



Honeywell

# 为可持续航空加油

可持续航空燃料和氢能航空燃料  
对技术、经济和环境的影响



## 航空业脱碳 | 霍尼韦尔观点 可持续航空燃料（SAF）和氢燃料的对比分析

每年，航空业产生的碳排放约占全球碳排放总量（大约 10 亿吨二氧化碳当量）的 3%<sup>1</sup>。为减少温室气体排放，政策制定者、政府、行业组织和监管机构积极制定规则和奖惩措施，以期通过政策“组合拳”推动行业进一步脱碳，其中大多数都将 2050 年设为实现碳排放强度（C.I.）大幅度降低的目标时间点。

航空业减少温室气体排放和降低运营总碳排放强度主要有三条途径：可持续航空燃料（SAF）、氢气和电气化。本文主要就 SAF 和氢气作商用航空的两种主要燃料来源进行分析。

在过去几十年中，霍尼韦尔已经助力将可持续航空燃料变为现实。2009 年，霍尼韦尔领导审批委员会<sup>2</sup>提交了将 HEFA-SPK（加氢处理的酯和脂肪酸—合成链烷烃煤油）作为航空涡轮燃料列入美国试验和材料协会（ASTM）标准《ASTM D7566 附件 2》的申请，并于 2011 年 7 月获批。随后，霍尼韦尔与美国国防部合作，就美国海军和空军使用 SAF 给予了证明。2012 年，AltAir Fuels 燃料公司安装了首个采用霍尼韦尔 UOP 技术的商业可再生喷气燃料生产装置；2016 年，美国联合航空公司成为第一家在定期航班上使用 SAF 的商业航空公司；2021 年 12 月，首架 100% 使用霍尼韦尔 UOP 的 Ecofining™ 工艺生产的 SAF 驱动的飞机由美国联合航空公司实现了历史性的首飞。

霍尼韦尔 UOP Ecofining™ 技术可以将 11 种生物基原料（如动物脂肪、废食用油、黄色油脂）转化为可再生柴油、可持续航空燃料和绿色石脑油。截至 2022 年，该技术已授权 32 次，目前已在 6 家工厂运行。霍尼韦尔认为，SAF 是全球航空业脱碳的优秀选择。

每年  
航空业**碳排放**  
约占全球碳排放总量的  
**3%**  
大约 **10** 亿吨  
二氧化碳当量

1 根据国际能源署航空排放数据

2 SPK 委员会 2011 年 7 月批准《ASTM D7566 附件 2》



# 目录

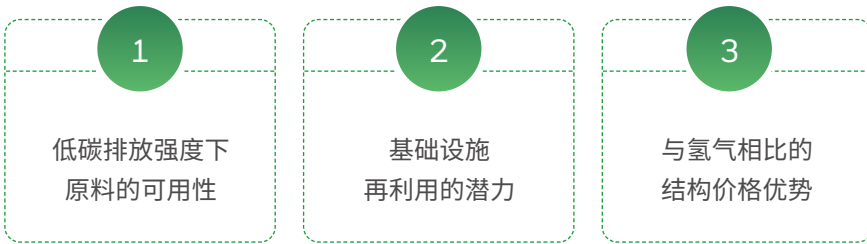
## 航空业脱碳 | 霍尼韦尔观点

可持续航空燃料 (SAF) 和氢燃料的对比分析.....	2
<b>摘要</b> .....	4
<b>可持续航空燃料</b> .....	5
1. 原料可用性 .....	5
2. 碳排放强度.....	6
3. 基础设施再利用.....	8
4. 对比氢气的结构价格优势.....	8
5. 航空旅行需求的非弹性特征.....	10
<b>氢燃料</b> .....	11
1. 氢气的能力优势.....	11
2. 体积能量密度障碍.....	11
3. 支持基础设施.....	11
4. 氢气、传统 Jet A 与 SAF 的碳排放强度对比 .....	12
<b>市场发展路标</b> .....	13
<b>霍尼韦尔— 推动航空运输的未来</b> .....	14
对可持续发展的承诺 .....	15



# 摘要

目前，通过加工脂肪、油和油脂（统称为“FOG”）生产的 SAF 已被视为一种成熟的生产路线，但预计原料供应量仅够满足 2030 年之前的需求<sup>3</sup>。2030 年以后，乙醇制航空燃料（ETJ）和生物质制液体燃料（BTL）等其他 SAF 路线将成为下一批能够满足 SAF 需求的可行原料，其原因主要在于三方面：



