



Federal Ministry
for Economic Affairs
and Climate Action



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

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二



giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

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》出版物的第二本，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/Banana Republic（封面）
Adobe Stock/Cozyta（第9页）
Adobe Stock/Cozyta（第13页）
Adobe Stock/Banana Republic（第19页）
Adobe Stock/Mynaral Kazakhstan（第29页）
Shutterstock/Hannu Rama（第72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年前实现碳中和的重大战略决策，节能与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%。

水泥行业对全球和中国实现脱碳目标十分重要。应对水泥行业脱碳的挑战需要行业 and 政策的共同努力，包括加强节能、改用低碳燃料、降低熟料与水泥的比率以及实施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。本报告由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》报告的第二份报告。它介绍了水泥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。希望本指南可以带来更多的启发与灵感，帮助水泥企业找到最优节能方案，引领我们走向更清洁的未来。



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	19
◆ 3 水泥行业概览	20
3.1 生产流程与工艺步骤简介	21
3.2 部门能源效率的现状与发展	26
3.2.1 欧洲和德国水泥行业的能源统计和基准	26
3.2.2 能量流向	30
3.2.3 能源密集型工艺流程	31
◆ 4 水泥行业能效提升措施	32
4.1 高效分离器和分级器	33
4.1.1 基线情况和能耗说明	33
4.1.2 建议改进措施	34
4.1.3 节能和温室气体减排潜力	35
4.2 水泥混合材料	36
4.2.1 基线情况和能耗说明	36
4.2.2 建议改进措施	38
4.2.3 节能和温室气体减排潜力	39
4.3 替代燃料协同处置	40
4.3.1 基线情况和能耗说明	40
4.3.2 建议改进措施	41
4.3.3 节能和温室气体减排潜力	43
4.4 烧成系统控制优化	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 节能和温室气体减排潜力	46
4.5 窑体热损耗减少（改进型耐火材料）	47
4.5.1 基线情况和能耗说明	47
4.5.2 建议改进措施	48
4.5.3 节能和温室气体减排潜力	49
4.6 悬浮预热器的低压降旋风分离器	50
4.6.1 基线情况和能耗说明	50
4.6.2 建议改进措施	51
4.6.3 节能和温室气体减排潜力	52
4.7 富氧燃烧技术	53
4.7.1 基线情况和能耗说明	53
4.7.2 建议改进措施	53
4.7.3 节能和温室气体减排潜力	55

4.8	熟料冷却器中的优化余热回收	56
4.8.1	基线情况和能耗说明	56
4.8.2	建议改进措施	57
4.8.3	节能和温室气体减排潜力	57
4.9	最后粉磨的立式辊磨机	59
4.9.1	基线情况和能耗说明	59
4.9.2	建议改进措施	59
4.9.3	节能和温室气体减排潜力	62
4.10	进一步发展展望	63
◆ 5	结语	64
◆ 6	参考文献	68

图目录

图 1: 选定措施的节能潜力	12
图 2: 终端能源消费总量结构配比	15
图 3: 工业部门终端能源消费结构	16
图 4: 欧盟工业部门能源效率指数	17
图 5: 德国工业部门能源效率指数	18
图 6: 采用不同方法的水泥生产阶段	21
图 7: 干法水泥生产工艺	22
图 8: 旋风分离器中生料和废气的温度曲线	24
图 9: 不含预煅烧炉的窑系统（左）、含预煅烧炉和燃烧室的窑系统（右）	25
图 10: 欧洲的水泥生产数据	26
图 11: 欧洲的单位能耗，吨油当量 / 吨水泥	27
图 12: 单位能耗与熟料 / 水泥生产比例的相关性，欧洲 2018	28
图 13: 德国的能耗占比	29
图 14: 能量与物质流向概览	30
图 15: 相关工艺步骤能源消耗情况	31
图 16: 高效分级器	34
图 17: 2DS 情景下水泥生产的全球热能构成	40
图 18: 窑和旋风分离器结构	42
图 19: 窑系统控制的控制点和参数	45
图 20: 回转窑壳表面温度监测	47
图 21: 通过窑壳的每日热损耗（2500 吨 _{熟料} / 天）	47
图 22: 水泥厂内不同应用区域使用的耐火材料	48
图 23: 通过一级旋风分离器的压降	50
图 24: 增加低压旋风分离器	51
图 25: 有富氧及无富氧工艺的窑炉内的火焰轮廓	53
图 26: 使用富氧技术的不同工厂实现的产量提升	54
图 27: 使用富氧技术的不同工厂实现的生产收益	54
图 28: 废热回收系统。左侧使用蒸汽朗肯循环（SRC），右侧使用有机朗肯循环（ORC）	57
图 29: 废热回收安装成本，美元 / 千瓦电	58
图 30: 球磨机（左）和立式辊磨机（右）	59

图 31: 立式辊磨机	60
图 32: 高压 /Gutbett 辊磨机	60
图 33: 球磨机和立式磨机的比能耗 (千瓦时 / 吨)	62
图 34: 二氧化碳 - 燃烧后和氧气燃料技术方案图	63
图 35: 对全球二氧化碳减排的贡献	65

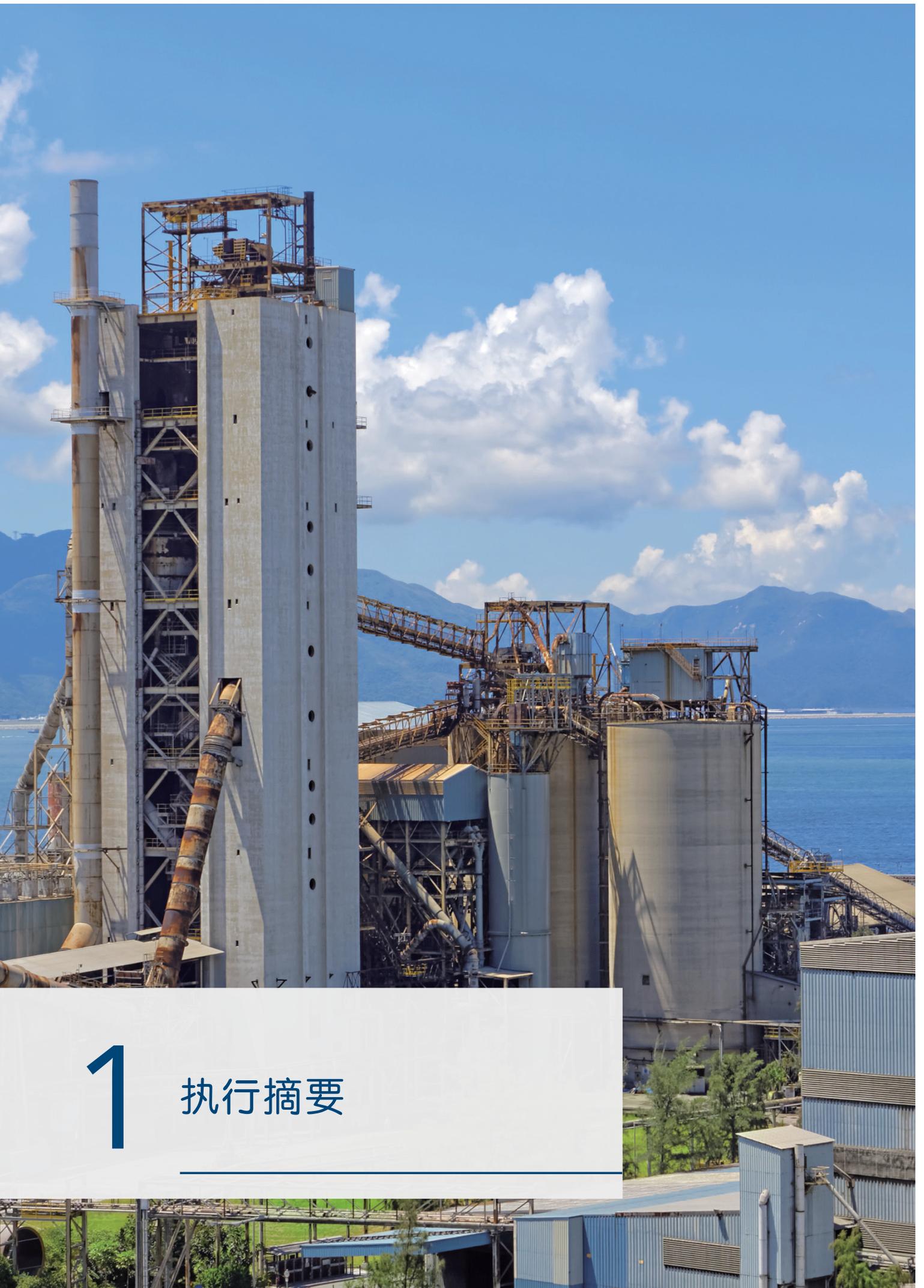
表目录

表 1: 措施概览	12
表 2: 节能减排成效概览	13
表 3: 欧盟国家用于生产水泥和熟料的原材料的平均消耗量	22
表 4: 欧盟国家水泥生产原材料和生料中的金属含量	23
表 5: 窑系统特征	25
表 6: 产品基准	29
表 7: 水泥部门能效措施概览	33
表 8: 措施的关键信息——高效分离器和选粉器	35
表 9: 符合 DIN EN 197-1 的水泥类型（译本）（Diethelm Bosold, 2017）	37
表 10: 措施的关键信息——混合水泥替代品	39
表 11: 措施的关键信息——替代燃料协同处置	43
表 12: 措施的关键信息——熟料制造中的工艺控制优化	46
表 13: 措施的关键信息——窑壳热损耗减少	49
表 14: 4、5 和 6 级旋风分离器的压降和能耗	51
表 15: 措施的关键信息——悬浮预热器的低压降旋风分离器	52
表 16: 措施的关键信息——富氧技术	55
表 17: 可用于篦式熟料冷区器的热量（* 百万吨年 - 每年一百万公吨）	56
表 18: 措施的关键信息——熟料冷却器中的优化废热回收（WHR）	58
表 19: 磨机类型的比较	61
表 20: 措施的关键信息——最后粉磨的立式辊磨机	62
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，化石燃料占比普遍偏高；
- 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，包括行业竞争力提升、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**欧盟排放交易体系**中的免费配额占比参考值。自 2005 年起，欧盟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进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**水泥行业**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。

欧洲每吨水泥的**单位能耗**从 86.03 千克标准煤到 184.35 千克标煤不等，说明单个水泥厂层面可能仍有一定节能提效空间。但近年来，总体平均单位产品能耗水平较为稳定并基本保持在约 122.29 千克标煤 / 吨_{水泥}。单位产品能耗水平受到各种因素的影响，包括熟料 / 水泥比（水泥熟料占其他非熟料成分的百分比）和生产过程的能效。因此，在水泥中使用其他材料、降低熟料 - 水泥比在节能减排方面发挥着重要作用。通用硅酸盐水泥最多可能包含 95% 的熟料（剩余 5% 为石膏）。欧洲国家典型的熟料比一般在 60 到 80%（有部分例外）。

考虑到总体能耗的一大部分源自于制造熟料所消耗的热能（大约 88%），其他流程中的耗电量占比较少，本指南将涵盖熟料生产和水泥生产两部分，包括生料制备和粉磨、熟料烧成、熟料冷却和最后水泥粉磨，重点关注熟料烧成这一耗能最密集的工段。本指南还将探讨其他相关主题，包括供能品种选择（改用低碳燃料）和原料替代（降低熟料比）。

下表罗列了公认最具潜力的能效措施，《指南》在接下来章节将对其进行详细介绍。

表 1：措施概览

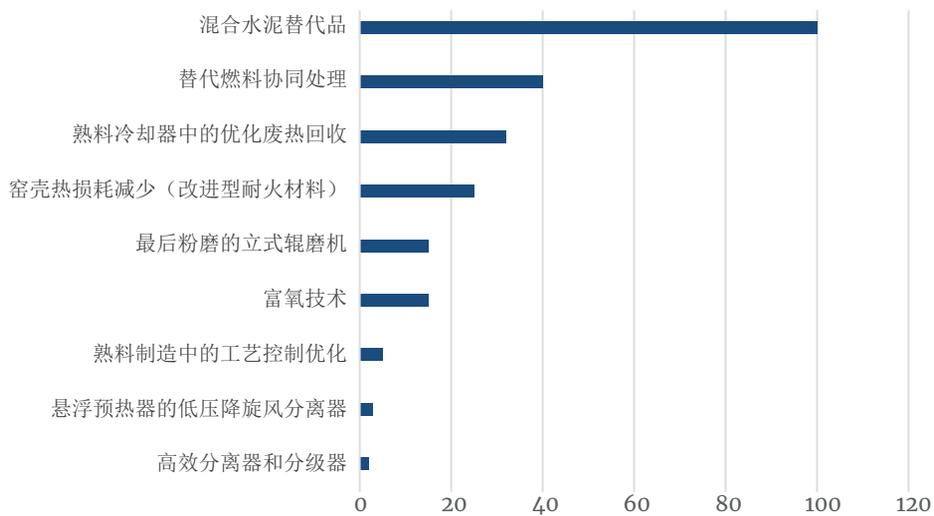
章节	措施	工段
4.1	高效分离器和选粉机	原料制备 / 水泥粉磨
4.2	水泥混合材料	原料制备
4.3	替代燃料协同处置	燃料替代
4.4	烧成系统控制优化	熟料烧成
4.5	减少窑体热损耗（改进耐火材料）	熟料烧成
4.6	悬浮预热器的低压降旋风分离器	熟料烧成
4.7	富氧燃烧技术	熟料烧成
4.8	优化熟料冷却器中的余热回收	熟料冷却
4.9	立式辊磨终粉磨技术	水泥粉磨

通过终端电能和热能消耗评估节能潜力时，必须将其与温室气体减排密切结合。也就是说，碳减排的实际效果在很大程度上取决于实际被取代的燃料和用于发电的能源。

通过采用过程排放量远低于通用硅酸盐水泥的混合水泥替代品和替代化石燃料（协同处置），可以实现最大的杠杆效应。熟料烧成工序耗能最多，应该着重优化（参见章节 4.4-4.7）。尽管与热能消耗相比，电力消耗的比重相对较低，但依然建议改进以电力消耗为主的粉磨和分离环节能效。

尽管各项节能措施的实际投资成本与效益取决于各个水泥厂现有产品类型与能耗现状，但根据相关文献与实践经验估算出以下措施的二氧化碳减排潜力¹：

图 1：选定措施的节能潜力



¹ 取决于措施类型 / 落实措施的地点，这指的是熟料或水泥。使用“产品”指代两者。

表 2：节能减排成效概览

章节	措施	节能				二氧化碳减排量	
		热能	电能	数值	单位	数值	单位
4.1	高效分离器和选粉机	-	×	2.2-4.5	千瓦时 / 吨 _{产品}	1.1-2.3	千克二氧化碳 / 吨 _{产品}
4.2	水泥混合材料	X	(X +)	30-110	千瓦时 / 吨 _{熟料}	100	千克二氧化碳 / 吨 _{熟料}
4.3	替代燃料协同处置	(X +)	(X +)	终端用能增加，但二氧化碳排放量（和一次能源消耗）减少	30-50	千克二氧化碳 / 吨 _{熟料}	
4.4	熟料烧成系统控制优化	X	X	32	千瓦时 / 吨 _{熟料}	2.9-5.9	千克二氧化碳 / 吨 _{熟料}
4.5	减少窑体热损耗（改进耐火材料）	X	-	33-111	千瓦时 / 吨 _{熟料}	25	千克二氧化碳 / 吨 _{熟料}
4.6	悬浮预热器的低压降旋风分离器	X	X	3.6-4.4	千瓦时 / 吨 _{熟料}	2-3	千克二氧化碳 / 吨 _{熟料}
4.7	富氧燃烧技术	X	-	27-55	千瓦时 / 吨 _{熟料}	10-20	千克二氧化碳 / 吨 _{熟料}
4.8	优化熟料冷却器中的余热回收	X	X	很大程度上取决于设备和余热回收系统的规模	32	千克二氧化碳 / 吨 _{熟料}	
4.9	立式辊磨终粉磨技术	-	X	10-15	千瓦时 / 吨 _{水泥}	8-19	千克二氧化碳 / 吨 _{水泥}

(x+) . 数值增长

表 2：节能减排成效概览

通过进一步改变水泥熟料比值、使用碳捕集与封存技术，可以超越目前所应用的节能措施，深度挖掘能源和资源效率提升潜力。



2

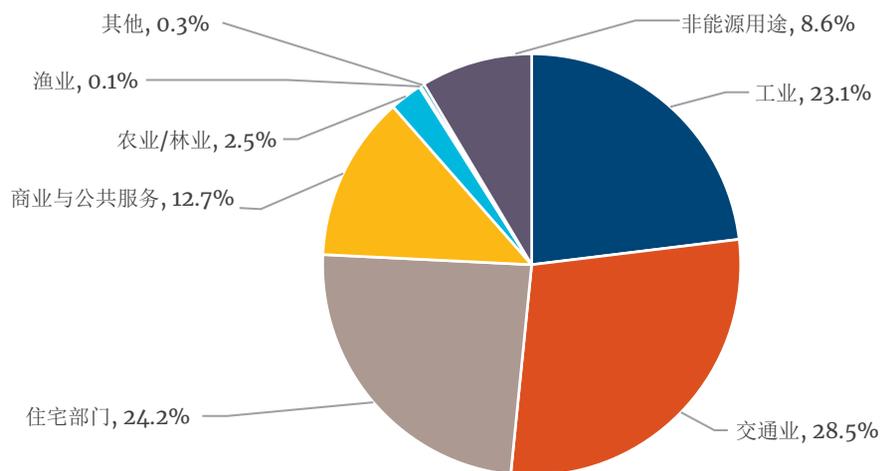
工业部门能源效率 概述

2.1 能源消耗与能源效率现状

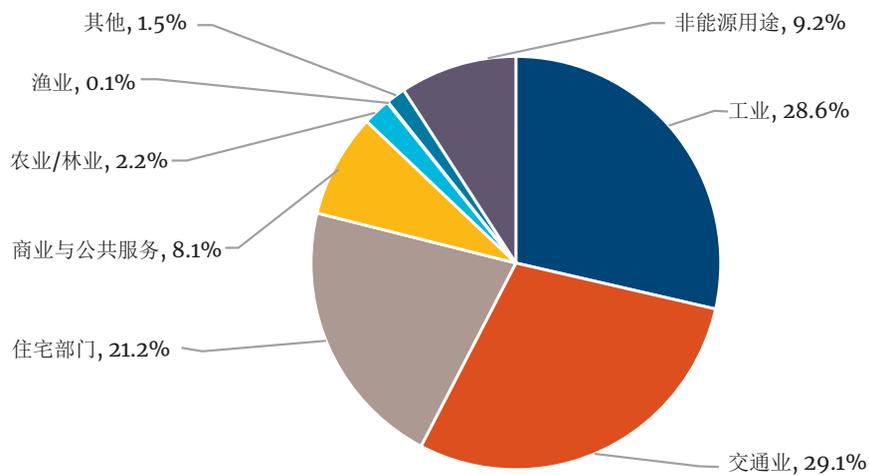
工业部门是全球主要能源消耗部门之一，如下图所示，工业部门占终端能源消费总量（TFC）比例较高：

