



Federal Ministry  
for Economic Affairs  
and Climate Action



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

# 陶瓷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三





## 编写说明

《水泥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》出版物的第三本，该技术指南系列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。

### 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

Adobe Stock/makedonski2015（封面）  
Adobe Stock/junrong（第9页）  
Adobe Stock/makedonski2015（第14页）  
Adobe Stock/SGr（第21页）  
Adobe Stock/Pavel（第33页）  
Shutterstock/Bosko（第62页）

© 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。目前，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，以减少温室气体排放。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年前实现碳中和的气候战略，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%。

陶瓷行业是一个能源密集型行业，工业陶瓷每吨产品的单位能耗高达14兆瓦时，能源消耗占到陶瓷产品总生产成本的30%。为应对陶瓷行业面临的低碳转型挑战，需要采取工艺和产品优化、核心工艺电气化等节能措施，并部署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。本报告是由中德能源与能效合作伙伴框架下的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》报告的第三份报告。它介绍了陶瓷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陶瓷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	10
◆ 2	工业部门能源效率概述	14
2.1	能源消耗与能源效率现状	15
2.2	能效政策与管理	18
2.3	能效措施概览	20
◆ 3	陶瓷行业概览	21
3.1	生产流程与工艺步骤简介	22
3.2	陶瓷行业节能现状及发展趋势	26
3.2.1	陶瓷行业能源统计与基准	26
3.2.2	能量和材料流向	30
3.2.3	能源密集型工艺流程	31
◆ 4	陶瓷行业能效提升措施	33
4.1	使用干法进行原材料制备	35
4.1.1	基线情况和能耗说明	35
4.1.2	建议改进措施	36
4.1.3	潜在节能量和温室气体减排量	37
4.2	陶瓷设计的改进	38
4.2.1	基线情况和能耗说明	38
4.2.2	建议改进措施	38
4.2.3	潜在节能量和温室气体减排量	40
4.3	无空气干燥	41
4.3.1	基线情况和能耗说明	41
4.3.2	建议改进措施	42
4.3.3	潜在节能量和温室气体减排量	43
4.4	受控的除湿	44
4.4.1	基线情况和能耗说明	44
4.4.2	建议改进措施	44
4.4.3	潜在节能量和温室气体减排量	45
4.5	喷雾干燥器内的排气再循环	46
4.5.1	基线情况和能耗说明	46
4.5.2	建议改进措施	47
4.5.3	潜在节能量和温室气体减排量	48
4.6	干燥空气预热	49
4.6.1	基线情况和能耗说明	49
4.6.2	建议改进措施	49
4.6.3	潜在节能量和温室气体减排量	51
4.7	高效燃烧器	52
4.7.1	基线情况和能耗说明	52
4.7.2	建议改进措施	53
4.7.3	潜在节能量和温室气体减排量	54

4.8 低热惯性窑车和窑具 .....	55
4.8.1 基线情况和能耗说明 .....	55
4.8.2 建议改进措施 .....	55
4.8.3 潜在节能量和温室气体减排量 .....	56
4.9 电窑和电干燥 .....	57
4.9.1 基线情况和能耗说明 .....	57
4.9.2 建议改进措施 .....	58
4.9.3 潜在节能量和温室气体减排量 .....	58
4.10 微波辅助烧成与干燥 .....	59
4.10.1 基线情况和能耗说明 .....	59
4.10.2 建议改进措施 .....	59
4.10.3 潜在节能量和温室气体减排量 .....	59
4.11 未来发展展望 .....	61
◆ 5 结语 .....	62
◆ 6 参考文献 .....	68

## 图目录

图 1: 对全球二氧化碳减排的贡献 .....	12
图 2: 选定措施的能源和二氧化碳节约潜力 .....	13
图 3: 终端能源消费总量结构配比 .....	15
图 4: 工业部门终端能源消费结构 .....	16
图 5: 欧盟工业部门能源效率指数 .....	17
图 6: 德国工业部门能源效率指数 .....	17
图 7: 产品类型——水泥行业 .....	22
图 8: 陶瓷生产步骤 .....	23
图 9: 隧道式干燥机（左）和喷雾干燥机（右） .....	24
图 10: 隧道窑示意图 .....	25
图 11: 辊道窑示意图 .....	25
图 12: 欧洲的陶瓷产值 .....	26
图 13: 欧洲的陶瓷产值结构配比 .....	27
图 14: 欧洲屋顶瓦温室气体排放强度的统计数据 .....	29
图 15: 陶瓷行业能量和材料流向 .....	30
图 16: 相关工艺步骤能源消耗情况 .....	32
图 17: 原材料制备——湿法 .....	35
图 18: 原材料制备——干法 .....	36
图 19: 波罗顿砖 .....	39
图 20: 烧结钵——常规的（左）和优化的（右） .....	39
图 21: 对流干燥过程 .....	41
图 22: 无空气干燥原理图 .....	42
图 23: 受控除湿干燥系统 .....	44
图 24: 喷雾干燥机制的示意图。（1）雾化。（2）液滴到颗粒转换。（3）颗粒收集 .....	46
图 25: 带排气再循环的喷雾干燥系统的示意图 .....	47
图 26: 典型砌砖生产过程的能量分解，展示从窑炉到干燥器的热回收 .....	49
图 27: 陶瓷窑热回收系统 .....	50
图 28: 左 - EPR-300- 扩散式自身预热式燃烧器 .....	53
图 29: 左 - 蓄热式燃烧器的描述 .....	53
图 30: RAMUL 组成部分（左）和 RAKOR 耐火黏土和烧制器具的范例 .....	55

图 31: 典型板材（左）和轻量型板材（右） ..... 56

图 32: 重量流的变化，取决于窑具重量 ..... 56

图 33: 隧道窑的最佳烧制时间表 ..... 57

图 34: 左侧是烧制过程的温度和持续时间，右侧是总能耗 ..... 60

图 35: 对全球二氧化碳减排的贡献 ..... 63

图 36: 陶瓷行业（使用 / 未使用电窑）二氧化碳减排路径 ..... 64

图 37: 碳减排的创新领域 ..... 65

## 表目录

表 1: 欧洲陶瓷行业生产及能耗数据 .....	22
表 2: 各子部门单位能耗及能源占比 .....	28
表 3: 产品基准 .....	28
表 4: 各子部门单位能耗及能耗占比 .....	31
表 5: 瓷砖制造子流程的能耗 .....	31
表 6: 陶瓷行业能效措施概览 .....	34
表 7: 湿法的关键消耗数据 .....	36
表 8: 干法的关键消耗数据 .....	37
表 9: 措施的关键信息——使用干法进行原材料制备 .....	37
表 10: 材料 / 设计相关改进的范例 .....	38
表 11: 措施的关键信息——陶瓷设计的改进 .....	40
表 12: 措施的关键信息——无空气干燥 .....	43
表 13: 措施的关键信息——受控除湿 .....	45
表 14: 措施的关键信息——喷雾干燥器内的排气再循环 .....	48
表 15: 措施的关键信息——干燥空气预热 .....	51
表 16: 连续窑的比能耗（干燥和烧制） .....	52
表 17: 措施的关键信息——高效燃烧器 .....	54
表 18: 措施的关键信息——低热惯性窑车和窑具 .....	56
表 19: 措施的关键信息——电窑和电干燥 .....	58
表 20: 措施的关键信息——微波辅助烧制与干燥 .....	60
表 21: 关键信息概述 .....	66



## 缩略语表

AF	替代燃料
BAT	最佳可行技术
BREF	最佳可行技术参考文件
CaO	氧化钙
DS	干基
EEA	欧洲环境署
ETS	排放交易系统
EU	欧盟
GBFS	粒化高炉矿渣
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
MJ	兆焦
mmWg	毫米水柱（通过媒介测量压降）
MSW	城市生活垃圾
Mt	百万吨
MWh	兆瓦时
NGO	非政府组织
O&M	运行维护
ODEX	能源效率指数目标
ORC	有机朗肯循环
RDF	垃圾衍生燃料
SRC	蒸汽朗肯循环
t/d	吨 / 日
toe	吨油当量
TFC	终端能源消费总量
UNEP	联合国环境规划署

VFD	变频器
VDZ	德国水泥工程协会（Vereinigung Deutscher Zementwerke）
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。原因如下：

- 工业部门能源消费占终端能源消费总量比例较高，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%**（国际能源署，2018）
- 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、减少碳排放以获得更多机遇、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配置显著优化。

在欧洲，一套成功的能效措施应包括：应用基准值法对比**最佳可行技术（Best Available Technologies, BAT）**批准设备或新建项目，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，欧盟碳市场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）的规定实施能源或环境管理体系认证。

能效提升措施类别广泛，既包括完善企业内部能源管理、使用控制管理系统等“简易”措施，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**陶瓷行业**的工艺相关措施，主要考虑其可实现的节能潜力、适用性及有效性（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。

欧洲每吨陶瓷的**单位能耗**从**122.9**千克标准煤（砖瓦）到**1720.6**千克标准煤（工业陶瓷）不等，说明陶瓷产品类别多样，必须谨慎探讨所谓的行业均值及相关节能措施。**20**世纪**90**年代，陶瓷行业的能效得到了大幅提升，此后发展多集中在相对小规模的节能改造，但仍存在持续改进的空间，包括整体工艺优化、能源管理、设计及原材料替代以及窑炉节能措施。要进一步减少二氧化碳排放，须付出更多努力。越来越多的欧洲陶瓷生产商采用包括热电联产在内的能源替代措施（尤其是在意大利、葡萄牙和西班牙）。还有一些技术虽然前景广阔，但目前还不具备经济性，包括碳捕集与封存、使用生物质或废弃物合成气体替代天然气。

本指南包括陶瓷生产企业需要完成的所有工序，包括原料制备、干燥、烧成和最终制备。与**能耗相关性最高**的工序是烧成阶段，所需能量占到总耗电量的**60%**左右。

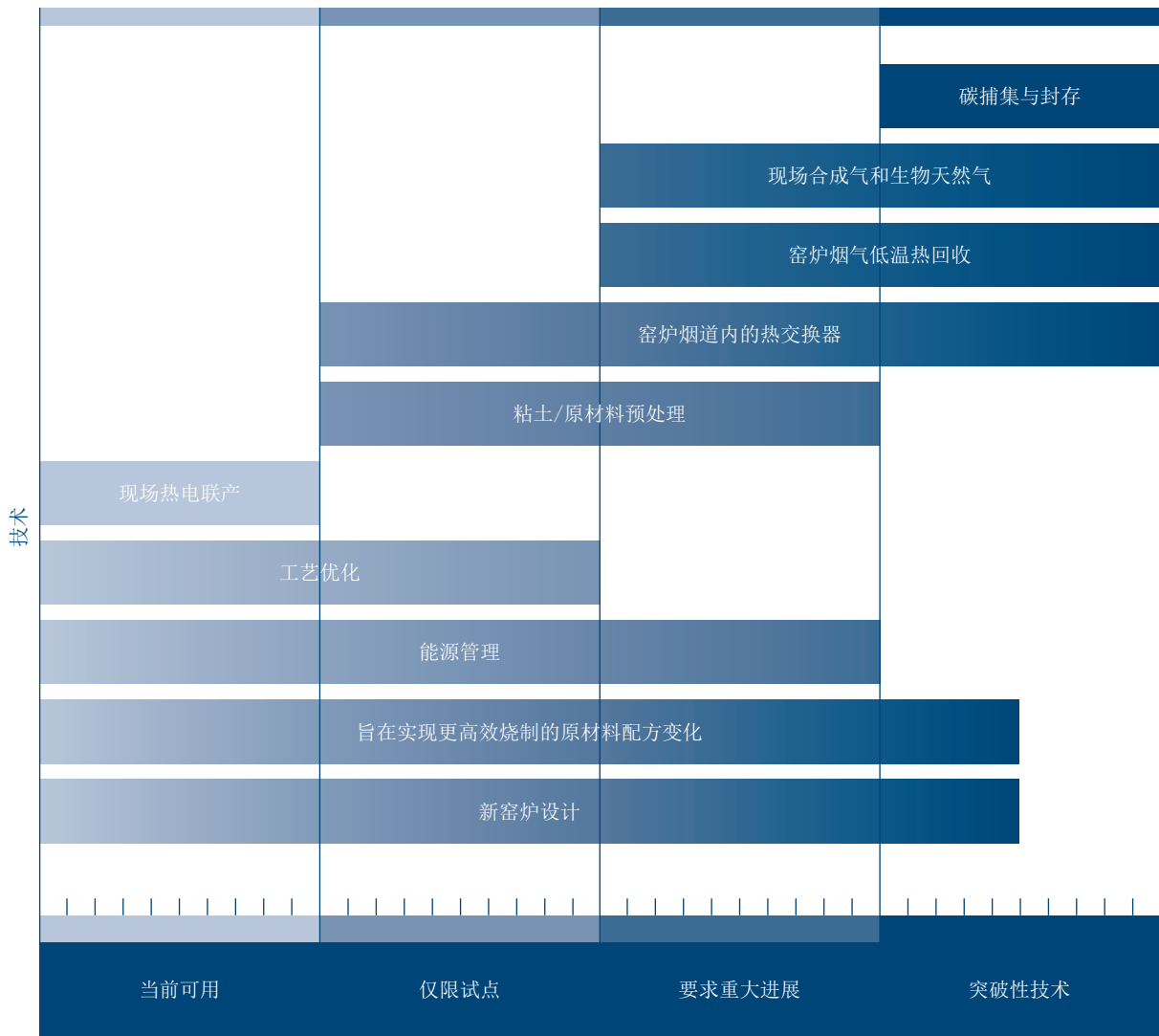
下表列出了公认最具潜力的能效措施，本指南在接下来的章节将对其进行详细介绍。

- 陶瓷原料干法制粉
- 改进陶瓷设计
- 无空气干燥
- 控制除湿
- 喷雾干燥塔内废气再循环
- 干燥空气预热
- 高效燃烧设备（窑炉）
- 低热惯性窑车和窑具
- 电窑和电干燥
- 微波辅助烧成与干燥

通过终端能耗变化评估节能潜力（电能和热能）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和电力来源方面实际的燃料替代情况，事实上所有燃料替代项目都无外乎这两种形式。针对陶瓷行业，指的是以电窑取代现用窑炉的措施。目前来看，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发电，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（工艺优化、原料调整等）外，陶瓷行业想要实现大规模脱碳依然任重道远。长远来看，采用碳捕集技术以及现场合成气和生物天然气，有望对二氧化碳减排做出重大贡献，如下图所示（CeramUnie, 2012）。

图 1：对全球二氧化碳减排的贡献



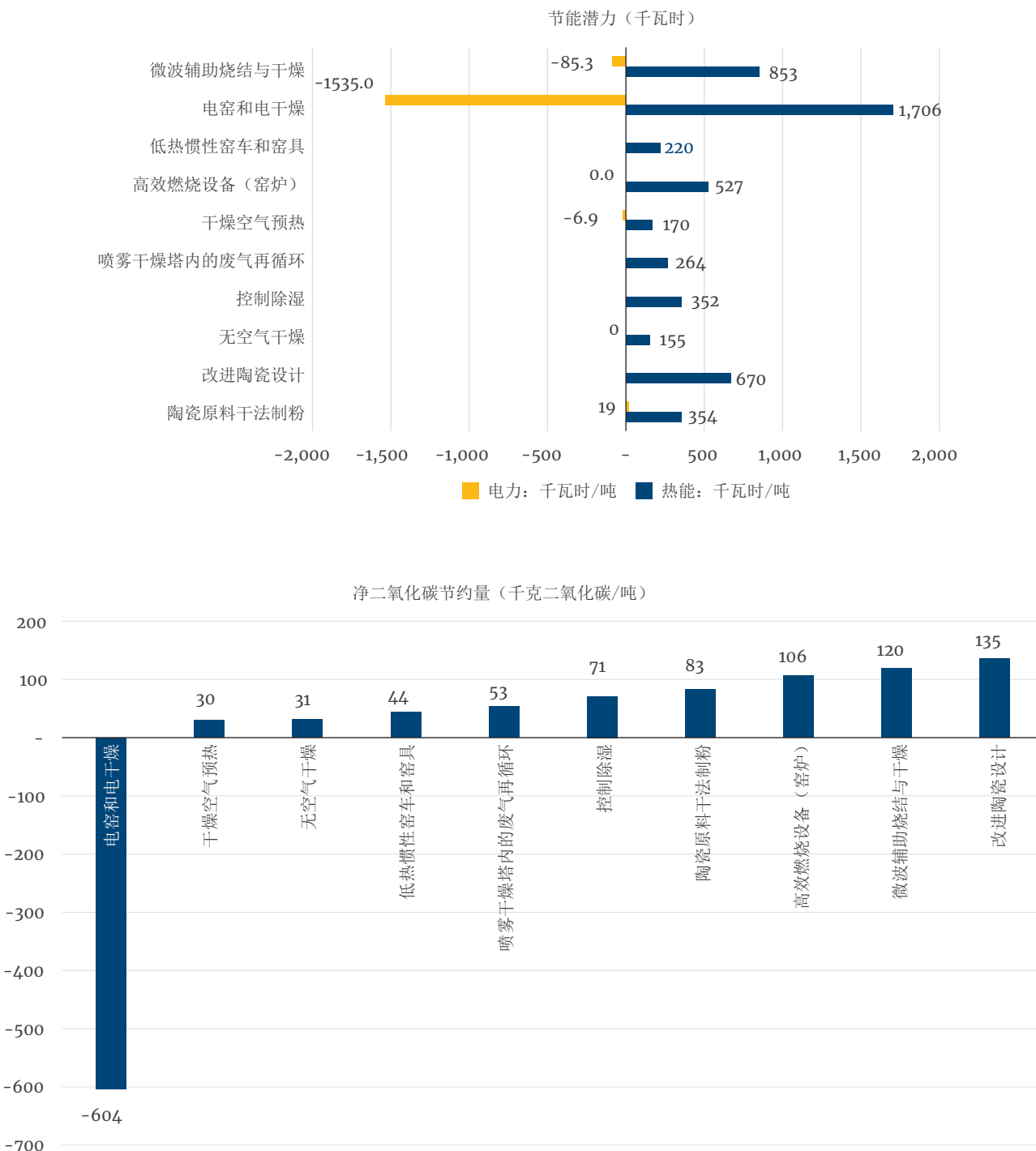
来源：(CeramUnie, 2012)

因为存在不同的陶瓷类别，所以本报告以下各章的能源消费和二氧化碳节约量的计算是基于一定假设的，如未另作规定，则是基于政府间气候变化专门委员会（IPCC）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）



下图总结了各项节能低碳措施的节能潜力以及净二氧化碳减排量<sup>1</sup>：

图 2：节能减排成效概览



<sup>1</sup> 作者注：由于各子部门的单位能耗差异巨大，建议读者仅参考本报告中分析的百分比节约量，而不是基于具体案例计算出的能源单位的绝对值。下图仅作为比较不同措施之用。



# 2

## 工业部门能源效率 概述

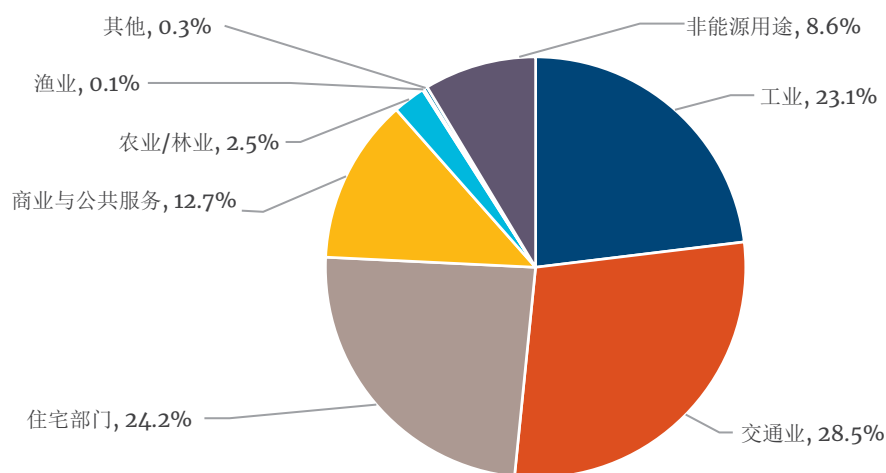
---

## 2.1 能源消耗与能源效率现状

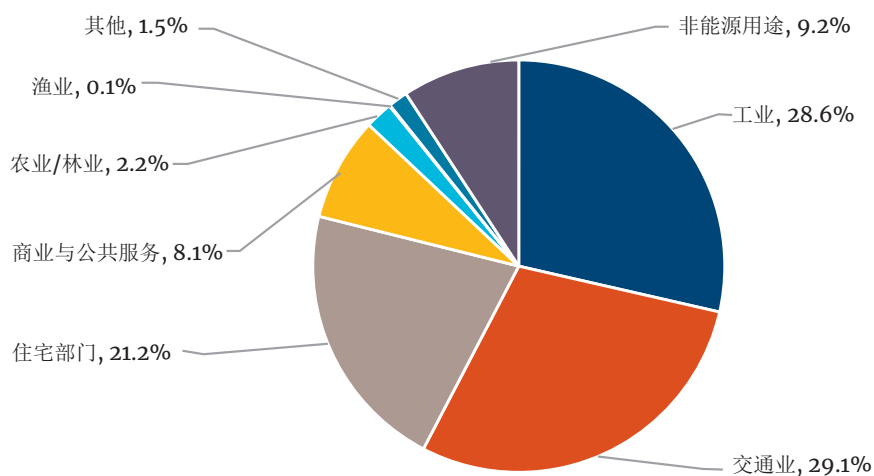
工业部门是全球主要能源消耗部门之一，如下图所示，工业部门占终端能源消费总量（TFC）比例较高：

