

实现可再生能源的零排放



除非另有说明，本出版物中的材料可以自由使用、分享、复制、印刷和/或存储，前提是适当注明IRENA为来源和版权所有。本出版物中归属第三方的内容可能受单独的使用条款和限制，在使用此类材料之前可能需要获得这些第三方的适当许可。

ISBN: 978-92-9260-649-7

引用：IRENA (2025)，[IRENA](#)，国际可再生能源
达到零排放——铝行业
机构，阿布扎比。

可供下载：www.irena.org/publications

关于进一步信息或提供反馈，请联系IRENA，邮箱：publications@irena.org

国际可再生能源机构（IRENA）是一个政府间组织，支持各国向可持续能源未来的转型，并作为国际合作的主要平台、卓越中心以及可再生能源政策、技术、资源和金融知识的存储库。IRENA促进各种可再生能源的广泛采用和可持续使用，包括生物质能、地热能、水能、海洋能、太阳能和风能，以追求可持续发展、能源获取、能源安全和低碳经济增长与繁荣。

报告由Karan Kochhar和Luis Janeiro撰写，在Francisco Boshell和Roland Roesch（IRENA创新与技术中心总监）的指导下完成。Pernelle Nunez和Linlin Wu（国际铝业协会）为报告的概念、发展和对分析的广泛反馈提供了大量意见。

马丁·伊费特博士（能源池，马丁·伊费特咨询）提供了大量背景信息和反馈。萨法尔·萨马多夫、阿卜杜拉·法哈德、杨 Chen、阿德里安·冈萨雷斯和肖恩·柯林斯（IRENA），以及马尔伦·贝特兰（IAI）和玛格汉蒂塔·约翰逊（澳大利亚铝业委员会）提供了宝贵的评审。IRENA感谢IAI能源与环境委员会对报告初步发现的意见反馈。

报告由Justin French-Brooks进行校对编辑，技术审核由Paul Komor提供。编辑支持由Francis Field和Stephanie Clarke提供。设计由战略议程提供。

本出版物及其内含材料提供“原样”使用。IRENA已采取所有合理的预防措施以验证本出版物中材料的可靠性。然而，IRENA及其任何官员、代理人、数据或其他第三方内容提供商均不提供任何形式的明示或暗示的保证，并且不对使用本出版物或内含材料的任何后果承担责任或义务。

此处包含的信息并不必然代表IRENA所有成员的观点。提及特定的公司、某些项目或产品并不暗示IRENA对这些（与未提及的其他类似项目）相比表示认可或推荐。此处使用的名称和材料呈现方式并不表示IRENA对任何地区、国家、领土、城市或地区的法律地位，或其当局的法律地位，或关于边界或边界的划定有任何意见的表达。

	7
	11
1.1 铝生产过程 13	
1.2 目前铝行业 14	
1.3 铝行业的环境相关性 16	
1.4 铝行业中的能源成本敏感性 19	
	20
2.1 第一支柱：用于熔炼和氧化铝精炼的可再生能源供应 22	
第二部分：最大化原材料效率和再生铝的潜力。 42	
2.3 第三支柱：额外的脱碳杠杆 51	
	53
3.1 铝行业转型近期进展 54	
3.2 决策制定者关键考虑因素 55	
3.3 加速铝行业转型的重要措施 57	
	59

图S1 铝行业脱碳的关键行动领域 9

图1 铝价值链 13

图2：原生铝生产的历史增长 14

图3	区域性的氧化铝、氧化铝和铝生产混合	15
图4	区域铝消费混合情况	15
图5	铝需求按用途的分解	16
图6	原铝价值链中的温室气体排放	17
图7	燃料混合在氧化铝精炼（顶部）和电力混合在铝冶炼（底部）中的演变	18
图8	能源成本占总生产成本的份额，在氧化铝精炼和铝生产中熔炼	19
图表9	概述铝行业温室气体影响的因素，以及脱碳的支柱。	21
图10	与原生铝生产相关的电力排放	22
图11	全球新建的公用规模可再生能源技术度电成本，2010-2023	24
图12	LCOE of utility-scale solar PV (top) and onshore wind (below) compared with fossil fuel 在不同铝冶炼产能区域的发电量分别为	25
图13	年度发电能力增减	26
图14	全球电力发电比例和装机容量按能源来源划分：计划能源情景和1.5°C情景下的2020年、2030年和2050年	27
图15	模型：为铝冶炼提供可再生能源的采购	29
图16	电力系统灵活性促进因素	31
图17	系统图：使用可再生能源运行的铝冶炼厂电力流向图 能源与储能	33
图18	平均每小时光伏和冶炼负荷每兆瓦装机容量产出	33
图19	太阳能光伏电站无电池的负载持续曲线与1号地点的冶炼厂负载对比图	34
图20	太阳能光伏电站带电池的负载持续时间曲线与1号地点的冶炼厂负载对比	35
图21	平均每小时太阳能光伏和陆上风电场产量与每兆瓦熔炼负荷对比 已安装的容量	36
图22	太阳能光伏、无电池风力发电站和2号地点的冶炼厂的负载持续时间曲线	36
图23	太阳能光伏、带电池的风力发电站以及2号地点的冶炼厂的负载持续时间曲线	37

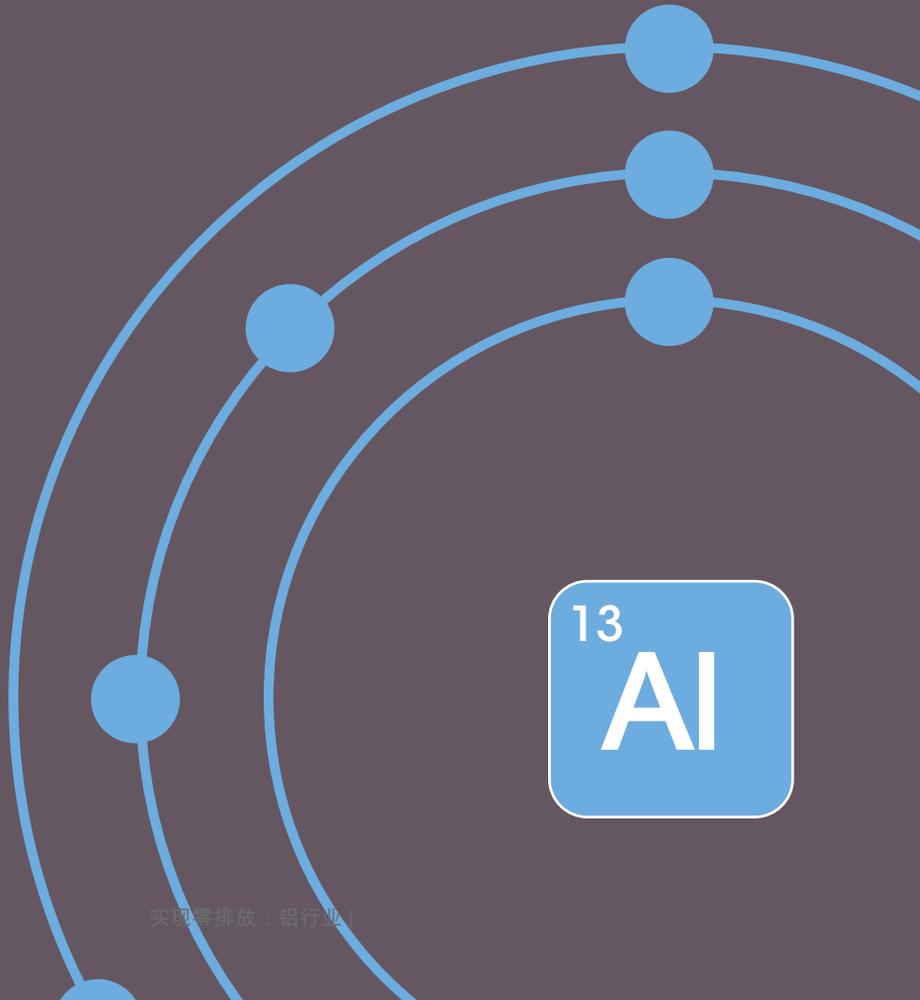
- 图24 系统性创新方法 38
- 图25 对氧化铝进行提纯，采用拜耳法。 40
- 图26 资源和铝的经济效率 42
- 图 27 2021年铝生产中废料的占比 47
- 图28 未来铝生产中回收利用的潜在作用 48
- 图29 2050年铝行业回收与材料效率措施的作用 50
- 图30 能源强度：冶金氧化铝精炼（顶部）和原生铝冶炼（底部） 52

- 表 1 太阳能光伏和风力发电购电协议计划用于铝冶炼（非详尽） 28
- 表 2 系统性创新以实现灵活的冶炼作业和将可再生能源（VRE）整合到电网中 39
- 表 3 脱碳化铝精炼工艺的选项 41
- 表 4 材料效率原则在铝的不同终端用途中的应用 43
- 表 5 能源和排放强度不同的铝生产线 45
- 表6 2020年预估的回收后消费废品收集率 46
- 表7 铝行业转型加速行动摘要 59

Al	铝	千瓦时	千瓦时
业务持续 (Business As Usual)	业务照常进行 (Usual)	生命周期成本 (Life Cycle Cost)	生命周期成本 (Life Cycle Cost)
COP28	第二十八次会议各方	MBtu	百万英热单位
CO ₂	二氧化碳	MPP	使命可行伙伴关系
CO ₂ eq	二氧化碳当量	Mt	百万吨
CST	集中式太阳能热能	MVR	机械蒸汽再压缩
DR	需求响应	MW	兆瓦
EJ	艾焦耳	兆瓦时 (MWh)	兆瓦时 (MWh)
FMC	首次行动联盟	OCGT	开环式燃气轮机
温室气体	温室气体	PES	国际可再生能源机构 (IRENA) 规划能源情景
GJ	千焦	PPA	电力购销协议
GO	原产地保证	PV (光伏)	光伏
Gt	吉加吨	研发与开发 (Research and Development)	研发与开发 (Research and Development)
GW	千瓦	研究与开发 (R&D)	研究与开发 (R&D)
千兆瓦时	千兆瓦时	SO ₂	二氧化硫
以色列航空国际公司 (IAI)	以色列航空国际公司 (IAI)	t	吨
国际能源署 (International Energy Agency)	国际能源署 (International Energy Agency)	太瓦时	太瓦时
国际可再生能源机构	国际可再生能源机构	可变可再生能源	可变可再生能源



执行摘要



铝是一种高度多功能的金属，由于其轻质、高强度、可回收性和良好的导电性，它在包装、运输、电子、建筑和可再生能源等多个行业中至关重要。在过去的几十年里，由于新市场和应用的开发以及经济增长，尤其是新兴经济体，铝的使用已经显著增加。尽管铝为现代社会提供了巨大的价值，但它也是气候变化的重要贡献者。2022年，铝的生产产生了大约1.1亿吨（Gt）的二氧化碳（CO₂）排放，主要原因是铝²生产对化石燃料的能源供应依赖。

铝产量预计到2050年将增长超过三分之一。如果不采取措施使该行业脱碳，铝行业的排放将持续增加。本报告为行业和政策制定者提供了关于可再生能源和其他减少铝行业排放杠杆作用的见解。

铝冶炼——从其精炼矿石中提取铝金属——占生产过程中（以吨计，全球平均）总二氧化碳排放的四分之三。冶炼主要依赖电力作为²能源输入。因此，熔炼过程中的排放量因电力组合而异；使用可再生能源（如水力发电）的熔炼厂比依赖化石燃料的排放量低。因此，通过增加可再生能源（如风能和太阳能）的使用量，而不是化石燃料，是减少该行业碳足迹的关键解决方案。

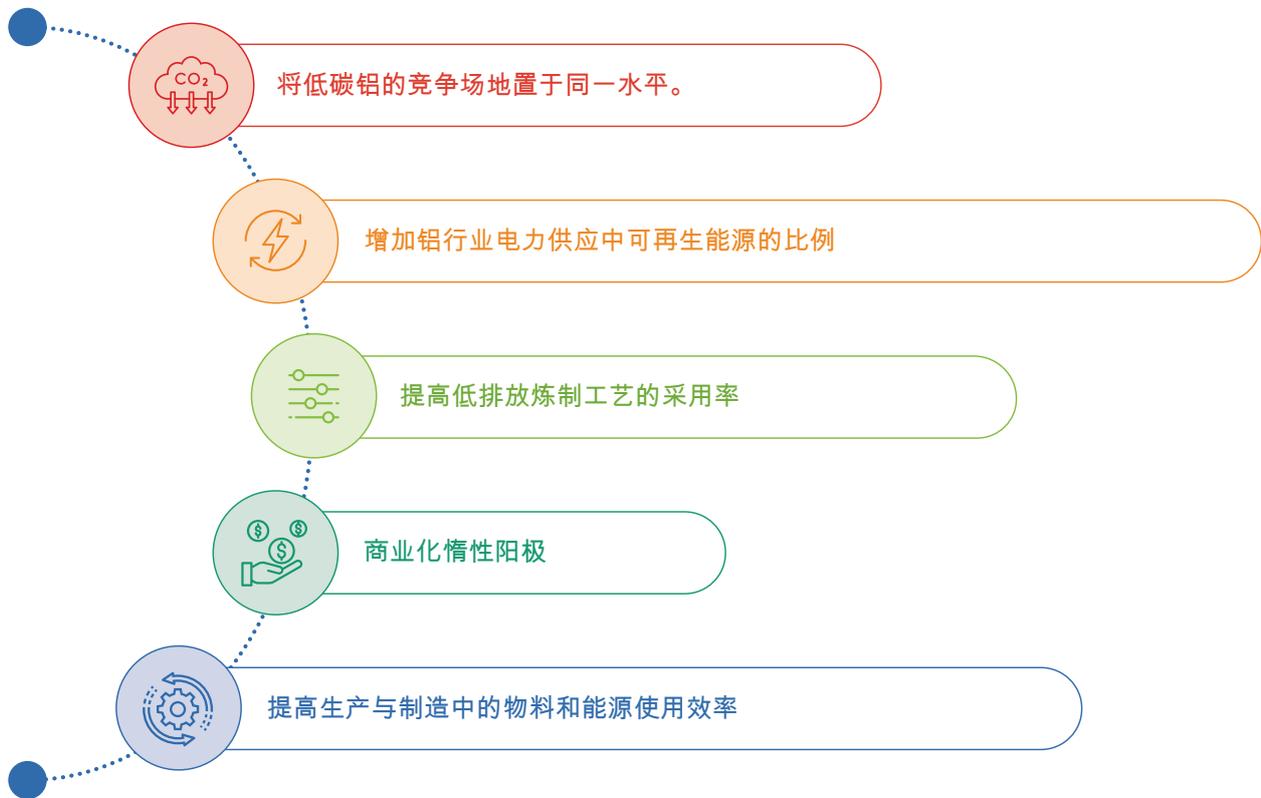
在过去十年中，现代可再生能源技术，如太阳能光伏（PV）和风力发电，已成为世界上大多数市场上成本最低的新能源发电方式。此外，通过规模经济和技术进步，太阳能光伏和风力发电还有降低成本的潜力。因此，它们有望成为全球低碳能源供应的基础，并在铝行业去碳化过程中发挥关键作用。随着时间的推移，那些具有最高质量和最丰富可再生能源供应地点可能会成为铝生产最具竞争力的地区。

通过在熔炼过程中整合太阳能光伏和风力发电，铝生产商可以引领行业按照《巴黎协定》进行转型。几家熔炼厂已经计划通过长期电力购买协议（PPAs）整合太阳能光伏和风力发电能力。然而，由于多种因素，大多数熔炼厂仍然难以获得有吸引力的可再生能源PPAs。这些因素包括监管和市场壁垒，阻碍了可再生能源的快速部署，以及对于低碳电力的旺盛需求，这可能会推高价格，超出铝生产商能够承担的水平，考虑到行业的狭小利润空间。此外，太阳能和风力的波动性对熔炼厂来说是一个挑战，因为它们传统上需要稳定的电力供应。

没有单一的“一刀切”方案可以将大量现代可再生能源整合到铝冶炼中。冶炼厂可用的选项取决于冶炼厂所在地可再生能源的可用性，该地区电力系统灵活性解决方案的可用性，以及冶炼厂自身的运营灵活性程度。

其他两个二氧化碳排放的主要来源是氧化铝提炼和碳阳极。这些来源²贡献了近五分之一的主要生产总二氧化碳排放量，并且在低碳区域。

²电力已经被用于冶炼，是排放的重要组成部分。铝行业的深度脱碳将涉及广泛采用低碳精炼工艺和惰性阳极。然而，低碳精炼工艺的成本在很多情况下仍然很高，而惰性阳极尚未商业化。



尽管面临挑战，铝行业正在采取措施以减少其排放。几家生产商已将可再生能源整合到熔炼过程中，并参与研发与开发（RD&D）举措，以降低铝生产其他领域的排放。在促进对低碳铝的需求方面也取得了进展。不同的参与者参与了跟踪排放、鼓励资金流向低碳铝、以及与其他参与者合作开展行业脱碳举措的倡议。

然而，按照《巴黎协定》的目标实现铝行业的脱碳将需要更多积极和协作的努力，涉及政府、生产商、消费者、学术界以及非国家行为体。

在总体上，一个支持性的政策环境对加速铝行业的减排至关重要。铝行业、项目开发商和投资者需要明确的、稳定的以及可信的减排目标信号和充足的经济激励措施，以促进对低碳技术的投资决策。细化来看，这需要关注具体的战略领域以有效推动变革。

关键的第一步是通过对化石能源的负面环境影响进行内部化，为低碳铝创造一个公平的竞争环境，或者创建一个低碳铝市场。后者包括通过公共采购和私营部门举措，如自愿计划和与生产商的伙伴关系来增长需求。制定和实施稳健的标准、认证和标签方案可以进一步促进市场的形成。

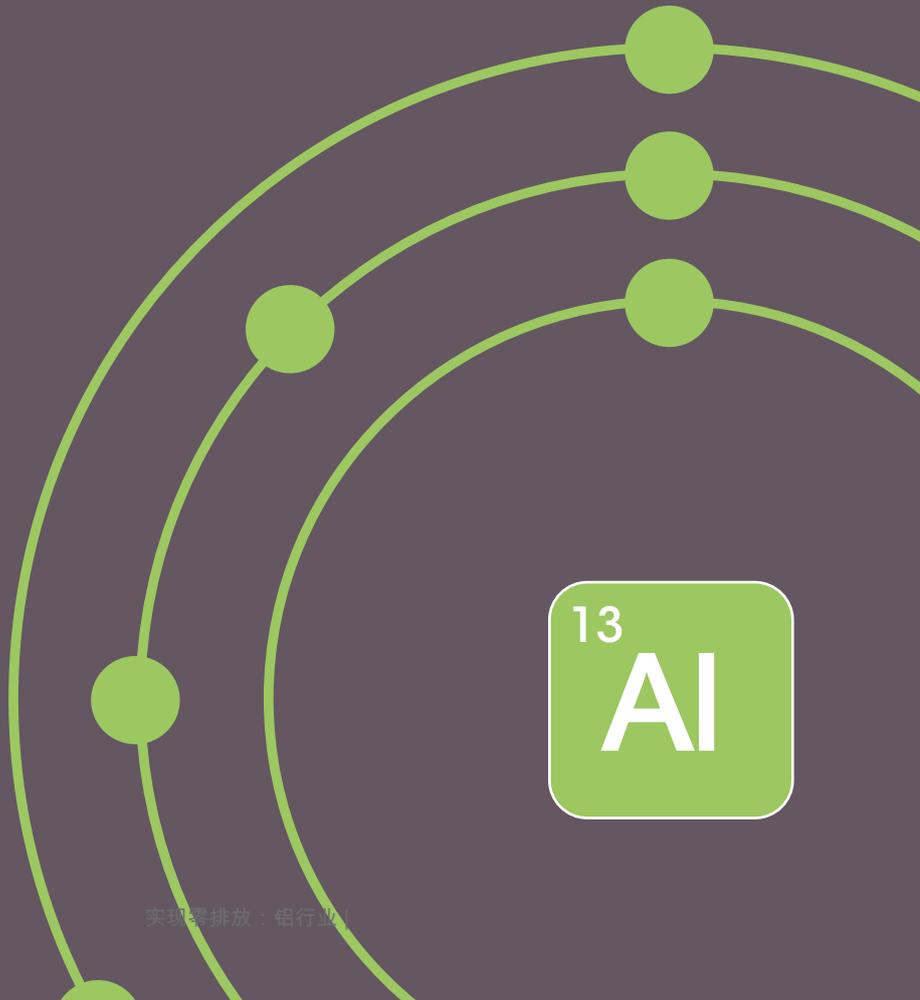
在行业转型的核心是增加铝行业可再生能源供应份额，尤其是用于冶炼的份额。这包括迅速发展可再生能源供应，到2030年将可再生能源产能增加到三倍，这与COP28第一次全球盘点成果中表达的目标一致，被称为“阿联酋共识”。政府可以通过减少开发和整合可再生能源进入电力系统的障碍来促进这种增长。铝生产商也可以通过不同的机制探索将可再生能源供电整合到他们的运营中。

尽管熔炼是最大的排放来源，但为了实现深度脱碳，关注其他排放源也很重要。为此，推动低排放的铝土矿提炼是重要的。为此，政府可以提供经济激励措施以采用低碳提炼技术，或者直接提供研究资金或支持。铝生产商也可以与其他参与者合作，增加对低排放提炼技术的研发和开发（RD&D）的努力。实现深度脱碳的另一个重要杠杆是惰性阳极的商业化，这需要行业和研究机构合作，解决剩余的运营差距，并高效推广该技术。

一些行业在材料与能源使用效率方面仍具有改进的潜力。这需要所有利益相关者在实施不同计划中共同参与，例如投资研发、采用先进技术、执行标准以及推广废料收集和新型合金开发的最佳实践。



1. 简介



铝提供卓越的通用性。它支持广泛的应用，包括包装、汽车、电力电缆和设备以及其他对人类进步至关重要的关键应用。铝的通用性归因于其高强度、轻重量、可回收性以及优异的电导率和热导率。铝还可以与不同的元素合金化，以实现特定应用所需的特性。这些特性使其成为建筑、交通和电子应用的理想材料。由于其非毒性，铝在食品包装以及作为健康和卫生产品的添加剂方面也得到了广泛使用。此外，铝由于其用于太阳能电池板、风力涡轮机、电动汽车和传输电缆，在促进能源转型中发挥着关键作用。

2022年，铝市场价值约为1600亿美元（GMI，未注明年份）。该行业对全球社区至关重要，2019年提供了超过700万个直接和间接工作岗位（IAI，2021a）。然而，铝的生产产生了大量的温室气体（GHG）排放，排放量超过11亿吨CO₂ eq

