

·工艺技术·

## 连铸工艺参数对高碳钢小方坯中心碳偏析的影响

冯 军 陈伟庆

(北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083)

**摘 要** 采用多元线性回归方法分析了在给定结晶器电磁搅拌条件下(230~245 A),碳含量 0.58%~0.83%,二冷比水量 0.82~2.86 L/kg,拉速 1.90~3.0 m/min,过热度 17~60 °C 范围内,各参数对 140 mm×140 mm 和 150 mm×150 mm 小方坯中心碳偏析的影响,并采用 BP 神经网络进行预测计算。多元回归分析结果表明,影响中心碳偏析的显著因素是钢中碳含量,其次是连铸拉速和二冷比水量;随钢中碳含量、拉速和过热度增加,铸坯中心碳偏析增大,随二冷比水量增加,中心碳偏析减小。

**关键词** 高碳钢 连铸小方坯 中心碳偏析 多元线性回归 BP 神经网络

## Effect of Concasting Technology Parameters on Center Carbon Segregation of High Carbon Steel Billet

Feng Jun and Chen Weiqing

(School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083)

**Abstract** The each technology parameters in range of carbon 0.58%~0.83%, water ratio in secondary cooling zone 0.82~2.86 L/kg, casting speed 1.9~3.0 m/min and superheating of liquid steel 17~60 °C on center carbon segregation of 140 mm×140 mm and 150 mm×150 mm billet has been analyzed at given mould electromagnetic stirring (230~245 A) using multivariate linear regression analysis, and the predicted calculation was carried out using Back Propagation (BP) neural networks. The results by multivariate regression analysis showed that the carbon content in steel was remarkable factor to influence the center carbon segregation, next were casting speed and water; and with carbon content in steel, casting speed and superheating of liquid steel increasing, the center carbon segregation in billet increased and with water ratio in secondary cooling zone increasing, the center carbon segregation decreased.

**Material Index** High Carbon Steel, Concasting Billet, Center Carbon Segregation, Multivariate Linear Regression, BP Neural Networks

国内外生产高碳钢有两种连铸工艺路线:一是大方坯连铸,开坯二火成材,以大压缩比保证轧材质量,同时高温均热过程中扩散减轻中心碳偏析;二是采用小方坯连铸,一火成材,以降低生产成本。小方坯连铸采用结晶器电磁搅拌,可显著减轻中心碳偏析,但在结晶器电磁搅拌条件下,高碳钢连铸小方坯的中心碳偏析仍受多种因素影响<sup>[1]</sup>。本项工作利用现场数据采用多元回归方法分析了结晶器电磁搅拌条件下生产高碳钢时,小方坯连铸工艺参数对中心碳偏析的影响,并采用神经网络方法对高碳钢小方坯中心碳偏析进行了预测计算。

### 1 生产和试验条件

39 组现场数据采自 140 mm×140 mm 和 150 mm×150 mm 小方坯,连铸机为 6 机 6 流,结晶器

电磁搅拌的电流为 230~245 A、频率为 5 Hz。生产钢种有 60 钢、70 钢、72A、77B 和 82B 等高碳钢。连铸生产时,二冷比水量一般为 1.5 L/kg,拉速一般控制在 2.5 m/min 以下;进行二冷强冷试验时,比水量达到 2.86 L/kg,拉速达到 3 m/min;为了检验连铸工艺参数对中心碳偏析的影响,试验时大范围地改变了二冷比水量和拉速。

### 2 高碳钢小方坯连铸工艺参数对中心碳偏析的影响

在不同连铸工艺条件下取坯样分析中心碳偏析,得到碳含量、二冷比水量、拉速、过热度与高碳钢小方坯中心碳偏析的关系如图 1 所示。由图可知:在碳含量为 0.58%~0.83%、二冷比水量为 0.82~2.86 L/kg、拉速为 1.9~3 m/min、过热度为 17~60 °C 范围内,仅考虑单一因素对高碳钢小方坯的中心碳偏析影响时,规律不明显。说明在结

