



中德能源与能效合作

Energiepartnerschaft

DEUTSCHLAND - CHINA

# 重工业低碳转型之路——中国和德国循环经济措施的作用

本报告在德国联邦经济和气候保护部发起的双边能源伙伴关系框架下编制。



## 出版说明

### 发行方

德国国际合作机构

中德能源转型研究项目 (EnTrans)

项目负责人: Markus Wypior

塔园外交办公楼 2-5

北京市朝阳区亮马河南路 14 号

邮编: 100600

北京, 中国

[www.energypartnership.cn](http://www.energypartnership.cn)

### 作者

Hannah Langmaack (第一作者), 德国能源署 (dena)

Leon Flöer, 德国能源署 (dena)

Pascal Hader Weinmann, 德国能源署 (dena)

Martin Albicker, 德国能源署 (dena)

Henning Wilt, 伍珀塔尔气候、环境、能源研究所

Maike Demandt, 伍珀塔尔气候、环境、能源研究所

### 图片来源

德国联邦经济和气候保护部 (BMWK) /封面与插图

第6页: shutterstock/Lambrett

第9页: shutterstock/3rdtimeluckystudio

第13页: shutterstock/Hyper\_Story

第19页: shutterstock/rob6777

第27页: shutterstock/graja

第36页: shutterstock/Owl\_photographer

第45页: shutterstock/Andrey\_Popov

第50页: shutterstock/Leonardo da

### 设计与排版

Heimrich & Hannot 有限责任公司

### 更新时间

2023年12月

本资料页是中德能源转型研究项目 (EnTrans) 的出版物。EnTrans 项目是中德能源与能效合作伙伴的组成部分之一, 项目致力于为中德两国政府和相关能源智库提供政策建议。

EnTrans 的德方执行机构为德国国际合作机构 (GIZ)、德国能源署 (dena)、德国智库 Agora 能源转型论坛; 中方执行机构为电力规划设计总院、中国南方电网能源发展研究院、中国科学院应用生态研究所。

### 项目管理与协调

刘雪玲, 德国国际合作机构

### 免责声明

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对其网站相关内容负责, 德国国际合作机构和相关作者不对其内容承担任何责任。本文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, 德国国际合作机构和相关作者概不承担任何责任。

能源合作伙伴



实施机构



合作伙伴



# 目录

目录 .....	3
执行摘要.....	5
<b>1 概述.....</b>	<b>7</b>
1.1 能源密集和碳密集产业的作用 .....	7
1.2 循环经济是工业向气候中和转型的重要组成部分 .....	8
<b>2 循环经济框架.....</b>	<b>10</b>
2.1 循环经济原则 .....	10
2.2 循环经济助力脱碳 .....	11
<b>3 德国、欧洲和中国循环经济概述 .....</b>	<b>13</b>
3.1 欧洲 .....	13
3.2 德国 .....	14
3.3 中国 .....	15
<b>4 实现高耗能原材料的物质流闭环 .....</b>	<b>18</b>
4.1 金属的回收利用 .....	18
4.2 纸张和纸板 .....	21
4.3 玻璃 .....	22
<b>5 建筑材料效率措施 .....</b>	<b>25</b>
5.1 材料效率 .....	25
5.2 欧洲和德国的建筑行业现状 .....	28
5.3 中国的现状 .....	29
<b>6 塑料循环解决方案 .....</b>	<b>32</b>
6.1 欧盟和德国现行政策概况 .....	32
33	
6.2 中国现状 .....	33
6.3 回收利用工艺 .....	34
6.4 生物塑料 .....	36
6.5 回收方法面临的挑战 .....	38
<b>7 循环经济措施带来的节能潜力 .....</b>	<b>40</b>
7.1 回收带来的潜在排放和节能 .....	40
7.2 塑料循环解决方案的节能潜力 .....	41
7.3 混凝土材料效率的节能潜力 .....	42
<b>8 政策建议.....</b>	<b>44</b>
8.1 减少初级和二次原材料之间的经济不对称 .....	44
8.2 创造需求 .....	46
8.3 循环设计 .....	47
8.4 开发适当的基础设施 .....	48

结论 .....	50
略语 .....	51
图片列表.....	53
参考文献.....	54

# 执行摘要

本报告旨在总结“实现重工业低碳转型的方法及中德循环经济措施的作用”研究的核心成果，是中德能源转型研究项目的重要产出。报告着重阐述了循环经济战略如何加速中德两国重工业的低碳转型进程。

研究发现将循环经济原则融入脱碳过程是至关重要的。虽然提高能效、采用可再生能源及碳捕集技术是众所周知的主要减排措施，但资源高效利用和循环经济也是其中的关键环节。循环经济战略旨在通过资源节约、高效的资源使用和延长产品寿命等措施，最大限度地减少资源消耗。

报告着重强调，从传统的线性生产模式向循环经济模式的转变，是通过减少废物产生并促进再利用和回收来实现的。这种循环方式不仅减少了物料消耗，也提升了工业过程的能效。

报告聚焦于碳密集型和能源资源密集型行业，重点研究钢铁、铝、玻璃、水泥及造纸行业的回收过程，并深入剖析了次级原料的应用潜力，提出了实施循环经济措施所面临的机遇与挑战。这些挑战包括二次材料含有的杂质、获取难度、精确分类方法以及回收过程所需的基础设施建设等问题。

报告概述了金属、纸张和玻璃为重点的高耗能原材料的回收过程，并描述了这些高耗能材料在中德两国的生产实践现状。

对于塑料，报告集中探讨了三种循环解决方案：机械回收、化学回收和生物塑料。尽管机械回收技术在全球范围内已较为成熟，但随着化工行业向可持续发展的转型，化学回收的潜力预计将进一步提升。鉴于水泥和混凝土的生产伴随着大量排放，报告还特别指出了建筑行业的材料效率问题。提出的建议包括优化建筑设计、减少熟料含量和使用预制技术来减少排放。

根据各章提出的潜力和挑战，报告针对中国特定的国情背景 and 具体问题，提出了一系列政策建议用以解决以下问题：

- **促进公平的原材料经济：**通过技术支援、潜在税收优惠和生产者责任延伸制度，缓解原材料与二次材料之间的经济差距。
- **刺激循环需求：**通过制定回收含量标准和利用政府采购来推动循环产品的需求。
- **推动循环设计：**通过（尤其）在建筑领域推行生态设计指令，提升可回收性和可持续做法。
- **建立循环基础设施：**建设有弹性的循环基础设施，设立回收配额、重复使用体系和促进塑料回收利用的激励框架。

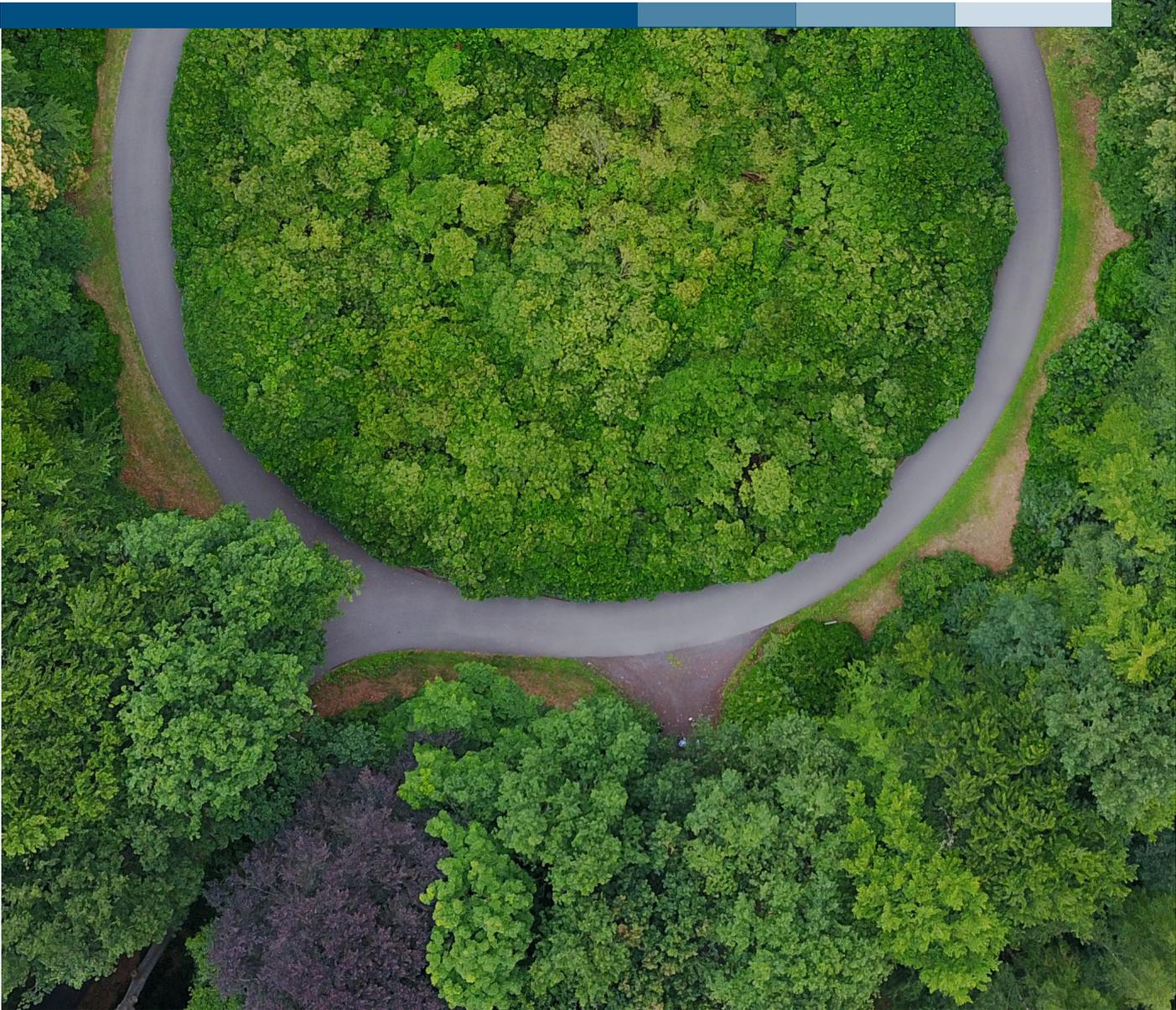
综上所述，本报告强调了循环经济战略在引导重工业向低碳发展转型中的关键作用，并呼吁共同努力，促进循环利用、控制排放和优化资源利用。中德能源转型研究项目致力于成为促进可持续工业转型的先锋。



project serves as a beacon for sustainable industrial transformation.

# 1

## 概述



# 1 概述

## 1.1 能源密集和碳密集产业的作用

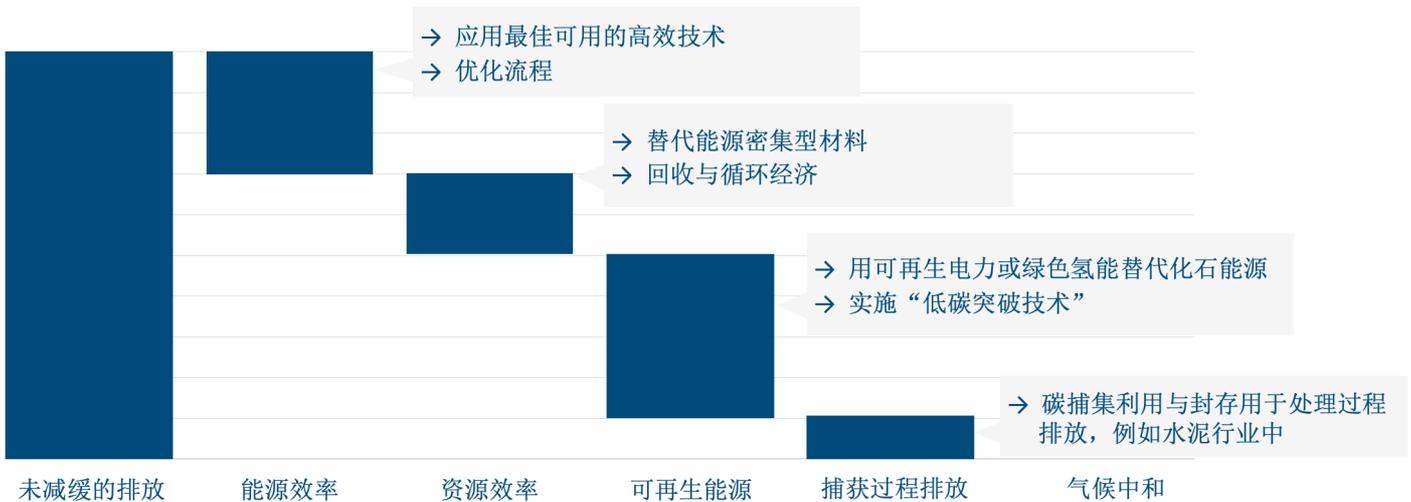
与以往任何时候相比，当今减缓气候变化和构建碳中和未来的需求更加迫切。重工业是仅次于电力部门的全球第二大二氧化碳排放源（IEA，2023），大多数工业排放来自钢铁、水泥和化学品等三大行业。随着全球经济和人口增长，对材料和商品的需求相应增加，包括碳密集产业的材料。尽管中国人口增长终会放缓，但外贸和基础设施建设的改善将持续带来对原材料的需求，如钢铁、原料铝和水泥（IEA，2021）。当前与可再生能源和生产效率相关的脱碳措施，正面临着随产量增长而排放量增加的风险。

全球的钢铁、塑料、氨和水泥等基础材料和化学品的生产排放正在增加，排放量约占总排放量的 20%（材料经济学公司，2050 年工业转型报告，2019）。除非采取重大举措，否则仅基础材料的生产就会耗尽实现 2°C 目标所预留的“碳预算”。这将使全球变暖“远低于 2°C”的控制目标很难实现。

挑战之一是这些部门的排放被归类为“难以减排”。碳与生产过程的关系复杂，例如，碳是塑料的基本组成部分，在氨、水泥和钢铁生产中也发挥着关键作用。重工业生产的材料和化学品在下游主要价值链（如交通、基础设施、建筑、消费品、农业等）中充当基本原材料，这使工业排放成为实现净零经济的主要障碍之一（材料经济学公司，2050 年工业转型报告，2019）。

工业领域当前减少碳足迹的措施，重点强调碳捕集，但即便在碳捕集利用与封存（CCU/S）框架内，预计仍会遗留相当的排放量。

图 1：资源效率在碳中和之路上的作用



## 1.2 循环经济是工业向气候中和转型的重要组成部分

在推动重工业脱碳的过程中，人们往往更关注一些公认的措施，如提高能效、发展可再生能源以及碳捕集技术等。资源效率问题应当受到同等的关注，循环经济与此密切相关。

循环经济包括更有效的利用资源、最大限度减少浪费并避免排放。通过延长产品使用寿命、促进修复和重复使用以及材料回收，可以有效减少对原始材料和资源的需求，减少对能源密集型开采和生产过程的需求，降低与商品生产相关的温室气体排放，特别是能源密集型基础材料产业的温室气体排放。

循环经济的总体目标是通过各种措施减少绝对资源消耗，这些措施包括推广资源节约型设计、提高资源利用效率、延长产品使用寿命以及逐步过渡到可再生能源使用等。提高回收和材料效率对于短期和长期实现能源密集型材料向无化石燃料生产的转型具有巨大潜力，循环经济方法具有节省能源的潜力。据估算，全球范围应用循环经济可以减少约 5-9% 的一次能源需求（Cooper 等，2017）。



# 2 循环经济框架



## 2 循环经济框架

### 2.1 循环经济原则

循环经济思想的基础是认识到地球资源和能源使用的极限，并承认将世界视为一个相互关联的系统的重要性，在这个系统中，废物和污染被视为不良后果（Kirchherr 等，2017 年）。循环经济方法与传统的“获取-制造-使用-丢弃”线性生产商业模式截然不同，旨在使资源使用与经济增长“脱钩”。在实践中，主要意味着通过不同的手段将废物减少到最低限度，并尽可能通过再利用或再循环将材料留在经济体内（Fischer-Kowalski, M. 等，2011 年）。

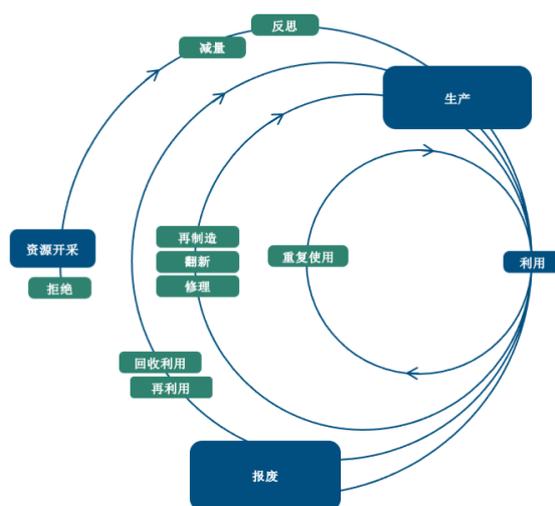
在比较产品和系统开发的线性和周期性方法时，可以区分“从摇篮到坟墓”的材料流动和“从摇篮到摇篮”的周期性流动。（Bocken 等，2016 年）。这一区别清楚地表明了线性模式和循环模式在资源流动模式上的不同。自首次使用这一概念以来，围绕“循环经济”的术语一直在分化而非趋同，同时存在着多种定义。

尽管不同学者对循环经济的定义和框架存在分歧，但对实现绝对减少资源使用的基本战略有着共识（《循环经济 2023》，Bocken 等，2016 年）。循环经济策略总体上致力于实现以下目标：

- 通过设计长寿命产品和延长产品使用周期来**减缓资源循环速度**；
- 实现资源的闭路循环**：通过回收和循环利用，实现使用后和生产之间的闭环，使资源循环流动；
- 提高资源效率或**缩小资源流量**，使每件产品消耗更少资源；
- 更新**淘汰有害或有毒的材料和工艺，并以再生生物质资源替代之。

各种被称为“R 策略”的方法被开发出来，旨在实现产品链中更少的资源和材料消耗，并使经济更具循环性。本报告采用了一个由九种不同的循环经济策略组成的“9R 框架”模型，这些策略构成了一个相互补足的等级体系。下文展示了这种在不同研究和出版物中广泛使用的 9R 框架（Reike 等，2018；Alexa Böckel 等，2022；José Potting, Marko Hekkert, Ernst Worrell 和 Aldert Hanemaaijer）。该框架显示 9R 策略是如何相互补充，以减少初级资源消耗、关闭材料循环、保持产品使用并消除废物的。

图 2：基于联合国环境规划署的 9R 循环经济策略框架



**拒绝 (Refuse)**：改变习惯，使用根本不同的（例如数字）产品或服务替代同样功能的可替代产品，或通过设计避免生产过程中的浪费，减少或消除原材料使用。

**反思 (Rethink)**：开发新的商业模式，有意识地选择材料（替代有问题的材料，开展材料创新）。加强产品的利用（例如通过产品即服务、重复使用和共享模式）。

**减量 (Reduce)**：通过更少的自然资源、材料和能源消耗，支持循环性设计，提高产品制造或使用效率。

**重复使用 (Reuse)**：重复使用状态良好、功能完好（非废物）的产品。依据其原设计目的，可能需要维修或翻新。

**修理 (Repair)**：修复和维护有缺陷产品，以便恢复其原始功能继续使用。

**翻新 (Refurbish)**：使一件老旧的产品恢复并更新至最新状态。

**再制造 (Remanufacture)**：将废弃产品的部件用于具有相同功能的新产品中。

**再利用 (Repurpose)**：将冗余产品或其部件用于具有不同功能的新产品。

**回收利用 (Recycle)**：从废物中回收材料重新加工生成新产品、材料或物质，用于原始或其他用途。包括有机物回收，不包括能量回收以及回收用于燃料或回填料的材料。

## 循环经济反弹效应

与能效方面观察到的反弹效应类似，循环经济方法也可能导致意想不到的后果，例如整体产品生产和使用量的增加。尽管进行了回收利用方面的努力，但仍可能导致环境影响加剧。在生产次级产品质量低下或不太受用户欢迎的情况下，就会触发循环经济反弹。这可能导致初级产品的生产和消费增加，从而抵消了循环的收益。循环经济反弹的另一个机制是次级生产活动增加对价格的影响。为了弥补实际或预计的技术缺陷而降低再利用产品和再生材料的价格，很可能导致反弹。即使次级产品没有降价，其产量的增加也会压低自身和所有替代品的价格，从而导致反弹。在低端或高端市场上竞争的次级产品只是扩大了“蛋糕”，而不是从初级生产中分一杯羹，这也会导致反弹。

为了避免循环反弹效应，循环经济活动必须确保其所产生的产品和材料真正成为初级生产产品的替代品。

(Zink 和 Geyer, 2017)

## 2.2 循环经济助力脱碳

对于钢铁、铝、塑料和水泥等能源、资源和二氧化碳密集型行业，循环经济方法可以通过更环保和资源效率较高的价值链，在脱碳方面发挥关键作用。此外，研究认为，如果不显著提高材料的效率和重复使用，工业和能源部门的气候目标将难以实现 (Agora Industry 2022)。

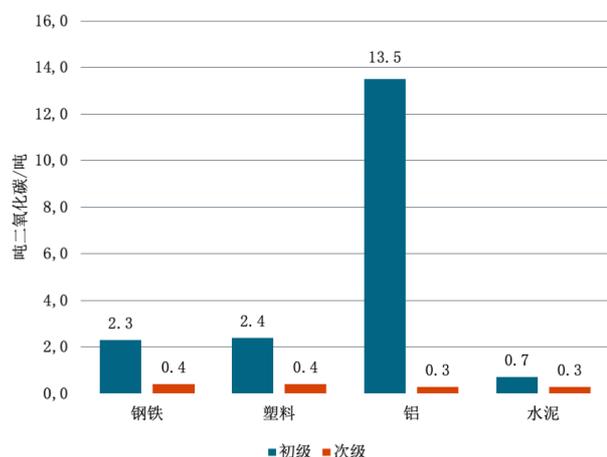
单纯关注现有初级材料生产工艺脱碳的策略面临诸多挑战，例如：实现所有相关终端用途电气化所需的巨大电力容量；实施碳捕集利用与封存等新技术所需的基础设施；某些自然和材料资源的短缺等。循环经济策略和措施不仅从能源角度，而且从整体方法角度都可以对现有脱碳策略形成有益的补充。例如，回收解决方案可以帮助减少对原生材料产品的需求。通过回收措施实现的封闭材料循环是减排的一个重要杠杆。更重要的是，从钢铁、铝或塑料等经过高能耗加工的基础材料中获得的二次材料明显减少了与新生产相比所需的能源，从而减少了二氧化碳排放。研究表明，二次材料生产可以减少高达 5 倍的能源使用 (Agora Industry 2022)。

一些国家和欧盟的循环经济措施都致力于回收利用。据估计，通过回收利用，欧洲每年可减少超过 1000 万吨二氧化碳。大部分原材料也可以通过重复使用已经生产的材料来覆盖 (材料经济学公司, 2019)。

但是，并非所有材料都可以回收利用。除了高价值材料的循环和闭环回收利用外，循环经济的第二个关键组成部分是降低每单位最终产品的材料的使用量。通过更有效利用关键产品 (如汽车、建筑或包装) 中的材料来实现。循环经济措施还可以包括其他一系列解决方案，如设计使用较少材料但提供相同性能的产品。在价值链开始阶段开采和加工原材料对环境 and 气候有着重大影响。在德国，40% 的温室气体排放是由原材料的开采和初级加工导致的。作为整体策略的一部分，回收利用等措施应与大幅减少所有使用的原材料并向前行。

图 3： 初级与次级生产途径中的二氧化碳强度因子

来源：Agora Industry 2022，基于材料经济学公司分析 (2021)、伍德麦肯锡和普氏分析公司





# 3

## 德国、欧洲和中国循环经济概述

## 3 德国、欧洲和中国循环经济概述

近年来，循环经济理念受到越来越多的关注。包括中国、欧洲与德国在内的许多国家和地区，均已制订了推动循环经济和闭环材料利用的政策。本章将介绍这些国家在废物管理和二次材料利用的现状，以及相关的框架和法规。

### 3.1 欧洲

#### 3.1.1 废物管理和二次材料利用现状

2020年，欧盟产生的不含主要矿物废物的废物总量高达7,810万吨，约占总废物量的36%，按人均计算，每位欧盟居民年均产生1.7吨废物。其中，德国（4.01亿吨）和法国（3.1亿吨）是废物总量的最大贡献国，分别占欧盟总量的19%和14%，合计约占三分之一。

在过去20年中，城市废物回收率显著提升。但是，仅有8个国家的回收率超过50%，而塞浦路斯、罗马尼亚和马耳他等国的回收率尚不足20%。到2020年，德国城市废物回收率位居欧盟之首，估计达到67%。由于各国对“城市固体废物”的定义不同，导致国家数据的可比性存在不确定性，因此城市废物管理的分析受到很大影响（EEA 2013）。欧洲环境署（EEA）的一项研究（EEA 2013）表明，不同地区间的差异显著，区域和地方政策在提高回收率方面发挥了重大作用。因此，尽管欧盟和国家目标在提升城市废物管理方面起到了总体推动作用，但地区和地方的具体实施对于取得积极结果显得尤为关键（EEA 2013）。

