

基于废气分析的 RH 脱碳模型

林 路^{1,2)} 包燕平^{1,2)} 岳 峰³⁾ 王 敏^{1,2)} 欧洪林³⁾

1) 北京科技大学钢铁冶金新技术国家重点实验室, 北京 100083 2) 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083

3) 北京科技大学冶金工程研究院, 北京 100083

✉通信作者, E-mail: baoy@ustb.edu.cn

摘 要 为连续预测 RH 熔池内碳含量, 实现对 RH 脱碳终点碳含量控制, 以物质 C 平衡为基础, 通过对某钢厂 250 t RH 废气分析系统分析的废气流量以及废气中 CO、CO₂ 含量进行连续监控, 建立了基于废气分析的 RH 脱碳数学模型. 该模型计算表明: 对于冶炼成品中碳质量分数 $\leq 30 \times 10^{-6}$ 的超低碳钢, 模型计算 RH 脱碳终点碳质量分数误差都在 $\pm 5 \times 10^{-6}$ 之间; 在 RH 脱碳后期, 废气中 CO + CO₂ 质量分数低于 5% 时, 熔池内脱碳速率低于 10^{-6} min^{-1} , 此时可判定脱碳结束. 同时结合现场工艺条件分析了压降平台以及吹氧操作对 RH 脱碳速率的影响.

关键词 炼钢; 精炼; 脱碳; 数学模型

分类号 TF 769. 4

RH decarburization model based on off-gas analysis

LIN Lu^{1,2)}, BAO Yan-ping^{1,2)} ✉, YUE Feng³⁾, WANG Min^{1,2)}, OU Hong-lin³⁾

1) State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

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

3) Engineering Research Institute, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

✉ Corresponding author, E-mail: baoy@ustb.edu.cn

ABSTRACT In order to continuously forecast the carbon content in a RH molten bath and control the carbon content at the RH terminal point, the off-gas flow rate was analyzed and the content of CO + CO₂ in the off-gas was monitored continuously. Based on carbon balance calculations, a decarburization mathematical model was established for the 250 t RH in a steel plant. Calculation results from the model showed that the precision of carbon content at the end point of RH treatment was $\pm 5 \times 10^{-6}$ for ultra-low-carbon steel ($w[\text{C}] \leq 30 \times 10^{-6}$). When the content of CO + CO₂ in the off gas was lower than 5% in the late period of RH decarburization, the decarburization rate was lower than 10^{-6} min^{-1} , so decarburization could be determined to finish. In combination with site technological conditions, the effects of the pressure drop platform and oxygen blowing operation on the RH decarburization rate were studied.

KEY WORDS steelmaking; refining; decarburization; mathematical models

RH 真空精炼装置以其良好的脱碳能力成为国内外生产超低碳钢普遍采用的手段之一. 而对于此类超低碳钢的应用来说, 开发一种监控 RH 钢液含碳量的动态变化和实时脱碳速度系统极为重要^[1]. 在钢铁工业领域中, 至今尚无直接测量钢水中碳含量的方法, 在 RH 脱碳过程中, 一般是根据现场操作经验和模型来控制脱碳过程, 其脱碳结果只有在取样化验后才能获得, 这无疑降低了终点碳命中率以及延长了精炼时间, 给钢铁生产效率、产品质量以及能源和物质消耗带来严重影响^[2-3]. 因此, 对炼钢过程中的废气进行

检测, 通过连续测量废气成分及流量, 间接推定熔池内碳含量的废气分析技术应运而生. 目前, 废气分析逐渐应用于 RH^[4-7]、VOD^[8]、转炉^[9-11]以及电弧炉^[12-13]等过程, 取得了较好的控制效果; 但基于废气分析的 RH 在线脱碳模型的研究报道很少.

本文是以某钢厂 RH 冶炼超低碳钢的脱碳过程为研究对象, 建立了基于废气分析的 RH 脱碳数学模型, 通过冶炼过程中废气分析来连续推定钢包中碳含量, 提高终点碳含量命中率, 为现场生产提供了有力的指导.

