

钢铁产品碳足迹核算及报告 方法学

——基于国际实践

2024.7



RMI是一家独立的非营利组织，成立于1982年，致力于通过市场驱动的解决方案来改变全球能源系统，使其与1.5摄氏度温控的未来保持一致，并为所有人实现一个清洁、繁荣且零碳的未来。我们在全球最关键的地理区域开展工作，并与企业、政策制定者、社区和非政府组织合作，确定和推广能源系统干预措施，到2030年将至少减少50%的温室气体排放。RMI在科罗拉多州的巴萨尔特和博尔德、纽约市、加利福尼亚州的奥克兰、华盛顿特区和中国北京均设有办事处。

rmi.org



中汽碳(北京)数字技术中心有限公司(以下简称“中汽碳数字”)隶属于中国汽车技术研究中心有限公司(国务院国资委直属中央企业)，是从事推动绿色金融和碳数字技术等新型经济要素与产业高质量发展有效融合的专业机构。中汽碳数字依托中国汽车技术研究中心有限公司在汽车全价值链技术服务的专业能力及广泛影响力，以汽车生命周期的碳排放数据作为关键生产要素，依托区块链、物联网等数字技术，以“碳管理咨询”明确发展方向，以“碳数字技术开发”为手段，以“环境金融平台”为动力，立足于“产融新视角，碳索新路径，释放新动能”的创新理念，将碳足迹数字技术有机融合于价值链、信息链、产业链、创新链、供应链及管理链。中汽碳数字致力于促进绿色金融经济要素高效、科学匹配汽车产业“双碳”关键环节和关键领域，探索数字经济技术在碳排放领域的应用场景与运营模式，释放汽车产业低碳高质量的发展新动能。

作者与鸣谢

作者

Lachlan Wright、刘希元、Iris Wu、Sravan Chalasani

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

联系方式

Lachlan Wright, lwright@rmi.org
刘希元Xiyuan Liu, xliu@rmi.org
Iris Wu, iwu@rmi.org
Sravan Chalasani, schallasani@rmi.org

引用建议

落基山研究所，钢铁产品碳足迹核算及报告方法学——基于国际实践，2024，https://rmi.org.cn/insights/steel_guidance/

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

除特别注明，本报告中所有图片均来自iStock。

致谢

RMI对所有参与工作组的成员表示衷心感谢，他们为本文件中所呈现的钢铁产品碳排放核算方法学的制定贡献了他们的时间、专业知识和见解。他们的宝贵贡献对于本方法学的形成和完善起到了至关重要的作用，极大地提升了我们研究的质量。

特别感谢以下专家对本方法学中文版的形成和撰写提供的洞见、审阅与建议（机构排序不分先后，专家姓名按姓氏排序）：

落基山研究所

郭凯迪、李抒苒、李婷、李威、刘雯娟、吴昊、薛雨军

中汽碳（北京）数字技术中心有限公司

付丽、林宇、孙铎、吴金龙、于佳鑫、张逸娟、赵冬昶、赵明楠

鞍钢集团钢铁研究院环境与资源研究所

李卫东、马光宇

包头钢铁（集团）有限责任公司

班华、曹晓明、王佳薇

宝山钢铁股份有限公司

陈超、陈思、刘颖昊、孟想、宋中华、王明月、张弛

河钢集团有限公司

樊赛、李梦龙

冶金工业信息标准研究院

陈剑、王姜维

东风日产乘用车公司

董善举、李文丽、周满

上海蔚来汽车有限公司

于淼

沃尔沃汽车技术（上海）有限公司

朱峰

目录

- 作者与鸣谢.....3
- 前言7
- 1 背景.....9
 - 1.1 简介9
 - 1.2 目的9
 - 1.3 原则9
 - 1.4 基本方法10
 - 1.5 术语10
- 2 碳排放报告要求 11
 - 2.1 产品层面11
 - 2.2 固定的系统边界12
 - 2.3 比较边界内的活动和产品13
 - 2.4 铁矿石炼钢和废钢炼钢14
 - 2.5 减排技术15
 - 2.6 数据来源15
- 3 碳足迹核算要求 16
 - 3.1 碳足迹核算程序16
 - 3.2 原材料输入的比例16
 - 3.3 碳排放强度与废钢比的关系17
 - 3.4 减排技术的定义和标准20

3.5 出口产品(中间产品和共生产品)	21
3.6 数据来源	24
3.7 原始数据比例	28
尾注	30
附录	32

前言

钢铁行业是我国制造业中碳排放量最大的行业，其碳排放约占全国的15%，是推进碳达峰、碳中和目标的重点行业。同时，钢铁产品作为被使用最为广泛的工业原材料之一，其低碳转型对于制造业、建筑业等下游行业的气候目标实现也至关重要。随着全球应对气候变化的进程不断深化，作为全球第一大钢铁生产国、消费国和进出口国，我国钢铁行业的低碳转型及其对下游产品隐含碳排放的影响必将成为全球供应链运转和贸易往来中的重点关注和考量因素。在产品层面进行的碳足迹核算和报告，将帮助钢铁及其下游企业掌握产品的碳排放水平，并通过采取措施减少供应链中的碳排放，加强上下游协同降碳；而相关方法学的科学性和一致性，也将为实现碳排放水平的透明和可比，以及为钢铁及下游企业积极参与国际绿色贸易提供有力支撑。

2023年11月，国家发展改革委、工业和信息化部、国家市场监管总局、住房和城乡建设部、交通运输部等部门联合印发《关于加快建立产品碳足迹管理体系的意见》，强调了产品碳足迹管理体系对绿色低碳转型的促进作用，以及对碳达峰碳中和的有力支撑，并将推动碳足迹国际衔接与互认作为重点任务之一。2024年5月，生态环境部等十五部门联合印发《关于建立碳足迹管理体系的实施方案》，要求完善国内规则、促进国际衔接，建立统一规范的碳足迹管理体系，推动规则体系兼具中国特色和国际影响，被视为我国产品碳足迹管理体系建设的“任务书”和“施工图”。

发布重点产品碳足迹核算规则标准是提及的主要任务之一，而钢铁是优先聚焦的重点产品之一。目前，国际上关于钢铁产品层面碳足迹的核算方法已经存在一定的共识，世界钢铁协会（World Steel Association）、责任钢铁（ResponsibleSteel）和国际标准化组织（ISO）等机构都已经积极开展相关工作。中国的钢铁产量占到世界一半以上，要编写具有现实意义的核算方法，就必须深入理解中国钢铁行业的生产实践和行业现状，一方面立足国情做好国际通用方法的本地化工作，同时积极推动相关规则的国际互信，并在相关规则制修订的过程中积极提升中国的贡献度。

为此，落基山研究所深入对比并研究了国际上较为主流的钢铁产品层面碳足迹核算和报告方法，力求在这些方法间寻求最大共识，并在此基础上结合我国实际情况编写了《钢铁产品碳足迹核算和报告方法学——基于国际实践》（以下简称《方法学》）。为了验证《方法学》在国内的适用性，落基山研究所与中汽碳数字先后召开“钢铁产品碳核算研讨会”及“中国汽车产业链低碳行动计划研讨会”，与40余名钢铁-汽车产业链专家探讨《方法学》的核算方法及关键指标，并与四家钢企、四家车企开展了针对主要车用钢铁产品的碳核算与数据传输测试工作，论证了依据《方法学》支持低碳钢铁产品采购的可操作性。

具体而言，《方法学》内容遵循如下三个关键原则：

- (1) 鼓励使用原始数据以提高核算结果准确性；
- (2) 设定基准碳足迹边界以增强不同钢铁产品间碳核算结果的可比性；
- (3) 以市场为导向以促进低排放钢铁产品市场的发展。在指标披露上，本《方法学》引入了“比较边界排放”、“废钢比”、“原始数据比例”、“减排技术标签”、“共生产品抵扣”等关键原则和指标，可有效反映钢铁企业的降碳努力及减排成效，并为车企采购低碳排放钢材提供充分依据。在数据传输上，采用“探路者框架（Pathfinder）”中的气候指标兼容的数据格式，促进国内国际数据标准的衔接。

为了在与国际标准接轨的同时充分体现中国特色，《方法学》的中文版本根据中国钢铁行业的发展特征做了针对性设计。在比较边界的选取上，国内钢企除了选取从“摇篮”到“热轧”的比较边界，还可以将“铸造（粗钢）”选取为可替代的终点，既包含了我国钢铁冶金工艺中主要的排放密集型工序以保证产品核算的完整性，又避免

了不同钢铁产品在热轧环节因碳排放差异过大而不可比的问题。

落基山研究所希望通过《钢铁产品碳足迹核算和报告方法学——基于国际实践》，为我国的碳足迹核算规则标准制定工作提供参考，助力我国的产品碳足迹管理体系建设以及在全球气候治理中的积极贡献。同时，我们也希望《方法学》能提供足够的信息，帮助广大需求侧企业更好地理解 and 掌握钢铁产品的碳足迹，并在采购决策中更有针对性地推动钢铁行业的低碳转型，为我国“双碳”目标的实现作出贡献。

1. 背景

1.1 简介

钢铁对现代社会的运转至关重要。它不仅广泛应用于建筑、交通、基础设施和机械领域，而且对于能源转型关键技术的发展也至关重要，例如风力涡轮机。

钢铁行业是温室气体 (GHG) 排放的主要来源之一。ⁱ 2020年，钢铁生产直接导致了约26亿吨的二氧化碳排放，占全球二氧化碳排放量的约7%。此外，钢铁行业用电产生约10亿吨的二氧化碳间接排放¹。目前的钢铁生产过于依赖化石燃料用于供能以及还原铁矿石。因此，必须对生产方法进行根本性的改变，以降低钢铁行业的碳排放。

由于钢铁产品的广泛使用，关注气候变化的终端用户（如风力涡轮机和电动汽车制造商）对低碳排放钢铁产品的需求非常大。为了满足这种需求，钢铁供应链中的参与者需要提供透明且可比的碳排放信息，确保采购商购买到的是低碳排放的钢铁产品，使得采购决策推动钢铁行业的低碳转型。

