

Inconel X-750 高温合金晶粒粗化行为研究

吕航鹰 潘巧玉 黄庆华 余新平 吕 君 潘光永
(浙江广厦建设职业技术大学智能制造学院)

摘 要 通过等温晶粒粗化方法研究了 Inconel X-750 高温合金的晶粒粗化行为。通过对微观组织形貌的定性分析,明确了 Inconel X-750 合金晶粒发生正常生长和异常生长的温度范围,且在晶粒异常长大时晶粒尺寸和不均匀度显著增加。通过对平均晶粒尺寸的定量分析,研究了温度和时间对 Inconel X-750 合金晶粒粗化行为的影响。基于 Inconel X-750 合金晶粒粗化规律,提出并求解了一种新的分段式晶粒粗化数学模型来精确描述 Inconel X-750 合金在等温条件下的晶粒粗化行为。

关键词 晶粒粗化;Inconel X-750 高温合金;晶粒尺寸;数学模型

中图分类号 TG146.1; TG113.12

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.03.015

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Grain Coarsening Behavior of Inconel X-750 Superalloy

Lü Hangying, Pan Qiaoyu, Huang Qinghua, Yu Xinping, Lü Jun, Pan Guangyong

(School of Intelligent Manufacturing, Zhejiang Guangsha Vocational and Technical University of Construction)

Abstract: A series of isothermal grain coarsening tests were carried out to investigate the grain coarsening behaviors of Inconel X-750 superalloy. Via the qualitative morphology analysis, the temperature ranges of normal growth and abnormal growth were revealed, and the grain size and non-uniformity are significantly increased in the abnormal growth temperature range. The influences of holding temperature and holding time on the average grain size of Inconel X-750 alloy were explored by quantitative analysis of average grain size. Based on the grain coarsening law, a novel segmented grain coarsening model were put forward and solved to accurately describe the grain coarsening behaviors of Inconel X-750 alloy under isothermal condition.

Key Words: Grain Coarsening, Inconel X-750 Superalloy, Grain Size, Mathematics Model

Inconel X-750 合金在 1 253 K 以下具有优异的耐腐蚀性和抗氧化性,在 1 073 K 以下具有较高的强度以及良好的焊接性和加工性^[1]。因此,Inconel X-750 合金已被成功应用于电力、航空航天、石油化工和造船等重要领域。镍基高温合金因其优异的强度和硬度而被列为常温难加工材料^[2-3],通常在高温条件下进行加工^[4]。然而,高温条件下因晶粒生长引起的晶粒粗化会导致高温合金微观组织和性能的退化^[5]。因此,为了控制和优化高温合金的性能,对其高温晶粒粗化行为进行深入和细致的研究十分必要^[6]。

目前,动态再结晶作为高温合金一种典型的微观组织演变形式,已经得到了广泛关注^[7-9]。然而,合金在加热、保温和冷却过程中的晶粒粗化却被忽略。DANG Y 等^[10]研究了 Inconel 740H 高温合金中晶界 M23C6 的粗化行为;ZENG Q 等^[11]研究了 K480 高温合金锯齿

晶界在长期时效过程中的粗化动力学和微观组织演变;COLLINS D M 等^[12]从 γ' 相的角度研究了 RR100 合金的晶粒生长行为。晶粒尺寸对材料力学性能有显著影响,但以往研究多关注晶粒粗化的微观机制,而忽略了晶粒尺寸演变规律及其影响因素。晶粒粗化数学模型是晶粒尺寸理论计算、有限元模拟和工艺优化的基础^[13]。对于高温合金晶粒粗化行为的数学表征,最常用的是 Sellar 型模型^[14]和 Anelli 型模型^[15]。这些模型具有固定的数学形式和物理意义,主要是通过数学方法结合试验结果来求解模型。但不同的合金可能具有不同的晶粒粗化规律,现有的晶粒粗化数学模型通常难以理想地描述不同合金的晶粒尺寸演化规律,因此需要根据不同合金实际的晶粒粗化规律对晶粒粗化数学模型进行改进以实现合金晶粒粗化行为的精确描述。

本研究对 Inconel X-750 合金的晶粒粗化行为进行

收稿日期:2022-09-06;修改稿收到日期:2022-10-25

基金项目:2021 年度高校国内访问工程师校企合作资助项目(FG2021304)

第一作者简介:吕航鹰,女,1987 年出生,讲师,浙江东阳(322100),E-mail:278613863@qq.com

通信作者:潘巧玉,女,1982 年出生,讲师,浙江东阳(322100),E-mail:793940935@qq.com

引用格式:吕航鹰,潘巧玉,黄庆华,等. Inconel X-750 高温合金晶粒粗化行为研究[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(3):363-369.

NÜ H Y, PAN Q Y, HUANG Q H, et al. Grain coarsening behavior of Inconel X-750 superalloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(3):363-369.

