

耐热不锈钢晶粒生长修正模型研究

郑海生¹ 申道明² 闫金友³

(1 新乡职业技术学院, 信息中心, 新乡 453000)

(2 新乡学院, 土木工程与建筑学院, 新乡 453000)

(3 新乡职业技术学院, 智能制造学院, 新乡 453000)

文 摘 为了研究 45Cr14Ni14W2Mo 耐热不锈钢晶粒生长行为及其数学模型,进行了晶粒生长试验。定性分析了微观组织形貌,确定温度在 1 100~1 200 K 内,耐热不锈钢晶粒呈现为等轴晶;而温度在 1 300~1 400 K 内,则表现为混晶形态。同时,还定量分析了平均晶粒尺寸,并深入探讨了保温时间和温度对耐热不锈钢晶粒生长行为的具体影响。针对耐热不锈钢晶粒的生长规律,基于传统的 Sellar 和 Beck 模型,提出并计算了一个修正的晶粒生长数学模型,用以表征和预测耐热不锈钢晶粒的生长行为。结果显示,该修正模型相较于传统模型,在预测精度上具有显著优势。

关键词 耐热不锈钢,晶粒生长,修正,数学模型

中图分类号: TG146. 1

DOI: 10.12044/j.issn.1007-2330.2025.03.003

Research on Modified Grain Growth Model of Heat-resistant Stainless Steel

ZHENG Haisheng¹ SHEN Daoming² YAN Jinyou³

(1 Information Center, Xinxiang Vocational and Technical College, Xinxiang 453000)

(2 College of Civil and Architecture, Xinxiang University, Xinxiang 45300)

(3 Intelligent Manufacturing Department, Xinxiang Vocational and Technical College, Xinxiang 453000)

Abstract To investigate the grain growth behavior and its mathematical model of 45Cr14Ni14W2Mo heat-resistant stainless steel, grain growth experiments were conducted. A qualitative analysis of the microstructure morphology was performed, revealing that the grains of the heat-resistant stainless steel exhibited an equiaxed grain structure within the temperature range of 1 100 to 1 200 K, whereas the grains exhibited a mixed grain structure within the temperature range of 1 300 to 1 400 K. Additionally, a quantitative analysis of the average grain size was conducted, and the specific effects of holding time and temperature on the grain growth behavior of the heat-resistant stainless steel was thorough discussed. Based on the traditional Sellar and Beck model, a modified mathematical model for grain growth was proposed and calculated to characterize and predict the grain growth behavior of the heat-resistant stainless steel. The results show that the modified model exhibits significant advantages in prediction accuracy compared to the traditional model.

Key words Heat-resistant stainless steel, Grain growth, Modified, Mathematics model

0 引言

作为一种高端耐热材料,45Cr14Ni14W2Mo 耐热不锈钢展现出卓越的高温稳定性和耐腐蚀性能,适合在严苛的高温环境中持续作业,并被广泛应用于航空、航天、兵器工业、核工业及石油化工等关键领

域^[1]。为提升其可加工性,45Cr14Ni14W2Mo 耐热不锈钢常采用热镦、热锻及热挤压等热成型工艺进行加工^[2]。在热成型过程中,该耐热不锈钢不仅宏观形状会发生变化,其微观组织也会发生演变^[3]。在高温条件下进行热成型或热处理时,耐热不锈钢的原子

收稿日期: 2024-04-06

基金项目: 国家自然科学基金(41877251), 河南省科技攻关项目(242102321100), 河南省科技攻关项目(232102230118)

第一作者简介: 郑海生, 1973 年出生, 高级讲师, 主要从事先进金属材料成型工艺及数值模拟研究工作。E-mail: xxvtzhs@dingtalk.com

活动性增强,扩散速率加快,这促进了晶界的移动,导致晶粒尺寸增大,即发生晶粒生长现象^[4]。晶粒生长可能会导致材料的力学性能改变,如强度和韧性等显著下降,疲劳寿命缩短,以及应力腐蚀开裂的风险增加^[5]。因此,研究耐热不锈钢晶粒生长行为,是实现材料微观组织演变分析及调控的基础,直接关系到材料及制品的综合力学性能,具有极其重要的意义。