图 2：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）



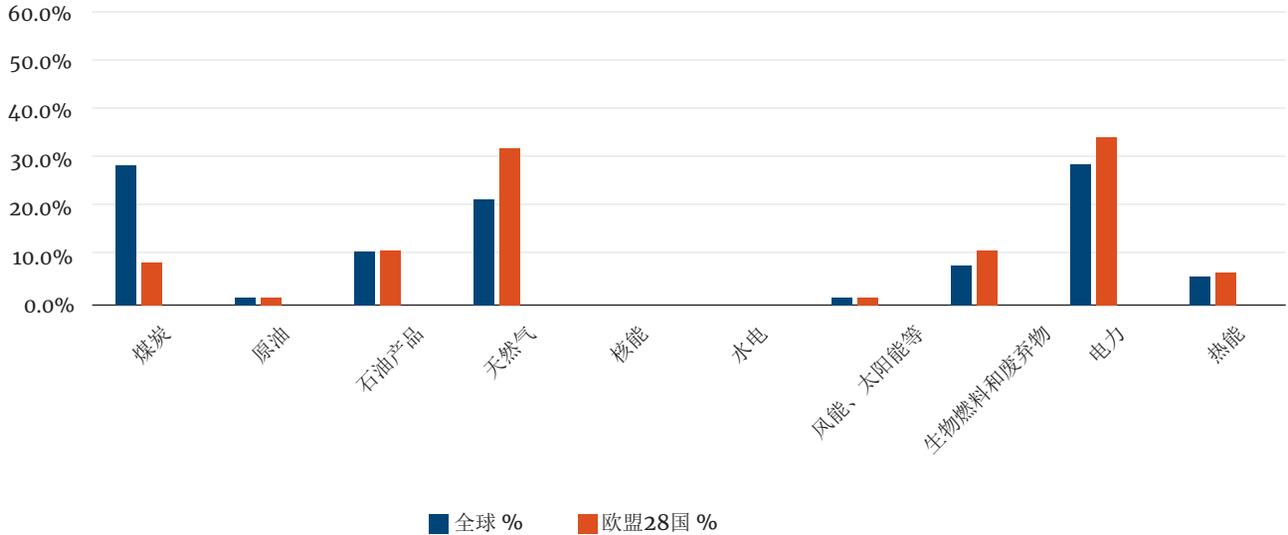
全球终端能源消费总量占比（2018 年）



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 3：工业部门终端能源消费结构



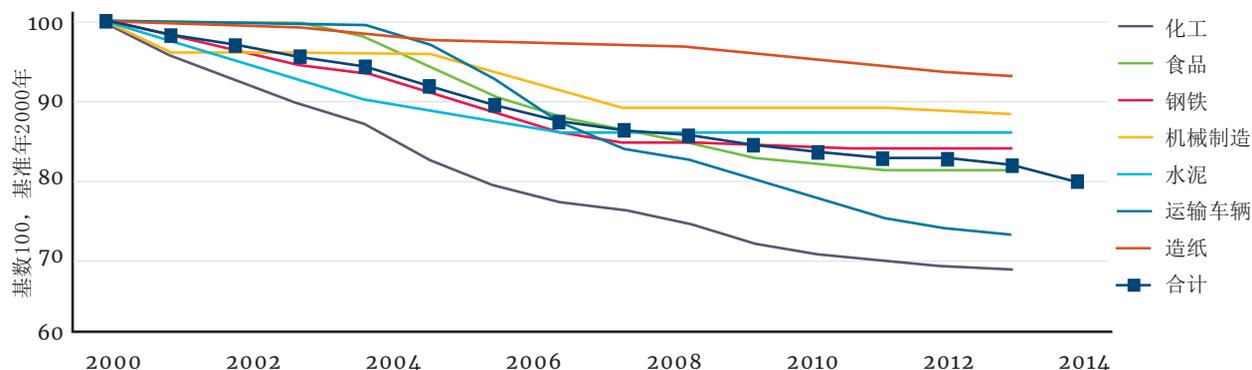
来源：（国际能源署，2018）

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。

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²，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。

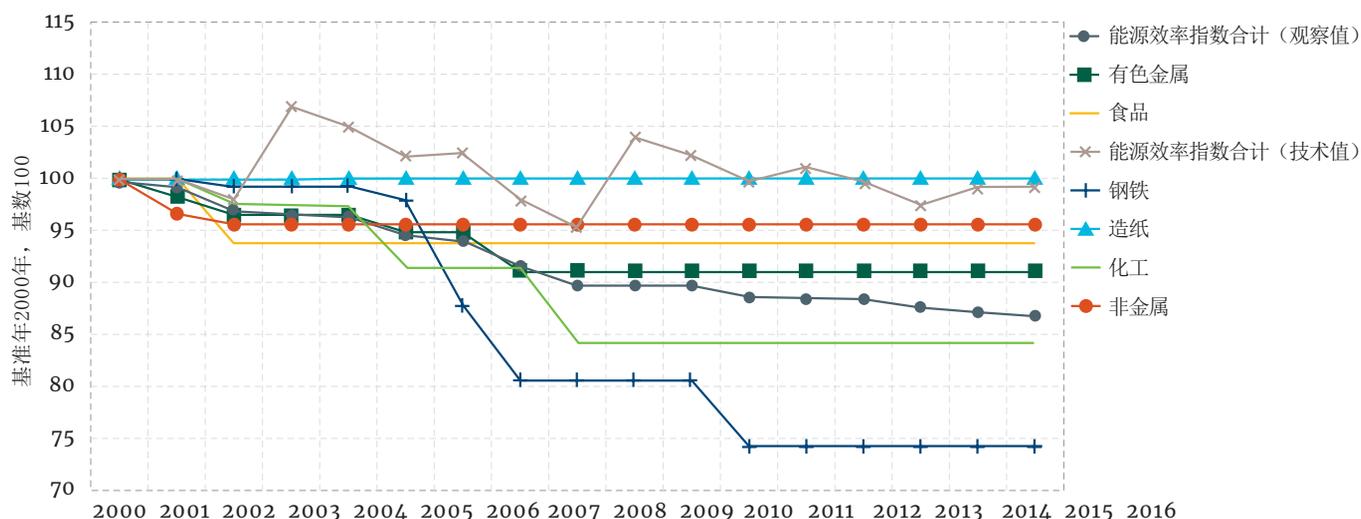
图 4：欧盟工业部门能源效率指数



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 5：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》(UNEP Best Practices and Case Studies Analysis) (Fawkes, 2016) 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 “ODEX”（能源效率指数）基于部门级别数据（居民、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）。

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 (Fawkes, 2016)。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》³（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。

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⁴。排放总量控制规定了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》⁵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%（欧洲委员会，2018，最近更新 2020 年 12 月）。目前，各方正全面探讨有关欧盟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 标准及管理体系。

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。⁶

³ 工业排放指令（IED, 2010/75/EU）

⁴ 欧盟成员国、挪威、冰岛

⁵ 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）。

⁶ 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。不过能效措施约是看似简单易行、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、绝缘处理得当等
- **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
- **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。（Fawkes, 2016）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

水泥行业概览

本章将介绍水泥行业整体生产流程及相关能耗情况，并概述欧洲水泥行业生产情况及能耗数据。

3.1 生产流程与工艺步骤简介

水泥是世界上应用最广泛的人造材料——一年人均水泥消耗量约为 521 千克 (CemNet, 2018)。水泥生产过程的不同阶段如下图所示。

图 6：采用不同方法的水泥生产阶段



生产水泥的最重要原材料是泥灰岩、碳酸钙或富石灰泥浆和石灰石。石灰石、白垩岩、壳料（贝壳）、页岩或灰岩中的氧化钙（CaO）决定了水泥的强度。

氧化钙（CaO）在矿化过程中发挥着至关重要的作用。如果石灰含量低于必要的最低水平，则水泥强度会降低，矿化过程的时间会增加。二氧化硅是第二重要的配料，可以从沙子、泥质岩等材料中获取。添加足够的二氧化硅有助于形成硅酸二钙和硅酸三钙，这些会影响水泥的强度 (Estrela, Sousa-Neto, & Guedes, 2012)。

过去几十年间，水泥制造过程经历了诸多变革。水泥生产有四种方法：湿法窑、半湿法窑、半干法窑和干法窑。2007 年，欧洲绝大部分（90%）水泥生产采用干法窑。另有 7.5% 采用半干及半湿法窑，只有大约 2.5% 采用湿法窑 (前瞻性技术研究所, 2013)。

当生料含水量比例超过 20% 时，通常优先采用湿法。在破碎过程中，将黏土与水混合，并与石灰石及其他成分进一步混合，形成高浓度泥浆。为了降低水泥窑燃料消耗量，要在原材料粉磨的过程中控制加水量。通过这种方式，用水量降到最低，泥浆依然可以满足必要的流动和可泵性（32% 到 40% 含水量）。湿法能耗更高，因此也更加昂贵 (前瞻性技术研究所, 2013)。

在半湿法中，从碾磨机中出来的材料类似泥浆材料。在进入水泥窑之前，通过挤压这些材料以立方体形状送入水泥窑。在工艺需要升级或者大幅改进的时候，使用半干法的工厂可以转而采用干法工艺。使用湿法或者半湿法的工厂通常只使用潮湿的原材料，丹麦和比利时的情况就是如此。

上述所有方法都包括以下生产工艺：

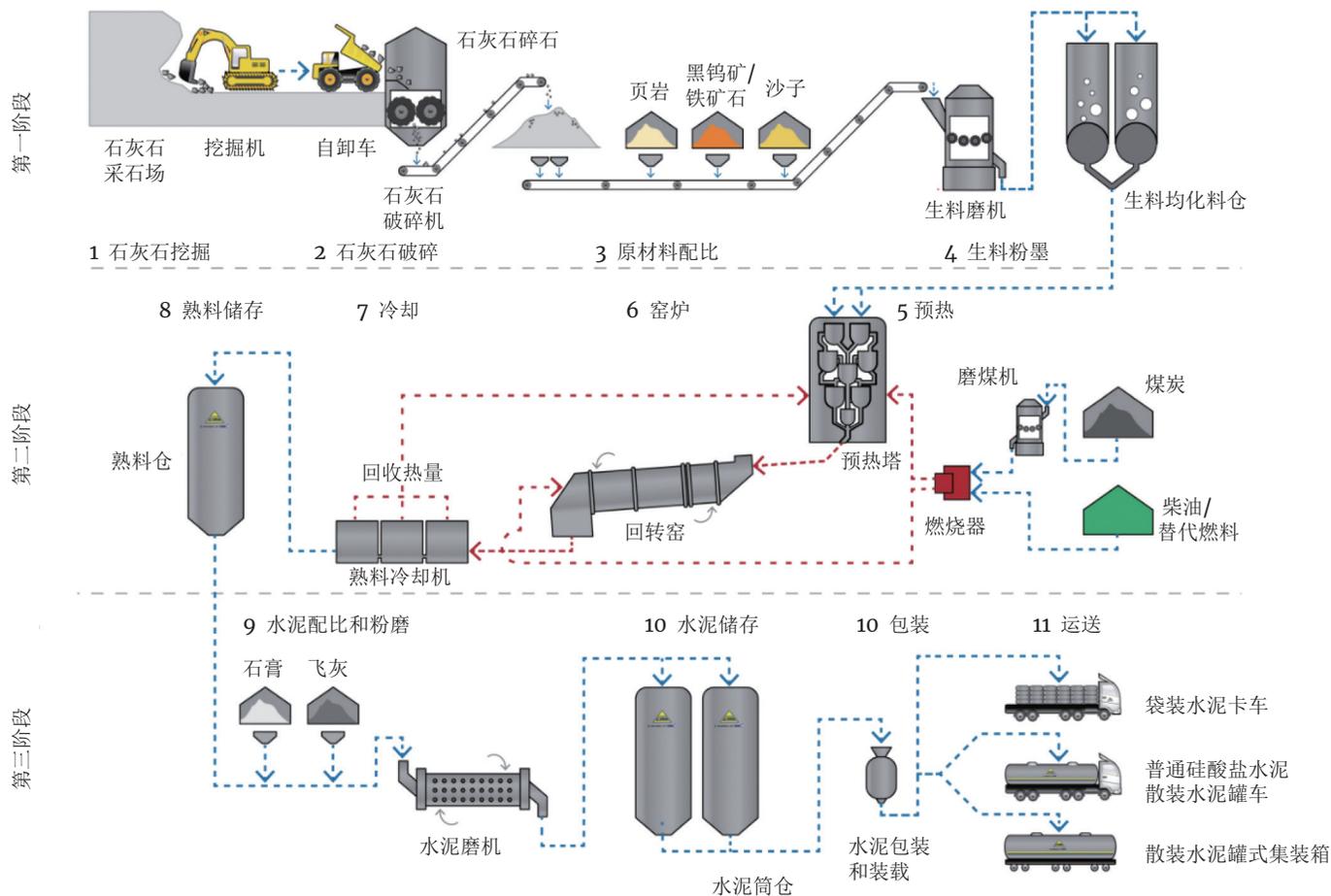
- 原材料——储存和制备
- 燃料——储存和制备
- 熟料制造
- 熟料冷却
- 水泥制备和储存（终粉磨）
- 包装发运

干法可以分成三个阶段（图 7）：

阶段一（原材料制备）

在阶段一（原材料制备），要从石灰石、白垩岩、黏土或页岩中提取必要的原材料，例如碳酸钙、硅、铝和铁。通过石灰石破碎机后，原材料被混合并粉磨，得到了“生料”，其中通常包含 70% 以上的碳酸钙。其他成分为二氧化硅、氧化铁、氧化铝和氯。

图 7：干法水泥生产工艺



来源：促进可持续发展工商理事会，2015

采石场的质量不同，可能导致原材料成分的不同。原材料必须满足特定的特征，包括生产水泥所必需的化学元素和成分。下表列出了欧盟水泥生产原材料的平均消耗量。

表 3：欧盟国家用于生产水泥和熟料的原材料平均消耗量

材料（干基）	每吨熟料	每吨水泥	每年每百万吨熟料
石灰石、黏土、页岩、泥灰岩、其他	1.57 吨	1.27 吨	1,568,000 吨
石膏、硬石膏	-	0.05 吨	61,000 吨
矿物掺合料	-	0.14 吨	172,000 吨

来源：(Schorcht, Kourti, Scalet, Roudier, & Sancho, 2013)

除了主要成分之外，这些原材料还包括下表中列示的一些金属元素：

表 4：欧盟国家水泥生产原材料和生料中的金属含量

元素		黏土和泥板岩	石灰石、泥灰岩和白垩岩	生料
		毫克 / 千克干物质		
锑	Sb	无可用数据	1-3	< 3
砷	As	13-23	0.2-20	1-20
铍	Be	2-4	0.05-2	0.1-2.5
铅	Pb	10-40	0.3-21	4-25
镉	Cd	0.02-0.3	0.04-0.7	0.04-1
铬	Cr	20-109	1.2-21	10-40
钴	Co	10-20	0.5-5	3-10
铜	Cu	无可用数据	3-12	6-60
锰	Mn	无可用数据	<250	100-360
镍	Ni	11-70	1.5-21	10-35
汞	Hg	0.02-0.15	< 0.01-0.13	0.01-0.5
硒	Se	无可用数据	1-10	< 10
碲	Te	无可用数据	<4	<4
铊	Tl	0.7-1.6	0.05-1.6	0.11-3
钒	V	98-170	4-80	20-102
锡	Sn	无可用数据	< 1-5	< 10
锌	Zn	59-115	10-40	20-47

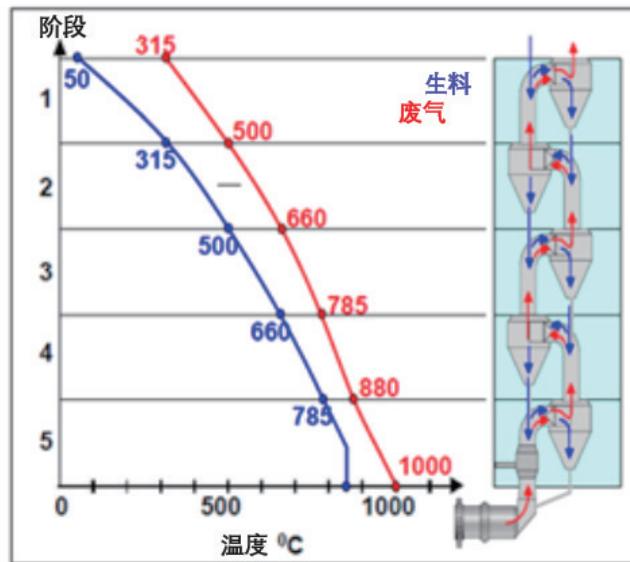
来源：(VDI-Richtlinien, 2003)

阶段二——熟料烧成和冷却

在粉磨及均化之后，生料进入阶段二——熟料烧成（图7）。生料的含水量为3-5%，在进入水泥窑之前，需要让这些水蒸发掉。阶段一完成之后，阶段二（预热）会在进气管道引入生料。预热部分的气体温度在300℃到900℃之间。预热部分通常由4到6个旋风分离器组成。旋风分离器中生料和气体的温度曲线如下图。如图所示，生料进入第一个旋风分离器之时的温度低于50℃。在与热烟道气直接接触及进行热能交换之后，材料的温度上升到大约850℃（Hidayat, 2013）。

在干燥过程中一定要控制材料温度。在进入最后一个旋风分离器之前，须对材料进行加热干燥，但因为石灰石的分解温度大约为800℃，所以干燥时的加热不应造成生料的任何化学变化。碳酸钙（石灰石）分解成氧化钙（生石灰）的反应被称为分解。煅烧是一种吸热反应。煅烧可以发生在原材料进窑之前，或者烧窑开始之时，这取决于窑和旋风分离器的结构。

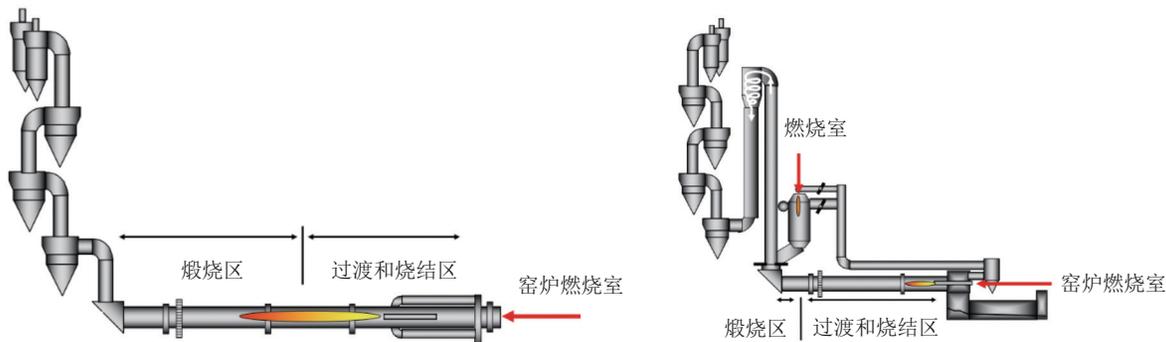
图 8：旋风分离器中生料和废气的温度曲线



来源: (Hidayat, 2013)

自 20 世纪 70 年代起，水泥行业就开始采用带预热器和预分解窑的窑炉。此种技术分别在两处消耗热能，一个是窑燃烧层，也称为主燃烧器，另一个是预热器和回转窑之间的燃烧室。因为热料在预煅烧区停留的时间更长，所以燃料总消耗量中的 65% 发生在分解炉内。生料在进窑之前几乎已经完全煅烧（煅烧率为 90% 及以上）。下图展示了含预煅烧炉窑和不含预煅烧炉窑之间的结构差异。列出了每一体系的特征。

图 9：不含预煅烧炉的窑系统（左）、含预煅烧炉和燃烧室的窑系统（右）



来源：(Hand, 2007)

表 5：窑系统特征

窑系统	特征
不含预分解窑的窑系统	<ul style="list-style-type: none"> • 热料的预煅烧率低（大约 40%） • 用于窑内烧结和煅烧的燃料多
含预分解窑和燃烧室的窑系统	<ul style="list-style-type: none"> • 热料的预煅烧率高（> 90%） • 煅烧炉内的燃料能源（最多 50%）用于预煅烧 • 窑内的燃料能源用于烧结工艺 • 可在燃烧室中使用低热值的二次燃料

阶段三——终粉磨

为了将原材料混合物转化成水泥熟料，燃烧区必须具有高工艺温度。回转窑烧结区的窑内温度一定要维持在 1400℃ - 1500℃，火焰温度维持在 2000℃ 左右。熟料是窑的最终产品，在冷却器内冷却之后，储存在贮仓内。

在阶段三（图 7：干法水泥生产工艺，）——终粉磨（和进一步措施）阶段为阶段二生产的熟料添加石膏和飞灰。在破碎和粉磨进料之后，储存、包装水泥，做好发运准备。

取决于所使用燃料的类型（以前是煤炭或化石燃料，现如今越来越多地采用替代燃料），需要其他的燃料制备工艺步骤。相关详细信息，参考章节 4.3。

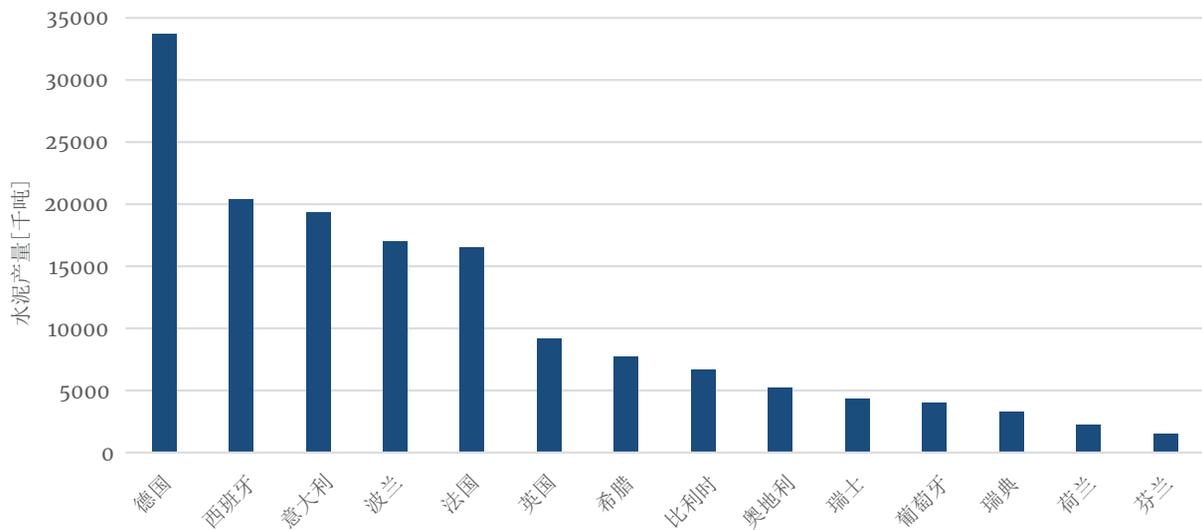
3.2 部门能源效率的现状与发展

这一部分将分析欧洲水泥部门能源消耗和能源效率现状，概述水泥部门的主要能耗工艺。

3.2.1 欧洲和德国水泥行业的能源统计和基准

下表概述了欧洲国家的水泥生产情况。2018 年，欧盟的水泥总产量为 167,018 千吨。前四大水泥生产国（德国、西班牙、意大利、波兰）的水泥产量占到了欧盟水泥总产量的 56%。

