
全球钢铁低碳转型 洞见15则

洞察报告

Agora
Industry



全球钢铁低碳转型 洞见15则

出版详情

洞察报告

全球钢铁低碳转型洞见 15 则

作者机构

Agora Industry
Anna-Louisa-Karsch-Straße 2 | 10178 Berlin
T +49 (0)30 700 14 35-000
F +49 (0)30 700 14 35-129
www.agora-industry.org
info@agora-industrie.de

伍珀塔尔气候、环境、能源研究所
(Wuppertal Institute for Climate,
Environment and Energy)
Döppersberg 19 | 42103 Wuppertal
T +49 (0)202 2492-0
F +49 (0)202 2492-108
https://wupperinst.org/
info@wupperinst.org

博众智能能源转型
北京市朝阳区东方东路 19 号
德国中心 0502E, 100600
www.agora-energy.com
info@agora-energy.com

项目负责人

Wido K. Witecka
wido.witecka@agora-energiewende.de

Ole Zelt
ole.zelt@wupperinst.org



本报告采用 CC-BY-NC-SA 4.0
许可协议

作者

Wido K. Witecka (Agora Industry)
Oliver von Eitzen Toni (Agora Industry)
Julian Somers (Agora Industry)
Dr. Kathy Reimann (Agora Industry)
Ole Zelt (Wuppertal Institute)
Alexander Jülich (Wuppertal Institute)
Clemens Schneider (Wuppertal Institute)
Prof. Dr. Stefan Lechtenböhmer
(Wuppertal Institute)

编译

涂建军 (博众智能能源转型)
赵文博 (博众智能能源转型)
陈尊 (博众智能能源转型)
王立 (原就职于博众智能能源转型)

本报告在英文版 (编号: 298/03-I-2023/EN) 的基础上, 由博众智和能源转型进行翻译、数据更新及内容增补, 旨在进一步提升报告的时效性和完整性。

排版: 北京米罗空间品牌设计有限公司
封面图片: Adobe Stock | yuliachupina

395/01-I-2026/ZH

版本: 1.0, 2026 年 2 月

致谢

在此谨致谢以下同事在本报告编制过程中提供的多方面支持与贡献: Helen Burmeister, Dr. Oliver Sartor, Aylin Shawkat, Frank Peter (以上均来自 Agora Industry), Dr. Jahel Mielke, Anja Werner, Alexandra Steinhardt, Kinita Shenoy (以上均来自 Agora Energiewende), Saerok Jeong (NEXT group), Prof. Dr. Max Åhman (Lund University)。同时, 我们也衷心感谢为报告翻译、校对、排版辛勤付出的同仁, 他们是: 李智鹏、孟伟、李琳。



扫码可下载报告

请按以下格式引用:

Agora Industry, Wuppertal Institute, 博众智能能源转型 (2026): 全球钢铁低碳转型洞见 15 则

www.agora-industry.org
www.agora-energy.com

序言

致读者：

当今世界正经历深刻而复杂的系统性变革。国际政治经济格局加速演变，地缘冲突与贸易摩擦持续演化，全球经济增长动能不足，能源体系与产业链格局正在重塑，不确定性显著上升。在此背景下，气候变化已不再只是环境议题，而是与产业竞争力、技术变革、能源安全和全球治理体系重构紧密交织，成为各国必须长期应对的战略性挑战。

与此同时，绿色低碳转型正在从“政策推动”逐步走向“市场驱动”。可再生能源快速扩张、低碳技术日益成熟、绿色金融和碳市场机制不断完善趋势下，工业领域特别是高排放行业的转型逻辑正在发生变化：未来竞争的关键，不仅在于减排目标的提出，更在于能否形成稳定可预期的政策框架，释放明确的市场价格信号，推动技术规模化应用，并在保障产业链安全和经济可行性的基础上实现绿色增长。

钢铁行业约占全球二氧化碳排放的 8%，是工业体系中最重要、也最具挑战性的减排领域之一。钢铁产业链长、资产锁定效应强、能源需求高度集中，其转型成效不仅关系到中国“双碳”目标的实现，也将深刻影响全球气候治理进程，并重塑未来全球制造业与材料产业的竞争格局。近年来，全球钢铁行业脱碳转型正在进入关键窗口期：以电炉短流程、氢基直接还原铁（DRI）、绿色电力替代以及资源循环利用为核心的技术路线日益清晰，绿色铁与低碳钢的国际贸易体系也逐步成为降低全球转型成本、优化资源配置的重要方向。

中国作为全球最大的钢铁生产国和消费国，在全球钢铁行业转型中具有决定性影响。随着“双碳”战略深入推进，钢铁行业于 2025 年纳入全国碳排放权

交易市场，同时中国新一轮国家自主贡献对 2035 年温室气体减排提出更明确要求，这为钢铁行业低碳转型提供了更加清晰的中长期政策信号，也对行业绿色竞争力重塑提出了更高标准。展望未来，中国钢铁行业能否在未来十到二十年实现结构性调整与技术突破，将不仅影响国内高质量发展和产业安全，也将对全球钢铁行业净零路径的进程产生重要牵引作用。

本报告立足全球视角，结合中国实践，对钢铁行业脱碳转型的关键议题开展了系统研究。围绕深度减排和净零排放目标，报告系统梳理并分析了主要技术路径及其演进趋势，评估了不同转型路径在经济可行性、供应链约束和政策环境等方面面临的机遇与挑战，并进一步探讨了国际贸易、政策协同与跨区域合作在推动行业转型中的重要作用，力求为相关研究与决策提供结构清晰、具有国际可比性的分析框架。

通过客观分析与情景研判，本报告旨在促进全社会对钢铁行业绿色低碳转型问题的理性认识，推动政策制定者、产业界与研究机构之间的沟通协作与共识凝聚。我们期待，本报告能够为完善政策工具体系、明确技术创新方向、深化国际协同合作提供有益参考，助力钢铁行业在保障产业安全与发展韧性的同时，加快迈向绿色低碳、高质量发展的新阶段。

希望本报告能对您有所裨益，并期待与各界一道，共同推动钢铁行业迈向绿色低碳、高质量发展的新阶段。

涂建军
博众智合能源转型 中国区总裁

核心要点：

1

在 2040 年代初期，实现钢铁行业净零排放并淘汰炼钢用煤，在技术上是可行的。这将使钢铁行业从难减排行业转变为快速减排行业，并成为提升全球气候雄心的关键要素。实现这一加速转型的核心策略包括：提高材料利用效率、增加废钢炼钢和氢基炼钢的比例，并结合生物质能与碳捕集封存技术。

2

绿铁贸易有助于降低全球钢铁转型的成本，为出口国和进口国创造双赢局面。以绿铁形式运输所承载的氢气 (H₂)，其成本将显著低于通过船舶运输氢气及其衍生品。对于可再生能源制氢成本较高的国家，进口绿色生铁能够提升低碳炼钢的竞争力，从而有助于维护当地钢铁产业的就业岗位。对绿铁出口国而言，此举将创造新的就业机会并增加附加值。

3

碳捕集与封存技术在煤基高炉 - 转炉炼钢路线上，不会在全球钢铁转型中发挥重要作用。该技术在此路线上最多仅能减少 73% 的直接二氧化碳排放，且无法解决上游排放问题（如煤矿甲烷泄漏）。与其他关键技术相比，目前钢铁企业推动该技术商业化的力度仍然较低。若高炉 - 转炉的碳捕集与封存技术未能落地，新建的煤基钢厂将面临高度的碳锁定风险与资产搁浅风险。

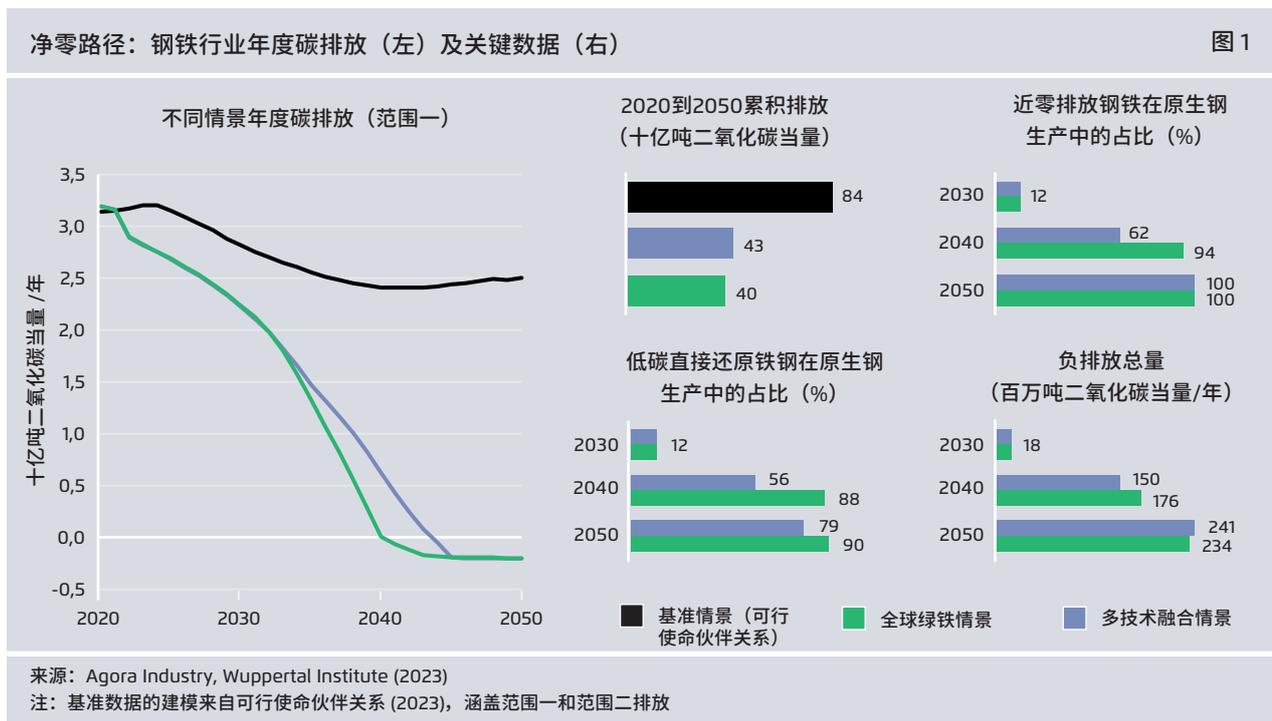
4

为充分释放钢铁转型的加速潜力，各国政府需要构建适当的监管框架，并发展跨国战略伙伴关系。有必要通过国际合作来突破关键瓶颈（如直接还原铁工厂工程、适用的铁矿石品质、低碳氢气供应），最大限度减少资产搁浅风险，并促进绿铁贸易的开展。

目录

见解1: 钢铁行业并非难以减排, 而是有希望快速减排——到2040年代初期, 钢铁行业实现净零排放在技术上是可行的。	6
见解2: 全球钢铁行业的加速转型可以成为提高全球气候目标的关键因素, 中国钢铁行业的绿色转型对于实现“双碳”目标发挥重要作用。	9
见解3: 实现与1.5°C温控目标相符的钢铁脱碳路径, 关键在于提高材料效率、增加废钢炼钢、发展氢能炼钢以及推进生物质能-碳捕集与封存。	12
见解4: 钢铁行业在2040年代初实现煤炭淘汰在技术上是可行的。	16
见解5: 国际绿铁贸易能降低全球钢铁转型的整体成本。	18
见解6: 国际绿铁贸易可实现进口国和出口国双赢。要充分释放绿铁转型的速度和规模, 需要建立公平的国际竞争环境并推动战略伙伴关系发展。	20
见解7: 直接还原铁工厂的设计和建设能力是目前的主要瓶颈, 需要大幅度提升, 因为这些能力将决定全球钢铁转型的进度。	23
见解8: 钢铁行业有望通过生物质能-碳捕集与封存实现负排放。	26
见解9: 高炉-转炉路线结合碳捕集与封存技术工艺不会在全球钢铁转型中发挥重要作用。	29
见解10: 到2040年, 90%以上的现有高炉可以实现自然淘汰而不必强制关停。	32
见解11: 目前新兴经济体计划于2030年前投产的未减排煤基高炉项目正面临着巨大的碳锁定和资产搁浅风险。	35
见解12: 如果将有限的低碳氢优先供应用于“无悔应用”, 那么低碳氢的供应可能不会成为全球钢铁转型的主要瓶颈。	38
见解13: 直接还原级球团矿的供应是全球钢铁转型的一个主要潜在瓶颈; 解决方案是存在的, 但需要积极推进。	41
见解14: 实现1.5°C兼容的钢铁转型瓶颈是可控的, 但需要政府和行业采取联合行动加以解决。	44
见解15: 要实现钢铁行业的净零排放, 各国政府就必须采用一个覆盖整个价值链的综合政策框架, 国际协调与合作将发挥关键作用。	47
参考文献	50

1 钢铁行业并非难以减排，而是有希望快速减排——到 2040 年代初期，钢铁行业实现净零排放在技术上是可行的。



如果全球钢铁行业能够在 2040 年代初期实现温室气体净零排放，你还会认为它是一个难以减排的行业吗？

钢铁行业的净零排放目标已经走过了漫长的发展历程

2020 年 10 月，国际能源署 (IEA) 发布了《钢铁技术路线图》，在其主要情景（即“可持续发展情景”）下，提出了钢铁行业到 2070 年¹实现 90% 温室气体减排的路径（国际能源署，2020）。2021 年 4 月，国际能源署发布了《2050 年净零排放》报告，展示

了全球如何在 2050 年前实现所有行业的净零排放，从而在 2100 年前将全球温升控制在 1.5°C 以内（国际能源署，2021）。

自此，煤基初级钢产量超过 5 亿吨的钢铁公司纷纷宣布了要在 2050 年或更早实现碳中和的目标。然而，在大多数碳中和目标和钢铁脱碳情景中，2050 年钢铁行业仍会有少量碳排放。在《2050 年净零排放》报告中，钢铁行业是少数仍会有残余碳排放的行业之一，2050 年的残余碳排放量为 2 亿吨（国际能源署，2021）。² 满足 1.5°C 温控目标的最新钢铁脱碳路径仍然显示，到 2050 年，钢铁行业的残余碳排放

1 国际能源署认为，可持续发展情景符合到 2100 年全球升温远低于 2°C 的要求。

2 在国际能源署《净零排放 (2021)》中，通过直接空气碳捕获与封存 (DACCS) 和生物质能 - 源碳捕获与封存，2050 年各部门的剩余排放量将得到负排放补偿。

量分别为 3 亿吨（可行使命伙伴关系，2022）和 1.8 亿吨（国际能源署 2022a 更新的“净零情景”），因此，2050 年实现净零排放，还需要其他行业的二氧化碳移除（负排放）来中和。

但钢铁行业还有更大的潜力

在此背景下，钢铁行业是否有可能在 2050 年之前实现净零排放？答案是肯定的。我们的两个满足 1.5°C 温控目标路径表明，从技术上看，钢铁行业在 2040 年代初期实现净零碳排放是可行的。实现快速转型的核心战略包括：快速部署关键技术（见解 3）；钢铁行业加速煤炭退出（见解 4、9、10 和 11）；发展绿铁贸易（见解 5）和生物质能 - 碳捕集与封存（见解 8）；采取措施应对关键瓶颈（见解 7、12、13 和 14）；建立合适的监管框架（见解 15）；以及强有力的国际合作（见解 6、11 和 15）。

钢铁行业不应再被贴上“难减排”的标签，全球钢铁行业有望快速减排，中国钢铁行业快速减排的时机或已出现

现在是时候去掉钢铁行业“难减排”的标签，主要原因有四：首先，启动低碳转型的全套技术已经出现，而且钢铁行业实现净零排放所需的关键战略和技术也已具备——当下需要的是快速部署这些战略和技术（见解 3）。例如，直接还原铁（DRI）技术已经具备商业可行性，而且钢铁制造企业还有很多其他的选择，包括原料替代（天然气、低碳氢、生物质）和选择性碳捕集与封存。其次，虽然在不考虑碳排放成本的情况下，近零排放炼钢成本预计比传统煤基炼钢高出 30% 至 60%，但近零排放钢铁仅会使终端产品（如汽车、建筑或家用电器）的最终成本增加 1%-2%（国际能源署，2023 年；可行使命伙伴关系，2022 年）。此外，针对低碳排放钢成本较高的问题，可以通过适当的政策工具和完善的监管框架来解决。第三，钢铁行业是零碳电力的最佳应用场景之一。从煤炭向电力或可再生氢的燃料转换（见解 12）是零碳电力实现二氧化碳减排最有效的方式之一。最后，我们的情景研究表明，钢铁行业

从“难减排”到“快速减排”：钢铁行业的角色悄然变化

图 2

	旧观念： 钢铁行业减排困难，因为	新发现： 钢铁可以快速减排，因为
科技	相关低碳技术尚未进入市场	启动低碳转型的关键技术现已具备，而且实现净零的关键战略和更具前景的技术也已出现。
成本	绿色钢材太昂贵	虽然绿色钢材的成本可能比传统钢材高出 30-60%，但在大多数终端产品中，成本仅增加 1-2%。恰当的政策可以解决成本问题。
零碳电力	将需要大量的零碳电力	钢铁行业是零碳电力的最佳应用领域之一。不论煤电还是煤转可再生氢，燃料转换都是零碳电力二氧化碳减排效用最大的方式之一。
速度	它是减碳最慢的行业之一	钢铁行业是实现净零排放最快的行业之一。如果充分发挥加速潜力，到 2040 年代初实现钢铁行业的净零排放从技术上是可行的

来源：Agora Industry, Wuppertal Institute (2023)

注：绿色钢材是指接近零排放的通用钢。本报告绿色钢材的额外成本范围计算考虑了 2030 年代熔融氧化物电解、可再生氢直接还原 - 电炉工艺的生产成本，对标的是不受碳价约束的高炉 - 转炉生产成本。

在 2040 年代初实现温室气体净零排放在技术上是可行的。这将使钢铁行业跻身全球最早实现脱碳的行业之列。换句话说，钢铁行业可以实现快速减排。

在中国的“双碳”目标下，钢铁行业减碳路径日渐清晰。回顾 2020 至 2024 中国粗钢产量曲线，钢铁行业已经显现出碳达峰的初步迹象，预计将早于全行业 2030 年达峰的目标。根据中国钢铁行业协会发布的《钢铁行业碳中和愿景和低碳技术路线图》，2030-2040 年将是钢铁行业通过创新驱动实现深度脱碳的关键阶段。目前，中国钢铁生产高度依赖高炉 - 转炉工艺，以焦碳为还原剂的高炉 - 转炉炼钢占年产量的 90% 以上。2020 年代初期，在钢铁产能置换的强制政策约束下，中国钢铁企业进行了大规模的高炉、转炉设备升级，但新上大容积设备的寿命在 20-30 年，为达峰后的减排工作带来了不小的挑战。Agora Industry (2025) 估计，随着中国老旧高炉的退役，将关闭约 1 亿吨煤炭炼钢产能。尽管已能看到一些进展，但相比于中国巨大的钢铁产能和碳排放基数，其减排力度和转型速度仍有待加强。

近年来，需求侧的变化表明，中国钢铁行业加速转型的时机或已出现。受建筑业用钢减少的影响，当前中国钢铁下游需求整体回落，但新能源汽车、高

端装备制造和可再生能源产业等新用钢需求增长，钢铁需求升级态势明显。由于缺乏相应的政策引导，新的用钢需求结构对于低碳钢乃至零碳钢的拉动作用尚不明显，中国、日本和欧盟的下游钢铁消费行业对绿色产品溢价的支付意愿都不强。因此，在促进低碳排放钢的市场推广方面，还需要政府给予更多政策支持。

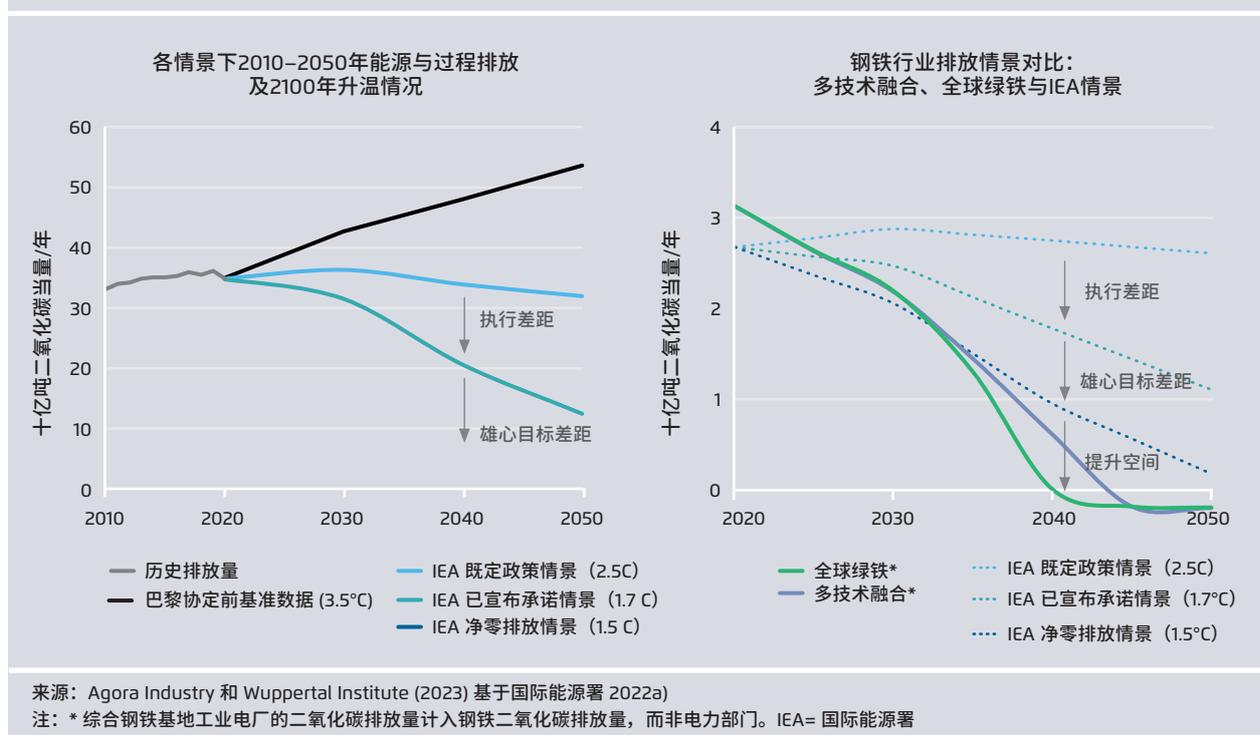
随着 2024 年 10 月中国钢铁行业协会低碳排放钢评价标准体系的出台，低碳钢铁产品有据可依。例如对于要推出低碳汽车、低碳家电、低碳建筑的企业，国家将制定全国性的碳排放标准，促进下游对低碳钢材等原材料的采购，以打造先导市场，增加接受度。地方政府在绿色采购、绿色低碳工业园区和绿色建筑等典型示范项目中，也应考虑设定低碳排放钢使用比例，以鼓励和带动低碳钢铁产品的消费。

