



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

Supported by:



Federal Ministry
for Economic Affairs
and Energy

on the basis of a decision
by the German Bundestag

造纸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一



giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

编写说明

《造纸行业国际能效及脱碳技术最佳实践指南》是重点用能行业能效技术指南系列出版物的第一本，旨在借鉴德国及国际最佳实践，为包括公共设施（如机场）、造纸、水泥、陶瓷和玻璃纤维行业提供能效与脱碳技术分析经验分享。本报告在中德重点用能单位节能诊断示范项目二期框架下编写和发布。项目受德国联邦经济和能源部（**BMWi**）委托和资助，由德国国际合作机构（**GIZ**）实施，旨在为重点用能单位开展节能诊断，挖掘节能潜力，提出能效措施，提供最佳实践，同时加强中德企业间交流，助力重点用能单位提高能效、减少碳排放。本研究也得到“支持江苏省低碳发展项目（三期）”（在德国联邦环境部资助下，由 **GIZ** 和江苏省生态环境厅共同实施）和“中德能源与能效合作伙伴项目”的支持。



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

研究团队

德国国际合作机构

尹玉霞、Maximilian Ryssel（胡天）、王一惠

编写专家

Nushin Shahri, Thomas Eisenhut, Manuela Farghadan

Helmut Berger（协调）

ALLPLAN GmbH



致谢

感谢中国制浆造纸研究院温建宇工程师对本指南中文专业术语翻译的校对！

地址

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

Torsten Fritsche Köthener Str. 2

柏林10963

图片来源

Shutterstock\ Jose Luis Stephens（封面）

Shutterstock\ NEFLO PHOTO（第9页）

Shutterstock\ seeshooteatrepeat（第13页）

Shutterstock\ hxdyl（第19页）

Shutterstock\ SocoXbreed（第29页）

Shutterstock\ Hannu Rama（第72页）

© 北京，2021年7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。

目录

◆ 1	执行摘要	9
◆ 2	工业部门能源效率概述	13
2.1	能源消耗与能源效率现状	14
2.2	能效政策与管理	17
2.3	能效措施概览	18
◆ 3	制浆造纸行业概览	19
3.1	制浆造纸生产流程与工艺步骤简介	20
3.2	制浆造纸行业节能现状及发展趋势	25
3.2.1	制浆造纸行业能源统计与基准	25
3.2.2	能量流向	27
3.2.3	能源密集型工艺流程	28
◆ 4	制浆造纸行业能效提升措施	29
4.1	间歇式蒸煮器改善	30
4.1.1	基线情况和能耗说明	30
4.1.2	建议改进措施	30
4.1.3	潜在节能量和温室气体减排量	33
4.2	石灰窑改造	34
4.2.1	基线情况和能耗说明	34
4.2.2	建议改进措施	35
4.2.3	潜在节能量和温室气体减排量	36
4.3	黑液蒸发器	37
4.3.1	基线情况和能耗说明	37
4.3.2	建议改进措施	37
4.3.3	潜在节能量和温室气体减排量	38
4.4	磨浆机改善	39
4.4.1	基线情况和能耗说明	39
4.4.2	建议改进措施	39
4.4.3	潜在节能量和温室气体减排量	40
4.5	余热回收	41
4.5.1	基线情况和能耗说明	41
4.5.2	建议改进措施	42
4.5.3	潜在节能量和温室气体减排量	44
4.6	靴式压榨	45
4.6.1	基线情况和能耗说明	45
4.6.2	建议改进措施	45
4.6.3	潜在节能量和温室气体减排量	47
4.7	干燥棒与固定式虹吸器	48
4.7.1	基线情况和能耗说明	48
4.7.2	建议改进措施	49
4.7.3	潜在节能量和温室气体减排量	50

4.8	蒸汽疏水阀维护	51
4.8.1	基线情况和能耗说明	51
4.8.2	建议改进措施	52
4.8.3	潜在节能量和温室气体减排量	52
4.9	实时能源管理系统	53
4.9.1	基线情况和能耗说明	53
4.9.2	建议改进措施	53
4.9.3	潜在节能量和温室气体减排量	54
4.10	泵、风机、压缩机适用的高能效变频器	55
4.10.1	基线情况和能耗说明	55
4.10.2	建议改进措施	55
4.10.3	潜在节能量和温室气体减排量	56
4.11	利用余热干燥生物燃料和污泥	57
4.11.1	基线情况和能耗说明	57
4.11.2	建议改进措施	57
4.11.3	潜在节能量和温室气体减排量	58
4.12	废弃物焚烧（使用污泥和废渣）	59
4.12.1	基线情况和能耗说明	59
4.12.2	建议改进措施	59
4.12.3	潜在节能量和温室气体减排量	61
4.13	污水处理制得沼气	62
4.13.1	基线情况和能耗说明	62
4.13.2	建议改进措施	62
4.13.3	潜在节能量和温室气体减排量	64
4.14	热电联产	65
4.14.1	基线情况和能耗说明	65
4.14.2	建议改进措施	65
4.14.3	潜在节能量和温室气体减排量	66
4.15	未来发展展望	69
4.15.1	数字孪生体	69
4.15.2	生物精炼厂	70
◆ 5	结语	72
◆ 6	参考文献	76

图目录

图 1: 终端能源消费总量结构配比	14
图 2: 工业部门终端能源消费结构	15
图 3: 欧盟工业部门能源效率指数	15
图 4: 德国工业部门能源效率指数	16
图 5: 制浆造纸工艺流程图	20
图 6: 硫酸盐法制浆厂核心工艺流程概览	21
图 7: 蒸煮器	23
图 8: 制备脱墨（再生利用）纸品	23
图 9: 新闻纸加工厂生产理念流程图	24
图 10: 造纸机	24
图 11: 欧洲纸张产量数据	25
图 12: 欧洲制浆造纸行业单位能耗，单位：吨油当量 / 吨	25
图 13: 部分欧洲国家制浆造纸行业单位能耗，单位：吨油当量 / 吨	26
图 14: 能量与物质流向	27
图 15: 相关工艺步骤能源消耗情况	28
图 16: 间歇式蒸煮器基础构造	31
图 17: 冷吹技术说明	32
图 18: 纸浆生产过程示意图——回转窑	34
图 19: 左图：石灰燃烧窑外观，右图：石灰燃烧窑内部结构	34
图 20: 普通石灰窑燃烧火焰曲线与富氧技术火焰曲线	35
图 21: 石灰回转窑耐火材料系统	35
图 22: 制浆工序流程示意图——蒸发器	37
图 23: 磨浆机示意图	39
图 24: 造纸机结构——干燥部	41
图 25: 造纸机纸张干燥部示意图	41
图 26: 热力压缩机示意图	43
图 27: 干燥机汽罩风力系统	43
图 28: 造纸机结构——压榨部	45
图 29: 左图：传统压榨技术图示，右图：薄纸机压榨区	45
图 30: 将传统压榨机改造为靴式压榨机	46

图 31: 传统（辊式）压榨机和靴式压榨机曲线对比说明。曲线下方区域即压榨冲力 (1 磅 / 平方英寸 = 6.9 千牛 / 平方米)	46
图 32: 造纸机结构——干燥部	48
图 33: 干燥缸内冷凝液的四种状态	48
图 34: 干燥缸用虹吸器主要类型，旋转式（左）或固定式（右）虹吸器将冷凝液 从烘缸壳体内吸出	49
图 35: 烘缸和固定式虹吸器，左图：不带扰流棒——右图：带扰流棒	49
图 36: 可拆卸保温垫	52
图 37: 通过使用节流阀来控制泵流量	55
图 38: 恒速泵与变频驱动泵功率曲线比较	56
图 39: 废弃物焚烧工序	49
图 40: 焚烧厂流程图	60
图 41: 污水处理场所示意图及制浆造纸厂污泥术语	62
图 42: 制浆造纸厂的污水处理场所及厌氧消化示意图	63
图 43: EffiSludge 概念	63
图 44: 传统发电与热电联产损失对比图	65
图 45: 制浆 / 造纸厂的热电联产机组实例	66
图 46: 烘缸和固定式虹吸器	70

表目录

表 1: 措施概览	11
表 2: 节能减排成效概览	12
表 3: 产品基准示例	26
表 4: 制浆造纸工艺流程能效提升措施	30
表 5: 措施的关键信息——间歇式蒸煮器改善	33
表 6: 措施的关键信息——石灰窑富氧燃烧	36
表 7: 措施的关键信息——石灰窑改造、高性能耐火材料	36
表 8: 措施的关键信息——黑液蒸发器	38
表 9: 按成品划分的典型耗电量	39
表 10: 硬木盘磨机 (300 绝干吨 / 天) 成本计算	40
表 11: 措施的关键信息——高效率磨浆机	40
表 12: 日产 667 吨造纸机热回收及热损耗示例	42
表 13: 措施的关键信息——余热回收、径流式风机	44
表 14: 措施的关键信息——余热回收、热力压缩机	44
表 15: 措施的关键信息——余热回收、纸机汽罩	44
表 16: 措施的关键信息——靴式压榨	47
表 17: 措施的关键信息——固定式虹吸管与干燥棒	50
表 18: 现有蒸汽疏水阀类型及其特性	51
表 19: 措施的关键信息——蒸汽疏水阀维护	52
表 20: 控制系统和典型的能效提升潜力	54
表 21: 措施的关键信息——实时能源管理系统	54
表 22: 措施的关键信息——泵、风机、压缩机适用的高能效变频器	56
表 23: 措施的关键信息——利用余热干燥生物燃料和污泥	58
表 24: 措施的关键信息——废弃物焚烧	61
表 25: 措施的关键信息——污水处理制得沼气	64
表 26: 德国某燃气轮机联合循环发电厂与某公用事业公司的环境绩效比较	67
表 27: 根据规模和技术计算出的 2010 年基本建设投资	69
表 28: 措施的关键信息——热电联产	69
表 29: 主要事实概述	73

缩略语表

AD	厌氧消化
ASP	活性污泥工艺
ASTEPP	先进造纸工业传感技术
BAT	最佳可行技术
BLGCC	黑液气化联合循环系统
BREF	最佳可行技术参考文件
CBG	压缩沼气
CCGT	燃气轮机联合循环发电机组
CHP	热电联产
CMP	化学机械浆
CNCG	浓缩不凝性气体
CO ₂ -eq	二氧化碳当量
COD	化学需氧量
CTMP	化学热磨机械浆
DIP	脱墨纸浆
DME	二甲醚
DS	干固形物
EEA	欧洲环境署
EFB	空果串
ETS	碳排放交易体系
EU	欧盟
GHG	温室气体
GJ	吉焦
GJ/ADt	吉焦 / 风干吨
GT	燃气轮机
GW	磨木浆
HRSRG	热回收蒸汽发生器
IC	内部循环
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
kWh/ADt	千瓦时 / 风干吨
kWh/kg	千瓦时 / 千克
LBG	液化沼气
LP	低压
mm	毫米
MP	中压
Mt	百万吨
MW	兆瓦
MWh	兆瓦时
NCASI	国家空气与河流改善委员会
NGO	非政府组织
O&M	运行维护
ODEX	能源效率指数
PGW	压力磨木浆
RAS	回流活性污泥
RCF	再生纤维
RMP	盘磨机械浆
SCOD	溶解性化学需氧量
t/d	吨 / 日
t/h	吨 / 小时
t/yr	吨 / 年
TFC	终端能源消费总量
TMP	热磨机械浆
UASB	上流式厌氧污泥床
UNEP	联合国环境规划署
VFD	变频器
WAS	废弃活性污泥
WWT	污水处理



1

执行摘要

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

- **工业部门能源消费占终端能源消费总量比例较高**，世界平均水平为 28.6%，（国际能源署，2018）中国为 50.4%（电热当量计算法，中国能源统计年鉴 2019）；
- 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）中国石油消费比重占 20.4%，天然气占 8.3%，煤炭占 63.9%（电热当量计算法，中国能源统计年鉴 2019）；
- **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。

提高能效的措施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**制浆造纸行业**相关的能效措施，主要考虑其可实现的节能潜力、对中国的适用性及有效性（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。

欧洲造纸厂的每吨纸品**单位能耗**从 1.5 兆瓦时到 6.6 兆瓦时不等，表明单厂层面仍有节能提效空间。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 3 兆瓦时。《制浆造纸行业节能——重点用能行业能效技术指南》（以下简称《指南》）主要关注制浆和造纸两大生产加工流程，并提供相关供能选择方案。制浆工序一般通过机械或化学法制得原浆，或由回收的废纸经过碎解、筛选、脱墨及漂白（可选）等附加环节加工形成废纸浆。造纸工序则包括流浆箱、网部（成形、脱水）、压榨、干燥等步骤，一定情况下根据纸品类别，还需要进行压光等其他处理。

其中对**能耗影响最大**的工艺流程包括：

- 压榨及干燥
- 不可回收纸品的精炼和盘磨
- 再生纤维纸张 / 纸巾的筛选及脱墨处理

下表罗列了公认具有较高能效提升和应用推广潜力的措施，《指南》在接下来章节将对其进行详细介绍。

措施概览

章节	措施	工艺	
4.1	间歇式蒸煮器改善	化学制浆	
4.2	石灰窑改造	富氧燃烧	化学回收
		高性能耐火材料	化学回收
4.3	黑液蒸发器	化学回收	
4.4	高效率磨浆机	机械制浆	
4.5	余热回收	径流式风机	造纸
		热力压缩机	造纸
		纸机汽罩	造纸
4.6	靴式压榨	造纸	
4.7	固定式虹吸管与干燥棒	造纸	
4.8	蒸汽疏水阀维护	蒸汽系统	
4.9	实时能源管理系统	所有工艺	
4.10	泵、风机、压缩机适用的高能效变频器	所有工艺	
4.11	利用余热干燥生物燃料和污泥	化学回收	
4.12	废弃物焚烧	化学回收	
4.13	污水处理制得沼气	化学回收	
4.14	热电联产	化学回收	

根据实践应用经验，改造**磨浆机**和**纸机汽罩**对于大多造纸企业节能降耗的成效尤为显著。此外，靴式压榨和变频驱动也可作为优先考虑措施，尚未采用这两项能效技术的造纸厂应优先考虑投入使用。对于综合性造纸厂（浆纸一体化综合工厂），应考虑改造间歇式蒸煮器、应用石灰窑富氧燃烧，并使用高性能耐火材料和黑液蒸发器。

尽管各项措施的实际投资成本与节能效益取决于造纸企业现有产品类型与能耗现状，但根据相关文献与实践经验能够识别出以下节能潜力：

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（取整）	单位	数值	单位
4.1	间歇式蒸煮器改善	×	×	350	千瓦时 / 吨 _{纸浆}	137	千克二氧化碳 / 吨 _{纸浆}
4.2	石灰窑富氧燃烧	×	×	30	千瓦时 / 吨 _{纸浆}	13	千克二氧化碳 / 吨 _{纸浆}
	石灰窑高性能耐火材料	×	×	20	千瓦时 / 吨 _{纸浆}	7	千克二氧化碳 / 吨 _{纸浆}
4.3	黑液蒸发器	×	-	60	千瓦时 / 吨 _{黑液}	23	千克二氧化碳 / 吨 _{黑液}
4.4	磨浆机改善	-	×	20	千瓦时 / 吨 _纸	12	千克二氧化碳 / 吨 _纸
4.5	径流式风机	×	-	30	千瓦时 / 吨 _纸	12	千克二氧化碳 / 吨 _纸
	热力压缩机	×	-	25	千瓦时 / 吨 _纸	10	千克二氧化碳 / 吨 _纸
	纸机汽罩	×	-	200	千瓦时 / 吨 _纸	78	千克二氧化碳 / 吨 _纸
4.6	靴式压榨	×	-	180	千瓦时 / 吨 _纸	70	千克二氧化碳 / 吨 _纸
4.7	固定式虹吸管与干燥棒	×	-	250	千瓦时 / 吨 _纸	98	千克二氧化碳 / 吨 _纸
4.8	蒸汽疏水阀维护	×	-	500	千瓦时 / 吨 _纸	195	千克二氧化碳 / 吨 _纸
4.9	能源管理系统	×	×	110	千瓦时 / 吨 _纸	43	千克二氧化碳 / 吨 _纸
4.10	泵、风机、压缩机适用的高能效变频器	-	×	10	千瓦时 / 吨 _纸	6	千克二氧化碳 / 吨 _纸
4.11	利用余热干燥生物燃料和污泥	×	-	无法按吨计算 **			
4.12	废弃物焚烧	×	-				
4.13	污水处理制得沼气	×	(×)*				
4.14	运用热电联产	×	(×)*				

* 电力生产

** 由于制浆造纸工厂类型与能源供应基准各不相同，针对能源供应优化措施，无法按同一标准计算得出每吨产品的节能量。

其中对于以下四项措施：

- 利用余热干燥生物燃料和污泥
- 废弃物焚烧
- 污水处理制得沼气
- 运用热电联产

可实现的节能减排量取决于企业自身情况及相关应用，下文对应章节将具体介绍相关决定因素。为进一步挖掘能源（资源）节约潜力，造纸企业可以超越现有应用技术范畴，运用数字孪生技术优化其理念、设计和运行。此外，企业也可选择扩大产品范围，进行生物质精炼（Biorefinery）生产供应化学品、原材料、电力和生物燃料。



2

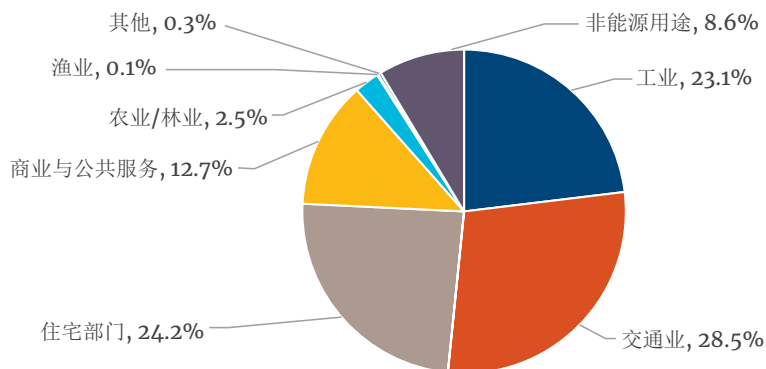
工业部门 能源效率概述

2.1 能源消耗与能源效率现状

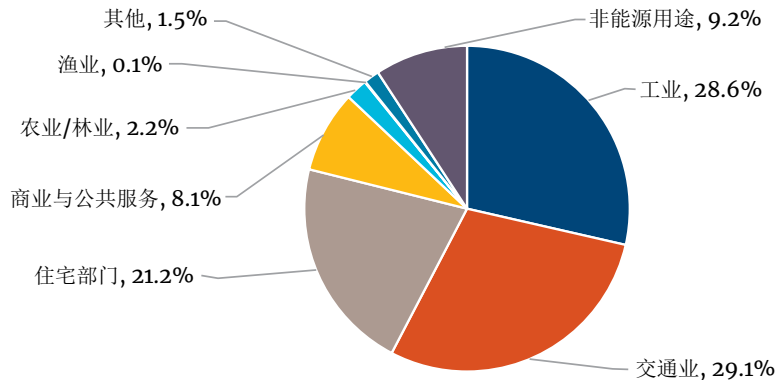
工业部门是全球及中国**主要能源消耗部门**之一，如下图所示，工业部门占终端能源消费总量（TFC）比例较高：

终端能源消费总量结构配比

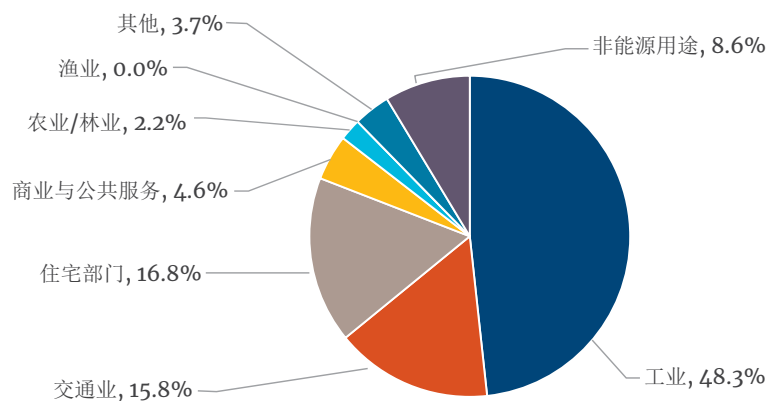
欧盟 28 国终端能源消费总量占比（2018 年）



全球终端能源消费总量占比（2018 年）



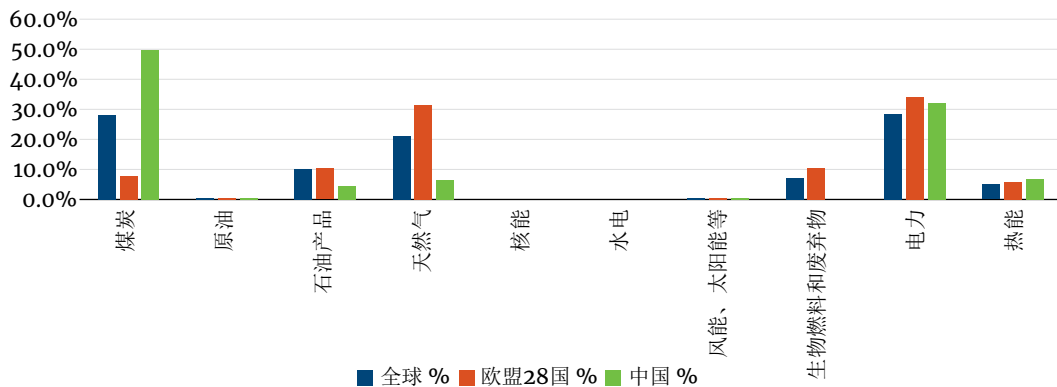
中国终端能源消费总量占比（2018 年）



资料来源：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。

工业部门终端能源消费结构



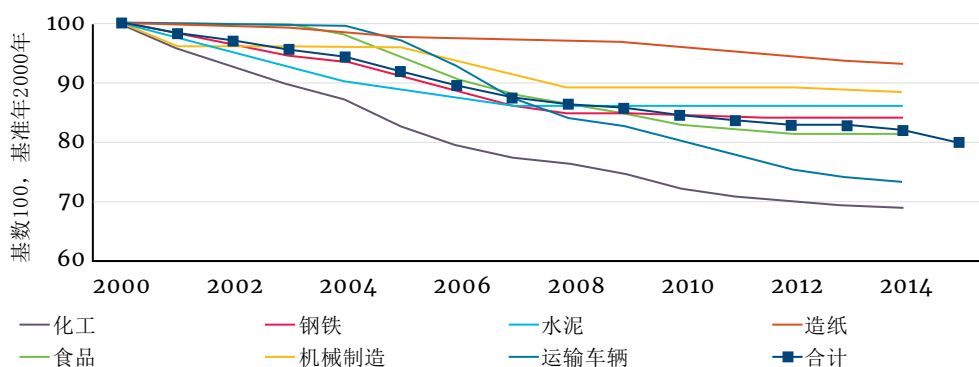
资料来源：国际能源署，2018

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（弗劳恩霍夫系统与创新研究所 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¹，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。

