

文章编号:1674-8190(2019)02-255-08

变温热处理过程的相场模拟及其参数标定

王婵¹, 石磊², 石多奇^{1,3}, 杨晓光^{1,3}

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

(2. 利莫瑞克大学 工程学院, 利莫瑞克 V94 T9PX)

(3. 北京航空航天大学 航空发动机结构强度北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: 航空发动机双性能涡轮盘热处理工艺的研究, 大多采用试验的方法建立涡轮盘合金的热处理工艺数据库, 但试验法的研究周期长、成本高, 提出一种可用于预测变温热处理过程中晶粒演化行为的相场模型。为了模拟不同热处理温度下高温合金的晶粒演化行为, 对相场模型进行改进, 在相场模型中引入 Arrhenius 关系, 用于描述高温合金晶界运动与温度的量化关系。基于改进的相场模型和拟合的模型参数, 计算分析热处理过程中晶粒尺寸的变化和形貌演化规律。结果表明: 计算数据与试验数据吻合, 晶粒的演化规律与理论分析和试验观察结果一致, 证明了拟合的 Arrhenius 关系中的晶界迁移速率 M 适用于模拟相应温度下的热处理过程, 同时, 以上结果也验证了该模型改进方法的可行性及其拟合参数的准确性。

关键词: 航空发动机涡轮盘; 晶粒演化; 相场模型; Arrhenius 关系; 晶界迁移率; 热处理

中图分类号: V252.2; V232.3

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2019.02.016

Phase-field Modeling of Heat Treatment Process with Variable Temperature and Its Parameter Calibration

Wang Chan¹, Shi Lei², Shi Duoqi^{1,3}, Yang Xiaoguang^{1,3}

(1. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China)

(2. School of Engineering, University of Limerick, Limerick V94 T9PX, Ireland)

(3. Beijing Key Laboratory of Aeroengine Structural Strength, Beihang University, Beijing 100083, China)

Abstract: For the research of heat treatment technology of aero-engine turbine discs with dual-performance, the experimental methods are mostly used to establish the database of heat treatment technology of turbine disk alloys. However, the experimental methods have a long research period and high cost. A phase field model that can be used to predict the grain evolution during heat treatment process with variable temperature is proposed. To simulate the grain evolution of superalloy at different heat treatment temperatures, the phase field model is improved by introducing the Arrhenius relationship, which describes the quantitative relationship between the grain boundary movement and temperature. Based on the improved phase field model and fitted model parameters, the grain average size and morphology evolution of superalloy FGH96 during the longer heat treatment process are simulated, and the simulated results are compared with the experimental results. The results show that the calculated data coincide with the experiment data, the evolution law of grain is consistent with the experimental observation and theoretical analysis. These results prove that the grain boundary mobility M in the Arrhenius relationship is suitable for simulating the heat treatment process at the corresponding temperature. At the same time, the feasibility of the improved method and accuracy of the fitted parameters of the phase-field model are verified.

Key words: aeroengine turbine disk; grain evolution; phase field model; Arrhenius relationship; grain boundary mobility; heat treatment

收稿日期: 2019-01-16; 修回日期: 2019-01-24

基金项目: 国家留学基金; 北京航空航天大学博士研究生卓越学术基金

通信作者: 石多奇, 07757@buaa.edu.cn

引用格式: 王婵, 石磊, 石多奇, 等. 变温热处理过程的相场模拟及其参数标定[J]. 航空工程进展, 2019, 10(2): 255-262.

Wang Chan, Shi Lei, Shi Duoqi, et al. Phase-field modeling of heat treatment process with variable temperature and its parameter calibration[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(2): 255-262. (in Chinese)

0 引言

涡轮盘是航空发动机的关键热端部件,其性能和可靠性直接影响了航空发动机的服役安全性。高性能航空发动机涡轮盘的首选材料为镍基粉末高温合金,与传统铸锻工艺相比,粉末冶金工艺消除了材料的宏观冶金偏析和组织不均匀,把偏析限制在单个粉末颗粒内,同时,粉末高温合金具有组织均匀、晶粒细小、屈服强度高、疲劳性能好等优点,成为推重比 8 以上高性能发动机涡轮盘的首选材料^[1]。

根据涡轮盘的温度和应力载荷分布,一方面,涡轮盘盘心部位工作温度较低,但轮盘中心孔区域周向应力最大,同时还承受涡轮轴的扭矩作用,需要细晶组织保证足够的拉伸强度和疲劳抗力。另一方面,涡轮盘轮缘部位的工作温度高,且容易在某些局部应力大的区域出现裂纹,需要粗晶组织保证其具有足够的持久、蠕变性能和抗裂纹扩展能力。因此,针对发动机涡轮盘不同部位材料的力学性能要求,出现了轮缘和盘心部位具有不同晶粒尺寸的双性能涡轮盘,其盘心部位的晶粒度(ASTM)约 10~12 级,盘缘部位的晶粒度(ASTM)约 3~6 级^[2]。双性能涡轮盘不仅能优化涡轮盘的结构设计,还能更加充分的挖掘、利用涡轮盘合金的力学性能,具有重要的研究意义和价值。

