

碳中和目标下的 中国钢铁零碳之路

2021.9



作者与鸣谢

作者

陈济

李抒苡

李相宜

李也

* 作者姓名按姓氏首字母顺序排列。除非另有说明，所有作者均来自落基山研究所。

其他作者

李婷

Adair Turner (全球能源转型委员会)

联系方式

李抒苡 sli@rmi.org

版权与引用

陈济, 李抒苡, 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

鸣谢

本报告作者特别感谢冶金工业规划研究院对本报告撰写提供的洞见观点与宝贵建议。

此外，团队也感谢能源转型委员会成员对本次工作的积极参与。

特别感谢Angela Wright Bennett Foundation、Bloomberg Philanthropies、ClimateWorks Foundation、Quadrature Climate Foundation和The William and Flora Hewlett Foundation对本报告的支持。

此外，我们也向为本研究提供意见和建议的来自企业和研究机构的专家们表示诚挚的感谢。

关于我们

落基山研究所(RMI)



落基山研究所是一家于1982年创立的专业、独立的非盈利机构。我们致力于通过提供市场化解方案推动全球能源系统转型，以实现1.5°C温升的气候目标，创造清洁、繁荣的零碳共享未来。我们在全球开展工作，与企业、政策制定者、社区和非政府机构合作，识别并规模化推广能源系统转型解决方案，旨在大幅降低温室气体排放。落基山研究所在中国北京、美国科罗拉多州巴索尔特和博尔德、纽约市、加州奥克兰及华盛顿特区设有办事处。

能源转型委员会

(ENERGY TRANSITIONS COMMISSION)



能源转型委员会 (ETC) 汇集了全球能源领域中各行各业的领导者，其中包括能源生产商、能源密集型产业、设备供应商、金融机构和环保领域的非政府机构。我们的使命是打造一个既能够确保发展中国家达到发达世界生活水平，又能够将全球气温上升限制在 2°C 以内，并尽可能趋近1.5°C的全球经济。要实现这一目标，我们的世界需要在世纪中叶前后实现温室气体净零排放。

目录

05 前言

06 第一章 开启中国钢铁零碳之路:挑战与机遇

10 第二章 中国零碳图景下的钢铁生产:达峰与减量

16 第三章 再生钢生产:从配角到主力

23 第四章 初级钢脱碳:改进与颠覆

32 第五章 展望中国钢铁零碳发展:愿景与转型

39 第六章 推动中国钢铁零碳发展:政策建议

前言

2020年9月22日,习近平主席提出了中国2030年前碳达峰和2060年前实现碳中和的战略目标(以下简称双碳目标),为中国全面开展脱碳行动提供了明确且强劲的政治动力。中国钢铁产量和消费量均占全球总量的一半以上,碳排放量占全国总量的17%,是中国第二大碳排放部门。双碳目标提出后,钢铁行业积极响应,行业协会和研究机构积极开展碳达峰和中和路线研究,《钢铁行业碳达峰及降碳行动方案》正在编制并已形成修改完善稿。宝武、河钢等头部企业宣布了2050实现碳中和目标、碳达峰和中和时间表并着手制定行动路线。

落基山研究所(RMI)与能源转型委员会(ETC)早在2019年11月发布《中国2050:一个全面实现现代化国家的零碳图景》报告(以下简称中国零碳报告),对中国全经济体实现零碳进行了情景分析,力图为国家长远战略目标决策提供技术参考。报告初步分析了在全经济领域脱碳下,中国钢铁行业相应实现脱碳的图景,本报告在这一基础上对钢铁行业如何实现上述图景进行了具体路线图的分析和搭建。我们的分析表明,在双碳目标之下,中国钢铁需求将加速达峰并快速下降,产品结构、能耗结构和生产工艺将发生巨大变化;再生钢将取代初级钢ⁱ成为中国钢铁产能的主力;化石燃料和原料基本退出钢铁生产过程,基于氢的钢铁生产工艺将在初级钢生产中扮演重要角色;碳捕集与封存技术(CCS)将为剩下的高-转炉长流程钢相关碳排放进行脱碳的末端处理。

值得强调的是,作为最大排放部门之一,钢铁行业脱碳的时间表和路线图对于全经济领域实现碳中和目标至关重要。在时间表上,我们认为,钢铁行业作为国民经济发展的重要支撑决定了下游产业是否能够实现全生命周期脱碳,钢铁行业需比全国提前实现完全脱碳。而相比深入地研究和确定脱碳时间表,本研究更聚焦于在假设时间框架下中国钢铁行业的零碳转型趋势、短中长期安排和技术经济路线图。



i 以下章节中会频繁出现初级钢和再生钢这两个较新的术语,分别与长流程钢和短流程钢对应。主要反映的是,在零碳情景下,随着直接还原和熔融还原等新工艺的普及,从铁矿石到粗钢的冶炼过程将不一定再是一个“长”流程。这也使得短流程的工艺更多样化,而并非只有电弧炉一种,因此再使用短流程钢将会引起歧义。我们因此使用再生钢突出强调其基于废钢冶炼的特点。

第一章 开启中国钢铁 零碳之路： 挑战与机遇

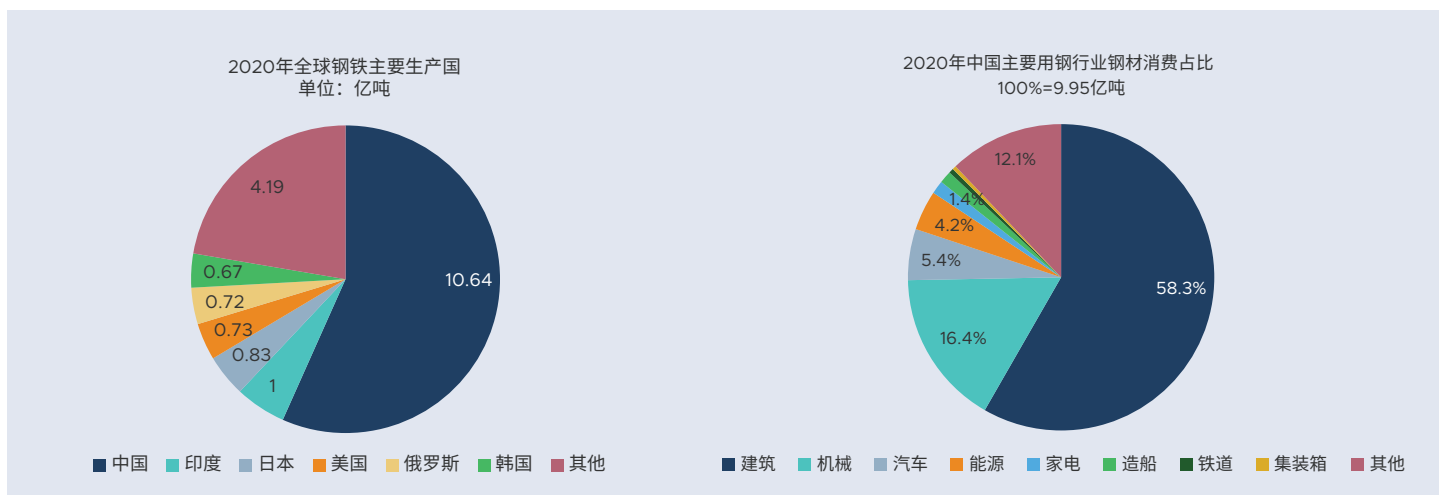


中国钢铁行业正处于零碳转型的起点，挑战与机遇并存。挑战主要包括：以丰富且价格低廉的煤炭为主的炼钢主要原料和燃料，以长流程钢为主导的产业结构，以及相对较年轻的产能设施。与此同时，中国钢铁的发展阶段以及特点，也使得其零碳转型在挑战中可见机遇，这包括钢铁需求即将达峰并下降，废钢资源持续丰富，对新技术新工艺的消化吸收和规模化能力强，以及由央企为主的钢铁产业执行国家政策的意愿和力度大。

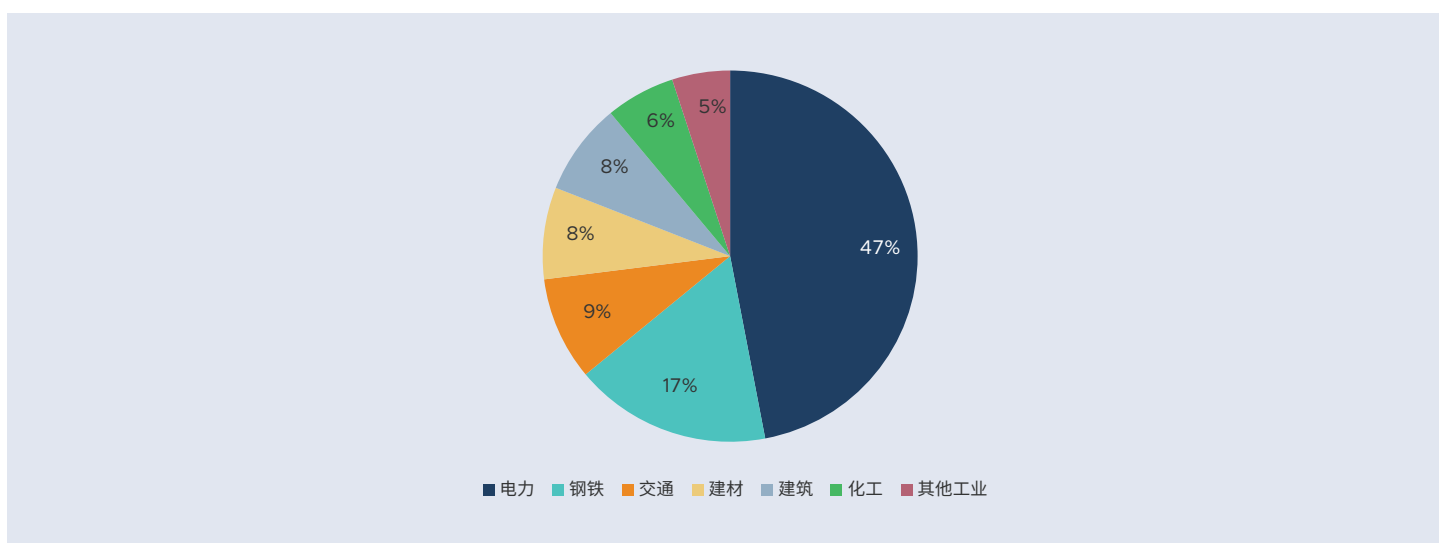
全球最大钢铁生产和消费国

中国是全球最大的钢铁生产国和消费国。即使在2020年全球疫情的冲击下，中国钢铁生产量再创新高。2020年，中国共生产10.65亿吨粗钢，占全球的56.4%；共消费9.95亿吨钢材，占全球的56.2%¹。其中，建筑部门钢铁消费量占总消费量的58.3%，机械制造占16.4%，汽车制造占5.4%（图表1）²。出口和进口分别达到了5140万吨和3790万吨，净出口1350万吨³。从碳排放的角度看，2019年，中国钢铁行业能源相关二氧化碳排放量为15.74亿吨⁴，占到了当年全国总排放量的17%⁵仅次于电力部门的第二大排放源（图表2）。钢铁行业的减排对于中国实现碳中和至关重要。

图表1: 2020年全球钢铁主要生产国和中国钢材消费



图表2: 2019年中国分行业碳排放结构



中国钢铁行业零碳转型的挑战

中国拥有丰富且廉价的煤炭资源使得钢铁冶炼能耗以煤为主。同等热值下煤与目前其他冶金所需能源品种相比碳排放最高。与欧美等发达国家钢铁冶炼用能结构相比，中国的煤炭消费占总能源消费的比例远远高于其他国家，以煤为原料的焦炭消耗占比也高于其他国家。如图表3所示，以美国和英国为例，不考虑电耗的情况下

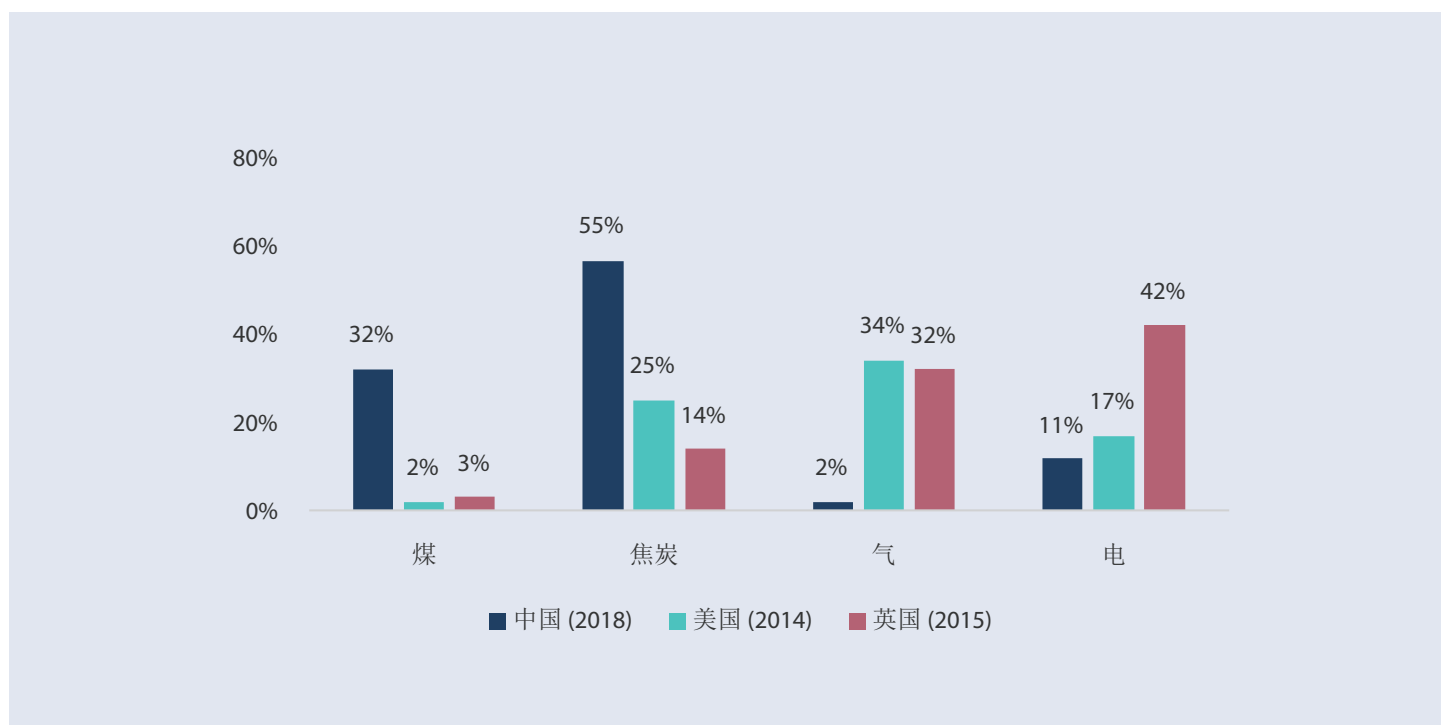
（电耗与电弧炉钢产量有关），两国钢铁冶炼占比最高的能源品种均为天然气。产生同等热值的情况下，煤炭燃烧产生二氧化碳是天然气的2倍多。中国钢铁行业脱碳因此面临更大的挑战。

中国钢铁产业结构特征是以长流程钢为主，长流程钢的吨钢碳排放是短流程钢的3倍多。目前，中国钢铁行业以基于“高炉—转炉”的长流程为主，产量占到90%左右，而

基于“废钢—电炉”的短流程炼钢占到10%。全球平均的长流程钢产量占比为73%，美国占比仅在30%左右，远低于中国水平。长流程炼钢的能源消耗以煤炭为主，吨钢综合能耗为550千克标准煤左右，吨钢碳排放约为2.0吨二氧化碳。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（基于平均电网碳强度计算ⁱⁱ）。

中国钢铁行业较新的冶炼产能占比大，快速转型带来的资产搁浅成本更大。目前，中国高炉设施投产后平均运行时间约为13年，还未达到正常使用年限的三分之一⁶。与其他钢铁生产国相比，中国钢铁高碳资产的搁浅成本更大，如何管理和处置好既有资产的问题更为棘手。

图表3: 中、美、英钢铁冶炼能源消费结构对比



数据来源: 冶金工业规划研究院; 中国统计年鉴; Global Efficiency Intelligence (2017), How Clean is The U.S. Steel Industry; statista

ii 按照0.9吨CO₂/兆瓦时计算, 参考国家气候战略中心《2019 年度减排项目中国区域电网基准线排放因子》。

中国钢铁行业零碳转型的优势

中国钢铁产业即将进入以总需求长期下降为趋势特征的发展阶段。随着工业化和城市化水平的不断提高，中国基础设施建设的速度在逐渐放缓，钢铁等基础材料的需求也将逐渐达峰并进入下降阶段。从人均粗钢表观消费量的角度看，中国目前的人均钢铁粗钢消费量已经达到了700千克以上，已经超过了欧美等国的峰值。中国人均粗钢消费量将在短期内达到峰值并开始下降⁷，届时粗钢的总产量也将进入下降的阶段。

全社会钢铁蓄积量的不断增长为发展短流程钢所需的废钢供应能力持续提升创造了条件。随着中国人均钢铁蓄积量的不断扩大，废钢资源的蓄积量也随之增大；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可得废钢资源量，为加速发展以废钢为原料的短流程炼钢创造了有力的条件。中国的钢铁行业需要抓住机会，扩大废钢产出量和利用率，扩大短流程的产能。

中国钢铁行业具有集成创新并推动新技术规模化、产业化的经验和能力。回顾中国钢铁行业发展可以看出，冶金装备制造经历了从购买国外二手设备到引进、集成和再创新的过程，并最终实现了大型冶金设备自主研发率达95%以上，钢铁冶炼装备和技术水平进入世界先进行列⁸。这些进步不但给全行业带来效率的不断提升，还全面提升了综合能效水平。自2000年以来，中国的吨钢综合能耗已下降近40%，许多环节的能耗水平和废弃污染物排放水平已经达到了国际先进水平。面对双碳目标的新发展方向，中国钢铁企业已经针对新技术新工艺开始布局，宝武、河钢、酒泉钢铁、建龙钢铁等企业已开始与国内外技术合作伙伴在氢能炼钢、熔融还原等领域合作。在新一轮的发展过程中，中国钢铁行业可充分利用以往积累的集成创新能力，扮演好将新技术、新工艺快速产业化、规模化的关键角色，为中国和全球钢铁行业脱碳做出贡献。

以央国企为引领的中国钢铁行业具有执行国家战略和政策的积极性和持续性。2020年，中国前十钢铁企业的粗钢产量占全行业产量的比例为39%。尽管产业集中度距离工信部提出的60%目标还有一定差距，但从发展趋势和政策方向看，未来产能将向头部企业集中，且考虑到央国企受政策引导更直接，兼并重组的力度将更大。总体而言，央国企对落实国家政策的执行力度和持续性更

