



## C650R 镍基合金大型锭铸态组织特征及均匀化工艺

寇金凤<sup>1</sup>, 白亚冠<sup>1</sup>, 聂义宏<sup>1</sup>, 张鑫<sup>1</sup>, 张冰冰<sup>1</sup>, 李金山<sup>2</sup>, 贺一轩<sup>2</sup>

(1 天津重型装备工程研究有限公司, 天津 300457; 2 西北工业大学, 西安 710072)

**摘要:** 借助光学显微镜、扫描电子显微镜、能谱分析仪, 研究了 650 °C 超超临界汽轮机转子用 C650R 镍基合金三联工艺 (VIM+PESR+VAR) 冶炼的 12 t 铸锭冒口端的铸态组织及不同均匀化处理后的显微组织, 并对比了均匀化处理前后的高温热塑性。结果表明, 采用三联工艺冶炼的  $\phi 960$  mm 锭型的自耗锭中存在明显的偏析, 主要偏析元素为 Mo、Nb、Ti, 均偏析于枝晶间, 晶内主要析出相为富含 Mo、Nb、Ti 的 MC 型一次碳化物, 碳化物形状不规则, 晶界上以小颗粒状的  $M_{23}C_6$  为主, 并含少量不规则的富含 Mo、Nb、Ti、Zr 的 MC 型一次碳化物。依据不同均匀化处理后枝晶消除、碳化物回溶、3 种元素 (Mo、Nb、Ti) 残余偏析系数变化, 确定了 12 t 级 C650 镍基合金铸锭的均匀化工艺为 1 200 ~ 1 220 °C 保温 96 h 以上。与铸态相比, 经均匀化后的试样高温热塑性显著增强, 为铸锭顺利开坯奠定了有利基础。

**关键词:** C650R 镍基合金; 大型铸锭; 偏析; 均匀化

**DOI:** 10. 20057/j. 1003-8620. 2025-00079 **中图分类号:** TG113. 12

## Microstructure and Homogenization Process of Large Ingot of As-cast Condition C650R Nickel-based Alloy

Kou Jinfeng<sup>1</sup>, Bai Yaguan<sup>1</sup>, Nie Yihong<sup>1</sup>, Zhang Xin<sup>1</sup>, Zhang Bingbing<sup>1</sup>, Li Jinshan<sup>2</sup>, He Yixuan<sup>2</sup>

(1 Tianjin Heavy Industries Research & Development Co., Ltd., Tianjin 300457, China;

2 Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** Using optical microscope, scanning electron microscope and energy dispersive spectrometer, the casting microstructure of 12 tons of ingots of as-cast condition C650R nickel-based alloy used in the 650 °C ultra-supercritical steam turbine rotor, smelted by the three-process method (VIM+PESR+VAR), and the microstructure after different homogenization treatments were studied. The high-temperature thermoplasticity before and after homogenization treatment was also compared. The results show that in the self-consumption ingots of  $\phi 960$  mm ingot size produced using the three-process smelting method, there is a significant segregation. The main segregation elements are Mo, Nb, and Ti, which are segregated between dendrites. Within the crystal, the main precipitated phase is a MC-type primary carbide rich in Mo, Nb, Ti, and Zr. The carbides have an irregular shape, with small granular  $M_{23}C_6$  primarily at the grain boundaries, along with a small amount of irregular MC-type primary carbide rich in Mo, Nb, and Ti. Based on the results of dendrite elimination, carbides re-dissolution, and changes in the residual segregation coefficients of three elements (Mo, Nb, Ti) after different homogenization treatments, it was determined that the homogenization process for a 12-ton C650 nickel-based alloy ingot should be 1 200 °C-1 220 °C with a holding time of over 96 hours. Compared to the cast state, the samples after homogenization treatment show a significant improvement in high-temperature plasticity, which lays a favorable foundation for the smooth casting of the ingot.

**Key Words:** C650R Nickel-based Alloy; Large Ingot; Segregation; Homogenization

依据我国“富煤、缺油、少气”的一次能源禀赋, 煤电将始终在新型电力系统中起到关键的兜底保障作用。结合我国积极稳妥推进“双碳”目标的战略规划, 发展大容量、高参数超超临界电站技术是我国当前及未来火力发电领域的主要目标<sup>[1-3]</sup>。在 650 °C 超超临界汽轮机组中, 高温转子锻件作为最核心的部件, 需要在高温、高转速、高应力、高温蒸汽氧化腐蚀的环境下长时间服役, 因此, 对材料的

高温抗氧化性、抗蒸汽腐蚀、组织稳定性提出了极高的要求, 普通的钢均已无法满足使用要求, 必须使用综合性能优异的镍基耐热合金<sup>[4-6]</sup>。

C650R 镍基合金是一种固溶强化型变形镍基合金, 是在国家重点研发项目支持下, 由钢铁研究总院针对 650 °C 超超临界汽轮机用转子锻件的性能和服役工况而开发的一种新型镍基合金, 兼具优异的高温强度、高温抗氧化性、组织稳定性、热加工性和