为定量分析和描述材料的晶粒生长行为,研究者们开发了一系列典型的晶粒生长数学模型,诸如 Sellar 模型^[6-7]、JMAK 模型^[8]以及 Beck 模型^[9-12]等。JMAK 模型专注于描述温度变化过程中晶粒的形核与生长现象。而 Sellar 模型和 Beck 模型则均可用于表征和预测等温条件下的晶粒生长行为,两者均纳入了温度对晶粒生长速率的影响,认为晶粒生长随温度升高而加速。不同之处在于,Sellar 模型额外考虑了初始晶粒尺寸的影响,而 Beck 模型则未明确将初始晶粒尺寸纳入考量,尽管如此,Sellar 模型却忽略了时间因子的作用。这些模型各具特色,适用于不同材料及研究目的,研究者在实际操作中会根据材料的特性和研究需求来选定合适的模型。然而,这些模型通常拥有固定的表达形式,一方面未能全面深入地考虑各种影响因素,另一方面,鉴于不同材料展现出各异的晶粒生长特性,这些模型的表征及预测精度难以满足各类材料的具体需求。因此,为更精确地描述和预测材料在高温状态下的晶粒生长行为,进而更深入地理解和控制材料的微观组织及力学性能,有必要根据实际情况对晶粒生长数学模型进行适当的修正。

本文主要探究 45Cr14Ni14W2Mo 耐热不锈钢晶粒生长行为。为全面理解该材料的晶粒生长规律与机理,精心设计并实施一系列涵盖广泛温度和时间范围的晶粒生长试验,并据此收集大量关于 45Cr14Ni14W2Mo 耐热不锈钢微观组织形貌及晶粒尺寸的详细数据。通过对其微观结构的细致观察与晶粒尺寸的精确测量,从定性和定量两个维度揭示耐热不锈钢晶粒生长的内在规律与机制。为促进晶粒生长模型在实际中的应用,对传统晶粒生长模型进行优化,开发出专门适用于 45Cr14Ni14W2Mo 耐热不锈钢在等温条件下晶粒生长行为的新数学模型。通过对比模型预测数据与实验结果,验证该模型的可靠性,拟为耐热不锈钢的热成型、热处理工艺的制定以及微观组织的控制提供坚实的理论支撑与应用指导。

1 晶粒生长试验

45Cr14Ni14W2Mo 耐热不锈钢(以下简称“耐热不锈钢”)的化学成分(wt%)为 Cr-45.24、Ni-14.64、

W-14.12、Mo-2.22、C-0.72、Si-0.59、Mn-0.52、P-0.44、S-0.25 和 Fe(余量)。如图 1 所示,室温下耐热不锈钢的原生组织以等轴晶为主,并伴有少量黑色析出相,平均晶粒尺寸为 24.5 μm 。为研究耐热不锈钢晶粒的生长行为,开展晶粒生长试验。首先,将耐热不锈钢棒材加工成 $\Phi 6\text{ mm}\times 9\text{ mm}$ 的圆柱形试样,并对其进行清洁与干燥处理。随后,将试样置于熔金炉中,以 0.2 K/s 的速度分别升温至 1 100、1 200、1 300 和 1 400 K,加热至指定温度后保温 300 s,使试样也达到该温度,保温 300 s 后再在该温度下保持 0、2 400、4 800 或 7 200 s。试验流程如图 2 所示。保温完成后立刻进行油淬以保存试样在保温结束时的微观组织形貌及尺寸。再对试样进行粗磨、精磨、抛光等预处理,并完成表面腐蚀后,利用金相显微镜对其微观结构进行观察和记录。获得金相照片后可在商业软件(如 Photoshop、VectorMagic、Image Pro Plus)中手动或自动地进行杂质过滤、晶界修复等图像处理过程,提取出金相照片中的晶界。然后通过晶粒尺寸统计软件 Image Pro Plus 进行标尺定义、晶粒识别、晶粒尺寸数据统计和转换,获得金相照片中各晶粒面积数据并通过圆面积和直径转换关系将其转化为各晶粒直径数据,这些晶粒直径的平均值即为平均晶粒尺寸。