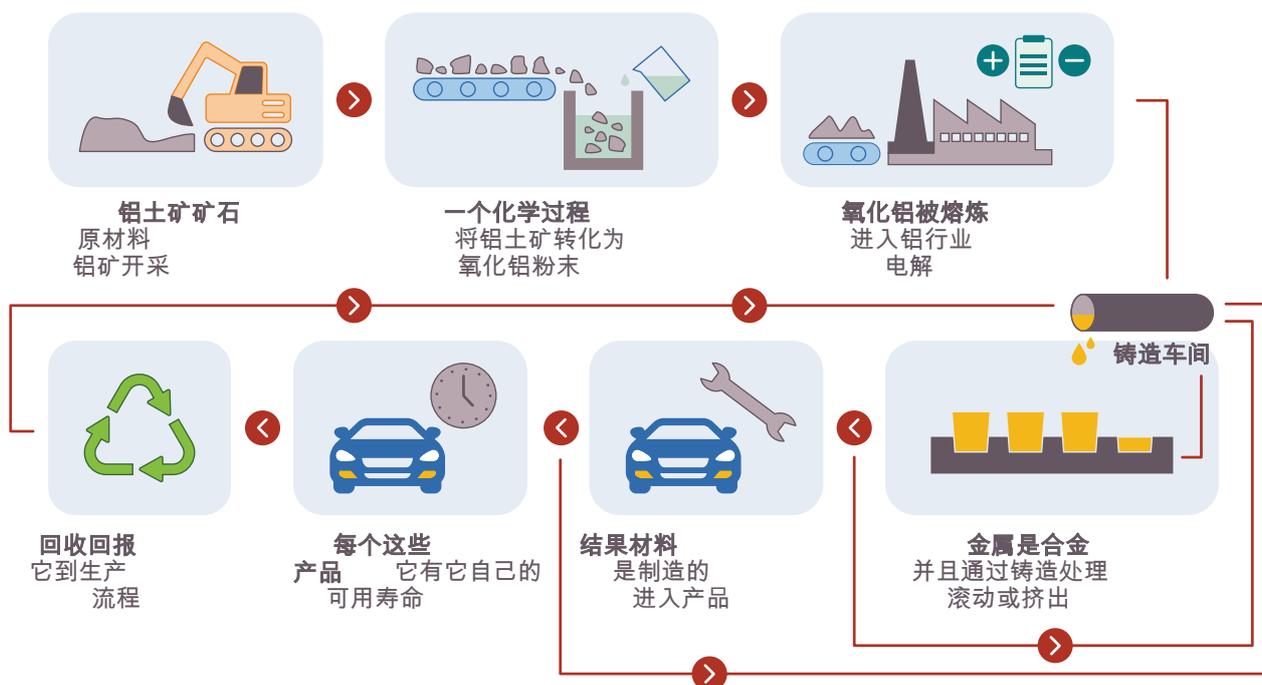
²（tCO₂ eq）在2022年（IAI，2023a）。因此，找到消除有害温室气体排放的方法是至关重要的

²从铝生产中提取能源，而不妨碍金属提供的基本服务。本报告考察了可再生能源在铝生产脱碳中的作用。它还探讨了减少该行业排放的其他杠杆，例如材料效率和回收。

本报告旨在向行业和政策制定者介绍铝工业通过整合增加可再生能源和其他脱碳杠杆来最小化其排放的方法。报告分为三章。第一章提供了铝工业的现状概述，包括其环境影响和氧化铝及铝生产的成本结构。第二章探讨了铝工业脱碳的关键杠杆，特别是可再生能源在铝冶炼中的作用。第三章评估了各利益相关者在脱碳方面取得的进展，并提出了进一步脱碳努力的建议。



铝生产涉及多个步骤，包括氧化铝和铝土矿的加工，阳极的生产和熔炼，铸造和成型工艺，以及使用后的收集和回收（图1）。



基于：(AL Circle, 2017).

铝的主要原料是铝土矿。开采的铝土矿在装运到氧化铝精炼厂之前被破碎和清洗。然后，铝土矿被磨碎并混合成含有碳酸钠和氢氧化钠的液体。混合物随后在消化器罐中加热至约110-270°C，以在沉淀后获得水合氧化铝晶体。这些晶体随后在煅烧炉中加热，以驱除结合水，留下氧化铝。然后，氧化铝经过霍尔-埃鲁过程。¹ 用于初铝的熔炼。该过程涉及将电流通过冰晶石熔融混合物中通过。² 氧化铝和氟化铝用于获得纯净的液态铝金属。一般来说，大约需要五吨铝土矿来提炼出两吨氧化铝，再次，两吨氧化铝用来熔炼出一吨铝（MPP., 2023）。
等人

电解铝厂需要电极，这些电极本质上是大型的碳块，在电解铝厂中的铝还原过程中传导电流。这些碳块在生产 and 分解过程中会释放一氧化碳（CO）。

² 必须定期更换。

熔融铝从冶炼锅中浇铸成不同形状，如锭子和板坯，在铸造车间中进行。

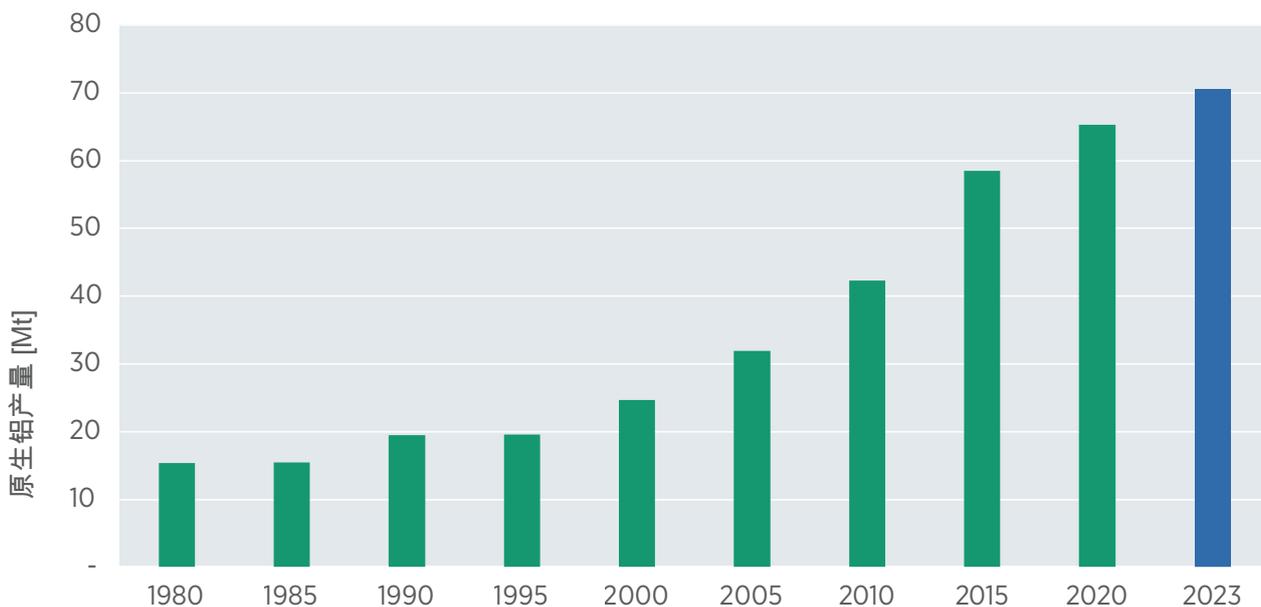
¹ 洛伦茨-赫尔-尤尔特法是一种通过电解法从氧化铝（氧化铝）中提取铝的方法。它是工业铝生产的初级过程，通常在950-980°C下运行。² 氟化锂是一种矿物，主要用作溶剂，以降低电解铝生产中氧化铝的熔点。

熔融铝还可以转移到另一个炉子中，在该炉子中可以向熔体中添加不同的合金元素。这些过程导致半成品铝合金产品的生产，这些产品随后被加工成成品。

对于二次生产，来自产品寿命终结或制造过程中产生的废料中的铝可以重熔或精炼后送回铸造流程。重熔过程使用高纯度废料，而精炼则使用较低质量的废料，其杂质含量各异。

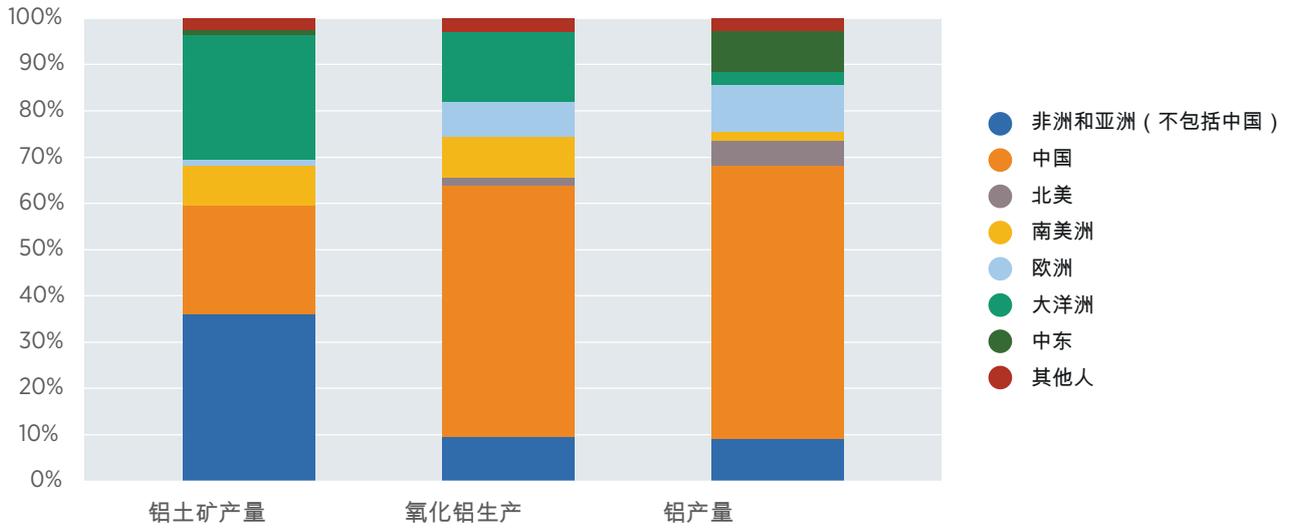
原生铝产量稳步增长，从1980年略超过1500万吨（Mt）每年增长至2023年接近7000万吨/年（图2）。生产增长主要受到亚洲，尤其是中国强劲需求的推动。由于该地区经济的快速工业化，亚洲的生产能力从1980年的仅150万吨/年增长至2022年的超过4500万吨/年。

废金属回收的作用自本世纪初以来也显著增加，从2005年的1700万吨增加到2023年的超过4300万吨（IAI，2021b）。



来源：（IAI，2023a）。

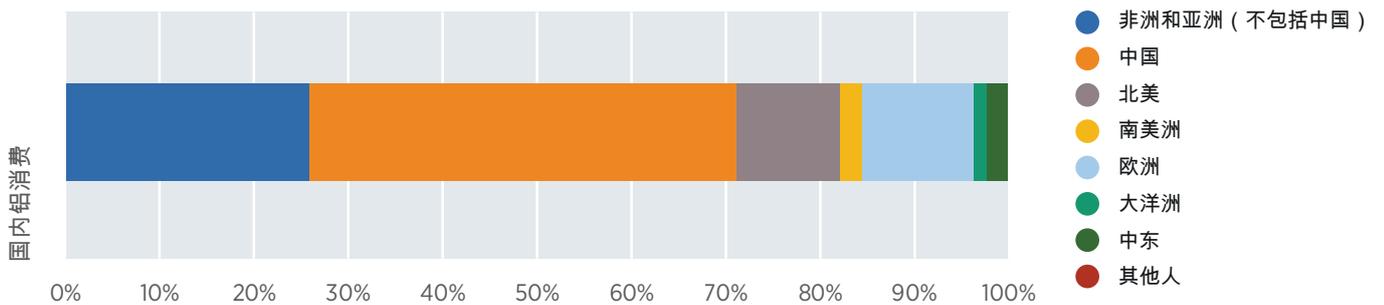
铝土矿主要开采于澳大利亚、中国、几内亚和印度尼西亚。这些国家在2021年全球铝土矿产量中占比约五分之三。中国也占据氧化铝和铝的生产主导地位，约占氧化铝和铝总产量的五分之三（图3）。



来源：(IAI , 2023a ; USGS , 2023)。

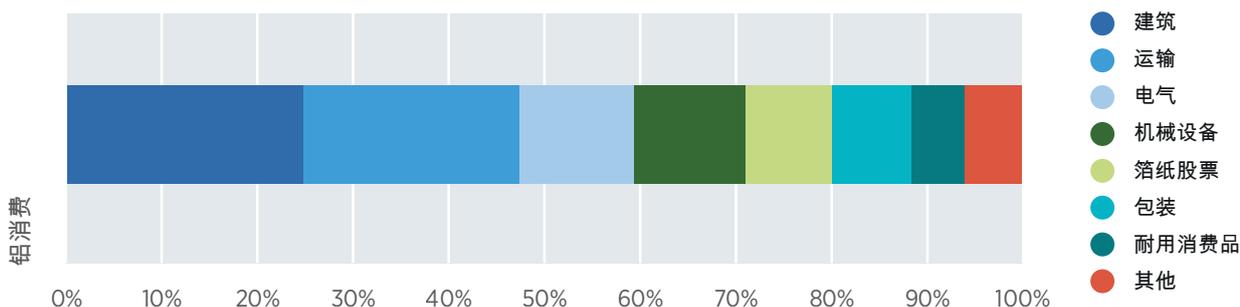
注意：欧洲包括俄罗斯联邦的估计值。

下游的铝产品加工和制造地点靠近市场。铝的使用也集中在亚洲，占2021年铝使用的近70% (见图4)。值得注意的是，中国是铝的最大单一消费国，几乎占全球使用量的一半。



来源：(IAI , 2023b)。

铝的需求与经济活动密切相关，它在各个领域都是必不可少的。如图5所示，超过70%的铝需求来自建筑（25%）、运输（23%）、电气应用（12%）和机械设备（10%）等领域的总和。预计铝的需求在本十年将增长约30%，主要受可再生能源技术和电动汽车的采用（CRU，2022年）驱动。可持续包装解决方案也将是铝使用增长的关键贡献者。



源：（CRU，2022年）。

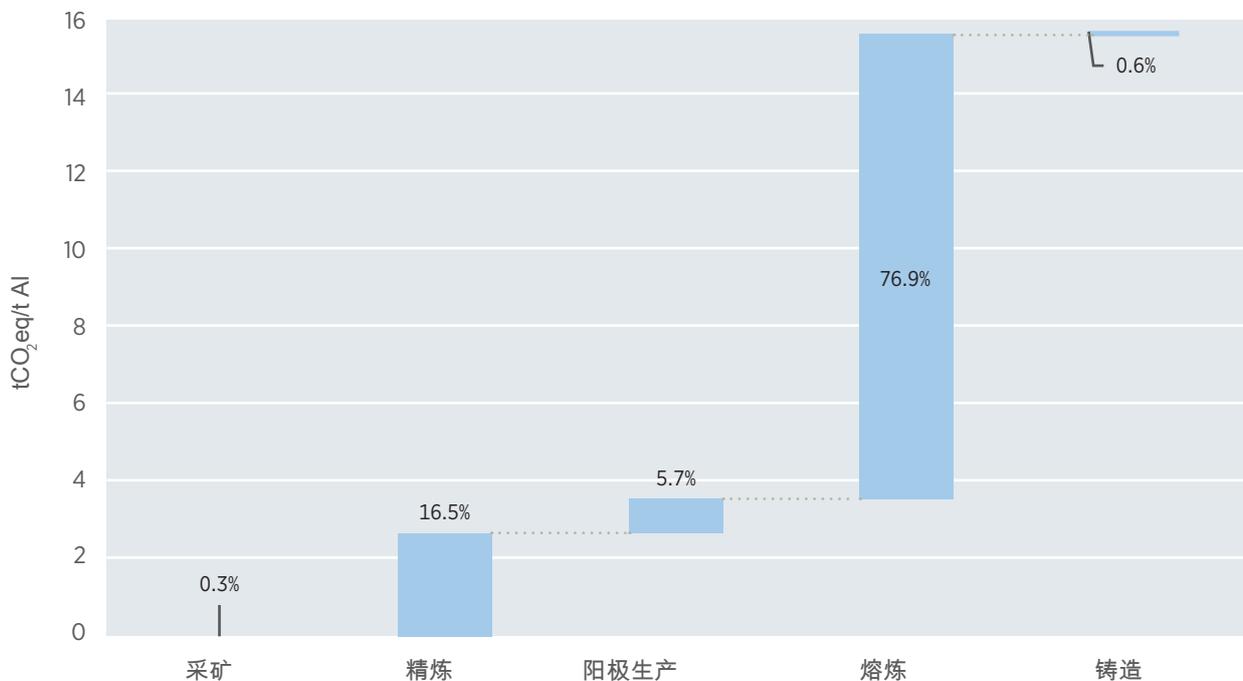
铝是全球贸易的商品，其价格在国际平台如伦敦金属交易所（LME）、上海期货交易所（SHFE）和纽约商品交易所（NYMEX）上进行基准定价。大多数铝的交易并不包含任何环境属性。然而，一些商品洞察平台如Fastmarkets和S&P已经推出了低碳铝指数，追踪欧洲低碳铝产品溢价（Peters，2024；S&P Global，2022）。这些举措旨在为低碳铝市场带来清晰度和透明度。它们将低碳初级铝定义为排放低于4 tCO eq/t Al（初级）的产品，基于范围1和范围2排放（Peters，2024；S&P Global，2022）。

在2022年，铝行业排放了大约1.1吉吨（Gt）的二氧化碳当量（CO eq）排放量（IAI，2023a）。这相当于大约为16 tCO eq/t Al（原生）和0.5 tCO eq/t Al（次生）产生（MPP，2023年）。

等作者³
 如图6所示，铝生产价值链中有多个排放来源。熔炼是铝生产中最大的排放源，占全球该行业排放近四分之三。尽管一些地区严重依赖可再生能源或水电作为其电力供应，而另一些地区则主要依赖煤炭，导致不同司法管辖区熔炼过程的排放强度存在显著差异（IRENA，2020）。

从摇篮到坟墓。

此外，在生产过程中除二氧化碳排放外，还会释放各种其他温室气体，例如氟化物和²在电解过程中生成的全氟碳化物。此外，阳极会排放出二氧化硫（SO₂），而²灰尘、液体废水和固体废物来自熔炼炉（Raabe，2022）。
 等作者

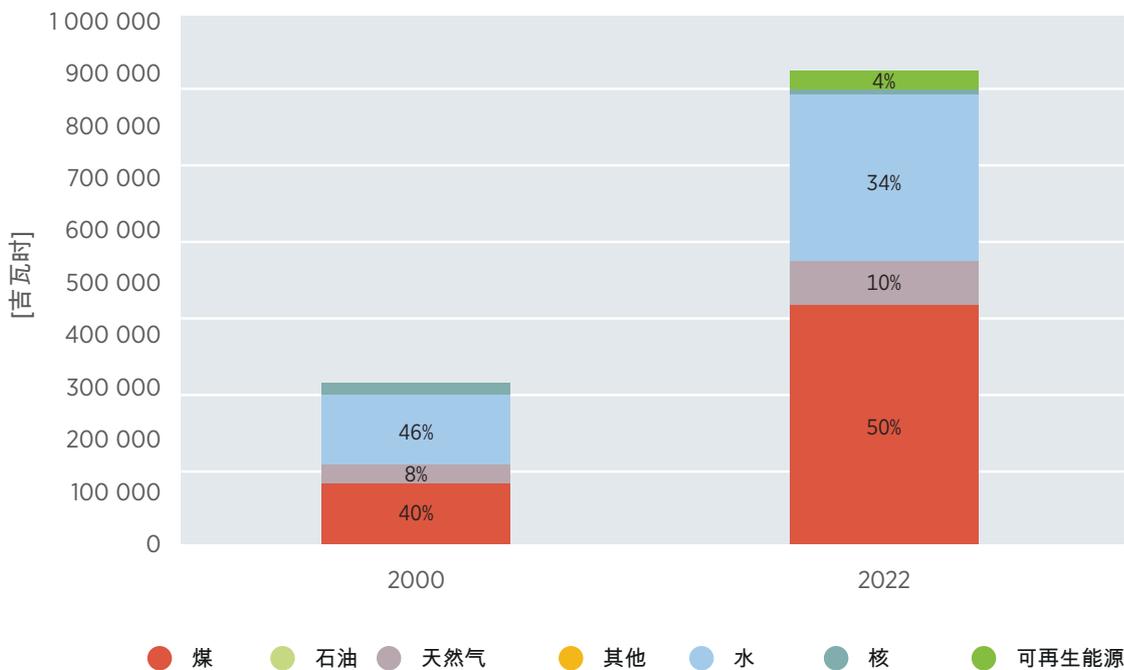
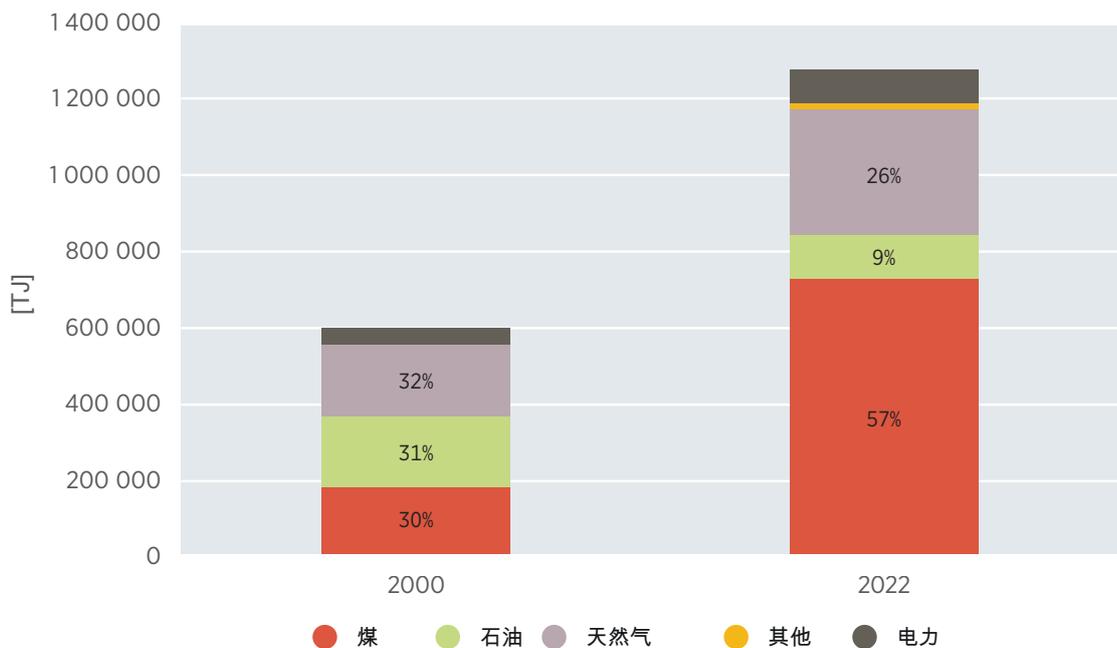


