

循环喷雾反应器生产软泡聚醚多元醇的工艺进展与工程优化

郜 胜

中国中轻国际工程有限公司, 北京

收稿日期: 2026年9月21日; 录用日期: 2026年10月14日; 发布日期: 2026年10月22日

摘 要

软质聚氨酯泡沫的核心原料为软泡聚醚多元醇, 传统间歇搅拌反应釜存在气液两相传质传热效果差、不同批次产品指标波动明显、环保排放压力大等短板, 难以匹配当下高端制品的生产标准。循环喷雾式反应装置依托高压雾化连续闭环生产模式, 搭配低添加量双金属氰化物(DMC)催化体系, 能够大幅强化气液接触效率, 稳定成品各项性能指标。本文立足于工业化落地应用视角, 对比连续喷雾工艺与传统间歇釜的生产差异, 探究各类关键操作条件对产品指标、发泡复配使用效果带来的影响, 梳理装置长期稳定运行过程中出现的雾化构件损耗、高粘度物料传质效率下滑、微量异味组分难以脱除、多工艺参数协同调节存在滞后性等工程难题, 结合现场实际技改案例提出分段梯度温控、薄膜脱挥耦合活性炭深度精制、多参数智能联动自控等优化手段, 同时对该工艺后续产业化发展方向进行展望。全文侧重于工业化实际生产操作, 可为聚醚多元醇规模化生产线设计、现有产线提质降耗改造提供工程层面参考依据。

关键词

循环喷雾反应器, 软泡聚醚多元醇, 气液传质, 工程优化, DMC催化剂

Process Advances and Engineering Optimization of Flexible Foam Polyether Polyol Production Using Circulating Spray Reactors

Sheng Gao

China Light Industry International Engineering Co., Ltd., Beijing

Received: September 21, 2026; accepted: October 14, 2026; published: October 22, 2026

Abstract

Flexible foam polyether polyol acts as the core raw material for flexible polyurethane foams. Conventional batch stirred reactors suffer from insufficient gas-liquid heat and mass transfer, dramatic performance fluctuations between product batches and heavy environmental pollutant emissions, which fail to satisfy the manufacturing standards for high-end finished products. The circulating spray reactor adopts a continuous closed-loop production route supported by high-pressure atomization, combined with a low-dosage DMC double metal cyanide catalytic system. This equipment can greatly boost gas-liquid contact efficiency and stabilize all performance indicators of finished products. From the perspective of industrial implementation, this paper compares the production gaps between the continuous spray process and traditional batch reactors, analyzes how various key operating conditions affect product indicators and the matching performance in foaming compounding, and sorts out four major engineering challenges emerging during long-term stable operation of the device, including abrasion of atomization components, reduced mass transfer efficiency of high-viscosity materials, difficult removal of trace odor components, and delayed coordinated adjustment of multiple process parameters. Combined with practical on-site technical transformation cases, multiple optimization approaches are proposed, such as segmented gradient temperature control, deep refining integrating thin-film devolatilization and activated carbon adsorption, as well as intelligent linkage automatic control of multi-parameters. Meanwhile, the industrialization development trend of this process in the future is prospected. Focusing on practical industrial production operations, this paper can provide engineering references for the design of large-scale polyether polyol production lines and quality-improving & consumption-reducing renovations of existing production facilities.

Keywords

Circulating Spray Reactor, Flexible Foam Polyether Polyol, Gas-Liquid Heat and Mass Transfer, Engineering Optimization, DMC Catalyst

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

聚氨酯软泡应用场景覆盖范围广，市场整体需求量常年保持高位。软泡聚醚多元醇以丙二醇、甘油作为起始原料，通过环氧丙烷(PO)、环氧乙烷(EO)开环共聚反应制备而成，该产品自身理化参数，以及与有机硅稳泡表面活性剂的复配相容能力，直接决定聚氨酯泡沫成品综合品质。

伴随新能源汽车内饰、母婴家居用品、食品接触类包装等高端下游行业快速扩张，市场对聚醚产品提出全新要求：低气味、分子量分布区间窄、不饱和键含量低。传统间歇釜采用氢氧化钾催化工艺，设备内部存在搅拌盲区，反应体系局部温度偏高，不同批次成品性能差距显著，后处理脱盐工序流程繁琐，三废产出量大，无法达到高端原料生产门槛[1]。

