



## 镍基高温合金 GH3230 晶粒长大行为

甄兴敏<sup>1</sup>, 寇金凤<sup>1</sup>, 白亚冠<sup>1,2</sup>, 聂义宏<sup>2,3</sup>, 商书铭<sup>4</sup>, 张冰冰<sup>1</sup>, 张鑫<sup>1</sup>

(1 天津重型装备工程研究有限公司, 天津 300457; 2 黑龙江省高端核电装备智能制造重点实验室, 齐齐哈尔 161042; 3 中国第一重型机械股份公司, 齐齐哈尔 161042; 4 首都航天机械有限公司, 北京 100076)

**摘要:** 晶粒长大行为对镍基合金锻造以及热处理工艺的制定有十分重要的意义。对 GH3230 合金在 1 150~1 240 °C 保温 1~10 h 的晶粒长大行为进行了研究, 分析了关键工艺参数加热温度、保温时间对其晶粒尺寸的影响规律, 并构建了 GH3230 合金晶粒长大模型。结果表明, GH3230 合金晶粒长大对加热温度更敏感, 提高加热温度晶粒长大更快, 而当加热温度高于 1 220 °C, 晶粒出现了异常长大; 晶界上碳化物的钉扎阻碍了晶粒的长大, 1 150 °C 保温 3 h 后、1 180~1 240 °C 保温 1 h 后合金晶界上原本的碳化物逐渐回溶, 晶粒长大速度加快; 建立了 GH3230 合金 1 150~1 220 °C 加热、保温时间不大于 10 h 范围内的晶粒长大模型  $D=D_0+e^{12.66t^{0.206}}\exp(-133\ 602/RT)$ , 其预测值与实验值吻合较好, 其结果可为实际生产及数值模拟研究提供一定的参考。

**关键词:** 镍基高温合金; GH3230; 碳化物; 钉扎; 晶粒长大模型

**DOI:** 10. 20057/j. 1003-8620. N250548 **中图分类号:** TG132. 3

## Grain Growth Behavior of Nickel-based Superalloy GH3230

Zhen Xingmin<sup>1</sup>, Kou Jinfeng<sup>1</sup>, Bai Yaguan<sup>1,2</sup>, Nie Yihong<sup>2,3</sup>, Shang Shuming<sup>4</sup>,  
Zhang Bingbing<sup>1</sup>, Zhang Xin<sup>1</sup>

(1 Tianjin Heavy Industries Research & Development Co., Ltd., Tianjin300457, China; 2 Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Intelligent Manufacturing for Advanced Nuclear Power Equipment, Qiqihar 161042, China; 3 China First Heavy Industries, Qiqihar 161042, China; 4 Capital Aerospace Machinery Co., Ltd., Beijing 100076, China)

**Abstract:** The grain growth behavior of nickel-based superalloys is of great significance for the formulation of forging and heat treatment processes. The grain growth behavior of GH3230 alloy was studied in the temperature range of 1 150 °C-1 240 °C for 1-10 hours. The effects of critical process parameters such as heating temperature and holding time, on the grain size were analyzed, and a grain growth model of GH3230 alloy was established. The results show that the grain growth of GH3230 alloy is more sensitive to the heating temperature. Grain growth accelerates rapidly with increasing temperature. When the heating temperature is higher than 1 220 °C, abnormal grain growth occurs. The precipitation of carbides on the grain boundaries pins the grain growth. After holding at 1 150 °C for 3 hours and at 1 180 °C-1 240 °C for 1 hour, the original carbides on the grain boundaries gradually dissolve, and the grain growth rate increases. A grain growth model of GH3230 alloy in the heating range of 1 150 °C-1 220 °C and holding time not exceeding 10 hours was established as  $D=D_0+e^{12.66t^{0.206}}\exp(-133\ 602/RT)$ , and the predicted values are in good agreement with the experimental values. The results can provide certain references for actual production and numerical simulation studies.

**Key Words:** Nickel-based Superalloy; GH3230; Carbide; Pinning; Grain Growth Model

镍基合金凭借着卓越的高温性能, 在众多的领域被广泛地应用。GH3230 合金是 Haynes230 合金的国产化仿制合金, 该合金主要利用铬元素(Cr)、钨元素(W)、钼元素(Mo)来实现固溶强化, 同时, 通过碳化物来实现析出强化, 因此, 其具备优良的高温强度, 耐腐蚀以及抗氧化能力也十分出色<sup>[1-4]</sup>。GH3230 合金主要用来制造化工、发电, 以及航空航天等行业的各类部件, 如航空发动机、燃气轮机的叶片等。在超高温核用承压及结构材料领域, GH3230 合金也展现出了广阔的市场需求。

国内外对于 GH3230 合金的研究主要集中在高温热变形行为、焊接工艺的研究<sup>[5-7]</sup>。在热处理方面, 李强等<sup>[8]</sup>研究了固溶温度和固溶时间对 GH3230 合金组织和力学性能的影响; 杜星霖等<sup>[9]</sup>研究了固溶态 GH3230 合金时效过程中碳化物  $M_{23}C_6$  的析出行为; 张勇路等<sup>[10]</sup>等研究了 GH3230 合金在 10% 和 5% 小变形下的恢复热处理工艺。在晶粒长大规律方面, 丁佐军等<sup>[3]</sup>研究了固溶温度对 Haynes 230 合金晶粒尺寸以及析出相溶解行为的影响, 杜青山等<sup>[11]</sup>研究了相同变形量下固溶温度对 Haynes 230

合金晶粒度的影响。但现有研究均以固溶温度为核心理念,未能系统地探究加热温度与保温时间对GH3230合金晶粒长大行为的调控作用,尤其对于大型铸锻件来说,其尺寸效应较为显著,所需保温时间相对更长,现有研究对此类场景下的晶粒长大行为的研究存在不足。

对于高温合金而言,其微观组织特性,尤其是晶粒尺寸分布特征对性能的影响尤为关键<sup>[12-13]</sup>。细化晶粒作为提升并维持高温合金强度与韧性的重要技术途径,在材料性能优化中也具有重要意义。当镍基合金进行锻造、轧制以及热处理时,出现的晶粒粗化甚至是异常长大,往往源于此类工艺参数的控制不当,最终导致材料晶粒评级无法满足相关标准要求<sup>[14-15]</sup>。此外,热处理过程中形成的异常粗大晶粒,亦难以通过后续加工过程有效消除,最终将造成材料性能劣化<sup>[16]</sup>。由此可见,晶粒的长大行为对镍基高温合金锻造以及热处理工艺的制定具有十分重要的指导意义,为确保高温合金在高温高负荷工况下实现安全服役,必须对材料的晶粒尺寸进行合理调控。

