

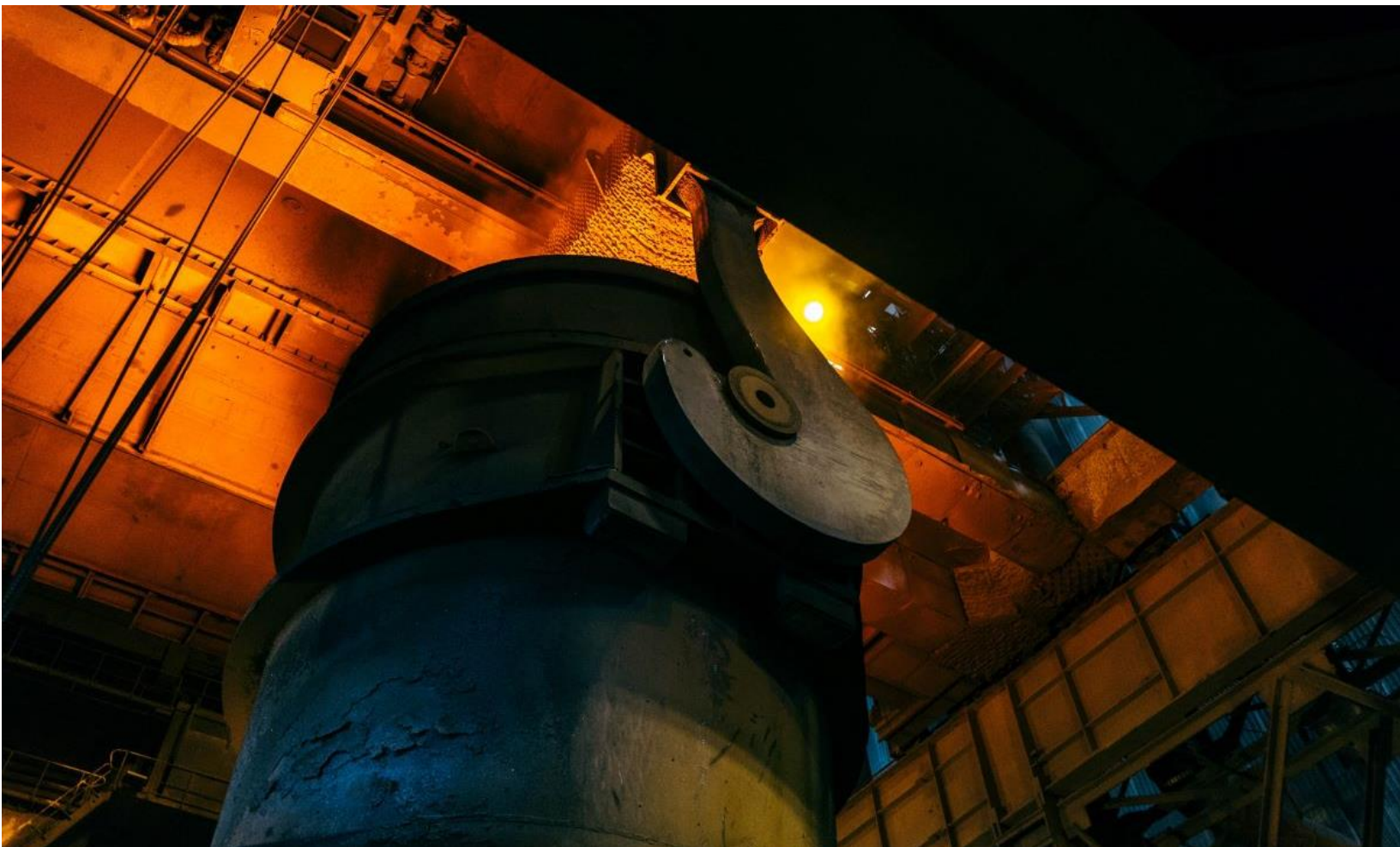


钢铁行业 1.5°C 转型路径

符合《巴黎协定》的钢铁行业脱碳路径

2021 年 10 月

作者：SHA YU、JOHANNA LEHNE、NINA BLAHUT 及 MOLLY CHARLES



免责声明

本报告为接受美国政府机构资助的研究而编制。美国政府或其任何机构、巴特尔纪念研究所、以及任何相关雇员均**不对披露的任何信息、设备、产品或工艺的准确性、完整性或有用性作出任何明示或暗示的保证，不承担任何法律责任，也不对使用该报告不会侵犯私人所有的权利作出保证**。在此通过品牌名称、商标、制造商或其他方式提及任何特定的商业产品、工艺或服务，不一定构成或暗示美国政府或其任何机构或巴特尔纪念研究所对该商业产品、工艺或服务进行背书、推荐或支持。本报告作者在此表达的观点和意见不一定陈述或反映美国政府或其任何机构的观点和意见。

西北太平洋国家实验室

由巴特尔纪念研究所根据DE-AC05-76RL01830号合约代表美国能源部管理

印刷于美国

美国能源部及美国能源部的承包商可通过科技信息办公室获取本报告

P.O. Box 62, Oak Ridge, TN 37831-0062

电话: (865) 576-8401

传真: (865) 576-5728

邮箱: reports@adonis.osti.gov

公众可通过美国国家技术信息服务局获取本报告

5301 Shawnee Rd., Alexandria, VA 22312

电话: (800) 553-NTIS (6847)

邮箱: orders@ntis.gov <<https://www.ntis.gov/about>>

在线订购: <http://www.ntis.gov>

E3G 简介

E3G 是一个独立的气候变化智库，旨在推动全球加速向气候安全的世界过渡。该智库建立了跨行业联盟，以取得精心设定的成果。这些联盟的选定是基于其利用变革的能力。E3G 与政府、政治、商业、民间团体、科学、媒体、公益基金会等领域志同道合的伙伴密切合作。

www.e3g.org

西北太平洋国家实验室简介

西北太平洋国家实验室（PNNL）始终推进知识前沿，应对世界上一些最为艰难的科学技术挑战。在化学、地球科学、生物学和数据科学等方面的独特优势对我们完成科学发现任务至关重要。我们的研究为一系列创新奠定了基础，通过脱碳和能源储存推动可持续能源进程，通过核材料和威胁分析加强国家安全。西北太平洋国家实验室与学术界合作进行基础研究，并与工业界携手将技术进行商业转化。

www.pnnl.gov

建议引用文献

Yu, S., Lehne, J., Blahut, N., & Charles, M. (2021). *1.5°C Steel: Decarbonizing the Steel Sector in Paris-Compatible Pathways*.

作者

Sha Yu、Nina Blahut、Molly Charles（西北太平洋国家实验室）

Johanna Lehne（E3G）

联系人

Sha Yu, sha.yu@pnnl.gov

Johanna Lehne, johanna.lehne@e3g.org

封面图片

一家工厂的钢铁生产。图片由 Ant Rozetsky 拍摄，源自 Unsplash 网站。

致谢

特别感谢 Mihnea Catuti (E3G)、Pieter de Pous (E3G)、Jae Edmonds (PNNL)、Jay Fuhrman (PNNL)、Page Kyle (PNNL)、Haewon McJeon (PNNL)、Suzanne Schenk (Europe Beyond Coal) 和 Wilf Lytton 的宝贵见解、建议、研究以及对本项研究的全程支持。

本报告作者还要感谢以下人士提供的见解和建议：

Rebecca Dell 和 Dan Fahey (气候工作基金会)、Philippa Horton (剑桥大学)、Wido Witecka (Agora Energiewende)、Chris Bataille (法国可持续发展与国际关系研究所)、Simon Evans (碳简报)、Alasdair Graham 和 Rob Campbell-Davis (能源转型委员会)、Peter Levi (国际能源署)、Caitlin Swalec (全球能源监测)、Chan Yang 和 Jimmy Aldridge (欧洲气候基金会)、Roger Smith (Might Earth)、Dave Jones (Ember)、Valentin Vogl (隆德大学)、Margaret Hansborough 和 Will Hall (英国商业、能源和工业战略部)、Ping He、Zixin Lin 和 Ziyang Huang (能源基金会 (中国))、Longqiang Zhang (中国冶金工业信息标准研究院)、Jeffrey Rissman (能源创新)、Frank Zhong (世界钢铁协会)、Yongjie Zhang (宝钢集团中央研究院)、Qi Zhang (东北大学)、Agnes Li 和 Shuyi Li (落基山研究所)、Hao Xu (麦肯锡公司)、Jiyong Eom (韩国科学技术院) 以及 Sarah Jackson、Belinda Schäpe、Madhura Joshi、Domien Vangenechten、Eleonora Moro、Hanna Hakko、Izumi Kotani、Alexandra Hackbarth 和 Lisa Fischer (E3G)。

最后，特别感谢气候工作基金会对本项研究的慷慨支持。

执行摘要

若想将全球温升控制在 1.5°C，所有行业都需要大幅削减碳排放，钢铁行业也必须快速脱碳。每年全球钢铁产量约为 20 亿吨，其产生的温室气体占全球温室气体排放量的 7% 左右。据当前估计，到 2050 年钢铁需求量将增加到每年 25 亿吨以上，其中大部分需求增长来自新兴经济体。

钢铁需求的增加恰逢钢铁行业需要快速减少排放，以使该行业实现《巴黎协定》设定的 2050 年净零排放目标。虽然脱碳的势头日渐上涨，但该行业目前尚未走上大幅减排的道路。加快钢铁行业脱碳需要在国家和国际层面协调一致的政策基础上，通过各种可用减排手段，进一步加快行动，以支持这一转变。

本研究对这些挑战进行了探讨，首次在全球和区域层面分析了符合将全球温升控制在 1.5°C 目标的转型路径对钢铁行业脱碳的影响。通过全球变化分析模型（GCAM）¹，我们探讨了当前政策轨迹与符合将全球温升控制在 1.5°C 目标的路径之间的差距，以及关键技术和需求侧措施在实现钢铁行业加速脱碳中的作用。我们在全球层面以及中国、欧洲、印度、日本、韩国和美国六大钢铁生产地区层面阐述了政策影响。

主要结论

- **钢铁行业加速脱碳是实现 1.5°C 目标的关键。**在具有成本效益的 1.5°C 转型路径中，2030 年钢铁行业排放需要在 2020 年的基础上至少减少 50%，到 2050 年至少减少 95%。如果推迟 10 年采取行动，钢铁行业将在 2020 年至 2050 年期间额外排放 200 亿吨二氧化碳，这一数字约占全球剩余碳预算²总量的 5%（将全球温升控制在 1.5°C 的可能性为 67%）。
- **需求侧手段对于将全球温升控制在 1.5°C 内至关重要。**采取一系列提高材料效率的措施以及扩大废钢回收利用规模，将促使钢铁行业在 2050 年减少 50% 的排放，以实现 1.5°C 目标。此外，这些解决方案现在可以轻松部署，使未来 10 年钢铁行业得以在排放方面取得快速进展，为突破性技术的成熟争取时间。
- **为避免资产提前退役和搁浅，2025 年之后不应上线使用无碳捕集、利用与封存（CCUS）技术的新高炉。**几乎所有无碳捕集、利用与封存技术的高炉（占目前钢铁产量的 61.3%（Swalec 和 Shearer，2021 年）将于 2045 年之前在有序的 1.5°C 转型中逐步淘汰。高炉的平均寿命为 20-25 年，这意味着任何在 2025 年或 2030 年后建成的无碳捕集、利用与封存技术的新高炉都存在成为搁浅资产的风险。这一情况也适用于在该时间框架内经过重新翻修但未进行碳捕集技术改造的现有高炉。

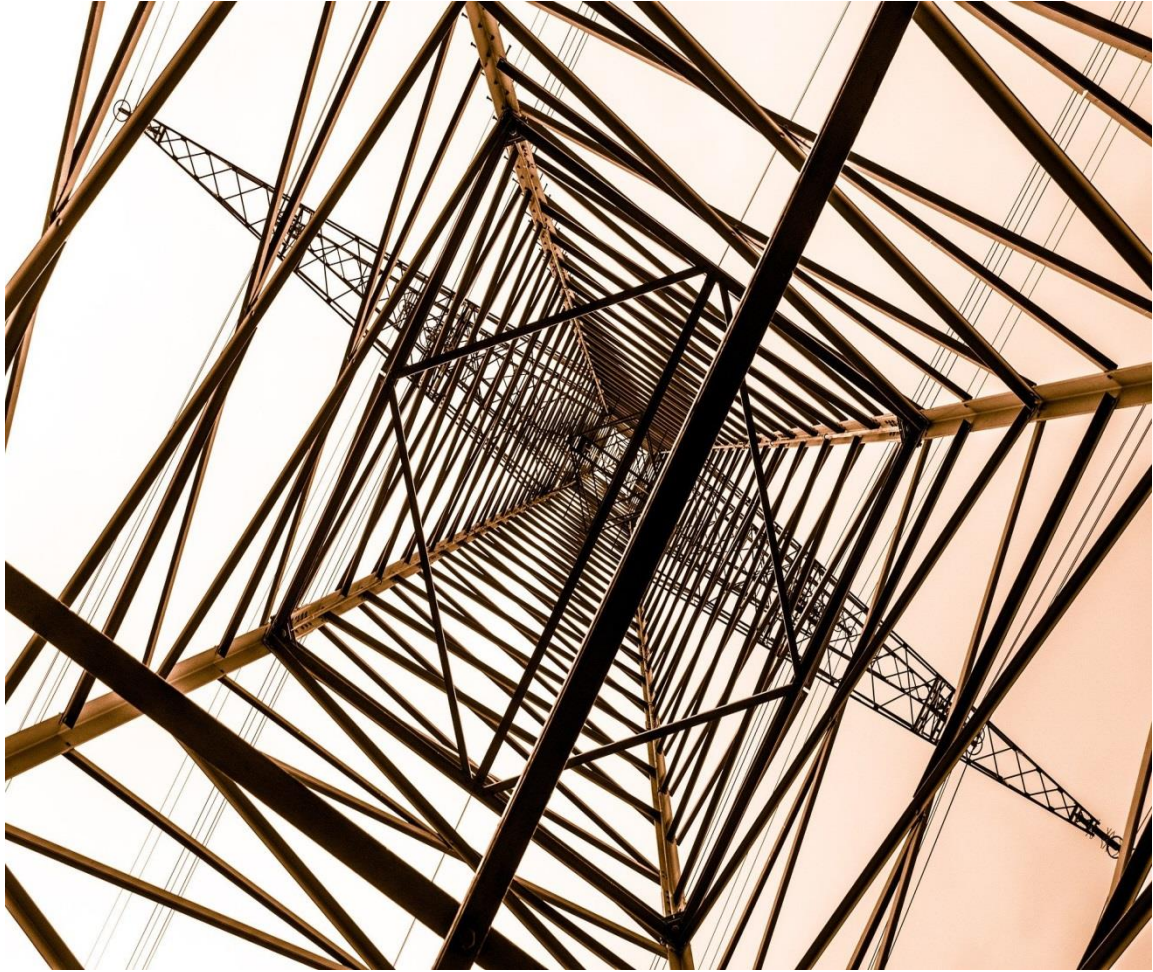
¹ GCAM 是一个开源的全球综合评估模型。源代码和假设请参阅 <https://github.com/JGCRI/gcam-core>。

² 根据联合国政府间气候变化专门委员会第六次评估报告，在将全球温升控制在 1.5°C 的可能性为 67% 的情况下，估计从 2020 年到实现全球二氧化碳净零排放之时的剩余碳预算为 4,000 亿吨二氧化碳。

- **全球钢铁行业需要大规模将产能转向突破性的近零排放炼钢技术。**从 2025 年开始，碳捕集、利用与封存技术需要用于改造现有高炉或配备在新高炉上。³随着其他具有成本竞争力的低碳钢铁生产技术进入市场，无论有无碳捕集、利用与封存技术，高炉的份额都会随着时间推移而下降。由氢基直接还原铁（H₂-DRI）技术生产的钢铁逐渐增多（本世纪 20 年代中期开始投产），到 2050 年占全球产量的 19%。采用碳捕集、利用与封存技术以直接还原铁为原料的电弧炉（EAF）也在增加，到 2050 年其产量占全球产量的 18%。至关重要的是，必须在未来 2-3 年为这一转变打下基础，预计未来 10 年将出现一大波对炼钢产能的再投资。
- **在钢铁行业中，必须逐步淘汰燃煤，增加可再生能源电力和氢气的使用，从而实现大幅减排。**在 1.5°C 有序转型情景中，到 2050 年，未减量煤炭¹仅占全球钢铁行业燃料消耗的 2%，而电力和氢气占 65%。全球钢铁行业用电量从 2019 年的 13,000 亿千瓦时增加到 2050 年的 19,000 亿千瓦时。氢气在钢铁行业中的使用量也大幅增长，到 2050 年将达到 4.5EJ。鉴于氢气和电力消耗的大幅增加，其上游生产比现在更加清洁变得至关重要，这需要在全球范围内大规模扩大可再生能源产能。
- **没有领导者和落后者之说。**各地区钢铁行业脱碳面临的挑战各不相同，所采取的技术路径也不同，六大钢铁生产地区都需要立即行动，加快钢铁行业脱碳。在 1.5°C 有序转型情景中，中国、欧洲、日本、韩国和美国等现有钢铁产能较大的地区，将在 2020 年至 2050 年期间减排 97-99%。随着钢铁产能的快速扩张，到 2050 年，印度需要在 2020 年的基础上将钢铁行业排放减少 90%。
- **钢铁行业转向符合将全球温升控制在 1.5°C 目标的路径，需要在政策制定、技术部署和循环经济方面有更大的雄心。**这需要各利益相关方通力协作，快速行动。政府和钢铁生产企业要尽早设定雄心勃勃的钢铁脱碳目标，通过直接支持钢铁脱碳和限制碳密集型钢铁产能扩张的监管措施（如逐步淘汰不采用碳捕集、利用与封存技术的高炉生产），实现向近零排放钢铁技术的快速转变。钢铁消费者和公共机构需要加强采购方面的投入，以确保近零排放钢铁从一种小众的高端产品变成一种主流商品。政策制定者需要出台相关法规，以充分利用循环经济和材料效率解决方案在钢铁行业的潜力。最后，主要钢铁生产国必须在研究、开发、示范、绿色钢铁标准、认证和绿色钢铁的其他重要市场工具、转型金融、补贴和贸易政策等方面进行协作，以确保公平的竞争环境。

³ 鉴于碳捕集、利用与封存技术在钢铁行业的应用存在不确定性，我们进行了敏感性测试，将碳捕集、利用与封存技术排除在钢铁行业脱碳的选项之外，并在专栏 3.2 中分析了影响。我们得出的结论是，如果钢铁行业不使用碳捕集、利用与封存技术，就需要更大幅度的减排和更早的高炉退役。

¹ 未减量煤炭指那些未使用碳捕集、利用与封存技术来抵消部分污染的煤炭。



缩略词表

BF	Blast furnace 高炉
BOF	Basic oxygen furnace 碱性氧气炉
CBAM	Carbon Border Adjustment Mechanism 碳边界调整机制
CCUS	Carbon capture, utilization and storage 碳捕集、利用与封存
CCFDs	Carbon contracts for difference 碳差价合约
CO ₂	Carbon dioxide 二氧化碳
COP26	26 th session of the Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change 第 26 届联合国气候变化大会
DRI	Direct reduced iron 直接还原铁
EAF	Electric arc furnace 电弧炉
ETS	Emissions trading system 碳排放权交易体系
EU	European Union 欧盟
GCAM	Global Change Analysis Model 全球变化分析模型
GDP	Gross domestic product 国内生产总值
GHG	Greenhouse gas 温室气体
IAM	Integrated assessment model 综合评估模型
IEA	International Energy Agency 国际能源署
IDDI	Clean Energy Ministerial Industrial Deep Decarbonization Initiative 清洁能源部长级会议的“行业深度脱碳计划”
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change 联合国政府间气候变化专门委员会
MDB	Multilateral development bank 多边开发银行

目录

执行摘要	3
缩略词表	6
第 1 章 背景：钢铁行业转型	8
第 2 章 方法和情景	11
2.1 方法.....	11
2.2 情景设计	12
第 3 章 全球钢铁行业转型的 1.5°C 路径.....	15
3.1 符合 1.5°C 路径的钢铁行业排放量	15
3.2 未来的钢铁需求和产量	16
3.3 各减排手段的贡献.....	19
3.4 延迟行动的影响.....	24
第 4 章 主要地区的 1.5°C 转型路径.....	25
4.1 中国：全球钢铁行业脱碳的基石.....	25
4.2 欧洲：潜在的钢铁行业脱碳政策领先者.....	27
4.3 印度：净零钢铁生产的主要增长市场.....	30
4.4 日本：从需求下降和结构性产能过剩向绿色钢铁创新者转变.....	31
4.5 韩国：钢铁行业的绿色新政.....	33
4.6 美国：绿色钢铁复苏.....	35
第 5 章 结论和要点	38
5.1 为实现净零钢铁进行规划和治理.....	38
5.2 支持钢铁技术从碳密集型向近零排放型转变.....	39
5.3 扩大近零排放钢铁的市场.....	40
5.4 充分发挥循环经济和材料效率的潜力，实现钢铁行业脱碳.....	41
5.5 加强净零钢铁的国际协作.....	41
附件 1 本研究考虑的钢铁生产技术	44
附件 2 情景矩阵	47
附件 3 与国际能源署情景的对比	48
附件 4 区域减排贡献	50
参考文献	51