雾化循环连续聚合工艺是目前国内聚醚行业主流先进生产路线。循环喷雾反应设备取消内置搅拌结构，依靠高压雾化形成微米级细小液滴，提升气液接触面积，适配微量 DMC 催化体系，现阶段国内多条工业化生产线已实现稳定投产[2]。本文结合循环喷雾装置现场实操案例，系统梳理设备模块化结构、整套生产控制流程、长期运行痛点与配套优化方案，为新建规模化聚醚多元醇生产装置、老旧产线提质改造提供工程实操参考。

试验基础与检测表征

本文工艺数据来源于国内 2 万 t/a 循环喷雾聚醚工业化装置，配套同厂区 1 万 t/a 传统间歇釜生产线作为对照基准，装置累计连续稳定运行 24 个月，试验覆盖通用软泡聚醚、高回弹聚醚两大牌号。

采用标准化检测表征手段：

分子量分布指数(PDI)：GPC 凝胶渗透色谱，四氢呋喃流动相；

羟值、不饱和度：国标酸碱滴定法；

微量异味挥发性组分：GC-MS 气相色谱 - 质谱联用定量检测醛、低碳醇含量；

工况参数：在线压力、温度、循环流量、氧含量实时采集系统；

三废、能耗：厂区 DCS 系统月度计量台账统计。

现有国内外文献大多聚焦 DMC 催化动力学、小/中试喷雾反应器机理模拟[3]，鲜有万吨级量产装置长期运行量化数据与成套后处理除味技改实效的相关研究。本文依托工业化实测数据展开分析，弥补了规模化喷雾聚醚装置工程量化优化领域的研究成果。

2. 循环喷雾反应器成套装备与工业化生产流程

2.1. 反应器成套装备工程结构与运行机理

循环喷雾反应器整套工业化装置由五大模块化系统集成，全部为密闭承压设计，适配 PO/EO 易燃易爆气相单体连续聚合工况，无机械搅拌内构件是核心工程创新点：

1) 高压雾化输送单元：包含高压外循环输送泵、耐磨抗冲刷雾化喷嘴、前置精密过滤装置。预混后的起始剂 - 催化剂混合液经加压处理后雾化，形成微米级分散液滴，显著扩大气液接触面积；前端过滤器可拦截物料中固体杂质，减少喷嘴堵塞、磨损概率，是降低现场运维成本的核心配套部件[2]。

2) 闭环物料循环单元：由反应釜、循环输送管路、变频输送泵组成，实现物料持续喷淋循环反应，未完全参与聚合的单体随液相再次进入反应体系，提升 PO、EO 原料整体利用率[2]。

3) 分段独立换热温控单元：反应器夹套换热搭配循环管路外置换热器协同工作，可分阶段独立调控温度，解决单一恒温模式难以适配聚合过程物料粘度动态变化的工程难题[4]。

4) 密闭承压反应器：全程通入高纯氮气隔绝空气，避免氧气、水分造成 DMC 催化剂失活、物料氧化产生异味；配套在线压力、氧含量实时监测仪表，保障体系惰性环境稳定。

5) 气相单体分离回收系统：未反应 PO、EO 气相冷凝回收，重新通入反应器，降低原料损耗，减少无组织排放。

设备整体运行逻辑：预混液相经高压加压雾化后自上而下喷淋，气相 PO、EO 持续通入反应器腔体内部，气液两相在微小液滴状态下完成开环共聚；底部汇集后的物料借助循环泵重新送入顶部雾化单元持续参与反应；换热系统实时带走聚合反应释放的热量，避免局部高温引发副反应；整套流程密闭不间断连续生产，从设备层面消除传统间歇釜搅拌死角、局部过热等固有缺陷。

