DOI:10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20200401

论中国发展全废钢电炉流程的战略意义

上官方钦[1]， 殷瑞钰[2]， 李 煜[3]， 周继程[1]， 郦秀萍[1]

(1. 中国钢研科技集团有限公司钢铁绿色化智能化技术中心，北京 100081； 2. 钢铁研究总院，北京 100081；
3. 中国钢铁工业协会，北京 100711)

摘 要：在分析国内外电炉钢发展概况的基础上，从废钢资源保障、电力资源保障、钢铁工业脱碳化发展、钢厂与城市的和谐共存、钢厂智能化 5 个方面系统论述了中国发展全废钢电炉流程的战略意义和价值。指出未来充足的废钢资源和丰富的电力资源将为全废钢电炉流程的发展提供资源和能源保障；发展全废钢电炉流程是当前最易实现的钢铁工业脱碳化发展的途径，可以更好地实现钢厂与城市的和谐共存，并将成为实现钢厂智能化的突破口。

关键词：全废钢电炉流程；战略意义；废钢；电力；错峰生产；脱碳化；钢厂智能化

文献标志码：A **文章编号**：0449-749X(2021)08-0086-07

Dissussion on strategic significance of developing full scrap EAF process in China

SHANGGUAN Fang-qin[1]， YIN Rui-yu[2]， LI Yu[3]， ZHOU Ji-cheng[1]， LI Xiu-ping[1]

(1. Steel Industry Green and Intelligent Manufacturing Technology Center, China Iron and Steel Research Institute Group, Beijing 100081, China; 2. Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China; 3. China Iron and Steel Association, Beijing 100711, China)

Abstract: Based on analysis for the development situation of EAF steel at home and abroad, the strategic significance and value of developing full scrap EAF process in China were systematically discussed from five aspects: scrap resource guarantee, power resource guarantee, decarbonization development of the steel industry, harmonious coexistence of steel plant and city, and intellectualization of steel plant. It is pointed out that sufficient scrap resources and abundant power resources will provide resource and energy guarantee for the development of full scrap EAF process in the future. And the development of full scrap EAF process is the most easy way to realize the decarbonization development of steel industry, which can also better realize the harmonious coexistence of steel plant and city, and will become a breakthrough to realize the intellectualization of steel plant.

Key words: full scrap EAF process; strategic significance; scrap; power; off-peak production; decarbonization; intellectualization of steel plant

1 国内外电炉钢发展概况

20 世纪 90 年代以来，中国钢铁工业先后在全国大范围突破了以连铸为中心的 6 项关键共性技术，初步实现了中国钢厂技术结构升级，促进了钢厂长材及部分板材生产流程的整体优化，各项技术经济指标有明显的进步[1]。与此同时，中国粗钢产量从 1996 年突破 1 亿 t 后，连续 25 年保持世界第一(如图 1 所示)，2020 年世界粗钢产量为 18.76 亿 t，中国为 10.65 亿 t，约占全世界 56.8%[2]。

然而，中国电炉钢的发展一直比较缓慢。比起 2001 年，2019 年中国电炉钢产量增加了 3.3 倍，达到 10 320 万 t，是世界上电炉钢产量最大的国家。但是，由于中国转炉钢产量的迅猛增长，如图 2 所示(数据来源于 WSA)，中国的电炉钢比从 2003 年开始下降，2016 年电炉钢比为 6.3%。随后由于取缔地条钢后，这部分废钢开始流向正规钢厂，近几年电炉钢比又有所上升，2018 年达到 11.6%，2019 年又下降到 10.4%，2020 年为 10.2%。中国电炉钢比低于世界主要产钢国，2019 年美国电炉钢比约为 70%，德国电炉钢比约为 30%，韩国电炉钢比约为 32%，日本电炉钢比约为 25%，印度电炉钢比约为 56%[3-4]。

应该说，造成中国电炉钢发展缓慢、电炉钢比低的主要原因在于：(1)粗钢产量过大，粗钢产量的增长速度远高于电炉钢的增速和废钢消耗量的增速。

基金项目：国家重点研发计划资助项目(2020YFB1712801)