二次原料（SRM）市场对实现循环经济至关重要，使得可回收物能够重新进入生产价值链，减少对初级资源的依赖。

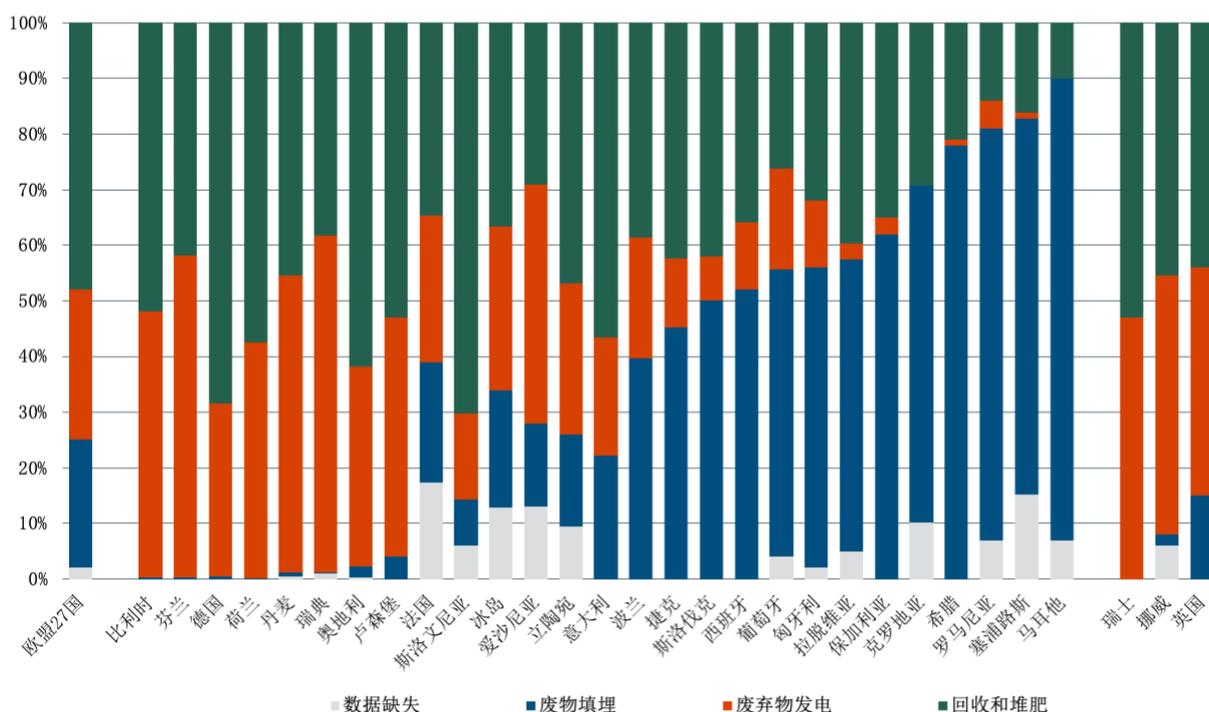
2021年，回收材料在所有使用材料中的占比为11.7%，相较于2010年仅增加了不到1个百分点。当前的缓慢进展及欧盟2030年材料需求增长的预测表明，欧盟尚未能实现其材料循环利用率的翻番目标（EEA 2022）。

尽管相关政策力图提升回收率并确保可回收物的稳定供应，但二次原料市场供给侧仍面临挑战。主要问题包括规格不一、废物和二次材料定义不明确，以及回收材料中存在有害物质等。另一方面，需求侧也表现出对二次原料信心不足的特征。人们对于投资将二次原料整合入原材料供应链的技术尚存顾虑（EEA 2022）。

图 4： 欧盟 27 国城市固体废物处理状况

来源：CEWEP 2020

2020年城市固体废物处理情况  
欧盟 27 国、瑞士、挪威和英国



### 3.1.2 目标、框架和法规

近年来，欧盟委员会已成为推动循环经济措施的主力军。2015年，随着《循环经济行动计划》（CEAP）的采纳，欧盟委员会提出了一个雄心勃勃的路线图，旨在将欧盟转型为一个循环价值创造体系。该行动计划的目标是尽可能长时间地保持材料和资源的使用，同时尽量减少废物。框架设定的具体目标包括：

- 到2030年将剩余废物量减半；
- 工业回收材料比例翻倍；
- 创造70万个新工作岗位；
- 每年创造800亿欧元的增加值。

除了环境和气候政策，《循环经济行动计划》还着重强调增进欧洲工业的竞争力和创新能力（欧盟委员会2020）。《循环经济行动计划》要求各成员国将其转化为国内法律，并包含35项关键措施，例如：

- 制定循环和可持续产品政策框架，如修复权以及扩展《生态设计指令》，增加产品循环利用。
- 为特定价值链（如包装、车辆或建筑）制定具体措施，如规定回收材料的使用比例。
- 改进现有废物法规工具，如除现有回收配额之外，设定具体废物预防目标或调整废物管理计划等。

除《循环经济行动计划》外，欧盟《废物框架指令》和《生态设计指令》主要涵盖了2015至2030年间欧盟废物立法中的30多个约束目标。一些成员国也已经制定了资源效率战略及循环经济框架。

在欧盟，材料循环利用率（CMU）是衡量材料回收量和材料总使用量的主要指标，定义是材料的循环利用量与总使用量的比率。只有奥地利、法国和荷兰制定了具体措施和目标，以避免产生废物和实现原材料消耗量的绝对减少。荷兰计划到2050年实现全面循环经济，到2030年将初级原材料消费量减半。奥地利的战略是到2030年将资源消费降至每人每年14吨，资源生产率提高50%，材料循环利用率提高到18%。法国的《废物和循环经济法》包括将资源消耗量相对于GDP降低30%的措施。

就材料循环利用率而言，德国总原材料利用中的二次原料比例约为12%。尽管某些欧洲国家在二次原料使用量上有显著增长，但德国自2010年以来仅增加了1个百分点（2010年为11%）（ifeu 2021）。

## 3.2 德国

德国在废物管理领域被公认为欧洲的先驱，这一成就在很大程度上得益于其高效的回收系统、成熟的废物能源化设施、先进的有机废弃物生物处理技术，以及较高的源头分类水准。多年来，德国的废物回收和回收率一直都呈现稳定增长态势。此外，通过避免垃圾填埋，废物管理行业显著减少了温室气体排放。目前，德国正在加强减少废物产生和提升回收效率，特别是对于一次性塑料制品。

德国每年产生的废物总量在3.25-3.5亿吨之间（净重），其中建筑及拆除废物60%，城市废物14%，有害废物5%。尽管德国建立了一个高效的废物管理体系，但废物总量在过去20年间却维持在相对稳定的水平（见图5）。这一现象可能与废物相关政策和法规的重心更多地放在后端处理而非预防和减量上有关。

图 5： 德国年废物产生量（单位：百万吨）

来源：欧洲统计局，2020



### 3.2.1 目标、政策框架和法规

德国目前正致力于制定一项全面的国家循环经济战略。迄今，已在国家和州一级制定了各种旨在促进循环经济各方面的计划和战略，涵盖循环和资源效率等议题。在国家层面，计划主要包括：

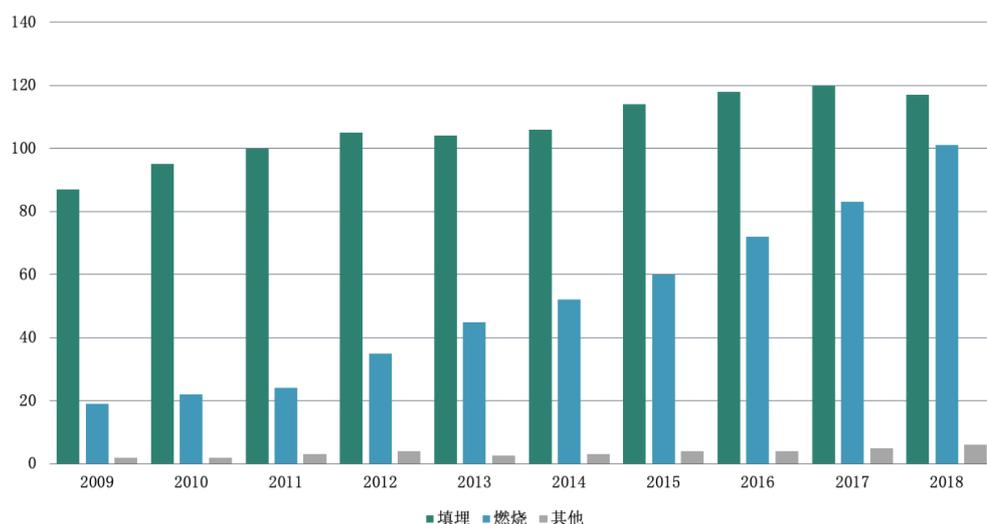
- 《德国资源效率计划 III》（ProgRes III）：涉及增强价值链各环节资源效率的措施，从原料开采、产品设计、生产和消费过程到循环经济的各个阶段；

- 《废物预防计划》：阐述了一系列影响产品生命周期各阶段的废物预防措施，包括生产、产品设计、贸易、商业及产品使用等方面的方法；
- 《原材料战略》：包括原材料供应的三大支柱中的 17 项具体措施：本地原材料、进口和回收；
- 《国家可持续消费计划》：旨在促进可持续发展目标，特别是目标 12：“确保可持续消费和生产模式”；
- 《循环经济法》：构成了实施循环经济的法律基础，在国家层面落实欧盟的废物立法要求。该法律主要规范产品报废后的处理，确保安全处置废物。

## 3.3 中国

图 6：中国城市固体废物处理状况

来源：根据 Lee 等的 2020 年数据，结合中华人民共和国住房和城乡建设部 2019 年数据进行调整



### 3.3.1 废物管理与再回收材料现状

总体而言，中国越来越关注减少对土壤、空气和水体的污染，以及降低温室气体排放。废物管理被视为实现这些目标的关键环节。除了执行源头分类和引入多样化的废物处理方法外，中国也开始着眼于废物减量和上游干预措施，力求减少废物产出（NAMA 2019）。

国内废物处理主要采用卫生填埋、焚烧、堆肥和水泥窑协同处理等方法。值得注意的是，焚烧处理量迅速增加，2003–2017 年，焚烧处理的废物比例从 4.9% 跃升至 40.2%。虽然在本研究开展期间未能获取更多近期数据，但有理由相信自 2017 年以来，焚烧处理的比例持续稳步增加。这一增长可以归因于土地需求减少、可控制的污染水平、较高的运行效率和持续处理能力的提高等因素。因此，随着技术的逐步成熟，焚烧已逐渐取代卫生填埋，成为中国废物处理的主导技术（Dr. Xianshan Ma 2023）。

虽然焚烧处理的废物量在增加，但填埋仍是中国的主要废物处置方法。2017 年，中国城市产生的 2.1 亿吨生活垃圾中，近 60% 被送往填埋场（Lee 等，2020）。这一做法伴随着一系列问题，包括填埋场占地和经济成本、填埋气体排放，以及对土壤和水体的污染等（Lee 等，2020）。作为新废物管理战

略的一部分，中国正在将废物处置的重点从填埋转向焚烧。尽管焚烧相对于填埋有诸多优势，但其应用仍面临多种挑战和问题，如城市固体废物湿度高、废物利用效率低和颗粒物排放造成的空气污染等。

随着 20 世纪 90 年代以来经济的发展和生活水平的提升，中国对塑料产品的需求激增。当时，中国缺乏原材料，产品质量无法满足日益增长的需求。为了应对经济快速发展带来的国内资源短缺，中国开始大量进口废物原材料。但随着时间推移，出口到中国的可回收材料质量逐渐降低，有些国家甚至以利用原材料的名义进口不可回收废物（Pieter van Beukering, Li Yongjiang, Zhou Xin 1997）。

其后，随着进口和国内废物量的增长超过中国的处理能力，加之进口废物质量的下降，中国开始实施更为严格的废物进口政策，提高了对进口废物的质量要求。从 2018 年初开始，中国政府禁止进口多种废物，包括塑料。这一禁令对全球回收行业产生了重大影响，因为中国曾是世界上最大的废塑料进口国，处理了大量难以回收的塑料。

## 再回收材料

截至 2021 年末，涵盖废钢铁、有色金属、废塑料、废纸、废轮胎、废弃电子电器产品、报废汽车、废旧纺织品、废玻璃及废电池等十大类别的再生资源总量达到约 3.81 亿吨，同比增长了 2.4%。其中，废塑料、废纸、报废汽车、废旧纺织品及废电池（铅酸电池除外）的增长率均超过了 10%（Dr. Xianshan Ma 2023）。尽管中国在过去二十年里一直致力于提高回收率，但报告显示，该比率长期徘徊在 5%-20% 之间，并且缺乏可靠的统计数据支持（Hu 等，2018b）。

虽然当前没有设定具体的回收配额，但政府已确立总体目标来引导回收。例如，国家发改委等部门发布的《关于加快废旧物资循环利用体系建设的指导意见》明确了一系列战略举措。这些措施意在构建健全的废物资源综合利用基础设施，并计划在 2025 年之前建成逾千个绿色分类处理中心。最终目标是将九大类再生资源的回收总量提升至 4.5 亿吨，这表明政府正在全面推进建设一个可持续的废物管理体系，以提升中国在资源回收利用方面的效率（Dr. Xianshan Ma 2023）。

## 3.3.2 目标、框架和法规

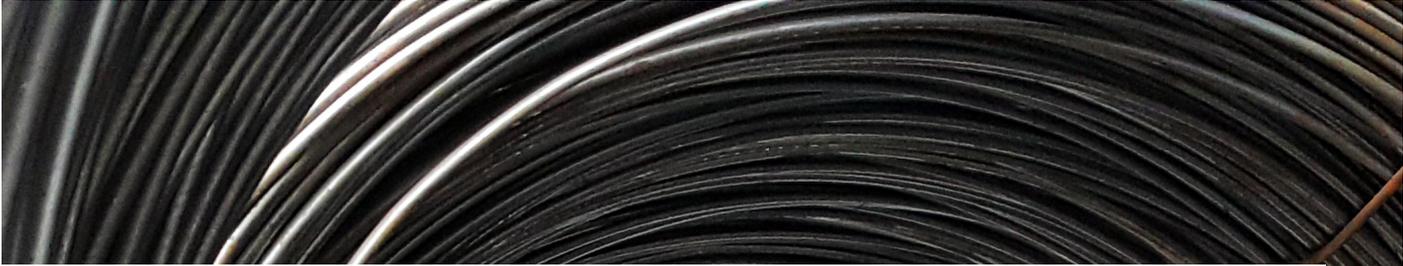
自上世纪 80 年代以来，中国相继出台了一系列旨在推进循环经济的法律法规、产业政策、经济政策和环境政策。这些政策最初主要聚焦于减少工业污染。虽然 1995 年就已出现有关循环经济的政策措施，然而直到 2002 年，中国政府才正式将循环经济作为一项新的发展战略，以缓解快速经济增长与环境影响以及原材料短缺之间的矛盾。2004 年，国家发改委在被指定负责循环经济战略的全面实施后，将其视为一个整体战略，而非仅仅局限于环境政策领域（Hu 等，2018b）。2000 年以来，各种法规陆续出台，包括禁止使用一次性塑料餐具、禁止生产和销售低于 0.025 毫米厚度的塑料购物袋，以及在零售场所实施塑料袋收费政策，均旨在减少包装废物。

其后，2008 年的《循环经济促进法》、2013 年的《循环经济发展战略及行动计划》以及 2021 年的《“十四五”循环经济发展规划》等法规，直接指向促进循环经济发展。提出一系列行动建议，如重新设计关键产品或增加废物收集和回收利用率等（EllenMcArthurFoundation 2022）。

“十四五”规划提出的具体目标包括：

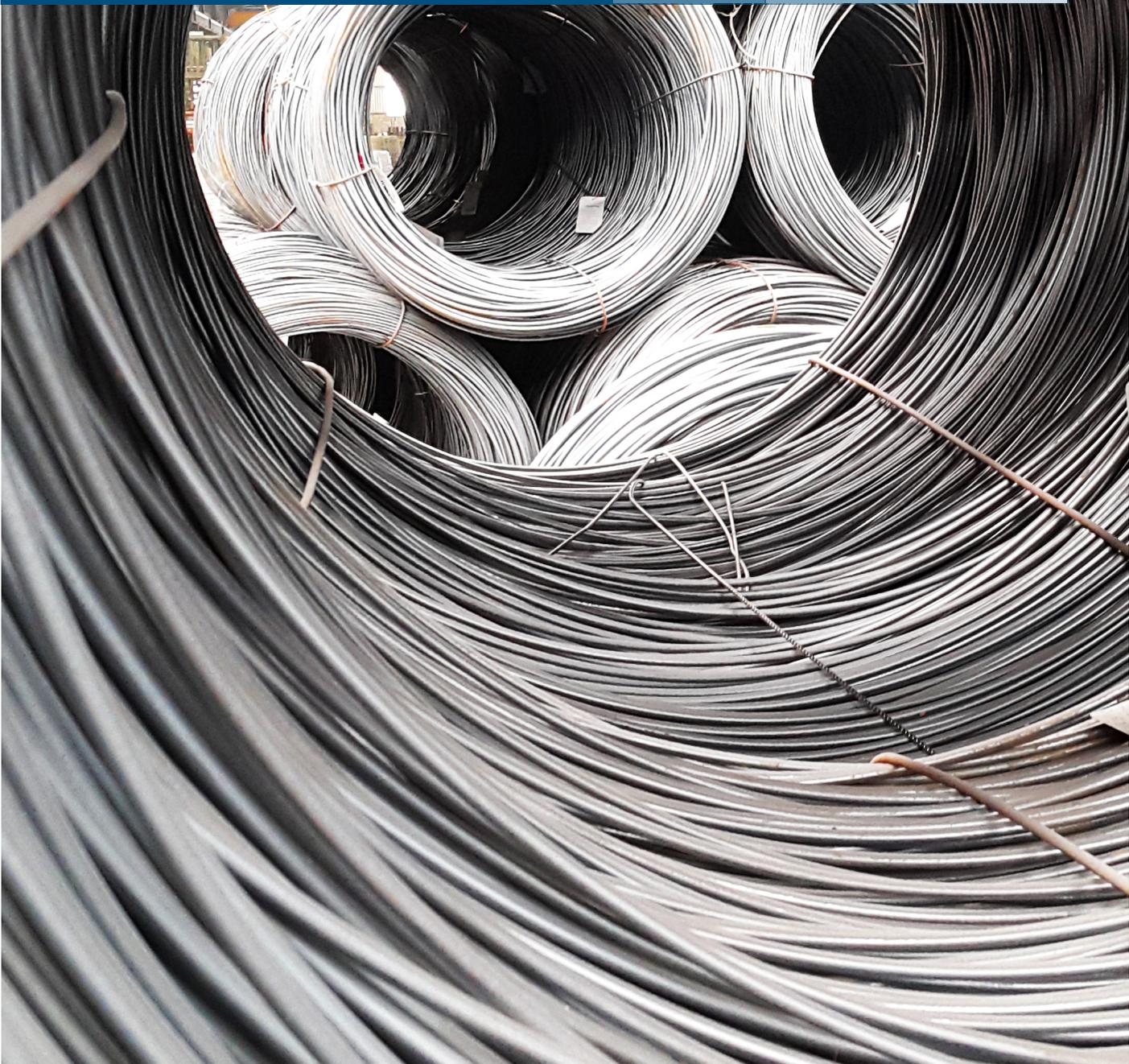
- 资源生产率较 2020 年提高 20%；
- 单位 GDP 能耗和水耗分别较 2020 年降低 13.5% 和 16%；
- 作物秸秆利用率达到 86%，大宗固体废物和建筑废料的利用率均达到 60%；
- 废纸回收利用量达到 6000 万吨，废钢铁达到 3.2 亿吨；
- 再生有色金属产量达到 2000 万吨；
- 资源综合利用产业产值达到 5 万亿元人民币（约合 7,730 亿美元）；
- 深化农业循环经济发展，构建循环型农业生产体系；
- 构建资源综合利用产业体系，提升资源利用率，形成废物资源综合利用体系，培育资源节约型社会。

与欧盟相比，中国对循环经济概念的理解更广泛：欧盟更侧重于废物层级结构和产品政策，而中国则一直在应对一系列问题，包括水污染和空气污染物等（McDowall 等，2017）。中国 2008 年发布的《循环经济促进法》中，循环经济是指在产品生产、流通和消费环节进行的减量化、再利用和回收（3R）活动。



# 4

## 实现高耗能原材料的物质 流闭环



## 4 实现高耗能原材料的物质流闭环

钢铁、铝、玻璃以及造纸等行业不仅碳排放密集，而且对能源与资源的消耗也极为巨大。本章着重梳理金属、纸张和玻璃等高耗能原材料的回收流程，并探讨德国与中国这些高耗能材料的生产实践。

政策制定者通常仅关注于减少原生材料（如低碳初级钢铁和水泥）的碳足迹，往往忽略了一个重要方面，即通过实现更为循环和资源高效的价值链，来减少原生材料（例如钢铁、

铝、水泥和塑料）的生产，达到降低潜在的排放的目的（Agora Industry 2022）。

### 4.1 金属的回收利用

金属以其力学强度、弹性以及良好的导电和导热性能，成为最广泛使用的原材料之一。尽管由于其物理特性，大多数金属理论上可以实现完全回收，但实际操作中，大量的合金和小零件使得单一品种的金属回收变得极为困难。

金属回收时会经历熔化过程，如果废料中的杂质含量较高或者需要分离合金组分时，必须对熔融金属进行精炼处理。对于锰、锌等易控制沸点的金属，可以采用物理精炼工艺，例如蒸发、蒸馏和挥发；而化学精炼工艺则可能涉及选择性氧化。

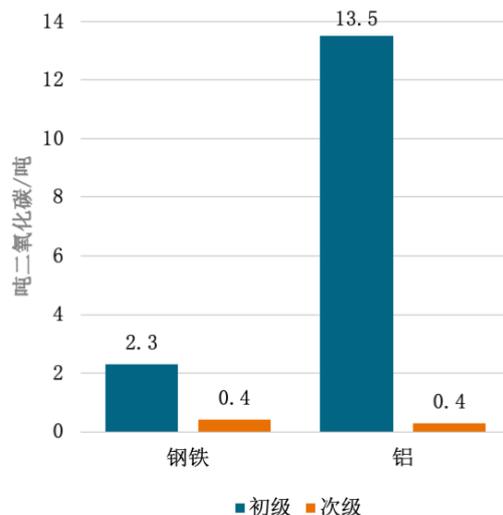
回收过程的经济效益受到工艺成本、最终产品质量以及金属在回收过程中的损失率的影响。此外，成本还受到金属和废料价格波动的高度影响。为了确保有效的金属回收，将回收的金属依据特性分类至相应组别至关重要，这些组别包括铁及铁合金（Fe 金属）、轻金属（如铝、镁、钛）、有色金属（如铜、铅、锌、锡、镍）以及贵金属和特种金属（如金、铂）等。

下面着重介绍钢铁和铝的回收，它们在初级生产过程中会产生很高的能量需求，同时，在实现回收后又具备巨大的能源节约潜力，另外一个原因是其巨大的产量。通过高炉生产初级钢的能量需求为每吨钢 3.5-4.2 兆瓦时，在中国这一生产过程中每吨钢铁大约产生 1.8-2.4 吨二氧化碳排放。而废钢的回收过程能量需求则降至每吨粗钢 0.83-1.67 兆瓦时，相比初级生产节约了大量能源。回收一吨钢大约可以节约 1.4 吨铁矿石、0.8 吨煤炭、0.3 吨石灰石和添加剂，同时减少约 1.67 吨二氧化碳的排放（EuRIC 2020）。由于钢铁的回收主要在电弧炉中完成，而电弧炉以电力为主要能源，因此二氧化碳的排放量在很大程度上取决于所用电力结构（Worrell and Carreon 2017）。

图 7： 全球平均条件下，初级与次级生产途径的二氧化碳排放强度因子对比

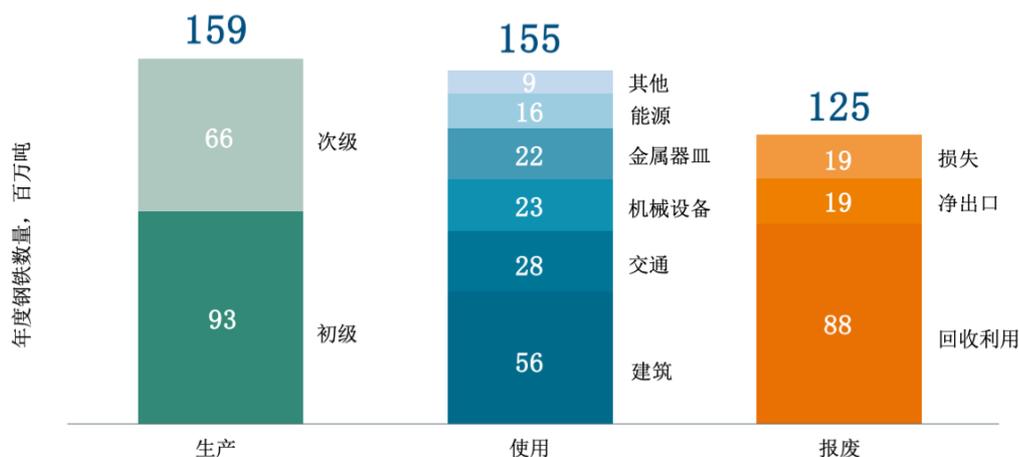
来源：Agora Industry 2022

在铝的生产过程中，首先需要在供热条件下将铝土矿转化为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。要生产 1 吨铝，大约需要 2 吨 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。在铝的霍尔-埃鲁电解法工艺中，每生产一吨铝需要消耗 13 至 15 兆瓦时的电能，使得初级铝生产成为最为能源密集的工艺之一。



相比之下，回收铝只需要霍尔-埃鲁电解法工艺所用能量的 5% 至 10%（即每吨铝仅需 0.65 至 1.5 兆瓦时）就足够了，同时还避免了铝土矿的开采过程（Lernhelfer 2023; Brunn 2021）。

