



2050 年铝业温室气体 减排路径

2021年3月

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%¹。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。

¹表示为二氧化碳当量——CO₂e（或二氧化碳（CO₂）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。

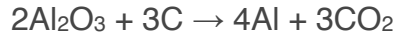
原铝生产是一种[能源密集型工艺](#)（IAI，2020c），需要大量的电力来打破进料化学品——氧化铝²的强氧键。铝的反应活性由其原子结构决定，也是其宝贵物理特性（如轻量化、高强度、耐久性和导电性）的来源，使其成为众多应用的首选材料。

[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%。

² 氧化铝是铝和氧的化合物，化学式为 Al₂O₃

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。

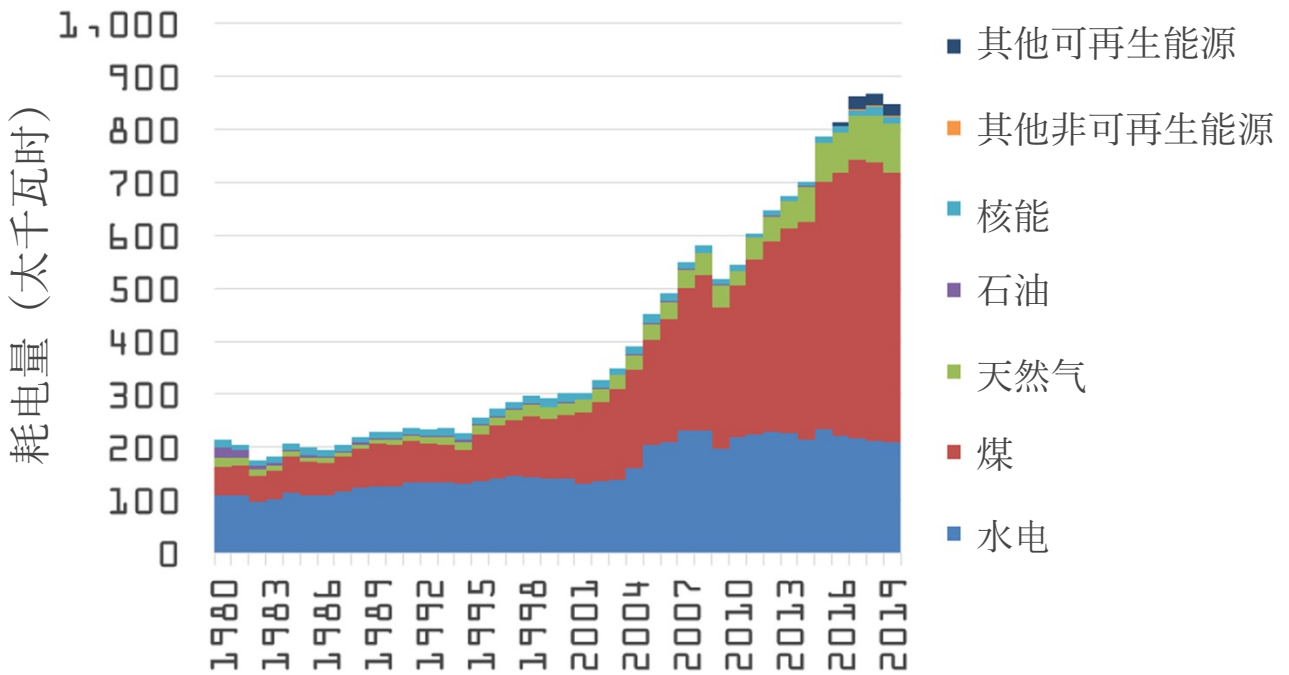


图2 全球用于原铝冶炼的电力组合，TWh (10 亿千瓦时)/年 (1980—2019)，(IAI, 2020d)

