首都师范大学学报(自然科学版)
第 41 卷　第 1 期　Journal of Capital Normal University　No. 1
2020 年 2 月　(Natural Science Edition)　Feb. ,2020

基于 TRIZ 理论的酶催化合成聚己内酯工艺改进

张媛媛*　孔繁树　白换荣　石茜瑶　侯晓辉　邓雅姗

(青岛科技大学化工学院,山东 青岛　266042)

摘要:聚己内酯(PCL)是一类可生物降解高分子材料,具有良好的生物相容性、无毒性和良好的渗药性,在生物医用材料、农业、化工等领域应用广泛.本研究针对现有的聚己内酯酶催化工艺存在的反应时间长、步骤多、产率低、成本较高等问题,利用发明问题解决理论(TRIZ,teoriya resheniya izobreatatelskikh zadatch)中的功能分析、因果分析、冲突理论、发明原理等方法,得到解决问题的最终方案,提出了一锅法聚己内酯合成工艺,可望有效提高产物产率、降低生产成本.

关键词:TRIZ;冲突理论;发明原理;聚己内酯;工艺改进

中图分类号:TQ31　**DOI**:10.19789/j.1004-9398.2020.01.007

0　引　言

发明问题解决理论(TRIZ)的英文缩写是由俄文的拉丁文 teoriya resheniya izobreatatelskikh zadatch 首字母组成,翻译成英文是 theory of inventive problems solving,是当今重要的创新方法之一. TRIZ 由苏联发明家根里奇·阿奇舒勒(Genrich Altshuller)于 1946 年创立,是一套实用的、以解决发明问题为主要目的的创新理论和方法体系[1].经过 70 多年的发展,TRIZ 已在机械制造、航天航空、电子科技等诸多工程技术领域及社会科学、管理科学、生物科学等非技术领域发挥着巨大作用,成为人们创造性地发现问题和解决问题的系统理论和方法工具,并创造出重大效益[2-3].TRIZ 理论目前在生物催化领域应用还相对较少,主要难点在于如何将生物催化领域的技术问题表达成 TRIZ 问题,从而应用 TRIZ 中的工具如发明原理、标准解等获得 TRIZ 解决方案模型.本研究针对现有酶催化合成聚己内酯工艺中存在的问题,应用 TRIZ 理论,对其进行功能分析,再利用因果分析法深入分析存在问题的深层次原因,找出关键点,转化为关键问题,利用冲突理论和冲突矩阵、裁剪获得 TRIZ 解决方案模型,最后根据发明原理得到最终方案.

收稿日期:2019-03-25

*通信作者:zyy800928@qust.edu.cn

1　TRIZ 解决问题的基本流程

TRIZ 解决问题的基本流程包括:(1)将待解决问题表达成 TRIZ 标准问题.(2)利用 TRIZ 分析工具(功能分析、因果分析、资源分析、物质—场分析)进行问题分析,找出矛盾.(3)利用 TRIZ 解题工具(40 条发明原理和矛盾矩阵、四大分离原理、76 个标准解、效应数据库等)求出普适解或模拟解[4-5].

定义当前技术系统中的冲突是什么,再根据当前系统中最重要、最突出的矛盾(冲突),构建 1 或 2 对能反映整个系统关键问题的技术矛盾,归结为 39 个工程参数,再查找矛盾矩阵表,找到相应的解决该矛盾的发明原理集,在发明原理的指导下,找到实际问题的解决方案;如果是物理矛盾,运用四大分离原理和 40 条发明原理,在发明原理指导下找到问题的解决方案.

2　酶催化合成聚己内酯工艺的问题描述

现有酶催化法制备聚己内酯主要包括脂肪酶催化的己内酯合成和脂肪酶催化的己内酯聚合两个工艺过程.合成工艺存在的主要问题是:(1)在己内酯合成步骤,反应体系中产物己内酯和副产物乙酸浓度的增加使脂肪酶失活严重,存在产物抑制,从而影响催化效率,反应 30 h,环己酮转化率仍不足 50%[6].(2)脂肪酶在离子液体中催化己内酯聚

首都师范大学学报(自然科学版)

合,反应 24 h,单体转化率可达 80%,但反应条件苛刻,需要氮气保护,在有机溶剂苯中催化己内酯聚合,可获得高分子量聚己内酯,但是存在酶用量大,反应时间长(>48 h)等弊端[7-8].

