



Federal Ministry  
for Economic Affairs  
and Climate Action



中德能源与能效合作

Energiepartnerschaft

DEUTSCHLAND - CHINA

# 玻璃纤维行业国际能效及脱碳技术 最佳实践指南

中德重点用能行业能效技术指南系列四



**giz**

Deutsche Gesellschaft  
für Internationale  
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH



## 编写说明

《玻璃纤维行业国际能效及脱碳技术最佳实践指南——中德重点用能行业能效技术指南系列》由德国国际合作机构（GIZ）在中德工业节能示范项目框架下发布。该示范项目是德国联邦经济与气候保护部（BMWK）与国家发展和改革委员会（NDRC）指导下中德能源与能效合作伙伴的一部分，由德国国际合作机构（GIZ）与国家节能中心（NECC）共同实施，致力于提供能效措施和最佳实践、加强中德企业间交流合作，助力重点用能行业能效提升与碳减排。本报告也得到由德国经济与气候保护部（BMWK）国际气候倡议（IKI）资助、德国国际合作机构（GIZ）与江苏省生态环境厅共同实施的“支持江苏省低碳发展项目（三期）”的支持。作为一家德国联邦企业，德国国际合作机构（GIZ）支持德国联邦政府通过国际合作实现可持续发展目标。

本报告系《中德重点用能行业能效技术指南系列》出版物的第四本，旨在借鉴德国及国际最佳实践，为包括公共建筑设施（如机场）、造纸、水泥、陶瓷和玻璃纤维行业提供能效技术分析与经验分享。



SUPPORTING THE LOW-CARBON DEVELOPMENT  
OF JIANGSU PROVINCE  
江苏低碳城市发展项目

### 发行方

中德工业节能示范项目  
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）委托

北京市朝阳区亮马河南路14号  
塔园外交办公楼2-5  
邮编：100600  
c/o  
德国国际合作机构（GIZ）  
Torsten Fritsche  
Köthener Str. 2  
柏林10963

### 研究负责人

Maximilian Ryssel（胡天）、原祯  
德国国际合作机构（GIZ）

### 研究协调

Helmut Berger,  
ALLPLAN GmbH



### 作者

Nushin Shahri, Thomas Eisenhut,  
Manuela Farghadan, ALLPLAN GmbH

### 图片来源

As stated in the document;  
Adobe Stock/Banana Republic（封面）  
Adobe Stock/Cozyta (P9)  
Adobe Stock/Cozyta (P12)  
Adobe Stock/Banana Republic (P18)  
Adobe Stock/Mynaral Kazakhstan (P27)  
Shutterstock/Hannu Rama (P52)

© 北京，2022年9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。

## 前言

尊敬的读者朋友们，

近年来，尽管全球面临很多挑战，我们仍看到中国和德国在推动“能源转型”这一进程中的巨大进步。中国是全球可再生能源装机容量最大的国家，而在德国，可再生能源净发电量占比首次超过了 50%。尽管发展可再生能源对缓解气候变化带来的负面影响有重要作用，但仅依靠可再生能源并不足以保障人类拥有宜居的未来。为实现能源转型，我们必须提高建筑、工业和交通部门的能源效率。工业部门是世界主要的能源消耗部门之一，大约占终端能源消费总量的 29%，因此聚焦工业生产中的能效提升是非常行之有效的措施。

作为德国能源转型的重要组成部分，德国联邦政府确定了至 2045 年所有领域实现碳中和的气候目标。到本世纪中期，德国的目标是减少 50% 的一次能源消耗（与 2008 年相比）。为了实现这个目标，德国采取了“能效优先”的原则，旨在尽可能地提升能源效率。

中国提出力争 2030 年前实现碳达峰，2060 年前实现碳中和的重大战略决策，节能提高能效是实现这一战略目标的重要一环。“十四五”的目标是到 2025 年，单位国内生产总值能耗比 2020 年下降 13.5%，单位国内生产总值二氧化碳排放比 2020 年下降 18%。

玻璃纤维行业是一个能源密集型行业，每吨玻璃产品的单位能耗在 7.2 至 12.6GJ 之间。从回收玻璃到使用绿氢、余热回收和电气化，有多项可减少该行业燃料消耗和碳排放的措施。值得注意的是，玻璃生产中 15%–25% 的二氧化碳排放是工艺排放，这类排放来自原材料本身产生的化学反应，无法通过常规手段避免。因此，玻璃纤维行业的全面低碳转型还需要部署如碳捕集和封存等创新技术。

在这一背景下，中德两国间的国际合作可以为此作出一定贡献。本报告是中德能源与能效合作伙伴框架下中德工业节能示范项目（即中德重点用能单位节能诊断示范项目二期）与德国联邦经济和气候保护部国际气候倡议（IKI）资助的“支持江苏省低碳发展（三期）”项目共同发布。

本报告是《中德重点用能行业能效技术指南系列》报告的第四份报告。它介绍了玻璃纤维生产过程中的相关能效措施，并对措施的节能减排潜力和效果进行了分析。

在此感谢所有参与该报告编写的专家和合作伙伴的支持，特别感谢国家节能中心（NECC）和江苏省生态环境厅的大力支持。希望本指南可以帮助玻纤企业找到最优节能方案，引领我们走向更清洁的未来，并进一步推动中德在工业部门的合作。



**Martin Hofmann**

可持续转型—投资于基础设施、  
能源、交通、废弃物管理项目组组长  
德国国际合作机构（GIZ）

# 目录

◆ 1	执行摘要 .....	9
◆ 2	工业部门能源效率概述 .....	12
2.1	能源消耗与能源效率现状 .....	13
2.2	能效政策与管理 .....	16
2.3	能效措施概览 .....	17
◆ 3	玻璃纤维行业概览 .....	18
3.1	生产流程与工艺步骤简介 .....	19
3.2	玻璃纤维行业节能现状及发展趋势 .....	22
3.2.1	玻璃（纤维）行业能源统计和基准 .....	22
3.2.2	能量和材料流向 .....	25
3.2.3	能源密集型工艺过程 .....	25
◆ 4	玻璃纤维行业能效提升措施 .....	27
4.1	优化的助熔剂 .....	29
4.1.1	基线情况和能耗说明 .....	29
4.1.2	建议改进措施 .....	29
4.1.3	节能和温室气体减排潜力 .....	29
4.2	玻纤（纤维）回收利用 .....	30
4.2.1	基线情况和能耗说明 .....	30
4.2.2	建议改进措施 .....	31
4.2.3	节能和温室气体减排潜力 .....	32
4.3	纯氧燃烧——热催化转化（TCR 工艺） .....	33
4.3.1	基线情况和能耗说明 .....	33
4.3.2	建议改进措施 .....	34
4.3.3	节能和温室气体减排潜力 .....	35
4.4	蓄热式纯氧燃烧熔窑（Eco-HeatOx） .....	36
4.4.1	基线情况和能耗说明 .....	36
4.4.2	建议改进措施 .....	36
4.4.3	节能和温室气体减排潜力 .....	37
4.5	电熔、电助熔 .....	38
4.5.1	基线情况和能耗说明 .....	38
4.5.2	建议改进措施 .....	39
4.5.3	节能和温室气体减排潜力 .....	39
4.6	配合料和碎玻璃预热 .....	41
4.6.1	基线情况和能耗说明 .....	41
4.6.2	建议改进措施 .....	41
4.6.3	节能和温室气体减排潜力 .....	42
4.7	低碳燃料 .....	43
4.7.1	基线情况和能耗说明 .....	43
4.7.2	建议改进措施 .....	43
4.7.3	节能和温室气体减排潜力 .....	45

4.8	基于模型的预测控制 (MBPC)	46
4.8.1	基线情况和能耗说明	46
4.8.2	建议改进措施	47
4.8.3	节能和温室气体减排潜力	48
4.9	压降最小化	49
4.9.1	基线情况和能耗说明	49
4.9.2	建议改进措施	49
4.9.3	节能和温室气体减排潜力	50
4.10	未来发展展望	51
◆ 5	结语	52
◆ 6	参考文献	56

## 图目录

图 1: 选定措施的节能潜力 (千瓦时 / 吨) .....	11
图 2: 选定措施的净二氧化碳节约 (千克二氧化碳 / 吨) 潜力 .....	11
图 3: 终能源消费总量占比: 左上欧盟、右上世界 .....	13
图 4: 工业部门最终能源消费结构 .....	14
图 5: 欧盟工业部门能源效率指数 .....	15
图 6: 德国工业部门能源效率指数 .....	15
图 7: 玻璃熔窑的组成部分 .....	20
图 8: 玻璃纤维的成形方法 .....	21
图 9: 欧洲玻璃生产子部门的生产占比 (%) .....	22
图 10: 不同玻璃类型的单位能耗 (吉焦 / 吨) (Leisin, 2019) .....	23
图 11: 欧洲连续玻璃纤维温室气体排放强度的统计数据 .....	24
图 12: 玻璃制造的生产步骤 .....	25
图 13: 产能 300 吨 / 天、碎玻璃用量 50% 的纯氧燃烧窑 (含 / 不含热回收 (HR)) 与蓄热式空气助燃窑 (4.0 吉焦 / 吨) 的比燃料消耗比较 .....	33
图 14: 不同的热催化转化 (TCR) 工艺: (a) - 基线; (b) 热催化转化 + 蒸汽锅炉; (c) - 热催化转化 + 碎玻璃预热器; 和 (d) - 热催化转化 + 氧气蓄热室; RFG: 循环烟气 ( ) .....	34
图 15: 纯氧燃烧窑的 Eco-HeatOx 工艺 .....	36
图 16: 玻璃熔窑 (Wallenberger, Watson, & Li, 2001) .....	38
图 17: 电熔和电助熔 (Stormont, 2010) .....	39
图 18: Nienburger 类型配合料预热系统的基本理念 (Barklage-Hilgefort, 2009) .....	41
图 19: 电解的工艺和应用 .....	44
图 20: 典型的通路控制系统 (Grega, Pilat, & Tutaj, 2015) .....	46
图 21: 通路玻璃调节过程先进控制系统“模型预测控制 (MPC)”的 多层分级结构 (Grega, Pilat, & Tutaj, 2015) .....	47

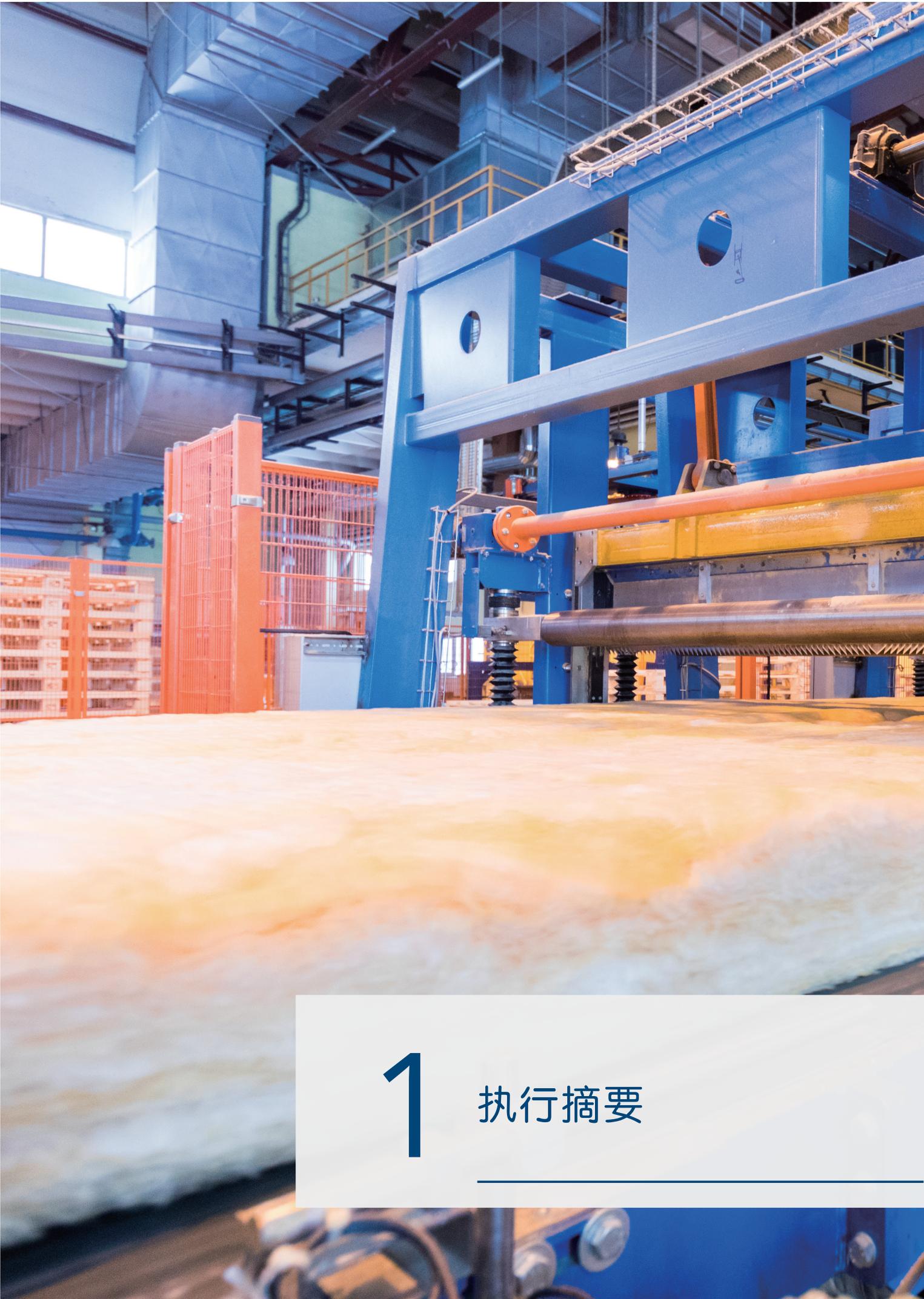
## 表目录

表 1: 欧洲的玻璃产量, 单位吨 (欧盟 28 国, 不含绝热玻璃纤维) .....	22
表 2: 2005 年欧盟的连续玻璃纤维设施和熔窑 .....	23
表 3: 产品基准 .....	24
表 4: 各子部门单位能耗及能耗占比 .....	26
表 5: 玻璃纤维行业能效措施概览 .....	28
表 6: 措施的关键信息——优化的助熔剂 .....	29
表 7: 德国玻璃生产的原料 .....	30
表 8: 措施的关键信息——玻璃纤维回收利用 .....	32
表 9: 措施的关键信息——纯氧燃烧 - 热催化转化 .....	35
表 10: 措施的关键信息——蓄热式纯氧燃烧窑 (Eco-HeatOx) .....	37
表 11: 措施的关键信息——电助熔 .....	40
表 12: 措施的关键信息——配合料和碎玻璃预热 .....	42
表 13: 电解和甲烷化的最新水平和发展 (DENA, 2017) .....	44
表 14: 措施的关键信息——低碳燃料 .....	45
表 15: 措施的关键信息——基于模型的预测控制 (MBPC) .....	48
表 16: 措施的关键信息——压降最小化 .....	50
表 17: 玻璃制造减排的技术潜力 .....	53
表 18: 关键信息概述 .....	54

## 缩略语表

BAT	最佳可行技术
BM	基准
BREF	最佳可行技术参考文件
CaO	氧化钙
CCS	碳捕集与封存
CCU	碳捕集与利用
CFF	连续纤维
EEA	欧洲环境署
ETS	碳排放交易体系
EU	欧盟
FEM	有限元模型
GAE	欧洲玻璃联盟
GHG	温室气体
GJ	吉焦
IEA	国际能源署
IGES	全球环境战略研究所
IPI	工业生产指数
ISO	国际标准化组织
JRC	欧盟委员会联合研究中心
kWh	千瓦时
LAGA	废弃物工作组 - 德国（德国）
MBPC	基于模型的预测控制系统
MJ	兆焦
Mt	百万吨
Mg	兆克（等于一吨）
MWh	兆瓦时
NGO	非政府组织
O&M	运行与维护
ODEX	能源效率指数
PEM	高分子电解质膜
PI	比例和积分
PID	比例积分微分

PtX	电转 X 技术
R&D	研究与开发
RFG	循环烟气
SCADA	监测控制和数据采集
SOEC	固体氧化物电解池
TCR	热催化转化
TFC	最终能源消费总量
TRL	技术就绪指数
UNEP	联合国环境规划署
WHR	余热回收



# 1

## 执行摘要

---

提高工业部门能源效率是降低能源消费总量、减少温室气体排放十分有效的手段。具体来说包括以下原因：

- 工业部门能源消费占最终能源消费总量（TFC）比例较高，世界平均水平为 28.6%
- 工业部门能源消费结构中，化石燃料占比普遍较高，世界平均水平石油产品占 10%，天然气占 20%，煤炭占近 30%
- 工业部门涉及行为主体相对较少，相比其他行业部门更能发挥可观的杠杆效应，甚至单家工厂实施能效提升措施即可节约大量能源
- 目前工业部门仍具有巨大能效潜力有待深挖
- 提升工业能效带来诸多附加效益：行业竞争力提升、生产运行更加平稳可靠、减少停机时间以及包括水、大气、土壤、原料在内的综合资源效率显著优化。

在欧洲，一套最成功的能效提升措施包括：应用基准值批准新设备或新建项目（另见最佳可行技术（Best Available Technologies, BAT）），以及确定欧盟碳排放交易体系中的免费配额占比参考值。自 2005 年起，欧盟碳排放交易体系依照总量控制与交易原则正式启动运行，目前覆盖发电、工业和航空部门在内的 1.1 万家用能大户，涉及碳排放约占参与国家碳排放总量的 40%。初步研究显示，该体系有力地推动了欧盟国家总体减排——2005 至 2019 年间，欧盟二氧化碳排放量下降约 35%。为实现《欧洲绿色协议》（European Green Deal）所规定到 2030 年减少温室气体排放至少 55% 的目标，包括工业在内的各个部门仍需继续努力。为持续提升工业能效水平，欧盟还要求大型企业每四年执行一次外部能源审计，或者按照欧盟能源效率指令（Energy Efficiency Directive）（202/27/EU 号指令及其 2018 年修订版）的规定实施能源或环境管理体系认证。

提高能效的措施既包括完善企业内部能源管理、使用“电气”控制系统等“简易”措施（这两项均为以下措施的前提条件），也包括更换新设备、整合工艺流程及升级新工艺等。本指南主要针对玻璃纤维行业的工艺相关措施。主要考虑其可实现的节能潜力、适用性（主要对中国）及有效性（必要的变更 / 投资措施的成本效益比率）。相关数据来自国内外科研工作成果，同时参考专家的经验预测。

