

理论与实验研究

Aermet100 钢高温保温过程奥氏体晶粒演化的原位实验研究

蒋 乔¹, 赵明杰², 张 健¹, 苏 阳², 李昌民², 班宜杰², 赵俊飞², 黄 亮²,
孙朝远³, 李蓬川³, 李建军²

(1. 大冶特殊钢有限公司, 湖北 黄石 435001; 2. 华中科技大学 材料科学与工程学院 材料成形与模具技术全国重点实验室, 湖北 武汉 430074; 3. 中国第二重型机械集团德阳万航模锻有限责任公司, 四川 德阳 618000)

摘要: 材料在加热保温过程中的微观组织演化会影响后续的变形过程。为了实现材料热变形过程中微观组织的有效调控, 采用高温激光共聚焦设备原位研究了 Aermet100 钢在加热保温过程中奥氏体晶粒的演化规律。结果表明: 随着加热速度的减小、保温温度和保温时间的增加, 奥氏体晶粒尺寸增加。相比于加热速度和保温时间, 保温温度对奥氏体晶粒尺寸的影响更显著。1000 ℃ 为 Aermet100 钢奥氏体晶粒长大的临界温度, 当保温温度低于 1000 ℃ 时, 奥氏体晶粒尺寸较小; 当保温温度高于 1000 ℃ 时, 奥氏体晶粒尺寸显著增加。基于统计的晶粒尺寸, 提出了两种耦合加热速度、保温温度以及保温时间影响奥氏体晶粒长大的模型, 两种模型的预测值均与实验值吻合很好, 表明建立的两种晶粒长大模型是可靠的。

关键词: 超高强度钢; 原位实验; 加热速度; 晶粒演化; 晶粒长大模型

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.08.036

中图分类号: TG142.33 文献标志码: A 文章编号: 1000-3940 (2023) 08-0261-07

In-situ experimental investigation on austenite grain evolution in Aermet100 steel during high temperature holding process

Jiang Qiao¹, Zhao Mingjie², Zhang Jian¹, Su Yang², Li Changmin², Ban Yijie², Zhao Junfei², Huang Liang²,
Sun Chaoyuan³, Li Pengchuan³, Li Jianjun²

(1. Daye Special Steel Co., Ltd., Huangshi 435001, China;
2. State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;
3. China National Erzhong Group Deyang Wanhang Die Forging Co., Ltd., Deyang 618000, China)

Abstract: The microstructure evolution of materials during the heating and holding process will affect the subsequent deformation process. Therefore, in order to realize the effective control of microstructure during the hot deformation process of material, the austenite grain evolution law of Aermet100 steel during the heating and holding process was studied in-situ by high temperature laser confocal equipment. The results show that the austenite grain size increases with the decreasing of heating rate and the increasing of holding temperature and the holding time. Compared with the heating rate and holding time, the holding temperature has a more significant effect on the austenite grain size. 1000 ℃ is the critical temperature for the austenite grain growth of Aermet100 steel. When the holding temperature is lower than 1000 ℃, the austenite grain size is smaller, and when the holding temperature is higher than 1000 ℃, the austenite grain size increases significantly. Based on the statistical grain size, two austenite grain growth models coupled with the effects of heating rate, holding temperature and holding time were proposed. The predicted values of the two models are in good agreement with the experimental values, which indicates that the two established grain growth models are reliable.

Key words: ultra-high strength steel; in-situ experiment; heating rate; grain evolution; grain growth model

超高强度钢由于其综合力学性能优良而被广泛

用于大型关键承力构件的生产^[1-3]。在超高强度钢大型构件的热锻成形过程中, 为了有效降低材料的变形抗力, 原始坯料会被加热至奥氏体化温度以上并保温, 以确保原始坯料内部温度均匀。在漫长的高温保温过程中, 材料内部的奥氏体晶粒尺寸会发生显著改变, 进而会影响后续的热锻过程^[4-5]。而在保温过程中, 材料的微观组织会受到不同参数的

收稿日期: 2022-11-13; 修订日期: 2023-02-15

基金项目: 湖北省重点研发计划 (2022BAA024)