尽管氢气具备一些有吸引力的物理特性（例如：高比能、当配送网络成熟时具备极低生命周期排放潜力），但要实现商业化规模，还需要应对几个挑战：一是飞机燃料需要液态氢以满足操作和安全要求；二是液态氢的低体积能量与常规喷气燃料相比，需要约 4 倍的体积<sup>4</sup>；三是现有飞机和配套基础设施（如压缩、管道和储存）需要扩充；四是氢液化需要新的投资。此外，其他难以减排的行业（如钢铁和水泥制造业）对氢燃料的争夺也可能导致低 C.I. 氢（即低碳氢 / 蓝氢和可再生氢 / 绿氢）的市场价格上涨。可再生氢的可用性可能会受到电解槽调试速度和电网脱碳速度的限制，后者也会受到其他行业电动化步伐的影响，导致电力总需求增加。



<sup>3</sup> 根据霍尼韦尔内部市场分析和预测

<sup>4</sup> 根据美国能源部 | 氢储存 - 按体积计算数据



# 可持续航空燃料

## 1 原料可用性



美国每年能够以可持续的方式收集大约

**10** 亿千吨生物质

转化为

超过 **500** 亿加仑的低 C.I. 燃料

可减少碳排放

**80%~94%**

虽然 FOG 工艺从技术角度看已经成熟，但内部分析表明，其原料供应量仅能满足 2030 年之前的需求。为了让 SAF 作为航空脱碳载体被广泛应用，增加低 C.I. 的产量至关重要。在使用当前原料和当前农业工艺的情况下，要满足未来的 SAF 需求，需要将用地数量增加至原来的 2 倍。然而，随着农业实践的不断发展和利用糖或生物质作为原料的下一代生产路线的不断改进（例如 ETJ 和 BTL），未来对产量和降低 C.I. 方面的需求都可以得到解决。因此，满足 SAF 增量需求所需的额外用地预计将远少于第一代原料生产所需的用地。

糖和生物质原料都比 FOG 更丰富。根据美国能源部生物能源技术部门的一项研究，美国每年能够以可持续的方式收集大约 10 亿千吨的生物质，这些生物质可以转化为超过 500 亿加仑（约 1900 亿升）的低 C.I. 燃料<sup>5</sup>（可减少 80% ~ 94% 碳排放）。此类生物质资源包括木材加工废料、农业和林业残留物、专用能源作物、油籽和城市固体废物物流等。这些原料加在一起可以满足美国航空业和其他运输方式对普适性低碳燃料的燃料需求，同时还可用于生产高价值的生物产品和可再生化学品<sup>6</sup>。用于 SAF 生产的生物质作物可以在农闲季节种植，帮助农民赚取额外收入、减少土壤养分损失、改善土壤和水质，并有助于控制土壤侵蚀。

<sup>5</sup> 美国能源部生物能源技术办公室 SAF 生物质报告

<sup>6</sup> 美国能源部能源效率和可再生能源办公室，可持续航空燃料、生物能源技术办公室

前述生物质中的一部分已经转化为乙醇，用于美国国内燃料消费。美国种植的玉米大约有 40% 用于生产混合燃料中的乙醇（年产能超过 175 亿加仑，其中 11 亿加仑为过度生产<sup>7</sup>）。随着电动汽车的不断普及，还将有更多的乙醇通过乙醇制航空燃料（ETJ）工艺被转化为航空燃料。根据爱迪生电气研究所和国际能源署的数据，到 2030 年，电动汽车将占到美国公路轻型车辆总数的 10% 左右（约 2700 万辆<sup>8</sup>，当前为 130 万辆<sup>9</sup>）。此外，《企业平均燃油经济性标准》（CAFE 标准）对于车辆每加仑燃料必须行驶的里程数也有相关规定。该标准未来将提出更高的燃油效率要求，并将导致汽油需求的下降。假设减少 10% 的汽油需求，那么到 2030 年，每年将释放出约 16 亿加仑的原料产能用于生产航空燃料。

## 2 碳排放强度

SAF 的碳排放强度高度依赖于以下变量：生产路线（也称“转化”，包括传统石油精炼、HEFA、ATJ 酒精制喷气燃料、ETJ 乙醇制航空燃料）、原料类型（如玉米、甘蔗、棕榈、大豆）、农业实践和运输基础设施（如卡车、货船）。例如，在传统炼油厂中，使用原油制成 Jet A 航空燃油的 C.I. 约为 85~95 克 CO<sub>2</sub>e/MJ<sup>10</sup>。相对而言，ETJ 路线（注意：预计到 2050 年，ETJ 将占总供应组合的约 50%）生产的 SAF 的生命周期 C.I. 在约 24~78 克 CO<sub>2</sub>e/MJ<sup>11</sup> 的范围内。这一巨大差异可以归因于原料的选择：使用巴西甘蔗生产的 SAF 或通过加工林业残留物生产的 SAF，其全生命周期 C.I. 约为 24 克 CO<sub>2</sub>e/MJ，而使用美国玉米生产的 SAF 的生命周期 C.I. 约为 78 克 CO<sub>2</sub>e/MJ<sup>12</sup>。

