



Federal Ministry
for Economic Affairs
and Climate Action



中德能源与能效合作
Energiepartnerschaft
DEUTSCHLAND - CHINA

德国工业脱碳路径简析及其对中国的借鉴意义

中德能源转型研究项目



dena
German Energy Agency

giz
Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

版本信息

《德国工业脱碳路径简要分析及其在中国的应用》报告介绍了钢铁、化工、水泥、制浆造纸和铝行业的未来技术选择以及跨部门技术，着重介绍了工业脱碳的不同政策工具。该报告在中德能源转型研究项目框架内发布，项目受德国联邦经济和气候保护部(BMWK)委托，在中国国家能源局(NEA)的支持下，致力于在中德两国在低碳能源政策的深入交流合作。作为中德能源与能效合作伙伴的一部分，项目结合德国能源转型的优秀实践经验及遇到的问题与挑战，为中国能源领域的政治决策者和能源政策研究相关的智库提供政策领域的参考建议。德国国际合作机构(GIZ)、德国智库 Agora 能源转型论坛和德国能源署(dena)受 BMWK 委托，与中方相关合作伙伴共同实施该项目。作为一家德国联邦企业，德国国际合作机构为德国政府实现可持续发展国际合作目标提供相应支持

发布方

中德能源与能效合作伙伴
受德国联邦经济和气候保护部(BMWK)的委托
北京市朝阳区亮马河南街14号
塔园外交办公大楼1-15, 邮编100600

德国国际合作机构(GIZ)

Torsten Fritsche
Köthener Str.2
Berlin 10963

项目管理:

Christoph Both

德国国际合作机构(GIZ)

作者:

Martin Albicker, Leon Flöer, Percy Schulze-Buschhoff,
Lisa Strippchen, 德国能源署(dena)

设计

edelman.ergo (受德国联邦经济与气候保护部委托)

图片:

德国联邦经济和气候保护部/封面

© 北京, 2023年1月

本报告全文受版权保护。截至本研究报告发布前，德国国际合作机构和相关作者对出版物中所涉及的数据和信息进行了仔细研究与核对，但并不对其中所涉及内容及评论的正确性和完整性做任何形式的保证。本出版物中涉及到的外部网站发行方将对其网站相关内容负责，德国国际合作机构不对其内容承担任何责任。本文件中的观点陈述不代表委托方的意见。对于图例是否最新、正确或者完整，以及由其使用造成的任何直接或间接损害，德国国际合作机构概不承担任何责任。

目录

1.	执行摘要	4
2.	综述	5
2.1.	气候目标	5
2.2.	工业能耗和排放	6
2.3.	部门目标以及关键措施	6
2.4.	相关能源立法	7
2.5.	中国工业的能源消费现状和趋势	7
3.	德国工业的能源转型	9
3.1.	工业能源转型的关键要素	9
3.2.	能源效率	9
3.3.	可再生能源发电量	10
3.4.	氢	10
3.5.	挑战	11
3.6.	附记：碳捕集与利用/封存	11
3.7.	附记：欧洲天然气和能源危机的影响	12
4.	工业中最重要的能源转型技术概述	14
4.1.	水泥行业	14
4.2.	钢铁行业	14
4.3.	化工	15
4.4.	制浆造纸行业	15
4.5.	玻璃行业	15
4.6.	有色金属行业	16
4.7.	高效的跨部门技术	16
5.	政策建议与结论	25
	参考文献	29

1. 执行摘要

1. 德国设定了远大的气候保护目标，要求打破“常规”的发展路径。

在工业排放问题裹足不前逾二十年后，德国设立了一项在 2030 年之前减少三分之一工业排放量的法律义务。德国要求必须在 2045 年之前，实现净温室气体（GHS）中和目标。

2. 为实现这些气候保护目标，德国工业必须做出快速且深远的变革。

未来，德国工业的主要能源是电力，不论直接的或间接的（实质上是通过氢衍生物）能源。水泥行业以及部分需要高温（>500°C）供热的工艺不可能实现直接电气化，因此需要使用温室气体中和的燃料。此外，在钢铁行业和化工行业，必须使用氢能和可持续碳源取代化石燃料。具体的落实需要依赖新的技术。

3. 中德两国钢铁、化工和水泥行业的转型取决于能全面减少过程及能源相关排放的新技术。

在钢铁行业，要实现初级钢生产的温室气体中和，就必须取代作为还原剂的煤炭。若新建钢厂在设计时就考虑以氢作为还原剂，则可减少大多数过程相关排放。此外，通过新的工艺设计，可以实现在电弧炉中使用可再生能源电力。这些措施的叠加，将实现初次炼钢工艺的脱碳。在水泥行业，必须使用二氧化碳捕集技术实现工艺排放的中和。在化工行业，使用碳作为原材料目前主要取决于天然气、石油以及在中国使用的煤炭。为了实现温室气体的净零排放，必须使用具有可持续性的碳源（生物质、源自直接空气捕集（DAC）的二氧化碳和富碳废弃物）取代煤碳需求。要使用新的碳源，就必须使用热解/气化、甲醇-烯烃/芳香剂和费托合成等其他技术。

4. 要实现工业脱碳，工艺用热的电气化是一项至关重要的跨部门技术。

每一行业部门都必须实现工艺用热的脱碳。能效最佳的选择是使用热泵和电极式锅炉进行 100°C~500°C 的供热。这些技术促成了直接的电气化，如果结合需求侧管理（DSM）措施，就具有了能对电网电力产量做出响应、减少成本和排放的优势。

技术的部署必须与可再生能源及电网的发展相辅相成，且必须协调各个方面的利益相关者。

5. 要实现转型，就必须综合利用监管和市场化措施，其中二氧化碳价格可能是一种能够发挥关键作用的工具。

要实现工业脱碳，就必须在最重要的部门引进新技术，此过程需要巨大的投资成本，某些情况下，还需要巨大的运营成本。二氧化碳价格在推广可持续技术方面发挥着关键作用，因为它可将传统技术挤出市场。德国工业即将迎来一个再投资周期，而与此同时，所有活动又必须符合德国的气候保护目标，因此必须通过额外的工具让“绿色”生产方法具备与传统技术一较高下的能力，从而促成对“绿色”生产方法的投资。尤其是，可以通过绿色先导市场和碳差价合同（CCfDs）实现此目的。

除了市场化工具以外，还应该在废热利用、循环经济及高能效技术的使用等领域推行激励措施，以减少工业部门的能源需求。尤其建议在推行激励措施的同时，就技术的使用提出监管要求，甚至是禁止某些产品组别，例如激励超高能效技术或者针对特定“绿色”或者二级材料的使用推行配额制。

2. 综述

德国能源转型的目标是在一代人的时间内，让整个能源系统从化石燃料和核燃料转向气候中和的能源载体。必须通过根本性的转变才能实现工业部门（占德国 20% 以上的二氧化碳排放量）的这些远大目标。短期内，只有通过提高能源效率，才能为工业部门的脱碳¹做出巨大贡献；长期来看，通过大规模的工艺切换以及改用可再生能源，将对二氧化碳减排产生巨大影响。

2.1. 气候目标

德国气候保护政策的指导原则和基准是《联合国气候变化框架公约》（UNFCCC）（United Nations, 1992）、《京都议定书》（1997）（United Nations, 1998）和《巴黎协定》（2015）（UNFCCC, 2015）。批准了《京都议定书》之后，欧盟（EU）承诺在 1990 年的基础上，到 2020 年温室气体（GHG）减排 20%。在后续的《巴黎协定》中，签署国同意采取必要的措施将全球平均气温较前工业化时期上升幅度控制在 2 摄氏度以内，并努力将温度上升幅度限制在 1.5 摄氏度以内。

2019 年欧盟绿色新政设定了快速减排的远大气候目标：2030 年将净排放量在 1990 年基础上减少 55%，到 2050 年实现全面的碳中和²（European Commission, 2019）。

2019 年，德国政府通过了《联邦气候保护法》（Bundes-Klimaschutzgesetz），设定了第一批具有法律约束力的气候保护目标。此项法律的宗旨是确保实现国家气候保护目标。因此，《气候保护法》及其他能源政策是基于三大支柱：供应安全、经济效率和气候保护。具体来说，它旨在通过改进能源效率、提高可再生

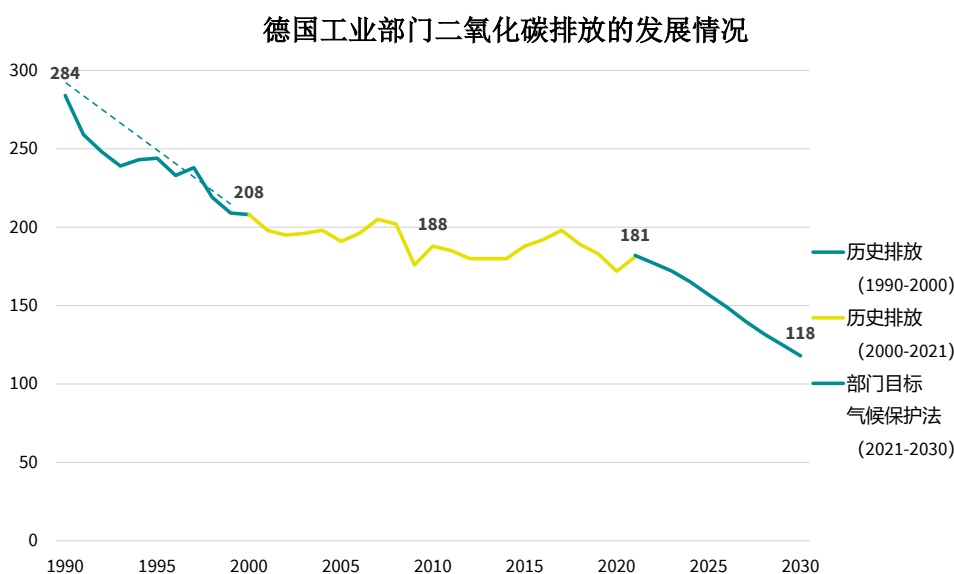


图 1 工业部门的历史排放以及 2030 年之前的部门目标 (UBA, 2022b)

¹脱碳的定义：彻底消除碳基能源的使用(dena, 2021)。

²气候中和的定义：“人类活动对气候系统没有净影响的状态的概念。要实现这种状态，需要利用排放（二氧化碳）移除来平衡残余

排放以及考虑人类活动的区域或局地生物地球物理效应，例如人类活动可影响地表反照率或局地气候（政府间气候变化专门委员会，2018）。

能源使用率以及推动部门耦合，淘汰核电和煤炭，并最终淘汰所有化石燃料。

经修订的 2021 年《联邦气候保护法》提出了与欧盟远大目标接轨的减排目标。该法律要求到 2030 年将总排放量在 1990 年基础上减少 65%，到 2045 年实现气候中和。此外，它针对建筑、交通、工业和农业部门以及土地利用、土地利用变化和林业（LULUCF）部门设定了 2020 和 2030 年的一类温室气体减排目标，即具有约束力的可允许排放水平。德国针对除能源部门以外的所有部门，都设定了具体年份目标。若未实现目标，将被采取相应的措施。

一类排放指的是源自组织拥有或控制来源的直接温室气体排放（例如与熔炉或车辆内燃料燃烧相关的排放或者拥有或控制的工艺设备的生产排放）。二类排放指的是组织购买及消费的电力在发电过程中产生的间接温室气体排放。排放发生在发电设施内（World Resource Institute, 2004）³。

2.2. 工业能耗和排放

2018 年，工业部门的能耗为 722 太瓦时，占德国最终能源需求的 38% 左右。因为效率的提高和新的工艺，预计 2030 年工业部门的能源需求会下降到 638 太瓦时左右，到 2045 年会低于 580 太瓦时（dena, 2021）。随着三分之一的炼钢改用还原工艺以及其他部门大规模淘汰煤炭，到 2030 年，煤炭消费量将缩减一半左右（dena, 2021）。

2018 年，工业部门的排放量超过 1.89 亿吨二氧化碳当量（Statistisches Bundesamt, 2022a）。展现了各子部门在工业部门总排放中的占比及其绝对排放量，以及 2045 年之前的减排路径。钢铁行业在总排放中的占比最大，大约为 30%，紧随其后的是化工（19%）、水泥熟料生产（17%）、造纸（3%）以及玻璃和陶瓷（3%）。剩余的工业排放为 0.49 亿吨二氧化碳当量（25%）。这里统计的温室气体包括二氧化碳、甲烷、一氧化二氮、氢氟烃、全氟化碳和六氟化硫（Statistisches Bundesamt, 2022a）。