双性能涡轮盘一般采用梯度热处理工艺制备。热处理工艺是一种重要的控制材料微观结构的工艺方法,热处理工艺参数对材料的微观结构具有重要影响,通过改变热处理工艺参数,可有效调节材料的微观结构。通常采用试验的方法研究涡轮盘的热处理工艺,通过不同的热处理试验,建立涡轮盘合金的热处理数据库,为该合金后续的研究和工程应用提供数据支持。但试验法的研究周期长、成本高,尤其是针对热处理数据比较缺乏的材料进行研究时,将耗费更长的研制周期。随着计算材料学的兴起和发展,现已提出、建立了多种模拟金属材料微观结构的计算方法。其中,相场方法因其稳固的理论基础和良好适用性,受到了国内外的普遍关注和发展,已成为模拟材料微结构演化的强有力工具。

目前,对于相场法模拟高温合金晶粒演化的研究,主要侧重于恒温条件下的晶粒演化行为,包括

由于晶界移动导致的晶粒长大现象^[3-6]和第二相粒子对晶粒长大的影响^[7-9],缺少变温过程中合金晶粒演化行为方面的研究。魏承扬等^[10]通过假设变温条件下的晶界迁移率在某一方向呈正态分布,计算模拟了合金在退火过程中的非均匀晶粒生长行为,但该模型由于假设条件的限制,不具有普遍适用性,且该模型没有进行试验验证。对于相场法模拟变温过程中合金其他微观结构的演化行为,I. Loginova 等^[11]和 C. W. Lan 等^[12]在相场模型中引入与温度相关的合金元素扩散方程,用于模拟合金在凝固过程中的枝晶生长;Y. H. Wen 等^[13]在相场模型的化学自由能中引入了与温度相关的变量,用于描述变温的热处理过程中 γ' 沉淀相的成核、生长、粗化行为;T. Na 等^[14]通过引入与温度相关的 γ 和 γ' 相晶格参数方程,计算模拟了不同温度下 γ' 沉淀相的演化行为。

本文基于 OpenPhase 中的恒温相场模型,在相场模型中引入 Arrhenius 关系,用来描述高温合金晶界移动与温度的量化关系,从而模拟变温的热处理过程的晶粒演化行为。并通过试验结果,验证该模型的可行性及其拟合参数的准确性。

1 相场模型

相场法是一种建立在热力学基础上描述系统动力学演化过程的模拟方法^[15-16]。相场法采用场变量来构造体系的总能量,包括化学自由能、界面能、弹性应变能、磁场能等,并根据体系微结构演化过程是其总自由能最小化过程的理论依据,得到材料的微结构演化方程。相场法采用扩散界面,避免了传统尖锐界面追踪界面的困难,因而可对各种复杂微结构进行二维和三维模拟。

在相场模型中,引入一系列与位置和时间有关的相场变量 $\phi(x, y, t)$ 来描述多晶高温合金的晶粒。对于高温合金的晶粒 i 和晶粒 j ,分别用相场变量 ϕ_i 和 ϕ_j 表示,在晶粒 i 内, $\phi_i = 1, \phi_j = 0$;在晶粒 j 内, $x_i = 0, x_j = 1$;在晶粒 i 和晶粒 j 的晶界处, $0 < x_i < 1, 0 < x_j < 1$,如图 1 所示。在求解域内的任何位置处,相场变量 ϕ_i 需满足约束方程:

$$\sum_{i=1}^N \phi_i = 1 \quad (1)$$

式中: N 为晶粒的个数。

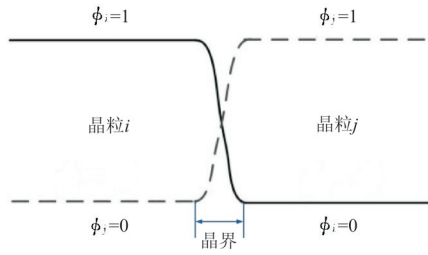


图 1 相场变量与晶粒位置的关系示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the relationship between phase field variable and grain position