该外循环雾化强化传质思路与 Stahl 等提出的 DMC 催化环路聚合体系设计逻辑一致[3]，但本文装置为万吨级工业化规模，弥补小试研究工程落地数据缺失。

2.2. 工业化生产流程

如图 1，整套生产流程为全自动密闭连续化操作，无间歇待机工序，现场标准化工序如下：

1) 系统预处理：高纯氮气多次置换反应器及管路，检测氧含量、水分达标后闭锁系统，杜绝催化剂失活、物料氧化异味；

2) 原料预混工段：多元醇起始剂与复合 DMC 催化剂通过计量泵精准配比，连续送入低速搅拌预混

罐充分混合，直至体系均匀透明、无催化剂团聚颗粒，防止固体颗粒堵塞雾化喷嘴；

3) 连续聚合工段：预混完成的物料经高压泵增压，由顶部雾化喷嘴喷淋分散，同步按照目标产品配比持续通入 PO、EO 混合气相；物料经过多次闭环循环喷雾完成聚合反应，在线检测羟值、分子量达标后，连续排出粗聚醚产品；

4) 后处理精制工段：粗聚醚依次完成中和调质、真空薄膜脱挥、活性炭吸附除杂、精密过滤、氮气吹扫除味等工序，检测色度、气味、不饱和度等指标合格后送入成品储罐储存[5]。

同等产能条件下，相较于传统间歇反应釜，整套生产耗时缩短 40%以上，设备可全天候不间断运行，无需反复升降温，规模化量产优势突出。

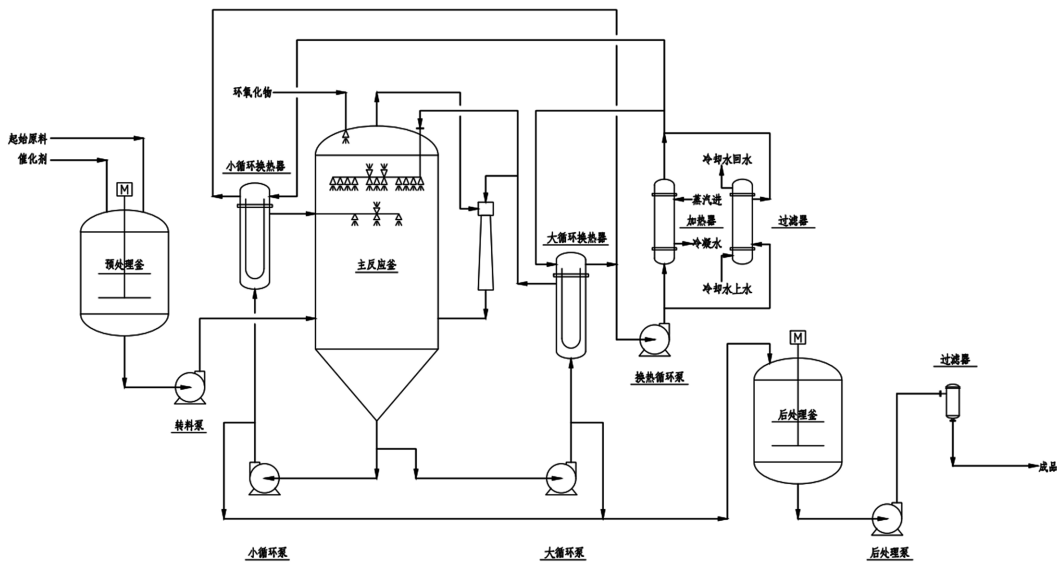


Figure 1. Schematic diagram of the circulating spray reactor process
图 1. 循环喷雾反应器工艺流程示意图

2.3. 与传统间歇釜式工艺的对比优势

从设备运维、生产能耗、产品品质、三废排放、多牌号柔性生产五个方面对比两类工艺实际落地差异，具体如下表 1：

Table 1. Comparison of key indicators between circulating spray process and traditional batch reactor process
表 1. 循环喷雾工艺与传统间歇釜工艺关键指标对比

对比项目	传统间歇搅拌釜	循环喷雾反应器
产品分子量分布 PDI	1.35~1.48	1.06~1.09
不饱和键含量/(mmol/kg)	0.038~0.052	0.012~0.018
批次间羟值波动范围	±2.2 mgKOH/g	±0.4 mgKOH/g
PO/EO 单体总转化率	96.2%~97.1%	99.6%~99.8%
单位产品综合能耗/(t 标煤/t 聚醚)	0.112	0.091
含盐废水产生量/(kg/t 产品)	32.6	12.1
固体废渣产生量/(kg/t 产品)	4.8	1.7
牌号单次切换耗时/h	4~8	0.4~0.8
下游泡沫不良品率	8.70%	5.90%