2.3. 部门目标以及关键措施

³温室气体核算体系（GHG 核算体系）是一套民间的企业碳核算和报告标准的跨国标准，正越来越多地被公立部门所采用。温室气体核算体系的标准主要与国际气候政策制度的标准挂钩，填补政府尚未解决的监管缺口。它被认为是为温室气体平衡做好准备的最广泛的标准。

按照 2021 年《联邦气候保护法》的规定，德国将在 2045 年之前实现温室气体净中和⁴。在过去二十年里，德国一直维持着稳定的排放水平，此后，其目标是到 2030 年减少三分之一的工业排放。此发展轨迹符合欧洲绿色新政的减排计划（European Commission, 2019）。2021 年，德国的直接工业排放量为 1.81 亿吨二氧化碳当量，但其中未计算电网电力等二类排放（UBA, 2022a），此类排在德国的温室气体总排放量中的占比为 20%。为了能够实现工业部门雄心勃勃的温室气体减排时间表，并为必要的工业投资提供规划安全性，政府必须针对工业部门的脱碳制定明确且可靠的长期框架条件。

根据德国联邦环境部（Umweltbundesamt, UBA）信息，工业造成的温室气体排放可被分为三类：

- 1) 燃料供能导致的直接能源相关温室气体排放，例如，工艺用热、蒸汽或者电力（在工业电厂内）；
- 2) 上游发电或者所使用热量造成的间接能源相关温室气体排放，该电力并非来自于公司自有（工业）电厂；
- 3) 含碳能源和其他原材料的非能源使用造成的直接工艺相关温室气体排放，或者除二氧化碳以外的工艺相关温室气体释放。

不同工业造成温室气体排放的原因不同，通常需要采取不同的方式和缓解措施。基本方式如下：

工业部门可以通过改用更高能效的技术，使用可再生能源电力，用于诸如工业热发生等目的，减少与能源直接相关的温室气体排放。

可以通过将更多电网馈入电力转换为可再生能源发电，即逐步淘汰燃煤发电和其他化石燃料发电，减少间接的能源相关温室气体排放。此外，提高能源转换的效率、改进工业应用领域的使用可能有助于减少间接温室气体排放。

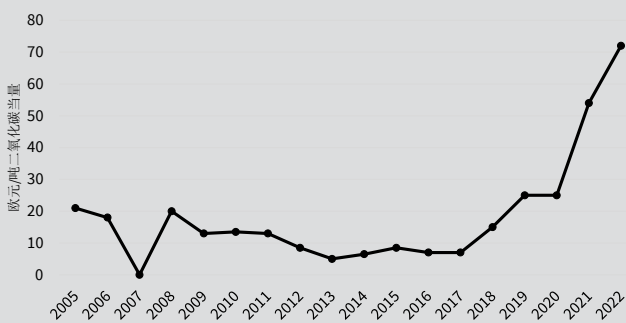
最后，可以通过根本性的工艺转变，即取代导致排放的原材料或产品，例如在炼钢工艺中以氢取代煤炭作为还原剂，或者逐步淘汰氟化气体，减少工艺相关的直接排放。碳捕集与利用或封存（CCU/S）技术是减少工艺相

⁴净温室气体中和的定义：人类活动引起的温室气体排放和温室气体汇清除之间的平衡（KSG § 2）。实际上，它和“气候中和”是同义词。

欧盟碳排放交易体系

电力和某些工业部门成为**欧盟碳排放交易体系（EU ETS）**的一部分。此体系自**2005**年推行以来，就是欧盟的核心气候保护工具。欧盟碳排放交易体系记录能源部门、欧洲国内航空和工业部门逾**10,000**家工厂的排放量，占到欧洲温室气体排放量的**36%**。欧盟碳排放交易体系采用基于**限额与交易**的运行机制。限额确定了受限于碳排放交易体系的工厂不可超过的年度二氧化碳限值。排放许可证可以在市场上交易，并根据欧盟气候目标，逐年减少许可证的发放量。在**2021**年**7**月的“Fit for 55”一揽子计划中，欧盟委员会提出进一步收紧排放限额的年度下调率，从目前的每年**2.2%**的下调比例增加到**4.2%**，此外，还要施加一次具体数量尚未确定的一次性下调（很可能发生在**2024**年）。在欧盟碳排放交易体系之外，德国还在供热和交通部门应用二氧化碳价格制度。**2019**年颁布的《**燃料排放交易法**》要求自**2021**年起，在预先定义的框架内稳步提高二氧化碳价格。自**2026**年起，转为市场定价机制。

欧盟碳排放交易体系（EU-ETS）中二氧化碳排放权的价格趋势（2005-2022年）



关二氧化碳排放的一种替代方式（参见附记：碳捕集与利用/封存）。

短期内，提高工业生产过程的能效是减少工业部门排放量的最简单措施（德国联邦环境部，**2022**）。要实现中期气候目标，就必须改换工艺，转用可再生能源，以促成低碳生产。还须颁行一系列法律法规，监管及激励工业部门的快速脱碳转型，才能实现这些目标。

2.4. 相关能源立法

在国家层面上，德国联邦政府和各部委正在通过各项法律和工具，落实脱碳路径。但是，作为欧盟成员国，德国的国家气候战略在很大程度上受限于欧盟气候政策框架。

- **能源效率指令**推动能源效率成为欧盟能源政策的一般性原则，设定了实现欧盟**2020**及**2030**年能源效率目标的规则和义务。其核心要素是根据**2007**年建立的**2030**年预测模型，设定了到**2030**年能源效率提高至少**32.5%**的目标。因此，欧盟**2030**年的总能源消费量不得超过**10.23**亿吨油当量。
- 在国家层面上，经修订的《**气候保护法**》旨在确保实现国家气候保护目标（见上文）。

2.5. 中国工业的能源消费现状和趋势

到目前为止，中国是世界上最大的煤炭消费国以及温室气体排放量最大的国家。**2019**年中国的二氧化碳排放量预计占全球总量的**30.6%**（Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit, **2021**）。**2020**年，中国提出了力争在**2030**年前实现碳达峰、**2060**年前实现碳中和的目标，而要实现此目标，就必须进行深远的、根本性的能源系统改革，摆脱化石燃料，打造一个基于可再生能源的系统。

2021年，中国的一次能源消费量**43,418**太瓦时。截止目前，煤炭在中国一次能源消费量中占比最高，达**54%**以上。大约**15%**的一次能源消费源自于可再生能源，其中占比最大的是水电（Ritchie, et al., **2020**）。

审视各部门的排放量可以发现，电力部门是中国单一的最大温室气体排放部门，**2019**年排放量占**42%**。工业、制造业和建筑部门加起来占总排放量的**33%**，其中钢铁

和水泥生产的排放量最大（参见图 2）。2020 年，中国钢铁行业的钢产量超过 11 亿吨，二氧化碳排放量达 15 亿吨，成为第一大二氧化碳工业排放源。自 2010 年起，钢产量提高了 67%。截至 2020 年，中国 80% 的钢材生产以铁矿石为原材料，远高于全球平均水平 60%。2021 年，中国钢铁工业协会发布倡议书，呼吁钢铁行业努力在“十四五”期间（2021-2025 年）提前实现碳达峰（Natural Resources Defense Council, 2022; IEA, 2021a）。

近几十年来，中国水泥行业经历了高速的增长。水泥产量翻了四番，从 2000 年的大约 6 亿吨增长到了 2020 年的大约 24 亿吨。2020 年，水泥生产的二氧化碳总排

放量达到 13 亿吨，占到中国总工业排放量的三分之一左右。中国化工行业的规模世界第一，2020 年的直接二氧化碳排放量为 5.3 亿吨。2020 年，化工、钢铁和水泥行业以外的行业加起来产生了 7.4 亿吨的排放量（IEA, 2021a）。

煤炭依然是推动中国经济发展的关键。为了确保 2030 年之后碳排放量的快速下降，中国必须采取激进的行动，实现其能源系统的脱碳。淘汰煤炭是减排的主要驱动力。电力是工业部门能源转型的支柱，也将成为工业部门的主要能量载体。重工业在中国的占比很高，而重工业又难以实现电气化，这给中国带来了额外的挑战。

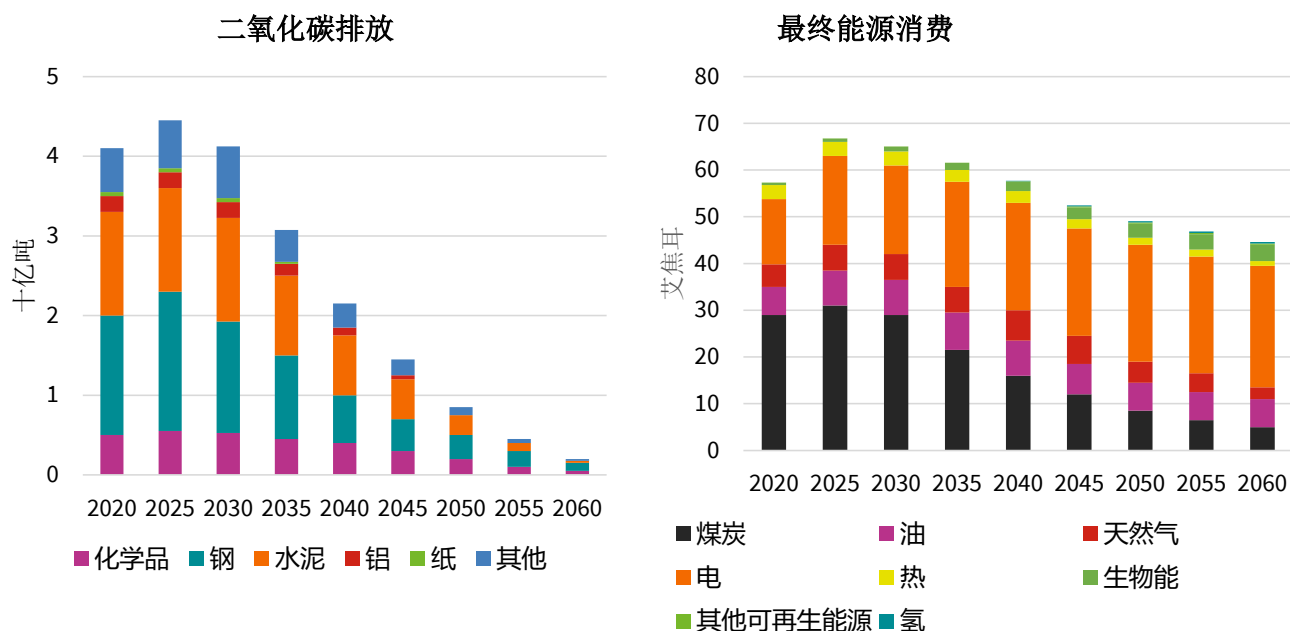


图 2：中国工业的二氧化碳排放和最终能源消费(IEA, 2021a)。

3. 德国工业的能源转型

本章将介绍德国工业能源转型所带来的各种挑战，尤其侧重于能源效率、可再生能源发电和氢能及其在转型中的角色。

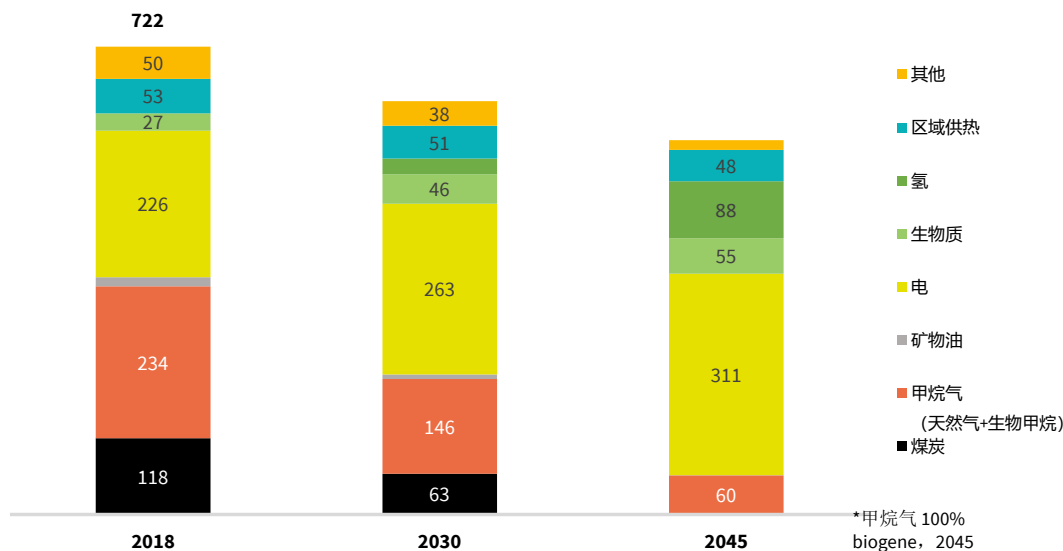


图 3：工业的终端能源消费，按能量载体列示 (dena, 2021)，单位：太瓦时

3.1. 工业能源转型的关键要素

2021 年，工业部门实现了温室气体减排目标，但其能源需求（2018 年为 722 太瓦时）一直居高不下，自 2000 年起只有略微下降。德国工业顺利实现能源转型的关键要素是提高能源效率，落实基于可再生能源的新技术 (dena, 2021)。