合成工艺的关键技术参数是环己酮转化率不低于 70%,聚己内酯分子量不低于 2 000. 现有酶催化法制备聚己内酯工艺路线如图 1 所示.

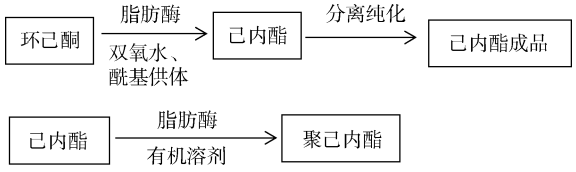


图 1 酶法聚己内酯工艺路线简图

3 发明问题初始形势分析

3.1 当前系统的工作原理

在过氧化氢作用下,由脂肪酶催化乙酸乙酯水解转化为过氧乙酸,进而过氧乙酸氧化环己酮生成己内酯,分离纯化得到己内酯产品;在有机溶剂或其他非水介质中由脂肪酶催化己内酯开环聚合,生成聚己内酯. 该系统存在的主要问题是:环己酮转化率低(<50%),脂肪酶用量大,聚己内酯产率低,成本较高. 其限制条件是:反应体系中产物己内酯和副产物乙酸浓度的增加使脂肪酶失活严重,存在产物抑制.

3.2 目前解决方案仍存在问题和不足

以环己醇为原料经醇脱氢酶(ADH)催化合成环己酮,再利用环己酮单加氧酶(CHMO)及南极假丝酵母脂肪酶 A(CAL-A)催化环己醇 3 步串联反应合成聚己内酯[9]. 目前的酶催化聚己内酯合成路线如图 2 所示. 该方案得到的聚己内酯分子量较低(<1 000),还需通过进一步化学聚合得到己内酯(PCL),才能满足不同功能材料的需求. 同时,该方案涉及 3 种酶,导致成本较高,而且 CHMO 等稳定性较差,反应产率较低,缺乏商品化酶制剂,限制其应用.

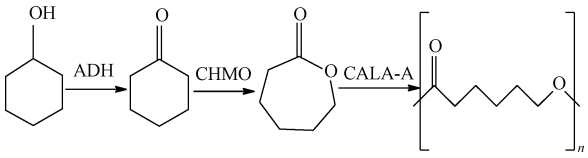


图 2 目前的酶催化聚己内酯合成路线

注:ADH 为醇脱氢酶;CHMO 为环己酮单加氧酶;CALA-A 为南极假丝酵母脂肪酶 A.

4 利用系统分析找出“酶催化合成聚己内酯工艺”技术系统中存在的矛盾

4.1 功能分析

4.1.1 组件分析

本研究中将“聚己内酯合成工艺”定义为一个技术系统,其功能定义为:制备聚己内酯. 将系统和超系统的组件加以区分,系统组件有 10 个,分别是酰基供体、脂肪酶、过氧化氢、环己酮、过氧乙酸、己内酯、乙酸、聚己内酯、有机溶剂和水;超系统组件有 2 个,分别是反应器和实验台面.

4.1.2 相互作用分析

对系统组件和超系统组件进行两两相互作用分析,详细结果列于表 1. 系统组件脂肪酶与系统组件酰基供体、过氧化氢、过氧乙酸、己内酯、乙酸、聚己内酯、水及超系统组件反应器均存在相互作用. 超系统组件反应器与各个系统组件之间均存在相互作用.

表 1 聚己内酯合成工艺技术系统的相互作用分析

组件	酰基供体	脂肪酶	过氧化氢	环己酮	过氧乙酸	己内酯	乙酸	聚己内酯	有机溶剂	水	反应器	实验台面
酰基供体		+	+	−	−	−	−	−	+	−	+	−
脂肪酶	+		+	−	+	+	+	+	+	+	+	−
过氧化氢	+	+		−	−	−	−	−	+	+	+	−
环己酮	−	−	−		+	−	−	−	+	−	+	−
过氧乙酸	−	+	−	+		−	−	−	+	−	+	−
己内酯	−	+	−	−	−		−	+	+	−	+	−
乙酸	−	+	−	−	−	−		−	+	−	+	−
聚己内酯	−	+	−	−	−	+	−		+	−	+	−
有机溶剂	+	+	+	+	+	+	+	+		−	+	−
水	−	+	+	−	−	−	−	−	−		+	−
反应器	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+
实验台面	−	−	−	−	−	−	−	−	−	−	+	