本方法学提供了关于钢铁产品碳足迹核算及报告的详细信息。钢铁企业可以使用这些信息来满足碳排放报告相关要求，同时应对市场对低碳排放钢铁的需求。

1.2 目的

本方法学的目的是为钢铁企业提供一种报告碳排放量的方法，以促进低碳排放钢铁的市场发展，并推动必要的投资以实现钢铁行业的低碳转型。

本方法学所介绍工具的广泛实施成果如下：

1. 通过提供足够的信息，将需求侧与供给侧联系起来，从而加速低碳排放钢铁生产技术的部署。
2. 提高透明度，采用一种能在不同地区和不同钢铁产品间保持一致的核算方法，进一步提供钢铁生产碳排放信息。
3. 使钢铁消费者能够购买碳排放信息明确的钢材，并向其展示碳绩效水平。
4. 识别与认可碳绩效方面领先同行的钢铁企业，尤其是在新技术应用方面领先的企业。

1.3 原则

本方法学是基于RMI“Horizon Zero”项目的广义碳排放核算原则而制定的。宗旨是在产品层面报告具体资产生产的碳排放数据。这是因为产品碳足迹是购买决策的基础，而本方法学旨在提供相关信息以支持采购决策。

ⁱ 在本方法学中，“排放”一词用作全球变暖潜能 (GWP) 的简称（以二氧化碳当量的形式计量）。

为了实现产品层面碳排放披露，本方法学采用了三项关键原则：

- 1. 鼓励使用原始数据(Primary data)ⁱⁱ——尽可能的情况下，碳足迹计算应基于供应链中参与者提供的一手数据。
- 2. 设定基准碳足迹边界——钢铁企业应针对一个固定的核算边界（即包含一致的工艺生产流程）报告碳排放量，以实现不同钢铁产品之间的可比性。
- 3. 以市场为导向——确保碳核算报告为决策提供了必要信息，以促进低碳排放钢产品市场的发展。

1.4 基本方法

在钢铁产品的碳足迹核算方面，全球已取得大量的工作成果。具体而言，世界钢铁协会(WorldSteelAssociation)《生命周期清单方法》²为计算钢铁从“摇篮”到“大门”的碳足迹提供了基础，而责任钢铁 (ResponsibleSteel)《标准钢铁产品的温室气体 (GHG) 2.0》为上游生产过程常见点的碳排放计算提供了额外的方法指导，用于对大多数钢铁产品进行基准碳绩效的评估。本方法学用于指导钢铁企业如何核算披露碳排放结果,并要求提供额外的碳绩效指标，以帮助采购方更好地明确和评估产品的碳足迹，并使他们的采购决策能够促进钢铁行业的低碳发展。

1.5 术语

根据世界工商理事会Pathfinder (WBCSD) 的框架要求，本方法学使用不同的术语来区分要求、建议和允许的选项。

术语	定义
“必须”	表示企业在应用RMI钢铁方法学时需要遵循该等规则。
“应”	表示建议遵循该等规则。
“可”	表示允许或可接受该选项。

ⁱⁱ 通过直接调查或实验获得的原始数据（生产商自己调查或供应商提供），这是统计数据的直接来源，一般称之为原始数据或一手数据(first-hand data)

2. 碳排放报告要求

根据本方法学，报告钢铁产品碳排放数据需要满足以下四个关键要求：

1. 产品碳足迹层面——应根据单个生产场所 (individual site) ⁱⁱⁱ 核算和报告产品的碳排放信息。
2. 固定核算边界——无论钢铁企业是否拥有或控制这些生产流程，应该报告固定边界范围内所有工艺流程的碳排放数据。
3. 供应链透明度——提供基于废钢输入源（如消费前和消费后部分）的相关信息、基准碳足迹相较于1.5°C目标的位置（参见第3.3节）以及减排技术标签（参见第3.4节），这些额外碳绩效信息可以帮助进一步理解从摇篮到大门的碳足迹。
4. 数据来源——披露总碳足迹核算中基于原始数据计算的排放量的比例（参见第3.7节）³。

根据这些关键要求，每个产品报告的数据如下：

- 完整系统边界：包括固定比较边界内的所有生产活动，以及后续加工过程的生产活动（如轧制、酸洗、镀层等），即从摇篮到大门的核算边界。“大门”的划定取决于钢铁企业所核算产品的最终生产工序（参见第3.1节）。
- 废钢比：用于生产产品的废钢比例（参见第3.2节），在可能的情况下，进一步细分为消费前废钢和消费后废钢。
- 基准碳足迹：从摇篮到基准点的固定的核算边界的碳足迹（基准点为粗钢或者热轧钢，钢铁企业需要报告使用的比较点）——这些数据可用于对产品进行基准碳绩效评估（参见第3.3节，钢铁企业或采购企业都可使用）。
- 原始数据比例：用于核算完整系统边界内总碳足迹的原始数据的比例（参见第3.7节）。
- 碳收益：钢铁企业还应报告完整系统边界外的碳排放影响（收益/抵扣），与整体碳足迹分开报告（参见第3.5节）。

这些数据为钢铁采购方提供必要的信息来理解钢铁企业在低碳转型所做的减排努力。

2.1 产品层面

本方法学的核心之一是从单个生产场所/供应链报告产品层面（例如热轧钢卷、钢筋和型钢等半成品钢材）的碳排放信息。这样报告的目的是使碳排放信息随着产品同步传递。随着产品在供应链上的移动（和转化），碳排放信息可以累加，从而使供应链中的每个参与者都能够准确了解所购买和销售的产品的隐含的碳排放。

ⁱⁱⁱ 单个生产场所 (individual site): 指特定地址的单个生产厂房或车间。在特定情况下，当多个生产设施中有同一原材料流转或共享中间产品时，单个生产厂房也可以指代临近的多个生产设施。

为实现这一目标，钢铁企业应报告各个生产场所/供应链上生产的钢铁碳排放强度。如果单个生产场所存在不同的平行独立的工艺生产线，钢铁企业可以分别报告每条生产线上钢铁产品的碳排放强度，旨在确保当某条生产线采用明显不同的低碳生产技术时，钢铁企业能够展现该生产线上产品的更优的碳绩效水平。

2.2 固定核算边界

固定核算边界定义了总碳排放必须报告的所有工艺流程，无论钢铁厂内是否囊括整合了这些工艺过程。这种方法解决了两个关键问题：

- 1. 组织碳（企业碳）的披露因纵向整合的程度而有所不同。**在某些情况下，纵向整合可以延伸到碳排放密集型的上游工艺流程，例如烧结和焦炭生产。如果钢铁企业控制这些工艺流程，排放量将计入范围1（根据Greenhouse Gas Protocol⁴）。在没有垂直整合的情况下，相同的排放量将计入范围3，因此可能不会被报告，这给比较钢铁行业产生的温室气体排放（GHG）排放带来了挑战。
- 2. 范围1、2和3的界定很可能随着时间的推移变得更加灵活，进一步限制可比性。**例如，随着氢冶金发展而更多使用直接还原铁（DRI）技术，直接还原铁的相关碳排放可能计入范围1（使用现场生产的绿氢制备DRI）、范围2（外购电力制氢）或范围3（使用由第三方生产的直接还原铁）。

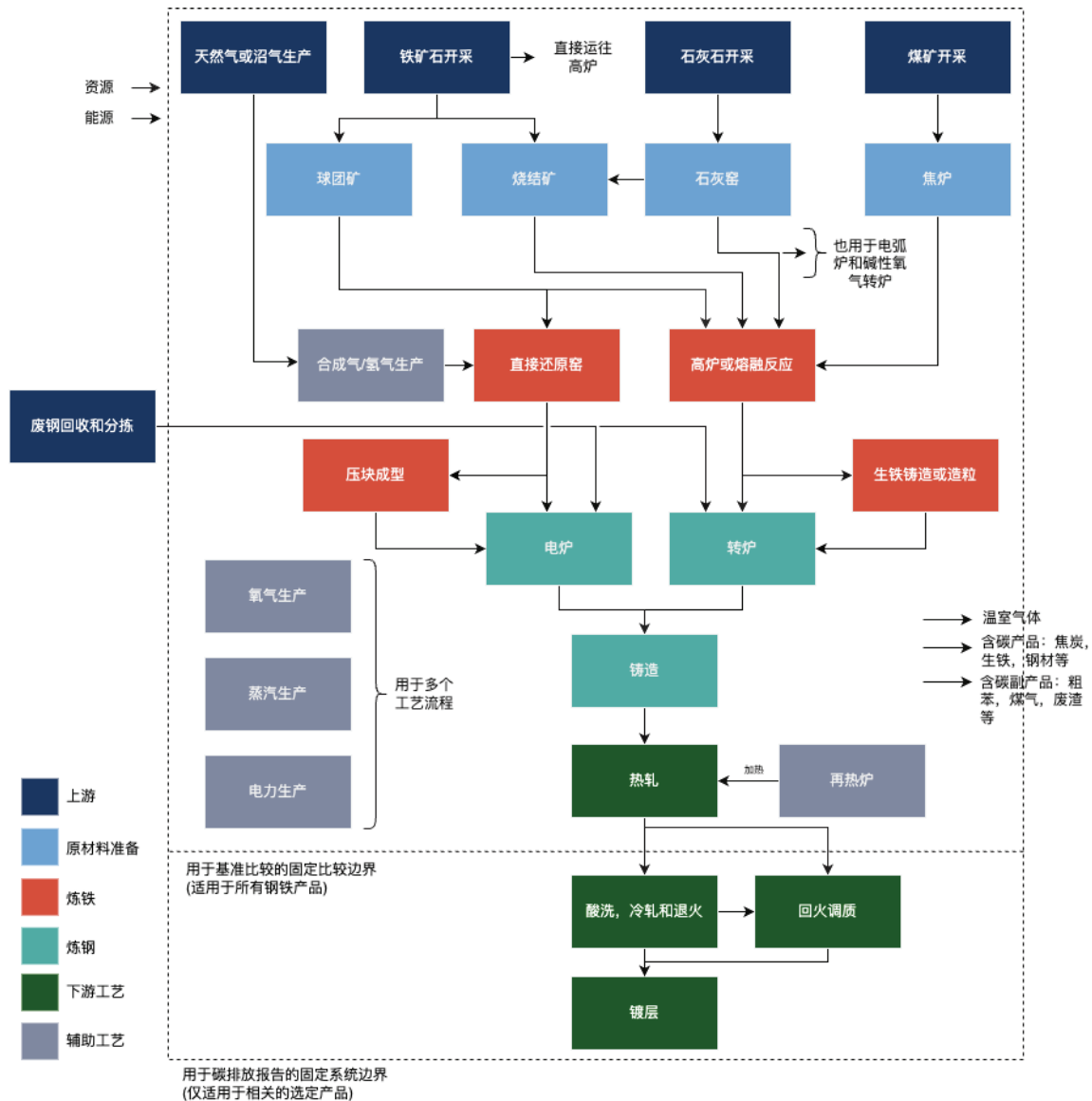
图1展示了碳排放报告的边界。为了能比较不同钢铁产品之间的碳足迹，应报告涵盖比较基准点及之前全部上游的碳排放并参照1.5°C IEA NZE（国际能源署净零排放情景）或其他减排路径进行对标（参考第3.3节）。比较基准点可设置在粗钢（即连铸后）或热轧后（见图1）。使用固定的比较边界来报告碳排放有以下优势：a. 明确包含钢铁生产过程中所有碳排放密集工艺流程（如炼铁）；b. 了解钢铁生产使用的主要减排技术；c. 为钢铁产品对标行业减排目标（如IEA 净零排放（NZE）情景）提供依据。

