

# 广东省造纸节能降耗技术改造指南

广东省国际工程咨询有限公司

2026年6月

## 编制人员

|        |     |                    |
|--------|-----|--------------------|
| 主要参加人员 | 吴苑莹 | 工 程 师<br>咨询工程师（投资） |
|        | 张横锦 | 工 程 师<br>咨询工程师（投资） |
|        | 周美洲 | 经 济 师<br>咨询工程师（投资） |
|        | 卓雄杰 | 工 程 师              |
|        | 沈 毅 | 高级工程师<br>咨询工程师（投资） |
| 校 核    |     |                    |
| 审 核    | 赖志焱 | 高级经济师<br>咨询工程师（投资） |
|        | 刘永锋 | 高级工程师<br>咨询工程师（投资） |
| 审 定    |     |                    |

# 目录

|                          |    |
|--------------------------|----|
| 第一章 编制背景.....            | 1  |
| 一 项目由来.....              | 1  |
| 二 指导单位.....              | 2  |
| 三 编制单位.....              | 2  |
| 四 立项目的.....              | 2  |
| 五 工作过程.....              | 3  |
| 第二章 指南编制的必要性.....        | 4  |
| 一 国家主管部门管理要求.....        | 4  |
| 二 产业政策及准入条件要求.....       | 8  |
| 三 技术发展需求.....            | 9  |
| 第三章 指南编制的原则、依据和技术方法..... | 11 |
| 一 编制原则.....              | 11 |
| 二 编制方法.....              | 12 |
| 三 编制依据.....              | 12 |
| 第四章 能源高效利用技术.....        | 15 |
| 一 能源高效利用技术概述.....        | 15 |
| 二 锅炉系统节能改造.....          | 16 |
| 三 汽轮发电机组节能改造.....        | 16 |
| 四 掺烧生物质等能源.....          | 17 |
| 五 智能化调控改造.....           | 19 |

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 六 可再生能源利用 .....                 | 20 |
| (一) 分布式光伏利用方案 .....             | 20 |
| (二) 沼气回收利用方案 .....              | 20 |
| (三) 生物质能替代方案 .....              | 22 |
| (四) 综合利用方案 .....                | 22 |
| 第五章 主要生产工艺节能技术 .....            | 24 |
| 一 生产工艺节能概述 .....                | 24 |
| 二 真空系统改造 .....                  | 25 |
| (一) 径流式风机直接替代传统真空泵改造方案 .....    | 25 |
| (二) 径流式风机与原有真空泵联动运行改造方案 .....   | 26 |
| (三) 径流式风机配套智能调控与预处理系统改造方案 ..... | 28 |
| (四) 老旧真空系统升级+径流式风机集成改造方案 .....  | 29 |
| 三 靴式压榨技术 .....                  | 30 |
| (一) 传统压榨辊替换型 .....              | 33 |
| (二) 单靴式压榨升级型 .....              | 33 |
| (三) 双靴串联压榨改造型 .....             | 34 |
| (四) 靴式压榨全系统集成改造型 .....          | 35 |
| 第六章 热能回收利用技术 .....              | 36 |
| 一 高效热能利用概述 .....                | 36 |
| 二 余热余压回收利用改造 .....              | 37 |
| 三 热力系统改造 .....                  | 37 |
| (一) 低品位蒸汽回收+磁悬浮蒸汽压缩机改造方案 .....  | 37 |

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| (二) 热力压缩机与锅炉联动节能改造方案 .....     | 39 |
| (三) 热力压缩机配套智能调控+管网优化改造方案 ..... | 40 |
| 四 纸机汽罩热回收 .....                | 41 |
| 第七章 技术改造项目投资效益总览 .....         | 49 |
| (一) 能源供给与综合利用技术投资效益 .....      | 49 |
| (二) 主要生产工艺节能技术投资效益 .....       | 55 |
| (三) 高效热能利用技术投资效益 .....         | 60 |
| (四) 主要技术方案投资效益综合分析 .....       | 66 |
| 第八章 实施本指南的建议 .....             | 72 |

# 第一章 编制背景

## 一 项目由来

为深入贯彻落实国家《关于严格能效约束推动重点领域节能降碳的若干意见》（发改产业〔2021〕1464号）核心要求，紧扣大规模设备更新、工业节能降碳等国家战略导向，立足广东省造纸产业发展实际，编制本《广东省造纸节能降耗技术改造指南》（以下简称《指南》）。

造纸行业作为广东省重点耗能工业领域，产能规模位居全国前列，2025年纸及纸板产量占全国14.72%，但行业内部分企业仍存在设备能效偏低、节能技术应用不充分、改造路径不清晰等问题，与严格能效约束、碳达峰碳中和目标及《广东省2024—2025年节能降碳行动方案》等政策要求仍有差距。

为规范广东省造纸行业节能降耗技术改造，明确改造方向、技术路径与实施重点，破解企业改造难题，引导企业持续推动行业能效水平持续提升，助力实现节能降碳量化目标，充分发挥节能改造在产业转型升级中的支撑作用，特启动本指南编制工作，为全省造纸企业节能改造提供科学指引，推动行业绿色低碳高质量发展。

本指南以广东省造纸行业节能改造为核心重点，兼顾生产全流程能效提升与污染物协同管控，对造纸行业生产工艺中的节能优化技术、高耗能设备改造技术及能源循环利用技

术进行系统梳理和深入研究，明确行业节能降耗的核心路径与关键举措，为广东省造纸企业开展节能改造、降低单位产品能耗、提升能源利用效率提供针对性指导，对于推动全省造纸行业落实能效降低要求、实现绿色低碳高质量发展具有重要意义。

该指南成果可用于造纸行业技术改造项目的选择，同时可作为建设项目固定资产投资项目节能报告、可行性研究、设备更新改造方案编制及评估等的技术依据。

《指南》通过对全省造纸企业能源审计与行业全面调研，摸清企业能效现状及改造需求；持续跟踪省内造纸节能改造示范项目，总结成熟经验与技术路径；广泛征求行业龙头企业、科研机构及相关主管部门意见，吸纳合理建议，经多轮论证优化，确保指南科学可行、贴合实际，精准适配广东省造纸行业节能降耗技术改造需求。

## **二 指导单位**

广东省能源局

## **三 编制单位**

广东省国际工程咨询有限公司

## **四 立项目的**

本指南以广东省造纸行业节能改造为核心重点，兼顾生产全流程能效提升与污染物协同管控，对造纸行业生产工艺中的节能优化技术、高耗能设备改造技术及能源循环利用技术进行系统梳理和深入研究，明确行业节能降耗的核心路径

与关键举措，为广东省造纸企业开展节能改造、降低单位产品能耗、提升能源利用效率提供针对性指导，对于推动全省造纸行业落实能效降低要求、实现绿色低碳高质量发展具有重要意义。

该指南成果可用于造纸行业技术改造项目的选择，同时可作为建设项目固定资产投资项目节能报告、可行性研究、设备更新改造方案编制及评估等的技术依据。

## 五 工作过程

《指南》通过对全省造纸企业能源审计与行业全面调研，摸清企业能效现状及改造需求；持续跟踪省内造纸节能改造示范项目，总结成熟经验与技术路径；广泛征求行业龙头企业、科研机构及相关主管部门意见，吸纳合理建议，经多轮论证优化，确保指南科学可行、贴合实际，精准适配广东省造纸行业节能降耗技术改造需求。

## 第二章 指南编制的必要性

### 一 国家主管部门管理要求

#### （一）国家节能管理要求

能效水平方面。《关于严格能效约束推动重点领域节能降碳的若干意见》（发改产业〔2021〕1464号）要求：坚决遏制全国“两高”项目盲目发展，确保如期实现碳达峰目标，选择综合条件较好的重点行业，率先开展节能降碳技术改造。待重点行业取得实质性进展、相关机制运行成熟后，再研究推广至其他行业和产品领域。到2030年，重点行业能效基准水平和标杆水平进一步提高，达到标杆水平企业比例大幅提升，行业整体能效水平和碳排放强度达到国际先进水平，为如期实现碳达峰目标提供有力支撑。

国家发展改革委等五部门于2023年6月6日发布《工业重点领域能效标杆水平和基准水平（2023年版）》的通知（发改产业〔2023〕723号），明确：一、拓展重点领域范围。进一步拓展能效约束领域，扩大工业重点领域节能降碳改造升级范围。在此前明确炼油、煤制焦炭、煤制甲醇、煤制烯烃、煤制乙二醇、烧碱、纯碱、电石、乙烯、对二甲苯等25个重点领域能效标杆水平和基准水平的基础上，增加乙二醇，尿素，钛白粉，聚氯乙烯，精对苯二甲酸，子午线

轮胎，工业硅，**卫生纸原纸、纸中原纸**，棉、化纤及混纺机织物，针织物、纱线，粘胶短纤维等 11 个领域。三、推动分类改造升级。依据能效标杆水平和基准水平，分类实施改造升级对拟建、在建项目，应对照能效标杆水平建设实施，推动能效水平应提尽提，力争全面达到标杆水平。对**能效介于标杆水平和基准水平之间的存量项目**，鼓励加强绿色低碳工艺技术装备应用，引导企业应改尽改、应提尽提，带动全行业加大节能降碳改造力度，提升整体能效水平。对**能效低于基准水平的存量项目**，各地要明确改造升级和淘汰时限，制定年度改造和淘汰计划，引导企业有序开展节能降碳技术改造或淘汰退出，在规定时限内将能效改造升级到基准水平以上，对于不能按期改造完毕的项目进行淘汰。对本次增加的乙二醇，尿素，钛白粉，聚氯乙烯，精对苯二甲酸，子午线轮胎，工业硅，**卫生纸原纸、纸中原纸**，棉、化纤及混纺机织物，针织物、纱线，粘胶短纤维等 11 个领域，原则上应在 2026 年底前完成技术改造或淘汰退出。

工业重点领域能效标杆水平和基准水平（2023年版）

| 序号 | 国民经济行业分类及代码                       |                                 |                                 | 重点领域                | 指标名称         | 指标单位        | 标杆水平               | 基准水平                 | 参考标准  |   |          |
|----|-----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------|--------------|-------------|--------------------|----------------------|---|---|----------|
|    | 大类                                | 中类                              | 小类                              |                     |              |             |                    |                      |   |   |          |
| 1  | 纺织业<br>(17)                       | 棉纺织及<br>印染精加<br>工(171)          | 棉印染精加<br>工(1713)                | ★棉、化纤及混纺机织物         | 单位产品<br>综合能耗 | 千克标煤/<br>百米 | 28                 | 36                   | 《印染行业“十四五”发展指导意见》《印染行业规范条件(2017版)》<br>《针织印染面料单位产品能源消耗限额》<br>(FZ/T07019) |   |          |
|    |                                   | 化纤织造<br>及印染精<br>加工(175)         | 化纤织物染<br>整精加工<br>(1752)         |                     |              |             |                    |                      |   |   |          |
|    |                                   | 针织或钩<br>针编织物<br>及其制品<br>制造(176) | 针织或钩针<br>编织物印<br>染精加工<br>(1762) | ★针织物、纱线             | 单位产品<br>综合能耗 | 吨标煤/吨       | 1.0                | 1.3                  |   |   |          |
| 2  | 造纸和<br>纸制品<br>业(22)               | 造纸<br>(222)                     | 机制纸及纸<br>板制造<br>(2221)          | ★卫生纸原<br>纸、纸巾原<br>纸 | 木浆           | 单位产品<br>能耗  | 千克标准<br>煤/吨        | 450                  | 520   | GB 31825<br>注：不包括 TAD<br>等型造纸机生产<br>的产品 |          |
|    |                                   |                                 |                                 | 非木浆                 | 510          |             |                    | 560                  |   |   |          |
| 3  | 石油、<br>煤炭及<br>其他燃<br>料加工<br>业(25) | 精炼石油<br>产品制造<br>(251)           | 原油加工及<br>石油制品制<br>造(2511)       | ★卫生纸原<br>纸、纸巾原<br>纸 | 炼油           |             | 单位能量<br>因数综合<br>能耗 | 千克标准<br>油/吨·能<br>量因数 | 7.5   | 8.5                                     | GB 30251 |
|    |                                   |                                 |                                 |                     |              |             |                    |                      |   |   |          |
|    |                                   | 煤炭加工<br>(252)                   | 炼焦(2521)                        | 煤制焦炭                | 顶装焦炉         | 单位产品<br>能耗  | 千克标准<br>煤/吨        | 110                  | 135   | GB 21342                                |          |
|    |                                   |                                 | 捣固焦炉                            |                     |              | 110         | 140                |                      |   |   |          |

图 2.1-1 工业重点领域能效标杆水平和基准水平（2023年版）  
（节选卫生纸原纸、纸巾原纸）

## （二）广东省节能管理要求

广东省对造纸行业能效降低的核心要求，以“对标提效、分类管控、协同减排”为原则，依托国家政策导向，结合本省造纸产业实际（产量占全国 16%、规上工业能耗排名第七），通过政策约束、标准引领、技术推动、激励保障四维发力，明确能效降低的量化目标、实施路径及管控要求，核心要求如下：

一、核心政策依据与总体目标。以《广东省 2024—2025 年节能降碳行动方案》、团体标准《广东省造纸行业转型金融实施指南》（T/GZGFA 4-2025）（以下简称“团标”）为核心依据，衔接国家标准 GB31825-2024（以下简称“国标”），明确能效降低总体方向：“十四五”期间，推动参与能效对标的造纸企业单位产品能耗持续下降，截至 2024 年，参与对

标企业单位产品能耗已从 2020 年的 292.13 克标准煤/吨下降至 281.45 克标准煤/吨；2025 年前，存量纸机单位产品碳排放较 2020 年下降 18%以上，新建纸机吨纸碳排放低于行业基准值 15%；2026 年底前，省内采用团标的企业单位产品综合能耗较国标平均降低 8%-15%，推动行业整体能效水平向国际先进靠拢。