强，对全行业的引领作用明显。例如，中国宣布双碳目标后，宝武集团、河钢集团、鞍钢集团等央国企相继宣布了碳达峰和碳中和计划。

基于上述对中国钢铁开启零碳转型基本面的理解，在接下来的章节，本报告将对中国钢铁行业的零碳路线图进行深入的研究。具体而言，第二章将对零碳情景下，未来钢铁需求量和产量进行宏观预测；第三章将针对再生钢铁生产，对废钢利用和短流程的发展进行经济和市场可行性分析；第四章将针对初级钢生产，介绍多种零碳钢铁的过渡性技术和突破性技术，并进行成本性分析；第五章将综合所有钢铁零碳手段，从时间发展和空间分布两个维度，描绘2050年前中国钢铁行业的零碳路线图；第六章将对政策和产业发展提出相应的建议。

图表4: 中国钢铁产量前10企业央国企占比（2020年）

	企业	产量（万吨）	企业属性
1	宝武集团*	11529	央企
2	河钢集团*	4376	国企
3	沙钢集团	4159	民企
4	鞍钢集团*	3819	央企
5	建龙集团	3647	民企
6	首钢集团	300	国企
7	山东钢铁集团	3111	国企
8	德龙集团	2826	民企
9	华菱集团	2678	民企
10	方大集团	1960	民企
	总和	41505	
	央国企总和	26235	
	央国企占比	63%	

数据来源: 世界钢铁协会
*注: 截止到2021年6月，宝武集团、河钢集团和鞍钢集团宣布了碳达峰和碳中和目标。

第二章 中国零碳 图景下的钢铁 生产:达峰 与减量



钢铁行业零碳转型的第一步是降低粗钢产量，只有产量尽快达峰，钢铁行业碳排放才有望尽早达峰。粗钢产量与下游行业需求量显著相关，也受进出口量及上游原材料价格影响。中国粗钢产量目前主要受国内需求拉动。2020年，国内钢铁消费量占总粗钢产量的95%以上，钢材出口量占总粗钢产量不到5%。根据RMI预测，虽然未来中国钢铁进出口量不确定性大，且占比可能会随着国内消费量降低而增高，但在零碳情景下，国内下游行业对钢铁的需求仍与钢铁产量密切相关。因此，本章将着重对中国未来钢铁需求情况进行分析，同时探讨影响未来进出口情况的因素，从而得出零碳情景下的中国粗钢产量的预测。

零碳中国下的钢铁需求

总体来看，中国钢铁需求在不考虑零碳转型目标驱动的情况下，也会随着工业化、城镇化进程的完成而达峰并快速下降。加入碳减排这一新的约束条件后，钢铁需求达峰和下降的进程将会被进一步加快。具体分析如下：

工业化和城镇化发展新阶段是中国钢铁需求下降的主要原因。随着大部分省市进入工业化后期，甚至后工业化阶段⁹，中国工业化进入高质量发展阶段，制造业比例降低。市场对高耗钢产品需求降低，促使制造业内部也逐渐开始产业转型、产品升级，整体对钢材的需求将逐渐呈现下降趋势。中国城镇化率在过去几十年大幅提升至60%以上¹⁰，但增速将逐渐放缓，建设宜居、智慧、绿色、韧性的现代化城市，加强城乡融合等将成为主流。新城镇化发展和工业的高质量发展潮流，使得社会在保持经济活力的基础上，逐渐减少对钢铁的需求。

在生态文明建设、可持续发展、数字化和智能化转型以及碳减排等多目标驱动下，循环、共享等理念将逐步成为消费市场的主流，促进整体钢材需求降低。随着下游行业减量化、资源化、共享化发展，产品或基础设施使用寿命提高，废弃产品回收率提升，对钢材尤其是新钢的需求将进一步降低。另外，循环经济发展也将倒逼钢铁行业调整产业结构，提高废钢利用率和短流程钢产能，减少需要由铁矿石、焦炭等原材料生产获得的长流程钢产能。

零碳转型也会增加个别领域钢材需求，但总体上远少于上述因素驱动的需求下降。零碳转型离不开电动化发展和清洁能源的大规模替代，与其生产、储运相关的基础设施，将在一定程度上提高未来能源行业对钢铁的需求，这是不可避免的。因此，其他下游消费端钢铁需求必须进一步下降，来弥补能源系统清洁化转型带来的额外钢铁需求，从而推动钢铁需求减量化发展，促进零碳转型。

•不同部门钢铁需求影响因素分析

2020年，中国的钢材消费接近60%来自建筑行业，包括各种建筑物，如住宅、停车场等；以及城市基础设施建设，如铁路、公路、城市管廊等城市等建设。除此之外，其他主要用钢行业包括机械（16.4%）、汽车（5.4%）、能源（4.2%），及其他行业，如家电制造、造船、轻工等（15.1%）¹¹。由于技术发展水平、需求变化等因素影响（图表3），中国主要用钢行业未来钢材消费量发展趋势有所不同。

建筑：随着城镇化率提升，未来中国房屋建设，城际铁路、高速公路等基础设施建设将保持一定规模，对钢材需求仍有较大的支撑作用¹²。主要用钢将集中在新型城镇化、老旧小区改造、新型住宅及配套设备服务等领域。数据显示，2020年中国房地产开发企业房屋施工面积926759万平方米，比上年增长3.7%¹³。中长期来看，随着城镇化率水平的不断提升，新增建筑和基础设施将逐渐减少，对钢材的需求也将减少。同时，由于技术和建筑材料提升，法律法规监管提高，建筑和基础设施的寿命将有所延长，更新替换率降低，未来建筑行业对钢材消费的支撑作用将会逐步减弱。

机械：中国传统机械工业包含较多高耗钢产业，如石化装备、机床、工程机械等。整体而言，高耗钢产业增速正在放缓，甚至有下降趋势。长期来看，随着中国技术水平的提升，如对智能制造、高性能器械的需求增长，必将带来机械领域用钢模式的改变¹⁴，尤其会拉动对优钢、特钢、特殊性能及高端钢材的需求，促进传统高耗钢产业转型，从而降低整体对钢材需求量。

汽车：汽车保有量与人均GDP有显著正相关性。据国务院发展研究中心预测，在不考虑技术替代和商业模式创

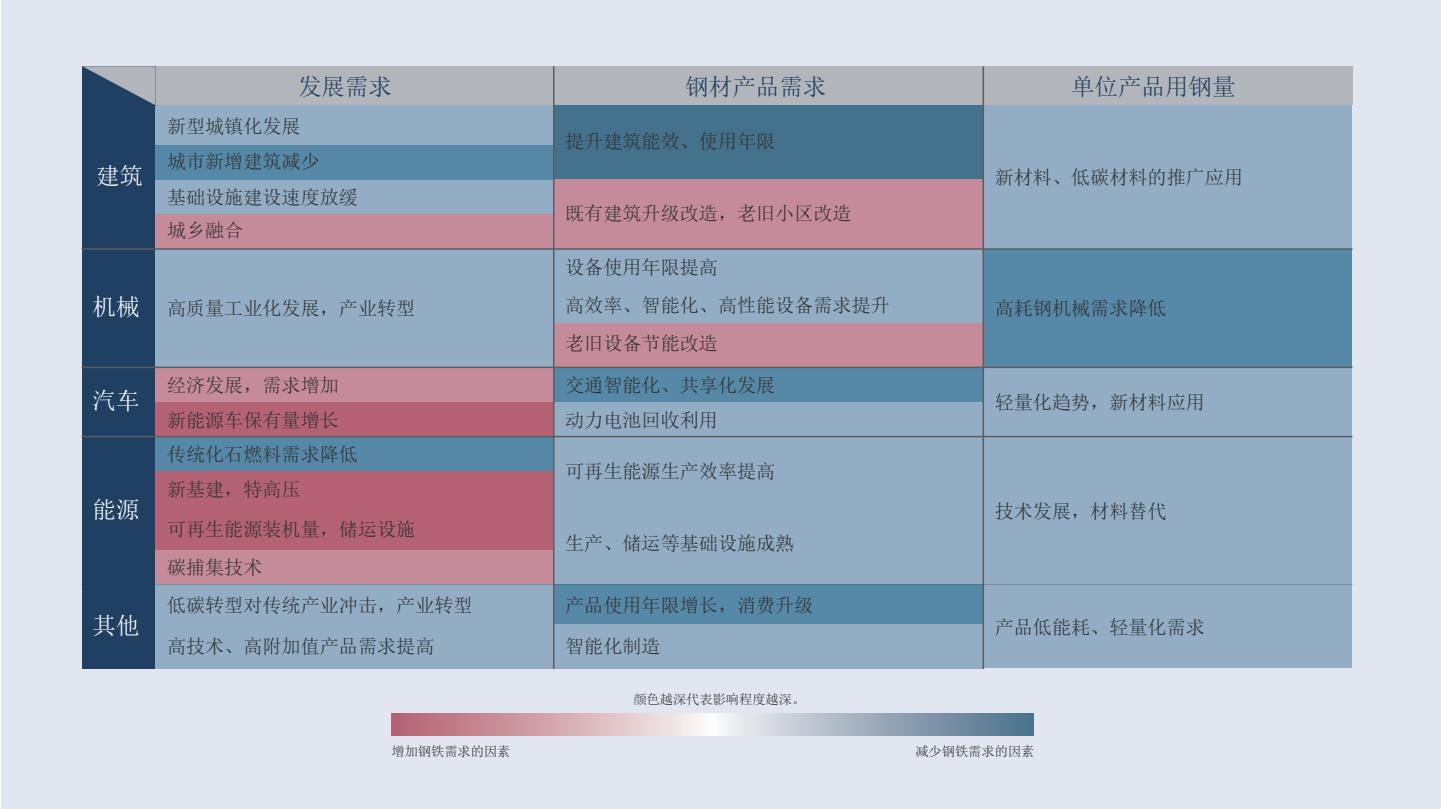
新条件下，到2030年我国汽车保有量约为4.3亿辆，千人汽车拥有量约为300辆，比2020年增长50%以上¹⁵。因此，近期内汽车领域用钢材料还将有所攀升。中长期来看，随着汽车制造技术提升，钢材的轻量化及材料革新（如碳纤维等），单车钢铁需求将有所降低。同时，随着汽车领域智能化、共享化、电动化发展，个人购置汽车的需求增长放缓甚至下降，将进一步减少汽车行业对钢铁的需求量。

能源: 零碳情景离不开电动化发展和大规模清洁能源替代，进而将推动新能源相关基础设施及电网的扩张，提高钢材需求。例如，特高压输电受国家新基建政策推动将持续增长。预计“十四五”期间，将建成7回特高压直流，新增5600万千瓦输电能力¹⁶，线路长度增加至40825公里¹⁷，为2019年的1.4倍。据测算，目前技术水平下，建设一公里特高压线路所需钢铁量约为220吨¹⁸，因此“十四五”期间，特高压输电网建设总钢材消耗量约为270万吨，平均每年仅54万吨。在RMI¹⁹零碳情景中，到2050年，太阳能和风能的装机量将达到2500GW和2400GW，是2019年的12倍和11倍。现有技术水平

下，风电发电装机每兆瓦钢材消耗量约为115吨²⁰。保守估计，到2050年，总钢材需求量约为2.5亿吨，平均每年消耗836万吨。而光伏发电目前每兆瓦装机量消耗钢铁约50吨/MW²¹，根据RMI零碳情景保守估计，到2050年，光伏发电平均年钢材消耗量约为382万吨。随着单机发电量提升、材料轻量化发展趋势，这些数字会逐渐降低。总而言之，油气行业在能源领域内的占比减少，会降低部分对钢材的需求，但整体来看，新能源领域和电力领域在一定程度上会带动全行业的钢材需求增长，虽然体量不大。

其他行业: 钢铁的下游应用市场分布广泛，包括家电制造、造船、集装箱、轻工业等领域，由于这些领域钢铁需求占总需求量的比例相对较小，本研究报告将不进行分析。但整体而言，随着技术进步、消费升级和产业转型，对高技术、高附加值、低耗钢产品的需求日渐提升。加上新材料研发和替代，产品使用寿命延长，以及可持续低碳化发展趋势，多数行业对钢材的需求量都将持续下降，从而助力钢材需求的尽早达峰。

图表 5: 不同部门钢铁需求影响因素

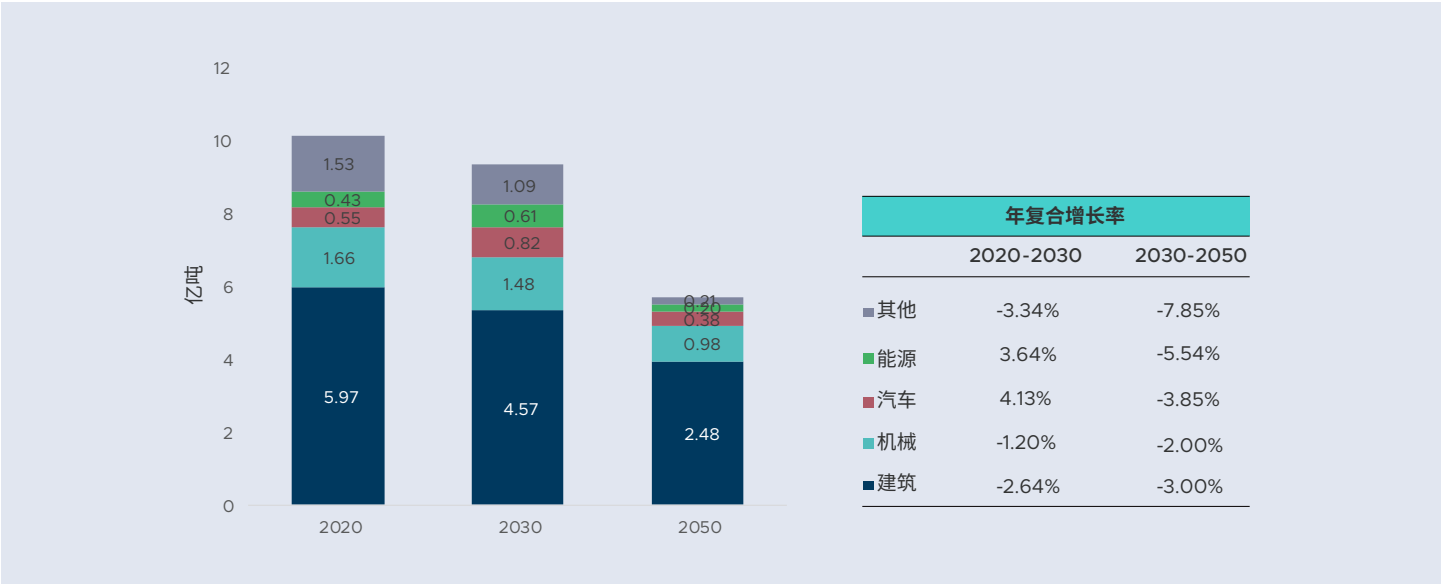


不同部门钢铁需求预测

综合前述影响因素，及当前技术水平和发展规划，RMI对零碳图景下中国主要用钢部门钢铁需求进行了测算。整体而言，钢铁需求总量呈下降趋势：到2030年，中国实现碳达峰目标后，除个别领域钢铁需求仍有增长外，国内总体钢铁需求量较2020年下降8.1%。到2050年零碳情景下，总钢铁需求量将大幅下降至5.71亿吨，与2030年比，下降38.8%以上。

不同行业发展路线不同。由于新型城镇化及绿色发展的需求，新能源车保有量持续增长，各行业对可再生能源、特高压输电网等需求持续增长，使得汽车和能源行业对钢铁的需求量到2030年前后才能逐渐达到峰值，而后呈现下降趋势（图表7右）。除汽车和能源行业外，大部分行业于2024年前后达到峰值，2030年后的新增需求量呈现明显下降趋势，尤其建筑行业，对钢材需求减少的贡献最大，占总减少需求的46%左右（图表7左）。

图表6: 零碳情景下中国主要用钢领域钢材需求及年复合增长率（2020, 2030, 2050）



图表7: 零碳情景下（左）建筑行业钢材需求（2020-2050）（右）其他主要用钢行业钢材需求（2020-2050）



全球零碳转型下的中国钢铁 进出口情况

钢材及产品的进出口也是影响粗钢产量的重要因素。目前中国钢材出口量占总产量的5%左右，但波动幅度较大。本研究分析中的“出口量”是钢材的直接出口量，而不包括出口钢材产品导致的间接出口情况，间接出口的钢材消耗量体现在下游各行业消费中。因此，除了国内需求外，海外国家和地区对中国钢材产品的需求，在一定程度上也会对国内钢材消费产生影响。但是，中国钢材产品整体进出口情况有很强的不确定性，与全球市场变动也有一定关系，具体表现在如下三个方面。

• **细分市场竞争力转变，导致不同产品进出口变化趋势不同。**随着生产成本低的东南亚等国家产能增加，中国在普碳钢、低合金钢等中低端产品市场竞争力可能会降低，导致出口减少。而随着技术改进提升，中国在高附加值钢材领域的国际市场竞争力增强，该领域出口可能会有所增加。

• **国内生产成本攀升，可能导致中国未来钢材进口增加。**国家“碳达峰”和“碳中和”目标的提出，加上环保法规日渐完善，钢铁企业生产合规成本将增加。结合国家对部分钢铁产品出口退税率下调，国内钢铁产品出口价格竞争力下降。

• **“一带一路”沿线国家需求将对中国钢材进出口带来动态影响。**“一带一路”沿线国家与中国在公路、铁路、港口等基础设施建设领域已经开展大量合作，这些项目的建设会提升各国钢材需求量，在一定程度上会带动中国钢材直接出口。但随着中国钢铁工业优势产能积累并出现过剩，越来越多钢铁企业将会走出去开展国际产能合作。届时，中国钢材出口量也将有所下降。另外，国际局势的不稳定，也将对“一带一路”沿线国家钢铁需求和中国钢铁出口带来进一步的不确定性。

综合以上原因，本报告主要考虑国内未来30年内钢材需求量的变化情况，并未对中国粗钢及钢铁产品进出口情况进行量化预测分析。值得注意的是，考虑到未来国内钢材需求下降趋势的确定性越来越大，粗钢及钢铁产品的进出口量占国内钢铁生产量的比例将提升。另外，随着中国钢铁工业低碳化发展，低碳炼钢技术提升，绿钢产能增加，中国有望在2040年后逐渐成为世界主要绿钢出口国。因此，中国钢铁产量可能因为国际市场对绿钢的需求提升而增加。

零碳中国下的钢铁产量预测

根据RMI模型测算，中国粗钢产量变化趋势与主要用钢行业钢铁需求变化相一致。中国粗钢产量将于2024年前后达到11亿吨的峰值（图表8），主要原因是消费占比超过一半的建筑行业在2024年前后用钢量达到峰值。虽然汽车、能源等下游行业有较快且稳定的增长态势，其钢材消费量到2030年前后达峰，但短期内对中国整体粗钢产量影响较小。中长期来看，中国粗钢产量将持续下降，在2050年零碳情景下，总产量将降至6.21亿吨，为2020年的58%左右，结果与国际能源署《能源技术展望》²²中可持续发展情景（SDS）的预测近似。在更为激进的情景下，若净出口量保持不变，中国钢铁总产量将进一步下降至4.75亿吨。这一结果与国内主流产量预测相比较低，但与国际能源署低于2度情景（Beyond 2-Degree Scenario）近似。