图 10：欧洲的水泥生产数据

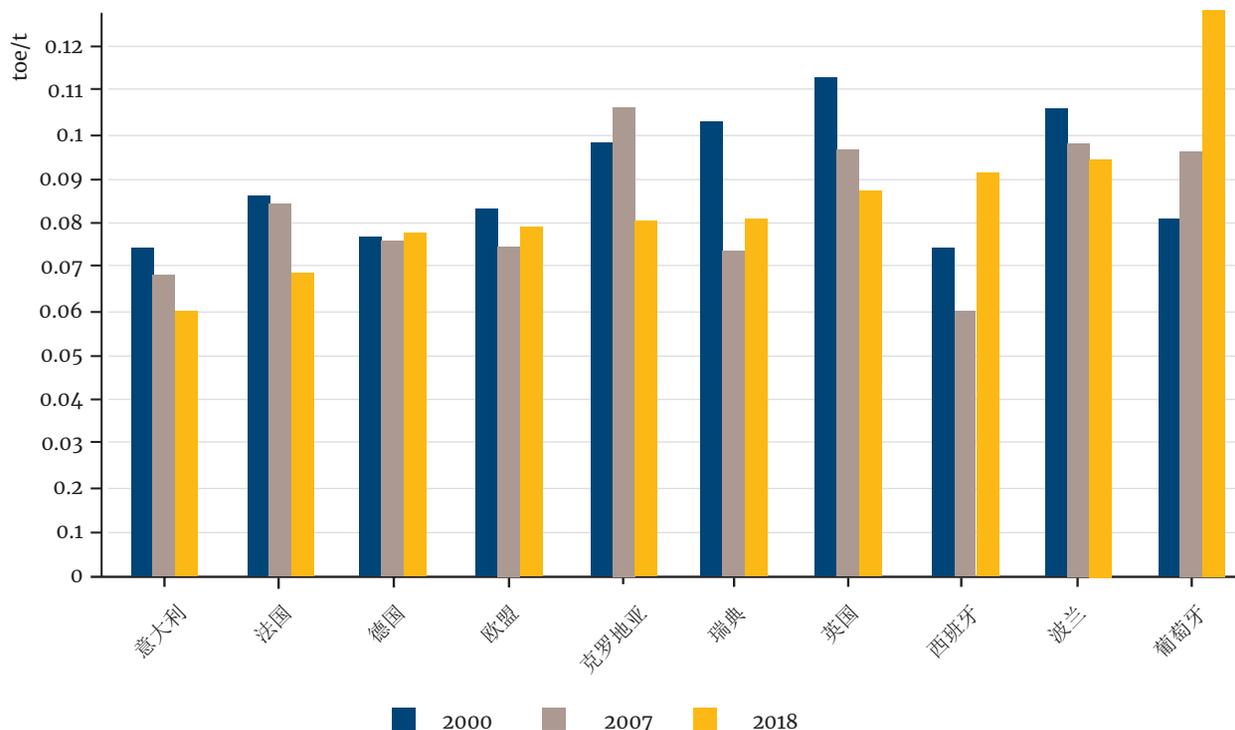


来源：(ODYSSEE 数据库, 2018)

2020 年，德国有 54 家运行中的水泥企业，其中 33 家也从事熟料烧成。(VDZ, 2021)

单位能耗的定义是生产单位产量所需的能源。在水泥生产中指生产一吨水泥所需的能源。2018年，水泥单位能耗（单位：吨油当量/吨_{水泥}）为0.06吨油当量/吨（折合85.72千克标煤/吨，意大利）到0.13吨油当量/吨（折合185.72千克标煤/吨，葡萄牙），而欧盟的平均值为0.08吨油当量/吨（折合114.29千克标煤/吨）。

图 11：欧洲的单位能耗，吨油当量 / 吨_{水泥}



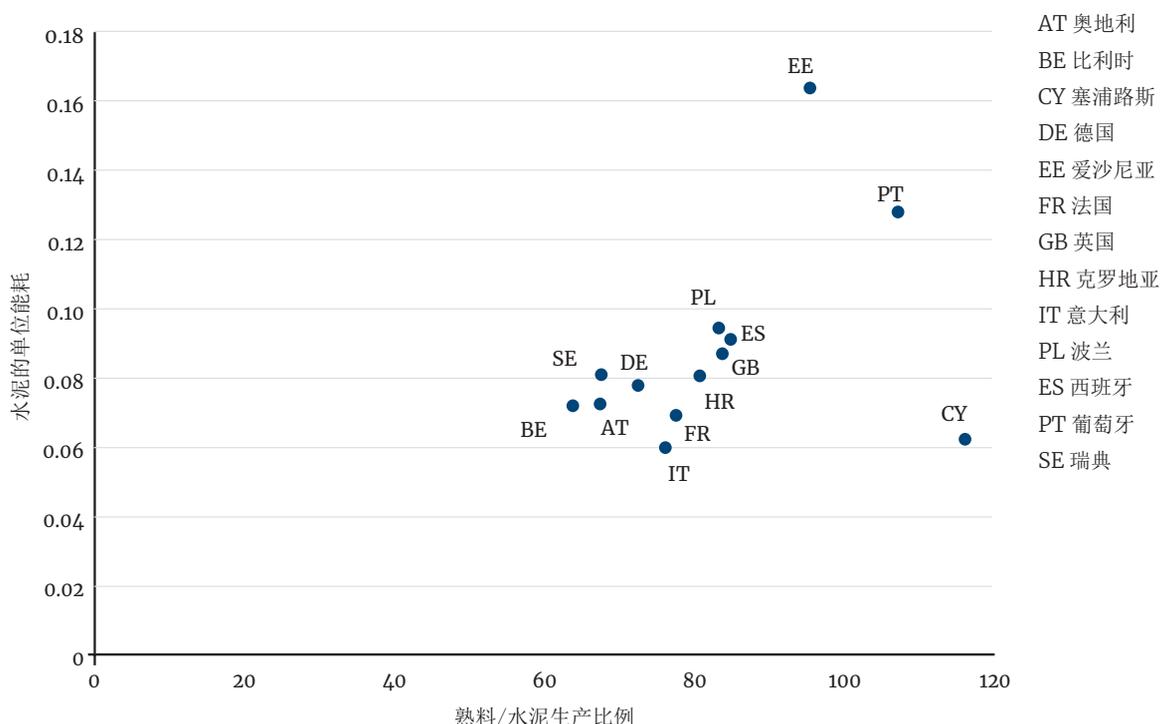
来源：（法国环境与能源控制署（协调员），2021）

自 2000 年起，单位能耗的发展情况如下：

- 自 2000 年起，意大利、德国、瑞典、法国、克罗地亚和波兰水泥生产的单位能耗略有下降。
- 自 2007 年起，受经济危机影响严重国家的单位能耗呈现急剧增长之势（例如葡萄牙和西班牙），但从欧盟整体来看，单位能耗数值趋于稳定。
- 不同国家之间存在巨大的差异。这部分是因为熟料生产的不同能效水平，部分是因为水泥生产中不同的熟料 / 水泥比例：此比例越高，比能耗就越高。

欧洲国家的熟料 / 水泥比例和单位能耗（2018）如下图所示，不同国家之间的这两个数字存在巨大差异，因此，改进的潜力也各有不同。

图 12：单位能耗与熟料 / 水泥生产比例的相关性，欧洲 2018



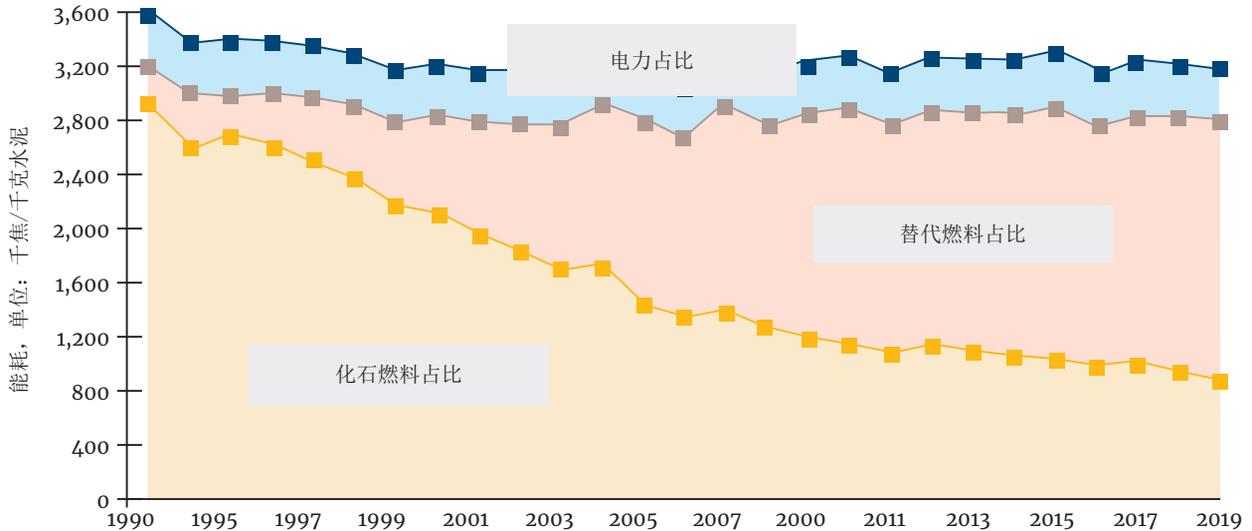
来源：（法国环境与能源控制署（协调员），2021）

除了熟料 / 水泥比例之外，所使用燃料种类也是分析节能减排时要考虑的一个重要方面。下图展现了过去几十年间德国生产单位重量水泥消耗能源 / 燃料占比变化趋势，可以发现化石燃料的占比大幅下降，目前涵盖大约四分之一的热需求。同时，作为二氧化碳减排的一项主要措施，替代燃料⁷的使用大幅增加。过去几十年间，每吨水泥的耗电量基本保持稳定（大约为每吨水泥 100 千瓦时），近年来呈上升之势，增长到 110 千瓦时左右，主要原因在于对高性能细磨水泥的需求不断增长。另一方面是必须使用减缓粉尘的附加过滤技术。因此，需要更多电力来维持流速。（Verein Deutscher Zementwerke, Hrsg., 2020）

⁷ 比排放系数远低于传统化石燃料，因此对欧盟碳排放交易体系涵盖的公司具有吸引力。

在总能耗中（大约 3200 千焦耳 / 千克水泥，相当于 108.15 千克标煤 / 吨_{水泥}），热能占比平均约为 88%。剩余 12% 来自于电力消耗。

图 13：德国的能耗占比



来源：(Verein Deutscher Zementwerke, Hrsg., 2020)

欧盟排放交易体系及其二氧化碳减排目的也是推动水泥生产能效提高的一个重要因素。

表 6 展示了欧盟排放交易体系中相关产品当前基准（欧洲委员会，2021），单位为每吨产品的二氧化碳排放量。此外，表中还列出了前 10% 最高效设施的平均值。比较最高效的设施和基准值，我们可以发现水泥（尤其是黑水泥⁸）生产相关二氧化碳减排的进一步空间。

表 6：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)
黑水泥熟料	0.722	0.693
白水泥熟料	0.973	0.957

来源：(欧洲委员会, 2021)

总而言之，单个工厂层面上仍有改进空间，不仅在终端能耗节约方面，也在温室气体减排方面。这可以通过多种途径实现：降低终端能耗的能效措施、燃料替代（替代燃料参见章节 4.3）、改变生产（替代原料的使用参见章节 4.2）和进一步的倡议，例如碳捕集与封存（参见章节 4.10）。

为了实现国际能源署在《水泥行业低碳转型技术路径图》（国际能源署，2018）中提出的“2 DS 情景⁹”和水泥行业全面碳减排目标，假设主要改变因素首先是创新技术（例如应用碳捕集与封存能够减少二氧化碳排放 48%），其次是降低熟料 / 水泥比例（减排 37%）和燃料替代。除此之外，参照最佳可行技术标准提高能效也有助于实现总体碳减排目标，其贡献相当于当前全球水泥生产直接二氧化碳排放量的 12%。

⁸ 能源系统途径，与基准情景相比，至少有 50% 的机会将全球平均温升限制在 2°C

⁹ 生产白水泥的原材料含铁量非常低（氧化铁含量 < 0.1%），主要用于水磨石、露石混凝土和石膏。白水泥适合浅色制品，而且与普通的灰波特兰水泥相比，它也更容易使用彩色颜料上色。生产白水泥的复杂度远高于灰水泥，同等规模的水泥厂，生产白水泥的产量低得多（与灰水泥相比的因素 3 到 4）。来源：维基百科（Wikipedia）

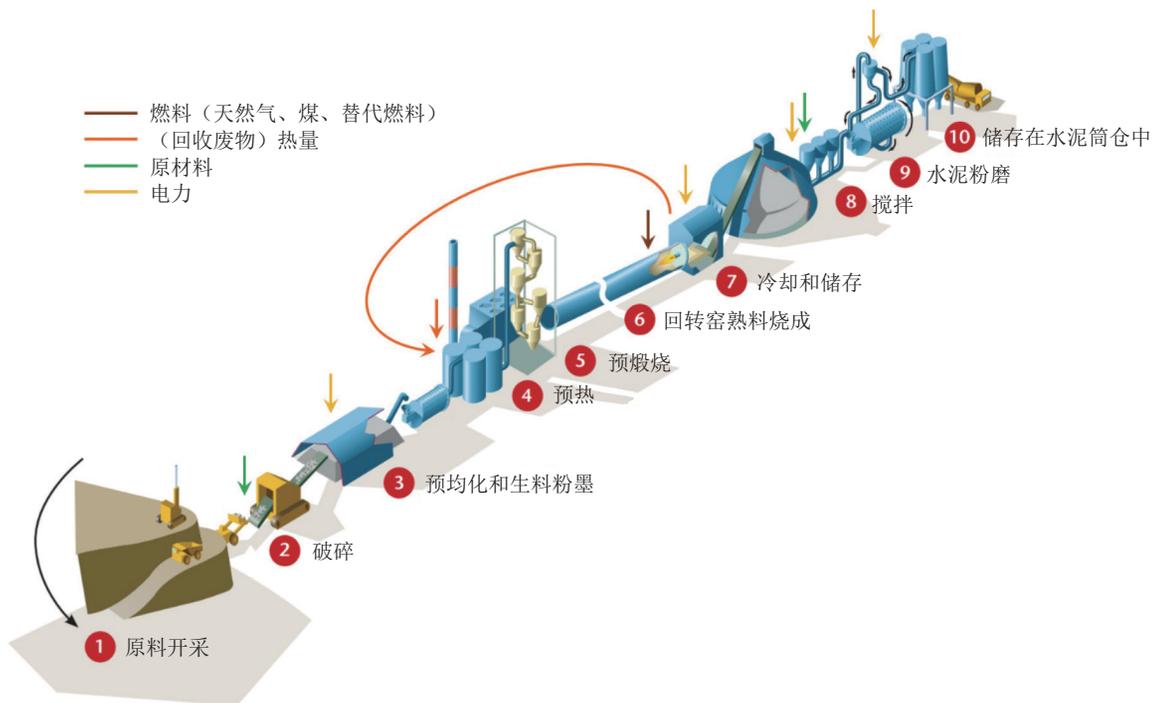
3.2.2 能量流向

水泥行业属于能源密集型产业，能源消费包括电力和由燃料转化的热能。《指南》以下各章介绍水泥行业能效措施，主要关注水泥生产（包括熟料制备）工序，未考虑高效电机等通用设备，同时考虑行业相关能源供应。

水泥行业使用能源包括燃料、废热和电力。电能主要用于粉磨工段（生料和终粉磨）。熟料制备工段必须使用燃料（化石燃料或替代燃料）。

下图简要示意了主要的能量流动：

图 14：能量与物质流向概览



改编自：（IEA, 2018）

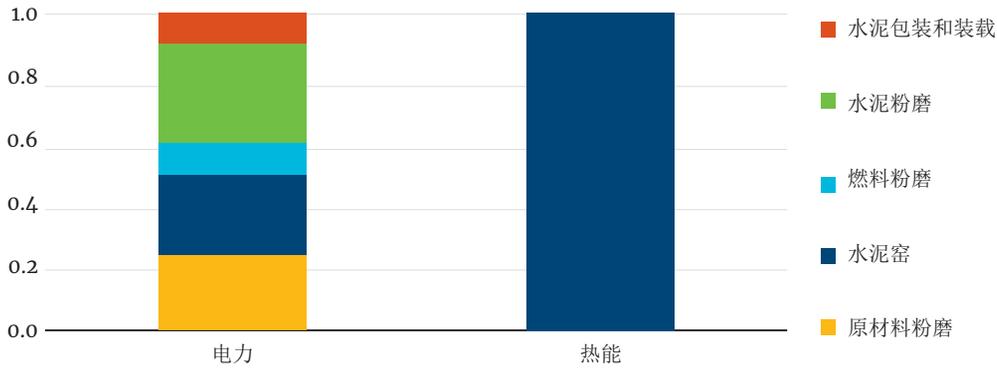
3.2.3 能源密集型工艺流程

分析具体节能潜力及节能措施时，首先需要确定各部门主要的耗能工序。

如图 15 所示，全部的热能消耗量集中于窑系统。所有工艺流程均有电力消耗，其中生料和水泥粉磨的电耗最高。

欧洲水泥生产的典型热能消耗量为 3500 吉焦 / 吨_{熟料}（972 千瓦时），可实现的最佳实践为 2900-3300 吉焦 / 吨_{熟料}（805-916 千瓦时）；熟料形成热最低值设定为 1700-1800 吉焦 / 吨_{熟料}（472-500 千瓦时）。电力消耗量为 100 千瓦时 / 吨_{水泥} (Tobias Fleiter, 2013)。

图 15：相关工艺步骤能源消耗情况



来源引用自：(国际能源署, 2018)¹⁰

根据最佳可行技术文件 (Schorcht, Kourti, Scalet, Roudier, & Sancho, 2013)，影响比能耗的重点包括：

- 规模和设备设计（旋风分离器阶段、分解炉、三次风、粉磨机的复合运行、窑的长度 / 直径比例、熟料冷却器的类型、窑的生产量）
- 生料的含水量和燃料
- 生料性质，例如易烧性
- 熟料的种类
- 窑进料和燃料的均化和精确计量
- 工艺控制优化，包括冷焰过程
- 旁通率
- 燃料混合组成和参数（含水量，尤其是在比较化石燃料和替代（由废弃物产生）燃料之时，反应性或者粗糙度、燃料的热值）

主要的用电终端是粉磨机（终粉磨和原料粉磨）和排风机（窑 / 生料磨机和水泥磨机），加在一起构成电力使用量的 80% 以上。

¹⁰ 图表指的是 100%（热能消耗和电力消耗）的不同数值



4

水泥行业能效提升措施

表 7 下表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 7：水泥部门能效措施概览

章节	措施	工艺
4.1	高效分离器和选粉机	原料制备 / 水泥粉磨
4.2	水泥混合材料	原料制备
4.3	替代燃料协同处置	燃料替代
4.4	熟料烧成系统控制优化	熟料烧成
4.5	减少窑体热损耗（改进耐火材料）	熟料烧成
4.6	悬浮预热器的低压降旋风分离器	熟料烧成
4.7	富氧燃烧技术	熟料烧成
4.8	优化熟料冷却器中余热回收	熟料冷却
4.9	立式辊磨终粉磨技术	水泥粉磨

