



## 废钢比对转炉钢液过氧化的影响及配料调优

李立凯<sup>1</sup>, 高放<sup>2</sup>, 王敏<sup>2,3</sup>, 何孝雨<sup>2</sup>, 李怡宏<sup>4</sup>, 包燕平<sup>2</sup>

(1 常州东方特钢有限公司炼钢厂, 常州 213000; 2 北京科技大学钢铁冶金新技术国家重点实验室, 北京 100083;

3 北京科技大学金属冶炼重大事故防控技术支撑基地, 北京 100083;

4 太原科技大学材料科学与工程学院, 太原 030024)

**摘要:** 转炉终点钢液过氧化不仅会造成合金收得率降低, 冶炼成本增加, 还会导致脱氧产物增多, 钢液洁净度变差。因此, 避免转炉终点钢液过氧化一直是工艺控制的重点。针对国内某特钢厂 100 t 转炉终点钢液过氧化严重的问题, 本文通过数据统计发现, 该厂平均废钢比高达 26%, 平均终点 C 含量仅有 0.055%, 平均终点温度为 1 605 °C。在未考虑炉内热平衡的前提下, 采取高废钢配料导致了炉内热量不足, 从而被迫采取补吹升温, 引发终点碳、温度命中率低以及钢液过氧化现象。因此, 本文基于该厂的原料条件, 从优化炉料结构的维度出发, 建立了最大废钢比计算模型, 综合考虑原料条件来配加废钢, 减少了需要补吹升温的炉次。模型应用后, 转炉终点温度平均提高 10 °C, 终点碳含量平均提高 0.036%, 钢液自由氧含量平均下降  $206.3 \times 10^{-6}$ , 降本提质效果显著。

**关键词:** 过氧化; 最大废钢比; 炉料结构; 降本提质

DOI:10.20057/j.1003-8620.2022-00198

## The Effect of Scrap Ratio on the Peroxidation of Molten Steel in Converter and the Optimization of Ingredient

Li Likai<sup>1</sup>, Gao Fang<sup>2</sup>, Wang Min<sup>2,3</sup>, He Xiaoyu<sup>2</sup>, Li Yihong<sup>4</sup>, Bao Yanping<sup>2</sup>

(1 Steelmaking Plant, Changzhou Eastan Special Steel Co., Ltd., Changzhou 213000; 2 State key Lab of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083; 3 Technical Support Center for Prevention and Control of Disastrous Accidents in Metal Smelting, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083;

4 School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024)

**Abstract:** The Peroxidation of molten steel at the end of the converter will not only lead to the decrease of alloy yield and the increase of smelting cost, but also lead to the increase of deoxidation products and the poor cleanliness of molten steel. Therefore, it is always the key point of process control to avoid the peroxide of molten steel at the end of converter. Aiming at the problem of terminal peroxide of 100 t converter in a domestic factory, this study finds that the average scrap ratio of this factory is up to 26%, the average terminal C content is only 0.055%, and the average terminal temperature is 1 605 °C. Without considering the heat balance in the furnace, the adoption of high scrap steel batching resulted in insufficient heat in the furnace, which forced the supplementary blowing to raise the temperature, resulting in a low hit rate of the terminal carbon and temperature, and then lead to the problem of molten steel peroxidation. Therefore, from the perspective of optimizing the burden design, this study establishes the calculation model of the maximum scrap ratio based on the raw material conditions of the plant. In the actual production, the raw material conditions are comprehensively considered to add scrap, which reduces the number of heats requiring supplementary blowing for temperature rise. After the application of the model, the end point temperature of converter increases by 10 °C, the end point carbon content increases by 0.036%, and the oxygen content of molten steel decreases by  $206.3 \times 10^{-6}$ . The data shows that the effect of cost reduction and quality improvement is significant

**Key Words:** Peroxidation; Maximum Scrap Ratio; Burden Design; Cost Reduction and Quality Improvement

根据钢种目标碳含量控制范围的不同, 转炉终点钢液氧含量一般在  $(200 \sim 800) \times 10^{-6}$ , 转炉终点钢液过氧化不仅会造成铁损增加, 脱氧合金消耗增加, 还会导致脱氧产物增多, 降低钢液洁净度, 也增加了冶炼成本<sup>[1-2]</sup>。吹氧过程中氧进入钢液, 吹炼结束后, 残留在钢液中的自由氧含量越高, 钢液氧化

