



基于多元线性回归的转炉石灰加入量计算模型

陈君¹, 苏春阳², 姜亚清¹

(1 大冶特殊钢有限公司工艺研究所, 黄石 435001; 2 靖江特殊钢有限公司, 靖江 214500)

摘要: 根据铁水条件和钢水要求准确计算石灰加入量, 避免熔剂浪费是转炉炼钢的重要要求之一。然而, 由于转炉生产节奏快, 影响因素多, 很难精准地确定石灰加入量。为了准确计算转炉石灰加入量, 避免石灰浪费, 建立了机理模型、分类模型和多元线性回归模型, 用于计算转炉石灰加入量。三种模型相比, 纯粹的机理模型计算精度很低, 难以直接应用到现场生产中。基于机理模型优化的分类模型, 仅有 60% 的炉次差值在 500 kg/炉以内。利用 SPSS 建立了多元线性回归模型, 得到了石灰加入量和其他参数之间的关系 $W_{\text{Lime}}=4\ 147.24 \times w_{\text{TSi}}+529.67 \times w_{\text{Te}}+60.20 \times W_{\text{qf}}+0.405 \times V_0-1\ 833.95$, 验证结果表明, 93% 的炉次计算差值在 400 kg/炉以内, 77% 的炉次计算差值在 300 kg/炉以内, 基本能够满足现场使用的要求, 模型应用在现场后, 石灰加入量得到有效的降低。

关键词: 转炉; 石灰; 机理模型; 多元线性回归模型; 精度

DOI: 10. 20057/j. 1003-8620. 2023-00152 **中图分类号:** TF711

Calculation Model of Converter Lime Addition Based on Multiple Linear Regression

Chen Jun¹, Su Chunyang², Jiang Yaqing¹

(1 Institute of Technology, Daye Special Steel Co., Ltd., Huangshi 435001, China;
2 Jingjiang Special Steel Co., Ltd., Jingjiang 214500, China)

Abstract: One of the important requirements for converter steelmaking is to accurately calculate the amount of lime added based on the conditions of hot metal and the requirements of molten steel, in order to avoid waste of flux. However, due to the fast pace of converter production and multiple influencing factors, it is difficult to accurately determine the amount of lime added. In order to accurately calculate the amount of converter lime, avoid lime waste and reduce unnecessary steel-making cost, mechanism model, classification model and multiple linear regression model are established to calculate the amount of converter lime. Compared with the three models, the pure mechanism model has low calculation accuracy and is difficult to be directly applied to field production. According to the classification model optimized by mechanism model, only 60% of the furnace times difference is less than 500 kg/ furnace. A multiple linear regression model is established using SPSS, and the relationship between lime addition amount and other parameters is obtained $W_{\text{Lime}}=4\ 147.24 \times w_{\text{TSi}}+529.67 \times w_{\text{Te}}+60.20 \times W_{\text{qf}}+0.405 \times V_0-1\ 833.95$. The verification results show that, 93% of the calculated difference of the furnace is less than 400 kg/ furnace, 77% of the calculated difference of the furnace is less than 300 kg/ furnace, which can basically meet the requirements of field use. After the model is applied in the field, the amount of lime added is effectively reduced.

Key Words: Converter; Lime; Mechanism Model; Multiple Linear Regression Model; Accuracy

在转炉炼钢过程中, 需要加入石灰、白云石和镁球等熔剂进行造渣, 以便脱除铁水中的 P、Si 等杂质元素, 得到成分合格的钢水^[1-2]。造渣制度也是转炉生产过程中重要的工艺制度之一^[3-4]。石灰的加入量直接影响钢渣的脱 P 能力, 但是, 加入的石灰量太大, 不仅会造成石灰无法完全熔化, 增加冶炼成本, 同时会增大渣量, 增加转炉喷溅的风险^[5-6]。石灰加入量少, 会使转炉钢渣不具备足够的脱 P 能力, 不能得到 P 含量合格的钢水^[7-8]。因此, 精度较高的石灰加入量计算模型对于转炉冶炼是十分重要的。

转炉石灰加入量计算模型属于静态模型的重要组成部分, 常用的建模方法包括机理模型、统计模型和神经网络模型^[9-12]。机理模型通常是根据铁水信息和钢水信息在理论上计算石灰加入量, 由于转炉冶炼过程受到很多因素的影响, 并且石灰在转炉中的状态也很难确定, 导致模型的计算精度普遍较低, 很难直接应用到生产现场^[13], 神经网络模型是目前常用的预测建模的方式之一, 但是神经网络模型的建立需要大量的完整数据对模型进行训练, 而现场数据的全面采集是非常困难的, 并且很多钢铁企业

