

二次硬化超高强度钢 AF1410 奥氏体晶粒长大行为

廉学魁¹ 厉勇¹ 刘宪民¹ 王春旭¹ 李建新² 严晓红²

(1 钢铁研究总院结构材料研究所,北京 100081; 2 抚顺特殊钢股份有限公司,抚顺 113001)

摘要 研究了二次硬化超高强度 AF1410 钢(% : 0.165C, 14.10Co, 9.83Ni, 1.92Cr, 1.05Mo) 在 800 ~ 1 200 °C 5 ~ 180 min 加热的奥氏体晶粒长大行为。结果表明, AF1410 钢奥氏体平均晶粒尺寸随加热温度的升高和保温时间延长而增大, 加热温度超过 1 100 °C 后, 奥氏体晶粒发生严重粗化; 不同加热温度下, 该钢的奥氏体平均晶粒尺寸与保温时间符合 Beck 关系; 建立了 AF1410 钢的奥氏体晶粒长大数学模型, 800 ~ 1 200 °C 加热时, 该钢奥氏体晶粒长大平均激活能为 220.2 kJ/mol, 其奥氏体平均晶粒尺寸与加热温度之间符合 Arrhenius 关系。

关键词 二次硬化超高强度钢 AF1410 奥氏体 晶粒长大

Growth Behavior of Austenite Grain of Secondary Hardening Ultra-high Strength Steel AF1410

Lian Xuekui¹, Li Yong¹, Liu Xianmin¹, Wang Chunxu¹, Li Jianxin² and Yan Xiaohong²

(1 Institute for Structure Materials, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081; 2 Fushun Special Steel Co Ltd, Fushun 113001)

Abstract The growth behavior of austenite grain of secondary hardening ultra-high strength steel AF1410 (% : 0.165C, 14.10Co, 9.83Ni, 1.92Cr, 1.05Mo) heating at 800 ~ 1 200 °C for 5 ~ 180 min has been studied. Results show that with increasing heating temperature and holding time the average austenite grain size of steel AF1410 increases, and the austenite grains coarsen seriously at temperature more than 1 100 °C; at different heating temperature; the relation between average austenite grain size of steel and holding time corresponds to Beck equation; the math model for austenite grain growth of steel AF1410 has been established, with heating at 800 ~ 1 200 °C the average activation energy for austenite grain growth of the steel is 220.2 kJ/mol, and the relation between its average austenite grain size and heating temperature conforms to Arrhenius-type equation.

Material Index Secondary Hardening Ultra-high Strength Steel AF1410, Austenite, Grain Growth

AF1410 钢是一种典型的二次硬化超高强度钢, 具有高的强度、断裂韧性和优良的抗应力腐蚀性和焊接性能, 可满足损伤容限设计要求, 因此在航空航天领域得到了广泛应用^[1]。本文在试验的基础上分析加热温度和保温时间对 AF1410 钢奥氏体晶粒长大的影响, 并描述不同加热温度下 AF1410 钢奥氏体晶粒长大规律的数学模型, 以为实际生产热处理工艺的制定和优化提供理论依据。

1 试验材料和方法

试验用 AF1410 钢采用双真空冶炼工艺(VIM + VAR), 其化学成分为(%): 0.165C、1.92Cr、9.83Ni、1.05Mo、14.10Co、0.02Si、0.03Mn、0.001S、0.003P, 其余为 Fe。将试验钢加热到 1 200 °C 后, 锻成尺寸为 Φ15 mm 的棒材, 经过 900 °C 正火 1 h, 680 °C 退火 8 h 后, 用线切割成 Φ15 mm × 15 mm 的金相试样块, 分别在 800 ~ 1 200 °C 保温不同时间后油

淬。用饱和苦味酸 + 十二烷基苯磺酸钠 + 少许洗洁精显示奥氏体晶界; 采用 Neophot II 型光学显微镜进行显微组织观察。根据 GB/T6394-2002 标准, 以截点法测量不同保温条件下 AF1410 钢的平均晶粒尺寸。

2 试验结果和讨论

2.1 加热温度和保温时间对 AF1410 钢奥氏体晶粒长大的影响

试样分别在不同加热温度下保温 60 min 后油淬, 其晶粒组织如图 1 所示, 可以看出, 随着加热温度的提高, 奥氏体晶界逐渐平直, 晶粒平均尺寸增大。试验中没有发现异常大晶粒。

