球团矿配比对高炉能质流动及碳足迹影响的分析

叶恒棣[1]，王兆才[1]，陈明远[2]，周 恒[2]，师本敬[1]
（1. 中冶长天国际工程有限责任公司，湖南 长沙 410007；2. 北京科技大学 冶金与生态工程学院，北京 100083）

摘要：球团矿作为优质的高炉炼铁原料，其生产工序能耗、污染物排放量显著低于烧结矿。高炉高配比球团矿冶炼已成为炼铁工序节能减排的主要方法之一。为研究球团矿配比对高炉冶炼过程物质流、能量流以及碳足迹的影响规律，本文建立高炉能质计算模型及全生命周期碳足迹评价模型，分析了不同球团矿配比对能量流、碳素流、铁素流、工艺参数以及全生命周期 CO_2 排放的影响。结果表明：当球团配比增至 50% 时，焦比、熔剂用量及渣比均有所降低，鼓风量与炉顶煤气量减少；风口前碳素燃烧放热由 2 667.89 MJ/t 降至 2 513.32 MJ/t，炉渣带走热量从 621.69 MJ/t 降至 466.56 MJ/t，直接还原耗热量由 1 107.67 MJ/t 增加至 1 287.23 MJ/t；碳素收入减少而铁素收入保持稳定，直接还原度略微增加，理论燃烧温度呈下降趋势。随着球团配比从 20% 增加至 50%，全生命周期 CO_2 排放从 1 785.4 kg/t 降低至 1 669.2 kg/t，约降低 6.5%。

关键词：高炉炼铁；球团矿；物质流；能量流；碳足迹
中图分类号：TF046.6 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764(2026)01－0204－10
doi：10.13403/j.sjqt.2026.01.018

Analysis of the effect of pellet ratio on energy-mass flow and carbon footprint in blast furnace

YE Hengdi[1], WANG Zhaocai[1], CHEN Mingyuan[2], ZHOU Heng[2], SHI Benjing[1]
(1. Zhongye Changtian International Engineering Co., Ltd., Changsha 410007, Hunan, China; 2. School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: As a high-quality raw material for ironmaking in blast furnace, the pellet has significantly lower energy consumption and pollutant emissions in production processes compared to the sinter. The method using high-proportion pellet for smelting in blast furnaces has become one of the primary methods for energy saving and emission reduction in the ironmaking process. To study the effect of pellet ratio on the material flow, energy flow, and carbon footprint during smelting in blast furnace, in this paper a blast furnace energy-mass calculation model and a full life cycle carbon footprint assessment model was built to analyze the effects of different pellet ratios on energy flow, carbon flow, iron flow, process parameters, and full life cycle CO_2 emissions. The results show that when the pellet ratio increases to 50%, the coke rate, flux consumption, and slag volume all decrease, while the blast volume and furnace top gas volume are reduced. The heat released by carbon combustion in front of the tuyere decreases from 2 667.89 MJ/t to 2 513.32 MJ/t, the heat carried away by slag decreases from 621.69 MJ/t to 466.56 MJ/t, and the heat consumed by direct reduction increases from 1 107.67 MJ/t to 1 287.23 MJ/t. Carbon revenue decreases while iron revenue remains stable, the direct reduction degree slightly increases, and the theoretical combustion temperature shows a decreasing tendency. As the pellet proportion increases from 20% to 50%, the full life cycle CO_2 emissions decrease from 1 785.4 kg/t to 1669.2 kg/t, with a reduction about 6.5%.

收稿日期：2025－10－22；**修回日期**：2025－11－10
基金项目：中国五矿集团科技专项资助项目(2023ZXA03)
作者简介：叶恒棣(1964—)，男，正高级工程师，五矿首席科学家，从事冶金环境工程基础理论与应用技术研究。
通信作者：王兆才(1984—)，男，正高级工程师，从事烧结球团及直接还原工艺优化研究。

Key words：blast furnace ironmaking；pellet；material flow；energy flow；carbon footprint

钢铁产业在我国经济社会发展中扮演着关键角色，不仅为基础设施建设提供重要支撑，更是国防军工领域不可或缺的材料保障。值得注意的是，该行业在全球范围内都是能源消耗和温室气体排放的重点领域[1-3]。在当前“碳达峰、碳中和”战略深入推进的形势下，国际社会对气候变化的关注度持续提升，环境保护意识不断增强，加之各国相继出台更为严格的碳税政策，这些因素都使得钢铁企业面临着前所未有的减排挑战。由于钢铁行业的碳排放中约有 70% 源自炼铁生产，因此，高炉炼铁系统的节能减排对于钢铁工业绿色低碳发展意义重大[4]。目前，我国高炉冶炼所用含铁炉料主要为高配比烧结矿搭配少量球团矿或块矿，而与烧结工艺相比，低能耗、低排放的球团工艺有助于高炉减排。因此，高炉高球比冶炼技术是当下节能减碳的有效措施之一[5-7]。然而，随着球团矿配比增加，高炉内的物质转变和能量流动较为复杂，整体碳足迹发生变化。探究高炉不同球团矿配比下的能质流动及碳足迹演变规律，有助于强化高炉实践高配比球团矿的冶炼认识。