性越强, 过氧化程度越高。罗源奎、王忠刚、程志刚以及臧晓俊等人<sup>[3-6]</sup>立足现场实践对钢液过氧化原因进行了系统研究, 研究表明导致钢液过氧化直接原因是转炉终点碳、温度、磷命中率低, 补吹现象严重, 导致这一现象的间接原因之一是炉料结构不合理, 废钢比较高。

基金项目: 中央引导地方科技发展资金项目(YDZJSX2022C028); 山西省基础研究计划面上项目(20210302123218)

作者简介: 李立凯(1978-), 男, 本科, 工程师; E-mail: 1662748520@qq.com; 收稿日期: 2022-12-05

行业竞争越发激烈,很多钢厂在提高转炉废钢比方面做了很多工作<sup>[7-8]</sup>。因为国内废钢累积量逐年增加,废钢的经济性和易获得性越来越强,在满足工艺和质量要求的前提下,增加转炉废钢比可以大幅度降低环境污染,提高炼钢产量<sup>[9]</sup>。然而,废钢作为炉内重要的冷却剂,提高废钢比应满足炉内热平衡,否则极易导致炉内热量不足,甚至出现废钢熔化不完全等现象,需要通过补吹升温或 LF 炉加热等工艺补救措施,严重影响生产效率和产品质量<sup>[10]</sup>。

本文立足国内某特钢厂的生产实践,准确定位了该厂转炉终点钢液过氧化的限制环节,分析了废钢装入量对熔池升温过程的影响,建立了最大废钢比计算模型,提出了基于铁水条件精准配加废钢的配料思路,对提高终点碳、温命中率,降低过氧化具有一定的指导意义。

## 1 转炉终点钢液过氧化因素剖析

### 1.1 钢液中的碳氧反应

对于钢液中的碳氧反应,其平衡常数可表示为:

$$K_c = \frac{p_{co}/p}{a_{[c]}a_{[o]}} = \frac{p_{co}/p}{f_c[\%C]f_o[\%O]} \quad (1)$$

假设 CO 分压  $p_{co}/p = 1$ , 同时考虑到  $[\%C]$  低时  $f_c$  和  $f_o$  均接近于 1, 由此可以得出

$$K_c = \frac{1}{[\%C][\%O]} \quad (2)$$

据式(2)可知,当  $p_{co}/p = 1$  时,钢液中碳和氧的浓度积受温度的影响,由此可得出

$$m = [\%C][\%O] = 10^{(-1160/T - 2.003)} \quad (3)$$

### 1.2 转炉终点钢液过氧化现状

国内某特钢厂拥有 2 座 100 t 转炉,产品以优特钢为主,工艺路线为 BOF-LF-CC。该厂转炉面临较为严重的终点过氧化问题,为排除钢种对分析结果的干扰,准确定位导致其钢液过氧化的工艺限制性因素,本文选取以 45# 钢为主的中碳钢作为研究主体,该厂对 45# 钢的出钢要求见表 1。

因转炉未配备副枪系统,转炉终点钢液氧含量数据通过定氧仪进行检测,该厂采用的是 ML2C-Celox 定氧仪,使用定温、测氧校验仪通过设定温度

和电动势进行校验,其中温度误差  $\pm 2$  °C,电压误差  $\pm 2$  mV。转炉终点钢液碳含量数据通过倒炉取样获得,实际碳氧积为终点钢液氧含量和碳含量的乘积。根据碳氧反应机理,本文计算了样本炉次的理论碳氧积,并将其与实际碳氧积对比,如图 1 所示。

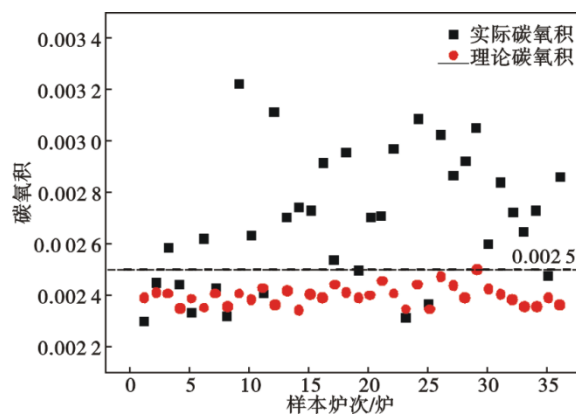


图 1 实际碳氧积与理论碳氧积对比

Fig. 1 Comparison between actual value and theoretical value of carbon-oxygen equilibrium