大部分钢铁产品（>95%）是经过热轧工序⁴，对大多数钢铁产品而言，热轧过程是最后一个相对常见且直接消耗大量燃料用于加热的过程。因此，可将热轧作为比较基准点。将热轧作为比较基准点还具有以下优势：如简化副产气体碳收益核算（因为大多数副产煤气会在热轧过程中再利用）；纳入独立电弧炉（EAF）的直接燃料排放使用情况，并与许多钢铁产品（如热轧钢卷、型钢、钢筋等）的摇篮到大门边界相一致，从而减少了一些钢铁企业需要报告两个单独碳足迹的负担。将热轧作为比较基准点还意味着针对加热步骤的创新技术可以在基准碳足迹中得到体现，例如近终型连铸，而不仅仅在总碳足迹中体现。

如ResponsibleSteel 2.0标准所述，另一个可接受的比较基准点是连铸后，即粗钢，例如方坯、坯料和板坯。使用粗钢作为基准点仍可以涵盖最主要的排放过程（如炼铁、烧结、焦化等），并适用于所有钢铁产品。

粗钢和热轧钢都可以作为比较基准点，同时用于对标的1.5°C IEA 净零排放（NZE）情景下包含的工序亦可以根据实际比较边界进行调整（详见第3.3节和附录）。

图1: 钢铁产品碳足迹的系统边界与比较边界



2.3 比较边界内的活动和产品

图1中提出的边界与表格1和表格2中提供的北美行业分类系统代码 (NAICS) 和国际商品统一分类代码 (HS) 代码相一致。

表格1: 用于比较边界内的钢铁活动NAICS代码

NAICS代码	活动
212210	铁矿石开采
331110	钢铁生产和铁合金制造
331210	采购钢材制造的钢铁管道
331221	轧制钢铁型材制造
331511	铸铁
331513	钢铁铸造（不包括投资）
332111	钢铁锻造

表格2: 用于比较边界内的钢铁产品HS代码

HS代码	产品
72.06	铁及非合金钢的锭坯或其他初级形式
72.07	铁或非合金钢的半成品
72.08	宽度在600毫米及以上的铁或非合金钢平板轧材，经热轧，但未经包覆、镀层或涂层。

2.4铁矿石炼钢和废钢炼钢

钢铁生产分为铁矿石（开采）和废钢（回收）为原料的两种生产路径。铁矿石炼钢相比于废钢炼钢本质上更加地耗能，因为需要从铁矿石中除去氧元素（这个过程称为还原）。目前，铁矿石炼钢路径主要使用煤炭作为能源和还原剂。高能耗过程和使用高碳能源导致钢铁行业90%以上的直接碳排放来源于铁矿石炼钢⁵。

当前，约三分之一的钢铁是通过回收废钢生产的⁶。废钢的供应取决于接近报废的钢铁制品的可利用率。在过去的25年中，随着中国和其他国家城市中心的建设，大量的铁矿石转化为钢铁制品，其中大部分潜在的废钢来源仍存在于现有基础设施中，废钢保有量高。国际能源署（IEA）⁵和可行使命伙伴关系（MPP）⁷等组织发布的最新模型表明：至2050年，在全球层面，废钢保有量将无法完全满足预计的钢铁生产的需求量。例如，在IEA 净零排放（NZE）情景下，到2050年废钢只能满足全球钢铁的需求的一半⁶。由于废钢供应受限，仅靠废钢炼钢无法实现钢铁行业的净零目标。因此，需要针对铁矿石路径采用新的减排技术进行炼钢。

为了应对这一挑战，钢铁企业应披露铁矿石和废钢作为原料在生产过程中的使用比例（参见第3.2节）。由于废钢供应量是动态变化的，应结合使用的废钢量考虑所生产钢铁的排放强度。一个基于废钢输入的滑轨（sliding scale）可以用来比较使用不同废钢比例的钢铁产品碳排放。滑轨可以是“静态滑轨”，即固定阈值，如ResponsibleSteel提出的阈值⁸，其中可接受的最低排放标准将根据新收集到的数据进行更新，如从等级1升级到等级2；也可以是“动态滑轨”，即根据钢铁行业的碳预算（如IEA NZE）每年更新，这是金融机构在《可持续钢铁原则》（Sustainable STEEL Principle）中使用的方法，科学碳目标倡议（SBTi）也建议将其用于钢铁企业的碳绩效评估。滑轨旨在平衡

钢铁行业降碳的两个关键手段——使用废钢减排和部署铁矿石路径炼钢的新技术。[第3.3节](#)提供了关于滑轨的实施细节。

2.5 减排技术

钢铁行业低碳转型的模型,如IEA NZE和MPP STS(可行使命伙伴关系-行业转型战略),确定了几种清洁能源和减排技术,可用于实现钢铁生产的减碳,包括:

- 碳捕集和封存——钢铁生产过程仍基于含碳化石燃料,但产生的碳排放被捕集并永久封存在地质层中。
- 碳捕集和利用——与上述手段相似,但捕集的碳排放被用于生产替代性含碳产品(例如甲醇)或替代当前二氧化碳的应用情景(例如强化采油技术)。
- 绿氢——钢铁生产过程使用可再生能源电解产生的氢气。
- 可再生能源——钢铁企业在钢铁生产过程中(如电弧炉、轧钢机等)直接使用可再生能源(如太阳能和风能)。
- 生物质——化石燃料被生物质生产的替代产品(如木炭)取代。

钢铁企业可能会根据当地情况在不同地点部署各种技术(例如绿氢的供应、太阳能/风能的容量或是否存在适合封存二氧化碳的位置)。每种技术也存在一定的风险,例如,使用生物质可能对土地利用产生间接影响,或者碳捕集和封存技术可能无法充分解决上游甲烷泄漏的问题。因此,采购方可以根据所希望采用的减排技术来调整采购策略。为了方便实现这一点,钢铁企业应根据[第3.4节](#)中的阈值/定义,相应地对产品进行技术标记。一个钢铁产品可以拥有多个技术标签。

2.6 数据来源

为了确保基于碳排放水平的采购决策能推动对减排技术的投资,钢铁企业需尽可能使用原始数据,即生产现场直接收集、检测的活动数据和生产现场检测、计算获得的排放因子(即范围1和范围2的碳排放数据)。钢铁企业应报告计算碳排放使用的原始数据。这需要钢铁企业向供应商请求获取用于估算碳排放的原始数据使用情况。关于原始数据的定义和公司计算原始数据比例的方法在[第3.7节](#)中给出。

如ISO 20915的第4.4.2节所建议,数据的时间覆盖范围应为整个年度,以避免任何季节性变化的影响。地理覆盖范围应为生产钢铁产品的单个生产设施;这可以包括为该生产设施提供中间产品的多个分散的生产场所。

3. 碳足迹核算要求

3.1 碳足迹核算程序

碳足迹核算需依据ISO 14044和ISO14067-2018标准，ISO 14044标准提供了进行生命周期评价（LCA）的指导说明，其中包括定义细化的生命周期清单（LCI）。这种细化的过程级数据规范为产品级排放计算奠定了基础。针对系统边界（参见图1）内定义的每个过程（例如焦化、烧结等），应按照ISO14044:2006的第4.3节制定清单。清单应尽可能地规范（即，包括输入和输出的度量），以通过质量/能量平衡对数据进行验证检查（根据ISO 14044:2006的第4.3.3.2节）。如不可行，则可以直接使用质量/能量平衡的方法来计算过程的输入/输出（例如根据输入碳的质量计算生产过程的二氧化碳输出）。在计算过程中，基于过程来编制生命周期清单，以便使用过程细分法来避免将排放分配给副产品或共生产品。

正如ISO14044:2006第4.3节所指出，应收集所有主要输入（包括能源、原材料和辅助材料）和输出（包括产品、共生产品、废弃物、向大气、水和土壤释放的物质以及其他环境因素），以整体了解过程/产品系统对环境的影响。通常情况下，应收集定义系统（或过程）边界内的所有输入/输出。ISO20915的第5.4节提供了钢铁产品系统相关数据的更多细节。

3.2 原材料输入的比例

用于生产钢铁的原材料输入来自铁矿石或废钢。废钢通常可以从以下几个方面获得：

- 消费前废钢——在制造过程中作为废弃物被回收利用的材料（例如，冲压过程中的余料）。消费前废钢进一步分为以下几类：

内部废钢——在同一场地产生并重新使用的废钢。

加工废钢（外部废钢）——由钢铁厂外部的下游制造过程产生的废钢。

- 消费后废钢——从报废的含钢产品中回收的废钢（例如报废汽车上钢铁的回收利用）。

为了使钢铁行业的发展与相关减碳路径目标（例如IEA NZE或MPP STS）保持一致，最小化生产前废钢的产生并最大化生产后废钢的回收。利用消费后废钢替代铁矿石生产钢铁可以获得最大的环境效益。然而，基于消费后废钢的使用量来定义不同原材料输入比例可能具有挑战性，因为消费前废钢和消费后废钢可能会在回收和分类过程中被混合在一起。

需要统计在给定钢铁生产场地中使用的不同原材料输入的比例，以向采购方提供有关回收材料使用比例的信息，并作为输入量用于开展基准设定/对比分析相关的核算（参见第3.3节）。

废钢类型（如上所述），通常是根据场地工序的边界来定义的。然而，由于不同钢铁厂之间纵向整合程度不同（例如，可能包括或不包括产生废钢的轧制流程），因此上述废钢定义可能会导致混淆，例如，从现场热轧回收的废钢可能会被排除在废钢比计算之外，而从独立轧钢厂购买的废钢可能会被纳入计算。