2024 年，钢铁行业与水泥和电解铝等高碳排放行业被纳入全国碳排放交易市场，并将于 2027 年逐步面临碳排放交易成本，为鼓励钢铁企业更积极地采取碳减排工艺提供支撑。2024 年中国碳市场全市场成交均价 96 元 / 吨，同比增长 41%，对于吨产品排放接近 2 吨二氧化碳的钢铁行业来说，需额外购买的碳排放配额将对钢铁企业形成有效减排压力。

2 全球钢铁行业的加速转型可以成为提高全球气候目标的关键因素，中国钢铁行业的绿色转型对于实现“双碳”目标发挥重要作用。

情景比较：全球二氧化碳排放（左）和钢铁行业排放（右）

图 3



全球尚未处于将升温控制在远低于 2°C 的路径上

尽管各国应对气候变化政策自 2015 年《巴黎协定》签署以来取得了重大进展，但仍未达到将全球升温控制在远低于 2°C 的目标（联合国政府间气候变化专门委员会 2023；国际能源署 2022a）。根据国际能源署的数据，在目前的既定政策情景（STEPS）下，到 2100 年，全球气温将升高 2.5°C。³ 在已宣布

承诺情景（APS）中，包括政府和公司尚未落实净零承诺，预计到 2100 年全球气温将升高 1.7°C（国际能源署 2022a）。既有政策情景与已宣布承诺情景之间仍有很大的差距；而已宣布承诺情景与满足 1.5°C 温控目标的净零排放（NZE）路径之间，仍存在目标差距（见图 3）。

3 联合国政府间气候变化专门委员会的最新综合报告认为，已实施的政策预计产生的排放量将导致 2100 年升温 3.2°C，范围为 2.2°C 至 3.5°C（中等置信度）。

钢铁行业可帮助提高全球气候雄心

目前，钢铁行业的温室气体排放量占全球总量的 7% 至 8%，具体比例因统计方法而异。⁴ 鉴于全球钢铁需求预计将进一步增加，以满足发展中国家和新兴经济体的需求，如果不采取适当措施，钢铁行业的排放量到 2030 年将继续上升（见国际能源署钢铁既定政策）。全球气候目标的一个关键问题在于，钢铁行业能以多快的速度，通过不断增加近零排放钢的产量，来扭转其二氧化碳排放曲线。

我们为钢铁行业模拟的路径有可能为缩小实施差距和目标差距做出重大贡献（见图 3）。在最理想的情况下，这些路径甚至比国际能源署为钢铁行业制定的最新 1.5°C 温控目标兼容的净零排放路径更具加速潜力（国际能源署 2022a）。然而，只有通过国际合作，并在政府和行业迅速采取行动解决重要瓶颈的情况下，这一潜力才有可能被释放。

满足 1.5°C 温控目标的钢铁脱碳路径是可能的

全球变暖的程度将取决于全球温室气体的累计排放量。因此，各行业的累计温室气体排放量和不断变化的碳预算，是衡量进展和评估企业气候承诺的重要指标。例如，许多钢铁企业与“科学碳目标倡议”（SBTi）合作，以认证其气候目标满足 1.5°C 温控要求（科学碳目标倡议 2022）。在其首个跨行业项目中，“可行使命伙伴关系”（MPP 2022）推算，为实现 1.5°C 温控目标，钢铁行业从 2020 年至 2050 年的累计碳排放预算为 560 亿吨二氧化碳当量。我们的两个 1.5°C 兼容情景（分别为 400 和 430 亿吨二氧化碳当量）表明，如果全球钢铁转型的加速潜力

得到充分释放，钢铁行业的累计碳排放有望显著低于实现 1.5°C 温控目标的 560 亿吨二氧化碳预算门槛（图 4）。

将钢铁行业的加速潜力转化为更雄心勃勃的气候行动是关键——更新目标是第一步

目前，已设定 2050 年前净零排放目标的原生钢生产企业仅代表了全球原生钢产量的 5%。另有 23% 原生钢产量受到 2050 年净零排放目标约束，但超过 70% 的原生钢产量尚未被企业纳入 2050 年碳中和承诺。将全球钢铁行业的加速潜力转化为更具雄心的气候目标和实际行动，将是实现减排的重要关键。

在全球钢铁减排目标覆盖仍然不足的背景下，中国钢铁行业的减排进展尤为关键。中国是全球最大的钢铁生产国和消费国，2024 年，中国的粗钢产量约 10.05 亿吨，约占全球 53.3%（世界钢铁协会 2025）。按照每吨粗钢碳排放量为 1.8 吨计算，2024 年中国钢铁行业碳排放约 18.09 亿吨，约占全球钢铁行业碳排放总量的 50%，约占全国碳排放总量 15%，是中国碳排放量最高的制造业行业。回顾中国 2020 年以来的粗钢生产情况可以发现，中国粗钢产量从 2021 年达到历史高点后开始缓慢下降，已经显现出达峰趋势。中国钢铁行业降碳不仅对于全球钢铁行业转型具有决定性作用，也是中国实现碳达峰、碳中和目标的重点领域。

老牌工业化国家的钢铁企业需要把净零排放的时间线调整至明显早于 2050 年。鉴于钢铁行业在 2040 年代初实现净零排放的技术上是可行的，同时考虑到工业化国家的历史碳排放的累积，仅以 2050 年净零排放为目标，很难满足 1.5°C 温控目标要求。

对于新兴市场经济体的钢铁企业而言，如果目标是实现与 1.5°C 温控要求相兼容的减排路径，其净零排放目标需提前至 2050 年或更早。为避免未来形成搁浅资产，这些具有雄心的目标及其配套的实施策略需要在当前阶段立即予以明确和制定（见解 11）。

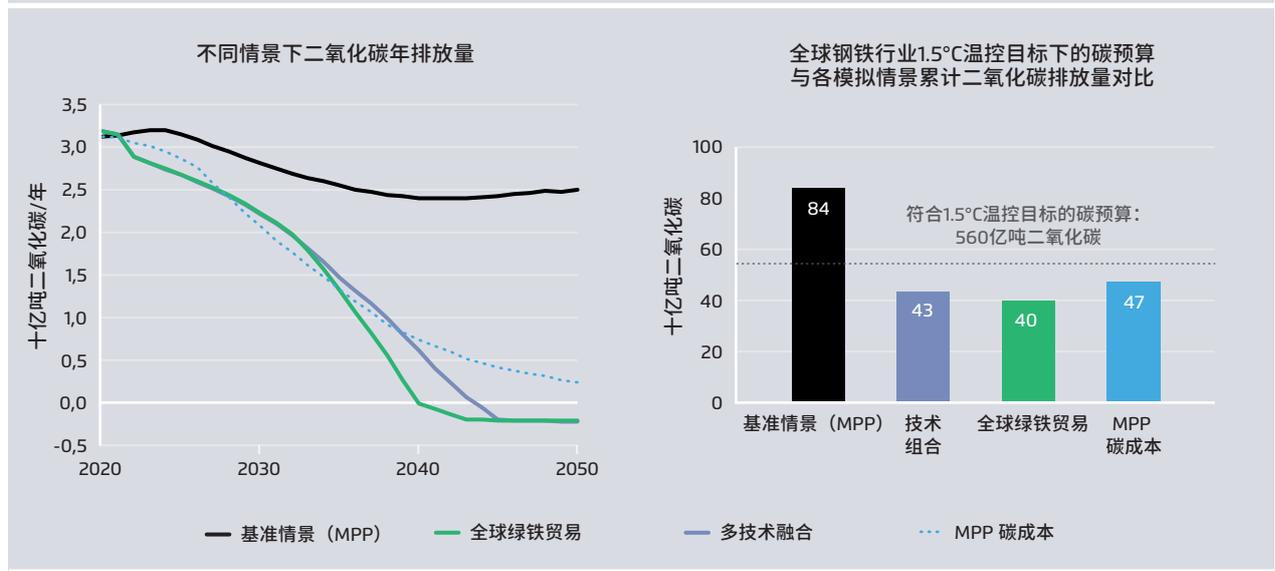
4 根据国际能源署《2022 年世界能源展望》，2021 年钢铁行业的二氧化碳排放量为 27.6 亿吨，占 2021 年 40.8 亿吨二氧化碳总排放量的 7%（国际能源署 2022a）。然而，在国际能源署的核算方法中，综合钢厂自备电厂的二氧化碳排放量被计入电力和热力部门的二氧化碳排放量中。在本研究的假设情景中，这些二氧化碳排放被计入钢铁行业，根据我们的方法，钢铁行业 2021 年二氧化碳排放量为 31.5 亿吨，占全球温室气体排放量的 8%。

鉴于钢铁行业具备从“难减排”行业转变为“可快速减排”行业的潜力，各国政府有必要采取切实可行的支持性政策，包括确保充足的清洁能源供给，

以及应对逐步淘汰化石能源资产所带来的社会 and 地区影响。此外，各国政府还必须更新其“国家自主贡献”（NDC），以反映这一更高水平的减排雄心。

情景比较：钢铁行业年度二氧化碳排放量（左）与累计二氧化碳排放量（右）

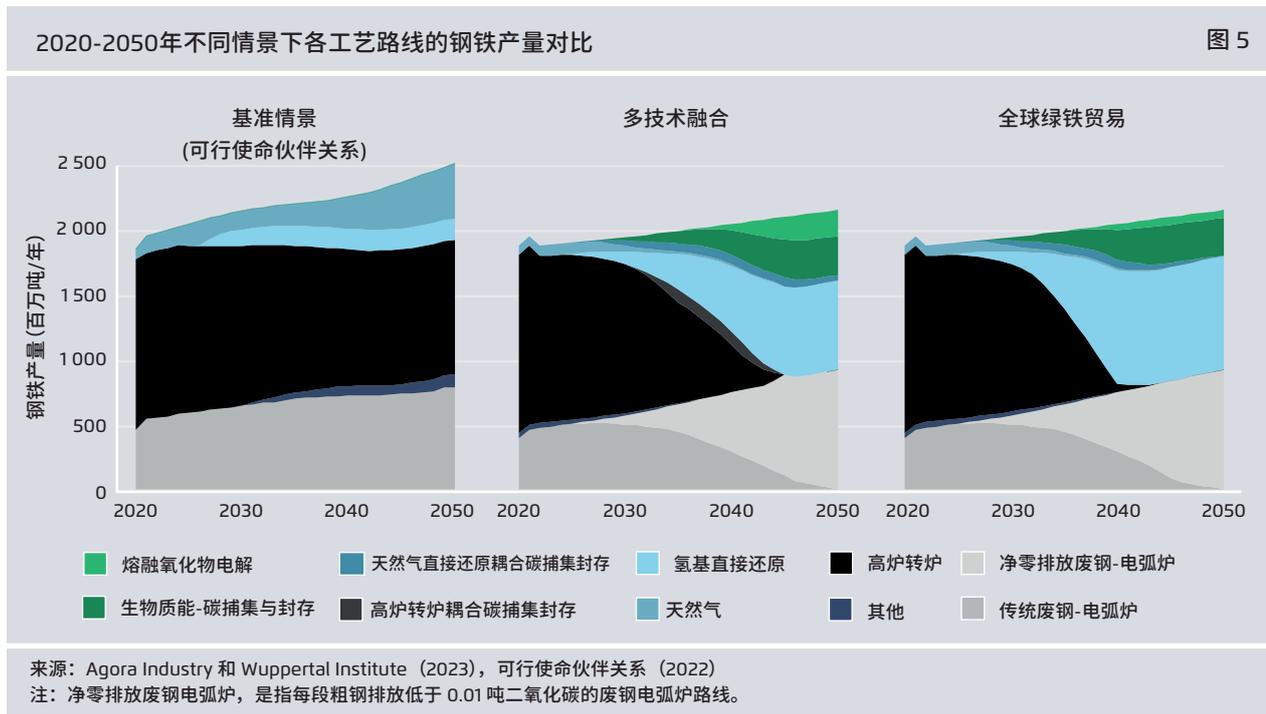
图 4



来源：Agora Industry 和 Wuppertal Institute (2023) * 钢铁行业的 1.5° C 兼容碳预算来自可行使命伙伴关系 (2022 年)

注：国际能源署净零排放情景未包括在碳预算比较中，因为其采用了不同的二氧化碳核算方法，即综合钢铁厂中发电厂的二氧化碳排放。在该方法中，综合钢厂中发电厂的二氧化碳排放被计入电力部门的二氧化碳排放中。MPP= 可行使命伙伴关系

3 实现与 1.5°C 温控目标相符的钢铁脱碳路径，关键在于提高材料效率、增加废钢炼钢、发展氢能炼钢以及推进生物质能 - 碳捕集与封存。



能够帮助钢铁行业减少化石燃料使用的脱碳措施已经足够多，重要的是需要尽快实施。

1.5°C 温控目标下的钢铁脱碳路径

在本研究中，我们模拟了两种满足 1.5°C 温控目标钢铁脱碳情景，并将其与作为参考的基准情景（可行使命伙伴关系 2022）进行了对比。如果主要瓶颈问题能够得到迅速解决，关键技术和基础设施快速推进，关键政策和监管框架及时到位，我们的 1.5°C 情景在技术上是可行的。我们的设想情景不是预测，而是从技术角度展示在理想条件下可能实现的目标。

其目的在于引导关注全球钢铁转型过程中所面临的技术瓶颈（见解 7、12、13 和 14）和潜在在技术发展趋势（见解 4、5、7、8 和 9）。

然而，我们所采用的方法也有一定局限性：例如，在研究中未基于区域细分钢铁生产。此外，该方法还假定全球多个地区将建立近零碳排放炼钢监管框架，从而使技术上可行的近零排放产能能够在最大规模上得以建设。如今，这样的框架尚未建立。而这种监管框架的所有主要要素都已为人所知（见解 15），国际合作（见解 6）可以有力地激励全球更多地区对近零排放炼钢厂的投资。

我们的情景基于以下主要假设：

→ **基准情景（可行使命伙伴关系 2022）**：在基准情景下，不考虑材料效率的提升。在每次重大再投资决策中，钢铁资产都会转向总拥有成本（TCO）最低的技术路径，且没有净零排放的约束。

→ **技术组合情景**：假定材料效率得到适度提高，从而带来全球钢铁需求涨幅的降低。低碳关键技术一旦实现商业化就会被立刻部署应用。其采用由较为雄心勃勃的部署率目标所驱动——技术成本对技术推广应用中起着重要作用，但并非唯一决定因素。

→ **全球绿铁情景**：在技术组合情景假设的基础上，假定 2030 年后直接还原铁技术的部署应用翻倍，用以说明如果绿铁国际贸易兴起，可能会出现的一种颠覆性情景。

两个 1.5°C 情景的关键撬动因素如下：

材料效率：基准情景假定钢铁产量将持续增长，到 2050 年达到约 25.5 亿吨。相比之下，在我们模拟的两个情景中，2050 年钢铁产量将只达到 21.5 亿吨。由于采取了提高制造得材率、近终形制造、改进建

筑设计和施工方法、延长建筑物寿命以及车辆轻量化等措施，在提供相同服务水平的前提下，2050 年的钢材需求量可降低 20%（Agora Industry, 2022 年；国际能源署 2020a）。与其他 1.5°C 情景相比，我们的材料效率假设（2050 年较基准情景低 16%）相对折衷（见图 6）。更新建筑规范以避免钢结构的过度设计，或通过政策鼓励交通运输模式转变，均有助于材料效率的提升（国际能源署，2020a）。

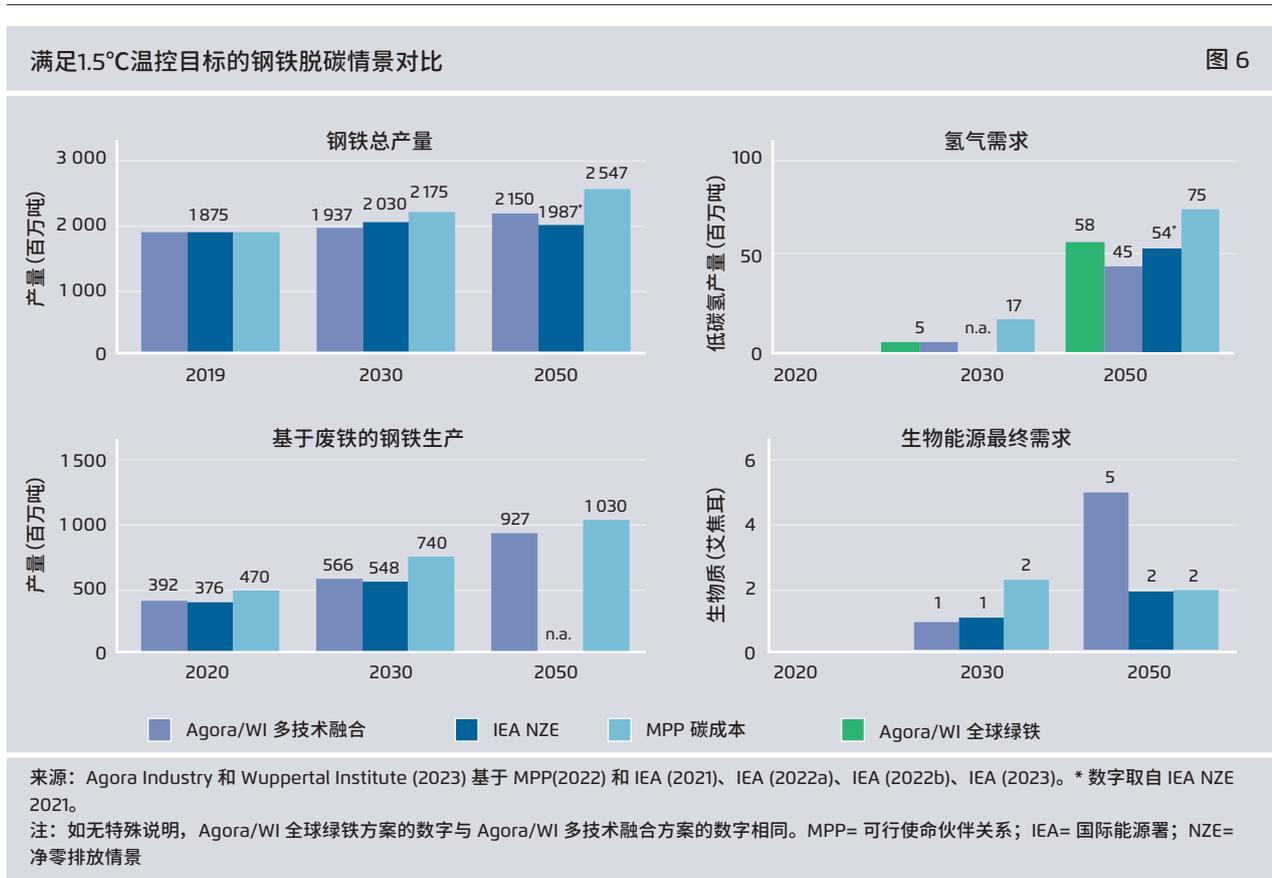
增加废钢炼钢：鉴于再生钢铁生产所需的能源仅为原生钢铁生产的五分之一至七分之一，扩大废钢炼钢是另一项关键战略。然而，该路径受到废钢供应量的限制。在我们的情景假设中，废钢供应量从 2020 年的 7.1 亿吨增加到 2030 年的 8.8 亿吨，并在 2050 年达到 12.40 亿吨。这使得全球废钢炼钢在钢铁总产量中的占比从 2020 年的 21% 提高到 2050 年的 43%。除了供应规模，废钢质量同样是关键因素。需要通过政策保持废钢流通体系的清洁性，以确再生钢铁可用于大多数应用领域，而不是被降级回收并局限于少数细分市场（见解 15）。

废钢供应紧张也是制约着中国废钢 - 电炉的快速发展。首先，作为废钢资源贡献量第二大行业的建筑行业废钢产量持续下滑，汽车和机械行业的供应增加量难以充分满足国内废钢需求，废钢市场整体处于供需紧张的状态。其次，国内 70% 左右废钢资源用于长流程炼钢，越来越多长流程钢企尝试转炉添加废钢，废钢电炉钢比例难以快速增长。为推动废钢进口量的提升，2021 年中国实施了《再生钢铁原料国家标准》，但由于标准较高，2021-2024 年以来每年进口废钢不足 50 万吨。2025 年 6 月 1 日，《再生钢铁原料》（GB/T39733-2024）新国家标准正式实施。新国标通过增加再生钢铁原料的种类、改进混料分类技术要求、完善运输规则、明确夹杂物定义与钢铁实物量等指标，优化成分与尺寸规定等要求，增强了与国际通用贸易规则的契合度，希望推动更多优质再生钢铁原料的进口。

氢基直接还原炼钢：在我们的情景中，氢基直接还原炼钢技术路线是一次资源炼钢脱碳的主要战略。预计到 2030 年，通过 100% 使用低碳氢⁵或低碳氢和天然气混合使用的直接还原炼钢产量将达到 9,600 万吨。到 2050 年，在“技术组合”和“全球绿铁”情景下，分别有 6.83 亿吨和 8.73 亿吨粗钢通过氢基