本研究以GH3230合金棒材为研究对象,重点探究其在不同加热温度、不同保温时间处理后的晶粒长大行为,分析该合金的晶粒长大规律,同时,建立晶粒长大模型,最终其研究结果可为实际工业生产中工艺的制定提供一定的基础理论数据。

## 1 实验材料及方法

本次实验所采用的原材料为GH3230合金锻棒,锻棒尺寸为 $\phi 30\text{ mm}\times 300\text{ mm}$ 。GH3230合金锻棒成分见表1。

表1 GH3230合金成分(质量分数)  
Table 1 Composition of GH3230 alloy %

C	Cr	Mo	W	Co	Al	Ti	Si	Fe	Ni
0.069	23.28	1.26	13.44	2.23	0.37	0.36	0.34	1.91	余量

采用线切割加工出25个试样块,尺寸为 $10\text{ mm}\times 10\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ ,将其在不同温度下进行保温。热处理试验在箱式炉中进行,设置5组等温温度1 150、1 180、1 200、1 220 $^{\circ}\text{C}$ ,每组温度下分别保温1、2、3、5、10 h。待热处理完成后,将试样立即进行水冷处理,目的是保留高温组织,便于后续的观察。

为观察晶粒的演变规律,首先将试样块的表面分别用180 $^{\#}$ 、320 $^{\#}$ 、600 $^{\#}$ 、1000 $^{\#}$ 砂纸进行机械研磨后,

再进行抛光处理,后采用王水溶液( $\text{HCl}:\text{HNO}_3=3:1$ )将试样表面浸蚀45 s,制得组织观察试样。利用Axio Observer.5 m金相显微镜(OM)以及Quanta 400型扫描电镜对晶粒以及析出相进行观察分析,通过扫描电镜配备的能谱分析(Energy dispersive spectroscopy, EDS)样品的元素成分,利用Oxford C-Swift电子背散射衍射(Electron backscatter diffraction, EBSD)表征晶粒分布状态,采用截点法进行晶粒尺寸统计。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 锻态组织

GH3230合金锻态微观组织如图1所示。GH3230合金锻态组织由等轴晶、孪晶以及大量的碳化物组成,存在碳化物密集区。将显微组织进一步放大观察,如图1(b)所示,可以清晰地看到,晶界和晶内除颗粒状析出相外未见有其他类型的析出相。EDS成分分析结果显示,在晶界分布着大量富Cr碳化物,晶内存在少量的富W碳化物。使用EBSD对其锻态组织的晶粒尺寸进行统计,如图1(c)、(d)所示,可以看到锻态试样的晶粒较为细小,其晶粒度(ATSM)可达8.4级,平均晶粒尺寸为 $17\text{ }\mu\text{m}$ 。

### 2.2 不同温度下保温处理后的组织

#### 1) 晶粒的长大

GH3230合金在1 150、1 180、1 200、1 220 $^{\circ}\text{C}$ 下保温1、2、3、5、10 h后的微观组织如图2-6所示。可以看到,当加热温度与保温时间不同,晶粒长大的程度也有所差异。加热温度为1 150、1 180 $^{\circ}\text{C}$ 时,如图2和图3所示,晶粒长大很慢,且碳化物密集处晶粒偏小,保温10 h后,晶粒未见有显著的长大。随着加热温度的提高,其晶粒长大速度逐渐加快。加热温度提高到1 200、1 220 $^{\circ}\text{C}$ ,如图4和图5所示,随着保温时间的延长,晶粒尺寸有较为显著的增长,且晶粒分布整体较为均匀。当加热温度升高至1 240 $^{\circ}\text{C}$ 时,如图6所示,保温1 h后个别晶粒已出现了异常长大,延长保温时间后,这些异常长大的少数晶粒进一步吞并周围较小晶粒而继续长大。

#### 2) 碳化物的回溶

如图3所示,加热温度为1 150 $^{\circ}\text{C}$ 时,保温1 h和2 h后,碳化物密集区仍清晰可见;保温3 h,碳化物密集区已经基本消失;保温5 h后则完全消失。如图4-6所示,加热温度为1 180、1 200、1 220 $^{\circ}\text{C}$ 时,保温1 h后,碳化物聚集区已有明显减少;保温2 h后基本消失;保温3 h后,碳化物密集区均已完全消