欧盟工业部门能源效率指数

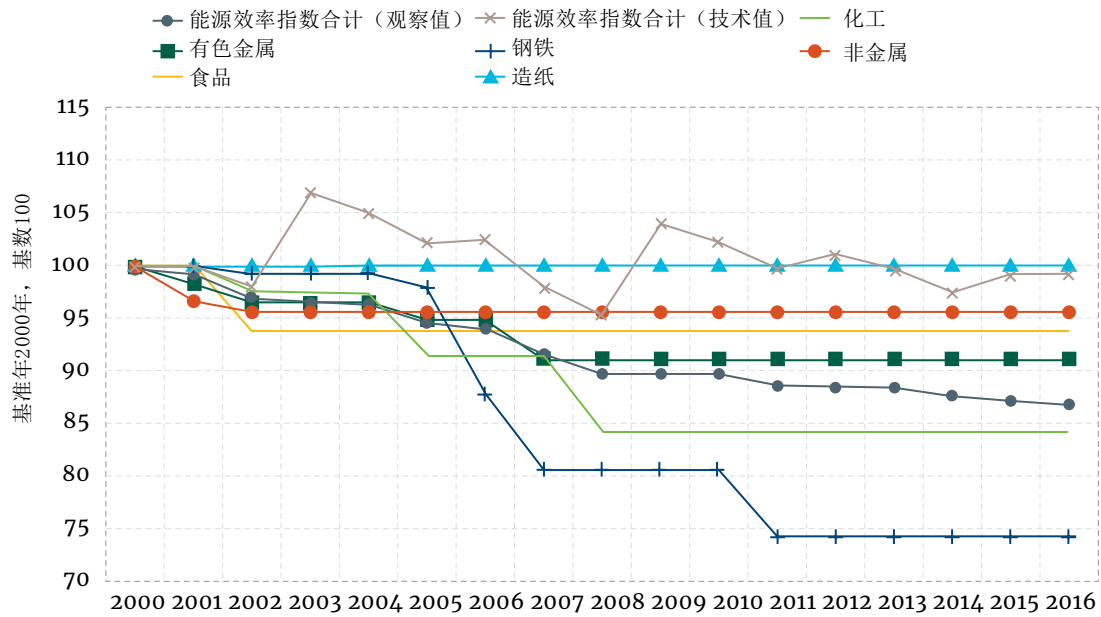


资料来源：Bruno Lapillonne，2018

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：

¹ “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）。

德国工业部门能源效率指数



资料来源：弗劳恩霍夫系统与创新研究所，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，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（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**之间的差距。

以欧洲为例，为落实《欧盟工业排放指令》²（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³。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**》⁴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 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⁵。

² 《工业排放指令》（IED, 2010/75/EU）

³ 欧盟成员国、挪威、冰岛

⁴ 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）。

⁵ 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

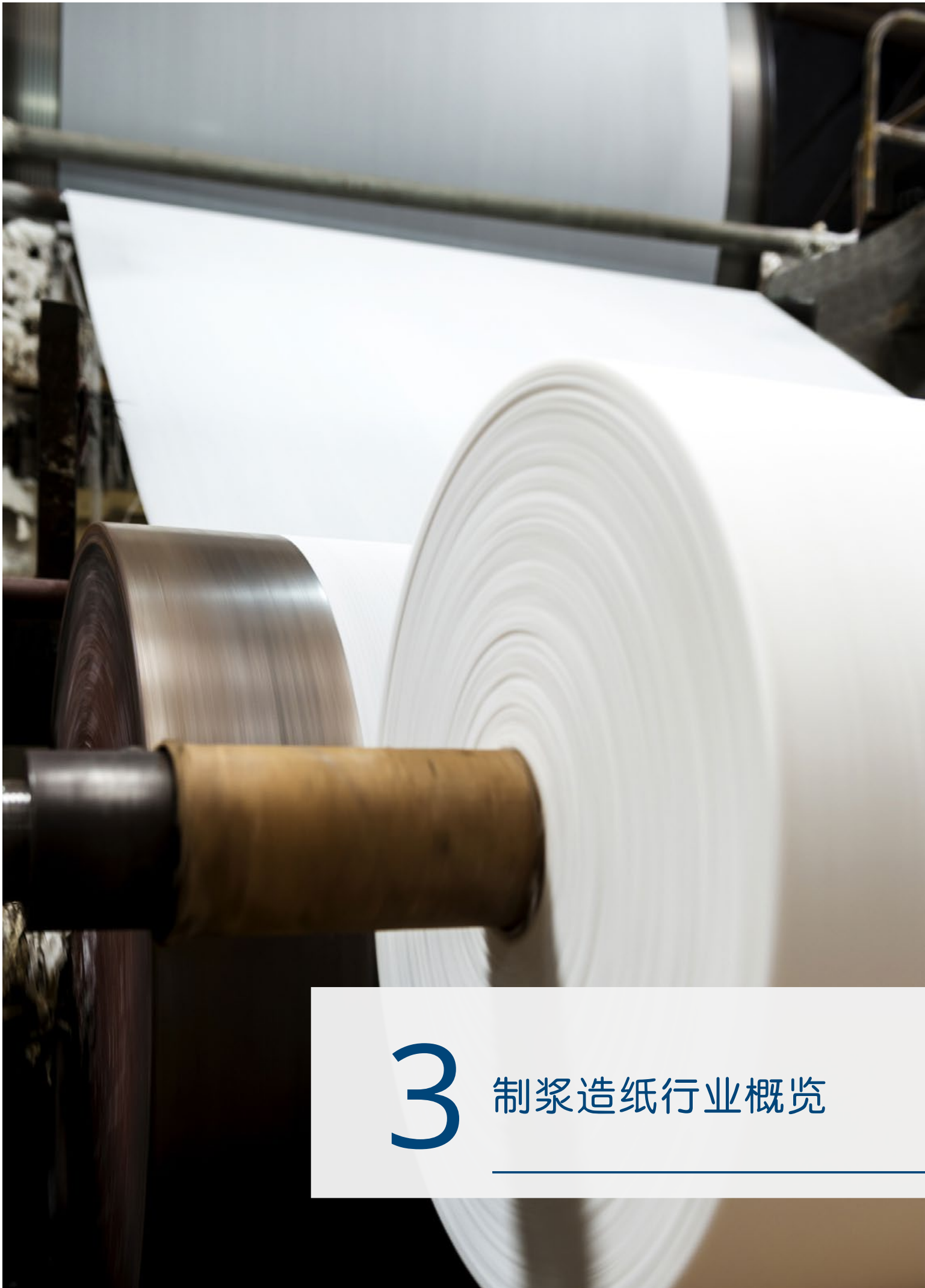
提高能源效率并非要求达到热力学定律（理论）能效极限值，相反目前很多企业能效表现普遍受限于操作惯性和成本限制。不过能效措施成效越“触手可及”，未来进一步挖掘节能潜力的难度就越大。能源成熟度模型对以下能效措施进行了区分：

- **（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《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。生产工艺相关能效措施包括：

- **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（工厂）**余热**为公司内部、邻近热用户或区域供暖系统提供热源工业生产流程余热温度较高的情况下利用余热发电
- 充分利用生产过程中废弃物中潜在的**能源**（优先考虑再生利用或循环利用方案）
- 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）

这些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。



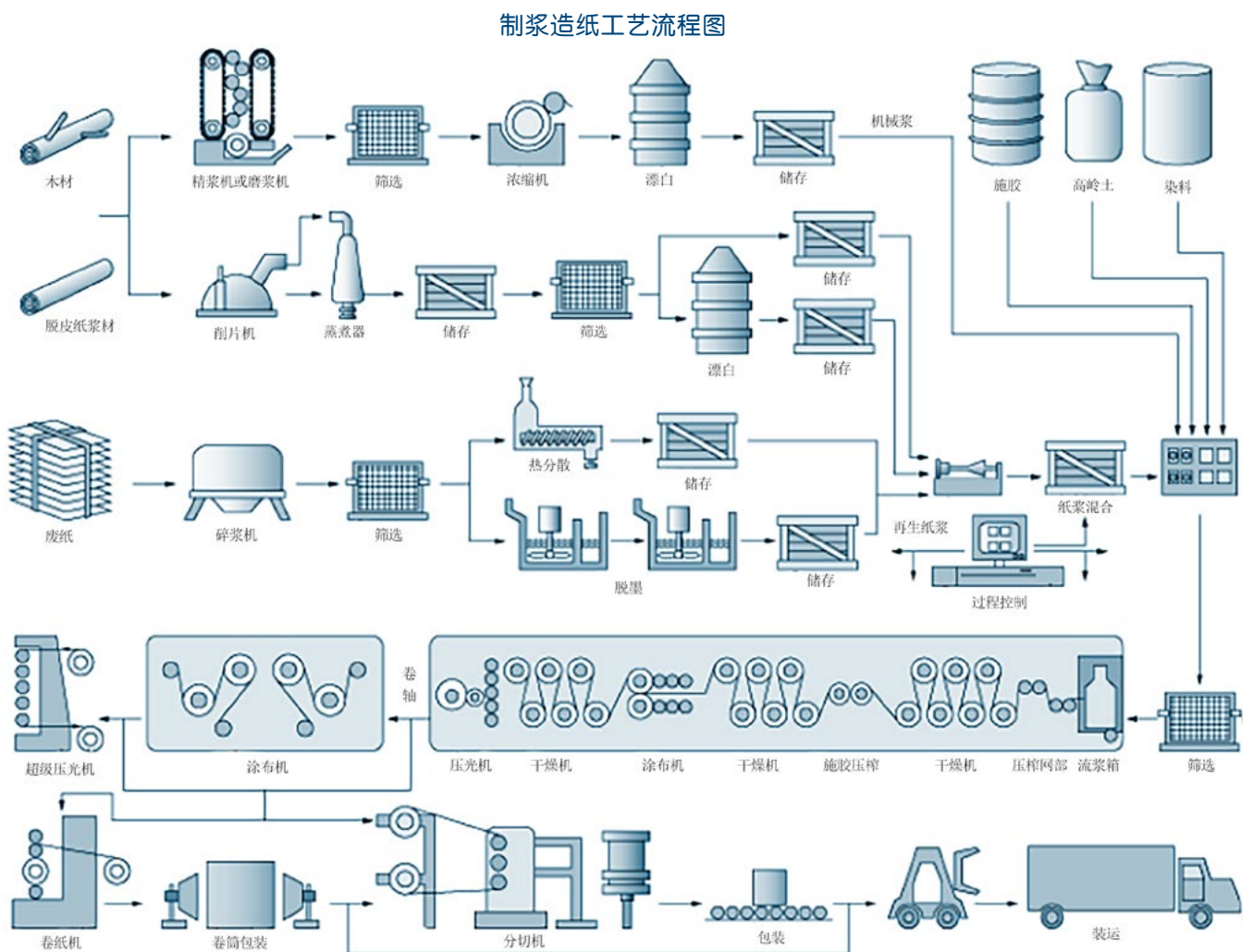
3

制浆造纸行业概览

本章将介绍制浆造纸行业整体生产流程及相关能耗情况，并概述欧洲制浆造纸行业生产情况及能耗数据。

3.1 制浆造纸生产流程与工艺步骤简介

造纸必先制浆，纸张由纤维制成，其中添加化学品以改善最终纸张成品的性能和质量。造纸厂的纸浆一般由纤维原料（原木、生物质或回收纤维）通过化学或机械法制成。制浆造纸厂的实际生产流程存在一定差异，具体视生产原料和纸制品而定。然而，制浆造纸工艺流程的基本原理不变。基本工艺流程图如下所示。包括制浆造纸两大生产工艺的工厂为浆纸一体化综合工厂。



资料来源：国际劳工组织百科全书 ILO Encyclopaedia, 2021

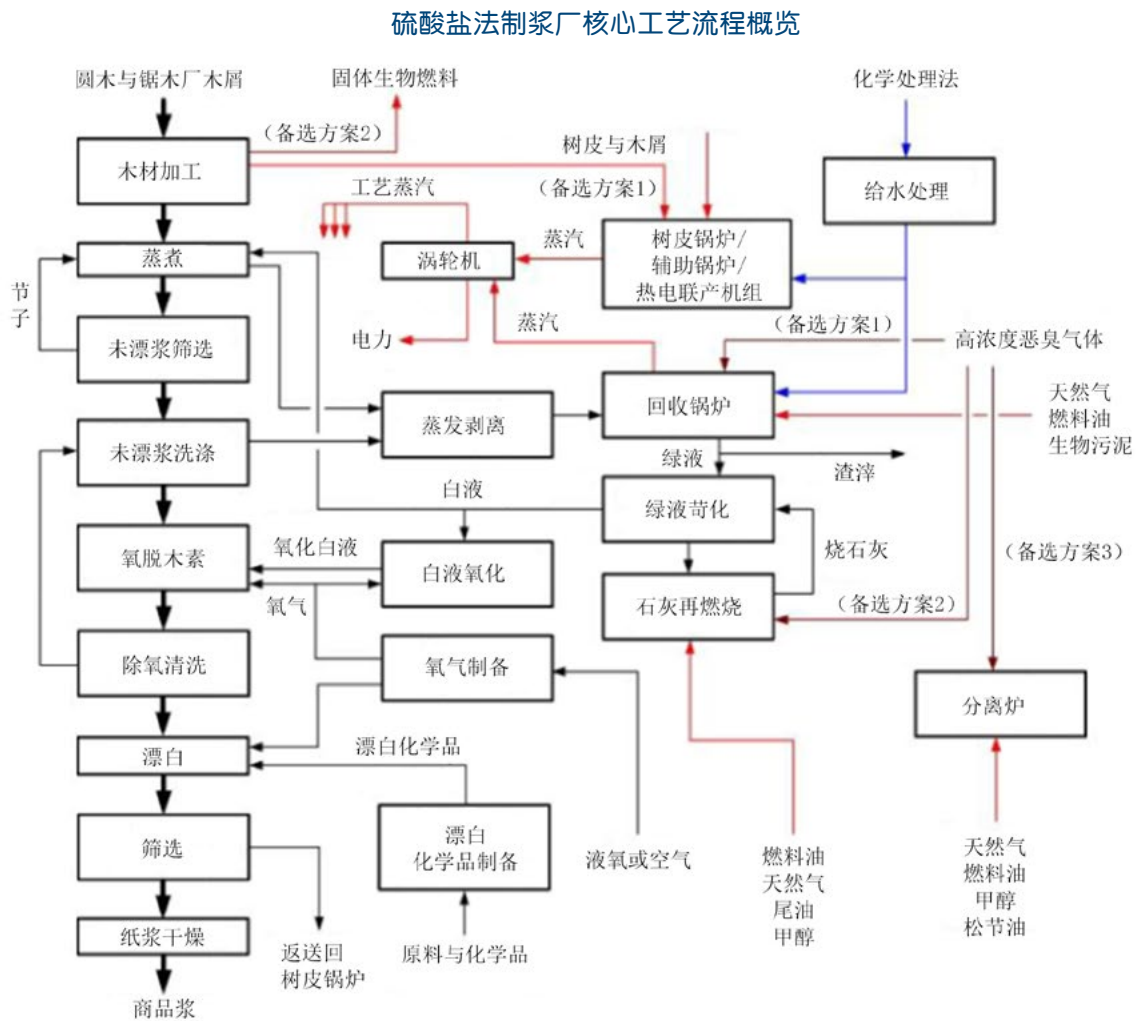
造纸工艺具体包括以下步骤：

- 打浆，纤维除渣、筛选
- 精浆
- 浆料浓度稀释
- 网部纸张成形
- 机械压榨脱水
- 热干燥脱水
- 精加工改善纸面质量

从木材或其他生物质中分离纤维制备纸浆的方法一般有两种：一是使用化学制剂，二是通过机械研磨。

化学制浆法

硫酸盐纸浆厂核心工艺如下图所示：



一般可采用两种化学制浆法制备纸浆：硫酸盐法和亚硫酸盐法。硫酸盐法制浆约占全球纸浆总产量 80%，是应用最为广泛的化学制浆法。亚硫酸盐法在行业占比不断下降，全球目前仅有 10% 纸浆产量采用这种方法。

硫酸盐法制浆使用氢氧化钠和硫化钠处理木质素，即碱法制浆工艺。此项工艺效率较高，适用于处理各类生物质，但缺点是制浆过程会产生甲硫醇⁶和硫化物等恶臭气体，而且漂白工序比“亚硫酸盐法制浆”更加严格。硫酸盐法制浆会产生含二氧化硫的废水，废水 PH 值介于 8-9 之间。此外，制浆产生的废水不得与其他工艺废水相互混合，必须单独进行净化处理。

亚硫酸盐法制浆工艺对原料进行酸性分解，尤其适合处理树节和树皮，而硫酸盐法无法处理这些部位。此项工艺为制浆工序提供更多选择，而且产生的异味更小。但是，成品纸张的强度较硫酸盐法略逊一筹。

机械制浆

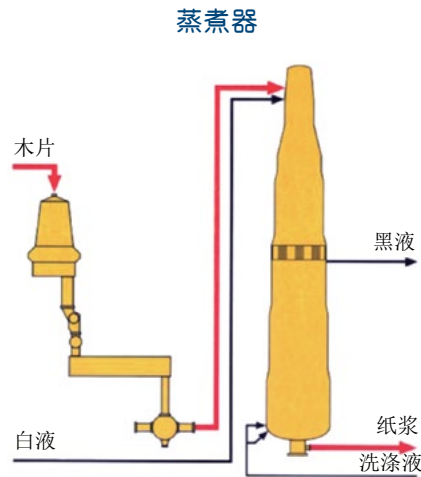
机械制浆工序通过机械作用离解木材或生物质纤维，尽量保留木质素以提高纸浆产量，而且满足一定的强度和白度要求。机械制浆工艺与技术种类多样。

制浆工艺名称	原料	常见用途
磨木浆 (GW) 压力磨木浆 (PGW)	云杉、冷杉 (软木)	印刷书写纸、新闻纸
热磨机械浆 (TMP)	云杉、冷杉 (软木)	印刷书写纸、新闻纸
化学机械浆 (CMP)	云杉，也包括白杨、山毛榉、氢氧化钠、亚硫酸钠、过氧化氢	印刷书写纸、新闻纸、卫生纸、包装纸板
化学热磨机械浆 (CTMP)	云杉，也包括白杨、山毛榉、氢氧化钠、亚硫酸钠、过氧化氢	印刷书写纸、新闻纸、卫生纸、包装纸板

磨木浆或压力磨木浆的制备方式是将原木放入不断旋转的磨石进行研磨，并持续向内注水。盘磨机械浆 (RMP) 的制备方式与热磨机械浆 (TMP)、化学热磨机械浆 (CTMP) 类似，主要使用金属圆盘磨解木屑或其他生物质纤维。

连续式蒸煮器生产纸浆的木质素含量取决于木材原料或其他生物质、化学电荷、停留时间以及蒸煮区的温度情况。连续式蒸煮器与间歇式蒸煮器在操作流程方面基本相同，木屑投入蒸煮区之前需要进行预热处理。下一步，木屑或其他生物质在浸渍罐内与蒸煮液完成浸渍，该步骤不在主蒸煮器内进行。经过浸渍工序，原液温度提升至 155-175 摄氏度。达到最高温度后，蒸煮时间一般需要一两个小时。

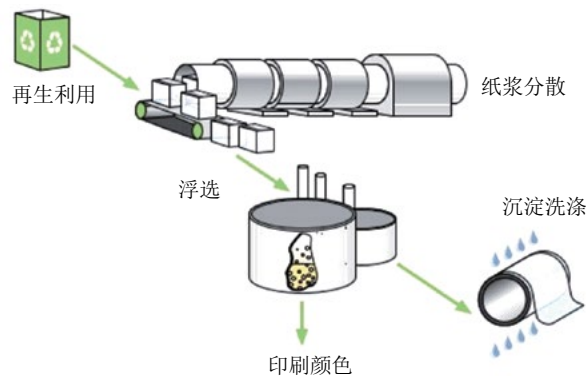
⁶ 甲硫醇是由碳、氢、硫组成的有机气体。



回收材料再生造纸

再生纤维（RCF）或回收材料造纸需要增加一道额外工序，以分离疏解纤维并去除杂质。具体生产加工流程取决于成品纸张类型，新闻纸、卫生纸或纸板等纸品对工序的要求各不相同。视成品加工需要，可仅进行机械清洗（生产全废纸挂面箱纸板或纸板）或增加脱墨工序（生产新闻纸、卫生纸或脱墨纸板）。

