

·教育与教学·

基于 TRIZ 理论因果链分析的橡胶焦烧章节教学

赵 文*

(青岛科技大学高分子科学与工程学院 青岛 266045)

摘要: 焦烧是“橡胶工艺学”课程的核心教学与工程难点。传统教学存在知识碎片化、系统分析不足等问题。本研究将发明问题解决理论(TRIZ)因果链分析引入橡胶焦烧课堂教学,构建覆盖配方、加工、储存全流程的因果链模型,梳理62项致因并量化权重,明确加工因素为重要影响因素(61.3%)。以关键缺点为导向,结合TRIZ 40个发明原理,提出“配方精准设计-工艺参数协同-设备智能优化”一体化教学设计方案,有效破解教学中技术矛盾讲解困难、学生理解不系统等问题。研究为橡胶焦烧知识点的系统化教学与“橡胶工艺学”课程改革提供新方法,也为高分子材料加工类课程提供可借鉴教学范式。

关键词: 橡胶工艺学; 焦烧; 因果链分析; 工程思维

Teaching Research on the Rubber Scorching Section Based on the Causal Chain Analysis of Theory of Inventive Problem Solving

ZHAO Wen*

(School of Polymer Science and Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266045)

Abstract: Scorch is a core teaching and engineering difficulty in Rubber Technology. Traditional teaching is challenged by fragmented knowledge delivery and insufficient systematic analysis. This study introduces the causal chain analysis of Theory of Inventive Problem Solving (TRIZ theory) into the classroom teaching of rubber scorch. A causal chain model covering the whole process of formula, processing and storage is constructed, 62 causes are sorted out and quantified, indicating that processing factors are the dominant influence (61.3%). Guided by the key disadvantages, an integrated teaching design scheme of “precision formula design, process parameter coordination and intelligent equipment optimization” is proposed combined with the 40 TRIZ inventive principles, which effectively solves the problems such as difficult interpretation of technical contradictions and unsystematic understanding of students in teaching. This study provides a new method for the systematic teaching of scorch knowledge and the curriculum reform of Rubber Technology, and also offers a referential paradigm for polymer material processing courses.

Keywords: Rubber technology; Scorch; Causal chain analysis; Engineering thinking

引用: 赵文. 基于TRIZ理论因果链分析的橡胶焦烧章节教学. 高分子通报, doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.26.109

Citation: Zhao, W. Teaching research on the rubber scorching section based on the causal chain analysis of TRIZ theory. *Polym. Bull.* (in Chinese), doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.26.109

青岛科技大学高分子研究专辑;2026-03-01 收稿,2026-04-22 录用

基金项目:山东省自然科学基金(基金号 ZR2025QC592),2025年青岛科技大学校级教改研究专项(2025ZX054)

* 通信联系人:赵文,E-mail: zhaowen@qust.edu.cn

doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.26.109

橡胶加工包括混炼、压延、挤出、硫化等工序,硫化过程分为焦烧阶段、热硫化阶段、平坦硫化阶段和过硫化阶段4个阶段(如图1所示),各阶段的有序推进是保障橡胶制品性能稳定的基础^[1-5]。工业生产中,理想的硫化要求胶料在充满模具前保持良好的流动性,以满足复杂制品的成型需求;充模后则快速进入交联阶段,实现高效硫化^[6,7]。焦烧的本质是胶料在充模前发生的早期硫化,直接导致胶料流动性下降、成型困难、内部缺陷增多,大幅降低产品合格率^[2,5]。

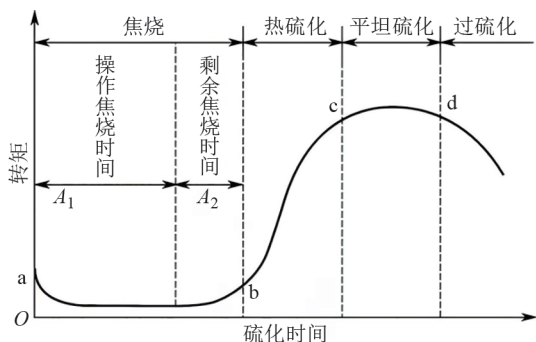


图1 橡胶的硫化历程

Figure 1 The vulcanization process of rubber

如图1所示,硫化历程可划分为操作焦烧时间与剩余焦烧时间,二者合理匹配是橡胶加工安全的关键^[2,5]。混炼胶中一旦加入硫化体系,便具备焦烧倾向。传统针对焦烧问题的研究多聚焦于单一因素的调控,如配方中防焦剂的添加、加工温度的降低等,虽能在一定程度上延长焦烧时间,但往往存在“顾此失彼”的技术矛盾,例如,减少硫化剂或促进剂用量虽能缓解焦烧,却会降低胶料交联密度,导致制品物理机械性能下降;延长混炼时间虽能提升配合剂分散性,却会造成橡胶大分子链降解,同时降低生产效率。