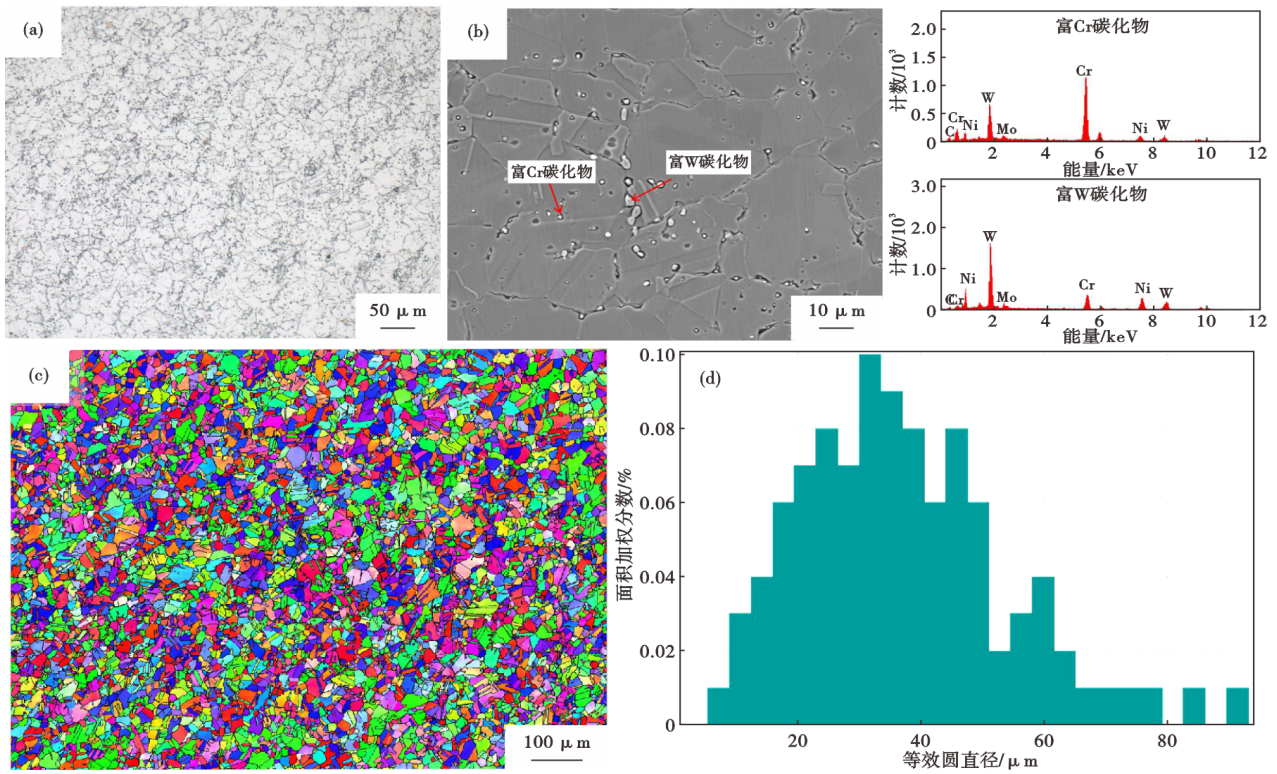


图 1 GH3230 锻态微观组织:(a)OM,(b)SEM图,(c)EBSD图,(d)晶粒等效圆直径分布

Fig. 1 Microstructure of GH3230 in forged state: (a)OM, (b)SEM, (c)EBSD, (d) distribution of equivalent circular diameter of grains

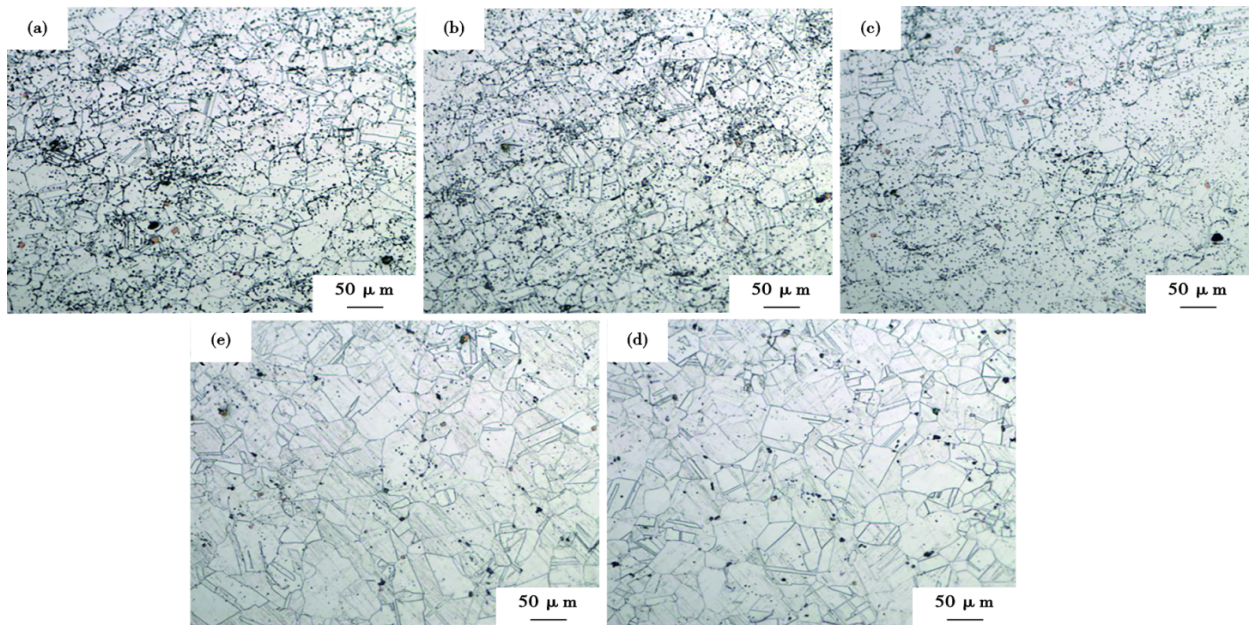


图 2 GH3230 合金在 1 150 °C 保温不同时间后的显微组织 OM 图:(a)1 h,(b)2 h,(c)3 h,(d)5 h,(e)10 h

Fig. 2 Microstructure OM images of GH3230 alloy after holding at 1 150 °C for different durations : (a)1 h, (b)2 h, (c)3 h, (d)5 h, (e)10 h