制备脱墨（再生利用）纸品



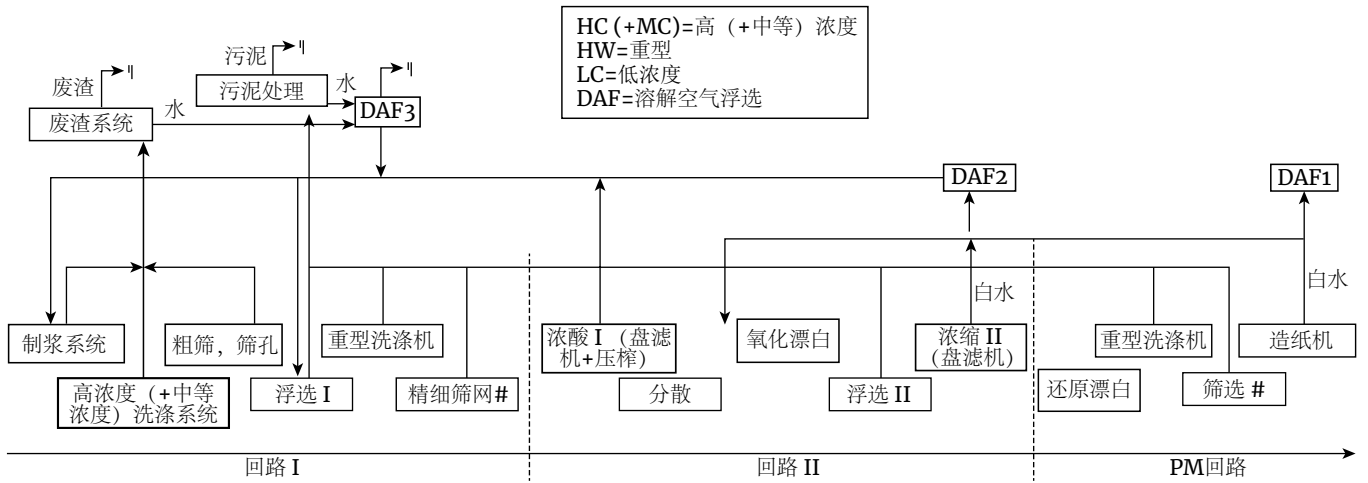
主要工艺步骤如下：

- 干燥纸张再次打浆进行再生利用：碎浆机加入热水、白水或生产用水分解纸张纤维。脱墨工序则需要加入添加剂（氢氧化钠）。
- 机械去除杂质
- 浮选脱墨（备选方案）：加入氢氧化钠和硅酸钠，将油墨颗粒从纤维中释放并使其保持分散状态。通过（多级）浮选技术分离纤维与油墨。可使用筛带压榨机、（盘式）增稠机、螺旋压榨机或洗浆机提高浆料浓度。
- 水洗脱墨和除灰工序（可选）可对较小颗粒进行脱墨处理
- 漂白（可选）

每吨再生纸产生约 100-150 千克脱墨残渣，多数情况下用于焚烧发电。

最佳可行技术参考文件提及的新闻纸再生利用案例如下图所示：

新闻纸加工厂生产理念流程图



制浆（精炼）工艺将原浆（上文所述化学浆、机械浆、再生纸浆）转化为造纸用成品浆，随后开始造纸工序。

磨浆

磨浆工序主要使用盘磨机（带旋转或固定式圆盘）改变纤维形态，使其满足成品特性需求。其耗电量通常介于 10 千瓦时 / 吨至 500 千瓦时 / 吨之间，生产特种纸时更可高达 3000 千瓦时 / 吨。因此，对于使用化学浆的单一造纸厂而言，磨浆环节的耗电量最高。

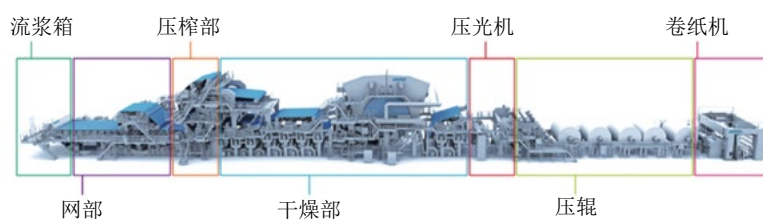
造纸工序

造纸工序在大型造纸机内完成，包括以下部分：

- 流浆箱：供应纤维悬浮液——经处理的浆液含水量：**99%**
- 网部：流浆在网部均匀分布，纤维排列和纸张强度就此定型，同时脱去大部分水分——处理之后含水量：**80%**
- 压榨部：压榨脱水；调整湿纸页松厚度、表面平滑度和强度——处理之后含水量：**50%**。
- 干燥部：在热蒸发空心圆筒内脱去残余水分——处理之后含水量：**3-8%**。
- 压光（影响纸张平滑度和光泽度）、卷取及复卷：将纸张制成母卷。

造纸机基本结构如下图所示：

造纸机



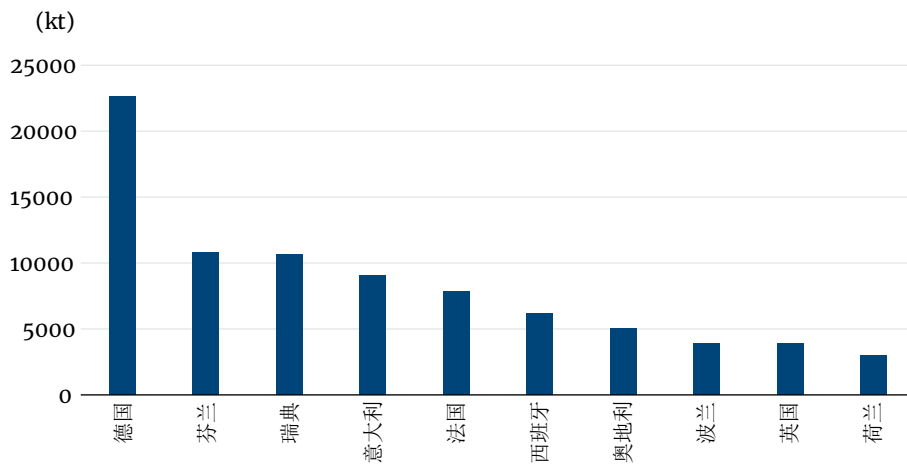
3.2 制浆造纸行业节能现状及发展趋势

本章主要分析欧洲制浆造纸行业节能提效发展现状，同时简要介绍行业主要耗能工艺。

3.2.1 制浆造纸行业能源统计与基准

欧洲各国纸张产量如下图所示。2018年，欧盟纸张产量总计9253.82万吨。前四大生产国分别为德国、芬兰、瑞典、意大利，占总产量56%。

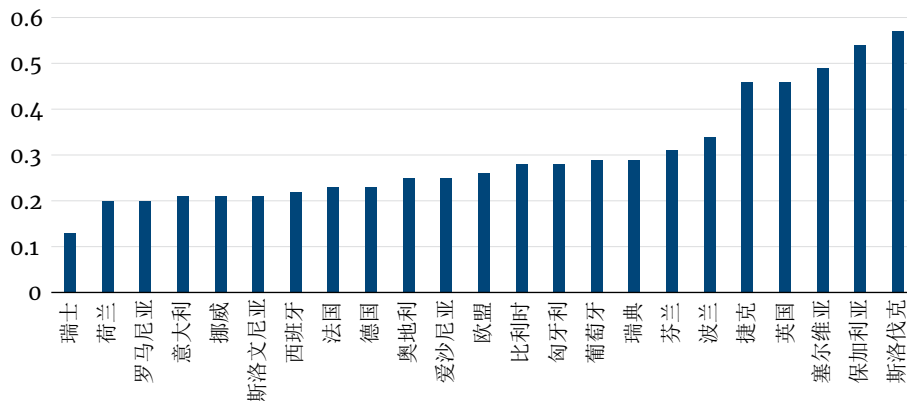
欧洲纸张产量数据



资料来源：ODYSSEE 数据库，2018

单位能耗即指单位产量能源消耗，在此基础上分析具体行业能耗情况。在制浆造纸行业，单位能耗指生产一吨纸张或纸浆消耗的能源。在欧盟地区，制浆造纸行业单位能耗从0.13吨油当量/吨（瑞士）到0.57吨油当量/吨（斯洛伐克）不等，2018年平均水平为0.26吨油当量/吨（约等于3兆瓦时/吨）。

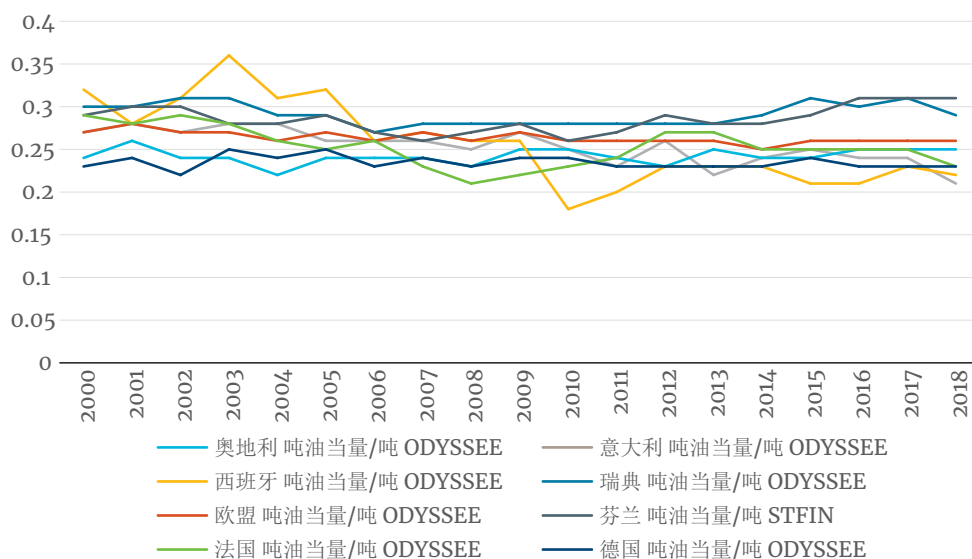
欧洲制浆造纸行业单位能耗，单位：吨油当量/吨



资料来源：ODYSSEE 数据库，2018

欧洲制浆造纸行业整体平均单位能耗趋于稳定。

部分欧洲国家制浆造纸行业单位能耗，单位：吨油当量 / 吨



资料来源：根据 ODYSSEE 数据库自制图表，2018

然而，造纸企业整体节能减排表现仍有待改进，需进一步**降低（终端）能耗**，同时加强**温室气体减排**力度。要实现该目标，可实施节能措施并改用替代性燃料或改造生产设施。欧盟碳排放交易体系部分纸浆纸制品当前基准如下图所示（欧盟委员会（European Commission），2021），单位：吨二氧化碳当量 / 吨。表中还列出能效排名前**10%**的设施的平均排放值⁷。排名靠前的高效设施排放值优于基准值，可以看出制浆造纸行业具备减排潜力。

产品基准示例

产品基准	2016 到 2017 年能效排名前 10% 的生产设备平均排放量（吨二氧化碳当量 / 吨）	2021-2025 年基准值（配额 / 吨）
亚硫酸盐浆、热磨机械浆和机械浆	0.000	0.015
回收纸浆	0.000	0.030
新闻纸	0.007	0.226
无涂层精细纸	0.011	0.242
涂层精细纸	0.045	0.242
纸巾	0.139	0.254
全废纸挂面箱纸板与瓦楞原纸	0.059	0.188
无涂层纸箱板	0.009	0.180
涂层纸箱板	0.011	0.207

资料来源：欧盟委员会，2021

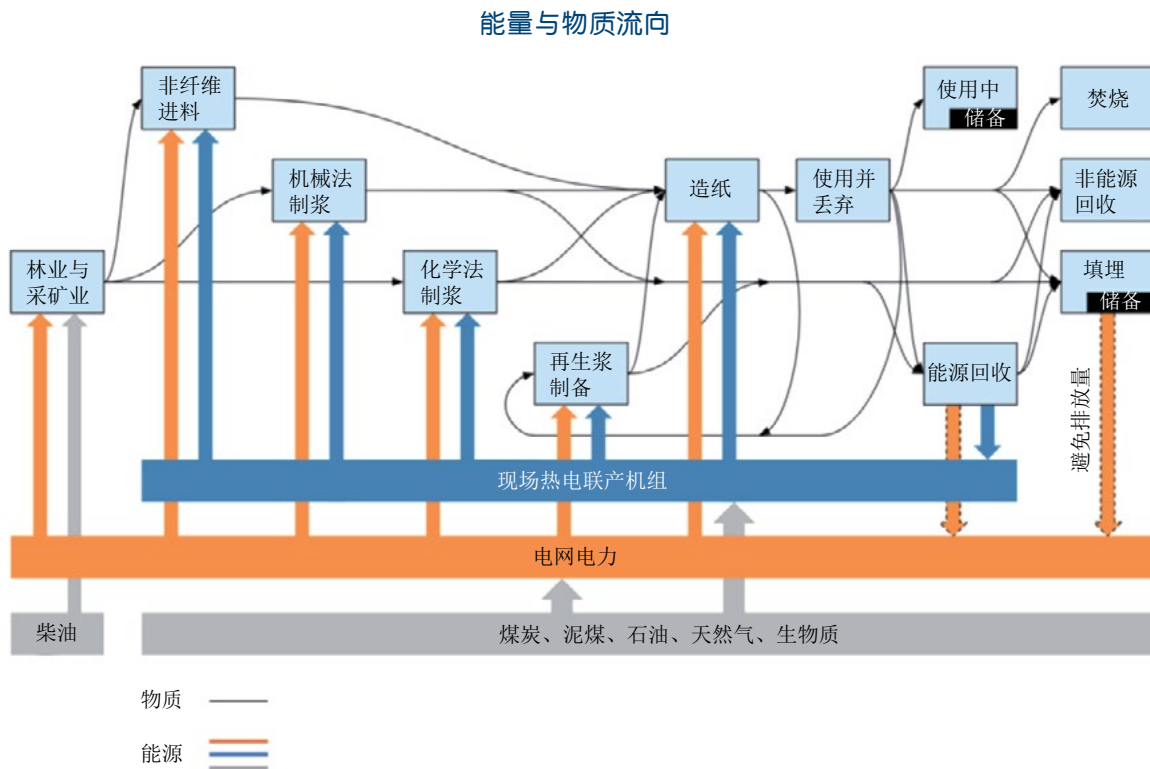
⁷ 若使用生物质和废弃物作为能源，排放即可为零。

3.2.2 能量流向

制浆造纸行业属于能源密集型产业，能源消费包括电力及由燃料转化的热能。由于能源供应短缺、能源成本上升，节能增效已成为制浆造纸行业的必经之路。《指南》以下各章介绍制浆造纸行业能效措施，主要关注制浆造纸工序（未考虑高效电机等输送功能型通用设备），同时考虑行业相关能源供应。

制浆造纸行业使用两类终端能源：热能与电能。电能主要用于驱动泵和风机。热能主要以蒸汽形式用于蒸煮器、蒸发器及纸浆干燥等环节。高压蒸汽则用于涡轮发电机发电。从涡轮机中抽取的中压或低压蒸汽主要有以下用途：

- 将水、木屑、纸浆纤维、空气及化学品加热至加工温度；
- 在化学制浆工艺中提高蒸煮液温度；
- 在蒸发器中蒸发硫酸盐和亚硫酸盐制浆废液中的水分，然后在回收锅炉中进行烧制；
- 提高纸张湿度，制备再生纸浆料（有时用于在分散器中加热浆料）；
- 在造纸机或制浆机干燥段蒸发纸浆或纸页残余水分；
- 干燥涂层纸。



在制浆造纸厂，电力用途相当广泛，例如用于：

- 磨浆机和盘磨机，生产磨木浆、热磨机械浆和化学热磨机械浆；
- 碎浆机，将所购纸浆打碎加工，或利用再生纤维制浆；
- 打浆、碎浆、磨浆；
- 驱动造纸机和其他制浆造纸机械设备；
- 驱动泵、风机、皮带和螺旋输送机进行输送；
- 混合液体和悬浮液；
- 现场制备化学品；
- 真空泵；
- 压缩机。

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。制浆造纸行业最佳可行技术参考文件对这一问题展开具体分析，同时借鉴德国联邦环境署 2009 年工作实例。

如图 15 所示，造纸工序的压榨部和干燥部普遍能耗最高。此外，制浆工序的精炼和磨浆环节（回收纸 / 再生纤维纸除外）能耗最高。注：能耗越高，表中方格颜色越深。

相关工艺步骤能源消耗情况

流程 (1)	一体化无涂层机械法	一体化涂层机械法	非一体化无涂层无木材	非一体化带涂层无木材	再生纤维不脱墨处理	基于再生纤维的图形纸（脱墨处理）	基于再生纤维的纸板（脱墨处理）	非一体化纸巾	基于再生纤维的纸巾	特种纸，无木材
木材加工			不适用	不适用	不适用	不适用	不适用	不适用	不适用	不适用
磨浆										
研磨			不适用	不适用	不适用	不适用	不适用	不适用	不适用	不适用
筛选										
高浓洗涤										
浓酸			不适用	不适用				不适用		不适用
脱墨			不适用	不适用	不适用			不适用		不适用
漂白			不适用	不适用	不适用			不适用		不适用
混合										
流送										
成型										
压榨										
干燥										
涂布	不适用		不适用		不适用	不适用		不适用	不适用	
压光					不适用		不适用	不适用	不适用	
表面处理										
核心服务										
	非常密集（制浆造纸厂能耗最大的工艺流程）									
	中等（主要耗能工艺流程）									
	低（对制浆造纸厂的用能状况产生轻微影响）									
	可忽略不计									
不适用	该工艺不适用于制造该等级纸品									
	该等级纸品所用工艺及生产流程存在差异									



4

制浆造纸行业 能效提升措施

下表中列出了本章将深入分析的 14 项能效提升措施。每节内容将首先介绍基线情况，并介绍能效提升措施及其在节约能源、减少温室气体排放方面的潜力。若缺乏节能或温室气体排放相关数据，则根据过往经验、制浆造纸行业相关能耗数据以及中国电网（平均）排放系数进行自行估算：（Institute for Global Environmental Strategies, 2021）。

制浆造纸工艺流程能效提升措施

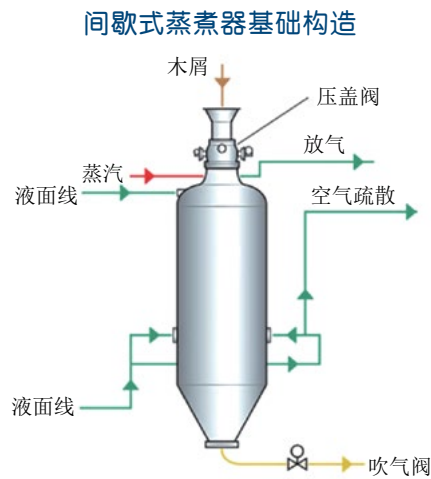
章节	措施	工艺
4.1	间歇式蒸煮器改善	化学制浆
4.2	石灰窑改造	富氧燃烧
		高性能耐火材料
4.3	黑液蒸发器	化学回收
4.4	高效率磨浆机	机械制浆
4.5	余热回收	径流式风机
		热力压缩机
		纸机汽罩
4.6	靴式压榨	造纸
4.7	固定式虹吸管与干燥棒	造纸
4.8	蒸汽疏水阀维护	蒸汽系统
4.9	实时能源管理系统	所有工艺
4.10	泵、风机、压缩机适用的高能效变频器	所有工艺
4.11	利用余热干燥生物燃料和污泥	化学回收
4.12	废弃物焚烧	化学回收
4.13	污水处理制得沼气	化学回收
4.14	热电联产	化学回收

4.1 间歇式蒸煮器改善

4.1.1 基线情况和能耗说明

为了分离纤维，首先需要去除纤维壁与中间层的木质素，该步骤主要通过化学制浆法完成。木屑或其他生物碎屑进入蒸煮器后应全面均匀受热并浸渍化学制剂，这点非常重要。木屑经由蒸汽加热，以减少其空气含量，提高蒸煮液吸收率。

在浸渍和蒸煮阶段，即初步脱木质素反应阶段，硫酸盐纸浆的木质素发生溶解反应。尽管该阶段仅能溶解20%-25%木质素，但能有效提高下一步蒸煮阶段的蒸煮液渗透率。在间歇式蒸煮器中，经预处理的木屑和蒸煮液在高温高压下进行蒸煮。残余木质素含量达标后，浆液被排出并重复蒸煮工序。



4.1.2 建议改进措施

近年来，间歇蒸煮系统得到显著改进。下文介绍的新系统不仅能耗更低、生产效率更高，而且能有效减少挥发性有机化合物，改善工作环境质量。

间接加热技术

通过换热器和强制循环间接加热液体，改善蒸煮均匀性，比传统工艺更可避免出现蒸煮液稀释的问题。蒸煮液从间歇式蒸煮器泵入外部换热器，随后再返回蒸煮器，可有效减少蒸汽负荷。该步骤要求将蒸煮液从含有大量木屑的蒸煮器内抽出至特定位置。为便于蒸煮液自由移动，木屑之间应保留足够间隙。首选木屑尺寸不可超过8毫米。

此项改进措施需要用到带泵循环系统和外部换热器，并且在蒸煮器壁加装过滤器。

冷喷放技术

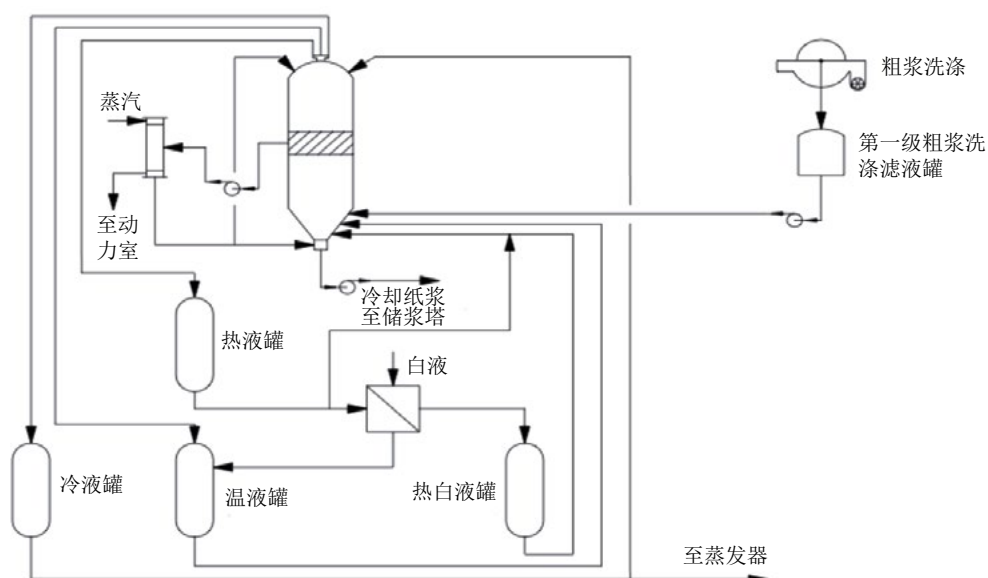
该项技术适用于改造硫酸盐法制浆工艺，但缺点是更换蒸煮器成本较高。通常情况下，除非增产或现有设备过于陈旧，否则不应随意更换蒸煮器。