由图 1 可以看出,大部分炉次实际碳氧积大于理论碳氧积。基于碳氧反应原理计算理论平均氧位为  $456.88 \times 10^{-6}$ , 实际平均氧位  $510.10 \times 10^{-6}$ , 存在过氧化现象。

### 1.3 转炉终点钢液过氧化原因

碳氧积在一定程度上可体现钢液过氧化程度,但在实际生产中,终点钢液自由氧含量才是评价钢液质量的关键指标。一般来说,终点氧含量越高,脱氧产物越多,钢液洁净度越差。将样本炉次的碳氧积映射到三维坐标系中,如图 2 所示。

图 2 中 A 点碳氧积为 0.003 23, C 点碳氧积为 0.002 33, 两炉终点碳含量都控制在 0.06%, A 点自由氧含量为  $538.4 \times 10^{-6}$ , C 点自由氧含量为  $389 \times 10^{-6}$ , 说明碳氧积的增加会导致钢中自由氧含量增加。B 点碳氧积为 0.002 98, D 点碳氧积仅为 0.002 43, 但因 B 点碳含量高达 0.08%, 氧含量仅有  $372.2 \times 10^{-6}$ , 而 D 点终点碳含量 0.04%, 其终点氧含量高达  $608.6 \times 10^{-6}$ , 说明在碳氧积较小的前提下,若终点碳含量过低,仍会导致钢中自由氧含量较高。因此,终点碳含量的控制水平是决定终点钢液氧含量高低的直接原因。为评估本厂转炉终点 C 含量的控制水平,本文选取了转炉公称容量与本厂类似的 A、B 两家企业进行数据调研,采集了其在冶炼中碳钢时的生产数据,其中各企业终点 C 含量的数据统

表 1 45# 钢的终点参数要求

Table 1 End parameter requirements for 45# steel

项目	C/%	P/%	T/°C
要求	0.06~0.1	<0.20	1 610

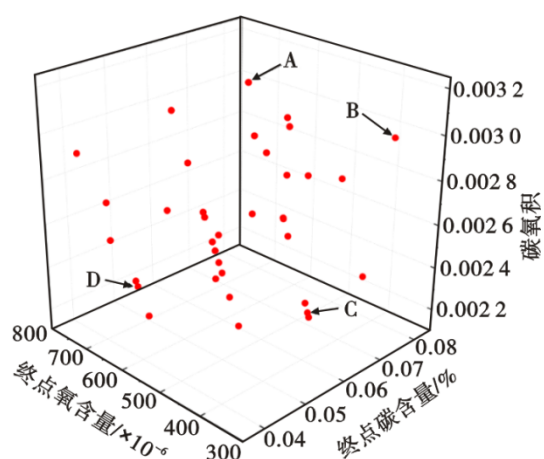


图2 碳氧积分布三维散点图

Fig. 2 Scatter diagram of three-dimensional distribution of carbon-oxygen equilibrium

计情况如图3所示。

由图3可知,本厂终点C含量集中分布在0.06%以下,平均终点碳含量为0.055%,低于0.06%。A厂平均终点碳含量为0.077%,B厂平均碳含量为0.072%。对比可知,本厂终点C含量偏低。为探究本厂终点碳含量较低的原因,借助SPSS软件进行相关性分析<sup>[11-12]</sup>,探究炉料结构对终点碳含量的影响,分析结果见表2。

根据表2可以看出,废钢量和终点温度的皮尔

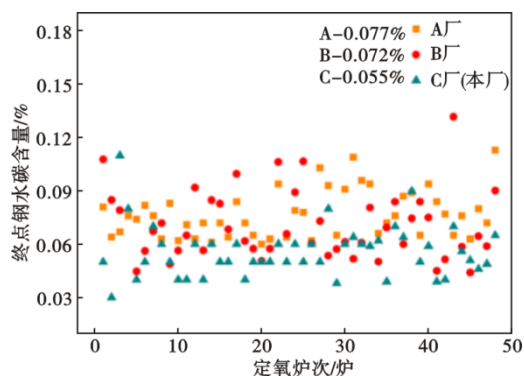


图3 终点碳含量控制对比

Fig. 3 Comparison of carbon content of molten steel at smelting end point

逊相关指数明显大于其他指标项。其中废钢量的皮尔逊相关指数为-0.310,说明终点碳与废钢装入量成负相关,即废钢装入量越多,终点碳含量越低。终点温度的皮尔逊相关指数为0.195,说明终点碳含量与终点温度呈正相关,即终点温度越高,终点碳越高。对比本厂与A、B两家企业的终点温度和废钢比的控制情况,如图4所示。