作者简介: 蒋 乔 (1971-), 男, 学士, 高级工程师

E-mail: 369876197@qq.com

通信作者: 黄 亮 (1981-), 男, 博士, 教授

E-mail: huangliang@hust.edu.cn

影响,使得保温过程中的晶粒演化规律难以被准确预测及有效调控^[6]。为此,有必要深入研究材料高温保温过程中的晶粒演化规律,并建立准确的定量表征模型。

研究者针对不同材料从不同角度研究了高温保温过程中的微观组织演化。Chen R C 等^[7]研究了 300M 钢在保温过程中的晶粒演化,发现材料的初始组织对晶粒演化无明显影响。Zhang Y 等^[8]研究了碳化物分布对 10MnVNb 热轧钢晶粒长大动力学的影响,发现铌在奥氏体中的溶解使奥氏体晶粒快速长大。Su F Y 等^[9]建立了 Fe-1C-1.5Cr 钢晶粒长大过程的三维元胞自动机模型,准确描述了不同温度下奥氏体晶粒的生长过程。Quan G Z 等^[10]研究了 Ni80A 合金的晶粒长大行为,并利用神经网络模型预测了其晶粒演化行为。综上可知,高温保温过程中晶粒演化规律复杂,材料特性不同会导致晶粒演化规律存在显著差异。此外,当前的晶粒长大模型忽视了加热速度的影响,使得所建的晶粒长大模型并不能准确地反映高温保温过程中的晶粒尺寸变化。因此,对于特定材料,有必要进一步深入研究其高温保温过程中的晶粒演化规律,并建立准确可靠的晶粒长大模型。

Aermet100 钢为一种典型的超高强度钢,经过热处理后其抗拉强度达到 1930 MPa 以上,断裂韧性达到 110 MPa·m^{1/2}^[11]。凭借优异的综合力学性能,Aermet100 钢被广泛用于生产飞机起落架、气体涡轮发动机主轴等关键承力构件^[12]。围绕 Aermet100 钢热变形过程的宏微观机制研究,当前有较多报道。孙朝远等^[13]研究了 Aermet100 钢热变形过程中的晶粒演化,并建立了动态再结晶动力学模型。Zhao Z L 等^[14]分析了 Aermet100 钢在不同变形参数下的微观组织演化,并建立了动态再结晶晶粒尺寸模型。乔慧娟等^[15]研究了不同工艺参数对 Aermet100 钢变形行为的影响,并利用热加工图评估了其热加工性能。王鑫等^[16]建立了 Aermet100 钢热压缩变形本构模型。可以看到,当前围绕 Aermet100 钢热变形过程中的研究主要集中于变形阶段的宏微观机制及建模研究,尚未见到关于其变形前保温过程中的微观组织演化规律的研究。而如前所述,高温保温过程中的微观组织演化对后续变形过程具有重要影响。因此,有必要进一步研究 Aermet100 钢高温保温过程中的微观组织演化。

本文采用高温激光共聚焦扫描显微镜设备原位研究 Aermet100 钢在不同加热速度、保温温度及保温时间下的奥氏体晶粒演变规律,并建立奥氏体晶

粒长大模型,以实现 Aermet100 钢高温保温过程中奥氏体晶粒演化的准确调控,为实际热锻过程提供理论指导。

1 实验材料及方法

本文所用实验材料是通过真空感应熔炼和真空电弧重熔而得,其化学成分如表 1 所示。原位高温保温实验在高温激光共聚焦扫描显微镜上完成,实验原理在文献 [17]和文献 [18]中有详细介绍,在此不再赘述。通过该设备可以实时观察、记录材料的微观组织在高温下的演化过程。实验中所用试样为直径为 Φ8 mm、高度为 3 mm 的小圆柱,实验前需要将试样进行抛光处理。实验流程如图 1 所示,首先以一定的加热速度将试样升温至设定的保温温度,随后开始高温保温过程,当保温时间达到设定值时,设备会自动对试样进行淬火处理。具体实验参数如表 2 所示,其中保温温度为 900~1200 ℃,保温时间为 25 min,加热速度为 300~900 ℃·min⁻¹。

表 1 Aermet100 钢的化学成分 (%, 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of Aermet100 steel (%, mass fraction)

Co	Ni	Cr	Mo	C	Si	Mn	Fe
14.41	11.13	3.07	1.20	0.23	0.03	0.01	余量

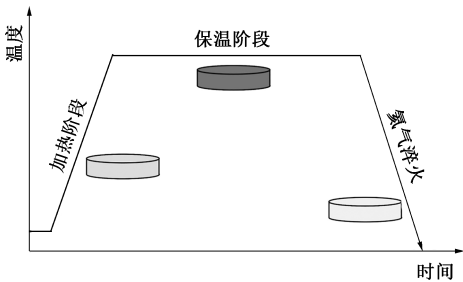


图 1 原位保温实验流程图

Fig. 1 Flow chart of in-situ holding temperature experiment

表 2 原位保温实验参数

Table 2 Parameters of in-situ holding experiment

方案	加热速度/(℃·min ⁻¹)	保温温度/℃	保温时间/min
1	300	1000	25
2	600	1000	25
3	900	1000	25
4	600	900	25
5	600	1100	25
6	600	1200	25

