

Haynes 282 新型高温合金晶粒长大行为及数学模型研究

叶青¹ 湛颖² 陈博³ 倪恒¹ 寇晨¹

(1 西京学院机电技术系, 西安 710021)

(2 成都九鼎科技(集团)有限公司, 成都 610100)

(3 咸阳师范学院物理与电子工程学院, 咸阳 712000)

文 摘 为了研究新型合金在高温状态下的晶粒长大行为,进行了Haynes 282合金在973~1 373 K条件下保温0~10 800 s的晶粒长大实验,通过实验分析了保温时间和保温温度对其晶粒尺寸的影响,研究了晶粒尺寸在其实验条件下的演变规律。由此构建了符合Haynes 282合金晶粒长大的数学模型,该模型的建立能够有效表征Haynes 282合金在高温下的晶粒长大行为。

关键词 Haynes 282合金,晶粒长大,演变规律,数学模型

中图分类号: TG132.3

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2022.05.005

Study on the Grain Growth Behavior and Mathematical Model of A New-type Superalloy Haynes 282

YE Qing¹ CHEN Ying² CHEN Bo³ NI Heng¹ KOU Chen¹

(1 Department of Mechatronics, Xijing University, Xi'an 710021)

(2 Chengdu Jiuding Science & Tech. (Group) Co., Ltd., Chengdu 610100)

(3 College of physics and Electronic Engineering, Xianyang Normal University, Xianyang 712000)

Abstract In order to study the grain growth behavior of a new-type nickel-base superalloy at elevated temperature, grain growth tests are carried out of Haynes 282 alloy within the holding temperature range from 973 to 1 373 K and holding time range from 0 to 10 800 s. The influence of the insulation time and insulation temperature on the grain size is analyzed, and the evolution law of the grain size under the experimental conditions is studied. The mathematical model of grain growth of Haynes 282 alloy is constructed, which can effectively characterize the grain growth behavior of Haynes 282 alloy at high temperature.

Key words Haynes 282 alloy, Grain growth, Evolution rules, Mathematical model

0 引言

Haynes 282合金是一种新型镍基高温合金,在高温下具有杰出的抗氧化、耐腐蚀、耐辐射性能及较高的蠕变强度,且其焊接性能优异^[1],已被成功应用于航空航天、石油化工及核工业等关键领域。Haynes 282合金在常温下具有很高的强度和硬度,是一种难加工合金,通常在高温下进行热成型^[2]。对于化学成分一定的材料,其微观组织会直接决定材料的强度、硬度、韧性等力学性能^[3]。在高温下成型时,晶粒长大引起的晶粒粗化可能导致材料的微观组织及性能劣化^[4]。因此,研究材料在高温环境下的晶粒长大行为具有重要的意义。

目前对于高温合金晶粒长大行为的研究主要集中在三个方面:第一是高温合金晶粒长大机理的研究,如CHEN L^[5]从微观角度研究了GH4033合金在热轧前的加热过程中的晶粒长大行为,KAI Song通过试验研究了镍基高温合金的晶粒长大和钉扎效应^[6];第二是高温合金的晶粒演变规律研究,如蒋世川研究了固溶温度范围1 140~1 200 °C和固溶时间范围20~60 min内GH3128合金平均晶粒尺寸的演变情况^[7],陈小敏研究了镍基高温合金完全再结晶后在980~1 040 °C保温范围内保温0~150 min的晶粒长大规律^[8]。这类研究往往基于特定的工艺过程,所

收稿日期:2021-03-31

基金项目:陕西省重点研发计划项目(2018NY-158);西京学院校基金(XJ170131)

第一作者简介:叶青,1986年出生,硕士,讲师,主要从事为机械结构材料设计、机电系统设计工作。E-mail:zq375496861@126.com

研究的影响因素变化范围较窄,对于其他工艺过程不具有通用性且研究获得的晶粒长大规律不一定符合宽泛的工艺参数范围内的晶粒长大规律;第三是高温合金的晶粒长大数学模型研究。目前高温合金常用的晶粒长大模型主要有 Sellar 模型^[9]及 Anelli 模型^[10],这些模型具有特定的形式及物理意义,在应用过程中具有计算简单、应用方便等优势,但不同高温合金的晶粒长大特性不尽相同,想要建立精确的高温合金晶粒长大模型应针对晶粒长大规律对模型进行一定的改进。

为了研究 Haynes 282 新型高温合金在高温环境下的晶粒长大规律,拟为其晶粒尺寸及力学性能控制提供理论依据,本文在宽泛的工艺参数范围内开展晶粒长大试验,并从微观组织形貌和平均晶粒尺寸的角度定性、定量地研究 Haynes 282 合金晶粒长大规律及保温时间和保温温度对 Haynes 282 合金晶粒尺寸的影响规律。

1 实验

1.1 实验方法

Haynes 282 合金化学成分如表 1 所示,采用 72 件 $\Phi 6\text{ mm}\times 9\text{ mm}$ 的圆柱试样。Haynes 282 合金原始微观组织如图 1 所示,其原始微观组织由尺寸均匀的等轴晶和少量孪晶组成,使用 Nano Measurer 软件统计 Haynes 282 合金原始晶粒尺寸为 $29.7\text{ }\mu\text{m}$ 。

