

DOI: 10.13228/j.boyuan.issn1006-9356.20180334

中国钢铁工业节能减排潜力及能效提升途径

张 琦¹, 张 薇¹, 王玉洁¹, 徐 进², 曹先常³

(1. 东北大学国家环境保护生态工业重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 新奥集团新奥能源控股有限公司, 河北 石家庄 050000; 3. 宝钢工程技术集团上海宝钢节能环保技术有限公司, 上海 201999)

摘 要: 钢铁工业是典型的资源能源密集型行业, 是节能减排重点行业之一。总结了我国钢铁工业“十二五”以来所取得的节能减排进展及存在的问题, 采用动态物质流分析方法, 构建了钢需求量和废钢回收量预测模型, 基于 35 项重点节能减排技术评估, 结合能源消耗与 CO₂ 排放模型, 分析了我国钢铁工业到 2050 年的节能减排潜力并分析了各因素的影响。在此基础上提出了提升我国钢铁工业能效的若干途径, 为钢铁工业的绿色低碳转型、可持续发展提供理论指导。

关键词: 钢铁工业; 节能; 减排; 能效

文献标志码: A **文章编号:** 1006-9356(2019)02-0007-08

Potential of energy saving and emission reduction and energy efficiency improvement of China's steel industry

ZHANG Qi¹, ZHANG Wei¹, WANG Yu-jie¹, XU Jin², CAO Xian-chang³

(1. State Environment Protection Key Laboratory of Eco-Industry, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China; 2. ENN Energy Holdings Limited, ENN Group, Shijiazhuang 050000, Hebei, China; 3. Shanghai Baosteel Energy Tech Co., Ltd., Baosteel Engineering and Technology Group, Shanghai 201999, China)

Abstract: The iron and steel industry is a typical resource- and energy-intensive industry and one of key industries for the energy conservation and emission reduction. The progress and problems in the energy conservation and emission reduction achieved by China's iron and steel industries since the 12th Five-Year Plan were summarized. Based on the dynamic material flow analysis method, the steel demand forecast and the scrap recovery model were constructed. Based on the evaluation of 35 energy saving and emission reduction technologies, combined with the energy consumption and CO₂ emission models, the energy saving potential of the China's iron and steel industry by 2050 and the impact of various factors were analyzed. Finally, several ways to improve the energy efficiency were proposed which provides the theoretical guidance for the green and low-carbon transformation and sustainable development of the China's iron and steel industry.

Key words: iron and steel industry; energy saving; emissions reduction; energy efficiency

钢铁工业是国民经济重要的支柱产业, 在工业化、城镇化发展过程中发挥着重要作用。但是, 钢铁工业也是资源、能源密集型行业, 能耗高、污染重是其典型特点^[1]。2017 年, 中国粗钢产量达到 8.3 亿 t, 占全球粗钢产量的 49.2%, 其中由高炉-转炉流程生产的粗钢产量占总产量的 90% 以上^[2]。2015 年, 钢铁行业的能源消耗占全国能源消耗总量的 15%, CO₂ 排放占全国 CO₂ 排放总量的 15.4%^[3], 是中国节能减排的重点行业之一。

近年来, 国内外众多学者对钢铁行业的节能减排进行了研究。Arens M 等^[4]分析了德国钢铁工业

未来能耗和碳排放趋势以及相应的技术路线。Hasanbeigi A 等^[5]量化分析了不同因素对中国钢铁工业能源消耗趋势的影响。MA D 等^[6]基于 China-TIMES 模型综合评估了中国钢铁行业 2010—2050 年的能源消耗和大气污染物排放, 并指出生产结构调整和节能减排技术应用对中国钢铁行业的节能减排有重要影响。蔡九菊等^[7]分析了自 1980 年以来中国钢铁企业吨钢能耗的下降趋势、能耗现状及其影响因素, 指出未来中国钢铁工业的节能难度将越来越大, 为了应对挑战, 既要节约用能, 更要科学用能。张春霞等^[8]比较了中美两国钢铁工业的能效,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51874095); 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0601301, 2016YFB0601305)

作者简介: 张 琦(1977—), 男, 博士, 副教授; **E-mail:** zhangqi@mail.neu.edu.cn; **收稿日期:** 2018-08-21

指出从中美两国钢铁工业整体能效对比来看,中国钢铁工业的能效比美国低约 3.7%,但重点钢铁企业的能效比美国高约 9.2%。

当下,能源、资源与环境问题已成为钢铁工业可持续发展面临的重要挑战,在应对国际金融危机和气候变化背景下,为实现绿色低碳发展、转型升级,提高能源的利用率成为钢铁工业实现绿色化发展的重要着力点^[9]。本文分析了中国钢铁工业的节能减排现状,采用自下而上的建模方法,结合节能减排技术评估,对中国未来钢铁行业的节能减排潜力开展研究,并分析其影响因素,在此基础上,提出能效提升的若干途径,为中国钢铁工业的绿色、低碳、可持续发展提供服务。

