

·试验研究·

轧制参数对板带晶粒尺寸影响的模拟分析和工艺优化模型

李立新 胡晶晶 汪凌云
(武汉科技大学, 武汉 430081) (重庆大学, 重庆 400044)

摘要 利用所建立的热轧微合金化钢板带晶粒尺寸仿真系统对开轧温度、变形速度、变形程度分配、道次间隙时间等工艺参数对晶粒尺寸的影响进行模拟分析和计算,在此基础上建立了晶粒尺寸与工艺参数间关系的 BP 网络模型,进而建立了工艺优化模型,以充分利用静态再结晶机制,细化微合金钢板带的晶粒。

关键词 微合金化钢 板带 模拟计算 BP 模型 工艺优化模型

Simulation Analysis of Effect of Rolling Parameters on Grain Size and Technology Optimization Model

Li Lixin and Hu Jingjing
(Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)
Wang Lingyun
(Chongqing University, Chongqing 400044)

Abstract The effect of technology parameters such as initial rolling temperature, deformed speed, draft distribution and interpass time on grain size has been simulated analyzed and calculated using established the simulation system for grain size of hot rolled plate and strip of microalloying steel. And based on this, a Back Propagation (BP) network for the relation between grain sizes and technology parameters and the technology optimization model are established to completely utilize static recrystallization mechanism, fine grain size of plate and strip of microalloying steel.

Material Index Microalloying Steel, Plate and Strip, Simulated Calculation, Back Propagation Model, Technology Optimization Model

借助仿真模拟系统的计算结果,通过建立性能质量与工艺参数间关系的 BP 网络模型来优化生产工艺,充分利用静态再结晶机制,达到细化晶粒的目的。

1 工艺参数对晶粒尺寸影响的模拟分析

为分析开轧温度、轧制速度及其分配、变形程度分配及道次间隙时间对产品晶粒尺寸的影响,用成分 (%) 为 0.05C, 1.57Mn, 0.50Cu, 0.05Nb, 0.25Mo, 0.001 2B 微合金钢热轧板带晶粒尺寸仿真模拟系统^[1]对各工艺参数与轧制产品晶粒尺寸间的函数关系进行模拟计算,轧机及轧制工艺参数见文献[1]。

1.1 开轧温度

取各道次轧制速度为现场工艺的平均速度即 $v(i) = 1\ 915\ \text{mm/s}$,道次间隙时间 $t(i) = 6\ \text{s}$,此时成品晶粒尺寸与开轧温度的函数关系示于图 1(a)。由该图可知,随开轧温度的提高晶粒尺寸逐渐减小,但当开轧温度超过一定值时,晶粒尺寸反而随温度的提高而增大。这是因为随开轧温度的

提高,再结晶过程易于进行,因再结晶而得到的细小晶粒所占比例增加,所以混晶组织的晶粒平均直径减小,但当开轧温度达到一定值时,尽管随开轧温度的提高再结晶分数增大,但因再结晶的晶粒尺寸增大较多,所以晶粒的平均直径亦增加。

1.2 变形速度

(1) 速度分配。取开轧温度 $T_0 = 950\ ^\circ\text{C}$,各道次间隙时间 $t(i) = 6\ \text{s}$,第 1 道次轧制速度 $v(1) = 1\ 800\ \text{mm/s}$,终轧道次轧制速度 $v(9) = 2\ 850\ \text{mm/s}$,中间道次轧制速度依抛物线规律分布,即

$$v(i) = c_v i^2 + (131.25 - 10c_v)i + 9c_v + 1\ 668.75 \quad (1)$$

式中: c_v 为反映轧制速度分配关系的一常数。

图 1(b)为速度分配常数与晶粒尺寸的关系, c_v 值对最终产品的晶粒尺寸影响不大。

(2) 轧制速度。图 1(c)为开轧温度 $T_0 = 950\ ^\circ\text{C}$,道次间隙时间 $t(i) = 6\ \text{s}$,各道次轧制速度与最终产品晶粒尺寸间的函数关系(图中横坐标为各道次速度与平均轧制速度 \bar{v} 的比值)。显然,当

