



# 2050 年铝业温室气体 减排路径

2021年3月

[world-aluminium.org](http://world-aluminium.org)

## 国际铝业协会（IAI）

目前，IAI 的全体成员代表了包括中国在内的所有重要地区铝土矿、氧化铝以及原铝的主要生产商。自 1972 年成立以来，IAI 的成员一直是从事铝土矿、氧化铝和原铝的生产、铝回收或铝制造，或作为此类生产领域的合资伙伴的公司。IAI 的主要目标是：

- 通过提高全球对铝独特、宝贵品质的认识壮大铝业市场；
- 就共同关心的问题为铝生产商提供全球论坛，并与各区域以及各国的铝业协会保持联络，以实现高效、经济的合作；
- 确定与铝的生产、使用和回收相关的问题，并促进有关这些问题的适当研究和其他行动；
- 鼓励并协助在铝业健康、安全和环保的生产方面持续取得进步；
- 收集统计数据以及其他相关信息，将其传达给该行业及其主要利益相关者；并
- 向国际机构和其他相关方传达铝业的观点和立场。

通过 IAI，铝业旨在促进外界对其活动的更广泛了解，并展示其生产金属的责任以及通过在可持续的应用和回收中使用金属而实现的潜在效益。

*免责声明：本出版物所包含的信息由 IAI 在其知识范围内提供，但并无担保。*

## 目录

1. 铝：可持续未来的核心 .....	1
2. 国际铝业协会：科学权威和变革推动者 .....	2
3. 铝业的碳足迹是什么？ .....	2
4. 对标《巴黎协定》的 2050 年铝足迹是什么样？ .....	7
5. 温室气体减排路径 .....	10
电力脱碳 .....	10
减少直接排放 .....	12
循环利用和资源效率 .....	15
6. 要实现一个符合《巴黎协定》要求的铝业，需要什么？ .....	19
7. 参考文献 .....	20

## 图表

图 1 2018 年铝业总排放量（百万吨二氧化碳当量）热图（按工艺和来源分列）（*消费前后废料的回收），（IAI, 2020a） .....	3
图 2 全球用于原铝冶炼的电力组合，TWh（10 亿千瓦时）/年（1980—2019），（IAI, 2020d） .....	5
图 3 全球原铝产量（按地区分列），百万吨铝/年（1973—2019），（IAI, 2021b） .....	5
图 4 2018 年用于原铝生产的混合电力从摇篮到大门排放强度的世界平均水平以及示例，吨二氧化碳当量/吨铝 .....	6
图 5 2018 年原铝生产从摇篮到大门的总排放量（按能源分列），百万吨二氧化碳当量 .....	6
图 6 全球铝业的历史排放量（2005—2018）和未来预计排放量（2019—2050）（照常经营情境下），百万吨二氧化碳当量/年 .....	7
图 7 BAU 和 B2DS 情境下的 2018 年和 2050 年全行业排放量，百万吨二氧化碳当量 .....	8
图 8 对标 B2DS 的 2050 年情境下的全球平均原铝碳足迹，吨二氧化碳当量/吨铝 .....	9
图 9 与 IEA “超过 2°C 情境（B2DS）” 相比，在 2050 年 BAU 情境下冶炼厂电力结构组合的变化。（B2DS 中主要与 CCUS 技术有关的化石燃料）。 .....	11
图 10 路径 1：电力脱碳 .....	12
图 11 路径 2：直接过程排放 .....	14
图 12 路径 3：循环利用和资源效率 .....	16
图 13 2018 年和 2050 年原铝和回收铝的供应情况，（在替代回收利用率情境下），百万吨铝 .....	17
图 14 回收及资源效率潜力的累积影响，百万吨二氧化碳当量 .....	18

## 1. 铝：可持续未来的核心

铝产品是低碳未来的基本推动力，更多地使用这种金属将减少整个经济的排放。

大量轻型自动电动汽车为日益增长的全球人口提供租赁的出行服务，由可再生能源电网供电；具有能量净正收益的模块化智能建筑，产生的能源比它们消耗的更多，并实时适应其居住者的各种需求；轻型和保护性包装解决方案，到 2050 年为 100 亿人带来营养和药物效益，最大限度地减少浪费，并减轻物流负担——所有这些都需要铝带来的不断增加的物质和能源效益。

虽然铝是可持续未来解决方案的一部分（因为其独特的特性组合：轻量化、高强度、耐久性、导电性及导热性、可塑性和可再生性），但该行业认识到如果不按照全社会的气候目标制定规划并快速采取行动以减少温室气体排放，其自身有可能成为难题的一部分。只有过渡到低碳路线，对铝的需求才能有所增加。对于全球铝业和价值链沿线的不同参与者，路径将有所不同。

这是一个挑战。不仅是环境方面的挑战，还是经济、政治、社会、物流和技术方面的挑战。由于需要通过不同途径来获得解决挑战的方案（以及许多解决方案尚在起草中而其他解决方案尚未出台的事实），挑战本身变得更加复杂。

然而，铝业正准备通过 IAI 的工作来应对这一挑战，该协会正在为 2050 年全行业温室气体的减排目标探索现实可靠的技术途径。这些途径符合《巴黎协定》的目标，即相比于工业化前的水平将全球变暖的状况限制在远低于 2°C 的水平，最好控制在 1.5°C。

凭借领先的工业和材料数据及分析，IAI 已为铝业绘制了实现全球气候目标的三条主要路线（同时解决其他可持续性方面的问题）。在许多情况下，所需技术正处于开发和部署的最后阶段，但需要大量投资。最需要的是支持并加速此类投资的政策。

## 2. 国际铝业协会：科学权威和变革推动者

由 IAI 的成员公司和区域协会组成的温室气体排放路径工作组已通过合作来理解和阐明如下内容：

- 通过使用和回收铝制品而产生的排放效益；
- 该行业的排放足迹和排放源；
- 考虑到铝产品需求的变化，如果不采取行动，未来三十年碳足迹将如何变化；
- 在全球变暖幅度低于 2°C 的情境下，整个行业（以及价值链上的个体参与者）需要实现什么；
- 脱碳技术的范围和组合，包括现有的、新的、正在开发中的和尚未开发的解决方案，可供具有不同工艺流程和排放状况的不同参与者使用；
- 政策（和投资）驱动力和脱碳障碍——通过减少生产过程的排放量和回收利用节省的排放量。

所有这一切都以 IAI 成熟的排放模型为基础，并基于其成员公司的数据和专业分析。

铝业参与者的路径选择将取决于其独特的能源条件、原材料和废料可用性、区域政策、投资选择以及技术开发和实施的可用性、速度和成本。

有必要建立行业内和行业间伙伴关系，以应对温室气体减排的巨大挑战，同时满足日益增长的需求。生产商之间，以及公共部门和学术界、发电厂、半成品制造商、客户/原始设备制造商（OEM）以及终端用户之间，需要建立合作关系。由于在工艺和产品方面的相对同质性，以及庞大的规模和遍及全球的影响范围，铝业可以满足这一需求，而 IAI 在发起、促进和宣传这种伙伴关系方面具有独特的优势。

## 3. 铝业的碳足迹是什么？

二十多年来，IAI 收集了行业排放数据，最近公布了 15 年来的[行业排放数据库](#)（IAI，2020a），该数据库涵盖“从摇篮到大门”的所有工艺流程。这意指该行业在自己的生产设施（原铝和回收铝）中产生的所有排放量，也包括该行业消耗的原材料、辅助原料和能源中的排放量。这是当今铝业，同时也是材料行业中，最全面、最详细、最新的数据集。

根据 2018 年的数据，该行业每年的温室气体排放量为 11 亿吨，约占全球人为排放量的 2%<sup>1</sup>。90% 以上的碳排放足迹来自原铝生产工艺，而目前原铝占每年金属需求的 70% 左右。

---

<sup>1</sup>表示为二氧化碳当量——CO<sub>2</sub>e（或二氧化碳（CO<sub>2</sub>）排放量的 4%）

	铝土矿 开采	氧化铝精 炼	阳极生产	电解	铸造	回收*	半成品生产	内部废料 重熔	总计
电力（间接）	0.6	16.9	-	670.6	-	3.1	9.5	2.5	703
非二氧化碳温室气 体（直接）	-	32.2	-	35.4	-	-	-	-	68
工艺二氧化碳（直 接）	-	-	6.4	92.6	-	-	-	-	99
辅助原料（间接）	-	14.8	19.3	6.4	-	-	-	-	41
热能（直接/间接 ）	2.6	124.3	6.4	-	6.4	15.6	19.0	8.4	183
运输（间接）	-	15.4	-	18.7	-	-	-	-	34
总计 （从摇篮到大门）	3	204	32	824	6	19	29	11	1,127