作者简介：上官方钦(1984—)，男，博士，高级工程师； **E-mail**：13811710701@qq.com； **收稿日期**：2021-07-14

从表 1 可知，2015 年比 2001 年粗钢产量增长了 429%，但电炉钢仅增长 144%，这就导致电炉钢比下降 8.5 个百分点，废钢比下降了 12.33 个百分点。(2)废钢资源有限，其价格高，钢铁工业可利用的废钢不足。(3)取缔地条钢之前，约一半的废钢资源被地条钢生产企业所消耗，导致大部分电炉冶炼只能兑加铁水，流程结构很不合理。直到取缔地条钢，情况才有所好转。

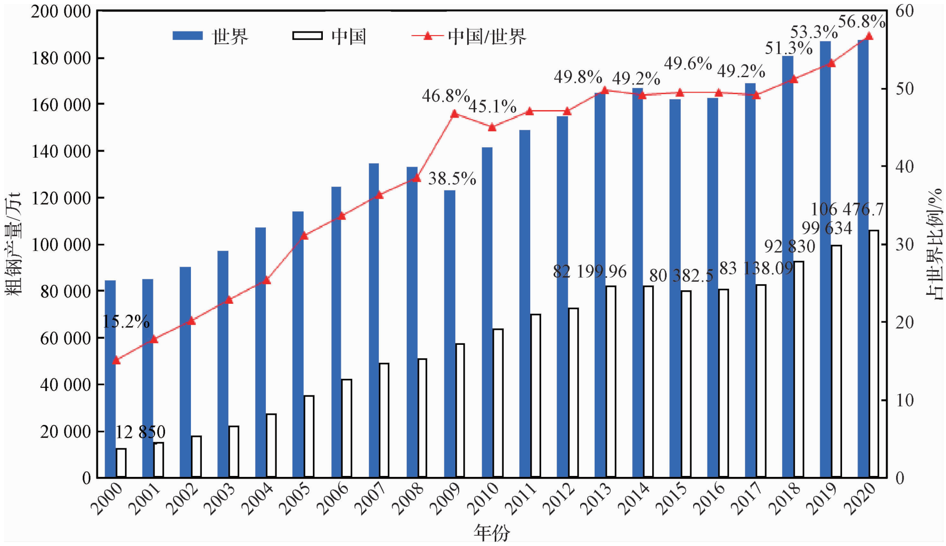

图 1　2000—2020 年中国粗钢产量、世界粗钢产量和中国粗钢产量占世界比例的变化

Fig. 1　Changes of crude steel outputs in China and the world and China's share from 2000 to 2020

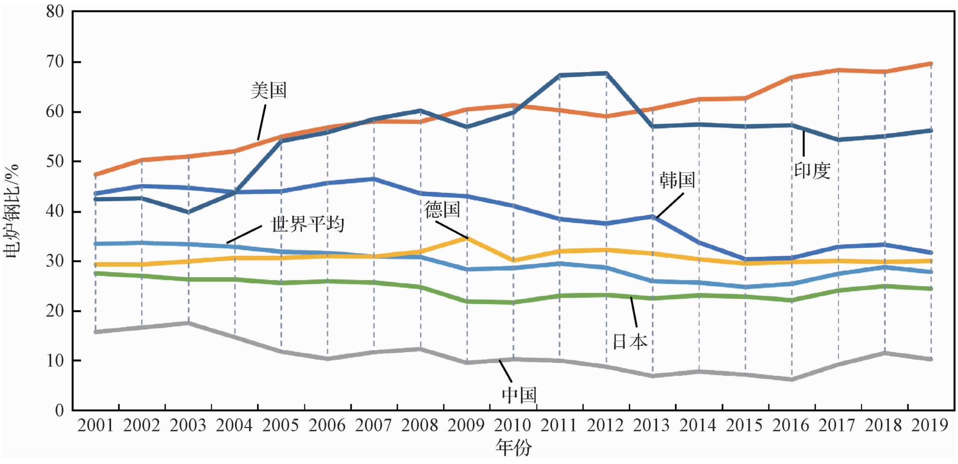

图 2　2001—2019 世界主要产钢国电炉钢比的变化

Fig. 2　Change of EAF steel ratio in the world's major steel producing countries from 2001 to 2019