1) 传质传热工程性能：传统搅拌釜依靠搅拌桨完成物料混合，罐体内部大面积区域换热不充分，局部温差最高可达 8℃~15℃；循环喷雾工艺雾化后气液接触面积提升数十倍，体系整体温差稳定控制在±2℃以内，无局部过热现象，副反应生成量降低[1]。

2) 产品品质工程指标：间歇釜产出产品分子量分布系数处于 1.3~1.5 区间，不饱和键含量偏高，不同批次物料发泡效果差异明显；循环喷雾装置可稳定将分子量分布控制在 1.1 以内，批次一致性优异，与有机硅表面活性剂复配后稳泡、调孔效果稳定，下游泡沫制品不良品率下降 30%以上[6]。

3) 能耗与原料利用率：间歇釜 PO、EO 单体转化率仅 96%~97%，单位产品能耗偏高；循环喷雾工艺单体转化率不低于 99.5%，综合能耗降低 15%~20% [2]。

4) 催化剂与三废管控：间歇釜使用高添加量氢氧化钾催化，后续中和脱盐环节会产生大量含盐废水、固体废渣；循环喷雾配套 DMC 催化体系，催化剂添加比例仅为物料总质量 0.02%~0.05%，后处理流程简化，固废、废水排放量下降 60%以上[7]，满足绿色化工园区准入要求。

5) 多牌号柔性生产切换：间歇釜更换产品规格需要停机清洗、长时间调节温度，单次切换耗时 4~8 小时；循环喷雾设备可在线调整雾化压力、单体配比、循环输送流量，一键切换产品牌号，停机调整时长不足 1 小时，适配多规格、小批量订单需求。

3. 核心工艺参数对生产与产品性能的工程影响

现场生产过程中，反应温度、雾化压力、物料循环流量、PO/EO 进料配比、DMC 催化剂添加量之间存在耦合关联，既会直接改变聚醚成品各项理化指标，也会影响其与表面活性剂复配后的发泡效果。结合设备运维实操经验，各参数工程管控要点整理如下。

3.1. 反应温度的工程管控要点

温度是平衡主聚合反应与副反应的核心控制变量，温度波动是现场批次不合格首要诱因[8]。Tran 等通过动力学研究证实，温度直接改变 DMC 催化链转移副反应速率阈值[8]，与本文工业化实测温度 - 不饱和度变化规律吻合。

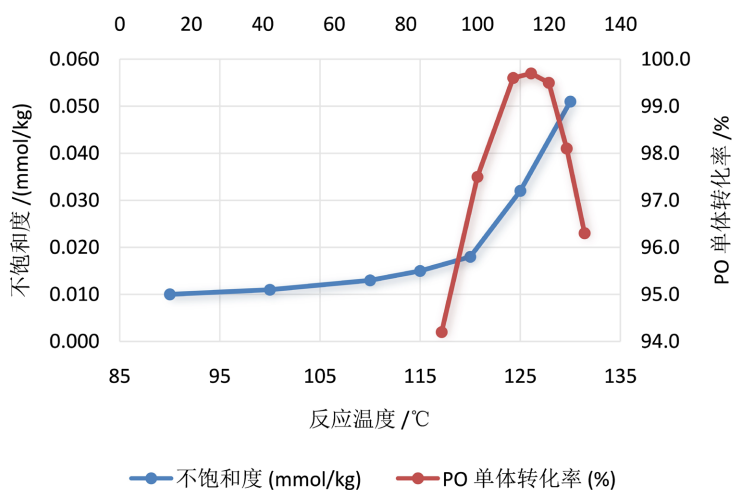


Figure 2. Effect of reaction temperature on degree of unsaturation and conversion rate of PO monomer

图 2. 反应温度对不饱和度、PO 单体转化率影响

从上图 2 中得出：90℃~110℃转化率快速上升、不饱和度缓慢增长；110℃~120℃区间转化率维持 99.5%以上、副反应最低；温度 > 120℃链转移副反应激增，不饱和度陡升、转化率持续下滑。

1) 低温工况(<110℃): DMC 催化活性受到抑制, PO、EO 开环反应速率缓慢, 单体转化不完全, 成品羟值超标、分子量达不到设计标准; 下游泡沫发泡倍率不足、回弹性能差、泡孔粗大, 整体生产效率大幅下滑。