缺乏必要的数据库[14],难以提供数量足够的完整、正确的数据,导致神经网络模型很难建立并持续保证较高的精度。统计模型需要的建模数据相对较少,并且具备较高的计算精度,能够更方便的应用到生产现场,对于生产流程、生产工艺相对稳定的企业,使用数据统计的方法建立的模型具备较高的实用性。

以某钢厂120 t转炉为研究对象,收集生产过程中完整的生产数据用于建立石灰加入量预测模型,根据冶金反应原理建立机理模型,在机理模型的基础上进一步开发分类模型,利用SPSS数据分析软件得到石灰加入量与其他参数之间的关系,得到多元线性回归模型,并对模型计算精度进行验证,结果表明,多元线性回归模型具备较高的计算精度,能够满足现场使用的要求,为缺乏数据采集和储存的中小型钢铁企业提供了一种数据量要求较少,并且模型精度相对较高的建模方式。

1 120 t转炉熔剂消耗情况

某钢厂120 t转炉在吹炼过程中加入石灰、轻烧白云石、镁球和生白云石进行造渣,其中镁球每炉加入400 kg。其他三种熔剂的消耗情况如图1所示。石灰消耗量在20~60 (kg/t金属料),大部分炉次石灰消耗在25~50 (kg/t金属料)。轻烧白云石消耗量在1~30 (kg/t金属料),大部分炉次轻烧白云石消耗在6~12 (kg/t金属料)。生白云石消耗量在1~30 (kg/t金属料),大部分炉次生白云石消耗在2~12 (kg/t金属料)。某钢厂转炉熔剂消耗波动较大,造成的原因一方面是熔剂成分的波动,另一方面是铁水成分波动较大导致的。

2 转炉石灰加入量计算模型

2.1 机理模型计算石灰加入量

在转炉炼钢造渣过程中,加入石灰的主要目的

是保证钢渣具备一定的碱度,能够将铁水中氧化的P固定到渣中,因此,石灰的加入量主要取决于铁水中Si和P的含量。采用二元碱度进行计算,某钢厂120 t转炉的炉渣碱度通常控制在3.0左右。理论上计算石灰加入量如式(1),理论计算石灰消耗量根据铁水产生的SiO₂的量和碱度的乘积来计算所需的CaO的量,再减去镁球和轻烧白云石、生烧白云石提供的CaO的数量,最后除以石灰的有效CaO含量。

$$W_{sh} = (R \times W_{SiO_2} - W_{sb} \times w_{CaO, sb} - W_{mq} \times w_{CaO, mq} - W_{qb} \times w_{CaO, qb}) / (w_{CaO, sh} - R \times w_{SiO_2, sh}) \quad (1)$$

式中, W_{sh} 为模型计算石灰加入量,kg; R 为钢渣二元碱度; W_{SiO_2} 为铁水产生的SiO₂的质量,kg; W_{sb} 为生白云石加入量,kg; W_{mq} 为镁球加入量,kg; W_{qb} 为轻烧白云石加入量,kg; $w_{CaO, sb}$ 为生白云石中CaO含量,%; $w_{CaO, mq}$ 为镁球中CaO含量,%; $w_{CaO, qb}$ 为轻烧白云石中CaO含量,%; $w_{CaO, sh}$ 为石灰中CaO含量,%; $w_{SiO_2, sh}$ 为石灰中SiO₂含量,%。

2.2 基于铁水条件进行分类计算石灰加入量

由于机理模型计算出的石灰加入量和实际石灰加入量之间的误差普遍较大,因此,在式(1)的基础上引入参数 δ 。

$$W_{sh}^{PL} = W_{sh} / \delta \quad (2)$$

式中, W_{sh}^{PL} 为实际转炉石灰加入量,kg; δ 为理论计算的CaO量和实际CaO量的比值。

为了确定式(2)中的系数 δ ,根据 δ 的大小对生产数据信息进行分类,并进行比较。某钢厂120 t转炉的系数 δ 分布情况如图2所示,根据图2可知,将系数 δ 分为 <0.5 , $\geq 0.5 \sim 0.6$, $\geq 0.6 \sim 0.7$, $\geq 0.7 \sim 0.8$, $\geq 0.8 \sim 0.9$, $\geq 0.9 \sim 1.0$ 六类。分别统计六类系数对应的铁水情况,结果如图3所示。由图3(a)可知,按照系数 δ 大小进行分类后,分类中铁水量差距很小,最低的铁