注:+. 两个组件之间有相互作用;−. 两个组件之间无相互作用;灰色部分表示同一组件之间不进行相互作用分析

首都师范大学学报(自然科学版)

4.1.3　功能模型

根据聚己内酯合成工艺技术系统的相互作用分析结果,对组件之间的具体功能进行识别,并对其执行功能的性能进行评估,得出聚己内酯合成工艺技术系统的功能结果列于表 2. 可知,酰基供体、脂肪酶、环己酮、过氧乙酸、反应器、实验台面均执行基本功能,过氧化氢、己内酯、有机溶剂、水在执行基本功能的同时还执行有害功能. 乙酸仅执行有害功能. 酰基供体、过氧化氢、环己酮、过氧乙酸、己内酯均存在不足功能.

表 2　聚己内酯合成工艺技术系统的功能

组件	功能描述	功能等级	性能水平
酰基供体	形成过氧乙酸	基本功能	不足
脂肪酶	激发过水解反应	基本功能	正常
	激发聚合反应	基本功能	正常
过氧化氢	形成过氧乙酸	基本功能	不足
	制约酶活性	有害功能	有害
环己酮	形成己内酯	基本功能	不足
过氧乙酸	起动环己酮氧化	基本功能	不足
己内酯	形成聚己内酯	基本功能	不足
	制约酶活性	有害功能	有害
乙酸	制约酶活性	有害功能	有害
有机溶剂	混合反应物	基本功能	正常
	制约酶活性	有害功能	有害
水	混合过氧化氢	基本功能	正常
	制约聚合反应	有害功能	有害
反应器	提供反应场所	基本功能	正常
实验台面	支撑反应器	基本功能	正常

根据聚己内酯合成工艺技术系统的功能表将系统功能进行图形化表示,聚己内酯合成工艺功能模型如图 3 所示. 模型清晰显示了每一个功能,特别是有问题的功能(不足功能和有害功能),主要包括:酰基供体、过氧化氢、己内酯、有机溶剂、水、环己酮、过氧乙酸、己内酯.

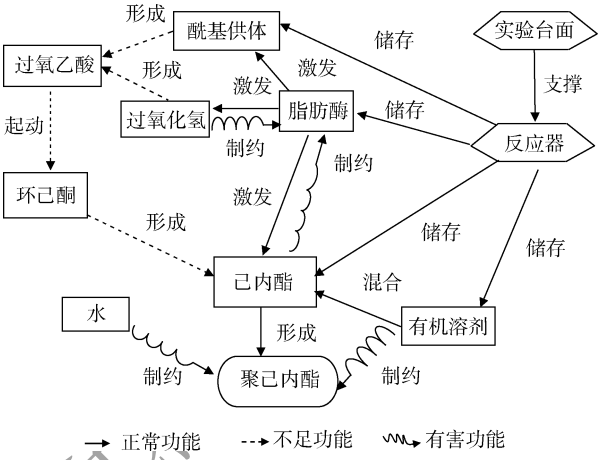


图 3　聚己内酯合成工艺功能模型图

4.2　因果链分析

4.2.1　因果链分析图

本研究的目标是降低聚己内酯生产成本,而初始缺点是项目目标的反面,即初始缺点为:聚己内酯生产成本高. 聚己内酯生产成本高的因果链分析如图 4 所示. 以初始缺点为起点,并分析造成此缺点的中间缺点,中间缺点既是上一层及缺点造成的原因,又是下一层及缺点造成的结果,逐层分析,最终找到末端缺点.

