



40CrNiMoA 合金结构钢奥氏体晶粒长大行为

周 民¹, 古佐鸿¹, 刘 明², 谭光耀¹, 冉 蓉¹

(1 中冶赛迪技术研究中心有限公司, 钢铁材料研究所, 重庆 401122;

2 中冶赛迪装备有限公司产品设计研究院, 重庆 401122)

摘要:奥氏体晶粒尺寸是影响40CrNiMoA合金结构钢强度和韧性的重要因素。为充分挖掘40CrNiMoA钢的性能潜力,有必要从奥氏体化阶段研究其晶粒演变行为。利用高温激光共聚焦显微镜,研究了加热温度和保温时间对40CrNiMoA钢奥氏体晶粒长大行为的影响规律,进一步建立了奥氏体晶粒长大模型。结果表明,随着加热温度的升高或者保温时间的延长,40CrNiMoA钢的奥氏体平均晶粒尺寸呈持续长大趋势。建立了描述40CrNiMoA钢奥氏体晶粒长大行为的Beck、Hillert和Sellars模型。拟合结果表明:Beck模型的预测值在低加热温度时低于实测值、高加热温度时高于实测值,Hillert模型的预测值显著高于实测值,而Sellars模型则具有良好的拟合效果,可为实际生产中制定40CrNiMoA钢的加热工艺提供依据。

关键词:40CrNiMoA; 合金结构钢; 原位观察; 奥氏体晶粒; 晶粒长大模型

DOI:10. 20057/j. 1003-8620. N250578 **中图分类号:**TG142. 1

Austenite Grain Growth Behavior of 40CrNiMoA Alloy Structural Steel

Zhou Min¹, Gu Zuohong¹, Liu Ming², Tan Guangyao¹, Ran Rong¹

(1 Ferrous Materials Research Division, CISDI Research and Development Co., Ltd., Chongqing 401122, China;

2 Product Design and Research Institute, CISDI Equipment Co., Ltd., Chongqing 402284, China)

Abstract: The austenite grain size is an important factor affecting the strength and toughness of 40CrNiMoA alloy structural steel. To fully explore the performance potential of 40CrNiMoA steel, it is necessary to investigate its grain evolution behavior during the austenitization process. Using a high-temperature laser confocal microscope, the effects of heating temperature and holding time on the austenite grain growth behavior of 40CrNiMoA steel were investigated, and the grain growth models were subsequently established. The results show that the average austenite grain size of 40CrNiMoA steel increases continuously with increasing heating temperature or prolonged holding time. Beck, Hillert and Sellars models were established to describe the austenite grain growth behavior of 40CrNiMoA steel. The fitting results indicate that the Beck model underestimates the measured values at lower heating temperatures but overestimates them at higher temperatures, while the Hillert model consistently predicts significantly higher values than the measured values. In contrast, the Sellars model exhibits an excellent agreement with the experimental results, providing a reliable basis for optimizing the heating process of 40CrNiMoA steel in practical production.

Key Words : 40CrNiMoA; Alloy Structural Steel; In-situ Observation; Austenite Grain; Grain Growth Model

40CrNiMoA合金结构钢,在调质处理后具有高强度、优良的冲击韧性和较低的缺口敏感性等诸多优点,被广泛应用于制造汽轮机轴、飞机起落架、柔轮、螺栓螺母、销钉等零部件^[1-3]。为了提高40CrNiMoA钢的综合力学性能,李子健等^[4]采用正交试验法研究了热处理工艺对40CrNiMoA钢性能的影响,确定该钢的最佳热处理工艺为淬火温度880℃,回火温度600℃。李世健等^[5]研究了回火温度对40CrNiMoA钢力学性能和显微组织的影

响,发现40CrNiMoA钢的抗拉强度和剪切强度随着回火温度的升高而降低,而塑性基本保持不变。支龙等^[6]研究了淬火温度对40CrNiMoA钢硬度的影响,发现该钢的硬度随淬火温度的升高先升高而后降低,并在870℃时达到最大值,确定了该钢最佳淬火温度为870℃。上述这些研究大多关注于热处理工艺参数对40CrNiMoA钢组织和性能的影响,而未关注材料的本质结构特征-原始奥氏体晶粒尺寸对力学性能的影响。根据钢的强韧化机

基金项目: 高端装备金属结构材料智能化自动实验技术装备与集成应用平台(2025ZD0619203)