对玻璃纤维行业范畴的界定并不统一。大多数情况下，它包括连续玻璃纤维（CFF），有时候也包括玻璃棉和岩棉的生产。连续纤维生产及供应的形式多样：无捻粗纱、毡、短切原丝、织物（纺织纱）、薄毡和磨碎纤维。主要的最终用途（大约 90%）是通过增强热固性和热塑性树脂，生产出复合材料（玻璃钢，GRP）。此报告专注于连续纤维的生产，也讨论所有玻璃生产设施常会遇到的主要能源消费场景，包括平板玻璃和瓶罐玻璃的生产。欧洲的玻璃纤维产量只有大约 80 万吨，还不到玻璃总产量的 3%。

欧洲每吨玻璃纤维的单位能耗为 2MWh (245.8 千克标准煤)，其中大约 80% 耗能来自熔化和澄清工序。

本指南包含玻璃纤维生产的所有工艺步骤，包括配合料制备、熔化和澄清、成形和表面处理。

下表罗列了公认最具潜力的能效措施，本指南在接下来章节将对其进行详细介绍：

- 优化的助熔剂
- 玻璃纤维回收利用
- 纯氧燃烧 - 合成气体
- 蓄热式纯氧燃烧熔窑（Eco-HeatOx）
- 电熔、电助熔
- 配合料和碎玻璃预热
- 低碳燃料（H<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>）
- 基于模型的预测控制（MBPC）
- 压降最小化

通过最终能耗（电能和热能）变化评估节能潜力时，必须与温室气体减排密切结合：实际碳减排效果在很大程度上取决于生产过程中实际燃料替代情况和电力来源。这一事实符合所有的燃料转换项目，包括以电窑取代化石燃料窑的措施等。目前来看，电网碳排放系数普遍较高，

采用电窑依然会带来二氧化碳排放，但如果使用清洁低碳电源，情况则可能大幅改观。

除现有成熟的节能技术与二氧化碳减排策略（余热回收、工艺优化和增加碎玻璃使用量等）以外，玻璃纤维

行业想要实现更大规模脱碳还需要更多努力。长远来看，采用碳捕集技术以及使用氢气、合成气和生物气，有望对二氧化碳减排做出重大贡献。

本指南能源和二氧化碳节约量的计算均基于特定的假设（见各章节所示），如未另作规定，也基于政府间气候变化专门委员会的天然气排放系数（0.202 吨二氧化碳 / 兆瓦时）和煤炭排放系数（0.335 吨二氧化碳 / 兆瓦时）。

下图总结了可预期的节能以及由此带来的二氧化碳净减排量。压降最小化的节能量相对较小，无法在下表中体现。

图 1：选定措施的节能潜力（千瓦时 / 吨）

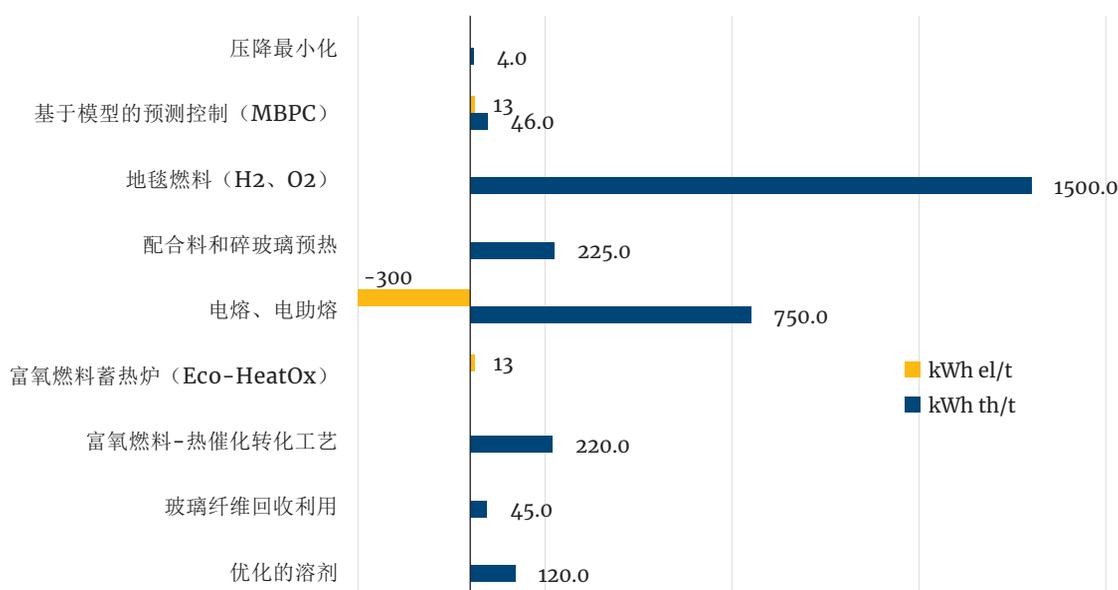
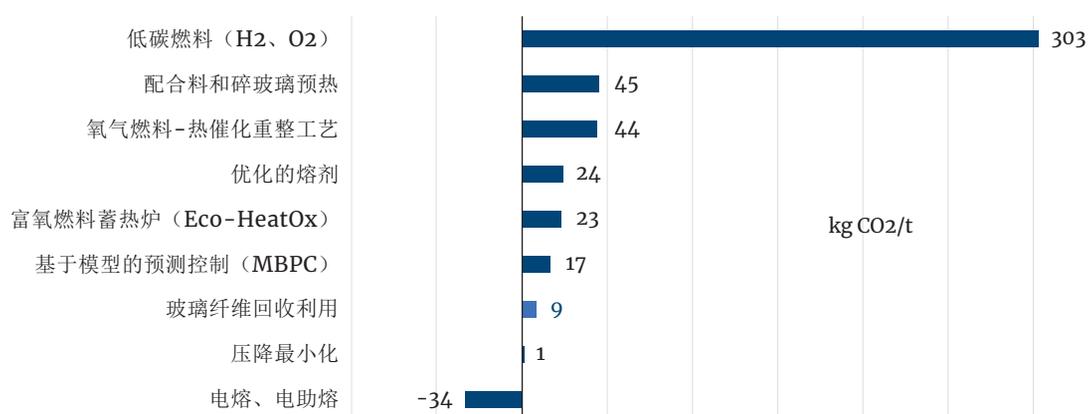


图 2：选定措施的净二氧化碳减排（千克二氧化碳 / 吨）潜力<sup>1</sup>



<sup>1</sup> 发电排放造成了当前电助熔的负减排。



# 2

## 工业部门能源效率概述

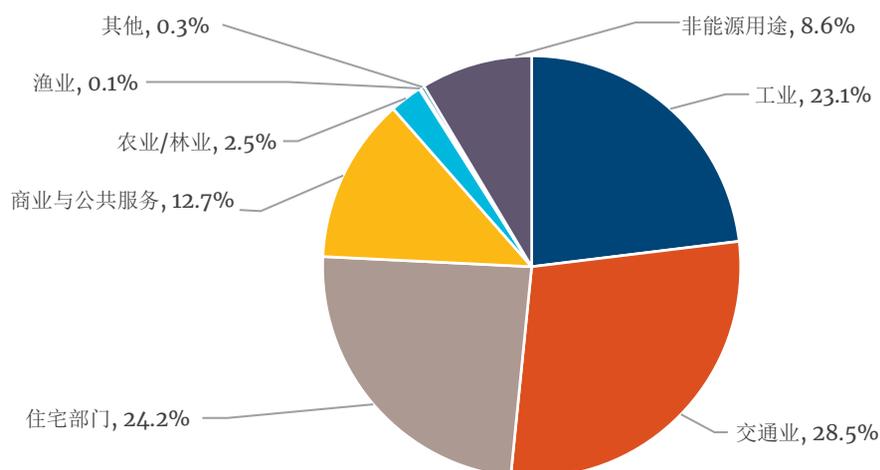
---

## 2.1 能源消耗与能源效率现状

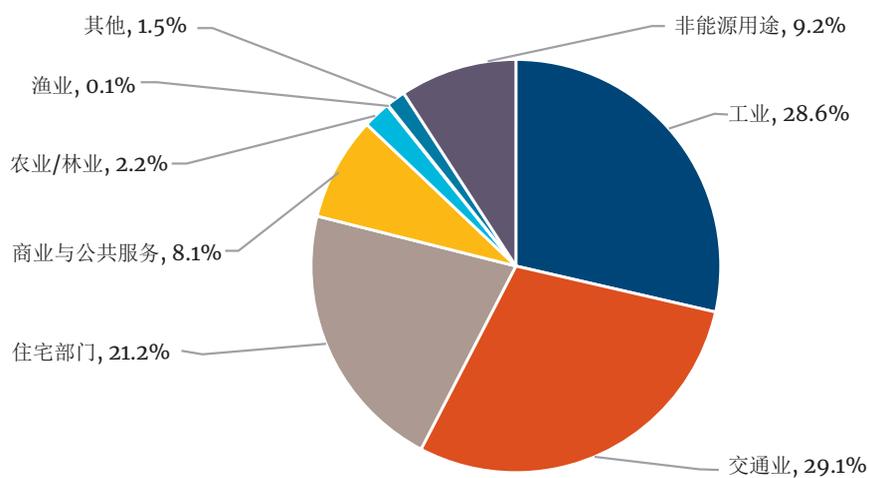
工业部门是全球主要能源消耗部门之一，如下图所示，工业部门占最终能源消费总量（TFC）比例较高：

图 3：最终能源消费总量占比

欧盟 28 国终端能源消费总量占比（2018 年）



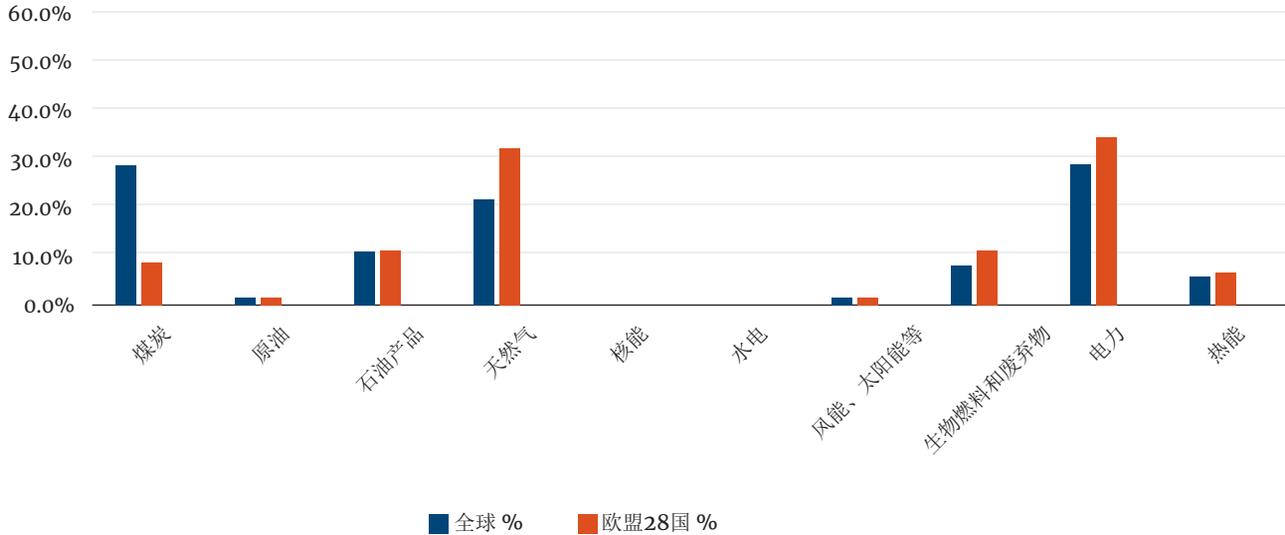
全球终端能源消费总量占比（2018 年）



来源：(IEA, 2018)

关于工业部门的能源结构，不同国家之间存在较大差异，特别是在煤炭和天然气的应用方面。

图 4：工业部门最终能源消费结构



来源：(IEA, 2018)

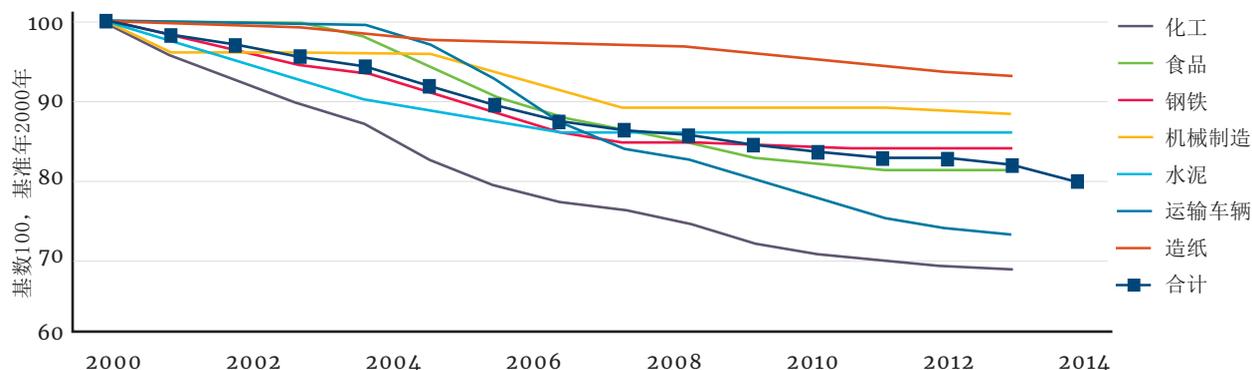
工业部门实施能效提升措施，可大幅降低能源消费总量，减少温室气体排放。原因在于工业部门规模庞大、地位重要，而且与其他部门相比，行为主体相对较少。因此，对一家工厂实施节能改造提升能效，就可以实现十分可观的节能效果。

2007 年以来，欧盟地区工业能源消耗量出现大幅下降。然而，超过一半以上的降幅是由整体经济衰退带来的工业生产下滑造成的。过去几年，尽管能效仍在以每年约 1% 的速率提升，但仍低于 21 世纪初的水平。造成这种情况的部分原因，一是大型设备无法满负荷运行，导致效率偏低，二是部分能源消费属于固定消耗量，与生产水平无关。(Fraunhofer ISI, 2018)

<sup>2</sup> “ODEX”（能源效率指数）基于部门级别数据（家庭、工业、交通），并加权于部门（或终端用途）具体消耗指数与其在该部门能耗占比。工业部门能源效率指数根据 14 个分支部门数据计算得出，基于生产每吨钢铁、水泥和纸张所需能耗量及其他分支部门工业生产指数（IPI）。

衡量总体能效改善情况，可以选用不同的指标体系。比如能源效率指数<sup>2</sup>，衡量部门一级生产活动所需能源消耗（以实物量而非财务支出量衡量）。该指标适用欧盟工业部门，如下图所示。

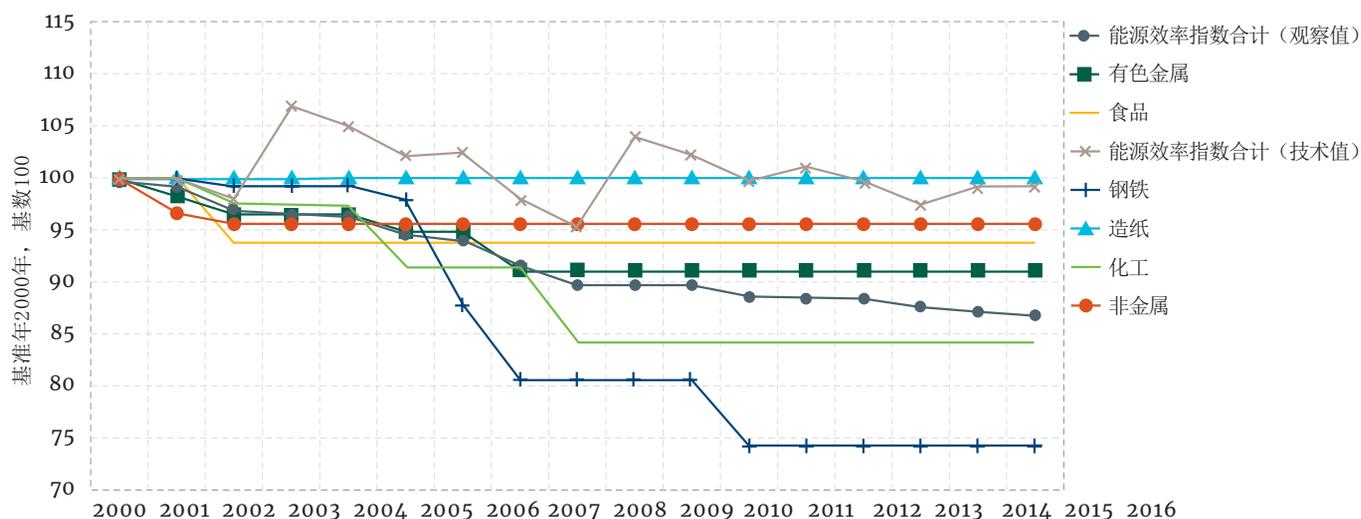
图 5：欧盟工业部门能源效率指数



来源：(Bruno Lapillonne, 2018)

可以看出自 2000 年以来，欧盟总体能效水平每年提高约 1.4%（或自 2000 年以来累计提高 17%）。然而 2008 年经济危机爆发之后，能效提升速度有所放缓。以德国为例，受经济危机影响尤为显著：

图 6：德国工业部门能源效率指数



来源：(Fraunhofer ISI, 2018)

据多项研究显示，目前全球范围存在巨大的能源效率提升潜力。例如，《联合国环境规划署最佳实践做法与案例研究分析》中援引的国际能源署的一项研究（2007）指出，实施商业化落地、具有成本效益、成熟可靠的能效技术，每年有望节约能源 6-9 亿吨油当量（折合 8.57-12.86 亿吨标准煤），减少二氧化碳排放 19-32 亿吨，相当于全球工业部门可节约 18%-26% 能源消耗，二氧化碳减排潜力则高达 19%-32%。其中，化工、钢铁、水泥、制浆造纸行业节能减排潜力最大。

## 2.2 能效政策与管理

公共政策一般可以分为“胡萝卜”式政策（鼓励相关方主动采取行动的激励机制，本文特指使能效提升更具吸引力的激励政策）和“大棒”式政策（对未实现相关规定目标的企业进行惩罚）。具体政策形式则包括监管措施、财政 / 金融政策及信息 / 能力建设。欧洲工业部门最重视的能效提升工具和措施包括定义最佳可行技术、欧盟碳排放交易体系以及能源审计义务。

根据工厂技术路径、发展规模和日常运营情况，同行业不同工厂在能源消耗、能源效率数据方面存在较大差异。为便于对比，最行之有效的方法之一是将工厂实际能耗与行业用能基准进行比较，同时衡量其与最佳可行技术（BAT）之间的差距。

以欧洲为例，为落实《欧盟工业排放指令》<sup>3</sup>（EU Industrial Emission Directive）规定，欧盟出台了各项参考文件（BREFs）介绍各个工业子部门的最佳可用技术。此类参考文件不仅涵盖各项技术的能耗表现，还包含与空气、水和土壤相关的排放与资源利用效率情况，具体内容由行业代表、非政府组织、欧盟成员国与欧盟委员会共同讨论后，在欧盟综合污染预防与控制局官网（<https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference>）发布。根据文件规定，新增设备或新建项目必须符合最佳可行技术标准<sup>4</sup>和规定排放水平，既有设施必须在最佳可行技术公布后四年内完成相关改造。