在德国能源署试点研究 (DPS) 中，经与各科学机构和利益相关方磋商，德国能源署打造了一个如何实现其 2030 年及 2045 年政治气候保护目标的模型。德国进行了多项气候中和研究，为简单起见，我们只引用了德国能源署试点研究的数据。

工业部门的未来能源需求，将主要通过基于可再生能源的氢能和电能来满足。因此，要满足未来的能源需求，就必须大规模扩大可再生能源，加强国际伙伴关系（例

如针对氢）。工业转型成本高昂，因为应用这些绿色解决方案需要巨大的投资成本。因此，高昂的成本以及确保国际竞争力是主要的挑战 (dena, 2021)。

3.2. 能源效率

不论是工艺方面还是材料方面，都需要提高能源效率。根据德国能源署试点研究，工艺相关的能效改进潜力巨大。如果德国未兑现这种潜力，那么在 2045 年，德国的能源需求将至少达到 100 太瓦时（采取相关措施后，2045 年预计能源需求 578 太瓦时）。所有工业部门都可以通过能效减少排放量，但跨部门技术（例如泵、发动机等）能效提升的效果尤为显著。第 4 章着重介绍了实现不同部门转型的新技术。

大多数情况下，与沿用传统技术继续生产相比，落实及使用新的、创新的、高效的技术所需成本更为高昂。因

此，快速转型以及改用新技术离不开财政支持 (dena, 2021)。

要加快转型、改用更高效的工艺，一个有用的工具是能源管理体系。此体系已经在付诸实施，但它还不是一项强制性要求。能源管理体系是一种认证体系，通过测量及分析公司内的能量流动、识别潜力以及落实提高潜力的措施，引导公司降低其能源消费量，提高能效。能源管理体系的国际标准是 ISO 50001 (UBA, 2019)。

除了提高能源部门的能效以外，也可能在生产、设计及材料加工中实现节能。例如，可以通过材料的重复利用、使用寿命的延长或者轻型结构来实现节能。

3.3. 可再生能源发电量

电力是工业最重要的能源，而且随着更多工艺从化石燃料改用电力，尤其是蒸汽等低温工艺用热，电力的使用势必会进一步增加，第 4 章将对此进行更详细地解释。通过使用电转热或者热泵，很多工业部门已经可以使用电气化作为一种脱碳选择。绿色氢能及其他合成燃料⁵

在试点项目之外尚不可用，未来是否可用还取决于可再生能源生产的规模扩大情况以及政治支持 (dena, 2021)。

德国能源署试点研究的作者预计 2045 年的直接用电需求为 311 太瓦时（作为对比，2018 年为 226 太瓦时），再加上用于供能及用作原材料的绿色氢能及其衍生物的用能需求。

除了工业以外，其他部门也必须实现电气化，才能实现政治气候保护目标。总的来说，这会导致用电需求从 2018 年的 500 太瓦时增加到 2045 年的 800-900 太瓦时。同时，德国电力系统的一半依然有赖于传统发电厂。2021 年，可再生能源在总电力消费量中的占比大约为 41.4% (234 太瓦时)。德国能源署试点研究预期到 2045 年，可再生能源的供电量将达到 750 太瓦时，其余 65 太瓦时负荷将通过氢能供应。

如前文章节所述，通过可再生能源供电是工业顺利完成转型、实现温室气体中和的先决条件。第 5 章审视了确保工业领域可再生能源供电的可能选择 (dena, 2021)。

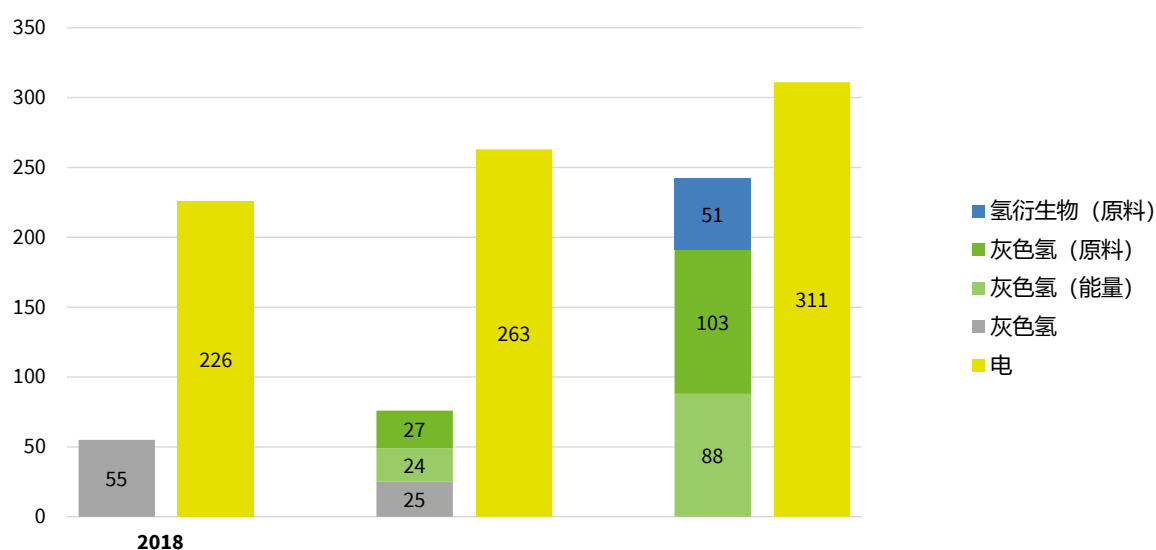


图 4：工业领域氢能和电力的消费量 (dena, 2021)，单位：太瓦时

3.4. 氢

作为一种跨部门技术，氢在能源系统转型中发挥着关键作用。在不可能实现直接电气化的领域，各个部门

都可能使用氢作为燃料，为脱碳做出贡献。例如，工业生产过程就可以选择使用氢来取代化石燃料。

目前，正在讨论的低碳氢生产工艺有三种。电解工艺使用可再生能源生产绿氢，可以做到完全无排放。因

⁵合成燃料的定义：基于可再生电力，使用电转 X 技术生成的气体和液体能量载体，包括氢(dena, 2021)。

为甲烷造成的排放，蓝色氢（例如甲烷的蒸汽转化、通过碳捕集与利用或封存实现的煤的气化）或者蓝色氢（甲烷热解、Kvaerner 工艺——固态碳捕集）等其他工艺永远无法实现完全的气候中和（Bauer, 2021）。

因为后者相较于绿氢可能具有成本优势，所以它们可能用作一项过渡技术。2021 年之前，成本优势主要是源自于低气价。

工业领域氢的大规模使用依赖于进口，因此在 2045 年之前，必须通过国际伙伴关系保证绿氢的供应。德国能源署试点研究的作者预计工业的能源相关氢能需求将在 2030 年达到 51.5 太瓦时，在 2045 年达到 191 太瓦时（dena, 2021）。

3.5. 挑战

实现工业的必要转型遇到的主要挑战是成本、新技术的当前技术就绪指数（TRL）⁶以及转型速度。在不少工业部门，必要的技术尚处于研发阶段，还没有做好投放市场的准备（Agora Energiewende, 2021）。为了实现必要的转型、打造气候中和的工业，这些技术必须按照 2045 年的目标，达到可上市的成熟度。

此外，成本方面也存在挑战，例如长摊还期限、传统燃料和技术的较低成本以及新技术的高成本，这些挑战可能限制竞争力。因此，必要的减排目标也可能增加碳泄漏的风险⁷，有的公司会将其生产设施搬迁到减排目标较低的其他国家（dena, 2021）。

之后，这些公司内部也会产生更多的挑战，这些挑战有些是来自专业技能的缺乏以及技术实现的可用性，还有一些是因为公司内部的低优先级。很多新技术都有很长的投资周期。投资周期长就会造成诸多不确定性，再加上缺少短期的赢利机会，就会让有意投资的

公司望而却步。第 5 章描述了克服这些挑战的可能工具。

最后，碳捕集与利用/封存（CCU/S）是实现负排放、抵消残余排放的必要技术。

3.6. 附记：碳捕集与利用/封存

政府间气候变化专门委员会（IPCC）和国际能源署（IEA）同意必须使用碳捕集与利用或/封存才可能实现 1.5 摄氏度目标（IPCC, 2022; IEA, 2021b）。尤其是关于实现负排放以抵消不可避免的排放以及捕集工业中的过程相关排放。在碳捕集与封存的情况下，捕集的二氧化碳被运输到适当的地质封存地点。建议使用碳捕集与封存抵消不可避免的排放（例如水泥工业），或者与生物质结合使用，以产生负排放（BECCS⁸）。

化工行业以及煤油等合成燃料也必须使用碳作为原料，其中可能用到碳捕集与封存（CCU）技术。化工行业的很多产品都是使用原油作为原料。这些产品中使用的碳在产品寿命周期到期前一直留存在产品中。未来，这些产品仍然需要碳。为了让化工行业停止使用原油作为原料，以停止产生排放，就需要采用绿氢和二氧化碳。甲烷化、甲醇合成和费托合成是可能用以取代作为原料的原油的三种合成法（参见章节 4.3）。

航运和航空领域会产生不同的问题。这些部门仍然需要使用含碳的燃料。这是由于缺少替代品造成的。其他技术，例如电池或者氢能的使用，因为其重量（电池）、能量密度及由此产生的蓄能量（氢能）等原因，所以并不适用（Fraunhofer-Institut UMSICHT, 2020）。所以未来仍将继续使用含碳燃料，问题在于无法捕集所产生的二氧化碳。为了实现长期的气候中和，这种碳必须来自于生物质、直接空气捕集（DAC）

⁶技术就绪指数（TRL）的定义：对新技术开发状态进行系统评估后评定的等级。取值范围从 1 到 9：

- TRL 一级：基本原理得到观察和描述（8 到 15 年）
- TRL 二级：技术的应用得到描述
- TRL 三级：技术的运行得到证明（5 到 13 年）
- TRL 四级：在实验室环境中得到验证
- TRL 五级：基本原型在运行环境中得到验证
- TRL 六级：原型在运行环境得到展示
- TRL 七级：原型得到应用（1 到 5 年）

- TRL 八级：功能能力在运行环境中得到证实的合格系统
- TRL 九级：成功运用得到证实的合格系统（ESA, 2022; NASA, 2022）

⁷碳泄漏的定义：碳泄漏指的是为避免之前生产所在地脱碳措施所引起的高昂成本，将生产设施搬迁到环境标准较低的其他国家，从而导致更高排放量的风险。

⁸BECCS 的定义——生物能碳捕集与封存：在使用生物质作为能源的工业设施中使用碳捕集与封存。根据（WGBU, 2009）的标准使用可持续生物质可能导致负排放。

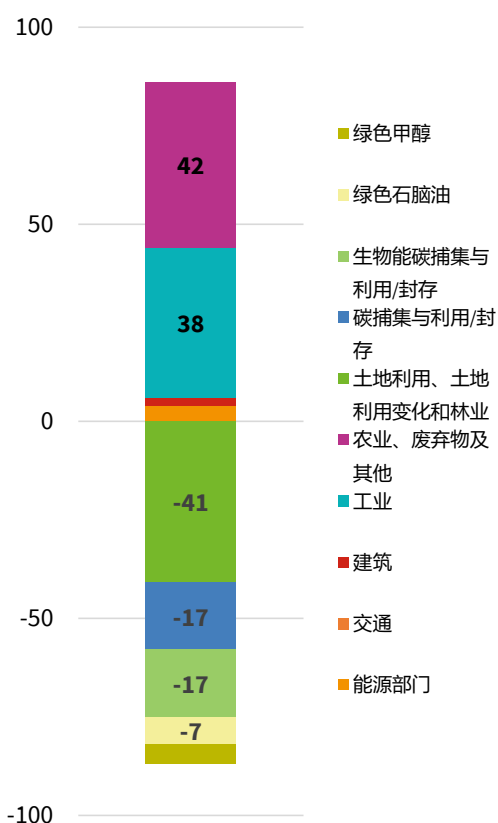


图 5：德国 2045 年的残余及负排放，德国能源署试点研究 (dena, 2021)，单位：百万吨二氧化碳当量

或者使用生物质或直接空气捕集生产的塑料的材料回收利用。

因此，气候中和的能源系统取决于基于碳捕集与利用/封存的功能性碳管理，尤其是在技术循环过程中。二氧化碳的运输和封存取决于公众接受度。在德国，人们担心因为泄露可能引起的健康风险，因此对这种技术持保留意见。因此一定要有一种监管制度，认真地对待并化解公众的顾虑 (Fischedick, 2015)。