2 保温过程中奥氏体晶粒形貌及尺寸

2.1 加热速度的影响

图2为 Aermet100 钢在保温温度为 1000 ℃、保温时间为 25 min 时,不同加热速度下的晶粒形貌。可以看出,经过长时间的高温保温,奥氏体晶粒的晶界均趋向平直。随着加热速度的增加,奥氏体晶粒尺寸减小,与 Liu F 等^[19]的研究结果一致。这主要归因于加热速度对奥氏体转变温度的影响^[20-21]。

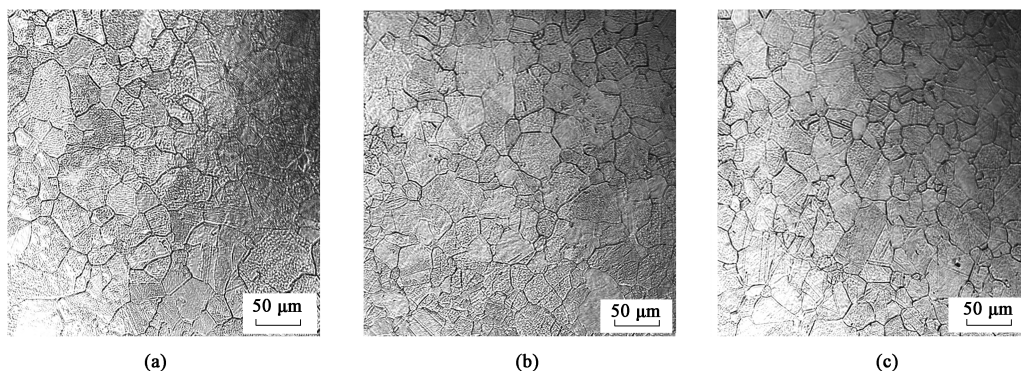


图2 保温温度为 1000 ℃、保温时间为 25 min 时不同加热速度下 Aermet100 钢的晶粒形貌

(a) 300 ℃ · min⁻¹ (b) 600 ℃ · min⁻¹ (c) 900 ℃ · min⁻¹

Fig. 2 Grain morphologies of Aermet100 steel under different heating rates at holding temperature of 1000 ℃ and holding time of 25 min

图3显示了保温温度为 1000 ℃时,不同加热速度下奥氏体晶粒尺寸随保温时间的变化规律。可以发现,随着保温时间的增加,奥氏体晶粒尺寸先迅速增大,然后基本保持不变。这是因为奥氏体晶粒长大的驱动力是

晶界能,晶界能与晶界的曲率半径相关^[22]。在晶粒长大初期,晶界的曲率半径小,晶界迁移的驱动力大,晶界迁移快速;随着晶粒长大,晶界趋于平直,晶界曲率增加,晶界迁移的驱动力减小,晶粒的长大速度减慢。