第 1 章 背景：钢铁行业转型

《巴黎协定》改变了有关重工业脱碳的政策辩论。之前的气候协定未将大量国家排放核算在内，《巴黎协定》则不同，它设定了将全球温升控制在 1.5°C 以内的目标，并提出了在本世纪中叶实现碳中和的碳预算。包括钢铁、水泥和化工在内的重工业领域预计将快速脱碳，到本世纪中叶接近净零排放。

钢铁生产是最大的工业排放领域。作为基础设施、建筑、风力涡轮机、家用电器和汽车的重要原料，钢铁是地球上使用最广泛的材料之一。钢铁占全球最终能源需求的 8%，占能源行业二氧化碳排放的 7%（国际能源署，2020 年）。目前绝大多数（61.3%）钢铁是通过燃煤高炉-碱性氧气炉（BF-BOF）炼钢法生产的。在炼钢过程中，冶金煤既是热源，也是碳排放源（Swalec 和 Shearer，2021 年）。钢铁行业高度依赖煤炭，煤炭满足了其 75% 的能源需求。平均每生产一吨钢铁会产生 2.2 吨二氧化碳（国际能源署，2020 年）。

此外，钢铁需求预计将继续增长。2020 年⁴，全球钢铁产量为 18.78 亿吨（世界钢铁协会，2021 年）。随着新兴经济体的壮大，据估计，全球需求将在未来 30 年继续上涨（国际能源署，2020 年）。因此，如果不采取针对性措施减少钢铁行业的碳足迹，该行业的二氧化碳排放可能会进一步增加。

从技术角度来看，减少钢铁行业排放的解决方案越来越多。设计的改变、钢材的高效利用以及钢材的直接再利用可能会降低对通用钢的需求。通过电弧炉对废钢进行回收利用的方式，生产每吨钢间接排放的二氧化碳不到 0.3 吨，比高炉-碱性氧气炉炼钢法低约 85%。电弧炉炼钢排放主要取决于电力来源，因此其产生的排放量比初次炼钢路径更容易减少。因此，扩大电弧炉废钢回收利用是一项关键的减排措施，目前电弧炉约占钢铁产能的 20%（Swalec 和 Shearer，2021 年）。该项措施的实施潜力因地区而异，因为它涉及当前通用钢和再生钢生产的比率、废钢的可用性和质量、现有高炉的平均使用年限以及通用钢和废钢贸易的平衡。

此外，还有一些新方法可以实现更为清洁的通用钢生产。与高炉-碱性氧气炉炼钢法相比，使用天然气以直接还原铁（DRI）为原料炼钢可以减少 66% 的排放强度（Witecka 等，2021 年）。专家认为这是一项关键的过渡性解决方案，因为这种方案目前已经可以实施，最终可以在不需要额外改造的情况下实现脱碳：随着时间的推移，越来越多以可再生能源生产的氢气可以用于钢铁生产。然而，天然气的锁定效应风险必须加以控制。

净零排放初次炼钢工艺也在开发中，包括使用电解制氢以直接还原铁为原料的电弧炉炼钢（直接还原铁-电弧炉-氢气）。该工艺的电力来源于可再生能源，炼钢采用的是碳捕集、利用与封存技术以及铁矿石电解技术。⁵ 去年宣布了一系列氢基直接还原工艺试点项目，且企业预测以氢气为燃

⁴ 受新冠疫情影响，2020 年的钢铁需求有小幅下降。

⁵ 由于铁矿石电解技术尚处于发展的早期阶段，本研究未将其考虑在内。然而，它已被列入国际能源署的《2020 年钢铁技术路线图》，并可能在钢铁行业脱碳中发挥重要作用。

料生产的净零钢铁最早可能在 2025 年投入商业使用（Henbest, 2021），使得氢基直接还原工艺的势头非常强劲。

对钢铁行业转型可行性的乐观情绪上涨，也促使私营部门作出更多承诺。去年，钢铁企业作出了一系列“净零”承诺，这些企业目前占全球钢铁产能的 20% 以上（Swalec 和 Shearer, 2021 年）。领先的钢铁消费者也开始发生转变。“买家俱乐部”倡议的出现（例如由气候组织运营的“零排放钢铁计划”）让市场参与者愿意为绿色钢铁支付溢价（Delasalle 等, 2021 年）。

然而，这些努力仍只覆盖了全球钢铁市场的一小部分，而且令人担忧的信号表明，该行业的行动还不够快。目前设定的净零排放承诺往往不明确，企业指望在 2030 年后才开始大幅减排。大多数承诺净零排放的钢铁企业尚未就如何实现其承诺制定详细的路线图（Gardiner 和 Lazuen, 2021 年）。

钢铁行业脱碳的道路上仍存在诸多众所周知的障碍。目前，无排放钢铁的生产成本仍然高昂，并且缺乏一个相当大的、有保障的市场。钢铁属于资本密集型行业，投资周期通常长达几十年，这就导致了高度惰性。钢铁行业的全球产能过剩压低了一些地区的钢铁价格，抑制了投资者的投资热情。目前，钢铁企业正面临用低排放产能取代现有产能的压力，这也使得新参与者难以进入市场和大公司竞争。最后，钢铁在全球范围内交易面临着激烈的价格竞争，在这种情况下，钢铁生产企业更难在不影响其竞争力的情况下转嫁投资于清洁技术的额外成本。

此外，快速脱碳的必要性与当前和计划中的钢铁产能形成了鲜明对比。目前正在建的钢铁产能有四分之三是基于污染最严重的燃煤高炉-碱性氧气炉炼钢法（Swalec 和 Shearer, 2021 年）。考虑到这些工厂较长的使用周期（大约 20-25 年或者更长，取决于地点），现在新建的任何高炉都将锁定大量碳排放，使全球温升控制在 1.5°C 范围内更加困难。因此，负责产业和经济规划的政策制定者应考虑在其各自国家加快钢铁行业的转型，并相应调整政策，这一点至关重要。

钢铁行业需要快速转型，沿着符合将全球温升控制在 1.5°C 目标的路径发展。预计未来十年将出现一大波钢铁产能再投资热潮（大于现有高炉-碱性氧气炉产能的 50%）。但关键问题是，在不久的将来，工厂所有者将选择怎样的技术路径。现在需要正确的政策信号，让工厂所有者有信心投资突破性技术，而不是通过工厂改造锁定碳密集型生产，或眼睁睁看着工厂关闭。

决策者需要对符合将全球温升控制在 1.5°C 目标的钢铁行业脱碳所需的速度、路径和政策有更多的了解。这份报告旨在填补其中的一些空白，针对在全球范围内和关键地区（中国、欧洲⁶、印度、日本、韩国和美国）钢铁行业脱碳达到 1.5°C 目标的影响，提供可靠详细的信息。

⁶ 本报告中所指欧洲包括：安道尔、奥地利、比利时、保加利亚、海峡群岛、塞浦路斯、捷克、丹麦、爱沙尼亚、福克兰群岛（马尔维纳斯群岛）、法罗群岛、芬兰、法国、德国、直布罗陀、希腊、格陵兰岛、匈牙利、爱尔兰、马恩岛、意大利、拉脱维亚、立陶宛、卢森堡、马耳他、摩纳哥、荷兰、波兰、葡萄牙、罗马尼亚、圣赫勒拿岛、圣皮埃尔和密克隆群岛、圣马力诺、斯洛伐克、斯洛文尼亚、西班牙、瑞典、特克斯和凯科斯群岛、英国、梵蒂冈、维尔京群岛（英国）、瓦利斯和富图纳群岛。



第 2 章 方法和情景

2.1 方法

为了了解钢铁需求、生产技术和排放的变化，我们在本研究中使用了全球变化分析模型（GCAM）（Bond-Lamberty, 2021 年）。该模型是一个全球范围内的多领域综合性模型，涵盖人类与地球系统动态，应用于联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）的所有综合评估报告中。这一模型包含能源、水、农业和土地利用、经济以及气候系统，可以通过情景分析来探索和量化它们各自的变化和之间的相互作用。全球变化分析模型包括 32 个地缘政治区域、384 个土地利用区域和 235 个流域。每个地区都有自己的一套假设，比如现有的基础设施、资源禀赋以及技术成本和效率。该模型的时间步长为 5 年，运行至 2100 年，并根据 2015 年的历史数据进行校准。使用 GCAM 模型的主要优点在于，它可以捕捉钢铁部门与其他能源、经济和环境系统之间的相互作用，并能深入了解上游和下游部门的变化将如何影响钢铁行业脱碳，反之亦然。

全球变化分析模型基于市场均衡原则运行，并在一组价格上迭代，直到模型中所有市场的供给和需求达到平衡。价格和其他相关信息被用来做出资源配置的决策。该模型是动态递归的，所以主体在当前周期做决策时不知道未来会怎样。关键的输入假设包括人口和国内生产总值、技术成本和性能、水和土地需求、资源可用性以及气候政策。模型输出包括能源供需、技术部署、每个领域的价格、土地使用、水需求和温室气体排放。

全球变化分析模型中的技术根据其特征、投入成本和输出价格来争夺市场份额。一项特定技术包含三部分成本：非能源成本、效率和投入燃料的价格。非能源成本包括在设备生命周期内产生的平准化资本成本、固定成本和可变成本。效率衡量生产一个单位产出所需的投入。燃料价格在模型内针对不同地区在每个周期通过内生性计算得到。全球变化分析模型中的技术，包括用于发电、炼制、工业、建筑和交通的技术，都是分不同年份的。现有的工厂或设备将继续运行，直到实际使用寿命结束。如果价格下降到运行成本超过资本寿命的程度，这时工厂或设备将被淘汰。在本项研究中，假设发达地区和中国的钢铁厂寿命为 20 年，印度和其他新兴经济体的钢铁厂寿命为 25 年。基于 logit 选择函数引进新技术。logit 函数已被广泛用于确定离散技术的市场份额，并考虑了可能影响技术选择的非模型因素，如社会、行为和制度因素（J. F. Clarke 和 Edmonds, 1993 年）。

全球变化分析模型是一个高分辨率的综合评估模型（IAM），包含高度耦合的经济、能源、土地、水和气候系统。与大多数现有的钢铁行业模型和能源系统模型相比，全球变化分析模型可以捕捉到系统之间复杂的相互作用和反馈，以及一个系统的变化如何影响其他系统。例如，钢铁行业内氢气的使用与航空和海运等其他行业的氢气使用存在竞争，并受到氢气生产和运输的限制，而氢气生产和运输又进一步受到天然气生产和发电等上游部门的影响。同样，以生物质能为基础的高炉的使用受到能源作物可用性的限制，而能源作物要与粮食作物和森林争夺土地；此类高炉的使用同时也受到能源系统其他部分的生物能消耗的影响。在本项研究中，全球生物能消耗上限为 100EJ，以保证可持续性（Creutzig, 2015 年）。但是，全球变化分析模型也有其局限性。虽然全球变化分析模型或其它综合评估模型是探索具有成本效益的 1.5°C 路径极具价值的工具，但它

他们没有充分考虑与快速系统转型相关的政治和社会约束，也没有衡量气候变化造成的经济损害和增长放缓。⁷

本研究使用的全球变化分析模型版本包含钢铁行业的详细阐述，其中包括钢铁生产的八项竞争技术（图 2.1）。这些技术包括现有技术，如高炉-碱性氧气炉以及使用废钢或直接还原铁作为主要原料的电弧炉，以及有潜力使钢铁行业完全脱碳的创新技术，如碳捕集、利用与封存技术和电弧炉氢气直接还原炼钢（详细的技术说明见附件 1 表格）。

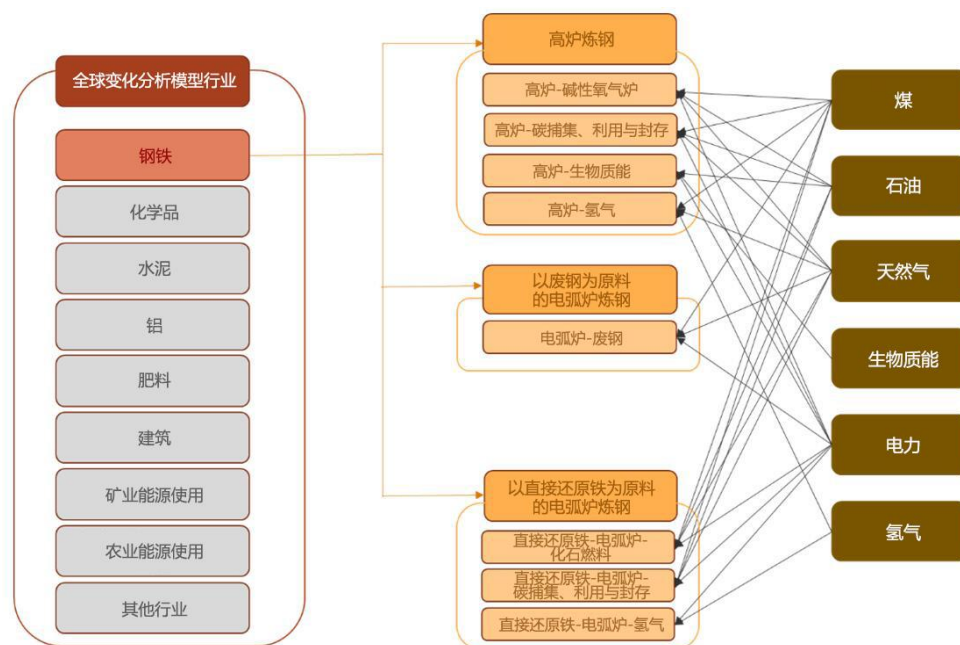


图 2.1 全球变化分析模型中的钢铁行业

2.2 情景设计

本研究所探讨的情景考虑了两个关键问题。第一，当前政策轨迹与符合将全球温升控制在 1.5°C 目标的路径之间存在什么差距？第二，在以将全球温升控制在 1.5°C 为目标的未来，关键技术和需求侧措施在钢铁行业转型中能发挥怎样的作用？

为了研究第一个问题，我们设定了三种全球排放路径。参考排放路径在很大程度上依赖于当前的政策和技术，可以用来评估减排政策的影响，是联合国政府间气候变化专门委员会评估报告和其

⁷关于“全球变化分析模型”文档，请参阅 <https://jgcri.github.io/gcam-doc/>。关于综合评估模型的优势和劣势的更多信息，请参阅联合国政府间气候变化专门委员会第三工作组第五次评估报告第 6.2 章：评估转型路径，https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_chapter6.pdf（L. E. Clarke 等，2015 年）；“如何使用‘综合评估模型’研究气候变化”，请查看 <https://www.carbonbrief.org/qa-how-integrated-assessment-models-are-used-to-study-climate-change>（Evans，2018 年）

他建模研究常用的方法。将全球温升控制在 1.5°C 有不同的路径。为了理解不同路径对钢铁行业转型的影响，我们研究了两个 1.5°C 路径：立即转型和延迟转型。第 3 章和第 4 章中讨论的 1.5°C 结果是基于实现图 2.2 所示排放轨迹的全球具有成本效益的路径。

- **参考路径 (Ref)**：参考路径假设各国在 2020 年后不采取任何新政策。该路径为我们探讨政策行动和减排行动的影响提供了一个基准。
- **有序 1.5°C 转型路径 (1p5)**。在有序 1.5°C 转型路径中，全球排放开始立即减少，各国通力协作到 2050 年实现二氧化碳净零排放。在这一路径中，2020 年至 2050 年（即净零年）的累计碳排放估计为 4,700 亿吨二氧化碳，这与有 50% 的可能性将全球温升控制在 1.5°C 以内的碳预算大致相符（Masson-Delmotte, 2021 年）。
- **延迟 1.5°C 转型路径 (1p5 延迟)**。在延迟 1.5°C 转型路径中，2030 年之前全球排放将继续增加，然后各国开始合作将排放降至零或远低于零。在 2020 年至 2100 年期间，两种路径设计了相同的累计排放，但由于延迟 1.5°C 转型路径在 2020 年至 2050 年期间更高的峰值温度碳预算——7,700 亿吨二氧化碳，延迟转型路径在短期内温升可能超出 1.5 度。

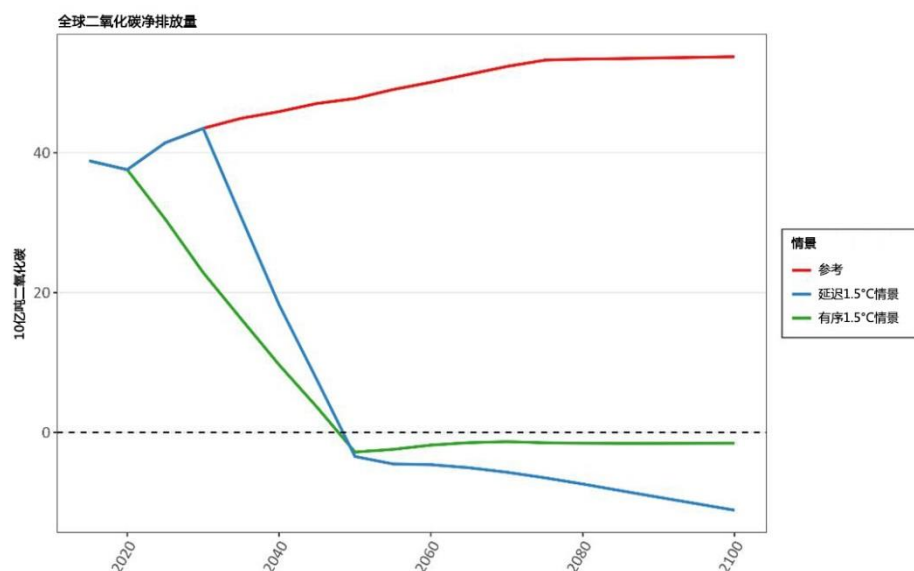


图 2.2 当前政策下、1.5°C 和 1.5°C 延迟转型路径下的全球二氧化碳净排放总量趋势

可以采取多种措施减少钢铁行业的排放。我们探讨了参考路径和符合将全球温升控制在 1.5°C 目标的路径中需求和供应侧的措施以及它们之间的相互作用和平衡。这些措施体现了技术成熟的不同阶段，具有不同程度的减排潜力。

- **能源效率**。能源效率提升虽然不能使钢铁行业完全脱碳，但可以以相对较低的成本减少钢铁行业的排放。据国际能源署（IEA）估计，升级到最佳可用技术平均可以将钢铁生产技术的能源效率提高 20%（Oki 和 Salamanca, 2021 年）。
- **材料效率**。材料效率措施可以在提供相同的材料服务的同时，减少钢材需求，从而减少排放。这些措施包括需求侧措施，如延长建筑寿命和汽车轻量化，以及供应侧措施，如提高

产量。我们考虑了八种不同的措施提高材料效率（见专栏 3.1），并评估了材料效率的提高对全球和主要地区钢铁脱碳的影响。

- **回收利用。**通过改善钢铁生产过程中的材料回收和废钢使用，可以实现大幅减排。以废钢为原料的电弧炉炼钢，再加上电力部门脱碳，有巨大潜力以具有竞争力的成本减少排放，但目前受到废钢供应和质量的限制。未来几十年，随着可用废钢的增加以及废钢分类和净化技术的发展，这样的机会会越来越多。
- **氢气。**氢气被认为是钢铁行业脱碳的关键策略之一，有两种使用方式：作为高炉-碱性氧气炉炼钢法的辅助还原剂或作为电弧炉-直接还原铁炼钢法的唯一还原剂。由于全球变化分析模型是一个综合评估模型，我们考虑了氢气的生产和运输以及氢气在其他部门（如化工和货运）的使用，并评估了这些因素如何影响钢铁行业对氢气的使用。
- **碳捕集、利用与封存技术。**碳捕集、利用与封存技术可以在钢铁行业的脱碳中发挥重要作用，特别是有使用时间较短的大型高炉-碱性氧气炉设施的地区。碳捕集技术可用于钢铁厂或钢铁厂所消耗燃料（如氢气、电力和精炼液体）的生产过程中。全球变化分析模型既考虑了特定行业的碳捕集技术，也考虑了特定地区的运输和储存能力。此外，还考虑了不同类型的利用和储存方式，包括增进石油回收、煤、油、气田和深盐水层（Li 等，2009 年）。在钢铁行业部署碳捕集、利用与封存技术的潜力取决于捕集成本以及二氧化碳管道和储存地点的成本。

能源效率、材料效率、提高回收和废钢使用、氢气和碳捕集、利用与封存技术都是实现钢铁行业大幅减排的必要措施。对大部分措施（回收利用、氢气和碳捕集、利用与封存技术）而言，零碳电力将成为一个关键因素。此外，技术成本、燃料价格、资源禀赋、原材料和关键基础设施、现有设施和钢铁产能以及特定地区的政策将影响技术组合和燃料转型，并在以将全球温升控制在 1.5°C 为目标的未来促进钢铁行业的转型。

为了研究减少钢铁行业排放的特定措施的影响，并探索不同的转型路径，我们为钢铁行业设计了 15 种情景，考虑了上述减排策略和排放路径之间的相互作用（见附件 2）。报告重点关注包含上述所有五项减排策略的 1.5°C 有序转型情景，这一情景呈现的是积极实施现有的减排措施，迅速开发和部署创新技术，即刻采取减排手段并在 2050 年实现全球二氧化碳总量净零排放。

第 3 章 全球钢铁行业转型的 1.5°C 路径

钢铁行业在深度脱碳中面临几个关键挑战。该行业的资本密集程度、低碳钢铁生产技术尚未成熟，以及全球钢铁价值链的出口特性，都让钢铁成了“减排难”的行业（Davis 等，2018 年）。然而，近年来，越来越多的研究表明了钢铁行业转型的可行性。⁸此外，全球和区域研究提出的一系列日益雄心勃勃的钢铁脱碳路径，已经开始使该行业的脱碳轨迹日渐充实。⁹