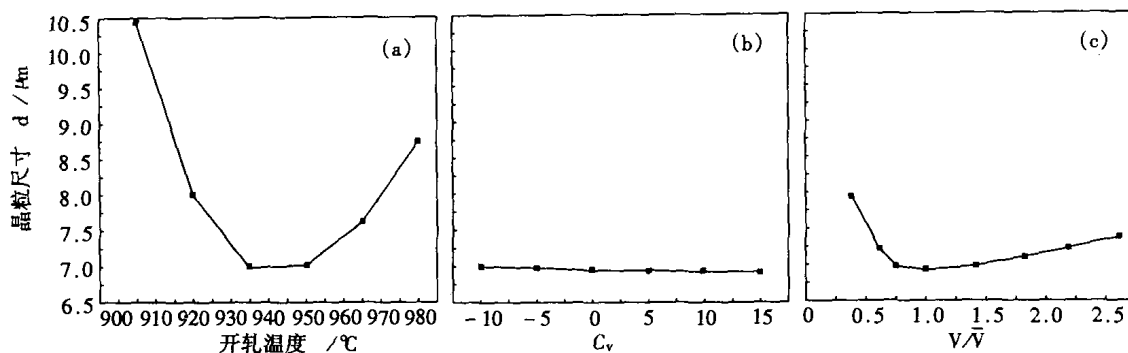


图 1 开轧温度(a)、速度分配 C_v 值(b)、轧制速度 V /平均轧制速度 \bar{V} (c)对晶粒尺寸的影响

Fig. 1 Effect of initial rolling temperature (a), rolling speed distribution (b) and rolling speed V /average rolling speed \bar{V} (c) on grain size

速度小于某一值时,随着轧制速度的提高,晶粒尺寸减小较快,但超过这一轧制速度后,平均晶粒尺寸反而增大。这是因为当速度值较低时,随着速度的提高,再结晶分数增长较快,因而晶粒平均尺寸以较大速度减小;随着速度值的进一步增大,道次间隙时间减小,轧制温度相应提高,从而使得晶粒尺寸反而增加。

1.3 变形程度分配

取第 1 道次轧件进口厚度为 51.6 mm,成品道次轧件出口厚度为 14 mm,若令各道次轧件出口厚度与道次数间呈抛物线规律,则

$$h(i) = c_h i^2 - (11c_h + 4.17778)i + 10c_h + 55.77778 \quad (2)$$

式中: c_h 为反映轧件厚度分布的一常数, c_h 值越大,压下量越集中于前面道次,现场生产工艺与 $c_h = 0.4$ 时的情况相当。

图 2(a)为压下分配与成品晶粒尺寸间的函数关系,显然 c_h 值越大,晶粒平均直径亦越大,即接近成品道次压下量越大,晶粒尺寸越小,这是由于此时再结晶分数增加较多,而再结晶晶粒尺寸

变化不大的缘故。

1.4 道次间隙时间

图 2(b)为开轧温度 $T_0 = 950\text{ }^\circ\text{C}$,各道次轧制速度 $v(i) = \bar{v}$,现场压下分配条件下道次间隙时间与晶粒尺寸间的函数关系。由该图可知,随着间隙时间的增加,晶粒直径先较快减小,当间隙时间达到一定值时,随着间隙时间的增加,晶粒直径反而增大。这是因为随着间隙时间的增加,再结晶分数增大,因温度降低使得再结晶晶粒尺寸减小,从而导致晶粒平均直径下降较快,但当间隙时间达到一定值时,再结晶分数增长较慢,并有可能因为温度下降较多而导致再结晶分数减少,加上再结晶晶粒尺寸的减小有限,从而使得晶粒尺寸随着间隙时间的增加而增加。