1 RH 脱碳模型研究基础

1.1 RH 基本参数

针对某钢厂 250 t RH 精炼炉建立了基于烟气分

析的 RH 脱碳数学模型. 该厂 RH 炉公称容量为 250 t, 平均出钢量 270 t, 采用双工位, 吹氧与否视钢液温度以及碳含量而定. 该钢厂与国内外著名厂家 RH 精炼设备基本参数见表 1.

表 1 RH 设备基本参数^[14]
Table 1 Parameters of RH vacuum degasser^[14]

参数	某钢厂	迁钢 ^[2]	君津 2#	水岛 4#
钢包容量/t	250	210	300	250
真空室内径/mm	2 322	2 138	2 420	2 500
浸渍管内径/mm	750	650	750	750
真空抽气能力 (67 Pa)/(kg·h ⁻¹)	1 100	750	1 000	1 000
最大提升气体流量/(L·min ⁻¹)	4 000	2 000	4 000	5 000

RH 的脱碳能力主要取决于其装备水平, 生产超低碳 IF 钢必须采用强大高效的 RH 装置. 由表 1 可知, 该钢厂的 RH 精炼炉与国外著名钢企相比其设备处于国际先进水平, 完全满足生产超低碳 IF 钢的要求.

1.2 RH 废气分析系统的建立

在 RH 脱碳过程中流经烟气管道的废气一般由 CO、O₂、CO₂、N₂ 和 Ar 气体组成, 其中, CO 和 CO₂ 是反应产生气体, N₂ 由漏气带入, 含量很少, Ar 是 RH 循环流动提升气体. 烟气分析系统是建立本脱碳模型的基础, 主要包括烟气取样探头、红外分析仪、PLC 和计算机等, 其控制示意图如图 1 所示. 废气通过取样探头, 连续从废气管道中提取废气样本, 在清除粉尘和水分之后, 将废气样送到气体分析系统, 利用红外分析仪连续测定烟气中 O₂、CO 和 CO₂ 含量, 同时通过安装在废气管道上的气体流量计连续不断地测定流经管道的废气流量. 红外气体分析仪每隔 10 s 分析一组烟气成分数据, 将测得的数据经 PLC 转换后传输到计算机中存储并显示分析相应数据.

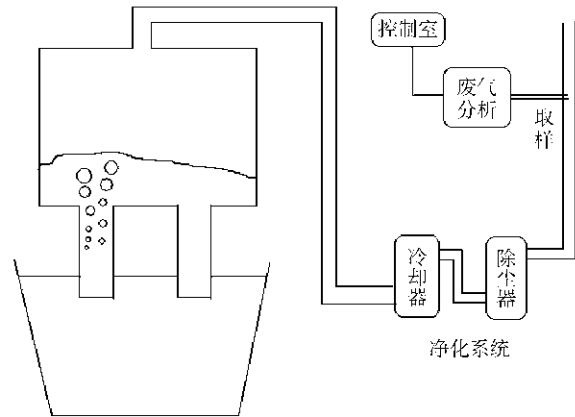


图 1 RH 废气分析系统框架图
Fig. 1 Functional block diagram of the RH off-gas analysis system

1.3 基于烟气分析的 RH 脱碳模型的建立

基于烟气分析的 RH 在线脱碳模型根据红外分析仪和气体流量计连续测定的烟气成分、废气流量, 结合 RH 入炉原料质量和成分等生产数据, 根据物料平衡原理, 通过模型能连续预测 RH 真空处理过程中脱碳速度和 RH 精炼炉内当前碳含量, 实现 RH 终点碳含量实时监控. 基于烟气分析的 RH 在线脱碳模型控制图如图 2 所示. 应用 VB 语言结合数据库语言, 将基于烟气的 RH 脱碳模型编制成 RH 真空脱碳模拟软件, 并应用于现场生产.