表 1　2001 年、2015 年和 2020 年中国废钢消耗、电炉钢比的变化

Table 1　Changes of scrap consumption and EAF steel ratio in China in 2001, 2015 and 2020

项目	2001 年	2015 年	增幅	2020 年
粗钢产量	15 163 万 t	80 383 万 t	+429%	106 477 万 t
废钢消耗量	3 440 万 t	8 330 万 t	+149%	22 030 万 t
废钢比	22.69%	10.36%	−12.33 个百分点	20.9%
转炉废钢消耗量	1 310 万 t	4 932 万 t	+276%	14 852 万 t
转炉废钢比	10.26%	6.62%	−3.64 个百分点	15.7%
电炉废钢消耗量	1 930 万 t	3 398 万 t	+76%	7 178 万 t
电炉废钢比	80.38%	57.97%	−22.41 个百分点	66.0%
电炉钢产量	2 401 万 t	5 862 万 t	+144%	10 870 万 t
电炉钢比	15.8%	7.3%	−8.5 个百分点	10.21%

进一步探究其根本原因在于对全废钢电炉流程发展的重要性认识不足。因此,下文在钢铁制造流程"三大功能"理念[5-8]的指导下,从废钢资源保障、电力资源保障、钢铁工业脱碳化发展、钢厂与城市的和谐共存、钢厂智能化5个方面系统论述中国发展全废钢电炉流程的战略意义和价值。

2 废钢资源保障

随着中国钢铁蓄积量和废钢资源量的增加,未来20年内,中国废钢资源短缺的局面将彻底改变,废钢资源总量将非常充足。初步估算,预计到2025年,中国社会钢铁蓄积量将达到120亿t,废钢资源的年产出总量将达到2.7亿～3.0亿t;到2030年,中国社会钢铁蓄积量将达到130亿t,废钢资源的年产出总量达到3.3亿t以上。若按90%的废钢资源用于钢铁工业估算,则2025年和2030年中国钢铁工业可利用废钢资源总量分别约为2.4亿～2.7亿t和2.9亿～3.1亿t[9]。进而预测2030年中国钢铁工业的发展情况,见表2。可见,如果2030年中国粗钢产量为8亿t,则中国钢铁工业废钢比将达到38%,电炉钢比为34%,铁矿石对外依存度仅为58%。

表2 2030年中国钢铁工业发展情况预测

Table 2 Development prediction of steel industry in China in 2030

粗钢产量/亿t	废钢比/%	电炉钢比/%	铁矿石对外依存度/%
6	50	46	32
8	38	34	58
10	30	27	69

注:2030年国内铁矿石产量8亿t[10](原矿,铁品位以2018年平均值28.5%为基准)。

3 电力资源保障

电力是全废钢电炉流程消耗的最主要能源,约占全废钢电炉流程能源消耗总量的80%。用电成本对全废钢电炉流程的发展具有重要影响。

中国电力体制从完全管制到逐步放松管制,体制机制日趋完善。近些年,中国逐步深化电力市场化改革,工业用电成本不断下降[11]。2018年和2019年在全国两会政府工作报告中均提出,一般工商业电价平均降低10%。2020年更是直接取消煤电价格联动机制,改为"基准价+上下浮动"的市场化机制。可见,对包括钢铁行业在内的工业企业来说,未来还将会享受到政府更多的电价扶持政策,进一步降低用电成本,提高竞争力,这对促进全废钢电炉流程的发展具有重要作用。

