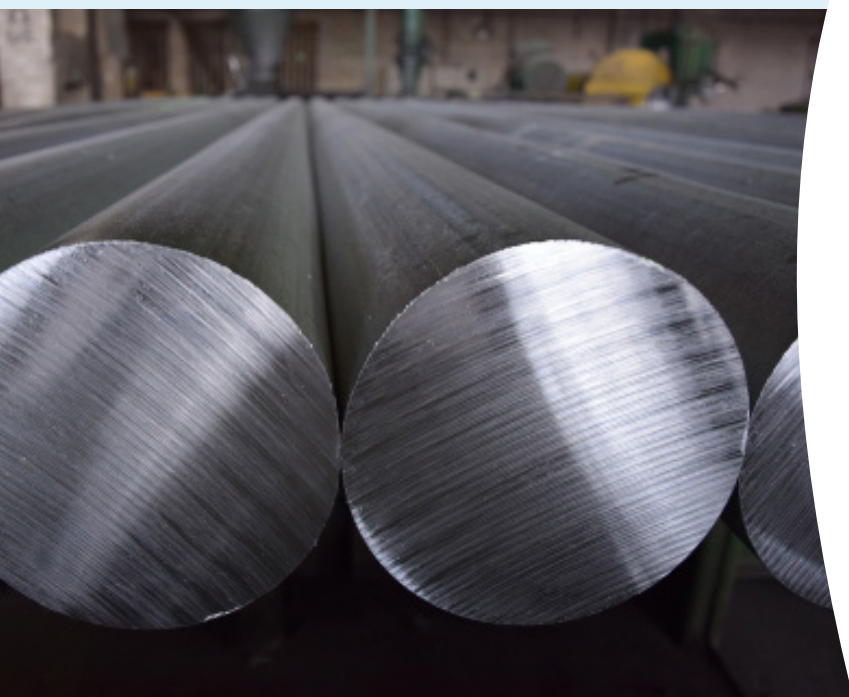


## 入门解说：

### 铝的生产、需求及行业减碳的机遇

2025年1月



## 数据和免责声明

本分析仅供参考，不构成投资建议，且不应作为作出任何投资决定的依据。此文代表了作者对受评估公司自行报告的公开信息的看法和解读。本文提供了公司报告的参考数据，但作者并未试图验证这些公司提供的公开自我报告信息。因此，作者无法保证本文提供的信息的事实准确性。作者和气候转型亚洲 (Transition Asia) 明确对第三方使用或发布参考本文的信息不承担任何责。

## 目录

引言	2
生产工艺	2
原生铝生产	2
再生铝生产	4
需求	5
评估铝生产过程减排潜力以及技术成熟度(TRL)的重点应放在废铝和可再生能源(RE)上	6

## 引言

铝是一种轻质、耐腐蚀、可塑性极强且可无限循环利用的材料。从饮料罐到车辆框架、建筑外墙、电网线路及可再生能源设施，铝的应用在日常生活中随处可见。然而，铝的生产过程耗能巨大，目前约占全球温室气体排放量的2%。中国在全球铝产量中占据主导地位，比例高达60%。

## 生产工艺

铝可以通过原生生产或再生生产实现。原生铝是从铝土矿中提取新的铝，而再生铝则是利用回收的铝废料进行生产。原生铝的能耗极高，主要是由于电力消耗巨大，其平均温室气体排放强度为每吨铝14.8吨二氧化碳当量(tCO<sub>2</sub>e)。

再生铝利用铝废料生产，则无需经过如氧化铝精炼和铝冶炼等高耗能的工艺。再生铝的加工强度显著降低，平均温室气体排放强度低于每吨铝1吨二氧化碳当量(tCO<sub>2</sub>e)。

## 原生铝生产

开采铝土矿后，透过精炼氧化铝和铝冶炼而生产原生铝。

### 氧化铝精炼

铝土矿中含有可溶性和不可溶性杂质，例如石英、赤铁矿和金红石。拜耳法是精炼铝土矿以生产纯度足够用于铝电解的氧化铝的主要工业方法。氧化铝精炼是第二大能源密集型工艺，其平均温室气体排放强度为每吨铝2.4吨二氧化碳当量 (tCO<sub>2</sub>e)。然而，其能源消耗中有90%来自化石燃料（图1）。