图 8： 2019 年欧盟钢产量、利用和回收统计



#### 4.1.1 德国与欧洲金属回收的生产实践

德国实现了高比例的金属废料回收利用，例如建筑行业，大约 88% 的钢构件得以回收利用，另外 11% 实现了再利用。此外，由电解镀锡的钢板制作的白铁包装，其回收率也超过了 90%。不锈钢产品的回收率在 60%-92% 之间（Fraunhofer 2019）。

鉴于金属的使用与消费量远超可回收金属废料的供给，德国在金属生产上仍然依赖进口的初级原材料。因此，回收利用的提升潜力仍然有限。只要建筑和商品中的金属存量还在不断增加，这些长期附着的金属存量又未被送去废物回收，就不可能主要或完全通过二次材料来满足金属需求（NABU 2023）。

尽管如此，但某些金属的回收率仍具有显著提升空间。据德国联邦环境署预估，生产的铁和钢中有 67%，铜、铅、铝和锌中高达 90% 由回收料构成（NABU 2023）。为提高回收率，仍存在一些挑战。首先需要加强次级金属的回收和处理，实施高效的源头分类和处理方法，确保回收材料的高品质是至关重要的。冶金过程中杂质的处理也是挑战之一，必须制订策

略，以有效去除污染物并妥善处理回收过程中产生的副产品。另外，为建立最终消费者对使用二次原料的信心，其所设定的质量要求也值得高度重视（Hiebel 2016）。

德国和欧洲的金属回收生产实践与共同市场和相关法规紧密相关。2019 年，欧盟的钢铁产量为 1.59 亿吨，其中 58% 来自初级钢，42% 来自通过电弧炉生产的二次钢，如图 8 所示。值得一提的是，钢的回收率达到了 88%（Agora Industry 2022）。在认识到应对气候变化的紧迫性后，钢铁制造商正在努力提高二次钢在生产中的占比。

随着欧盟地区钢屑存量的逐年增加，利用二次钢取代初级钢生产的潜力也在不断扩大（Agora Industry 2022）。Agora Industry（2022）认为，到 2050 年，欧盟 80%-90% 的钢需求理论上可以通过钢屑回收渠道得到满足。

然而，钢铁回收面临多项挑战。铜和其他元素的污染可能会降低回收钢的质量，限制其应用范围（见下文方框——扩大回收的其他措施）。欧洲缺乏将回收钢加工成平面和长形工件的小型钢铁厂，这可能导致生产瓶颈。另外，钢制品对铜

图 9： 2019 年欧盟铝生产、使用和回收统计数据

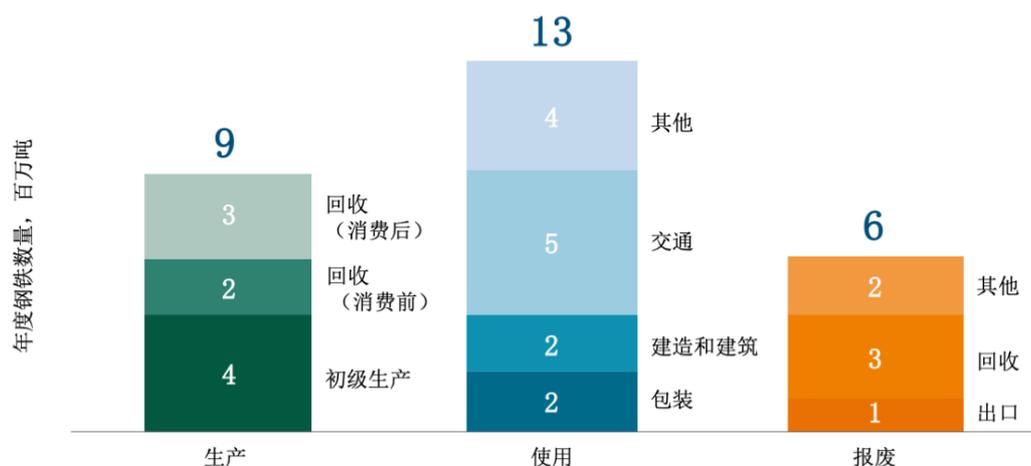
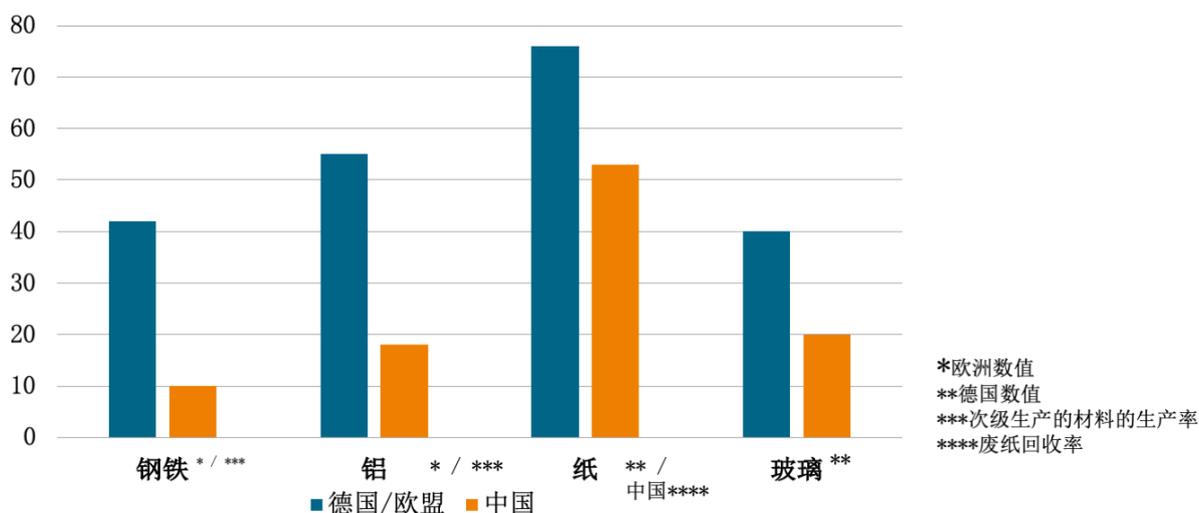


图 10：德国、欧盟和中国的金属回收率比较 (%)



含量的耐受度差异也需要在产品阶段以及收集和加工实践中仔细考虑 (Agora Industry 2022)。尽管存在这些挑战，鉴于全球所面临的铜污染问题，提高钢的质量势在必行 (Agora Industry 2022)。

过去二十年中，欧盟已由自给自足的铝生产者转变为重要的净进口国，2019 年铝消费量的 40% 以上依赖进口。由于铝制品的使用寿命较长，铝废料的末端产量受到限制，导致可用于回收的铝的数量有限。

2019 年，欧盟内部报废的 500 万吨铝中，有 300 万吨被回收，剩余 200 万吨则进入垃圾填埋场、在低效的回收过程中流失或非法出口。多数回收铝被降级用于铸造铝产品，因为这些产品对杂质有较高的耐受度 (见图 9)。

Agora Industry (2022) 指出，选择性拆除和去除污染对于提高建筑和拆除废物中铝的回收潜力至关重要。原铝通常不以纯产品形式销售，而是以各种冶金合金形式出售，以满足不同用途。有效回收和利用报废铝依赖于识别和分类这些合金及其品质。为了实现铝的闭环回收的最大潜力，需要运用先进技术进行铝的粉碎、识别和铝材分类。

#### 4.1.2 中国金属回收的生产实践

随着工业化和城镇化的快速发展，中国已成为全球最大的钢铁生产国，2019 年产量高达 9.96 亿吨，占全球总产量的 53% (Lin 等, 2021)。中国通过电弧炉生产的二次钢仅占粗钢产量的 10%，远低于全球平均水平 29%。这主要是由于中国废钢质量参差不齐以及短流程电炉钢铁冶炼技术的复杂性所致。同时，现有的废钢分类技术缺乏标准化，导致废钢成分规范化程度不够。

##### 扩大回收的其他措施

钢铁回收面临的一个关键问题是铜污染，这种污染无法通过氧化过程消除。铜会导致钢的质量下降并导致其变脆。此外，回收比率取决于特定的领域。例如，汽车废料的污染程度较高，而在使用过程中又需要高纯度的钢材。

为解决这一问题，有多种途径可供选择。首先，可以改变产品设计，以其他材料替代铜。其次，可以提高钢在应用中对污染的容忍度，直到出现更高质量的可用钢材。在建筑领域，可以采取次优选择的策略，包括对每个部件的钢质量要行单独测试。Agora Industry 2023 报告认为，将回收物含量提高到 50% 是可行的。

在技术层面，存在各种创新技术从液态钢中去除铜，这些技术目前处于早期开发阶段 (技术成熟度低于 4)。其中，常温浸出和氢脆性被认为在能源需求和效果方面具有巨大潜力。

另一种方法提供了废料使用和混合的灵活性。在直接还原铁 (DRI) 工艺中，可以灵活地添加 0 -100% 的废铁。这种混合方式可以增加对杂质的容忍度。

在材料效率的提升方面，减少制造废料，汽车轻量化设计，优化建筑设计，以及用其他材料 (例如木材) 替代钢材，都可以有效减少初级钢的生产。

(Agora Industry 和 System IQ 2023)

2020年，中国钢铁行业的废钢资源总量约2.1亿吨，主要用作电弧炉的原料、高炉生产的辅助材料，以及用于调节转炉的热平衡。然而，技术限制导致在短流程电炉钢铁冶炼过程中，铜、锌、铅、磷、氮和氢等杂质难以得到有效控制。

中国钢铁工业协会（CISA）颁布的废钢分类国家标准规定，废钢中的碳含量应低于2.0%，硫磷含量通常不超过0.05%。此标准还对非合金废钢提出了要求（Dr. Xianshan Ma 2023）。这一要求，加上国内废钢质量的参差不齐，限制了短流程电弧炉的广泛应用，后者目前主要用于生产型材、线材等低端产品和部分不锈钢。

此外，中国工业化的历史相对较短，废钢的积累量较小，也限制了电弧炉钢材的产量。初期钢铁产能过剩导致生铁价格低于废钢价格，这从成本角度削弱了废钢的市场竞争力。废钢的分类和整理工艺尚未成熟，处理和分拣成本以及技术要求相对较高。尽管近年来中国已实施了废钢回收利用的相关政策和标准，但满足这些标准的企业数量仍然有限（Dr. Xianshan Ma 2023）。

2022年，中国的初级铝产量约为4000万吨。由于电力生产主要来自燃煤电厂，导致2020年的排放量高达6.7亿吨。根据国际铝业协会的数据，2019年的铝回收率仅为17%（Liu和Patton 2023；Guoping和Ge 2021）。

## 4.2 纸张和纸板

纸是一种用植物纤维制成的材料。纤维的内聚力是通过毡化和自粘合产生的。用于制作纸浆的植物纤维包括木浆、纤维素和废纸纤维。纸浆是通过在160°C对木片进行湿法化学处理获得的，由于纸浆纤维与木质素分离，因此具有良好的强度特性和高白度（Nurdiawati和Urban，2021）。

废纸的杂质分类是按照不同纸品的质量来区分的，例如纸板和纸张。废纸常含有多种添加剂，如打印油墨。湿法分类工艺可将纸张分解成单个纤维，以实现添加剂与杂质的分离。使用化学品（如氢氧化钠和脂肪酸）能有效分离打印油墨，但这一工艺会产生大量的废水，需要在造纸过程中进行处理和污泥管理。

技术上，纤维的回收利用次数是有限的，随着回收次数的增加，纤维的长度和强度会逐渐降低，通常只允许5-8次回收循环，之后纤维将变得脆弱无法再利用。这限制了二次纤维在某些纸品中的使用。

### 4.2.1 德国和欧洲纸张和纸板回收的生产实践

德国每年生产约2200万吨纸张和纸板，涵盖大约3000种不同类型。平均每天处理40,000吨废纸生产新纸张。每吨纸张的生产平均使用790公斤废纸（Umweltbundesamt 2022a）。

在德国，从原生纤维（如木材和木浆）生产的纸张和利用二次纤维（即废纸）生产的纸是同一枚硬币的两面，各占50%。德国的废纸利用率达到了79%，在全球处于领先地位。然而，废纸回收再利用的过程需要不断地补充新鲜纤维，这可以通过直接添加纸浆实现，也可以通过使用原生纤维纸来实现，这些原生纤维纸在使用后，其初级纤维可以用于增强废纸的循环利用。（Umweltbundesamt 2022a）。

德国纸张生产能耗约为每吨纸2.75兆瓦时。造纸行业正努力降低能耗。与此同时，多家企业投资于额外的工艺步骤，目

的是从回收纸中生产出亮度更高、表面更平滑的纸张，这无疑增加了能源需求，因此总能耗从1990年的440亿千瓦时增至2020年的590亿千瓦时，增幅约50%（Umweltbundesamt 2022a）。

回收利用纸张和纸板的主要优势是保护森林、降低生产工艺的能耗以及减少造纸的用水量，因为回收纸的用水量仅为原生纤维纸的三分之一至七分之一。

2018年，德国的回收纸入料比例（即回收纸在所有纸张总产量中的比例）为76%（Umweltbundesamt 2022a）。包装纸和纸板的回收纸入料比例为100%，而绘图纸和卫生纸的回收纸入料比例分别仅为51%和50%，相对较低。基于这些数据，德国环境署认为，在杂志纸、办公行政用纸以及卫生纸的生产中使用更多回收纸具有进一步的技术潜力，改善潜力预计可达80%左右（Purr et al. 2019）。

### 4.2.2 中国纸张和纸板回收的生产实践

根据中国造纸协会的数据，2022年中国废纸回收利用率为53.1%（Birkners Paper World 2023）。过去，中国造纸行业在很大程度上依赖进口废纸。然而，进口废纸中日益增多的未分类和部分受污染的低质量纸张，导致其生产区域面临环境污染问题（Shi and Zhang 2023）。自2017年起，中国通过对一系列进口政策的调整，包括禁止混合废纸进口及多次调整中间产品的进口关税等，重塑了全球和国内的纸浆和造纸产业格局。此后，中国由曾经的最大废纸进口国转变为高质量纸浆产品进口国，2022年的废纸进口量从2013年的3000万吨骤降至仅5.7万吨（Birkners Paper World 2023）。尽管如此，根据《“十四五”循环经济发展规划》（2021-2025年），中国仍计划将国内废纸的回收利用率从2020年的5490万吨增加至2025年的6000万吨（Umweltbundesamt 2023）。

## 4.3 玻璃

玻璃作为一种通用材料，在日常生活、科学研究、现代建筑以及未来产业中扮演着关键角色。玻璃主要由非晶态二氧化硅构成，但确切成分会根据具体玻璃类型和预期用途而有很大差异（Bundesverband Glas 2022）。

除了原材料，废玻璃也可作为新玻璃制造的原料来源。在处理废玻璃前，首先通过手工分拣和机械处理工艺，如使用磁性或涡流切割机来分离金属，使用气流分离器去除塑料盖和标签，以及光学过程来识别和去除除陶瓷、石材和瓷器等材料，去除不正确的玻璃类型、不需要的颜色玻璃碎片和杂质。最后，在高温环境下（可达 1600° C），将废玻璃熔化制作成新的玻璃制品（Bundesverband Glas 2022）。

玻璃碎片可以细分为三大类：自产碎片、外来碎片和废玻璃碎片。

- **自产碎片**指的是玻璃工厂生产过程中产生的废料，通常占总产量的 10–20%。
- **外来碎片**来自于玻璃加工业的干净生产废料，可再次用作生产玻璃的原料。
- **废玻璃碎片**包含各种来源的未知玻璃碎片，可能含有干扰杂质，使用前可能需要额外的筛选和处理。

玻璃熔化过程是在高温（1600° C）下将玻璃碎片与初级原料进行混合。利用废玻璃可在较低的温度下完成熔化，因此在熔化过程中加入废玻璃能够节省能源和减少原材料的使用。在生产过程中，使用 10% 的回收玻璃替代原材料可将能耗降低大约 3%。若使用率达到 65%，则能实现约 20% 的能耗节约。根据所使用的能源类型，更低的能耗还可减少二氧化碳排放，例如将 10% 的废玻璃碎片加入原料可使二氧化碳排放量降低约 5%（Umweltbundesamt 2022b）。

然而，废玻璃的利用受到生产对碎片纯度要求的限制，杂质的存在可能会影响最终玻璃产品的质量。虽然容器玻璃（如饮料瓶）的回收率很高，占玻璃废物的 71%，但其他类型的玻璃在数量、组成和杂质方面则差异较大。用于窗户、建筑照明和汽车安全玻璃的平板玻璃，其回收率和杂质含量差异显著。成分各异的特种玻璃难以实现高效回收。平板玻璃废料主要来源于商业领域，由于质量标准较高，只有少量的平板玻璃碎片可以用于新的平板玻璃生产。大多数平板玻璃废料被转化为容器玻璃的生产。回收玻璃的其他应用包括浇铸玻璃、玻璃砖、隔热棉和玻璃纤维制品等。玻璃回收的盈利能力取决于不同类型玻璃的质量比例和应用领域。

与容器玻璃的生产相比，平板玻璃的生产对回收材料的质量要求更为苛刻。大多数玻璃制造厂所接受的来自陶瓷、石料和瓷器的回收材料污染（称为 KSP 含量）最多为每吨 5 克。因此，平板玻璃的生产一般不使用从建筑物拆除的回收玻璃，而是主要依赖生产过程中产生的透明碎片和生产废料（也称为内部废料）（Umweltbundesamt 2022b; Bundesverband Glas 2022; BauNetz\_Wissen）。

### 4.3.1 德国和欧洲二次玻璃的生产实践

目前，绿色容器玻璃中的碎玻璃（回收玻璃）比例为 90%，而白色容器玻璃中的比例则为 60%（Bundesverband Glas 2022）。碎玻璃的潜在应用受制于最终产品的质量要求，由于碎玻璃的具体成分不明，这可能导致无法满足某些特定玻璃产品的成分要求。绿色容器玻璃中最大允许的碎玻璃比例为 95%，白色容器玻璃中则为 70%（Bundesverband Glas 2022）。

#### 更进一步的循环经济措施

**回收设计**——当前部分玻璃包装由于其形状或选择的特殊制造工艺，重量超出标准要求。一些玻璃因过薄而无法高效回收。近年来，超细玻璃的使用比例不断上升，但其回收率会随着壁厚增加而受到影响。部分玻璃包装经历了印刷、涂层和粘合等复杂处理过程。在选择玻璃颜色时，应优先考虑白色、棕色和绿色这三种常用颜色。建议制定粘合剂的正面和负面清单，加强标签的去除能力，保证回收过程的顺畅。此外，还应建立全面的强制性生态设计标准，以确保高质量再生材料的广泛供应。

**再制造**——鼓励品牌制造商采用消费后回收材料（PCR）。

**重复使用**——与部分品牌制造商合作，推动和扩大可重复使用模式的应用。随着定制玻璃包装的普及，某些特殊瓶型可能会对灌装过程造成限制。建议优先选择本地灌装商。合作解决方案将是可行的途径。

**反思**——设计 100% 可回收且资源高效的玻璃包装，同时应易于消费者识别。因此，应制定行业统一的回收兼容性评估标准，向消费者保持透明。可以通过独立的包装评估和在瓶子上明确注明包装类别来实现。扩大共享和可重复使用系统以及押金方案，以节约资源并减少排放，并与消费者进行有效沟通。

**回收**——应扩大玻璃回收基础设施的规模。至少要增加回收基础设施中彩色玻璃和透明玻璃的玻璃回收容器数量，同时也应扩大回收系统。

（WWF Deutschland 2022）

在德国，废玻璃的回收利用率已经很高，84.4% 的包装玻璃（容器玻璃）被回收利用（Umweltbundesamt 2022b）。在玻璃制造中，废玻璃在所有产品中的平均比例约为 40%。德国联邦环境署预计，到 2030 年废玻璃再利用比例可增至 45%，到 2050 年可达 69%（Purr 等，2019）。

德国拥有全国性的平板玻璃回收、处理和再利用网络。可根据两类标准进行区分：浮法玻璃碎片和需要进一步处理的平板玻璃碎片。

回收玻璃的纯度对其再利用的质量至关重要。因此，在收集和运输过程中，容器必须保持清洁，确保废玻璃不含有任何与产品无关的杂质（例如汽车挡风玻璃中的发热线和薄膜）。处理后的平板玻璃碎片可广泛应用，从重新投入平板玻璃生产，到制造浇铸玻璃、容器玻璃、隔热棉、砂纸和玻璃砖等产品。

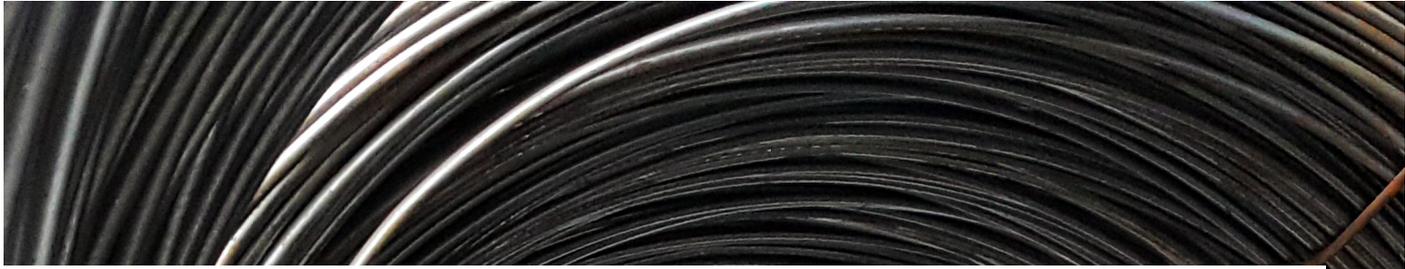
平板玻璃主要通过浮法工艺生产，并且大量用于建筑和汽车玻璃。由于这些用途对质量的要求极高（例如用于安全玻璃或汽车挡风玻璃），目前在浮法池再利用方面仍存在技术限制（WWF Deutschland 2022）。

### 4.3.2 中国二次玻璃的生产实践

中国容器玻璃回收方面的数据相对较少，据估计，中国容器玻璃的回收率目前不足 20%。一些报告指出，中国废玻璃（玻璃碎片）的经济价值较低，许多玻璃制造厂倾向于使用天然原材料而非回收玻璃（Serena 2019；Hu 等，2018a；Harder 2018b）。

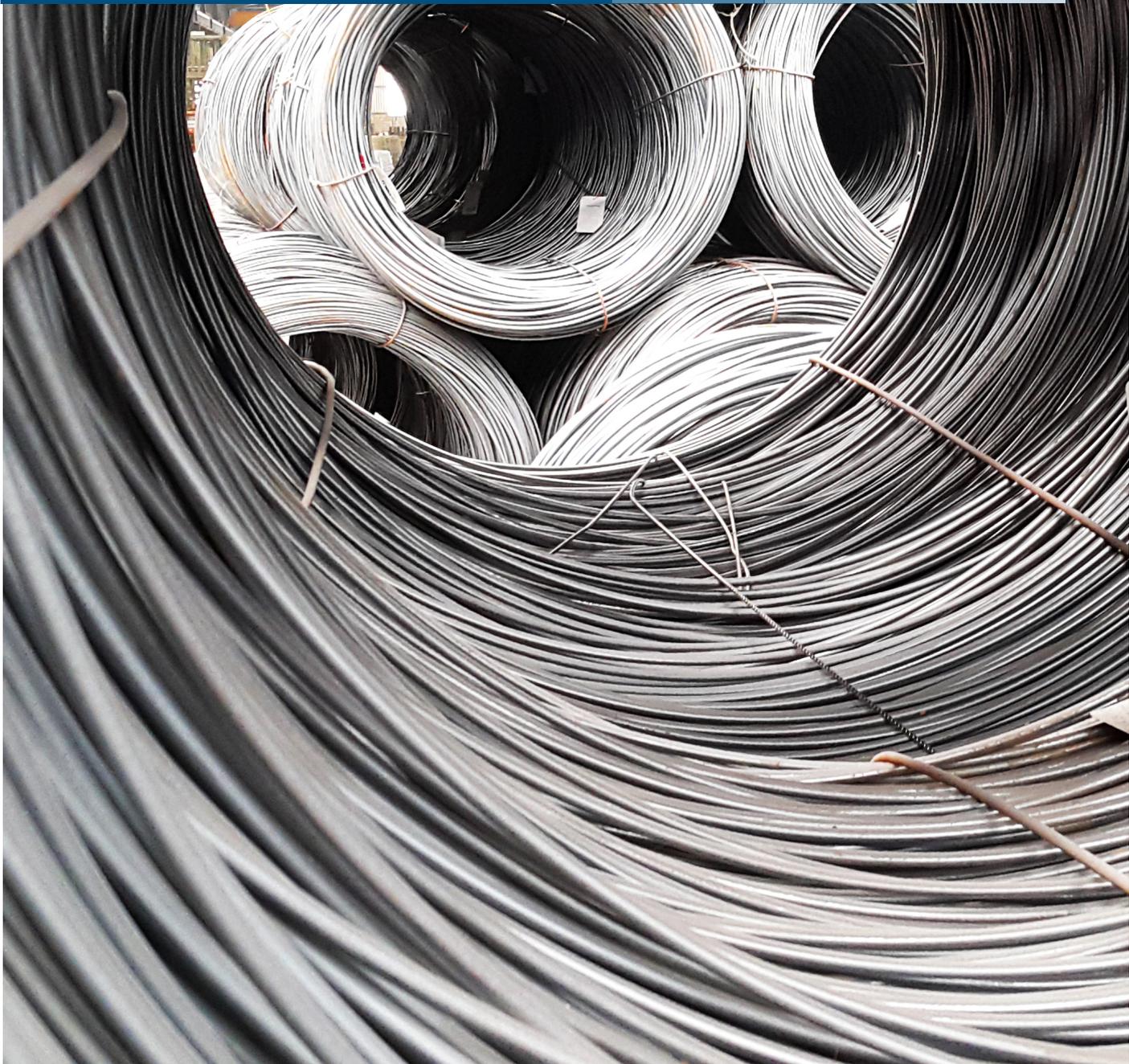
尽管过去中国回收率较低（Harder 2018a），但近年来大城市推出的生活垃圾分类计划具有提升回收废玻璃质量的潜力。若废玻璃纯度更高，则其回收的经济效益也会增强。市级政策与国家法规相辅相成，最新法规要求从 2023 年开始在消费者包装（包括玻璃容器）上标明回收信息（中国国家市场监督管理总局，2022 年 7 月 11 日）。