此外,由于近年来可再生能源(特别是风电、光电)发展过快,出现了可再生能源发展与电网发展不协调、与用电需求增长不匹配的现象,如近年来,新疆、甘肃等地新能源发电装机快速增长,远超全社会用电量的增速,本地消纳能力严重不足。此外,由于中国新能源资源和需求是呈现逆向分布的,风光资源大部分是分布在华北、东北、西北"三北"地区,而用电负荷主要位于南部和中东部地区,跨省跨区通道规划建设与可再生能源发展不同步。从而就出现了"三弃"现象,即弃水、弃风、弃光。据估算,2018年全年"三弃"电量共约1 023亿kW·h,其中弃水约691亿kW·h,弃风277亿kW·h,弃光54.9亿kW·h。以电炉钢吨钢需要消耗电力400 kW·h/t来估算,假设"三弃"电量全部用于电炉钢的生产,则可以满足2.56亿t电炉钢的生产需求,而2018年中国电炉钢产量仅为9 143万t。可见,如能充分将"三弃"电量应用于电炉钢的生产,则可以更为彻底地实现钢铁工业的脱碳化发展。

4 钢铁工业脱碳化发展

钢铁工业作为工业的重要领域,是能源消费大户,同时也是CO_2排放大户[12-13]。全球钢铁工业CO_2排放总量约占全球化石燃料燃烧产生的CO_2排放总量的7%～9%[14-16]。中国钢铁工业在过去三十年来节能减排取得了明显进展,然而,由于中国粗钢产量巨大,钢铁工业的CO_2排放量占全国CO_2排放总量的份额仍然较高,约占15%～18%[17-18]。钢铁工业"脱碳化"发展的策略和技术[17]主要有:提高能源使用效率;提高全废钢电炉流程的比例;转向清洁能源的利用;变革工艺流程,直接减少碳排放;提高下游钢铁产品的使用效率;降低钢材消费需求;钢厂与其他行业形成产业生态链;碳捕集、利用与封存(CCSU)。分析表明,基于全废钢电炉流程本身的节能减排优势(表3)以及与其他"脱碳化"对策相比存在的显著优势,有策略地推进并提高全废钢电

炉流程的比例是当前最易实现的钢铁工业脱碳化发展的途径[17]。初步估算，钢铁工业如果每年有 3 亿 t 粗钢采用全废钢电炉流程生产，将减少 CO_2 排放约 4.8 亿 t/a。

表 3 高炉-转炉长流程与全废钢电炉短流程投资、占地、资源、消耗、能源消耗和污染物排放的对比

Table 3 Comparison of investment, land occupation, resource consumption, energy consumption and pollutant emissions between BF-BOF process and EAF process with 100% scrap

流程	投资/(元·t^{-1})	占地/(m^2·t^{-1})	铁矿石消耗/(t·t^{-1})	CO_2 排放/(t·t^{-1})	废气排放		固体废物排放/(t·t^{-1})	能耗/(kgce·t^{-1})
					m^3/t(标准态)	t/t		
高炉-转炉长流程	约 3 000（不含焦化）	约 0.75（不含焦化）	约 1.65	2.0～2.4	31 249.3	40.31	铁尾矿：约 2.6 高炉渣：约 0.3 转炉渣：约 0.1	600～700
全废钢电炉短流程	约 1 200	约 0.2	0	0.5～0.7	6 837.9	8.82	电炉渣：约 0.1	约 350

注：吨钢能耗数据计算的电力折算标准煤系数取等价系数。

此外，钢铁行业未来必将是碳排放权交易市场和碳税开征的主要目标和核心参与者，碳排放权交易市场的建设和合理的碳税制度在增加钢铁行业碳排放成本的同时也将促进全废钢电炉流程的发展[18]。

5 钢厂与城市的和谐共存

为了满足用户一天中的用电高峰需求，供电厂必须按高峰时段的需求来设计生产规模或供电能力，而其中一部分设备在非高峰时间内(特别是夜间用电低谷期)是停转闲置或降低负荷运行的。加之近年来由于非化石能源发电的快速增长，火电机组停转闲置或降低负荷运行的频率越来越高。这一影响体现在中国火电利用小时数逐年下降，从 2014 年起，中国火电利用小时数维持在 5 000～5 500 h 的时代将一去不复返，由 2013 年的 5 021 h 下降到 2019 年的 4 293 h，未来还将继续下降。降低负荷运行，深度调峰会带来发电煤耗的上升，降低电力系统的效率并带来发电成本的上涨。初步估算，火电机组负荷率为 80%时要比负荷率为 100%时的供电煤耗增加 2～7 g/(kW·h)，如图 3 所示[19]。