蒸煮工序结束后，使用洗浆机粗浆滤液置换高温废浆液并将其从蒸煮器中排出，可减少蒸煮器高温蒸汽消耗。此外，回收黑液还可预热木屑并对其进行浸渍，同时加热其他原料，如白液或生产用水。

冷喷放技术回收部分黑液热量并用于下一个蒸煮环节，有助于减少蒸汽及热量消耗。同时，回收的黑液还可预热并浸渍木屑原料，或用于加热白液或生产用水。此外，以冷喷放系统替换现有间歇式蒸煮器可减少漂白剂用量。

如前所述，这项技术可减少蒸煮器的蒸汽需求量，同时降低锅炉燃料消耗，有效降低运营成本。具体节能效果视蒸煮器数量和规模而定，但总体成效相当显著。

冷吹技术说明



4.1.3 节能和温室气体减排潜力

间接加热技术从蒸煮器中抽取蒸煮液并泵入外部换热器，然后再通过两个开口返送回蒸煮器。冷喷放技术使用洗浆机粗浆滤液置换蒸煮器内高温废液（碎屑、蒸煮液、空气等）。废液热量经过回收，将再次用于蒸煮加热，从而减少蒸汽消耗。

劳伦斯伯克利国家实验室（Lawrence Berkeley National Laboratory）针对制浆造纸行业的分析结果表明，与传统工艺相比，实施间接加热技术和冷喷放技术后，产品的单吨能耗可节约 880 千瓦时。投资成本估计约为 4.80 欧元 / 产品。

措施的关键信息——间歇式蒸煮器改善（间接加热和冷喷放技术）

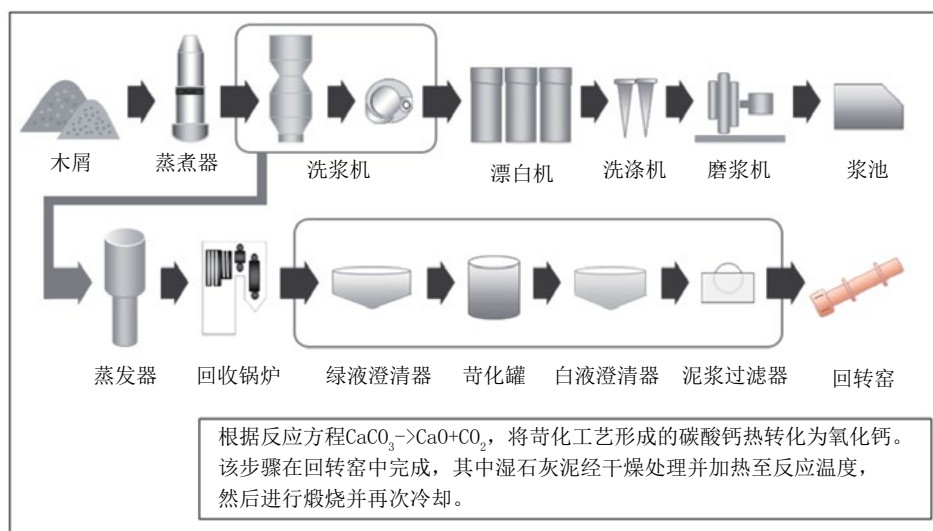
投资成本：	4.80 欧元 / 产品 _{纸浆}
节能量：（热能和电能）	880 千瓦时 / 吨 _{产品}
二氧化碳减排量：	0.3 吨 _{二氧化碳} / 吨 _{产品}
优点：	<ul style="list-style-type: none"> • 扩大产能（最高 30%） • 减少燃料消耗（石油、天然气等） • 减少能耗 • 硫化氢风险低
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> • 更换成本高 • 维护成本高

4.2 石灰窑改造

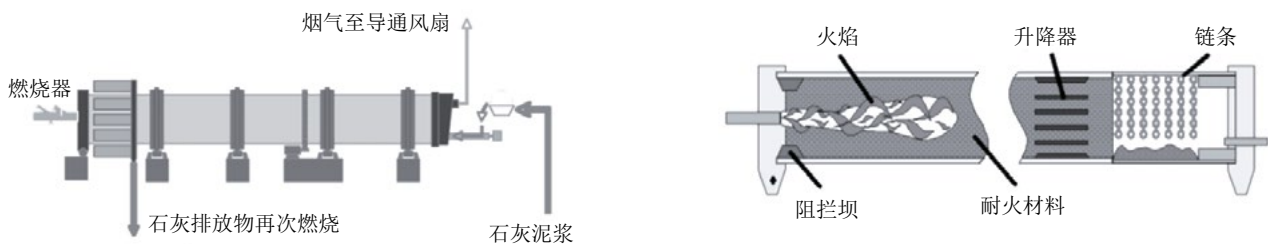
4.2.1 基线情况和能耗说明

纸浆厂将木屑加工制成纸浆时会产生石灰泥副产品，该副产品由石灰窑利用热量、动能和气流加工转化为石灰。该过程称为煅烧，即将碳酸钙转化为氧化钙。硫酸盐纸浆厂通常使用回转式石灰窑，其主体结构为大型钢管或圆筒，内侧衬以耐火砖，整体稍倾斜并绕轴线缓慢旋转。

纸浆生产过程示意图——回转窑



左图：石灰燃烧窑外观，右图：石灰燃烧窑内部结构



石灰窑筒体上端连续加入石灰泥，随着筒体不断旋转，石灰泥缓慢向下移动，抵达筒体另一端。窑内燃烧器提供煅烧反应所需热量，石灰泥进料端装有引风机，将热气拉进窑内。石灰窑不断旋转运作，搅拌石灰泥并使其充分暴露在热量中。石灰窑内共有三大加工段，按照先后顺序，分为蒸发段、加热段和煅烧段。硫酸盐纸浆厂的石灰窑燃料消耗最大，约为 305-390 千瓦时 / 风干吨⁸。

制浆造纸行业所用石灰回转窑规格从直径 2.1 米、长 53 米到直径 4 米、长 122 米不等，石灰日产能可达 50 吨至 450 吨。

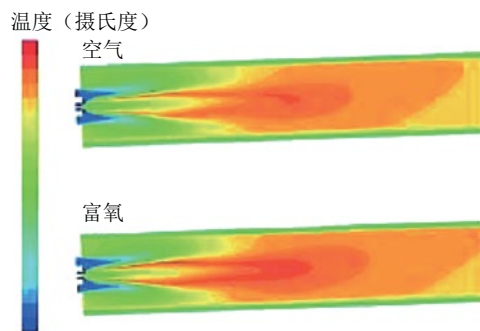
4.2.2 建议改进措施

提高石灰窑能源效率，可采用富氧技术和高性能耐火材料。

富氧燃烧

为确保石灰质量稳定、燃料消耗最低，同时符合环境排放规定，需要对石灰窑进行改造。目前，富氧燃烧技术较为成熟，可有效提高燃烧效率。该项技术适用高温燃烧工序，在诸多行业得到广泛应用。氧气可发挥助燃作用，帮助改善燃烧区状态，同时提高石灰窑稳定性，减少排放。具体操作流程为向石灰窑注入高纯度氧气，提高助燃空气氧含量，促进火焰升温并提高传热效率，从而改善整体燃烧效率。

普通石灰窑燃烧火焰曲线与富氧技术火焰曲线

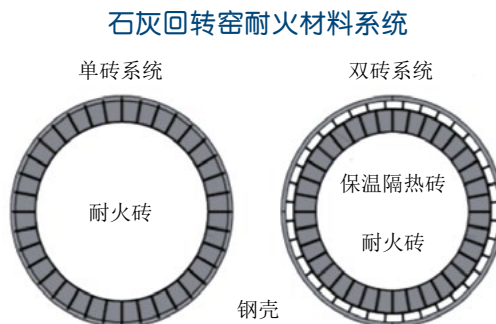


富氧技术增加了火焰核心地带的高温区域，而窑壁温度仍与普通空气燃烧时相似（见上图），从而增加产量、减少排放。

高性能耐火材料

回转窑内壁使用耐火材料或耐火内衬，可确保工艺效率并延长使用寿命。常规维护流程即包括耐材维护。常见耐火材料为耐火砖，经特殊耐热耐化学侵蚀材料（通常为氧化铝和二氧化硅）制成。窑内靠近火焰高温区的砖块含 **70%** 氧化铝成分，以耐受该区域高温和化学侵蚀。窑体两侧三分之一段采用含 **40%** 氧化铝的砖块，保温隔热性能更佳。

耐火材料改造方案较多，包括铝镁碳砖或双砖系统方案，钢制外壳内砌保温隔热砖层与耐化学砖层，后者直接与石灰固体和燃烧气体发生接触。图 21 为单层砖系统和双层耐火砖系统结构图。



资料来源：N.Adams

⁸ 具体化学品及能源消耗、成本和排放量以“每 90% 风干浆”表示。

4.2.3 节能和温室气体减排潜力

向石灰窑进气流中注入氧气，可提升窑炉温度并提高燃料效率。这项技术适用于硫酸盐制浆工序的石灰煅烧窑。石灰窑富氧技术可减少约 **7%-12%** 燃料消耗，而制造商则表示可节约 **50%** 能耗。

报道称，富氧燃烧技术改造投资较低（**10 万欧元以内**），只需添置进料管、喷枪和控制器。据估算，投资回收期大约为 **1 至 3 年**。

措施的关键信息——石灰窑富氧技术	
投资成本：	10 万欧元以内（关注能源，2006）
节能量：（热能）	燃料减少 7%-12%（25-40 千瓦时 / 吨 _{纸浆} ）
二氧化碳减排量	0.01-0.02 吨 _{二氧化碳} / 吨 _{纸浆}
优点：	<ul style="list-style-type: none"> • 扩大产能（最高 30%） • 减少燃料消耗（石油、天然气等） • 减少能耗 • 硫化氢风险低
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> • 高投资 • 高运行成本

随着化石燃料价格不断攀升，制浆造纸企业应谨慎选择石灰窑内衬材料，确保选用市场最先进的保温耐火材料。纸浆厂石灰窑应使用高性能耐火材料。耐火材料通常由喷枪进行涂覆，相比传统砖砌法，其施工时间更短，从而减少石灰窑停机时间。据制造商称，高性能耐火材料可节约 **5%** 能耗。按常规制浆造纸厂产能计算，每年可节省 **195000 欧元**。

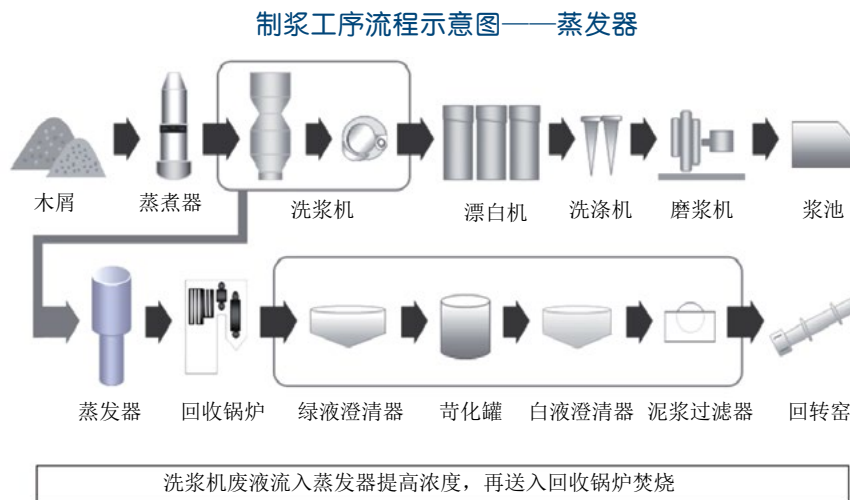
措施的关键信息——石灰窑改造、高性能耐火材料	
投资成本：	使用标准耐火材料或高性能耐火材料改造常规石灰窑，其成本差异不到 15600 欧元
节能量：（热能）	燃料减少 5%（17 千瓦时 / 吨 _{纸浆} ）
二氧化碳减排量：	0.007 吨 _{二氧化碳} / 吨 _{纸浆}
优点：	<ul style="list-style-type: none"> • “喷枪”涂覆应用，减少施工时间 • 减少燃料消耗（石油、天然气等）
缺点	<ul style="list-style-type: none"> • 仅适用于改造石灰窑（即实施硫酸盐法的工厂）

4.3 黑液蒸发器

4.3.1 基线情况和能耗说明

硫酸盐纸浆厂使用蒸发器脱去制浆化学废液中的水分并对其进行浓缩处理。这是回收化学制剂的第一步，以便再次用于制浆工序。其中，黑液蒸发工艺至关重要，能显著提高黑液的干固形物浓度，促进黑液在回收锅炉中高效燃烧。黑液成分较为复杂，主要含水、有机质与无机质。由于各家工厂产生的黑液成分各不相同，因此需要在广泛的参数范围内灵活设计蒸发系统。

黑液蒸发器有着多重作用：一是加热黑液并有效去除水分，便于回收锅炉焚烧；二是避免蒸发器内部形成水垢；三是产生清洁冷凝水或温水再次投入制浆工序和再苛化区重复利用，减少淡水消耗；四是安全去除生产流程产生的挥发性成分或不凝性气体。



纸浆洗涤工序通常产生固体含量为 **14%-18%** 的黑液，必须大幅提高其固形物浓度方可进行燃烧。经蒸发器处理的黑液固形物含量通常约为 **58-60%**，约等于低位热值 **7000 千焦 / 千克**。在常压条件下，固形物含量上限约为 **72%-74%**。

4.3.2 建议改进措施

为提高锅炉燃烧效率，应尽量增加黑液固形物浓度，减少水分含量。黑液固形物浓度越高，原木浆生产效率也相应越高，而且燃烧流程更加可靠、锅炉爆炸风险更小。

在蒸发器和回收锅炉之间加装固形物浓缩器，可以将黑液固形物浓度从 **65%-70%** 提高至 **80%-85%**，从而改变物料与能量平衡，改善回收锅炉的燃烧效率。若固形物浓度超过 **80%**，可以提高产量或延长脱木质素反应阶段，促进高效回收黑液。根据工厂现代化改造实践经验显示，经高压处理的黑液固形物含量可高达 **85%**。在此种情况下，回收锅炉燃烧温度更高而粘度更低。此外，硫酸盐纸浆厂减少二氧化硫排放最行之有效的方法便是提高黑液固形物含量，以此改善回收锅炉燃烧效率。而高浓度不凝性气体的含硫量以及锅炉使用的燃料油皆与二氧化硫减排的关系不大。

4.3.3 潜在节能量和温室气体减排量

提高黑液固形物含量 (>80%) 可有效改善能源效率, 促进浆纸综合厂实现能源自给自足甚至产生能源盈余, 同时降低硫化物和一氧化碳排放并减少污垢。多数造纸厂的二氧化硫排放量低于 5-25 毫克 / 标准立方米, 即生产每风干吨纸浆排放的二氧化硫少于 0.01-0.10 千克。

在处理能力为 1000 吨 / 天的黑液回收系统上加装黑液蒸发器 (提高固形物含量), 预计每日可节约 59000 千瓦时。

该项措施适用于新建项目与既有硫酸盐纸浆厂节能改造项目。此外, 还可在蒸发装置上加装超级浓缩器。造纸厂改造成本取决于黑液固形物浓度高低。根据最佳可行技术, 要将日产 1500 风干吨的硫酸盐纸浆厂黑液固形物浓度提升至不同水平 (最低 63%), 具体投资成本如下:

- 浓度从 63% 提升至 70%: 170 万 -200 万欧元;
- 浓度从 63% 提升至 75%: 350 万 -400 万欧元;
- 浓度从 63% 提升至 80%: 800 万 -900 万欧元。

需要指出的是, 若不采取任何其他措施, 随着固形物含量不断增加, 锅炉温度亦相应变高, 尽管可以减少硫化物排放, 但会增加氮氧化物排放。回收锅炉内黑液固形物含量较高, 有助于提升炉温并最大限度提高锅炉发电量。而正因为固形物浓度较高, 在烟气净化工序之前将排放大量颗粒物, 需要加装安全高效但造价昂贵的静电除尘器。在固形物含量极高的情况下 (>80%), 最后的蒸发阶段还会释放相对大量的硫化物, 必须统一收集并进行焚烧。

措施的关键信息——黑液蒸发器 (固形物浓缩器)

投资成本:	170 万 -900 万欧元, 视目标浓度而定 此类设施的投资回报率估计为 7% 至 14%。
节能量:	59 千瓦时 / 吨 _{黑液}
二氧化碳减排量:	0.023 吨 _{二氧化碳} / 吨 _{黑液}
优点:	<ul style="list-style-type: none"> • 热效率 • 降低硫化物排放 • 回收过程可靠 • 生产率提高 2%
缺点	<ul style="list-style-type: none"> • 在烟气净化工序之前排放大量颗粒物, 需要安装安全高效而造价昂贵的静电除尘器

4.4 磨浆机改善

4.4.1 基线情况和能耗说明

使用磨浆机有助于软化木质素，促进木质纤维纤维化。磨浆工序是满足不同纸张性能的重要步骤。磨浆机用于机械制浆工序（热磨机械浆）以及后续磨木浆精炼加工流程。



磨浆机耗电量较高，电能通过摩擦转化为热能和蒸汽能。电能主要用于驱动磨浆机转子。能源消耗主要取决于原料和纸张特性。生产不同纸张类型的净能耗如下表所示。数据代表净耗电量，即单位纤维需要的能量（千瓦时/吨），磨浆输出功率转移至纤维。

按成品划分的典型耗电量⁹

纸张类型	净耗电量（千瓦时/吨）	备注
纸巾	30 以内	在旁路模式下磨浆，而非满负荷运行
印刷书写纸	60-200	取决于长纤维和短纤维混合物
无碳纸	150-200	取决于长纤维和短纤维混合物
玻璃/防油纸	450-600	取决于长纤维和短纤维混合物
描图纸	800-1200	取决于长纤维和短纤维混合物

4.4.2 建议改进措施

空载功率由电机、泵送和摩擦损失引起，可以使用高效率磨浆机予以改善。根据具体应用情况，空载功率可占磨浆机能耗的 30%-50%。使用高效率磨浆机更换现有设备的节能效果尤为显著。本小节将对此展开论述。

新建项目或既有原木浆造纸厂改造项目是否应选用高效率磨浆机，取决于加工原料以及希望实现的纸张或纸浆特性。若造纸企业的磨浆设备体积过大或效率偏低，可对磨浆工序实施改造。为确保可靠运行，可能需要调整进料泵、磨浆设备和贮槽容量。

⁹ 净能量由总功率减去空载或自由运行功率得出。总能量指包括损耗在内的总体电能消耗。总能量 = 净能量 × 1.3-1.5。磨浆机空载是指机械阻力和湍流占用功率而无法处理纤维。

4.4.3 节能和温室气体减排潜力

根据一项案例研究（特种基础纸，50000 吨 / 年）显示，两台磨浆机依次（连续作业）运行，工作负荷约为装机功率的 50%，而闲置功率（空载功率）几乎占总功耗的 40%。将运行模式改为间歇运行，即可实现 18% 的节电效果。

某图文造纸厂对锥形精浆机进行节能改造，节能效果达到 110 千瓦时 / 吨_{盘磨浆}。值得一提的是，节能潜力极大程度上取决于造纸厂使用的原料以及需要实现的磨浆效果（多盘或双缸磨浆机）。改造磨浆机即意味着工艺流程发生重大变更，所需投资成本相应较高。采用高效率磨浆机加工盘磨短纤维木浆的经济性评估如下表所示：

硬木盘磨机（300 绝干吨 / 天）成本计算

成本因素	能源利用	成本 / 节省
未配置高效率磨浆机的造纸厂能耗	2145 千瓦时 / 吨	
配置高效率磨浆机的造纸厂能耗	2100 千瓦时 / 吨	
节省电力（12%）	45 兆瓦时 / 年或 9770 兆瓦时 / 年	欧元 488500 / 年
二氧化碳	6077 吨 / 年	欧元 91155 / 年
总节约量（电力、二氧化碳减排量）		欧元 580000 / 年
高效率磨浆机投资成本		欧元 600000
		投资回收期：1 年

措施的关键信息——高效率精磨机

投资成本：	60 万欧元
节能量：（电能）	节电 7%-20%，视应用而定 20-45 千瓦时 / 吨 _纸
二氧化碳减排量：	0.012-0.03 吨 _{二氧化碳} / 吨 _纸
优点：	<ul style="list-style-type: none"> 空载功率较低，节省电力 降低成本 提高产品质量
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> 投资成本高 可能需要调整进料泵、精炼设备和贮槽容量，确保可靠运行

