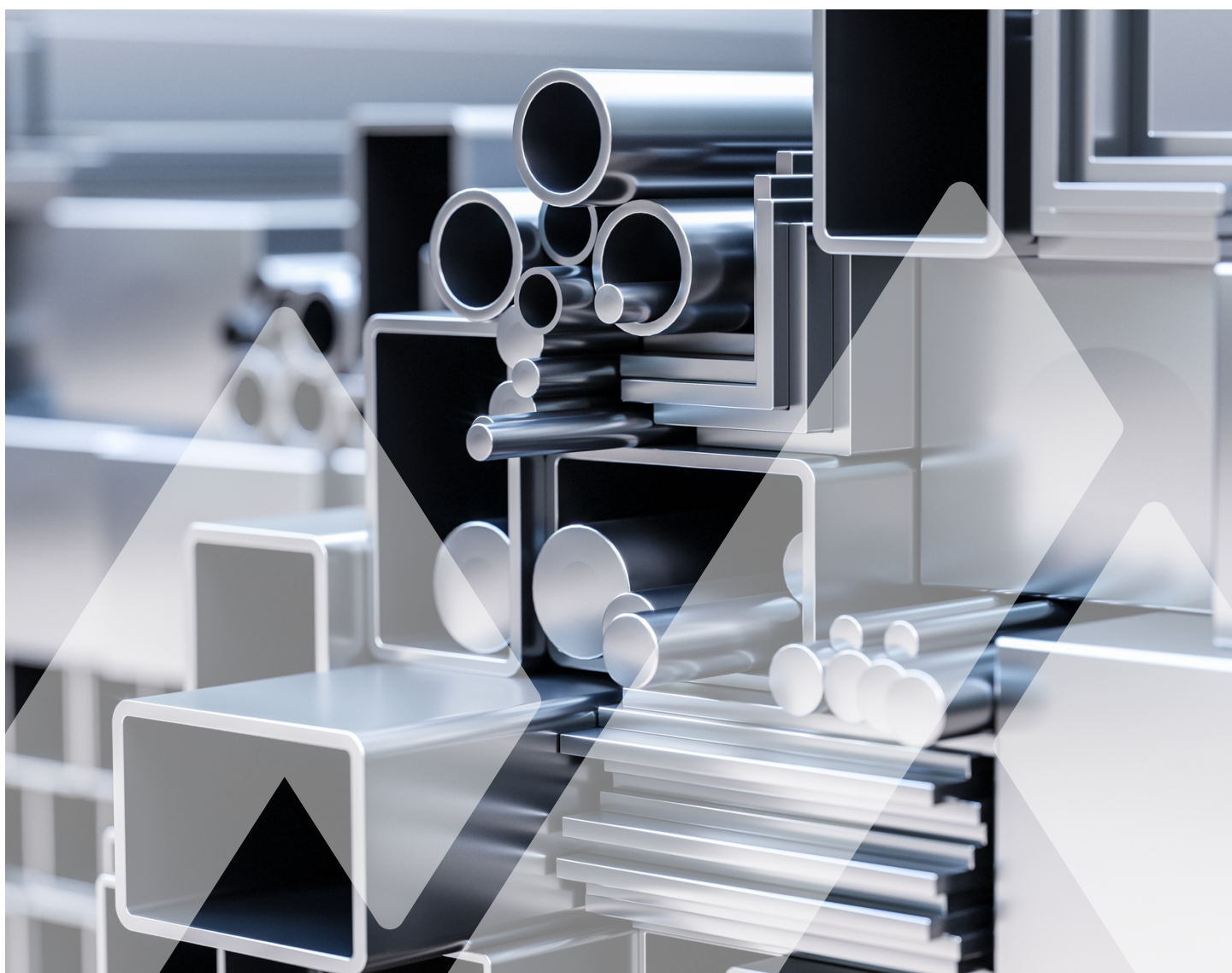


铝产品碳足迹核算及报告方法学 ——基于国际实践



作者

刘雯娟, Sravan Chalasani, Iris Wu

*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

刘雯娟, wliu@rmi.org
李抒苒, sli@rmi.org

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铝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):

东风日产乘用车公司 陈瓶, 李建平, 周满

尚轻时代金属信息咨询(北京)有限公司 董春明

魏桥创业集团 董娜

北京工业大学 龚先政

中国有色金属工业协会绿色产品评价中心 李佳珉, 王佩, 赵越

山东宏顺循环科技有限公司 王景坤

河北新立中有色金属集团有限公司 魏少更

中铝材料应用研究院有限公司 吴永福

中信戴卡股份有限公司 尹志高

上海蔚来汽车有限公司 于淼

中汽碳(北京)数字技术中心有限公司 赵冬昶, 赵明楠, 张逸娟

沃尔沃汽车技术(上海)有限公司 朱峰

其他作者

落基山研究所

李婷, 李抒苒, 闫榕, 王珮珊

中汽碳(北京)数字技术中心有限公司

孙铎, 付丽

中国有色金属工业协会绿色产品评价中心

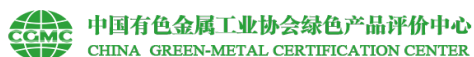
马存真, 葛青



落基山研究所(Rocky Mountain Institute, RMI)是一家于1982年创立的专业、独立、以市场为导向的智库，与政府部门、企业、科研机构及创业者协作，推动全球能源变革，以创造清洁、安全、繁荣的低碳未来。落基山研究所着重借助经济可行的市场化手段，加速能效提升，推动可再生能源取代化石燃料的能源结构转变。落基山研究所在北京、美国科罗拉多州巴索尔特和博尔德、纽约市及华盛顿特区和尼日利亚设有办事处。



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。



中国有色金属工业协会绿色产品评价中心(以下简称“评价中心”)隶属于中国有色金属工业协会，致力于为行业提供权威的绿色低碳相关产品评价服务。为推进铝行业进行以绿色低碳为底色和特征的高质量发展，评价中心于2023年6月20日正式启动了绿电铝评价工作，于2024年10月8日正式启动了绿色低碳铝评价工作。评价中心以铝为核心，外延拓展至硅、镁及其他有色金属绿色产品的评价工作，继而建立起覆盖全行业的绿色产品评价体系，以此推动全行业的绿色低碳转型。目前，评价中心正全力打造中国铝工业产品碳足迹核算平台和中国有色金属产品碳足迹数据库，以期为铝行业企业碳足迹核算和碳足迹管理提供安全、科学的大数据服务。评价中心将不断完善自身建设，提升服务功能，推行评价认证一体化，打造有色金属行业专业、权威的绿色服务机构，助力中国有色金属工业绿色低碳发展！

目录

- 前言6
- 1 背景8
 - 1.1 简介8
 - 1.2 目的8
 - 1.3 原则9
 - 1.4 范围9
 - 1.5 术语10
- 2 碳排放报告要求 11
 - 2.1 产品碳足迹 12
 - 2.2 固定核算边界 12
 - 2.3 供应链碳排放的透明度 14
 - 2.4 原始数据来源 14
- 3 碳排放核算方法 15
 - 3.1 核算步骤 15
 - 3.2 废铝成分含量的报告 16
 - 3.2.1 废铝的定义 16
 - 3.2.2 废铝比例的计算 17
 - 3.2.3 消费后废铝比例的计算 17
 - 3.2.4 依据质量平衡法进行产品间废铝比例的分配 18
 - 3.3 产品碳足迹的核算和报告 18
 - 3.3.1 一般性核算原则 18
 - 3.3.2 原铝生产的碳排放透明度 19

3.3.3 产品碳绩效核算方法.....	19
3.3.4 合金排放	21
3.3.5 取舍准则	22
3.4 能源排放的核算	22
3.4.1 外购电力/热力.....	22
3.4.2 自备电力/热力.....	23
3.4.3 产品间可再生能源信用的质量分配	24
3.5 输出产品	24
3.5.1 中间产品	24
3.5.2 副产品	25
3.5.3 能源输出	25
3.6 数据来源	26
3.6.1 数据质量	26
3.6.2 直接排放因子	26
3.6.3 电力排放因子	29
3.6.4 间接排放因子	30
3.6.5 原始数据比例	33
附录A-第3.3.3节的核算示例.....	35
索引备注	38

前言

电解铝行业是我国工业领域碳排放的重点行业，其碳排放约占整个有色金属行业的64%，约占全国碳排放的4.5%。未来，随着我国工业化和城市化的快速发展，铝的应用领域也将不断拓展，其消费量仍然呈上升趋势。例如，建筑、交通、耐用消费品等对铝的需求将持续攀升，汽车轻量化、新能源的发展等也将成为铝的新增需求点。我国是全球第一大铝生产国、消费国和出口国，铝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及报告，将帮助铝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，以及为铝及下游企业推进低碳转型提供有力支撑。

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，而铝是优先聚焦的重点产品之一。目前，国际上关于铝产品层面碳足迹的核算方法已有一定实践，国际铝业协会（IAI）、铝管理倡议认证（ASI）、国际标准化组织（ISO）等机构都积极开展了相关工作。中国的铝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，并在相关规则的制修订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国际上较为主流的铝产品层面碳足迹核算及报告方法，在这些方法间寻求最大共识，并在此基础上编写了《铝产品碳足迹核算及报告方法学——基于国际实践》（以下简称《方法学》），同时联合中汽碳(北京)数字技术中心有限公司、中国有色金属工业协会绿色产品评价中心，开展广泛的行业、企业相关方意见征询和工作组讨论，基于国内行业特征，对《方法学》进行精进完善。在《方法学》的编写过程中，我们先后与中铝材料应用研究院有限公司、魏桥创业集团、中信戴卡股份有限公司、山东宏顺循环科技有限公司等五家铝行业企业进行了一对一意见咨询，并召开“铝及铝合金产品碳足迹核算方法学研讨会”，与铝-汽车产业链专家探讨《方法学》中核算方法的适用性，以及对关键指标选取和应用的意见建议。《方法学》还与中国有色金属工业协会绿色产品评价中心和有色金属技术经济研究院联合建设的“中国铝工业产品碳足迹核算平台”实现了互认，为该平台的核算方法提供参考。

具体而言，《方法学》提出以下五个关键原则：

1、固定的比较边界

《方法学》提供了固定的核算边界，确保不同业务范围和产品结构的铝企之间的产品碳足迹具有可比性。固定核算边界涵盖包括上游在内的整个供应链的排放密集的关键工序，覆盖了铝产品碳足迹中的大部分排放。

2、废铝的信息披露

《方法学》综合主流观点，统一废料的定义，明确废料含量的计算方法，以提高废料和再生铝相关的信息透明

度，从而促进生产效率和消费后废料的回收利用率的提高。

3、排放的透明度

《方法学》提出应单独报告原铝部分的排放强度，帮助下游采购方更精确地评估铝产品中原铝部分的排放水平，从而激励电解铝的减排行动。《方法学》还提出应使用双重报告方法披露废料中的隐含碳排放。这可以帮助采购方全面了解消费后废料的使用情况，从而鼓励消费后废料的回收。

4、电力相关排放

《方法学》对绿电的使用提出额外性、区域支持和长期承诺等参考原则，并推荐了绿电采购的决策优先级，以激励电解铝生产企业在电力脱碳中发挥推动性作用。

5、数据质量

《方法学》提出应明确披露现场数据比例，确保与国际上的探路者框架（Pathfinder）框架相一致。

在下述方面，《方法学》在国际现有共识的基础上结合国内现实进行了调整与改进。根据我国铝生产的现实情况，《方法学》在核算边界示意图中加入铝水直接合金化的情况，并对铝水直接合金化的固定比较边界作出界定。在外购电力章节，结合我国电力市场的实际情况，为使用非捆绑型能源属性证书采购绿电提供参考原则。此外，与《企业温室气体排放核算与报告指南 铝冶炼行业（征求意见稿）》保持一致，《方法学》推荐企业在使用基于市场的方法计算外购电力排放时，使用不包括市场化交易的非化石能源电量的电力排放因子计算外购电网电的排放量。