来源：（IAI，2023a）。

过去几十年中，由于生产增加，铝行业的年能源消耗显著增加。目前，非铁金属行业每年消耗约7艾焦（EJ）的能源，其中氧化铝精炼和铝冶炼每年消耗大约4.5艾焦的能源。然而，该行业排放量的增加并不仅仅是因为生产量的增加，还因为过去二十年来生产过程中使用的能源来源发生了重大转变（图7）（IAI，2023b）。

在2000年之前，该行业的熔炼电力混合主要由水力发电组成。然而，由于产量激增，尤其是在中国和印度等亚洲国家，煤炭作为关键的一次能源载体，用于熔炼的煤炭电力使用量显著增加。铝行业的能源混合在不同地区之间有所不同；例如，天然气在中东是最主要的电力来源，而非洲则拥有水力和煤炭作为能源来源的平衡混合。同时，欧洲、南美洲和北美洲仍然主要依赖水力发电。在过去二十年里，可变可再生能源（VRE）的使用也有所增加，2022年铝熔炼中使用的电力中有4%来自可变可再生能源（IAI，2023a）。

煤炭使用量增加的趋势也适用于氧化铝精炼，由于中国生产量增长，煤炭的份额有所增加。目前，中国占全球氧化铝精炼量的一半以上（图4）。主要用于精炼和熔炼的化石燃料，尤其是煤炭，的使用增加导致了铝生产排放的显著增加。



来源：(IAI, 2023a)。

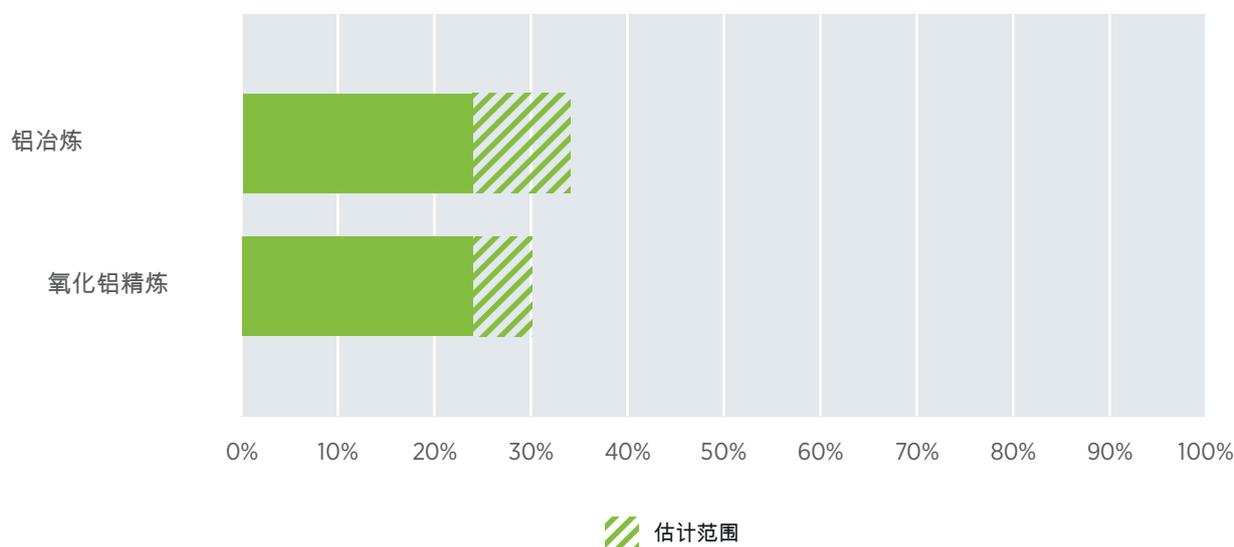
备注：TJ = 太焦耳；GWh = 千瓦时。图表中的数据标签表示该特定年份燃料的份额。

典型的铝生产成本分解主要由原材料和能源成本主导。原材料输入成本在竞争对手之间往往相似，因为它们是全球贸易商品。此外，炼铝厂通常与供应商签订长期协议，这有助于稳定其原材料成本。

能源成本，另一方面，在不同生产商之间可以显著变化，这取决于自然资源禀赋、电力行业政策法规、技术进步等因素。能源成本作为生产总成本的一部分，通常占总成本的四分之一到三分之一（见图8）。

铝的价格以及国际市场上原材料投入，使得能源价格成为铝生产商之间成本差异的关键区分因素。这也是为什么历史上，电解铝厂通常建在电力成本较低的地区，例如，北美靠近廉价水力发电的地区的电解铝厂早期发展，或者在拥有丰富廉价天然气的中东地区。

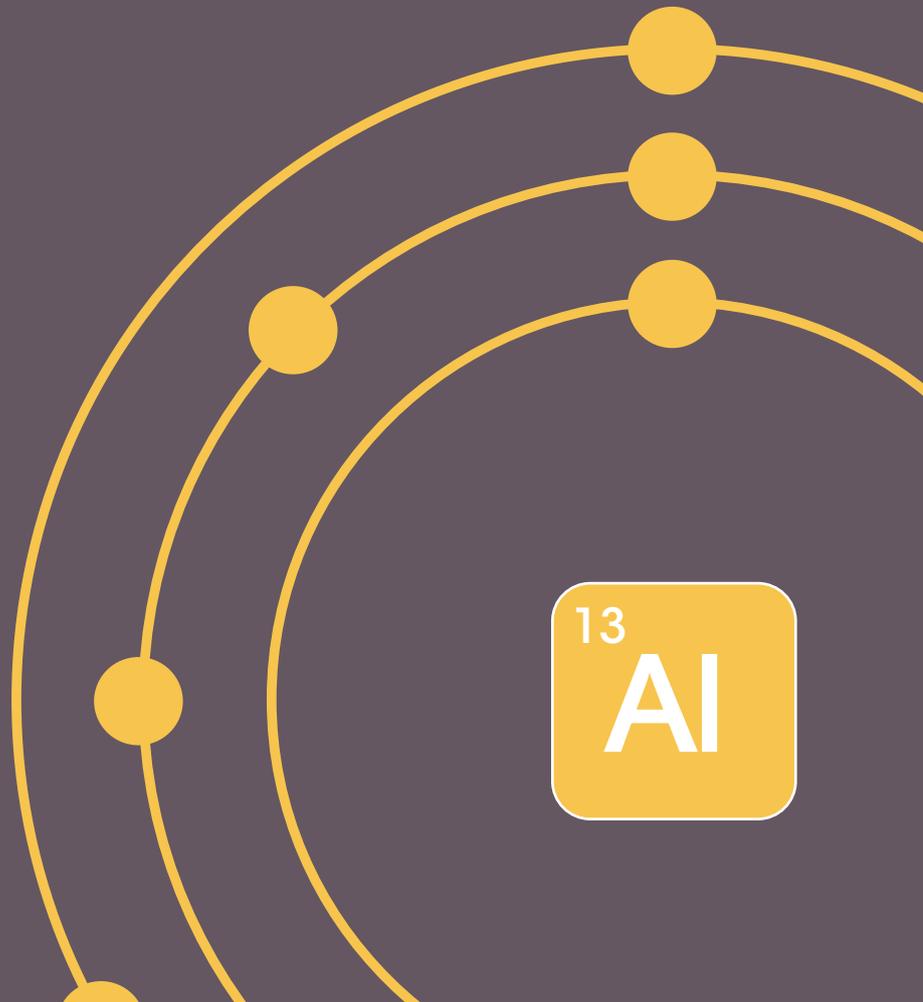
能源价格的敏感度在区域能源价格上涨对炼制厂运营产生负面影响时也表现得淋漓尽致。这在2022年欧洲能源价格上涨迫使几家炼制厂削减生产甚至全面关闭时尤为明显（Burton，2022年）。



来源：（美国铝业公司，未注明年份；Boudreau 等，2024；Braga 和 Netto，2016；Shkolnikov 等，2011）。等



2. 转型支柱：铝行业迈向碳中和

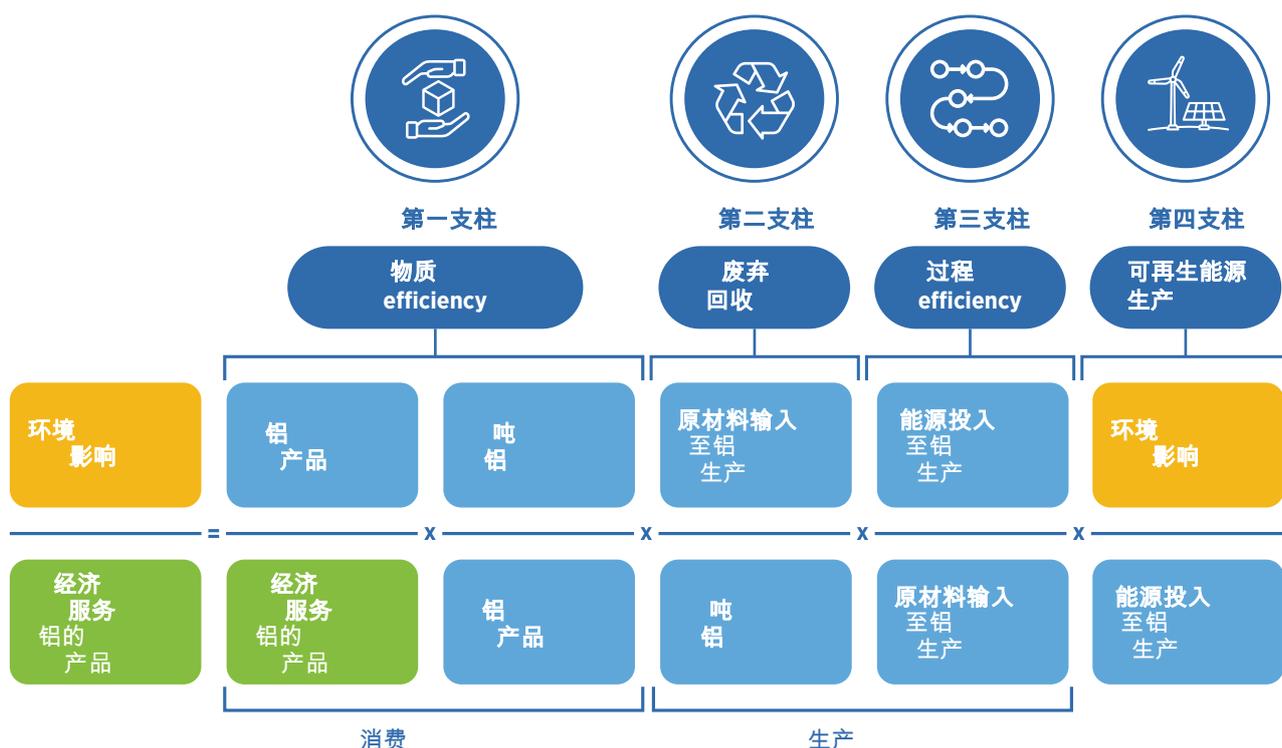


铝生产在以燃煤发电为主的地区的扩张导致了显著排放量的增加。铝行业的排放量从2005年的0.56吉吨二氧化碳当量增长到2022年的1.1吉吨二氧化碳当量。

^{2 2} (IAI, 2023a)。由于在各个领域的广泛应用，预计铝的需求将增长。根据国际铝业协会的温室气体减排路径，在“按现状发展” (BAU) 情景下，铝行业排放预计将从1.1 Gt CO₂ eq增长到约1.6 Gt CO₂ eq，到2050年 (IAI, 2021b)。

^{2 2} 因此，在铝行业中部署脱碳策略以减轻其环境影响，同时保留其对社会有益性的紧迫需求。

图9显示了推动铝行业温室气体 (GHG) 影响的重点因素以及实现行业碳减排的关键支柱。国际铝业研究院 (IAI) 概述了三个关键的行业碳减排路径：在生产过程中增加低碳电力来源；消除直接和热能相关的排放；以及最大化回收和资源效率。这与IRENA的工业碳减排优先事项相一致，即部署材料效率措施，随着废料的增加，提高回收铝的份额，部署 (工艺) 高效技术，以及转向使用可再生能源生产。未来向碳减排的铝行业转型时应考虑所有可能的手段相结合，以产生最大影响。



物料效率： 这些措施涉及多种策略，例如延长产品使用寿命、回收和翻新现有产品，以及在适当的情况下，根据全面的生命周期分析重新设计使用替代材料的产品。这些措施有助于优化铝产品使用，同时最小化浪费。在实施材料效率措施时，重要的是考虑产品的整体生命周期影响，以避免产生负面影响，例如难以回收的产品。

废金属回收： 回收是减少碳排放的重要手段，因为它允许将使用到寿命终期的产品中的铝材重新加工成新产品。平均而言，回收铝废料相对于原生生产，能显著减少能源和排放量。

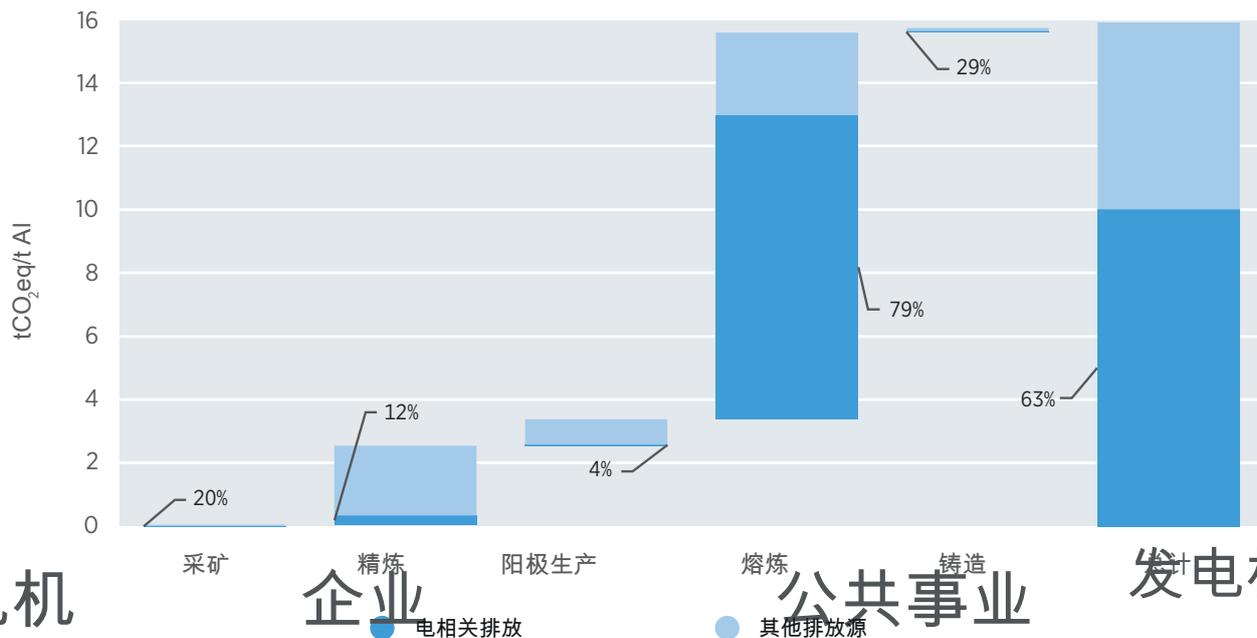
提高流程效率： 铝生产采用更高工艺效率可以有助于降低生产过程的环保影响。

使用可再生能源进行生产： 在近年来，可再生能源占全球电力混合度的比例显著增加。⁴ 使用可再生能源可以显著减少铝生产过程中的直接和间接排放。可再生能源电力可以大幅度减少与冶炼相关的排放。对于精炼过程，除了使用可再生能源进行直接电气化外，使用可再生能源物质或氢气也可以是脱碳的低排放选项。

除了这些因素之外，使用惰性电极可以减少电极消耗引起的排放。

可再生能源用于熔炼

铝冶炼是生产过程中排放强度最高的部分。它主要依赖电力作为能源输入，这大约占冶炼过程中排放的五分之四（见图10）。冶炼过程依赖于相对稳定的电力供应，以避免熔炉中的不平衡。



发电机

企业

公共事业

发电机证书

来源：(IAI, 2023a)。

全球电力系统中可再生能源的份额从2011年的20.4%增长到2023年的30.3%，这一增长主要得益于风能和太阳能光伏发电 (REN21, 2022, 2024)。

电力相关排放占全球铝供应链中冶炼排放的很大一部分，这是因为全球铝供应链的电力混合以化石燃料为主。采用可再生能源作为冶炼过程的电力可以减少这些排放。随着全球电力系统越来越多地转向可再生能源，其碳强度也在下降。然而，铝工业却是独特的，因为生产中使用的相当大一部分电力来自自发电源或专门的发电厂，因此增加可再生能源电力的比例可能更加复杂，这取决于几个因素。从历史上看，水力发电是可再生能源电力的关键来源，并且由于其能够以低成本提供大量稳定的电力，一直是铝冶炼的首选选择。尽管如此，近年来，太阳能和风能在电力系统中的比例逐渐增长，这也在全球铝电力混合中开始显现。

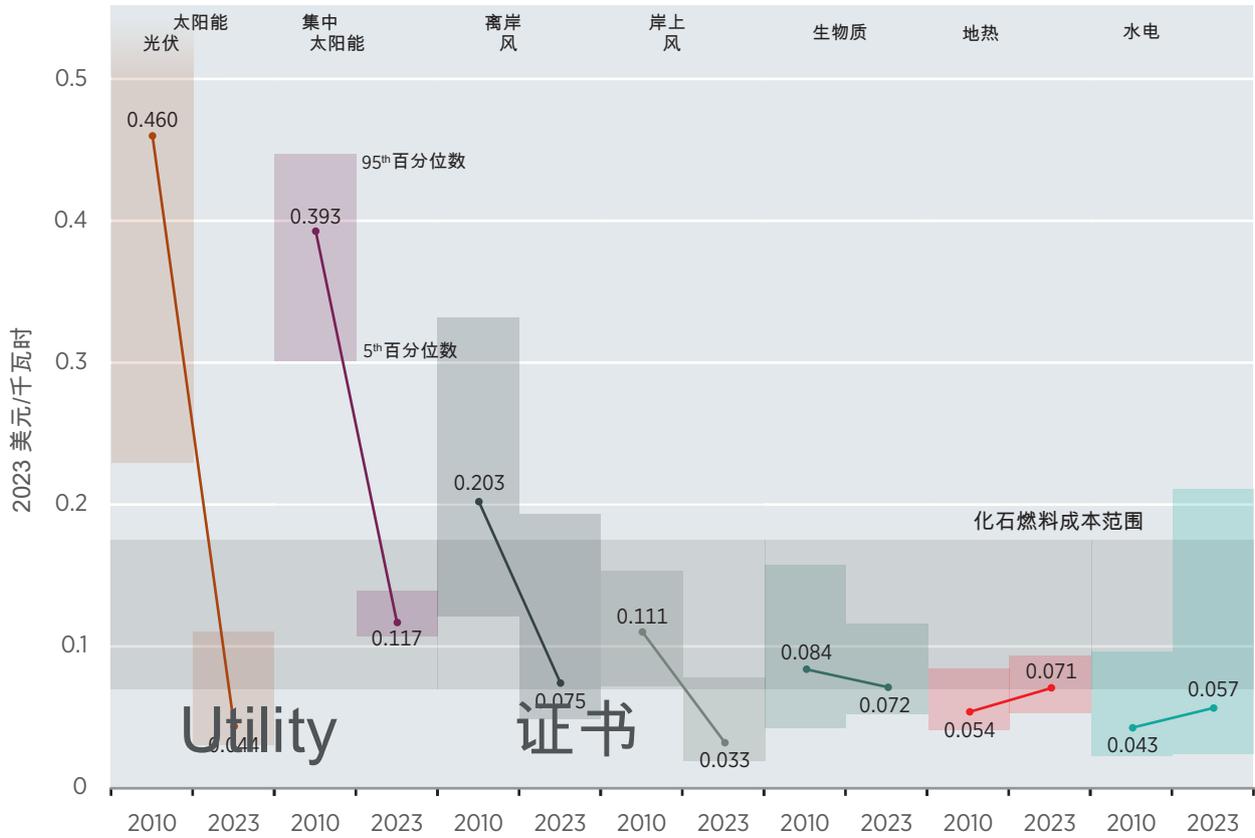
全球电力系统中可再生能源的份额从2011年的20.4%增至2023年的30.3%，这一增长主要得益于风能和太阳能光伏发电（REN21，2022，2024）。2022年，可再生能源（不包括水电）占铝能混比的4%，与十年前的微不足道相比，这是一个显著的增长（IAI，2023a）。

可再生能源发电的成本正在快速且持续地降低，使其与化石燃料发电来源具有成本竞争力。

自2010年以来，全球加权平均平准化电力成本（LCOE）⁵关于光伏发电的规模型太阳能、陆上和海上风电装机容量分别下降了90%、70%和63%（图11）。太阳能光伏发电、陆上风电、生物质发电、地热能发电和水电项目加权平均发电成本已经低于全球范围内最便宜化石燃料发电的来源（国际可再生能源机构，2023c）。在全世界许多司法管辖区，可再生能源，特别是太阳能光伏发电和风能发电，正日益成为生产电力的最廉价选项。另外，通过规模经济效益和技术进步，如双面太阳能电池组件、太阳能跟踪系统、更大的涡轮机以及更长的叶片等技术，可再生能源发电成本有望进一步降低（国际可再生能源机构，2023a）。

可再生能源发电成本可能在过渡性情况下有所上升。例如，由于新市场昂贵项目的并网和通货膨胀（IRENA，2023c），与2021年相比，2022年新并网海上风电的全球加权平均LCOE略有上升。此外，可能存在不可预见的价格和供应链冲击，这些冲击会增加与可再生能源发电技术相关的成本。然而，这样的暂时性增长并不改变长期的技术趋势，即可再生能源发电成本的下降趋势。