作者简介: 周 民(1982—),男,博士,正高级工程师; **E-mail:** min.zhou@cisdi.com.cn; **收稿日期:** 2025-11-21

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

理可知,细化40CrNiMoA钢的原始奥氏体晶粒尺寸可以同时提高强度和韧性。Jiang等^[7]的研究表明,当40CrNiMoA钢的原始奥氏体晶粒尺寸由9.14 μm降低至4.51 μm时,抗拉强度和硬度分别由1 081 MPa和362HV显著提高至2 314 MPa和620HV。Chen等^[8]的研究也表明,细化40CrNiMoA钢的原始奥氏体晶粒尺寸可以显著提高硬度、抗拉强度和屈服强度。钢的奥氏体晶粒尺寸与加热工艺密切相关,为了精准控制40CrNiMoA钢的力学性能,有必要研究该钢在不同加热温度和保温时间下的奥氏体晶粒演变规律。

目前,常用的描述钢铁材料奥氏体晶粒长大过程的模型有Beck模型^[9-10]、Hillert模型^[11-12]和Sellers模型^[13-14]。尹超坤^[15]利用Beck模型描述了微钨合金钢的奥氏体晶粒长大行为,发现采用Beck模型具有良好的拟合精度;代智鹏等^[12]研究了Nb微合金化齿轮钢的奥氏体晶粒长大行为,并建立了不同温度下较细和较粗晶粒的晶粒长大Hillert模型,发现这样可以更加精准地对奥氏体晶粒尺寸进行预测;沈鑫珺等^[16]研究了风电齿轮箱用100CrMo7-3轴承钢的晶粒长大行为,建立了Sellers晶粒长大模型,发现该模型具有良好的拟合效果;邹扬等^[17]研究了水电用强度贝氏体钢的奥氏体晶粒长大行为,建立了相应的Beck、Hillert

和Sellers奥氏体晶粒长大模型,发现相比于Beck模型,Hillert模型和Sellers模型能够更加精准地描述奥氏体晶粒长大行为。为了更加精准地控制40CrNiMoA钢的显微组织,有必要分别建立该钢的三种奥氏体晶粒长大模型,并对拟合效果进行比较。

1 试验材料和方法

试验材料为φ110 mm的商用40CrNiMoA合金结构钢,表1为40CrNiMoA钢的化学成分。采用VL2000DX-SVF18SP高温激光共聚焦显微镜对40CrNiMoA钢的奥氏体晶粒演变过程进行原位观察。在实验用钢上切取φ5 mm×3 mm的高温激光共聚焦显微镜用试样,在实验之前,对试样进行机械研磨、抛光及超声波清洗。首先将试样置于刚玉坩埚中,再将坩埚放置于加热腔上方,将样品室抽真空后充入氩气并在实验过程中始终保持氩气微正压。具体的实验参数如下:将试样以200 K/min的速率加热至673 K,再以400 K/min的速率将试样分别加热至目标温度(1 223、1 273、1 323、1 373、1 423、1 473 K)并保温60 min,利用设备自带的显微成像系统记录保温过程中的奥氏体晶粒长大情况,拍照频率为每秒1张。利用Image Pro Plus软件,采用面积法测定不同加热条件下40CrNiMoA钢的奥氏体平均晶粒尺寸。

