

论聚烯烃化工生产中装置异常工况识别与安全风险控制

张海明

国家能源集团宁夏煤业有限责任公司烯烃一分公司 宁夏 银川 750000

摘要：聚烯烃化工生产中，装置异常工况识别与安全风险控制至关重要。异常工况涵盖温度、压力、流量、液位及腐蚀异常等，需通过智能监测系统（含传感器网络、物联网架构）及多模态数据融合算法（如LSTM时序预测、CNN图像识别）实现早期预警。安全风险控制依托分级响应机制（一至三级预警）、本质安全设计（SIS系统、防爆结构）及应急管理能力提升（VR演练、区块链追溯），保障生产安全稳定。

关键词：聚烯烃化工生产；装置异常工况识别；安全风险控制

引言：聚烯烃作为重要的化工材料，广泛应用于各领域，其生产装置的稳定运行关乎产业安全与发展。然而，化工生产环境复杂，装置易受设备老化、工艺波动及环境变化等因素影响，出现温度、压力等异常工况，引发安全事故，造成人员伤亡与财产损失。因此，及时识别异常工况、有效控制安全风险成为保障聚烯烃化工生产安全的关键，对推动行业可持续发展具有重要意义。

1 聚烯烃装置异常工况分类与机理分析

1.1 典型异常工况分类

(1) 温度异常：核心表现为反应器飞温，其诱因为催化剂活性突变，如催化剂注入量失控或原料杂质触发活性激增，导致聚合反应放热速率远超移除能力，短时间内使反应器温度突破安全阈值，严重时可能引发物料分解。(2) 压力异常：以聚合釜超压为典型，压力失控会直接威胁设备结构安全。2023年某化工厂曾发生因聚合釜进料阀门内漏，导致未反应单体持续累积，釜内压力超出设计值30%后引发爆炸，造成设备损毁与生产中断。(3) 流量异常：关键体现为循环气流量骤降，该异常会破坏反应器内物料混合均匀性，进而诱发聚合物结块。实测数据表明，当循环气流量波动幅度超过 $\pm 15\%$ 时，结块风险较正常工况提升4倍。(4) 液位异常：常见问题是分离塔液泛，液位过高会阻碍气液两相正常接触。模拟实验显示，当分离塔液位超过85%设计值时，气液传质效率显著下降，分离效率较正常工况降低60%，导致产品纯度不达标。(5) 腐蚀异常：主要发生于换热设备，表现为换热器管程或壳程穿孔。通过EDX（能量色散X射线光谱）分析发现，循环水中的氯离子会加速金属腐蚀，在高盐环境下腐蚀速率可达0.3mm/年，远超设备允许的腐蚀速率上限。

1.2 异常工况形成机理

(1) 设备层面：关键设备故障是重要诱因，以催化

剂泵为例，其密封件长期处于高温、高压的聚合物料环境中，易发生磨损或老化失效。FMEA（失效模式与影响分析）数据显示，催化剂泵密封件寿命服从Weibull分布，平均无故障工作时间随使用周期显著缩短，密封失效后会导致催化剂泄漏，破坏反应体系平衡。(2) 工艺层面：工艺参数失控是核心原因，其中氢气/乙烯比例对聚合反应速率影响显著。动力学模拟结果表明，当氢气/乙烯比例偏差超过5%时，聚合反应速率会激增10倍，引发爆聚现象，导致反应器温度、压力同步失控。(3) 环境层面：外部环境波动会间接影响装置运行状态，夏季高温环境尤为突出。实测数据显示，冷却水温度每升高1°C，压缩机冷却效率下降，排气温度随之升高，设备故障率对应上升8%；当冷却水温度升高5°C时，压缩机排气温度会超出安全运行范围，触发保护停机。

2 聚烯烃化工生产中装置异常工况识别技术

2.1 智能监测系统构建

(1) 传感器网络部署：针对装置核心参数，采用多类型、高可靠性传感器组合，构建全方位监测网络。1) 温度监测：采用红外热像仪与铂电阻双冗余方案，红外热像仪可实现反应器、换热器等大型设备表面温度的非接触式全域监测，铂电阻则针对关键管道、阀门等局部点位进行接触式精准测量，两者配合使温度监测精度控制在 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内，既能覆盖广域温度分布，又能捕捉局部温度异常波动，有效避免单一传感器故障导致的监测盲区。2) 压力监测：选用智能压力变送器，其量程覆盖0-10MPa，可满足聚合釜、循环气管道等不同压力等级设备的监测需求，且响应时间小于50ms，能快速捕捉压力骤升、骤降等瞬时异常，如聚合釜超压初期的压力波动可在0.1秒内被识别，为后续应急处置争取时间。3) 腐蚀监测：安装电化学探头，重点监测换热器、冷却水管路等易腐蚀设备，其腐蚀速率监测下限低至0.01mm/年，可