1 中国钢铁工业的发展及节能减排现状

1.1 中国钢铁工业的发展现状

21 世纪以来,中国钢铁工业基本完成了生产工艺结构调整与优化,初步实现了钢铁生产流程现代化^[10]。“十二五”期间,工艺装备大型化进步明显,技术经济指标得到改善。130 m²以上烧结机产能占比 80.1%,先进焦炉产能占比 49.7%,重点统计钢铁企业 1 000 m³ 及以上高炉先进产能占比 73.3%,120 t 及以上转炉和 70 t 及以上电炉炼钢先进产能占比 66.2%,轧钢生产线先进水平装备占比 70%以上^[11]。随着智能化步伐加快、信息化水平明显提升,钢铁企业已建和在建能源管控中心数量超过 90 家^[12]。进入“十三五”时期,以“中国制造 2025”为契机,钢铁工业智能制造将以工业化与信息化的深度融合,实现产品制造流程的标准化、柔性化和智能化^[10]。但是,“十二五”以来,中国钢铁工业生产结构变化带来的节能减排潜力未能有效发挥,电炉钢比例呈下降趋势,远低于世界平均水平^[12]。2016 年,中国电炉钢占比仅为 7%左右,而世界平均水平为 25%,差距明显。在未来 20 年内,中国废钢铁资源将快速增长,并对钢铁工业流程结构、钢厂模式和钢厂布局、铁素资源消耗、能源消耗和碳排放产生重要的影响^[13]。

1.2 中国钢铁工业节能现状

近年来,随着中国钢铁工业生产结构调整、节能减排技术普及和节能管理水平提高,能源消耗得到进一步下降,节能减排工作取得了一定的进步,部分企业生产技术经济指标达到世界先进水平。1996—2016 年的 20 年间,钢铁工业综合能耗进一步降低,重点大中型企业的吨钢综合能耗由 33 176 下

降到 17 174 MJ,节能降耗成效显著。图 1 所示为中国钢铁工业能源消耗变化趋势图,数据来源于中国钢铁工业协会统计数据。其中,1996—2005 年电力折算系数为 11.84 MJ/(kW·h),2006—2016 年电力折算系数为 3.60 MJ/(kW·h)。

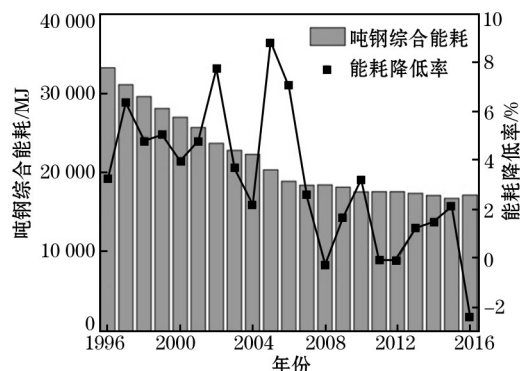


图 1 1996—2016 年中国吨钢综合能耗与能耗降低率

Fig. 1 Comprehensive energy consumption and reducing rate of per ton steel in China

“十二五”期间,重点钢铁企业主要能耗指标逐步改善,烧结、焦化、炼铁、转炉冶炼、轧钢等工序能耗进一步下降,节能技术得到进一步普及^[12]。截至 2015 年底,干熄焦技术和高炉煤气干法除尘技术在重点大中型钢铁企业的普及率均已达到 90%以上,转炉煤气干法除尘在重点大中型钢铁企业的普及率已达到 20%^[11]。已建和在建的烧结余热发电机组数量超过 150 套,部分关键共性节能技术已达到世界领先水平^[12]。焦炉荒煤气显热回收技术、烧结竖罐式余热回收技术、高炉渣显热回收技术、高温超高压煤气发电技术、低温余热发电技术等得到进一步研发和工业化应用^[9,14],余热余能资源利用水平得到提升^[15]。尽管钢铁工业在节能工作中取得了一定进展,但纵观整个行业,仍然存在很多问题,能源管理水平亟待提高,节能潜力急需进一步挖掘。

1.3 中国钢铁工业 CO₂ 排放现状

以煤为主的能源结构决定了中国钢铁工业 CO₂ 的大量排放,在气候变化日趋严重的今天,中国钢铁工业在碳排放约束下将面临巨大的挑战。钢铁生产过程产生的 CO₂ 排放 95% 以上来自能源消耗^[16-18]。中国钢铁工业 CO₂ 排放量占全球钢铁工业 CO₂ 总排放量的 51%,而欧盟为 12%,日本为 8%,俄罗斯为 7%,美国为 5%,其他国家为 17%^[16]。造成中国钢铁工业 CO₂ 排放量高的主要原因是以煤为主的能源结构和以高炉-转炉流程为主的钢铁生产模式。面对气候变化和生态环境治理给钢铁工业可持续发展带来

的新压力,中国钢铁工业必须要走一条低碳绿色发展之路。据文献[19]报道,以废钢为源头的电炉流程与以铁矿石为源头的高炉-转炉流程相比,每吨钢可节约铁矿石 113 t,降低能耗 350 kg 标准煤,减排 CO₂ 1.3 t,减排废渣 600 kg。而中国钢铁工业的情况又比较特殊,高炉-转炉流程消耗废钢少,短流程消耗铁水多、废钢少,造成钢铁工业 CO₂ 排放量升高。张春霞等^[8]比较了中美两国的情景,若条件一致,电炉钢比例一致,中国钢铁工业吨钢 CO₂ 排放量将降低 0.57 t。所以,适度鼓励钢铁短流程工艺发展,发挥短流程工艺的低碳绿色优势,才能实现中国钢铁工业转型升级,推动结构调整^[14,19],进一步挖掘钢铁工业的节能减排潜力。