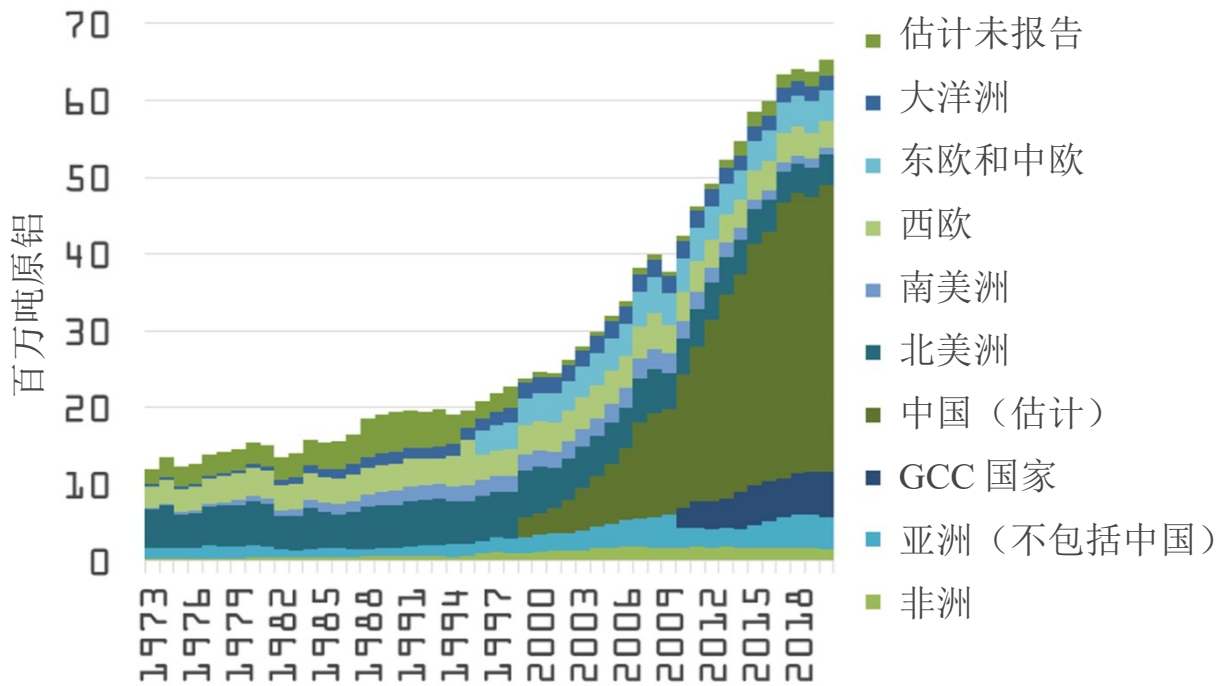


图3 全球原铝产量 (按地区分列)，百万吨铝/年 (1973—2019)，(IAI, 2021b)

