

叶丝干燥工艺中提质与降耗的协同策略

杨 莲 秦绍勇

红塔烟草(集团)有限责任公司昭通卷烟厂 云南 昭通 657000

【摘要】：在叶丝干燥工序中，提升感官与物理质量往往会增加能源、原料消耗，与“降耗”之间存在固有矛盾，采用传统工艺更难以兼顾二者。在现代技术的支持下，未尝不可实现“提质”与“降耗”协同。本文探索两者协同的可行路径，首先解析“质”与“耗”内在的耦合与矛盾关系，论证协同的必要性。之后识别并尝试优化干燥温度、湿度、时间等关键工艺参数，建立兼顾“提质”与“降耗”双目标的参数协同域，再从实现角度出发，阐述实现协同的具体方法。研究认为，通过优化系统参数，集成智能化技术，可有效破解矛盾，实现“提质”与“降耗”协同。

【关键词】：叶丝干燥；提质降耗；协同优化；参数优化；数据驱动

DOI:10.12417/2705-0998.25.24.044

卷烟制丝生产中叶丝干燥工艺效果对产品感官品质、物理特性及生产成本均有直接影响。在生产中，追求更佳香气、色泽和填充值往往增加投入；单纯出于降低消耗考虑去调整工艺又可能影响产品质量，也可能增加原料损耗。在当前大环境下，探索“提质”与“降耗”协同策略既有一定条件，也是驱动技术升级的迫切需求。

1 干燥工艺中提质与降耗的内在关联与矛盾分析

1.1 工艺目标解析

在叶丝干燥工艺中，“提质”是指稳定乃至提升最终产品的内在品质。对于烟草产品而言，“提质”即提高感官品质与物理、化学品质。感官品质包括香气特征呈现充分度、协调性、杂气与刺激性物质的多少以及余味纯净度；物理与化学品质包括叶丝的填充值、弹性、耐加工性、保留与转化的关键致香成分多寡等。“降耗”主要指降低生产过程中的各类消耗，主要指能源消耗与原料损耗。在烟草生产中，能耗以干燥环节的热能与电能消耗为主；原料损耗与过度干燥、造碎或工艺不当均有关系。“提质”“降耗”均是对工艺进行优化，可用于衡量干燥工序技术水平高低与经济性。

1.2 主要矛盾点

在传统干燥工艺中，“提质”与“降耗”此消彼长，难以兼顾，二者呈矛盾关系。从“提质”角度着手，需确保叶丝内外水分均匀、充分去除杂气、形成更多的香气物质，为达到目标，最直接的办法就是延长干燥时间、增加干燥温度或加剧脱水过程，但无疑会增加单位产品能耗。为避免出现干燥不足的情形，工艺上会设定安全余量，实际生产中可能会使部分物料过度干燥，浪费能源，也可能降低填充值、增加造碎，损耗更多原料。反之，仅考虑“降耗”的情况下，最直接的办法是缩短时间、降低温度，但是会增加干燥不均、残留杂气、香气少等品质缺陷的可能性，水分控制不当也可能对后续工序造成负面影响，进一步增加质量风险，增加整体消耗。

以程向红等人关于干燥强度对香料烟品质影响的一项研

究为例，研究发现，干燥强度对香料烟酸性致香成分含量、中性致香成分含量、感官品质和物理指标均有较大影响。随着干燥强度的提高，挥发性有机酸总量、非挥发性有机酸总量均呈现下降趋势，挥发性有机酸总量下降幅度较大，超过50%；非挥发性有机酸总量下降幅度较小，小于20%。随着干燥强度的提高，中性致香成分中美拉德反应产物总量呈增加趋势，最高增幅达56%；新植二烯含量呈现下降趋势，最终降幅达40%；中性致香成分总量先增加后降低，以中等干燥强度时含量最高。干燥强度越大，香料烟香气特征越弱，中等、较低干燥强度有利于提高香气质、香气量、杂气、刺激和余味，较高强度有利于提升烟气的浓度。干燥强度的提高有利于提高叶丝填充能力，但会增加叶丝的造碎程度[1]。以上研究数据表明，单一追求“提质”可能增加消耗，单纯“降耗”则也可能对核心品质造成损害，“质”与“耗”之间存在复杂的权衡关系。

2 面向协同的关键工艺参数优化与控制策略

2.1 核心参数识别

在各项参数中，干燥温度直接决定水分蒸发速率，通常范围在120-180℃，决定内部热湿传递驱动力，对热能利用率、能耗以及香气物质变化、色泽固定、热损伤程度造成直接影响。干燥介质湿度或排潮速率会影响干燥推动力，影响叶丝表面蒸发与内部扩散之间的平衡，影响干燥均匀性、能耗及叶丝结构。干燥时间通常在3-8min，越长叶丝受热处理总时长越长，影响能耗，也影响化学与物理变化的完全程度[2]。工艺气流速度与分布均匀性影响对流传热系数，也会影响介质与叶丝的接触效率，关系到热能利用效率和叶丝干燥的均匀性。以上各参数之间相互关联。