钢铁生产过程中，物质流和能量流始终相互作用，共同决定着钢铁生产流程的能耗和碳排放[8-10]。为了探究钢铁行业的物质流和能量流，业内对此进行了大量研究工作。殷瑞钰院士[11]以“物质流网络”和“能量流网络”命名钢铁生产流程中物质流和能量流流经的这种特定的流程网络。周继程等[12]从炼铁系统物质流和能量流的角度出发，分析了炼铁系统(包括烧结和高炉)的资源和能源消耗情况，并以唐钢南区炼铁系统为例，计算了其炼铁系统由含碳能源引起的 CO_2 排放量。李承志等[13]通过建立高炉的物质流、能量流模型，研究了高炉在不同富氧率下喷吹烧结废气生产的能耗变化。结果显示，随着富氧率增加，能量效率逐渐提高。苗壮等[14]提出了一种多膛炉－转底炉－熔态电炉协同处理固废的工艺。基于质量和能量守恒定律，建立了物质流和能量流的解析模型，计算并分析了物质和能量在工艺流程中内部循环的潜在节能效果。生命周期评价(LCA)是一种通过产品生命周期全过程来量化其资源消耗和环境排放，并评价这些消耗和排放对资源、生态环境及人体健康带来的影响的评价方法。目前，该方法已广泛用于环境评估及碳核算[15-16]。CHEN 等[17]通过生命周期评估探讨了高配比球团矿在炼铁高炉中的应用对环境的影响及全球变暖的减缓作用，发现使用高配比球团矿能有效减少 CO_2 和其他污染物的排放。SONG 等[18]构建了基于生命周期视角的中国钢铁行业二氧化碳排放模型，并基于 2019 年的数据进行了实证分析，计算了钢铁行业全生命周期的 CO_2 排放量。上述研究为探究高炉高配比球团冶炼的物质流能量流演变及碳足迹分布提供了有效借鉴，但涉及不同球团矿配比下高炉的铁素流、碳素流以及全生命周期 CO_2 排放等相关研究还有待进一步定量分析。

因此，基于物质流和能量流平衡以及生命周期理论，本文建立高炉能质计算模型及全生命周期碳足迹评价模型。选取某钢铁厂实际生产数据，探究球团矿配比对物质流、能量流的影响规律，以及相关高炉操作参数、碳足迹变化，以期为高炉高球比工业生产和应用提供理论依据。

1　能质平衡模型及全生命周期评价模型

本研究以物质守恒定律和能量守恒定律为理论基础[19]，基于已知初始条件(Base)——物料条件、工艺参数及目标产品指标，构建高炉冶炼过程的物质－能量平衡计算模型和生命周期评价模型。该模型可准确计算高炉冶炼过程中物料输入输出平衡关系以及能量利用与损耗状况，从而深入探究球团矿配比与物质流、能量流之间的内在关联机制，以及碳足迹变化规律，旨在为高配比球团矿冶炼工艺优化提供科学依据，从而推动钢铁行业资源的高效利用。

1.1　物质流和能量流平衡模型

1.1.1　物质流计算模型

物质流分析是一种基于工业代谢理论的研究方法，其核心原理遵循质量守恒定律，即系统输入物质总量恒等于输出物质总量与系统内存储量之和。当前，该方法已被广泛应用于国家、区域及企业等不同尺度的物质代谢研究。在企业层面应用

中，通过追踪特定元素或物质的输入－输出路径，可系统解析其来源特征与流动规律，为企业资源管理和工艺优化提供科学依据。物质平衡关系如下。

$$M_{in} = M_{out} \tag{1}$$

物料收入计算公式：

$$M_{in} = M_s + M_p + M_c + M_i + M_l + M_o + M_b + M_q \tag{2}$$

物料支出计算公式：

$$M_{out} = M_h + M_z + M_d + M_g \tag{3}$$

式中：M_{in}和M_{out}分别为高炉物质流的输入和输出总质量，kg；M_s、M_p、M_c、M_i、M_l、M_o、M_b和M_q分别为烧结矿、球团矿、焦炭、煤粉、熔剂、氧气、鼓风和块矿的质量，kg；M_h、M_z、M_d、M_g分别为铁水、炉渣、炉尘和炉顶煤气的质量，kg。

1.1.2 能量流模型

根据能量守恒定律，能量输入量等于能量输出量。对于高炉系统，能量平衡的关系如下。

$$Q_{in} = Q_{out} \tag{4}$$

式中：Q_{in}、Q_{out}分别为高炉输入和输出总能量，MJ。其中：

$$Q_{in} = Q_c + Q_b \tag{5}$$

$$Q_{out} = Q_{hd} + Q_{Des} + Q_{Dec} + Q_s + Q_{HM} + Q_{TG} + Q_{EVA} + Q_D + Q_{PC} + Q_{H_2O} \tag{6}$$

式中：Q_c和Q_b分别为风口前碳素燃烧放热和热风带入热量，MJ；Q_{hd}、Q_{Des}、Q_{Dec}、Q_s、Q_{HM}、Q_{TG}、Q_{EVA}、Q_D、Q_{PC}和Q_{H_2O}分别为直接还原耗热、脱硫耗热、碳酸盐分解耗热、炉渣带走热、铁水带走热、炉顶煤气带走热、炉顶炉料带入物理水蒸发、炉尘带走热、煤粉分解热和水分分解热，MJ。

1.1.3 模型求解

在对模型进行模拟计算时，忽略机械损失，同时参考河北某钢铁厂高炉实际运行数据，获得基础数据，见表1～4。在此基础上改变球团配比，作出如下设立：Base为基础案例，w(球团矿)∶w(烧结矿)=2∶8；Case1、Case2、Case3分别表示球团矿配比为30%、40%、50%。Base的炉渣碱度为1.15，炉顶煤气温度为187 ℃，鼓风温度为1 206 ℃，富氧率为7.15%。

在确保高炉整体物质流与能量流计算模型可靠性的前提下，保持原燃料及操作参数不变情况下，同时固定铁水成分、炉渣碱度和风口喷煤量，炉尘改变量忽略不计。通过调整球团矿的配比，对其余炉料进行配料计算，获得高配比球团入炉料组成。同时在保证适宜热损失的同时，获得高配比球团的物质流和能量流变化。具体计算流程如图1所示。

表1 炉料主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of furnace charges %

名称	TFe	S	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO
烧结矿	56.35	0.02	10.91	5.40	1.81	2.04
球团矿(酸性)	65.78	0.02	1.88	2.58	0.57	0.79
块矿	62.30	0.02	0.09	3.21	1.17	0.02
熔剂	—	0.02	—	90.87	—	—

表2 燃料主要物化性能(质量分数)

Table 2 Main physicochemical preperties of fuels %

名称	FC	灰分	挥发物	湿度
焦炭	86.52	11.99	1.24	0.24
煤	72.87	8.80	17.99	1.55

表3 铁水主要化学成分(质量分数)

