

中国铝工业： 降碳的挑战与机遇

2025年4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所有信息的事实准确性。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任。

我们的团队

研究分析员

陈云悠 vittoria@transitionasia.org

影响力发展主管

Lauren Huleatt lauren@transitionasia.org

传讯主任

黄雯嘉 monica@transitionasia.org

关于气候转型亚洲

Transition Asia（气候转型亚洲）成立于2021年，是一间总部设于香港的非牟利智库，专注于以深度的产业和政策分析、投资者洞见及策略性游说，在亚洲地区推动与实现限升温1.5°C目标一致的企业气候行动。Transition Asia与全球的企业、金融和政策持份者协作，致力推动变革，实现净零排放、富抗逆力的未来。请造访transitionasia.org或关注我们LinkedIn帐号以了解更多信息。

目录

引言	2
中国铝工业的发展历程	3
铝需求向汽车和可再生能源行业转移	4
高度依赖进口的原材料：铝土矿	5
铝制品进出口	6
原生铝碳排放	6
再生铝的排放	9
绿色转型、产能控制与电价政策	11
行业降碳所面临的挑战与机遇	12

引言

中国铝工业的降碳可有效减少全国约5%的温室气体排放，有助于实现中国的气候目标，并对电动汽车（EV）和可再生能源基础设施等新兴行业产生深远影响。中国在这些下游行业占据了全球领先地位，若铝行业无法实现降碳，未来的碳排放量可能会持续增长。

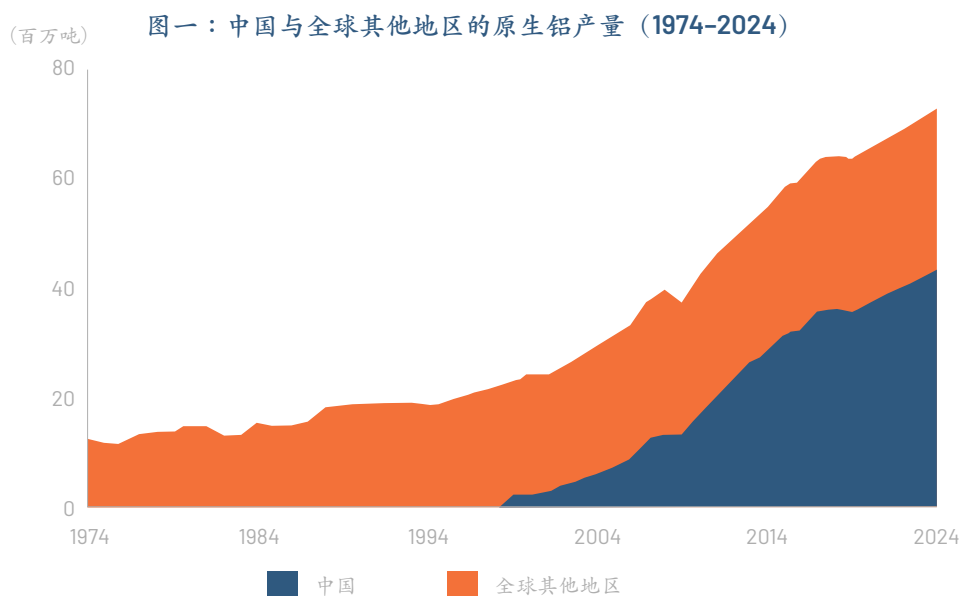
铝行业的碳排放主要源于冶炼过程，该过程高度依赖燃煤发电。由于中国电网以煤电为主，铝企还在煤炭资源丰富地区自备燃煤机组，以满足生产需求。本报告对这两类排放来源进行了省级分析，并分别指出其面临的挑战。同时，报告强调，推动行业降碳的关键路径在于提高可再生能源的使用比例以及增加废铝回收利用。

尽管铝工业在降碳方面仍面临诸多挑战，政策动向已开始推动行业迈向低碳未来。贸易保护主义可能加速低碳生产，而绿色转型政策则设定了量化目标，要求行业加大可再生能源的整合，并禁止新增自备燃煤机组。此外，若中国覆盖电力和铝行业的碳排放交易体系（ETS）能得到有效且持续的实施，将成为推动行业脱碳最具影响力的政策措施。

本报告通过评估这些复杂变化，全面分析中国铝行业现状，并探讨其迈向低碳未来的挑战与机遇。

中国铝工业的发展历程

中国是全球最大的铝生产国和消费国，产量约占全球总量的60%。截至2024年，中国电解铝年产量已突破4,000万吨，较1949年的10吨实现了巨大发展。经过70多年的演变，中国铝工业经历了深刻变革（见图一）。



数据来源：国际铝业协会 (IAI)，TA 分析

自1949年起，中国优先发展重工业，并将铝工业列为冶金工业部管辖的重点行业。在第一个五年计划（1953-1957年）期间，中国在山东建立了首座氧化铝厂，并在抚顺建成首座电解铝厂，为铝工业奠定基础。到1956年，东北轻合金加工厂投入运营，标志着铝加工产业的初步形成。¹

1960年代，「三线建设」战略推动铝工业向西部迁移，以满足国家安全需求。贵州、青铜峡等地相继建立冶炼厂及配套加工厂，促使中国铝工业体系逐步完善。²

20世纪70年代末的改革加速了铝行业的发展，推动产业扩张与现代化。1983年，行业重组催生了中国有色金属工业总公司，带动山西、中州等地新氧化铝厂的建设，并在云南、白银等地建立新的冶炼厂。^{3,4} 1992年后的市场化改革进一步深化，最终促成了1998年国家有色金属工业局的成立，并推动了电解槽技术的进步。⁵

进入21世纪，中国经济的快速增长，GDP年均增长8%。⁶推动铝行业进入爆发式增长阶段。国内房地产投资热潮拉动铝需求，而中国丰富的煤炭资源带来的低电力成本，加上地方政府提供的优惠电价，使铝冶炼企业具备显著的成本优势，进一步推动行业扩张。此外，铝行业还受益于低息贷款、出口退税等财政激励措施，政府将其视为战略性产业加以重点扶持。2001年中国加入世界贸易组织(WTO)后，国内铝企迎来海外扩张的特殊机遇，此后中国长期保持铝材及铝制品的净出口国地位。

同一时期，铝行业逐步整合，涌现出一批主导企业，它们通过产业链垂直整合并拓展海外市场，逐渐占据市场主导地位。在政府融资支持下，国有企业通过并购收购中小型企业，确保产能合规并适应日益严格的

行业监管。如今，中国铝业集团（中铝）、宏桥集团和山东信发集团三家企业主导着市场。

中国铝业集团是全球最大的铝企业，也是国有企业。成立于2001年，先后在海外上市，并在国内9个省份扩展业务。通过收购云南铝业（中国第三大铝企），中铝进一步巩固了其市场领导地位。宏桥集团是一家民营企业，通过在中国东北煤炭资源丰富地区建设自有电网和自备燃煤机组，大幅降低电力成本，发展成为中国铝行业的第二大企业。信发、东方希望和鸿骏最初都以火电起家，利用中国煤炭资源丰富的地区，将其优势延伸至铝业生产。