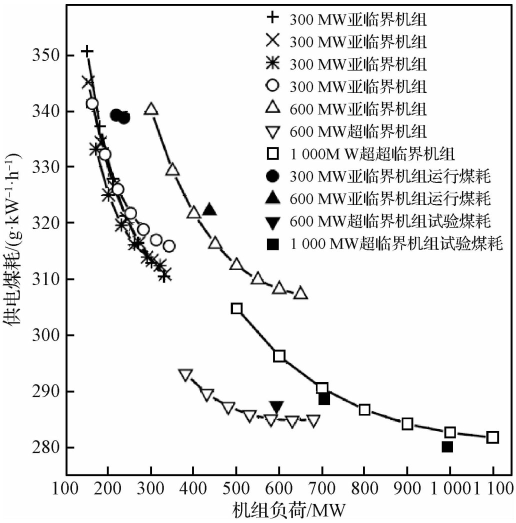

图 3 不同机组供电煤耗与负荷的关系

Fig. 3 Relationship between coal consumption for power supply and load of different units

要解决这一问题，实施峰谷不同电价，可以有效发挥电价的杠杆作用，促进用户“削峰填谷”，抑制高峰时段用电量的快速增长，提高低谷时段的用电量[20-22]。总的来说，“削峰填谷”一方面提高了企业用电的主动权，便于企业合理安排生产，减少企业用电成本；另一方面，优化了企业的峰谷用电量，使得一部分高峰负荷移至低谷，能够积极发挥电力价格杠杆作用，减少电网尖峰期的超负荷运行和低谷期的低负荷运行时间，从而提高电网的运行效率，促进全社会实现节能减排。

对传统的高炉一转炉长流程钢铁企业的用电管理而言，由于这类企业是 24 h 连续生产的，不能被中断，通过高峰时段的减产或停产，往往会造成生产效率低下，得不偿失。因此，长流程钢铁企业针对“削峰填谷”的用电管理主要是通过高峰时段引导企业多用副产煤气自发电量，低谷时段多用电网电量来实现。然而，这种方式受煤气柜容量的限制，“削峰填谷”降低成本的作用有限。而对全废钢电炉短流程钢铁企业的用电管理而言，由于电炉的能源主要是电力，加上操作的灵活性，则可以充分利用谷电的低价格优势，削减高峰时段的电炉生产能力甚至是直接停产，全部转向夜间低价时段满负荷运行，从而实现大幅降低用电成本。

以当前某钢厂的销售电价为例(表 4)，尖谷电价差最高 0.470 9 元/(kW·h)，峰谷电价差为0.376 8/(kW·h)，谷平电价差为 0.188 4 元/(kW·h)。

表 4 某钢厂外购电价格

Table 4 Price of purchased electricity in a steel plant

项目	时段	某钢厂单价(含税)/(元·kW^{-1}·h^{-1})
尖	10:00—12:00、17:00—18:00(每年6、7、8月份)	0.780 8
峰	10:00—12:00、13:00—19:00	0.686 7
平	6:00—10:00、12:00—13:00、19:00—22:00	0.498 3
谷	22:00—次日6:00	0.309 9
	平均	0.498 3

在上海、江苏、广东等地的大工业峰谷电价差更高,最高的可以达到0.83元/(kW·h)。这些地区不仅是废钢资源的主要聚集地,而且是钢材的消费大户,如果在这些地区进一步发展全废钢电炉,并充分发挥"削峰填谷"的降本增效作用,其带来的经济效益将是可观的。同样,以电炉钢吨钢需要消耗电力400 kW·h/t来估算,如果能将电炉钢全部在夜间用电低谷期生产,吨电炉钢的用电成本将下降160~320元/t,此外,还将显著提高火电机组的负荷率和运行效率,进而实现全社会的节能减排。