**基金项目:** 国家重点研发计划项目 (2021YFB3704102)

**作者简介:** 寇金凤 (1988—), 女, 硕士, 高级工程师;

**E-mail:** 15202297887@163.com;

**收稿日期:** 2025-03-26

**通信作者:** 聂义宏 (1977—), 女, 博士, 高级工程师;

**E-mail:** nieyihong126.com

焊接性<sup>[7-8]</sup>。C650R镍基合金用于研制650℃超超临界汽轮机转子用全尺寸工业试制件,采用真空感应熔炼+保护气氛电渣重熔+真空自耗重熔三联工艺冶炼了12t铸锭。针对如此大锭型的镍基合金铸锭,需系统开展铸态组织评价与分析,包括枝晶偏析、一次碳化物、元素偏析等。

在大型镍基合金锻件热加工过程中,铸锭均匀化处理是非常重要的一步。镍基合金由于合金元素种类多,难扩散元素含量高,铸锭凝固过程中会在枝晶间析出大量拓扑密排相和大块状的一次碳化物,显著降低铸锭的高温热塑性,从而加大开坯过程的开裂倾向,因此,铸锭在开坯前需进行合理的均匀化处理,降低枝晶偏析,使元素在高温长时间扩散后达到尽可能均匀一致的状态,使大块状的一次碳化物棱角钝化减少开坯过程中应力集中导致的开裂<sup>[9-10]</sup>。因此,试验在了解C650R镍基合金铸锭铸态组织特点的基础上,对均匀化工艺开展了系统的研究,明确均匀化处理温度、时间对偏析和大块状一次碳化物的影响规律,从而确定适宜的均匀化处理工艺范围,为12t级C650R大型铸锭的顺利开坯奠定基础。

## 1 试验材料及方法

### 1.1 试验材料

试验用的 $\phi 960$  mm的12t级C650R镍基合金铸锭由真空感应熔炼(VIM)+保护气氛电渣重熔(PESR)+真空自耗(VAR)三联工艺冶炼,铸锭的化学成分详见表1。由于铸锭冒口端是最后凝固区域,化学元素偏析最严重,因此,铸锭脱模冷却后锯切冒口盘片,并在冒口盘片上采用线切割切取中心、0.5R、边缘不同位置的试样进行铸态组织分析,取中心区域的试样进行均匀化工艺研究,取样示意图如图1所示。

表1 C650R镍基合金化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of C650R nickel-based alloy										
										%
C	Cr	Co	Mo	Al	Ti	B	Nb	Zr	Ni	
0.06	22.00	8.00	7.00	1.00	0.60	0.003	0.20	0.05	Bal.	

### 1.2 均匀化处理实验

均匀化处理系列实验在箱式电阻加热炉中进行。考虑到试验料取自12t大型铸锭,结合项目组前期研究基础和实验,均匀化处理选择在1180、

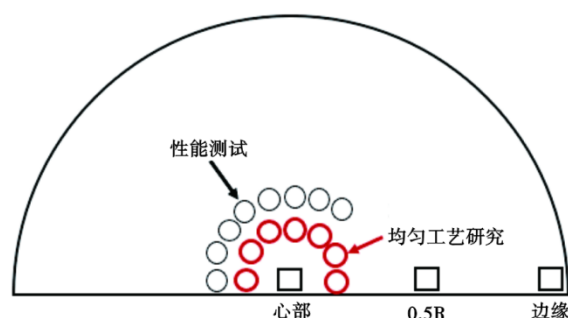


图1 C650R镍基合金取样示意图

Fig. 1 Schematic diagram for sample machining of C650R nickel-based alloy

1200、1220℃下分别保温24、48、72、96、108h,采用到温装炉,炉温温差控制在 $\pm 5$ ℃,保温结束后采取水淬的方式进行冷却,以确保试样在冷却后仍保持高温热处理后的组织状态。

### 1.3 组织检测实验方案

铸态和均匀化处理后的试样用金相砂纸打磨至1000#后抛光,然后用三氯化铁35g+盐酸50mL+水100mL的溶液腐蚀,并清洗、吹干后在光学显微镜(OM)以及扫描电子显微镜(SEM)进行显微组织观察,并用能谱分析仪(EDS)测量均匀化前后枝晶干和枝晶间的化学成分,一个枝晶干和一个枝晶间的成分为一组,每个试样随机测试五个视野,每个视野中随机测试三组成分,最后测得平均值,以此来分析自耗锭均匀化前后的显微组织及元素偏析消除情况。

### 1.4 高温拉伸测试

从冒口盘片的中心附近的位置取样如图1所示,采用电子式高温拉伸试验机测试铸态和均匀化处理后的的高温拉伸性能,对比分析均匀化处理对C650R镍基合金高温热塑性的影响。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 铸态组织

#### 2.1.1 枝晶特征

$\phi 960$  mm锭型的12t C650R自耗锭头部三个部位(中心、0.5R、边缘)的金相组织如图2所示,三个位置均呈现明显的枝晶。真空自耗锭在熔炼过程采用氩气强冷技术来提高冷速和凝固速度,因此,靠近结晶器的位置凝固速度最快,由外而内凝固速度逐渐变慢,中心部位的凝固速度最慢,因此,边缘部位的枝晶生长杂乱、随机分布,且二次枝晶间距较小,铸态晶粒也相对细小;0.5R处的枝晶仍然呈杂乱分布,但二次枝晶间距有所增大,铸态晶粒比