图 3：终端能源消费总量结构配比

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）

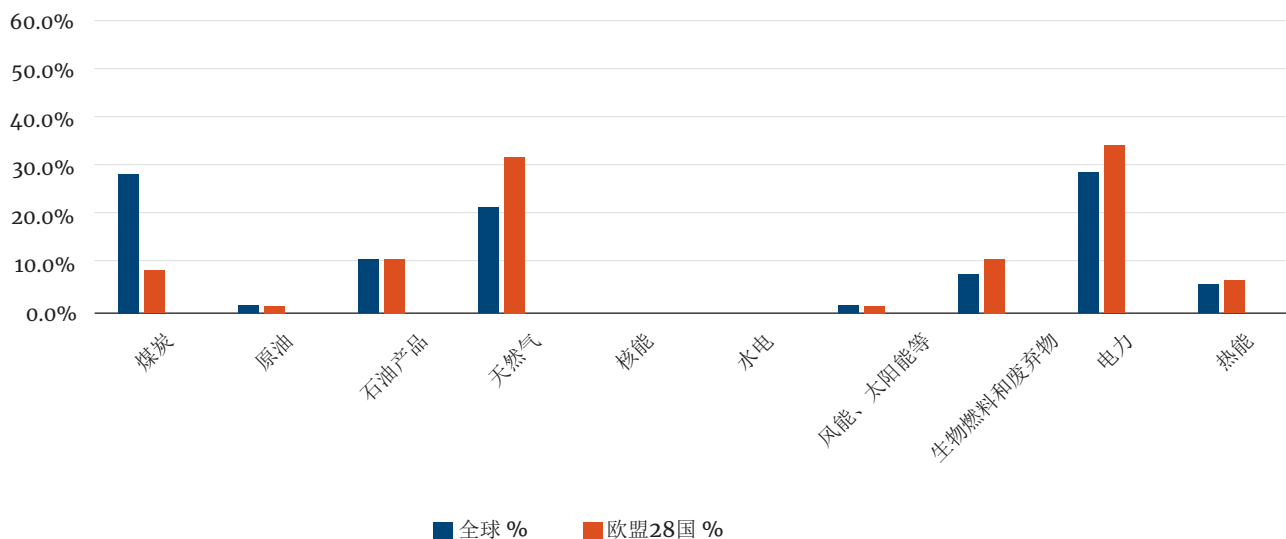


来源：国际能源署，2018



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：工业部门终端能源消费结构



来源：国际能源署，2018

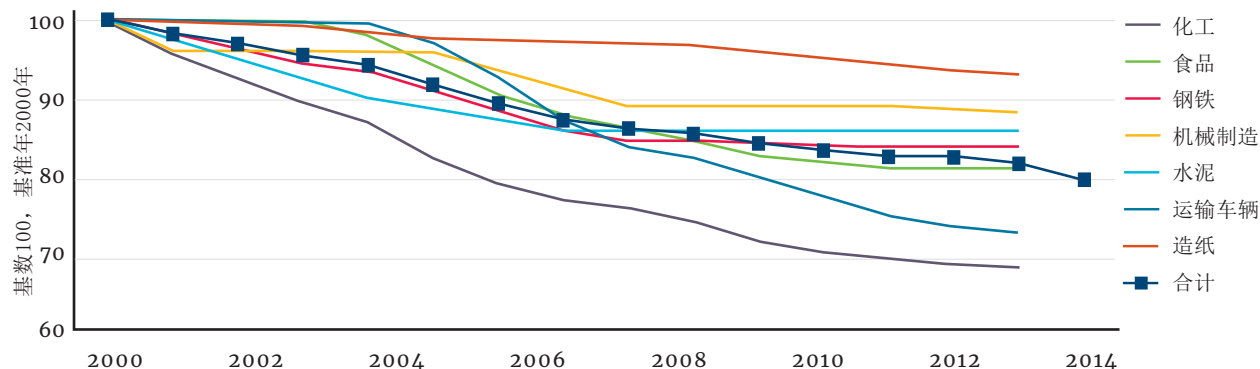
工业部门实施能效提升措施，可大幅降低能源消费总量、减少温室气体排放。原因在于工业部门规模庞大、地位重要，而且与其他部门相比，行为主体相对较少。因此，对一家工厂实施节能改造提升能效，就可以实现十分可观的节能效果。

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，但增速仍低于2000年初水平。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)。

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。

<sup>2</sup> “ODEX”（能源效率指数）基于部门级别数据（家庭、工业、交通），并加权子部门（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）。

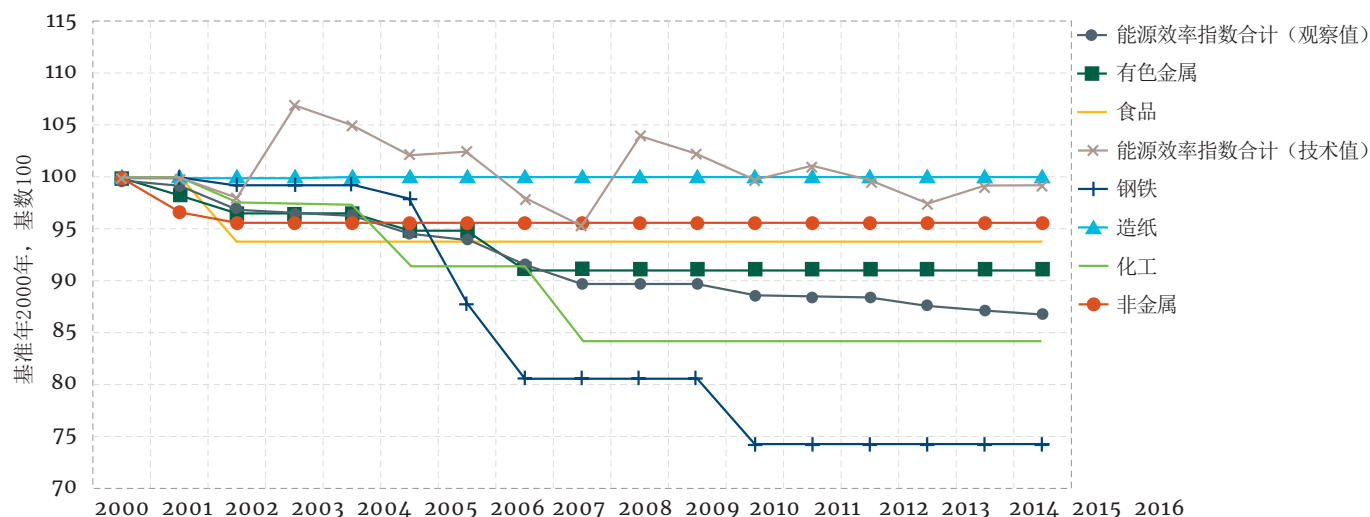
图 5：欧盟工业部门能源效率指数



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》中引用的一项国际能源署研究（2007）表明，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措施包括基准值法对标行业先进能效技术（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和规定排放水平，既有项目必须在最佳可行技术公布后四年内完成相关改造。

能效标准方面，中国国家发展改革委等部门于 2021 年 11 月发布《高耗能行业重点领域能效标杆水平和基准水平（2021 年版）》，在附件中明确了高耗能行业重点领域能效标杆水平和基准水平（2021 年版），通知中明确：对标国内外生产企业先进能效水平，确定高耗能行业能效标杆水平。参考国家现行单位产品能耗限额标准确定的准入值和限定值，根据行业实际情况、发展预期、生产装置整体能效水平等，统筹考虑如期实现碳达峰目标、保持生产供给平稳、便于企业操作实施等因素，科学划定各行业能效基准水平。对拟建、在建项目，应对照能效标杆水平建设实施，推动能效水平应提尽提，力争全面达到标杆水平。对能效低于本行业基准水平的存量项目，合理设置政策实施过渡期，引导企业有序开展节能降碳技术改造，提高生产运行能效。依据能效标杆水平和基准水平，限期分批实施改造升级和淘汰。

通知附件中对陶瓷制品的标杆值和基准值的要求是：

重点领域	指标名称	指标单位		标杆	基准
建筑陶瓷制品制造 (3071)	吸水率 ≤0.5% 的陶瓷砖	单位产品 综合能耗	千克标准 煤 / 平方米	4	7
	0.5 < 吸水率 ≤10% 的陶瓷砖			3.7	4.6
	吸水率 >10% 的陶瓷砖			3.5	4.5
卫生陶瓷制品制造 (3072)	卫生陶瓷	单位产品 综合能耗	千克标准 煤 / 平方米	300	630

<sup>3</sup> 工业排放指令（IED, 2010/75/EU）

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>4</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>5</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，提高能源效率是重点领域，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，可再生能源占比应至少达到 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，它是核准实际节能量的基础。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>6</sup>

<sup>4</sup> 欧盟成员国、挪威、冰岛

<sup>5</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>6</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（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。不过能效措施越是看似简单易行、成效快速，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格、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、闭环系统或余热回收（WHR）
- **替代工艺**：如热电联产、动态模拟预测控制、最新工艺技术等

“能源成熟度”越高，潜在节能潜力越大，但同时需要投入也更多、知识储备要求更高、复杂程度及商业风险也越大。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。改进优化单项通用技术，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》主要任务范围。本文也不涉及工业制造企业的厂房建筑能耗及其影响。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冷却操作）
- **优化制冷和冷却系统**
- **重视工艺（或者生产用水）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**（优先考虑再生利用或循环利用方案）





# 3

## 陶瓷行业概览

---



本章将介绍陶瓷行业整体生产流程及相关能耗情况，并概述欧洲陶瓷行业生产情况及能耗数据。

### 3.1 生产流程与工艺步骤简介

欧洲陶瓷行业包含的最终产品门类繁杂，如下图所示。

图 7：水泥行业产品类型



来源：(Cerame-Unie, Cerame-Unie Facts and Figures, 2021)

鉴于最佳可行技术参考文件目前尚在审核阶段，欧洲最新的生产数据只能追溯到 2009 年。这些数据展示了墙面和地面瓷砖以及砖块和屋顶瓦在总产量份额较高，能耗占比相对较大。

表 1：欧洲陶瓷行业生产及能耗数据

产品	部门能耗占比	产量（百万吨）
墙面和地面瓷砖	42%	25
砖块和屋顶瓦	38%	55
餐具和装饰品	6%	0.5
耐火产品	7%	4.5
卫生洁具	3%	0.5
工业陶瓷	2%	0.15
釉面陶土管	1%	0.7

修改自：(EU Merci, 2018) (Ecofys, Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research; Öko-Institut, 2009)

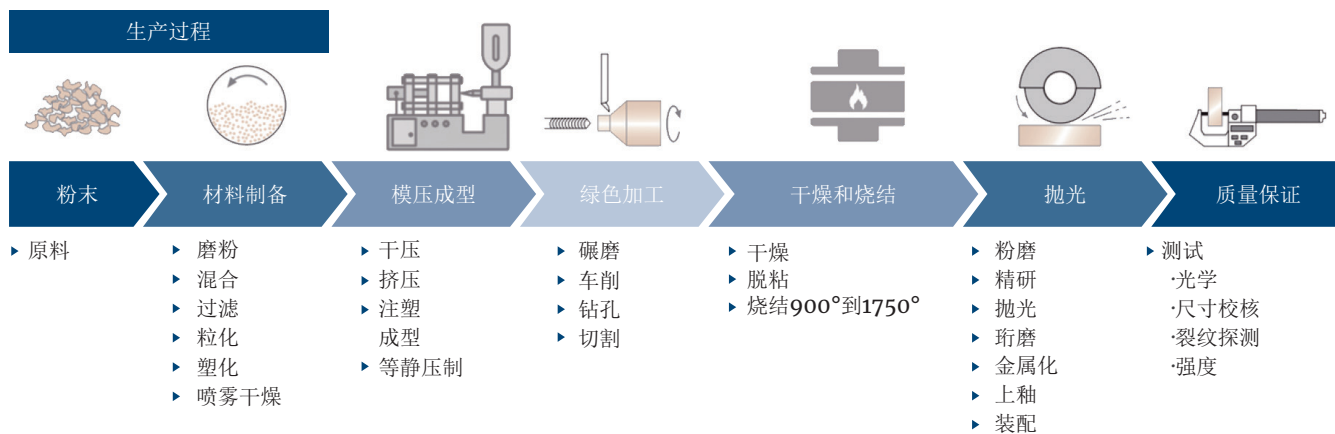
各类陶瓷的主要生产阶段是类似的：

- 原料制备
- 模压成型 / 注浆成型 / 滚压成型 / 挤压成型等
- 干燥
- 烧结（烧成）
- 冷加工（如抛光 / 磨边等）



下图展示了典型的分步骤：

图 8：陶瓷生产步骤



来源：改编自 (Vogt Ceramic, 2021)

不同类型陶瓷生产过程的差别与以下因素相关：

- 使用的原材料
- 成形工艺
- 采用的烧制温度
- 特定产品的具体需求（类别、形状、尺寸、必需的性质等）

下文解释了与各类陶瓷产品都相关的主要生产阶段。

## 原材料制备和成型<sup>7</sup>

原材料制备是将陶瓷混合料与必需的添加剂混合在一起供后续工艺阶段使用。通常采用干磨或湿磨，以减小颗粒尺寸。

“生坯”指的是烧制之前的物体。不同的最终产品会采用不同制备及成形工艺。

- **干压**（将粉末压入压模）——用于瓷砖
- **喷雾干燥**（使用热气快速干燥工艺，将浆料制成粉末，实现高度均质的颗粒）
- **挤压**（湿润地可塑坯料在压力下通过模具）——应用于砖块和屋顶瓦片。
- **注浆成型**（将浆料注入石膏模具，通过该模具缓慢吸其中水分。在模具内部留下一个外壳）——应用于所有卫生洁具。
- **熔铸**（材料预熔并灌入模具。这类成型工艺必须采用可控的冷却和固化工艺，以避免破裂，此工艺能源密集度高，用于特种陶瓷。（EU Merci, 2018）

<sup>7</sup> 包括上图中的材料制备、模压成型和绿色加工等工艺

## 干燥和烧成<sup>8</sup>

对于未经干压的产品，下一步是干燥，即在烧成工艺之前缓慢脱水。温度通常在 60 到 200 之间。干燥时间取决于初始含水量以及器具的尺寸：卫生洁具所需时间最长，瓷砖最少。除了陶瓷产品以外，用于注浆成型的模具重复使用之前也要干燥。

隧道式干燥机和喷雾干燥机如下图所示。

图 9：隧道式干燥机（左）和喷雾干燥机（右）

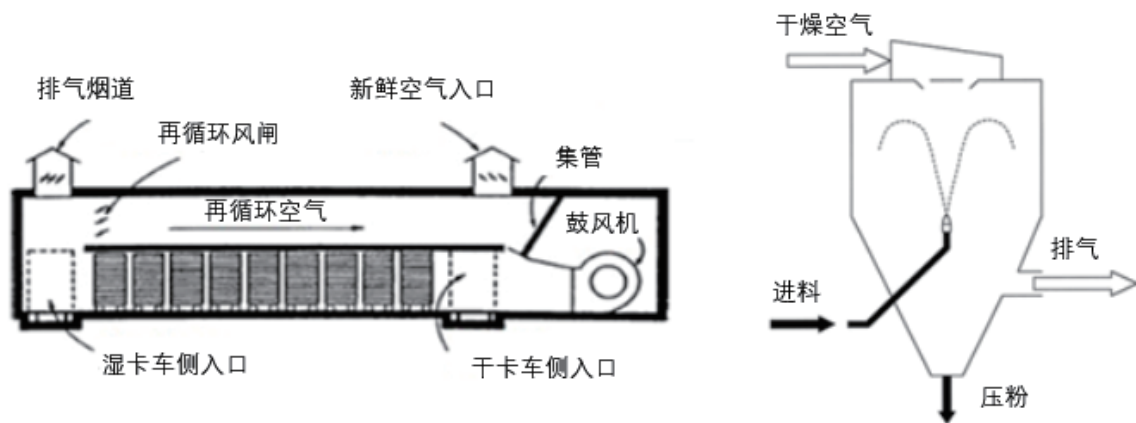


示意图 (Oliveira, Iten, Cruz, & Monteiro, 2020)

烧成是陶瓷生产的核心，即产品在窑炉内加热，温度范围在 800 到 1800 之间，取决于产品和窑炉类型，此过程最多可花费几天时间。某些产品的烧制（瓷砖、卫生洁具和最廉价的餐具）只需要一次烧制即可，而其他产品则可能需要多次烧制。第一次烧制是为了提高陶瓷基体（称为素烧坯）的强度。制造餐具时，需在上釉之前进行装饰，然后进行第二次烧制，称为釉烧。其他类型的装饰物可以采用彩烧固定。

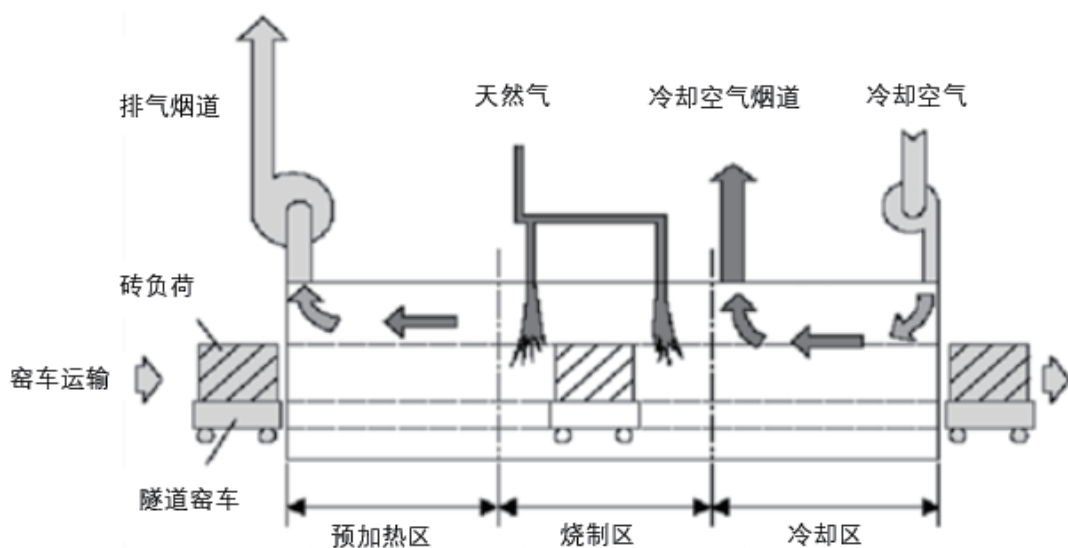
原则上，窑炉分为连续式窑炉或间歇式窑炉（间断窑），可进一步分类如下：

- 隧道窑（产品使用窑车运输；正常情况下，首尾两端为开放式；加热发生在中心位置）
- 梭式窑
- 辊道窑（使用陶瓷辊棒或运输产品）
- 间歇式 / 不连续式窑 (Oliveira, Iten, Cruz, & Monteiro, 2020)

<sup>8</sup> 在上图中：干燥和烧结

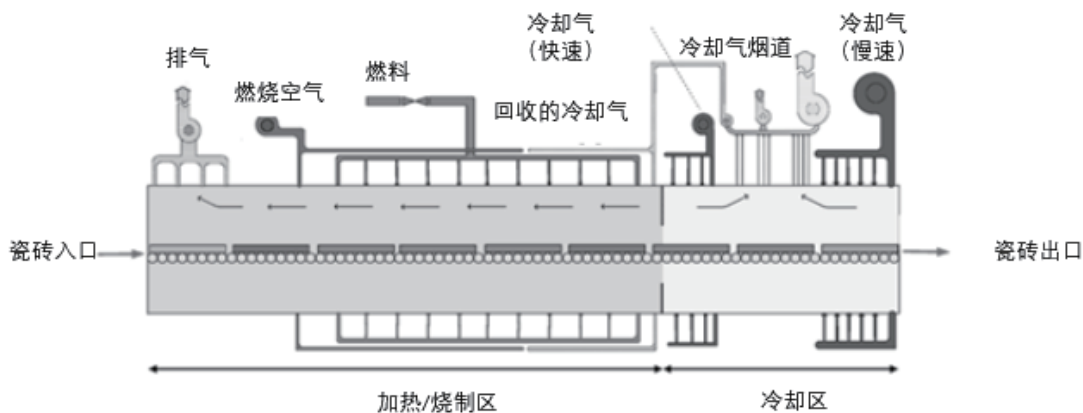
隧道窑和辊道窑的示意图如下

图 10：隧道窑示意图



来源：(Oliveira, Iten, Cruz, & Monteiro, 2020)

图 11：辊道窑示意图



来源：(Oliveira, Iten, Cruz, & Monteiro, 2020)

通常采用以下能源用于加热：燃料油、（柴油、）液化石油气（LPG）、甲烷或天然气、煤炭（焦炭）和电。（Agrafiotis & Tsoutsos, 2001）在欧洲，主要的燃料是天然气；工业陶瓷也使用电窑。（Kollenberg, 2013）

在燃料产生的热能进行干燥和烧成的同时，原料制备阶段的研磨操作、成形阶段的压制操作以及加工阶段的自动化及材料的处理和转移均需要电能。（Agrafiotis & Tsoutsos, 2001）