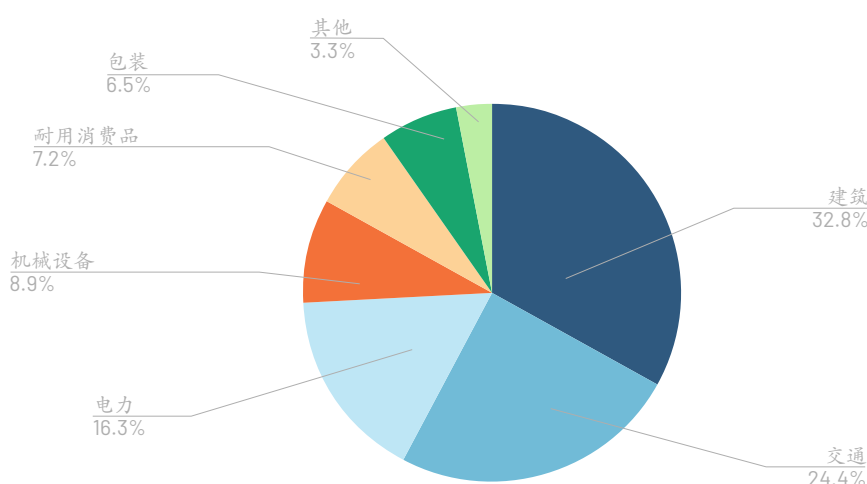
铝需求向汽车和可再生能源行业转移

在中国，铝广泛应用于建筑、交通、电力和包装行业。2023年，建筑行业仍是铝制品的最大消费领域，占总需求的33%。然而，随着房地产危机抑制了新建项目的进展，交通行业的铝需求逐渐增长，目前已占总需求的25%。铝的轻便性、耐用性和金属稳定性等独特特性，推动了其在交通领域的广泛应用，并逐步取代钢铁成为关键结构部件的材料。

在交通行业，铝合金广泛应用于时速超过300公里的高速列车。随着部分列车速度突破每小时350公里，唯独底盘部分例外，几乎所有制造商的列车都已完全采用铝合金。中国高速铁路网络计划到2030年实现60,000公里的建设，这一目标将继续推动铝需求增长。与此同时，电动汽车（EV）销量的持续增长以及减重趋势，预计将进一步刺激铝需求。在电动汽车中，铝的使用量远高于传统内燃机车辆。在车辆结构中，铝既能减轻重量，又能保持良好的耐用性。而在电池外壳方面，铝由于其轻便性和优异的热导性，成为了理想的选择。

电力行业是仅次于交通行业的第二大增长领域，目前占铝需求的16%。可再生能源，特别是太阳能光伏（PV）和风能的快速扩展，预计将推动铝需求到2035年增长五倍。⁷铝在太阳能光伏组件、支架（尤其是分布式太阳能光伏）、逆变器、电池以及风力涡轮机的机舱、内部组件和外部设施中得到了广泛应用。此外，铝因其优异的导电性能，还是电力传输和配电电缆的理想材料。为了满足日益增长的电力生产需求，传输和配电网需要扩展和更新。根据国际能源署（IEA）的预测，到2030年，传输和配电网的总长度将达到2021年水平的1.5倍，预计到2050年将增加三倍。⁸

图二：2023年中国铝消费情况



来源：彭博社，TA分析

高度依赖进口的原材料：铝土矿

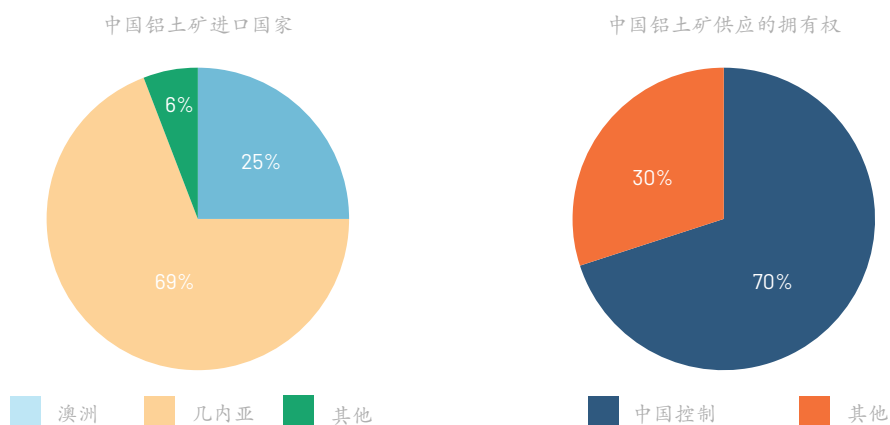
中国仅拥有全球铝土矿储量的2%，因此是全球最大的铝土矿进口国，进口量几乎是2023年国内生产量的两倍，主要来自几内亚和澳洲。国内铝土矿储量主要集中在山西、河南、广西和贵州等省份。除广西开采的铝土矿石质量较高，含有更多的三水铝石以外，大部分矿山开采的是低品质的单水铝土矿。然而，国内铝土矿储量和品质的逐步下降，加上日益严格的安全与环保法规，导致近年来矿业项目的审批和开发进展放缓。

自2000年「走出去」政策发布以来，中国一直鼓励企业进行海外投资。为了确保铝土矿储备，政府出台了针对铝土矿进口的具体政策支持，包括零关税以及鼓励国际合作的总体战略，如《有色金属行业稳增长工作方案》和《全国矿产资源规划》。^{9 10}此外，中国政府还鼓励国内冶炼企业与海外供应商签订长期合同。

历史上，中国的铝土矿进口分布在多个国家，其中东南亚和澳洲的矿山提供了大部分铝土矿。2015年，马来西亚曾是中国最大的铝土矿贸易伙伴，但由于环保原因，尤其是关丹矿场的环境问题，该合作关系突然终止。¹¹从那时起，中国的铝土矿贸易逐渐变得更加集中。几内亚与澳洲成为中国最大的铝土矿贸易伙伴，於2024年，它们合计占据中国铝土矿总进口量的94%。在2023年矿业禁令发布前，印尼曾是第三大铝土矿出口国。¹²

中国铝业公司在几内亚铝土矿矿山进行了战略性投资，现已成为该国铝土矿的主要进口来源。2022年，中国从几内亚进口的铝土矿量达到7,000万吨，占该国总出口量的82%。¹³到2023年，至少70%的几内亚铝土矿进口需求来自中国企业或中外合资企业。中国与几内亚铝土矿行业的经贸关系始于2007年，当时河南国际合作集团首次进入市场，随后中国铝业（中铝）于2011年以及赢联盟（Winning Consortium SMB）于2014年相继加入。至今，这些公司仍是几内亚铝土矿开采的重要参与者。

图三：2024年中国铝土矿来源及中国控制的铝土矿供应比例



来源：中国海关数据、公开信息和TA分析

澳洲是中国第二大铝土矿进口来源国，2022年贸易额达到15亿美元。澳洲的铝土矿出口高度依赖中国需求，其中98%的铝土矿出口至中国。¹⁴自1963年开始开采铝土矿以来，澳洲在政府支持下发展成为全球最大的铝土矿生产国。¹⁵目前，澳洲拥有六座铝土矿，均由澳洲公司所有。¹⁶