拜耳法包括以下四个步骤：

#### 溶出过程

铝土矿被研磨至细粉后，与苛性钠溶液混合，并在高温（100-300°C）和高压条件下于溶出容器中蒸发。产生的溶液为一种铝酸钠溶液，通常称为“浆液”。可溶性杂质如二氧化硅透过与苛性钠产生反应而被去除。

#### 溶出过程的能源消耗与排放

溶出过程消耗了氧化铝精炼厂中一半以上的能源，这些能源大多来自现场燃烧的天然气和煤炭。为了实现溶出过程的减碳，电锅炉是一种相对成熟的技术，特别适用于低温环境（技术就绪度等级 [TRL]9）。然而，在高温高压（约50巴，TRL 4-5）的条件下，其商业化应用尚未得到验证。

#### 净化

净化的目的是通过物理手段进一步去除固体杂质。溶出过程得到的浆液经过几个闪蒸罐以降低压力和温度，然后被泵送到沉降罐，通过物理手段（如旋转设备）进行净化。不能溶解的残留物，通常称为“赤泥”，从浆液中过滤出来后送至尾矿池处理。净化过程也被称为沉降过程。

### 沉淀

沉淀是将小的铝水合物晶体通过胶结作用形成更大颗粒的过程。过滤后的溶液被泵送到一系列六层楼高的沉淀罐中。通过添加结晶种，小的铝水合物晶体会发生胶结，逐渐沉降，同时溶解附着的氧化铝并继续增长为更大的团聚晶体。此过程的产物是铝水合物。

### 净化与沉淀过程的能源消耗与排放

净化与沉淀过程的能源消耗约占氧化铝精炼总能耗的5%。与整个原生铝生产过程相比，这些工艺的相关排放量相对较小。

### 煅烧

煅烧的目的是通过加热铝水合物，除去其化学结合的水分，从而获得氧化铝。这一过程在煅烧炉中进行，温度高达约1000°C。

### 煅烧过程的能源消耗与排放

煅烧因其高温需求成为第二大能源密集型过程，占氧化铝精炼总能耗的约30%。目前的脱碳方法主要集中于用电力、热能或氢能替代化石燃料。例如，电煅烧炉（TRL 4）、太阳能加热工艺（TRL 6-7）以及氢能煅烧（TRL 4）等技术均处于工业试验阶段。

## 铝冶炼

### 铝冶炼过程

铝冶炼是从氧化物中提取金属铝的过程。在此过程中，氧化铝通过与碳阳极反应产生二氧化碳，同时生成液态铝。精炼后的氧化铝被溶解在由熔融冰晶石（氟化钠铝）及其他材料组成的电解浴中，温度约为960-980°C。阳极通过导杆悬挂在电解槽（铝电解槽）内，高强度电流通过阳极进入电解槽，维持约950°C的高温环境，使氧化铝分解为金属铝和氧气。

