$ ,  $\delta$  相析出, 直到完全凝固。

图 4 为 GH4706 合金非平衡凝固过程中合金元素再分配规律, 可以看出 Nb、Ni、Ti、P、B 为正偏析元素, Fe、Cr、Al 为负偏析元素, C 元素在 1 250  $^{\circ}\text{C}$  以上为正偏析, 在 1 250  $^{\circ}\text{C}$  以下为负偏析。

### 2.1.2 GH4706 合金铸态组织及析出相

GH4706 合金的铸态显微组织如图 5 所示, 灰

色区域为枝晶干, 黑色区域为枝晶间。铸态显微组织呈树枝状结构, 铸锭边缘铸态组织与心部铸态组织相比明显细化, 偏析相也更细小。心部的铸态组织最为规整, 从心部到边缘, 枝晶分布杂乱程度增加, 二次枝晶间距分别为 164、147 和 109  $\mu\text{m}$ 。由于高含量 Nb、Ti 等合金元素的存在, 在 GH4706 合金铸锭的枝晶间易富集形成 Laves 相 ((Fe, Ni)<sub>2</sub>Nb)、 $\eta$  相 (Ni<sub>3</sub>(Nb, Ti))、 $\gamma+\gamma'$  (Ni<sub>3</sub>(Al, Ti)) 共晶相和块状 M(C, N) 等有害相<sup>[20]</sup>(图 6)。由图 7d~f 可见, Laves 相呈块状或链状分布,  $\eta$  相呈白色棒状或针状,  $\gamma+\gamma'$  相呈细小颗粒状, M(C, N) 相为块状分布。如图 8 所示, 基体中的块状析出相包括富 Ti 的氮化物以及富 Nb 和 Ti 的复合碳化物。心部的 Laves 相数量较多, 尺寸较大, 边缘的析出相数量最少。利用 EDS 点扫描测得 3 个

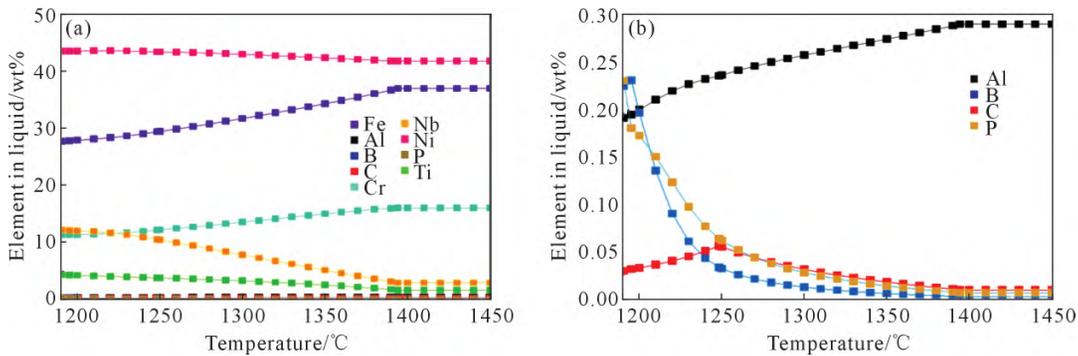


图 4 GH4706 合金非平衡凝固过程元素再分配规律:(a) 性质图;(b) Al、B、C、P 局部放大图

Fig.4 Element redistribution of the GH4706 alloy during non-equilibrium solidification: (a) property diagram; (b) enlarged diagram of Al, B, C, and P