# 5

## 建筑材料效率措施



## 5 建筑材料效率措施

“运营碳”（operational carbon）指的是建筑持续运行过程中的碳排放，而建筑的“隐含碳”（embodied carbon）则包括其整个生命周期的排放量，涵盖材料生产、运输、施工以及拆除过程。鉴于地上结构和混凝土对建筑隐含碳作用明显，本章将重点关注通过材料效率措施降低水泥和混凝土的隐含碳的排放潜力。

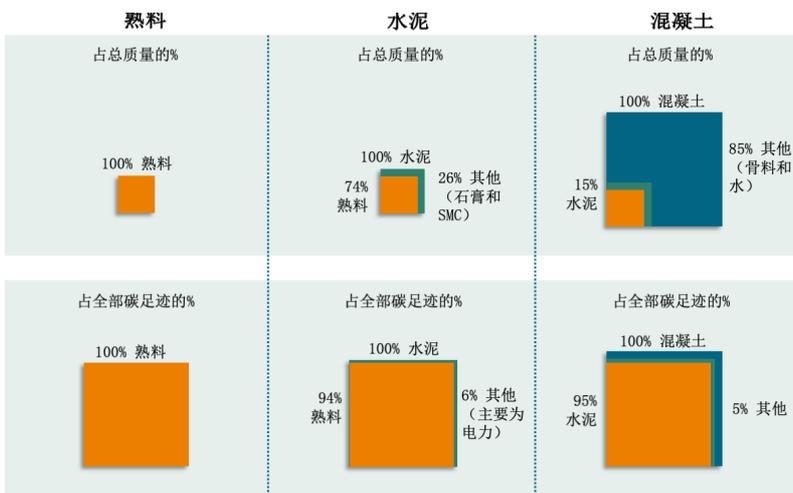
生产 1 吨混凝土大约会产生 80 公斤的二氧化碳排放，其中绝大部分排放（95%）来自水泥生产，尤其是水泥熟料生产。熟料是混凝土中主要的胶结材料（Watari 等，2022）。水泥是与骨料和水混合形成混凝土的关键材料，在全球范围内，胶结材料占到了建筑用材料总量的一半以上（Favier 等，2018）。

在水泥生产过程中，石灰石（碳酸钙  $\text{CaCO}_3$ ）分解产生的二氧化碳排放占比超过 60%，而能源消耗则不到 40%。鉴于水泥对石灰石（一种丰富且广泛分布的钙源，用于熟料生产）的严重依赖，碳中和对水泥行业是一项重大挑战（Favier 等，2018）。

目前，混凝土和水泥行业的脱碳主要集中在提高能效、转变燃料来源等措施，这些措施旨在减少与工艺相关的碳排放（UNEP，2022）。然而，由于大部分排放与固有的化学过程相关，无法仅靠提升能效来减少排放，因此最近政治和科学界都在探讨在水泥生产过程中对二氧化碳进行回收，作为应对不可避免排放的一种选择。

尽管碳捕集和封存（CCS）技术正在研发中，但仍面临一系列技术挑战，这些技术需要大规模的资本投入和运营成本，并且需要依靠大量可再生能源才能发挥其作用。然而，Favier 和 Wolf 等人的研究表明，通过考虑价值链的所有阶段，可以在不使用 CCS 技术的情况下实现高达 80% 的二氧化碳减排（Favier 等，2018），这包括了目前在减排措施中代表性不足的一些材料效率措施。

图 11：混凝土生产过程中基础材料的能源强度（Agora Industry 2022）



### 5.1 材料效率

能效关注节约能源，并优化能源的投入与产出比率；材料效率则着眼于节省自然材料资源、高效管理副产品、降低废物产生以及促进重复使用和回收等。Allwood 等人（2013 年）将材料效率界定为减少用于生产的材料量，但保持与其他方法相当的服务水平，以此来减少二氧化碳排放（Allwood 等，2013）。材料效率可以通过多种不同措施实现，例如延长现有产品的使用寿命、增加产品的使用强度或设计用料更省的产品等。Allwood 等人（2013 年）在文献中确定了六种常见的材料效率措施：

- **提高使用强度：**在提供相同服务的情况下减少产品的使用量，例如采用更节省空间的建筑设计或通过共享提升产品利用率；
- **延长产品寿命：**包括通过维修、转售、再制造等方式延长产品寿命；
- **轻量化设计：**在产品生产中采用更少的材料和/或减少温室气体排放；
- **组件的重复使用；**
- **回收利用和升级；**
- **改进生产、加工、废物处理。**

随着近年来循环经济的兴起和环境问题的加剧，材料效率受到了越来越多的关注。但直至最近，政策制定者才开始关注材料效率与温室气体减排之间的协同潜力。在政治领域，

“资源效率”一词与“材料效率”等效使用（IEA 2019；Hertwich 等，2019c）。

迄今为止，许多材料效率措施往往因材料用途迥异和环境条件的多样性，而难以为人所理解，部分也可归结为缺乏深入的分析研究。大多数减排情景或气候政策并未系统地纳入材料效率。与温室气体排放不同，材料相关政策的研究往往侧重于废物管理。然而，材料效率有可能带来巨大的协同效益，有利于减少资源开采和废物产生（Allwood 等，2013）。根据 2019 年材料经济学（Material Economics）的一项研究，预计到 2050 年，建筑行业在每年减少使用 1.21 亿吨（65%）水泥材料的情况下实现相同的经济效益是可行的（见图 12）。（材料经济学，2019）。

材料效率作为一种经常被忽略的减排途径，在从设计、制造、使用到最终报废的整个产品生命周期中都存在着改善的机会。通过将措施发展充分发挥作用，可以显著降低对关键材料的需求（IEA 2019）。在建筑行业背景下，下文将重点关注结构优化和工程设计的改进、预制混凝土构件、降低水泥中熟料含量（替代）、降低混凝土中水泥含量、延长建筑物寿命、以及回收和再利用等。

### 5.1.1 结构优化与工程设计的改进

在土木工程领域，结构的设计往往需要精确计算，以便根据负载来决定造型，这有助于优化混凝土的使用量。然而，在建筑设计过程中，设计阶段通常时间较紧，有时候会带来因结构不合理而过度使用材料。举例来说，无论建筑的规模大小或者高度如何，混凝土板和隔墙的标准厚度经常是 20 厘米，典型的柱间距大约是 6 米。这些尺寸通常受到施工现场的限制、物流运输甚至是声学效果等实际因素的影响，而非根据实际结构（Favier 等，2018）。通过更细致地控制建筑中混凝土的使用，发现在成本节约方面有很大的潜力，因为这些实际因素往往会导致材料使用量增加 20% 以上（Pameter 和 Myers，2021）。虽然难以量化，但 De Wolf 等人 and Shanks 等人的研究表明，目前可以在不改变设计的情况下实现 10%–20% 的减量（Shanks 等，2019）。

高效的结构设计旨在用最少的材料体积实现个别构件必需的功能。减少混凝土结构的过度设计可以采用多种手段实现。首先，合理使用安全边际——确保设计不超出给定的载荷要求（或对于该载荷要求显得“过于保守”），这是避免在结构中使用不必要材料的一个简单而有效的方法（Favier 等，2018）。其次，创新的混凝土应用可以针对特定的设计约束提高材料效率，例如在预制轻型楼板模块中采用钢筋混凝土复合材料（Ahmed 和 Tsavdaridis，2019）。近年来，像蜂窝结构这样的优化几何结构构件重新兴起，可作为比标准化构件更高效的替代品（Favier 等，2018）。

迄今为止，多数建筑规范和标准都对混凝土和水泥的使用设定了具体要求，以确保建筑安全。然而，通过修改国家建筑规范，实现基于性能的设计，可以为资源节约和减排创造新的可能性。

### 5.1.2 预制混凝土构件

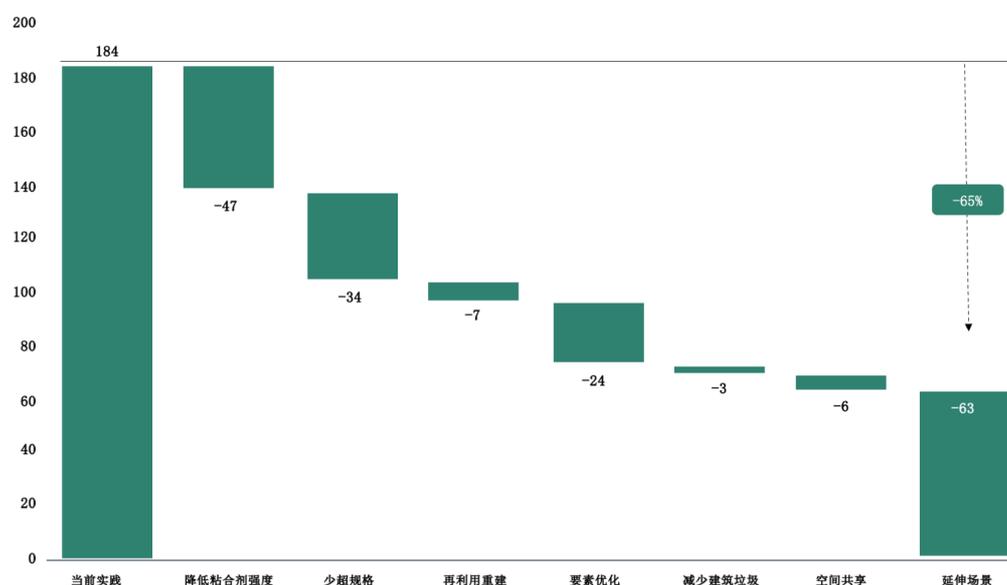
提高预制件的使用，即主要在工厂内生产、在现场组装部件或建筑构件，有利于促进节材措施和技术（Hertwich 等，2019a）的发展。预制程度可以从小型部件（例如窗户）的分次装配到完整的模块化建筑。

预制模块化建筑构件为材料效率的提升提供了契机。这种效率来源于标准化和场外生产的效率，预制还可以通过增加废料回收、整合与材料利用相关的材料和技术，以及减少施工现场产生废料等方式提高材料利用效率。此外还可以减少运输、提供更安全的工作条件、以及因结构接缝更加紧密等因素而改善建筑物热工性能等。预制还可以提高维护、翻新和重复使用的可行性，进而提升材料效率（Hertwich 等，2019a）。

虽然建筑构件长期以来一直在场外的工厂中生产，但现在制造的构件在大小和复杂性上都有所创新。预制混凝土构件的生产环境更为可控，精度也优于现场浇筑混凝土，从而使设计师能够更加自信地使用更薄、材料利用更高效的构件。还可以生产更复杂的构件，比如重量更轻、材料使用更少的“空心”板（Shanks 等，2019）。

图 12：每年使用的水泥材料和可能的节约方案，2050 年情景，单位：百万吨

来源：材料经济学，2019)



尽管研究表明节能潜力相当大，但关于节能潜力的可靠数据依旧稀缺。关于隐含排放量减少的说法通常不可靠，因为它们大多依赖变量，例如从工厂到工地的距离以及水泥材料含量等。对于与非预制结构构件相比的节约量，估算数据相差很大，例如预制构件可以减少大约 15-23% 的混凝土用量。而其他研究，如 Shanks 的研究发现，预制混凝土比现场浇筑混凝土的排放更多 (Shanks 等, 2019)。

当前许多国家都采用了全部或部分预制技术，主要使用单向实心或空心核板 (Mata-Falcón 等, 2022)。中国在建筑预制领域拥有悠久的发展历史。江等人 (2019) 研究了政府预制激励措施的有效性，但并未探讨这些措施与实际应用或环境结果之间的关联 (Hertwich 等, 2019b)。

### 5.1.3 降低混凝土中的熟料含量

利用辅助水泥材质 (SCM) 和石灰石来降低熟料 (水泥的核心成分) 的含量，是水泥行业减碳蓝图的核心要素 (Marsh 等, 2022)。采取熟料替代战略，已被证实能有效缓解生产活动对环境的负担。

普通硅酸盐水泥 (OPC) 包含 95% 的熟料。欧洲标准允许的其他水泥类型的熟料与水泥比例从 5% - 95% 不等。在这类水泥类型中，部分熟料由其他行业的废料或副产品取代，如燃煤电厂的粉煤灰、钢铁行业的高炉渣，或是天然火山灰和石灰石粉等天然材料。这些替代材质无需高能耗生产过程，能显著减少二氧化碳排放量。燃煤电厂产生的副产品粉煤灰 (fa) 和钢铁行业产生的磨细高炉矿渣粉 (ggbfs) 都可以作为替代材质使用。尽管这些替代材质并不影响熟料生产相关的过程排放，但在隐含排放中的确比熟料低得多。通过减少对熟料的使用，有助于降低最终产品的隐含排放量 (Shanks 等, 2019 年)。

图 13: 辅助水泥材质概况

来源: 德国能源署 (dena)



与硅酸盐水泥相比，使用熟料替代材质能够使隐含排放平均降低约 15%。然而，这些材质的可获得性存在局限性。国际能源署和世界可持续发展工商理事会 (2009) 预测，全球范围内，使用这些替代材质所能实现的熟料替代量，最多仅能使当前排放量减少 10% (Shanks 等, 2019)。

Pameter 和 Myers 确定了五类主要的非硅酸盐水泥材质：硫酸钙 (如石膏)、石灰石、初级天然火山灰 (如火山灰)、初级合成火山灰 (如煅烧粘土) 以及二次材料 (粉煤灰——煤燃烧的副产品以及高炉渣——生铁生产的副产品)。目前，在德国、英国及其他欧洲国家中，石灰石和二次材料 (粉煤灰和高炉渣) 是使用最广泛的非硅酸盐水泥材质。

### 5.1.4 降低混凝土中的水泥含量

除了减少水泥中的熟料含量，还可通过降低混凝土中的水泥用量来实现减排。在建筑领域，常用的混凝土配方往往含有超出实现所需强度所必需的水泥量。这一现象主要是由于标准设定的传统做法或最低规范所导致 (Shanks 等, 2019 年)。通过调整水泥含量以适应特定的需求 (如抗压强度)，可以有效减少混凝土生产过程中的碳排放。结合减少建筑规范和设计中不必要的过度要求，这种减排潜力将进一步增强。

### 5.1.5 延长使用年限

在西欧，住宅的平均使用年限通常超过 80 年，相比之下，其他发达地区如美国和日本的住宅使用年限则相对较短。中国等快速崛起的新兴经济体，由于较高的拆迁率，建筑物的平均使用年限仅为 25-30 年（Hertwich 等，2019c）。在全球的非住宅建筑领域，建筑物的使用年限很少能超过 50 年，这主要归因于商业需求的快速变迁（IEA 2019）。在新兴国家，由于快速城市化和工业化过程中造成的建筑物缺陷和灵活性不足，建筑物的使用年限一般较短。但当前面临的一个重要问题是，如何防止建筑迅速老化，如何设计出可灵活调整以适应不断变化的需求的新建筑（Hertwich 等，2019c）。

建筑的使用年限相对较长，而导致大量混凝土结构被拆除的主要原因并非物理退化或无法修复，而是由于技术、功能、经济、法律及需求等原因，使得建筑物变得过时，进而决定了它们的使用周期。这一现象促使人们质疑拆除那些结构稳固的建筑物背后的基本动机和商业策略，尤其是考虑到这些建筑中的许多混凝土构件在物理寿命尚未结束之前有可能被再次利用或重新组装（Marsh 等，2022）。在 2000 年代后期，中国每年大约拆除 1000 万平方米的建筑面积，这一数字约占当时每年建筑面积的 15%（IEA 2019）。

延长建筑使用年限的措施包括对建筑进行再利用或适应性利用。这些措施能够显著节约材料并减少排放，因为无需建造新建筑。延长使用年限的关键措施包括：

改造和翻新既有建筑以减少拆除和新建，包括对既有建筑进行节能改造；

加强维护和维修，延长重要构件的寿命；

提高灵活性和/或高强度利用（如共享或替代型住房）并支持深度翻新（可再利用建筑）。

虽然延长建筑物使用年限可能不会立刻显著减少既有建筑存量，但随着时间的推移，能显著降低材料流动和废物产生。这种做法具有在维持相同功能水平的同时，最大化地减少环境影响的潜力（Marsh 等，2022）。虽然估计和情景分析仍然有限，但国际能源署估计，通过减少材料需求，到 2060 年建筑业可以累计减少 100 亿吨碳排放，其中 90%可归因于建筑使用年限的延长。

### 5.1.6 回收利用

建筑和拆除废物占固体废物的绝大部分，例如在德国占到所有废物总量的 55%。尽管金属常被回收利用，混凝土和其他矿物建材主要被当作粗骨料降级回收（Hertwich 等，2019c）。在建筑物寿命终止时，混凝土废物通常会被粉碎，最多只能作

为回收骨料应用于道路底层或砂砾。这个过程不仅耗能，也会降低材料特性。

回收混凝土可以减轻建筑废物的产生，降低天然材料的开采压力，但生产过程仍需要水泥，温室气体排放量并不比生产新混凝土少。根据应用场景和运输量的不同（比如在施工现场之间移动），使用回收混凝土可能只能节省约 7% 的二氧化碳排放量，但在某些情况下可能甚至高于使用非回收混凝土。此外，混凝土制备过程中的能耗很高，可能会抵消任何潜在的二氧化碳减排量（CEWI，2021）。一些研究表明，混凝土生产中使用低品级回收废料可能需要额外的水泥来达到相同的混凝土质量。在比较原生材料与次生资源时，矿物回收的环境效益也会受到运输距离的影响（Hertwich 等，2019c）。

对于细粒度的建筑和拆除废物的回收利用，技术上更具挑战性。目前已开发出一种将水合水泥废料回收利用为新水泥的方法，不过这项技术仍处于早期开发阶段。一些未经审议的生命周期评估表明，这种方法可能会大幅降低温室气体排放，但这些数据仍有待进一步验证（Nusselder 等，2015）。

### 5.1.7 材料与建筑物的再利用

当前，一个被广泛忽视但富有前景的措施是在新建项目中重新使用从废弃建筑中回收的建筑材料，最新研究聚焦于金属的再利用。尽管混凝土目前在建筑废物中占比最大，但人们对预制建筑墙体混凝土板的再利用潜力及相关问题的了解仍然有限（Hertwich 等，2019c；Küpfer 等，2022）。尽管如此，对钢材构件再利用的案例研究表明，与回收相比，再利用能够实现可观的二氧化碳减排，大大超过了原生钢。鉴于混凝土目前在建筑回收中的作用仍然有限，预计混凝土的节能潜力或许同样可观（Hertwich 等，2019c）。

现代建筑频繁拆除往往不是由于材料退化或结构安全问题，而是由于其他因素所导致，因此其结构构件的状况普遍良好，具备延长使用年限的潜力。当拆除不可避免时，仔细地将混凝土结构锯开，并在新建筑中重新使用这些板块，成为一种循环且可持续的解决方案。为了实现混凝土构件的再利用，可以精心地将其从即将拆除的建筑中拆出，并在新组件中直接用于另一个使用周期，而无需其他重大改造（Küpfer 等，2022）。

选择再利用材料的过程需要综合考虑技术、美学、经济和社会等多方面因素，这往往会导致设计和建造过程变得更为漫长和成本更高。同样，为了满足强制性标准和获得认证及许可，必要的材料测试和专业知识的需求也会成为一个影响因素。另外，是否存在与质量保障和风险相关的问题、能否获得适当规格构件及相应成本，都是潜在的障碍（Hertwich 等，2019c）。

## 5.2 欧洲和德国的建筑行业现状

建筑业是经济体中资源消耗最大的部门之一，德国建筑业每年消耗的原材料约达 5 亿吨。同时，还产生了约 55% 的废弃物，居各行业之首。

尽管矿物建筑废物的回收率约为 90%，但实际上，被回收和再利用的建筑废物的比例显著低于此数值。目前，德国建筑废物大多数没有经过高标准的回收处理，也没有实现高比例的再利用，而是最终被用于道路和土方工程、填埋施工以及沥

青混凝土或混凝土骨料的生产。官方数据显示，约 93.9% 的建筑废物被回收利用，但其中只有约 16% 被用于填埋或回填（“其他材料回收”），77.9% 用于土木工程（包括土方、道路和小路施工）（Basten 2021）。这意味着进一步的处理和后续使用，实质上是一种材料的降级回收使用，而非真正的闭环循环，这种做法导致依赖新道路施工来处理拆迁废物。鉴于德国道路状况和近年来材料密集型新道路施工量的减少，这种依赖性在未来应当会减少。

建筑行业材料的闭环受到多方面因素的制约，包括建筑法规和许可规定、技术发展水平或回收骨料的区域可获得性等。例如建筑施工中，目前仅占总骨料体积的 45% 可作为回收材料使用（Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. 2021）。在德国，因为缺乏对细小材料进行高质量加工的技术，细小碎片目前还无法被重新回收到水泥生产中。相反，未来必须更加重视重复使用、延长使用年限和提高材料效率的措施。

在当前德国或欧洲建筑行业监管体系中，材料效率尚未得到充分的重视。现行的欧洲法规与提升材料效率和整体资源效率的政策目标是遥相呼应的。但与受欧洲指令规制的能源性能不同，材料效率相对不受监管。此外，尽管存在促进建筑

物能效和翻新的财政激励政策和工具，但并没有类似的规定来提升建筑物的材料效率（Ruuska 和 Häkkinen, 2014）。

《欧洲建筑产品条例》（CPR）要求建筑产品在整个生命周期内满足基本要求，并适合其预期用途。其中，资源的可持续利用是一项关键要求，强调拆除后材料的再利用/回收性、耐用性以及使用环境友好的原材料和二次材料的重要性。尽管《建筑产品条例》强调了材料效率的重要性，但它并未提供规范性规则，也没有制定关于材料效率的强制性要求（Ruuska 和 Häkkinen, 2014）。

## 5.3 中国的现状

中国持续位居全球水泥生产和消费的前列。然而，中国水泥行业在整体环境效率方面表现欠佳，提升的潜力巨大。在国家总排放量中，水泥产业的排放约占 13%，仅次于电力和钢铁行业（中国水泥协会，2022）。

目前，水泥行业的减排主要通过提升设备能效，包括从煤炭向低碳能源转型、能效提升，以及发展二氧化碳捕集与利用技术来实现（中国水泥协会，2022）。

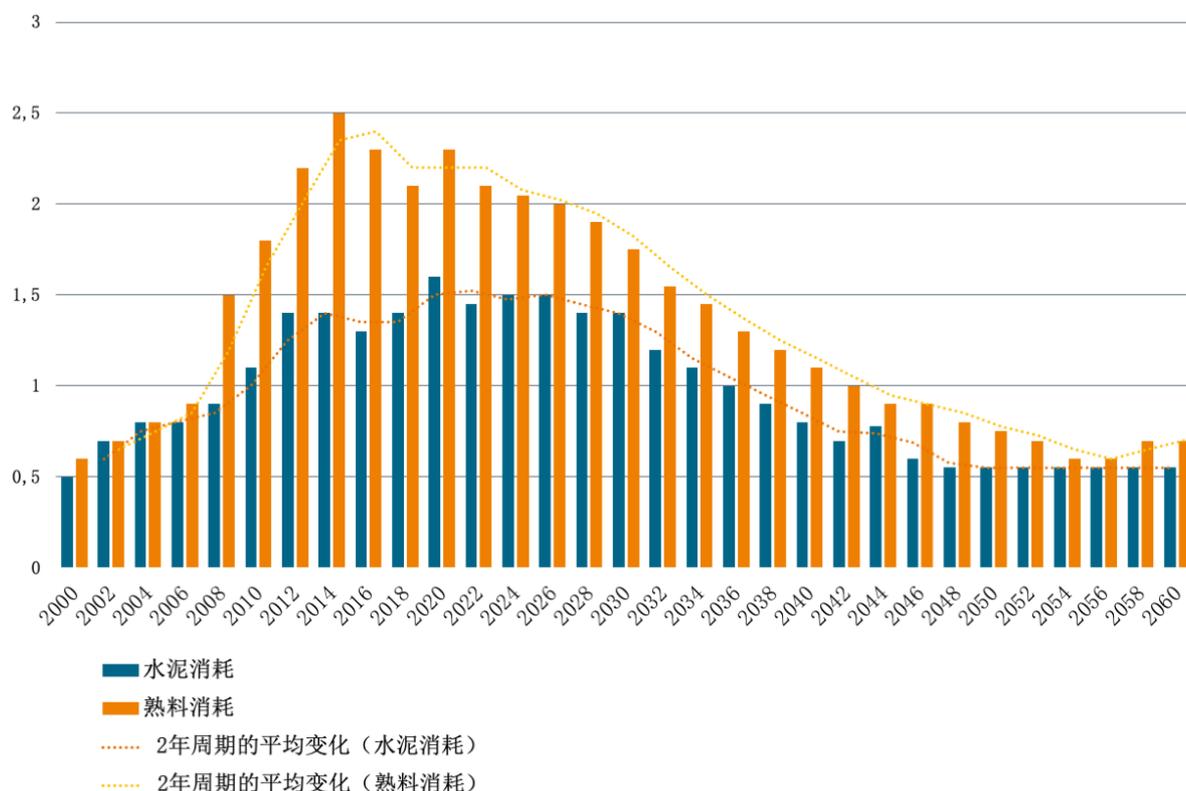
除碳减排措施外，降低需求是水泥和混凝土产业脱碳的主要驱动力。特别是随着城镇化和基础设施建设速度放缓，住房和基础设施建设需求的长期减少将导致新房开发规模减小。尽管中国仍需加强基础设施，但其建设规模已在减小。房