图 1 2018 年铝业总排放量（百万吨二氧化碳当量）热图（按工艺和来源分列）  
（\*消费前后废料的回收），（IAI，2020a）

根据 IAI [物料流分析](#)（IAI，2021a），到 2050 年，铝的需求量预计将增长 80%。这一增长量将通过回收铝和原铝的组合方式来实现。铝制品的回收利用率已经很高。即使收集过程得到进一步改进，然而耐用铝制品寿命长，人口数量不断增长，应用范围变广，意味着未来没有足够的消费后废料来完全满足增长的铝需求，原铝生产，至少到本世纪下半叶，仍是必需的。

目前，报废产品的收集率已超过 70%，在过去 10 年中增加了 10%（IAI，2020b）。然而，仍然有很大机会加强消费后产品的收集、分类和回收，以（在一定程度上）减少对原铝的需求。

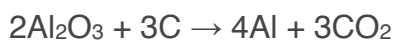
原铝生产是一种[能源密集型工艺](#)（IAI，2020c），需要大量的电力来打破进料化学品——氧化铝<sup>2</sup>的强氧键。铝的反应活性由其原子结构决定，也是其宝贵物理特性（如轻量化、高强度、耐久性和导电性）的来源，使其成为众多应用的首选材料。

[原铝的生产](#)（IAI，2018 年）始于铝土矿石的开采。生产 1 吨铝平均需要约 5.5 吨铝土矿。采矿过程本身的排放量相对较低（相比于价值链中的其他工艺流程），占行业总排放量 1%的四分之一，主要来自移动设备。铝土矿（和所有其他中间产品）运输中的排放量约占排放总量的 3%。

使用[拜耳法](#)从铝土矿中提取氧化铝，需要消耗以热和蒸汽形式存在的能量，以及诸如氢氧化钠之类的辅助原料，所有这些材料都有碳足迹。氧化铝生产中的排放量仅占行业总排放量的不到 20%。

<sup>2</sup> 氧化铝是铝和氧的化合物，化学式为  $Al_2O_3$

目前，铝的冶炼通过原料、氧化铝和碳阳极之间的还原—氧化反应完成，其中每个铝离子得到三个电子被还原成金属形态，而阳极的碳原子则被氧化成二氧化碳。反应式如下：



因此，该工艺流程中直接产生的二氧化碳排放与铝的生产成正比。这种电化学工艺（电解）需要电力、碳阳极和诸如冰晶石（氟化铝钠）之类的辅助产品，以及将液态金属铸成固态产物的热能。与电力相关的排放量占铝业排放量的 75%。然而，整个行业变化最大的地方就在此处，这取决于冶炼厂的电力结构——历史上以水电为主，但现在以煤、气燃烧发电的比重不断增加（IAI，2020d）。