2 晶粒尺寸与工艺参数关系的 BP 网络模型

因单隐蔽层足以描述复杂的非线性过程^[2],故选取晶粒尺寸与热加工参数间关系的神经网络模型结构为一个输入层、一个隐蔽层和一个输出层。鉴于速度分配对产品最终晶粒尺寸影响不大,选取道次间隙时间、开轧温度、轧制速度、反映

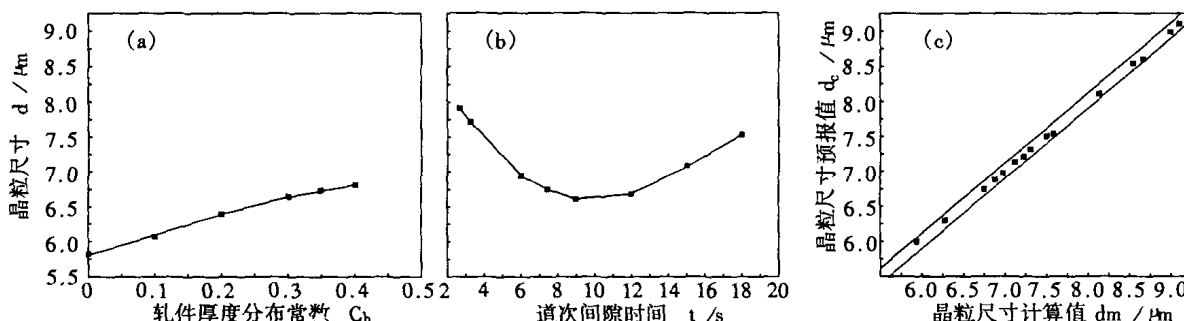


图 2 压下分配(a)、道次间隙时间(b)对晶粒尺寸的影响;晶粒尺寸计算值 d_m 和预报值 d_c 的对比(c)

Fig. 2 Effect of distribution of reduction in pass (a) and interpass time (b) on grain size; and comparison between calculated value and measured value of grain size (c)

变形程度的厚度分配系数作为输入层的 4 个输入量,轧后晶粒尺寸作为输出层的 1 个输出量。

参考图 1 和 2(a)、(b),选取开轧温度 $T_0 = 925\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $940\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $955\text{ }^\circ\text{C}$ 、 $970\text{ }^\circ\text{C}$,道次间隙时间 $t(i) = 6\text{ s}$ 、 9 s 、 12 s 、 15 s ,各道轧制速度 $v(i) = 0.75\bar{v}$ 、 \bar{v} 、 $1.25\bar{v}$ 、 $1.5\bar{v}$,反映压下分配的常数 $c_h = 0.1$ 、 0.2 、 0.3 、 0.4 ,按正交表^[3]L(4⁵)进行 16 次计算,可得各自变量不同水平组合情况下轧件最终产品晶粒尺寸计算值,以所得数据为训练样本,经 9 000 余次训练后,得网络输出误差不大于 0.73%,图 2 (c)表明,BP 网络的预测结果十分理想。

3 工艺优化及应用

3.1 优化模型的建立

轧制工艺优化问题可表述为求成品晶粒直径函数 $d(x)$ 的极小值,其中 x 为由开轧温度 T_0 、道次间隙时间 $t(i)$ 、轧制速度 $v(i)$ 及反映变形程度分布的 c_h 组成的一向量,根据前述计算结果,取

$$925 \leq T_0 \leq 970 \quad (3)$$

$$6 \leq t(i) \leq 15 \quad (4)$$

$$0.75 \bar{v} \leq v(i) \leq 1.5 \bar{v} \quad (5)$$

$$0.1 \leq c_h \leq 0.4 \quad (6)$$

上述约束条件均可写作 $g_i(x) \leq 0$ 的形式,于是轧制工艺优化问题可归结为如下带不等式约束的非线性优化问题:

$$\begin{cases} \min d(x) \\ \text{st. } g_i(x) \leq 0 (i = 1, 2 \dots 8) \end{cases} \quad (7)$$