为了避免混淆，消费后废钢以及任何来自粗钢工序后（参见图1）的消费前废钢（即连铸后产生的废钢），均为废

钢，应计入废钢比的计算。铁矿石路径的比例是根据所购矿石原材料输入（即铁矿石、球团矿、烧结矿、生铁和直接还原铁/热压铁块）的质量和铁含量计算。因此，加入废钢比例的计算如下：

$$F_s = \frac{M_s}{(M_s + \sum_{i=1}^N M_p \times x_p)}$$

其中， M_s 为废钢质量， M_p 和 x_p 分别为每种输入的矿石原材料的质量和铁含量。

在上述计算中，任何粗钢工序之后产生的废钢都包含在内，这意味着对于某些钢铁企业来说，一部分加工废钢（例如现场冷轧过程产生的废钢）将纳入其中。这种方法确保了回收材料的可比性，无论钢铁厂工序的纵向整合水平如何，均可与基准评估所用的废钢定义保持一致（参见第3.3节）。

为了进一步了解所使用的废钢情况，钢铁企业在可能的情况下还应报告消费前废钢和消费后废钢的使用比例。在这种披露中，消费后废钢是指寿命结束时从产品中回收利用的所有钢铁，而其他废钢将被视为消费前废钢。

3.3 碳排放强度与废钢比的关系

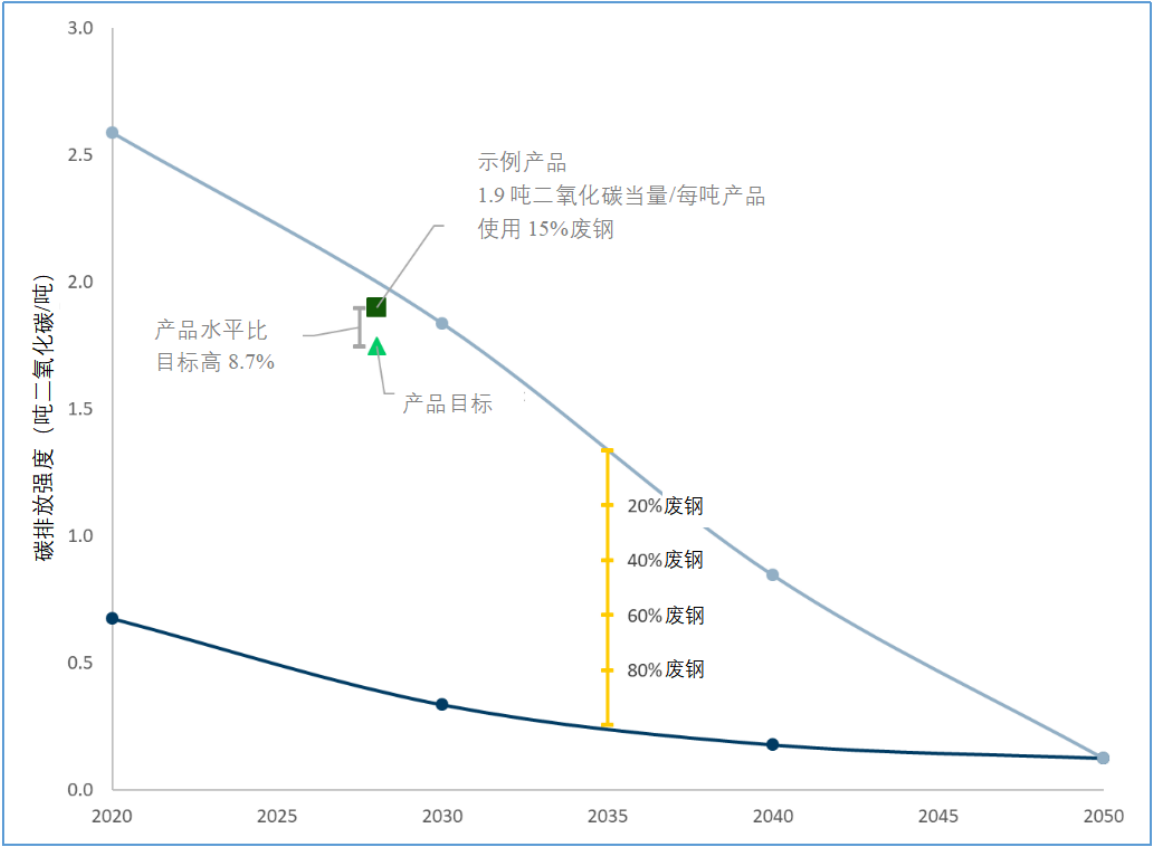
在分析钢铁产品的碳排放强度时，应考虑到其使用的废钢量，原因如下：

- 与铁矿石炼钢相比，废钢炼钢所需的能源（和产生的碳排放）较少；
- 废钢供应将不足以满足2050年的钢铁总需求，因此，转向废钢炼钢不应成为钢铁行业实现减碳的唯一途径。

滑轨的设计旨在创建一个框架，以同时平衡和激励增加废钢使用量和部署新的低碳排放钢铁生产技术这两种手段。滑轨已在企业层面上通过科学碳目标倡议（SBTi）和《可持续钢铁原则》（Sustainable Steel Principles）（贷款机构要求钢铁企业碳排放披露的框架准则）得以实施（或提议阶段）。在产品层面上，该方法应用于ResponsibleSteel框架，并获得国际能源署（IEA）认可。滑轨有两种形式，动态和静态。

动态滑轨涉及计算符合钢铁行业1.5°C目标（例如在IEA NZE情景下）的总碳预算（参见附件5），包含铁矿石生产和废钢生产两条路径。为了有效平衡鼓励增加废钢使用量和部署低碳排放钢铁生产技术这两种减碳途径，采用高于平均水平的废钢生产碳排放将总预算拆分（本文采用根据国际上国家级电网排放数据和钢铁生产数据估算出的80分位点的碳排放数据，详见附录）。使用高于平均水平的废钢生产排放量作为分割点，使废钢使用比例更高的产品相对更容易实现减排目标，从而鼓励增加废钢的使用。

图2: 基于废钢比衡量产品碳绩效的动态滑轨
(包含上游, 粗钢生产和热轧工序的排放)



*之后将根据中国钢铁企业预测的减排路径图对此图进行更新

基于动态滑轨, 可将产品的碳排放强度与当年低碳排放钢目标值进行比较。目标值为两个轨迹的加权平均值 (按废钢比加权), 其中上方滑轨是基于100%铁矿石生产的减排路径, 下方滑轨是基于100%废钢生产的减排路径。对于图2中所示的示例产品, 其与动态滑轨目标值进行比较的计算过程如表格3所示。

表格3: 动态滑轨下的示例计算

参数	数值	来源
生产年份	2028	-
产品碳排放强度	1.9吨二氧化碳当量/吨	钢铁企业的报告
废钢含量	15%	钢铁企业的报告
初级钢的强度目标	1.99吨二氧化碳当量/吨	IEA NZE
再生钢的强度目标	0.40吨二氧化碳当量/吨	IEA NZE
产品特定目标	$1.75 = (15\% \times 0.40 + 85\% \times 1.99)$	计算
与当年目标水平的对比	$\text{高出} 8.7\% = (1.90 - 1.75) / 1.75$	计算

静态滑轨采用相同的概念，但通过等级划分（而不是偏离目标值百分比差异）来衡量产品碳排放强度与减排路径定义的减排目标之间的差距，详见图3，其中展示了由ResponsibleSteel提出的静态滑轨，IEA NZE 2028年目标（按照动态滑轨中，0%-100% 废钢比加权平均得到的所有目标值连成的绿线），以及图3和图2中相同示例产品的关系。在静态滑轨中，示例产品将位于1级碳绩效。在IEA NZE情景下，到2028年，低碳排放钢产品平均基准值需要处于2级碳绩效及以上以实现1.5°C目标，所以示例产品未达到目标水平（基准值）。