铝制品进出口

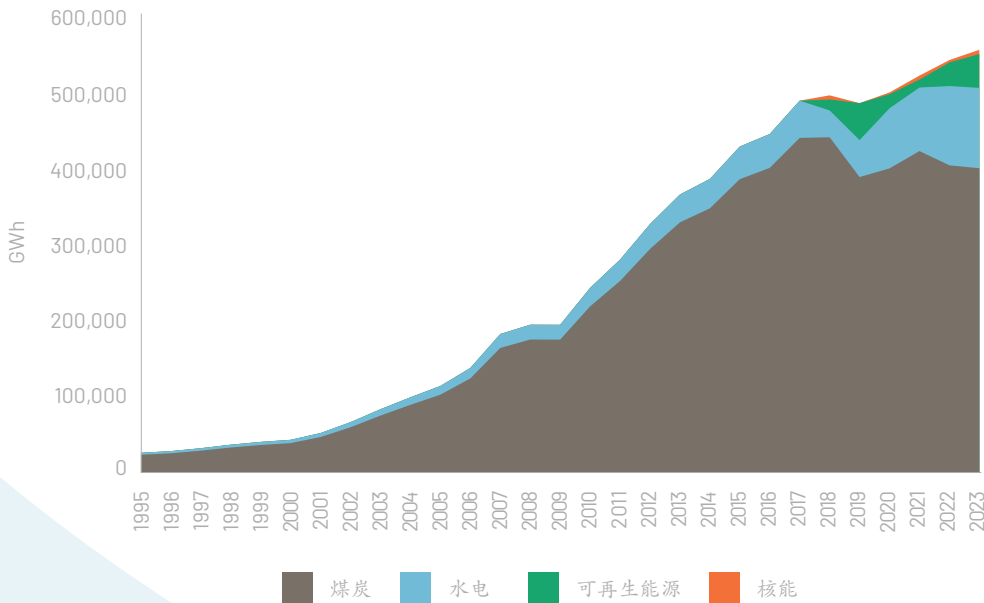
在贸易中，中国的铝制品主要以出口为主，而进口则主要集中在原铝和铝屑上。俄罗斯是中国原铝的主要进口来源，并于2022年超越印度，成为中国最大的原铝进口国，并在2024年占总进口量的50%以上。印度曾是主要来源国，但由于关税政策冲突，原铝进口大幅减少。¹⁷铝屑进口在过去10年中占总进口量的约20%，且近年来来自其他亚洲国家（如马来西亚、泰国和日本）的进口趋势逐渐上升。¹⁸历史上，美国曾是铝屑进口的主要来源，直到2020年马来西亚取而代之。此后，马来西亚一直是最大的铝屑进口来源国，并在2024年占总铝屑进口的24%。

中国是全球最大的铝制品出口国，涵盖半成品和成品。在2024年，中国出口了约600万吨铝材和约300万吨成品，两者合计占国内原铝生产总量的22%。作为铝制品制造的领先国家，中国出口各种类型的铝材，如铝卷、铝箔、铝带和铝型材。与原铝相比，铝制品的出口目的地更加多样化，尤其是在2017年贸易争端导致对美国的出口大幅下降后，主要出口市场转向了墨西哥、韩国、东南亚和印度。¹⁹成品铝制品的出口目的地也较为分散。在过去十年里，美国一直是主要市场，占总出口量的10%至20%。

原生铝碳排放

铝冶炼过程能源消耗极大，主要原因是电解过程需要大量电力。仅冶炼过程就占全球电力需求的3%，在中国，这一需求在2023年占全国总电力需求的7%，超过了法国和德国等国的总电力生产量。^{20 21}自铝工业起步以来，煤炭一直是中国铝冶炼的主要能源。丰富的煤炭资源不仅为铝业提供了更具成本优势的能源选择，而且便捷的运输条件使煤炭成为中国电力生产和铝冶炼厂的首选能源。水电是第二大能源来源，自2018年以来，随着中国铝业公司逐渐增加水电的使用，水电在冶炼过程中的比重也快速上升，尤其是在云南和四川等水资源丰富的省份。2018至2023年间，水电在冶炼中的使用量增长了三倍，但相比煤炭，水电的占比仍然较低。与此同时，太阳能和风能等可再生能源也开始在电力供应中扮演越来越重要的角色，逐步压低了煤炭电力的份额。自2017年起，铝冶炼厂才开始采用可再生能源，这进一步挤压了煤电的使用比例。近期，铝业公司纷纷投资自有可再生能源设施。截至2024年，至少17家铝业公司已拥有分布式太阳能光伏系统，3家公司则拥有风电场。²²

图四：1995–2023年中国原生铝冶炼电力消耗



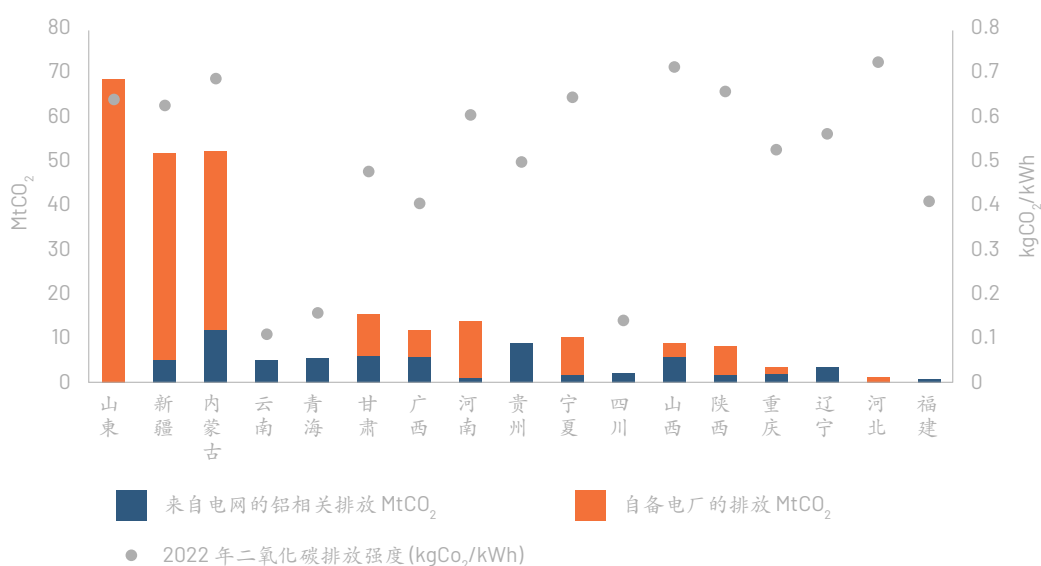
来源：国际铝业协会（IAI），TA 分析

在中国，铝生产及排放主要集中在山东、新疆、内蒙古和云南省，2021年这四个省份占全国总生产量的60%。山东凭借其优越的港口基础设施和自供电力，拥有全国最大的电解铝产能。新疆和内蒙古则凭借丰富的煤炭资源，分别位居国内生产能力的第二和第三位。铝生产的高度集中，以及各省电网排放强度高，给脱碳带来了巨大挑战。前三大生产省份的电网排放强度平均为0.65千克二氧化碳/千瓦时，比全国平均水平高出0.1，并且是云南（电网电力最清洁的地区）的六倍。