另一项应用基准值法对标行业先进能效的政策是 2005 年启动运行的欧盟碳排放交易体系。这项市场机制旨在通过总量控制与交易，以最具有成本效率的方式减少总体温室气体排放。换言之，纳入欧盟碳排放交易体系的所有参与方（目前约覆盖 1.1 万用能大户，包括发电站、工厂以及在参与国间运行的航空线路）均受排放总量控制约束，其碳排放约占参与国碳排放总量的 40% 左右<sup>5</sup>。排放总量控制规定了碳排放交易体系覆盖范围内允许排放的温室气体总量。企业每年必须清缴“排放配额”，以完全覆盖实际排放量。排放配额通过分配机制向企业发放，该项机制主要参考各部门历史排放量以及行业前 10% 最优排放水平（基准）。配额盈余或缺口可通过碳市场交易达到平衡。

初步结果显示，欧盟碳排放交易体系达成了预期目标，2005 年至 2019 年期间，交易体系覆盖下的各类设施减少碳排放量约 35%。为实现更高、更有力的碳定价，欧盟自 2019 年开始实行“市场稳定储备机制”。随着《欧洲绿色协议》<sup>6</sup>的颁布，到 2030 年，欧盟整体温室气体减排目标调整为减少 55%。其中，能源效率被指定为首要目标，因为它被认为是公认的减少温室气体排放、降低能源成本最简单有效的方法之一。为此，欧盟制定具有约束力的能效提升目标，即相对于“基准情景”，到 2030 年能源效率至少提高 32.5%。另外，到 2030 年，终端能源消费总量中可再生能源的占比应至少达到 32%（欧盟委员会，2018，2020 年 12 月更新）。目前，各方正全面探讨有关欧盟碳排放交易体系修订及扩容事宜。

对节能项目而言，监测与核查工作也十分重要，它是核准已实现节能量的基础。若企业希望拓展自身能源管理知识、将能源管理纳入整体质量与环境管理流程，可选择应用 ISO 50001《能源管理体系要求及使用指南》标准。

欧洲大型企业需要实施能源（或环境）管理体系，或根据《欧盟能源效率指令》（Energy Efficiency Directive）（2012/27/EU 号指令及其 2018 年修正案）规定，完成周期为四年的能源审计工作。<sup>7</sup>

<sup>3</sup> 工业排放指令（IED，2010/75/EU）

<sup>4</sup> 该文件包括在新 / 现有的工厂和其他限制因素下，对应用工艺的描述和有关能源效率措施的最低工艺要求（除了材料效率、各种物质的排放水平、废物和噪音），取决于新 / 现有的工厂和其他限制因素。要求包括：工艺优化、定期维护、炉子设计和熔化技术的优化、燃烧控制技术的应用、使用越来越多的玻璃碎、使用余热锅炉进行能量回收、使用批量和玻璃碎预热。

<sup>5</sup> 欧盟成员国、挪威、冰岛

<sup>6</sup> 继 2015 年签订《巴黎气候协定》之后，欧盟承诺，到 2030 年，整体温室气体排放量比 1990 年至少减少 40%。为实现这一目标，同时为能源转型铺平道路，欧盟委员会于 2016 年提出更具雄心的能源新规，即《全欧洲人共享清洁能源倡议》（Clean Energy Package for all Europeans）。

<sup>7</sup> 2018 年 12 月 11 日，欧洲议会与欧洲理事会关于修订 2012/27/EU 号能源效率指令的 2018/2002 号（欧盟）指令（欧洲经济区适用文本）。

## 2.3 能效措施概览

提高能源效率并非要求达到热力学定律的（理论）能效极限值，相反目前很多企业能效表现普遍受限于操作惯性和成本限制。不过能效措施成效越“触手可及”，未来进一步挖掘节能潜力的难度就越大。“能源成熟度模型”（引用于：Fawkes 等人，2016）对以下能效措施进行了区分：

- **（良好）内部管理**：包括维护、例行检查、正确的设备安装、根据实际需求确定设备规模、隔热处理得当等
- **控制系统应用**：如温度控制限值、减少多余流量、使用变速驱动、开展预防性维护等
- **简单改造**：更换设备
- **工艺整合**：使用热交换器、闭环系统或废热回收（WHR）
- **替代工艺**：如热电联产、动态模拟和预测控制、最新工艺技术等

“能源成熟度”越高，潜在节能潜力越大，但要求的相关努力和知识更多，复杂程度及商业风险也更大。因此，所有节能项目都应由易到难，从能源成熟度较低的措施入手。改进单项通用技术，如电机、变速驱动器等，对某些工业部门而言相当重要，但不属于本《指南》范围。本文也不涉及工业企业的厂房建筑对能耗的影响。整个生产过程中的工艺相关措施可能适用不同的工业部门，相应部门也会视情况制定具体指南予以说明。这些措施可能包括：

- **蒸汽系统优化**（尽量减少热转换次数、预热水或空气、采用节能型换热器、尽量减少或优化同步加热和冷却操作）
- **优化制冷和冷却系统**
- **重视水中的化学成分**（矿物盐、溶解气体等）对水质或水处理要求的影响
- **安装热电联产机组**减少高温热损失
- **充分利用系统热回收**为公司内部、邻近热用户或区域供暖
- **在余热温度较高的情况下，将余热发电**用于工业生产流程
- **将生产过程中产生的废弃物转化为能源**（筛选再生利用或循环利用方案之后）



# 3

## 玻璃纤维行业概览

---

本章将介绍玻璃纤维行业整体生产流程及相关能耗情况，并概述欧洲玻璃纤维行业生产情况及能耗数据。

## 3.1 生产流程与工艺步骤简介

欧洲玻璃行业协会（欧洲玻璃联盟）由五个重要的子部门<sup>8</sup>构成，其中一个较小的部门涉及玻璃纤维生产（<http://www.glassfibreeurope.eu/>）。

玻璃纤维生产包括：

- 连续纤维，一种高机械强度、低导电性的材料，用于以下产品或领域  
轻重量汽车（例如车辆底盘、车身、车门等）  
压缩气体储存（例如电动汽车的氢燃料罐）  
风力涡轮机（例如涡轮叶片）  
航空航天行业 (US. Department of Energy, Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, 2017)
- 建筑行业保温用玻璃棉和岩棉
- 通信行业用光学玻璃纤维

玻璃纤维用途常常运用玻璃纤维的典型特征，例如高纯度、耐高温性以及非常高的抗热震性。

值得注意的是，对玻璃生子部门的分类在不同的研究中并不完全一致，尤其是玻璃棉和岩棉产品经常被归入不同的部门。(Zier Michael, 2021)

连续玻璃纤维生产及供应的形式多样：无捻粗纱、毡、短切原丝、织物（纺织纱）、薄毡和磨碎纤维。主要的最终用途（大约 90%）是用来增强热固性和热塑性树脂，生产出复合材料（玻璃钢，GRP）。(Scalet Bianca Maria, 2013)

尽管不同玻璃子部门的生产构成及加工技术存在差异，但它们的主要工艺步骤是相同的，包括：配合料制备、熔化和澄清、成形以及表面处理。

下文解释了与各类玻璃产品都相关的主要生产阶段。

### 配合料制备

配合料制备的目的是适当且均匀地混合干的原料（二氧化硅和添加剂），以确保玻璃熔体满足质量要求。此阶段出现的复杂问题可能导致熔化时间变长以及最终产品的质量。配合料制备包括各种成分的破碎、过筛和储存。为了减少粉尘、确保均匀性，应加水（按重量计 2-4%）使原料（有时碎玻璃）湿润。配合料制备必需的耗电量仅在总能耗中占很小份额。它用于斗式提升机、气动输送机和混料机动力设备。

<sup>8</sup> 平板玻璃、瓶罐玻璃、餐具、玻璃纤维、其他（包括特种玻璃）

## 熔化和澄清

熔化和澄清是玻璃生产的核心工艺，通过此工艺应该生产出热均匀和化学均匀的熔体，不含结晶或气态夹杂物或者其他杂质。它发生在由耐火材料制成的熔窑 / 熔池内，温度在 1200 到 1600℃ 之间。

用于生产玻璃纤维(除了光学玻璃纤维)的玻璃熔窑是连续作业窑，即原料从一端送入，玻璃熔体从另一端流出。

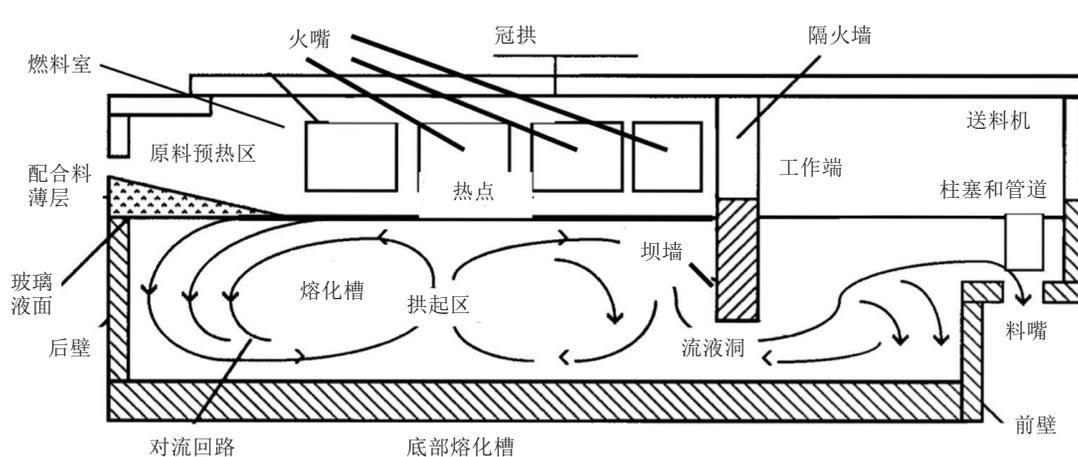
连续作业窑的典型特征有：

- 在连续 5 到 15 年的窑龄内，连续不断地向熔池（由耐火材料制成）内投入配合料
- 目前，熔窑使用化石燃料（主要是天然气，少数情况也用油）和预热空气或者氧气燃烧加热不同的工艺步骤发生在窑内的不同位置
- 窑的熔化能力(玻璃出料量)通常以每天(24 小时)熔化玻璃的吨数表述。它取决于熔窑和所产玻璃的类型，出料量可能从每天 20 吨到每天超过 700 吨不等（总的玻璃生产情况）
- 火焰方向可能是横火焰或者纵火焰第 4 章更详细地介绍了不同类型的烟气热回收（换热或蓄热）

熔化过程还可细分为粗熔化过程和细熔化过程。在粗熔化过程中，投入的配合料在高温下分解。由此形成的玻璃熔体非常不均匀，充斥着气泡。在后续的细熔化过程中，熔融玻璃被澄清，也就是使玻璃熔体均质化，去除其中的气泡。玻璃熔体在熔池中的停留时间取决于所需的玻璃质量。最后，将玻璃熔体转移到熔池中的另一区域，使玻璃冷却，达到适合成形的黏度。

下图展示了玻璃熔窑的主要组成部分：

图 7：玻璃熔窑的组成部分



来源：(Hubert, 2015)

要了解特殊熔窑类型的详细信息，请参考第 4 章的相应部分。

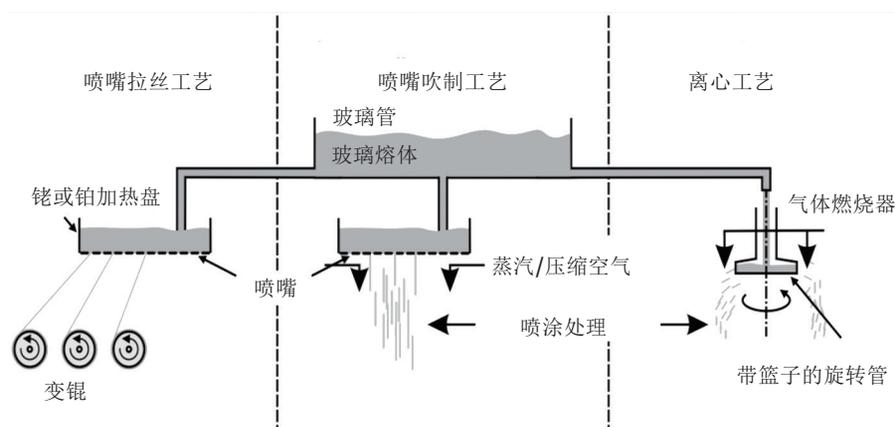
**成型和表面处理：**通过熔窑之后使玻璃熔体成形。玻璃纤维的生产过程中有三种类型的工艺：

**漏嘴拉丝：**此工艺用于生产可增强印刷电路板、塑料或用作织物添加物的连续纤维。在此工艺中，玻璃熔体从玻璃熔池流入铂铑合金漏板，从漏板底部漏嘴流出。为确保温度恒定，电流通过漏板为玻璃熔体加热，将形成的玻璃丝卷绕到旋转的筒子上。玻璃丝的直径在 5 到 20 微米之间，与电灯泡里的灯丝直径相当，可由旋转机头的速度决定。在卷绕之前先将玻璃丝集束成原丝。

**气流喷吹：**此工艺可以生产出更短的、可用作隔热纤维的玻璃纤维。和漏嘴拉丝工艺一样，玻璃熔体通过铂铑合金制成的熔化装置漏嘴，在其下方由空气流或蒸汽流进一步吹拉玻璃丝至一定长度。然后喷涂酚醛树脂。纤维通过输送带进入干燥炉内进行干燥。最后被切成片段并压制成板。

**离心工艺：**此工艺用于生产玻璃棉。生产过程中，玻璃熔体通过旋转管体。管体的底端是一个带孔的分配器。在旋转力的作用下，玻璃通过这些孔甩出。同心设置的燃烧器将玻璃纤维打断。之后的处理方式与喷吹工艺一样。

图 8：玻璃纤维的成形方法



来源：(EnArgus, 2021)

处理步骤指的是表面处理和涂层，也称为上浆。具体的处理方式取决于产品的类型，本指南不作进一步讨论。

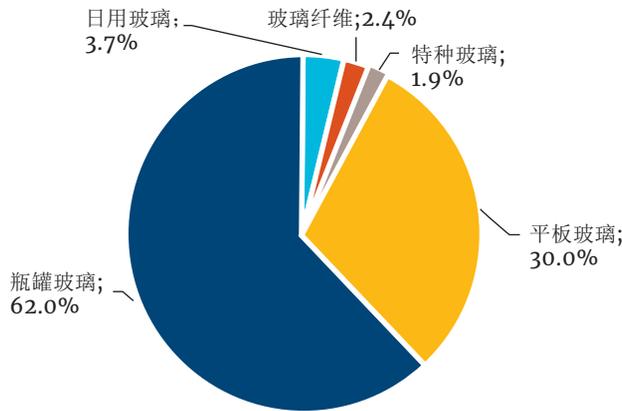
## 3.2 玻璃纤维行业节能现状及发展趋势

本章进一步解释了欧洲玻璃（纤维）行业能源消耗和能源效率的现状，同时简要介绍与行业相关的主要耗能工艺。

### 3.2.1 玻璃（纤维）行业能源统计和基准

欧洲的玻璃总产量为 3600 万吨，由不同的子部门 / 产品构成，其中最大的子部门就是瓶罐玻璃和平板玻璃。玻璃纤维产量所占比重较小：大约 80 万吨，相当于玻璃总产量的 2.4%。

图 9：欧洲玻璃生产子部门的生产占比（%）



来源：(WKO, Fachverband der Glasindustrie Österreich, 2019)

下表概述欧洲国家的玻璃生产，加在一起的总产量大约为 3600 万吨 / 年。

表 1 欧洲的玻璃产量，单位吨（欧盟，不含绝热玻璃纤维，2020）

玻璃类型	瓶装玻璃	平板玻璃 (未加工)	日用玻璃器皿	连续强化纤维	特种玻璃	其他	总计
产量	22 331 000	10 773 000	1 132 000	853 000	542 000	220 000	35 851 000
表面消费量	22 477 968	10 374 663	1 151 670	1 238 412	532 899	539 359	36 314 971
出口 - 欧盟外	1 186 884	882 961	307 251	188 785	19 781	594 684	3 180 346
进口 - 欧盟外	1 333 852	484 624	326 921	574 197	10 680	914 043	3 644 317
出口 / 进口	0.9	1.8	0.9	0.3	1.85	0.65	0.87
进口渗透	5.9	4.5	28.9	67.3	19.7	415	10.2

来源：(Glass Alliance Europe, 2021)

下表展示了截至 2005 年<sup>9</sup>，欧盟成员国连续纤维设施和熔窑的数量。产量从每天不到 50 吨，到中等规模（每天 50-100 吨），再到每天超过 100 吨的大型熔窑不等。

表 2：2005 年欧盟的连续玻璃纤维设施和熔窑

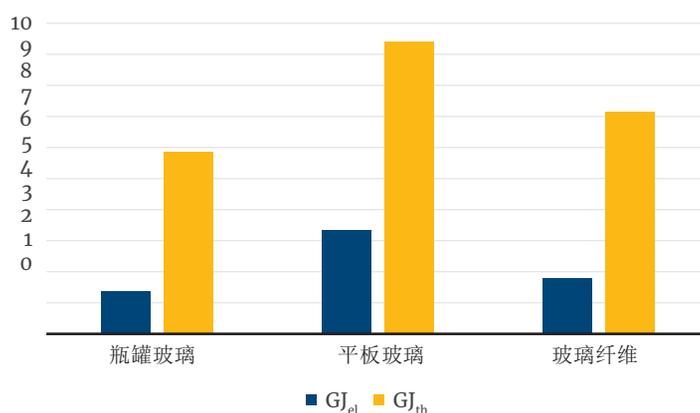
成员国	设施数量	熔炉数量（2005 年运行中的）
德国	3	5
比利时	2	5
捷克共和国	2	4
法国	2	4
意大利	2	3
芬兰	1	3
斯洛伐克	1	3
荷兰	1	2
英国	1	2
西班牙	1	2
拉脱维亚	1	1
总计	17	34

来源：（Scalet Bianca Maria, 2013）

单位能耗的定义是达成单位产量所必需的能量投入。在玻璃生产中即为生产一吨玻璃所需的能量。在对文献进行研究后发现术语“一吨玻璃”的用法并不一致——它可以指一吨玻璃熔体或者一吨包装好的玻璃。因为有破碎的玻璃或者不适合销售的玻璃，所以数字可能存在大幅偏差。废纤维和玻璃放料可能占到工艺输入量的 10% 到 30%（每吨玻璃纤维产品会产生 60-250 千克玻纤废丝和 1-13 千克粘结剂废弃物）。（Scalet Bianca Maria, 2013）