屋、道路、铁路等建筑行业的放缓将不可避免地减少水泥需求。

据预测，到 2050 年，水泥熟料产量将降至每年 5.6 亿吨，相当于从 2020 年水平上减少约 67% 的碳排放总量。预计到 2050 年，中国水泥熟料需求将减少三分之二。随着中国经济发展模式调整，建筑投资比例已呈下降态势，水泥消费与 GDP 增长的解耦趋势仍将延续。

图 14：2060 年水泥和熟料消费情景

来源：落基山研究所（RMI）和中国水泥协会，2022 年



虽然这些方法能在中短期内实现一定程度的减排，但仅靠现有技术几乎无法实现净零排放目标。中国对混凝土的需求量正在减少，但作为全球最大的水泥生产和消费国，通过提升材料效率减少水泥使用的潜力巨大。

住房和城乡建设部发布了国标《建筑节能与可再生能源利用通用规范》，旨在提升能源资源利用效率、促进可再生能源的使用、减少建筑碳排放、并创造良好的建筑室内环境，以满足高质量经济社会发展的需要。与过去多为建议性或指导性的建筑碳排放标准不同，该标准自2022年4月生效后，将建筑碳排放计算纳入强制性要求。

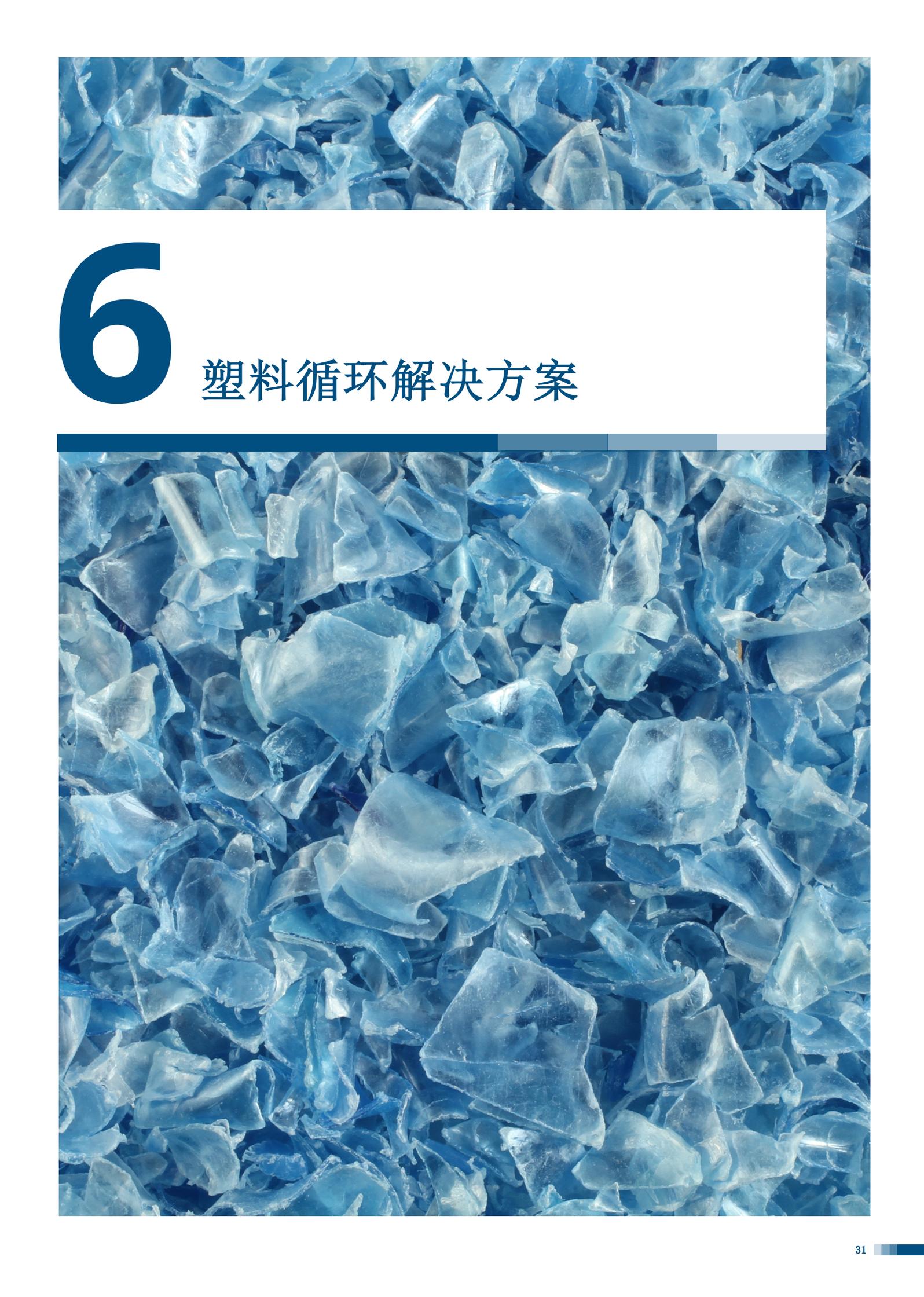
2020年，包括万科、金茂在内的10家房地产企业公开承诺，公司新建建筑100%达到绿色建筑标准。部分地产企业已在其项目中采用了低碳节能技术设备。在碳中和的大背景下，绿色建筑或将成为行业趋势。

## 建筑废物

目前，中国的建筑废物回收率大约为5%，远低于发达国家的水平。主要由于对建筑废物处理的认识不足、相关立法的不完善，以及研发投入有限所致（Dr. Xianshan Ma 2023）。

中国的建筑废物包括废土、废混凝土、废砖、废钢材、废木材、废塑料等。中国每年产生的建筑废物量达到15.5-24亿吨，大约占城市废物总量的40%。值得注意的是，中国国家统计局数据库仅统计一般固体废物的处理和利用率，并没有单独列出建筑废物的处理和利用情况。

建筑废物的处理和处置方法包括露天堆放、简易填埋、综合治理和就地资源化利用等方式。由于监管力度不同，在小城镇非法露天倾倒的现象比较常见，但是这种情况在大城市很少发生。中等城市主要采用简易填埋方法，而在一些小城市，该方法的使用也在增加。在经济发达的地区，如京津冀、长三角和粤港澳大湾区，主要采取综合治理模式。该模式强调简单的源头分类，占这些地区废物管理实践的约95%。相对而言，就地资源化利用模式的应用相对有限，主要集中在个别经济发达地区，仅占5%左右（Dr. Xianshan Ma 2023）。



# 6

## 塑料循环解决方案

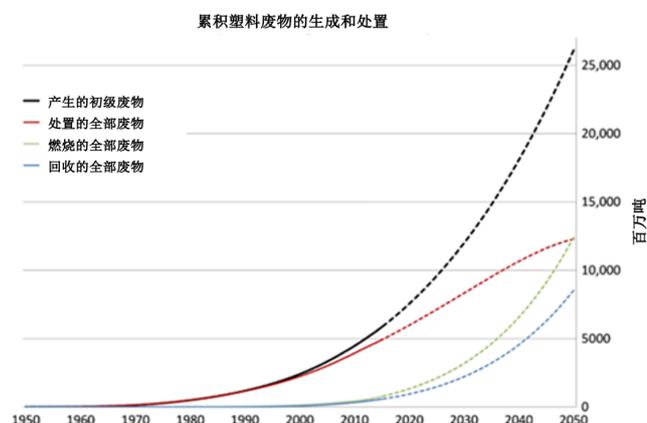
## 6 塑料循环解决方案

可持续的处理废旧塑料垃圾不仅有利于降低对原材料的需求（及二氧化碳排放），也是减少塑料全生命周期碳排放的关键。塑料回收在减少温室气体排放方面扮演了双重且关键的角色。

塑料的生产和管理在全球范围内具有重大的环境影响。Geyer 等人（2017 年）的研究显示，迄今全球已生产 83 亿吨原生塑料，产生的 63 亿吨塑料废物中，只有 9% 被回收利用，12% 被焚烧，而高达 79% 的废弃塑料堆积在填埋场或自然环境中。按照当前的生产趋势，预计到 2050 年，填埋场或自然环境中的塑料废物将达到 120 亿吨。在区域分布方面，美国约占全球塑料生产的 18%，欧盟占 15%，中国以 32% 的比例位居首位（Plastics Europe 2022）。

图 15：塑料废物累积生成量和处理量（单位：百万吨）

来源：Geyer 等，2017



2014 年，欧洲的塑料回收率最高为 30%，中国为 25%，美国仅为 9%。这些数据凸显了迫切需要采取全面和紧急行动来应对日益严重的塑料废物问题，并转向更加循环的塑料生产和废物管理模式的必要性（Geyer 等，2017）。

解决塑料污染的主要目标之一是减少塑料生产总量。这可以通过多种措施实现，包括促进可持续的消费方式、鼓励使用替代材料，以及对塑料的生产和使用施加更为严格的法规等。保持塑料在循环经济中的流通是解决此问题的另一关键方面，这涉及设计可回收产品、改善废物管理系统以促进回收，以及在制造过程中大力推广使用再生塑料等问题。通过循环使用和回收塑料材料，可以节约宝贵的资源，极大地减少塑料生产对环境的影响。

对于无法有效回收的塑料废物，焚烧处理可以作为最后的手段加以考虑。然而，必须确保焚烧过程采用先进的技术，尽可能减少有害污染物向环境的排放。

### 6.1 欧盟和德国现行政策概况

近年来，欧洲塑料产业在生产、需求和回收率等方面经历了显著变化。2021 年，欧洲的塑料总产量达到 5720 万吨，2021 年塑料产量细分如下：

- 化石基塑料 5010 万吨
- 回收塑料 580 万吨
- 生物基塑料 130 万吨

包装行业占比最高，为 39.1%，其次是建材行业，占比 21.3%，其余为其他行业。欧洲对回收塑料的利用在 2021 年有所增长，达到 9.9%。2020 年，欧盟 27 国加上其他 3 个国家总共收集了 2950 万吨塑料废物。值得注意的是，分类收集的塑料废物回收率比混合废物收集高出 13 倍。相比之下，混合废物收集的回收率仅为 5%，有 57% 用于回收再利用，38% 被送往填埋场。分类收集的塑料包装废物的回收率比混合废物收集高 80%。这些数据凸显了有效的废物分类收集系统在提高回收率和促进塑料循环经济方面的重要性（Plastics Europe 2022）。

《欧洲绿色协议》及其循环经济行动计划引入了一系列塑料政策，以应对与塑料废物相关的环境挑战，其核心目标之一

是到 2030 年达到塑料包装 50% 的回收率。为实现这一目标，欧盟采取了多项措施（Agora Industry 2022）。自 2021 年 1 月起，欧盟已禁止销售包括吸管、餐具、聚苯乙烯制成的食品和饮料容器及棉签等几种一次性塑料制品。同时，所有可降解塑料也在禁止之列。这些措施旨在降低这些产品的消费量，并促进更可持续的替代品（Agora Industry 2022）。

为了控制低质量塑料废物的出口，根据《巴塞尔协定》的规定，欧盟自 2021 年起限制将其运往境外。这一举措确保了塑料废物管理符合国际标准，避免将废物转移到法规较为宽松的地区（Agora Industry 2022）。

2021 年，欧盟对未回收塑料征收每吨 800 欧元的税收，旨在促进制造业使用可回收、可重复使用或可堆肥的材料。该项税收激励企业摆脱对未回收塑料的依赖，同时鼓励采用更可持续的替代品（Agora Industry 2022）。

在生物塑料方面，欧盟正制定监管框架，以明确其适用范围。这一框架旨在防止企业对其产品作出虚假的可持续性声明，同时确保生物塑料的使用方式既负责任又环境友好（Agora Industry 2022）。

当前，欧盟的塑料工业价值链呈现出线性和分散的特点，且高度依赖化石原料。在欧洲，塑料原料的78%来源于石脑油，其生产过程始于炼油。炼油厂生产石脑油，石化厂通过裂解石脑油生成单体，最终合成聚合物，并将其转化为塑料产品。这种线性价值链导致资源耗尽和环境污染问题加剧（Agora Industry 2022）。因此，欧盟委员会对《垃圾填埋场指令》进行了修订，其目标是到2030年消除可回收或可利用的废物填埋。

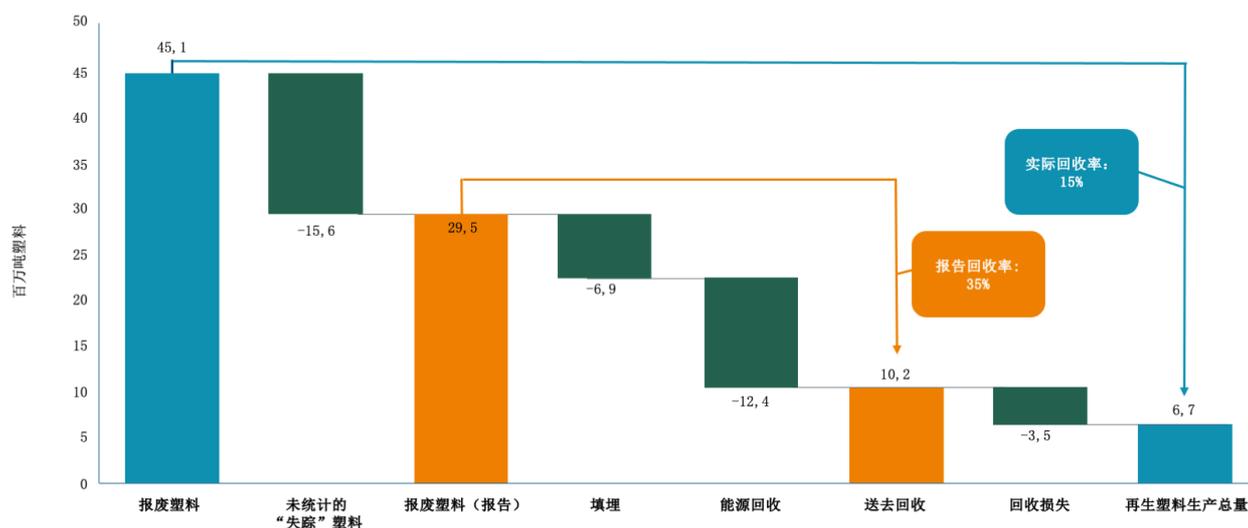
## 德国

近年来，德国在处理塑料废物方面经历了重大变化。2020年，德国处理的塑料废物总量为5400吨，处理方式包括回收利用、能量回收和填埋。数据分析显示，回收利用在其中发挥了重要作用，2020年占总处理量的42%。同时，57%的塑料废物通过能量回收过程处理，而填埋的比例仅为1%（Plastics Europe 2022）。

塑料包装废物的处理方式略有不同，回收利用占塑料包装废物处理量的55%，这反映出德国为建立高效的回收基础设施所付出的巨大努力和投入。另外，45%的德国塑料包装废物经过了能量回收过程（Plastics Europe 2022）。

图 16：报告塑料回收率和实际塑料回收率对比，欧盟+瑞士+挪威 2020 年废塑料处理情况

来源：Agora Industry 2022



## 6.2 中国现状

总体而言，中国的废物管理模式正逐渐从焚烧转向资源化利用，整个废物资源产业（包括物理和化学塑料回收）将进入快速增长阶段。

随着化学回收日益成为一种重要的环保塑料发展路径，预计物理和化学回收的处理量将增加数千万吨<sup>1</sup>。此外，预计2030年中国的塑料回收率有望达到45%-50%。然而，需要认识到，要实现这一目标必须依靠共同努力并有效执行回收策略。

中国目前已发布多项政策以解决这一问题，例如《“十四五”循环经济发展规划》提出了塑料污染治理、快递包装改造等五项重点工程和六项重点行动。规划强调，应从源头减少塑料使用，禁止使用超薄农膜等有害产品，并推动对塑料替代品全生命周期环境影响的评估。规划还鼓励在适当的条

件下使用可降解塑料，同时改进相关标准和测试能力，以及加强塑料的正确使用和处置。规划还着重提出，应提高回收效率，强化废物分类和再利用，以及发展废物焚烧设施等。同时强调了减少填埋场的塑料废物、清理海洋垃圾以及提高公众意识等措施。

自2020年起，包括国家发展和改革委员会在内的政府部门发布了一系列政策文件，旨在控制塑料污染和促进循环经济的发展。这些政策呼吁建立覆盖塑料制品生产、流通、使用、回收和处置的综合管理体系，设定了2020年、2022年和2025年阶段性目标，并就限制某些产品的使用、促进回收和规范其他产品的使用提出了具体措施。这些政策突出了绿

<sup>1</sup> 值得注意的是上述预测值受到各种因素和不确定性的影响。

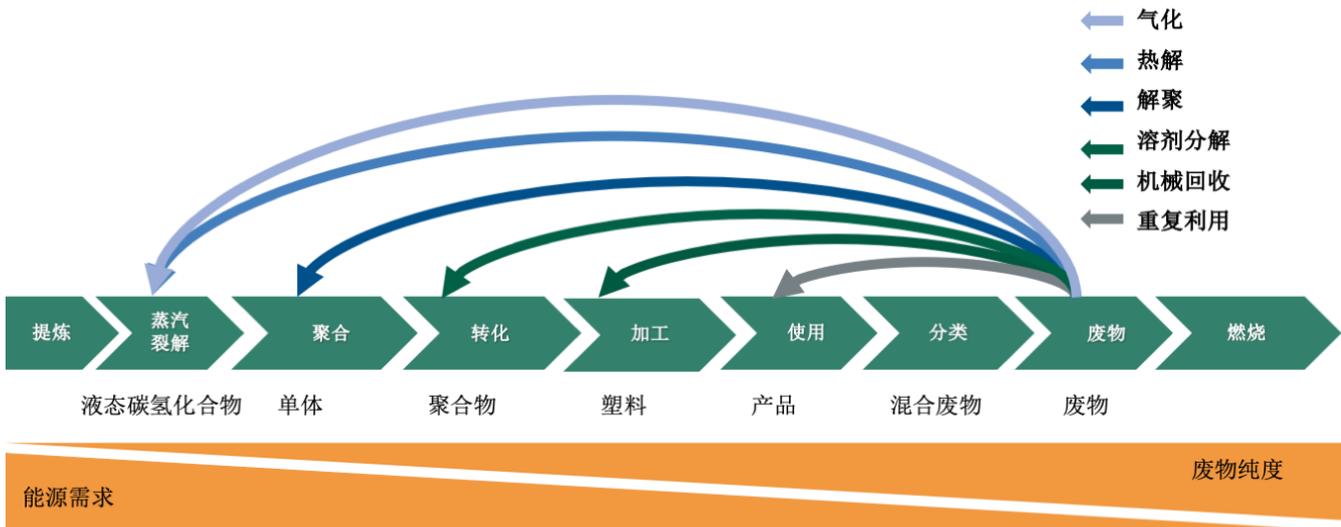
色、低碳和循环发展的重要性，强调推动可持续消费和对塑料污染的综合治理。

到目前为止，废塑料化学回收技术在《国民经济行业分类》中尚缺乏明确的定义和框架。现行的法规和技术标准对化学

回收技术的定义和分类缺乏足够的指导，这种模糊性可能导致该技术被错误地归类为“高能耗高污染”项目，从而使得审批流程变得更为复杂 (chem. vogel 2023)。

图 17: 回收利用流程和能源需求

来源: Agora Industry 2022



### 6.3 回收利用工艺

回收利用作为一种技术解决方案，在减少塑料污染方面发挥着重要作用。虽然减少和重复使用塑料的努力不容忽视，但由于塑料的许多有益特性以及在众多领域中的广泛应用，这些策略也有其局限性。因此，回收利用是打破塑料污染循环的关键组成部分，特别是在工业生产领域，涉及塑料废物的收集、分类、加工以及将其转化为新产品或材料等过程。

回收利用主要分为三种方式：机械闭环、机械开环和化学回收。初级回收或闭环回收用于单一塑料流，使其在同一循环中得以保存并转化为与原产品性能相同的新产品。次级回收或开环回收则与大部分消费后的塑料有关，包括对塑料废物流的分类、减小聚合物废物的粒径。开环意味着塑料通常被用于低价值产品，质量较差 (Arena and Ardolino 2022)。

图 18: 机械回收与热解回收的原料耐受度比较 (化学转化扩大原料耐受度)

来源: 德国能源署 (dena) 基于 PEW 和 SystemIQ 数据, 2020

		PET	HDPE	PP	LDPE & LLDPE	PVC	PS	多层	
清洁/分类废物	机械回收	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✓ 技术上可行 ✓ 某些情况下可行 ✗ 技术上不可行
	热解	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✓	
受污染废物	机械回收	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	
	热解	✗	✓	✓	✓	✗	✓	✓	
塑料值		高 → 低							

### 6.3.1 机械回收

机械回收是最简单、最便宜、最常见的回收形式，通常包括按聚合物类型对塑料废物进行分类、去除标签、清洗、机械粉碎、熔融和塑形成新产品（Rosenboom 等，2022）等步骤。这一系列步骤可以制备出适合再次用于制造塑料产品的回收料。在这个过程中，塑料的结构保持不变。这种方法只适用于某些塑料，因为不同的塑料在温度变化和其他影响因素下会改变其性质，不适合机械回收。机械回收的三种主要工艺包括：

- **重新磨碎** - 对产品进行粉碎和磨碎后的产物
- **再造粒** - 使用挤出法在不改变化学组成的情况下制造的塑料回收料
- **共混改性和再生** - 相对于原流，化学组成经过改性的塑料回收料

聚合物废物中的污染物，包括微量元素（如小分子降解产物）和添加剂（如阻燃剂、挥发性有机化合物、邻苯二甲酸酯、稳定剂、油漆和涂料），可以显著影响回收塑料的质量。多层材料的不可分离性也增加了挑战。此外，对温度敏感且在高温下不流动的塑料可能会对回收带来限制。

然而，某些塑料，如 PET、聚乙烯和 PP，主要来自包装行业，通常通过机械回收方法进行处理和回收（Arena and Ardolino 2022；PEW and SystemIQ 2020）。图 18 展示了一些主要塑料及其机械回收或热解的能力，从图可以看出，并非所有类型的塑料都适合回收工艺，特别是受污染的废物。

塑料的纯度对回收潜力影响很大。在处理生活垃圾时，必要的先决条件是对废物进行收集和分类，以实现塑料的回收利用（Shamsuyeva and Endres 2021；Umweltbundesamt 2016）。

图 19：回收利用过程和挑战

来源：德国能源署（dena）

过程	挑战	可处理聚合物类型范围	对原料的敏感性	技术准备水平	所需技术的复杂性	成本
<b>机械回收</b>	包括按聚合物类型对塑料废物进行分类、去除标签、清洗、机械粉碎、熔化和重塑成新形状。	有限(未污染的 PE, PET, PP, PS/HIPS, ABS)	高	高(9)	低	低
<b>溶剂型纯化</b>	化学回收过程，旨在溶解或液化塑料废物而不损坏聚合物结构。	有限	非常高	低(3-4) 水解和 4-5 糖醇解	高	高
<b>溶剂型解聚</b>	该过程涉及将塑料废物溶解在液浴中以产生低聚物和单体。该方法中使用了多种解聚过程。	非常有限	非常高	低-中 (3-6)，取决于工艺和目标聚合物	高	高
<b>热解</b>	该过程涉及在缺氧的情况下对塑料废物进行热裂解。该过程产生的产品是气体、焦炭和液态油，其中热解油是大多数情况下所需的产品（Solis 和 Silveira 2020）。 需要温度达到 300 至 700 °C	宽	非常低	中(6-7)	高	高
<b>气化</b>	固体废物转化为碳氢化合物和成气的混合物。这需要高水平的废物分离和大量的能源。自热气化使用原料中约 28% 的碳能量来保留剩余 72% 的气体（Porshnov 2022）。 需要温度达到 700° 和 1200° C，具体取决于气化剂	宽	非常低	中-高(6-8)	高	高

### 6.3.2 化学回收

化学回收是指将塑料废物分解成其化学组分的一系列工艺，这些组分可以用来生产新的塑料产品，工艺主要分为两大类：热解和溶剂分解。热解包括多种热处理方法，通过不同的分解反应产生不同成分的碳氢混合物。溶剂分解涉及在溶剂中发生的化学诱导的聚合物降解反应，导致产生聚合物降解产物或单体，可以与原生材料聚合，并进一步加工成新的塑料（Shamsuyeva and Endres 2021）。原料回收则是将塑料废物转化为化学品和燃料原料（Rollinson and Oladejo 2020）。

#### 技术现状

如上文所述，化学回收存在多种不同的工艺。下文将介绍其中的一些主要方法，包括气化、热解、溶剂提纯和溶剂脱聚（Arena and Ardolino 2022）。

#### 挑战

气化和热解工艺的主要挑战在于可能产生强烈毒性和高爆炸性的气体混合物，这要求其采用远高于焚烧方法的安全标准。这些设施技术复杂、成本高昂、资金密集，且由于城市固体废物原料的不可预测性，使其成为有问题的原料来源，因此需要对废物进行预分类（Porshnov 2022）。