表 1 Haynes 282 合金化学成分

Tab. 1 The chemical compositions of Haynes 282 alloy

| % (w) | | | | | | | | | | |
|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----|
| Cr | Mo | Co | C | Mn | Si | Cu | Al | Ti | Fe | Ni |
| 19.99 | 8.44 | 9.98 | 0.07 | 0.29 | 0.14 | 0.28 | 1.51 | 2.08 | 1.39 | 余量 |

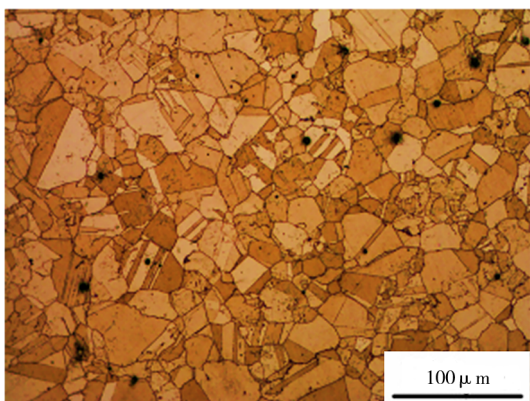


图 1 Haynes 282 合金原始金相照片

Fig. 1 The original metallograph of Haynes 282 alloy

试验设备为电磁感应加热的数控金属熔炼炉。将试样清洗、干燥后,每 3 件为一组放入炉膛,关闭炉门,按照图 2 所示,以 20 K/min 的加热速度将试样分别随炉加热至 973 、 $1\ 073$ 、 $1\ 173$ 、 $1\ 223$ 、 $1\ 273$ 、 $1\ 373\text{ K}$,然后保温 0 、 $3\ 600$ 、 $7\ 200$ 、 $10\ 800\text{ s}$,全程温控精度 \pm

1 K ,保温完成后迅速取出试样,水淬并干燥。打磨、抛光并腐蚀试样端面,在光学显微镜下观察 Haynes 282 合金晶粒长大试验后的微观形貌并拍摄金相照片。试验中保温 0 s (即不保温)的试样作为该保温温度下的初始试样,保温 $3\ 600$ 、 $7\ 200$ 、 $10\ 800\text{ s}$ 的试样作为该保温温度下的晶粒长大试样。试验中选择的温度范围 $973\sim 1\ 373\text{ K}$,最长保温时间 $10\ 800\text{ s}$ 可涵盖实际工艺过程的工艺参数范围,设置 $3\ 600$ 、 $7\ 200\text{ s}$ 两个试验保温时间是为了揭示 Haynes 282 合金在保温过程中的晶粒演变方式及规律。

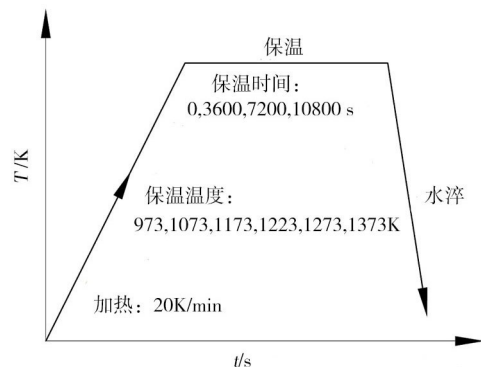


图 2 Haynes 282 合金晶粒长大试验示意图

Fig. 2 The diagrammatic process for the grain growth tests of Haynes 282 alloy

1.2 试验结果

通过晶粒长大试验,获得 Haynes 282 合金在不同温度下保温不同时间后的微观组织如表 2 所示。由表 2 中 Haynes 282 合金微观形貌可知, Haynes 282 合金在 $973\sim 1\ 273\text{ K}$ 温度范围内保温后获得的微观组织晶界平直,晶界间夹角多不大于 120° ,各个晶粒所占晶界数量接近,微观组织与原始组织相似,为尺寸均匀的等轴晶和孪晶,晶粒正常长大。晶粒长大的驱动力是晶粒的总界面能差^[11]。细晶粒的晶界多,界面能高,粗晶粒晶界少,界面能低。因此,晶粒在高温状态下往往通过由细晶粒向粗晶粒转变的晶粒长大过程降低总界面能以达到稳定的形态。理想状态下,晶粒的稳定形态为六边形,平直的晶界有利于降低晶界运动的驱动力,各个晶界间 120° 夹角有利于各晶粒间的形状协调及能量分配^[12]。而 Haynes 282 合金于 373 K 温度下保温 $3\ 600$ 、 $7\ 200$ 或 $10\ 800\text{ s}$ 后,部分晶粒出现异常长大现象^[13],大尺寸晶粒周围晶界逐渐合并消失,大尺寸晶粒与周围细小晶粒逐渐合并,形成尺寸大、晶界夹角无规律呈多边形,与周围的其他晶粒共同形成尺寸大小不一的非等轴组织。

