



国家电网
STATE GRID

中国电力科学研究院有限公司
CHINA ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE

电力需求侧灵活性系列： 钢铁行业灵活性潜力概述





关于落基山研究所 (RMI)

落基山研究所 (RMI), 是一家于1982年创立的专业、独立、以市场为导向的国际智库。我们与政府部门、企业、科研机构及创业者协作, 推动全球能源变革, 以创造清洁、安全、繁荣的低碳未来。落基山研究所致力于借助经济可行的市场化手段, 加速能效提升, 推动可再生能源取代化石燃料的能源结构转变。落基山研究所在北京、美国科罗拉多州巴索尔特和博尔德、纽约市、加州奥克兰、华盛顿特区及印度尼西亚设有办事处。

作者与鸣谢

作者

落基山研究所: 刘雨菁, 刘子屹, 谢俊
中国电力科学研究院有限公司: 李德智

其他作者

落基山研究所: 陈梓浩, 高硕, 李婷, 张沥月, 周勤
中国电力科学研究院有限公司: 陈宋宋, 宫飞翔

感谢落基山研究所的李抒苡和薛雨军在报告撰写过程中给与的宝贵建议
所有作者姓名按姓氏首字母顺序排列

联系方式

刘雨菁, yujingliu@rmi.org

版权与引用

刘子屹, 谢俊, 刘雨菁, 李德智等. 电力需求侧灵活性系列: 钢铁行业灵活性潜力概述, 落基山研究所, 2023,
<http://rmi.org.cn/insights/dsf-steel/>

鸣谢

本报告作者特别感谢以下来自企业和研究机构的专家对报告撰写提供的洞见与建议。

孙文强 东北大学
曾永生 上海佰能信息技术有限公司
林科 鞍钢股份有限公司
王顺江 国网辽宁省电力有限公司
童流川 腾讯SSV碳中和实验室
孙冲 国网河北省电力有限公司营销服务中心
孙钢 国网浙江省电力有限公司营销服务中心
张海静 国网山东省电力公司营销服务中心(计量中心)

特别感谢Climate Imperative Foundation对本报告的支持。

本报告所述内容不代表以上专家和所在机构, 以及项目支持方的观点。

目录

作者与鸣谢	3
一、钢铁行业是工业需求侧灵活性的重要来源	5
1.1 低碳政策促进钢铁行业绿色转型升级	5
1.2 钢铁柔性负荷助力新型电力系统灵活性提升	8
二、钢铁生产工艺特征及负荷调节潜力	10
2.1 钢铁生产工艺流程	10
2.2 钢铁生产负荷特征	11
2.2.1 负荷分类特征	11
2.2.2 负荷曲线特征	12
2.3 钢铁需求侧灵活性来源	14
2.3.1 可中断负荷调节	14
2.3.2 可削减负荷调节	14
2.3.3 可转移负荷调节	14
2.3.4 自备电厂或副产气发电	14
2.4 钢铁企业各生产环节灵活性来源及潜力	15
三、全球钢铁需求侧灵活性实践	16
3.1 荷兰塔塔长流程钢铁厂需求响应实践	16
3.2 德国短流程钢厂灵活性潜力评估与仿真	17
3.3 浙江万泰特钢公司参与电网供需互动	18
3.4 华东某短流程钢铁企业负荷管理时间	20
四、钢铁需求侧灵活性挖掘的挑战与机遇	23
4.1 技术层面	23
4.1.1 生产过程的负荷建模、调节能力预测及协同优化	23
4.1.2 钢铁生产过程解耦以发挥负荷调节潜力	23
4.2 市场层面	23
五、结语	24
参考文献	25

一、钢铁行业是工业需求侧灵活性的重要来源

1.1 低碳政策促进钢铁行业绿色转型升级

钢铁行业是我国主要碳排放部门之一，其绿色转型升级是实现碳达峰碳中和的重要抓手。作为国民经济的重要基础产业，中国钢铁行业 GDP 占总 GDP 的 5% 左右。中国是世界最大的钢铁生产国和消费国，2022 年，中国生产粗钢 10.2 亿吨，消费成品钢消费 9.2 亿吨，分别占全球产量的 54.0% 和 51.7%。同时作为能源密集型行业，2022 年，钢铁行业的能源消费总量占全国比重在 10% 以上，碳排放总量约为 18 亿吨，占全国总排放的约 15%，是碳排放占比最高的制造业类别。因此，钢铁行业的零碳转型于全经济领域实现碳中和目标至关重要，其作为国民经济发展的重要支撑也决定了下游产业是否能够实现全生命周期脱碳。

在此背景下，提升钢铁生产能效、实现绿色低碳转型已成为政府和钢铁企业共同关注的焦点。从能效上看，过去十年钢铁行业的能效有明显提升。我国大中型钢铁企业的吨钢综合能耗从 0.669 tce/t 下降到 0.551 tce/t，下降率 16.64%，且各生产工序能耗均有不同程度的下降¹。钢铁行业能效总体实现了 7.5% 的提升，预计未来 30 年能效提升可达 10% ~ 15%。然而，为进一步实现行业深度脱碳，钢铁行业将在产品结构、能耗结构和生产工艺等方面出现巨大变化，短流程电炉炼钢将取代长流程炼钢成为中国钢铁产能的主力²。相比长流程炼钢，短流程炼钢的能耗更低。长流程炼钢的能耗以煤炭为主，吨钢综合能耗约为 550 千克标准煤，而短流程炼钢以电力为主要能源来源，吨钢电耗约为 500 千瓦时，吨钢碳排放约为 0.6 吨二氧化碳，为长流程的 1/3 以下。2020 年，我国长流程粗钢产量占比仍高达约 90%，远高于同期欧盟的 57.6%、美国的 29.4% 的水平。相比之下，美国、印度、欧洲的短流程电炉钢占比分别达到了 70%、56% 和 41% 左右。

国家陆续颁布一系列政策目标，在产能治理、能源环保和提高废钢使用方面提出了严格的要求(图表 1)。2021 年 12 月，工信部、科学技术部和自然资源部共同发布了《“十四五”原材料工业发展规划》，明确到 2025 年，钢铁、有色金属、建材等重点行业能源消耗总量、碳排放总量控制取得阶段性成果，钢铁行业吨钢综合能耗降低 2%。2022 年，钢铁行业低碳工作推进委员会发布了《钢铁行业碳中和愿景和低碳技术路线图》，明确了中国钢铁工业“双碳”六大技术路线，即系统能效提升、资源循环利用、流程优化创新、冶炼工艺突破、产品迭代升级、捕集封存利用。2022 年 6 月，生态环境部等七部门发布《减污降碳协同增效实施方案》，提出逐步减少独立烧结、热轧企业数量，大力支持电炉短流程工艺发展。2025 年和 2030 年，全国短流程炼钢占比分别提升至 15%、20% 以上。从政策内容上看，除了降低各生产环节的能效之外，政策也在逐步引导未来钢铁生产从长流程向短流程转移，部分省份也专门发布了促进钢铁短流程生产技术的相关政策目标(图表 2)。

图表1 近年钢铁行业低碳相关政策

时间	发布单位	政策名称	钢铁相关内容
2021.10	发改委等十部门	《“十四五”全国清洁生产推行方案》	钢铁行业完成5.3亿吨钢铁产能超低排放改造、4.6亿吨焦化产能清洁生产改造
2021.10	国务院	《2030年前碳达峰行动方案》	深化钢铁行业供给侧结构性改革,严格执行产能置换,严禁新增产能,推进存量优化,淘汰落后产能。促进钢铁行业结构优化和清洁能源替代,大力推进非高炉炼铁技术示范,提升废钢资源回收利用水平,推行全废钢电炉工艺
2021.11	工信部	《“十四五”工业绿色发展规划》	到2025年,钢铁等重点行业碳排放总量控制取得阶段性成果。制定工业领域和钢铁等重点行业碳达峰实施方案,明确主要碳排放生产工序或子行业,提出降碳和碳达峰实施路径
2021.12	工信部、科学技术部、自然资源部	《“十四五”原材料工业发展规划》	明确到2025年,钢铁、有色金属、建材等重点行业能源消耗总量、碳排放总量控制取得阶段性成果。钢铁行业吨钢综合能耗降低2%
2022.01	国务院	《“十四五”节能减排综合工作方案》	以钢铁、有色金属等行业为重点,推进节能改造和污染物深度治理。到2025年,通过实施节能降碳行动,钢铁等重点行业产能和数据中心达到能效标杆水平的比例超过30%
2022.01	发改委、国家能源局	《“十四五”现代能源体系规划》	严格控制钢铁、化工、水泥等主要用煤行业煤炭消费
2022.01	工信部、发改委、生态环境部	《关于促进钢铁工业高质量发展的指导意见》	力争到2025年,钢铁工业基本形成布局结构合理、资源供应稳定、技术装备先进、质量品牌突出、智能化水平高、全球竞争力强、绿色低碳可持续的高质量发展格局。80%以上钢铁产能完成超低排放改造,吨钢综合能耗降低2%以上,确保2030年前碳达峰
2022.02	发改委、工信部、生态环境部、国家能源局	《高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南(2022年版)》	到2025年,钢铁行业炼铁、炼钢工序能效标杆水平以上产能比例达到30%,能效基准水平以下产能基本清零,行业节能降碳效果显著,绿色低碳发展能力大幅提高
2022.06	生态环境部等七部门	《减污降碳协同增效实施方案》	研究建立大气环境容量约束下的钢铁、焦化等行业去产能长效机制,逐步减少独立烧结、热轧企业数量。大力支持电炉短流程工艺发展。2025年和2030年,全国短流程炼钢占比分别提升至15%、20%以上
2022.06	工信部等六部门	《工业能效提升行动计划》	到2025年,钢铁、石化化工等行业重点产品能效达到国际先进水平,规模以上工业单位增加值能耗比2020年下降13.5%
2022.07	工信部、发改委、生态环境部	《工业领域碳达峰实施方案》	推动钢铁等行业企业实施节能、节水、节材、减污、降碳等系统性清洁生产改造