2 钢铁工业节能减排潜力分析

本文结合中国未来社会经济指标估算值、各下游用钢行业的历史数据和所预测的未来发展趋势,运用动态物质流分析方法,对各年钢需求量、社会钢铁库存量以及废钢量进行连续迭代计算,预测得到 2050 年的中国钢需求量;并建立钢铁行业层面的能耗与 CO₂ 排放模型,预测未来中国钢铁行业的能耗和碳排放总量及强度;同时引入对数平均迪氏指数分解法(logarithmic mean divisia index decomposition,简称 LMDI),分析对未来能耗和碳排放的影响因素^[3]。

2.1 钢需求量及废钢回收量预测模型

物质流分析(substance flow analysis,简称 SFA)方法是研究人类活动中物质资源新陈代谢的一种有效方法^[20]。东北大学陆钟武院士将物质流分析分为两种:一种是定点观察法,即静态分析法;另一种是跟踪观察法,即动态分析法,并详细地分析对比了两者的异同^[21]。动态物质流分析法相比于静态物质流分析法的不同点是具有“时间概念”,其核心思想是“产品生命周期物流图”。本文采用动态物质流分析法,构建了钢需求量及废钢回收量预测模型。

描述模型的基本方程见式(1)和式(2),可以明确得知钢铁的流入量、流出量和社会库存量之间的相互关系。

$$dS = [F_{in}(\tau) - F_{out}(\tau)]d\tau \quad (1)$$

$$F_{out}(\tau) = SC(\tau) = \sum_{i=1}^{L_m} F_{in}(\tau-i)d(i) \quad (2)$$

式中: S 为社会中处于使用阶段的钢铁库存量,t; F_{in} 、 F_{out} 分别为社会中钢铁制品库存的流入量与流出量,在这里即为产品消费量与折旧量,t; SC 为折旧量,t;

L_m 为钢铁产品可达到的最长寿命,一般确定为该产品平均寿命的 2 倍,年; d 为折旧率,%; τ 为时间,年。

假设新造钢铁制品当年就进入社会使用阶段,且钢铁制品达到寿命后的折旧废钢会被回收至钢铁行业重新冶炼。一般来说,在考虑消耗、库存和报废时的最小时间单位通常为 1 年。这样,式(1)可以改写为

$$\Delta S = F_{in}(\tau) - F_{out}(\tau) \quad (3)$$

式中: τ 为时间,年。

在钢铁流动过程中, $F_{in}(\tau)$ 实际上相当于第 τ 年的钢铁需求量,它与钢产量之差为钢净出口量,即

$$P(\tau) = F_{in}(\tau) + EX(\tau) \quad (4)$$

式中: P 为粗钢产量,t; $EX(\tau)$ 为粗钢净出口量,t。

2.2 能源消耗与 CO₂ 排放模型

能源消耗模型建立在吨钢能耗 e - p 分析法基础上,综合考虑了节能技术的普及应用、生产结构调整等因素,预测未来中国钢铁行业能源消耗。单位能耗通常定义为某工序生产 1 t 主产品所消耗的能量,计算方法见式(5)~式(6)^[3]。

$$e_{\tau+1,k} = e_{\tau,k} - \sum_j (ES_{\tau,j} \times (IR_{\tau,j} - IR_{\tau=ref,j})) \quad (5)$$

式中: $e_{\tau,k}$ 为第 τ 年工序 k 的单位能耗,GJ/t; $ES_{\tau,j}$ 为第 τ 年通过节能技术 j 带来的节能潜力,GJ/t; $IR_{\tau,j}$ 为第 τ 年节能技术 j 普及率,%; $IR_{\tau=ref,j}$ 为基准年节能技术 j 普及率,%。

这样,可以得到钢铁行业的总能源消耗

$$TEC_{\tau} = \sum_k e_{\tau,k} \times p_{\tau,k} \times P_{\tau} \quad (6)$$

式中: TEC_{τ} 为第 τ 年钢铁行业总能源消耗,GJ/t; $p_{\tau,k}$ 为第 τ 年工序 k 的钢比系数; P_{τ} 为第 τ 年全国钢产量,t。

碳排放模型与能耗模型类似,但由于中国钢铁企业间生产结构、产品类别等差异较大,同时尚存在许多难以统计但排放很高的小型钢厂,数据收集难度较大。所以本研究在前文研究基础上,将能耗分为燃料消耗与电耗,分别计算产生的碳排放量,见式(7)。

$$SCE_{\tau,k} = U_{\tau,k,F} \cdot EF_F + U_{\tau,k,E} \cdot EF_E \quad (7)$$

式中: $SCE_{\tau,k}$ 为第 τ 年工序 k 的单位碳排,kg/t; $U_{\tau,k,F}$ 为第 τ 年工序 k 的燃料消耗,GJ/t; $U_{\tau,k,E}$ 为第 τ 年工序 k 的电力消耗,kW·h/t; EF_F 为燃料的碳排因子,kg/GJ; EF_E 为电力的碳排因子,kg/GJ。