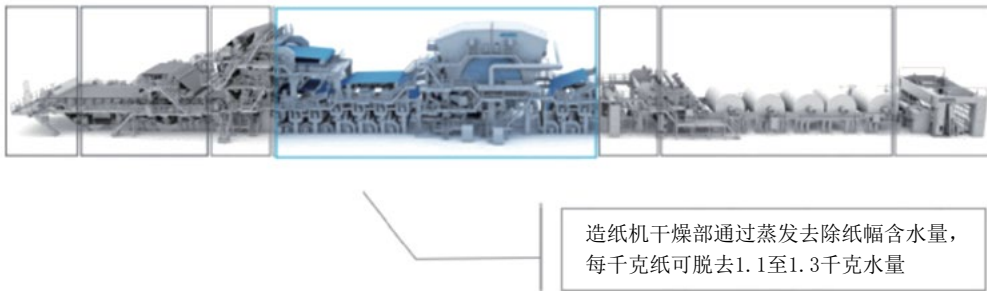
为进一步节约能源，可通过优化调整进料泵、工作负荷或操作模式改造现有精浆 / 磨浆设备。

4.5 余热回收

4.5.1 基线情况和能耗说明

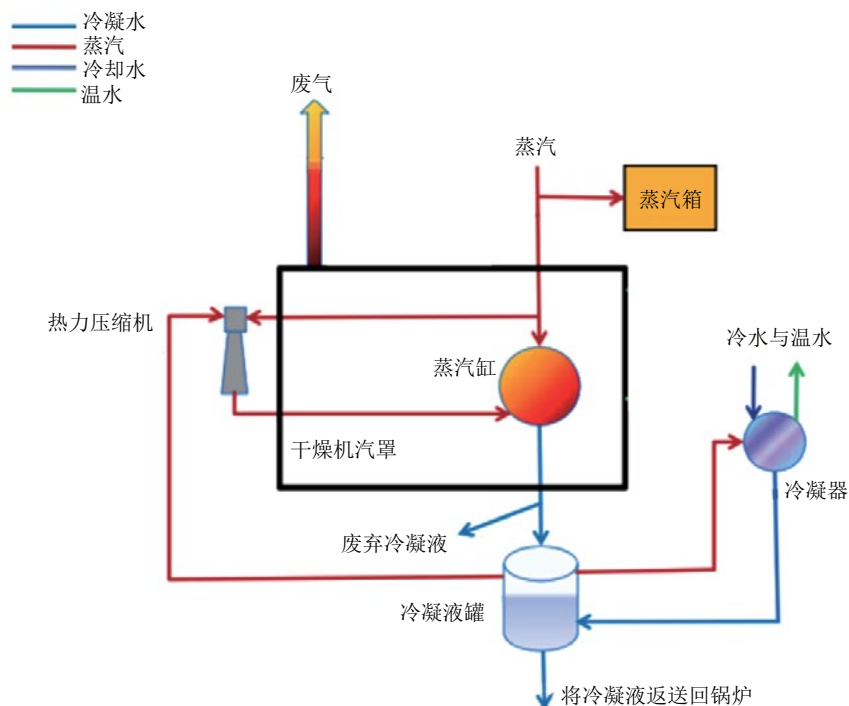
造纸厂消耗的热能几乎全部用于干燥纸张，而干燥部也成为造纸设备的主要能耗装置。由于干燥部消耗的大量热能最终作为废气排出，因此加装热回收系统对提高造纸工序整体能效发挥至关重要的作用。

造纸机结构——干燥部



在干燥部所需的能量中，大约有 **80%** 是通过一次蒸汽进入干燥缸中的，剩下的 **20%** 则来自于干燥的、废气的气体以及纸幅。干燥部能源最终几乎全以废气形式排出。废气温度一般为 **80-85** 摄氏度，湿度为 **140-160** 克水/千克干空气。造纸机干燥部总体情况如下图所示。能量在造纸机中以蒸汽、冷凝液、空气、水流和纸张形式流动。当前挑战在于明确哪些区域存在能源浪费的情况，并对其实施节能措施。

造纸机纸张干燥部示意图



干燥性能常用指标包括蒸发率(单位面积干燥机蒸发水量,以千克计)和单位产品能耗(每千克产品消耗蒸汽量,以千克计)。理论而言,传统圆筒式干燥机每蒸发1千克水,最少需要消耗1.24千克蒸汽。

下表为某大型现代化造纸机的热流走向(回收及损耗)¹⁰。从表中看出,造纸机产生大量余热。

日产667吨造纸机热回收及热损耗示例

热回收源	干燥部热损耗	热量分布 (%)
进风	1.8 兆瓦热 或 233 兆焦 / 吨	6
网部用水	3.6 兆瓦热 或 466 兆焦 / 吨	11
淡水	5.5 兆瓦热 或 712 兆焦 / 吨	19
循环用水	8.0 兆瓦热 or 或 036 兆焦 / 吨	27
排入大气	10.8 兆瓦热 或 1 399 兆焦 / 吨	37
合计(汽罩排气量)	29.7 兆瓦热 或 3 847 兆焦 / 吨	100

4.5.2 建议改进措施

热回收系统旨在以经济高效的方式有效利用造纸机产生的工艺余热,从而减少造纸厂的一次能源消耗。新建工厂或既有工厂均可应用热回收系统。余热回收途径包括在真空系统安装径流式风机、使用热力压缩机或从纸机汽罩回收余热。

在真空系统安装径流式风机

径流式风机适用于所有纸张类型的网部和网毯脱水,通常安装于大型造纸机。通过余热回收利用,可以减少造纸机干燥部的蒸汽需求量。废气中的余热可加热干燥汽罩进风,从而节省蒸汽消耗。

真空鼓风机进行压缩作业排出的废气温度可高达130-160摄氏度。这些高温废气进入空气对空气换热器进行能量回收,回收率高达75%。

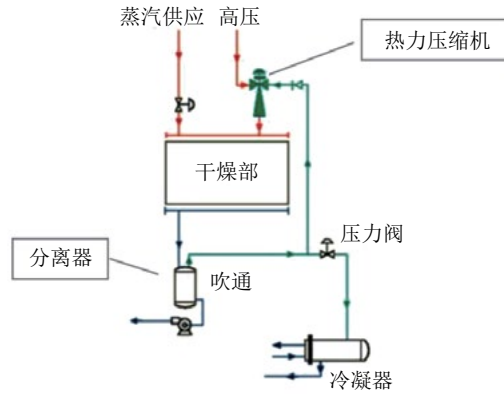
径流式风机适用于生产各类纸品的新建工厂和既有工厂。在真空系统应用径流式风机,出口压力必须足以抵消换热器的压降。然而,装有鼓风机的造纸机脱水部(热源)和干燥部(散热器)之间的距离通常很短。

¹⁰ 该台造纸机产能为240120吨/年(667吨/天)。进入干燥部的纸幅干度为44.5%,离开时干度为91%。废气温度为82摄氏度,湿度为160克水/千克干空气。数值取自斯堪的纳维亚半岛冬季环境(-15至4摄氏度)。

使用热力压缩机

使用热力压缩机同样可以减少干燥部蒸汽消耗。热力压缩机有助于提高干燥部能源效率，减少冷凝器的蒸汽需求。为此，需提高分离器排放的蒸汽压力。图 26 为热力压缩机使用示意图。

热力压缩机示意图

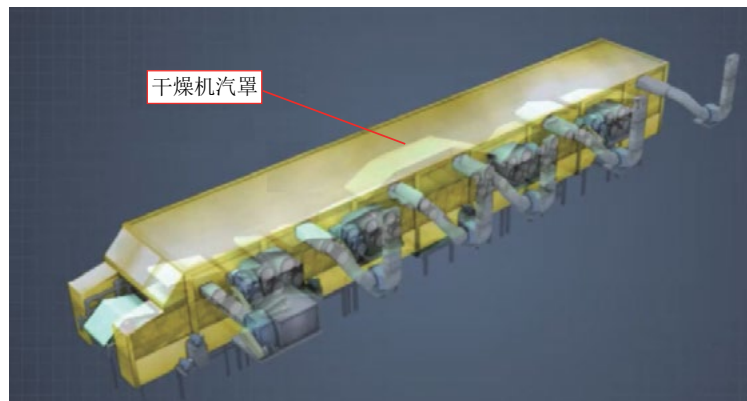


通常情况下，新建造纸厂与既有造纸设备改造项目都会安装热力压缩机。热力压缩机需要使用中压蒸汽。多数应用中，蒸汽压力必须为 5-12 巴。

纸机汽罩热回收

有些纸机汽罩没有安装热回收系统，而本项节能措施主要针对此类未安装热回收系统的汽罩，并对其进行加装改造。造纸机干燥部风力系统主要发挥两大作用：一是去除干燥部纸页蒸发的水蒸气，二是控制纸页所在环境的温度、湿度和空气流向。汽罩风力系统有助于提高造纸机的干燥能力，改善纸张含水量并减少污渍，同时提高干燥部运行能力。

干燥机汽罩风力系统



4.5.3 节能和温室气体减排潜力

余热回收利用系统可减少造纸机干燥部的蒸汽用量。废气中的余热用于加热汽罩进风，节省蒸汽消耗。

径流式风机的投资回收期通常较短，其经济效益视具体情况而定。举例而言，某造纸厂经过改造，生产单吨产品可节约 26 千瓦时，投资回收期为一年半。在某些情况下，鼓风机中残留的湿度具有腐蚀性。通过定期维护，可有效避免发生因堵塞或腐蚀损坏而导致的不必要且昂贵的停机事故。

措施的关键信息——径流式风机

投资成本：	取决于具体情况，投资回收期不到 2 年
节能量：（热能）	20-30 千瓦时 / 吨 _纸
二氧化碳减排量：	0.008-0.012 吨 _{二氧化碳} / 纸
优点：	<ul style="list-style-type: none"> • 节省蒸汽降低成本 • 提高生产率 • 干燥能力更强
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> • 可能发生腐蚀

热力压缩机的经济效益视具体情况而定，投资回收期通常不到 1 年。举例而言，某造纸厂节能效果为 25 千瓦时 / 吨，投资回收期为 0.8 年。

措施的关键信息——热力压缩机

投资成本：	视具体情况而定，投资回收期不到 1 年
节能量：（热能）	25 千瓦时 / 吨 _纸
二氧化碳减排量：	0.01 吨 _{二氧化碳} / 吨 _纸
优点：	<ul style="list-style-type: none"> • 蒸汽节能
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> • 需要大量高压蒸汽

纸机汽罩排放废气通常温度较高。利用热回收技术可回收大部分能量，并将其返送至加工工序继续使用。这项技术适用于造纸机干燥部，余热来源还包括真空泵排气等。根据汽罩排气量、温度、湿度、热需求等因素，热回收技术具备极大节能潜力，每小时可节约 3200 千瓦。根据造纸机规模、运行速度及汽罩类型，投资回收期在 12 到 24 个月之间。

措施的关键信息——纸机汽罩

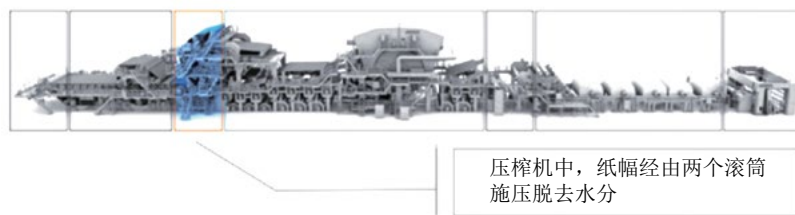
投资成本：	投资回收期 1-2 年
节能量：（热能）	每小时节省约 3200 千瓦时 200 千瓦时 / 吨 _纸
二氧化碳减排量：	0.07 吨 _{二氧化碳} / 吨 _纸
优点：	<ul style="list-style-type: none"> • 节能 • 减少外部积冰和烟囱噪声排放
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> • -

4.6 靴式压榨

4.6.1 基线情况和能耗说明

纸张成型后要经过网部和压榨部脱去水分。通常情况下，纸幅经过压榨部后的干度为 45-50%（约 1 千克水 / 1 千克填料）。为了蒸发剩余水分，干燥部蒸汽消耗量高达 580 千瓦时 / 吨。经压榨处理的纸幅干度越高，纸张干燥所需热能就越低。

造纸机结构——压榨部



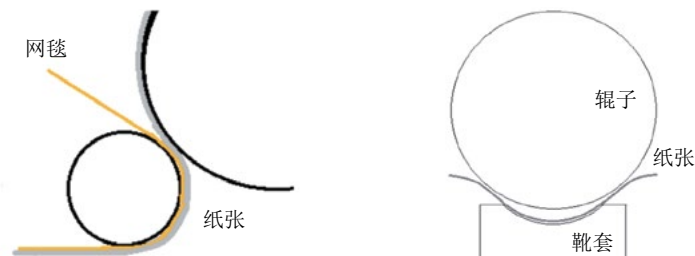
通常，压榨部的结构包括两个旋转滚筒和两条网毯，纸张夹在网毯之间进行压榨。传统辊式压榨设备无法进一步提升压力，脱水效果有待改进。

4.6.2 建议改进措施

靴式压榨技术或宽幅压榨技术能改善湿压榨部的脱水效果，减少后续蒸发干燥作业强度。

该项技术延长了纸张在压榨区的停留时间，从而提高脱水效果。这个时间段称为压榨区停留时间。压榨部脱水量与施加于纸页表面的压力及压力持续时间成正比。压力与压榨区停留时间的乘积称为“压榨冲力”。

左图：传统压榨技术图示，右图：薄纸机压榨区

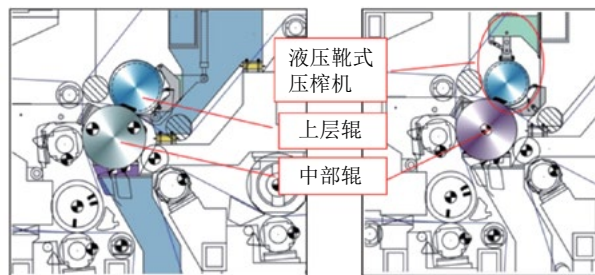


使用宽幅压榨机替换窄幅压榨机，可以获得比传统辊式压榨机更强的压榨冲力。靴式压榨机使用大型压榨靴套代替传统旋转式辊体，可延长纸张停留时间，比传统辊式压榨机的机械脱水效果更佳。

靴式压榨机亦开发出高速机型（最高 2000 米 / 分钟），可应用于各式新旧造纸机生产纸张与纸板。使用靴式压榨机的重要前提是压榨部需留有充足空间，而且建筑结构应能承受更多重量负荷。在某些情况下，由于靴式压榨设备较重，必须增加桥式起重机的承载能力。

对于中小规模生产线而言，可选择迷你型靴式压榨机作为替代方案，压榨区长度仅为 90 ~ 120 毫米，线性载荷为 250 ~ 400 千牛 / 米。微型靴式压榨机改造流程如下图所示。

将传统压榨机改造为靴式压榨机

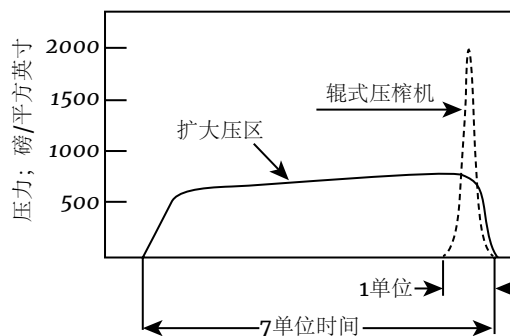


靴式压榨机改造方案需要用到压榨靴套，其长度与直径设计紧凑，对辊（实心辊）直径亦经优化设计。为缩短停机时间，改造期间应尽可能不改动压榨部外形结构、整体框架和相邻部件。

传统压榨机的压榨压力和压榨区停留时间均受到一定限制，不得超过压力阈值，否则会损坏纸页（机器高速运转时尤需注意）。此外，机器运转速度越快，压榨区停留时间越短。这两大制约因素限制了传统辊式压榨机的压榨冲力，但是靴式压榨技术在这方面成功实现突破。

传统压榨曲线和靴式压榨曲线对比图如下所示。靴式压榨机增加了压榨区停留时间，峰值压力亦显著降低。

传统（辊式）压榨机和靴式压榨机曲线对比说明。曲线下方区域即压榨冲力（1 磅 / 平方英寸 = 6.9 千牛 / 平方米）



4.6.3 节能和温室气体减排潜力

从节能减排角度来看，靴式压榨机的主要优势在于减少干燥部的蒸汽消耗，从而提高整体能效。尽管由于配置原因，靴式压榨机耗电量较高，但其耗电量仍然低于节约的蒸汽量。由于生产 1 吉焦的蒸汽比生产 1 吉焦的电力耗能更多，靴式压榨机在节能方面具有巨大优势。

据估计，若经压榨部加工的纸幅含水量减少 1%，干燥部蒸汽消耗量即可相应减少 3% 至 8%。以千瓦时 / 吨计算，如果经压榨加工的纸页干度提高 1%-3%，每吨产品大约可节约 60-180 千瓦时热能。

若以靴式压榨机替代辊式压榨机，干燥机总计可节能 20%-30%。同时，用于干燥纸张的蒸汽消耗量亦相应下降，每吨蒸汽价格在 10 至 15 欧元之间，而生产 1 吨纸可节约 2 吨蒸汽，即每吨纸可节省 20 至 30 欧元。

毛纸幅宽 5 米的造纸机加装一台靴式压榨机的投资总成本约为 1000 万欧元（含全套装置）。

靴式压榨机的运行成本与传统压榨机大致相同。完成改造后，若在提速方面不受限制，如不受流浆箱或设备驱动能力限制，一般投资回收期约为 2.5 年。

改造既有系统并加装靴式压榨机，可有效提高运行性能，生产能力可提升 10%-20%。新建造纸设备使用靴式压榨机可缩短干燥段，降低运行成本。在造纸工序中减少干燥纸张所需蒸汽量，有助于改善纸张强度并节约成本。

措施的关键信息——靴式压榨

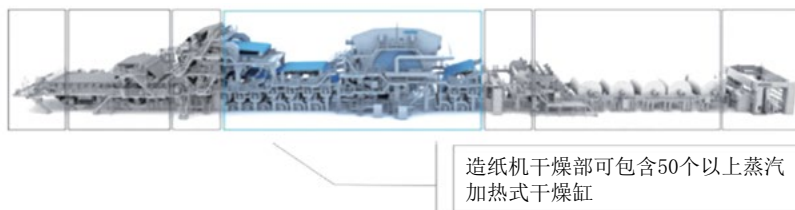
投资成本：	毛纸幅宽 5 米的造纸机加装一台靴式压榨机的投资总成本约为 1000 万欧元
节能量：	压榨后干度提高 1%-3%，可节约 60-180 千瓦时 / 吨 _纸
二氧化碳减排量：	0.01-0.07 吨 _{二氧化碳} / 吨 _纸
优点：	<ul style="list-style-type: none"> • 压榨后干度较高 • 减少热干燥需求 • 节省体积 • 提高成品质量 • 增产
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> • 投资成本高 • 空间要求

4.7 干燥棒与固定式虹吸器

4.7.1 基线情况和能耗说明

最后的干燥步骤在干燥部完成。干燥部包括若干蒸汽加热式干燥机（干燥缸或干燥罐），多组设备同步运行。纸页在干燥机依次行进，每台干燥机均会脱去纸张部分水分。蒸汽在干燥机中作为加热介质，以饱和或接近饱和的状态进入干燥设备。热量经由干燥机外壳传导至纸页时，蒸汽冷凝成液态并释放潜热。潜热指在沸腾温度下将水变为蒸汽所需的热量，该热量在蒸汽冷凝过程再次释放。

造纸机结构——干燥部







所有纸浆机、造纸机、纸板机和大多数薄纸机的干燥部均配备了蒸汽冷凝系统。

造纸机蒸汽冷凝系统旨在确保干燥作业温度并去除冷凝液。为了提高干燥缸温度，蒸汽通过旋转接头进入干燥机，而当蒸汽凝结于壳体内表面时即释放出潜热。压差与吹通系统将冷凝液推入虹吸管并通过回流管道返回干燥机。

下表显示干燥机旋转变速时冷凝液的四种状态。由于干燥机内部存在湍流，层叠阶段传热效果最佳，但电涌可能导致齿轮和轴承出现问题。

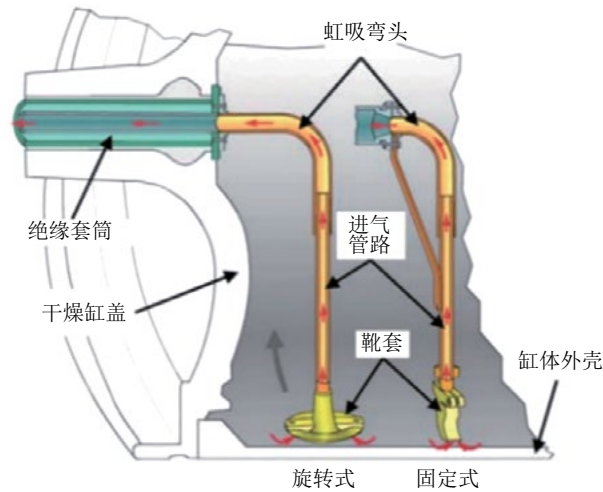
干燥缸内冷凝液的四种状态

	第1阶段——无旋转 冷凝水在烘缸底部静置
	第2阶段——搅动 干燥机开始转动时，冷凝水随干燥机外壳旋转而向上移动，在外壳表面形成一层冷凝水薄膜。
	第3阶段——层叠 干燥机快速旋转，冷凝水向壳体上方移动，直到重力克服离心力而回流至底部。
	第4阶段——包边 干燥机继续加大转速，离心力克服重力，在干燥机壳体形成厚度均匀的薄膜。

虹吸器可将冷凝液从旋转式干燥机内吸出，其主要有两种类型：

- 旋转式虹吸器：固定在干燥机内，随干燥机旋转；
- 固定式虹吸器：位置固定，干燥机围绕虹吸器旋转。

干燥缸用虹吸器主要类型，旋转式（左）或固定式（右）虹吸器将冷凝液从烘缸壳体内吸出



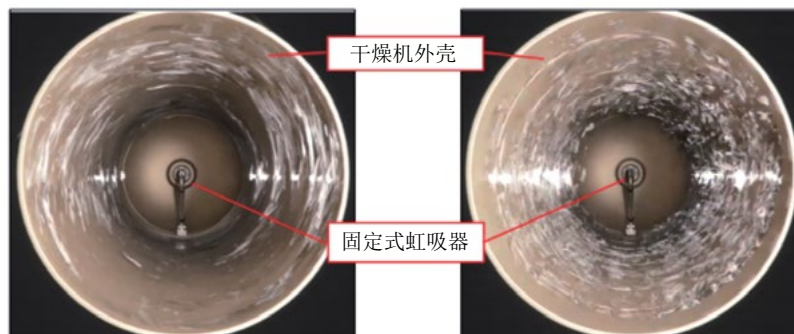
固定式虹吸器吹通蒸汽流量为干燥机蒸汽消耗量的 8%–12%，而旋转式虹吸器需要 20%–25% 吹通蒸汽方能充分去除冷凝液。