尽管甘蔗和林业残留物生产路线具有相似的总生命周期 C.I. 值，但两者的 C.I. 在整个价值链上的分布却截然不同。例如，使用甘蔗作为 ETJ 原料时，约 80% 的排放主要来自上游活动（如农业、采集）和间接改变土地用途（ILUC）。与这些活动相关的排放量也被列入国际航空碳抵消和减排计划（CORSIA），称为“核心 LCA 值”（核心生命周期评估值）<sup>13</sup>。使用甘蔗生产 SAF，仅生产流程产生的 C.I. 占总 C.I. 的 15%，约 4 克 CO<sub>2</sub>e/MJ<sup>14</sup>。相对而言，使用林业残留物生产 SAF 时，80% 的 C.I. 来自生产流程，并且没有来自 ILUC 的 C.I.



原油制成

**Jet A 航空燃油**

C.I. 约为

**85~95 克**

CO<sub>2</sub>e/MJ

ETJ 路线生产的

**SAF** 的生命周期 C.I.

约 **24~78 克**

CO<sub>2</sub>e/MJ

7 美国能源信息管理局 | 生物燃料解释，乙醇中的数据

8 爱迪生电气研究所数据

9 IEA 发布 2022 全球电动汽车报告

10 2021 国际清洁能源理事会发布数据

11 美国阿贡国家实验室，迎宾航空模块 2022 年修订版数据

12 美国阿贡国家实验室 2022 年发布 GREET 模型数据

13 2021 国际清洁能源理事会发布数据

14 美国阿贡国家实验室 2022 年发布 GREET 模型数据



使用玉米原料的 ETJ 转换生产的 SAF，其生命周期 C.I. 大约为

**78** 克 CO<sub>2</sub>e/MJ

产生的温室气体  
比林业残留物

多出 **2 ~ 3** 倍

罚分。部分转换路线（例如基于芒草和柳枝稷等草本能源作物的路线）会产生负的 ILUC 分数。负 ILUC 分数会降低整体核心 LCA 值，从而使其成为温室气体排放强度较低的燃料。C.I. 范围值较高的一端是使用玉米原料的 ETJ 转换生产的 SAF，其生命周期 C.I. 大约为 78 克 CO<sub>2</sub>e/MJ<sup>15</sup>，产生的温室气体比林业残留物多出 2 ~ 3 倍。玉米乙醇生产的 C.I. 大约 45% 来自价值链的生产部分。与玉米相比，巴西的乙醇精炼厂能够通过燃烧甘蔗渣来获取能源，并通过使用更少的土地种植甘蔗来降低其生产 C.I.。然而，巴西甘蔗乙醇生产会造成雨林遭受砍伐以让位给更多的农田的后果。

通过费托合成途径生产的其他生物质衍生 SAF，其生产部分的 C.I. 范围为 6 ~ 36 克 CO<sub>2</sub>e/MJ<sup>16</sup>。林业残留物和城市固体废物的 C.I. 分别为 6 克 CO<sub>2</sub>e/MJ 和 14 克 CO<sub>2</sub>e/MJ，而柳枝稷的 C.I. 为 36 克 CO<sub>2</sub>e/MJ。改变土地用途（LUC）是柳枝稷 C.I. 值较高的主要原因，因为它需要在耕地上种植，会占用其他作物的土地，而林业残留物和城市固体废物是当前生产过程或商品消费所产生的废物<sup>17</sup>。

国际民用航空组织（ICAO）确定了符合 CORSIA 标准的燃料的 CORSIA 默认生命周期排放值。基于 CORSIA 默认生命周期排放值，飞机运营商可以宣称在给定年份使用了符合 CORSIA 标准的燃料而减少的排放量。另外，借助 CORSIA 框架，燃料生产商还可以计算 SAF 的实际生命周期排放值，以宣称生命周期排放值低于提供的默认值，前提是炼油厂可以用可量化的指标和支持性数据正确验证其工艺流程。计算实际值的详细方法详见 ICAO 文件“计算实际生命周期排放值的 CORSIA 方法”。计算和认证实际 C.I. 值的过程需要第三方认证机构的参与，整个过程可能需要 12 ~18 个月的时间。

15 美国阿贡国家实验室 2022 年发布 GREET 模型数据

16 美国阿贡国家实验室 2022 年发布 GREET 模型数据

17 美国阿贡国家实验室 2022 年发布 GREET 模块数据

### 3 基础设施再利用

与氢能燃料相比，SAF 的优势在于当下就能够获得合理的产出，且现有基础设施非常适合 SAF 燃料的运输和配送。鉴于飞机的使用寿命一般在 30 年以上，目前正在生产或交付的飞机可能到 2050 年之前都不会退役。SAF 作为一种普适性燃料，其应用几乎不需要对发动机进行任何改装，也 / 或不需要改变飞机内外的燃油储存方式。这对航空公司的日常运营几乎不会带来影响，也就意味着航空公司现在就可以开始实施脱碳。随着生产能力的提高和更先进工艺技术的应用，SAF 的部署范围可能更加广泛，价格可能进一步降低。