除下游行业需求外，粗钢产量也与一些因素有相关性，如钢铁库存量，及铁矿石、废钢等原材料价格等。但由于库存总量不足钢铁年产量的千分之一，不同行业、地区对去库或补库的实际需求不同，因此在预测钢铁产量时，本研究不考虑库存的动态变化，仅考虑下游行业需求和进出口量的影响。另外，不同生产路线的原材料价格影响因素众多，实际生产过程中对产量的影响复杂，较难预测，因此本报告对此进行简化处理。

图表8: 零碳中国下的粗钢产量 (2020-2050)



在零碳情景下, 中国未来粗钢产量将迅速达峰, 并逐年持续下降。然而, 产量降低并不足够支撑钢铁行业碳达峰和碳中和目标的实现。生产方式转变, 能效提升, 以及生产过程的脱碳, 都是钢铁行业实现碳减排的重要手段。因此, 本报告将重点分析当前两种主要钢铁生产工艺, 短流程钢和长流程钢, 各自领域未来资源技术和成本发展趋势, 并基于分析结果, 探讨中国不同地区短期技术发展方向, 和长期零碳图景。

第三章 再生钢生产： 从配角到主力



在零碳情景下,国内基于废钢的短流程电炉钢生产将持续发力,从目前仅占总钢铁生产的约10%,逐渐扩张到2050年60%的高比例。短流程再生钢铁生产从配角到主力的角色转变,一方面得益于中国钢铁蓄积量的积累和废钢资源的保障;另一方面,则有赖于碳排放压力、优惠电价等条件带来的成本优势。综合分析国内废钢资源量累积规律和回收利用潜力,中国再生钢铁发展将经历逐渐回升、快速增长、趋于平衡三个阶段。

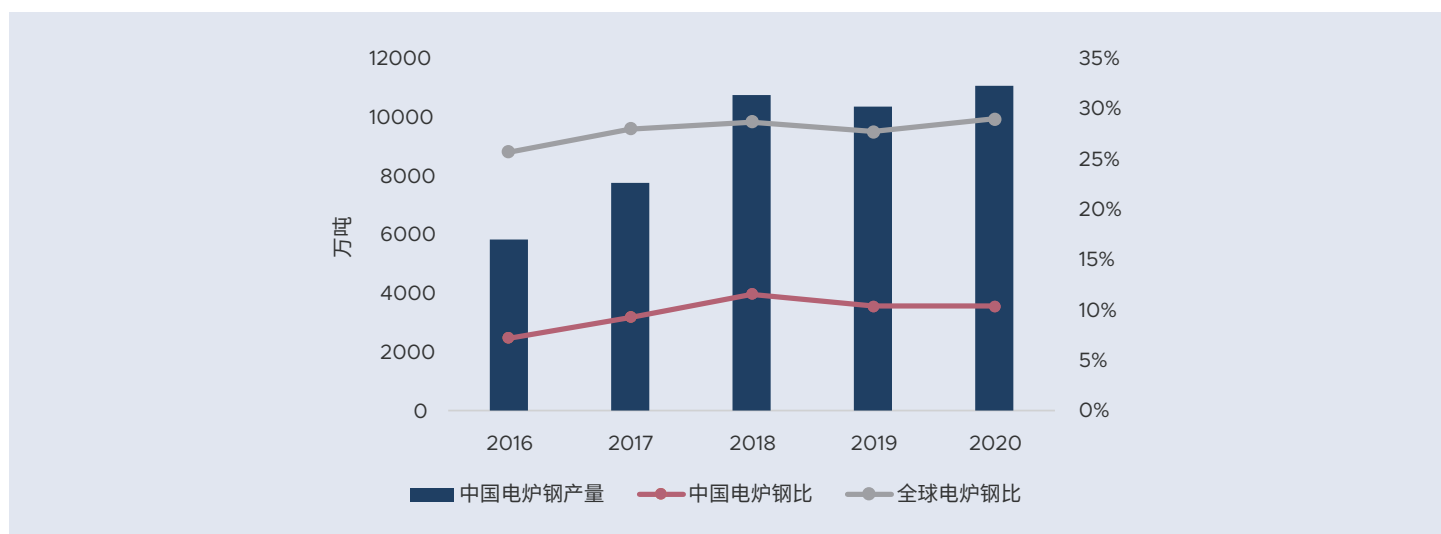
资源保障: 长期废钢供给充足, 为再生钢铁规模化创造条件

中国电炉钢ⁱⁱⁱ占比长期处在低位的主要原因是废钢供给不足。从历史数据(图表9)可以看出,中国电炉钢产量波动性大,增长缓慢。截至2020年底,中国电炉钢产能为17375万吨,其中全废钢电炉短流程产能为12820万吨。^{iv}在2020年中国粗钢产量的10.65亿吨中,电炉钢产量占比约10%,比历史最低7%仅提高了3个百分点。与世界平均水平的30%左右、美国的近70%、中国以外其他地区平均水平的50%左右相比,差距显著。废钢消费方面,中国钢铁企业废钢资源消费总量整体上升,由

2016年0.9亿吨增至2020年2.3亿吨,年均增幅9.8%。生产吨钢消耗的废钢数量(废钢单耗)整体由111千克/吨增至219千克/吨,年均增幅18.3%。然而,与世界平均废钢单耗336千克/吨、美国690千克/吨、欧盟550千克/吨、日本340千克/吨相比,中国的废钢单耗仍偏低。

造成中国电炉钢占比低、废钢利用水平不高的原因主要包括两个方面:一是废钢资源总量不足,且分布不均。随着中国钢铁积蓄量的不断累积,尽管社会废钢供应量稳步增长,年增量在1500-2000万吨,2020年中国可统计废钢供应量约2.6亿吨。然而在现阶段中国粗钢产量超过10亿吨规模的情况下,国内废钢资源供应远未达到足够充沛的程度。此外,在钢铁行业总体效益较好的前提下,钢铁企业生产积极性较大,转炉流程也消耗掉大量废钢,长短流程企业废钢资源竞争相对激烈。另外,目前国内废钢市场存在阶段性、区域性供需不平衡情况,钢铁消费主要集中在东南沿海等经济较发达地区,废钢资源供给也呈现地域性特征。二是废钢供给和回收体系还不够完善和高效。截止2019年,工信部废钢铁行业准入企业约400家,全国经营废钢的企业超过2000家,产业集中度和行业规范性较低,“小散乱差”现象仍然存在。此外,行业内存在的增值税进项抵扣不足、税负过重等问题,也为行业健康发展带来挑战。

图表9: 2016-2020年中国电炉钢产量情况



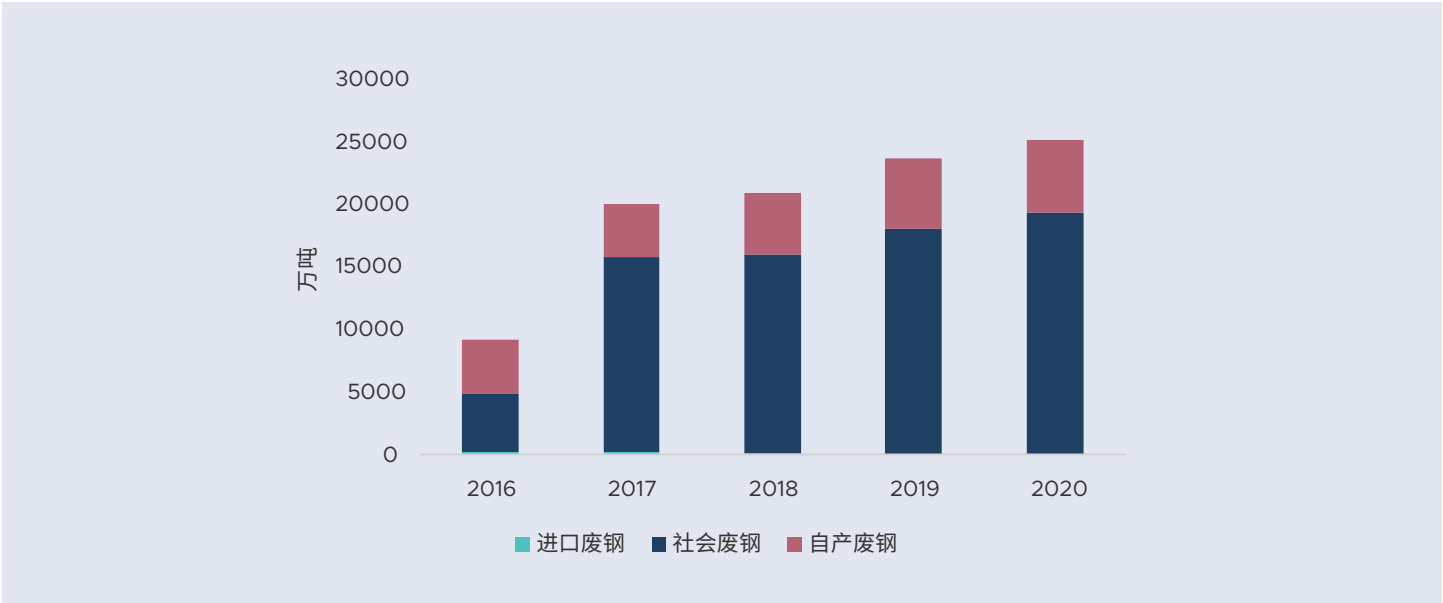
ⁱⁱⁱ 文中电炉钢均指以废钢为原料、电炉为主要设备生产的再生钢,由于“电炉钢”为目前习惯叫法,报告中涉及当前再生钢情况的部分仍用“电炉钢”指代再生钢

^{iv} 根据冶金工业规划研究院统计资料整理,按照工业和信息化部《钢铁行业产能置换实施办法》折算产能估算

从趋势上看，中国废钢资源供给所面临的上述两方面问题均会不断得到改善，零碳转型的新要求可加速这一进程。首先，中国废钢资源即将进入快速增长阶段。“十三五”期间，中国废钢资源供应总量总体上升，其中自产废钢占比20-25%，社会废钢占比75-80%，进口废钢占比不及1%（图表10）。随着中国新型工业化、城镇化发展所带动装备制造业、新兴产业、日用品制品业的蓬勃发展，中国废钢资源的产出量将进一步增加。通过研究废资源产生量与钢铁积蓄量、钢铁产品生命周期的关系，并结合近年废钢实际增长情况测算，预计2025年中国社会废钢资源产生量将达到3.4亿吨，2030年达到4.0亿吨。此外，再生钢铁原料进口已于2021年初放开，参考近年进口量最大值为2009年的1369万吨，乐观预计2025年再生钢铁原料的进口量约1000万吨，2030年达到2000万吨。

其次，废钢回收的体系建设正不断完善，废钢回收产业正逐步规范，并向规模化发展。随着国家持续推进化解钢铁行业过剩产能工作，特别是2017年全国1.4亿吨“地条钢”被依法取缔后，灰色地带的废钢资源回归到正规流通领域。政策层面也在大力推动废钢回收的发展。例如，工业和信息化部印发《京津冀及周边地区工业资源综合利用产业协同转型提升计划（2020-2022年）》提到，要统筹区域内资源配置，发挥现有产能优势，引导废旧金属资源向优势企业集聚，支持一批钢铁生产企业与废钢回收加工企业合作，建设一体化大型废钢铁加工配送中心。从全国层面看，这也是废钢回收产业发展完善的方向。

图表10: 2016-2020年中国废钢资源供应情况



成本驱动：利好条件下，短流程再生钢成本优势逐渐凸显

从成本结构看，转炉炼钢的钢铁料成本占全口径成本比例为88%-92%，电炉炼钢的钢铁料成本占比为83-88%，冶炼电耗成本占比3-6%。废钢和生铁的相对价格和电价水平，都将影响长短流程炼钢成本的高低，从而影响不同钢铁生产路线的竞争格局。从而影响不同钢铁生产路线的竞争格局。

· 废钢价格的影响

历史上，国内废钢价格与螺纹钢价格正相关，但由于近几年铁矿石价格猛涨，钢材价格变化，特别是环保限产、督查等政策影响废钢市场，废钢价格波动较大，出现过月度波动幅度几百元，年度波动幅度1000元以上情况。此外，短期内，国内废钢资源紧缺，有可能导致废钢价格在短期内的上涨趋势。然而，随着废钢进口的逐步放开和国内钢铁蓄积量的积累，中长期看废钢紧缺问题将得到缓解，又会对国内废钢价格产生影响。

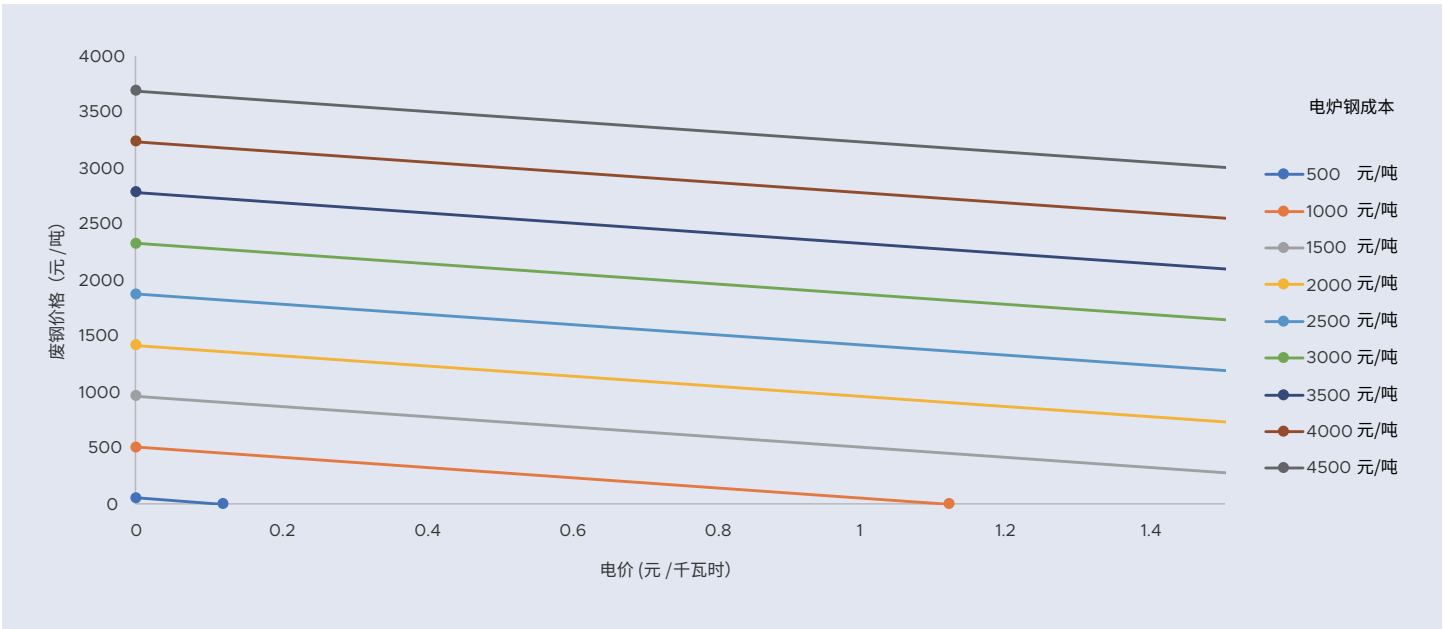
因此，废钢价格的不确定性较高。目前，国内废钢回收体系仍不够完善，废钢质量参差不齐，且整体流通性不高。未来，若要保证再生钢的成本竞争力，如何持续完善废钢回收体系、改善市场环境，以获得充足的、价格较低的废钢资源是关键。

· 电价的影响

中国电力供给长期以燃煤发电为主，火电发电量占比72%左右，由于煤电价格联动机制不完善和交叉补贴持续存在，造成中国工业用电价格相对较高。目前，对于钢铁企业用电优惠多以大用户直供电方式体现，地方执行的差别化电价政策多以惩罚性为主，尚未对全废钢电炉炼钢企业执行专项的优惠电价。与转炉炼钢相比，全废钢电炉炼钢需增加300千瓦时/吨钢左右的用电量，按照0.6元/千瓦时电价粗略估算，仅电费成本就高出180元/吨钢，造成电炉炼钢成本偏高。未来，废钢资源消费量将扩大，再生钢规模进一步发展，优惠的电价政策能为降低再生钢成本、推动产业发展发挥重要作用。

废钢价格和电价对再生钢成本的综合影响如图表11所示。

图表11：废钢价格和电价对电炉钢成本的影响



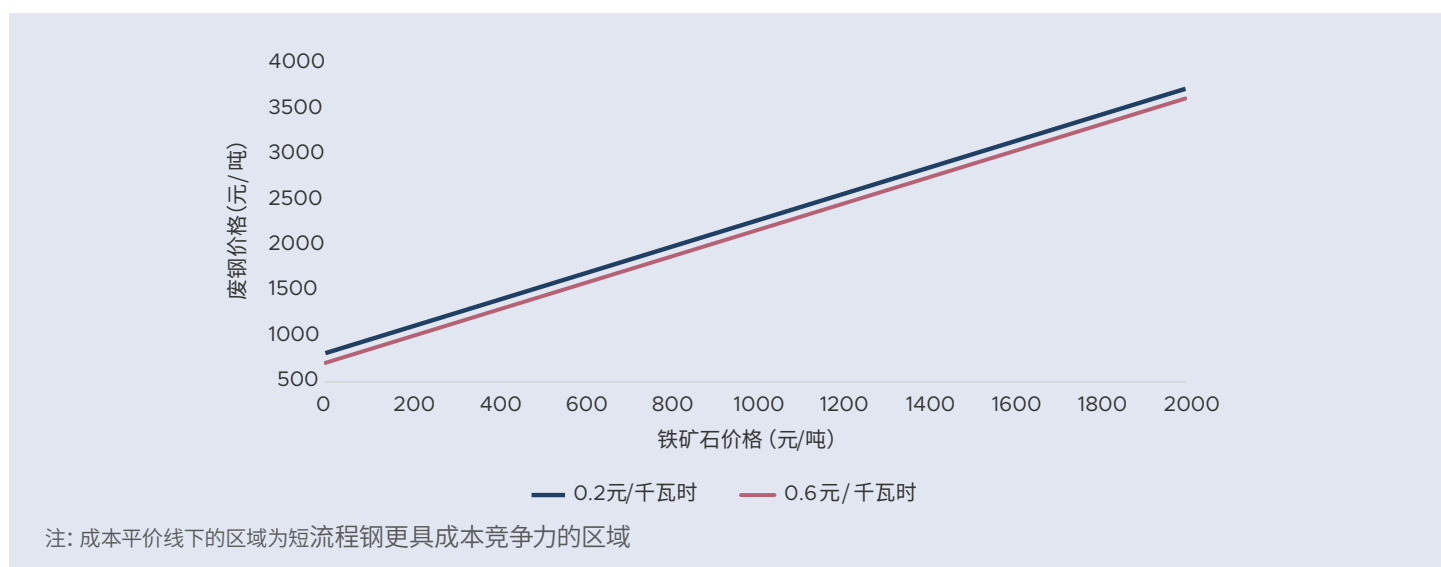
· 长短流程炼钢成本比较

本研究对废钢价格、铁矿石价格和电价对长短流程炼钢成本的影响进行综合分析。图表12给出在不同的电价下，短流程钢和长流程钢的成本平价线，以及对应的废钢和铁矿石的价格。在图中，在给出电价的成本平价线以下的区域，为短流程钢比长流程钢更具有成本竞争力的区域，从图中可对对应相应条件下的废钢和铁矿石的价格。例如，按目前中国进口的铁矿石约500元/吨的成本计，若要使短流程钢比长流程钢更具有成本竞争力，即使在0.2元/千瓦时的低电价下，废钢成本需要在1600元/吨左右，大约是目前水平的60%；按进口铁矿石约1400元/吨计，电价为0.2元/千瓦时时，废钢成本在2800元/吨左右，再生钢即可和长流程钢达到平价。未来，保证废钢供给以压低成本以及较优的电价条件，将大大推动短流程钢的发展。

