

高密度聚乙烯树脂聚合工艺参数优化及产品力学性能调控研究

岳鹏飞

(中石化英力士(天津)石化有限公司, 天津 300450)

摘要 高密度聚乙烯是应用最广的一种通用塑料, 其力学性能决定产品的市场竞争力。聚合工艺参数是决定产品性能的关键因素, 但是在生产中普遍存在工艺参数波动大、性能调控精准度不够等问题。本文系统地分析了高密度聚乙烯树脂聚合工艺参数优化的重要意义, 对高密度聚乙烯树脂聚合工艺中存在参数波动引起性能不稳定、力学性能和加工性能难以平衡、传统优化方法效率低等主要问题进行了详细的分析。在此基础上, 从关键工艺参数系统化调控与优化、力学性能需求下的配方设计方法、数据驱动的工艺参数智能优化技术等方面出发, 提出相应的优化策略, 以期为高密度聚乙烯树脂的工业化生产提供参考, 进而推动产品质量提高和产业升级。

关键词 高密度聚乙烯; 聚合工艺; 参数优化; 力学性能; 智能调控

中图分类号: TQ32

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.10.041

0 引言

高密度聚乙烯树脂属于五种通用塑料之一, 被广泛地运用在包装、建材、汽车、电子等领域之中, 产品质量以及性能稳定性对下游产业的发展产生直接影响。聚合工艺参数是决定树脂分子结构、产品质量以及产品性能的重要因素, 合适的工艺参数可以有效提高产品的质量, 降低生产成本, 满足各种不同的市场需求。但是目前生产过程中还存在着工艺参数波动大、性能调控难度大、优化效率低等问题。因此, 研究高密度聚乙烯树脂聚合工艺参数的优化和力学性能的调节, 对于聚烯烃工业的高质量发展起到了重要的推动作用。

1 高密度聚乙烯树脂聚合工艺参数优化的意义

1.1 提升产品质量稳定性与一致性

聚合工艺参数控制得当才能保证高密度聚乙烯产品质量的稳定。反应温度、压力、催化剂浓度等关键参数稍有波动就会引起聚合物分子量分布、结晶度等结构参数的变化, 从而影响到产品的力学性能表现。对工艺参数进行系统的优化可以精确地调控聚合反应, 使每一批次产品的分子结构参数都在合理的范围内, 从而提高产品性能的一致性、稳定性, 减少不合格品率, 满足下游客户对产品质量稳定性的严格要求^[1]。

1.2 降低生产成本与能源消耗

改变工艺参数可以大幅度地提高生产效率和资源利用率。调节反应温度、停留时间等参数来提高单位

时间内的产量, 缩短生产周期。同时, 调节催化剂的用量和氢气的浓度等参数可以提高催化效率、原料转化率、降低原料的浪费。另外, 采用温度控制精量化、反应条件改善可以减少加热、冷却过程消耗的能量, 减轻公用工程负荷。这些改进不但可以降低单位产品的生产成本, 而且也有利于实现节能减排的目标, 提高企业的经济效益和环境效益^[2]。

1.3 满足不同应用领域的性能需求

不同的应用领域对于高密度聚乙烯的性能要求有很大的不同。包装薄膜需要有很好的韧性和抗冲击性能, 管材需要有高的刚性和耐环境应力开裂性能, 注塑制品需要有良好的加工流动性和尺寸稳定性。通过系统的优化聚合工艺参数来调节树脂的分子量、分子量分布、支化度等结构参数, 从而达到产品力学性能定向设计。根据客户不同的要求进行定制可以满足客户的个性化需要, 扩大产品适用的对象范围, 提高企业市场竞争力, 使企业的盈利能力得到提升^[3]。

2 高密度聚乙烯树脂聚合工艺中存在的问题

2.1 工艺参数波动导致产品性能不稳定

目前高密度聚乙烯的生产工艺参数变化较大, 从而影响到产品的质量。反应器内温度分布不均匀, 局部过热或者过冷的现象时有发生, 造成聚合反应速率不一致, 出现分子量分布宽化。催化剂进料系统计量

作者简介: 岳鹏飞(1998-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 高分子材料。

精度不够,造成催化剂浓度在不同时间段出现偏差,影响聚合活性,使产品的熔体流动速率稳定性变差。压力控制系统的响应滞后,在负荷变化时不能迅速调节,造成反应条件偏离最佳状态。氢气的浓度检测和调节精度不高,分子量不能调整到很精确。原料中杂质含量的波动也会影响催化剂的活性,从而影响聚合反应的稳定性。另外,不同的操作人员对于工艺参数以及调控习惯存在着差异,没有统一的操作规范,加大了参数的波动问题。综合以上因素造成产品密度、熔体指数、拉伸强度、冲击韧性等关键性能指标出现大的波动,给下游加工企业带来困扰,也阻碍了产品高端应用的发展^[4]。