Table 3 Main chemical composition of hot metal

Fe	C	Mn	Si	P	Ti
95.06	4.36	0.11	0.31	0.07	0.03

表4 炉渣主要化学成分(质量分数)

Table 4 Main chemical composition of slag %

SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	TFe
33.94	39.15	8.57	14.75	0.39

1.2 生命周期评价模型

在本研究中，功能单位定义为一吨铁水。基于生命周期理论，本研究在考虑数据可用性的情况下，明确定义了高配比球团冶炼生产铁水的生命周期核算的范围[20]。将整个过程区分为资源开采环节、运输环节、生产制造环节和副产品处置4个部分。内部涉及到高炉工序、球团工序、烧结工序和焦化工序等。图2展示了本研究采用的系统边界(COG为焦虑煤气；BFG为高炉煤气；BF为高炉)。

铁水全生命周期污染物(CO_2、CH_4、SO_2等)排放计算公式：

$$Q = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \tag{7}$$

式中：Q为高炉铁水全生命周期污染物排放总量，kg；C_1、C_2、C_3、C_4分别为资源开采环节、运输

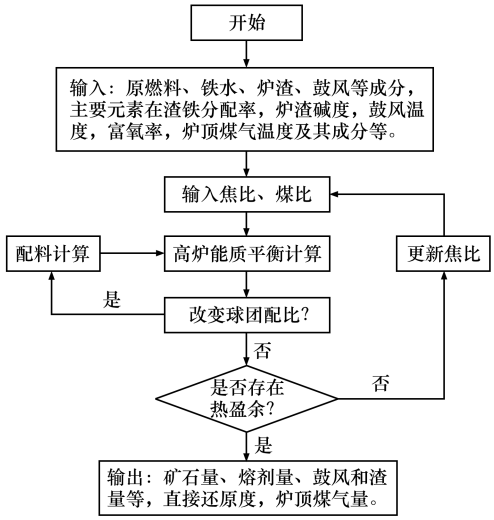


图 1　高炉高比例球团冶炼数学模型计算流程

Fig. 1　Calculation flowchart of the mathematical model for blast furnace smelting with high pellet ratio

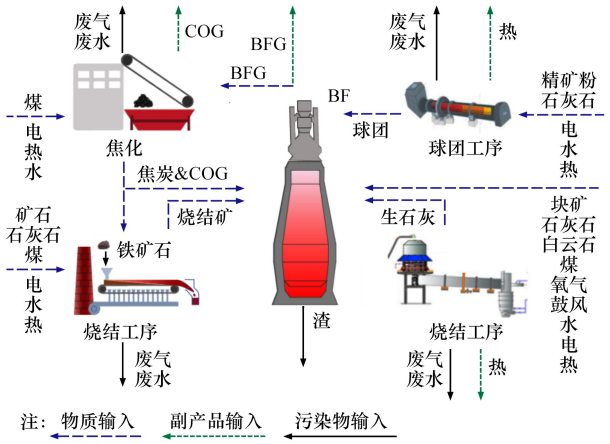


图 2　高炉高配比球团冶炼全生命周期碳足迹边界

Fig. 2　Life cycle carbon footprint boundary of blast furnace smelting with high pellet ratio

环节、生产制造环节和副产品处置 4 个部分的污染物排放量。资源开采环节和生产制造过程中的污染物排放量具体公式：

$$C_1 = \sum_{i=1}^{\alpha} G_i \times M_i \tag{8}$$

$$C_3 = \sum_{i=1}^{f} R_i \times H_i \tag{9}$$

式中：α 和 f 分别表示资源开采环节与生产制造过程的原燃料类别；G_i 是资源开采环节程中的原燃料的污染物排放系数，kg/kg；M_i 为原燃料消耗量，kg；R_i 是生产制造过程中的原燃料污染物排放系数，kg/kg；H_i 为原燃料消耗量，kg。

原料运输阶段的碳排放计算公式：

$$C_2 = \sum_{i=1}^{y} L_i K_i S_i \times 1.67 \tag{10}$$

式中：y 表示运输方式类别；L_i 表示第 i 类运输方式原辅料的运输量，t；K_i 表示所选 i 类运输工具的污染物排放因子，t/(t·km)；S_i 表示第 i 类运输方式钢材产品由生产地至消费地的运输距离，km。

副产品处置阶段的碳排放计算公式：

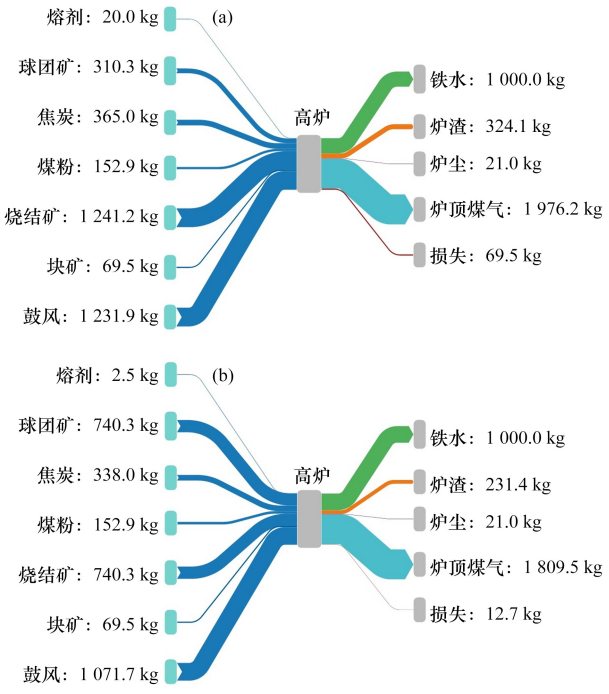
$$C_4 = \sum_{i=1}^{n} -J_i D_i \tag{11}$$

