高 分 子 通 报
POLYMER BULLETIN

教育与教学 / Education

DOI: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26414

国家标准引领的高分子物理实验教学重构

何 洋* 王彦杰 冯 霞 赵义平 陈 莉

(天津工业大学材料科学与工程学院 材料科学与工程国家级实验教学示范中心 天津 300387)

摘 要 针对高分子物理实验教学中重操作与结果、轻条件论证与数据判断，以及理论分析与工程规范衔接不足的问题，以球晶形态观察、聚合物的示差扫描量热分析、稀溶液黏度法测定分子量、浓溶液表观黏度测定和熔体流动速率测定等5项经典实验为对象，开展国家标准引领的实验教学改革。围绕高分子材料测试结果对试样状态、热历史、温度和流动条件的依赖性，将标准中的术语定义、方法适用范围、仪器要求和结果表达与高分子物理原理相结合，重新组织实验内容。球晶形态观察与示差扫描量热实验分别承担形态表征和热效应分析任务，辨析不同熔融判据的物理意义；在黏度法测定分子量实验中，强化溶剂、温度、黏度计规格与分子量换算参数的匹配，分析测量误差对计算结果的影响；在表观黏度测定实验中，结合扭矩测量原理，讨论转子与转速选择对表观黏度及其可比性的影响；在熔体流动速率实验中，引导学生依据材料特点选择测试条件，并通过重复测量评价数据一致性。教学实施中，课前设置标准研读与方案论证任务，课中开展规范测量并保留原始记录，课后引入标准偏离报告、方法比较和异常数据分析。以方案依据、记录完整性、数据处理合理性及结论适用范围为评价重点，将物理原理理解、实验条件设计和结果有效性判断贯穿教学全过程。该改革将国家标准的教学作用由操作指导拓展至概念理解、实验设计和工程判断，为培养学生的实验研究能力、现代工具应用能力与工程规范意识提供了具体路径。

关键词 国家标准；高分子物理实验；实验教学改革；测量条件；数据有效性

Teaching Polymer Physics Experiments Based on National Testing Standards

Yang He*, Yan-jie Wang, Xia Feng, Yi-ping Zhao, Li Chen

(*National Demonstration Center for Experimental Materials Science and Engineering Education, School of Materials Science and Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387*)

Abstract Polymer physics laboratory teaching often emphasizes procedures and numerical results, while giving less attention to the justification of test conditions, evaluation of data, and links between physical theory and engineering standards. This study describes a teaching reform based on national standards for five experiments: observation of spherulitic morphology, thermal analysis of polymers by differential scanning calorimetry, determination of viscosity-average molecular weight by dilute-solution viscometry, measurement of apparent viscosity in concentrated polymer solutions, and melt flow rate testing. The revised experiments connect terminology, the scope of test methods, instrument requirements, and reporting conventions with polymer physics, focusing on how sample condition, thermal history, temperature, and flow conditions affect measurement results. Spherulite morphology observation and differential scanning calorimetry are used for morphological characterization and thermal effect analysis, respectively, to clarify the physical meaning of different melting criteria. Dilute-solution viscometry emphasizes the compatibility of solvents, temperatures, viscometer specifications, and molecular weight calculation parameters, together with the effects of measurement errors. Apparent viscosity measurements are examined through the principles of torque measurement to explain how spindle selection and rotational speed affect readings and their

2026-09-15 收稿, 2026-10-08 录用

* 通信联系人: 何洋, E-mail: heyang@tiangong.edu.cn

comparability. Melt flow rate testing requires students to select conditions according to the material and applicable standards and to evaluate data consistency through repeated measurements. Before laboratory sessions, students study the standards and justify their experimental plans. During the sessions, they perform measurements following the specified procedures and retain raw records. Afterward, they document deviations from standard methods, compare methods, and analyze anomalous data. Assessment focuses on the justification of experimental choices, completeness of records, appropriateness of data analysis, and scope of conclusions. The reform uses national standards to support the teaching of physical concepts, experimental design, and evaluation of results, providing practical learning tasks for developing experimental research skills, the ability to use modern tools, and an understanding of engineering standards.