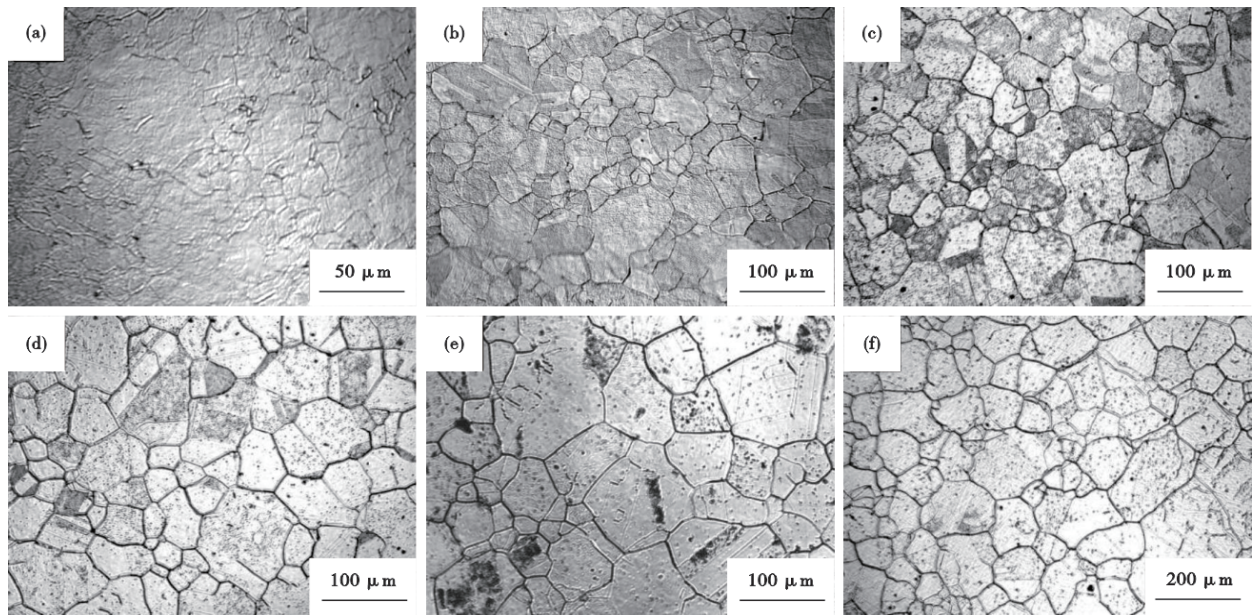


图1 保温时间为1 500 s时40CrNiMoA钢在不同加热温度下的奥氏体晶粒形貌:(a) 1 223 K, (b) 1 273 K, (c) 1 323 K, (d) 1 373 K, (e) 1 423 K, (f) 1 473 K
 Fig. 1 Austenite grain morphology of 40CrNiMoA steel at different heating temperatures at 1 500 s : (a) 1 223 K, (b) 1 273 K, (c) 1 323 K, (d) 1 373 K, (e) 1 423 K, (f) 1 473 K

表 1 试验用 40CrNiMoA 钢的化学成分 (质量分数)

Table 1 Chemical composition of the experimental 40CrNiMoA steel

| 40CrNiMoA steel | | | | | | | | | % |
|-----------------|------|------|-------|-------|------|------|------|----|---|
| C | Si | Mn | S | P | Cr | Ni | Mo | Fe | |
| 0.43 | 0.24 | 0.67 | 0.006 | 0.019 | 0.79 | 1.43 | 0.18 | 余量 | |

2 试验结果与分析

2.1 不同加热温度下 40CrNiMoA 钢的奥氏体晶粒长大行为

图 1 为保温时间 1 500 s 时,不同加热温度下 40CrNiMoA 钢的奥氏体晶粒形貌照片。图 2 展示了保温时间为 1 500 s 时,加热温度变化对 40CrNiMoA 钢奥氏体平均晶粒尺寸的影响。可见当加热温度 $\leq 1\ 373\ \text{K}$ 时,40CrNiMoA 钢的奥氏体晶粒长大比较缓慢;而当加热温度高于 1 373 K 时,奥氏体晶粒迅速长大,高温下晶界迁移能力的增强可能是奥氏体晶粒迅速长大的原因。

2.2 不同保温时间下 40CrNiMoA 钢的奥氏体晶粒长大行为

图 3 为 40CrNiMoA 钢在 1 373 K 加热温度下保温时间为 600、1 200、1 800、2 400、3 000、3 600 s 时的奥氏体晶粒形貌照片。可见在保温初期,奥氏体晶粒长大较快,而后长大趋势减缓。还可以看出,随着保温时间的延长,奥氏体晶粒逐渐变得

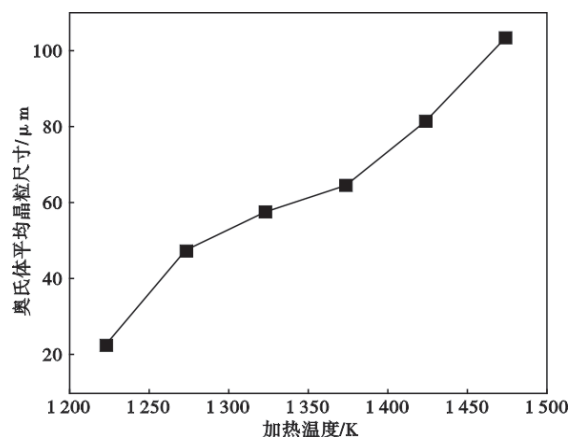


图 2 保温时间为 1 500 s 时奥氏体平均晶粒尺寸随加热温度的变化

Fig. 2 Average austenite grain size versus heating temperature at a holding time of 1 500 s