河南、宁夏、山西和陕西等省份虽铝产量相对较低，但总排放量仍然较高。近年来，尽管可再生能源装机规模有所增长，电网供电仍以煤电为主。因此，优化方案是将产能转移至水电占主导的西南地区，以降低碳排放。

中国西南地区凭借丰富的水电资源，近年来已成为电解铝产能转移的重要目的地，从而实现较低的碳排放。过去六年间，云南省的铝产量增长了三倍。中国第二大铝企亦在年度报告中明确提出，将产能由山东转移至云南。截至2022年，魏桥创业集团（宏桥集团母公司）所持有的646万吨合规电解铝产能中，约400万吨已迁至云南，以发展水电铝生产。²³然而，水电并未成为中国铝业脱碳的万能解方。随着越来越多行业向云南迁移，有限的水电资源面临，加上中国南方频繁发生干旱，水电供应的不稳定性日益凸显，电力短缺问题愈趋严峻。2022年和2023年的枯水期，电解铝企业多次被迫限产甚至停产，暴露出云南电力供应的脆弱性。此外，云南优先保障居民和农业等基础民生用电，使包括电解铝在内的高耗能产业面临更大的供电不确定性。

图五：2021年各省铝产量及2022年相应电网碳排放强度的排放类型



注：X轴上的省份是按2021年铝产量排列（从左到右降序）

来源：MEE²⁴、Tan et al., 2025²⁵，TA分析

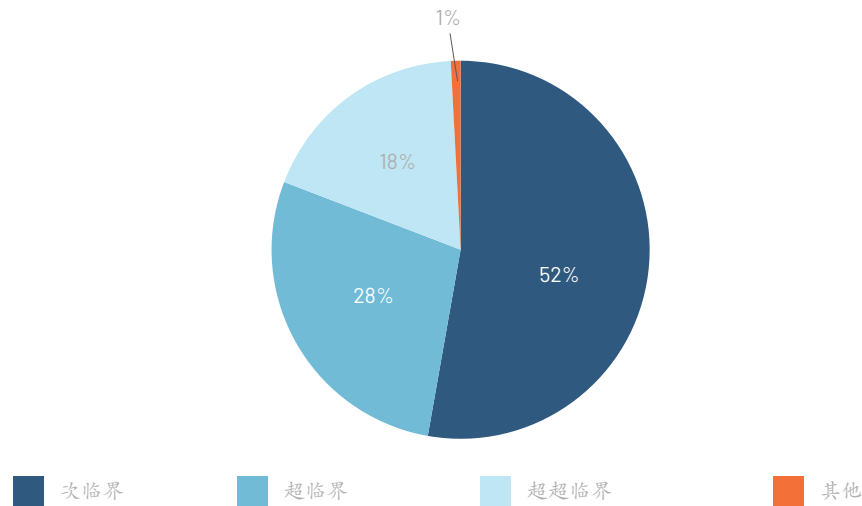
自备燃煤机组长期以来在中国铝行业中扮演着关键角色，不仅保障了电力供应，还以低于享受补贴的电网电价，帮助企业有效控制用电成本。然而，这一优势也成为行业脱碳进程中的主要阻力。

目前，中国仍有超过80GW的自备燃煤机组在运营，占全国煤电装机总容量的7%。2021年，自备燃煤机组产生的温室气体排放约占铝土矿冶炼电力消费总排放量的75%。在同时使用自备机组和电网电力的省

份，自备机组的排放强度是当地电网的三倍。在山东、新疆和内蒙古等自备机组产能最多的地区，自备机组的利用率已经高到无需依赖电网电力。

2021年，超过50%的铝业自备机组产能仍采用低效的次临界燃煤技术。其中大部分位于山东，并由宏桥集团运营。此外，直到2020年，煤炭资源丰富的内蒙古等地区仍在建设新的次临界燃煤机组。

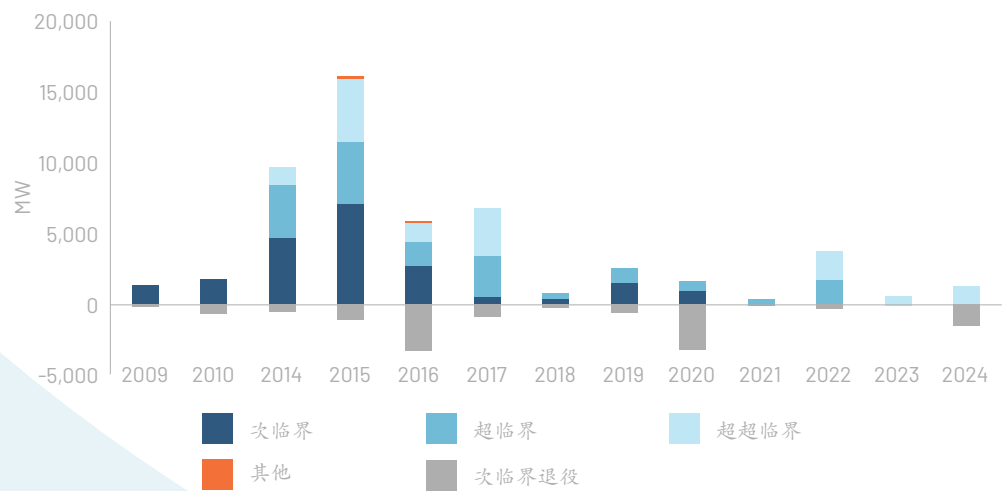
图六：2021年中国自备燃煤机组不同类型发电机组占比



来源：GEM、Tan et al., 2025²⁶，TA 分析

过去15年来，中国新增的燃煤机组以超临界和超超临界机组为主，合计约27吉瓦（GW），而次临界自备机组则在过去五年间逐步退役。超临界和超超临界技术因其更高的能效和较低的排放强度而受到青睐。相比之下，次临界燃煤机组的平均碳排放约为800-850克CO₂/千瓦时，而超临界和超超临界机组分别降至750-800克CO₂/千瓦时和700-750克CO₂/千瓦时。²⁷目前，全球仅有两座燃煤机组配备碳捕集与封存（CCS）装置，且其减排效果仍存争议。在碳排放交易体系（ETS）逐步覆盖铝行业的背景下，燃煤机组未来将面临更高的合规成本。