图3: 基于废钢比衡量产品碳绩效的静态滑轨

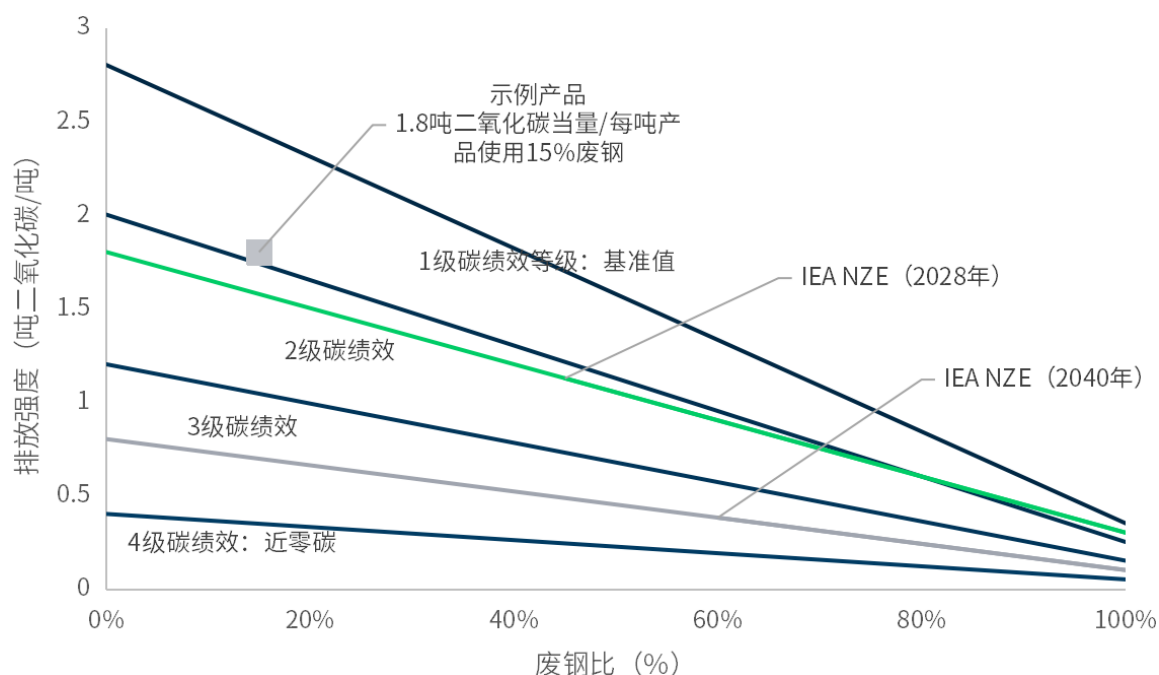


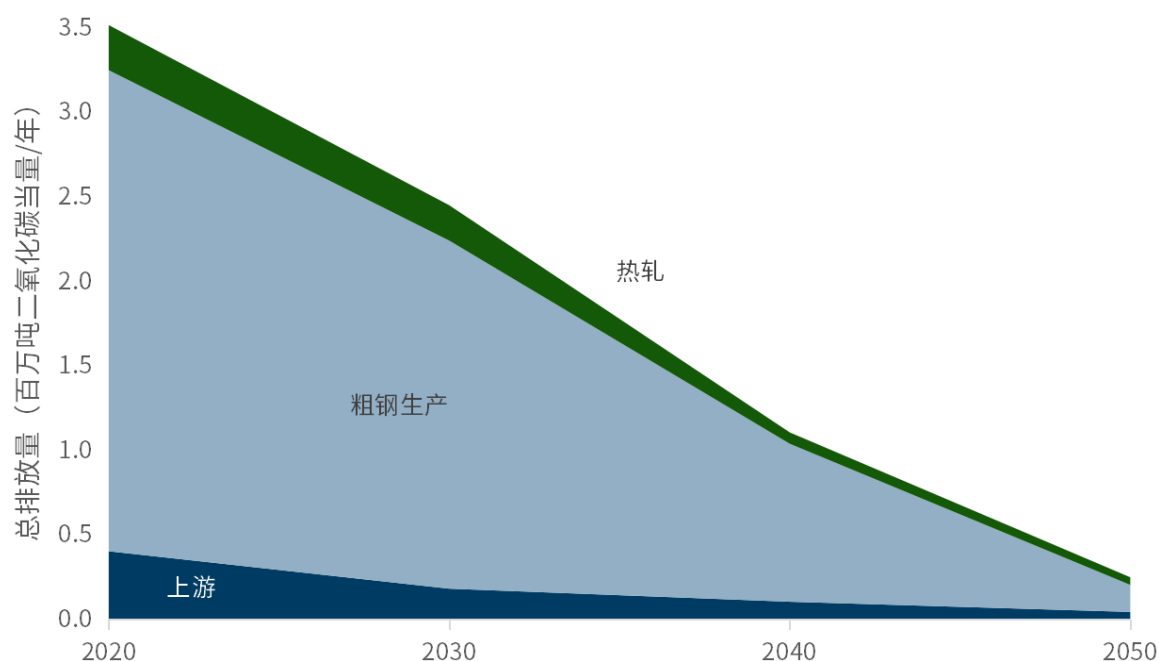
图2和图3展示了动态和静态滑轨方法之间的联系，即图3中的IEA NZE (2028) 目标是通过图2中将相关年份的铁矿石路径生产排放目标（对应于0%废钢点）和废钢路径生产排放目标（对应于100%废钢点）按照加权平均计算出一条直线来定义的。每种方法都有其优点和缺点，而不同组织会对这两种方法有不同偏好（例如，动态滑轨与1.5°C目标连接更为紧密，原则上需每年更新，而静态滑轨提供更高的稳定性，因为等级划分在一段时间内不会发生变化）。鉴于两种方法采用了相同的宗旨（即旨在同时激励增加废钢使用量和部署新的低碳排放钢铁生产技术的两种减碳措施），任何一种方法都能有效评估产品的碳排放强度。

根据钢铁企业披露的产品碳足迹和废钢含量，静态或动态滑轨均可应用。用于比较不同钢铁产品的碳排放阈值所包含的工序范围需与比较边界保持一致（即粗钢或热轧产品）。对于IEA NZE目标而言，这需要估计钢铁行业排放量报告中未包括的碳排放数据，具体包括：

- 与原材料和燃料开采、加工和运输相关的上游排放（包括逸散性甲烷的排放）。
- 与电力使用相关的碳排放（数据来源于IEA报告中电力行业的碳排放）。
- 在粗钢生产工序后产生的碳排放（由比较边界确定）。

图4展示了与比较边界一致的钢铁行业减碳路径（计算细节和假设见附录）。将整体排放阈值根据80%分位点分为初级钢阈值和再生钢阈值（阈值计算详情见附录）。

图4: IEA NZE钢铁产品的减碳路径 (依据不同比较边界)



请注意，在比较不同钢铁产品时，与滑轨目标点或目标等级的对比不应是唯一的考核指标。这种方法可以在一定程度展示相关碳排放的变化，但采购方仍应考虑所使用的相关减排技术（参见第3.4节），以及整体碳足迹（因为这可能会纳入后续产品层级或公司层面的碳预算报告）和消费后废钢的比例。

3.4 减排技术的定义和标准

钢铁企业报告产品应用的减排技术时需符合表格4中对各项技术的定义。其中的门槛阈值百分比是为了确保钢铁企业需将该减排技术运用于商业规模（而不是试点/示范）才能获得减排标签，而其减排效益仍会在报告的碳足迹中体现。

表格4: 减排技术标签和标准

减排技术	定义
碳捕捉和封存	适用于在炼铁或炼钢现场或在后续炼铁燃料生产现场（例如，通过蒸汽甲烷重整生产氢气）部署的碳捕捉系统，其设计应确保能够捕捉50%以上的碳排放（基于点源）。由此产生的二氧化碳流必须永久储存在与石油生产无关的地质储层中。
碳捕捉和利用	适用于在炼铁或炼钢现场或在后续炼铁燃料生产现场（例如，通过蒸汽甲烷重整生产氢气）部署的碳捕捉系统，其设计应确保能够捕捉50%以上的碳排放（基于点源）。由此产生的二氧化碳流用于制造含碳产品（例如，甲醇、使用二氧化碳固化的混凝土等），或用于替代现有的二氧化碳用途（例如，提高原油采收）。
可再生氢	适用于可再生氢供应占铁矿石还原所需能量20%以上的情况，或满足50%以上热能需求在与铁还原无关的其他工序（例如球团、热轧等）的加热过程中。可再生氢定义为通过水电解产生的氢气，其中电解所用电力可以直接来自可再生能源，也可以通过电网结合项目特定的市场机制采购可再生能源（例如，购电协议、公用电力事业绿色费率等）。
可再生能源	适用于可再生能源在炼铁或炼钢现场满足50%以上电力需求的情况。可再生能源可以直接来自可再生能源，也可以通过电网结合项目特定的市场机制采购可再生能源（例如，购电协议、公用电力事业绿色费率等）。
生物质	适用于生物质供应占铁矿石还原所需能量20%以上的情况，或满足50%以上热能需求在与铁还原无关的其他加热工序以及现场炼钢过程（例如热轧、废钢熔化等）中。生物质与可持续生物能源证明绑定。（例如，生物质原料对可持续土地利用的影响）。

3.5 出口产品(中间产品和共生产品)

由系统边界内流程产生的但未用于最终钢铁产品的相关排放量不得计入钢铁产品总碳足迹。根据ISO 14404 (第4.3.4.2节), 计算出口产品相关排放量的方法为：

- **过程细分法 (Process subdivision):** 将分配单元进一步划分为两个或多个子过程，并收集与这些子过程相关的环境数据，避免分配。
- **系统扩展法 (System expansion):** 在无法避免分配时，根据共生产品的实际用途，抵扣其所替代的产品的环境负荷^{iv}。

^{iv} 在实践中，几乎总是通过替换环境负荷来应用系统扩展，请参阅<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frsus.2021.692055/full>以了解进一步的背景。

过程细分法最容易应用于中间产品(如焦炭、球团矿等),因为用于生产这些产品的过程已经明确定义。对于钢铁生产过程中的共生产品(如高炉水渣、焦炉煤气),这种细分无法实现,因此需要使用系统扩展法。

在任何一种情况下,如果出口产品的采购方在计算钢铁产品碳足迹时未使用分配给出口产品的等效碳足迹,则有可能出现排放量碳泄漏(即由于企业重复计算排放量或排放收益导致的国家层面漏算)的情况。这种错配最容易出现在共生产品(例如,高炉水渣用作水泥熟料)计算中,共生产品通常被采购方视为零排放原料,但钢铁企业已经为其分配了相应的碳足迹(例如,高炉水渣替代水泥熟料的环境负荷后的剩余排放),随即出现碳排放漏算的情况。为了避免这种情况,钢铁企业应确保将钢铁产品碳足迹(PCF)中分配的共生产品的碳足迹传递给共生产品的采购方(例如,与采购文件一起的书面披露文件)。为了最大限度地减少这一要求的负担,只有当出口产品碳足迹达到ISO 20915⁹中定义的截断法(cut-off method)(即占整体碳排放比例超过5%)时,才应传递其碳足迹给下游购买企业。

除了披露出口产品的碳足迹外,钢铁企业还应确保系统扩展计算中使用的替代产品环境负荷尽可能准确。理想情况下,要实现这一点,须开展出口产品的相应生命周期评估研究,该研究将确定其生产所替代的产品。如果无法做到这一点,钢铁企业应与采购方协商,以确定替代产品的环境负荷或使用平均排放因子。

3.5.1钢铁生产中的中间产品

如第3.1节所述,可在钢铁生产过程中使用并出口的中间产品(intermediate product)的生产排放不应包括在产品的总碳足迹中。这是为了确保报告的碳排放量仅为生产该钢铁产品所产生的实际排放量。

如ISO 14044所述,中间产品计算的首选方法是过程细分法(以避免需要进行分配),这涉及到仅用于生产中间产品的过程定义的环境数据,识别并将其剥离,例如,如果生产特定钢铁产品的钢厂内的球团厂生产并出口一部分球团矿,那么与这些卖出的球团矿相关的碳排放量不应包括在本钢铁产品的碳足迹中,而是计入在消耗这部分输出的球团矿的钢铁产品的碳足迹中。

根据过程细分方法,钢铁企业应确定中间产品制造过程中的碳排放强度。这涉及到确定系统边界内生产中间产品所需的所有碳排放(例如,对于球团矿,将涉及铁矿石开采和球团化)。然后,通过所选流程的排放量之和除以中间产品的总量来确定排放强度。表格5中提供了该计算的示例。