总的来说，尽管化学回收目前在全球尚未发挥显著作用，但随着化工行业逐渐转向非化石燃料，其作用有望增强。要实现这一转变，需要克服各种技术挑战。与机械回收相似，通过产品设计和建立适当的收集和处理基础设施来形成纯净的材料流将是关键。如果没有这些要素，化学回收的效果也将受到限制，其作用可能仅限于部分支持机械回收。

## 6.4 生物塑料

利用生物质生产塑料的方法提供了一种温室气体中和的塑料生产方式。当使用可持续种植的生物质时，可以被视为“生物源回收”，因为这些生物质在其生命周期结束时不会释放比光合作用期间吸收的二氧化碳更多的二氧化碳。

生物塑料是一类从可再生资源或生物降解材料中制得的塑料，或者是通过生物化学过程生产的塑料。鉴于生产过程中涉及的能源密集型过程、可能的土地使用影响，以及与其生命周期相关的整体环境足迹，生物塑料并不总是比化石基塑料更具可持续性。因此，有必要进行全面的生命周期评估（LCA），以准确评估生物塑料的可持续性及其潜在的环境效益（Brizga 等，2020；Rosenboom 等，2022）。

生物塑料生产的最大挑战在于所用的生物质原料来源，这决定了其面临的各种限制，例如与粮食安全和土地管理的潜在竞争。为应对这一问题，生物塑料的生产被划分为三代，以便更全面地理解所用原料及其对粮食安全、土地管理和资源可获得性的潜在影响（Brizga 等，2020）。

**第一代**——涉及使用从可食用多糖类来源（如玉米、甘蔗和可食用植物油）中提取的易发酵糖。这一代生物塑料引起了关于粮食生产潜在冲突和土地使用的担忧。

**第二代**——利用生物废料和木质纤维素生物质作为原料，有助于缓解与第一代相关的部分问题。使用废料可以减少与粮食生产的竞争，最大限度地利用资源。利用木质纤维素生物质，如废木材和农业衍生产品（例如短轮作林），优势在于不需要与粮食生产竞争，因为可以在不适合粮食作物生长的土地上种植。

**第三代**——主要关注来源于藻类的生物质。

目前，全球农用地中仅约 0.02% 用于生产生物塑料原料。考虑到生物质资源的有限潜力，完全用生物质替代化石原料以生产生物塑料的可能性极低。目前 100% 基于生物质的生物塑料的年产量约为 200 万吨（Rosenboom 等，2022）。

### 生物源塑料的潜在作用

生物塑料的生产方法主要分为两类：**替代品（Drop-ins）**和**新材料**。

图 20：生物基替代品概览及主要树脂类型的新材料替代品

来源：Rosenboom 等，2022；Brizga 等，2020

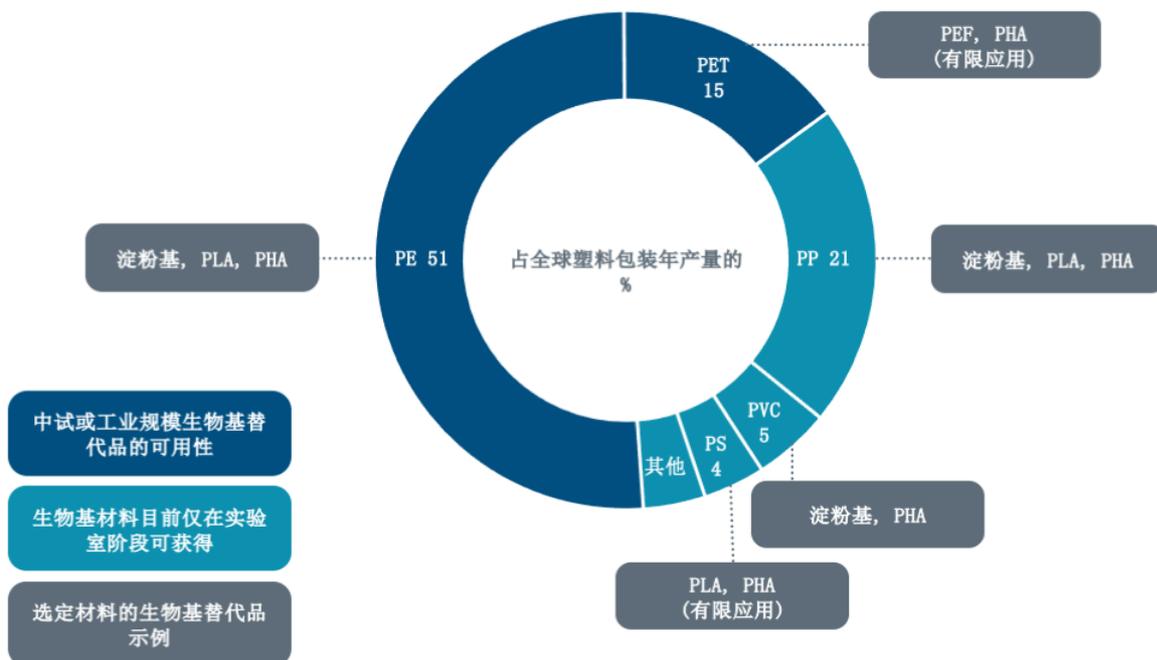
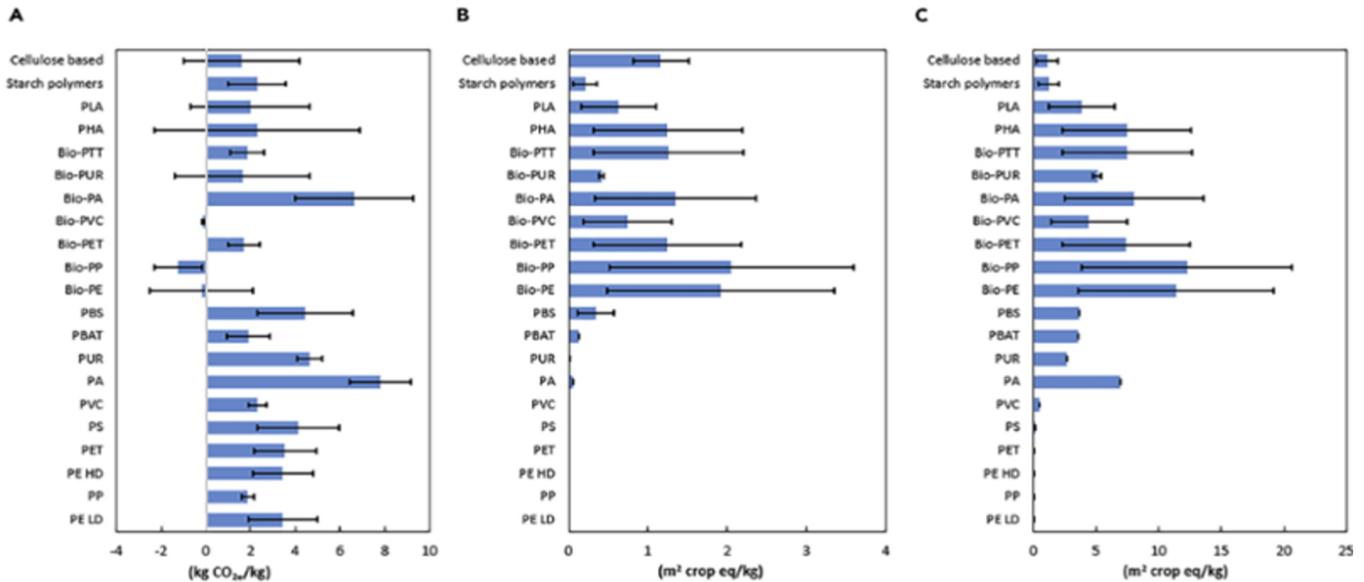


图 21: 塑料生产的全球变暖潜势、土地利用和水利用情况

来源: Brizga 等, 2020



(A) 全球变暖潜力。

(B) 土地利用。

(C) 用水。

完整柱显示平均值, 误差线显示最大和最小水平。有关计算生物塑料最大和最小土地和水使用量的更多详细信息, 请参阅[实验程序](#)。

**替代品**——“替代品”的概念指与当前使用的化石基塑料完全相同的对应物, 但来源于可再生材料。这类替代品, 例如用作 PE 替代的生物基 PE 和作为 PET 替代的生物基对苯二甲酸乙二醇酯 (PET), 具备与其化石基对应物相同的化学和物理属性。

**新材料** - 某些新材料, 如聚乳酸 (PLA) 和聚羟基醇酸酯 (PHA), 与常规化石基塑料在化学和物理特性上有所区别。但是, 这些材料仍广泛应用于各类包装领域。例如, 标准 PLA 通常用于一次性食品服务包装及其他一次性用品, 因其具备良好的生物降解性和与食品接触的兼容性。

同样, PHA 虽具备生物降解性和通用性, 但其力学和加工特性可能与化石基塑料有所不同。为了克服这些差异, 可以在生物基塑料中掺入一些添加剂, 以增强其力学性能、加工性能和其他特性 (Brizga 等, 2020)。

图 20 给出了最具商业相关性的生物塑料聚合物概览。虽然生物塑料提供了减少对化石资源依赖和潜在的生物降解性等诸多益处, 但原料种植的副作用可能会抵消这些工艺的整体可持续性。例如, 农业中化肥和农药使用量的增加可能导致酸化潜势和富营养化等问题, 从而对生态系统造成负面影响。为了解决这些挑战, 需要全面考虑生物塑料的整个生命周期, 从原料培育到其生命周期的末端管理。目前正在探索可持续的农业实践、高效的预处理技术和优化工艺设计, 以减

轻生物塑料生产的环境影响, 提高其整体可持续性 (Brizga 等, 2020; Rosenboom 等, 2022)。下文将简要介绍生物塑料的生命周期评估。

关于生物塑料生命周期评估的文献非常有限, 且主要关注能源消费和全球变暖潜势问题。研究表明, 与传统材料相比, 生物塑料能够节约非可再生能源的使用并减少温室气体排放 (Brizga 等, 2020)。

### 生物塑料的回收利用

与传统塑料相比, 生物塑料的回收利用尚不成熟, 新型生物塑料使得混合塑料废物的分类变得更具挑战性。PLA 和 PHA 的机械回收通常导致质量下降, 由于无法从聚合物废物中移除杂质和添加剂, 导致回收降级。着色材料、低密度材料和医疗污染物进一步增加了回收的复杂性。生物降解率高度依赖多种因素, 某些可堆肥塑料可能不适合标准的堆肥工艺 (Rosenboom 等, 2022)。

可以使用微生物及其水解酶将缩合聚合物生物回收为单体。尽管这种方法的研究还不充分, 但作为一种化学方法的清洁替代方案, 它展现出了很大的潜力。通过更好地理解酶的活性和利用基因编辑技术, 有可能提高聚氨酯等聚合物的生物回收效率 (Rosenboom 等, 2022)。

## 6.5 回收方法面临的挑战

在生物塑料、机械回收和化学回收的应用上存在一系列挑战，这些挑战必须在可持续解决方案的框架内得到解决，以实现其有效应用：

**总体战略的必要性**——为最大限度地应用于各行业，需要制定一个全面的总体战略。该战略应明确展示如何满足未来的碳需求，同时考虑技术可行性和社会及政治层面的支持性措施，包括应对人口行为变化的挑战。

**成本考量**——使用这三种工艺进行塑料生产可能涉及显著的成本提升。原油价格起着决定性作用，影响初级生产的成本。因此，探索降低成本的潜力极其重要。

### 德国的当前发展状况

在德国，人们已经认识到建立废物回收技术网络的必要性。首先是尽可能扩大机械回收的范围，逐步引入化学回收作为补充。然而，现行监管框架面临挑战，主要是因为法规大多是针对机械回收制定的，而化学回收相关法规还需要进一步完善。这导致了法律和执行上的障碍，因为化学回收的次级原料不被视为回收物。

另一个挑战在于废物状态的确定——即对“废物终点”的认定：何时适用废物监管，何时将其视为次级原料？目前在德国和欧盟范围内，这一标准尚未统一。德国在这方面的不协调阻碍了对化学回收的投资。相较于焚烧，回收利用面临着经济上的不足。因此，需要额外的激励措施来促进化学回收。除此之外，欧盟数据还显示，原生塑料的生产成本大约是回收塑料的一半。因此，德国环境署正在考虑对矿物油征税进行豁免。

还有一个考虑因素是为所有塑料生产商设立一个基金，要求每个生产商都要出资，并奖励特定行为。另一方面，机械回收（分离、挤出和预处理）的进步也带来了新的挑战。

# 7

## 循环经济措施带来的节能潜力



## 7 循环经济措施带来的节能潜力

本报告所述的工业过程，包括钢铁、塑料和水泥，是工业中最耗能的行业，中国和德国的碳排放量都很大。以钢铁行业为例，其排放量大约占中国总排放的 10%。若转向使用二次材料进行生产，排放量将显著下降。本章在总结前几章影响减排潜力的因素的基础上，对循环经济的节能潜力做一个概述。

循环经济可以实现更高效的能源利用。许多用于初级工业生产脱碳的技术依赖大量可再生电力或绿氢。例如，使用氢直接还原铁、利用绿氢作为燃料或原料以及蒸汽裂解装置的电

气化等。在不采用循环措施的情况下，工业转型会导致钢铁、水泥和化工行业用电大幅增加。

### 7.1 回收带来的潜在排放和节能

如第 4 章所述，与初级生产相比，钢铁、铝、玻璃、纸张和其他材料的二次生产能够节省大量能源。节能潜力对气候的影响非常显著。Agora Industry (2022) 的研究显示，到 2050 年，循环措施可以将欧洲工业能源需求从约 1400 太瓦时降至约 1000 太瓦时，减少 400 太瓦时。这些节能量主要得益于通过各种循环经济措施实现的更高回收率。如图 22 所示，钢铁、塑料、铝和水泥的二次生产所需能源显著减少，这直接带来二氧化碳排放量大幅下降。例如，初级和二次生产在能耗和二氧化碳排放强度上存在显著差异：全球常规初级铝

生产通常每吨排放 13-16 吨二氧化碳，而二次铝生产仅排放 0.3 吨二氧化碳/吨（两者都受地点和电力部门的碳排放强度影响）。以下通过中国的案例来阐述通过二次材料生产所能实现的节能和减排潜力。目前，中国铝业每年约造成 6.7 亿吨二氧化碳排放，其回收率略低于 20%，初级和二次生产总量约为 5000 万吨。图 22 展示了基于不同电力结构的二氧化碳排放因子。与欧洲情况相似，40-50%的节能减排潜力对中国来说是切实可行的。

图 22：铝 - 不同初级生产份额和不同电力 CO2 强度的减排潜力（排放因子）

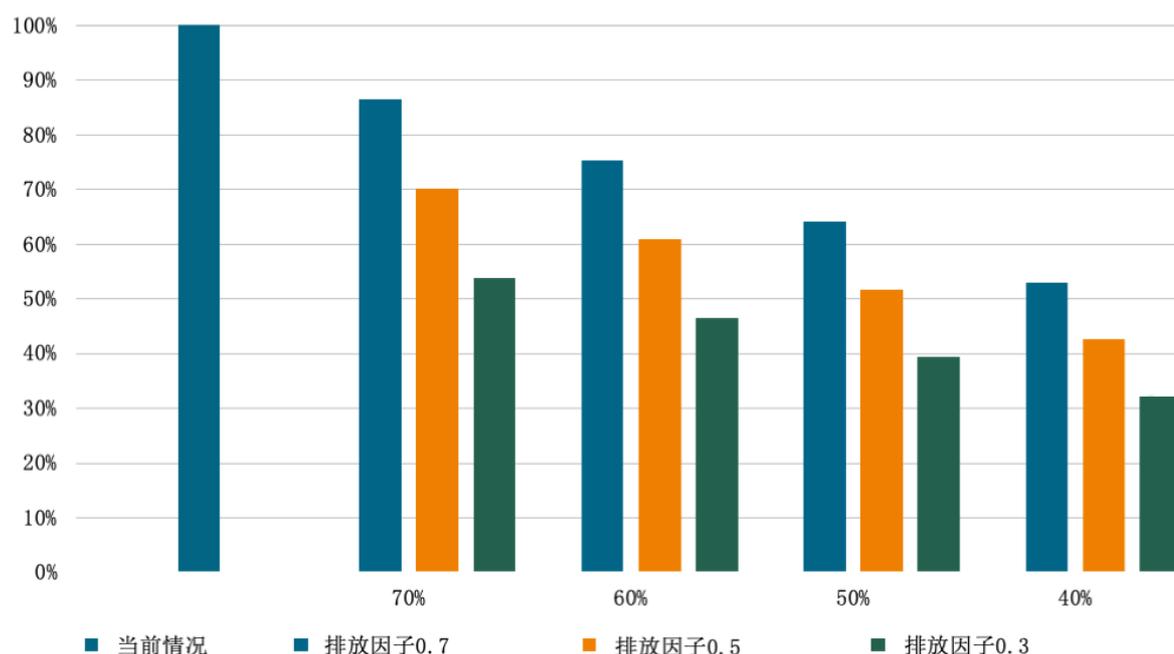
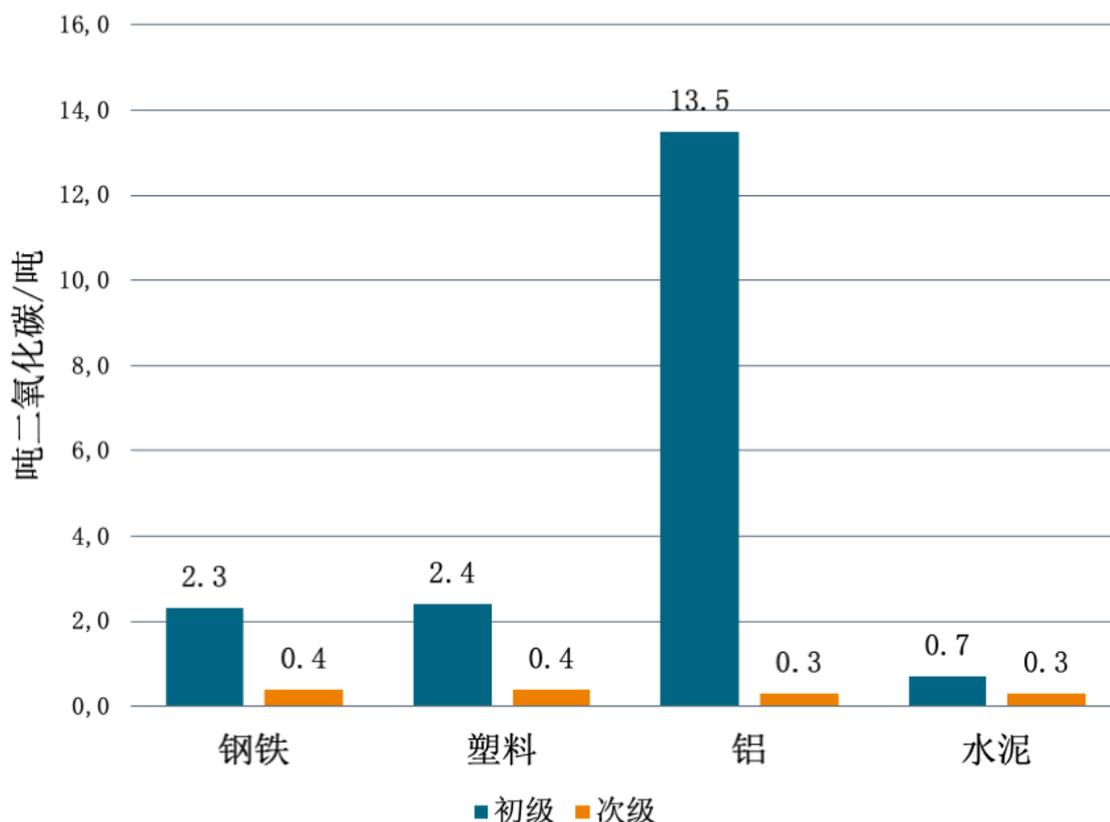


图 23: 初级生产路线与二次生产路线的二氧化碳排放强度因子

来源: Agora Industry 2022, 基于材料经济学公司的分析 (2021) 以及 Wood Mackenzie 和 S&amp;P Global Platts Analytics



## 7.2 塑料循环解决方案的节能潜力

塑料的回收利用有巨大的节能减排潜力，因为将塑料废料转化为塑料产品仅需少量能源。在回收工艺中，机械回收在能源、材料和成本效益方面表现最佳，但它要求废物相对纯净。

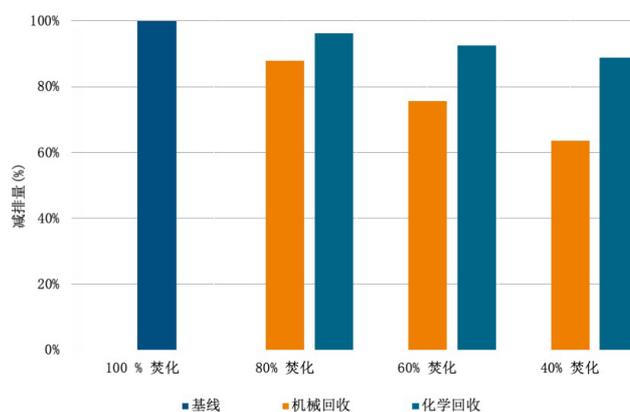
目前，回收利用的主要优势在于其显著的减排效果，这是因为回收避免了废物焚烧（参见图 24）。未来，回收利用将带来更为显著的节能效果，因为采用氢和二氧化碳的替代温室气体中和生产路线有着明显更高的能量需求。

如果将当前 15% 的机械回收率提升至 35%，与通常情景相比，到 2050 年，欧洲的二氧化碳排放量可以减少 2700 万吨（Agora Industry 2022）。如图 24 所示，与每吨塑料焚烧产生的 5.4 吨二氧化碳相比，机械回收每吨塑料仅产生 2.1 至 3.5 吨二氧化碳。

在考虑化学回收时，需要留意其相对较高的能量需求，通常需要通过焚烧部分废物来满足。此外，还需考虑在蒸汽裂化炉中生产新塑料所需的能量。如图 24 所示，每吨塑料产生约有 4.4 吨二氧化碳排放，低于焚烧排放量。此外，值得强调的是，这种方法允许生产新塑料，相比主要产生热能的废物热处理而言，其价值更高。

研究发现，在某些影响类别中，焚烧可能比热解表现更好，而气化路线可能导致更高的排放和酸化趋势。总体来说，化

图 24: 处理 7500 万吨塑料所产生的排放



学回收方法需要更多的研究和开发来解决这些问题（Zero Waste Europe 2020）。

在考虑不同回收率对减排的影响时，机械回收的优势变得尤为明显。需要注意的是，如果使用可再生能源，化学回收和焚烧的排放值有可能降低，前提是在过程后捕获二氧化碳。

这项简短分析的一个关键结论是，电力结构的当前二氧化碳强度对结果影响巨大。在中国这样广泛使用煤电的背景下，这一点尤为重要，这为减排提供了巨大机遇。

鉴于中国目前较低的回收率，向回收利用转型具有巨大的节能减排潜力，即便在维持较高二氧化碳强度的情况下也是如此。未来，节能措施可能带来更多积极影响，凸显回收利用不仅能提升能效，还能提高中国实现气候目标的可能性。

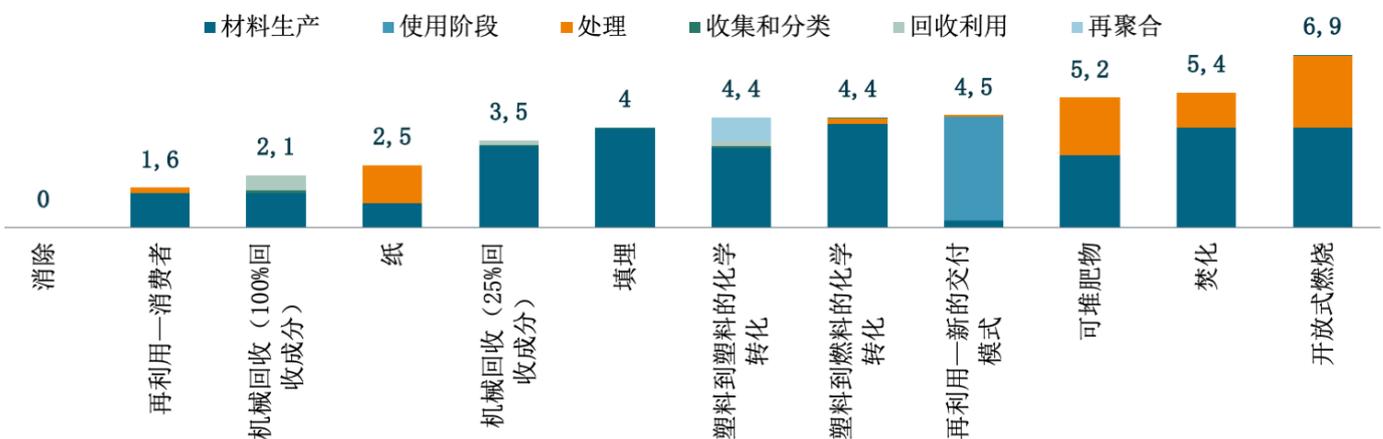
1 吨塑料废物可转化为约 0.41 吨新的 HVC（塑料原料）。因此，在未来使用二氧化碳作为原料的温室气体中和生产工艺（碳捕集与利用）中，可能节省 0.41-0.58 吨氢和 10.1-14.3 兆瓦时电力。