2) 超温工况(>120℃): 链转移、热降解等副反应大幅增多, 产品不饱和键含量上升、颜色加深, 挥发性异味杂质生成量增加; 高温会破坏聚醚与表面活性剂界面结合能力, 稳泡剂成膜性能下降, 发泡过程易出现大泡合并、泡沫开裂问题。

工程最优管控区间: 通用软泡聚醚(羟值 48~56 mg KOH/g)恒温控制 110℃~120℃, 装置自控系统温度波动严格锁定 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 内; 针对高粘度、高 EO 含量特种聚醚采用分段梯度控温, 适配不同聚合阶段粘度变化。

3.2. 雾化压力、循环流量的现场调控规律

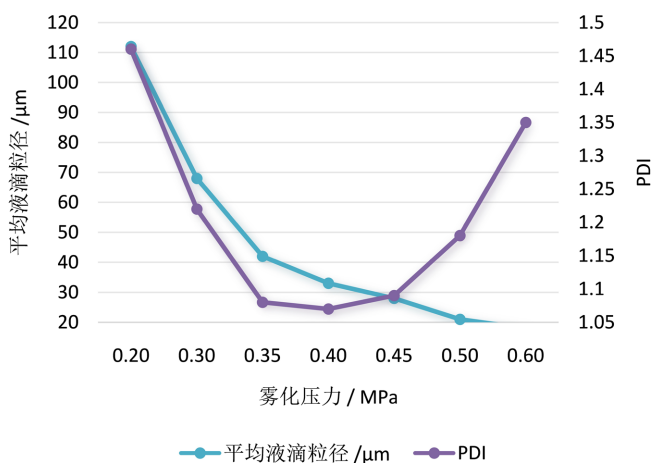


Figure 3. Effect of atomization pressure on droplet size and PDI
图 3. 雾化压力对液滴粒径及 PDI 的影响

从图 3 可以得出: 雾化压力 <0.35 MPa 液滴粗大、PDI 显著升高; 0.35~0.45 MPa 粒径均匀、PDI 稳定 1.07~1.09; 雾化压力 >0.45 MPa 雾滴过细, PDI 回升。

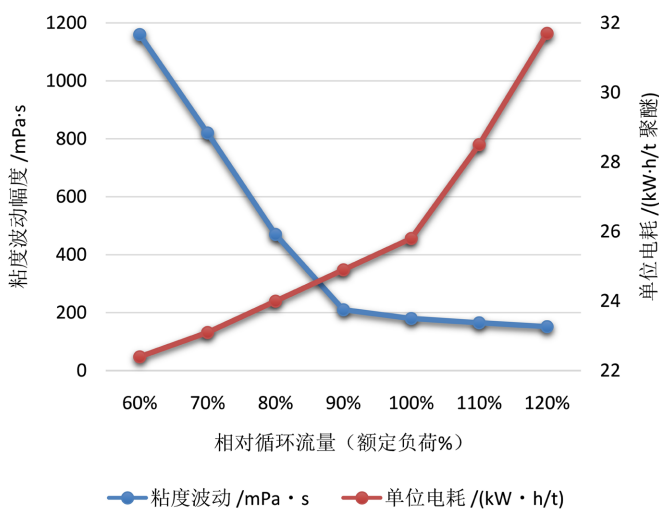


Figure 4. Effect of relative circulation flow rate on viscosity fluctuation and power consumption
图 4. 相对循环流量对粘度波动与电耗的影响

从图 4 可以得出：相对循环流量 < 90%额定负荷，物料停留不均，粘度波动剧烈；相对循环流量在 90%~100%区间，粘度波动可控、电耗适中；相对循环流量 > 100%，粘度小幅降低，电耗线性快速上升。

1) 雾化压力：直接决定雾化后液滴粒径大小，工程最优控制区间 0.35~0.45 MPa。压力偏低时，喷出液滴粒径偏大，气液接触不充分，单体转化率下降，分子量分布区间变宽；压力过高会形成超细雾滴，大量物料粘附反应器内壁，壁面积料长期受热生成异味杂质，同时加剧喷嘴冲刷磨损，提升备件更换频率。