由于汽油需求下降，世界各地的炼油厂也在寻求如何重新充分利用现有设备进行生产转型，其中 SAF 和可再生柴油转型在经济上对炼油厂非常具有吸引力。这些资产已经完全资本化，并拥有向市场供货所需的必要基础设施。在作出最终投资决定后，炼油企业可以在两年内完成改造并重新利用这些资产，这为企业提供了大规模生产生物燃料并快速上市的解决方案。

例如，某个改造项目利用 Ecofining™ 技术，通过为期 18 个月的改造，把之前未被充分利用的传统化石燃料资产重新利用改造成为了产量超过 7000 BPD（桶 / 日）的生物燃料装置。

### 4 对比氢气的结构价格优势

低 C.I. 的氢的来源有两种：一是通过甲烷蒸汽重整工艺生产的低碳氢；二是可再生能源供电的电解生产的可再生氢。本文主要关注的是可再生氢。目前，可再生氢的主要成本构成包括低成本可再生电力（约占氢气总成本的 50%）、资本成本和固定成本加上工厂配套设施（约占氢气总成本的 30%）、电解槽组（约占氢气总成本的 10%）以及水处理和净化（约占氢气总成本的 10%）。尽管电力通常占可再生氢产品成本至少 50%，但在高电价和 / 或低资本成本的情况下，电力成本的占比可能超过 80%。

2020 年世界工业用电的平均生产成本为 103 美元 / 兆瓦时。如将配电成本包括在内，平均工业电价将攀升至 216 美元 / 兆瓦时<sup>18</sup>。如果可再生能源成本很低，假设是 10~ 30 美元 / 兆瓦时，则可再生氢的生产价格可能与航空燃料持平或更低。然而，美国国家可再生能源实验室（NREL）估计，到 2050 年，美国使用可再生能源组合预计将达到 80%，零售电价约为 50 美元 / 兆瓦时<sup>19</sup>。如果可再生能源的组合占比低于预期，那么通过在电网上部署碳捕集和

#### 低 C.I. 氢

来源有两种

- 通过甲烷蒸汽重整工艺生产的

#### 低碳氢

- 可再生能源供电的电解生产的

#### 可再生氢

<sup>18</sup> 阿贡国家实验室，能源系统和基础设施分析

<sup>19</sup> NREL 电力期货研究





封存（CCS）技术，仍有可能减少电力供应的 C.I.，但这会增加所供应电力的成本。

其他资金成本取决于所采用的电解槽技术类型。电解槽技术有四种类型：碱性（ALK）、质子交换膜（PEM）、阴离子交换膜（AEM）和固体氧化物电解槽（SOEC）。2021 年，ALK 技术占电解槽销售额的 69%，遥遥领先于 PEM。这是由于 ALK 电解槽进入商业化应用大约已有 70 年。然而，PEM 的普及率预计将随着性能的提高和成本的降低而增长。PEM 的成本下降速度比 ALK 更快，因为一是 PEM 具有更高的功率密度潜力，二是生产规模的快速扩大可能带来成本效益。所以预计到 2025 年，PEM 的市场份额将超过 ALK<sup>20</sup>。

假设电价为 20 ~ 40 美元 / 兆瓦时，则目前采用 ALK 技术的可再生氢的生产成本预计约为 3.3 美元 / 公斤。另外，预计在现有的 ALK 设备使用寿命结束后，会有更大规模的 PEM 和 AEM 电解槽将其取代，所以 ALK 可再生氢的生产不太可能反映未来的生产成本，而这才能代表未来的安装产能。

根据霍尼韦尔对 PEM 电解槽进行的技术经济分析，当电力成本为 30 美元 / 兆瓦时时，可再生氢的净生产成本约为 3.1 美元 / 千克。根据当前全球平均发电成本 103 美元 / 兆瓦时（不包括配电成本）进行相同的分析，可再生氢的净生产成本约为 7.0 美元 / 千克。预计随着 PEM 和 AEM 电解槽达到商业化规模，净生产成本也将随之下降。

可再生氢的各项成本（2020-2050 年）	
运输成本	约 0.7 美元 / 千克 <sup>21</sup>
储存成本	下降 25% 从约 0.4 美元 / 千克降至约 0.3 美元 / 千克
压缩成本	下降 60% 从约 0.5 美元 / 千克降至约 0.3 美元 / 千克
交付成本	降至约 8.3 美元 / 千克