表格5: 中间产品抵扣计算示例

参数	数值
球团矿总产量 (公吨)	4.0
生产球团矿的总排放量 (公吨二氧化碳)	0.5
球团矿的排放强度 (吨二氧化碳/吨球团矿)	0.125 (0.5/4.0)
输出球团矿 (公吨)	1.0
现场总排放量 (公吨二氧化碳)	5.625
扣除相关数值后的输出球团矿排放量 (公吨二氧化碳)	0.125= (0.125*1.0)
扣除相关数值后的现场总排放量 (公吨二氧化碳)	5.5

3.5.2 钢铁生产中的共生产品

钢铁厂会生产一些共生产品(by-products), 如粒化高炉矿渣粉(GGBFS)和煤焦油, 这些副产品可以用于其他产品的生产供应链。例如, 粒化高炉矿渣粉可以替代水泥熟料, 以降低水泥的隐含碳排放。

这些共生产品通常被采购部门视为具有零排放负担(例如, 混凝土制造商假设粒化高炉矿渣具有零隐含排放特性)。因此, 采购部门会鼓励使用这些共生产品以降低排放量。

ISO 14404和20915均建议对共生产品运用系统扩展法(假设无法进行过程细分)。也可以使用替代方法(如基于物理关系进行分配), 前提是这些方法已根据ISO 14044: 2006的要求进行记录并证明有效。系统扩展方法基于识别与共生产品(例如, 粒化高炉矿渣的熟料)类似的功能产品的环境负荷, 其环境负荷(例如, 熟料)和共生产品(如粒化高炉矿渣灰)的排放强度之间的差值将应用于钢铁产品生产碳足迹。

这种方法避免了在钢铁碳足迹计算中使用分配方法, 但不足之处在于系统边界之外(例如, 在水泥生产过程中)发生的减排也被包括在钢铁产品碳足迹中。在比较不同钢铁产品时, 基准碳足迹(例如, IEA NZE目标或Responsible Steel阈值)不应包括边界外的这些排放影响。因此, 任何基于系统扩展的计算均不应包括在比较边界的产品碳足迹计算中。系统扩展计算应包括在完整系统边界的碳足迹中(根据第3.5节所概述的披露要求)。

与优化共生产品相关的碳排放量(即附件1所示系统边界中未包含的流程)无需包含在钢铁排放量计算中。例如, 与高炉矿渣粒化和研磨相关的碳排放量无需包括在钢铁产品碳足迹中。鼓励钢铁企业向共生产品采购方提供其优化流程的排放量数据。

3.5.3 能源输出

在一些炼钢流程中, 特别是炼焦和高炉流程, 会产生含有氢气、一氧化碳和二氧化碳的废气, 这些废气可以燃烧产生热量或电力。在大多数综合钢铁厂中, 这些废气会与其他生产工序提供能量输入(例如, 预热进入焦炉的煤)。

许多钢铁生产企业还通过自有设施利用这些废气发电, 或将这些废气输出到附近的第三方发电商, 然后从第三方购买电力。在某些情况下, 钢铁生产设施可能是电力净输出(使用上述两种方式的任何一种)。在这种情况下, 钢铁企业也可以将系统扩展方法应用于电力输出, 该方法类似于上述共生产品的处理方法, 即

$$E = V_e \times (EF_{off-gas} - EF_{displaced})$$

其中, E 是电力净输出排放量, V_e 是输出电力量(兆瓦时), $EF_{off-gas}$ 是用废气发电的排放因子(吨二氧化碳当量/兆瓦时); $EF_{displaced}$ 是钢铁企业输出所取代的电力的排放因子。

钢铁厂废气发电的排放强度取决于气体的混合情况。例如, 与高炉煤气(260千克二氧化碳/吉焦)相比, 焦炉煤气的碳排放密集度较低(44千克二氧化碳/吉焦)。对于具有转化效率(37%)的典型混合(例如, 60%的高炉煤气和40%的焦炉煤气), 产生的发电排放强度约为1.7吨二氧化碳/兆瓦时。这比全球电网(0.438吨二氧化碳/兆瓦时)的排放强度高出约3倍, 也比燃煤发电厂的排放强度(约1吨二氧化碳/兆瓦时)高¹⁰。因此, 净输出电力的收益可能为负(即增加钢铁的产品碳足迹), 因为被取代的电力的排放强度较低。因此, 最大限度地减少废气产生和最大限度地利用现场废气供暖(导致净电力输入)的策略将最大限度地降低钢铁产品碳足迹。

如第3.5节所述, 归果型生命周期评价(consequential LCA)是确定取代电力来源的理想选择, 在无法获得consequential LCA数据的情况下, 钢铁企业应使用:

1. **国家/地区电网平均值**——可以使用该国家或地区的平均电网排放量（例如，使用IEA数据）。
2. **全球电网平均值**——如果无法获得上述数据源，则可使用IEA确定的全球电网平均排放量。

钢铁企业不得使用能源性证书（绿证）来抵扣废气产生的任何部分电力（现场使用或输出）。这些机制只能用于从电网物理输入的电力。与其他共生产品一样，任何与电力相关的系统扩展计算均不应包括在比较边界报告的产品碳足迹中。

3.6 数据来源

3.6.1 直接排放因子

直接排放源是指钢铁生产过程中现场使用的燃料（固体、液体或气体）。在可能的情况下，钢铁企业应根据测量结果确定其使用的燃料的排放因子。如果无法获得燃料排放因子的原始数据，可以使用表格6和7中提供的各种燃料类型的平均排放因子作为缺省值，或者可以根据测量的燃料碳含量来确定排放量（假设可完全转化为二氧化碳）。

表格6: 固体燃料源的排放因子

温室气体排放源	单位	排放因子（吨二氧化碳当量/单位）	数据来源
焦煤	吨	2.69	IPCC，2019年 ¹¹
炼铁煤 ^v	吨	2.98	IPCC，2019年 ¹¹
烧结/转炉煤	吨	2.64	IPCC，2006年 ¹
蒸汽煤	吨	2.48	IPCC，2019年 ¹¹
木炭	吨	3.48	IPCC，2006年 ¹
石油焦	吨	3.26	IPCC，2019年 ¹¹
电炉煤	吨	3.28	IPCC，2019年 ¹¹

表格7: 液体和气体燃料源的排放因子

温室气体排放源	单位	排放因子（千克二氧化碳当量/单位）	数据来源
柴油	升	2.69	IPCC，2006年 ¹
液化石油气（LPG）	升	1.62	IPCC，2006年 ¹
天然气	吉焦	56.27	IPCC，2006年 ¹

^v指直接用于高炉、直接还原炉和熔融还原流程的煤。

这些排放因子是指与每种燃料的碳含量转化为二氧化碳相关的排放量和除二氧化碳外的温室气体排放量。每种燃料的生产流程也涉及排放，最显著的是逸散性甲烷排放，特别是在煤炭和天然气生产中。鉴于燃料生产流程包含在固定边界内，亦须报告这些排放量的数据。如果可能，燃料供应商确定甲烷排放量，并将这些信息提供给钢铁企业。有几种方法可以用于确定逸散性甲烷排放，燃料供应商应使用现有标准（如适用于天然气的MiQ标准或适用于煤炭的EPA方法）来确定甲烷排放量^{12,13}。如果不可能，钢铁企业可以使用第3.6.4节中提供的标准排放因子来确定逸散性甲烷排放量（注意，根据第3.7节，使用这些因子会减少原始数据比例）。

炼钢流程中还使用了其他几种含碳的直接原料。与燃料一样，在可能的情况下，应测量这些原料的碳含量，以确定其排放因子。如果无法获得，可以使用表格8中的平均排放因子。如果无法获得IPCC数据，各个来源的其他温室气体排放量均可基于EPA排放因子中心或其他因子库的值进行估计¹⁴。

表格8: 其他输入物的排放因子

GHG排放源	单位	排放因子（吨二氧化碳当量/单位）	数据来源
石灰石	吨	0.44	IPCC，2019年 ¹¹
白云石	吨	0.48	IPCC，2019年 ¹¹
EAF电极	吨	3.7	IPCC，2019年 ¹¹

3.6.2 电力排放因子

温室气体核算体系企业标准协议提供了两种确定电力排放因子的方法：基于区域位置(location-based)和基于市场(market-based)。基于区域位置的排放因子是使用消费者所在电网的平均排放量来确定的，而基于市场的排放因子考虑了消费者可以用来抵减电力排放量的合同机制(如绿证)。温室气体核算体系企业标准(GHG protocol)鼓励各公司使用这两种方法报告基于电力的排放量，因为每种方法都提供了不同的信息。

根据本方法学进行的碳足迹报告，两种方法都是可以接受的。这两种方法的组合使用有可能导致碳泄漏(重复计算收益)，从而导致报告的总排放量偏低。例如，连接到低排放电网的设施使用基于区域位置的方法，而连接到高排放电网的另一个设施则使用基于市场的方法，二者均可声称输入了低排放的发电源。为解决此问题，应使用剩余组合排放因子(Residual mix emission factor)，即电网所有发电源的平均排放因子(剔除通过市场机制单独出售的发电源的排放因子)。如电力公司(或其他来源)提供此数据，钢铁企业应使用电网的剩余组合排放因子，即剔除外售可再生能源后的电网平均排放因子，计算外购电的排放量。本方法学鼓励电力公司广泛提供这些数据。

关于电力排放，钢铁企业的独特之处在于可使用炼钢流程中产生的副产煤气(如焦炉煤气、高炉煤气等)发电。通常，钢铁企业会通过以下方式之一使用这些废气发电：

- 由钢铁企业持有和运营现场发电。
- 满足外售自产电力/热力资格的钢铁企业，会将副产煤气出售给位于钢铁厂附近的独立发电企业(Independent Power Provider)，然后从独立发电商处回购电力。

对于向独立发电商输出副产煤气的钢铁企业，需要通过计算确定钢铁厂是电力净供应商还是消费者(对于现场发电，可能无需进行该计算，因为电网的电力输出或输入会被计量)。

钢铁企业应测量副产煤气输出量，并将其与测量的能量和转化效率相结合（由独立发电商报告）进行计算。如果无法实现这一点，可以使用表格9中的值。输出副产废气产生的电力总量应为各种废气的能量乘以输出废气的体量再乘以转化效率的总和。

表格9: 电力计算的默认值

参数	单位	数值	数据来源
焦炉煤气能量	兆焦/标准立方米	22.3	US EPA, 2022年 ¹⁴
高炉煤气能量	兆焦/标准立方米	3.43	US EPA, 2022年 ¹⁴
转化效率	%	37	IEA, 2020年 ⁸