4.1 高效分离器和选粉机

4.1.1 基线情况和能耗说明

分离器和选粉机与原材料制备和终粉磨都有关联。必须密切结合所采用的粉磨技术，评估其功能。有些粉磨设备（立式辊磨机，同时参见章节 4.9）整合了分选和粉磨两项功能。

总的来说，分离的目的是按尺寸分离微粒。其定义如下：“根据微粒尺寸对其进行区分，区分依据是在受到特定力量的条件下，不同微粒在液体中的移动可能获得不同速率。空气分离是将干微粒材料分成两个有明显差别的粒度，一个高于设定的分选点，另一个低于设定的分选点。分选点的正常范围是 1 微米到 300 微米。” (Hardy, 2021) 水泥、煤炭、陶瓷、纸浆造纸、废料和制药等多个行业都使用此项技术。

这些装置将磨机产出物分成粗颗粒和细颗粒。生产出来的细粒可以直接输送，粗颗粒则返工进行进一步粉磨。此外，也可以使用分离器实现具体的产品特性，例如更适合的粒度分布。很多应用都通过分离来加强其他工艺的运行。(Hardy, 2021)

原则上，有静态分离器和动态分离器。静态分离器没有任何运动件，因而运行成本较低。第一代（涡轮）分离器、第二代（旋风）分离器和第三代（笼型或高效）分离器都是动态分离器。

第一代选粉器配备了内部风扇，分离效率较低，只有 50-60%。第二代选粉器（60-75% 分离效率）改进了空气再循环和分离离心运动 (Worrell, Kermeli, & Galitsky, 2013)。

4.1.2 建议改进措施

建议改进措施是在新工厂使用高效分离器，或者使用第三代高效分离器取代低效分离器。这些分级器可实现最高 80-90% 的分离效率，拥有改进型空气分配系统以及先进的气流控制。材料在分离器中停留的时间更长，从而实现更清晰的分离，减少过度粉磨。(Worrell, Kermeli, & Galitsky, 2013)

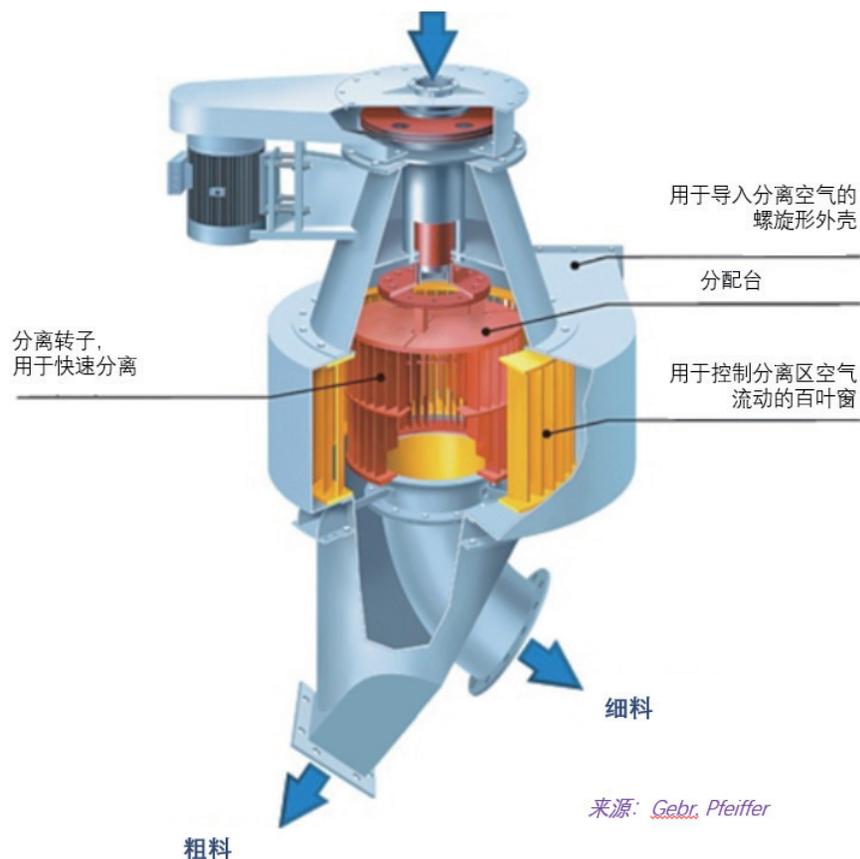
高效分离器是 20 世纪 80 年代初期开发的。与第二代类似，它是由外部风机形成分离所必需的气流。适当的连续输送机将材料送入分离器。通过气流将细粒送入外部旋风分离器或者直接送入袋式过滤器。主要的分离装置是**隐极转子**。隐极转子通过变速传动装置进行操作，就像一个由密集分布的刀片构成的笼子。转子速度决定了分类区内的旋涡，因此也决定了分离器的开口。

正常情况下，从分离器顶部加入材料。材料进入分离器，通过分配盘分散到循环空气中。微粒受到三种力的驱动：

- 源自于分散盘的离心力（试图将材料推向导流叶片）
- 源自于气流的拖曳力（试图将材料拖进转笼）
- 微粒质量引起的重力。

分离出的粗颗粒不会进入转笼，而是在重力的作用下，离开分级器，进入底部装置（锥体或其他形态）。而细颗粒进入转笼，在气流的作用下，从分离器的上半部分或下半部分离开。下图展示了一个高效选粉器的范例。(The Cement Grinding Office, 2021)

图 16：高效分级器



来源: Gebr. Pfeiffer, 引用自: (工业生产力研究所, 2021)

4.1.3 节能和温室气体减排潜力

以高效选粉器取代传统选粉器可使粉磨机产量增加 15%，通过提高生料和水泥粒度的一致性，提升产品质量。生料中有更好的粒度分布，也可能节省窑炉的燃料用量，改进熟料质量。（Worrell、Kermeli 和 Galitsky, 2013）

净节能的预期范围在 10-15% 之间，或者每吨产品节电 2.3-4.5 千瓦时¹¹。

投资成本估算变化范围为 2-3 美元 / 年 / 吨原材料生产（Worrell Ernst, 2013），投资两百万欧元改造产量为两百万吨 / 年的工厂，即大约 1 欧元 / 年 / 吨。（欧洲水泥研究所，水泥可持续发展倡议 Ed., 2017）

表 8：措施的关键信息——高效分离器和选粉器

措施的关键信息——高效分离器和选粉机	
投资成本：	1-2.5 欧元 / 吨 _{产品}
节能量：（电能）	2.3-4.5 千瓦时 / 吨 _{产品}
二氧化碳减排量：	1.1-2.3 千克二氧化碳 / 吨 _{产品}
优点：	<ul style="list-style-type: none"> • 减少电力消耗 • 增加产量 • 改善产品质量
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> • 难以实现最佳的密封系统粉磨系统的实际装置必须为改造留出余地

¹¹ 总节电减去分级器的附加电力消耗，约为粉磨能耗的 5-8%

4.2 水泥混合材料

4.2.1 基线情况和能耗说明

熟料系数指熟料在水泥中的质量占比。水泥强度由熟料和水混合之后水化硬化提供，熟料是水泥中的主要成分。鉴于熟料生产工艺的过程排放以及熟料生产中由化石能源燃烧产生的相关排放，将部分熟料替换为碳足迹较低的其他成分是降低水泥生产二氧化碳排放量的主要手段之一。（国际能源署，2018）

不同品类水泥的熟料系数也不尽相同，取决于最终产品或应用的机械和耐用性要求。硅酸盐水泥一般掺加90%的熟料，还有石膏和磨细细石灰石。混合水泥替代品熟料配比较低，因此二氧化碳排放和碳足迹也较低。能够替代水泥熟料的材料包括：

- 粒化高炉矿渣（GBFS，在生铁的生产过程中产生）
- 粉煤灰（来自燃煤发电厂）
- 天然火山灰材料
- 石灰石
- 煅烧黏土

欧洲规范 DIN EN 197-1 定义了五种主要类型的水泥 (Diethelm Bosold, 2017):

- 硅酸盐水泥 I
- 硅酸盐水泥 II
- 矿渣硅酸盐水泥
- 火山灰水泥 CEM IV
- 复合水泥 CEM V。

各个成分及其比重如下表所示。

表 9：符合 DIN EN 197-1 的水泥类型 (Diethelm Bosold, 2017)

水泥类型			波特兰水泥熟料之外的主要成分	
主要类型	名称	缩写	类型	比例 [质量, -%]
CEM I	硅酸盐水泥 I	CEM I	-	0
CEM II	矿渣硅酸盐水泥	CEM II/A-S	矿渣砂 (S)	6-20
		CEM II/B-S		21-35
	硅酸盐水泥 II/A-D	CEM II/A-D	矽尘 (D)	6-10
	火山灰质硅酸盐水泥	CEM II/A-P	天然火山灰 (P)	6-20
		CEM II/B-P		21-35
		CEM II/A-Q	天然回火火山灰 (Q)	6-20
		CEM II/B-Q		21-35
	粉煤灰硅酸盐水泥	CEM II/A-V	富含硅酸的飞灰 (V)	6-20
		CEM II/B-V		21-35
		CEM II/A-W	富含石灰的飞灰 (W)	6-20
		CEM II/B-W		21-35
	黑色板岩硅酸盐水泥	CEM II/A-T	黑色板岩 (T)	6-20
		CEM II/B-T		21-35
	石灰石硅酸盐水泥	CEM II/A-L	石灰石 (L)	6-20
		CEM II/B-L		21-35
		CEM II/A-LL	石灰石 (LL)	6-20
		CEM II/B-LL		21-35
	复合硅酸盐水泥	CEM II/A-M	所有主要成分都有可能 (S、D、P、Q、V、W、T、L 和 LL)	12-20
CEM II/B-M		21-35		
CEM III	矿渣硅酸盐水泥	CEM III/A	矿渣砂 (S)	36-65
		CEM III/B		66-80
		CEM III/C		81-95
CEM IV	火山灰水泥 1	CEM IV/A	矽尘、火山灰和飞灰 (D、P、Q、V 和 W)	11-35
		CEM IV/B		36-55
CEM V	复合水泥	CEM V/A	矿渣砂 (S)	18-30
			火山灰、飞灰 (P、Q、V)	18-30
		CEM V/B ²	矿渣砂 (S)	31-49
			火山灰、飞灰 (P、Q、V)	31-49

1: 矽尘的比例限制在 10% (按重量算)

2: 熟料的比例必须在 20% 到 38% 之间 (按重量算)

4.2.2 建议改进措施

建议改进措施与使用其他混合材替代熟料相关。最终水泥性质（尤其是钙含量和其他主要元素的含量）要在耐久性和强度方面**适合具体的应用**。要考虑的其他要素是进一步使用替代原材料的可能性和成本及当地或区域的条件。

考虑到工业及能源脱碳的总体目标，我们可以预期未来几十年间，来自燃煤电厂的高炉矿渣或粉煤灰可能越来越少。如钢铁部门从高炉工艺转变到更高效的电弧炉，燃煤电厂会被其他电力生产方式所取代。

天然火山灰材料（源自于火山混合物或沉积岩；源自于农业废弃物和硅粉的灰烬）的可获得性取决于本地条件以及与其他工业应用的竞争。

此外，应该考虑以下限制（国际能源署，2018）：

- 可以提高粒化高炉矿渣的比例（95%，按质量计算）。考虑到全世界范围内不同的质量，飞灰的使用比例最高可达到 25-30%；与波特兰水泥相比，这两种方法耗电量高，因为它们需要额外的工艺步骤。但是可以节约耗热可以抵消这部分耗电量。
- 使用石灰石取代熟料的范围一般为质量的 25-35%，但最高可以提高到 50%。
- 使用煅烧黏土的历史悠久，可以追溯到 20 世纪 30 年代旧金山的桥梁建筑。现如今的应用指向煅烧黏土和石灰石的优化组合，在不改变水泥性质的情况下，最多可以取代 50% 的熟料。

¹² <https://www.iea.org/reports/cement>

4.2.3 节能和温室气体减排潜力

以碳排放密集度较低的其他原材料取代熟料降低了总能耗和二氧化碳排放量（在工艺排放和煅烧工艺的耗热方面）。但它必须采取额外的工艺步骤（粉磨、混合），这会导致电力消耗（略微）增加。

相关投资成本包括替代原料的储存和处理成本。运行成本不仅包括替代材料的成本和上述电力成本，还包括所取代材料方面的节省。以下估算中未考虑磨损等附加成本。（欧洲水泥研究所，水泥可持续发展倡议 Ed., 2017）。

我们进一步预计碳定价将在后续成本效益分析中发挥重要作用。实际结果在很大程度上取决于具体的原料和竞争性应用。

表 10：措施的关键信息——混合水泥替代品

措施的关键信息——水泥混合材料	
投资成本：	0-6 百万欧元 / 吨 _{熟料} ；运行成本增加 0-4.2 欧元 / 吨 _{熟料}
节能量：（热能和电能）	100-400 兆焦 / 吨 _{熟料} （30-110 千瓦时 / 吨 _{熟料} ）热能需求减少 0-3 千瓦时 / 吨 _{熟料} 电能需求增加
二氧化碳减排量：	100 千克二氧化碳 / 吨 _{熟料} （以粒装高炉矿渣取代 10-15% 的原材料）
优点：	<ul style="list-style-type: none"> • 热能需求和工艺排放的大幅降低 • 部分使用废料
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> • 并非所有类型的水泥都适合所有应用 • 必须采取额外工艺步骤（粉磨、混合），增加质量保证 • 替代原料本地可获得性的差别（质量 / 数量） • 因为预期的生产变革，粒装高炉矿渣和飞灰的可获得性未来会有所下降

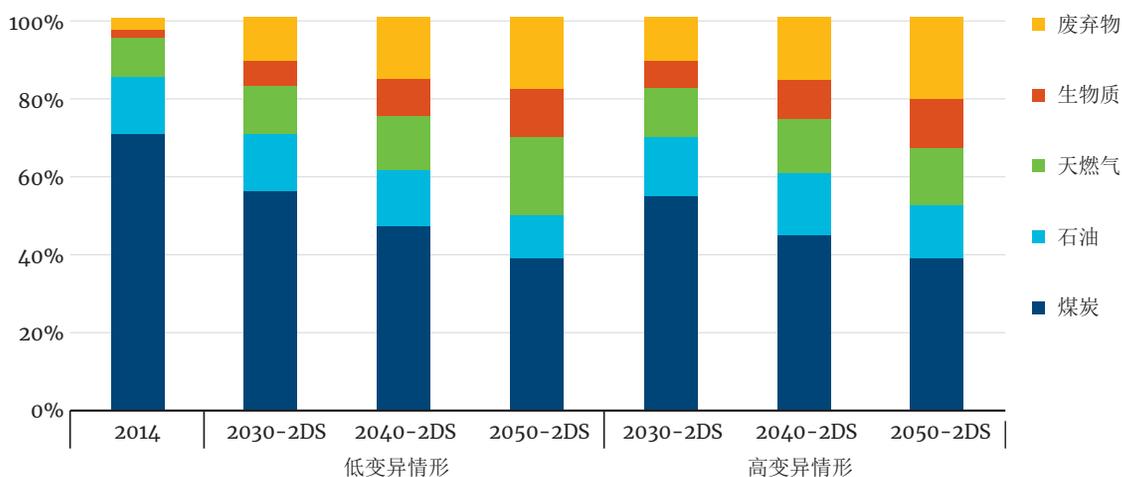
4.3 替代燃料协同处置

4.3.1 基线情况和能耗说明

全球层面上，煤炭是水泥生产中最广泛应用的燃料，占到全球热能消耗量的 70%。油气加在一起合计达到 25%。原则上，生物质和可燃废弃物（下文中也称为替代燃料）可以取代目前用于水泥生产的化石燃料。

根据国际能源署的路径图分析（国际能源署，2018），到 2050 年，化石燃料的占比有可能降低 24%，且因水泥生产的热能需求造成的二氧化碳排放量可能从 0.088 吨二氧化碳 / 吉焦降低到 0.058 吨二氧化碳 / 吉焦。2DS 情景¹³下水泥的全球热能构成及其预期发展如下图所示。

图 17：2DS 情景下水泥生产的全球热能构成



来源引用自：(国际能源署, 2018)

目前，欧盟水泥行业大约三分之一的燃料供给为替代燃料。此占比自 1990 年起就呈现出稳定增长之势。德国和捷克共和国等一些国家所报告的这一占比已经超过 60%。据报道，从纯技术的角度来看，80% 的替代率（年平均水平）是可行的。(Cembureau, 2021)

¹³ 能源系统途径，至少有 50% 的机会将全球平均升温限制在 2°C

4.3.2 建议改进措施

技术问题

建议改进措施结合了能效、资源效率和碳减排等方面，与使用生物质或可燃废弃物(进一步)取代化石燃料相关。可使用以下废弃物类型：

- 废轮胎
- 废油和废溶剂
- 工业废料，包括造纸行业的石灰污泥
- 不可回收利用的塑料、纺织品和造纸浆渣
- 城市生活垃圾
- 水和废水处理厂的污水处理淤泥

使用这些类型燃料需要考虑到 (Shahri, 2020):

- **城市生活垃圾 (MSW)** 并非同质来源，其中包含一定比例的可燃部分（例如废木料、塑料、硬纸板、橡胶和纸）、惰性材料（例如陶瓷、沙、石头、黑色 / 有色金属）、湿有机材料以及有害物质，例如焦油、树脂、浸渍锯屑，或者非有害材料。在不同国家乃至不同城市，城市生活垃圾的数量和质量都存在巨大差异，并非所有类型的城市生活垃圾都适合协同处置。
- **废塑料**比城市生活垃圾更容易处理，具有更高热值，从**17**到**49**吉焦 / 吨不等，取决于其具体构成和含水量。但是，塑料的主要问题就是会形成二噁英和呋喃等可能造成健康危害的物质。这些物质的形成取决于废弃物构成和燃烧温度。
- **废油**具有高热值，易于储存和处理的特点，因此是一个具有吸引力的选择。潜在来源包括由勘探、采石、采矿以及矿物质的物理和化学处理造成的废弃物；皮草、皮革和纺织品行业的废弃物；以及天然气净化、石油提炼和煤炭热解处理的废弃物。

理论上来看，其他生物质类型，例如快速生长的生物（如特定木材类型）也可作为替代燃料，但目前在经济上尚不具备可行性。此外，有害废弃物的协同处置原则上也是可能的。但是焦点应放在废弃物的处理而非热利用上。

从技术的角度来看，选择替代燃料时，有两个方面具有重要意义：**热值**和**含水量**。以替代燃料取代化石燃料可能导致热能需求增加，因为替代燃料热值较低、含水量较高。要在窑炉中燃烧，燃料的最低平均热值要达到**20-22**吉焦 / 吨；预分解炉是在较低的工艺温度下运行，因此，可使用**60%**的较低热值燃料。在预煅烧炉中，最低热值大约为**13**吉焦 / 吨。

此外，**替代燃料的预处理**往往要求确保燃料效率，将有问题的物质降至最低（例如高浓度的氯或者其他微量物质或者金属）。此种预处理意味着需要采取附加工艺步骤（粉磨、干燥），也会导致附加的能源消耗和成本。必须结合使用替代燃料节约的能源，权衡这些因素。

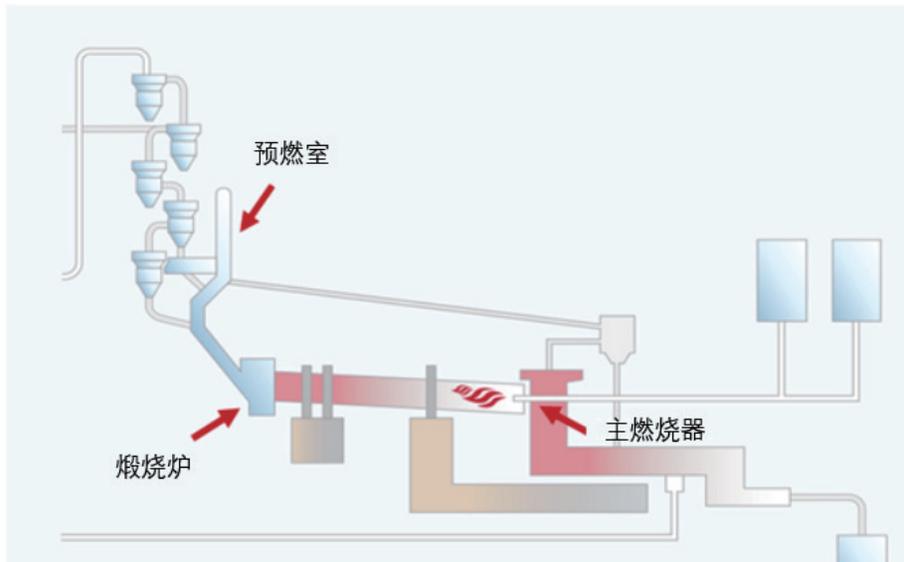
替代燃料的高替代率（**65%**及以上）可能导致窑炉系统的**运行问题**。含高浓度氯和硫的燃料可能导致窑入口、预热器下料管道以及较低的旋风分离器工作台上形成更多结皮。因为这一情况，所以窑入口处需要执行额外的清洁工作，或者必须安装旁路。（欧洲水泥研究所，水泥可持续发展倡议 Ed., 2017）