直接还原路线生产，分别占一次资源炼钢的 56% 和 72%。与可行使命伙伴关系的碳成本基础情景相比，我们情景中的低碳氢气需求量明显降低，这主要归因于材料效率提升带来的钢铁总产量降低。

5 在本研究中，低碳氢被定义为含有碳捕集、利用与封存的可再生或化石燃料氢。



基于生物质能 - 碳捕集与封存的炼钢: 在我们的情景中, 生物质能同碳捕集与封存 (BECCS) 在钢铁行业中发挥着关键作用, 可以产生负排放 (见解 8)。直接还原铁路线或熔融还原路线 (如 HIsarna®) 可使用可持续生物质并配备碳捕集与封存⁶。鉴于可持续生物质供应受到土地使用限制 (如与植树造林和粮食生产竞争), 基于生物质能 - 碳捕集与封存的炼钢产能是有限的。从系统角度来看, 生物质的有效分配在短期内仍需进一步探讨 (见解 8)。在我们的技术组合情景中, 到 2050 年, 基于生物质能 - 碳捕集与封存的路线将占原生炼钢的 25% (3 亿吨)。

6 尽管原则上高炉 - 转炉工艺路线上的生物质能 - 碳捕集与封存也是可行的, 但由于与基于直接还原铁的工艺路线和希萨纳生物质能 - 碳捕集与封存 (HIsarna BECCS) 相比, 该工艺中每单位生物质产生负排放的效率要低得多, 因此在钢铁行业内, 不应将生物质分配用于高炉 - 转炉工艺路线 (见解 8)。

基于直接电解的技术一旦问世, 将改变游戏规则

基于直接电解的技术, 如熔融氧化物电解 (MOE) 或碱性铁电解 (AEL), 是近零排放炼钢技术中二氧化碳减排成本最低的技术 (见解 15)⁷。但由于技术成熟度相对较低, 这些技术仍存在很大的不确定性 (Agora/WI/Lund, 2024)。上述两种技术分别预计在 2030 年至 2035 年间 (熔融氧化物电解) 和 2040 年前后 (碱性铁电解) 才会有工业规模的项目投运, 考虑到这些技术从当前来看距离商业化仍较遥远, 因此在技术组合情景中采用了非常保守的熔融氧化物电解部署假设, 在 2050 年可以达到 2 亿吨钢产量。从纯成本角度来看, 这些技术可能比氢

7 这两种技术的一个主要区别是, 熔融氧化物电解需要 1500°C 以上的温度, 而碱性电解可以在 110°C 左右的温度下工作 (Agora/WI/Lund, 2024)。

基直接还原路线更经济，但考虑到这些技术能否以及何时能够商业化还存在很大的不确定性，不应以此为由推迟目前氢基技术路线的部署。⁸

配备碳捕集与封存的煤基技术在我们的情景中作用甚微

与许多其他情景不同，在我们的技术组合情景中，高炉 - 转炉碳捕集与封存路线发挥作用有限，而在全球绿铁情景中则未被采用。原因主要包括：高炉 - 转炉路线的碳捕集与封存可能会留下大量的直接残余排放；无法解决与冶金煤开采相关的上游甲烷排

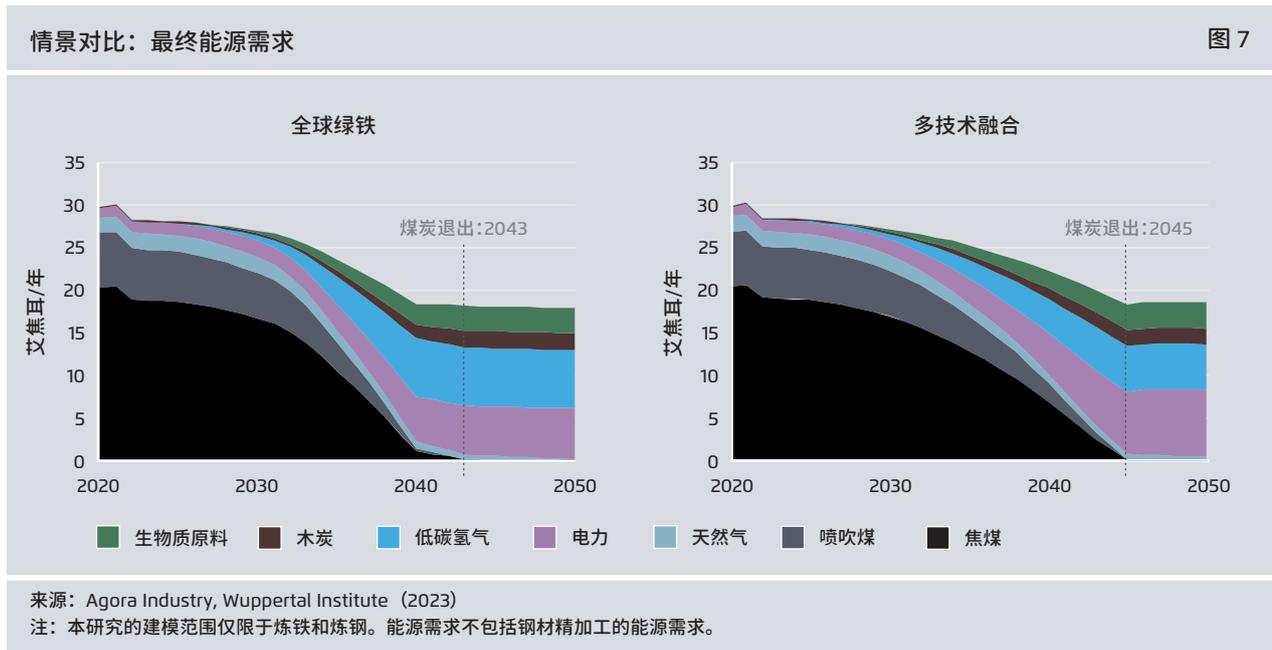
放问题；并且容易受到其他技术降本的影响——例如熔融氧化物电解等直接电解技术的商业化（见解 4 和 9）。

基于直接还原铁的路线为钢铁制造商提供了极大的灵活性

为钢铁制造商提供极大的灵活性是直接还原铁工厂的优势之一：新的先进直接还原铁工厂可以在过渡到纯氢之前使用任意比例的天然气与低碳氢混合气、带碳捕集与封存的天然气，甚至是与碳捕集与封存结合以产生负排放的生物质。在我们的情景中，我们主要倚重氢基直接还原铁路线和生物质能 - 碳捕集与封存直接还原铁路线，只考虑了很小比例的以天然气基结合碳捕集与封存路线。氢基直接还原铁可以最大限度地减少天然气的直接排放残余和上游甲烷排放。就生物质能 - 碳捕集与封存而言，虽然理论上可以产生一些技术上的负排放（更多详情，请参阅见解 8），但这些发展还有不确定性。如果可利用的可持续生物质减少，直接还原铁路线可能会更多地使用低碳氢。同样，如果低碳氢仍然供不应求，更多的直接还原铁路线可以使用带碳捕集与封存的天然气。在所有情况下，最重要的还是部署新的直接还原铁产能（见解 7）。

8 鉴于熔融氧化物电解的技术就绪水平较低（TRL 4），商业规模工厂的成本评估具有很大的不确定性。根据我们的技术评估，熔融氧化物电解路线每吨粗钢将需要约 14.8 吉焦耳的电力。这将导致能源需求略高于以可再生氢为基础的直接还原铁 - 电弧炉路线，后者在假设电解槽效率为 70% 的情况下，每吨粗钢需要 14.3 吉焦耳（Agora Industry/Wuppertal Institute/Lund University, 2024）。然而，鉴于熔融氧化物电解路线将直接使用电力，无需额外的工艺步骤来生产可再生氢，因此总体而言，该路线的成本仍可能低于以可再生氢为基础的钢铁生产路线（见图 30）。

4 钢铁行业在 2040 年代初实现煤炭淘汰在技术上是可行的。



使用化石燃料炼钢至 2050 年的残余碳排放本可避免

在其它大多数符合 1.5°C 温控目标的钢铁脱碳情景中，到 2050 年，煤炭和天然气都不会被完全淘汰（参见国际能源署 2022a 的“净零排放情景”和可行使命伙伴关系 2022 的“碳成本情景”）。尽管上述两种情景都假定在使用化石燃料的同时，配套采用碳捕集与封存技术，但由于二氧化碳捕集率不可能达到 100%，因此，继续使用化石燃料至 2050 年将导致每年分别产生 1.8 亿吨和 3 亿吨二氧化碳的残余排放。这其中大部分排放本可避免。

钢铁行业淘汰煤炭具备可行性

我们的情景首次证明，在 2050 年前钢铁行业淘汰煤炭在技术上是可行的。⁹ 在“全球绿铁”和“技术组合”情景中，煤炭将分别于 2043 年和 2045 年被淘汰。

⁹ 我们的建模范围包括炼铁和炼钢，但不包括钢材精加工。我们的最终能源需求总量是根据各种炼钢技术的最终能源消耗情况自下而上得出的。这些数据将在 (Agora/WI/Lund, 2024) 中详细介绍。由于我们的建模范围和自下而上的方法，我们的数据可能会与其他来源有所偏差。

使用化石燃料的碳捕集与封存技术会产生残余直接排放和潜在上游排放

在我们评估的各种低碳技术中，所有基于碳捕集与封存技术的残余排放都明显高于氢基技术或如熔融氧化物电解的直接电解技术（见图 8）。此外，当前煤炭和天然气的开采都会带来甲烷泄漏，上游排放无法通过碳捕集与封存技术解决。例如，在 2021 年，用于钢铁行业的煤炭相关的煤矿甲烷泄漏量高达 3.84 亿吨二氧化碳当量，这将使钢铁行业的碳排放量增加约 12%。¹⁰ 虽然存在减少甲烷泄漏的措施，但目前如何实施以及能减少的泄露规模还尚不明确。在炼钢过程中淘汰煤炭使用，则可以完全消除这部分排放。

用负排放抵消可避免的残余排放需要付出机会成本

用负排放抵消残余排放总是要付出机会成本的，因此我们才需要将残余排放减少到尽可能最低。这是因为负排放本可用来真正减少大气中的二氧化碳浓度，而不是用来抵消本可避免的残余排放。在全球

亟需规模化部署碳移除技术，以避免气候变化带来最严重影响的背景下（见解 8），继续放任煤炭等化石燃料产生本可规避的残余排放难以接受，尤其是在已有经济可行的替代方案的情况下。

限制搁浅资产需要采取一系列措施

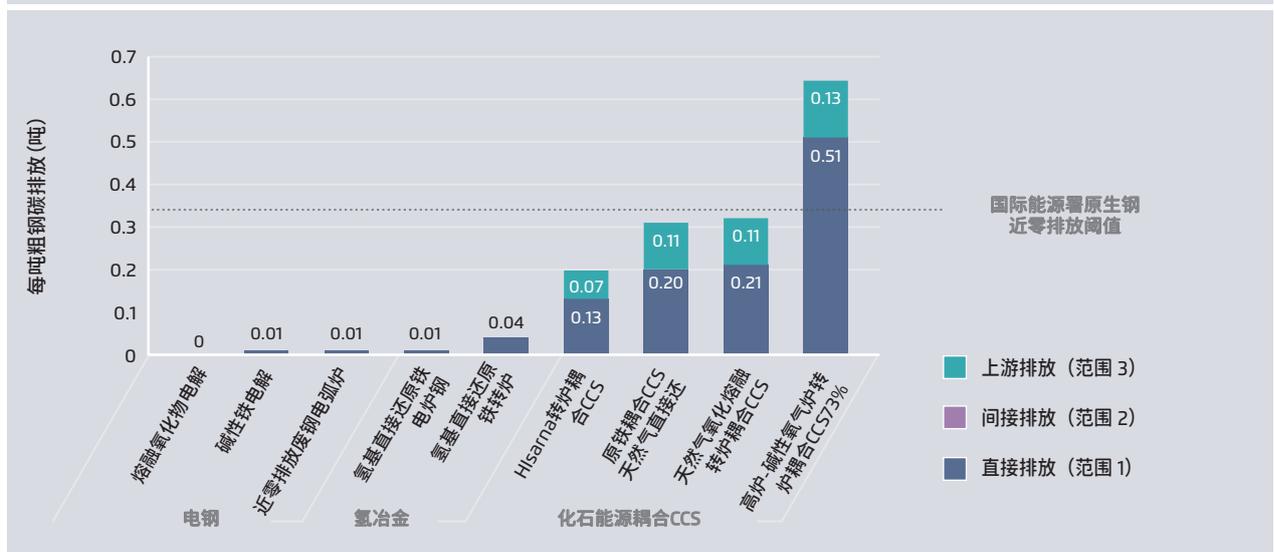
在我们的设想情景中，搁浅资产将降至最低。虽然现有煤基高炉的搁浅资产风险有限（见解 10），但对于新兴经济体计划在 2030 年前大规模新建的燃煤高炉 - 转炉钢厂而言，其导致的碳锁定效应及在 2040 年代面临的搁浅资产风险则非常高（见解 11）。尽管许多钢铁脱碳情景都部署了高炉 - 转炉碳捕集与封存设施以避免资产搁浅，但实际情况很可能恰恰相反：碳捕集与封存无法保证这些工厂免于成为搁浅资产（见解 9）。对于钢铁企业和国家政府而言，确定煤炭退出目标并建立满足近零排放能力的替代战略¹¹ 和监管框架（见解 15），可以增加现有的净零排放承诺的可信度，确保消除煤基钢铁生产可避免的残余排放。通过提供可靠的投资环境，这些措施可最大限度地减少碳锁定和资产搁置风险并为实现净零兼容投资提供必要条件（见解 11）。

10 该计算基于甲烷排放 100 年的全球升温潜能值（GWP100）。

11 界定这些替代战略超出了本研究范围，但可以作为今后研究和讨论的主题。

突破性技术的残余二氧化碳排放（范围1和范围3）及国际能源署建议的原生钢近零排放阈值

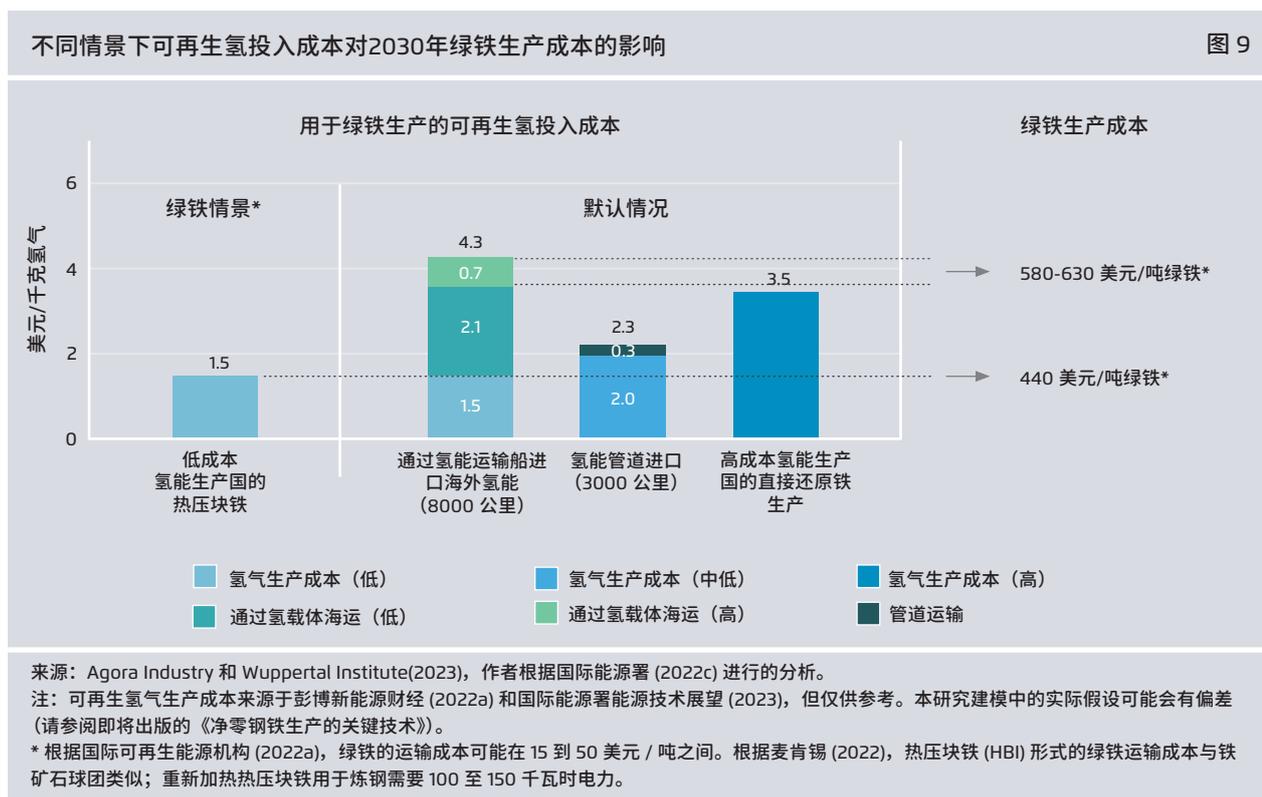
图 8



来源：Agora Industry 和 Wuppertal Institute (2023)，基于作者的分析和国际能源署 (2022g)

注：本图中所有原生钢生产工艺均基于 16.5% 的废钢比例计算。* 由于废钢比例的调整，国际能源署设定的近零排放原生钢排放阈值约为 0.34 吨二氧化碳 / 吨粗钢。碳捕集与封存技术上游排放数据援引自国际能源署 (2022 年) 报告中基于 2050 年“化石燃料间接排放”的数值。该数据已假定相比当前，甲烷排放已实现大幅削减。若仅使用零碳电力，则间接排放（范围 2）假设为零。CCS= 碳捕集与封存

5 国际绿铁贸易能降低全球钢铁转型的整体成本。



如果全世界都以绿铁的形式运输所含氢，而不是直接运输氢或其衍生品¹²，那么全球钢铁转型的总体成本可能更低。

公斤（彭博新能源财经 2022a；国际能源署 2023）。因此，许多预计成本较高的国家正在积极争取进口大量可再生或低碳氢。

可再生和低碳氢的成本因国家和地区而异

根据可再生能源发电的预期成本和廉价天然气的供应情况，不同国家和地区的可再生氢或带碳捕集与封存的化石燃料氢成本差异很大。就可再生氢而言，在成本最低的国家（约 1.50 美元 / 公斤氢）和成本最高的国家（3.50 至 4 美元 / 公斤氢）之间，各种研究发现其的生产成本差距高达 1.50 至 2.50 美元 /

氢及其衍生品船运成本高昂

氢的进口方式对其交付成本影响巨大。到 2030 年，通过改造超过 3000 公里的天然气管道进口氢，每公斤氢的运输成本将增加约 0.30 美元。而通过船运进口的主要方案，如氨、液态有机载体 (LOHC) 和液态氢，仅运输成本就将增加 2.10 至 2.80 美元 / 公斤氢 (国际能源署 2022c)。目前，在大多数希望从煤基高炉 - 转炉炼钢转为氢能炼钢的钢铁生产大国，公共讨论聚焦在国内生产可再生氢，还是通过管道或船舶进口氢（见默认情景，图 9）。

12 在本研究中，氢及其衍生品指的是液态氢、液态有机氢载体和氨，这些都是可通过船舶运输氢的方式。

以氢能衍生品运输比直接运输氢气更便宜

以绿铁（例如热压铁块）的形式运输氢的选项常被忽视。作为大宗商品，绿铁在运输过程中不会造成任何能源损失，这与通过船舶运输氢及其衍生品形成鲜明对比。相比之下，由于氢及其衍生品在运输过程中的能量和转换损失，运输后的氢仅剩初始量的76%（液态氢）、64%（氨）和58%（液态有机载体）（国际能源署 2022c）。因此，以热压铁块形式的运输，成本将明显更低。

值得注意的是，这种成本优势具有结构性。换句话说，未来即便通过船舶运输氢及其衍生品的成本有所下降，这一优势依然存在。因为在绿铁运输的工艺链中，这些运输成本根本不会出现，即氢无需单独运输（见图10）。此外，热压铁块的运输成本与氢基直接还原铁 - 电弧炉路线所需的铁矿石球团的运输成本大致相同（麦肯锡 2022a）。只有在钢铁生产国不进口铁矿石而国内生产的情况下，热压铁块的运输才会产生额外成本。