资料来源: 各部委官网,落基山研究所整理

图表2

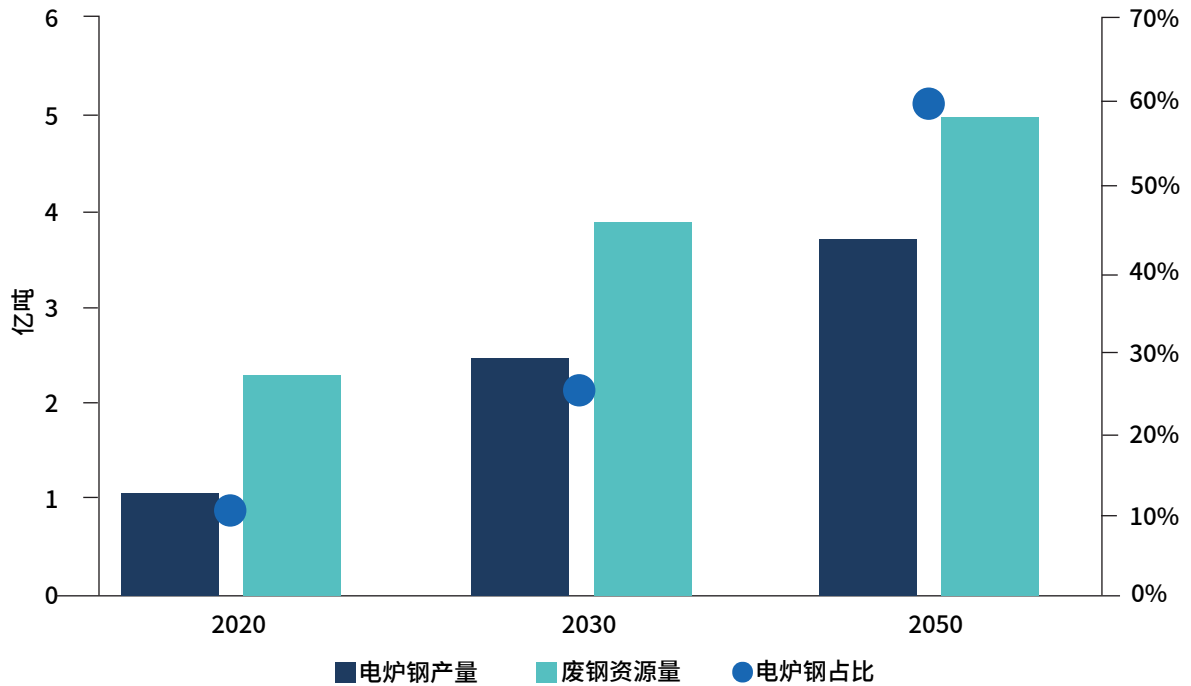
部分省份推动钢铁行业向短流程发展相关政策目标

省份	文件名	具体内容
吉林省	《吉林省碳达峰实施方案》	2025年和2030年,全省短流程炼钢占比分别提升至15%、20%以上
四川省	《关于开展电炉短流程炼钢高质量发展引领工程的实施方案(征求意见稿)》	目标到2025年电炉短流程炼钢产量占比达到40%,超低排放改造率达到100%
上海市	《上海市碳达峰实施方案》	加快发展以废钢为原料的电炉短流程工艺,到2025年,废钢比力争达到15%以上,到2030年,废钢比提升至30%
福建省	《福建省钢铁工业高质量发展实施意见》	力争到2025年,产业结构不断优化。持续推进工艺结构优化调整,电炉钢产量占全省钢产量比重达20%以上
浙江省	《浙江省推动钢铁行业高质量发展的行动方案》	力争到2025年,产业结构不断优化。电炉钢产量占粗钢总产量比例的40%以上
山东省	《山东省钢铁产业“十四五”发展规划》	力争“十四五”时期,短流程炼钢占比达到20%左右,废钢在钢铁原料中占比达到30%左右
辽宁省	《辽宁省“十四五”节能减排综合工作方案的通知》	鼓励将高炉—转炉长流程炼钢转型发展为电炉短流程炼钢
江西省	《江西省碳达峰实施方案》	开展非高炉炼铁技术示范,完善废钢资源回收利用体系,推进废钢铁利用产业一体化,积极发展全废钢冶炼
湖南省	《湖南省碳达峰实施方案》	大力发展短流程电炉炼钢和废钢炼钢,加快建立废钢资源循环利用体系
广西省	《广西“十四五”节能减排综合实施方案的通知》	鼓励将高炉—转炉长流程炼钢转型为电炉短流程炼钢

资料来源: 各省政府官网,落基山研究所整理

虽然中国钢铁产业已走过高速发展期，且即将进入总需求长期下降的发展阶段，但全社会钢铁蓄积量仍不断增长，这为短流程生产技术所需的废钢供应能力的持续提升创造了条件。伴随着我国基础设施建设速度逐步放缓，预计全国钢铁需求量在 2025 年左右达峰并进入下降阶段。但 2020 年，我国人均粗钢消费量约 730 千克，人均钢铁蓄积量接近 8.3 吨，已经超过了欧美等国的历史消费量峰值³。伴随着早期进入消费环节的钢铁逐渐达到使用年限，将加速释放出越来越多的废钢资源。预计中国社会废钢资源产生量 2030 年达到 4.0 亿吨，2050 年达到 5.0 亿吨，推动短流程电炉钢产量占比从 2020 年的 10% 左右提高到 2050 年的 60% 左右(图表 3)²。

图表3 可供钢铁行业的废钢供给量、电炉钢产量和占比变化

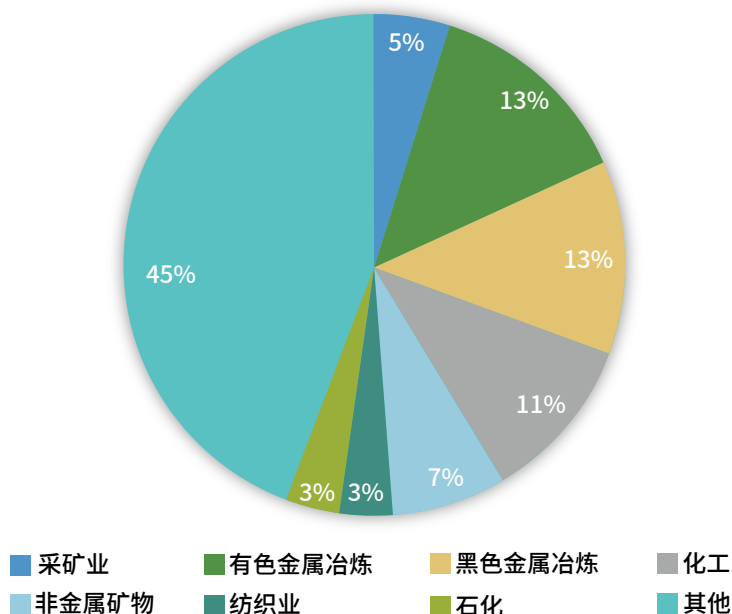


数据来源：落基山研究所

1.2 钢铁柔性负荷助力新型电力系统灵活性提升

“十四五”期间，随着双碳战略推进和新型电力系统建设，电力供需面临新形势，夏季冬季电力负荷“双高峰”特征更加显著，新能源并网规模不断扩大，局部地区电力供需矛盾依然突出，电力供需平衡压力和新能源消纳困难叠加并长期存在，亟需进一步发挥电力需求响应在保平衡、促消纳中的重要作用⁴。钢铁工业负荷具有基数大、潜力高、激励敏感度高等优点。一方面，新的“两个细则”将提供辅助服务的主体范围扩大到包括自备电厂、传统高载能工业负荷、工商业可中断负荷等，推动挖掘供需两侧的灵活调节能力。另一方面，工业负荷通过参与电网互动消纳新能源发电，降低用电成本、促进产业低碳绿色转型，自身具有强烈意愿。新的政策文件及能源互联网与工业互联网的融合发展为工业负荷资源充分参与电网互动提供了政策支撑和技术支撑。目前，在钢铁生产的总耗能中，电力消耗约占总能耗的 20 ~ 30%¹，2021 年我国钢铁行业电力消费约占全国总工业用电量的 13%，为工业电力需求大户(图表 4)。而随着未来钢铁生产逐步向短流程转移，以电弧炉为主的生产工艺将使得钢铁行业耗电量进一步增大⁵。因此，钢铁行业将逐渐成为电力系统需求侧灵活性的重要潜在来源。

图表4 2021年不同工业用电量占比



数据来源：中国能源统计年鉴,落基山研究所

在电力市场机制逐步完善的背景下，需求侧灵活性挖掘与高效利用将会为钢铁行业带来新的降本增效机遇。近年来，由于全国钢铁需求量收紧，叠加燃料价格上涨等因素，钢铁行业广泛开展降本增效措施以提高盈利能力。据国家统计局数据，2022 年我国粗钢产量已连续两年下降，黑色金属冶炼和压延加工业实现利润总额 365.5 亿元，是自 2003 年来的新低⁶。而工业企业生产运作与综合用能过程的联合优化技术的发展，可帮助钢铁企业参考分时电价或现货市场的价格信号来调整用电负荷，从而进一步降低用电成本、提升企业效益。同时，伴随着国家发展改革委与国家能源局《电力需求侧管理办法(2023 年版)》、《电力负荷管理办法(2023 年版)》等新政策的出台，传统高耗能工业负荷等能够响应调度指令的用户可调节负荷已纳入为电力辅助服务的提供主体，钢铁企业电力负荷的灵活调节能力可通过参与有偿电力辅助服务或专门的需求响应机制来获取补贴。这些激励也将为钢铁行业开发需求侧灵活性带来新的机遇。