平直。

图 4 为加热温度为 1 223、1 273、1 323、1 373、1 423、1 473 K 时,40CrNiMoA 钢的奥氏体平均晶粒尺寸随保温时间的变化。可见随着保温时间的增加,40CrNiMoA 钢的奥氏体平均晶粒尺寸逐渐增加。

2.3 奥氏体晶粒长大模型的建立

2.3.1 Beck 模型的建立

在等温条件下,奥氏体平均晶粒尺寸与保温时

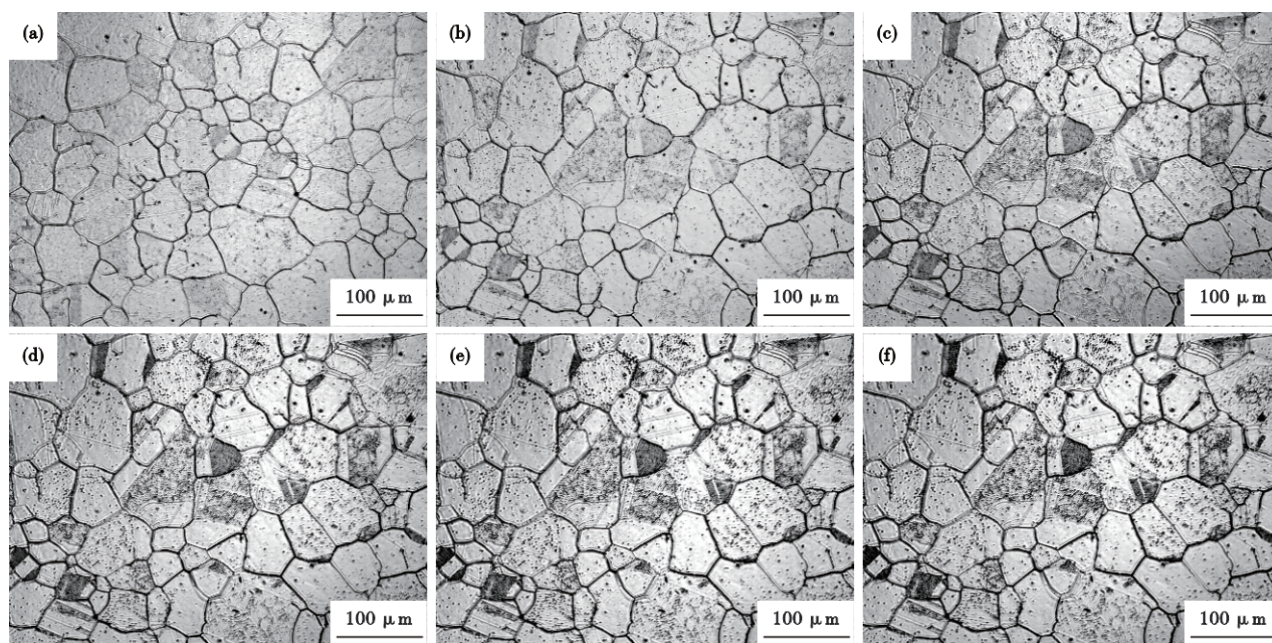


图 3 40CrNiMoA 钢在 1 100 °C 加热温度下保温不同时间的奥氏体晶粒形貌 : (a) 600 s, (b) 1 200 s, (c) 1 800 s, (d) 2 400 s, (e) 3 000 s, (f) 3 600 s

Fig. 3 Austenite grain morphology of 40CrNiMoA steel at 1 100 °C with different holding times : (a) 600 s, (b) 1 200 s, (c) 1 800 s, (d) 2 400 s, (e) 3 000 s, (f) 3 600 s

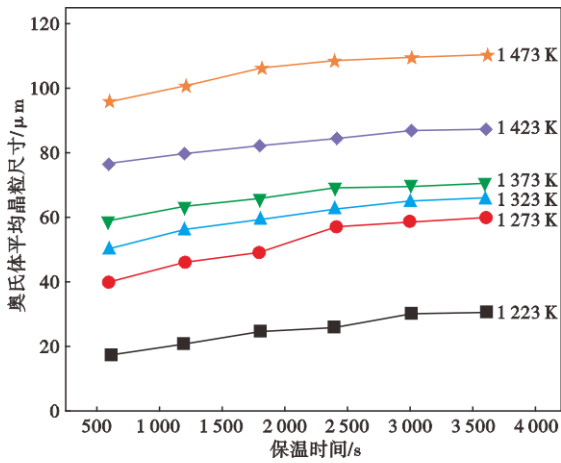


图4 40CrNiMoA 钢奥氏体平均晶粒尺寸随保温时间的变化
Fig. 4 Relationship between average austenite grain size of 40CrNiMoA steel and holding time