对于热处理过程中高温合金的晶粒长大过程, 体系总自由能是相界面总自由能, 其表达式如下:

$$F = \int_{\Omega} f_{int} dV \quad (2)$$

式中: f_{int} 为界面能密度; Ω 为模拟区域。

模拟区域内含有 N 个晶粒, 界面能密度 f_{int} 表示为:

$$f_{int} = \sum_{i,j=1, i \neq j}^N \frac{4\sigma_{ij}}{\eta} \left[-\frac{\eta^2}{\pi^2} \nabla \phi_i \cdot \nabla \phi_j + \phi_i \phi_j \right] \quad (3)$$

式中: σ_{ij} 为晶界能; η 为晶界宽度。

式(3)表明: 在晶粒内部, 界面能密度为 0, 在晶界处, 界面能密度非 0, 则晶界上总自由能的减小驱动了晶界的移动, 并驱动晶界的总面积减小。根据能量最小化的原理, 得到相场变量的演化方程为:

$$\phi_i = \frac{\partial \phi(x, t)}{\partial t} = - \sum_{j=1}^N \frac{\pi^2 M_{ij}}{8\eta N} \left[\frac{\delta F}{\delta \phi_i} - \frac{\delta F}{\delta \phi_j} \right] \quad (4)$$

式中: M 为迁移率, 即晶界在单位驱动力作用下的迁移速度, 用于描述晶界的迁移行为。

当热处理温度较低时, 镍基高温合金的碳化物和沉淀相对晶界有钉扎作用, 阻碍了晶界的移动; 当热处理温度升高到一定温度, 镍基合金内部的碳化物和沉淀相逐渐溶解, 晶界运动的阻力减小, 晶界运动加快, 因此, M_{ij} 的值与温度有关。为了描述晶界运动与温度的量化关系, 本文对相场模型进行改进, 引入了 Arrhenius 关系^[17] 来描述不同温度下的晶界迁移速率, 从而使得该相场模型可用于模拟不同参数的热处理过程中的晶粒演化行为。Arrhenius 关系表达为:

$$M_{ij} = M_0 \exp(-Q/RT) \quad (5)$$

式中: M_0 为指前因子; Q 为晶界迁移激活能, 气体常数 $R=8.314 \text{ J/mol/K}$ 。

将式(2)、式(3)、式(5)带入式(4)中, 得到描述多晶合金晶粒的一系列演化方程。

采用周期性边界条件, 并依靠有限差分法对相场演化方程进行离散化处理, 然后带入 Euler 显式积分方程, 建立相场微结构演化动力学方程:

$$\phi_i(x_h, y_h, t + \Delta t) = \phi_i(x_h, y_h, t) + \Delta t \phi_i(x_h, y_h, t) \quad (6)$$

最后通过可视化软件 ParaView 得到镍基高温合金晶粒演化过程的可视化结果。

2 模拟参数

本文以镍基高温合金 FGH96 为模拟对象。该合金是镍基 γ' 相沉淀强化型粉末高温合金, 基体组织为 γ 固溶体, 主要强化相 γ' 相的质量分数约占 33%, γ' 相完全溶解温度为 $1120 \sim 1130 \text{ }^\circ\text{C}$ ^[18-20]。

根据文献中的试验结果^[21], FGH96 高温合金初始状态的晶粒平均尺寸设为 $10 \text{ } \mu\text{m}$, 为了保证统计结果的准确性, 初始状态包含的晶粒数量为 $850 \sim 900$ 个, 模拟区域的大小为 $400 \text{ } \mu\text{m} \times 400 \text{ } \mu\text{m}$ 。随后对 FGH96 合金的热处理过程进行计算模拟, 模拟的热处理工艺流程如图 2 所示, 热处理工艺参数如表 1 所示。将合金加热至一定温度 T 后, 保温一定时间 t , 最后迅速水淬以保留其高温组织。其他模拟参数包括: dx 为 $2 \text{ } \mu\text{m}$, dt 为 0.01 s , 晶界宽度 $5 \text{ } \mu\text{m}$, 界面能 0.24 J/m^2 。

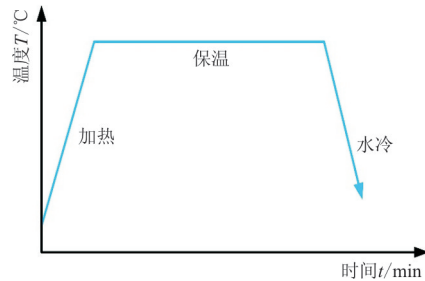


图 2 相场法模拟的热处理工艺过程

Fig. 2 The heat treatment process simulated by phase field method

表 1 热处理工艺参数

Table 1 Heat treatment process parameters

保温温度 $T/^\circ\text{C}$	保温时间 t/min	冷却速度 $/(\text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1})$
1 000	5	200
1 050	5	200
1 100	5~25	200
1 135	5~25	200
1 150	5~25	200
1 170	5~25	200