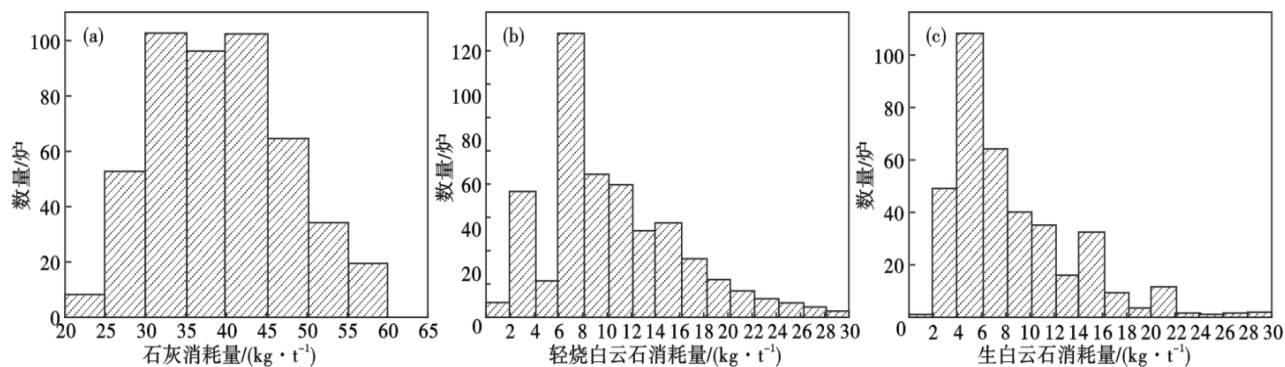


图1 120 t转炉辅料消耗情况:(a)石灰,(b)轻烧白云石,(c)生白云石

Fig. 1 Consumption of auxiliary materials for 120 t converter (a) lime, (b) light burned dolomite, (c) raw dolomite

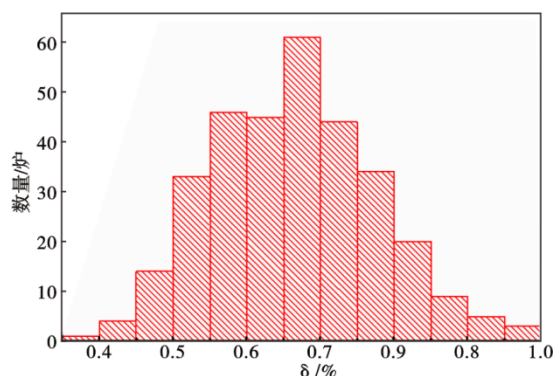


图2 某钢厂 120 t 转炉的 δ 分布情况

Fig. 2 δ distribution of 120 t converter in a steel plant

水量为 109.85 t,最高的铁水量为 113.77 t,铁水量差距最大仅为 3.92 t。由图 3(b)可知,分类中铁水温度差距也很小,最低的铁水温度为 1 336.84 °C,最高的铁水温度为 1 346.88 °C,铁水温度差距最大为 10.03 °C。在各个类别中,铁水量和铁水温度基本

没有差异。图 3(d)为各个类别中的铁水成分,铁水中 $w[C]$ 、 $w[Mn]$ 、 $w[P]$ 、 $w[Si]$ 最大差距分别为 0.169%、0.049%、0.005%、0.014%。而在各个类别中,铁水中 $w[Si]$ 最低为 0.243%,最高为 0.628%,差距最大为 0.385%。按照系数 δ 大小进行分类后,各个类别中铁水 Si 含量的差别是非常大的,而且随着系数 δ 的增加,铁水 Si 含量也呈现出明显的增加趋势。

根据铁水 Si 含量(质量分数)对铁水进行分类,以 0.1% 的 Si 含量进行划分,分别计算每类中的系数 δ 的平均值,并以此值作为整个类别的系数 δ ,进而计算石灰加入量。具体的 δ 值见表 1。

2.3 统计模型计算石灰加入量

采用 SPSS 数据统计分析软件对转炉石灰加入量进行多元线性回归分析。参与回归的数据项包括:铁水装入量,铁水温度,重废钢、轻废钢、生铁、渣钢加入量,铁水中 C、Si、Mn、P、S 含量,吹氧量,钢水温

