

基于故障树分析 (FTA) 的 HDPE 挤压造粒机关键部件可靠性研究

宋 刚

(中石化英力士(天津)石化有限公司, 天津 300450)

摘 要 润滑系统失效、螺杆磨损、熔体压力异常、对中不良与传动振动、摩擦离合器故障是导致顶事件发生的关键路径, 其中润滑系统为核心薄弱环节, 螺杆与机筒为寿命受限部件, 切刀系统为维护频率最高部件。本文以 HDPE 挤压造粒机为研究对象, 通过故障树分析 (FTA) 方法识别关键部件的故障发生机制与薄弱环节。梳理挤压造粒机的系统组成、工作原理及常见故障模式, 选取主电机扭矩异常 (过高) 导致联锁停车作为顶事件构建故障树模型, 通过最小割集求解与定性分析识别关键故障路径与薄弱环节, 并明确了 HDPE 挤压造粒机可靠性提升的重点方向, 旨在为设备预测性维护策略制定、故障诊断效率提升提供参考。

关键词 故障树分析; HDPE 挤压造粒机; 挤压系统; 传动系统; 切粒系统

中图分类号: TQ320.5+2; TB114.3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.22.010

0 引言

高密度聚乙烯 (HDPE) 作为全球产量规模最大的通用热塑性树脂之一, 在包装、管材、汽车、电子电器等领域得到广泛应用。挤压造粒是 HDPE 树脂生产流程中的最终工序, 挤压造粒机组承担着将上游聚合工段输送而来的粉料进行熔融、塑化、均化、挤出、切粒并制成成品颗粒的全过程任务。该机组通常由主电机、主减速箱、筒体与双螺杆、熔融泵、换网器、模板、水下切粒系统以及各类辅助系统 (润滑系统、加热冷却系统、仪表控制系统等) 组成, 属于集机械、电气、仪表于一体的复杂成套装备。在现代石化企业中, 挤压造粒机组的平稳运行直接关系到产品质量的稳定性和装置经济效益的提升。

1 HDPE 挤压造粒机系统分析

1.1 设备工作原理与工艺流程

HDPE 挤压造粒机是一种通过机械挤压结合热熔效应实现干法造粒的工业设备。其核心工作原理是: 上游聚合工段生产的 HDPE 粉料经喂料系统计量后进入挤压系统, 在螺杆的旋转作用下被向前输送; 在筒体的加热和剪切作用下, 粉料逐渐熔融、塑化并形成均匀的熔体; 熔体在螺杆末端建形成足够的压力, 经熔融泵增压、换网器过滤后通过模板挤出成条状或股状, 随后在水下切粒室中被高速旋转的切刀切割成均匀的

颗粒; 颗粒经脱水、干燥和分级后进入成品料仓^[1]。

1.2 关键部件组成与功能

HDPE 挤压造粒机作为集机、电、仪于一体的复杂成套装备, 其关键部件可划分为以下几个子系统。(1) 挤压系统。挤压系统是造粒机的核心做功部分, 包括双螺杆、机筒 (筒体)、料斗、熔融泵、换网器、模板等。螺杆是整台设备最核心的部件, 负责物料的输送、熔融、混合, 其磨损状况直接影响产品质量与生产效率。机筒通过分段加热为物料熔融提供必要的热量, 筒体内壁与螺杆元件之间的间隙通常控制在 2.0 mm 左右。换网器用于过滤熔体中的杂质, 模板则决定挤出熔体的截面形状。(2) 传动系统。传动系统由主电机、主减速箱、摩擦离合器、辅助齿轮箱部件构成, 主电机为整机提供动力, 主减速箱把电机的高转速降到螺杆工作所需转速并把动力合理传递给两根螺杆, 摩擦离合器有启动、过载时的缓冲保护作用。(3) 切粒系统。切粒系统包括水下切粒机、切刀、切粒电机、颗粒水循环系统等, 负责将挤出熔体切割成规定尺寸的成品颗粒。切刀的磨损程度直接影响颗粒切割质量和系统的连续运行。(4) 润滑系统。润滑系统为齿轮箱、轴承等高速运转部件提供润滑油, 其供油压力、油温、油质等参数对传动系统可靠性具有重要影响。(5) 加热冷却系统。加热冷却系统对筒体、模板等关键部位的温度进行精确控制, 以保证物料熔融充分、温度场