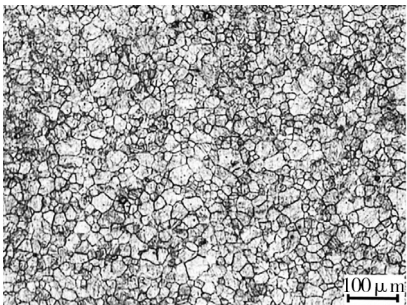


图1 耐热不锈钢原始微观组织

Fig. 1 Initial microstructure of heat-resistant stainless steel

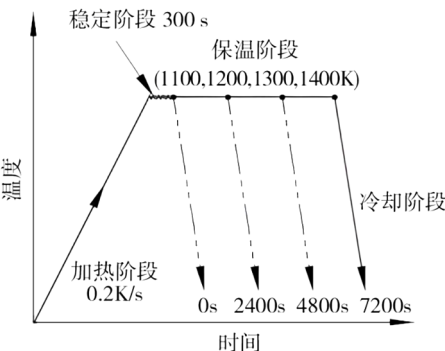


图2 耐热不锈钢晶粒生长试验流程

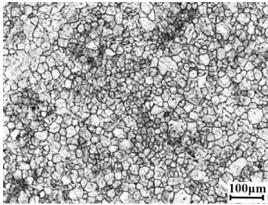
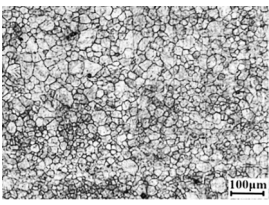
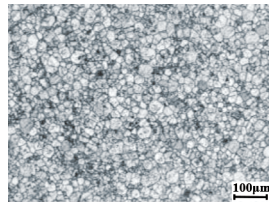
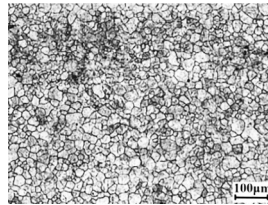
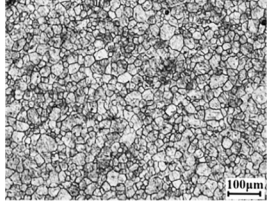
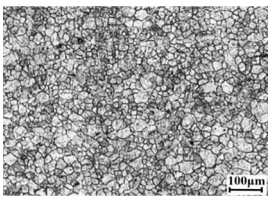
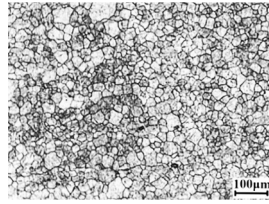
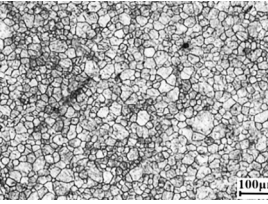
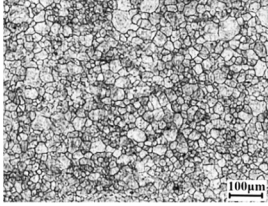
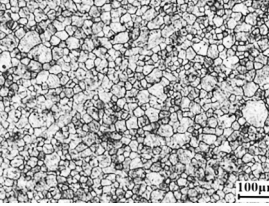
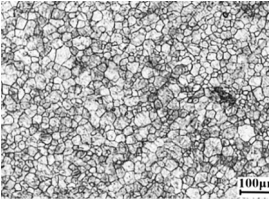
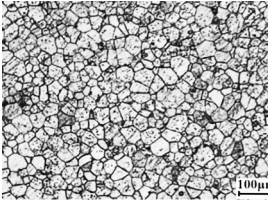
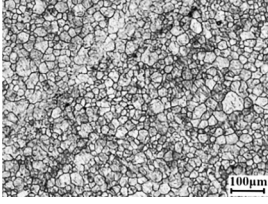
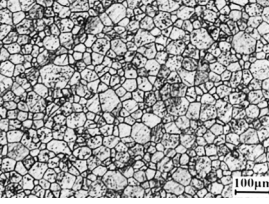
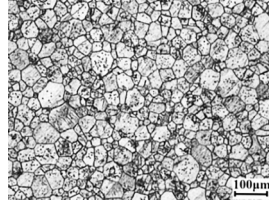
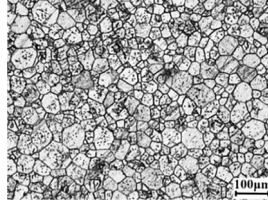
Fig. 2 Grain growth experiments processes of heat-resistant stainless steel