拟合不同热处理温度下保温 5 min 后试验获得的晶粒平均尺寸(直径),从而获得 Arrhenius 关系中的晶界迁移激活能 Q 和指前因子 M_0 。不同温度下拟合的晶粒平均尺寸和试验结果如表 2 所示,相应的曲线如图 3 所示,同时拟合得到的晶界迁移激活能 Q 为 248 kJ/mol,指前因子 M_0 如表 3 所示。

表 2 不同热处理温度下保温 5 min 后晶粒平均尺寸的拟合结果和试验结果

Table 2 The fitted and experimental results of average grain size after holding 5 min at different heat treatment temperatures

热处理温度/°C	热处理保温时间/min	平均晶粒尺寸/ μm	
		拟合结果	试验结果
1 000	5	12.27	11.88
1 050	5	15.27	14.42
1 100	5	16.86	15.84
1 135	5	19.67	19.93
1 150	5	21.42	20.94
1 170	5	37.92	38.10

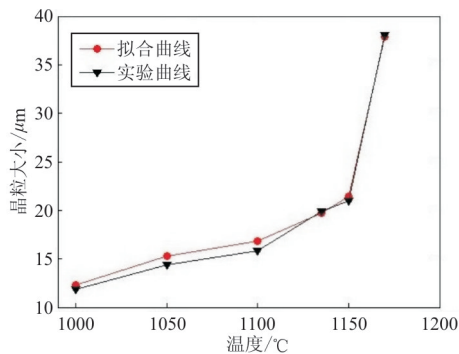


图 3 不同热处理温度下保温 5 min 后的拟合曲线和试验曲线

Fig. 3 The fitted and experimental curves after holding 5 min at different heat treatment temperatures

表 3 不同温度下的指前因子 M_0

Table 3 Pre-Factor M_0 at different temperatures

温度/°C	指前因子 $M_0/(\text{m}^4 \cdot \text{J}^{-1} \cdot \text{s}^{-1})$
1 000~1 110	1.0×10^{-2}
1 135~1 150	2.1×10^{-2}
1 170	6.5×10^{-2}

不同温度下指前因子的不同体现了镍基合金

的主要沉淀相 γ' 相对晶界运动的阻碍作用。当热处理温度范围为 1 000~1 100 °C 时,低于 γ' 相的完全溶解温度,大量未溶解的 γ' 相对晶界运动有阻碍作用,晶界运动速率 M 较小。当热处理温度继续升高到 1 135~1 150 °C 时,达到 γ' 相的完全溶解温度, γ' 相随着保温时间的增加逐渐溶解,晶界运动的阻力减小,晶界运动速率 M 增大。当热处理温度升高到 1 170 °C 时,更高的温度使得 γ' 相在短时间内大量溶解,溶解速率增大^[22-23],则晶界运动速率 M 进一步增大。FGH96 合金晶界迁移率 M 随温度的变化曲线如图 4 所示。

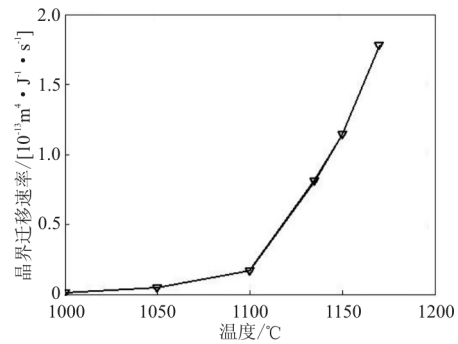


图 4 FGH96 合金晶界迁移率 M 随温度的变化曲线

Fig. 4 The curve of grain boundary mobility M of FG96 alloy with temperature

3 模型验证

基于以上拟合的模拟参数,和改进的相场模型,计算了拟合温度下更长保温时间 15 min 和 25 min 后的晶粒平均尺寸和形貌,并将该结果与试验结果进行对比,试验数据来源于文献[21-24],用来验证该温度下拟合参数的准确性和模型改进方法的可行性。

3.1 模型参数的验证

热处理保温温度为 1 100、1 135、1 150、1 170 °C 时,模拟 FGH96 合金保温 15、25 min 后的晶粒形貌,并统计以上时刻晶粒的平均尺寸,统计结果如表 4 所示,并结合表 2,得到不同温度下晶粒平均尺寸随热处理时间的变化曲线如图 5 所示。

表 4 不同温度和保温时间的 FGH96 高温合金的平均晶粒尺寸

Table 4 Average grain size of superalloy FGH96 at different temperatures and holding times