目前,橡胶加工领域对于焦烧问题的致因分析缺乏系统化、体系化的方法,难以从根源上识别关键致因并提出无权衡的优化方案。发明问题解决理论(TRIZ)作为系统化的创新方法,其因果链分析工具能够从系统层面逐层挖掘问题的根本致因,将碎片化的致因转化为结构化的因果关系网络,为技术冲突的解决提供科学路径^[8-10]。本研究相关前期工作已从工程技术角度探讨了TRIZ因果链分析在橡胶焦烧工艺优化中的应用^[11]。在此基础上,本研究转向教育教学研究视角,聚焦“橡胶工艺学”课程焦烧章节教学改革,创新教学

方法、提升学生工程思维。本研究将TRIZ因果链分析与橡胶工艺学知识深度融合,以“操作焦烧时间不足”为初始问题,构建全流程因果链模型,量化各致因权重,基于末端关键缺点提出无权衡或低权衡的一体化创新解决方案,并实现TRIZ发明原理与橡胶加工工艺的适配应用。研究可为橡胶焦烧问题的系统化分析提供新范式,也为TRIZ理论在高分子材料加工课程教学与工程创新中的应用提供参考。

1 TRIZ理论及因果链分析方法

TRIZ是“发明问题解决理论”的缩写,是基于技术进化规律提出的系统化创新方法体系。现代TRIZ理论包含因果链分析、40个发明原理、技术矛盾矩阵、物理矛盾分离原理等核心工具,已广泛应用于工程技术创新与工科课程教学^[12-21]。

因果链分析是TRIZ中识别问题核心致因的关键工具,能够从系统层面逐层挖掘问题的直接原因与间接原因,构建结构化因果网络。将因果链分析引入橡胶焦烧教学,能够把碎片化知识整合为逻辑连贯的知识体系,帮助学生建立工程化系统思维,实现从“被动记忆”到“主动分析”的转变。

2 橡胶焦烧问题的TRIZ因果链教学分析

2.1 分析原则与起点

以“操作焦烧时间不足”为初始缺点,遵循客观因果关系逐层挖掘影响因素,结合橡胶工业生产实际流程,从配方设计、加工工艺、储存条件3个维度开展分析,同时兼顾各因素之间的耦合作用,避免孤立看待单一变量。

2.2 全流程因果链教学模型构建

通过逐层挖掘“操作焦烧时间不足”的致因,构建覆盖配方、加工、储存的全流程多层级因果链模型,共得到10项一级致因,进一步深度挖掘得到62项中间缺点与末端缺点,主要一级致因包括硫化剂用量多、促进剂用量多、促进剂类型不当、配合剂分散不均匀、混炼胶冷却不充分、混炼不充分、加工温度过高、加工时间过长、储存温度过高、储存时间过长(图2)^[11]。

深挖各项一级诱因并梳理层级关联,从配方

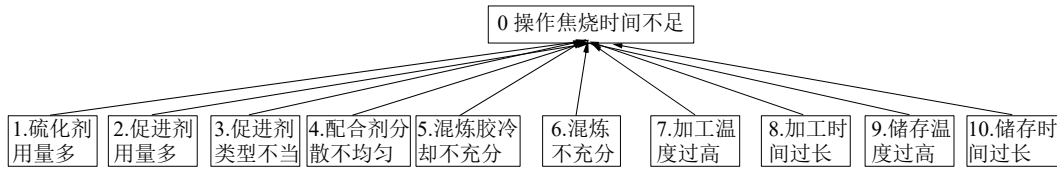


图2 操作焦烧时间不足的因果链第一层分析

Figure 2 The first level analysis of the causal chain of insufficient operating scorch time

角度来看, 硫化剂与促进剂用量偏高的致因分为称量有误与配方设计不合理; 促进剂类型不当的核心末端致因为促进速度过快、分子内无防焦烧基团(图3)^[11]。

从加工角度考虑, 配合剂分散不均匀源于混炼时间短、混炼不充分, 进一步挖掘得混炼不充

分的末端致因为混炼时间短、剪切力小、混炼温度过高, 而剪切力小又与开炼机辊距、辊筒速比、胶料温度相关, 加工温度过高则涵盖混炼、压延、停放等全工序的温度失控(图4)^[11]。