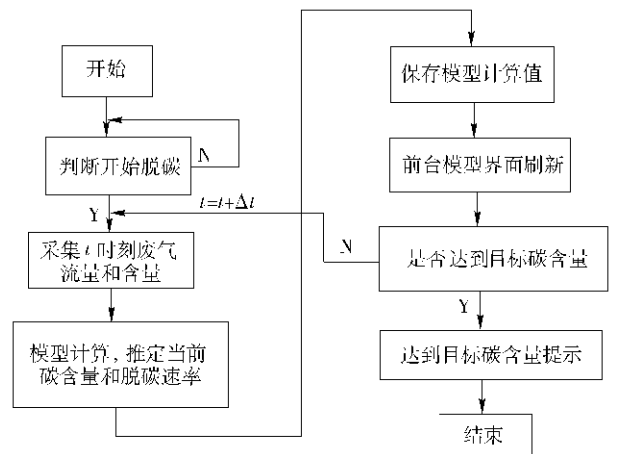


图 2 RH 脱碳模型控制原理图
Fig. 2 Control schematic diagram of the RH decarburization model

1.4 RH 脱碳模型的数学描述

本试验厂由于设备限制, 只能采用红外分析仪配合气体流量计来分析废气成分和流量. 基于烟气分析脱碳模型根据 C 平衡, RH 脱碳速度可以表示为

$$\nu = \left(\frac{\varphi_{CO}}{14} + \frac{\varphi_{CO_2}}{22} \right) \cdot \frac{100Q_A}{W_{steel}} \quad (1)$$

式中, φ_{CO_2} 、 φ_{CO} 分别为废气中 CO₂ 和 CO 的质量分

数, W_{steel} 为钢水质量 (t), Q_A 为废气流量 ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$), ν 为脱碳速度 (10^{-6} min^{-1}).

有些炉次由于温度较高等原因, 在 RH 过程中会加入废钢、锰铁等而带入部分碳, 根据入 RH 炉总碳含量与累计脱碳量, 可计算出 t 时刻熔池内碳含量为

$$C_{(t)} = C_0 - \xi \int_0^t \left(\frac{dC}{dt} \right) dt \quad (2)$$

$$C_0 = C_{\text{ini}} + 10 \times \frac{W_{\text{scrap}} C_{\text{scrap}} + W_{\text{MnFe}} C_{\text{MnFe}}}{W_{\text{steel}}} \quad (3)$$

式中, C_0 为 RH 入炉总碳含量, C_{ini} 为 RH 到站初始碳含量, C_{scrap} 为废钢中碳的质量分数, C_{MnFe} 为锰铁中碳的质量分数, $C_{(t)}$ 为脱碳 t 时刻推定碳含量, Q_{Ar} 为提升气体氩气流量 ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$), W_{MnFe} 为 RH 过程中加入的锰铁量 (kg), W_{scrap} 为 RH 过程中加入的废钢量 (kg), ξ 为修正系数.

质谱仪分析速度快, 分析的组分多, 同时分析的精度高, 能在数秒之内给出 CO 、 CO_2 、 O_2 、 H_2 、 He 、 N_2 、 Ar 和 H_2O 等八种气体成分的含量. 因此, 在炼钢过程废气分析中也经常用到. 对于质谱仪分析, 可根据氮平衡和氩平衡, 由提升气体流量反推出废气流量 Q_A , 不需要气体流量计来测量废气流量, 如下式:

$$Q_A = \frac{8.07 Q_{\text{Ar}}}{75.4 \varphi_{\text{Ar}} - 1.28 \varphi_{\text{N}_2}} \quad (4)$$

式中, Q_{Ar} 为提升气体氩气流量 ($\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$), φ_{N_2} 和 φ_{Ar} 分别为废气中 N_2 和 Ar 的质量分数.

采用红外分析仪不能测出废气中 N_2 、 Ar 成分, 废气流量 Q_A 是由气体流量计测出, 存在一定误差. 相较于质谱仪废气分析系统建立的脱碳模型, 其精度稍差.