下图展现了不同玻璃类型的平均单位能耗，范围在 7.2 到 12.6 吉焦 / 吨（2.0-3.5 兆瓦时 / 吨）之间。能耗的一大部分（大约 80% 左右）是热能。

图 10：不同玻璃类型的单位能耗（吉焦 / 吨）（Leisin, 2019）



<sup>9</sup> 尽管信息源较老，但总体的生产厂址似乎仍保持着相同的排序，因为现有的定位数量也提及 17 个设施（术语“设施”指的是执行欧盟碳排放交易体系指令附录 1 中列示的一项或多项活动的技术单元）

从根本上降低整体（终端）能耗的每项措施都是为了实现温室气体减排的更广泛目标。可以通过各种方式实现此目的，本指南下文章节包括减少最终能耗的能效措施、更换燃料和进一步倡议。

下表展示了欧盟碳排放交易体系中不同玻璃产品基准的现有水平 (European Commission, 2021)，单位为每吨产品的二氧化碳排放吨数。此外，表中还列出了能效排名前 10% 设施的平均排放值。通过比较最高效的设施和行业基准值，可以发现进一步减少二氧化碳排放的空间依然存在，只是不同设施之间的差异较大。

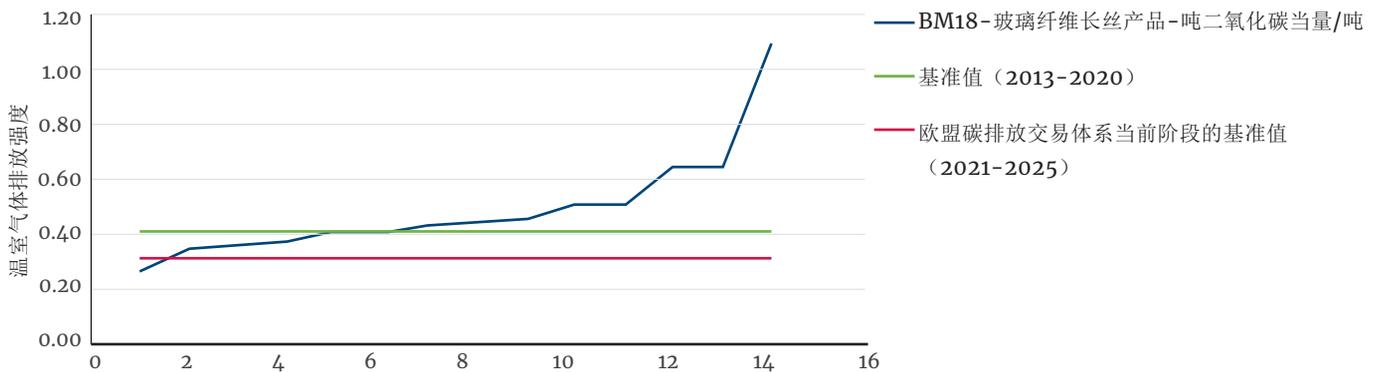
表 3: 产品基准

产品基准	2016 和 2017 年前 10% 最高效设施的平均值 (吨二氧化碳当量 / 吨)	2021-2025 年基准值 (限额 / 吨) 2021-2025
平板玻璃	0.421	0.399
无色玻璃瓶罐	0.323	0.290
有色玻璃瓶罐	0.265	0.237
连续玻璃纤维产品	0.290	0.309

来源: (European Commission, 2021)

下图展示了欧洲连续玻璃纤维生产场所的温室气体排放强度：

图 11: 欧洲连续玻璃纤维温室气体排放强度的统计数据



来源: (欧洲委员会, 2021)

蓝线表示欧洲连续玻璃纤维生产商的实际温室气体排放强度，而红线表示欧盟碳排放交易体系当前阶段 (2021-2025 年) 的基准值 (BM)。2016-2017 年所有设施的平均温室气体排放强度为 0.492 吨二氧化碳当量 / 吨，而排名前十的最高效设施的平均温室气体排放强度仅为 0.29 吨二氧化碳当量 / 吨。这意味着处在平均排放水平的生产企业依然有改进的空间，或者需要购买排放许可证。

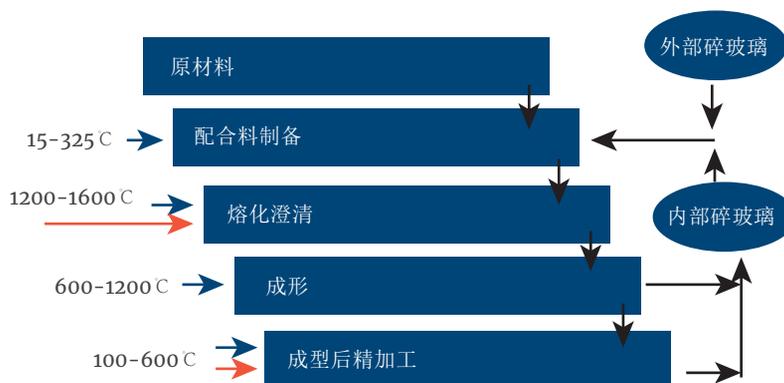
温室气体背景下另一个值得注意的事实是过程排放的占比相当大。取决于具体的矿物和本地地质条件，总二氧化碳排放量中大约有 15-25%<sup>10</sup> 为过程排放。这些排放与燃料供给无关，而是石灰岩、白云石或菱镁矿等原料中碳酸盐分解而产生的固有排放，因而在不改变原料供给的情况下无法避免。(Glass Alliance Europe, 2021)

<sup>10</sup> 取决于多项生产参数，尤其是碎玻璃使用率。

### 3.2.2 能量和材料流向

下图概述了主要的能量和材料流向。“外部碎玻璃”指的是来自其他行业的碎玻璃；“内部碎玻璃”指的是生产过程本身产生的碎玻璃。箭头描绘了能量输入及大致的温度水平（红色箭头：热能；蓝色箭头：电能）。

图 12：玻璃制造的生产步骤



来源：改编自 (Zier Michael, 2021)

### 3.2.3 能源密集型工艺过程

为确定具体节能潜力及节能措施，首先需要确定主要的耗能工序。

不同资料来源的玻璃纤维生产的平均单位能耗数据存在差异。可以假定这种差异是由以下情况引起的：

- 玻璃纤维分类方式差异（含 / 不含绝热材料），
- “一吨玻璃”的定义差异（玻璃熔体或可直接出售的玻璃），
- 燃料差异；碎玻璃的使用率不同等

然而，可使用以下数字粗略表示单位能耗及子工序的占比。这些数字也凸显了相较于电能，热能在总能耗中占有主导地位，重点工序为熔化和澄清，其在总能耗中占比 80% 左右<sup>11</sup>。欧洲主要使用天然气为燃料，贡献了总热能的 97%。

<sup>11</sup> 为了实现更好的数据可比较性，热能数据采用的单位是千瓦时和吉焦。

表 4：玻璃厂商各工序单位能耗及能源占比

	电能	热能	吉焦 / 吨 <sub>玻璃</sub>	千瓦时 / 吨 <sub>玻璃</sub>	占比 (%)
配合料制备	y	n	0.195	54	3%
熔化和澄清	y	y	5.4	1500	81%
成形	y	n	0.26	72	4%
成型后表面处理	y	y	0.845	235	13%
总计	—	—	6.7	1861	—

来源：(Zier Michael, 2021)

如上表所示，玻璃纤维生产中主要用能设备是熔窑。根据产品类型和具体的生产步骤，具体的能耗占比有所不同（参见前一章节）。对于玻璃纤维而言，后期处理和加工，如玻璃纤维干燥、表面处理会消耗大量能源，根据具体产品情况有所不同。

对于玻璃全行业而言，熔化和澄清过程都需要由燃料燃烧提供的热能，而所有工序都涉及电能（但相关程度相当低）。

根据最佳可行技术文件，影响具体能耗的重点因素包括：

- 熔窑容量：大型熔窑能效更高，因为其表面积 / 体积比更低。
- 熔窑产量：大多数熔窑在峰值负荷下实现最高能效的生产。
- 熔窑服役期：熔窑越老旧，比能耗就越高（相比窑龄初期最多高出 20%）。
- 电助熔的使用（参见章节 45）。
- （增加）碎玻璃的使用（参见章节 42）。
- 纯氧燃烧（参见章节 43 和 44）。(Scalet Bianca Maria, 2013)



# 4 行业能效提升措施

---

表 5 中列出了本章介绍的能效提升措施。每节内容将首先介绍基线情况，并介绍能效提升措施及其在节约能源、减少温室气体排放方面的潜力。在所有类型的玻璃产品生产过程中熔化和澄清工序的能源消耗占比最高，因此这一工序是后文的重点。

表 5：玻璃纤维行业能效措施

章节	措施	工序
4.1	助熔剂优化	配合料制备
4.2	玻纤回收利用	配合料制备
4.3	纯氧燃烧 - 热催化转化	熔化和澄清
4.4	蓄热式纯氧燃烧窑 (Eco-HeatOx)	熔化和澄清
4.5	电熔、电助熔	熔化和澄清
4.6	配合料和碎玻璃预热	熔化和澄清
4.7	低碳燃料 (H <sub>2</sub> 、O <sub>2</sub> )	熔化和澄清
4.8	基于模型的预测控制 (MBPC)	调节和成形
4.9	压降最小化	涂浸润剂和后处理

## 4.1 助熔剂优化

### 4.1.1 基线情况和能耗说明

玻纤生产过程中会在原料混合物中加入助熔剂，以降低配合料的熔化温度。主要使用纯碱（ $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ）或者氧化钾（ $\text{K}_2\text{O}$ ）作为助熔剂。德国玻璃生产中应用最广泛的助熔剂是纯碱。纯碱是一种稀有材料，所以经常使用索尔维法合成生产。按重量算，纯碱在所有原料中仅占到 13%，但却增加了原料成本 70%。

### 4.1.2 建议改进措施

建议的措施是以其他助熔剂取代纯碱，即改用近 5 到 10 年才投入应用的锂化合物。

据资料显示，与纯碱相比，锂化合物的熔化温度更低，相应的热能要求也更低。因为其化学性质（小离子半径和高离子电位），锂可以降低黏度和热膨胀，实现更高的熔化效率和更大的有效熔窑容量。（Institute for Industrial Productivity, 2021）

### 4.1.3 节能和温室气体减排潜力

考虑到熔窑的平均节能率为 8%，则每生产一吨玻璃熔体可节省 120 千瓦时的能量。

表 6：措施的关键信息—助熔剂优化

措施的关键信息——优化的助熔剂	
投资成本：	不适用（纯碱和锂化合物的成本差异）
节能量：（热能）	熔窑能耗减少 5-10%：120 千瓦时 / 吨 <sub>玻璃</sub>
二氧化碳减排量：	24 千克二氧化碳 / 吨玻璃
优点：	<ul style="list-style-type: none"> <li>降低熔化温度，减少能源需求</li> <li>改进成形性能，提高玻璃质量</li> <li>与成本相比的成本优势</li> </ul>
缺点：	-

## 4.2 玻纤回收利用

### 4.2.1 基线情况和能耗说明

总的来说，玻璃产品种类驳杂，具有不同的材料性质，相应的原料也有所不同。如下图所示，玻璃纤维产品的成分与瓶罐玻璃和平板玻璃等其他产品差异甚大。

表 7：德国玻璃生产的原料

	SiO <sub>2</sub> [wt%]	Na <sub>2</sub> O [wt%]	CaO [wt%]	MgO [wt%]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [wt%]	K <sub>2</sub> O [wt%]
瓶罐玻璃	71-73	12-14	8.5-12	0-3.5	1-3	0-1.5
平板玻璃	70-73	13.5-14	8.5-9	0-5	0.3-1.5	0.3-0.7
玻璃纤维	52-65	<17	16-25	0-5	12-16	<2

来源：(Zier Michael, 2021)

除了原料，玻璃混合料中还加入内部和外部碎玻璃（图 12）。从来源角度来讲，**内部碎玻璃**是因为裂纹、缺陷或者其他质量问题而未通过质量测试、无法销售的玻璃。因此，内部碎玻璃的特征与最终产品大致相同。**外部碎玻璃**来自于消费后玻璃或者其他行业。大多数玻璃部门会例行回收所有内部碎玻璃。瓶罐玻璃和玻璃棉行业既使用内部碎玻璃，也使用外部碎玻璃。根据 2013 年的最新最佳可行技术文件，“因为质量要求限制”，玻璃纤维部门使用内部碎玻璃的情况有限，使用外部碎玻璃也局限于矿物棉部门的某些用途。(Scalet Bianca Maria, 2013) 同时，也存在不同的用途，见下文描述。

用于消费产品或工业产品的**玻璃纤维使用期满废弃物**（尤其是配混材料）往往会被填埋分解。因此在可持续性，即再使用和回收利用方面，存在着巨大的优化潜力。例如，在德国，玻璃纤维配混料（汽车的仪表盘、保险杠）大多数情况下会被切碎和进行热回收。对风力涡轮机的废旧风轮叶片也有适当的处理系统，在水泥厂内进行能量（树脂）和材料（玻璃）的组合回收利用——树脂用于能量目的，玻璃作为物料投入。在回转窑内，将二氧化硅充分融入到水泥熟料中，从而进入新产品。但是，玻璃纤维废弃物的可利用比例有限，只有代替其他二氧化硅来源时才有可能实现。(LAGA, 2019)

## 4.2.2 建议改进措施

玻璃的回收利用（打碎的玻璃或者使用后的最终产品）包括：

- 在生产过程中增加内部或外部碎玻璃的使用，
- 回收使用期满的玻璃纤维，用于其他用途。

这两项措施都能通过减少原材料投入量和降低单位能耗来提高材料效率。第一项措施直接影响玻璃纤维生产的能耗，而第二项措施与玻璃纤维生产过程并无直接关联，而是与总体的资源效率提升相关。但这两方面在全面脱碳路径中都发挥着重要作用。

碎玻璃所需的熔化能量低于原料。这是因为它已经完成了玻璃生产过程中必要的化学反应，且质量低于与之相当的输入材料。

提高碎玻璃占比也有其他好处，例如降低颗粒物排放并提高熔窑产量。此外，碎玻璃的预热也比（原料）配合料容易，可以提高熔窑的产量。但另一方面，尤其是在使用外部碎玻璃时，总是存在杂质严重影响耐火材料、减少熔窑使用寿命的风险。此外，对产品成分及物理特征的控制也减弱了，可能带来质量问题。

关于玻璃行业回收利用的详细数据聚焦于其他更大规模的子部门。例如，在欧洲瓶罐玻璃的生产中，外部碎玻璃的使用率从不足 20% 到超过 90% 不等。玻璃棉行业也使用内部碎玻璃。

关于玻璃纤维回收利用的研究仍在进行，如下文案例研究所述，它正成为一种更有吸引力的减少材料损耗的解决方案。因为外部碎玻璃的使用存在前述缺点，所以玻璃纤维行业大多数应用局限于内部碎玻璃。

### 案例研究：Electric Glass Fibre NL 公司的玻璃纤维回收利用

Electric Glass Fibre NL 公司本身经营着一个内部回收利用的回收站，目前其生产中用到 6% 到 8% 的回收材料。公司的目的是回收生产过程中产生的所有废玻璃纤维，以避免生产损耗。（R. Krijgsman, 2019）

### 案例研究：朗盛公司（Lanxess）对回收玻璃纤维的使用

比利时安特卫普市的 Lanxess 公司使用玻璃纤维生产过程废弃物，实现工业后再循环。针对三种不同类型的玻璃纤维增强聚酰胺 6 混合物，它们分别以 30%、35% 和 60% 的重量百分比使用回收纤维。此种材料尤其适合电动汽车的前端、踏板轴承座或者蓄电池托架。（Königsreuther, 2020）

### 案例研究：使用回收的液晶显示屏（LCD）玻璃用于无碱玻璃和玻璃棉

正在开展的研究也在考察回收特定玻璃类型的适用性。例如，液晶显示屏玻璃具有可确保高显示质量的高纯度，因此适合回收利用。研究人员通过测量黏度和液线温度，分析了将液晶显示屏玻璃用于无碱玻璃和玻璃棉的可行性。他们得到的结论是：针对无碱玻璃<sup>12</sup>，使用液晶显示屏碎玻璃取代原来玻璃的重量百分比最高可达 25%；而对玻璃棉可达 20%。自 2010 年起，韩国的一些无碱玻璃生产厂就已经使用液晶显示屏的碎玻璃。（Kim K.-D. H.-H., 2011）

<sup>12</sup> 无碱玻璃是一种最常见的玻璃纤维类型，是碱性氧化物重量占比不到 1% 的铝硼硅酸盐玻璃，主要用于玻璃纤维增强塑料。（维基百科 Wikipedia）

### 4.2.3 节能和温室气体减排潜力

总的来说，使用回收材料不仅能降低生产过程的能耗比，也能提高材料效率（即减少单位产量的原料输入量），能够带来积极的“副作用”，例如减少废弃物处理的成本或努力。

可以粗略假设，回收玻璃的占比每提高 10%，熔窑能耗就会降低 2.5% 到 3%。（Scalet Bianca Maria, 2013）。应用表 4 中的数值，即假设总能耗大约为 1500 千瓦时 / 吨玻璃，就意味着碎玻璃的使用量提高 10%，就可以节省 45 千瓦时 / 吨的能量。

表 8：措施的关键信息——玻璃纤维回收利用

措施的关键信息——玻纤回收利用	
投资成本：	成本取决于所使用的碎玻璃
节能量：（热能）	所使用的碎玻璃量每增加 10%，熔窑就可以节能 2.5%-3%；45 千瓦时 / 吨 <sub>玻璃</sub>
二氧化碳减排量：	所使用的碎玻璃量每增加 10% 即减排 9 千克二氧化碳 / 吨 <sub>玻璃</sub>
优点：	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 降低能耗，提高资源效率</li> <li>• 减少颗粒物排放量</li> <li>• 更容易预热熔窑增加熔窑产量</li> </ul>
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 杂质造成熔窑内的潜在问题</li> <li>• 碎玻璃的质量和成分引起潜在质量问题</li> </ul>