这对全球钢铁转型有两个深远的影响：

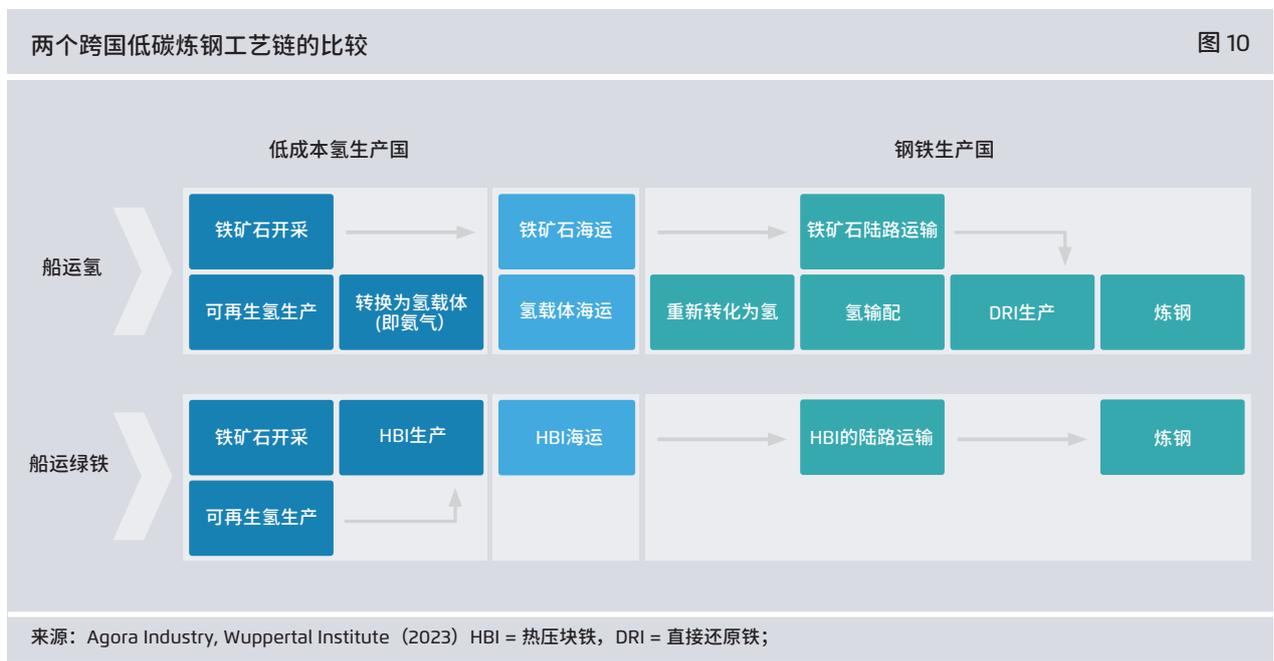
→ 对于氢基炼钢来说，通过船舶进口氢及其衍生品可能永远不会具有竞争力。

→ 如果热压铁块通过船舶运输，且绿铁生产商之间形成一个充分流动的 global 竞争市场，那么全球最便宜的可再生氢成本可以直接惠及所有钢铁生产国。

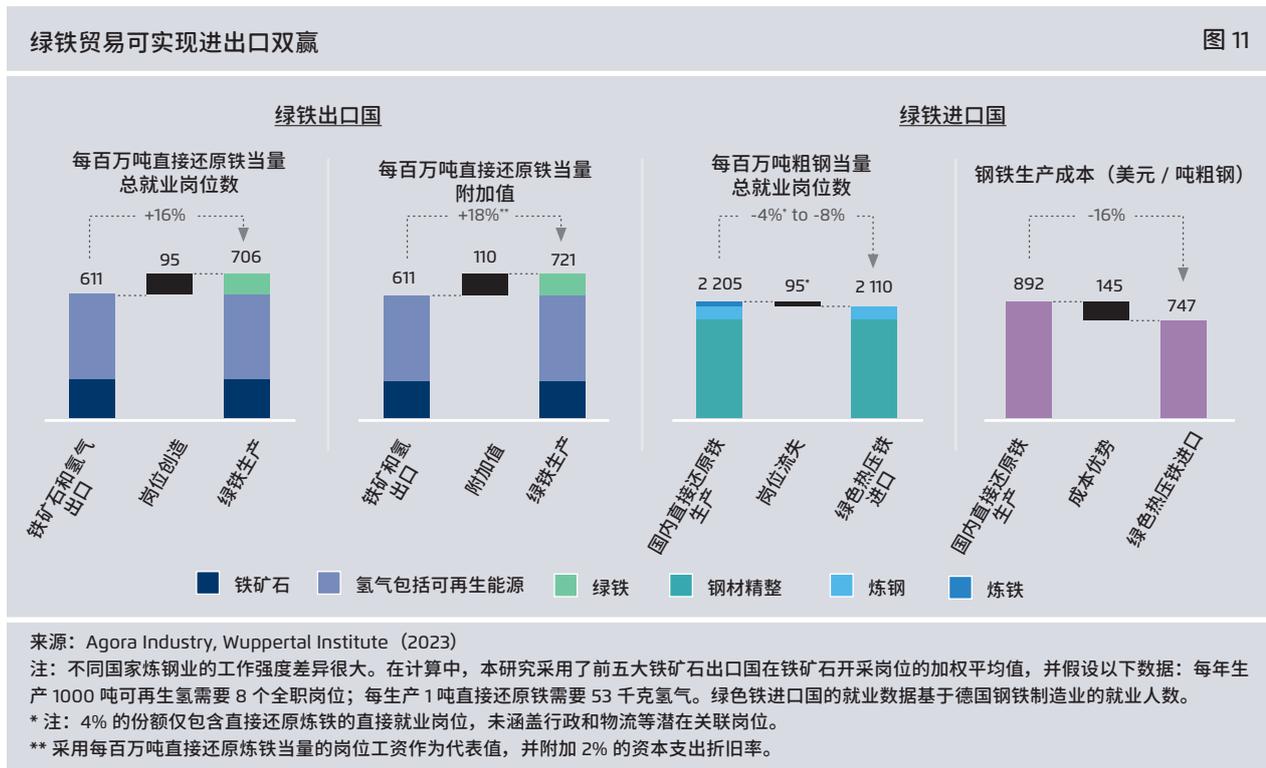
绿铁贸易可减少与氢相关的基础设施

此外，运输绿铁衍生品所需的流程步骤，以及所需与氢相关的基础设施也会大幅减少。以氢衍生品氨气的船运为例，需要在出口国与进口国分别建造制氨厂，氨裂解厂及与炼钢厂之间的氢气输送管道。相比之下，绿铁运输只需要在出口国建造一座热压铁块厂（见图10）。且热压铁基本上可以使用与铁矿石相同的现有基础设施，并可通过轮船、内河船舶和火车进行运输。2021年，热压铁块工厂生产的800万吨热压铁块被运往海外，1500万吨热压铁块通过火车或内河船舶进行陆路运输（Midrex, 2022a）。

虽然从经济的角度来看，绿铁运输比船舶海外氢气运输的理由更为充分，但在比较绿铁进口和综合钢厂直接还原铁生产时，还需要考虑战略自主性、技术创新、市场力量以及综合钢厂热装直接还原铁的好处等其他因素。另一个关键问题是绿铁贸易如何影响绿铁进口国的就业，将在“见解6”部分讨论。



6 国际绿铁贸易可实现进口国和出口国双赢。要充分释放绿铁转型的速度和规模，需要建立公平的国际竞争环境并推动战略伙伴关系发展。



对未来的氢出口国而言，绿铁贸易将提供新的商机和就业岗位

绿铁出口不仅将为计划出口可再生或低碳氢的国家创造更多国内就业岗位，还能让这些国家在钢铁价值链中获得额外的增值。当今主要铁矿石出口国中，大多数预计可再生氢生产成本相对较低。与这些国家通过用船舶出口铁矿石和氢及其衍生品的情况相比，出口绿铁可以使当地就业岗位增加约 16%，附加值增加 18%（见图 11）。即使对于没有国内铁矿石资源的低成本氢出口国来说，进口铁矿石并出口绿

铁也可能形成可行的商业选择。绿铁出口国的机会显而易见，但绿铁贸易会对进口国产生什么影响？是否会导致大量失业？

对于未来的绿铁进口国来说，绿铁贸易的兴起可以提高其钢铁行业在绿色领先市场上的竞争力，从而可以保障钢铁行业 90% 以上的就业岗位

一个略显意外的发现是，绿铁进口只会对进口国的就业产生微不足道的负面影响。这是因为整个钢铁价值链的就业分布不均。根据德国的就业数据，我

们发现在钢铁行业的直接就业中，炼铁占比小于10%，炼钢占10%-20%，而钢材精加工占超过80%（WV Stahl，2025年）。对于可再生氢结构性成本较高的国家，这对于向氢基炼钢转型的战略具有重要影响。仅仅建造以氢为基础的直接还原铁工厂，并以高于其他国家的可再生氢成本运行，将会对竞争力带来风险。在最坏的情况下，这不仅会影响炼铁行业的直接就业，还会危及整个钢铁价值链的就业。作为一系列多元化战略的支柱之一，绿铁进口可以通过降低近零排放炼钢成本，提高钢铁价值链整体竞争力，从而保障90%以上的就业岗位（见图11）。

绿铁进口商：在价值链中找到适当的自主水平

换句话说，对于低碳氢气成本相对较高的国家来说，进口绿铁可能是一种重要的对冲策略，既可应对高成本，又可规避低碳氢气供应潜在短缺的风险。在此背景下，潜在的绿铁进口国需要采取平衡多种因素的多元化策略。支持国内绿铁生产，将有助于提

升战略自主性，并推动氢基工艺的技术创新，从而助力全球钢铁转型。相比之下，进口绿铁的主要优势是提高成本效率，从而增强整体竞争力（见图12）。然而，除了这些高层次的论点外，还有更多的考量因素：初期的绿铁市场规模可能较小，且市场集中度较高，因此进口商的采购成本可能远远高于低成本氢国家的绿铁生产成本。国内的直接还原铁可以热装，而进口的绿铁则需要出口国额外耗能进行热压造块，并在使用前重新加热¹³，从而造成一定的能量损失。因此，各国和各企业都必须权衡上述因素和其他潜在因素，以找到最合适的发展路径。

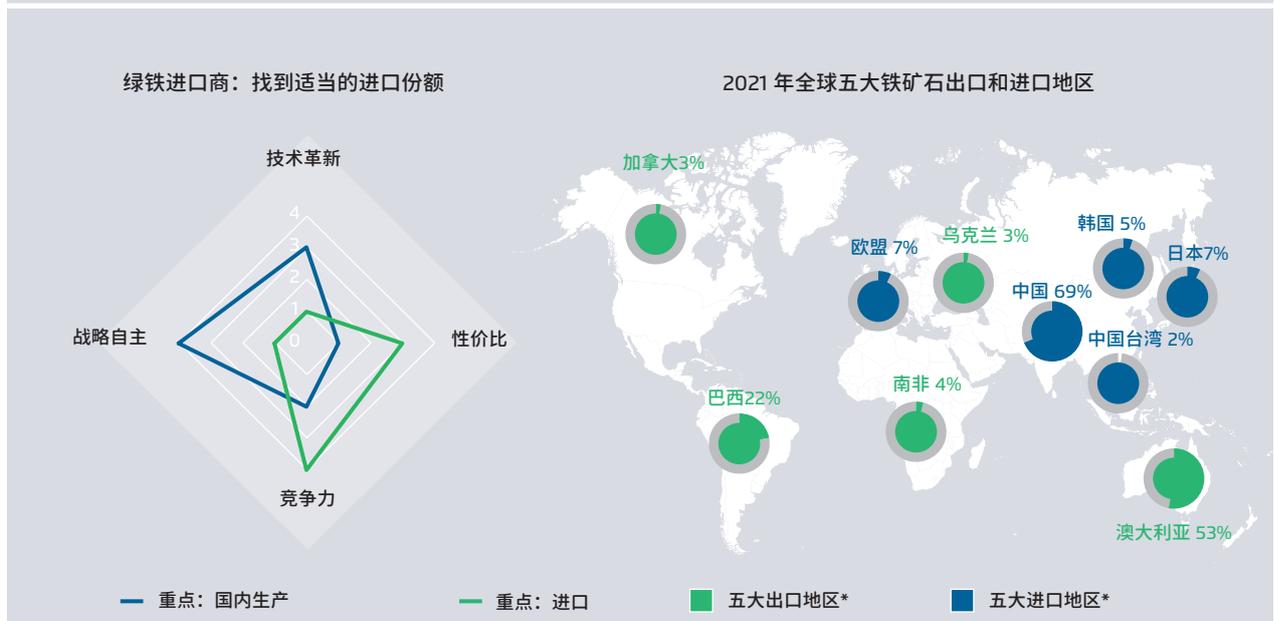
释放绿铁贸易的潜力需要国际合作和战略伙伴关系

尽管经济条件有利，但世界绿铁市场的流动性不会自发形成，而是需要国际合作和国际公平竞争环境。

13 根据麦肯锡（2022年a）的研究，与可以热加料的一体化直接还原铁生产相比，加热热压铁块炼钢需要100到150千瓦时。

绿铁进口国和出口国：因潜在市场垄断风险，多元化战略将成为关键

图 12



来源：Agora Industry 和 Wuppertal Institute（2023）（左）和澳大利亚政府《资源与能源季刊》，（2022）（右）

注：雷达图中的例子仅供参考。它们假定，在可再生能源廉价且丰富的国家/地区，绿铁的生产成本与绿铁进口的采购成本不会相差太大。因此，成本优势在一定程度上会转嫁给绿铁进口国/地区，从而提高成本效益。但现实情况并非总是如此。* 世界进口/出口的百分比（来自2021年世界贸易数据）

对于绿铁出口国而言，关键因素可能包括：获得气候融资；进入工业化国家的绿钢市场；降低可再生能源、电解槽、氢相关的基础设施和热压铁块工厂建设资本成本的去风险工具以及当地社区的接受和参与。对于绿铁进口国而言，关键的因素可能包括可靠的长期承购协议和公平的进口价格。

单靠私营部门难以满足这一系列复杂多样的要求。要以公平和可持续的方式释放国际绿铁贸易的潜力，需要各国政府的参与，并在平等的基础上建立战略性国际伙伴关系。¹⁴

14 工业化国家间战略合作伙伴关系的一个实例是韩国和澳大利亚之间的低碳排放和零碳排放技术合作伙伴关系（澳大利亚政府，2021年）。两国已同意在氢供应、低排放钢与铁矿石，以及碳捕集、利用和封存等领域的现有和新兴的低碳排放与零碳排放技术方面开展合作。

7 直接还原铁工厂的设计和建造能力是目前的主要瓶颈，需要大幅度提升，因为这些能力将决定全球钢铁转型的进度。

要加快全球钢铁转型，就必须大规模增加直接还原铁工艺路线的规模

图 13



直接还原铁的部署将引领全球钢铁转型

直接还原铁工厂的部署速度是显著加快全球钢铁转型的关键推动力。与其他符合 1.5°C 温控的情景相比，我们的情景在经历雄心勃勃的市场提升之后，直接还原铁产能部署明显更多（见图 13）。考虑到绿铁贸易的益处，从经济角度来看，这是合理的。但这在实际操作上是可行的呢？

当今直接还原铁技术市场规模小且高度集中

目前，两家技术供应商占据了气基直接还原铁工厂 97% 的市场份额：Midrex (80%) 和 Tenova HYL (17%) (Midrex 2022a)。在直接还原铁工厂的设计和建造方面，Tenova HYL 可同时提供设计和建造服务，而 Midrex 则采用向 SMS 集团和 Primetals 授权许可的模式进行。因此，目前只有三家主要的成熟技术供应商可建造气基直接还原铁工厂。从 2011 年到 2020 年，已建成的气基直接还原铁产能为 5000 万吨，年均建设能力为 500 万吨 (Midrex 2022a)。

直接还原铁工程和建设能力是加速转型的最大瓶颈

根据专家访谈，我们估计当下直接还原铁工程和建设能力为每年 600 万至 800 万吨。在一个雄心勃勃的基础案例中，我们估计到 2030 年可新增约 7000 万吨氢基直接还原铁产能。在本研究进行时，已规划的兼容氢气的直接还原铁工厂在 2030 年前的年产能 8400 万吨，已经超过了这一数字。这不禁让人怀疑，如果不采取进一步措施，目前的储备项目能否如期实现（Agora Industry，全球钢铁转型跟踪）。此外，这仅相当于 1.5°C 温控路径下到 2030 年所需的 1.2 至 1.5 亿吨直接还原铁产能的一半左右（见解 14）。因此，尽管我们估计现有企业可在 2030 年前增加多达 1 亿吨的直接还原铁产能，但为了满足直接还原铁工厂快速增长的需求趋势，很可能还需要额外的解决应对方案。

提高直接还原铁部署的解决方案已经存在

解决这一产能瓶颈的一个关键途径是对工程师和建设工人进行再培训，使其能够建造直接还原铁工厂。总体而言，全球钢铁行业并不缺乏专业的工程和建

设能力。此外，直接还原铁工厂的设计和建造并不一定比高炉 - 转炉工厂更复杂，但为了将目前专门用于高炉 - 转炉扩建和大修的部分工程和建设能力释放出来，需要进行再培训。例如，仅在 2004 年中国就建成了 1.4 亿吨的高炉 - 转炉产能，和这相当于我们全球绿铁情景下 2030 年代中期全球直接还原铁的部署能力（见图 13）。另一个关键的解决方案是在氢基直接还原铁技术领域，引入新的市场参与者。¹⁵

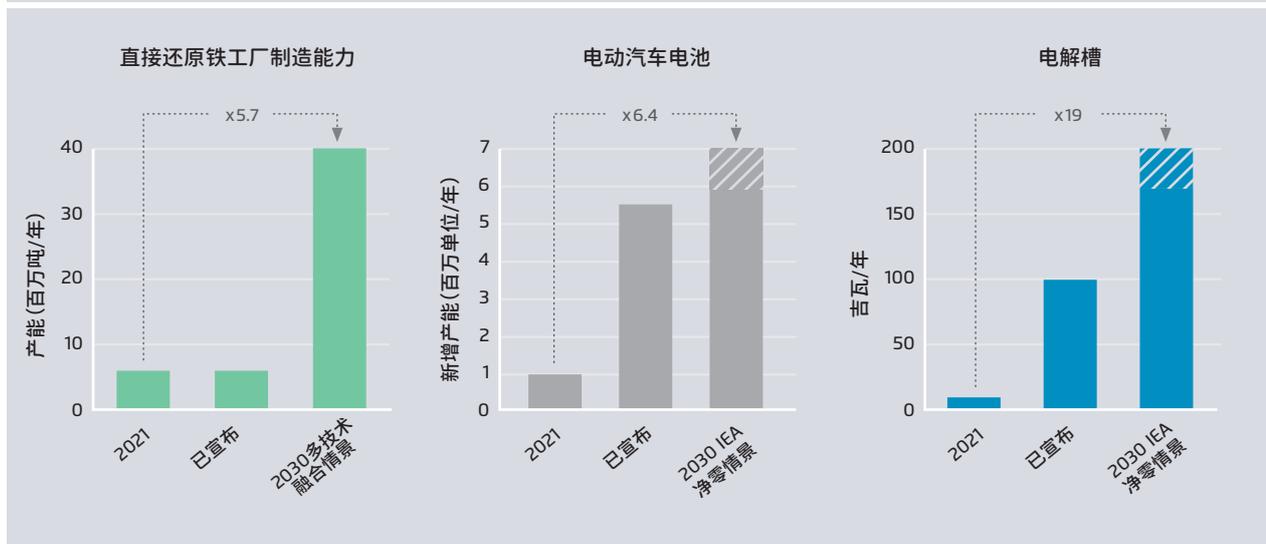
符合 1.5°C 温控情景下的直接还原铁部署速度与其他关键技术相似

与任何处于技术应用曲线起点的技术一样，直接还原铁的长期部署速度也很难预测。然而，与国际能源署 2050 年净零排放情景相比，我们的情景中直接还原铁的部署速度与电动汽车电池等其他清洁能源技术相似，但比电解槽的部署速度慢（国际能源署 2023，见图 14）。虽然这些技术可能并不完全具有

15 例如，Circored、浦项制铁公司（POSCO）和 Primetals 正致力于使用流化床反应器的新型创新氢基直接还原铁工厂的商业化。该技术预计到 2030 年实现商业化。

本研究情景中的直接还原铁部署与国际能源署净零排放情景中选定的清洁能源技术部署对比

图 14



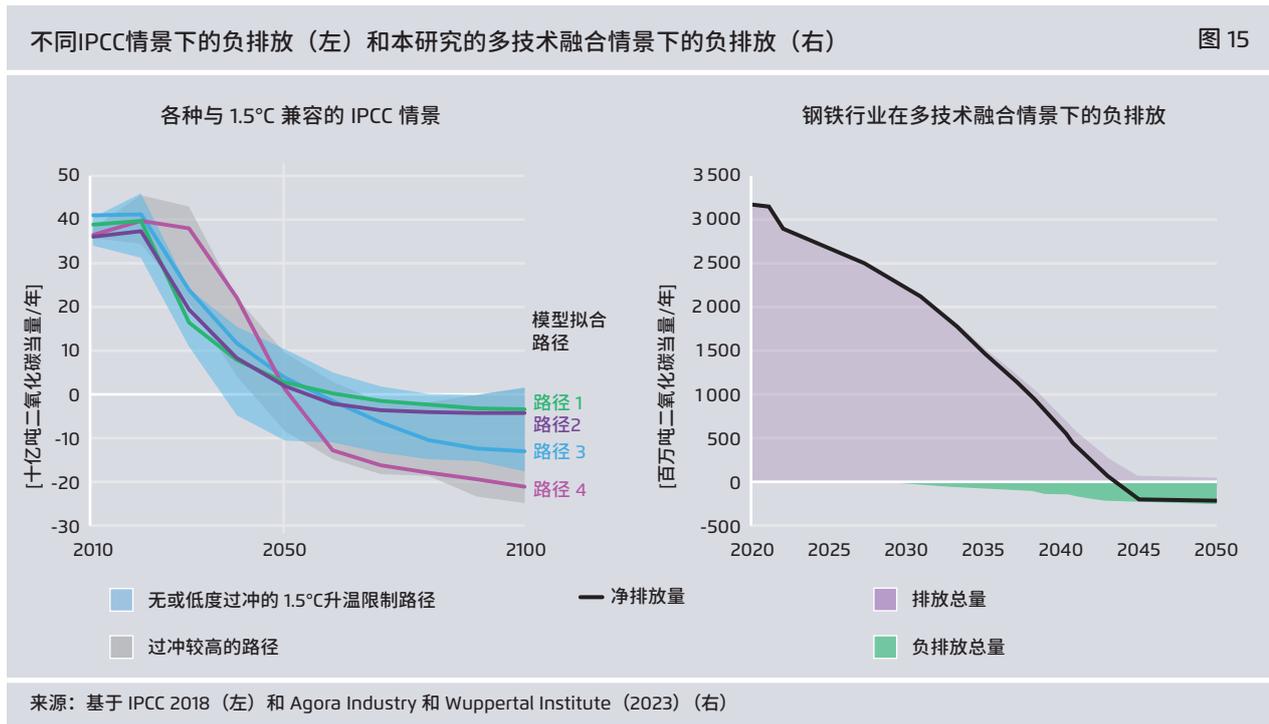
来源：Agora Industry (2023) 基于自身分析和 IEA (2023)

注：本对比选取了处于潜在 S 型技术采用曲线初期的清洁技术。IEA NZE = 国际能源署净零排放情景（基于国际能源署，2023 年）。2030 年国际能源署净零排放情景目标的范围显示存在一定的剩余容量，以应对潜在需求波动。