4.7.2 建议改进措施

旋转式虹吸器对压差要求较高，以便将冷凝液从干燥缸内抽出。固定式虹吸器采用勺状吸盘，在冷凝液绕壳体旋转时将其抽进虹吸器，所需压差与蒸汽均相对较少，可大幅节省成本。

如前所述，干燥缸旋转时，固定式虹吸器的位置保持不变，同时抽取壳体内表面冷凝液。为最大限度提高包边冷凝液的热传递效果，可在系统中使用经优化设计的扰流棒，以有效提高湍流运动。

烘缸和固定式虹吸器，左图：不带扰流棒——右图：带扰流棒



使用固定式虹吸器取代旋转式虹吸器，冷凝液直接排入冷凝器，有助于提高纸张干燥效率。高速造纸机的热传导效果应均匀而高效，确保纸张干燥。干燥棒和固定式虹吸器采用最新干燥技术，确保干燥机内蒸汽热量分布均匀并回收冷凝液。为提高纸张产量，必须在纸张接触干燥机壳体一秒内脱去纸张水分。

4.7.3 节能和温室气体减排潜力

使用固定式虹吸器和干燥棒可将干燥机排出冷凝液所需的“吹通”蒸汽量降至最低水平。这项技术适用于造纸机的干燥部，不仅广为人知且被广泛接受，已在全新造纸机及既有造纸机改造项目上得到充分应用，最适合在干燥机处于包边状态下运行。

这项技术不仅节能，还具有诸多其他优势，比如确保造纸机温度曲线更为平稳，同时减少蒸汽消耗，每小时可节省 500 到 4000 千克蒸汽。某造纸厂使用固定式虹吸器提高了干燥效率，生产每吨纸可节约 250 千瓦时能源。

措施的关键信息——固定式虹吸管与干燥棒

投资成本：	通常，此项技术的投资回报率在 25% 至 80% 之间
节能量：（热能）	250 千瓦时 / 吨
二氧化碳减排量：	0.1 吨 _{二氧化碳} / 吨 _纸
优点：	<ul style="list-style-type: none"> 最大限度减少干燥纸张所需蒸汽量
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> 投资成本高 实施工作耗时漫长

4.8 蒸汽疏水阀维护

4.8.1 基线情况和能耗说明

在典型制浆造纸厂中，蒸汽应用于许多重要工序，不过迄今为止主要用于蒸煮、漂白、蒸发和干燥工序。回收锅炉和动力锅炉是制浆造纸厂的两大蒸汽来源。用黑液燃烧回收锅炉，以回收制浆化学品并产生蒸汽。动力锅炉则可用多种燃料燃烧，并在高压下运行。

产生的蒸汽沿分配系统的管道传输，最终到达使用热量的对应工序。当用于加热工序时，甚至通过分配系统到达有待加热的工序时，蒸汽冷却，其中一些冷凝成热水。这种热冷凝液通过蒸汽疏水阀排出。

蒸汽疏水阀是各蒸汽系统中使用的自动阀门，用于清除冷凝液、空气和其他不凝性气体，同时阻止或最大限度减少蒸汽通过。如果在管道和设备内收集冷凝液，则会降低蒸汽管道的流量和传热设备的热容量。此外，过量冷凝液可能会导致“水锤现象”，可能造成破坏和危险后果。系统启动后残留的空气会降低蒸汽压力和温度，还可能降低传热设备的热容量。氧气和二氧化碳等不凝性气体会引起腐蚀。最后导致通过疏水阀的蒸汽不提供加热功能。这样的设计会显著降低蒸汽系统的制热量或增加为满足热需求而产生的蒸汽量。

蒸汽疏水阀必须具备以下功能：

- 迅速排出废水
- 排出空气和二氧化碳等不凝性气体
- 防止空气泄漏。

蒸汽疏水阀有三种故障模式：堵塞、泄漏和吹贯。堵塞的蒸汽疏水阀导致蒸汽或冷凝液无法通过。蒸汽疏水阀会被固体物质（如锈屑）堵塞；过滤器通常安装在疏水阀的上游侧，以减少堵塞风险，但在严重情况下，甚至过滤器也会堵塞。普通蒸汽疏水阀不会通过蒸汽或仅通过极少量蒸汽，具体取决于蒸汽疏水阀的类型。泄漏的蒸汽疏水阀所通过的蒸汽量高于正常值，这可能是由于疏水阀内的阀门卡在部分打开的位置。

在 3 至 5 年未维护的蒸汽系统中，约 15% 至 30% 的蒸汽疏水阀会发生故障。如果使用热动力式蒸汽疏水阀而言，则故障百分比可能显著高于 15% 至 30%。应当根据应用和用途选择蒸汽疏水阀。下表列出现有的蒸汽疏水阀类型。

现有蒸汽疏水阀类型及其特性

类型	特性	应用
圆盘式	(1) 体积小，重量轻	蒸汽管道和集管
浮球式	(1) 连续排出 (2) 必须根据应用选择	热交换器，出现大量排水的地方，主管道
桶式	(1) 操作灵敏 (2) 蒸汽损失小 (3) 排水量极少时会渗漏	热交换器
双金属式（温控）	(1) 可设置排水口温度 (2) 可收集排水	蒸汽伴热
波纹管式	(1) 低压使用 (2) 费用低廉 (3) 耐久性方面存在问题	加热

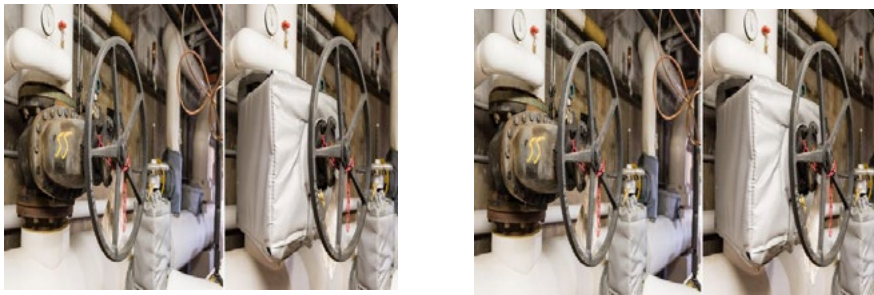
4.8.2 建议改进措施

可以采用不同技术优化蒸汽疏水阀，例如适当的维护、监测和改进当前设备的使用过程。通过实施简单的蒸汽疏水阀检查计划确保蒸汽疏水阀正常运行，此举可显著节能。如果未实施蒸汽疏水阀维护计划，蒸汽分配系统中高达 15% 至 20% 的蒸汽疏水阀存在故障。与蒸汽疏水阀一样，蒸汽分配管网经常泄漏。如果未实施定期检查和维护计划，则无法发现这些泄漏。

使用自动监测设备监测蒸汽疏水阀，同时实施维护计划，这种双管齐下的方法可以节省更多能源，而且不会显著增加成本。相比单纯的蒸汽疏水阀维护，这样的措施可谓锦上添花：可以更快提示蒸汽疏水阀故障，并可检测到蒸汽疏水阀何时没有保持最高效率。

在蒸汽分配系统中，使用更多或最好的保温材料可以节能。在热分配系统经过维修后，往往并未更换保温层。工业设施中普遍使用可拆卸保温垫，用于法兰、阀门、换热器膨胀节、泵、涡轮机、槽罐及其他表面的保温隔热。保温垫易于拆卸，以便定期检查或维护，并可根据按需更换。保温垫还包含内置隔音屏障，帮助控制噪音。

可拆卸保温垫



4.8.3 节能和温室气体减排潜力

Smurfit Kappa 公司旗下一家欧洲工厂将 25 个蒸汽疏水阀改为涂层电池上的文丘里式¹¹，从而节省近 14 万欧元的能源成本，投资回收期为 2.5 个月。其他项目则将预热器和末端瓦楞辊（10 个蒸汽疏水阀）的蒸汽需求量减少 11%，将瓦楞机的蒸汽需求量减少 30%。

蒸汽疏水阀定期检查和后续维护系统的节能率保守估计为 10%。相比单纯的蒸汽疏水阀维护，对蒸汽疏水阀进行监测可以额外节省 5% 的能源，投资回报期约为一年。

劳伦斯伯克利国家实验室进行的一项研究显示，这项措施实现的节能量、资本成本以及年度运维成本变化分别为 497 千瓦时 / 吨产品、0.91 欧元 / 吨产品和 0.04 欧元 / 吨产品。

措施的关键信息——蒸汽疏水阀维护

投资成本：	0.91 欧元 / 吨 _{产品}
节能量：（热能）	497 千瓦时 / 吨 _{产品}
二氧化碳减排量：	0.19 吨 _{二氧化碳} / 吨 _纸
优点：	<ul style="list-style-type: none"> 提升安全生产水平
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> -

¹¹ 与大多数机械式蒸汽疏水阀不同，文丘里孔口式蒸汽疏水阀可以持续不断地排出系统中的冷凝液。

4.9 实时能源管理系统

4.9.1 基线情况和能耗说明

公司对能源管理的需求源于不断增加的成本压力。成本压力是每天都无法回避的现实。此外，政界和社会要求为提高能效和保护气候贡献力量的呼声日渐高涨。能源管理的目的是在经济和生态两个层面，在从能源购买到能源消费的各个环节优化公司的能源使用。

能源管理涵盖计划和实施的所有措施，目的是在保证最高舒适度的前提下尽可能减少能耗。因此，能源管理侧重于：

- 供应安全：可靠的能源供应，以确保预期质量和舒适度。
- 成本：通过提高工序、机器和设备的能效，例如通过回收能量（热能）或更换能源（电改气），节省能源或能源成本并减少二氧化碳排放。
- 环境保护：提高使用者（员工）的节能和气候保护意识。

4.9.2 建议改进措施

实时能源管理是一项前沿技术，这项技术将历史性能数据持续发送至先进的云系统。在云系统中，这些数据转化为具有实际价值的建议，服务于技术团队、维护团队和行业管理者。

实时能源管理系统可包括分项计量、监测和控制系统。该系统可以减少执行复杂任务所需的时间，通常能够提高产品和数据的质量和一致性，并且优化工序操作。

受益于能源管理系统的机器和设备包括锅炉、蒸发器、粗浆洗浆机、石灰窑、造纸机和污水处理装置。能源管理系统可以接入现有的分布式控制系统以及操作员控制系统，以便操作员看到趋势图。能源管理系统应能够在报告及核算装置的能源使用情况，包括蒸汽、冷凝液回流、燃料消耗以及各个装置的其他重要过程变量。

4.9.3 节能和温室气体减排潜力

通常，节能措施与更换、改造或升级工艺设备的投资有关。实施此类措施的驱动力不仅是节能，更重要的是提高生产效率、提升产品质量以及降低总体成本。因此，必须将节能技术纳入到造纸工艺的方方面面，这项工作至关重要。

全面采用能源监测和控制系统的具体节能量和投资回收期因工厂而异。几乎所有工业生产都有各种各样的过程控制系统可用；有大量文献资料可用于评估多数工业部门的控制系统。下表为控制系统分类和典型的能效提升潜力。

控制系统和典型的能效提升潜力

系统	特征	典型节能量 (%)
监测与锁定	适用于各行各业的专用系统，在许多国家和地区成熟应用	典型节能量 4%-17%，平均 8%，基于英国经验
计算机集成制造 (CIM)	改善整体流程经济性，例如库存、生产率和能源	> 2%
过程控制	水分、氧气和温度控制，气流控制“基于知识的模糊逻辑”	典型节能量 2%-18%

实时能源管理系统可缩短停机时间，降低维护成本，缩短加工时间，提高资源和能源效率，改进排放控制。

措施的关键信息——实时能源管理系统

投资成本：	3.22 欧元 / 吨 _{产品}
节能量：（热能和电能）	111 千瓦时 / 吨 _{产品}
二氧化碳减排量：	0.04 吨 _{二氧化碳} / 吨 _纸
优点：	<ul style="list-style-type: none"> • 提高资源和能源效率 • 降低维护成本 • 缩短处理时间
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> • -

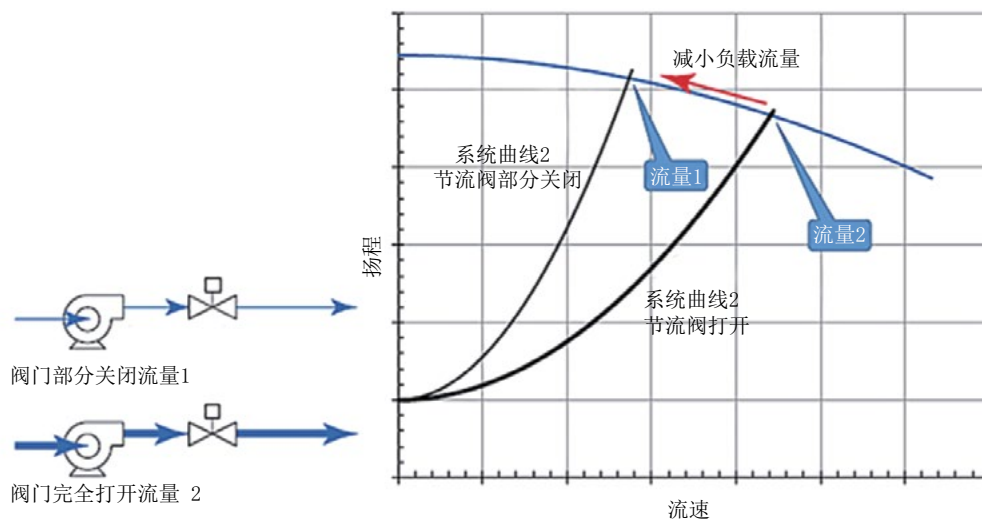
4.10 泵、风机、压缩机适用于泵、风机和压缩机高效变频器

4.10.1 基线情况和能耗说明

在大多数造纸厂，泵、风机和压缩机的流量由节流阀控制，而设备以恒速运行。节流阀是一种阀，可用于启动、停止和调节通过回动力泵的流体流量。使用节流阀控制方法时，泵连续运行。打开或关闭泵排出管路中的阀，以将流量调节到所需值。

下图显示通过使用节流阀改变系统阻力来控制泵流量。在阀门完全打开的情况下，泵在流量 2 下运行。当阀门处于部分打开位置时，它将在系统中引入额外的摩擦损失，从而产生一条新的系统曲线，该曲线与流量 1 处的泵曲线相交，形成新的工作点。所示两条曲线的工作点之间的扬程差是节流阀上的扬程（压力）下降。

通过使用节流阀来控制泵流量



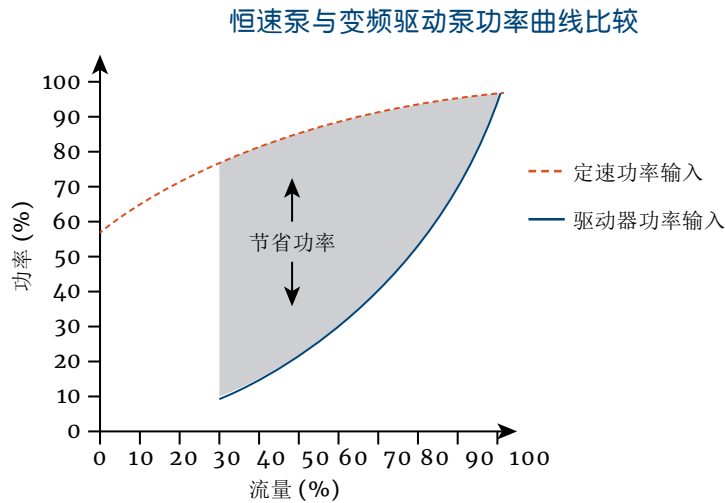
资料来源：（Pumps and systems, 2021）

节流控制的通常做法是即使在最大系统设计流量时也要部分关闭阀门，以实现可控性。因此，在所有流量条件下，为克服通过阀门的阻力将浪费一定能量。径向流量会随着流速的减小而降低泵的功率。然而，流量乘以阀门上的落差，则是浪费的能量，但如果使用速度控制作为替代方案，则可以回收这些能量。另一方面，对混合泵或轴流泵使用节流控制时，泵的功率曲线通常会随着流量的减少而增加，这可能导致功耗增加到不可接受的水平，不仅会浪费能源，还会导致驱动器过载。

4.10.2 建议改进措施

可以通过改变泵的转速来改变质量流率，使泵在更高的效率值下运行。可调速驱动器能更好地将速度与电机运行的负载要求相匹配，从而确保在特定应用中优化电机能耗。此类泵通常称为变速泵（VSP）或变频驱动（VFD）泵。

下图示出恒速泵和变频驱动泵的功率曲线。从图中可以看出，在质量流率相同的情况下，功耗差异显著。



通过使用逆变器，可以调整电网提供的电力系统频率，以调节异步电动机转速（因为异步电动机转速是频率的函数）。

4.10.3 节能和温室气体减排潜力

变频器可以应用于使用三相异步电动机的新工厂和现有工厂。可以使用可调速驱动器进行优化的电机包括制浆造纸厂的浆泵、液泵、滤液泵和造纸机泵；木制品加工厂的窑风机和干燥机风机；锅炉风机；以及任何其他流量可变的泵或风机。当污水水流断断续续且具有突变特点时，变频器在污水处理厂的应用会受到限制。

通过降低泵的节流损失和提高泵的液压输出流量，可以节约泵送应用的电能。各种应用通常节电 15% 至 25%。近年来，变频器的价格大幅下降。需要评估每种情况的经济效益。投资回收期介于 0.5 至 4 年之间。

根据劳伦斯伯克利国家实验室对中国制浆造纸行业进行的研究，这项措施实现的节电量和资本成本分别为 10.5 千瓦时 / 吨_{产品}和 0.69 欧元 / 吨_{产品}。

措施的关键信息——适用于泵、风机和压缩机高效变频器

投资成本:	0.69 欧元 / 吨 _{产品}
节能量: (电能)	10.5 千瓦时 / 吨 _{产品}
二氧化碳减排量:	0.006 吨 _{二氧化碳} / 吨 _纸
优点:	<ul style="list-style-type: none"> • 降低成本 • 节能 (电能) • 过程控制
缺点:	• -

4.11 利用余热干燥生物燃料和污泥

4.11.1 基线情况和能耗说明

许多制浆造纸厂有大量生物燃料（树皮和木质生物质）、污泥（第 4.13.1 章）和大量低品位热源（余热）可用。目前，有两种业内普遍使用的污泥管理策略：

- 机械脱水后堆肥（本章）
- 机械脱水和焚烧（第 4.12 章）

工厂也可选择不在于现场处理污泥，一些工厂将堆肥或干燥业务外包给外部运营商，运输需求随之增加。两种策略的成本与固体废物的质量成正比。

4.11.2 建议改进措施

在制浆造纸及水处理过程中产生的最终净化废渣、损耗的纤维和污泥必须在最终处置或进一步处理之前进行脱水。脱水旨在尽可能去除污泥中的水分，增加废渣的干固形物（DS），最终意味着处置成本降低。

生物和化学污泥通常在脱水和增稠之前进行预脱水。这意味着干固形物含量从大约 1%-2% 增加到 3%-4% 或更高。污泥的预脱水通常在重力分选台、重力盘式浓缩机、静压盘式浓缩机中进行，对于生物污泥，也可通过离心浓缩机进行预脱水。

若采取机械方法，通过使用带式压榨机，废渣最多可脱水 40%-50%（含纤维性污泥），干物质占比达到 25%-40%（含纤维 / 生物 / 化学混合污泥）。若要提高带式压榨机脱水后的干固形物含量，则可以使用螺旋压榨机。不过，螺旋压榨机需要在压榨前粉碎废渣，该环节会增加内部成本。

只有通过热干燥才能获得显著更高的干物质含量。通过使用干燥设备处理废渣，可将干固形物含量从 50% 增加到 90%。通过调查生产现场可用的余热，可以确定这些热源的能源含量，并将其与干燥过程所需的能源进行比较。

4.11.3 节能和温室气体减排潜力

污泥脱水可以减小污泥体积，减轻污泥重量，从而减小输送和处置的体积。机械干燥和热干燥可使干固形物的含量达到 90%。这项措施所需的热能可由烟气余热提供。据估计，废渣处置成本可降低 50%。

通过干燥污泥可以产生额外收入(或降低能源购买成本)，从而激励工厂进一步对主要工序进行节能改造。通常，只有在其他工序的余热可以用于此目的的情况下，生物燃料和污泥的干燥才具有经济可行性。

这项措施一般适用于拥有合适的余热源以干燥生物质和污泥的新工厂和现有工厂。通常可使用热风或工艺热水等余热。其他成本更昂贵的选择有蒸汽热交换器或燃气干燥系统。

措施的关键信息——利用余热干燥生物燃料和污泥

投资成本:	可实现的节能量和投资成本取决于工厂特性和干燥所用能源
节能量:	
二氧化碳减排量:	
优点:	<ul style="list-style-type: none"> 减轻重量，降低运输和填埋成本 增加焚烧前热值
缺点:	<ul style="list-style-type: none"> 提取物湿度可能导致气味问题，需要加以控制