另一方面，铝回收需要的能量要少得多——基本上只被用来熔化铝废料。此外，由于不需要将氧化铝还原成金属铝，也就不存在上述化学反应产生的二氧化碳排放。

因此，铝业排放以原铝生产导致的排放为主，每千克原铝的碳排放足迹在小于 5 千克至大于 25 千克二氧化碳当量之间，这取决于发电所用的能源种类。

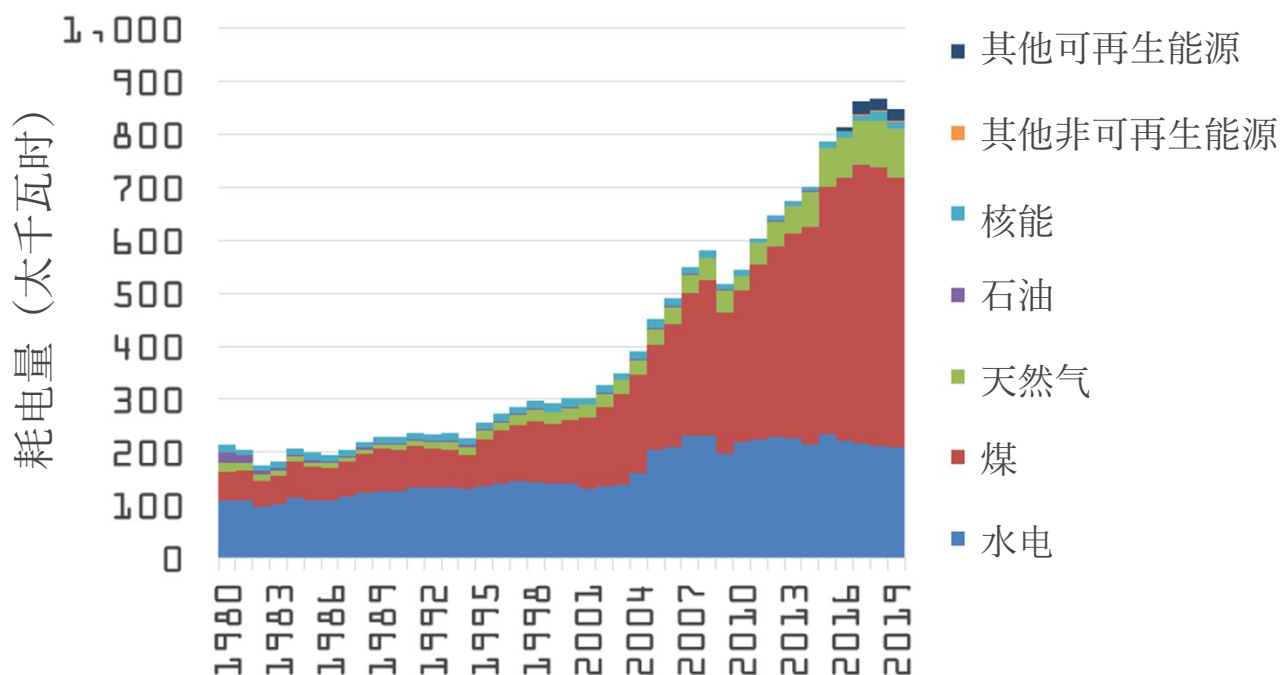


图2 全球用于原铝冶炼的电力组合，TWh（10 亿千瓦时）/年（1980—2019），（IAI，2020d）

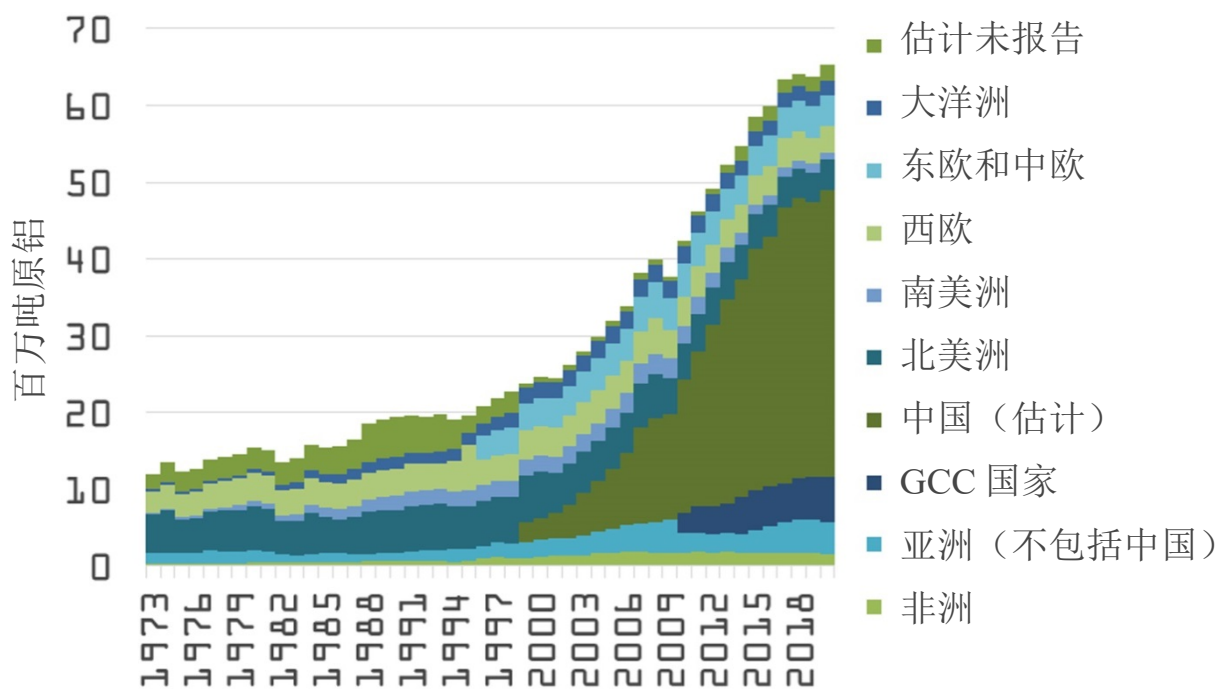


图3 全球原铝产量（按地区分列），百万吨铝/年（1973—2019），（IAI，2021b）



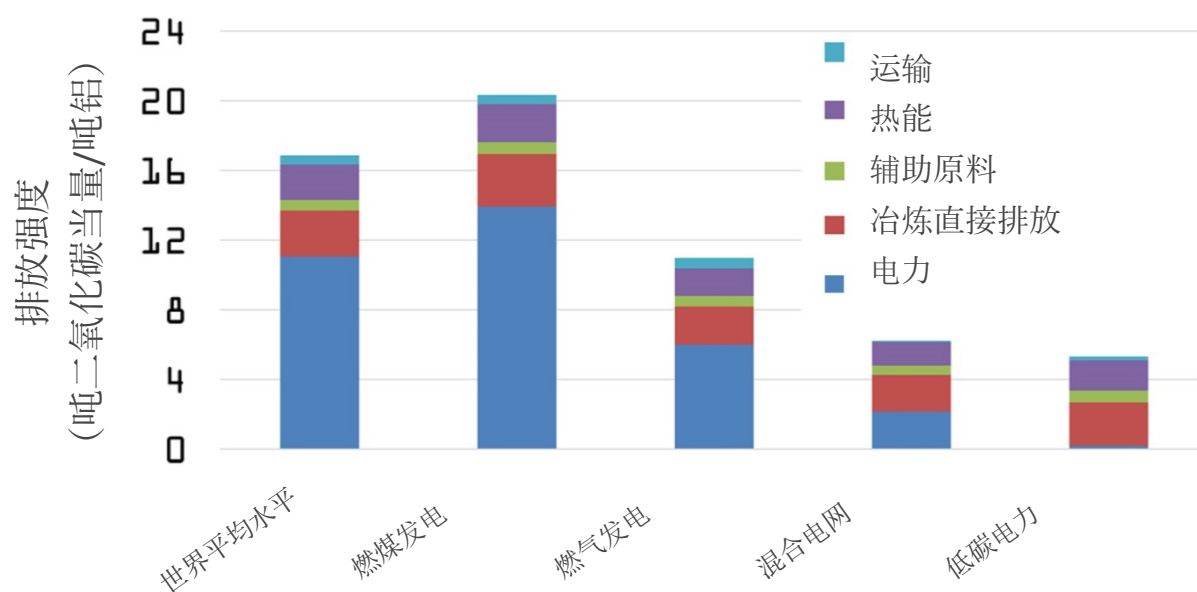


图4 2018年用于原铝生产的混合电力从摇篮到大门排放强度的世界平均水平以及示例，  
\_吨二氧化碳当量/吨铝

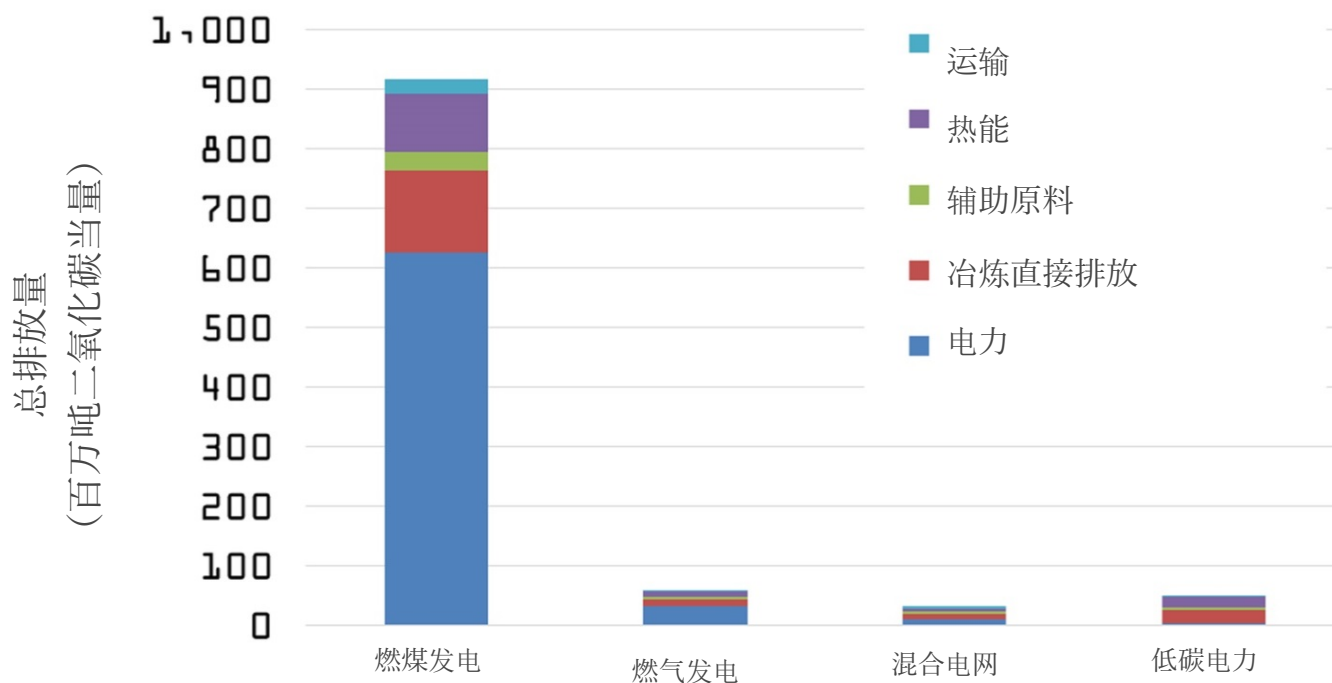


图5 2018年原铝生产从摇篮到大门的总排放量\_（按能源分列），百万吨二氧化碳当量

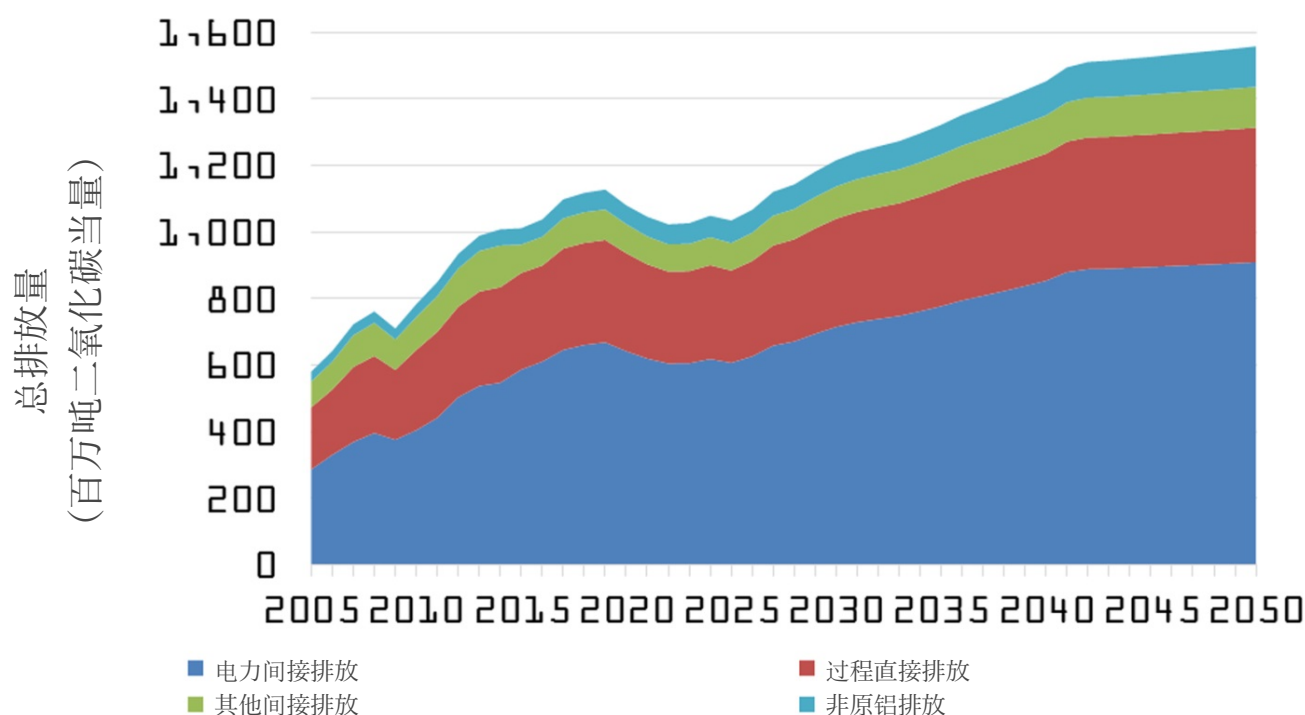


图6全球铝业的历史排放量（2005—2018）和未来预计排放量（2019—2050）  
（照常经营情境下），百万吨二氧化碳当量/年

在铝应用需求预期增长的推动下，即使回收铝在供应中占很大的比例（到世纪中叶达到 60%），行业的正常排放量预计到 2050 年将达到 16 亿吨二氧化碳当量，其中大部分（15 亿吨）来自原铝生产。

#### 4. 对标《巴黎协定》的 2050 年铝足迹是什么样？

国际能源署（IEA）认识到铝对世界脱碳的贡献。因此即使到 21 世纪下半叶全世界必须实现零排放，该机构已经同意给予铝业 2050 年温室气体排放量一定的排放额度。

IEA 发布了以下两种全球升温不超过 2°C 的情境：[2°C 优化情境（B2DS）](#)和[可持续发展情境（SDS）](#)（IEA，2020）。根据 B2DS，IEA 预测，到 2050 年，二氧化碳人为排放总量将从 343 亿吨（2014 年）减少到 48 亿吨，与此同时，SDS 要求二氧化碳排放量从 357 亿吨（2019 年）减少到 94 亿吨（2050 年）。鉴于区域电力数据集的可用性以及截至 2050 年全球二氧化碳排放总量预算较低，IAI 决定在 B2DS 情境框架下开展工作。尽管如此，IAI 将根据物料流模型和气候科学的发展，持续改进其绘制的情境。

