

基于 Petri 网建模的转炉炼钢系统中炉渣炉气分析*

岳有军¹, 于水¹, 赵辉^{1,2}, 王红君¹

(1.天津理工大学 自动化学院, 天津市复杂控制理论与应用重点实验室, 天津 300384;
2.天津农学院, 天津 300384)

摘要: 利用 Petri 网的建模方法, 根据物料平衡原则及转炉中高温下发生的化学反应和炼钢的损耗建立一个转炉炼钢系统反应的物流模型, 并利用 Matlab 下的 Simulink/Stateflow 模块对所建的模型进行仿真分析。基于以上的仿真分析, 可以通过加入待吹炼的铁水的质量, 预算出理论需要加入造渣剂各成分的质量, 以及转炉吹炼时需要吹入的氧气量, 同时, 还可以在反应结束后, 分析生成的炉渣、炉气中各成分的含量。

关键词: Petri 网; Simulink/Stateflow; 转炉炼钢; 炉渣; 炉气

中图分类号: TF721

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2013)08-0075-04

Modeling and simulation of slag and gas in convert steelmaking on Petri net

Yue Youjun¹, Yu Shui¹, Zhao Hui^{1,2}, Wang Hongjun¹

(1.Tianjin Key Laboratory for Control Theory & Applications in Complicated System,
College of Automation, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China;
2.Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China)

Abstract: Based on the material balance principle, the chemical reactions in the converter and the loss of steelmaking, a logistics model of converter steelmaking reaction system was established with Petri net, then the Stateflow module on Matlab / Simulink was also adopted to analyze the logistics model of converter steelmaking which has been made. Based on the above analysis, the quantity of the ingredients of mineral powder and the quantity of oxygen can also be budgeted. Meanwhile, the content of each component in the slag and gas of converter steelmaking system after the reaction can be calculated.

Key words: Petri net; Simulink/Stateflow; converter steelmaking; slag; gas

在如今资源日渐减少和竞争日益激烈的情况下, 如何有效地减少成本及能耗是钢铁企业极为关注的问题, 因为钢铁企业的物质流、能量流相互作用, 共同决定着企业的物耗、能耗, 且物质流是钢铁生产的主体, 所以物流成为了钢铁生产系统十分重视的研究目标^[1-2]。正确认识和分析转炉炼钢中的物流问题, 必将对钢铁生产改进产品质量、降低生产成本的节能降耗工作产生深远的影响。

转炉炼钢生产是钢铁生产流程的关键环节, 是一个非常复杂的多元多相高温物理化学过程, 具有反应速度快、影响因素多、反应复杂、人工操作不易控制的特点, 属于多相、多变量、反应复杂、原材料品种多的大系统^[3]。

世界各国的研究者采用不同的方法对其进行了研究, 而模型方法也是研究钢铁企业生产系统中节能的基础。

1 转炉炼钢系统物流 Petri 网模型

作为一种系统模型, Petri 网模型不仅具有较强的直观性, 而且还可以描述系统的动态行为、异步、并发等特征, 非常适合于转炉炼钢物流类的混合动态过程的建模^[4-5], 所以本文选用 Petri 网的方法对转炉炼钢系统的物流进行建模。

1.1 转炉炼钢中成分分析

转炉炼钢的模型主要建立在物料平衡的基础上, 物料平衡是计算炼钢过程中加入炉内和参与炼钢过程的全部物料(包括铁水、废钢、氧气、冷却剂、渣料和被侵蚀的炉衬等)与炼钢过程的产物(包括钢水、熔渣、炉气和烟尘等)之间的平衡关系。铁水中含有的待脱去元素为:

* 基金项目: 天津市应用基础及前沿技术研究中心(09JCZDJC23900)

技术与方法 Technique and Method

C、Si、Mn、P、S；造渣球成分为：石灰、萤石、白云石、铁矿石^[6]。转炉炼钢物料平衡图如图 1 所示。

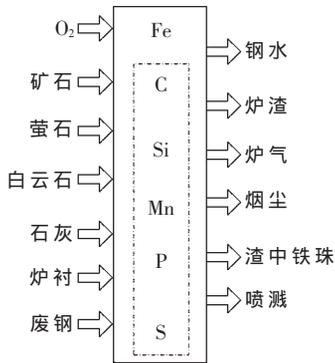


图 1 转炉炼钢物料平衡图

炼钢各成分的含量是计算炉渣及生成量的基础，只有准确掌握各成分的含量，才可以得出准确的生成产物量。其中，铁水中含有其他元素的成分及造渣球、炉衬侵蚀的成分如表 1 所示，石灰、萤石、白云石、铁矿石及被侵蚀的炉衬中各成分百分比含量参考某铁厂的具体数据。