3.2 优化模型的求解及结果

运用坐标轮换法^[4],可得带不等式约束非线性优化模型(7)的优化解为开轧温度 $T_0 = 956\text{ }^\circ\text{C}$,道次间隙时间 $t(i) = 8.7\text{ s}$,各道轧制速度 $v(i) = 1.196\bar{v}$,反映压下分配的常数 $c_h = 0.1$,与之相应,各道次再结晶软化分数及晶粒尺寸示于图 3,产品晶粒尺寸较现场生产工艺减少 13.37%。

3.3 对比分析

由图 3 及文献[1]数据可知,与现场生产工艺相比,采用优化工艺生产时,各道次间的间隙时间

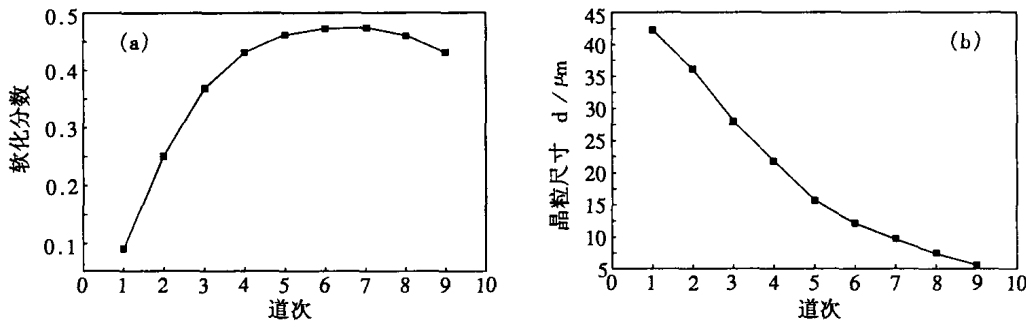


图 3 优化工艺条件下各道次再结晶分数(a)和各道次晶粒尺寸(b)

Fig.3 Recrystallization fraction (a) and grain size (b) of each pass at optimal technology conditions

里均发生了较大程度的静态再结晶,特别是在第 5 道以后,静态再结晶分数仍然较大,致使晶粒尺寸随轧制道次逐道明显减小,从而使得最终产品的晶粒尺寸比较细小。这也说明,对于那些不易产生动态再结晶的金属材料,通过静态再结晶来细化晶粒尺寸也是完全可能的^[5,6]。

4 结论

(1) 热轧板带晶粒尺寸仿真模拟系统的计算结果能较好揭示各工艺参数对产品组织和晶粒尺寸的影响规律;BP 网络模型能很好反映各工艺参数对产品晶粒尺寸影响的函数关系。

(2) 通过优化生产工艺,充分利用静态再结

晶机制以细化晶粒,可达到良好效果。

参考文献

- 1 李立新,汪凌云.热轧板带晶粒尺寸变化的计算机模拟.特殊钢,2004,25(5):38
- 2 王永骥,涂健.神经网络控制.北京:机械工业出版社,1999
- 3 白新桂.数据分析与试验优化设计.北京:清华大学出版社,1986
- 4 刘惟信,孟嗣宗.机械最优化设计.北京:清华大学出版社,1986
- 5 Matsumura Y, Yada H. Evolution of Ultrafine-Grained Ferrite in Hot Successive Deformation. ISIJ International, 1987, 27(6): 492
- 6 Ishikawa F, Takahashi T, Ochi T. Intragranular Ferrite Nucleation Medium Carbon Vanadium Steels. Metall. and Mater. Trans., 1994, 25A(5): 929

李立新(1963-),男,教授,材料成型及控制工程研究。

收稿日期:2005-01-10