IEA 的铝业 B2DS 预算包括该行业直接排放子集，以及该行业所耗电力的区域排放路径。因此，IAI 已将铝业的二氧化碳直接排放及其所耗电力与 IEA 的情境结合起来，对标 B2DS，开发的排放路径包含了 IEA 数据集中未囊括的排放。开发成果是整个铝业对标 B2DS 的排放路径，这表明截至 2050 年：

- 覆盖全产业链（铝土矿、氧化铝及原铝生产，消费前后铝废料回收和半成品铝生产过程，摇篮到大门）的铝业排放总量需要减少至 2.5 亿吨二氧化碳当量（从 2018 年 11 亿吨二氧化碳当量的基线排放量和依据“照常经营（BAU）”情境在 2050 年达到 16 亿吨二氧化碳当量的预计排放量）。
- 在这 2.5 亿吨排放量中，所有与原铝生产相关的工艺流程（特别是冶炼过程）中耗电产生的排放量将近于零。目前，该来源的排放量为 7 亿吨二氧化碳当量，2050 年在 BAU 情境下的排放量将达到 9 亿吨二氧化碳当量。
- 原铝生产中非耗电产生的排放量（从摇篮到大门）需要从目前的 4 亿吨二氧化碳当量（2050 年在 BAU 情境下将超过 5.2 亿吨）减少至低于 2 亿吨二氧化碳当量。
- 与 BAU 情境相比，回收和制造过程中燃料燃烧和电力消耗产生的排放量需要减少 55%，即从超过 1.2 亿吨二氧化碳当量减少至 5000 万吨二氧化碳当量。

2018 年，全球铝的年需求量为 9500 万吨；其中三分之二由原铝供应，三分之一来自于铝废料回收。

未来几十年，人口和经济将迅速增长，意味着到 2050 年，全球铝需求将增长 80%（至 1.7 亿吨）（[物料流模型“2020 年 IAI 参考情境”](#)（IAI，2021a），这一需求仍将通过铝回收和原铝生产的混合供应方式得到满足。

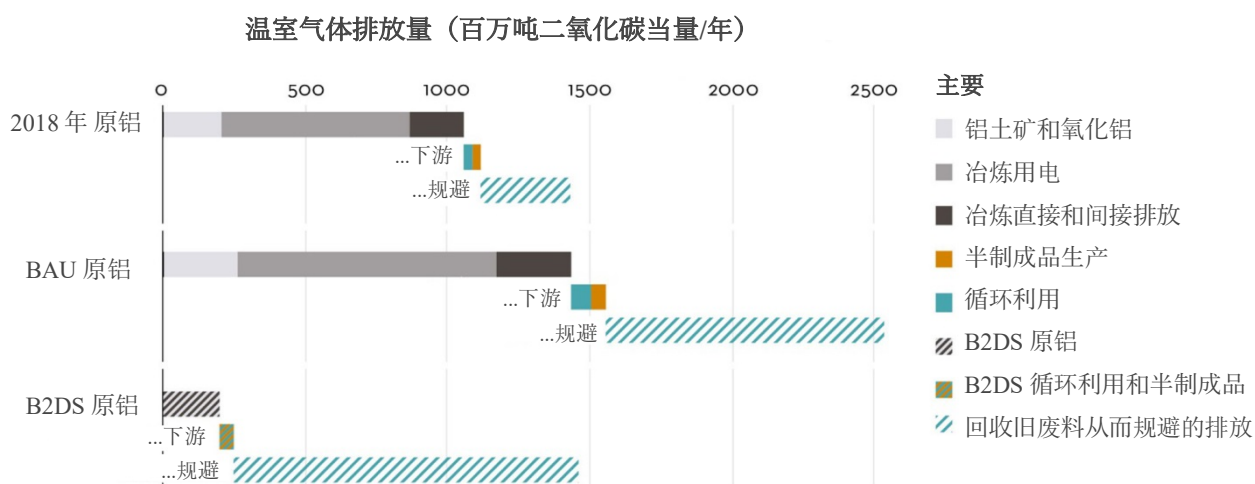


图 7 BAU 和 B2DS 情境下的 2018 年和 2050 年全行业排放量，百万吨二氧化碳当量

因此，在 2050 年，生产一吨铝（半制成）产品的全球平均排放强度需达到约 1.5 吨二氧化碳当量/吨铝（从摇篮到大门），才能与 B2DS 保持一致：

*（对标 B2DS 的 2050 年行业“额度”）/（2050 年铝半制成品需求）*

*（百万吨二氧化碳当量）/（百万吨铝）*

**250 / 170**

**=1.5 吨二氧化碳当量/吨铝半制成品**

尽管回收金属的供应量预计会有所增加，但 IAI 估计到 2050 年，每年仍将需要 7500 万吨至 9000 万吨原铝。假设原铝排放“额度”为 2 亿吨（2050 年预算的 80%，相比于现今排放量的 95%），则每吨原铝的平均排放强度需达到 2~3 吨二氧化碳当量/吨铝（从摇篮到大门），才能与 B2DS 保持一致：