被公众接受之后，还需要打造用于运输和储存的基础设施。二氧化碳基础设施规划应该包括电、气和氢基础设施。化工行业的碳捕集与利用以及合成燃料的生产尤其需要氢能和二氧化碳的结合。可以通过联合规划实现协同效应。此外，应该包含产业集群，因为产业集群可能形成规模经济，聚集较高数量的二氧化碳，从而达到降低成本的效果。大规模运输选择包括船运和管道运输。总的来说，运输和储存依然面临着以下挑战：风险管理、融资（二氧化碳市场）以及缺乏使

用大型船只（1000 万吨）运输的经验 (elementenergy, 2018)。

根据在德国能源署试点研究框架内进行的评估，2045 年的残余排放值⁹为 8700 万吨二氧化碳。其中假定土地利用、土地利用变化和林业 (LULUCF) 部门可实现 4100 万吨二氧化碳的负排放，符合国家目标。通过使用碳捕集与利用/封存处理过程排放以及结合使用生物能（生物能碳捕集与利用/封存）的技术解决方案，可以减少及补偿剩余排放。研究预计使用碳捕集与利用/封存的减排潜力为 1700 万吨二氧化碳。剩余排放必须通过负排放予以抵消。研究表明到 2045 年，德国工业必须捕集至少 2400 万吨二氧化碳，之后对其进行地质封存。此外，通过碳捕集与利用转移利用 1000 万吨的二氧化碳。通过使用生物能碳捕集与封存，可以实现 1700 万吨二氧化碳的负排放 (dena, 2021)。

作为比较，根据国际能源署就实现中国气候政策目标进行的情景分析 (2021)，到 2060 年，仅中国化工行业的碳捕集与利用或封存需求就会达到 2 亿吨二氧化碳 (IEA, 2021a)。国际能源署 (2021) 预计到 2060 年，年碳捕集与利用/封存容量大约为每年 25 亿吨 (IEA, 2021a)。总的来说，因为工业中煤炭的使用导致了更高的排放量和捕集率，所以碳捕集与利用/封存的比重预计会更高。

3.7. 附记：欧洲天然气和能源危机的影响

立法应对措施：

供气对德国具有重要意义。2019 年，48.2% 的德国家庭使用燃气中央供热系统为住宅供暖。同样的，天然气也是工业中最重要的能源：2020 年，工业部门消费了 325 太瓦时，占到总消费量的 31.2% (Statistisches Bundesamt, 2022b)。

乌克兰危机以及随后俄罗斯停止向西欧供应天然气引发了欧洲的能源和天然气危机，这让欧洲尤其是德国开始慎重审查其能源政策。欧盟和德国正在努力使其能源供应多样化，以减少对天然气的需求。德国已落实立法程序，以确保供应安全，加速可再生能源的部

⁹ 残余排放：残余排放指的是农业、废弃物管理及工业领域难以缩减且在能源系统脱碳后仍会继续发生的排放（尤其是甲烷、一氧化二氮和过程排放）。

署。供电是充足且安全的，但主要用于供热和工业的供气却并非如此（Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2022a）。

德国政府实施了《替代电厂备用法案》和《能源安全法案》，旨在让燃气电厂退出电力市场以节省用于发电的天然气，并扩大德国联邦网络局的责任范围。因此，有限的供气被优先用于家庭和公共建筑供暖以及工业，因为与发电相比，这些地方更难实现燃料的替换。

尤其是在工业部门，短期内很难取代天然气（参见章节 2.3 部门目标和实现目标的关键措施）。2022 年 8 月，在俄罗斯停止通过“北溪 1 号（Nord Stream 1）”管道输送天然气之后，已经可以观察到由天然气价格飙升导致的产量大幅下降。

因此，德国政府的当务之急是保障天然气供应。措施包括：

- 打造液化天然气（LNG）站以实现天然气供应的中短期多样化
- 天然气储存设施
- 保障天然气市场的正常运行以维持供气（接管 Uniper、边缘化计划）
- 节约用气：欧盟议定了节约 15% 用气量的目标，德国则设定了 20% 的目标
- 系列能效措施

此外，德国政府颁布了气价补贴政策来缓解德国工业和家庭的经济压力。对工业消费者而言，基本配额应该对应于 2021 年消费量的 70%。有鉴于此，设定了 7 欧分/千瓦时的总采购价格，超过 70% 的门槛值后，支付议定的市场价格（Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, 2022b）。这种调节可能影响到大约 25,000 家公司，允许公司在市场上出售其未消费的补贴天然气量。此项措施旨在鼓励节能。收到补贴的条件是保留生产场址并改用气候友好型生产方法。

工业应对措施：

能源价格的飙升以及不稳定的供气影响了当前的工业生产以及中长期的工业战略规划。

在中短期内，工业可能通过改用其他能源和原材料（加热油、液态丙烷（LPG）和石脑油等石油产品以及生物质），在一定程度上对高天然气价格做出回应。蒸汽供应电气化的加速让减少用气量成为可能。此外，预期会削减产量并进口能源密集型中间产品（例如氨）。根据某些预测，到 2025 年，工业用气量可能减少 50%（MCC, 2022）。

2022 年上半年，德国家庭和工业的用气量相比 2021 年同期减少了约 15%，折算过来的节气量为 80 太瓦时。但是，这种用气量的下降主要源自于工业，2022 年前九个月的工业用气量与之前五年的相同时期相比下降了 17%（MCC, 2022）。

这种下降是因为能效措施、电气化、改用替代化石能源、生产工艺的变化以及产量的下降。中长期内，工业企业必须使用可再生能源取代天然气及其他化石能源，提高能源效率，从而减少最终能源需求，达到战前的生产能力。这种转型与第 3 章中描述的工业转型并无差别，但仍需要进一步加快转型速度。

4. 工业中最重要的能源转型技术概述

如前文章节所述，德国工业必须经历根本性的变革才能实现《联邦气候法》中规定的目标，尤其是要改用新技术。下文章节详细描述了水泥、钢铁、化工、有色金属以及制浆造纸行业最重要的技术以及跨部门技术。为了更好地呈现各项技术，本章节末提供了德国目前及未来（2045 年）使用的技术和能量载体的概述以及技术概况表（参见图 7）。

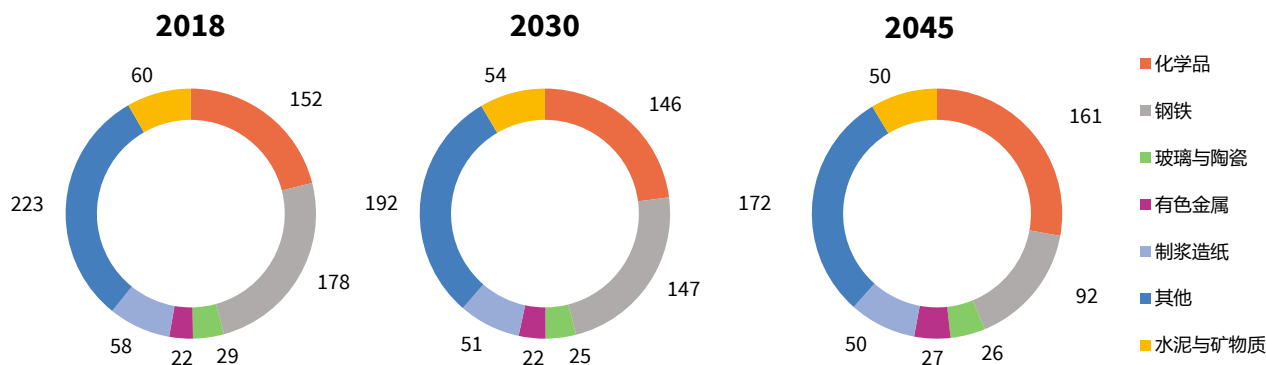


图 6: 不同行业的最终能源消费（太瓦时）(dena, 2021)

4.1. 水泥行业

水泥行业的排放占德国总排放量的 2.5% 左右 (UBA, 2020)。

水泥行业的脱碳过程与其他行业不同，主要是因为其高比例的过程排放。在水泥行业，不可避免的二氧化碳排放发生在石灰岩燃烧 ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) 的过程中。这些过程相关的排放占水泥生产总排放量的 65% 左右 (Johnsson, 2020)。为了减少此种排放，必须使用碳捕集与利用/封存技术。

剩余的过程排放与能源相关。通过使用气候中和的电力实现电气化，或者通过使用气候中和的燃料，例如可持续生物质、绿色氢或者合成气体，可以部分或者完全消除这一部分的排放。使用气候中和燃料，再结合碳捕集与利用/封存技术，可能带来实现负排放的潜力。各项研究表明使用可持续生物质作为燃料会导致负排放 (Briones-Hidrovo, 2022; Garcia-Freites, 2021)。

在德国，我们假定传统工艺不会发生根本性的技术发展。脱碳是基于各项技术措施的组合。降低能耗的能效措施以及使用气候中和的燃料可能彻底减少能源相关排放。针对过程相关排放，必须使用碳捕集与封存技术。总的

来说，水泥行业有两个过程排放阶段：富氧燃烧和燃烧后。水泥工艺过程中产生的排放让燃烧后捕集变得不可能，例如电厂整体煤气化联合循环 (IGCC) 中采用的燃烧后捕集 (Fischedick, 2015)。

燃烧后过程在实际过程结束之后捕集二氧化碳。其优势在于如果有可用的空间，就有翻新改造的可能性 (Fischedick, 2015) (参见图 8、图 9、图 10 和图 11)。

4.2. 钢铁行业

在德国，钢铁行业占到工业部门能源需求的 25%；因此，钢铁行业是德国脱碳战略的基本组成部分。

钢铁行业在生产过程中区分了初级钢和二级钢。在德国，大约三分之二的钢为初级钢。初级钢是高炉炼钢，使用焦煤作为还原剂和能源。其余的是二级钢，即通过使用电力的电弧炉回收利用废钢料。此工艺能源效率更高，但它无法生产出高品质的钢材。此外，生产受限于废钢料的可用性和品质 (dena, 2021)。

在中国，初级钢的占比为 80%。未来，预计二级钢的占比会有所提高 (IEA, 2021a)。

高炉炼钢的过程相关排放源自于铁矿石（ Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 ）还原为铁水的过程，由此产生的废气在过程中被回收利用，从而导致了二氧化碳排放。在高炉工艺之后，通过加氧处理去除粗铁中的碳会导致额外的过程排放。要实现完全脱碳，不仅必须消除能源相关排放，也必须消除过程相关排放 (Agora Energiewende, 2021)。

下文介绍了减少二氧化碳排放的各项工艺。德国能源署试点研究项目预计，到 2045 年德国的初级钢将完全基于直接氢还原 (dena, 2021) (参见图 12)。

除了直接氢还原工艺以外，其他两项工艺将在 2040 年之前做好上市准备。这些工艺可能无助于德国气候保护目标的实现。这两种工艺通过碳捕集与利用/封存继续使用化石燃料（煤炭或者天然气）(参见图 13、图 14)。

4.3. 化工

化工行业的大部分产品都需要用碳作为原料，所以化工行业要实现脱碳，就必须使用能够实现气候中和生产的新工艺 (VCI, 2019)。下文描述了德国现在及未来在最重要的化学产品（甲醇、氨、烯烃和芳烃以及氯）的生产中所使用的原材料。

中德两国化工行业之间的主要差别在于用于生产化学品的不同原料（原材料）。德国主要通过天然气和石脑油生产化学品，而中国使用的主要原料是煤炭。因此，基于石脑油的技术对中国化工行业的助益不大。相反，甲醇制烯烃（MTO）工艺具有重大的意义 (IEA, 2021a)。