边缘位置的明显增大;心部枝晶最为发达,枝晶粗大且排列整齐,二次枝晶臂间距达到 207  $\mu\text{m}$ ,铸态晶粒尺寸达到厘米级别,按照图 2 中箭头所示,在不同位置试样的金相组织中分别随机测定几组枝晶距离,计算每个箭头所覆盖的二次枝晶臂个数,用枝晶距离除以二次枝晶臂个数,即求得二次枝晶臂的平均间距,具体统计分析结果列于表 2。

表 2 C650R 镍基合金不同位置铸态组织

Table 2 As-cast structure of different positions of the C650R nickel-based alloy

位置	平均枝晶间距/ $\mu\text{m}$	枝晶形貌	晶粒尺寸/ $\mu\text{m}$
心部	207	枝晶组织发达 排列整齐	>1 100
0.5R	205	枝晶生长混乱 排列不规则	1015
边缘	198	枝晶细小 排列不规则	430

### 2.1.2 析出相

C650R 镍基合金铸态组织中的晶内析出相和晶界析出相及能谱分析结果如图 3 所示,这些析出相主要位于枝晶间。晶内主要是块状的一次碳化物,晶界上以小颗粒状的碳化物为主,同时串联少量块状碳化物。从尺寸上来讲,心部的碳化物较大,边缘的最小,碳化物尺寸与凝固速率密切相关,凝固越慢,一次碳化物尺寸越大。大块状的碳化物,尺寸大、形状不规则、棱角尖锐,在热变形过程中会造成碳化物附近应力集中,导致开裂。EDS 分析结果显示,晶内的块状碳化物主要是富含 Mo、Nb、Ti、Zr 的碳化物;晶界上主要是  $\text{M}_{23}\text{C}_6$  的碳化物,同时含有少量富含 Mo、Nb、Ti、Zr 的 MC 型碳化物。

### 2.1.3 铸态偏析系数

利用能谱仪测量了 C650R 合金铸态组织中枝晶干和枝晶间的成分,并计算了不同元素在枝晶间和枝晶干的比值—即偏析系数 K,见表 3。Mo、Nb、

Ti 的偏析系数大于 1,表现为正偏析,偏聚于枝晶间,其他主合金元素 Cr、Co、Al 只表现出轻微的正偏析或负偏析。因此,本研究重点关注 C650R 合金中的 Mo、Nb、Ti 三个元素的变化。

## 2.2 均匀化工艺研究

### 2.2.1 不同均匀化处理后枝晶变化

不同均匀化处理后的枝晶形貌如图 4 所示。在 1 180  $^{\circ}\text{C}$  保温不同时间后,枝晶消除不太明显;1 200  $^{\circ}\text{C}$  保温不同时间后,枝晶消除明显,保温 96 h 后枝晶已明显淡化,保温 108 h 后枝晶已基本消除;1 220  $^{\circ}\text{C}$  保温后,枝晶快速淡化,保温时间大于 96 h 后,已基本看不出枝晶痕迹。在较短的保温时间内,不同保温温度下,枝晶均未明显淡化,当保温时间超过 96 h,保温温度在 1 200、1 220  $^{\circ}\text{C}$  时,枝晶基本消除。

### 2.2.2 不同均匀化处理后碳化物变化

不同均匀化处理后晶内碳化物的变化如图 5 所示,从成分上看,这些碳化物均为富含 Mo、Nb、Ti、Zr 的 MC 型碳化物。从尺寸和形态上来看,1 180  $^{\circ}\text{C}$  保温不同时间后,碳化物在前期变化不明显,只有经长时间保温后尺寸略有减小;1 200  $^{\circ}\text{C}$  保温后,随着时间的延长,碳化物由大块状变为空心的小颗粒状,且小颗粒较为圆滑、钝化;1 220  $^{\circ}\text{C}$  保温后碳化物整体细化明显,即使经历短时间保温后碳化物也变小、变少,在长时间保温后则变得更小、更少。

不同均匀化处理后晶界碳化物的变化如图 6 所示,从成分上看,与铸态相比晶界上  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$  的碳化物已全部回溶,主要为未完全回溶的富含 Mo、Nb、Ti、Zr 的 MC 型碳化物。从形态和数量上看,在 1 180  $^{\circ}\text{C}$  保温时间不同时间后,晶界碳化物数量变化不大,尺寸随这保温时间的延长而逐渐减小;1 200  $^{\circ}\text{C}$  保温较长时间后,晶界碳化物明显变小、变少;1 220  $^{\circ}\text{C}$  保温后,已观察不到块状碳化物,仅剩小颗粒状碳化物,且随着保温时间延长,碳化物数量显著减少。