由于废气分析系统每 10 s 更新一次烟气成分与流量, 故该模型每隔 10 s 推定一次熔池中碳含量, 实现对 RH 中碳含量的连续预报.

2 RH 脱碳模型的验证

首先利用自动化部门采集的 RH 脱碳过程中相关信息变化曲线进行分析. 图 3 和图 4 分别显示了典型的 RH 吹氧强制脱碳和自然脱碳条件下废气流量及废气中 CO 和 CO_2 含量随 RH 处理时间的变化. 图 5 给出了相对应两试验炉次 RH 处理过程中真空室压力和提升气体变化曲线.

从图 3 和图 5 可以看出, TOP 吹氧强制脱碳第 1 炉次开抽 230 s 后真空室压力降至 10 000 Pa 左右, 在 190 ~ 310 s 时出现压降平台, 420 s 后达到极限真

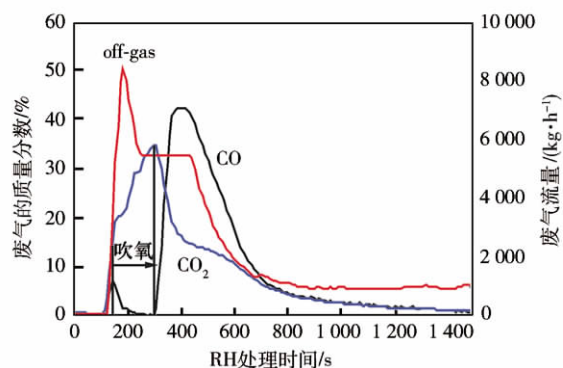


图 3 RH 处理过程中第 1 炉次废气流量及成分变化

Fig. 3 Flow rate and composition of the off-gas in the 1st furnace during RH treatment

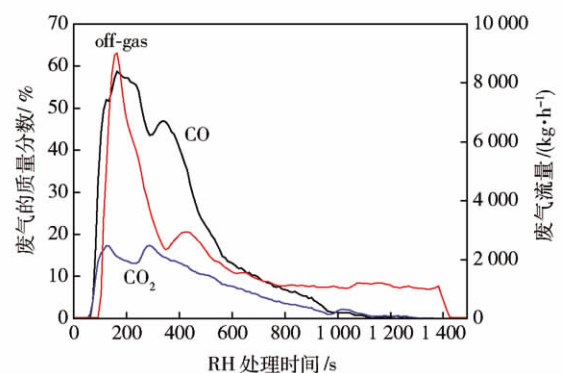


图 4 RH 处理过程中第 2 炉次废气流量及成分变化

Fig. 4 Flow rate and composition of the off-gas in the 2nd furnace during RH treatment

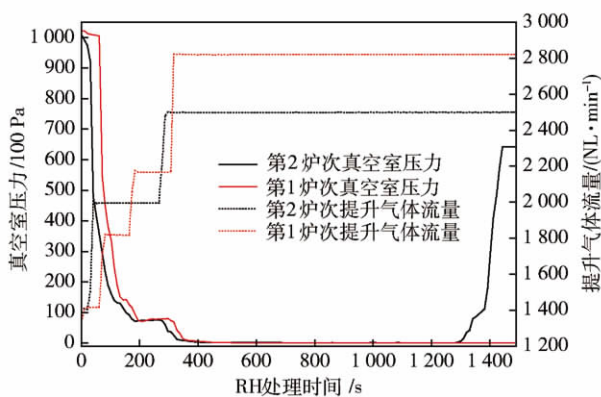


图 5 RH 真空室压力和提升气体流量变化

Fig. 5 Variations in pressure and lifting gas flow rate of the RH vacuum chamber

空度 (如图 5 所示). 冶炼开始时废气中 CO 含量正处在上升期, 150 s 时吹氧开始, 二次燃烧剧烈, 使废气中 CO 含量逐渐下降直至趋近于零, 此时 CO_2 逐渐上升并达到最大值, 直至 300 s 吹氧结束, 随后 380 s 提升气体流量达到最大且真空室压力进一步降低并达到极限真空度 (67 Pa), C-O 反应剧烈, CO

