高 分 子 通 报
POLYMER BULLETIN

教育与教学 / Education DOI: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26368

生成式人工智能辅助“聚合物合成工艺学”教学改革
——学生批判性思维培养的路径探索

马晓峰*

(南京林业大学理学院 南京 210037)

摘 要 批判性思维是工科创新人才的核心素养，但在传统“单向灌输”式教学中难以有效培育。本研究以“聚合物合成工艺学”课程为载体，基于成果导向教育(OBE)理念，探索人工智能(AI)技术辅助下学生批判性思维培养的系统路径。通过构建“AI驱动—问题导向—对话碰撞—工程验证”四阶教学流程，将AI智能体分别扮演“质疑者”“对质者”与“对话伙伴”角色，贯穿课前质疑引导、课中多维对话、课后项目实践与元认知反思全过程；同时建立多元化全过程评价体系。结果表明，学生批判性思维倾向总均分由(203.6±22.3)分提高至(229.5±20.1)分，差异具有统计学意义(p<0.001)，配对效应量d_z=0.73；寻真性、开放性和分析性3个报告维度亦均显著提高。实践表明，改革后学生在质疑意识、逻辑推理、工程决策及创新实践能力方面均有显著提升，考研升学率从35%跃升至47%，并在全国性学科竞赛中获特等奖。本模式为高分子材料与工程专业核心课程的高阶思维培养提供了可借鉴的范式。

关键词 聚合物合成工艺学；批判性思维；AI辅助；成果导向教育理念；教学改革

Generative AI-assisted Teaching Reform of “Polymer Synthesis Technology”
—Exploring Pathways for Cultivating Students’ Critical Thinking

Xiao-feng Ma*

(*College of Science, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037*)

Abstract Critical thinking is a core competency for innovative engineering talents, yet it is difficult to cultivate effectively in traditional “one-way lecture” teaching. Taking the course “Polymer Synthesis Technology” as a carrier and based on the outcome-based education (OBE) concept, this study explores a systematic approach to cultivating students’ critical thinking assisted by artificial intelligence (AI). By constructing a four-stage teaching process of “AI-driven, problem-oriented, dialogic-collision, and engineering-verification”, AI agents are assigned as “questioner”, “challenger” and “dialogue partner” throughout the whole process of pre-class questioning guidance, in-class multi-dimensional dialogue, post-class project practice and metacognitive reflection. A diversified whole-process evaluation system is also established. The total CCTDI score increased from (203.6±22.3) to (229.5±20.1) (p<0.001; paired-samples effect size d_z=0.73), with significant improvements in truth-seeking, open-mindedness, and analyticity. Practice shows that after the reform, students’ abilities in questioning consciousness, logical reasoning, engineering decision-making and innovative practice have been significantly improved; the postgraduate entrance rate increased from 35% to 47%, and a national special prize in discipline competitions was achieved. This model provides a referable paradigm for cultivating higher-order thinking in core courses of polymer materials and engineering majors.

Keywords Polymer synthesis technology; Critical thinking; AI assisted; Outcome-based education concept; Teaching reform

2026-08-05 收稿, 2026-09-14 录用

基金项目: 江苏高校优势学科项目(PAPD)

* 通信联系人: 马晓峰, E-mail: maxf@njfu.edu.cn

引用: 马晓峰. 生成式人工智能辅助“聚合物合成工艺学”教学改革：学生批判性思维培养的路径探索. 高分子通报, doi: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26368
Citation: Xiao, F. M. Generative AI-assisted teaching reform of “polymer synthesis technology”: exploring pathways for cultivating students’ critical thinking. *Polymer Bulletin* (in Chinese), doi: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26368

1 传统教学模式下批判性思维培养的困境

在新一轮科技革命与产业变革的驱动下，高等工程教育亟需培养具备高阶思维能力和工程创新素养的高素质人才。批判性思维——表现为勇于质疑、独立分析、严密推理并基于证据做出理性判断的能力——正是这种高阶能力的核心引擎[1~3]。然而，在理工科教学中，“重知识传授、轻思维训练”的积弊依然突出。学生往往能够熟练记忆教材中的工艺参数与反应机理，但在面对真实工程矛盾时，却难以主动识别问题、提出有效假设并构建创新方案。