式中：n 表示废弃物类别；D_i 表示 i 类副产品产生系数；J_i 表示 i 类副产品在企业内的清单环境排放系数。

2　结果与讨论

2.1　高球团配比物质流和能量流变化

基于高炉炼铁物质流与能量流模型，对不同球团矿配比条件下的物质流进行了模拟计算，结果如图 3 所示。由图 3 可知，Base 下，焦比为 365.0 kg/t，渣比为 324.1 kg/t，鼓风量与炉顶煤气量分别为 1 231.9 kg/t 和 1 976.2 kg/t，其中炉顶煤气与炉渣在物质流的输出中占比较大[图 3(a)]。



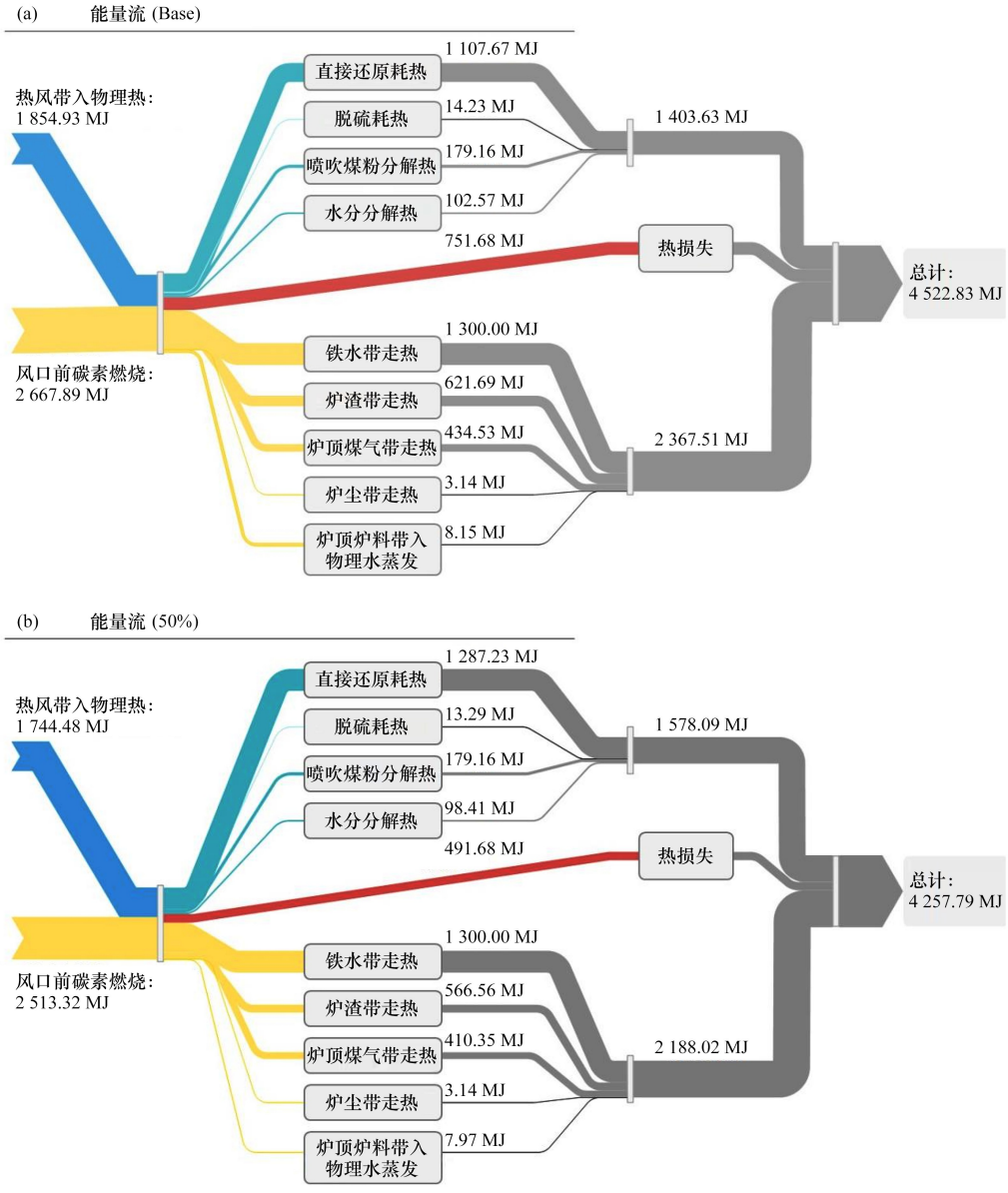
(a) Base；(b) Case3

图 3　不同球团配比下的物质流桑基图

Fig. 3　Sankey diagram of material flow under different pellet ratios

当球团矿配比提升至 50% 时[图 3(b)]，作为主要固体燃料的焦炭消耗量降至 338.0 kg/t；同时，熔剂用量减少，渣比降低，鼓风量由 1 231.9 kg/t 降至 1 071.7 kg/t，炉顶煤气量由 1 976.2 kg/t 降至 1 809.5 kg/t。

图 4 为不同球团矿配比条件下的能量流桑基图。由图 4 可知，在热收入方面，球团矿配比提升会对能量流产生影响：焦比降低使得风口前碳素燃烧放热量由 2 667.89 MJ/t 降至 2 513.32 MJ/t；鼓风量减少导致热风物理热由基准工况的 1 854.93 MJ/t下降至 1 744.48 MJ/t。总热收入上有所降低。在热支出方面，球团矿配比提高使直接还原耗热从 1 107.67 MJ/t 增加至 1 287.23 MJ/t，但是随着球团配比的升高，炉顶煤气发生量及渣比降低，炉顶煤气带走热量从 434.53 MJ/t 降至 410.35 MJ/t，炉渣带走热从 621.69 MJ/t 降至 466.56 MJ/t。随着球团配比从 20% 增加至 50%，有效热量支出从 3 043.59 MJ/t 增加至 3 067.08 MJ/t，能量利用系数由 67.29% 增加至 72.03%。