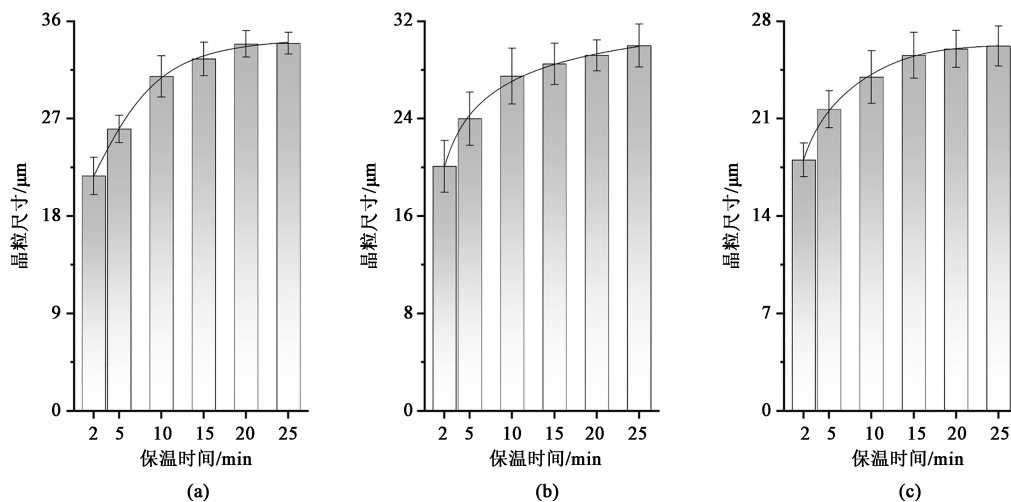


图3 保温温度为 1000 ℃时不同加热速度下的奥氏体晶粒尺寸

(a) 300 ℃ · min⁻¹ (b) 600 ℃ · min⁻¹ (c) 900 ℃ · min⁻¹

Fig. 3 Austenite grain sizes under different heating rates at holding temperature of 1000 ℃

2.2 保温温度的影响

图4为加热速度为 600 ℃ · min⁻¹、保温时间为

25 min 时,不同保温温度下的 Aermet100 钢的晶粒形貌。可以看到,随着保温温度的升高,奥氏体晶粒

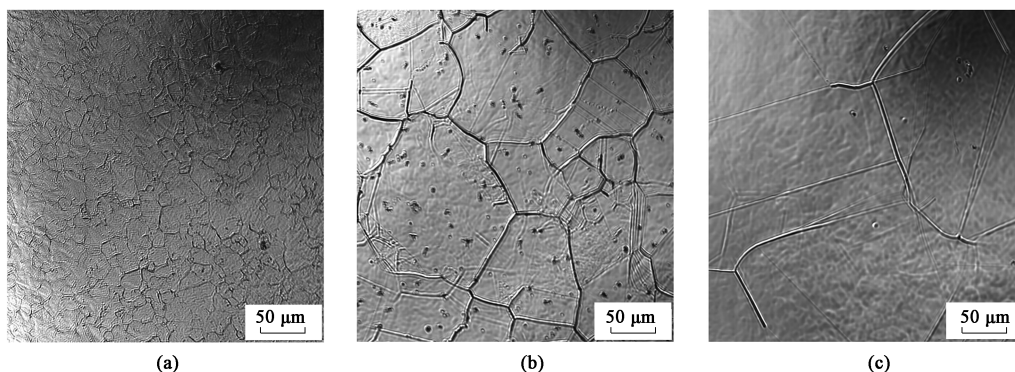


图 4 加热速度为 $600\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 、保温时间为 25 min 时不同保温温度下 Aermet100 钢的晶粒形貌

(a) 900 $^{\circ}\text{C}$ (b) 1100 $^{\circ}\text{C}$ (c) 1200 $^{\circ}\text{C}$

Fig. 4 Grain morphologies of Aermet100 steel under different holding temperatures at heating rate of $600\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ and holding time of 25 min

尺寸增大。这是因为晶粒长大是一个温度相关的过程，温度越高，原子扩散越剧烈，晶界迁移越充分，晶粒长大越明显。当保温温度低于 1000 $^{\circ}\text{C}$ 时，奥氏体晶粒尺寸随着保温温度的升高而缓慢增大。当保温温度高于 1000 $^{\circ}\text{C}$ 时，随着保温温度的升高，奥氏体晶粒尺寸急剧增大。这表明 1000 $^{\circ}\text{C}$ 为 Aermet100 钢晶粒长大的临界保温温度，在实际的热处理过程中应控制保温温度在 1000 $^{\circ}\text{C}$ 以下，以免晶粒尺寸过大。

图 5 为加热速度为 $600\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 时不同保温温度下奥氏体晶粒演化尺寸随保温时间的变化规律。可以看到，随着保温温度的增加，奥氏体晶粒的长大速度显著增加。在保温时间均为 25 min 条件下，保温温度为 1200 $^{\circ}\text{C}$ 时的晶粒尺寸是保温温度为 900 $^{\circ}\text{C}$ 时的近 10 倍。由此可见，奥氏体晶粒尺寸受保温时间、保温温度和加热速度的耦合影响，但与保温时间和加热速度相比，保温温度对晶粒长大的影响更显著。