终点温度分布情况如图4(a)所示,本厂终点温度波动范围较大,主要分布在1560~1640℃,平均终点温度1605℃,低于1610℃,而A厂平均终点温度1638℃,B厂平均终点温度1632℃,可见本厂终

表2 终点C与炉料相关性分析表

Table 2 Correlation analysis table between endpoint C content in and furnace charging

项目	铁水量	废钢量	石灰	轻烧	吨钢氧耗	终点温度
皮尔逊相关性	-0.063	-0.310*	0.030	-0.024	0.096	0.195*
Sig.(双尾)	0.716	0.066	0.862	0.889	0.579	0.253
样本数	36	36	36	36	36	36

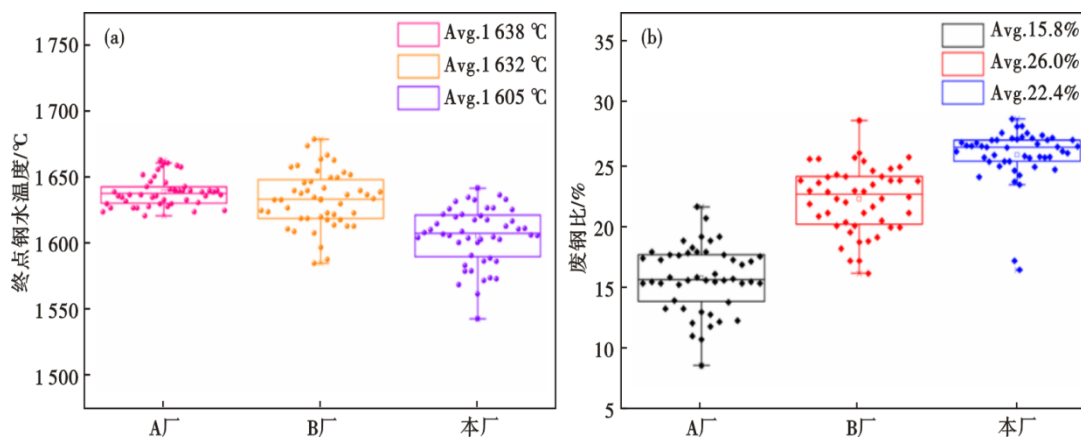


图4 终点温度和废钢比情况对比

Fig. 4 Comparison of molten steel temperature at smelting end point and scrap ratio

点温度较低。废钢比分布情况如图 4(b)所示,本厂废钢比主要分布在 24%~28%,平均废钢比为 26%,A 厂平均废钢比为 15.8%,B 厂平均废钢比为 22.4%,本厂炉料结构中废钢配比高于其他两厂。

综上所述,样本数据中平均终点碳和终点温度皆低于出钢标准的下限,主要原因是炉料结构不合理。在未考虑炉内热平衡的前提下,采取高废钢比配料导致炉内热量不足,补吹升温率较高,造成终点碳含量低,进而引发钢液的过氧化问题。因此,合理的炉料结构是高效、稳定冶炼的前提。

## 2 转炉废钢装入量的限制性环节

### 2.1 废钢对熔池升温过程的影响

转炉冶炼过程中,温度控制直接影响到冶炼过程中的能量、合金元素的收得率、炉衬使用寿命及成品钢的质量等技术经济指标。科学合理的控制熔池温度是调控冶金反应进行的方向和限度的重要工艺手段。以定氧炉次的铁水温度和一倒温度进行分析,如图 5 所示。

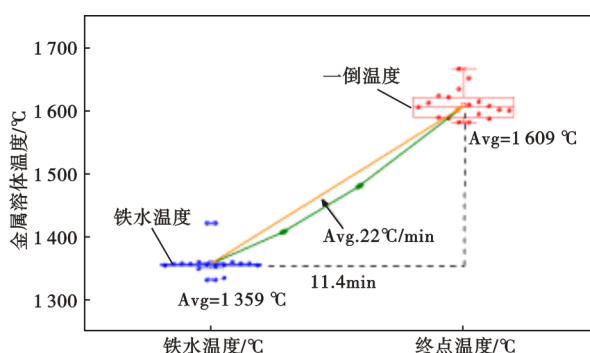


图 5 废钢对熔池升温的影响分析

Fig. 5 Analysis of the influence of scrap steel on temperature rise in molten iron pool