可比性，但电动汽车电池和电解槽的例子说明，当工业界和政府协同推动关键技术的部署时，将释放巨大潜力。国际绿铁贸易与加快部署直接还原铁相结合，具有重大的革命性潜力。在我们的“技术组合”情景中，到 2035 年，直接还原铁的年均部署量增加了十倍，全球钢铁行业可在 2044 年实现净零

排放。在“全球绿铁”情景中，到 2035 年，直接还原铁的年均部署量增加了 20 倍，净零排放可以在 2040 年实现。尽管今天还很难预测实际的部署速度，但可以明确的是，任何接近这一部署速度的进展，都将对传统化石能源技术构成巨大的搁浅资产风险（见解 4、9 和 11）。

8 钢铁行业有望通过生物质能 - 碳捕集与封存实现负排放。



限制全球变暖需要负排放

将全球变暖限制在与《巴黎协定》相符的水平，首先需要迅速减少温室气体排放。但与此同时，还需要通过移除大气中的二氧化碳来实现负排放。这主要有两个原因：(1) 抵消无法以其他方式减少的残余排放量，从而实现温室气体净零排放目标（例如畜牧业、水泥和石灰生产等部门）¹⁶；(2) 纠正二氧化碳排放和大气中二氧化碳浓度过冲，这一情形几乎在所有与 1.5°C 温控目标兼容的情景中都都有所体现（联合国政府间气候变化专门委员会 2018）¹⁷。

16 这些不可避免的残余排放包括畜牧业的甲烷排放以及水泥和石灰中与加工相关的残余排放，由于捕获率不完善，这些排放无法通过二氧化碳捕获和储存技术完全消减。

17 由于上述原因，远低于 2°C 的路径也需要清除二氧化碳。

需要广泛的二氧化碳清除方法组合

在主要的 1.5°C 兼容情景中，二氧化碳清除量（CDR）的规模差异较大：根据不同研究，到 2050 年，二氧化碳清除量从每年 19 亿吨（国际能源署 2021）和 45 亿吨（国际可再生能源机构 2022b）到 35 至 165 亿吨 / 年不等（联合国政府间气候变化专门委员会 2018）。¹⁸ 由于土地资源日益稀缺，以及全球变暖对具有重要碳储存和封存功能的生态系统的不利影响，植树造林等基于自然的二氧化碳清除方案受到明显限制。因此，需要直接空气碳捕集与封存和生物质能 - 碳捕集与封存等技术性二氧化碳清

18 二氧化碳清除量含量最低的情景（如国际能源署净零排放 2021）假定 2050 年前的减排量最大。

除量方案来补充自然碳汇。钢铁行业可通过生物质能 - 碳捕集与封存技术为实现负排放做出贡献（见图 15）。

超越净零排放——钢铁行业可通过生物质能 - 碳捕集与封存实现负排放

生物质能 - 碳捕集与封存的基本原理很简单：生物质在生长阶段从大气中吸收二氧化碳。如果钢铁行业使用生物炭作为还原剂或用于供热，并将由此产生的二氧化碳加以捕集和储存，就可以实现负排放，从而有效地将二氧化碳从大气和碳循环中永久清除。然而，无论在哪个行业，生物质能 - 碳捕集与封存技术实现负排放的潜力都将受到两个主要因素的限制：一是生物质资源供应的有限性，二是如何将有限的生物质资源在不同终端用途之间进行最有效的分配。

可持续利用的生物质资源受限于土地利用竞争

土地是一种稀缺资源，由于世界人口的不断增长、动物蛋白消费的持续增加、城市化进程的推进、气候变化对生产力的不利影响，以及遏制并扭转生物

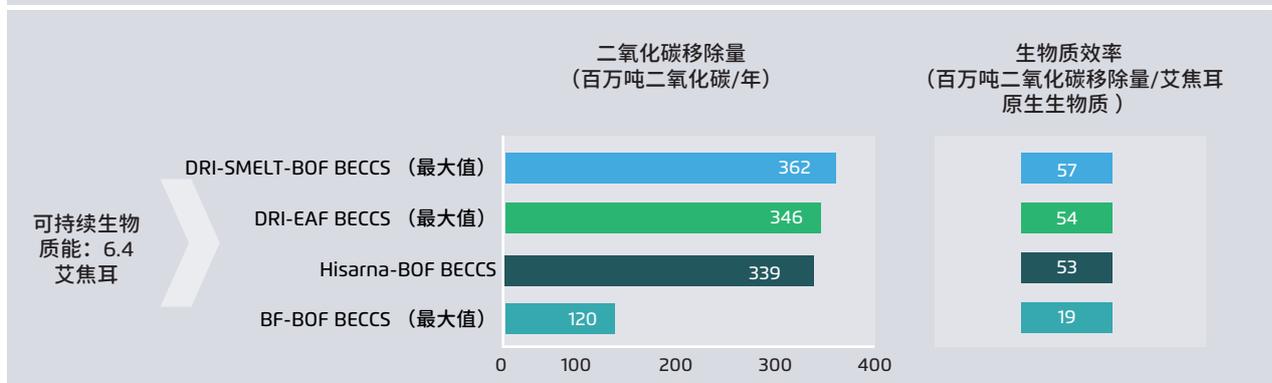
多样性丧失趋势的需求，未来土地利用竞争预计将进一步加剧。在假定无论生物质的具体用途如何，其开采和利用都不应对生态系统和碳循环造成不利影响的前提下，可用于生物质能 - 碳捕集与封存的生物质资源将持续受到限制。在严格可持续性标准下，对 2050 年可用于材料和能源用途的生物质供应量估计值差异较大：从 44 到 64 艾焦耳¹⁹（能源转型委员会 2021），到超过 102 艾焦耳（国际能源署 2021），甚至高达 153 艾焦耳（国际可再生能源机构 2022b）²⁰。我们选择了较为保守的“中间路径”假设，认为到 2050 年可持续的可利用生物质资源约为 64 艾焦耳。

生物质资源应分配到最有效的使用场景

鉴于用于材料和能源用途的生物质供应有限，必须将其分配给最有效的应用场景。为此，应遵循三项核心原则：优先用于材料用途而非能源使用；在可能的情况下实行生物质的级联利用；以及有限用于

19 这是基于 2021 年能源转型委员会的审慎情景（30 至 50 艾焦耳），但其中还包括 10 艾焦耳来自林业用于材料的木质生物质，以及来自回收材料的 4 艾焦耳。
20 欲了解更多信息，请参阅《净零排放经济中的生物质资源》报告（能源转型委员会，2021）。

钢铁行业中不同生物质能-碳捕集与封存技术在使用6.4艾焦耳可持续一次生物质情况下的二氧化碳清除潜力 图 16



来源：Agora Industry, Wuppertal Institute (2023)

注：本图中的潜力值为理论最大值，现实中可能难以完全实现。假设生物质全生命周期排放为零；在 Hisarna 和 BF-BOF BECCS 路径中，生物质转化为生物炭的效率为 60%；图中潜力值为非累积性（因假设所有生物质仅用于单一路径）。基于对能源转型委员会（2021）、国际能源署（2021）及国际可再生能源机构（2022b）等文献的综述，研究假设：到 2050 年，全球可持续原生生物质资源总量可达 64 艾焦耳钢铁行业最多可使用其中 10% 的生物质资源。DRI-SMELT-BOF= 直接还原铁 - 熔分炉 - 转炉；BECCS= 生物质能 - 碳捕集与封存；DRI-EAF= 直接还原铁 - 电炉；Hisarna-BOF= Hisarna 熔融还原 - 转炉工；BF-BOF= 高炉 - 转炉

能够产生负排放的场景，而非那些已有可行脱碳替代方案的温室气体中和。虽然某些直接的材料用途（如木制品、纸浆和纸张，以及闭合碳循环中的生物基塑料）应优先于生物质能 - 碳捕集与封存的应用，但在建筑供热和道路运输等可直接电气化的领域，部分现有生物质的使用可能被释放出来，并可用于生物质能 - 碳捕集与封存应用以产生负排放。

如果钢铁行业到 2050 年使用 6.4 艾焦耳的可持续一次生物质（占能源和材料用生物质总供应量的 10%），每年可产生高达 3.6 亿吨的负排放（图 16）。

然而，现实中很难实现这一全部潜力。²¹ 在我们的技术组合情景中，我们假设使用 6.2 艾焦耳的一次生物质，相当于基于生物质能 - 碳捕集与封存的钢铁生产路线 5 艾焦耳的最终生物质能消费量，这样到 2050 年，每年可产生约 2.4 亿吨二氧化碳的负排放。由于与基于直接还原铁的生物质能 - 碳捕集与封存（DRI-BECCS）及 Hisarna 熔融还原 - 转炉生物质能 - 碳捕集与封存工艺（Hisarna-BOF BECCS）相比，高炉转炉流程单位生物质产生负排放的效率要低得多，因此我们的情景中未在高炉 - 转炉路线部署任何生物质能 - 碳捕集与封存。

21 这就要求生物质在生命周期内实现零排放，但实际上这种情况不太可能实现。

9 高炉 - 转炉路线结合碳捕集与封存技术工艺不会在全球钢铁转型中发挥重要作用。

全球钢铁行业走向何方：2030年（已宣布）低碳炼钢项目

图 17



高炉 - 转炉流程碳捕集与封存是否只是一个白日梦？

2020 年，国际能源署《钢铁技术路线图》将 100% 可再生氢基的直接还原和高炉 - 转炉碳捕集与封存路线的技术成熟度等级 (TRL) 均定义为 5 级。两项技术预计在 2030 年前具备商业化就绪水平 (国际能源署 2020a)。然而，自 2020 年以来，这两种技术的商业化项目进展却大相径庭：迄今为止，几乎所有计划建设低碳炼钢产能的钢铁公司都选择了氢基或氢就绪的直接还原铁工厂。在本研究进行时，已规划的兼容氢气的直接还原铁工厂在 2030 年前的年产能已增加到 8400 万吨，而高炉 - 转炉路线的商业规模碳捕集与封存仅有 100 万吨 (见图 17)。

高炉 - 转炉路线的燃烧后碳捕集与封存将产生较高的残余直接排放

许多钢铁脱碳情景预估，相对于传统的高炉 - 转炉路线，高炉 - 转炉碳捕集与封存路线可减少 90% 的二氧化碳排放 (Bataille 等, 2021; 可行使命伙伴关系 2022, 国际能源署 2022a)。根据详细深入的技术评估 (Agora/WI/Lund, 2024)，尽管理论上技术可行，但我们认为这一假设过于乐观。²² 首先，将高炉 - 转炉路线中的许多二氧化碳排放点源连接到碳捕集与封存系统上，经济上可能永远不可行。其次，烧结厂废气流中的二氧化碳浓度非常低，

22 可行使命伙伴关系 2022 提出了一种情况，即在高炉 - 转炉路线上仅实现 50% 的碳捕集与封存捕集率，这表明 90% 的捕集率是否现实还存在疑问。然而，在他们的情景建模中，他们假设二氧化碳减排率为 90%。

仅为 4%-5%。由于这两个原因，在我们的技术评估 (Agora/WI/Lund, 2024) 中，我们得出结论：相对于无减排措施的高炉 - 转炉路线，高炉 - 转炉碳捕集与封存路线可能只能实现 73% 的减排量 (默认情景)。这意味着在最优情况下，二氧化碳浓度相对较高的大型二氧化碳点源 (焦炉底火、热风炉和发电厂) 会接入碳捕集系统，但烧结厂和其他小型二氧化碳排放点源则不会接入。对于这些小型排放源，虽然二氧化碳捕集在技术上是可行的，但捕集成本会呈指数上升。

高炉 - 转炉碳捕集与封存工厂容易受到其他技术成本下降的冲击

高炉 - 转炉碳捕集与封存路线的成本受到多种因素影响，包括电价以及是否接入陆上或海上二氧化碳封存设施。然而，未来高炉 - 转炉碳捕集与封存可能会被其他新兴技术所取代。例如，根据我们的计算，一旦熔融氧化物电解技术达到商业化规模应用，

在 60 美元 / 兆瓦时的交付电价下，即使是最佳的高炉 - 转炉碳捕集与封存工厂也会被其成本优势超越 (Agora/WI/Lund, 2024)。此外，如果国际绿铁贸易获得发展动力，可再生能源丰富国家的氢投入成本相对低廉，也可能从成本上对高炉 - 转炉碳捕集与封存形成竞争压力。

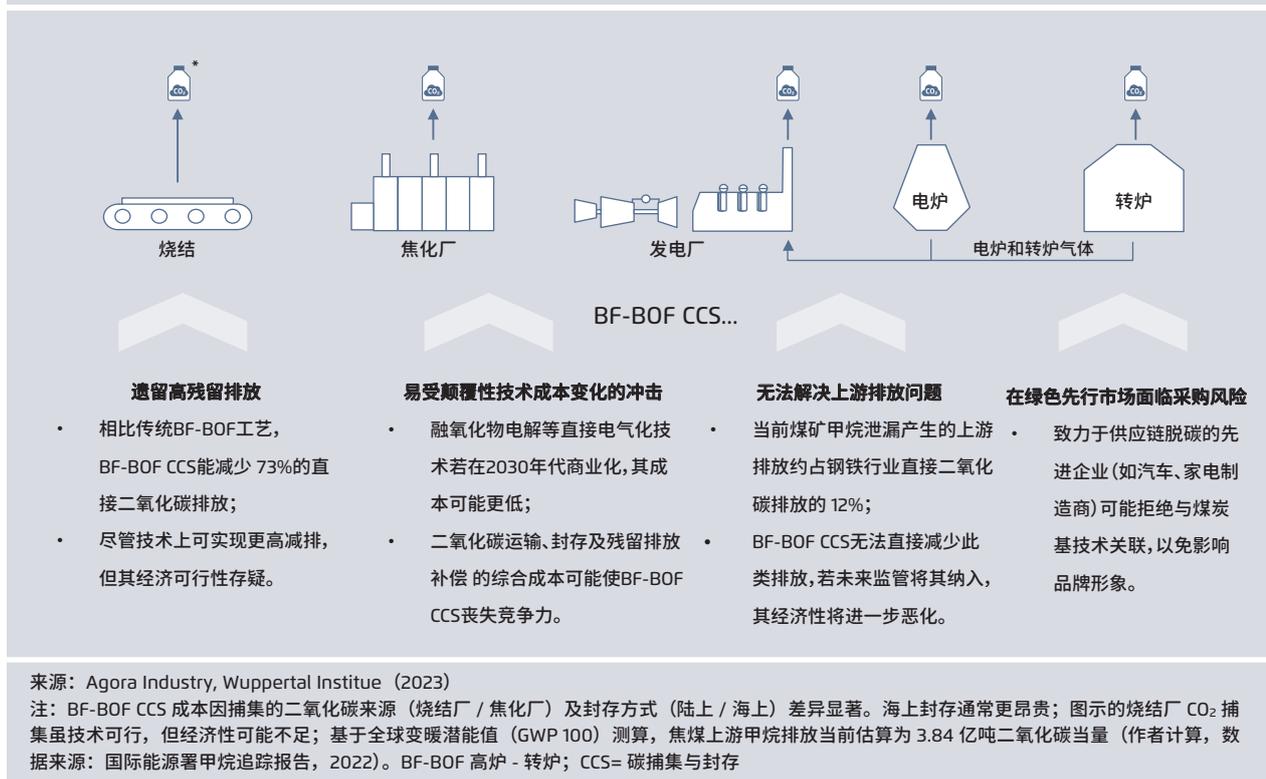
高炉 - 转炉碳捕集与封存无法解决煤矿甲烷泄漏的上游排放问题

另一个风险是，高炉 - 转炉碳捕集与封存无法消除煤矿甲烷泄漏相关的排放。以炼焦煤为例，2021 年煤矿甲烷排放总量为 1200 万吨，这将使钢铁行业的温室气体排放量增加 3.84 亿吨二氧化碳当量，约增加 12% (Ember 2023, 国际能源署 2020b 和 2022d)。²³ 虽然部分甲烷排放可以通过各种措施减

23 这一计算基于 100 年内甲烷的平均全球升温潜能值，即每吨甲烷产生 32 吨二氧化碳 (见国际能源署 2020b)。

多重风险因素使高炉-转炉工艺结合碳捕集与封存缺乏吸引力

图 18



少，但无法完全消除（国际能源署 2023）。一旦法规要求将上游排放纳入计算并纳入绿色钢铁的定义，对于依赖后期加装碳捕集与封存的钢铁企业而言，这将构成重大风险，并可能进一步削弱高炉 - 转炉碳捕集与封存的经济性。

来自高炉 - 转炉碳捕集与封存路线的钢材 在绿钢市场面临销售风险

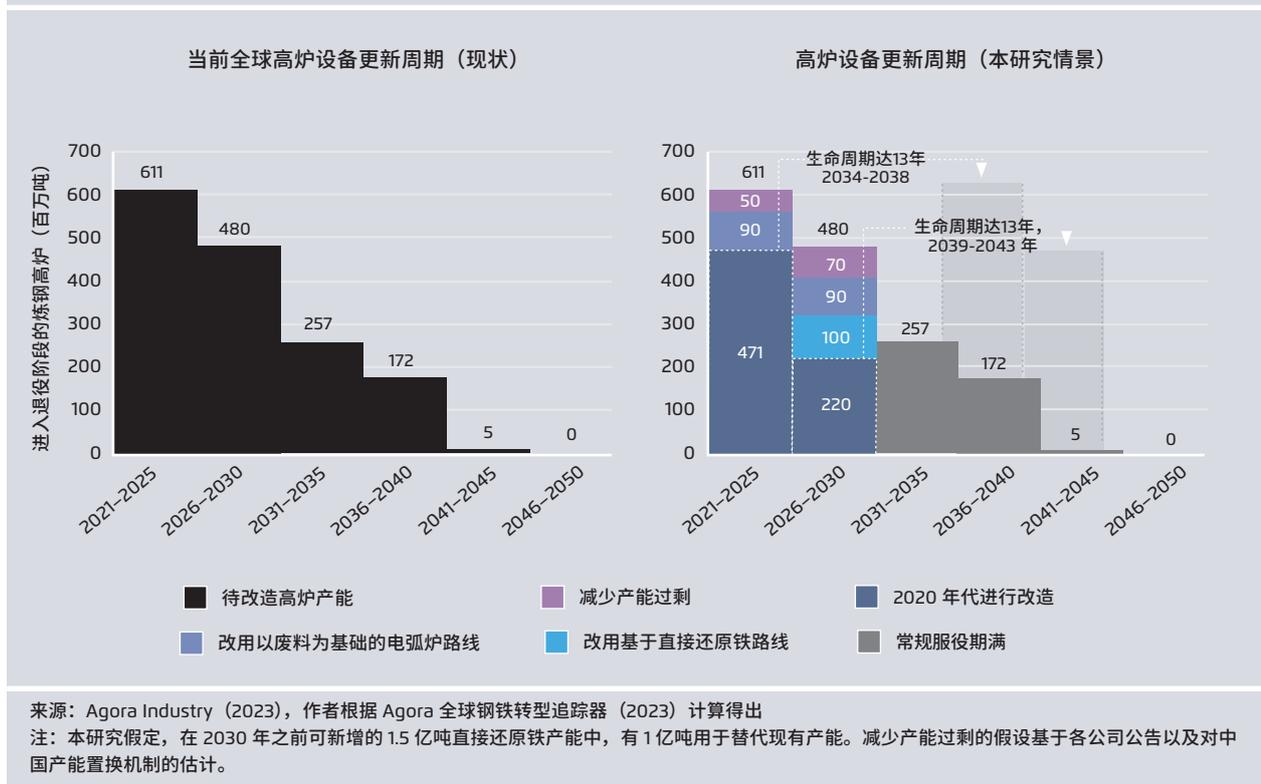
此外，部分旨在实现供应链脱碳的用钢企业可能完全不愿与煤基技术挂钩。希望将绿钢产品以更高价格销售给终端消费者（如汽车或家电）的公司，可能会担心与煤基项目相关联会对其品牌声誉造成负面影响，因为这可能与其品牌形象和脱碳战略不符。

总之，要对高炉 - 转炉碳捕集与封存的未来潜力进行详细评估，就必须综合分析各种风险因素。如果该技术未来未能实现，这将对高炉成为搁浅资产的风险产生重要影响（参见见解 10 和 11）。

10 到 2040 年，90% 以上的现有高炉可以实现自然淘汰而不必强制关停。

到2040年，90%以上的现有高炉可在不提前关闭的情况下逐步退出

图 19



到 2030 年，70% 以上的现有高炉需要再投资

2020 年代对于大部分现有高炉而言是一个十字路口。超过 70% 的高炉（1.90 亿吨产能）将达到使用年限，需要进行再投资。这些高炉运营商将面临一个选择：是大修改造并将再次被高排放锁定十多年，还是用低碳技术替代已达到使用年限的高炉。理想情况下，所有高炉运营商都应选择后者。但这可能吗？

低碳技术的推广应用无法替代所有在 2030 年前达到使用年限的高炉

在 2030 年之前，替代已达到炉役寿命终点高炉主要有两种途径：一是改用直接还原铁技术，二是通过电弧炉发展以废钢为基础的炼钢。²⁴ 然而，即使这些技术快速发展，在现实中也难以在 2030 年前，全部替代 10.9 亿吨的高炉产能（见图 19）。

²⁴ 根据一项详细的技术评估 (Agora/WI/Lund, 2024)，我们预计其他低碳炼钢技术在 2030 年前不会达到商业准备状态，也不会大规模推广。

在最佳情况下，我们估计，到 2030 年最多可建设 1.5 亿吨直接还原铁产能（见解 14），其中 1 亿吨将用于替代现有高炉；同时，随着废钢供应的增加，2030 年废钢炼钢产量将比 2020 年增加约 1.8 亿吨。²⁵ 此外，在世界其他地区，由于产能问题，高炉产能可能会被关停而不会被替代。我们估计，到 2030 年，这种高炉产能关停将达到 1.2 亿吨。即便如此，到 2020 年代，仍有约 6.9 亿吨高炉产能需要大修改造。这是否是一个大问题，从而在未来 20-25 年内排放排放，或导致搁浅资产？简短的回答是否定的。因为实际数据显示，高炉在大修改造后的运行寿命（平均约 13 年）比人们普遍假设的要短得多。

25 其他 5,000 万吨直接还原铁新增产能假定建在新兴经济体，而不是新建高炉 - 转炉工厂（见解 11）。

高炉大修改造后的寿命比以前假设的要短 ...