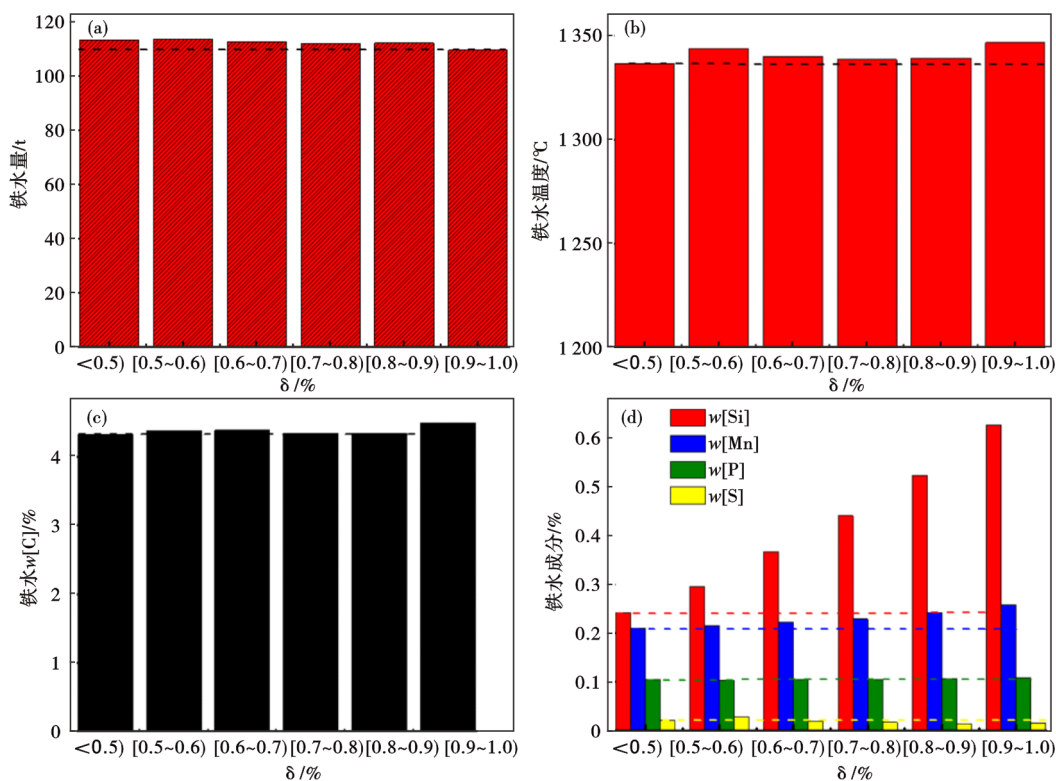


图3 根据 δ 统计铁水情况 (a) 铁水量, (b) 铁水温度, (c) 铁水 C 含量, (d) 铁水成分

Fig. 3 Statistics of hot metal situation according to δ (a) number of hot metal, (b) hot metal temperature, (c) carbon content of hot metal, (d) hot metal composition

表 1 根据铁水 $w[Si]$ 含量确定的 δ 值

Table 1 The δ value determined according to the silicon content of molten iron

铁水中 $w[Si]/\%$	≤ 0.1	0.1 ~ 0.2	0.2 ~ 0.3	0.3 ~ 0.4	0.4 ~ 0.5	0.5 ~ 0.6	0.6 ~ 0.7	≥ 0.7
δ	0.492 2	0.586 7	0.675 5	0.750 8	0.808 1	0.912 0	0.939 6	0.99

度,钢水中C、Mn、P、S含量,轻烧镁球加入量,轻烧白云石加入量,生白云石加入量。在SPSS多元线性回归过程中,方法项选择“逐步”,软件会在处理过程中自动筛选参数参与线性回归。

收集了现场292炉完整的数据用于数据分析和验证,利用SPSS统计分析软件对262炉数据进行多元线性回归,得到转炉石灰加入量与其他参数的关系见表2。

表2 多元线性回归得到的转炉石灰加入量与其他参数的系数关系

Table 2 The coefficient relationship between the amount of lime added to the converter and other parameters obtained from multiple linear regression

参数	非标准化系数	标准化系数
铁水 Si 含量	4 147.241	0.634
铁水 C 含量	529.672	0.168
轻废钢加入量	60.201	0.131
吹氧量	0.405	0.121
常数	-1 833.954	-