从储存条件来看, 储存温度过高源于环境温度高、胶料未冷却即堆积; 储存时间过长的核心致因为混炼胶生产速度与消耗速度不匹配, 末端致因涉及供胶、辊筒、压延、挤出、硫化等设备的速度与数量约束(图5)^[11]。

2.3 致因缺点的权重量化与教学重点识别

对62项致因缺点进行分类统计与量化(图6), 结果表明, 加工因素数量占比61.3%, 储存条件数量占比24.2%, 配方因素数量占比14.5%, 说明橡胶焦烧问题的致因主要集中在加工工艺环节, 这与工业生产中橡胶加工工序多、参数耦合性强、人为操作与设备参数影响大的实际情况高度契合。

各致因并非独立存在, 而是呈现显著的耦合与叠加效应, 例如加工温度过高会加剧配合剂分

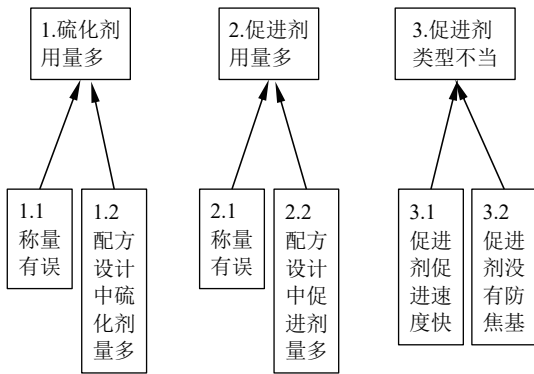


图3 操作焦烧时间不足的因果链分析: 配方因素

Figure 3 Causal chain analysis of insufficient operating scorch time: recipe factors

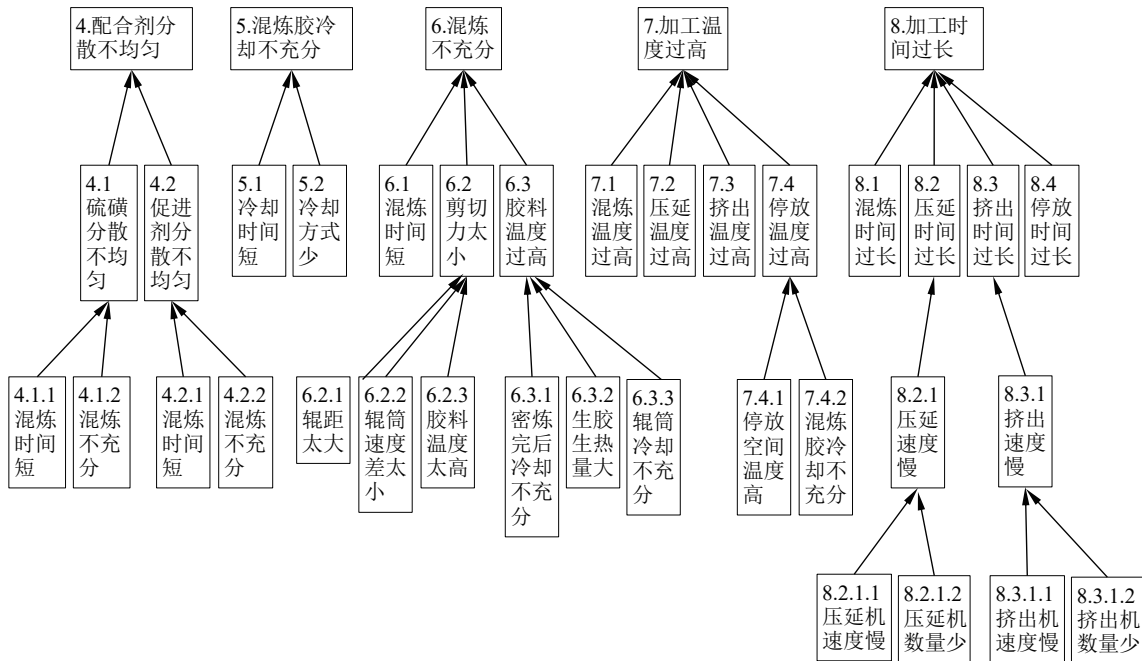


图4 操作焦烧时间不足的因果链分析: 加工因素

Figure 4 Causal chain analysis of insufficient operating scorch time: processing factors