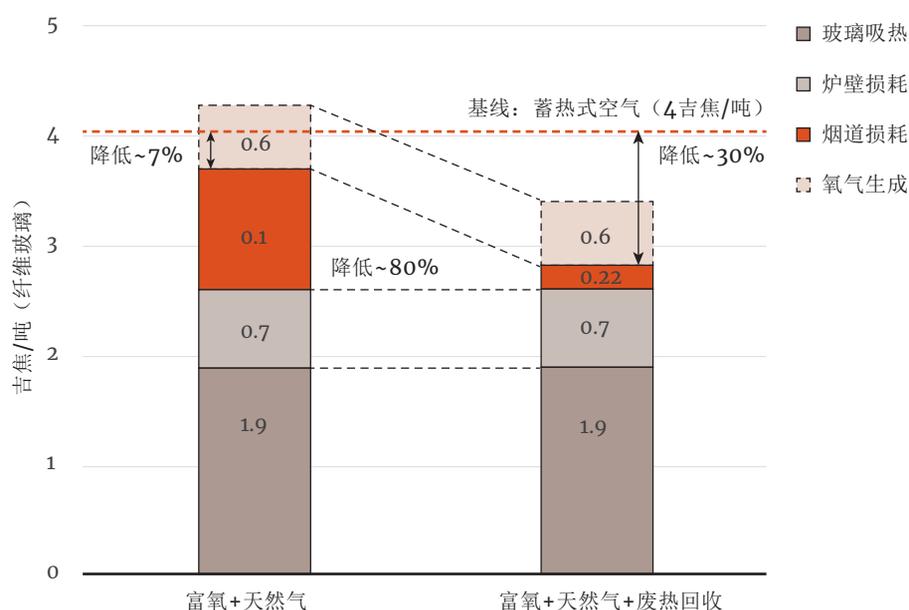
## 4.3 纯氧燃烧——热催化转化（TCR 工艺）

### 4.3.1 基线情况和能耗说明

纯氧燃烧熔制玻璃技术最初是针对各类大型玻璃熔窑开发的，其目的是相比蓄热式空气助燃熔窑，减少燃烧生成的氮氧化物排放量（最多减少 70%-90%<sup>13</sup>）。与蓄热式空气助燃燃烧相比，改用纯氧燃烧的另一个主要原因是燃料效率大幅提高，而无需购置蓄热室或其他热回收系统。即便是配备了高效蓄热室的空气助燃熔窑（最终能源消耗总量基线为大约 4 吉焦 / 吨），改用纯氧燃烧窑可将比燃料消耗率降低 7.5%。大约有 25%（0.92 吉焦 / 吨）的燃料能量输入依然以烟气中显热的形式流失。这是由于烟气热容比和纯氧流的不平衡造成的，因为纯氧燃烧窑并未使用如今已经成熟的废热回收技术。（图 13，红色区域）。

因此，将实行纯氧燃烧的初始燃料要求——取决于可再生能源在能源构成中的占比（图 13，蓝色区域）——包含在内，纯氧燃烧窑的总体能耗可能达到 4.3 吉焦 / 吨，高于蓄热式空气助燃窑的基线能耗。（Chakravarti, Alexander, & Kobayashi, 2021）

图 13：产能 300 吨 / 天、碎玻璃用量 50% 的纯氧燃烧窑（含 / 不含热回收（HR））与蓄热式空气助燃窑（4.0 吉焦 / 吨）的比燃料消耗比较。



来源：改编自：(Chakravarti, Alexander, & Kobayashi, 2021)

为了回收纯氧燃烧过程产生的大量废热（同时利用纯氧燃烧熔制玻璃的效益，例如大幅减少氮氧化物排放量），热化学热回收（TCR）及其变异是具有前景的选择，能够在减少二氧化碳排放量的同时，提高总体燃料效率。

<sup>13</sup> 空气助燃窑的氮氧化物排放基线：~4.7-5 千克 / 公吨，相比改用纯氧燃烧后的 0.4 千克 / 公吨（来源：亚洲纯氧燃烧玻璃熔化的趋势，<https://www.airproducts.co.uk/-/media/airproducts/files/en/337/337-17-001-us-oxy-fuel-glass-melting-trends-in-asia.pdf>）

### 4.3.2 建议改进措施

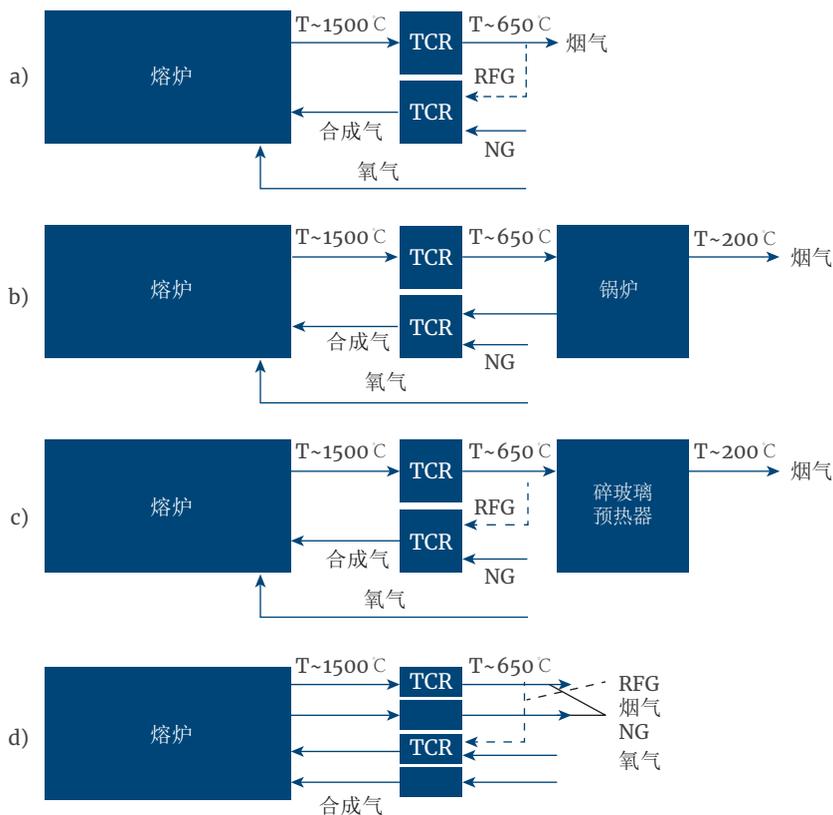
热催化转化是一项基于高温吸热化学反应的热回收技术，专门用于纯氧燃烧玻璃熔窑。图 14a 展示了其主要流程。

工艺循环始于蓄热室格子砖（热催化转化用砖）之一：其使用和预热（~1,250°C）方式与空气助燃窑用于热回收的传统交替蓄热室类似。在此种格子砖中，(i) 天然气（NG，主要是甲烷）与再循环的 (ii) 热烟气（RFG；主要是水和二氧化碳）混合，实现气体混合物的蒸汽转化。在此特定阶段，产生了主要由氢气（H<sub>2</sub>）和一氧化碳（CO）的热“合成气”燃料，可大幅提高混合气体的热值。之后，合成气与玻璃熔窑内的氧气燃烧，为玻璃熔化提供热能。为了在熔化过程中始终维持蒸汽转化的吸热过程，需要两个转化器。因此，以交替模式使用及运行蓄热室格子砖：在第一种模式中，通过燃烧室的废气将蓄热室加热到目标温度。在另一种模式中，通过蒸汽转化为工艺过程降温。当蓄热室温度下降到不再发生此种蒸汽转化之时，切换到交替模式。（Kobayashi, et al., 2015）

热催化转化工艺仅用于纯氧燃烧窑，因为只有这种类型的熔窑可以保证（因为没有氮气）烟气中含有高浓度的水和二氧化碳（80%-95%）。这是实现高效转化过程以及吸热反应的必要条件。

热催化转化蓄热室在设计上与传统空气加热蓄热室类似，但其格子砖体积仅为后者格子砖的 33%，这让改造或者重建成为具有经济吸引力的选择。

图 14: 不同的热催化转化 (TCR) 工艺: (a) - 基线; (b) 热催化转化 + 蒸汽锅炉; (c) - 热催化转化 + 碎玻璃预热器; 和 (d) - 热催化转化 + 氧气蓄热室; RFG: 再循环烟气。



来源: 改编自: (Zier Michael, 2021)

### 4.3.3 节能和温室气体减排潜力

在理论和实验框架下，大量研究证明热催化转化设施对生产和产品质量具有积极影响，而且天然气和氧气消耗有所下降。要强调的是，对于一个产量 300 吨 / 天的瓶罐玻璃熔制装置，使用热催化转化技术可以节省燃料使用量，相比蓄热式空气助燃窑，可节省大约 28%，相比纯氧燃烧窑，可节省 20%。对于更大规模的装置，预计可以节省更多燃料，因为单位玻璃产量的总窑墙损耗更低。此外，针对相同熔窑调查热整合及热回收选择的组合显示，使用热催化转化和氧气蓄热室的组合蓄热式热回收技术最高可节省 11% 的燃料（图 14d）。碎玻璃预热装置与热催化转化系统相结合的设施可以节省 29% 的燃料（图 14 c），而废热锅炉（图 14 b）相比纯氧燃烧基线可节省 20% 的燃料。（Kobayashi, et al., 2015）

#### 案例研究——商业设施：墨西哥，50 吨 / 天瓶罐玻璃熔窑：

2014 年 9 月，该案例先在一个产量为 50 吨 / 天的瓶罐玻璃熔窑上示范应用了热催化转化系统，之后一直稳定运行。此项技术将纯氧燃烧烟气中的废热储存在蓄热床内，利用此种热能将天然气和再循环烟气的混合物转化为热合成气，与熔窑内的氧气燃烧。采用了热催化转化系统之后，墨西哥的熔窑能耗相比基线纯氧燃烧窑减少了 16% 到 18%。（Gonzalez, et al., 2016）

表 9：措施的关键信息——纯氧燃料 - 热催化转化

措施的关键信息——纯氧燃烧 - 热催化转化	
投资成本：	未知
节能量：（热能）	0.22 兆瓦时 <sub>热</sub> / 吨 <sub>玻璃</sub> （无热回收的基线纯氧燃烧）
二氧化碳减排量：	44 千克二氧化碳 / 吨 <sub>玻璃</sub>
优点：	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 无催化转化工艺</li> <li>• 低氮氧化物排放</li> <li>• 可扩展的熔化技术</li> </ul>
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 氧气换热器处相对较小的热回收增量需要高昂的资本支出</li> </ul>

## 4.4 蓄热式纯氧燃烧窑 (Eco-HeatOx)

### 4.4.1 基线情况和能耗说明

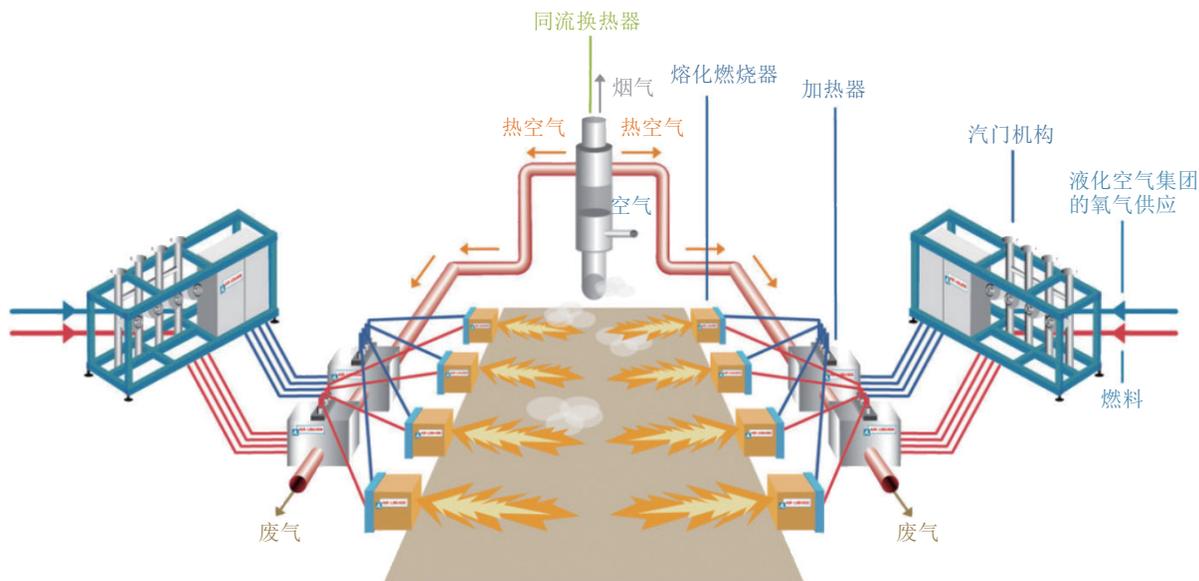
在玻璃行业内，纯氧燃烧被广泛地用于玻璃纤维和技术玻璃的生产，以改进燃烧过程，降低空气污染物排放，节约燃料。如前文章节所述，纯氧燃烧窑相比配有高效蓄热室的空气助燃窑可以减少 **7.5%** 的燃料（主要为天然气）消耗。研究报告称，即便不采取任何额外的能源回收措施，和换热式熔窑相比，纯氧燃烧窑的平均节能潜力在 **25% 到 35%**<sup>14</sup> 之间。对于大型蓄热式熔窑，节能潜力最高可达 **15%**。可以通过不同的供应系统提供和预热氧气，以充分发挥熔化过程中的能效潜力。

### 4.4.2 建议改进措施

法国液化空气集团 (Air Liquide) 开发出了一种特别的纯氧燃烧技术，名为 “Eco-HeatOx”。此项技术采用热 - 氧燃烧技术为使用天然气和氧气 (液态) 的中小型熔窑引入了热回收系统。此系统使用熔窑废热将反应物 (天然气和氧气) 预热到 **550°C**，从而减少燃料的总消耗量。图 15 展示了此过程的主要概念。

热回收系统由以下部分组成：(i) 初始热交换器 (换热器)，使用熔窑热烟气 (废气) 将环境空气温度加热到大约 **700°C**；(ii) 后续热交换器，使用来自初始热交换器的气体，将氧气预热到 **550°C**，将天然气预热到 **450°C**；(iii) HeatOx 专利燃烧器，可以使用 “冷” 和 “热” 的氧气 / 天然气混合物运行；(iv) 阀门和自动化设备，控制和测量每一燃烧器内的氧气和天然气流速。

图 15：纯氧燃烧窑的 Eco-HeatOx 工艺



来源：(www.ecoheatox.com, 2021)

<sup>14</sup> 包括制氧的能源消耗。

### 4.4.3 节能和温室气体减排潜力

保加利亚的一家玻璃工厂中试验证了 **Eco-HeatOx** 纯氧燃烧技术。基于此工厂的实验数据，**Eco-HeatOx** 技术相比蓄热式空气助燃窑，能够实现大约 **19%** 的能效增益。前提条件是要达到反应物的目标设计温度 **450°C**。(Akviran, 2016)

此外，表 10 介绍了 **HeatOx** 模式（预热反应物）和 **ColdOx** 模式（无热回收）之间的节能结果。在中试工厂层面上，**HeatOx** 相比 **ColdOx** 模式可以减少大约 **8%** 的二氧化碳排放量。(Caumont-Prim, Paubel, Juma, & Jarry, 2018) 和 (Kim, et al., 2016)。

两项案例研究 (Liquide, 2017) 中的浮法和中空玻璃熔窑<sup>15</sup> 概述了此技术的经济可行性。据估计，使用 **166** 万欧元投资中空玻璃熔窑，或者 **425** 万欧元投资浮法玻璃熔窑，通过缩减燃料消耗量，能分别节约每年最高 **30** 万欧元和每年 **110** 万欧元的成本。目前，在欧盟约有 **35** 台熔窑（**293** 台）在使用纯氧燃烧技术，主要用于玻璃纤维和工业玻璃生产。这些工厂可以转换为使用 **HeatOx** 纯氧燃烧技术，理论上伴随工厂的升级，“生产各种类型玻璃以及使用任何燃料”的工厂（即欧洲的 **628** 个工厂）都可以根据经济收益转而使用该技术 (Pasabahce Bulgaria, 2016)。

表 10：措施的关键信息——蓄热式纯氧燃烧窑（Eco-HeatOx）

措施的关键信息——蓄热式纯氧燃烧窑（Eco-HeatOx）	
投资成本：	约 42-85 千欧元 / 吨 <sub>玻璃</sub> <sup>16</sup>
节能量：（电能）	13.8 千瓦时 / 吨 <sub>玻璃</sub> （与基线 ColdOx 相比） <sup>17</sup>
二氧化碳减排量：	23 千克二氧化碳 / 吨 <sub>玻璃</sub>
优点：	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 降低能源成本</li> <li>• 能源采购灵活</li> <li>• 有限的附加资本支出，不到 3 年的投资回收期</li> <li>• 可重复性和可复制潜力</li> </ul>
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 技术依然处于示范阶段</li> </ul>

<sup>15</sup> 没有关于出料的详细数据；计算中包含特许费，相当于资本支出的 2.2% 到 2.4%

<sup>16</sup> 实际出料率 50-100 吨 / 天

<sup>17</sup> 假设制氧的耗电量总共为 0.6 吉焦 / 吨或者 166 千瓦时 / 吨——观测到 8% 的效率增益（图 15）

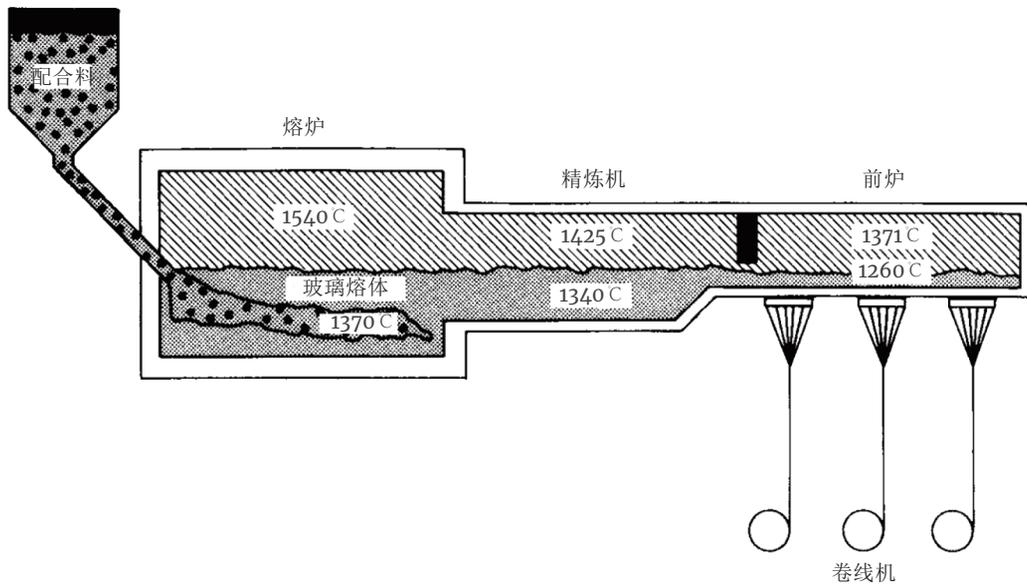
## 4.5 电熔与电助熔

### 4.5.1 基线情况和能耗说明

玻璃熔化是一个能源密集的过程。将混合原料转化成充分熔化和澄清的玻璃所需的净能耗大约为 0.6 千瓦时 / 千克。这是假设碎玻璃用量约为 20%，碎玻璃的比例和玻璃类型不同会造成一定程度的变化。玻璃熔窑的热效率会因熔窑设计及玻璃类型的不同而发生变化。但是，即便是最好的燃料熔窑也只能实现 45% 左右的热效率，且很多熔窑的热效率远低于此。