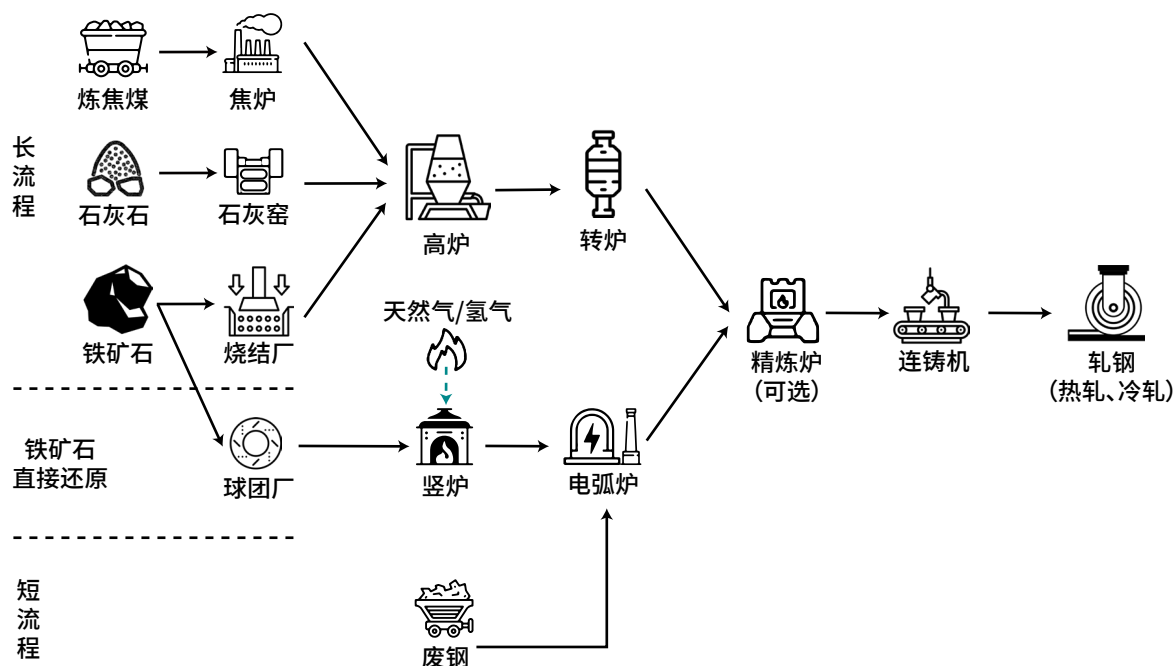
此外，工业互联网技术的快速发展，为钢铁行业开发需求侧灵活性提供了重要技术支撑。近年来，中国钢铁行业正利用大数据、云计算、工业互联网等信息技术赋能钢铁行业数字化转型升级，提出了“超级自动化、极致柔性”、“极致能效”等行业发展目标。据《2022 钢铁行业经济运行报告》介绍，中国宝武启动钢铁工业大脑战略计划，打造了一批大数据、人工智能与钢铁深度融合的典型示范项目；鞍钢基于工业互联网平台的全流程数字孪生综合应用，打造以数字孪生和信息物理系统为核心的钢铁数字化制造新模式；首钢基于专网 5G 技术在“灯塔”工厂建设中达到全覆盖，实现工序间互联互通、天车智能操控；柳钢自主创新研发了“转炉看火”工业机器视觉决策模型，引领柳钢进入人工智能新时代⁷。以上这些技术的实现，一方面使得一些精确度要求高的负荷调节过程能够得以实现，另一方面能够更好地与外部系统协同，例如与电网调度形成实时互动，及时根据电网信息调节生产负荷。伴随着新型电力系统源网荷储平衡能力灵活性的提升需求，钢铁行业发展电力需求响应能力具有必要性，同时新型数智化技术的融合应用和需求响应市场的潜在效益也为其提供了技术和市场基础。

二、钢铁生产工艺特征及负荷调节潜力

2.1 钢铁生产工艺流程

钢铁工艺被认为是最复杂的工业之一，目前主要有长流程和短流程两种生产工艺。其中，长流程的生产从矿石原料开始，主要包括铁矿、炼焦煤和石灰石。铁矿经过选矿工序先选成铁精矿，然后制成烧结矿或球团矿；炼焦煤经过洗煤、配煤后经过焦炉干馏后得到焦炭；石灰石可直接用于高炉炼铁的造渣熔剂。然后将以上三种原料放入炼铁高炉冶炼得到液态铁水，再经过氧气转炉吹炼配以精炼炉得到合格钢水。钢水经过连铸成为钢坯或钢锭，再经过轧制成为钢材。此外，长流程中还有一种直接还原铁工艺，即将精铁矿制成的球团矿在竖炉中直接还原成金属铁，后续再送入电弧炉中炼钢。由于其应用程度较低，在现有灵活性研究中的关注也较低，本文后续的灵活性讨论暂不涉及该方法。短流程炼钢原材料是废钢，经加工破碎或剪切、打包后装入电弧炉中，利用石墨电极与铁料之间产生电弧所发生的热量来熔炼铁料，并配以精炼炉完成脱气、调成分、调温度、去夹杂等功能，得到合格钢水，后续工艺与长流程基本一致。其中，长流程生产过程需要以煤作为原料，电力消耗仅占总能耗的 20%-30%；而短流程只需消耗电力，并且可以通过精确调节电流大小来控制炉内温度，可长时间精确控制钢水温度，工艺柔性强而无需额外燃气作为燃料。两类工艺具体生产过程如图表 5 所示。

图表5 钢铁长流程和短流程生产流程示意图



资料来源：落基山研究所

2.2 钢铁生产负荷特征

2.2.1 负荷分类特征

从负荷功能来看，钢铁企业生产过程负荷可分为主要生产负荷、辅助生产负荷、安全保障负荷和非生产性负荷。其中，主要生产负荷是指电炉、精炼炉、高炉等主要生产设备维持运行所需负荷，占总负荷 65% 以上；辅助生产负荷是指各分厂水泵、传动液压泵、棒材及线材风机、电炉厂风机等辅助生产设备维持运行所需负荷；安全保障负荷是指废气、粉尘回收吸入风机、消防及治安用电设备等所需负荷。而非生产性负荷则包括了办公用电、办公照明等生活用电，突然失电有可能会造成人员的伤害或财产的损失。各类型负荷占比及其对应的主要设备如图表 6 所示。

图表6 钢铁行业分功能负荷类型及其占比

负荷类型		负荷占比	主要设备
生产性负荷	主要生产负荷	65%-75%	电炉、精炼炉、制氧机、高炉、转炉、烧结机、轧钢、棒材和线材生产线
	辅助生产负荷	5%-10%	各分厂水泵、传动液压泵、棒材及线材风机、电炉厂风机、行车、车间通风轴流风机
	安全保障负荷	10%-15%	废气、粉尘回收吸入风机、循环冷却水泵、消防及治安用电设备
非生产性负荷		2%-5%	办公用电、生活用电等

资料来源：国网电力科学研究院⁸，中国电力科学研究院，落基山研究所

从负荷变化程度来看，钢铁生产负荷可分为持续型冲击负荷、间歇型冲击负荷和平稳型负荷，各生产环节所对应的负荷类型如图表 7 所示⁹。其中，从原料处理的烧结到炼铁炼钢过程负荷较为稳定，只有在检修时才会有显著变动。轧制过程则属于持续型冲击负荷，而精炼炉的过程属于间歇型冲击负荷。各类负荷对应的负荷变动曲线参考下节。

图表7 分特征的负荷类型及其对应环节

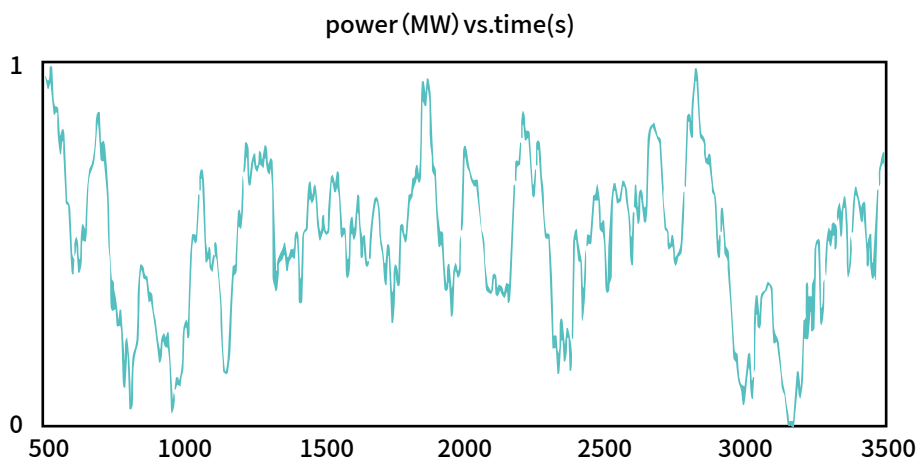
类型	主要生产工艺	负荷性质
持续型冲击负荷	热轧	轧机负荷为持续型冲击负荷，辅助负荷为稳定负荷
	厚板	
	中板	
间歇型冲击负荷	精炼炉	间歇型冲击负荷时间根据生产计划随时变化
平稳型负荷	烧结	非检修时负荷稳定
	炼铁	
	炼钢	

资料来源：鞍钢股份⁹，中国电力科学研究院，落基山研究所

2.2.2 负荷曲线特征

钢铁行业属于典型的高耗能行业，一般采用三班 24h 连续工作制，全天负荷波动不大，没有明显的波峰和波谷，连续性生产设备较多，例如烧结机、焦炉、高炉等，除检修时间外通常满负荷运行，除检修期外负荷率长期维持高位。负荷率较高、对电能质量要求较高。以某钢铁企业为例，其典型日总负荷曲线波动如图表 8 所示。

图表8 某钢铁企业典型负荷曲线(归一化处理后)