我们的报告建立在上述研究的基础上，对符合将全球温升控制在 1.5°C 目标的钢铁行业脱碳路径及其对主要钢铁产区的影响进行了详细研究（我们的研究与国际能源署路径的对比，请参阅附件 3）。以我们的参考情景作为基准，以延迟 1.5°C 转型情景作为对比，本章阐述了我们关于全球范围内钢铁行业有序 1.5°C 情景的主要结论。首先，我们概述了总体排放路径，然后预测了钢铁需求和产量以及材料效率对钢铁需求和产量的影响；其次深入探讨了各个减排手段的贡献、对能源使用和基础设施部署的影响；最后，我们研究了全球层面延迟行动的风险。

3.1 符合 1.5°C 路径的钢铁行业排放量

根据《巴黎协定》符合将全球温升控制在 1.5°C 目标的路径，需要钢铁行业在 2020 年的基础上，到 2030 年至少减排 50%，到 2050 年至少减排 95%。若想按此目标加速减排，就需要对生产地和供应链基础设施进行规模远远大于当前水平的改造。现有的综合炼钢厂（高炉-碱性氧气炉）面临的挑战尤为严峻，这些钢铁厂不能完全脱碳，必须进行设备退役、设备改造或关闭工厂。根据全球钢铁厂追踪器（Global Steel Plant Tracker）的数据，目前全球约 61.3% 的粗钢产能使用高炉-碱性氧气炉炼钢法（Swalec 和 Shearer，2021 年）。

为实现这一目标，主要钢铁生产企业必须加快行动。到 2050 年，印度将超过中国成为全球最大的钢铁行业排放国（图 3.1）。中国的钢铁需求将大幅减少，钢铁生产技术也将发生巨大转变，但到 2050 年，中国依然是主要排放国。在 1.5°C 情景下，到 2050 年，印度和中国共占钢铁行业剩余 1 亿吨二氧化碳排放的 55%，这两个国家的钢铁产量也占全球的 55%。与此同时，这两个国家的钢铁行业排放在 2020 年至 2050 年期间明显减少，其总排放量从 24 亿吨二氧化碳减少到 6,000 万吨二氧化碳。包括欧洲、日本、韩国和美国在内的其他主要钢铁生产国都通过先进的减排手段大幅减少了钢铁行业排放，到 2050 年仅有 100-500 万吨二氧化碳的剩余排放。新兴经济体，特别是亚洲的发展中国家（不包括中国和印度），将在钢铁生产中发挥日益重要的作用。在 1.5°C 情景下，这些国家到 2050 年将占全球钢铁行业排放的 14%。

⁸ Material Economics: 《产业转型 2050》；麦肯锡：《钢铁行业的脱碳挑战》；经济合作与发展组织：《钢铁和水泥行业的低排放和零排放》。

⁹ 最近公布的钢铁行业脱碳路线图包括：国际能源署的《钢铁技术路线图》和《2050 年净零排放》；印度能源与资源研究所的《向低碳钢铁行业转型》；落基山研究所（中国）的《中国实现零碳钢铁》；可行使命伙伴关系的《净零钢铁行业转型战略》；法国可持续发展研究所的《全球设施瞄准净零钢铁路径》。

各地区钢铁行业二氧化碳排放量所占比例，延迟1.5°C情景

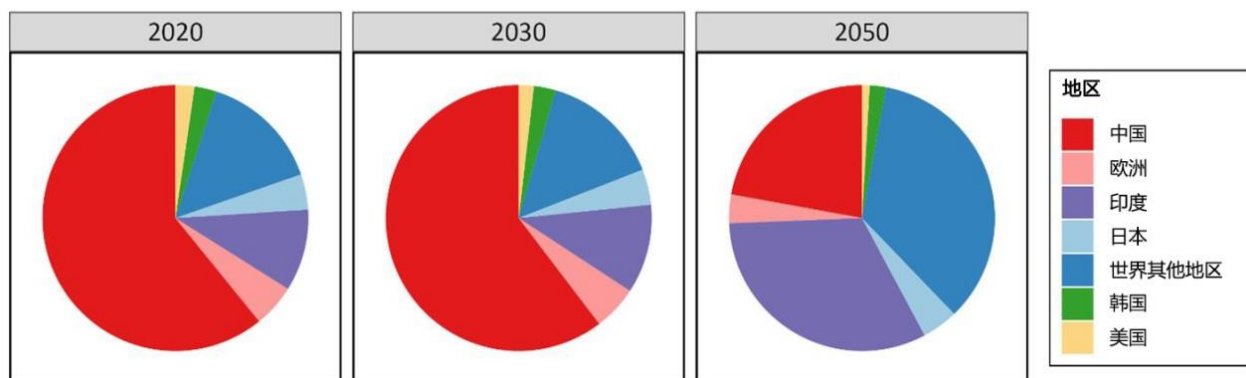


图 3.1 有序 1.5°C 路径下，主要地区在 2020 年、2030 年和 2050 年的钢铁行业二氧化碳排放量所占比例。全球钢铁行业二氧化碳排放总量在 2020 年、2030 年和 2050 年分别为 34 亿、17 亿和 1 亿吨二氧化碳。

3.2 未来的钢铁需求和产量

未来各地区的钢铁产量

钢铁是众多行业的重要投入原材料，为基础设施、清洁能源技术、大型家用电器和运输行业提供零部件。目前，就多种最终用途而言，几乎没有现成的替代品能达到与钢铁类似的标准，这使得钢铁成为现代经济的基础。因此，钢铁需求与任何一个国家的经济发展阶段都密切相关。由于基建扩张、城市化和消费者需求增加的推动，新兴市场预计将出现钢铁需求的大量增长（世界钢铁协会，2021 年）。这一需求增长预计将持续到本世纪中叶，甚至更长时间。相比之下，大多数发达经济体的钢铁需求要么达到饱和水平，要么预计将在不久的将来达峰并下降。发达经济体钢铁需求的一个关键驱动因素将是可再生能源基础设施的持续扩建（Audenaerde，2017 年；国际能源署，2020 年）。

从全球范围看，新兴经济体不断增长的钢铁需求和发达经济体相对稳定的需求，导致全球钢铁产量将持续增长至 2050 年。在我们的参考情景中，全球钢铁产量在未来 30 年将增长近 35%，从 2020 年的 18.64 亿吨（世界钢铁协会，2021 年）到 2050 年的 25 亿吨左右。

三大关键趋势支撑着钢铁生产的区域动态（图 3.2）。第一，随着中国转向资源密集程度较低的经济增长模式，中国的钢铁产量在 2025 年左右达到峰值，此后呈下降趋势。尽管到 2050 年，中国仍是全球最大的钢铁生产国，但其在全球钢铁产量中的占比从 2020 年的 54% 下降到 2050 年的 30%。第二，在未来几十年，欧洲、日本、韩国和美国等发达经济体的钢铁产量将呈平稳状态，没有增长或略有下降。这四个地区的钢铁产量占比从 2020 年的 22% 下降到 2050 年的 15%。第三，2050 年之前，新兴经济体是钢铁需求和产量增长的主要推动力。特别是，印度的钢铁产量从 2020 年的 1.17 亿吨（全球产量的 6%）增加到 2050 年的约 5.7 亿吨（全球产量的 23%）。其他发展中地区也出现了快速增长。例如，印度尼西亚的钢铁产量到 2050 年将增加到 6,000 万吨左右，占全球钢铁总产量的 2.5%。

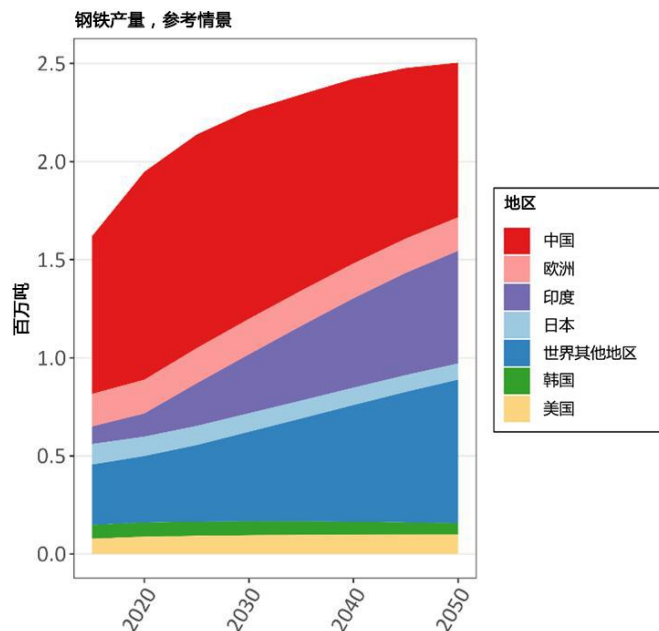


图 3.2 参考情景下的钢铁产量

材料效率对未来钢铁产量的影响

雄心勃勃的材料效率举措可以显著降低全球钢铁需求和产量。通过改变设计，使用更高质量钢材，延长钢材密集型产品和建筑的寿命，可以减少钢铁需求，在某些给定情况下可以减少 40% 以上（本研究考虑的材料效率措施见专栏 3.1）。与参考情景相比，在我们的 1.5°C 情景下采取一系列积极材料效率措施，到 2050 年将使全球钢铁产量减少 4.7 亿吨（图 3.3a）。这一举措将使排放到 2050 年前减少 21%，成为将全球温升控制在 1.5°C 范围内的关键手段之一。

材料效率措施的影响因地区而异。拥有更多基础设施和在用库存的发达经济体进行材料效率改进会产生更大的影响。积极材料效率举措会使欧洲、日本、韩国和美国的钢铁产量到 2050 年相比参考情景减少 22-26%，而中国和印度会减少 18-19%。不过，考虑到印度、中国和非洲未来的钢铁产量和消耗量，如果钢铁行业要实现净零排放，就必须在主要增长市场充分利用需求侧措施的潜力。然而，提高材料效率的行动依赖多方的合作和推动，包括钢铁供应链的各个环节，比如建筑师、汽车制造商、工程师和消费者。

图 3.3a 全球钢铁产量

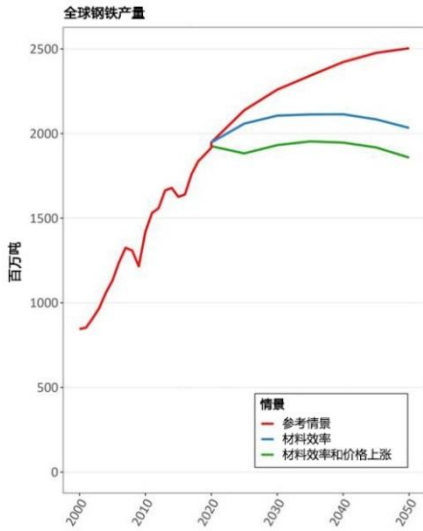


图 3.3b 材料效率措施对全球钢铁总产量减少的贡献

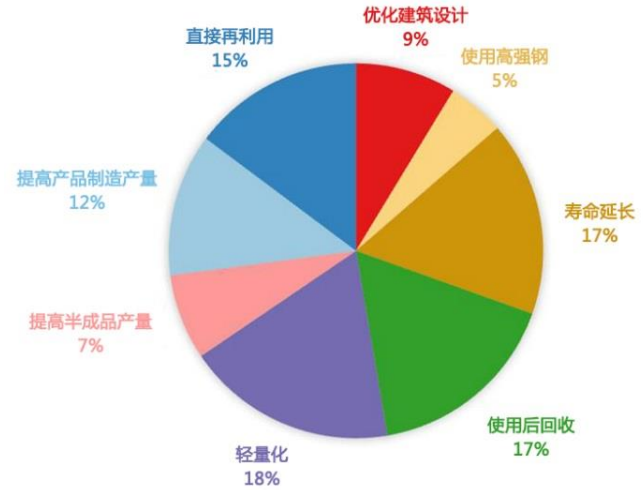


图 3.3 全球钢铁产量和材料效率的影响

除了材料效率，钢材的需求和产量也受价格的影响。在 1.5°C 情景下，到 2050 年全球平均钢铁价格较参考情景上涨 17%。钢铁价格上涨的原因主要包括碳价格的上涨（从 2025 年每吨二氧化碳大约 100 美元增加到 2050 年每吨二氧化碳 1,300 美元），以及钢铁生产中使用更昂贵的燃料和技术。钢铁价格的上涨进一步降低了全球钢铁产量。到 2050 年，全球钢铁产量将降至 18.6 亿吨，与参考情景相比下降了 25%。

专栏 3.1 材料效率对钢铁产量的影响

我们在本研究中考虑了八种不同的材料效率措施。这些措施的贡献是基于国际能源署的假设和现有钢铁库存的数据计算的（Pales、Teter、Abergel 和 Vass，2019 年；Pauliuk、Wang 和 Müller，2013 年）。落实所有这些措施后，到 2050 年全球钢铁产量将减少 4.7 亿吨。其中，轻量化、使用后回收和寿命延长产生的影响最为显著（图 3.3b）。

- 延长建筑寿命
- 优化建筑设计
- 建筑方面的使用后回收
- 使用高强钢
- 车辆轻量化
- 提高半成品产量
- 提高产品制造产量
- 直接再利用

3.3 各减排手段的贡献

钢铁行业转向符合将全球温升控制在 1.5°C 目标的路径，在 2050 年达到净零排放，需要通过各种可用减排手段，进一步加快行动。在有序 1.5°C 情景下，通过现有和新兴技术和解决方案，到 2050 年，全球排放量将减少约 95%，剩余排放为 1 亿吨二氧化碳。如前文所述，更高水平的循环经济下，提高材料效率和改善回收利用可以显著减少钢铁行业排放，但这还不够。创新的近零排放技术，如碳捕集、利用与封存和氢气技术，对于解决钢铁行业的剩余排放，为 1.5°C 未来铺平道路来说至关重要（图 3.4）。

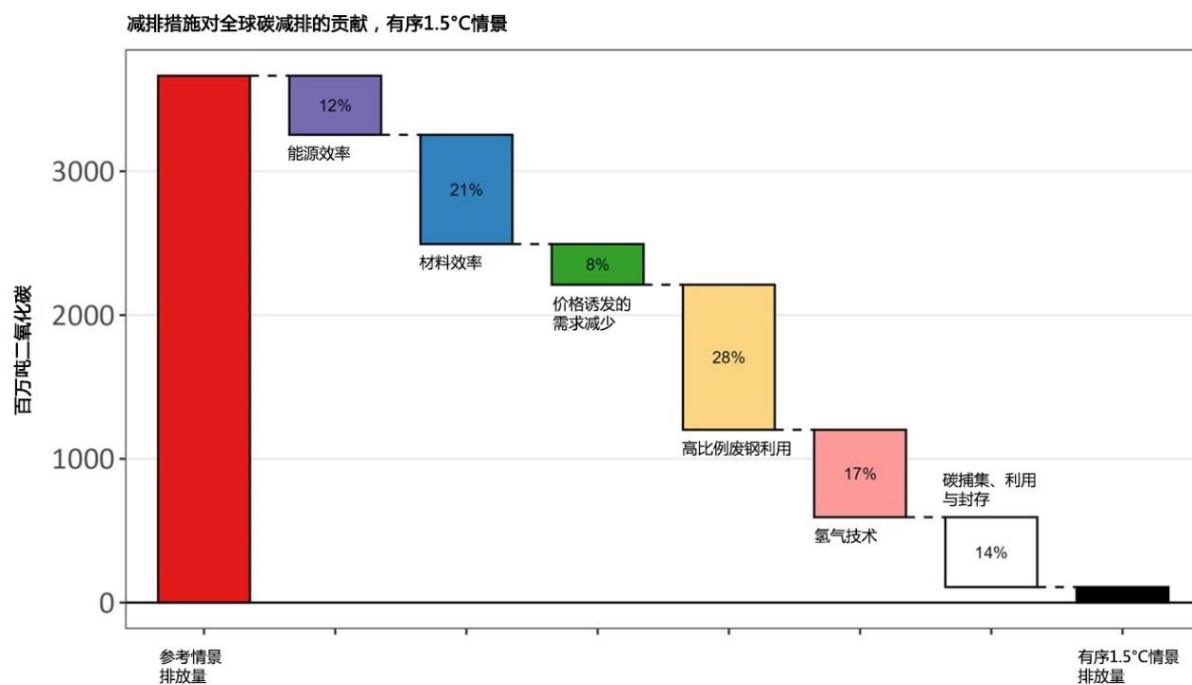


图 3.4 不同减排措施对 2050 年全球钢铁行业减排的贡献

根据符合将全球温升控制在 1.5°C 目标的路径，提高能源效率、材料效率和废钢利用，到 2050 年钢铁行业可减少 61% 的排放。到 2050 年，主要的钢铁生产方式是以废钢为原料的电弧炉炼钢，从近 10 亿吨废金属中生产约 47% 的钢（图 3.5）。这意味着通用钢和再生钢产量比例的大幅转变——从 2020 年的约 70:30% 变为 2050 年的 50:50%。

电弧炉-废钢炼钢法在钢铁生产中所占比例因地区而异，取决于现有的基础设施和废钢的可用性。2050 年，美国等地区的这一比例可达 72%，而印度仅为 36%（图 3.6）。

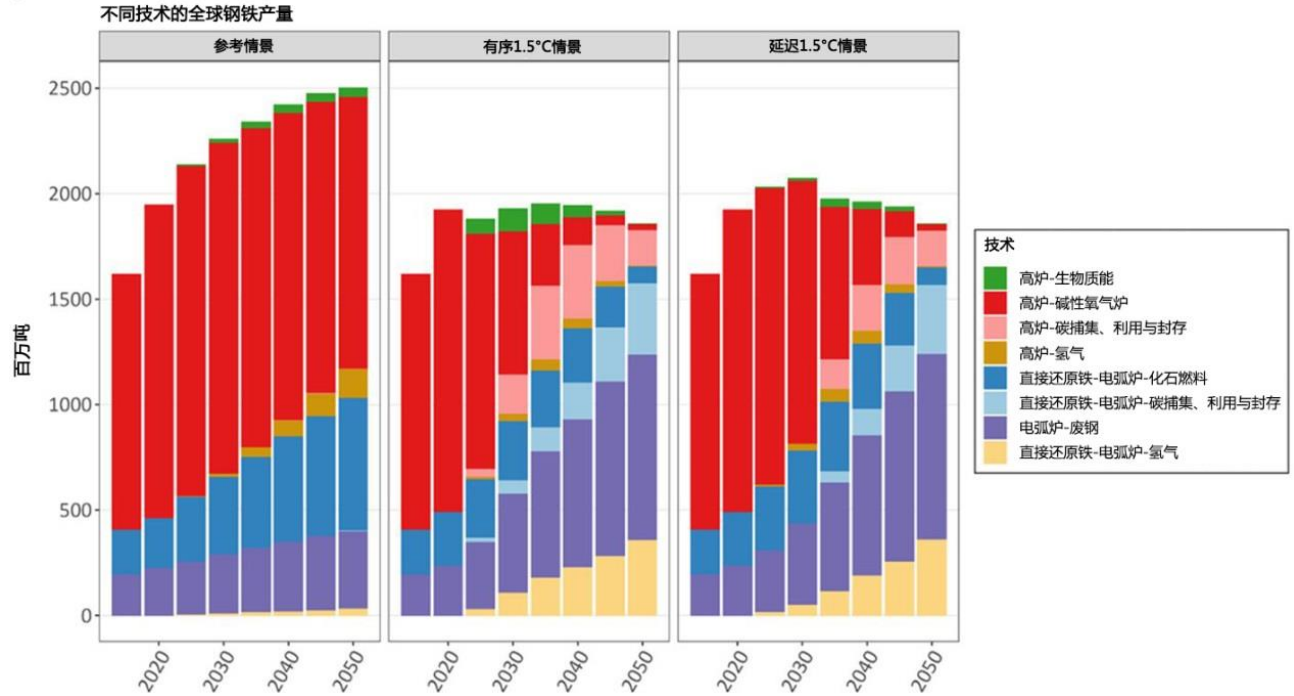


图 3.5 参考情景、有序 1.5°C 情景和延迟 1.5°C 情景下的全球钢铁生产技术

突破性技术对于钢铁行业完全脱碳至关重要。在有序 1.5°C 情景下，几乎所有未减量的高炉（不采用碳捕集、利用与封存技术的高炉）将在 2045 年左右被淘汰，占现在钢铁产量的 61.3%。对于有大量新高炉的地区，碳捕集、利用与封存技术将是防止这些高炉提前退役的关键（Swalec 和 Shearer，2021 年）。高炉需要在 2025 年之前进行改造或配备碳捕集、利用与封存技术，以避免提前退役（图 3.6）。随着其他具有成本竞争力的低碳钢铁生产技术进入市场，无论有无碳捕集、利用与封存技术，高炉的份额都会随着时间推移而下降。氢气直接还原炼钢将在 2025 年左右开始商业化，到 2050 年逐渐增长到全球产量的 19%。电弧炉-直接还原铁-碳捕集、利用与封存炼钢的比例也在增加，到 2050 年占全球产量的 18%。