样本炉次铁水平均温度 1 359 °C,一倒平均温度 1 609 °C,平均升温 250 °C,平均吹炼时间为 11.4 min,熔池平均升温速率 22 °C/min。因废钢的存在,实际熔池温度并非稳定上升。铁水和废钢一同被装入炉后,因废钢熔点高且与铁水存在较大温差,其表面会快速形成凝钢层,废钢周围会形成低温区,导致熔池温度降低<sup>[13-14]</sup>。冶炼前期 Si、Mn 等元素氧化放热,熔池温度升高,但前期熔池内有大量未熔化的废钢,熔池升温速率低于 22 °C/min。进入吹炼中期,碳氧反应加剧,熔池升温速度加快,此时熔池内尚有未熔化的废钢,并且随着造渣料和冷料的加入,熔池升温速率保持相对稳定。进入吹炼后期,此时熔池内废钢已熔清或有少部分残留,化学热主要用于熔池升温,此时升温速率大于 22 °C/min。

杨文远<sup>[15]</sup>等对转炉吹炼过程进行了密集测温,得到转炉吹炼过程温度变化曲线。本文选取了具有代表性的 N98 和 N26 两炉次进行对比,分别如图 6(a)和图 6(b)。N98 炉次升温曲线最接近平均升温曲线,符合图 5 中分析的升温过程。N26 炉次因废钢比较高,从开吹一直到吹炼中期,熔池温度始终被压制在 1 450 °C 以下,中后期温度快速上升。吹炼前期炉温被压制,这是由于铁水中元素氧化放热量被废钢所吸收,熔池升温很慢。可以想象,针对某一炉次,在炉内废钢量逐渐增加的过程中存在一个临界值,当实际废钢入炉量超过这个临界值会抑制过程升温,还会导致终点温度降低,被迫补吹升温或精炼升温。本文将这个废钢临界值称之为最大废钢装入量。

### 2.2 合理废钢装入量的影响因素

废钢加入量受炉内热平衡的限制。在不添加其他冷料的前提下,炉内能允许加入的最大废钢

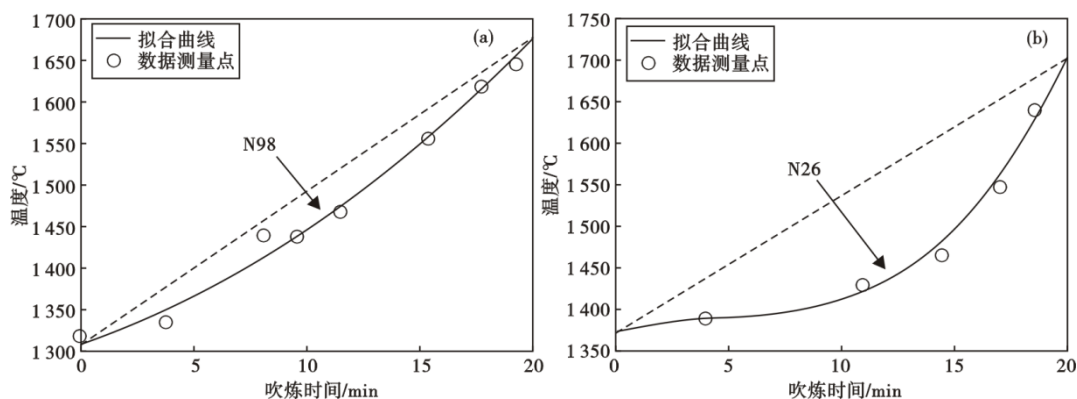


图 6 废钢对熔池升温的影响分析

Fig. 6 Analysis of the influence of scrap steel on temperature rise in molten iron pool

量,便可称之为最大废钢加入量<sup>[16]</sup>。在生产过程中,为保证炉内热量充足,实际废钢加入量应小于最大废钢装入量。基于热平衡的理论基础,计算炉内热量来源分布情况见表3。

表3 炉内热量来源  
Table 3 Heat Input Items in Converter

序号	热量输入项	热量占比/%
1	铁水物理热	58.9
2	元素氧化热	34.4
3	成渣热	3.7
4	烟尘氧化放热	3

如表3所示,铁水物理热占据炉内热量总收入的58.9%,化学元素氧化放热量占据炉内热量总收入的34.4%,两者占据炉内热量来源的93.3%。因此,铁水条件奠定了炉内的热量基础,也限制了废钢的最大加入量,在实际废钢配入时一定要考虑铁水条件,其中铁水条件对废钢比的影响如图7所示。