作者简介: 宋刚 (1992-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 化学工程与技术。

均匀。(6) 仪表控制系统。仪表控制系统实时监测并调节主电机扭矩、转速、熔体压力、各点温度、润滑油压、振动等关键参数,并在异常情况下触发联锁保护动作。

1.3 常见故障模式统计与分析

基于生产实践统计,HDPE 挤压造粒机的常见故障模式可归纳为以下几类:(1) 主电机扭矩异常。润滑油系统故障、主电机输出轴与齿轮箱输入轴对中不良、电机及离合器振动、喂料负荷过大或物料熔融不良等均可导致主电机扭矩过高;喂料系统故障致使双螺杆空转则会导致扭矩过低。扭矩异常是机组最常见的联锁停车原因之一。(2) 摩擦离合器故障。主电机瞬间启动电压过低、摩擦盘与摩擦片过热或老化、仪表风压力不足等均可导致离合器脱开。摩擦离合器故障直接导致动力中断,造成机组停车。(3) 切粒系统故障。切刀磨损过量、颗粒水流量过低、切粒机振动过大、切刀与模板贴合不紧、物料熔融指数波动等均可导致水下切粒系统停车,进而引发整个机组联锁停车。尤其在 HDPE 装置中,低融指高密度物料对切刀的磨损尤为严重。(4) 传动系统振动与异响。齿轮磨损、断齿、点蚀、间隙超差,轴承滚动体缺陷、保持架损坏、配合松动,以及摩擦离合器间隙过大等问题均可引发振动异常。已有案例中,辅助齿轮箱解体检查发现 SL184930 轴承损坏,滚珠变形,滚道出现凹坑,轴颈表面金属层剥落。(5) 螺杆磨损与断裂。螺杆在机筒内长期高速旋转,物料与螺杆、机筒的摩擦使两者工作表面逐渐磨损,螺杆直径逐渐缩小,机筒内孔直径逐渐加大。当螺杆与机筒间隙过大时,物料的输送和熔融效率下降,甚至出现螺杆与机筒干涉的严重故障。螺杆芯轴还可能发生疲劳断裂,裂纹起源于齿顶部的表面压痕缺陷和芯轴内齿棱角处的应力集中。

2 故障树分析法原理与建模

2.1 FTA 基本原理

故障树分析法是一种自上而下的演绎式系统可靠性分析方法,由美国贝尔电话实验室于 20 世纪 60 年代提出,最初应用于“民兵”导弹发射控制系统的安全性分析,随后逐步推广到核工业、航空航天、化工、机械制造等各个领域。FTA 的基本原理是:以系统不希望发生的事件作为顶事件 (Top Event),按照系统的功能结构和故障因果关系,逐级向下分解,直至找到不可再分解的基本事件 (Basic Event),从而构建一棵逻辑树形图——故障树^[2]。

2.2 FTA 在机械系统中的应用适应性

FTA 在机械系统可靠性分析中有着适用性,可从几个方面予以阐述:第一,FTA 能很好地处理系统级故障

的多因素耦合特性,用逻辑门把复杂故障路径予以准确表达,克服单一故障经验分析的重大不足。第二,FTA 的树形结构极其直观,故有利于分析人员之间的交流沟通,也有利于故障排查经验的积累和传承。第三,FTA 本身支持从定性到定量的递进分析,在故障数据充分时可直接做可靠性量化评价,数据不足时又可用最小割集分析确定薄弱环节。对于 HDPE 挤压造粒机这类复杂的旋转机械设备,FTA 的应用价值尤为突出。挤压造粒机组的故障往往是多个因素综合作用的结果。例如:主电机扭矩过高可能同时涉及润滑系统失效、对中不良、工艺波动等多种原因,且这些原因之间并非完全独立。FTA 能够将这些因素及其相互关系系统地组织起来,从逻辑层面揭示故障的发生机制,为故障诊断和预防维护提供科学依据。