失。当温度进一步升高至 1 240 °C 时,保温 1 h 后碳化物密集区已基本消除,如图 6 所示。

GH3230 合金 1 200 °C 加热不同时间后碳化分

布情况如图 7 所示,可以看到,随着保温时间的延长,碳化物的数量逐渐减少,碳化物颗粒也逐渐变小,晶界处的碳化物逐渐发生了回溶,保温 10 h 后

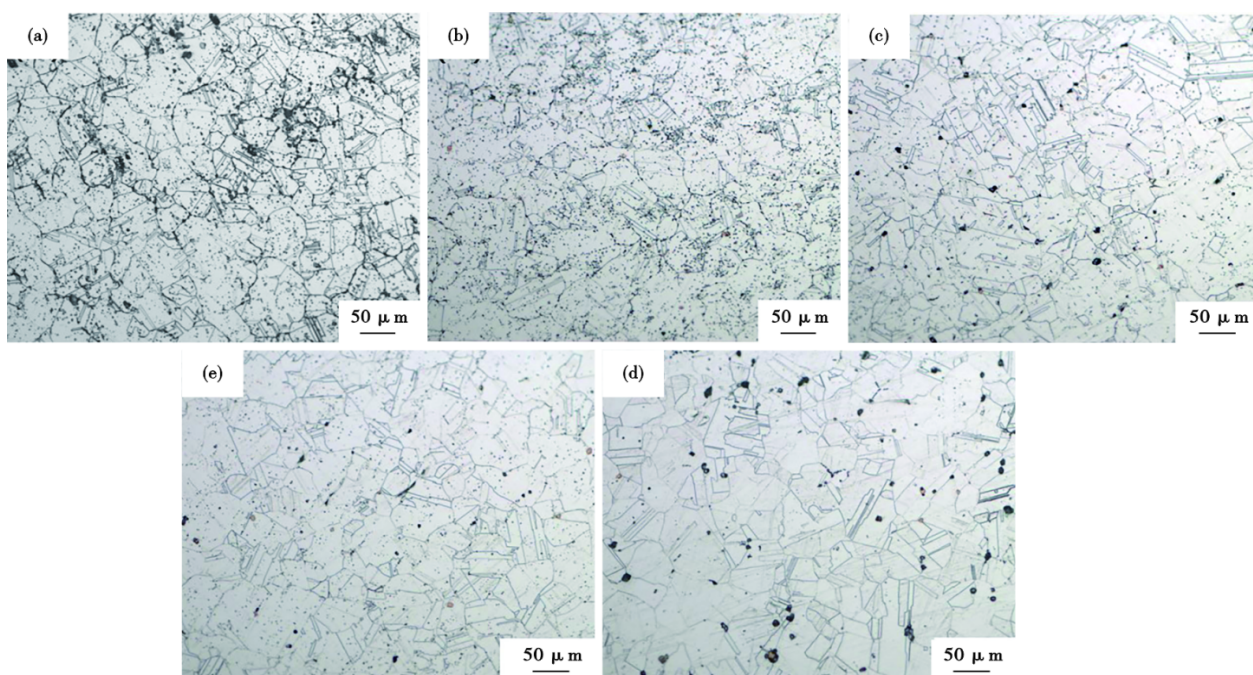


图3 GH3230合金在180 °C保温不同时间后的显微组织OM图:(a)1 h,(b)2 h,(c)3 h,(d)5 h,(e)10 h

Fig. 3 Microstructure OM images of GH3230 alloy after holding at 180 °C for different durations: (a)1 h, (b)2 h, (c)3 h, (d)5 h, (e)10 h

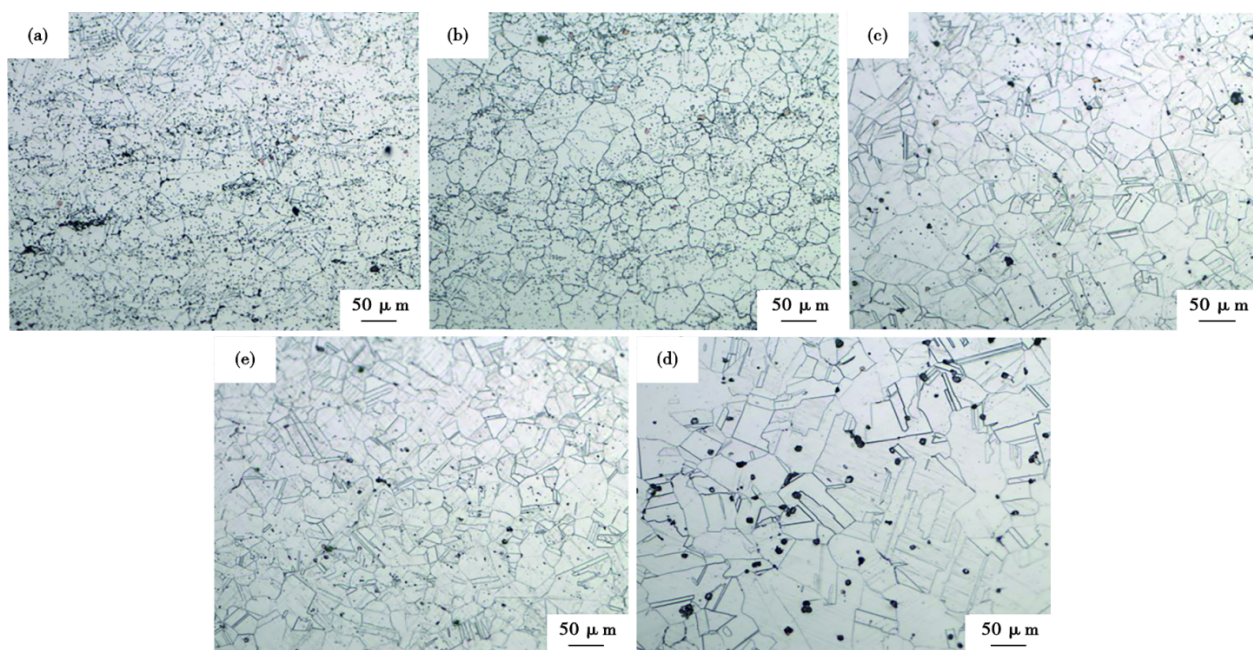


图4 GH3230合金在200 °C保温不同时间后的显微组织OM图:(a)1 h,(b)2 h,(c)3 h,(d)5 h,(e)10 h

Fig. 4 Microstructure OM images of GH3230 alloy after holding at 200 °C for different durations: (a)1 h, (b)2 h, (c)3 h, (d)5 h, (e)10 h

如图7(e)所示,晶界上的碳化物已基本全部回溶。

同样地,使用EDS对200 °C保温5 h后合金中碳化物的成分进行了分析,其结果如图8所示,晶界和晶内存在少量富W碳化物,晶内存在着极少量的细小富Cr碳化物。200 °C下5 h保温后,晶界 $M_{23}C_6$

绝大部分发生了回溶,其数量明显减少。

合金中晶粒粗化的核心机制是晶界迁移合并,而晶粒长大及粗化过程,主要归因于其中碳化物的含量及其分布特性。综上可知,合金锻态组织中存在着大量的碳化物(主要为富Cr碳化物),处于保温