2 结果与讨论

2.1 晶粒生长试验结果

表1展示了耐热不锈钢在1 100~1 400 K、0~7 200 s试验条件下的金相照片。从表1中的耐热不锈钢微观组织形貌能够看出,在1 100~1 200 K温度区间内,晶粒呈现出类似于原始晶粒的尺寸较小且相对均匀的等轴形态,此时晶粒未发生明显的生长;

表1 不同试验条件下耐热不锈钢的微观组织

Tab. 1 The microstructures of heat-resistant stainless steel under different experimental conditions	
保温温度/K	微观组织
	0 s2400 s4800 s7200 s
1 100	   
1 200	   
1 300	   
1 400	   

对晶粒生长试验条件下的平均晶粒尺寸进行统计,具体数据列于表2中。

表2 晶粒生长试验条件下试样的平均晶粒尺寸
Tab. 2 The average grain sizes of the samples under grain growth experiment conditions

保温温度/K	晶粒尺寸/ μm			
	0 s	2400 s	4800 s	7200 s
1100	24.81	26.00	26.80	26.84
1 200	27.53	30.85	33.16	34.74
1300	30.28	37.45	40.55	43.61
1 400	34.83	45.42	51.99	54.81

2.2 保温时间对晶粒生长的影响

在耐热不锈钢晶粒生长试验中,将在指定温度下稳定阶段(保温300 s)结束后的试样状态视为在该宇航材料工艺 <http://www.yhclgy.com> 2025年 第3期

而在1 300~1 400 K的温度区间内,一些晶界开始缓慢移动并相互融合,导致小晶粒逐渐消失并合并成较大的晶粒。这一过程最终导致了大尺寸晶粒的形成,与那些未经历生长或生长程度较轻的小晶粒共同形成混晶形态。这是由于在较高温度下,晶粒生长加剧,但各晶粒生长速率不同,晶粒尺寸出现一定差异,晶粒尺寸不均匀性增加。

温度下的初始恒温状态,该状态下的平均晶粒尺寸为该温度条件下的原始晶粒尺寸。根据表2中的数据可以发现,在不同的保温温度下开始保温时耐热不锈钢平均晶粒的尺寸已升高至24.81~34.83 μm 不等。与原材料的平均晶粒尺寸(24.5 μm)相比较,揭示了在能够促进晶粒生长的高温环境中,晶粒在试样加热升温过程中已经经历了一定程度的生长。晶粒生长过程的核心在于晶界迁移,这种晶界迁移依赖于原子的扩散,其背后的驱动力源自晶界总长度的缩减,这与晶界能的降低密切相关^[13-14]。在高温环境下,原子扩散速率加快,晶界迁移更为活跃和频繁,促进了晶界能的进一步降低,从而使晶界总长度减少,晶粒尺寸相应增加。图3为平均晶粒尺寸和保温时间的映射关系。由图3可知,平均晶粒尺寸和

保温时间的关系曲线是典型的抛物线形曲线。在保温过程中,晶粒的大小随着保温的持续进行而逐渐增长,当保温时间达到7 200 s时,晶粒明显生长,晶粒尺寸达到26.84~54.81 μm 。同时,晶粒生长的速率随着时间的推移而逐步减缓。

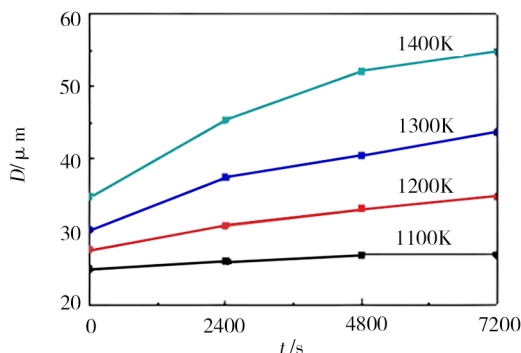


图3 耐热不锈钢平均晶粒尺寸随保温时间的变化

Fig. 3 The variation of the average grain size of heat-resistant stainless steel with holding time