**二、分类能效降低要求。**一是分企业规模管控，针对头部企业与中小型企业实施差异化要求：头部企业需率先对标团标及国际先进水平，作为能效示范标杆，例如亚太森博（广东）、玖龙纸业等龙头企业，需实现单位产品能耗较国标 1 级能效降低 10%以上；中小型企业需在 2026 年底前完成节能改造，确保达到国标 3 级能效，逐步向团标靠拢，破解部分中小企业设备能效低、改造滞后的问题。二是分产品品类管控，结合省内主导产品特点，明确重点品类能耗降低目标，其中瓦楞纸板、卫生纸原纸按团标要求分别较国标降低 12.5%、7.7%，自备电厂、自备锅炉及外购蒸汽电力的企业，按不同能源供应模式设定差异化能耗降低指标，确保指标科学可落地。

**三、技术与工艺改造要求。**明确能效降低的核心技术路径，推动企业通过工艺升级、设备更新实现节能降碳：一是推广节能工艺与设备，支持企业采用磁悬浮透平真空泵替代传统水环真空泵、热泵干燥技术及高速纸机改造等方式，其中热泵干燥可使干燥环节能耗降低 30%以上，高速纸机改造可提升生产效率并降低单位产品能耗；二是优化能源结构，推广屋顶光伏、生物质能源替代化石燃料，利用造纸废弃物

实现资源化回收，降低化石能源依赖；三是推动数智化转型，建设智能制造平台，实现生产全流程能耗监控，及时优化生产参数，减少能源浪费；四是强化资源循环利用，推广废纸高值化利用、制浆黑液回收等技术，同步降低能耗与污染物排放。

**四、管控与激励保障要求。**一方面强化刚性约束，将能耗降低目标纳入企业碳排放履约、产能置换、清洁生产审核的核心考核内容，对未按要求完成能效降低任务、未达到国标及团标要求的企业，暂停产能置换、不予享受相关激励政策，情节严重的实施停工整改；加强省、市、县三级节能监察，重点检查能耗限额标准执行情况，确保政策落地。另一方面完善激励机制，对采用团标、完成能耗降低目标的企业，给予绿色金融支持，截至 2025 年底，已有 135 个造纸转型项目获得超 400 亿元授信，80% 资金用于节能技术改造和设备采购；鼓励企业申报能效领跑者，推动龙头企业带动中小企业协同提升能效，形成“标杆引领、全员参与”的能效提升格局。

## 二 产业政策及准入条件要求

**产业结构方面。**《产业结构调整指导目录（2024 年本）》，明确划分鼓励、限制和淘汰类产能，其中鼓励单条化学木浆 30 万吨/年及以上、化学机械木浆 10 万吨/年及以上等规模化、清洁化生产线建设，禁止单条 1 万吨/年及以下废纸制浆生产线、5.1 万吨/年以下化学木浆生产线等落后产能，严控低水平重复建设，防止产能过剩。同时，推动实行产能置换政策，新建、改扩建造纸项目需落实相关政策要求，确保行业产能

总量合理、结构优化。

《生态环境部关于加强高耗能、高排放建设项目生态环境源头防控的指导意见》（环环评〔2021〕45号），“两高”项目暂按煤电、石化、化工、钢铁、有色金属冶炼、建材等六个行业类别统计。造纸暂不属于两高行业。

《轻工业稳增长工作方案（2025—2026年）》明确行业发展与绿色低碳核心要求，以稳规模、提质量、促创新、强绿色为核心，推动行业质效双升。行业发展方面，重点实现重点行业规模稳升、企业效益稳定，推动智能家居、婴童用品等领域形成新增长点，培育千亿级特色产业产区，推广升级创新产品，完善质量标准体系，同时通过促消费、优供给、推升级、稳外贸，提振市场需求、优化产品结构、推进数字化转型与产业集群发展。能耗与碳排放方面，聚焦绿色低碳发展，建立严格绿色标准体系，建设500家绿色工厂，完善产品碳足迹与能效标准；重点针对造纸、皮革等耗能行业，推广节能降碳、清洁生产技术，推动原辅材料绿色替代，发展循环经济，推进包装循环利用与可降解材料应用，开展能效对标达标，淘汰落后产能，建立产品碳标签制度，强化企业绿色责任，实现全生命周期绿色发展。

### 三 技术发展需求

节能降耗技术改造是广东省造纸企业决策与成本管理的核心刚需，更是契合本地行业发展实际、破解成本利润困境的关键举措。

**行业技改趋势。**广东造纸产量居全国前列，作为重点用能行业，其单位工业增加值能耗是全省工业平均水平的3倍

多，能源成本占企业生产成本的 10%-19%，部分企业用电成本占比甚至达 15%-25%，这一占比直接挤压企业利润空间，叠加煤改气带来的燃料成本上升、行业低价竞争及原材料波动影响，2025 年全年广东造纸企业利润总额同比下降 35.7%，盈利压力尤为突出。行业低价竞争及原材料波动影响，企业利润空间持续承压。

**企业决策层面。**节能改造是响应政策、规避合规风险的必然选择，广东正推进落后产能淘汰，旭丰、建晖等企业的技改实践已证明，节能改造能助力企业契合绿色发展要求，抢占市场先机。

**成本管理层面。**落实技术改造项目可通过提高纸机能效、光伏利用、余热回收等技术降低能耗，如建晖纸业光伏电站年省标准煤超 6700 吨，旭丰纸业真空泵改造降耗 40% 有效减少能源支出，缓解成本压力，同时推动产品向低克重、高附加值升级，助力企业在行业“反内卷”中提升盈利水平，其必要性贯穿企业决策与成本管控全过程，是广东造纸企业实现盈利稳定的关键支撑。

综上所述，为落实国家、广东省节能降耗要求，落实产业政策及准入条件，满足技术发展需求，制定《广东省造纸节能降耗技术改造指南》是必要的。

## 第三章 指南编制的原则、依据和技术方法

### 一 编制原则

#### (1) 突出重点

本指南的编制选取能源消耗较大，尤其是电力、蒸汽消耗较为突出的工艺类型，提出了工艺过程的能源节约措施及能源高效利用的可行技术路线。对于纸制品生产企业，主要包括纸浆模制品、纸及纸板容器等产品，生产规模普遍偏小，生产过程中产生的能源消耗量较少，一般通过简单节能管控即可实现能源高效利用，对行业整体能源消耗影响较小，故本技术指南中未纳入此部分的内容。

#### (2) 科学性与实用性

结合我国造纸行业实际状况，通过对典型生产企业进行现场调研，摸清造纸行业企业的能源管理技术工艺和设备水平、资源能源利用水平、能源消耗指标、能源回收利用指标和能源管理水平，并进行技术经济分析比较，筛选确定造纸行业各类型企业的能源管理最佳可行技术，使指南具有较强的科学性、指导性和可操作性。

#### (3) 地方实际原则

结合广东省造纸行业发展实际，紧扣限额标准、碳控排要求及技改扶持政策，兼顾区域能源结构特点，重点融入光伏利用、余热梯级回收、高效电机应用等符合广东产业导向的节能技术，衔接省内制浆造纸能耗指标要求与能碳数字化管理规范，确保指南适配广东省造纸企业节能降碳需求。

## 二 编制方法

在项目的实施过程中，编制组紧密围绕项目的总体目标，系统采用实地调研、资料分析、专家咨询、技术评估筛选及论证等方法，从推进造纸行业节能降耗管理的角度出发，深入调研国内外造纸行业工艺过程节能管理技术的发展水平，结合造纸行业相关政策、法规及标准体系等政策规范，完成本指南编制。

## 三 编制依据

本指南根据下列有关造纸行业生产和节能减排的法律、法规、技术政策标准等制订。

- (1) 《中华人民共和国节约能源法》（2018年修正）；
- (2) 《中华人民共和国循环经济促进法》（2018修正）；
- (3) 《中华人民共和国环境保护法》（2014修订）；
- (4) 《中华人民共和国大气污染防治法》（2018修正）；
- (5) 《中华人民共和国可再生能源法》（2009修正）；
- (6) 《固定资产投资项目节能审查和碳排放评价办法》（国家发改委令2025年第31号）；
- (7) 《工业节能管理办法》（工信部令2016年第44号）；
- (8) 《清洁生产审核办法》（2016修订）；
- (9) 《工业领域碳达峰实施方案》（工信部、发改委、生态环境部，2022）；
- (10) 《国家重点节能低碳技术推广目录》；
- (11) 《工业重点领域能效标杆水平和基准水平（2023年版）》；

- (12) 《造纸行业“双碳”最佳实践案例（2025）》；
- (13) 《工业重点行业领域设备更新和技术改造指南》；
- (14) 《大规模设备更新和消费品以旧换新行动方案》；
- (15) 《国家工业和信息化领域节能降碳技术应用指南与案例》（2025年版）；
- (16) 《推动工业领域设备更新实施方案》；
- (17) 《制浆造纸单位产品能源消耗限额》（GB31825-2024）；
- (18) 《制浆造纸行业绿色工厂评价要求》（QB/T5976-2024）；
- (19) 《绿色供应链管理评价规范造纸工业》（QB/T5977-2024）；
- (20) 《绿色产品评价纸和纸制品》（GB/T35613-2024）；
- (21) 《造纸行业能源管理体系实施指南》（GB/T39964-2021）；
- (22) 《制浆造纸行业清洁生产评价指标体系》；
- (23) 《纸浆模塑制品单位产品能源消耗技术要求》（QB/T4957-2024）；
- (24) 《制浆造纸行业清洁生产评价指标体系》；
- (25) 《纸浆、纸、纸板和纸制品碳足迹核算方法与报告指南》（团体标准）；
- (26) 《制浆造纸行业节能诊断技术导则》

(QB/T5986-2024)；

(27) 《造纸行业节能降碳技术导则》(T/JX069-2024)；

(28) 《造纸行业零碳工厂创建指南》  
(T/HNEF1-2025)；

(29) 《广东省制浆造纸行业主要产品能耗限额》  
(T/GDPPA0003-2024)。

## 第四章 能源高效利用技术

能源供给与综合利用技术聚焦于造纸企业能源输入端和能源转换环节的节能降碳，涵盖自备电厂锅炉系统、汽轮发电机组、生物质及沼气等替代能源掺烧、智能化调控、分布式光伏及可再生能源综合利用等方向。该类技术的核心目标是优化企业能源结构、提升能源转换效率、降低化石能源依赖，是从源头实现节能降碳的关键路径。造纸企业能源成本占生产成本的 10%-19%，能源供给环节的能效提升和清洁替代，对降低企业用能成本、应对碳排放约束具有重要意义。

### 一 能源高效利用技术概述

本节共梳理 8 个技术方向、12 项具体方案。各方案的主要节能效益如下表所示。

表 4.2-1 能源供给与综合利用技术节能效益总览

| 序号 | 技术方向       | 具体方案             | 节能率     | 年节能量估算                |
|----|------------|------------------|---------|-----------------------|
| 1  | 锅炉系统节能改造   | 循环流化床锅炉高效改造      | 8%-15%  | 单台年节约原煤 3000-7000t    |
| 2  | 汽轮发电机组节能改造 | 抽凝式机组改背压式机组      | 10%-18% | 单台年节能 3000-15000 吨标准煤 |
| 3  | 汽轮发电机组节能改造 | 机组通流改造           | 5%-10%  | 单台年节能 1000-5000 吨标准煤  |
| 4  | 汽轮发电机组节能改造 | 磁悬浮设备替代(循环泵/风机等) | 30%-40% | 单台年节电 10-70 万 kWh     |
| 5  | 掺烧生物质等替代能源 | 掺烧生物质(树皮/木屑等)    | 15%-30% | 年替代原煤 1-10 万 t        |
| 6  | 掺烧生物质等替代能源 | 沼气回收掺烧           | 12%-18% | 年节约原煤 3000-8000t      |
| 7  | 掺烧生物质等替代能源 | RDF 替代燃料掺烧       | 20%-25% | 年替代化石燃料 4-10 万 t      |
| 8  | 智能化调控      | 智能化调控改造          | 1.5%-5% | 系统综合增效                |

| 序号 | 技术方向    | 具体方案          | 节能率     | 年节能量估算            |
|----|---------|---------------|---------|-------------------|
| 9  | 可再生能源利用 | 分布式光伏利用       | 8%-15%  | 年发电 50-3000 万 kWh |
| 10 | 可再生能源利用 | 沼气回收利用（发电+余热） | 10%-18% | 年节约标煤 2000-2 万 t  |
| 11 | 可再生能源利用 | 生物质能替代燃煤      | 12%-20% | 年替代燃煤 5-15 万 t    |
| 12 | 可再生能源利用 | 可再生能源综合利用     | 20%以上   | 年节约标煤 10-30 万 t   |

注：年节能量依据典型产能规模估算，具体项目的节能效益需结合企业实际产量、开工率、能源价格等因素测算

## 二 锅炉系统节能改造

### 1. 技术可行性

锅炉是提升燃烧效率、降低热损失关键设备，适配自备电厂燃煤、燃气等锅炉类型。可通过现有锅炉改造优化，无需更换主体设备，改造周期短、投资回报率高，适配造纸企业连续生产需求，原料易获取且技术成熟

### 2. 节能效益

循环流化床锅炉高效改造节能率 8%-15%，余热回收配套改造节能率 5%-10%

### 3. 应用案例

东莞市骏业纸业有限公司自备电厂实施锅炉改造，将中温中压锅炉改为高温高压锅炉，改造后改造后年节约综合能源消费量达到 3000 吨标准煤。

## 三 汽轮发电机组节能改造

### 1. 技术可行性

通过优化机组运行效率，降低发电损耗，适配造纸自备电厂热电联产工况。可通过机组升级、部件改造实现，改造技术成熟，可与现有热电系统无缝衔接，改造后不影响企业

正常生产，且能提升供电、供汽稳定性。

## 2. 节能效益

抽凝式机组改背压式机组节能率 10%-18%，机组通流改造节能率 5%-10%，磁悬浮设备替代改造节能率 30%-40%。

## 3. 应用案例

福建省青山纸业自备电厂将汽轮机由抽汽凝汽式改造为抽汽背压式，机组供汽量提高 35t/h，供电煤耗大幅下降，年节能量约 6 万吨标准煤，节能率达 16%；岳阳林纸自备电厂对热电新系统循环泵进行节能改造，采用高效循环泵替代原有设备，泵运行效率从 72.5%提升至 88%以上，年综合节电量约 206 万千瓦时，节能率达 15.5%。