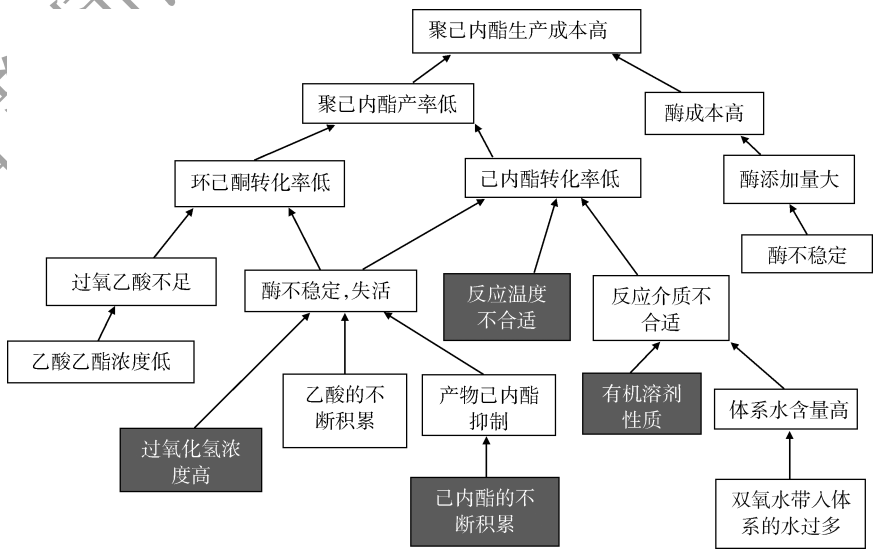


图 4　聚己内酯生产成本高的因果链分析图

首师范大学学报(自然

4.2.2 确定关键点

根据聚己内酯生产成本高的因果链分析图,确定以下缺点为关键缺点:(1)体系中己内酯的不断积累;(2)反应温度不利于己内酯的开环聚合;(3)有机溶剂的种类不利于聚合;(4)过氧化氢带入体系的水过多不利于聚合;(5)体系中过氧化氢浓度高;(6)乙酸乙酯浓度低.

4.2.3 确定关键问题及提出可能的解决方案

将关键点转化为关键问题,寻找可能的解决方案,并从各个关键问题出发,找出可能存在的矛盾,聚己内酯生产成本高的因果链分析结果列于表 3. 体系中己内酯的不断积累和过氧化氢浓度高可能是造成聚己内酯产率低、成本高的主要关键点,因此,关键问题是"如何将产生的己内酯转移"和"如何降低体系过氧化氢浓度". 针对前者,可能的解决方案是将己内酯原位分离或用两相体系将产物转移到与酶分隔的另一相;针对后者,可能的解决方案是减少过氧化氢与乙酸乙酯的摩尔比.

表 3 聚己内酯生产成本高的因果链分析

序号	关键点	关键问题	可能的解决方案	矛盾描述
1	体系中己内酯的不断积累	如何将产生的己内酯转移	(1)用分离方法将己内酯原位分离;(2)用两相体系将产物转移到与酶分隔的另一相	有矛盾,即希望己内酯的浓度低减少产物抑制,又希望己内酯的浓度高,有利于聚合
2	反应温度不利于己内酯的开环聚合	如何确定最佳反应温度	利用 RSM 法优化	无
3	有机溶剂的种类不利于聚合	如何确定最佳溶剂	利用 RSM 法优化	无
4	过氧化氢带入体系的水过多不利于聚合	如何减少过氧化氢带入体系中的水	提高加入的过氧化氢浓度	无
5	体系中过氧化氢浓度高	如何降低体系中过氧化氢浓度	减少过氧化氢与乙酸乙酯的摩尔比	有矛盾,即希望过氧化氢浓度高产生足够的过氧乙酸,又希望过氧化氢浓度低,不使酶失活
6	乙酸乙酯浓度低	如何提高乙酸乙酯的浓度	利用 RSM 法优化	无

注:RSM 为响应表面法.

5 利用 TRIZ 工具解决问题

5.1 利用技术矛盾原理提出方案

5.1.1 矛盾的描述

为了提高聚己内酯的产率(A),本研究提高体系中己内酯的浓度(C),但同时会导致系统酶的活性(B)的降低. 改善的参数为 A;恶化的参数为 B;A 和 B 为技术冲突;C 为物理冲突.

5.1.2 问题模型

对应 39 个通用工程参数,改善的参数 A:26(物质或事物的数量);恶化的参数 B:23(物质损失). 39 个通用工程参数列于表 4.

表 4 通用工程参数

编号	参数名称	编号	参数名称	编号	参数名称	编号	参数名称
1	运动物体的重量	11	应力或压力	21	功率	31	物体产生的有害作用
2	静止物体的重量	12	形状	22	能量损失	32	可制造性
3	运动物体的长度	13	结构的稳定性	23	物质损失	33	可操作性
4	静止物体的长度	14	强度	24	信息损失	34	可维修性
5	运动物体的面积	15	运动物体的作用时间	25	时间损失	35	适应性及多用性
6	静止物体的面积	16	静止物体的作用时间	26	物质或事物的数量	36	装置的复杂性
7	运动物体的体积	17	温度	27	可靠性	37	监控与测试的困难程度
8	静止物体的体积	18	光照强度/亮度	28	测试精度	38	自动化程度
9	速度	19	运动物体的能量	29	制造精度	39	生产率
10	力	20	静止物体的能量	30	影响物体的有害因素		

首都师范大学学报(自然科学版)

5.1.3　解决方案模型

对应查看阿奇舒勒矛盾矩阵表得到参考发明原理为:3(局部质量)、6(多用性)、10(预先作用)和 24(中介物).40 条发明原理参数列于表 5.