2.3 保温温度对晶粒生长的影响

图4展示了晶粒尺寸随保温温度的变化趋势。

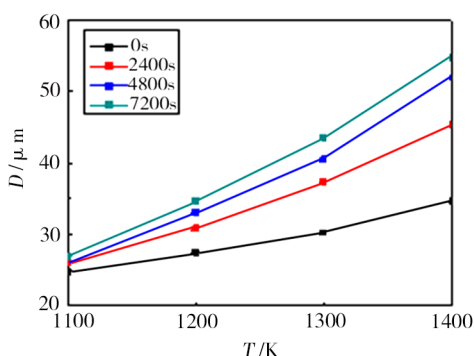


图4 耐热不锈钢平均晶粒尺寸随保温温度的变化

Fig. 4 The variation of the average grain size of heat-resistant stainless steel with holding temperature

从图中可以清晰地观察到,当保温时间保持不变时,温度的升高显著促进了晶粒尺寸的增长。这是因为保温温度的增加直接影响了原子运动的活跃程度,进而提升了晶界移动的速率,促进了晶界的合并及晶界总长度的减少,导致晶粒的生长。

3 晶粒生长模型的修正与评价

3.1 晶粒生长模型的修正

材料在等温状态下的晶粒生长特性目前主要通过两种经典数学模型进行描述。其中一种是如式(1)所描述的Sellar模型,它系统地分析了保温时间、温度和晶粒生长前尺寸对晶粒生长行为的影响,假设晶粒尺寸与保温时间之间仅存在线性关系;另一种模型是Beck模型,如式(2)所示,该模型在分析中

完全忽略了晶粒生长前尺寸对晶粒生长的潜在影响。

$$D_g^n = D_0^n + At \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

$$D_g = At^m \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

式中, D_g 代表晶粒生长后的平均晶粒直径, D_0 代表晶粒生长前的平均晶粒直径, t 是保温持续时间, T 表示保温过程中的温度, R 是理想气体常数, Q 是晶粒生长所需的激活能, A 、 n 和 m 则是模型中需要求解的常数。

耐热不锈钢晶粒生长规律分析结果揭示,保温温度和时间对耐热不锈钢的晶粒生长行为具有较为显著的影响。众多研究亦证实,最终的晶粒尺寸也受初始晶粒尺寸的影响,尤其是最终的晶粒尺寸和初始晶粒尺寸数量级无显著差别时,不可忽略其影响^[15]。因此,为了构建精确的晶粒生长模型,必须全面评估初始晶粒尺寸、保温温度和保温时长对晶粒生长过程的综合效应。同时,耐热不锈钢晶粒尺寸随保温时间的增长遵循抛物线规律,这与Sellar模型所假设的线性关系模式存在差异。因此,结合Sellar和Beck两种模型的优势,将Beck模型中的指数 m 纳入Sellar模型,是提升模型晶粒生长预测准确性的有效策略。在本研究中,采用 m 作为保温时间的指数因子。通过确定合适的模型参数,即可更精确地考虑各种影响因素,全面揭示耐热不锈钢晶粒生长的规律。改进后的晶粒生长模型见式(3)。

$$D_g^n = D_0^n + At^m \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (3)$$

3.2 晶粒生长模型的计算

对式(3)进行对数转换,可以得到式(4)的对数形式。

$$\ln(D_g^n - D_0^n) = \ln A + m \ln t - \frac{Q}{RT} \quad (4)$$

根据式(4)可以推导出:在给定常数 n 以及保温时间 t 或保温温度 T 的条件下,指数 m 和激活能 Q 能够通过式(5)–(6)来表达,并通过线性回归分析的方法来确定。

$$m = \frac{\partial \ln(D_g^n - D_0^n)}{\partial (\ln t)} \Big|_T \quad (5)$$

$$Q = \frac{\partial \ln(D_g^n - D_0^n)}{\partial (-1/RT)} \Big|_t \quad (6)$$

通过将激活能 Q 和指数 m 的数值输入式(3),可以计算出在不同条件下的 A 值。随后,将计算的不同保温温度和时间条件下的 A 值的平均值作为 A 的最终取值。