如图 16 所示，熔化部液深中部以下的熔窑内玻璃熔体的温度略低于 1400℃。为了弥补传输至玻璃的热损耗，必须通过燃烧提供更高温度的能量。在此过程中，即便是采用了蓄热室或者换热器等热回收系统，从炉体上部结构的热传递会造成能量损耗，剩余废气中的热能也会造成能量损耗。

图 16 玻璃熔窑 (Wallenberger, Watson, & Li, 2001)



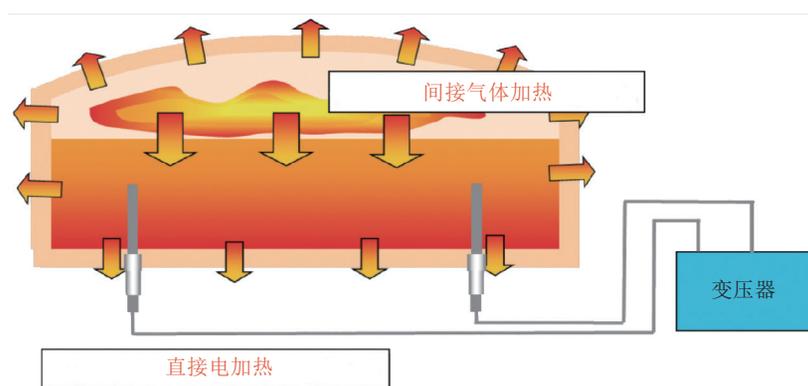
## 4.5.2 建议改进措施

要消除或者减少由热传输造成的能量损耗，最有效的方法是采用浸没式电极进行电助熔或者全电熔。

通过将玻璃中的浸没式电极与适当电源和变压器相连接，可以让电流通过玻璃，直接向玻璃本身释放热能，避免巨大的过程热损。

助熔电极最优数量、位置、间距、尺寸、埋入和连接方式的选择，都会直接造成助熔系统设计的效率差异 (Stormont, 2010)。

图 17：电熔和电助熔 (Stormont, 2010)



需要分析熔窑内的温度，以落实电助熔系统的协调理念和适当布置 (Stormont, 2010)。

电助熔技术通过以下方面实现工艺效率的最大化 (Reynolds, 2018)：

- 电助熔可以提高玻璃温度和实现玻璃温度的均一化（尤其是低传输类型）。
- 电助熔可以加强理想的对流（即改善熔化和澄清区之间的“热障”）。
- 澄清区的电助熔有助于减少停滞玻璃和控制流液洞温度。

玻璃熔化的过程中，会因为化石燃料的燃烧而产生二氧化碳排放，改用脱碳电力的全电熔后，会消除此种二氧化碳排放。但因为设施规模、玻璃成分以及配合料中所含碎玻璃的数量等问题，这项颇具潜力的技术目前的应用仍然有限 (Glass Alliance Europe, 2021)。

小型熔窑（< 200 吨 / 天）可使用电熔，但平板玻璃或者瓶罐玻璃生产中使用的较大熔窑（200 到 1,000 吨 / 天）仍有待验证。对于特定的玻璃组成（例如用于连续玻璃纤维的无碱玻璃），一些技术方面的问题会限制熔化玻璃用电能的热量输入 (Glass Alliance Europe, 2021)。

玻璃全电熔的一个前提条件是电网稳定性和供电安全，因为玻璃熔窑需要永久、稳定的能量供给，不能间歇式运行。影响此项技术应用的更多因素包括电力成本、熔化的质量（尤其是碎玻璃高用量的情况）和最终玻璃产品的质量要求 (Glass Alliance Europe, 2021)。

### 4.5.3 节能和温室气体减排潜力

采用当前最先进的助熔技术，助熔系统的能量要求为每千克 0.48 千瓦时，或者每天每多生产一吨玻璃需要 20 千瓦的连续电力输入。熔化过程的总节能率最高可达到 17%(Stormont, 2010)。

预计未来几十年间，投资成本会不断下降。目前的资本支出为 130 欧元 / 吨玻璃产能 (Szczeniak, Bauer, & Kober, 2020)。

温室气体综合减排量取决于当地实际的电力结构。

- 若采用电熔，熔化和澄清所需的全部热能将被电能所取代。估计欧洲的二氧化碳减排潜力大约为 30%。如果电力完全源自于可再生能源，则减排率可能达到 75% 到 100%。
- 对于电助熔，可以假设用于熔化和澄清的热能可节省 30%，20% 的热能可被电能所取代 (Szczeniak, Bauer, & Kober, 2020)。

下表中列出的节能量仅适用于电助熔。若采用电熔，熔化和澄清所需的全部能量都会被电能提供。考虑到现有的电力结构，此技术能够实现的二氧化碳减排量还要高得多。

表 11：措施的关键信息——电助熔

措施的关键信息——电助熔	
投资成本：	每处 130 万欧元 13 欧元 / 吨 <sub>玻璃</sub>
节能量：（热能和电能）	750 千瓦时 <sub>热</sub> / 吨 <sub>玻璃</sub> -300 千瓦时 <sub>电</sub> / 吨 <sub>玻璃</sub>
二氧化碳减排量：	-34 千克二氧化碳 / 吨 <sub>玻璃</sub>
优点：	• 改善玻璃质量
缺点：	• 在落实系统之前，必须完成大量的分析工作

从全局排放的角度来看，在熔窑中燃烧燃料优于使用燃料发电再进行熔化。在发电会产生高二氧化碳排放量的地方，应该将“电熔和电助熔”措施与现场的可再生能源生产相结合 (Stormont, 2010)。

## 4.6 配合料和碎玻璃预热

### 4.6.1 基线情况和能耗说明

将所有热能转移到熔窑中。通常是在环境温度下将配合料和碎玻璃引入熔窑 (Zier Michael, 2021)。

### 4.6.2 建议改进措施

使用废气废热对配合料和碎玻璃的混合物进行预热。正常情况下，将配合料和碎玻璃送入熔窑时不需进行任何的额外加热。此理念将回收的能量直接回用到熔化过程中，因此，不易受到外部因素的影响。这可以应用到现有的玻璃生产链中，无需中断生产过程。将配合料和碎玻璃预热到 300°C 左右，可减少燃料消耗，节约能源。此外，配合料和碎玻璃预热可减少粉尘问题，在配合料预热阶段还可安全地去除湿气。

与运行配合料预热器相关的其他好处包括：

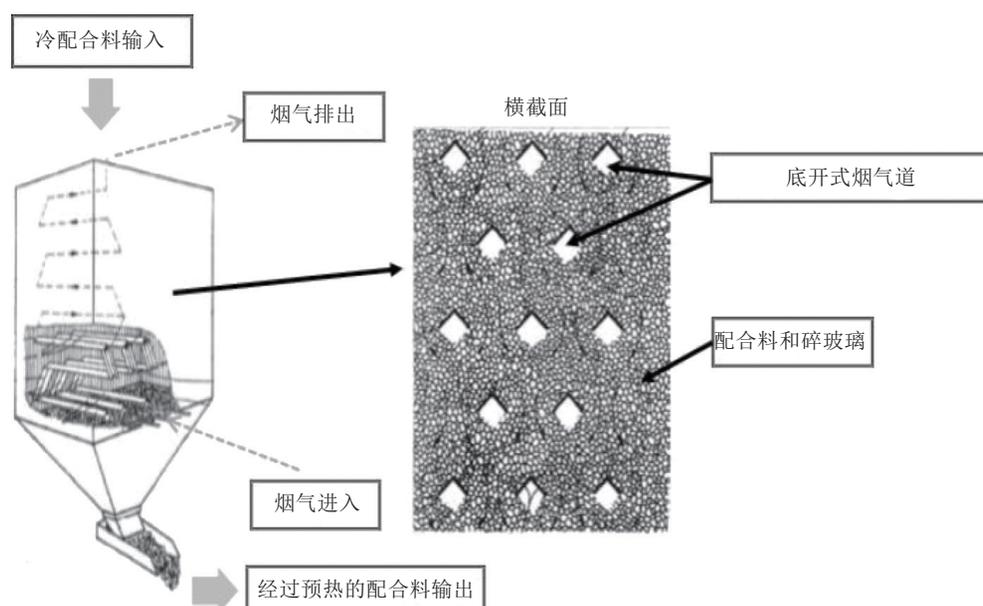
- 降低窑墙温度，
- 去除废气中的一氧化硫、氯化氢和氟化氢，因为配合料在直接接触系统中发挥洗涤剂的作用，
- 火石玻璃生产过程中回收硒。

而应用“配合料和碎玻璃预热”前，必须考虑以下限制因素：

- 巨大的空间要求，因为要传输大量废气——配合料预热器应该靠近熔窑投料口，以避免运输过程中的粉尘问题和热损耗，
- 由腐蚀和高温造成的预热器结构劣化，
- 碎玻璃中有机残留物增加的情况下会造成气味问题

玻璃行业应用了多种不同类型的配合料和 / 或碎玻璃预热系统。下图展示了配合料预热的基本理念。基本上，热烟气从位于配合料中的管状热交换器通过。

图 18: Nienburger 类型配合料预热系统的基本理念 (Barklage-Hilgefort, 2009)



### 4.6.3 节能和温室气体减排潜力

配合料和碎玻璃预热是提高能效、减少二氧化碳排放量的最佳可行技术之一。过去 30 年间，欧洲 10 多个不同工厂安装了预热系统。平均可节约 12% 到 20% 的能源。同时，解决了粉尘扩散和材料阻塞等问题 (Zippe, 2011)。

根据预热配合料和碎玻璃数量的不同，此项措施的节能范围在 10-20% 之间。此外据报道，玻璃出料量提高了 10%，投资回报期在 3 到 4 年之间 (Zier Michael, 2021)。基于“熔化和澄清”过程的热能消耗，能够带来 15% 的实际节能量。

表 12：措施的关键信息——配合料和碎玻璃预热

措施的关键信息——配合料和碎玻璃预热	
投资成本：	每处 220 万欧元 22 欧元 / 吨 <sub>玻璃</sub>
节能量：（热能和电能）	225 千瓦时 <sub>热</sub> / 吨 <sub>玻璃</sub>
二氧化碳减排量：	45 千克二氧化碳 / 吨 <sub>玻璃</sub>
优点：	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 30 年前就已获得批准的简单技术</li> <li>• 去除废气中的一氧化硫、氯化氢和氟化氢</li> </ul>
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 巨大的空间要求</li> <li>• 预热器劣化（由腐蚀和高温造成）</li> </ul>

## 4.7 低碳燃料

### 4.7.1 基线情况和能耗说明

欧洲的玻璃生产中，用于提供热能的主要燃料是天然气。3.2 节中详细讨论了玻璃行业的能源需求和消耗。

### 4.7.2 建议改进措施

减少与化石燃料燃烧相关的温室气体排放的选择包括改用电熔和电助熔，如 4.5 节所述，或者以气态能量载体取代化石燃料：生物天然气、固体生物质及其汽化产物、合成甲烷和氢气。这些燃料目前还没有实现工业规模的应用，仅局限于示范项目。主要的限制因素之一就是它们相比天然气尚不具备价格竞争力。

因为生物质的有限可用性以及与粮食作物的土地使用冲突，本节所描述的措施集中于氢气和合成甲烷的使用。但原则上（且已经进行了半工业规模的试用），也可采用共燃用（未经处理的）生物天然气部分取代天然气。一份德国玻璃熔窑的研究表明，（部分）燃料切换不会严重影响燃烧行为、产品质量或者耐热性质。尽管天然气和生物天然气在总热值<sup>18</sup>等方面存在差异，但最高可实现 30% 的能量输入替代，而不会对燃烧或产品质量产生负面影响。但如今，主要的限制因素是玻璃厂附近是否能获取足够的生物气。眼下，因为天然气成本低，所以生物气不具备经济可行性。

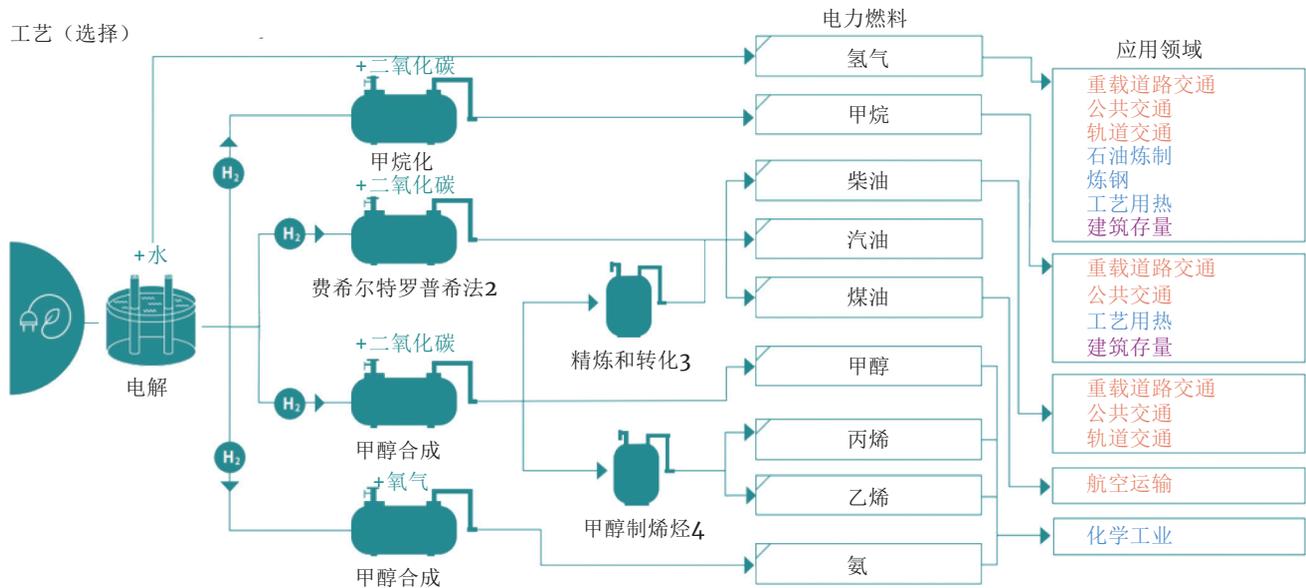
“电转 X”技术（PtX）是在电解作用的帮助下分解水，直接使用氢气，或者将之加工为甲烷或者液体能源。通过电转 X 技术生产的气态和液态燃料被称为“电力燃料”。如果使用了可再生能源电力和非化石二氧化碳来源，“电力燃料”可被认为是气候中和且可再生的能源。此类燃料可以以气态及液态的形式用作燃料或化学行业的原料。对于玻璃熔化过程等高温加热过程，直接可用的可再生能源选择有限，因此这些燃料是未来实现脱碳的一项强有力技术。

所有转化过程的起点是在电解过程（使用可再生电力）中将水分解成氢气和氧气。此种氢气生产过程，以及通过后续的氢气甲烷化生产合成甲烷，都被称为电转气。原则上，两种燃料都可用于玻璃（纤维）行业等高温工艺热应用。

<sup>18</sup> 来自能源作物的生物气：19.8-23.4 兆焦 / 立方米

下图阐释了不同类型的电解及其可能的用途。

图 19：电解的工艺和应用



来源：翻译自：(DENA, 2018)

在德国，电解技术已经存在了几十年，其在能源部门的广泛应用正刚刚兴起。随着生产数量和规模扩大、组件标准化，工厂理念优化等方面发展，投资及运营成本预计会有所下降。目前，德国有超过 30 个电转 X 试点项目，电解厂的产量为 25 兆瓦左右。新创企业和知名公司目前都在试用新的工艺、设备和运行方案。(DENA, 2017)

下表总结了最先进的电解和甲烷化工艺。未来，能效可能提升 10 个百分点以上（固体氧化物电解池（SOEC）电解达到 95%）。投资成本可能下降到目前价格的三分之一不到（例如碱性电解为 250-400 欧元 / 千瓦）。

表 13：电解和甲烷化的最新水平和发展 (DENA, 2017)

	电解			甲烷化	
类型	碱性电解	质子交换膜 (PEM) - 电解	高温电解 (SOEC)	催化甲烷化	生物甲烷化
技术就绪指数 <sup>19</sup>	9	8	6	8	7
优点	成本效益好（大型工厂），长期经验	紧凑型工厂，更好的动态，良好的可扩展性，无腐蚀	使用废热更高效、更具成本效益	良好的可扩展性，高品质废热	稳健、灵活、快速的反应时间
挑战	碱液、冷启动和部分负荷行为	昂贵的材料、材料要求	高温工艺	昂贵的材料、低灵活性；所使用气体的纯度	截止目前，生物系统要达到兆瓦级工厂
效率	62-82%	65-82%	65-85%	77-83%	77-80%
投资	800-1500 欧元 / 千瓦	900-1850 欧元 / 千瓦	2200-6500 欧元 / 千瓦	400-1230 欧元 / 千瓦	400-1980 欧元 / 千瓦

<sup>19</sup> 技术就绪指数 (TRL) 是美国国家航空和宇宙航行局 (NASA) 在 20 世纪 70 年代开发的一种方法，用于在项目采购阶段估算技术的成熟度。使用技术就绪指数，即可以统一且一致的方式探讨不同类型技术的技术成熟度。技术就绪指数打分为 1 分到 9 分，其中 9 分是最成熟的技术。(维基百科 Wikipedia)

### 4.7.3 节能和温室气体减排潜力

使用基于电转 X 的燃料，可实现温室气体减排，而不一定是最终用能节约。温室气体减排的程度取决于化石燃料的替代率，以及与替代燃料生产相关的二氧化碳排放。下表假设电转 X 燃料仅采用可再生能源生产。

表 14：措施的关键信息——低碳燃料

措施的关键信息——低碳燃料（氢气和合成甲烷）	
投资成本：	800-1500 欧元 / 千瓦电解能力（碱性电解）
节能量：（热能和电能）	最终节能（化石燃料）取决于燃料及替代率，最高可能实现 100%（相当于 1500 千瓦时 / 吨 <sub>玻璃</sub> ）
二氧化碳减排量：	最高可实现 75%-85%（假设完全以氢气取代）
优点：	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 可实现高二氧化碳减排</li> <li>• 可实现高工艺温度</li> <li>• 可再生能源可选择储存</li> </ul>
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 技术尚未大规模应用</li> <li>• 投资成本 / 运行成本依然高昂</li> </ul>