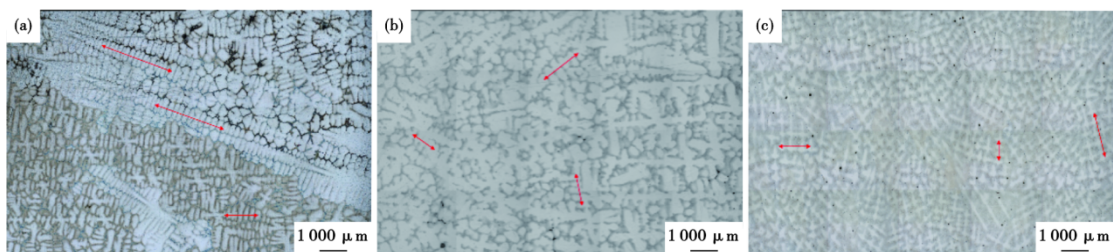


图 2 C650R 铸态组织:(a)中心,(b)0.5R,(c)边缘

Fig. 2 Optical micrographs of the C650R VAR ingot : (a)center, (b)0.5R, (c)edge

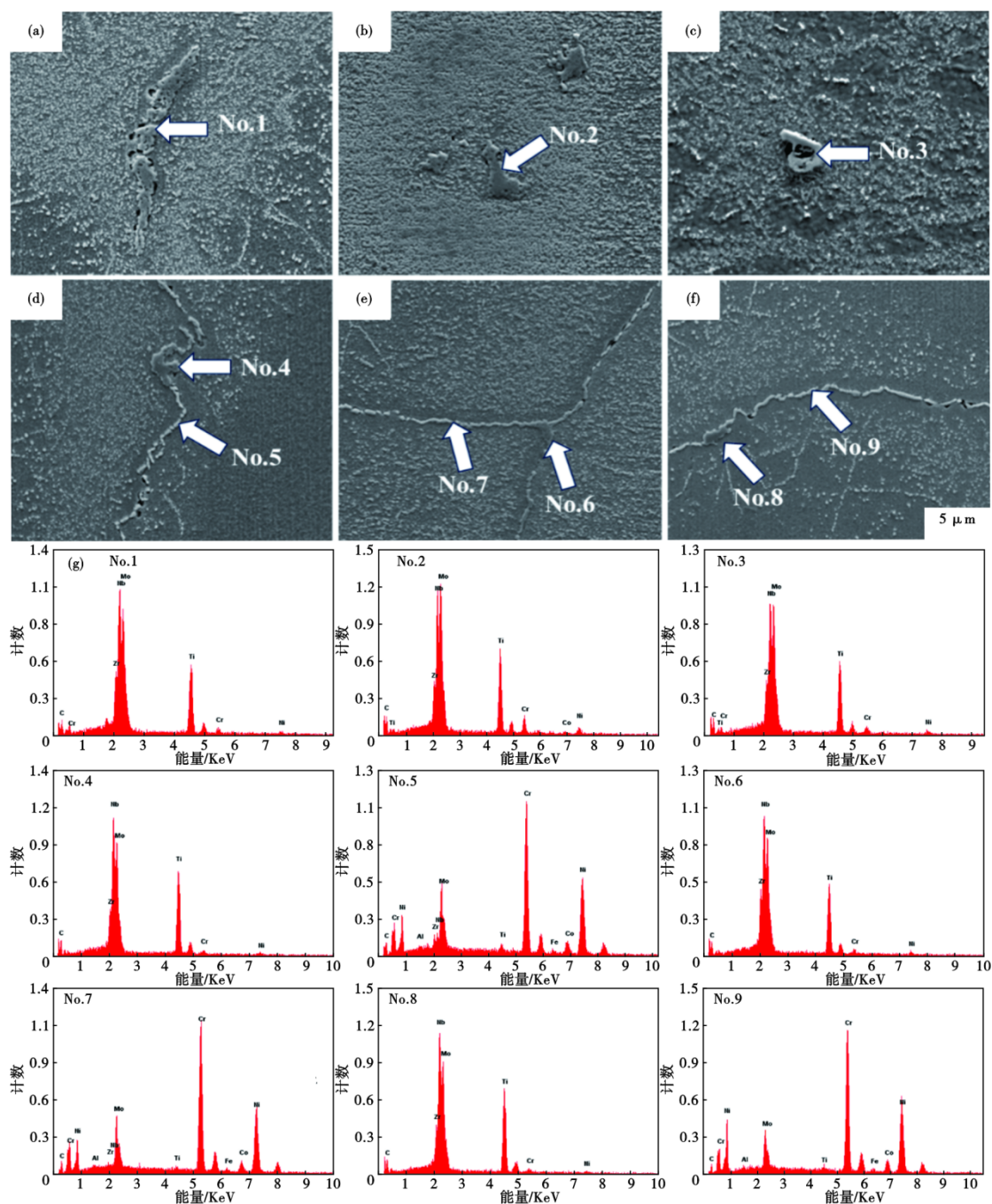


图3 C650R 合金自耗锭组织及能谱分析:(a)心部的晶内析出相,(b)0.5R处的晶内析出相,(c)边缘的晶内析出相,(d)心部的晶界析出相,(e)0.5R处的晶界析出相,(f)边缘的晶界析出相,(g)析出相能谱