以上求解思路假设了常数 n 的值为已知且固定,

但实际上 n 的确切值是未知的,通常 n 取 0~10 的正数。为了解决这一问题,选取了 1~16 间的整数作为 n 的可能值,并运用上述的求解方法来确定晶粒生长激活能 Q 、常数 n 和 A 。然后,利用式(7)中定义的平均绝对相对误差(AARE)^[16]来评估不同 n 值下晶粒生长模型的精度。AARE 值的大小体现了模型预测的晶粒尺寸与试验测量得到的平均晶粒尺寸之间的差异程度,AARE 值越低,表示模型具有更高的精度。经计算获得 AARE 随 n 值的变化关系如图 5 所示。通过拟合 AARE- n 数据点形成的平滑曲线,可以观察到 AARE 在 n 值增加的初期有所降低,但随着 n 值的进一步增加,AARE 又开始上升。AARE- n 曲线在点 (7.71, 0.91%) 处演化至最低水平,表明当 $n=7.71$ 时,模型精度达到最高,此时对应的 AARE 为 0.91%。

$$AARE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{B_i - A_i}{A_i} \right| \times 100\% \quad (7)$$

式中, A 表示通过试验测量得到的平均晶粒尺寸, B 代表晶粒生长模型预测的晶粒尺寸, N 表示用于预测的数据点总数。

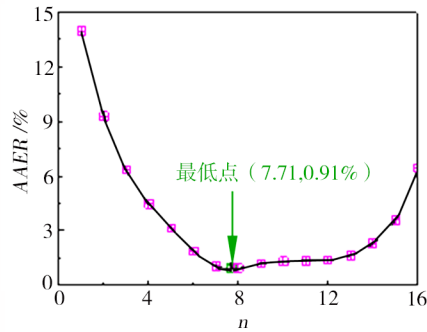


图 5 AARE 随 n 值的变化关系
Fig. 5 The variation of AARE with n -value

假设 $n=7.71$,对修正的晶粒生长模型中的参数进行计算。所得到的线性关系,即 $\ln(D_g^n - D_0^n)$ 与 $-1/RT$ 的线性拟合结果展示于图 6 中。通过拟合直线得到的直线斜率代表了在对应于各保温时间时的晶粒生长激活

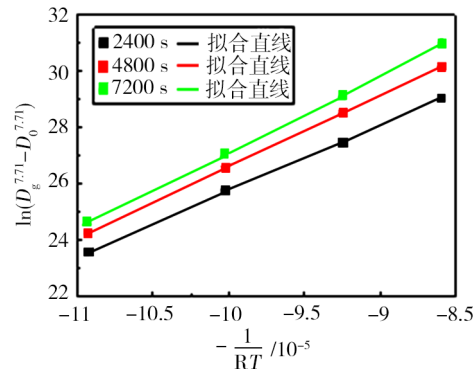


图 6 $\ln(D_g^n - D_0^n)$ 和 $-1/RT$ 的关系
Fig. 6 The relationship between $\ln(D_g^n - D_0^n)$ and $-1/RT$

能 Q ,这些斜率的平均值将被作为晶粒生长激活能 Q 的最终确定值。同理,图 7 所示的 $\ln(D_g^n - D_0^n)$ 与 $\ln t$ 线性关系的拟合直线斜率的平均值可认定为 m 值。通过计算,确定 Q 值和 m 值分别为 $Q=252.959$ kJ/mol, $m=1.236$ 。将 Q 和 m 的值代入式(3)可得到 A 及其平均值,最终确定 $A=1.1369 \times 10^{18}$ 。

通过上述计算,晶粒生长模型如式(8)所示。

$$D_g^{7.71} = D_0^{7.71} + 1.1369 \times 10^{18} t^{1.236} \exp\left(-\frac{252959}{RT}\right) \quad (8)$$

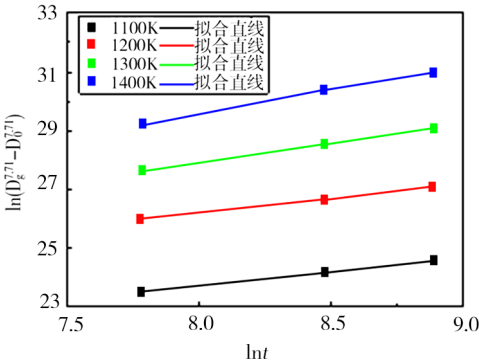


图 7 $\ln(D_g^n - D_0^n)$ 和 $\ln t$ 的关系
Fig. 7 The relationship between $\ln(D_g^n - D_0^n)$ and $\ln t$