在大多数现有的钢铁脱碳情景中，高炉平均运行寿命的假设从 20 年（可行使命伙伴关系 2022）到 25 年（国际能源署 2021 和 Bataille et al 2021）不等。然而，据我们所知，所有这些关于高炉运行寿命的假设都是基于文献值。

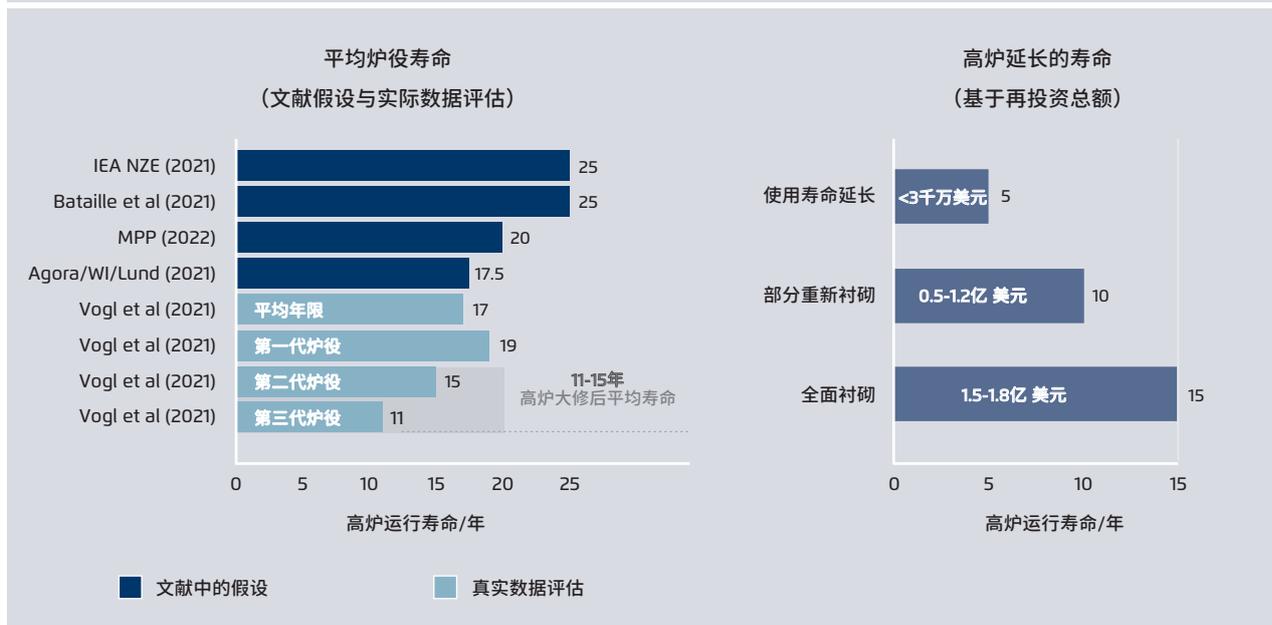
唯一一项对高炉实际运行数据进行评估的研究认为，高炉的平均运行寿命为 17 年（Vogl 等人，2021 年）。此外，第二次炉役（15 年）和第三次炉役（11 年）的持续时间往往比大多数钢铁脱碳研究中普遍假定的 20-25 年运行寿命要短得多。

高炉运营方可选择不同的改造措施，其对应的延寿年限也不尽相同

此外，还有各种高炉改造措施，包括使用寿命延长（最多 5 年）、部分重新衬砌（8 至 12 年）和全面衬砌（15 年）。改造措施的投资总额与所带来的寿命延长直接相关（见图 20）。

高炉炉役寿命与各类升级改造措施

图 20



来源：Agora Industry (2023) 基于 Vogl 等人 (2021) 和本研究的分析 (右)
 注：右侧数字基于本研究对欧洲各钢铁企业改造措施的分析。

因此，到 2040 年，90% 以上的高炉可以在不提前停产的情况下退出运行。

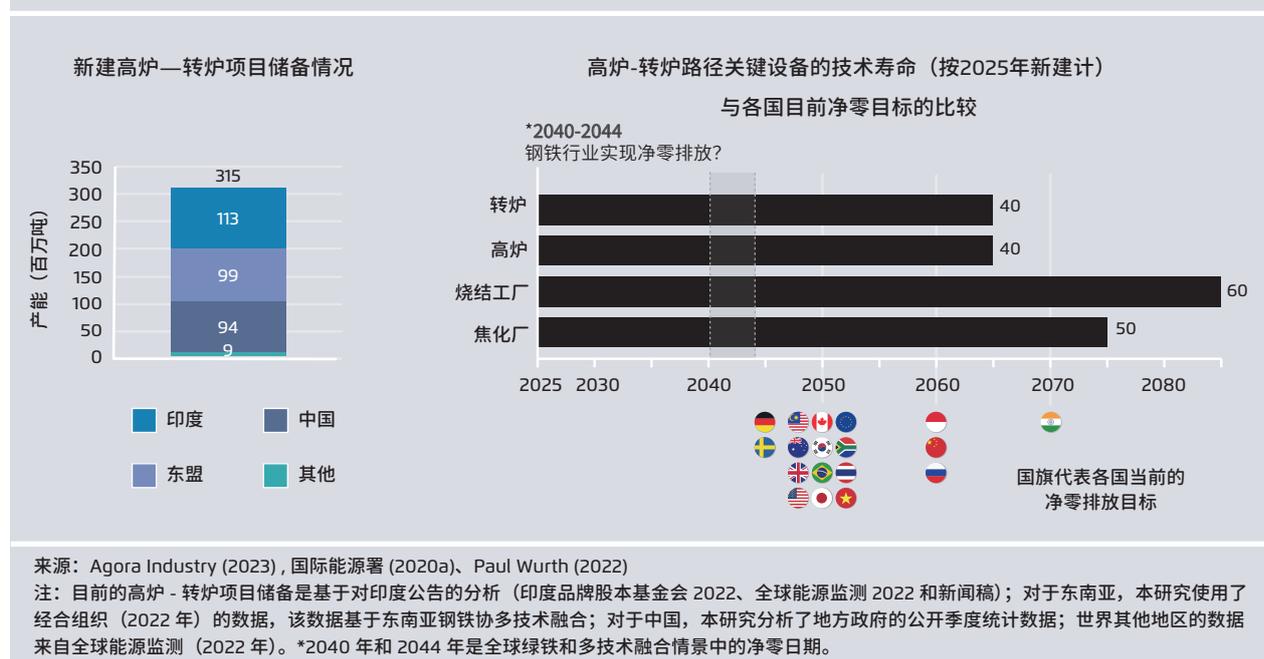
因此，即使在 2020 年代，由于低碳技术的发展速度不足以取代所有高炉，有相当一部分高炉必须大修改造，鉴于其较短的炉役寿命以及多样化的改造选

择，到 2040 年，90% 以上的现有高炉可以在不提前关闭的情况下实现退出。到 2043 年，所有现有高炉都可以在不提前关闭的情况下完成淘汰。总体而言，从全球角度看，现有高炉的资产搁浅风险较低。

11 目前新兴经济体计划于 2030 年前投产的未减排煤基高炉项目正面临着巨大的碳锁定和资产搁浅风险。

当前新建以煤炭为基础的高炉—转炉钢铁生产项目储备正面临严重的碳锁定风险和资产搁浅风险

图 21



今天对新建煤基钢铁厂的投资很可能成为明天的搁置资产

2020 年代将决定全球钢铁业向温室气体净零排放转型过程中, 会产生多少搁置资产。这是因为高炉-转炉路线的关键设备的技术寿命从 40 年 (高炉和转炉) 到 50 年 (焦化厂) 或 60 年 (烧结厂) 不等。如果高炉-转炉碳捕集与封存路线在未来无法实现 (从目前的角度看, 从当前视角看这一可能性较大 (见解 9), 那么这些高炉-转炉路线的核心设备将面临在其技术寿命结束前过早关闭的巨大风险。除了各国的净零目标外, 问题还在于整个钢铁行业的脱碳速度有多快。如果国际绿铁贸易 (见解 5) 或熔

融氧化物电解部署等颠覆性发展出现, 那么 2020 年代新建的煤基高炉-转炉工厂将在 2040 年代面临巨大的公众压力以及碳锁定和资产搁置风险。

新兴经济体 2030 年新建高炉-转炉工厂的项目储备庞大

我们预计主要新兴经济体的钢铁需求仍将增长, 以满足不断增长的人口对基础设施和发展的需求 (国际能源署 2022a; 可行使命伙伴关系 2022)。据估计, 目前新兴经济体新建高炉-转炉工厂的储备项

目约为 3.15 亿吨。迄今为止，印度（1.13 亿吨）、东盟²⁶ 国家（0.99 亿吨）和中国（0.94 亿吨）占项目储备的 97%（见图 21）。²⁷

2020 年代是全球钢铁行业的十字路口

21 世纪 20 年代是投资新建钢铁厂的十字路口。钢铁行业可以选择继续被高二氧化碳排放量锁定数十年，并面临碳锁定和资产搁置的高风险，或者选择净零投资路径，为未来提供可持续的就业机会。然而，由于对追溯性碳捕集与封存（CCS）在高炉 - 转炉路线上的作用的假设过于乐观，这一观点在符合 1.5°C 温控的钢铁脱碳情景中尚未获得一致认可。对于到 2050 年实现净零目标的国家或钢铁公司来说，如果高炉 - 转炉结合碳捕集与封存不能实现，就会有重大的碳锁定和资产搁置风险。而对于在设立在

2050 年之后才实现净零目标的国家或钢铁公司而言，如果政府将净零目标提前实施，或者世界其他地区的钢铁转型显著加快，同样会面临重大的碳锁定和资产搁置风险。

除了长期风险，还存在全球钢铁产能过剩相关的短期风险。例如，根据东南亚钢铁协会（SEAISI）的数据，东盟六国的产能利用率已经相对较低，尤其是长材生产商（经合组织 2022）。在此背景下，如果不解决产能过剩问题，建设新的煤基钢铁厂也可能在短期和中期的盈利能力方面也可能面临风险。

在 2030 年前开始将投资从煤炭转向清洁能源的解决方案是必要的

开始将新兴经济体新建钢铁厂的项目从煤炭转向清洁能源将是一个巨大的挑战，同时也是机遇。这需要一系列广泛的有利因素推动，包括对可再生能源、低碳氢以及相关基础设施的大规模投资。

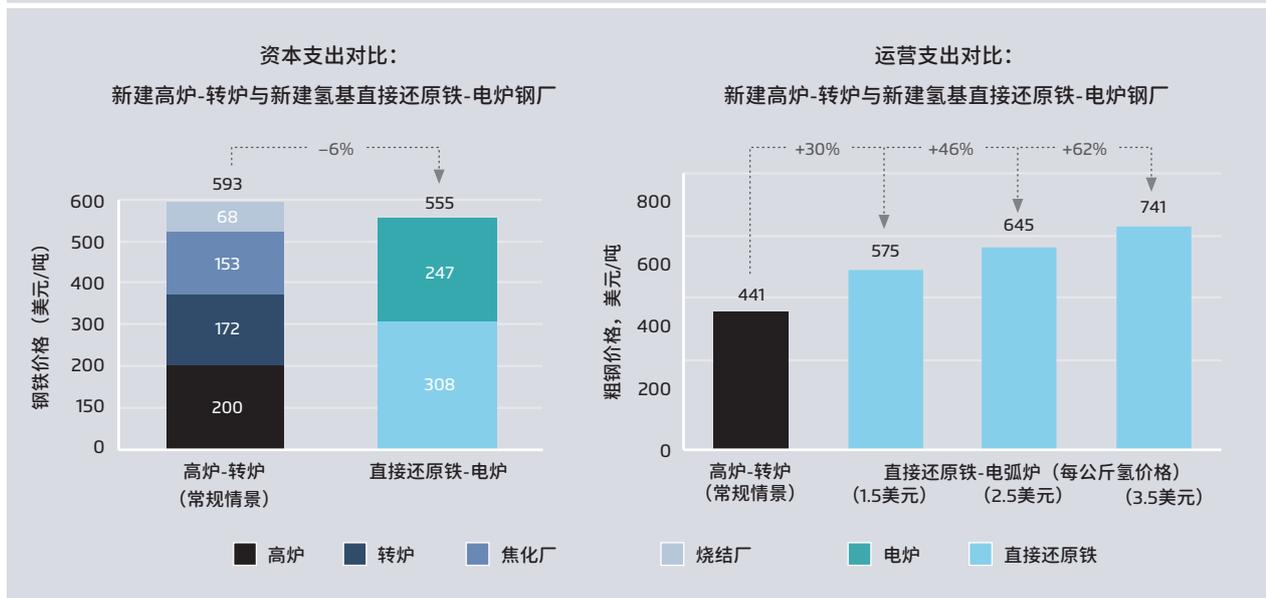
另一个关键问题是成本。在投资方面，印度、东南亚和中国用于新建高炉转炉钢厂的资本支出

26 东盟是东南亚国家联盟的简称。

27 虽然印度和东南亚新建的高炉 - 转炉工厂代表了额外的净炼钢产能，但由于所谓的产能置换机制，中国近年来淘汰的高炉产能超过了新增产能（作者根据中国地方政府公开数据进行的分析）。

将新兴经济体的投资从煤炭转向清洁能源需要解决较高的运营支出成本

图 22



来源：Wörtler 等人，2013 年（左）和 Agora Industry, Wuppertal Institute, 2023 年（右）

注：左边的数字最初是以 2010 年的欧元计算的。本研究根据相关年份（2010 年）以 1 至 1.34 的兑换率将欧元调整为美元。右图：作者的计算结果。

(CAPEX) 可用于直接还原铁工厂。这些支出几乎持平，因此不会增加成本。真正的挑战在于如何解决氢基直接还原铁工厂的额外运营支出 (OPEX)。这些费用占比从 30% 到 62% 不等，在很大程度上取决于未来的低碳氢的成本 (见图 22)。如果没有适当的解决情景来解决运营支出成本差距，成本仍将是关键问题。

国际合作是关键

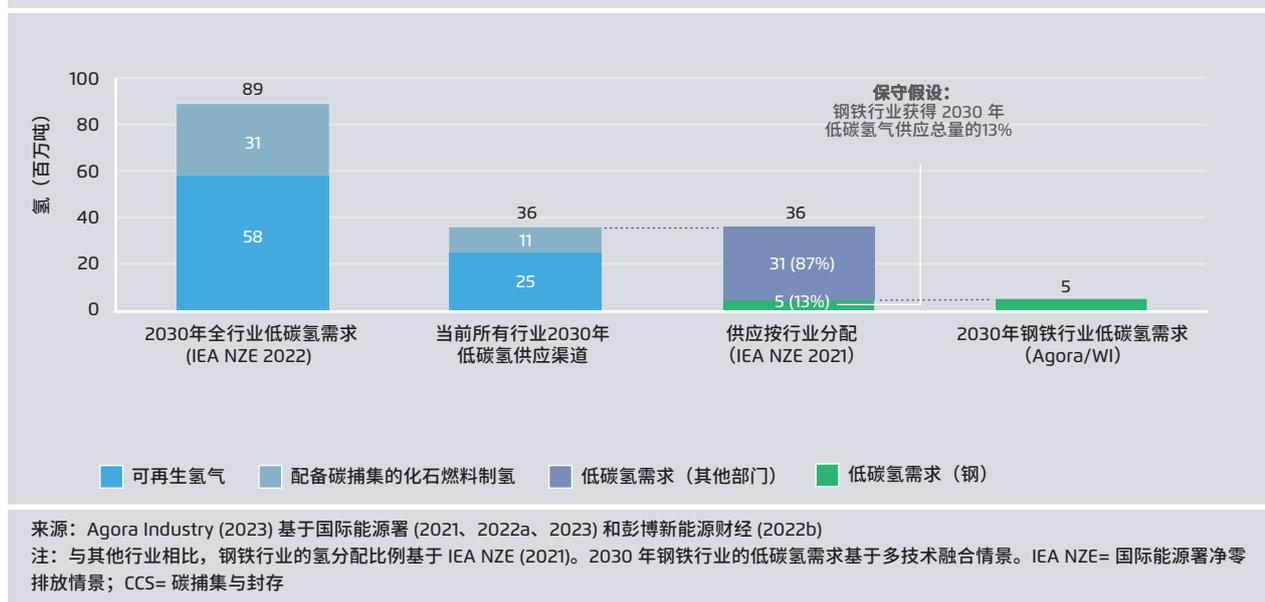
为了使越来越多的投资转向符合净零排放的方向，国际合作是必需的。举例来说，重要的合作领域包括大幅增加对新兴经济体的气候融资、通过降低资

本成本的政策减轻风险、非扭曲性贸易协定以及联合技术开发。虽然挑战巨大，但首批有雄心壮志的行动者已经证明，在 2030 年之前对新兴经济体进行符合净零排放的投资是可能的。例如，2022 年，马来西亚国有钢铁公司 (SOGDC) 宣布将新建一座可使用氢的直接还原铁综合钢厂，计划于 2025 年建成，初期以天然气运营，并在低碳氢气可用时逐步采用 (Borneo Post 2022)。可以肯定的是，通过国际合作，将新钢铁厂投资中越来越多的份额从煤炭转向清洁能源是可能的。

12 如果将有限的低碳氢优先供应用于“无悔应用”，那么低碳氢的供应可能不会成为全球钢铁转型的主要瓶颈。

2030年低碳氢气供应链与钢铁行业对低碳氢需求对比

图 23



低碳氢供应是否会成为钢铁转型的主要瓶颈？

直接还原铁工艺的氢基炼钢需要低碳氢。迄今为止，低碳氢产量不足 100 万吨（国际能源署 2022e）。这就引出了一个问题：低碳氢供应短缺是否会延迟或减缓全球钢铁转型？简短的回答是否定的。

2030 年前的低碳氢项目储备增长迅速，但最终投资决策仍然较少

预计 2030 年，低排放氢的需求量很大，项目储备正在快速增长。国际能源署在其最新的国际能源署净零排放中预计，到 2030 年，所有行业将需要 8900 万吨低碳氢供应，以实现符合 1.5°C 控温目标

的路径。其中大约三分之二将由可再生的氢供应，三分之一将由化石燃料衍生的氢供应（国际能源署 2022a）。

目前看，2030 年前低碳氢气项目储备量合计 3600 万吨。目前已公布的可再生氢气项目预计到 2030 年可提供 2500 万吨（彭博新能源财经 2022b），带有碳捕集与封存的化石燃料制氢占 1100 万吨（国际能源署 2023）。虽然这仅占所需的 8900 万吨的 40%，但低排放氢项目储量正在快速增长。例如，3600 万吨的储备量相较于 2022 年 9 月的 2400 万吨增长了 50%，而 2400 万吨与前一年相比已经增长了 40%（国际能源署 2022e）。然而，根据国际能源署截至 2022 年 10 月的氢项目数据库，只有总计 400 万吨的氢项目已进入最终投资决策阶段（国际能源署 2022f）。

在全球范围内，低碳氢的供应可能不会成为全球钢铁转型的瓶颈

一个有点出人意料的发现是，到 2030 年，低碳氢的供应可能不会成为全球钢铁转型的瓶颈。在我们设定的两种钢铁脱碳情景中，钢铁行业到 2030 年的低碳氢需求量为 500 万吨。如果所有低碳氢项目都能如期建成，这相当于目前低碳氢项目储备量的 13%。巧合的是，13% 恰好是国际能源署净零排放 2021 年为钢铁行业分配的 2030 年低碳氢的份额，这是一个非常保守的假设，下文将对此进行说明。

燃料替代（如钢铁），相比天然气转换为氢（化肥）或石油转向氢衍生品替代（海运中的氨或甲醇），将产生更大的二氧化碳减排影响（图 24）。

可以肯定的是，减缓气候影响并不是氢分配的唯一考量因素。为海运、航空和化工行业生产合成燃料以实现气候中性的技术创新也很重要。然而，钢铁行业有充分的理由使用不止 13% 的可用低碳氢供应。对钢铁行业而言，主要瓶颈可能不是氢供应，而是快速部署可使用氢的直接还原铁工厂（见解 7 和 14）。

钢铁行业从煤炭向氢转换可能是相对最有效的二氧化碳减排措施之一

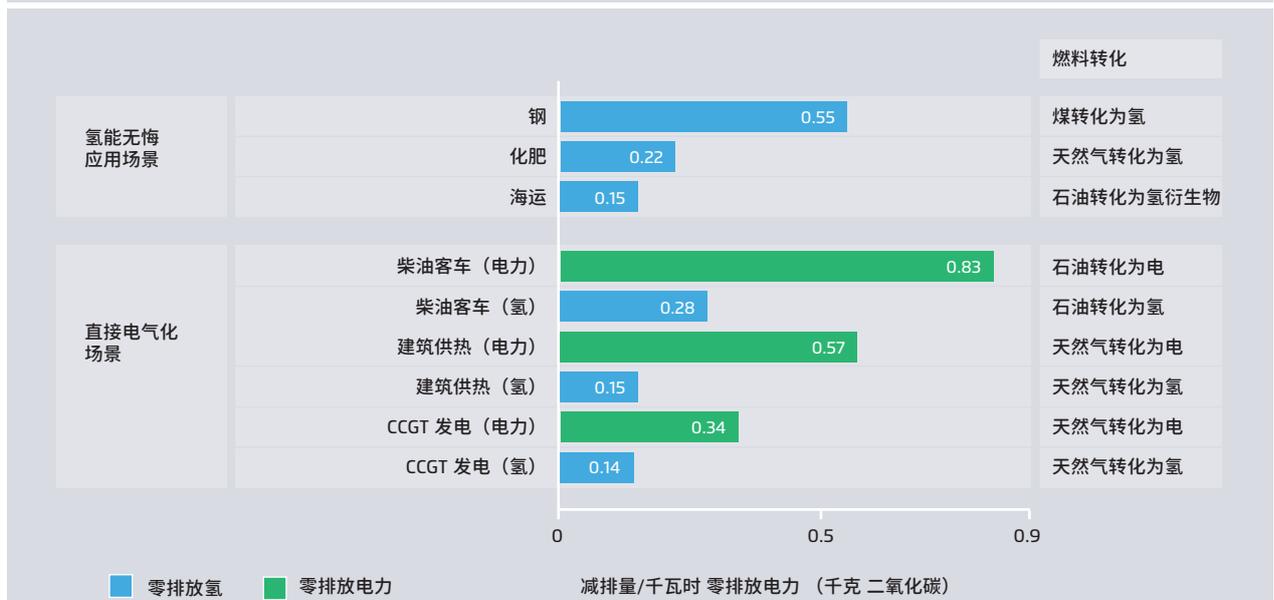
科学界越来越认为，低碳氢不应被用于那些已有直接电气化可行方案的行业（例如，Liebreich 2022；Agora Energiewende 2022）。然而，这不仅是效率问题。事实上，这同样也关系到如何在“无悔应用”中分配低碳氢的问题。如果可以将煤炭转换为氢的