《铝产品碳足迹核算及报告方法学——基于国际实践》旨在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。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铝产品的碳足迹。通过明晰的数据和指导，企业可以在采购决策中更有针对性地推动铝行业的脱碳转型，为我国“双碳”目标的实现作出贡献。

1. 背景

1.1 引言

铝作为重要的有色金属和工业基础原料之一，是国民经济发展的第二大的金属，仅次于钢铁。铝合金产品在交通运输、建筑、电子电力、航空航天和消费品等各个领域已有广泛应用。鉴于其在输电、太阳能光伏、电动汽车等清洁能源和节能减排技术方面发挥的关键作用，铝也是加快向脱碳经济过渡和转型的重要原料。

铝冶炼产生的温室气体（GHG）是全球的重要排放源之一。2018年，全球铝工业的二氧化碳当量排放量ⁱ 超过了11亿吨，约占全球总人为排放量的2%。目前，原铝（电解铝）的冶炼过程严重依赖以化石燃料、火电为主的能源和以石油焦、沥青焦为主的阳极材料。因此，实现全球的能源转型和脱碳目标，离不开铝工业向可再生能源和低碳技术的全面转型。

在全球范围内，环境、社会和治理（ESG）因素已经越来越多的融入公司的核心战略。铝及铝合金产品的下游用户行业，如电动汽车、电子设备和铝罐制造等，已经开始寻求供应链减碳的方案，从而将推动对低碳排放铝ⁱⁱ产品的需求，助力铝行业脱碳。为确保下游用户能够放心购买低碳排放铝产品，铝产品生产加工企业需要根据一致、透明的方法计算并披露产品的碳足迹等信息，以确保相关碳绩效信息的准确性和可比性。

本《方法学》建立了产品碳足迹和碳绩效ⁱⁱⁱ相关的核算和报告方法，旨在帮助铝产品生产加工企业通过一致、透明的方式提供铝产品的碳排放信息，从而更好的满足下游用户企业对供应链减碳和低碳排放铝的需求。

1.2 目的

本《方法学》主要通过为铝产品生产加工企业提供核算和报告产品碳排放信息的方法和工具，加快低碳排放铝差异化市场的发展，从而推动全行业的减碳、脱碳行动。

其他广泛的目标的包括：

1. 促进全球产品碳足迹核算方法的一致性，提高铝产品碳排放的透明度；
2. 识别低碳排放或具备市场领先减排技术的铝生产加工企业；
3. 以碳足迹数据为纽带，推动需求与供给的有效联结，从而加快开发净零排放铝材的关键低碳技术；
4. 提高铝产品碳绩效的可比性，为下游用户行业提供更全面的信息支持更明智的低碳采购决策；
5. 帮助铝采购企业获得可信、透明的产品碳绩效数据，展示企业的供应链减排成果。

ⁱ 碳排放、排放等在本文中指所有温室气体。

ⁱⁱ 目前铝行业对于“低碳排放铝”的定义尚不明确。通常，低碳排放铝指碳排放强度为4t CO₂e/t原铝的产品，其中包含范围一和范围二的碳排放。

ⁱⁱⁱ “碳绩效”是指《方法学》中建议的衡量铝产品碳排放情况的量化指标，包括铝锭的排放强度，半加工铝合金制品的排放强度（如相关），从“矿山到冶炼”的原铝排放强度，废铝比例，消费后废铝比例，和碳核算中的原始数据的比例。

1.3 原则

为促进供应链上下游企业联动合力开展脱碳，本《方法学》的总体原则的制定致力于为低碳采购决策提供透明、一致、可比的信息。由于下游企业的采购决策和供应商选择通常是在产品层面做出的，在《方法学》中，铝生产加工企业需要根据具体生产厂房或车间的活动数据（生产过程、能源活动、电力输入输出、排放因子等），计算相关产品的碳排放量，从而确保数据的准确性和可信性。

具体报告的内容有以下三个原则：

1. **鼓励使用原始数据：**碳核算中应该尽可能使用供应商最新提供的一手信息。
2. **确保核算边界的一致性：**生产企业应根据固定的核算边界（即一套一致的工艺流程）报告排放量，以实现披露数据之间的可比性。
3. **满足市场需求的碳排放衡量指标：**确保衡量产品排放情况的量化指标充分结合市场需求，促进低碳排放铝差异化市场的发展。

1.4 范围

本《方法学》适用于拥有和运营与原铝和再生铝相关的铝生产设施的任何企业。

在方法学中，“铝生产商”是指供应链上中游生产、加工铝产品的企业，包括铝液、以原铝及再生铝为原料的熔铸产品（如压铸锭、轧制锭、挤压锭等），各种形式的半加工铝合金制品（如箔、板带、型材等铝材）。铝生产商应根据图表1所示的固定核算边界计算与报告相关的直接和间接排放量。其中，铝土矿开采、氧化铝精炼、预焙阳极材料生产等其它可能没有与铝冶炼厂垂直整合的工艺过程，也应包含在核算范围内。供应链下游可以基于本方法学收集相关产品的排放数据，以更好地了解供应链的上游排放情况。

根据图表1中的固定核算边界，单独的铝矿开采商、单独的氧化铝精炼厂、单独的阳极制造商、单独的半成品加工商无需按照固定边界进行核算，但应该向下游企业提供其生产过程相关的排放数据。

本方法学中对温室气体的讨论基于时间跨度为100年的全球变暖潜能值（GWP），其中二氧化碳（CO₂）、甲烷（CH₄）、一氧化二氮（N₂O）和全氟化碳（CF₄和C₂F₆）是与铝工业碳排放相关的主要温室气体。

1.5 术语

本方法学采用不同的术语来区分符合Pathfinder框架的要求、建议和允许的选项。

术语	定义
“应当”	表示采用RMI铝排放报告方法学的公司应遵守的规则
“应该”	表示建议遵守的规则
“可以”	表示允许的选项

2. 碳排放报告要求

《方法学》中报告的主要框架如下：

1. **产品碳足迹**：生产商需要根据单个生产场所^{iv}核算和报告产品^v的碳排放信息。
2. **固定核算边界**：生产商需要根据固定边界内的所有生产工序的排放源进行核算，无论生产商是否拥有或控制这些工序。
3. **供应链透明度**：生产商需要根据报告产品内原铝和再生铝的使用情况补充报告相关的排放量，为产品总碳足迹提供背景信息。额外报告生产中废铝使用情况可以提供更多与废铝成分相关的背景信息。
4. **原始数据**^{vi}：生产商需要报告总碳足迹核算中基于原始数据计算的排放量的比例。

基于以上主要框架，生产商应每年根据单个生产场所的活动排放源进行产品级别的核算。每个产品需要报告的具体碳绩效如下：

- **基准碳足迹**：根据固定的比较边界计算的铝产品碳足迹，单位为吨二氧化碳当量/吨铝熔铸产品（包括各类铝及铝合金锭、压铸锭、轧制锭、挤压锭）（见第3.1节和第3.3节）。
- **总碳足迹**（如相关）：根据完整系统边界计算的铝产品总碳足迹，单位为吨二氧化碳当量/吨半加工铝合金制品（见第3.1节和第3.3节）。
- **“矿山到冶炼”的排放强度**（如相关）：原铝的总排放强度，单位为吨二氧化碳当量/吨原铝（见第3.3.2节）。
- **废铝比例**：在固定的比较边界内再生料的投入比例，并单独报告的消费后废铝的比例（见第3.2节）。
- **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（见第3.6.5节）。

拥有或控制熔铸设施（包括原铝和再生铝熔铸）的生产商为报告主体，承担主要的报告责任。相关的常见产品按用途分类包括：轧制铝锭、挤压铝锭、压铸铝锭、铝线、铝棒等增值产品，用于轧制、挤压和压铸等半加工铝合金制品（铝材）生产。报告主体企业通常需要从供应商、金属贸易商、或其它供应链合作伙伴收集必要的排放信息。

在一些情况下，如果熔铸厂和半加工企业不是一个一体化实体，则熔铸厂需要向半加工（铝材）企业提供上游排放数据，再由半加工企业核算场内的排放数据，从而向下游买家报告完整的总碳绩效信息。对于一体化整合的

^{iv} 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。

^v 产品 (product): 本《方法学》中产品的定义根据基准比较边界和系统边界有所不同。具体定义请参照第2.2节。

^{vi} 原始数据 (Primary data): 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)。

熔铸车间和半加工车间，报告主体需要向下游买家报告所有要求的碳绩效信息。作为最佳实践，所有供应链合作伙伴都有责任（应该）向下游企业提供相关的碳排放信息（见第1.4节）。

2.1 产品碳足迹

使用本《方法学》报告的碳排放数据，应随相应产品在供应链上的流转（和转化）而累计，从而供应链中的每个参与方都能了解所购买和销售产品的碳排放情况，更好地制定“净零”目标，实施减碳、脱碳方案。

为提高报告数据的准确性，报告主体企业应基于每个生产场所的生产活动进行产品层面的碳足迹核算。本报告主要以两种铝及铝合金产品的形式展示碳足迹信息：（1）铝熔铸产品（铝锭），（2）半加工铝合金制品（铝材），分别对应计算方法中的固定比较边界和完整系统边界的最终产品。具体核算方法请参照第3节和本节中概述的其它报告方法。

2.2 固定核算边界

核算边界通常用于界定碳排放核算过程中应包含的生产活动和排放源。《方法学》中规定了固定的核算边界，包括一系列指定的铝产品生产加工过程的排放，独立于报告主体的所有权结构。《方法学》中的固定核算边界等产品碳核算方法主要解决组织碳在可比性方面的两个关键问题：

1. **组织碳（企业碳）通常因为组织（企业）纵向整合程度不同而无法直接进行比较。**在铝工业中，生产加工企业的垂直整合可以扩展到一些排放密集型工序，如石灰煅烧、焙烧石油焦、预焙阳极生产等。如果这些工序在报告企业的所有权范围内，相关排放量将包括在组织碳的报告范围内（如《温室气体协议》的范围一排放）。对于非整合企业，相同的排放将归为范围3，因此可以不计入组织碳的报告内。因此，企业组织碳排放的可比性存在诸多挑战。
2. **能源转型带来的变化可能使企业的组织碳从范围一向范围二转移。**例如，随着对电力脱碳需求的增加，运营/拥有自备电厂的铝冶炼厂可能会考虑使用网电或搬迁到可再生能源丰富的地区并连接电网。在这些情况下，企业组织碳排放可能从范围1（自备电）转移到范围2（外购网电）。