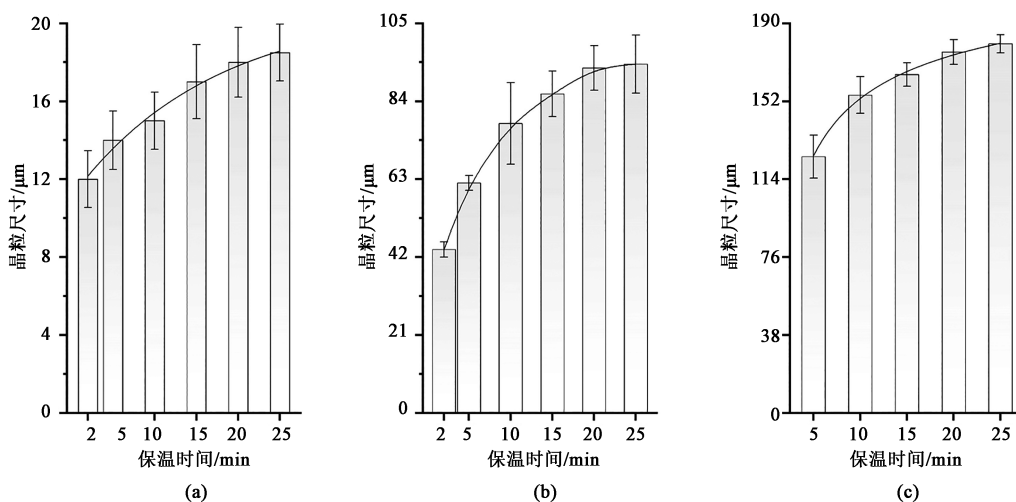


图 5 加热速度为 $600\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 时不同保温温度下的奥氏体晶粒尺寸

(a) 900 $^{\circ}\text{C}$ (b) 1100 $^{\circ}\text{C}$ (c) 1200 $^{\circ}\text{C}$

Fig. 5 Austenite grain sizes under different holding temperatures at heating rate of $600\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$

3 保温过程奥氏体晶粒尺寸模型建立

3.1 经典的晶粒长大模型

为了进一步量化保温条件对奥氏体晶粒尺寸的影响，有必要建立准确的晶粒长大模型。保温过程中晶粒长大模型一般形式如式 (1) 所示^[23]：

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

式中： D 为晶粒尺寸； t 为保温时间； M 和 n 为材料常数。

参数 M 通常可以写为 Arrhenius 形式，如式 (2) 所示^[24-25]：

$$M = a \exp(-Q/RT) \quad (2)$$

式中： a 为材料常数； Q 为晶粒长大激活能； R 为

气体常数; T 为保温温度。

可以看到, 该模型仅考虑了保温温度和保温时间对晶粒长大的影响, 并未考虑加热速度对晶粒长大的影响。根据 2.1 节可知, 加热速度对高温保温过程中的晶粒尺寸也有影响。为了准确描述不同参数下的奥氏体晶粒演化, 有必要对式 (1) 进行修正。

3.2 修正的晶粒长大模型

图 6 为不同保温时间下奥氏体晶粒尺寸与加热速度的关系。由图 6 可知, 奥氏体晶粒尺寸与加热速度呈线性关系。因此, 将加热速度的影响耦合进式 (1) 中可得修正的晶粒长大模型, 如式 (3) 所示。

$$D = Mt^n(c\dot{\zeta} + e) \tag{3}$$

式中: c 、 e 为材料常数; $\dot{\zeta}$ 为加热速度。

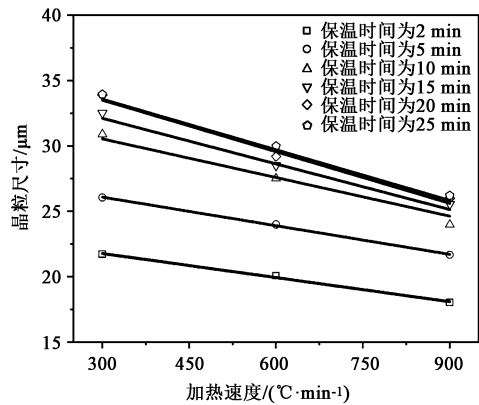


图 6 晶粒尺寸与加热速度之间的关系
Fig. 6 Relationship between grain size and heating rate

将式 (2) 带入式 (3) 中可得:

$$D = a \exp(-Q/RT) t^n (c\dot{\zeta} + e) \tag{4}$$

对式 (4) 两边取对数可得:

$$\ln D = \ln a - Q/RT + n \ln t + \ln(c\dot{\zeta} + e) \tag{5}$$

利用 SPSS 软件对式 (5) 进行多元非线性回归分析可得式 (4) 中各参数值, 如表 3 所示。为了验证上述模型的准确性, 将式 (4) 的预测值与晶粒尺寸的实验值对比, 如图 7 所示。可以看到两者的线性相关性很好, 相关性系数为 0.970, 这表明建立的耦合加热速度影响的晶粒长大模型能够准确地描述材料在保温过程中晶粒尺寸与保温温度、加热速度以及保温时间之间的定量关系。