表 5　发明原理参数

序号	名称	序号	名称	序号	名称	序号	名称
1	分割	11	事先防范	21	减少有害作用时间	31	多孔材料
2	抽取	12	等势	22	变害为利	32	改变颜色
3	局部质量	13	反向作用	23	反馈	33	同质性
4	非对称	14	曲率增加	24	中介物	34	抛弃或再生
5	组合、合并	15	动态特性	25	自服务	35	物理化学状态变化
6	多用性	16	未达到或过度的作用	26	复制	36	相变
7	嵌套	17	空间维数变化	27	廉价替代品	37	热膨胀
8	重量补偿	18	机械振动	28	机械系统替代	38	加速氧化
9	预先反作用	19	周期性作用	29	气压或液压结构	39	惰性环境
10	预先作用	20	有效作用的连续性	30	柔性壳体或薄膜	40	复合材料

5.1.4　提出方案

(1)使用 3(局部质量):使系统中己内酯的浓度缓慢增加,将原来一次性加入过氧化氢方式改为阶段性加入或滴加过氧化氢.

(2)使用 6(多用性):使系统中的己内酯具备多功能性,既是环己酮转化的产物又是聚己内酯形成的底物,使己内酯在同一反应中既做产物又做底物,也就是说将己内酯合成和己内酯聚合2个工艺进行合并,一锅进行,使己内酯原位开环聚合.

(3)使用 10(预先作用):在向反应体系加入过氧化氢之前,预先除掉部分的水,即使用浓度更高的过氧化氢,如浓度从 30% 提高到 50%,减少体系中的水含量,有利于己内酯聚合,提高聚己内酯的产率.

(4)使用 24(中介物):不直接加入过氧化氢,而是加入葡萄糖氧化酶(GOD)和葡萄糖,利用 GOD 氧化葡萄糖原位产生的过氧化氢为氧化剂.

5.2　利用物理矛盾原理提出方案

5.2.1　确定物理矛盾

提高 *C* 可以满足提高 *A* 的要求;降低 *C* 以满足减少产物抑制 *B* 的要求.

5.2.2　采用分离原理提出方案

(1)空间分离. 基于空间分离推荐的解决物理矛盾的发明原理:1(分割)、2(抽取)、3(局部质量)、4(非对称)、7(嵌套)和 17(空间维数变化). 确认合适的原理:3(局部质量). 提出技术方案:使系统中己内酯的浓度缓慢增加,将原来一次性加入过氧化氢方式改为阶段性加入或滴加过氧化氢.

(2)时间分离. 基于时间分离推荐的解决物理矛盾的发明原理:9(预先反作用)、10(预先作用)、11(事先防范)、15(动态特性)和 34(抛弃或再生). 确认合适的原理:9(预先反作用)和 10(预先作用). 提出技术方案:首先使用 9(预先反作用),预先在体系中加入碱性物质,将反应过程中形成的过氧乙酸中和,从而减少乙酸浓度不断升高导致的酶失活;其次使用 10(预先作用),在向反应体系加入过氧化氢之前,预先除掉部分的水,即使用浓度更高的过氧化氢,如浓度从 30% 提高到 50%,减少体系中的水含量,有利于己内酯聚合,提高聚己内酯的产率.

(3)条件分离. 基于条件分离推荐的解决物理矛盾的发明原理:22(变害为利)、23(反馈)、6(多用性)、8(重量补偿)、26(复制)和 35(物理化学状态变化). 确认合适的原理:6(多用性)和 35(物理化学状态变化). 提出技术方案:首先使用 6(多用性),使系统中的己内酯具备多功能性,既是环己酮转化的产物又是聚己内酯形成的底物,使己内酯既做产物又做底物,也就是说作为中间产物,将己内酯合成和己内酯聚合 2 个工艺进行合并,一锅进行,使己内酯原位开环聚合. 其次使用 35(物理化学状态变化),过氧化氢的加入方式可以从过氧化氢改成加入固体的尿素过氧化氢复合物,也可以起到充当氧化剂的作用,因为是固体,不含水,有利于己

首都师范大学学报(自然科学版)

内酯聚合.