2.3 顶事件选取与边界条件确定

选取“主电机扭矩异常(过高)导致联锁停车”作为故障树的顶事件。选择该事件作为研究对象,主要基于以下几点考虑:首先,主电机扭矩异常是挤压造粒机组最常见、发生率最高的故障类型之一,具有代表性和典型性。其次,主电机扭矩异常与机械、润滑、工艺、电气、仪表因素相关,成为检验 FTA 系统分析能力的理想案例。最后,扭矩数据在工业现场是实时监测的参数,异常信号能够被及时捕捉,具有实际工程意义。

3 HDPE 挤压造粒机故障树的定性分析

3.1 最小割集求解

最小割集是故障树分析中的核心概念。所谓割集,是指一组基本事件的集合,当这组基本事件全部发生时,顶事件必然发生。最小割集则是指不能再进一步简化的割集——删除其中的任何一个基本事件,剩余的基本事件集合就不再构成割集。求解最小割集的过程,本质上就是找出导致顶事件发生的所有最基本的故障组合^[3]。

对构建的故障树进行最小割集求解,采用下行法 (Fussell-Vesely 算法) 和上行法 (Sanderes 算法) 相结合的策略。下行法从顶事件出发,按照逻辑门的类型逐层向下替代扩展:遇到或门则用其输入事件分别替代原事件(产生多个分支),遇到与门则用其输入事件的组合替代原事件(产生扩展组合)。经过迭代扩展直到所有分支的末端均为基本事件,然后对得到的割集进行简化——删除其中包含超集关系的非最小割集,即可得到全部最小割集。

3.2 关键故障路径识别

将全部最小割集进行分析和归类,可以识别出导致顶事件发生的若干条关键故障路径。路径一:润滑

系统失效路径。润滑油泵故障、油路堵塞、油质劣化、油温过高或油压过低等润滑系统相关的基本事件,在各最小割集中出现频率最高。润滑系统失效导致齿轮箱轴承和齿轮处于缺油或润滑不良状态,摩擦系数急剧增大,传动效率下降,主电机负荷显著上升。此外,润滑系统故障还会引发齿轮和轴承的异常磨损,形成恶性循环。路径二:螺杆磨损与异常振动路径。螺杆磨损使螺杆与机筒间隙增大,物料回流增大,挤出效率降低,主电机要输出更大的扭矩才能保证产量。严重时螺杆振动剧烈,与机筒内壁发生干涉,产生异常摩擦甚至卡阻,主电机扭矩因而突增。螺杆芯轴的疲劳断裂会带来灾难性后果。路径三:熔体压力异常路径。过滤网堵塞、模板堵塞、筒体温度过低导致物料熔融不良、物料熔融指数偏低等因素均可导致熔体压力异常升高,熔体在螺杆末端形成的背压增大,主电机负荷相应增加。这一路径将工艺参数异常与设备负荷直接关联起来。路径四:对中不良与传动振动路径。主电机输出轴与齿轮箱输入轴对中不良会导致附加弯矩和振动,加速轴承磨损,使传动效率下降,主电机扭矩升高。对中不良的原因可能是安装误差、基础沉降或运行中螺栓松动。

