

盾构机轴承套圈用钢 42CrMo 连续加热奥氏体晶粒长大模型

郑禹¹ 姜培扬¹ 张豪臻¹ 周乐育² 张朝磊² 刘雅政²
(北京科技大学 1 高等工程师学院; 2 材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘要 基于盾构机轴承套圈用 42CrMo 钢的等温奥氏体长大模型, 并利用相加性原则, 建立了该钢在连续加热过程中的奥氏体晶粒长大模型。该建立的模型考虑了原始奥氏体晶粒尺寸的影响, 包括建立的在间隔时间 (t_{i-1}, t_i) 内晶粒尺寸 d_i 模型以及保温时间 t_i^* 模型。通过 Gleeble-1500 试验机, 测试了 42CrMo 钢 (/%: 0.40C, 0.23Si, 0.60Mn, 0.016P, 0.001S, 1.08Cr, 0.22Mo) 锻坯 (终锻温度 850 °C) 以 100 °C/s 加热 1 000 ~ 1 300 °C, 水冷后的奥氏体晶粒尺寸。结果表明, 奥氏体化温度由 1 000 °C 增加至 1 100 °C 时, 42CrMo 钢奥氏体晶粒尺寸由 16.3 μm 增至 30.3 μm; 加热温度超过 1 100 °C, 晶粒尺寸急剧增加, 1 300 °C 时, 奥氏体晶粒尺寸为 112.5 μm; 奥氏体晶粒尺寸的模型预测值与实测值吻合较好。

关键词 轴承套圈用钢 42CrMo 连续加热 奥氏体 晶粒长大 模型

Model of Austenite Grain Growth during a Continuous Heating Process of Steel 42CrMo for Bearing Ring of Shield Tunneling Machine

Zheng Yu¹, Jiang Peiyang¹, Zhang Haozhen¹, Zhou Leyu², Zhang Chaolei² and Liu Yazheng²
(1 School of Advanced Engineering, 2 School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract Based on the model of isothermal austenite grain growth of steel 42CrMo for bearing ring of shield tunneling machine, the model of austenite grain growth during continuous heating process of steel has been established by using the principle of additivity. The effect of original austenite grain size is considered in the established model, it is included in established models of grain size d_i and soaking time t_i^* during interval time (t_{i-1}, t_i). With using Gleeble-1500 thermal simulation machine the austenite grain size of forged billet (finishing forging at 850 °C) of steel 42CrMo (/%: 0.40C, 0.23Si, 0.60Mn, 0.016P, 0.001S, 1.08Cr, 0.22Mo) with 100 °C/s heated to 1 000 ~ 1 300 °C and water cooling has been tested and measured. Results show that with increasing austenitizing temperature from 1 000 °C to 1 100 °C the grain size of austenite in steel 42CrMo increases from 16.3 μm to 30.3 μm, the grain size of steel rapidly increases as heating temperature is more than 1 100 °C and the austenite grain size in steel heating at 1 300 °C is 112.5 μm; the predicted value by model and measured value of austenite grain size in steel are better identical.

Material Index Steel 42CrMo for Bearing Ring, Continuous Heating, Austenite, Grain Growth, Model

盾构机是盾构施工中的主要施工机械, 广泛应用于城市地铁和隧道的挖掘。盾构机主轴承是盾构机的主要部件, 由于盾构机在既定施工段不容许失效, 盾构机主轴承的寿命和可靠性直接影响盾构机械的施工安全, 几乎等同于盾构机的寿命^[1]。感应淬火是生产大型轴承套圈、实现套圈外强内韧而保证轴承寿命的主要热处理方式。许多研究者对于各个钢种等温加热条件下的奥氏体长大模型研究较多, 进行了一系列的公式拟合计算, 但对于连续加热后的奥氏体长大模型的建立研究较少^[2-7]。本文基于 42CrMo 钢的等温奥氏体晶粒长大模型, 对其连续加