则各工序的碳排量可用式(8)计算。

$$SCE_{\tau+1,k} = SCE_{\tau,k} - \sum_j [CS_{\tau,j} \times (IR_{\tau,j} - IR_{\tau=ref,j})] \quad (8)$$

式中： $CS_{\tau,j}$ 为第 τ 年通过技术 j 带来的碳排降低潜力, kg/t。

钢铁行业的总碳排强度为

$$TCE_{\tau}=\sum_k SCE_{\tau,k} \times p_{\tau,k} \times P_{\tau} \tag{9}$$

式中： TCE_{τ} 为第 τ 年钢铁行业总碳排放量, kg/t。

2.3 重点节能减排技术

节能减排技术是工业能效提升的关键措施,不

仅能降低生产能耗、减少污染物排放,而且能在一定程度上为企业节省生产成本。近年来,工信部和国家发改委等部门已经发布了一系列钢铁工业节能减排技术措施,但是缺乏对技术节能潜力进行全面的量化分析,这给技术在全行业的普及推广带来了障碍。本文根据钢铁生产特点,技术的先进性、适用性等原则,筛选出 35 项技术措施作为本文的研究对象,见表 1。

表 1 钢铁行业重点节能减排技术特征信息
Table 1 Date of selected available energy saving technologies in CISI

序号	工序	节能技术	单位节能量 ^① / (GJ·t ⁻¹)	单位 CO ₂ 减排量/ (kg·t ⁻¹)	当前市场普及 率 ^② /%	技术类型
T1	焦化	干法熄焦(CDQ)	0.37	42.54	95	资源、能源回收利用技术
T2		煤调湿(CMC)	0.06	1.47	9	资源、能源回收利用技术
T3	烧结	烧结余热回收利用技术	0.35	14.77	20	资源、能源回收利用技术
T4		厚料层烧结技术	0.08	1.18	80	工艺过程节能技术
T5		降低烧结漏风率技术	0.18	0.20	70	工艺过程节能技术
T6		低温烧结工艺技术	0.35	3.15	60	工艺过程节能技术
T7	高炉炼铁	高炉高效喷煤技术(130 kg/t)	0.70	24.16	40	工艺过程节能技术
T8		高炉炉顶煤气干式余压发电(TRT)	0.12	22.66	8	资源、能源回收利用技术
T9		热风炉烟气双预热技术	0.25	1.30	5	资源、能源回收利用技术
T10		高炉煤气回收技术	0.01	5.49	94	资源、能源回收利用技术
T11		高炉渣综合利用技术	0.18	0.19	1	资源、能源回收利用技术
T12		高炉喷吹焦炉煤气技术	0.39	0	0	资源、能源回收利用技术
T13		高炉喷吹废塑料技术	0.10	0.32	3	资源、能源回收利用技术
T14		转炉煤气显热回收技术	0.12	19.28	40	资源、能源回收利用技术
T15		转炉干法除尘技术(湿改干)	0.14	5.77	20	工艺过程节能技术
T16		转炉烟气高效利用技术	0.09	2.89	15	资源、能源回收利用技术
T17		转炉煤气干法电除尘	0.14	0.78	20	资源、能源回收利用技术
T18		转炉渣显热回收技术	0.06	0.69	5	资源、能源回收利用技术
T19	电炉炼钢	废钢预热技术	0.02	0.47	10	资源、能源回收利用技术
T20		电炉优化供电技术	0.01	2.31	15	工艺过程节能技术
T21		电炉烟气余热回收技术	0.06	0.771	10	资源、能源回收利用技术
T22		泡沫渣利用技术	0.01	0.46	30	资源、能源回收利用技术
T23	精炼和连铸	高效连铸技术	0.39	27.49	75	工艺过程节能技术
T24		钢包高效预热技术	0.02	0.08	15	工艺过程节能技术
T25	热轧	带钢集成连铸连轧技术	0.28	6.99	20	工艺过程节能技术
T26		加热炉蓄热式燃烧技术	0.15	18.6	40	资源、能源回收利用技术
T27		热轧厂过程控制技术	0.28	20.49	80	工艺过程节能技术
T28		冷却水余热回收技术	0.04	0.59	20	资源、能源回收利用技术
T29		连铸坯热装热送技术	0.23	26.78	80	资源、能源回收利用技术
T30	冷轧	在线热处理技术	0.11	16.83	55	资源、能源回收利用技术
T31		自动监控和识别系统	0.20	13.22	55	综合性节能技术
T32	综合性技术	预防性维护技术	0.45	19.68	40	综合性节能技术
T33		能源监测和管理系统	0.12	18.22	50	综合性节能技术
T34		热电联产技术	0.38	70.19	90	综合性节能技术
T35		燃气-蒸汽联合循环发电(CCPP)	0.51	8.19	15	综合性节能技术