⁵ 电力的平准化成本（LCOE）是通过将发电机的终身成本除以其终身电力生产来获得的。成本和生产都使用反映资本成本的折现率折现到同一年。

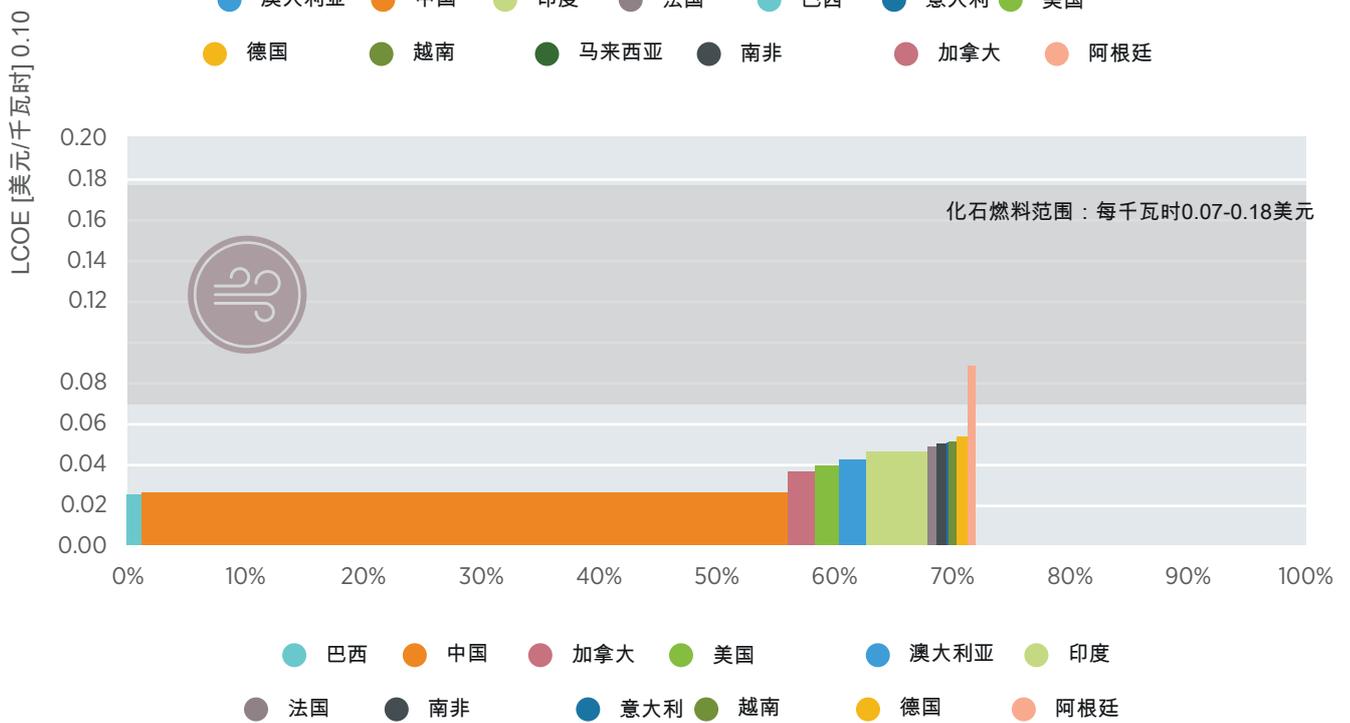
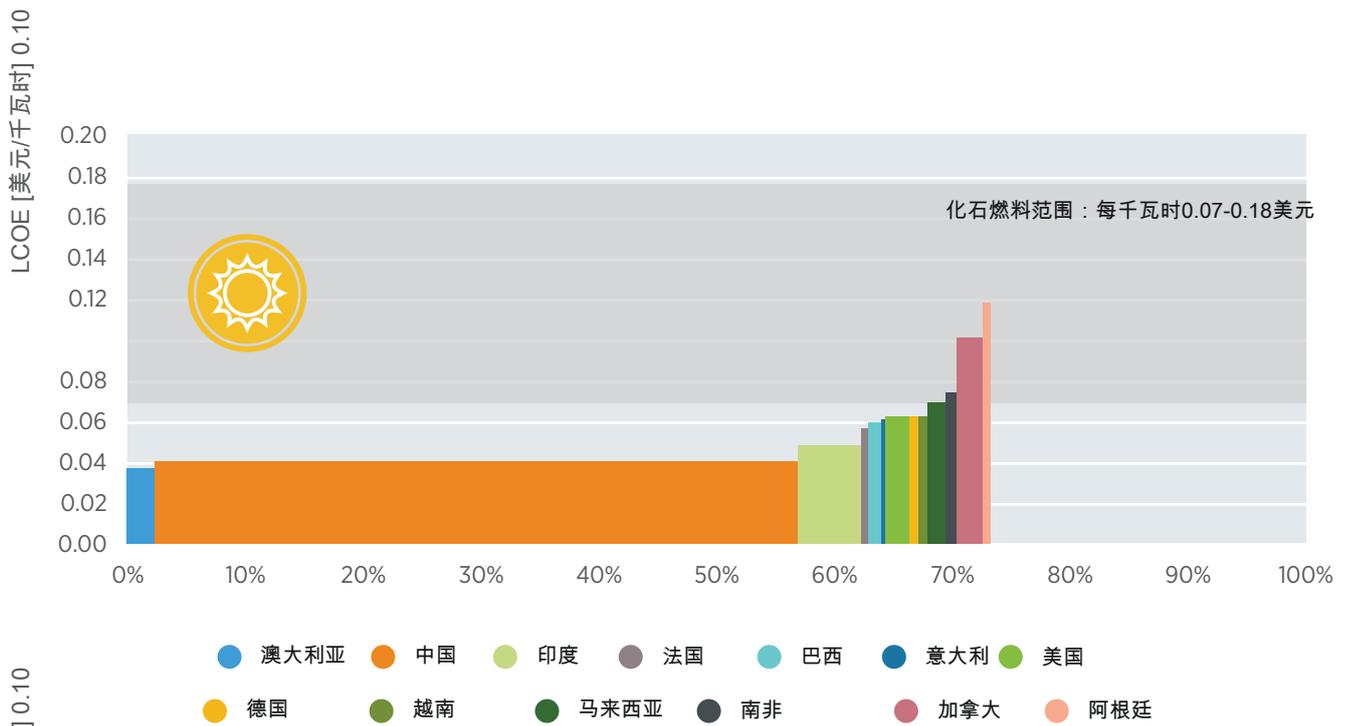


来源：（国际可再生能源机构，2024年）。

可再生能源发电成本的下降使得其在全球多个地区的成本上高度具有竞争力，与化石燃料发电相比。在2023年，新投运的太阳能光伏发电和陆上风电在大多数市场的基础成本平准化基础上，其成本低于以化石燃料为基础的类似发电方式（如图12所示）。

在公共事业绿色定价项目

该公用事业公司要么拥有发电机并且保留可再生能源证书（RECs），或购买第三方发电企业的可再生能源证书（RECs）。可再生能源证书（RECs）随后被出售给企业，通过支付费用来承担这些费用。附加在他们的电费账单上。

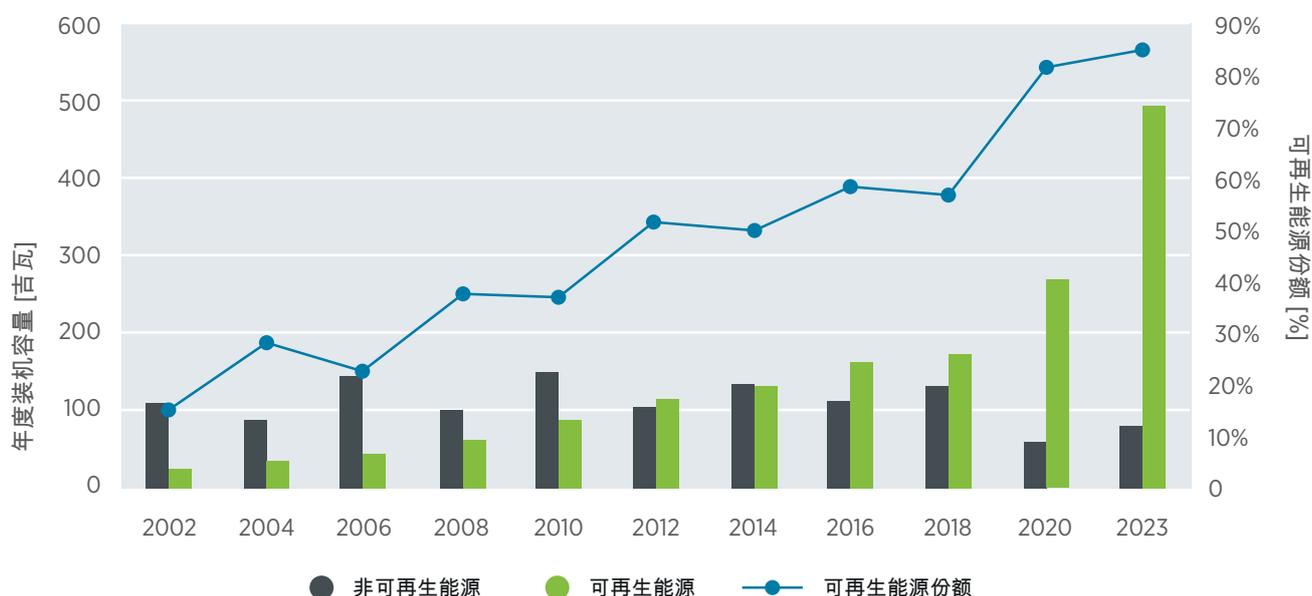


来源：(IRENA , 2024 ; MPP . , 2023) 等

注意：国家特定的成本数据适用于包括大约占世界总熔炼能力四分之三的地区。年熔炼能力不包括水电供应的熔炼厂。

市场参与者，无论是在公共领域还是私营领域，都在关注可再生能源成本的显著降低。这种兴趣反映在新增发电能力增长上——在过去的十年里，可再生能源已成为新电力发电能力市场的主导者。

2023年，电力行业经历了可再生能源装机容量的最大年增长，新增约495吉瓦（GW），占新增装机容量的86%（国际可再生能源机构，2023b）。在阿拉伯联合酋长国举行的COP28会议上，超过100个国家承诺到2030年将它们的可再生能源装机容量翻三倍（COP28主席，2023）。

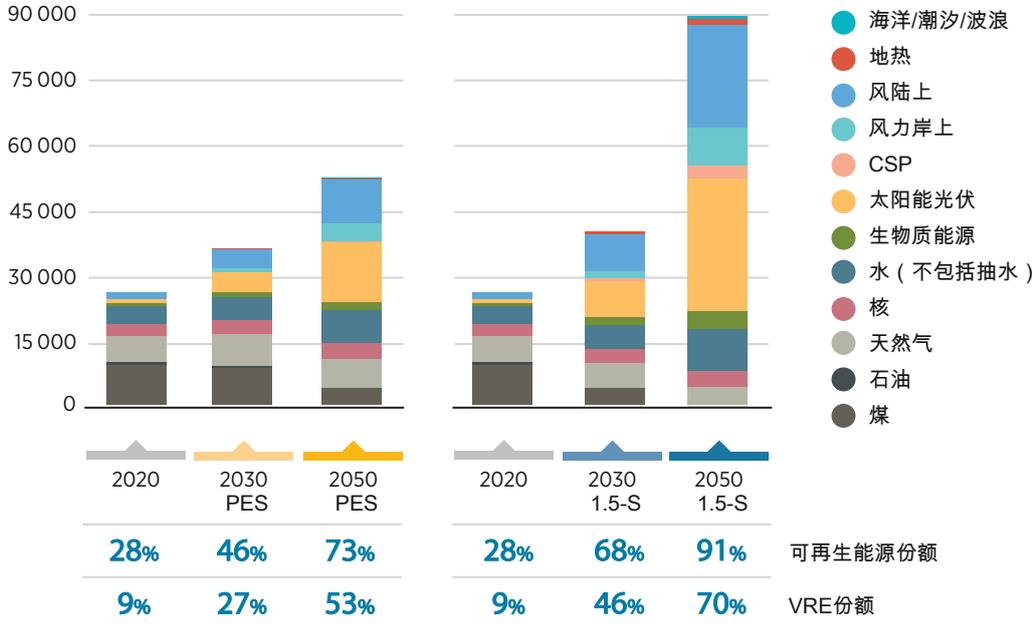


来源：(IRENA, 2023b)。

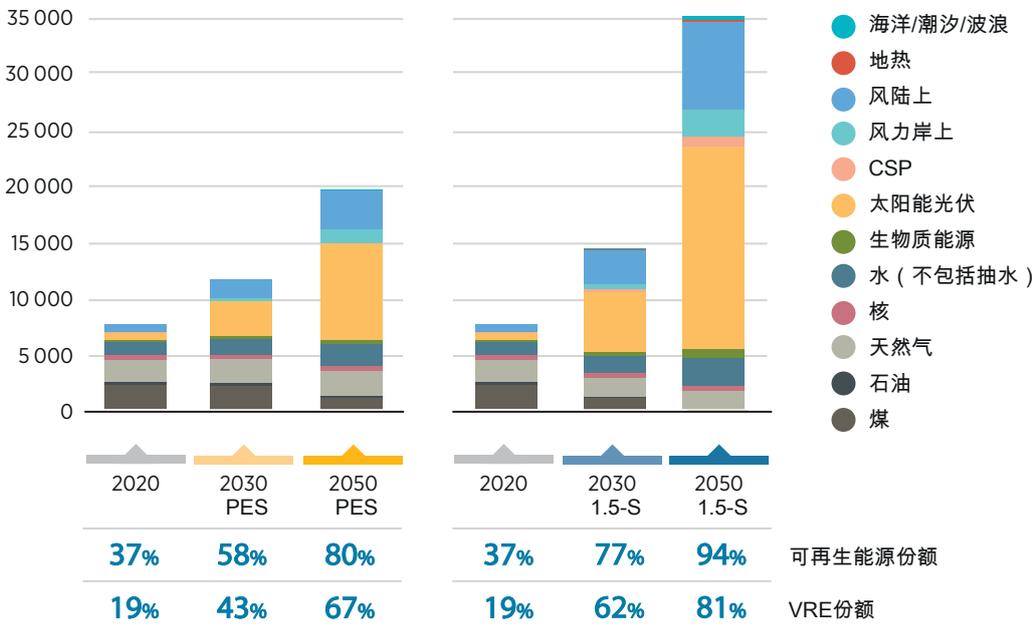
可再生能源发电成本的下降、电力生成能力增加的趋势，以及进一步降低成本的潜力，表明全球电力系统的脱碳将很大程度上受到可再生能源发电技术的采用推动。

VRE（可再生能源）资源如太阳能光伏和风能有望成为脱碳电力行业的骨干。在IRENA（国际可再生能源机构）的“计划能源情景”中，VRE在装机容量组合中的份额从2020年的19%增长到2050年的67%。在IRENA的“1.5°C情景”下——旨在满足《巴黎协定》的目标——VRE在装机容量组合中的份额需增加到81%。这意味着在PES（计划能源情景）下，VRE将提供所有来源产生的电力的超过一半，在IRENA的1.5°C情景下则为70%（IRENA，2023c）。

电力产量 (TWh)



电力容量 (吉瓦)



来源：(国际可再生能源机构，2023c)。

备注：1.5-S = 1.5°C情景；CSP = 聚焦式太阳能；GW = 吉瓦；PES = 计划能源情景；PV = 太阳能光伏；TWh = 太瓦时。

可再生能源作为廉价、低碳的电力来源的吸引力在铝业也越来越明显，因为熔炼厂越来越多地采用太阳能光伏和风能。全球几个熔炼厂，尤其是在巴西、西班牙、澳大利亚、挪威和印度，计划通过签订长期电力购买协议（PPAs）（表1）整合或已经整合了大量的太阳能光伏和风能产能。可再生能源成本效益的一个显著例子是西班牙阿洛卡公司San Ciprián熔炼厂计划恢复运营，该厂由于能源价格高而停产两年后，将依靠低成本的风能（阿洛卡，2022年）。

熔炉	熔炼厂容量 (每年每吨)	国家	地区	电力来自 可再生能源 (MW)	股份 关于负载 (%)	可再生能源 来源	开始 日期	结束 日期
阿尔科拉 莫斯约恩	0.20	挪威	莫斯约恩	284		风		
				330		风		
阿卢马尔 熔炉	0.45	巴西			40%		2022	
阿拉布拉斯 主要 铝 植物		巴西	巴拉那州	438	12%	太阳能光伏	2025	2044
韦丹塔 嘉鲁达	1.80	印度	奥迪萨	180				
韦丹塔 巴洛科	0.57	印度	查蒂斯加尔邦	200				
阿洛卡桑 Ciprián	0.23	西班牙	San Ciprián	131	75%	风	2025	2033
				183			2024	2033
阿拉布拉斯 主要 铝 植物	0.45	巴西	米纳斯热拉斯	902		太阳能光伏	2025	
印铝公司 Aditya 铝 熔炼厂	0.36	印度	奥达isha	375-400		太阳能光伏 & 风		
力拓集团 格拉德斯通	0.54	澳大利亚	澳大利亚昆士兰州	1100		太阳能光伏	2029	2049

备注：MW = 兆瓦；Mt/year = 每年百万吨；PV = 太阳能光伏。

熔炉主要使用两种工具来增加熔炼过程中的可再生能源份额：购电协议（PPA）或自用生产（图15）。其他工具包括来源保证（GOs）、可再生能源证书和虚拟PPA，这些建议不涉及任何可再生能源的实物交付（IRENA，2018a）。



来源：（国际可再生能源机构，2018a）。

铝冶炼厂所创造的价值与电价之比，与其他行业相比是有限的，在这些行业，电费占其成本结构的比例较小。电价强烈影响冶炼厂的生产成本和盈利能力。在竞争激烈的电力市场中，其他消费者由于这一更高的附加值，通常有能力支付更多，因此在没有（工业）政策支持的情况下，他们可以出价高于冶炼厂。

对于像铝这样的全球交易商品，电价上涨可能导致冶炼厂失去竞争力，甚至可能关闭或削减生产。因此，冶炼厂通常会与供应商签订长期合同，为其大部分电力需求提供保障，以减轻高电价相关的风险。成本竞争力强的可再生能源的前景可能会激励铝冶炼厂建设绿色新项目，甚至将生产迁至具有廉价、高质量可再生能源资源的地区。工业迁址的趋势可能也将持续。

运营活动在富含廉价、高质量可再生能源的地区在像钢铁和氨生产等能源密集型产业中已经很明显。例如，Stegra 和 Iberdrola 计划在伊比利亚半岛建立一个大规模的可再生氢和直接还原铁厂，以获取廉价的可再生能源（Iberdrola, 2021）。Neom、Air Products 和 ACWA Power 计划在沙特阿拉伯开发一个大规模绿色氨项目，可以利用该国的丰富太阳能和风能资源（Neom, 2023）。

历史上，铝冶炼厂多建立在阿尔卑斯山或北美等可获取廉价水电的地区。随着煤炭和燃气发电等不同发电技术的开发，铝冶炼的生产已扩展到世界各地的不同地区，更加靠近需求中心。

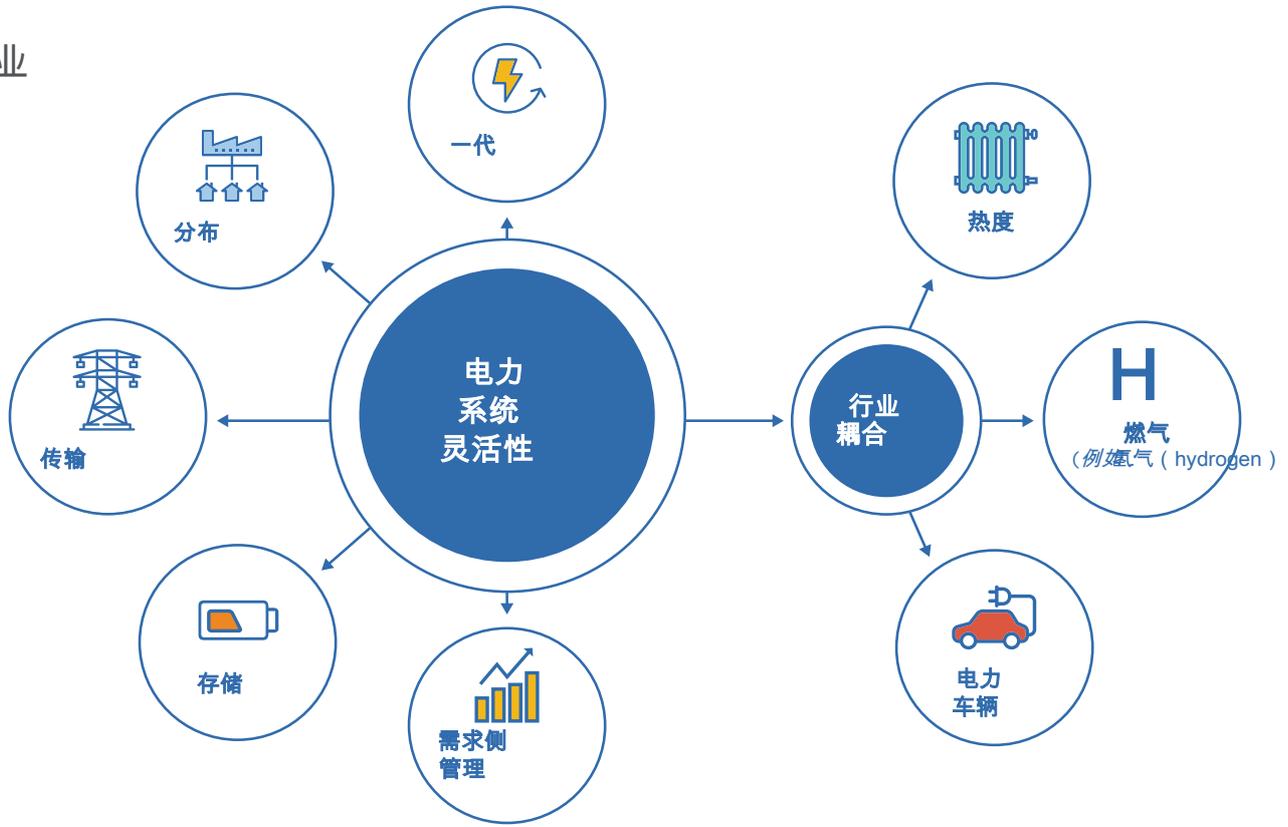
尽管如此，目前铝冶炼厂向拥有廉价和可再生电力资源的地区转移的趋势日益明显。例如，中国铝生产商鸿庆正在将其4Mt/年的冶炼能力从山东省转移到云江，以利用该地区的丰富水力发电。截至2023年底，该公司已经转移了其产能的超过三分之一（Onstad，2023）。

铝土矿资源丰富的地区，如几内亚、澳大利亚和巴西，出口大量铝土矿用于氧化铝和铝的生产（IAI，2023 a；USGS，2023）。这些地区也富含可再生资源。在铝土矿和可再生资源丰富的地区整合铝供应链（铝土矿开采、氧化铝精炼和铝冶炼）可以显著减少铝生产链的排放。在冶炼，排放最显著的来源，使用可再生资源至关重要，以实现减排。

关键可再生能源（如风能和太阳能光伏）的电力产出在不同时间尺度（每小时、每日、每月甚至每年）上可能会有显著差异。电力系统的可靠性取决于确保总发电量始终与负载相匹配。随着更多可再生能源发电并入电网，这构成了一项挑战。传统上，电力系统倾向于依赖“可调度”的灵活发电机，通过增加或减少生产来为系统提供灵活性，以允许实时匹配发电和负载。然而，确保系统可靠性的责任并非单一发电技术，而是整个系统的责任。

为此，电力系统可以利用除了发电以外的其他来源来提高灵活性。这包括强大的输电和配电网，与邻近系统的互联，储能和负荷管理（IRENA, 2018b）。此外，将交通、供暖和工业等各个部门与电力系统整合可以进一步提高灵活性和弹性。这种多方面方法可以在将variable renewable energy（VRE）整合到电力系统中时确保电力系统的弹性。