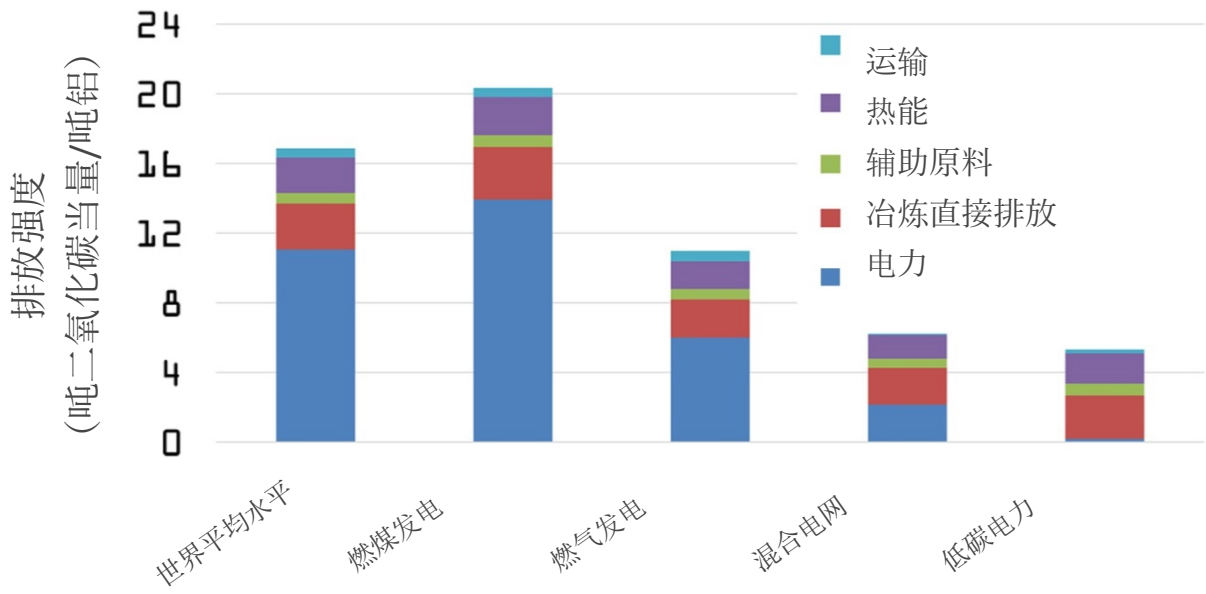


图4 2018年用于原铝生产的混合电力从摇篮到大门排放强度的世界平均水平以及示例，
_吨二氧化碳当量/吨铝

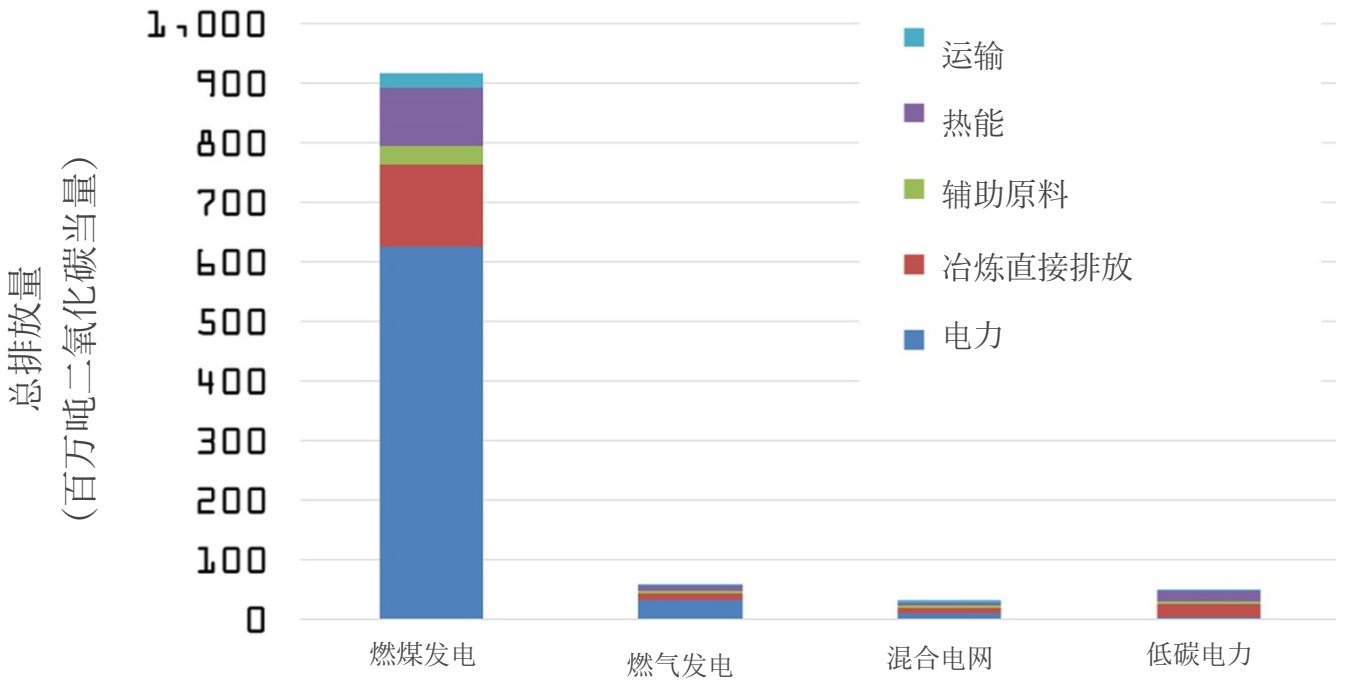


图5 2018年原铝生产从摇篮到大门的总排放量 (按能源分列), 百万吨二氧化碳当量

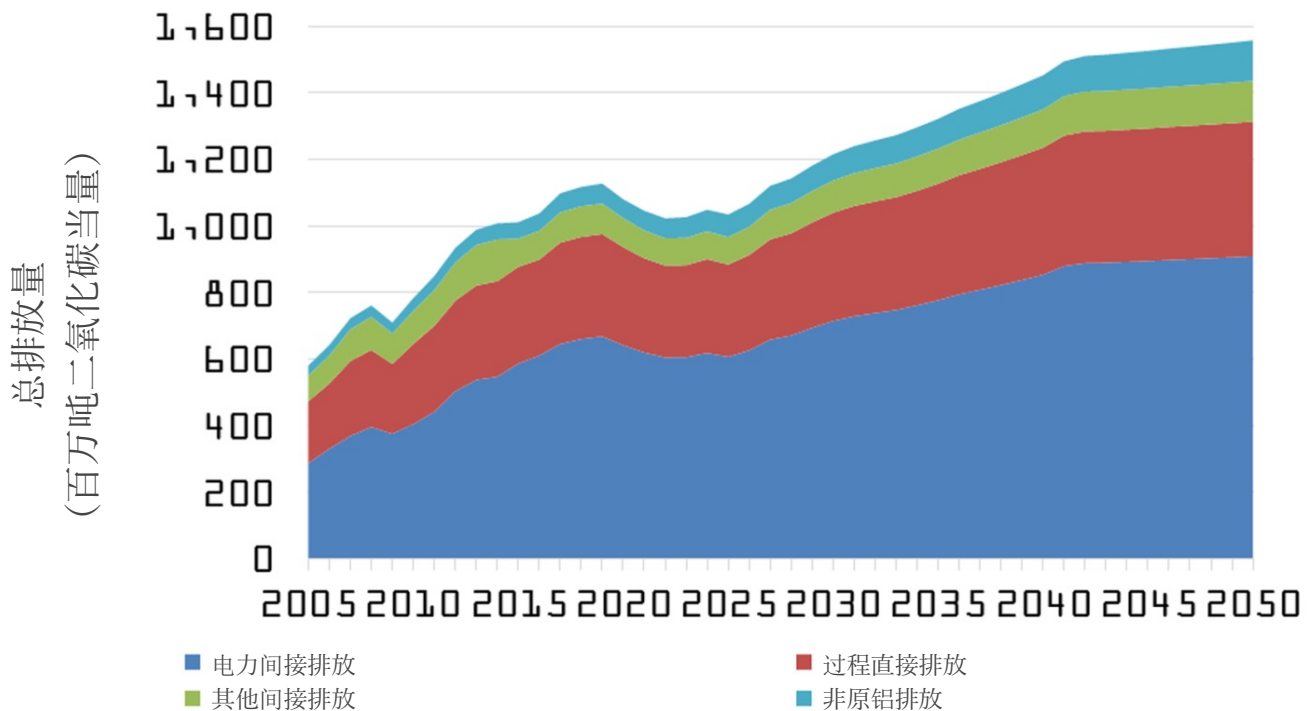


图6 全球铝业的历史排放量（2005—2018）和未来预计排放量（2019—2050）
（照常经营情境下），百万吨二氧化碳当量/年

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。

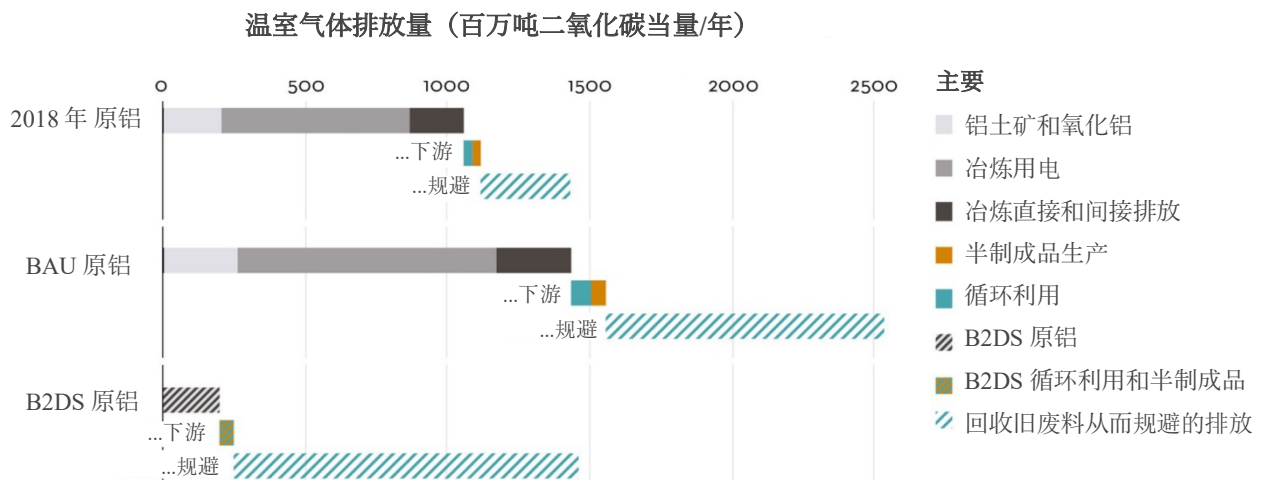