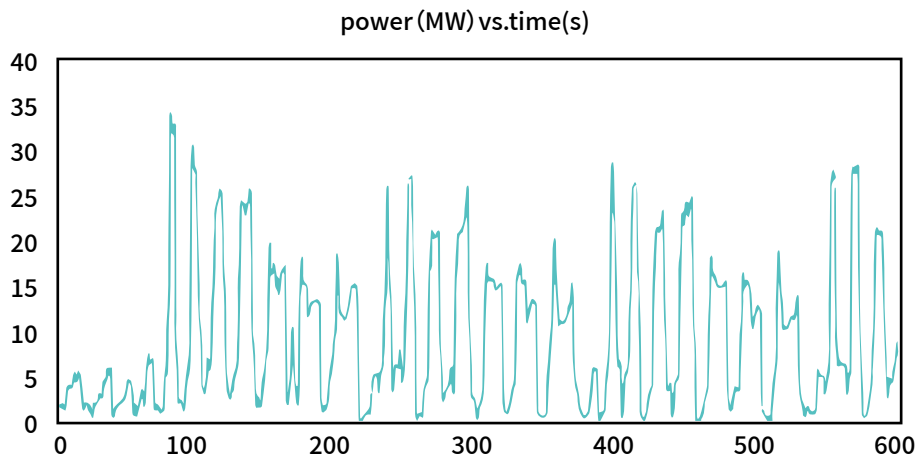


数据来源：东北大学,中国电力科学研究院

分环节来看，不同生产工艺对应的负荷波动情况有所差异。

- 轧钢生产线：轧钢负荷占总负荷比例大约 15%，属于电动机的一种，其任务是完成钢坯的塑形。轧钢生产线是典型的冲击型负荷，当钢坯进入轧机时，轧机功率会急剧上升，当钢坯离开轧机时，轧机功率急剧下降。负荷曲线如图表 9 所示。由于轧钢生产线属于离散型生产过程，且负荷的大小与受到轧制的钢板的型号影响显著。在需求响应期间，根据负荷削峰填谷调节的不同需求，可以利用轧钢负荷的功率波动性，将轧钢生产线的生产 / 停止时段编排为特定预案，完成电网指令。具体操作为根据负荷调节需求，提前安排钢板轧制的排产计划，实现负荷曲线的提前整形。

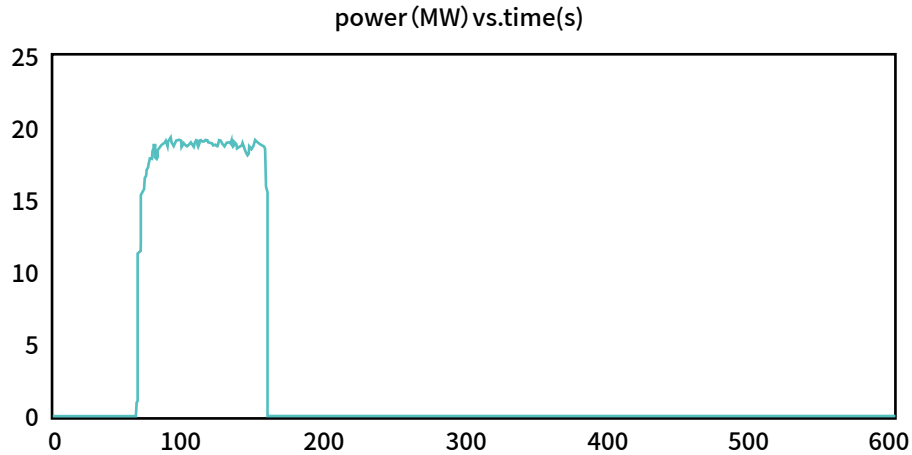
图表9 轧钢生产线负荷特性曲线



数据来源：东北大学,中国电力科学研究院

- 精炼炉：精炼任务的主要设备钢包炉占生产总能耗的比重极大。精炼炉在精炼过程中通过电极下放产生电弧加热炉内钢水进行温度补偿或升温，其精炼过程对应的功率如图表 10 所示。精炼任务中有数次加料(如铜、镍、硅、锰等)微调钢水成分的过程。因各加料阶段温度要求不同，通常升温一段时间后停炉测温，若温度达标，此时加入金属料并恢复钢包炉电极送电使其继续升温。该过程重复数次，直至钢水产出成分及温度合格。

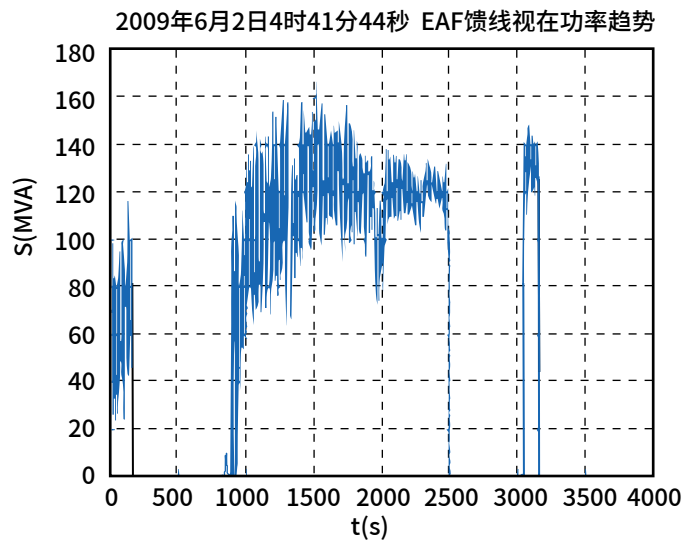
图表10 精炼炉的负荷曲线



数据来源：东北大学,中国电力科学研究院

- 电弧炉：电弧炉负荷占整体负荷比例大约 40%，电弧炉通电后，操作人员缓缓下放电极，直至电极与炉料之间的电位差击穿空气形成电弧，电弧炉功率会在数秒内迅速增加。电弧炉通常以某一恒定挡位功率运行，由于炉内温度、炉料状态等变化因素，其功率含有大量高频谐波，呈现出“带状”功率的特性。当电弧炉完成加热任务后，操作人员将电极缓缓上抬，待电弧熄灭后，中断送电，整个停炉过程通常在数秒内完成。电弧炉在完成加热任务后，会由操作人员中断送电，这部分的可调负荷间隙、周期性取决于前序工艺的来料速度和后序工艺的生产进度，因此可将电弧炉前后工艺串联成完整的生产预案，在需求响应期间，通过调整电弧炉前后生产排序，完成电网指令。

图表11 电弧炉炼钢生产负荷曲线(150T交流电弧炉)



数据来源：中国宝武设计院,中国电力科学研究院

2.3 钢铁需求侧灵活性来源

钢铁行业需求侧灵活性主要来源于两大类,即生产过程中的负荷调节和自备电厂或副产气发电替代电网发电,其中,负荷调节可进一步分为可中断负荷、可削减负荷和可转移负荷三类。

2.3.1 可中断负荷调节

可中断负荷调节是指直接切断负荷需求以提供需求侧灵活性。这里的可中断是指短时间的中断,在一段时间后会恢复正常生产运行,而非彻底停止生产。事实上,钢铁行业作为流程型生产工业,其生产过程存在严格的工序限制,设备启动与运行时间按照生产安排提前确定,一旦工作不可随意停电。但在某些情况下,较短时间内的负荷中断不会显著影响生产过程,因而成为潜在的需求侧灵活性来源。钢铁短流程生产中的电弧炉,便具备这类调节潜力。在短流程生产过程中,通过电弧炉熔化废钢是最为主要的耗电过程,占总用电量约40%,是所有生产负荷中最具调节潜力的设备。当企业需要进行需求响应时,可以立即中断电弧炉的运行,以此提供灵活性。然而,当中断时间超过30min时,之前所熔化的废金属会重新开始冷却,此时需尽快恢复生产,否则需要重新开始熔化废钢。废钢的熔化时间约45min,重新充填炉的还需15min,这会带来额外的时间和经济成本¹⁰。因此,电弧炉所提供的可中断负荷灵活性,响应时间通常最多可持续半个小时。此外,多台电弧炉同时启停容易对电网产生较大冲击,且对邻近发电机寿命及安全性产生负面影响¹¹。

2.3.2 可削减负荷调节

可削减负荷调节是指在需求响应期间减少部分功率,以满足电网的削峰需求。在短流程生产过程中,电弧炉可以通过此方式来提供灵活性。由于电弧炉由变压器供电,通过调整变压器分接头的位置可快速灵活地改变电弧炉功率¹¹,可调节的范围取决于电弧炉的耗电率和避免钢水冷却的最小功率。但总体而言,电弧炉的负荷需求是一个可控的过程,具备调节潜力¹²。除了电弧炉之外,精炼炉、连铸机等生产设备能在不影响生产的条件下、在一定范围内进行功率调整¹³。这些除电弧炉以外的设备调节对于长流程工艺同样适用。

2.3.3 可转移负荷调节

可转移负荷调节是指通过转移生产时间来提供灵活性,这种负荷变化只进行用电的转移,而总耗能不变。基于分时电价的生产班序调整,或者日内将白天高峰时段用电负荷转移至夜间低谷时段以实现错峰,均是常见的提供需求侧灵活性的调节方式。例如,热轧工艺属于连续型冲击负荷,电耗大且可调度性强,根据分时电价或现货价格调整整个生产计划,可以帮助电网有效降低负荷高峰、填补负荷低谷¹⁴。然而在当前各生产环节强耦合的背景下,进行负荷调整势必影响整个生产效率。由于生产各工序的复杂联系,优化建模仍存在一定困难,使得轧钢过程暂无法成为主要的负荷调节方式。

2.3.4 自备电厂或副产气发电

除了通过直接的负荷调节方式提供需求侧灵活性之外,企业也可通过自备电厂或副产气发电来替代部分电网供电,来间接实现负荷调节⁵。一方面,许多钢铁企业通常会自备小型发电厂或者热电联产工厂提供电力;另一方面,对于长流程生产企业,炼铁炼钢过程中的副产煤气、余热余压也可用于发电,这将有助于提升企业总体的能源效率,同时减少对电网的供电需求,体现了负荷的灵活性调节能力。自备电厂的灵活性潜力取决于电厂副产气和余热余压的存储能力⁵。然而,现有大部分自备电厂为煤电厂,其参与负荷调节会额外产生碳排放,影响企业的节能减排效果。