2) 物料循环流量：依靠变频输送泵在线实时调节。流量偏低时，物料在反应器内停留时间差距较大，部分物料反应过度、部分转化不完全，成品粘度波动明显；流量过高会缩短物料单次循环反应时长，聚合反应达不到标准，同时高压泵运行负荷上升，电耗与机械磨损同步加剧。现场需根据产品粘度匹配对循环流量，高粘度规格产品适当提升循环流量，优化雾化分散效果。

3.3. PO/EO 单体配比与进料速率工程控制

PO 构建聚醚柔性主链，提升泡沫弹性、耐低温性能；EO 富集分子链端基，提升反应活性、改善发泡流动性，但 EO 占比过高会造成泡沫吸水率上升、尺寸稳定性变差。生产高回弹泡沫专用聚醚可适度提高 EO 配比，开孔透气泡沫则降低 EO 添加比例[6]。

单体进料速率需要与雾化传质速率匹配：进料速度过快，气相单体在腔体堆积，罐内压力剧烈波动，存在冲料安全隐患，同时大量单体未参与反应直接回收，原料利用率下降；进料速度偏慢，体系内部单体浓度不足，反应速率大幅降低，装置产能缩水。工业生产采用匀速连续进料模式，搭配在线气相浓度监测设备，自动微调进料量维持气液两相平衡。

3.4. DMC 催化剂添加量的工业化最优区间

相较于传统 KOH 催化体系，DMC 催化剂是循环喷雾装置产出高品质产品的核心配套体系，添加量管控直接影响生产成本与成品质量，其催化活性阈值可通过环氧开环动力学模型解释[8]：

添加比例低于 0.02%：催化活性不足，反应启动存在明显延迟，单体转化周期拉长，装置产能下降；

添加比例高于 0.05%：体系内残留过量催化剂会改变聚醚极性，削弱表面活性剂界面活性，泡沫孔径均匀度变差，同时增加原料成本，微量催化剂残留易加深产品色度。

现场标准化添加区间为物料总质量 0.02%~0.05% [7]，预混工段保证催化剂完全分散无团聚，防止堵塞雾化喷嘴。

4. 循环喷雾装置工业化运行现存工程瓶颈

4.1. 雾化喷嘴易磨损堵塞，装置连续运行稳定性差

喷嘴长期处于高温、高压、高粘度物料持续冲刷工况，属于损耗频率较高的零部件；物料中微量固体杂质、团聚催化剂颗粒易附着喷嘴内壁，造成孔径收缩、雾化分散不均匀。现场故障直观表现：雾化压力持续波动、液滴粒径变大、产品分子量分布变宽、不同批次性能出现漂移；喷嘴频繁检修更换，生产线非计划停机时长增加，运维备件投入成本偏高，是制约装置长周期稳定运行的首要问题[2]。

4.2. 高粘度聚醚生产阶段传质效率衰减

聚合反应中后期物料分子量持续提升，体系粘度明显增大，高粘度液相难以撕裂形成均匀细小液滴，气液接触比表面积快速缩减，传质传热效率下滑，单体转化速率放缓，反应周期延长。对比中低粘度通

用聚醚，高粘度特种软泡聚醚生产效率下降 20%~30%，成品均匀度变差，是高端特种聚醚规模化量产的核心工程障碍。

4.3. 微量挥发性副产物脱除难度大，高端低气味产品受限

连续生产过程中体系会持续微量生成醛类、低碳醇等挥发性有机物，反应器内壁积料长期高温氧化也会产生异味杂质；常规真空脱水、过滤等后处理工序仅能去除大分子杂质，对微量低分子异味组分去除能力有限。汽车内饰、母婴制品对聚醚气味指标管控严苛，现有基础后处理工艺难以满足标准；同时挥发性杂质会破坏表面活性剂分子结构，削弱稳泡效果，限制产品向高端市场拓展。

4.4. 多参数耦合系统人工调控滞后，产品合格率偏低

循环喷雾聚合属于多参数耦合的复杂反应系统，温度、雾化压力、循环流量、单体进料速率、体系压力等参数相互制约，单一指标波动会引发连锁反应，打破整体反应平衡。现阶段部分量产产线仍依靠人工辅助调控，参数调整存在明显滞后性与人为误差，无法实现多指标精准协同匹配。更换产品牌号、设备工况波动阶段，极易出现短时反应失衡，造成成品性能不达标，降低产品合格率与生产稳定性。