研究,提出符合 Inconel X-750 合金高温晶粒尺寸演变规律的晶粒粗化数学模型,以期为其加工和应用提供借鉴。

1 试验材料及方法

InconelX-750 合金的化学成分(质量分数):Cr 为 15.94%、Fe 为 6.27%、Ti 为 2.42%、Co 为 1.02%、Nb 为 0.92%、Al 为 0.69%、Mn 为 0.72%、Si 为 0.245%、C 为 0.05%,余量为 Ni。室温下 Inconel X-750 合金的原始组织为板条状孪晶和等轴晶,见图 1,平均晶粒尺寸为 31.5 μm 。首先,对 $\phi 8\text{ mm}\times 12\text{ mm}$ 试样进行机械加工、清洗、烘干并分成 20 组。随后,将各组试样放入熔炼炉中,以 10 K/min 的加热速度分别加热至 1 123、1 223、1 273、1 323 和 1 423 K,并在炉内保温 0、100、200 和 300 min。保温后将试样进行水淬。

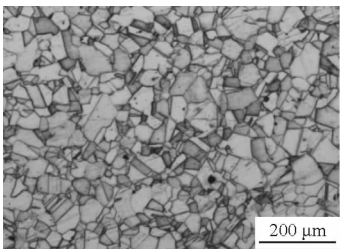


图 1 Inconel X-750 合金原始微观组织
Fig.1 Original micro-structure of Inconel X-750 alloy

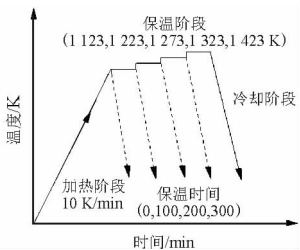


图 2 Inconel X-750 合金晶粒粗化试验时间-温度曲线
Fig.2 Time-temperature curves of grain coarsening test for Inconel X-750 alloy

2 晶粒粗化试验

图 3~图 6 分别为 InconelX-750 合金在 1 123~

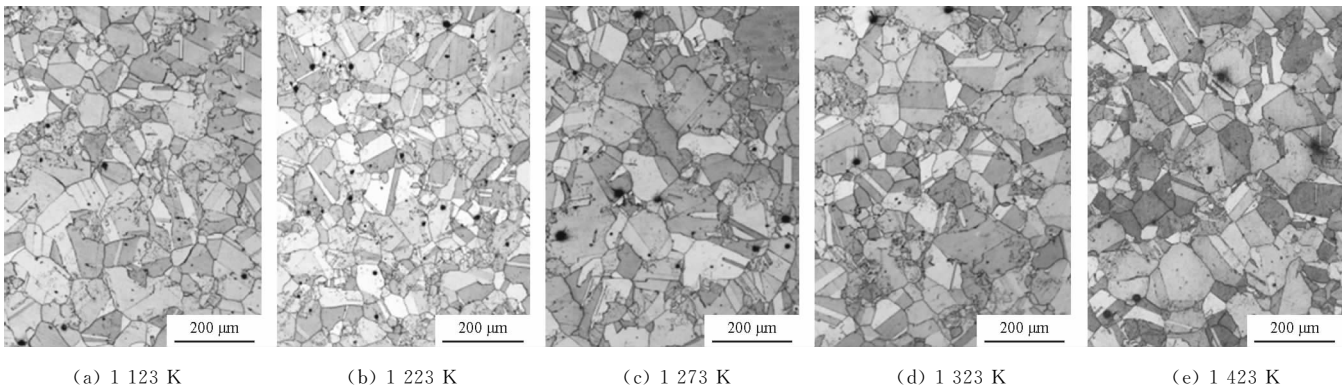


图 3 Inconel X-750 合金在不同温度不保温的组织形貌
Fig.3 Microstructure of Inconel X-750 alloy at various temperatures

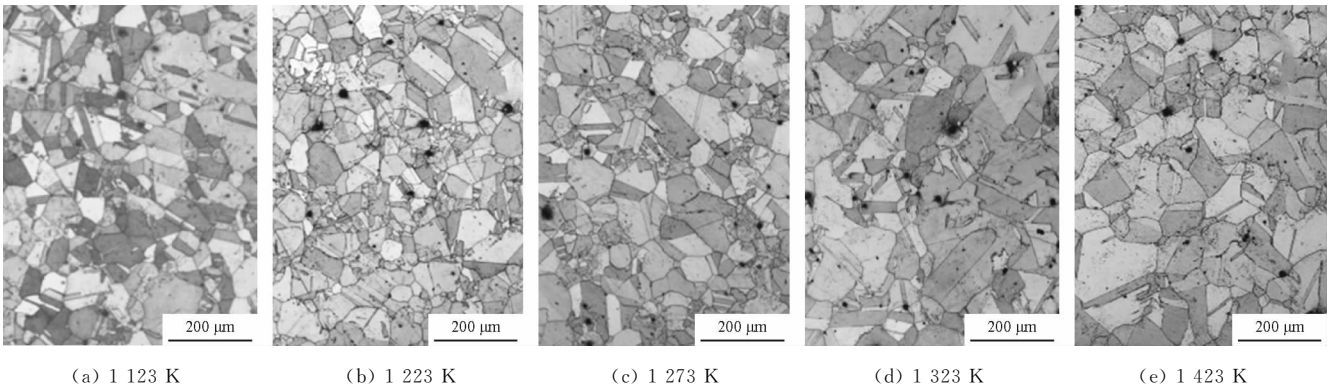


图 4 Inconel X-750 合金在不同温度下保温 100 min 的组织形貌
Fig.4 Microstructure of Inconel X-750 alloy at various temperatures holding time for 100 min