进料点

必须在工艺过程中最适当的地方引入废弃物燃料和原材料，这取决于温度要求。最常见的选择有：

- 通过回转窑出口端的主燃烧器
- 通过回转窑入口端的过渡室内的进料槽（针对块状燃料）
- 通过连接立管的二级燃烧器
- 通过连接预煅烧炉的预煅烧炉燃烧器
- 通过连接预煅烧炉的进料槽（针对块状燃料）
- 采用长湿法窑和干法窑的情况下，通过窑中阀门（针对块状燃料）(Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), 2017) (Shahri, 2020)

图 18 窑和旋风分离器结构



来源: Shahri, 2020

框架条件

除了纯技术问题以外，替代燃料的使用也必须具备适当的框架条件，例如：

- 推广废弃物回收而非填埋的废弃物管理立法
- 是否有受管控的废弃物收集、处理和加工，包括本地废弃物收集（含监测）
- 批准替代燃料使用许可时，减少官僚作风¹⁴
- 对水泥企业协同处置废弃物燃料提出明确的信息和排放监测要求，提高社会接受度（国际能源署，2018），以及
- 围绕二氧化碳排放的立法和定价。

4.3.3 节能和温室气体减排潜力

以替代燃料取代化石燃料（假设：65% 替代率）可能导致终端能源消费总体增长，但也会带来化石燃料消费减少以及温室气体减排。投资改造成本的估算基于两百万吨 / 年的熟料产能，假设替代燃料成本低于煤价，运行成本（仅燃料成本）预计将有所下降。（欧洲水泥研究所，水泥可持续发展倡议 Ed., 2017）

表 11：措施的关键信息——替代燃料协同处置

措施的关键信息——替代燃料协同处置	
投资成本：	500-1500 万欧元（改造；熟料产能 2 百万吨 / 年） 运行成本降低 2-2.5 欧元 / 吨 _{熟料}
节能量：（热能和电能）	化石燃料消耗减少 ¹⁵ 总体热力消费的增长：增长 200-300 兆焦 / 吨 _{熟料} 总体电力消费的增长：增长 2-4 千瓦时 / 吨 _{熟料}
二氧化碳减排量：	1.42-1.8 吨二氧化碳 / 吨废弃物制得燃料（取代煤炭消费） 30-50 千克二氧化碳 / 吨 _{熟料}
优点：	<ul style="list-style-type: none"> • 化石燃料消耗减少 • 更高材料效率，更少废弃物处理
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> • 热力需求在一定程度上高于化石燃料 • 燃料制备的附加工艺步骤（干燥、粉磨） • 高替代率下的潜在运行问题 • 若框架条件（立法、废弃物回收 / 可获得性和监测、社会接受度）尚未确立，则该项措施难以落实

¹⁴ 德国联邦环境局（Umweltbundesamt Germany）的研究中深入分析了现行要求（https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_11_05_texte_202_2020_abfallverbrennung_zementwerke_1.pdf）

¹⁵ 15-19 吉焦 / 吨垃圾衍生燃料（取代煤炭）（工业生产力研究所，2021）

4.4 熟料烧成系统控制优化

4.4.1 基线情况和能耗说明

熟料制备的能源密集度极高。非自动或非最优的工艺控制系统会导致热量损耗、不稳定的工艺条件以及更多的运行中断，最终导致系统的燃料需求增加。此外，设备（比如耐火衬砌）的寿命期取决于工艺条件。不采用最优工艺，氮氧化物和二氧化硫等排放物及粉尘会增加。

4.4.2 建议改进措施

工艺控制系统是优化燃烧过程和条件、维持窑内运行条件处于最优水平的有效措施。改进的工艺控制也将有助于改进产品质量和易磨性，例如所生产熟料的反应性和硬度，从而提高熟料粉磨的效率。氮氧化物、二氧化硫和粉尘等排放物的减少是此种优化的次级效应（国际金融公司 (IFC), 2017) (Schorcht, Kourti, Scalet, Roudier, & Sancho, 2013)。

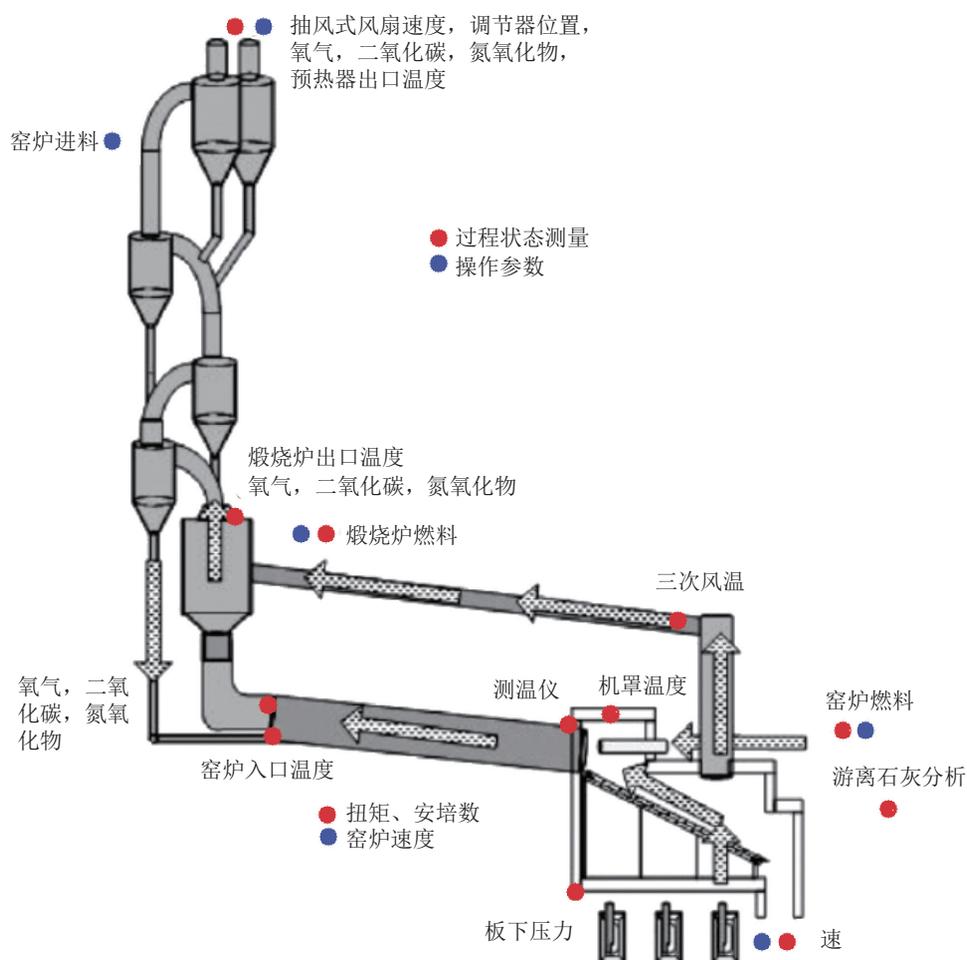
火焰和燃烧温度降低导致燃料消耗量减少。此外，氮氧化物排放可能减少。配备更快速测量和控制设备的现代工艺控制系统可能实现更高的切断标准，从而减少一氧化碳自动断开的次数。应用静电除尘器避免窑翻倒和一氧化碳自动断开，会减少粉尘排放。采用这种方式，也可以降低吸附粉尘的任何物质的排放量，例如金属。

工艺控制优化适用于所有窑，其中包括对窑操作人员的技术指导与培训，例如原材料均化、确保统一品质的煤炭配量以及改进冷却器的运行等。为了确保固体燃料的进料率稳定在最低峰值时保持稳定，一定要设计好饲料斗、传送机和进料器，例如现代的重量法固体燃料进料系统 (Schorcht, Kourti, Scalet, Roudier, & Sancho, 2013)。

附加工艺控制系统包括使用在线分析器，允许操作人员确定原材料和产品的化学成分，从而即时改变这些材料的配比。

该措施除了实现原材料称重和混合工艺的自动化之外，还可以控制气流、质量流和温度分布等其他参数以优化窑运行。下图展示了窑系统控制和管理系统中的控制点和参数。

图 19：窑系统控制的控制点和参数



来源：改编自：（国际金融公司 (IFC), 2017）

一些管理系统面向水泥行业制造商进行销售，在全球范围内得到了应用。现代系统使用所谓的“模糊逻辑”或专家控制，或者基于规则的控制策略。专家控制系统不通过建模过程控制工艺条件，而是试图模拟最佳人类操作人员，利用源自各个工艺阶段的信息。

现代化的工艺控制和优化系统利用了信息和通讯技术的进步，可实现多用户对工艺参数的实时监测和调整。

4.4.3 节能和温室气体减排潜力

在新建工程中安装先进工艺控制不存在任何障碍。大多数现有设施也能够进行运行改造，以适应控制系统。

工艺控制系统可节约 2.5% 到 10% 的热能，典型的节能比例预计在 2.5% 到 5% 之间（国际金融公司 (IFC), 2017）。此外，每吨熟料的电力消耗最多可减少 2 千瓦时（Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH (FfE), 2019）。

一个日产量 4500 吨某工厂安装了工艺控制和优化系统之后，年能耗减少了 395.6 兆焦（109 吉瓦时）。安装此系统所需的投资为 125,000 欧元，耗时一个月。此系统一年可节省 100 万欧元，回收期为两个月（国际金融公司 (IFC), 2017）。

表 12：措施的关键信息——熟料制造中的工艺控制优化

措施的关键信息——熟料烧成系统控制优化	
投资成本：	125,000 欧元（年产量 4,500 吨的工厂）
节能量：（热能和电能）	热能：2.5-10%，32 千瓦时 / 吨 _{熟料} （具体的节能潜力） 电能：2 千瓦时 / 吨 _{熟料}
二氧化碳减排量：	2.9-5.9 千克二氧化碳 / 吨 _{熟料}
优点：	<ul style="list-style-type: none"> 改进热回收 改进材料通过量 对熟料中游离石灰含量的可靠控制 减少燃料消耗 减少耐火材料消耗 较低的维护成本
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> 操作人员 and 职工的高培训水平是工艺控制和优化的关键。

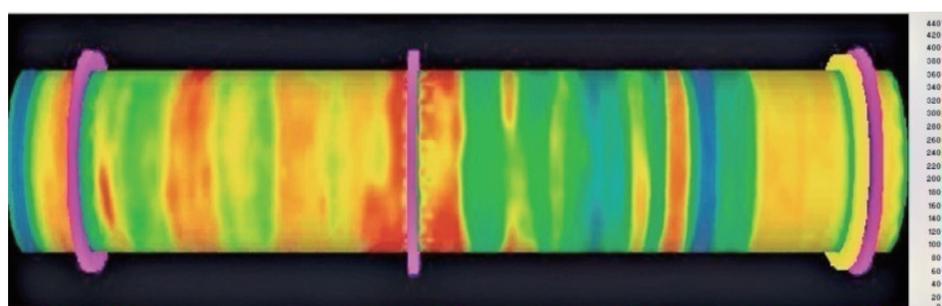
4.5 减少窑体热损耗（改进耐火材料）

4.5.1 基线情况和能耗说明

在任何水泥工厂中，回转窑都是使用热能的主要部分，熟料制造工艺涉及到各种化学反应。窑运行时，窑壳温度和环境温度之间存在巨大差异。窑内发生必要化学反应所需的温度大约为 1450°C 。

燃烧区存在相当大的热损耗。主要的热损耗包括窑废气的热损耗（10-20%）、来自冷却器管组的热风（5-10%）以及来自窑表面的组合辐射及对流热（超过 40%）。考虑所有的热损耗，窑的运行效率较低，大约为 30-50% (Oorja energy engineering service, 2021) (Schorcht, Kourti, Scalet, Roudier, & Sancho, 2013)。

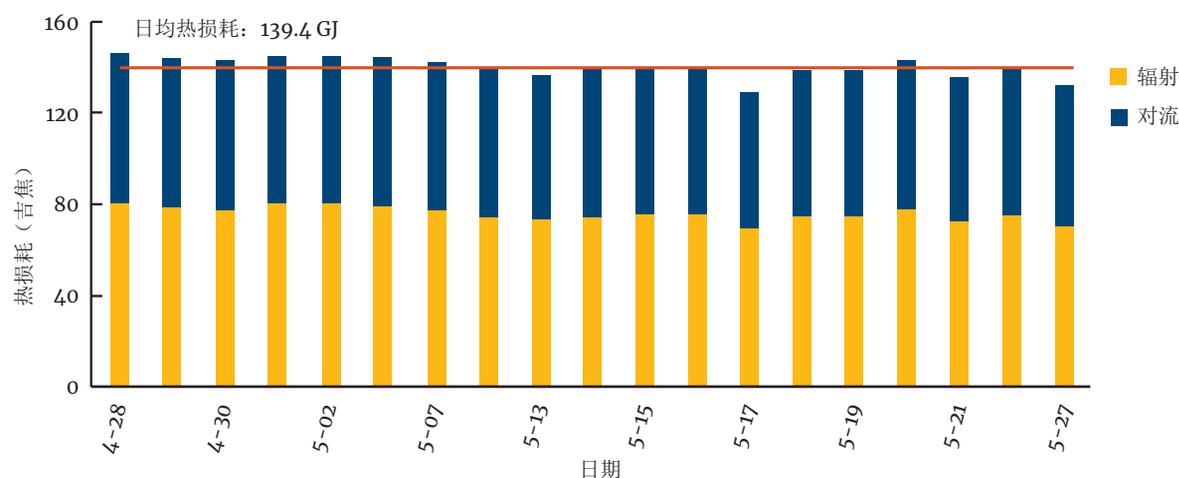
图 20：回转窑壳表面温度监测



来源：(ZKG-Bauverlag, 2021)

下图展示了被调查的水泥窑¹⁶煅烧区内 19 天的热损耗。窑的尺寸为 4 米 × 60 米，倾斜角为 2.29° 。该水泥窑以粉煤为燃料，大多数情况下以低旋转速度 ($n=3-3.8$ 转 / 分钟) 运行，产能为 2500 吨 / 天。

图 21：通过窑壳的每日热损耗（2500 吨熟料 / 天）



来源：(Wua, Xiao-YanLiu, Hu, Zhang, & Lua, 2019)

被调查的水泥窑的日均热损耗为 140 吉焦（38 兆瓦时，折合 4.67 吨标煤），这意味着每生产一吨熟料，就会损耗 0.05 吉焦（14 千瓦时，折合 1.72 吨标煤）的热能 (Wua, Xiao-YanLiu, Hu, Zhang, & Lua, 2019)。

¹⁶ 某水泥公司内配备五段式旋风分离器预热器和预煅烧炉的典型新型干法水泥窑作为案例研究。

4.5.2 建议改进措施

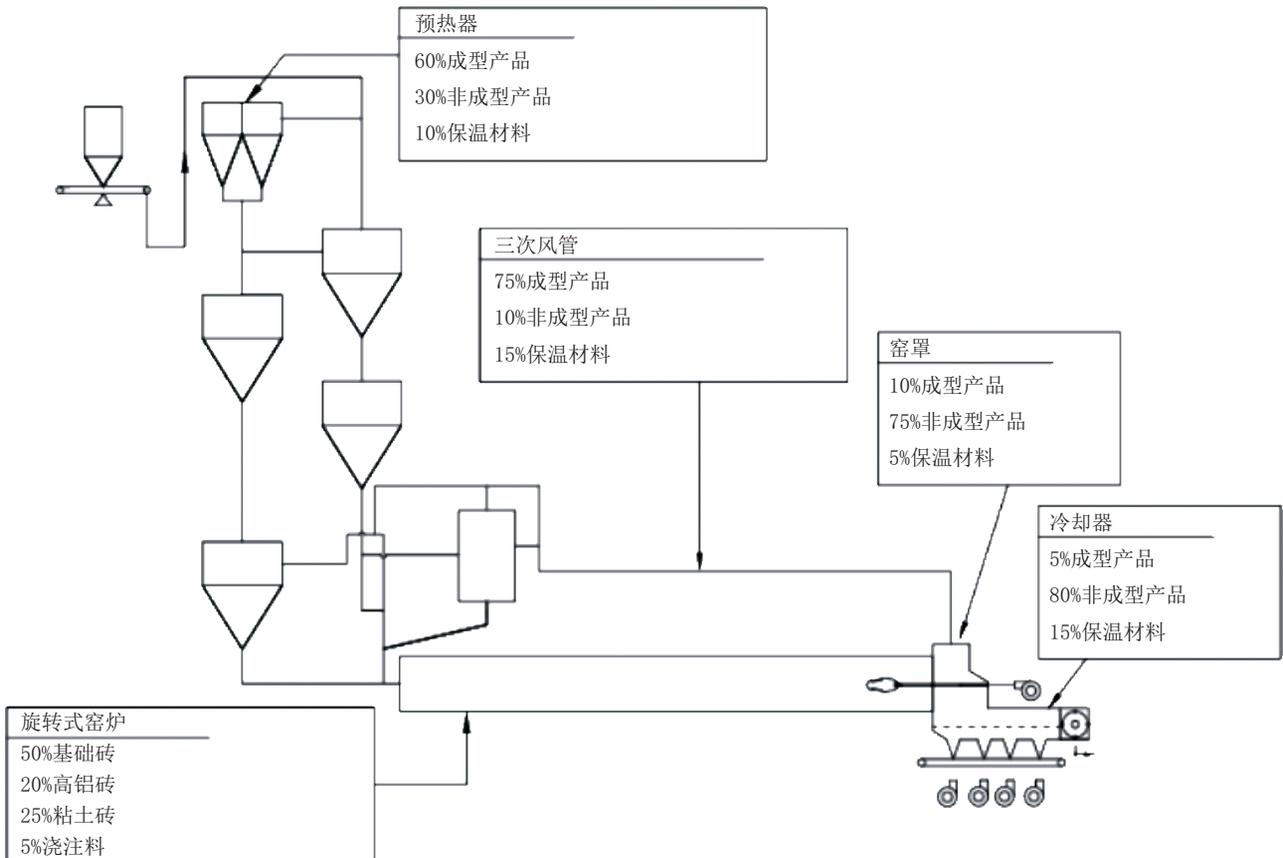
为了保护窑的钢壳免遭窑内高温（熟料制造过程中产生的高温）的破坏，必须采用耐火材料衬层。耐火材料通常为适合耐受高温的非金属材料。窑内的耐火材料通常由特殊成分和尺寸的砖块构成。

使用更好的隔热耐火材料（例如 **Lytherm**）可以减少热损耗。耐火材料的选择关系到砖块的隔热性能以及形成并维持窑皮的能力。涂层有助于减少热损耗，保护燃烧区的耐火砖。

耐火材料的选择取决于原材料、燃料和运行条件的组合。耐火材料的设计和安装应该始终提供平衡且可预测的经济寿命。如果因为耐火材料问题造成窑停机，就必须让窑炉完全冷却下来，这一过程非常容易出现问题且成本高昂。

因为尺寸、产能、原材料、所使用燃料以及操作实务等方面特征千差万别，所以不可能提供一种适用于所有工厂的标准耐火材料使用建议。但是，最好遵循通用的指导方针，以最低成本改善窑内每一分区的耐火性能以及所有其他辅助设备，将耐火材料衬层的故障率降至最低。

图 22：水泥厂内不同应用区域使用的耐火材料



来源：(Routschka & Wuthnow, 2012)

4.5.3 节能和温室气体减排潜力

估算表明针对窑耐火材料开发高温衬层可以减少燃料的使用量，减少量为 0.12 到 0.4 吉焦 / 吨_{熟料}（33 到 111 千瓦时 / 吨_{熟料}）。某水泥厂的垂直窑采用节能窑衬层，实现节能 0.46 到 0.63 吉焦 / 吨_{熟料}（127 到 175 千瓦时 / 吨_{熟料}）。除了上述节能以外，它们还能提高产量 (Worrell, Galitsky, & Price, 水泥行业的能效改进机会, 2008) (Worrell, Kermeli, & Galitsky, 2013)。

改进耐火系统的成本预计为 0.20 欧元 / 年吨_{熟料}产量。结构限制可能会影响新耐火材料的使用。但更高质量的耐火材料使用寿命更长，因此运行期更长，窑换衬之间损失的生产时间更少。因此，其优点抵消了更高的成本。