使用 Nano Measurer 软件统计各试验条件下 3 个试样的平均晶粒尺寸,将其平均值作为该条件下的平均晶粒尺寸,统计结果如表 3 所示。

表2 Haynes 282合金微观组织
Tab. 2 The microstructure of Haynes 282 alloy

| 保温温度/K | 保温时间/s | | | |
|--------|--------|-------|-------|--------|
| | 0 | 3 600 | 7 200 | 10 800 |
| 973 | | | | |
| 1 073 | | | | |
| 1 173 | | | | |
| 1 223 | | | | |
| 1 273 | | | | |
| 1 373 | | | | |

表3 不同温度和保温时间下的平均晶粒尺寸
Tab. 3 The average grain sizes at different holding temperatures and holding times

| 保温时间/s | 晶粒尺寸/ μm | | | | | |
|--------|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | 973 K | 1 073 K | 1 173 K | 1 223 K | 1 273 K | 1 373 K |
| 0 | 30.2 | 31.5 | 33 | 37.1 | 40.2 | 49.8 |
| 3 600 | 32.1 | 35.2 | 41.1 | 45.8 | 52.2 | 68.8 |
| 7 200 | 31.9 | 36.9 | 47.2 | 55.8 | 61.5 | 84 |
| 10 800 | 33.6 | 38.3 | 47.7 | 58.7 | 66.9 | 88.6 |

2 晶粒长大规律研究

2.1 保温时间对晶粒长大的影响

由表3可知,在高温条件下, Haynes 282合金晶粒会出现不同程度的长大。在加热到试验温度后,平均晶粒尺寸由原始平均晶粒尺寸 $29.7 \mu\text{m}$ 根据试验温度的不同长大至 $30.2 \sim 49.8 \mu\text{m}$ 。保温过程中 Haynes 282合金晶粒尺寸与保温温度及保温时间的关系如图3所示。由图3可知,在较高温度下保温时,外界环境能够为 Haynes 282合金晶粒长大提供

充足的能量作为驱动力,晶粒尺寸随着保温时间的增加逐渐增加。当在 973~1 373 K 恒温环境下保温 10 800 s 后, Haynes 282 合金晶粒尺寸已经由开始保温时的 30.2~49.8 μm 长大至 33.6~88.6 μm 。此外,在 973~1 173 K 温度范围内, Haynes 282 合金晶粒尺寸处于较低水平,而在 1 273~1 373 K 温度范围内晶粒尺寸明显增加至较高水平。一方面,这是由于更高的温度能够为原子扩散和晶界迁移提供有利条件,促进晶粒长大;另一方面,在 1 273~1 373 K 温度范围内晶粒发生了异常长大,促使某些晶粒吞食周围的细小晶粒,导致其自身晶粒尺寸显著增加且晶粒数量减少,因此,平均晶粒尺寸显著升高。镍基高温合金晶粒异常长大的主要原因是在较高温度下,晶粒均获得了继续长大所需的能量,但由于 γ' 相的钉扎作用,绝大多数晶粒的长大会受到阻碍,只有少量晶粒能够不受束缚吞食其他晶粒而快速长大,直至外界提供的能量不足以支撑其继续长大或吞食其他晶粒后被钉扎作用限制长大^[14]。

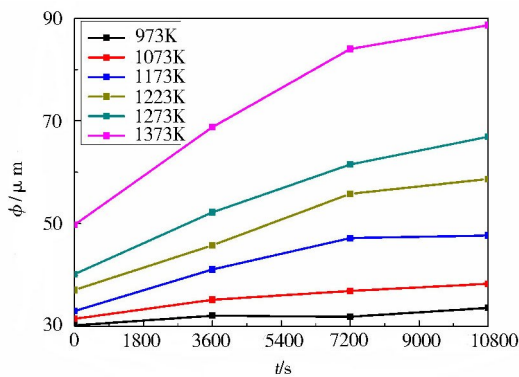


图3 不同温度下 Haynes 282 合金平均晶粒尺寸随保温时间演变情况

Fig. 3 The average grain size evolution of Haynes 282 alloy with holding time at different holding temperatures

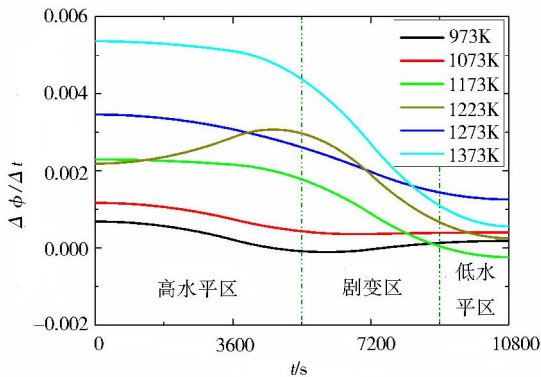


图4 Haynes 282 合金在不同保温温度下晶粒长大速度随保温时间的变化关系

Fig. 4 The variation relationship of the grain growth rate of Haynes 282 alloy with holding time at different holding temperatures