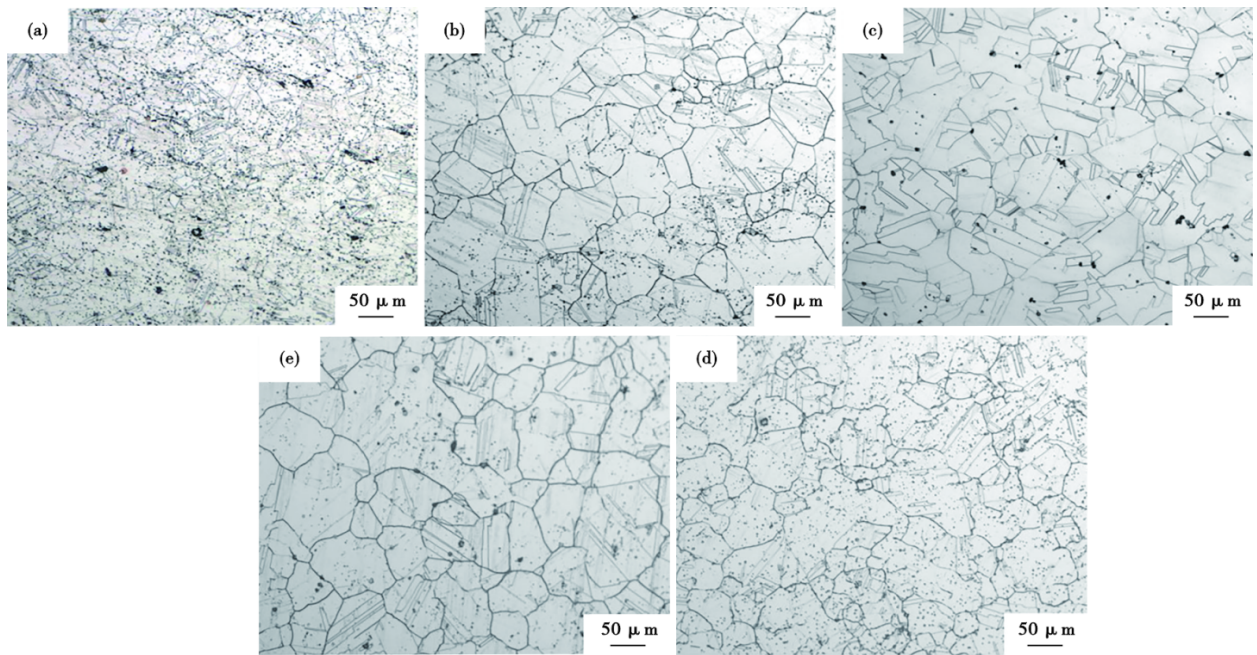


图 5 GH3230 合金在 1 220 °C 保温不同时间后的显微组织 OM 图:(a)1 h,(b)2 h,(c)3 h,(d)5 h,(e)10 h

Fig. 5 Microstructure OM images of GH3230 alloy after holding at 1 220 °C for different durations: (a)1 h, (b)2 h, (c)3 h, (d)5 h, (e)10 h

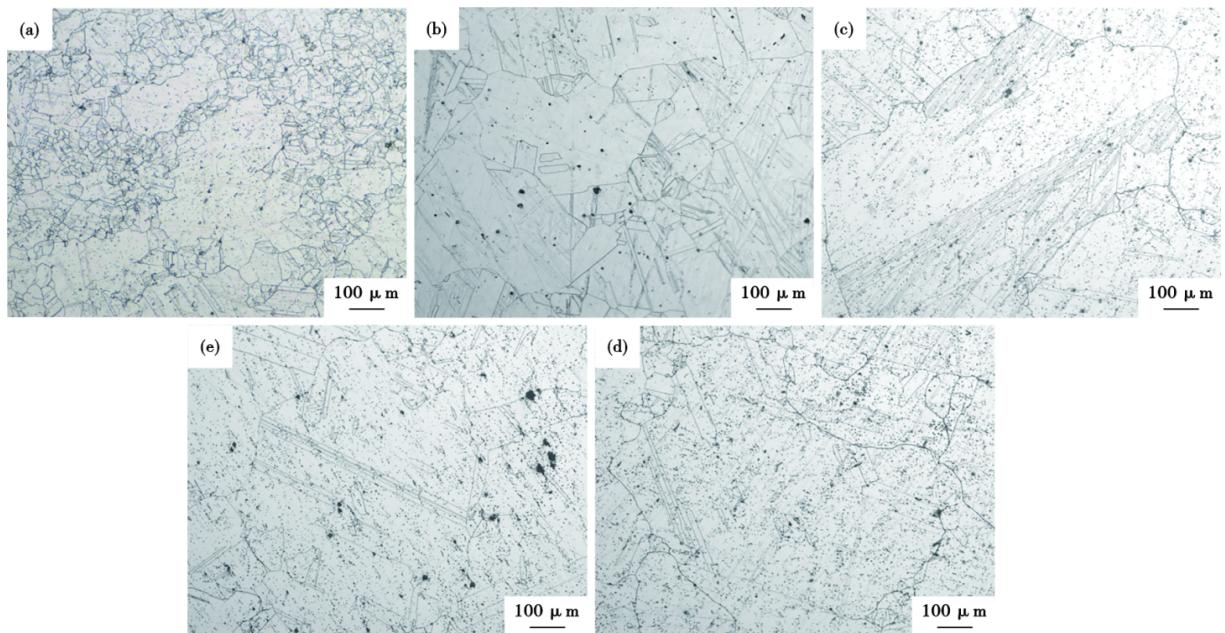


图 6 GH3230 合金在 1 240 °C 保温不同时间后的显微组织 OM 图:(a)1 h,(b)2 h,(c)3 h,(d)5 h,(e)10 h

Fig. 6 Microstructure OM images of GH3230 alloy after holding at 1 240 °C for different durations: (a)1 h, (b)2 h, (c)3 h, (d)5 h, (e)10 h

阶段时,这类碳化物会通过钉扎晶界来阻碍晶粒长大,提高加热温度的升高,延长保温时间,碳化物会逐渐发生回溶,其对于晶界的钉扎效应随之减弱,对晶粒长大的限制作用相应降低,因此晶粒长大速度加快。