3.3 晶粒生长模型的评价

应用所开发的晶粒生长模型,对耐热不锈钢晶粒尺寸进行了预测。基于这些预测结果,得出预测结果的 AARE 值为 1.03%,这一数值低于所有整数 n 值对应的 AARE 值。这进一步支持了 n 取 7.71 时模型精度最高的结论。从图 8 可以看出,模型预测的晶粒尺寸与试验测量结果高度一致,这表明开发的晶粒生长模型能够有效地抓住耐热不锈钢的晶粒生长规律并进行精确预测。

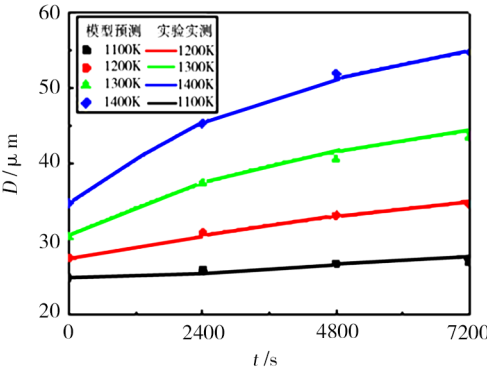


图 8 计算和实测结果的比较
Fig. 8 The comparisons between the measured and calculated results

基于晶粒生长试验数据及式(1)-(2)中 Sellar 模型和 Beck 模型的形式,通过回归分析计算了耐热不锈钢晶粒生长过程的 Sellar 模型和 Beck 模型,计算结果见式(9)-(10)。

$$D_g^{2.25} = D_0^{2.25} + 72478t \exp\left(-\frac{126716}{RT}\right) \quad (9)$$

$$D_g = 468.35t^{0.01187} \exp\left(-\frac{27301}{RT}\right) \quad (10)$$

应用所开发的 Sellar 模型和 Beck 模型对晶粒尺寸进行了预测。结果显示,修正的晶粒生长模型的 AARE 值低至 1.04%,而传统的 Sellar 和 Beck 模型的 AARE 值则分别为 5.20% 和 4.58%。在图 9 中,横轴表示试验测量的晶粒尺寸,纵轴表示三种模型的计算结果。图中各点与 45° 线的偏离程度揭示了试验数据与模型预测之间的相关性。通过图 9 可以发现,修正模型的预测结果与理想值更为接近,显示出较高的一致性。相比之下,Sellar 模型和 Beck 模型的预测点距离 45° 线更远。为进一步评估模型的精度,引入了式(11)中定义的相关系数(R)^[17]。计算结果显示,Sellar 模型、Beck 模型和修正模型的相关系数(R)分别为 0.982 4、0.985 5 和 0.998 4。这些数值表明,针对耐热不锈钢晶粒生长行为的修正模型在预测精度上优于传统的 Sellar 和 Beck 模型。

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (A_i - \bar{A})(B_i - \bar{B})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (A_i - \bar{A})^2 \sum_{i=1}^N (B_i - \bar{B})^2}} \quad (11)$$

式中, $\bar{A}$ 和 $\bar{B}$ 分别代表试验测量得到晶粒尺寸的平均值与模型计算所得晶粒尺寸的平均值。

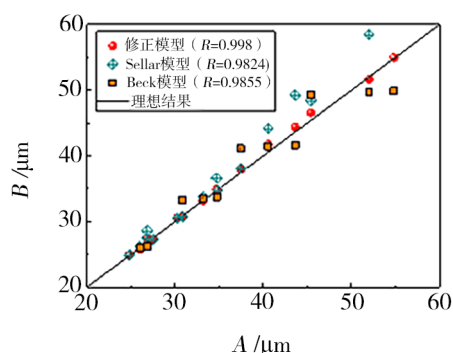


图9 修正模型、Sellar模型和Beck模型预测结果对比

Fig. 9 Comparisons of prediction results among the modified model, Sellar model and Beck model

4 结论

(1) 45Cr14Ni14W2Mo 耐热不锈钢在 1 100~1 200 K 内晶粒生长程度小,微观组织表现为等轴晶;在 1 100~1 200 K 内晶粒生长明显,微观组织表现为混晶。