目前，甲醇的生产是通过甲烷的蒸汽重整、德国的原油部分氧化或者中国的煤炭气化。未来，可能通过氢和二氧化碳的合成或者生物质的气化，实现气候中和的甲醇生产。对德国来说，德国能源署试点研究假设 60% 的甲醇使用绿色氢生产，还有 40% 则是使用生物质气化 (dena, 2021)。

目前，氨的生产使用哈伯-博施法 (Haber-Bosch)。原材料是甲烷和氮蒸汽重整生成的氢。为了实现此工艺的脱碳，使用通过水电解生成的氢，所以原料是电和氢。可以通过进口或者工厂附近的电解装置供应氢气。德国能源署试点研究项目假设，到 2045 年氨的生产将完全采用电解工艺（绿色氢），结合基于电力的哈伯-博施法 (Haber-Bosch)，可以实现气候中和 (dena, 2021)。

现有工业厂房内烯烃和芳烃的生产是基于化石石脑油的蒸汽裂解。化石石脑油的生产须使用原油作为原料。烯烃和芳烃是碳氢化合物。不可能用其他原料取代碳。未来的生产将考虑采用两种工艺，将在后文中更详细的解释 (参见图 15 和图 16)。两种工艺都要使用氢和二氧化碳作为原料。氢可以进口或者通过电解供应。二氧化碳的可能来源是生物质、废弃物、从其他工业生产过程（例如水泥行业）中捕集的二氧化碳以及空气（直接空气捕集——DAC）。

在当前的工业设施中，氯的生产是以电力为基础。预计未来也不会发生变化。只是工厂采用的工艺会发生变化，将以更高效的隔膜法取代目前仍广泛应用的混汞法 (VCI, 2019)。

绿色石脑油生产使用氢和二氧化碳作为原料。石脑油的供应可以采用费托合成和水气变换反应 ($\text{H}_2 + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}$) (参见图 17)。在德国能源署试点研究项目框架内，假设 60% 的芳烃和烯烃将使用甲醇制烯烃/芳烃生产，还有 40% 使用绿色石脑油的蒸汽裂解生产 (dena, 2021)。

总的来说，要实现脱碳，就必须使用基于绿色氢和非化石二氧化碳的甲醇和合成气作为原料。

4.4. 制浆造纸行业

在制浆造纸行业，排放源自于能源的使用，主要是用于形成蒸汽所消耗的能量。因为必要供热的低温度水平，因此热泵和电热锅炉是可能的选择，这一点与化工行业类似 (参见图 23)。未来，使用“黑液”（纤维素生产的一种富集能量和木质素的副产品）的其他技术可能更有价值 (参见图 18 和图 19)。目前，生产过程中积累的黑液是通过回收锅炉产生能量 (Nurdiawati, 2021)。

4.5. 玻璃行业

玻璃的生产采用以煤气作为能源的熔炉熔化工艺。未来的脱碳有多种选择。首先，可以使用电炉进行生产。另一个选择是使用氢作为能源。混合型熔炉（电+氢）也是未来可能采用的一种选择。玻璃生产过程中会产生少量的工艺排放，通过将原材料从碳酸盐改为氧化物可以避免此种排放 (dena, 2021)。

4.6. 有色金属行业

铝的生产主要有两种工艺。首先，使用拜耳法将铝土矿转化为氧化铝（ Al_2O_3 ），然后将氧化铝转化为铝（Chan, 2019）。原铝生产使用的是霍尔-赫鲁特（Hall-Héroult）工艺。此工艺须使用电力作为能源。生产过程中，会在阳极产生过程排放，而因为阳极由碳构成，会与过程中产生的氧气反应，生成二氧化碳。此外，铝可以循环利用。此工艺的效率高得多（原始工艺能耗的 5%），是在使用煤气作为能源的熔炼炉内执行的（Mobarakeh, 2022）（参见图 20、图 21 和图 22）。

铜的生产有两种可能的加工方法。第一种是火法冶金（80%），第二种是湿法冶金（20%）。铜的生成过程中不会产生任何过程排放。因此，通过弃用化石燃料、改用气候中和的电力，可能实现脱碳。

4.7. 高效的跨部门技术

整个工业部门都有机会通过使用高效技术，降低能源需求。在德国，使用此类技术可能减少 100 太瓦时的能源需求，2018 年的现有能源需求为 722 太瓦时。这种降低是由改用高效压缩机、发动机和其他技术造成的。

在所有工业部门，工艺用热的高效供给都在脱碳过程中发挥着重要作用。

在德国，工艺用热占到最终能耗（510 太瓦时）的 22%。通过电极锅炉和热泵，可以实现电转热技术的使用，尤其是针对最高达到 500°C 的温度。与氢相比，此类技术不仅可以提供更高的效率，还可被用于提高电力系统的灵活性（需求侧管理——DSM）。因为可再生能源在电力构成中占比较高，所以可以选择性地加入这些技术，以利用低电价成本。同时，如果可再生能源的供应量低，可以减少负荷，避免在峰值时段使用昂贵的电厂（Agora Industrie & Future Camp, 2022）（参见图 23）。此外，废热利用具有巨大的潜力。废热利用可用于各种工艺，例如工业生产过程中的热源或者热泵或区域供热的热量输入。有鉴于此，必须考虑必要的前提条件。例如，要在区域供热网络中利用废热，就必须对网络进行相应的调整以适应废热的利用（dena, 2021）。

产品		技术现状		新技术	
		工艺/技术	主要能量载体	工艺/技术	主要能量载体
铝	原生	霍尔-赫鲁特法 点式下料器	电	使用惰性阳极	电
	再生	煤气熔化炉	天然气	混合/电炉	电、氢
氨		哈伯-博施法、蒸汽甲烷 转化（SMR）	气体（作为能量+材料）	使用绿色氢的哈伯-博施法	使用氢和电进行电 解作用
芳烃和烯烃		蒸汽裂解	化石石脑油（材料）	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 甲醇制烯烃/芳烃 ▪ 蒸汽裂解、绿色石脑油 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 电 ▪ 电转液（材料）
水泥		半干法 干燥工艺	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 替代燃料（即废弃物） ▪ 硬煤 	干燥工艺	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 替代燃料 ▪ 生物质
铜	原生	熔化与精炼	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 电 ▪ 气 ▪ 硬煤 	化石燃料转换为电和氢	电、氢
	再生	铜的回收利用			
玻璃		典型的熔化槽	天然气	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 氢熔化槽 ▪ 电熔化槽 ▪ 混合炉 	电、氢
甲醇		合成： <ul style="list-style-type: none"> ▪ 重燃油的部分氧化 ▪ 蒸汽甲烷重组 	重燃油/天然气	合成： <ul style="list-style-type: none"> ▪ 氢/二氧化碳 ▪ 生物质的气化 	氢、电、生物质
制浆造纸		<ul style="list-style-type: none"> • 热电联产 • 黑液回收锅炉 	天然气	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 热消耗（热泵）的电气化 ▪ 黑液气化 ▪ 木质素提取 	电
钢	原生	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 高炉法/氧气顶吹转炉 ▪ 使用焦炉煤气/媒体进行钢加工 	焦煤	<ul style="list-style-type: none"> ▪ 直接还原+电弧炉 ▪ 使用氢进行钢加工 	氢、电
	再生	电弧炉	电	电弧炉	电

图 7：关键工业部门当前及未来技术概述

通过碳酸盐循环实现的碳捕集与利用/封存

可能的可用性	减排潜力
- 2030-2040	- > 90%
	- 100%，当使用气候中和燃料时
开发状态	二氧化碳减排成本
- 示范工厂（TRL 6-7级）	- 14-70美元/吨二氧化碳

技术描述

此种燃烧后工艺尚在开发中（TRL 6-7级），之所以提到它是因为它与水泥熟料生产中使用的原材料之间有协同效应（CLEANKER, 2020; Global CCS Institute, 2021）。碳酸盐循环工艺使用氧化钙捕集二氧化碳。其商业应用预计将在2030到2040年之间实现（Moborakeh, 2022; Nuridiawati, 2022），减排潜力为90%。二氧化碳减排成本为14-70美元/吨二氧化碳（Leeson, 2017）。

图 10：水泥行业——技术书：通过胺洗涤实现的碳捕集与利用/封存

通过胺洗涤实现的碳捕集与利用/封存

可能的可用性	减排潜力
- 2025-2030	- > 90%
	- 100%，当使用气候中和燃料时
开发状态	二氧化碳减排成本
- 示范工厂 - （TRL 6-7级）	- 60-170欧元/吨二氧化碳

技术描述

胺洗涤燃烧后工艺已经在电厂和其他工业生产过程中得到了工业规模的应用。此工艺使用化学溶剂（MEA）捕集二氧化碳。在挪威，捕集水泥生产排放的首个示范工厂正在规划当中，预计将在2024年投入运行（HeidelbergCement, 2022）。工业级应用预计将在2025-2030年实现（Nuridiawati, 2022）。德国能源署试点项目假设此工艺将被用于德国水泥行业的脱碳（德国能源署, 2021）。预计捕集率为90%。此项技术的二氧化碳减排成本为60-170美元/吨二氧化碳（Leeson, 2017）。

图 9：水泥行业——技术书：通过碳酸盐循环实现的碳捕集与利用/封存

通过富氧燃烧工艺实现的碳捕集与利用/封存

可能的可用性	减排潜力
- 2025-2030	- > 90%
	- 100%，当使用气候中和燃料时
开发状态	二氧化碳减排成本
- 示范工厂（TRL 6-7级）	- 50-65美元/吨二氧化碳

技术描述

此工艺在燃烧过程中使用纯氧和回收利用的二氧化碳的混合物。其优势在于废气流中的二氧化碳纯度更高，捕集二氧化碳更容易，可以实现高达90%的捕集率。此工艺经改造后可用于现有设施。但是，必须改变工艺的管理方式。假设可实现最优的技术开发，预计最早将在2025年实现商业应用（Mobarakeh, 2022; Nuridiawati, 2022）。二氧化碳减排成本为50-65美元/吨二氧化碳（Leeson, 2017）。

图 8：水泥行业——技术书：通过富氧燃烧工艺实现的碳捕集与利用/封存

替代粘合剂

可能的可用性	减排潜力
<ul style="list-style-type: none"> - 2020-2030（取决于产品） 	<ul style="list-style-type: none"> - 最高达到53%
开发状态	成本
<ul style="list-style-type: none"> - 硅酸镁（TRL 3级） - 碳酸化硅酸钙（TRL 7-8级） - 碱激活粘结剂（TRL 9级） 	<ul style="list-style-type: none"> -
技术描述	
<p>使用替代粘结剂取代熟料以及资源节约型混凝土可以节省能量，将减少排放。因为开发阶段各有不同，目前不可能对替代粘结剂的市场成熟度和减排潜力进行评估。最高可实现53%的减排潜力（Agora Energiewende, 2021）。工业应用取决于具体产品，有望在2020到2030年之间实现（Mobarakeh, 2022; Nuridawati, 2022）。因为不同粘合剂的异质性及其开发状态的不同，无法估算成本。</p>	

图 11：水泥行业——技术书：替代粘合剂

氢气直接还原（H₂-DRI）

可能的可用性	减排潜力
<ul style="list-style-type: none"> - 目前已投入运行（使用天然气） - 2025-2030（使用氢能） 	<ul style="list-style-type: none"> - 97% - 如果使用生物质或者合成气使炉渣泡沫化，则为100%
开发状态	二氧化碳减排成本
<ul style="list-style-type: none"> - 氢气直接还原铁：示范工厂（TRL 5-7级） - 天然气碳直接还原铁：商业工厂（TRL 8-9级） 	<ul style="list-style-type: none"> - 2030年：60欧元/吨二氧化碳——使用天然气 - 2050年：85-144欧元/吨二氧化碳
技术描述	
<p>在直接氢气还原及电弧炉熔炼过程中，使用氢气还原颗粒状铁矿石。由此产生的海绵铁可以在电弧炉内被熔化成原钢。通过使用绿色氢，此工艺几乎可以做到气候中和。剩余的排放量是由为炉渣泡沫化提供碳载体所产生的。如果碳载体是生物质或者合成气，此工艺即为气候中和工艺。其商用设施尚处于规划阶段。除了氢气以外，规划中的设施还使用冶金烟气和天然气作为还原剂（Agora Energiewende, 2021）。根据规划，完全基于氢气的工厂的工业化生产最早将在2025到2030年之间实现（Mobarakeh, 2022; Krook-Riekola, 2022; Nuridawati, 2022）。如上文所述，如果先使用天然气取代氢气，之后再逐步提高氢气的比例，则可能更早投入应用。通过使用天然气，已经可以实现66%的二氧化碳减排。转换涉及到额外的成本，主要取决于电价和氢气价格。Agora Energiewende（2021）假设到2030年，二氧化碳减排成本为60-99美元/吨二氧化碳（Agora Energiewende, 2021）。</p>	