如果副产煤气输出产生的电力总量超过总用电量，钢铁企业应报告其场地设施使用的所有燃料的排放（因为这已包含副产煤气后续燃烧的排放）。相反，如果废气产生的电力总量小于总用电量，则应将基于位置的因子应用于电力净输入（再次根据现场使用的燃料报告废气燃烧产生的排放量）。

请注意，钢铁企业不得使用基于市场的排放因子来减少废气发电产生的排放量值。

3.6.3间接排放因子

间接排放主要指输入原材料自身生产加工过程中的碳排放，而不是来自燃料燃烧或其它含碳燃料使用或反应产生的碳排放¹⁵。因为这些排放通常不在钢铁生产商的生产范围之内，间接排放因子可以用来估计这些间接排放源的排放量。

在可能的情况下，钢铁企业应向运营这些流程的供应商或消费者获取相关原材料的实际排放因子（注意，在多层供应链中，可能不是钢铁企业的直接供应商）。在原始数据无法获得的情况下，可以使用背景排放因子作为缺省值。但使用背景数据会导致总碳足迹计算中的原始数据比例下降（见第3.7节）。

通常钢铁企业不直接运营的流程可能包括为炼铁和炼钢制备原料所需的流程，如炼焦和烧结，以及一些排放密集型下游流程，如热轧。这些流程产生的排放量来源于燃料使用（主要用于加热）、电力消耗和一些直接过程排放（例如，用石灰石生产石灰）。如果这些工序在钢铁企业的生产范围以外，应该优先向供应商获取这些材料或过程的具体排放数据。在原始数据无法获得的情况下，可以参照表格10中提供的背景排放因子。

表格10: 间接加工排放因子

流程	单位	排放因子 (吨二氧化碳当量/单位)	数据来源
铁矿石开采	吨铁矿石	0.013	Ferreira et Leite, 2015年 ¹⁶
煤开采	吨煤	0.04	Mutchek, 2016年 ¹⁷
焦炭生产	吨焦炭	0.3	IPCC, 2019年 ¹¹
烧结	吨烧结矿	0.21	IPCC, 2019年 ¹¹
球团化	吨球团矿	0.19*	IPCC, 2019年 ¹¹
生铁生产	吨铁水	1.43*	IPCC, 2019年 ¹¹
直接还原铁 (天然气) 生产	吨直接还原铁	0.7	IPCC, 2019年 ¹¹
煅石灰生产	吨石灰	0.75*	IPCC, 2006年 ¹
煅烧白云石生产	吨白云石	0.86*	IPCC, 2006年 ¹
产氧	吨氧气	0.09	Chisalita, 2019年 ¹⁸
铸轧	吨HRC	0.084	Backes, 2021年 ¹⁹
天然气生产	吨甲烷	0.6	NETL, 2019年 ²⁰

* 源文件中并未提供这些流程的非二氧化碳温室气体排放量数据, 但这些排放量被视为微小可忽略。

对于涉及提取相对低品位铁矿石并需要更多初步矿石加工 (即研磨和浓缩) 的铁矿石开采, 其开采流程的排放量可能高达0.09吨二氧化碳当量/吨铁矿石。

煤炭开采的排放因子也可能因所使用的开采流程而异。通常, 煤矿开采中消耗的大部分能源是电力, 这意味着碳排放强度可能会因电网的能源组合不同而大幅变化。此外, 逸散性甲烷也是煤矿开采和天然气加工运输过程中产生的重要温室气体。然而, 这些逸散甲烷的排放量通常依煤矿种类、开采情况、和运输方式而异, 并且难以直接监测或计算。因此煤矿的甲烷排放量不包括在煤矿开采流程的排放因子中, 天然气加工和输送产生的甲烷排放量也不包括在天然气生产流程的排放因子中。[第3.6.4节](#)对这些逸散性甲烷排放量进行了讨论。

为了将天然气从质量单位转换为能量单位, 可以假设一公吨天然气相当于55.58吉焦 (GJ) 的能量和1470.3立方米。由于过程排放因子的高度可变性, 与所有背景数据源一样, 本方法学鼓励钢铁企业直接向供应商索取排放量信息。

3.6.4逸散性甲烷

逸散性甲烷是指在煤矿开采过程中以及沿天然气供应过程中, 释放到大气中的甲烷气体。在煤炭开采过程中, 逸散性甲烷主要来自于煤层中的甲烷, 其具体释放量与多种因素有关, 如开采的煤炭类型、开采深度和开采方法。煤矿逸散性甲烷排放因子的典型值如表11中所示, 在实际操作中, 排放值的变化幅度可达±15%²¹。

天然气供应链中的逸散性甲烷可以来自生产、加工、传输和分销等多个阶段。供应给最终消费者的天然气中, 约有1.3%至2.2%以逸散性甲烷的形式逃逸到大气中。表11提供了天然气逸散性甲烷排放因子的平均值, 该值基于1.7%的平均逸散量计算²⁰。

在表格11中, 提供了甲烷作为温室气体在20年和100年的全球变暖潜能值。根据IPCC第五次评估报告, 甲烷20年的全球变暖潜能是二氧化碳的84倍, 100年的全球变暖潜能是二氧化碳的28倍¹。为了与最新的IPCC报告保持一致, 钢铁生产商在报告排放量时应使用100年的全球变暖潜能值计算。

表格 11: 逸散性甲烷排放因子

流程	单位	逸散性甲烷 (立方米/单位)	排放因子 (吨二氧化碳当量/单位)		数据来源
			20年间全球变暖潜能	100年间全球变暖潜能	
煤——露天开采	千克煤	0.006	0.34	0.11	Kholod, 2020年 ¹⁵
煤——地下开采	千克煤	0.019	1.08	0.36	Kholod, 2020年 ¹⁵
天然气	立方甲烷	0.017	1.43	0.48	Littlefield, 2017年 ²²

逸散性甲烷的实际排放量有较大的可变性, 这意味着这些平均排放因子可能低估了特定供应链的真实排放量。方法学建议燃料生产商和钢铁生产商可以利用甲烷监测技术和相关监测数据获得甲烷排放的真实信息。

3.7 原始数据比例

如上所述, 在许多情况下, 由于工艺类型和燃料来源的不同, 使用平均排放因子作为缺省值可能导致总排放量和产品碳足迹的计算不准确。

为了鼓励使用原始数据, 方法学要求同时报告用于核算产品总碳足迹的原始数据比例, 即计算完整系统边界的总碳足迹时使用原始数据计算的碳排放量占总排放量的比例。其具体计算如下:

原始数据比例 (%) =
$$\frac{\text{基于原始数据计算的排放量}(CO_2e)}{\text{总排放量}(CO_2e)}$$

以上方法与世界可持续发展工商理事会 (WBCSD) 的Pathfinder框架下要求的原始数据比例计算一致²³。

过程排放是由活动数据 (原料、燃料的消耗量) 乘以对应的碳排放因子计算获得。在考量过程排放的排放量是否为“原始数据”时, 生产商需要确保活动数据和排放因子均来自原始数据来源。在大多数情况下, 生产商应当已具有活动数据的原始来源, 如生产过程用的燃料、能源、原材料等的消耗量。因此, 排放因子的选择基本决定了排放量的原始数据比例。其他关于原始数据和背景数据的具体定义见表格12。

表格12: 原始数据和背景数据定义

活动类型		原始数据定义	背景数据定义
燃料	燃烧/使用	标准排放因子（WSA、IPCC、EPA）或测得的碳含量	-
	生产	供应商数据	第3.6.3节所述的排放因子或Pathfinder所列的数据库
其他材料输入		供应商数据	第3.6.1节所述的排放因子或Pathfinder所列的数据库
外购热力		供应商数据	基于假定燃料热源的排放因子
电力		• 厂内发电原始数据 • 供应商（电力公司）数据 • 区域性^{vi}基于区域位置的电网排放因子或基于市场的（符合GHG范围2附加文件质量标准）电网排放因子	国家或全球电网排放因子

^{vi} 请注意，如果连接的电网覆盖整个国家，则国家电网因子可被视为原始数据。

4. 尾注

¹ *Iron and Steel Technology Roadmap*, International Energy Agency (IEA), 2020. <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>.

² “Life Cycle Inventory Methodology Report”, World Steel Association (WSA), 2017. <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Life-cycle-inventory-methodology-report.pdf>

³ *Pathfinder Framework: Guidance for the Accounting and Exchange of Product Life Cycle Emissions*, WBCSD, 2021. <https://www.wbcsd.org/contentwbc/download/13299/194600/1>.

⁴ *ISO 14404-3:2017 Calculation method of carbon dioxide emission intensity from iron and steel production — Part 3: Steel plant with electric arc furnace (EAF) and coal-based or gas-based direct reduction iron (DRI) facility*, 2017. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14404:-3:ed-1:v1:en>

⁵ Dora-Andreea Chisalita et al., “Assessing the Environmental Impact of an Integrated Steel Mill with Post-Combustion CO₂ Capture and Storage Using the LCA Methodology,” *Journal of Cleaner Production* 211 (February 2019): 1015–25, doi:10.1016/j.jclepro.2018.11.256.

⁶ ISO 20915 Life Cycle Inventory Calculation Methodology for Steel Products, 2018.

⁷ The ‘Sliding Scale’: Setting Equitable Thresholds to Drive Global Steel Decarbonisation”, ResponsibleSteel, 2022 <https://www.responsiblesteel.org/news/the-sliding-scale-setting-equitable-thresholds-to-drive-global-steel-decarbonisation/>

⁸ *Net Zero by 2050*, International Energy Agency (IEA), 2021. https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf.

⁹ “Biomass in steelmaking”, World Steel Association (WSA), 2021. <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Biomass-in-steelmaking.pdf>

¹⁰ Rainer Remus et al., *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production*, European Commission Joint Research Centre Institute for Prospective Technological Studies, 2013. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/eea047e8-644c-4149-bdcb-9dde79c64a12/language-en>.

¹¹ 2019 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 3, “Chapter 4: Metal Industry Emissions,” Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2019. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/pdf/3_Volume3/19R_V3_Ch04_Metal_Industry.pdf

¹² Michele Mutchek et al., “Understanding the Contribution of Mining and Transportation to the Total Life Cycle Impacts of Coal Exported from the United States,” *Energies* 9 (7), Multidisciplinary Digital Publishing Institute (July 2016): 559, doi:10.3390/en9070559.