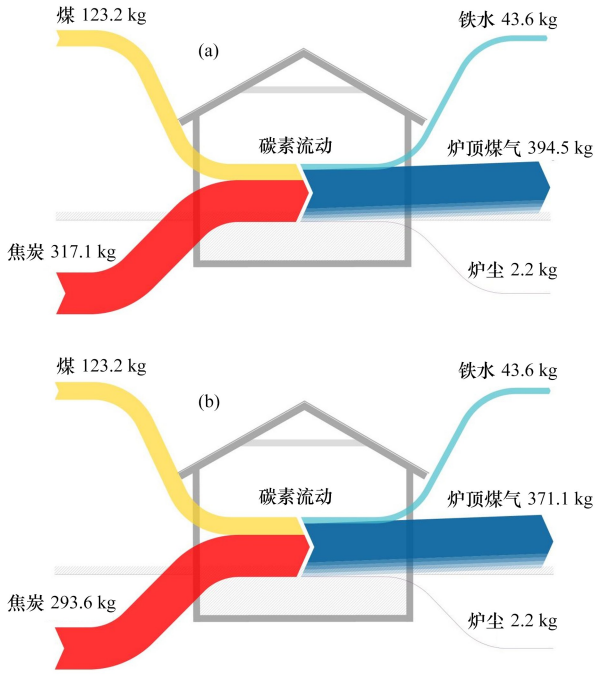
(a) Base；(b) Case3

图 4 不同球团配比下的能量流桑基图

Fig. 4 Sankey diagram of energy flow under different pellet ratios

2.2　球团配比增加下的 Fe 素流和碳素流变化

图 5 为球团矿配比对高炉冶炼过程碳素流动的影响规律。由图 5 可知，Base 工况下，吨铁碳素总收入为 440.3 kg，其中焦炭贡献为 317.1 kg（占比 72.0%），煤粉贡献为 123.2 kg（占比 28.0%）。碳素支出分配情况：铁水带走 43.6 kg（占比 9.9%），炉尘带走 2.2 kg（占比 0.5%），炉顶煤气带走量最大，达 394.5 kg（占比 89.6%）。随着球团矿比例提高，焦炭带入的碳素收入显著减少。在碳素守恒条件下，炉顶煤气的碳素支出相应降低。

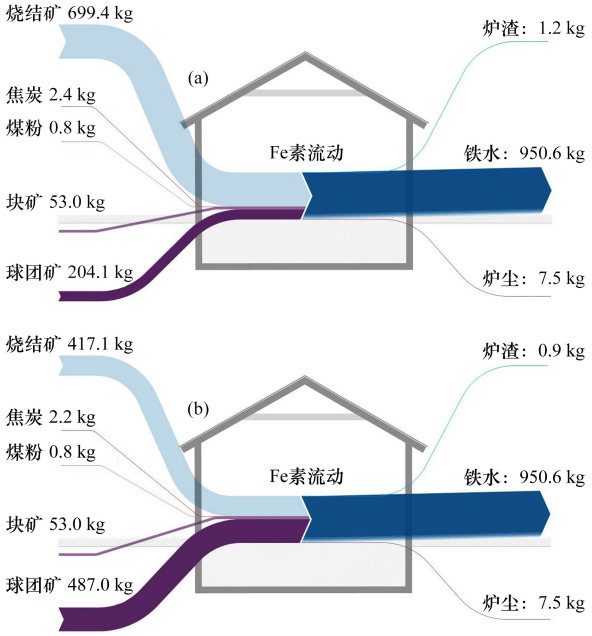


（a）Base；（b）Case3

图 5　球团配比增加下的碳素流变化

Fig. 5　Changes in carbon flow with increasing pellet ratio

图 6 为球团矿配比提高对铁素（Fe 素）流动的影响特征。由图 6 可知，Base 下，吨铁铁素总收入为 959.7 kg，其中烧结矿和球团矿贡献了主要部分（903.5 kg，占比 94.1%），块矿贡献约 5.5%，而焦炭和煤粉带入的铁素含量极低。在铁素输出方面，铁水是最主要的去向（950.6 kg，占比 99.1%），其余少量分布于炉尘和炉渣中。当球团矿配比提升至 Case3 工况时，铁素总收入基本保持稳定（960.1 kg）。从输入结构来看，球团矿贡献的铁素比例显著增加，而烧结矿贡献相应减少。在输出方面，由于球团矿配比提高导致渣比降低，炉渣带走的铁素量明显减少。



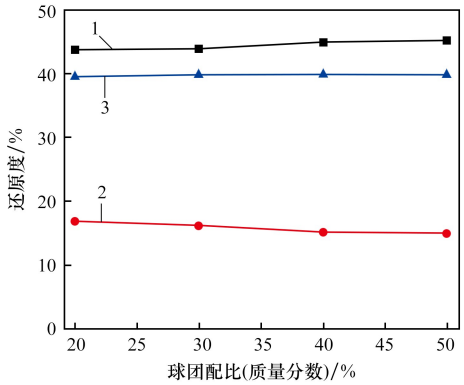
（a）Base；（b）Case3

图 6　球团配比增加下的 Fe 素流变化

Fig. 6　Changes in iron flow with increasing pellet ratio

2.3　球团配比增加下的工艺参数变化

图 7 为不同球团矿配比对高炉内还原反应特性的影响规律。由图 7 可知，随着球团矿配比的提高，直接还原度呈现略微上升趋势，CO 还原度略微升高，H_2 还原度略微降低。这是因为随球团矿配比增加使得渣比减少，所需成渣热减少，进而降低高温区热需求，使得风口前所需燃烧的碳素减少，全炉的 CO 气体量因此减少，相应的直接还原度略微升高。此外，相较烧结矿，球团矿的



1—直接还原度；2—H_2 还原度；3—CO 还原度。

图 7　球团配比对还原度的影响

Fig. 7　Effect of pellet ratio on reduction degree

软熔特性较差，高配比球团矿入炉易导致软熔带变厚并升高，从而使得高炉直接还原度有所升高。

图 8 为不同球团配比下理论燃烧温度的变化。由图 8 可知，随着球团配比从 20% 增加至 50%，高炉的理论燃烧温度从 2 357.4 ℃降低至 2 326.2 ℃。一方面，风口的鼓风量减少，导致风口燃烧碳量降低，使得碳素燃烧提供的热量减少(图 4)，并使得炉顶煤气量逐渐减少(图 9)；另一方面，由于鼓风温度不变，风量减少使得鼓风携带的热量降低；综合上风口理论燃烧温度逐渐变低。高配比球团矿炉料结构在使综合入炉品位得到大幅度提高的同时，也使得高炉渣量降低，高炉排碱、脱硫效率等方面面临一定挑战。同时，由于焦比降低，焦炭颗粒间的空隙减少，还可能面临压差升高的问题，这是高炉实践高配比球团矿冶炼需要关注的。