热过程中奥氏体长大模型进行了研究。

1 连续加热奥氏体长大模型的建立

1.1 等温加热奥氏体长大模型

等温过程奥氏体晶粒长大模型如式(1)所示:

$$d^n - d_0^n = K_0 \exp(K_1/T)t \quad (1)$$

式中: d - 等温长大后的奥氏体晶粒尺寸/μm; d_0 - 起始晶粒尺寸/μm; T - 温度/K; t - 时间/s; K_0, K_1, n - 与材料和温度有关的参数。根据前期的研究工作, 得到了 42CrMo 钢的等温奥氏体晶粒长大模型, 如式(2)所示, 该模型的建立考虑了原始奥氏体晶粒的

影响,更能精确反映奥氏体等温长大的规律。

$$d^{3.55} - d_0^{3.55} = 2.90 \times 10^{25} \exp(-64\,273.96/T)t \quad (2)$$

1.2 连续加热奥氏体长大模型

利用奥氏体等温长大模型以及相加性准则,将连续加热过程看成是若干个等温加热过程,如图 1 所示。在间隔时间 (t_{i-1}, t_i) 内长大后,得到奥氏体晶粒尺寸 d_i 可以通过如下方式求得^[8-10]:经过连续加热时间 t_{i-1} 后,在温度 T_{i-1} 时,奥氏体晶粒尺寸 d_{i-1} 可以看作是在 T_i 温度下保温时间 t_i^* 后得到的晶粒尺寸大小。其中, t_i^* 可以表示如下:

$$t_i^* = \frac{d_{i-1}^n - d_0^n}{K_0 \exp(K_1/T_i)} \quad (3)$$

式中: d_0 - 奥氏体转变后开始长大的起始晶粒。经过时间 Δt 后,晶粒尺寸 d_i 可以表示为:

$$d_i = [d_0^n + K_0(t_i^* + \Delta t) \exp(K_1/T_i)]^{1/n} \quad (4)$$

奥氏体转变温度一般稍高于 Ac_3 , 在这里设为 T_s , 假设连续加热过程中的加热速度为 ν , 在经历 i 个 Δt 时间后,此时的温度 T_i 可以表示为:

$$T_i = T_s + i \Delta t \nu \quad (5)$$

将整个连续加热过程中看作是 N 个等温加热过程,加热完成时的温度为 T_e , 则 Δt 可以表示为:

$$\Delta t = \frac{(T_e - T_s)/\nu}{N} \quad (6)$$

图 2 为整个计算的流程图, N 可以设为任意大于 2 的整数, 则 Δt 可以由式(6)求得, 给出计算的容许误差值 δ 。计算出第 1 个循环的奥氏体晶粒尺寸 d_1 后, 再将 N 值增大为原来的 2 倍, 得到下一个循环的奥氏体晶粒尺寸为 d_2 , 循环进行 j 次, 每个循环结束后, 计算 $[d_j - d_{j-1}]$ 的值。当 $[d_j - d_{j-1}] \leq \delta$

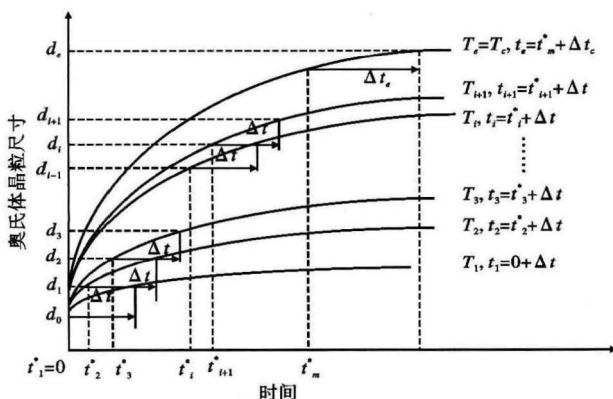


图 1 连续加热过程中奥氏体等温长大的相加性图解
Fig. 1 Schematics of principle additivity for isothermal austenite grain growth during definite continuous heating process

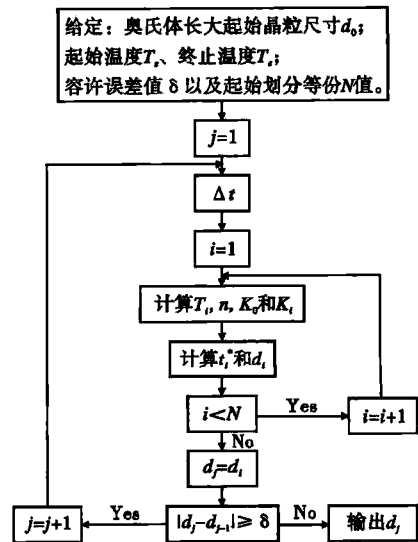


图 2 连续加热过程中奥氏体晶粒尺寸的计算流程图
Fig. 2 Flow chart of calculation procedure of austenite grain size during continuous heating process