由图 2(a) 可以看出, 在不同的保温时间内, AF1410 钢奥氏体的晶粒尺寸随着加热温度的升高近似呈指数形式增加; 在相同的加热温度内奥氏体晶粒平均尺寸随保温时间延长而增大。当加热温度

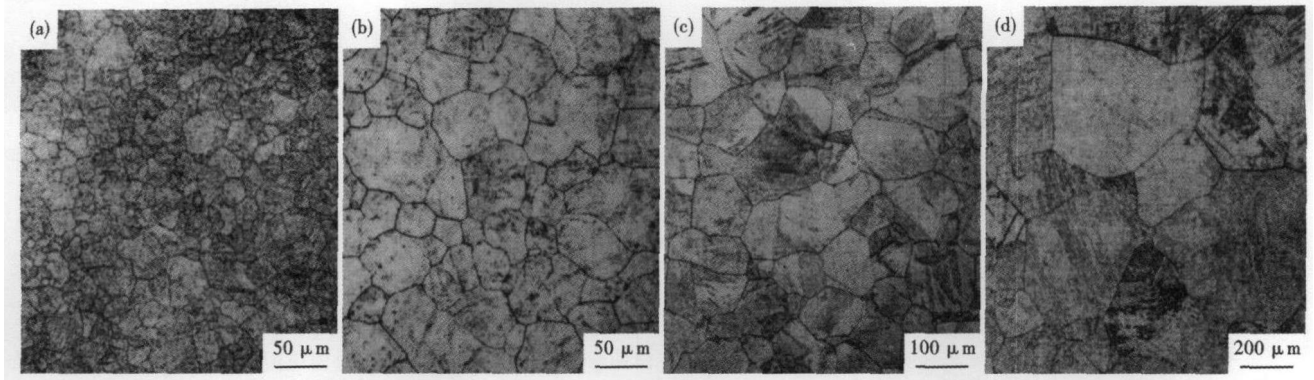


图 1 AF1410 钢在 900 °C (a), 1 000 °C (b), 1 100 °C (c) 和 1 200 °C (d) 60 min 油淬的组织形貌

Fig. 1 Morphology of structure of steel AF1410 heating at 900 °C (a), 1 000 °C (b), 1 100 °C (c) and 1 200 °C (d) for 60 min, oil cooling

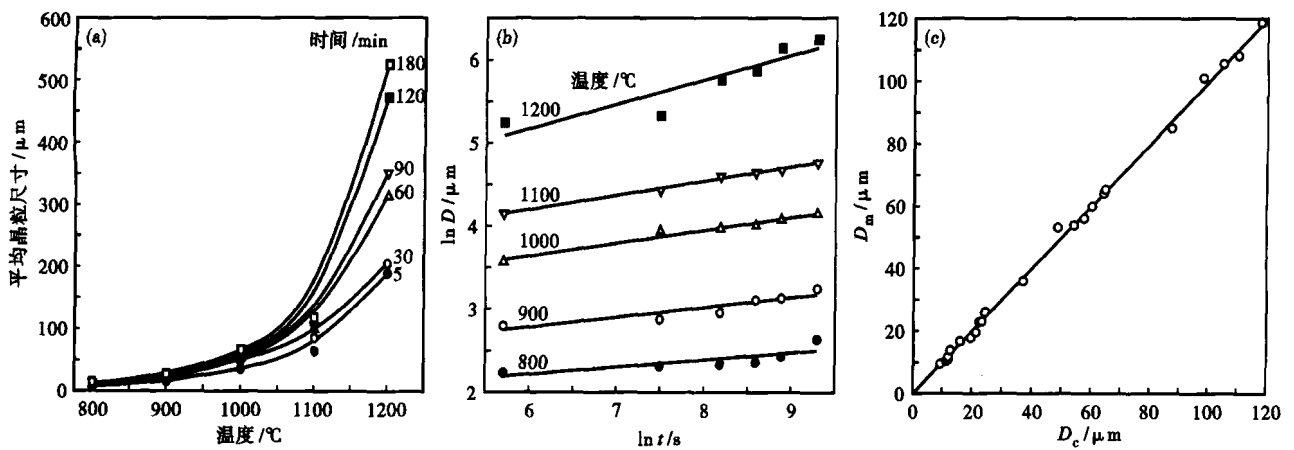


图 2 AF1410 钢加热温度和时间对奥氏体晶粒尺寸的影响 (a), 奥氏体晶粒 $\ln D - \ln t$ 曲线 (b), 平均奥氏体晶粒尺寸的计算值与实测值对比 (c)

