

高碳钢盘条冷却线 FeO 层厚百分比模型及其应用

王 煜¹ 程晓茹¹ 范敬国² 沈金龙²

(1 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081; 2 武汉钢铁股份有限公司, 武汉 430083)

摘 要 72A 高碳钢(0.67%~0.73% C)盘条的氧化铁皮总量和氧化铁皮中 FeO 层厚百分比显著影响盘条的剥离性能。利用人工神经网络和数理方法,建立 BP 网络模型,实现了高碳钢线材氧化过程中的冷却制度与氧化后生成的 FeO 层厚百分比之间的复杂的非线性映射关系。将实测的参数与网络模拟结果进行比较得出,建立的 BP 网络训练精度非常高,泛化能力强,能很好的反应各个因素对 FeO 层厚百分比的影响。生产应用结果表明,根据 BP 网络模拟结果改进冷却工艺,适当降低吐丝温度,提高 850~720 °C 区间冷却速度,使氧化铁皮中 FeO 层厚百分比减小,改善了机械剥离性能。

关键词 72A 高碳钢盘条 剥离性能 人工神经网络 冷却制度 FeO 层厚百分比

Establishment of FeO Thickness Percentage Model of High Carbon Steel Coil at Cooling Line and Its Application

Wang Yu¹, Cheng Xiaoru¹, Fan Jingguo² and Shen Jinlong²

(1 Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2 Wuhan Iron and Steel Company Limited, Wuhan 430083)

Abstract The iron-oxide scale total thickness and FeO layer thick percentage of 72A high carbon steel (0.67%~0.73% C) coils have markedly influence on coil stripping performance. With using artificial neural networks and mathematical method the BP network model is established to realize the complex non-linear mapping relationship between the cooling schemes during oxidation process of high carbon steel wire and the formed FeO layer thickness percentage after oxidation. Compared between measured parameters and network simulation results, it is obtained that the training accuracy of BP network is very high and has better generalization ability to quite well response the effect of each factor on FeO layer thickness percentage. The production application results show that based on BP network simulation results to improve cooling process, suitable decreasing wire laying-off temperature and increasing cooling speed at 850~720 °C, the FeO layer thickness percentage of scale decreases in order to improve the mechanical peeling performance.

Material Index High Carbon Steel 72A Coil, Peeling Performance, Artificial Neural Network, Cooling Scheme, FeO Layer Thickness Percentage

钢材在冷却过程中会发生氧化现象,生成氧化铁皮,氧化铁皮是由 FeO、Fe₃O₄、Fe₂O₃ 组成的^[1]。最内层靠近基体的是 FeO 层,比较疏松、易开裂、易酸洗,呈蓝灰色;第二层为致密的 Fe₃O₄ 层,无裂缝、耐腐蚀、不易酸洗,呈黑色;最外层为 Fe₂O₃ 层,比较致密,呈红色。一般情况下,温度高于 570 °C 时,热轧钢材氧化层中,FeO 的含量是最多的,对于 72A 高碳钢盘条而言,当温度达到 900 °C 时,FeO 层甚至可以占到 95%,而相对来说,Fe₃O₄ 和 Fe₂O₃ 的含量就十分少了。在实际生产过程中,氧化铁皮成分和结构会对其剥离性能产生很大的影响^[2-3],即 FeO 层厚百分比会对剥离性能产生很大的影响。如果需要采用酸洗对钢材进行剥离,则缺陷较多、结构疏松的

FeO 层厚百分比值越大越好,如果采用机械剥离,则应当适当增加拥有致密结构的 Fe₃O₄ 含量,而 FeO 层厚百分比值越小越好。

1 实验基础

试样为经酸洗、打磨的 72A 高碳钢线材,尺寸为 Φ5.5 mm × 300 mm,化学成分如表 1 所示。

把试样放入充满氩气的罐体中,将罐体放入特制的冶金加热炉里加热至指定温度,待温度稳定于

表 1 72A 高碳钢盘条化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of high carbon steel 72A / %						
C	Si	Mn	P	S	Al	Cr + Ni + Cu
0.67 ~	≤	0.44 ~	≤	≤	≤	≤0.010
0.73	0.30	0.56	0.02	0.015	0.005	

通讯作者:程晓茹,教授,武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室,武汉 430081;E-mail:1157831942@qq.com