4.12 废弃物焚烧（使用污泥和废渣）

4.12.1 基线情况和能耗说明

参见第 4.11.1 章

4.12.2 建议改进措施

在未进行脱墨的回收纸加工厂中（例如全废纸挂面箱纸板、瓦楞芯纸、纸箱板或折叠纸板），大约 **4% 至 10%** 的进料会成为残留物。其中包括碎浆机处置系统的残留物、制浆厂各个筛选和净化阶段产生的废渣以及污水处理产生的污泥。这些部分大多数不适合物料再生利用（不过可以利用造纸机回路的最终净化和筛选阶段产生的废渣生产堆肥）。然而，其热值约为 **21960-24120 千焦 / 千克干物质**，因此对其进行焚烧或许是可行的废物管理方案。

脱水后的污泥和废渣可以干燥，以提高焚烧厂能量回收物料的热值。焚烧进一步减少从机械制浆到垃圾填埋处置环节的废物数量，并且回收废物组分的能量含量。这项技术通过以下过程减少蒸汽锅炉消耗的化石燃料：

废弃物焚烧工序

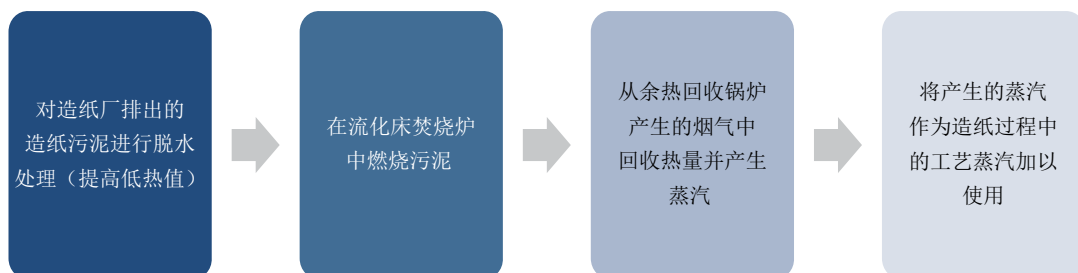
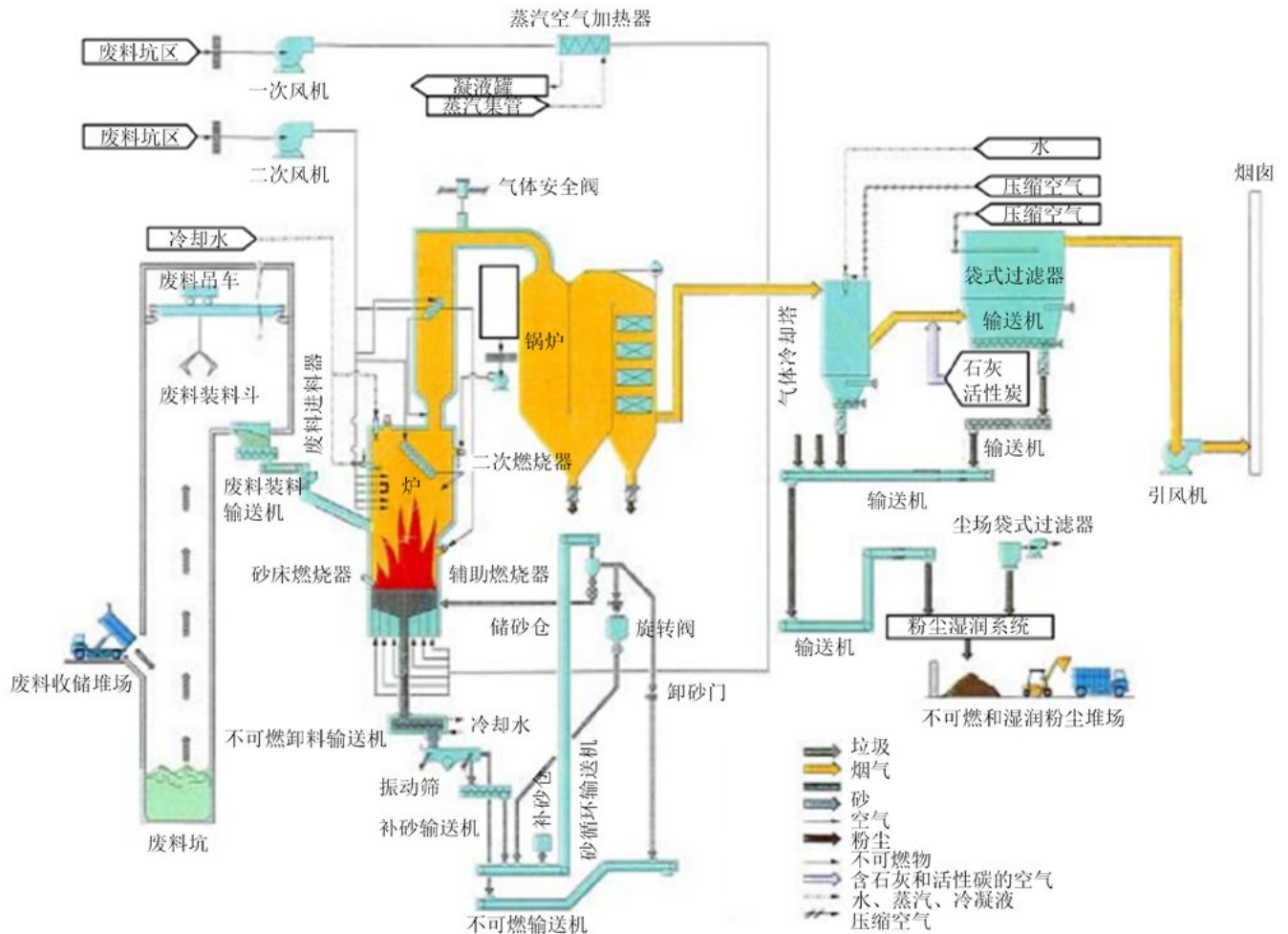


图 40 展示了造纸污泥焚烧厂的总体视图。将脱水至含水量约 55% 的造纸污泥送入焚烧炉进料斗，并在 600 摄氏度或更高温度的焚烧炉中依次焚烧。焚烧炉内的不可燃组分与循环使用的流化砂一起从焚烧炉底部排出。焚烧期间，烟气温度变为 850 - 950 摄氏度，因此锅炉能够制热并产生蒸汽。该蒸汽用作造纸过程的蒸汽。

焚烧厂流程图



4.12.3 潜在节能量和温室气体减排量

一吨含水率约为 45% 的废渣（来自无脱墨工序的工厂）可替代锅炉中的 0.7 吨褐煤。在一家产能为 37 万吨 / 年的德国工厂，通过集成至工厂发电站的炉膛燃烧装置（处理能力：28000 吨 / 年）中焚烧废渣减少的发电量达 66000 兆瓦时的化石燃料。在另一家日处理 110 吨干法造纸污泥的工厂，节能量则为 9 万兆瓦时 / 年。

一座焚烧厂的投资成本估计约为 250 万欧元，其中包括废渣预处理、干燥设施和最高 3 吨 / 小时废渣体积流率的气化室。

措施的关键信息——废弃物焚烧

投资成本：	250 万欧元
节能量：	节能量取决于各组成部分的一般情况。 6 万 - 9 万兆瓦时 / 年
二氧化碳减排量：	10 万吨 _{二氧化碳} / 年
优点：	<ul style="list-style-type: none"> • 废弃物减量，降低运输和填埋成本 • 可行的垃圾管理方案 • 能量回收
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> • 投资成本高

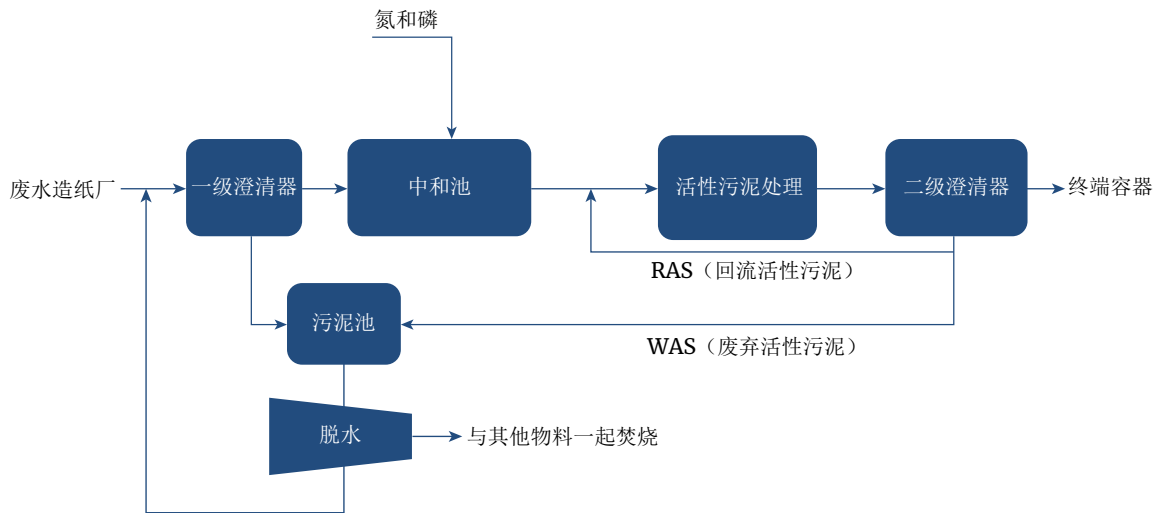
4.13 污水处理制得沼气

4.13.1 基线情况和能耗说明

废水是制浆造纸厂的副产物。根据当地条件可采用不同的水净化技术，如沉降、生物处理、化学沉淀、浮选和厌氧处理的组合。

在造纸过程中，一些有机物最终会进入生产用水中，进而污染水，需要对其净化。在生物污水处理环节，部分溶解的有机物可以得到利用，以促进各种微生物生长。这些微生物很容易从水中分离出来，然后形成污泥。下图详细示出污水处理过程，并列污水处理过程中产生的三种最常见污泥的来源点。

污水处理场所示意图及制浆造纸厂污泥术语



造纸厂污泥通常在垃圾填埋场处置。一级处理装置排出的污泥主要由纤维、细粉和填料组成。在二级处理环节，或者在生物处理环节产生生物污泥，或者在化学絮凝处理环节产生化学絮凝污泥，或者两者兼而有之。

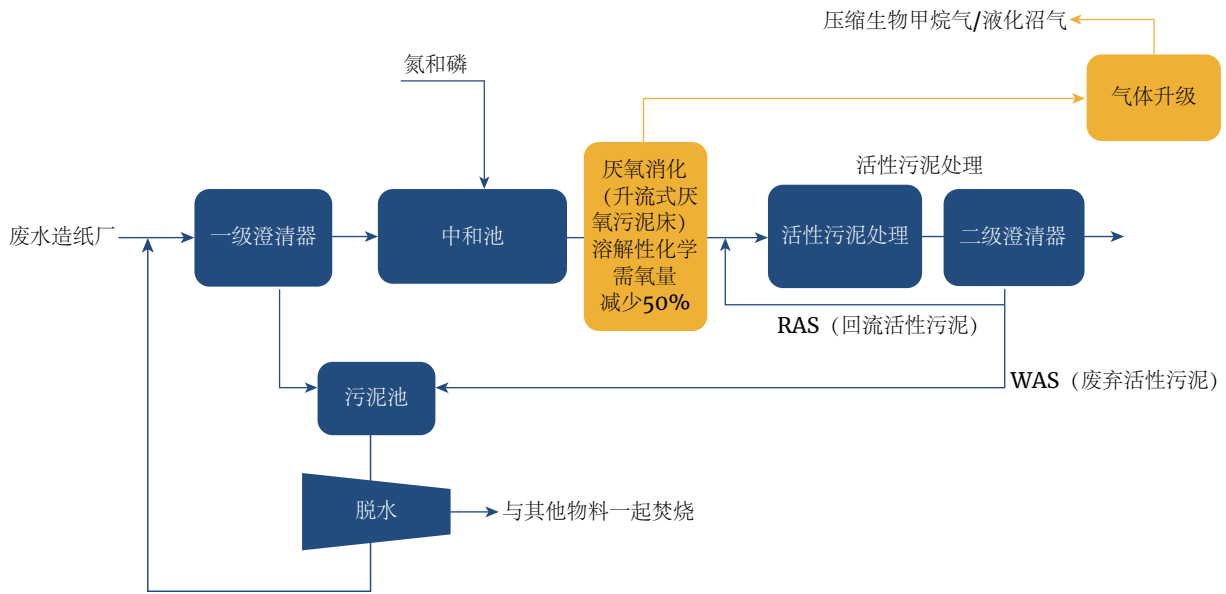
4.13.2 建议改进措施

通过改变污水处理的好氧步骤以增加生物污泥（也称为废弃活性污泥）的产量，将获得显著的节能效果。产生的生物污泥将用作底物，用于通过厌氧消化（AD）生产生物甲烷。在厌氧生物污水处理过程中，由于微生物的消化作用（主要产生甲烷和二氧化碳），在无氧条件下降低了生物可降解负荷。这一过程中有不同工艺设计可供选择。应用的反应器类型主要有固定床反应器、污泥接触法、上流式厌氧污泥床（UASB）、膨胀颗粒污泥床（EGSB）以及最近开始使用的内循环（IC）反应器。

过去几十年里，与上流式厌氧污泥床的基本概念相关的厌氧消化技术取得重大进展。由于运行条件能够防止腐蚀和堵塞问题，新解决方案通常规模较小，安装和维护成本较低。因此，业界日益关注在进行好氧处理（活性污泥处理）之前将含有高溶解性化学需氧量（sCOD）的污水加工成沼气的技术解决方案。

厌氧 - 好氧联合污水处理厂的简化方案如图 42 所示。实施厌氧污水处理可以提高污水处理能力，减少化学品需求。

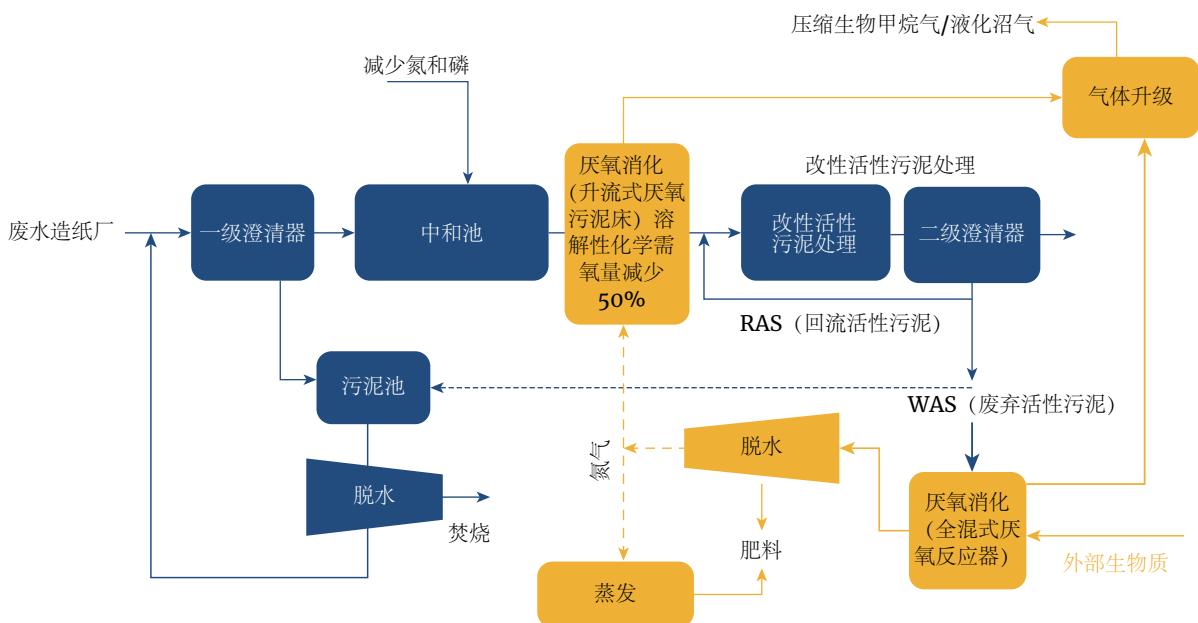
制浆造纸厂的污水处理场所及厌氧消化示意图



挪威某制浆造纸厂目前正在实施示范项目“EffiSludge for LIFE”，该项目通过实施新的污水处理概念降低污水处理（WWT）的能耗，同时将残余废物（生物污泥）转化为能源。EffiSludge for LIFE 将污泥视为生产沼气的资源，使污泥产量从最小化转变为最大化，从而减少了对曝气的需求和污水处理中的停留时间（低污泥龄）。下图示出 EffiSludge 概念：从废弃活性污泥中产生沼气，并通过再循环使营养物质进入活性污泥工艺（ASP）环节。实施 EffiSludge 的主要目标是：

- 减少污泥停留时间（污泥龄），提高好氧处理的有机负荷率。
- 减少好氧处理中的曝气需求，从而显著节能，减少好氧污水处理的碳足迹。
- 产生生物污泥，用作沼气生产过程的底物。生物污泥可作为单一底物进行消化，也可与其他现场或场外底物共同消化。

EffiSludge 概念



4.13.3 节能和温室气体减排潜力

实施 **EffiSludge** 对碳排放的主要影响来自于减少生物污水处理步骤曝气所需的电力。目前，污水处理过程各部分的最大碳足迹为 **9.6-13** 千克二氧化碳当量 / 千克纸浆。据估计，通过实施 **EffiSludge** 概念，未来的碳足迹为 **3.6-5.9** 千克二氧化碳当量 / 千克纸浆。通过实施 **EffiSludge** 概念，可望减少 **6-8** 千克二氧化碳当量 / 千克纸浆。此外，将产生沼气以取代化石燃料，并减少二氧化碳排放。

措施的关键信息——污水处理制得沼气

投资成本：	经济可行性和节能量取决于选址和工厂
节能量：	
二氧化碳减排量：	<ul style="list-style-type: none"> • 每立方米污水 500 克二氧化碳（斯堪的纳维亚沼气公司，2019）
优点：	<ul style="list-style-type: none"> • 可行的垃圾管理方案 • 能量回收 • 提高污水处理能力 • 减少化学品需求 • 降低二氧化碳当量 / 千克纸浆
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> • 投资成本高 • 空间要求

4.14 热电联产

4.14.1 基线情况和能耗说明

造纸行业已采用不同的热电联产工艺。除了经典的背压式蒸汽发电厂外，自 1980 年以来，市场上出现了联合循环发电厂。背压式蒸汽发电厂的电热比约为 0.2，无法完全满足现代造纸厂的电力需求。最先进的造纸机要求电热比达到 0.3~0.65（机械制浆厂的要求甚至更高），主要取决于纸张种类、质量和纸浆生产设备。

根据中国热电联产市场评估结果，所有木浆造纸厂都有自备热电联产发电厂，而大部分秸秆制浆造纸厂则没有此类发电厂。在年产量 3 万吨的秸秆制浆造纸厂中，部分使用烧黑液的锅炉回收碱。但只有少数几家建有自给自足的热电联产发电厂。而大部分都有自给自足的锅炉。一些秸秆制浆造纸厂从区域热电联产发电厂采购热量。

4.14.2 建议改进措施

大量稳定的工艺蒸汽需求、现场对电力的高需求、常年稳定高水平的运行时长以及现场充足的燃料供应（即木材废料和黑液）：这些优势使得热电联产在运营和经济层面成为全球许多工厂一个有吸引力的选择。

传统蒸汽发电厂可以通过改造蒸汽循环和在锅炉上游安装燃气轮机来提高发电功率，这里所说的便是联合循环燃气轮机。

热电联产（是一套同时生产电能和热能的综合技术。热电联产机组在能源梯级利用系统中使用燃料高效生产蒸汽和电能。热电联产发电厂将燃料使用的转换率（燃料利用率从传统发电站的约 30% 提高到 80%–93% 左右。

传统发电与热电联产损失对比图

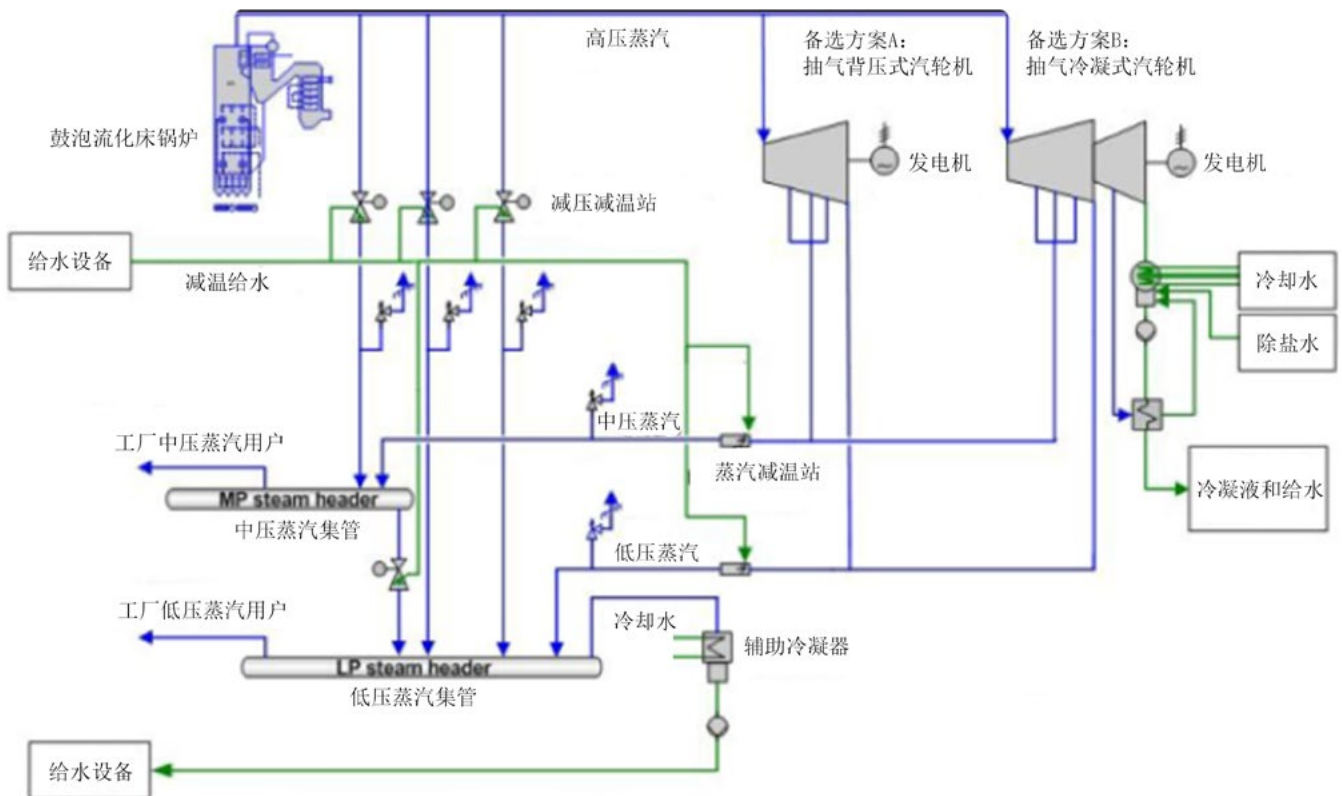


资料来源：摘自（Energy Transition, 2021）

制浆造纸行业中的热电联产发电厂通常由蒸汽轮机和 / 或燃气轮机组成。蒸汽轮机连接到产生高压蒸汽的锅炉，可以使用各类燃料（黑液、树皮、垃圾、液体、固体或气体燃料）。使用化石燃料或生物燃料的典型热电联产机组（即大多数纸浆厂）的电热比约为 **0.30**