图 7 BAU 和 B2DS 情境下的 2018 年和 2050 年全行业排放量，百万吨二氧化碳当量

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：

$$\begin{aligned} & (\text{对标 B2DS 的 2050 年行业“额度”}) / (\text{2050 年铝半制成品需求}) \\ & (\text{百万吨二氧化碳当量}) / (\text{百万吨铝}) \\ & 250 / 170 \\ & = 1.5 \text{ 吨二氧化碳当量/吨铝半制成品} \end{aligned}$$

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：

$$\begin{aligned} & (\text{对标 B2DS 的 2050 年原铝排放“额度”}) / (\text{2050 年原铝需求}) \\ & (\text{百万吨二氧化碳当量}) / (\text{百万吨铝}) \\ & 200 / 80 \\ & = 2.5 \text{ 吨二氧化碳当量/吨原铝} \end{aligned}$$

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)

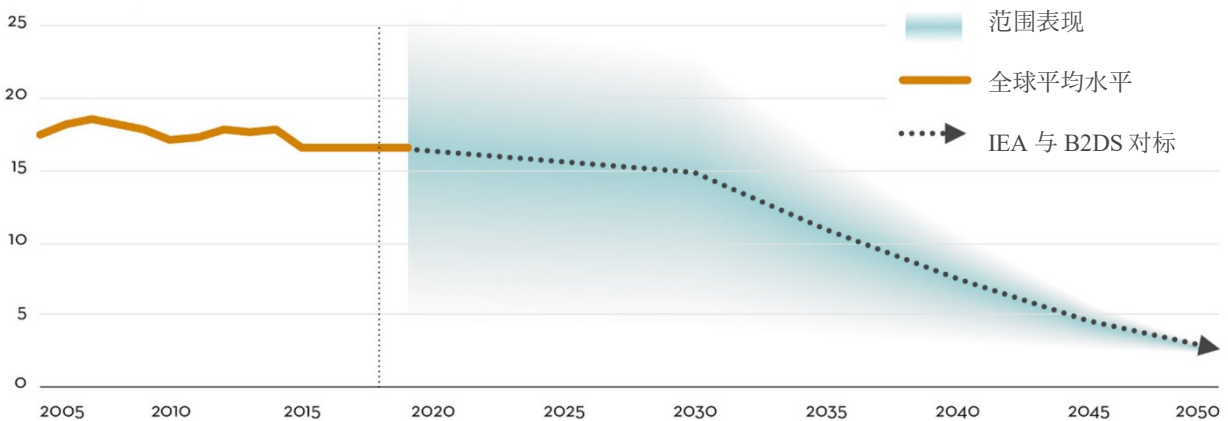


图 8 对标 B2DS 的 2050 年情境下的全球平均原铝碳足迹，吨二氧化碳当量/吨铝

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/438042074035006133>