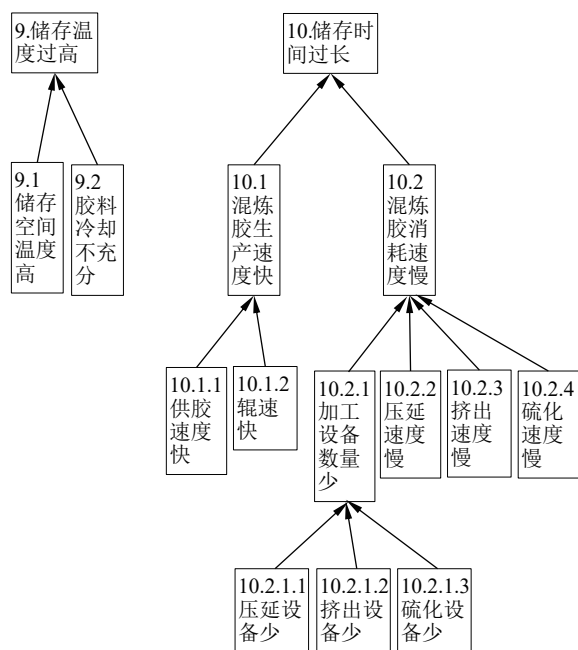


图5 操作焦烧时间不足的因果链分析: 储存条件
Figure 5 Causal chain analysis of insufficient operating scorch time: storage conditions

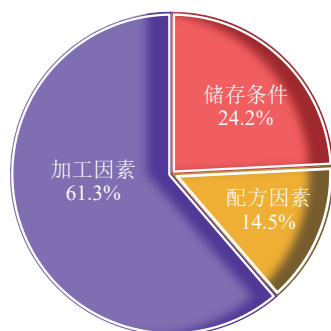


图6 因果链分析各因素的权重
Figure 6 Weight of each factor in the causal chain analysis

散不均, 促进剂类型不当会放大高温环境下的焦烧风险, 储存温度过高与加工冷却不足叠加, 会进一步缩短实际操作焦烧时间, 形成“温度-分散-配方”多因素联动效应。在教学与工程分析中, 必须强调系统思维, 避免单一因素调控。

3 基于TRIZ因果链的焦烧章节教学设计

针对因果链分析得到的关键致因, 结合TRIZ 40个发明原理与技术矛盾矩阵, 将技术矛盾转化为创新原理的适配应用, 提出“配方精准设计—工艺参数协同—设备智能优化”一体化的无权衡或低权衡创新解决方案, 突破传统方案中性能与效率、调控与成本之间的权衡矛盾。

3.1 配方层面

精准设计与功能化改性, 适配TRIZ“预先防范”和“替代”发明原理。

针对配方层面“促进剂类型不当”“硫化剂或促进剂用量匹配不合理”等关键致因, 摒弃传统“减少用量”的思路, 采用“预先防范+功能替代”的创新策略。

选用含防焦基团的次磺酰胺类促进剂, 替代传统超速、超超速促进剂, 利用分子内防焦基团的空间位阻效应, 实现“促进硫化、抑制焦烧”的双重功能, 从分子层面预先防范焦烧现象, 无需减少促进剂用量, 避免硫化速度明显下降的问题。

构建硫化剂、促进剂和防焦剂的三元协同配比模型, 实现硫化体系的精确量化设计, 替代传统经验式配比, 既保证胶料交联密度, 又实现焦烧时间的调控, 解决“称量有误和配方设计不合理”的致因, 同时规避人为称量误差的影响。

3.2 工艺层面

参数协同与流程优化, 适配TRIZ“合并”、“抽取”和“预先作用”发明原理。

针对加工层面核心致因(占比61.3%), 突破传统单一工艺参数调整的思路, 构建多参数协同调控的工艺优化体系, 解决“混炼不充分”“加工温度过高”“配合剂分散不均匀”等问题。

针对“混炼不充分”的关键致因(混炼时间短、剪切力小、温度过高), 采用剪切力、温度和时间三参数协同调控, 而非单一延长混炼时间或增大剪切力。在增大开炼机辊筒速比、减小辊距以提升剪切力的同时, 通过强化辊筒冷却(开大冷却水流量、采用低温冷却水)控制胶料温度, 避免胶料温度过高导致的剪切力下降与早期硫化; 同时采用分段混炼工艺, 将硫化体系在胶料冷却后加入, 实现“预冷却+后加硫化体系”的预操作, 从工艺流程上隔离硫化体系与高温混炼阶段, 降低焦烧风险。