Fig. 3 SEM image and EDS analysis of the C650R alloy self-consumption ingot : (a) intragranular precipitates of center, (b) intragranular precipitates of 0.5R, (c) intragranular precipitates of edge, (d) grain boundary precipitates of center, (e) grain boundary precipitates of 0.5R, (f) grain boundary precipitates of edge, (g)energy spectrum of the precipitates

表 3 C650R 合金铸态组织各元素偏析系数 K

Table 3 Segregation coefficients K of different elements of the C650R alloy casting structure

位置	Cr	Co	Al	Mo	Nb	Ti
中心	1.04	0.92	1.03	1.50	1.85	1.93
0.5R	1.03	0.98	1.02	1.34	1.72	1.75
边缘	1.02	1.01	0.98	1.21	1.55	1.13

少量的小颗粒的碳化物在热变形过程中不会像铸态大块状碳化物那样,造成局部应力集中而导致开裂,有利于显著提高开坯过程的塑性。

### 2.2.3 不同均匀化处理后残余偏析系数

均匀化处理的本质是降低铸锭中的元素偏析,消除其在热加工后的组织不均匀性,同时,能使铸

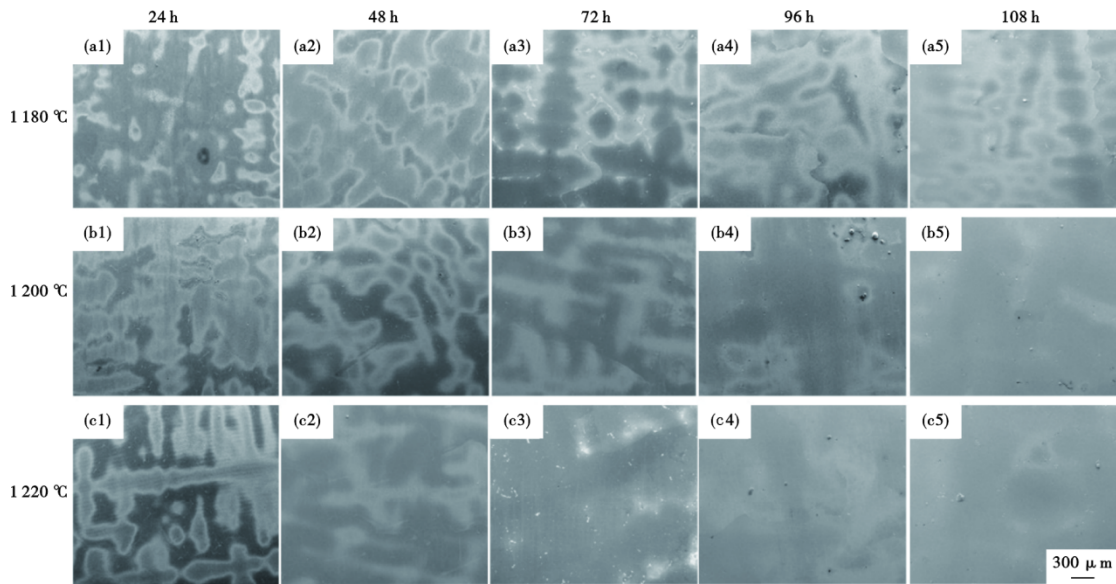


图 4 C650R 合金经 1 180 °C(a1、a2、a3、a4、a5)、1 200 °C(b1、b2、b3、b4、b5)、1 220 °C(c1、c2、c3、c4、c5)保温 24 h(a1、b1、c1)、48 h(a2、b2、c2)、72 h(a3、b3、c3)、96 h(a4、b4、c4)、108 h(a5、b5、c5)小时均匀化处理后的组织形貌  
 Fig. 4 Microstructure of C650R ingot after homogenization treated at 1 180 °C(a1、a2、a3、a4、a5)、1 200 °C(b1、b2、b3、b4、b5)、1 220 °C(c1、c2、c3、c4、c5)hold temperature for 24 h(a1、b1、c1)、48 h(a2、b2、c2)、72 h(a3、b3、c3)、96 h(a4、b4、c4)、108 h(a5、b5、c5)