公共事业



来源：(IRENA, 2018b)。

通过管理负荷侧，即需求响应 (DR)，实现供需平衡是一项消费者可以为电力系统提供的有价值的服务。铝冶炼厂是提供DR服务的强力候选者。

对于电力系统具有积极作用，同时保持热平衡可以再生能源 (VRE) 并入电网。作为交换，它们可以通过市场对这些电力系统服务获得报酬，这可能有助于降低炼铝厂的能量成本。在铝冶炼过程中，维持熔炼炉的热和磁平衡至关重要。这通过控制供应到熔炼炉的电能来实现。保持热平衡对于防止炉体损坏至关重要。允许铝炼厂提供需求响应 (DR)。这可以通过两种方式实现。首先，通过对炉线输入的小幅减少

电压在一两秒内增加可导致熔炉的电力消耗减少。熔炼厂可以在不进行任何重大工艺升级的情况下做到这一点。其次，熔炼厂还可以通过完全降低熔炉线来提供需求响应 (DR)，从而显著减少消耗 (Starke., 等作者

2009)。在这种情况下，中断的持续时间可能从几分钟到几小时不等。拥有多条熔炼线的生产设施可以通过在不同熔炼线之间轮换中断来延长断电时间。然而，工厂操作员通常有强烈的动机以恒定负载运行熔炼炉，以避免操作风险并确保稳定和安全的运行。

6 铝电解槽是一种耐热容器，用于霍尔-埃鲁尔法从氧化铝中提取铝，通过连续电解进行。

存在几个正在进行的项目，以实现更加灵活的熔炼。德国铝生产商Trimet Aluminium SE积极参与DR项目，并在高峰期间降低能源消耗以稳定电网（Depree，2016）。公司正在采用先进的换热器

等人的

该技术能够在高负荷期间实现更显著的电力消耗调整。炼厂可以通过灵活操作在电力系统中充当“虚拟电池”。这意味着它可以在需求高峰和定价期间向电网提供额外容量，从而避免需要增加等效的传统能源生产能力（Depree，2016）。

等作者

美国铝业公司（Alcoa）在澳大利亚维多利亚州的波特兰铝冶炼厂已参与了该地区的可靠性及紧急储备交易商（RERT）方案。这一举措使得冶炼厂能够在高负荷期间减少负载，从而为电力系统提供有价值的服务（The Hon Angus Taylor MP, 2020）。澳大利亚的汤姆ago铝厂也在为澳大利亚的电力系统提供一系列服务（Australian Aluminium Council, 2023）。美国铝业公司的San Ciprian冶炼厂，除了依赖风能满足其75%的电力需求外，还计划从2024年至至少2030年向电网提供平衡服务。

没有单一的方法可以整合大量VRE到铝冶炼中。冶炼厂可获得的选项取决于熔炼厂所在地可再生能源的可用性，以及该地区电力系统灵活性解决方案的可用性，以及熔炼厂自身操作的灵活性程度。

在季节性可再生能源发电情况相对平衡的地区，例如澳大利亚和巴西，电池可以在太阳能光伏发电时段存储多余的电力。这种安排可以在没有或太阳能发电低的时候向冶炼厂提供可再生能源。

此外，拥有高质量风能和太阳能资源的几个地理区域在发电特征上存在一定程度上的互补性。在这种条件下，夏季节能光伏输出可以（部分地）补偿低风速发电，而冬季高风速发电可以（部分地）补偿较低太阳能发电。这种互补性使冶炼厂更接近全天候电力供应。配合储能，冶炼厂可以显著应对太阳能和风能的波动性。冶炼厂还可以接入电网，在商业上有利时灵活地与可再生能源和储能系统协同运作。

可再生能源，例如太阳能光伏和风电，正迅速成为全球能源体系中的主要电力来源。然而，太阳能和风能的不稳定性对追求恒定电力供应的冶炼厂来说是一个挑战。本演示性练习探讨了在使用小时调度分析的情况下，利用可再生能源加上储能系统，在未来为铝冶炼厂提供更稳定可再生能源供应的潜力。

这项练习比较了不同地区的两家炼厂。一家炼厂假设位于季节性太阳能光伏发电变化较小的地区，并依赖太阳能资源（位置1），而另一家位于太阳能季节性变化较高的地区，除了太阳能光伏发电外，还补充了风力发电（位置2）。

太阳能光伏和风电可以单独提供一年的部分电力，多余的再生能源电力将被削减或溢回电网进行出口。通过电池储能，多余的电力可以被储存并在可再生能源工厂因发电不足以满足炼厂需求时使用。炼厂可能还需要从电网或辅助电源获取电力以补充

它使用的可再生能源发电量与其实际需求之间的差距 (图17)。

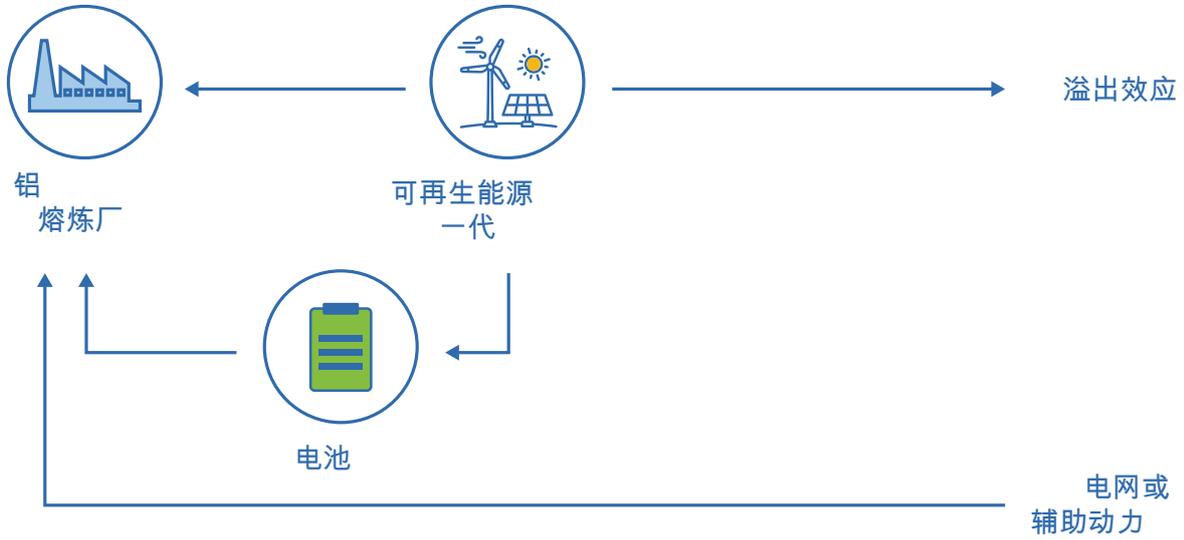
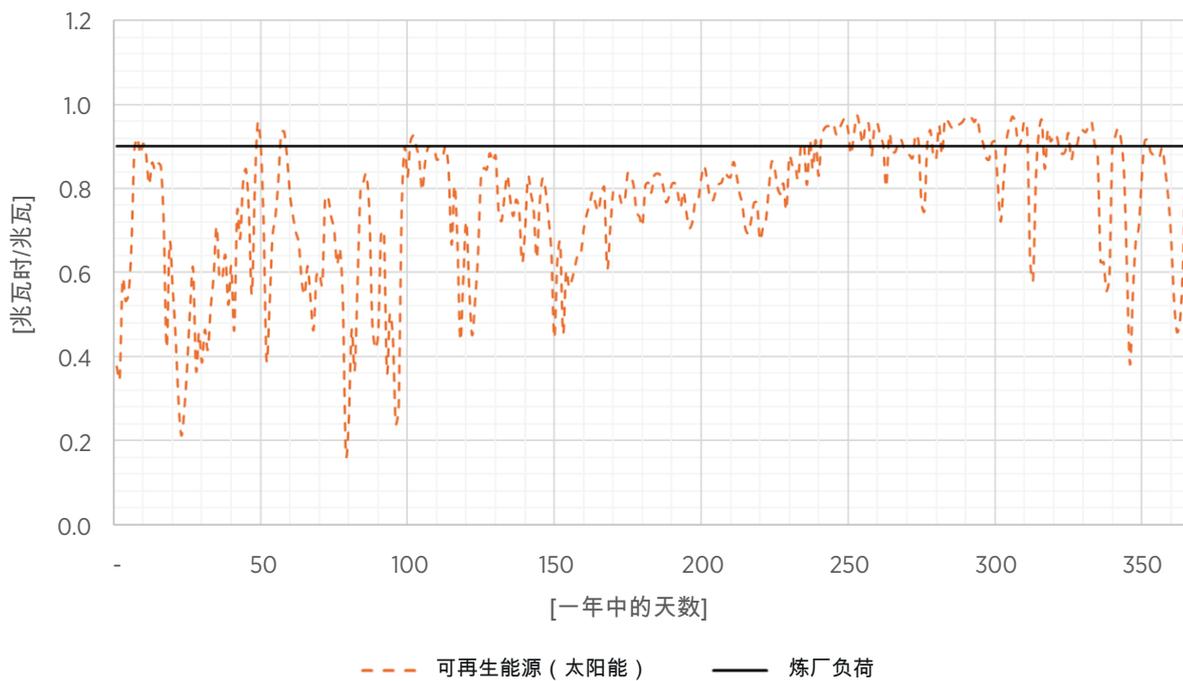
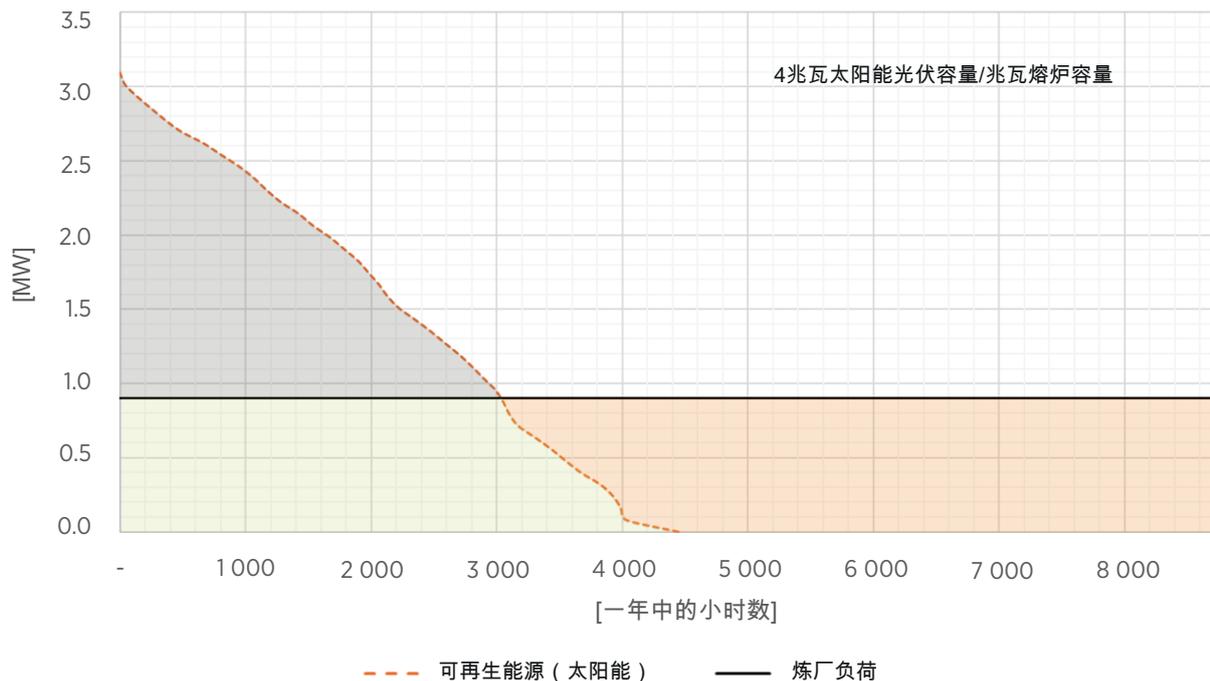


图18显示了每兆瓦装机容量太阳能光伏电站的平均每小时输出以及1号位置的假设熔炉负荷。假设熔炉以90%的恒定产能因子运行。



注意：MWh/MW = 每兆瓦装机容量兆瓦时。

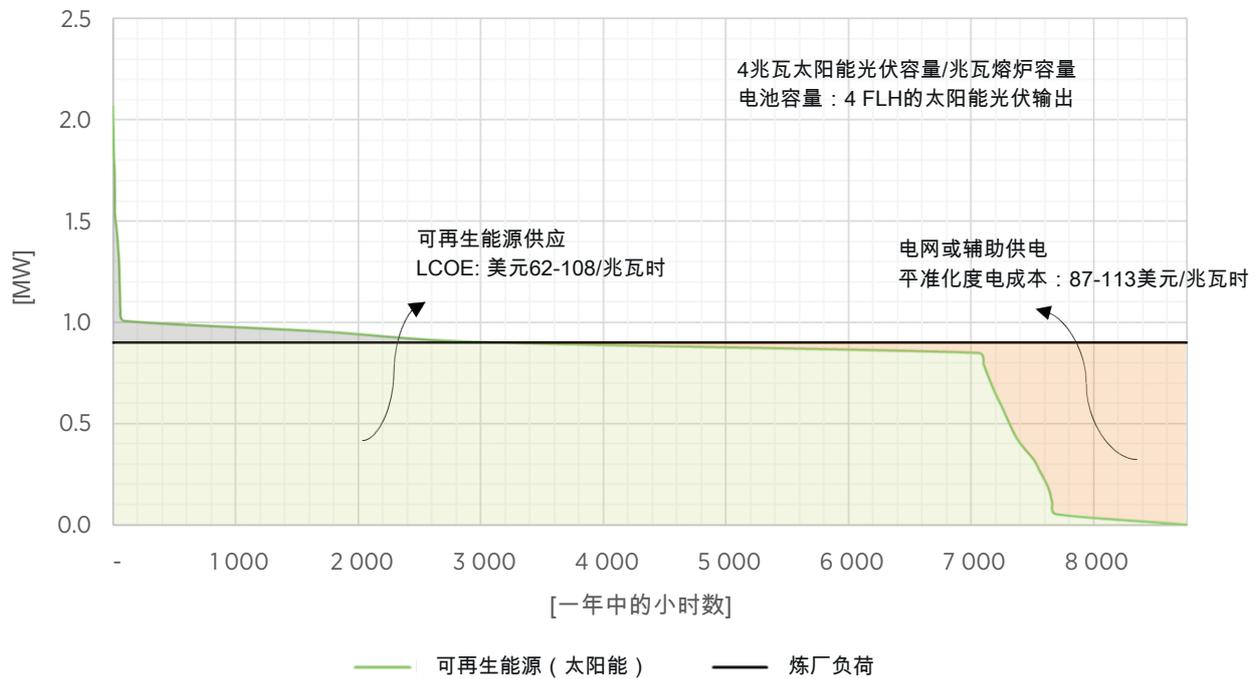
有时太阳能发电量超过炼铝厂的需求，有时太阳能又无法完全满足炼铝厂的需求。这种情况通过负载持续曲线可以更清楚地显示。⁷ 图19中，由于太阳能供电高于冶炼需求所带来的溢出效应由“灰色”区域表示。太阳能光伏电站为“绿色”区域所示年度冶炼负荷提供一部分。在此情况下，当太阳能电站产生的电量不足以满足冶炼需求，即“橙色”区域所示，冶炼厂也将需要辅助或电网电力。



注：MW = 兆瓦。

图20显示了上述系统在电池供电下的运行结果。该电池设计用于储存太阳能电站四小时的满载输出。在新系统中，部分过剩的太阳能供应可以被储存，因此溢出量显著减少。因此，与无电池相比，太阳能电站和电池系统可以满足炼铝更大比例的需求（从炼铝年需求的41%增加到82%）。此外，从辅助电源获取电力的需求也降低了（从年消耗的59%降至仅18%）。

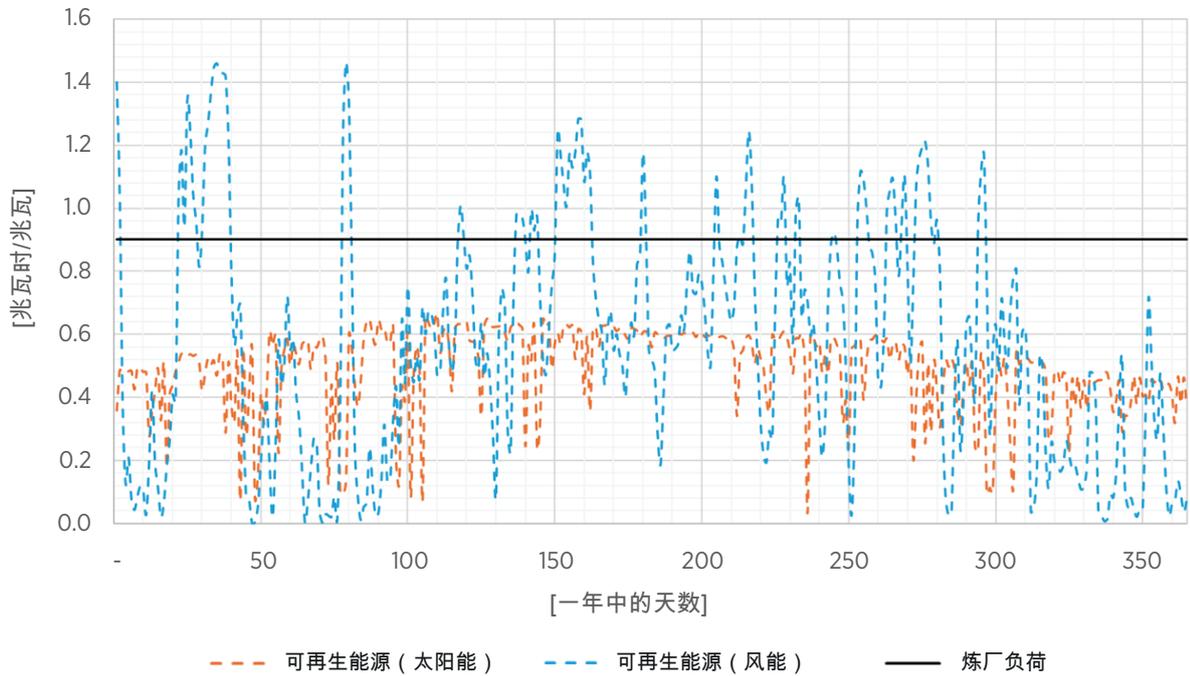
⁷ 负载持续时间曲线是负荷（需求）或发电在一定时间内的图形表示。它是通过将按时间顺序排列的负荷或发电曲线转换为降序排列的曲线而创建的。



来源：(Pfenninger and Staffell , 2016) 提供的太阳能小时发电概况

笔记：一种开式循环燃气轮机 (OCGT) 被假设为辅助电源，它可以提供熔炉的全部容量。不假设从可再生发电的溢出中获得货币化。OCGT的夜间投资成本假设为每千瓦630美元，总效率为40%。天然气成本假设为每百万英热单位 (MBtu) 6-9美元。Location 1位置太阳能光伏的夜间投资成本假设为每千瓦650美元。电池储能系统的夜间投资成本假设为每千瓦时 (kWh) 60-180美元。资本加权平均成本假设为7%。FLH =满载小时数；MW =兆瓦；MWh =兆瓦时；PV =光伏。

对于位置2，考虑了太阳能光伏和陆上风能的供应组合。假设的冶炼负荷容量系数与位置1相同，平均为90%。图21展示了太阳能光伏和风力发电站的平均每小时输出 (分别绘制) 以及位置2中安装的容量每兆瓦的假设冶炼负荷。



注意：MWh/MW = 每兆瓦装机容量兆瓦时。

联合影响可再生能源资产共同供电的情况在图22中展示。就位置1而言，溢出效应显示在“灰色”区域，辅助或电网供电显示在“橙色”区域，而炼钢厂消耗的可再生能源显示在“绿色”区域。

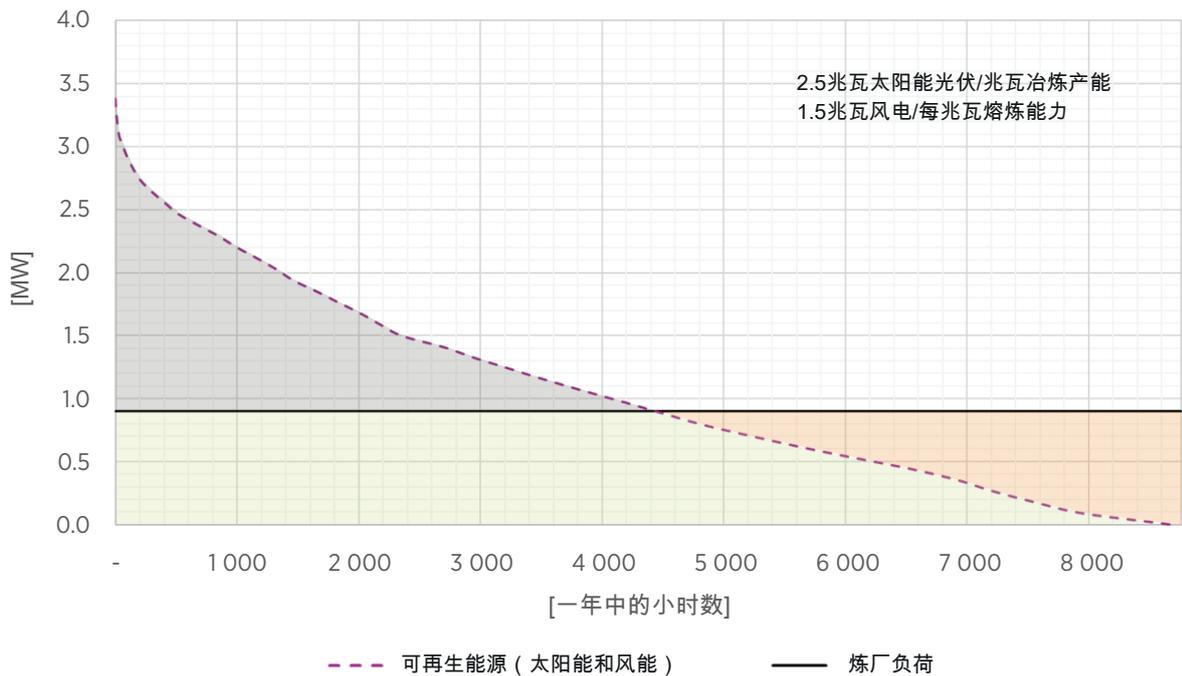
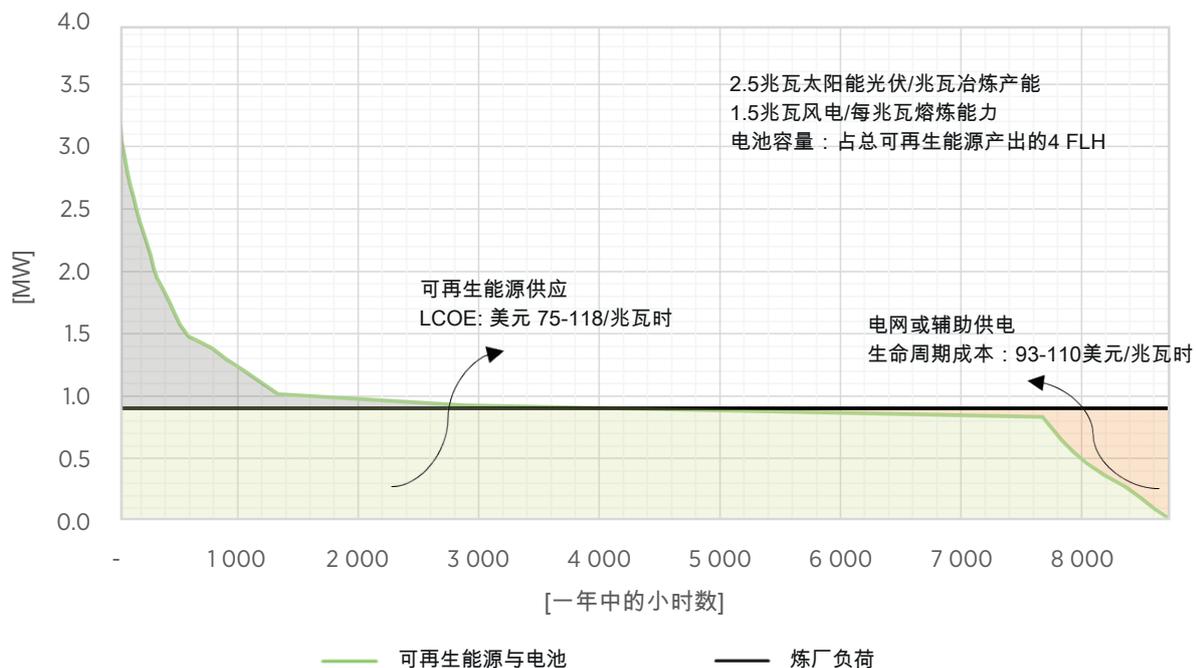