表 13：措施的关键信息——窑壳热损耗减少

措施的关键信息——减少窑壳热损耗（改进耐火材料）	
投资成本：	0.20 欧元 / 年吨 _{熟料} 产量
节能量：（热能）	0.12 到 0.4 吉焦 / 吨 _{熟料} （33 到 111 千瓦时 / 吨 _{熟料} ）
二氧化碳减排量：	24.6 千克二氧化碳 / 吨 _{熟料} (Price, et al., 2012)
优点：	<ul style="list-style-type: none"> • 热损耗减少 • 改善窑稳定性 • 降低生产成本
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> • 结构限制

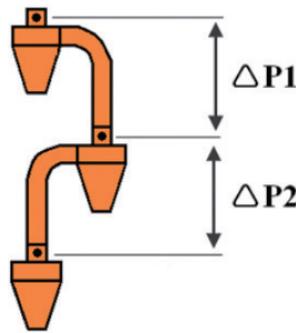
4.6 悬浮预热器的低压降旋风分离器

4.6.1 基线情况和能耗说明

旋风分离器预热器一般包括四到六个级，依次向上呈塔式，高 50 到 120 米。回转窑的废气从下到上流经不同的旋风级。另一方面，从顶部预热器的进风管道引入生料，按照与废气流相反的方向流经旋风分离器预热器，在每一旋风级上加热到更高温度。

除了干燥材料外，选择旋风式预热器的级数也有标准。典型的因素包括建造成本、电力和燃料价格、天然气处理系统、热交换效率、辐射损失和压降，后者是影响旋风分离器级数的最重要因素之一。预热器系统中预热器级数在很大程度上决定了系统的热效率。

图 23：通过一级旋风分离器的压降



来源：(Infinity for Cement Equipment, 2021)

通常情况下，通过一个 4 级预热器的压降为 500 到 550 毫米水柱。预热器数量有任何增加，都会导致额外的压降，抵消燃料效率方面的改进。

4.6.2 建议改进措施

旋风分离器的压降与操作旋风式分离器装置所必需的风机功率直接相关。因此，一定要测量与每一入口速度相关的压降。

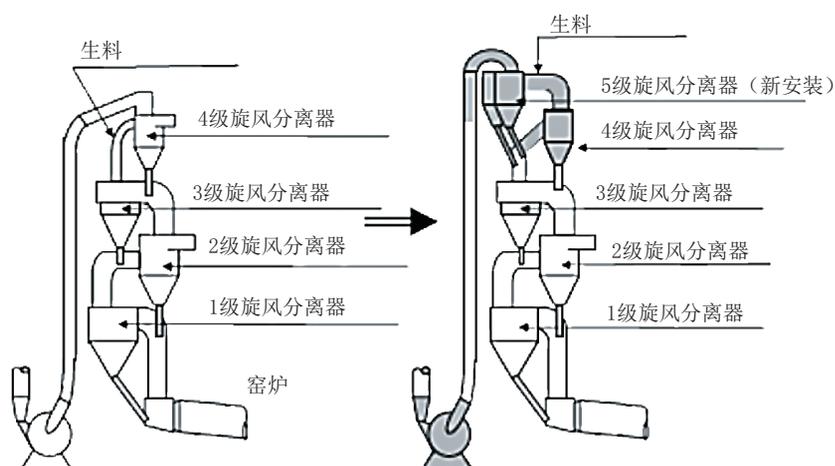
改进普通旋风分离器的入口形状以降低入口风速。改进后的形状利用、重力沉降作用，在维持粉尘收集效率的同时，降低压力损失。这种特别的入口形状类型可采用轴向及横向。

在工厂内安装压力损失更低的更新式旋风分离器将减少窑废气风机系统的耗电量。使用低压设计的旋风分离器不仅会降低燃料消耗量，还能降低特定气体体积，单位为 $\text{Nm}^3/\text{千克熟料}$ 。高效的 6 级预热器的压降等同于甚至低于老款 4 级预热器的压降（见下表）。因为压降减少了，因此与 4 级旋风分离器相比，预热器风机的温度以及降低的气体体积比功率也更低。因为这种发展，所以从 4 级增加到 6 级将很大程度上减少燃料消耗，而电力消费增长较少。

表 14：4、5 和 6 级旋风分离器的压降和能耗

级数	压降 [毫米汞柱]	废气温度 [°C]	燃料消耗 [千瓦时 / 千克熟料]	其他消耗 [标方 / 千克熟料]	动力风机 [千瓦时 / 吨熟料]
4	280-300	350	0.93	1.65	5.75
5	320-370	300	0.87	1.55	6.05
6	400-450	270	0.81	1.45	6.30

图 24：增加低压旋风分离器



来源：(Infinity for Cement Equipment, 2021)

4.6.3 节能和温室气体减排潜力

在工厂内安装压力损失更低的更新式旋风分离器将减少窑废气风机系统的电耗量。根据风机的效率不同，每损失 50 毫米汞柱的压力，可以节省 0.6-0.7 千瓦时 / 吨_{熟料}。对于老款的窑炉，节能量可达到 0.6-1.4 千瓦时 / 吨。还有报告称可节电 3 千瓦时 / 吨_{熟料}，产能可提升 3% (Worrell, Kermeli, & Galitsky, 2013)。

欧盟水泥研究所 (ECRA, 2009) 预计更换 3 级旋风分离器的投资成本为 4.4-5.2 欧元 / 年吨_{熟料}产量，而在另一项研究中 (Hollingshead 和 Venta, 2009)，预计更换一级及最后一级旋风分离器的成本为 3 欧元 / 年吨_{熟料}产量。以低压降预热器取代更老款的预热器具有经济意义，因为不必重建预热器塔 (Worrell, Kermeli, & Galitsky, 2013)。新的预热器系统可能增加总粉尘含量，增加预热器塔的粉尘带出。

表 15：措施的关键信息——悬浮预热器的低压降旋风分离器

措施的关键信息——悬浮预热器的低压降旋风分离器	
投资成本：	3-5.2 欧元 / 年吨 _{熟料} 产量
节能量：（热能和电能）	热能：2.16-5 吉焦 / 吨 _{熟料} （0.6 到 1.4 千瓦时 / 吨 _{熟料} ） 电能：3 千瓦时 / 吨 _{熟料}
二氧化碳减排量：	2-3 千克二氧化碳 / 吨 _{熟料}
优点：	<ul style="list-style-type: none"> • 耗电减少 • 燃料消耗减少 • 增加产能
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> • 预热器塔需要改造 • 增加总粉尘含量

4.7 富氧燃烧技术

4.7.1 基线情况和能耗说明

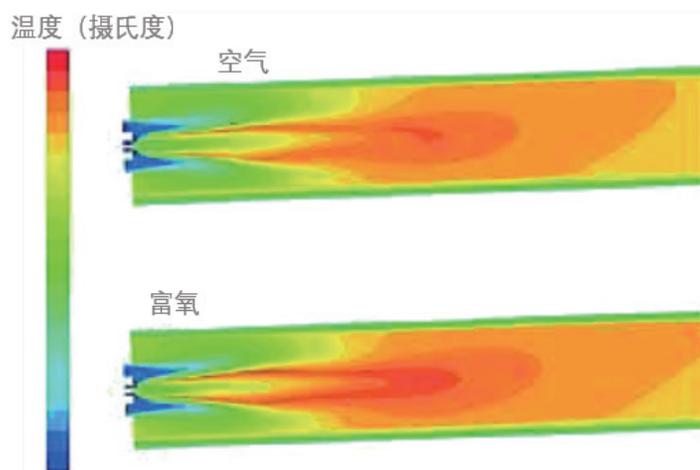
水泥回转窑需要达到极端的燃烧温度。高火焰温度可保障熟料的正常燃烧，这与燃料类型、燃料供应、窑体热损耗以及注氧量等其他因素有关。为了维持水泥窑内的最低热损耗，水泥窑应该在合理范围内的最低余氧水平下运行。

因为一次空气系统中的含氧量提高了，氧分子可与可燃物充分接触，实现完全燃烧。如果含氧量不足，火焰温度就会下降，减少从火焰到熟料的热传递，而这反过来又会造成熟料窑温的下降。

4.7.2 建议改进措施

富氧燃烧是直接向燃烧区注入氧气（而非空气）或者作为燃烧空气流的附属物、以提高燃烧效率的过程。应用高温燃烧工艺的行业已应用了此项技术。氧气的助燃，改进了燃烧区。此外，通过使用此项技术，窑的稳定性会提高，排放量会下降。通过增加相对较纯的氧气，提高燃烧空气的氧浓度，可以提高火焰温度，改善热传导率，提升整体燃烧效率。

图 25：有富氧及无富氧工艺的窑炉内的火焰轮廓



来源: (Mittal, Saxena, & Mohapatra, 2020)

富氧提高了火焰中心周围最热区域温度，而窑壁上的温度与传统空气燃烧火焰的温度类似（见上图）。这会转化为产量的提升和排放量的下降。与氧气相关的报告和经验证明，注氧会带来最高达到 25% 的产量提升，降低特定粉尘损失，改进窑稳定性，熟料质量和窑窑皮作为其证明（国际金融公司 (IFC), 2017）。

图 26：使用富氧技术的不同工厂实现的产量提升

公司	基础产量 (吨 / 日)	最新产量 (吨 / 日)	产量提升 %
A	1,300	1,490	15
B	4,000	4,360	9
C	3,800	5,000	32
D	2,000	2,140	7

来源：（国际金融公司 (IFC), 2017）

富氧也可用于改进替代燃料稳定且充分的燃烧，改进燃料与低热值和更大颗粒的协同处置（章节 4.3）。在焰源处注入氧气对低质量替代燃料来说是一种有效的手段，因为注氧能够促成更快速的升温、燃料热解和燃料燃烧。

图 27：使用富氧技术的不同工厂实现的生产收益

	工厂							
	A	B	C	D	E	F	G	H
不使用富氧技术时替代燃料用量 %	45.4	31.1	45.9	44.3	42.8	43.9	60.5	27.0
使用富氧技术时替代燃料用量 %	72.9	52.4	69.3	65.6	77.3	58.3	67.0	40.7
减少化石燃料用量 %	-50.0	-25.9	-40.0	-36.0	-57.5	-25.0	-10.8	-22.0
二氧化碳减排量 (吨 / 年) b	13,500.0	8,100.0	10,800.0	9,720.0	34,500.0	10,800.0	3,780.0	11,880.0

- a. 生产率保持不变，但工厂 G 在注氧条件下产量提升了 4%。
- b. 结果基于最新装机情况（自 2009 年以来）。
- c. 由于采用了生物质燃料替代化石燃料，工厂 E 的二氧化碳当量 (CO₂e) 减排量更大。

来源：（国际金融公司 (IFC), 2017）

4.7.3 节能和温室气体减排潜力

这一措施对需要提升产能或者想要实现替代燃料使用率最大化的工厂很有效果。该措施要求有氧气源和专用的空气分离设备，这些都需要密集的资金投入。制氧所造成的用电量增加必须纳入到工厂的能源消耗中。

热能消耗可减少 100 到 200 吉焦 / 吨_{熟料} (27 到 55 千瓦时 / 吨_{熟料})。制氧可能导致电能消耗增加 10 到 35 千瓦时 / 吨_{熟料} (国际金融公司 (IFC), 2017)。

因为燃料消耗量的下降，此种技术可减少 10 到 20 千克 / 吨_{熟料} 的直接二氧化碳排放量，但因为用电量的增加，间接排放量预计会增加 15 到 25 千克 / 吨_{熟料} (工业生产力研究所, 2021)。实际的净二氧化碳减排效果取决于电力来源。

此种技术的经济性由电价和投资成本决定。对于一个年产量 200 万吨的工厂，假设其拥有空气分离设备，则其新安装及改造成本预计为 600 万欧元到 1200 万欧元。

表 16: 措施的关键信息——富氧技术

措施的关键信息——富氧燃烧技术	
投资成本:	600 万欧元到 1200 万欧元
节能量: (热能和电能)	热能节约 97-198 兆焦 (27 到 55 千瓦时 / 吨 _{熟料}) 用电量增加 10 到 35 千瓦时 / 吨 _{熟料}
二氧化碳减排量: (直接)	10 到 20 千克 / 吨 _{熟料}
优点:	<ul style="list-style-type: none"> • 节能 • 最大化替代燃料的使用 • 提高燃烧的稳定性的
缺点:	<ul style="list-style-type: none"> • 高投资成本 • 需要空气分离设备 • 用电需求的增加 • 用电量增加导致间接排放量的增加

4.8 优化熟料冷却器中的余热回收

4.8.1 基线情况和能耗说明

熟料冷却器是窑系统的重要部分。它会影响熟料生产的性能和经济性。冷却器有两项任务：从热（1450℃）熟料中回收尽可能多的热量，将之重新用于工艺流程，降低熟料温度到适合后续工艺步骤的水平。

冷却器有两种主要类型：回转式冷却器和篦冷机。篦冷机中，熟料在往复炉篦上运输，空气通过炉篦沿着垂直于熟料流的方向流动。在回转式冷却器中，熟料在逆流空气流中冷却。

有两种从冷却器中利用余热的常见的做法：一是将余热用于加热送入窑燃烧工序的二次空气，第二种并不常见的做法是将余热用于预热送入预煅烧炉的三次空气。篦冷机使用电扇和余热。剩余空气中最高温度部分的可被用作送入预煅烧炉的三次空气。回转式冷却器不需要燃烧空气风机，几乎不使用剩余空气，因此其热损耗相对较低 (Schorcht, Kourti, Scalet, Roudier, & Sancho, 2013), (Worrell, Kermeli, & Galitsky, 2013)。

对于新型干法水泥窑，总耗热的 40% 左右可使用预热器和熟料冷却器出口排气的废热。来自熟料冷却器的热量范围为 330 到 540 兆焦 / 吨_{熟料} (91-150 千瓦时 / 吨_{熟料})，源自于冷却器的废气。下表总结了不同代篦冷机的可用热量。熟料冷却器的废气温度从 250 到 340℃ 不等，取决于冷却器的配置和回收效率 (国际金融公司 (IFC), 2018)。

表 17：可用于篦式熟料冷却器的热量 (* 百万吨年——每年一百万公吨)

参数	单位	第一代	第二代	第三代
篦板型		垂直通风，板上有孔	水平通风	水平通风
冷却空气进气	标方 / 千克熟料	2.0-2.5	1.8-2.0	1.4-1.5
废气体积	标方 / 千克熟料	1.0-1.5	0.9-1.2	0.7-0.9
废气中的可用热量	吉焦 / 吨 _{熟料} (千卡 / 千克)	0.419-0.502 (100-120)	0.335-0.419 (80-100)	0.293-0.335 (70-80)
	100 万吨年的吉焦 / 小时 * (兆千卡 / 小时)	52.3-62.8 (12.5-15.0)	41.9-52.3 (10.0-12.5)	36.6-41.9 (8.8-10.0)
回收效率	%	< 65	< 70	> 73

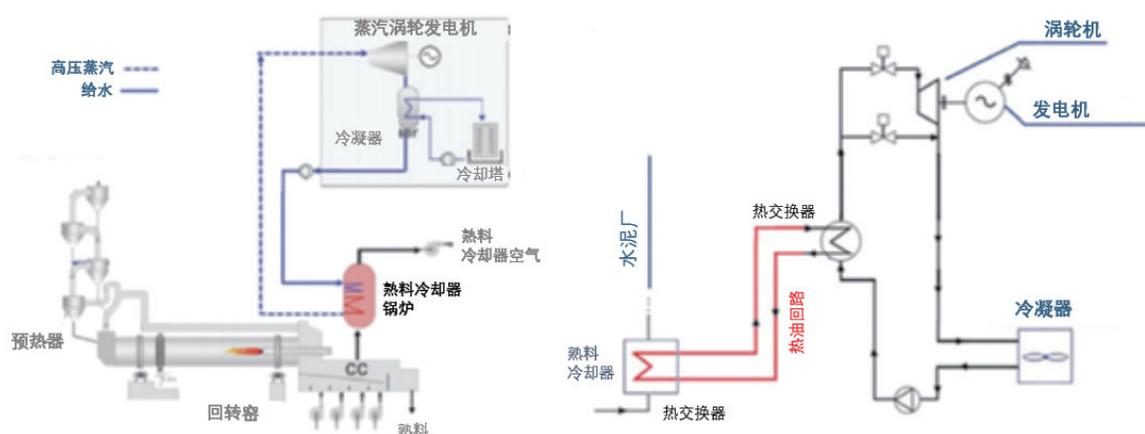
来源：(国际金融公司 (IFC), 2018)

4.8.2 建议改进措施

通常情况下，水泥厂没有大的低温供热要求，因此废热回收项目主要用于发电。废热回收最多可以满足水泥厂 30% 的总电力需求。

用于水泥窑的废热回收电力系统按照朗肯循环（RC）运行。这种热力循环包含一个热源（锅炉），将液态工作流体转变为高压水汽（蒸汽，发电站中），然后膨胀通过涡轮式发电机进行发电。涡轮式发电机排放的低压水汽凝结回液体状态，从冷凝器中流出的冷凝物回到锅炉给水泵，继续循环。废热回收朗肯循环可基于蒸汽或者用作工作液体的有机化合物。蒸汽朗肯循环（SRC）和有机朗肯循环（ORC）是水泥行业最常见的废热回收系统。

图 28：废热回收系统。左侧使用蒸汽朗肯循环（SRC），右侧使用有机朗肯循环（ORC）



来源：改编自：（国际金融公司 (IFC), 2018）

如图 28：废热回收系统。左侧使用蒸汽朗肯循环（SRC），右侧使用有机朗肯循环（ORC）- 左侧工作液体所示，蒸汽朗肯循环中的水先被泵到高压，再进入锅炉。在蒸汽朗肯循环中，使用熟料冷却器锅炉的热废气令水汽化，然后在涡轮机中膨胀到较低温度和压力。如此可产生驱动发电机的机械动力。低压蒸汽随后在真空条件下排入冷凝器，膨胀的水蒸气凝结成低压液体后，回到给水泵和锅炉（国际金融公司 (IFC), 2018）。

有机朗肯循环系统的设计配有两个传热级（图 28：废热回收系统。左侧使用蒸汽朗肯循环（SRC），右侧使用有机朗肯循环（ORC）- 右）。第一级将源自废气的热量传导到中间传热流体（例如热传导油）。第二级将源自中间传热流体的热量传导到有机工作流体。有机朗肯循环系统通常使用高分子质量的有机工作流体，例如比水沸点更低、蒸汽压力更高、分子质量更高、质量流更高的丁烷或者戊烷。

现代发电厂中蒸汽朗肯循环的电效率可能达到 45% 到 46%。源自冷却器的废气温度相对较源自冷却器的热量温度相对较低（250 到 340℃），这限制了水泥窑废热回收系统的效率，最高为 18% 到 25%。有机朗肯循环系统可用于低至 150℃ 的废热源，其涡轮机效率高于蒸汽系统的效率。

4.8.3 节能和温室气体减排潜力

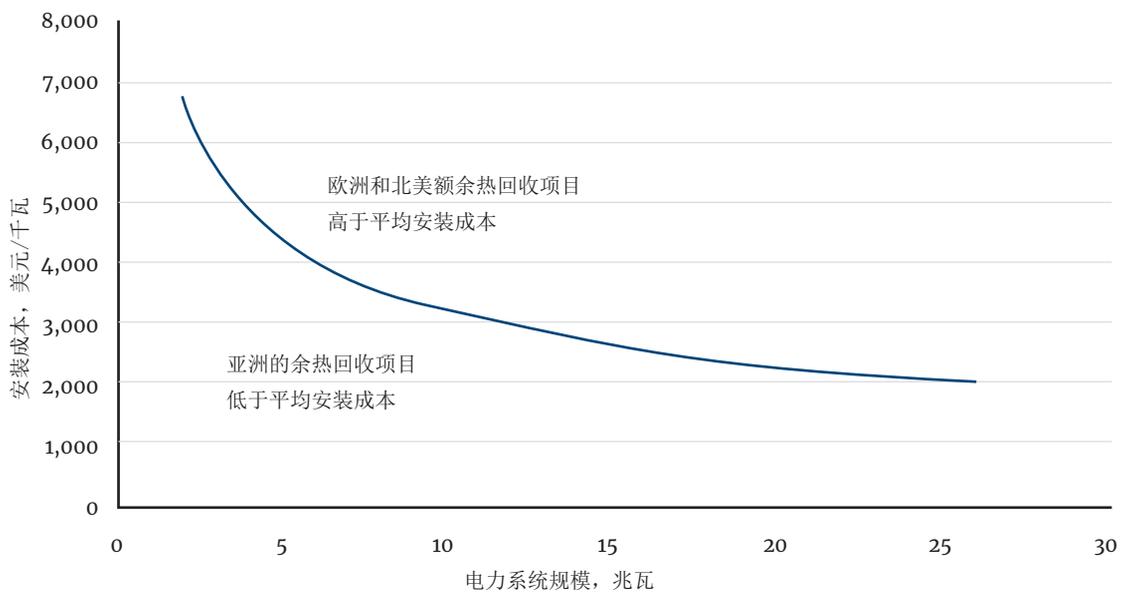
废热发电的经济性取决于与具体地点和具体项目相关的多个因素，包括以下：

- 废气中可用的热量以及该等其他的条件，决定了废热回收系统的规模，可能决定其技术和整体发电效率。
- 热回收系统的资本成本，通常取决于规模、所使用的技术以及设备供应商。