· 来自氢气供应商的研究

考虑到氢气的比能量约为常规燃料的 2.8 倍，在不考虑燃料箱和冷却设备额外质量影响的情况下，交付喷气燃料的可变成本为 3.35 美元 / 千克<sup>22</sup>（包括生产 2.85 美元 / 千克和运输 0.50 美元 / 千克），比交付可再生氢的成本低约 1/2 到 2/3。

在美国，可再生氢的投资和生产税收抵免为 3 美元 / 千克，这一举措将持续到 2032 年，但目前仅有一小部分飞机可以利用氢气作为燃料。

20 H2 理事会相关数据

21 霍尼韦尔 UOP TEA 2022 年 10 月内部数据

22 国际航空运输协会，燃油价格监测数据 (iata.org)

## 5 航空旅行需求的非弹性特征

市场正在发生结构性变化。目前宏观经济逆风发展，地缘政治的紧张局势日益加剧，消费者或供应商行为发生变化，这些都极大地限制了航空出行，具体而言：

<p><b>1</b></p> <p>喷气燃料发生全球性短缺；通常每年四季度，欧洲的 Jet A 航空燃油的交易价格比美国要低</p>	<p><b>2</b></p> <p>俄乌冲突导致石油价格压力上升，而目前还看不到明显的冲突程度降低的前景</p>	<p><b>3</b></p> <p>持证飞行员短缺，导致航班数减少和票价上涨；由于飞行员认证过程大约需要 3 年时间，因此短期内（18~24 个月）无法解决人员短缺问题<sup>23</sup></p>	<p><b>4</b></p> <p>更多资深飞行员正在调整工作时间以平衡工作与生活</p>
---	---	--	--

从历史上看，高航空燃油价格并不会导致乘客总数的显著下降，尽管在高价格时期，乘客出行的增长率趋于平缓<sup>24</sup>。平均机票价格通常会逐年下降，因为航空公司会通过各种方式来提高运营效率，比如购买更新、更高效的飞机；将机队运营标准化以降低维护、维修和大修（MRO）成本；以及对附加服务或优质服务，如：座位选择、托运行李、优质食品和饮料等收取额外费用。在过去，较高的燃料成本将抵消一部分前述效率收益，并导致乘客票价上涨，但当前旅行者的支付意愿相当高。被疫情抑制的航空旅行和度假需求正在复苏。根据最近一项面向潜在美国旅行者的调查，约 67%<sup>25</sup> 的受访者表示，他们希望和疫情大流行前一样或更多的旅行。

假设燃油成本占票价约 30%，平均票价为每位乘客约 370 美元<sup>26</sup>，则每位乘客的燃油相关成本为每个航班约 110 美元，每位乘客需承担约 33 加仑的燃油成本。如果 Jet A 航空燃油的价格翻一番，则每位乘客的燃油成本也会翻一番，从约 110 美元增加到约 220 美元。这直接意味着平均票价将从 370 美元提高到 480 美元，提升 30%。历史上，平均票价也曾经接近过 480 美元，最近一次是在 2014 年，当时的平均票价为 477 美元。因此，大多数乘客很可能能够承受 20%~25% 的上涨幅度（即每张机票的平均票价约 440~460 美元），客运量不会因为价格上浮而大幅减少。

实事求是地讲，政府不会永久性地为生产商提供补贴。尽管目前尚不清楚 SAF 是否会与 Jet A 达成确切的比价，但随着 SAF 市场的成熟和规模的扩大，新途径的生产成本将下降。此外，鉴于航空旅行需求的相对非弹性特征以及新型飞机效率的不断提升，航空公司可以在不大幅改变需求的情况下，降低总体油耗，同时将较高的净燃油成本转嫁给乘客。



如果 Jet A 航空燃油的价格

**翻一番**

平均票价将从

**370** 美元

提高到 **480** 美元

提升 **30%**

23 国际航空运输协会，燃油价格监测数据 (iata.org)

24 美国 IEA 世界航空客运量演变分析

25 晨间咨询 | 跟踪恢复正常：旅行分析

26 晨间咨询 | 跟踪恢复正常：旅行分析



# 氢燃料



## 1 氢气的能力优势

同化石 / 生物质燃料相比，氢燃料具有两个明显的优势。首先氢气燃烧时不含二氧化碳，如果通过可再生能源生产，其整个生命周期产生的 C.I. 会非常低。其次氢气具有非常高的比能量，这意味着从化石 / 生物质燃料中获得同等能量输出所需的质量更少。随着更严格的排放要求的实施，如果不购买额外的碳补偿额度或与成本更高的生产方法，例如电转液混合，原本一些 SAF 生产路线将缺乏竞争力。