实时捕捉氯离子等介质引发的微腐蚀过程，相较于传统定期检测，能提前3-6个月发现腐蚀隐患，避免设备因腐蚀穿孔导致的物料泄漏^[1]。（2）物联网架构：采用LoRa无线传输技术结合边缘计算节点，构建低延迟、高稳定的数据传输与处理体系。LoRa技术具备远距离（传输半径可达3km）、低功耗特性，适合在大型化工园区复杂环境下部署，可减少布线成本与设备维护难度；边缘计算节点就近处理传感器采集的数据，数据处理延迟控制在200ms以内，避免大量原始数据上传云端导致的传输拥堵，同时能快速筛选异常数据并触发预警，提升监测系统的实时性。

2.2 多模态数据融合算法

（1）时序数据预测：基于LSTM（长短期记忆网络）模型对温度、压力等时序性监测数据进行训练与预测，该模型能有效捕捉数据的长期依赖关系，如反应器温度随反应时间、催化剂用量的变化规律。经实际生产数据验证，LSTM模型的温度预测平均绝对误差（MAE）小于0.8°C，均方根误差（RMSE）小于1.2°C，可提前15-30分钟预测温度异常趋势，为预防反应器飞温提供决策依据。（2）图像识别应用：采用CNN（卷积神经网络）构建设备表面缺陷识别模型，通过采集换热器、储罐等设备的高清图像，训练模型识别表面裂纹、腐蚀斑点等异常特征。模型经上万张标注图像训练后，对设备表面裂纹的识别准确率达94%，可替代人工目视检测，避免因人工疲劳导致的漏检问题，同时能识别宽度小于0.1mm的微裂纹，实现缺陷的早期发现。（3）声纹分析技术：结合MFCC（梅尔频率倒谱系数）特征提取与SVM（支持向量机）分类器，构建设备异常振动监测模型。MFCC可从设备运行声纹中提取关键特征，如泵体轴承磨损引发的声纹频率变化，SVM分类器则对特征数据进行分类，判断设备是否处于正常运行状态。该技术对压缩机、风机等旋转设备异常振动的召回率达89%，能有效识别轴承磨损、转子不平衡等隐性故障，减少设备突发性停机^[2]。

2.3 人机协同决策系统

（1）AR辅助巡检：借助Hololens增强现实设备，将传感器监测的设备健康状态（如温度、压力数值、腐蚀程度）以虚拟图标、数据标签的形式叠加在设备实体上，巡检人员可直观获取设备运行信息。同时，系统会自动标记异常点位，如换热器腐蚀超标区域、阀门内漏预警位置，使故障定位时间较传统巡检缩短60%，巡检人员无需逐一核对数据报表，即可快速聚焦关键问题设备，提升巡检效率与准确性。（2）数字孪生平台：采用Unity引擎构建与实际工厂1:1比例的虚拟工厂，将传

感器实时数据、设备运行状态同步至虚拟模型，实现生产过程的可视化监控。该平台可用于操作培训，新员工通过虚拟环境模拟异常工况处置（如聚合金超压应急操作），无需接触实际设备即可积累操作经验，使操作培训效率提升3倍；同时，平台支持模拟不同异常工况下的处置方案，如调整氢气/乙烯比例对爆聚的抑制效果，为实际生产中的应急决策提供模拟验证，降低试错成本。

3 聚烯烃化工生产中安全风险控制策略

3.1 分级响应机制

（1）一级响应（黄色预警）：适用于参数轻微偏离正常范围的场景，以工艺参数微调为核心处置手段，避免异常扩大。典型措施为调整进料量，通过减少催化剂或单体进料速率，降低反应负荷，缓解设备运行压力。例如某聚烯烃工厂曾监测到反应器温度较设定值高3°C，立即启动一级响应，将乙烯进料量降低15%，同时适度提升循环气冷却强度，2小时内使反应器温度恢复正常，成功避免超温风险进一步发展。该响应模式无需中断生产，仅通过工艺优化即可实现风险控制，兼顾安全性与经济性。（2）二级响应（橙色预警）：针对参数持续偏离且有恶化趋势的情况，需启动设备级应急措施，强化系统抗风险能力。核心动作是启动备用冷却系统，弥补主冷却系统的效能不足。某厂通过改造冷却系统管路与控制逻辑，将备用冷却系统的启动方式从手动切换改为自动触发，实测显示响应时间从原来的15分钟缩短至3分钟。在2024年一次循环水温度异常升高事件中，该系统自动启动，快速降低聚合金夹套温度，有效阻止了釜内反应温度的进一步上升，避免了超压风险。（3）三级响应（红色预警）：用于应对参数严重失控、可能引发事故的紧急场景，需采取破坏性小、见效快的极端处置手段。标准流程为紧急泄压与注入阻聚剂同步进行：通过开启聚合金紧急泄压阀，快速释放釜内高压物料，降低压力至安全范围；同时向反应体系注入阻聚剂，终止聚合反应，切断放热来源。2024年某聚烯烃工厂因氢气/乙烯比例严重失衡，引发反应速率骤增，系统触发红色预警后，紧急泄压阀在10秒内开启，阻聚剂同步注入，30秒内控制住反应态势，成功阻断爆聚事故，未造成设备损坏与人员伤亡^[3]。