表 1 铁水及造渣球、炉衬中成分

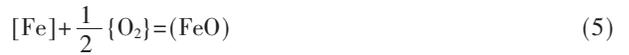
项目	成分							
铁水	Fe	C	Si	Mn	P	S		
造渣球	S	P	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	CaF ₂	FeO Fe ₂ O ₃ H ₂ O
炉衬侵蚀	C	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃			

另补充数据：

- (1)渣中铁珠量为渣量的 8%；
- (2)金属中碳的氧化，其中 90%的碳氧化成 CO，10%的碳氧化成 CO₂；
- (3)喷溅铁损为铁水量的 1%；
- (4)取炉气平均温度 1450℃；炉气中自由氧含量为 0.5%；烟尘量为铁水量的 1.6%；
- (5)炉衬侵蚀量为铁水量的 0.5%；
- (6)氧气成分，O₂ 为 98.5%，N₂ 为 1.5%。

1.2 转炉炼钢的过程

转炉炼钢的主要过程为：经过预处理的铁水通过铁水包兑入到转炉中，进行转炉吹炼，进一步除去杂质元素。转炉吹炼时发生的主要反应具体为：前一炉钢出完之后，倾倒入炉内的残留炉渣，再进行溅渣护炉，装入废钢和铁水，加入第一批渣料（主要为造渣球和铁矿石），当氧枪降至规定高度时，开始吹炼。而后，根据火焰情况、吹炼时间等因素适当调整氧枪位置，适当的时候可能再次加入铁矿石和造渣材料，直至停止吹炼^[7]。其中，内部在高温的条件下发生了多种化学反应，反应方程式如下所示：



$$\text{消耗 CaO 量} = \text{矿石中含的 } m_s \times \frac{56}{32} \quad (12)$$

$$\text{生成 CaS 量} = \text{矿石中含的 } m_s \times \frac{72}{32} + \text{石灰中含的 } m_s \times \frac{72}{32} \quad (13)$$

$$\text{石灰加入量} = \frac{R \times \sum (SiO_2) - \sum (CaO)}{\%CaO_{石灰} - R \times \%SiO_2_{石灰}} \quad (14)$$

$$\text{生成 } P_2O_5 \text{ 量} = \text{萤石中含的 } m_p \times \frac{142}{62} \quad (15)$$

其中， m_s 表示 S 的质量， m_p 表示 P 的质量， R 为炉渣碱度。

1.3 转炉炼钢系统的 Petri 网模型

由以上的成分及反应数据分析，可以根据 Petri 网建模的原则搭建转炉炼钢系统物流的 Petri 网模型，所搭建模型如图 2 所示，对应的库所及变迁如表 2、表 3 所示。

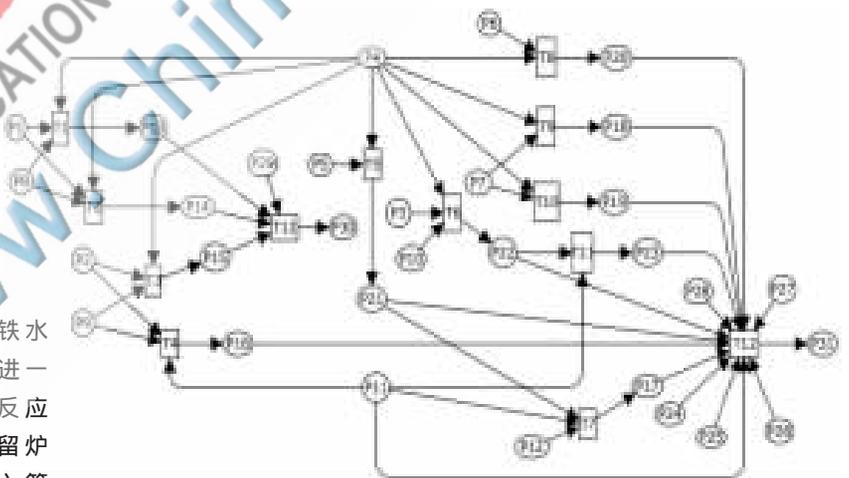


图 2 转炉炼钢系统物流的 Petri 网模型

2 转炉炼钢系统物流 Petri 网模型的 Stateflow 仿真

Matlab 中的 Stateflow 是一个创建、仿真复杂响应系统和事件驱动系统的工具，能够对混杂、事件驱动、连续、离散系统进行分析，是研究 Petri 网的理想工具^[8]。Stateflow 需要与 Simulink 整合在一起对复杂系统进行建模、仿真和分析^[9]。