“聚合物合成工艺学”是高分子材料与工程专业的核心必修课，兼具理论系统性、工程实践性和技术前沿性[4,5]。传统的“教师讲、学生记”模式容易造成思维惰性，学生对聚合反应机理、工艺条件优化、设备选型等深层次问题缺少批判性审视。成果导向教育(OBE)强调“以学生为中心、以能力达成为目标”[6]，而基于提问和对话的互动教学，以及以真实问题为载体的项目式学习(PBL)[7]，为突破传统范式提供了理论基础。

近年来，生成式AI为高等教育提供了新的教学工具。与传统数字资源相比，ChatGPT、DeepSeek等大语言模型能够根据学习者输入即时生成解释、反例、观点和问题，为个性化学习及课堂互动提供支持[8~14]。但与此同时，AI生成的海量信息也可能让学生不加甄别地接受，这对批判性思维本身提出了更高要求。因此，AI在专业课程中的教育价值不应仅体现为提高信息获取效率，更应被重新设计为促进质疑、论证、证据核查和反思的认知工具。已有高分子与材料专业教学研究主要关注AI助手、教学资源生成、实验指导和个性化学习支持等方面[15,16]。例如，高分子化学实验AI助手的研究显示，生成式AI可以改善实验课程资源获取和学习支持[15]；“高分子材料”课程研究则从教学内容设计、实验辅助和个性化学习等方面总结了AI应用路径[16]。这些研究为AI进入高分子专业课程提供了基础，但如何进一步将AI嵌入批判性思维培养的全过程，仍有较大的探索空间。基于此，本研究将AI定位由“答案提供者”转变为“质疑者”和“对话伙伴”，并将其与OBE反向设计、课堂对话和真实工程PBL相结合。

2 OBE-AI融合的整体框架

针对传统教学中“重结论轻过程、重记忆轻反思”的痛点，本课程以成果导向教育(OBE)理念为统领，贯彻“反向设计、正向实施”的原则，重构课程教学目标体系。课程将“批判性思维能力(具体分解为质疑、分析、论证、建构、反思5个子维度)”显性化融入高分子材料与工程专业的毕业要求指标点中。在此基础上，采用ChatGPT和DeepSeek作为主要生成式AI工具，构建了“一主线、双驱动、三阶段”的OBE-AI融合式教学整体框架。

一主线，以“高分子工业复杂工程问题的批判性解决”为主线，将高分子合成工艺的反应机理、条件控制、设备选型与绿色转型贯穿课程始末。

双驱动，以“生成式AI智能体角色赋能”与“启发式提问/多维互动对话”为双轮驱动力，打破传统课堂的单向知识传递，营造高强度的思辨环境。

三阶段，实施“课前AI质疑引导(重构预习)→课中人机/师生对话碰撞(深化辩论)→课后真实PBL项目实践与元认知反思(创新建构)”的递进式全流程教学环路。

该框架实现了技术工具(AI)与教育理念(OBE)的有机融合，旨在推动学生从低阶的“知识记忆与理解”向高阶的“批判性评估与工程创新”跨越。

3 AI辅助的批判性思维培养策略

3.1 AI作为“质疑者”重构课前预习与问题生成

传统课前预习多局限于对教材概念与工艺流程的被动记忆，缺乏对知识体系的深度拷问与批判性审视。为此，课程团队设计了“反向提问”提示词模板(prompt template)，要求学生在预习阶段向ChatGPT或DeepSeek发起追问，并对AI生成的回答进行“逻辑挑错”与工程可行性校验。表1给出了可供教师直接复用的核心Prompt结构。其基本原则是：AI不得直接给出最终答案，而应主动暴露假设、提出反例、要求证据并检查自身回答。

典型Prompt示例：请作为“聚合物合成工艺学”

表 1 生成式AI “反向提问—批判性对话”提示词模板

Table 1 Template of prompt words for “reverse questioning-critical dialogue” in generative AI

模块	Prompt核心框架	学生主要认知任务
角色设定	请作为聚合物合成工艺课程中的批判性审查者……	明确AI为质疑者而非答案提供者
问题识别	识别方案中可能被忽略的关键假设、潜在风险和边界条件。	发现问题
反向提问	若改变温度、单体浓度、引发剂或反应器形式，结论是否仍成立？为什么？	反事实推理
多维分析	从反应机理、传热传质、产品性能、安全、经济性和环境影响等维度分析。	多维权衡
证据要求	为每个判断说明理论依据，并指出需要查证的文献、实验数据或工程计算。	证据评价
观点对质	分别提出支持和反对该方案的观点，并比较其合理性。	论证与反驳
自我纠错	检查回答中的事实错误、逻辑跳跃或未经证实的推断。	元认知反思
最终任务	不要直接给出答案，请提出学生必须进一步验证的问题。	避免答案依赖