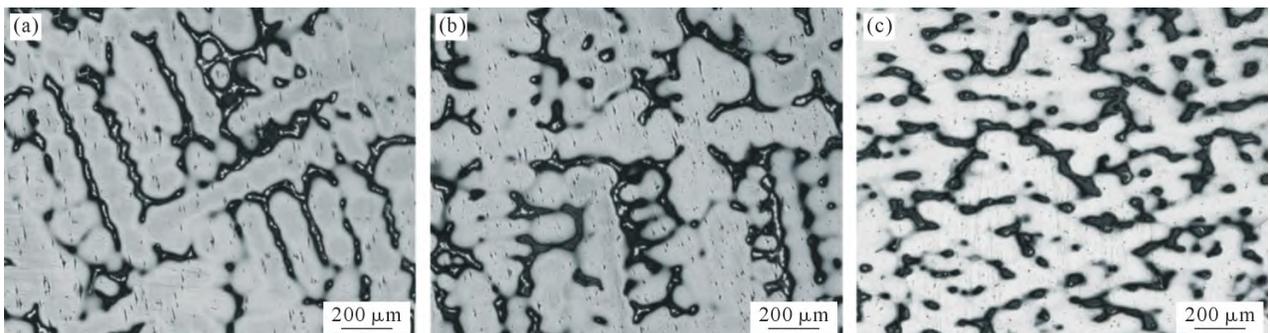


图 5 GH4706 合金铸锭不同部位的枝晶形貌:(a) 心部;(b) R/2;(c) 边缘

Fig.5 Dendritic morphology at different positions of the GH4706 alloy ingot: (a) center; (b) R/2; (c) edge

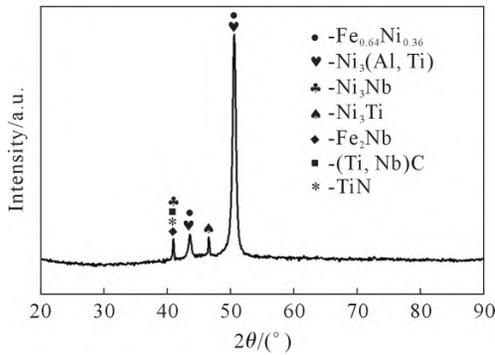


图 6 GH4706 合金铸锭的 XRD 谱  
Fig.6 XRD pattern of the GH4706 alloy ingot

表2 GH4706合金铸锭不同部位的元素质量浓度  
Tab.2 Mass concentration of elements at different positions in the GH4706 alloy ingot

		(mass fraction/%)					
Part	position	C	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb
Center	A1	5.31	1.89	15.81	35.73	38.96	2.29
Center	A2	5.77	2.91	13.64	31.36	41.76	4.57
Center	A3	7.02	3.06	8.75	22.38	29.41	28.64
R/2	A1	5.31	1.26	16.19	38.42	37.27	1.54
R/2	A2	8.05	3.10	12.51	29.05	42.38	4.92
R/2	A3	6.19	3.07	9.27	24.60	28.59	27.48
Edge	A1	4.70	1.36	16.19	37.99	38.17	1.59
Edge	A2	5.15	2.10	15.27	35.17	39.44	2.85
Edge	A3	6.60	2.87	10.38	24.77	30.33	24.50

部位枝晶干、枝晶间、析出相的化学成分如表 2 所示 (A1、A2、A3 分别对应枝晶干、枝晶间、析出相)。GH4706 合金中 Nb、Ti 含量较高, 在凝固过程中易集中于液相中, 从而导致宏观偏析的出现。从枝晶干到枝晶间再到析出相, Nb、Ti 的含量显著增加, Cr、Fe 的含量逐渐减少。析出相中 Nb 元素的质量浓

度可达 25%左右, 是枝晶干和枝晶间的 6~12 倍, 这是由于析出相中存在大量富 Nb 的 Laves 相及 NbC。由于枝晶间存在大量 η 相及 γ+γ' 相, 故枝晶间的 Ni 元素质量浓度比枝晶干和析出相高。