①单位某参数中“单位”指每吨粗钢；②表中陈列的参数是通过专家约谈、实地调研以及参考国家权威部门发布的数据综合得出的结果，仅代表行业的平均值，中小规模钢铁企业不包括在内。

2.4 情景设置与结果分析

2.4.1 钢需求量预测结果

根据预测模型,中国钢需求量将从2010年的6.04亿t逐渐增长,在2013年达到峰值7.89亿t,而后逐年降低至2043年的4.40亿t。如图2所示,钢需求量在2045年开始趋于平稳,社会年消耗钢材保持在4.5亿t附近。钢铁产品需求达到峰值后下滑的主要原因是经过了经济社会的飞速发展,中国即将全面建成小康社会,社会钢铁产品保有量逐渐达到饱和阶段,导致钢材市场的刚性需求出现下滑^[3]。

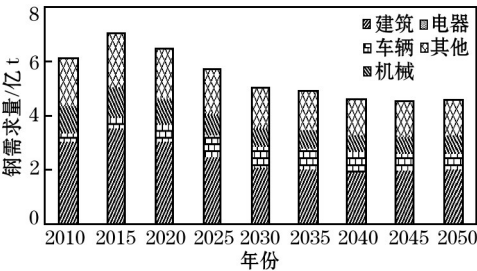


图2 2010—2050年中国钢需求预测量

Fig. 2 Forecast of steel demand in China from 2010 to 2050 under BAU scenario

2.4.2 废钢量回收预测结果

2010—2050年中国折旧废钢量如图3所示。可以看出,在预测时间段内,每年折旧废钢量不断快速增长,由2010年的1.23亿增长到2050年的4.28

亿t,且在末期并未呈现明显的放缓趋势,可以预见2050年后仍会保持一段时间的增长。

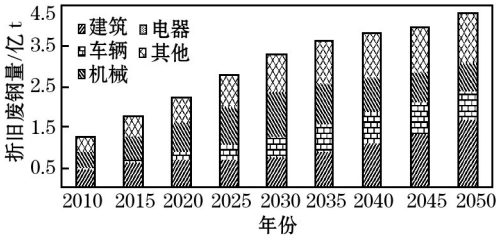


图3 2010—2050年中国折旧废钢量

Fig. 3 Obsolete scrap amount in China from 2010 to 2050

2.4.3 情景设计与预测结果

为了更好地分析钢铁行业节能减排潜力,本文将设置4个情景:基准情景(business-as-usual scenario,简称BAU)、生产结构调整情景(structure adjustment scenario,简称STA)、能效提升情景(energy-efficiency improvement scenario,简称EEI)和政策强化情景(strengthened policy scenario,简称STP)。设定各情景中节能减排技术普及率的年增长量如下:在BAU和STA情景下,2015—2030年的年增长量为1%,2030—2050年的年增长量为2%;在EEI情景下,2015—2030年的年增长量为3%,2030—2050年的年增长量为4%;在STP情景下,2015—2030年的年增长量为4%,2030—2050年的年增长量为5%。具体见表2。

表2 情景描述

Table 2 Scenario description

%

年份	电炉铁水比				电炉钢比例			
	BAU	STA	EEI	STP	BAU	STA	EEI	STP
2015	62.8	62.8	62.8	62.8	4.2	4.2	4.2	4.2
2020	62.8	55.3	62.8	53.8	10.0	15.0	10.0	18
2030	62.8	40.2	62.8	35.9	10.0	20.0	10.0	25
2040	62.8	25.1	62.8	18.0	10.0	25.0	10.0	35
2050	62.8	10.0	62.8	0	10.0	30.0	10.0	45

注:2015年电炉铁水比和电炉钢比例均来自《中国钢铁工业年鉴》。

由模型分析可知,2010—2050年的总能耗如图4所示。能耗的减少主要归因于未来中国粗钢产量的下降。2015年中国钢铁工业总能耗为13 841.89 PJ,至2050年,在BAU、STA、EEI和STP四个情景下的总能耗减小量分别为5 851.77、7 097.71、6 402.93和8 415.77 PJ。与BAU情景相比,其他3个情景能耗降低更加明显,而各情景的

能耗都在2010—2015年达到峰值。2010—2050年的总碳排如图5所示。2015年中国钢铁工业CO₂总排放量为17.05亿t。至2050年,BAU、STA、EEI和STP四个情景下的CO₂排放减少量分别为7.19亿、8.51亿、7.66亿和9.98亿t,与能效提升情景相比,生产结构调整情景减排效果更加显著。

