

C-Mn 钢热轧带奥氏体再结晶晶粒尺寸的预测

李 壮 周晓光 王佳夫 吴 迪

(东北大学, 沈阳 110004)

张平礼

(辽宁省教育厅, 沈阳 110032)

摘 要 在研究板带控轧控冷过程中钢中显微组织演变过程奥氏体再结晶、碳氮化合物析出、奥氏体相变和组织性能对应关系的物理冶金模型的基础上, 通过 Gleeble-1500 热模拟机和计算机模拟计算得出成分(%) 0.16C, 0.06Si, 1.30Mn 钢在 1 173 ~ 1 081 K 经 7 道次热变形后奥氏体晶粒尺寸为 43 μm , 同时实测 7 道次变形后轧钢组织中奥氏体尺寸为 38 μm , 相对误差 13%。计算机模拟计算的奥氏体再结晶晶粒尺寸与实测结果吻合较好。

关键词 计算机模拟 热轧带 C-Mn 钢 奥氏体晶粒尺寸

Prediction of Austenite Recrystallized Grain Size in Hot Rolled Strip of C-Mn Steel

Li Zhuang, Zhou Xiaoguang, Wang Jiafu and Wu Di

(Northeastern University, Shenyang 110004)

Zhang Pingli

(Liaoning Provincial Education Department, Shenyang 110032)

Abstract Based on the research on physical metallurgy prediction model including the model of austenite recrystallization in microstructure evolution, carbo-nitride precipitation, and relation between austenite phase transformation and structure-properties during strip control rolling and cooling, the austenite grain size of 0.16C-0.06Si-1.30Mn steel simulated calculated by computer after 7 pass hot deformation between 1 173 K and 1 081 K by Gleeble-1500 hot simulator was 43 μm , while the actual-measured austenite grain size in structure of strip after 7 pass deformation was 38 μm , the relative error was 13%. Therefore the austenite recrystallization grain size simulated calculated by computer better conform to that of actual measured value.

Material Index Computer Simulation, Hot Rolled Strip, C-Mn Steel, Austenite Grain Size

热轧带钢生产是钢铁生产中非常关键性的生产过程之一。目前 90% 以上的薄钢板要经过热轧工序生产出来^[1]。实现热轧板带的生产过程中对组织-性能的预测和控制的方法就是以物理冶金学原理为基础, 建立不同生产工艺条件下发生的各种金属学现象的数学模型, 从而准确的预测生产条件的改变所导致的显微组织和力学性能的变化。要建立一个奥氏体再结晶模型, 首先应由这几个部分组成: 轧制的过程中所发生的动态再结晶; 动态再结晶后发生的晶粒长大; 间隔时间所发生的静态再结晶; 静态再结晶后奥氏体晶粒的长大。通过本模型的建立可以预测出在轧制期间任意时刻的奥氏体晶粒尺寸; 可以通过预测值调整其参数, 使奥氏体晶粒在轧制过程中达到最大

可能的细化; 为随后的奥氏体相变模型提供初始条件。

1 奥氏体再结晶模型的建立

1.1 初始奥氏体晶粒尺寸计算

出加热炉时钢中奥氏体晶粒尺寸^[2]为:

$$d_0(t=0) = A \cdot \alpha^{-0.15}$$

$$d_0(t) = d_0(t=0) + 3.68 \times 10^8 C_{\text{eq}}^{-1.43} \cdot$$

$$\exp\left(-\frac{20\,000}{T}\right) \cdot t^{0.24}$$

$$C_{\text{eq}} = [C] + [Mn]/6$$

式中: A -常数; α -升温速度(K/min); C_{eq} -碳当量。

1.2 低碳钢的动态和静态再结晶模型

动态再结晶动力学及动态再结晶的晶粒尺寸

方程可通过应力-应变曲线,采用下面方程描述^[2]:

$$X_D = 1 - \exp[-0.693\{(\epsilon - \epsilon_c)/\epsilon_p\}^2]$$

$$d_{DRX} = 16\,000 Z^{-0.23}$$

$$Z = \epsilon_{\text{平均}} \cdot \exp(Q_{\text{rec}}/RT)$$

式中: X_D -动态再结晶率; Z -Zener-Hollomen^[3] 参数; Q_{rec} (kJ/mol)-动态再结晶激活能; R 和 T -分别为气体常数和绝对温度; d_{DRX} -动态再结晶完成时的晶粒尺寸; ϵ_c 和 ϵ_p -分别为动态再结晶临界应变和峰值应变所对应的应变。