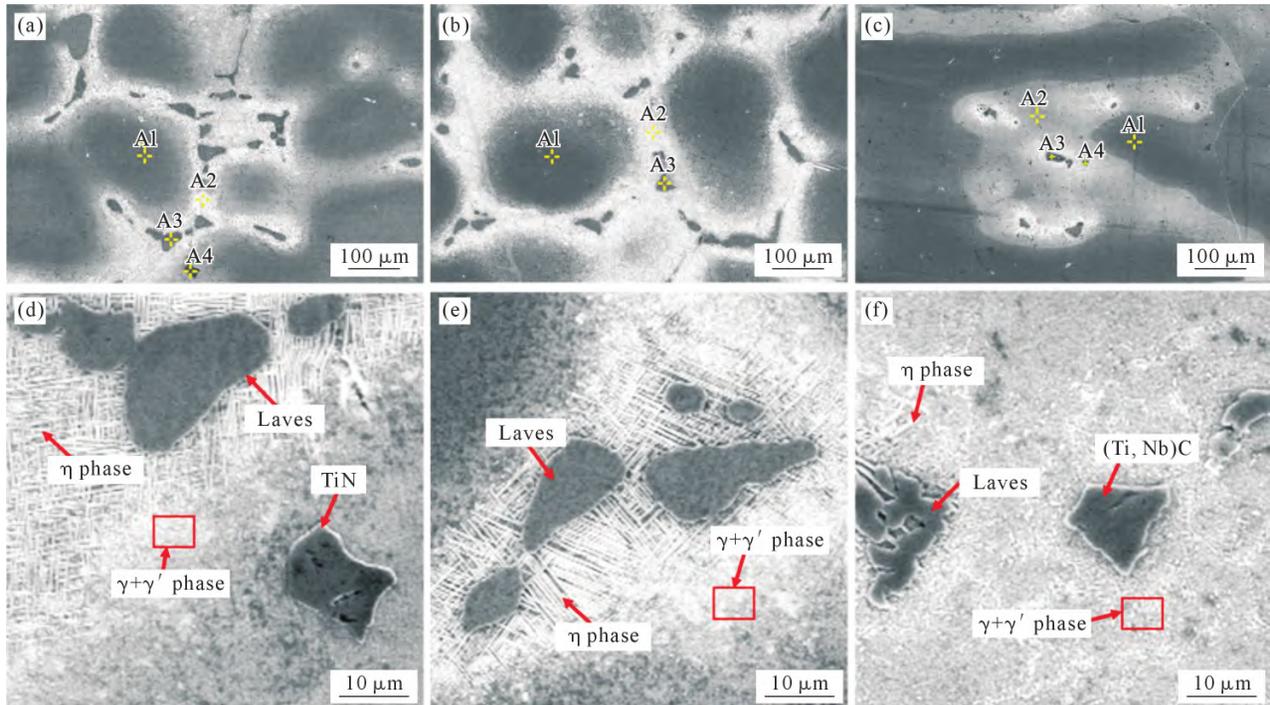


图 7 GH4706 合金铸锭不同部位的析出相分布: (a, d) 心部; (b, e) R/2; (c, f) 边缘  
Fig.7 Distribution of the precipitates in GH4706 alloy ingot: (a, d) center; (b, e) R/2; (c, f) edge

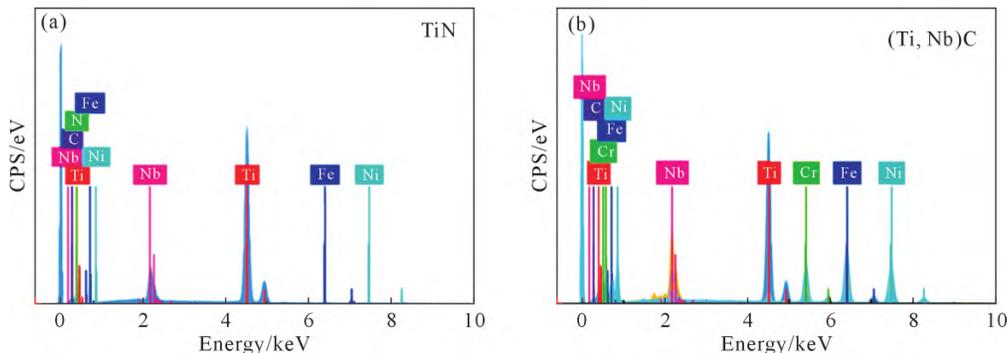


图 8 GH4706 合金的 EDS 分析: (a) 图 7a 中 A4; (b) 图 7c 中 A4  
Fig.8 EDS analysis of the GH4706 alloy: (a) A4 in Fig. 7a; (b) A4 in Fig. 7c