- 系统安装成本（设计、工程、建造、试运行和培训），取决于安装规模、技术、复杂度、供应商和本地条件。
- 系统运行和维护成本受到规模、技术、特定点位的运行限制或者要求的影响。
- 窑的运行小时数和热回收系统的可用性。
- 废热回收系统的净功率输出。
- 预热器、冷却器和空气冷凝器附近空间的可用性。

下图展示了与水泥窑余热回收项目总平均¹⁷安装成本相关的行业估算，单位为美元/千瓦_电（1美元=0.82欧元），表明成本在很大程度上取决于项目规模（兆瓦）、本地成本变动（安装地区）和技术类型（低于2到3兆瓦的系统倾向于采用有机朗肯循环系统）。总资本成本（设备和安装）受到规模的强烈影响——更小规模的废热回收系统每千瓦发电容量的成本更高。因此，欧洲2兆瓦废热回收系统（有机朗肯循环）的总安装成本为5,700欧元/千瓦_电，亚洲25兆瓦系统（蒸汽）的总安装成本为1,600欧元/千瓦_电。

图 29：废热回收安装成本，美元 / 千瓦_电



来源：(国际金融公司 (IFC), 2018)

表 18：措施的关键信息——熟料冷却器中的优化废热回收 (WHR)

措施的关键信息——优化熟料冷却器中的余热回收	
投资成本：	参见图 29
节能量：（热能和电能）	很大程度上取决于设备和废热回收系统的规模。
二氧化碳减排量：	31.7 千克二氧化碳 / 吨 _{熟料} (Price, et al., 2012)
优点：	<ul style="list-style-type: none"> • 降低对能源成本的依赖 • 减少二氧化碳排放
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> • 高投资成本

¹⁷ 曲线代表平均安装成本。欧洲和北美的典型项目具有更高的安装成本，亚洲废热回收项目的安装成本则低于平均值。

4.9 立式辊磨终磨技术

4.9.1 基线情况和能耗说明

水泥生产的最后一步是终粉磨，其电力消耗占到水泥厂总耗电量的 40-45% 左右，约为 51 千瓦时 / 吨_{水泥}。水泥粉磨极大影响水泥的性质（例如强度、需水量）。近年来，水泥产品朝着更高强度级别、更精细化的方向转变。这种改变也使得水泥粉磨工艺能源需求的不断提高。（Ausfelder Florian, 2018）

熟料单独细磨（可能含有最高达到 5% 的次要成分）或者与其他主要成分一起细磨。为了调节凝固，在研磨材料中添加石膏石或石膏 - 硬石膏混合物。混合细磨时，无法单独影响个别成分的颗粒尺寸与分布。因为水泥的原材料具有不同的可磨性，所以对其进行单独粉磨之后再混合，也有助于实现最优的水泥生产。

原则上，有三种类型的磨机：

- 球磨机（使用磨球压碎水泥原材料）
- 材料床辊磨机（使用两个相互旋转的磨辊将材料碾碎）或者
- 立式辊磨机（在旋转磨盘上辊压，将材料粉磨碾碎），用于水泥的粉磨。

（Diethelm Bosold, 2017）

球磨机是最常用的磨机类型，因为它是较容易操作的一种可靠技术。球磨机可以实现广泛的粒度分布，因此有利于加工。正常情况下，球磨机的最大管径为 6 米，最大长度为 20 米。此外，可以使用进入磨机的热气以及粉磨工艺产生的热量，烘干具有一定含水量的矿物掺合料，但烘干范围有限。（Schorcht, Kourti, Scalet, Roudier, & Sancho, 2013）

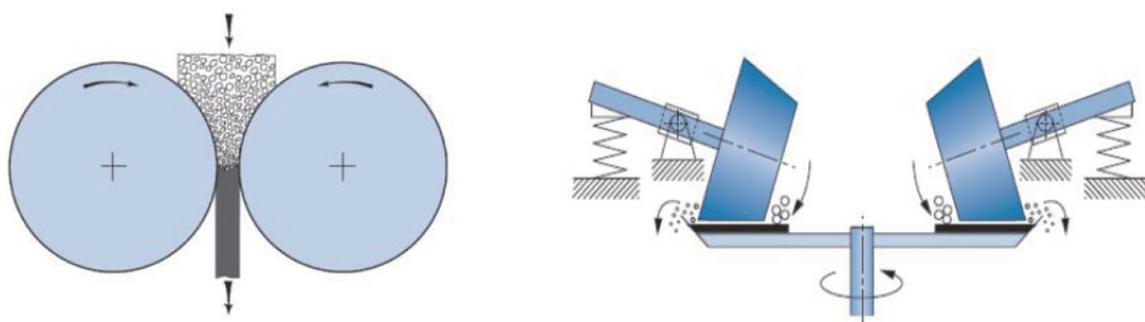
但是，与其他磨机类型相比，球磨机的能耗更高，能源效率排在最后。

4.9.2 建议改进措施

通过工艺优化（包括选粉机的优化，分级器的循环数或者循环速度等工艺变数的调整或者助磨剂的使用）以及使用更高效的磨机取代现有球磨机，可以实现粉磨工艺的节能潜力。（ALLPLAN GmbH, 2010）此章节集中讨论高效磨机。

下图展示了辊压机和立式辊磨机的概念：

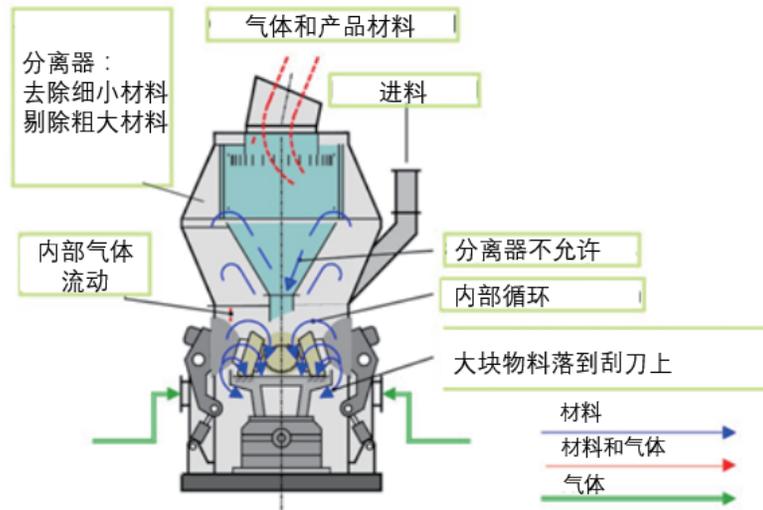
图 30：辊压机（左）和立式辊磨机（右）



来源：（ALLPLAN GmbH, 2010）

立式辊磨机（见下图）由两到四个磨辊构成，以铰接臂为支撑，横跨在水平磨盘或磨碗之上。这些类型的磨机尤其适合同时进行水泥原材料或矿渣的粉磨和干燥，因为立式辊磨机可以处理磨机进料中相对较高的含水量物质。材料通过磨机的传送时间足够短，可以防止水泥熟料的预水化，例如在矿渣水泥粉磨的情况下。（Schorcht, Kourti, Scalet, Roudier, & Sancho, 2013）

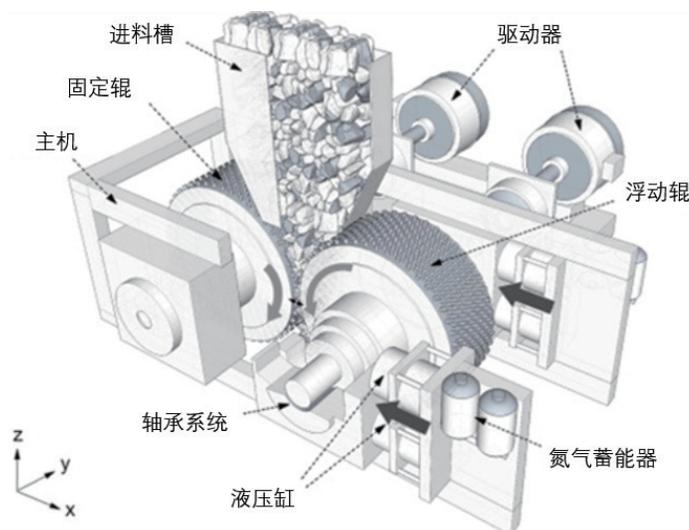
图 31：立式辊磨机



立式辊磨机最开始出现的问题在于磨机内的振动、磨辊和研磨盘的磨损以及最后粉磨的产品质量问题。主要的问题与水泥的最终粒度分布有关，取决于具体的系统。根据较新的信息源，这些问题基本上已被解决，但维护和备件管理依然是此种磨机类型主要考虑的问题。（IFC, 2017）

另一种类型，高压双辊磨机（Gutbett 辊磨机）——见下图——在高压下工作（最高达 3500 巴），经常用于扩大现有磨机的容量。（IFC, 2017）。根据最佳可行技术文件（Schorcht, Kourti, Scalet, Roudier, & Sancho, 2013），此种类型依然需要较高程度的维护。高压双辊磨机经常配合球磨机使用。

图 32：高压 /Gutbett 辊磨机



来源：(Barrios Gabriel K.P., 2016)

立式辊磨机和高压磨辊可以实现最高 4,500 到 5,500 布莱恩（Blaine）的粒度。下表总结了不同磨机类型的特征：

表 19：磨机类型的比较

粉磨工艺	能源消耗	维护要求	干燥能力	高细度粉磨适合性
球磨机	100%	轻微	平均	优秀
Gutbett 辊磨机	65 到 50%	轻微到重大	低（1）	平均
立式辊磨机	75 到 70%	平均	高	平均

（1）分级器内的烘干
来源：[60, VDI 2094 Germany, 2003] [76, Germany, 2006]

来源：(Schorcht, Kourti, Scalet, Roudier, & Sancho, 2013)

结合或以更高效的工艺取代球磨机可以实现巨大的节能。最常见的选择有：

- **预粉磨**，在立式辊压机中完成，在典型球磨机 - 选粉器中完成终粉磨
- **混合粉磨**：部分粉磨工作由球磨机完成，部分由立式辊磨机完成。
- **组合粉磨**：将新料置于辊压机上；将此种集料捣碎之后，通过辊压机的筛子将初步捣碎阶段形成的细料分离出来。经过一次粉磨回路形成的“半成品”之后送入到球磨机中，可作为闭合的粉磨 - 分级回路或者连续磨机运行。通过这种二次粉磨，辊压机的中间产物之后会被研磨到理想的产品细度。一次回路的粗粉与新料则一起被回馈到辊压机中。
- **分别粉磨**：考虑水泥各个组分的具体性质，可使用不同的磨机，分别粉磨不同的水泥进料部分。因为水泥熟料和高炉矿渣的可磨性不同，CEM-III 水泥的混合粉磨总是会出现问题。因为立式辊磨机尤其适合高含水量进料物质的磨机烘干，在处理更大量矿渣时，安装此类磨机效果更为显著。

基于奥地利的经验，上述每一工艺都可能节约最高 10% 的电力 (ALLPLAN GmbH, 2010)。¹⁸

除了现有磨机的改进（如上文所述）之外，也可以完全**更换球磨机**（以内置分离器的立式辊磨机取代球磨机），节约 30-40% 电力。

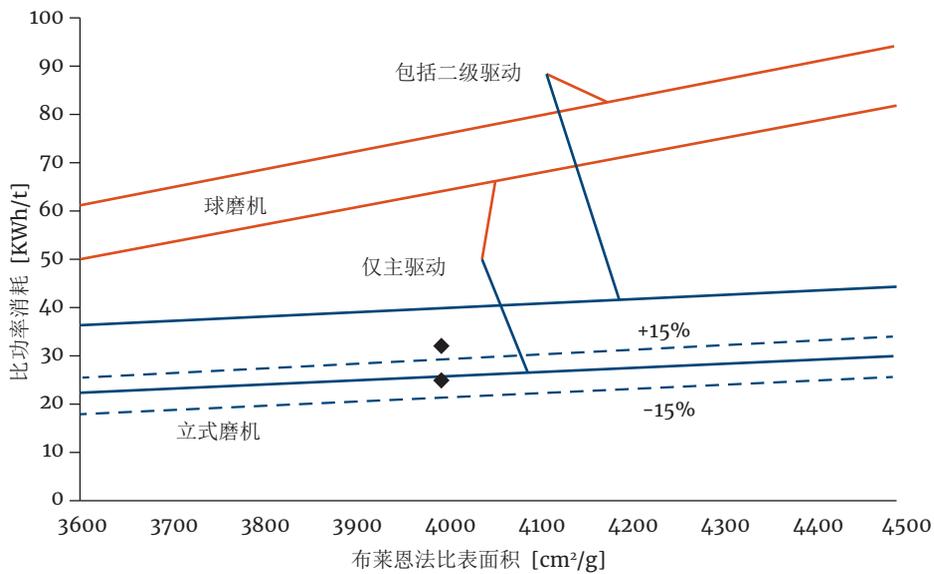
¹⁸ 其他来源所指向的节电要高得多，例如组合使用压力辊和球磨机比传统球磨机的节电高出 15-30%。（IFC, 2017）。

4.9.3 节能和温室气体减排潜力

各种资料来源¹⁹显示，相比球磨机，辊磨机的节能潜力预计为节约电力消耗的30-40%，即10-15千瓦时/吨水泥。（工业生产力研究所，2021）下文描述了根据布莱恩法（描述粉磨的细度）得出的能耗具体评估，还描述了主驱动装置和辅助驱动装置之间的差别。

每生产一吨成品（根据布莱恩法得出的粉磨细度4,000平方厘米/克），配备新的磨辊和完整磨盘表面的主驱动装置须满足25千瓦时/吨产品的能源需求。随着磨损的不断增加，这一数值可能上升到30千瓦时/吨。如果性能评估中纳入了辅助驱动装置（包括鼓风机、内部分级器等），能源需求会增加到大约40千瓦时/吨。与之相比，配备/未配备辅助驱动装置的球磨机的能源需求分别为60/75千瓦时/吨。

图 33：球磨机和立式磨机的能耗（千瓦时 / 吨）



来源：(M. Pohl, C. Oby Buzzi Unicem S.p.A., & K.-H. Zysk, 2012)

表 20：措施的关键信息——立式辊磨终磨技术

措施的关键信息——立式辊磨终磨技术	
投资成本：	2.5-8 美元 / 吨水泥 (年)
节能量：（电能）	更换：30-40%（电），10-15 千瓦时 / 吨水泥 配合球磨机使用：约 10%，5 千瓦时 / 吨水泥
二氧化碳减排量：	更换：7.9 到 19 千克 / 吨水泥
优点：	<ul style="list-style-type: none"> 节能量巨大 也适合矿渣处理
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> 之前：材料床的不稳定性、磨机内的振动、磨辊和磨盘的严重磨损 产品质量问题，主要与水泥最终粒度分布相关 维护工作增多

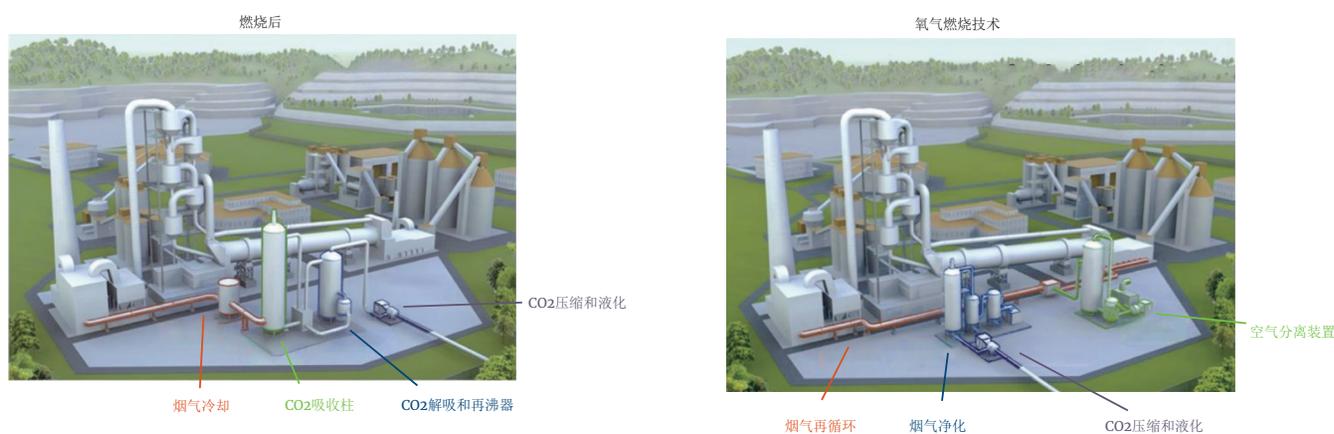
¹⁹ (工业生产力研究所，2021)，(M. Pohl, C. Oby Buzzi Unicem S.p.A., & K.-H. Zysk, 2012)，(Schorcht, Kourti, Scalet, Roudier, & Sancho, 水泥、石灰石和氧化镁生产的最佳可行技术 (BAT) 参考文件，2013)

4.10 进一步发展展望

鉴于水泥生产工艺相关排放量的巨大占比，未来几年的最大挑战必然是降低水泥生产的二氧化碳排放。水泥生产企业的不懈努力使生产过程中能效不断提高，开发出了碳足迹低于典型硅酸盐水泥的熟料高效型水泥。由于复合水泥和高炉水泥的广泛使用，水泥中的平均熟料含量下降到了 71%。但总体来说水泥生产中的过程排放限制了水泥行业深度脱碳。(Verein Deutscher Zementwerke, Hrsg., 2020) 有鉴于此，欧盟水泥研究所 (ECRA)、水泥生产企业、工程技术人员、大学和科研院所一直致力于研究如何进一步减少水泥行业二氧化碳排放对于水泥这样的难减排工业，二氧化碳捕集利用与封存是为数不多可行的脱碳技术选择之一——在水泥厂的回转窑烟囱内捕获二氧化碳，以长期封存（碳捕集与封存）或者之后用于其他目的（碳捕集与利用）。在执行了多项不同的研究和专项调查项目之后，欧洲水泥行业目前正在开展产业规模的碳捕集应用，有望大幅减少工艺相关的温室气体排放。

目前正在研究的两项主要技术：燃烧后处理式（Post-combustion）和全氧燃烧技术（Oxyfuel Technology）。

图 34：二氧化碳 - 燃烧后捕获和氧气燃料技术方案图



来源：(Schneider, 2018)

主要特征是：

燃烧后处理式：（参见 Norcem Brevig Project, Heidelberg Cement 等，<https://www.norcem.no/en/CCS>）

- 通过化学吸收、吸附、薄膜或钙循环对烟道气中的二氧化碳进行尾端分离。
- 高能源密集型技术。

全氧燃烧技术（参见奥地利 Lafarge Retznei 的试点项目等）：

- 使用纯氧而非空气燃烧，加上烟道气再循环，提高二氧化碳浓度。
- 要求工艺和设计调整。(Schneider, 2018)

其缺点在于相关工艺需要消耗大量能源，成本高昂，涉及二氧化碳运输、长期封存或再利用方面的问题还未有很好的答案。



5

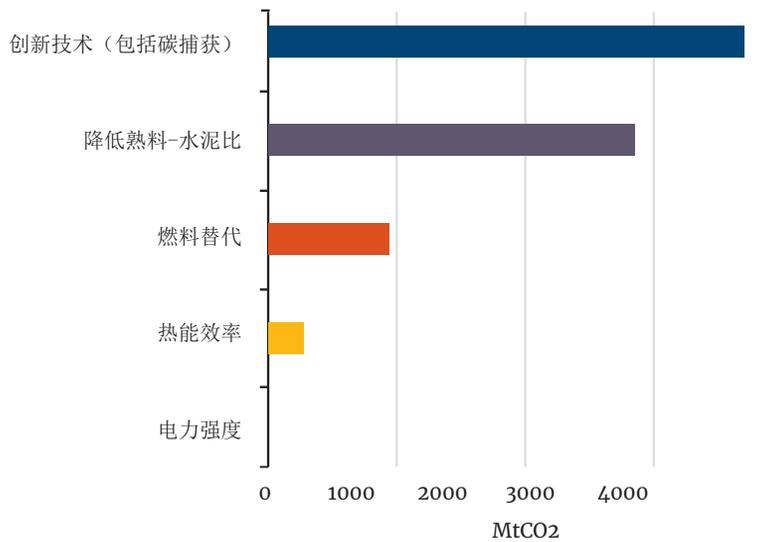
结语

水泥生产是一项能源密集度非常高的工艺。在其整个生产制备过程中，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。