ϵ_c 和 ϵ_p 二者之间的关系可表示为^[4]:

$$\epsilon_c = 0.8 \epsilon_p$$

而 ϵ_p 与初始奥氏体晶粒直径 d_0 和 Z 参数之间的关系为:

$$\epsilon_p = A^* d_0^{0.5} Z^{0.16}$$

式中 A^* 为常数。

当 $\epsilon < \epsilon_c$ 时,低碳钢变形后发生静态再结晶软化。钢种的化学成分对静态再结晶有显著的影响,这主要是通过化学成分影响激活能 Q_{rec} 来实现的。静态再结晶率达到 50% 的时间 $\tau_{0.5}$, 可由下式确定^[4]:

$$\tau_{0.5} = A \epsilon^k d_0^p \exp(Q_{\text{rec}}/RT)$$

式中: ϵ 为应变; A 、 p 和 k 均为常数。这里取 $p = 2$, $k = 2$ 。由上式可得:

$$\ln \tau_{0.5} = \ln A + k \ln \epsilon + p \ln d_0 + (Q_{\text{rec}}/RT)$$

根据 Sellars 等人的研究结果, Q_{rec} 与变形条件 (ϵ , T) 基本无关,因此对于某一钢种, $\ln \tau_{0.5}$ 与 $1/T$ 成直线关系,直线斜率即为 Q_{rec}/R 。根据实验数据测出不同温度下 $\tau_{0.5}$ 的数值,可得到 $\ln \tau_{0.5}$ 与 $1/T$ 之间的关系,经回归分析可得到 Q_{rec} 和 A 。经实验数据回归后得出 $A = 2.5 \cdot 10^{-19}$ 。

对于静态再结晶动力学的研究,一般按照 Avrami 方程^[4]:

$$X_s = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{t_{0.5}}\right)^n\right]$$

1.3 再结晶后晶粒的长大

动态再结晶后将发生晶粒的长大,可以用下

式表示^[5]:

$$d_{DC} = d_D^2 + 39\,000 \cdot C_{\text{eq}}^{-1.43} \cdot \exp(-5\,380/T) \cdot t^{0.3}$$

对静态再结晶后的晶粒长大情况采用江坂-彬的模型,取:

$$d_{SC}^2 = d_s^2 + A \cdot (t - 4.32 t_{0.5}) \cdot \exp(-Q_{\text{rec}}/RT)$$

式中: $A = 4.0 \cdot 10^7$, $Q_{\text{rec}} = 113\,000$ kJ/mol

由于在不同时间并不是所有的奥氏体都发生了再结晶,未发生再结晶的晶粒尺寸可以用下式表示:

$$d_N = d_0 \cdot \exp(-\epsilon/4)$$

所以奥氏体最终的晶粒尺寸可表示为^[2]:

$$d_{\text{平均}} = d_{SC} \cdot X_s + d_{DC} \cdot X_D + d_N (1 - X_s - X_D)$$

2 热模拟实验及结果分析

实验在轧制技术及连轧自动化国家重点实验室 Gleeble-1500 热/力模拟机上进行。实验采用的是宝钢热轧厂提供的厚度为 50 mm 的坯料,其化学成分 (%) 为: 0.16C, 0.06Si, 1.30Mn, 0.017P。

取热模拟机上不同道次热变形及保温后的试样,经水淬冷至室温(图 1),将处理过的试样沿长

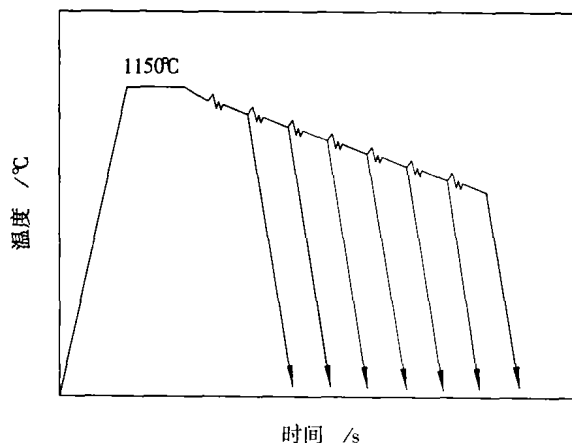


图 1 C-Mn 钢 50 mm 带坯 7 道次热变形试验工艺示意图

Fig.1 Schematic of 7-pass hot deformation test for 50 mm strip slab of C-Mn steel

度方向切开,用苦味酸腐蚀出奥氏体晶界,在 Leica DMIRM 显微镜下,计算其每一道次的晶粒尺寸的大小。在计算的过程中,对每一道次的实验采取多次测量,取平均值。

将7道次轧制的轧制参数带入计算机,实验参数见表1。

表1 Gleeble-1500 热模拟机 C-Mn 钢轧制实验参数
Table 1 Test parameters of C-Mn steel rolling by Gleeble 1500 hot simulator