2.4 钢铁企业各生产环节灵活性来源及潜力

钢铁生产环节中设备众多,具有较高的调控潜力,图表 12 展示了各环节主要设备的负荷占比、调控时间和灵活性潜力。结合各生产工艺及设备的负荷特性分析,钢铁行业可控负荷主要分为生产性负荷和辅助生产性负荷。生产性负荷调控时间和自身设备特性有关,其中电炉负荷占比最大,约为 40%,由于生产负荷连续性,所以调控方式都为自控,这部分负荷中有 25% 可实现调节,占全部负荷的 10% 左右;负荷占比 15% 的轧钢生产也能通过负荷调节提供 5% 左右的负荷调节空间。辅助生产性负荷包含办公照明、分体及中央空调系统和生活用电,占比较小,调控方式为直控(柔性),准备和恢复时间可以达到秒级,响应时间为 0.5-2h。综合典型用户生产数据分析,钢铁行业在生产条件允许的情况下,综合调控负荷约占到总生产负荷的 14%~27%。

图表12 钢铁生产各环节负荷调控潜力汇总

负荷类别	主要设备	负荷占比	调控方式	调控时间			可调负荷占比	
				准备时间	响应时长	恢复投运时间	个体占比	合计
主要生产性负荷	电炉	40%	开关	0.5h	0.5h	0.5h	25%~50%	14%~27%
				s min 1h 2h 4h 8h	s min 1h 2h 4h 8h	s min 1h 2h 4h 8h		
	精炼炉	3%	开关	0.5h	0.5h	0.5h	30%~50%	
				s min 1h 2h 4h 8h	s min 1h 2h 4h 8h	s min 1h 2h 4h 8h		
	制氧机	2%	开关	10分	0.5-1h	10分	1%~10%	
				s min 1h 2h 4h 8h	s min 1h 2h 4h 8h	s min 1h 2h 4h 8h		
轧钢生产线	15%	开关 / 档位	每班次	小时级	每班次	5%~10%		
			s min 1h 2h 4h 8h	s min 1h 2h 4h 8h	s min 1h 2h 4h 8h			
棒材生产线	5%	开关 / 档位	每班次	小时级	每班次	2%~10%		
			s min 1h 2h 4h 8h	s min 1h 2h 4h 8h	s min 1h 2h 4h 8h			
线材生产线	5%	开关 / 档位	每班次	小时级	每班次	2%~10%		
			s min 1h 2h 4h 8h	s min 1h 2h 4h 8h	s min 1h 2h 4h 8h			
非生产性负荷	办公照明	1%	开关	秒级	0.5-2h	秒级	0%~100%	
				s min 1h 2h 4h 8h	s min 1h 2h 4h 8h	s min 1h 2h 4h 8h		
	分体及中央空调系统	1%	开关 / 温度	秒级	0.5-2h	秒级	0%~100%	
s min 1h 2h 4h 8h				s min 1h 2h 4h 8h	s min 1h 2h 4h 8h			
生活用电	1%	开关	秒级	0.5-2h	秒级	0%~100%		
			s min 1h 2h 4h 8h	s min 1h 2h 4h 8h	s min 1h 2h 4h 8h			

数据来源: 中国电力科学研究院,落基山研究所

三、全球钢铁需求侧灵活性实践

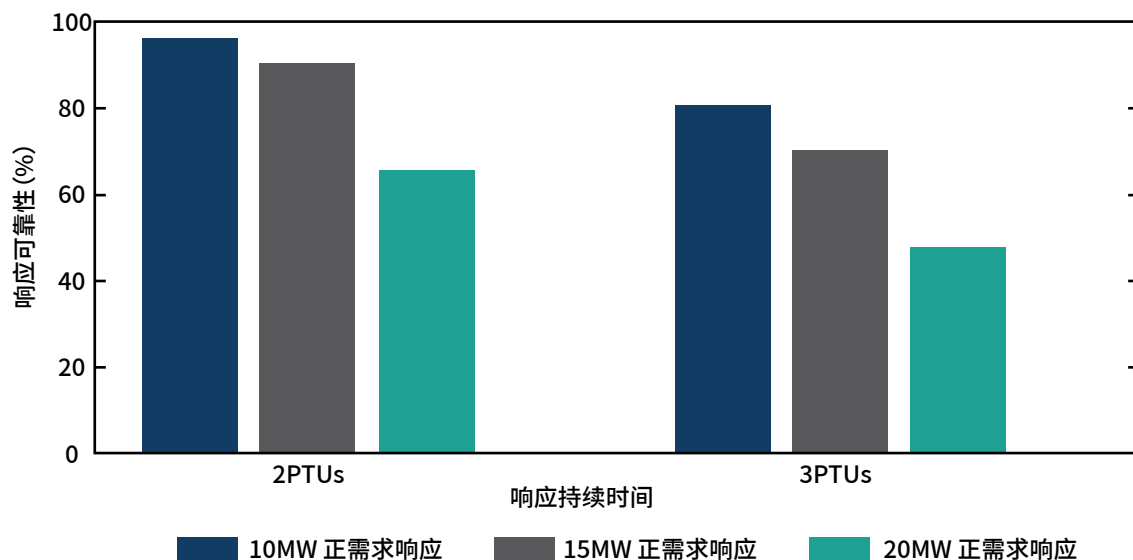
在欧洲，钢铁行业的需求侧灵活性已被广泛研究，并被逐步纳入到欧洲低碳电力系统的规划建设中。作为欧盟最大的钢铁生产国，德国钢铁行业的需求响应能力达 2.9GW，约占全国最大负荷的 3.8%。因此，钢铁生产的电力需求侧灵活性潜力挖掘将极大促进其雄心勃勃的电力部门脱碳目标的实现。此外，荷兰的金属工业也整体具备约 0.6GW 的需求响应能力，约全国最大负荷的 3.0%¹⁵。对于中国而言，钢铁企业的需求侧灵活性探讨仍在初步阶段，相关优化模型尚不成熟，仅有小部分企业有所实践应用。本节将分别从长流程副产气供电灵活性和短流程电弧炉调节灵活性两个主要方面给出中国及国外相关实践案例。

3.1 荷兰塔塔长流程钢铁厂需求响应实践

欧洲西北部的可再生能源发电占比预计在未来将大幅增加，这进一步增加了电力供应的不确定性，从而提升了对电力需求侧灵活性的关注。作为主要的电力用户和需求侧灵活性潜力较大的工业企业，位于荷兰艾默伊登的塔塔钢铁厂被作为紧急型需求响应(Emergency Capacity Program)的主要实践目标，以探讨其作为电网调频备用资源的潜力。

作为长流程生产工艺企业，塔塔钢铁厂可以通过停止电力密集型生产流程或调整副产气(WAG)发电量来实现为电网提供需求侧灵活性¹⁶。在本案例中，WAG 会出现在钢铁制造过程中的不同阶段，塔塔钢铁厂通过调整 WAG 发电量以减少(或增加)对电网的供电需求，来实现正向(或负向)的需求响应能力。而这种需求响应潜力也受到包括总生产电力需求、发电机组的爬坡速率以及 WAG 储气装置容量等约束限制。实验结果表明，在不影响生产进度的前提下，通过增加 WAG 发电以提供正向需求响应的持续时间最多不超过 45min(3 个程序时间单位 PTU, 每个 PTU 为 15min)，而响应持续时间也决定了需求响应水平和响应可靠性(图表 13)¹⁶。例如，在响应持续时间为 1PTU 时，塔塔钢铁厂可以提供 20MW 的正向响应能力，响应可靠性高达 97%；而响应持续时间延长到 2PTUs 时，则仅能以 65% 的可靠性提供 20MW 的正向响应能力，或者以 95% 的可靠性提供 10MW 的正向响应能力；如果延长到 3PTUs，20MW 正向响应能力的可靠性仅为 47%。

图表13 不同响应持续时间对应的需求响应水平和响应可靠性



数据来源：Tata 钢铁¹⁵落基山研究所

3.2 德国短流程钢厂灵活性潜力评估与仿真

Serpe 等人针对 2019 年德国输电网络，研究了不同电价水平下短流程电炉炼钢厂的需求侧灵活性对实现电网稳定的作用。从宏观层面来看，提高钢铁企业的需求侧灵活性，是为了应对可再生能源发电带来的系统灵活性需求，同时减少高成本和高排放的传统火电厂发电。研究所采用的输电网络由 337 条主要网络线路组成，包含小时级分辨率的传统和可再生能源发电数据。图表 14 显示了德国各地短流程钢厂的位置(以黑点表示)，绿色和深蓝色同心圆分别表示每个钢厂的最大和最小可用灵活性¹⁷。

