

点糠成金——稻壳全产业链协同增值的工程管理 创新实践

成文时间：2025 年 3 月 23 日

投稿赛道：“产业创新”

1 案例综述

1.1 案例背景

江西省作为全国主要的水稻产区，每年产生稻壳超过 300 万吨。然而，传统的稻壳处理方式长期存在效率低、污染重的问题。露天焚烧是最常见的处理方式之一，但每吨稻壳燃烧会产生约 1.8 吨二氧化碳当量的温室气体，不仅破坏生态环境，也违反绿色发展理念。堆肥处理虽然在一定程度上实现了资源回归土壤，但由于管理粗放和技术落后，导致转化效率低、农艺效果差。此外，还有部分企业以稻壳作燃料直接供热，但该方式能源利用率低，设备结焦严重，运营维护成本高。

随着国家“双碳”战略推进，农业废弃物资源化利用被提升到战略高度。2019 年，国家发改委印发《秸秆综合利用实施方案（2019-2025 年）》，提出到 2025 年秸秆综合利用率达到 86% 以上，明确稻壳等农业废弃物应向高附加值方向转化。江西金糠生物科技有限公司积极响应政策号召，创新构建了以稻壳为核心原料的“三级利用”多联产技术体系，实现了从原料预处理、低温热解到高值材料精深加工的全流程产业链，稻壳资源利用率达 98.5%。

尽管金糠公司在技术研发和装备制造方面取得突破，但在项目实施过程中暴露出一系列工程管理问题，如工艺环节协同不足、原料收储系统不健全、产品市场定位模糊、运行能耗偏高等。研究小组以工程管理方法为指导，系统分析金糠公司稻壳多联产项目在工程建设与运营管理中的核心问题，并通过流程再造、系统集成、风险控制与组织协调等手段进行系统性优化。

1.2 案例简介

金糠公司围绕稻壳“吃干榨净”的理念，构建了“预处理—热解—深加工”三级梯度利用技术体系。在预处理环节，通过风选除尘、机械筛分和磁选去除杂质，实现稻壳颗粒标准化。在热解阶段，采用公司自主研发的连续式低温热解炉，将稻壳在 280-350℃ 条件下热解，分离出生物炭、粗制醋液和可燃气体。在深加工环节，分别提取高纯度二氧化硅用于轮胎、涂料等工业材料生产，利用生物炭开

发土壤改良材料和新能源电池电极材料。

项目建成后年处理稻壳 12 万吨，年产 5 万吨生物质颗粒、2000 吨纳米二氧化硅、8000 万立方米生物燃气，年减排二氧化碳 6.8 万吨。公司采用 EPC 工程总承包模式，通过模块化设计缩短建设周期，并建立了“农户—合作社—企业”三级收储网络。

通过研究团队的工程管理优化，金糠公司在多个方面取得实质性改善。包括：生产系统集成度提升、设备布置密度提高 27%、堵塞率由 15 次/月下降至 0.3 次/月、农户参与率由 60%上升至 89%、单位能耗下降 19%。

1.3 主要问题

1) 技术瓶颈：传统热解炉效率低，残炭率波动大

传统热解设备存在能效低、热场不均的问题，热解反应常因炉温控制不稳导致反应不充分，致使残炭率在 25%-40%之间大幅波动。这不仅影响了炭产品的质量和一致性，也降低了整体稻壳转化效率，形成资源浪费。此外，部分热解炉在运行中还伴随焦油堵塞、热解气泄漏等问题，制约了工艺稳定性和规模化推广的可行性。

2) 工程衔接：物料输送系统堵塞频繁

在原有工艺流程中，稻壳等轻质疏松物料在输送过程易发生架桥、堆积现象，造成管道堵塞和系统停机。数据显示，物料输送系统每月因堵塞而中断运行高达 15 次，严重影响了生产节奏和设备连续性运行。特别是在风送或螺旋输送环节，缺乏适应性结构设计成为关键瓶颈，急需工程端的装备创新来破解这一难题。

3) 经济性障碍：高端产品制造成本过高

尽管项目产出的纳米级二氧化硅、炭材料等具有较高市场潜力，但在实际运行中，其制造成本普遍高出市场平均价约 30%。主要原因在于原材料提纯环节能耗大、工艺复杂，且相关核心设备尚未完全国产化，需依赖进口设备与技术支持，造成初期投资大、回报周期长。这对项目的盈利能力和持续运营构成不小挑战。

4) 农户参与：稻壳收集运输成本过高

由于稻壳密度低、分布广，收集半径一旦超过 50 公里，运输成本便会高于物料价值，形成“成本倒挂”。这导致部分偏远区域农户失去参与积极性，影响了

稻壳原料的稳定供应。同时，农户缺乏标准化存储与初筛设备，原料杂质高也给后续工艺带来处理负担。因此，亟需建立合理高效的收储体系，并借助合作社等组织优化物流效率，提升农户参与度。

2 案例研究

2.1 研究思路

2.1.1 研究内容

以金糠公司稻壳多联产项目为对象，围绕“技术可行、工程可控、经济合理、农户可参与”四大目标展开。研究内容主要聚焦以下四个方面：

- 1) 生产过程中的关键工程风险识别与评估：结合热解工艺、材料提取和多联产集成系统，分析设备、流程、温控、原料波动等引发的技术性与操作性风险。
- 2) 物流与供应链组织优化：分析稻壳收储环节中的成本结构、行为激励问题，基于风险行为理论与供应链网络模型，设计更具可行性的收储模式。
- 3) 流程耦合与系统集成再设计：利用系统工程与价值工程思想，分析热解单元与精制系统之间的物料流错配问题，构建协同优化的再设计方案。
- 4) 商业结构与产品价值链延伸：分析当前单一盈利模式的风险，基于风险经济学原理设计多维价值链模型，实现不同产品线协同发展。