通过将晶粒尺寸-保温时间关系拟合并对保温时间求导,可得到如图4所示的 Haynes 282 合金在不同保温温度下晶粒尺寸随保温时间的变化率(晶粒长大速度)。可知看出,随着保温的进行,晶粒长大速度逐渐放缓,当保温时间达到 5 400~9 000 s 时,晶粒长大速度急剧下降,最终趋于 0,这是由于在特定的温度环境下,环境提供的能量有限,当晶粒长大到一定程度后,环境提供的能量不足以供应晶粒继续长大所需能量。因此,如图3所示,在特定的保温温度下, Haynes 282 合金晶粒尺寸与保温时间的关系曲线呈抛物线型。从图4还可以看出,随着温度升高,晶粒长大速度整体水平显著提高,说明更高的温度能够显著促进 Haynes 282 合金的晶粒长大。

2.2 保温温度对晶粒长大的影响

由图5可知,当保温时间一定时,随着保温温度升高, Haynes 282 合金晶粒尺寸逐渐增大。这是由于在更高的保温温度下,环境提供的能量更加充分,晶界自由能越高,晶界更倾向于通过迁移的方式降低自身自由能^[11],在晶界迁移的过程中会逐渐合并周围的细小晶粒使自身晶粒尺寸变大。

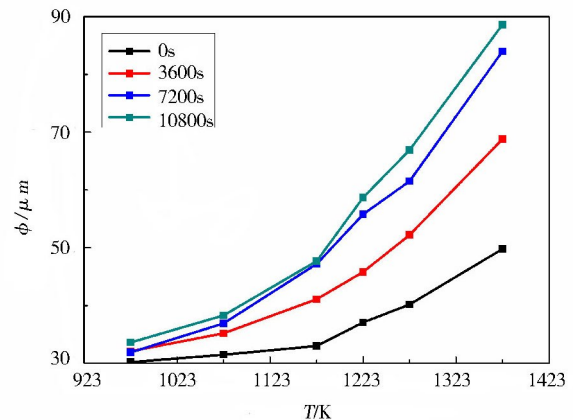


图5 不同保温时间下 Haynes 282 合金晶粒尺寸与保温温度的关系

Fig. 5 The relationship between the average grain size of Haynes 282 alloy and holding temperature at different holding times

3 晶粒长大模型构建

3.1 晶粒长大模型改进

用于表征等温条件下晶粒长大后晶粒尺寸的模型主要有两种:其一是如式(1)所示的 Sellar 模型,该模型考虑了初始晶粒尺寸、保温时间、保温温度对最终晶粒尺寸的影响,但其将最终晶粒尺寸和保温时间考虑为线性关系,未充分考虑最终晶粒尺寸与保温时间关系的复杂性;其二是如式(2)所示的 Anelli 模型,该模型未考虑初始晶粒尺寸的影响。

$$d_A = d_0 + kt \exp\left(-\frac{Q_a}{RT}\right) \quad (1)$$

$$d_A = kt^n \exp\left(-\frac{Q_a}{RT}\right) \quad (2)$$

式中, d_A 和 d_0 分别表示保温后的平均晶粒尺寸和初始晶粒尺寸, t 和 T 分别表示保温时间和温度, R 代表普适气体常数, $R=8.314 \text{ J/(mol/K)}$, Q_a 表示晶粒长大激活能, k 和 n 为常数。

研究结果表明, 初始晶粒尺寸对于晶粒长大过程有显著影响^[15-16], 在晶粒长大模型中应充分考虑。考虑到最终晶粒尺寸与保温时间的抛物线型关系, 将 Sellar 模型与 Anelli 模型结合, 构建如式(3)所示的晶粒长大模型, 以实现 Haynes 282 合金晶粒长大行为的精确表征。此外, 由分析可知, Haynes 282 合金在 973 ~ 1 173 K 内保温晶粒尺寸及长大速度均处于较低水平, 而在 1 173 ~ 1 373 K 内保温晶粒尺寸及晶粒长大速度均显著提高, 因此, 在本次研究中将 Haynes 282 合金晶粒长大模型按温度 $T \leq 1 173 \text{ K}$ 和温度 $T > 1 173 \text{ K}$ 分为两段计算。 $T \leq 1 173 \text{ K}$ 时, 模型常数取 m_1, k_1, n_1 和 Q_{a1} , $T > 1 173 \text{ K}$ 时, 模型常数取 m_2, k_2, n_2 和 Q_{a2} 。

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

式中, m, k 和 n 为需要求解的常数。

3.2 晶粒长大模型计算

将式(3)变换可得:

$$\ln(d_A^m - d_0^m) = \ln k + n \ln t - \frac{Q_a}{RT} \quad (4)$$

表 4 不同 m 值对应的晶粒长大模型计算常数值和均方误差

Tab. 4 The calculated constant values and mean square errors of grain growth model corresponding to different m -values