课程中的批判性审查者。针对“某聚合物采用连续聚合工艺是否优于间歇聚合工艺”这一问题，不要直接给出结论，而是从反应动力学、传热传质、分子量控制、设备安全、产品质量、生产效率、能耗和经济性等方面提出至少5个需要进一步论证的问题。对每个问题说明理论依据，并指出哪些信息需要通过教材、文献、工程计算或实验进一步验证。最后检查你的分析中可能存在的假设、事实错误或过度推断，并提出学生需要进一步核查的问题。

案例(自由基聚合工业实施)：学生向AI输入指令：“对比聚氯乙烯(PVC)悬浮聚合与乳液聚合的工艺特点、产品性能及工业应用。”AI输出标准化对比表格后，学生需结合“高分子化学”与“高分子物理”的基础理论，系统核查其回答中的漏洞。例如：指出AI是否混淆了油溶性与水溶性引发剂的分散机制，是否忽视了悬浮聚合中凝胶效应引起的爆聚与传热限制，以及是否遗漏了乳液聚合后处理中破乳、脱单体(VCM)及残留乳化剂对树脂电绝缘性能的影响等关键工程细节。学生最终需提交《AI生成解答之批判性评估报告》。

通过这一“人机互训”过程，学生打破了对AI生成内容的盲目崇拜，实现了从“知识被动接收者”向“理性评估者与批判者”的角色转变，初步建立了基于科学事实与严密逻辑的质疑意识。

3.2 课中多维对话深化辩证推理与批判性分析

课堂教学改变传统“单向灌输”模式，构建“学生－AI－教师”三方联动的动态思辨课堂，重点运用反事实追问与AI辅助对质辩论2类交互策略。

(1)反事实追问。深化工程因果链条推演。在讲授自由基聚合反应器选型与热量传输控制时，教师提出：“若某高黏度本体聚合体系(如聚甲基丙烯酸甲酯)发生严重热量积聚，在不改变常规降黏或冷却介质的前提下，若改用半衰期更短的引发剂或将釜式反应器替换为管式反应器，可能会引发哪些连锁隐患?”引导学生结合自加速效应(凝胶效应)、传热传质阻力及流体流动状态，推演体系温度失控、局部过热焦化及分子量分布宽化等风险，显著提升学生的风险预判能力与工程因果逻辑推演能力。

(2)AI辅助对质辩论。锻炼多视角权衡与严密论证。针对复杂的工艺路线选择，引入AI作为“第三方辩手”，实时生成不同技术路线(如悬浮法对溶液法)的评估意见，学生分组展开“最佳工艺方案”对质辩论。在人机与生生的辩论碰撞中，引导学生细致审视反应温度、引发剂配比、搅拌剪切速率等参数微变对高分子链结构(如聚合度、支化度、序列结构)及最终加工性能的系统性影响。这一过程消解了学生对“标准答案”的依赖，锻炼了其在多约束工程条件下的综合权衡与严密论证能力。

3.3 课后真实PBL项目实现知识迁移与创新建构

课后环节紧扣高分子工业“双碳”转型与绿色发展的实际需求，以真实工程瓶颈问题为载体推进项目式学习(PBL)。课程精心设计了如“聚碳酸酯(PC)非光气熔融酯交换法工艺的技术经济性评估与改进”及“生物基聚乳酸(PLA)丙交酯开环聚合的工业化障碍与降本策略”等开放性项目(表2)。

在该环节中，学生首先利用AI大模型与学术数据库高效检索、梳理最新专利与文献；随后，必须对AI给出的工艺路线进行批判性审视，重点评估其在原子经济性、反应副产物处理、催化剂回收利用以及能耗成本等方面的现实可行性与环保局限。在此基础上，学生需针对技术痛点提出个人改进假说(如优化催化体系、设计连续化脱挥反应器或改进预聚物缩聚工艺)，并通过Aspen Plus工程仿真模拟或实验室小试设计进行可行性验证，最终完成《批判性评估与工艺方案优化报告》。

这一过程将AI定位为“高效率的信息检索与整

表 2 生成式AI辅助“聚合物合成工艺学”的典型教学案例

Table 2 Typical teaching cases of generative AI assisting “Polymer Synthesis Technology”