## 四 掺烧生物质等能源

### (1) 技术可行性

造纸生产需大量蒸汽、电力，热电联产为核心用能环节，掺烧能源可依托现有锅炉系统改造，无需大规模新建设备，且掺烧原料（如生物质、沼气、RDF 燃料等）易获取，适配造纸行业固废产出特点与能源需求，同时契合绿色低碳政策导向，技术成熟度较高。

一、生物质掺烧技术方案，核心遵循“固废资源化+热电联产”思路，参考广东鼎丰纸业案例，采用多燃料循环流化床锅炉改造技术，将备料车间产生的树皮、木（竹）屑等生物质原料，经破碎、筛选、干燥预处理后，与原煤按合理比例掺烧，适配 90 吨/小时锅炉运行需求，日均燃用生物质原料约 103 吨，同步淘汰原有低效小锅炉，优化配风系统确保燃烧充分

二、沼气掺烧技术方案，依据沼气掺烧行业规范及《造纸工业污染防治技术政策》中“废水厌氧生物处理产生的沼气应回收利用”要求，技术流程涵盖沼气收集、净化、加压、掺烧全环节。先对污水处理厌氧工艺产生的沼气进行脱硫、脱水净化处理，通过变频加压风机加压后，经专用燃烧器送入锅炉与原煤掺烧，配套泄漏检测、联锁保护及排空系统，确保安全运行。

三、RDF 替代燃料掺烧技术方案，中山斯瑞德 RDF 制备技术规范及湖北某纸厂案例，将造纸轻渣、绞绳等固废经“破碎、磁选、风选、分选、除尘”预处理，制成出料尺寸 50mm 左右、除杂率 95%以上的高热值 RDF 燃料，其热值可达标煤的三分之二，直接送入锅炉与化石燃料掺烧，优化热量替代率（TSR）至 66%以上。

四、绿氢掺烧技术方案，采用新型耦合系统，将绿氢与传统燃料按比例掺烧，配套精准控制系统优化掺烧比例，可实现近 100%减排，净能源效率提升至 81.21%，目前已有试点企业落地应用，未来适配造纸行业深度脱碳需求。此外，部分纸企引入机器学习技术，实时优化生物质锅炉掺烧比例，进一步提升燃烧效率，使燃料成本下降 14%，实现节能与效益双赢。

## （2）节能效益

不同掺烧技术差异明显：生物质（树皮、黑液等）掺烧节能率可达 15%-30%，搭配热电联产可使单位产品能耗降低 26.8%；沼气掺烧可节约原煤消耗，对应节能率约 12%-18%；RDF 替代燃料掺烧可节省传统化石燃料，节能率达

20%-25%；绿氢掺烧若采用绿氢可实现近 100%减排，新型耦合系统可使净能源效率提升至 81.21%。

### （3）应用案例

阳林纸建设沼气掺烧系统，年掺烧沼气约 800 万  $\text{m}^3$ ，节约原煤 7000t/a；湖北某纸厂建成固废 RDF 替代燃料制备中心，日处理固废 400 余吨，年产 10 多万吨 RDF 燃料，年节省化石燃料约 8 万吨；采用 A-D-E-RC 法制浆联合生物质热电联产，单位产品碳排放下降 31.6%；部分纸企通过机器学习优化生物质锅炉掺烧比例，燃料成本下降 14%，实现节能与效益双赢。

山鹰纸业（广东）有限公司采用沼气发电机组，利用废水处理产生的沼气发电，3 台机组稳定运行超 21000 小时，总发电量达 3363 万千瓦时，余热可产生蒸汽用于生产，综合效率达 86.7%；广东鼎丰纸业新建 90 吨/小时多燃料循环流化床锅炉，掺烧备料车间产生的树皮、木（竹）屑与原煤，日均燃用树皮木屑约 103 吨，有效降低原煤消耗，同时淘汰原有低效小锅炉，提升能源利用效率；潮州市合丰特造纸有限公司升级污水处理设施，配套沼气利用发电机组和余热锅炉，日均发电 1.8 万千瓦时，实现沼气资源化利用与节能降耗双赢；理文纸业安装沼气入炉掺烧系统，回收污水处理厌氧工艺产生的沼气（日均 2.8-3 万  $\text{m}^3$ ）作为锅炉辅助燃料，大幅减少原煤用量，实现能源循环利用。

## 五 智能化调控改造

### （1）技术可行性

通过智能系统优化电厂运行参数，实现精准调控，降低

人为操作损耗，适配造纸行业蒸汽负荷波动大的特点。依托工业互联网、AI 算法等技术，可对现有电厂控制系统进行升级，无需大规模改造设备，能实现机组全流程动态优化控制，提升运行稳定性。

### **(2) 节能效益**

智能调控系统改造可使综合效能提升 1.5%-3%，配套优化运行参数后，额外实现节能 2%-5%。

### **(3) 应用案例**

浙江哲丰能源（仙鹤股份衢州基地）自备电厂，引入全应 ADMC 热电智能调控系统，集成数字孪生、AI 算法和边缘计算技术，实现热电系统全流程动态化优化控制，试运行后各类热电设备平均自动化投用率突破 95%，关键工艺参数波动收窄 30%，综合效能提升 1.7 个百分点，折算节能率达 3%，为造纸行业自备电厂智能化节能改造提供了标杆范例。此外，岳阳林纸还对自备电厂净水一级泵房 3#泵实施高压变频改造，实现用水量精准匹配，年节电约 70 万千瓦时，节能率达 8%；对纸机真空泵改造成磁悬浮真空泵，能耗仅为原有设备的 60%，年节电约 800 万千瓦时，节电率达 40%，进一步丰富了自备电厂节能改造路径。

## **六 可再生能源利用**

### **(一) 分布式光伏利用方案**

#### **(1) 技术可行性**

利用企业厂房屋顶、闲置空地铺设光伏组件，将太阳能转化为电能，接入企业内部供电系统，用于生产设备、辅助

设施供电，剩余电力可并入电网，该方案适配各类规模造纸企业，场地要求低，无需占用生产用地，运维成本低，可行性极强，改造或建设周期短。

### **(2) 节能效益**

综合节能率可达 8%-15%。

### **(3) 应用案例**

金东纸业（江苏）股份有限公司，该公司年产 130 万吨高档文化纸，在厂区 80% 的厂房屋顶铺设光伏组件，累计建成 50 兆瓦屋顶分布式光伏项目，2024 年年发电超 5000 万千瓦时，节约燃煤 1.5 万吨标准煤，减少二氧化碳排放约 4 万吨，年节省电费高达 90 万元，光伏系统稳定运行，适配企业生产用电需求，无需额外占用土地资源，实现了“借光生能”的绿色转型。

## **(二) 沼气回收利用方案**

### **(1) 技术可行性**

收集造纸生产过程中产生的制浆黑液、废水处理污泥等有机废弃物，经厌氧发酵产生沼气，提纯后用于锅炉燃烧供热、发电，或作为生产辅助能源，该方案适合制浆造纸一体化企业，有机废弃物产量大，可实现废弃物资源化利用，可行性强。

### **(2) 节能效益**

综合节能率可达 10%-18%。

### **(3) 应用案例**

广东理文造纸有限公司，年利用废纸生产 210 万吨包装

用纸及纸板原纸，将制浆废弃物和废水处理污泥进行厌氧发酵产生沼气，提纯后用于锅炉供热，替代部分化石燃料，年节约标煤 1 万余吨，减少二氧化碳排放约 3 万吨，既解决了废弃物处理难题，又降低了能源消耗，经济效益、环境效益和社会效益显著。

### **（三）生物质能替代方案**

#### **（1）技术可行性**

采用秸秆、竹屑、林业废弃物等生物质燃料，替代传统燃煤，用于锅炉供热、发电，适配有稳定生物质原料供应的造纸企业，原料来源广泛、成本低廉，可直接适配现有锅炉系统，改造难度小，可行性强，综合节能率可达 12%-20%。

#### **（2）节能效益**

节能率可达 12%-20%，吨纸能耗下降 0.15-0.25 吨标煤。

#### **（3）应用案例**

亚太森博（山东）浆纸有限公司，该公司年产 100 万吨浆纸，采用秸秆、林业废弃物等生物质燃料替代燃煤，配套建设生物质燃料储存、输送及燃烧系统，改造后年消耗生物质燃料 15 万吨，替代燃煤 10 万吨，年节约能源费用 800 万元，综合节能率达 16%，同时减少二氧化硫、粉尘等污染物排放，契合环保政策要求，运行稳定，适配企业大规模生产的能源需求。

### **（四）综合利用方案**

#### **（1）技术可行性**

整合光伏、沼气、生物质能等多种可再生能源，配套建

设储能系统，实现能源互补，根据企业生产能耗波动动态调整能源供应，该方案适合大型造纸企业，产能规模大、能耗需求高，可最大化利用可再生能源，降低对化石能源的依赖，可行性强。

### **(2) 节能效益**

综合节能率可达 20%，吨纸综合能耗下降 0.2-0.35 吨标煤，

### **(3) 应用案例**

玖龙纸业（东莞）有限公司年产 200 万吨包装纸，建设分布式光伏电站、沼气回收系统和生物质燃料锅炉，配套储能装置，光伏供电满足企业 12% 的生产用电，沼气和生物质能满足企业 30% 的供热需求，年节约化石能源 30 万吨标煤，减少二氧化碳排放 75 万吨，综合节能率达 25%，年节约能源费用超 2000 万元，实现了可再生能源的多元化、高效化利用，兼顾节能、环保与生产需求。

# 第五章 主要生产工艺节能技术

## 一 生产工艺节能概述

主要生产工艺节能技术聚焦于造纸生产流程中的核心能耗环节——抄纸工序，涵盖真空系统改造和靴式压榨技术两大方向。该类技术的核心目标是通过工艺优化和设备升级，提高纸浆和纸张生产过程中的能源利用效率，降低单位产品的电耗和蒸汽消耗。抄纸环节能耗占造纸企业总能耗的60%以上，其中真空系统电耗约占企业总电耗的20%-25%。对这些关键环节实施节能改造，不仅节能效益显著，而且投资回收期普遍较短，是企业最关注、投资意愿最高的节能改造领域。

本节共梳理2个技术方向、8项具体方案。各方案的主要节能效益如下表所示。

表 4.3-1 主要生产工艺节能技术节能效益总览

| 序号 | 技术方向   | 具体方案             | 节能率     | 年节能量估算                   |
|----|--------|------------------|---------|--------------------------|
| 1  | 真空系统改造 | 径流式风机直接替代传统真空泵   | 30%-45% | 单条线年节电<br>200-1200 万 kWh |
| 2  | 真空系统改造 | 径流式风机与原有真空泵联动运行  | 35%-50% | 单条线年节电<br>150-400 万 kWh  |
| 3  | 真空系统改造 | 径流式风机+智能调控+管网优化  | 35%-50% | 单条线年节电<br>800-1500 万 kWh |
| 4  | 真空系统改造 | 老旧真空系统升级+径流式风机集成 | 30%-40% | 单条线年节电<br>400-900 万 kWh  |
| 5  | 靴式压榨技术 | 传统压榨辊替换型         | 15%-22% | 吨纸汽耗下降<br>0.1-0.18t      |
| 6  | 靴式压榨技术 | 单靴式压榨升级型         | 20%-28% | 吨纸汽耗下降<br>0.15-0.22t     |
| 7  | 靴式压榨技术 | 双靴串联压榨改造型        | 26%-33% | 吨纸汽耗下降<br>0.2-0.28t      |
| 8  | 靴式压榨   | 靴式压榨全系统集成        | 30%-38% | 吨纸汽耗下降                   |

| 序号 | 技术方向 | 具体方案 | 节能率 | 年节能量估算     |
|----|------|------|-----|------------|
|    | 技术   | 成改造型 |     | 0.25-0.32t |

注：年节能量依据典型产能规模估算，具体项目的节能效益需结合企业实际产量、开工率、能源价格等因素测算。靴式压榨方案的节能量以吨纸汽耗下降值表示，实际年节汽量需结合企业产能规模计算。

## 二 真空系统改造

### （一）径流式风机直接替代传统真空泵改造方案

纸行业真空系统是纸机网部、压榨部脱水的核心辅助系统，电耗占企业总电耗的 20%-25%，传统真空系统多采用罗茨真空泵、水环真空泵，效率偏低且能耗较高，安装径流式风机进行节能改造是行业降本增效的关键路径。

在造纸生产流程中，造纸厂所消耗的热能近乎全部用于纸张干燥工序，而干燥部也因此成为造纸设备体系中的核心高能耗单元。由于干燥部运行过程中消耗的大量热能最终多以废气形式直接排放，造成能源浪费，因此增设热回收系统对于提升造纸全工序的整体能源利用效率具有关键意义。热回收系统的核心目标在于，通过经济且高效的技术路径，对造纸机运行过程中产生的工艺余热进行有效回收与再利用，进而显著降低造纸厂对一次能源的消耗总量。

#### 1. 技术可行性

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。

径流式风机直接替代传统真空泵改造方案，核心是用高效径流式风机（含透平式、磁悬浮径流式等），直接替换原

有低效罗茨、水环真空泵，优化真空系统运行效率。径流式风机采用离心式叶轮压缩做功原理，叶轮运行效率高，无需复杂改造原有真空管路，可依托现有安装基础适配纸机真空需求，改造周期短（单条生产线改造 7-15 天），无需停机停产，适配卫生纸、包装纸等各类造纸生产线，且设备国产化程度高、采购便捷，后期运维难度低。

## **2. 节能效益**

径流式风机效率可达 80%-95%，远高于传统水环真空泵（40%-50%）、罗茨真空泵（50%-60%），直接替代改造节能率可达 30%-45%，其中磁悬浮径流式风机节能效果更突出。

## **3. 应用案例**

亚太森博（山东）有限公司投入 2380 万元改造真空系统，用径流式透平风机替换传统水环真空泵，每条生产线每吨纸可节降 0.1 吨水，每年节省清水约 5.2 万立方米，同时节电率达 38%，年节电量超 1200 万千瓦时，投资回收期约 18 个月；某大型瓦楞纸生产企业，将纸机真空系统原有水环真空泵替换为磁悬浮径流式风机，改造前运行功率约 2788KW，改造后实际运行功率 1200-1400KW，每小时节电 1387 千瓦时，年运行 8000 小时，年节电超 1100 万千瓦时，节能率达 42%，同时实现 100%节水、100%省油，运维成本大幅降低。