小型造纸厂的热电联产装机容量小于 **1 兆瓦**热，而大型纸浆厂的回收锅炉的热电联产产能最高可达 **500 兆瓦**热。图 45 是造纸行业中的热电联产实例。该案例中使用鼓泡流化床锅炉，锅炉可为任何类型并使用任何燃料。可以使用抽气背压式汽轮机（图中方案 A）、凝汽式汽轮机（图中方案 B），也可同时使用两者。

制浆 / 造纸厂的热电联产机组实例



4.14.3 节能和温室气体减排潜力

热电联产机组的优点包括与单独发电和产热相比能效更高，因此生产每千瓦时电或每兆焦耳热的排放量更低。通过安装热电联产机组，可将一次能耗减少 **10% 至 15%**，从而减少二氧化碳排放。配电系统中的损耗降至 **5%**。

下表提供了为德国中等负荷公用事业公司供电的燃气轮机联合循环发电厂的环境绩效示例。该燃气轮机联合循环发电机组示例代表具有最佳热效率的热电联产工艺。将具有 **92%** 燃料利用率的蒸汽和电力联产量与最先进的燃煤电站（在德国示例中电效率为 **42%**）和现场蒸汽机组（锅炉效率为 **88%**）的所购发电量进行比较。在该示例中，烟气中的氧含量为 **3%**。

德国某燃气轮机联合循环发电厂与某公用事业公司的环境绩效比较

热电联产工厂示例，设计产能 95 吨蒸汽 / 小时；实际产能约 90 吨蒸汽 / 小时；输出 24 兆瓦电 [1]					毫克 / 兆焦耳
	单位			值	NA
功率输出合计	兆瓦			24.0	NA
生产用热合计	兆瓦			60.0	NA
功率与热量比	兆瓦 / 兆瓦			0.40	NA
能量总产量	兆焦耳 / 小时			302 400	NA
		公用事业			
	单位	燃气轮机	补燃	合计	毫克 / 兆焦耳
额定热输入	兆瓦	37.9	53.6	91.5	NA
气体流量（干气，正常条件下）	立方米 / 小时	NA	NA	109 000	NA
氮氧化物排放量	毫克 / 立方米	NA	NA	70	NA
一氧化碳排放量	毫克 / 立方米	NA	NA	5	NA
二氧化硫排放量	毫克 / 立方米	NA	NA	0	NA
氮氧化物质量流量	千克 / 小时	NA	NA	10.9	36.0
一氧化碳质量流量	千克 / 小时	NA	NA	0.5	1.8
二氧化硫质量流量	千克 / 小时	NA	NA	0	0
二氧化碳质量流量	吨 / 小时	NA	NA	19.0	62 830
购电：24 兆瓦，来自燃煤中负荷公用事业公司 - 蒸汽机组产生工艺蒸汽 90 吨 / 小时 [2]					
	单位			值	毫克 / 兆焦耳
购买功率	兆瓦			24	NA
产热量	兆瓦			60	NA
能量总产量	兆焦耳 / 小时			302 400	NA
		公用事业			
	单位	发电量	蒸汽产生量	合计	毫克 / 兆焦耳
额定热输入	兆瓦	59.4	67.6	127	NA
气体流量（干气，正常条件下）	立方米 / 小时	73 070	69 030	142 100	NA
氮氧化物排放量	毫克 / 立方米	200	100	NA	NA
一氧化碳排放量	毫克 / 立方米	200	50	NA	NA
二氧化硫排放量	毫克 / 立方米	200	0	NA	NA
氮氧化物质量流量	千克 / 小时	14.6	6.90	21.5	71.1
一氧化碳质量流量	千克 / 小时	14.6	3.45	18	59.7
二氧化硫质量流量	千克 / 小时	14.6	0	14.6	48.3
二氧化碳质量流量	吨 / 小时	19.6	13.9	33.6	110950

注：NA = 不详

(1) 废气中的氧气含量为 3%。

(2) 将数字转换为具体值的计算方法。1 兆瓦 × 3 600 = 兆焦耳 / 小时；例如，(24.0 + 60.0) × 3 600 = 302 400 兆焦耳 / 小时；例如，具体氮氧化物排放量可计算为 10 900 克 / 小时除以 302 400 兆焦耳 / 小时 = 36 毫克 / 兆焦耳。

在该示例中，氮氧化物减少 49%，一氧化碳减少 97%，二氧化硫减少 100%，二氧化碳减少 43%。

热电联产适用于新建和现有工厂。获得建厂许可证的行政程序可能对实施热电联产构成障碍。在现有工厂中，可以重新为现有蒸汽背压式机组供电，并将其改造成联合循环热电联产工厂，以实现热电联产。

可实现的节能量和投资回收期主要取决于国内的电力和燃料价格。热电联产的投资成本取决于工厂规模。每兆瓦装机容量的基本建设投资随着工厂规模的扩大而下降，并取决于所采用的热电联产技术。根据规模和技术，基本建设投资如下：

根据规模和技术计算出的 2010 年基本建设投资

技术	规格	投资
燃气轮机单循环	1 兆瓦，产量：3 吨低压饱和蒸汽 / 小时	150 万欧元
	4.5 兆瓦，产量：6 吨低压饱和蒸汽 / 小时	500 万欧元
发动机单循环	1 兆瓦，生产蒸汽或制冷	130 万 -150 万欧元
燃气轮机联合循环发电机组 (CCGT)	25 兆瓦，产量：40 吨低压饱和蒸汽 / 小时	3000 万欧元
	48 兆瓦，产量：90 吨低压饱和蒸汽 / 小时	5400 万欧元

措施的关键信息——热电联产

投资成本：	参见表 27
节能量：	减少 10-5%
二氧化碳减排量：	减少 45% (表 25)
优点：	<ul style="list-style-type: none"> • 提高能效 • 降低电力成本 • 减排
缺点：	<ul style="list-style-type: none"> • 投资成本高 • 实施和运行复杂

4.15 未来发展展望

在《欧洲战略能源技术计划》（欧盟委员会联合研究中心（JRC），能源和运输研究所，2011）的技术地图中，制浆造纸行业的潜在突破性技术分为三类：

- 深入开发**创新干燥技术**（包括“脉冲干燥”、“冷凝带”法和“蒸汽射流冲击干燥”）。
- 通过专注于木材备料和更高效的磨浆盘优化**机械制浆**
- 将工厂打造成一体化**生物精炼**综合体

除上述措施外，还可以**数字孪生**为方向，着力发展仿真和数字化。

有鉴于对整个制浆造纸行业的潜在影响，本报告将重点分析后两方面的发展情况。

4.15.1 数字孪生

制浆造纸工艺的进一步优化往往与数字化和监测技术挂钩。例如，在由生态创新倡议（ASTEPP，造纸领域的先进传感技术）参与资助的 2014-2016 年优化项目（www.astepbycristini.it）中，除了节约大量水资源和减少物料损耗外，温室气体排放量也减少了 5.5%。这样的显著效果要归功于使用新一代先进传感器，此类传感器能够监测造纸过程的不同阶段。

对于制造应用，数字孪生超越了单一工具的优化和单一过程的计算机仿真范畴，后者自 20 世纪 80 年代起就已实施。根据定义，数字孪生“模拟整个纸浆厂相互关联的工艺流程，并将这些工艺流程实时连接至纸浆厂的实际运行环节”。数字孪生是信息物理系统的核心组成部分之一，信息物理系统与人工智能及高级分析方法则是工业 4.0（物联网）的组成部分。数字孪生应用可以为设计和运行阶段提供有价值的结论，同时估量工艺流程的条件或物理特性以及对整个工厂的实时影响。可在任何方面（时间、物料、能量）进行优化，并可及早发现以往无法发现的任何问题。

德国最近一项调查结果显示，大约一半的大型工业企业计划在 2021 年实施数字孪生。目的是监测资产和流程，并持续改进复杂的工业设施、机器以及服务和流程。只有 7% 的受访者（来自 10 个分支机构的 170 名中高层管理人员）不认为实施数字孪生会提高效率。预计未来五年内，数字孪生的使用量将增长近一倍。此外，预计大多数数字孪生（80%）将用于不同企业（而不仅仅是在一家企业内）。

4.15.2 生物精炼厂

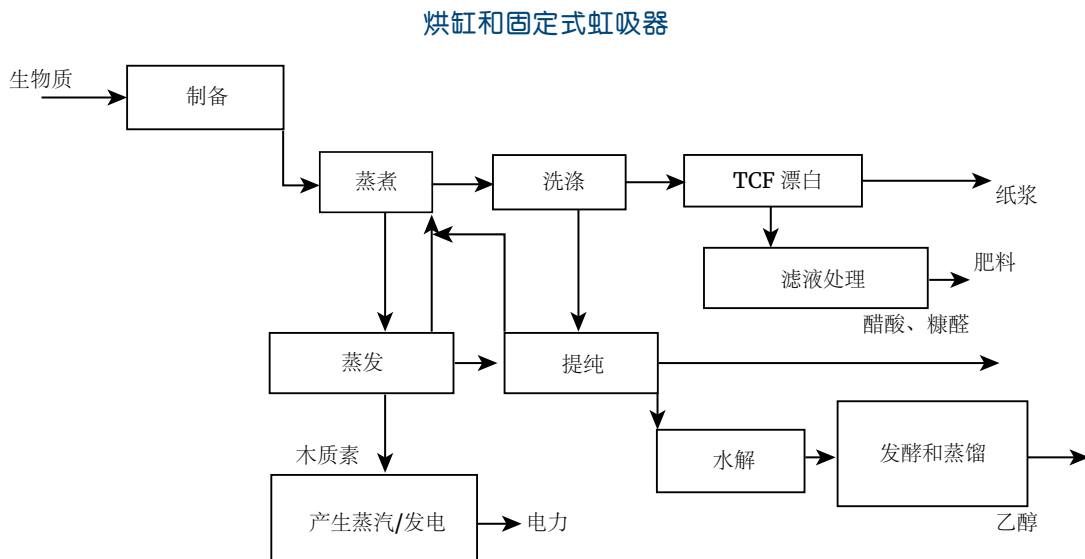
与“常规”工厂相比，生物精炼厂扩大了工艺流程和产出的范围。生物精炼厂可定义为充分利用输入的生物质和其他原料，从而以经济优化的方式同时生产纤维、化学品和能源的工厂（改编自：（瑞典能源署，2008））。

潜在产品（除传统纤维制品外）包括：

- 化学品和材料，如苯酚、粘合剂、碳纤维、药品等
- 生物燃料（颗粒、甲醛、二甲醚 -DME、乙醇等）
- 电力（凝汽式发电、生物质整体气化联合循环发电）。

在传统化学纸浆厂中，木材的三种主要成分（纤维素、半纤维素和木质素）用于生产纤维和电力 / 蒸汽；在生物精炼厂，部分木质素和 / 或半纤维素用于其他产品。有观点认为（资料来源同上），得益于新型高效技术、工艺集成和新的系统解决方案，在未来的化工市场，纸浆厂的生物燃料过剩量很有可能增加。此外，不断上涨的能源价格和政策工具不仅要求提高能源效率，而且要求提高资源效率，因此生物精炼厂成为一个前景良好的选择。

下图示出生物精炼厂的生物质处理概况：



相比之下，在纸浆厂，非选择性分馏导致大量半纤维素组分与木质素一起燃烧以产生蒸汽；这种方式仅使用大约 **60%** 的生物质。

总体而言，目前存在不同类型的工厂一体化；生物精炼厂侧重于化学品和材料生产，或侧重于能源生产（生产电力或木质素、生产升级生物燃料或利用气化技术（如甲醇或二甲醚 **DME**）生产电力）。

总体而言，制浆造纸行业与其他耗能行业通过合作可以提高整体能源 / 资源效率。潜在合作方式包括

- 利用纸浆厂的余热干燥生物质 / 制造生物质颗粒（潜力估计为 **1-1.5** 吉焦 / 风干吨）
- 利用森林残留物的酸浸出，从而增加其作为石灰窑燃料的吸引力（此工艺可减少灰分和环境 / 焚烧问题）
- 为其他低温供热需求量较大的行业提供能源。

在主要生产化学品和材料的生物精炼厂，来自纸浆厂的有机化合物（如黑液和树皮）可以加工成化学品或新原料，而不是在回收锅炉中焚烧。化学品包括回收的木质素，其可以进一步用作粘结剂、道路外加剂或电池成分。此外，人们目前正在研究将其用于碳纤维。回收的半纤维素可用作纤维添加剂，以提高纸浆纤维间的粘合力，还可用作不同类型塑料的水凝胶（活细胞封装）或糠醛。

例如，某芬兰公司开发出对非食品生物质进行生物精炼的第三代技术并获得专利。该公司经营一家中试规模的生物精炼厂，目前正在印度建设一家精炼厂。该公司表示，如今能够以可持续方式从所有木质纤维素原料（阔叶木和针叶木、非木材和非食品生物质，如秸秆、蔗渣、玉米秸、空果串和竹子）中生产生物乙醇、高品质纸浆（如溶解纸浆）、纤维素糖、生物化学品和无硫木质素，生物质使用比例达到 **90%** 左右。



5 结语

制浆造纸是能源密集型产业，也是重点耗能行业之一。在整个生产过程中，有多种多样的措施用以提高企业的能源和资源利用效率，减少二氧化碳排放。

下表总结了最具前景的措施，这些措施易于实施，或者具有很大潜力。详细情况见本报告各章节。

技术	措施的关键信息				
	投资成本	节能量	二氧化碳减排量	优点	缺点
间歇式蒸煮器改善（间接加热和冷喷放技术）	4.8 欧元 / 产品 _{纸浆}	880 千瓦时 / 吨 _{产品}	0.3 吨二氧化碳 / 吨 _{产品}	<ul style="list-style-type: none"> 扩大产能（最高 30%） 减少燃料消耗（石油、天然气等） 减少能耗 硫化氢风险低 	<ul style="list-style-type: none"> 更换成本高 维护成本高
石灰窑富氧燃烧	10 万欧元以内（关注能源，2006）	燃料减少 7%-12% (25-40 千瓦时 / 吨 _{纸浆})	0.01-0.02 吨二氧化碳 / 吨 _{纸浆}	<ul style="list-style-type: none"> 扩大产能（最高 30%） 减少燃料消耗（石油、天然气等） 减少能耗 硫化氢风险低 	<ul style="list-style-type: none"> 高投资 高运行成本
石灰窑改造、高性能耐火材料	使用标准耐火材料或高性能耐火材料改造常规石灰窑，其成本差异不到 15600 欧元（关注能源，2006）	燃料减少 5% (17 千瓦时 / 吨 _{纸浆})	0.007 吨二氧化碳 / 吨 _{纸浆}	<ul style="list-style-type: none"> “喷枪”涂覆应用，减少施工时间 减少燃料消耗（石油、天然气等） 	<ul style="list-style-type: none"> 仅适用于改造石灰窑（即实施硫酸盐法的工厂）
黑液蒸发器（固形物浓缩器）	"170 万 -900 万欧元，视目标浓度而定 此类设施的投资回报率估计为 7% 至 14%"	59 千瓦时 / 吨 _{黑液}	0.023 吨二氧化碳 / 吨 _{黑液}	<ul style="list-style-type: none"> 热效率 降低硫化物排放 回收过程可靠 生产率提高 2% 	<ul style="list-style-type: none"> 在烟气净化工序之前排放大量颗粒物，需要安装安全高效而造价昂贵的静电除尘器
高效率磨浆机	60 万欧元	节电 7%-20%，视应用而定 20-45 千瓦时 / 吨 _纸	0.012-0.03 吨二氧化碳 / 吨 _纸	<ul style="list-style-type: none"> 空载功率较低，节省电力 降低成本 能够提高产品质量 	<ul style="list-style-type: none"> 投资成本高 可能需要调整进料泵、精炼设备和贮槽容量，确保可靠运行
径流式风机	取决于具体情况，投资回收期不到 2 年	20-30 千瓦时 / 吨 _纸	0.008-0.012 吨二氧化碳 / 纸	<ul style="list-style-type: none"> 节省蒸汽降低成本 提高生产率 干燥能力更强 	<ul style="list-style-type: none"> 可能发生腐蚀

热力压缩机	视具体情况而定， 投资回收期不到 1 年	25 千瓦时 / 吨 _纸	0.01 吨二氧化碳 / 吨 _纸	<ul style="list-style-type: none"> 蒸汽节能 	<ul style="list-style-type: none"> 需要大量高压蒸汽
纸机汽罩	投资回收期 1-2 年	每小时节省约 3200 千瓦时 200 千瓦时 / 吨 _纸	0.07 吨二氧化碳 / 吨 _纸	<ul style="list-style-type: none"> 节能 减少外部积冰和烟囱噪声排放 	<ul style="list-style-type: none"> -
靴式压榨	毛纸幅宽 5 米的造纸机加装一台靴式压榨机的投资总成本约为 1000 万欧元	压榨后干度提高 1%-3% 可节约 60-180 千瓦时 / 吨 _纸	0.01-0.07 吨二氧化碳 / 吨 _纸	<ul style="list-style-type: none"> 压榨后干度较高 减少热干燥需求 节省体积 提高成品质量 增产 	<ul style="list-style-type: none"> 投资成本高 空间要求
固定式虹吸管与干燥棒	通常，此项技术的投资回报率在 25% 至 80% 之间	250 千瓦时 / 吨	0.1 吨二氧化碳 / 吨 _纸	<ul style="list-style-type: none"> 最大限度减少干燥纸张所需蒸汽量 	<ul style="list-style-type: none"> 投资成本高 实施工作耗时漫长
蒸汽疏水阀维护	0.91 欧元 / 吨产品	497 千瓦时 / 吨 _{产品}	0.19 吨二氧化碳 / 吨 _纸	<ul style="list-style-type: none"> 提升安全生产水平 	<ul style="list-style-type: none"> -
实时能源管理系统	3.22 欧元 / 吨产品	111 千瓦时 / 吨 _{产品}	0.04 吨二氧化碳 / 吨 _纸	<ul style="list-style-type: none"> 提高资源和能源效率 降低维护成本 缩短处理时间 	<ul style="list-style-type: none"> -
泵、风机、压缩机适用的高能效变频器	0.69 欧元 / 吨产品	10.5 千瓦时 / 吨 _{产品}	0.006 吨二氧化碳 / 吨 _纸	<ul style="list-style-type: none"> 降低成本 节能（电能） 过程控制 	<ul style="list-style-type: none"> -
利用余热干燥生物燃料和污泥	可实现的节能量和投资成本取决于特定工厂特性和干燥所用能源			<ul style="list-style-type: none"> 减轻重量，降低运输和填埋成本 增加焚烧前热值 	<ul style="list-style-type: none"> 提取物湿度可能导致气味问题，需要加以控制
废弃物焚烧	250 万欧元	" 节能量取决于各组成部分的一般情况。 6 万 - 9 万兆瓦时 / 年 "	10 万吨 _{二氧化碳} / 年	<ul style="list-style-type: none"> 减轻重量，降低运输和填埋成本 可行的垃圾管理方案 能量回收 	<ul style="list-style-type: none"> 投资成本高

污水处理制得沼气	经济可行性和节能量取决于选址和工厂		每立方米污水500克二氧化碳（斯堪的纳维亚公司，2019）	<ul style="list-style-type: none"> 可行的垃圾管理方案 能量回收 提高污水处理能力 减少化学品需求 降低二氧化碳当量 / 千克纸浆 	<ul style="list-style-type: none"> 投资成本高 空间要求
热电联产	参见表 27	减少 10%-15%	减少 45%（表 25）	<ul style="list-style-type: none"> 提高能效 降低电力成本 减排 	<ul style="list-style-type: none"> 投资成本高 实施和运行复杂

参考文献

- 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.
- ASPAPEL/CELPA. (2010). *Environmental issues specific to eucalyptus-based kraft pulp making*.
- 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.
- China Energy Conservation Investment Corporation. (2001). *Market assessment of cogeneration in china*. Energy Resources International, Inc.
- 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
- 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.
- 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.
- IEA. (2018). *IEA data and statistics*. Von <https://www.iea.org/data-and-statistics> abgerufen
- 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

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

Lingbo Kong, A. H. (2013). *Analysis of Energy-Efficiency Opportunities for the Pulp and Paper Industry in China*. China Energy Group, State Key Laboratory of Pulp and Paper Engineering; Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory.

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

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.

Nazari, S. (2018). Andritz, IDEAS Digital Twin in Process Industries, Improving Pulp Mill Operation with Digital Twin Technology. *Tech News No 38/2*.

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

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

Sappi Fine Paper Europe. (2012). Von <https://www.slideshare.net/SappiHouston/paper-machine> abgerufen

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

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

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

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

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

网站



微信