间的关系可用Beck 模型表征^[9-10].

$$D = Kt^n \quad (1)$$

式中, D 为奥氏体平均晶粒尺寸, μm ; t 为保温时间, s ; K 为晶粒生长速率, $\mu\text{m/s}$; n 为晶粒生长指数。 K 又可以表示为^[18]式(2)。

$$K = K_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (2)$$

式中, K_0 为材料常数; Q 为晶粒长大的激活能, J/mol ; R 为气体常数, $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为绝对温度, K 。

对式(1)取自然对数, 可得式(3)

$$\ln D = \ln K + n \ln t \quad (3)$$

根据不同加热温度下 $\ln D - \ln t$ 的关系图, 如图5所示, 可确定 n 值为各加热温度下拟合直线斜率的平均值, 由此可得 $n=0.17$ 。

对式(2)取自然对数, 可得式(4)

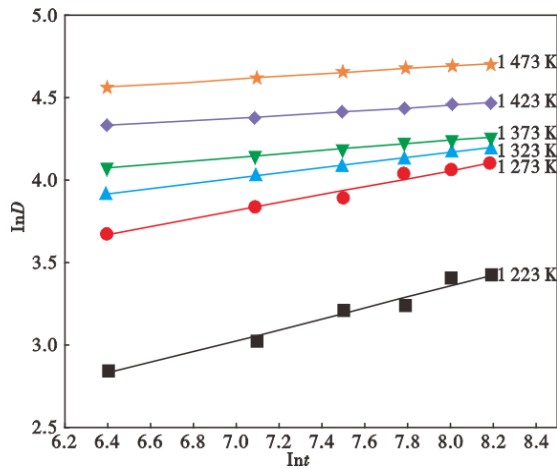


图5 $\ln D - \ln t$ 关系曲线
Fig. 5 Relationship between $\ln D$ and $\ln t$

$$\ln K = \ln K_0 - \frac{Q}{RT} \quad (4)$$

由图5可以获得不同加热温度下的 K 值。做 $\ln K - 1/T$ 散点图, 如图6所示, 并进行线性拟合, 由图6可以确定 $Q=193799 \text{ J/mol}$, $K_0=5.9 \times 10^8$ 。由此可以确定40CrNiMoA 钢的Beck 模型如式(5):

$$D = 5.9 \times 10^8 \exp\left(-\frac{193799}{RT}\right) t^{0.17} \quad (5)$$

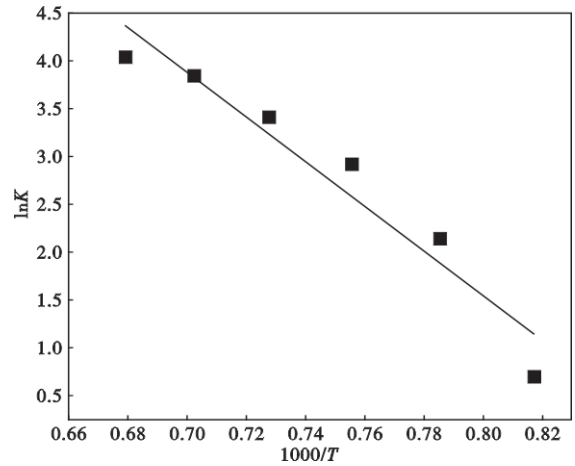


图6 $\ln K - 1000/T$ 关系曲线
Fig. 6 Relationship between $\ln K$ and $1000/T$

2.3.2 Hillert 模型的建立

当保温时间一定时, 奥氏体平均晶粒尺寸与加热温度之间的关系可用Hillert 模型描述^[19]:

$$D^2 - D_0^2 = C \exp\left[-\frac{Q}{RT}\right] t \quad (6)$$

式中, D_0 为奥氏体晶粒的初始尺寸, μm ; C 为材料常数。

由于本试验的升温速率较快, 因此, 可以忽略 D_0 的影响。式(6)可简化为:

$$D^2 = C \exp\left[-\frac{Q}{RT}\right] t \quad (7)$$

对式(7)两边同时取自然对数, 可得:

$$\ln D = \frac{1}{2} \ln C - \frac{1}{2} \frac{Q}{RT} + \frac{1}{2} \ln t \quad (8)$$