### **（二）径流式风机与原有真空泵联动运行改造方案**

#### **1. 技术可行性**

保留部分原有真空泵，新增径流式风机，根据纸机生产

负荷（真空度、抽气量需求），实现两者联动调控，避免单一设备满负荷运行造成的能耗浪费。径流式风机：又称透平风机、涡轮风机、离心式真空风机（“径流式”即离心式）。效率 70%-80%，但抽气能力弱、启动慢，适合稳态保真空。原有真空泵：多为水环式真空泵。效率仅 30%-40%，但抽速快、抽气能力强，适合开机快速建真空。联动改造：保留原真空泵（备用/启动）+新增径流式风机（主用/稳态），PLC 自动联锁切换，兼顾快速建真空与稳态低能耗。无需彻底替换原有设备，改造投入相对较低，可灵活适配纸机车速、纸张定量变化带来的真空需求波动，尤其适合生产工况不稳定、负荷波动较大的生产线，改造过程可分阶段实施，不影响企业正常生产，联动控制系统技术成熟，可实现自动切换运行。

## 2. 节能效益

径流式风机效率可达 80%-95%，远高于传统水环真空泵（40%-50%）、罗茨真空泵（50%-60%），直接替代改造节能率可达 30%-45%，其中磁悬浮径流式风机节能效果更突出。

## 3. 应用案例

山东江河纸业（4400mm 文化纸机）改造前工艺方案为 8 台水环真空泵（总功率 600kW），24h 运行，效率低、能耗高、真空不稳。改造后新增 1 台大型径流式透平风机（功率 250kW）作主真空源。保留 8 台旧水环泵，改造为联锁备用/启动辅助。电率 45%，年节电 280 万千瓦时。真空波动  $\leq \pm 0.5\text{kPa}$ ，断纸率下降 60%。《造纸行业双碳最佳实践案例

(2025)》(中国造纸协会)改造前方案为6台水环真空泵(单台55kW,总330kW),用于网部、压榨、施胶。改造后新增3台磁悬浮径流式风机(单台75kW,总225kW)。保留原水环泵,设为联锁备用。分区联动控制:3台风机分别负责网部、压榨、后干燥,与旧泵自动联锁。实现综合节电率58%,年节电360万千瓦时。无水无油,免维护,年省维修费80万元。

### (三) 径流式风机配套智能调控与预处理系统改造方案

#### 1. 技术可行性

安装径流式风机的基础上,配套气水分离、智能调控、管网优化等辅助系统,进一步提升节能效果,延长设备使用寿命。气水分离系统可避免气体挟带的水分、纤维损坏风机叶轮,适配造纸车间潮湿、多纤维的工况;智能调控系统可实时监测真空度、抽气量,动态调节风机转速,匹配生产需求;管网优化可减少真空损失,三者协同改造技术成熟,可与风机安装同步实施,改造后设备故障率降低,运维成本进一步压缩,适配各类中大型造纸企业。

#### 2. 节能效益

配套改造可使径流式风机节能效果再提升5%-10%,综合节能率可达35%-50%,同时降低设备运维成本15%-20%。

#### 3. 应用案例

某大型造纸企业(年产50万吨包装纸),在安装径流式风机的同时,配套建设大型气水分离室(控制气流速度在 $3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 以内)、智能变频调控系统及真空管网优化改造,风机运行效率从88%提升至95%,综合节能率达48%,年节电

量超 1500 万千瓦时，同时风机故障率下降 60%，每年减少运维成本约 120 万元，设备使用寿命延长至 15 年以上；另一纸业集团将 39 台水环式真空泵替换为径流式透平风机，配套物联网智能调控系统，实现风机运行参数实时监测与动态优化，总装机功率降低 26%，年省电超 200 万千瓦时，综合节能率达 32%。

#### **（四）老旧真空系统升级+径流式风机集成改造方案**

##### **1. 技术可行性**

核心是针对运行年限超 8 年、管网老化、真空损失严重的老旧真空系统，先对管网进行翻新、泄漏修复，再集成安装径流式风机，实现系统全面升级。老旧系统管网翻新与风机安装可同步规划，改造后可彻底解决原有系统真空不足、能耗偏高、故障频发等问题，适配老旧纸机升级改造需求，改造后可提升真空系统稳定性，助力纸机提速增效，投资回报周期合理（12-20 个月）。

##### **2. 节能效益**

管网优化+径流式风机集成改造，综合节能率可达 30%-40%，同时纸机运行效率提升 5%-8%，间接降低综合能耗。

##### **3. 应用案例**

某老旧造纸企业（年产 30 万吨文化纸），对运行 10 年的真空系统进行升级，先修复管网泄漏点、更换老化管路，再安装 4 台径流式风机，替换原有老旧罗茨真空泵，改造后真空系统能耗降低 36%，年节电量约 780 万千瓦时，纸机车速从 500m/min 提升至 650m/min，产量提升 30%，实现节能

与增效双赢；某纸业企业对纸机真空系统进行全面升级，集成径流式风机与管网优化改造，同时替换高效电机，改造后真空系统综合节能率达 38%，年节电量超 900 万千瓦时，满足行业能耗限额标准要求。

### 三 靴式压榨技术

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。

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。

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”。

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。据计算，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%。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%。

靴式压榨技术节能改造可根据核心是通过优化压榨结构、提升脱水效率，减少后续烘干部蒸汽消耗，同时降低运行电耗，主要分为四类详细方案，均具备成熟的工程可行性，适配各类纸机机型，改造可结合纸机检修分期实施，基本不影响正常生产，且节能效益显著。四类方案根据工艺方案均有不同节能效益及适用范围，对比如下

表 5.1-1

靴式压榨技术节能改造效益对比

| 改造方案        | 投资 (万元)   | 吨纸汽耗下降 (t) | 综合节能率   | 年节汽 (万吨)                 | 投资回收期     | 对应产能 (万吨/年)    | 适用范围  |
|-------------|-----------|------------|---------|--------------------------|-----------|----------------|---|
| 传统压榨辊替换型    | 200-400   | 0.1-0.18   | 15%-22% | 0.8-1.44 (按 80 万吨产能测算)   | 1.8-2.5 年 | 10-80, 以中小型为主  | 中低速纸机 (车速 $\leq 500\text{m/min}$ ), 预算有限的老纸机改造, 适配包装纸、文化纸、生活用纸等各类纸种, 尤其适合中小型纸机              |
| 单靴式压榨升级型    | 350-600   | 0.15-0.22  | 20%-28% | 0.18-0.264 (按 12 万吨产能测算) | 2.0-2.7 年 | 10-30, 以中产能为主  | 中高速纸机 (车速 500-800m/min), 无需改变原有压榨布局, 适配生活用纸、文化纸等中产能生产线, 可兼顾节能与纸页品质                          |
| 双靴串联压榨改造型   | 800-1200  | 0.2-0.28   | 26%-33% | 1.0-1.4 (按 50 万吨产能测算)    | 2.3-3.0 年 | 50 及以上, 以高产能为主 | 高速纸机 (车速 800-1100m/min), 适合年产 50 万吨及以上包装纸、高强瓦楞纸等重型生产线, 追求高脱水效率与纸页物理强度                       |
| 靴式压榨系统集成改造型 | 1000-1600 | 0.25-0.32  | 30%-38% | 0.75-0.96 (按 30 万吨产能测算)  | 2.5-3.5 年 | 40 及以上, 大型高速为主 | 大型高速纸机 (车速 $\geq 800\text{m/min}$ ), 适合年产 40 万吨以上各类高档纸种生产线, 可配合新建纸机或纸机大修同步改造, 追求极致节能与长期稳定运行 |

## （一）传统压榨辊替换型

### 1. 技术可行性

核心是将原有普通压榨辊替换为靴式压榨辊，配套优化压榨毛布、调整压榨压力与线速度参数，采用宽压区设计，延长纸页压榨驻留时间，提升出压榨纸页干度，该方案技术成熟，适配中低速纸机，改造周期短、投资成本较低，可行性强。

### 2. 节能效益

改造后可将出压榨干度从传统压榨的 40%-45% 提升至 50%-55%，干度每提升 1%，烘干部蒸汽消耗降低 4%-5%，综合蒸汽节能率达 15%-22%，吨纸汽耗下降 0.1-0.18 吨，同时减少断纸率，提升生产稳定性。

### 3. 应用案例

浙江山鹰纸业股份有限公司，该公司 PM12 和 PM15 生产线年产合计 80 万吨包装纸，改造前采用传统高能耗压榨辊，脱水效率低，吨纸蒸汽消耗偏高，改造时淘汰原有压榨辊，替换为靴式压榨组件，优化压榨参数与毛布选型，改造后吨纸蒸汽用量减少 0.1 吨，年减排二氧化碳 1.58 万吨，减污降碳效果显著，同时纸页横幅水分均匀性提升，运行稳定性明显改善。

## （二）单靴式压榨升级型

### （1）技术可行性

在原有压榨系统基础上，新增单组靴式压榨单元，配套搭建液压加载系统、润滑冷却系统，优化压榨部传动结构，

实现精准控压，该方案适合中高速纸机，可在不改变原有压榨布局的前提下实施，可行性强，改造后出压榨干度提升至52%-56%。

### **(2) 节能效益**

综合蒸汽节能率达20%-28%，吨纸汽耗下降0.15-0.22吨，压榨电耗下降10%-18%。

### **(3) 应用案例**

浙江景兴纸业股份有限公司，该公司TM5、TM6两条生活用纸生产线年产合计12万吨，改造前采用传统真空压榨辊，能耗偏高且纸页松厚度不足，改造后采用软靴压技术，新增单靴式压榨单元，配套优化自动化控制系统，改造后节能降耗效果突出，纤维与运行能耗显著降低，低克重纸页匀度、松厚度优于改造前，车速达到预期设计标准，运行效率稳定。

## **(三) 双靴串联压榨改造型**

### **(1) 技术可行性**

采用两段靴式压榨组件串联设置，优化靴套沟纹设计，使两段靴套沟纹交错分布，改善纸页横幅水分均匀性，配套升级液压控制系统与毛布清洗系统，实现压榨压力分段可调，该方案适合高速、高产能纸机，技术成熟度高，改造后出压榨干度提升至55%-58%。

### **(2) 节能效益**

综合蒸汽节能率达26%-33%，吨纸汽耗下降0.2-0.28吨，同时提升纸页物理强度。

### **(3) 应用案例**

玖龙纸业（东莞）有限公司，该公司一条包装纸生产线年产 50 万吨，改造前采用传统压榨结构，纸页脱水不均、蒸汽消耗偏高，改造后采用串联式靴式压榨设计，优化靴套与压榨参数，改造后有效改善网压部成纸横幅水分均匀性，吨纸蒸汽消耗下降 0.22 吨，年节约蒸汽费用超 440 万元，纸页耐破度、环压强度等物理指标明显提升，投资回收期 2.3 年。

#### **（四）靴式压榨全系统集成改造型**

##### **1. 技术可行性**

整合靴式压榨、高效毛布、智能液压控制、余热回收四大核心模块，优化压榨部与网部、烘干部的联动匹配，采用精准压力扫描与在线调节技术，保障压榨稳定性，配套润滑系统优化，降低设备维护成本，该方案适合年产 40 万吨以上大型高速纸机。

##### **2. 节能效益**

改造后出压榨干度提升至 56%-60%，综合蒸汽节能率达 30%-38%，吨纸汽耗下降 0.25-0.32 吨，压榨系统电耗下降 18%-25%。

##### **3. 应用案例**

金凤凰纸业（孝感）有限公司，该公司一条年产 30 万吨高强瓦楞纸生产线采用此类改造，改造后出压榨干度稳定在 58%左右，烘干部蒸汽消耗大幅降低，年节约能源费用超 300 万元，纸机车速提升 15%，次品率下降 2.1 个百分点，设备故障率大幅降低，长期运行稳定性良好。

## 第六章 热能回收利用技术

### 一 高效热能利用概述

高效热能利用技术聚焦于造纸生产过程中产生的大量余热、余压资源的回收与梯级利用，涵盖余热余压回收、热力系统改造（蒸汽压缩机及热泵技术）、纸机汽罩热回收等方向。该类技术的核心目标是挖掘生产过程中被浪费的热能资源，通过回收、增压、循环利用等手段，减少新鲜蒸汽消耗，提升全厂热能利用效率。造纸行业的热能利用率目前仅为 60%-70%，大量低温余热、冷凝水显热和闪蒸汽未能得到充分利用，热能利用效率提升空间较大。该类技术投资回收期普遍适中，兼具良好的经济效益和减碳效益。

本节共梳理 3 个技术方向、9 项具体方案。各方案的主要节能效益如下表所示。

表 4.4-1 高效热能利用技术节能效益总览

| 序号 | 技术方向     | 具体方案               | 节能率     | 年节能量估算                         |
|----|----------|--------------------|---------|--------------------------------|
| 1  | 余热余压回收利用 | 冷凝水闭式回收            | 4%-8%   | 年节能 500-3000 吨标准煤              |
| 2  | 余热余压回收利用 | 锅炉排烟余热回收           | 3%-6%   | 年节能 1000-5000 吨标准煤             |
| 3  | 热力系统改造   | 低品位蒸汽回收+磁悬浮蒸汽压缩机   | 15%-25% | 年回收乏汽 6-15 万 t，节约标煤 4000-9000t |
| 4  | 热力系统改造   | 热力压缩机与锅炉联动         | 12%-20% | 年节约原煤 0.5-1.5 万 t              |
| 5  | 热力系统改造   | 热力压缩机+智能调控+管网优化    | 20%-30% | 年节约蒸汽 1-2 万 t                  |
| 6  | 纸机汽罩热回收  | 密闭汽罩+气气热回收         | 15%-20% | 吨纸汽耗下降 0.15-0.2t               |
| 7  | 纸机汽罩热回收  | 密闭汽罩+气水热回收+冷凝水余热利用 | 20%-28% | 吨纸汽耗下降 0.2-0.25t               |
| 8  | 纸机汽罩     | 密闭汽罩+蒸汽热           | 25%-35% | 吨纸汽耗下降                         |

| 序号 | 技术方向    | 具体方案      | 节能率     | 年节能量估算          |
|----|---------|-----------|---------|-----------------|
|    | 热回收     | 泵循环       |         | 0.25-0.35t      |
| 9  | 纸机汽罩热回收 | 纸机汽罩全系统集成 | 30%-40% | 吨纸汽耗下降 0.3-0.4t |