(4)整体与部分分离.基于整体与部分分离推荐的解决物理矛盾的发明原理:3(局部质量)、17(空间维数变化)、19(周期性作用)、31(多孔材料)、32(改变颜色)和 40(复合材料).确认合适的原理:19(周期性作).提出技术方案:采取分次加入方式加入过氧化氢,每间隔一定的时间加入过氧化氢以减少过氧化氢对酶的抑制作用.

5.3 裁剪

根据因果链分析,导致系统问题的根本原因是体系中己内酯浓度过高,因此,在功能模型上确定的最终冲突区域元件是己内酯.裁剪后的聚己内酯合成工艺功能模型如图 5.应优先裁剪最终冲突区域中的己内酯.根据裁剪规则,如果系统或超系统中存在某一元件能够取代当前功能载体执行相同或更好的功能,则当前功能载体可以裁去.

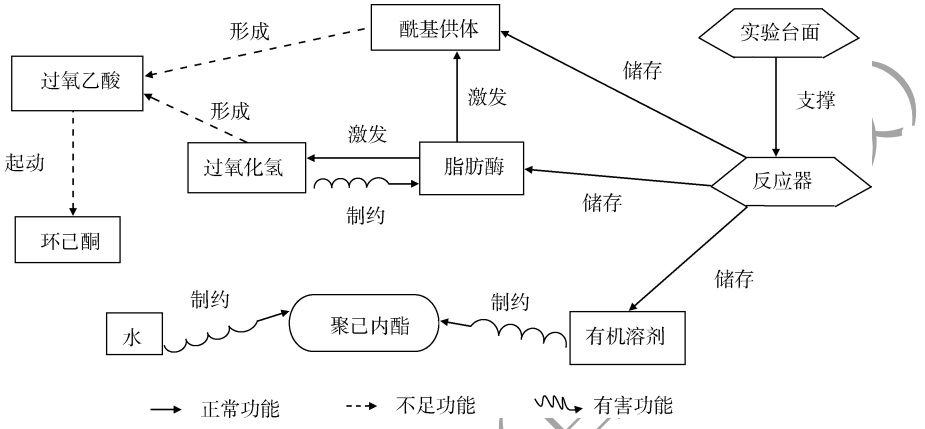


图 5 裁剪后的聚己内酯合成工艺功能模型

5.3.1 问题模型

裁剪后的模型失去了原来己内酯聚合形成聚己内酯的功能.

5.3.2 应用冲突求解

希望改进的特性为聚己内酯产率[26(物质或事物的数量)];采用的措施是添加己内酯;恶化的特性为操作复杂性增加[33(可操作性)].

查矛盾矩阵得到可使用的发明原理为:10(预先作用)、25(自服务)和 35(物理化学状态变化).

(1)使用 10(预先作用):在向反应体系加入过氧化氢之前,预先除掉部分的水,即使用浓度更高的过氧化氢,如浓度从 30% 提高到 50%,减少体系中的水含量,有利于己内酯聚合,提高聚己内酯的产率.

(2)使用 25(自服务):通过过氧酸氧化环己酮产生的己内酯作为合成聚己内酯的原料而不是直接向体系加入己内酯.即:将己内酯合成和己内酯聚合 2 个工艺进行合并,一锅进行,使己内酯原位开环聚合.

(3)使用 35(物理化学状态变化):过氧化氢的加入方式可以从过氧化氢改成加入固体的尿素过氧化氢复合物,也可以起到充当氧化剂的作用,因为是固体,不含水,有利于己内酯聚合.

6 讨 论

利用 TRIZ 理论得到的全部技术方案及分析评价见表 6.方案 1:采用滴加或阶段性加入过氧化氢的方式,使系统中己内酯浓度缓慢增加,减少己内酯对脂肪酶的抑制作用;该方案容易操作,可以实行.方案 2:将己内酯合成和己内酯聚合 2 个工艺进行合并,一锅进行,使己内酯原位开环聚合;该方案减少了中间产物的分离纯化过程,使工艺操作大大简化,减少中间产物损失,有效降低操作成本,可以实行.方案 3:预先在体系中加入碱性物质,中和反应过程中形成的过氧乙酸,从而减少对酶的抑制作用;该方案在实际操作中容易实现,但是可能会对聚合产生影响,可行性需验证.方案 4:加入 GOD 和葡萄糖,使过氧化氢原位生成.该方案向反应体系引入新的酶和底物,会增加生产成本,实际工艺中不适合应用.方案 5:在向反应体系加入过氧化氢之前,预先除掉部分的水,即使用浓度更高的过氧化氢,如浓度从 30% 提高到 50%,减少体系中的水含量,有利于己内酯聚合,提高聚己内酯的产率.方案 6:以固体的尿素过氧化氢复合物形式加入过氧化氢,代替原来的过氧化氢.