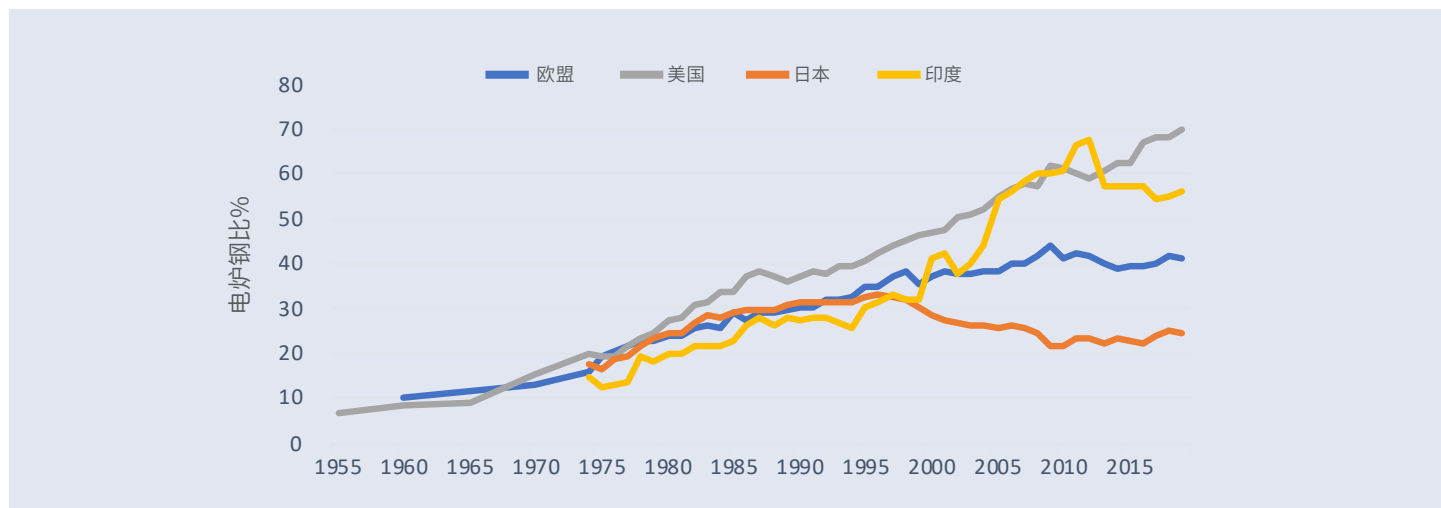
从配角到主力：废钢利用和短流程再生钢发展趋势和路线

从国际经验看，亿吨级产钢国提升电炉钢比例需要较长时间，且电炉炼钢短流程发展均在粗钢产量峰值区中后期开始兴起。美国电炉钢比例自上世纪中叶以来呈持续上升态势，目前已经接近70%，印度、欧洲和日本电炉钢比例也分别达到56%、41%和25%左右，基本处于发展平台期。从欧盟、美国、日本和印度电炉钢整体发展历程看，电炉钢比例从10%提高到20%，属于起步阶段，大致需10-15年时间；由20%提高到30%需5-15年；在电炉钢比提高到峰值后会进入平台期，达到稳定（图表13）。

图表12: 长短流程炼钢成本平价线



图表13: 主要产钢国电炉钢比例



此外，主要钢铁生产国电炉钢比例提高存在明显的阻力区。在年粗钢产量5000万吨以上的国家中，大部分国家电炉钢比例均达到过30%，但仅美国和印度发展到了50%以上，其他均在20%-40%之间（除中国外）。例如，俄罗斯电炉钢比例约33.7%，韩国电炉钢比例约31.8%，德国电炉钢比例约30%，日本电炉钢比例约24.5%。可见，20%-40%是钢铁大国电炉钢比例的阻力区，或者说主要钢铁生产国电炉钢比例提升过程一般停滞在20%-40%的区间，随后在该区间内波动发展。

各国电炉钢发展主要受制于国家的工业化发展需求和资源条件。美国是世界钢铁工业起步发展最早的国家之一，并较早实现工业化，20世纪中后期由于废钢资源的大量积累，短流程炼钢比例快速上升，并超过长流程，是典型的废钢资源决定型流程转变。日本则受制于国内废钢资源的不足，限制了电炉的应用，且由于废钢大量出口、电力资源短缺和长流程炼钢工艺相对成熟等因素，日本钢铁企业发展电炉短流程的动力不足。中国同时兼具美国和日本的特点，一方面，随着工业化进程推进，废钢资源将进一步丰富；另一方面，中国长流程炼钢工艺成熟具有一定发展惯性，但碳中和的压力给打破这一惯性、充分发展短流程提供了强大的政策动力。

综合来看，为实现钢铁行业的零碳转型，中国废钢利用和再生钢发展应具备以下三大特征：

特征一：推动短期内废钢资源供给快速增长，并保持中长期供应总量持续提升。2020年，中国可统计废钢供应量约2.6亿吨，相比目前中国粗钢产量10亿吨量级，废钢资源供应远未达到可以支撑高比例短流程炼钢的程度。冶金工业规划研究院预计，2025年、2030年中国废钢供应总量将达3.5亿吨、4.2亿吨。按照铸造、机械行业消费废钢3000万吨/年估算，2025年、2030年可供钢铁行业的废钢资源总量分别为3.2亿吨、3.9亿吨。到2050年，预计钢铁行业废钢供给量5.0亿吨。也足以支撑RMI零碳图景下中国钢铁总产量6.21亿吨中60%来自短流程的情景。

在RMI的钢铁零碳转型的情景下，未来30年，废钢资源量的积累将经历两个阶段：2030年前，钢铁蓄积量快速积累，废钢资源量以较快速度增长，平均每年增长约1600万吨；2030到2050年，随着基础设施建设等进程放缓，废钢蓄积量虽然仍持续增加，但累积速度放缓，平均每年增长量下降到仅约550万吨。因此，应尽可能在未来5-10年内推动以废钢为主要原料的短流程钢生产的快速增长。

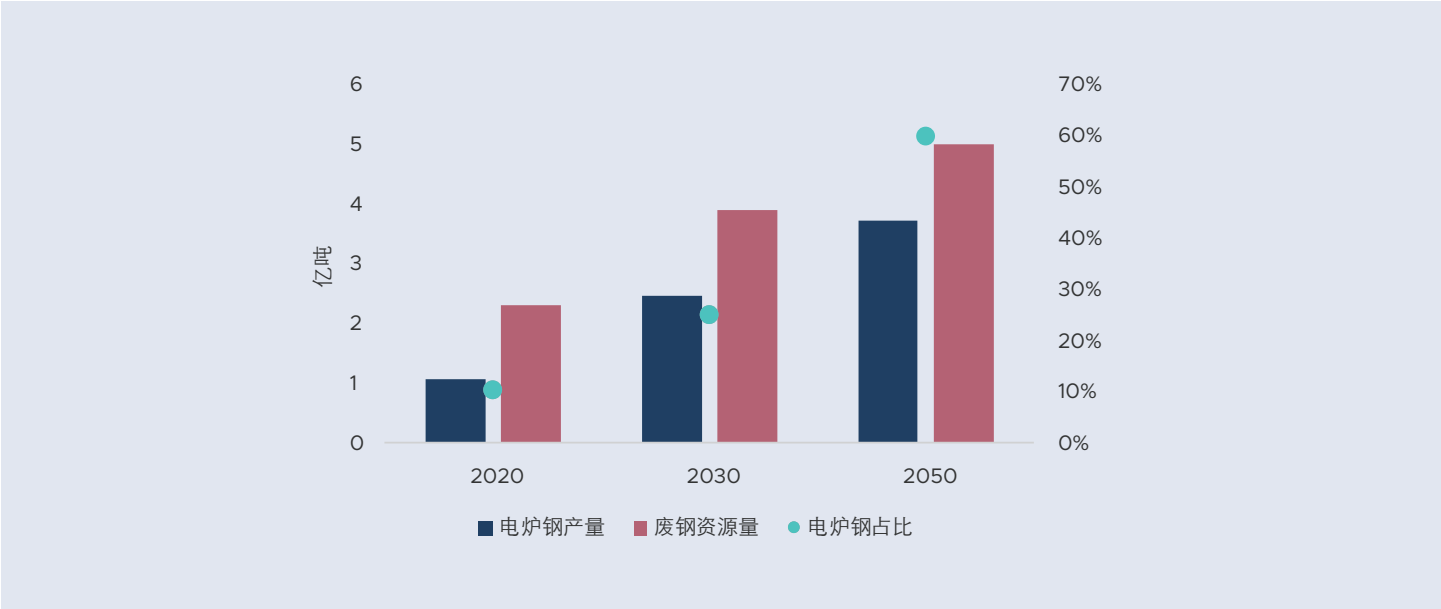
特征二：中国再生钢发展将经历逐渐上升、快速增长和趋于平衡三个阶段。如果中国废钢供给量能够按照上述特征持续增长，且相关的产能置换、电价优惠、环保、土地等政策予以配套，中国再生钢也应可以实现快速规模化增长。具体将经历三个阶段：

- 一是再生钢产量占总产量比例逐渐上升的起步阶段（2020-2025年）。在该阶段，中国再生钢产量增长超过5000万吨，达到1.6亿吨，产量占总产量的比例将发展到15%左右。这一阶段，虽然再生钢比例增长较少，但由于钢铁生产总量基数大，且废钢资源放量较迅速，再生钢的实际产能将会较快扩张。

- 二是再生钢比例快速增长阶段（2025-2030年），该阶段中国再生钢将由15%提升到25%，期间再生钢产量增加8400万吨左右，达到2.5亿吨。在这一阶段，再生钢比例和产量均加速增长。

- 在第三阶段（2030年-2050年），再生钢比例缓慢趋于平衡。再生钢实际产量在20年间仅增长约1.3亿吨吨，一方面是钢铁生产总量下降和废钢资源积累速度放缓带来的制衡，另一方面是长短流程钢铁生产对废钢资源竞争达到动态平衡。到2050年，再生钢产量占总钢铁产量比例达到60%，即3.7亿吨。总体来看，本研究估计，此时再生钢生产对废钢的消费量占到总废钢供给的80%以上。

图表14: 可供钢铁行业的废钢供给量、电炉钢产量和占比变化



特征三：电炉钢技术将呈现高效化、智能化发展特征。近年来，国内陆续出现量子电炉（Quantum EAF）、生态电炉（ECOARC EAF）、绿色智能电炉（CISDI-Green EAF）等新型电炉，未来电炉炉型的选择将更加关注连续加料、废钢预热、高效节能、绿色环保、余热回收及智能炼钢技术的优化集成。此外，电炉企业建设智能工厂具有先天优势，未来智能化发展重点是采用先进的监测手段和整体优化控制方案相结合，更加关注冶炼过程质量分析与成本优化控制等技术，实现全流程管控与优化。

第四章 初级钢脱碳： 改进与颠覆



在零碳情景下, 中国的钢铁生产仍然需要一部分基于铁矿石的初级钢生产, 并不能完全使用再生钢来替代。目前, 已有多种节能减排路线来进一步对长流程进行改造。而其最终零碳化也有多种技术路线选择: 氢气直接还原铁、碳捕集与封存、熔融还原等, 且这些技术有可能在2050年前实现成本竞争力。这些改进性技术与颠覆性技术, 都将帮助钢铁行业初级钢生产逐步实现最终零碳化。

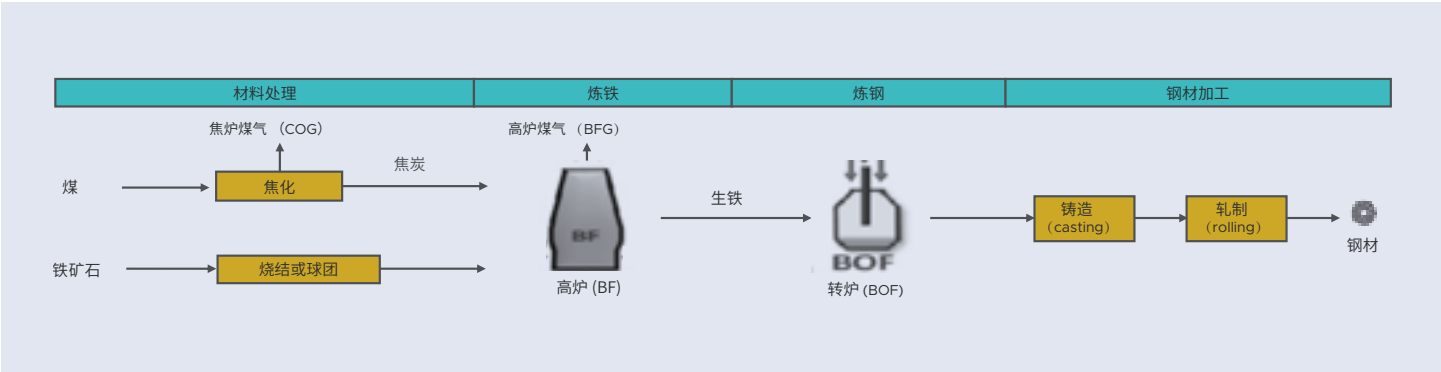
初级钢完全脱碳的技术可行性

可用于减少长流程钢铁生产碳排放的技术有很多 (图

表16), 一部分是基于目前的高炉-转炉 (BF-BOF) 流程的改进性技术, 而另一部分则将完全颠覆传统的初级钢生产过程。

高炉-转炉是中国最常见的生产流程, 也称为长流程炼钢 (图表15)。该流程基于煤和铁矿石等原材料, 分为材料处理、炼铁、炼钢、钢材加工等多个步骤。核心环节为炼铁——将铁矿石中的铁还原提炼出来; 和炼钢——对元素比例进行除杂等调整, 将生铁熔炼成钢。而材料处理环节是炼铁前的准备工作, 一方面要将煤焦化焦炭, 作为炼铁过程中的还原剂。另一方面需要将铁矿石进行烧结或球团化等处理, 使其更易于反应。钢材加工环节则主要包括铸造和轧制环节, 制成板材、线材等多种钢材产品。

图表 15: 长流程 (高炉-转炉) 的生产流程示意图



图表 16: 长流程钢铁脱碳的技术列表

	技术路线	减排潜力 (% of BF-BOF)	技术成熟度	资源可得性	经济性	容易度	潜力
长流程改进性技术	能效提高	15-20%	●	●	●	●	· 干熄焦, 微波烧结, 余气回收等 · 数字化管理可以带来10-15%能效提升
	纯氧高炉	30%	◐	◐	◐	◐	· 在中国、日本等地实验中 · 能够利用现有高炉的设备和经验
	高炉喷吹氢气	20%	◐	◐	◐	◐	· 利用焦炉煤气中的氢气 · 中国有试点项目
	生物质	30% (95% 如果配合CCS)	◐	◐	◐	◐	· 中国的生物质资源较为紧缺
	碳捕集与封存(CCS)	60%	◐	◐	◐	◐	· 目前中国的试点项目比较有限
	熔融还原 (Hisarna, Hismelt, COREX, FINEX等)	0-20% (80% 如果配合 CCS)	◐	◐	◐	◐	· 中国有一台 Hismelt 设备 · 需要技术完善 · 工信部政策支持
颠覆性初级钢技术	氢气直接还原铁	95%	◐	◐	◐	◐	· 中国有试点项目, 且受工信部政策支持 · 需要绿氢的成本降低
	氢等离子体熔融还原	95%	◐	◐	◐	◐	· 建龙钢铁试点项目的最终阶段 · 可以从煤基逐步转到氢基
	直接电解	95%	◐	◐	◐	◐	· Boston Metal等公司在进行研发

图表17: 长流程炼钢的能效提高技术举例

流程环节	技术	节能效果
烧结	微波烧结技术	吨钢碳排放强度降低10%
	烧结烟气循环技术	
炼焦	焦炉上升管余热回收技术	
	焦炉煤气产品化技术	循环利用焦炉煤气作为产品或进一步生产甲醇等
高炉	大比例球团	球团环节比烧结环节的能源强度低50%
	提高煤焦比	减少焦炭消耗
	高炉炉顶均压煤气回收技术	
轧铸	免加热轧制技术	ESP (Endless Strip Production) 技术、MIDA技术等，工序能耗比常规热轧连机减少50%以上
数字化	能源数字化智能管理平台	整体能源效率提高10-15%

改进煤基高转炉工艺实现减碳大有可为

- **能效提高:** 中国钢铁行业自本世纪初以来，一直致力于提高能效，在开发和实施先进的节能技术方面取得了重大进展。目前，仍有一些技术还在开发当中，将来可以应用到长流程炼钢的各个环节。图表17展示了其中的一些例子。
- **纯氧高炉:** 对高炉进行改进，在高炉中用纯氧代替空气，帮助煤的燃烧，提高炉顶气体的二氧化碳含量，从而可以以较低的成本进行碳捕集和利用。这种技术可将粗钢的碳排放强度降低30%，但目前其技术成熟度（TRL）仍然较低，在中国（八钢）、日本和欧洲等地处于试验阶段。
- **高炉喷吹氢气:** 在焦化环节产生的焦炉煤气中，含有大量的氢气，如果加以纯化，可以注入高炉，用氢气替代焦炭，用于铁的还原。日本的COURSE50项目、德国的蒂森克虏伯公司和一些中国炼钢公司已在试点应用这种工艺。该技术不仅可以降低煤炭消耗和碳强度，还可以成为氢气炼钢的过渡途径。
- **生物质:** 生物质也可支持钢铁的脱碳。从生物质来源转化而来的木炭可以作为焦炭的替代品，生物天然气也可以作为直接还原铁工艺的原料。例如，目前，巴西每年大约有1000万吨生铁的生产使用木炭。²³ 不过，