预设温度后保温 30 s,将氩气置换成空气,用鼓风机模拟斯太尔摩风冷线对试样进行冷却,通过控制鼓风机风量的大小来实现不同的冷却工艺制度。

将试样制成 8 mm 长的小样块,在扫描电镜(SEM)下观测,标出氧化铁皮各层厚度,得到 FeO 层厚百分比的实测数据。

2 FeO 层厚比模型建立

运用 BP 网络^[4]的基本计算方法和原理,建立冷却制度与氧化铁皮 FeO 层厚百分比模型,该模型由一个输入层、一个隐含层和一个输出层构成。输入量为吐丝温度(P1)和线材冷却过程中每一阶段的冷却时间占整个冷却时间的比例(P2~P12)。之所以将冷却时间分成若干段进行分析,是因为在等温条件下,FeO 层与 Fe₃O₄ 层所占的比例是一个固定值,但是实际生产中斯太尔摩冷却线上是一个连续温降的过程,温度对于氧化层结构的影响是一个非线性的影响。把冷却时间分成了不同温度区间的若干段(共 11 段),可以对每一段进行线性分析,进而探讨不同的冷却工艺对 FeO 层厚百分比的影响规律。各输入量的原始数据共有 39 组,其中部分数据如表 2 所示,BP 网络的输入变量见表 2,输入层共有 12 个节点。输出量则为氧化铁皮中 FeO 层厚百分比,即 FeO 层厚占整个氧化铁皮层厚的比例,只有一个节点。BP 模型结构图如图 1 所示。

3 输入输出数据的预处理

为了使网络训练里面的输入输出量具有同等重

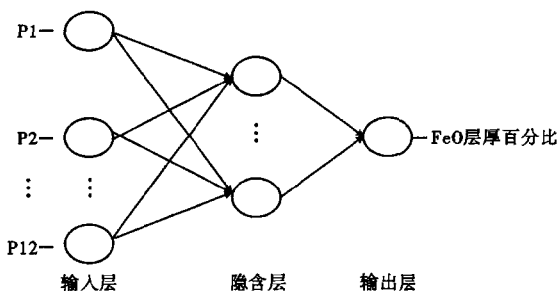


图 1 BP 模型结构图

Fig. 1 Diagram of BP model structure

表 2 吐丝温度,各温降区间冷却时间和输入变量

Table 2 Wire laying-off temperature, cooling time in each temperature decreasing zone and input variable

试样编号	吐丝温度/℃	吐丝温度-850℃段冷却时间/s	各温降区间(℃)的冷却时间/s										
			850~810	810~780	780~750	750~720	720~690	690~660	660~630	630~600	600~570	570~350	
			P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	
1	899	14.8	3.3	1.0	1.2	1.4	1.5	1.5	1.8	1.9	2.0	27.9	
2	905	12.0	2.9	1.6	1.7	1.5	2.1	2.2	2.6	2.7	3.0	24.3	
3	892	16.7	3.1	1.0	1.2	1.6	1.4	1.6	2.4	1.9	1.8	34.1	
4	897	19.9	2.1	1.7	2.0	2.1	2.2	2.2	25.2	19.2	39.2	202.8	
5	898	18.3	3.7	1.4	1.3	1.1	1.2	1.3	16.1	12.0	22.1	47.3	
6	900	14.4	2.7	1.7	1.8	1.8	2.3	2.7	22.0	28.2	25.8	58.7	
7	900	19.6	1.4	1.3	1.2	1.4	1.5	1.8	1.9	2.1	2.4	179.7	
8	900	22.9	2.1	1.1	0.8	0.9	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	13.3	
9	900	14.6	2.6	1.8	1.9	2.0	2.3	2.1	3.8	3.1	4.0	187.8	
10	898	17.2	5.8	2.4	3.1	3.2	2.3	3.1	3.0	2.8	2.4	15.8	

注:P2~P12 为各冷却温度区间冷却时间百分比

要的地位,常常需要对输入输出数据进行归一化处理,将这些变量限制在[0,1]或者[-1,1]之间,归一化后既可以控制输出值的绝对误差,又可以加快收敛^[5]。公式(1)为本程序所用的归一化的公式:

$$pn(n,1:m) = [p(n,1:m) - X_{min}] / (X_{max} - X_{min}) \quad (1)$$

式中:p- 原始输入输出数据;pn- 归一化之后的数据;n- 第 n 组输入或输出数据;m- 数据总组数;X- 输入或输出数据;X_{max}、X_{min}- 第 n 层输入或输出数据里的最大值和最小值。