许误差值 δ 值时, 停止循环, 得到的奥氏体晶粒尺寸 d_j 为最终的奥氏体晶粒尺寸值。

2 实验过程与结果

2.1 实验材料与方法

实验钢取自钢厂 42CrMo 钢退火态锻材, 原始铸锭尺寸为 480 mm × 480 mm, 出炉温度 1 200 °C, 终锻温度 850 °C, 锻材尺寸为 220 mm × 220 mm, 化学成分 (%): 0.40C, 0.23Si, 0.60Mn, 1.08Cr, 0.22Mo, 0.22Ni, 0.016P, 0.001S, 0.02Cu。将其加工成 $\Phi 6$ mm × 15 mm 的热模拟试样, 在 Gleeble-1500 热模拟实验机上以 100 °C/s 加热到不同奥氏体化温度 1 000 ~ 1 300 °C 后直接水淬。用 60 °C 饱和苦味酸加缓蚀剂侵蚀, 并用 Zeiss Axio Scope A1 显微镜观察, 根据 GB/T6394-2002《金属平均晶粒度测定方法》, 用 Micro-image & Process 软件测量统计奥氏体晶粒尺寸。

2.2 实验结果

由图 3 和图 4 可以看出, 随着加热温度由 1 000 °C 升高到 1 100 °C, 奥氏体晶粒尺寸增加缓慢, 由 16.3 μm 增加到 30.3 μm; 加热温度继续升高至 1 300 °C, 奥氏体晶粒尺寸显著增加到 112.5 μm。在 100 °C/s 的加热速度连续加热条件下, 奥氏体的开始粗化温度点为 1 100 °C。

3 模型的验证

利用建立的连续加热奥氏体长大模型, 对上述实验不同工艺参数下加热后的奥氏体晶粒尺寸进行

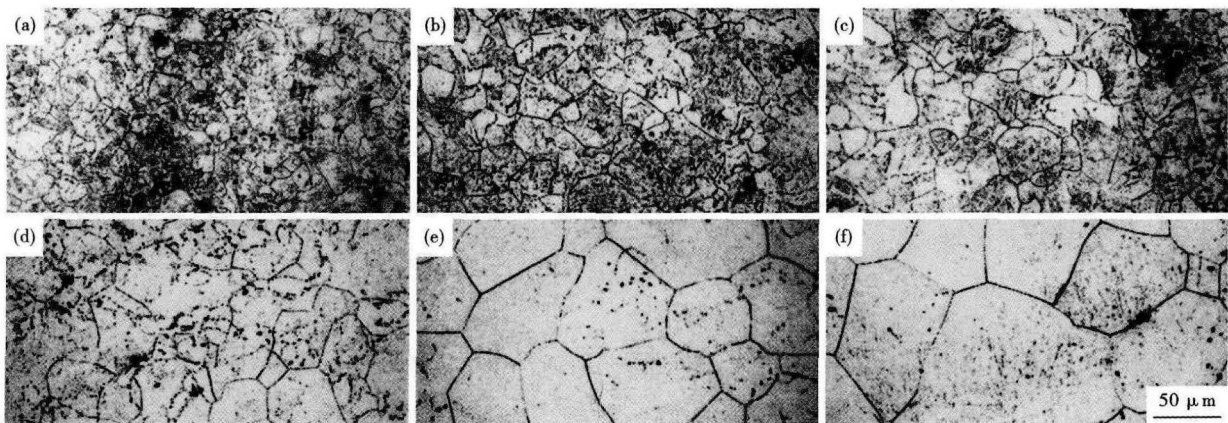


图3 连续加热到(a)1 000 ℃,(b)1 050 ℃,(c)1 100 ℃,(d)1 200 ℃,(e)1 250 ℃,(f)1 300 ℃水冷的42CrMo 钢原始奥氏体晶粒