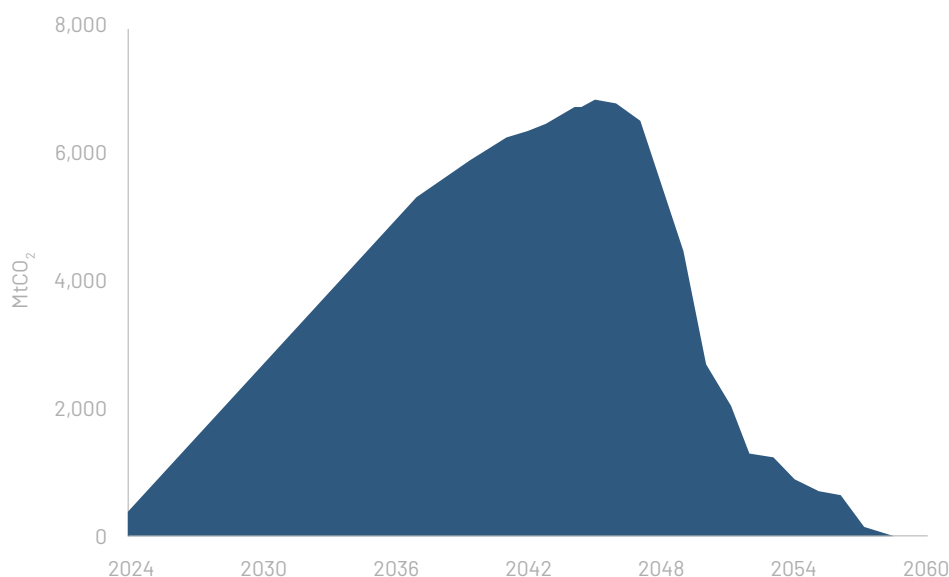
图七：2009-2024年中国自备燃煤机组不同类型的新增产能及次临界自备机组的退役情况



来源：GEM，TA 分析

随着中国加快推进「双碳」目标，政府和铝企正展现出转型趋势。地方政府积极推动风能和太阳能发展，加速从燃煤发电向可再生能源的过渡，并对包括内蒙古和林格尔新区在内的重点工业区域进行产业升级。该地区过去依赖丰富的煤炭资源，形成「煤—电—铝」产业链，而如今正加快向「绿电—铝」模式转型。预计到2025年底，该地区将建成6吉瓦专供本地消纳的可再生能源装机容量。²⁸截至2023年，中国电解铝行业的清洁能源占比已达到27%。铝行业的绿色电力项目取得了显著增长，多个主要铝企成功将光伏发电项目并入电网。例如，云铝股份已在六个工业园区投运175.4兆瓦的分布式光伏项目。²⁹此外，内蒙古金联铝业和河南豫联工业园区分别完成了80兆瓦和40兆瓦的光伏项目。³⁰

图八：中国自备燃煤机组累计锁定排放量（2024-2060）



来源：GEM，TA分析

在扩展可再生能源的同时，应逐步淘汰自备燃煤机组，以减少未来35年内二氧化碳排放被锁定的风险。中国的大多数自备机组相对较新，仍有20-30年的使用寿命。如果现有机组继续按当前水平运营，且未进行有效的碳捕集、利用与封存（CCUS）改造，或与低排放燃料混烧，预计从2024年到2060年将排放95亿吨二氧化碳，是2023年中国铝行业总排放量的18倍。自备机组的排放量将在2045年达到约69亿吨二氧化碳的峰值，是中国根据国家自主贡献（NDC）目标在未来10年内需要减少的二氧化碳排放量的五倍。³¹

再生铝的排放

铝废料在铝行业的脱碳进程中发挥着关键作用。相较于从铝土矿提炼原铝，利用铝废料生产再生铝的能耗仅为前者的5%，可节约高达95%的能源。³²

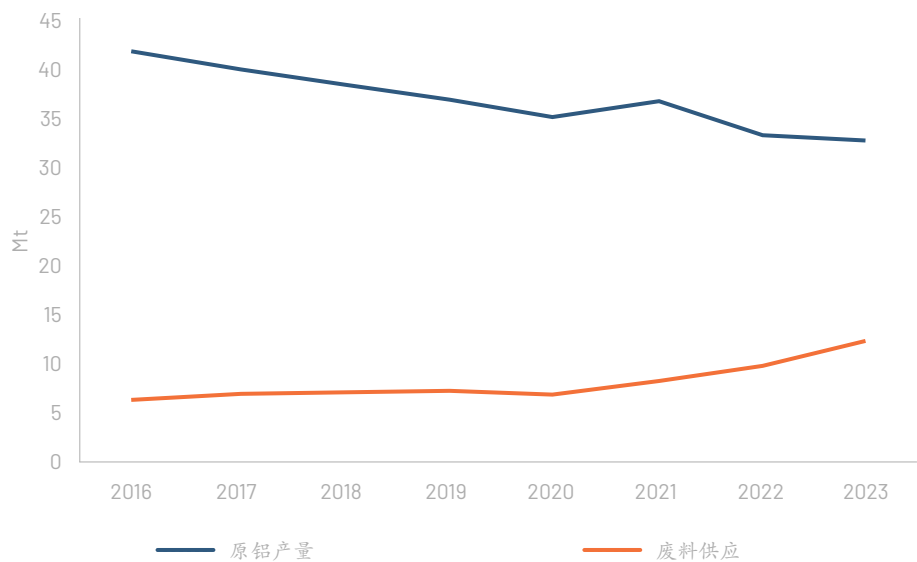
铝废料来源广泛，包括最终产品、半成品生产环节，以及铸造厂、挤压厂或轧制厂的生产过程中。来自最终产品的铝废料通常被称为旧废料或消费后铝废料，主要来自废弃的易拉罐、窗框等使用过的产品。而新废料则是在半成品加工为最终产品的过程中产生的边角料。此外，铸造厂、挤压厂和轧制厂内部循环利用的铝废料被称为内部废料，通常通过厂内回收系统再利用。由于不同来源的铝废料成分各异，含有不同类型和含量的合金元素，因此在回收过程中需要经过不同的预处理工序，以确保达到最终产品所需的合金配

比。回收流程通常包括：破碎、分选和热处理，以提高铝废料的纯度和质量；重熔，主要利用清洁、分类良好的变形铝合金废料生产新的变形铝合金；精炼，通过去除杂质并调整合金成分，以满足特定合金要求；铸锭，最终用于制造各种铝制产品。

过去十年，中国的再生铝供应稳步增长，并在2022年后加速提升，2023年突破1,000万吨。其中，约80%的铝废料来源于国内。然而，由于原铝产量仍然较高，再生铝在总供应中的占比同期平均约为20%，低于全球历史平均水平的35%（即再生铝投入率RIR）。³³

中国的铝回收行业起步较晚，直到近年来RIR才突破20%，并在2023年提升至接近30%水平。随着国内铝存量的不断积累，未来再生铝供应潜力巨大。截至2023年，中国铝储量已达4.8亿吨，而原铝与再生铝产量之间的差距（图11）也显示出未来的供应空间。此外，随着国内铝制品逐步进入回收循环，国内铝废料的供应占比预计将进一步提高。从行业来看，交通运输业是中国最大的铝废料来源，占比约41%，铝制品使用寿命平均为8至20年。³⁴其次是建筑行业，占比34%，使用寿命为30至50年，而包装行业占比约21%。在汽车和建筑材料领域，铝废料的回收率可达90%。