完成归一化之后,需要确定隐层节点数,如果隐层节点数太少,则网络获取信息的能力差,不能体现样本的规律;如果隐层节点数太多,又会出现过度饱和,影响了模型的泛化能力^[1]。在建立模型的过程中,可以采用“试凑法”来确定隐含层的节点数^[5],公式(2)为本程序预估节点数目采用的经验公式:

$$m = \sqrt{n+h} + \alpha \quad (2)$$

式中:m- 待求的隐层节点数;n- 输入层节点数;h- 输出层节点数;α- 1~10 的常数。

通过反复的试凑和训练,最终确定 6 为最佳的隐含层节点数,建立的 BP 网络结构如图 1。

4 BP 网络模型建立

本研究所用的材料是 72A 高碳钢盘条,取各阶段冷却制度不同的 39 组实测数据作为样本进行网络训练,在建立 BP 网络时,隐层神经元的传递函数选择的是对数函数 logsig,输出层传递函数选择的是线性函数 purelin,训练函数用的是 trainlm 函数^[6]。

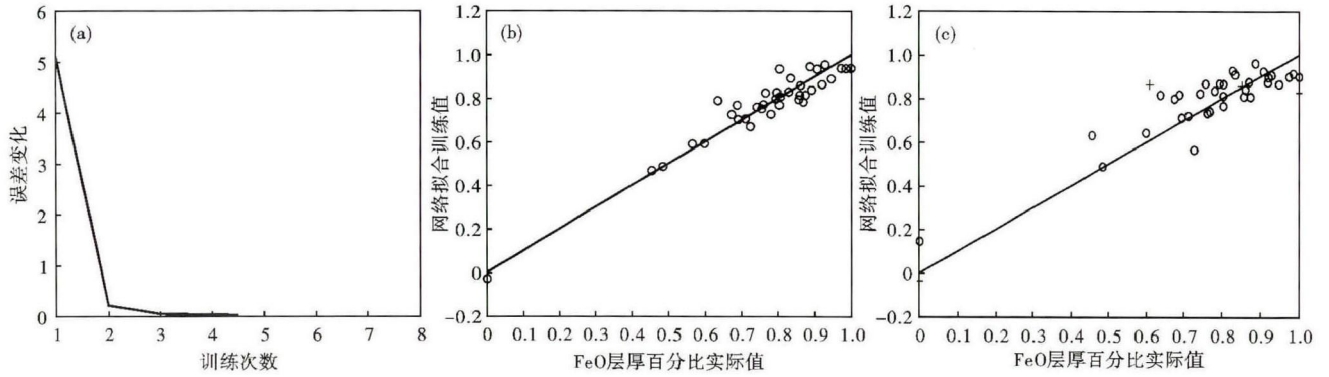


图 2 (a) 网络训练误差曲线; (b) FeO 层厚百分比实际值与网络训练值的对比; (c) 泛化能力验证图形

Fig. 2 (a) Curve of network training error; (b) Comparison between measure value and network training value of FeO layer thickness percentage; (c) Graphic chart of generalization ability verification

对网络进行训练和仿真模拟,得到了网络训练的误差曲线和 FeO 层厚比实际值与网络训练值的相关性曲线,如图 2(a,b)。

图 2(b)上所用的训练点都分布在 $Y = X$ 直线周围,可以看出,网络的训练精度非常高。FeO 层厚比的实际值与 BP 神经网络拟合出来的训练值的相关系数为 0.9915。

5 BP 网络泛化能力验证及应用

5.1 BP 网络泛化能力的验证

从建模的 39 组数据中随机取出 4 组作为测试样本,对网络进行验证。结果如图 2(c) 所示。

从图 2(c) 中可以看出验证结果很好。4 个验证样本都分布在 $Y = X$ 直线周围,与训练样本点融合在一起。说明网络的泛化能力很强。

5.2 吐丝温度与冷却速度对 FeO 层厚百分比的影响

P2 ~ P12 为冷却过程中各温度段冷却时间百分比,其总和为 1,改变其中一个量就必须同时改变另一个量以保持总和不变,而在温度低于 570 °C 时,钢

材表面氧化速度很慢,氧化铁皮层厚几乎不再发生变化,只是会在氧化铁皮内部发生少量的先共析反应,以 P12(570 ~ 350 °C 温度段的冷却时间百分比)为固定的变量,在分别改变输入量 P3、P6、P8 的同时改变 P12,保证各温度段时间百分比总和不变,以吐丝温度为横坐标,FeO 层厚百分比为纵坐标,用模型计算出来的结果分别绘制图形,如图 3(a,b,c) 所示。因 P12 为固定变量,且 P12 对氧化铁皮层厚改变影响很小,所以图 3(a,b,c) 实际上反映的是 P3、P6 以及 P8 对 FeO 层厚百分比值的影响。