5. 面向量产提质降耗的成套工程优化改造方案

5.1. 分段梯度控温变参数工艺，解决高粘度物料传质短板

采用分阶段差异化温控、变频调节循环流量的连续反应工艺，匹配不同聚合阶段物料粘度特性：

- 1) 反应初期(低粘度)：控温 105℃~110℃，低循环流量，避免初期集中放热引发副反应；
- 2) 反应中期(粘度稳步上升)：升温至 110℃~120℃，提升循环流量，强化主反应速率，提升产能；
- 3) 反应后期(粘度峰值)：微调温度至 115℃~125℃，大幅提高循环流量、适度降低雾化压力，降低液相表观粘度，改善雾化分散效果，提升气液传质效率，缩短高粘度产品反应周期。

5.2. 精细化后处理系统改造，实现低气味产品量产

在原有脱水过滤工序基础上新增两级提纯单元，构建深度脱挥除味成套工艺：

- 1) 增设真空薄膜脱挥设备：高温高真空工况快速剥离体系醛类、醇类微量挥发性异味组分，刮膜式薄膜蒸发器对聚醚微量 VOC 脱除已有较多工程研究报道[9]；
- 2) 配套活性炭吸附精制塔：选用高比表面积食品级活性炭，吸附微量色素、氧化异味杂质；
- 3) 全流程氮气密闭保护：杜绝物料与空气接触氧化，从源头减少异味杂质生成。

改造后成品气味等级可满足汽车、母婴高端泡沫原料标准，同时保护聚醚与表面活性剂复配体系稳定性，可在后处理工段按需复配有机硅、聚醚型稳泡剂，实现聚醚-发泡助剂一体化产出。

薄膜脱挥 + 活性炭精制技改前后异味组分定量对比如下表 2。

Table 2. Quantitative comparison of odor components before and after the improvement of membrane devolatilization + activated carbon refining technology (unit: ppm)
表 2. 薄膜脱挥 + 活性炭精制技改前后异味组分定量对比(单位: ppm)

挥发性异味组分	技改前常规后处理	技改后深度精制	去除率
乙醛	18.6	2.3	87.60%
丙醛	12.3	1.8	85.40%
甲醇	26.8	3.5	86.90%
异丙醇	15.2	2.1	86.20%

5.3. 搭建多参数联动智能自控系统，消除人工调控缺陷

对整套生产装置实施自动化升级改造，集成温度、压力、流量、在线羟值实时监测仪表，搭建智能联动控制平台，数据驱动预测控制算法已在连续聚合反应器工况调控中得到应用[10]：

- 1) 建立各规格聚醚标准化工艺数据库，切换产品时一键调取方案，系统自动匹配温度、雾化压力、单体进料速度、循环流量全套工艺参数；
- 2) 实时采集全线运行数据，指标小幅波动时系统自主微调，避免多参数耦合失衡；
- 3) 大数据平台长期存储生产运行数据，构建工艺参数与成品性能关联模型，提前预判质量波动趋势，减少不合格品产出。

6. 工业化应用前景与工程发展趋势

国内聚氨酯产业持续朝着绿色环保、高端化、智能生产方向升级，下游新能源汽车、高端家居、环保包装领域对低气味、窄分子量分布软泡聚醚的采购需求持续上涨。传统间歇釜工艺在能耗、环保排放、成品品质层面已难以适配行业升级需求，循环喷雾连续化工艺凭借高效气液传质、低三废排放、全天候连续量产的核心优势，成为新建装置、老旧产线技改的主流选型。

结合工程落地实际，预判行业三大发展方向：

- 1) 设备结构迭代升级：研发适配超高粘度特种聚醚的新型雾化构件、多级串联喷雾反应设备，突破高粘度物料传质瓶颈，扩充高活性、高模量特种软泡聚醚产能；
- 2) 全流程智能生产普及：数字孪生技术、在线实时分子量检测、全自动无人值守生产线逐步落地，基于大数据的闭环预测控制方案可降低连续反应过程多参数耦合波动[10]，稳定不同批次产品一致性；
- 3) 绿色低碳工艺深度集成：持续迭代优化 DMC 催化体系，进一步降低催化剂添加比例；配套尾气深度回收、余热回收换热设备，持续削减单位产品能耗，契合化工行业双碳发展政策[7]，近年国外连续聚合反应器、DMC 催化动力学、聚合物薄膜脱挥领域已有大量连续化工工艺量化研究成果[3][8][9]，后续可结合国内外前沿催化机理进一步优化装置运行窗口。