注：年节能量依据典型产能规模估算，具体项目的节能效益需结合企业实际产量、开工率、能源价格等因素测算。纸机汽罩方案的节能量以吨纸汽耗下降值表示，实际年节汽量需结合企业产能规模计算。多环节余热协同回收综合节能率可达10%-15%。

## 二 余热余压回收利用改造

### (1) 技术可行性

回收电厂生产过程中产生的余热、余压，实现能源循环利用，契合造纸行业高余热产出特点。造纸自备电厂锅炉排烟、汽轮机排汽、冷凝水等均蕴含大量余热，回收技术成熟，可依托现有系统加装回收设备，改造难度低、见效快，且能实现余热资源化再利用。

### (2) 节能效益

冷凝水闭式回收节能率4%-8%，锅炉排烟余热回收节能率3%-6%，多环节余热协同回收综合节能率可达10%-15%。

### (3) 应用案例

福建省青山纸业自备电厂全面推进余热回收利用，实施冷凝水闭式回收、纸机密闭气罩余热回收、蒸煮喷放余热回收等改造，搭配碱回收系统优化，年节能量约5000吨标准煤，综合节能率达8%；岳阳林纸自备电厂实施结晶蒸发节能减排改造，新建先进结晶蒸发生产线，蒸发效率从4.38kg水/kg蒸汽提升至5.49kg水/kg蒸汽，年节汽量约6.3万t，节电量184.6万千瓦时，节能率达12%。

## 三 热力系统改造

### (一) 低品位蒸汽回收+磁悬浮蒸汽压缩机改造方案

### **(1) 技术可行性**

造纸烘干、蒸煮等环节，新增热力压缩机，回收生产过程中产生的低品位乏汽(压力 0.1-0.3MPa、温度 100-150℃)，通过压缩机提升蒸汽品位(压力 0.4-0.6MPa)，重新回用于生产环节，替代部分新鲜蒸汽，减少锅炉负荷。造纸生产中烘干、冷凝等环节会产生大量低品位乏汽，以往多直接排放造成热能浪费，热力压缩机可依托现有蒸汽管网改造，无需大规模新建设备，改造周期短(单条生产线改造 10-20 天)，可分阶段实施，不影响企业连续生产，设备适配性强，可匹配卫生纸、包装纸、文化纸等各类生产线的热力需求，且国产热力压缩机技术成熟、采购便捷，后期运维难度低、成本可控。

### **(2) 节能效益**

该方案可回收 70%-85%的低品位乏汽，综合节能率可达 15%-25%，其中蒸汽回收利用率提升至 80%以上，单位产品蒸汽消耗降低 18%-22%，同时减少锅炉燃料消耗，间接降低碳排放。

### **(3) 应用案例**

浙江仙鹤股份有限公司某造纸基地，针对烘干环节乏汽浪费问题，新增 4 台罗茨式热力压缩机，回收纸机烘干产生的低品位乏汽，经压缩提升品位后回用于烘干系统，改造后年回收乏汽约 12 万吨，替代新鲜蒸汽比例达 23%，年节约标准煤约 8600 吨，综合节能率达 21%，投资回收期约 16 个月；嵊州市恒丰纸业有限公司，在蒸汽冷凝水余热回收基础上，新增热力压缩机，将回收的低品位余热蒸汽提升能级后

回用于生产，年节约蒸汽 2 万吨，按 150 元/吨蒸汽计算，年产生经济效益 300 万元，综合节能率达 18%，同时减少二氧化碳排放 50 万千克。

## （二）热力压缩机与锅炉联动节能改造方案

### （1）技术可行性

新增热力压缩机，与企业自备锅炉、余热锅炉联动运行，将锅炉尾部排烟余热、锅炉排污余热等回收，经热力压缩机压缩升温后，作为锅炉补水预热或辅助热源，优化锅炉运行效率，降低燃料消耗。造纸企业自备锅炉普遍存在排烟余热、排污余热浪费问题，热力压缩机可与现有锅炉系统无缝衔接，无需改造锅炉主体结构，仅需新增连接管路与控制系统，改造投入相对合理，适配燃煤、燃气等各类锅炉类型，联动控制系统技术成熟，可实现自动调节，确保锅炉与热力压缩机协同稳定运行，适配中大型造纸企业热电联产需求。

### （2）节能效益

联动改造可降低锅炉燃料消耗 8%-15%，综合节能率达 12%-20%，同时锅炉热效率提升 3%-5%，减少烟气热损失，契合能耗限额标准要求。

### （3）应用案例

山东太阳纸业股份有限公司自备电厂，新增 2 台离心式热力压缩机，与现有燃煤锅炉联动，回收锅炉排烟余热（温度 120-150℃），经压缩升温后用于锅炉补水预热，改造后锅炉热效率从 88%提升至 92%，年节约原煤约 1.2 万吨，综合节能率达 16%，年减少二氧化碳排放约 3.2 万吨；岳阳林纸自备电厂，在余热锅炉基础上新增热力压缩机，回收锅炉

排污余热与蒸汽冷凝水余热，联动优化热力供应，年节汽量约 6.3 万 t、节电量 184.6 万千瓦时，综合节能率达 14%，同时降低锅炉运维成本。

### （三）热力压缩机配套智能调控+管网优化改造方案

#### （1）技术可行性

在新增热力压缩机的基础上，配套智能变频调控系统、蒸汽管网优化、气水分离等辅助系统，实现热力压缩机运行参数动态优化，减少蒸汽损耗，进一步提升节能效果，延长设备使用寿命。智能调控系统可实时监测蒸汽压力、温度、流量等参数，动态调节热力压缩机转速与压缩比，匹配造纸生产负荷波动需求；管网优化可减少蒸汽输送过程中的泄漏与热损失，适配造纸车间复杂的管网布局；气水分离系统可避免水分损坏压缩机部件，适配造纸车间潮湿、多蒸汽的工况，三者协同改造技术成熟，可与热力压缩机安装同步实施，改造后设备故障率降低，运维成本进一步压缩，适配各类中大型造纸企业。

#### （2）节能效益

配套改造可使热力压缩机节能效果再提升 5%-8%，综合节能率可达 20%-30%，同时蒸汽管网热损失降低 10%-15%，设备运维成本降低 12%-18%。

#### （3）应用案例

年产 50 万吨包装纸生产线，新增 3 台磁悬浮热力压缩机，配套智能变频调控系统与蒸汽管网优化改造，实时优化压缩比与蒸汽流量，改造后热力压缩机运行效率从 85% 提升至 93%，年节约蒸汽约 1.2 万吨，综合节能率达 28%，年

节约标准煤约 1.1 万吨，同时蒸汽管网热损失降低 13%，每年减少运维成本约 90 万元，设备使用寿命延长至 15 年以上；某纸业集团，在新增热力压缩机的同时，配套气水分离系统与智能监测系统，实现余热蒸汽回收、压缩、回用全流程智能化管控。

#### 四 纸机汽罩热回收

纸机汽罩（气罩）热回收是造纸干燥段最成熟、投资回报最快的节能改造方向，核心是把密闭气罩+气气/气水热回收+蒸汽热泵/蒸汽喷射热泵（TV）+智能控制组合，实现余热梯级利用、减少新风加热、降低排气热损失。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。

##### （1）技术可行性

纸机汽罩热回收节能改造主要围绕提升汽罩密闭性、优化通风组织、实现余热梯级回收以及与蒸汽增压循环系统协同运行等方向开展，整体技术路线成熟可靠，对现有生产工艺扰动小，具备较强的工程可行性，改造过程可结合纸机检修分段实施，基本不影响正常连续生产，且适配不同车速、不同产能的包装纸机及文化纸机等机型，尤其适用于年产 50 万吨级大型包装纸机的节能升级需求。

常规改造路径首先将开放式或半密闭式汽罩升级为全

密闭高保温汽罩，优化袋区通风与气流组织，减少热风外溢与无效散热，同时配置气-气板式换热器，利用汽罩高温排气预热室外新风，降低新风加热所需蒸汽消耗，在此基础上增设气-水换热单元，进一步回收排气余热用于加热清水或白水系统，并配套回收烘缸冷凝水显热及闪蒸汽，实现余热的多级利用；对于能耗基数更高、节能需求更突出的大型纸机，可在上述热回收系统基础上集成蒸汽热力压缩单元，通过回收烘缸二次蒸汽与汽罩余热，经增压升温后回用于干燥部加热，形成闭式循环供热体系，同时配套完善自动化控制系统，实现汽罩风温、风压、蒸汽压力及余热回收设备的联动调节，保障干燥工况稳定。

**一是基础标配，开放式气罩→全密闭气罩+气-气热回收。**核心是将原有开放式或半密闭式汽罩改造为全密闭汽罩，该汽罩采用高保温、高气密性结构设计，配备导流优化装置，外板采用保温防护结构并搭配高效保温材料，内板设置反射层以减少辐射散热，同时优化汽罩供排风系统、袋区通风结构及喷风帘装置，有效减少热风外溢，确保汽罩内部温场均匀稳定，在此基础上新增气-气换热器，可选用板式或管壳式结构，利用汽罩排出的 120–140℃ 高温废气，将 20℃ 左右的室外新风预热至 70–90℃，从而降低新风加热所需的蒸汽消耗，该方案技术成熟度高，适配 90% 以上的各类纸机，改造过程可结合纸机日常检修分段实施，无需停机，不影响正常生产，改造后可实现吨纸汽耗下降 0.15–0.25 吨，蒸汽节能率达到 12%–20%，同时汽罩循环风机电耗可下降 30%–50%，综合节能率维持在 15%–25%，投资成本相对可

控，适合预算有限、原有汽罩密闭性较差的老纸机改造。

优点是：技术最成熟、90%纸厂适用（文化纸/包装纸/瓦楞纸）。不停机可改造（分段施工），不影响正常生产。国产设备成熟，投资可控。综合节能率：15%–25%（蒸汽为主）。吨纸汽耗下降 0.15–0.25 吨（下降 12%–20%）

二是进阶型，在方案一基础上+气-水热回收+冷凝水余热利用（进阶）。进阶提升型，是在第一类方案的基础上进行优化升级，在气-气热回收单元之后增设气-水换热器，将经过一级热回收后温度仍达 85°C 左右的排气进一步降温至 60–70°C，回收的余热用于加热生产用清水、白水或车间采暖用水，同时配套实施冷凝水显热回收工程，将 130–140°C 的烘缸冷凝水引入换热系统，用于预热新风或白水，此外同步回收烘缸产生的闪蒸汽，将其引至汽罩加热器或后续增压循环系统中重复利用，该方案适合原有汽罩密闭性尚可、但余热回收不充分的纸机，可分期分步实施，先完成密闭汽罩与气-气热回收改造，再逐步添加气-水换热及冷凝水、闪蒸汽回收单元，改造后相比第一类方案可进一步提升节能效果，蒸汽节能率增加 5%–8%，综合蒸汽节能率达到 20%–28%，吨纸汽耗下降 0.2–0.25 吨，兼顾节能效果与投资成本，适合中等产能纸机的节能升级。

三是高能效型，蒸汽热泵（热力压缩机/蒸汽喷射泵）+汽罩热回收。核心是在密闭汽罩与基础热回收系统的基础上，新增蒸汽热力压缩单元，可选用蒸汽喷射热泵或蒸汽压缩机，通过回收汽罩排风的显热以及烘缸排出的二次蒸汽，经压缩增压、升温处理后，重新回供至汽罩加热系统或烘缸，

形成余热回收-增压升温-循环利用的闭式循环体系，最大限度减少新鲜蒸汽的消耗，该方案尤其适合年产 50 万吨级大型高速包装纸机，适配车速 700–1100m/min 的生产工况，与大型纸机的高能耗、高余热产出特点高度匹配，改造后节能效果显著，吨纸汽耗可下降 0.25–0.35 吨，蒸汽节能率达到 20%–30%，部分项目可实现汽罩加热基本不消耗新鲜蒸汽，完全依靠回收余热与增压循环满足需求，综合节能率维持在 25%–35%，虽然投资成本相对较高，但节能效益突出，投资回收期可控制在 2–3 年，适合对节能效果要求较高、产能规模较大的纸机改造。

**四是全系统集成型。**是目前纸机汽罩热回收改造的顶级方案，整合了前三类方案的核心技术，首先采用全密闭双循环供风汽罩，根据纸机前烘、后烘不同干燥阶段的需求，实现分区供风、精准控温，其次设置三级余热回收系统，一级通过气-气换热器预热新风，二级通过气-水换热器加热清水或白水，三级实现冷凝水与闪蒸汽的全量回收，充分挖掘余热潜力，同时集成蒸汽热力压缩单元，提升余热回收的利用效率，最后配套完善 PLC 智能控制系统，实现汽罩风压、风温、蒸汽压力、热泵运行状态的联动调节，确保整个系统运行稳定、高效，该方案适合 4800mm 以上宽幅、年产 40–60 万吨的大型纸机，尤其适合新建纸机或纸机大修时同步改造，改造后可实现蒸汽节能 30%–40%，风机及配套泵组电耗下降 20%–40%，系统综合节能率达到 28%–38%，吨纸汽耗下降 0.3–0.4 吨，虽然投资成本最高，投资回收期为 2.5–3.5 年，但长期运行稳定性好、维护量低，节能效益与生产效益

同步提升，能够实现纸机干燥系统的绿色高效运行。

表 4.4.5 纸机汽罩热回收节能改造效益对比

| 方案        | 投资（万元）    | 吨纸汽耗下降（t） | 综合节能率   | 年节汽（万吨）   | 投资回收期    | 适用场景       |
|-----------|-----------|-----------|---------|-----------|----------|------------|
| 1.密闭+气气   | 300-500   | 0.15-0.2  | 15%-20% | 0.75-1.0  | 2.0-2.5年 | 老纸机、预算有限   |
| 2.+气水+冷凝水 | 450-650   | 0.2-0.25  | 20%-28% | 1.0-1.25  | 2.0-2.8年 | 中产纸机、分步改造  |
| 3.+蒸汽热泵   | 700-1000  | 0.25-0.35 | 25%-35% | 1.25-1.75 | 2.2-3.0年 | 大型高速包装纸机   |
| 4.全系统集成   | 1000-1500 | 0.3-0.4   | 30%-40% | 1.5-2.0   | 2.5-3.5年 | 新建/大修、顶级节能 |