| m | Q_{a1} | n_1 | k_1 | MSE_1 | Q_{a2} | n_2 | k_2 | MSE_2 |
|-----|----------|---------|--------------------------|---------|----------|---------|--------------------------|---------|
| 1 | 79 422 | 0.526 5 | 394.36 | 1.003 | 60 230 | 0.660 4 | 17.053 | 3.422 |
| 2 | 89 820 | 0.573 6 | 58 605 | 0.983 | 94 094 | 0.780 6 | 14 833 | 3.531 |
| 3 | 100 589 | 0.623 7 | $1.850 7 \times 10^6$ | 0.989 | 128 640 | 0.912 9 | $1.329 5 \times 10^6$ | 2.929 |
| 4 | 111 715 | 0.676 7 | 6.8663×10^8 | 1.016 | 163 801 | 1.056 3 | $5.1753 6 \times 10^9$ | 2.267 |
| 5 | 123 185 | 0.732 7 | 6.4775×10^{10} | 1.055 | 199 506 | 1.209 6 | $4.653 2 \times 10^{12}$ | 2.059 |
| 6 | 134 980 | 0.791 | 6.5004×10^{12} | 1.101 | 235 684 | 1.371 8 | $1.234 4 \times 10^{15}$ | 2.267 |
| 7 | 147 081 | 0.850 9 | 4.16414×10^{19} | 1.146 | 272 258 | 1.541 5 | $2.991 3 \times 10^{24}$ | 2.716 |
| 8 | 159 469 | 0.911 8 | 1.40655×10^{20} | 1.185 | 309 153 | 1.717 5 | $1.010 4 \times 10^{25}$ | 3.23 |
| 9 | 172 123 | 0.972 8 | 3.1925×10^{20} | 1.21 | 346 295 | 1.898 5 | $2.293 3 \times 10^{25}$ | 3.634 |
| 10 | 185 026 | 1.033 2 | 5.99635×10^{20} | 1.215 | 383 610 | 2.083 4 | $4.307 5 \times 10^{25}$ | 3.753 |

由表 4 中数据可得到 m 值与 MSE 值关系如图 6 所示。当 $T \leq 1 173 \text{ K}$ 时, MSE_1 值随 m 值先减小后增大, 在 $m_1=2.2$ 时, 模型精度最高, $MSE_1=0.981$; 当 $T > 1 173 \text{ K}$ 时, MSE_2 值随 m 值先轻微增大, 然后减小至最小值后再增大, 在 $m_2=4.88$ 时, 模型精度最高, $MSE_2=2.041$ 。将 $m_1=2.2$ 及 $m_2=4.88$ 作为晶粒长大模型 $T \leq 1 173 \text{ K}$ 及 $T > 1 173 \text{ K}$ 温度区间的最优解并求解模型。 $\ln(d^m - d_0^m)$ 和 $-1/RT$ 值的关系如图 7 所示,

假设 m 已知, 保温温度 T 一定时, 有:

$$n = \frac{\partial \ln(d_A^m - d_0^m)}{\partial \ln t} \Bigg|_T \quad (5)$$

保温时间 t 一定时, 有:

$$Q_a = \frac{\partial \ln(d_A^m - d_0^m)}{\partial (-1/RT)} \Bigg|_t \quad (6)$$

通过回归方法可以通过式(5) ~ (6) 求解 Q_a 和 n 值, 将其代入式(3)可求解 k 值。

为验证模型的预测精度, 将 973、1 073、1 173、1 273、1 373 K 条件下的试验数据作为模型计算基础数据, 1 223 K 条件下的试验数据作为测试组, 不参与模型计算, 作为最终计算模型的验证数据组。为确定晶粒长大模型中 m 值, 假设取 m 值为区间 $[1, 10]$ 的整数, 按式(3) ~ (6) 对晶粒长大模型进行求解并预测不同试验条件下的晶粒尺寸, 通过式(7)所示的均方误差 (MSE) 来评价所构建的晶粒长大模型的预测能力。 MSE 值越小表明模型精度越高。

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - Y_i)^2 \quad (7)$$

式中, S 和 Y 分别代表平均晶粒尺寸试验值和晶粒长大模型预测值, N 为样本数量。

经求解, 不同 m 值所对应的模型常数值和均方误差如表 4 所示。

对不同保温时间下的数据进行线性拟合, 各直线斜率即为不同保温时间下的 Q_a 值, 取其平均值为最终 Q_a 值。经计算, $Q_{a1}=91 519 \text{ J/mol}$, $Q_{a2}=194 480 \text{ J/mol}$ 。同理, $\ln(d^m - d_0^m)$ 和 $\ln t$ 值的关系如图 8 所示, 对不同保温温度下的数据进行线性拟合, 各直线斜率即为不同保温温度下的 n 值, 取其平均值为最终 n 值。经计算, $n_1=0.581 46$, $n_2=1.132 73$ 。将 Q_a 值和 n 值代入式(3)可求解不同保温时间和保温温度条件下的 k