钢铁企业在 2030 年前开始转型有多种选择

尽管在全球层面，低碳氢的供应可能不会成为钢铁行业的主要瓶颈，但在特定的地区环境下，尤其是短期内，情况可能会有所不同。除氢供应外，钢铁生产基地与氢基础设施的连接也至关重要。但是，即使这种连接存在困难，钢铁转型仍然可以从现在

氢气无悔应用：与其他各种氢应用相比，钢铁具有最大的二氧化碳减排潜力

图 24



来源：Agora Industry, Wuppertal Institute (2023)，基于落基山研究所 (2022) 提出的概念和作者在 Agora Energiewende (2023) 中的计算
 注：本假设全球平均传统高炉 - 转炉钢厂生产每吨粗钢排放 2.1 吨二氧化碳；以 100% 可再生氢运行的直接还原铁 - 电弧炉工艺，生产每吨粗钢的电力需求为 3.84 兆瓦时；针对海运燃料替代，基于落基山研究所 (2022 年) 假设：氢在效率为 39% 的内燃机中替代重油。其他假设均引自 Agora Energiewende (2023 年)。CCGT= 燃气轮机联合循环

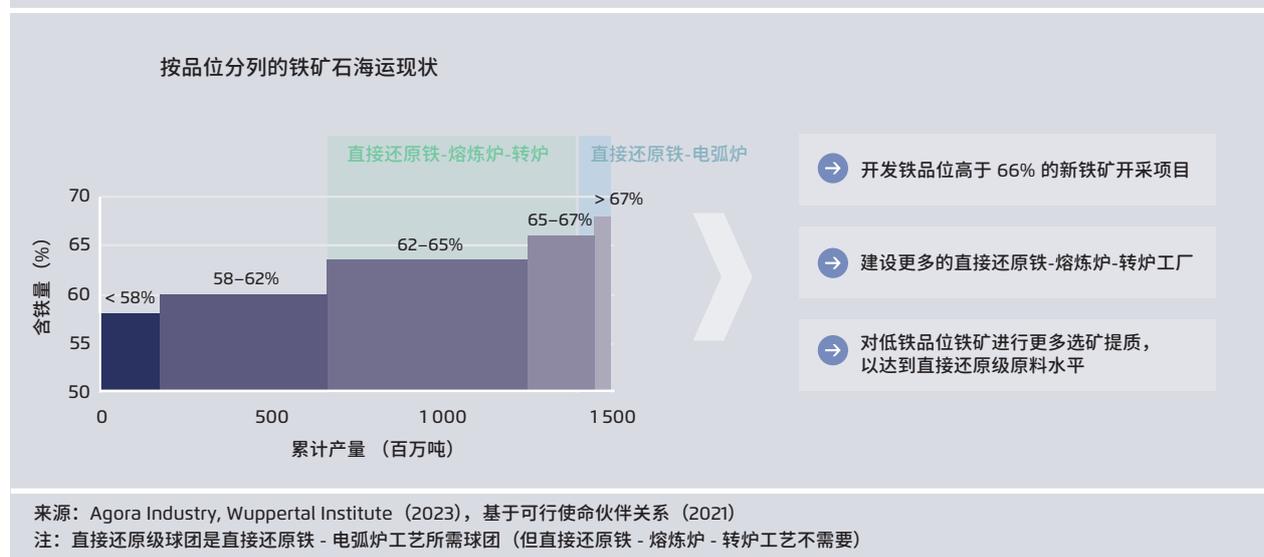
开始，有多种可行路径。第一种选择是不需要任何氢，用电弧炉代替高炉。如果钢铁制造商生产的优质再生钢在某些使用情况下可以替代原生钢，这就可以激励更好的废钢回收实践，以确保废钢的清洁流动，从而改善循环性，同时为再生钢开辟新的细分市场。阿尔戈马钢铁（Algoma Steel）、奥钢联（voestalpine）和利百得钢铁（Liberty Steel）等几家钢铁制造商已经在不同的生产基地实施了这一方案。第二种选择是建造“氢就绪”的直接还原铁

工厂，并在初期使用天然气运行，直到工厂可以接入氢气基础设施。采用这种策略的钢铁企业包括蒂森克虏伯（thyssenkrupp）和安赛乐米塔尔多法斯科（ArcelorMittal Dofasco）。最后，钢铁制造商可以选择从国外进口绿铁，这样可以避免建设氢基础设施的较长周期和跨洋氢运输的高成本，同时仍能在2030年前实现近零排放钢铁生产。浦项制铁（POSCO）和日本制铁（Nippon Steel）已宣布相关计划，正是沿着这一战略方向推进。

13 直接还原级球团矿的供应是全球钢铁转型的一个主要潜在瓶颈；解决方案是存在的，但需要积极推进。

如何应对直接还原级球团矿瓶颈问题

图 25



直接还原级球团供应可能成为全球钢铁转型的主要瓶颈

直接还原级球团供应常常被认为是向氢基炼钢转变的一个主要瓶颈 (麦肯锡 2021; Midrex 2022b; 能源经济与金融分析研究所 2022a)。目前的情况如何，是否有解决这一问题的方案？

向氢基直接还原铁 - 电弧炉路线转型需要直接还原级球团

在短期内，氢基直接还原铁 - 电弧炉路线将是大幅减少原生钢生产二氧化碳排放量的最有前景的选择。直接还原铁 - 电弧炉路线需要使用所谓的直接还原级球团矿。直接还原级球团的要求是杂质少、含铁量高 (>66%)，这意味着除非对低品位铁矿石

进行选矿提质 (Midrex 2022a; 能源经济与金融分析研究所 2022a)，否则只有优质铁矿石才适用于该工艺。

但目前仅有 3% 至 4% 的铁矿石货物达到直接还原级球团质量

目前，只有 3% 到 4% 的海运铁矿石具有直接还原级球团质量，适合直接还原铁 - 电弧炉路线 (可行使命伙伴关系 2021, 引自能源经济与金融分析研究所 2022a 的淡水河谷数据)。除非这个问题得到解决，否则这有可能成为直接还原铁 - 电弧炉工厂部署和运营的主要瓶颈 (见解 14)。

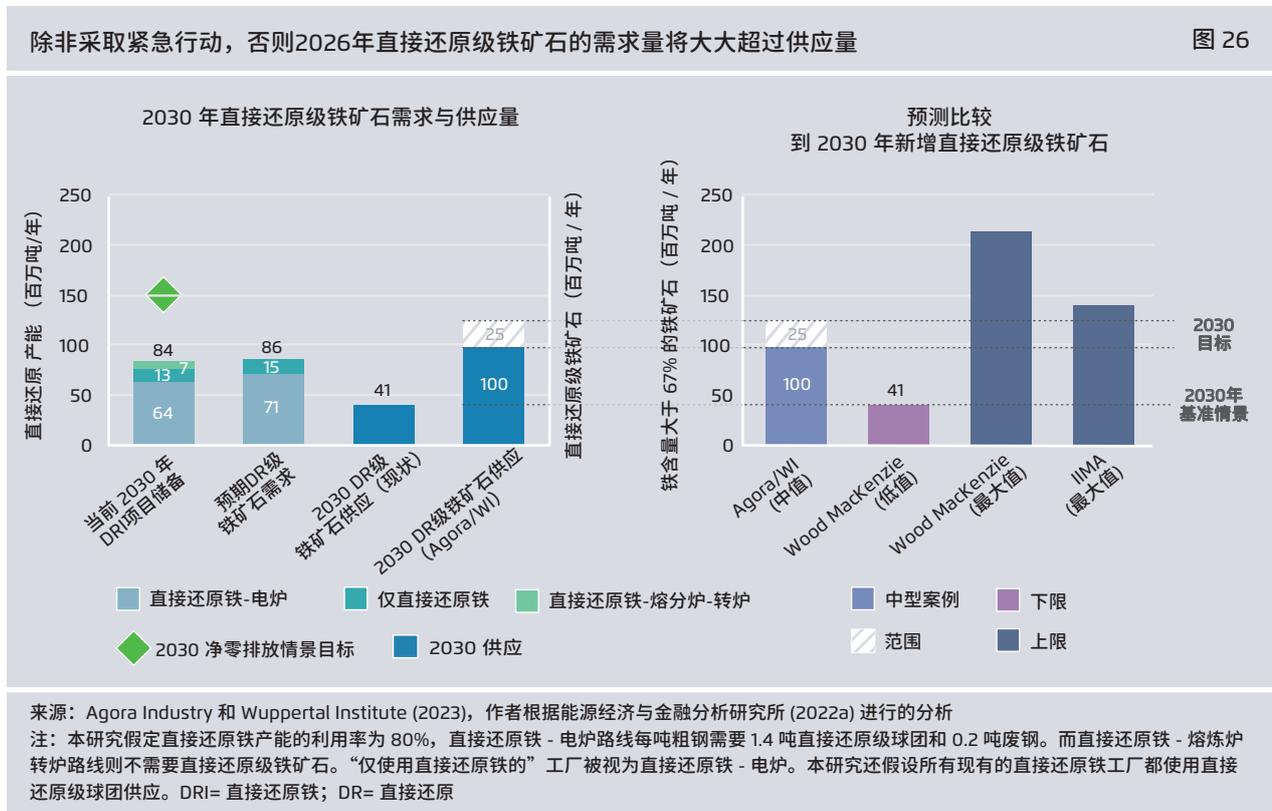
直接还原级优质铁矿石供应能否满足直接还原级球团需求？

一个关键问题是，到2030年还能增加多少直接还原级铁矿石的供应，以满足快速增长的直接还原级球团矿需求。目前公布的2030年直接还原铁-电弧炉项目储备对应增加6400至7700万吨的产能²⁸，这将需要每年从合适的铁矿石中获得7100至8600万吨的直接还原级球团矿。这已经远超目前2030年可供应直接还原级优质铁矿石的新铁矿开采项目储备能力，因此这将成为一个主要瓶颈（见图26）。解决这一瓶颈的办法是存在的，但需要积极推进。

28 这些数字仅指直接还原铁-电弧炉产能，不包括直接还原铁-熔分炉-转炉产能，因为后者不需要直接还原级球团。

需要开发更多可供应直接还原级铁矿石的新铁矿开采项目

根据伍德麦肯兹（Wood MacKenzie）2021年的铁矿石项目评估，能源经济与金融分析研究所得出结论，到2030年可提供直接还原级品质铁矿石的现有项目储备供应能力为每年4100万吨至2.13亿吨（能源经济与金融分析研究所2022a）。其中，4100万吨的下限是指基于那些到2030年极有可能实现的项目，而上线的估计则包含了有可能实现的项目。其他预测认为，到2030年最大供应量为1.4亿吨（IIMA 2021）。鉴于新铁矿石开采项目的建设时间较长，不太可能在2030年前实现所有可能的项目。因此，我们估计到2030年，只要能够积极推进，每年增加1亿吨到1.25亿吨的直接还原级优质铁矿石供应量是一个雄心勃勃的目标但可实现的目标。



创新的氢基炼钢路线可缓解直接还原级球团瓶颈带来的压力

还有一些创新的氢基直接还原铁路线不需要使用直接还原级球团矿。例如，直接还原铁 - 熔炼炉 - 转炉路线可以使用传统的高炉级球团矿，其铁含量只需 62% 至 65%。第一家商业规模的直接还原铁 - 熔炼炉 - 转炉工厂的合同已经签订（蒂森克虏伯，2023 年）。目前 2030 年项目储备量为年产量为 700 万吨。除钢铁制造商外，铁矿开采公司如必和必拓同福蒂斯丘与普瑞梅塔尔斯合作，也在开发和测试电熔炉解决情景，以便使更多铁矿品位可用于直接还原铁的炼钢路线（必和必拓 2023；普瑞梅塔尔斯 2022）。将部分已宣布的直接还原铁 - 电弧炉的投资转向直接还原铁 - 熔炼炉 - 转炉投资，将有助于缓解直接还原级球团矿瓶颈的压力。

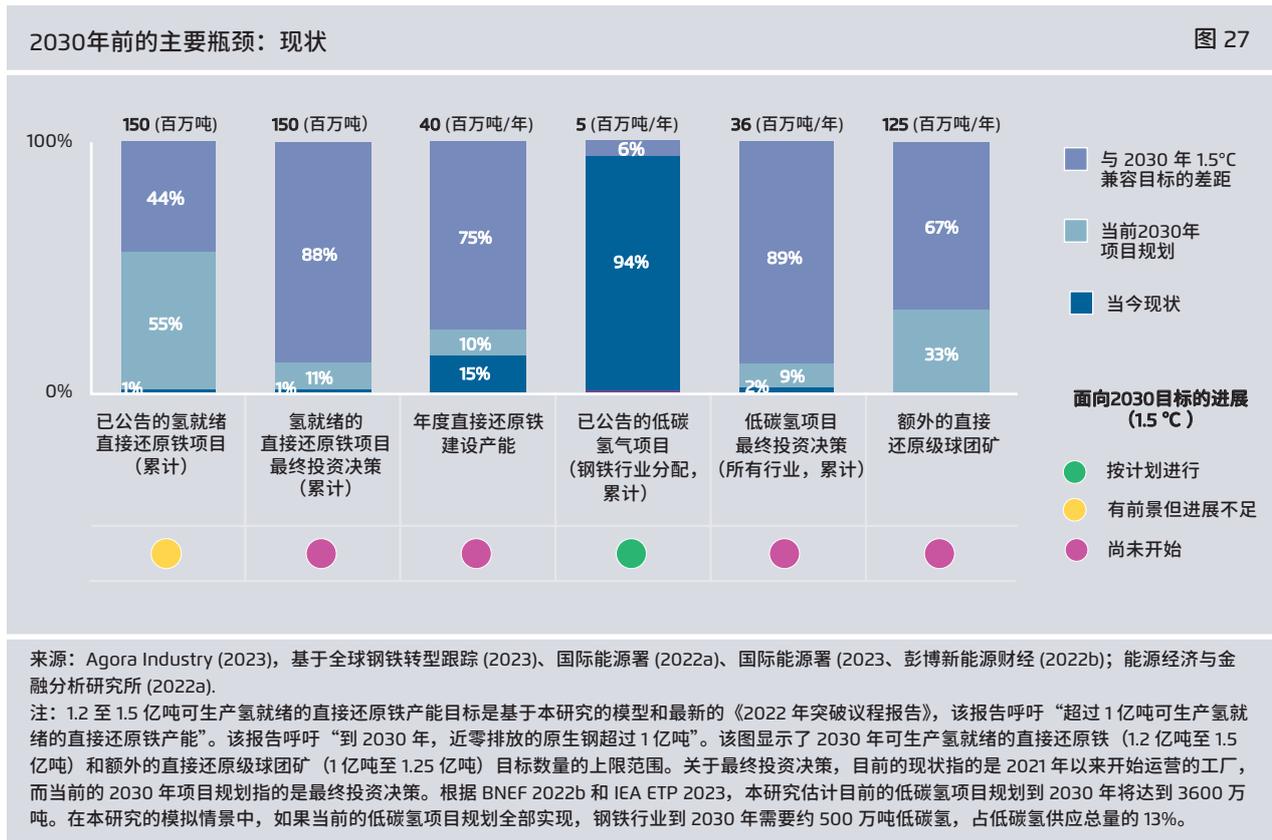
此外，基于流化床反应器的创新氢基直接还原铁路线正在研发中，未来可以使用更多品位的铁矿石（Metso Outotec 2021；浦项制铁 2022；普瑞梅塔尔斯 2022）。目前预计该技术路线将在 2030 年左右实现商业化。

铁矿石选矿是增加直接还原级球团供应的另一个关键选项

增加直接还原级铁矿石供应的另一个主要解决方案是铁矿石选矿（能源经济与金融分析研究所 2022b）。铁矿石开采公司可以建立铁矿石选矿设施，将低品位铁矿石提升到直接还原级品位。

从目前的角度来看，要解决这一瓶颈问题，可能需要同时依靠所有三种解决方案。

14 实现 1.5°C 兼容的钢铁转型瓶颈是可控的，但需要政府和行业采取联合行动加以解决。



实现 1.5°C 温控目标兼容的钢铁脱碳途径是可能的，但需要政府和行业采取一致行动来解决关键瓶颈。具体而言，如果全球钢铁行业要走上 1.5°C 兼容的钢铁脱碳道路，就必须同时制定技术挑战（即直接还原铁部署、低碳氢供应和直接还原级球团矿）的解决方案和有利于低碳炼钢的监管框架。到 2030 年，我们估计需要增加 1.2 亿吨到 1.5 亿吨的直接还原铁产能，才能生产出“超过 1 亿吨近零排放的原生

钢”，这在《2022 年突破性议程》报告（国际能源署 / 国际可再生能源署 / 联合国高级别会议）中被列为 2030 年与 1.5°C 兼容的潜在目标。²⁹ 图 27 首次尝试衡量实现这一目标的进展情况。

29 2022 年突破性议程报告并未指出哪些技术将有助于实现这一目标。根据我们的技术分析 (Agora/WI/Lund, 2024)，我们认为直接还原铁很可能是在 2030 年之前能够显著提升初级炼钢脱碳能力的唯一关键技术。

为实现 2030 年 1.5°C 兼容性目标，需要采取紧急行动解决若干瓶颈问题

氢就绪的直接还原铁项目公告：在本研究进行时，钢铁公司已宣布到 2030 年将发展 8400 万吨氢就绪的直接还原铁产能，这相当于 2030 年目标上限的 56%。如果直接还原铁项目公告继续保持过去几年的发展势头（2021 年和 2022 年平均为 3300 万吨/年），那么到 2020 年代中期就可以实现该类别的 2030 年目标。现状：有希望，但进展不足。

氢就绪的直接还原铁最终投资决策 (FID)：低碳钢铁技术的最终投资决策是衡量钢铁转型实际进展的关键指标之一。这需要钢铁公司和投资者对低排放钢厂的运营有充分信心。这些运营条件在很大程度上取决于建立有利于低碳钢铁生产、能够应对高成本的监管框架（见解 15）和上述其他瓶颈。截至本研究进行时，中国已建成一座具备商业规模的氢就绪的直接还原铁工厂，并将宣布若干氢就绪的直接还原铁工厂宣布最终投资决策。如果将这些最终投资决策计算在内，2030 年目标的 12% 将得以实现

（图 27 和 28）。因此，需要采取紧急行动，提供适当的监管框架和必要的基础设施，以促进更多的最终投资决策落实。**现状：**尚未按计划推进。

年度直接还原铁建设产能：直接还原铁工程 and 建设能力是钢铁转型的关键因素，但同时也是一个主要瓶颈。目前 2030 年直接还原铁项目储备为 8400 万吨，已经大大超过了我们对基于现有工程 and 建设能力的新厂建设潜力的估计（到 2030 年为 7000 万吨）。这是目前的一个主要瓶颈，甚至可以说是最大瓶颈。除非采取紧急行动解决这一问题，否则这将危及 2030 年目标的实现（见分析 7）。**现状：**未按计划推进。

低碳氢项目公告：低碳氢的供应是氢基直接还原铁工厂实现近零排放炼钢的关键因素。目前，2030 年的可再生低碳氢项目储备预计为 3600 万吨，占国际能源署净零排放预测的 2030 年 8900 万吨氢需求量的 40%（国际能源署，2022a）。在我们的设想中，钢铁行业到 2030 年的低碳氢需求约为 500 万吨，占 3600 万吨需求的 13%。即使仅实现当前储备的 2030 年前项目，只要氢优先用于无悔应用，这

2030项目储备：近零排放原生钢产能的已公告项目与最终投资决策

图 28



来源：全球钢铁转型跟踪（2023），Agora Industry（2023）

注：所有已宣布的项目原则上都可以是可生产氢的直接还原铁工厂。但是迄今为止，只有约 25% 的项目在设计之初就考虑到了转用可再生氢。所有其他直接还原铁工厂将使用天然气或天然气与氢的混合气，大多数公司都表示最终将 100% 转用低碳氢、一旦有了低碳氢，大多数公司都表示最终将转用 100% 低碳氢（见 Agora Industry，全球钢铁转型跟踪）。*2030 年目标指的是近零排放的原生钢根据国际能源署、国际可再生能源署、联合国 2022 年计划和作者的设想，2030 年的目标指的是在 1.5°C 兼容路径上所需的近原生零排放炼钢能力。