由于中国生物质资源有限，我们认为生物质对中国炼钢领域脱碳的作用有限。

- **碳捕集与封存 (CCS):** 高-转炉长流程钢生产中，石灰窑、发电厂、热风炉、焦炉、高炉、转炉等工艺单元产生的烟气和可燃气（焦炉煤气、高炉煤气等）中有不同浓度的二氧化碳。从经济技术角度考虑，这些环节中产生的二氧化碳浓度越高，捕集效率越高，成本越低。高炉烟气中的二氧化碳最高可占到钢铁生产总排放的60%，目前一种方式是针对高炉排放部署碳捕集设施，另一种方式是针对整个钢铁联合生产工艺在流程末端部署捕集设施。从碳捕集工艺上看，目前主要包括胺吸收、变压吸附、膜分离等方式。这些捕集工艺在成本、能耗、稳定性等方面存在差异，应根据钢铁行业各环节不同的碳排放特性应用。
- **熔融还原:** 熔融还原工艺（Hisarna或Hismelt技术等）利用熔融炉代替高炉，通过煤与铁水直接反应，省去炼铁前的烧结和焦化过程，从而显著地减少煤炭消耗。因此与传统的高炉相比产生更少的二氧化碳。同时，该路线下仍然可以使用转炉，对现有项目进行改造。此外，熔融还原与碳捕集技术的兼容性更高，有助于将CCS捕集率提高到80%。目前在中国，建龙钢铁、宝钢八一钢铁都在应用这项技术，邢钢搬迁优化项目也将采用“熔融还原+电炉”的路线。但是，该技术在效率和设备容限方面仍需进一步提高。

非高炉冶铁技术产业化未来可期

•**氢气直接还原铁:** 基于氢气的直接还原铁 (Direct Reduced Iron, DRI) 技术提供了一种完全脱碳的炼铁方式, 与电炉相结合后代替高炉和转炉, 其技术成熟度 (TRL) 达到了6-8的较成熟水平。该技术可以电力为主要能源来生产零碳粗钢。生产每吨粗钢总共需要3500-3800千瓦时的用电量。

直接还原铁 (DRI) 是一项较为成熟的技术, 在印度、美国等国有所应用, 主要利用天然气作为还原剂。而基于氢气的DRI则是一项新技术。虽然基于氢气的DRI可能面临着成本性和替代现有资产等挑战, 但它是一项非常有前途的钢铁脱碳技术, 中国和其他国家的许多钢铁企业都在进行试点。瑞典的HYBRIT项目已经通过氢气-直接还原铁-电炉路线生产出了第一吨零碳钢材。中国的河北钢铁集团也开始了其120万吨/年氢气直接还原铁试点工厂的建设。宝武钢铁和其他中国钢铁企业也在计划试验这一技术。

此外, 产出的直接还原铁 (又称海绵铁) 可被运输并用于转炉, 以替代传统生铁。这有助于提高现有设施的利用率。

•**氢等离子体熔融还原:** 氢等离子体熔融还原 (HPSR) 技术正在发展中, 利用氢, 而不是煤, 作为熔融还原的还原剂。该路线将完全替代高炉-转炉路线, 并且省去烧结、炼焦等步骤。奥钢联的SuSteel项目以及中国建龙集团都在部署这一技术, 进行试点实验。后者将逐步从基于煤的熔融还原过渡到基于氢能的熔融还原。不过, 目前该技术的技术成熟度 (TRL) 仍低于直接还原铁。

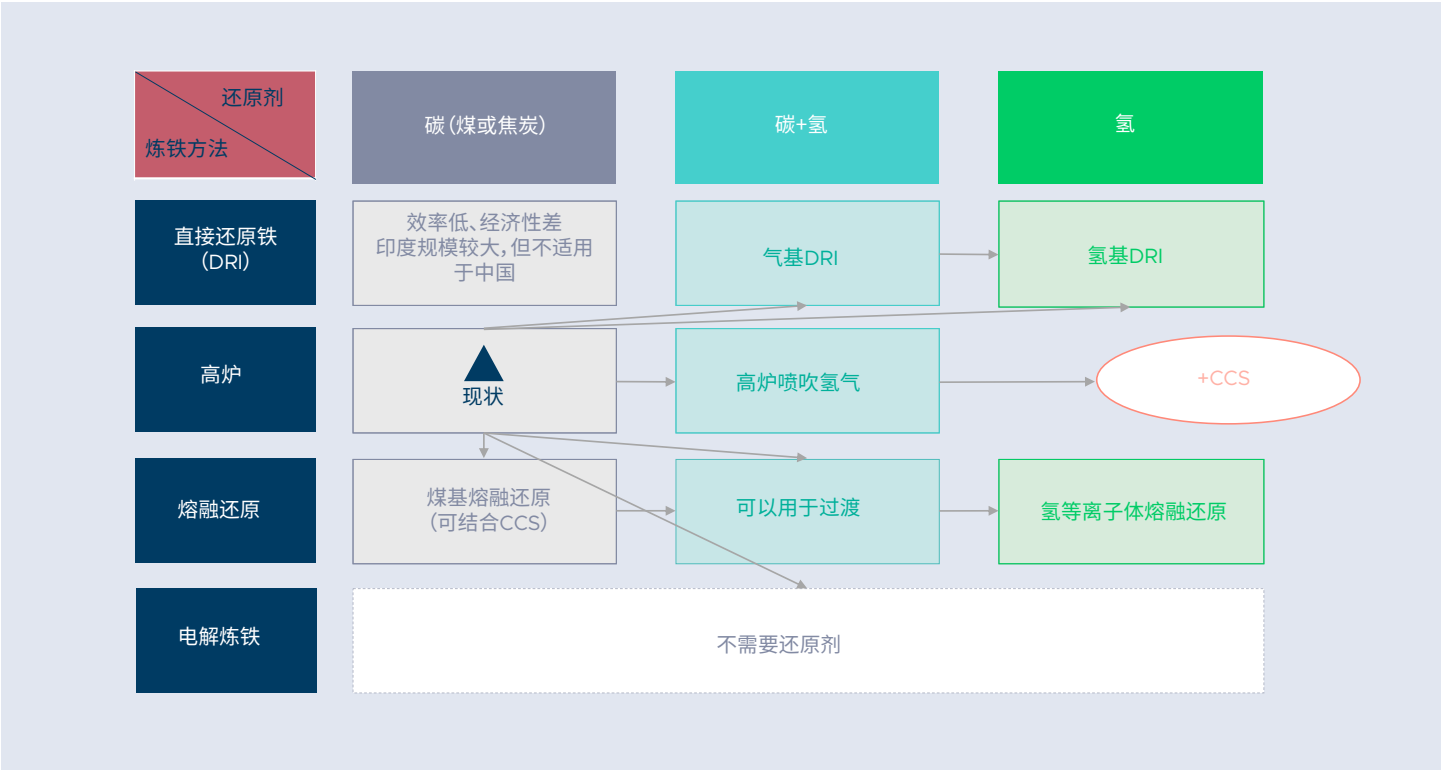
•**直接电解:** 直接使用电力通过电解来生产铁在技术上是可行的, 利用电极、电解液将铁从矿石中分离出来, 随后可以再与电弧炉配合, 调整元素比例, 制成各种钢铁产品。安赛乐米塔尔 (ULCOS项目) 和美国Boston Metal等公司已开始开发这种技术来加工铁矿石原料。

初级钢脱碳转型应基于冶铁工艺和还原剂清洁化进程寻找过渡性路线

初级钢的脱碳主要聚焦在冶铁环节的还原剂与工艺的替代 (图表18)。对于以高-转炉为主的既有产能, 可以通过高炉喷吹氢气技术充分利用焦炉煤气回收氢或直接生产的氢气替代部分作为还原剂的煤炭, 积累利用氢气作为还原剂的冶铁实践经验, 以及打造钢铁企业制氢、用氢与现有冶金流程协调融合的运行管理能力。但是, 该路线并无法改变以煤为基础的高-转炉工艺路线。因此, 要继续以更低碳的方式利用这些既有产能还应引入CCS技术。

而为了更进一步地实现炼铁的完全零碳化, 应考虑选择直接还原铁、熔融还原和电解冶铁等非高炉冶铁产能, 对产能进行全面更新改造或建立新产能。在建设运行非高炉冶铁产能时, 也应充分考虑还原剂的技术和经济过渡性。具体而言, 直接还原铁产能一开始可以考虑用成本相对较低的天然气或合成气逐步过渡到绿氢作为冶铁还原剂; 熔融还原一开始可以成本最低的煤作为还原剂并加装碳捕集设施以确保低碳或零碳排放, 逐步过渡到煤+气混用, 最终利用氢等离子体熔融还原技术实现绿氢的还原剂替代; 对于电解冶铁, 由于不需要还原剂, 因此没有过渡过程, 但考虑到目前技术成熟度较低, 应成为较中长期的选项 (图表19)。

图表18: 初级钢炼铁脱碳路线选择



图表19: 初级钢脱碳过渡路线的特点

脱碳技术	高炉喷吹氢气	碳捕集与封存 (CCS)	直接还原铁	熔融还原
有利条件	任何有低碳改进要求的高炉	靠近碳封存地点或潜在二氧化碳需求方	低廉的可再生能源用于制氢	没有特殊要求
局限性	氢气掺烧比例有限制	需要碳封存容量或潜在二氧化碳需求方	可能需要球团或高品质的铁粉，会提高原料成本	技术成熟度需要提高；深度脱碳可能需要配合CCS
过渡性			可以使用焦炉煤气中的氢气进行过渡	煤基-气基-氢基过渡路线
优先试点地区	中国各地	华中、华北、西北地区，四川盆地	内蒙古、河北、山西、辽宁、四川等可再生能源丰富的省份	与可再生能源或碳封存地点靠近，以方便进一步转型

长流程钢完全脱碳的经济可行性

目前，与传统的化石燃料炼钢相比，零碳钢铁路线有40-100%的成本溢价。如图表20所示，常规长流程（高炉-转炉，即BF-BOF）路线的粗钢生产成本约为2800元/吨。按照目前氢气价格40元/千克计算，氢气-直接还原铁（DRI）路线生产的粗钢成本将会上升80%。按照0.6元/千瓦时的电价计算，碳捕集与封存（CCS）炼钢路线也会带来40%的成本溢价。而生物质木炭炼钢路线的成本溢价超过100%，在中国的应用成本过于昂贵，将不给予重点考虑。

未来，随着技术的发展、规模经济效益的显现和电力系统的发展，零碳钢铁路线的经济竞争力将得到极大的提高（图表20）。

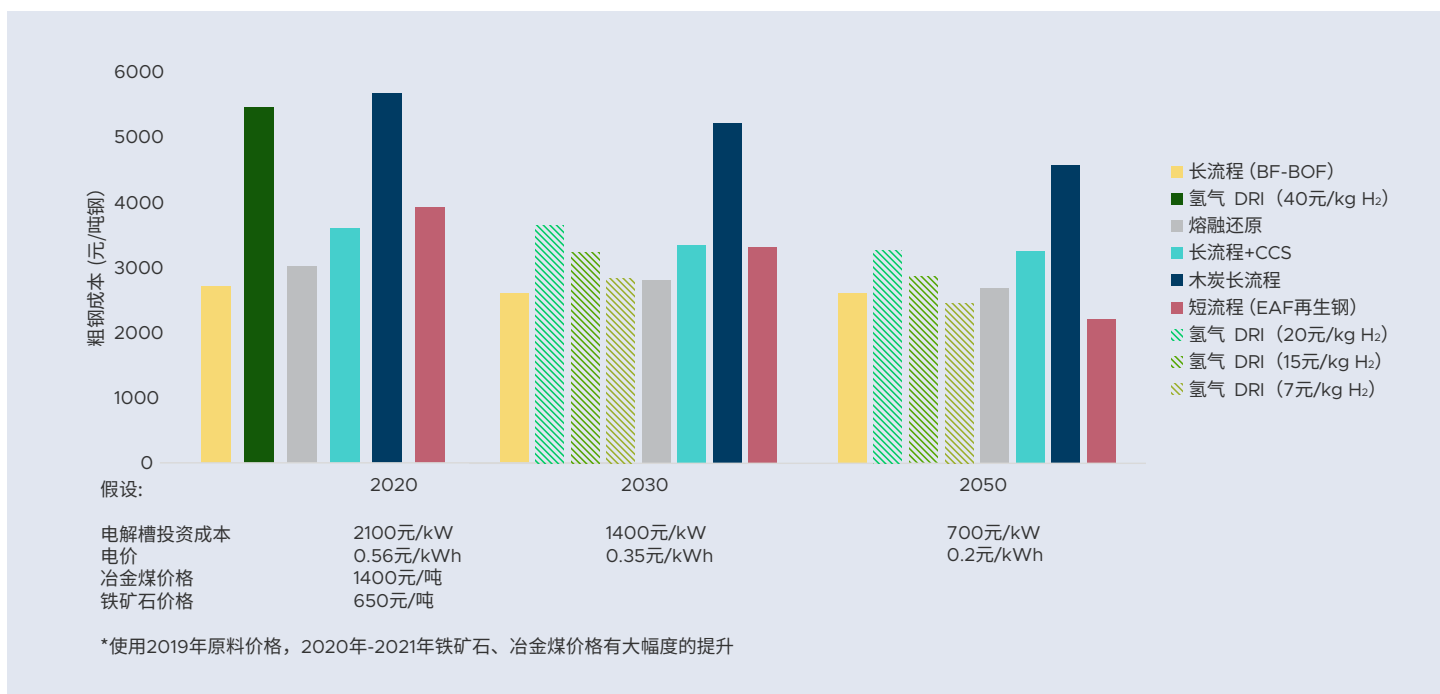
首先，固定投资成本有望降低。未来30年，CCS设备的成本可能会降低10-20%。对于电解槽而言，预计在中国的固定成本将从现在的300美元/千瓦降至100美元/千瓦。同时，电解水技术的能效也会得到提高。此外，随着中国可再生能源产能的大幅增长，预计未来30年电价将大幅下降。如果按照2030年的电价0.35元/千瓦时、2050年的电价降至0.2元/千瓦时来计算，高-转炉加装CCS路线的炼钢成本将从现在的溢价40%

降至2030年的30%以及2050年的27%。电力价格的下降也将导致绿氢成本的大幅降低。包括德国和美国在内的许多国家已经制定了目标，到2030年将氢气的成本有望下降到15元/千克，并在2050年进一步降低到7元/千克。如图表20所示，这将显著提高基于氢气的炼钢路线未来的成本竞争力。

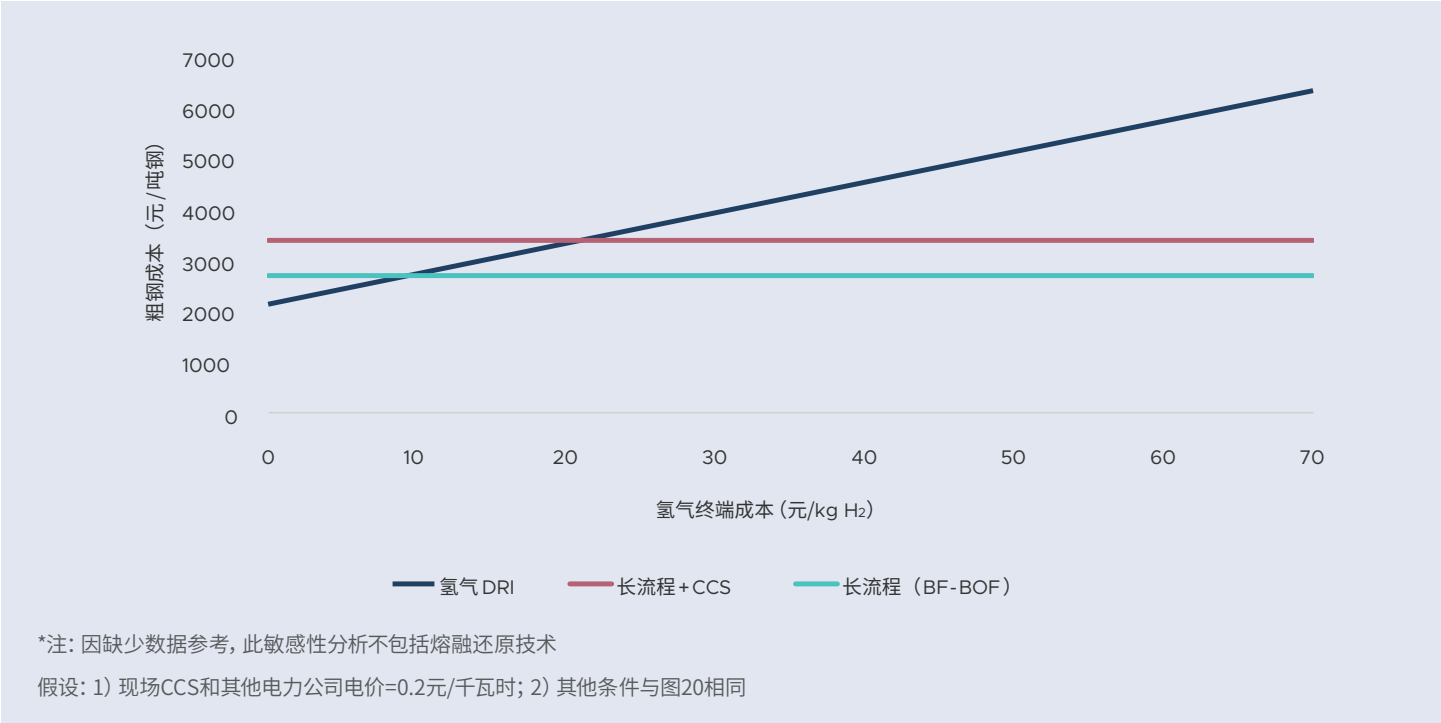
对于新建项目，基于氢气的炼钢路线可能是唯一可以与传统炼钢路线达到平价的零碳选择。根据RMI的分析，如图表21所示，如果氢气成本低于20元/千克，到2050年，基于氢气的直接还原铁炼钢将是比碳捕集更经济的选择。如果氢气的成本低于10元/千克，那么用于新建项目的基于氢气直接还原铁的粗钢成本甚至可能低于传统长流程的成本。而对于碳捕集路线来说，则不能达到与传统长流程路线的平价，始终会有加价改造成本。

这意味着，在可再生能源就地制氢用于钢铁冶炼的情景下，当电力成本低于0.2元/千瓦时的时候，直接还原铁的新建项目将比传统长流程新建项目更具成本优势（图表22）。在实际情况下，即使再考虑加入氢气储运成本，考虑到中国（尤其是西北）可再生能源成本下降趋势在一个相当长的时间内仍将存在，氢基直接还原冶金的成本优势也将逐步形成。