1 423 K 下保温不同时间的微观组织。可以看出,在 1 123~1 273 K 范围内,大部分晶界是平直的,且相互之间保持约 120° 的夹角,金相组织中的晶粒尺寸无太大差异。这种由板条状孪晶和等轴晶组成的组织与原始组织相似,表明在晶粒粗化试验的 1 123~1 273 K 范围内,晶粒未出现明显的异常粗化。而在 1 323~1 423 K 范围内,部分晶界逐渐迁移合并,部分小晶粒消

失并融合成大晶粒,最终出现一些尺寸异常的晶粒和多边晶界。这种不等轴的微观组织表明,Inconel X-750 合金晶粒在 1 323~1 423 K 范围内发生了异常生长。不同试验条件下的平均晶粒尺寸统计结果见表 1。不同温度下保温 300 min 的晶粒尺寸分布见图 7。使用标准差(σ)和变异系数(C_v)来描述晶粒尺寸的分散程度。

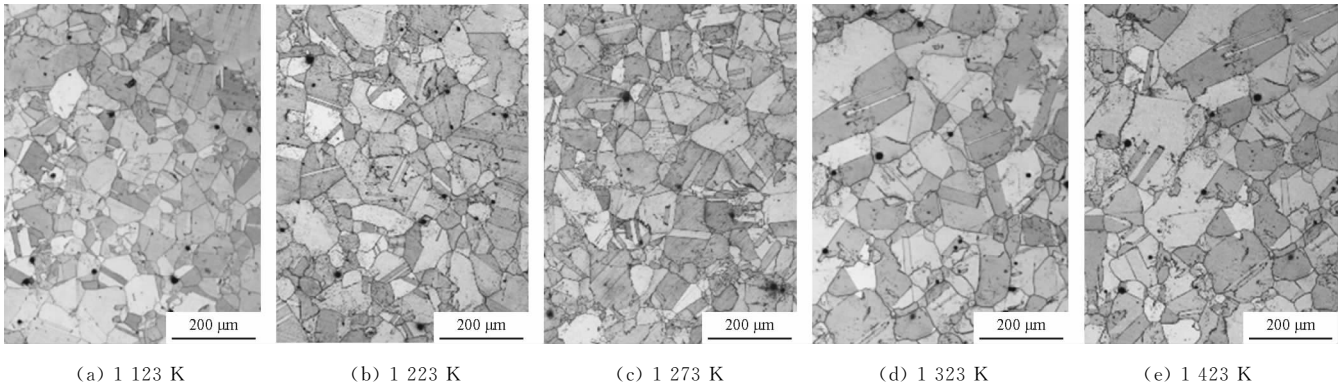


图 5 Inconel X-750 合金在不同温度下保温 200 min 的组织形貌

Fig.5 Microstructure of Inconel X-750 alloy at various temperatures holding time for 200 min

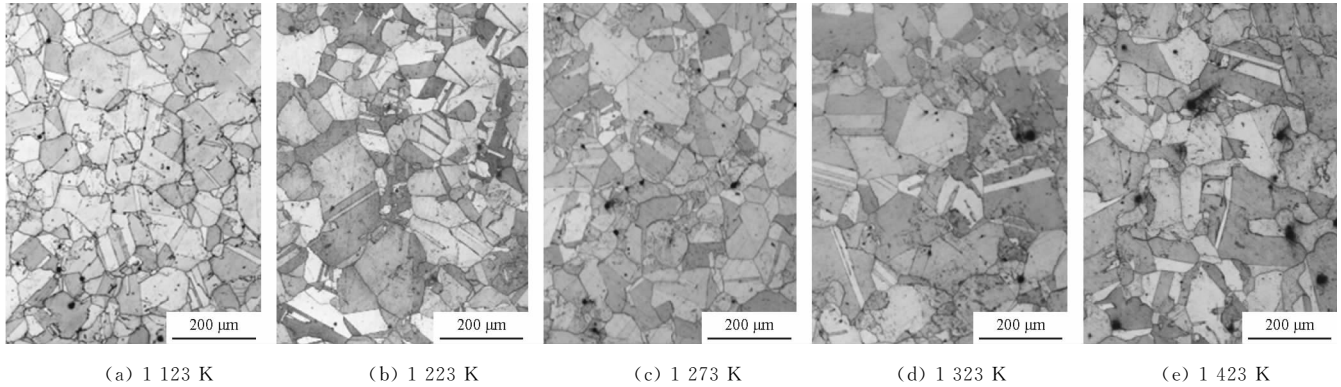


图 6 Inconel X-750 合金在不同温度下保温 300 min 的组织形貌

Fig.6 Microstructure of Inconel X-750 alloy at various temperatures holding time for 300 min