*（对标 B2DS 的 2050 年原铝排放“额度”）/（2050 年原铝需求）*

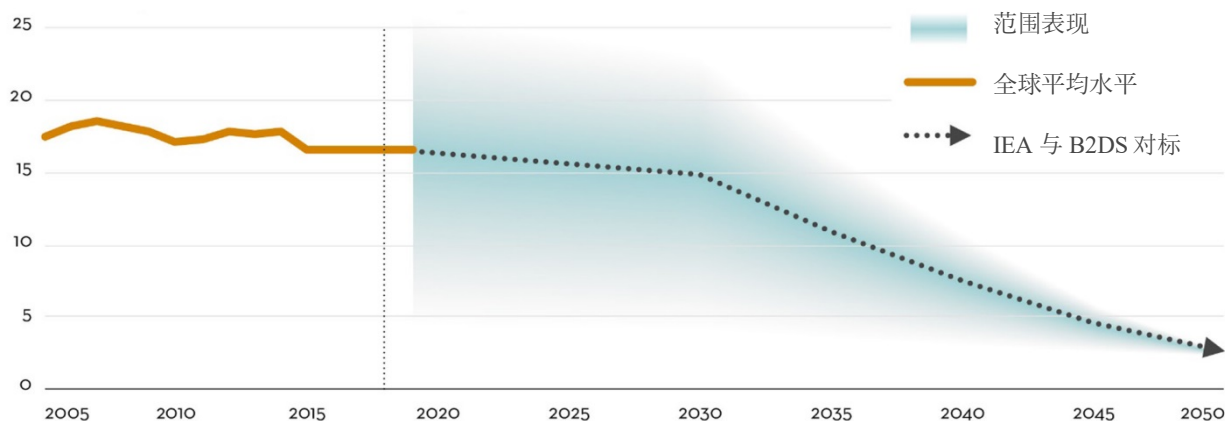
*（百万吨二氧化碳当量）/（百万吨铝）*

**200 / 80**

**=2.5 吨二氧化碳当量/吨原铝**

从广义上讲，这些数字意味着未来 30 年与电力相关的排放量将减少 100%——这是原铝生产商面临的重大挑战，还意味着 50%的直接（工艺和热能）减排以及原材料和辅助工艺过程中的减排——这是价值链所有参与者（包括下游行业）共同面临的挑战。

**原铝碳足迹(吨二氧化碳当量/吨铝)**



**图8对标 B2DS 的 2050 年情境下的全球平均原铝碳足迹，吨二氧化碳当量/吨铝**

## 5. 温室气体减排路径

有三大领域有潜力促成行业增长和温室气体排放的脱钩，每个领域都有独特的创新、政策以及金融驱动因素、障碍、成本和重要性：

1. 电力脱碳
2. 减少直接排放
3. 循环利用和资源效率

以下对温室气体排放途径的探索确定了可以/可能实施的最重大（最大减排潜力）技术和政策变化，以实现对标 B2DS 的行业脱碳目标。

根据它们在铝价值链中的位置、当前采用的工艺流程以及未来能源和原料资源的可用性，不同的企业参与者将从不同的起点出发，采取不同的速度，遵循不同的（或一系列不同的）途径。

### 电力脱碳

2018 年，发电导致的排放占该行业排放量的 60%。

脱碳发电，以及碳捕获利用和储存（CCUS）技术的加快部署，为减排提供了最重要的机会。

无论是对于目前由化石燃料发电供电的 4500 万吨原铝生产，还是对于为满足 2050 年需求而额外增加的 2000 万~2500 万吨铝产能，电网脱碳（目前供应行业三分之一的电力需求）以及由自备（自发电）发电厂向低/近零排放能源的转变，都将需要大量的投资。

根据当地环境和能源条件，现有生产商拥有多种截然不同的机会、技术和排放路径。

大量依靠化石燃料地区的铝业生产主要依靠自发电供电。在某些情况下，这是由于在冶炼厂建设期间电网电力不可靠，此类建设需要 1 周 7 天、1 天 24 小时不间断供电。[IAI 数据](#)表明，亚洲（除中国）97%的电力都是自备电（IAI，2020d）。

根据遵循的排放路径，未来 30 年，电力脱碳所需的资本投资在 0.5 万亿~1.5 万亿美元之间。

除了资本投资之外，人们认识到，该行业（以及整个社会）单位能源价格上涨，从而需要进一步投资来升级或安装新的铝生产设施。

水电是[整个 20 世纪](#)铝冶炼厂的主要电力来源（IAI，2020d）。自上世纪 70 年代以来，水电生产一直保持相对平稳，但近年来有显著增长计划。中国的许多铝生产商开始用云南省的新产能取代中国中部和东部的燃煤产能（其中大部分相对年轻，不到 10 年）。去年，300 万吨铝产能已搬迁，未来几年将计划再转移 300 万~500 万吨产能。这是中国最大生产商提出的[低碳铝生产](#)规划中的一部分（中国宏桥和中国铝业公司，2021）。

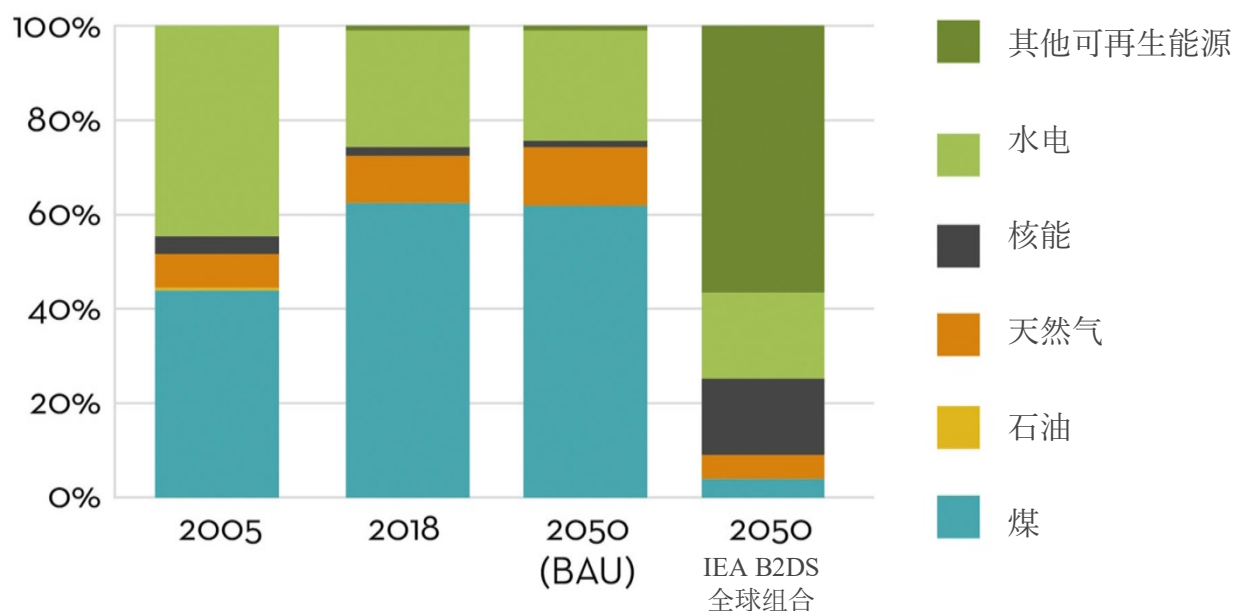


图9与 IEA “2° C 优化情境 (B2DS)” 相比，在 2050 年 BAU 情境下冶炼厂电力结构组合的变化。  
(B2DS 中的化石燃料主要采纳 CCUS 技术)。

阿拉伯联合酋长国（阿联酋）[能源战略 2050](#)（阿联酋政府，2017 年）旨在将发电的碳足迹减少 70%（能源结构由可再生能源、核能和其他清洁能源组成）。在未来 30 年内，还将通过 6000 亿迪拉姆（合 1650 亿美元）的投资将消费能源效率提高 40%，从而节省 7000 亿迪拉姆（合 1900 亿美元）。

发电厂的 CCUS 技术可达到与电网脱碳相似水平的减排效果，且每吨碳的减排成本类似。[IEA 指出](#)燃煤和燃气发电厂的减排成本为 40~80 美元/吨二氧化碳（IEA，2019）。

通过逐渐改进（“蠕变”）、改装现有设施和安置新产能来提高能效，对减排的助益仅有 10%。

随着电网向低惯量（间歇性可再生发电来源，随着包括更多电动汽车等需求基础的变化，在一定时间内产生峰值负荷）转变，诸如铝冶炼厂一类的大型、持续型电力用户将在稳定电网方面发挥越来越重要的作用。这一有利作用对于使冶炼厂进入可再生能源电网至关重要——正如在 20 世纪许多冶炼厂能够促使巴西和非洲南部等地区发展新电网一样。