根据 Petri 网创建转炉炼钢系统物流 Stateflow 状态

技术与方法 Technique and Method

表 2 转炉炼钢系统物流的 Petri 网模型库所对应表

库所	对应内容	库所	对应内容	库所	对应内容
P1	铁水中 C	P12	造渣球中 SiO ₂	P22	P ₂ O ₅
P2	铁水中 S	P13	CO	P23	4CaO·P ₂ O ₅
P3	铁水中 P	P14	CO ₂	P24	MgO
P4	O ₂	P15	SO ₂	P25	Al ₂ O ₃
P5	铁水中 Si	P16	CaS	P26	CaF ₂
P6	铁水中 Mn	P17	2CaO·SiO ₂	P27	矿石中 FeO
P7	Fe	P18	FeO	P28	矿石中 Fe ₂ O ₃
P8	造渣球及炉衬中 C	P19	Fe ₂ O ₃	P29	H ₂ O
P9	造渣球中 S	P20	MnO	P30	炉渣总量
P10	造渣球中 P	P21	生成 SiO ₂	P31	炉气总量
P11	CaO				

对应的 Simulink 仿真模型如图 4 所示。相应的转炉炼钢中炉气成分的仿真分析与炉渣分析等同此法。

表 3 转炉炼钢系统物流的 Petri 网模型变迁对应表

变迁	对应内容	变迁	对应内容	变迁	对应内容
T1	式(1)	T5	式(9)	T9	式(5)
T2	式(2)	T6	式(7)	T10	式(6)
T3	式(3)	T7	式(10)	T11	式(11)
T4	式(4)	T8	式(8)	T12	总计

图,在 Stateflow 状态图中可以用状态(state)表示 Petri 网中库所和变迁,用跃迁(transition)表示有向弧,用状态的行为(action)和跃迁上标识来描述变迁规则^[10]。根据某钢铁厂的转炉数据和各工序之间的约束关系设定 Stateflow 状态图的变迁关系及控制逻辑,再利用 Simulink 中的各种工具模块,加入相应的输入和输出模块,就可建立出对应的转炉炼钢系统物流 Petri 网的 Stateflow 仿真模型。通过此模型来分析转炉炼钢中生成的炉渣、炉气以及造渣球成分等数据。