2.2 力学性能与加工性能难以平衡

高密度聚乙烯的力学性能与加工性能一般存在相互制约的关系,在实际生产中很难找到两者的最佳平衡。提高树脂的分子量能够明显改善拉伸强度、抗冲击性、耐环境应力开裂性等力学性能,但是也会导致熔体粘度增大、流动性变差,给注塑、吹塑等加工过程带来不便,增加加工能耗,降低生产效率。采用宽分子量分布设计可以提高加工流动性,但是会牺牲一些力学性能,冲击韧性可能会大幅度降低。调节氢气浓度以控制分子量时,很难准确找到平衡点,要么力学性能达不到要求,要么加工性能不好。催化剂体系的选择也存在两难,高活性催化剂能提高生产效率,但是可能会造成分子量分布较宽,影响某些力学性能的均匀性。共聚单体可以提高材料的韧性和加工性,但是过多地加入会降低材料的结晶度和刚性。企业通常会根据主要应用领域的要求侧重于某一方面的性能,很难开发出力学性能和加工性能兼优的产品牌号,从而影响产品应用范围以及市场竞争力^[5]。

2.3 传统工艺参数优化方法效率低下

传统的工艺参数优化主要依靠经验摸索、单因素试验,存在着周期长、成本高、效率低等许多问题。操作人员一般依靠以往的生产经验以及工艺知识去调整参数,这样主观性很强,缺乏系统性、科学性,很难找到最佳的工艺条件。单因素试验法虽然可以研究某一个参数对产品性能的影响规律,但是忽略了参数之间的交互作用,不能反映工艺系统的复杂性,所得结论片面,难以推广。正交试验等统计方法虽然有所改进,但是试验次数还是较多,耗费大量时间、原料。更重要的是,传统的方法很难建立工艺参数和产品性能之间的定量关系模型,不能对参数进行准确的预测和优化。传统的方法对多目标优化问题就显得力

不从心了,不能很好地找到不同性能指标间的最佳平衡。生产中的参数调整大多为试错式,要经过多次调试才能满足要求,既浪费资源又产生大量的不合格品。市场对产品的性能要求越来越高,产品牌号越来越多,传统的优化方法已不能满足快速开发新产品、精确调节性能的需求,亟须采用更加高效、智能的优化技术。

3 高密度聚乙烯树脂聚合工艺参数优化策略

3.1 关键工艺参数的系统化调控与优化

创建关键工艺参数的系统性调节体系,是达到产品性能精准控制的前提。首先要识别影响产品力学性能的主要参数,即反应温度、反应压力、催化剂浓度、氢气浓度、共聚单体含量等,通过敏感性分析来确定各个参数的影响程度以及调控的优先顺序。温度应该用多点检测、分段控制的方法来使反应器内温度分布均匀,防止局部出现温度异常。压力控制要升级控制系统精度,达到快速响应、精确稳定的效果。催化剂进料系统应配高精度计量装置,保证浓度稳定,还要建立活性在线监测系统。氢气浓度需要在线检测和自动调节,用流量控制来调节分子量。共聚单体的加入要使用质量流量计来准确计量,根据目标性能的要求动态调整共聚单体的比例,建立原料预处理系统,严格控制原料中水分、氧气等杂质的含量,减少对催化剂活性和聚合反应的影响。

在温度优化的实际操作中,在反应器的不同高度和径向位置上布置若干个温度传感器,随时观测温度分布。当反应器某处温度过高的时候,就立刻调整夹套冷却介质的流量分配,加大该区域的冷却强度。同时优化加热介质的进料方式,用分段加热法将反应器分为预热区、反应区和稳定区等几个温度控制段,每个区域分别控制加热量。通过调节控制算法的参数来减小温度波动的幅度。对氢气控制来说,安装在线氢气浓度分析仪,依据目标分子量调节氢气进料流量,配合质量流量控制器达到精准计量。经过不断的参数调整后,产品熔体指数的批次间差异大大减少,拉伸强度波动范围也大大缩小,产品的性能稳定性明显提高,为以后的大规模稳定生产打下了良好的基础。

3.2 基于力学性能需求的配方设计方法

根据不同的应用领域对性能的不同要求来建立科学的配方设计方法,是实现产品差异化的关键。首先要对目标应用对力学性能的具体要求做深入的分析,确定出拉伸强度、断裂伸长率、冲击韧性、刚性模量等指标目标值的范围。以分子设计理论为指导进行配

方优化,得到分子结构参数与宏观力学性能的构效关系。高强度、高刚性的应用应该使用分子量高、结晶度高的配方,严格控制氢气浓度获得理想分子量,优化温度和压力提高结晶度。对于需要优异的韧性的产品可以采用双峰或多峰分子量分布设计,通过串联反应器或者多活性位催化剂来实现。对于加工性能要求高的应用,应当适当扩大分子量分布,加入长链支化结构,通过调节共聚单体的种类来调节流变性。催化剂体系的选择要根据性能需求匹配合适的催化剂类型,配方设计时还要考虑加工助剂、抗氧剂等添加剂的协同作用,通过复配优化提高产品的综合性能。