## 路径 1

### 电力脱碳潜能

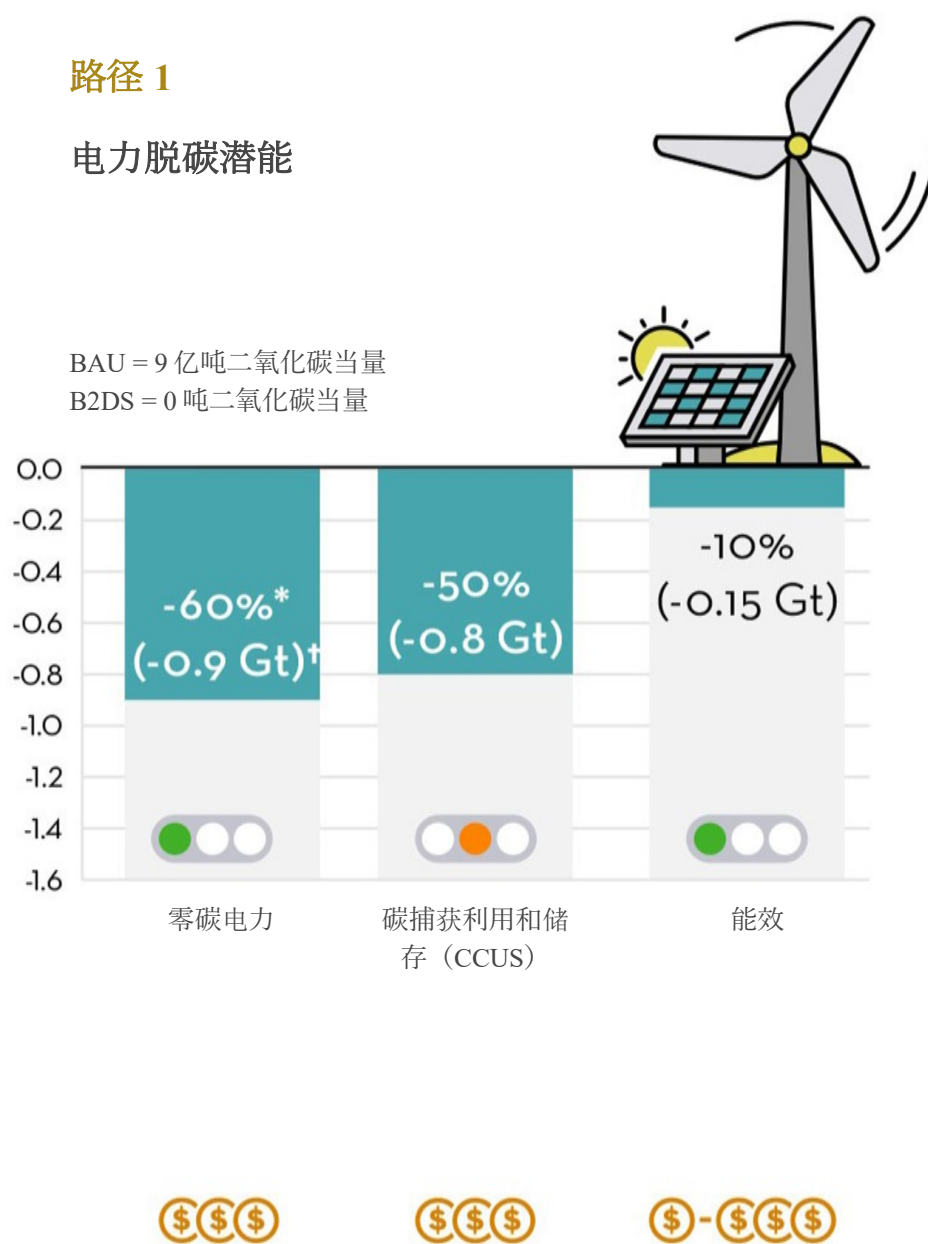


图 10 路径 1: 电力脱碳

### 减少直接排放

过去 20 年，行业排放量中来自铝生产过程的直接排放量（与其消耗的电力和原材料相反），由燃料燃烧（提供热量和蒸汽）导致的排放量以及其他来源的排放量急剧下降。

这在一定程度上是化石燃料能效增长的结果，也是该行业聚焦于消除与工艺流程相关的排放的结果，例如阳极效应产生的可潜在加剧全球变暖的气体全氟化碳(PFC)，提高能源效率，以及增加新的（和最佳可用的）精炼和冶炼技术。



1990 年，全行业排放量不到每年 3 亿吨二氧化碳当量，直接排放量约占总量的三分之二。在约 2 亿吨二氧化碳当量中，PFC 构成 1 亿吨二氧化碳当量（33%）。

当前，直接排放量仅占行业排放总量的不到三分之一（2018 年的总排放量为 11 亿吨二氧化碳当量，直接排放量为 3 亿吨二氧化碳当量），PFC 仅构成 3500 万吨二氧化碳当量（3%）（IAI，2020a）。这是由于在 20 世纪 90 年代和 21 世纪 00 年代集中改善了冶炼工艺的管理水平，以及在 21 世纪 00 年代和 10 年代出现了新的技术。冶炼工艺过程中的阳极消耗和所有生产过程的燃料燃烧几乎成为该行业所有直接排放的来源。

因此，实现这类减排的有希望的途径集中在两方面：

- 免除冶炼过程中对碳阳极需求的新型（惰性阳极）技术，以及
- 开发在不燃烧化石燃料的情况下提供热量和蒸汽的技术（例如，依靠可再生能源的电气化、生成可再生能源的氢气燃烧、作为能源组合一部分的聚光光热和机械蒸汽再压缩）。

此外，从排放点或进程点捕获和封存各来源的温室气体是另一个潜在路径。

CCUS 技术带来的挑战对铝业并非独一无二，成本反映了在适当开发和实施这些技术时排放企业将面临的更广泛的问题。然而，对于铝冶炼行业而言，从电解槽中排出的气体流中，低浓度的二氧化碳（浓度为 500~15,000 ppm）带来了额外的挑战，需要重新设计或改造电解槽，并承担由此产生的设计、实现和实施成本。这不包括在捕获碳之前洗涤其他污染物的成本（以减少捕获二氧化碳导致的污染）。

去除电解冶炼工艺的直接排放（将氧化铝转化为铝）是所有原铝生产商共同面临的挑战，需要通过逐步改变技术来实现。惰性阳极等新型电解槽技术将在减排方面发挥重要作用，但应该注意的是，这些技术所抑制的排放源约占全行业全球排放量的 15%。

在向零碳电能环境过渡的过程中，这些技术还需要在与现有碳阳极相似或比其更好的能耗强度下运行。这是因为，如果在化石燃料电网中以更高的能耗实行直接减排，那么与电力相关的间接排放可能会抵消直接排放减少的效果。然而，从长远来看，惰性阳极将是对标 B2DS 的行业排放路径的重要组成部分。

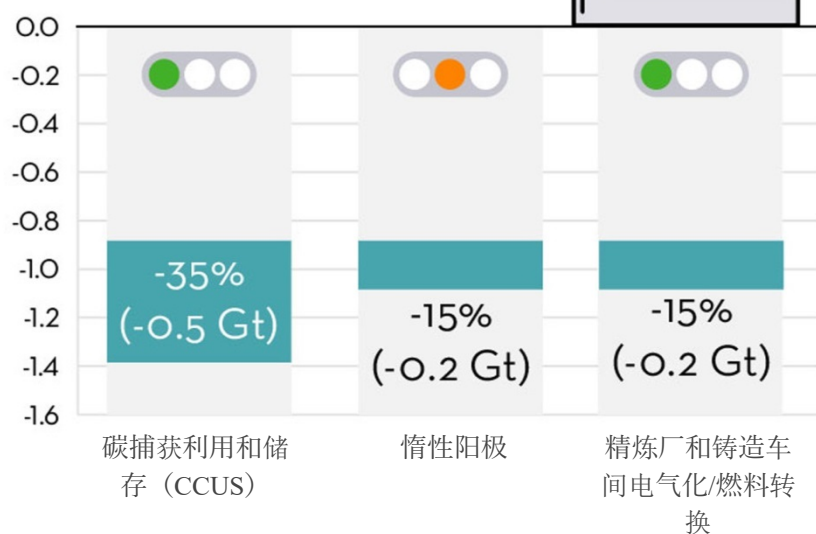


## 路径 2

### 直接过程排放潜能

BAU = 6.5 亿吨二氧化碳当量\*\*

B2DS = 2.5 亿吨二氧化碳当量



\*\*包括来自间接排放源的 1.5 亿吨二氧化碳当量（主要是输入原料和运输）

图 11 路径 2：直接过程排放

氧化铝生产（来自铝土矿）需要大量的热量和蒸汽（IAI，2020e）。并不是只有铝业面临着与这些能源载体脱碳技术相关的挑战。

对于这些热工艺过程，依靠可再生能源的电气化提供了潜在的脱碳路径。在电气化不可行的情况下（比如氧化铝的煅烧过程），将燃料转换为绿色氢、聚光光热能源和 CCUS 技术都是潜在的选择。在氧化铝的煅烧过程中，用电动锅炉直接取代化石燃料锅炉可能会影响产品质量，从而在下游行业产生更高的排放量。