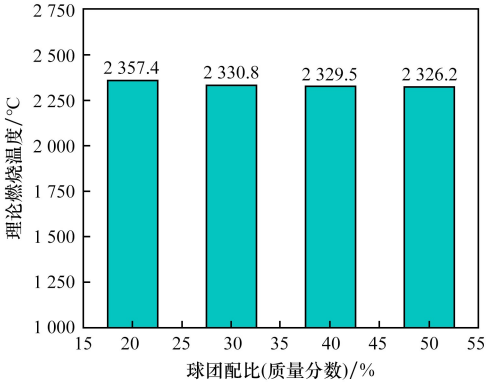
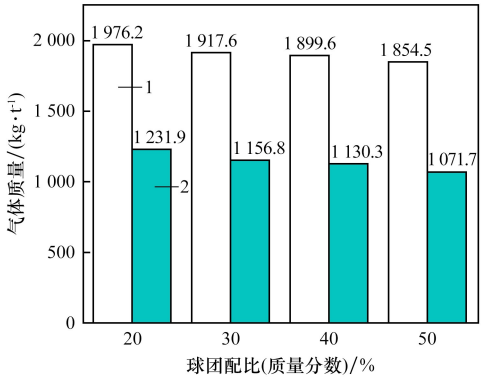


图 8 球团配比对理论燃烧温度的影响

Fig. 8 Effect of pellet ratio on theoretical combustion temperature



1—炉顶煤气量；2—鼓风量。

图 9 球团配比对鼓风量和炉顶煤气量的影响

Fig. 9 Effect of pellet ratio on blast volume and top gas volume

2.4 全生命周期二氧化碳排放分析

图 10 展示了铁水产品的全生命周期 CO_2 排放情况(Base 和 Case3)。由图 10 (a)可知，在上游资源开采阶段，CO_2 排放主要来源于铁矿石和煤，约占 95%。在运输阶段，碳排放来自运输铁矿石、煤炭等过程中燃烧的燃料，其中大部分来源于铁矿石和煤，约占 94%。最终用作高炉生产。生产制造阶段 CO_2 排放主要来源于高炉本体，约 640.48 kg/t。过程中使用的中间产品，例如烧结矿、球团矿、焦炭等，使得球团、烧结、焦化和焙烧分别带来 234.71、16.18、245.06 kg/t 和 99.45 kg/t，同时电力的使用带来额外的 CO_2 排放，约 212.73 kg/t。上游、运输和生产制造过程中带来附加值产品抵消约 387.65 kg/t。从全生命周期上来看，生产 1 吨铁水的碳排放量约为 1 785.35 kg/t。其中主要来源于煤的使用，矿石开采和中间产品带来的工序排放亦来源于煤炭的使用。因此降低 CO_2 排放的源头是降低燃料比。

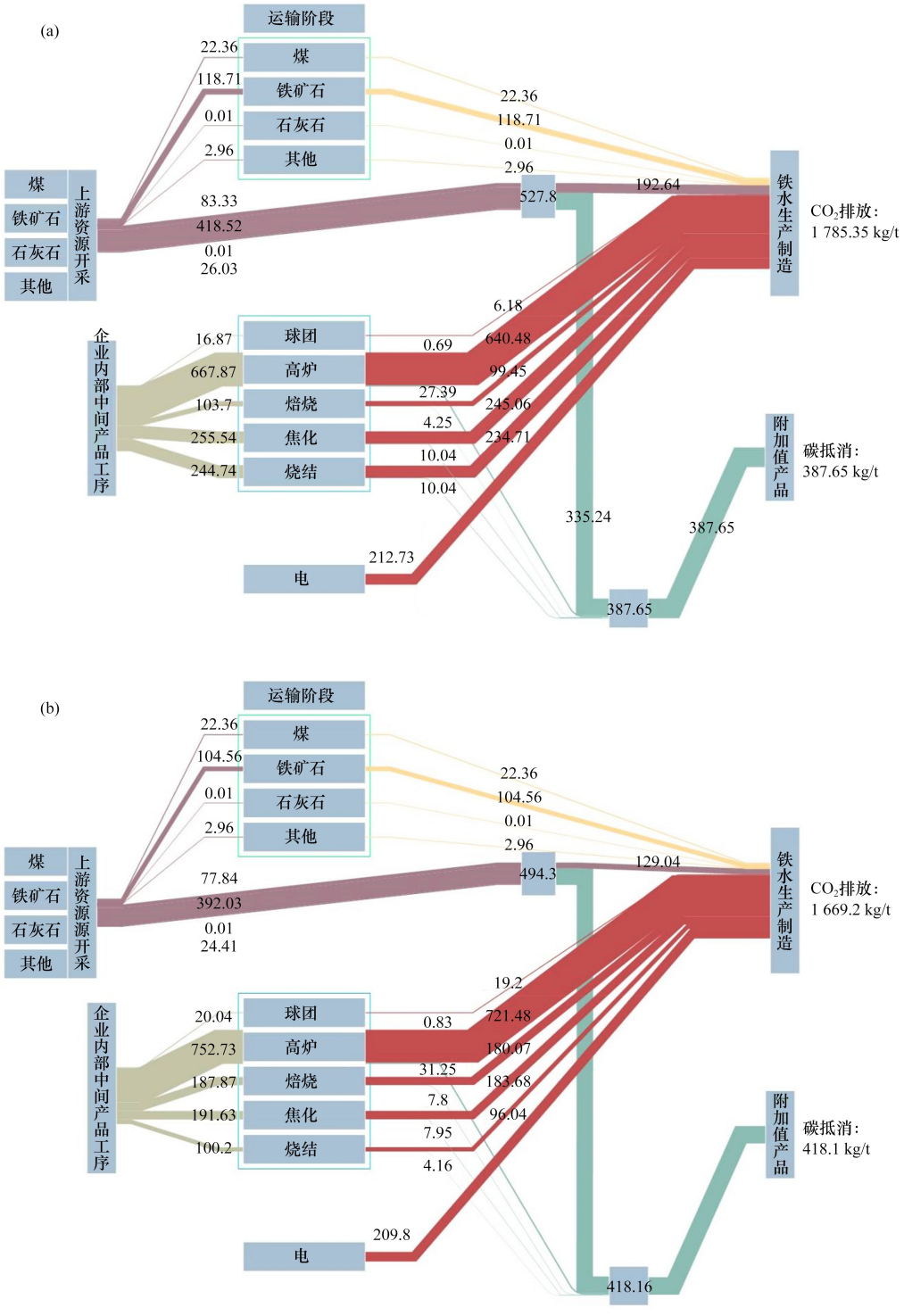
由图 10 (b)可知，当球团配比上升时(Case3)，全生命周期 CO_2 排放从 1 785.35 kg/t 降低至 1 669.2 kg/t，其中生产制造、上游和运输带来的 CO_2 排放均有所降低，副产品收益有所提高，生产过程中的中间工序，如高炉和球团工序的直接排放有所增加，焦化和烧结工序的排放明显降低。这是由于球团配比的升高导致球团矿使用量提高，以及焦炭和烧结矿使用量减少导致。电力的使用带来的排放从 212.73 kg/t 降低至 209.8 kg/t。煤、矿石和石灰石等间接排放有所降低。因此，高配比球团冶炼对全生命周期冶炼是有益的。