含量逐渐增加并达到最大值; 当 C-O 强反应期过后, 熔池中碳含量较低, C-O 反应较弱, 因此废气中 CO、CO₂ 含量逐渐减少直至接近于零。

自然脱碳第 2 炉次开抽 150 s 后真空室压力降至 10 000 Pa 左右, 在 180 ~ 290 s 之间出现了压降平台, 400 s 后达到极限真空度(如图 5 所示)。图 4 在自然脱碳条件下, CO 和 CO₂ 含量变化趋势一致, 且出现两个峰值, 峰值的变化分别出现在真空度压降平台前后。由于钢液开始循环后, 随着真空度升高, 脱碳速率逐渐增加, 废气中 CO、CO₂ 含量增加并达到第 1 个峰值; 在 370 s 左右氩气流量提升以及真空室压力进一步下降并达到最极限真空度(67 Pa), C-O 反应剧烈造成 CO、CO₂ 含量再一次增加并达到第 2 个峰值; 随后到脱碳后期, 废气流量达到一个相对稳定的值, 废气中 CO、CO₂ 含量逐渐减少直至接近于零。

由于废气分析装置安装位置离真空室有一定距离, 同时分析仪器有一定的响应时间, 所以通过废气分析仪得到的废气信息有一段延迟时间。对该钢厂 2010 年 6 月—2011 年 3 月生产 90 余炉 IF 钢数据进行分析, 找出烟气分析系统合理延时时间, 并同时得出较优的流量修正系数, 建立精确的基于烟气分析的 RH 脱碳数学模型。利用该模型对现场典型两炉次进行了模拟计算, 对熔池中碳含量连续预报, 同时对此两炉次进行取样分析, 并将模型预报值同取样分析结果进行比较, 从而验证模型的准确性。

经模型预算后 RH 脱碳过程中的脱碳速率如图 6 所示。两炉次考虑延时脱碳速率明显比没有考虑延时的时候脱碳速率快, 也更加符合 RH 脱碳过程的真实情况。

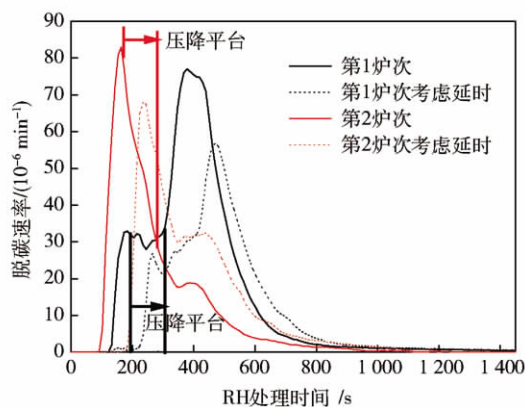


图 6 脱碳速率的变化

Fig. 6 Variation of decarburization rate

自然脱碳炉次压降速度比吹氧强制脱碳炉次快, 脱碳速率迅速升高, 到达峰值后, 由于在 180 ~

290 s 时出现压降平台, 脱碳速率迅速下降, 在 370 s 左右由于提升氩气流量达到最大且真空压力进一步下降, 脱碳速率稍稍上升后由于熔池中碳含量传质限制, C-O 反应减弱, 脱碳速率下降直至为零; 而强制脱碳炉次, 由于吹氧作用对脱碳速率的正面作用与压降平台的负面作用相互抵消, 在压降平台期脱碳速率没有下降, 而是出现一段脱碳速率近似平稳期。由此说明真空压降平台的存在, 不利于钢液脱碳反应的进行, 消除压降平台可进一步增大 RH 脱碳速率, 达到在更短时间获得更低碳含量的目的。

实际生产中在 RH 脱碳后期, 由于碳含量很低, C-O 反应很弱, 加之真空室压力和提升气体流量已趋于稳定, 废气中 CO + CO₂ 含量在一定程度上能较好地反映熔池内的碳含量。当废气中 CO + CO₂ 含量低于 5% 时, 可认为脱碳结束, 通过 90 余炉数据分析可知, 此时脱碳速率一般低于 10^{-6} min^{-1} 。