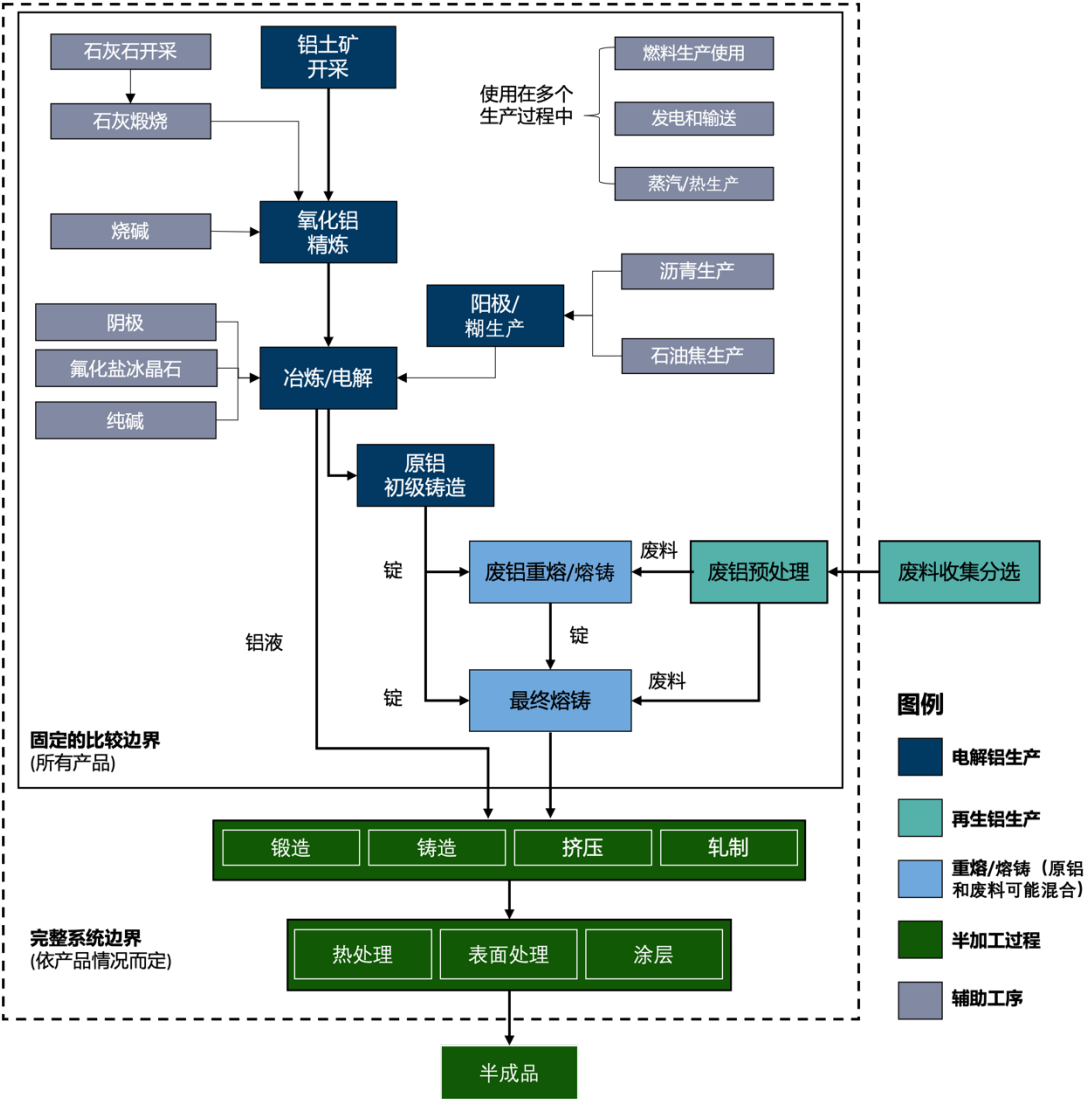
《方法学》中边界的划分主要参考了国际铝协发布的全球铝行业1.5°C脱碳路径，以帮助跟踪行业脱碳进展。图表1展示了具体的核算边界，其中包括：

- **固定比较边界：**包括从采矿到最终熔铸的所有生产活动，不包含最终半加工过程和所有其他后续加工过程。该边界的划分以提高产品碳绩效的可比性为主要目的，因此选择最终熔铸产品（如纯铝或铝合金锭、轧制锭、挤压锭、压铸锭等）为基准产品，以便比较后续加工的各类铝制品的碳排放情况。对于铝水直接合金化的企业，固定比较边界的核算应当包含从采矿到合金锭浇铸的所有工序排放。
- **完整系统边界：**包括固定比较边界内的所有生产活动，以及进一步加工（如轧制、挤压、铸造等）和后续加工过程的生产活动，即从摇篮到大门的核算边界。“大门”的划定取决于报告主体所核算产品的最终生产工序。此边界既反应了后续加工工序的排放，也体现了材料利用率提升带来的减碳效果。

合金材料相关的排放（即铝水合金化过程的活动排放和合金金属的隐含碳），如果相关，也应当加入核算边界。

运输相关排放暂不计入核算边界，主要考虑《方法学》侧重于计算铝行业内生产活动相关的排放量。但鼓励铝生产商参考运输部门相关的指导意见，如全球物流排放委员会（GLEC）框架，以核算和单独报告运输排放。

图表1: 铝产品碳足迹的系统边界与比较边界



注释:

- 燃料包括生产中使用的所有固体、气体和液体燃料。
- 输入产品（如碳酸盐生产）是指输入产品从摇篮到大门的排放。
- 最终熔铸车间：包括半加工厂熔铸车间，指生产铝锭的车间，包括轧制锭、挤压锭、压铸锭等纯铝或铝合金锭产品的最后一道工序，其产品应可直接用于半成品（铝材）加工。

2.3 供应链碳排放的透明度

铝锭的工业生产方式主要有两种：(1) 基于铝土矿开采、提炼和冶炼的原铝生产，和 (2) 基于废铝回收和重熔的再生铝生产。原铝主要由铝矿石开采，通过拜耳法提取氧化铝，再由霍尔-埃鲁特法电解工艺冶炼为液态铝。该工艺使用熔融冰晶石为溶剂，使用大量的电力还原生成铝液。再生铝主要通过废铝进行重熔和精炼生产。其中铝废料的来源包括半加工、加工制造产生的过程废料、和消费后的报废的铝产品。重熔过程的投料可能包括电解铝液、原铝铝锭、废料等，以生产特定废铝成分比例的再生铝锭。在最终产品中，原铝和再生铝之间没有性能差异，只是原铝的合金化灵活性更好。

然而，原铝和再生铝生产过程的碳排放强度显著不同，再生铝的碳足迹仅为原铝碳足迹的6%^{vii}。在短期内，增加再生铝的使用成为了供应链减排最快速有效的方法。但长远来看，再生铝的总体减排潜力会受到废料保有量的限制。根据国际铝协1.5°C减排路径的各种模拟情景，到2050年，全球再生铝的保有量预计只能满足铝总需求的50%-60%。因此无法仅依靠再生铝实现全行业脱碳的目标，投资和部署原铝的低碳生产技术必不可少。

为更好地展现在原铝减排方面所做的努力，铝生产商应同时报告最终熔铸产品（铝锭/铝合金锭）中与原铝相关的排放强度。一般情况下，用于型材加工的铝锭是由一定比例的原铝和废料的混合熔铸，因此下游用户很难直接比较不同供应商提供的产品的碳绩效情况。为提高产品的碳排放透明度，在《方法学》中，铝生产商核算并报告“矿山到冶炼”的排放强度，以帮助下游用户企业识别使用了减排技术（如绿电、可再生能源、惰性阳极等）的低碳排放铝，推进原铝生产企业加快研发、投资和部署低碳生产技术。

提高材料利用率是铝工业脱碳的另一重要路径。铝生产加工过程既要逐步减少消费前废料（过程废料）的产生，又要提高消费后废料的回收利用。消费前与消费后废料一般在重熔过程中混合，在废铝比例的报告中也不做区分，因此很难通过下游用户推动对消费后废料回收利用率的提升。根据《方法学》，铝生产商应当使用一致的方法报告再生材料的比例，并单独报告消费后废料的含量。具体核算方法和不同来源废铝的定义请参见第3.2节。

2.4 原始数据来源

为确保根据《方法学》提供的铝产品碳绩效信息能够支持采购决策，从而推动低碳排放铝冶炼技术的投资和部署，报告主体（铝生产商）需要尽可能使用原始数据计算和报告碳绩效指标，同时还应明确总碳足迹核算中使用原始数据的比例。

原始数据是指由负责相关生产活动的实体直接提供的排放数据，因此有时报告主体可能需要向供应商获取购入产品的相关排放信息和原始数据使用情况。具体计算原始数据比例的方法请参见第3.6.5节。

^{vii} 再生铝的碳足迹包括废料预处理、重熔和熔铸过程相关的碳排放。

3. 碳排放核算方法

3.1 核算步骤

过程排放的核算步骤主要依据国际铝协 (IAI) 的发布的碳核算相关文件, 具体包含:

- 铝行业温室气体协议
- 铝工业碳足迹技术支持文件
- 原铝和前序产品碳足迹核算的良好实践指南V2
- 良好实践指南: 测量全氟碳化合物
- 废铝隐含碳足迹计算参考文件

总体上, 产品的碳排放强度的是由总碳排放量除以总生产量计算得出。总碳排放量由以下公式计算:

$$E_{CO_2} = \sum_{t=1}^n EF_{t,d,CO_2e} \times Q_{t,d} + \sum_{t=1}^n EF_{t,i,CO_2e} \times Q_{t,i} - \sum_{t=1}^n EF_{t,s,CO_2e} \times Q_{t,s}$$

式中: t (1~n): 指相关生产活动中的每种排放源 (即燃料、能源或其它输入);
EF (emission factor): 指排放因子;
Q (quantity): 指每种排放源的投入质量;
d、i和c: 分别指直接排放 (direct emissions)、间接排放 (indirect emissions) 和抵扣排放 (emission credits);

各类排放的具体定义如下:

- **直接排放:** 指直接生产过程中含碳原材料的使用, 包括阳极消耗导致的碳排放、碳酸盐分解产生的碳排放、化石燃料燃烧 (包括自备电厂发电燃料使用) 产生的碳排放、铝冶炼过程中阳极效应所导致的四氟化碳和六氟化二碳的排放。
- **间接排放:** 指直接生产过程以外的排放, 包括外购原材料 (如冰晶石、碳酸盐等) 的隐含碳、铝生产工序以外辅助工序的排放 (如阳极材料生产)、外购电力的排放, 以及燃料和电力的上游生产排放。尽管这些排放通常发生在铝生产企业的控制以外, 但也需要计算入固定边界 (参见第2.2节)。这些排放的数据应该由报告主体向相关供应商主动获取, 在无法获得的情况下, 可以使用背景数据的平均排放因子替代计算。然而, 使用背景数据会影响原始数据的使用比例, 降低产品碳绩效的准确性。对于高能效的设施和生产工艺, 使用背景数据还可能导致对排放量的高估 (参见第3.6.4节)。
- **抵扣排放:** 指应该从总排放计算中减去的排放量, 仅适用于扣减外销的中间产品 (如氢氧化铝等) 相应的碳排放量。详见第3.5节。

《方法学》也提供了铝工业过程中常见的直接和间接排放源的排放因子。直接和间接排放源请参见第3.6节, 电力排放因子请参见第3.4节, 常见输出产品的类别和排放因子请参见第3.5节。

3.2 废铝成分含量的报告

3.2.1 废铝的定义

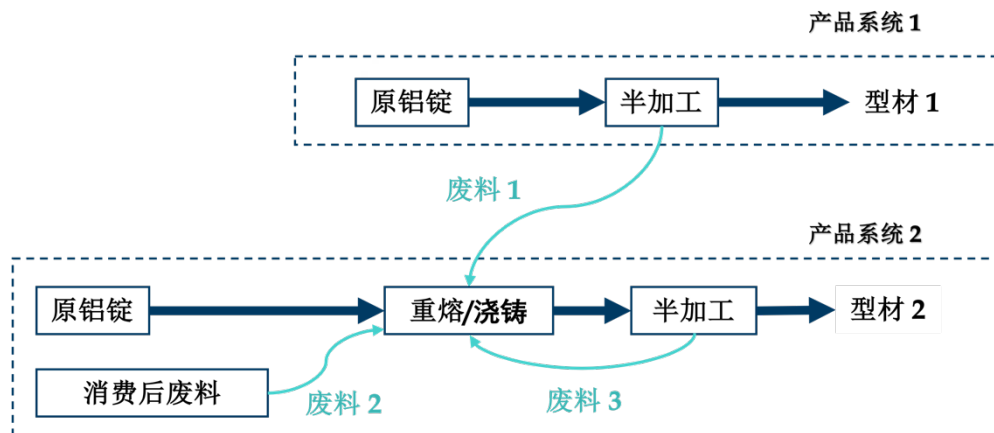
铝产品的金属原材料主要来自铝土矿精炼冶炼后的原铝和回收重熔的废料。根据来源，废料可进一步分为消费前废料和消费后废料。不同的行业和工业协会对废料的认定和划分稍有不同。在本《方法学》中，废料的定义参考国际铝协《废铝隐含碳足迹计算参考文件》的草案，定义如下：

- 内部废料：即周转废料或自产废料(home scrap)，指在重熔工序的熔铸单元产生的边角余料，通常重新流入同一重熔工序。
- 消费前废料：指从未被使用的、半加工、加工等制造过程中产生的边角余料，或因为报废、过剩、未达标等转移出来的含铝材料。这种废料不适合最终使用，也无法在该制造过程中直接回收，因此可能包括在铝生产商的同一地点、不同工序产生的过程废料（包括从铝灰或其它含铝废料中回收的铝）和下游制造商产生的过程废料。
- 消费后废料：指已被使用的、产品寿命的废弃物中回收使用的废铝（如从报废汽车零件、使用后的铝罐中回收铝）。