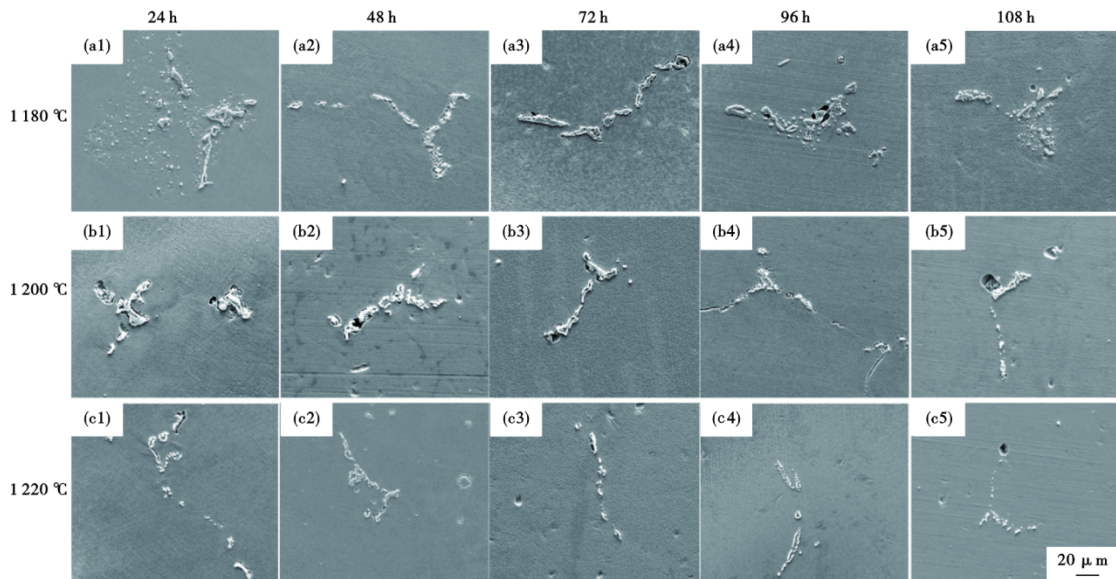


图 5 C650R 合金经 1 180 °C(a1、a2、a3、a4、a5)、1 200 °C(b1、b2、b3、b4、b5)、1 220 °C(c1、c2、c3、c4、c5)保温 24 h(a1、b1、c1)、48 h(a2、b2、c2)、72 h(a3、b3、c3)、96 h(a4、b4、c4)、108 h(a5、b5、c5)小时均匀化处理后的晶内碳化物形貌  
 Fig. 5 Morphology of carbide precipitates in grains of C650R ingot after homogenization treated at 1 180 °C(a1、a2、a3、a4、a5)、1 200 °C(b1、b2、b3、b4、b5)、1 220 °C(c1、c2、c3、c4、c5)hold temperature for 24 h(24 h(a1、b1、c1)、48 h(a2、b2、c2)、72 h(a3、b3、c3)、96 h(a4、b4、c4)、108 h(a5、b5、c5)

锭中一些有害的低熔点相回溶,改善大块状碳化物的形态,从而改善开坯过程的塑性,防止开裂<sup>[11-13]</sup>。均匀化处理目的是选择合适的温度保温合适的时间后,使各元素原子在热激活作用下经过扩散而达到均匀一致的状态。在工业上通常引入残余偏析

系数  $\delta$  作为衡量合金元素达到均匀的量化指标<sup>[14-15]</sup>,如式(1)。

$$\delta = \frac{C_{\max} - C_{\min}}{C_{\max}^0 - C_{\min}^0} \quad (1)$$

式中,  $C_{\max}^0$  为在铸态组织中测得的元素在枝晶间的

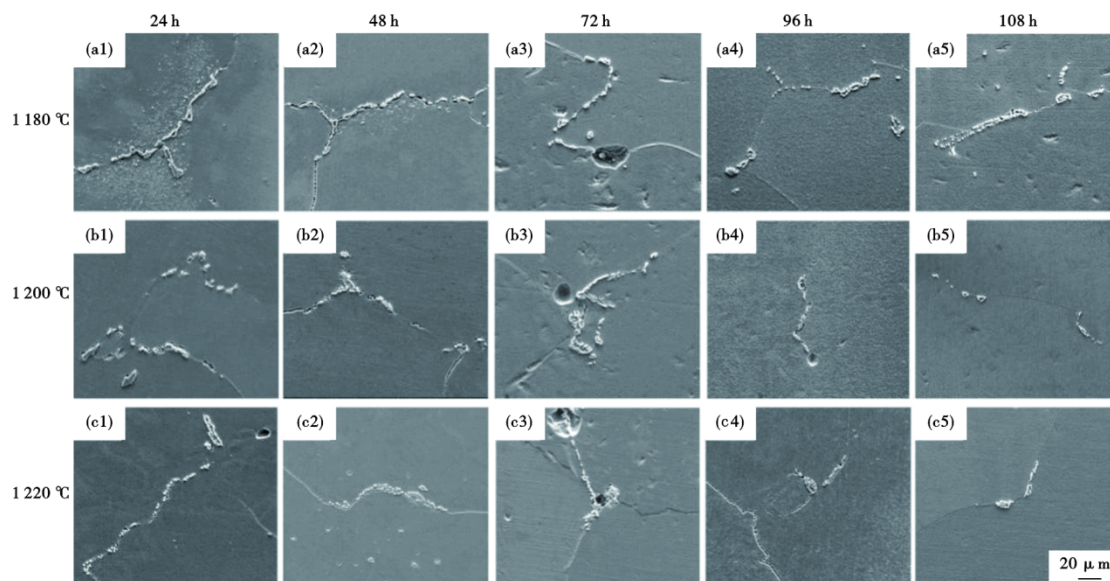


图6 C650R合金经1180 °C(a1、a2、a3、a4、a5)、1200 °C(b1、b2、b3、b4、b5)、1220 °C(c1、c2、c3、c4、c5)保温24 h(a1、b1、c1)、48 h(a2、b2、c2)、72 h(a3、b3、c3)、96 h(a4、b4、c4)、108 h(a5、b5、c5)小时均匀化处理后的晶界碳化物形貌