图 11 为球团配比增加下的全生命周期碳排放变化。由图 11 可知，随着球团配比从 20% 增加至 50%，全生命周期 CO_2 排放呈下降趋势。从 1 785.4 kg/t 降低至 1 669.2 kg/t，约降低 6.5%。

3 结 论

本文建立高炉能质计算模型及全生命周期碳足迹评价模型，探究球团矿配比对高炉铁水冶炼过程中的质量、能量、碳足迹等的影响规律。本研究得出以下结论。

(1) 随着球团配比的增加，焦比与渣比显



（a）Base；（b）Case 3

图 10　全生命周期碳排放

Fig. 10　Full life-cycle carbon emissions

著降低，吨铁鼓风量及炉顶煤气生成量减少。风口前碳素燃烧放热量因焦炭消耗下降而减少；直接还原反应吸收热量有所增加，且炉渣显热损失随渣量减少而下降。

（2）随着球团配比的增加，吨铁碳素总收入呈现下降趋势，主要归因于焦炭碳输入量的减少；支出项中，炉顶煤气所含碳素同步降低。吨铁铁素总收入变化不显著，但构成发生变化，球团矿

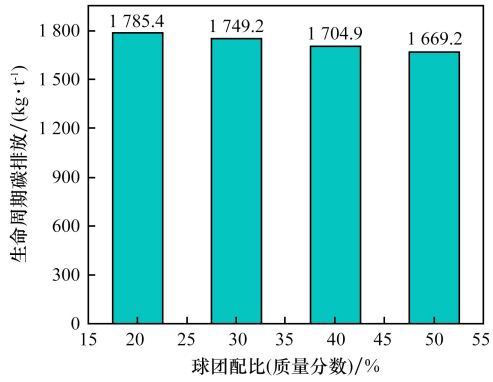


图 11 不同球团配比下的全生命周期碳排放(Base)

Fig. 11 Life-cycle carbon emissions under different proportions of pellets(Base)

贡献的铁素比例增加，烧结矿相应减少；输出上，因渣比降低，炉渣携带的铁素损失减少。

(3) 随着球团配比提高，高炉直接还原度略微升高，理论燃烧温度、鼓风量及炉顶煤气量均呈下降趋势。

(4) 从全生命周期上来看，生产 1 吨铁水的 CO_2 排放量约为 1 785.35 kg。其中主要来源于煤的使用，矿石开采和中间产品带来的工序排放亦来源于煤炭的使用。随着球团配比从 20% 增加至 50%，全生命周期 CO_2 排放呈下降趋势。从 1 785.4 kg/t 降低至 1 669.2 kg/t，约降低 6.5%。

参考文献：

[1] 潘钊彬. 碳中和背景下我国低碳炼铁技术发展现状与前景[J]. 烧结球团,2024,49(1):35 - 41.
PAN Zhaobin. Development status and prospect of Chinese low-carbon ironmaking technology under carbon neutrality background[J]. Sintering and Pelletizing, 2024,49(1):35 - 41.

[2] 李毅仁,邢奕,孙宇佳,等. 钢铁工业低碳绿色发展路径与实践[J]. 工程科学学报,2023,45(9):1583 - 1591.
LI Yiren, XING Yi, SUN Yujia, et al. Low-carbon green development path and practice of the iron and steel industry[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(9):1583 - 1591.

[3] 王新东,李建新,胡启晨. 基于高炉炉料结构优化的源头减排技术及应用[J]. 钢铁,2019,54(12):104 - 110.
WANG Xindong, LI Jianxin, HU Qichen. Application practice of source and process sulfur-nitrate reduction technology based on optimization of blast furnace charge structure[J]. Iron & Steel,2019,54(12):104 - 110.

[4] 刘然,张智峰,刘小杰,等. 低碳绿色炼铁技术发展动态及展望[J]. 钢铁,2022,57(5):1 - 10.
LIU Ran, ZHANG Zhifeng, LIU Xiaojie, et al. Development trend and prospect of low-carbon green ironmaking technology[J]. Iron & Steel,2022,57(5): 1 - 10.

[5] 金永龙,何志军,王川. 不同炉料结构高炉实现低碳排放的解析[J]. 钢铁,2019,54(7):8 - 16.
JIN Yonglong, HE Zhijun, WANG Chuan. Analysis on low carbon emission of blast furnace with different raw materials structure[J]. Iron & Steel, 2019, 54(7): 8 - 16.