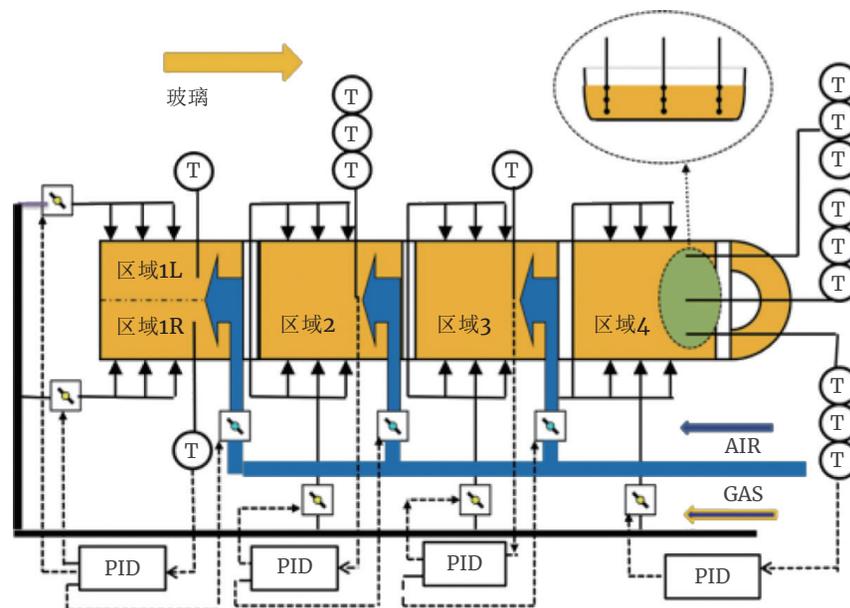
## 4.8 基于模型的预测控制 (MBPC)

### 4.8.1 基线情况和能耗说明

现代控制系统往往并非专门针对节能设计，而是旨在提高生产率、产品质量或者生产线效率。各个工业部门都存在着处于不同发展阶段的控制系统和能源管理系统。应用控制系统可缩短生产时间，减少停工时间，降低维护成本，减少加工时间，提高资源和能源效率，改进排放控制。过程控制系统的应用发展迅速，几乎每一工业过程都存在现代的工艺控制系统。但是，实施控制系统仍存在巨大潜力，系统不断更新迭代。

典型的通路控制系统如下图所示。在每一区，都通过自主比例积分 (PI) 控制器控制玻璃温度。每一区温度传感器的输出信息发送到控制器上，通常是单回路比例积分控制器或者由监控与数据采集 (SCADA) 系统仿真的软控制器。比例积分微分 (PID) 控制器调整加热 / 冷却控制执行器，让玻璃温度达到设定值。控制器通过专有网络与图形化操作界面连接，实现数据收集和离线分析。由九个温度传感器构成的矩阵位于通路区域 4 的端部，负责监测玻璃的热均匀性。各个区域的控制回路之间没有直接连接。

图 20：典型的通路控制系统 (Grega, Pilat, & Tutaj, 2015)



理论上，操作人员只需在通路端部设定必要的温度，控制系统就能处理好所有其他事情。但实际情况证明，因为存在以下问题，所以要控制好玻璃熔体的热均匀性是一项艰难的任务：

- 温度控制回路的响应时间相当长；
- 玻璃的热性能和力学性能会随着温度变化，产生非线性动态；
- 加热 / 冷却组合控制执行器是非线性的。

因此操作人员必须确定每一控制区的设定值。这些数值之间的关系可能严重影响通路端部玻璃的热均匀性，所以操作人员的经验对于设备的运行是非常重要的。

## 4.8.2 建议改进措施

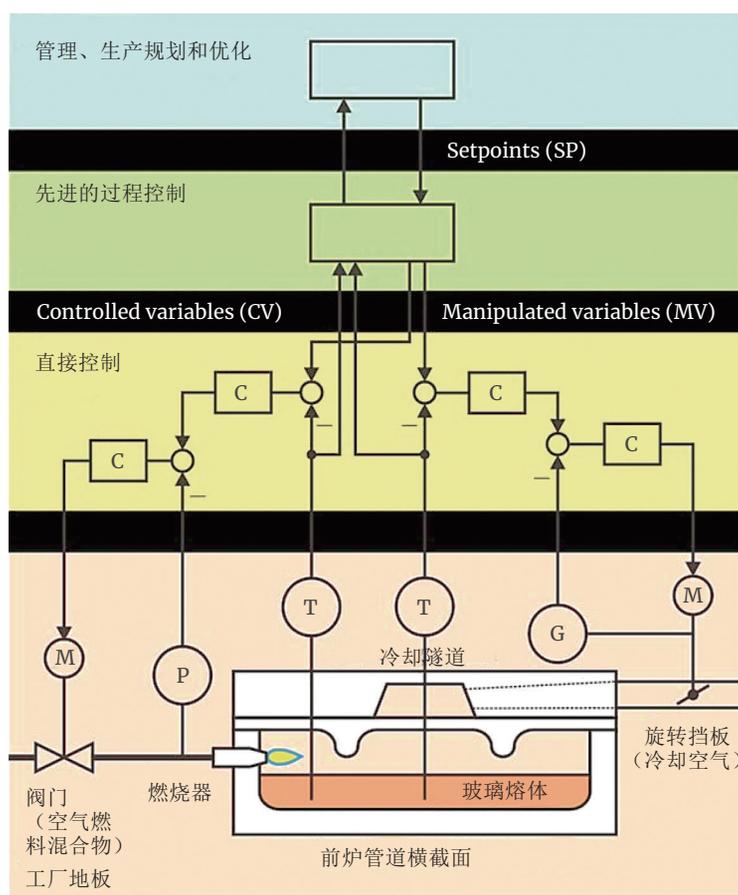
基于模型的预测控制（MBPC）是一种动态的工艺数值模型，通过反馈和模糊逻辑控制进行控制。此种系统已经广泛地应用于石油加工，但在玻璃行业的应用尚处于新兴阶段（Backx, Ludlage, & Koenraads, 2000）。

不断优化的热输入分布实现了燃料节约。此外，熔窑可以持续运行，基本无需操作人员介入。由此形成的稳定性减少了故障，提高了产量，改进了产品质量，形成了更稳定的窑拱和底部玻璃温度，延长了熔窑的使用寿命。

为了实现节能效果，典型的通路控制系统被埋入到复杂的层级结构中，如下图所示。以下要点描述了建议的层级结构的三个基本层次，用于实施基于模型的预测控制系统：

- 1、过程优化层面（蓝色）：制定了稳态能耗等一些过程质量指数作为优化问题。优化的结果显示了完美的玻璃熔化温度设定值。也可以将过程有限元模型和优化算法相结合，自动确定设定值。
- 2、预测及多变量过程控制（绿色）：控制器使用来自优化器层面的过程要求，计算温度设定值或者多点输入信号（例如燃烧器的一系列燃料流速）的最优轨迹，实现多点输出的最佳依时性行为（例如一系列底部温度）。
- 3、直接控制层面（黄色）：主要是比例积分或比例积分微分级联控制器。

图 21：通路玻璃调节过程先进控制系统“模型预测控制（MPC）”的多层分级结构（Grega, Pilat, & Tutaj, 2015）



MPC	模型预测控制	M	伺服电动机	P	压力传感器
C	控制器	G	位置传感器	T	温度传感器

针对每一特定层面上的控制算法，可将该层面下方的所有层面纳入考虑范围，形成全面的设备或控制目标。所处层级不同，此种等同设备的动态性质会出现巨大差别。因此，在各个层面上执行的算法要求单独选择计算时步 (Grega, Pilat, & Tutaj, 2015)。

### 4.8.3 节能和温室气体减排潜力

熔窑配备了基于模型的预测控制后，实现了大约 2% 到 3% 的节能，产量提升了大约 8%，投资回收期不到 6 个月。电视、纤维、浮法玻璃、瓶罐玻璃和特种玻璃工厂的空气助燃窑和纯氧燃烧窑中都已安装了这种系统 (Galitsky, Worrell, & Crijs-Graus, 2008)。基于电能和热能的总消耗量，可实现 2.5% 的节省。

表 15：措施的关键信息——基于模型的预测控制 (MBPC)

措施的关键信息——基于模型的预测控制 (MBPC)	
投资成本：	每处 200,000 欧元 2 欧元 / 吨 <sub>玻璃</sub>
节能量：（热能和电能）	46 千瓦时 <sub>热</sub> / 吨 <sub>玻璃</sub> ，12.5 千瓦时 <sub>电</sub> / 吨 <sub>玻璃</sub>
二氧化碳减排量：	17 千克二氧化碳 / 吨 <sub>玻璃</sub>
优点：	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 可以实现可视化和远程访问</li> <li>• 改进玻璃质量更全面地掌握工厂情况</li> </ul>
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 必须用到很多技术构件</li> <li>• 难以实施在安装系统之前，必须完成大量的分析工作</li> </ul>

## 4.9 压降最小化

### 4.9.1 基线情况和能耗说明

在玻璃生产中，压缩空气被用于瓶罐成形、其他特种玻璃产品的成形以及工具运行。不同产品、不同工厂使用压缩空气的方式不同。对瓶罐玻璃来说，成形的用电量预计为 **105 千瓦时 / 吨**，其中很大一部分是用于压缩空气。在使用电熔窑生产灯具的特种玻璃厂内，用于生成压缩空气的电量比重估计占到总用电量的 **3%**，或者所有非熔窑耗电量的 **7%**。

压缩空气效率低下，是工业厂房中使用的最昂贵的能源形式。通常情况下，从压缩空气的生成到最终使用的效率在 **10%** 左右 (Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) and Resource Dynamics Corporation, 1998)。因为效率低下，所以如果要使用压缩空气，应尽可能将使用量降至最低、使用时间降至最短。还应该不断监测压缩空气，比照替代方式重新权衡。(Galitsky, Worrell, & Crijns-Graus, 2008)。

### 4.9.2 建议改进措施

过度的压降会导致系统性能不佳以及大量能耗。系统中存在的任何类型的流动限制，例如阻塞或粗糙，都会导致运行压力高于必要水平。流动阻力每造成 **2 磅 / 平方英寸** 的压差，就会使其提供动力的容积式压缩机的驱动能量提高 **1%**。使用点通常会出现最高压降，包括尺寸不足或者泄漏的软管、导管、断开处、过滤器、调节器、阀门、喷嘴和润滑器（需求侧），以及经过润滑的回转式压缩机和压后冷却器上的空气 / 润滑油分离器、水汽分离器、干燥器和过滤器（供应侧）(Galitsky, Worrell, & Crijns-Graus, 2008)。

要实现压降的最小化，必须采取系统的设计和维护方式。选择空气处理组件时，应该根据规定的最大运行条件以及最佳性能状况下可能实现的最低压降选择。应该遵循制造商的维护建议，尤其是针对可能发生破坏性水分影响（例如管道腐蚀）的空气过滤和干燥设备。最后，应该将空气在分配系统中的行进距离最小化。对工业设施进行的审计发现：针对以上几点采取相应措施，典型的投资回收期不到 **3 个月** (Galitsky, Worrell, & Crijns-Graus, 2008)。

提高压缩空气系统效率的进一步措施是 (Galitsky, Worrell, & Crijns-Graus, 2008):

- 维护
  - 持续对过滤器进行检查和维护
  - 保持压缩机发动机适当润滑和清洁
  - 检查风扇和水泵以实现最佳性能
  - 维护冷却器（压缩机）
  - 检查压缩机皮带
  - 更换空气润滑剂分离器
  - 检查水冷却系统
  - 将整个系统的压缩空气泄漏降至最低
  - 检查过度的压力、持续时间或容积。
- 检测系统通常包括以下部分
  - 每一个接收机或者主分支管线上安装压力计，干燥器、过滤器等部分之间安装差动压力计
  - 在压缩机及其冷却系统之间安装温度计，以探测污垢和阻塞
  - 测量空气用量的流量计
  - 监测空气干燥器效率的露点温度计

在压缩机驱动器上安装电度表和计时表

在配置好设备之后，检查压缩空气分配系统，以确保没有空气流入未使用的设备或者压缩空气分配系统的淘汰部分

检查系统中可能造成系统运行压力非必要升高的任何类型的流动限制，例如阻塞或粗糙

检查生产时段之外的压缩空气使用

- 减少泄漏

总的来说，通过解决压缩空气系统中的泄漏问题，预计一年可节省 20% 的能耗

- 系统的尺寸和运行

适当尺寸的管道直径、调节器和压缩机发动机

以修改系统来代替提升的压力，在可能实现的最低压力下使用空气

切断不必要的压缩空气，改进负荷管理

- 回收系统

热能及能量回收，用于空气干燥

### 4.9.3 节能和温室气体减排潜力

很多减少压缩空气系统用能的机会成本并非极其高昂，有些技术选择的投资回收期非常短。

例如，田纳西州纳什维尔有一家汽车零部件控股公司的玻璃工厂，针对其自身的压缩机系统执行了全面的能源审计和能效提升措施，从而减少了泄漏，降低了运行压力，提高了压缩机效率，最终实现了超过 700,000 美元的年度节省，其投资回收期仅为 1 年 (United States Department of Energy (DOE), 2003)。在 700,000 美元的年度节省中，有 300,000 美元来自于节能，有 400,000 美元来自于能效提升带来的维护和劳动力成本缩减 (Galitsky, Worrell, & Crijns-Graus, 2008)。

奥司朗喜万年 (OSRAM Sylvania) 位于新罕布什尔州埃克塞特的一家特种玻璃厂也执行了类似的全面审计 (评估内容包括控制策略、泄漏探测和需求减少)，找出了每年节省 164,000 千瓦时电力的机会，从而实现了一年接近 14,000 美元的能源成本节约 (D' Antonio, Hildt, Patil, Moray, & Shields, 2003)。节省的能量相当于压缩空气系统所使用电能的 25% (Galitsky, Worrell, & Crijns-Graus, 2008)。

表 16: 措施的关键信息——压降最小化

措施的关键信息——压降最小化	
投资成本:	每处 300,000 欧元 3 欧元 / 吨 <sub>玻璃</sub>
节能量: (热能和电能)	4 千瓦时 <sub>热</sub> / 吨 <sub>玻璃</sub>
二氧化碳减排量:	1 千克二氧化碳 / 吨 <sub>玻璃</sub>
优点:	<ul style="list-style-type: none"> <li>更全面地掌握工厂情况，因为需要分析整个压缩空气系统</li> </ul>
缺点:	<ul style="list-style-type: none"> <li>难以实施 (必须进行全面的系统分析)</li> </ul>

## 4.10 进一步发展展望

根据欧盟脱碳路径<sup>19</sup>，未来几年最大的挑战之一必然是降低工业生产中的二氧化碳排放<sup>20</sup>。玻璃纤维行业，作为玻璃生产的子部门之一，是能源密集度最高的部门之一，也是对工艺用热有极高温度要求的部门。因此，仅解决工艺过程的能效优化不足以实现脱碳目标。在高温工艺中，直接以可再生能源取代化石燃料是一项充满挑战的任务。最有前景的选择是改用前文中概述的电熔窑、氢气或合成燃料。

欧洲玻璃联盟分析了该部门对气候中和经济的贡献。在此方面，欧洲的玻璃制造在过去 50 年间大幅降低了自身的排放量：例如，在 1960 到 2010 年之间，法国玻璃行业几乎实现了 70% 的减排（单位为吨二氧化碳 / 吨玻璃熔体）。但是，实现进一步减排的步伐更小，难度更大。75% 到 85% 的总排放量源自于供应高温热能的燃料燃烧，15% 到 25% 是由配合料中碳酸盐的分解造成。

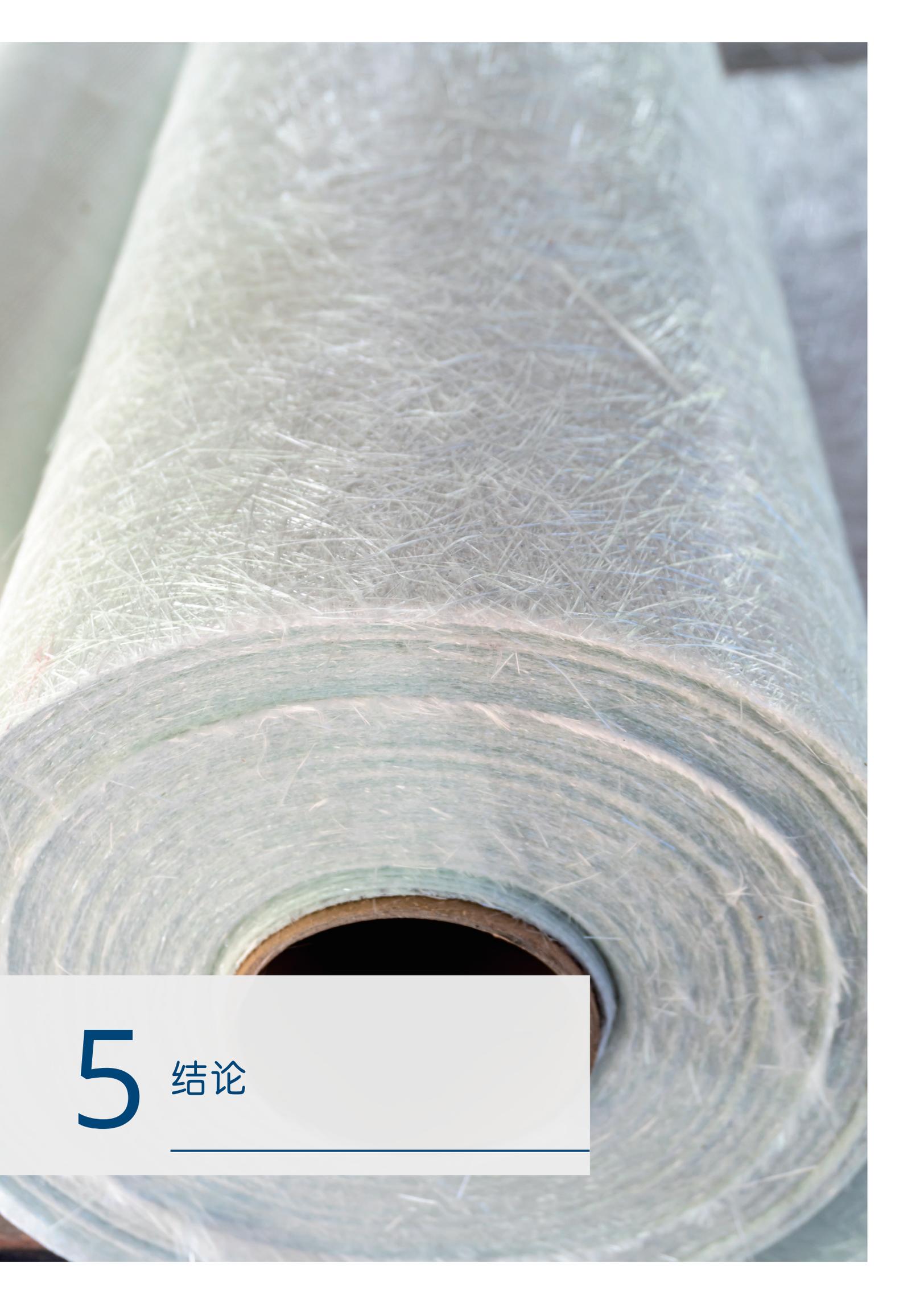
为了降低与高温热相关的能量要求，欧洲玻璃联盟将目光投向了熔窑工艺中的最佳可用技术，包括更大规模地使用回收玻璃、废热回收以及熔窑设计和运行。尤有潜力的选择是改用生物气和电熔等碳中和资源。提高碎玻璃使用量不仅能减少过程排放，还能降低熔化过程的能量要求。但在欧盟整个玻璃行业内，几乎所有内部碎玻璃都被重复利用——所以应在消费后环节探索进一步的回收利用潜力。这方面有待解决的主要问题是高品质碎玻璃的可供性和可负担性。