### 2.1.3 GH4706 合金铸态组织元素偏析

利用 EDS 测量铸锭心部、R/2、边缘的枝晶间与枝晶干位置溶质元素平均浓度,并通过式(1)计算偏析系数  $K$ ,结果如表 3 所示。Nb、Ni、Ti 为正偏析元素,  $K > 1$ ; Fe、Cr 为负偏析元素,  $K < 1$ ,与图 4 中热力学计算结果吻合。

$$K = \frac{\text{枝晶间溶质元素平均浓度}}{\text{枝晶干溶质元素平均浓度}} \quad (1)$$

正偏析元素 Nb 和 Ti 在铸锭 R/2 处偏析最为显著。其中 Nb 的偏析系数最大,在铸锭心部、R/2、边缘分别达到 2.440、3.127、2.053。负偏析元素 Cr、Fe 的偏析系数基本在 0.8~0.9 之间波动,且与心部和边缘相比,铸锭 R/2 处的偏析更为严重。合金中主要元素为 Nb、Ti、Cr、Ni,因此制定均匀化工艺应重点解决 Nb、Ti、Cr、Ni 的偏析问题,防止铸锭后续锻造变形开裂。

表 3 GH4706 合金铸锭溶质元素偏析系数

Tab. 3 Segregation coefficient of solute elements in the GH4706 alloy ingot

Part	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb
Center	2.050	0.832	0.841	1.129	2.440
R/2	2.549	0.809	0.796	1.123	3.127
Edge	1.657	0.930	0.909	1.039	2.053

### 2.2 均匀化工艺研究

#### 2.2.1 均匀化处理对 GH4706 合金微观组织的影响

为分析均匀化工艺对 GH4706 合金元素偏析的影响,在 GH4706 合金铸锭心部、R/2、边缘取样,经 1 160 °C 保温 10 h,再升到 1 190 °C 保温 30 h,水冷,通过光学显微镜观察各试样的微观组织形貌,如图 9 所示。经过均匀化处理后,3 个部位的枝晶组织均已全部退化,晶粒尺寸大且不均匀,未见明显碳化物。

#### 2.2.2 均匀化工艺对 GH4706 合金拉伸性能的影响

利用万能静态拉伸试验机对 3 个部位均匀化

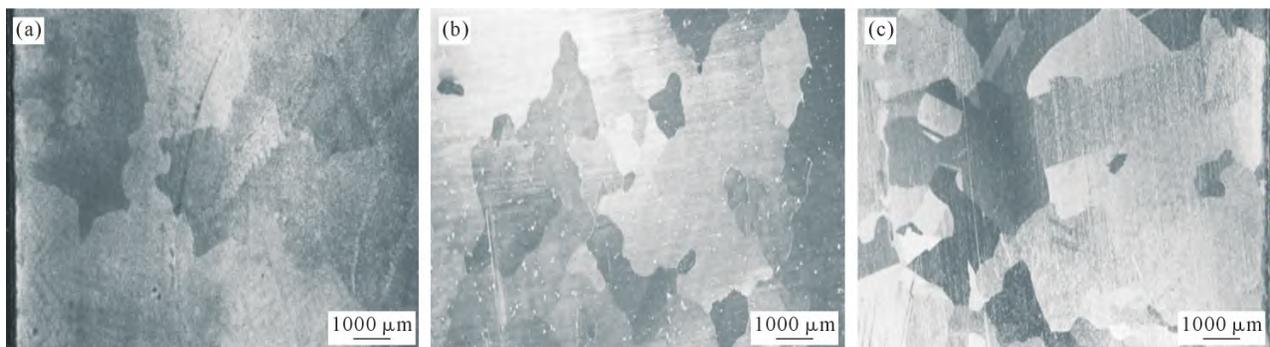


图 9 均匀化处理后 GH4706 合金不同部位的组织形貌:(a) 心部;(b) R/2;(c) 边缘

Fig.9 Morphology of different parts of the GH4706 alloy after homogenization: (a) center; (b) R/2; (c) edge