[6] 王新东,金永龙. “双碳”背景下高炉使用高比例球团的展望[J]. 过程工程学报,2022,22(10):1379 - 1389.
WANG Xindong, JIN Yonglong. Prospect on high ratio pellet utilized in blast furnace under the background of carbon peaking and carbon neutrality[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2022, 22(10):1379 - 1389.

[7] 客海滨,董国强,王丽丽,等. 唐钢新区高比例球团矿冶炼高炉的操作炉型控制[J]. 炼铁,2024,43(5): 12 - 16.
KE Haibin, DONG Guoqiang, WANG Lili, et al. Control of operating profile of Tangshan steel BF smelting with high percentage of pellets[J]. Ironmaking,2024,43(5): 12 - 16.

[8] 吴复忠,蔡九菊,张琦,等. 炼铁系统的物质流和能量流的分析[J]. 工业加热,2007,36(1):15 - 18.
WU Fuzhong, CAI Jiuju, ZHANG Qi, et al. Exergy analysis of energy and materials flows in the system of ironmaking plants[J]. Industrial Heating,2007,36(1): 15 - 18.

[9] 郑忠,杨永杰,张开天,等. 钢铁制造流程铁素物质流运行优化的能效评价方法及应用[J]. 钢铁,2025, 60(7):180 - 192.
ZHENG Zhong, YANG Yongjie, ZHANG Kaitian, et al. Energy efficiency evaluation methods and applications for optimizing operation of ferrite material flow in steel manufacturing process[J]. Iron & Steel,2025,60(7): 180 - 192.

[10] 贺东风,胡正彪. 钢铁制造流程物质流与能量流表征与协同评价[J]. 钢铁,2023,58(11):32－42.
HE Dongfeng, HU Zhengbiao. Characterization and collaborative evaluation of material flow and energy flow in steel manufacturing process[J]. Iron & Steel, 2023, 58(11):32－42.

[11] 殷瑞钰. 从开放系统、耗散结构到钢厂的能量流网络化集成[J]. 中国冶金,2010,20(8):1－14.
YIN Ruiyu. From open system and dissipative structure to the integration of energy flow network in steel manufacturing process[J]. China Metallurgy, 2010, 20(8):1－14.

[12] 周继程,赵军,张春霞,等. 炼铁系统物质流与能量流分析[J]. 中国冶金,2012,22(3):42－47.
ZHOU Jicheng, ZHAO Jun, ZHANG Chunxia, et al. Analysis on material flow and energy flow of ironmaking system[J]. China Metallurgy,2012,22(3):42－47.

[13] 李静琪,李承志,张伟,等. 氧气高炉喷吹烧结烟气过程的物质流、能量流和㶲能流[J]. 清洁生产杂志,2022,371:65－72.
LI Jingqi, LI Chengzhi, ZHANG Wei, et al. Material, energy and exergy flows of the oxygen blast furnace process with sintering flue gas injection[J]. Journal of Cleaner Production,2022,371:65－72.

[14] 苗壮,佘雪峰,石建红,等. 协同处理钢厂固废工艺的物质流和能量流分析[J]. 钢铁,2023,58(11):150－162.
MIAO Zhuang, SHE Xuefeng, SHI Jianhong, et al. Analysis of material flow and energy flow in synergistic treatment of solid waste in steel mills[J]. Iron & Steel, 2023,58(11):150－162.

[15] 刘涛,刘颖昊,宋中华. 中国钢铁行业 LCA 背景数据库开发方法研究与实践[J]. 钢铁,2025,60(7):262－270.
LIU Tao, LIU Yinghao, SONG Zhonghua. Research and practice on method of LCA background database development in Chinese steel industry[J]. Iron & Steel, 2025,60(7):262－270.

[16] 杜斌,李然,杨花,等. 基于钢铁超低排放政策的炼焦工序生命周期评价[J]. 中国冶金,2023,33(10):116－124.
DU Bin,LI Ran,YANG Hua,et al. Life cycle assessment of coking process in context of ultra-low emission policy on iron and steel industry[J]. China Metallurgy,2023, 33(10):116－124.

[17] CHEN M Y,ZHOU H,WANG C,et al. Influence of blast furnace pellet proportions on environmental impact and global warming:A life cycle assessment[J]. Fuel,2025, 381:133571.

[18] SONG X C,DU S,DENG C N,et al. Carbon emissions in China's steel industry from a life cycle perspective: Carbon footprint insights[J]. Journal of Environmental Sciences,2025,148:650－664.

[19] 殷瑞钰. 冶金流程工程学[M]. 2 版. 北京:冶金工业出版社,2009.
YIN Ruiyu. Metallurgical process engineering[M]. 2nd ed. Beijing:Metallurgical Industry Press,2009.

[20] 刘涛,刘颖昊. 钢铁产品生命周期评价研究现状及意义[J]. 冶金经济与管理,2009(5):25－28.
LIU Tao, LIU Yinghao. Research status and significance of life cycle assessment of iron and steel products[J]. Metallurgical Economics and Management, 2009(5): 25－28.

(上接第 175 页)

[28] ZULKANIA A, ROCHMADI R, HIDAYAT M, et al. Reduction reactivity of low grade iron ore-biomass pellets for a sustainable ironmaking process[J]. Energies,2021, 15(1):137－153.

[29] K. Kawata,Y. Sekiya,T. Umehara,et al. 高性能气体渗碳炉的研发[J]. 热处理,2015,30(3):31－35.
KAWATA K, SEKIVA Y, UMEHARA T, et al. Development of high performance gas carburizing furnace [J]. Heat Treatment,2015,30(3):31－35.

[30] 司新国,赵二敏. H_2-CO 还原钛精粉的热重法试验[J]. 钢铁,2014,49(1):85－91.
SI Xinguo,ZHAO Ermin. Experiment on H_2-CO reduction of titanium concentrate by thermogravimetry[J]. Iron and Steel,2014,49(1):85－91.