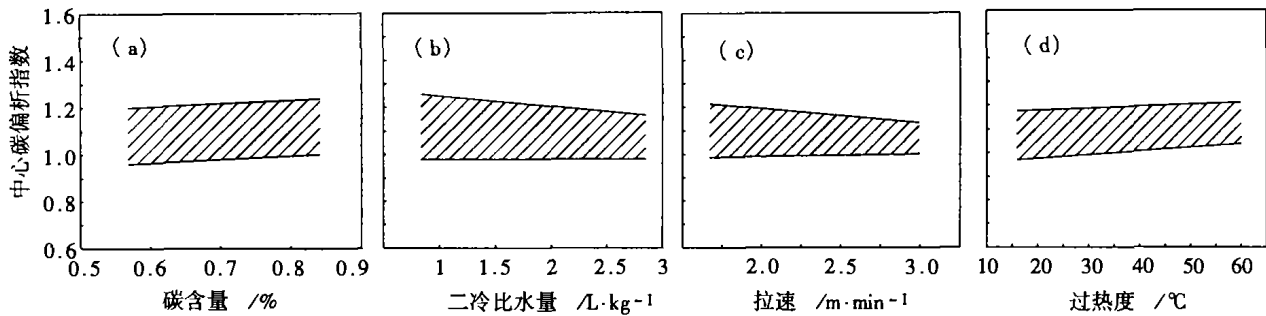


图 1 碳含量(a)、二冷比水量(b)、拉速(c)和钢水过热度(d)对铸坯中心碳偏析指数的影响

Fig.1 effect of carbon content (a), water ratio in secondary cooling zone (b), casting speed (c), superheating of liquid steel (d) on center carbon segregation index of billet

晶器电磁搅拌条件下,高碳钢小方坯的中心碳偏析受多种因素综合影响。

### 3 多元回归分析

#### 3.1 实验数据及多元回归计算表

在上述条件下,采用多元线性回归的统计方法分析连铸工艺参数对中心碳偏析的影响规律<sup>[2]</sup>,结果如表 1 所示。

对变量中心碳偏析指数 Y 和二冷比水量  $X_1$ 、

表 1 连铸工艺实验数据及其多元线性回归计算

Table 1 Test data of concasting process and its multivariate linear regression calculation

项目	二冷比水量/ $L \cdot kg^{-1}$ ( $X_1$ )	过热度/ $^{\circ}C$ ( $X_2$ )	拉速/ $m \cdot min^{-1}$ ( $X_3$ )	碳含量/ $\%$ ( $X_4$ )	中心碳偏析指数 (Y)
连铸参数(1~39 炉)	0.82~2.86	17~60	1.9~3	0.58~0.83	0.97~1.22
和	66.91	1 276	94.17	28.39	42.73
平均	1.716	32.718	2.415	0.733	1.096
平方和	132.112	46 276	229.913	21.208	46.937
$X_1$ 与各变量乘积和		2 013.08	164.329	50.437	73
$X_2$ 与各变量乘积和			3 034.29	914.73	1 402.088
$X_3$ 与各变量乘积和				69.208	103.147
$X_4$ 与各变量乘积和					31.355

过热度  $X_2$ 、拉速  $X_3$ 、碳含量  $X_4$  有 39 组独立观测值:

$$(X_{\alpha 1}, X_{\alpha 2}, \dots, X_{\alpha 3}, X_{\alpha 4}), \alpha = 1, 2, \dots, 39 \quad (1)$$

假定它们之间有如下关系:

$$Y_{\alpha} = \beta_0 + \beta_1 X_{\alpha 1} + \beta_2 X_{\alpha 2} + \beta_3 X_{\alpha 3} + \beta_4 X_{\alpha 4}, \quad \alpha = 1, 2, \dots, 39 \quad (2)$$

式中:  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$  是 5 个待估参数,  $X_{\alpha 1}, X_{\alpha 2}, X_{\alpha 3}, X_{\alpha 4}$  是 4 个可以测量或可控制的一般变量的第 39 组检测值。

#### 3.2 参数的最小二乘估计

根据 39 组检测值求  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$  的估计值,从而可以获得四元线性回归方程:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_4 \quad (3)$$

得到下列方程组:

$$\begin{cases} 20.188 3\beta_1 - 121.349 5\beta_2 + 6.806\beta_3 + 2.58\beta_4 = 1.523 \\ -121.349\beta_1 + 5 571.6\beta_2 + 30.267\beta_3 + 2.071\beta_4 = 39.001 \\ 6.806\beta_1 + 30.267\beta_2 + 8.213\beta_3 + 1.853\beta_4 = 2.55 \\ 2.58\beta_1 + 2.071\beta_2 + 1.853\beta_3 + 0.745\beta_4 = 0.792 \end{cases} \quad (4)$$

解此方程组,得:  $\beta_1 = -0.06, \beta_2 = 0.005, \beta_3 = 0.135, \beta_4 = 0.923$

$$\beta_0 = Y_{\text{平均}} - \beta_1 X_{1\text{平均}} - \beta_2 X_{2\text{平均}} - \beta_3 X_{3\text{平均}} - \beta_4 X_{4\text{平均}} = 0.033$$