转炉石灰加入量如式(3)所示。

$$W_{\text{Lime}} = 4\,147.24 \times w_{\text{TSi}} + 529.67 \times w_{\text{TC}} + 60.20 \times W_{\text{qf}} + 0.405 \times V_0 - 1\,833.95 \quad (3)$$

式中, W_{Lime} 为石灰加入量,kg; w_{TSi} 为铁水Si含量,%; w_{TC} 为铁水C含量,%; W_{qf} 为轻废钢加入量,t; V_0 为吹氧量, m^3 。

3 模型精度预测

120 t转炉平均钢渣成分见表3,碱度在3.06左右,氧化镁含量为8.38%,T.Fe含量为17.21%。

机理模型计算的石灰加入量与实际的石灰加入量的对比如图4所示,机理模型计算的石灰加入量普

表3 120 t转炉钢渣成分(质量分数)

Table 3 Ingredient of 120 t converter steel slag %					
CaO	SiO ₂	MgO	MnO	T.Fe	P ₂ O ₅
42.88	14.00	8.38	3.21	17.21	1.81

遍比实际石灰加入量低,整体的预测精度很低。机理模型计算误差较大,83%的炉次差值在1 000 kg/炉以上。纯粹的机理模型计算的石灰加入量误差太大,难以直接应用到现场生产中。

分类模型计算的石灰加入量与实际的石灰加入量的对比如图5所示,如图5(a)所示,相比纯粹的机理模型,分类模型计算的石灰加入量更加接近实际的石灰加入量,计算精度比纯粹的机理模型要高。如图5(b)所示,分类模型计算差值最大为2 000 kg/炉,大部分炉次差值在1 000 kg/炉以内,60%的炉次差值在500 kg/炉以内。

多元线性回归模型计算的石灰加入量与实际的石灰加入量的对比如图6所示,如图6(a)所示,相比纯粹的机理模型、分类模型,多元线性回归模型计算的石灰加入量与实际的石灰加入量相比更加一致,计算精度比纯粹的机理模型、分类模型要高。如图6(b)所示,多元线性回归模型计算差值均在500 kg/炉以内。其中,93%的炉次计算差值在400 kg/炉以内,77%的炉次计算差值在300 kg/炉以内,基本满足现场使用的要求。

4 工业生产实践

上文描述的多元线性回归石灰加入量计算模型使用Matlab软件进行编程,并在生产现场使用。根据铁水成分和原料等参数计算石灰加入量,结果见表4。模型应用后120 t转炉石灰消耗量有比较明显

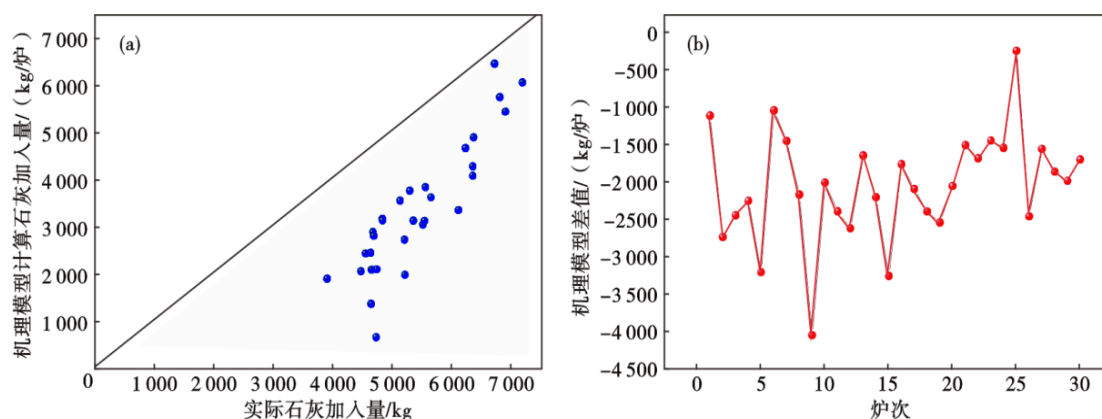


图4 机理模型预测精度 (a)模型计算值和实际值的比较,(b)模型差值

Fig. 4 Prediction accuracy of mechanism model (a) comparison between model calculated values and actual values (b) model deviation