做40CrNiMoA 钢不同保温时刻对应的 $\ln D - 1000/T$ 散点图并进行线性拟合, 可得图7。由图7可计算出 $Q=153797 \text{ J/mol}$, $C=1.4 \times 10^7$ 。

由此可以获得40CrNiMoA 钢的Hillert 模型如式(9):

$$D^2 = 1.4 \times 10^7 \left[\exp\left(-\frac{153797}{RT}\right) \right] t \quad (9)$$

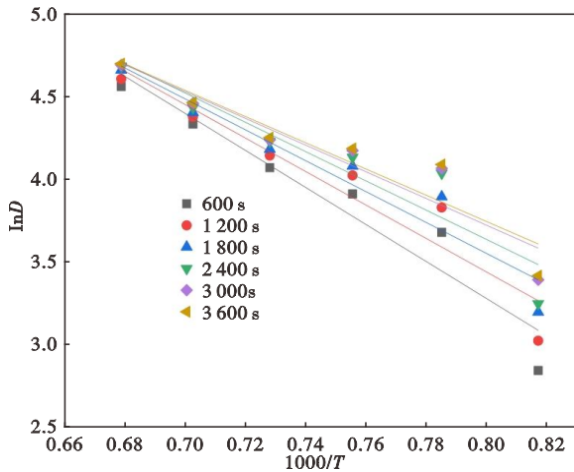


图7 lnD-1000/T关系曲线
Fig. 7 Relationship between lnD and 1000/T

2.3.3 Sellars 模型的建立

Sellars 模型可同时描述保温时间与加热温度对奥氏体平均晶粒尺寸的综合影响^[20]:

$$D^n - D_0^n = kt \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (10)$$

式中, D_0 为奥氏体晶粒的初始尺寸, μm ; n 和 k 为材料常数。

同样可以忽略 D_0 的影响, 式(10)可以化简为:

$$D^n = kt \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (11)$$

对式(10)取自然对数, 可得:

$$\ln D = \frac{\ln k}{n} + \frac{\ln t}{n} - \frac{Q}{nRT} \quad (12)$$

由式(12)可知, 当保温时间 t 一定时, $\ln D$ 与 $1/T$ 呈线性关系; 当加热温度 T 一定时, $\ln D$ 与 $\ln t$ 呈线性关系。由图 5 中 $\ln D - \ln t$ 的关系图可以确定不同加热温度下 Sellars 模型中的 n 值, 列于表 2 中。 n 值应取 6 条拟合直线斜率倒数的平均值, 由此可以求得 $n=8.05$ 。依据 $\ln D - 1000/T$ 的关系图, 可以确定不同保温时间下的 Q 值, 取 6 个保温时间下 Q 平均值可得 $Q=584\,247\text{ J/mol}$ 。利用全局算法可求得 $k=1.09 \times 10^{34}$ 。由此获得 40CrNiMoA 钢的 Sellars 模型:

$$D^{8.05} = 1.09 \times 10^{34} t \exp\left(-\frac{584\,247}{RT}\right) \quad (13)$$

2.3.4 三种模型拟合效果的比较

图 8 为三种模型的预测值(图中的实线)与实测值(图中的散点)的比较。可见 Hillert 模型的预测值显著高于实测值, 且加热温度越高, 预测值与实测值的差值就越大。Beck 模型的预测值在低加热温度时小于实测值, 高加热温度时大于实测值。Sellars 模型在各种条件下都具有良好的拟合效果。也就是说, 在进行 40CrNiMoA 钢的奥氏体晶粒尺寸预测时, 应该采用 Sellars 模型。应该指出的是, 本文的