因此

$$Y = 0.033 - 0.06X_1 + 0.005X_2 + 0.135X_3 + 0.923X_4 \quad (5)$$

利用式(5)可计算出不同连铸工艺条件下的小方坯中心碳偏析指数。

#### 3.3 回归方程的显著性检验

检验步骤如下:

$$S_T = \sum_{\alpha} Y_{\alpha}^2 - \frac{1}{n} (\sum_{\alpha} Y_{\alpha})^2 = 1.291 \quad (6)$$

$$S_R = \sum_i \beta_i l_{iy} = \beta_1 l_{1Y} + \beta_2 l_{2Y} + \beta_3 l_{3Y} + \beta_4 l_{4Y} = 1.179 \quad (7)$$

$$S_{\text{剩}} = S_T - S_R = 0.111 \quad (8)$$

方差分析<sup>[3]</sup>如表2所示。结果表明,方程(5)在 $\alpha = 0.01$ 水平上回归方程是显著的。

表2 方差分析表

Table 2 Variance analysis schedule

来源	S(平方和)	F(自由度)	V(均方)	F比	显著性
回归	1.179	4	0.295	98.33	$\alpha = 0.01$
剩余	0.111	34	0.003		
总计	1.291	38		$F_{0.01}(4, 34) = 3.93$	

因为 $\alpha = 0.01$ 时,查F分布表得临界值 $F_{0.01}(4, 34) = 3.93$ ,而 $F = 98.33 > 3.93$ ,所以回归方程十分显著。

在实际应用中常用“复相关系数”R去衡量方程的好坏,其定义为:

$$R = \sqrt{S_R/S_T} = 0.9556 \quad (9)$$

式(9)表明 $R = 0.9556$ ,这说明实测值与回归值拟合得很好。

### 3.4 多元线性回归的结果分析

从多元线性回归的表达式(5)可以看出,高碳钢的中心碳偏析受多种因素的影响。从回归系数的显著性检验,可以看出:高碳钢小方坯的中心碳偏析的显著影响因素是高碳钢的碳含量;其次是拉速以及二冷比水量。多元线性回归系数分析表明:高碳钢碳含量的升高,小方坯中心碳偏析加重;提高拉速,中心碳偏析加重;加大二冷比水量,中心碳偏析降低;过热度升高,中心碳偏析加重。

### 4 利用神经网络预测高碳钢小方坯的中心碳偏析

采用BP神经网络方法尝试对高碳钢小方坯中心碳偏析进行预测计算(有结晶器电磁搅拌的条件下),在高碳钢小方坯的中心碳偏析的预测模型中,确定了4个输入参数:二冷比水量、过热度、拉速、碳含量;1个输出参数:中心碳偏析值。

神经网络系统对数据样本进行学习,需要学习系数、动量系数、整体误差等参数的支持。这些

参数对网络的运行速度和精度有很大的影响<sup>[4]</sup>。经过试算,选定网络有关系统参数:学习率 $\eta$ 为0.7,惯性系数 $\alpha$ 为0.85,隐含层数为2,系统整体误差为0.0001,最大个体误差为0.00001。

### 5 高碳钢碳偏析的不同预测方法的比较

运用多元线性回归和神经网络预测的中心碳偏析与实测值进行比较,两种方法的预测偏差如表3所示。从表3可以看出,中心碳偏析预测值偏差小于0.05的情况下,神经网络所占的比例为71.8%,多元线性回归所占的比例为69.2%。

表3 预测值与实测值的偏差分析结果

Table 3 Error analysis results of predicted value and measured value

不同预测方法与 实测值的误差范围	多元线性回归 比例/%	BP神经网络 预测比例/%
$\leq 0.01$	25.6	41
$\leq 0.02$	15.4	12.9
0.02 ~ 0.05	28.2	17.9
$> 0.05$	30.8	28.2

注:误差范围是指实测值与预测值之间的差值,为 $\pm$ 误差,如实测值的中心碳偏析值为1.13,预测值为1.083,那么误差范围为0.047。

### 6 结论

(1) 在连铸结晶器电磁搅拌条件下,高碳钢小方坯的中心碳偏析受多种因素综合影响。通过多元回归分析,得到如下结果:高碳钢的碳含量对小方坯中心碳偏析的影响最为显著,中心碳偏析随碳含量的增加而加重;中心碳偏析随拉速的提高有加重的趋势;中心碳偏析随二冷比水量的加大有相应的减轻;钢水过热度高,中心碳偏析加重。

(2) 运用多元线性回归和BP神经网络的方法来预测高碳钢小方坯中心碳偏析都有较高的精度,可对高碳钢小方坯中心碳偏析进行估算。

### 参考文献

- 1 蔡开科. 连铸坯中心缺陷的控制. 现代连铸技术进展, 第7届全国连铸学术年会论文集, 2003, 73
- 2 王松桂, 陈敏, 陈立萍. 线性统计模型: 线性回归与方差分析. 北京: 高等教育出版社, 1999
- 3 俞大刚. 线性回归模型分析. 北京: 中国统计出版社, 1987, 10
- 4 杨遵杰, 陈伟庆. LF-VD-CC 钢液温度预报. 钢铁, 2000, 35(1): 13

冯 军(1969-), 男, 在读博士生。从事高碳钢质量的研究。

收稿日期: 2004-12-25