Fig. 2 Effect of heating temperature and time on austenite grain size (a), $\ln D - \ln t$ curves of austenite grain (b) and comparison between measured value and calculated value of average austenite grain size, steel AF1410

低于 900 °C 时, 奥氏体平均晶粒尺寸增幅不明显。当加热温度为 900 °C 时, 晶粒平均尺寸从保温 5 min 后的 16.6 μm 仅增加到了保温 180 min 后的 25.9 μm, 晶粒度级别在 7.0 ~ 8.5 级。当加热温度升高至 1 000 °C 时, 奥氏体晶粒发生明显长大, 晶粒度级别迅速降到了 4.5 ~ 6.5 级; 随着加热温度的进一步升高, 加热温度达到 1 100 °C 时, 奥氏体晶粒长大加速, 当加热温度达到 1 200 °C 时, 晶粒严重粗化, 当保温时间由 5 min 延长至 180 min 时, 奥氏体平均晶粒尺寸迅速由 189.9 μm 粗化至 527.2 μm。因此, AF1410 钢的热处理温度应该控制在 800 ~ 900 °C 进行, 这样热处理后可以得到较为细小的晶粒组织。

在保温时间相同的情况下, 奥氏体晶粒的长大速率可以用式 (1) 来表示^[2]。

$$v = k \exp(-Q/RT) \cdot \frac{\alpha}{d} \quad (1)$$

式中: k - 常数; Q - 晶界迁移的激活能/(kJ · mol⁻¹);

R - 气体常数; T - 绝对温度/K; d - 奥氏体平均晶粒尺寸/μm; α - 界面能/(kJ · mol⁻¹)。

由式 (1) 可知, 奥氏体晶粒的长大速率随加热温度的升高会呈指数关系增加。而当保温时间相同时, 随着加热温度的升高, 奥氏体平均晶粒尺寸也应呈指数关系增大, 这与本试验结果相一致。

2.2 奥氏体晶粒长大动力学

2.2.1 奥氏体晶粒的等温长大规律

一定温度下, 晶粒长大与时间的关系可用 Beck 方程描述^[3]:

$$D - D_0 = \Delta D = kt^n \quad (2)$$

式中: D - 一定时间下的平均晶粒尺寸/μm; D_0 - 原始晶粒尺寸/μm; k - 常数; t - 保温时间/s; n - 晶粒长大指数。

因本文中的奥氏体原始晶粒尺寸 D_0 值远远小于保温一定时间后的晶粒平均尺寸 D 值, 可将 D_0 近似不计, 则 (2) 式可简化为: $D = kt^n$ (3)

对上式两边同时取对数可得:

$$\ln D = \ln k + n \ln t \quad (4)$$

对图 2(a) 中不同温度保温不同时间条件下 AF1410 钢的奥氏体平均晶粒尺寸数据进行整理, 可得到晶粒度尺寸与保温时间之间的关系, 如图 2(b) 所示。由图 2(b) 中可见, 在给定的加热温度下, $\ln D$ 与 $\ln t$ 之间呈良好的线性关系, 即 AF1410 钢奥氏体的晶粒长大规律符合 Beck 方程, 由图 2(b) 通过线性回归分析, 可得到 AF1410 钢不同加热温度下的奥氏体晶粒长大指数 n 和常数 k , 如表 1 所示。

表 1 不同加热温度下 AF1410 钢晶粒长大指数 n 和系数 k
Table 1 Grain growth exponent n and coefficient k of steel AF1410 at different heating-up temperatures

加热温度/℃	晶粒长大指数 n	系数 k
800	0.09	5.41
900	0.12	7.84
1 000	0.15	15.51
1 100	0.17	24.68
1 200	0.29	29.92

由表 1 看出, 在 800 ~ 1 200 ℃, AF1410 钢的奥氏体晶粒长大指数 n 随着加热温度的升高而逐渐增大。当加热温度高于 1 100 ℃ 时, n 值增长迅速, 当加热温度达到 1 200 ℃ 时, n 值达到了 0.29。