### 氢气

- 燃烧时不含 CO<sub>2</sub>
- 高比能量
- 能量密度低

## 2 体积能量密度障碍

尽管与常规航空燃料（43 兆焦耳 / 公斤）相比，氢气具有极高的比能量（120 兆焦耳 / 公斤），但它是一种非常小的分子，因此能量密度较差，仅为 8.5 兆焦耳 / 升（低温液氢），而航空燃料能量密度约为 34 兆焦耳 / 升。因此，与传统的航空燃料相比，飞机需要携带约 4 倍体积的液氢，这也会对飞机的燃料加注时间产生负面影响。此外，冷却设备和储存容器也会增加额外的质量，会抵消掉较高比能量带来的一部分性能增益。

## 3 支持基础设施

每年的航空燃料消耗量约为 840 亿加仑<sup>27</sup>，换算成产量大约为每小时 2.9 万吨（kt/hr）。与航空燃料相比，每千克氢气的能量约为前者的 2.8 倍。假设由效率为 85% 的电解槽以 33 千瓦时 / 公斤的速度生产可再生氢，那么在不考虑氢气在其他行业的其他用途的情况下，所需的最低电解槽运行容量为 400 吉瓦。

27 国际航空运输协会发布数据

考虑到太阳能和风能的平均容量系数分别为 25%<sup>28</sup> 和 40%<sup>29</sup>，这将需要 50 亿个太阳能电池板（假设每个电池板装机容量为 320 瓦）或大约 33.4 万个风力涡轮机（假设每个涡轮机装机容量为 3 兆瓦<sup>30</sup>）。尽管可再生能源基础设施的部署正在加快，但国际能源署估计，太阳能和风力发电装机容量的建设规模需要扩大 2~3 倍，才能满足“2050 年净零排放”目标要求<sup>31</sup>。

## 4 氢气、传统 Jet A 与 SAF 的碳排放强度对比

传统 Jet A 产生的 C.I. 为 85~95 克 CO<sub>2</sub>e /MJ。基于原料路线和运输方法，氢气作为喷气燃料的全生命周期 C.I. 范围为 5.1~18 克 CO<sub>2</sub>e /MJ。传统 Jet A 和 SAF 可利用现有基础设施和配送网络，通过海运船只、管道和公路卡车进行大批量运输。大型机场可通过本地管道从本地储罐配送喷气燃料。因此，Jet A 和 SAF 每吨产品配送的 C.I. 相对较少。

与 SAF 类似，氢气的 C.I. 因原料、储存状态（液态与气态的对比）以及所用运输方式的类型而异。氢气传统上是通过甲烷蒸汽重整工艺（SMR）生产的，一座现代 SMR 工厂生产每千克氢气产生的排放量在 9~11 千克二氧化碳当量之间<sup>32</sup>。这种氢气通常被称为“灰氢”。将常规碳捕集和封存设施添加到 SMR 工厂（以生产低碳氢，也称“蓝氢”）可以将 C.I. 降低到每千克氢气 1.5~5 千克二氧化碳当量，具体数值取决于碳捕集量。使用可再生能源电解水而产生的可再生氢（也称“绿氢”）的 C.I. 约为 0.45 克 CO<sub>2</sub>e /MJ。

然而，与传统航空燃料或 SAF 相比，由于氢气用作航空燃料时，需要为冷却和液化、蒸发和运输的多个步骤提供的额外电力，其 C.I. 会显著增加。用于制备可再生氢的电解过程以及运输和储存的压缩需求都极为耗能；使用氢气作为燃料的燃料电池汽车（FCV）每行驶一英里消耗的能量比柴油车高出 40%~55%<sup>33</sup>。为限制因蒸发而造成的产品损耗，在氢气的运输和储存过程中还可能需要额外的压缩和液化。在氢气运输、储存和输送基础设施成熟之前，运输氢气的 C.I. 可能会高于传统 SAF。

从使用常规航空燃料转为使用 SAF 或氢气，有可能显著减少飞行中的温室气体排放和其他相关排放（例如氮氧化物、水蒸气和凝结尾迹）。例如，SAF 和氢气可以将凝结尾迹的排放相关影响降低约 40%~80%<sup>34</sup>。使用 SAF 导致的大气中水蒸气体积增量很小，而使用氢气有可能显著增加释放到地球大气中的水蒸气量。

### 灰氢

一座现代 SMR 工厂生产每千克氢气产生的排放量在

**9~11** 千克

二氧化碳当量之间

### 蓝氢

每千克氢气的 C.I.

降低到 **1.5~5** 千克

二氧化碳当量

### 绿氢

可再生氢的 C.I.