前、后的试样进行高温拉伸性能测试,温度分别设为 600、800、1 050 及 1 100 °C,结果如图 10 所示。均匀化前 GH4706 合金的强度随着拉伸温度的升高而降低,塑性反之。经过均匀化处理后,合金的强度在 600 °C 时大幅度降低,而塑性提高了约 154%,这是由于未经过均匀化处理的枝晶组织存在严重的偏析,导致合金塑性降低,而经过均匀化处理之后,晶粒尺寸变大,强度降低,同时枝晶完全退化,偏析得到消除,塑性提高。与均匀化之前相比,强度在 800、1 050 及 1 100 °C 时略有下降,塑性在 1 050 及 1 100 °C 时提高 10% 左右,而在 800 °C 时显著降低,断后伸长率仅 6.3% 左右,这与 800 °C 时的混晶组织有关(图 11)。图 11 中,600 °C 时晶粒尺寸最小且相对最均匀,而 800 °C 时晶粒大小和形状不均匀,出现混晶现象,晶粒间的应力集中和变形程度增加,容易导致裂纹的萌生,所以塑性显著降低;但混晶中许多细小的晶粒能提高晶界密度,阻止位错传播,从而使合金的强度提高。GH4706 合金发生动态再结晶的临界温

度为 975 °C<sup>[7]</sup>,应变速率一定时,变形温度越高越利于动态再结晶的充分进行,稳态下晶粒尺寸相对较大<sup>[25]</sup>。当动态再结晶机制开启后,动态再结晶形核与长大削弱了材料内部的加工硬化效应<sup>[26]</sup>,因此拉伸温度升高到 1 050 和 1 100 °C 时,合金塑性提高。

## 3 结论

(1)通过理论研究和均匀化试验验证,CH4706 合金基体为  $\gamma$  相,主要析出相为  $\eta$  相、 $\gamma+\gamma'$  共晶相、Laves 相、M(C, N)相。合金中的主要偏析元素有 Ti、Ni、Nb、Cr、Fe,其中 Ti、Ni、Nb 为正偏析元素,负偏析元素为 Cr、Fe。在铸锭的 R/2 处枝晶间的元素偏析最显著。

(2)采用均匀化工艺为 1 160 °C×10 h+1 190 °C×30 h,可有效消除 GH4706 合金原始铸态的枝晶组织,消除元素偏析。通过高温拉伸试验,采用该均匀化工艺热处理后,GH4706 合金在 600 °C 时可获得较好的塑性,断后伸长率提高 154%。