2.2 提质导向的参数优化

以提质为优先目标，优化参数时必须创造有利于形成优良品质、提升产品品质稳定性的热湿环境。在以提质为导向的策略中，设定干燥温度时可采用“前高后稳”或“梯度控制”模式，通过较高的初始温度快速去除表面水分，钝化酶活性，固

定色泽,但也需要控制持续高温时间,防止表面硬化使内部水分难以排出;主要干燥阶段采用中等温度保证干燥效率,使香气物质充分发挥作用。对于介质湿度,可适当提高干燥前段湿度,以此降低排潮速率,减缓表面蒸发,使更多热量传导到内部,实现“里外同干”,促进叶丝形成舒展、卷曲形态。干燥时间长短需考虑目标水分,在满足目标水分后即止,否则会损失香气、加深色泽,增加脆性[3]。优化气流时,需确保气流均匀穿透叶料层,不能出现局部过干或气流短路现象,风速波动宜控制在 ± 0.2 m/s 以内。

2.3 降耗导向的参数优化

首先,降低干燥介质的初始温度,权衡初始温度与干燥效率,优化热风炉效率、精确控制供热。其次,设计应用高效的气流循环系统,充分利用排出废气中的部分余热(排气温度通常仍在 $80-110^{\circ}\text{C}$),与湿度可控的介质混合,再重新引入干燥区,通过精确调控循环风与补新风的比例及状态来降低新鲜热介质的消耗量,预计可节能 $10\%-20\%$ 。第三,应用在线水分仪精准控制干燥终点水分,精度可达 $\pm 0.2\%$,可消除无效能耗与原料损耗。第四,在保证传热效果的前提下优化工艺气流速度与系统阻力,控制风速,可降低风机能耗 $15\%-25\%$ 。

2.4 建立“提质”与“降耗”协同域

“提质”与“降耗”看似对立,但可以纳入一个统一的框架,兼顾二者进行融合、寻优,找到温度、湿度、时间、风量等工艺参数的交集空间,在该空间内操作,在满足产品关键质量指标预设标准的同时尽量降低单位产品的综合能耗与原料损耗。首先,可采用响应曲面法研究各关键参数及其交互作用对“质”和“耗”的影响,建立量化影响模型。例如,模型可能显示参数组合为温度 $135-150^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $15\%-25\%$ 、时间 $4.5-6\text{min}$ 、风速 $1.6-2.0$ m/s 的范围内叶丝填充值 ≥ 4.5 cm^3/g 、感官评分 ≥ 85 分,同时单位能耗低于某一阈值。其次,在模型基础上,以质量指标为约束条件,以综合成本最小化为目标函数,利用满意度函数法、遗传算法等多目标优化算法求解,以此得到有价值的工艺参数组合方案[4]。最后,实际生产中结合应用该参数域与先进过程控制系统,基于来料波动由控制系统自动在最优域内小幅动态调整参数,与来料波动相适应,在稳定生产的同时实现长期质耗协同。

3 实现协同的关键技术手段

3.1 精准控制技术

实现“提质”与“降耗”协同,需要精准控制技术的支持,需要借此将“协同域”内理论上的最优工艺参数转化为生产线生产参数,确保生产线在新参数下稳定、可靠运行,可基于来料波动进行自适应调节参数。为实现精准控制,需要采用大量高精度的传感器,建立在线传感网络,在入口与出口处需应用叶丝水分近红外快速检测技术,该技术检测频率可达 1 次/秒,

精度 $\pm 0.1\%-0.2\%$,实时监控干燥设备各工艺段介质的温度(精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$)与湿度(精度 $\pm 2\%\text{RH}$),测量关键点工艺气流流速(精度 ± 0.1 m/s)与压力,在线评估最终产品填充值。实时收集以上数据,汇集至先进过程控制系统(APC)中,基于多变量预测模型,APC系统执行前馈-反馈复合控制。在实际应用中,如果系统检测到来料的水分批次性偏高,例如从标准 12.5% 升至 13.5% ,则可根据模型预测提前、小幅、协同地优化参数,例如提高干燥温度 $3-5^{\circ}\text{C}$,增加排潮开度 5% ,降低输送速度 2% 等,确保出口水分稳定在 $12.5\% \pm 0.3\%$,减少质量波动与能耗峰谷幅度,稳定工艺过程,兼顾“提质”与“降耗”。