通过对2017—2020年全废钢电炉流程生产螺纹钢的企业在不同时段的利润调研发现,谷时段的吨钢利润要比平时段高145元左右,而在峰时段往往是没有亏本的(表5)。可见,发展城市钢厂要充分利用夜间的谷电时段,完全可以在峰电时段停产,平电时段减产,谷电时段满负荷生产,从而实现更高利润,而不是追求24 h满负荷的生产。

表 5 2017—2020年全废钢电炉流程生产螺纹钢不同时段的利润

Table 5 Profits of different periods for rebar production by full scrap EAF process from 2017 to 2020

年份	废钢含税价格/(元·t^{-1})	平时段螺纹钢含税成本/(元·t^{-1})	峰时段螺纹钢含税成本/(元·t^{-1})	谷时段螺纹钢含税成本/(元·t^{-1})	利润(平时段)/(元·t^{-1})	利润(峰时段)/(元·t^{-1})	利润(谷时段)/(元·t^{-1})
2017年	1 652	2 974	3 155	2 829	822	640	966
2018年	2 362	3 968	4 149	3 823	115	−67	260
2019年	2 480	3 834	4 016	3 689	−6	−188	139
2020年	2 376	3 579	3 760	3 434	96	−85	241

6 全废钢电炉流程钢厂智能化

绿色化、智能化是当前钢铁工业发展的时代命题。钢厂智能化的核心就是要建立一个信息物理融合系统(CPS)[23-24],需要开展物理系统自组织结构优化的物理本质和本构特征以及耗散结构优化的研究;旨在提升工厂物理系统的自组织性和自组织程度。同时更为需要的是研究信息系统(外部背景信息、物理系统内在的自组织信息和人为输入的他组织调控信息)的优化,其中,人为输入的他组织调控信息是最为积极、最有活力的,包括信息的自感知、自学习、自决策、自执行、自适应。可见,改进全废钢电炉流程物理系统的自组织性,并促进其与他组织信息系统的融合,是实现全废钢电炉流程智能化的有效路径。

构建全废钢电炉流程信息物理融合系统的路径是:从物理系统一侧而言,电炉-精炼-连铸-轧钢"四位一体"的全废钢电炉流程是比较容易实现全流程的动态-有序、协同-连续运行。可以通过采取工程设计动态优化、流程中某些工序/装置的优化或改进、"界面"技术优化等措施,从而推动物质流网络、能量流网络的协同优化,进而为智能化钢厂打好"物理"基础,并使物理系统的架构有利于信息流的导入与贯通。而从信息系统一侧而言,全废钢电炉流程消耗的能源主要是电力,较易实现信息调控(包括自组织信息、外部背景信息和人为主动输入的他组织信息)。可以通过制造流程中关键信息要素的实时检测感知,构建工业互联网平台,完善不同层次(PCS、MES、EMS,直至ERP)、不同过程(例如废钢料场系统、炼钢系统、轧钢系统、钢材库系统)的信息流网络结构和模型,打通物理系统与生产管控系统之间的信息流,使物质流、能量流、信息流"三流"关联、协同起来。因此,全废钢电炉流程有望成为实现钢厂智能化的突破口。

7　结论

中国电炉钢的发展速度一直比较缓慢，究其根本原因在于对全废钢电炉流程发展的重要性认识不足。中国已具备发展全废钢电炉流程的资源、能源等条件，发展全废钢电炉流程具有重要的战略意义和价值：

(1)未来充足的废钢资源将为全废钢电炉流程的发展提供资源保障；同时，这将使中国钢铁工业铁素资源构成发生重大变化，对国际铁矿石资源的需求量将逐步下降。

(2)中国电力资源丰富，工业用电成本不断下降，为钢铁行业发展全废钢电炉流程创造了有利条件；同时，利用“三弃”电量在全废钢电炉流程生产可实现无碳排放，并有望改变长期以来钢铁工业以煤炭为主的能源结构。