在未来主要依靠可再生电力和电力燃料的能源系统中，电力将成为重要商品。钢铁和基础化学品（如塑料）等高耗能产品的生产高度依赖电力，因为所需的减排能源和原材料（如氢）都来自于电力。因此，回收利用的效率在这些工艺中更为显著。由于向二次生产转型，这些能源不再局限于工业用途，而可以用于其他领域（如交通、建筑）的脱碳。需求减少还将带来一个好处，那就是扩张速度放缓，从而减少了对新建筑材料和资源的需求。

此外，由于可再生能源容量需求减少了，还可能带来对电厂备用容量需求的降低。总体负荷波动的减少也有助于减轻电网压力。

图 25: 1 吨塑料的单位温室气体排放

来源: PEW 和 SystemIQ, 2020



### 7.3 混凝土材料效率的节能潜力

虽然针对金属和塑料等材料的循环措施能带来可观的节能潜力，但对于混凝土和水泥等材料，情况则有所不同。混凝土回收对减废至关重要，但在节能方面并不明显。这是因为大部分排放源自水泥和混凝土生产的化学过程（过程排放），而非燃烧过程本身。其意义在于资源保护，而非节能。通过优化生产量和采用创新方法替代混凝土密集型产业，重工业能够实现多重效益。

有关循环经济在混凝土材料领域的研究仍处于早期阶段，关于混凝土和水泥中材料效率的节能及温室气体减排潜力的研究或文献并不多。然而，Shanks 等人（2019）针对英国材料效率措施的研究表明，使用煅烧粘土和石灰石替代水泥在减少材料需求方面具有显著的潜力，其次是降低混凝土中的水泥含量。综合考虑，所调查的六项技术措施预计可使英国水

泥排放量减少 44%。此外，通过优化设计，减排潜力可进一步提升至 51%。从政策角度来看，这些方案无需改变消费者习惯，仅需对建筑设计作出最小调整。但另一方面，这需要大规模生产新型混凝土，并激励设计人员进行更优化的建筑设计（Shanks, 2019）。

Watari 的另一项研究显示，一些需求端措施，如基于性能的混凝土设计、使用预制混凝土构件、预应力后张法，以及避免过度设计，建筑和基础设施的更高效利用，如通过整合城市功能来延长建筑和基础设施的使用寿命等，均能带来显著的减排效果。



# 8

## 政策建议



## 8 政策建议

报告提出了 20 项政策建议，并由伍珀塔尔气候、环境、能源研究所进行了评估。以下是针对中国国情最具影响力的政策建议，沿三个关键维度进行评估：有效性、技术成熟度和可行性。

**有效性：**鉴于基础产业在塑造整体碳足迹方面的重要作用，着重于确定能带来显著减排效果的措施，评估了每项措施对基础工业脱碳的贡献潜力。

**技术成熟度：**在考虑任何政策建议时，评估当前技术成熟度至关重要，因此将技术的成熟度和可获得性纳入考量。报告

旨在识别能够利用经过验证且可用的技术解决方案的措施，同时认识到培育创新以弥补任何技术差距的重要性。

**可行性：**评估在现有监管和经济环境下引入每项措施的可能性，包括考察所提措施与现行政策的一致性、财务影响以及所需基础设施的可获得性。

**中国相关性：**除了评估政策建议的有效性和可行性之外，还评估了与中国国情的相关性。

### 8.1 减少初级和二次原材料之间的经济不对称

#### 8.1.1 税收和定价机制（初级材料、二氧化碳、塑料）

R-战略	有效性	技术准备情况	可行性
减少、回收、反思	●●●●●	●●●●●	●●●●●

对于某些塑料回收工艺以及水泥和混凝土行业，初级生产的成本低于二次材料的生产成本。通过对初级材料、二氧化碳排放和塑料征税，使用初级原材料的生产成本可能会提高。这有助于营造一种公平竞争环境，使得二次材料的生产成本与初级材料相当或更低，促进向二次材料生产的转变。

对初级原材料征税将引入基于市场的激励措施，以提高资源效率，减少对初级原材料的依赖，同时增加对二次原材料的需求。税基可以基于数量和价值以及生态相关性进行设定——例如，初级原材料税可以采用生态背包<sup>2</sup>等指标，覆盖所有原材料，以防止不必要的替代效应。目前，这类税收主要针对建筑材料等长距离运输无利可图、国际竞争较小的原材料。

在促进可再生能源使用或提高能效的背景下，目前，一些国家正在讨论或已经实施了诸如税收或排放交易系统<sup>2</sup>等二氧化碳定价机制。但如果碳强度较低的回收材料的经济吸引力优于初级原材料，则这类机制也可以促进循环经济的发展。

#### 有效性

对原材料和二氧化碳排放实施双重征税，有望促进资源效率和推动向循环经济的转型。这种双重税收策略的成效，取决于多个因素。就原材料税而言，其影响与税率水平密切相关。

同样，碳排放税的有效性在很大程度上取决于碳价格。这种税收能够使二次原材料的回收工艺在财务上更具吸引力，否

则这些工艺可能不具备经济效益。然而，回收过程中不断上升的能源成本可能会促使人们转向其他选择，比如塑料，其生产与金属等材料相比时表现出更低的碳排放强度。

#### 技术成熟度

原材料税对资源效率的实际影响，取决于二次材料是否能成功替代被征税的初级材料。在没有替代的情况下，税收可能仅产生收入，而不能实现预期的可持续发展导向效应。

与此同时，碳排放税对价值链中的二氧化碳减排作用也存在方法论上的挑战。这种复杂性导致了由于产品设计、回收能力和减排兼容性的不同，产品的税负也会有所差异。解决这一问题至关重要，因为关系到税收激励在市场早期参与者之间的公平分配问题。

#### 可行性

在实施原材料和二氧化碳排放双重税收政策时，需要细致考虑众多现实挑战。特别是当涉及到进口以防止市场扭曲时，形势变得更为复杂。由于进口原材料成分的信息通常受限，引发了对税收管理有效性和制定合理豁免制度的关切。

碳排放税则需要全面而准确的数据，以评估产品在各个生产阶段的碳足迹。此外，为了保持国内产业的竞争力，对进口产品征税也是必要的。这些挑战凸显了建立完善的数据基础设施和精心设计的税制的必要性，以确保这种复合税收策略的可行性。

#### 中国背景

2020 年，中国开始实施碳排放权交易体系（ETS），通过 ETS 系统征税是可行的。钢铁、水泥、铝等行业完全可以纳入到

<sup>2</sup> 生态背包指标衡量产品或服务中使用的材料净重，不包括产品的实际重量。通过全生命周期方法评估隐含的物质流，并反映环境影响和资源效率。

这个体系当中，垃圾焚烧同样适用。但应确保在此体系中排除填埋方式，并为回收利用提供额外的激励。

### 8.1.2 促进新技术应用——通过提高纯度实现重复使用

R-战略	有效性	技术准备度	可行性
回收、减少	●●●●●●●●	●●●●●●●●	●●●●●●●●

控制钢的纯度是实现高质量回收的先决条件。目前，从钢中去除更多杂质的技术仍有待完善。这一技术的发展需要与其他措施（如适当的产品设计）相结合。

为避免降级回收，甚至在成熟的回收系统（如玻璃、铝和钢的回收）中也应采用优化工艺，特别是在原料的预分类和预处理方面。例如，可以利用激光诱导等离子体光谱法或X射线荧光法等先进技术。同时，从生态角度来看，这些复杂分类工艺所涉及的能量投入也应纳入考量。

#### 有效性

通过去除杂质和污染物，可以制造适用于高附加值应用的二次原材料。然而，鉴于钢铁的质量分类超过2500种，要做到全面评估颇具挑战性。

#### 技术成熟度

对于“特定合金的回收”，虽有多种技术可用，但通常不支持所需要的大规模处理量，或因高成本而使得这些技术只对特定材料具有经济性和可行性。

#### 可行性

在诸如“OptiMet”项目框架内对这类过程的评估表明，目前应用的基于传感器的分选工艺仅在颗粒尺寸大于10毫米时才具备经济可行性。然而，在回收领域，关注的往往是尚未在此尺寸范围内释放或分离成不同材料的复杂颗粒（例如金属/塑料复合材料）。

#### 中国背景

对中国而言，推荐采用这种方法，但初期应给予较低优先级。鉴于当前的生产量，重点应放在尽快建立必要的基础设施和设计产品方面，以实现循环利用。在某些领域，如汽车车身，建立有针对性的回收设施以防止废料混合时受到其他行业的污染可能是有益的。

### 8.1.3 生产者延伸责任制度

R-战略	有效性	技术准备度	可行性
回收、重新设计	●●●●●●●●	●●●●●●●●	●●●●●●●●

生产者延伸责任制度（EPR）是一种工具，使生产者（即制造商、进口商或品牌所有者）承担其产品整个生命周期的责

任。这意味着制造商必须在财务和/或实际操作中负责其产品的收集、回收和处理。旨在创造调整产品设计和投资回收基础设施的激励措施。在某些情况下，生产者责任组织（PRO）代表多个制造商共同承担责任。

在产品层面，生产者延伸责任制度也影响上游价值链。例如，制造商从设计易于回收的产品中受益，因为这降低了产品使用寿命终止时的回收成本。此外，消费者也变得更加敏锐和知情。另外，建立回收系统和生产者责任组织（如适用）将创造新的就业机会。

#### 有效性

现有生产者延伸责任体系证明了该措施总体上具有很高的有效性，并成功地将处置成本从纳税人转移到制造商。例如，德国对包装制造商实施双重生产者延伸责任制度，这提高了该国包装废物的回收率。

#### 技术成熟度

鉴于许多材料已建立了回收基础设施和技术，因此为这些产品引入生产者延伸责任体系在技术上并没有难度。但是，一些收集和分类技术可能需要提升效率，以处理增加的回收产品量。

#### 可行性

这方面的挑战包括建立回收和相关基础设施，以及应对那些没有投资该系统但仍从中受益的“搭便车者”。此外，还必须确保中小企业不会因引入生产者延伸责任制度而处于不利地位。

#### 中国背景

中国可以建立这种制度，因为从监管角度看（特别是对于国有企业），可以快速实施。可建立一个专门机构，代表企业承担收集、分类和其他相关工作。

#### 最佳实践：法国的生产者责任延伸体系

在法国所有的生产者责任延伸系统中，分销商有责任组织并/或资助其产品在其生命周期末端的回收和处理工作。生产者可以选择建立自己的回收系统或利用集体系统来履行他们的责任。分销商向生产者责任组织支付费用，这些费用随后被用于组织回收基础设施的建设。在法国，存在两种不同的系统：在组织系统中，生产者责任组织直接管理废物处理；在财政系统中，生产者责任组织使用所收集的费用来支持城市/市政机构。后者负责最终的废物处理。生产者责任组织需每六年重新获得当局批准，一旦批准，便可独立运行。借助包容性治理模式，所有利益相关方，包括非政府组织和消费者团体，都有机会参与决定生产者责任延伸系统的设计和目标。

截止2021年，法国的强制性生产者责任延伸系统共筹集了大约18亿欧元的生态税，其中大约15亿欧元被用于废物处理（8.3亿欧元通过市政府处理，7.38亿欧元由生产者责任组织处理），其余的4.03亿欧元用于其他开支，如提升公众意识和研发工作。最终，所有类型废物的回收率均超过了50%。

## 8.2 创造需求

### 8.2.1 回收材料配额——特定产品使用回收材料的最低配额

R-战略	有效性	技术准备度	可行性
回收、减少	●●●●●●●●	●●●●●●●●	●●●●●●●●

保障高质量回收材料的充足供应是建立回收基础设施和确保回收过程不会导致材料质量降级的一个前提。德国和欧盟的经验表明，实施回收配额的同时应当设定回收材料配额，以防止回收材料被用于质量较差的产品。

最低回收配额要求制造商在其产品中至少使用一定比例的回收材料。而回收材料配额则是直接替代原始产品中的初级原材料，避免降级回收的发生。然而，值得注意的是，由于回收材料的需求和可获得性各不相同，因此不同产品需区别对待。

通过强制规定一定比例的回收材料含量，可以刺激对高质量回收材料和正确分类塑料废物的需求，从而为中期设计更环保产品提供激励。回收材料配额可以针对特定产品，也可以针对特定材料，例如某些聚合物。聚合物的最低回收材料配额不针对制造商，而是针对价值链中更早环节的塑料生产商。这些生产商需要保证市场上销售的某种聚合物（如 PET、PP 或 ABS）中含有一定比例的回收材料。这一工具可以替代或补充针对特定产品的最低回收含量要求。对特定聚合物设定的替代配额将大幅提升回收规模，尽管需要大量初始投资，但从长远来看可能通过规模效应实现成本节省。

#### 有效性

工具的有效性极高，因为采用了塑料废物闭环回收的一个重要机制。这将自然增加需要有效回收的塑料废物数量，为塑料制造商投资循环商业模式以确保获取塑料废物提供了强大的激励。

#### 技术成熟度

技术上总体可行，但当前可能缺乏足够的处理能力。此外，需要评估不同应用领域在技术上可实现的回收含量水平。

#### 可行性

与针对单个产品的最低回收含量配额类似，实现特定聚合物配额具有挑战性。采用质量平衡方法，企业必须在一定时间内满足配额要求，而不是每批次。这简化了合规监测，因为全球塑料市场 80% 的份额由约 20 家公司控制。《全球塑料公约》等国际协议的谈判对此至关重要。

#### 中国背景

在中国，由于国家导向性较强，配额的实施比财务激励措施更为合适。

### PET 瓶中回收塑料的最低回收材料配额（欧盟）

欧盟委员会规定，塑料饮料瓶中必须包含至少 25% 的回收塑料，这已成为塑料最低回收配额成功执行的一个典型案例。这一配额的实施激发了对整个价值链的大规模投资，同时通过各种影响机制提高了塑料的回收利用。

实施这一义务后，多个欧盟成员国开始准备推行塑料瓶的押金制度。为了有效地满足配额要求，其核心条件在于以尽可能纯净的形式收集材料，特别是在实施押金和分类回收系统之后，这种方法被证明极其有效。

高品质的再生 PET（rPET）因供不应求而价格大幅上升。这对企业构成了强烈的激励，促使它们整合价值链，比如建立自有的回收系统及提升其回收能力，或收购相关公司（如 Black 集团和 PreZero）。这种做法将催生全新的商业模式，如通过提升产品的可回收性来节约成本。

强制引入的最低回收含量要求向消费者传达了一个明确信号，即使用回收塑料并不表示因节省成本而牺牲品质（这通常与较低的支付意愿有关）。相反，这激发了各大品牌之间的竞争，争相引入更高比例的回收材料，以表明自己为“最环保”的瓶装饮料品牌。

### 8.2.2 通过政府采购促进循环技术

R-战略	有效性	技术准备度	可行性
减少、回收、再制造、再利用	●●●●●●●●	●●●●●●●●	●●●●●●●●

回收产品（尤其是塑料产品）面临的一个主要挑战是缺乏市场需求，这阻碍了回收基础设施的建设。因此，通过政府采购为回收产品创造市场需求是一种有效的方法。

在大多数经济体中，公共部门占商品市场需求的很大一部分：例如，德国的公共采购占 GDP 的比例约为 15%。循环采购工具旨在将回收含量、可回收性或可维修性等标准纳入公共招标中。目的是为循环产品创造稳定的需求，进而引发私营部门对这类产品的研发或新生产能力的投资。

环境友好型公共采购的核心方法是建立可靠的全生命周期成本核算（“生命周期成本核算”）制度，这在决策中变得越来越重要。如果公共采购更多关注二手或可修复的产品，则会产生积极的就业影响。

#### 有效性

有效性非常高，许多案例证明企业能够迅速适应这些要求，并将符合相应标准的产品/服务（如更耐用的电子产品）纳入产品组合。

#### 技术成熟度

技术可用性需要不同角度考虑：公共采购的框架已经建立，并且整合额外标准不构成特别挑战。然而，实际操作中通常缺乏这些标准的具体技术描述，这阻碍了法律的顺利实施：一个具体的例子是产品的可修复性，公共采购商通常缺乏标准化的评估依据。

## 可行性

实施方面构成最大的挑战。德国《循环经济法》规定，原则上公共部门只有当额外成本在经济上不合理的情况下才能购买线性产品。然而，缺乏一套监督机制来评估这一要求是否以及如何实施，尤其是追偿机制。

## 8.3 循环设计

### 8.3.1 生态设计指令

R-战略	有效性	技术准备度	可行性
回收、减少、反思、 维修、再利用	●●●●●●	●●●●●●	●●●●●●

生态设计法规使产品在设计之初就考虑循环性，从而促进产品的再利用、修复和有效回收。回收潜力往往受到产品设计和配套添加剂的限制。

### 有效性

由于生态设计法规针对价值链的起始阶段，对产品的循环性能够产生重大影响，因此有效性显著。有利于拆解和分离单个材料的产品设计可以实现高效且经济的回收工艺。此外，法定的可维修性要求延长了产品使用寿命，减缓了对复杂回收工艺的需求。另外，这些要求还能促进其他 R 策略的实施，例如易拆解设计不仅有利于回收，还便于翻新，而耐用的产品或部件也更适合重复使用。

### 技术成熟度

技术可用性取决于指令中所规定的具体要求。尽管如此，一些产品示例表明，为了达到更好的循环性而调整设计（例如，采用单一聚合物生产功能性外套）和实现可修复性（例如，公平手机）是可行的。

### 可行性

这些要求促使人们重新思考产品和基础设施的设计。鉴于结构性变化需要时间和持续投入，因此视为一项长期措施。考虑到某些权衡因素（例如使用高质量和耐用材料与节能制造之间的平衡）的存在，也可能出现其他一些挑战。

### 中国背景

考虑到中国目前大量生产钢铁、水泥和塑料，生态设计法规对中国尤为重要。如果在未来几年内推行循环设计，20-30年后实现循环经济转型的进程将大大简化，并带来节能等多种优势。

## 中国背景

在中国，这一措施特别有助于在经济中创造需求，特别是在具备二次材料的前提下。对于某些产品，如再生混凝土或低熟料混凝土，引入这一方法可能是合适的。虽然行业内可能存在疑虑，但可以在政府采购中大量使

### 8.3.2 优先考虑翻新既有建筑而非拆除和新建的法律要求

R-战略	有效性	技术准备度	可行性
减少、 再利用、 反思	●●●●●●	●●●●●●	●●●●●●

拆除和新建建筑可以提高使用期间的能效；然而，生产建筑材料所需的“灰色能源”通常未被考虑在内。

### 有效性

通过有针对性的翻新或再利用来延长建筑的使用寿命，可以显著节约资源和减少温室气体排放。由于在建筑物的使用阶段越来越多地使用可再生能源供热，在考虑全生命周期排放时，“灰色能源”的相关性日益提升。

### 技术成熟度

技术可行性在很大程度上取决于具体的建筑结构。在评估延长建筑使用寿命措施时，应结合结构耐久性一起考虑。

### 可行性

可采用不同工具，设定针对性更强的翻新激励措施，例如通过城市土地利用规划、要求制定拆除方案或调整资助工具以提高能效等。

### 中国背景

考虑到中国建筑平均使用寿命短至 25-30 年，且拆迁率极高，导致了大量建筑废物和资源消耗。延长建筑使用寿命对于中国可能是一个尤为有用的手段。

## 8.4 开发适当的基础设施

### 8.4.1 回收配额

R-战略	有效性	技术准备度	可行性
回收	●●●●●●●●	●●●●●●●●	●●●●●●●●

提高回收利用的一项重大挑战是确保有稳定的需求，并让企业相信已经建立了适当的回收基础设施。明确的配额可以作为指导，并为回收基础设施提供保证，确保稳定的市场，并为回收材料提供有保障的需求。

强制性回收配额规定每个系统每年必须回收多少材料。除其他目的外，设立配额的目的在于提高有关材料（如黑色金属、铝或玻璃）的回收率，确保更有效的资源利用，最大限度地减少对新材料生产的依赖。配额还可以为资源高效材料回收设定基准。欧盟已经制定了一些回收配额：例如，长期目标是黑色金属达到80%的回收率，铝达到60%。但通常这种配额针对的是产品而非单个材料（如包装废物或废弃电气电子设备）。

强制回收率能够对价值链的上游阶段（如收集与分类、产品设计等）产生影响。比如，设计易于回收的产品和实施高效分类可以对整个回收过程带来好处。此外，强制回收配额还能推动循环商业模式的发展，企业通过保持对产品的所有权，确保获得可回收材料。扩大回收基础设施也可能创造新的就业岗位。

#### 有效性

这一措施的有效性取决于回收配额的水平：提高回收配额将导致更有效的回收。

#### 技术成熟度

对于钢这样的材料，已经存在一些有效的回收技术，这些技术可以确保质量的稳定，而对于其他一些材料（如塑料），通常会降低质量。因此，针对不同材料的实际情况设置相应回收率非常重要。此外，许多材料已经具备可回收利用的条件，但经济效益有时会导致实施上的限制。

#### 可行性

为评估可行性，应与行业专家密切协商，引入强制回收配额。此外，需要提前投资基础设施和技术，以建立和发展适当的基础设施。为了最大限度地减少这一挑战，一个可行方案是逐步增加配额。

#### 中国背景

在中国，玻璃和铝等多个行业的回收率仍明显低于全球平均水平。强制回收率可能会推动适当回收基础设施的发展。

### 8.4.2 强制实施可重复使用系统

R-战略	有效性	技术准备度	可行性
减少、再利用	●●●●●●●●	●●●●●●●●	●●●●●●●●

目前，尤其是在包装和日常消费品领域，一次性产品非常普遍，主要涉及塑料，也包括铝、玻璃和纸制品。为了提高这些产品的循环性，采用可重复使用的产品，延长其循环使用周期变得至关重要。对可重复使用系统的强制要求将大幅减少一次性产品产生的废物量。例如，自2023年起，德国对一定规模的餐饮外卖服务实施了使用可重复使用容器的强制规定。对这些容器征收的押金为将其返还至回收系统提供了激励。

可重复使用系统的收集、清洗、分类和分配所需的新基础设施将提高对熟练工人的需求，创造新的就业机会。此外，对原材料的需求也将发生转变，例如，陶瓷或玻璃可代替塑料，用于相应的可重复使用方案。但同时，需要考虑转向可持续性较差的材料的可能性，如铝箔使用的增加。

#### 有效性

可重复使用系统可以预防废物的生成和持续的资源开采。但对于每个纳入可重复使用系统的产品，都应进行生命周期评估，因为可重复使用系统在其他领域可能会造成一定的环境影响。例如，可重复使用产品的生产通常需要更多的能源和原材料，其清洗可能会导致比一次性解决方案更高的耗水量。

#### 技术成熟度

尽管已经存在一些具备可重复使用解决方案的押金回收计划，但并非所有企业都具备必要的基础设施。尤其对于中小企业而言，可能会因产品和清洁设备或服务的额外成本而面临实施可重复使用系统的挑战。

#### 可行性

实施可重复使用系统面临的挑战包括确定适当的押金金额和解决消费者接受度问题，例如退还选项的可获得性。并非每家公司都有采用可重复使用系统的能力。

#### 中国背景

在中国实施配额是可行的，但应确保产品数量充足。在这方面，逐步实施押金回收计划可能会有所帮助。

### 8.4.3 塑料产品可回收性奖惩制度

R-战略	有效性	技术准备度	可行性
回收、反思			

为了减少不可回收产品，一种方法是通过奖惩机制激励企业进行产品设计。然而，这种方法需要恰当的回收基础设施来支持。在生产者延伸责任制度框架下，产品制造商通常根据其产品的数量和/或重量支付一定的许可费。对于包装，通常根据特定材料计算许可费，例如塑料包装或金属包装的费用不同。生态差异化的许可费中还可以将包装的可回收性纳入考量。

#### 有效性

这种制度的有效性取决于经济激励或惩罚的力度。奖惩制度的一个可能的副作用是过分关注一次性产品的可回收性，这可能会削弱废物减量或可重复使用系统推广方面的作用。

#### 技术成熟度

充足且稳健的收集和回收基础设施对于奖惩机制的有效实施至关重要。没有发达且高效的回收基础设施，潜在的可回收产品将无法实现其实际效益，也无法被有效回收。

#### 可行性

可行性的核心要求是建立产品可回收性的公认评估标准。在此基础上，需要像中央包装品管理局这样的机构以强制性方式实施这种奖惩制度。德国包装法的例子表明，这种制度不会通过市场力量自发形成。

#### 中国背景

鉴于这种制度需要回收基础设施的支持，奖惩制度更适合于作为一种补充手段，在后期阶段发挥作用。

# 结论

本报告的核心目标是全方位梳理德国与中国循环经济实践的现状，旨在探讨推行循环经济过程中遇到的挑战，提出有针对性的技术与监管方案。此外，本报告还评估了在循环经济实践背景下节能及温室气体减排的潜力。

报告凸显了循环经济实践对节能和温室气体减排的重大贡献，尤其是在钢铁、铝、玻璃和纸张等材料的回收工艺中，与原始生产方法相比，展现出了显著的节能效果。

研究表明，并不是所有材料都适合回收利用，也不是所有回收方式都能有效减少生产过程中的能源消耗。以混凝土回收为例，虽然对减少废物至关重要，但在节能方面的效果并不理想。相反，采用材料效率策略成为一种独特且重要的手段，其意义不仅在于节能，更在于对资源的保护。

## 中国背景

就中国而言，尽管与欧洲的循环经济措施相比仍处于初期阶段，但中国已展现出向更为循环和资源高效型社会转型的坚定承诺。影响众多材料流减排潜力的一个关键因素是回收工艺所用电力力的二氧化碳排放强度。考虑到中国广泛使用燃煤发电，这一点在中国背景下显得尤为重要，为减排提供了巨大的机遇。