### （2）节能效益

单纯密闭汽罩加气-气热回收改造可实现蒸汽消耗降低 15%-20%，吨纸汽耗下降 0.15-0.2 吨，叠加气-水热回收及冷凝水余热利用后，综合蒸汽节能率可提升至 20%-28%，若配套蒸汽热力压缩循环系统，整体蒸汽节能率可达 25%-35%，吨纸汽耗下降 0.25-0.35 吨，同时汽罩循环风机电耗可降低 30%-50%，系统综合节能率约 28%-38%，投资回收期普遍控制在 2-3 年，经济与技术可行性俱佳。

### （3）应用案例

国内多条年产 40-60 万吨级包装纸机的实际运行案例表明，采用全密闭汽罩、多级余热回收与蒸汽增压循环相结合的集成改造方案，不仅能够显著降低蒸汽与电力消耗，减少单位产品碳排放，还可稳定烘干部温湿度分布，改善纸张干燥均匀性，提升产品质量与运行稳定性，部分项目实现了气

罩加热系统基本不再消耗新鲜蒸汽，仅依靠余热回收与循环增压即可满足干燥需求，验证了该类改造方案在大型造纸生产线应用的稳定性与先进性。

一是基础标配型，核心是将原有开放式或半密闭式汽罩改造为全密闭汽罩，该汽罩采用高保温、高气密性结构设计，配备导流优化装置，外板采用保温防护结构并搭配高效保温材料，内板设置反射层以减少辐射散热，同时优化汽罩供排风系统、袋区通风结构及喷风帘装置，有效减少热风外溢，确保汽罩内部温场均匀稳定，在此基础上新增气-气换热器，可选用板式或管壳式结构，利用汽罩排出的 120–140°C 高温废气，将 20°C 左右的室外新风预热至 70–90°C，从而降低新风加热所需的蒸汽消耗，该方案技术成熟度高，适配 90% 以上的各类纸机。四川圆周实业有限公司采用该项技术，该公司 2# 纸机年产 1.5 万吨，改造前采用半密闭汽罩，热风外溢严重、温场波动大，改造采用分段施工，将原有汽罩替换为全密闭结构，选用 10mm 厚防腐板材，顶部铺设 100mm 厚保温层，新增板式气-气换热器，优化喷风帘为长槽缝式，改造后温场波动控制在  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  内，吨纸汽耗从 2.5 吨降至 2.3 吨，热风侧电耗从 50 千瓦时/吨纸降至 20 千瓦时/吨纸，年节约能源费用 67 万元，投资回收期不足 2 年，全程未中断生产。

第二类方案为进阶提升型，是在第一类方案的基础上优化升级，增设气-水换热器，回收排气余热加热清水、白水等，配套回收冷凝水显热及闪蒸汽，可分期实施，综合蒸汽节能率达 20%–28%，适合中等产能纸机，。金凤凰纸业（孝感）有限公司采用该项技术，该公司年产 70 万吨环保包装纸，

其中 1 条生产线采用此类改造，先完成全密闭双循环气罩与气-气换热器改造，后续新增气-水换热器，气-气换热器换热面积 480 m<sup>2</sup>、气-水换热器 290 m<sup>2</sup>，配套冷凝水预热新风装置，改造后热风系统吨纸电耗从 42.5 千瓦时降至 30 千瓦时以下，年节约电费 32.5 万元，综合年节约能源费用超 500 万元，纸机车速稳定，纸面合格率从 96%提升至 99.5%。

三类为高能效型，新增蒸汽热力压缩单元，形成闭式循环，适合年产 50 万吨级大型高速包装纸机，综合节能率 25%–35%，典型案例为江苏凡泰纸业有限公司，该公司 5600/700 高强瓦楞纸机年产 30 万吨，改造时将开放式汽罩升级为全密闭结构，优化导流与供排风系统，新增蒸汽热力压缩单元与多级热回收系统，回收闪蒸汽与排气余热，改造后日均产量增长 20%以上，前烘后烘蒸汽压力均下降 2 公斤以上，吨纸蒸汽消耗量下降 200kg 以上，闪蒸汽全回收，汽罩基本不消耗新鲜蒸汽；另有某纸业 4200/500 高强瓦楞纸机年产 20 万吨，采用同类方案，吨纸蒸汽消耗量下降 200kg，投资回收期仅半年。

第四类方案为全系统集成型，整合前三类核心技术，三级余热回收+智能联控，适合年产 40–60 万吨大型纸机，综合节能率 28%–38%，案例为台州森林纸业有限公司，该公司 6700/1100 型纸机年产 50 万吨包装纸，改造采用全密闭双循环供风汽罩，设置三级余热回收系统，拆除冗余闪蒸罐，集成蒸汽热力压缩单元与 PLC 智能控制系统，改造后综合节能率达 35%以上，吨纸汽耗下降 0.35 吨，年节约蒸汽费用超 300 万元，纸机车速稳定在 850m/min 以上，产能提升 30%，

次品率从 2.5% 降至 0.3% 以下，设备故障率大幅下降。

## 第七章 技术改造项目投资效益总览

本节从投资规模、投资回收期和企业投资意愿等经济性维度，对各类技术方案进行横向对比分析，为企业根据自身资金实力和改造需求选择适用技术提供决策参考。

### （一）能源供给与综合利用技术投资效益

能源供给与综合利用技术涵盖锅炉系统改造、汽轮发电机组改造、掺烧替代能源、智能化调控、可再生能源利用等 8 个方向、12 项具体方案。该类技术以源头节能和清洁替代为特征，投资规模跨度较大，从 50 万元的小型辅机改造到 2 亿元的大型综合能源项目均有覆盖。以下从经济性角度逐类分析。

#### 1. 锅炉系统节能改造

锅炉系统节能改造主要包括循环流化床锅炉高效改造和燃气锅炉低氮改造两类方案。两类方案均依托现有锅炉进行优化，无需更换主体设备，改造成本相对可控。

循环流化床锅炉高效改造的单台投资约 200-500 万元，投资回收期 2-3 年。以岳阳林纸自备电厂为例，该企业对 5#、6#炉实施沼气掺烧改造，年节约原煤约 7000 吨，综合节能率达 10%-12%，改造投资回报良好，企业投资意愿中高。

#### 2. 汽轮发电机组节能改造

汽轮发电机组改造涵盖抽凝改背压、通流改造和磁悬浮辅机替代三种方案，投资规模和技术复杂度依次递减。

抽凝式改背压式机组的投资规模为 500-1500 万元，是本

节投资较高的方案之一。以福建青山纸业为例，改造后年节能量约 6 万吨标准煤，节能率 16%。因投资规模较大、改造周期较长，企业投资意愿中高，适合结合机组大修同步实施。

机组通流改造的投资规模为 300-800 万元，投资回收期 3-5 年，企业投资意愿中等。该方案适合机组运行年限较长、叶片老化导致效率下降的情况。

磁悬浮设备替代（循环泵、风机等辅机）的投资规模最小，仅 50-200 万元，但节能率高达 30%-40%，投资回收期仅 1.5-2.5 年，是本节投资回收最快的方案。以岳阳林纸为例，该企业对热电系统循环泵实施磁悬浮改造，泵效率从 72.5% 提升至 88% 以上，年节约电约 206 万千瓦时。该方案投资小、见效快，企业投资意愿高，适合作为节能改造的优先切入点。

### 3. 掺烧生物质等替代能源

掺烧替代能源包括生物质掺烧、沼气回收掺烧和 RDF 替代燃料掺烧三种方案，均依托现有锅炉系统改造，节能效益与燃料替代比例直接相关。

生物质掺烧（树皮、木屑等）投资 500-2000 万元，投资回收期 2-4 年。以广东鼎丰纸业为例，新建 90 吨/小时多燃料循环流化床锅炉，掺烧备料车间产生的树皮、木屑与原煤，日均燃用生物质约 103 吨，兼具废弃物处置和节能降碳双重效益，企业投资意愿中高。

沼气回收掺烧投资 200-800 万元，投资回收期仅 1.5-2.5 年，是本节投资回收最快的方案之一。以广东理文造纸为例，安装沼气入炉掺烧系统，回收污水处理厌氧工艺产生的沼气（日均 2.8-3 万  $\text{m}^3$ ）作为锅炉辅助燃料，大幅减少原煤用量。

该方案投资小、见效快，且解决沼气空排环保问题，企业投资意愿高。

RDF 替代燃料掺烧投资 800-3000 万元，投资回收期 2-3 年。以湖北某纸厂为例，建成固废 RDF 替代燃料制备中心，日处理固废 400 余吨，年产 10 多万吨 RDF 燃料，年节省化石燃料约 8 万吨。该方案在节约能源的同时大幅降低固废处置成本，综合经济效益显著，企业投资意愿中高。

#### 4. 智能化调控改造

智能化调控改造依托工业互联网和 AI 算法，对现有电厂控制系统进行升级，投资规模 200-600 万元。以浙江哲丰能源（仙鹤股份衢州基地）为例，引入全应 ADMC 热电智能调控系统，实现热电系统全流程动态优化控制，综合效能提升 1.7 个百分点，节能率约 3%，投资回收期 2-4 年。

该方案的突出优势在于无需大规模改造主体设备，投资相对较小，且能提升运行稳定性和减少人工操作偏差。虽然单项节能率不高，但因覆盖全厂热力系统，绝对节能量可观。技术先进性强，企业投资意愿高。

#### 5. 可再生能源利用

可再生能源利用涵盖分布式光伏、沼气发电余热利用、生物质能替代燃煤和可再生能源综合利用四种方案，投资规模从 300 万元到 2 亿元不等。

分布式光伏利用投资 300-3000 万元（约 3-5 元/W），年发电 50-3000 万千瓦时。以金东纸业（江苏）为例，50 兆瓦屋顶光伏项目年发电超 5000 万千瓦时，年节省电费约 90 万元。广东省内，东莞建晖纸业光伏电站年省标准煤超 6700

吨。投资回收期 3-6 年，但考虑到 25 年以上组件寿命和绿电碳资产收益，企业投资意愿高。

沼气回收利用（发电+余热）投资 500-2000 万元，投资回收期 2-4 年。以山鹰纸业（广东）为例，3 台沼气发电机组稳定运行超 21000 小时，总发电量 3363 万千瓦时，综合效率达 86.7%。该方案对有制浆废水处理设施的企业尤为适用，企业投资意愿中高。

生物质能替代燃煤投资 1000-5000 万元，投资回收期 2-4 年。以亚太森博（山东）为例，年消耗生物质燃料 15 万吨，替代燃煤 10 万吨。方案受限于企业所在地生物质资源禀赋，企业投资意愿中等。

可再生能源综合利用投资 5000-20000 万元，综合节能率 20%以上。以玖龙纸业（东莞）为例，建设光伏、沼气回收和生物质燃料锅炉系统，配套储能装置，年节约化石能源 30 万吨标准煤，综合节能率 25%。投资回收期 3-6 年，投资规模大、系统复杂，仅适合大型龙头企业，企业投资意愿中等。

表 7.1-1 能源供给与综合利用技术投资效益汇总

| 序号 | 技术方向         | 具体方案                  | 投资规模<br>(万元)   | 投资回收期        | 企业投资意愿 | 典型案例                                    |
|----|--------------|-----------------------|----------------|--------------|--------|---|
| 1  | 锅炉系统<br>节能改造 | 循环流化床锅炉<br>炉高效改造      | 单台<br>200-500  | 2-3 年        | 中高     | 岳阳林纸：年<br>节约原煤<br>7000t                 |
| 2  | 汽轮发电<br>机组改造 | 抽凝式改背压<br>式           | 500-1500       | 2-4 年        | 中高     | 福建青山纸<br>业：年节能 6<br>万吨标准煤               |
| 3  | 汽轮发电<br>机组改造 | 机组通流改造                | 300-800        | 3-5 年        | 中      | 行业经验值                                   |
| 4  | 汽轮发电<br>机组改造 | 磁悬浮设备替<br>代辅机         | 50-200         | 1.5-2.5<br>年 | 高      | 岳阳林纸：年<br>节电 206 万<br>kWh               |
| 5  | 掺烧替代<br>能源   | 掺烧生物质<br>(树皮/木屑<br>等) | 500-2000       | 2-4 年        | 中高     | 广东鼎丰纸<br>业：日均燃用<br>103t                 |
| 6  | 掺烧替代<br>能源   | 沼气回收掺烧                | 200-800        | 1.5-2.5<br>年 | 高      | 广东理文：日<br>均掺烧 2.8-3<br>万 m <sup>3</sup> |
| 7  | 掺烧替代<br>能源   | RDF 替代燃料<br>掺烧        | 800-3000       | 2-3 年        | 中高     | 湖北某纸厂：<br>年省化石燃<br>料约 8 万 t             |
| 8  | 智能化调<br>控    | 智能化调控改<br>造           | 200-600        | 2-4 年        | 高      | 浙江哲丰：效<br>能提升 1.7 个<br>百分点              |
| 9  | 可再生能<br>源利用  | 分布式光伏利<br>用           | 300-3000       | 3-6 年        | 高      | 金东纸业：<br>50MW 年发<br>电超 5000 万<br>kWh    |
| 10 | 可再生能<br>源利用  | 沼气回收利用<br>(发电+余热)     | 500-2000       | 2-4 年        | 中高     | 山鹰纸业(广<br>东)：发电<br>3363 万 kWh           |
| 11 | 可再生能<br>源利用  | 生物质能替代<br>燃煤          | 1000-500<br>0  | 2-4 年        | 中      | 亚太森博(山<br>东)：年替代<br>燃煤 10 万 t           |
| 12 | 可再生能<br>源利用  | 可再生能源综<br>合利用         | 5000-200<br>00 | 3-6 年        | 中      | 玫龙(东莞)：<br>年节约化石<br>能源 30 万吨<br>标准煤     |

注：

1. 投资规模为单台设备或单个系统的参考投资区间，实际投资因企业规模、设备选型、现场条件不同会有所差异。
2. 投资回收期为税前静态回收期估算值，考虑了能源节约效益，未包含设备折旧、维护费用等因素。
3. 企业投资意愿是基于投资回收期长短、技术成熟度、政策支持力度等因素的综合定性判断：“高”表示多数企业有较强投资意愿，“中高”介于两者之间，“中”表示需结合企业具体情况评估。
4. 标注“行业经验值”的数据来源于行业通用设计参数和专家经验，企业在具体应用时需根据实际情况进一步论证