### 铝冶炼的能源消耗与碳排放

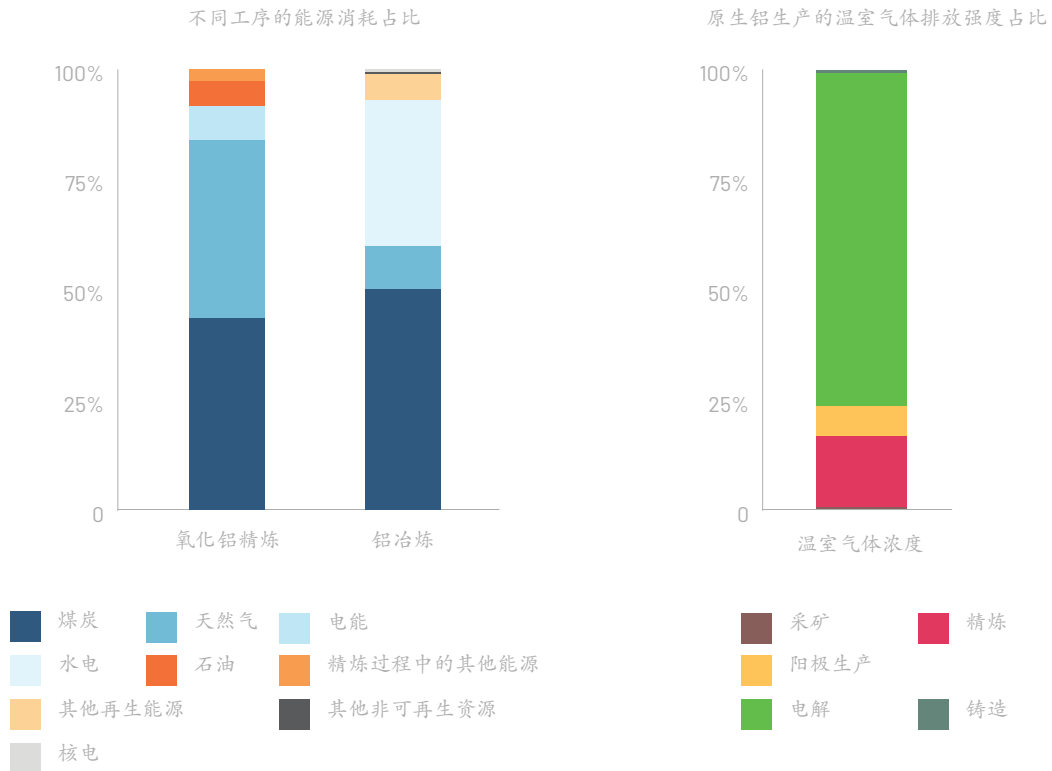
铝冶炼是原生铝生产中温室气体排放强度最高的环节，每吨铝约为11吨二氧化碳当量。仅这一工艺就占全球电力需求的3%，在中国更是高达7%。化石燃料仍然是铝冶炼电力的主要来源，其中煤炭占全球电力的50%，而中国的煤炭电力占比更是超过80%。

此外，碳阳极在冶炼过程中被消耗时会释放二氧化碳作为副产物，进一步加剧碳排放。

铝冶炼是一个持续的电解过程，需消耗大量电能。实现减碳的关键在于提高可再生能源（技术就绪度等级TRL 9）的使用比例。若该工艺完全转向100%可再生能源，全球铝电解相关的碳排放有望减少80%。

此外，用惰性阳极（TRL 7）替代传统碳阳极也是推动原铝生产减碳的重要途径。惰性阳极释放的副产物是氧气，并非二氧化碳。尽管惰性阳极技术已有数十年的研发积累，但要将其大规模应用于商业生产仍面临挑战，至今尚未成功实现。

图1：原生铝生产各阶段的能源消耗占比与温室气体排放强度



## 再生铝生产

### 再生铝生产过程

再生铝是由多种类型的铝废料及经过一系列不同的处理工艺组成。当中过程通常包括撕碎、破碎、分类和去涂层等过程，去涂层工艺用于去除表面涂料（如油漆和塑料），然后将其送入熔炼炉（即是重熔炼炉）。一旦再生铝被重熔后，会进行额外的净化过程，通常使用氯气和氮气。根据所需的铝材等级，随后添加辅助合金。

理论上，铝可以无限次重熔和铸造，而不影响质量且损失极小。但实际上，针对不同废料类型，通常需要进行多种处理以去除杂质：

### 铝废料类型

旧废料 / 消费后废料	在最终产品使用并废弃后，通过回收系统收集的废料。
新废料	在半成品生产后的供应链中产生的废料。
内部废料	在半成品生产过程中的废料，通常发生在铸造车间之后。这些废料通常会通过内部废料回收环节被重新送回上游供应链。
消费前废料	新废料和内部废料

消费后废料通常会与其他金属（如钢、铜和锌）一起收集。关于成分的资料是顺利去除杂质过程的关键。如果没有足够的成分资料，最常见的解决方案是降级或与原生铝混合，以生产高合金废料。可是这带来负面的经济后果，包括增加成本、最终产品质量下降，以及压低销售价格。