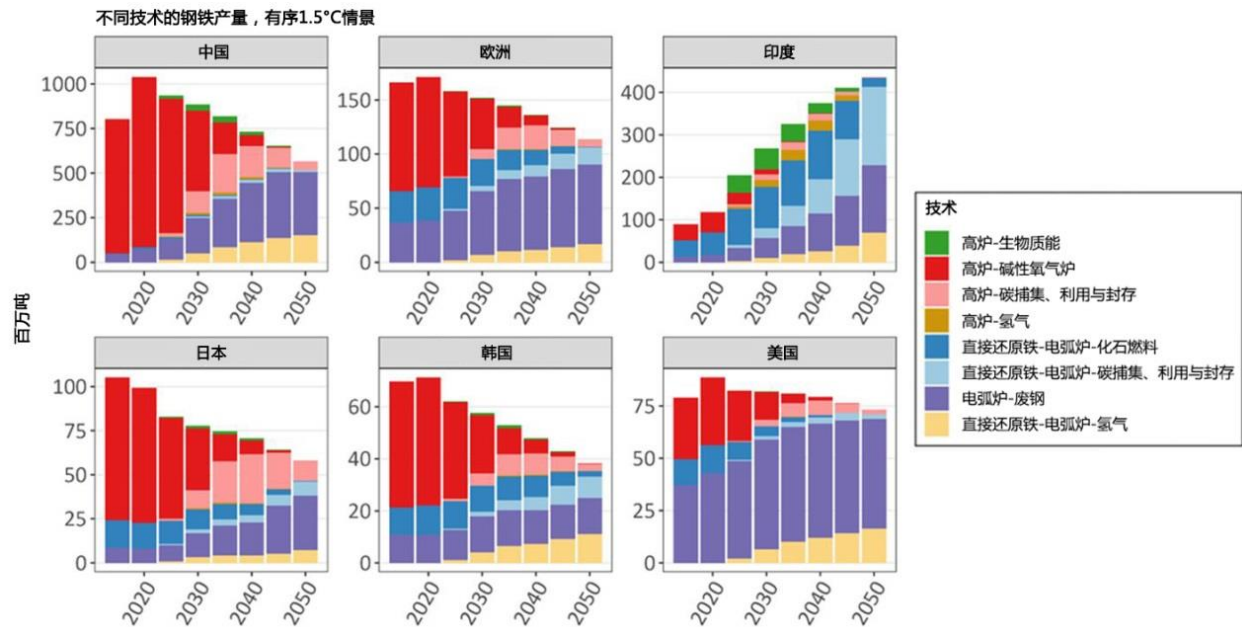


图3.6 有序1.5°C 路径下的钢铁生产技术转型

专栏 3.2 碳捕集、利用与封存技术在钢铁行业脱碳中的作用

碳捕集、利用与封存技术目前仍处于试验示范阶段，在部署、商业模式开发以及运输和存储基础设施的推出等方面需要全世界的巨大努力。截至 2021 年 9 月，全球只有 4 个钢铁碳捕集、利用与封存技术的试验示范项目，捕集率相对较低（全球碳捕集与封存研究院，2021 年）。此外，目前正在推进低碳钢铁项目的钢铁企业中，没有一家考虑针对高炉的燃烧后碳捕集与封存的商业规模项目。虽然在本研究中，碳捕集、利用与封存技术仍然是一项重要的减排措施，并发挥重要作用，但实际中，在钢铁生产设施中部署这一技术进展缓慢。

鉴于碳捕集、利用与封存技术在钢铁行业的应用存在不确定性，我们进行了敏感性测试，将碳捕集、利用与封存技术排除在钢铁行业脱碳的选项之外。在这种情况下，尽管全球仍将在 2050 年左右达到净零排放，以实现将温升控制在 1.5°C 的目标，但钢铁行业内部以及钢铁与其他行业之间存在取舍问题。。

具体来说，如果钢铁行业不采用碳捕集、利用与封存技术，将会出现以下情况：

- 到 2050 年，需要使用更多的废钢（在采用碳捕集、利用与封存技术的情景下，电弧炉废钢回收利用占全球钢产量的 47%vs. 在没有采用碳捕集、利用与封存技术的情景下，电弧炉废钢回收利用占全球钢产量的 57%）和氢气（在采用碳捕集、利用与封存技术的情景下，占全球钢产量的 19%vs. 在没有采用碳捕集、利用与封存技术的情景下，占全球钢产量的 31%），这也意味着印度等国家需要进口废钢；
- 在中短期内，拥有大量现有钢铁设施的地区面临更加昂贵的钢材价格（例如，在 2030-2040 年期间，中国没有采用碳捕集、利用与封存技术的情景的钢材价格将比采用该技术的情景高 5-20%，欧洲的这一数据为 5-15%）；
- 钢铁行业中短期内的排放较高（2035-2045 年期间，没有采用碳捕集、利用与封存技术的情景全球钢铁二氧化碳排放比采用这一技术的情景高 15-25%），需要由电力和其他行业抵消。

关闭未减量煤炭²产能，增加电力和氢气的使用，从而大幅减少钢铁行业的排放。在有序 1.5°C 情景下，电力和氢气在钢铁行业的能源消耗中所占比例迅速增加，到 2050 年占全球燃料消耗的 65%（图 3.7）。全球钢铁行业用电量从 2019 年的 13,000 亿千瓦时增加到 2050 年的 19,000 亿千瓦时。钢铁行业的氢气使用量也有大幅增长，到 2050 年将达到 4.5EJ。在大多数地区，未减量煤炭产能在 2050 年前将被逐步淘汰。燃料转换因地区而异，取决于资源和技术的可用性。例如，在 2050 年，采用碳捕集、利用与封存技术的天然气预计将占欧洲钢铁生产能源消耗的 20%左右，而印度的这一比例不到 1%（图 3.8）。

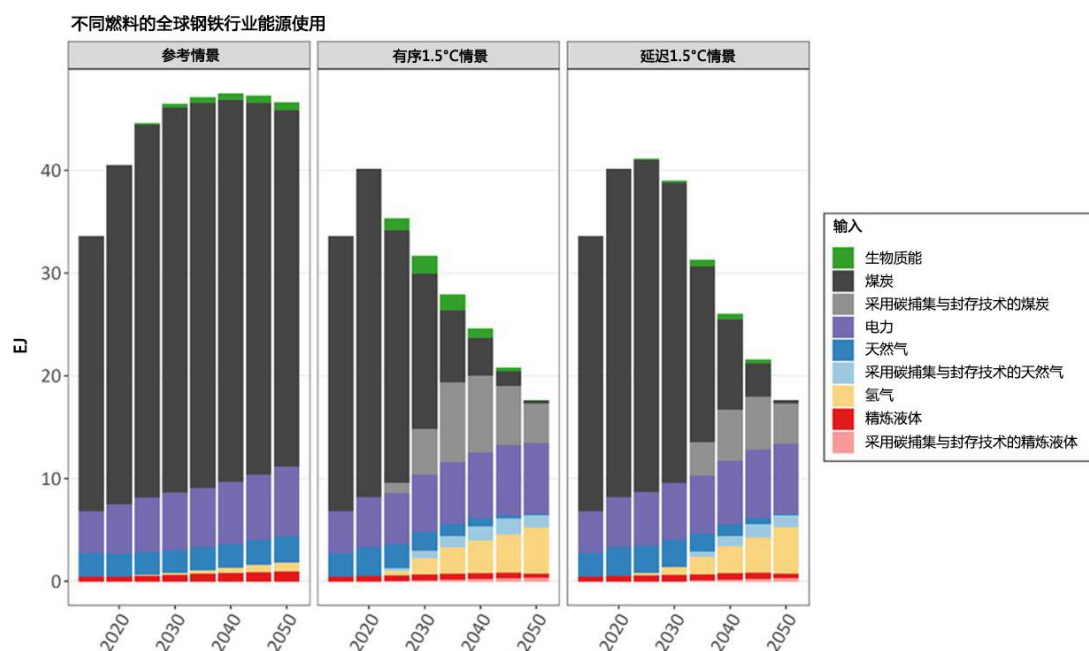


图 3.7 参考情景、有序 1.5°C 情景和延迟 1.5°C 情景下的全球钢铁行业燃料使用

鉴于氢气和电力消耗的大幅增加，其上游生产比现在更加清洁变得至关重要。钢铁行业的间接排放情况见专栏 3.3。目前，约 35% 的电力利用低碳技术产生；在 1.5°C 情景下，几乎所有的发电到 2045 年都是近零碳¹⁰的。目前，超过 80% 的氢气是由未减量化石燃料制备的；到 2050 年，几乎 99% 的氢气生产由可再生能源提供或采用碳捕集技术（专栏 3.3）。

² 未减量煤炭指那些未使用碳捕集、利用与封存技术来抵消部分污染的煤炭。

¹⁰ 在本研究中，利用太阳能、风能、水力、地热、生物质能、核能和采用碳捕集、利用与封存技术的化石燃料产生的电力均被认为是无碳或清洁的。

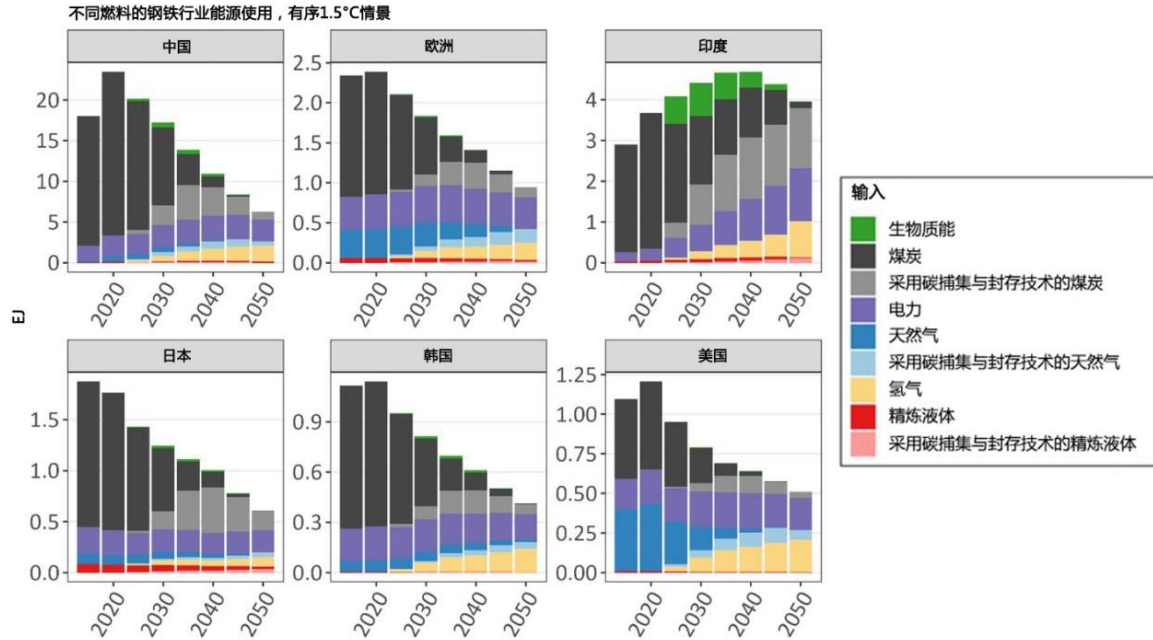
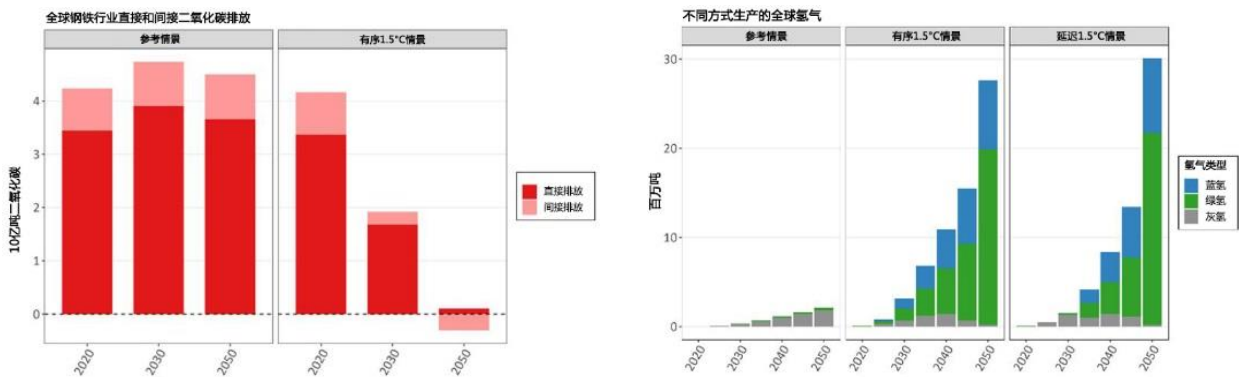


图3.8 有序1.5°C路径下，主要地区的燃料转换

专栏 3.3 上游行业的技术转型

为了实现1.5°C目标，整个经济都需要在2050年实现脱碳，这要求钢铁行业及其上游行业实现近零排放。在参考情景下，到2050年，源自电力和氢气的间接钢铁排放仍保持在每年大约8亿吨二氧化碳。随着1.5°C有序情景下上游氢气和电力生产的变化，由于发电和氢气生产技术的革新，到2050年，源自两个行业的间接钢铁排放将变为负值。随着可再生能源、核能和采用碳捕集、利用与封存技术的生物能源的增加，电力行业的净二氧化碳排放量到2045年将变为负值。全球氢气产量将增加到近30EJ，其中约71%为绿氢，28%为蓝氢。¹¹



¹¹ 本研究考虑的制氢技术包括采用和未采用碳捕集与封存技术的天然气水蒸气重整制氢、采用和未采用碳捕集与封存技术的生物质气化制氢、核能热裂解制氢、并网发电和现场可再生能源发电的电解制氢以及采用和未采用碳捕集、利用与封存技术的煤炭制氢（仅在选定区域）。生物质气化、热裂解和电解技术制备的氢气被归类为绿氢，采用碳捕集、利用与封存技术的化石燃料制备的氢气被归类为蓝氢。

3.4 延迟行动的影响

如果延迟行动，到 2050 年钢铁行业将额外排放 200 亿吨二氧化碳。这一差额约占全球剩余碳预算（将全球温升控制在 1.5°C 的可能性为 67%）的 5%。从所有行业的角度看，延迟行动将导致到 2050 年额外排放 3000 亿吨二氧化碳，使温升峰值高于 1.5°C。

延迟行动所导致的累计二氧化碳排放的巨大差异，可以归因于煤炭在中短期内的缓慢退出。对于钢铁行业，在有序 1.5°C 情景下，48%的能源来自未减量煤炭，而在 2030 年的延迟 1.5°C 情景下，这一比例为 75%。到 2040 年，在延迟行动情景下，煤炭仍为钢铁行业提供超过 34%的能源，而在有序情景下这一比例约为 15%。

为了实现净零目标，到 2050 年，高炉几乎需要全部淘汰。高炉的平均寿命为 25 年，这意味着任何在 2025 年之后建成的高炉都存在成为搁浅资产的风险。基于这一假设，延迟行动可能造成到 2050 年约 5.6 亿吨搁浅高炉产能，而在有序情景下仅为 2 亿吨。

第 4 章 主要地区的 1.5°C 转型路径

本章探讨了符合将全球温升控制在 1.5°C 目标的钢铁行业脱碳路径对六大钢铁生产国和地区的影响，包括中国、欧洲、印度、日本、韩国、美国。这六大钢铁生产国和地区占全球钢铁产能的 77%（见表 4.1），将在决定全球钢铁行业未来方向中发挥重要作用（六个地区的排放路径和减排措施的贡献见附件 4）。我们分析了各个地区的脱碳路径、分别面临的挑战、以及将钢铁行业转型到 1.5°C 路径可以采取的政策和立即行动。

表 4.1 1.5°C 情景下 2050 年不同地区的减排量和各减排措施的贡献

地区	当前产能				钢铁排放（百万吨二氧化碳）		有序 1.5°C 情景下不同减排措施的贡献（百万吨二氧化碳）					
	粗钢产量（tt pa）	高炉-碱性氧气炉（%）	电弧炉（%）	混合/未知（%）	2050 年参考情景	2050 年有序 1.5°C 情景	能源效率	材料效率	价格诱发需求减少	高比例废钢利用	氢气	碳捕集、利用与封存
中国	1,023,671	77	4	19	1,500	23	-150 (-10%)	-230 (-16%)	-150 (-10%)	-570 (-39%)	-270 (-18%)	-100 (-7%)
欧洲	171,747	69	29	2	170	4	-24 (-14%)	-51 (-30%)	-14 (-8%)	-42 (-25%)	-19 (-11%)	-21 (-13%)
印度	90,125	63	24	13	1,100	33	-97 (-8.8%)	-280 (-25%)	-91 (-8%)	-240 (-22%)	-200 (-17%)	-200 (-18%)
日本	117,083	73	15	12	120	5	-14 (-12%)	-24 (-21%)	-10 (-9%)	-34 (-30%)	-10 (-9%)	-21 (-19%)
韩国	70,260	25	37	38	71	2	-9.6 (-13%)	-19 (-27%)	-9.0 (-12%)	-9.0 (-10%)	-16.3 (-24%)	-8.8 (-13%)
美国	84,151	42	58	0	82	1	-16 (-20%)	-26 (-32%)	-5.9 (-7%)	-4.9 (-6%)	-19 (-24%)	-9.1 (-11%)

备注：产能和百分比数据源于 [Global Steel Plant Tracker](#) 和全球能源监测，2021 年 2 月。

4.1 中国：全球钢铁行业脱碳的基石

作为世界上最大的钢铁生产国和消耗国，中国绝对是全球钢铁行业脱碳轨迹的中心（Ji Chen，2021 年）。中国占全球钢铁产量的一半以上，而全球 60% 以上的碳排放来自钢铁厂（Swalec 和 Shearer，2021 年）。自上世纪 90 年代以来，中国经济的快速发展导致其钢铁产量和消耗量大幅增加。然而，有迹象表明，由于中央政府试图削减钢铁产量，增长趋势开始放缓（金融时报，2021 年）。

中国钢铁行业主要由大型企业集团组成，其中多数由地方政府或国家所有。钢铁主要通过燃煤高炉-碱性氧气炉炼钢法生产，占钢铁产量的 77% 以上。因此，中国炼钢的能源强度和排放强度在全球名列前茅。钢铁行业占中国总用煤量的 30% 以上，是煤炭需求增长的主要来源（Shanshan，

2021年)。此外，高炉的使用时间尚短（平均13年）是中国钢铁行业的一大特点，行业转型增加了资产搁浅的风险（Ji Chen, 2021年）。

中国钢铁行业目前每年排放超过20亿吨二氧化碳，约占全国碳排放量的17%（Ren等，2021年）。钢铁行业如果要符合中国提出的到2030年前实现碳达峰，2060年前实现碳中和的目标，就必须迅速采取行动。2021年3月，一家国有新闻机构报道称，政府正在制定计划，使钢铁行业的排放量在四年内达峰。主要钢铁企业中国宝武钢铁集团和河钢集团有限公司提出了2050年实现碳中和的计划，两家企业分别计划在2023年和2022年达到碳排放峰值，2025年分别减少30%和10%的排放。

然而，这些计划与近期钢铁生产限制的相关政治动态形成了鲜明对比。2020年初，主要钢铁生产中心的地方政府取消了对钢铁生产的限制，以推动疫情期间的经济复苏。2020年的钢铁产量比十三五计划的预测高出40%（Myllyvirta, 2021年）。

为了实现将全球温升控制在1.5°C的目标，中国钢铁行业排放需要在目前基础上，到2030年和2050年分别减少50%和99%。这就需要大幅降低排放强度，从现在的每生产1吨钢排放2.15吨二氧化碳（Hasanbeigi、Arens、Cardenas、Price和Triolo, 2016年）到2030年的1.1吨二氧化碳，再到2050年的0.04吨二氧化碳。这一转变意味着中国钢铁供应链和更广泛的国家经济发展模式的深度结构调整。

需求侧措施，特别是废钢回收，在中国钢铁行业转型中发挥着重要作用。到2050年，中国56%的钢铁产能来自以废钢为原料的电弧炉炼钢，与参考情景相比减排39%。中国工业和信息化部呼吁从高炉-碱性氧气炉的炼钢工艺中转变出来，而提高以废钢为原料的电弧炉炼钢的比重也是政府阐明的一项目标。然而，这一目标与目前及计划中的钢铁产能形成了鲜明对比。高炉-碱性氧气炉占中国在建钢铁产能的93%，而电弧炉炼钢产能仅占7%（Swalec和Shearer, 2021年）。

材料效率和价格诱发的钢铁需求减少促使中国向以废钢为原料的电弧炉炼钢转变，进一步降低了中国的钢铁需求。与参考情景相比，仅材料效率的提高就使钢铁产量下降了19%，到2050年降至6.5亿吨/年。在1.5°C情景下，钢铁价格上涨，导致需求进一步下降至5.6亿吨/年。

充分发挥这些需求侧手段的潜力，需要采取协调一致的政策措施，抑制通用钢的生产，鼓励回收利用，改善废钢的收集和分类，并延长钢铁密集型资产的使用寿命。鉴于钢铁生产传统上对中国经济增长，包括疫情期间经济复苏的关键作用，减少钢铁产量虽然至关重要，但实施起来可能具有挑战性（Lo, 2021年）。

除了减少通用钢产量，中国1.5°C钢铁行业脱碳轨迹还需要通用钢生产技术的重大转变。在有序1.5°C情景下，到2050年，高炉生产的钢铁约占中国钢铁产量的10%，而现在这一比例接近80%。到2050年，剩余高炉将采用碳封存技术。为了实现脱碳目标，在短期内，采用碳捕集、利用与封存技术、氢气和生物质能的高炉可以作为过渡性技术，因为这些技术有可能在现有高炉设施中采用。从长远来看，高炉炼钢将被以废钢为原料的电弧炉炼钢和氢气直接还原炼钢所取代，两者分别占2050年产量的62%和27%。