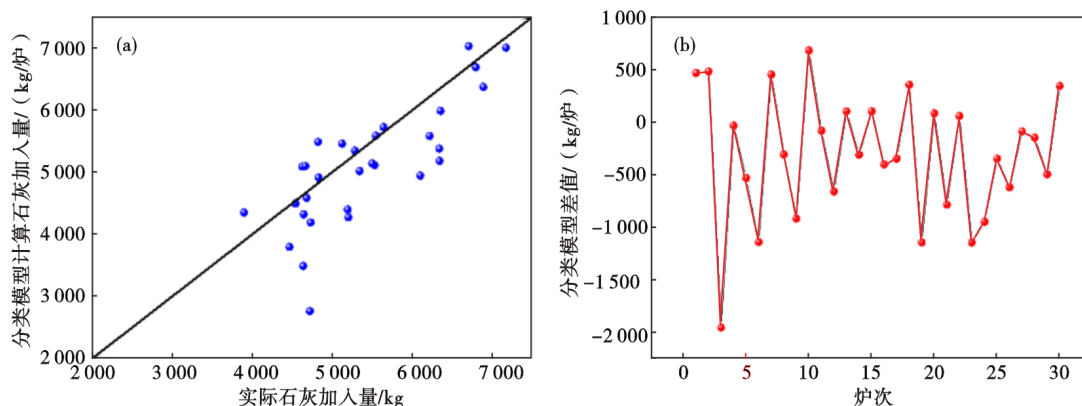


图 5 分类模型预测精度 (a)模型计算值和实际值的比较,(b)模型差值

Fig. 5 Prediction accuracy of classification model (a) comparison between model calculated values and actual values (b) model difference

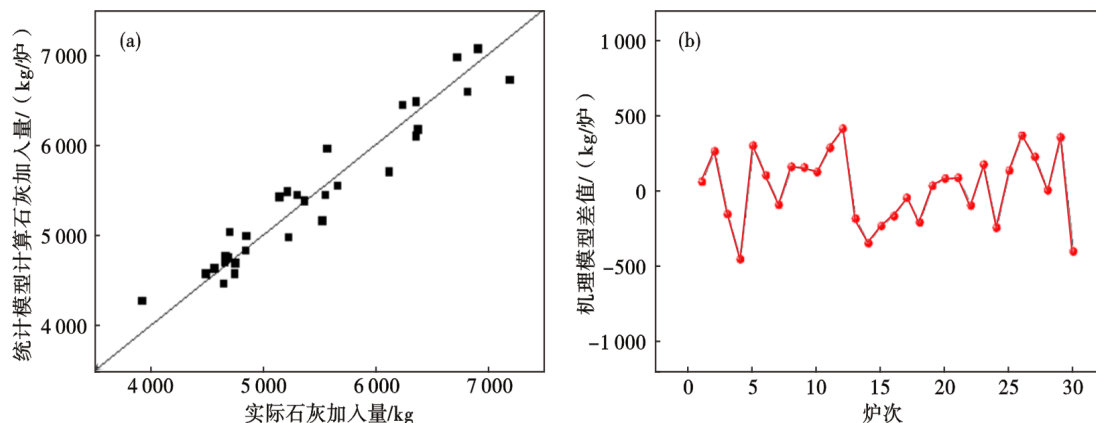


图 6 多元线性回归模型预测精度: (a)模型计算值和实际值的比较,(b)模型差值

Fig. 6 Prediction accuracy of multiple linear regression model (a) comparison between model calculated values and actual values (b) model difference

的降低,尤其是铁水 $w[\text{Si}]$ 为 0.1% ~ 0.5% 的炉次,石灰消耗量减少 3.3% 以上。

表 4 120 t 转炉模型应用情况

Table 4 Application of 120 t converter model

铁水中 $w[\text{Si}]/\%$	炉数/炉	模型应用前石灰加入量/ ($\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 金属料)	模型应用后石灰加入量/ ($\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$ 金属料)	应用前后石灰减量 比例/%
≤ 0.1	9	28.45	27.95	1.77
$> 0.1 \sim 0.2$	111	29.43	28.40	3.48
$> 0.2 \sim 0.3$	311	32.44	30.70	5.37
$> 0.3 \sim 0.4$	439	35.38	33.74	4.62
$> 0.4 \sim 0.5$	203	38.21	36.93	3.36
$> 0.5 \sim 0.6$	93	39.26	38.42	2.13
$> 0.6 \sim 0.7$	37	43.06	42.58	1.10