Fig. 6 Morphology of grain boundary carbide precipitates in grains of C650R ingot after homogenization treated at 1180 °C(a1、a2、a3、a4、a5)、1200 °C(b1、b2、b3、b4、b5)、1220 °C(c1、c2、c3、c4、c5)hold temperature for 24 h(a1、b1、c1)、48 h(a2、b2、c2)、72 h(a3、b3、c3)、96 h(a4、b4、c4)、108 h(a5、b5、c5)

平均浓度,  $C_{\min}^0$  为在铸态组织中测得的元素在枝晶干的平均浓度,  $C_{\max}$  为均匀化处理后元素在枝晶间的平均浓度,  $C_{\min}$  为均匀化处理后元素在枝晶干的平均浓度。 $\delta$  的值在0~1, 铸态时为1, 完全均匀化态为0。

原子扩散系数随温度的变化规律如式(2)。

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

式中,  $D_0$  为常数,  $Q$  为原子扩散激活能,  $R$  为气体常数。

由公式(2)可知, 温度越高, 原子扩散系数越大, 越有利于元素成分的均匀化, 但此温度不能过高, 否则会导致晶界过热、过烧及低熔点相初熔等问题; 温度越低, 原子扩散系数越小, 越起不到均匀化处理的效果。

Mo、Nb、Ti元素在不同温度均匀化后残余偏析系数的变化如图7所示。在不同温度保温处理后, Ti元素残余偏析系数下降最快; 当保温时间小于48 h, Mo元素比Nb元素下降得快; 当保温时间大于48 h后, Mo元素比Nb元素下降得慢, 这不仅与元素的含量有关, 而且与原子序数大小有关。元素含量越高, 元素的原子序数越大, 偏析消除越困难。本试验的C650R合金中, Ti元素含量较低, 且原子序数最小, 因此, 偏析消除最快; Mo元素是主固溶强化元素, 含量较高, 因此, 均匀化处理后期, 参与偏析系数变化

缓慢; Nb元素含量很低, 但原子序数最大, 热激活过程中扩散速率最慢, 同时有一部分以一次碳化物的形式存在, 在均匀化处理前期残余偏析系数变化缓慢, 而到了后期则比Mo元素降低的快。工业上一般认为 $\delta$ 小于0.2时即认为偏析的溶质原子扩散均匀。在1180 °C保温不同时间后, Mo、Nb元素的残余偏析系数均在0.2以上; 在1200 °C保温时间大于96 h后, 三种元素的残余偏析系数都降至0.2以下; 1220 °C保温不同时间后, Nb、Ti元素的残余偏析系数快速降至0.2以下, Mo元素的残余偏析系数在保温时间大于96 h后降至0.2以下。因此, 从三种元素残余偏析系数的变化来看, 均匀化处理工艺宜选择在1200~1220 °C, 保温时间大于96 h。

### 2.3 高温热塑性

根据以上均匀化处理研究结果, 并考虑降本节能因素, 后续试验采用1200 °C保温96 h的均匀化处理工艺, 并将铸态试样和均匀化处理后的试样分别做高温拉伸, 高温拉伸后的断面收缩率和伸长率数据如图8所示。由于铸锭开坯时始锻温度相对较高, 因此, 本试验重点关注并对比了高温段的拉伸数据。由图8可知, 均匀化处理后, 1150~1250 °C范围的断面收缩率都在95%以上且断后伸长率均在75%以上, 而铸态试样在1150~1250 °C范围的断面收缩率和伸长率均较低, 说明采用合适的均匀

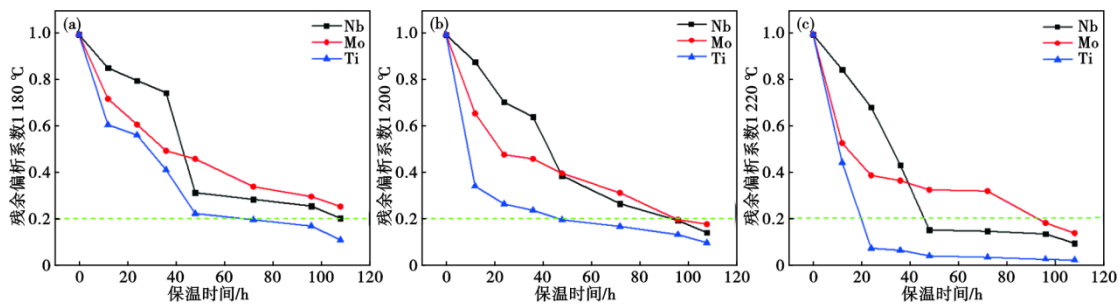


图 7 Nb、Mo、Ti 元素残余偏析系数经不同均匀化处理后的变化: (a) 1 180 °C, (b) 1 200 °C, (c) 1 220 °C

Fig. 7 Variation of residual segregation parameter after different homogenization treatments : (a) 1 180 °C, (b) 1 200 °C, (c) 1 220 °C