将表 1 中的晶粒长大指数 n 和常数 k 带入式 (3) 中, 可以得到 AF1410 钢在不同加热温度条件下的奥氏体晶粒长大经验公式, 通过该经验公式可以预测 AF1410 钢在不同加热温度和时间条件下的奥氏体的平均晶粒尺寸。AF1410 钢奥氏体晶粒尺寸的计算值 D_c 和实测值 D_m 的对比关系曲线, 如图 2(c) 所示。可以看出计算值和实测值吻合的很好。

2.2.2 晶粒尺寸的 Arrhenius 分析

钢在加热过程中发生奥氏体化转变后, 在奥氏体晶界净驱动压力的作用下发生晶界迁移, 导致晶粒长大。因此, 加热温度对晶粒长大的影响, 实质上是对钢中晶界处原子跨越界面迁移的扩散过程的影响。当保温时间为给定值时, 可以用 Arrhenius 形式的公式描述该类影响规律^[4]。

晶界迁移与原子的热激活能密切相关, 根据 Arrhenius 方程和 Beck 方程可得到晶粒长大速率与温度的关系式如下^[5]:

$$\frac{dD}{dt} = k \cdot \frac{1}{D} e^{-\frac{Q}{RT}} \quad (5)$$

对上式积分可得:

$$\ln D = \frac{1}{2} \ln kt - \frac{1}{2} \frac{Q}{RT} \quad (6)$$

式中: D - 最终平均晶粒尺寸/ μm ; t - 保温时间/s; Q - 晶粒长大激活能/($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$); R - 气体常数; T - 绝对温度/K; k - 常数。

$$D = (kt)^{\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{Q}{2RT}\right) \quad (7)$$

通过对 AF1410 钢不同加热温度和保温时间条件下的平均晶粒进行数值回归分析, 可得 AF1410 钢在 800 ~ 1 200 ℃ 的奥氏体晶粒长大的平均激活能 Q 为 220.2 kJ/mol, 这与纯铁的自扩散激活能很接近。

将在 800 ~ 1 200 ℃ 保温 60 min 时所测得的奥氏体平均晶粒尺寸按式 (1) 进行回归分析, 可以获得加热温度与 AF1410 钢奥氏体平均晶粒尺寸的关系方程为:

$$D = 1.91 \times 10^6 \exp(-110.1 \times 10^3/RT) \quad (8)$$

3 结论

(1) 800 ~ 900 ℃ AF1410 钢奥氏体平均晶粒尺寸随加热温度的升高和保温时间的延长而增大; 加热温度低于 900 ℃ 时, 奥氏体平均晶粒尺寸增幅不明显; 加热温度高于 1 100 ℃ 后, 晶粒发生严重粗化。

(2) AF1410 钢奥氏体平均晶粒尺寸与保温时间之间符合 Beck 关系, 且奥氏体晶粒长大指数随着加热温度的升高而逐渐增大。

(3) 800 ~ 1 200 ℃ 加热, AF1410 钢的奥氏体晶粒长大激活能为 220.2 kJ/mol, 其奥氏体平均尺寸 D 与加热温度 T 之间近似服从 Arrhenius 关系, 保温 60 min 条件下的数学模型为:

$$D = 1.91 \times 10^6 \exp(-110.1 \times 10^3/RT)$$

参考文献

- 胡正飞, 吴杏芳, 王春旭. 二次强化高 CoNi 超高强度合金钢的研究近况. 钢铁研究学报, 2001, 13(4): 62
- 岳重祥, 张立文, 廖舒纶, 等. GCr15 钢奥氏体晶粒长大规律研究. 材料热处理学报, 2008, 29(1): 94
- Chadwick G A, Smith D A. Grain Boundary Structure and Properties. London New York San Francisco: Academic Press, 1976: 217
- 钟云龙, 刘国权, 刘胜新, 等. 新型油井管钢 33Mn2V 的奥氏体晶粒长大规律. 金属学报, 2003, 39(7): 699
- 何毅, 杨柯, 毛萍利, 等. 高强度无钴马氏体时效钢的晶粒长大及其力学性能研究. 航空材料学报, 2002, 22(4): 1

廉学魁(1984-), 男, 硕士研究生, 高强度钢的组织 and 性能。

收稿日期: 2010-04-07