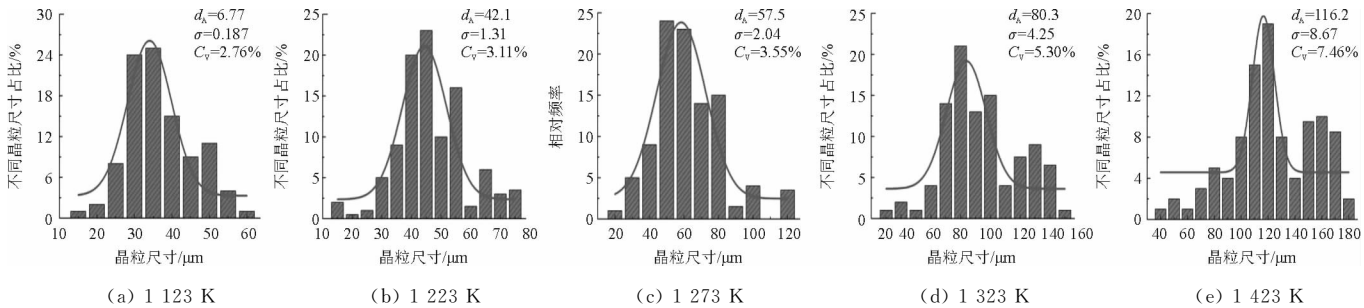


图 7 Inconel X-750 合金不同保温温度下保温 300 min 时的晶粒尺寸分布

Fig.7 The grain size distributions of Inconel X-750 alloy at various temperatures for 300 min

表 1 不同温度 and 不同保温时间下试样的平均晶粒尺寸

Tab.1 The average grain sizes of specimens at various temperatures for different holding time

保温时间/ min	温度/K				
	1 123	1 223	1 273	1 323	1 423
0	31.7	34.6	38.9	48.2	65.3
100	33.5	38.7	48.8	62.6	90.7
200	33.6	40.5	55.7	73.8	110.6
300	35.3	42.1	57.5	80.3	116.2

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (d_i - d_A)^2}$$
 (1)

$$C_v = \frac{\delta}{d_A} \times 100\%$$
 (2)

式中, N 为晶粒总数; d_i 和 d_A 分别为每个晶粒的晶粒

尺寸和在一定条件下的平均晶粒尺寸。

图8为晶粒尺寸的标准差和变异系数与温度的关

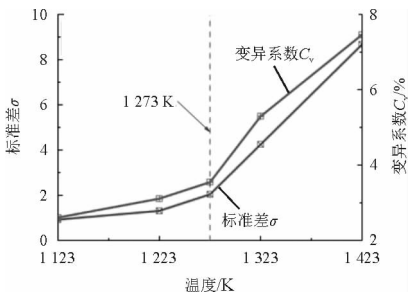


图 8 晶粒尺寸的标准差和变异系数与温度的关系

Fig.8 Relationship between standard deviation or variation coefficient of grain size and holding temperature

系。可以看出,试样晶粒尺寸的标准差和变异系数随保温温度的升高而增大。此外,标准差和变异系数在 1 273 K 以下增加缓慢,而在 1 273 K 以上增加迅速,说明在 1 273 K 以上,晶粒尺寸的离散程度大大增加。从图 7 看出,在 1 323 K 和 1 423 K 下,晶粒尺寸的分布在大尺寸区域形成了一个额外的峰值,表明在此温度下产生了一些异常生长的大尺寸晶粒。

3 工艺参数对晶粒尺寸的影响

3.1 保温时间对晶粒尺寸的影响

从表 1 可知,不同温度下的初始晶粒尺寸为 31.7~65.3 μm 。对比表明,在有利于晶粒生长的高温环境下,晶粒在加热阶段即发生了不同程度的粗化。晶粒粗化的本质是晶界的移动,晶界移动是通过原子扩散实现的,其驱动力是晶界总面积的减小,即晶界能减小^[16-17]。高温下可以显著促进原子扩散和晶界移动,进而降低晶界能,导致晶界总面积减小,晶粒尺寸增大。图 9 为 Inconel X-750 合金在不同保温时间的晶粒平均晶粒。可以发现,在保温阶段,晶粒尺寸也随着时间的推移呈现上升趋势。当达到 300 min 时,晶粒明显长大,晶粒尺寸达到 35.3~116.2 μm 。此外,在 1 123~1 273 K 范围内平均晶粒尺寸保持在相对较低的水平,而在 1 323~1 423 K 范围内晶粒尺寸显著增加。

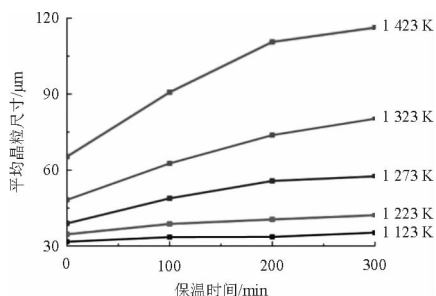


图 9 不同温度下晶粒尺寸随保温时间的变化
Fig.9 Variation of grain size with holding time at different temperatures

晶粒粗化速率(平均晶粒尺寸 d_A 随保温时间 t 的变化率, $\partial d_A / \partial t$)与保温时间的关系见图 10。在初始保温阶段(0~100 min),晶粒粗化速率处于较高水平。但晶粒粗化速率在随后的 100~200 min 内迅速降低,并最终稳定在接近于 0 的低水平。晶粒粗化速率在保温阶段逐渐减缓,证明等温条件下晶粒粗化并不是无止境的。这是由于晶界移动引起的总晶界能降低使晶界逐渐稳定,致使晶粒无法发生无限制的粗化。从整体上也看出,Inconel X-750 合金的晶粒粗化速率随着温度的升高而增加,说明较高的温度可以显著促进晶粒粗化速率的增加。