表 3 修正晶粒长大模型的参数值
Table 3 Values of parameters in modified grain growth model

参数	a	$Q/(J \cdot mol^{-1})$	n	c	e
数值	4.814×10^5	1.118×10^5	0.203	-0.004	1.115

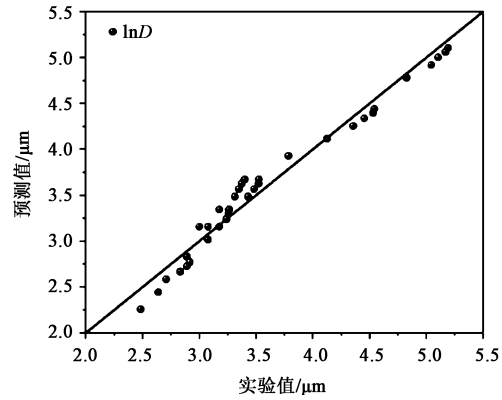


图 7 奥氏体晶粒尺寸的实验值和修正模型预测值对比
Fig. 7 Comparison of austenite grain sizes between experimental values and predicted values by modified model

然而, 当 $c\dot{\zeta} + e > 0$ 时, 式 (4) 才有意义, 因此, 根据表 3 可知, 当加热速度大于 $1672.5 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, $c\dot{\zeta} + e < 0$, 式 (4) 无意义。而根据 Banerjee K 等^[21]的研究可知, 当加热速度达到 $6000 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 加热速度对晶粒尺寸仍然有影响。因此, 式 (4) 仅适用于加热速度小于 $1672.5 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 时保温过程的晶粒尺寸预测。

3.3 适用于宽加热速度范围的晶粒长大模型

为了更好地描述宽加热速度范围内保温过程的晶粒演化, 有必要对式 (4) 进行修正。根据 Xu Y W 等^[26]的研究可以发现, 在更宽的加热速度范围内, 加热速度和晶粒尺寸呈指数关系, 因此, 晶粒尺寸和加热速度的关系可以表述为式 (6)。

$$D = a \exp(-Q/RT) t^n \exp(\beta \dot{\zeta}) \tag{6}$$

式中: β 为材料常数。

通过多元非线性拟合可以得到式 (6) 中的各参数值, 如表 4 所示。

表 4 宽加热速度范围修正晶粒长大模型的参数值
Table 4 Values of parameters in modified grain growth model for wide heating rate range

参数	a	$Q/(J \cdot mol^{-1})$	n	β
数值	6.611×10^5	1.118×10^5	0.203	-0.065

图 8 为基于式 (6) 求得的晶粒尺寸与实验获得的晶粒尺寸对比。线性相关性系数为 0.970, 表明所建立的晶粒长大模型准确可靠。

对比式 (4) 和式 (6) 可知, 在较低的加热速度范围内, 晶粒尺寸与加热速度之间呈线性关系, 但是在宽加热速度范围内, 晶粒尺寸与加热速度之间呈指数关系。因此, 在小的加热速度范围内, 式

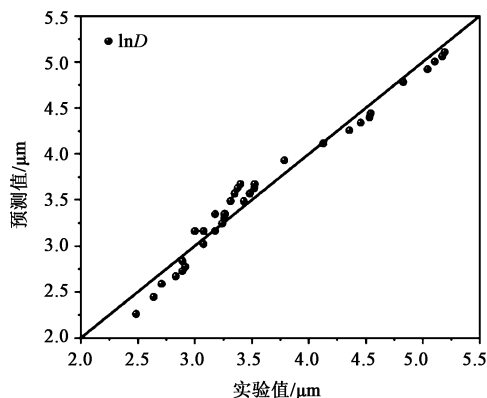


图 8 奥氏体晶粒尺寸的实验值和宽加热速度范围修正模型预测值对比

Fig. 8 Comparison of austenite grain sizes between experimental values and predicted values by modified model for wide heating rate range

(4) 能够更准确地描述晶粒尺寸与加热速度的关系。在宽加热速度范围内, 式 (6) 的适用性更广泛。

4 结论

(1) 采用原位实验研究了 Aermet100 钢高温保温过程中的晶粒演化, 发现加热速度、保温温度及保温时间均会影响奥氏体晶粒尺寸, 且奥氏体晶粒尺寸与加热速度呈负相关, 与保温温度和保温时间呈正相关。