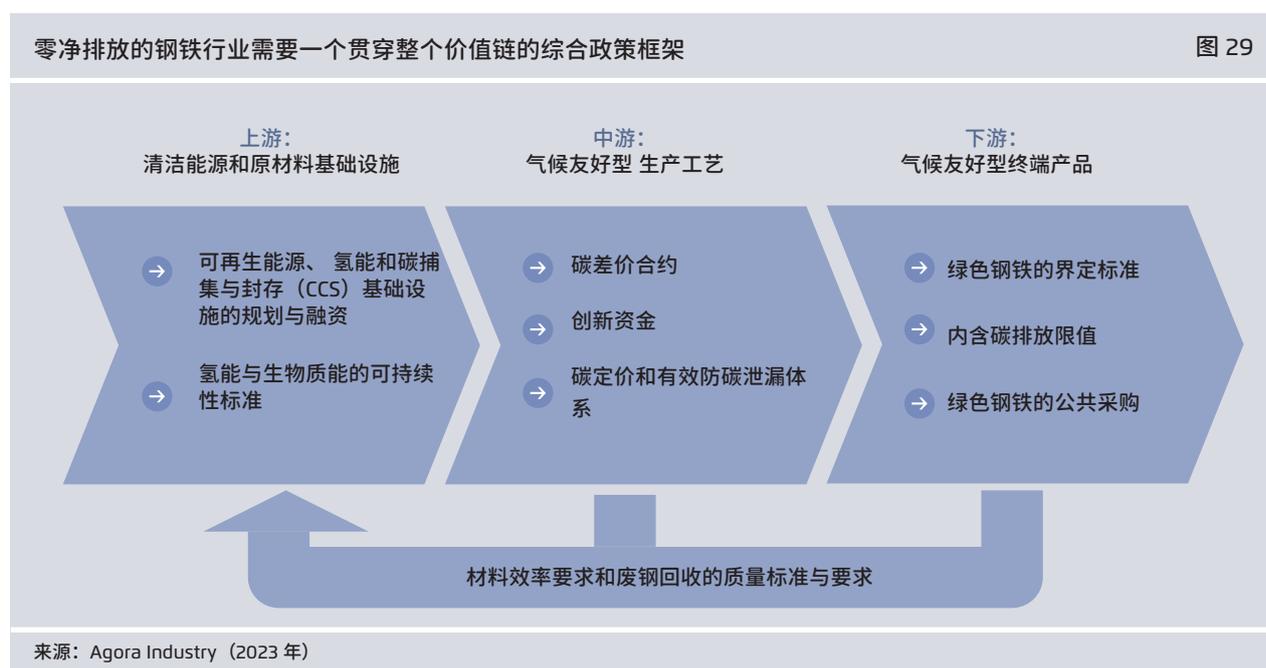
也不会成为全球钢铁转型的主要瓶颈（见解 12）。然而，除了政府出台政策鼓励氢气用于无悔应用（例如，鼓励氢就绪的直接还原铁工厂大力增加氢的使用），钢铁公司还应制定更明确的目标，说明计划在何时使用多少低碳氢。³⁰ 否则，全球充足的低碳氢供应可能无法转化为满足钢铁行业 2030 年的低碳氢需求。**现状：**按计划进行。

30 许多钢铁生产商已宣布有意建造可使用氢基直接还原铁工厂，并表示这些工厂未来可转为使用低碳氢，但未具体说明何时转为使用。低碳氢使用的具体目标有助于协调氢和相关基础设施的加速发展，跟踪实现净零排放目标的进展，并将近零排放的钢铁生产商与潜在买家联系起来（IEA，2023 年）。

低碳氢最终投资决策：目前，低碳氢产量为 60 万吨（国际能源署 2022e）。根据国际能源署的氢项目数据库，到 2022 年 10 月，约有 400 万吨产能已进入最终投资决策或建设阶段。加快引入强有力的低碳氢监管框架对于增加最终投资决策项目的数量非常重要。**现状：**未按计划推进。

直接还原级球团矿供应：直接还原级球团供应经常被认为是转向氢基直接还原铁工厂的关键要求（麦肯锡 2021；Midrex 2022b；能源经济与金融分析研究所 2022a）。然而，这是只针对直接还原铁 - 电弧炉路线而言的，而直接还原铁 - 熔炼炉 - 转炉路线不适用。虽然存在解决这一瓶颈的方案，但目前的关于直接还原级球团供应计划仅能满足我们对 2030 年估计需求量的 33%，与 2030 年的需求量相差甚远（见解 13）。**现状：**未按计划推进。

15 要实现钢铁行业的净零排放，各国政府就必须采用一个覆盖整个价值链的综合政策框架，国际协调与合作将发挥关键作用。



钢铁转型不会自行发生——需要一个全面的政策框架

要启动钢铁转型，就必须尽快具体的市场和监管条件。这些条件可以通过一个覆盖整个炼钢价值链的综合政策框架来实现（见图 29）。在上游，这需要建设清洁能源和原材料基础设施；中游，需要政策工具来支持近零排放炼钢的商业可行性；而在下游，则需要市场拉动为导向的政策型工具来释放绿铁先导市场的潜力。

上游：清洁能源和原材料基础设施

→ **可再生能源、氢气和碳捕集与封存基础设施的规划与融资：**钢铁转型需要大量清洁能源以及配套的电力、氢气和二氧化碳运输基础设施。

→ **氢气和生物质的可持续性标准：**需要对可再生和低碳氢以及真正可持续的生物质制定严格和共同认可的可持续性规则，以创造一个公平竞争的国际环境。

中游：气候友好型生产工艺

→ **碳差价合约 (CCfDs)：**碳差价合约可以弥补相对于二氧化碳密集生产方法的近零排放炼钢技术的额外成本（尤其是运营成本）。其制度设计既可以与碳定价或碳边界调整机制 (CBAM) 相配合，但也可单独实施 (Agora/WI/Futurecamp 2022)。

→ **创新资金支持：**通过提供额外资金，支持与净零目标相一致的投资，有助于支持近零排放炼钢技术的商业化和规模化推广。

→ **碳定价和有效的反碳泄漏体系：**二氧化碳定价是政策组合的关键因素，有助于将二氧化碳密集型生产方式的成本内部化。从而缩小近零排放钢铁生产与高排放生产方式之间的成本差距。为了避免钢铁企业在与其他碳定价较低或没有碳定价的国家竞争中出现碳泄漏，需要建立碳边界调整机制或类似等效措施。

下游：气候友好型终端产品

→ **绿钢定义：**共同认可的绿钢定义是释放绿色先导市场潜力的关键（国际能源署 2022g）。基于明确定义的规则，私营公司和政府可以以更高的溢价采购绿色和（或）低排放钢材，为绿色钢材创造一个不依赖持续补贴的商业模式。

→ **产品隐含碳排放限值：**对最终产品设定隐含碳排放阈值（例如近零排放材料强制要求），是为近零排放产品创造市场的另一项重要政策工具，并有助于逐步淘汰超过特定阈值的二氧化碳密集型最终产品。

→ **绿色钢铁的公共采购：**政府和其他公共机构在公共基础设施项目或公共交通等领域采购大量钢铁。政府可利用其采购权，逐步提高绿色钢材的采购比例。

2030年关键技术的二氧化碳减排成本与高炉-转炉路线的减排成本比较

图 30



来源：Agora Industry 和 Wuppertal (2023)

注：本研究成本假设基于文献综述并采用一种“折中审慎”的方法，即在成本范围中排除了最低和最高的极端数值。2030 年的关键投入成本设定如下：到厂的零碳电力成本为 50 至 80 美元 / 兆瓦时；到厂的低碳氢成本为 2 至 3 美元 / 千克；天然气成本为 13 至 31 美元 / 兆瓦时；二氧化碳的运输与封存（不含捕集成本）成本为 30 至 60 美元 / 吨。DRI= 直接还原铁；SMELT= 熔融炉；BOF= 转炉；NG= 天然气；MOE= 熔融氧化物电解；EAF= 电弧炉；H2= 氢气；CCS= 碳捕集与封存

→ **材料效率要求和废钢回收质量标准：**材料效率的潜力遍及整个价值链。有助于提高材料效率的政策手段包括：更新建筑规范减少结构钢的过高设计；采取激励措施以延长建筑物的使用寿命；制定政策鼓励运输部门转变运输方式。

在废钢回收方面，废钢往往受到铜等杂质的污染。这导致以废钢为基础的钢材质量较低，仅适用少数应用领域（降级循环）。在回收过程中，对废钢分选和破碎提出明确要求，可以避免这种情况（Agora Industry 2022）。

国际协调与合作是关键

预计到2030年，各种低排放炼钢技术的平均二氧化碳减排成本预计在每吨二氧化碳110到160美元/吨之间（Agora/WI/Lund, 2024）。预计到2030年，预计只有少数国家碳价格能达到这一水平。如果没有一个全面的政策框架，2030年前近零排放钢铁厂无法做出最终投资决策。国际协调与合作至关重要。这种协调与合作有助于：创造一个公平的国际竞争环境；降低全球钢铁转型的成本（见解5）；创造双赢机会（见解6）；有助于共同消除关键瓶颈（见解14）；最大限度地减少资产搁浅（见解11）；并确保公正的转型。正如国际能源署署长法提赫·比罗尔（Fatih Birol）在2023年1月发表《国际能源署能源技术展望报告》时所说的那样：“通过共同努力，各国的力量将大于各自力量之和”。

2025年11月，在巴西贝伦举行的《联合国气候变化框架公约》第三十次缔约方会议（COP30）期间，中国钢铁协会（CISA）与国际组织负责任钢铁（ResponsibleSteel）签署了谅解备忘录，旨在将中国碳效分级（C2F）标准与“负责任钢铁”标准建立互操作性及相互认可机制，实现低碳钢铁碳指标的转换与等效互认。此举是迈向全球绿色钢铁认证标准化的重要一步。

参考文献

Agora Energiewende (2022). *12 Insights on Hydrogen*. Online available at: 12 Insights on Hydrogen. Online available at: <https://www.agora-energiewende.de/en/publications/12-insights-on-hydrogen-publication/>

Agora Energiewende, Wuppertal Institute, Futurecamp (2022). *Transforming industry through carbon contracts (Steel)*. Online available at: <https://www.agora-energiewende.de/en/publications/transforming-industry-through-carbon-contracts-steel/>

Agora Energiewende (2023). *Breaking free from fossil gas*. Online available at: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2021_07_EU_GEXIT/A-EW_292_Breaking_free_WEB.pdf

Agora Industry, Wuppertal Institute, Lund University (2021). *Global Steel at a Crossroads*. Online available at: <https://www.agora-energiewende.de/en/publications/global-steel-at-a-crossroads/>

Agora Industry (2022). *Mobilising the circular economy for energy-intensive materials*. Online available at: https://www.agora-industry.org/fileadmin/Projekte/2021/2021_02_EU_CEAP/A-EW_254_Mobilising-circular-economy_study_WEB.pdf

Agora Industry (2023). *Global Steel Transformation Tracker*. Online available at: <https://www.agora-energiewende.de/en/service/global-steel-transformation-tracker/>

Agora Industry, Wuppertal Institute, Lund University (2024): Low-carbon technologies for the global steel transformation. *A guide to the most effective ways to cut emissions in steelmaking.*

Online available at: <https://www.agora-industry.org/publications/low-carbon-technologies-for-the-global-steel-transformation>

Agora Industry (2025). *Agora Industry (2025): Achieving climate-neutral steel by 2050. How the steel sector can shift from coal-based to clean production*. Online Available at: <https://www.agora-industry.org/publications/coal-to-clean-climate-neutral-steel-by-2050>

Australian Government (2021). *New low emissions technology partnership with the Republic of Korea*. Online available at: <https://www.dccew.gov.au/about/news/new-low-emissions-technology-partnership-with-the-republic-of-korea>

Australian Government (2022). *Resources and Energy Quarterly*. Online available at: <https://www.industry.gov.au/sites/default/files/minisite/static/ba3c15bd-3747-4346-a328-6b5a43672abf/resources-and-energy-quarterly-september-2022/documents/Resources-and-Energy-Quarterly-September-2022-Iron-Ore.pdf>

Bataille et al (2021). *Global facility level net-zero steel pathways*. Online available at: http://netzerosteel.org/wp-content/uploads/pdf/net_zero_steel_report.pdf

BHP (2023). *BHP and Hatch commence design study for an electric smelting furnace pilot*. Online available at: <https://www.bhp.com/news/media-centre/releases/2023/03/bhp-and-hatch-commence-design-study-for-an-electric-smelting-furnace-pilot>

BloombergNEF (彭博新能源财经) (2022a). *2H 2022 Hydrogen Levelized Cost Update*.

BloombergNEF (彭博新能源财经) (2022b). *A Breakneck Growth Pivot Nears for Green Hydrogen.* Online available at: <https://about.bnef.com/blog/a-breakneck-growth-pivot-nears-for-green-hydrogen/>

Borneo Post (2022). *Green Steel Project to be built in Sipitang.* Online available at: <https://www.theborneopost.com/2022/11/30/green-steel-project-to-be-built-in-sipitang/>

Carbon Brief (2018). In-depth Q&A: *The IPCC's special report on climate change at 1.5C.* Online available at: <https://www.carbonbrief.org/in-depth-qa-ipccs-special-report-on-climate-change-at-one-point-five-c/>

Ember (2023). *Why the steel industry needs to tackle coal mine methane.* Online available at: <https://emberclimate.org/insights/research/why-the-steel-industry-needs-to-tackle-coal-mine-methane/#supporting-material-downloads>

Energy Transitions Commission (能源转型委员会) (2021). *Bioresources within a Net-Zero Emissions Economy.* Online available at: <https://www.energy-transitions.org/publications/bioresources-within-a-net-zero-economy/>

Global Energy Monitor (GEM) (2022). *Global Steel Plant Tracker.* Online available at: <https://globalenergymonitor.org/projects/global-steel-plant-tracker/>

Institute for Energy Economics and Financial Analysis (能源经济与金融分析研究所) (2022a). *Iron ore quality a potential headwind to green steelmaking – Technology and mining options are available to hit net-zero steel targets.* Online available at: <https://ieefa.org/resources/iron-ore-quality-potential-headwind-green-steelmaking-technology-and-mining-options-are>

Institute for Energy Economics and Financial Analysis (能源经济与金融分析研究所) (2022b). *Solving iron ore quality issues for low-carbon steel.* Online available at: <https://ieefa.org/resources/solving-iron-ore-quality-issues-low-carbon-steel>

Intergovernmental Panel on Climate Change (联合国政府间气候变化专门委员会) (2018). *Global Warming of 1.5°C.* Online available at: <https://www.ipcc.ch/sr15/>

Intergovernmental Panel on Climate Change (联合国政府间气候变化专门委员会) (2023). *AR6 Synthesis Report (SYR).* Online available at: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>

International Energy Agency (国际能源署) (2020a). *Iron and Steel Technology Roadmap.* Online available at: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>

International Energy Agency (国际能源署) (2020b). *Methane Tracker 2020.* Online available at: <https://www.iea.org/reports/methane-tracker-2020>

International Energy Agency (国际能源署) (2021). *Net Zero by 2050.* Online available at: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>

International Energy Agency (国际能源署) (2022a). *World Energy Outlook 2022.* Online available at: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>

International Energy Agency (国际能源署) (2022b). *Iron and Steel Tracking Report.* Online available at: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel>

International Energy Agency (国际能源署) (2022c). *Global Hydrogen Review.* Online available at: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>

International Energy Agency (国际能源署) (2022d). *Global Methane Tracker 2022*. Online available at: <https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2022/overview>

International Energy Agency (国际能源署) (2022e). *Hydrogen Tracking Report*. Online available at: <https://www.iea.org/reports/hydrogen>

International Energy Agency (国际能源署) (2022f). *Hydrogen Projects Database*. Online available at: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-projects-database>

International Energy Agency (国际能源署) (2022g). *Achieving Net Zero Heavy Industry Sectors in G7 Members*. Online available at: <https://www.iea.org/reports/achieving-net-zero-heavy-industry-sectors-in-g7-members>

International Energy Agency (国际能源署) (2023). *Energy Technology Perspectives 2023*. Online available at: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023>

International Energy Agency (国际能源署), International Renewable Energy Agency (国际可再生能源机构), UN Climate Change High Level Champions (2022). *Breakthrough Agenda Report 2022*. Online available at: <https://www.iea.org/reports/breakthrough-agenda-report-2022>

International Iron Metallurgy Association (IIMA) (2021). *Global Iron Ore - Outlook for DR grade iron ore: issues and challenges for the industry*. Online available at: https://www.metallurgy.org/assets/files/Public-Area/Presentations/FM-IO_210318.pdf

International Renewable Energy Agency (国际可再生能源机构) (2022a). *Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor*. Online available at: <https://www.irena.org/publications/2022/Jan/Geopolitics-of-the-Energy-Transformation-Hydrogen>

International Renewable Energy Agency (国际可再生能源机构) (2022b). *World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway*. Online available at: <https://www.irena.org/publications/2022/mar/world-energy-transitions-outlook-2022>

Iron Brand Equity Foundation (IBEF) (2022). *Iron & Steel Industry in India*. Online available at: <https://www.ibef.org/industry/steel>

Liebreich (2022). *The Clean Hydrogen Ladder*. Online available at: <https://www.linkedin.com/pulse/clean-hydrogen-ladder-v40-michael-liebreich>

McKinsey & Company (2021). *The DRI dilemma: Could raw material shortages hinder the steel industry's green transition?* Online available at: <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/the-dri-dilemma-could-raw-material-shortages-hinder-the-steel-industrys-green-transition>

McKinsey & Company (2022). *Closing Europe's green-metallurgy gap*. Online available at: <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/closing-europes-green-metallurgy-gap>

McKinsey & Company (2022b). *中国加速迈向碳中和钢铁篇：钢铁行业碳减排* Online available at: <https://www.mckinsey.com.cn/中国加速迈向碳中和钢铁篇：钢铁行业碳减排/>

Metso Outotec (2021). *Circored Fine Ore Direct Reduction - a proven process to decarbonize steelmaking*. Online available at: <https://www.mogroup.com/insights/blog/mining-and-metals/circored-fine-ore-direct-reduction-a-proven-process-to-decarbonize-steelmaking/>

Midrex (2022a). *World Direct Reduction Statistics*. Online available at: <https://www.midrex.com/wp-content/uploads/MidrexSTATSBook2021.pdf>

Midrex (2022b). *The Iron Ore Challenge for Direct Reduction On Road to Carbon-Neutral Steelmaking.* Online available at: <https://www.midrex.com/tech-article/the-iron-ore-challenge-for-direct-reduction-on-road-to-carbon-neutral-steelmaking/>

Mission Possible Partnership (可行使命伙伴关系) (2021). *The Net Zero Steel Sector Transition Strategy.* Online available at: <https://www.energy-transitions.org/publications/the-net-zero-steel-sector-transition-strategy/>

Mission Possible Partnership (可行使命伙伴关系) (2022). *Making Net Zero Steel possible.* Online available at: <https://missionpossiblepartnership.org/wp-content/uploads/2022/09/Making-Net-Zero-Steel-possible.pdf>

Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) (2022). *The ASEAN Steel Industry Development: Investment and Green Industry Challenges.* Online available at: https://search.oecd.org/industry/ind/Item_6.3_SEAISI.pdf

Paul Wurth (2022). *Coke Oven Batteries.* Online available at: <https://www.paulwurth.com/en/technology/cokemaking/coke-oven-batteries/>

POSCO (2022). *POSCO starts to design the HyREX demonstration plant.* Online available at: <https://newsroom.posco.com/en/posco-starts-to-design-the-hyrex-demonstration-plant/>

Primetals (2022). *Primetals Technologies, Fortescue und voestalpine evaluieren gemeinsam eine bahnbrechende Anlage für grüne Eisenerzeugung.* Online available at: <https://www.primetals.com/de/presse-medien/news/primetals-technologies-fortescue-und-voestalpine-evaluieren-gemeinsam-eine-bahnbrechende-anlage-fuer-gruene-eisenerzeugung>

RMI (2022). *Hydrogen Reality Check: We Need Hydrogen — But Not for Everything.* Online available at: <https://rmi.org/we-need-hydrogen-but-not-for-everything/>

Science Based Targets (科学碳目标倡议) (2022). *Steel science-based target setting guidance.* Online available at: <https://sciencebasedtargets.org/resources/files/SBTi-Steel-Guidance-draft.pdf>

Thyssenkrupp (2023). *thyssenkrupp Steel awards a contract worth billions of euros to SMS group for a direct reduction plant: one of the world's largest industrial decarbonization projects gets underway.* Online available at: <https://www.thyssenkrupp.com/en/newsroom/press-releases/pressdetailpage/thyssenkrupp-steel-awards-a-contract-worth-billions-of-euros-to-sms-group-for-a-direct-reduction-plant--one-of-the-worlds-largest-industrial-decarbonization-projects-gets-underway-163184>

Vogl et al (2021). *Phasing out the blast furnace to meet global climate targets.* Online available at: [https://www.cell.com/joule/pdfExtended/S2542-4351\(21\)00435-9](https://www.cell.com/joule/pdfExtended/S2542-4351(21)00435-9)

Wörtler et al (2013). *Steel's Contribution to a Low-Carbon Europe 2050.* Online available at: <https://www.bcg.com/publications/2013/metals-mining-environment-steels-contribution-low-carbon-europe-2050>

World Steel Association (世界钢铁协会) (2025)
World Steel in Figures Online available at: <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures/>

WV Stahl (2025). *Employment in the Steel Industry.*

博众工业转型论坛 (Agora Industry)

博众工业转型论坛是博众能源转型论坛 (Agora Energiewende) 的下属机构，致力于为德国、欧盟及全球范围内的工业气候中性转型制定相关战略与实施工具。机构秉持独立运作原则，不受任何经济利益集团和党派立场影响，其唯一使命是践行气候治理理念。

博众智合能源转型

博众智合能源转型 (Agora Energy China) 成立于 2021 年，致力于提出以科学为依据、切实可行的问题解决方案，推动中国及全球清洁能源转型并迈向气候中性目标。我们的工作重点涵盖清洁电力系统转型、工业脱碳及地区能源转型等领域。我们是博众能源转型论坛 (Agora Energiewende) 与博众工业转型论坛 (Agora Industry) 的战略合作伙伴，同时积极参与国际合作，共同推动全球净零转型进程。



扫码可下载报告

Agora Industry

Anna-Louisa-Karsch-Straße 2 | 10178 Berlin, Germany
P +49 (0)30 700 14 35-000
F +49 (0)30 700 14 35-129
www.agora-industry.org
info@agora-industrie.de

博众智合能源转型

北京市朝阳区东方东路 19 号
德国中心 0502E, 100600
www.agora-energy.com
info@agora-energy.com