在报告中，内部废料不计入废铝成分，也不加入废铝比例的计算，因此废铝成分应当只包括消费前和消费后废料两种。区分废料是否为消费前或消费后的主要指标是该废料是否已经被生产为最终产品而使用。

图表2展示了《方法学》中对不同废料源的定义，并对比了ISO14021环境标签和声明中的相关定义。ISO14021中对消费前废料的定义并不明确，留下了解释的空间。其中最主要的争议在于，在半加工过程中产生的、并重新投入同一场地的重熔工序的废料（即废料3）是否应该计入为消费前废料。在这种情况下，消费前废料的定义取决于铝生产商半加工工序的整合程度（即重熔/熔铸和半加工是否属于同一公司）。由于定义的不明晰，不同整合程度的企业对消费前废料的计算无法统一，降低了铝产品的回收成分比例的可比性。虽然统一废料流的定义并不属于本方法学的范围，但《方法学》致力于高了铝产品间的回收成分含量的一致性和可比性，因此在定义消费前废料时与企业的整合程度脱钩。

图表2：《方法学》中对不同废料的定义与ISO14021的对比



废料流	本《方法学》定义	ISO 14021-环境标签和声明	与ISO的一致性
废料1	消费前废料	消费前废料	一致
废料2	消费后废料	消费后废料	一致
废料3	消费前废料	消费前废料；取决于对工艺的界定	一致

参考自国际铝协 (IAI) 《废铝隐含碳足迹计算参考文件》

3.2.2 废铝比例的计算

《方法学》中对于废铝比例的核算是基于固定比较边界的产品（即最终熔铸产品，铝锭/铝合金锭）。为了简化计算，本《方法学》将任何消费前或消费后的废铝（无论自产还是外购）统一定义为输入产品碳核算系统的废铝量，其中包括从任何含铝废料（如熔渣）中回收的铝。任何离开产品碳核算系统的铝，如生产过程中的永久损耗和外售废铝，应从废铝的总输入量中减去。废铝比例的计算在每个涉及添加废料的工序进行，即如果产品在最终熔铸前还涉及多个熔铸过程，则每个熔铸工序都需要计算相应的废铝比例。废铝比例的具体计算方式如下：

$$\text{废铝比例} = \frac{M_{\text{废铝}}}{(M_{\text{废铝}} + M_{\text{原铝}})}$$

其中， M_{Scrap} 是废铝的净质量，包括消费前废铝、消费后废铝、其他含铝废料中回收的铝的质量减去外售废铝的质量。 M_{Primary} 是原铝的质量，包括含铝量最低为99.7%的固态或液态铝。

《方法学》中提供的废铝成分（消费前、消费后）的规定无意取代铝行业现行的定义，但通过将废铝成分的定义和计算方式与报告企业的整合程度脱钩的方式，下游企业可以对不同产品的废铝成分进行横向对比。该定义与RMI的《钢铁产品碳足迹核算及报告方法学》中的相关规定也达成一致。

3.2.3 消费后废铝比例的计算

回收和使用消费后废料可以减少开采铝土矿生产原铝的需求，从而带来显著的环境效益。在全球层面，提高资源回收和材料利用率也被确定为铝工业脱实现1.5°C控温目标的重要途径之一。这要求全球铝行业既要增加消费后废料的回收利用，又要充分利用和尽量减少消费前废料的产生。目前，在一些例如建筑等行业的铝消费端，消费后废料的回收率较高。然而在其他终端行业，铝消费后废料的回收率依旧较低，这些废料经常与其它材料（如塑料）混合收集，质量也偏低。

为了增加这些废料的回收使用，本《方法学》将消费后废铝比例作为一个关键的产品碳绩效标进行报告。因此在报告回收成分比例的同时，铝生产商还应报告消费后废铝的使用比例，核算方法如下：

$$\text{消费后废铝比例} = \frac{M_{\text{消费后废铝}}}{(M_{\text{废铝}} + M_{\text{原铝}})}$$

考虑到目前的大多数废料在收集和分销过程中，并不对消费前和消费后的废料进行区分，因此计算和报告消费后废铝比例普遍具有挑战性。生产商应该首先尝试向废料供应商或贸易商索要相关的原始信息，提高回收成分的透明度。如果仍然存在数据缺口，生产商可以参考IAI《[区域废料比例转换因子](#)》，根据废料的来源地估算废料输入中的消费后废铝的比例。

3.2.4 依据质量平衡法进行产品间废铝比例的分配

《方法学》不推荐使用质量平衡方法的分配方式对同一生产场所的同种产品分别计算废铝的比例。大体上，这种计算方式在铝行业中并不被普遍接受。

3.3 产品碳足迹的核算和报告

3.3.1 一般性核算原则

铝生产商应使用以下一般性原则核算和报告该生产铝产品相关的排放，这些原则的设定主要参考自第3.1节所列举的国际铝协发布的相关文件：

- 产品碳绩效应当根据单个生产场所（厂房/车间）的实际生产情况进行核算和报告。如果铝企拥有多个生产场所，则应分别核算并报告每个厂房/车间的相关产品的碳绩效数据。在有些情况下，单个厂房/车间也可指拥有同一原材料流转或共享中间产品的临近的多个生产设施时。或者，当多个生产厂房使用同样的能源，并且已获得同一份环境产品声明（EPD）标签，这些厂房也可能算作“单个生产场所”。
- 产品的碳排放应当包括图表1中核算边界内所有工序的相关温室气体排放，包括生产过程中含碳原料使用的直接排放、燃料的上游和燃烧排放、电力的生命周期排放，以及辅助材料的从摇篮到大门的排放。
- 产品碳足迹应当根据两种核算边界的最终输出产品进行核算，并以t CO₂e/t产品为单位报告。例如，汽车轮毂的碳足迹核算，应当先计算挤压铝锭的基准碳足迹，以固定比较边界内的总排放量除以挤压铝锭的总产量来计算，然后，汽车轮毂的总碳足迹应当核算为完整边界内的总排放量除以汽车轮毂的总产量。
- 对于涉及原铝（原铝液或原铝锭）的产品系统（如在板锭铸造中使用了原铝为原料），报告主体应当报告“矿山到冶炼”的原铝排放强度。更多细节见第3.3.2节。
- 对于涉及废料的产品系统（消费前或消费后），应当使用截断法（cut-off method）计算废料相关的隐含碳排放。如果有报告主体对输入废料有详细数据和一定的追踪能力，也应当同时报告分配法（co-product allocation method）计算的碳足迹信息。相关细节见第3.3.3节。
- 合金排放应当计入碳核算边界之内。相关细节见第3.3.4节。
- 中间产品和输出能源的相关排放应当在总排放量的核算中扣除，以准确反映最终产品的实际排放量。中间产品的相关细节见第3.5.1节，输出能源的相关细节见第3.5.3节。

- 副产品和废弃物在其他产品系统的相关碳排放收益不应计入本产品系统的碳收益，不应抵消本产品系统的碳排放量。更多细节见第3.5.2节。
- 如果无法提供直接的物理联系，可再生能源电力相关的排放效益不应分配给特定的产品线或组合，以减少洗绿风险。更多细节见第3.4节。
- 在铝产品的生产加工过程中，如果企业需要使用市场化交易的方式采购可再生能源电力，企业首先应当参照《方法学》中提供的评定高质量市场化购电方式的标准，以大致了解所涉及的购电方式的可信度。然后，企业可以遵循《方法学》提供的决策层级决定其可再生能源电力购电方案。更多细节见第3.4节。
- 本《方法学》推荐同时使用基于市场的方法(market-based approach)和基于位置的方法(location-based approach)报告电力相关的排放量。如果仅使用一种方法，报告主体应当明确披露其所用选择的方法。

3.3.2 原铝生产的碳排放透明度

原铝的生产需要消耗大量的能源。许多原铝冶炼厂（电解铝厂）主要依赖化石能源发电来满足需要的能源，因此基于化石能源的火电贡献了该行业的主要碳排放量。尽管向再生铝生产转型带来了较大的脱碳机遇，但由于废料的保有量有限（至2050年，再生铝的保有量只能满足全球铝总需求的54%），铝行业的脱碳将不可避免地需要实现原铝生产过程的脱碳。使用低碳电力和部署净零排放技术是实现原铝生产减排的两个关键路径。

提高原铝生产的碳排放透明度对推动行业开展脱碳行动发挥着关键作用。在《方法学》中，对于使用原铝作为原料的产品，报告主体需要额外报告“矿山到冶炼”的碳排放强度。这可以帮助低碳高效的生产商更好地展示他们在原铝生产减排方面所做的努力，也为下游用户企业提供了针对原铝减排直接相关的、透明可信的碳足迹数据，从而了解供应商在行业脱碳方面的具体进展^{viii}。

在计算“矿山到冶炼”的碳排放强度时，生产商应核算与采矿、氧化铝精炼、阳极生产、铝冶炼和初级铸造相关的所有直接和间接排放，并包括辅助工艺排放和辅助材料的隐含碳。对于铝水直接合金化的企业，“矿山到冶炼”的核算应计算从采矿到铝冶炼相关的所有排放，不包括原铝初级铸造相关的排放。为了与基准碳足迹和全碳足迹的核算保持一致，“矿山到冶炼”的计算中也不包含运输排放。如果原铝初级铸造的工序需要添加废铝，并且在重熔废铝的过程中需要额外燃料，则与额外燃料相关的排放量可以通过废料熔融所需的理论能耗进行估算，并从“矿山到冶炼”计算中扣除。但这些排放量应当计入基准碳足迹和全碳足迹的核算中。

3.3.3 产品碳绩效核算方法

产品的碳绩效核算应当遵循第3.3.1节中关于固定比较边界和完整边界（如相关）的原则。通常情况下，消费前和消费后废铝在从摇篮到大门的产品碳足迹的计算中被认为是无负担的（零隐含碳）。近期，为了更好地在排放量上差异化消费后废铝，铝行业内部关于是否应该为消费前废铝分配负担的讨论日益激烈。但该问题目前还未达成广泛的共识，因此影响了产品环境声明中碳足迹的可比性和一致性。国际铝协（IAI）发布了[参考文件](#)以帮助增强和协调全行业对废铝隐含碳计算方法的理理解。《方法学》建议铝生产商参考该文件了解相关计算方法的详细信息。

^{viii} 这是指MPP和国际铝协（IAI）发布的2050年铝业温室气体排放路径中涉及的脱碳关键技术。

一般来说，截断法、共生产品分配法和替代法是产品碳足迹核算中计算消费前废料隐含碳的常见方法。在ISO标准中，这些方法都被认定为有效，只是各自对消费前废料的使用功能的假设（即作为废弃物、共生产品、或再生材料）有本质上的不同。

截断法是最广泛使用的方法。该方法在计算中将消费前废料的隐含碳当作无负担（即零排放），因此计算过程最为简单。特别是当铝生产加工中的涉及的废料来自多个供应商并难以追溯至废料的源头，该方法的计算尤其方便。截断法可以鼓励生产加工过程中减少过程废料的产生，提高资源利用率，并促进过程废料的回用。然而，在某些情况下，截断法对提高消费后废料的回收利用作用有限，因为该方法无法在排放量上差异化消费后废料。它甚至可能会为一些在高排放过程中产生的消费前废料带来规避法律的机会或意外的竞争优势。

共生产品分配法和替代法会将原铝生产中的一些碳排放分配给消费前废料。它们需要更复杂的核算程序，并需要对废料具有一定程度的追溯性（如需要了解废料的来源或售出的目的地）。缺乏这些追溯性信息可能导致核算过程中出现碳泄漏（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）的问题。这两种方法对消费前废料的闭环回收的刺激作用有限，因此有些行业专家认为该方法会导致产生更多消费前废料。这两种方法都在排放量上对消费前和消费后废料进行了区分，进一步推动行业提高消费后废料回收利用和原铝减排。