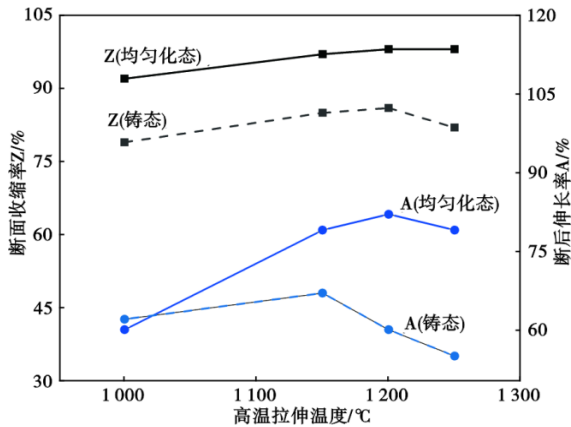


图 8 铸态和均匀化处理后的 高温拉伸结果

Fig. 8 High temperature tensile properties of as-cast and homogenization treated samples

化处理后铸锭的高温热塑性有了大幅度提

升, 这为 C650R 大型铸锭的顺利开坯奠定了有利基础。

### 3 结论

1) C650R 合金  $\phi 960$  mm 铸锭的铸态组织中存在明显的成分偏析, Mo、Nb、Ti 元素在枝晶间偏析最严重, 析出相主要分布于枝晶间及晶界, 主要是富含 Mo、Nb、Ti 的一次碳化物。

2) 从不同均匀化处理后的枝晶消除、碳化物回溶、主偏析元素残余偏析系数变化情况综合分析, 得出 C650R 合金  $\phi 960$  mm 铸锭的均匀化工艺宜选择在 1 200~1 220 °C 保温 96 h 以上。

3) 相比铸态试样, 采用 1 200 °C 保温 96 h 均匀化处理后的试样高温热塑性明显提高, 这为铸锭顺利开坯奠定了有利基础。

### 参考文献

[1] 彭建强, 宗影影, 高晨曦, 等. 国内外汽轮机转子用镍基合金锻件研制现状[J]. 大型铸锻件, 2024(6): 44-49.

[2] 聂义宏, 白亚冠, 寇金凤, 等. 700 °C 超超临界汽轮机用镍基合金转子锻件的试制[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(10): 3814-3818.

[3] 李 斌, 易大伟, 严靖博, 等. 高参数超超临界燃煤机组汽轮机高中压转子用材研究进展[J]. 热加工工艺, 2023, 52(18): 1-8.

[4] 聂义宏, 白亚冠, 金嘉瑜, 等. 700 °C 先进超超临界汽轮机转子锻件用铁镍基合金的高温组织稳定性研究[J]. 动力工程学报, 2019, 39(8): 661-665.

[5] Donth B, Blaas N, Diwo A, et al. Large-scale manufacture of nickel alloy turbine rotor forgings for A-USC power plants [J]. Transactions of the Indian National Academy of Engineering, 2020, 5(1): 75-82.

[6] Donth B, Blaas N, Diwo A, et al. New material and manufacturing developments for USC and A-USC steam turbine rotor forgings [C]. Advances in Materials Technology for Power Plants, "Advances in Materials Technology for Fossil Power Plants: Proceedings from the Eighth International Conference. 2016: 657-688.

[7] 何西扣, 刘正东, 王天剑, 等. 中国超超临界汽轮机转子耐热材料及锻件研制进展[J]. 中国冶金, 2023, 33(12): 1-11.

[8] 刘正东, 陈正宗, 何西扣, 等. 630~700 °C 超超临界燃煤电站耐热管及其制造技术进展[J]. 金属学报, 2020, 56(4): 539-548.

[9] 高首磊, 徐晓卫, 张 宏, 等. 高温均匀化对 GH4710 镍基合金组织及性能的影响[J]. 特殊钢, 2024, 45(1): 87-93.

[10] 李科敏, 杨玉军, 王志刚, 等. GH350 合金铸锭元素偏析及其均匀化处理[J]. 钢铁研究学报, 2012, 24(7): 54-58.

[11] 吴 贇, 聂义宏, 赵 帅, 等. 改型 617 合金的铸态组织特征及均匀化工艺研究[J]. 材料热处理学报, 2015, 36(7): 150-155.

[12] 向雪梅, 江 河, 董建新, 等. 难变形高温合金 GH4975 的铸态组织及均匀化[J]. 金属学报, 2020, 56(7): 988-996.

[13] 肖东平. 均匀化处理对 GH141 高温合金热变形行为的影响 [J]. 材料热处理学报, 2022, 43(4): 107-115.

[14] 王 珏, 吴 贇, 董建新, 等. 700 °C 超超临界锅炉材料 GH4700 合金铸态组织及均匀化工艺[J]. 稀有金属材料与工程, 2013, 42(9): 1908-1914.

[15] 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.