表 6　各方案分析评价表

方案	消除矛盾	产生新的危害	成本	复杂性	可行性	排名
1	*A*、*B*、*C*	无	低	略复杂	可行	3
2	*A*、*B*、*C*	无	低	简单	可行	1
3	*B*	碱影响聚合	低	简单	不可行	4
4	*B*	葡萄糖影响聚合	高	复杂	不可行	6
5	*A*	高浓度过氧化氢操作不安全	低	简单	不可行	5
6	*B*	无	低	简单	可行	2

注:*A* 为聚己内酯的产率;*B* 为系统酶的活性;*C* 为 己内酯的浓度.

经过综合比较分析,最终采用方案 2 和 6 的综合,一锅法由环己酮高效合成聚己内酯. 最终方案形成的酶催化一锅法聚己内酯工艺如图 6 所示. 在过氧化氢(以尿素过氧化氢复合物的形式加入,实际参与反应的是过氧化氢)存在下,由固定化脂肪酶催化乙酸乙酯过水解原位生成过氧乙酸,进而过氧酸氧化环己酮生成己内酯,检测体系中己内酯浓度,当到达聚合浓度时,加入有机溶剂,此时聚合反应开始,即由固定化脂肪酶催化己内酯原位开环聚合,生成聚己内酯.

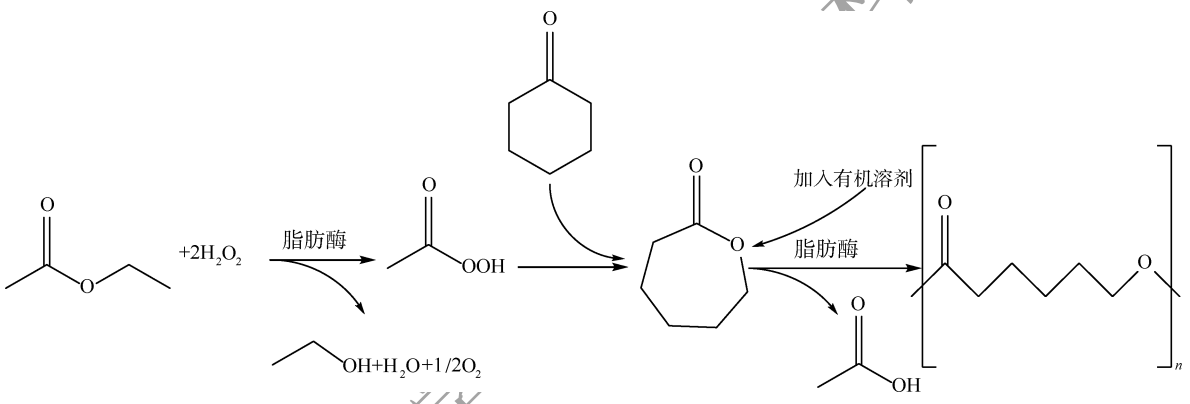


图 6　最终方案形成的酶催化一锅法聚己内酯工艺

近年来,TRIZ 理论已在工程领域成功地用于解决工艺优化等相关技术问题,取得了较好的效果. 李齐春等[10]利用 TRIZ 分离原理有效解决了有机铝聚合物制备过程中的物理矛盾,提高了聚合反应稳定性,并根据物–场分析法,利用乙醇消除丙酮对异丙醇铝合成反应的有害效应,提高了合成反应速度. 苏国宏[11]针对水溶性小麦蛋白生产工艺中“面筋与碱液混合效果不理想”的问题,充分利用 TRIZ 工具分析问题,提取技术参数,通过矛盾矩阵表查找发明原理,最终提出技术方案. 刘闯等[12]将 TRIZ 创新方法应用到化学工艺研发中,完善了聚醚醚酮复合材料制备工艺并提高了复合材料强度. 笔者也将 TRIZ 中的冲突解决理论、技术系统进化理论、物质–场模型等引入到制药分离工程的教学过程中,并用以解决制药分离工程中的实际问题,效果良好[13].