热处理温度/℃	热处理保温时间/min	平均晶粒尺寸/ μm	
		拟合结果	试验结果
1 100	15	18.87	18.03
1 100	25	20.58	18.86
1 135	15	22.57	21.97
1 135	25	28.54	27.14
1 150	15	25.02	24.85
1 150	25	31.12	28.41
1 170	15	61.98	58.94
1 170	25	78.32	79.77

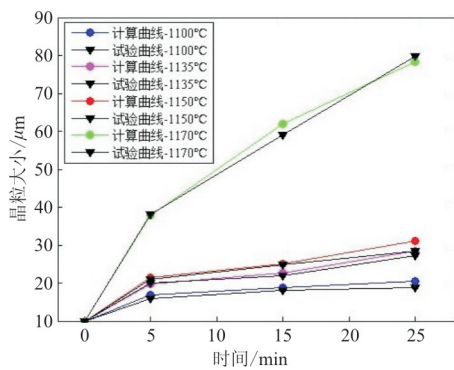


图 5 晶粒的平均尺寸随热处理时间的变化曲线

Fig. 5 The average grain size varying with the heat treatment time

从表 4 和图 5 看出: 以上各温度下保温 15 min 和 25 min 的计算数据与试验数据吻合, 证明了拟合得到的 Arrhenius 关系中的晶界迁移速率 M 适用于相应温度下, 更长保温时间的热处理过程, 同时, 验证了该改进模型的可行性及其拟合参数的准确性。

FGH96 合金晶粒平均尺寸随热处理保温时间的延长增大, 且随着保温温度的升高, 晶粒长大速率增大。初始状态 FGH96 合金晶粒的平均尺寸约为 $10 \mu\text{m}$ 。当热处理温度为 $1\ 100\ ^\circ\text{C}$ 时, 保温 25 min 后晶粒平均尺寸为 $20.58 \mu\text{m}$, 增大了 $10.58 \mu\text{m}$; 当热处理温度升高到 $1\ 135$ 和 $1\ 150\ ^\circ\text{C}$ 时, 随着保温时间的延长, 晶粒平均尺寸增长更快, 保温 25 min 后约为 $30 \mu\text{m}$, 增大了 $20 \mu\text{m}$; 热处理温度继续升高, 达到 $1\ 170\ ^\circ\text{C}$ 时, 晶粒在短时间内迅速长大, 保温 25 min 后的晶粒平均尺寸达到 $78.32 \mu\text{m}$, 增大了 $68.32 \mu\text{m}$, 增长显著。

对计算和试验得到的晶粒增长规律使用 Beck 方程拟合:

$$d - d_0 = kt^n \quad (7)$$

式中: d 为保温 t 时间后晶粒的平均尺寸; d_0 是初始时刻晶粒的平均尺寸; k 为常数; t 为保温时间; n 为晶粒的长大指数。

拟合的曲线如图 6 所示, 拟合的晶粒长大指数如表 5 所示。从表 5 可以看出: 计算结果与试验结果相比误差较小, 基本吻合。

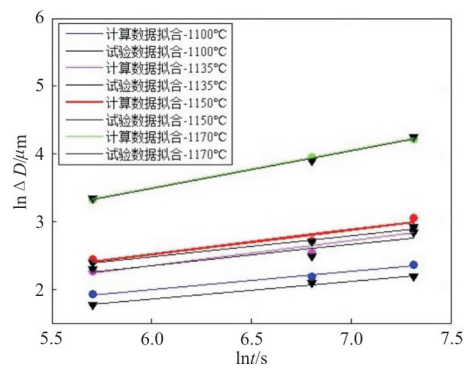


图 6 FGH96 高温合金 $\ln \Delta D - \ln t$ 的关系曲线

Fig. 6 The changing curves of $\ln \Delta D - \ln t$ of superalloy FGH96

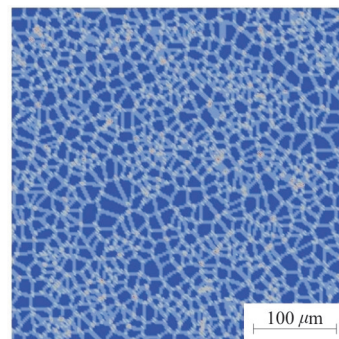
表 5 不同温度的 FGH96 高温合金的晶粒长大指数

Table 5 Grain growth indexes of superalloy FGH96 at different temperatures

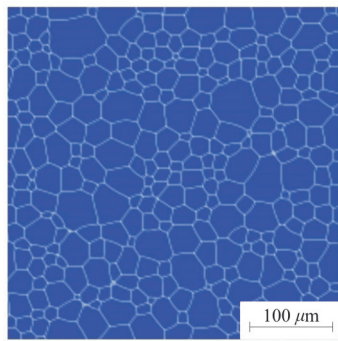
热处理保温温度/℃	晶粒长大指数 n	
	模拟结果	试验结果
1 100	0.26	0.26
1 135	0.37	0.31
1 150	0.36	0.32
1 170	0.55	0.55