根据图 3 和表 2 可知,随着吐丝温度增加,FeO 层厚百分比会增加。图 3(a) 中,随 P3(850 ~ 810 °C 段冷却时间百分比)增加,FeO 层厚百分比增加,且增加幅度很大;图 3(b) 中,随 P6(750 ~ 720 °C 段冷却时间百分比)增加,FeO 层厚百分比增加,增加幅度整体来说比图 3(a) 稍小一些;图 3(c) 中,虽然随 P8(690 ~ 660 °C 段冷却时间百分比)增加,FeO 层厚百分比也有所增加,但增长的幅度非常小。可见,试

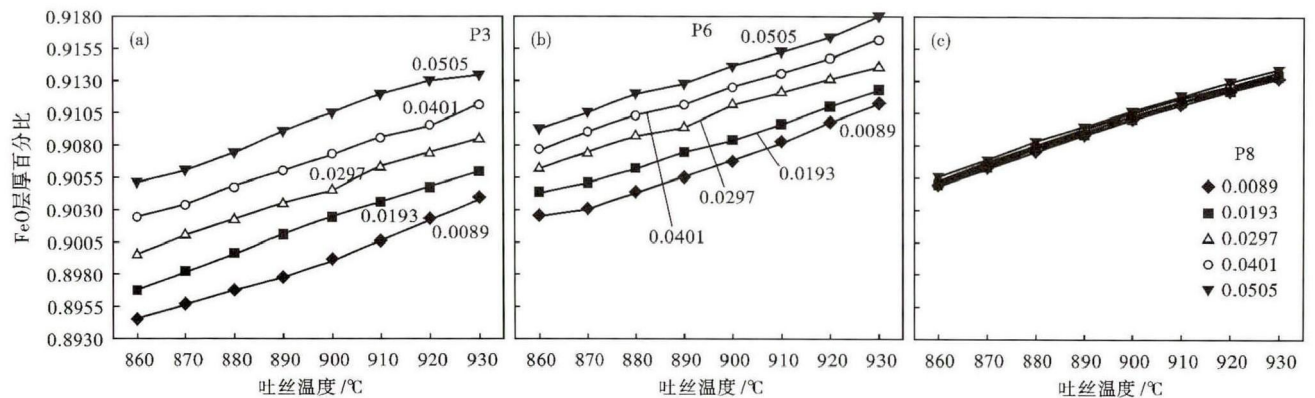


图 3 吐丝温度与各温度段冷却时间(a) P3 与 P12; (b) P6 与 P12 和(c) P8 与 P12 对 FeO 层厚百分比的影响

Fig. 3 Effect of wire laying-off temperature and cooling time in each temperature zone- (a) P3 and P12, (b) P6 and P12, and (c) P8 and P12 on FeO layer thickness percentage

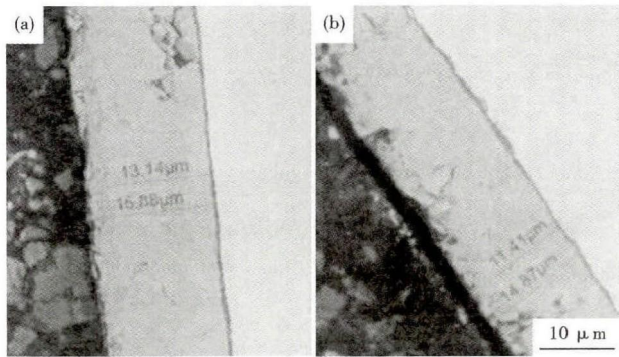


图4 冷却工艺改进前(a)后(b)的氧化铁皮结构形貌图
Fig.4 Morphology of structure of oxide scale before (a) and after (b) cooling process improvement