图23显示了具有太阳能光伏、风能和电池的系统以及熔炉的负载持续曲线。与位置1相同，在新系统中，多余的可再生能源生产可以在熔炉需求大于可再生能源设施输出时储存和使用。这相对于没有电池的情况减少了辅助能源供应的需求。电池的加入使熔炉的可再生能源消费份额从占熔炉年度需求的73%增加到几乎90%。因此，辅助供应份额从27%降低到约占熔炉年度需求的10%。



来源：太阳能和风力发电的每小时生成状况来自 (Pfenninger and Staffell, 2016 ; Staffell and Pfenninger, 2016) 。

注释 一个开放循环燃气轮机 (OCGT) 被假定为辅助电源，能够提供熔炉的全部产能。假设没有从可再生能源溢出的货币化。OCGT的过夜投资成本假定为每千瓦630美元，总效率为40%。在地点2的天然气的成本为每MBtu 4-7美元。地点2的过夜投资成本分别为太阳能光伏和陆上风能为每千瓦600美元和每千瓦1655美元。电池储能系统的过夜投资成本假定为每千瓦时 (kWh) 60-180美元。假设资本加权平均成本为7%。FLH = 完全负载小时；MW = 兆瓦；MWh = 兆瓦时；PV = 光伏。

高比例可变可再生能源电力系统的前景给电力系统运行带来了新的挑战。克服这些挑战需要创新的解决方案，而这些解决方案需要超越技术本身。

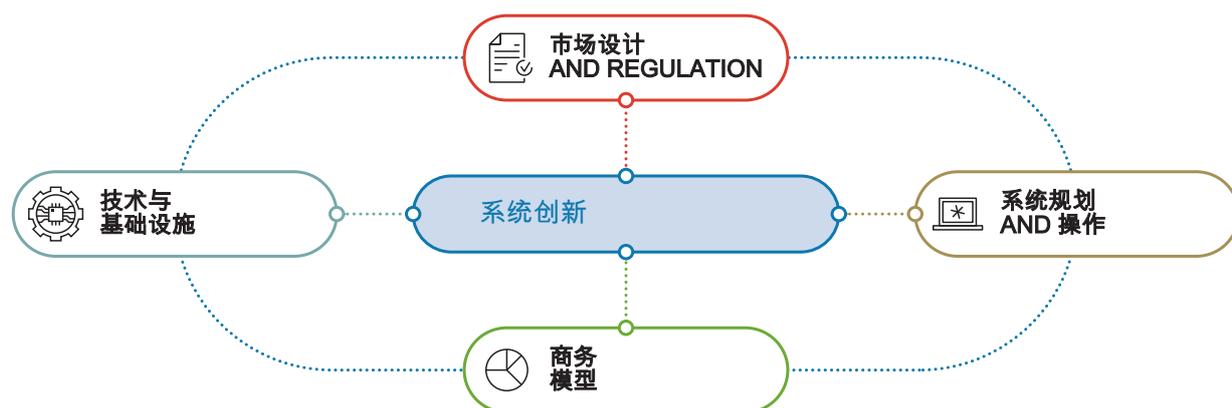
电力市场及系统运营方面的创新——通过先进的供应预测、数字化，

例如：

先进的平衡规则，以及其他措施——可以支持将可变可再生能源集成到电网中，以及增加与电网连接的熔炼厂的可再生能源供应份额。技术和基础设施可以促进可变可再生能源发电的集成和熔炼厂灵活运行。通过向电力系统提供某些服务，商业模式的创新可以为具有战略重要性的新服务创造价值

例如：

对电力系统和冶炼厂而言。新的市场设计和法规，如辅助市场的建立，可以鼓励在以可再生能源为基础的电力能源系统中所需的灵活性，铝冶炼厂能够提供这种灵活性。



来源：(IRENA, 2023d)。

创新维度	描述	示例
系统运行 并且规划	本特写文章探讨了创新的解决方案。关于运营电力系统的，允许更高集成变量可再生能源股份代	先进的太阳能光伏和风力发电能源预测可以启用系统运营商安排电力将发电量准确预测，以规划更有效。在电力领域的需求平衡系统。
技术和基础设施	不同的技术方法能够使灵活性更高在来自冶炼厂的动力需求，而维持热平衡。	利用热交换器进行控制热量损失有助于管理熔炉温度在中断期间。 利用电池存储剩余电量可再生能源发电使用当太阳能光伏和风力发电不可用时生成
商业模式	利用灵活性的潜力去中心化来源，例如铝冶炼厂在战略上至关重要。关于电力系统未来的也可以提供经济效益。 商业模式也可能在下列情况下出现：供应侧对于可再生能源（VRE）。	通过灵活操作冶炼炉，熔炉企业可以参与电力系统通过参与辅助活动实现平衡服务市场并可能减少总体电力供应成本。 在供应链方面，可再生能源聚合器可以管理多个分布式可再生能源来源，确保更加可靠和稳定能源输出至电力系统。
市场设计及法规	电力市场设计及法规可以赋予灵活性分布式来源，如冶炼厂帮助整合高比例的可再生能源（VRE）进入电网。	提高时间和空间效率电力市场的细化程度可以有助于降低平衡成本对于可再生能源运营商并启用更精细的价格信号，适用于两者发电机和冶炼厂以激励灵活性。

来源：（IRENA，2019，2023d；Xu，2019）。

可再生能源在炼油领域的应用

拜耳法是提取铝土矿中氧化铝的主要方法。它包括几个阶段：磨碎、消化、澄清/沉降、沉淀、蒸发、分类和烧成。



氧化铝精炼需要大量的能源（约~10 GJ/t 氧化铝），主要与低温消化（100°C至300°C）和高温煅烧步骤（1000°C至1300°C）使用的热量相关。消化和煅烧的排放强度大约为1.8 t CO eq/t Al。

²
0.8吨CO当量/吨铝（MPP ., 2023年）。

等作者⁸

将电力和氢能源转变为可再生能源可以降低炼制过程的碳排放。其他解决方案包括通过机械蒸汽再压缩回收废热和使用集中式太阳能热集热器。表3突出了这些技术在炼制过程不同阶段的应用，以及它们的技术成熟度水平和扩大规模的关键推动因素。

这些技术可以显著减少氧化铝提炼过程中的排放。然而，在许多情况下，与基于化石燃料的类似技术相比，它们可能需要显著更高的成本来采用，这可能是由于较高的设备或运营成本（Deloitte., 2022）。这些技术还需要大量的电力。

等作者

或者氢基础设施，这可能会增加采用成本。此外，仍需要大量的研发和开发（RD&D）以将MVR（机械蒸汽再压缩）和CST（连续蒸汽冷凝）等技术在炼油领域实现商业化规模。CST技术也仅限于太阳能辐射高的地区。

² 2018 IAI全球平均数。

技术	过程	状态	关键驱动因素	案例示例
燃料转换				
电锅炉	低-温度消化	早期采用	大规模可再生能源 储能	Hydro operates an electric boiler for Alunorte氧化铝巴西的炼油厂，拥有两座更多安排于2024年。
电力煅烧	对于高-温度煅烧	演示		Alcoa意图展示电气在Pinjarra的煅烧铝冶炼厂在澳大利亚
氢锅炉	低-温度消化	演示	大规模可再生能源 储能 氢运输与存储	
氢煅烧	对于高-温度煅烧	概念		可行性研究 氢气焦化 由力拓公司进行在Yarwun氧化铝厂炼油厂。
废热回收				
机械蒸汽再压缩 (MVR)with 可再生电力	低-温度消化	演示	热能储存	瑞奥尼尼公司将对此进行调查。利用废热升级MVR在QAL炼油厂。
其他举措				
集中太阳能热 (中国标准时间)	对于低-温度并且消化并且高-温度煅烧	演示	大规模太阳能资源 热能储存	南澳大学是调查整合CST在拜耳法中的含量。 麦丹矿业与玻璃点公司演示项目。

来源：(德勤和ARENA , 2022 ; MPP . , 2023) 。 等

9 热力学膨胀机系统是一种通过压缩增加蒸气 (低品位热) 压力和温度的热泵系统。

物料效率

实施提高材料效率的措施可以导致需求变化，从而提高铝的利用率。通过减少对铝的需求，这些措施有效减轻了其生产的环境影响。然而，必须注意，材料效率措施旨在维持铝的社会效益，同时减少相关的排放。

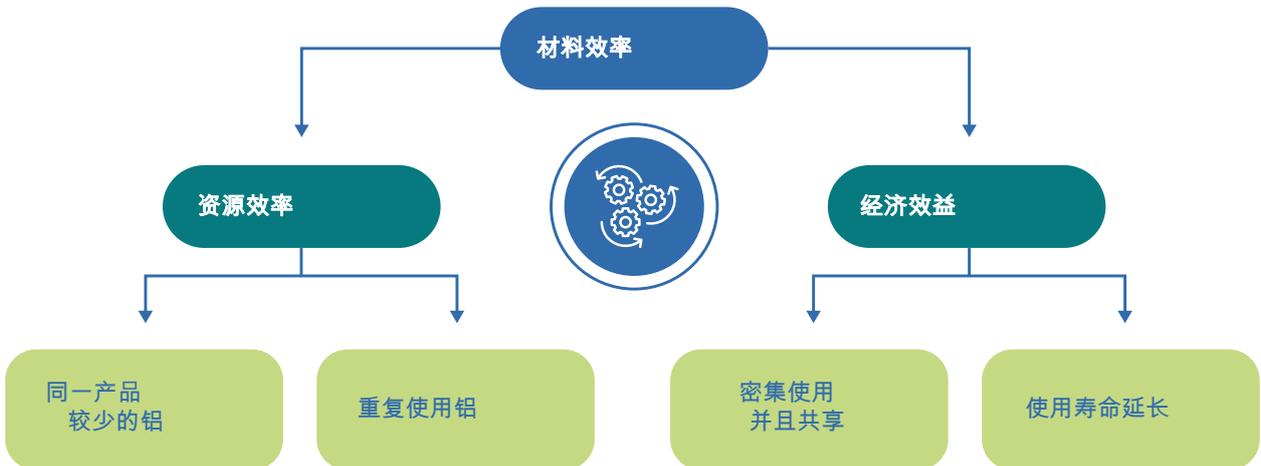
材料效率措施可以从两个角度来考虑：资源效率和经济效益（图26）。两者都利用技术干预、消费者偏好、商业模式和政策工具来优化其在终端应用中的铝消费（Allwood 等，2013）。

措施集中在资源效率上，旨在在最小化使用资源的同时提供相同的服务。

铝。这些措施适用于铝价值链的设计、制造、使用阶段以及生命终结阶段。

经济效率措施可以延长铝产品的使用寿命或增强其能力。

通过使用相同数量的物料投入，提供更多服务。这些干预措施在铝合金价值链的设计和使用寿命阶段实施。



资源效率措施可以通过以下两种策略实施：

1. “相同产品，铝含量更低”涉及减少生产单个终端产品所需的铝量。一个例子是采用轻量化技术，通过使用高强度铝合金优化设计以最小化飞机重量，或者减少铝饮料罐的厚度。
2. “回收铝”允许将报废铝制品中的铝回收用于其他应用，同时处理量最小化。与原生和再生铝的生产相比，这种策略使用的能源可忽略不计，并在提高资源效率的策略中扮演一定角色。例如，含有铝合金的汽车发动机缸体和交流发电机可以被回收再利用。

经济效率措施可以通过以下两种策略实施：

1. “终身延长”涉及设计具有更长使用寿命的产品。针对可维修性进行设计，特别是针对消费者产品和车辆，也可以显著提高其使用寿命。
2. “更密集的使用”涉及到改变行为和偏好，以最大化个体铝制品的效用。对于车辆和建筑，可以考虑多种选项来提高铝制品的利用率。这可以包括过渡到共享办公空间或远程工作等可能性，以改善建筑表面的利用率。对于车辆，从私人交通过渡到公共交通或共享车辆也可以提高利用率。

策略	关键机遇	障碍
相同的产品 较少的铝	金属加工更高效 (<i>例如</i> 汽车制造，太阳能光伏 结构，风力涡轮机，结构 设计) 金属和聚合物粉末 (<i>例如</i> ： 添加剂制造 (additive manufacturing)) 轻量化 (<i>例如</i> 车辆 制造、航空航天、建筑 ())	产品设计往往忽视了 材料利用率的重要性 缺乏大规模生产技术 控制形状和厚度 元件 规范性设计规范 可能会产生负面影响 回收

策略	关键机遇	障碍
重复使用铝	原地及场外再利用 (例如建筑组件)	合金复杂性 零部件的检索 元件退化 非标准化零件 缺失的供应链参与者 拆除成本
密集使用和分享	运输车辆和消费者 家用电器	由于社会原因引起的文化抵抗 实务 产品使用寿命缩短 加速磨损会降低效益
使用寿命延长	次级市场 (例如消费者家电, 包装) 商业与工业建筑	预测需求和包括可重构性及设计中的可升级性 物理故障, 如疲劳或腐蚀 更高的前期成本

来源 : (Cooper and Allwood, 2012; Cullen and Cooper, 2022; IRENA, 2023e; UNEP and IRP, 2011)。

材料效率措施在环境和非环境方面具有巨大的潜力, 但其实施可能复杂 (表4)。技术挑战包括安全性和性能考虑, 以及生产和供应链的调整。挑战还包括监管障碍、新技术投资需求、资源有限、技能差距和数据不足。文化实践也可能影响材料效率措施的实施 (IRENA , 2023e)。

废钢回收

铝具有高可回收性，这意味着它可以多次回收而不损失质量。铝的回收（或二次生产）是铝行业减碳的重要支柱，因为它消耗的能量仅占从铝土矿生产铝的能量的一小部分，并且排放量远低于后者（见表5）。

	原生铝	二次铝
能源强度 (克/吨)	77	3.3
排放强度 (CO ₂ e/t)	16	0.5

来源：(MPP., 2023) 等人

由于铝在众多应用中的使用，铝废料的质量从低质量的混合废料到用于特定应用中的极高质量废料不等。因此，铝废料回收过程取决于废料中存在的杂质数量和种类。

废铝回收率通常较高，但根据应用、地区和合金（见表6）有很大差异。在所有地区，具有大量废弃物的价值较高的专业化产品回收率都很高。这得益于这些报废产品的经济价值。例如，航空航天组件在退休或升级叶片和航电系统期间会产生大量的报废品。这些报废品具有价值，因为这些组件中使用的合金对产品高度专用，可以用于类似的应用。相比之下，小产品的回收率很大程度上取决于区域政策、项目以及充足的基础设施和技术，以及提高消费者意识和为负责任的处理提供激励。

鉴于征收率存在相当大的差异，实施符合最佳国际实践的自定义政策和项目，以缩小差距是至关重要的。

	汽车	建筑	罐头	电气	消费者耐用消费品
中国	94%	94%	99%	93%	94%
欧洲	95%	95%	76%	60%	50%
南美洲	80%	80%	97%	60%	60%
北美	95%	80%	46%	50%	30%
中东	91%	92%	33%	91%	93%

来源：(MPP., 2023). et al

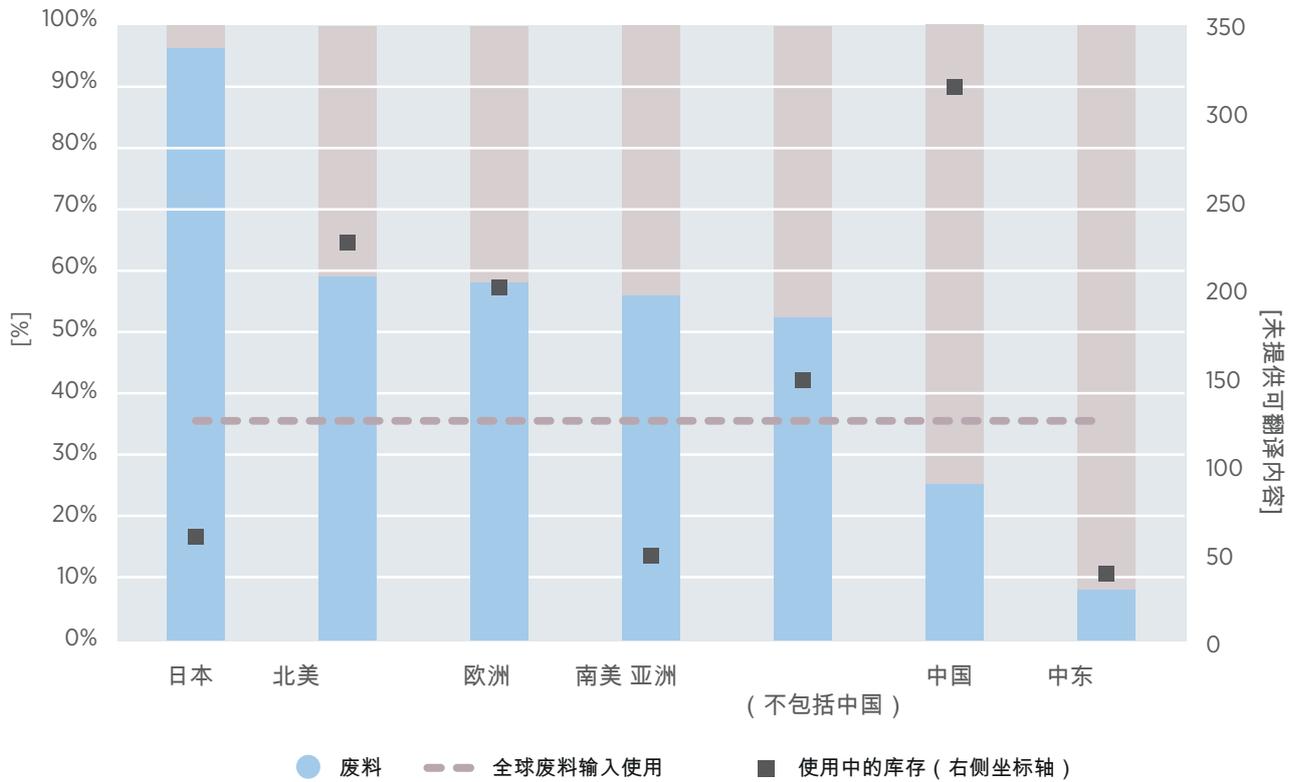
注意：绿色表示回款率超过80%，而橙色表示回款率在50%至80%之间。红色表示回款率低于50%。

提高旧废料的使用率¹⁰ 在提高回收利用在铝生产中作用的过程中，这是关键。然而，旧废料的回收率会根据其应用和收集及分拣流程的效率而有所不同。随着收集到用于回收的旧废料比例的增加，单位回收成本往往会上升。由于额外旧废料可能存在潜在的地理分散，收集、识别和分拣流程可能带来挑战并增加回收成本，尤其是对于小批量废料而言。

在工业化历史较长的国家，相当一部分铝产量来自于废料。这归因于这些国家经济中积累了数十年的大量库存，以及对金属需求的饱和。相比之下，新兴和发展中国家通常必须依赖初级生产过程，因为它们不断增长的需求超过了现有的铝库存。

随着工业化程度的提高，废料贸易也影响着废料使用的区域分布（图27）。从2010年到2021年，亚洲经济体，如印度、香港特别行政区（中国）、韩国和泰国，是铝废料最大的进口国（OEC，2021）。