针对消费前废料隐含碳的计算方式，《方法学》有以下考虑：

- 现有政策和标准通常在“摇篮到坟墓”的产品全生命周期碳足迹计算方法中对废料的计算提出了明确的要求，但这些要求无法直接适用于“从摇篮到大门”的碳足迹核算。
- 共生产品分配法在碳泄漏或重复计算方面的不确定性较低（即由废料产生者将其实际生产过程排放分配给废料）。相比于需要废料生产者追溯其买家的使用情况，废料使用者更容易从供应商处追溯。
- 共生产品分配法能更好地区分消费前废料生产过程中的碳排放情况。
- 截断法是全球铝生产商目前最常用的计算方法。生产商需要时间来过渡和适应新方法，并需要配置相应的数据收集系统来追溯废料的产生和使用情况。

因此，在本《方法学》中，报告主体使用截断法计算和报告基准碳足迹和全碳足迹。此外，如果报告主体对输入废料有详细数据和一定的追踪能力，也应当同时报告分配法计算的碳足迹信息。或者在无法获得的情况下，可以使用国际铝协提供的背景数据替代计算。报告主体应该参考下一节中关于截断法和分配法的具体内容，以确保计算的一致性，避免重复计算。

截断法

在该方法中，产生消费前废料的铝生产商在核算中将所有的排放量计入其主要最终产品的碳足迹，因此生产过程中产生的废料的碳足迹可计为零。当回收利用时，废料的使用者在相应产品的碳足迹核算中也将此废料计为零隐含碳。具体计算示例可参考附录。在实践中，废料使用者应当与其废料供应商确认其废料没有排放负担，以保持计算的一致性。

分配法

该方法在《方法学》中特指根据质量对废料和主产品的碳排放做出分配的方法^{ix}。在这种方法下，废料生产者根据主要产品和废料的质量对生产相关的排放量进行分配。具体核算示例见附录。

在具体操作时，铝生产商（尤其废料使用者）通常很难追踪废料流和获得相关生产过程的实际排放数据，尤其是在涉及多个废料源的情况下。因此，为了降低核算的复杂性并确保完整性，本《方法学》建议采用以下决策层级：

- 废料生产者应该优先使用材料流和原铝排放强度的原始数据进行计算。但如果废料生产者从供应商购买原锭，则应该从供应商处收集原料的排放数据，然后根据本方法学提供的报告工具估算废料的隐含碳排放量。或者，也可以使用[国际铝协的《废铝隐含碳足迹计算参考文件和工具》](#)依照CP0方法进行计算，计算示例见附录。废料使用者也应该优先向其废料供应商询问废料的排放数据。
- 如果以上原始数据无法获得，废料用户应该尽量追踪废料生成过程中涉及的原铝的排放和使用情况，尽量追溯到最初产生废料的铝生产工序^x：
 - 当产生废料的工序中，50%以上输入材料来自原铝，废料用户可采用原铝的排放强度作为废料的隐含碳数值。
 - 当产生废料的工序中，50%以上的输入材料来自外购废料，建议废料用户追溯最初生产废料时原铝的相关排放强度。
- 如果废料用户无法获得供应商的原始数据，废料用户应当使用国际铝协提供的背景数据替代计算。
- 废料生产商应当与其下游买家确认，并确保废料的排放负担已正确地添加到其产品的碳足迹中，以保证计算的一致性。

考虑使用分配法进行核算的挑战，本《方法学》建议废料生产商和用户尽快开展相关的数据收集工作。这激励了可追溯系统和技术的发展。总的来说，本方法学建议采用两种PCF（截断法和共生产品分配法）报告，以推动更多的行业需要的减排行动，帮助原铝脱碳并提高消费后废料的回收和利用。如果生产商在使用分配法计算废料隐含碳时使用了背景数据，应该告知下游用户。

3.3.4 合金排放

合金排放通常是铝产品碳足迹中不可忽略的一部分，特别是当硅、镁、锰和铜等碳排放强度大的元素被使用时。铝生产商应当核算与合金化相关的排放量，其中包括合金过程的排放量和合金元素的隐含排放量。对于常见合金元素的隐含碳，生产商应从合金供应商处获取原始数据。如果无法获得该数据，生产商可参考[国际铝协《范围3核算指导文件》](#)获得常见合金元素的相关排放因子，或使用“原铝替代法”用等量的原铝代替合金元素的碳排放。

^{ix} 分配法的计算方式有多种变体，《方法学》中建议的具体内容与IAI参考文件中的CP0方法一致。

^x 一些情况下，这里可能涉及多种来源的原铝输入，报告主体应该按照所涉及原铝的使用量和排放强度值计算加权平均值，作为废料的隐含碳数值。

3.3.5 取舍准则

在计算铝产品碳足迹的过程中，铝生产商可以舍弃产品碳足迹影响小于1%的单项材料或能量排放源，如铝电解槽大修材料（阴极炭块、阴极钢棒）等，但所有舍弃的合计值不应超过产品碳足迹总量的5%，并在产品碳足迹报告中予以说明。

3.4 能源排放的核算

《方法学》对能源排放的核算符合国际铝协《原铝和前序产品碳足迹核算良好实践指南》以及RMI《钢铁产品碳足迹核算及报告方法学》的相关内容。对于在铝生产加工过程中使用的各种燃料，报告主体应当核算与燃料生产相关的排放量（即燃料“摇篮到大门”的排放量）和燃料消耗的排放量。

在计算燃料消耗的排放量时（包括一切固体、液体、气体燃料），报告主体应该根据所用燃料的碳含量，使用实验室分析、现场监测等方法确定其排放因子。如果无法获得燃料的含碳量，第3.6.2节的各种燃料类型的标准排放因子可作为背景数据使用。对于燃料的上游生产排放，计算中应当包含与燃料开采、加工相关的所有温室气体排放（包括逸散性甲烷排放）。《方法学》鼓励报告主体优先向燃料供应商索要相关原始数据，例如燃料生产的排放量、开采方式等，然后参考第3.6.4节关于上游生产排放和逸散性甲烷排放的其它数据来源和方法。

在计算电力相关排放时，无论外购电力或自发电，《方法学》使用电网的全生命周期排放因子，其中包括用于发电的燃料的开采和加工、燃料的燃烧、输配电（T&D）损失、以及发电设施的建造等发电上游所有的直接和间接排放。报告主体应优先使用与设施用电相关的原始数据计算排放因子，或根据国际铝协《原铝和前序产品碳足迹核算良好实践指南》的方法计算报告场地的排放因子。如果无法获得上述排放因子的原始数据，报告主体应使用应国家政府主管部门发布的官方数据或者可以参考第3.6.3节中提供的区域或国家平均排放因子。

3.4.1 外购电力/热力

购买电力和热能的排放报告

《温室气体协议》范围2指南提供了两种确定电力排放因子的方法：基于市场的方法(market-based approach)和基于位置的方法(location-based approach)，并鼓励公司同时使用这两种方法报告外购电力的碳排放情况，提供不同的信息。

本《方法学》也推荐报告主体同时使用这两种方法计算产品碳足迹信息。如果仅使用一种方法，报告主体应当明确披露其所用选择的方法。在核算时，铝生产商应从电力供应商处索取相关的电力排放因子（全生命周期碳排放因子），否则可以使用第3.6.2节提供的区域或国家平均电力排放因子（全生命周期碳排放因子）进行计算。

采购可再生能源电力（绿电）

电力脱碳是铝工业最关键的脱碳途径。考虑到铝冶炼（电解）过程的大量电力需求，铝冶炼企业在推动能源转型和实现行业脱碳方面发挥着重要的作用，因此，铝冶炼企业应遵循以下决策优先级采购可再生能源电力（绿电）：

- 拥有自发电设施（现内或场外）的铝冶炼企业，应优先推进实体能源转型，从火电向可再生能源电力过渡。

^{xi} 物理联系指，企业购买的可再生能源电力在物理上属于企业生产用电的一部分。

- 如果需要使用市场化交易的方式采购绿电，铝冶炼企业应优先考虑以下能确保物理联系^{xii}的购电方案：

- 从本地电力供应商的可再生能源发电设施处直接采购，并直接输送至铝冶炼企业（可以通过或不通过当地电网输送）。

- 直接从场外可再生能源发电设施采购，无需电网输送。

- 在属同一电网的厂外并网发电设施，通过购电协议直接采购。

- 以上各方案的可再生能源发电项目不得参与其它项目额外销售相关能源属性证书/绿证。

- 在一些国家和地区，非捆绑型能源属性证书（如绿证）可能是唯一获取生产用绿电的交易方式。因此，当以上购电方案不可用时，铝冶炼企业可以使用非捆绑型能源属性证书（如绿证）采购绿电。在这种情况下，铝冶炼企业应同时建立内部政策，优先选用同一区域、并为电网增加了新的可再生能源装机容量的绿证，并建立长期的采购计划支持可再生能源项目的长期发展。

当铝冶炼企业必须依靠市场化工具实现电力脱碳，《方法学》建议企业优先考虑优质的、减排贡献大的绿电交易方案。在评价相关市场化工具的总体质量时，铝冶炼企业应该参考以下关键标准：

- **额外性：**采购的绿电/绿证直接为区域/国家电网增加了新的可再生能源装机容量。

- **区域支持：**采购的绿电/绿证与用电企业在同一区域电网，并有一定的物理联系。

- **长期承诺：**拥有长期采购合同或长期购电/证计划，或有措施确保对可再生能源项目的长期金融支持。

铝冶炼厂以外的其他生产加工过程的电力脱碳决策也建议遵循以上标准和决策优先级。为了提高碳排放的透明度并避免重复计算，上述方案相关的能源属性证书/绿证应由报告方或其代表持有或核销。铝生产商应当从供应商处明确了解购电合同中所涉及的电力的全生命周期排放因子及其发电结构比例。如果铝生产商在报告中涉及有关可再生能源电力（绿电）的声明，其购电合同、能源属性证书（如绿证、可再生能源电力证书(REC)和其它此类证书）或相关电表读数，应作为证据支持相关声明。此外，在使用基于市场的方法计算外购电力排放时，如果有数据支持，企业应使用电网的“剩余组合排放因子”^{xii}，即在剔除经过市场化工具外售的可再生能源电量后的电网平均排放因子，计算外购电网电的排放量。

3.4.2 自备电力/热力

拥有并经营发电厂的铝生产商，应当掌握相关的自产能源（电力/热力）排放因子。如果没有，铝生产商可以按照国际铝协《原铝和前序产品碳足迹核算良好实践指南》的方法估算排放因子。发电用燃料上游的直接和间接排放，应当采用与燃料上游排放相同的核算方法。

在许多情况下，铝生产商可能会向其他行业出售部分自产电力（和/或热力）。相关企业应当参考第3.5.3节中的方法计算与出售的电力/热力相关的排放。

^{xii} 中国2024年发布的“全国电网剩余组合排放因子”为0.5942 t CO₂/MWh。

3.4.3 产品间可再生能源信用的质量分配

为了推动长期脱碳行动和电力能源的全面转型，本《方法学》不建议企业使用质量平衡方法在产品组合中分配可再生能源信用。外购可再生能源/绿电的排放收益应在单个生产场所进行核算，并在该生产场所各产线的产品之间平均分配。

3.5 输出产品

3.5.1中间产品

铝生产商可能会外售一部分在生产过程中的中间产品，那么这些中间产品相关的碳排放应从最终产品的碳排放计算中扣除，以确保报告的排放仅来自最终铝产品的生产活动。

铝行业最常见的中间产品有两种：氧化铝精炼中间过程的未煅烧氢氧化铝水合物，和预焙阳极生产商的剩余阳极。通常，氧化铝厂未煅烧的中间产物（氢氧化铝）可能被出售给其他行业，而剩余阳极可能卖给其他铝冶炼厂或最终用户。因此，与生产这些外售产品相关的排放应从总排放量中减去。