约为 **0.45** 克 CO<sub>2</sub>e/MJ

28 美国能源信息署，EIA，独立统计和分析

29 陆基风电市场报告：2021 版

30 美国能源部 | 能源效率与可再生能源办公室发布数据

31 美国 IEA，可再生电力分析

32 蒙纳士透镜 | “绿色”与“蓝色”氢，以及“颜色”的徒劳中研究数据 (monash.edu)

33 加利福尼亚州尔湾的运输燃料咨询公司发布数据，Stillwater Associates

34 GREET Modul





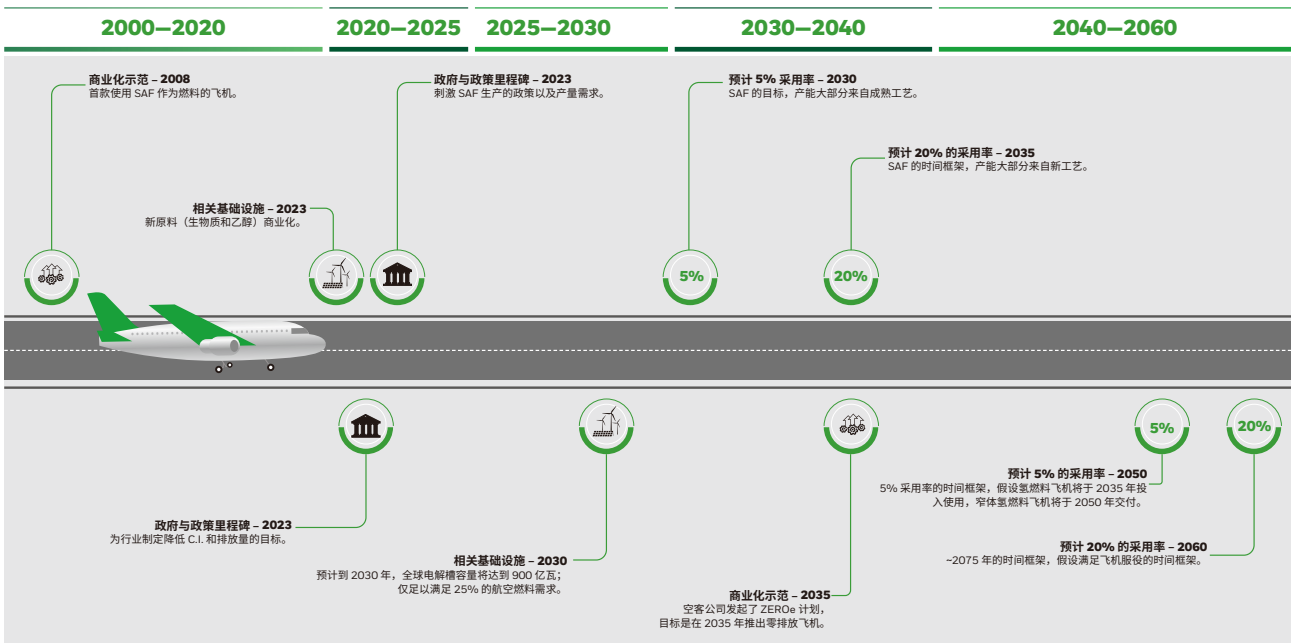
# 市场发展路标

有几个里程碑可用于评估采用 SAF 和可再生氢的可能性：政策杠杆和激励措施、示范和商业化、支持性基础设施的投资，以及现有解决方案采用量的增加。

政府、监管机构和行业机构已经为航空业脱碳制定了初步目标，目标指出要在 2050 年实现“净零排放”。随着脱碳目标和合规要求的增加，预计对低 C.I. 燃料的需求也将大幅增加。虽然可能需要额外的激励措施来吸引更多早期投资，但欧盟和美国的相关政策和监管杠杆已经到位并可推动这些要求。

目前，SAF 仅占航空燃料消耗量的一小部分，但是美国和欧盟设定的政策，预计 2030 年达到占比的 5%。随着其他原料途径（如 ETJ 和 BTL）的不断扩大，我们预计到 2030 年代中期，SAF 将占据航空燃料市场大约 20% 的份额。

尽管可再生氢的 C.I. 极具吸引力，但还不足以满足上市数量所需规模的基础设施。目前，仅有约 100 吉瓦的电解槽容量预计将在 2030 年初投入使用。配套基础设施，包括可再生电力、管道等缺乏也是一个问题。氢气要取代 SAF 作为航空燃料，也需要对应氢能源的机身达到一定数量。运营商和航空公司之间必须签署承购协议，以留出足够的时间投资对应的基础设施。





# 霍尼韦尔 ——推动航空运输的未来

110 多年来，霍尼韦尔人一直在寻找使飞行更安全、更舒适、更高效的方法。我们最新任务是通过创新解决方案帮助全球航空业减小其环境足迹，借助这些解决方案提高燃油效率、减少二氧化碳排放，并通过改变游戏规则的技术突破来推动新的边界。