¹⁰ “旧废料”指的是由报废产品产生的废料，而“新废料”则是指在铝产品制造过程中的废料。与旧废料不同，新废料品质较高，其冶金成分通常也是已知的。

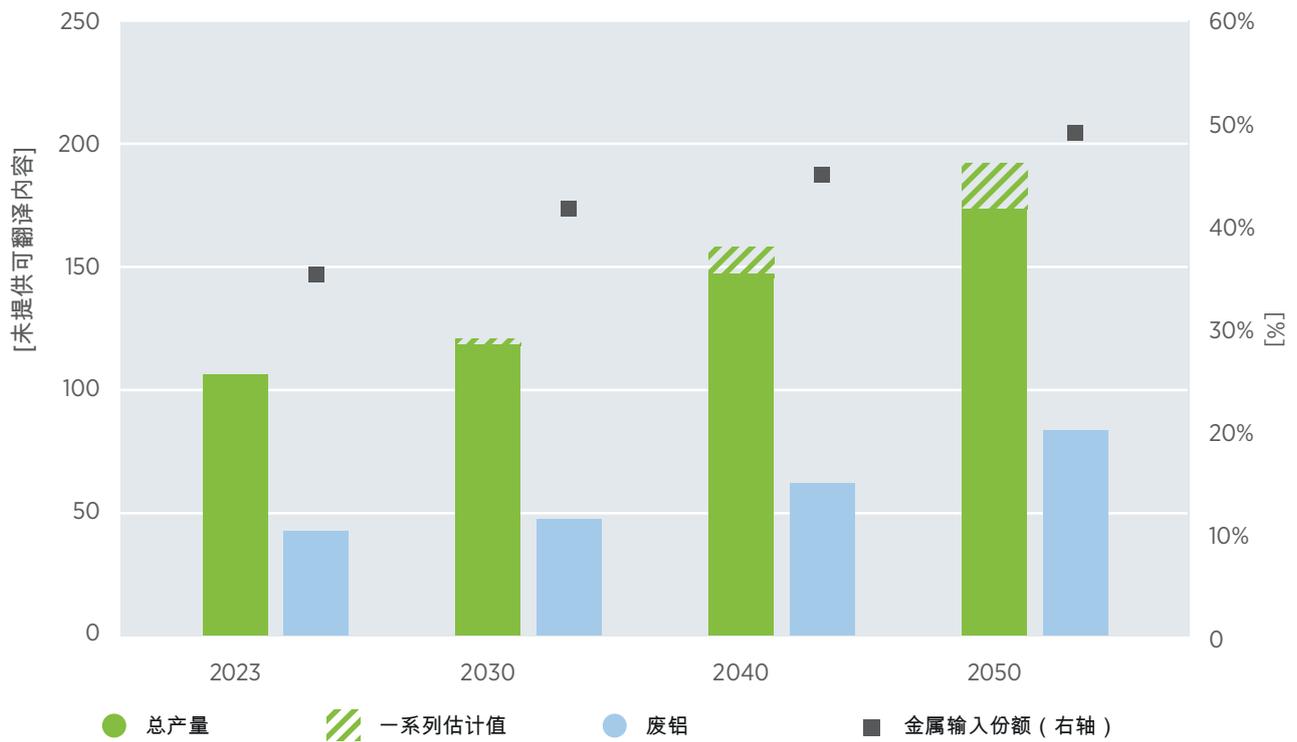


源： (IAI , 2023b)。

笔记： 在讨论铝行业回收利用作用时，查看不同的定义以确保清晰性和一致性是非常重要的。回收效率 (RER) 是指回收的废旧和新废料相对于可利用废料的比。另一方面，回收投入率 (或称回收率) 定义为生产铝的废旧和新废料的总量占生产铝总量的一部分。这可以被视为铝生产过程中金属输入中废料占总量的比。

回收利用预计将在未来的生产中扮演更加重要的角色。图28显示，预计废料可用量的增加将导致回收铝在时间上扮演越来越重要的角色，其份额将从现在的35%增长到2050年左右的50%。

这一增长主要归因于新兴经济体中铝库存量大的产品达到使用寿命结束，以及国家更加重视再生铝生产。例如，中国2022年生产了约4000万吨初级铝。然而，由于政府实施的45万吨初级铝产能上限，该行业正转向再生铝生产 (Ampofo , 2023)。



来源：(IAI, 2023b)。

笔记：生产及再生铝的预估受全球条件、国内政策和科技发展变化的影响。废料预估的范围根据不同情景而有所不同。

值得注意的是，回收限制不仅可能由于可用废料数量，也可能由于材料质量而产生。铝的不同合金通常在单一产品、多材料产品中一起使用。例如，车辆的车身板、框架和保险杠是由不同材料制成的。

即

合金铝通常不可互用。这一问题需要重大考虑，因为报废车辆是铝废料的最主要来源之一 (Raabe et al., 2022)。

不同合金元素的污染问题。与钢不同，铝对多种元素的溶解度低，这可能导致金属间相的形成。¹¹ 当发生污染时更容易去除。由于它们分布在金属中并且还可以改变合金的性质，因此难以在不损坏金属的情况下去除。这给分离和分类废料带来了额外的挑战，除了管理所有类型的废物输入 (Raabe et al., 2022)。

¹¹ 金属间相是两种或更多金属元素之间形成的化合物。金属间相的生成可以显著改变合金的性能、强度、耐腐蚀性以及其它特性。

为了应对这些挑战，投资于发展高级的收集和分拣基础设施，如光谱学，有助于在回收过程中去除污染 (Raabe)。 (Raabe 等，2022)。尽管废料
等人

目前使用的分类方法已经高度发展，但重要的是要记住，它们是为与现代产品相比合金成分较少的复合产品而创建的。这突出了探索能够准确识别铝废料中不同类型合金的新技术的必要性。

此外，探索创新合金选项，如交叉合金或单合金以及具有增强杂质容忍度的合金，可以提高废料回收。交叉合金可以结合不同合金的特性，以适应广泛的用途，而具有高杂质容忍度的合金可以在不改变性能的情况下处理更高比例的受污染旧废料 (Raabe 等，2022年)。然而，在这方面还需要更多的研发工作。

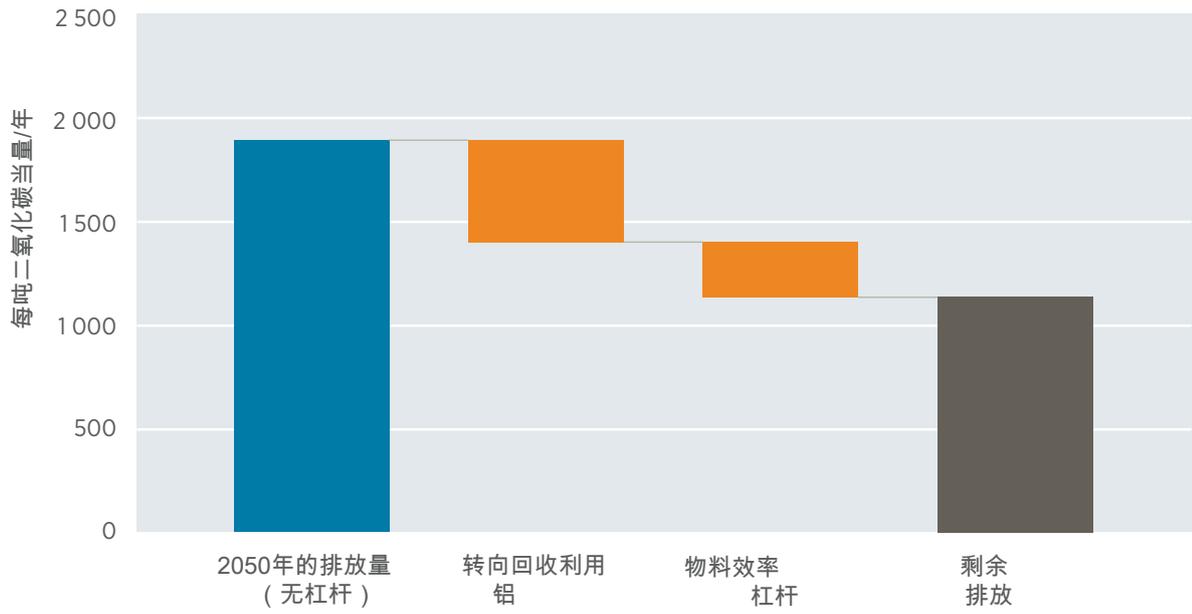
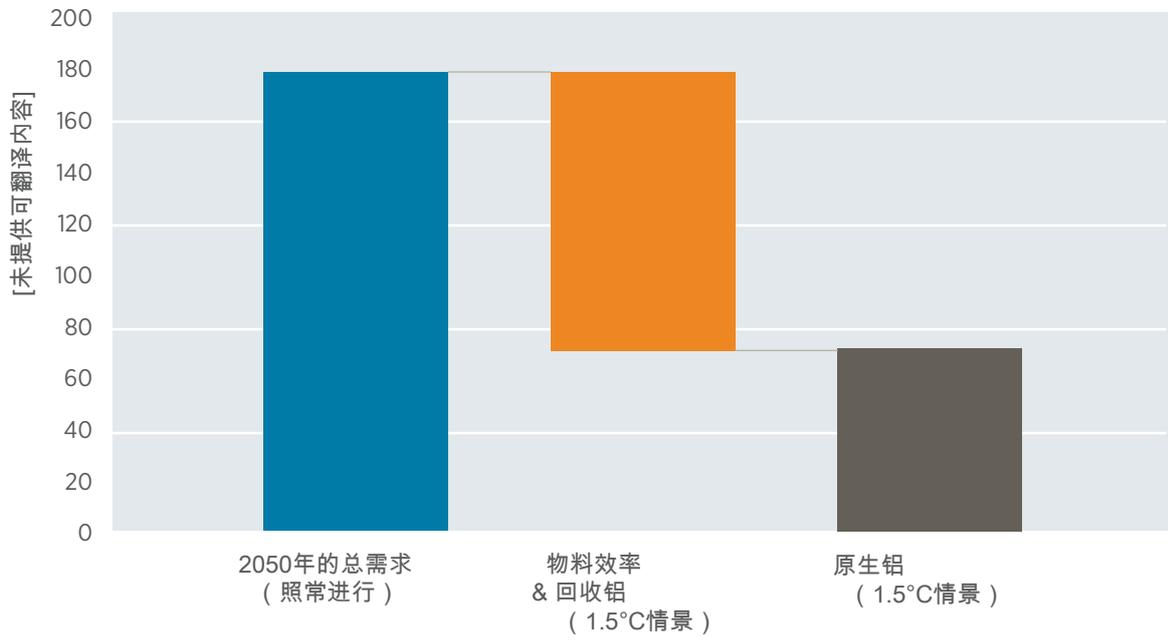
等人
前部。

促进各国和地区之间无限制的废料贸易对于优化废料价值同样重要。不同种类的铝废料在不同应用中具有适用性。通过实现无缝跨境废料贸易，有机会在废料原产地以外的地区利用废料。因此，这允许更精确地协调废料供应与不同地理位置的铝生产商的具体产品需求。

物料效率措施和增加回收利用可以显著减少铝行业排放，降低对原生生产的依赖。Mission Possible Partnership进行的一项研究发现，这两种杠杆的联合效应到2050年可将原生铝的消费需求减少约1100万吨/年，并导致温室气体排放量大约减少每年8000万吨CO₂当量。

²
截至2050年 (图29) (MPP 等，2023)。然而，这些努力将不足以消除排放
等人

铝生产全部。未来几十年仍需原生铝生产，因此需要转向更清洁的能源来源。



来源：(MPP., 2023b). 等人

惰性阳极

熔融氧化铝（或铝土矿）通过霍尔-埃鲁尔电解法生产金属铝，并在电池的阴极产生二氧化碳，在阳极产生。这些阳极由碳制成，并在过程中被消耗。

阴极是熔炼过程中排放的主要来源——大约占生产每吨铝1 tCO₂ eq/t的排放。

² 生产的——即使在精炼厂使用可再生能源供电的情况下（IAI，2023a）。除了CO，碳
² 一氧化碳以及几种全氟碳化合物如CF₄和CF₃在反应过程中生成。

⁴ ²⁶ 一个消除碳阴极排放的有希望的方法是使用惰性阴极。这些阴极在电解质中不溶，并产生氧气而不是一氧化碳。使用惰性阴极还能够消除一氧化碳。

² 并且采用传统碳阳极生成的全氟烃。与碳阳极相比，惰性阳极的寿命更长，降低了需要更换阳极的频率（Padamata 等人，2023）。本
等人
也可能消除对阳极制造场所的需求。

合适的惰性电极材料需要具备几个特性，包括高电导率、耐热震性和在电解质中的低溶解度，（Padamata 等人，2023）。此外，还有几个
等人

额外障碍阻碍了惰性电极的广泛应用。这些障碍包括与成本相关的不确定性、对电极如何应对电源波动如何反应的担忧，以及它们与各种等级的原料和杂质的性能（MPP，2023）。此外，对现有工厂的改造
等人
项目可能需要调整布局和设计，这可能会导致大量的资本支出。

Several initiatives such as TRIMMET Aluminium SE¹² 和 ELYSIS™¹³ 正在努力降低惰性电极在大规模商业化部署中的障碍。ELYSIS™表示，其技术将很快准备好进行商业化部署（ELYSIS，2021）。最近，阿卢瓦和力拓宣布将在2024年进行惰性电极的大规模演示（阿卢瓦，2022）。

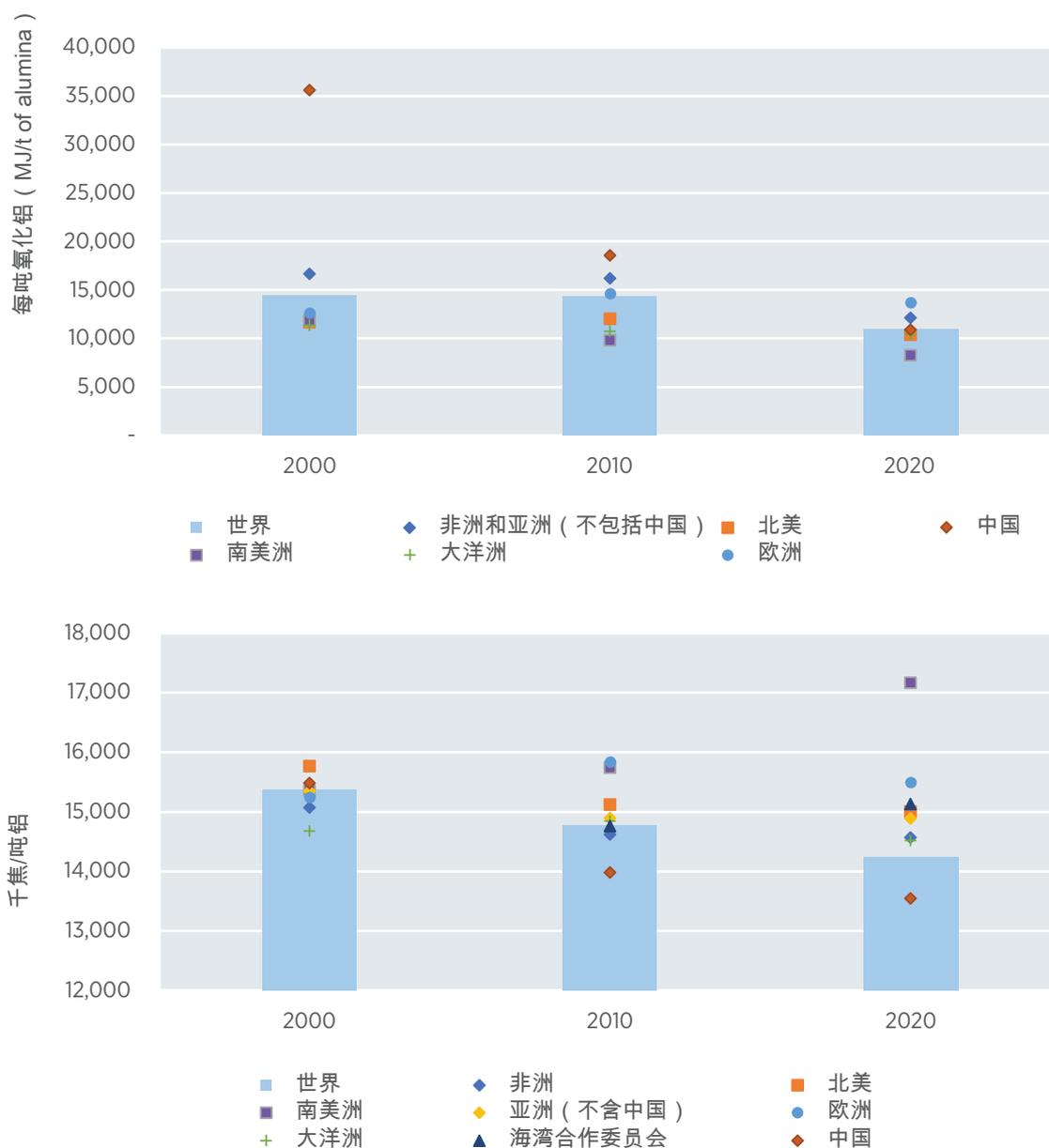
流程效率

在过去二十年里，各种国家采用了节能铝合金加工技术，导致精炼过程中的单位能耗平均降低了24%，降低了8%。¹⁴ 在熔炼过程中（图30）。这种改进对于管理能源消耗以及降低因使用大量化石燃料而导致的行业环境影响至关重要。

¹² 与Arctus 铝业公司合作。¹³ ELYSIS™是阿洛卡和力拓的联合倡议。¹⁴ 对于整个能源强度的显著降低，尤其是在炼铝方面，中国大型炼厂的发展是一个重要因素。这些设施使炼厂在可比的安培级别下能够炼制更多数量的氧化铝，例如在欧洲（Fastmarkets，2016年）。

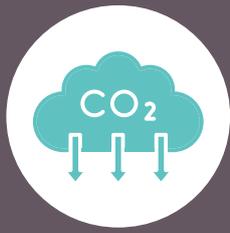
在氧化铝精炼方面，数据显示，随着时间的推移，不同地区的能源强度正在趋同。然而，对于熔炼过程，能源强度仍存在显著差异，从中国的13.5千瓦时/吨铝到南美洲的16.7千瓦时/吨铝不等。能源强度的广泛差异表明，通过应用最佳可用技术（BAT），有可能提高和改进工艺效率。

虽然精炼和熔炼占据了大部分的能源消耗，但在铝价值链的其他方面也存在显著降低能源消耗的潜力。这包括回收、挤压、铸造和轧制（哈拉尔松和约翰松，2018）。

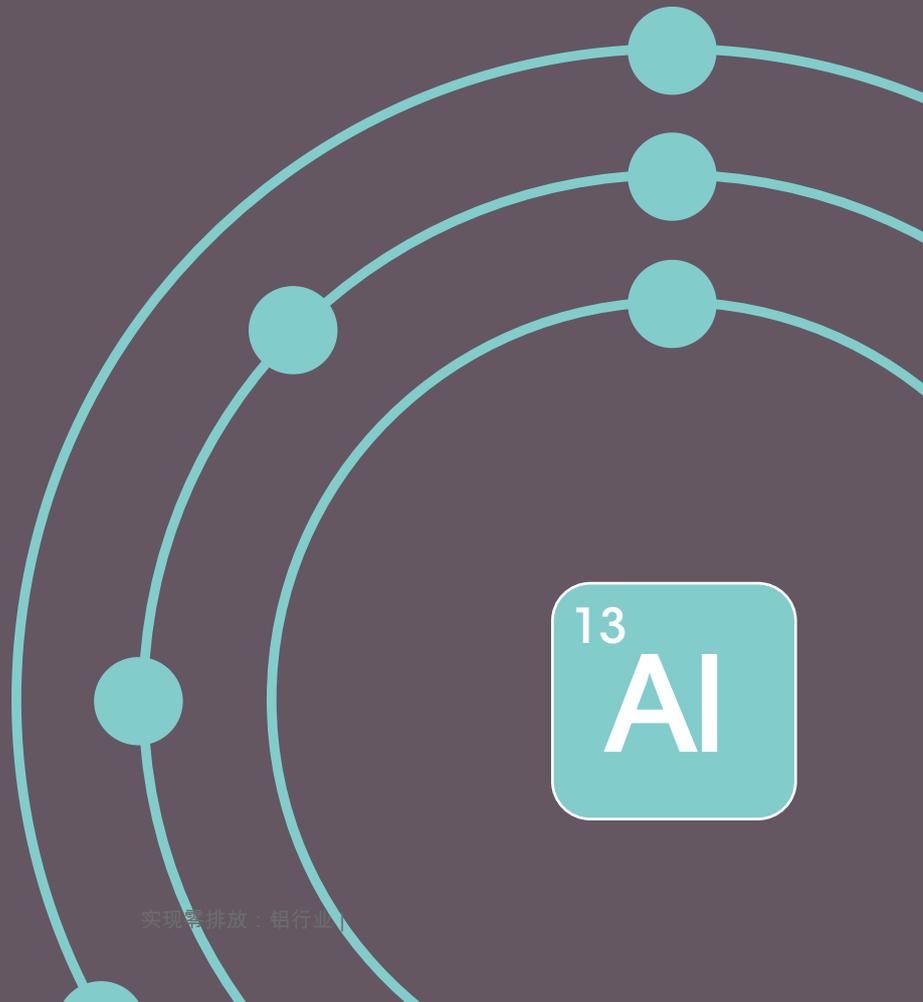


来源：(IAI, 2023a)。

注：2020年南美洲更高能源强度是由于该地区生产关闭所致。



加速铝行业向净零排放转型



3.1

铝行业目前是温室气体排放的主要来源。然而，铝行业的利益相关者正在积极实施旨在减少这些排放的倡议和可持续实践。

例如，一些铝生产商已表现出通过实施净零排放承诺来减少排放的雄心。数家铝生产商还支持了国际铝业协会 (IAI) 与“可能使命伙伴关系” (MPP) 联合发布的报告，该报告突出了铝行业脱碳的不同策略 (MPP, 2023)。2023年，IAI启动了一项新的举措，用于衡量和公开跟踪

等人
来自其所有成员 (IAI, 2023c)。IRENA的工业脱碳联盟促进对话并支持合作，以帮助企业实现脱碳。其成员包括如阿联酋全球铝业等铝生产商以及数家能源公司 (AFID, n.d.)。

可再生能在铝冶炼行业中的关注度也在不断增加。自2022年以来，澳大利亚、巴西和西班牙的铝冶炼商已签订了几项新的太阳能光伏和风电购电协议 (PPAs)，总容量约4.1吉瓦 (截至2024年12月)。此外，诺斯克氢铝公司已与斯特拉特克电力公司签订了一项购电协议，总共6.6太瓦时的可再生能源，用于其在挪威的运营 (氢铝, 2023)。2022年，塔摩哥铝业公司寻求采购、投资或开发可再生能源资源，以实现其在澳大利亚的冶炼厂实现100%可再生能源使用的目标 (塔摩哥铝业公司与安永, 2022)。

科学基准目标倡议也在开发工具，以便铝业公司制定基于科学的基准目标 (SBTi, 未注明年份)。2023年，洛基山研究所与花旗、荷兰国际集团、法国兴业银行和渣打银行合作推出了可持续铝业金融框架 (RMI, 2023)。该框架旨在使金融机构能够衡量、基准测试并披露其贷款组合的环境影响，并鼓励它们与1.5°C情景相一致。

第一移动者联盟 (FMC) 于2022年推出了铝产品组合，旨在催化对低碳铝的需求。参与铝产品组合的企业承诺至少购买其原生铝的10%，符合FMC的低碳铝定义 (低于3 tCO₂ eq/t Al, 从摇篮到坟墓)。

² 严重 (grave) 且利用突破性技术生产于2030年。此外，企业可以选择性地承诺每年从回收中采购50%的铝。

在技术方面，几个低碳研发与开发 (RD&D) 项目旨在减少铝生产过程中的直接排放。这些项目包括通过电和氢气进行低温和高温热处理的努力，以及用于低温和高温精炼过程的MVR (机械蒸汽再压缩)。例如，美国铝业公司 (Alcoa) 在澳大利亚的Pinjarra铝精炼厂展示了电热处理技术。力拓集团 (Rio Tinto) 正在进行氢气热处理的可行性研究。美国铝业公司还探讨了MVR在氧化铝精炼脱碳中的作用 (Alcoa, 2024)。此外，还有迹象表明电动锅炉的早期采用，挪威氢能公司 (Norsk Hydro) 目前在巴西运营一台电动锅炉，并计划在2024年再增加两台 (Deloitte, 2022)。在惰性阳极的开发方面，TRIMMET