### 再生铝的能源消耗与排放

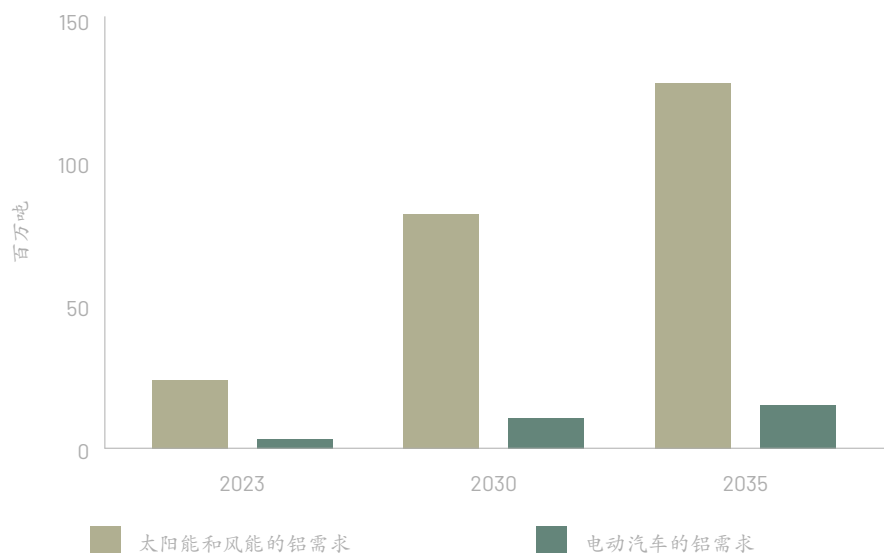
增加废料的使用可能是铝行业未来实现减碳的最可行解决方案，因为废料加工的平均二氧化碳强度每吨铝为低于1吨二氧化碳当量（CO<sub>2</sub>e）。在中国，废料的能源消耗仅为原生铝生产的约6%。

## 需求

全球铝需求目前主要由运输和建筑行业推动，分别占30%和20%，其次是电力行业和包装。在中国，铝广泛地应用在建筑行业，2023年贡献了总需求的32.8%。随着房地产危机放缓了新建项目的推进，运输行业的需求正在快速增长，目前已占总需求的25%。电器行业是仅次于运输行业的第二大增长行业，目前贡献了16%的需求。

能源转型是持续需求增长的支柱。铝在可再生能源（太阳能光伏和风能）及电动汽车（EV）领域的需求预计将在2035年前增长五倍。太阳能和风能的扩展意味着铝需求将增加，特别是在太阳能光伏模块、支架、逆变器和电池，以及风力发电机的机舱、内部和外部设施中。由于铝具有很高的耐腐蚀性，它也是浮动技术的常用材料，例如浮动海上风电或浮动太阳能发电系统。电动汽车作为道路运输行业减碳的关键推动力，使用的铝比传统内燃机汽车要多。在车辆结构中，铝可以减少重量，同时保持耐用性；在电池外壳中，铝因其良好的热导性和轻便性成为最佳选择。

图2. 中国太阳能和电动汽车增长及相应铝需求，2023-2035



来源：IEA WEO2024，CRU《后疫情经济中铝的机遇》，TA分析

注：预测基于IEA全球能源与气候模型的已宣布政策情景。电动汽车包括插电式混合动力电动汽车和电池电动汽车。

## 评估铝生产过程减排潜力以及技术成熟度（TRL）的重点应放在废铝和可再生能源（RE）上

铝在支持清洁能源转型中发挥着独特作用，它不仅减少了全球排放增长的瓶颈，还通过推动太阳能光伏、风力发电和电动汽车（EV）的快速发展而实现减碳。然而，要挖掘这一潜力，需要国际行动来提高公众意识并共同努力，减少可再生能源电力接入的障碍，以及改善废铝回收的可行性。现时全球有多项致力于实现铝行业脱碳的倡议，包括铝业管理倡议（Aluminium Stewardship Initiative）一直致力于为铝价值链制定全球适用的标准和认证体系；国际铝业协会（Aluminium International Aluminium Institute）在COP28上启动了[铝行业温室气体减排倡议](#)（Aluminium Industry Greenhouse Gas Initiative），承诺报告铝行业的全局温室气体排放并追踪公司减排目标。First Movers Coalition是另一个由世界经济论坛主导的倡议，成员承诺到2030年采购10%的低碳铝，并鼓励使用再生铝。

短期内，铝的原生生产过程需要更容易接入清洁电力，可以通过建设自用可再生能源发电厂或通过电力购买协议（PPA）接入电网。废铝利用率也应提高，以实现快速减排。在长期内，减碳技术需要进一步开发和投资，以提升其技术成熟度（TRL），才能达到商业化规模。





**Transition**ASIA

ACCELERATING EAST ASIAN CORPORATE CLIMATE ACTION