在氧化铝精炼厂的例子中，氧化铝生产商应该准确计算出外售氢氧化铝的实际排放强度，其中精炼厂的总排放量、与煅烧工序相关的排放量、外售的氢氧化铝的质量、以及煅烧前的氢氧化铝的质量是主要核算参数。氢氧化铝的排放强度是通过煅烧前的总排放量除以中间产品的总量（包括输出和冶炼厂）来核算的，见图表3的计算示例。如果无法获得煅烧前的氢氧化铝的质量，可以采用质量转换因子，即1.53吨氢氧化铝/吨氧化铝，进行估算^{xiii}。

图表3: 中间产品的减扣核算示例

参数	煅烧用氢氧化铝	外售氢氧化铝
氢氧化铝生产（铝土矿溶出、澄清、沉淀）排放量（Mt CO ₂ ）	12.0	
氢氧化铝产量（Mt）	15	5
氢氧化铝排放强度（t CO ₂ e/t）	0.6=12.0/（5+15）	
氧化铝煅烧排放量（Mt CO ₂ ）	5.0	
减扣后的现场总排放量（Mt CO ₂ ）	14.0=0.6*15+5.0	

在核算预焙阳极生产的碳排放时，也应扣除出售给其他用户的阳极材料排放量。其次，在制造预焙阳极时，并非所有输入材料(煤沥青和石油焦)的碳含量都可以转化为预焙阳极和二氧化碳，还会产生一些含碳废弃物。由于这些含碳废弃物的化学性质稳定，在适当的废弃物管理下，并不会转化为碳排放。

^{xiii} 该转换因子基于铝焙烧过程中氢氧化铝（Al（OH）₃）和氧化铝（Al₂O₃）的质量平衡（即2Al（OH）₃→Al₂O₃+3H₂O）

如果生产场所缺乏关键信息计算常见输出中间产品的排放强度，可以参考图表4中的背景排放因子为缺省值。

图表4: 外售中间产品的平均排放因子

常见中间产品	单位	排放因子(tCO ₂ e/单位) ^{xiv}	来源
铝土矿	t	0.0084	IAI范围3指南 (2023)
氢氧化铝	t	1.4211	
氧化铝	t	1.2648	
阳极	t	1.7499	
原铝液	t	13.0056	
原铝铸锭	t	16.4777	

3.5.2 副产品

铝生产加工过程中常见的副产品（或废物）有赤泥、铝渣、铝灰、盐渣、废槽衬、污泥和其它含碳或不含碳产品，其中一些副产品可以回收利用或用于其它行业。对于副产品回用的规定每个国家/地区有所不同，例如，美国不允许使用回用赤泥，但欧盟的一些国家允许将赤泥用于建筑材料，但相关应用并不广泛。因此，这些副产品回用不应计入企业的排放收益。

3.5.3 能源输出

在一些地区，满足售电资格的铝生产商可能会将自产电力/热力的一部分外售给能源市场、工业用户、能源分销公司等。对于企业外购的自产电力/热力，应在总能源排放核算中扣减已售出的能源和相应的排放量，通过自产能源的排放因子乘以外售的能量量计算。

一些铝生产企业可能使用热电联产技术在其自备电厂发电/热。热电联产厂的电力和热力输出的排放量应按照《温室气体协议》中的效率分配法确定^{xv}：

$$E_H = \frac{\frac{H}{e_H}}{\frac{H}{e_H} + \frac{P}{e_p}} \times E_T$$

$$E_p = E_T - E_H$$

资料来源:《温室气体协议- CHP指南》，2006

^{xiv} 这里指不包括运输在内的从摇篮到大门的排放因子。
^{xv} 该方法基于这样的假设，即将燃料能量转换为蒸汽能比将燃料转换为电力更有效

式中： E_p 和 E_H 分别指分配给电力和热力的排放量；
 E_T 为热电联产电厂的总排放量；
 H 为热力（蒸汽）输出量，单位为千瓦时，kWh；
 P 为发电量，单位为千瓦时，kWh；
 e_p ， e_H 分别为发电效率和发热效率。 $e_H=0.8$ ， $e_p=0.35$ 为行业经验值^{xvi}。

输出电力和热力的排放因子，应通过将电力/热力的总排放量除以总发电/发热量（即 E_p/P 和 E_H/H ）来计算。售电/热铝生产企业应按照这些排放因子计算外售能源关的排放量。《方法学》鼓励铝生产商检测适当的效率值（ e_H 和 e_p ）带入计算以更好反应真实的排放量。

3.6 数据来源

3.6.1 数据质量

铝生产商应优先使用实测或原始数据，并向供应商获取相关原材料的实际排放因子，计算代表真实生产排放水平的碳足迹。在原始数据无法获得的情况下，企业可以使用国家政府主管部门发布的官方数据中的排放因子作为缺省值，但使用背景值会降低总碳足迹计算中原始数据的比例。

本《方法学》不对数据的做出具体质量要求，但鼓励报告实体通过计算数据质量评级（DQR）指标，展示核算中数据源的相关性和可靠性。铝生产商可以参考其它相关组织如[Pathfinder框架](#)和[欧盟产品环境足迹规则](#)的DQR指标进行计算。

3.6.2 直接排放因子

铝生产加工过程中的直接排放源是包括生产使用的燃料燃烧（固体、液体或气体）、含碳原料的使用和反应、和阳极效应中产生的全氟化碳。在可能的情况下，铝生产商应该通过测量确定其使用的燃料的排放因子，包括由于不完全燃烧释放的 CH_4 和 N_2O 排放及任何非 CO_2 的温室气体排放。如果无法获得燃料排放因子的原始数据，也可以使用图表5和6中提供的平均排放因子作为缺省值。以下平均排放因子包括了燃料燃烧产生的 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 的排放，以IPCC AR5 100年全球变暖潜势(GWP)的二氧化碳当量为单位表示。与燃料上游生产有关的排放将在3.6.4.2节中讨论。

^{xvi} 标准值取自美国环保局的《温室气体协议》指导文件。

图表5: 固体燃料源的直接排放因子

常见固体燃料排放源	单位	排放因子 (tCO ₂ e/单位)	来源
无烟煤	吨	2.64	IPCC,2006
焦煤	吨	2.69	IPCC,2019
其它烟煤	吨	2.46	IPCC,2006
次烟煤	吨	1.83	IPCC,2006
褐煤	吨	1.21	IPCC,2006

注:《企业温室气体排放核算与报告指南铝冶炼行业》的数据取值由相应能源燃料的低位发热量、单位热值含碳量、碳氧化率的乘积,然后乘以3.67转化为二氧化碳当量计算获得。

图表6: 液体和气体燃料源的直接排放因子

常见气体、液体燃料排放源	单位	排放因子 (tCO ₂ e/单位)	来源
重油（残渣燃料油）	公升	2.95	IPCC,2006
柴油	公升	2.69	IPCC,2006
液化石油气	公升	1.62	IPCC,2006
天然气	吉焦	0.0585	IPCC,2006

注:《企业温室气体排放核算与报告指南铝冶炼行业》的数据取值由相应能源燃料的低位发热量、单位热值含碳量、碳氧化率的乘积,然后乘以3.67转化为二氧化碳当量计算获得。

铝冶炼过其它含碳原材料的使用和反应属于直接排放。根据两种主要的铝电解技术,使用预焙阳极预焙槽技术（用于95%的原铝生产）和使用阳极糊的自焙槽技术,铝生产商应该测量预焙阳极/阳极糊的含碳量,从而计算预焙阳极/阳极糊的含碳量在电解过程中消耗产生的碳排放量。如果无法测量含碳原材料的含碳量计算排放因子,铝生产商可以使用图表7中提供的背景数据排放因子。

图表7: 其它输入的直接排放因子^{xvii}

其他排放源	单位	排放因子 (tCO ₂ e/单位)	来源
石油焦煅烧	吨 生焦	0.22	国际铝协 《温室气体 协议-铝行业 计算工具》， 2015
阳极焙烧	吨 预焙阳极	0.23	
预焙阳极消耗	吨 阳极消耗	3.61	
自焙阳极糊消耗	吨 电极糊消耗	3.52	
碳酸盐消耗（纯碱）	吨 碳酸盐	0.39	
石灰煅烧	吨 石灰	0.78	

铝电解的过程还会释放是另一类温室气体，全氟化碳(PFC)。当电解过程中的氧化铝浓度低于生产铝所需的最佳浓度水平时，“阳极效应”会产生四氟化碳(CF₄)和六氟化碳(C₂F₆)排放。在可能的情况下，电解过程中的全氟化碳排放应当按照生产现场的活动参数计算，并将全氟化碳排放量按照各自的全球变暖潜能值转换为二氧化碳当量。作为参考，按照温室气体的100年全球变暖潜能，四氟化碳是二氧化碳的6630倍，六氟化碳是二氧化碳的11100倍。考虑到阳极效应的全氟化碳实际排放量根据不同的工艺等因素差异较大，《方法学》建议铝冶炼企业优先使用实测值进行计算。如果实测无法实现，企业应参考国际铝协《良好实践指南：测量全氟碳化合物》中的斜率法进行估算。如果以上两种方法均无法实现，铝冶炼企业可以使用最符合生产工艺的权威数据源或排放因子进行估算，如《企业温室气体排放核算与报告指南铝冶炼行业》中提供的排放因子，0.02kg CF₄ /t 原铝，0.0011 kg C₂F₆ /t 原铝。或者，铝冶炼企业也可以参照图表8中代表国际平均水平的排放因子。

^{xvii} 这些排放因子不包括相关燃料燃烧产生的二氧化碳排放，燃料燃烧排放应按照燃料使用的核算方法计算。

图表8: 阳极效应全氟化碳的排放因子

工艺	单位	PFC 类型		t CO ₂ /单位	来源
		CF ₄ (kg/单位)	C ₂ F ₆ (kg/单位)		
中心下料预焙	吨铝	0.4	0.04	3.1	国际铝协 《温室气体 协议-铝行业 计算工具》, 2015 ²³
侧面下料预焙	吨铝	1.6	0.4	15.05	
上插自焙槽工艺	吨铝	0.8	0.04	5.75	
侧插自焙槽工艺	吨铝	0.4	0.03	2.98	

3.6.3 电力排放因子

铝生产商应当尽量从电力供应商处获得生产设施用电的生命周期碳排放因子。电力排放的生命周期碳排放因子包括发电所用燃料的开采、生产和运输所产生的排放,也包括与建设和用于建设发电设施的原材料有关的排放,还包括输电和配电(T&D)损失相关的排放(见国际铝协《原铝和前序产品碳足迹核算良好实践指南》第6.4节)。

如果铝生产商使用的是自产电力,则应当使用与其自产电力设施相关的生命周期碳排放因子。如果数据无法获得,可以按照自发电的燃料结构,使用图表9中发电燃料生命周期碳排放因子计算。

图表9: 发电燃料的生命周期碳排放因子

燃料来源	单位	排放因子 (tCO ₂ e/单位)	来源
煤	兆瓦时	0.82	IPCC AR5 WG 3, 2014
燃气	兆瓦时	0.50	IPCC AR5 WG 3, 2014
其它化石	兆瓦时	0.66	IPCC AR5 WG 3, 2014
原子能	兆瓦时	0.01	IPCC AR5 WG 3, 2014
水电	兆瓦时	0.02	IPCC AR5 WG 3, 2014
风能	兆瓦时	0.01	IPCC AR5 WG 3, 2014
太阳能	兆瓦时	0.05	IPCC AR5 WG 3, 2014
生物能源	兆瓦时	0.23	IPCC AR5 WG 3, 2014
其它可再生能源	兆瓦时	0.06	IPCC AR5 WG 3, 2014

对于外购电力，铝生产商应当尽可能使用其购电区域的电网生命周期碳排放因子计算(应包括输配电损失)，或通过区域电网的燃料结构，使用发电燃料的生命周期碳排放因子进行计算。如果无法获得区域电网的数据，应当选用其所在国家电网的生命周期碳排放因子（或燃料结构和然后生命周期排放因子进行计算）。铝生产商应当优先采用国家发布的最新的电网生命周期碳排放因子。如果铝生产商无法得知外购电力的燃料结构，也可以使用来自可靠数据来源的国家平均电力燃料结构进行计算，然后依照IPCC的发电燃料生命周期碳排放因子和平均输配电损失估算相关外购电力排放。通常，使用更贴近真实电力来源的原始数据可以更准确地反应铝生产过程的电力相关排放量。