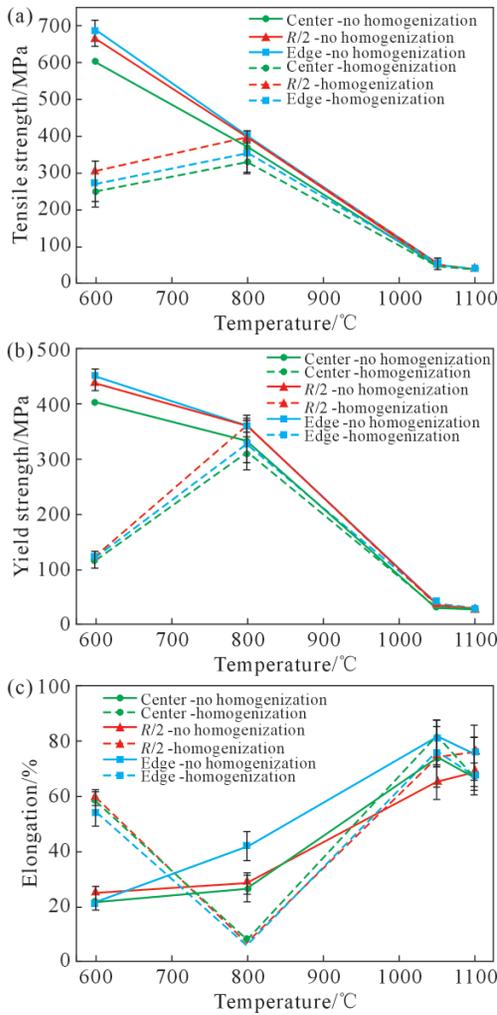


图 10 均匀化处理前后 GH4706 合金的高温拉伸性能对比：  
(a) 抗拉强度；(b) 屈服强度；(c) 断后伸长率

Fig.10 Comparison of the high-temperature tensile properties of the GH4706 alloy before and after homogenization: (a) tensile strength; (b) yield strength; (c) elongation

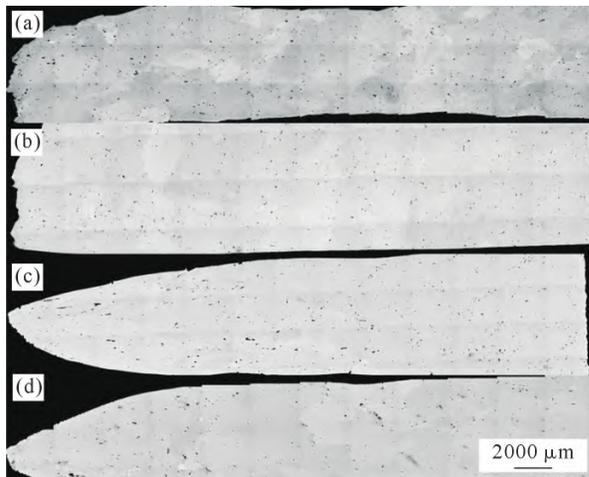


图 11 均匀化后 GH4706 合金 R/2 处在不同拉伸温度下的组织对比：(a) 600 °C；(b) 800 °C；(c) 1 050 °C；(d) 1 100 °C

Fig.11 Comparison of microstructures at R/2 of the GH4706 alloy after homogenization at different tensile temperatures:

(a) 600 °C；(b) 800 °C；(c) 1 050 °C；(d) 1 100 °C

参考文献：

- [1] ZHANG S, HUANG L J, ZHANG A W, YU L X, XIN X, SUN W R, SUN X F. Segregation of phosphorus and precipitation of MNP-type phosphide at the grain boundary of IN706 superalloy[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2017, 33(2): 187-191.
- [2] KINDRACHUK V, WANDERKA N, BANHART J.  $\gamma'/\gamma''$  Co-precipitation in Inconel 706 alloy: A 3D finite element study[J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 417(1-2): 82-89.
- [3] ZHANG S, JIA D, ZHAO D Q, ZENG L R, ZHANG L, ZENG G S, QU X H, SUN W R. Influence of stabilization heat treatment temperature on microstructure and stress rupture properties of Inconel 706 superalloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 27: 7998-8007.
- [4] 黄烁, 王磊, 张北江, 赵光谱. GH4706 合金的热变形行为与显微组织演化[J]. 材料工程, 2015, 43(2): 41-46.  
HUANG S, WANG L, ZHANG B J, ZHAO G P. Hot deformation behavior and microstructure evolution of GH4706 alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(2): 41-46.
- [5] KIM H, OH H, BAE H J, SUNG H, TALEGHANI F, YOON E Y, SEOL J B, KIM S, KIM J G. Effect of heat treatment conditions on the plastic deformation behavior of the Inconel 706 alloy[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 21: 2145-2155.
- [6] ZHANG S, XIN X, SUN W R, SUN X F, YU L X, ZHANG Y C, HU Z Q. Effect of phosphorus segregation on as-cast microstructure and homogenization treatment of IN706 alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25: 2939-2947.
- [7] 黄烁, 王磊, 张北江, 张文云, 赵光谱. GH4706 合金的动态再结晶与晶粒控制[J]. 材料研究学报, 2014, 28(5): 362-370.  
HUANG S, WANG L, ZHANG B J, ZHANG W Y, ZHAO G P. Dynamic recrystallization behavior and grain size control of GH4706 superalloy[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2014, 28(5): 362-370.
- [8] STINVILLE J C, GALLUP K, POLLOCK T M. Transverse creep of nickel-based superalloy bicrystals[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2015, 46(6): 2516-2529.
- [9] 杨浩, 王方军, 李采, 吴畏. 镍基高温合金的熔炼工艺研究进展[J]. 特殊钢, 2023, 44(3): 1-9.  
YANG H, WANG F J, LI C, WU W. Research progress on the melting process of nickel-based superalloy[J]. Special Steel, 2023, 44(3): 1-9.
- [10] 张北江, 黄烁, 张文云, 田强, 陈石富. 变形高温合金盘材及其制备技术研究进展[J]. 金属学报, 2019, 55(9): 1095-1114.  
ZHANG B J, HUANG S, ZHANG W Y, TIAN Q, CHEN S F. Recent development of nickel-based disc alloys and corresponding cast-wrought processing techniques[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2019, 55(9): 1095-1114.
- [11] FUCHS G E. Solution heat treatment response of a third generation single crystal Ni-base superalloy[J]. Materials Science and Engineering: A, 2001, 300(1-2): 52-60.
- [12] 孙晓峰, 金涛, 周亦胄, 胡壮麒. 镍基单晶高温合金研究进展[J]. 中国材料进展, 2012, 31(12): 1-11.  
SUN X F, JIN T, ZHOU Y Z, HU Z Q. Research progress of nickel-base single crystal superalloys[J]. Materials China, 2012, 31(12): 1-11.