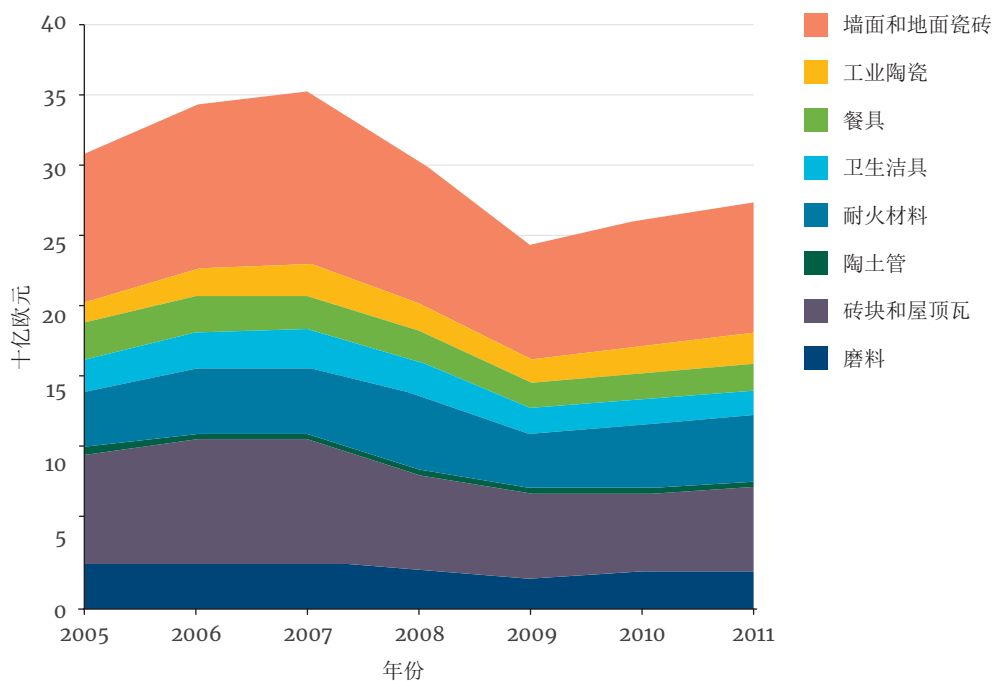
## 3.2 陶瓷行业节能现状及发展趋势

本章将进一步介绍欧洲陶瓷行业能源消耗和能源效率的现状，同时概述与行业相关的主要耗能工序。

### 3.2.1 陶瓷行业能源统计与基准

下表是欧洲国家的陶瓷生产情况概述，合计产量大约为 8700 万吨 / 年（参见前一章节的表 1）或者产值 2800 亿欧元（参见下文图 12）。2011 年，四个最大的生产国家（意大利、德国、西班牙、法国）占到总产值的 60%。<sup>9</sup>

图 12：欧洲的陶瓷产值

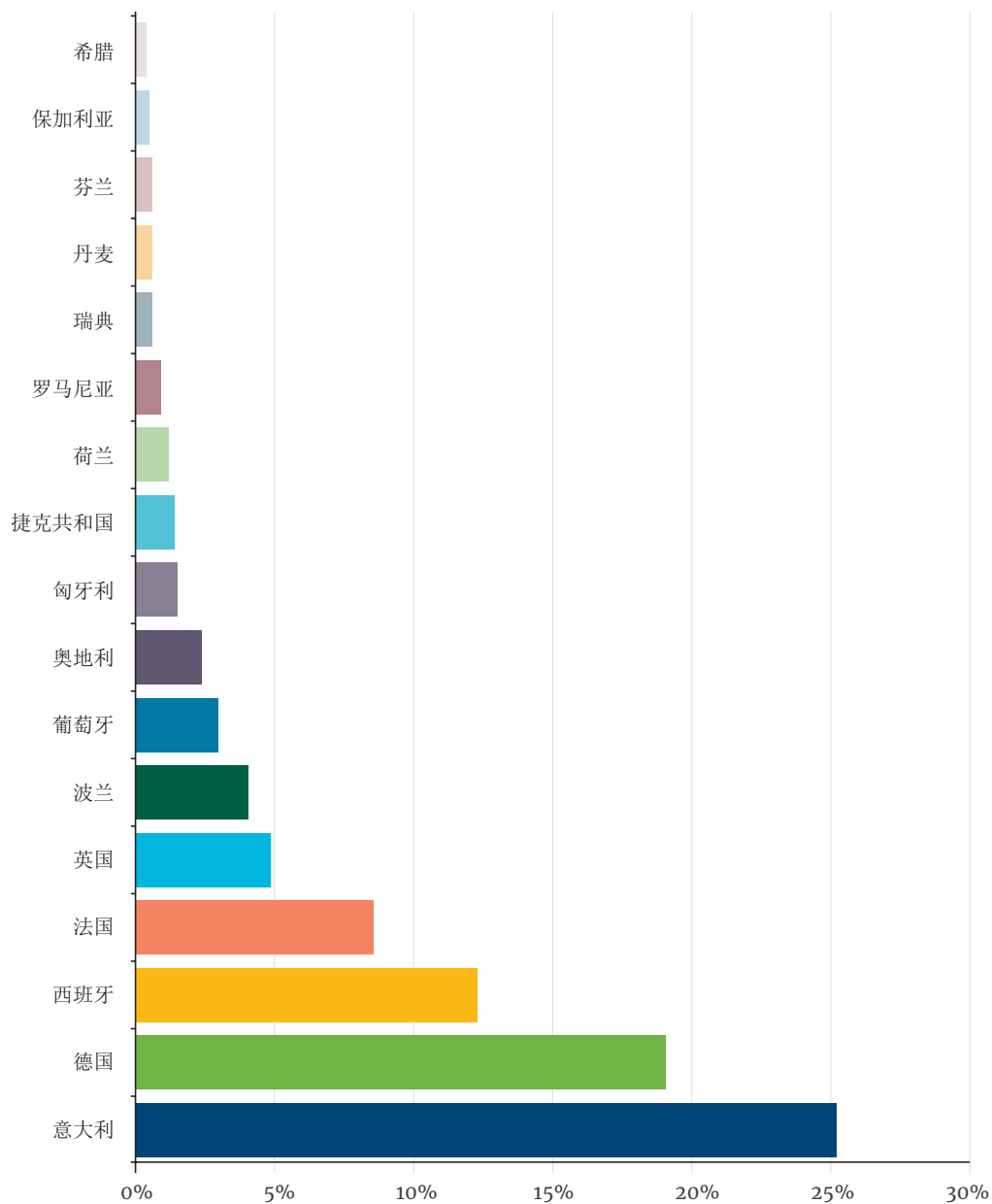


来源：(CeramUnie, 2012)

<sup>9</sup> 更新的具体产品产值（以吨计）目前并不可用；最佳可行技术参考文目前尚在接受审查，将更新到 2025 年。陶瓷行业联盟只呈现了销售额方面的数据；无法找到此行业的 ODYSSEE 数据（其他行业有可用的数据库）。

下图展示了欧洲国家产值占比（以货币值表示）。

图 13：欧洲的陶瓷产值结构配比



来源：(CeramUnie, 2012)

**单位能耗**的定义是完成单位产量所必需的能量投入。在陶瓷生产中指生产一吨陶瓷所需的能量。但是，这类平均数并不能完全代表陶瓷行业平均能耗，因为产品类型及各自的能耗之间存在巨大差异。下表展示了具体产品类型的单位能耗。

欧洲陶瓷行业联盟指出：在1990年代到2000年代，砖块、墙面和地面瓷砖的生产能耗大幅降低，分别下降了47%和39%。但是，这些数字的参考单位是生产“1平方米瓷砖”所需的能源。这意味着行业发展不仅仅推动了能效提升，也带动了产品设计变更，减少了构建1平方米瓷砖所需的材料用量（例如薄型陶瓷砖）。

表 2：各子部门单位能耗及能源占比

产品	吉焦 / 吨	兆瓦时 / 吨	部门能耗占比	产量（百万吨）
墙面和地面瓷砖	5.6	1.6	42%	25
砖瓦和屋顶瓦	2.32	0.6	38%	55
餐具和装饰品	45.18	12.6	6%	0.5
耐火产品	5.57	1.5	7%	4.5
卫生洁具	21.87	6.1	3%	0.5
工业陶瓷	50.39	14.0	2%	0.15
釉面陶土管	5.23	1.5	1%	0.7

改编自：(EU Merci, 2018)

比较单位能耗值可以发现，能耗最高的产品类型是餐具和装饰品以及工业陶瓷。这些产品的单位能耗值分别高于每吨产品12兆瓦时和14兆瓦时（折合1474.8千克标煤和1720.6千克标煤）。每吨产品能耗最低的是砖块和屋顶瓦，低于每吨产品1兆瓦时（折合122.9千克标煤）。因此，最重要的结论之一就是因为生产工序不同，所以比较不同陶瓷子部门的“平均”能耗意义有限。

降低整体终端能耗的每一次尝试最终都是为了实现温室气体减排这一总体目标。可以通过各种方式实现此目的，既包括减少最终能耗的能效措施、燃料替代和更多动议和项目（参见章节4.11），也包括改变生产设计以降低单位能耗（参见章节4.2）。

表3展示了欧盟碳排放交易体系中部分产品基准的当前水平 (European Commission, 2021)，单位为单位产品的二氧化碳排放吨数。此外，表中还列出了排名前10% 高效设施的平均值。通过比较最有效的设施和基准值，可以发现欧洲陶瓷行业还有一定的二氧化碳减排空间。

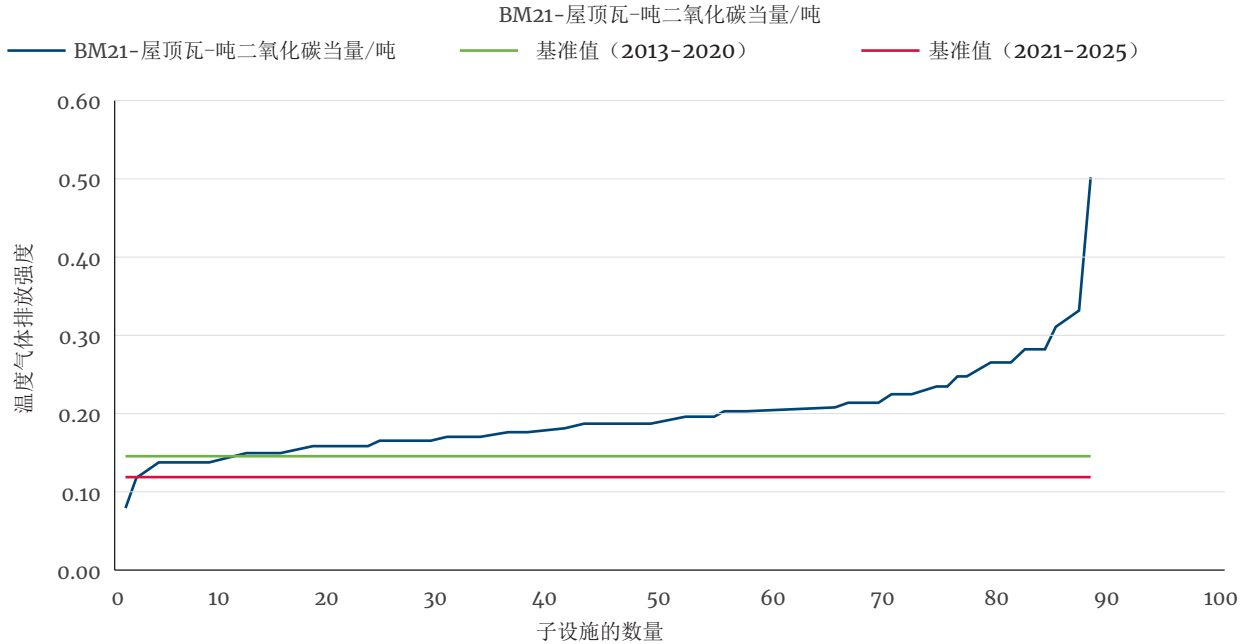
表 3：产品基准

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)
面砖	0.094	0.106
铺路材料	0.140	0.146
屋顶瓦	0.130	0.120

来源：(European Commission, 2021)

在设定基准的过程中，欧盟委员会还收集了生产数据，比较了实际的二氧化碳排放量。针对屋顶瓦的评估如下：

图 14：欧洲屋顶瓦温室气体排放强度的统计数据



来源：(欧洲委员会，2021)

蓝线表示欧洲屋顶瓦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。2016/2017年所有生产设备的平均温室气体排放强度为0.197吨二氧化碳当量/吨，而其加权平均温室气体排放强度为0.185吨二氧化碳当量/吨<sup>10</sup>。十大能效最高的设备的平均排放为0.13吨二氧化碳当量/吨。这意味着处在行业一般水平的生产商依然有提升空间（或者购买排放许可的需求）。

与温室气体相关的另一个值得注意的事实是过程排放。取决于具体的矿物质和本地地质条件的不同，总二氧化碳排放量中大约有16%<sup>11</sup>为过程排放。这些是与燃料供给无关的排放，而是石灰岩、白云石或菱镁矿等原材料中碳酸盐分解的固有排放。这些排放是烧制过程的天然副产品，如不改变原材料则无法避免。如陶瓷行业实现2050年温室气体减排目标的路径图所示，应该在改进燃料排放之外，包括窑炉的热回收和电气化（仅在使用低碳电源的时候才能实现改进），考虑热电联产以及生物气或合成气等替代燃料的使用。(CeramUnie, 2012)

据《建材行业能源管理体系教程》中介绍，中国的陶瓷砖行业能源结构主要为天然气、原煤（煤粉）和电力，部分余热可用于干燥取暖等。主要用能过程包括：原料破碎、球磨、喷雾干燥、压制成型、烧成、磨边、抛光等过程。不同的企业其能源使用有一定的差别。窑烧天然气的陶瓷砖企业，天然气占比约51--55%，原煤（煤粉）占比35--37%，电力占比约10--15%，柴油等其他能源占比约0.5%。窑烧水煤气的陶瓷砖企业，原煤（煤粉、水煤气）占比85--90%，电力占比约10--13%，柴油等其他能源占比约0.5%。中国瓷质砖产量相对较大，瓷质砖单位产品综合能耗不超过7kgce/m<sup>2</sup>，先进值会小于4kgce/m<sup>2</sup>。卫生陶瓷行业主要能源结构主要为天然气和电力，其中，天然气占比80—85%，电力占比约15%，柴油等其他能源占比不到1%。主要用能过程包括：原料破碎、泥浆制备、模具制造、注浆成型、干燥、喷（浸）釉、烧成等过程。不同的企业其能源使用有一定的差别。我国卫生陶瓷的种类较多，不同的产品类别其能耗水平也不一样，总体上，卫生陶瓷单位产品综合能耗不超过630kgce/t，先进值会小于300kgce/t。

<sup>10</sup> 用2016和2017年的归属排放量（二氧化碳）总额除以2016和2017年活动水平的总额（即生产量），计算出每一基准的加权平均值

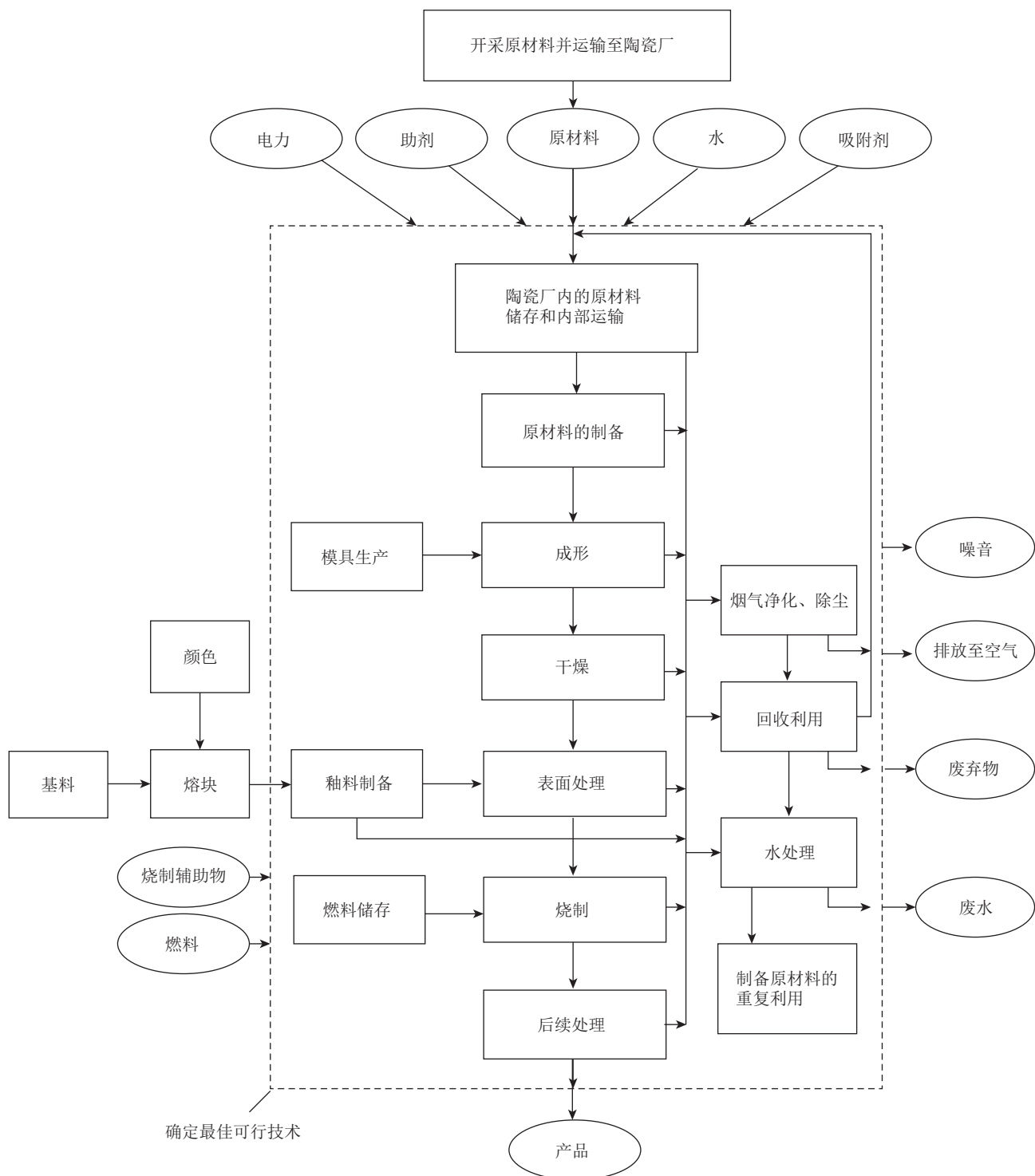
<sup>11</sup> 砖块和屋顶瓦、耐火材料以及墙面和地面瓷砖子部门的数据



### 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：

图 15：陶瓷行业能量和材料流向



来源：(European Commission, 2007)

### 3.2.3 能源密集型工艺流程

为确定具体节能措施及其节能潜力，首先需要确定主要的耗能工段。

前一章提到的陶瓷行业子部门之间的巨大差别意味着在解读所有国际比较及单项数字时，都必须谨慎处理。但是，可使用以下数字示意单位能耗。这些数字也显示，相比电能消费，热能消耗需求占主导地位，热能在总能耗中所占比重约为 83%-91%<sup>12</sup>。

表 4：各子部门单位能耗及能耗占比

国家	单位电能能耗	单位热能能耗	
	千瓦时 / 吨	千瓦时 / 吨	吉焦 / 吨
印度	210	1557.4	5.6
意大利	139	1348.2	4.9

自有图表，数据来源：(SIDBI, 2019)

如图 16 所示，主要能耗来自陶瓷窑炉，另外产品类型不同、具体的生产步骤不同，具体的占比也有所不同（参见前一章节）。

干燥和烧成必须用到燃料（主要是天然气）产生的热能，而研磨 / 原料制备、压制 / 成形以及部件的处理 / 移动必须用到电能。(Agrafiotis & Tsoutsos, 2001)

以瓷砖生产为例，主要耗能工序的典型能耗数字如下表所示：

表 5：瓷砖制造子流程的能耗

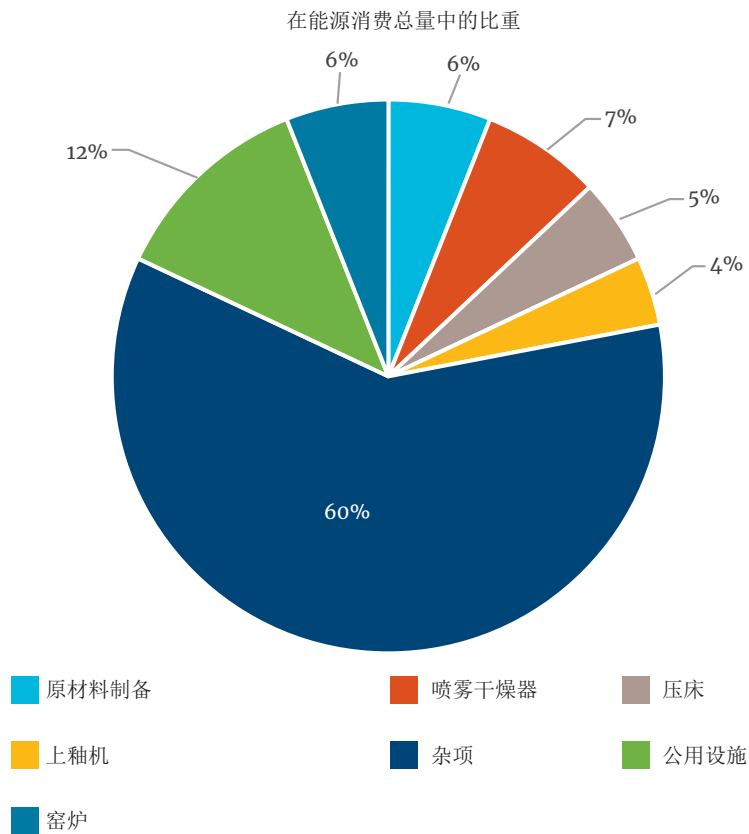
生产过程	能量类型	单位	最小基准值	最大基准值	平均基准值	平均基准值 [ 千瓦时 ]
喷雾制粉	热能	吉焦 / 吨	0.98	2.2	1.59	442
干燥	热能	吉焦 / 吨	0.25	0.75	0.5	139
烧制	热能	吉焦 / 吨	1.9	7.3	4.6	1278
压制	电能	吉焦 / 吨	0.05	0.15	0.1	28