(2) 耐热不锈钢晶粒的尺寸随着保温温度的升高和保温时间的延长而增大。晶粒生长速度随着时间的推移逐渐减缓。

(3) 根据耐热不锈钢晶粒的生长规律,在 Sellar 型和 Beck 型晶粒生长模型的基础上,提出并计算了

修正的晶粒生长模型。通过对模型的评价,发现该模型对耐热不锈钢晶粒生长行为展现出较高的预测精度。

参考文献

- [1] 包文全,刘桂江,杨建华,等. 热处理对 45Cr14Ni14W2Mo 钢组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2016, 41(5): 153-155.
- [2] BAO W Q, LIU G J, YANG J H, et al. Influence of heat treatment on the microstructure and properties of 45Cr14Ni14W2Mo steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2016, 41(5): 153-155.
- [3] 陈诗荪,李保民,齐向华. 加热温度和压缩变形对 4Cr14Ni14W2Mo 钢晶粒大小的影响[J]. 西北工业大学学报, 1986, 4(3): 253-259.
- [4] CHEN S S, LI B M, QI X H. Effect of heating temperature and compression deformation on grain size of 4Cr14Ni14W2Mo steel [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 1986, 4(3): 253-259.
- [5] 梅荣,任志俊,仇伟. 06Cr18Ni11Ti 奥氏体不锈钢热变形行为研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2019, 42(6): 88-92.
- [6] MEI R, REN Z J, CHOU W. Hot deformation behavior of 06Cr18Ni11Ti austenitic stainless steel [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2019, 42(6): 88-92.
- [7] 宋逸思,李传维,李克等. 0Cr16Ni5Mo1 马氏体不锈钢奥氏体晶粒生长行为[J]. 材料热处理学报, 2023, 44(12): 136-143.
- [8] SONG Y S, LI C W, LI K, et al. Austenite grain growth behavior in 0Cr16Ni5Mo martensitic stainless steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2023, 44(12): 136-143.
- [9] 吴跃. Super304H 耐热钢时效过程中的奥氏体晶粒长大及力学性能[J]. 金属热处理, 2023, 48(1): 105-111.
- [10] WU Y. Austenite grain growth and mechanical properties during the aging process of Super304H heat-resistant steel [J]. Heat Treatment of Metals, 2023, 48(1): 105-111.
- [11] SELLARS C M, WHITEMAN J A. Recrystallization and grain growth in hot rolling[J]. Metal Science Journal, 1978, 13(3/4): 187-194.
- [12] QUAN G Z, ZHANG P, YAO-YAO M A, et al. Characterization of grain growth behaviors by BP-ANN and sellars models for nickle-base superalloy and their comparisons [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30(9): 2435-2448.
- [13] GUO L, ZHU Q, CHEN Z, et al. Non-isothermal crystallization kinetics of Fe76Ga5Ge5B6P7Cu1 alloy [J]. acta Metallurgica Sinica, 2022, 58(6): 799-806.
- [14] LINZHEN L, GENGWEI Y, CHENGKE D, et al. Austenite grain growth behavior and mathematical model of 30CrMo Steel[J]. Shanghai Metals, 2016, 38(6): 16-19.
- [15] 周红,陶龙杰,李智丽,等. 0.22C-0.45Mn 钢低温奥氏体晶粒长大行为的研究[J]. 安徽工业大学学报:自然科学

版,2023,40(1):52-58.

ZHOU H, TAO L J, LI Z L, et al. A study of grain growth behavior of cryogenic austenite in 0.22C-0.45Mn steel [J]. Journal of Anhui University of Technology (Natural Science), 2023,40(1):52-58.

[11] 叶青, 谌颖, 陈博, 等. Haynes 282 新型高温合金晶粒长大行为及数学模型研究[J]. 宇航材料工艺, 2022, 52(5): 35-42.

YE Q, CHEN Y, CHEN B, et al. Study on the grain growth behavior and mathematical model of a new-type superalloy haynes 282 [J]. Aerospace Materials & Technology, 2022, 52(5):35-42.

[12] NAJAFKHANI F, KHEIRI S, POURBAHARI B, et al. Recent advances in the kinetics of normal/abnormal grain growth: A review [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2021, 21:1-20.

[13] 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.

[14] SIRADJ E S. Evaluation of austenite grains growth in high Nb and low Nb HSLA steel [J]. Materials Science Forum, 2020, 1000:404-411.

[15] BERDICHEVSKY V L. Thermodynamics of microstructure evolution: Grain growth [J]. International Journal of Engineering Science, 2012, 57:50-78.

[16] YU G L. Two flowing stress models for hot deformation of XC45 steel at high temperature [J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 534(1):101-110.

[17] 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.