图九：中国原铝产量与铝废料供应对比（2016-2023年）



来源：国家统计局，《中国再生资源报告》（2016-2023年），TA分析

中国的铝废料排放量极低。根据中国的一项生命周期研究，再生铝生产的温室气体排放量仅为原铝的4.45%，约657千克CO₂当量/吨铝废料。其平均能耗约为9,207兆焦耳/吨，仅为原铝的6%。从能耗分布来看，冶炼环节占比最高，超过50%，其次是铝废料的预处理环节，约占18%。在预处理方面，大型回收企业通常配备更先进的设备并采用更高效的技术。例如，主要企业使用磁选机去除铁杂质，而一些小型企业仍依赖人工分拣废铁。³⁵

天然气是熔炼设备的主要能源，主要用于旋转炉和反射炉。炉型的选择取决于废铝的质量和数量。含有更多杂质的废铝需要使用旋转炉，而旋转炉通常比反射炉更昂贵，因为其效率较低。虽然也有电炉，但它们通常只用于小型加工作业。

企业通常倾向于使用再生铝废料生产相同类型的铝合金，即将加工废料用于生产加工铝合金，将铸造废

料用于生产铸造铝合金。加工铝合金由重熔厂生产，质量较高，而铸造铝合金则在冶炼厂生产，在此过程中会添加合金元素。虽然加工废料可以用于生产铸造铝合金，但这样做成本较高，因为加工废料价格较高且含硅量较低，需要额外添加硅来弥补使用更多加工废料制作铸造铝合金所带来的不足。³⁶ 实际上，当废料的来源或成分不明确时，通常有两种处理方式：降级，将废料与其他不明合金混合，降低最终产品的纯度；或稀释，将废料与原铝混合，提高纯度。

绿色转型、产能控制与电价政策

近年来，中国针对电解铝行业的政策主要聚焦于减少碳排放、提高能源效率以及向更清洁的能源转型。这些政策是实现「双碳」目标的国家战略的一部分——即力争在2030年前实现碳排放达峰，2060年前实现碳中和。

表一：聚焦绿色铝产业的重大国家政策发展

年份	政策名称	关键点
2024	2024年、2025年电解铝行业绿色电力消费比例	2024年和2025年各省电解铝行业绿色电力在总电力消耗中的占比目标：2024年：21%-70%，2025年：22%-70%
2024	电解铝行业节能降碳专项行动计划	<ul style="list-style-type: none"> 大气污染防治重点区域不再新增电解铝产能 新建和改扩建电解铝项目须达到能效标杆水平和环保绩效A级水平 退出和处置电解铝落后低效产能，加快淘汰200kA以下预焙阳极铝电解槽 原则上不再新增自备燃煤机组 <p>到2025年：</p> <ul style="list-style-type: none"> 电解铝行业能效标杆水平以上产能占比达到30 可再生能源利用比例达到25%以上 2024-2025年再生铝产量达到1150万吨；电解铝行业2024年-2025年形成节能量约250万吨标准煤、减排二氧化碳约650万吨
2024	2024-2025年节能降碳行动方案	<ul style="list-style-type: none"> 优化有色金属产业的产能布局 严格实施电解铝产能置换，严格控制铜、铝土矿等金属的新冶炼产能新增。 <p>到2025年：</p> <ul style="list-style-type: none"> 达到或超过能源效率基准水平的电解铝行业产能比例将达到30%。 可再生能源使用比例将超过25%。
2021	“十四五”原材料工业发展规划	<ul style="list-style-type: none"> 到2025年，电解铝冶炼碳排放减少5% 实施铝冶炼行业分级电价政策
2021	发电行业被纳入全国碳排放权交易市场（ETS）	<ul style="list-style-type: none"> 将二氧化碳排放超过26,000吨的火力发电厂纳入碳排放交易体系（ETS）。 纳入范围的实体必须根据排放强度基准，每排放一吨二氧化碳当量（tCO₂e）就使用一个排放配额，配额分配基于排放强度基准。

除环境政策外，关于产能控制和电价的政策也在塑造中国铝业的发展。在产能控制方面，中国在供应侧进行了严肃的改革。历史上，该行业普遍使用小型且效率低的电解槽，经过升级后导致了产能过剩。为了解决这一问题，中国政府发布了一系列政策，例如针对违反法律或法规的项目制定了具体时间表（区分2013年之前和之后建造的项目），以及2015年实施的产能替代措施。^{37 38}早期这些政策的效果不尽如人意，直到2017年出台的一项特别政策才成为转折点。这项政策，《清理整顿电解铝行业违法违规项目专项行动工作方案》，专注于电解铝行业，并随之发布了详细通知，指出哪些产能可以进行替代，哪些需要淘汰。³⁹逐渐地，容量低于200 kA的预焙阳极电解槽被淘汰，因为它们被认为效率太低，无法满足现代能源和环境标准。2018年后，由于严格的监管，铝业产能基本保持稳定，新增产能几乎只能通过抵消退役或淘汰设施来实现。从2018年到2024年，制造产能仅从约四千万吨增加到四千四百万吨。

中国的电力价格政策和自备燃煤组机的相关规定对行业产生了深远的影响。关键的政策节点包括2013年出台的分级电价政策、2018年宣布不再批准新建自备燃煤组机，以及2021年发布的电价调整通知，该通知允许可变新能源电力部分抵消电价。^{40 41}此外，这项政策还强化了费用征收和不合规处罚的执行力度，进一步加重了企业的财务压力。未按时缴纳分级电价费用的企业将面临1.5倍罚款、市场参与限制以及可能的声誉损害。

为了吸引企业，地方政府曾提供低于电网价格的优惠电价。例如，在内蒙古东部，电解铝生产的电价为0.05元/千瓦时，低于其他主要工业用户的电价。在内蒙古西部，电价为0.043元/千瓦时，低于其他工业和商业用户的两部制电价机制下的电价。⁴²这种优惠电价政策直到2018年才被取消，而这种情况并非个别现象。在云南省，当地政府曾为铝业公司提供低于电网电价的保障。然而，2021年起，这一优惠政策也被取消，取而代之的是分级电价制度。⁴³

企业建设自备电厂有助于降低电力成本，但这些电厂规避了电网电厂所面临的监管要求，且普遍存在逃避交叉补贴责任的情况，同时它们也因污染严重而广受诟病。⁴⁴直到2018年，随着《燃煤自备电厂规范建设和运行专项治理方案》的发布，非法自备电厂才得以关闭，并且禁止建设自用电网系统。⁴⁵从那时起，自备电厂逐步转型为公共事业电厂，纳入了国家电网的管理与调度体系。

行业降碳所面临的挑战与机遇

应对地缘政治风险的措施可以为降碳带来机遇

美国近期上调铝产品关税可能加速中国的降碳进程，引导贸易流向更注重气候政策的市場。此次关税调整将铝产品税率提高至25%，并取消对加拿大和墨西哥的关税豁免，预计将影响中国约15%的铝产品对美出口。这些产品有可能转向澳洲、英国及东南亚国家，这些市场不仅是中国铝产品的主要出口目的地，也在政策上更加支持低碳转型。例如，澳洲正在评估碳边境调节机制（CBAM）的可行性，泰国正起草包含CBAM的气候变化法案，而英国计划在2027年推出本国的CBAM。这些逐步推进的碳边境政策为中国低碳铝企业创造了机遇，使其在出口至这些市场时更具竞争优势。