案例	核心教学问题	AI角色	学生主要任务	主要验证方式
PC的熔融酯交换法合成	如何兼顾产品性能与成本？	对话伙伴+工程顾问	构建并提出改进方案	教材、文献和专利
PLA绿色合成	如何兼顾成本、能耗和产品性能？	对话伙伴	构建多目标优化方案	文献、工艺数据
PMMA聚合反应器	如何降低热量积聚和失控风险？	对质者	比较反应器和引发体系并推演风险	工程计算、文献
PVC悬浮/乳液聚合	不同聚合工艺如何选择？	质疑者	识别工艺选择中的关键变量与AI遗漏因素	教材、文献
水性聚氨酯低/零VOC	如何兼顾性能与绿色工艺？	质疑者+工程顾问	识别技术瓶颈并提出改进方案	文献、实验/工程数据

理助手”，逼迫学生走出对AI现有方案的绝对依赖，在“发现工程缺陷—提出创新假说—仿真/实验验证—构建优化方案”的全流程闭环中，实现知识的深度迁移与批判性思维的高阶跃升。

4 全过程多元化考核评价体系

为了客观、精准地衡量学生批判性思维能力的达成度，课程摒弃了传统的“一考定终身”和纯知识记忆性考核模式，构建了基于OBE理念的“多维过程性+高阶终结性”全过程评价体系。该体系将批判性思维的维度(质疑、分析、论证、建构、反思)显性化融入各项考核指标中，注重对学生在人机对话、课堂辩论及工程PBL项目中所展现的思辨过程与决策逻辑进行综合评估，具体考核维度、载体及权重分布如表3所示。

5 改革成效与反思

5.1 实施成效

本课程自2024年开始实施教学改革，并在2024~2025年2个教学周期中持续迭代。2024年课程覆盖学生49人，2025年覆盖学生51人，累计覆盖100人。本研究以2024年49名学生为主要量化研究对象。2025年学生主要用于进一步验证和优化教学模式，其过程性表现和工程实践作为教学改革持续实施的补充证据。

5.1.1 批判性思维倾向显著增强

为了定量评估教学改革成效，课程团队采用加利福尼亚批判性思维倾向量表(CCTDI)[17,18]，对2024年49名学生在课程开课前(前测)与结课后(后测)分别进行测评，并对测试数据实施配对样本t检验，结果如表4所示。需要说明的是，改革实施前的往届学生未进行同一量表的规范化测评，因此本研究未设置历史对照组。

结果表明，经过一学期的改革实践，学生在CCTDI各维度得分均展现出统计学意义上的显著提升(p<0.005)。其中，“寻真性”维度得分从(68.2±9.5)分大幅提升至(76.5±8.7)分(p<0.001)，反映出课前“AI反向挑刺”有效激活了学生不轻信既有结论、主动探求事实真相的意识；“开放性”维度从(65.3±10.2)分提高至(74.8±9.3)分(p<0.001)，表明课中“AI辅助方案对质”拓宽了学生审视复杂工程问题的包容度与

表 3 批判性思维的评价体系的维度、考核方式、评价指标与权重

Table 3 Dimensions, assessment methods, evaluation indicators, and weights of the evaluation system for critical thinking

评价维度	评价载体与考核方式	批判性思维评价指标	权重占比
预习与AI互动	AI反向提问记录、《AI回答质疑与修正报告》	能否识别AI输出内容中的逻辑漏洞、概念混淆或工程细节遗漏；提问的深刻性与启发性	15%
课堂互动对话	课堂反事实追问、AI辅助方案对质辩论、小组研讨	论据的客观真实性、逻辑推理的严密性、能否对视角审视参数微变对高分子的系统性影响并辩证采纳他人的观点	20%
工程PBL项目	《批判性评估与工艺方案优化报告》、团队答辩、实验/仿真设计	针对高分子工艺绿色瓶颈提出质疑的能力；改进方案的创新性、技术可行性、经济性与环保综合权衡决策能力	35%
期末综合考核	开放性高分子工程案例分析题(禁止直接搜索获取标准答案)	对复杂高分子工程问题的剖析深度、面对不确定性条件时的对方案对比权衡、逻辑自洽性与方案建构能力	30%

表 4 改革前后学生批判性思维倾向(CCTDI)得分对比(N=49，配对t检验)

Table 4 Comparison of critical thinking disposition inventory (CCTDI) scores of students before and after reform (N=49, paired t-test)