3.2 热处理过程中合金晶粒形貌的演化

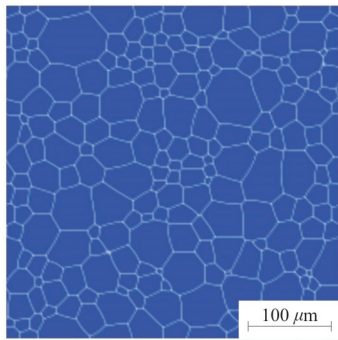
热处理保温温度为 $1\ 135\ ^\circ\text{C}$ 时, 模拟的高温合金 FGH96 晶粒形貌的演化行为如图 7 所示。



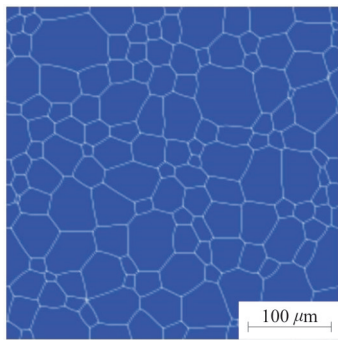
(a) 初始状态



(b) 5min



(c) 15min



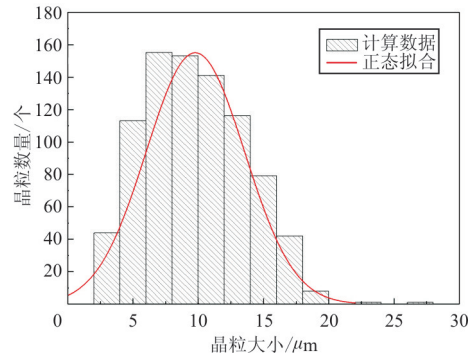
(d) 25min

图 7 不同保温时刻 FG96 高温合金的晶粒形貌

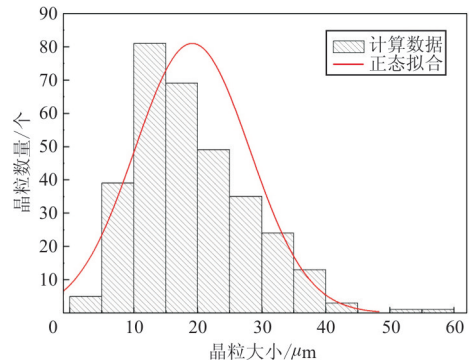
Fig. 7 Grain morphology of superalloy FG96 at different holding times

从图 7 可以看出:在热处理过程中,随着保温时间的延长,较大尺寸的晶粒逐渐增大,并吞噬较小尺寸的晶粒,晶粒正常长大,此结果与试验结果吻合^[25]。对图中各个时刻晶粒的总面积进行统计得到,初始时刻晶粒的总面积为 $7.80 \times 10^4 \mu\text{m}^2$,热处理 5、15、25 min 后晶粒的总面积分别为 1.18×10^5 、 1.25×10^5 、 $1.31 \times 10^5 \mu\text{m}^2$,合金中晶粒的总面积增大,晶界的总面积减小。