行业应当围绕以下问题进行进一步研发，该研发将带来跨部门效益：

- 熔化温度在 1000°C 以上的更大型熔窑的电气化
- 仅凭能效措施无法解决的过程排放问题
- 大型熔窑替代热源和零碳替代燃料
- 碳捕集与封存（CCS）的适用性以及现场的碳捕集利用（关于碳捕集与封存和碳捕集与利用的进一步详情，请参考 ALLPLAN 相关报告）。

欧洲玻璃联盟表示，为了实现可用的潜力，还必须在相关基础设施方面进行巨大的公共投资，改变监管框架。这与生物天然气分配网络、氢气网络和无碳电力的可供性尤为相关。（Glass Alliance Europe, 2021）

<sup>20</sup> 2050 年之前的气候中和目标（净零温室气体排放）——指的是欧洲绿色新政和欧盟在《巴黎协定》项下的承诺。（[https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en)）。



# 5 结论

---

玻璃（纤维）生产是一种能源密集的工艺过程，要求温度在1600℃以上的工艺用热，每吨产品的能量要求在1.8兆瓦时（折合221.2千克标煤）左右。在整个生产过程中，可采用多种多样的措施提高熔窑的能源和资源效率，减少二氧化碳排放。

尽管低于水泥等其他行业，但玻璃生产过程排放量依然占到总排放量的15-25%。因此，通过优化生产工序来减少二氧化碳排放的潜力有限。上文中已经详细描述了优化能耗最大工段（熔窑）的措施，该措施可大幅节约各工序的能耗（从每吨玻璃几千瓦时到1兆瓦时以上）。热回收措施、改用零碳燃料以及工艺优化具有最大的节能潜力。

长远来看，碳捕集技术以及氢气、液态生物燃料和电熔的使用，有望对二氧化碳减排做出重大贡献（Glass Alliance Europe, 2021）。大多数分析是在全球层面针对整个玻璃制造行业完成的，并非专门针对玻璃纤维制造（一个相对较小的子部门）。但是，可以假设针对玻璃生产的总体结论也适用于玻璃纤维部门，因为其玻璃熔化过程的性质与其他子部门并无差别。

表 17：玻璃制造过程减排的技术潜力

潜力的分类	技术	二氧化碳减排潜力 <sup>21</sup>
碳捕集与封存 / 碳捕集与利用	碳捕集	最大 90%
燃料转换	零碳气体	75-85%
	电熔	75-85%
	液态生物燃料	75-85%
	气体管道中氢气占 20%	15-17%
	100% 氢气	75-85%
循环经济	增加回收玻璃的使用量（瓶罐玻璃）	最大 20%
	增加回收玻璃的使用量（平板玻璃） <sup>22</sup>	最大 5%
过程	配合料粒化	最大 5%
	原料预热	最大 15%
	玻璃配合料重新配制	最大 20%
	余热回收	最大 15%

来源：改编自：(Glass Alliance Europe, 2021)

<sup>21</sup> 部分相互排斥的潜力无法简单的归纳：这些数字是长期的最大节能量，可能与本报告前文章节描述的与当前可实现节能量相关的其他假设不同。

<sup>22</sup> 没有具体提及玻璃纤维的生产

此报告介绍了最具前景的节能措施，总结如下：

表 18：关键信息概述

措施	措施的关键信息				缺点
	投资成本	节能量（热能和电能）	二氧化碳减排量	优点	
优化的助熔剂	不适用（纯碱和锂化合物的成本有差异）	熔窑内的能耗减少 5-10%： 120 千瓦时 / 吨 <sub>玻璃</sub>	24 千克二氧化碳 / 吨玻璃	<ul style="list-style-type: none"> <li>降低熔化温度，减少能源要求</li> <li>改进成形性能，提高玻璃质量</li> <li>与纯碱相比有成本优势</li> </ul>	-
玻纤回收利用	成本取决于所使用的碎玻璃	所使用的碎玻璃量每增加 10%，熔窑就可 以节能 2.5%-3%；45 千瓦时 / 吨 <sub>玻璃</sub>	所使用的碎玻璃量每增加 10% 能减排 9 千克二氧化碳 / 吨 <sub>玻璃</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>减低能耗，提高资源效率</li> <li>减少颗粒物排放量</li> <li>更易于预热熔窑可以提高熔窑的产量</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>杂质可能造成熔窑内的问题</li> <li>碎玻璃的质量和成分可能造成质量问题</li> </ul>
纯氧燃烧 - 热催化转化	未知	0.22 兆瓦时 <sub>热</sub> / 吨 <sub>玻璃纤维</sub> （无热回收的基线 纯氧燃烧）	44 千克二氧化碳 / 吨 <sub>玻璃</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>无催化转化工艺</li> <li>氮氧化物排放少</li> <li>可扩展的熔化技术</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>氧气换热器对较小的热回收增量需要高昂的资本支出</li> </ul>
蓄热式纯氧燃烧窑（Eco-HeatOx）	~42-85 千欧元 / 吨 <sub>玻璃</sub>	13.8 千瓦时 / 吨 <sub>玻璃</sub> （与以基线 ColdOx 相比）	23 千克二氧化碳 / 吨 <sub>玻璃</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>降低能源成本</li> <li>灵活能源采购</li> <li>有限的附加资本支出，不到 3 年的投资回报期</li> <li>可重复性和可转移性潜力</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>技术依然处于试点阶段</li> </ul>
电助熔	每个现场 130 万欧元 13 欧元 / 吨 <sub>玻璃</sub>	750 千瓦时 <sub>热</sub> / 吨 <sub>玻璃</sub> - 300 千瓦时 <sub>电</sub> / 吨 <sub>玻璃</sub>	-34 千克二氧化碳 / 吨 <sub>玻璃</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>改善玻璃质量</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>在运行系统之前，必须完成大量的分析工作</li> </ul>
配合料和碎玻璃预热	每个现场 220 万欧元 22 欧元 / 吨 <sub>玻璃</sub>	225 千瓦时 <sub>热</sub> / 吨 <sub>玻璃</sub> ，225 千瓦时 <sub>电</sub> / 吨 <sub>玻璃</sub>	45 千克二氧化碳 / 吨 <sub>玻璃</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>30 年前就已获得批准的简单技术</li> <li>去除废气中的一氧化碳、氯化氢和氟化氢</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>空间要求大</li> <li>预热器劣化（腐蚀和高温）</li> </ul>

措施的关键信息					
措施	投资成本	节能量 (热能和电能)	二氧化碳减排量	优点	缺点
低碳燃料 (氢气和合成甲烷)	800-1500 欧元 / 千瓦电 解能力 (碱性电解)	最终节能 (化石燃料) 取决于所替代的燃料和替代率, 最高可能实现 100% (相当于 1500 千瓦时 / 吨)	最高 75%-85% (使用 100% 氢气时)	<ul style="list-style-type: none"> <li>可实现高二氧化碳减排量</li> <li>可实现高工艺温度</li> <li>可选择储存再生能源</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>技术尚未大规模应用</li> <li>投资成本 / 运行成本依然高昂</li> </ul>
基于模型的预测控制 (MBPC)	每个现场 200,000 欧元 2 欧元 / 吨 <sup>玻璃</sup>	46 千瓦时 <sub>热</sub> / 吨 <sup>玻璃</sup> 12.5 千瓦时 <sub>电</sub> / 吨 <sup>玻璃</sup>	17 千克二氧化碳 / 吨 <sup>玻璃</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>可实现可视化和远程访问</li> <li>改善玻璃质量</li> <li>更全面地掌握工厂情况</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>必需很多技术构件</li> <li>难以实行</li> <li>在安装系统之前, 必须完成大量的分析工作</li> </ul>
压降最小化	每个现场 300,000 欧元 3 欧元 / 吨 <sup>玻璃纤维</sup>	4 千瓦时 <sub>热</sub> / 吨 <sup>玻璃纤维</sup> 4 千瓦时 <sub>电</sub> / 吨 <sup>玻璃纤维</sup>	1 千克二氧化碳 / 吨 <sup>玻璃</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>更全面地掌握工厂情况, 因为需要分析整个压缩空气系统</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>难以实行 (必须进行全面的系统分析)</li> </ul>

## 参考文献

- Akviran, M. (2016). LIFE Eco-HeatOx Layman 的报告 . LIFE12 ENV/BG/000756 欧洲共同体。
- ALLPLAN. (2021). 《德国和国际上机场、水泥、陶瓷、玻璃纤维和纸浆及造纸行业先进能效措施的技术指南，纸浆及造纸行业报告》。德国国际合作机构。
- Backx, T., Ludlage, J., & Koenraads, A. (2000). 《模型预测控制在玻璃熔化过程质量控制中的应用》。IPCOS 技术。荷兰：<http://www.esat.kuleuven.ac.be/~HK05/les4/icg2000.pdf>。
- Barkage-Hilgefort, H. (2009). 《瓶罐玻璃窑的配合料预热》。美国纽约：第 69 届玻璃问题会议：陶瓷工程和科学论文集，约翰·威利出版社。
- Beerkens, R. (2009). 《玻璃窑的节能选择及从其烟气中回收热量》。美国纽约：第 69 届玻璃问题会议：陶瓷工程和科学论文集，约翰·威利出版社。
- Bruno Lapillonne, K. P. (2018). ODYSSEE-MURE 关于指标的区域培训 2. 部门的能源效率趋势：ODEX。
- Caumont-Prim, C., Paubel, X., Juma, S., & Jarry, L. (2018). [www.lifecleanox.com](http://www.lifecleanox.com)。于 2021 年 10 月 20 日检索 [www.lifecleanox.com](http://www.lifecleanox.com) 网站：[https://www.lifecleanox.com/sites/cleanox/files/2018/05/30/extractpage\\_glass\\_worldwide\\_may-june\\_2018.pdf](https://www.lifecleanox.com/sites/cleanox/files/2018/05/30/extractpage_glass_worldwide_may-june_2018.pdf)
- Chakravarti, S., Alexander, J., & Kobayashi, H. (2021). 纯氧燃烧玻璃熔窑的余热回收——通往可持续性和降低二氧化碳排放的道路。第 81 届玻璃问题会议 (S. 121 - 135)。S.K. Sundaram (编辑)。 <https://doi.org/10.1002/9781119823056.ch12>。
- D' Antonio, M., Hildt, N., Patil, Y., Moray, S., & Shields, T. (2003)。玻璃制造行业的能源效率机会。美国能效经济委员会 (ACEEE) 夏季研究学报。纽约：拉伊布鲁克 (Rye Brook)。
- 德国能源署。(2017)。电转气路线图。
- 德国能源署。(2018)。利用气候友好型合成能源中电力燃料的当前实况报道。
- Dolianitis, I., Giannakopoulos, D., Hatzilau, C.-S., Karellas, S., Kakaras, E., Nikolova, E., ... Zitounis, T. (2016). 玻璃工业中进行配合料和碎玻璃预热的余热回收。
- 德国联邦经济和能源部平台 EnArgus. (2021 年 10 月 1 日)。玻璃纤维制造。参见 [https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d4454-2/\\*/\\*Glasfaserherstellung.html?op=Wiki.getwiki\\_abgerufen](https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d4454-2/*/*Glasfaserherstellung.html?op=Wiki.getwiki_abgerufen)
- 欧洲委员会。(2018 年，最后更新 2020 年 12 月)。所有欧洲人的清洁能源包。参见 [https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans\\_en#energy-efficiency\\_abgerufen](https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans_en#energy-efficiency_abgerufen)
- 欧洲委员会。(2021)。根据欧洲议会和理事会 2003/87/EC 号指令第 10a(2) 条确定 2021 年至 2025 年期间免费分配排放配额的修订基准值的实施条例 (草案)。
- Fawkes, S. O. (2016). 提高工业能效的最佳做法和案例研究 —— 决策者简介。哥本哈根：联合国能源署和丹麦技术大学伙伴关系。

弗劳恩霍夫系统与创新研究所。(2018)。德国的能源效率趋势和政策——基于 ODYSSEE 和 MURE 数据库的分析。

Galitsky, C., Worrell, E., & Crijns-Graus, W. (2008). 玻璃行业的能源效率改进和成本节约机会。“能源之星”能源和工厂经理指南。<https://www.researchgate.net/publication/236372948>。

欧洲玻璃联盟。(2021)。欧洲玻璃工业的全景。参见 [https://www.glassallianceeurope.eu/images/cont/panorama-2020-eu27\\_file.pdf](https://www.glassallianceeurope.eu/images/cont/panorama-2020-eu27_file.pdf)。

欧洲玻璃联盟。(2021年10月4日)。欧洲玻璃行业对气候中性经济的贡献，立场文件第2版。参见 [https://www.glassallianceeurope.eu/images/cont/2021-05-05-gae-position-paper-on-decarbonisation-v2\\_file.pdf](https://www.glassallianceeurope.eu/images/cont/2021-05-05-gae-position-paper-on-decarbonisation-v2_file.pdf)

Gonzalez, A., Solorzano, E., Laux, S., Iyoha, U., Wu, K., & H. Kobayashi. (2016). 纯氧燃烧玻璃熔窑 Optimelt™ 蓄热式热化学热回收的操作经验。第76届玻璃问题会议 (S. 17 - 25)。S.K. Sundaram (编辑)。<https://doi.org/10.1002/9781119282471.ch2>。

Grega, W., Pilat, A., & Tutaj, A. (2015). 实时实施玻璃熔化过程的建模。国际建模和优化杂志。

Hubert, M. (2015). 国际玻璃新材料研究院 (IMI-NFG) 玻璃加工课程，讲座3：工业玻璃熔窑基础。参见 [https://www.lehigh.edu/imi/teched/GlassProcess/Lectures/Lecture03\\_Hubert\\_industglassmeltfurnaces.pdf](https://www.lehigh.edu/imi/teched/GlassProcess/Lectures/Lecture03_Hubert_industglassmeltfurnaces.pdf)

国际能源署。(2018)。国际能源署数据和统计。参见 <https://www.iea.org/data-and-statistics>

工业生产力研究所。(2021年4月14日)。工业效率技术数据库。参见 <http://www.iipinetwork.org/wp-content/Ietd/content/cement.html>

Kim, H., Kang, T., Kaiser, K., Liedel, S., Jarry, L., Paubel, X., . . . Kaya, L. (2016). 热氧燃烧玻璃行业的创新节能方案。第76届玻璃问题会议：(S. 149 - 155)。S. K. Sundaram, <https://doi.org/10.1002/9781119282471.ch12>。

Kim, K.-D. H.-H. (2011). 回收 TFT-LCD 碎玻璃作为玻璃纤维的原料；玻璃技术 -- 《欧洲玻璃科学与技术杂志》A 部分，第 52 卷，第 6 号。

Kobayashi, H., Gonzalez, A., Solorzano, E., Lagos, C., Lugo, G., S. Laux, K. W., . . . Francis, A. (2015). 用于纯氧燃烧熔窑的 Optimelt™ 蓄热式热化学热回收。第75届玻璃问题会议 (S. 113 - 120)。S.K. Sundaram (编辑)。

Königsreuther, P. (2020年6月29日)。玻璃纤维生产：当前塑料用玻璃纤维生产变得更加可持续。参见 <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/jetzt-wird-die-glasfaserherstellung-fuer-kunststoffe-nachhaltiger-a-943664/>

德国道路工程材料质量标准 LAGA. (2019)。含纤维废物的处理，最终报告 2019 年 7 月。

劳伦斯伯克利国家实验室 (LBNL) 和资源动力公司。(1998)。改进压缩空气系统性能，工业资料手册。美国能源部，发动机挑战计划。

Leisin, M. (2019). 工业中的能源转型、潜力及与能源行业的互动，玻璃产业的产业概况，报告给：德国联邦经济事务和能源部及合作方德国 Navigant 能源有限公司

Liquide, A. (2017). www.ecoheatox.com. 于 2021 年 10 月 15 日检索 www.ecoheatox.com: [https://www.ecoheatox.com/sites/ecoheatox/files/2017/06/28/nexelia\\_g\\_melt-ing-heat\\_oxy-combustion\\_offer\\_sheet\\_v5.pdf](https://www.ecoheatox.com/sites/ecoheatox/files/2017/06/28/nexelia_g_melt-ing-heat_oxy-combustion_offer_sheet_v5.pdf)

Marcel Fiehl 等人 (2017)。生物气作为热加工行业的共燃燃料：在玻璃熔窑中的实施。埃森。

ODYSSEE 数据库。(2018)。摘自 <https://www.odyssee-mure.eu/>

R. Krijgsman, M. M. (2019). 荷兰玻璃纤维行业的脱碳选择。

Reynolds, A. (2018). 电助熔和熔化技术 --FSL 的发展和目前的工作计划概述。法孚集团。

Scalet Bianca Maria, G. M. (2013). 玻璃制造的最佳可用技术 (BAT) 参考文件。

Stormont, R. (2010). 用于提高玻璃质量的电熔和助熔。《全球玻璃》。

Suhr, M., Klein, G., Kourti, I., Gonzalo, M. R., Santonja, G. G., Roudier, S., & Sancho, L. D. (2015)。纸浆、纸张和纸板生产的最佳可用技术 (BAT) 参考文件。卢森堡：欧洲委员会。

Szczeniak, J., Bauer, C., & Kober, T. (2020). 工业一玻璃。欧洲脱碳战略对话 (DEEDS)。

美国能源部 (DOE)。(2002)。玻璃工业的能源和环境概况。华盛顿特区：能源部工业技术办公室。

美国能源部 (DOE)。(2003)。压缩空气系统升级改进。华盛顿特区：工业技术办公室。

美国能源部，能效和可再生能源办公室。(2017)。关于美国玻璃纤维增强聚合物制造业的能源使用和潜在节能机会的研究。

Wallenberger, F., Watson, J., & Li, H. (2001). ASM 玻璃纤维手册。PPG 工业公司。

奥地利商会，奥地利玻璃行业协会 (2019)。2019 年度报告。

Zier Michael, P. S. (2021 年 5 月)。玻璃工业的脱碳选择述评。能源转换和管理。X, [www.sciencedirect.com/journal/energy-conversion-and-management-x](http://www.sciencedirect.com/journal/energy-conversion-and-management-x).

Zippe, P. (2011). 欧洲配合料和碎玻璃预热的最新发展——实际经验和影响。纽约，美国：第 71 届玻璃问题会议：陶瓷工程和科学论文集，约翰·威利出版社。



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

网站



微信