在帮助航空业减少对传统燃料的依赖和使用更可持续的航空燃料（SAF）方面，霍尼韦尔均取得了不俗的进展。

作为公务机和直升机推进发动机以及各种固定翼飞机 APU（辅助动力装置）的领先制造商，我们正在确保自身的燃气轮机能够使用 SAF 高效运行。我们已经通过认证，可以使用 SAF 最高占比 50% 的混合燃料运行，并且正在就使用 100% SAF 开展测试。2023 年 1 月，我们已经完成对霍尼韦尔 APU 使用 100% SAF 进行首次飞行的测试。预计在未来五到十年里，将有数以千计的飞机利用我们的这一优势，采用 100% SAF 运行霍尼韦尔 APU 和发动机。我们估计，采用 100% SAF 运行发动机能够将霍尼韦尔产品的温室气体排放量减少 60% ~ 80%<sup>35</sup>。



未来 **5~10** 年

估计采用 100% SAF 运行的发动机将使霍尼韦尔产品的温室气体排放量减少

**60% ~ 80%**

35 霍尼韦尔可持续航空燃料 (honeywell.com)



## 对可持续发展的承诺



航空业是第一个设定了减少环境影响目标的工业部门，该行业承诺到 2050 年将温室气体排放量减少一半（以 2005 年为基准<sup>36</sup>）。霍尼韦尔很高兴与客户、合作伙伴和供应商携手合作，帮助行业实现这一宏伟目标。

可持续性深深植根于霍尼韦尔的企业文化，例如我们宣布到 2035 年实现碳中和的承诺。这也符合我们的使命要求，其中包括提供创新的产品、服务和软件解决方案，以帮助我们的客户实现自身的可持续发展目标。

作为霍尼韦尔人，我们为自己所取得的成就感到无比自豪。但我们从不固步自封。在世界各地，数千名霍尼韦尔员工致力于利用专业和领域知识满足客户的需求、提高生活质量，保护我们的地球。

36 ATAG 航空运输行动小组



## 关于我们

霍尼韦尔（中国）有限公司可持续发展研究院隶属于霍尼韦尔特性材料和技术集团，前身为 2018 年成立的霍尼韦尔（中国）有限公司环境保护研究院。升级后的研究院融合了该业务集团的创新力量和专家，涵盖了研发、技术、市场、产品等各个领域。可持续发展研究院低碳中心（以下简称“低碳中心”）成立于 2021 年 8 月，专注于研究低碳技术发展和市场需求，以霍尼韦尔创新的产品和技术为引擎，推动低碳解决方案在中国市场的开拓和实施，助力客户可持续发展以及中国“碳达峰”和“碳中和”目标的实现。低碳中心继发布第一本《炼化行业低碳发展》白皮书后，在成立一周年之际，又发布了《以绿色技术促进可持续发展——霍尼韦尔 2022 低碳发展》绿皮书以及《氢能工业与应用发展》白皮书。本月早些时候，我们发布了《顺应多变未来，引领低碳方向——环境友好型氢氟烯烃（HFOs）的前沿应用》白皮书。本次发布的《为可持续航空加油——可持续航空燃料和氢能航空燃料对技术、经济和环境的影响》白皮书是研究院发布的第一本关于航空可持续燃料的白皮书。后续还将有更多的研究洞见与大众见面。

霍尼韦尔特性材料和技术业务集团是全球领先的特性材料、工艺技术和自动化方案供应商。集团下属霍尼韦尔 UOP 拥有超过 4900 个专利和应用，并且全球广泛使用的 36 种炼油工艺中的 31 种是霍尼韦尔 UOP 的发明。集团下属过程控制部则是分布式控制系统（DCS）的发明者，引领工业自动化行业长达半个世纪之久，其技术应用于全球超过 15000 家生产基地，覆盖超过 125 个国家和地区。集团下属高性能材料部专业生产多样的高性能产品，包括环境友好型制冷剂、发泡剂和气雾剂。集团旗下智慧能源与热能解决方案部拥有面向多行业的综合燃烧控制方案，可满足全球客户对更加清洁、精准和高效的热量传输的需求。

### 编辑委员会

感谢参与撰写《为可持续航空加油——可持续航空燃料和氢能航空燃料对技术、经济和环境的影响》白皮书的各位编者：

COPPERTHITE, AMANDA; OWENS, BEN; NORMAN, BYRNE;



# Honeywell

霍尼韦尔(中国)有限公司  
可持续发展研究院

地址:上海环科路555弄1号楼 邮编:201203  
电话:400-842-8487  
网址:[www.honeywell.com.cn](http://www.honeywell.com.cn)



联系我们