图 12：水泥行业——技术书：氢气直接还原（H₂ - DRI）

结合碳捕集与封存使用的HIsarna@工艺

可能的可用性	减排潜力
<ul style="list-style-type: none"> - 2030-2035 	<ul style="list-style-type: none"> - 86%
开发状态	二氧化碳减排成本
<ul style="list-style-type: none"> - 试点工厂 (TRL 5-7级) - 没有碳捕集与封存 (TRL 7-9级) 	<ul style="list-style-type: none"> - 2030年: - - 2050年: 25-45欧元/吨二氧化碳
技术描述	
<p>结合碳捕集与封存使用的HIsarna®工艺继续使用煤炭作为能源和还原剂。使用专用反应器取代高炉。铁矿石被直接注入到反应器中，与纯氧而非空气和煤炭发生反应。其产物是富含二氧化碳的废气，此种废气更适合捕集。此工艺可以实现86%的捕集率（Agora Energiewende, 2021）。此技术预计将在2030到2035年之间做好上市准备。因为技术达成可用性的时间太晚，所以对德国的价值有限（Mobarakeh, 2022; Krook-Riekola, 2022; Nuridawati, 2022）。与直接还原法相比，其优势在成本较低。Agora Energiewende（2021）预计到2050年，二氧化碳的减排成本为25-45欧元/吨二氧化碳，从而导致9%-16%的附加特定成本（Agora Energiewende, 2021）。</p>	

图 14: 水泥行业——技术书：结合碳捕集与封存使用的 HIsarna@工艺

高炉法产生的冶金烟气的碳捕集与封存

可能的可用性	减排潜力
<ul style="list-style-type: none"> - 2025-2030 	<ul style="list-style-type: none"> - 50-63%
开发状态	二氧化碳减排成本
<ul style="list-style-type: none"> - 试点工厂 (TRL 4-5级) - 没有碳捕集与利用/封存 (TRL 7级) 	<ul style="list-style-type: none"> - 2030年: 231-439欧元/吨二氧化碳 - 2050年: 178-379欧元/吨二氧化碳
技术描述	
<p>此工艺使用从高炉冶金烟气中捕集的二氧化碳生产有价值的化学物质。技术的改造可用于高炉，最早可以从2025年起投入应用。化学品的生产具有高用电需求。出于此原因，应该在整个寿命周期内考虑潜在的节能。减排比例在50%到63%之间（Agora Energiewende, 2021）。此项技术被认为是一项过渡技术，因此对德国实现气候保护目标的价值不大，因为氢气直接还原法必须在早期阶段（2025-2030年）就开始提升产能（Mobarakeh, 2022; Krook-Riekola, 2022; Nuridawati, 2022）。Agora Energiewende（2021）预计到2030年，二氧化碳为231-439欧元/吨二氧化碳。这会导致63%-119%的附加特定成本。高成本是因为将德国工业和电价纳入研究范围所造成的（Agora Energiewende, 2021）。</p>	

图 13: 水泥行业——技术书：高炉法产生的冶金烟气的碳捕集与封存

甲醇制烯烃/芳烃工艺

可能的可用性	减排潜力
<ul style="list-style-type: none"> - 2025-2030 	<ul style="list-style-type: none"> - 100%
<p>开发状态</p> <ul style="list-style-type: none"> - 甲醇制烯烃 (TRL 8-9级) - 甲醇制芳烃 (TRL 6级) 	<p>二氧化碳减排成本</p> <ul style="list-style-type: none"> - 2030年: 160-355欧元/吨二氧化碳 (甲醇制烯烃) - 2050年: 84-515欧元/吨二氧化碳 (甲醇制烯烃) - 2050年: 122-615欧元/吨二氧化碳 (甲醇制烯烃/甲醇制芳烃加权平均数)
<p>技术描述</p> <p>在此工艺中, 使用甲醇代替化石石脑油作为烯烃和芳烃的生产原料。要实现气候中和工艺, 必须使用氢和二氧化碳生产甲醇 (Agora Energiewende, 2021)。假设可实现最优的技术开发, 可能在2025到2030年之间实现大规模应用 (Krook-Riekola, 2022)。如果使用废弃物、可持续生物质或者空气中的二氧化碳等非化石来源提供二氧化碳, 则减排潜力为100%。其成本假设严重依赖于氢价和电价。出于此原因, Agora Energiewende (2021) 计算出两种工艺的平均减排成本为122-615欧元/吨二氧化碳。这会导致45%-277%的附加特定成本 (Agora Energiewende, 2021)。</p>	

图 16: 化工行业——技术书: 甲醇制烯烃/芳烃工艺

化学回收 (气化和热解)

可能的可用性	减排潜力
<ul style="list-style-type: none"> - 2025-2030 	<ul style="list-style-type: none"> - 100%
<p>开发状态</p> <ul style="list-style-type: none"> - 示范工厂 (TRL 6-7级) 	<p>二氧化碳减排成本</p> <ul style="list-style-type: none"> - 2030年: 58-60欧元/吨二氧化碳 (非集成热解, 取决于石脑油价格) - 2050年: 11-49欧元/吨二氧化碳 (热解: 包括电动蒸汽裂解和甲醇制烯烃)
<p>技术描述</p> <p>通过化学回收, 可能将塑料转换为工业用原料 (合成气: 氢+一氧化碳, 热解油)。转换可能伴随着两个过程, 导致不同的产物和工业应用。首先, 塑料废弃物可通过气化转换为合成气 (氢+一氧化碳), 作为甲醇和石脑油生产的初始材料。其次, 可以选择通过热解将废弃物转换为油状液体。油状液体可在蒸汽裂解装置中进一步处理, 从而减少化石石脑油的使用 (Agora Energiewende, 2021)。两种工艺都处于较高的开发水平 (TRL 6-7级), 意味着预计自2025到2030年起可以实现大规模应用 (Krook-Riekola, 2022)。如果使用可再生能源, 且碳始终保持在循环中, 则减排潜力为93%。化学回收产生的二氧化碳减排成本为11-49欧元/吨二氧化碳。Agora Energiewende (2021) 预计这会导致6%-25%的附加特定成本 (Agora Energiewende, 2021)。</p>	

图 15: 化工行业——技术书: 化学回收 (气化和热解)

蒸汽裂解装置的电气化

可能的可用性	减排潜力
- 2030-2040	- 100%
开发状态	二氧化碳减排成本
- 实验室阶段 (TRL 1-3级)	- 2030年: 73-121欧元/吨二氧化碳 - 2050年: 11-49欧元/吨二氧化碳

技术描述

烯烃和芳烃目前通过石脑油的蒸汽裂解供应。此工艺使用化石燃料，发生温度为600到900℃。要实现能源相关排放的脱碳化，就必须完成供热的电气化。使用气候中和电力的减排潜力为100%。目前假设大规模设施将在2035到2045年之间得到可用性。Agora Energiewende (2021) 预计到2050年，二氧化碳避免成本为11-49欧元/吨二氧化碳。这会导致特定成本增加15%-18% (Agora Energiewende, 2021)。

图 19: 化工行业——技术书: 蒸汽裂解装置的电气化

黑液气化

可能的可用性	减排潜力
- 2020-2025	- 10%
开发状态	成本
- 商业工厂 (TRL 8-9级)	- 初始投资成本差异: 300-500欧元/吨年生产能力

技术描述

黑液气化是一种产生过剩电力或生物燃料的技术。此工艺将黑液 (纤维素生产中的能量和木质素密集型副产品) 转换为无机化合物 (主要是钠和硫)。这让可燃材料和烟道气的回收成为可能, 尤其是合成气 (氢气+一氧化碳)。目前, 黑液是在回收锅炉中使用 (热能或电能的生产)。上述工艺的优势是效率更高、终端使用的灵活性更大 (合成气到燃料、化学品等)。此技术预计将在2020到2025年之间做好上市准备。技术投资的初始成本差异为300-500欧元/吨年生产能力 (Chan, 2019)。

图 17: 纸浆造纸行业——技术书: 黑液气化

新干燥技术

可能的可用性	减排潜力
- 2020-2025	- 20%
开发状态	成本
- 试点工厂 (TRL 5-7级)	-

技术描述

在制浆造纸行业, 造纸厂的干燥过程是主要的耗能过程。出于此原因, 人们有兴趣开发新的节能型干燥技术。文献研究专注于蒸汽/空气冲击干燥、冷凝带干燥和脉冲干燥等技术。因此, 在此阶段无法进行成本假设。假设可能实现20%的减排 (Chan, 2019)。

图 18: 纸浆造纸行业——技术书: 新干燥技术

Elysis工艺（惰性/非碳阳极）

可能的可用性	减排潜力
<ul style="list-style-type: none"> - 2024（Elysis工艺） 	<ul style="list-style-type: none"> - 100%的过程排放
开发状态	成本
<ul style="list-style-type: none"> - 惰性阳极（TRL 5级） - Elysis工艺（TRL 6级） 	<ul style="list-style-type: none"> -
技术描述	
<p>传统的霍尔-赫鲁特（Hall-Heroult）工艺使用碳阳极，这会导致反应中的过程排放。使用惰性阳极有可能避免此种排放。因为惰性阳极上会形成氧气而非二氧化碳。除了使用惰性阳极以外，还可能使阳极湿润，从而改进阳极与熔融铝的接触。两种调整都可以整合到Elysis工艺中。只要使用的是气候中和电力，Elysis工艺就被认为是第一项气候中和的铝生产工艺。此工艺大幅延长了阳极的使用寿命，同时将运行成本压低了15%，将生产率提高了15%（Chan, 2019）。</p>	

图 22：化工行业——技术书：Elysis 工艺（惰性/非碳阳极）

碳热还原

可能的可用性	减排潜力
<ul style="list-style-type: none"> - 2015年或以后 	<ul style="list-style-type: none"> - 100%
开发状态	成本
<ul style="list-style-type: none"> - 实验室阶段（TRL 2-3级） 	<ul style="list-style-type: none"> - 预计投资成本：3000欧元/吨铝
技术描述	
<p>碳热还原工艺是唯一具有应用潜力的非电化学铝生产工艺。在此工艺中，氧化铝（Al_2O_3）在高温（$>2000^\circ C$）下与碳发生反应，生成铝和一氧化碳。与霍尔-赫鲁特（Hall-Heroult）相比，此工艺的优点可能包括单位铝的能耗下降20-30%、资本成本下降50%以及运营成本大幅下降（Chan, 2019）。</p>	

图 21：化工行业——技术书：碳热还原

先进的矿物回收处理

可能的可用性	减排潜力
<ul style="list-style-type: none"> - 	<ul style="list-style-type: none"> - 消除作为危险废弃物的赤泥
开发状态	成本
<ul style="list-style-type: none"> - 试点工厂（TRL 3-4级） 	<ul style="list-style-type: none"> -
技术描述	
<p>此工艺对整体能效的影响不大，但它在铝生产的环境影响方面具有重要意义。在使用铝土矿生产氧化铝（Al_2O_3）的过程中，产生了大量的危险固态废弃物（赤泥）。采用先进的矿物回收技术（AMRT），可以在不进行任何预处理的情况下，熔化赤泥，形成适合生产工业矿物棉的粗铁和粘性渣。因此，此项技术能够将对环境有害的产品转换为两种副产品，从而预防赤泥可能造成的环境危害。采用拜耳法，可以将能效从3%-4%提高到9%-13%（Chan, 2019）。</p>	

图 20：化工行业——技术书：先进的矿物回收处理

用于蒸汽的电转热

可能的可用性	减排潜力
<ul style="list-style-type: none">- 2020年（电热锅炉）- 2025年（热泵）	<ul style="list-style-type: none">- 100%
开发状态	二氧化碳减排成本
<ul style="list-style-type: none">- 热泵（100-150℃）（TRL 7-8级）- 热泵（150-200℃）（TRL 6-7级）- 电热锅炉（TRL 9级）	<ul style="list-style-type: none">- 2030年：-54-40欧元/吨二氧化碳- 2050年：76-131欧元/吨二氧化碳

技术描述

大量工业生产过程要求使用热量作为能源。某些案例中，热量水平存在巨大差异。温度水平从100℃到1000℃以上不等。出于此原因，要使用不同的电转热工艺实现脱碳。在低温范围内（最高200℃），可能部署高温热泵（Agora Energiewende, 2021）。假设可实现最优的技术开发，则预计最早在2025年，就可以实现高温热泵的工业规模应用。