在此,仅对炉渣进行举例仿真分析,所建的转炉炼钢中炉渣成分的 Stateflow 状态图仿真分析如图 3 所示,



图 3 转炉炼钢系统炉渣生成的 Stateflow 状态图

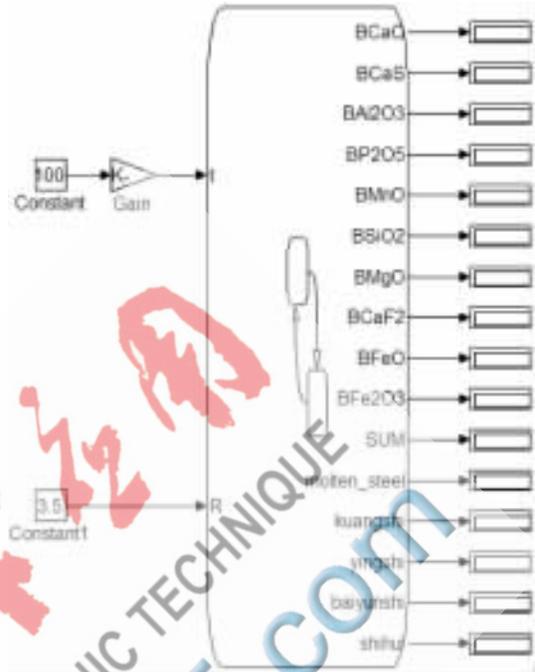


图 4 转炉炼钢系统炉渣生成的 Stateflow 状态图的 Simulink 模型

在输入端输入经铁水预处理后需要进行吹炼的铁水量,即可在输出端得出各造渣剂和耗氧的需求量以及炉渣含量及总量,所得仿真数据如表 4 所示。

本文用 Petri 网的建模方法及 Simulink/Stateflow 仿真,对转炉炼钢系统中生成的炉渣、炉气进行了分析,在输入端输入一炉铁水的量或者要进行吹炼铁水的质量,即可得到转炉炼钢生成的炉渣和炉气中各成分的质量、吹炼需要的吹氧量,也可以得到需要造渣剂的各成分质量。同时,通过此仿真,可以预测生成产物量,以及要加入造渣剂和吹入的氧气的量,可以辅助对钢铁生产系统物流配比的分析,为原料加入量及产物量的分析提供了很好的分析基础和便利的辅助作用。

参考文献

- [1] 陆钟武,蔡九菊,于庆波,等.钢铁生产流程的物流对能耗的影响[J].金属学报,2000,36(4):370-378.
- [2] 王泰昌,迟京东.我国钢铁工业节能降耗现状分析与措施建议[J].冶金管理,2007(3):37-43.
- [3] 孔祥瑞.转炉炼钢终点优化控制模型的研究[D].杭州:杭州电子科技大学,2010.
- [4] 曹健飞.基于 Petri 网的生产物流仿真研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.

表 4 转炉炼钢造渣球投入和炉渣生成数据

种类	铁水/kg										
	1 000	1 500	2 000	2 500	3 000	3 500	4 000	4 500	5 000	5 500	
钢水	902.4	1 354	1 805	2 256	2 707	3 159	3 610	4 061	4 512	4 963	
耗 O ₂	81.3	121.7	162.3	202.8	243.4	284	324.5	365.1	405.6	446.2	
造渣剂	矿石	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
	萤石	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20	22.5	25	27.5
	白云石	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
	石灰	86.18	129.3	172.4	215.5	258.5	301.6	344.7	387.8	430.9	474
炉渣成分	CaO	71.29	106.9	142.6	178.2	213.9	249.5	285.2	320.8	356.5	392.1
	CaS	0.29	0.44	0.585	0.73	0.88	1.02	1.17	1.316	1.46	1.61
	Al ₂ O ₃	1.26	1.90	2.528	3.16	3.79	4.42	5.06	5.69	6.32	6.95
	P ₂ O ₅	3.16	4.73	6.31	7.89	9.47	11.05	12.62	14.2	15.78	17.36
	MnO	5.29	7.94	10.59	13.23	15.88	18.52	21.17	23.82	26.46	29.11
	SiO ₂	25.44	38.17	50.89	63.61	76.33	89.05	101.8	114.5	127.2	139.9
	MgO	9.03	13.54	18.06	22.57	27.09	31.6	36.2	40.63	45.14	49.66
	CaF ₂	4.5	6.75	9	11.25	13.5	15.75	18	20.25	22.5	24.75
	FeO	14.15	21.22	28.3	35.37	42.45	49.52	56.6	63.67	70.75	77.82
	Fe ₂ O ₃	7.08	10.61	14.15	17.69	21.22	24.76	28.3	31.84	35.37	38.91
总炉渣量	141.5	212.2	283	353.7	424.5	495.2	566	636.7	707.5	778.2	

- [5] 刘惠玲. 基于 Petri 网的生产物流系统建模与仿真[D]. 北京: 北京交通大学, 2008. (收稿日期: 2013-01-24)
- [6] 薛正良. 钢铁冶金概论[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010.
- [7] 张小龙. 钢炼铁系统工艺优化研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2007.
- [8] 陶继平, 徐文艳, 杨根科, 等. 基于 Stateflow 的 Petri 网仿真方法[J]. 计算机仿真, 2006, 2(12): 96-99.
- [9] 贾秋玲. MATLAB7. X/Simulink/Stateflow 系统仿真、分析及设计[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2008.
- [10] 张威. Stateflow 逻辑系统建模[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2007.

作者简介:

岳有军, 男, 1970 年生, 副教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向: 智能控制。

于水, 女, 1985 年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 智能控制理论及应用。

赵辉, 男, 1963 年生, 博士, 博士生导师, 教授, 主要研究方向: 智能控制理论及应用、网络控制理论与技术。