值,取其平均值为最终 k 值。经计算, $k_1=126\ 347$, $k_2=1.776\ 23\times 10^{12}$ 。

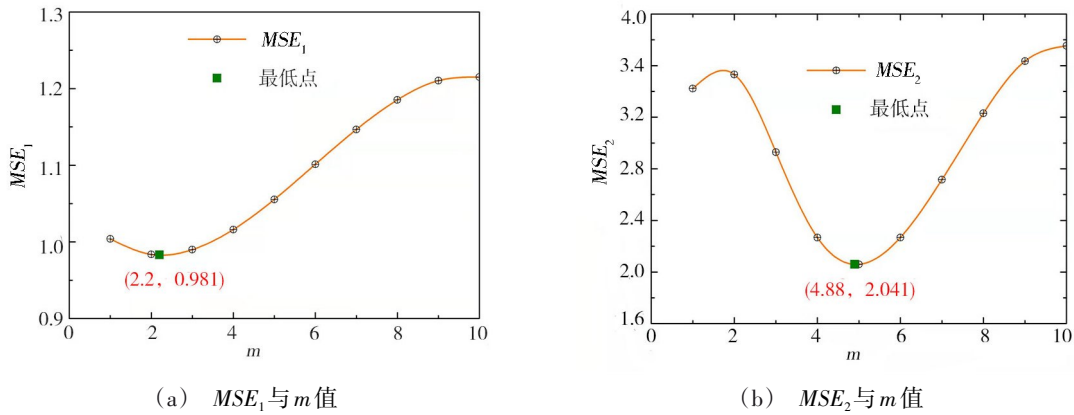


图6 均方误差 MSE_1 及 MSE_2 和 m 值的关系

Fig. 6 The relationships between the mean square errors MSE_1, MSE_2 and m -values

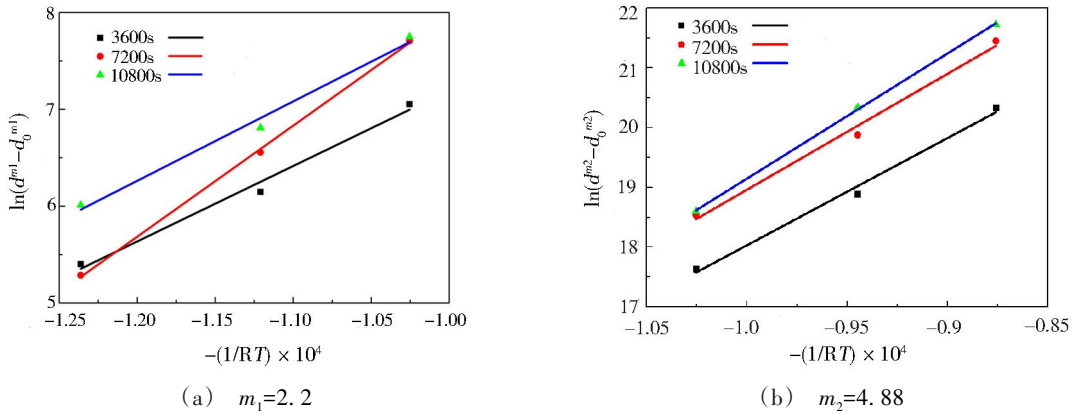


图7 $\ln(d^m - d_0^m)$ 和 $-1/RT$ 值的关系

Fig. 7 The relationships between $\ln(d^m - d_0^m)$ and $-1/RT$

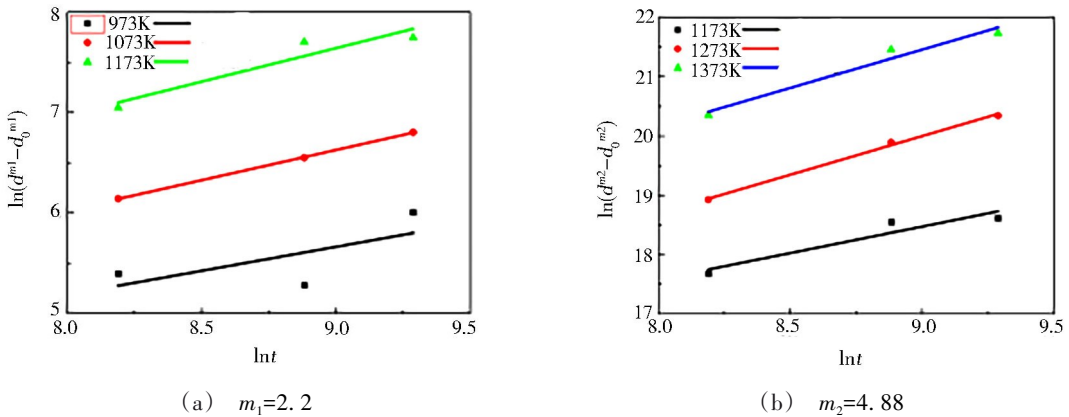


图8 $\ln(d^m - d_0^m)$ 和 $\ln t$ 值的关系

Fig. 8 The relationships between $\ln(d^m - d_0^m)$ and $\ln t$

综上所述,计算所得 Haynes 282 合金晶粒长大模型为:

$$\begin{cases} d^{2.2} = d_0^{2.2} + 126347t^{0.58146} \exp\left(-\frac{91519}{RT}\right) & T \leq 1\ 173\ \text{K} \\ d^{4.88} = d_0^{4.88} + 1.77623 \times 10^{12} t^{1.13273} \exp\left(-\frac{194480}{RT}\right) & T > 1\ 173\ \text{K} \end{cases} \quad (8)$$