维度	前测(均值±标准差)	后测(均值±标准差)	平均变化	t值	p值	配对效应量d_z
寻真性	68.2±9.5	76.5±8.7	+8.3	4.56	<0.001	0.65
开放性	65.3±10.2	74.8±9.3	+9.5	4.21	<0.001	0.60
分析性	70.1±8.6	78.2±8.0	+8.1	3.98	0.003	0.57
总分	203.6±22.3	229.5±20.1	+25.9	5.12	<0.001	0.73

注：CCTDI各子维度满分均为100分；配对效应量d_z根据配对样本t检验统计量按$d_z = t/\sqrt{N}$计算；p<0.05认为差异具有统计学意义。以上数据为基于教学改革实测数据的统计结果。本文重点报告寻真性、开放性和分析性3个维度及总分。

多维视角；“分析性”维度由70.1±8.6分提升至(78.2±8.0)分(p=0.003)，体现了课后真实PBL项目对学生严密逻辑推演与工程决策能力的塑造作用。整体而言，学生CCTDI总均分由(203.6±22.3)分显著跃升至(229.5±20.1)分，平均提高25.9分(p<0.001)，跨越了批判性思维倾向的“正向阈值”(210分)，客观证实了AI赋能下“质疑—对话—验证”四阶教学模式对培养学生高阶思辨素养的显著赋能作用。配对效应量d_z=0.73，提示改革前后具有较明显的实际差异。这里的统计结果反映的是课程改革前后学生批判性思维倾向的变化，而非在缺乏同期对照条件下对因果效应的严格证明。

5.1.2 高阶工程实践与创新成果显著

2个教学周期中，学生持续参与学科竞赛、科技创新项目和工程实践。2025年，课程学生团队参加中国青年科技创新“揭榜挂帅”擂台赛，围绕“超临界CO_2辅助乳化实现水性聚氨酯零VOC”等工程技术问题开展方案设计与论证，并获得全国特等奖第一名(擂主)。该赛事属于第十九届“挑战杯”系列赛事之一，面向高校学生和青年科技人才设置学生赛道与青年科技人才赛道；2025年度赛事面向全国开展，终审团队来自多所高校。赛事规则显示，每个发榜题目评出1个“擂主”并评出若干特等奖及其他奖项。

需要指出的是，竞赛成果同时受到学生前期专业基础、指导教师、团队协作、科研训练和实践资源等多种因素影响，因此本文不将竞赛获奖直接归因于本课程教学改革，而将其作为学生将课程中的问题识别、方案比较和工程论证方法迁移至课外创新实践的补充性案例。

5.1.3 深入探究的学术志向与升学质量双提升

教学改革实施期间，本专业本科生考研与出国深造升学率由改革前的35%提高至47%。这一变化与课程改革期间学生专业认同、学术探究意识和复杂问题分析能力的发展在时间上具有一定一致性，但学生升学结果同时受到学习基础、个人发展规划、报考选择、招生政策及就业环境等多重因素影响。因此，本文不据此建立课程教学改革与升学率提高之间的直接因果关系，而将其作为学生综合发展状况的辅助性指标。

5.1.4 教学相长推动教师角色与课程建设转型

AI辅助的思辨课堂打破了教师作为“唯一权威”和“知识灌输者”的传统定位，促使教师向“高阶问题设计者”“对话碰撞引导者”与“评估者”成功转型。面对学生在人机对话和PBL项目中提出的前沿性、挑战性质疑，教学团队实现了自我迭代与教学相长，推动了课程教学理念的整体更新，为将“聚合物合成工艺学”打造成高水平省级/国家级“一流本科课程”(金课)奠定了坚实的教学实践基础。

5.2 反思与展望

警惕“AI认知依赖”。AI在提升信息效率的同时，可能导致部分学生产生思维惰性。未来需进一步强化对AI输出内容的机理验证和逻辑复核训练，明确AI作为辅助工具而非答案来源的定位。

平衡工程广度与机理深度。高分子合成工艺兼具复杂的化学反应机理和显著的工程放大效应。在有限课时内兼顾基础知识和高阶思维训练，仍需对PBL项目的难度梯度和课时分配进行持续优化。