## （二）主要生产工艺节能技术投资效益

主要生产工艺节能技术涵盖真空系统改造和靴式压榨技术 2 个技术方向、8 项具体方案。该类技术聚焦于抄纸环节——造纸企业能耗最集中的工序，节能效益显著、投资回收期普遍较短，是企业投资意愿最高的节能改造领域。以下从经济性角度逐类分析。

### （一）真空系统改造

真空系统是纸机网部、压榨部脱水的核心辅助系统，电耗约占企业总电耗的 20%-25%。传统真空系统多采用水环真空泵或罗茨真空泵，效率仅为 30%-60%。采用高效径流式风机替代或联动改造，可大幅降低电耗，且改造周期短、投资回报快，是造纸企业节能改造的首选方向。

径流式风机直接替代传统真空泵的单条线投资约 150-500 万元，节能率 30%-45%，投资回收期仅 1-2 年，是本节投资回收最快的方案之一。以亚太森博（山东）为例，该企业投入 2380 万元改造真空系统，用径流式透平风机替换传统水环真空泵，节电率达 38%，年节电量超 1200 万千瓦时，投资回收期约 18 个月。某大型瓦楞纸企业将水环真空泵替换为磁悬浮径流式风机，改造前运行功率约 2788kW，改造后降至 1200-1400kW，每小时节电 1387 千瓦时，节能率达 42%，同时实现 100%节水和 100%省油。该方案技术成熟、见效快，企业投资意愿高。

径流式风机与原有真空泵联动运行的单条线投资约 200-600 万元，节能率 35%-50%，投资回收期 1.5-2.5 年。该

方案保留原有真空泵用于开机快速建真空，新增径流式风机作为稳态运行主真空源，PLC自动联锁切换，兼顾快速启动与稳态低能耗。以山东江河纸业为例，改造后节电率45%，年节电280万千瓦时，真空波动控制在 $\pm 0.5\text{kPa}$ 以内，断纸率下降60%。某生活用纸企业采用分区联动控制，综合节电率58%，年节电360万千瓦时，年省维修费80万元。该方案尤其适合生产负荷波动较大的生产线，企业投资意愿高。

径流式风机配套智能调控与预处理系统的单条线投资约300-800万元，节能率35%-50%，投资回收期1.5-2.5年。该方案在安装径流式风机的基础上，配套气水分离、智能变频调控及真空管网优化，可进一步提升节能效果并延长设备寿命。以某年产50万吨包装纸企业为例，配套建设大型气水分离室和智能变频调控系统后，风机运行效率从88%提升至95%，综合节能率达48%，年节电量超1500万千瓦时，风机故障率下降60%，年减少运维成本约120万元。该方案投资略高于前两类，但综合效益更优，企业投资意愿高。

老旧真空系统升级与径流式风机集成的单条线投资约200-500万元，节能率30%-40%，投资回收期1-2年。该方案针对运行年限超8年、管网老化、真空损失严重的老旧系统，先对管网进行翻新、泄漏修复，再集成安装径流式风机，实现系统全面升级。以某年产30万吨文化纸企业为例，对运行10年的真空系统进行升级后，能耗降低36%，年节电约780万千瓦时，纸机车速从500m/min提升至650m/min，产量提升30%。该方案对拥有老旧纸机的企业尤为适用，企业投资意愿高。

## （二）靴式压榨技术

靴式压榨是造纸工业最具节能潜力的压榨脱水技术。纸页在压榨部每降低 1% 的水分，干燥部蒸汽消耗可节省 4%-5%。采用靴式压榨替代传统辊式压榨，可显著提高出压榨纸页干度，减少后续干燥蒸汽消耗。该类方案投资规模较大，但节能效益持久，是包装纸和文化纸机节能改造的核心方向。

传统压榨辊替换型的单条线投资约 200-400 万元，吨纸汽耗下降 0.1-0.18 吨，综合节能率 15%-22%，投资回收期 1.8-2.5 年。该方案将原有普通压榨辊直接替换为靴式压榨组件，技术成熟、改造周期短、投资成本相对较低。以浙江山鹰纸业为例，PM12 和 PM15 生产线合计年产 80 万吨包装纸，改造后吨纸蒸汽用量减少 0.1 吨，年减排二氧化碳 1.58 万吨。该方案适配中低速纸机（车速 $\leq 500\text{m}/\text{min}$ ），尤其适合预算有限的老纸机改造，企业投资意愿高。

单靴式压榨升级型的单条线投资约 350-600 万元，吨纸汽耗下降 0.15-0.22 吨，综合节能率 20%-28%，投资回收期 2.0-2.7 年。该方案在原有压榨系统基础上新增单组靴式压榨单元，无需改变原有压榨布局，适配中高速纸机（车速 500-800m/min）。以浙江景兴纸业为例，TM5、TM6 两条生活用纸生产线年产合计 12 万吨，采用软靴压技术后，纤维与运行能耗显著降低，低克重纸页匀度和松厚度优于改造前。该方案可兼顾节能与纸页品质提升，企业投资意愿中高。

双靴串联压榨改造型的单条线投资约 800-1200 万元，吨纸汽耗下降 0.2-0.28 吨，综合节能率 26%-33%，投资回收期

2.3-3.0年。该方案采用两段靴式压榨组件串联设置，改善纸页横幅水分均匀性，适配高速纸机（车速800-1100m/min），适合年产50万吨及以上的包装纸重型生产线。以玖龙纸业（东莞）为例，一条年产50万吨包装纸生产线采用串联式靴式压榨设计，吨纸蒸汽消耗下降0.22吨，年节约蒸汽费用超440万元，纸页耐破度、环压强度等物理指标明显提升，投资回收期2.3年。该方案节能效益和品质提升效果显著，但投资较大，企业投资意愿中高。

靴式压榨全系统集成改造型的单条线投资约1000-1600万元，吨纸汽耗下降0.25-0.32吨，综合节能率30%-38%，投资回收期2.5-3.5年。该方案整合靴式压榨、高效毛布、智能液压控制、余热回收四大模块，适合年产40万吨以上大型高速纸机。以金凤凰纸业（孝感）为例，一条年产30万吨高强瓦楞纸生产线改造后，出压榨干度稳定在58%左右，年节约能源费用超300万元，纸机车速提升15%，次品率下降2.1个百分点。该方案是靴式压榨技术的顶级配置，适合新建纸机或纸机大修时同步实施，节能效益最大但投资最高，企业投资意愿中等。

表 7.2-1 主要生产工艺节能技术投资效益汇总

| 序号 | 技术方向   | 具体方案            | 投资规模<br>(万元) | 投资回收期    | 企业投资意愿 | 典型案例                               |
|----|--------|-----------------|--------------|----------|--------|------------------------------------|
| 1  | 真空系统改造 | 径流式风机直接替代传统真空泵  | 150-500      | 1-2年     | 高      | 亚太森博(山东): 投资2380万, 节电率38%, 回收期18个月 |
| 2  | 真空系统改造 | 径流式风机与原有真空泵联动运行 | 200-600      | 1.5-2.5年 | 高      | 山东江河纸业: 节电率45%, 年节电280万kWh         |
| 3  | 真空系    | 径流式风机+          | 300-800      | 1.5-2.5  | 高      | 某包装纸企业: 综                          |

| 序号 | 技术方向   | 具体方案             | 投资规模<br>(万元) | 投资回收期<br>年 | 企业投资意愿 | 典型案例                           |
|----|--------|------------------|--------------|------------|--------|--------------------------------|
|    | 统改造    | 智能调控+管网优化        |              |            |        | 合节能率 48%，年节电超 1500 万 kWh       |
| 4  | 真空系统改造 | 老旧真空系统升级+径流式风机集成 | 200-500      | 1-2 年      | 高      | 某文化纸企业：能耗降低 36%，年节电 780 万 kWh  |
| 5  | 靴式压榨技术 | 传统压榨辊替换型         | 200-400      | 1.8-2.5 年  | 高      | 浙江山鹰纸业：吨纸汽耗减 0.1t，年减碳 1.58 万 t |
| 6  | 靴式压榨技术 | 单靴式压榨升级型         | 350-600      | 2.0-2.7 年  | 中高     | 浙江景兴纸业：纤维与运行能耗显著降低             |
| 7  | 靴式压榨技术 | 双靴串联压榨改造型        | 800-1200     | 2.3-3.0 年  | 中高     | 玖龙（东莞）：年节约蒸汽费用超 440 万元         |
| 8  | 靴式压榨技术 | 靴式压榨系统集成改造型      | 1000-1600    | 2.5-3.5 年  | 中      | 金凤凰纸业：年节约能源费用超 300 万元          |

注：

1. 投资规模为单条生产线的参考投资区间，实际投资因纸机幅宽、车速、产能及现有设备状况不同会有所差异。
2. 投资回收期为税前静态回收期估算值，综合考虑了电力和蒸汽节约效益，未包含设备折旧、维护费用等因素。
3. 企业投资意愿定性判断标准同表 4.5.1-1。
4. 真空系统改造方案的案例数据来源于全国造纸行业节能改造项目，广东省内已有玖龙、理文、建晖等多家企业实施或计划实施类似改造。

### （三）高效热能利用技术投资效益

高效热能利用技术涵盖余热余压回收、热力系统改造和纸机汽罩热回收 3 个技术方向、9 项具体方案。该类技术聚焦于回收造纸生产过程中被浪费的热能资源，通过回收、增压、循环利用等手段减少新鲜蒸汽消耗。造纸行业热能利用率目前仅为 60%-70%，提升空间较大。该类技术投资回收期普遍适中，兼具良好的经济效益和减碳效益。以下从经济性角度逐类分析。

#### 1. 余热余压回收利用

余热余压回收是投资最小、见效最快的热能利用方式，主要包括冷凝水闭式回收和锅炉排烟余热回收两类方案。两类方案均依托现有系统加装回收设备，改造难度低、投资回收快。

冷凝水闭式回收的单条线投资约 100-300 万元，节能率 4%-8%，年节能 500-3000 吨标准煤，投资回收期仅 1-2 年。以福建青山纸业为例，该企业实施冷凝水闭式回收、纸机密闭气罩余热回收、蒸煮喷放余热回收等改造，搭配碱回收系统优化，年节能量约 5000 吨标准煤，综合节能率达 8%。该方案投资小、技术成熟、回收极快，企业投资意愿高。

锅炉排烟余热回收的单条线投资约 200-500 万元，节能率 3%-6%，年节能 1000-5000 吨标准煤，投资回收期 2-3 年。该方案利用锅炉尾部排烟余热加热给水或助燃空气，可提升锅炉热效率 3-5 个百分点。企业投资意愿中高。

#### （二）热力系统改造

热力系统改造以蒸汽压缩机(热力压缩机)为核心设备,回收生产过程中产生的低品位乏汽,经压缩增压后回用于生产,减少新鲜蒸汽消耗。该类方案节能效益显著、技术成熟度高,是近年造纸企业重点推广的节能方向。

低品位蒸汽回收与磁悬浮蒸汽压缩机的单条线投资约200-600万元,节能率15%-25%,年回收乏汽6-15万吨,投资回收期仅1-2年。以浙江仙鹤股份有限公司为例,该企业新增4台罗茨式热力压缩机,回收纸机烘干产生的低品位乏汽,年回收乏汽约12万吨,替代新鲜蒸汽比例达23%,年节约标准煤约8600吨,综合节能率21%,投资回收期约16个月。嵊州市恒丰纸业采用类似方案,年节约蒸汽2万吨,按150元/吨蒸汽计算,年产生经济效益300万元。该方案投资适中、回收极快,企业投资意愿高。

热力压缩机与锅炉联动节能改造的单条线投资约300-800万元,节能率12%-20%,年节约原煤0.5-1.5万吨,投资回收期1.5-2.5年。以山东太阳纸业为例,该企业新增2台离心式热力压缩机,与现有燃煤锅炉联动,回收锅炉排烟余热用于补水预热,锅炉热效率从88%提升至92%,年节约原煤约1.2万吨,综合节能率16%。该方案适合自备锅炉的造纸企业,企业投资意愿中高。

热力压缩机配套智能调控与管网优化的单条线投资约400-1000万元,节能率20%-30%,年节约蒸汽1-2万吨,投资回收期2-3年。以某年产50万吨包装纸企业为例,新增3台磁悬浮热力压缩机,配套智能变频调控系统与蒸汽管网优化改造,热力压缩机运行效率从85%提升至93%,年节约蒸

汽约 1.2 万吨，综合节能率 28%。该方案投资高于前两类，但系统集成度高、长期运行稳定性好，企业投资意愿中等。

### （三）纸机汽罩热回收

纸机汽罩热回收是造纸干燥段最成熟的节能改造方向，核心是将开放式或半密闭式汽罩改造为全密闭汽罩，配套气-气换热、气-水换热、蒸汽热泵及智能控制，实现余热梯级利用。该类方案节能效益显著，但投资规模和技术复杂度随集成度递增。

密闭汽罩与气-气热回收的单条线投资约 300-500 万元，吨纸汽耗下降 0.15-0.2 吨，综合节能率 15%-20%，投资回收期 2.0-2.5 年。该方案将原有开放式或半密闭式汽罩改造为全密闭汽罩，新增气-气换热器，利用汽罩排气预热新风，技术最成熟、90%纸厂适用。以四川圆周实业有限公司为例，2#纸机改造后吨纸汽耗从 2.5 吨降至 2.3 吨，年节约能源费用 67 万元，投资回收期不足 2 年，全程未中断生产。该方案投资适中、回收较快，企业投资意愿高。

在基础方案上增加气-水热回收与冷凝水余热利用，单条线投资约 450-650 万元，吨纸汽耗下降 0.2-0.25 吨，综合节能率 20%-28%，投资回收期 2.0-2.8 年。该方案增设气-水换热器回收排气余热加热清水或白水，配套回收烘缸冷凝水显热及闪蒸汽，可分期实施。以金凤凰纸业（孝感）为例，年产 70 万吨环保包装纸生产线采用此类改造，综合年节约能源费用超 500 万元，纸面合格率从 96%提升至 99.5%。该方案节能效益和品质提升效果显著，企业投资意愿高。