改编自：(UNIDO, 2016)

<sup>12</sup> 为了实现更好的数据可比较性，热能数字采用的单位是千瓦时和吉焦。

来自印度的相关资料说明了普通陶瓷能耗的总占比情况 (SIDBI, 2019)。尽管必须谨慎看待所有此类平均数字，但根据数据可大致估计大多数陶瓷生产类型的相关情况。任何情况下，窑炉都是目前为止最大的耗能设备，因此也是所有优化工作的起点。

图 16：相关工艺步骤能源消耗情况



来源：(SIDBI, 2019)

根据最佳可行技术文件，影响能耗的重点包括：

- 窑炉和干燥器的改进设计
- 窑炉余热回收
- 热电联产 / 热电联合机组
- 以低排放量的燃料取代重燃油和固体燃料
- 陶瓷体改性 (European Commission, 2007)

下一章节介绍了包含以上要点在内的具体措施。





# 4

## 陶瓷行业能效提升措施

---



表 6 中列出了本章将深入分析能效提升措施。每节内容将首先介绍基准情况，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。

表 6：陶瓷行业能效措施概览

章节	措施	工艺
4.1	陶瓷原料干法制粉	原料制备
4.2	改进陶瓷设计	一般工艺
4.3	无风干燥	干燥
4.4	控制除湿	干燥
4.5	喷雾干燥塔内的废气再循环	干燥
4.6	干燥空气预热	干燥
4.7	高效燃烧设备	烧成
4.8	低热惯性窑车和窑具	烧成
4.9	电窑和电干燥	干燥 / 烧成
4.10	微波辅助烧成与干燥	干燥 / 烧成



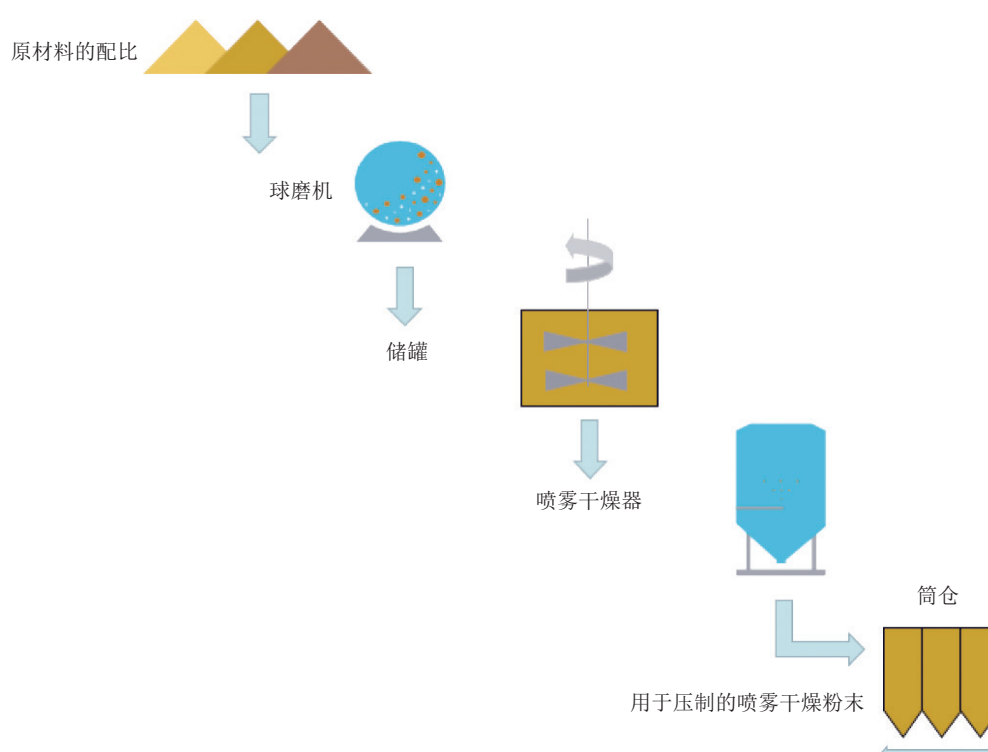
## 4.1 陶瓷原料干法制粉

### 4.1.1 陶瓷原料干法制粉基线情况和能耗说明

为了改进材料混合、增加材料表面积、释放杂质或者改变颗粒形状，一定要缩减原材料的颗粒大小。经过压碎，把厘米尺寸的大块材料破碎至 1-2 毫米后，可通过研磨实现进一步破碎。一般来说这一步是在湿润环境下，使用湿磨法和喷雾干燥完成的。(Kocak & Karasu, 2018)

下图展示了湿法的典型工艺步骤。

图 17：原材料制备——湿法



来源：(Mezquita, Monfort, & Salvador Ferrer, 2017)

在这一过程中，干燥的细磨粉料与水（固体的重量占比约为 65-72%）混合形成浆体，“之后使用开槽的旋转离心盘或者喷嘴在干燥室内予以雾化” (Kocak & Karasu, 2018)。

燃烧过的气体在此过程中蒸发，留下 4-7% 的水和一个中空的球体。在喷雾干燥塔中，材料随着振动和气流移动，可能形成不同的粒状结构，具体取决于所选择的喷口直径、进料增压和料浆黏度。

下表展示了湿法工艺的典型能耗数据。表格中的所有数值都以兆克（Mg）为单位，相当于干物质的公吨。

表 7：湿法的关键消耗数据

湿法工艺中原料制备的耗水量、能耗和二氧化碳排放量，（a）d.s.：干燥过的固体；（b）HHV：更高发热值；（c）天然气的排放系数：0.202 千克二氧化碳 / 千瓦时（IPCC，2006）。

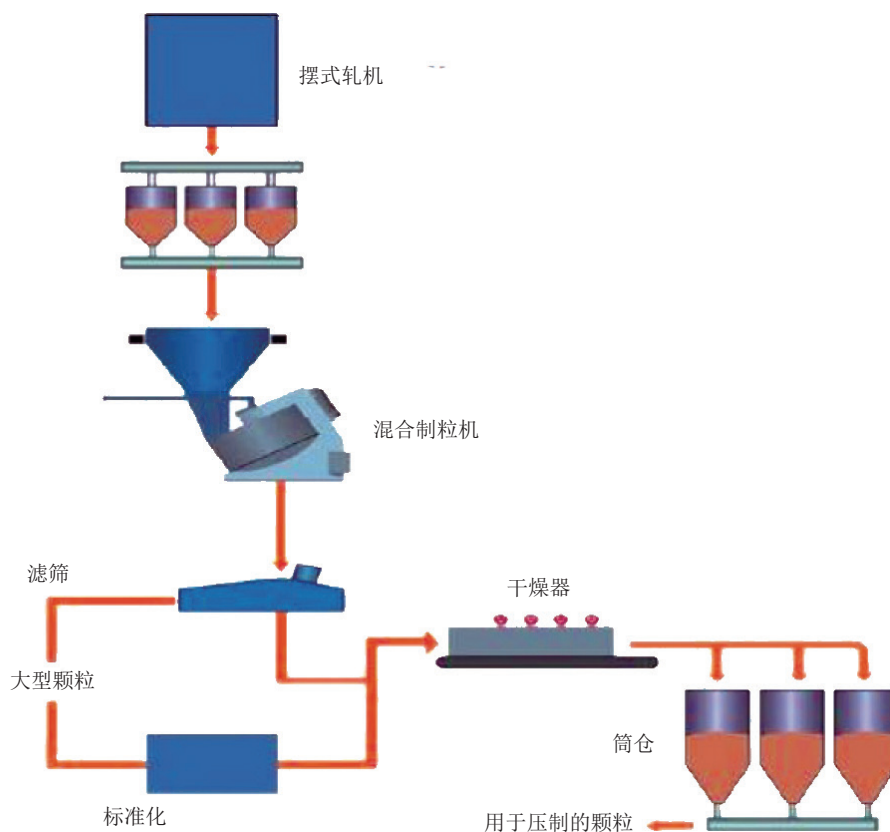
湿法	消耗量
耗水量	0.47-0.59 立方米 / 兆克 d.s. <sup>a</sup>
电能消耗量	50-54 千瓦时 / 兆克 d.s.
热能消耗量（HHV <sup>b</sup> ）	442-462 千瓦时 / 兆克 d.s.
二氧化碳直接排放 <sup>c</sup>	80-84 千克二氧化碳 / 兆克 d.s.

来源：(Mezquita, Monfort, & Salvador Ferrer, 2017)

#### 4.1.2 建议改进措施

作为湿法工艺的替代方式，建议使用干法工艺，其中包括一台摆式轧机和后续的颗粒制备设备 (Mezquita, Monfort, & Salvador Ferrer, 2017)，如下图所示。

图 18：原料制备——干法



来源：(Mezquita, Monfort, & Salvador Ferrer, 2017)

喷雾干燥工艺处理后的几乎所有产品都具有适当的尺寸及含水量，干法工艺与此不同，其初始阶段球状体会在一定程度上过大或过小，必须重新加工。最终形成的颗粒具有与经过喷雾干燥的颗粒同等水平的吸水率（3%），也有同样的干燥和烧制周期。瓷砖表面“极其统一，非常适合进行哑光和光泽处理”。<sup>13</sup>在能效和节水效率方面，干法工艺表现出巨大的优势，如下表所示<sup>14</sup>。

表 8：干法的关键消耗数据

干法工艺中原料制备的耗水量、能耗和二氧化碳排放量，（a）d.s.：干燥过的固体；（b）HHV：更高发热值；（c）天然气的排放系数：0.202 千克二氧化碳 / 千瓦时（政府间气候变化专门委员会，2006）。

干燥工艺	消耗量
水消耗量	0.12-0.16 立方米 / 吨 d.s. <sup>a</sup>
电能消耗量	31-35 千瓦时 / 吨 d.s.
热能消耗量（HHV <sup>b</sup> ）	88-108 千瓦时 / 吨 d.s.
二氧化碳直接排放 <sup>c</sup>	16-20 千克二氧化碳 / 吨 d.s.

来源：(Mezquita, Monfort, & Salvador Ferrer, 2017)

#### 4.1.3 潜在节能量和温室气体减排量

分别考虑湿法（表 7）和干法（表 8）的关键数据，可得出节约热能约为 78% 或每吨产品 354 千瓦时。节电量合计达到 37% 或者每吨产品 19 千瓦时。

表 9：措施的关键信息——陶瓷原料干法制粉

措施的关键信息——使用干法进行原材料制备	
投资成本：	维护费用节省 2.5 欧元 / 吨和人员（2 人而非 3 人）(Kocak & Karasu, 2018)
节能量：（热能和电能）	1274 兆焦 / 吨 <sub>陶瓷</sub> （354 千瓦时 / 吨）热能需求减少 19 千瓦时 / 吨 <sub>陶瓷</sub> 电能需求减少
二氧化碳减排量：	83 千克二氧化碳 / 吨 <sub>陶瓷</sub>
优点：	<ul style="list-style-type: none"> <li>不需要干燥电力</li> <li>比湿磨法更少的介质和衬里损耗</li> <li>更少的收缩</li> <li>任意时间启 / 停</li> </ul>
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> <li>与湿法相比更多灰尘</li> <li>湿法提供更窄的粒度和更好的均化</li> </ul>

<sup>13</sup> 在下一批次、大颗粒中加入超细颗粒可能是磨碎的，可返回至流化床干燥器或者直接加入到压粉中。

<sup>14</sup> 单位：吨

## 4.2 改进陶瓷设计

### 4.2.1 基线情况和能耗说明

在工艺步骤的简单优化之外，还有多项因素影响着陶瓷生产的（单位）能耗。其中一项重要因素就是所使用的原材料和添加剂——其特性影响着实现理想的产品及烧成特征所必需的质量，从而会影响能耗。此外，其形态和浆料的类型发挥着重要作用。

总的来说，在所有工艺步骤中采用减少不良品（烧制后的破裂、成形过程中的磨损以及研磨废料等）的措施会大幅减少能耗。与玻璃或金属相比，陶瓷的成分只可能在非常有限的范围内重复利用，因为烧结过程会导致原材料发生不可逆的变化。尽管可以将其再次并将之加入到原材料之中，但其效果并不明显，反而会增加成本和耗能。(Kollenberg, 2013)

因此，此种措施的基线情况是当前并未优化的产品设计，不同子部门以及不同个体陶瓷厂采用的设计不同。

### 4.2.2 建议改进措施

建议改进措施针对的是产品设计的优化，包括所使用的材料。典型的干预包括：

- 需要更少原材料（出于相同的目的）、更短烧制时间的新材料和设计
- 新材料成分，包括造孔剂（例如碳纳米管）
- 掺杂利用残留物生产热能
- 使用添加剂（例如焚化灰、废玻璃、低温烧结黏土）以降低烧结温度
- 找出具有相同性能的新 / 更轻的陶瓷材料。(Oliveira, Iten, Cruz, & Monteiro, 2020)

下表中提供了具体的潜在改进，总结了旨在开发欧洲陶瓷行业节能理念的全面研发项目的发现。

表 10：材料 / 设计相关改进的范例

子部门	材料 / 成形	添加剂	其他
砌筑砖、屋顶瓦	使用更优质的黏土以减少需水量	烧结添加剂：灰、废玻璃、玻璃和矿物棉、降低烧结温度的低温烧结黏土	废石墨、石油焦炭、耐火黏土作为燃料添加剂
路面砖和面砖	与砌筑砖相同；设计更低质量的砖块	与砌筑砖相同	与砌筑砖相同
餐具	含锂长石或硬硼钙石 <sup>15</sup> 等新材料导致烧结温度最多降低 200°C 允许单独烧制（而非双重烧制）的特殊坯体和釉料	--	一个烧制步骤内可能实现的颜色越多，所需能源就越少。
卫生洁具	含锂长石或硬硼钙石等新材料导致烧结温度最多降低 200°C 传统黏土和陶土的优化坯体导致烧制温度下降最高达 50°C	--	优化长石 / 其他添加剂的粒度分布以改进反应性、减少能耗

来源：基于 (Kollenberg, 2013)

<sup>15</sup> 钾及钠长石的混合物

一个设计变更的典型范例就是所谓的“波罗顿砖（Poroton）”。这是一种多孔空心砖，不仅重量轻，还有更好的热传导率。此外，此种砖可添加一种额外填料，可填入保温材料。

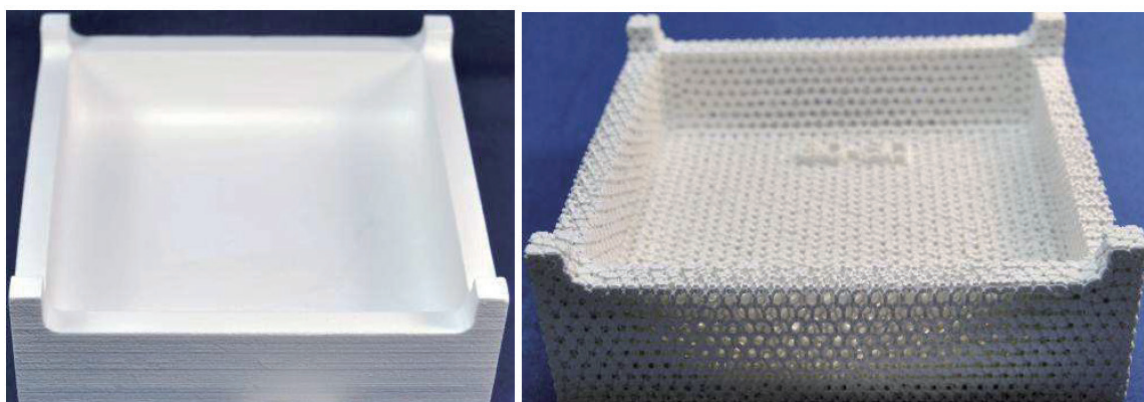
图 19：波罗顿砖



来源：(Wienerberger, 2021)

最新的发展也应用了仿生学方法，即在未承受高承重的组成部分，将材料用量缩减到最少，类似于人体骨组织。通常是通过三维打印实现设计。一个范例如下图所示——常规烧结钵和优化后的烧结钵。

图 20：烧结钵——常规（左）和优化后（右）



来源：(Kollenberg, 2013)



### 4.2.3 潜在节能量和温室气体减排量

在陶瓷行业无法针对不同类型的行动、改进和设计变更确定统一的节能潜力。下表针对材料孔隙度提升 15% 能够如何提高吸水率、降低抗压强度，从而大幅减少干燥阶段的能耗。(Oliveira, Iten, Cruz, & Monteiro, 2020)

节能潜力与烧制阶段（烧制温度下降）、干燥阶段（更好的吸水性）或者更少的不良品（用更少的材料提供同样的服务）相关。

表 11：措施的关键信息——陶瓷设计的改进

措施的关键信息——改进陶瓷设计	
投资成本：	取决于具体的干预，例如温度下降 200℃ 带来的节能导致比能耗下降约 15%（卫生洁具 670 千瓦时 / 吨，135 千克二氧化碳 / 吨）
节能量：（热能和电能）	
二氧化碳减排量：	
优点：	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 烧制温度下降导致的节能</li> <li>• 更高的材料孔隙度、更大的吸水性</li> <li>• 设计 / 形式变更——以更低材料成本实现可比产品特征</li> </ul>
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> <li>• -</li> </ul>

## 4.3 无空气干燥

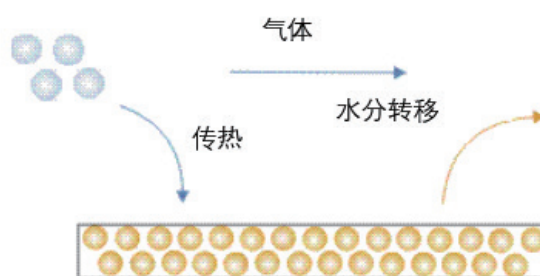
### 4.3.1 基线情况和能耗说明

干燥是通过消耗能量减少固体中含水量的过程。从材料内部到表面的水分输送可能是液体或蒸汽的形式，取决于产品的类型和含水量。在干燥过程中，热空气提供了蒸发潮湿材料中水分所必需的热能 (Mota Neto, 2008) (Silva & Farias, 2013)。

通过对流、辐射、传导或者内部发热的方式，加热潮湿材料，实现水分蒸发。之后，热空气吸收水蒸气 (Keey, 1992)。图 21 概述了此干燥过程。

通常情况下，对流干燥的热效率低于 60% (Vasić & Radojević, 2015)。剩余能量通过产品运输设备（例如窑车）的热吸收以及热空气流失或者冷空气的进入而损耗。

图 21：对流干燥过程



来源 (Keey, 1992)

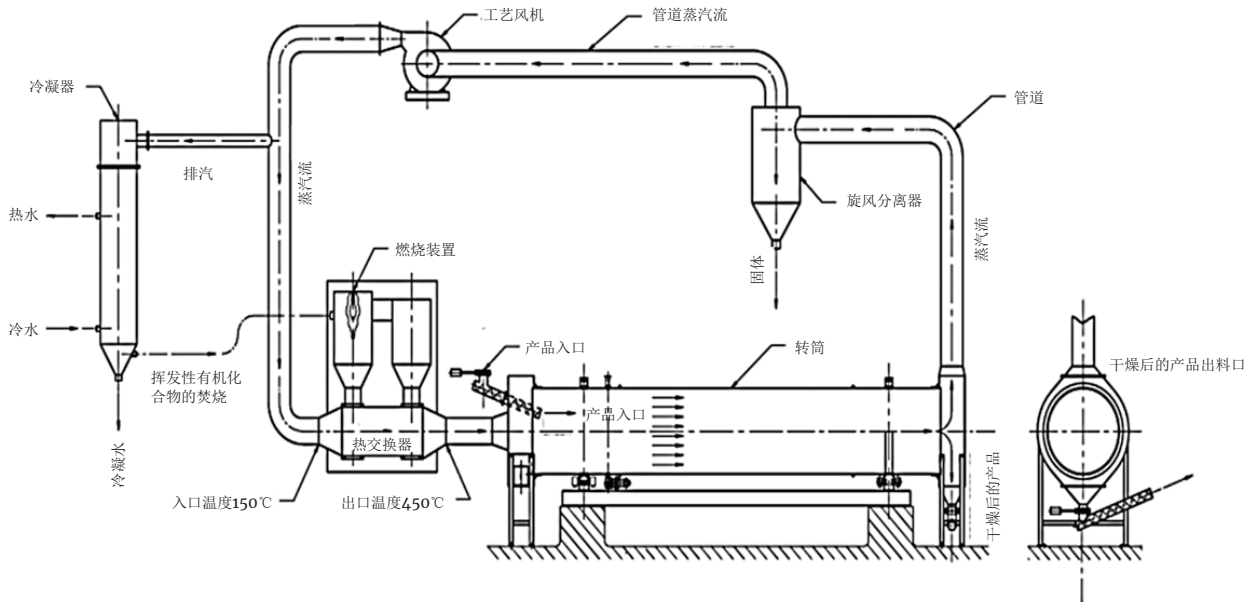
陶瓷行业使用温度在 60 到 200 之间的热空气流作为运载空气，完成干燥过程。干燥过程在总燃料消耗量中的占比高达 30% (UNIDO, 2016)。图 9 和第 22 页已经介绍了一种干燥工艺的方案。

### 4.3.2 建议改进措施

在常规的干燥器中，排气及其中所含热能被释放到环境中，而无空气干燥则是使用了蒸汽循环 (Miguel Castro Oliveira, 2020)。无空气干燥的理念是使用过热蒸汽作为干燥介质，主要优势是在更高温度下，过热蒸汽的传热性优于空气。在干燥过程中去除氧气也会创造独特的环境和运营优势 (Keith, 2016)。干燥循环如图 22 所示。

这一过程的运行温度超过 250，同时在整个自足式、密封、无空气系统内维持大气压力。此闭环环境通过使用过量蒸气中的能量（潜热）实现节能。因为超临界蒸汽循环的温度，所有水分都会在干燥过程中转化成蒸汽态，从材料中脱离。(Keith, 2016)。