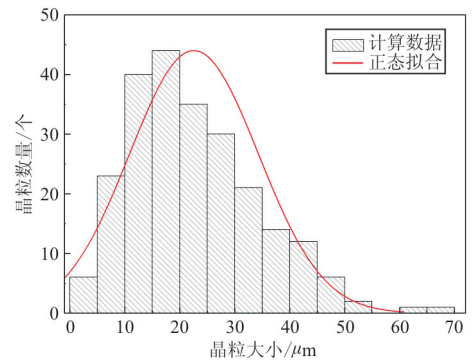
在热处理过程中,不同时刻的晶粒尺寸分布情况如图 8 所示。



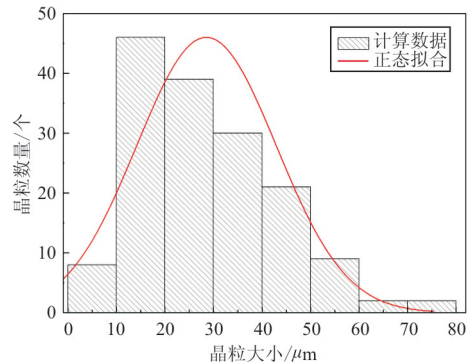
(a) 初始状态



(b) 5min



(c) 15min



(d) 25min

图 8 不同保温时刻 FG96 高温合金的晶粒尺寸分布图

Fig. 8 Grain size distribution of superalloy FG96 at different holding times

从图 8 可以看出:晶粒尺寸在演化过程中都满足正态分布。初始状态,晶粒的尺寸主要集中在 $5.5\sim 12.5\ \mu\text{m}$,其平均尺寸为 $9.88\ \mu\text{m}$;随着保温时间的延长,由于高温促进了不稳定的晶界运动,晶粒的尺寸逐渐增大,25 min 以后,晶粒尺寸主要集中在 $15\sim 35\ \mu\text{m}$,且较大尺寸的晶粒数量增多,晶粒平均尺寸增大到 $28.54\ \mu\text{m}$;同时,随着保温时间的延长,晶粒的数量逐渐减少,保温 25 min 后,晶粒数量从初始状态的 853 个减少到 157 个。以上计算模拟的晶粒演化规律与理论分析和试验观察结果一致^[26]。

4 结 论

(1) 本文在恒温相场模型中引入 Arrhenius 关系,用于描述晶界移动与温度的量化关系,并通过拟合试验获得的不同温度下热处理 5 min 后的晶粒平均尺寸,得到了 $1\ 000\sim 1\ 170\ ^\circ\text{C}$ 范围内晶界迁移速率 M 与温度的关系曲线。

(2) 基于以上改进的相场模型和拟合得到的模型参数,计算分析了拟合温度下保温更长时间后晶粒平均尺寸的变化和形貌的演化,并与试验结果进行对比可知,计算数据与试验数据吻合,晶粒演化规律与试验观测和理论分析结果一致,证明了拟合参数的准确性,且拟合得到的 Arrhenius 关系中的晶界迁移速率 M 适用于模拟相应温度下合金的热处理过程。同时,验证了该模型改进方法的可行性,改进的相场模型可用于模拟不同热处理过程中的晶粒演化行为。

(3) 由于试验数据有限,文中得到的晶界迁移速率与温度的关系曲线,在其他温度下的数值精确性有待进一步验证,即该改进的相场模型对其他热处理温度下的晶粒演化行为的定量描述,有待试验验证。

参 考 文 献

- [1] 张义文,刘建涛.粉末高温合金研究进展[J].中国材料进展,2013,32(1):1-11.
Zhang Yiwen, Liu Jiantao. Development in powder metallurgy superalloy[J]. Materials China, 2013, 32(1): 1-11. (in Chinese)
- [2] 宁永权,李辉,姚泽坤,等. FGH96 高温合金的再结晶组织特征[J].稀有金属材料与工程,2016,45(5):1225-1229.
Ning Yongquan, Li hui, Yao Zekun, et al. Recrystallization characterization of FGH96 superalloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2016, 45(5): 1225-1229. (in Chinese)
- [3] Kazaryan A, Wang Y, Dregia S A, et al. Grain growth in systems with anisotropic mobility: analytical model and computer simulation[J]. Physical Review B: Condensed Matter and Materials Physics, 2001, 63(18): 145-155.
- [4] Kazaryan A, Wang Y, Dregia S A, et al. Grain growth in anisotropic systems: comparison of effects of energy and mobility[J]. Acta Materialia, 2002(50): 2491-2502.
- [5] Krill C E, Chen L Q. Computer simulation of 3-D grain growth using a phase-field model[J]. Acta Materialia, 2002(50): 3057-3073.
- [6] Ma N, Kazaryan A, Dregia S A, et al. Computer simulation of texture evolution during grain growth: effect of boundary properties and initial microstructure[J]. Acta Materialia, 2004(50): 3869-3879.
- [7] Moelans N, Blanpain B, Wollants P. A phase field model for the simulation of grain growth in materials containing finely dispersed incoherent second-phase particles[J]. Acta Materialia, 2005(53): 1771-1781.
- [8] Moelans N, Blanpain B, Wollants P. Phase field simulation of grain growth in two-dimensional systems containing finely dispersed second-phase particles[J]. Acta Materialia, 2006(54): 1175-1184.
- [9] Suwa Y, Saito Y, Onodera H. Phase field simulation of grain growth in three dimensional system containing finely dispersed second-phase particles[J]. Scripta Materialia, 2006(55): 407-410.
- [10] 魏承场,李赛毅.温度梯度对晶粒生长行为影响的相场模拟[J].物理学报,2011,60(10):132-139.
Wei Chengyang, Li Saiyi. Effect of temperature gradient on grain growth behavior from phase field simulation[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(10): 132-139. (in Chinese)
- [11] Loginova I, Amberg G. Phase-field simulations of non-isothermal binary alloy solidification[J]. Acta materialia, 2001(49): 573-581.
- [12] Lan C W, Shih C J. Phase field simulation of non-isothermal free dendritic growth of a binary alloy in a forced flow[J]. Journal of Crystal Growth, 2004(264): 472-482.
- [13] Wen Y H, Wang B, Simmons J P, et al. A phase-field model for heat treatment applications in Ni-based alloys[J]. Acta Materialia, 2006(54): 2087-2099.
- [14] Ta N, Zhang L, Du Y. Design of the precipitation process for Ni-Al alloys with optimal mechanical properties: A phase-field study[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2014, 45(4): 1787-1802.
- [15] Steinbach I. Phase-field models in materials science. Modelling and simulation in materials science and engineering[J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2009, 17(7): 1-31.
- [16] Tegeler M, Shchyglo O, Darvishi K R, et al. Parallel mul-