7　总　结

TRIZ 为人们创造性地发现问题和解决问题提供了系统理论和方法工具,在工程技术领域甚至非技术领域都取得了很好的应用成效. 本研究运用 TRIZ 理论中的功能分析、因果分析确定酶催化合成聚己内酯工艺中的关键问题,并利用冲突理论、发明原理等方法,得到解决问题的最终方案,进而提出了一锅法酶催化聚己内酯合成工艺,可望有效提高产物产率、降低生产成本. 本研究为其他产品的类似工艺改进提供了参考,具有较好的启发指导意义,推动 TRIZ 理论在研发过程中的普及和应用.

参 考 文 献

[1] 孙永伟,谢尔盖·伊克万科. TRIZ:打开创新之门的金钥匙[M]. 北京:科学出版社,2015:11.

[2] 陈敏慧,蒋艳萍,吕建秋. TRIZ 国内外研究现状、存在问题及对策研究[J]. 科技管理研究, 2015, 35(1): 24 – 27.

[3] ILEVBARE I M, PROBERT D, PHAAL R. A review of TRIZ, and its benefits and challenges in practice [J]. Technovation, 2013, 33(2): 30 – 37.

[4] 张换高. 创新设计:TRIZ 系统化创新教程[M]. 北京:机械工业出版社,2017: 40.

[5] 郑称德. TRIZ 的产生及其理论体系-TRIZ 创造性问题解决理论[J]. 科技进步与对策, 2002, 19(1): 112 – 114.

[6] CHÁVEZ G, HATTI-KAUL R, SHELDON R A, et al. Baeyer-Villiger oxidation with peracid generated in situ by CaLB-CLEA catalyzed perhydrolysis [J]. Journal of Molecular Catalysis B: Enzymatic, 2013, 89: 67 – 72.

[7] YUAN J G, DAI Y P, YU Y Y, et al. Biocatalytic synthesis of poly(ε-caprolactone) using modified lipase in ionic liquid media[J]. Eng Life Sci, 2016, 16: 371 – 378.

[8] KUMAR A, GROSS R A. Candida antartica lipase B catalyzed polycaprolactone synthesis: effects of organic media and temperature [J]. Biomacromolecules, 2000, 1(1): 133 – 138.

[9] SCHMIDT S, SCHERKUS C, MUSCHIOL J, et al. An enzyme cascade synthesis of ε-caprolactone and its oligomers [J]. Angew Chem Int Ed, 2015, 54(9): 2784 – 2787.

[10] 李齐春,王兴隆,孙云辉. TRIZ 理论在异丙醇铝工艺改进中的应用[J]. 当代化工, 2017, 46(1): 112 – 114.

[11] 苏国宏. 运用 TRIZ 理论改进水溶小麦蛋白工艺[J]. 创新科技, 2012, 5: 18 – 19.

[12] 刘闯, 石飞, 张晓明, 等. TRIZ 创新方法在化学工艺研发中的应用[J]. 工业技术经济, 2016, 12: 151 – 155.

[13] 张媛媛. TRIZ 创新理论在制药分离工程课程教学中的体现和应用[J]. 首都师范大学学报(自然科学版), 2019, 40(1):50 – 54.

Improvement of Enzymatic Synthesis of Polycaprolactone Based on TRIZ Theory

ZHANG Yuanyuan KONG Fanshu BAI Huanrong SHI Xiyao HOU Xiaohui DENG Yashan

(College of Chemical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao Shandong 266042)

Abstract: Poly(ε-caprolactone) (PCL) is a kind of biodegradable macromolecule material, which has good biocompatibility, non-toxicity and good penetration. It has been widely used in biomedical materials, agriculture, chemical industry and other fields. To solve the problems including long reaction time, many steps, low yield and high cost existing in the current catalytic process of PCL, a one-pot process for the synthesis of PCL was proposed based on TRIZ theory. The final solution of the problem was obtained by means of functional analysis, causal analysis, conflict theory and inventive principle by using TRIZ theory. This novel process proposed here is expected to increase the yield of the product effectively and reduce the production cost.

Keywords: TRIZ theory; conflict theory; invention principle; poly(ε-caprolactone); process improvement

首都师范大学学报(自然科学版)