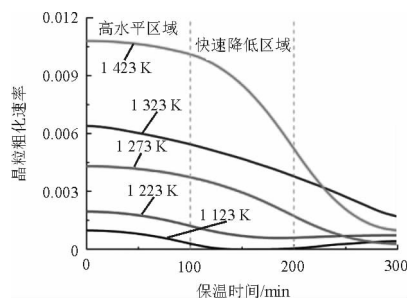


图 10 晶粒粗化速率与保温时间的关系
Fig.10 Relationship between the grain coarsening rate and holding time

3.2 保温温度对晶粒尺寸的影响

图 11 为 Inconel X-750 合金在不同保温时间下平均晶粒尺寸与保温温度的关系。可以看到,在固定的保温时间下,较高的温度可以显著地促进晶粒的粗化,提高晶界迁移的效率,从而形成较大的晶粒尺寸。

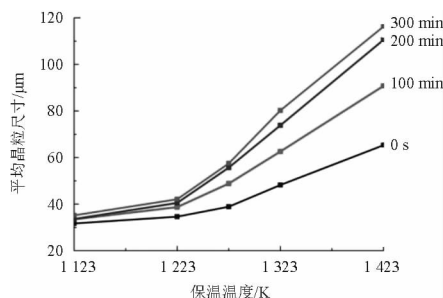


图 11 不同保温时间下晶粒尺寸随保温温度的变化
Fig.11 Variation of grain sizes with holding temperature for different holding time

4 晶粒粗化模型的改进与评价

4.1 晶粒粗化模型的改进

目前主要使用 Sellar 模型^[14]和 Anelli 模型^[15]来表征合金的晶粒粗化行为,表述如下:

$$d_A = d_0 + kt \exp\left(-\frac{Q_a}{RT}\right) \quad (3)$$

$$d_A = kt^n \exp\left(-\frac{Q_a}{RT}\right) \quad (4)$$

式中, d_A 、 d_0 、 t 和 T 分别为平均晶粒尺寸、初始晶粒尺寸、保温时间和保温温度; R 为气体常数; Q_a 为晶粒生长激活能; k 和 n 为常数。

Sellar 模型虽然系统地考虑了初始晶粒尺寸、温度和时间的影响,但简单地将晶粒尺寸与保温时间的关系视为线性关系。Anelli 模型完全不考虑初始晶粒尺寸的影响。

通过分析可以得出,Inconel X-750 合金的晶粒尺寸对温度和时间都比较敏感。在等温条件下,初始晶粒

尺寸对最终晶粒尺寸有重要影响^[18]。因此,有必要综合考虑初始晶粒尺寸、温度和时间对晶粒粗化行为的影响,构建可靠的晶粒粗化模型。此外,晶粒尺寸与保温时间呈抛物线型增长规律,而不是 Sellar 模型中的线性关系。因此,综合 Sellar 模型和 Anelli 模型的优点,将指数(正如 Anelli 模型中的指数 n)引入 Sellar 模型是提高晶粒粗化模型精度的有效途径。引入 m 作为平均晶粒尺寸和初始晶粒尺寸的指数,引入 n 作为保温时间的指数。因此,只要计算出合理的模型常数,就可以系统、细致地考虑影响因素,充分表征 Inconel X-750 合金晶粒的粗化规律。晶粒尺寸模型的改进形式如下:

$$d_A^m = d_0^m + kt^n \exp(-\frac{Q_a}{RT}) \tag{5}$$

式中, m 、 n 、 k 和 Q_a 均为常数。

此外,Inconel X-750 合金在 1 123~1 273 K 和 1 323~1 423 K 内的晶粒尺寸相差很大,因此,采用以 1 273 K 为分界点的两段式晶粒粗化模型。Inconel X-750 合金在 $T \leq 1\,273\text{ K}$ 和 $T > 1\,273\text{ K}$ 时,模型常数分别定义为 m_1 、 k_1 、 n_1 、 Q_{a1} 和 m_2 、 k_2 、 n_2 、 Q_{a2} 。

4.2 晶粒粗化模型的计算

对式(5)进行变换并取自然对数,表示如下:

$$\ln(d_A^m - d_0^m) = \ln k + n \ln t - \frac{Q_a}{RT} \tag{6}$$

由式(6)可推断,当 m 和 t 或 T 一定时,晶粒生长激活能 Q_a 和指数 n 可由下式表示,可通过线性回归的方法进行计算。

$$n = \frac{\partial \ln(d_A^m - d_0^m)}{\partial (\ln t)} \Big|_T \tag{7}$$

$$Q_a = \frac{\partial \ln(d_A^m - d_0^m)}{\partial [-1/(RT)]} \Big|_t \tag{8}$$

将 Q_a 和 n 的值代入式(5)可以计算出不同温度和保温时间下的 k 值,将 k 的最终值确定为平均值。

求解过程是基于固定且已知的 m 值,但 m 值是完全未知的。为了解决这个问题,取 m 值为整数 1~15,根据上述求解过程计算 Q_a 、 n 和 k 。然后通过下式中的平均绝对相对误差 (A_{ARE})^[19] 来评价取不同 m 值时晶粒粗化模型的预测精度。通过 A_{ARE} 可以计算晶粒粗化模型预测的晶粒尺寸与试验得到的平均晶粒尺寸之间的偏差水平, A_{ARE} 值越小,模型的预测精度越高。表 2 为与 m 值 1~15 对应的计算 A_{ARE} 值。

$$A_{ARE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{P_i - M_i}{M_i} \right| \times 100\% \tag{9}$$