在控制变量的前提下,铁水碳含量提高0.1%,废钢比可提高0.45%左右;铁水硅含量提高0.1%,废钢比提高0.45%左右;铁水温度提高20℃,废钢比提高0.75%左右;终点温度降低10℃,废钢比提高0.55%左右。因此,高废钢比的物料结构,无论是对铁水条件还是终点条件具有一定的限制和要求。反之,在转炉配料时,需要综合考虑铁水条件和目标终点条件,确定合理废钢加入量。

### 3 基于炉料结构模型的配料调优

铁水作为转炉内的主要热量来源,废钢装入量一定要根据铁水情况做出相应调整,以保证炉内热量合理。鉴于本厂基于经验的配料现状,本文基于物料平衡和热平衡建立了最大废钢比计算模型,综

合考虑铁水条件和目标终点信息,计算合理废钢装入量,优化炉料结构,以达到提高终点碳、温度命中率的目的。

#### 3.1 炉料结构模型的设计及计算流程

最大废钢比计算模型存在以下几点假设<sup>[17]</sup>:

- (1) 炉渣中的铁珠量为渣量的8%;
- (2) 喷溅损失为铁水量的1%;
- (3) 烟尘量为铁水量的1.6%,其中烟尘含77%FeO,含20%Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>;
- (4) 炉衬侵蚀量为铁水量的0.5%;
- (5) 熔池中的碳氧化生成90%的CO和10%的CO<sub>2</sub>;
- (6) 炉气温度取1450℃,炉气中自由氧的含量为总炉气量的0.5%;
- (7) 该厂入炉废钢以轻薄料为主,忽略废钢类型对熔化过程的影响,冶炼终点前废钢能够熔化完全;

基于以上假设条件,根据该厂实际数据,建立最大废钢比计算模型,模型计算思路如图8所示。

如图8所示,铁水信息和目标终点信息是模型计算的必要条件,因为渣量受铁水Si和P含量的影响较大,并且炉渣物理热是关键的热支出项。因此,首先计算本炉的炉渣量,然后,基于能量守恒的基本原则,在不添加其他冷料的前提下,计算得到当前炉次的最大废钢加入量。