3.3 晶粒长大模型评价

使用构建的晶粒长大模型预测 973 ~ 1 373 K 保

温温度及 3 600 ~ 10 800 s 保温时间范围内 Haynes 282 合金晶粒尺寸,预测值与试验值的比较如表 5 及

图9所示。

根据预测数据,可计算出型 $T \leq 1173\text{ K}$ 及 $T > 1173\text{ K}$ 时对应 $MSE_1=0.963$, $MSE_2=2.048$ 。 $m_1=2.2$, $m_2=4.88$ 时 MSE_1 、 MSE_2 值较 m_1 、 m_2 取其他值时更小,进一步验证了 $m_1=2.2$, $m_2=4.88$ 时模型精度最高。

表5 不同试验条件下晶粒尺寸预测数据及其与试验数据比较

| 温度 T/K | 时间 t/s | 实测晶粒 尺寸/ μm | 计算晶粒 尺寸/ μm | 相对误差 /% |
|--------------------|--------------------|---------------------------|---------------------------|------------|
| 973 | 3 600 | 32.1 | 31.76 | -1.04 |
| 973 | 7 200 | 31.9 | 32.51 | 1.90 |
| 973 | 10 800 | 33.6 | 33.09 | -1.53 |
| 1 073 | 3 600 | 35.2 | 35.58 | 1.09 |
| 1 073 | 7 200 | 36.9 | 37.42 | 1.40 |
| 1 073 | 10 800 | 38.3 | 38.82 | 1.35 |
| 1 173 | 3 600 | 41.1 | 41.64 | 1.31 |
| 1 173 | 7 200 | 47.2 | 45.23 | -4.17 |
| 1 173 | 10 800 | 47.7 | 47.89 | 0.40 |
| 1 223 | 3 600 | 45.8 | 47.25 | 3.17 |
| 1 223 | 7 200 | 55.8 | 52.89 | -5.21 |
| 1 223 | 10 800 | 58.7 | 57.90 | -1.37 |
| 1 273 | 3 600 | 52.2 | 53.97 | 3.39 |
| 1 273 | 7 200 | 61.5 | 61.63 | 0.22 |
| 1 273 | 10 800 | 66.9 | 67.09 | 0.28 |
| 1 373 | 3 600 | 66.8 | 70.16 | 5.02 |
| 1 373 | 7 200 | 84 | 80.63 | -4.01 |
| 1 373 | 10 800 | 88.6 | 87.96 | -0.72 |
| MRE | | | | 2.04 |

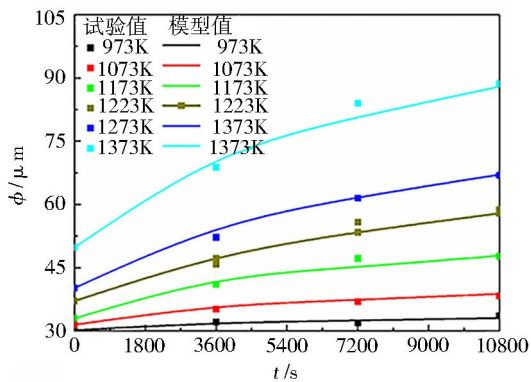


图9 晶粒尺寸实测值及计算值的比较

Fig. 9 The comparisons between the experimental and predicted grain sizes

由图9可知,晶粒长大模型预测的不同试验条件下的晶粒尺寸数据与实际测量的晶粒尺寸数据吻合度较高,说明模型能够较好地描述 Haynes 282 合金宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2022年 第5期

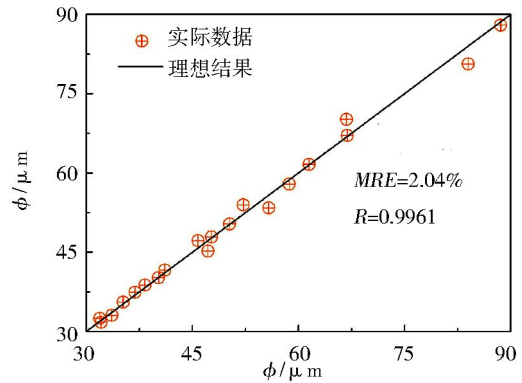


图10 晶粒尺寸预测结果与试验结果的相关性

Fig. 10 The correlation relationship between the predicted and experimental grain sizes

恒温条件下晶粒尺寸演变趋势。引入式(9)~(10)所示的平均相对误差(MRE)和相关系数(R)^[17]来进一步对晶粒长大模型精度进行评价。由表5可知,晶粒长大模型预测的晶粒尺寸数据最大相对误差仅为5.21%,平均相对误差仅为2.04%。图10表示以晶粒尺寸试验值为横坐标,以预测值为纵坐标,以45°斜线为理想结果反映预测数据和试验数据的相关性。由图10可以看出实际数据沿理想结果直线分布且距离理想结果直线较近,说明预测数据和试验数据的相关性良好。经计算,预测数据和试验数据的相关系数为0.9961。 MRE 值较小且 R 值较大,表明构建的晶粒长大模型具有较高的预测精度。

$$MRE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Y_i - S_i}{S_i} \right| \times 100\% \quad (9)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2 \sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (10)$$