3.2 热能高效利用技术

热能高效利用技术核心思想是“开源节流”,即尽量减少对新鲜热能的需求,最大化利用已输入热能。在实际生产中,一是可以采用废气余热回收技术提高能源利用率,通过应用热管式、板式高效换热器回收高温高湿的干燥尾气中的显热和潜热,将这部分热量用于预热补入的新风或工艺用水,此举可以降低系统基础热负荷,实现节能。二是精细化调控循环风系统,应用自动化的阀门与湿度传感器动态调节干燥过程各阶段循环风与排潮风,优化二者比例。高湿阶段以介质自身的湿热空气为传热传质载体,适当提高循环风比例,维持干燥推动力,减少直接排气,以此降低热能损失;干燥后期适当加大排潮,保证除湿效率。通过动态调控满足品质所需湿度,同时提升热能利用率,实现工艺参数最优化。三是精准匹配热量需求,梯级利用供热系统。干燥各区的实际热需求存在差异,实际生产中,结合实际需求精确控制供热强度可以减少能耗 $5\%-8\%$ 。集成上述技术,可改变干燥系统“高能耗、高排放”的开放式运行状态,使热能系统进入“低输入、高循环、智能调控”的生产模式,一方面满足工艺所需热条件,另一方面大幅降低单位产品能耗。实现“提质”“降耗”。

3.3 质量保障性技术

应用质量保障性技术的重点是解决干燥过程中的不均匀性问题,通过设计设备、生产过程改善物理条件,提高生产产品品质均一性和稳定性,实现“提质”目标。首先,设计改进干燥设备的进风道,采用多孔均匀分配板,开孔率 $40\%-60\%$,优化导流片角度与布局,使热风均匀、柔和地穿透整个叶料层,避免局部因高速气流“过干”,因低速气流“湿心”,使批次内水分标准差控制在 0.3% 以内,物理结构趋于一致,创造整体降低平均干燥强度的有利条件。其次,料层堆积或稀薄会引发受热不均,对此,需改进进料振槽、布料器,提高叶丝进入干燥区时厚度、流量的均匀性,厚度波动控制在 $\pm 10\text{mm}$ 以内[5]。在干燥设备内部采用柔性抄板,适当降低物料跌落高度,优化筒体转速,通过以上方法减轻机械力对叶丝完整性、填充值的影响,减少已干燥叶丝加工造碎率 $0.5\%-1.0\%$ 。

3.4 数据驱动决策

构建全流程数据自动采集系统，实时监控出口水分标准差、填充值趋势与瞬时蒸汽耗量、累计电耗等关键指标，发现异常波动并设置溯源报警，快速判断异常波动原因，明确源于设备故障、参数漂移还是来料异常。基于历史生产积累的海量数据，利用工艺模型与机器学习算法，基于来料特性、环境参数、控制设定值与最终质量、消耗结果之间的关系建立高阶非线性关系模型。在实际生产前，根据特定批次叶丝的初始状态，由系统自动预测各种参数组合下的质耗结果，从中选出综合成本最低的参数组合。在生产中，模型可结合实际生产参数情况滚动优化，微调参数，使生产始终保持逼近最优参数的状态。

参考文献：

- [1] 程向红,刘强,王根发,等.不同干燥强度对香料烟叶丝质量的影响[J].轻工学报,2022,37(02):59-64.
- [2] 赵美丽,王乐,吴键,等.叶丝气流干燥过程中水分和丙三醇迁移特性[J].烟草科技,2022,55(11):89-96.
- [3] 邵宁,翟鲁文,杨佳玫,等.不同烘丝方式对卷烟质量的影响研究进展[J].现代农业研究,2022,28(06):107-110.
- [4] 曹娟.叶丝回潮滚筒出口含水率稳定性研究[J].中国科技投资,2021,(33):134-137.
- [5] 唐军,何邦华,孔维玲,等.叶丝滚筒干燥过程复杂网络关系研究与应用[J].烟草科技,2020,53(10):88-95.

在系统运行中，保持对生产参数的监控状态，对比生产结果与预测值之间的差异，吸收操作人员的经验，自动修正模型参数，不断提高系统适应设备性能衰减、季节变化等慢时变因素的能力，实现协同域动态进化，不断提高质耗协同水平。

4 结语

综上所述，叶丝干燥工艺中“提质”与“降耗”协同发展具有可行性，通过精准控制各类参数、优化新鲜热能需求，最大化利用已输入热能，数据驱动决策，可以为实现协同目标提供有力的技术支持。破解“质耗矛盾”的关键是突破传统思维局限，从系统整体出发，推动工艺控制向模型化、智能化转变。