2.1.2 技术路线

研究小组基于工程管理理论框架，综合使用实证调研与定量分析相结合的方法，设计如下技术路线：

1) 问题识别与系统建模

采用流程图法和因果分析法梳理全流程；
构建热解系统运行逻辑模型与产能平衡模型。

2) 风险识别与等级评估

运用风险矩阵与模糊层次分析（FAHP）评估热控波动、堵塞频次、收储失败等多重风险等级；

引入敏感性分析法识别关键变量。

3) 流程再造与资源优化

应用价值工程（VE）方法对预处理、热解、深加工各环节进行功能-成本分析；

利用 BIM+仿真平台重构厂区布局与工艺路径。

4) 供应链行为分析与激励模型设计

引入风险行为理论与博弈模型分析农户参与意愿与原料供应风险；

设计“农户-合作社-企业”三级激励机制，优化供给网络。

5) 综合绩效评估系统建立

设计涵盖技术指标（热解效率、能耗）、经济指标（毛利率、单位成本）、社会指标（农户参与率、减排量）的综合绩效模型；

构建 PDCA 闭环机制，确保持续优化。

2.2 研究过程及方法

从“识别问题—理论建模—实践调研—方案设计—绩效评估”五个阶段展开，综合运用定性分析与定量建模相结合的方法。具体如下：

第一阶段：问题识别与全流程建模

通过实地调研金糠公司生产基地，收集设备运行数据、操作流程图和运维记录，结合 BIM 模型重建整条生产链的逻辑流程。对“预处理—热解—深加工”三个阶段进行功能分解，绘制 SIPOC 模型与流程价值流图（VSM），初步识别出热控不稳定、物料堵塞、产线衔接失衡等问题。

第二阶段：风险评估与行为建模

运用风险矩阵法对工程、技术、原料收集和运营风险进行评级。针对农户参与率低的问题，引入风险行为理论构建“参与意愿-收益预期-行动成本”博弈模型，模拟农户是否参与收储的行为路径，并提出提升参与率的最小激励边界。

第三阶段：系统再设计与流程优化

结合 TRIZ 工程矛盾分析与价值工程方法，对现有物料处理设备结构与产线

布置方案进行优化，设计“双螺旋-低阻输送”改良型通道，降低堵塞率；并对热解工艺参数进行 DOE 实验设计法模拟，寻找最佳运行区间，稳定出炭率与热解效率。

第四阶段：供应链重构与激励机制设计

研究金糠公司当前稻壳原料收集体系，发现半径过大导致的运输成本倒挂问题。提出设立“共建型村级稻壳收储点+动态补贴+智能配送系统”的新型供应网络，并借助农户信用积分、分级议价策略激励原料供给稳定。

第五阶段：绩效评估与反馈循环

构建基于关键绩效指标（KPI）的三维评价体系，涵盖技术绩效（热解效率、纯度）、经济绩效（单位收益、成本占比）、社会绩效（减排量、农户参与率等），并通过 PDCA 循环机制建立常态化调整机制，确保技术方案能够长期落地与持续改进。

2.3 主要成果

1) 技术优化成果

通过热解参数优化与设备结构改造，热解效率由 58%提升至 82%，残炭率稳定控制在 12%以内；

开发多级旋风除尘装置，炭粉回收率由 92%提升至 99.7%；

热控系统智能化改造后，单吨产品能耗降低 19%。

2) 工程管理优化成果

基于现有建筑模型分析改造可行性，通过 BIM 逆向建模，建立数字底座后实施优化，降低试错成本、提升空间效率、增强柔性生产能力。

实施“流程同步+节点联动”机制，解决产线间衔接失衡问题，堵塞率由 15 次/月下降至 0.3 次/月；

引入价值工程分析方法，识别并剔除 3 项高成本低价值工序，节约建设成本约 230 万元。

3) 农户供应链优化成果

设立 17 个村级收储点，实现 50 公里半径内原料覆盖率 91%，运输成本降低约 20%；

农户原料参与率由不到 60%提升至 89%，年均增收 2300 万元；

设计差异化收购机制与共建激励模式，提升农户忠诚度和合作意愿。

4) 综合经济与环境绩效

项目整体毛利率由 28%提升至 41.7%，高值产品（白炭黑、炭基肥）占比提升；

年度碳减排量达 6.8 万吨，入选地方“双碳”示范项目；

为区域循环农业、绿色制造提供可复制范式。

3 案例讨论与启示

1) 农业废弃物工程管理体系构建需强化系统集成理念。

稻壳多联产涉及原料收储、能源转换、材料深加工等多个复杂子系统。传统“单点突破”策略难以保障系统整体效能的最优发挥。本项目借助系统工程与流程优化方法，打通技术链与管理链之间的衔接壁垒，提升了整体协同效率。这表明在农业固废资源化领域，必须构建以协同为核心的管理集成机制。

2) 供应链韧性提升离不开行为机制设计。

农业原料端的不稳定性一直是资源化工厂的痛点。本研究通过引入风险行为理论与博弈模型，识别影响农户参与的心理变量，并设计差异化激励机制，显著提高了原料供应的及时性与可靠性。可见在类似项目中，农户不仅是物料提供者，更是系统的一环，应从激励、培训、共建等方面系统培育其合作粘性。

3) 多维绩效评估机制助力绿色项目提质增效。

本项目在研究中构建了覆盖“技术—经济—社会”三维指标的绩效评估体系，结合 PDCA 闭环管理模式，实现了从实施到调整的动态监测。该机制保障了技术方案落地的有效性，也为后续政策支持和行业推广提供了可量化的评估依据。