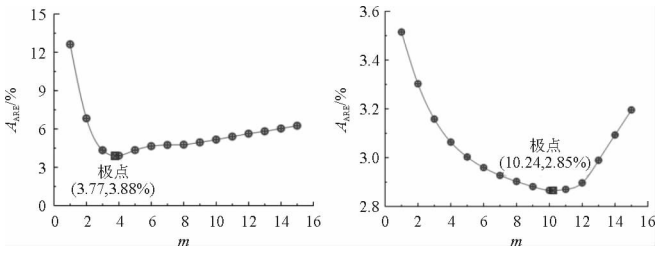
式中, M 和 P 分别为试验实测的平均晶粒尺寸和晶粒粗化模型预测的晶粒尺寸; N 为预测数据数量。

表 2 不同的 m 值和温度范围对应的 A_{ARE} 值

Tab.2 Values of A_{ARE} corresponding to different

m values and temperature ranges								%
m	1	2	3	4	5	6	7	8
A_{ARE1}	12.61	6.82	4.33	3.91	4.34	4.65	4.74	4.77
A_{ARE2}	3.51	3.30	3.15	3.06	3.00	2.95	2.92	2.90
m	9	10	11	12	13	14	15	—
A_{ARE1}	4.94	5.16	5.40	5.62	5.81	6.03	6.25	—
A_{ARE2}	2.88	2.86	2.87	2.89	2.98	3.09	3.19	—

在 $T \leq 1\,273\text{ K}$ 和 $T > 1\,273\text{ K}$ 范围内, A_{ARE} 与 m 值的关系见图 12。通过对这些点进行平滑曲线拟合,发现 A_{ARE1} 和 A_{ARE2} 均随着 m 值的增大先减小后增大。 $A_{ARE}-m$ 曲线分别在点 (3.77, 3.88%) 和 (10.24, 2.85%) 处演化至最低水平,表明当 $m_1 = 3.77$ 和 $m_2 = 10.24$ 时,模型精度达到最高。



(a) A_{ARE1} 与 m 值的变化关系 (b) A_{ARE2} 与 m 值的变化关系

图 12 平均绝对相对误差 A_{ARE1} 、 A_{ARE2} 随 m 值的变化关系

Fig.12 Variation relationship between average absolute relative errors A_{ARE1} or A_{ARE2} and m values

将 $m_1 = 3.77$ 和 $m_2 = 10.24$ 作为最优解,求解 $T \leq 1\,273\text{ K}$ 和 $T > 1\,273\text{ K}$ 对应的改进晶粒粗化模型中的常数。拟合的 $\ln(d^m - d_0^m)$ 与 $-1/(RT)$ 以及与 $\ln t$ 的线性关系见图 13。拟合直线的斜率即为不同保温时间下的 Q_a 值,其平均值作为最终的 Q_a 值。拟合直线斜率的平均值可视为最终的 n 值。通过计算,确定 Q_a 值和 n 值分别为 $Q_{a1} = 240\,264\text{ J/mol}$, $Q_{a2} = 688\,476\text{ J/mol}$, $n_1 = 1.000\,7$, $n_2 = 2.154\,5$ 。将 Q_a 和 n 的值代入式(5)可计算不同温度和保温时间下 k 的平均值, $k_1 = 1.228\,2 \times 10^{12}$, $k_2 = 2.245\,6 \times 10^{37}$ 。

通过上述计算,确定 $T \leq 1\,273\text{ K}$ 和 $T > 1\,273\text{ K}$ 范围内的晶粒粗化模型如下:

$$\begin{cases} d_A^{3.77} = d_0^{3.77} + 1.228\,2 \times 10^{12} t^{1.000\,7} \exp(-\frac{240\,624}{RT}) & T \leq 1\,273\text{ K} \\ d_A^{10.24} = d_0^{10.24} + 2.245\,6 \times 10^{37} t^{2.154\,5} \exp(-\frac{688\,476}{RT}) & T > 1\,273\text{ K} \end{cases} \tag{10}$$

采用构建的晶粒粗化模型对 Inconel X-750 合金在 1 123~1 423 K 和 0~300 min 内的晶粒尺寸进行预测,建立了等温条件下晶粒尺寸、保温温度和保温时间