3.6.4 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。因为这些排放通常不在铝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，铝生产商应该优先向供应商获取相关原材料的实际排放因子。在原始数据无法获得的情况下，可以使用标准排放因子作为缺省值。但使用背景值会降低总碳足迹计算中原始数据的比例。

外购原材料和可能涉及的场外加工过程的排放

通常不在铝生产商的生产范围之内的排放可能包括一些外购原材料自身生产相关的排放，例如铝土矿开采、石灰石开采、石灰煅烧，烧碱生产等。煅烧的石灰、烧碱和铝土矿是氧化铝精炼过程的原材料，制成氧化铝后，再与碳酸盐和熔融冰晶石在电解槽生产纯铝。预焙阳极是铝冶炼过程中的另一个重要输入材料，主要由煅烧的石

油焦和煤沥青制成。如果这些工序在报告主体的生产范围以外，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，可以参照图表10中提供的背景排放因子，和图表11中可能涉及的场外加工过程的平均排放因子作为缺省值。在实际生产中，这些材料的排放强度可能根据生产技术、燃料种类、和电力使用情况有所不同。

图表10: 输入材料“摇篮到大门”的排放因子

外购材料的隐含碳	单位	排放因子 (tCO ₂ e/单位)	来源
铝土矿	吨 铝土矿	0.0084	IAI范围3核算工具
烧碱	吨 氢氧化钠	1.12	
煅烧石灰	吨 氧化钙	0.79	
硫酸	吨 硫酸	0.14	
煅烧石油焦（CPC）	吨 石油焦	1.88	
煤沥青（CTP）	吨 煤沥青	2.62	
预焙阳极	吨 预焙阳极	1.75	
氧化铝	吨 氧化铝	1.26	
纯碱	吨 碳酸钠	0.41	
钢（阴极）	吨 钢	1.89	
原铝液	吨 铝液	13.01	
氟化铝	吨 氟化铝	1.02	Peng et al., 2019

图表11: 可能涉及的场外加工过程（“大门到大门”）的排放

工序	单位	排放因子 (tCO ₂ e/单位)	来源
石灰石开采	吨 石灰石	0.003 ^{xviii}	美国能源部，2003
铝锭浇铸	吨 铸锭	0.139	IAI范围3核算工具
轧制	吨 加工材	0.43	IAI范围3核算工具
挤压	吨 加工材	0.68	IAI范围3核算工具
废料重熔/精炼	吨 废铝	0.53	美国铝协，2022

燃料的间接排放

每种燃料的生产过程也涉及碳排放，其中主要包括燃料的开采、生产加工、运输产生的排放。尤其在煤炭和天然气的生产中，逸散性甲烷是最主要的温室气体，因此这些排放也应该包括在产品碳足迹和碳绩效的核算范围内。在可能的情况下，铝生产商应该优先向供应商获取相关的实际排放因子。在原始数据无法获得的情况下，可以使用标准排放因子作为缺省值。

在可能的情况下，应该由燃料供应商确定燃料上游生产的相关排放，并将此信息提供给铝生产商。如在原始数据无法获得的情况下，铝生产商可以使用图表12提供的标准排放因子作为缺省值。对于逸散性甲烷，铝生产商可以要求燃料生产商依照现有标准，如天然气的MiQ，计算甲烷的排放量，更多细节参见下一节。

图表12: 燃料的上游排放因子

常用的化石燃料	上游排放的排放因子 (tCO ₂ e/TJ) ^{xviii}	来源
天然气	8.7	IAI范围3核算工具
煤	14.7	
重质燃料油	11.2	
轻质燃料油	11.2	
液化石油气	7.03	
柴油	16.36	
汽油	17.29	
丙烷	6.95	

^{xviii} 源文件中未提供该过程的非CO₂ GHG排放。因此，这些数值仅代表二氧化碳排放量。非二氧化碳温室气体排放量一般较小，可以通过生产过程中使用的燃料量和类型进行估算。

^{xix} 如果要将排放因子从能量单位 (TJ) 换为质量或体积单位(吨、立方米)，需要使用标准来源的能量密度值，如《温室气体协议》的“跨部门工具排放因子” excel表格。

如果需要将天然气从质量单位转换为能量单位，可以使用1公吨天然气约等于55.58 GJ的能量和1470.3立方米的行业经验值进行转换。

逸散性甲烷

逸散性甲烷是指在煤矿开采过程中以及天然气生产供应过程中，逃逸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，如煤炭类型、矿井深度和开采方法等。煤矿逸散性甲烷的平均排放因子见图表13，在实际操作中，排放值的变化幅度可达±15%。

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。在供应给最终消费者的天然气中，约有1.3-2.2%的量以逸散甲烷的形式排放。图表13也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。

图表14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。为了与最新的IPCC报告保持一致，铝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。然而在制定减排行动战略时，铝生产商需要考虑甲烷对气候的短期影响。

图表13: 煤矿和天然气逸散性甲烷排放因子

工艺	单位	逸散性甲烷 排放 (m³/ 单位)	排放因子 (tCO ₂ e/单位)		来源
			20年GWP	100年GWP	
煤炭-地表开采	Kg煤	0.006	0.34	0.11	Knolod,2020
煤炭-地下开采	Kg煤	0.019	1.08	0.36	Knolod,2020
天然气	m³ NG	0.017	0.97	0.32	Littlefield,2017

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》建议燃料生产商和铝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。

3.6.5 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，在《方法学》中，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。具体核算如下：

$$\text{原始数据比例 (\%)} = \frac{\text{基于原始数据计算的排放量 (CO}_2\text{e)}}{\text{总排放量(CO}_2\text{e)}}$$

以上方法与国际上的Pathfinder框架下所要求的原始数据的核算方法是一致的。

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次级数据的具体定义见图表14。考虑到燃料的上游生产排放的原始数据普遍较难获得，本《方法学》建议在解读原始数据比例时，应认为在5%的误差范围内具有相同的可信度。

图表14: 初级数据定义

活动类别		原始数据定义	次级数据定义
燃料	燃烧/使用	首选供应商数据 本方法学中提供的标准排放因子（IAI、IPCC、EPA等）或测定的碳含量	不适用
	生产	供应商数据	第3.6.4.2节中的排放因子或Pathfinder中列出的数据库
其它材料输入		供应商数据	第3.6.4.1节中的排放因子或Pathfinder中列出的数据库
外购热力		供应商数据	基于假定燃料热源的平均排放因子
电力		· 厂内发电：场内原始数据 · 外购电力：供电商数据或绿证/能源属性证书中合法注册和注销的排放量^{xx} · 基于区域位置的电网排放因子^{xxi}	国家或全球电网排放因子

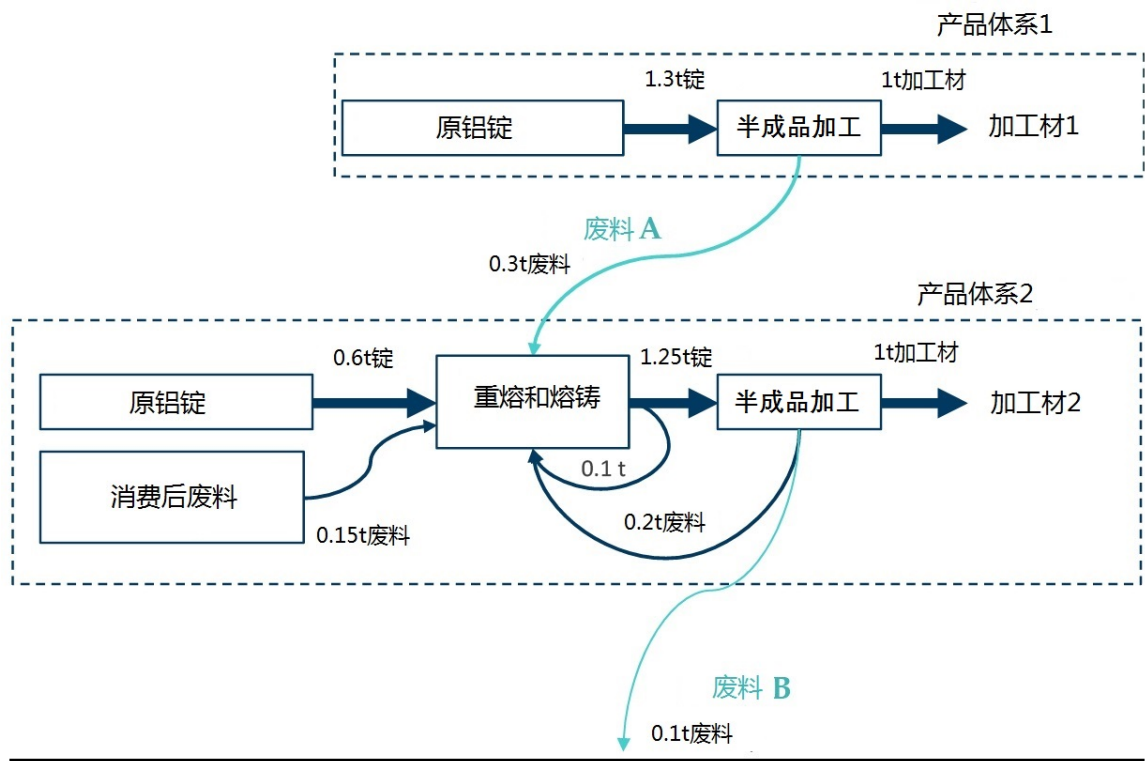
注:次级数据也可从行业机构发布的相关数据库中获取,例如汽车生命周期评价数据库(CALCD)等

^{xx} 绿证/能源属性证书的使用需满足第3.4.1.2节中的高质量市场化购电方式标准。

^{xxi} 如果连接的电网覆盖整个国家，则可将国家电网的排放因子视为原始数据。

附录A-第3.3.3节的核算示例

图表15: 用于说明截断法和共生产品分配法的产品系统



截断法

产品系统1	排放强度 (t CO ₂ e/t Al)	工序排放 (t CO ₂ e)		
		总排放	加工材1	废料A
原铝锭	4	5.2	5.2	0
半成品加工	0.5	0.5	0.5	0
合计			5.7	0
核算的产品碳足迹PCF(t CO ₂ e/t Al)			5.7	0

产品系统2	排放强度 (t CO ₂ e/t Al)	工序排放 (t CO ₂ e)		
输入流/工序		总排放	加工材2	废料B
原铝锭	9	5.4	5.4	0
消费后废料	0	0	0	0
废料A	0	0	0	0
重熔和回收	0.3	0.41	0.41	0
半成品加工	0.5	0.5	0.5	0
合计			6.31	0
核算的产品碳足迹PCF(t CO ₂ e/t Al)			6.31	0

共生产品分配法

产品体系1	排放强度 (t CO ₂ e/t Al)	工序排放 (t CO ₂ e)		
输入流/工序		总排放	加工材1	废料A
原铝锭	4	5.2	$5.2 \times 1 / (1 + 0.3) = 4$	$5.2 \times 0.3 / (1 + 0.3) = 1.2$
半成品加工	0.5	0.5	0.5	0
合计			4.5	1.2
核算的产品碳足迹PCF(t CO ₂ e/t Al)			4.5	$1.2 / 0.3 = 4$

产品体系2	排放强度 (t CO ₂ e/t Al)	工序排放 (t CO ₂ e)		
输入流/工序		总排放	加工材2	废料B
原铝锭	9	5.4	$5.4 \times 1 / (1 + 0.1) = 4.91$	$5.4 \times 0.1 / (1 + 0.1) = 0.49$
消费后废料	0	0	0	0
废料A	4	1.2	$1.2 \times 1 / (1 + 0.1) = 1.09$	$1.2 \times 0.1 / (1 + 0.1) = 0.11$
重熔和回收	0.3	0.4	$0.4 \times 1 / (1 + 0.1) = 0.37$	$0.4 \times 0.1 / (1 + 0.1) = 0.04$
半成品加工	0.5	0.5	0.5	0
合计			6.87	0.64
核算的产品碳足迹PCF(t CO ₂ e/t Al)			6.87	0.64/0.1=6.4

一致性检验:

如果对所有产品采用相同的核算方法,那么总排放量将一致,不存在排放泄漏。

方法	半加工1 (t CO ₂ e)	半加工2 (t CO ₂ e)	废料B (t CO ₂ e)	合计 (t CO ₂ e)
截断法	5.7	6.31	0	12.01
共生产品法	4.5	6.87	0.64	12.01

索引备注

¹ “1.5 Degrees Scenario: A Model To Drive Emissions Reduction” IAI, October 2021. <https://international-aluminium.org/resource/1-5-degrees-scenario-a-model-to-drive-emissions-reduction/>.