(3)钢铁工业“脱碳化”发展势在必行，发展全废钢电炉流程是当前最易实现的钢铁工业脱碳化发展的途径，是中国钢铁工业推进节能减排、循环经济、绿色发展的重要抓手。

(4)发展全废钢电炉流程可以更好地实现钢厂与城市的和谐共存，一方面可以消纳社会大宗废弃物(废钢)，另一方面可以通过“削峰填谷”，合理组织生产，进一步降低用电成本，并提高电能的社会利用效率，从而实现全社会的节能减排、钢厂与城市的和谐共存。

(5)钢厂智能化的核心就是要建立一个信息物理融合系统(CPS)，全废钢电炉流程“四位一体”的物理系统架构及其生产特点决定了其在物理系统一侧较有利于信息流的导入与贯通，在信息系统一侧较易实现信息调控。因此，全废钢电炉流程有望成为实现钢厂智能化的突破口。

参考文献：

[1] 殷瑞钰，王晓齐，李世俊，等. 中国钢铁工业的崛起与技术进步[M]. 北京：冶金工业出版社，2004.(IN Rui-yu，WANG Xiao-qi，LI Shi-jun，et al. The rise and technological progress of steel industry in China[M]. Beijing：Metallurgical Industry Press，2004.)

[2] World Steel Association. Global crude steel output decreases by 0.9% in 2020[EB/OL]. Access at URL：https://www.worldsteel. org/media-centre/press-releases/2021/Global-crude-steel-output-decreases-by-0.9-in-2020.html. 2021-01-26.

[3] World Steel Association. Steel Statistical Yearbooks 2000 to 2019[R]. Brussels：WSA，2000—2019.

[4] World Steel Association. Steel Statistical Yearbook 2020[R]. Brussels：WSA，2020.

[5] 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 Edition Beijing：Metallurgical Industry Press，2009.)

[6] 殷瑞钰. 冶金流程工程学[M]. 北京：冶金工业出版社，2004.(YIN Ruiyu. Metallurgical Process Engineering[M]. Beijing：Metallurgical Industry Press，2004.)

[7] YIN Rui-yu. Theory and Methods of Metallurgical Process Integration[M]. Beijing，China，Elsevier Inc，San Diego，CA，USA：Academic Press and Metallurgical Industry Press，2016.

[8] YIN Rui-yu. Metallurgical Process Engineering[M]. Beijing，Berlin：Metallurgical Industry Press，Springer-Verlag Heidelberg，2011.

[9] 上官方钦，郦秀萍，周继程，等. 中国废钢资源发展战略研究[J]. 钢铁，2020，55(6)：8.(SHANGGUAN Fang-qin，LI Xiu-ping，ZHOU Ji-cheng，et al. Strategic research on development of steel scrap resources in China[J]. Iron and Steel，2020，55(6)：8.)

[10] 黑色金属矿产资源强国战略研究专题组. 黑色金属矿产资源强国战略研究报告[M]. 北京：科学出版社，2019.(Research Group on the Strategy of a Powerful Country with Ferrous Metal Mineral Resources. Research Report on the Strategy of a Powerful Country with Ferrous Metal Mineral Resources[M]. Beijing：Science Press，2019.)

[11] 白玫. 新中国电力工业 70 年发展成就[J]. 电器工业，2019(12)：11.(BAI Mei. 70 years′ development achievements of power industry in New China[J]. Electrical Industry，2019(12)：11.)

[12] 上官方钦，张春霞，胡长庆，等. 中国钢铁工业的 CO_2 排放估算[J]. 中国冶金，2010，20(5)：37.(SHANGGUAN Fang-qin，ZHANG Chun-xia，HU Chang-qing，et al. Estimation on CO_2 emission in chinese iron and steel industry and enterprises[J]. China Metallurgy，2010，20(5)：37.)