然而，由于过程排放的占比高，通过优化燃料和电力消费减少二氧化碳排放的潜力十分有限。进一步的脱碳潜力在于产品变更（降低熟料 / 水泥比）并考虑二氧化碳碳捕集与封存技术。

长远来看，碳捕集技术有望实现最高 48% 的二氧化碳减排，降低熟料 / 水泥比例有望带来 37% 的减排。使用替代燃料和提高热能效率的作用相对较小（国际能源署，水泥行业低碳转型的技术路径图，水泥行业低碳转型，2018）。²⁰

图 35：对全球二氧化碳减排的贡献



注：累计二氧化碳排放量指的是2020年至2050年，基于各情景的低变异性情形。

关键信息：2050年前，与参考技术情景相比，在路线图愿景下的水泥生产中，碳捕集（48%二氧化碳减排）和降低熟料——水泥比（30%二氧化碳减排）等创新技术所带来的累计二氧化碳减排量处于领先地位。

改编自：（国际能源署，水泥行业低碳转型的技术路径图，水泥行业低碳转型，2018）

²⁰ 2050 年愿景路径图，与 2050 年参考技术情景（RFS）相比

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
高效分离器和选粉机	1-2.5 欧元 / 吨 _{产品}	2.3-4.5 千瓦时 / 吨 _{产品}	1.1-2.3 千克二氧化碳 / 吨 _{产品}	<ul style="list-style-type: none"> 减少电力消耗 增加产量 改善产品质量 	<ul style="list-style-type: none"> 难以实现最佳的密封系统磨粉系统的实际装置必须为改造留出余地
水泥混合材料	0-6 百万欧元 / 吨 _{熟料} ；运行成本增加 0-4.2 欧元 / 吨 _{熟料}	100-400 兆焦 / 吨 _{熟料} (30-110 千瓦时 / 吨 _{熟料}) 热能需求减少 0-3 千瓦时 / 吨 _{熟料} 电力需求增加	100 千克二氧化碳 / 吨 _{熟料} (以粒装高炉矿渣取代 10-15% 的原材料)	<ul style="list-style-type: none"> 热需求和工艺排放的大幅降低 部分使用废料 	<ul style="list-style-type: none"> 并非所有类型的水泥都适合所有类型的应用 必须采取附加工艺步骤 (粉磨、混合)，附加质量保证 替代原材料本地可获得性的差别 (质量 / 数量) 因为预期的生产变革，粒装高炉矿渣和飞灰的可获得性未来会有所下降
替代燃料协同处置	500-1500 万欧元 (改造；熟料产能 2 百万吨 / 年) 运行成本降低 2-2.5 欧元 / 吨 _{熟料}	化石燃料消耗减少 21 总体热能需求的增长：增长 200-300 兆焦 / 吨 _{熟料} 总体电能需求的增长：增长 2-4 千瓦时 / 吨 _{熟料}	1.42-1.8 吨二氧化碳 / 吨垃圾衍生燃料 (取代煤炭) 30-50 千克二氧化碳 / 吨 _{熟料}	<ul style="list-style-type: none"> 化石燃料消耗减少 更高材料效率，更少废弃物处理 	<ul style="list-style-type: none"> 热能需求在一定程度上高于化石燃料 燃料制备的附加工艺步骤 (干燥、粉磨) 高取代率下的潜在运行问题 在框架条件 (立法、废弃物收集 / 可获得性和监测、社会接受度) 尚未到位之时难以落实
熟料烧成系统控制优化	125,000 欧元 (年产量 4,500 吨的工厂)	热能：2.5-10%，32 千瓦时 / 吨 _{熟料} (具体的节能潜力) 电能：2 千瓦时 / 吨 _{熟料}	2.9-5.9 千克二氧化碳 / 吨 _{熟料}	<ul style="list-style-type: none"> 改进热回收 改进材料通过量 对熟料中游离石灰含量的可靠控制 减少燃料消耗 减少耐火材料消耗 较低的维护成本 	<ul style="list-style-type: none"> 操作人员和职工的高教育水平是工艺控制和优化的关键

减少壳体热损耗（改进耐火材料）	0.20 欧元 / 年吨 _{熟料} 产量	0.12 到 0.4 吉焦 / 吨 _{熟料} (33 到 111 千瓦时 / 吨 _{熟料})	24.6 千克二氧化碳 / 吨 _{熟料} (Price, et al., 2012)	<ul style="list-style-type: none"> 热损耗减少 改善窑稳定性 降低生产成本 	<ul style="list-style-type: none"> 结构性考量
悬浮预热器的低压降旋风分离器	3-5.2 欧元 / 年吨 _{熟料} 产量	热能 2.16-5 吉焦 / 吨 _{熟料} (0.6 到 1.4 千瓦时 / 吨 _{熟料}) 电能: 3 千瓦时 / 吨 _{熟料}	2-3 千克二氧化碳 / 吨 _{熟料}	<ul style="list-style-type: none"> 耗电减少 燃料消耗减少 增加产能 	<ul style="list-style-type: none"> 预热器塔需要改造 增加总粉尘含量
富氧燃烧技术	600 万欧元到 1200 万欧元	热能节省 97-198 兆焦 (27-55 千瓦时 / 吨 _{熟料}) 耗电增加 10 到 35 千瓦时 / 吨 _{熟料}	10 到 20 千克 / 吨 _{熟料}	<ul style="list-style-type: none"> 节能 最大化替代燃料的使用 提高燃烧的稳定性 	<ul style="list-style-type: none"> 高投资成本 需要空气分离设备 用电需求的增加 用电量增加导致的间接排放量的增加
熟料冷却器中的优化余热回收	参见图 29	很大程度上取决于设备和废热回收系统的规模	31.7 千克二氧化碳 / 吨 _{熟料} (Price, et al., 2012)	<ul style="list-style-type: none"> 与能源成本的独立性提高 减少二氧化碳排放 	<ul style="list-style-type: none"> 高投资成本
终立式辊磨终磨技术	2.5-8 美元 / 吨 _{水泥} (年)	更换: 30-40% (电), 10-15 千瓦时 / 吨 _{水泥} 配合球磨机使用: 约 10%, 5 千瓦时 / 吨 _{水泥}	更换: 7.9 到 19 千克 / 吨 _{水泥}	<ul style="list-style-type: none"> 节能可观 也适合矿渣处理 	<ul style="list-style-type: none"> 之前: 材料床的不稳定性、磨机内的振动、磨辊和磨盘的严重磨损 产品质量问题, 主要与水泥最终粒度分布相关 维护工作增多

参考文献

- National Development and Reform Commission of China. (2012). *National Key Energy-Saving Technologies Promotion Directory*. Beijing.
- ADEME (Coordinator). (2021). *ODYSSEE MURE Sectoral Profile Industry*. Von <https://www.odyssee-mure.eu/publications/efficiency-by-sector/industry/cement-unit-consumption.html> abgerufen.
- ALLPLAN GmbH, W. V. (2010). *Energieeffizienz der österreichischen Zementindustrie*.
- Arumugam, A. (2015, March). Development in bio-refinery and its impact on pulp and paper industry. *IPPTA: Quarterly Journal of Indian Pulp and Paper Technical Association*, pp. 92-101.
- ASPAPPEL/CELPA. (2010). *Environmental issues specific to eucalyptus-based kraft pulp making*.
- Ausfelder Florian, S. A. (2018). *Flexibilitätsoptionen in der Grundstoffindustrie, Methodik Potenziale Hemmnisse*.
- Barrios Gabriel K.P., T. L. (10. November 2016). A preliminary model of high pressure roll grinding using the discrete element method and multi-body dynamics coupling. *International Journal of Mineral Processing Volume 156*, S. 32-42.
- Bhutania, N., Lindberg, C.-F., Starr, K., & Horton, R. (2012). *Energy assessment of Paper Machines*. Energy Procedia.
- Blum et al. (2009). *Revision of best available technique reference document for the pulp & paper industry*. München: Federal Environmental Agency Germany.
- Bruno Lapillonne, K. P. (2018). Regional training on indicators « ODYSSEE-MURE » 2. Energy efficiency trends by sector: ODEX.
- Cembureau. (19. 04 2021). *Alternative Fuels*. Von <https://lowcarboneyconomy.cembureau.eu/5-parallel-routes/resource-efficiency/alternative-fuels/> abgerufen.
- CemNet. (2018). *The Global Cement Report*. International Cement Review.
- China Energy Conservation Investment Corporation. (2001). *Market assessment of cogeneration in china*. Energy Resources International, Inc.
- Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). (2017). *Waste-to-Energy Options in Municipal Solid Waste Management*. Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.
- Diethelm Bosold, R. P. (2017). *Zement-Merkblatt Betontechnik B 1 9.2017*.
- Durag Group. (2019). www.durag.com. Abgerufen am March 2019 von <https://www.durag.com/fr/industries-fr/cement-industry-fr/>
- Elaahi, A., & Lowitt, H. (1988). *The U.S. Pulp and Paper Industry: An Energy Perspective*. Washington, DC: U.S. Department of Energy.
- Energy Transition. (2021). *energytransition*. Von energytransition.org abgerufen.
- Estrela, C., Sousa-Neto, M. D., & Guedes, O. A. (2012). *Characterization of calcium oxide in root perforation sealer materials*. Brazil.
- European Cement Research Academy, Cement Sustainability Initiative Ed. (2017). *Development of State of the Art-Techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead; CSI/ECRA- Technology Papers 2017*. Düsseldorf, Geneva: available at: <http://www.wbcscement.org/technology>.

European Commission. (2003). *Refuse Derived Fuel, Current Practice and Perspectives*. Brussel.

European Commission. (2018, last update 12/2020). *Clean energy for all Europeans package*. Von https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-strategy/clean-energy-all-europeans_en#energy-efficiency abgerufen.

European Commission. (2021). *COMMISSION IMPLEMENTING REGULATION determining revised benchmark values for free allocation of emission allowances for the period from 2021 to 2025 pursuant to Article 10a(2) of Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council (draft)*.

European Commission Joint Research Centre (JRC), Institute for Energy and Transport. (2011). *2011 Technology Map of the European Strategic Energy Technology Plan (SET Plan)*.

Ewijk, S. v., Stegemann, J. A., & Ekins, P. (2021). Limited climate benefits of global recycling of pulp and paper. *Nature sustainability* 4, S. 180–187.

F.Hutter. (2010). *Data related to the environmental performance of the recently built CCGT plant at the paper and cartonboard mill in RCF DE 2. Germany*.

Fawkes, S. O. (2016). *Best Practices and Case Studies for Industrial Energy Efficiency Improvement – An Introduction for Policy Makers*. Copenhagen: UNEP DTU Partnership.

Focus on Energy. (2006). *Pulp and Paper Energy Best Practice Guidebook*. Madison, Wisconsin.

Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH (FfE). (2019). *CO2 Verminderung in der Zementherstellung*.

Fraunhofer ISI. (2018). *Energy Efficiency Trends and Policies in Germany – An Analysis Based on the ODYSSEE and MURE Databases*.

Gardner. (2008). *Steam Traps & Condensate Systems: How to Maximise a Steam System's Safety, Reliability and Efficiency*. Amsterdam.

Hagelqvist, A. (2013). *Sludge from pulp and paper mills for biogas production*. Karlstad University Studies.

Hand, A. (2007). *Technology Options for the Cement Industry with the Use of Alternative Fuels*. KHD Humboldt Wedag GmbH.

Hardy, O. (27. 04 2021). *AIR SEPERATION TECHNOLOGIES USED IN CEMENT INDUSTRY*. Von Slide Player: <https://slideplayer.com/slide/12697794/> abgerufen.

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

IEA. (2018). *IEA data and statistics*. Von <https://www.iea.org/data-and-statistics> abgerufen.

IEA. (2018). *Technology Roadmap Low-Carbon Transition in the Cement Industry, Low-Carbon Transition in the Cement Industry*.

IFC. (2017). *Improving Thermal and electric Energy Efficiency at Cement Plants – International Best Practice, Capital and Operation Costs*.

IGES (Institute for Global Environmental Strategies). (2021). *Grid Emissions Factors (GEF) Published by Country Government or Adopted as CDM Standardized Baseline V10.10*.

ILO Encyclopaedia. (2021). *Workplace Health and Safety Information*. Von <http://www>.

ilocis.org/documents/chpt72e.htm abgerufen.

Infinity for Cement Equipment. (2021). *Infinity for Cement Equipment*. Von Infinity for Cement Equipment: <https://www.cementequipment.org/> abgerufen.

Institute for Industrial Productivity. (14. 04 2021). *Industrial Efficiency Technology Database*. Von <http://www.iipinetwork.org/wp-content/Ietd/content/cement.html> abgerufen.

Institute for Prospective Technological Studies. (2013). *JRC Reference Reports*. Spain.

International Finance Corporation (IFC). (2017). *Improving thermal and electric energy efficiency at cement plants: international best practice*. Washington, D.C.

International Finance Corporation (IFC). (2018). *Waste Heat Recovery in Turkish Cement Industry*. World Bank Group.

Kramer, K., Masanet, E., Xu, T., & Worrell, E. (2009). *Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Pulp and Paper Industry*. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory.

Kurita. (2021). *Kurita Water Industries Ltd*. Von https://www.kurita.co.jp/english/our_business/business/pulp_and_paper.html abgerufen

Lemmetti, A., Murtovaara, S., Leiviskä, K., & Sutinen, R. (1999). *Cooking Variables Affecting the Kraft Pulp*. University of Oulu.

Lenntech. (kein Datum). *Lenntech*. Von <https://www.lenntech.de/papier-und-pulpindustrie.htm> abgerufen.

Luiten, E. (2001). *Beyond energy efficiency. Actors, networks and government intervention in the development of industrial process technologies*. Utrecht, the Netherlands.

M. Pohl, D. A., C. Obry Buzzi Unicem S.p.A., C. M., & K.-H. Zysk, L. G. (2012). *Operating experience with a vertical roller mill for grinding granulated blastfurnace slag and composite cements; Article in Cement International March 2012*. Düsseldorf, Germany.

MacGregor, M. (1989). *Wet pressing research in 1989. An historical perspective, analysis and commentary*. Cambridge: Fundamentals of Paper Making, Proceedings of the 9th Fundamental Research Symposium.

Martin, N., Anglani, N., Einstein, D., Khrushch, M., Worrell, E., & Price, L. (2000). *Opportunities to Improve Energy Efficiency and Reduce Greenhouse Gas Emissions in the U.S. Pulp and Paper Industry*. California: Lawrence Berkeley National Laboratory.

Mittal, A., Saxena, A., & Mohapatra, B. (2020). *Oxygen Enrichment Technology—An Innovation for Improved Solid Fuel Combustion and Sustainable Environment*. In K. Sangwan, & C. Herrmann, *Enhancing Future Skills and Entrepreneurship* (S. 13–19). Springer, Cham.

N.Adams, T. (kein Datum). *Lime Kiln Principles and Operation*. Washington.

NAF Control Valves. (2021). *Flowserve*. Von <https://naf.se/applications/chemical-pulping/fiberline/cooking/batch-digester/> abgerufen.

National Council for Air and Stream Improvement (NCASI). (2001). *Technologies for Reducing Carbon Dioxide Emissions: A Resource Manual for Pulp, Paper and Wood Products Manufacturers*. Research Triangle Park.

NEDO. (2003). *Model project of efficient use of paper sludge combustion waste heat*.

New Energy and Industrial Technology Development Organization. (2008). *Japanese Technologies for Energy Savings/GHG Emissions Reduction*. Japan.

Nygårds, E. (2016). *Experimental equipment for simulation of press nip in tissue paper machine*. Faculty of Health, Science and Technology, Karlstad University.

ODYSSEE Database. (2018). Von <https://www.odyssee-mure.eu/> abgerufen.

Oorja energy engineering service. (2021). *Oorja*. Von Waste Heat Recovery from Cement Kiln: <http://www.oorja.in/waste-heat-recovery-from-cement-kiln/> abgerufen.

Price, L., Zhou, N., Lu, H., Sambeek, E. v., Yowargana, P., Shuang, L., & Kejun, J. (2012). *Policy Options for Encouraging Energy Efficiency Best Practices in Shandong Province's Cement Industry*. Orlando: Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.

Pumps and systems. (2021). *Pumps and systems*. Von <https://www.pumpsandsystems.com/> abgerufen

Routschka, G., & Wuthnow, H. (2012). *Handbook of Refractory Materials*. Vulkan-Verlag GmbH.

Scandinavian Biogas. (2019). *Industrial wastewater treatment for biogas production*. Amsterdam.

Schneider, M. (2018). *ECRA's cement carbon capture project*. Brussels: ECRA/CEMCAP/CLEANER Workshop, Brussels, 17 October 2018.

Schorcht, F., Kourti, I., Scalet, B. M., Roudier, S., & Sancho, L. D. (2013). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide*. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU. Luxembourg: JRC Reference Reports.

Shahri, N. (2020). *Feasibility Study on the Implementation of Waste Incineration System for a Cement Industry in Algeria*. *Master's Thesis*. Vienna.

Shenzhen Gozuk. (2021). *Gozuk*. Von <http://www.gozuk.com/applications/vfd-for-pumps.html> abgerufen.

Staudt, J., Partners, A. T., Yelverton, W., Witosky, M., Torres, E., EPA, U., International, R. (2010). *ISIS Emissions Control for Pulp and Paper Plants*.

Suhr, M., Klein, G., Kourti, I., Gonzalo, M. R., Santonja, G. G., Roudier, S., & Sancho, L. D. (2015). *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Pulp, Paper and Board*. Luxembourg: European Commission .

Swedish Energy Agency. (2008). *Swedish Pulp Mill Biorefineries, A Vision of Future Possibilities*.

The Cement Grinding Office. (27. 04 2021). *The Cement Grinding office*. Von www.thecementgrindingoffice.com abgerufen.

The Institute for Industrial Productivity. (2016). *Pulp and Paper*. New Delhi.

Tobias Fleiter, B. S. (2013). *Energieverbrauch und CO₂-Emissionen industrieller Prozesstechnologien – Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente*. Fraunhofer Verlag.

U.S. Environmental Protection Agency, Sector Policies and Programs Division, Office of Air Quality Planning and Standards. (2010). *Available and Emerging Technologies for Reducing Greenhouse Gas Emissions from the Portland Cement Industry*. North Carolina.

Umwelt im Unterricht. (August 2018). *Papierherstellung, Papierkonsum und die Folgen für die Umwelt*. Von Umwelt im Unterricht: <https://www.umwelt-im-unterricht.de/hin->

tergrund/papierherstellung-papierkonsum-und-die-folgen-fuer-die-umwelt/ abgerufen.

UPM. (2020). *SO ENTSTEHT QUALITÄTSPAPIER*.

Uwe Weber, H. G. (2019). *Digitale Zwillinge - Wegbereiter für Ökosysteme von morgen*. De-tecon Consulting.

Valmet Forward. (2021). *Valmet Forward*. Von <https://www.valmet.com/media/articles/up-and-running/performance/FPSPUG17/> abgerufen.

VDI-Richtlinien. (2003). *Emissionsminderung Zementwerke*. Germany.

VDZ. (15. 04 2021). *VDZ online*. Von <https://www.vdz-online.de/zementindustrie/zahlen-und-daten/zementindustrie-in-deutschland> abgerufen.

Verein Deutscher Zementwerke, Hrsg. (2020). *Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2019*. Düsseldorf.

Wahlstrom, B. (1991). *Pressing – the state of the art and future possibilities in Paper Technology*.

World Business Council for Sustainable Development. (2015). *Guidelines for Co-Processing Fuels and Raw Materials in Cement Manufacturing*. Geneva.

Worrell, E., Galitsky, C., & Price, L. (2008). *Energy Efficiency Improvement Opportunities for the Cement Industry*. Lawrence Berkeley National Laboratory .

Worrell, E., Kermeli, K., & Galitsky, C. (2013). *Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Cement Making*. An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers.

Worrell, E., Kermeli, K., & Galitsky, C. (2013). *Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for Cement Making*. U.S. Environmental Protection Agency: An ENERGY STAR® Guide for Energy and Plant Managers.

Wua, W.-N., Xiao-YanLiu, Hu, Z., Zhang, R., & Lua, X.-Y. (2019). Improving the sustainability of cement clinker calcination process by assessing the heat loss through kiln shell and its influencing factors: A case study in China. *Cleaner Production*, 132-141.

ZKG-Bauverlag. (2021). ZKG. Von https://www.zkg.de/en/artikel/zkg_Continuous_surveillance_of_kiln_shell_temperature_1548108.html abgerufen.

www.energypartnership.cn

网站



微信