式中, S 和 Y 分别表示试验值和预测值, \bar{S} 和 \bar{Y} 分别表示试验值和预测值的平均值, i 和 N 分别表示试验值和预测值对象的序号和总数。

4 结论

(1)在高温条件下保温时, Haynes 282 合金晶粒会出现不同程度的长大。在973~1 273 K条件下保温,晶粒正常长大,在1 373 K条件下保温晶粒出现异常长大现象。

(2) Haynes 282 合金在特定的温度下保温时,晶粒随着保温时间的增加逐渐长大,但晶粒长大速度逐渐降低;保温时间一定时,保温温度越高, Haynes 282 合金晶粒尺寸越大。 Haynes 282 合金在973~1 173 K内保温晶粒尺寸及长大速度均处于较低水平,而在1 173~1 373 K内保温晶粒尺寸及晶粒长大速度均显著提高。

(3)根据 Haynes 282 合金晶粒长大规律构建了分段式晶粒长大改进模型,其预测值最大相对误差

5.21%,平均相对误差2.04%,相关系数0.9961,具有较高的预测精度。

参考文献

- [1] BOEHLERT C J, LONGANBACH S C. A comparison of the microstructure and creep behavior of cold rolled HAYNES 230 alloy and HAYNES 282 alloy [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2011, 528(15): 4888-4898.
- [2] BUCKSON R A, OJO O A. Cyclic deformation characteristics and fatigue crack growth behaviour of a newly developed aerospace superalloy Haynes 282 [J]. *Materials Science and Engineering A*, 2012, 555(15): 63-70.
- [3] LIN Y C, NONG F Q, CHEN X M, et al. Microstructural evolution and constitutive models to predict hot deformation behaviors of a nickel-based superalloy [J]. *Vacuum*, 2017, 137: 104-114.
- [4] CHEN R C, HONG C, LI J J, et al. Austenite grain growth and grain size distribution in isothermal heat-treatment of 300M steel [J]. *Procedia Engineering*, 2017, 207: 663-668.
- [5] CHEN L, CHENG Q, ZHU F, et al. Grain growth behavior of a Ni-Cr based superalloy GH4033 in reheating process prior to hot rolling [C]. *The 8th Pacific Rim International Congress on Advanced Materials and Processing*, 2013.
- [6] KAI Song, MARK Aindow. Grain growth and particle pinning in a model Ni-based superalloy [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2007, 479(1).
- [7] 蒋世川, 张健, 刘庭耀, 等. 固溶处理对GH3128合金奥氏体晶粒长大的影响[J]. *钢铁钒钛*, 2019, 40(5): 150-156.
- JIANG Shichuan, ZHANG Jian, LIU Tingyao, et al. Effect of solution heat treatment on the austenitic grain growth of GH3128 alloy [J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2019, 40(05): 150-156.
- [8] 陈小敏, 蔺永诚, 胡宏伟, 等. 镍基合金完全再结晶后的晶粒长大行为研究[J]. *精密成形工程*, 2021, 13(1): 72-77.
- CHEN Xiaomin, LIN Yongcheng, HU Hongwei, et al. Grain growth behavior after full recrystallization in a nickel-based superalloy [J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2021, 13(1): 72-77.
- [9] SELLARS C M, WHITEMAN J A. Recrystallization and grain growth in hot rolling [J]. *Metal Science Journal*, 1978, 13(3-4): 187-194.
- [10] LAN Y J, LI D Z, LI Y Y. A mesoscale cellular automaton model for curvature-driven grain growth [J]. *Metallurgical & Materials Transactions B*, 2006, 37(1): 119-129.
- [11] GIL F J, PLANELL J A. Grain growth kinetic of the near alpha titanium alloys [J]. *Journal of Materials Science Letters*, 2000, 19(22): 2023-2024.
- [12] ZHANG S S, LI M Q, LIU Y G, et al. The growth behavior of austenite grain in the heating process of 300M steel [J]. *Materials Science & Engineering A*, 2011, 528(15): 4967-4972.
- [13] LEE S B, YOON D Y, Henry M F. Abnormal grain growth and grain boundary faceting in a model Ni-base superalloy [J]. *Acta Materialia*, 2000, 48(12): 3071-3080.
- [14] XU W, ZHOU L, HUA Y, et al. Effect of second phase on grain growth of spray formed superalloy GH742y [J]. *Rare Metals*, 2011, 30(1 Supplement): 392-395.
- [15] BERDICHEVSKY V L. Thermodynamics of microstructure evolution: Grain growth [J]. *International Journal of Engineering Science*, 2012, 57: 50-78.
- [16] YU B Z, GODFREY A, MIODOWNIK M A, et al. Generation of initial microstructures for monte carlo potts model simulations of quasi-binary grain growth [J]. *Materials Science Forum*, 2007, 558-559: 821-824.
- [17] WEN D X, LIN Y C, CHEN M S. Study of hot deformation behavior in GH4169 superalloy [J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 712-715(1): 658-661.