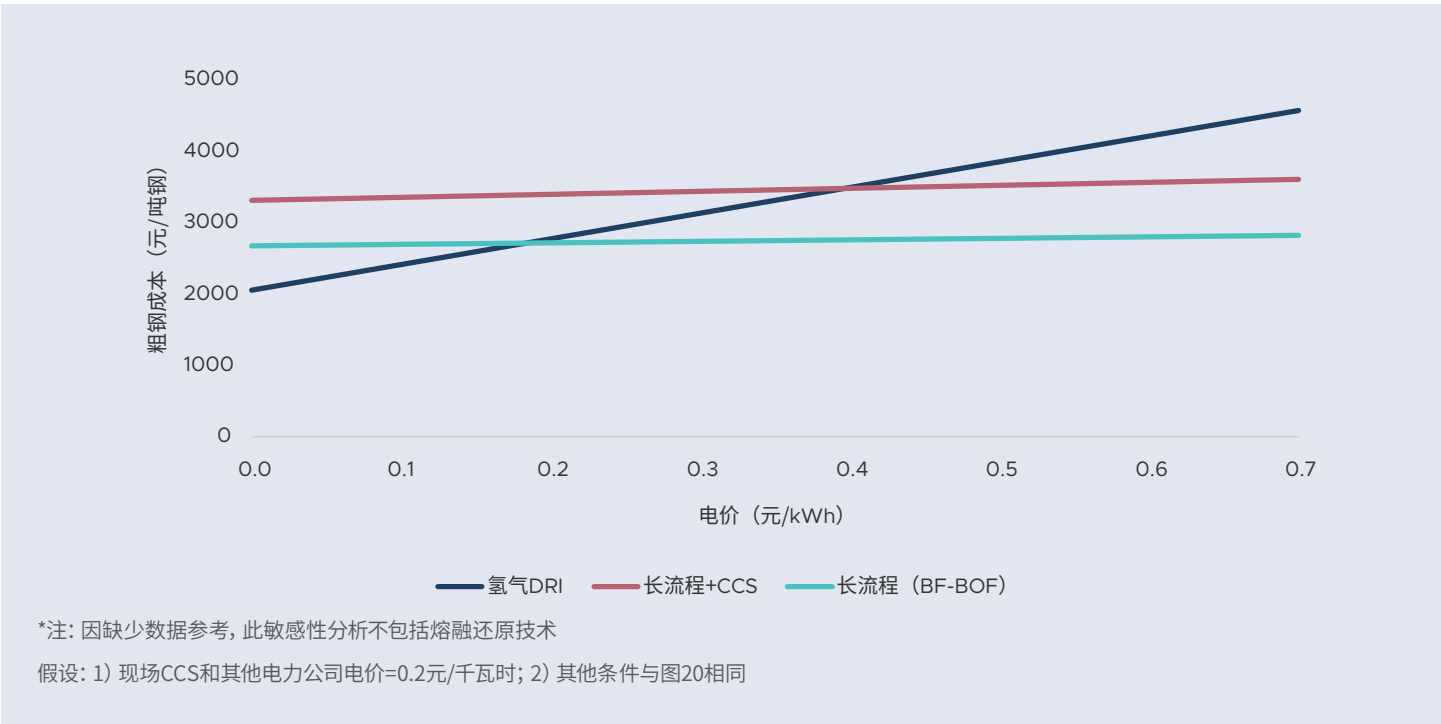
图表20：不同技术路线的目前成本和未来成本



图表21: 氢气成本对炼钢成本的影响 (新建项目, 2050年)



图表22: 用电成本对炼钢成本的影响 (新建项目, 2050年)



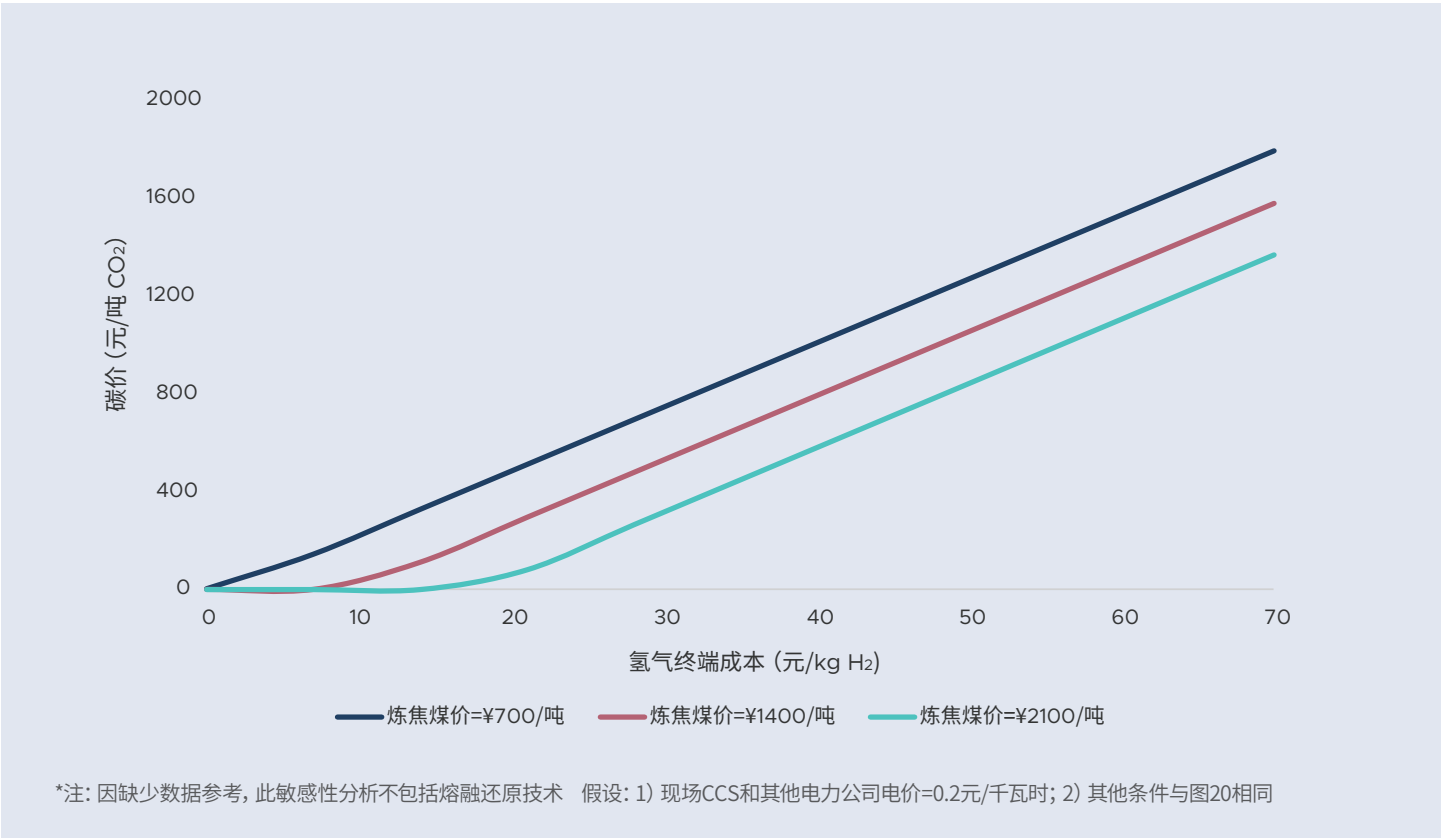
成本平价还会受到炼焦煤价格、碳价等其他因素的影响。炼焦煤价格和碳价越高，绿氢的优势就越明显。如图表23所示，如果炼焦煤价格上涨到2100元/吨，基于氢气直接还原铁的炼钢路线将在氢气成本为15元/千克时与传统长流程路线达到成本平价，这是许多国家2030年的目标。此外，如果对炼钢和煤炭消费加征碳价，以绿氢为基础的零碳炼钢的成本平价条件将显著放宽。在当前煤炭价格为1400元/吨的情况下，如果碳价达到350元/吨二氧化碳，那么氢气直接还原铁路线可以在氢气成本为20元/千克时达到粗钢成本盈亏平衡。

图表24中的二氧化碳减排成本也表明，到2050年，基于碳捕集和氢气直接还原铁的钢铁生产都可以低于700元/吨二氧化碳的成本得到实施。而当氢气成本足够低时，基于氢气直接还原铁的炼钢甚至可以提供接近零或更低的减排成本。

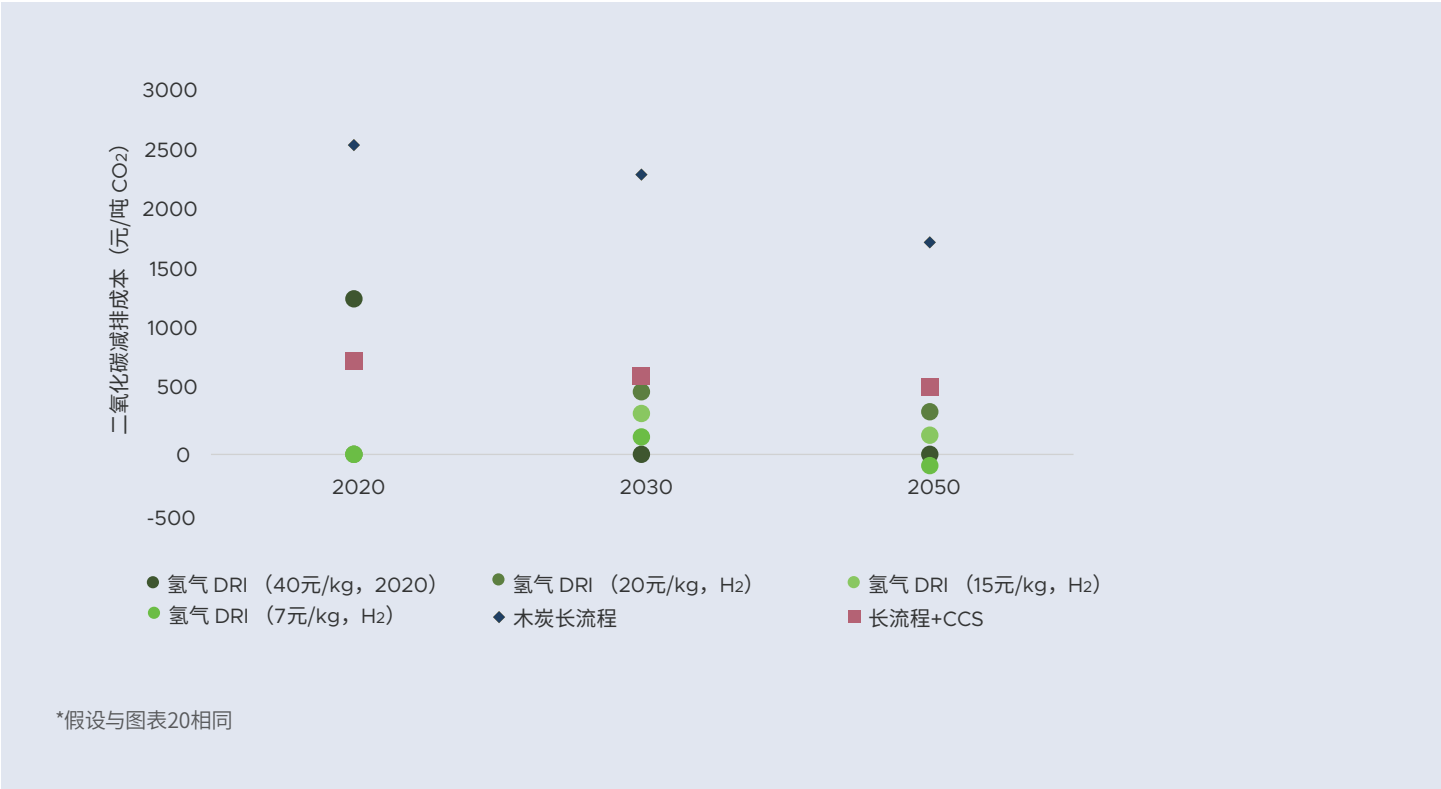
对改造项目而言，碳捕集路线可以利用更多现有设施，节约固定投资成本。到2050年，如图表25所示，当氢气成本高于15元/千克时，碳捕集路线可能更具效益；而当氢气成本低于15元/千克时，基于氢气直接还原铁的技术路径仍然具备经济效益（假设用于碳捕集的电价不变）。

因此，包括基于氢气的直接还原铁（DRI）和碳捕集与封存（CCS）在内的零碳炼钢技术在未来具有很大的经济可行性，特别是直接还原铁路线特别是直接还原铁技术路径。技术发展、电价降低、碳价机制以及煤控等驱动因素将不断推动成本的降低。

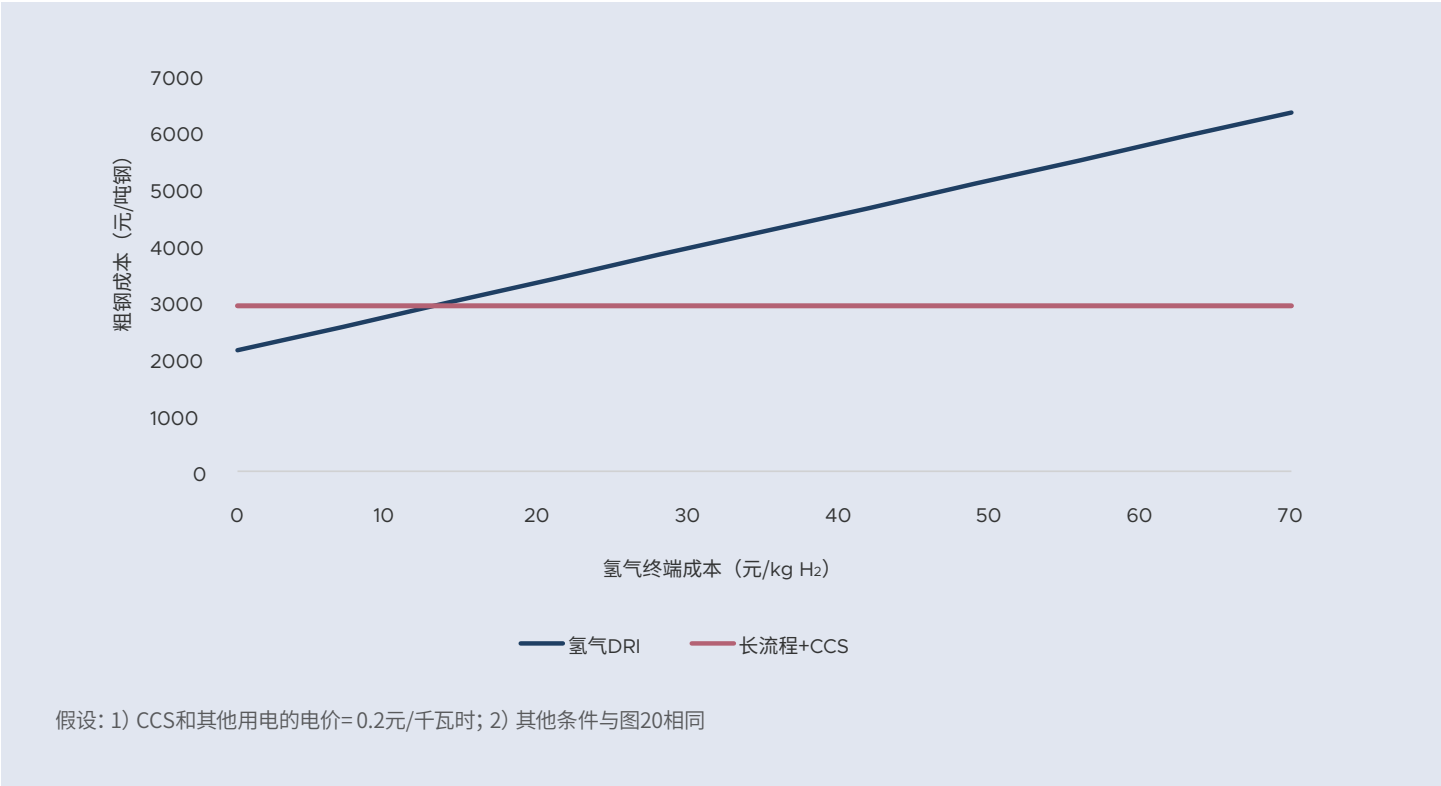
图表23: 在不同电价和碳价条件下，氢气DRI炼钢与传统炼钢路线路线的平价线（新建项目，2050年）



图表24: 不同技术路线的二氧化碳减排成本



图表25: 氢气成本对炼钢成本的影响 (改造项目, 2050年)



第五章 展望中国钢铁零 碳发展：愿景与 转型



本章将从时间和空间两个维度展望中国钢铁行业的零碳转型路线图。一方面，我们将分析短期过渡行动和长期发展愿景，描绘钢铁行业逐步实现零碳转型的路线；另一方面，将结合既有炼钢流程、资源分布、成本性等多项因素，阐述钢铁行业分地区的重点零碳行动，及最终的零碳产能布局。基于此，本章也将对中国钢铁行业未来可能呈现的新业态提出大胆的猜想。

零碳情景下未来三个十年的转型之路

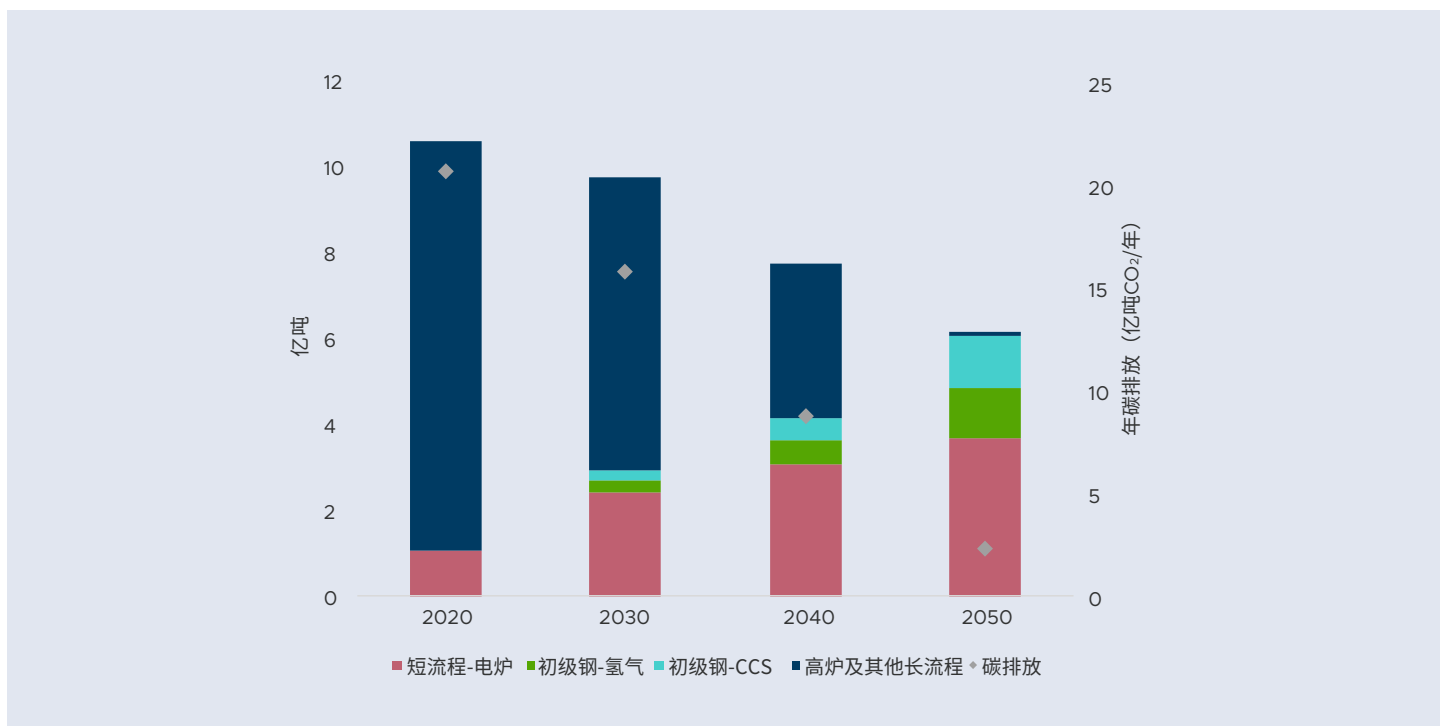
在钢铁行业零碳情景下，中国的炼钢方式将逐渐从以煤炭为主的路线转向零碳路线（图表26）。我们预计，在零碳情景下，到2030年，短流程钢铁产量将占到25%（约2.5亿吨），相较目前产能提高一倍。相应地，废钢需求量将达到每年2.7亿吨。从废钢市场角度来讲，在2030年前，较为完整的区域性废钢市场将逐渐形成，特别是在渤海地区、珠三角、长三角等发达地区，废钢的供给不断扩大，较为可靠的废钢收集、分拣系统将建立起来，废钢的价格稳定性也将得到提高。炼钢企业也可将价值链向上游延伸，进入废钢供应市场，建立自己的供应体系。就电炉钢而言，受益于电力成本，一方面，电炉炼钢厂将在