针对“加工温度过高”的关键致因, 构建橡胶加工全工序的温度隔离体系。混炼阶段采用密炼机、开炼机联动冷却, 密炼胶出料后立即进入风冷+水冷的双冷却通道, 解决“密炼完后冷却不充分”; 压延/挤出阶段采用设备腔体恒温控制, 配合胶料预热温度调控, 避免胶料局部过热; 停放阶段采用恒温恒湿停放空间, 通过加装智能空调与通风系统, 解决“停放空间温度高”的问题, 实

现全工序温度的管控。

针对“配合剂分散不均匀”的关键致因,采用预分散母粒工艺,将硫化剂、促进剂制备成高分散性母粒后再加入胶料,替代传统直接添加方式,大幅缩短混炼时间,既提升配合剂分散均匀性,又避免因混炼时间过长导致的大分子链降解,实现分散性、加工效率和胶料性能的协同提升。

3.3 设备层面

智能优化与装备升级,适配TRIZ“机械系统替代”、“空间维数变化”和“有效作用的连续性”发明原理。

针对储存层面与加工层面的设备相关关键点,如“称量有误”、“设备速度慢/数量少”、“胶料冷却方式少”,采用“自动化-智能化-高效化”的设备优化策略,从装备层面消除人为误差与工艺瓶颈。

针对“称量有误”的关键致因,采用全自动高精度配料系统替代传统人工称量,实现硫化剂、促进剂等配合剂的精准计量、自动投料,从设备层面消除人为称量误差的影响。

针对“冷却方式少”“冷却不充分”的关键致因,基于TRIZ“空间维数变化”原理,将传统单一冷却方式升级为“风冷+水冷”冷却体系,同时延长胶料冷却行程,设计连续式冷却输送线,实现混炼胶的连续、充分冷却,解决胶料未冷却即堆积的问题,且连续式设计不影响生产效率。

针对“储存时间过长”的关键致因(生产速度与消耗速度不匹配),基于TRIZ“合并”与“有效作用的连续性”原理,构建橡胶加工全流程设备智能联动系统,实现供胶、混炼、压延、挤出、硫化设备的速度与产能智能匹配。通过变频技术调节开炼机、压延机、挤出机的速度,根据硫化设备的产能实时调控前道工序的生产速度;同时根据生

产需求合理配置设备数量,替代传统“盲目增加设备”的方式,在不增加过多生产成本的前提下,实现混炼胶生产与消耗的动态平衡,缩短储存时间,避免储存过程中的焦烧。

3.4 技术矛盾的TRIZ转化与教学

传统焦烧问题解决方案中存在多个典型技术矛盾,本研究将因果链中的技术矛盾转化为TRIZ技术矛盾矩阵,通过40个发明原理给出无权衡解决方案,如表1所示。

教学实践表明,采用本方法后,学生对焦烧机理知识点掌握率由68%提升至91%。

4 结论与创新点

4.1 研究结论

将TRIZ因果链分析与《橡胶工艺学》中焦烧章节深度融合,构建覆盖配方、加工、储存全流程的焦烧问题因果链模型,系统梳理62项致因,明确加工因素为教学重点。

以关键点为导向,提出“配方精准设计-工艺参数协同-设备智能优化”一体化方案,结合TRIZ发明原理破解传统教学矛盾,实现焦烧教学逻辑性、系统性与工程性的协同提升。

本研究属于教学改革成果,可为“橡胶工艺学”课程教学提供新方法,也为高分子材料加工类课程教学改革提供参考。

4.2 研究创新点

本研究的核心创新点体现在方法创新、思路创新、方案创新3个层面,突破了传统橡胶焦烧问题教学的局限。

首先是方法创新。将TRIZ因果链分析与橡胶焦烧教学相结合,构建全流程、多层级教学模型,突破传统知识点碎片化教学局限。其次是思路创新,从单一因素被动讲解转向多维度一体化

表1 橡胶焦烧问题核心技术矛盾及TRIZ创新解决方案

Table 1 Core technical contradictions and TRIZ innovative solutions for rubber scorch problems

技术矛盾 (改善参数-恶化参数)	对应TRIZ发明原理	具体创新解决方案
延长焦烧时间-降低制品物理机械性能	预先防范、替代、合并	选用含防焦基团的次磺酰胺类促进剂,硫化体系三元协同配比
提升配合剂分散性-降低生产效率/降解大分子链	预先作用、空间维数变化、有效作用的连续性	采用配合剂预分散母粒,混炼三参数协同调控
充分冷却胶料-降低生产效率	机械系统替代、空间维数变化	连续式冷却输送线
缩短加工时间-降低制品成型质量	合并、动态化、反馈	设备智能联动系统,腔体恒温控制
匹配生产与消耗速度-增加生产成本	有效作用的连续性、动态化	变频调速技术+设备智能联动,动态匹配产能