- 1-11.
- [13] 徐堃,操光辉,严靖博,张鹏,刘鹏,袁勇. 一种新型 Ni-Fe 基高温合金的微观组织演化与蠕变行为[J]. 上海金属, 2024, 46(4): 40-46, 52.  
XU K, CAO G H, YAN J B, ZHANG P, LIU P, YUAN Y. Microstructural evolution and creep behavior of a new Ni-Fe-base superalloy[J]. Shanghai Metals, 2024, 46(4): 40-46, 52.
- [14] 石英男,孙少斌,曲敬龙,刘明东,荣昆,贾建. 粉末高温合金热挤压工艺研究进展[J]. 粉末冶金工业, 2024, 34(1): 124-133.  
SHI Y N, SUN S B, QU J L, LIU M D, RONG K, JIA J. Research progress on hot extrusion process of P/M superalloy[J]. Powder Metallurgy Industry, 2024, 34(1): 124-133.
- [15] 杨权,谭舒平. 617 合金的组织稳定性[J]. 钢铁, 2014, 49(2): 60-64.  
YANG Q, TAN S P. Analysis for the microstructure stability of alloy 617[J]. Iron and Steel, 2014, 49(2): 60-64.
- [16] LEE J, KIM K, KIM K S. Effect of microstructure on low cycle fatigue behavior of Inconel 706 at 650 °C [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials and Structures, 2024, 47(2): 372-383.
- [17] 刘静姝,王磊,刘杨,宋秀,杨楠,刘世忠,李嘉荣. Co 含量对一种新型高温合金铸态及热处理组织的影响[J]. 材料与冶金学报, 2023, 22(4): 351-360.  
LIU J S, WANG L, LIU Y, SONG X, YANG N, LIU S Z, LI J R. Effect of Co content on the as-cast and heat-treated microstructure of a novel fourth-generation nickel-based single crystal superalloy [J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2023, 22(4): 351-360.
- [18] 张冰冰,白亚冠,张鑫,聂义宏. 固溶和时效处理时间对 IN706 合金组织与性能的影响[J]. 特殊钢, 2022, 43(4): 75-81.  
ZHANG B B, BAI Y G, ZHANG X, NIE Y H. Effect of solution and aging treatment time on structure and mechanical properties of IN706 alloy[J]. Special Steel, 2022, 43(4): 75-81.
- [19] 徐焯玲,肖海林,王冲,黄烁,廉心桐,董瀚. 晶粒尺寸对 GH4706 高温合金显微组织及力学性能的影响[J]. 上海金属, 2024, 46(5): 27-32.  
XU Y L, XIAO H L, WANG C, HUANG S, LIAN X T, DONG H. Effect of grain size on microstructure and mechanical properties of GH4706 superalloy[J]. Shanghai Metals, 2024, 46(5): 27-32.
- [20] 张冰冰,白亚冠,聂义宏,张鑫,寇金凤. 超超临界汽轮机转子用 IN706 合金均匀化处理工艺研究[J]. 大型铸锻件, 2024(4): 33-37, 54.  
ZHANG B B, BAI Y G, NIE Y H, ZHANG X, KOU J F. Research on homogenization treatment process of IN706 alloy for ultra-supercritical steam turbine rotor[J]. Heavy Casting and Forging, 2024(4): 33-37, 54.
- [21] 张瑞,刘鹏,崔传勇,曲敬龙,张北江,杜金辉,周亦曹,孙晓峰. 国内航空发动机涡轮盘用铸锻难变形高温合金热加工研究现状与展望[J]. 金属学报, 2021, 57(10): 1215-1228.  
ZHANG R, LIU P, CUI C Y, QU J L, ZHANG B J, DU J H, ZHOU Y Z, SUN X F. Present research situation and prospect of hot working of cast & wrought superalloys for aero-engine turbine disk in China[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2021, 57(10): 1215-1228.
- [22] 信昕,孙文儒,程丽萍,郭守仁,杨洪才,胡壮麒. Al, Nb 含量对 GH706 合金长期时效组织及持久性能的影响[J]. 材料与冶金学报, 2010, 9(1): 62-67.  
XIN X, SUN W R, CHENG L P, GUO S R, YANG H C, HU Z Q. Effects of Al and Nb on microstructures and stress rupture property of long-time aging GH706 alloy[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2010, 9(1): 62-67.
- [23] 朱良,邵博,刘德华. GH4698 镍基合金均匀化组织及变形抗力研究[J]. 铸造技术, 2017, 38(11): 2629-2632.  
ZHU L, SHAO B, LIU D H. Homogenization and deformation resistance of GH4698 alloy[J]. Foundry Technology, 2017, 38(11): 2629-2632.
- [24] 李亚辉,聂义宏. 700 °C 超超临界机组用镍基合金转子锻件制造过程中常见问题解析[J]. 大型铸锻件, 2017(4): 5-8, 17.  
LI Y H, NIE Y H. Analysis on common problems of Ni-base alloy rotor forgings for 700 °C ultra supercritical unit during manufacturing process[J]. Heavy Casting and Forging, 2017(4): 5-8, 17.
- [25] 费荣高,赵刚,叶传龙,韩汝洋,易航,甘晓龙. 基于元胞自动机的 30CrMo 钢动态再结晶组织演变规律研究[J]. 武汉科技大学学报, 2019, 42(6): 401-408.  
FEI R G, ZHAO G, YE C L, HAN R Y, YI H, GAN X L. Study of microstructural evolution of 30CrMo steel during dynamic recrystallization based on cellular automata [J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2019, 42(6): 401-408.
- [26] 蔺永诚,陈小敏,陈明松. 镍基合金的热变形行为及智能热加工技术研究进展[J]. 精密成形工程, 2021, 13(1): 1-18.  
LIN Y C, CHEN X M, CHEN M S. Recent development of high-temperature deformation behavior and intelligent processing of Ni-based superalloy[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13(1): 1-18.

(责任编辑:宫文婧)