开发高韧性管材专用料时,首先要确定产品应达到较高的拉伸强度、断裂伸长率和冲击强度等性能目标。双峰分子量分布方案,在第一反应器里控制低氢气浓度产生高分子量组分,主要贡献韧性和强度。在第二反应器中提高氢气的浓度来生成低分子量的组分,提高加工流动性。改变催化剂体系,选用适合宽分子量分布的催化剂类型,加入少量共聚单体来提高韧性。中试验证后,对第一反应器、第二反应器的温度进行调节,对各个反应器的氢气浓度进行精确控制。通过系统的配方设计、工艺调整,最终产品的拉伸强度、断裂伸长率、冲击强度等各项指标均达到或者超过目标要求,熔体指数控制在合理范围内,既满足了力学性能要求,又保证了良好的加工性能,成功实现了高性能产品的定向开发。

3.3 数据驱动的工艺参数智能优化技术

使用数据驱动的智能优化技术能提升优化的效率和精度。首先要建立完善的数据采集系统,实时采集温度、压力、流量、浓度等工艺参数和密度、熔体指数、力学性能等质量指标,形成包含工艺与性能数据资源库。数据预处理阶段进行清洗、异常值剔除、缺失值填补,保证数据质量。利用机器学习算法来建立工艺参数和产品性能之间的预测模型,经过训练验证后提高预测的精度。利用多目标优化算法,在满足多个性能约束的情况下得到最优的参数组合。创建在线优化系统,将预测模型嵌入控制系统中,根据实时数据动态调整参数,从而达到闭环优化的目的。采用数字孪生技术创建出虚拟仿真模型,利用虚拟环境来进行参数的调整和新产品的研发。采用深度学习的方法挖掘出工艺参数波动和产品质量波动的内在关系,建立故障诊断预警系统,及时发现参数偏差、及时纠正,防止不合格品产生。

实施智能优化项目时,先建立以温度、压力、催

化剂浓度、氢气浓度等共计几十个工艺参数,以及密度、熔指、拉伸强度、冲击强度等性能指标为大数据集,收集大量的生产历史数据。数据清洗之后去除明显异常的数据,用合适的方法处理缺失值。使用神经网络算法建立预测模型,把数据分为训练集和测试集,反复训练、优化网络结构,建立可靠的预测模型。用遗传算法做多目标优化,设定力学性能和加工性能等多目标约束条件,在多维参数空间里寻找最优解。将优化模型投入生产控制系统,根据当下的生产状况和所需性能要求,系统自动得出合适的工艺参数值建议,操作者依据这一建议来做出相应调整。同时建立数字孪生模型,在虚拟环境中模拟不同的参数组合聚合过程以及产品的性能,新产品开发时先在虚拟平台做大量的实验来筛选出比较好的方案,然后再进行实际的生产验证,大幅缩短了开发周期,降低了试验成本,提高了工艺参数优化的效率和科学性。

4 结束语

高密度聚乙烯树脂的聚合工艺参数优化和产品力学性能调节是一项系统工程,提高产品质量、降低成本、满足市场多样化需要有重要的意义。针对目前生产中存在的参数波动大、性能平衡难、优化效率低等问题,企业要从关键参数的系统化调控、基于性能需求的配方设计、数据驱动的智能优化等方面入手,创建科学完善的工艺优化体系。用先进的控制技术、优化算法、智能化工具等手段对聚合过程实现精确控制,从而达到产品性能定向设计的目的。在新的科技革命和产业变革的大背景下,聚烯烃生产企业应抓住数字化、智能化转型的机遇,加强产学研合作,持续推进工艺技术创新,为高密度聚乙烯产业的高质量发展做出贡献。

参考文献:

- [1] 周祚东. Ti系小中空高密度聚乙烯树脂开发及应用[J]. 炼油与化工, 2023, 34(02): 70-72.
- [2] 雷佳伟, 刘旭东, 郑昌, 等. InnoveneS 装置大中空高密度聚乙烯树脂性能[J]. 石油化工, 2025, 54(09): 1330-1335.
- [3] 张黎明. 高密度聚乙烯树脂在管材挤出的应用研究[J]. 山西化工, 2024, 44(01): 182-183.
- [4] 雷佳伟, 邓起焱, 张祖平, 等. IBC 桶专用高密度聚乙烯树脂性能研究[J]. 塑料科技, 2019, 47(07): 59-62.
- [5] 郑文明. 高密度聚乙烯树脂拉伸屈服应力测量不确定度评价[J]. 石化技术, 2021, 28(05): 13-15.