图 22：无空气干燥原理图



来源：(Keith, 2016)

### 4.3.3 潜在节能量和温室气体减排量

采用此种措施，与干燥过程相关的热能消耗可能节省 20% 到 50% (Miguel Castro Oliveira, 2020)。热能消耗减少 35% 是切实可行的。

表 12：措施的关键信息——无空气干燥

措施的关键信息——无空气干燥 <sup>16</sup>	
投资成本：	不可用，取决于具体干预
节能量：（热能和电能）	557 兆焦 / 吨 <sub>陶瓷</sub> （155 千瓦时 / 吨）热能需求减少
二氧化碳减排量：	31 千克二氧化碳 / 吨 <sub>陶瓷</sub>
优点：	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 环境和运行优势</li> <li>• 对干燥过程的更好监管</li> </ul>
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 更复杂的过程结构</li> </ul>

<sup>16</sup> 平均产量 235,000 吨 / 年、能耗 6,830 兆焦 / 吨<sub>陶瓷</sub> (UNIDO, 2016)



## 4.4 控制除湿

### 4.4.1 基线情况和能耗说明

章节 4.3.1 详细介绍了控制除湿过程当前的基线情况。

### 4.4.2 建议改进措施

使用除湿窑的一个优势就是以窑内热量的不间断回收利用取代常规窑的放热。大多数水分在除湿机的线圈上凝结，以液体形式去除，而不是通过换气排到窑炉外部。

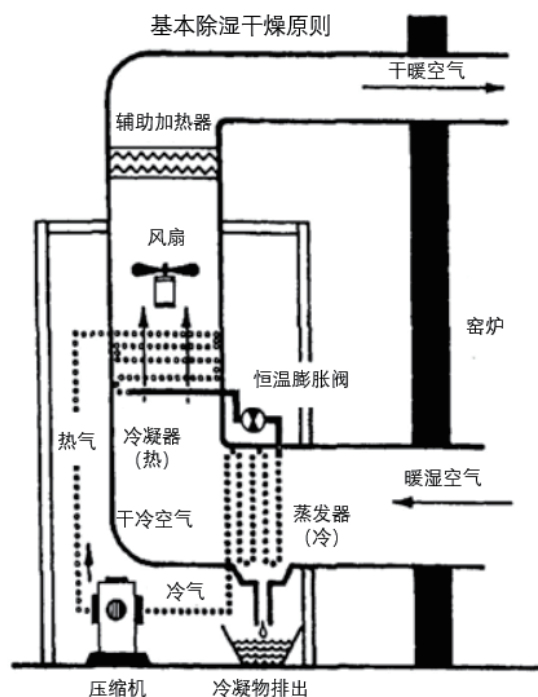
干燥陶瓷的关键因素是湿度和热量。这两个因素都必须受到严格控制，以避免快速蒸发和蒸汽形成。

除湿被认为是控制干燥过程中温度的最佳可行选择。除湿机实质上降低了空气的湿度，将含水量保持在一个非常低的百分比。干燥过程中的控制除湿可以大幅加快干燥时间。它还能减少停工期和废品率，实现运行过程的时间效率和能源效率。

如图 23 所示，温暖潮湿的空气流会吸收干燥室内的湿气，然后被压入压缩机的冷却盘管。空气冷却之后，凝结成水分。之后，将此种空气加热到规定的温度，送入容纳材料的干燥室内进行干燥。

在陶瓷干燥的初始阶段，最理想的情况就是潮湿的热空气承受轻微压力，以便能够均匀地通过负荷。干燥室加热到要求的温度后（取决于具体产品，从 60 到 200 不等），干燥室内的强制对流风机吹动空气通过负荷，气流感应式鼓风机牵引环境空气通过干燥室。随着温度的上升，空气会损失一部分湿气，负荷中的水分会被空气带走。随着循环的推进，越来越多的水分被空气流吸收并去除，直到干燥完成，产品做好烧制准备。

图 23：受控除湿干燥系统



来源：(Hiziroglu, 2017)

### 4.4.3 潜在节能量和温室气体减排量

尽管除湿窑使用的是比燃气成本更高的电能，但因为它们可以回收利用热能，所以依然比常规窑炉更有经济性。使用回收的热能有助于节能，可提高除湿窑的环保性。它也有在烧成过程中减少窑内裂纹或断裂的优势，因此可以预防有缺陷的产品。

表 13：措施的关键信息——控制除湿

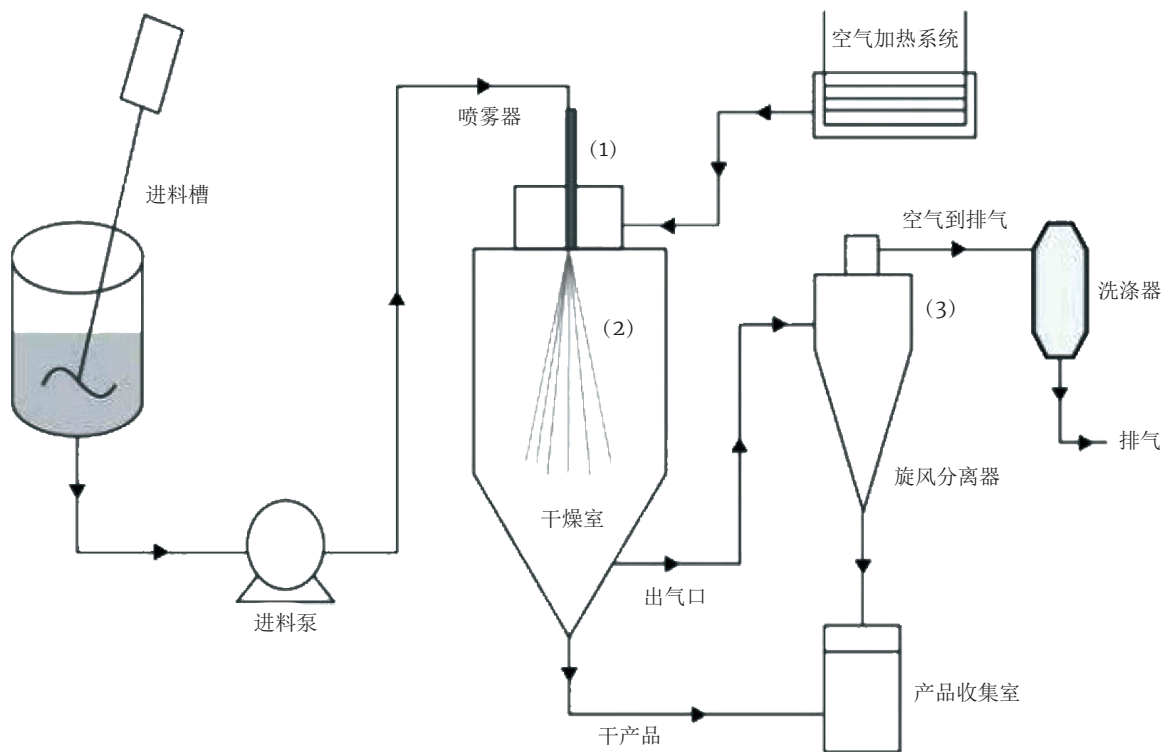
措施的关键信息——控制除湿	
投资成本：	不可用，取决于具体措施
节能量：（热能和电能）	典型节能 80% 352 千兆瓦 / 吨
二氧化碳减排量：	71 千克二氧化碳 / 吨 <sub>陶瓷</sub>
优点：	<ul style="list-style-type: none"> <li>在烧成过程中减少窑内裂纹或断裂</li> <li>节能</li> </ul>
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> <li>-</li> </ul>

## 4.5 喷雾干燥塔内的废气再循环

### 4.5.1 基线情况和能耗说明

在陶瓷行业内，喷雾干燥器已被广泛地用于生产颗粒产品。此过程将纳米粒子液体或浆体的形式将进料喷入干燥室，干燥与干燥介质热气流接触的小液滴，回收排出气流中的粉末产品。下图展示了喷雾干燥过程的方案。

图 24：喷雾干燥过程的示意图。（1）雾化。（2）液滴到颗粒转换。（3）颗粒收集



来源：(Pignatello & Musumeci, 2018)

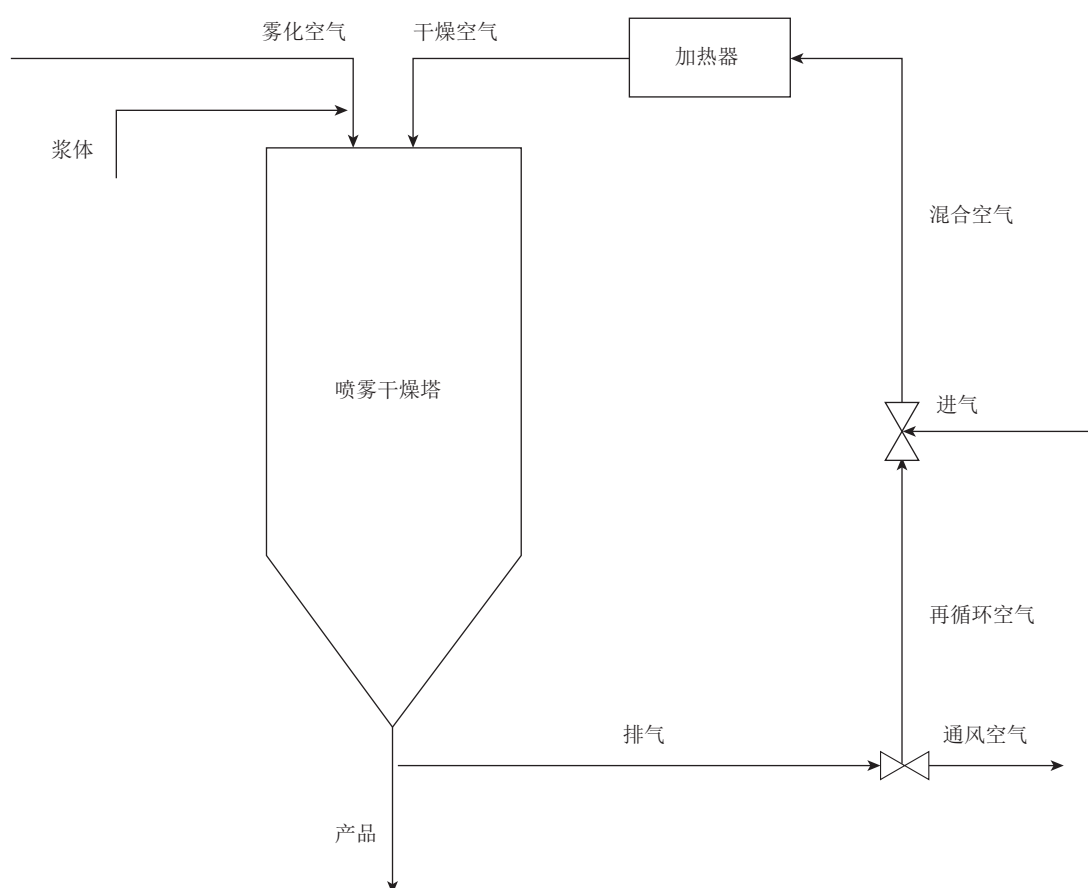
喷雾干燥原理是使用加热空气去除水分。此过程可以分成三个主要阶段描述：雾化、液滴 - 颗粒转换和颗粒收集，相关文献中也会使用四个或五个小步骤进行更具体的描述。如上图所示，浆体用泵送入喷雾器，将液体饲料打碎成细液滴的喷雾。之后，液滴被注入干燥空气室，蒸发掉水分，从而形成干微粒。最后，使用适当的装置，将干燥后的微粒与干燥介质彼此分离，然后收集到料罐中 (Golman & Julklang, Simulation of exhaust gas heat recovery from a spray dryer, 2014)。

此过程比较复杂。其中涉及液滴和干燥介质之间的传热、传质和动量传递，以及部分干燥的团块中的传热与传质。此步骤要求大量能量，以蒸发浆体中的水分。根据最佳可行技术参考文件，墙砖及地砖喷雾干燥过程的典型热能消耗值在 980-2200 千焦 / 千克<sub>产品</sub> (0.27-0.61 千瓦时 / 千克) 之间。

## 4.5.2 建议改进措施

可以回收喷雾干燥塔的废气,用作干燥空气。在再循环过程中,可以安装空气预热器,以进一步利用废气的余热。再循环过程中,废气气流被分成再循环空气和通风孔气流。之后将再循环空气流与环境空气混合,以达到干燥空气所需的湿度。下图展示了喷雾干燥塔中的排气再循环 (Golman & Julklang, 2014)。

图 25: 带排气再循环的喷雾干燥系统的示意图



改编自 (Golman & Julklang, 2014)

### 4.5.3 潜在节能量和温室气体减排量

与现行实践相比，带排气再循环的干燥器可以减少陶瓷粉生产的能耗，最多可减少 **60%**。不同的研究和模拟表明：为了提高喷雾干燥过程的能效，应该提高排气和浆体进料的再循环率。同时，应该提高浆料浓度、进口干燥空气温度和干燥空气流速。换句话说，此过程应在适当降低浆料进料速度、高浆料浓度以及高排气再循环率下运行。

尽管采用余热回收系统的资本成本较高（在欧洲为 **1,500,000 欧元**），但投资回报率让其有利可图。资本成本包括采购设备的成本、安装成本、材料和劳动力成本 (Ndimande, 2020)。

表 14：措施的关键信息——喷雾干燥塔内的排气再循环

措施的关键信息——喷雾干燥塔内的排气再循环	
投资成本：	1500000 欧元
节能量：（热能和电能）	与现行实践相比，热能需求最多减少 60%（264 千瓦时 / 吨 <sub>产品</sub> ）
二氧化碳减排量：	53 千克二氧化碳 / 吨 <sub>陶瓷</sub>
优点：	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 高节能潜力</li> <li>• 简单改变</li> </ul>
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 高投资成本</li> <li>• 空间要求</li> </ul>



## 4.6 干燥空气预热

### 4.6.1 基线情况和能耗说明

有两个要求干燥的不同工艺步骤：“喷雾干燥”和“窑炉干燥”。此种能效措施可能应用于两种干燥工艺，取决于子部门和热量的重复利用度 (Szczeniak, Bauer, & Kober, 2020)。基于所使用的技术，在不同温度下执行干燥过程。在隧道式干燥塔内，温度范围在 300-350 之间，而立式干燥塔内的温度在 200-220 之间 (UNIDO, 2016)。

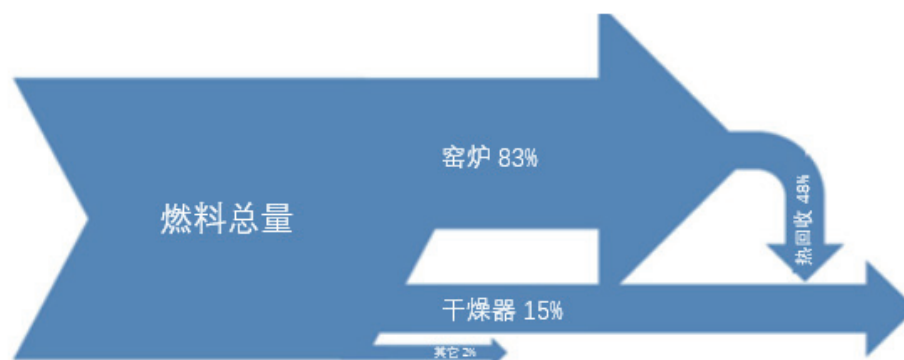
此措施的基线情况是无预热的干燥工艺。干燥工艺所需燃料消耗量最多占到总燃料消耗量的 30%<sup>17</sup>，相当于大约 2,000 兆焦或 580 千瓦时 / 吨<sub>产品</sub><sup>18</sup> (Parsons Brinckerhoff, WSP, DNV GL, 2015)。

### 4.6.2 建议改进措施

作为直接热空气循环利用的替代方式（章节 4.5），可在窑炉冷却区的排气气体流和 / 或热空气流处安装空气 - 气体热交换器，升级系统。针对此用途的典型空气预热器类型是热管式热交换器，因为它与传热能力和经济可行性相关 (Miguel Castro Oliveira, 2020)。

图 26 展示了砖窑生产过程中不同耗能工艺在总燃料消耗中的占比。窑炉和干燥器使用了大多数燃料。热回收经常被用于回收窑炉的冷却空气，送入干燥器。窑炉的排放气体主要被用于高温热回收。但因为高含水量和低温水平，所以干燥器排放空气的热量回收相当难以实现 (Parsons Brinckerhoff, WSP, DNV GL, 2015)。

图 26：典型砌砖生产过程的能量分解，展示从窑炉到干燥器的热回收



来源：(Parsons Brinckerhoff, WSP, DNV GL, 2015)

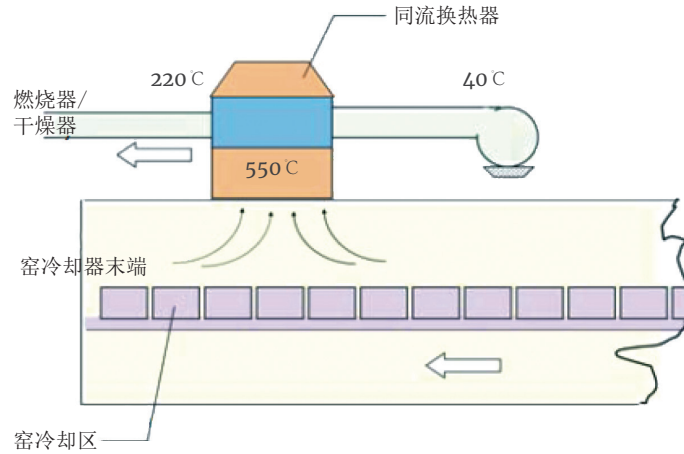
<sup>17</sup> (UNIDO, 2016)

<sup>18</sup> 平均产量 235,000 吨 / 年和平均热能 6,140 兆焦 / 吨。(UNIDO, 2016)

使用烟气必须有适当的热交换器。大型现代窑炉的复杂设计需要优化，保持适当的运行条件，才能在排气气流中落实热交换器 (Szczeniak, Bauer, & Kober, 2020)。

例如，下图所示的热回收系统可在冷却区域落实。从窑尾冷却器末端排出的 550 的热空气收集到同流换热器中，用于对干燥工艺的供气进行预热 (SIDBI, 2019)。

图 27：陶瓷窑热回收系统



来源：(SIDBI, 2019)

### 4.6.3 潜在节能量和温室气体减排量

使用上文描述的再生燃烧热的典型成本大约为每个场地 3,000,000 欧元。因此，二氧化碳排放量可以减少 7% 到 20% (Szczeniak, Bauer, & Kober, 2020)。燃料节约潜力大约为 110,000 立方米燃料 / 年 (Miguel Castro Oliveira, 2020)。考虑到 235,000 吨 / 年的典型产量以及 6,140 兆焦 / 吨的平均热能消耗量，可以实现 25% 的燃料节约 (UNIDO, 2016)。实际上，总热能消耗量预期可以减少 10%。因为使用了额外的风机，平均电能需求会翻倍。

表 15：措施的关键信息——干燥空气预热

措施的关键信息——干燥空气预热 <sup>19</sup>	
投资成本：	13 欧元 / 吨 <sub>陶瓷</sub>
节能量：（热能和电能）	613 兆焦 / 吨 <sub>陶瓷</sub> （170 千瓦时 / 吨）热能需求减少 7 千瓦时 / 吨 <sub>陶瓷</sub> 电能需求增加
二氧化碳减排量：	30 千克二氧化碳 / 吨 <sub>陶瓷</sub>
优点：	<ul style="list-style-type: none"> <li>比直接热空气回收利用的回收率更高</li> </ul>
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> <li>要求适当的热交换器</li> </ul>

<sup>19</sup> 平均产量 235,000 吨 / 年、能耗 6,830 兆焦 / 吨<sub>陶瓷</sub> (UNIDO, 2016)

## 4.7 高效燃烧设备（窑炉）

### 4.7.1 基线情况和能耗说明

如前文所述，窑烧是陶瓷生产的关键过程，也是能耗最大的过程。它控制着成品的很多重要特性。其中包括机械强度、耐磨性、尺寸稳定性、吸水率、耐化学性以及耐火性。主要的燃料是天然气和燃料油。某些情况下，固体燃料、生物气 / 生物质和电力也被用于发热。下表列出了两种不同类型窑炉干燥及烧制的能耗值（单位能耗）：

表 16：连续窑的比能耗（干燥和烧制）

窑炉	单位	比能耗产品		
		黏土砖	面砖	屋顶瓦
快速烧制隧道窑	千焦 / 千克	1,250-3,500	1,590-4,500	2,930-4,605
	千瓦时 / 千克	0.35-0.97	0.44-1.25	0.87-1.28
隧道窑	千焦 / 千克	1,000-2,500	1,600-3,000	1,600-3,500
	千瓦时 / 千克	0.28-0.69	0.44-0.83	0.44-0.97

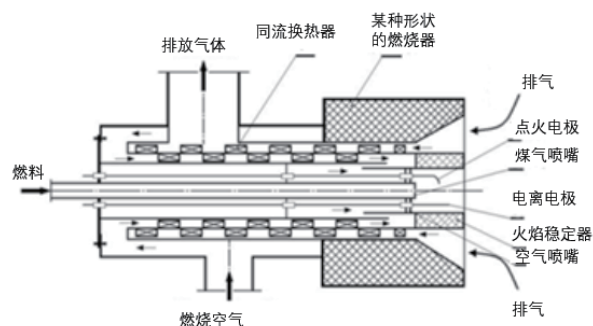
来源：(European Commission, 2007)