图表14 德国电弧炉钢厂地理分布及其灵活性潜力



资料来源：德国可持续系统工程研究院¹⁷，落基山研究所

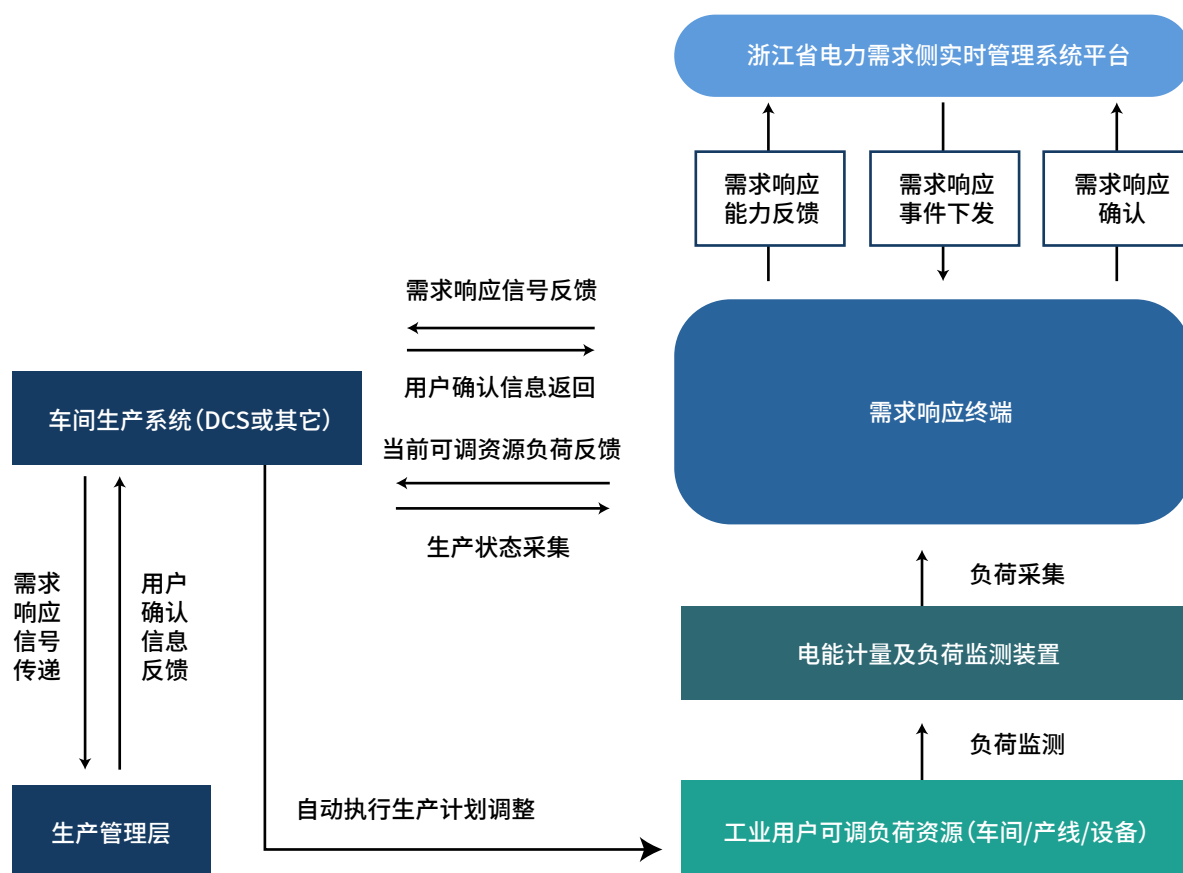
从模拟结果来看，钢铁厂需求侧灵活性的参与可以使得传统火电厂发电量下降 12.34%，可再生能源弃风量下降 1.25%，共减少 7% 的电力系统总排放。由于这种需求侧灵活性无需额外成本的投入，其在优化模型中会被优先考虑，进而成为实现电网平衡的有吸引力的选择，这也将进一步促进德国钢铁行业的需求侧灵活性实践。

3.3 浙江万泰特钢公司参与电网供需互动

浙江万泰特钢有限公司通过主动开展需求响应，实现对公司可调节负荷资源的用电负荷以及运行状态的实时监测，能准确测算出用户的实时需求响应能力，在浙江省电力需求侧实时管理系统平台和电力用户间建立了需求响应交互窗口，为企业参与电力实时需求响应提供了环境条件，对缓解电网运行压力、保障工业生产、优化能源配置具有十分重要的意义。

具体需求响应流程如下：(1) 需求响应终端持续监测工业用户可调节负荷资源（车间 / 产线 / 设备）的运行状态及负荷数据，实时测算需求响应能力并上报浙江省电力需求侧实时管理系统平台；(2) 在电网启动需求响应时，平台根据上报的需求响应能力，智能分配负荷调控指标，通过需求响应终端下发需求响应事件至用户 DCS/PLC 系统以及用户交互装置，并同时短信通知电力用户；(3) 用户对需求响应事件进行决策，并通过交互界面反馈平台决策结果，若选择参与则通过 DCS/PLC 系统自动执行生产计划调整方案对设备进行负荷调控。

图表15 浙江省电力实时需求响应基本流程



资料来源：国网浙江省电力有限公司，中国电力科学研究院

在不影响生产进度及产品品质的情况下，炼钢工艺中生产负荷仅有电弧炉类负荷可通过短时间中断、转移的方式来响应系统需求，而其他负荷或与生产紧密相关，或功率规模太小，不具备需求侧响应的能力；轧钢工艺生产线通过软停机或待机的方式，降低自身负荷，完成负荷调控。生产辅助的设备负荷特性为连续性生产不可中断，不具备调节能力。浙江万泰特钢有限公司设备基本信息如图表 16 所示。

图表16 万泰特钢主要用电设备的基本信息

工艺环节	产线/车间	设备名称 (含数量)	总运行 功率(kW)	设备用途 (属性)	设备 负荷特性	工艺环 节特性	正常工作时段 XX:XX-XX:XX	纳入可调节 负荷资源池
炼钢	电炉	电炉	31000	生产工艺	可调节	连续性生产	00:00-24:00	是
	电炉	电炉	34000	生产工艺	可调节	连续性生产	00:00-24:00	是
	电弧炉	电弧炉	9550	生产工艺	可调节	连续性生产	00:00-24:00	是
轧钢	轧钢高棒 1	轧钢高棒产线 1	4200	生产工艺	延迟关停	连续性生产	00:00-24:00	是
	轧钢大棒 1	轧钢大棒产线 1	4180	生产工艺	延迟关停	连续性生产	00:00-24:00	是
	轧钢高棒 2	轧钢高棒产线 2	4100	生产工艺	延迟关停	连续性生产	00:00-24:00	是
	轧钢大棒 2	轧钢大棒产线 2	3200	生产工艺	延迟关停	连续性生产	00:00-24:00	是
生产辅助	制氧机	制氧机	2440	生产辅助	不可中断	连续性生产	00:00-24:00	否
	环保(除尘等)	环保(除尘等)	1300	生产辅助	不可中断	连续性生产	00:00-24:00	否
	冷却系统	冷却系统	2150	生产辅助	不可中断	连续性生产	00:00-24:00	否

资料来源：浙江万泰特钢有限公司,国网浙江省电力有限公司

根据万泰特钢提供的可调节负荷资源日常生产调度信息，通过调整生产安排策略，在典型生产日参与需求响应的最大可调节容量为 33303.9kW，其中炼钢环节的电炉和精炼炉可通过调频降速、降低负载贡献 19218.9kW 的可削减容量，轧钢环节可通过延迟关停、优化排产贡献 14085kW 的可转移容量，调节过程耗时最长为 20 分钟，响应可持续时长不小于 60 分钟(图表 17)。

图表17

可调节负荷资源的最大需求响应能力

设备情况						调节措施			需求响应能力			
	产线/车间	设备名称/类型	额定功率(kW)	运数/总数	负载率	调节策略	削减比例	调节途径	资源编号	可调节/削减容量(kW)	调节过程耗时(分钟)	响应可持续时长(分钟)
工艺环节	电炉305	电炉	45000	1/1	69%	调频降速	26%	DCS系统	1	7984.3	20	60
	电炉306	电炉	45000	1/1	76%	调频降速	26%	DCS系统	2	8794.3	20	60
	精炼炉307	电弧炉	13000	1/1	73%	调频降速	26%	DCS系统	3	2440.3	20	60
轧钢	轧钢高棒1	轧钢高棒产线1	5500	1/1	76%	延迟关停	90%	DCS系统	4	3762	20	60
	轧钢大棒1	轧钢大棒产线1	6500	1/1	64%	延迟关停	90%	DCS系统	5	3744	20	60
	轧钢高棒2	轧钢高棒产线2	5500	1/1	75%	延迟关停	90%	DCS系统	6	3712.5	20	60
	轧钢大棒2	轧钢大棒产线2	6500	1/1	49%	延迟关停	90%	DCS系统	7	2866.5	20	60
最大可调节(削减)容量									33303.9kW			

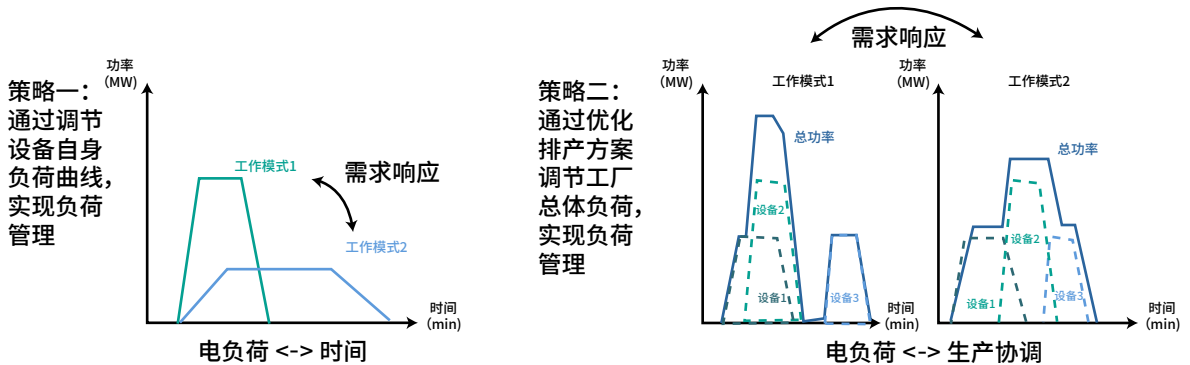
资料来源：浙江万泰特钢有限公司,国网浙江省电力有限公司

3.4 华东某短流程钢铁企业负荷管理实践

目前，腾讯 SSV 碳中和实验室联合一家短流程钢铁生产企业，应用数字化技术赋能企业通过设备灵活调节、优化排产等策略释放需求侧灵活性，帮助企业参与电网调峰调频响应。如图表 18 所示，策略一是企业通过调节设备本身的负荷曲线实现负荷管理，例如通过一定程度上降低电炉的功率、但同时延长设备运作时间，以保证电炉总热量不变；策略二是通过优化排产方案调节工厂总体负荷曲线，但要加强各个设备以及生产组织之间的协同，保证全天总用电量和总产量不变。