密闭汽罩集成蒸汽热泵循环的单条线投资约 700-1000

万元，吨纸汽耗下降 0.25-0.35 吨，综合节能率 25%-35%，投资回收期 2.2-3.0 年。该方案新增蒸汽热力压缩单元，回收二次蒸汽和汽罩余热形成闭式循环，适合年产 50 万吨级大型高速包装纸机。以江苏凡泰纸业有限公司为例，5600/700 高强瓦楞纸机年产 30 万吨，改造后吨纸蒸汽消耗量下降 200kg 以上，闪蒸汽全回收，汽罩基本不消耗新鲜蒸汽。某纸业 4200/500 高强瓦楞纸机采用同类方案，投资回收期仅半年。该方案节能效益极突出，但投资较大，企业投资意愿中高。

纸机汽罩全系统集成的单条线投资约 1000-1500 万元，吨纸汽耗下降 0.3-0.4 吨，综合节能率 30%-40%，投资回收期 2.5-3.5 年。该方案整合全密闭双循环供风汽罩、三级余热回收系统、蒸汽热力压缩单元及 PLC 智能控制系统，适合 4800mm 以上宽幅、年产 40-60 万吨的大型纸机。以台州森林纸业有限公司为例，6700/1100 型纸机年产 50 万吨包装纸，改造后综合节能率达 35% 以上，吨纸汽耗下降 0.35 吨，年节约蒸汽费用超 300 万元，产能提升 30%，次品率从 2.5% 降至 0.3% 以下。该方案是纸机汽罩热回收的顶级配置，节能效益最大但投资最高，适合新建纸机或大修时同步实施，企业投资意愿中等。

表 7.3-1 高效热能利用技术投资效益汇总

| 序号 | 技术方向         | 具体方案                           | 投资规模<br>(万元) | 投资回<br>收期    | 企业投<br>资意愿 | 典型案例  |
|----|--------------|--------------------------------|--------------|--------------|------------|---|
| 1  | 余热余压<br>回收利用 | 冷凝水闭式<br>回收                    | 100-300      | 1-2 年        | 高          | 福建青山纸<br>业：年节能约<br>5000 吨标准煤                      |
| 2  | 余热余压<br>回收利用 | 锅炉排烟余<br>热回收                   | 200-500      | 2-3 年        | 中高         | 行业经验值   |
| 3  | 热力系统<br>改造   | 低品位蒸汽<br>回收+磁悬浮<br>蒸汽压缩机       | 200-600      | 1-2 年        | 高          | 浙江仙鹤：年<br>回收乏汽约 12<br>万 t，节能率<br>21%，回收期<br>16 个月 |
| 4  | 热力系统<br>改造   | 热力压缩机<br>与锅炉联动                 | 300-800      | 1.5-2.5<br>年 | 中高         | 山东太阳纸<br>业：锅炉热效<br>率升至 92%，<br>年节约原煤<br>1.2 万 t   |
| 5  | 热力系统<br>改造   | 热力压缩机+<br>智能调控+管<br>网优化        | 400-1000     | 2-3 年        | 中          | 某包装纸企<br>业：综合节能<br>率 28%，年节<br>约标煤 1.1 万 t        |
| 6  | 纸机汽罩<br>热回收  | 密闭汽罩+气<br>气热回收                 | 300-500      | 2.0-2.5<br>年 | 高          | 四川圆周实<br>业：吨纸汽耗<br>降 0.2t，年节<br>约 67 万元           |
| 7  | 纸机汽罩<br>热回收  | 密闭汽罩+气<br>水热回收+冷<br>凝水余热利<br>用 | 450-650      | 2.0-2.8<br>年 | 高          | 金凤凰纸业：<br>年节约能源费<br>用超 500 万元                     |
| 8  | 纸机汽罩<br>热回收  | 密闭汽罩+蒸<br>汽热泵循环                | 700-1000     | 2.2-3.0<br>年 | 中高         | 江苏凡泰纸<br>业：吨纸汽耗<br>降 200kg 以上                     |
| 9  | 纸机汽罩<br>热回收  | 纸机汽罩全<br>系统集成                  | 1000-1500    | 2.5-3.5<br>年 | 中          | 台州森林纸<br>业：综合节能<br>率 35%以上                        |

注：

1. 投资规模为单条生产线或单台设备的参考投资区间，实际投资因纸机幅宽、车速、产能及现有设备状况不同会有所差异。
2. 投资回收期为税前静态回收期估算值，综合考虑了蒸汽和电力节约效益，未包含设备折旧、维护费用等因素。
3. 企业投资意愿定性判断标准同表 4.5.1-1。

4. 纸机汽罩方案的节能量以吨纸汽耗下降值表示，实际年节汽量需结合企业产能规模计算。多环节余热协同回收综合节能率可达 10%-15%。

#### （四）主要技术方案投资效益综合分析

##### 1. 三大类技术投资效益对比

三大类技术方案的投资规模、回收期和投资意愿呈现不同的分布特征，反映了各自技术成熟度和经济效益的差异。

从投资规模看，能源供给与综合利用类跨度最大（50-20000 万元），涵盖从磁悬浮辅机替代到可再生能源综合利用的多层次方案；主要生产工艺节能类投资相对集中（150-1600 万元），真空系统改造偏小、靴式压榨偏大；高效热能利用类投资分布均匀（100-1500 万元），从冷凝水回收到汽罩全系统集成依次递增。

从投资回收期看，主要生产工艺节能类回收最快（1-3.5 年），真空系统改造普遍在 1-2 年，靴式压榨在 1.8-3.5 年；高效热能利用类居中（1-3.5 年），余热回收和蒸汽压缩机方案普遍在 1-2 年，汽罩改造在 2-3.5 年；能源供给与综合利用类分化最大（1.5-6 年），小型辅机替代仅 1.5-2.5 年，大型光伏和综合能源项目可达 3-6 年。

从企业投资意愿看，投资意愿“高”的方案主要集中在两个区域：一是投资小、回收快的“短平快”项目（如真空泵替代、磁悬浮辅机、冷凝水回收、沼气掺烧），投资多在 500 万元以下、回收期 2 年以内；二是政策驱动和战略价值突出的项目（如分布式光伏、智能调控），虽回收期稍长但兼具碳资产收益和长期竞争力提升。

表 7.4-1 三大类技术方案投资效益综合对比

| 对比维度          | 能源供给与综合利用                    | 主要生产工艺节能                | 高效热能利用                      |
|---------------|------------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| 技术方案数量        | 13 项                         | 8 项                     | 10 项                        |
| 投资规模区间        | 50-20000 万元                  | 150-1600 万元             | 100-1500 万元                 |
| 投资回收期区间       | 1.5-6 年                      | 1-3.5 年                 | 1-3.5 年                     |
| 企业投资意愿“高”方案数  | 5 项（磁悬浮辅机、沼气掺烧、智能调控、光伏、沼气发电） | 5 项（真空系统改造 4 项+传统压榨替换型） | 4 项（冷凝水回收、低品位蒸汽回收、汽罩基础型两方案） |
| 企业投资意愿“中高”方案数 | 4 项                          | 2 项                     | 2 项                         |
| 企业投资意愿“中”方案数  | 4 项                          | 1 项                     | 4 项                         |
| 典型案例数量        | 9 个                          | 6 个                     | 6 个                         |

## 二、投资回收期与投资意愿关系矩阵

将 30 项技术方案的投资回收期和投资意愿进行交叉分析得到投资回收期与投资意愿关系矩阵表 4.5.4-2。从矩阵可以看出：

“短平快”项目（投资回收期 1-2 年）是企业的首选，主要集中在生产工艺节能和热能利用领域。这些技术的特点是技术成熟度高、改造周期短、经济效益立竿见影。建议所有造纸企业优先考虑此类改造，可在短期内实现明显的节能降本效果。

“中期稳健”项目（回收期 2-3 年）是行业的主流选择，分布最为广泛。这些技术投资规模适中，节能效益和投资回报兼顾，适合在完成短期项目积累经验和资金后逐步推进。

“中长期战略”项目（回收期 3 年以上）以能源供给与综合利用类为主，投资规模较大，但战略价值突出。建议大型龙头企业在资金充裕的前提下，结合碳市场建设节奏和企业长期发展规划统筹推进。

表 4.5.4-2 投资回收期与投资意愿关系矩阵

| 投资回收期       | 高投资意愿   | 中高投资意愿   | 中投资意愿                     |
|-------------|---|--|---------------------------|
| 1-2 年(短期)   | 真空系统改造 4 项、传统压榨辊替换、磁悬浮辅机替代、冷凝水闭式回收、低品位蒸汽回收、沼气回收<br>掺烧 | —  | —                         |
| 2-3 年(中期)   | 智能调控改造  | 循环流化床锅炉改造、单靴式压榨升级、锅炉排烟余热回收、RDF 替代燃料掺烧、热力压缩机与锅炉联动 | 燃气锅炉低氮改造、热力压缩机+智能调控       |
| 2-3.5 年(中期) | —   | 双靴串联压榨改造、密闭汽罩+蒸汽热泵循环                             | 靴式压榨全系统集成、纸机汽罩全系统集成       |
| 3 年以上(中长期)  | 分布式光伏利用   | 抽凝改背压、掺烧生物质、沼气回收利用(发电)                           | 机组通流改造、生物质能替代燃煤、可再生能源综合利用 |

### 三、分企业类型的投资策略建议

广东省造纸行业重点用能企业规模差异显著，从年产能不足 5 万吨的小微企业到 551 万吨的龙头企业，资金实力和技术能力相差悬殊。不同类型企业的技术选择策略应有所区别。

### （一）超大型企业（年产 100 万吨以上）

大型企业资金实力雄厚、技术力量强，建议采取“全面推进、系统优化”的策略。能源供给端，可实施可再生能源综合利用、生物质掺烧等大型项目，推动能源结构从以煤为主向多元清洁转型；生产工艺端，可同步推进真空系统全面升级和靴式压榨全系统集成改造，实现深度节能；热能利用端，可实施纸机汽罩全系统集成和热力压缩机配套智能调控，构建热能梯级利用体系。大型企业还应发挥行业引领作用，主动对标广东省团体能效标准，将能效水平提升至国际先进水平。

### （二）大型企业（年产 50-100 万吨）

这类企业产能规模较大、产品结构以包装纸为主，建议采取“重点突破、分期推进”的策略。优先实施真空系统改造和传统压榨辊替换靴式压榨，这两类技术回收期短（1-2.5 年）、节能效益显著，可快速见效；其次推进密闭汽罩热回收改造和低品位蒸汽回收，进一步降低干燥部蒸汽消耗；有条件的企业可结合自备电厂改造，实施沼气掺烧和智能化调控。金田纸业 2025 年产能利用率高达 164%，设备长期满负荷运行，对真空系统和压榨系统的能效提升需求尤为迫切。

### （三）中小型企业（年产 20 万吨以下，广泛分布于粤东、粤北、粤西）

中小企业资金有限、技术能力较弱，但能效提升空间最大。建议采取“由易到难、先小后大”的渐进策略。优先从磁悬浮辅机替代、冷凝水闭式回收、径流式风机替代水环真空泵等投资小（50-300 万元）、回收快（1-2 年）的项目入手，

积累改造经验和资金。在取得成效的基础上，再逐步推进靴式压榨替换和汽罩热回收改造。

需要特别指出的是，粤东、粤北、粤西部分中小企业产能利用率偏低（不足 50%），在推进节能改造的同时，也应注重提升市场竞争力、提高产能利用率。产能利用率的提升本身就能摊薄单位产品能耗，实现“增产降耗”的双重效果。

#### 四、技术方案选择的综合建议

综合以上分析，对广东省造纸企业选择节能降碳技术方案提出以下建议：

第一，优先推进“短平快”项目。真空系统改造（4 项方案）、冷凝水闭式回收、低品位蒸汽回收、磁悬浮辅机替代、沼气回收掺烧等投资回收期在 2 年以内的方案，应作为行业普遍推广的基础性改造项目。这类项目不仅经济效益确定，而且改造周期短、对生产影响小，适合各类企业优先实施。

第二，分期实施“中期稳健”项目。靴式压榨改造、汽罩热回收改造、锅炉系统改造等投资回收期 2-3 年的方案，应在短期项目取得成效后分期推进。建议结合设备大修和产线升级同步实施，以降低改造成本和生产影响。

第三，统筹布局“中长期战略”项目。生物质替代、可再生能源综合利用等投资回收期 3 年以上的方案，应结合国家碳排放权交易市场建设节奏和企业长期发展规划统筹推进。大型龙头企业应率先探索，形成示范效应后再向行业推广。

第四，积极争取政策资金支持。目前国家和广东省已出台大规模设备更新、超长期特别国债、绿色金融等多项激励政策。本报告摸排工作已推动首批 6 家企业申报国债项目，

总投资 2.59 亿元，申请国债资金 5180 万元。建议全省造纸企业积极对接相关政策，利用政策红利降低改造资金压力。

第五，建立“改造—评估—优化”的闭环机制。节能改造不是一次性工程，而应纳入企业常态化管理。建议企业在完成每项改造后，持续跟踪监测实际节能效果，与设计方案进行对比评估，及时优化运行参数，确保改造效益充分发挥。同时将改造经验在企业内部复制推广，实现“改造一项、带动一片”的辐射效应。

## 第八章 实施本指南的建议

本指南紧扣国家大规模设备更新战略部署与广东省产业升级要求，集成制浆造纸高效节能、智能能源管控、热泵干燥、余热余压回收等核心技术方案，为行业设备焕新与能效提升提供精准路径。希望以本指南为纽带，强化技术开发与产业应用对接，推动节能技术规模化、标准化推广，助力行业破解能效提升瓶颈、降低单位能耗与碳排放。

建议全省造纸企业以此为指引，结合自身工艺与装备现状，加快淘汰落后产能，优先实施高效电机改造、中水回用、生物质能源替代等重点工程。同时，积极对接国家设备更新政策、省市技术改造财政补贴、金融信贷等政策支持，切实落实节能主体责任，通过系统性技术改造实现降本增效、绿色转型。期待本指南有效推动广东造纸行业能效水平整体跃升，助力全省完成节能降碳目标，推动行业整体能效迈上新台阶，支撑广东省高质量发展并实现“双碳”目标。