在1.5°C情景下，部分由于传统高炉技术的停止使用，到2050年，中国钢铁行业将逐步淘汰未减量煤炭。然而，尽早针对钢铁行业中的煤炭采取行动将成为关键。到2030年，在有序1.5°C情景下，仍在使用的煤炭仅为9.5EJ，而在延迟情景下，这一数字为21EJ。过渡到通过氢气直接还原炼

钢技术增加产量，将导致氢气的使用量长期增加。目前，中国钢铁行业未使用氢气；在 1.5°C 情景下，到 2050 年，氢气对该行业的贡献为 2EJ。为了达到必要的减排水平，氢气和电力来自低碳资源至关重要。在有序 1.5°C 情景下，到 2030 年，中国生产的氢 38% 是绿氢，45% 是蓝氢；到 2050 年，绿氢所占比例为 72%，蓝氢占 27%。在 1.5°C 情景下，行业用电量也随之增加，从 2020 年的 7,100 亿千瓦时到 7,500 亿千瓦时；2030 年清洁发电占比为 73%，到 2050 年将达到完全清洁。电力部门的净二氧化碳排放量预计到 2040 年将成为负值。

钢铁行业加速脱碳是实现 1.5°C 目标的关键。如果中国钢铁行业不发生改变，2020 年至 2050 年的累计排放量预计为 590 亿吨二氧化碳。上述措施有可能使该行业的累计二氧化碳排放量降至 230 亿吨二氧化碳，而延迟采取行动可能使排放量升至 310 亿吨二氧化碳。

中国钢铁行业转型的主要优先事项包括：

- 作为碳达峰碳中和“1+N”政策体系的一部分，在即将出台的分领域分行业碳达峰实施方案中，为钢铁行业设定雄心勃勃的脱碳目标。
- 加大对过剩钢铁产能的识别和关闭力度，对剩余的高炉-碱性氧气炉产能进行改造，扩张的钢铁产能只能采用“净零准备”技术，如以废钢和直接还原铁为原料的电弧炉炼钢。
- 为公共项目使用低碳钢制定公共采购标准，随着洁净钢技术的成熟，逐步收紧碳强度要求。
- 在中国循环经济现有成就的基础上，扩大钢铁行业废钢分类和回收的规模，将材料效率的潜力最大化。
- 加快将钢铁和水泥纳入碳排放权交易体系（ETS），以鼓励对清洁生产投资，并保护这些行业免受贸易伙伴引入的碳关税的影响，如欧盟提出的碳边界调整机制。

最近发布的《2030 年前二氧化碳排放达峰行动方案》涵盖了上述措施，包括扩大废钢回收利用规模、推动由高炉-碱性氧气炉炼钢法向其他替代工艺转型等。但是这些措施需要通过分领域分行业碳达峰实施方案中的量化目标进一步充实。

4.2 欧洲：潜在的钢铁行业脱碳政策领先者

钢铁行业通常被视为欧洲经济的支柱，间接带动就业岗位 200 多万个，并为重要行业、汽车制造商、建筑和机械领域供应材料（Bekaert、Van Hoey、Hagenbruch 和 Zeumer，2021 年）。然而，自 2008/2009 年全球金融危机以来，欧洲钢铁制造企业面临着巨大挑战：需求结构性下降（世界钢铁协会，2018 年）、¹² 国际竞争加剧、原材料价格波动和结构性产能过剩（Bekaert 等，2021 年）。

此外，欧洲钢铁行业即将进入更深层次的结构调整时代。欧盟（EU）制定了到 2050 年欧洲成为第一个“气候中和”大陆的宏伟目标。2020 年 12 月，欧洲理事会投票决定将欧盟 2030 年的气候目标提高到“在 1990 年基础上减少 55% 的温室气体排放”。¹³ 实现这些目标需要整个欧洲经济减

¹² 欧洲钢铁需求仍未从 2008 年全球金融危机中恢复，并因新冠疫情进一步减少（世界钢铁协会，2021 年）。由于欧洲汽车需求下降、汽车出口量减少、工程领域进口国企业投资本地化、石油和天然气开发减少以及中期建设投资减少等原因，预计钢铁需求将持续低迷（Espel，2021 年）。

¹³ 在我们的研究中，欧洲包括英国（即欧盟 28 国）。然而，对英国钢铁行业具体政策的深入分析超出了本节的范围。因此，我们主要关注欧盟的政策措施，这样做也是基于这些政策将继续影响英国的钢铁行业脱碳举措。英国政府预计将在第 26 届联合国气候变化大会前发布净零排放路线图，其中可能包括针对钢铁行业的关键举措。

排（包括钢铁行业的减排）情况发生巨变。目前，钢铁行业占欧盟排放的约 5%（2017 年为 1.88 亿吨二氧化碳）。

此外，欧盟可以采取行动的政策窗口很窄。与印度等新兴工业化国家相比，欧盟的钢铁生产设施较老旧，48%的产能需要在未来十年进行大规模再投资（Witecka 等，2021 年）。针对这点的挑战在于政策调整和投资周期。政策制定者现在需要释放正确的政策信号，让工厂所有者有信心投资低碳工艺，而不是锁定 20-25 年之久的碳密集型生产，或眼看着这些工厂关闭。

为了使欧盟钢铁行业在 2050 年实现向气候中和过渡，其排放量必须在 2020 年的基础上，到 2030 年至少减少 48%，到 2050 年至少减少 97%。钢铁行业的排放强度需要从每生产 1 吨钢铁排放 1 吨二氧化碳降低到 2030 年的 0.6 吨二氧化碳，再到 2050 年的 0.03 吨二氧化碳。

目前尚待开发的一套需求侧手段，可能首先降低欧洲的通用钢需求。**到 2050 年，设计的改变、钢材的高效利用、钢材的直接再利用和新型商业模式可能会减少 25%的钢铁需求。**在 1.5°C 情景下，材料效率的提高将使 2050 年的钢铁产量降至 1.23 亿吨，比当前水平减少 28%。材料效率措施自身也存在挑战，尤其是需要协调供应链上的大量参与者。然而，其中许多参与者已经可以部署这些减排措施，确保需求能够得到抑制，为欧洲氢气直接还原炼钢的发展争取时间。通过“循环经济行动计划”，欧盟在循环经济和废弃物管理方面已经取得了良好成绩，以此为基础，欧盟可以充分发挥这些需求侧手段的潜力（欧盟委员会，2020 年）。

欧盟钢铁行业还需要产能的大规模转变。高炉-碱性氧气炉炼钢目前仍是欧洲主要的钢铁生产工艺，约占钢铁产能的 69%，以废钢为原料的电弧炉炼钢占 29%（Swalec 和 Shearer，2021 年）。**在钢铁行业有序 1.5°C 情景下，通过电弧炉生产的钢铁比重比现在增加一倍多，到 2050 年，以废钢为原料的电弧炉生产的钢铁占总产量的 64%。**

氢气直接还原炼钢规模也将不断扩大，到 2050 年占钢铁产量的 15%。欧洲目前被认为是开发氢气直接还原炼钢工艺的领先者。包括阿塞洛米塔尔、蒂森克虏伯、瑞典钢铁集团和奥托昆普在内的许多欧盟大型钢铁生产企业承诺到 2050 年实现碳中和，其中瑞典钢铁集团计划最早在 2026 年提供无化石钢材。在 Green Steel Tracker 收录的洁净钢项目中，欧洲约占三分之二（Vogl 等，2021 年）。世界上第一批氢还原海绵铁源自于 2021 年 6 月底在瑞典进行的试点生产（Heynes，2021 年）。

欧盟钢铁生产企业预计将在欧盟成员国范围内采取多种途径。技术的选择可能反映了基础设施的获取情况，例如低成本的可再生能源和最终可再生能源制备的足量氢气，公共资金的供应，以及每个地区炼钢的具体政治经济状况。例如，虽然我们的 1.5°C 情景显示，碳捕集、利用与封存技术在减少欧洲直接还原铁-电弧炉和高炉剩余排放中占比较小，作用却极其重要，但是一直以来对碳捕集、利用与封存技术的保守态度，使得这项技术在欧洲一些地区（德国）发挥作用的可能性比其他一些地区（荷兰和英国）更小。

上述技术转变需要大量投资，用于增加发电使用的可再生能源和扩大用于炼钢的绿氢生产。目前，欧盟钢铁行业的能源使用结构包括 65%的煤炭、18%的电力、14%的化石燃料和天然气，还有一小部分精炼液体、生物质和氢气。钢铁行业使用的电力所占比重将从 2019 年的 18%增加一倍以上，至 2050 年的 40%，尽管实际使用量不会大幅增长，超过该行业目前的 1,070 亿千瓦时。到

2030 年，60%的电力是清洁电力，电力部门的净二氧化碳排放量到 2040 年将变为负值。氢气的使用量稳步上涨，从 2030 年的 0.08EJ 到 2050 年的 0.20EJ，占钢铁行业预计能源使用量的 22%。在有序 1.5°C 情景下，到 2030 年，75%的氢气是绿氢，24%是蓝氢。

从 2020 年到 2050 年，上述措施可能使欧盟钢铁行业的累计二氧化碳排放量减少近三分之二。根据我们的预测，在参考情景下，累计排放量约为 57 亿吨二氧化碳，而在有序 1.5°C 转型情景下，累计排放量为 22 亿吨二氧化碳。

到目前为止，对碳泄漏的担忧阻碍了欧盟在钢铁行业脱碳方面占据领导地位。政策制定者一直不愿实施严格的气候政策，因为这些政策可能会影响欧盟钢铁制造企业的竞争力，并存在碳泄漏的风险。也许最好的例子是欧盟碳排放交易体系，这一体系常被认为是欧盟工业脱碳的主要工具。包括钢铁行业在内的工业部门继续免费获得大部分碳排放配额，¹⁴ 减弱了投资清洁生产工艺的激励作用。因此，除了 2008/2009 年经济危机导致的排放量大幅下降以外，钢铁行业的排放量自 21 世纪初以来基本持平。

然而，最近政治风向开始发生变化。越来越多的人意识到，向更可持续的生产工艺转型是欧盟钢铁行业继续保持竞争力的一项促成因素，甚至是先决条件。对钢铁行业转型可行性的信心日益增强，为更加协调一致的政策行动创造了政治空间。

为此，欧盟委员会于 2021 年 7 月中旬出台了“Fit-for-55”一揽子减排提案，包括一系列旨在加速工业脱碳的措施：通过碳差价合约（CCFD），对创新生产工艺的早期商业化提供额外支持，通过提出覆盖钢铁行业和其他行业以及确保绿氢使用和工业部门优先次序的目标的碳边界调整机制（CBAM），建立一个更强大的反碳泄漏系统（Vangenechten 和 Lehne，2021 年）。

尽管这些都是鼓励性举措，但需要精心设计，以确保它们可以真正激励钢铁企业进行必要的投资。大量研究证实了一种普遍认定的看法，即到目前为止，重工业部门相对来说在坐享其成（Schep、Jujin 和 Bruyn，2021 年）。为了确保碳边界调整机制和碳差价合约不会促成这种情况，政府需要对钢铁行业提出更严格的脱碳要求，并逐步取消它们目前受益的一些支持（如免费碳排放配额）。

由于大量跨国钢铁生产企业的总部设在欧洲，欧洲最近在钢铁行业近零排放创新方面展现的领导力，以及在雄心勃勃的气候政策方面取得了长期进展，欧洲是全球钢铁市场潜在议程的关键制定者。

欧盟钢铁行业转型的主要优先事项包括：

- 确保快速就“Fit-for-55”一揽子减排提案下的政策达成一致并采取行动，包括欧盟碳排放交易体系和碳边界调整机制提案，以确保尽早向钢铁行业释放明确信号。
- 加快可再生能源基础设施扩建，扩大投资，确保提供相应监管支持（如加快批准可再生能源，更明确的再生氢认定）。

¹⁴ 欧洲环境署（EEA）的数据显示，2013 至 2020 年期间，纳入欧盟碳排放交易体系的工业部门免费获得了其已核实排放量的 99.67%的排放配额（自行计算）。

- 以《可再生能源指令》修订版提案中提出的工业部门氢气使用目标为基础，重点在钢铁等具有极大减排潜力的行业部署可再生能源氢气。
- 根据即将出台的《可持续产品倡议》（预计 2021 年初）和《建筑能效指令》，设定严格的产品要求，以提高材料效率、循环性，并降低钢铁的碳含量。
- 寻求在钢铁脱碳方面与贸易伙伴的协作机会，探索在碳关税、产品标准、补贴和公共采购方面的辅助性办法，例如通过欧盟-美国贸易和技术理事会与美国进行协作。

4.3 印度：净零钢铁生产的主要增长市场

印度是世界第二大粗钢生产国。随着国家的快速城市化和不断增长的基础设施需求，钢铁消耗量将从 2020 年的 9,400 万吨增加到 2050 年的 4.89 亿吨（Henbest, 2021 年）。根据 2017 年国家钢铁政策，印度政府的目标是到 2030-31 年将钢铁产量增加到 3 亿吨，为目前产能的两倍多（普华永道，2015 年）。能源与资源研究所（TERI）预计，在基准情景下，印度钢铁行业的排放量将从 2020 年的 2.42 亿吨二氧化碳增至 2050 年的 8.37 亿吨二氧化碳（Hall、Spencer 和 Kumar, 2020 年）。印度面临的主要挑战将是协调钢铁行业扩张与长期减排目标之间的关系。

印度政府尚未就减少钢铁行业的碳排放设定具体目标，对于重工业在实现国家气候目标方面的作用也没有相关讨论（Del Bello, 2020 年）。然而，据报道，印度已有两家钢铁企业采用了内部碳定价，其他公司可能会效仿（Sharma、Pujari 和 Agha, 2021 年）。虽然塔塔钢铁欧洲公司承诺到 2050 年实现碳中和，但占印度粗钢产量约 22% 的印度塔塔钢铁股份有限公司尚未就长期目标作出承诺。JSW 钢铁公司（占印度钢铁产能的 20%）已经制定了到 2030 年降低排放强度的目标，即在 2005 年的水平上减排 40%（Layek, 2021 年）。

为了实现 1.5°C 目标，印度钢铁行业的排放量需要在 2030 年和 2050 年分别减少 46% 和 90%。这意味着排放强度从现在的每生产 1 吨钢铁排放 2.8 吨二氧化碳下降到 2030 年的 0.68 吨二氧化碳，再到 2050 年的 0.076 吨二氧化碳。

碳排放强度的下降很大程度上是由于从碳密集型的高炉-碱性氧气炉炼钢法转向更清洁的工艺：以直接还原铁为原料的电弧炉炼钢、氢气直接还原炼钢和以废钢为原料的电弧炉炼钢。目前，印度大部分钢铁（55%）是通过电弧炉和感应炉生产的，45% 由高炉-碱性氧气炉生产（Sharma 等，2021 年）。到 2050 年，采用碳捕集、利用与封存技术以直接还原铁为原料的电弧炉炼钢和以废钢为原料的电弧炉炼钢需要成为印度的主导技术，两者生产的钢铁分别占 42% 和 36%。小规模碳捕集、利用与封存技术项目正在印度开展，尽管该技术仍处于早期发展阶段。印度政府还在 2019 年出台了废钢回收政策，改善了废钢的处理和回收。这两种技术路径均需要印度政府一致政策行动的强力支持。

氢气直接还原炼钢预计将对钢铁行业减排发挥重要作用，特别是许多印度钢铁制造企业目前采用的是以煤炭而非天然气为燃料的直接还原炼钢技术（Alfonso, 2021 年）。这一技术使该行业有能力通过为这些设施改用可再生能源制备的氢气，从而较容易地净化大部分钢铁产能（Swalec 和 Shearer, 2021 年）。预计到 2050 年，氢气直接还原炼钢将占钢铁产量的 16%。

技术上的转变，特别是可再生氢需求的增加，需要大规模的基础设施投资，以确保足够的清洁电力。氢气直接还原炼钢技术的采用，将使 2030 年的氢使用量达到 0.035EJ，2050 年达到 0.87EJ。

在有序 1.5°C 情景下，到 2050 年，印度生产的氢气中，27%是蓝氢，72%是绿氢。钢铁行业的电力需求预计将大幅增长，从 2050 年的 830 亿千瓦时增至 3,600 亿千瓦时。在 1.5°C 情景下，印度的电力生产日益清洁：到 2030 年，清洁电力占比 85%，到 2050 年完全淘汰未减量化石燃料。2040 年，电力部门的净二氧化碳排放量将成为负值。

印度政府制定了扩大可再生能源和氢气产能的计划，从而从可观的可再生能源潜力中获益。其制定了雄心勃勃的可再生能源产能目标——到 2022 年达到 175GW，到 2030 年达到 450GW。2021 年 2 月，印度政府宣布了一项国家氢能计划，旨在扩大绿氢生产和各部门绿氢使用，到 2030 年每年生产约 100 万吨绿氢（Infrahub，2021 年）。

将印度钢铁行业转向 1.5°C 路径，也意味着未减量煤炭使用量的大幅减少。印度钢铁行业仍留存部分煤炭使用量：到 2030 年，未减量煤炭使用量为 1.7EJ，采用碳封存技术的煤炭使用量为 0.99EJ；到 2050 年，这两个数字分别为 0.16EJ 和 1.5EJ。印度目前严重依赖进口冶金煤，其 85%的需求通过进口得到满足（商业标准报，2021 年）。不使用煤炭炼钢将大大提高国内钢铁行业的弹性和经济安全性，使其不易受到国际大宗商品价格飙升的影响。

虽然印度钢铁市场将来以扩大生产为主，但材料效率也将发挥重要作用。**我们估计，与参考情景相比，材料效率措施可以在 2050 年减少 18%的钢铁需求。**材料效率的提高促使印度 2050 年的钢铁产量接近 4.7 亿吨。受碳定价、对更清洁、更昂贵的技术和燃料的投资等因素综合影响，钢铁成本预计将增加 36%，产量将降至 4.4 亿吨。

作为主要钢铁增长市场，印度拥有丰富的直接还原铁炼钢经验和巨大的国内可再生能源潜力，在推动扩大洁净钢生产方面具有独特优势，有助于增强印度的全球竞争力，并加强国家能源安全。

印度钢铁行业转型的主要优先事项包括：

- 为钢铁行业制定雄心勃勃的气候路线图，协调短期产能扩张与长期减排目标之间的关系。
- 确保在计划产能扩张范围内的新建钢铁厂采用“净零排放”技术，即投资的电弧炉和直接还原铁产能可以更容易转向使用更为清洁的能源原料，而不是进一步锁定高炉-碱性氧气炉产能。
- 在雄心勃勃的可再生能源目标的基础上，对从燃煤向氢气直接还原炼钢转变的必要基础设施扩建进行可靠评估。

4.4 日本：从需求下降和结构性产能过剩向绿色钢铁创新者转变

日本是世界第三大钢铁生产国和主要的钢铁出口国。由于美国和中国征收的进口关税及新冠疫情给贸易造成的影响，日本的钢铁制造企业经历了一段动荡期。由于人口减少及来自韩国和中国的竞争加剧，自 20 世纪 90 年代以来，国内需求呈现出下降趋势。

日本钢铁行业的排放量占日本二氧化碳排放总量的 14%（Eguchi，2021 年）。根据日本到 2050 年实现碳中和的承诺，日本的钢铁制造企业在压力之下制定宏伟的排放目标。日本制铁株式会社和株式会社神户制钢所已发布了二氧化碳减排计划，承诺到 2050 年实现碳中和，其重点是实现氢气直接还原炼钢和以废钢为原料的电弧炉炼钢（Swalec 和 Shearer，2021 年）。2021 年，日本制铁

株式会社发布计划，将使用由无碳电力驱动的新电弧炉替代部分高炉产能（Suda，2021年）。此外，日本制铁株式会社与株式会社神户制钢所及 JFE 钢铁株式会社（JFE）合作成立了 COURSE 50 项目，目标是示范炼钢过程中使用的碳捕集、利用与封存技术（Course50）。

为了实现 1.5°C 目标，到 2030 年和 2050 年，日本钢铁行业的排放，需要分别下降 50%和 97%。到 2030 年和 2050 年，排放强度需要从 1.5 吨二氧化碳/吨钢，分别下降至 0.94 吨二氧化碳/吨钢和 0.078 吨二氧化碳/吨钢。

排放强度的下降，主要归因于钢铁产能的整体下降和常规高炉的淘汰。**采用一系列材料效率方法，使日本的钢铁产能到 2050 年下降 21%（降至 6,500 万吨），占 2050 年累计减排量的 14%。**在有序 1.5°C 情景下，钢铁平均成本增长 67%，使需求进一步下降至 5,800 万吨。

这也与钢铁制造企业近期为应对产能过剩而采取的措施保持一致，如使高炉停产，而不是对高炉工厂进行再投资。日本制铁株式会社发布了停产两个高炉的计划：和歌山制铁所高炉将于 2021 年停产，鹿岛制造所高炉将于 2024 年停产（日本制铁株式会社，2021 年）。这些计划是作为更广泛的结构改革一揽子计划的一部分而发布的，旨在从现有的高炉-碱性氧气炉产能，转变为更清洁的生产工艺和大型电弧炉。这些措施的方向均是正确的，而根据符合 1.5°C 目标的路径，日本钢铁产能过剩和钢铁行业转型的需求，意味着政府和主要钢铁制造企业需要共同努力，削减行业规模和调整行业结构。