电极式锅炉温度最高可以达到500℃。这是已经做好上市准备的可用技术，搭配气候中和电力的使用，即可实现全面的减排（Krook-Riekola, 2022; Mobarakeh, 2022）。

Agora Energiewende（2021）预计2050年的减排成本为76-131欧元/吨二氧化碳。与传统工艺（热电联产或者燃气锅炉）相比，这会导致49%-83%的附加特定成本（Agora Energiewende, 2021）。

图 23：跨部门技术——技术书：用于蒸汽的电转热

5. 政策建议与结论

工业脱碳所需技术的概况明确表明成本和潜在的可用性都是障碍。因此，本章介绍了可能用于克服这些障碍的工具。此外，还提供了一项评估，集中关注这些工具在中国得以落实的可行性。

基于市场的工具

二氧化碳定价

在基于市场的生态转型的背景下，碳定价是一个关键因素。二氧化碳定价是最有效的转型措施，因为目前它会使得传统技术的成本高于气候中和技术，从而激励人们摒弃传统技术。但是，仅靠碳定价还是不够的。中短期内，低二氧化碳价格意味着需要使用符合二氧化碳价格的其他工具促成新技术的资本密集型投资。随着时间的变化，碳价格会上涨并取代目前必要的补贴。在工业领域，最低二氧化碳价格可能是一种选择，因为它会为公司提供一个明确的价格信号 (Agora Energiewende, 2021)。其优势是为长期投资提供了开发确定性 (dena, 2021)。

绿色先导市场

尤其推荐在钢铁行业（氢气直接还原铁——H₂-DRI）、水泥行业（碳捕集与利用/存）和化学原材料的生产（化学回收和甲醇制烯烃/芳烃——MTO/MTA）中引进绿色先导市场。这些部门要改用气候中和的生产方法，必须进行大笔的投资，某些部门的运营成本也会提高。

绿色先导市场的原理

在绿色先导市场上，制造商有义务使用气候中和材料创造特定比例的产品（不排放二氧化碳的生产）。此项义务可确保基本材料行业的公司所生产出的（气候中和）绿色材料获得一个稳固的销售市场。落实绿色先导市场就消除了碳泄漏的风险，因为出口海外的商品不受影响。(BDI, 2021)

绿色先导市场可以创造一个稳固的销售市场，降低投资风险 (BDI, 2021)。为了落实绿色先导市场，政府可以针对某些产品设定配额，或者在政府采购措施中规定一个法定比例。自 2022 年起，二氧化碳影子价格¹⁰已被应用于德国国家层面上的采购交易。其中考虑了产品在其整个寿命周期内的二氧化碳排放，所以由此导致的采购成本可能高于具有可持续性的产品。

设定了配额的情况下，制造商所产生的附加成本可能被转嫁给终端消费者。总的来说，设定配额的优势是明确推广某些产品，例如“绿色”钢或水泥。公共采购的情况并非一定如此，因为公共采购取决于进行招标的项目。但是，此种方式的优势在于相对直接的落实，因为决定是由政府独立做出的 (BDI, 2021)。

碳差价合同 (CCfDs)

钢铁、水泥和化工行业的转型要求对成本高昂的新技术（例如氢气直接还原铁）进行早期投资，因此这些行业尤其适合使用碳差价合同。

碳差价合同 (CCfDs)

与当前及未来的碳价格相比，一些关键技术的二氧化碳减排成本要高得多，使用碳差价合同是为了给这些技术提供经济支持。碳差价合同是为相较于传统技术而产生的额外成本提供补充。此类合同是由公共部门和个体供应商签订的。碳差价合同与二氧化碳价格的演变相挂钩。公共部门承担额外成本，直到二氧化碳价格超过二氧化碳减排成本（履约价格）。如果二氧化碳价格超过履约价格，就必须偿还金额（德国能源署，2021）。

¹⁰ “二氧化碳影子价格”的定义：二氧化碳影子价格是二氧化碳的虚构价格，旨在代表由产品的二氧化碳排放导致的潜在损害。与二氧化

碳差价合同可分为两类：能量载体和产品碳差价合同。例如，能量载体碳差价合同可为 1 兆瓦时天然气（+最有效的二氧化碳影响）与 1 兆瓦时绿色氢之间的价格差做出补偿。另一方面，产品碳差价合同弥补采用高炉法生产 1 吨钢的成本与采用氢气直接还原铁工艺生产 1 吨钢的成本之间的差值（BDI, 2021）。其中包括具体工厂的成本。

为了涵盖具体工厂的成本，一开始推荐使用产品碳差价合同。通过尽可能长久地涵盖成本，保证规划安全性。针对碳差价合同的可能应用，必须有设定符合条件的技术的法律框架。

低碳技术的落实

工业气候中和的实现尤其取决于可再生能源的扩张。没有气候中和的电力，就不可能实现工业的气候中和。一方面，这是因为电力密集型工艺，另一方面，要绿色氢能的生产离不开可再生能源电力（dena, 2021）。

在此方面，工业可能对低碳技术的进一步落实产生积极的影响。一种可能性是订立购电协议（PPA），即公司与功能供应商签订的可再生能源供应合同。此类协议的优势在于让具有价格竞争力的电力供应成为可能，同时又避免公司的投资成本。此外，订立购电协议确保了可再生电力的长期供应。

政策方面需要采取其他必要措施。可再生能源的扩张要求有充分的土地。政策制定者应该利用空间规划为可再生能源提供可用的区域。此外，德国必须加快及简化可再生能源审批程序，以加速转型。在能源系统的整体背景下考虑推广可再生能源时，也需要在其他领域采取进一步的措施。

德国现行的可再生能源补贴政策

在德国，可再生能源的推广尤其聚焦于电价。通过《可再生能源法》拨款推动光伏电站、风电厂和生物质电厂的扩张。《可再生能源法》拨款全部被分配给电价。这种方式导致电力部门的减排成本升高，减轻了参与转型的其他部门的经济负担。

出于此原因，德国政府于 2022 年废除了《可再生能源法》拨款。目前，德国是通过设定扩张目标以及补贴投标，推广可再生能源。扩张目标的设定具有控制功能（《可再生能源法》）。

因为电网波动性的不断提高，需要采用灵活性技术确保最优成本的供电。因此，推广热电联产（CHP）厂的设计应该确保它们为电网稳定性做出贡献（dena, 2021）。此外，一定要避免可能的路径依赖。一种选择是将拨款与氢能就绪度（可能进行改造以使用氢能）的要求挂钩，以确保这些技术未来可以转换为气候中和的高效运营。如前文的解释，氢在转型中是必不可少的一环。要实现氢的工业用途，就必须推进氢的产能提升。一方面，这种产能提升要求推行一种监管框架，将氢整合到当前能源系统中，并设定哪些要求适用于氢的使用（二氧化碳足迹、纯度等）（dena, 2021）。另一方面，必须打造一个氢市场，为公司创造规划安全性。为实现此目的，必须为某些成本高昂的技术提供补贴。

提高能源效率

提高能源效率可以减少能耗、降低成本，从而降低对其他转型措施（低碳技术）的速度要求。在产品方面，可以通过推拉原则（push & pull principle）提高能源效率。在此过程中，法律规定了产品的最低标准。不满足最低标准的产品会被禁止销售（根据欧盟监管框架禁止在欧洲经济区销售）。同时，推广超高能效产品，例如，鼓励在其寿命周期终止之前就予以更换。此外，标签上突出产品的超高能效，以让终端消费者获悉。推拉原则（push & pull principle）的缺点在于确立最低要求的过程漫长，成本高昂（BDI, 2021）。

德国的建筑部门具有最大的能效潜力。这并不局限于居住建筑，工业建筑也是如此。可通过改造/整改或者通过改进技术设备，提高建筑物的能效。为了推动改造，应该将补贴与改造水平挂钩，改造程度越高，可以得到的补贴就更高。此外，改造应该遵循“最差优先”原则，因为这么做的节能潜力最大（dena, 2021）。

最后，必须对工业进行深入的研究。在集成新系统时，应该做出使用最高效技术的承诺。与气候中和目标不相容的系统不得再获得任何补贴。工业领域能效措施的投资应该受益于较短的折旧期限，从而缩短摊还期限（dena, 2021）。

此外，还需要考虑工业在电力需求灵活性中的作用。需求侧管理（DSM）可以应对风力发电和光伏发电的波动性。需求侧管理具有成本效益，因为当供大于求时，峰值负荷时段的电价就会大幅降低。因此，应该鼓励使用需求侧管理（Agora Industrie & Future Camp, 2022）。

这通常需要审查能源价格及碳价格现有免税制度的相容性和必要性。

应该强制要求落实第 3 章（能源管理体系、能源审计）中确定的措施，以推动及支持公司不断提高其能效，并将能效与财政支持挂钩。此项措施有助于减少能源需求，加速全面减排。

废热利用

废热的利用也是一项能效措施。废热可被用于工业厂房或者本地及区域供热网络。

将低温（<100℃）废热用于本地及区域供热网络具有巨大的价值。为此，可能允许使用服务器机房等废热源，以及使用废水、湖泊或者河流，作为热泵的热量输入。要实现此目的，就必须按照术语区域供热网络 4.0 项下的总结，完成本地和区域供热网络（例如温度下降、灵活化等）的转换。因为这是一项基础设施项目，所以必须采取一种将区域供热网络和建筑物都纳入考虑范围的系统方式。因此，建议要求市政当局制定市政供热计划，全局统筹规划（BDI, 2021）。

推广废热的利用应该包括推广公司之间的利用。应该将公司并入废热网络，鼓励公司与周边区域的其他公司共同制定废热利用策略（Agora Energiewende, 2021; dena, 2021）。可能的激励措施包括为公司间理念拨款以及由政府为诸多利益相关方参与的复杂项目提供执行担保。最后，绘制废热地图册¹¹可能有助于识别废热潜力，促成行之有效的本地理念（dena, 2021）。

努力实现循环经济

之前的理念主要聚焦于如何实现更高效、气候中和的能源使用。循环经济的焦点在于闭合材料流、减少材料用量。循环经济旨在限制一次原料的使用量，可以大幅降低成本、能源要求及二氧化碳排放量。

下文提供的建议分为配额、禁令、标准和税收几个方面。

欧盟已经颁行了禁止使用一次性塑料以及部分禁止塑料废弃物出口的禁令。未来，欧盟还会颁行全面禁止所有塑料废弃物出口的禁令。此外，之后还应纳入其他易于替代的产品（BDI, 2021）。

回收材料的使用配额可能推动循环经济的发展。此种配额是要求公司在其产品中使用一定比例的可回收利用材料。配额的稳定增加给公司发出了一个未来生产如何变化的明确信号。这也为必要的投资提供了长期信息。在设定配额时，必须考虑整个寿命周期和能源效率（Agora Energiewende, 2021）。尽早提供与预期效果相关的信息可以降低引进配额制度的难度。回收材料的使用至关重要，因为即便未得到回收利用配额的保证，也必须更换一次原料（降级回收）。

以回收利用比例的形式规定可回收利用材料的配额。为了实现产品的循环使用，必须引进产品设计标准。在此类标准中，制造商必须依法采用可以促进产品回收（修理）或者循环利用的产品设计。其中包括针对具体产品的规定，例如产品组件的标准化、便于拆卸的产品设计、复合材料的限制、小件废弃物的限制等（BDI, 2021）。另一种可能是建立产品的修理和耐用性规范。首先，应该提高最低标准，并针对所有非可再生材料引进可回收利用的法定要求。此外，应该通过审核现有标准和规范，消除使用二次材料的障碍。最后，监管要求可能包括使用保证金系统，并就末期阶段提出具体的要求。

作为最后的手段，建议就一次原料的进口和生产征税。征税对象应包括已经可以使用回收材料的材料（例如某些塑料产品）。之后，税收可能在加强回收材料市场的同时，提高回收利用率、进一步预防废物产生并提高一次原料的回收使用（dena, 2021）。此外，垃圾填埋税可能导致不可回收利用材料的使用量和废弃物数量的下降。

结论

本文所提出的建议是否可应用于中国，取决于当前的经济和政治条件。碳定价、绿色先导市场、碳差价合同、配额、补贴和禁令等工具可以根据中国现状进行相应的调整。

¹¹废热地图册的定义：废热地图册提供了特定区域（工业厂房、城镇、乡村）内废热源的位置和数量的信息。

而与可再生能源发展相关的具体措施还需要根据中国国情做出进一步考量。为了完成定性评估，还必须确定中国的土地可用性以及必要的未来需求。

但是，最重要的差别是宏观经济形势的不同。多年来，德国一直保持着温和的增长（每年国内生产总值增长率约为 1%-2%），与此同时，能源需求和二氧化碳排放量在逐步下降。而到目前为止，中国经济的高速增长始终伴随着生产数量的巨大增长。