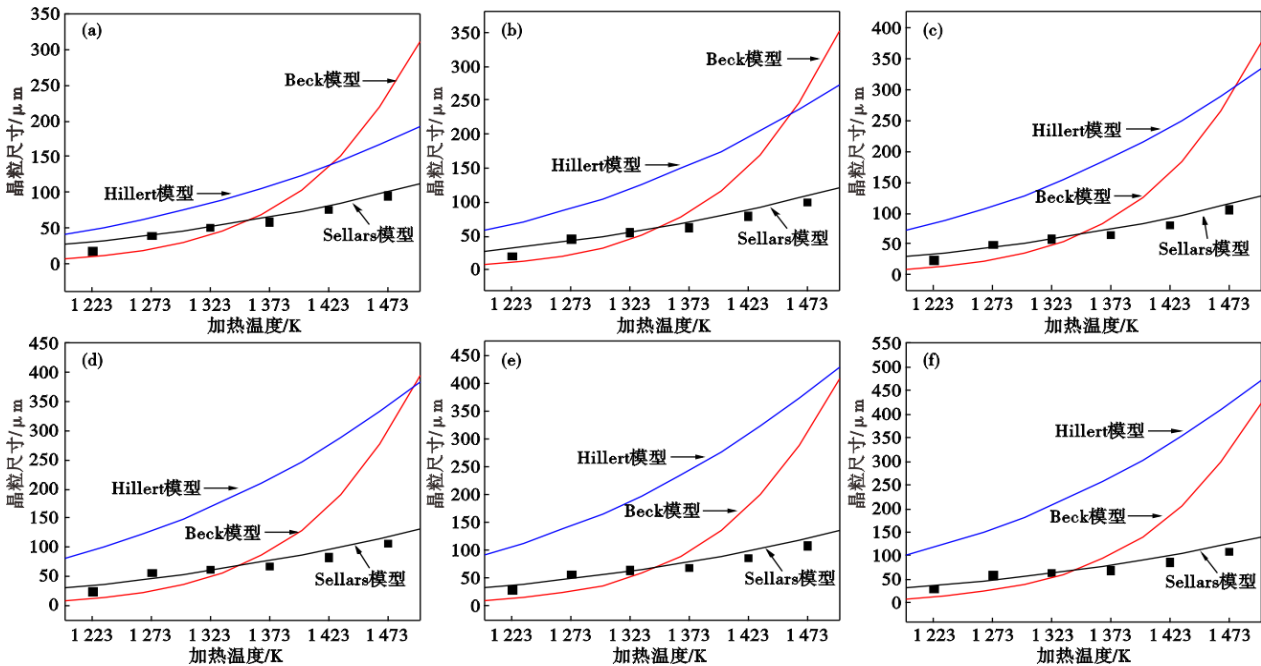


图 8 不同保温时间下三种模型预测值与实际值的比较: (a) 600 s, (b) 1200 s, (c) 1800 s, (d) 2400 s, (e) 3000 s, (f) 3600 s

Fig. 8 Comparison between predicted values of three models and measured values under different holding times: (a) 600 s, (b) 1200 s, (c) 1800 s, (d) 2400 s, (e) 3000 s, (f) 3600 s

表2 Sellars模型中不同加热条件下的 n 值和 Q 值
Table 2 n values and Q values in the Sellars model under different heating conditions

| 加热温度/K | n | 保温时间/s | $Q/(J \cdot mol^{-1})$ |
|--------|-------|--------|------------------------|
| 1 223 | 3.02 | 600 | 280 984.8 |
| 1 273 | 4.15 | 1 200 | 349 394.2 |
| 1 323 | 6.35 | 1 800 | 493 123.9 |
| 1 373 | 9.50 | 2 400 | 699 150.5 |
| 1 423 | 13.11 | 3 000 | 879 460.9 |
| 1 473 | 12.19 | 3 600 | 803 367.6 |
| 平均值 | 8.05 | 平均值 | 584 247.0 |

试验条件为加热温度 1 223 ~ 1 473 K, 保温时间 0 ~ 3 600 s, 所以, Sellars 模型的适用范围为加热温度 1 223 ~ 1 473 K, 保温时间 0 ~ 3 600 s。

3 结论

1) 当加热温度小于等于 1 373 K 时, 40CrNiMoA

钢的奥氏体晶粒长大比较缓慢; 而当加热温度高于 1 373 K 时, 该钢的奥氏体晶粒迅速长大。40CrNiMoA 钢奥氏体平均晶粒尺寸随保温时间的延长而持续增加。

2) 分别建立了 40CrNiMoA 钢的奥氏体晶粒长大 Beck 模型为 $D = 5.9 \times 10^8 \exp(-\frac{193\,799}{RT})t^{0.17}$; Hillert 模型为 $D^2 = 1.4 \times 10^7 \left[\exp\left(-\frac{153\,797}{RT}\right) \right] t$; Sellars 模型为 $D^{8.05} = 1.09 \times 10^{34} t \exp(-\frac{584\,247}{RT})$ 。