### 2.3 晶粒长大动力学

#### 1) 保温时间和加热温度对晶粒尺寸的影响

为了定量地描述 GH3230 合金的晶粒长大行为,采用截点法对加热保温后晶粒的平均尺寸开展了统计,统计结果见表 2。

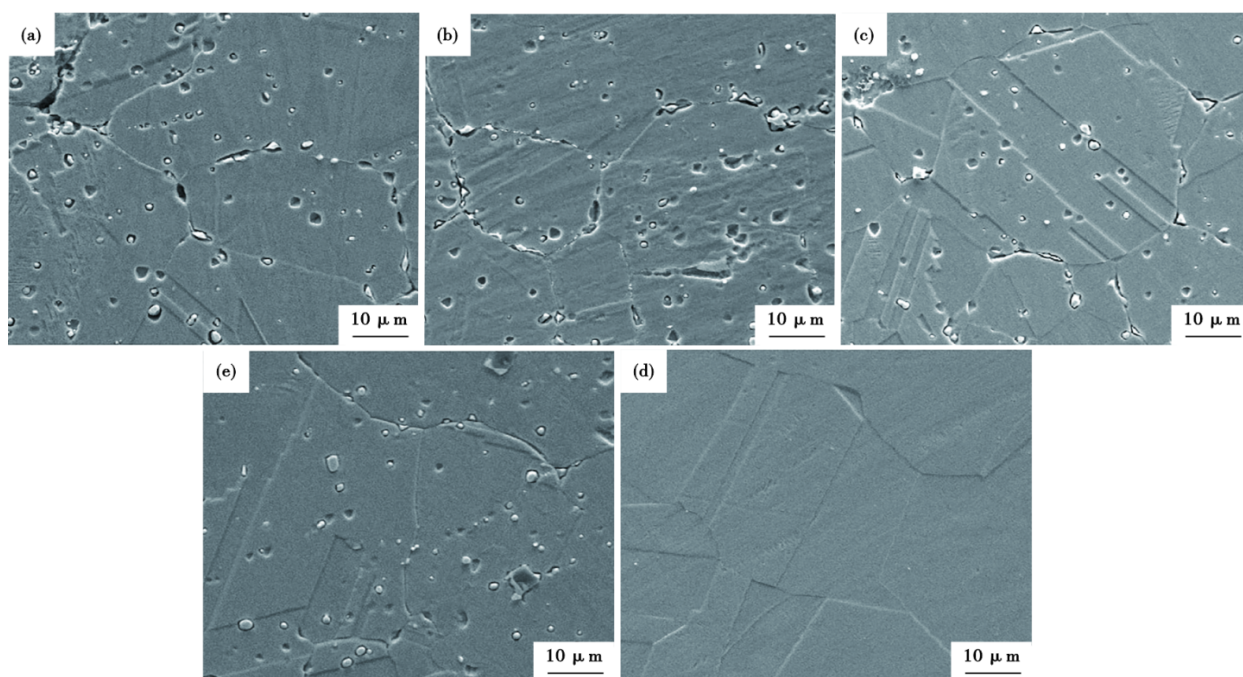


图 7 GH3230 合金 1 200 °C 加热不同时间后碳化物分布情况:(a)1 h,(b)2 h,(c)3 h,(d)5 h,(e)10 h

Fig. 7 Carbide distribution of GH3230 alloy after heating at 1 200 °C for different durations: (a)1 h, (b)2 h, (c)3 h, (d)5 h, (e)10 h

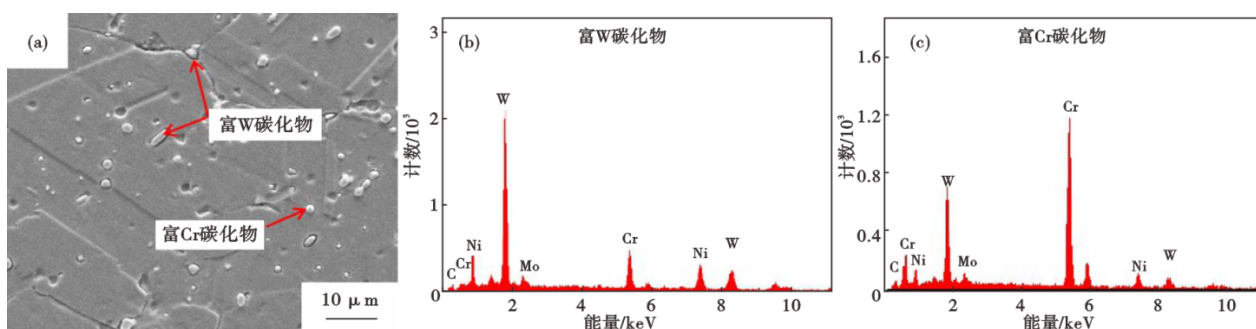


图 8 1 200 °C 保温 5 h 后 GH3230 合金:(a)显微组织,(b)富 W 碳化物,(c)富 Cr 碳化物

Fig. 8 GH3230 alloy after holding for 5 h at 1 200 °C: (a) microstructure, (b) W-rich carbide (c) Cr-rich carbide

表 2 GH3230 合金不同加热温度和保温时间下晶粒平均尺寸

Table 2 The average grain size of GH3230 alloy under different heating temperatures and holding times

保温时间/h	1 150 °C	1 180 °C	1 200 °C	1 220 °C
1	38	41	44	45
2	40	47	51	58
3	45	49	58	63
5	48	55	66	74
10	54	60	71	87

GH3230 合金平均晶粒尺寸与保温时间、加热温度的关系如图 9 所示。就保温时间影响晶粒长大的角度而言,当加热温度为 1 150、1 180 °C 时,晶粒长大的速度较为缓慢,基本维持在 60 μm 以下,保温 10 h 后,其平均晶粒尺寸从锻态的 17 μm 分别长大

至 54、60 μm。当加热温度升高到 1 200 °C 时,晶粒长大速度加快,保温 5 h 后,晶粒便长大到 66 μm,经过 10 h 的保温,其平均晶粒尺寸达到了 71 μm;温度升高到 1 220 °C,晶粒快速长大,保温 3 h 后,晶粒长大到 63 μm,保温 10 h 时后,晶粒长大至 87 μm。就加热温度影响晶粒长大的角度而言,当加热温度低于 1 200 °C,随着温度的升高,晶粒长大速度较慢,当加热温度达到 1 200 °C 后,晶粒呈现快速长大的趋势。