## 4.7.2 建议改进措施

现代的窑炉可使用废气对燃烧空气进行预热（范例包括自身预热式和蓄热式燃烧器）。此类窑炉可以取代陶瓷隧道窑和辊道窑中的老旧燃烧器，从而减少燃料消耗量。

此类窑炉系统中使用的热交换器采用碳化硅等高导热性材料制成，配有凹槽和散热翅片。燃烧器置于逆向的冷空气流和热排气流之间。自身预热式燃烧器是标准化的预装配产品，因此价格远低于要求具体实现的单独外部交换器。此外，在维护期间或者出现问题时，唯一的燃烧器必须停止工作，而其他窑炉可能还要继续运行。自身预热式辐射管燃烧器也能大幅减少废热。

图 28：左 - EPR-300- 扩散式自身预热式窑炉



来源：(Rozpondek & Wnek, 2010)

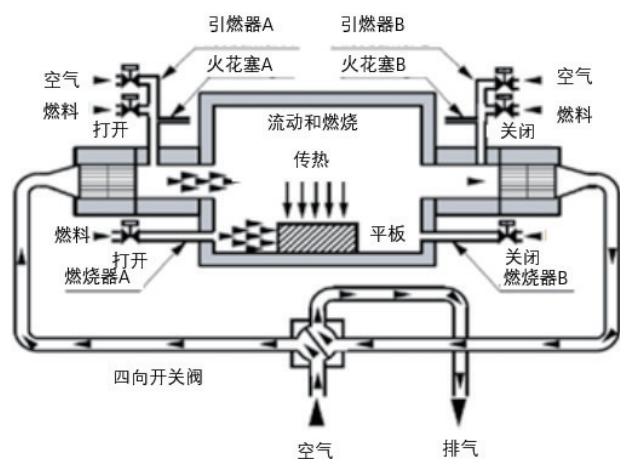
右 - 辐射管自身预热式窑炉



来源：(ESA S.p.A., 2021)

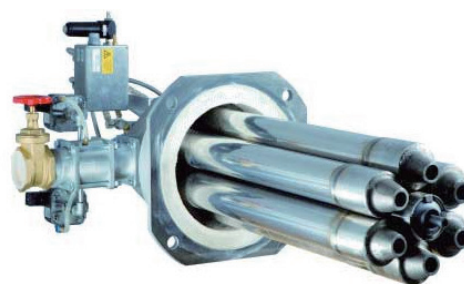
其他类型的高效燃烧器为蓄热式窑炉。此类窑炉使用烟道气强回收技术对燃烧空气进行预热。它使用基于成对燃烧器的系统。此类燃烧器通过介质换热，在排放气体吸气和吹气的交替循环中接收及转移热量。介质或“再生床”是正常情况下使用不同形状和类型的陶瓷材料填充的罐体。

图 29：左 - 蓄热式窑炉的描述



来源：(Elmabrouk, 2011)

右 - REGEMAT 蓄热式窑炉



来源：(CRUX Thermal, 2021)



### 4.7.3 潜在节能量和温室气体减排量

落实此项措施可能导致烧制效率提高大约 10%，自身预热式窑炉的燃料节约 25%–30%，蓄热式窑炉的燃料节约 50%–60% (ESA Pyronics International, 2015) (Tangjitsicharoen, Ratanakuakangwan, Khonmeak, & Fuangworawong, 2013)。

自身预热式窑炉整合了热交换器，使用烟道气焓对燃烧空气进行预热，与使用冷空气相比，二氧化碳和氮氧化物的消耗量和排放量平均减少了 30%。

表 17：措施的关键信息——高效燃烧设备（窑炉）

措施的关键信息——高效燃烧设备（窑炉）	
投资成本：	不可用（要求卖方报价）
节能量：（热能和电能）	自身预热式窑炉燃料节约 25%-30%，蓄热式窑炉节约 50%-60% 自身预热式窑炉 351 千瓦时 / 吨 蓄热式窑炉 702 千瓦时 / 吨
二氧化碳减排量：	最多减少 30%（平均 106 千克二氧化碳 / 吨）
优点：	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 节能</li> <li>• 减少燃料消耗</li> <li>• 减少二氧化碳和氮氧化物排放量（自身预热式燃烧器）</li> <li>• 减少热损耗</li> </ul>
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> <li>• -</li> </ul>

## 4.8 低热惯性窑车和窑具

### 4.8.1 基线情况和能耗说明

在热处理 / 烧结过程中，使用窑具和窑车载运炉内产品。取决于具体应用，窑具（和窑车）加起来占到窑料总质量的 80%。(Noeth & Neubauer, 2017). 更具体地说，生产大多数餐具时，窑具与器皿（陶瓷）的质量比大约为 4: 1；瓷器约为 6:1；卫生洁具为 6:1 或以上。(Agrafiotis & Tsoutsos, 2001). 不论是陶瓷材料还是窑内的任何其他东西都需要加热到要求的温度，这会导致大量能耗和长加工周期。

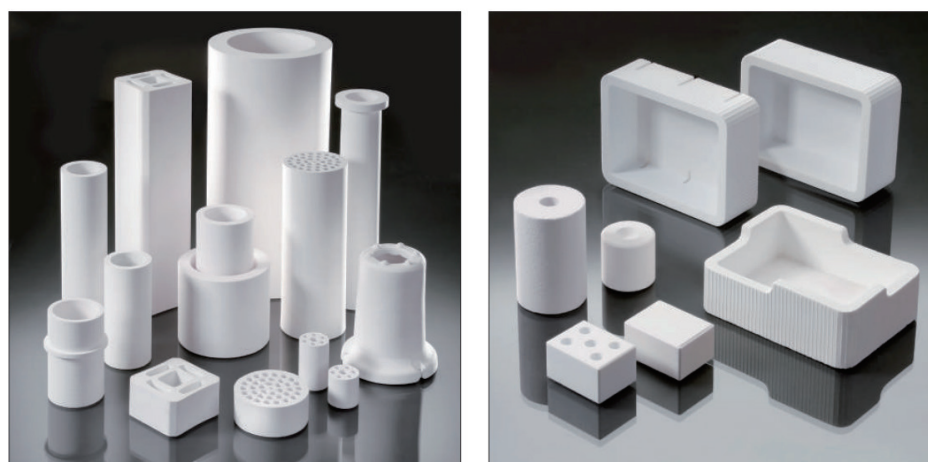
### 4.8.2 建议改进措施

原则上，有两种减少窑车和窑具热质量的可能性：设计方式和材料方式。其中包括以下选择：

- 更薄的窑壁
- 提高孔隙度
- 结合不同材料
- 改进所使用材料的高温特性。

但是，应在材料的最低高温变形和减少窑具材料质量之间权衡。有一些前景可观的产品设计，其中一个范例就是基于氧化铝和莫来石的窑具材料成分<sup>20</sup>。这些代表了具有前景的产品性能，如下图所示。该等材料的总减重范围在 20% 到 50% 之间，同时还能维持甚至改善材料的技术性质 (Noeth & Neubauer, 2017)。

图 30：RAMUL 组成部分（左）和 RAKOR 耐火黏土和烧制器具的范例



来源：(Noeth & Neubauer, 2017)

有一种不同的方式可实现窑车减重 17%（从 1186 千克到 983 千克），即使用超轻<sup>21</sup>空心砖等改进型隔热材料改造窑车。此外，对于放置货架的支撑柱，可使用空心陶瓷涂层管取代耐火砖。每个周期的总燃料节省量估计在 10% 到 13% 之间。此种措施可应用于隧道和梭式窑中使用的的所有窑车。(GEF-UNIDO-BEE-PMU Bureau of Energy Efficiency; Patna Ceramic, 2021)

<sup>20</sup> 由 Paul Rauschert Steinbach GmbH 和 弗劳恩霍夫高温材料设计中心 (Fraunhofer Center for High Temperature Materials and Design HTL) 设计

<sup>21</sup> 改进型隔热材料

下图展示了以轻量型挤压堇青石玻璃棉取代固体堇青石货架的范例。

图 31：典型板材（左）和轻量型板材（右）

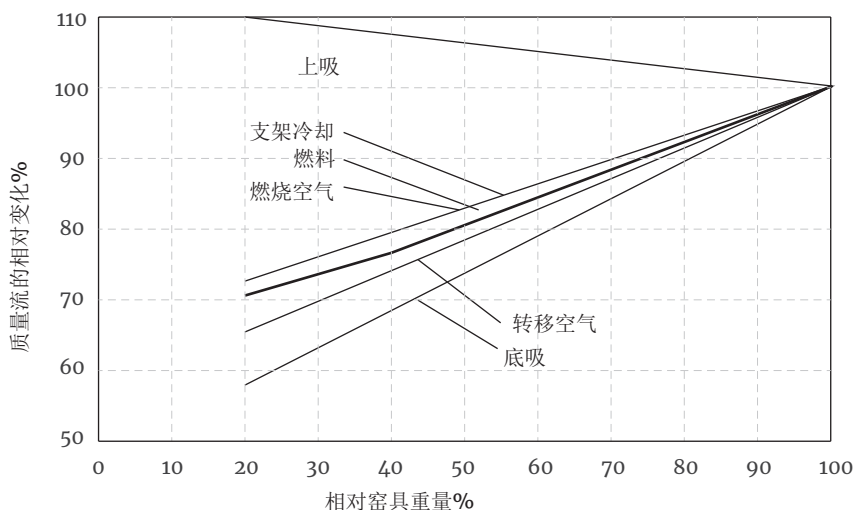


来源：(GCPC ENVIS RP, 2021)

### 4.8.3 潜在节能量和温室气体减排量

下图展示了相对窑具重量与必需燃料、冷却要求和燃烧空气要求的相应变化之间的关联性。分析表明窑具重量减少 80%（即窑具和窑车全面减少 35%）可节省大约 30% 的能源。(Redemann, 2019)

图 32：重量流的变化，取决于窑具重量



改编自：(Redemann, 2019)

表 18：措施的关键信息——低热惯性窑车和窑具

措施的关键信息——低热惯性窑车和窑具	
投资成本：	每个现场 1,500,000-2,000,000 欧元（取决于子部门）(Szczeniak, Bauer, & Kober, 2020)
节能量：（热能）	假设：热能节省 20% 瓷砖生产的范例：大约 780 兆焦 / 吨 <sub>陶瓷</sub> （220 千瓦时 / 吨）热能需求减少 <sup>22</sup>
二氧化碳减排量：	5%-20% 减排（吨二氧化碳）(Szczeniak, Bauer, & Kober, 2020)，平均 44 千克二氧化碳 / 吨 <sub>陶瓷</sub>
优点：	<ul style="list-style-type: none"> <li>更少的运行成本、修理、停工期和维护</li> </ul>
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> <li>材料变化时：需要评估热性能</li> </ul>

<sup>22</sup> 自行计算，基于瓷砖节能 20% 以及热能消耗为 3.92 吉焦 / 吨的假设

## 4.9 电窑和电干燥

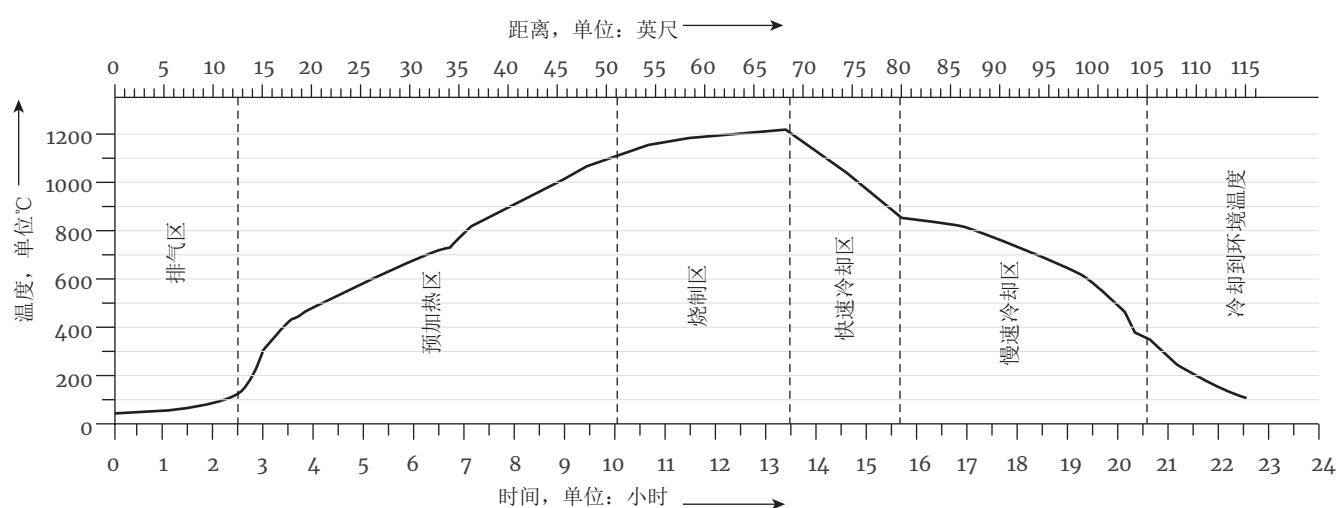
### 4.9.1 基线情况和能耗说明

陶瓷行业使用的窑炉有两类：

#### 连续窑

- 产品以低速通过宽 10 米、高 5 米、长度在 60 到 200 米不等的窑炉。在产品通过不同区域的过程中，温度逐步上升到峰值温度，之后是受控冷却。图 33 展示了隧道窑的最佳烧制周期（Parsons Brinckerhoff, WSP, DNV GL, 2015）。

图 33：隧道窑的最佳烧制时间表



来源：(SIDBI, 2019)

#### 间断窑

- 在此类间断窑中，陶瓷器皿在带门的绝缘外壳内经过烧制循环。此类窑尺寸各异，既有桌面窑，也有要装料、烧制及卸料的房间大小的生产窑。烧制过程的持续时间取决于产品的尺寸和厚度，所需时间可能在几个小时到一周不等（Parsons Brinckerhoff, WSP, DNV GL, 2015）。

以下事实总结了两种类型窑的基线情况：

- 典型情况下，通过燃料燃烧提供热能（Parsons Brinckerhoff, WSP, DNV GL, 2015）。
- 辊道窑、隧道窑或者定期运行窑内的烧制过程可能是一次、两次甚至是三次烧制。烧制过程所需的温度在 1050 到 1150 之间。隧道窑的烧制时间为 20 到 50 个小时，而现代辊道窑只需花费 1 到 2 个小时（SIDBI, 2019）。
- 窑和干燥过程的总能耗比例约为 90%，相当于 6,140 兆焦 / 吨<sub>陶瓷</sub> (1,705 千瓦时)<sup>23</sup>。

<sup>23</sup> 平均产量 235,000 吨 / 年和平均热能 6,140 兆焦 / 吨。(UNIDO, 2016)

#### 4.9.2 建议改进措施

脱碳过程的一个选择是以低碳电力取代化石燃料能源，即改用电窑和电力干燥。但是，目前没有任何可用的大型连续窑的设计能够满足陶瓷行业的需求。大型连续电力窑有待进一步发展，须与制造商合作发明并制定具有广泛适用性的适当设计。总减排量取决于现场使用的电力构成 (Parsons Brinckerhoff, WSP, DNV GL, 2015)。

#### 4.9.3 潜在节能量和温室气体减排量

在欧洲，升级到大型电窑和干燥器的成本大约为每个现场 23,000,000 欧元。因此，总热能消耗可能减少到几乎为零。采购低碳电力结构时，耗电量可能增加六倍以上，但二氧化碳排放量可能下降 80% (Szczeniak, Bauer, & Kober, 2020)。

此类措施实际减少的二氧化碳排放量在很大程度上取决于电力结构的排放系数。鉴于电能消耗量的增加，建议在生产现场安装光伏系统。

表 19：措施的关键信息——电窑和电干燥

措施的关键信息——电窑和电干燥	
投资成本：	100 欧元 / 吨 <sub>陶瓷</sub>
节能量：（热能和电能）	6,140 兆焦 / 吨 <sub>陶瓷</sub> （1,706 千瓦时 / 吨）热能需求减少 1,535 千瓦时 / 吨 <sub>陶瓷</sub> 电能需求增加
二氧化碳减排量：	基于目前为负数的假设，大约为 -600 千克二氧化碳 / 吨 <sub>陶瓷</sub>
优点：	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 减少最终能耗</li> <li>• 可观二氧化碳减排的潜力</li> </ul>
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 更高的电能消耗量</li> <li>• 高投资成本</li> <li>• 目前没有可用的大型连续窑的设计</li> </ul>



## 4.10 微波辅助烧成与干燥

### 4.10.1 基线情况和能耗说明

章节 4.9.1 详细介绍了烧成和干燥过程当前的基线情况。

### 4.10.2 建议改进措施

陶瓷器皿的烧制过程（烧成和干燥）是保障最终产品质量的关键步骤。大型窑的高负荷对从目标产物外部到中间的热传递有负面影响。温度梯度会导致材料内的应力和破坏 (European Commission, 2007)。

研究表明若在陶瓷器皿的烧制过程使用微波能量，从设备外部到中心位置的热分布会更加均匀。结合使用微波能量和天然气或电能等常规加热手段，可以避免窑结构的过度热损耗 (European Commission, 2007)。

目前，只有间断窑使用微波辅助技术。对大型连续窑来说，此种技术依然是实验性的，但其具有巨大的优势：

- 整个烧制周期内的热应力最小化
- 大幅提高产品生产量，即大幅缩短烧制周期
- 大幅减少烧制能耗——但可用于干燥目的的过剩热可能也会减少
- 减少固体的过程损失 / 固体废弃物
- 改进质量，包括机械性能的大幅提升
- 增强粘合剂的去除（从耐火产品中去除）
- 通过减少能耗、提高生产量减少能耗
- 更少的氟化物排放——与产品经受 800 以上温度的时长密切相关

目前，此工艺不论在经济上还是技术上都不成熟：在实现全面应用之前，还需要解决一些技术问题，包括安全方面的问题。从经济的角度来看，此工艺对电能的需求很高 (European Commission, 2007)。

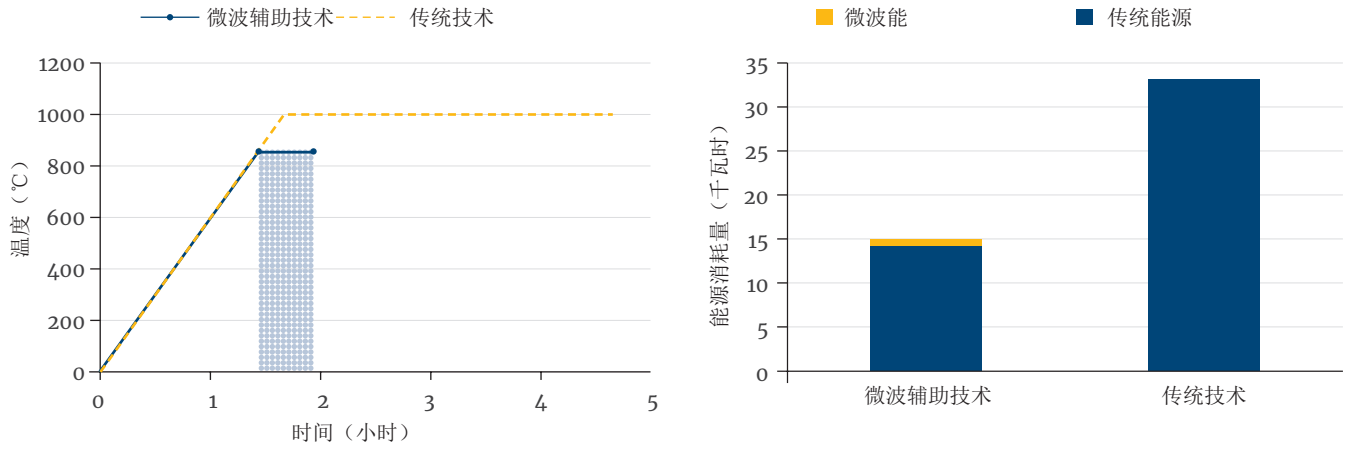
原则上，微波能量也可用于干燥陶瓷器皿。上述针对烧制的优点和缺点也适用于使用微波炉进行干燥的工艺。研究表明微波辅助干燥不适用于复杂的产品形状，仅适用于薄壁形状 (European Commission, 2007)。

### 4.10.3 潜在节能量和温室气体减排量

通过减少 8 倍的烧成时间以及 7 到 30 倍的干燥时间，可以实现燃料节约 (Miguel Castro Oliveira, 2020)。在使用天然气和微波炉混合烧制工艺 (MAGF) 的试点规模的窑炉中，采用这种方式，各种陶瓷产品可实现最高 50% 的节能。此种方式既缩短了生产时间，也减少了氟化物排放——这两项都是当前主要的生产问题 (DTI, 2017)。

根据舒尔曼 (Shulman, 2007) 的研究，此种技术尤其适合细粒度陶瓷，可大幅减少能源使用量。如图 34 所示，使用微波辅助技术 (MAT) 所需的能量不到传统加热技术的 50%。造成这种差别的主要原因在于烧制过程的持续时间，使用微波辅助技术的烧制时间不到两小时，而传统加热技术则需要将近五个小时。

图 34：左侧是烧成过程的温度和持续时间，右侧是总能耗



来源：(Shulman, 2007)

基于上述研究，我们估计热能可节约 50%，电能会增加 5%。因为尚处于实验状态，所以大型工厂的投资成本还无法估算。

表 20：措施的关键信息——微波辅助烧制与干燥

措施的关键信息——微波辅助烧制与干燥 <sup>24</sup>	
投资成本：	不可用
节能量：（热能和电能）	3,070 兆焦 / 吨 <sub>陶瓷</sub> （853 千瓦时 / 吨）热能需求减少 85 千瓦时 / 吨 <sub>陶瓷</sub> 电能需求增加
二氧化碳减排量：	120 千克二氧化碳 / 吨 <sub>陶瓷</sub>
优点： <sup>25</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>更精细的微观结构</li> <li>改进的机械性能</li> <li>更少的加工时间和能耗</li> </ul>
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> <li>技术问题</li> <li>安全方面</li> <li>高电能成本</li> <li>未来的技术仍需要开发</li> </ul>