(2) 提出了新的耦合加热速度影响的奥氏体晶粒长大模型, 其中, 加热速度与奥氏体晶粒尺寸呈线性关系, 该模型的预测精度达到 0.970, 但该模型无法描述高加热速度对晶粒长大的影响。

(3) 提出了适用于宽加热速度范围的奥氏体晶粒长大模型, 模型的预测精度达到 0.970, 与提出的加热速度与奥氏体晶粒尺寸呈线性关系的晶粒长大模型相同, 但是该模型的应用范围更广。

参考文献:

- [1] 赵明杰, 邓磊, 孙朝远, 等. 300M 高强钢大型构件全流程锻造变形机理及工艺研究进展 [J]. 科学通报, 2022, 67 (11): 1036-1053.
Zhao M J, Deng L, Sun C Y, et al. Advances on the deformation mechanism and forging technology of 300M high-strength steel heavy components in the whole forging process [J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67 (11): 1036-1053.
- [2] 赵明杰, 黄亮, 李昌民, 等. 300M 钢的热变形行为及热锻成形工艺研究现状 [J]. 精密成形工程, 2020, 12 (6): 16-27.
Zhao M J, Huang L, Li C M, et al. Research status of the hot de-

formation behaviors and hot forging process of 300M steel [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12 (6): 16-27.

- [3] 赵明杰, 黄亮, 李建军, 等. 300M 钢热扭转变形条件下的变形行为研究 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (11): 159-166.
Zhao M J, Huang L, Li J J, et al. Deformation behaviors of 300M steel under hot torsion [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (11): 159-166.
- [4] Chamanfar A, Chentouf S M, Jahazi M, et al. Austenite grain growth and hot deformation behavior in a medium carbon low alloy steel [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9 (6): 12102-12114.
- [5] Zhao M J, Huang L, Li C M, et al. Investigation and modeling of austenite grain evolution for a typical high-strength low-alloy steel during soaking and deformation process [J]. Acta Metallurgica Sinica: English Letters, 2022, 35 (6): 996-1010.
- [6] Zhao F, Hu H, Liu X H, et al. Effect of billet microstructure and deformation on austenite grain growth in forging heating of a medium-carbon microalloyed steel [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 869: 159326.
- [7] Chen R C, Zheng Z Z, Li J J, et al. In situ investigation of grain evolution of 300M steel in isothermal holding process [J]. Materials, 2018, 11 (10): 1862.
- [8] Zhang Y, Li X H, Liu Y C, et al. Study of the kinetics of austenite grain growth by dynamic Ti-rich and Nb-rich carbonitride dissolution in HSLA steel: In-situ observation and modeling [J]. Materials Characterization, 2020, 169: 110612.
- [9] Su F Y, Liu W L, Wen Z. Three-dimensional cellular automaton simulation of austenite grain growth of Fe-1C-1.5Cr alloy steel [J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9 (1): 180-187.
- [10] Quan G Z, Zhang P, Ma Y Y, et al. Characterization of grain growth behaviors by BP-ANN and Sellars models for nickel-base superalloy and their comparisons [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2020, 30 (9): 2435-2448.
- [11] 张一帆, 朱晓飞, 周舸, 等. A100 钢的热变形行为及加工图 [J]. 精密成形工程, 2022, 14 (2): 88-94.
Zhang Y F, Zhu X F, Zhou K, et al. Hot deformation behavior and processing map of A100 steel [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14 (2): 88-94.
- [12] 钱芳, 王忠堂. AerMet100 超高强度钢的热变形行为及本构模型研究 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (14): 88-90, 96.
Qian F, Wang Z T. Study on thermal deformation behavior and constitutive model of AerMet100 ultra high strength steel [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (14): 88-90, 96.
- [13] 孙朝远, 谢静, 苗小浦, 等. Aermet100 超高强度钢热变形中的动态再结晶行为研究 [J]. 热加工工艺, 2017, 46 (20): 112-115.
Sun C Y, Xie J, Miao X P, et al. Research on dynamic recrystallization behavior of Aermet100 ultra-high strength steel during hot deformation [J]. Hot Working Technology, 2017, 46 (20): 112-115.