图 7 是两试验炉次在 RH 脱碳过程中熔池内钢水碳含量实测值与模型预测值的对比。由图可见, 考虑延时后, 模型预测值与实测值吻合较好。在脱碳前期, 模型预测值与实测值相差较大, 约为 30×10^{-6} ; 而在脱碳末期, 模型计算值与实际测量值相差不大, 试验结果吻合较好, 达到终点预报的目的。

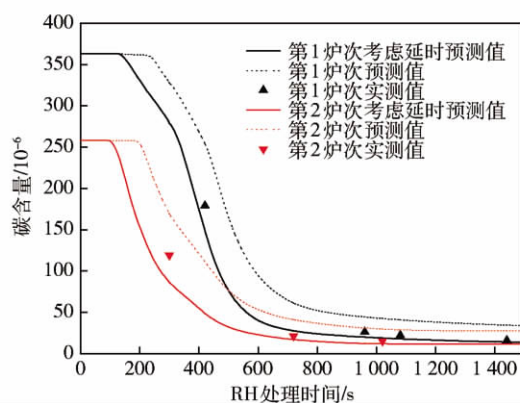


图 7 RH 熔池内钢水碳含量对比

Fig. 7 Comparison of carbon content in the RH molten bath

3 模型计算 RH 脱碳终点碳含量的精确性

对某钢厂生产 IF 钢中十余炉次脱碳终点碳含量进行了取样分析, 分析结果与基于废气分析脱碳模型计算的 RH 脱碳终点碳含量进行了比较, 结果如图 8 所示。由图可知, 模型预报结果误差范围都在 $\pm 5 \times 10^{-6}$ 之间; 其中, 预报范围在 $\pm 3 \times 10^{-6}$ 之间的占 73.7%, 证明了模型对脱碳终点的预测有一定的可靠性。

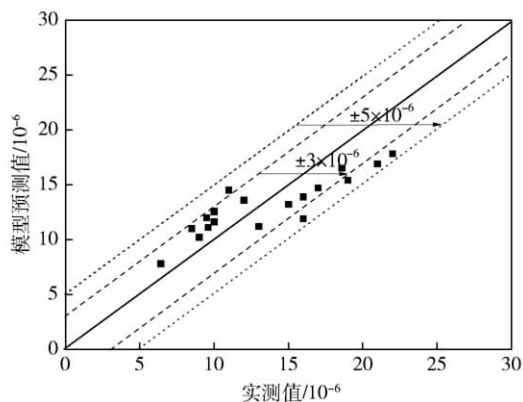


图 8 RH 脱碳终点碳含量实测值与预测值比较

Fig. 8 Comparison of carbon content at the end of RH decarburization between the measured values and the predictive ones by the model

4 结论

(1) 以红外分析仪分析技术和物料中 C 平衡为基础, 根据废气成分和废气流量的生产数据建立基于烟气的 RH 脱碳数学模型, 脱碳速率为

$$\nu = \left(\frac{\varphi_{\text{CO}}}{14} + \frac{\varphi_{\text{CO}_2}}{22} \right) \cdot \frac{100Q_A}{W_{\text{steel}}}$$

与该 250 t RH 精炼炉实际冶炼数据对比, 采用该模型可以准确连续预报熔池中碳含量, 提高终点碳命中率。

(2) 考虑延时后, 对生产终点碳的质量分数 $\leq 30 \times 10^{-6}$ 的超低碳钢来说, 模型预报结果都在 $\pm 5 \times 10^{-6}$ 之间, 预报范围在 $\pm 3 \times 10^{-6}$ 之间的占 73.7%, 模型具有一定的可靠性。