- tipphase field simulations with open phase[J]. Computer Physics Communications, 2017(215): 173-187.
- [17] Shi L, Alexandratos S A, O'dowd N P. Combined finite element and phase field method for simulation of austenite grain growth in the heat-affected zone of a martensitic steel weld[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2019, 233(1): 13-27.
- [18] 中国航空材料手册编委会. 中国航空材料手册[M]. 2 版. Beijing: 中国标准出版社, 2002: 46.
China Aviation Material Handbook Editorial Board. China Aviation Material Handbook[M]. 2nd ed. Beijing: Standards Press of China, 2002: 46. (in Chinese)
- [19] 张莹, 张义文, 陶宇, 等. FGH96 粉末高温合金的组织演变[J]. 材料工程, 2002(增刊): 62-64.
Zhang Ying, Zhang Yiwen, Tao Yu, et al. The Evolution of FGH96 powder superalloys[J]. Journal of Materials Engineering, 2002(S): 62-64. (in Chinese)
- [20] 何胜春, 廖云建, 张田仓, 等. 粉末高温合金 FGH96 惯性摩擦焊接头室温疲劳裂纹扩展速率测试与分析[J]. 航空制造技术, 2015, 480(11): 77-79.
He Shengchun, Liao Yunjian, Zhang Tiancang, et al. Testing and analysis of rate of fatigue crack propagation of P/M superalloy FGH96 inertia friction welding joint[J]. Aviation Manufacturing, 2015, 480(11): 77-79. (in Chinese)
- [21] 刘建涛, 刘国权, 胡本芙, 等. FGH96 合金晶粒长大规律的研究[J]. 材料热处理学报, 2004, 25(6): 25-29.
Liu Jiantao, Liu Guoquan, Hu Benfu, et al. Study on grain growth of FGH96 alloy[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2004, 25(6): 25-29. (in Chinese)
- [22] 刘建涛, 陈焕铭, 胡本芙, 等. 新型粉末高温合金静态再结晶退火的试验研究[J]. 金属热处理, 2004, 29(6): 37-40.
Liu Jiantao, Chen Huanming, Hu Benfu, et al. Static recrystallization annealing of a new type P/M superalloy[J]. Metal Heat Treatment, 2004, 29(6): 37-40. (in Chinese)
- [23] Wang T, Wang X, Zhao Z, et al. Dissolution behaviour of the γ' precipitates in two kinds of Ni-based superalloys[J]. Materials at High Temperatures, 2016, 33(1): 51-57.
- [24] 刘建涛, 张义文, 陶宇, 等. FGH96 合金锻造盘坯热处理过程中的晶粒长大行为[J]. 金属热处理, 2006(6): 40-44.
Liu Jiantao, Zhang Yiwen, Tao Yu, et al. Grain growth behavior during heat treatment of FGH96 alloy forged disk [J]. Metal Heat Treatment, 2006(6): 40-44. (in Chinese)
- [25] Liu C, Feng Liu, Huang L, et al. Effect of hot extrusion and heat treatment on microstructure of nickel-base superalloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(8): 2544-2553.
- [26] 贾建, 陶宇, 张义文, 等. 热等静压温度对新型粉末冶金高温合金显微组织的影响[J]. 航空材料学报, 2008, 28(3): 20-23.
Jia Jian, Tao Yu, Zhang Yiwen, et al. Effects of HIP temperature on microstructures of a new P/M superalloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2008, 28(3): 20-23. (in Chinese)

作者简介:

王 婵(1990—),女,博士研究生。主要研究方向:发动机高温部件合金的微结构演化和力学性能。

石 磊(1987—),男,博士。主要研究方向:材料加工工艺及机理。

石多奇(1975—),男,博士,教授。主要研究方向:本构理论、材料疲劳与断裂、航空发动机结构强度。

杨晓光(1962—),男,博士,教授。主要研究方向:高温结构及材料的疲劳与断裂、疲劳寿命预测及本构理论。

(编辑:沈惺)