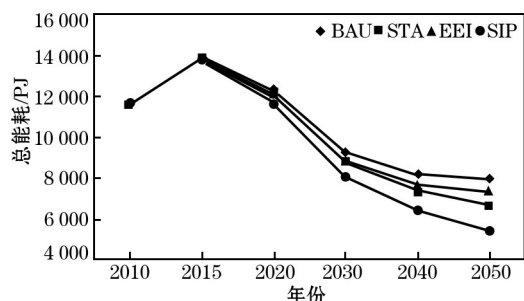


图 4 2010—2050 年各情景下中国钢铁行业总能耗的变化趋势

Fig. 4 Total final energy consumption under different scenarios

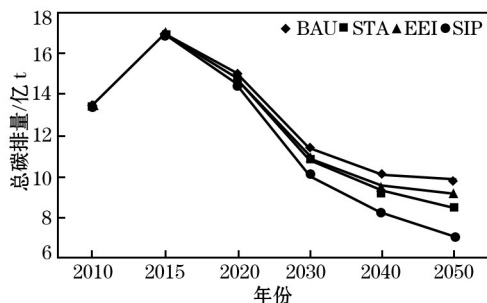


图 5 2010—2050 年各情景下中国钢铁行业总碳排放的变化趋势

Fig. 5 Total final CO₂ emissions under different scenarios

2.4.4 影响因素分析

钢产量、电炉钢比例、电炉吃铁水比和节能技术应用等因素对节能减排潜力的贡献程度不同,本节应用 LMDI 分解法,对政策强化情景(strengthened policy scenario,简称 STP)下的能耗碳排放降低潜力的影响因素进行量化分解^[9]。

中国钢铁行业的能耗潜力分解结果如图 6 所示。2010—2015 年,因钢产量的增加导致最终总能耗增加 2 920.30 PJ。随后的 2015—2050 年,因钢需求量下降对能耗的影响转为负向。在生产结构调整方面(电炉钢比例和电炉铁水比),能耗得到不同程度的下降,从 2015—2050 年,可降低总能耗值为 2 588.56 PJ。此外,同期技术普及率的提升对降低能耗的贡献为 1 308.73 PJ。对生产结构调整和技术普及率的分解结果显示,前者节能贡献随着电炉炼钢的比例增多以及电炉使用铁水的减少而逐渐增大,而后者随之逐渐减小。2020 年之前,节能技术普及率对于能源消耗是更大的制约因素,而长期来看,中国钢铁行业的生产结构调整将是降低钢铁生产能耗的关键手段。

如图 7 所示,与能耗因素类似,相比生产结构调整,节能技术的普及将在 2030 年前对抑制 CO₂ 的排

放起到更加明显的作用,此后生产结构的影响则会更显著。2015—2050 年,节能技术将累计产生 1.49 亿 t 的减排潜力,同时生产结构调整将会产生 2.78 亿 t 的减排潜力。短期来看,减少碳排放工作更依赖于技术普及,而长期来看,生产结构调整的影响将会逐渐增强。

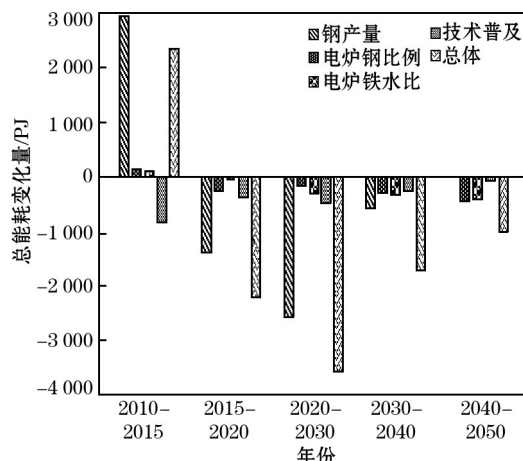


图 6 STP 情景下中国钢铁行业总能耗的 LMDI 分解结果

Fig. 6 Results of decomposition of total energy use in CISI under STP scenario

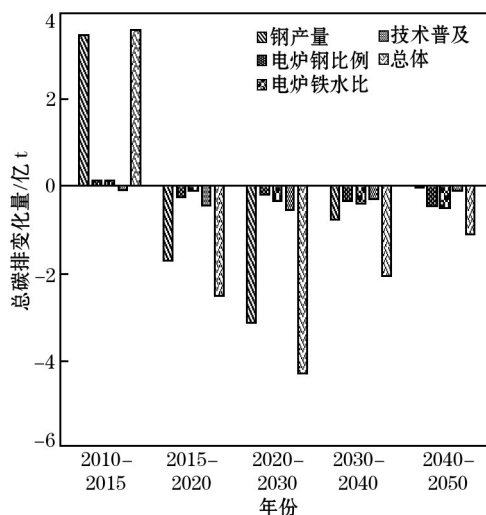


图 7 STP 情景下中国钢铁行业总碳排放的 LMDI 分解结果

Fig. 7 Results of decomposition of total CO₂ emission in CISI under STP scenario

3 钢铁工业能效提升及低碳绿色发展途径

钢铁生产的能源利用效率对其能源消耗和 CO₂ 排放有直接影响^[8]。情景分析和 LMDI 分解结果表明,2030 年之前,与生产结构调整相比,能效提升对节能减排潜力的贡献更加显著,所以提升能效水平将是未来 10 年内钢铁工业节能减排的重点。“十三