图表18

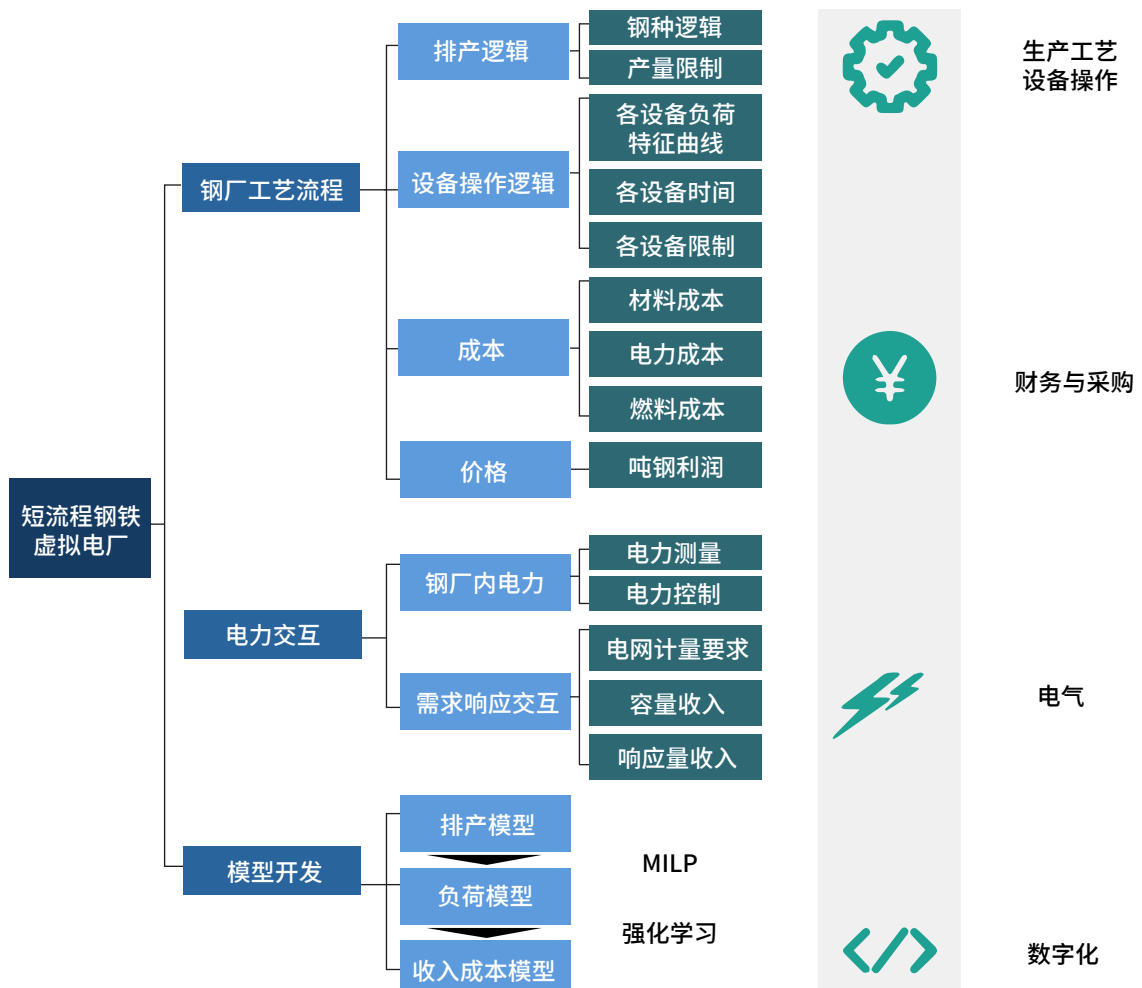
短流程钢铁企业两种实现负荷调节的策略



资料来源：腾讯碳中和实验室

为实现最优控制，实践团队打造了钢厂工艺流程、电力交互、模型开发三大模块，协调生产、财务与采购、电气和数字化四大部门，从而实现将钢铁工业物理生产过程转化成数字化模型(图表 19)。该方法的核心在于需要深度了解企业生产的物理约束，综合考虑企业电力需求特征和电力市场参与机遇，最大化生产效益，以根据模型结果指导排产和负荷调节。

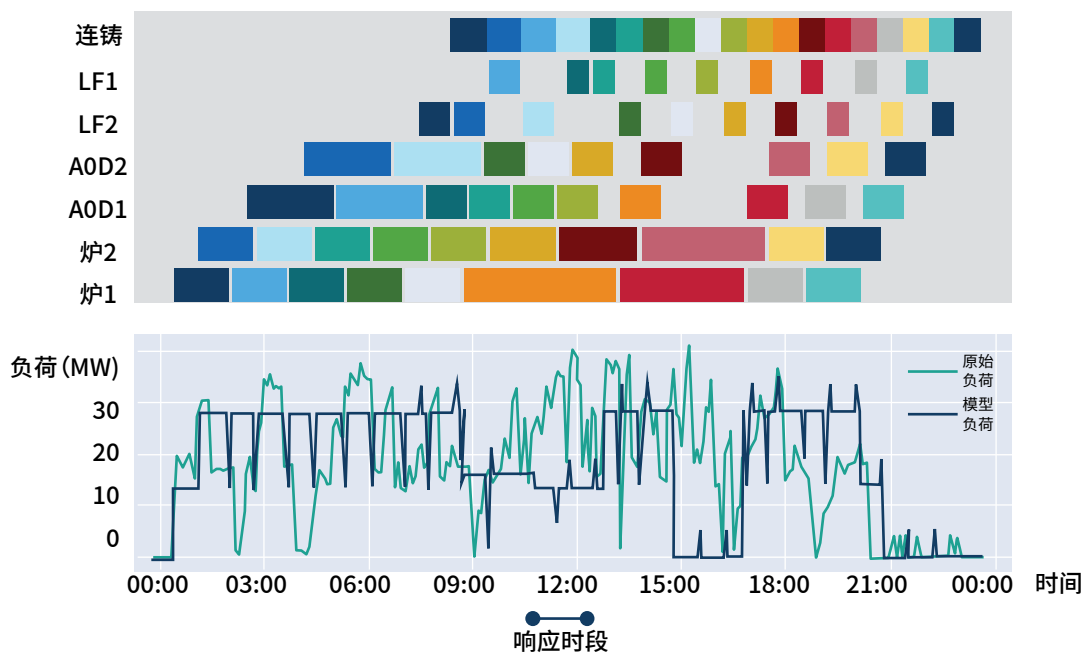
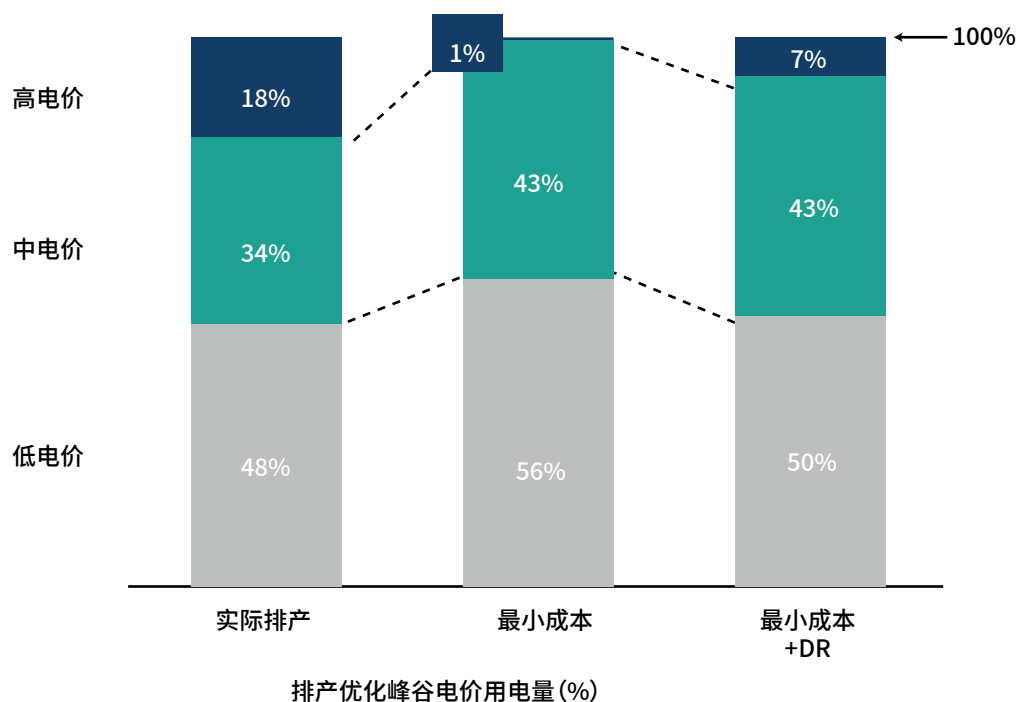
图表19 腾讯碳中和实验室钢铁虚拟电厂项目框架图



资料来源：腾讯碳中和实验室

根据短流程炼钢的工艺流程，该企业实现需求响应将以保证连铸工艺的连续性为主要约束、以调节电炉的生产节奏和负荷功率为主要灵活性手段。图表 20 上图表示通过排产优化实现节约用电成本，通过降低高电价时段的用电量、提高中电价和低电价时段用电量，当日生产 19 炉用电成本降低了 11.7%，节约了 3.1 万元。图表 20 下图进一步展示了通过设备负荷管理，可在 11-13 点的时段提供负荷下调的灵活性，这将在排产优化的基础上进一步降低用电成本 1.1 万元，同时额外获得需求响应服务收益 8.4 万元。

图表20 负荷管理实践结果



资料来源：腾讯碳中和实验室

注：右上图每种颜色分别代表一个生产批次，而同一种颜色的小色块分别代表该时间段下对应的生产环节(设备)，把同一时刻所有色块对应的设备负荷累加起来，即得到右下图的负荷曲线(对应着模型负荷曲线)