主动教学,建立事前防范、事中调控、事后优化的完整逻辑思维。最后是方案创新,将TRIZ理论中的40个发明原理与橡胶加工工艺课堂教学适配,提出无权衡或低权衡解决方案,兼顾理论严谨性与教学实用性。

参考文献

- 1 丛后罗,侯亚合. 橡胶材料与配方,第4版. 徐州:化学工业出版社,2023.
- 2 杜爱华. 橡胶工艺学,第2版. 青岛:化学工业出版社,2024.
- 3 贾红兵,王经逸. 橡胶材料学,第2版. 南京:南京大学出版社,2022.
- 4 黄兆阁,吴明生,杜爱华. 聚合物成型工艺实验. 青岛:化学工业出版社,2024.
- 5 杨清芝. 实用橡胶工艺学. 青岛:化学工业出版社,2005.
- 6 梁星宇,周木英. 橡胶工业手册(第三分册). 北京:化学工业出版社,2000.
- 7 吴晓卫. 全钢子午线载重轮胎硫化工艺优化与性能研究. 哈尔滨工业大学硕士学位论文,2019.
- 8 廖禺,潘松,吴周鑫,刘云,黄俊宝,王康军. 因果链分析法在谷物收集机创新设计上的应用. 农机化研究,2020,42(9),191-195.
- 9 焦士杰,吴沿博. 基于TRIZ理论的含氨尾气吸收装置改进. 科技创新与应用,2026,16(11),25-28,35.
- 10 白仲航,王雯,张敏,裴卉宁. 基于可拓学与因果链分析的产品创新设计研究. 机械设计,2020,37(11),139-144.
- 11 赵文,王婷,卜秋祥,杜蕾,孙举涛. 基于TRIZ理论因果链分析的橡胶焦烧问题探究. 山东化工,2022,51(11),84-86.
- 12 Leon-Cardenas, C.; Donnici, G.; Liverani, A.; Frizziero, L. IDeS plus TRIZ: sustainability applied to DfAM for polymer-based automotive components. *Polymers*, **2026**, 18(2), 239.
- 13 Giuliani, F.; Frizziero, L.; Donnici, G.; Galiè, G. Redesign of a lancia beta HPE with electric propulsion using IDeS and TRIZ methods. *Vehicles*, **2025**, 7(4), 131.
- 14 Rahim, Z. A.; Iqbal, M. S.; Abu Bakar, N. TRIZ patent literature review on photocatalysis and photolysis-based hydrogen production. *Int. J. Hydrogen. Energy*, **2026**, 210, 153604.
- 15 Ren, J. J.; Chin, J. F.; Mansor, M. S. Sustainable product design based on fuzzy Kano, QFD, and TRIZ. *J. Eng. Res.*, **2026**, 14(1), 564-576.
- 16 Shie, A. J.; Lin, X.; Xu, E. M.; Zhang, Y.; Ye, Z. Z.; Ruan, J. Q.; Fang, Z. Y.; Lee, C. H. Kansei-driven and TRIZ-informed product service systems design with abductive logic: case study of children's digital Reading book. *J. Eng. Des.*, **2026**, 37(2), 372-405.
- 17 付旭,杨猛,李茜,刘焕芹,张晶晶. TRIZ创新理论在应用型本科院校中的推广模式研究. 北华航天工业学院学报,2026,36(1),43-46.
- 18 刘传灏,郑嘉禹,周于然,师龙. 基于TRIZ理论的石油化工工艺优化研究:以甲基叔丁基醚为例. 化工设计通讯,2025,51(11),71-73.
- 19 许鹏. 基于TRIZ理论体系高校学生创新创业人才培养应用研究. 塑料包装,2025,35(6),349-351.
- 20 陈强,刘宜滨,孙伯航,孙宇,吴景新. 基于TRIZ理论的高校环境设计专创融合教学改革——以“建筑制图”课程为例. 科技风,2025,(33),87-89.
- 21 陈绘如,翁智兵,张文雯,王进宇. 基于TRIZ创新理论的“课赛训研”专创融合育人模式探索与实践——以药品生产技术专业为例. 现代职业教育,2026,(8),37-40.