五”期间,钢铁工业应该以能效提升为着力点,在行业发展和产业升级方面取得成效,逐步实现钢铁生产绿色化^[22]。本文从不同层次提出了钢铁工业的能效提升及低碳绿色发展路径,为钢铁工业的绿色化、智能化发展提供方向:(1)物质流/能量流相互匹配,提升流程综合能效水平。构建钢铁生产流程的物质流、能量流及其耦合模型,开发界面技术,完善物质流/能量流相互匹配关系,合理预测能源需求,提升钢铁生产综合能效水平,降低能源消耗和CO₂排放。同时,优化钢铁生产流程物质流/能量流相互耦合关系,实现生产过程的连续化、紧凑化和高效化,提高钢铁生产流程能源使用效率,降低污染物排放,逐步实现从工序节能到系统节能的真正转变。(2)挖掘能量流网络动态特性,完善能源管控系统功能。钢铁生产过程中能源介质种类繁多,其中煤气、蒸汽、电力是主要的能源介质,占企业总能耗的60%以上,是能量流网络运行的主体^[23],目前依靠人工经验为主的调度方式往往造成煤气、蒸汽等能源的大量放散。因此,挖掘能量流供需动态特性,提升能源管控系统的智能化水平成为当前钢铁生产过程节能降耗的关键环节之一。所以要完善能量流网络化功能,在信息化基础上提升智能化水平,进行能源系统的精细化管理,加强能源动态预测和优化调度,提升能源管控系统核心功能。(3)科学评估节能减排技术,挖掘技术节能减排潜力。大力实施节能重点工程,普及和推广先进节能低碳技术装备,研发能源高效利用技术、持续有效推进工业化技术成果转化,加快能效提升领域的跨行业融合,挖掘先进技术节能减排潜力,为钢铁工业的节能减排贡献力量。开展钢铁工业先进节能减排适用技术的科学评价与应用实践,对推动工业企业生产工艺升级、节能减排技术改造具有重要作用。(4)加快钢铁行业流程结构优化,实现低碳绿色发展。钢铁工业低碳绿色发展是指按照循环经济的基本原则,以清洁生产为基础,重点抓好资源高效利用和节能减排两个方面,全面实现钢铁产品制造、能源转换、废弃物处理-消纳和再资源化等三大功能,具有低碳特点,能与其他行业和社会实现生态链接,从而实现良好的经济、环境和社会效益的发展模式^[19]。低碳绿色发展是钢铁工业实现转型升级战略发展的核心和关键。可以通过总量调整、工艺结构调整等措施来解决区域环境质量不平衡、区域产业发展不平衡等问题,推动钢铁工业布局结构调整^[13]。随着中国废钢铁资源量的大幅度增长,逐步完善废钢

铁产业支撑体系,适度鼓励钢铁短流程工艺发展,发挥短流程工艺的低碳绿色优势,实现钢铁工业的可持续发展。

4 结论

(1)采用动态物质流分析方法,对中国钢铁工业的节能减排潜力进行合理预测,结果表明:2010—2050年,中国钢需求量在2013年达到峰值7.89亿t后,呈逐年下降趋势,并于2045年开始趋于平稳,保持在4.5亿t附近;废钢资源量由2010年的1.23亿逐步增长到2050年的4.28亿t;能源消耗及CO₂排放将不同程度下降,钢产量将是未来能耗排放下降的主要驱动力,短期来看,节能减排工作更依赖于技术普及,而长期来看,生产结构调整将占主导地位。

(2)“十三五”期间,为实现中国钢铁工业生产流程综合能效提升,应着眼于绿色化、智能化协同发展,挖掘钢铁行业节能减排潜力,实现技术节能与管理节能相融合。统筹安排废钢资源量,加快钢铁行业流程结构优化,实现低碳绿色发展。

参考文献:

- [1] 陆钟武,蔡九菊,杜涛,等.论钢铁行业能耗、物耗、排放的宏观调控[J].中国工程科学,2015,17(5):126.(LU Zhong-wu, CAI Jiu-ju, DU Tao, et al. The macro-control on energy consumption, material consumption and waste emission of steel industry[J]. Engineering Sciences, 2015, 17(5): 126.)
- [2] 世界钢铁协会.世界钢铁统计数据2018[EB/OL].<https://www.worldsteel.org/zh/media-centre/press-releases/2018/world-steel-in-figures-2018.html>. [2017-10-20]. (World Steel Association. Word Steel in Figure 2018[EB/OL]. <https://www.worldsteel.org/zh/media-centre/press-releases/2018/world-steel-in-figures-2018.html>. [2017-10-20].)
- [3] ZHANG Q, XU J, WANG Y J, et al. Comprehensive assessment of energy conservation and CO₂ emissions mitigation in China's iron and steel industry based on dynamic material flows [J]. Applied Energy, 2018, 209: 251.
- [4] Arens M, Worrell E, Eichhammer W, et al. Pathways to a low-carbon iron and steel industry in the medium-term-the case of Germany[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 163: 84.
- [5] Hasanbeigi A, Jiang Z, Price L. Retrospective and prospective analysis of the trends of energy use in Chinese iron and steel industry[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 74(4): 105.
- [6] MA D, CHEN W, YIN X, et al. Quantifying the co-benefits of decarbonisation in China's steel sector: an integrated assessment approach[J]. Applied Energy, 2016, 162: 1225.
- [7] 蔡九菊,孙文强.中国钢铁工业的系统节能和科学用能[J].钢铁,2012,47(5):1.(CAI Jiu-ju, SUN Wen-qiang. Systems ener-