中国的铝土矿储量仅占全球总量的2.39%，近70%的需求依赖进口，使行业面临贸易风险。⁴⁶截至2024年，95%的进口铝土矿来自几内亚和澳洲，使供应链易受地缘政治因素影响，例如几内亚的政局不稳或潜在的出口限制。过去，印尼在2023年实施矿产出口禁令，马来西亚自2016年以来因环境问题多次暂停铝土矿开采，均对供应链稳定性构成挑战。

确保高质量铝土矿供应对降低氧化铝精炼过程的碳排放至关重要。⁴⁷当前，该工艺仍依赖化石燃料，而可行的脱碳技术尚未实现商业化。⁴⁸相比之下，高质量铝土矿可在更低温度下精炼，能耗强度最高可降低四倍，从而有效降低生产成本并减少环境影响。然而，中国铝土矿品位持续下降，大部分储量为低品位的一水硬铝石矿，进一步增加了精炼过程的能耗和成本。

为降低供应链风险，中国企业已在海外布局，掌控约70%的铝土矿资源，其中包括几内亚80%的铝土矿出口，相当于每年约9,000万吨。这一策略不仅确保了稳定的原料供应，还缓解了原材料价格波动带来的不确定性，同时降低了生产成本，为满足国内不断增长的需求提供了有力支撑。

低碳铝的生产或高品质铝土矿的供应不仅关乎上游原材料，也对下游产业产生深远影响，尤其是在中国主导全球电动车市场和可再生能源基础设施建设的背景下。电动车比传统燃油车使用更多铝材，主要应用于电池外壳和轻量化车身。随着2023年中国电动车销量达到950万辆，占全球市场的40%，高强度铝合金的需求预计到2030年将以每年15%的速度增长。除了电动车，可再生能源和电网扩建同样推动铝消费增长。国际能源署（IEA）预计，到2050年，中国电网规模需扩大至当前的三倍，每年将消耗约500万吨铝用于电缆和设备。此外，越来越多企业对绿色低碳产品表现出更高需求。光伏企业晶科能源承诺实现光伏生产和供应链的净零排放，同时，围绕绿色电解铝和再生铝的合作也在增加，例如华晨汽车与河南神火集团、沃尔沃与云南铝业分别达成相关协议。

绿色能源转型趋势正在推动碳密集型能源结构的转变

铝行业占中国电力消费的7%，其中燃煤机组主导了冶炼作业。自备煤电机组占总煤电装机容量的6%，加剧了碳排放。这些机组大多使用过时的次临界技术，尽管它们相对较新，但如果不及时解决，从2024年到2060年，它们可能会导致高达95亿吨二氧化碳的长期排放，进而妨碍中国实现碳中和目标。尽管这些机组提供了稳定且低成本的电力，但改造或淘汰的费用高昂，成为持续的挑战。

尽管电网电力提供了比便宜的自备电力更高成本的替代选择，但如果地区电网仍然依赖燃煤电厂，这并不能迅速解决问题。山东、新疆和内蒙古等省份——这些省份负责60%的铝产量——的电网排放强度比全国平均水平高出25%，主要因为这些地区电网中燃煤电厂的比例较高。与此同时，水电资源丰富的省份，尽管电网排放强度较低，已不再是简单的降碳路径。由于气候变化的影响日益加剧，这些地区面临季节性降水短缺和工业限电的常态化问题，进一步增加了降碳的难度。

铝业需要长期稳定的零碳电力供应，这为电力和冶炼基础设施的整合提供了机会。例如，内蒙古的“绿色电力-铝业”集群正在利用风能和太阳能替代煤炭。云南铝业安装了175兆瓦的屋顶太阳能，降低了成本和排放。集成项目在部分地区可以有效保障可再生电力供应，但要提升全国范围内的电力消费，统一且规范的电力市场监管同样重要。2020年中长期电力市场的引入是一个良好的开端，使得企业能够从可再生电力项目中获得长期购电协议（PPA）。然而，由于可再生电力项目可以选择由政府全额回购以确保固定收入，导致该市场活跃度较低。⁴⁹

最近，对于2025年6月后建设的项目，政府取消了可再生电力回购方案，取而代之的是基于竞标定价的差价合同（CfD）机制。⁵⁰如果电力改革进一步成熟，尤其是那些位于工业场地上的可再生能源项目，其容量价值和灵活性贡献将得到充分认可，且为电网提供辅助服务的能力也将获得奖励。虽然目前仍处于过渡阶段，但中国日益变化的市场结构有望为可再生能源提升成本竞争力提供有利条件，前提是同时限制煤电厂的主导地位。⁵¹

与此同时，政策不断施压铝业公司，要求其增加可再生能源的使用，设定了铝冶炼中最低绿色电力使用的目标。更严格的环境法规，包括分级电价和中国碳排放权交易体系（ETS），使得煤电使用成本不断攀升。值得注意的是，自备煤电厂的扩张已被禁止，且淘汰落后产能的进程已经开始。

ETS被视为双刃剑，挑战与机遇并存

发电行业被纳入中国碳排放权交易市场（ETS）的时候已经涵盖了为铝业提供电力的大部分自备煤电厂，但其减排效果仍有限。理论上，这一体系鼓励对现有电厂进行改造，采用更高效的燃烧技术，并淘汰小型低效煤电厂。然而，普遍认为现有的排放强度基准并不严格，导致特别是大电力公司（这些公司获得了较为宽松的配额）交易量较低。此外，市场交易主要集中在合规截止日期前，而非形成持续的交易模式。最近，铝冶炼行业被正式纳入ETS，⁵²并将所有温室气体（GHGs）排放纳入考量，包括二氧化碳（CO₂）、CF₄和C₂F₆，并且只计算直接排放，这将显著影响电解过程中阳极效应带来的排放。这一变化会影响到更高效冶炼厂的转型及尚未商业化的零碳惰性阳极的应用，因为目前行业标准使用的碳阳极是CF₄和C₂F₆排放的主要来源。由于这些排放量较低，相比冶炼过程中的电力使用（已涵盖在发电行业ETS中），它们不太可能成为铝业降碳的主要驱动因素。短期内，影响有限，因为在首个合规年度将分配免费的配额，而接下来的两年仅会设定排放强度基准。同时，来自电网或自备电厂的间接排放已被电力行业ETS覆盖，因此不包括在内。

如果设计得当，ETS可能成为行业转型的重要契机。经过三年实施，电力行业的排放强度略有下降。奖励与惩罚机制已经建立，并为高碳排放企业带来了额外的碳成本。如果ETS的监管设计逐步完善，能够确保低碳铝生产因其排放表现得到奖励，而高碳铝生产受到惩罚，那么这一趋势有望继续深化。长期来看，随着更严格的排放基准的设定，以及间接排放的纳入，该政策将成为中国工业降碳的重要推动力。