¹³ *MiQ Standard for Methane Emissions Performance: Main Document – Offshore*, MiQ, 2021. <https://miq.org/document/miq-standard-offshore/>.

¹⁴ US EPA Emissions Factor Hub, 2022. https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-04/ghg_emission_factors_hub.pdf

¹⁵ Nazar Kholod et al., “Global Methane Emissions from Coal Mining to Continue Growing Even with Declining Coal Production,” *Journal of Cleaner Production* 256 (May 2020): 120489, doi:10.1016/j.jclepro.2020.120489.

¹⁶ *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, “Chapter 8: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing,” Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013.

¹⁷ *Life Cycle Analysis of Natural Gas Extraction and Power Generation*, Pittsburgh: National Energy Technology Laboratory, 2019. <https://www.osti.gov/biblio/1529553-life-cycle-analysis-natural-gas-extraction-power-generation>.

¹⁸ *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 2*, “Chapter 2: Stationary Combustion,” Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2006. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>.

¹⁹ *ISO 14404-3:2017 Calculation method of carbon dioxide emission intensity from iron and steel production — Part 3: Steel plant with electric arc furnace (EAF) and coal-based or gas-based direct reduction iron (DRI) facility*, 2017. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14404:-3:ed-1:v1:en>

²⁰ Jana Gerta Backes et al., “Life Cycle Assessment of an Integrated Steel Mill Using Primary Manufacturing Data: Actual Environmental Profile,” *Sustainability* 13 (6), Multidisciplinary Digital Publishing Institute (January 2021): 3443, doi:10.3390/su13063443.

²¹ *MiQ Standard for Methane Emissions Performance: Main Document – Onshore*, MiQ, 2021. <https://miq.org/document/miq-standard-onshore/>.

²² James A. Littlefield et al., “Synthesis of Recent Ground-Level Methane Emission Measurements from the U.S. Natural Gas Supply Chain,” *Journal of Cleaner Production* 148 (April 2017): 118–26, doi:10.1016/j.jclepro.2017.01.101.

²³ *Net-Zero Steel Sector Transition Strategy*, Mission Possible Partnership, 2021. https://missionpossiblepartnership.org/wp-content/uploads/2021/10/MPP-Steel_Transition-Strategy-Oct19-2021.pdf.

5. 附录

IEA NZE轨迹包括上游排放，使用第80百分位点分割。

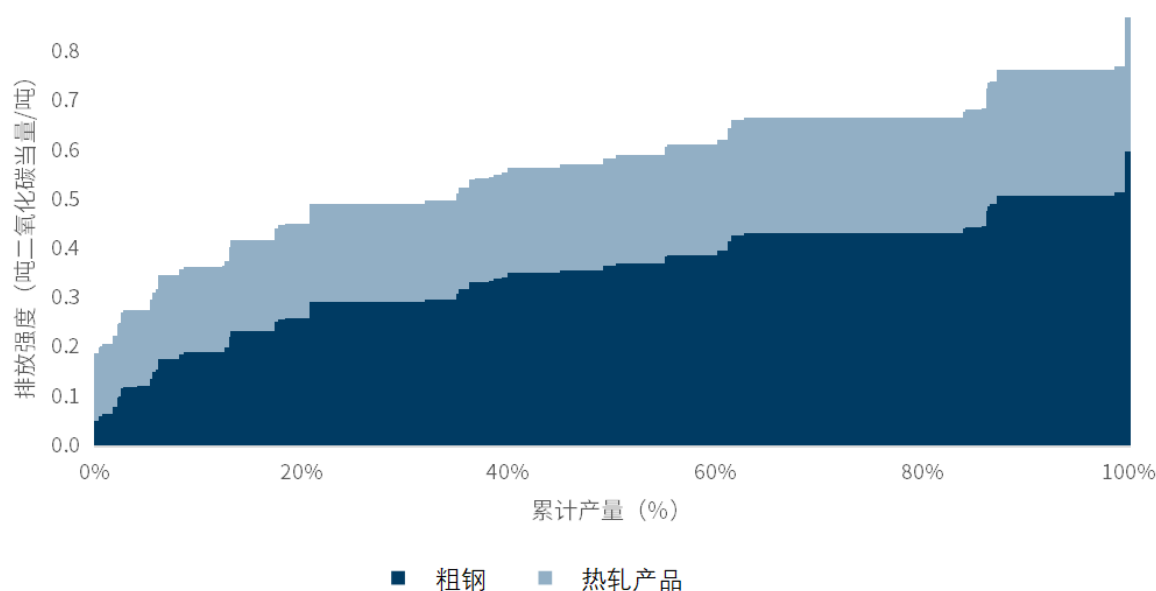
年份	粗钢（吨二氧化碳当量/吨）		热轧产品（吨二氧化碳当量/吨）	
	初级钢	再生钢	初级钢	再生钢
2020	2.37	0.44	2.59	0.68
2021	2.30	0.42	2.51	0.64
2022	2.23	0.39	2.44	0.61
2023	2.16	0.37	2.36	0.57
2024	2.08	0.35	2.29	0.54
2025	2.01	0.32	2.21	0.51
2026	1.94	0.30	2.14	0.47
2027	1.87	0.28	2.06	0.44
2028	1.80	0.26	1.99	0.40
2029	1.73	0.23	1.91	0.37
2030	1.66	0.21	1.84	0.34
2031	1.57	0.20	1.74	0.32
2032	1.49	0.19	1.64	0.31
2033	1.40	0.18	1.54	0.29
2034	1.31	0.17	1.44	0.27
2035	1.22	0.16	1.34	0.26
2036	1.14	0.15	1.24	0.24
2037	1.05	0.13	1.14	0.23
2038	0.96	0.12	1.04	0.21
2039	0.87	0.11	0.94	0.19
2040	0.79	0.10	0.85	0.18
2041	0.72	0.10	0.77	0.17
2042	0.65	0.10	0.70	0.17
2043	0.58	0.10	0.63	0.16
2044	0.51	0.10	0.56	0.16
2045	0.44	0.10	0.49	0.15
2046	0.38	0.10	0.41	0.15
2047	0.31	0.10	0.34	0.14
2048	0.24	0.10	0.27	0.14
2049	0.17	0.10	0.20	0.13
2050	0.10	0.10	0.13	0.13

IEA NZE钢铁轨迹（不包括上游排放）使用第80个百分位点将再生钢铁排放分为初级钢和再生钢。

注意，不建议排除上游排放（参考第2.2节）。

年份	粗钢（吨二氧化碳当量/吨）		热轧产品（吨二氧化碳当量/吨）	
	初级钢	再生钢	初级钢	再生钢
2020	2.14	0.44	2.28	0.62
2021	2.09	0.41	2.22	0.59
2022	2.04	0.39	2.17	0.55
2023	1.98	0.36	2.11	0.52
2024	1.93	0.34	2.05	0.49
2025	1.87	0.32	2.00	0.45
2026	1.82	0.29	1.94	0.42
2027	1.76	0.27	1.88	0.39
2028	1.71	0.24	1.83	0.35
2029	1.65	0.22	1.77	0.32
2030	1.60	0.19	1.72	0.28
2031	1.51	0.18	1.62	0.27
2032	1.43	0.17	1.53	0.25
2033	1.35	0.16	1.44	0.24
2034	1.26	0.15	1.35	0.22
2035	1.18	0.14	1.25	0.20
2036	1.10	0.13	1.16	0.19
2037	1.01	0.11	1.07	0.17
2038	0.93	0.10	0.98	0.16
2039	0.85	0.09	0.88	0.14
2040	0.77	0.08	0.79	0.13
2041	0.70	0.08	0.72	0.12
2042	0.63	0.08	0.65	0.12
2043	0.56	0.08	0.58	0.12
2044	0.49	0.08	0.52	0.12
2045	0.42	0.08	0.45	0.11
2046	0.35	0.08	0.38	0.11
2047	0.29	0.08	0.31	0.11
2048	0.22	0.08	0.24	0.11
2049	0.15	0.08	0.17	0.11
2050	0.08	0.08	0.10	0.10

基于废料的电弧炉生产的排放强度分布，用于计算80百分位阈值，该阈值用于将钢铁部门预算分为初级钢和再生钢生产。使用国家级电力排放因子（来自国家报告，如欧盟委员会、美国环保局等，或来自Ember关于电力生产组合的数据）和国家级电弧炉生产数据（来自worldsteel）计算分配。



建筑排放预算方法说明：

- 在IEA NZE预测期（即至2050年）内，该行业总用电量的计算以每种技术原型（高炉转炉法，直接还原法，废钢电弧炉法，氢气直接还原法，直接电解法，高炉转炉法配CCS和直接还原法配CCS）的假定恒定用电量和国际能源机构报告的每种技术的钢产量为基础。
- IEA NZE预测期的全球平均电网排放量用于将总用电量转化为排放量。唯一的例外是约36%的电力（根据国际能源机构钢铁技术路线图中报告的技术类型间接排放强度进行估算）被认为是高炉转炉法废气的自发电。废气发电的排放强度以80/20的高炉煤气和焦炉煤气混合物以及37%的转换效率为基础进行计算。
- 铁矿石、煤炭和天然气生产的上游排放量是根据国际能源机构的数据估算的（辅以一些生命周期评估数据，以确定直接排放和电力排放的细目）。根据IEA NZE报告的电网排放，假设上游生产中的所有电力排放都将减少。根据IEA NZE的报告，假定逸散性甲烷会减少（到2030年减少约75%）。根据IEA NZE报告的工业替代率，钢铁行业的天然气总使用量被假定会被一些生物甲烷所替代。

关于将排放预算分为初级钢和再生强度的方法的说明：

- 初级钢和再生钢总产量以IEA NZE报告的钢总产量和废钢率为基础。
- 再生钢排放强度的初始起点以分布的第80个百分位数（见上文）为基础。排放强度中的电力部分根据IEA NZE报告的电网削减量而减少（即，到2030年和2040年分别减少68%和100%）。
- 剩余预算分配给原始生产，并计算最终的排放强度。

Lachlan Wright、刘希元等，钢铁产品碳足迹核算及报告方法学——基于国际实践，2024，https://rmi.org.cn/insights/steel_guidance/

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



除特别说明，本报告中所有图片均来自iStock。



RMI Innovation Center

22830 Two Rivers Road
Basalt, CO 81621

www.rmi.org

©2024年7月，落基山研究所版权所有。Rocky Mountain Institute和RMI是落基山研究所的注册商标。