长远来看，循环喷雾反应器连续化生产工艺将全面替代中小型间歇釜装置，成为软泡聚醚高端化、规模化生产核心工程技术，为下游聚氨酯泡沫制品产业链高质量发展提供稳定原料保障。

7. 结论

1) 循环喷雾反应器取消内置搅拌构件，依靠高压雾化闭环循环强化气液传质传热，搭配低添加量 DMC 催化体系，从根源解决传统间歇釜局部过热、副反应多、批次性能差异大、能耗偏高、三废产出量大等工程缺陷，可稳定产出窄分子量分布、低不饱和键、低气味的高品质软泡聚醚，适配高端聚氨酯泡沫生产需求，工业化应用经济与环保效益突出。

2) 反应温度、雾化压力、物料循环流量、PO/EO 单体配比、DMC 催化剂添加量是现场生产五大核心管控指标，多参数协同精准调控是保障产品质量、优化聚醚与表面活性剂复配发泡效果的关键；各参数均存在最优工程控制区间，大幅偏离区间会直接造成成品不合格、装置生产效率下降。

3) 当前装置长期运行存在雾化构件损耗快、高粘度工况传质效率不足、微量异味组分难以脱除、人工调控多参数存在滞后四大工程痛点；通过分段梯度变参数反应、薄膜脱挥搭配活性炭深度精制、智能联动自控、雾化系统硬件升级等成套优化手段，可有效解决量产各类问题，提升装置长周期运行稳定性与产品档次。

4) 在聚氨酯产业高端化、绿色化、智能化升级大背景下，循环喷雾规模化工艺具备广阔推广空间；后续设备结构、智能控制系统、催化体系持续优化后，能够进一步拓宽特种软泡聚醚生产边界，成为国

内聚醚行业主流连续化生产工程技术。

参考文献

- [1] 杨波. 合成聚醚多元醇的研究进展[J]. 广东化工, 2009, 36(12): 78-80.
- [2] 彭江涛, 王铭, 魏建波. 一种用外循环喷雾式反应器制备聚醚多元醇的方法[P]. 中国专利, CN103739834A. 2014-04-23.
- [3] Stahl, S.F., Wietzer, M. and Luinstra, G.A. (2023) DMC-Mediated Propoxylation in Semibatch with an External Loop: Insights into the Catalytic Action. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, **62**, 11536-11548. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c01313>
- [4] 于剑昆. 聚醚合成反应器工艺进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 1998(1): 19-21.
- [5] 李顺民, 吕兴连, 王超. 高活性低气味短周期聚醚多元醇连续化生产工艺及其装置[P]. 中国专利, CN117358162A. 2024-01-09.
- [6] 郭媛媛, 李杨. 聚醚多元醇生产工艺改进探讨[J]. 广东化工, 2025, 52(4): 76-77.
- [7] 荆晓东, 徐培, 耿佃勇, 等. DMC 催化法制备聚醚多元醇的研究进展[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2021, 19(6): 26-30.
- [8] Tran, C.H., Pham, L.T.T., Lee, Y., Jang, H.B., Kim, S. and Kim, I. (2019) Mechanistic Insights on Zn(II)-Co(III) Double Metal Cyanide-Catalyzed Ring-Opening Polymerization of Epoxides. *Journal of Catalysis*, **372**, 86-102. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2019.02.028>
- [9] 于剑昆, 李志刚, 訾伟旗. 降低聚氨酯泡沫用聚醚多元醇 VOC 技术简介[J]. 化学推进剂与高分子材料, 2019, 17(3): 27-35.
- [10] Park, M.J. and Rhee, H.K. (2001) LMI-Based Robust Model Predictive Control for a Continuous MMA Polymerization Reactor. *Computers & Chemical Engineering*, **25**, 1513-1520. [https://doi.org/10.1016/s0098-1354\(01\)00715-3](https://doi.org/10.1016/s0098-1354(01)00715-3)