Fig. 3 Original austenite grain of steel 42CrMo continuous heating to 1 000 ℃ (a), 1 050 ℃ (b), 1 100 ℃ (c), 1 200 ℃ (d), 1 250 ℃ (e) and 1 300 ℃ (f), water cooling

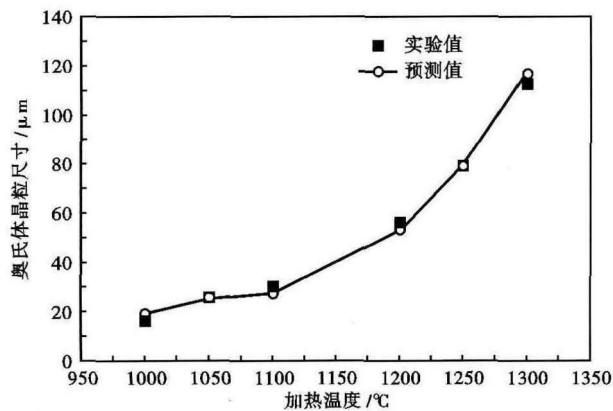


图4 1 000 ~ 1 300 ℃加热水冷的42CrMo 钢原始奥氏体晶粒尺寸实验值与预测值对比

Fig. 4 Comparison between calculated and measured original austenite grain size of steel 42CrMo heated at 1 000 ~ 1 300 ℃, water cooling

预测,将预测的结果与实验测得的结果进行对比。如图4所示,可以看出预测值与实验值吻合度较高。

参考文献

- [1] 胡胜利,乔世珊. 盾构机概论[J]. 建筑机械,1999(11):16-20.
- [2] Apple C A, Krauss G. The Effect of Heating Rate on the Martensite to Austenite Transformation in Fe-Ni-C Alloys[J]. Acta Metallurgica, 1972, 20(7):849-856.
- [3] Xu Y, 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.
- [4] Manohar P A, Dunne D P, Chandra T, et al. Grain Growth Predictions in Microalloyed Steels[J]. ISIJ International, 1996, 36(2):194-200.
- [5] 金桂香,王福明,李克非,等. 82B 高碳钢奥氏体长大行为[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(7):41-46.
- [6] 刘振宝,杨志勇,梁剑雄,等. 超高强度马氏体时效不锈钢中逆转变奥氏体的析出与长大行为[J]. 金属热处理, 2010, 35(2):11-15.
- [7] 孙乐飞,王福明. 海洋平台用钢 E690 奥氏体晶粒长大行为[J]. 金属热处理, 2014, 39(1):1-6.
- [8] Anelli E. Application of Mathematical Modelling to Hot Rolling and Controlled Cooling of Wire Rods and Bars[J]. ISIJ International, 1992, 32(3):440-449.
- [9] Jiao S, Penning J, Leysen F, et al. The Modeling of the Grain Growth in a Continuous Reheating Process of a Low Carbon Si-Mn Bearing TRIP Steel[J]. ISIJ International, 2000, 40(10):1035-1040.
- [10] Denis S, Farias D, Simon A. Mathematical Model Coupling Phase Transformations and Temperature Evolutions in Steels[J]. ISIJ International, 1992, 32(3):316-325.

4 结论

(1)利用42CrMo钢的等温加热模型以及相加性原则,建立了钢在连续加热过程中的奥氏体晶粒长大模型。该模型考虑了原始晶粒尺寸的影响,主要包括在间隔时间(t_{i-1}, t_i)内晶粒尺寸 d_i 模型以及保温时间 t_i^* 模型的建立。

(2)通过热模拟实验得到在100 ℃/s的加热速度连续加热条件下,随着加热温度的升高,奥氏体晶粒尺寸增加,42CrMo钢的开始粗化温度为1 100 ℃。

(3)将建立的模型利用计算机程序对热模拟实验不同工艺下的奥氏体晶粒尺寸进行预测,预测值与实验值吻合度较高,验证了模型的正确性。

“十二五”国家863计划项目(No. 2012AA03A503); 北京科技大学本科生创新计划项目(国家级, No. 14180008)

郑禹(1993-),男,本科生(北京科技大学),材料成型与控制工程。E-mail:402491962@qq.com

收稿日期:2014-06-23