<sup>24</sup> 平均产量 235,000 吨 / 年、能耗 6,830 兆焦 / 吨<sub>陶瓷</sub> (UNIDO, 2016)

<sup>25</sup> 指定的源无效。(European Commission, 2007)

## 4.11 未来发展展望

根据欧盟议定的脱碳路径<sup>26</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。陶瓷行业差异性较强，产品从地砖、屋顶瓦到餐具、卫生洁具再到工业陶瓷，品类驳杂。在此行业内，总二氧化碳排放量中约有16%为所使用材料（石灰岩、白云岩或菱镁矿）分解过程中固有的过程排放。大部分排放（大约66%）源自于化石燃料的燃烧。除了此报告中描述的措施以外，这还意味着改用低碳燃料是减少温室气体排放的一个主要途径。但是，只有在可以提供低碳电力的情况下，从燃料燃烧切换到电气窑才能实现总体的温室气体减排。

另一个选择是使用生物天然气或者源自生物质或废弃物的合成气取代天然气。这一选择要求改造现有窑炉，其缺点在于生物天然气的成本比天然气昂贵2到3倍。（CeramUnie, 2012）。还有一种选择是采用现场生物质气化炉，将生物质转换为燃料，取代化石燃料。英国执行了一项研究（Parsons Brinckerhoff, WSP, DNV GL, 2015），其中提供的数据指出重黏土行业的资本支出大约为1700万欧元，减排比例为29%。

除了改进工艺本身的选择以外，碳捕集与封存（CCS）等终端治理技术预计也将在二氧化碳的进一步减排情景中发挥重要作用，其减排潜力在50%到90%之间。但是，因为陶瓷行业内公司的规模与水泥和其他行业相比较小，所以目前，此种技术在陶瓷行业内的应用有限。（Axelson, Robson, Wyns, & Khandekar, 2018）

可以在窑炉设备的烟囱内捕集二氧化碳，以长期封存（碳捕集与封存 -CSS）或者之后用于其他目的（碳捕集与利用 -CCU）。

目前有两项技术尚处于研究阶段：燃烧后和含氧燃料技术。要了解此类技术的更多详情，参考系列报告之二《水泥行业国际能效及脱碳技术最佳实践指南》。

<sup>26</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

## 结语

---

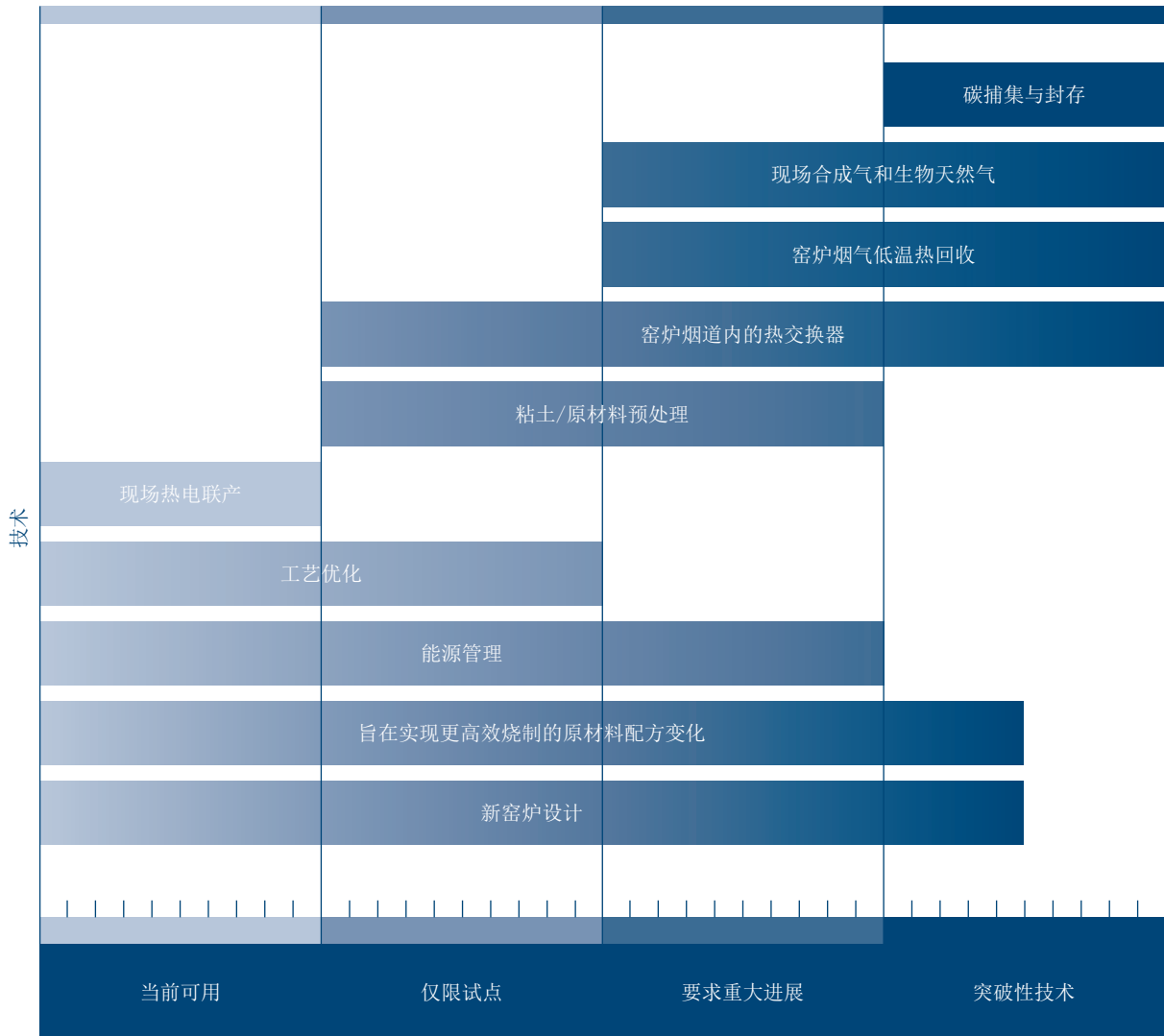


陶瓷生产是一项高能源密集度的工艺，所含产品范围广泛，每吨产品的能源消费从不到**122.9** 千克标准煤（砖瓦和屋顶瓦）到**1720.6** 千克标准煤（工业陶瓷）不等。在整个生产过程中，可采用多种多样的措施提高工厂的能源和资源效率，减少二氧化碳排放。

尽管低于水泥等其他行业，陶瓷生产行业过程排放量依然占到总排放量的**16%**。因此，通过热能和电能效率优化减少二氧化碳排放的潜力有限。本文详细描述了对最大能耗阶段（干燥和烧成过程）的优化，通过优化，可能实现这些工序的大幅节能（节能幅度在大约**130** 到 **700** 千瓦时 / 吨<sub>产品</sub>之间）。进一步的节能潜力在于产品设计变更和燃料替代。

长远来看，碳捕集技术以及现场合成气和生物天然气的使用，有望对二氧化碳减排做出重大贡献 (CeramUnie, 2012)。

图 35：对全球二氧化碳减排的贡献



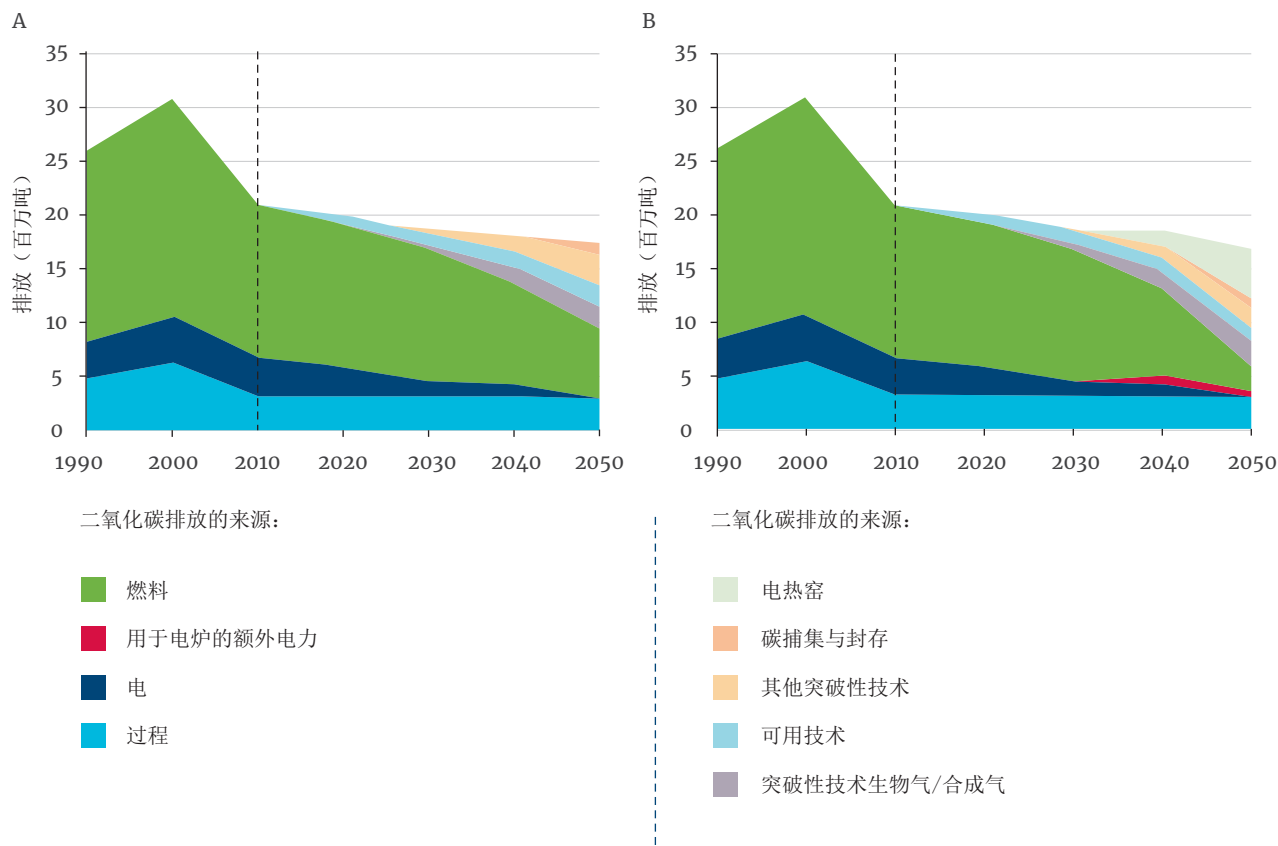
来源：(CeramUnie, 2012)



CeramUnie 开发的欧洲陶瓷行业二氧化碳减排路径表明：从 1990 年到 2050 年，减排潜力最高可达到 65%。模型是基于所有当前可用技术，其基本假设是使用替代燃料的所有障碍均可消除。另一个假设是在 2030 到 2050 年期间，欧洲半数的窑炉将转用电力或合成气 / 生物天然气（附带天然气燃烧）。与 1990 年水平相比，二氧化碳排放量最多可以减少 78%。因为存在过程排放，因此无法实现零排放。（CeramUnie, 2012）

下图描绘了欧洲陶瓷行业二氧化碳排放量和减排量的假设占比：

图 36：陶瓷行业（使用 / 未使用电窑）二氧化碳减排路径



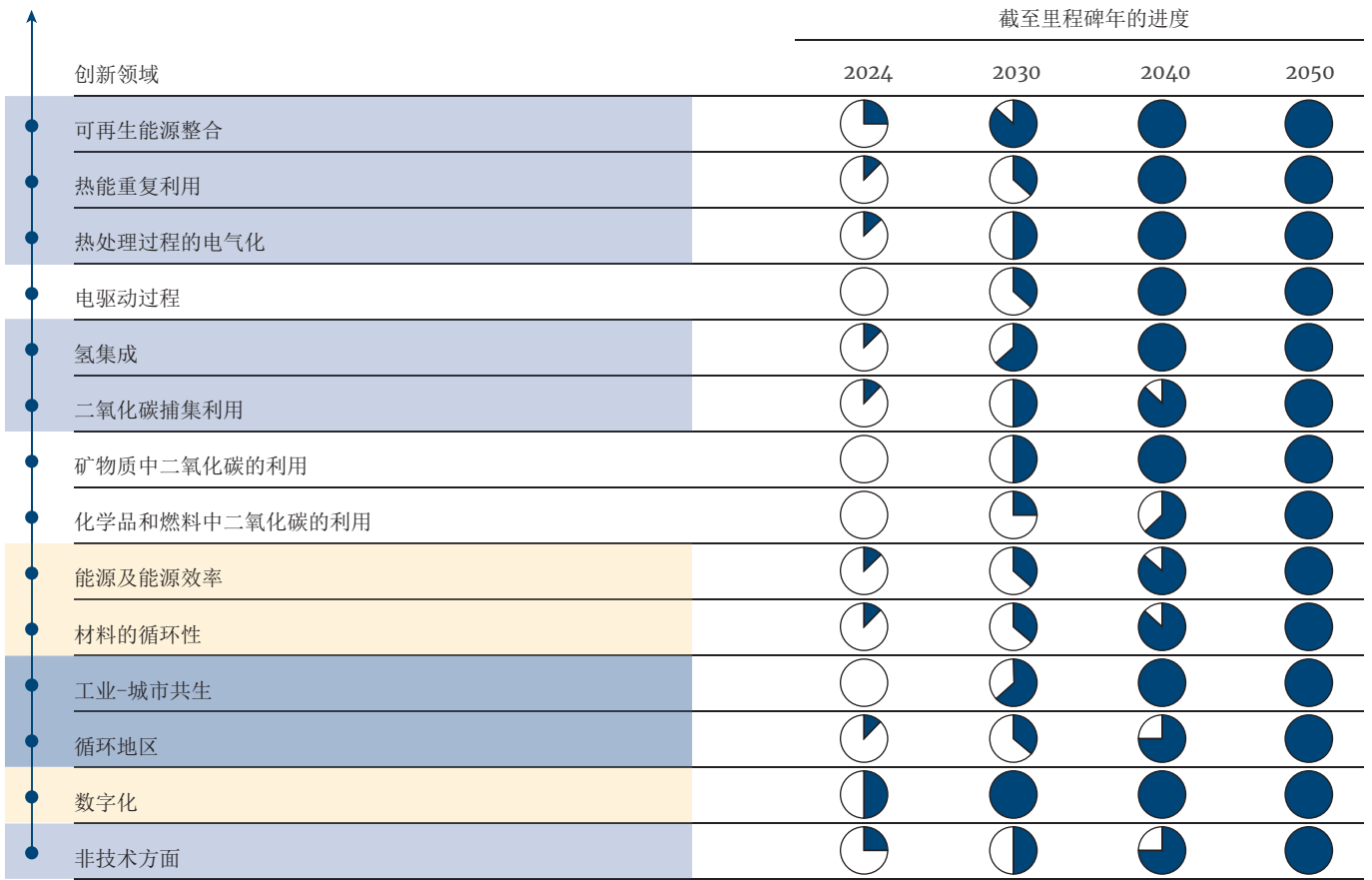
改编 / 翻译自：(CeramUnie, 2012)

“2020 年欧洲陶瓷日”针对的是努力实现绿色经济的加工工业和中小企业，此活动中的演示材料强调：为了实现 2050 年减排目标，需实现所有已确定的降低碳强度及环境影响的途径。

实现进度在下图中以圆圈描绘<sup>27</sup>。到 2040/2050 年，必须充分利用所有类型的措施 / 创新领域，以实现脱碳目标。

<sup>27</sup> 涂满颜色的圆圈代表全面实现，白色圆圈代表毫无实现；部分实现以部分涂色的圆圈表示。更具体的说，进度以 2050 年之前已规划项目（TRL 9）或者投资需求（针对循环地区、数字化和非技术方面等领域）的完成百分比描绘。TRL 基于系统分析评估了新技术的发展状态。为各项技术打分，分值从 1 到 9，代表其先进程度。

图 37：碳减排的创新领域



来源：(Orduña, 2020)

措施关键信息					
措施	投资成本	节能量 (电能)	二氧化碳减排量	优点	缺点
陶瓷原料干法制粉	维护费用节省 2.5 欧元 / 吨和人员, 2 人而非 3 人 (Kocak & Karasu, 2018)	<ul style="list-style-type: none"> <li>1274 兆焦 / 吨陶瓷 (354 千瓦时 / 吨) 热能需求减少</li> <li>19 千瓦时 / 吨陶瓷电能需求减少</li> </ul>	83 千克二氧化碳 / 吨陶瓷	<ul style="list-style-type: none"> <li>不需要干燥电力</li> <li>比湿磨法更少的介质和衬里损耗</li> <li>更少的收缩</li> <li>任意时间启 / 停</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>与湿法相比更多灰尘</li> <li>湿法提供更窄的粒度和更好的均化</li> </ul>
改进陶瓷设计	取决于具体的措施, 例如温度下降 200°C 带来的节能 => 比能耗下降约 15% (卫生洁具 670 千瓦时 / 吨, 135 千克二氧化碳 / 吨)			<ul style="list-style-type: none"> <li>烧制温度下降导致的节能</li> <li>更高的材料孔隙度、更大的吸水性</li> <li>设计 / 形式变更——以更低的材料成本实现可比产品特征</li> </ul>	
无空气干燥	取决于具体干预措施	<ul style="list-style-type: none"> <li>557 兆焦 / 吨陶瓷 (155 千瓦时 / 吨) 热能需求减少</li> </ul>	31 千克二氧化碳 / 吨陶瓷	<ul style="list-style-type: none"> <li>环境和运行优势</li> <li>对干燥过程的更好监管</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>更复杂的过筛结构</li> </ul>
控制除湿	取决于具体措施	<ul style="list-style-type: none"> <li>典型节能 80%</li> <li>352 千瓦 / 吨</li> </ul>	71 千克二氧化碳 / 吨陶瓷	<ul style="list-style-type: none"> <li>在烧制过程中减少窑内裂纹或断裂</li> <li>节能</li> </ul>	
喷雾干燥器内的排气再循环	1500000 欧元	<ul style="list-style-type: none"> <li>与现行实践相比, 热能需求最多减少 60% (264 千瓦时 / 吨产品)</li> </ul>	53 千克二氧化碳 / 吨陶瓷	<ul style="list-style-type: none"> <li>高节能潜力</li> <li>简单改变</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>高投资成本</li> <li>空间要求</li> </ul>
干燥空气预热	13 欧元 / 吨陶瓷	<ul style="list-style-type: none"> <li>613 兆焦 / 吨陶瓷 (170 千瓦时 / 吨) 热能需求减少</li> <li>7 千瓦时 / 吨陶瓷电能需求增加</li> </ul>	30 千克二氧化碳 / 吨陶瓷	<ul style="list-style-type: none"> <li>比直接热空气回收利用的回收率更高</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>要求适当的热交换器</li> </ul>
高效燃烧器	取决于卖方报价	<ul style="list-style-type: none"> <li>自身预热式燃烧器燃料节约 25%-30%, 蓄热式燃烧器节约 50%-60%</li> <li>自身预热式燃烧器 351 千瓦时 / 吨</li> <li>蓄热式燃烧器 702 千瓦时 / 吨</li> </ul>	最多减少 30% (平均 106 千克二氧化碳 / 吨)	<ul style="list-style-type: none"> <li>节能</li> <li>减少燃料消耗</li> <li>减少二氧化碳和氮氧化物排放量</li> </ul>	

措施关键信息					
措施	投资成本	节能量 (电能)	二氧化碳减排量	优点	缺点
低惯性窑车和窑具	每个现场 1,500,000-2,000,000 欧元 (取决于部门) (Szczeniak, Bauer, & Kober, 2020)	<ul style="list-style-type: none"> <li>假设: 热能节省 20%</li> <li>瓷砖生产的范例: 大约 780 兆焦 / 吨陶瓷 (220 千瓦时 / 吨) 热能需求减少</li> </ul>	5%-20% 减排 (吨二氧化碳) (Szczeniak, Bauer, & Kober, 2020), 平均 44 千克二氧化碳 / 吨陶瓷	<ul style="list-style-type: none"> <li>更少的运行成本、修理、停工期和和维护</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>材料变化时: 需要评估热性能</li> </ul>
电窑和电干燥	100 欧元 / 吨陶瓷	<ul style="list-style-type: none"> <li>6,140 兆焦 / 吨陶瓷 (1,706 千瓦时 / 吨) 热能需求减少</li> <li>1,535 千瓦时 / 吨陶瓷电能需求增加</li> </ul>	基于目前为负数的假设, 大约为 -600 千克二氧化碳 / 吨陶瓷	<ul style="list-style-type: none"> <li>减少最终能耗</li> <li>可观二氧化碳减排的潜力</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>更高的电能消耗量</li> <li>高投资成本</li> <li>目前没有可用的大型连续窑的设计</li> </ul>
微波辅助烧制与干燥	不适用	<ul style="list-style-type: none"> <li>3,070 兆焦 / 吨陶瓷 (853 千瓦时 / 吨) 热能需求减少</li> <li>85 千瓦时 / 吨陶瓷电能需求增加</li> </ul>	120 千克二氧化碳 / 吨陶瓷	<ul style="list-style-type: none"> <li>更精细的微观结构</li> <li>改进的机械性能</li> <li>更少的加工时间和能耗</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>技术问题</li> <li>安全方面</li> <li>高电能成本</li> <li>未来的技术开发仍需要开发</li> </ul>

## 参考文献

中国国家发展和改革委员会（2012）。《国家重点节能技术推广目录》。北京。

法国环境与能源管理局（ADEME）（协调员）（2021）。《欧洲能效监测工具项目（ODYSSEE MURE）部门简介工业》。参见 <https://www.odyssee-mure.eu/publications/efficiency-by-sector/industry/cement-unit-consumption.html>