尽管中国碳排放交易体系仍面临一些监管挑战，这些挑战可能影响其在铝业降碳方面的效果，但该框架本身仍有潜力成为推动行业变革的关键。

铝废料的潜力

铝回收的低碳排放强度（低于1吨CO₂/吨铝）使其成为铝业降碳的一个高效且具成本效益的途径。长期以来，中国的铝废料供应量一直低于原铝生产量，导致大量废料资源尚未得到充分利用。由于原铝生产的占比过高，中国的回收投入率长期低于全球水平，平均仅为20%。⁵³然而，随着报废车辆（使用寿命8-20年）和建筑物（使用寿命30-50年）的逐步淘汰，废料回收的潜力将进一步释放。^{54 55 56}为了更好地挖掘废料回收潜力，必须加速废料回收进程，并扩大回收能力。目前，中国的铝废料回收能力约为1,400万吨，占2024年原铝生产量的30%。随着现代化技术的引入，许多小型回收企业仍依赖人工分拣，回收效率有待提升。更重要的是，当前的2025年1,150万吨回收目标尚未达到所需水平。如果市场能够进一步扩大，废料替代将在短期内成为铝业降碳的重要推动力。

尾注

- 1 <https://finance.sina.cn/sa/2009-10-29/detail-ikftssan9762925.d.html>
- 2 https://xnl.chinalco.com.cn/xwzx/hyzz/202410/t20241030_137572.html
- 3 <https://finance.sina.cn/sa/2009-10-29/detail-ikftssan9762925.d.html>
- 4 <https://www.cnmm.com.cn/ShowNews1.aspx?id=22843>
- 5 https://www.gov.cn/xgk/pub/govpublic/mrlm/201011/t20101117_62827.html
- 6 <https://data.worldbank.org.cn/indicator/NY.GDP.MKTP.KD.ZG?locations=CN>
- 7 <https://transitionasia.org/explainer-aluminium-decarbonisation/>
- 8 <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ea2ff609-8180-4312-8de9-494bcf21696d/ElectricityGridsandSecureEnergyTransitions.pdf>
- 9 https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202308/content_6900272.htm
- 10 <https://en.cgs.gov.cn/xwtt/201612/W020161222510373427768.pdf>
- 11 <https://www.bangkokpost.com/business/813956/bauxite-mining-worries-malaysia>
- 12 <https://www.aseanbriefing.com/doing-business-guide/indonesia/sector-insights/indonesia-to-ban-bauxite-export-from-june-2023-an-explainer>
- 13 <https://wits.worldbank.org/trade/comtrade/en/country/USA/year/2023/tradeflow/Imports/partner/ALL/product/260600>
- 14 <https://wits.worldbank.org/trade/comtrade/en/country/USA/year/2023/tradeflow/Imports/partner/ALL/product/260600>
- 15 <https://aluminium.org.au/wp-content/uploads/2023/11/Aluminium-Critical-Mineral-Report-Nov23.pdf>
- 16 <https://aluminium.org.au/australian-industry/australian-bauxite/>
- 17 中国海关资料
- 18 根据中国海关的规定，废料包括铝合金（包括由再生铝制成的铝合金）以及铝废料和碎料。
- 19 https://mp.weixin.qq.com/s/BOclzQmVr9_FkNVMIIvbkq
- 20 <https://transitionasia.org/explainer-aluminium-decarbonisation/>
- 21 <https://ember-energy.org/data/yearly-electricity-data/>
- 22 <https://www.cnmm.com.cn/ShowNews1.aspx?id=452210>
- 23 https://xnl.chinalco.com.cn/xwzx/hyzz/202208/t20220829_98560.html
- 24 https://www.mee.gov.cn/xgk/2018/xgk/xgk01/202412/t20241226_1099413.html
- 25 <https://www.nature.com/articles/s41558-024-02193-x>
- 26 <https://www.nature.com/articles/s41558-024-02193-x>
- 27 <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/average-co2-intensity-of-power-generation-from-coal-power-plants-2000-2020>
- 28 http://paper.people.com.cn/rmrbhwb/html/2024-08/20/content_26075838.htm
- 29 https://xnl.chinalco.com.cn/xwzx/hyzz/202404/t20240422_126538.html
- 30 https://xnl.chinalco.com.cn/xwzx/hyzz/202404/t20240422_126538.html
- 31 <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/climate-pledges-explorer>
- 32 <https://international-aluminium.org/landing/aluminium-recycling-saves-95-of-the-energy-needed-for-primary-aluminium-production/>
- 33 <https://iea.blob.core.windows.net/assets/3af7fda6-8fd9-46b7-bede-395f7f8f9943/RecyclingofCriticalMinerals.pdf>
- 34 <https://zlqdz.chinalco.com.cn/xwzx/hyzz/202410/t20241018136958.html#:~:text=%E6%8D%AESMM%E%BC%8C2022%E5%B9%B4%E4%B8%AD%E5%9B%BD,%E6%97%A7%E6%96%99571.9%E4%B8%87%E5%90%A8%E3%80%82>
- 35 Peng T, Ou X, Yan X, Wang G. Life-cycle analysis of energy consumption and GHG emissions of aluminium production in China. Energy Procedia. 2019;158:3937-3943. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.849>
- 36 IAI, <https://iaimain.interstruct.dev/wp-content/uploads/2024/04/Global-Impacts-of-Aluminium-Flows-from-End-of-life-Buildings-in-China.pdf>
- 37 <https://jxt.hubei.gov.cn/fbjd/zc/qtzdgkwj/gwfb/201705/W020191211623836775860.pdf>
- 38 <https://gdii.gd.gov.cn/protect/P0201507/P020150708/P020150708552013418812.pdf>
- 39 <https://jxt.hubei.gov.cn/fbjd/zc/qtzdgkwj/gwfb/201705/W020191211623836775860.pdf>
- 40 https://www.gov.cn/zwqk/2013-12/26/content_2554621.htm
- 41 https://www.ndrc.gov.cn/xgk/zcfb/tz/202108/t20210827_1294888.html
- 42 <https://www.cnmm.com.cn/ShowNews1.aspx?id=392731>
- 43 <https://www.cls.cn/detail/823821>
- 44 电价与许多政策目标密切相关，如保障民生、支持农村发展、引导电力投资和电力消费，这导致了电价存在大规模的交叉补贴。
- 45 <https://news.bjx.com.cn/html/20180328/888343.shtml>
- 46 <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024-bauxite-alumina.pdf>
- 47 Tabereaux AT, Peterson RD. Chapter 2.5—Aluminium Production. In: Seetharaman S, ed. Treatise on Process Metallurgy. Elsevier; 2014:839-917. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096988-6.00023-7>
- 48 <https://transitionasia.org/explainer-aluminium-decarbonisation/>
- 49 <https://www.ndrc.gov.cn/xgk/zcfb/fzggwl/202403/P020240315321827362975.pdf>
- 50 https://www.ndrc.gov.cn/xgk/zcfb/tz/202502/t20250209_1396066.html
- 51 <https://www.rechargenews.com/opinion/chinas-reforms-show-renewables-can-hold-their-own-but-it-s-not-yet-a-fair-fight/2-1-1778209>
- 52 <https://www.mee.gov.cn/xgk/2018/xgk/xgk03/202503/W020250326367625819894.pdf>
- 53 二级供应在总供应中所占的比例
- 54 <https://www.mee.gov.cn/gkml/hbb/gwy/W020130115569687931219.pdf>
- 55 <https://www.yicai.com/news/333003.html>
- 56 https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/zc/wjk/art/2021/art_17339_761192.html