3.3 薄弱环节分析与讨论

通过对最小割集的结构特征和基本事件出现频次的综合分析,可以识别出HDPE挤压造粒机可靠性中的若干薄弱环节:(1)润滑系统——最关键的薄弱环节。润滑系统失效在各最小割集中反复出现,且往往与其他故障因素形成耦合效应——润滑不良会加速轴承和齿轮的磨损,而磨损产生的碎屑又会进一步恶化润滑状态。在HDPE挤压造粒机中,润滑系统承担着齿轮箱、轴承等核心传动部件的关键润滑任务,其可靠性直接影响整机寿命。然而,在实际生产中,润滑系统往往被忽视,润滑油更换周期不严格、油质监测流于形式等问题普遍存在。(2)螺杆与机筒——寿命最受限的部件。螺杆和机筒直接与物料接触,长期处于高温、高压、磨料磨损的恶劣工况下,其使用寿命往往远低于其他部件。HDPE物料中常含有催化剂残留、填料颗粒等硬质成分,加速了螺杆表面的磨粒磨损。当螺杆与机筒间隙过大时,挤出效率和产品质量双双下降,机组不得不在能耗增加和停机的困境中作出选择^[4]。

4 基于故障树分析(FTA)的HDPE挤压造粒机关键部件可靠性提升策略

4.1 润滑系统优化策略

针对润滑系统关键薄弱环节提出以下优化策略:建立润滑油在线监测系统,实时监测油液的黏度、水

分含量、酸值、颗粒污染度等关键指标,取代传统的定期换油模式,实现按质换油。定期检查主电机输出轴与齿轮箱输入轴之间的对中状况,首次开车或更换轴承运行三个月后必须检查对中情况。对齿轮箱润滑油出口压力、油温进行趋势监测,当压力过低或油温异常时提前预警,避免润滑失效引发连锁故障。在润滑油品选择上,应根据HDPE挤压造粒机低速重载的工作特点,选用合适黏度等级和极压性能的合成润滑油,并严格控制换油周期和质量标准。

4.2 状态监测与故障预警方案

考虑到挤压造粒机属于低速、重载、变速的特殊旋转设备,国内在挤压机状态监测与故障诊断技术方面还存在一定难度。建议建立多层次状态监测体系:在主电机轴承、齿轮箱轴承、螺杆轴承等关键部位安装在线振动传感器和温度传感器,建立振动速度、振动加速度、温度的趋势图。当振动值或温度值超出趋势值时,测定主电机空转电流值或功率值是否超规定值,判断是否应更换轴承或进行检修。对离合器进行振动速度测试,如果超出规定值则应重新调整动平衡。定期对筒体加热、冷却系统进行检查,保证物料受热均匀、熔融充分^[5]。通过对关键部件的振动、温度、扭矩等参数进行趋势分析,建立预测性维护模型,在故障发生前识别异常征兆,变“事后维修”为“预知维修”。

5 结束语

故障树分析法能有效拆解复杂成套装备的故障传导逻辑,形成多因素耦合故障的系统梳理,为HDPE挤压造粒机的故障诊断与预测性维护提供了清晰的技术路径。未来,可进一步结合设备全生命周期的故障统计数据开展故障树定量分析,计算顶事件发生概率与各基本事件的重要度,落实可靠性的量化评估;同时将本研究的分析结果与工业互联网平台结合,开发挤压造粒机智能故障诊断系统。

参考文献:

- [1] 白文鹏,付尧明,陈余杰.基于故障树分析法的B737全动飞行模拟机操纵系统可靠性分析[J].民航学报,2026,10(01):87-90.
- [2] 王康,姜南,刘雨薇.聚乙烯挤压造粒系统运行效能提升策略研究[J].化工管理,2025(36):119-122.
- [3] 张荧驿,田雪艳,李娜,等.基于WQS软件的安全环路故障树分析[J].铁道车辆,2025,63(06):50-55.
- [4] 苏子超.移动式秸秆造粒机关键部件设计及试验[D].南京:南京农业大学,2021.
- [5] 陈序,李向东,樊卫华.基于故障树的起重机械控制系统可靠性分析[J].建筑机械,2024(12):61-64.