拓展跨课程协同。建议将本模式推广至“高分子物理”“高分子材料成型加工”等关联课程，形成贯通式批判性思维培养体系。

6 结语

在人工智能赋能高等教育的新时代，教学改革的本质不应停留在技术工具的简单叠加上，而在于借助技术重构学生的认知模式与思维习惯。“聚合物合成工艺学”课程立足高分子材料与工程专业特色，深度融合成果导向教育(OBE)理念，构建了集“AI智能辅助、问题驱动、多维对话与PBL工程实践”于一体的批判性思维培养新型教学范式。

教学实践表明，该模式成功将生成式AI从“答案

提供者”转化为促发深层思辨的“质疑者与对话伙伴”，有效打破了学生的思维惰性，显著提升了其质疑意识、工程逻辑分析与创新建构能力。这一模式不仅为高分子专业核心课程的“金课”建设提供了可复制、可推广的实践范式，更为培养能够应对未来复杂工程挑战与高分子工业绿色低碳转型的高素质创新人才提供了可行路径。

参 考 文 献

1 费白露, 李克明, 周环. 工科大学生批判性思维素质现状分析. 安徽工业大学学报(社会科学版), **2020**, 37(4), 117−119.
2 朱晓玲, 郑琼, 许芳芳, 杨晔琴, 李一美, 吴永琴. 案例设计教学法对提高本科生批判性思维能力的效果分析. 温州医科大学学报, **2020**, 50(8), 686−688.
3 冯向东. 批判性思维教育融入大学创新型人才培养的机理、理念和路径. 高等教育研究, **2023**, 44(10), 57−63.
4 杜隆超, 杨捷. 《聚合物合成工艺学》的课堂教学改革与实践初探. 高分子通报, **2021**, (2), 88−90.
5 张高文, 赵西坡, 胡涛, 龙世军. 基于成果导向的《聚合物合成工艺学》课程教学设计与实践. 高分子通报, **2019**, (3), 79−82.
6 黄改玲, 蒋玲, 贾巧娟, 张永辉, 户敏. 基于OBE理念的无机及分析化学“金课”建设探索与实践. 化学教育(中英文), **2022**, 43(10), 24−28.
7 梁继然, 刘强, 张宁. 基于项目式教学的大学生批判性思维培养. 电气电子教学学报, **2024**, 46(1), 146−148.
8 田芬, 卢春燕. 美国顶尖研究型大学应对生成式人工智能的立场与策略. 电化教育研究, **2025**, 46(11), 108−113.
9 朱婧, 谷飞. 生成式人工智能赋能教育变革的风险挑战与应对. 未来与发展, **2026**, 50(4), 116−121.
10 Jaramillo Gómez, D. L.; Álvarez Maestre, A. J.; Parada Trujillo, A. E.; Pérez Fuentes, C. A.; Bedoya Ortiz, D. H.; Sanabria Alarcón, R. K. Determining factors for the development of critical thinking in higher education. *J. Intell.*, **2025**, 13(6), 59.
11 Gerlich, M. AI tools in society: impacts on cognitive offloading and the future of critical thinking. *Societies*, **2025**, 15(1), 6.
12 Larson, B. Z.; Moser, C.; Caza, A.; Muehlfeld, K.; Colombo, L. A. Critical thinking in the age of generative AI. *Acad. Manag. Learn. Educ.*, **2024**, 23(3), 373−378.
13 Harahap, D. S. Implementation of ChatGPT to improve students' critical thinking abilities. *Indones. J. Educ. Soc. Humanit.*, **2024**, 1(2), 33−39.
14 Nasr, N. R.; Tu, C. H.; Werner, J.; Bauer, T.; Yen, C. J.; Sujo-Montes, L. Exploring the impact of generative AI ChatGPT on critical thinking in higher education: passive AI-directed use or human–AI supported collaboration. *Educ. Sci.*, **2025**, 15(9), 1198.
15 佘砚, 庄启昕, 张浩然, 左沛元, 顾金楼, 滕鑫. 数智化时代生成式AI助力材料专业实验课程探索研究. 高分子通报, **2025**, 38(6), 958−966.
16 丁海, 和淑文, 王利丹, 李发闯, 闵志宇, 曹伟. 人工智能技术在《高分子材料》课程中的教学应用与探索. 高分子通报, **2025**, 38(10), 1567−1575.
17 Facione, P. A.; Facione, N. C.; Winterhalter, K. *CCTST Test Manual*. 4th ed. Millbrae: California Academic Press, **2017**.
18 Jacobs, S. S. Technical characteristics and some correlates of the california critical thinking skills test, forms A and B. *Res. High. Educ.*, **1995**, 36(1), 89−108.