#### 3.2 模型的验证与精度分析

基于如图8所示的废钢计算模型,以该厂1#转炉140炉历史数据作为样本数据,计算废钢加入量,与实际废钢加入量进行对比,结果如图9所示。

据图9可知,废钢加入量计算模型误差主要集中在-2t≤e≤2t,其中预测误差在±1t内的炉次占总炉次的45.7%,预测误差在±2t内的炉次占总炉次的

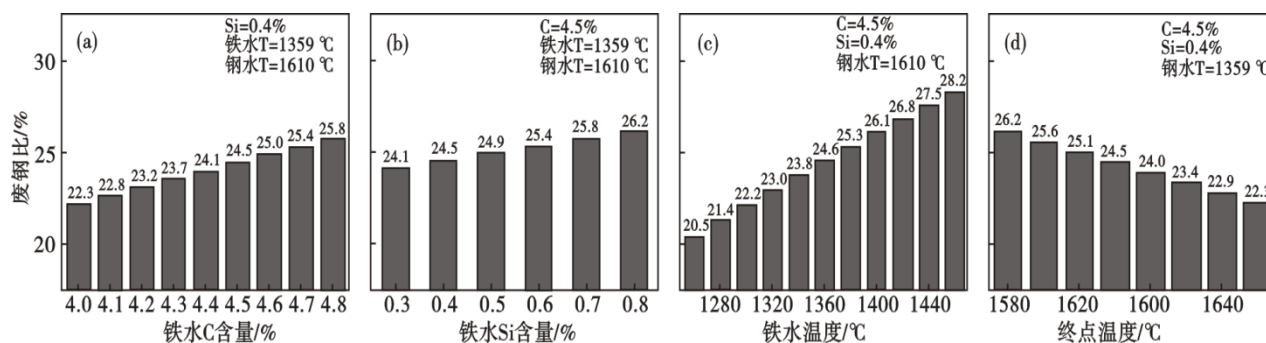


图7 铁水条件对废钢比的影响

Fig. 7 Effect of hot metal conditions on scrap ratio

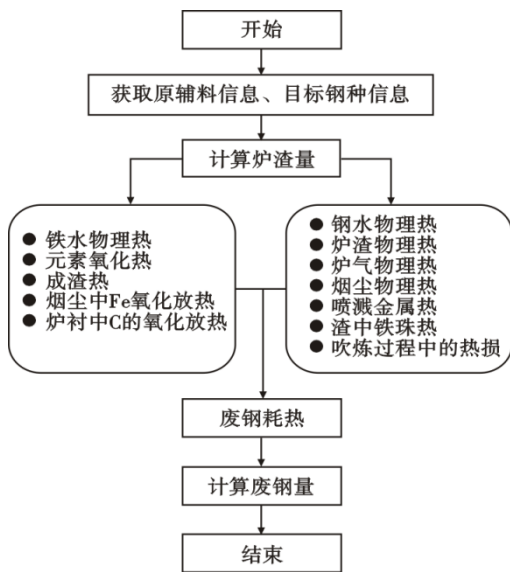


图8 最大废钢比计算流程图  
Fig. 8 Calculation flow chart of maximum scrap ratio

88.6%,模型精度较高,具备应用价值。

### 3.3 模型的应用效果

基于最大废钢比计算模型,计算不同铁水条件和目标条件下的合理废钢装入量。以45#钢作为试验钢种进行工业生产试验,实际配料过程中,要求实际废钢装入量小于最大废钢装入量,终点控制情况得到较大改善,见表4。

据表4可知,转炉冶炼终点C含量得到较好控制,钢液自由氧位有所降低。模型应用之前,终点温度较低,平均1599.8℃,终点碳含量控制在0.04%~0.07%,平均0.054%,钢液自由氧控制在(500~700)×10<sup>-6</sup>,平均氧位589.88×10<sup>-6</sup>。模型应用之后,废钢装入量得到有效控制,平均终点温度1609.8℃,同比提高10℃,终点碳含量控制到

表4 模型应用前后效果对比  
Table 4 Comparison of effect before and after application of model

模型	试验次数	终点C/%	定氧值/10 <sup>-6</sup>	终点温度/℃
应用前	1	0.05	642.8	1585
	2	0.04	589.7	1603
	3	0.07	554.2	1616
	4	0.05	597.3	1604
	5	0.06	565.4	1591
	平均值(Avg.)	0.054	589.88	1599.8
	6	0.08	482.2	1620
应用后	7	0.08	455.3	1614
	8	0.1	316	1605
	9	0.1	315.4	1602
	10	0.09	349	1608
	平均值(Avg.)	0.09	383.58	1609.8

0.08%~0.1%,平均0.09%,同比提高0.036%,钢液自由氧控制在(300~500)×10<sup>-6</sup>,平均氧位383.58×10<sup>-6</sup>,同比下降206.3×10<sup>-6</sup>,效果较为显著。

### 4 结论

(1)碳氧积的增加会导致钢中自由氧含量增加。但在碳氧积较小的前提下,若终点碳含量过低,仍会导致钢中自由氧含量较高,终点碳含量的控制水平是决定终点氧含量的直接原因。

(2)合理的炉料结构是稳定、高效冶炼的前提。基于物料平衡和热平衡建立了100t转炉废钢计算模型,提出了基于铁水条件精准配废钢的配料思路,在100t转炉废钢计算模型的配合指导下,废钢装入量得到有效控制,终点温度平均提高10℃,终点碳含量平均提高0.036%,钢中自由氧含量平均下降206.3×10<sup>-6</sup>。

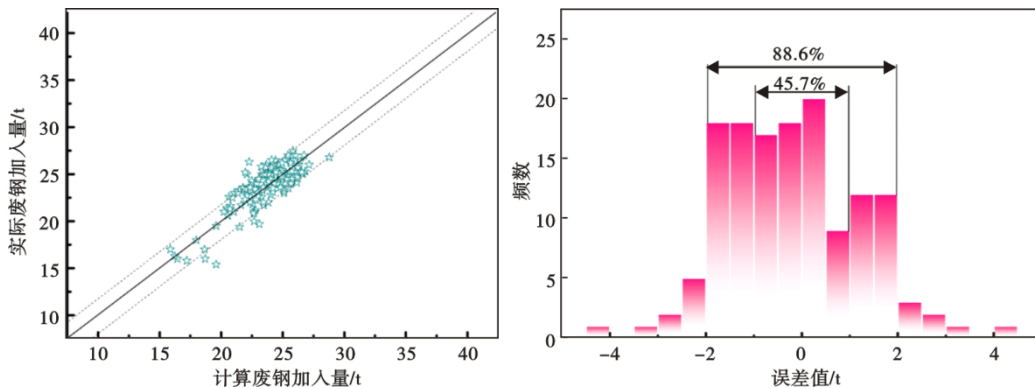


图9 废钢加入量计算误差图  
Fig. 9 Distribution diagram of calculation error of scrap addition value