² “RMI Horizon Zero” RMI, Accessed April 5, 2023. <https://rmi.org/our-work/climate-intelligence/horizon-zero/>.

³ “Pathfinder Framework Version 2.0” WBCSD, January 2023. <https://www.wbcsd.org/PFV2.0>.

⁴ *Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard*, WRI/WBCSD GHG Protocol, March 2004. <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf>.

⁵ “1.5 Degrees Scenario” IAI, October 2021. <https://international-aluminium.org/resource/1-5-degrees-scenario-a-model-to-drive-emissions-reduction/>.

⁶ “Global Logistics Emissions Council (GLEC) Framework for Logistics Emissions Accounting and Reporting Version 2.0” Smart Freight Centre, July 2022. <https://www.smartfreightcentre.org/en/how-to-implement-items/what-is-glec-framework/58/>.

⁷ “1.5 Degrees Scenario” IAI, October 2021. <https://international-aluminium.org/resource/1-5-degrees-scenario-a-model-to-drive-emissions-reduction/>.

⁸ *The Aluminum Sector Greenhouse Gas Protocol*, WRI/WBCSD GHG Protocol, October 2006. https://ghgprotocol.org/sites/default/files/aluminium_1.pdf.

⁹ *Aluminium Carbon Footprint Technical Support Document*, IAI, February 2018. <https://www.international-aluminium.org/wp-content/uploads/2021/03/Aluminium-Carbon-Footprint-Technical-Support-Document.pdf>.

¹⁰ *Good Practice Guidance for Calculation of Primary Aluminium and Precursor Product Carbon Footprints v2.0*, IAI, August 2021. https://international-aluminium.org/wp-content/uploads/2021/08/CF-Good-Guidance-v2_final-2021.pdf.

¹¹ *Good Practice Guidance: Measuring Perfluorocarbons*, IAI, December 2020. https://international-aluminium.org/wp-content/uploads/2021/03/iai_good_practice_guidance_measuring_perfluorocar.pdf.

¹² *Reference Document on Carbon Footprint Calculations of Aluminium Scrap*, IAI, January 2023. <https://international-aluminium.org/wp-content/uploads/2023/01/Carbon-footprint-of-recycled-aluminium-IAI-Documents-Public-Review-Final.pdf>.

¹³ *Reference Document on Carbon Footprint Calculations of Aluminium Scrap*, IAI, January 2023. <https://international-aluminium.org/wp-content/uploads/2023/01/Carbon-footprint-of-recycled-aluminium-IAI-Documents-Public-Review-Final.pdf>.

¹⁴ *ISO 14021:2016 Environmental Labels and Declarations — Self-Declared Environmental Claims (Type II Environmental Labelling)*, International Organization for Standardization (ISO), March 2016. <https://www.iso.org/standard/66652.html>.

¹⁵ *Reference Document on Carbon Footprint Calculations of Aluminium Scrap*, IAI, January 2023. <https://international-aluminium.org/wp-content/uploads/2023/01/Carbon-footprint-of-recycled-aluminium-IAI-Document-Public-Review-Final.pdf>.

¹⁶ “Aluminium Sector Greenhouse Gas Pathways to 2050” IAI, September 2021. <https://international-aluminium.org/resource/aluminium-sector-greenhouse-gas-pathways-to-2050-2021/>.

¹⁷ “Guidelines on Transparency - Aluminium Scrap” IAI, September 2022. <https://international-aluminium.org/resource/guidelines-on-transparency-aluminium-scrap/>.

¹⁸ *Making Net-Zero Aluminium Possible*, Mission Possible Partnership (MPP), September 2022. <https://missionpossiblepartnership.org/wp-content/uploads/2022/09/Making-1.5-Aligned-Aluminium-possible.pdf>.

¹⁹ *Reference Document on Carbon Footprint Calculations of Aluminium Scrap*, IAI, January 2023. <https://international-aluminium.org/wp-content/uploads/2023/01/Carbon-footprint-of-recycled-aluminium-IAI-Document-Public-Review-Final.pdf>.

²⁰ *Reference Document on Carbon Footprint Calculations of Aluminium Scrap*, IAI, January 2023. <https://international-aluminium.org/wp-content/uploads/2023/01/Carbon-footprint-of-recycled-aluminium-IAI-Document-Public-Review-Final.pdf>.

²¹ *Good Practice Guidance for Calculation of Primary Aluminium*, IAI, August 2021. https://international-aluminium.org/wp-content/uploads/2021/08/CF-Good-Guidance-v2_final-2021.pdf.

²² *Good Practice Guidance for Calculation of Primary Aluminium*, IAI, August 2021. https://international-aluminium.org/wp-content/uploads/2021/08/CF-Good-Guidance-v2_final-2021.pdf.

²³ *GHG Protocol Scope 2 Guidance*, WRI/WBCSD GHG Protocol, 2015. <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2023-03/Scope%20%20Guidance.pdf>.

²⁴ *ISO 14067:2018 Greenhouse gases Carbon footprint of products - Requirements and guidelines for quantification*, International Organization for Standardization (ISO), August 2018. <https://www.iso.org/standard/71206.html>.

²⁵ *Good Practice Guidance for Calculation of Primary Aluminium*, IAI, August 2021. https://international-aluminium.org/wp-content/uploads/2021/08/CF-Good-Guidance-v2_final-2021.pdf.

²⁶ “IAI Scope 3 Calculation Tool & Guidance” IAI, November 2022. <https://international-aluminium.org/resource/iai-scope3-calcuation-tool-and-guidance/>. <https://international-aluminium.org/resource/iai-scope3-calcuation-tool-and-guidance/>.

²⁷ *Allocation of GHG Emissions from a Combined Heat and Power (CHP) Plant*, WRI/WBCSD GHG Protocol,

September 2006. https://ghgprotocol.org/sites/default/files/CHP_guidance_v1.0.pdf.

²⁸ *Allocation of GHG Emissions from a Combined Heat and Power (CHP) Plant*, WRI/WBCSD GHG Protocol, September 2006. https://ghgprotocol.org/sites/default/files/CHP_guidance_v1.0.pdf.

²⁹ *Indirect Emissions from Purchases/Sales of Electricity and Steam*, Climate Leaders Greenhouse Gas Inventory Protocol Core Module Guidance, October 2004. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPURL.cgi?Dockkey=P1004NA2.TXT>.

³⁰ *Good Practice Guidance for Calculation of Primary Aluminium*, IAI, August 2021. https://international-aluminium.org/wp-content/uploads/2021/08/CF-Good-Guidance-v2_final-2021.pdf.

³¹ “Pathfinder Framework Version 2.0” WBCSD, January 2023. <https://www.wbcds.org/PFV2.0>; and *Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR) for Metal Sheets for Various Applications*, European Commission, June 2019. https://wayback.archive-it.org/org-1495/20221004164603/https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/2019-06-28_PEFCR_Metal_Sheets_final.pdf.

³² “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>.

³³ *2019 Refinement to the 2006 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.

³⁴ *The Aluminum Sector Greenhouse Gas Protocol*, WRI/WBCSD GHG Protocol, October 2006. https://ghgprotocol.org/sites/default/files/aluminium_1.pdf.

³⁵ “IAI-GHG Protocol Aluminum Sector Tool, Version 2.1” WRI/WBCSD GHG Protocol, May 2015. https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2023-03/Aluminium%20Sector%20GHG%20Workbook%20-%20version%202_1_0.xls.

³⁶ “Aluminum Industry” US EPA Overviews and Factsheets, 2016. <https://www.epa.gov/f-gas-partnership-programs/aluminum-industry>.

³⁷ *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.

³⁸ “IAI-GHG Protocol Aluminum Sector Tool, Version 2.1” WRI/WBCSD GHG Protocol, May 2015. https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2023-03/Aluminium%20Sector%20GHG%20Workbook%20-%20version%202_1_0.xls.

³⁹ *Good Practice Guidance for Calculation of Primary Aluminium*, IAI, August 2021. https://international-aluminium.org/wp-content/uploads/2021/08/CF-Good-Guidance-v2_final-2021.pdf.

⁴⁰ *Annex III: Technology-Specific Cost and Performance Parameters. In: Climate Change 2014:*

Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2014.

⁴¹ “IAI Scope 3 Calculation Excel Tool” IAI, November 2022. <https://international-aluminium.org/wp-content/uploads/2022/11/IAI-Scope-3-Calculation-Tool.xlsm>.

⁴² Peng, Tianduo, Xunmin Ou, Xiaoyu Yan, and Gehua Wang, *Life-Cycle Analysis of Energy Consumption and GHG Emissions of Aluminium Production in China*, Energy Procedia, Innovative Solutions for Energy Transitions, 158 (February 1, 2019): 3937–43. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.849>.

⁴³ *Energy and Emission Reduction Opportunities for the Cement Industry*, U.S. Department of Energy, December 29, 2003. https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/industries_technologies/imf/pdfs/eeroci_dec03a.pdf.

⁴⁴ “IAI Scope 3 Calculation Tool & Guidance” IAI, November 2022. <https://international-aluminium.org/resource/iai-scope3-calcuation-tool-and-guidance/>.

⁴⁵ “IAI Scope 3 Calculation Excel Tool” IAI, November 2022. <https://international-aluminium.org/wp-content/uploads/2022/11/IAI-Scope-3-Calculation-Tool.xlsm>.

⁴⁶ “IAI Scope 3 Calculation Excel Tool” IAI, November 2022. <https://international-aluminium.org/wp-content/uploads/2022/11/IAI-Scope-3-Calculation-Tool.xlsm>.

⁴⁷ *The Environmental Footprint of Semi-Fabricated Aluminum Products in North America*, The Aluminum Association, January 2022. https://www.aluminum.org/sites/default/files/2022-01/2022_Semi-Fab_LCA_Report.pdf.

⁴⁸ “The MiQ Standard” MiQ, Accessed April 9, 2023. <https://miq.org/the-technical-standard/>; “40 CFR Part 98 Mandatory Greenhouse Gas Reporting Subpart FF -- Underground Coal Mines” US EPA, 2010. <https://www.ecfr.gov/current/title-40/chapter-I/subchapter-C/part-98/subpart-FF>.

⁴⁹ “IAI Scope 3 Calculation Excel Tool” IAI, November 2022. <https://international-aluminium.org/wp-content/uploads/2022/11/IAI-Scope-3-Calculation-Tool.xlsm>.

⁵⁰ *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.

⁵¹ Kholod, Nazar, Meredydd Evans, Raymond C. Pilcher, Volha Roshchanka, Felicia Ruiz, Michael Coté, and Ron Collings, *Global Methane Emissions from Coal Mining to Continue Growing Even with Declining Coal Production*, *Journal of Cleaner Production* 256 (May 20, 2020): 120489. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120489>.

⁵² Littlefield, James A., Joe Marriott, Greg A. Schivley, and Timothy J. Skone, *Synthesis of Recent Ground-Level Methane Emission Measurements from the U.S. Natural Gas Supply Chain*, *Journal of Cleaner Production* 148 (April 1, 2017): 118–26. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.101>.

⁵³ *Improving Characterization of Anthropogenic Methane Emissions in the United States*, National Academies of Sciences, Engineering, 2018. <https://doi.org/10.17226/24987>.

⁵⁴ “Pathfinder Framework Version 2.0” WBCSD, January 2023. <https://www.wbcsd.org/PFV2.0>.

刘雯娟, Sravan Chalasani等, 铝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/aluminum_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10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。