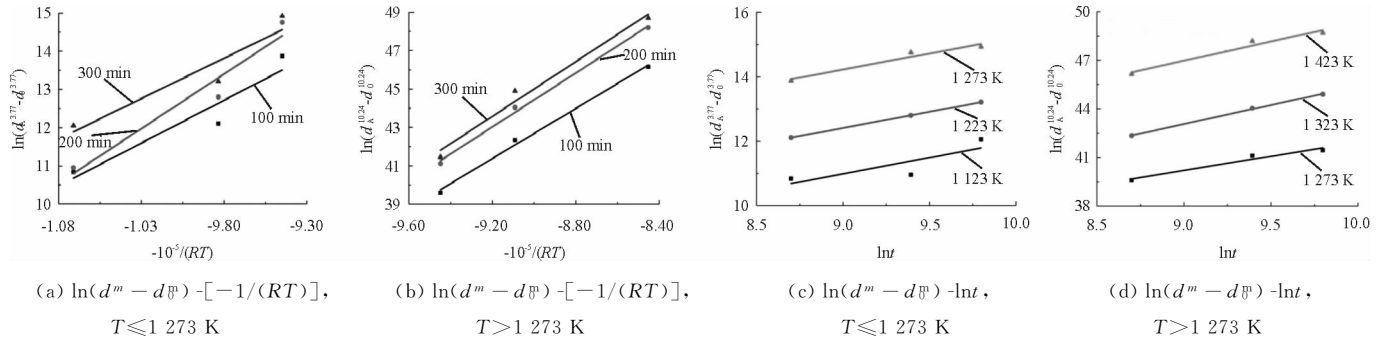


图 13 $\ln(d^m - d_0^m)$ 与 $-1/(RT)$ 或 $\ln t$ 之间的线性拟合关系

Fig.13 Fitted linear relationship between $\ln(d^m - d_0^m)$ and $-1/(RT)$ or $\ln t$

之间的响应关系, 见图 14。

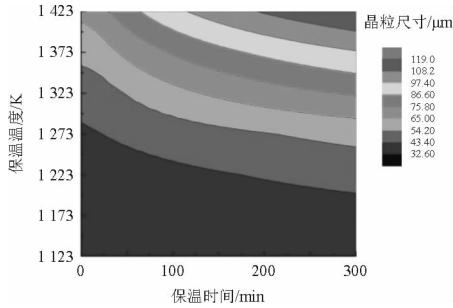


图 14 晶粒尺寸对保温温度和保温时间的响应关系

Fig.14 Response relationships of grain size to holding temperature or holding time

4.3 晶粒粗化模型的评价

利用构建的晶粒粗化模型预测了 Inconel X-750 合金在 1 123~1 423 K 和 0~300 min 内的晶粒尺寸。根据预测数据, 计算得到 $T \leq 1273 \text{ K}$ 和 $T > 1273 \text{ K}$ 对应的 A_{ARE1} 和 A_{ARE2} 分别为 3.79% 和 2.84%, 均小于表 2 中整数 m 对应的 A_{ARE} 值。这进一步证明了当 m_1 和 m_2 分别取 3.77 和 10.24 时, 晶粒粗化模型达到最高精度的结论。图 15 为测量和计算的晶粒尺寸之间的比较。可以看出, 晶粒粗化模型计算的晶粒尺寸与试验测量的晶粒尺寸符合度较高, 表明所构建的晶粒粗化模型能够表征 Inconel X-750 合金在等温条件下的晶粒尺寸演化规律。

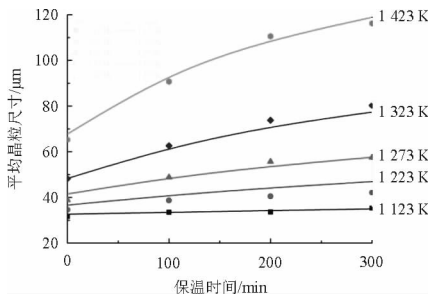


图 15 晶粒尺寸测量值和模拟预测值对比(点为实测值)

Fig.15 Comparison between the measured and calculated grain sizes

Inconel X-750 合金晶粒粗化的 Sellar 模型和 Anelli 模型如下:

$$d_A = d_0 + 3\,094\,t \exp\left(-\frac{159\,351}{RT}\right) \quad (11)$$

$$d_A = 1\,975\,t^{0.1464} \exp\left(-\frac{51\,686}{RT}\right) \quad (12)$$

使用构建的 Sellar 模型和 Anelli 模型对晶粒粗化试验条件下的晶粒尺寸进行预测。通过计算可知, 改进的晶粒粗化模型的 A_{ARE} 值仅为 3.46%。Sellar 模型和 Anelli 模型的 A_{ARE} 分别为 7.34% 和 9.73%。图 16 为试验实测和 3 种模型计算的晶粒尺寸。各点与 45° 线的偏差反映了试验与计算晶粒尺寸的相关。可以看出, 改进模型对应的数据点非常接近 45° 线, 表明试验和计算的晶粒尺寸具有很好的一致性。与改进模型对应的数据点相比, Sellar 模型和 Anelli 模型对应的数据点距离 45° 线相对更远。用相关系数 (R)^[20] 来进一步评价改进晶粒粗化模型的准确性为:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2 \sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}} \quad (13)$$

式中, $\bar{M}$ 和 $\bar{P}$ 分别为实测和数学模型预测平均晶粒尺寸的平均值。

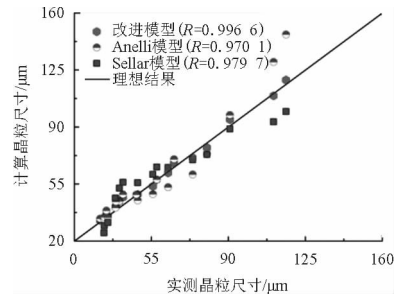


图 16 改进模型、Sellar 模型和 Anelli 模型预测的平均晶粒尺寸与实测值之间的相关性

Fig.16 Correlation relationship between the measured and predicted average grain sizes by modified model, Sellar model and Anelli model

根据式(3)和式(4)及相关数据, 使用回归方法求解

根据计算数据计算得到改进模型、Sellar 模型和 Anelli 模型的相关系数(R)分别为 0.996 6、0.979 7 和 0.970 1。 A_{ARE} 值更接近于 0, R 值更接近于 1,表明改进的 Inconel X-750 合金晶粒粗化模型比常用的 Sellar 模型和 Anelli 模型对晶粒粗化行为的预测精度更高。