然而，中国面临一些特有的挑战，例如有限的废钢储备和较高的废钢处理成本这为循环经济实践，尤其是能源密集型行业如钢铁生产带来了阻碍。预计中国在水泥和混凝土领域的需求会逐步降低，特别是随着城市化进程和基础设施建设的放缓，将成为该行业脱碳的主要动力。随着城市化和住房需求的长期下降，新住房开发规模预计将减少。虽然中国仍需改善基础设施，但基础设施建设的规模正在逐渐缩减。由于建筑行业包括住房、道路和铁路的建设放缓，水泥需求的减少将不可避免。尽管中国对混凝土的需求正在下降，但它仍占据全球大部分水泥生产和消费量。因此，通过材料效率措施减少水泥的使用潜力依旧巨大。

关于塑料的循环解决方案，重点正转向资源利用途径，整个废物资源行业——包括塑料的物理和化学回收——预计将进入一个快速增长的阶段。物理和化学回收方法的回收预计都将上升数千万吨，化学回收有望成为更主要的绿色塑料发展途径。值得注意的是，这些预测受到多种因素和不确定性的影响。此外，有预测显示，中国的塑料回收率到2030年可能达到45-50%。但是，重要的是要认识到实现这一目标需要共同努力和有效的回收举措。

## 德国背景

德国已经实现了许多材料的高回收率。在二次钢的生产方面，已实现90%以上的白铁包装回收，建筑行业约88%的钢构件得到回收利用，另外11%则被直接重复利用。

在水泥和混凝土方面，材料效率在德国或欧洲的建筑业监管中发挥的作用有限。当前欧洲法规符合促进和提高材料效率和整体资源效率的政策目标。与受欧洲指令管辖的能源性能不同，材料效率相对不受监管。

在通过塑料回收实现循环解决方案的背景下，近年来德国塑料包装废物的处理发生了显著变化。数据分析表明，回收发挥了重要作用，2020年回收占德国塑料包装废物总处理量的42%，57%的塑料包装废物得到能量回收，填埋仅占德国塑料包装废物总处理量的1%。

## 建议

本报告提出了减少初级和二次材料间经济差距、激发对二次材料的需求、促进循环设计和发展回收基础设施等措施。这些措施覆盖了价值链的各个阶段，并运用了从信息方法到市场机制和监管干预等多种工具。尽管存在大量可用措施和工具，但仍需加快实施步伐以推动能源密集型产业向低碳转型。

报告中提出的工具表明，向循环经济的转型可以采取多种不同的支持方式，创新的想法和具体建议并不少见。中德能源转型研究项目确定的工具可应用于价值链的不同阶段，涵盖多种类型的工具——从纯信息工具（尤其是在相关行为主体已具备足够财务激励来实施的情况下）到基于市场或监管的市场干预。报告详细讨论了当循环方法在经济上更具优势（例如在气候保护潜力或就业方面），但这种优势并未在个别主体的激励结构中得到体现的情形，其原因包括环境成本未被充分内部化（特别是从国外进口的原材料）、环境有害的补贴导致市场扭曲（例如对塑料生产中使用石油税收豁免）或过高的交易成本（例如验证二次原材料的质量）等。

尽管不乏可行的措施和手段，但实施速度明显过慢。欧洲审计法院的一份最新报告指出：“从积极的一面来看，成员国政府自第一份行动计划发布以来，确实加大了循环经济活动的力度。然而，进展依然缓慢。欧盟到2030年将废物回收和再利用比例翻倍的目标仍然是一项重大挑战。”对于德国而言，实现这一目标需要将转型速度提高四倍——尽管其起点很高。这不仅需要更加一致的政策，还需要更加雄心勃勃的实施策略，并且必须得到相应预算的支持。仅靠政府无法实现向循环经济的转型，需要私人投资发生重大转变——然而为了实现这一目标，研发和公共部门投资需要更加注重向循环经济倾斜。

报告概述了几种特定的方法及其优劣势，但确定措施优先顺序的挑战仍然存在。许多相关方，特别是商业界，对于选择正确的切入点感到困惑。为了实现优先排序，并对工具进行必要的量化评估，这些工具必须更具体（例如，税收——税率应设定多高，税收在法律上如何实施，征税最终用于什么目的？），建模将作为循环经济战略制定的科学依据，本报告对预算和时间不做赘述。因此，评估仅为粗略定性研究，为进一步的更详细的讨论提供依据。

报告认识到确定措施优先顺序的复杂性，强调使工具更具体化和可量化的必要性。尽管为今后的讨论提供了一定基础，但在制定国家循环经济战略的背景下，需要更详细的分析和建模。

德国、欧盟和中国对循环经济的实践日益增强，报告分析了实现高质量循环经济的挑战，包括物流中的杂质分离、分类和回收基础设施不足、初级和二次材料供应之间的不平衡等，强调继续深入研究和制定相关政策，有助于解决这些挑战并进一步推进循环经济的实践。

# 略语

CCU/S	Carbon Capture Use and / or Storage	碳捕集利用与封存
CE	Circular Economy	循环经济
CEAP	Circular economy Action Plan	循环经济行动计划
CEPL	Circular Economy Promotion Law	循环经济促进法
CISA	China Iron and Steel Association	中国钢铁工业协会
CMU	Circular Material Use Rate	循环材料利用率
CPR	Construction Product Regulation	建筑产品条例
DRI	Direct Reduced Iron	直接还原铁
DRI-H2	Direct reduction of iron with hydrogen	用氢直接还原铁
EAF	Electric Arc Furnace	电弧炉
EEA	European Environment Agency	欧洲环境署
EPR	Extended Producer Responsibility	生产者延伸责任制度
ETS	Emissions Trading System	施碳排放权交易体系
EU	European Union	欧盟
EuRIC	European Recycling Industries Confederation	欧洲回收工业联合会
fa	fly ash	粉煤灰
ggbfs	ground granulated blast furnace slag	磨细高炉矿渣粉
GHG	Greenhouse Gas	温室气体
Gt	Billion tonnes	十亿吨
IEA	International Energy Agency	国际能源署
kt	kilotonnes	千吨
LCA	Life Cycle Assessment	生命周期评估
MSW	Municipal Solid Waste	城市固体废物
Mt	Million tonnes	百万吨
NABU	Naturschutzbund	德国自然保护联盟
NDRC	National Development and Reform Commission	国家发展和改革委员会

OPC	Ordinary Portland cement	普通波特兰水泥
PCR	Post-consumer recycled material	消费后回收材料
PE	Primary Energy	初级能源
PET	Polyethylene terephthalate	聚对苯二甲酸乙二醇酯
PHA	Polyhydroxyalkanoates	聚羟基脂肪酸酯
PLA	Polyactic acid	聚乳酸
PP	Polypropylen	聚丙烯
PROs	Producer Responsibility Organizations	生产者责任组织
SCMs	supplementary cementitious materials	辅助水泥材质
SDGs	Sustainable Development Goals	可持续发展目标
SMEs	Small and medium-sized enterprises	中小企业
SRM	Secondary raw material	二次原料
UNEP	United Nation Environment Programme	联合国环境规划署

# 图片列表

图 1:	资源效率在碳中和之路上的作用.....	7
图 2:	基于联合国环境规划署的 9R 循环经济策略框架 .....	10
图 3:	初级与次级生产途径中的二氧化碳强度因子.....	11
图 4:	欧盟 27 国城市固体废物处理状况.....	13
图 5:	德国年废物产生量（单位：百万吨）.....	14
图 6:	中国城市固体废物处理状况.....	15
图 7:	全球平均条件下，初级与次级生产途径的二氧化碳排放强度因子对比.....	18
图 8:	2019 年欧盟钢产量、利用和回收统计 .....	19
图 9:	2019 年欧盟铝生产、使用和回收统计数据 .....	19
图 10:	德国、欧盟和中国的金属回收率比较（%）.....	20
图 11:	混凝土生产过程中基础材料的能源强度（Agora Industry 2022）.....	25
图 12:	每年使用的水泥材料和可能的节约方案，2050 年情景，单位：百万吨.....	26
图 13:	辅助水泥材质概况.....	27
图 14:	2060 年水泥和熟料消费情景 .....	29
图 15:	塑料废物累积生成量和处理量（单位：百万吨）.....	32
图 16:	报告塑料回收率和实际塑料回收率对比，欧盟+瑞士+挪威 2020 年废塑料处理情况.....	33
图 17:	回收利用流程和能源需求.....	34
图 18:	机械回收与热解回收的原料耐受度比较（化学转化扩大原料耐受度）.....	34
图 19:	回收利用过程和挑战.....	35
图 20:	生物基替代品概览及主要树脂类型的新材料替代品.....	36
图 21:	塑料生产的全球变暖潜势、土地利用和水利用情况.....	37
图 22:	铝 - 不同初级生产份额和不同电力 CO2 强度的减排潜力（排放因子）.....	40
图 23:	初级生产路线与二次生产路线的二氧化碳排放强度因子.....	41
图 24:	处理 7500 万吨塑料所产生的排放.....	41
图 25:	1 吨塑料的单位温室气体排放 .....	42

## 参考文献

- 推动能源密集型材料的循环经济，欧洲如何加速向无化石燃料、节能和独立工业生产的过渡，” 阿格拉工业，2022。
- Ahmed I. M., Tsavdaridis K. D., “采用普通和轻质混凝土的预制复合地板系统，” 2019, 《ce papers》3 (3-4), 第 257 - 263 页, DOI: 10.1002/cepa.1053.
- Alexa Böckel, Jan Quaing, Ilka Weissbrod, Julia Böhm, 《循环经济的神话》，2022。
- Allwood 等, “物料效率：用更少的材料生产提供物料服务人，” 2013。
- Arena Umberto, Ardolino Filomena, “挑战性塑料废弃物替代处理的技术和环境表现，” 2022, 《资源、保护和循环利用》183, 第 106379 页, DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106379, .
- Basten M. , “循环经济建筑监测报告，” 2021。
- BauNetz Wissen, “玻璃回收 | 玻璃 | 制造/性质，” 《BauNetz》，查阅日期：2023 年 9 月 14 日，网址：<https://www.baunetzwissen.de/glas/fachwissen/herstellung-eigenschaften/recycling-von-glas-2445257>。
- “中国通过大幅增加生产量减少对纸浆进口的依赖，” 纸浆和纸张行业新闻，伯克纳纸世界，2023，查阅日期：2023 年 12 月 7 日，网址：<https://www.paper-world.com/en/newsdetail/china-reduces-dependence-on-pulp-imports>。
- Bleischwitz Raimund, Yang Miying, Huang Beijia, XU Xiaozhen, Zhou Jie, McDowall Will 等, “中国的循环经济：成就、挑战和脱碳潜在影响，” 2022, 《资源、保护和回收》183, 第 106350 页, DOI: 10.1016/j.resconrec.2022.106350。
- Bocken Nancy M. P., Pauw Ingrid de, Bakker Conny, van der Grinten Bram, “循环经济的产品设计和商业模式策略，2016，” 《工业和生产工程杂志》33 (5), 第 308-320 页, DOI: 10.1080/21681015.2016.1172124。
- Brizga Janis, Hubacek Klaus, Feng Kuishuang, “生物塑料的意外副作用：碳、土地和水足迹，” 2020, 《地球》3 (1), 第 45-53 页, DOI: 10.1016/j.oneear.2020.06.016。
- Brunn Michael, “分拣技术使铝变“绿色”-《回收》杂志，2021，” 查阅日期：2023 年 9 月 14 日，网址：<https://www.recyclingmagazin.de/2021/08/03/sortiertechnologie-macht-aluminium-green/>，2023 年 9 月 13 日更新。
- “玻璃 2045 年 - 德国玻璃工业脱碳路线图，” 联邦玻璃协会，2022。
- “建筑行业实现气候中性和资源高效循环经济的机遇与风险，” 土木工程目录 (CEWI)，2021。
- “废塑料化学回收系列报告之政策篇：现状+对策深度分析 - 技术分享 - PROCESS 流程工业，” 流程工业网，2023，查阅日期：2023 年 9 月 28 日，网址：<https://chem.vogel.com.cn/c1163525.shtml>，2023 年 9 月 28 日更新。
- “走向净零排放：中国水泥工业脱碳路线图，” 中国水泥协会，2022。
- “包装回收标志，” 中国国家市场监督管理总局，2022 年 7 月 11 日，查阅日期：2023 年 7 月 19 日，网址：[https://enviliance.com/regions/east-asia/cn/report\\_7656](https://enviliance.com/regions/east-asia/cn/report_7656)，[https://enviliance.com/regions/east-asia/cn/report\\_7656](https://enviliance.com/regions/east-asia/cn/report_7656)。
- “全球循环经济差距报告，” 循环经济，2023。
- Cooper Samuel J.G., Giesekam Jannik, Hammond Geoffrey P., Norman Jonathan B., Owen Anne, Rogers John G., Scott Kate, “循环经济的热力学见解与评估，” 2017, 《清洁生产杂志》162, 第 1356-1367 页, DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.06.169。
- “混凝土可持续建筑设计指南，” 德国钢筋混凝土协会，2021。
- Xiangshan Ma 博士, “中国行业专家关于碳捕获利用/储存和循环经济的访谈，” 2023, 受访人：Qiao Zhang 教授, Xian 博士, Wang Kailiang。

“城市固体废物管理, 32 个欧洲国家成就回顾,” 欧洲环境署, 2013.

“调查欧洲次生原材料市场。欧洲环境署报告,” 欧洲环境署, 2022.

“中国塑料循环经济之路-机遇和建议,” 艾伦·麦克阿瑟基金会, 2022.

“金属回收事实,” 欧洲回收工业联合会, 2020.

“新的循环经济行动计划, 为了更清洁和更具竞争力的欧洲,” 欧盟委员会, 2020.

Favier Aurélie, Wolf Catherine de, Scrivener Karen, Habert Guillaume, “欧洲水泥和混凝土工业的可持续未来: 2050 年实现产业全面脱碳的技术评估,” 2018, DOI: 10.3929/ETHZ-B-000301843.

Fischer-Kowalski M., Ren Y., Swilling M., von Weizsäcker E.U., Moriguchi Y., Crane W. 等, “将自然资源利用和环境影响与经济增长分离,” 2011.

“废品奖励,” 弗劳恩霍夫协会, 2019.

Geyer Roland, Jambeck Jenna R., Law Kara, “所有塑料的生产、使用和命运,” 2017, 《科学进展》3 (7), DOI: 10.1111/jiec.12557.

罗国平, 杨戈, “官员表示, 中国铝业着眼于回收和搬迁以减少排放,” 财新全球, 2021, 查阅日期: 2023 年 9 月 14 日, 网址: <https://www.caixinglobal.com/2021-03-09/chinas-aluminum-industry-eyes-recycling-relocation-to-reduce-emissions-official-says-101673159.html>, 2023 年 9 月 14 日更新.

Harder Joachim, “玻璃回收-当前市场趋势,” 回收利用-全球回收技术, 2018 年 5 月, 查阅日期: 2023 年 7 月 12 日, 网址: <https://www.recovery-worldwide.com/en/artikel/glass-recycling-current-market-trends-3248774.html>.

Harder Joachim, “当前玻璃回收市场趋势,” 回收利用-全球回收技术, 2018 年 10 月 23 日, 查阅日期: 2023 年 9 月 14 日, 网址: <https://www.recovery-worldwide.com/de/artikel/aktuelle-markttrends-im-glasrecycling-3248772.html>.

Hertwich Edgar, Lifset Reid, Pauliuk Stefan, Heeren Niko, Ali Saleem, Tu Qingshi 等, “资源效率和气候变化: 低碳未来的材料效率战略,” 2019a.

Hertwich Edgar, Lifset Reid, Pauliuk Stefan, Heeren Niko, Ali Saleem, Tu Qingshi 等, “资源效率和气候变化: 低碳未来的材料效率战略,” 2019b.

Hertwich Edgar G., Ali Saleem, Ciacci Luca, Fishman Tomer, Heeren Niko, Masanet Eric 等, “减少建筑物、车辆和电子产品相关温室气体排放的材料效率战略-回顾,” 2019c, 《环境研究快报》14 (4), 第 43004 页。DOI: 10.1088/1748-9326/ab0fe3.

Hiebel Markus, “废钢回收有助于确保德国钢铁生产,” 2016.

Hu Peipei, Li Yanze, Zhang Xuanzhao, Guo Zhen, Zhang Peidong, “中国容器玻璃的二氧化碳排放及减排战略分析,” 2018a, 《碳管理》9 (3), 第 303-310 页, DOI: 10.1080/17583004.2018.1457929.

Hu Yuan, He Xuan, Poustie Mark, “立法能促进循环经济吗? 基于物质流的中国经济循环度评估,” 2018b, 《可持续性》10 (4), 第 990 页, DOI: 10.3390/su10040990.

“清洁能源转型中的材料效率,” 国际能源署, 2019, DOI: 10.1787/aeaaccd8-en.

“中国实现碳中和的能源行业路线图: 经济合作与发展组织,” 国际能源署, 2021.

“世界可持续发展工商理事会: 2009 年水泥技术路线图, 2050 年前碳排放减少,” 国际能源署, 2009.

“德国的次级原材料,” 海德堡能源与环境研究所 (IFEU), 2021.

José Potting, Marko Hekkert, Ernst Worrell 和 Aldert Hanemaaijer, “循环经济: 产品链创新评估”.

Kirchherr Julian, Reike Denise, Hekkert Marko, “概念化循环经济: 对 114 个定义的分析,” 2017, 《资源、保护与回收》第 127 期, 第 221-232 页, DOI : 10.1016/j.resconrec.2017.09.005.

Küpfer C., Bastien-Masse M., Devènes J., Fivet C, “重复利用现有混凝土构件的新建筑技术的环境和经济分析: 两个案例研究,” 2022, 载于《IOP 会议系列: 地球与环境科学》1078 (1), 第 12013 页, DOI : 10.1088/1755-1315/1078/1/012013.

Lee Roh Pin, Meyer Bernd, Huang Qiuliang, Voss Raoul, “中国无废城市可持续废物管理: 潜力、挑战和机遇,” 2020, 《清洁能源》4 (3), 第 169-201 页, DOI : 10.1093/ce/zkaa013.

Lernhelfer, “化学中的熔流电解,” 查阅日期: 2023 年 9 月 14 日, 网址: <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/chemie/artikel/schmelzflusselektrolyse>, 2023 年 9 月 13 日更新.

Lin Yuancheng, Yang Honghua, Ma Linwei, Li Zheng, Ni Weidou, “中国和世界钢铁工业的低碳发展: 现状、未来愿景和关键行动,” 2021, 《可持续性》13 (22), 第 12548 页, DOI : 10.3390/su132212548.

Liu Siyi, Patton Dominique, “2022 年中国铝产量创下 4021 万吨的历史新高,” 《路透社媒体》, 2023 年 1 月 17 日, 查阅日期: 2023 年 9 月 14 日, 网址: <https://www.reuters.com/markets/commodities/chinas-2022-aluminium-output-hits-record-high-4021-mln-tonnes-2023-01-17/>.

Marsh Alastair T.M., Velenturf Anne P.M., Bernal Susan A, “混凝土的循环经济战略: 实施与整合,” 2022, 《清洁生产杂志》362, 第 132486 页, DOI : 10.1016/j.jclepro.2022.132486.

Mata-Falcón Jaime, Bischof Patrick, Huber Tobias, Anton Ana, Burger Joris, Ranaudo Francesco 等, “数字化制造的钢筋混凝土楼板: 建筑业的可持续解决方案,” 2022, 《RILEM 技术通讯》7, 第 68-78 页, DOI : 10.21809/rilemtechlett.2022.161.

“2050 年工业转型,” 材料经济学第 165 页, 2019.

McDowall Will, Geng Yong, Huang Beijia, Barteková Eva, Bleischwitz Raimund, Türkeli Serdar 等, “中国和欧洲的循环经济政策 (21),” 2017.

“德国的循环经济- NABU,” 德国自然保护联盟 (NABU), 2023, 查阅日期: 2023 年 6 月 20 日, 网址: <https://www.nabu.de/umwelt-und-ressourcen/abfall-und-recycling/kreislaufwirtschaft/29818.html>, 于 2023 年 6 月 20 日更新.

“德国的废物管理政策发展,” NAMA, 2019.

Nurdiawati Anissa, Urban Frauke, “走向能源密集型产业的深度脱碳化: 当前状况、技术和政策回顾,” 2021, 《能源》14 (9), 第 2408 页, DOI : 10.3390/en14092408.

Nusselder Sanne, Maqbool Amtul Samie, Deen Rory, Blake Gregory, Bouwens Joris, Fauzi Rizal Taufiq, “闭环经济: 以荷兰混凝土为例,” 2015.

Pameter Sarah, Myers Rupert J, “水泥制材料循环脱碳, 对英国水泥供应链进行脱碳的整体系统审查,” 2021.

皮尤 (PEW), SystemIQ, “打破塑料浪潮,” 2020.

Pieter van Beukering, Li Yongjiang, Zhou Xin, “中国塑料循环中的趋势和问题, 特别关注贸易和回收,” 1997.

“塑料-2022 年事实,” 欧洲塑料制造商协会, 2022.

- Porshnov Dmitry, “热解和气化作为低碳经济的废物到能源工具的演变,” 2022, 《威利跨学科评论-能源与环境》11 (1), DOI: 10.1002/wene.421.
- Purr Katja, Günther Jens, Lehmann Harry, Nuss Philip, “资源节约型温室气体中和之路-救援研究,” 2019.
- Reike Denise, Vermeulen Walter J.V., Witjes, Sjors, “循环经济: 全新还是翻新的循环经济 3.0?—通过关注历史和资源价值选项探索循环经济概念化的争议,” 2018, 《资源、保护和回收》135, 第 246-264 页, DOI: 10.1016/j.resconrec.2017.08.027.
- Rollinson Andrew N., Oladejo Jumoke, “化学回收: 现状、可持续性和环境影响,” 2020.
- Rosenboom Jan-Georg, Langer Robert, Traverso Giovanni, “生物塑料促进循环经济,” 2022, 《自然评论: 材料》7 (2), 第 117-137 页, DOI: 10.1038/s41578-021-00407-8.
- Ruuska Antti, Häkkinen Tarja, “建筑施工的材料效率,” 2014, 《建筑》4 (3), 第 266-294 页, DOI: 10.3390/buildings4030266.
- Serena Yao, “低回收率导致中国专家建议政府立法回收玻璃瓶,” 《纽瑞瓶子》, 2019 年 11 月 28 日, 查阅日期: 2023 年 9 月 14 日, 网址: <https://www.newraybottles.com/china-legislate-glass-bottle-recycling/>.
- Shamsuyeva Madina, Endres Hans-Josef, “循环经济和可持续塑料回收背景下的塑料: 关于研究发展、标准化和市场的综合评论,” 2021, 《复合材料 C 部分: 开放获取》6, 第 100168 页, DOI: 10.1016/j.jcomc.2021.100168.
- Shanks W., Dunant C. F., Drewniok Michael P., Lupton R. C., Serrenho A., Allwood Julian M, “我们能少用多少水泥? 英国水泥材料流动的经验教训,” 《资源、保护和回收》, 2019.
- Shi Xinzhen, Zhang Ming-ang, “废物进口与空气污染-来自中国废物进口禁令的证据,” 2023, 《环境经济与管理杂志》120, 第 102837 页, DOI: 10.1016/j.jeem.2023.102837.
- “增加塑料回收和回收材料的使用,” 德国联邦环境署, 2016.
- “废纸,” 德国联邦环境署, 2022a, 查阅日期: 2023 年 6 月 20 日, 网址: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/altpapier>, 于 2023 年 6 月 20 日更新.
- “玻璃和废玻璃,” 德国联邦环境署, 2022b, 查阅日期: 2023 年 6 月 20 日, 网址: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/glas-altglas#massenprodukt-glas>, 于 2023 年 6 月 20 日更新.
- “国际资源政策监测 (MoniRess II),” 德国联邦环境署, 2023, 查阅日期: 2023 年 7 月 13 日, 网址: [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte\\_05-2023\\_monitoring\\_internationale\\_ressourcenpolitik.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_05-2023_monitoring_internationale_ressourcenpolitik.pdf).
- “建筑和施工全球状况报告: 迈向零排放、高效和有弹性的建筑和施工行业,” 联合国环境规划署, 2022.
- “循环,” 联合国环境规划署, 2023, 查阅日期: 2023 年 9 月 21 日, 网址: <https://www.unep.org/circularity>, 于 2023 年 9 月 21 日更新.
- Watari Takuma, Cao Zhi, Hata Sho, Nansai Keisuke, “高效利用水泥和混凝土, 减少对净零排放供给端技术的依赖,” 2022, 《自然通讯》13 (1), DOI: 10.1038/s41467-022-31806-2.
- Worrell Ernst, Carreon Jesus Rosales, “国际背景下材料的能源需求,” 2017, 《自然科学会报》A 辑, 数学、物理和工程科学 375 (2095), DOI: 10.1098/rsta.2016.0377.

“玻璃包装实现更为循环的经济,” 德国世界自然基金会, 2022, 查阅日期: 2023 年 9 月 14 日, 网址:  
<https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Unternehmen/Mehr-Kreislaufwirtschaft-bei-Glasverpackungen.pdf>.

“理解化学回收的环境影响-对现有生命周期评估的十大关注,” 欧洲零废物组织, 2020.

Zink Trevor, Geyer Roland, “循环经济的反弹,” 2017, 《工业生态学杂志》21 (3), 第 593-602 页, DOI : 10.1111/jiec.12545.

[www.energypartnership.cn](http://www.energypartnership.cn)

网站



微信公众号