5 结论

建立了机理模型、分类模型和多元线性回归模型用于计算转炉石灰加入量。结果表明,纯粹的机理模型计算精度很低,83%的炉次差值达到了 1 000 kg/炉以上,难以直接应用到现场生产中。根据机理模型优化的分类模型,计算精度有了一定的提升,大部分炉次误差在 1 000 kg/炉以内,60%的炉次差值在 500 kg/炉以内,误差也比较大。利用 SPSS 建立的多元线性回归模型,预测精度有了较大的提高,93%的炉次计算差值在 400 kg/炉以内,77%的炉次计算差值在 300 kg/炉以内,基本满足了现场使用的要求,模型应用后 120 t 转炉石灰消耗量有了比较明显的降低。

参考文献

[1] 周朝刚, 胡锦涛, 艾立群, 等. 炼钢转炉脱磷的研究进展及展

望[J]. 钢铁研究学报, 2021, 33(3): 183-195.

- [2] 阿不力克木·亚森. 降低转炉冶炼高硅高磷 COREX 铁水成本的研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2019.
- [3] 杨丽梅, 印传磊, 马庆丰, 等. ZG-12 超低磷钢 90 t BOF-RH-CC 工艺的生产实践[J]. 特殊钢, 2023, 44(1): 15-18.
- [4] 赵 斌, 张 娜, 彭国宏, 等. 复吹转炉双联工艺冶炼 X80 管线钢脱磷试验研究[J]. 特殊钢, 2023, 44(2): 52-55.
- [5] 翟勇强, 王建伟, 张 毅, 等. 100 t 转炉用含钛铁水冶炼高碳钢的留渣+单渣操作实践[J]. 特殊钢, 2020, 41(5): 29-33.
- [6] 张天旭, 宋劲松, 周东东, 等. 120 t 转炉第一次倒渣脱磷参数计算与工艺试验[J]. 特殊钢, 2020, 41(2): 25-27.
- [7] 陈 璟, 李 泽. 邯钢一炼钢厂 120T 转炉“低磷、低氧”冶炼工艺技术开发[J]. 中国金属通报, 2018(7): 3-4.
- [8] 朱继衡, 张太生, 贺瑞飞, 等. 烧结返矿在转炉炼钢过程中的实践与应用[J]. 河南冶金, 2017, 25(4): 19-21.
- [9] 张本亮, 何 腾, 张壬寅, 等. 基于现场工况下的炼钢物料平衡和热平衡理论模型研究及应用[J]. 宽厚板, 2021, 27(6): 37-40.
- [10] 张敬泽. 转炉炼钢终点控制技术分析[J]. 冶金管理, 2021(21): 7+9.
- [11] 宋保民, 王建江, 史书广. 智能炼钢模型的工业实践[J]. 河南冶金, 2021, 29(4): 40-43+56.
- [12] 管成东. 转炉炼钢过程工艺控制的发展浅析[J]. 中国金属通报, 2021(8): 11-12.
- [13] 韩怀宾, 虞学庆, 白瑞娟, 等. 基于加热炉埋偶实验的 GCr15 钢坯心部温度预测[J]. 特殊钢, 2023, 44(2): 1-6.
- [14] 姚树鹤, 杨成忠, 徐生林, 等. 灰色算法在转炉炼钢石灰加入量计算中的应用[J]. 杭州电子科技大学学报(自然科学版), 2015, 35(4): 50-53.

下 期 要 目

螺纹加工顺序对 A286 紧固件室温疲劳性能的影响	孔祥伟等
AOD 法冶炼护环用奥氏体不锈钢 1Mn18Cr18N	章东海等
高强焊丝钢 N2M2T 连铸坯表面缺陷分析及工艺改进	苏永泽等
S44535 铁素体不锈钢高温氧化行为	曹小强等
中碳 CrMo 钢中 Ti、Nb 液析形貌及生成机理分析	蒋 乔等
Ti 微合金化对高锰钢组织和性能的影响	杨治争等
喷雾组合控冷技术对弹簧钢 54SiCr6 组织性能的影响	宗 浩等
高温形变参数对殷瓦合金组织演变的影响	王 玉等
Mo 微合金化对 82B 钢高温力学性能及显微组织的影响	王为民等
热处理工艺对高铬铁素体-马氏体钢力学性能的影响	孙文强等
Mn 含量对 Inconel718 板材焊接接头组织性能影响	杨亚倩等