在工业部门，各种设施剩余的技术寿命周期之间存在着巨大的差别。未来十年间，德国将经历一个再投资周期，在特定的工业部门，必须更换的设施比例最多高达 50%。在中国，设施的平均使用年限约为 15 年，这意味着其相应的设施更换期将发生在 2030-2040 年代。

在德国，建议在二氧化碳定价之外，同时使用其他工具，因为德国还需要部署具有高初始投资的新型非商业技术。而如果中国在再循环周期内发生了必要的转型，那么因为技术的进步以及规模经济效应的原因，此类技术的投

资和运营成本届时可能已经大幅降低。因此，落实二氧化碳定价以外的工具很可能会变得无足轻重。

在朝着气候中和能源系统转型的背景下，中国尚未遇到德国已经遇到过的挑战。

在中国，即将发生的煤炭淘汰以及工业的根本性转变可能在受影响区域造成社会经济挑战。因此，建议为此种发展提供结构性变化支持，让不同利益相关方参与其中，以将可能出现的社会问题降至最低。

为了实现政治气候保护目标，中德两国的工业在夏季都会面临经济及技术挑战。尤其是新技术的快速集成具有决定性影响。短期内，可以在额外的经济工具（例如碳差价合同和绿色先导市场）的帮助下，实现此目标。积极的发展可能有利于中国完成理想的工业转型，因为规模的扩张会带来成本降低效应。

参考文献

Agora 能源转型论坛, 2021. 欧洲气候中和产业的突破性战略: 提高欧盟气候目标的政策和技术路径.

参见: https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2020/2020_10_Clean_Industry_Package/A-EW_208_Strategies-Climate-Neutral-Industry-EU_Study_WEB.pdf

Agora 工业和未来营地, 2022. 电到热: 工业领域的天然气节约和气候保护.

参见: <https://www.agora-energiewende.de/veroeffentlichungen/power-2-heat-1/>

[访问日期: 2022 年 10 月 26 日].

Bauer, C., 2021. 关于蓝色氢气生产的气候影响.

参见: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2022/se/d1se01508g>

[访问日期: 2022 年 10 月 26 日].

德国工业联合会 (BDI), 2021. 气候之路 2.0 - 气候和未来的经济方案.

参见: https://issuu.com/bdi-berlin/docs/211021_bdi_klimapfade_2.0_-_gesamtstudie_-_vorabve

[访问日期: 2022 年 10 月 27 日].

Briones-Hidrovo, A., 2022. 通过动态生命周期评估和土地-水-能源关系来评估碳捕集和封存的生物能源系统 (BECCS).

参见: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S019689042200807X>

[访问日期: 2022 年 10 月 26 日].

德国联邦环境、自然保育、核能安全及消费者保护部, 2022. 行业的去碳化.

参见: <https://www.bmuv.de/programm/dekarbonisierung-in-der-industrie>

[访问日期: 2022 年 10 月 26 日].

德国联邦经济事务和气候行动部, 2022a. 电力系统的压力测试.

参见: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2022/09/20220905-stresstest-zum-stromsystem.html>

[访问日期: 2022 年 10 月 26 日].

德国联邦经济事务和气候行动部, 2022b. 安全地度过冬天: 天然气和热能专家委员会的临时报告.

参见: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Dossier/Gas-Kommission/zwischenbericht-expert-innen-kommission-gas-warme.html>

[访问日期: 2022 年 10 月 26 日].

Chan, Y., 2019. 工业创新: 工业深度去碳化的路径: 第一部分: 技术分析.

参见: https://climate.ec.europa.eu/system/files/2019-03/industrial_innovation_part_1_en.pdf

[访问日期: 2022 年 10 月 26 日].

CLEANKER, 2017. 通过钙质循环工艺进行清洁的清污机生产.

参见: http://www.cleanker.eu/download.html?n=CLEANKER_Flyer&e=pdf

[访问日期: 2022 年 10 月 26 日].

德国能源署 (dena), 2021. 德国能源署主导的研究: 气候中和的曙光.

参见: <https://www.dena.de/newsroom/meldungen/dena-leitstudie-aufbruch-klimaneutralitaet/>
[访问日期: 2022 年 10 月 26 日].

elementenergy 公司, 2018. 运输二氧化碳--英国成本估算研究.

参见: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/761762/BEIS_Shipping_CO2.pdf
[访问日期: 2022 年 10 月 26 日].

欧洲航天局 (ESA), 2022. 技术就绪度 (TRL).

参见: https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Shaping_the_Future/Technology_Readiness_Levels_TRL
[访问日期: 2022 年 10 月 26 日].

欧盟委员会, 2019. 欧洲绿色新政.

参见: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2019%3A640%3AFIN>
[访问日期: 2022 年 10 月 26 日].

Fischedick, M., 2015. 二氧化碳: 捕获、储存、使用 - 能源部门和工业的整体评估.

参见: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-19528-0>
[访问日期: 2022 年 10 月 26 日].

弗劳恩霍夫环境、安全和能源技术研究所, 2020. 弗劳恩霍夫环境、安全和能源技术研究所的立场 - 主题: 未来的燃料.

参见: <https://www.umsicht.fraunhofer.de/de/presse-medien/pressemitteilungen/2020/zukunft-der-kraftstoffe.html>
[访问日期: 2022 年 10 月 26 日].

Garcia-Freites, S., 2021. 带碳捕集与封存的生物能源 (BECCS) 的温室气体清除潜力, 以支持英国的净零排放目标.

参见: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953421002002>
[访问日期: 2022 年 10 月 26 日].

德国国际合作机构, 2021. 中国能源转型现状报告 2021.

参见: https://www.energypartnership.cn/fileadmin/user_upload/china/media_elements/publications/2021/China_Energy_Transition_Status_Report_2021.pdf
[访问日期: 2022 年 10 月 26 日].

全球碳捕集与封存研究院, 2021. 碳捕集与封存的技术就绪度和成本.

参见: <https://scienceforsustainability.org/w/images/b/bc/Technology-Readiness-and-Costs-for-CCS-2021-1.pdf>
[访问日期: 2022 年 10 月 26 日].

海德堡水泥公司, 2022. 突破性的技术: CCU/S--碳捕集、利用和封存.

参见: <https://www.heidelbergmaterials.com/sites/default/files/assets/document/cc/6d/heidelbergcement-factsheet-ccus.pdf>
[访问日期: 2022 年 10 月 26 日].

国际能源署, 2021a. *中国能源行业实现碳中和路线图*.

参见: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/9448bd6e-670e-4cfd-953c-32e822a80f77/AnenergysectorroadmaptocarbonneutralityinChina.pdf>

[访问日期: 2022 年 10 月 26 日].

国际能源署, 2021b. *到 2050 年实现净零排放*.

参见: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>

[访问日期: 2022 年 10 月 26 日].

政府间气候变化专门委员会 (IPCC), 2018. *附录一: 术语表*.

参见: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2022/06/SR15_AnnexI.pdf

[访问日期: 2022 年 10 月 26 日].

政府间气候变化专门委员会, 2022. *政策制定者摘要*. 在: *气候变化 2022. 缓解气候变化*. 第三工作组对政府间气候变化专门委员会第六次评估报告的贡献.

参见: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>

[访问日期: 2022 年 10 月 26 日].

Johnsson, F., 2020. *工业二氧化碳捕集与封存的边际减排成本曲线--瑞典案例研究*.

参见: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2020.00175/full>

[访问日期: 2022 年 10 月 26 日].

Krook-Riekkola, A., 2022. *技术可用性对瑞典向净零排放工业过渡的影响*.

参见: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095965262202193X>

[访问日期: 2022 年 10 月 26 日].

Leeson, D., 2017. *应用于钢铁、水泥、炼油、纸浆和造纸行业以及其他高纯度来源的碳捕集与封存的技术经济分析和系统综述*.

参见: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S175058361730289X?via%3Dihub>

[访问日期: 2022 年 10 月 26 日].

Madeddu, S., 2020. *欧洲工业通过直接电气化供热 (电转热) 减少二氧化碳排放的潜力*.

参见: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abbd02/pdf>

[访问日期: 2022 年 10 月 26 日].

墨卡托全球公共气候变化研究院 (MCC), 2022. *走出天然气危机的德国 - 气候保护和能源主权如何结合*.

参见: <https://ariadneprojekt.de/publikation/deutschland-auf-dem-weg-aus-der-gaskrise/>

[访问日期: 2022 年 10 月 26 日].

Mobarakeh, M., 2022. *能源密集型产业的气候中和战略: 奥地利案例研究*.

参见: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666790822001501>

[访问日期: 2022 年 10 月 26 日].

美国国家航空航天局 (NASA), 2022. *技术就绪度*.

参见: https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/technology_readiness_level

[访问日期: 2022 年 10 月 26 日].

自然资源保护协会, 2022. 中国重点行业于2025年达到集体排放峰值.

参见: <https://www.nrdc.org/experts/jake-schmidt/chinas-top-industries-can-peak-collective-emissions-2025>

[访问日期: 2022年10月26日].

Nurdiawati, A., 2021. 能源密集型产业实现深度脱碳: 现状、技术和政策回顾.

参见: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/9/2408>

[访问日期: 2022年10月26日].

Ritchie, H., Roser, M. & Rosado, P., 2020. 能源.

参见: <https://ourworldindata.org/energy>

[访问日期: 2022年10月26日].

德国联邦统计局, 2022a. 德国能源密集型产业的重要性.

参见: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Industrie-Verarbeitendes-Gewerbe/produktionsindex-energieintensive-branchen.html>

[访问日期: 2022年10月26日].

德国联邦统计局, 2022b. 关于天然气供应的事实: 天然气是工业和私人家庭最重要的能源来源.

参见: [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/07/PD22_N044_43.html#:~:text=Erdgas%20war%20im%20Jahr%202020%20der%20wichtigste%20Energietr%C3%A4ger%20mit%20einem,%25\)%20sowie%20Kohle%20\(16%20%25](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/07/PD22_N044_43.html#:~:text=Erdgas%20war%20im%20Jahr%202020%20der%20wichtigste%20Energietr%C3%A4ger%20mit%20einem,%25)%20sowie%20Kohle%20(16%20%25)

[访问日期: 2022年10月26日].

德国联邦环境署 (UBA), 2019. 能源管理系统实践.

参见: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/energiemanagementsysteme-in-praxis>

[访问日期: 2022年10月26日].

德国联邦环境署, 2020. 水泥行业的脱碳.

参见: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/dokumente/factsheet_zement-industrie.pdf

[访问日期: 2022年10月26日].

德国联邦环境署, 2022a. 2021年温室气体排放增加了4.5%.

参见: <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/treibhausgasemissionen-stiegen-2021-um-45-prozent>

[访问日期: 2022年10月26日].

德国联邦环境署, 2022b. 温室气体排放.

参见: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/treibhausgas-emissionen>

[访问日期: 2022年11月18日].

联合国气候变化框架公约 (UNFCCC), 2015. 巴黎协定.

参见: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/parisagreement_publication.pdf

[访问日期: 2022年10月27日].

联合国, 1992. 联合国气候变化框架公约.

参见: https://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/conveng.pdf

[访问日期: 2022 年 10 月 27 日].

联合国, 1998. 联合国气候变化框架公约京都议定书.

参见: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>

[访问日期: 2022 年 10 月 27 日].

VCI, 2019. 2050 年化学路线图-- 德国化学工业实现温室气体中和.

参见: <https://www.vci.de/vci/downloads-vci/publikation/2019-10-09-studie-roadmap-chemie-2050-treibhausgasneutralitaet.pdf>

[访问日期: 2022 年 10 月 26 日].

德国全球变化咨询委员会 (WBGU), 2009. 转型中的世界-- 可持续生物能源和土地利用.

参见: <https://www.wbgu.de/de/publikationen/publikation/welt-im-wandel-zukunftsfaehige-bioenergie-und-nachhaltige-landnutzung#sektion-downloads>

[访问日期: 2022 年 10 月 27 日].

世界资源研究所, 2004. 温室气体议定书. 企业会计和报告标准.

参见: <https://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/standards/ghg-protocol-revised.pdf>

[访问日期: 2022 年 10 月 26 日].

Website



Wechat