其他燃料燃烧过程（采矿中的移动设备、焙烧阳极的烘箱、铸造炉、再熔和回收）将遵循类似的路径（电气化、燃料转换和 CCUS 技术），而已经电气化的工艺过程（挤压、轧制等）将需要以与冶炼相同的速率部署可再生能源（到 2050 年实现零排放）。

辅助原料和运输排放（占 BAU 情境下行业排放的 8%左右）将通过其他行业的路径变化和铝生产商的采购选择，以与直接排放相同的速率减少。

### **循环利用和资源效率**

无性能损失的无限可循环性是铝的独特优势之一，使其成为循环经济的有利材料（IAI，2018）。目前，金属在其最大细分市场（运输、建筑和施工）的报废（消费后）回收（收集）率较高——高于 90%。然而，这些应用往往具有较长的使用寿命（利用铝的耐久性），因此，像受限于回收率一样，废料的可用性同样受到产品寿命的限制。

因此，已生产的 14 多亿吨铝中，有四分之三目前仍在全球范围内有效使用，并可用于未来的收集和回收/再利用（IAI，2021a）。

包装应用中的铝的寿命要短得多，收集和回收率也大不相同，这取决于应用（罐装材料中铝的寿命往往高于柔性包装）和当地市场、消费者行为和政治环境。

在产品寿命结束时收集的铝废料的质量也各有不同，这取决于合金类别组成和废料的分类程度。质量较低的混合废料，虽然今天用于某些应用，但在未来却几乎没什么用途，未来需要更高价值的变形合金（如应用于电动汽车的轻量化）。

生产商和消费者（以及废物管理参与者）有责任确保在材料的生命结束时将其带回系统。设计金属并将其转化为产品的人员也有责任创造轻松有效地分离、收集和分类铝部件的应用，以确保金属的价值及其合金得以保留。

如今，消费后废料的回收规避了近 2000 万吨的原铝需求，从而减少了约 3 亿吨二氧化碳当量的排放。一旦废料得到收集，其加工和熔化过程中的金属损耗相对较低（分别是 3%和 6%）。

### 路径 3

#### 循环利用和资源 效率潜能

BAU = 规避 9 亿吨二氧化碳当量的排放  
B2DS = 规避 11 亿吨二氧化碳当量的排放

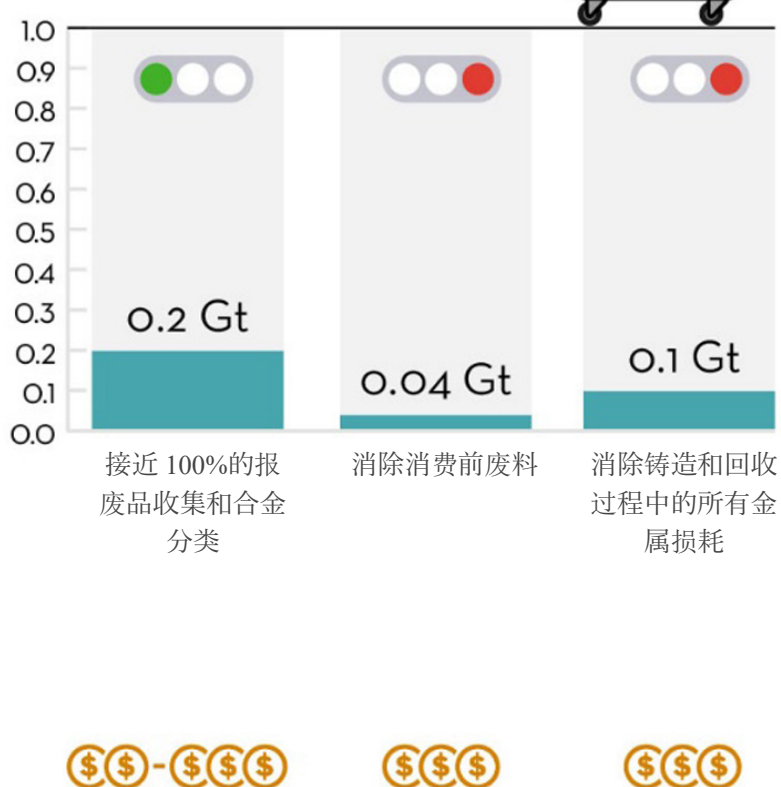


图 12 路径 3：循环利用和资源效率

建筑、施工和汽车板块的回收率高 (> 90%)。铝罐在一些地区的回收率几乎达 100%，但低回收率地区的金属消耗量大。2018 年，用过的饮料罐和其他硬性包装材料中有 120 万吨铝在报废时没有被收集。

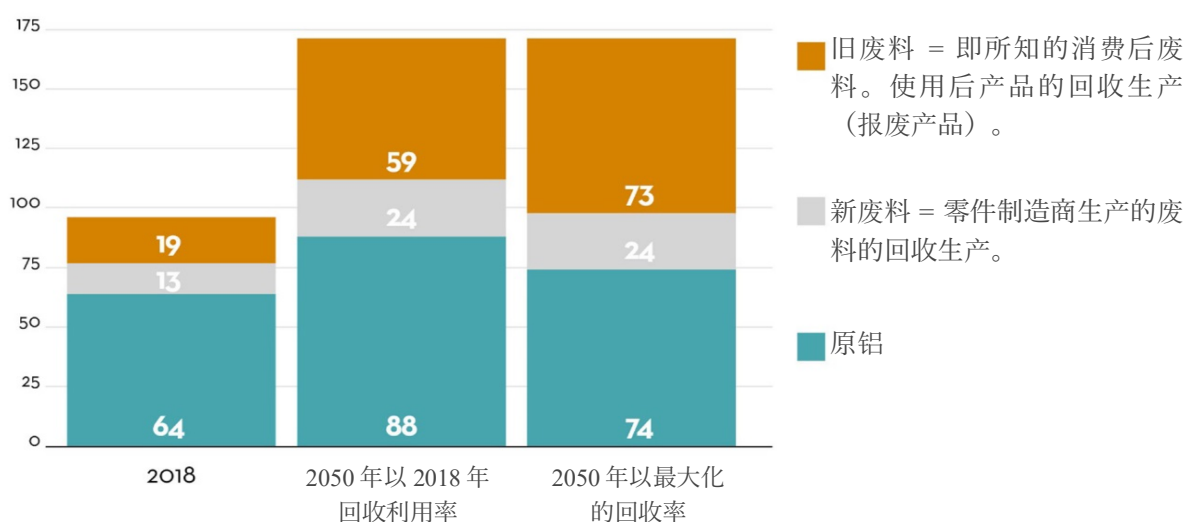
在所有细分市场中，由于在报废时的收集和加工损耗，每年约有 700 万吨铝没有被回收（2018 年），如果依照目前的回收率，到 2050 年这一数字将增加到每年 1700 万吨（IAI，2021a）。

如果在经济运行中没有回收该金属，则必须用原铝替代。如今，原铝生产的平均温室气体排放量是回收利用消费后废料导致的排放量的 25 倍。

通过改进收集、分类和回收工艺流程可以回收 95% 的原料，将使原铝需求减少 15%，每年减排 2.5 亿吨绝对二氧化碳当量，减排量仅次于冶炼厂的电力脱碳。

新废料和内部废料（在最终产品制造之前，各种生产和制造过程中产生的废料）的收集率非常高，收集后损耗也较低。这是因为这一收集过程往往是一个干净且分类良好的物料流，已经处于生产商的管理和控制之下。生产商了解其价值，并且对于他们来说物料损耗会影响盈利。因此，虽然目前（2018 年为 1300 万吨）和 2050 年（2400 万吨）产生的新废料量都很高，但损耗极低。