- gy conservation and scientific energy utilization of iron and steel industry in china[J]. Iron and Steel, 2012, 47(5): 1.)
- [8] 张春霞, 上官方钦, 酆秀萍, 等. 中美钢铁工业能效对标研究[J]. 钢铁, 2013, 48(1): 87. (ZHANG Chun-xia, SHANG-GUAN Fang-qin, LI Xiu-ping, et al. Study on energy efficiency benchmarking of the steel industry between China and the US [J]. Iron and Steel, 2013, 48(1): 87.)
- [9] 李冰, 李新创, 李闯. 国内外钢铁工业能源高效利用新进展[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2017, 9(1): 68. (LI Bing, LI Xin-chuang, LI Chuang. Progress on efficient utilization of energy resources of steel industry home and abroad[J]. Journal of Engineering Studies, 2017, 9(1): 68.)
- [10] 酆秀萍, 张春霞, 周继程, 等. 钢铁行业发展面临的挑战及节能减排技术应用[J]. 电力需求侧管理, 2011, 13(3): 4. (LI Xiu-ping, ZHANG Chun-xia, ZHOU Ji-cheng, et al. Steel industry development challenges and technology application of energy saving and emission reduction[J]. Power Demand Side Management, 2011, 13(3): 4.)
- [11] 李新创. 钢铁工业“十二五”回顾和未来发展思考[J]. 钢铁, 2016, 51(11): 1. (LI Xin-chuang. Review of steel industry in the 12th Five-Year Period and future development[J]. Iron and Steel, 2016, 51(11): 1.)
- [12] 郇学, 尚海霞. 中国钢铁工业“十二五”节能成就和“十三五”展望[J]. 钢铁, 2017, 52(7): 9. (GAO Xue, SHANG Hai-xia. Energy saving achievements of 12th Five-Year Program and prospect of 13th Five-Year Program for Chinese steel industry[J]. Iron and Steel, 2017, 52(7): 9.)
- [13] 殷瑞钰. “流”、流程网络与耗散结构为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(2): 136. (YIN Rui-yu. “Flow”, flow network and dissipative structure—understanding of the physical system of manufacturing process of process manufacturing type[J]. Scientia Sinica: Technologica, 2018, 48(2): 136.)
- [14] 彭岩, 曹先常, 张玉柱. 钢铁典型工序流程节能技术新进展[J]. 中国冶金, 2017, 27(5): 8. (PENG Yan, CAO Xian-chang, ZHANG Yu-zhu. New progresses of energy saving solutions in typical iron and steel making process flow[J]. China Metallurgy, 2017, 27(5): 8.)
- [15] ZHANG Q, ZHAO X Y, LU H Y, et al. Waste energy recovery and energy efficiency improvement in China's iron and steel industry[J]. Applied Energy, 2017, 191: 502.
- [16] 李士琦, 吴龙, 纪志军, 等. 中国钢铁工业节能减排现状及对策[J]. 钢铁研究, 2011, 39(3): 1. (LI Shi-qi, WU Long, JI Zhi-jun, et al. Status of energy-saving and emission reduction and countermeasures for iron and steel industry in China[J]. Research on Iron and Steel, 2011, 39(3): 1.)
- [17] 张春霞, 上官方钦, 胡长庆, 等. 钢铁流程结构及对 CO₂ 排放的影响[J]. 钢铁, 2010, 45(5): 1. (ZHANG Chun-xia, SHANG-GUAN Fang-qin, HU Chang-qing, et al. Steel process structure and its impact on CO₂ emission[J]. Iron and Steel, 2010, 45(5): 1.)
- [18] ZHANG Q, LI Y, XU J, et al. Carbon element flow analysis and CO₂ emission reduction in iron and steel works[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 172: 709.
- [19] 张春霞, 王海风, 张寿荣, 等. 中国钢铁工业绿色发展工程科技战略及对策[J]. 钢铁, 2015, 50(10): 1. (ZHANG Chun-xia, WANG Hai-feng, ZHANG Shou-rong, et al. Strategic study on green development of Chinese steel industry[J]. Iron and Steel, 2015, 50(10): 1.)
- [20] Baccini P, Brunner P H. Metabolism of the Anthroposphere[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1991.
- [21] 陆钟武, 岳强. 物质流分析的两种方法及应用[J]. 资源再生, 2006(2): 27. (LU Zhong-wu, YUE Qiang. Non-ferrous metals recycling and utilization[J]. Resource Recycling, 2006(2): 27.)
- [22] 殷瑞钰, 丘亮辉. 主持人语[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2017, 9(1): 3. (YIN Rui-yu, QIU Liang-hui. Moderator's speech[J]. Journal of Engineering Studies, 2017, 9(1): 3.)
- [23] 张琦, 马家琳, 高金彤, 等. 钢铁企业煤气-蒸汽-电力系统耦合优化及应用[J]. 化工学报, 2018, 69(7): 3149. (ZHANG Qi, MA Jia-lin, GAO Jin-tong, et al. Coupled optimization modeling and application of fuel gas-steam-power system in integrated iron and steel works[J]. CIESC Journal, 2018, 69(7): 3149.)