3) Beck 模型的预测值在低加热温度时小于实测值、高加热温度时高于实测值; Hillert 模型的预测值明显高于实测值; Sellars 模型在 1 223 ~ 1 473 K 的加热温度范围和 0 ~ 3 600 s 的保温时间范围内与实验数据具有较好的一致性, 更适合用于 40CrNiMoA 钢奥氏体晶粒尺寸的预测。

参考文献

- [1] 罗杰, 李祥, 杨旭, 等. 40CrNiMoA 钢热处理组织与性能研究[J]. 金属加工(热加工), 2025, (9): 102 - 106.
- [2] 王淑婧, 刘锦滔, 肖杰, 等. 热处理方式对 40CrNiMoA 冲击性能的影响[J]. 大型铸锻件, 2020, (3): 31 - 32.
- [3] 陈正周, 罗凯宇. 热处理对 40CrNiMoA 钢柔轮显微组织和力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2021, 42(2): 103 - 112.
- [4] 李子健, 贾丽敏, 韩鹏彪, 等. 热处理工艺对 40CrNiMoA 合金组织及力学性能的影响[J]. 河北科技大学学报, 2024, 45(1): 67 - 73.
- [5] 李世键, 潘新, 刘艳梅, 等. 回火温度及磷化工艺对 40CrNiMoA 钢性能和组织的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(12): 99-102.
- [6] 支龙, 李雄伟, 赵国平, 等. 不同淬火温度对滚刀刀圈用钢 40CrNiMoA 组织的性能的影响[J]. 延安职业技术学院学报, 2025, 39(1): 105 - 108.
- [7] Jiang P, Xu Z Y, Li Z X, et al. Microstructure, mechanical properties and wear resistances of 40CrNiMoA steel affected by cyclic quenching treatment[J]. Materials Today Communications, 2024, 40: 109799.
- [8] Chen W L, Wu W K, Li C, et al. Influence of deep cryogenic treatment and secondary tempering on microstructure and mechanical properties of medium-carbon low-alloy steels[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29(1): 10-22.
- [9] 刘浩楠, 徐东, 姚菲, 等. 20MnTiB 钢奥氏体化过程中晶粒长大行为[J]. 钢铁研究学报, 2025, 37(4): 525 - 538.
- [10] Zhang M J, Zhang T Y, Hu C Y, et al. Synergistic effects of V, Ti, and Nb microalloying on prior austenite grain growth kinetics in high-carbon pearlitic steel wire rods[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 39: 4307-4317.
- [11] 汪杨鑫, 赵秀明, 毛向阳, 等. SCr420H 钢奥氏体晶粒长大动力学[J]. 钢铁, 2018, 53(7): 80 - 84+ 104.
- [12] 代智鹏, 杨健, 张庆松, 等. Nb 微合金齿轮钢晶粒长大行为与析出相的影响[J]. 炼钢, 2025, 41(1): 95 - 104.
- [13] Han R Y, Yang G W, Xu D M, et al. New approach to modeling of ultra-refined austenite grain size in medium manganese martensitic steel[J]. Journal of Materials Science, 2025, 60(5): 2640-2657.
- [14] Liu Y X, Zhang H M, Yu Z X, et al. Austenite grain growth behavior and dynamic model of ADB790E hydropower steel[J]. Metals, 2025, 15(9): 1028.
- [15] 尹超坤. 奥氏体化工工艺对微合金钢组织演变和力学性能的影响[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2024.
- [16] 沈鑫珺, 王煜彬, 张永鹏, 等. 风电齿轮箱用 100CrMo7-3 轴承钢的奥氏体晶粒长大规律及模型构建[J]. 金属热处理, 2025, 50(5): 57 - 65.
- [17] 邹扬, 高悦敏, 张苏渊, 等. 形变组织对水电用高强度贝氏体钢再加热奥氏体晶粒长大的影响[J]. 金属热处理, 2023, 48(3): 151 - 158.
- [18] 郭超, 莫文玲, 严春亮, 等. EH420 钢的奥氏体晶粒尺寸及其对诱发晶内铁素体的影响[J]. 材料热处理学报, 2025, 46(8): 113 - 123.
- [19] Svoboda J, Zickler G A, Kozeschnik E, et al. Generalization of classical Hillert's grain growth and LSW theories to a wide family of kinetic evolution equations and stationary distribution functions[J]. Acta Materialia, 2022, 235: 118085.
- [20] Xu D, Ji C, Zhao H Y, et al. A new study on the growth behavior of austenite grains during heating processes[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 3968.