此外，从常规高炉转变为以直接还原铁为原料的电弧炉，推动 1.5°C 情景下的减排。在短期内（自 2025 年起），引入过渡性技术：使用碳捕集技术改造高炉，引入氢和生物质能作为临时原料，采用配备碳捕集技术的电弧炉-直接还原铁工艺。从长远角度来看，配备氢气直接还原炼钢工艺的设施和以废钢为原料的电弧炉，替代以直接还原铁为原料的电弧炉和高炉设施。目前，日本的钢铁产能中，73%为高炉-碱性氧气炉产能，15%为电弧炉产能（Swalec 和 Shearer，2021 年）。2050 年，氢气直接还原炼钢和以废钢为原料的电弧炉炼钢，将分别占钢铁产能的 12%和 53%。

日本政府计划在未来十年内，从 2 万亿日元的绿色基金中，拨款 1,935 亿日元，用于支持发展氢气直接还原炼钢（Suga，2021 年）。据称，日本政府还考虑引入碳定价系统，以减少能源密集型行业的排放。

目前，日本的钢铁行业使用约 1.4EJ 未减量煤炭。在 1.5°C 情景下，到 2050 年，将停止使用所有的未减量煤炭。在各情景下，有序和无序技术转型之间的主要差异，在于使用碳捕集技术改造现有燃煤高炉的速度。到 2030 年，在有序情景下，应用碳捕集、利用与封存的高炉产能，将占钢铁产能的 10%；而在无序情景下，这一数字不足 1%。

日本钢铁行业部署碳捕集、利用与封存面临的主要挑战是，目前重点把碳捕集、利用与封存技术作为电力行业脱碳的主要手段。日本经济产业省发布了 2050 年预测，认为电力行业在很大程度上仍将依赖配备碳捕集、利用与封存的燃煤火电。但是，日本国内的地质储存能力有限，这意味着地质的储存将是有限且昂贵的。因此，保留碳捕集、利用与封存，将其用于潜力最大的领域变得

尤为重要，包括向更清洁的生产工艺转型时选择性较少的某些钢铁制造厂。另一个限制因素是，碳捕集、利用与封存的示范仍处于早期阶段，日本目前只有少量此类项目。

除碳捕集、利用与封存之外，在 1.5°C 情景下，氢的使用显著增加，2050 年将达到 0.089EJ。在 1.5°C 情景下，到 2030 年，在日本生产的氢气中，37%是蓝氢，40%是绿氢。到 2050 年，31%是蓝氢，68%是绿氢。根据扩大可再生能源氢气及向以废钢为原料的电弧炉转型的要求，日本的电力行业未来也需要迅速脱碳。

到 2050 年，电力行业的用电量将从目前的 680 亿千瓦时，小幅下降至 600 亿千瓦时。届时，电力生产将淘汰未减量化石燃料。到 2045 年，电力行业的净排放量将变为负值。

上文所述的 1.5°C 转型，可能使日本钢铁行业 2020 年至 2050 年的二氧化碳累计排放量，从参考情景下预计的 41 亿吨，降至有序 1.5°C 转型情景下的 17 亿吨左右。

日本作为全球钢铁市场上的主要国家，是粗钢和钢铁密集型制成品的出口国。在全球向符合 1.5°C 目标的净零排放钢铁行业转型的过程中，日本发挥着非常重要的作用。

日本钢铁行业转型的主要优先事项包括：

- 为钢铁行业制定符合 1.5°C 目标的净零排放路线图和 2030 年中期目标，包括确定和关停钢铁过剩产能的强有力计划、提供财政支持使钢铁制造企业向低碳生产工艺转型、以及为碳密集型钢铁制造技术制定日落条款。
- 为钢铁行业脱碳制定电力行业和碳捕集、利用与封存基础设施需求，将钢铁纳入发展氢能经济的计划，包括制定条款确保在减排潜能最大的领域部署氢能，如钢铁行业。
- 制定宏伟的公共和民营部门绿色钢材采购目标，支持清洁能源部长级会议的“行业深度脱碳计划”等国际计划，以便拉动对绿色钢材的国际需求。
- 作为长期技术领跑者，协调各方集中并加大对国际研发和部署的投资，寻求与发展中国家开展合作，特别是东南亚和印度（在这些国家，日本的钢铁生产和供应链网络不断扩大）。

4.5 韩国：钢铁行业的绿色新政

钢铁行业是韩国经济的支柱产业，在韩国的增长轨迹中发挥了重要作用。韩国拥有较多的钢铁消耗行业，如汽车和船舶制造业，这使得韩国的经济成为钢铁密集型经济。但是，近年来，钢铁需求放缓，2008 年金融危机及新冠疫情给经济造成不良后果，使钢铁需求大幅下降且复苏缓慢，造成了产能的过剩。

钢铁行业是韩国排放量最大的行业，韩国 13%的温室气体排放直接来源于钢铁行业。其中 90%以上的排放集中在两家公司：韩国浦项制铁集团公司和现代钢铁公司。韩国浦项制铁集团公司承诺到 2050 年实现净零排放，并制定计划对 9 个高炉进行转型，计划投资 1,000-2,000 亿韩元来遵守更严格的环保规定，包括采取措施增加废钢的利用（Chung, 2019 年）。

2021年年初，钢铁行业成立了绿色钢材委员会，致力于到2050年实现净零排放的目标。但是，在做出这些长期承诺后，并未推出近期战略措施。例如，与计划到2025年实现绿色钢材上市的欧洲相比，韩国计划的绿色钢材试点项目最早到2030年才能上线。

韩国政府为各工业部门制定了强有力的气候目标和具体规定。韩国总统文在寅的“绿色新政”议程，确定了到2050年实现净零排放的目标，而且将为绿氢生产提供资金支持（Gabbatiss, 2020年）。自2015年以来，韩国的碳排放权交易体系对韩国各个行业的排放进行了规范，但是韩国免费发放了大量的碳排放配额，削弱了减排的动力。虽然韩国政府最近威胁要向排放大户征收碳税（EconoTimes, 2021年），气候保护透明联盟报告称，韩国未制定要求新的工业生产装置实现低碳排放的具体政策（气候保护透明联盟，2018年）。

为了实现1.5°C目标，到2030年和2050年，韩国钢铁行业排放量，需要分别比2020年的水平降低51%和98%。这意味着到2030年和2050年，排放强度需要从1.3吨二氧化碳/吨钢，分别下降至0.77吨二氧化碳/吨钢和0.05吨二氧化碳/吨钢。这大体与韩国政府制定的到2050年钢铁行业实现碳中和情景一致，即到2050年，钢铁行业的排放量比2018年的水平下降95%。¹⁵

韩国政府预计，通过整体向氢气直接还原炼钢转型，把所有高炉转变为电弧炉，到2050年将实现这一目标。我们的有序1.5°C情景恰恰表明了这个转型：**为了大幅降低钢铁行业的排放强度从而实现1.5°C目标，高炉将被淘汰，并被以废钢为原料的电弧炉和氢气直接还原炼钢替代。**在1.5°C情景下，到2050年，37%的钢材生产，将来源于以废钢为原料的电弧炉。

我们的1.5°C情景还预测，到2050年，材料效率策略将使钢铁需求下降22%，使产能降至4,400万吨。到2050年，钢铁价格将增长90%左右，使需求进一步降至3,800万吨。

目前，在韩国钢铁行业使用的能源中，约85%来源于煤炭。在1.5°C情景下，到2030年，这一比例将降至40%。到2050年，在韩国钢铁行业的生产用能中，煤炭将被彻底淘汰。在2020年至2050年期间，钢铁行业的用电量将下降21%。目前，可再生能源在韩国电力系统的占比很小。我们的1.5°C情景有赖于可再生能源产能的大幅提升：2030年，56%的电力生产将来源于清洁能源。到2050年，100%的电力生产将来源于清洁能源。在1.5°C情景下，到2050年，氢气用量将从目前的0.0EJ，上升至0.14EJ。在1.5°C情景下，到2050年，在韩国生产的氢气中，76%是绿氢，23%是蓝氢。

在有序1.5°C情景下，韩国能将钢铁行业在2020年至2050年期间的二氧化碳累计排放限制为11亿吨。如果不改变钢铁行业和上游的能源生产，预计累计排放量将达到26亿吨。

作为世界第六大钢铁制造国，韩国做出了宏伟的气候承诺，制定了国家和企业层面的政策，能很好地帮助加快全球钢铁行业的转型。

¹⁵ 在政府设定的情景下，到2050年，钢铁行业排放量从2018年的1.012亿吨二氧化碳当量，降至460万吨二氧化碳当量，降幅为95%。

韩国钢铁行业转型的主要优先事项包括：

- 目前的任务是把为钢铁行业制定的宏伟的长期承诺和目标，转变为近期（2030年前）政策和投资决策。
- 发挥电弧炉-废钢产能大规模扩张的潜力，通过制定针对性的规定增强废钢提取、分类和净化的动力，替代现有高炉。
- 作为主要的钢铁消耗国，为汽车行业和家电行业制定民营企业绿色钢材采购要求，从而拉动对更清洁方案的需求。
- 制定政策确保不再新增对燃煤炼钢设施的投资。

4.6 美国：绿色钢铁复苏

美国是世界第五大钢铁制造国。在经历了二十年的产能下降后，随着特朗普政府的贸易关税提高了进口钢材的价格，美国的钢铁行业近期出现了复苏（Ferry, 2020年）。2020年，受新冠疫情的影响，钢铁需求下降了18%。但是，拜登政府近期公布了针对基础设施投资的多年计划，这将在短期内拉动钢铁需求。

美国的钢铁制造主要来源于以废钢为原料的电弧炉产能。美国有99家电弧炉钢厂，归51家企业所有；另有9家综合的高炉-碱性氧气炉钢厂，由位于东海岸的3家企业控制（Hasanbeigi和Springer, 2019年）。以废钢为原料的电弧炉的高占比，意味着美国是世界上吨钢能源强度和碳排放强度最低的国家之一。

虽然美国在钢铁回收利用方面在全球处于领先地位，但是美国并未制定具体的民营企业计划和政府计划来加快近期的钢铁行业脱碳。拜登政府承诺到2030年使各经济部门的温室气体排放减半（与2005年水平相比），到2050年实现净零排放。目前，拜登正与国会的民主党人合作通过聚焦气候的支出法案，包括拨款数百万美元，帮助钢铁、水泥及其他制造企业落实产品材料所含碳排放的宣言（Yarmuth, 2021年）。但是，该法律文本尚不包括基础设施投资的采购标准，仅帮助企业贯彻产品宣言，降低建筑材料所含的排放量。美国尚未制定具体的脱碳政策和针对各行业的脱碳目标。

同时，美国主要的钢铁企业已经开始采取措施来实现更清洁的钢铁生产。美国钢铁公司经营着美国最大的综合高炉-碱性氧气炉钢厂，制定了到2050年实现净零排放的目标，并计划使用更高比例的电弧炉产能来降低近期的排放量。今年年初，克利夫兰克里夫公司宣布，公司的目标是到2030年使温室气体排放降低25%，目前正在位于伯恩斯港的工厂推进碳捕集项目（Buxbaum, 2021年）。近期，该公司收购了美国最大的废钢加工和销售企业，以便为不断增长的电弧炉设施增加废钢供应（Surran, 2021年）。2020年10月初，纽柯钢铁公司宣布启动净零排放钢铁产品线，还宣布与通用汽车达成了承购协议，以便在2022年启动产品采购（Downey, 2021年）。但是，与总部位于欧洲的许多企业相比，在美国这四家主要的钢铁制造企业中，没有一家企业计划在2030年前生产净零排放钢材。纽柯钢铁公司的近零排放钢材将成为有补偿的回收利用钢材，以抵消过程中使用的碳。

为了实现 1.5°C 目标，到 2030 年和 2050 年，美国钢铁行业的排放，需要分别比 2020 年的水平下降至少 50%和 99%。到 2030 年和 2050 年，美国钢铁生产的排放强度，需要从目前的 0.84 吨二氧化碳/吨钢，分别下降至 0.35 吨二氧化碳/吨钢和 0.013 吨二氧化碳/吨钢。

其中的部分必要减排可以通过降低产能完成。在我们的 1.5°C 情景下，到 2050 年，材料效率策略将使钢铁需求下降 24%，使累计排放量下降 32%。到 2050 年，材料效率的提升使产能下降至 7,800 万吨。到 2050 年，钢材均价也将增长 15%，使需求进一步下降至 7,300 万吨。

在 1.5°C 情景下，50%以上的减排来源于被淘汰的碳密集型工厂，包括天然气直接还原炼钢的电弧炉和目前的 9 个高炉及其被更清洁技术的替代。目前，以废钢为原料的电弧炉、高炉和直接还原铁电弧炉分别占钢铁产能的 48%、38%和 14%。在 1.5°C 情景下，到 2050 年，以废钢为原料的电弧炉产能和氢气直接还原炼钢产能在美国钢铁产能中的占比，将分别增长至 72%和 22%。

以废钢为原料的电弧炉产能的不断增加，与行业截至目前所采取的行动计划保持一致，而且是建立在美国钢铁制造企业在生产优质再生钢方面的现有竞争优势基础之上。但是，向氢气直接还原炼钢的转型，要求对氢气示范项目进行更多超出现有水平的针对性的投资。截至目前，美国只有一个氢气直接还原炼钢试点项目，而欧盟有 31 个此类项目（Vogl 等，2021 年）。但是，通过波士顿金属公司的项目，美国多家机构对铁矿石电解装置项目进行了公共投资，这将来会成为有前途的减排手段（Boston-Metal，2021 年）。

炼钢生产工艺和技术的转型，需要对美国钢铁行业的能源原料进行重大转变，要求分别为了给电弧炉提供更清洁的电力，以及扩展使用可再生能源的氢气，大规模建设可再生能源产能。在有序 1.5°C 情景下，到 2040 年，未减量煤炭和天然气将被淘汰；在无秩序 1.5°C 情景下，未减量煤炭和天然气淘汰要到 2045 年。氢气和电力将成为主要的燃料来源，分别占能源供应量的 40%。到 2050 年，氢气的用量将从目前的 0.00EJ，增加至 0.20EJ。在 1.5°C 情景下，到 2050 年，在美国生产的氢气中，约 78%是绿氢。在 2020 年至 2050 年期间，钢铁行业的年度用电总量将保持在 0.20EJ 左右。使用清洁电力生产的比例，将从 2030 年的 64%，增长至 2050 年的 100%。

在有序 1.5°C 情景下，在 2020 年至 2050 期间，钢铁行业的变化以及上游行业更清洁能源的生产，能使美国的钢铁二氧化碳累计排放量，从预计的参考情景下的 25 亿吨，下降至 7.7 亿吨。

作为世界主要的气候变化贡献国和钢铁回收利用领跑者，美国能为世界各国钢铁行业向净零排放转型的紧密合作铺平道路。但是，这一机会正在不断减少，而美国可以借此机会提升国内对行业脱碳的宏伟目标，以确保更积极地参与国际合作。

美国钢铁行业转型的主要优先事项包括：

- 为钢铁行业制定符合 1.5°C 目标的净零排放路线图，制定到 2030 年实现的近期目标。

- 为行业脱碳制定国内目标，形成综合的政策框架，从而为推广钢铁制造脱碳的业务模式创造良好的环境，包括针对“低碳”和“净零排放钢铁”的严格标准和公共采购要求，从而拉动需求，淘汰剩余的高炉。
- 作为世界主要捐赠国，通过多边开发银行，为新兴和发展中国家提供钢铁行业脱碳转型融资。
- 通过“重建更美好世界”计划（B3W），扩大与发展中国家在技术和政策方面的合作（美国白宫，2021年）。

第 5 章 结论和要点

全球钢铁行业快速的脱碳轨迹，是实现 1.5°C 路径的关键。到 2030 年和 2050 年，全球钢铁行业的排放，需要分别比 2020 年的水平下降至少 50% 和 95%。必须相继采取如下措施，包括能源效率提升、材料效率措施、高比例的废钢利用、氢气直接还原炼钢法的应用、上游更清洁的能源生产、以及碳捕集、利用与封存技术的部署，从而实现减排。

虽然民营部门保持着增长势头并做出了令人鼓舞的承诺，但是与全球强劲和不断增长的钢材需求一样，钢铁行业的排放继续保持着增长趋势。为了使钢铁行业向符合 1.5°C 目标的路径转型，需要在政策制定、技术部署和循环经济方法方面制定更宏伟的目标。这需要各相关方齐心协力，迅速采取行动。

虽然本报告所述的时间框架跨越 29 年的时间到 2050 年，但我们能采取行动的时间窗口非常有限。在未来十年内，我们研究的主要地区的钢铁制造企业，将面临关键的投资决策。欧洲、韩国、日本和美国的钢铁制造企业，需要决定如何应对老化的生产设施，如何减少就业岗位，以及如何应对这些决策带来的社会影响。

对于中国和印度而言，尽早采取行动也是至关重要的。鉴于中国和印度的生产规模，延迟行动会导致 2020 年至 2050 年期间各行业的累计排放量增加 140 亿吨，需要使用剩余全球碳预算（将全球温升控制在 1.5°C 的可能性为 67%）的 3% 左右。中国面临的挑战是，中国拥有大型和目前较新的排放密集型钢铁生产基地，需要探索对其进行改造和尽早退役的方案。印度面临的困境是，钢铁制造产能的大幅增长，其中的关键是确保新厂进入“净零准备”状态，换言之，一旦条件具备，新厂能够适应清洁技术改造。

此外，这些要求与当前计划的钢铁投资管线形成鲜明的对比。在目前在建的钢铁产能中，有四分之三是建立在污染最严重的高炉-碱性氧气炉炼钢法基础之上（Swalec 和 Shearer, 2021 年）。鉴于这些工厂较长的使用寿命（因所在位置不同，使用寿命约为 20-25 年甚至更长），2025 年以后新建的高炉成为重要的排放锁定，不符合将全球温升控制在 1.5°C 的要求。

因此，需要确定本报告所述的长期减排的基础。即将在下月举行的第 26 届联合国气候变化大会，将成为把这些行动付诸实践的关键时刻。在第 26 届联合国气候变化大会上，作为主席国的英国将启动一个包括钢铁行业在内的新的行业合作项目，使各国承诺共同采取雄心勃勃的行动。

我们将在下文分享研究发现的主要观点，这会为钢铁行业快速脱碳创造条件。虽然这些观点适合不同的地域，但是不同的国家情况（现有钢铁生产设施的使用年限、基础设施要求和资源可用性）将对必要干预的相对重要性、顺序和具体性质造成影响。

5.1 为实现净零钢铁进行规划和治理

在特定环境下，目标和行业路线图在按转型的预期速度和方向提供清晰的政策信号方面，发挥着关键作用。正如第 4 章各主要地区深入探究部分所述，目前很少有国家政府特别为钢铁行业制定宏伟的目标。我们的研究为六大钢铁制造地区了解“宏伟的目标”、或至少符合将全球温升控制在 1.5°C 的目标提供了初步介绍。大量民营企业做出了净零排放承诺。但是，其中的大部分企业

并未就如何履行承诺制定足够详细的计划（Gardiner 和 Lazuen，2021 年）。这为吸引各相关方、政府、民营部门、学术界和民间团体参与创造机会，从而为钢铁行业的未来发展制定宏伟的共同愿景。

- **为钢铁行业制定宏伟的脱碳目标。**实现本报告所述的脱碳轨迹的关键步骤，是为最晚在 2050 年之前实现钢铁行业净零排放制定宏伟的国家行业路线图。这就要求各相关方的积极参与，包括政府、钢铁制造企业和消费者、劳工代表、民间团体和学术界。如果路线图包括可根据国家气候目标纳入国家自主贡献目标的清晰的近期（2030 年）脱碳目标，这样的路线图则更加有效。钢铁制造企业的主要优先事项是，如果尚未做出承诺，则承诺到 2050 年或之前实现净零排放，制定包括 2030 年近期目标的详细转型计划，并由独立机构对此进行详细审查。
- **为主要钢铁制造地区制定公平的转型计划。**在制定国家或行业性钢铁路线图的过程中，各国政府有必要为如何管理钢铁行业转型带来的就业和社会影响制定专门的计划，包括工人再培训规定。
- **确定重点基础设施并对其进行投资。**我们的研究强调投资新基础设施（可再生能源发电、使用可再生能源制氢的电解装置、二氧化碳运输和储存设施、废钢逆向物流设施）的重要性，从而支持近零排放钢铁技术，提高行业的材料效率。为了促进对新型清洁能源基础设施的投资，需要很好地了解基础设施需要、协调研究、开发和部署计划、制定近期投资策略。

5.2 支持钢铁技术从碳密集型向近零排放型转变

如上文所述，未来十年面临的直接挑战，是释放市场信号，帮助从对现有的碳密集型钢铁生产资产的投资，转向对清洁和近零排放型钢铁生产资产的投资。

目前，本报告讨论的许多钢铁脱碳技术方案，明显比常规生产工艺昂贵得多。甚至在更高碳价格管辖区，如欧盟碳排放权交易体系下，盈亏平衡的碳价远远高于目前认为合适的价格（Sartor 和 Lehne，2020 年）。此外，对首批使用更清洁钢铁生产技术的商业化生产基地的投资，具有风险水平较高的特征。随着规模的扩大，这些技术的成本将出现下降，但在此期间，需要补贴或二氧化碳价格风险缓解工具等直接支持，以承担较高的运行成本和资本成本，确保近零排放钢铁技术能与现有碳密集型技术进行竞争。