西南、华北等非化石能源丰富的地区投建和扩产；另一方面，既有的综合性钢厂也将不断扩大电炉钢产能。

另外，在2030年前，如图表27所示，高炉喷吹氢气可作为一种清洁化的过渡手段被规模化应用。氢气直接还原铁、碳捕集等技术将建立多个试点项目，技术成熟度不断提高，成本不断下降。试点项目可以进行项目新建，也可以基于既有高炉或电炉产能，减小投资成本。氢气直接还原铁和碳捕集路线产能占比将各达到2.5%，共贡献约每年5000万吨的钢铁产量。熔融还原等其他技术也将开始试点，有望贡献一部分零碳化初级钢产量。

在2040年前，在零碳情景下，废钢的可获取量将进一步扩大，回收比例和质量也将不断提高，预计短流程将进一步扩大产能，达到每年3.1亿吨。并且，在2040年前，氢气直接还原铁、碳捕集等技术将逐渐进入商业化试点阶段（图表27），在氢气成本降低、碳价、设备规模扩大等因素的驱动下，逐渐缩小成本溢价，扩大应用规模。熔融还原技术也将不断完善，并开始过渡到氢等离子体熔融还原，进一步扩大零碳炼钢技术的可选范围。氢气直接还原铁和碳捕集路线产量占比将各达到7%，共贡献约每年1.08亿吨的钢铁产量。

图表26: 零碳情景下钢铁生产流程（2020-2050）



到2050年，在零碳情景下，再生钢将支撑60%钢铁产量，废钢需求量将达到4.1亿吨每年左右。而对于初级钢而言，氢气直接还原铁和碳捕集技术将实现规模化，在炼钢完全零碳化的过程中发挥更大的作用，可分别达到总钢铁产量的近20%，即2.4亿吨左右的产量规模。这意味着每年700万吨的氢气需求和1亿吨的碳捕集和封存容量需求。另外，氢等离子体熔融还原等其他新型初级炼钢技术也有可能实现规模化，在未来钢铁行业中占据一席之地。在这样的生产结构下，钢铁行业每年能源相关碳排放将下降到每年1.9亿吨以下，较2019年水平下降90%以上。

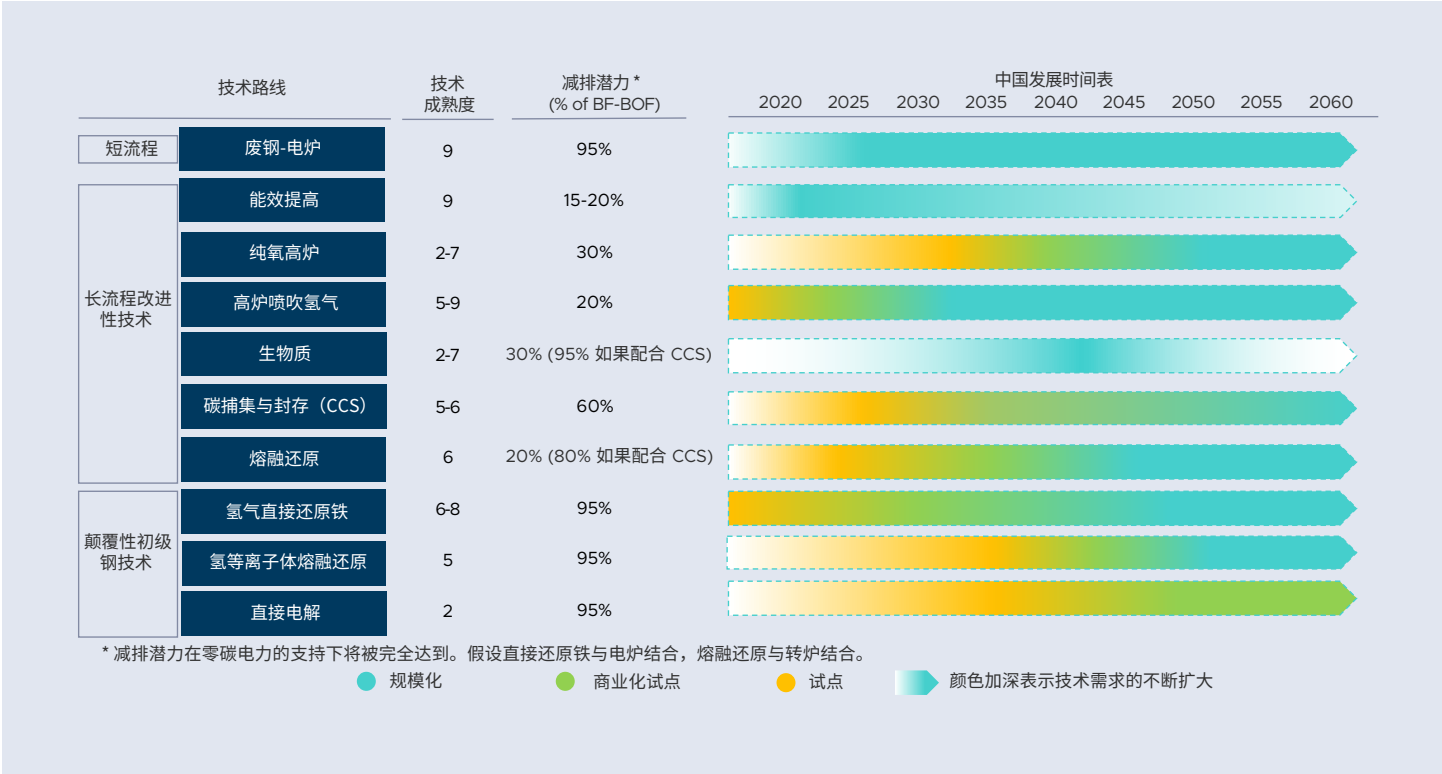
零碳钢铁冶炼产能的地理分布

可再生能源和碳封存容量等零碳资源将重塑零碳钢铁产能地理分布

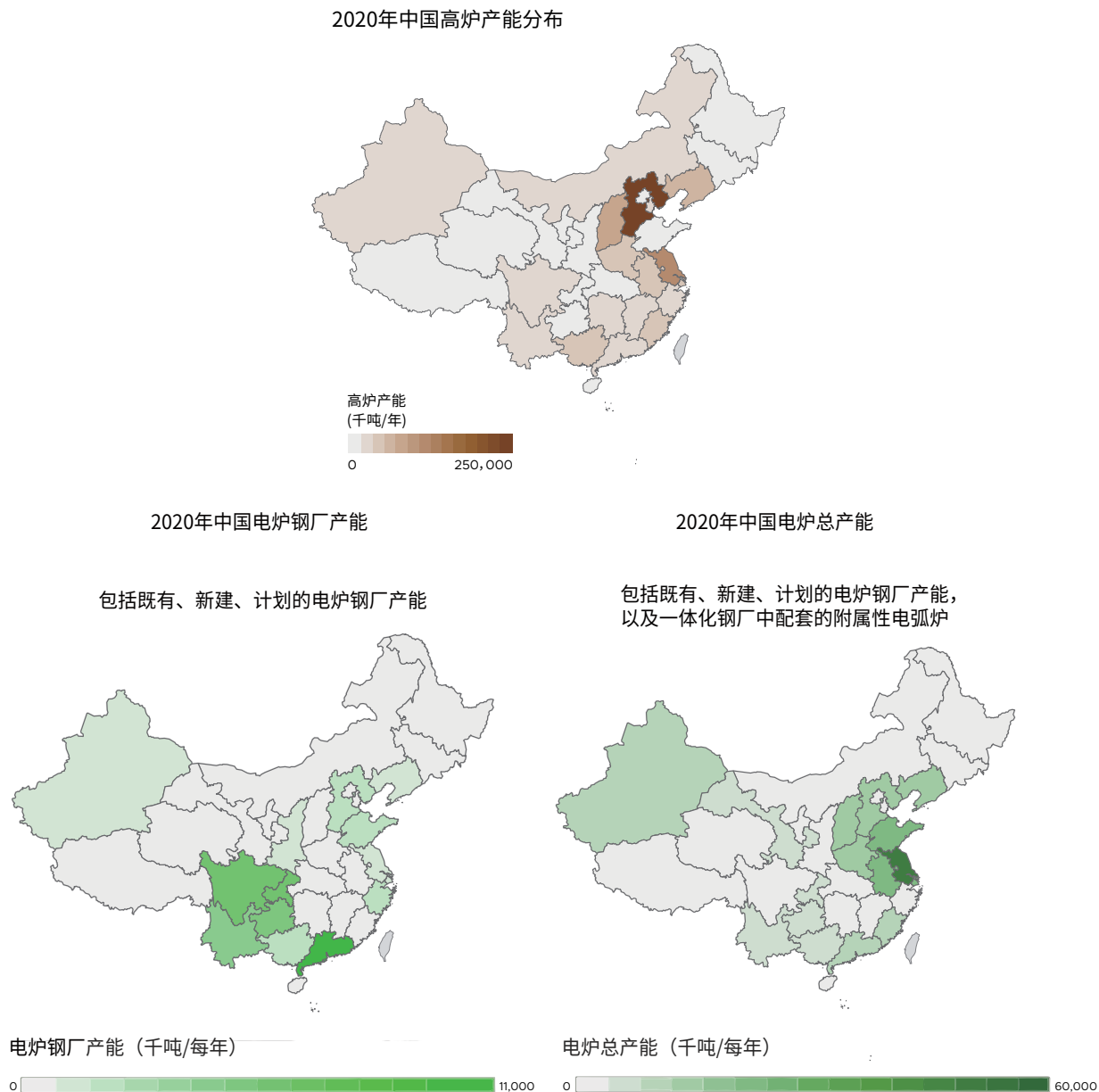
在零碳情景下，钢铁生产的产能布局将受到可再生能源和碳封存容量等新资源约束的影响，形成新的引力场推动产能转移。值得注意的是，既有产能分布、铁矿石等原料来源等现有约束条件仍将对钢铁产能地理布局具有较强的约束性。最终的产能布局将取决于上述所有因素共同作用。

对于既有钢铁冶炼产能，中部和东部地区以高炉产能为主，电炉主要分布在中国西南。如图表28所示，高炉产能集中在中东部地区，其中河北、江苏、山西三省占40%。在电炉产能方面，电炉炼钢厂产能——即设施完全电气化且以废钢为原料——主要位于中国西南部，包括四川、云南和广东等省；同时，还有一些一体化钢厂配备有附属的电炉以提供灵活性，也可以支持电炉路线的产能扩张。

图表27： 钢铁脱碳技术的技术成熟度和发展时间表



图表28: 中国钢铁产能地理分布



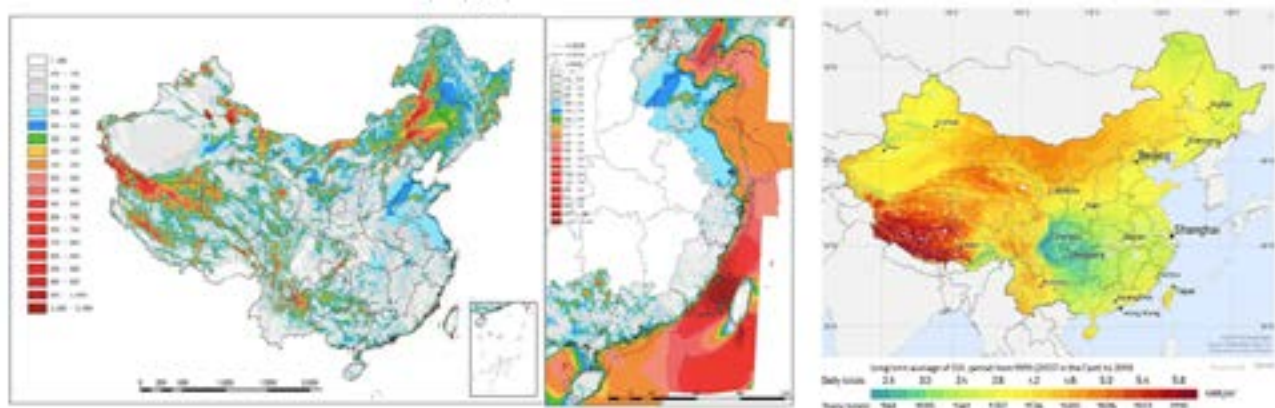
在可再生电力资源方面，西部和北部可再生电力资源丰富，开发成本较低，更利于氢气直接还原铁和氢等离子熔融还原等需要大规模清洁电力供给的路线实施。如图表29所示，中国北方拥有相对较好的风能和太阳能资源，由于大量的弃风弃光现象，多数北方省份已经引入了各种机制以降低可再生能源电力价格。对西南地区而言，丰富的水电资源和议价机制也在发挥作用。对于中国沿海地区，目前工业用户的平均电价高于北部和西部地区，但其在未来可能将受益于电力市场改革和海上风电的发展。因此，短期内，基于氢气的炼钢技术在中国北部

和西部地区可能更具优势，而在东部地区有长期扩大规模的潜力。对于CCS技术的应用考虑到在东北、西北、华北南部、四川盆地等区域有大量咸水层地质以及油田、煤层气田、天然气和页岩气田等适合地质封存即碳利用的场景（图表30），需要利用碳捕集技术的零碳钢铁冶炼产能，应考虑与上述碳封存容量在地理上的适配性，尽可能降低将捕集后的二氧化碳运输到封存地的成本。

图表29: 可再生能源资源在中国的地理分布

70米高度陆上风力资源分布 (左) 及100米高近海5-20米水深海上风力资源分布 (右) , 单位: 瓦/平方米

以水平辐射计的中国太阳能资源分布



数据来源: 国家发改委能源研究所; IEA. (2011). Development Roadmap for China's Wind Power 2050 ; Solargis数据库

图表30: 中国的二氧化碳储存容量分布²⁴



数据来源: KAPSARC

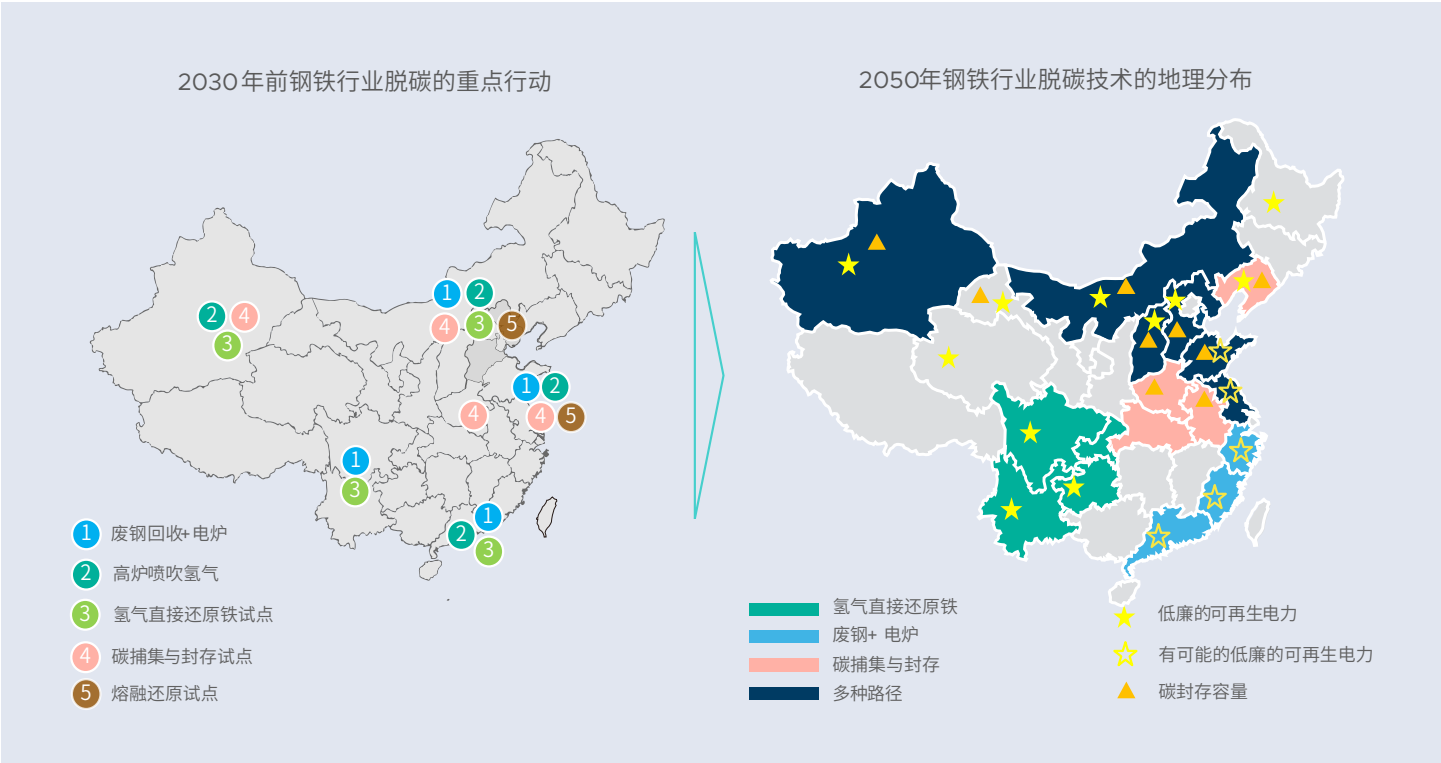
零碳钢铁冶炼产能的空间布局与演进

对各约束因素进行综合考虑，我们得出了中国炼钢行业脱碳的大致地理分布特点。

在零碳情景下的2030年前，针对不同区域，有选择性地采取五大关键行动，向零碳钢铁进行过渡（图表31左）：1) 废钢供应充足的沿海省份和电炉路线基础较好的华北、西南地区，不断扩大电炉短流程炼钢规模；2) 应用高炉喷吹氢气炼钢技术以减少高炉煤炭用量；3) 可再生能源成本低的中国西南和华北地区，开展以氢气为基础的直接还原铁试点；4) 环渤海地区、华中地区 and 新疆等地，开展钢铁行业碳捕集和封存；5) 在华北地区进行熔融还原试点。这些试点将有助于进一步推动技术发展，成本降低，和规模化生产。