Keywords National standards; Polymer physics laboratory; Laboratory teaching reform; Measurement conditions; Data validity

引用:何洋, 王彦杰, 冯霞, 赵义平, 陈莉. 国家标准引领的高分子物理实验教学重构. 高分子通报, doi: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26414

Citation: He, Y.; Wang, Y. J.; Feng, X.; Zhao, Y. P.; Chen, L. Teaching polymer physics experiments based on national testing standards. *Polymer Bulletin* (in Chinese), doi: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26414

高分子物理实验是高分子材料与工程专业连接理论学习与工程实践的核心环节，通过观察、测量和分析帮助学生理解链结构、凝聚态结构、分子运动与力学/流变响应等抽象概念[1]。然而，长期以来，该课程仍沿用验证性实验的组织方式，教学内容呈现出较为明显的“三重三轻”倾向。其一，重现象呈现，轻规范约束。传统实验往往以能否观察到典型现象作为主要教学目标，如是否出现球晶黑十字消光、黏度是否随浓度变化、聚合物熔体能否顺利挤出等，而对现象成立所依赖的试样状态、仪器校准、环境条件和判定准则关注不足。其二，重结果获取，轻证据链条。实验评价通常集中于能否计算出预期数值、拟合曲线是否具有良好线性关系以及结果是否接近参考值，却较少考察从初始操作到最终结论之间的证据链条是否完整。对于仪器读数如何换算为测量结果，模型假设具有哪些限制条件，参数来源是否可靠，异常数据应当保留还是剔除，测量偏离是否足以改变结论，学生缺少对这些关键问题的分析训练。其三，重单项操作，轻体系贯通。不同实验通常按照仪器和教材章节分别设置，各自对应一套操作步骤与计算公式，实验之间缺少共同问题的牵引。学生可能掌握多种仪器的使用方法，却未能建立贯穿不同实验的测量逻辑，也难以理解热历史、浓度、温度、时间尺度和剪切条件如何共同影响高分子材料的测试结果。这种碎片化教学限制了知识迁移，当面对未知材料或真实工程问题时，学生仍难以依据材料状态选择合适的表征方法，更难以判断不同方法所得结果是否具有可比性。

上述问题的深层次原因往往不是实验学时、仪器数量或教学内容更新不足造成的，而是实验教学隐含着一种被简化的测量认识，默认将实验理解为使用某种仪器去测量一个预先存在且具有唯一答案的数值。实际上，在高分子物理领域，这一前提在相当大范围内并不成立。由于高分子材料显著的多尺度结构特征，其测量结果受到热历史、取向状态、时间尺度、温度和剪切历史等因素影响，这种条件依赖性更加突出。脱离测量方法和试验条件孤立地讨论高分子材料的性能数值，往往不具有完整的物理意义。因此，实验教学的重点应由“获得某个数值”进一步转向强调“明确测量对象、控制影响因素并判断结果是否可信”。

国家标准为实现这一转变提供了适宜的教学载体。国家标准不仅规定了试样制备、仪器选择和操作步骤，还对被测量的术语定义、方法适用范围、测试条件、误差来源、有效性和结果表达作出了系统的约定。其核心作用是通过规范测量步骤和限定影响条件，使具有明显条件依赖性的表征结果获得可重复、可比较和可用于工程决策的统一规范。因而，将国家标准融入高分子物理实验，不应停留在要求学生依照标准操作，而应进一步追溯标准条款背后的物理依据，使学生理解某一条件为何必须严格控制、一次读数如何转化为测量结果、发生标准偏离后结论是否仍然成立。由此培养的实验能力，与《工程教育认证标准(2024版)》中关于实验设计、数据分析、现代工具局限性认识及工程职业规范等毕业要求也是高度契合的[2]。

近年来，国家标准融入高校实验教学改革大体沿3条研究路径展开[3]。一类是“标准引入式”改革，

即在原有实验讲义中引入国家标准，将其作为操作依据或拓展资料。这种方式有助于提升操作规范性，但规范逻辑与技术依据未被展开，标准仍容易被理解为更加详细的实验步骤。另一类是面向“检测能力导向”的标准化实训，多见于材料检测和质量管理等应用型专业开展标准化实训，突出仪器操作、质量控制和报告规范，其工程针对性较强，但对标准条款所对应的物理模型和方法局限的讨论相对不足。还有一类改革主要围绕虚拟仿真、数字化教学、科研成果反哺教学、综合设计型实验和课程思政融入等，有效扩展了实验内容与教学情境。就高分子物理实验而言，仍需进一步解决3个相互关联的问题：如何从标准条款中提炼出可分析的物理问题，如何在不同实验中持续训练条件设计与数据判断，以及如何将“结果是否可信”转化为可观察、可评价的学习产出。