- **支持净零排放钢铁示范项目。**创造促进钢铁制造脱碳商业模式的有利环境，是加快推进净零排放钢铁示范项目的关键因素。至于这种支持的准确含义，因各国背景不同而有所差异。在欧洲，政策制定者正在探索提供直接支持，如碳差价合约（CCFD），以承担较高的突破性清洁生产技术的运行费用。在其他地区，为示范项目提供公共资金时，可以采取政府主导转型资金，民营部门为辅的形式。
- **提升行业研发能力。**行业相关方、政府和研发基金可以展开合作，以确保为仍处于研发初期阶段的近零排放钢铁技术提供研究支持，如铁矿石电解技术。

- **通过政策加快从碳密集型技术的转移。**新建使用寿命约为 20-25 年的未减量高炉（未应用碳捕集、利用与封存技术），给实现 1.5°C 路径造成关键风险。为了管理这种风险，其中一种方法是制定日落条款，约束钢铁产能扩展至“净零准备”技术，如直接还原铁-电弧炉，其在条件成熟时能容易地转为使用可再生能源制备的氢气，或转为废钢-电弧炉钢厂。其他方法包括鼓励向更清洁的原料转移，制定近零排放钢铁的生产或销售百分比目标。

5.3 扩大近零排放钢铁的市场

除为必要的技术和基础设施提供直接支持外，政府和钢铁消费者在建立对近零排放钢铁的需求方面发挥着关键作用。使更清洁钢铁的采购主流化，将改变钢铁制造企业的商业实践——使企业确信能为其更昂贵和更低碳的钢铁找到市场，从而收回必要投资的成本。研究表明，使用更昂贵的绿色钢材仅使终端消费者的成品费用略微增加，而中间制造企业能够转嫁增加的成本。¹⁶

在过去的一年中，已呈现出令人鼓舞的进展迹象。汽车、建筑和可再生能源行业的大型钢铁消费者已经开始表明对绿色钢材的需求。先行者受到消费者和投资者压力及价值创造新可能性期待的激励（Delasalle 等，2021 年）。十余家企业签署了气候组织的自愿“零排放钢铁计划”，承诺最晚在 2050 年前实现钢铁 100%净零排放。尽管有发展势头的存在，但是这些努力在整体钢铁市场上的占比相对较小。需要增加采购承诺，以确保近零排放钢铁从小众的优质产品发展成为主流商品。

此外，需要做大量工作界定“低碳”、“近零”和“净零”排放钢铁。与证明符合上述定义的透明和可靠流程相关联的严格定义，是推动钢铁行业脱碳的有力工具。它们还可以帮助提高钢铁排放数据的透明度，而这类数据目前通常由钢铁企业自行报告，而且并不标准，这意味着在很大程度上信任取决于这些钢铁制造企业自身。更透明的钢铁排放数据，还将帮助投资者努力支持钢铁行业的脱碳。

- **加大净零排放钢铁的公共采购。**各国政府可以通过设定宏伟的公共采购承诺，扩大近零排放钢铁市场，如承诺采购一定数量的“绿色”或“净零排放”钢铁，制定在某一特定日期前市场上近零排放产品的具体比例目标。国家和地方政府及公共机构可以通过强制在公共项目中衡量碳含量启动公共采购流程，从而逐步收紧碳含量规定。
- **制定和实施宏伟的零排放钢铁产品要求。**目前，有多个并程序用于定义“绿色”和“净零排放”钢铁。从促进全球近零排放钢铁供应链角度而言，统一的国际性标准会有帮助。例如，ISO 77.140.01 等国际标准委员会，可以召集相关专家、钢铁消费者和制造企业制定衡量碳强度的行业性方法及其他界定“低碳”和“净零排放”钢铁的指标。
- **加强主要钢铁消费企业的承诺。**扩大低碳排放钢铁市场，也有赖于承诺在 2050 年或之前 100%采购“近零”或“净零”排放钢铁、和/或加入零排放钢铁计划或先行者联盟等买方

¹⁶ 国际能源署估计，使用绿色钢材使中型家庭的成本仅增加 0.2%，使中型汽车的成本仅增加 0.1%。（国际能源署，2020 年）

俱乐部倡议（Rathi，2021 年）的钢铁消费者，从而共同发出需求信号，并在可能的情况下与低碳钢铁制造企业签署直接承购协议（Delasalle 等，2021 年）。

5.4 充分发挥循环经济和材料效率的潜力，实现钢铁行业脱碳

虽然我们的研究强调部署和开发突破性近零排放通用钢制造技术的重要性，但是我们也发现需求侧手段巨大且目前未被开发的潜力。为实现 1.5°C 路径，采取一整套材料效率措施及扩大钢铁回收利用，到 2050 年，占钢铁行业减排的 50%。这些方法相互促进，材料效率能帮助提高钢铁回收利用的废钢的可用性，二者能共同大幅降低我们最初需要的通用钢的用量。此外，与碳捕集、利用与封存和氢气相比，目前已对这些方法进行了部署，考虑到未来十年钢铁行业排放的进展，无需等到突破性技术成熟再进行部署。

材料效率和回收利用的提升，增加了解决更广泛的环境挑战的效益。通过减少主要资源开采（铁矿石、煤炭、可再生能源基础设施需要）和降低整体的废物产量，这些方法帮助减缓生物多样性损失和污染，缓解可能受到主要资源开采负面影响的地方社区和本土群众的压力。

但是，在某种程度上，把握这一潜力，是比通用钢铁制造厂转型更复杂、影响更深远的挑战。这需要协调钢铁供应链上的大量相关方：从需要轻量化产品和建筑爆破设计的设计方、到需要获取、分类和回收废钢的废物管理企业、再到建立新的业务模式来改变汽车等钢铁密集型产品相关消费模式的初创企业。这种协调的程度和需要的框架，在任何地区都是不容易实施的。在拥有良好的建筑和汽车库存、重要的再利用和回收利用潜力的经济体及刚刚建立现有钢铁库存的国家之间，这些手段的潜力有很大差异。

- **加大激励措施来回收、分类和再利用废钢。**许多政策能帮助把握循环经济方法对钢铁行业脱碳的潜力。这包括制定钢铁回收利用目标、强制性增加钢铁密集型产品中回收利用钢铁比例的产品要求、及鼓励在钢铁首个使用年限到期后以更可回收的方式使用钢铁的政策，如循环产品设计。此外，改善回收和分类也很关键。需要更好地了解现有回收利用网络，如目前的出口流量和形成这种动态趋势的规定。专门用于提升废钢分类和分离技术的研发资金，也能帮助降低铜等微量金属的污染，并确保优质的再生钢。
- **鼓励高效减量使用通用钢。**施工规定和建筑规范的变化，对于鼓励再利用汽车、建筑和家用电器等钢铁密集型资产，并延长它们的使用寿命是必要的。目前，回收利用、再利用和建筑爆破通常面临国家建筑规范和规定的监管障碍。

5.5 加强净零钢铁的国际协作

针对钢铁行业脱碳的研究、开发和部署展开国际协作和合作，将有利于更好地利用资源，帮助预防资金缺口，降低技术开发成本，确保技术的国际推广。国际一致的“低碳”、“近零”和“净零”排放钢铁标准以及统一的钢铁制造排放强度报告程序和方法，将改善透明度和数据收集，确保公平的竞争环境，并最终推动全球钢铁供应链的绿色化。

近期，许多平台和倡议为钢铁行业脱碳国际合作提供机会。工业转型领导小组（LeadIT）是由瑞典和印度政府于 2019 年成立的，旨在为致力于加速行业脱碳的国家和企业提供一个合作和经验分享的平台（工业转型领导小组，2020 年）。“可行使命伙伴关系”将碳密集型行业的首席执行官、金融家和消费者集合起来，就宏伟的脱碳路线图达成共识（可行使命伙伴关系，2021 年）。2021 年 6 月，又有另外两个平台被启动：七国集团工业脱碳议程（UK-G7-Presidency，2021 年）和旨在使十个国家政府在未来三年实施绿色钢铁公共采购政策的行业深度脱碳计划（IDDI）（联合国工业发展组织，2021 年）。

但是，如果这些计划想要实现必要的目标，仍需要填补很多重要的空白。第一，除印度在工业转型领导小组和行业深度脱碳计划中的作用外，这些国际层面的行业脱碳计划和行动主要受到少数欧洲国家、美国和加拿大的推动。虽然部分国家发挥领导作用很重要，但是采取包容性措施同等重要。第二，最近的计划尚未被具体化。这些计划理论上看起来不错，但是仍需要得到主要钢铁制造国家的支持和同意，以便采取行动。第三，截至目前，重点被放在召开会议、经验分享和合作上。虽然这些方面至关重要，但是为了加快推进钢铁行业脱碳，我们需要致力于清晰的脱碳目标和路线图、有崇高志向的组织。

下个月召开的第 26 届联合国气候变化大会，是见证这样一个有崇高志向的组织成形的重要机会。作为主席国的英国将启动一个包括钢铁行业在内的新的行业合作项目，使各国承诺共同采取雄心勃勃的行动。

- **扩大现有钢铁行业脱碳的国际计划。**如上文所述，现有国际计划具有包容性，这一点很关键，从而使各地区的主要钢铁制造国家参与其中。
- **增强钢铁行业脱碳长期目标和近期行动。**第 26 届联合国气候变化大会为主要钢铁制造国家展示它们对钢铁行业的实际领导力提供机会。为了实现 1.5°C 目标，钢铁行业需要可靠和宏伟的长期目标及符合目标的近期行动。
- **支持和扩大在零排放钢铁方面的国际共同研发。**各国政府可以集中并加大对研发和部署的投资。在第 26 届联合国气候变化大会上，国际清洁能源使命计划将在奥地利政府的领导下，启动新的专门的工业脱碳使命。
- **为新兴和发展中国家提供转型资金。**多边开发银行开始把重点放在工业脱碳上，但是为此需要额外的资金。由地区性多边开发银行参与的世界银行的气候投资基金，成立了新的工业脱碳基金，正在寻求补充捐赠人。在为工业脱碳扩大投资、调动针对性支持和技术协助、及提升绿色气候基金方面，各国政府和多边开发银行能发挥重要作用，从而进一步推动钢铁行业的转型。
- **创建公平的竞争环境。**上文所述的一些方案（为清洁钢铁生产技术、产品标准和要求提供直接补贴支持）及主要地区正在探索的其他方案（欧盟的碳边界调整机制方案），陷入充满挑战的贸易政策领域。贸易讨论和全球产能过剩的担忧过去给国际合作造成了障碍。创

建专门的对话空间对这些问题展开讨论，从而形成应对贸易商品碳问题的通用方法，探索碳边界调整机制和碳定价协作，及达成补贴支持协议，能帮助打开这一僵局。

附件 1 本研究考虑的钢铁生产技术

技术	描述	成熟度	案例	排放强度	挑战
高炉-碱性氧气炉	冶金煤和铁矿石在高炉中加热。煤作为热源，去除铁矿石中的氧气，留下铁水，使之在碱性氧气炉中制成钢铁	容易以有竞争力的成本获得	约 61.3%的钢铁是以这种方法炼制的 (Swalec 和 Shearer, 2021 年)	2.2 吨二氧化碳/吨钢 (Swalec 和 Shearer, 2021 年)	很难在高炉-碱性氧气炉路径中替代煤，因为煤被用来生产高温热能（在炼焦炉中温度为 1,100°C，在高炉中温度为 1,650-2,200°C），同时发生化学反应分解铁矿石 (Andrea、Serdoner 和 Whiriskey, 2018 年)。除使用碳捕集技术进行改造外，可用的减排方案很少。
使用生物质能的高炉 (高炉-生物质能)	使用生物质能作为高炉中冶金煤的替代性还原剂或燃料	示范项目；受大多数地区生物质能可用性的限制	阿塞洛米塔尔钢铁集团位于比利时的工厂正在试验用生物煤替代煤 (Jacobs, 2021 年)	使用粉状生物质注入 (PBI)，使排放强度减少 0.28，达到 0.59 吨二氧化碳/吨钢，这取决于高炉技术和生物质能的来源 (Feliciano-Bruzual, 2014 年)	排放强度和技术可行性取决于生物质能的类型 (Feliciano-Bruzual, 2014 年)。只有使用升级形式的生物质能，才能实现最高水平的替代 (国际能源署, 2020 年)，但是生物炭的使用甚至会给安装尺寸造成技术限制。多个行业将竞争有限的可持续生物质能，这也会降低扩展性。可持续生物质能也在空气质量、生物多样性、土地利用和粮食安全方面面临权衡取舍 (Catuti 和 Elkerbout, 2020 年)。
使用氢气的高炉 (高炉-氢气)	使用氢气作为高炉中的辅助还原剂	示范项目	自 2019 年以来，德国蒂森克虏伯集团试验将氢气作为高炉中的还原剂 (国际能源署, 2020 年)	严格使用可再生氢气后，排放强度为 1.73 吨二氧化碳/吨钢 (减少 21.4%) (Yilmaz、Wendelstorf 和 Turek, 2017 年)。 如果钢铁制造过程中使用的电力也来源于可再生能源，排放	虽然氢气能减少焦化厂和高炉对煤炭的需求，但是它仅作为辅助还原剂 (Andrea 等, 2018 年)。仅使用氢气在技术上是不可行的，因此无法彻底淘汰煤炭的使用 (Nogami、Kashiwaya 和 Yamada, 2012 年)。在很大程度上，排放还取决于生产氢气的来源 (Andrea 等, 2018 年)

				强度为 1.57 吨二氧化碳/吨钢（Fan 和 Friedmann, 2021 年）。	
使用碳捕集、利用与封存的高炉（高炉-碳捕集、利用与封存）	从高炉气体或热电厂气体中捕集二氧化碳排放	示范项目	日本的 COURSE 50 项目完成了高炉-碳捕集、利用与封存测试阶段，计划在 2030 年前达到完全商业化规模（国际能源署，2020 年）	0.81 吨二氧化碳/吨钢（减少 63%），这取决于高炉的配置（Witecka 等，2021 年）	减排的整体程度，取决于大规模永久性储存或使用捕集的二氧化碳的能力。高捕集率仍需通过示范项目得以证明。碳捕集、利用与封存不会彻底消除排放，因为很难实现极高的捕集率（>90%）。碳捕集技术的应用给能源效率带来不利后果，会增加捕集率。此外，高炉-碱性氧气炉装置有多个排放点，增加了二氧化碳捕集的技术复杂性（主要来源于高炉，也有部分来源于碱性氧气炉和焦化厂）（Witecka 等，2021 年）
以废钢为原料的电弧炉（电弧炉-废钢）	在电弧炉中熔化废钢	容易以有竞争力的成本获得	电弧炉占钢铁制造产能的 20.2% 左右（Swalec 和 Shearer, 2021 年）	0.3 吨非直接二氧化碳排放/吨铁（减少 86%）（Swalec 和 Shearer, 2021 年）	废钢有限的可利用性和部分应用中优质钢生产时通用钢的必要性，意味着电弧炉-废钢路径目前无法满足所有钢铁生产需求。排放强度也会因使用电力的碳强度不同而有所差异。
使用化石燃料-天然气以直接还原铁为原料的电弧炉（直接还原铁-电弧炉-化石燃料）	铁矿石在由天然气加热的井式炉中被一氧化碳和氢气还原，之后铁在电弧炉中和废钢一起被熔化	容易获得	阿塞洛米塔尔钢铁集团规划的位于敦刻尔克的大型直接还原铁-电弧炉钢厂首先使用天然气运行（阿塞洛米塔尔钢铁集团，2020 年）	使用天然气时，排放强度为 0.75 吨二氧化碳/吨钢（减少 66%）（Witecka 等，2021 年） 使用煤炭时，熔融还原炼铁工艺（COREX/FINEX）的排放强度为 1.3-1.8 吨二氧化碳/吨钢（减少 40.9%），回转炉工艺的排放强度为 3.2 吨二氧化碳/吨钢	这不是完全脱碳工艺，存在化石燃料-天然气锁定的风险。钢铁生产的碳强度也受到甲烷排放差异的影响，需要将这一因素考虑在内。使用电力的碳强度对整体排放的影响甚至高于电弧炉-废钢装置。

				(增加 45.5%) (Swalec 和 Shearer, 2021 年)	
以直接还原铁为原料, 使用碳捕集、利用与封存的电弧炉 (直接还原铁-电弧炉-碳捕集、利用与封存)	捕集井式炉的二氧化碳排放	以高成本获得	特尔尼翁钢铁集团公司自 2008 年以来在墨西哥运营的两家直接还原铁工厂的二氧化碳捕集率为 5% (国际能源署, 2020 年)	0.57 吨二氧化碳/吨钢 (减少 74.1%) (国际能源署, 2020 年)	减排的整体程度, 取决于大规模永久性储存或使用捕集的二氧化碳的能力。高捕集率仍需通过示范项目得以证明。 不会彻底消除排放, 因为很难实现极高的捕集率 (>90%)。碳捕集技术的应用给能源效率带来不利后果, 这会增加捕集率。
使用氢气的电弧炉 (直接还原铁-电弧炉-氢气)	纯净的氢气还原铁矿石, 之后在电弧炉中和废钢一起被熔化	示范项目	HYBRIT 公司的电弧炉-直接还原铁-氢气试点工厂成为首家向消费者供应无化石钢铁的工厂 (Vattenfall, 2021 年)。	0.71 吨二氧化碳/吨钢 (减少 67.7%), 这取决于氢气的来源 (Swalec 和 Shearer, 2021 年)	排放因生产氢气的来源不同而有所差异。例如, 蒸汽甲烷转化 (SMR) 与二氧化碳和甲烷排放均有关系。电解作用生产的氢气能实现非常低的排放, 但是这取决于使用电力的类型。电解氢需要低于 200 克二氧化碳/千瓦时的电力的碳强度, 从而实现比蒸汽甲烷转化生产的氢气更低的排放水平。此外, 电弧炉装置也需要碳来源以便从铁矿石生产钢铁, 这会增加约 53 公斤二氧化碳/吨钢 (Vogl, Åhman 和 Nilsson, 2018 年)。碳来源于煤粉、捕集的二氧化碳、生物甲烷或其他来源的生物碳, 各种方案对整体排放的影响不尽相同。

*备注: 本研究未考虑铁矿石电解作用, 因为它目前仍处于发展的早期阶段。但是, 铁矿石电解作用被纳入国际能源署《世界能源技术展望 2020—钢铁技术路线图》, 而且能在钢铁行业脱碳中发挥重要作用。

附件 2 情景矩阵

本研究对 15 种情景进行了探讨。下表展示的三种情景是在整个报告中被讨论到、且具有代表性的情景，包括参考情景、有序 1.5°C 情景和延迟 1.5°C 情景。

排放路径	转型时间	钢铁行业减排策略				
		能源效率	材料效率	回收利用	氢气	碳捕集、利用与封存
参考情景	不适用	Ref	Ref	Ref	Ref	无
	不适用	Adv	Ref	Ref	Ref	无
	不适用	Ref	Adv	Ref	Ref	无
	不适用	Ref	Ref	Adv	Ref	无
	不适用	Adv	Adv	Adv	Ref	无
有序 1.5°C 转型	近期	Ref	Ref	Ref	Ref	Ref
	近期	Adv	Ref	Ref	Ref	Ref
	近期	Adv	Adv	Ref	Ref	Ref
	近期	Adv	Adv	Adv	Ref	Ref
	近期	Adv	Adv	Adv	Adv	Ref
	近期	Adv	Adv	Adv	Ref	Adv
	近期	Adv	Adv	Adv	Adv	Adv
延迟 1.5°C 转型	近期	Adv	Adv	Adv	Adv	无
	延迟	Adv	Adv	Adv	Adv	Adv
延迟 1.5°C 转型	延迟	Adv	Adv	Adv	Adv	Adv
	延迟	Adv	Adv	Adv	Adv	无