[13] 张春霞，上官方钦，胡长庆，等. 钢铁流程结构及对 CO_2 排放的影响[J]. 钢铁，2010，45(5)：1.(ZHANG Chun-xia，SHANGGUAN Fang-qin，HU Chang-qing，et al. Steel process structure and its impact on CO_2 emission[J]. Iron and Steel，2010，45(5)：1.)

[14] World Steel Association. Steel′s Contribution to a Low Carbon Future and Climate Resilient Societies-Worldsteel Position Paper[R]. [S. l.]：World Steel Association，2019.

[15] Vaclav Smil. Still the Iron Age：Iron and Steel in the Modern World[M]. Oxford：Butterworth-Heinemann，Elsevier，2016.

[16] Millward-Hopkins J，Zwirner O，Purnell P，et al. Resource recovery and low carbon transitions：The hidden impacts of substituting cement with imported ‘waste’ materials from coal and steel production[J]. Global Environmental Change，2018，53：146.

[17] 上官方钦，周继程，王海风，等. 气候变化与钢铁工业脱碳化发展[J]. 钢铁，2021，56(5)：1.(SHANGGUAN Fang-qin，

ZHOU Ji-cheng, WANG Hai-feng, et al. Climate change and decarbonization development of steel industry[J]. Iron and Steel, 2021, 56(5): 1.)

[18] 上官方钦. 全废钢电炉流程优化研究——城市钢厂与钢铁工业脱碳化[D]. 北京:钢铁研究总院, 2021. (SHANGGUAN Fang-qin. Study on the Optimization of Full Scrap EAF Process—City Steel Plants & Decarbonization of Steel Industry[D]. Beijing: Central Iron and Steel Research Institute, 2021)

[19] 刘福国, 蒋学霞, 李志. 燃煤发电机组负荷率影响供电煤耗的研究[J]. 电站系统工程, 2008, 24(4): 47. (LIU Fu-guo, JIANG Xue-xia, LI Zhi. Study on the influence of load rate of coal-fired generating unit on coal consumption of power supply [J]. Power Station System Engineering, 2008, 24 (4): 47.)

[20] 戴晓露, 吴薇, 黄蓓雯, 等. 基于大数据分析的高压用户峰谷电量优化研究[J]. 自动化技术与应用, 2019, 38(1): 54. (DAI Xiao-lu, WU Wei, HUANG Bei-wen, et al. Peak valley power optimization of high voltage consumers based on big data analysis[J]. Automation Technology and Application, 2019, 38 (1): 54.)

[21] 张钦, 王锡凡, 王建学, 等. 电力市场下需求响应研究综述[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 97. (ZHANG Qin, WANG Xi-fan, WANG Jian-xue, et al. Review of demand response in power market[J]. Power System Automation, 2008, 32(3): 97.)

[22] 阮文骏, 王蓓蓓, 李扬, 等. 峰谷分时电价下的用户响应行为研究[J]. 电网技术, 2012(7): 86. (RUAN Wen-jun, WANG Bei-bei, LI Yang, et al. Research on user response behavior under peak valley TOU price[J]. Power Grid Technology, 2012, (7): 86.)

[23] 殷瑞钰. 关于智能化钢厂的讨论——从物理系统一侧出发讨论钢厂智能化[J]. 钢铁, 2017, 52(6): 1. (YIN Rui-yu. A discussion on ′smart′ steel plant-view from phsical system side [J]. Iron and Steel, 2017, 52(6): 1.)

[24] 殷瑞钰. "流"、流程网络与耗散结构——关于流程制造型制造流程物理系统的认识[J]. 中国科学:技术科学, 2018, 48: 1. (YIN Rui-yu. "Flow", flow network and dissipative structure—Understanding of the physical system of manufacturing process of process manufacturing type[J]. Sci Sin Tech, 2018, 48: 1.)

作者简介

上官方钦 工学博士，高级工程师。主要涉足与钢铁制造流程资源、能源和环境有关的技术开发及战略咨询工作，包括全废钢电炉流程优化；钢铁制造流程碳减排理论与技术开发；冶金渣资源综合利用；钢铁工业发展战略研究等。