Agrafiotis, C., & Tsoutsos, T. D.（2001年8月）。欧洲陶瓷行业的节能技术：系统回顾。《应用热能工程》，21（12），S. 1231-1249。

ALLPLAN, W.V.（2010）。《奥地利水泥行业能源效率》。

Arumugam, A.（2015年3月）。生物炼制行业的发展及其对纸浆和造纸业的影响。印度纸浆造纸技术协会（IPPTA）：《印度纸浆造纸技术协会季刊》，第92-101页。

西班牙纸浆与造纸协会（ASPAPEL）/帕拉州发电厂（CELPA）（2010）。《桉树牛皮纸浆制造的具体环境问题。》

Ausfelder Florian, S. A.（2018）。《第一产业的灵活性选择，方法、潜力和障碍》。

Axelsson, M., Robson, I., Wyns, T., & Khandekar, G.（2018）。《突破——即将到来的工业低碳技术》。布鲁塞尔自由大学欧洲研究学院。发布时间：2018年7月13日。可登录：[www.ies.be/Breaking-Through\\_Report\\_13072018](http://www.ies.be/Breaking-Through_Report_13072018)

Barrios Gabriel K.P., T. L.（2016年11月10日）。使用离散元素法和多体动力学耦合的高压辊研磨的初步模型。《国际矿物加工期刊》第156卷，S. 32-42。

Bhutania, N., Lindberg, C.-F., Starr, K., & Horton, R.（2012）。《造纸机的能源评估》。Energy Procedia 杂志。

Blum 等人（2009）。《纸浆和造纸行业的最佳可得技术参考文件修订》。慕尼黑：德国联邦环境署。

Bruno Lapillonne, K. P.（2018）。“欧洲能效监测工具项目（ODYSSEE MURE）”指标区域培训 2. 各部门的能源效率趋势：能源效率指数（ODEX）。

欧洲水泥协会（2021年4月19日）。《替代燃料》。参见 <https://lowcarboneyconomy.cem-bureau.eu/5-parallel-routes/resource-efficiency/alternative-fuels/>

CemNet（2018）。《全球水泥报告》。国际水泥评论。

欧洲陶瓷行业协会（2012）。《铺设通往2050年的道路——陶瓷工业路线图》。

欧洲陶瓷行业协会。（2021年6月16日）。参见欧洲陶瓷行业协会事实与数字：<http://cerameunie.eu/ceramic-industry/facts-figures/>

欧洲陶瓷行业协会（2012）。《铺设通往2050年的道路——陶瓷工业路线图》。

中国节能投资公司（2001）。《中国热电联产的市场评估》。能源资源国际公司。



CRUX 热能公司 (2021)。CRUX 热能。参见 <http://www.cruxthermal.com/product-details/self-regenerative-burners/>

德国国际合作机构 (GIZ) (2017)。《城市固体废物管理中的废物变能源选择》。埃施博恩：德国国际合作机构 (GIZ) 有限公司。

德语 (德国) Diethelm Bosold, R. P. (2017)。《混凝土技术水泥数据手册》B 1 9.2017。

丹麦技术研究所 (2017)。《最终报告 - 用微波能源可持续地制造砖和瓦》。丹麦：丹麦技术研究所 (DTI)。

杜拉格 (Durag) 集团 (2019)。www.durag.com. 2019 年 3 月检索，参见 <https://www.durag.com/fr/industries-fr/cement-industry-fr/>

Ecofys, 弗劳恩霍夫系统和创新研究所；生态研究所 (2009)。《2012 年后欧盟排放交易计划中自由分配排放配额的方法 - 陶瓷行业部门报告》。

Elaahi, A., & Lowitt, H. (1988)。《美国纸浆和造纸行业：能源视角》。华盛顿特区：美国能源部。

Elmabrouk, E. (2011)。《通过改善燃烧增强热处理炉的传热》。英国：谢菲尔德大学。

能源转型 (2021)。能源转型。参见 [energytransition.org](http://energytransition.org)

ESA 派诺尼科 (ESA Pyronics) 国际公司。 (2015)。《自换热式高速自由火焰燃烧器，Pyronics 国际公司 - SAID》。参见 Esapyronics: <http://www.esapyronics.com/wp-content/uploads/2014/12/E3901FE.pdf>

ESA S.p.A. (2021)。ESA PYRONICS。参见 esapyronics: <http://www.esapyronics.com/technology/technology-portfolio/self-recuperative-burners/>

Estrela, C., Sousa-Neto, M. D., & Guedes, O. A. (2012)《根管穿孔密封剂材料中氧化钙的特性》。巴西。

欧盟 Merci. (2018)。《技术分析 - 陶瓷行业，基于真实案例、实现有效实施支持产业能源效率的政策和措施的欧盟协调的方法和程序，WP4：实施效率项目的图片》。

欧洲水泥研究学院，水泥可持续发展倡议编辑 (2017)。《水泥生产中最先进技术的发展：前瞻》；水泥可持续发展倡议行动组织 (CSI) / 欧洲水泥研究院 (ECRA) —— 技术论文 2017。杜塞尔多夫，日内瓦：参见：<http://www.wbcscement.org/technology>。

欧盟委员会 (2003)。《垃圾衍生燃料，目前的做法和前景》。布鲁塞尔。

欧盟委员会 (2007)。《关于最佳可利用技术的参考文件 - 陶瓷制造行业》。

欧盟委员会 (2018, 最后更新于 2020 年 12 月)。《所有欧洲人的清洁能源方案》。参见 [https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans\\_en#energy-efficiency](https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans_en#energy-efficiency)

欧盟委员会（2021）。委员会执行条例，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 年期间自由分配排放配额的修订基准值（草案）。

欧盟委员会联合研究中心（JRC），能源和运输研究所（2011）。欧洲战略能源技术计划（SET 计划）的 2011 年技术地图。

欧盟委员会，数字绿色证书（D.-G.C.）（2021）。《欧盟排放交易计划第四阶段 2021-2025 年的基准值更新，基准曲线和关键参数》。

Ewijk, S. v., Stegemann, J. A., & Ekins, P.（2021）。全球纸浆和纸张回收的有限气候效益。《自然可持续性》4, S. 180-187。

F.Hutter.（2010）。与在德国 RCF DE 2 的造纸和纸板厂最近建造的 CCGT 工厂的环境性能有关的数据。

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。联合国环境规划署与丹麦技术大学伙伴关系。

关注能源问题（2006）。《纸浆和纸张能源最佳实践指南》。威斯康星州麦迪逊。

能源经济研究所（FfE）（2019）。《在水泥生产中减少二氧化碳》。

弗劳恩霍夫系统与研究所（Fraunhofer ISI）（2018）。《德国能源效率趋势与政策——基于 ODYSSEE 和 MURE 数据库的分析》。

Gardner（2008）。《蒸汽疏水阀和冷凝水系统：如何最大限度地提高蒸汽系统的安全性、可靠性和效率》。阿姆斯特丹。

GCPC ENVIS RP.（13. 07 2021）。《改造窑炉车以有效利用热量》。参见 [http://www.gcp-cenvis.nic.in/Ceramic/Modifying\\_Kiln\\_Cars\\_for%20Efficient\\_Use\\_of\\_Heat\\_\(Low%20Thermal%20Mass\)/1.pdf](http://www.gcp-cenvis.nic.in/Ceramic/Modifying_Kiln_Cars_for%20Efficient_Use_of_Heat_(Low%20Thermal%20Mass)/1.pdf)

GEF-UNIDO-BEE-PMU 能源效率局；巴特那陶瓷（2021 年 7 月 13 日）。《在印度选定的微型、小中小企业集群中促进能源效率和可再生能源》。参见 <https://beeindia.gov.in/sites/default/files/7%20-20Reducing%20the%20dead%20weight%20of%20the%20kiln%20car%20using%20low%20mass%20kiln%20furniture.pdf>

Golman,B.,& Julklang,W.（2014 年 9 月 26 日）。通过废气再循环对喷雾干燥器的热回收进行分析。《能源转换与管理》。

Golman,B.,& Julklang,W.（2014）。《模拟喷雾干燥器的废气热回收》。泰国：苏兰拉里科技大学化学工程学院。

Hagelqvist, A.（2013）。《纸浆和造纸厂的污泥用于沼气生产》。卡尔斯塔德大学研究。

Hand, A.（2007）。水泥行业使用替代燃料的技术选择。KHD。

Hardy, O. (2021年4月27日)。《水泥工业中使用的空气分离技术》。参见 Slide Player: <https://slideplayer.com/slide/12697794/>

Hidayat, M. (2013)。Wordpress。参见 <https://maulhidayat.wordpress.com/2013/02/25/suspension-preheater-2/>

Hiziroglu, S. (2017)。窑炉干燥木材的基本方面

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>

国际能源署 (2018)。《水泥行业低碳转型技术路线图，水泥行业的低碳转型》。

国际金融公司 (2017)。《提高水泥厂的热能和电能效率——国际最佳实践、资本和运营成本》。

全球环境战略研究所 (IGES) (2021)。国家政府发布的或作为清洁发展机制标准化基线采用的电网排放系数 (GEF) V10.10。

国际劳工组织百科全书 (2021)。《工作场所健康与安全信息》。参见 <http://www.ilocis.org/documents/chpt72e.htm>

水泥设备的无限性 (2021)。《水泥设备的无限性》。参见水泥设备的无限性: <https://www.cementequipment.org/>

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>

前瞻性技术研究所 (2013年)。《联合研究中心 (JRC) 参考报告》。西班牙。

国际金融公司 (IFC) (2017)。《提高水泥厂的热能和电能效率：国际最佳实践》。华盛顿特区。

国际金融公司 (IFC) (2018)。《土耳其水泥行业的余热回收》。世界银行集团。

Katharina Fallmann, L. W. (2018)。《奥地利工厂瓷器产品生产的最新技术水平》。联邦环境局。

Keey, R. B. (1992)。《松散和颗粒状材料的干燥》。Hemisphere, 纽约。

Keith. (2016)。《无气干燥技术——开发未来的干燥技术》。澳大利亚 :Keith 工程。

Kocak, A., & Karasu, B. (2018)。干式和湿式路线瓷砖生产之间的差异。《El-Cezeri 科学与工程学报》，第 6 卷；2009 第 1 期，S. 8-23。

Kollenberg, W. (2013)。《北威州的陶瓷工业 -- 效率提升的潜力 (代表北威州资源效率机构)》。

Kramer, K., Masanet, E., Xu, T., & Worrell, E. (2009)。《纸浆和造纸业的能源效率改进和成本节约机会》。加利福尼亚州伯克利：劳伦斯伯克利国家实验室。

栗田 (2021)。栗田水工业有限公司。参见 [https://www.kurita.co.jp/english/our\\_business/business/pulp\\_and\\_paper.html](https://www.kurita.co.jp/english/our_business/business/pulp_and_paper.html)

Lemmetti, A., Murtovaara, S., Leiviskä, K., & Sutinen, R. (1999)。《影响牛皮纸浆的烹饪变量》。奥卢大学。

莱恩泰科 (Lenntech) (无日期)。莱恩泰科。参见 <https://www.lenntech.de/papier-und-pulpindustrie.htm>

Luiten, E. (2001)。超越能源效率。工业加工技术发展中的行为者、网络和政府干预。荷兰，乌得勒支。

M.Pohl, D. A., C. Obry Buzzi Unicem S.p.A., C. M., & K.-H.Zysk, L. G. (2012)。《立式辊磨机研磨粒化高炉矿渣和复合水泥的操作经验》；文章发表在 2012 年 3 月的《国际水泥》上。德国，杜塞尔多夫。

MacGregor, M. (1989)。《1989 年湿压研究。历史的视角，分析和评论》。剑桥：造纸基础，第九届基础研究研讨会论文集。

Martin, N., Anglani, N., Einstein, D., Khrushch, M., Worrell, E., & Price, L. (2000)。《美国纸浆和造纸业提高能源效率和减少温室气体排放的机遇》。加利福尼亚州：劳伦斯伯克利国家实验室。

Mezquita, A., Monfort, E., & Salvador Ferrer, D. G.-E. (2017 年 4 月)。如何减少瓷砖生产原料制备过程中的能源和水的消耗。干法与湿法路线。《清洁生产杂志》。

Miguel Castro Oliveira, M. I. (2020 年 11 月)。关于陶瓷行业以废热回收为重点的能源效率进展、技术和战略的评论。《能源》2020, 13, 6096。

Mittal, A., Saxena, A., & Mohapatra, B. (2020)。富氧技术——改进固体燃料燃烧和可持续环境的创新。在 K. Sangwan, & C. Herrmann, 《增进未来技能和创业精神》(S. 13-19)。施普林格，卡姆。

Mota Neto, J. (2008)。应用于进料为天然气的立式陶瓷干燥器的温度和化学计量的同步控制。机械工程的硕士论文，巴西，里约热内卢。南里奥格兰德联邦大学。

N.Adams, T. (无日期)。石灰窑的原理和操作。华盛顿。

NAF 控制阀 (2021)。福斯公司 (Flowserve)。参见 <https://naf.se/applications/chemical-pulping/fiberline/cooking/batch-digester/>

国家空气与河流改善委员会 (NCASI) (2001)。《减少二氧化碳排放的技术：纸浆、纸张和木制品制造商的资源手册》。三角洲研究园。

Ndimande, A. M. (2020)。《奶粉喷雾干燥过程中的热量回收》。南非：德班理工大学。

新能源产业技术综合开发机构 (NEDO) (2003)。《高效利用造纸污泥燃烧余热的示范项目》。

新能源产业技术综合开发机构 (2008)。《日本节约能源 / 减少温室气体排放的技术》。日本。

Noeth, A., & Neubauer, G. (2017)。用于轻质窑具的高温陶瓷。《陶瓷应用》(5), S.73-77。

Nygårds, E. (2016)。《用于模拟纸巾纸机压区的实验设备》。卡尔斯塔德大学健康、科学和技术学院。

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

Oliveira, M. C., Iten, M., Cruz, P. L., & Monteiro, H.（2020 年 11 月）。以余热回收为重点的陶瓷行业能源效率进展、技术和战略回顾。《能源》2020, 13, 6096。

Oorja（2021）。Oorja。参见从水泥窑中回收余热：<http://www.oorja.in/waste-heat-recovery-from-cement-kiln/>

Orduña, À.（2020）。加工工业和中小企业为绿色经济开发解决方案，SPIRE。演讲：欧洲陶瓷日，2020 年 11 月 17 日的虚拟活动。

Parsons Brinckerhoff, WSP, DNV GL.（2015）。《工业脱碳和能源效率到 2050 年路线图——陶瓷行业》。

Pignatello, R., & Musumeci, T.（2018）。《生物材料、物理和化学——新版》。意大利：意大利，卡塔尼亚大学。

Price, L., Zhou, N., Lu, H., Sambeek, E. v., Yowargana, P., Shuang, L., & Kejun, J.（2012）。《鼓励山东省水泥行业能源效率最佳实践的政策选择》。奥兰多：欧内斯特奥兰多劳伦斯伯克利国家实验室。

泵和系统（2021）。《泵和系统》。参见 <https://www.pumpsandsystems.com/>

Redemann, T.（2019）。《根据数学过程模型为烧制陶瓷材料开发创新的隧道窑概念》，获得工程博士学位的学位论文。奥托·冯·格里克马格德堡大学过程与系统工程学院批准。

Routschka, G., & Wuthnow, H.（2012）。《耐火材料手册》。火山出版社（Vulkan-Verlag GmbH）。

Rozpondek, M., & Wnęk, M.（2010）。《热力设备中自身预热式和自身蓄热式烧嘴的应用方面》。波兰：西里西亚技术大学。

斯堪的纳维亚沼气（2019）。《沼气生产中的工业废水处理》。阿姆斯特丹。

Schneider, M.（2018）。《ECRA 的水泥碳捕获项目》。布鲁塞尔：ECRA/CEMCAP/LEANK-ER 研讨会，布鲁塞尔，2018 年 10 月 17 日。

Schorcht, F., Kourti, I., Scalet, B. M., Roudier, S., & Sancho, L. D.（2013）。《水泥、石灰和氧化镁生产的最佳可行技术（BAT）参考文件》。2010/75/EU 工业排放指令。卢森堡：联合研究中心（JRC）参考报告。

Schorcht, F., Kourti, I., Scalet, B. M., Roudier, S., & Sancho, L. D.（2013）。《水泥、石灰和氧化镁生产的最佳可行技术（BAT）参考文件》。

Shahri, N.（2020）。阿尔及利亚水泥行业实施废物焚烧系统的可行性研究。硕士论文。维也纳。

深圳 Gozuk（2021）。Gozuk。参见 <http://www.gozuk.com/applications/vfd-for-pumps.html>



- Shulman, H. (2007)。《用于产品改进和能源的微波辅助技术》。美国, 纽约: Ceralink。
- SIDBI. (2019)。《陶瓷行业的节能措施》。
- Silva, W., & Farias, V. (2013)。粘土板的干燥。二维扩散模型的实验测定和预测。
- Staudt, J., Partners, A. T., Yelverton, W., Witosky, M., Torres, E., EPA, U., ... 国际, R. (2010)。《ISIS 纸浆和造纸厂的排放控制》。
- 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: 欧盟委员会。
- 瑞典能源局 (2008)。《瑞典纸浆厂生物炼制厂, 对未来可能性的展望》。
- Szczeniak, J., Bauer, C., & Kober, T. (2020)。《工业——陶瓷》。DEEDS。
- Tangjitsicharoen, S., Ratanakuakangwan, S., Khonmeak, M., & Fuangworawong, N. (2013)。《不同规格再热炉蓄热式和预热式烧嘴的调查》。国际机械与机电工程杂志。
- 水泥粉磨办公室 (2021 年 4 月 27 日)。水泥粉磨办公室。参见 [www.thecementgrindingoffice.com](http://www.thecementgrindingoffice.com)
- 工业生产力研究所 (2016)。纸浆和纸张。新德里。
- Tobias Fleiter, B. S. (2013)。《工业加工技术的能源消耗和二氧化碳排放——节能潜力、障碍和工具》。弗劳恩霍夫出版社。
- 美国环境保护局, 部门政策和规划司, 空气质量规划和标准办公室 (2010)。《减少波特兰水泥行业温室气体排放的现有和新兴技术》。北卡罗来纳州。
- 教学中的环境 (2018 年 8 月)。《纸张生产、纸张消费及环境后果》。参见教学中的环境: <https://www.umwelt-im-unterricht.de/hintergrund/papierherstellung-papierkonsum-und-die-folgen-fuer-die-umwelt/>
- 联合国工业发展组织 (2016)。《陶瓷部门的工业能源效率基准报告》, 由 Amr Osama 博士和 Fatheya Soliman 博士编写。工发组织。
- UPM. (2020)。《优质纸张的制造方法》。
- Uwe Weber, H. G. (2019)。《数字双胞胎 -- 为未来的生态系统铺平道路》。
- 前言 (2021)。前言。参见 <https://www.valmet.com/media/articles/up-and-running/performance/FPSPUG17/>
- Vasić, M., & Radojević, Z. (2015)。非等温干燥过程的优化——粘土砖的干燥。IOP 会议。
- 德国工程师协会准则 (2003)。《水泥厂减少排放》。德国。

德国水泥工业协会（2021年4月15日）。德国水泥工业协会在线。参见 <https://www.vdz-online.de/zementindustrie/zahlen-und-daten/zementindustrie-in-deutschland>

德国水泥工业协会（2020）。《德国水泥工业环境数据 2019》。杜塞尔多夫。

沃格特陶瓷（2021年7月13日）。沃格特生产过程。参见 [https://www.vogt-ceramic.de/tl\\_files/medien/leistungen/Tabellen\\_2016/ENG/Vogt\\_Production-process.pdf](https://www.vogt-ceramic.de/tl_files/medien/leistungen/Tabellen_2016/ENG/Vogt_Production-process.pdf)

Wahlstrom, B.（1991）。《压榨 -- 造纸技术的技术现状和未来可能性》。

维纳博良（2021年7月19日）。回填砖。参见 <https://www.wienerberger.de/informationen/wand/verfuellte-ziegel.html>

世界可持续发展工商理事会（2015）。《水泥生产中的燃料和原料共同加工指南》。日内瓦。

Worrell, E., Galitsky, C., & Price, L.（2008）。《水泥行业改进能源效率的机会》。劳伦斯伯克利国家实验室。

Worrell, E., Kermeli, K., & Galitsky, C.（2013）。《水泥生产提高能源效率和节约成本机遇》。能源之星® 能源和工厂经理指南。

Worrell, E., Kermeli, K., & Galitsky, C.（2013）。《水泥生产提高能源效率和节约成本机遇》。美国环境保护署。能源之星® 能源和工厂经理指南。

Wua, W.-N., Xiao-YanLiu, Hu, Z., Zhang, R., & Lua, X.-Y.（2019）。通过评估窑壳的热损失及其影响因素，提高水泥熟料煅烧过程的可持续性。中国案例研究。《清洁生产》，132-141。

《国际水泥石灰石膏（ZKG）》——建筑出版局（Bauverlag（2021）。ZKG。参见 [https://www.zkg.de/en/artikel/zkg\\_Continuous\\_surveillance\\_of\\_kiln\\_shell\\_temperature\\_1548108.html](https://www.zkg.de/en/artikel/zkg_Continuous_surveillance_of_kiln_shell_temperature_1548108.html)

建材行业能源管理体系教程。2021年，中国建材工业出版社。

《高耗能行业重点领域能效标杆水平和基准水平（2021年版）》。2021年11月15日，中国国家发展改革委等部门发布。

《新时代的中国能源发展》白皮书（2020）。2020年，国务院新闻办发布《新时代的中国能源发展》白皮书。

中国能源统计年鉴 2019：中国 2018 年工业分行业终端能源。

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

网站



微信