## 参考文献

- [1] 操瑞宏, 王学林, 孙乐飞, 等. LF精炼脱氧方式对钢中氧含量和夹杂物演变规律的影响[J]. 炼钢, 2019, 35(5):30-36.
- [2] 尹卫平, 刘洪波, 李洪春, 等. 转炉钢液氧含量变化规律的研究[J]. 炼钢, 2004, 20(1):47-49.
- [3] 罗源奎, 吕凯辉. Q195钢过氧化的危害及原因分析[J]. 中国冶金, 2016, 26(1):53-58.
- [4] 王忠刚, 杜金科, 王洪军. 转炉钢液过氧化原因分析及危害[J]. 山东冶金, 2009, 31(4):29-30.
- [5] 程志刚, 王彦平. 钢液过氧化原因及控制措施[J]. 山西冶金, 2006, (3):43-44.
- [6] 臧晓俊, 朱丽云, 陈明亮, 等. 钢液过氧化原因分析及应对措施[J]. 山西冶金, 2005, 28(3):15-16.
- [7] 李伟东, 何海龙, 李冰, 等. 鞍钢提高转炉废钢比的生产实践[J]. 鞍钢技术, 2019(5):53-56.
- [8] 管挺, 王耀, 刘飞, 等. 180 t转炉高废钢比冶炼工艺开发[J]. 特殊钢, 2019, 40(3):19-22.
- [9] 张彦恒, 周海龙, 喻林, 等. 钒钛铁水冶炼提升废钢比的探索与实践[J]. 特殊钢, 2018, 39(5):21-23.
- [10] 张国裕, 王志强. 低铁耗条件下提高转炉废钢比的冶炼工艺优化[J]. 中国金属通报, 2019(12):87-88.
- [11] Zebende G F. DCCA cross-correlation coefficient: Quantifying level of cross-correlation[J]. Physica A Statistical Mechanics and Its Applications, 2011, 390(4):614-618.
- [12] 高放, 包燕平, 王敏, 等. 基于FA-ELM的转炉终点磷含量预测模型[J]. 钢铁, 2020, 55(12):24-30.
- [13] Gao M, Gao J T, Zhang Y L, et al. Two-Dimensional Temperature Distribution and Heat Transfer during Scrap Melting[J]. JOM, 2020, 72(5):1943-1952.
- [14] 习小军. 电弧炉熔池内废钢快速熔化机理[D]. 北京:北京科技大学, 2021.
- [15] 杨文远, 郑丛杰, 崔健, 等. 大型转炉吹炼过程中熔池温度的变化状况[J]. 钢铁研究学报, 2003, 15(4):5-8.
- [16] 肖龙鑫, 李晶, 闫威, 等. 合理的转炉废钢比探析[J]. 有色金属科学与工程, 2019, 10(5):46-53.
- [17] 王新华. 钢铁冶金:炼钢学[M]. 北京:高等教育出版社, 2007.

## 下 期 要 目

热处理对时速 350 km/h 列车制动盘材料组织及性能的影响 .....	李凯昕等
电渣重熔过程不同渣系对电渣锭洁净度的影响 .....	李健等
KR 脱硫喷粉工艺实践 .....	甄先锋等
高强度热采套管 TP110H 的 350℃ 高温力学性能研究 .....	吴亮亮等
高温均匀化对 GH4710 镍基合金组织及性能的影响 .....	高首磊等
15CrMoG 矩形坯保护渣优化实践 .....	张军卫等
石油套管用 37Mn5 钢全流程洁净度分析及工艺改进 .....	宋景凌等
S31254 超级奥氏体不锈钢凝固相转变的热力学分析 .....	张威等
Nb 含量和热变形参数对纵向变截面耐候桥梁钢变形抗力及组织的影响 .....	林田子等
16MnCr5 高温热塑性及连续冷却转变曲线测定及应用 .....	王宁涛等
铸造双相不锈钢 CD3MWCuN 凝固与析出热力学模拟 .....	苏学虎等