四、钢铁需求侧灵活性挖掘的挑战与机遇

尽管钢铁行业具备较大的需求侧灵活性潜力，其实际落地仍然面临着来自技术和经济成本等多方面的挑战。本节将重点讨论钢铁行业挖掘需求侧灵活性当前所面临的技术挑战，以及潜在的发挥需求侧灵活性价值的市场机遇。

4.1 技术层面

4.1.1 生产过程的负荷建模、调节能力预测及协同优化

由于钢铁生产的复杂性，其工艺过程往往涉及多个串联或并联的流程，使得整个生产过程的物料转换、设备运行与电力需求之间呈现耦合伴生、相互依存的复杂关系。因此，当进行设备负荷调节或者整体排产计划调整时，需要考虑设备之间的协同（各设备负荷和产生的自身变化和相互关系）、生产组织的协同（需要平衡设备运行和人力排产）以及电网的调度控制（电网按不同时间尺度通知 / 控制企业，企业判断成本效益）等多方面约束。具体而言，需要实时监测各核心生产设备的负荷曲线，同时考虑不同生产设备之间的耦合关系，发展可靠调节能力分析预测技术，从而实现负荷的动态、精准量化。这将更加有效地挖掘钢铁需求侧资源的可调潜力。其次，将企业的其他生产运营成本和潜在收益等关系和约束纳入负荷调节模型中，以最大化效益等目标展开协同优化。此外，还需要建立多时间尺度的参与电网互动技术，以确保需求侧灵活性能够得以实施。

4.1.2 钢铁生产过程解耦以发挥负荷调节潜力

由于钢铁行业生产特征相关耦合约束，许多环节的需求侧灵活性潜力难以得到充分发挥¹⁴；因此，除了从数字化和模型刻画层面进行技术攻克之外，也要考虑钢铁实际生产过程的解耦。这将极大减少生产过程的系统性约束，进而发挥各环节的需求侧灵活性潜能。例如，生产作业的时间约束和质量约束使得热轧过程的负荷调节极为复杂¹⁵。如果未来热轧环节能与前序的电弧炉生产和连铸环节解耦，则会减少运作时间等约束，使得整个轧钢过程离散化，负荷调节过程更为独立。这种解耦也将进一步发挥以往难以实施的轧钢环节的负荷调节潜力。

4.2 市场层面

技术的发展协助企业探索了需求侧灵活性的理论潜力，而有效的市场机制则会进一步提高企业自主挖掘灵活性的积极性。从全球现有实践来看，钢铁企业的需求侧灵活性可通过电能量现货市场、辅助服务、需求响应等机制参与到电力市场交易当中¹⁸⁻²⁰。例如，钢铁企业可以基于现货市场或分时电价的价格信号进行优化排产，以节约用能成本。在市场电价较高的时段，长流程企业可以提高自备电厂或副产气生产的电力，以减少电网购电需求甚至进行电力出售；短流程企业可在高电价时段降低生产节奏和负荷功率，同时在电价降低时提高生产负荷，从而减少电力运营成本²¹。此外，钢铁企业的可中断负荷、可调节负荷等还能作为灵活性资源直接或者间接（以负荷聚合商或虚拟电厂等形式）参与辅助服务、需求响应等机制，来获得额外的收益²²。

五、结语

钢铁行业作为我国国民经济的重要基础产业，其生产过程能耗高、碳排放多是实现国家“双碳”目标、促进绿色低碳转型的重点领域。随着钢铁产量的持续增长，钢铁行业面临节能减排的艰巨任务。为实现绿色低碳发展，在综合用能方面应加快推进制氢和氢冶炼、电炉钢生产、绿电消纳等低碳技术应用，构建清洁高效的用能体系，推动生产废物资源化，深化电力体制改革，建立健全碳管理和交易机制。与此同时，钢铁企业需灵活调节工业负荷，以解决高比例的可再生能源并网给电力系统运行带来的阻碍，抓住电网友好型工业负荷参与电网互动的机遇。

随着我国《电力需求侧管理办法（2023年版）》和《电力负荷管理办法（2023年版）》的实施，以经济激励为驱动的需求响应机制有望实现常态化、市场化运行，需求响应主体可平等参与相应的电能量市场、辅助服务市场、容量市场等，按市场规则获取经济收益。此外，钢铁企业也面临着国际碳关税征收、国内由能耗“双控”向碳排放总量和强度“双控”转变的挑战，开展节能降碳与网荷互动耦合研究是未来的技术发展趋势。未来，伴随钢铁行业被纳入全国碳市场、电力系统碳排放核算的时间和空间精细度逐渐提高，有望进一步引导企业用户根据电力市场价格和动态碳排放因子信号进行低碳需求响应，充分展现工业需求侧灵活性在构建新型低碳电力系统中的重要地位。

此外，应加强国际间合作和经验交流，建立国际合作机制共同应对气候变化和环境污染等全球性问题。钢铁行业绿色低碳发展是一个长期而复杂的过程，需政府、企业和社会各方的共同努力，通过技术创新、政策引导和合作交流实现工业发展和环境保护的良性循环，推进可持续发展的目标。

参考文献

- 1 官飞翔, 孙文强, 李德智, 等. 综合用能视角的钢铁行业低碳绿色发展技术展望. 可持续发展经济导刊, (2023). <http://182.92.83.95/NewsList/info.aspx?itemid=69050>
- 2 陈济, 李抒苒, 李相宜, 李也. 碳中和目标下的中国钢铁零碳之路. 落基山研究所, (2021).
- 3 新华网. http://www.xinhuanet.com/fortune/2021-07/29/c_1127710403.htm.
- 4 Chen, S. et al. Planning and Scheduling for Industrial Demand-Side Management: State of the Art, Opportunities and Challenges under Integration of Energy Internet and Industrial Internet. *Sustainability* 13, 7753 (2021).
- 5 Boldrini, A., Koolen, D., Crijns-Graus, W., van den Broek, M. & Worrell, E. The Demand Response Potential in a Decarbonising Iron and Steel Industry: A Review of Flexible Steelmaking. SSRN Scholarly Paper at <https://doi.org/10.2139/ssrn.4472250> (2023).
- 6 国家统计局. <https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?cn=C01>.
- 7 中国钢铁工业协会. 2022年钢铁行业经济运行报告. (2023).
- 8 程元, 饶尧, 丁胜. 工业领域电力需求侧可调节负荷潜力分析. *能源工程* 43, 72–78 (2023).
- 9 刘迎宇, 詹守权, 阚颂, 等. 钢铁企业电力需量优化调控研究与实践. *冶金动力*, 2020(12).
- 10 Shoreh, M. H., Siano, P., Shafie-khah, M., Loia, V. & Catalão, J. P. S. A survey of industrial applications of Demand Response. *Electric Power Systems Research* 141, 31–49 (2016).
- 11 叶兴杰, 徐永海, 黄子桐, 祝涛. 钢铁企业参与电力系统调度及风电消纳. *电力自动化设备* 1–14 doi:10.16081/j.epae.202301021.
- 12 Gerami, N., Ghasemi, A., Lotfi, A., Kaigutha, L. G. & Marzband, M. Energy consumption modeling of production process for industrial factories in a day ahead scheduling with demand response. *Sustainable Energy, Grids and Networks* 25, 100420 (2021).
- 13 Zhang, X., Hug, G. & Harjunkski, I. Cost-Effective Scheduling of Steel Plants With Flexible EAFs. *IEEE Trans. Smart Grid* 8, 239–249 (2017).
- 14 Gong, F. et al. Integrated scheduling of hot rolling production planning and power demand response considering order constraints and TOU price. *IET Generation Trans & Dist* 16, 2840–2851 (2022).
- 15 Tennet. *Unlocking Industrial Demand Side Response*. (2021).
- 16 Feta, A., van den Broek, M., Crijns-Graus, W. & Jägers, G. Technical demand response potentials of the integrated steelmaking site of Tata Steel in IJmuiden. *Energy Efficiency* 11, 1211–1225 (2018).
- 17 Serpe, L., Fürmann, T., Qussous, R. & Weidlich, A. Demand-side flexibility of the German steel industry: A case study. in *2023 19th International Conference on the European Energy Market (EEM) 1–6 (IEEE, 2023)*. doi:10.1109/EEM58374.2023.10161699.
- 18 Gholian, A., Mohsenian-Rad, H. & Hua, Y. Optimal Industrial Load Control in Smart Grid. *IEEE Transactions on Smart Grid* 7, 2305–2316 (2016).
- 19 Huang, X., Hong, S. H. & Li, Y. Hour-Ahead Price Based Energy Management Scheme for Industrial Facilities. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 13, 2886–2898 (2017).
- 20 Tang, W., Liou, L.-L. & Yang, H.-T. Mid-Short Term Industrial Demand Response Strategy-Case Study for a Steel Mill. in *2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM) 1–5 (2020)*. doi:10.1109/PESGM41954.2020.9281426.
- 21 Hadera, H., Harjunkski, I., Sand, G., Grossmann, I. E. & Engell, S. Optimization of steel production scheduling with complex time-sensitive electricity cost. *Computers & Chemical Engineering* 76, 117–136 (2015).
- 22 Boldrini, A., Koolen, D., Crijns-Graus, W. & Broek, M. V. D. The demand response potential of a hydrogen-based iron and steel plant. in *2022 18th International Conference on the European Energy Market (EEM) 1–6 (IEEE, 2022)*. doi:10.1109/EEM54602.2022.9921013.

刘子屹, 谢俊, 刘雨菁, 李德智等. 电力需求侧灵活性系列: 钢铁行业灵活性潜力概述, 落基山研究所, 2023
<http://rmi.org.cn/insights/dsf-steel/>

RMI重视合作, 旨在通过分享知识和见解来加速能源转型。因此, 我们允许感兴趣的各方通过知识共享 CC BY SA 4.0 许可参考、分享和引用我们的工作。 <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>



除特别注明, 本报告中所有图片均来自 iStock。



RMI Innovation Center
22830 Two Rivers Road
Basalt, CO 81621

www.rmi.org

©2023年12月, 落基山研究所版权所有。Rocky Mountain Institute 和 RMI 是落基山研究所的注册商标。