综上得出,加热温度和保温时间二者,均会影响晶粒的长大行为,但延长保温时间晶粒缓慢长大且长大的程度有限,晶粒长大过程对于加热温度的提升更为敏感。

## 2) 晶粒生长指数

热处理工艺中保温时间对晶粒的影响规律可

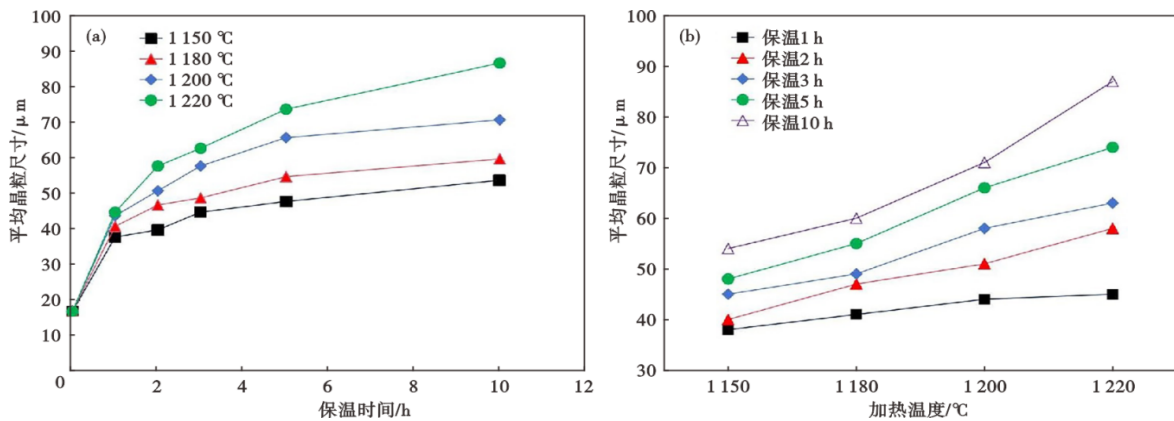


图9 GH3230合金平均晶粒尺寸与(a)保温时间(b)加热温度的关系

Fig. 9 Relationship between the average grain size of GH3230 alloy and (a) holding time and (b) heating temperature.

以用 Beck 公式来描述<sup>[17]</sup>:

$$D - D_0 = Ct^\eta \quad (1)$$

式中,  $D$ 、 $D_0$  分别代表原始试样、加热保温后试样的平均晶粒尺寸,  $\mu\text{m}$ ;  $C$  为常数,  $\eta$  为晶粒生长指数,  $C$  和  $\eta$  都是与材料和温度有关的常数;  $t$  为保温时间,  $\text{s}$ 。

将保温时间  $t$  和保温前后试样的平均晶粒尺寸的实测数据代入(1)式进行拟合分析, 其结果如图 10 所示。

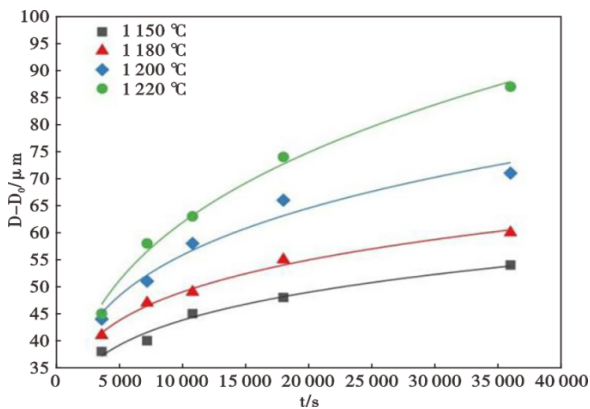


图 10 GH3230 合金在不同温度条件下 (保温前  $D$  - 保温后  $D_0$ ) 平均晶粒尺寸与保温时间  $t$  的关系

Fig. 10 Relationship between the average grain size of GH3230 alloy under different temperature conditions (before holding  $D$  - after holding  $D_0$ ) and the holding time  $t$

合金在 1 150、1 180、1 200、1 220 °C 时的晶粒生长指数见表 3, 从表 3 看出, 加热温度越高, 合金的晶粒生长指数越高。

### 3) 晶粒长大模型的建立

为预测晶粒长大的规律, 本研究采用 Anelli 改进模型来建立加热温度和保温时间与 GH3230 合金

表 3 GH3230 合金在不同加热温度下晶粒生长指数

Table 3 Grain growth index of GH3230 alloy at different heating temperatures

加热温度/°C	晶粒生长指数 $\eta$
1 150	0.16
1 180	0.16
1 200	0.20
1 220	0.27

的关系模型<sup>[18-19]</sup>。

$$D - D_0 = At^m \exp(-Q/RT) \quad (2)$$

式中,  $D$ 、 $D_0$  分别代表为原始试样、加热保温后试样的平均晶粒尺寸,  $\mu\text{m}$ ;  $t$  代表保温的时间,  $\text{s}$ ;  $R$  代表气体常数, 取  $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ;  $T$  代表加热温度,  $\text{K}$ ;  $Q$  表示晶粒长大激活能,  $\text{kJ}/\text{mol}$ ;  $m$  为常数。

对公式(2)两端取对数, 可得式(3)。

$$\ln(D - D_0) = \ln A + m \ln t - Q/(RT) \quad (3)$$

对  $\ln(D - D_0)$  与  $\ln t$  的关系进行拟合, 如图(11)所示, 可以看到, 二者呈现出了良好的线性关系。

当时间一定时, 对  $\ln(D - D_0)$  与  $-1/RT$  的关系进行拟合, 可得平均激活能  $Q$  为  $133.602 \text{ kJ}/\text{mol}$ , 将  $m$  和  $Q$  代入公式(3)可得到  $A$ , 最终计算得到 GH3230 合金晶粒长大方程为式(4)。

$$D = D_0 + e^{12.66} t^{0.206} \exp(-133 602/RT) \quad (4)$$

将上述模型计算出的晶粒尺寸与实验统计数据对比及拟合, 相关结果如图 12 所示, 可见二者线性相关程度较高,  $R^2$  值超过 0.93, 反映出模型计算结果与实测数据之间偏差不大, 因此, 在 1 150 °C 至 1 220 °C 加热区间, 且保温时间不超过 10 h 的条件下, 该模型可用于实际生产中晶粒尺寸的预估, 并能够为有限元分析软件的数值仿真工作提供数