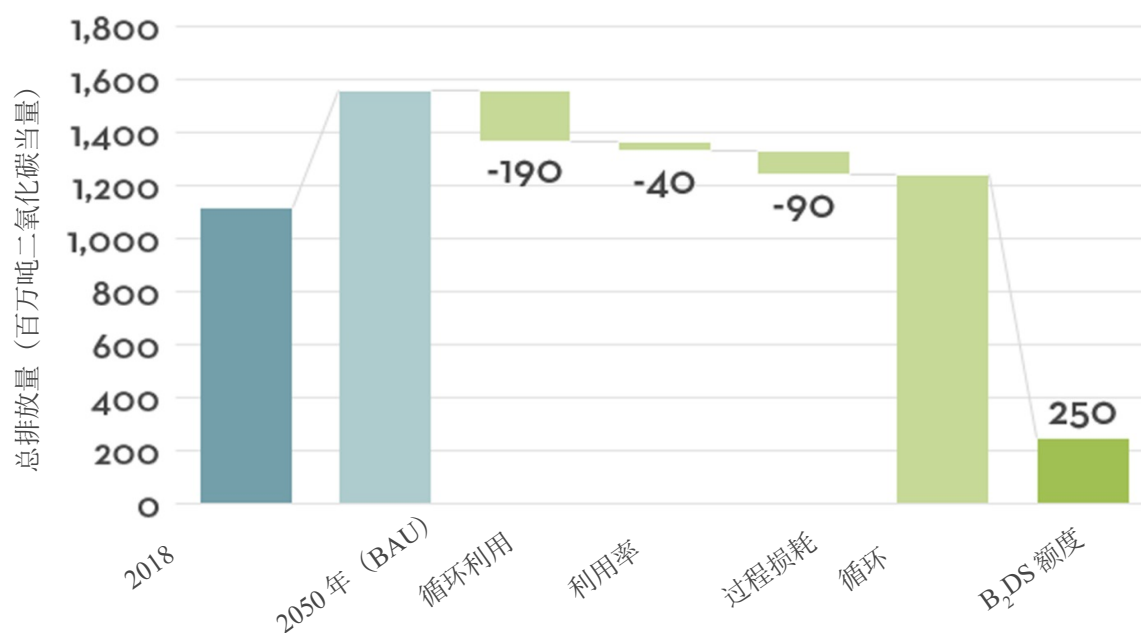
**铝半制成品供应量（百万吨/年）**



**图 13 2018 年和 2050 年原铝和回收铝的供应情况，  
（在替代回收利用率情境下）， 百万吨铝**

新废料和内部废料被重新熔化（通过热工艺）后产生二氧化碳，尽管与原铝生产相比其二氧化碳水平非常低（IAI，2020a）。通过一些未知工艺（如 3D 打印）减少新废料导致的排放量，虽然似乎有助于减少内部废料循环的数量，但对减排的影响有限（1.5%或 3800 万吨二氧化碳当量）。

没有（收集、加工和熔化）损耗以及不产生新废料和内部废料的全循环系统，将在 BAU 情境下使行业排放量减少 20%。



2050 年 (BAU)	2018 年回收利用率
回收	最大化的回收率
利用	新废料零生成量
过程损耗	零预熔和熔化损耗
循环	最大回收及资源效率潜力

图 14 回收及资源效率潜力的累积影响，百万吨二氧化碳当量

铝供应的这种转变需要价值链上包括消费者在内的所有参与者共同采取行动及制定激励循环的政策框架，包括投资废料回收能力和拆卸/回收设计以及研发新型金属/材料连接技术。

## 6. 要实现一个符合《巴黎协定》要求的铝业，需要什么？

作为一个向一些温室气体排放量最高的行业提供节能、减排、轻质、可回收产品的全球性综合产业，全价值链的减排举措对于铝业至关重要。这种生命周期方法要求，除了减少全球工业足迹外，铝产品的使用效益和回收收益要得到最大化。

当一个行业的排放量从 11 亿吨二氧化碳当量基准变为截至 2050 年的 2.5 亿吨二氧化碳当量，而其产量却增长高达 80% 时，就需要价值链上的所有参与者采取行动，包括技术提供商、政府和投资者。

生产商对标 B2DS 情境或 SDS 情境，实现本世纪中叶目标的承诺需要政策的支持和推动，这些政策将确保铝业长期获得有竞争力价格的可再生电力，并促进对电气化工艺、绿氢、惰性阳极以及 CCUS 技术（与同地协作行业合作）的研究、开发和部署增加投资。此外，促进废料收集改进（特别是包装工业）和废料合金分类（特别是在汽车工业）的循环经济政策对于确保铝的价值（及其初始生产阶段所需的主要能源）在产品寿命结束时不会损失至关重要。

在这一点上，客户在设计含铝产品时也将发挥作用，产品设计应能最大限度地回收并利用金属铝，废料产生时即可按照合金类别进行分类。

最后，至关重要的是，随着铝业的脱碳成本达到几万亿美元，2050 年实现低碳铝业的关键推动因素是投资：

- 提供高达 2500 万吨的新冶炼产能，并实现现有 6500 万吨产能的脱碳。
- 对满足冶炼厂需求的 1.8 亿吨氧化铝产能进行投资。
- 对新型无碳技术或 CCUS 技术进行投资，此类技术目前用于不到 1% 的铝产量，但截至 2050 年，需要用于 50% 以上的铝产量。
- 对价值链上的运营电气化以及为它们供电的可再生能源电网进行投资。
- 对在本世纪末全球实现所有行业净零排放至关重要的行业进行投资。

## 7. 参考文献

- 中国宏桥集团和中国铝业公司. (2021 年 1 月 15 日). 加速铝行业绿色低碳发展的联合提案. 检索日期: 2021 年 3 月 10 日, 检索网址: <http://en.hongqiaochina.com/details/750.html>
- IAI. (2018). 铝的故事. 检索日期: 2021 年 3 月 10 日, 检索网址: [www.theluminumstory.com](http://www.theluminumstory.com)
- IAI. (2020a, 7 月 21 日). 铝业的温室气体排放数据 (2005-2019). 检索日期: 2021 年 3 月 9 日, 摘自: 《世界铝业》 [https://www.world-aluminium.org/media/filer\\_public/2020/10/01/ghg\\_emissions\\_aluminium\\_sector\\_21\\_july\\_2020\\_read\\_only\\_25\\_september\\_2020.xlsx](https://www.world-aluminium.org/media/filer_public/2020/10/01/ghg_emissions_aluminium_sector_21_july_2020_read_only_25_september_2020.xlsx)
- IAI. (2020b, 10 月). 《铝回收概况介绍》. 检索日期: 2021 年 3 月 10 日, 摘自《世界铝业》: [https://www.world-aluminium.org/media/filer\\_public/2020/10/20/wa\\_factsheet\\_final.pdf](https://www.world-aluminium.org/media/filer_public/2020/10/20/wa_factsheet_final.pdf)
- IAI. (2020c, 8 月 5 日). 《原铝冶炼能量强度》. 检索日期: 2021 年 3 月 10 日, 摘自《世界铝业》: <https://www.world-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-smelting-energy-intensity/>
- IAI. (2020d, 7 月 8 日). 《原铝冶炼电力消耗》. 检索日期: 2021 年 3 月 10 日, 摘自《世界铝业》: <https://www.world-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-smelting-power-consumption/>
- IAI. (2020e, 6 月 22 日). 《冶金氧化铝精炼能量强度》. 检索日期: 2021 年 3 月 10 日, 摘自《世界铝业》: <https://www.world-aluminium.org/statistics/metallurgical-alumina-refining-energy-intensity/>
- IAI. (2021a). 2018 年全球铝周期. 检索日期: 2021 年 3 月 9 日, 摘自《全球铝循环》: <https://alucycle.world-alum.org/>
- IAI. (2021b, 2 月 22 日). 《原铝产量》. 检索日期: 2021 年 3 月 10 日, 摘自《世界铝业》: <https://www.world-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-production/>
- IEA. (2017). 《2017 年能源技术展望》. 巴黎: IEA. 检索日期: 2021 年 3 月 10 日, 检索网址: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2017>
- IEA. (2019). 《通过 CCUS 技术改造行业》. 巴黎. 检索日期: 2021 年 3 月 10 日, 检索网址: <https://www.iea.org/reports/transforming-industry-through-ccus>
- IEA. (2020). 《2020 年能源技术展望》. 巴黎: IEA. 检索日期: 2021 年 3 月 10 日, 网址: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>

阿联酋政府. (2017). 《2050 年能源战略》. 阿拉伯联合酋长国. 检索日期: 2021 年 3 月 10 日, 检索  
网址: <https://u.ae/en/about-the-uae/strategies-initiatives-and-awards/federal-governments-strategies-and-plans/uae-energy-strategy-2050>





国际铝业协会  
圣詹姆斯，杜克街 2 号  
伦敦  
SW1Y 6BN  
英国

+44 (0) 20 7930 0528

[world-aluminium.org](http://world-aluminium.org)