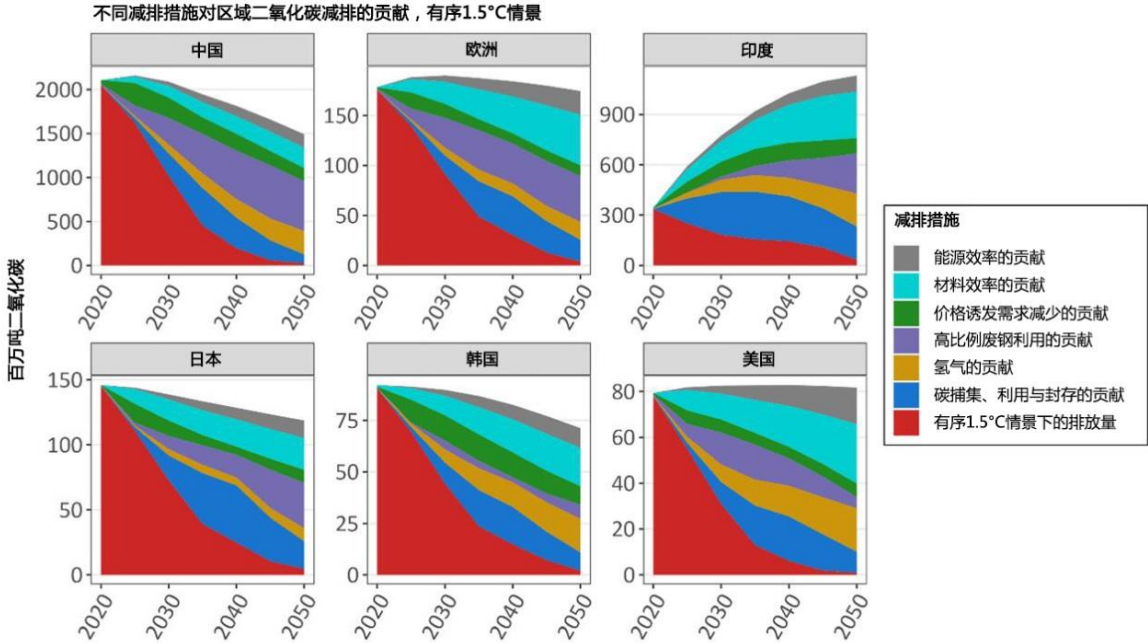
附件 3 与国际能源署情景的对比

报告来源	国际能源署《钢铁技术路线图》-《可持续发展设想》	国际能源署《钢铁技术路线图》-《快速创新案例》	国际能源署《2050 年净零排放：全球能源行业路线图》	E3G 和 PNNL《钢铁行业的 1.5°C 路径》
能源系统目标	2°C /净零排放 2070 年	1.5°C /净零排放 2050 年	1.5°C /净零排放 2050 年	1.5°C /净零排放 2050 年
相对于 2019 年二氧化碳排放的钢铁行业目标	2030 年排放 23 亿吨二氧化碳，2050 年排放 12 亿吨二氧化碳，2070 年排放 3 亿吨二氧化碳，到 2050 年直接和工艺排放下降 54%	2050 年排放 3 亿吨二氧化碳，到 2050 年直接和工艺排放下降 88.5%	2030 年排放 18 亿吨二氧化碳，2050 年排放 2 亿吨二氧化碳，到 2050 年直接和工艺排放下降 92%	2030 年排放 17 亿吨二氧化碳，2050 年排放 1 亿吨二氧化碳，到 2050 年直接和工艺排放下降 95%
使用电弧炉生产钢铁的比例	2019 年：29%；2050 年：57%	假设与《可持续发展设想》相同	2020 年：24%；2030 年：37%；2050 年：53%	2020 年，以直接还原铁为原料的电弧炉，12%；以废钢为原料的电弧炉，11%；2050 年，直接还原铁-电弧炉-化石燃料，1.3%；电弧炉-直接还原铁-电弧炉-碳捕集、封存与利用，18%；以废钢为原料的电弧炉，47%；
废钢占投入的比例	2019 年：32%；2050 年：45%	假设与《可持续发展设想》相同	2020 年：32%；2030 年：38%；2050 年：46%	2020 年：11%；2030 年：24%；2050 年：47%
材料效率	相对于 2019 年基准，到 2050 年，累计减排 40%	相对于 2019 年水平，到 2050 年，使钢铁需求减少 19%	相对于 2020 年水平，到 2050 年，使钢铁需求减少 20%	相对于参考情景（25 亿吨），到 2050 年，使全球钢铁需求减少 19% 相对于基准，到 2050 年，贡献 21%的减排 2020 年至 2050 年，累计产生 17%的减排
技术性能改进（最佳可行技术和最佳实践）	技术改进（最佳可行技术和最佳实践）到 2050 年，累计减排 21%		虽然《2050 年净零排放：全球能源行业路线图》指出配置最佳可行技术和优化设备运行效率的重要性，但是并未	到 2050 年，所有技术使能源效率提升 20%。

			提供技术性能改进带来的减排估计值。	相对于基准预测，到2050年，贡献12%的减排
仍处于开发/原型阶段的技术	到2050年，累计减排30%。到2050年，每年约减排40%	到2026年，引入市场。到2050年，每年约减排75%	到2050年，累计减排54%	相对于基准预测，到2050年，贡献30%的减排
氢气直接还原铁	到2050年，累计产生8%的减排。到2050年，实现15%的钢铁制造产能。到2030年，引入市场。引入市场后，每月建设一家电解作用氢气直接还原铁工厂	到2026年，引入市场。引入市场后，每月建设两家100%使用可再生能源的氢气直接还原铁工厂	到2050年，实现29%的钢铁制造产能	到2050年，实现19%的钢铁制造产能 到2050年，每年约减排19% 到2025年，引入
碳捕集、利用与封存（包括蓝氢直接还原铁）	到2050年，累计减排16%。到2030年，引入市场。每年捕集100万吨二氧化碳。引入市场后，每2-3周安装一个使用碳捕集、利用与封存的项目。到2050年，每年捕集4亿吨二氧化碳	到2025年引入市场。每年捕集100万吨二氧化碳。引入市场后，每月建设多个使用碳捕集、利用与封存的项目	到2050年，实现53%的钢铁制造产能。到2050年，总计捕集6.7亿吨二氧化碳	到2050年，实现27%的钢铁制造产能 到2050年，捕集4.9亿吨二氧化碳
铁矿石电解作用	未部署	到2050年，实现5%的钢铁制造产能。到2030年引入市场。2030年至2050年期间，每2个月建设一个工厂	到2050年，实现13%的钢铁制造产能	未纳入

附件 4 区域减排贡献

第 4 章探讨了符合 1.5°C 目标的钢铁行业脱碳路径对六大钢铁制造国家和地区的影响，包括中国、欧洲、印度、日本、韩国和美国，并讨论了不同减排策略对这些国家和地区钢铁行业脱碳的影响。下图呈现了深入探讨的各国家和地区的排放路径，以及与参考情景相比，在有序 1.5°C 情景下，不同的减排策略对减排的贡献。这些减排策略包括提升能源效率、提升材料效率、价格诱发需求减少、高比例废钢利用、氢气的贡献、碳捕集、利用与封存。



参考文献

- Alfonso, S. (2021). India's carbon neutral aim hinges on top emitters using hydrogen. *Bloomberg*. Retrieved from <https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-03-23/india-s-carbon-neutral-aim-hinges-on-top-emitters-using-hydrogen>
- Andrea, J.-J., Serdoner, A., & Whiriskey, K. (2018). An industry's guide to climate action. *Bellona Europa*. Retrieved from <https://network.bellona.org/content/uploads/sites/3/2018/11/Industry-Report-final.pdf>
- Audenaerde. (2017). Steel Demand Beyond 2030. *Accenture Strategy*. Retrieved from https://www.oecd.org/industry/ind/Item_4b_Accenture_Timothy_van_Audenaerde.pdf
- Bekaert, F., Van Hoey, M., Hagenbruch, T. V., Steven Kastl, Emanuel, & Zeumer, B. M., Sigurd (2021). The future of the European steel industry. *McKinsey & Company*. Retrieved from https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/industries/metals%20and%20mining/our%20insights/the%20future%20of%20the%20european%20steel%20industry/the-future-of-the-european-steel-industry_vf.pdf
- Bond-Lamberty, B. (2021). GCAM 5.4. doi:<https://doi.org/10.5281/zenodo.5093192>
- Boston-Metal. (2021). Boston Metal: Imagine steel production with no CO2 emissions. Retrieved from <https://www.bostonmetal.com/>
- Business-Standard. (2021). India can fulfill 50% coking coal requirement from Russia: JSPL MD. Retrieved from https://www.business-standard.com/article/markets/india-can-fulfil-50-coking-coal-requirement-from-russia-jspl-md-121071800158_1.html
- Buxbaum, P. (2021). Global steel industry in major decarbonization push. *American Journal of Transportation*(721). Retrieved from <https://ajot.com/premium/ajot-global-steel-industry-in-major-decarbonization-push>
- Catuti, M., & Elkerbout, M. A., Monica Egenhofer, Christian (2020). Biomass and climate neutrality. *Center for European Policy Studies*. Retrieved from <https://www.ceps.eu/ceps-publications/biomass-and-climate-neutrality/>
- Chung, J. (2019). South Korea steelmaker POSCO may push 'green' output with up to \$169 million in new funds: executive. *Reuters*. Retrieved from <https://www.reuters.com/article/us-southkorea-posco-idUSKCN1T40Z5>
- Clarke, J. F., & Edmonds, J. A. (1993). Modelling energy technologies in a competitive market. *Energy Economics*, 15.2, 123–129.
- Clarke, L. E., Jiang, K., Akimoto, K., Babiker, M., Blanford, G. J., Fisher-Vanden, K., . . . Loschel, A. (2015). *Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Retrieved from https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_chapter6.pdf

- Climate-Transparency. (2018). Brown to Green: The G20 Transition to a low-carbon economy. Retrieved from https://www.climate-transparency.org/wp-content/uploads/2019/01/BROWN-TO-GREEN_2018_South_Korea_FINAL.pdf
- Course50. *New Energy and Industrial Technology Development Organization*. Retrieved from <https://www.course50.com/en/research/>
- Creutzig, F. e. a. (2015). Bioenergy and climate change mitigation: an assessment. *Gcb Bioenergy*, 7.5, 916-944. doi:10.1111/gcbb.12205
- Davis, S. J., Lewis, N. S., Shaner, M., Aggarwal, S., Arent, D., Azevedo, I. L., . . . Chiang, Y.-M. (2018). Net-zero emissions energy systems. *Science*, 360(6396).
- Del Bello, L. (2020). India's steel sector is getting in the way of its climate action goals. *Quartz India* Retrieved from <https://qz.com/india/1801368/indias-steel-sector-is-getting-in-the-way-of-its-climate-goals/>
- Delasalle, F., Graham, A., Naughton, M., Pereira, F., Randle, C., Perez, A., . . . Kignaciuk, K. (2021). Steeling Demand: Mobilising buyers to bring net-zero steel to market before 2030. *Mission Possible Partnership's Net-Zero Steel Initiative*. Retrieved from <https://www.energy-transitions.org/wp-content/uploads/2021/07/2021-ETC-Steel-demand-Report-Final.pdf>
- Downey, J. (2021). Nucor launches line of net-zero carbon steel with General Motors as first customer. *Charlotte Business Journal*. Retrieved from <https://www.bizjournals.com/charlotte/news/2021/10/05/nucor-introduces-full-line-of-net-zero-steel.html>
- EconoTimes. (2021). Carbon tax to burden S. Korean firms by up to 36 trillion won: Nice Rating. Retrieved from <https://www.econotimes.com/Carbon-tax-to-burden-S-Korean-firms-by-up-to-36-trillion-won-Nice-Rating-1616896>
- Eguchi, E. S., Takao. (2021). Steel industry sets 2050 target for net zero CO2 emissions. *The Asahi Shimbun*. Retrieved from <https://www.asahi.com/ajw/articles/14197485>
- European-Commission. (2020). A new Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe. Retrieved from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1583933814386&uri=COM:2020:98:FIN>
- Evans, S. (2018). Q&A: How 'integrated assessment models' are used to study climate change. *CarbonBrief*. Retrieved from <https://www.carbonbrief.org/qa-how-integrated-assessment-models-are-used-to-study-climate-change>
- Fan, Z., & Friedmann, S. J. (2021). Low-carbon production of iron and steel: Technology options, economic assessment, and policy. *Joule*, 5(4), 829-862. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.02.018>
- Feliciano-Bruzual, C. (2014). Charcoal injection in blast furnaces (Bio-PCI): CO2 reduction potential and economic prospects. *Journal of Materials Research and Technology*, 3(3), 233-243. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2014.06.001>

- Ferry, J. (2020). Tariffs Are Keeping US Steel Production Strong. *Industry Week*. Retrieved from <https://www.industryweek.com/the-economy/trade/article/21148048/tariffs-are-keeping-us-steel-production-strong>
- Financial-Times. (2021). Chinese steel prices fall on scepticism over emission policies. Retrieved from <https://www.ft.com/content/76ef4195-a56b-4647-8aa5-1c8d9a3f08cf>
- Gabbatiss, J. (2020). The Carbon Brief Profile: South Korea. *Carbon Brief*. Retrieved from <https://www.carbonbrief.org/the-carbon-brief-profile-south-korea>
- Gardiner, D., & Lazuen, J. (2021). Global Sector Strategies: Investor Interventions to Accelerate Net Zero Steel. *Institutional Investors Group on Climate Change*. Retrieved from <https://www.climateaction100.org/wp-content/uploads/2021/08/Global-Sector-Strategy-Steel-IIGCC-Aug-21.pdf>
- Global CCS Institute. (2021). Global CCS Facilities Database. Retrieved from <https://www.globalccsinstitute.com/co2re/>
- Hasanbeigi, A., Arens, M., Cardenas, J. C. R., Price, L., & Triolo, R. (2016). Comparison of carbon dioxide emissions intensity of steel production in China, Germany, Mexico, and the United States. *Resources, Conservation and Recycling*, 113, 127-139. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.06.008>
- Hasanbeigi, A., & Springer, C. (2019). How Clean is the US Steel Industry. *Global Efficiency Intelligence*. Retrieved from <https://static1.squarespace.com/static/5877e86f9de4bb8bce72105c/t/60c136b38eeef914f9cf4b95/1623275195911/How+Clean+is+the+U.S.+Steel+Industry.pdf>
- Henbest, S. M. K., Jef Callens, Amar Vasdev, Tifenn Brandily, Ian Berryman, Josh Danial, Ben Vickers. (2021). New Energy Outlook 2021. *BloombergNEF*. Retrieved from <https://about.bnef.com/new-energy-outlook/>
- Heynes, G. (2021). HYBRIT produces world's first hydrogen-reduced sponge iron at pilot scale. *H2 View*. Retrieved from <https://www.h2-view.com/story/hybrit-produces-worlds-first-hydrogen-reduced-sponge-iron-at-pilot-scale/>
- IEA. (2020). Steel Technology Roadmap. *IEA, Paris*. Retrieved from <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>
- Infracore, I. (2021). India To Target One Million Tonnes Green Hydrogen Production Per Annum By 2030. *Swarajya Magazine*. Retrieved from <https://swarajyamag.com/news-brief/india-to-target-one-million-tonnes-green-hydrogen-production-per-annum-by-2030>
- Jacobs, J. (2021). ArcelorMittal trekt groene kaart en investeert 1,1 miljard euro in Gentse staalfabriek. *VRT NWS*. Retrieved from <https://www.vrt.be/vrtnws/nl/2021/09/28/arcelormittal-trekt-groene-kaart-en-investeert-1-1-miljard-euro/>
- Ji Chen, S. L., Ye (Agnes) Li. (2021). Pursuing Zero-Carbon Steel in China. *Rocky Mountain Institute*. Retrieved from <https://rmi.org/insight/pursuing-zero-carbon-steel-in-china/>

- Layek, S. (2021). India's JSW Steel sets 2030 carbon emissions target. *Argus Media*. Retrieved from <https://www.argusmedia.com/en/news/2247147-indias-jsw-steel-sets-2030-carbon-emissions-target>
- LeadIT. (2020). Leadership Group for Industry Transition. Retrieved from <https://www.industrytransition.org/who-we-are/>
- Li, X., Wei, N., Liu, Y., Fang, Z., Dahowski, R., & Davidson, C. (2009). CO2 point emission and geological storage capacity in China. *Energy Procedia*, 1(1), 2793-2800. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.02.051>
- Lo, J. (2021). China's dirty Covid-19 recovery leaves heavy lifting on climate to its five-year plan. *Climate Home News* Retrieved from <https://www.climatechangenews.com/2021/03/01/chinas-dirty-covid-19-recovery-leaves-heavy-lifting-climate-five-year-plan/>
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J.B.R., Maycock, T.K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., Zhou, B.,. (2021). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Mission-Possible-Partnership. (2021). The Power of Partnership. Retrieved from <https://missionpossiblepartnership.org/about/>
- Nogami, H., Kashiwaya, Y., & Yamada, D. (2012). Simulation of blast furnace operation with intensive hydrogen injection. *ISIJ international*, 52(8), 1523-1527.
- Oki, T., & Salamanca, H. (2021). Driving Energy Efficiency in Heavy Industries. *IEA, Paris*. Retrieved from <https://www.iea.org/articles/driving-energy-efficiency-in-heavy-industries>
- Pales, A., Teter, J., Abergel, T., & Vass, T. (2019). Material Efficiency in Clean Energy Transitions *IEA*. Retrieved from https://iea.blob.core.windows.net/assets/52cb5782-b6ed-4757-809f-928fd6c3384d/Material_Efficiency_in_Clean_Energy_Transitions.pdf
- Pauliuk, S., Wang, T., & Müller, D. B. (2013). Steel all over the world: Estimating in-use stocks of iron for 200 countries. *Resources, Conservation and Recycling*, 71, 22-30.
- PWC. (2015). Steel in 2025: quo vadis? . *PWC-Metals*. Retrieved from <https://www.pwc.com/gx/en/metals/pdf/metals-stahlmarkt-2015.pdf>
- Rathi, A. (2021). Kerry lines up pledges to scrub emissions from carbon heavy industries. *Bloomberg*. Retrieved from <https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-10-05/kerry-lines-up-pledges-to-scrub-emissions-from-carbon-heavy-industries>
- Ren, M., Lu, P., Liu, X., Hossain, M., Fang, Y., Hanaoka, T., . . . Dai, H. (2021). Decarbonizing China's iron and steel industry from the supply and demand sides for carbon neutrality. *Applied Energy*, 298, 117209.

- Schep, E., Jujin, D., & Bruyn, S. (2021). Additional profits from the EU ETS. *CE Delft*. Retrieved from https://carbonmarketwatch.org/wp-content/uploads/2021/05/Presentatie_AdditionalProfits7Junevs2.pdf
- Sharma, D., Pujari, R., & Agha, Z. (2021). A spotlight on decarbonising heavy industry in India: Narratives on iron and steel, cement, and chemicals. *The Climate Group*. Retrieved from <https://www.theclimategroup.org/our-work/publications/spotlight-decarbonising-heavy-industry-india-narratives-iron-and-steel-cement>
- Suda, R. (2021). Japan's Nippon Steel eyes EAF, hydrogen to decarbonise. *Argus Media*. Retrieved from <https://www.argusmedia.com/en/news/2201033-japans-nippon-steel-eyes-eaf-hydrogen-to-decarbonise>
- Suga, M. (2021). Nippon Steel riding Beijing policy tailwind to record profit. *Japan Times*. Retrieved from <https://www.japantimes.co.jp/news/2021/08/31/business/corporate-business/nippon-steel-china/>
- Surran, C. (2021). Cleveland-Cliffs to enter scrap metal business with \$775M deal for FPT. *Seeking Alpha*. Retrieved from <https://seekingalpha.com/news/3751132-cleveland-cliffs-to-enter-scrap-metal-business-with-775m-deal-for-fpt>
- Swalec, C., & Shearer, C. (2021). Pedal to the Medal: No time to delay decarbonizing the global steel sector. *Global Energy Monitor*. Retrieved from <https://globalenergymonitor.org/wp-content/uploads/2021/06/Pedal-to-the-Metal.pdf>
- UK-G7-Presidency. (2021). G7 Industrial Decarbonisation Agenda Retrieved from https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/996388/EPD3_G7_Industrial_Decarbonisation_Agenda.pdf
- UNIDO. (2021). Industrial Deep Decarbonisation. Retrieved from <https://www.unido.org/IDDI>
- Vangenechten, D., & Lehne, J. (2021). From Blockage to Breakthrough: Benchmarks for EU Industrial Transition for Fit for For 55 and Beyond E3G. Retrieved from https://9tj4025o153byww26jdkao0x-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/Benchmarks-for-Industry-Transition_FF55_E3G-Briefing.pdf
- Vattenfall. (2021). HYBRIT: The world's first fossil-free steel ready for delivery. *Vattenfall*. Retrieved from <https://group.vattenfall.com/press-and-media/pressreleases/2021/hybrit-the-worlds-first-fossil-free-steel-ready-for-delivery>
- Vogl, V., Åhman, M., & Nilsson, L. J. (2018). Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking. *Journal of Cleaner Production*, 203, 736-745.
- Vogl, V., Sanchez, F., Gerres, T., Lettow, F., Bhaskar, A., Swalec, C., . . . Schenk, S. (2021). Green Steel Tracker, Version 1. Retrieved from <https://www.industrytransition.org/green-steel-tracker/>
- White House. (2021). Fact Sheet: President Biden and G7 Leaders Launch Build Back Better World (B3W) Partnership. *White House Briefing*. Retrieved from <https://www.whitehouse.gov/briefing->

[room/statements-releases/2021/06/12/fact-sheet-president-biden-and-g7-leaders-launch-build-back-better-world-b3w-partnership/](https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2021/06/12/fact-sheet-president-biden-and-g7-leaders-launch-build-back-better-world-b3w-partnership/)

Witecka, W. K., Dr. Oliver Sartor, Philipp D. Hauser, D. C. O., Dr. Fabian Joas, T. L., Frank Peter,, Fiona Seiler, Clemens Schneider, D. G. H., . . . Yilmaz, Y. (2021). Breakthrough Strategies for Climate-Neutral Industry in Europe. *Agora*. Retrieved from https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2020/2020_10_Clean_Industry_Package/A-EW_208_Strategies-Climate-Neutral-Industry-EU_Study_WEB.pdf

World Steel Association. (2018). Steel Facts. Retrieved from <https://www.worldsteel.org/about-steel/steel-facts.html>

World Steel Association. (2021). 2021 World Steel in Figures. Retrieved from <https://www.worldsteel.org/en/dam/jcr:976723ed-74b3-47b4-92f6-81b6a452b86e/World%2520Steel%2520in%2520Figures%25202021.pdf>

Yarmuth, J. (2021). *Build Back Better Act*. U.S. Government Publishing Office Retrieved from <https://www.congress.gov/bill/117th-congress/house-bill/5376>

Yilmaz, C., Wendelstorf, J., & Turek, T. (2017). Modeling and simulation of hydrogen injection into a blast furnace to reduce carbon dioxide emissions. *Journal of Cleaner Production*, 154, 488-501.