5 结 论

(1) Inconel X-750 高温合金在 1 323~1 423 K 内出现晶粒异常粗化,晶粒尺寸及其分布不均匀性显著增加。

(2) Inconel X-750 高温合金的晶粒尺寸随着保温温度的升高和保温时间的延长而增大。晶粒粗化速率随着保温时间的延长和温度的降低而降低。在 1 123~1 273 K 内,晶粒低幅长大,在 1 323~1 423 K 内,晶粒粗化程度显著增加。

(3) 根据 Inconel X-750 高温合金的晶粒粗化规律,在 Sellar 型和 Anelli 型晶粒粗化模型的基础上,开发并计算了分段式晶粒粗化模型。平均相对误差为 3.46%,相关系数为 0.996 6,与 Sellar 模型和 Anelli 模型比较表明,该模型对 Inconel X-750 合金的晶粒粗化行为具有较高的预测精度。

参 考 文 献

- [1] HUAP T, ZHANG W H, HUANG L J, et al. Investigation of work hardening behavior of inconel X-750 alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2017, 30(9): 869-877.
- [2] MIL L S, MASTEL W J. Room temperature and elevated temperature deformation characteristics of inconel X-750 (Room temperature to 816 °C)[J]. Society & Natural Resources, 1979, 20: 177-185.
- [3] PU E, ZHENG W, SONG Z, et al. Hot deformation characterization of nickel-based superalloy UNS10276 through processing map and microstructural studies[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2017, 694: 617-631.
- [4] YU Q Y, YAO Z H, DONG J X. Deformation and recrystallization behavior of a coarse-grain, nickel-base superalloy udimet 720Li ingot material[J]. Materials Characterization, 2015: 398-410.
- [5] TIAN G, JIA C, LIU J, et al. Experimental and simulation on the grain growth of P/M nickel-base superalloy during the heat treatment process[J]. Materials & Design, 2009, 30(3): 433-439.
- [6] COLLINS D M, CONDUIT B D, STONE H J, et al. Grain growth behaviour during near- γ' solvus thermal exposures in a polycrystalline nickel-base superalloy[J]. Acta Materialia, 2013, 61(9): 3 378-3 391.
- [7] NING Y, YAO Z, FU M W, et al. Recrystallization of the hot isostatic pressed nickel-base superalloy FGH4096: I. Microstructure and mechanism[J]. Materials Science and Engineering, 2011, A528(28): 8 065-8 070.
- [8] ZHAO G, ZANG X, JING Y, et al. Role of carbides on hot de-

formation behavior and dynamic recrystallization of hard-deformed superalloy U720Li[J]. Materials Science and Engineering, 2021, A815: 141 293.

- [9] JIN Y, XI C, XUE P, et al. Constitutive model and microstructure evolution finite element simulation of multidirectional forging for gh4169 superalloy[J]. Metals, 2020, 10(12): 1 695-1 700.
- [10] 党莹樱, 赵新宝, 尹宏飞, 等. Inconel 740H 蠕变过程中晶界 M23C6 的粗化行为[J]. 材料科学与工艺, 2017, 25(6): 22-26.
- [11] ZENG Q, YAN P, SHAO C, et al. Investigation on coarsening behaviors of serrated grain boundaries in K480 nickel base superalloy during long term aging at 900 °C [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49(1): 63-68.
- [12] COLLINS D M, CONDUIT B D, STONE H J, et al. Grain growth behaviour during near- γ' solvus thermal exposures in a polycrystalline nickel-base superalloy[J]. Acta Materialia, 2013, 61(9): 3 378-3 391.
- [13] CHO J R, JEONG H S, CHA D J, et al. Prediction of microstructural evolution and recrystallization behaviors of a hot working die steel by FEM[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 160(1): 1-8.
- [14] SELLARS C M, WHITEMAN J A. Recrystallization and grain growth in hot rolling[J]. Metal Science Journal, 1978, 13(3-4): 187-194.
- [15] LAN Y J, LI D Z, LI Y Y. A mesoscale cellular automaton model for curvature-driven grain growth[J]. Metallurgical & Materials Transactions, 2006, B37(1): 119-129.
- [16] WEN D X, LIN Y C, ZHOU Y. A new dynamic recrystallization kinetics model for a Nb containing Ni-Fe-Cr-base superalloy considering influences of initial δ phase[J]. Vacuum, 2017, 141: 316-327.
- [17] SIRADJ E S. Evaluation of austenite grains growth in high Nb and low Nb HSLA steel[J]. Materials Science Forum, 2020, 1 000: 404-411.
- [18] BERDICHEVSKY V L. Thermodynamics of microstructure evolution: Grain growth[J]. International Journal of Engineering Science, 2012, 57: 50-78.
- [19] YU G L. Two flowing stress models for hot deformation of XC45 steel at high temperature[J]. Materials Science and Engineering, 2012, A534(1): 101-110.
- [20] YU X, DENG L, ZHANG X, et al. Accurate numerical computation of hot deformation behaviors by integrating finite element method with artificial neural network[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2018, 19(3): 395-404.

(编辑:刘卫)

欢迎使用在线稿件处理系统

投稿、查稿、审稿

敬请登录 www.special-cast.com