(3) RH 脱碳后期, 当废气中 $\text{CO} + \text{CO}_2$ 的质量分数低于 5%, 脱碳速率一般低于 10^{-6} min^{-1} , 可以判定 RH 脱碳结束, 直接进行后续脱氧、合金化等操作, 有利于缩短 RH 操作时间, 提高生产效率。

(4) RH 过程中压降平台对 RH 脱碳速率影响明显, 冶炼过程中消除压降平台对提高脱碳速率, 降低 RH 终点碳含量有着重要意义。

(5) 由炉气成分冶炼曲线以及脱碳速率曲线的变化可以判断 RH 冶炼过程中工艺参数的变化, 对提高 RH 生产效率、产品质量和节能降耗具有重大意义。

参 考 文 献

- [1] Chou C L. Dynamic supervision of oxygen top-blowing converter steel-making decarburization. *Wusteel Technol*, 1997(4): 24 (周长龙. 氧气顶吹转炉炼钢脱碳的动态监控. 武钢技术, 1997(4): 24)
- [2] Liu B S, Zhu G S, Li B H, et al. Application of waste gas analysis for RH decarburization process. *Iron Steel*, 2010, 45(2): 23 (刘柏松, 朱国森, 李本海, 等. 废气分析在 RH 脱碳过程中的应用. 钢铁, 2010, 45(2): 23)
- [3] Shen X J, Wang H Z. Waste gas analysis for dynamic control of steelmaking processes // *Proceedings of China Iron & Steel Annual Meeting*. Beijing, 2003: 581 (沈学静, 王海舟. 炼钢动态控制中的废气分析. 中国钢铁年会论文集. 北京, 2003: 581)
- [4] Kleimt B, Köhle S. Dynamic modelling of vacuum circulation process for steel decarburization. *Rev Metall*, 1995, 92(4): 493
- [5] Chiang M S, Lin C T, Chou C L, et al. Application of off-gas analysis for RH decarburization process. *SEASIS Q*, 1997, 26(2): 27
- [6] Tachibana H, Yamamoto T, Narita K, et al. On-line end-point guidance system for the refining of ultra-low-carbon steel in RH process // *Steelmaking Conference Proceedings*. Toronto: ISS-AIME, 1992: 217
- [7] Yamaguchi K, Kishimoto Y, Sakuraya T, et al. Effect of refining conditions for ultra low carbon steel on decarburization reaction in RH degasser. *ISIJ Int*, 1992, 32(1): 126
- [8] Alok C, Cerhard B, Harald S, et al. Computerized control of the VOD process with the application of a mass spectrometer. *MPT Metall Plant Technol*, 1988, 11(5): 44
- [9] Takawa T, Katayama K, Katohgi K, et al. Analysis of converter process variables from exhaust gas. *Trans Iron Steel Inst Jpn*, 1988, 28(1): 59
- [10] Zhang G Y, Wang X F, Lin D, et al. Application of BOF off-gas analysis dynamic control. *Iron Steel*, 2007, 42(9): 29 (张贵玉, 万雪峰, 林东, 等. 转炉炉气分析动态控制技术的应用. 钢铁, 2007, 42(9): 29)
- [11] He P, Liu L, Liu K, et al. Critical carbon content in BOF blowing process with gas analysis. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2009, 31(2): 156 (何平, 刘浏, 刘锟, 等. 采用烟气分析法对转炉吹炼过程临界碳含量的研究. 北京科技大学学报, 2009, 31(2): 156)
- [12] Khan M, Zuliani D. EAF water detection using off-gas measurement // *AISTech 2009 Proceedings*. St. Louis, 2009: 549
- [13] Kirschen M, Pfeifer H, Deng J X, et al. Off-gas measurements at the EAF primary dedusting system of electric arc furnaces. *Stahl Eisen*, 2004, 124(11): 73
- [14] Xu H M. The equipment discussion of RH vacuum circulation degasser // *Countrywide RH Refining Technology Proseminar*. Shanghai, 2007: 28 (徐汉明. RH 真空循环脱气装备选型探讨 // 全国 RH 精炼技术研讨会文集. 上海, 2007: 28)