样冷却过程在高温段停留时间越长,FeO 层厚百分比越高,当温度冷却到 600 °C 之后,FeO 层厚百分比变化很小。

一般而言,对于钢来说,氧化铁皮的增重与氧化速率常数之间符合一个抛物线关系^[7-8],而氧化速率常数又会随着温度的增加而增大,且二者之间呈指数关系^[9]。对于 72A 高碳钢盘条,从图 3 中可以看出,850 ~ 810 °C 温度段,温降速率对氧化铁皮厚度和结构影响很大,随冷却速率增加,单位面积 FeO 层厚增重很快;750 ~ 720 °C 温度段,温降速率对氧化铁皮厚度和结构有一定影响,随着冷却速率增加,单位面积 FeO 层厚增重逐渐变慢;690 ~ 660 °C 温度段,温降速率对氧化铁皮厚度和结构影响很小,FeO 层厚增重非常平缓,几乎没有变化。这是符合氧化动力学原理的。

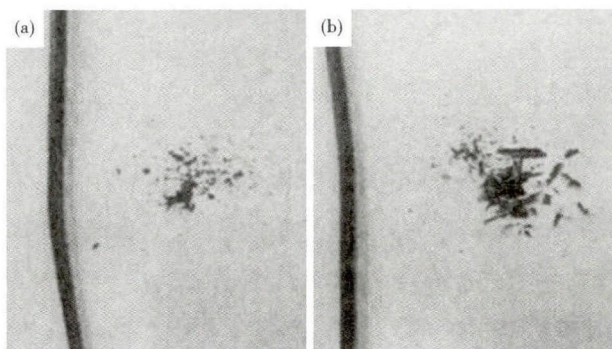


图5 冷却工艺改进前(a)后(b)的氧化铁皮剥离形貌
Fig.5 Morphology of oxide scale peeling before (a) and after (b) cooling process improvement

6 实际生产的应用

从钢厂的实际生产线上取回部分 72A 高碳钢盘条样品,取两根样品分别进行 SEM 扫描电镜观测实验和弯曲实验(采用万能试验机,型号 CMT5105),实验结果分别如图 4(a)和图 5(a)。根据 BP 网络模拟结果,对冷却工艺进行改进,适当降低吐丝温度,提高 850 ~ 720 °C 温度段的冷速,另取两根样品,打磨表面,按照改进后的冷却工艺进行热模拟实验,热模拟实验后将两根样品进行 SEM 扫描电镜观测实验和弯曲实验,实验结果如图 4(b)和图 5(b)。由实验结果图 4、图 5 可以看出,工艺改进后,氧化铁皮中 FeO 层厚百分比减小了,机械剥离性能得到了改善。

7 结论

(1)建立的 BP 网络精度高,泛化能力好,可用于指导现场实际生产中对氧化铁皮成分的控制。

(2)影响 72A 高碳钢盘条的氧化铁皮结构最大的是吐丝温度、850 ~ 720 °C 各温度段的冷却时间。

参考文献

- [1] Wolf M M. Scale Formation and Descaling in Continuous Casting and Hot Rolling[J]. Iron Making and Steel Making,2000,21(1):22-43.
- [2] Hudson R M. Nonacidic Descaling of Hot Band: Reduction of Hydrogen or Carbon[J]. Metal Finishing,1985,83(11):73-80.
- [3] Sun Weihua, Tieu A K, Jiang Zhengyi, et al. Oxide Scales Growth of Low-Carbon Steel at High Temperatures [J]. Materials Processing Technology,2004,155:1300-1306.
- [4] 金星姬,贾炜炜. 人工神经网络研究概述[J]. 林业科技情况,2008,40(1):65-71.
- [5] 韩力群. 人工神经网络理论、设计及应用(第二版)[M]. 北京:化学工业出版社,2007:58-61.
- [6] 许东,吴铮. 基于 MATLAB6. X 的系统分析与设计—神经网络(第二版)[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2002:69-82.
- [7] Jost W. Diffusion in Solids, Liquids and Gas[M]. New York: Academic Press,1952.
- [8] 高巍,金耀华,王正品,等. 高温空气介质下碳钢氧化动力学研究[J]. 热加工工艺,2007,36(20):10-12.
- [9] Neil Birks, Gerald H Meier, Frederick S Pettit. 金属高温氧化导论[M]. 辛丽,王文,译. 北京:高等教育出版社,2010:59-63.

王 煜(1990-),女,硕士生(武汉科技大学),2012 年长江大学(本科)毕业,高碳钢线材表面氧化铁皮研究。

E-mail:2739479335@qq.com

收稿日期:2015-10-26