轧制道次	轧制时间/s	间隙时间/s	入口厚度/mm	出口厚度/mm	轧制速度/ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	工作辊直径/mm	轧制温度/K
F ₁	5	5	42.7	27.6	770	776	1 173
F ₂	2.9	3.7	27.6	18.2	1 356	816	1 149
F ₃	1.81	3	18.2	12.6	2 150	844	1 130
F ₄	1.35	2.4	12.6	10.3	3 200	719	1 115
F ₅	1	1.89	10.3	8.8	4 280	716	1 104
F ₆	0.8	1.25	8.8	8.2	5 280	739	1 093
F ₇	0.65	0.82	8.2	7.5	6 110	745	1 081

注:C、Mn 含量分别为 0.16% 和 1.3%。

由此得出在轧制期间的奥氏体晶粒长大的规律。计算机模拟其具体轧制后和间隙时间后奥氏体的晶粒尺寸和实测奥氏体晶粒尺寸对比见表2。

表2 计算机模拟计算和实测奥氏体晶粒尺寸对比/ μm
Table 2 Comparison between computer-simulated calculated and actual measured austenite grain size / μm

轧制道次	计算机模拟晶粒尺寸		实测晶粒尺寸
	轧制后	轧制间隙时间	
F ₁	66	82	70
F ₂	63	75	66
F ₃	62	72	60
F ₄	55	64	56
F ₅	49	57	52
F ₆	47	53	50
F ₇	43	—	38

采用相同参数的热模拟实验获得的试样经金相观察,图2为第7道次轧制后经淬火得到马氏体,再用苦味酸腐蚀得到的奥氏体晶粒。

由结果可见,计算机模型输入实验参数后得到的结果与实验室的实测数据基本吻合,经7道次轧制后,模拟晶粒尺寸为 $43 \mu\text{m}$,实测晶粒尺寸为 $38 \mu\text{m}$,相对误差 13%,这说明该模型可以预测奥氏体再结晶晶粒尺寸。

3 结论

以物理冶金学模型为基础,分析了带钢热轧过程中奥氏体动态再结晶和静态再结晶晶粒尺寸的预测模型,得出 C-Mn 钢 50 mm 带坯经7道次热轧至 7.5 mm 带钢时的模拟计算的奥氏体晶粒尺

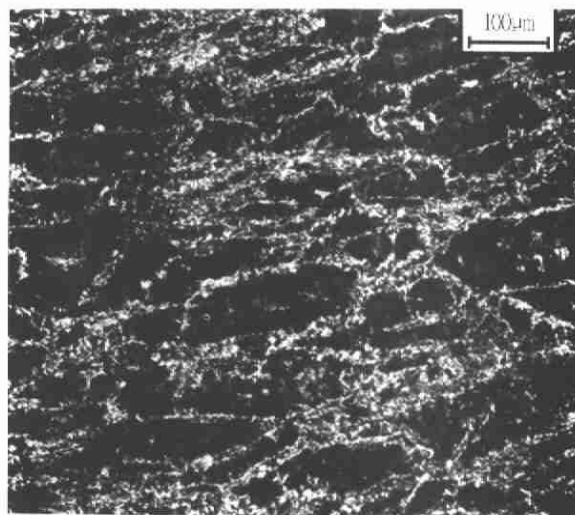


图2 C-Mn 钢 7 道次轧制后的组织
Fig.2 Structure of C-Mn steel after 7 pass rolling

寸为 $43 \mu\text{m}$,由金相观察和测定的7道次轧制后的平均奥氏体晶粒尺寸为 $38 \mu\text{m}$ 。通过计算机模拟与实验结果的比较可得奥氏体晶粒尺寸的相对误差为 13%,可以看出本文所采用的奥氏体晶粒尺寸的计算模型可以较准确地预测 C-Mn 钢带的多道次热轧后的奥氏体再结晶晶粒尺寸。

本课题为国家自然科学基金资助项目(批准号:50334010)

参考文献

- Ohjoon Kwon. A Technology for the Prediction and Control of Microstructural Change and Mechanical Properties in Steel. ISIJ International, 1992, 32: 350
- 濂户一洋,王 冰,王 萍,柳长虹.动态再结晶超微细结晶化的高强度热轧钢板.国外金属加工,2003,24:32
- 许云波,刘相华,王国栋.低碳钢热轧过程中工艺参数及组织演变的预测.钢铁,2002,37(9):47
- Laasraoui A, Jonas J J. Recrystallization of Austenite After Deformation at High Temperatures and Strain Rates-Analysis and Modeling. Metall Trans, 1991, 22A: 151
- Siciliano F, Minami K, Mccagno T M, et al. Mathematical Modeling of the Mean Flow Stress Fractional Softening and Grain Size during the Hot Strip Rolling of C-Mn Steels. ISIJ International, 1996, 36: 1500

李 壮,男,40岁,副教授,博士研究生。工作单位:沈阳航空工业学院,邮编 110034。1986年毕业于吉林工业大学,从事金属材料的组织与性能研究。

收稿日期:2004-08-24