3.2 本质安全设计

（1）SIS系统配置：采用SIL3级安全仪表系统，作为独立于生产控制系统的安全保障，专门监测关键风险点并执行紧急联锁动作。该系统的平均故障概率（PFDavg）低于10⁻⁴，具备极高的可靠性，可有效避免因单一故障导致的安全失效。例如在聚合金超压监测中，

SIS系统通过独立压力传感器实时采集数据，当压力超过安全阈值时，无需人工干预即可自动触发泄压阀开启，响应时间小于1秒，远快于人工处置速度，为遏制事故提供关键保障。（2）防爆结构优化：对存在可燃气体泄漏风险的设备，采用正压通风柜体结构设计。该结构通过持续向柜体内通入洁净空气，维持柜内正压状态，阻止外部可燃气体进入，同时柜体采用高强度合金材料，经测试其爆炸压力耐受值较传统柜体提升2倍。在2023年某厂溶剂泄漏事件中，正压通风柜体有效隔绝了泄漏的可燃溶剂与外部火源，避免了爆炸事故发生，仅通过通风系统即可将泄漏溶剂安全排出。（3）冗余设计：在关键控制系统与能源供应环节采用双重冗余配置，包括双电源供电与双DCS控制器。双电源系统通过两路独立供电线路，确保在一路电源故障时，另一路可无缝切换，供电中断时间小于50ms；双DCS控制器采用主备模式，实时同步数据，当主控制器故障时，备控制器可立即接管控制权限，避免系统失控。该冗余设计使整个控制系统的可用性达到99.999%，极大降低了因设备故障导致的安全风险^[4]。

3.3 应急管理能力提升

（1）VR演练系统：构建虚拟的聚烯烃生产场景，模拟泄漏、超压、火灾等典型事故的处置过程，学员通过VR设备沉浸式参与操作，如佩戴VR眼镜模拟换热器泄漏后的堵漏操作、聚合金超压时的泄压阀开启流程。系统会实时反馈操作是否正确，并记录操作时间与步骤完整性。某厂引入该系统后，组织员工定期开展演练，学员对泄漏处置的操作合格率从原来的72%提升至91%，且在实际应急事件中，员工的处置反应时间缩短了30%，操

作失误率显著降低。（2）区块链追溯：将事故相关数据（如参数变化曲线、响应动作记录、设备运行日志等）实时上传至区块链平台，利用区块链的不可篡改特性，确保数据真实性与完整性。在事故调查阶段，无需逐一收集各系统数据，可直接从区块链平台调取完整的事故时序数据，快速还原事件发展过程。某厂应用该技术后，对一起阀门内漏事故的调查时间从原来的10天缩短至5天，调查效率提升50%，同时避免了数据篡改或丢失导致的调查偏差，为后续制定针对性改进措施提供了可靠依据。

结束语

聚烯烃化工生产中，装置异常工况识别与安全风险控制是一项长期且系统的工程。通过构建智能监测体系、应用先进识别技术，可精准捕捉异常信号；依托分级响应、本质安全设计与应急能力提升等策略，能有效化解风险。未来，需持续融合新技术、优化管理机制，强化人员培训，以更高效、智能的方式应对生产挑战，为聚烯烃产业的安全、稳定、可持续发展筑牢坚实防线。

参考文献

- [1]康秦宝.基于风险评估的煤化工聚烯烃生产安全管理对策研究[J].化工管理,2024,(12):100-102.
- [2]封帆.APC在煤化工聚烯烃装置中应用[J].化学工程与装备,2022,(08):202-203.
- [3]张宗文.煤化工聚烯烃挤压造粒机组故障分析[J].化工设计通讯,2021,43(10):16-18.
- [4]雷廷,李世星,刘准凯.化工工程安全风险识别及其控制策略[J].山东化工,2023,52(09):219-220.