在零碳情景的2050年前，这些技术路线将在不同地区共同支持钢铁行业实现碳中和目标（图表31右）。钢铁行业将按照技术、成本、资源等多因素考量，采用多种零碳技术路线，并可能呈现一定的区域性特点。考虑到我国西南地区丰富的水力资源和短流程经验，氢气-直接还原铁技术路线将是其优先考虑的路线之一。沿海地区废钢供应充足但缺乏低成本的可再生能源，可重点关注废钢回收利用和短流程炼钢。华中地区等具有碳捕集容量的地区可以考虑采用碳捕集路线。而华北地区具有多种有利条件，钢铁企业将会根据具体项目的成本和技术可行性从众多路线中进行综合选择。

图表31: 中国钢铁行业零碳发展路线的地理分布图景



需要注意的是，设备的使用年限和产品要求也会对钢铁行业脱碳的路线和地理分布产生影响。使用年限上，中国高炉的平均寿命还不到这些钢厂正常使用年限的三分之一，如果改变工艺，炼钢企业和投资者需要思考如何处理既有资产投资的问题。产品要求上，由于废钢中的杂质问题，以废钢为基础的短流程炼钢的产品类型有一定的局限性。例如，短流程不能用于生产汽车薄钢板等低碳素钢产品。不过，直接还原铁路线可能可以帮助解决这个问题，其杂质较少，可以代替废钢，为短流程生产高质量的钢板提供原料。

与此同时，零碳情景下，新技术路线的普及可能会为钢铁行业开辟新机遇，创造新的商业模式，并改变国内外钢铁行业的业态。

•机遇1: 从东部到西部/北部重新部署炼钢设备

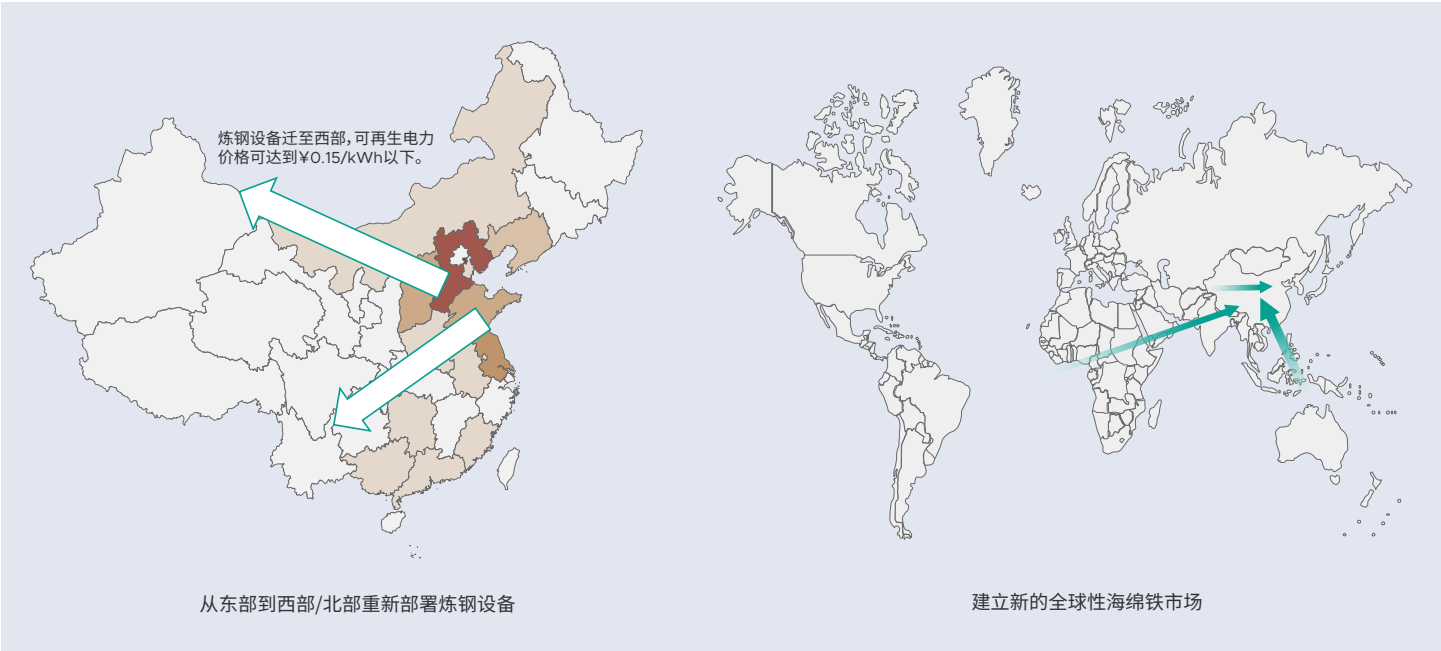
对于2050年前的新建炼钢项目而言，在低成本的可再生能源和不断上升的碳价条件下，以氢气为基础的直接还原铁路线可能实现比长流程更低的成本（图表32左）。因此，未来新建钢铁产能部署在可再生能源丰富且成本低廉的中国西部/北部地区可能是比中国东部地区更好的选择。那么，钢铁企业可以在未来考虑集团内部产能在地理分布上的重新部署，以更好地试点零碳炼钢路线。

•机遇2: 建立新的全球性海绵铁市场

直接还原铁（也称为海绵铁）可以被压缩并进行远距离运输。海绵铁不仅可以用于电炉炼钢，也可以用于转炉工艺，进而延长现有转炉设备的使用寿命，降低资产搁浅的风险。通过在可再生能源成本低的地区（如中国西部）使用直接还原铁工艺生产海绵铁，然后将其运输到中国各地的电炉和转炉，可以实现炼铁和炼钢过程的分离，创造一个零碳海绵铁新市场。在这一模式下，海绵铁的整体成本降低，现有电炉和转炉设施可以继续使用，短流程产能可以大规模扩张，相应的价值链都将从中受益。

此外，澳大利亚、巴西和其他铁矿石生产国也可能成为海绵铁出口国，创造一个全球性市场（图表32右）。这些国家拥有低成本的铁矿石和可再生资源优势，从而帮助他们在零碳钢铁价值链上的扩张。目前，生铁国际贸易市场已经建立，特别是在美国 and 欧洲之间。海绵铁新市场的建立有望进一步支持包括中国在内的全球钢铁行业的脱碳。

图表32: 碳中和目标下中国钢铁产业链的新机遇



第六章 推动中国钢铁 零碳发展： 政策建议



中国钢铁行业要在未来最多40年相对较短的时间内实现全面脱碳，这几乎不可能是一个行业自身发展的过程，而势必是一个以政策趋动为主实现气候影响的外部性成本加速行业内部化的过程，政策指引和规范不论对推动行业尽早碳达峰，还是最终实现碳中和都将发挥关键作用。推动钢铁行业全面脱碳涉及钢铁生产和消费的方方面面。在生产方面，政策的制定既要重点关注脱碳领域，也要兼顾协同其他产业政策目标，并从行业脱碳的视角重新定义中国钢铁对外贸易和投资策略；在消费侧，则要为零碳钢铁产品创造友好的市场发展环境。

具体政策建议如下：

•以终为始，量化定义碳中和目标，倒逼高质量达峰，定期动态调整后达峰时期的碳中和实施路线。考虑到本轮钢铁产业转型将以碳中和为核心驱动力和终极目标，必须进一步明确行业的脱碳的量化目标，即当全国实现碳中和时钢铁行业需要实现近零排放、零排放还是负排放。明确了行业的最终脱碳目标后，应倒推出全行业的达峰年、峰值以及达峰后的碳排放下降速率。正如报告第二章综合分析各研究指出的，中国钢铁产量将很快达峰，在生产工艺和效率不可能快速改变的前提下，中国钢铁行业的碳达峰将主要由产量驱动。因此，在达峰前，政策应该倒逼行业的高质量达峰，避免出现以达峰为由抢上上高碳产能的风潮；达峰后，应综合定期评估行业脱碳行动的进展和相关工艺技术的发展趋势，动态调整行业脱碳目标、时间表和实施路线。

•在碳达峰前和达峰后的5-10年，可持续挖掘基于传统高碳炼钢工艺的能效提升潜力。以高-转炉为主的中国钢铁资产普遍比较年轻，与发达国家相比，距离退役年限还有较长时间。提高能效被普遍认为是具有正经济效益的脱碳手段，从资产充分利用的角度看，应持续推动余热高效利用、数字化能效平台等能效技术在钢铁生产的各环节为行业脱碳发挥重要作用。具体而言，进一步提升高-转钢铁资产的能效可以缓解钢铁行业碳达峰前由于钢产量可能小幅增长所带来的碳排放上升压力，降低全行业峰值，并在达峰后为碳排放尽早结束“平台期”，尽快形成碳排放下降趋势做出关键贡献。在行业碳达峰5-10年后，随着高碳炼钢资产逐步退出，基于相关资产的能效提升碳减排效益也将逐步减小。

•在碳达峰前和达峰后的5-10年，应推动再生钢产能快速替代，并在全行业实现完全脱碳前，合理分配政策资源，更多关注再生钢与零碳初级钢的协调发展。从报告的第三和第四章不难看出，中国初级钢铁生产绝对量大、占比高，在钢铁需求近期不会迅速下降且CCUS和氢基炼钢不能迅速普及的情况下，再生钢替代可以在适当政策支持下具有较好的成本优势，并能较快地实现一定规模的减排效应，甚至将对行业碳达峰产生直接贡献。因此，建议在行业碳达峰前及达峰后的5-10年，通过产能置换，以及从废钢产业生态培育、电弧炉钢电价等方面的政策为再生钢创造加速发展的条件。此外，建议政策通过强有力的监管，推动汽车、家电、建筑等方面的废钢最大程度回收，并制定量化的回收目标。在行业脱碳的中后期，即实现零碳转型前的15-20年，零碳初级钢与再生钢的成本逐步趋近，在一些场景下将具有一定的竞争力。这主要是由于，一方面氢基炼钢、CCUS等技术和工艺已经历了多年的发展和完善，基本形成较成熟的产业体系；另一方面，废钢资源量释放速度放缓，废钢收集成本下降的红利逐渐收缩；此外，初级和再生钢铁生产对有限废钢资源的竞争，也会在一定时期内抑制废钢成本下降，提高短流程钢获得足够资源的成本压力。基于这一趋势变化，政策宜更多注重再生钢和零碳初级钢的协调，避免由于政策的干预，产生偏袒某一种技术路线的情况。如届时钢铁行业参与碳市场已较为完善，可依靠市场的手段，推动形成合理的长短流程产能占比。

•按照燃料/原料和工艺设备替代成本由小到大的原则，循序渐进推动长流程钢生产的脱碳。按照报告第四和第五章的分析，长流程钢的脱碳成本可包括以替代原料/燃料为主的运行成本替代和以替代工艺设备为主的固定成本替代。中国在长流程钢脱碳进程的初期，由于直接还原、熔融还原、直接电解等技术都处在成熟前的不同阶段，还需要一定时间逐步成熟完善。因此，这一时期应尽量少地颠覆式替代既有工艺设备，而是通过在既有技术路线的基础上追加固定投资（安装CCUS设施）以及提高运行成本（氢、电、生物质的应用）的方式实现碳减排。具体而言，应鼓励高炉提高焦化环节副产氢的利用水平，对钢铁企业制氢和用氢予以财政支持，培育钢铁行业氢气消费需求和习惯，并充分利用以高炉为主体的既有资产。同时，积极推动熔融还原、直接还原等未来可适用于氢炼铁的技术工艺路线的研发和示范，加快CCUS的试

验示范以及规模化,鼓励通过跨行业合作推动碳捕集后的资源化利用;在长流程钢脱碳进程的中后期,考虑到原来的高转炉资产逐步进入退役年限,且新技术和新工艺逐步成熟,政策重点应转为加速推动对新资产的投入。具体而言,应逐步完善针对钢铁行业的氢气供应体系和CCUS产业,持续推动氢和CCUS成本的下降,根据各地不同的资源条件推动熔融还原、直接还原等技术工艺的规模化投产和运行。

•注重碳达峰和碳中和目标与其他产业发展目标的协同,将碳减排全面纳入到产业政策制定过程。中国钢铁产业下一阶段的发展将主要围绕推动从绝对规模优势到核心竞争力的提升,具体政策领域包括淘汰落后产能、提高产业集中度以及发展智能制造和推动服务型制造。这些政策总体上将有力地支撑行业碳减排行动。为促进这些产业政策对行业碳减排产生更大的协同效应,应在制定产业政策时,进一步将碳减排量作为落实相关政策和考核政策实施进展的重要量化指标。例如,将碳排放量纳入衡量产能是否落后的标准体系,在实施产能置换项目的审批过程中纳入碳减排量的考虑;在推动企业兼并重组的评估过程考虑碳减排效益。另外,在制定和审批产能布局的过程中,综合考虑本报告第五章提及的可再生能源可得成本性、碳捕集封存地质资源等与零碳钢铁生产相关的新约束条件。

•积极应对全球碳关税形势带来的相关风险,把握好钢铁行业对外贸易和对外投资的节奏,助力全球钢铁脱碳。中国钢铁产业在对外贸易与投资方面的发展也将影响行业的脱碳进程,且不同的贸易或投资目标国对于政策制定有不同关注。对于欧美等发达国家和地区,主要考虑欧美如实施的碳边境调节税可能带来的影响。尽管中国目前对发达国家的钢铁出口量不大,但在中国钢铁行业脱碳初期,仍应做好合理应对碳边境调节税压力的准备,并加快推进钢铁行业加入碳市场的进程,在碳价格机制上实现与发达国家同步,尽可能减少碳边境调节税可能给钢铁出口带来的影响;对于发展中国家,在中国钢铁行业脱碳初期,应慎重考虑海外钢铁项目投资,并合理控制钢铁出口规模。在零碳钢铁生产技术工艺成熟后,可加速零碳钢铁项目的大规模投资和出口规模。

•建立零碳钢铁产品标准认证体系,培育零碳钢铁的消费市场。钢铁生产的绿色化和零碳化是一个循序渐进的过程。在这个过程中,零碳钢铁的生产成本在一个相当

长的时间内将会高于基于化石能源生产的冶金产品。这一成本溢价如能传递给有支付能力和支付意愿的消费者,将为零碳钢铁产业的发展提供可持续的动力。因此,应建立零碳钢铁产品的标准认证体系,在基本建设领域推动全生命周期减排,鼓励各级政府和央企采购零碳钢铁,在适当时机将绿钢消费与地方和企业的碳减排考核指标挂钩,最大限度的培育绿钢消费市场。

参考文献

1. 国家统计局, 中华人民共和国2020年国民经济和社会发展统计公报, 2021.
2. 冶金工业规划院, 2021年中国和全国钢铁需求预测成果研究报告, 2020.
3. World Steel Association, World Steel in Figure 2020, 2021.
4. 上官方钦等, 气候变化与钢铁工业脱碳化发展, 钢铁 Vol.56, No.5 (2021): P1-6.
5. 全球能源互联网发展合作组织, 中国2030年前碳达峰研究报告, 2021.
6. 国际能源署, 钢铁技术路线图: 迈向可持续发展的钢铁技术, 2020.
7. SHIM Sang-Hyung, POSCO Research Institute, Chindia steel industry forecast in 2040, 2011, https://www.posri.re.kr/files/file_pdf/71/270/2804/71_270_2804_file_pdf_1457072498.pdf
8. 中国钢铁工业协会副会长骆铁军: 钢铁技术装备业迎来新发展机遇. <https://www.163.com/dy/article/FROB7IIM05509P99.html>
9. 黄群慧、李芳芳等, 中国工业化进程报告 (1995-2015), 第47页, 社会科学文献出版社, 2017.
10. 城市蓝皮书: 中国城市发展报告No.12, 中国社会科学院城市发展与环境研究所和社会科学文献出版社, 2019.
11. 冶金工业规划院, 2021年中国和全国钢铁需求预测成果研究报告, 2020.
12. 世界钢铁协会, 钢铁下游市场, <https://www.world-steel.org/zh/steel-by-topic/steel-markets.html>
13. 国家统计局, 2020年1-12月份全国房地产开发投资和销售情况, http://www.stats.gov.cn/tjsj/zxfb/202101/t20210118_1812429.html
14. 包斯文, 后疫情时代下, 下游行业“钢需”新变化, 中国钢铁新闻网, http://www.csteelnews.com/sjzx/hyyj/202009/t20200901_39204.html
15. 中国汽车工业协会, 公安部: 全国机动车保有量达到3.8亿辆, http://www.caam.org.cn/chn/7/cate_120/con_5233729.html
16. 新华网, 国家电网公司发布“碳达峰、碳中和”行动方案, http://www.xinhuanet.com/energy/2021-03/02/c_1127158604.html
17. 吴小燕, 2020年中国新基建特高压产业链全景图深度分析汇总, 前瞻经济学人, <https://www.qianzhan.com/analyst/detail/220/200521-a524463f.html>
18. 光大期货研究所, 光期研究新基建系列报告二: “新基建”耗钢几何? https://www.sohu.com/a/388700596_120029359
19. 能源转型委员会、落基山研究所, 中国2050: 一个全面实现现代化国家的零碳图景, 2019.
20. 2021年中国风电用钢市场需求分析, http://www.yuyuannyzx.com/pxb/n_10268.html
21. 河北能源工程设计有限公司, 光伏电站设计优化及增配储能系统可行性讨论.
22. 国际能源署, 能源技术展望2017, 2017, <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2017>
23. Nogueira, L. A. H., Coelho, S. T., & Uhlig, A, “Sustainable charcoal production in Brazil: Criteria and indicators for sustainable woodfuels”. Rome: FAO, 31-46, 2009.
24. The King Abdullah Petroleum Studies and Research Center, Policy lessons from China’s CCS experience, 2018. <https://www.kapsarc.org/research/publications/policy-lessons-from-chinas-ccs-experience/>

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, 2021



除特别标注, 图片均来自istock和freepik .



北京市朝阳区景华南街5号远洋光华国际C座16层
06、07、08A单元

www.rmi.org

© September 2021 RMI. 版权所有。Rocky Mountain Institute® 和RMI® 都是注册商标