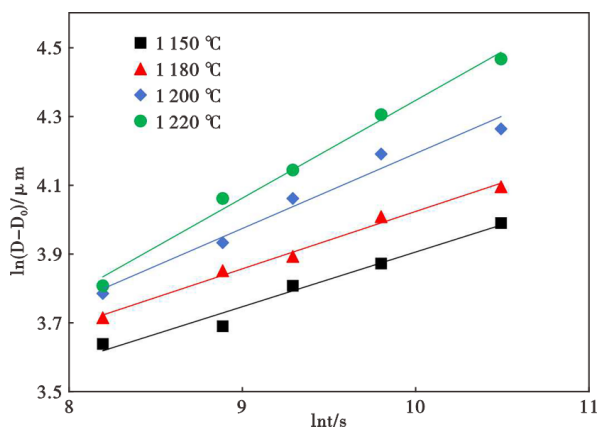


图 11 GH3230 合金不同温度条件下保温前后平均晶粒尺寸对数  $\ln(D-D_0)$  与保温时间对数  $\ln t$  的关系

Fig. 11 Relationship between the logarithm of the average grain size difference ( $\ln(D-D_0)$ ) of GH3230 alloy at different temperatures before and after holding and the logarithm of holding time ( $\ln t$ )

据支持。

### 3 结论

1) GH3230 合金晶粒长大对加热温度更敏感, 提高加热温度晶粒长大更快, 当加热温度高于 1 220 °C, 出现了晶粒的异常长大。

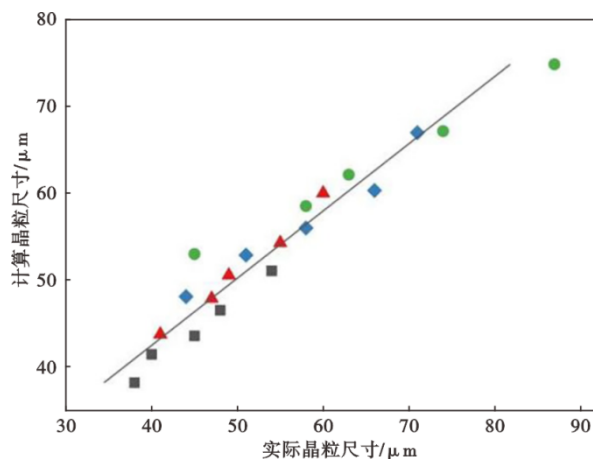


图 12 晶粒尺寸模型预测值与实验值的比较

Fig. 12 Comparison of predicted values and experimental values of grain size model

2) 晶界上富 Cr 碳化物的钉扎阻碍了晶粒的长大, 1 150 °C 保温 3 h 后、1 180~1 240 °C 保温 1 h 后合金晶界上原本的碳化物逐渐回溶, 晶粒长大速度加快。

3) 建立了 GH3230 合金 1 150~1 220 °C 加热、保温时间不大于 10 h 范围内的晶粒长大模型:  $D=D_0+e^{12.66t^{0.206}}\exp(-133\ 602/RT)$ 。

### 参考文献

- [1] Zhang S H, Ye N Y, Cheng M, et al. Effect of cold rolling and heat treatment on the mechanical properties of GH4169 alloy sheet at room temperature[J]. Metals, 2016, 6(1): 1-11.
- [2] Lu Y L, Liaw P K, Wang G Y, et al. Fracture modes of HAYNES® 230® alloy during fatigue-crack-growth at room and elevated temperatures [J]. Materials Science and Engineering: A, 2005, 397(1-2): 122-131.
- [3] 丁佐军, 郭亮, 徐晓懿, 等. 固溶温度对 Haynes 230 合金热轧棒材显微组织演变和拉伸性能的影响[J]. 特殊钢, 2025, 46(2): 103-108.
- [4] 黄乾尧, 李汉康. 高温合金[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- [5] 何绍祥, 薛松, 邓瑞, 等. GH3230 高温合金的热变形行为研究[J]. 塑性工程学报, 2025, 32(4): 191-198.
- [6] 许璠, 宋国新, 郑成斌, 等. GH4099/GH3230 异种高温合金焊接工艺性能研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(5): 231-235.
- [7] 张天昊, 鞠泉, 蒙肇斌, 等. GH3230 合金焊接板材长期热暴露后组织和性能研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2023, 52(7): 2573-2581.
- [8] 李强. 固溶处理对 GH3230 棒材力学性能和金相组织影响研究[J]. 科学技术创新, 2022(16): 37-40.
- [9] 杜星霖, 鞠泉, 马惠萍, 等. GH3230 合金  $M_{23}C_6$  型碳化物的析出行为[J]. 金属热处理, 2021, 46(2): 50-54.
- [10] 张勇路, 鞠泉, 胡曼, 等. GH3230 合金小变形下的恢复热处理工艺[J]. 金属热处理, 2021, 46(7): 187-191.
- [11] 杜青山, 王平, 郝宪朝, 等. 冷变形和热处理对 Haynes 230 合金晶粒度的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(11): 1542-1547.
- [12] Jiang R, Everitt S, Lewandowski M, et al. Grain size effects in a Ni-based turbine disc alloy in the time and cycle dependent crack growth regimes [J]. International Journal of Fatigue, 2014, 62: 217-227.
- [13] Xiong Y H, Wei X Y, Jun D, et al. Grain refinement of superalloy IN718C by the addition of inoculants [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2004, 35(7): 2111-2114.
- [14] 徐烨玲, 王冲, 侯翔益, 等. GH4706 合金涡轮盘锻件不同部位的组织及高温力学性能[J]. 特殊钢, 2024, 45(5): 102-107.
- [15] 郭婧, 姚志浩, 董建新, 等. 高温合金中晶粒异常长大及临界变形量研究进展[J]. 世界钢铁, 2011, 11(4): 38-45+ 67.
- [16] Collins D M, Conduit B D, Stone H J, et al. Grain growth behaviour during near- $\gamma'$  solvus thermal exposures in a polycrystalline nickel-base superalloy [J]. Acta Materialia, 2013, 61(9): 3378-3391.
- [17] 刘志凌, 孟新宇, 吕少敏, 等. GH4151 镍基高温合金棒材微观组织研究[J]. 特殊钢, 2025, 46(5): 80-86.
- [18] 余永宁. 金属学原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- [19] 李立新, 汪凌云, 周家林, 等. 等温条件下晶粒长大模型研究[J]. 武汉科技大学学报(自然科学版), 2002, 25(4): 335-336.