等人
铝业公司SE和ELYSIS™是致力于其大规模商业部署的倡议。阿洛卡和力拓宣布在2024年进行大规模惰性阳极的示范 (阿洛卡, 2022年)。像EnPot这样的热交换器可能允许熔炉的灵活操作，并在2019年安装在Trimmet熔炉的120个炉子上 (EnPot, 未注明年份)。

这些举措和协议显示出铝行业不同利益相关者在取得显著进展。

可再生能源可以在铝工业的脱碳中扮演核心角色。熔炼是能量消耗最高的过程，占初级铝生产排放的四分之三左右。熔炼过程依赖于电力作为其主要能源输入。

可再生能源发电，如太阳能光伏和风力发电，在过去十年中经历了巨大的成本降低。目前，太阳能光伏和风力发电已成为全球大多数市场中成本最低的新能源来源，并在全球新的电力产能部署中占据主导地位。加快这些技术的采用步伐，将为铝行业实现大幅度的减排打开大门。

引入如太阳能光伏和风能等可变可再生能源将带来新的挑战，这些挑战与确保铝生产可靠的电力供应相关。需要部署一系列灵活性选项，从电力存储到需求响应等。将可变可再生能源整合到铝行业没有一劳永逸的解决方案。解决方案的混合将取决于每个铝生产商的具体条件，包括该地区可再生能源的质量和丰富程度、当地/区域电力部门的灵活性条件（发电组合、电网连接和存储），以及潜在的灵活性。

例如：
冶炼厂本身。

尽管取得进展，该行业仍未按计划在中世纪中期实现脱碳。仍存在几个重要差距：

大多数铝贸易发生时并未考虑其碳足迹（未获得认证的环境

属性。

太阳能光伏和风力技术的采用在该行业仍然非常有限。可再生能源购电协议（PPA）

在一些市场，新的机遇正在出现，但重大的障碍依然存在。由于多种因素的综合作用，冶炼厂在有些市场上仍然难以获得有吸引力的可再生能源购电协议（PPA）。这些因素包括阻碍可再生能源快速部署的监管和市场壁垒，以及低碳电力的需求很高，这可能会推高价格，超出铝生产商在行业微薄利润空间内所能承担的金额。

尽管精炼厂有在一定程度上灵活运作的潜力，从而有助于整合

可再生能源在电力系统中的应用，由于技术和市场的不确定性，这种能力尚未得到充分利用。

商业对成熟、低排放炼油工艺的采用，如电动锅炉

并且煅烧炉，由于包括高初始成本、电力与其他燃料的税收以及与操作/工艺相关挑战等多种因素组合，面临障碍。

尽管在不久的将来采用惰性阳极在技术上可能成为可能，但其大规模应用仍面临诸多挑战。

商业利用似乎因操作挑战而遥远，例如电力波动和杂质，以及如高成本和对现有冶炼配置的更改等障碍。

努力加快该行业的转型必须通过扩大可再生能源的使用、提高能源和材料效率以及追求其他脱碳解决方案来加强。为了加速铝产业的脱碳，需要采取一些促进条件。这需要政府和私营部门的果断行动。

政府可以通过确立针对工业脱碳的长期、特定行业的国家目标，并设定清晰的阶段性里程碑，来支持铝行业转型。政府还可以通过实施将化石能源负面环境影响总价值内部化的国家碳定价政策，进一步创造铝行业绿色技术的公平竞争环境。持续的多边合作，以实现国际碳定价的进一步趋同，将为投资创造强烈的市场信号。

铝行业实现脱碳的关键条件是按照所需速度开发和建设所需的清洁能源供应和价值链。铝行业需要大规模扩展电力生产能力。在过去十年中，全球年度可再生能源装机容量持续增长，到2023年已安装记录的473吉瓦。然而，IRENA的1.5°C情景表明，部署率需要大致翻倍，每年安装1 043吉瓦的新可再生能源发电容量。

政府可以通过与COP28的三倍承诺一致加速可再生能源供电的部署来支持铝行业的转型。这可以通过更新电力领域政策和法规来实现，包括简化许可程序和调整电力市场设计，以允许增加的可再生能源份额的整合。

电力领域的基础设施规划和部署至关重要。在所有级别上——包括输电和配电——对电网的投资是必要的，以释放可再生能源发电能力的投资。相反，

即

如果不能按时部署，缺乏电网可能成为将电力供应转型到铝业和其他部门的临界瓶颈。

为了促进铝行业循环发展，政策制定者应优先创建一个支持性的监管框架，以鼓励材料效率和循环性。这可以通过建立强制性规定、标准及目标来实现，以引导生产商并激励消费者采取可持续的做法。

铝是一种国际交易的商品，以其低利润率和激烈的（国际）竞争为特征。由于生产低碳铝需要电力、技术和工艺变革，这通常会导致成本溢价，而冶炼厂无法获得足够的溢价来抵消所需的巨额投资。在没有足够高且普遍的碳价格的情况下，有必要开发低碳铝的市场。

私营部门可以通过利用某些终端消费者愿意支付溢价意愿的自愿方案来促进这种市场的创建。然而，这些自愿市场具有有限的扩展性。公共部门可以通过支持大规模需求的创造并建立这些市场运作的监管框架来做出贡献。政府还可以在多边论坛上工作，以加快在定义、标准、阈值和认证程序方面的国际趋同，从而促进此类低碳铝的全球贸易。

工业部门在全球气候融资中获得的份额不成比例地低（2022年为140亿美元——约占总额的1%），尽管其负责几乎所有三分之一的二氧化碳排放（Buchner等，2023）。

等人

²

政府可以通过与私营部门和金融机构合作，降低脱碳项目的风险，从而增加全球投资流向铝业。政府对项目可行性提供支持

可以通过多种机制实现，例如通过提供担保、优惠贷款和混合融资等方式，以及其他工具。

可再生能源技术的成本竞争力不断提高可能会重新分配多个国际贸易工业商品的地域足迹，包括铝。那些拥有廉价、丰富和高品质可再生能源资源的地区可能在不久的将来处于生产成本最低的低碳铝的最佳位置。这在一方面为某些司法管辖区带来了去工业化的风险，另一方面，也为全球范围内减少该领域转型成本提供了国际合作的机会。各国政府可以在多边论坛上共同努力，寻求互利共赢的伙伴关系，以脱碳全球铝供应链。这可以通过合作的长远投资规划实现，从而降低所有方面的脱碳成本。

主动和协作的努力，涉及政府、生产商、消费者、研究人员以及非国家行为者，将需要加速铝行业的脱碳进程。

需要在多个领域采取行动，从开发低碳铝的市场，到加快熔炼过程中可再生电力供应的部署，到支持下游过程中的清洁能源解决方案，再到支持进一步提升材料效率和循环。表7总结了这些关键减排行动领域，并为每个领域提供了关键推荐行动，以及预期将担任领导角色的相关利益相关者。

关键区域为行动	建议	相关股东
创建一个层级-竞技场对于低碳铝	<ul style="list-style-type: none">政府可以建立国家碳定价机制。政策内部化负面影响的全部成本化石能源的环境外部性。政府可以创造对低碳产品的需求。铝材通过绿色公共采购获得市场配额。大型消费者也可能积极制定策略以采购低碳通过与其他铝生产商合作。多边贸易合作可以奏效向一个更公平的低排放竞争环境迈进铝政府、行业及非国家行为者可以共同努力开发稳健的低排放标准、认证和标签体系。	政府； 铝消费者； 非国家行为体

关键区域为行动	建议	相关股东
增加份额 可再生能源在 电力供应至 铝行业	<ul style="list-style-type: none"> 政府可以在多国环境中开展工作。朝着国际碳减排的统一标准迈进定价，最小化“碳排放泄漏”的风险及激励向可再生能源的转变。 简化可再生能源的许可程序项目开发。 降低可再生能源领域的监管障碍电力系统和市场运行。 拓展电网基础设施。 	各国政府
	<ul style="list-style-type: none"> 铝生产商可以探索稳定选项。提高他们在当地/区域可再生能源的供应量。电力系统灵活性环境。 铝生产商可以探索潜在为了支持灵活的冶炼厂运营可再生能源的整合。 对于绿地项目，铝生产商可以考虑具有丰富地理位置的地点。最低成本的可再生能源战略投资决策。 	铝生产商
提高采用率 低排放的 精炼工艺	<ul style="list-style-type: none"> 政府可以在税收负担上实现平衡。电力与其他燃料相比。 支持获得融资以减轻高初次成本 提供经济激励措施 (例如 税收减免，投资支持) 。 铝生产商可以开发研究与开发 (RD&D) 项目关于低排放精炼技术。 	政府； 铝生产商
商业化惰性 电极	<ul style="list-style-type: none"> 行业和研究机构可以合作共同解决与运营差距相关的问题杂质和现有工厂的改造。 	铝生产商； 研究机构
提高材料质量 能源使用 在生产中及 制造业	<ul style="list-style-type: none"> 所有铝供应链的利益相关者可以投资研发、采用先进技术。严格执行高效监管标准，推动最佳废品回收支持实践合金的创新开发。 	政府； 铝生产商 和消费者； 研究人员

AFID (不详) , 工业脱碳联盟 , www.allianceforindustrydecarbonization.org/

AL Circle (2017), “ASI推出针对铝价值链的新认证项目” , www.alcircle.com/news/asi-launches-new-certification-program-for-the-aluminium-value-chain-29393 (访问时间 : 2024年5月31日)。

美国铝业公司 (未注明日期) , 财务摘要表 , <https://investors.alcoa.com/financials/quarterly-earnings/default.aspx>

美国铝业公司 (2022) , “美国铝业宣布长期可再生能源合同以支持圣西普里安铝炼厂2024年重启” 。 <https://news.alcoa.com/press-releases/press-release-details/2022/Alcoa-Announces-Long-Term-Contract-for-Renewable-Power-to-Support-2024-Restart-of-San-Ciprin-Aluminum-Smelter/default.aspx> (访问日期 : 2024年1月26日)。

阿洛卡公司 (2024年) , “MVR蒸发项目总结报告” , www.arena.gov.au/assets/2024/06/Alcoa-MVR-for-Low-Carbon-Alumina-Refining-Close-Out-Report.pdf (访问日期 : 2025年1月21日)

Allwood, J. M., (2013), “材料效率 : 用更少的材料生产提供材料服务” , *et al. 自然科学皇家学会哲学学报, 系列A : 数学、物理和工程科学* 卷371/1986 , 第20120496页 , <https://doi.org/10.1098/rsta.2012.0496>

Ampofo, Dr. K. (n.d.), “从废料中挖掘 : 绿色铝的未来” (Switched ON), www.bloomberg.com/news/audio/2023-07-26/mining-for-scrap-the-future-of-green-aluminum-podcast

澳大利亚铝业理事会 (2023年) , “将价格响应性资源整合进国家电力市场” , <https://aluminium.org.au/wp-content/uploads/2023/09/230914-Aluminium-Integrating-price-responsive-resources-into-the-NEM.pdf>

Boudreau, P., (2024), “对铝作为清洁能源载体的技术经济评估以实现脱碳”
等作者
远程行业 , 第3/8卷 , 第1919–31页 , RSC , <https://doi.org/10.1039/D4YA00151F>

布鲁纳, B. (2023), 气候政策倡议组织 , 加州 , www.climatepolicyinitiative.org/publication/global-landscape-of-climate-finance-2023/

Braga, C. A. P. , Netto, J. V. da F. (2016) , “用于控制铝生产单元能耗的动态状态观测器” , *系统科学与控制工程* , 第4卷/第1期 , 第307-9页 , <https://doi.org/10.1081/021642583.2016.1238325>

Burton, M. (2022), “德国铝冶炼厂因能源成本考虑减产一半” , Bloomberg, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2022-08-23/german-aluminum-smelter-considers-halving-output-on-energy-costs> (访问日期 : 2023年7月21日)。

Cooper, D. R., 和 Allwood, J. M. (2012), “在产品生命周期结束时重复使用钢和铝组件” 。
ACS
第46卷/第18期 , 第10334-40页 , <https://doi.org/10.1021/es301093a>
出版物

COP28主席 (2023年), “COP28: 全球可再生能源和能源效率承诺”, www.cop28.com/zh/全球可再生能源和能源效率承诺 (访问日期: 2024年1月26日)。

CRU (2022), 国际铝业协会. 后疫情经济中铝的机遇

Cullen, J. M., 和 Cooper, D. R. (2022), “物资流动与效率”。, *《材料研究年度评论》*
第52卷第1期, 第525-59页 <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070218-125903>

德勤与ARENA (2022年), 澳大利亚, www.arena.gov.au/assets/2022/11/roadmap-for-decarbonising-australian-alumina-refining-report.pdf
一份澳大利亚氧化铝精炼去碳化的路线图

迪普雷, N., (2016) “虚拟电池: 利用灵活的能量输入操作铝冶炼厂”, 收录于
等作者

E. Williams (编), (第571-6页), 斯普林格国际出版社, https://doi.org/10.1007/978-3-319-48251-4_96
轻金属 2016

ELYSIS (2021), “无碳铝冶炼迈出一步: ELYSIS推进商业化示范, 并在工业规模上运营”, <https://elysis.com/en/carbon-free-aluminium-smelting-a-step-closer-elysis-advances-commercial-demonstration-and-operates> (访问日期: 2023年11月7日)。

EnPot (n.d.), “EnPot: 铝的灵活未来”, www.enpot.com/ (于2023年12月12日访问)。

Fastmarkets (2016), “2016年LME周: 中国是最有效率的有色金属生产国”, *Fastmarkets*,
www.fastmarkets-prod-01.altis.cloud/insights/lme-week-2016-china-is-the-most-efficient-aluminium-producer-nation/ (访问时间: 2023年12月11日)。

GMI (n.d.), “铝市场份额及规模 | 全球统计数据报告 - 2032”, www.gminsights.com/industry-analysis/aluminum-market (访问日期: 2023年7月3日)。

Haraldsson, J., and Johansson, M. T. (2018), “生产相关过程中铝行业提高能源效率措施的回顾——从电解到回收”,
可再生能源与可持续能源
第93卷, 第525-48页, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.043>
评论,

Hydro (2023), “Hydro signs long-term power contract with Statkraft” www.hydro.com/en-HU/media/news/2023/hydro-signs-long-term-power-contract-with-statkraft/ (访问日期: 2023年12月12日)。

IAI (2021a), “全球铝业就业状况, 2019年”, 伦敦, www.international-aluminium.org/wp-content/uploads/2021/06/Employment-in-Aluminium-Industry-Report-2021.pdf

IAI (2021b), 国际铝业研究院, 伦敦,
1.5度场景: 推动减排的模型
www.international-aluminium.org/resource/1-5-degrees-scenario-a-model-to-drive-emissions-reduction/

IAI (2023a), “Statistics”, 国际铝业协会, www.international-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-production/ (访问日期: 2023年5月15日)。

IAI (2023b), “全球铝循环”, 国际铝业协会, <http://alucycle.international-aluminium.org/public-access/> (访问日期: 2023年7月5日)。

IAI (2023c), “铝行业新的温室气体倡议 - 国际铝业协会”, www.international-aluminium.org/resource/aluminium-industrys-new-greenhouse-gas-initiative/ (访问日期: 2024年7月3日)。

伊贝德拉 (2021年)，“伊贝德拉计划在西班牙建设首个工业规模的浮动海上风电场，投资额超过10亿欧元”，伊贝德拉， www.iberdrola.com/press-room/news/detail/iberdrola-plans-first-industrial-scale-floating-of-fshore-wind-farm-spain-with-investment-more-than-billion (2021年2月22日查阅)。

IEA (2023), 国际能源署, iea.blob.core.windows.net/assets/86ede39e-4436-42d7-ba2a-edf61467e070/WorldEnergyOutlook2023.pdf (访问日期: 2024年2月20日)。

IRENA (2018a), 国际企业可再生能源采购: 市场及行业趋势; REmade指数2018, 可再生能源机构, 阿布扎比, www.irena.org/publications/2018/May/Corporate-Sourcing-of-Renewable-Energy

IRENA (2018b), 国际电力系统灵活性在能源转型中的应用——第一部分: 政策制定者概览 可再生能源机构, 阿布扎比, www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Nov/IRENA_Power_system_flexibility_1_2018.pdf (访问日期: 2022年12月16日)。

IRENA (2019), 创新未来可再生能源领域的格局: 解决整合不可预测可再生能源的方案 国际可再生能源机构, 阿布扎比, www.irena.org/publications/2019/Feb/Innovation-landscape-for-a-renewable-powered-future

IRENA (2020), 达到零排放: 消除工业和运输中的CO₂排放 (p. 216), 国际可再生能源机构, 阿布扎比, www.irena.org/publications/2020/Nov/2020-IRENA-World-Energy-Transitions-Outlook-2020 与1.5°C气候目标一致, 出版物/2020/11/通过可再生能源实现零排放 国际可再生能源机构 (IRENA) (2023a), 国际可再生能源署, 阿布扎比, 2022年可再生能源发电成本 www.irena.org/Publications/2023/Aug/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2022

国际可再生能源机构 (2023b), 国际可再生能源机构, 阿布扎比, www.irena.org/Publications/2023/Mar/Renewable-capacity-statistics-2023 2023年可再生能源产能统计数据,

IRENA (2023c), 国际可再生能源机构, 世界能源转型展望2023: 1.5°C路径, 阿布扎比, www.irena.org/Publications/2023/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook-2023

IRENA (2023d), 智能电气化创新格局: 使用可再生能源实现终端消费的脱碳, 国际可再生能源机构, 阿布扎比, www.irena.org/Publications/2023/Jun/Innovation-landscape-for-smart-electrification

IRENA (2023e), 国际可再生能源署, 阿布扎比, www.irena.org/publications/2023/7/迈向循环钢铁产业 朝着循环钢铁工业发展

IRENA (2024), 国际可再生能源机构, 阿布扎比, 2023年可再生能源发电成本, www.irena.org/Publications/2024/Sep/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2023

MPP, . (2023), 等人 使净零铝成为可能: 一个行业支持、与1.5°C目标一致的转型策略 使命可能伙伴, 能源转型委员会, 国际铝业协会, 伦敦, www.energy-transitions.org/publications/making-net-zero-aluminium-possible/

新奥 (2023), “NEOM 绿氢公司完成了世界上最大碳中性绿氢工厂8.4亿美元的投资总额的融资关账”。 www.neom.com/en-us/newsroom/neom-green-hydrogen-investment (访问日期: 2024年2月7日)。

OEC (2021), “废铝”, <https://oec.world/en/profile/hs/scrap-aluminium?countryComparisonGeo-Selector=sa&countryComparisonMeasureSelector=Trade%20Value&disaggregationValue=value1&yearSelector=2010&countryComparisonFlowSelector=Exports> (访问时间：2023年7月26日)。

Onstad, E. (2023), “至今中国宏桥将150万吨铝冶炼产能转移到云南”
www.reuters.com/markets/commodities/china-hongqiao-shifts-15-mln-t-aluminium-capacity-yunnan-路透社,
截至2023年9月13日 (访问时间：2024年1月25日)。

Padamata, S. K., . (2023), “综述——使用氧气发生阳极的铝初级生产”,
等人 期刊
第170卷/第7期, 第073501页, IOP Publishing出版社 <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ace332>

美国电化学学会
Peters, Y. (2024), “Fastmarkets推出低碳铝价差”, Fastmarkets, www.fastmarkets.com/insights/fastmarkets-launches-low-carbon-aluminium-differential/ (访问日期：2024年5月2日)。

Pfenninger, S., 和 Staffell, I. (2016), “使用30年的验证小时再分析和卫星数据, 探讨欧洲光伏发电的长期模式”, 第114卷, 第1251-65页, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.060>
能源

拉贝, D., (2022), “通过回收废料制造可持续铝: ‘脏’合金的科学”,
等作者 进展
第128卷, 第100947页, <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2022.100947>

在材料科学领域
REN21 (2022), “21世纪可再生能源政策网络”

《2022年全球可再生能源发展状况报告》
秘书处, 巴黎, 978-3-948393-04-5 (2022年12月30日访问)。

REN21 (2024), R , 可再生能源政策网络
《2023年全球可再生能源状况报告: 能源供应》
21世纪秘书处, 巴黎

RMI (2023), 《可持续铝业金融框架》, 新闻稿, www.rmi.org/press-release/rmi-launches-the-first-finance-framework-to-support-the-decarbonization-of-aluminum-production-the-sustainable-aluminum-finance-framework/ (访问日期：2023年12月12日)。

SBTi (未注明年份), “SBTi 铝”, , www.sciencebasedtargets.org/sectors/aluminium
科学目标倡议
(访问日期：2023年12月12日)。

S&P Global (2022), “低碳和零碳铝”, www.cilive.com/commodities/metals-mining/news-and-insight/091222-platts-launching-new-daily-european-low-carbon-aluminum-billet-assessments-moving-standard-billet-to-daily-frequency (访问日期：2024年5月2日)。

Shkolnikov, E. I., . (2011), “铝作为能源载体: 可行性分析和当前技术研究概述”
等人

, 第15/9卷, 第4611-23页, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.091>
可再生能源与可持续发展评论

Staffell, I. 和 Pfenninger, S. (2016), “利用偏差校正再分析模拟当前和未来风力发电输出” 第114卷, 第1224-139页 <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.068>
能源,

斯塔克, M. R., (2009),
等人 通过需求响应提供可靠性服务: 初步评估
No. ORNL/TM-2008/233, 橡树岭国家实验室 (ORNL), 橡树岭
阿尔科公司 (Alcoa Inc.) 的需求响应能力
里奇, 田纳西州 (美国), <https://doi.org/10.2172/948544>

尊敬的安格斯·泰勒议员（2020年），“确保维多利亚州的能源系统”，新闻稿，www.minister.industry.gov.au/ministers/taylor/media-releases/securing-victorias-energy-system，<https://www.minister.industry.gov.au/ministers/taylor/media-releases/securing-victorias-energy-system>（2024年5月3日访问）。

2022年，汤姆ago铝业和安永（EY），“汤姆ago铝业：行业简报会议”，<http://www.tomago.com.au/wp-content/uploads/2022/11/TAC-Industry-Briefing-Presentation-14-Nov-22.pdf>（访问日期：2023年12月12日）。

联合国环境规划署和国际可再生能源署（2011年），联合国环境规划署，www.unep.org/resources/报告/回收率-金属状态报告

美国地质调查局（2023年），“美国地质调查局，矿物商品摘要，2023年1月”，美国地质调查局，<https://pubs.usgs.gov/publication/mcs2023>（2023年7月5日查阅）。

徐，Z. (2019), 牛津能源研究所
电力市场设计针对分布式灵活性资源
研究，牛津，doi.org/10.26889/9781784671433