- [14] Zhao Z L, Min X N, Xu W X, et al. Dynamic recrystallization models of AerMet100 ultrahigh strength steel during thermo-mechanical processing [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2020, 49 (10): 3285–3293.
- [15] 乔慧娟, 李付国, 冀国良, 等. Aermet100 钢高温变形行为及热加工图研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43 (4): 926–931.
- Qiao H J, Li F G, Ji G L, et al. Deformation behavior at elevated temperature and processing map of Aermet100 steel [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43 (4): 926–931.
- [16] 王鑫, 董洪波, 邹忠波, 等. AerMet100 钢的热变形显微组织演变及动态再结晶行为 [J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36 (2): 121–125.
- Wang X, Dong H B, Zou Z B, et al. Microstructure evolution and dynamic recrystallization behavior of hot deformed Aermet100 steel [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2016, 36 (2): 121–125.
- [17] Zhao M J, Huang L, Zeng R, et al. In-situ observations and modeling of metadynamic recrystallization in 300M steel [J]. Materials Characterization, 2020, 159: 109997.
- [18] Zhao M J, Huang L, Zeng R, et al. In-situ observations and modeling of static recrystallization in 300M steel [J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 765: 138300.
- [19] Liu F, Xu G, Zhang Y L, et al. In situ observations of austenite grain growth in Fe-C-Mn-Si super bainitic steel [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2013, 20 (11): 1060–1066.
- [20] Li M Y, Yao D, Yang L, et al. Kinetic analysis of austenite transformation for B1500HS high-strength steel during continuous heating [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2020, 27 (11): 1508–1516.
- [21] Banerjee K, Militzer M, Perez M, et al. Nonisothermal austenite grain growth kinetics in a microalloyed X80 linepipe steel [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2010, 41 (12): 3161–3172.
- [22] Rudnizki J, Zeislmaier B, Pahl U, et al. Prediction of abnormal grain growth during high temperature treatment [J]. Computational Materials Science, 2010, 49 (2): 209–216.
- [23] 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 and Engineering: A, 2011, 528 (15): 4967–4972.
- [24] Lee S J, Lee Y K. Prediction of austenite grain growth during austenitization of low alloy steels [J]. Materials & Design, 2008, 29 (9): 1840–1844.
- [25] Ruan J J, Ueshima N, Oikawa K. Phase transformations and grain growth behaviors in superalloy 718 [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018, 737: 83–91.
- [26] Xu Y W, Tang D, Song Y, et al. Prediction model for the austenite grain growth in a hot rolled dual phase steel [J]. Materials & Design, 2012, 36: 275–278.

锻压技术

DUANYA JISHU

FORGING & STAMPING TECHNOLOGY

我们藉行业 **翘楚之势**

为您搭建 **广阔的信息桥梁**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告

1958年创刊。中国机械工业联合会主管，中国机械总院集团北京机电研究所有限公司和中国机械工程学会塑性工程分会合办。

全国锻压行业会刊，全国中文核心期刊。中文核心期刊要目总览（北京大学）、中国科学引文数据库（CSAD）、中国科技期刊引证报告（核心版，CJCR）、中国科技核心期刊（中国科技论文统计源期刊）、RCCSE中国核心学术期刊、中国学术期刊文摘数据库（核心版，CSAD-C）、中国学术期刊文摘数据库（英文版）、中国学术期刊综合评价数据库、中国学术期刊（光盘版）、中国知网、万方数字化期刊群、美国剑桥科学文摘（CSA）、美国化学文摘（CA）、日本科学技术振兴机构数据库（JST）、俄罗斯文摘杂志（AJ）。

金属塑性工程行业专业技术（月刊）期刊 国内外公开发行

地址：北京市海淀区学清路18号 《锻压技术》编辑部 100083

电话：010-62920652 82415085

E-mail: fst@263.net (稿件咨询) fst_linyutong@163.com (广告咨询)

发表文章请登录网站在线投稿 <http://www.fstjournal.net>



主要栏目

综述	技术交流
锻造	节能技术
模具	摩擦与润滑
轧制	计算机应用
标准化	装备与成套技术
管材成形	加热与热处理
板材成形	材料与成形性能
特种成形	理论与实验研究
测试技术	挤压与拉拔

全国各地邮局均可订阅，逾期未订上者可与编辑部联系邮购

- ◆ 国内邮发代号：2-322
- ◆ 国外邮发代号：BM5549
- ◆ 国内定价：25元/册，300元/年
- ◆ 国内刊号：CN 11-1942/TG
- ◆ 国际刊号：ISSN 1000-3940
- ◆ 广告许可证：京海工商广登字20170021号 杂志网站 微信公众号