针对上述问题，本研究选取偏光显微镜法观察聚合物球晶形态、聚合物的示差扫描量热分析(DSC)、稀溶液黏度法测定聚合物分子量、旋转黏度计法测定聚合物浓溶液表观黏度和热塑性塑料熔体流动速率测定等五项经典实验，围绕依据标准设计测量方案与判断结果有效性开展教学重构。5项实验在测量对象、仪器原理和结果用途上各具特点，为学生提供了在不同实验条件下理解和运用国家标准的机会。其中，偏光显微镜法观察聚合物球晶形态实验着重讨论观测现象与结构判断之间的关系，DSC实验侧重热历史控制、特征温度判定和转变焓分析，两者通过同批材料的形态与热效应比较构成综合分析任务。稀溶液黏度法测定聚合物分子量实验着重分析由测量数据推算分子量所需的模型与参数条件，旋转黏度计法测定聚合物浓溶液表观黏度实验着重辨析测试条件对测量结果及其可比性的影响，热塑性塑料熔体流动速率测定实验则着重说明标准条件与材料评价之间的联系。各项实验均要求学生从标准规定出发，说明方法选择与条件控制的依据，并判断所得数据能够支持何种结论。

同时，依据工程教育认证对研究、现代工具使用及职业规范的要求，将五项实验的共同能力目标落实为测量方案论证、工具选择与方法边界判断、数据分析与结论形成以及规范操作与数据责任四个方面。各项实验结合自身的测量对象与技术特点设置具体任务，并采用一致的评价维度，考查学生在不同实验中运用物理原理和国家标准解决测量问题的能力。通过测试方案、操作记录、标准偏离报告和结果讨论等学习产出，建立教学任务与课程目标评价之间的对应关系，如表1所示。

在具体实施中，实验采用一致的任务要求与评

表 1 5项实验的国家标准依据、教学任务与支撑的毕业要求

Table 1 National standards, learning tasks, and graduate attributes supported by the five experiments.

实验项目	涉及的国家标准	主要教学任务	重点支撑的毕业要求
偏光显微镜法观察聚合物球晶形态	GB/T 24665—2009《偏光显微镜》；GB/T 16582—2008《塑料 用毛细管法和偏光显微镜法测定部分结晶聚合物熔融行为(熔融温度或熔融范围)》	制备球晶试样并记录热历史，检查偏光观察条件；比较热台偏光与DSC所得熔融表征结果，分析试样状态、热程序和判定准则的影响	研究(4.3.4)：综合不同表征证据解释实验结果；使用现代工具(4.3.5)：理解光学观察与热分析方法的适用范围和局限
聚合物的示差扫描量热分析(DSC)	GB/T 19466.3—2025《塑料 示差扫描量热(DSC)法 第3部分：熔融和结晶温度及热焓的测定》	区分首次和第二次升温的用途，记录热循环；判定特征温度、选取基线并计算熔融焓；联系球晶形态解释热历史影响	研究(4.3.4)：分析热历史与测试结果；使用现代工具(4.3.5)：比较形态与热效应证据及其限制
稀溶液黏度法测定聚合物分子量	GB/T 1632.1—2024《塑料 使用毛细管黏度计测定聚合物稀溶液黏度 第1部分：通则》；GB/T 30514—2014《玻璃毛细管运动黏度计 规格和操作说明》	论证溶剂、温度与黏度计规格的选择，设计浓度梯度；核对单位、外推方法及Mark-Houwink参数，分析异常数据对分子量计算的影响	研究(4.3.4)：设计测量方案并分析数据；使用现代工具(4.3.5)：合理选择黏度计，理解测量条件与模型参数的适用性
旋转黏度计法测定聚合物浓溶液表观黏度	GB/T 40280—2021《塑料 液态或乳液态或分散体系的树脂 用单筒旋转黏度计测定表观黏度》	依据有效测量范围选择转子与转速，记录温度、浸没深度和测量时间；比较同一试样在不同转速下的读数，判断结果的可比条件	研究(4.3.4)：分析测试条件对结果的影响；使用现代工具(4.3.5)：解释扭矩读数与表观黏度的关系，认识仪器与换算模型的局限
热塑性塑料熔体流动速率测定	GB/T 3682.1—2018《塑料 热塑性塑料熔体质量流动速率(MFR)和熔体体积流动速率(MVR)的测定 第1部分：标准方法》；GB/T 25278—2010《塑料 用毛细管和狭缝口模流变仪测定塑料的流动性》	依据材料及相应标准确定温度、负荷和切样条件，开展组内重复测量；按规定报告结果，讨论测试条件和数据质量对材料评价的影响	研究(4.3.4)：选择试验条件并评价数据一致性；工程伦理和职业规范(4.3.7)：规范报告测量结果，理解工程数据的质量责任

价依据，教学组织与评价方式如图1所示。实验前，学生通过研读标准提交测试方案，明确测量对象、试样要求、关键条件和数据有效性判据；实验中，记录实际操作与测试条件，标记可能影响结果的标准偏离；实验后，结合原始记录说明数据处理和异常判断的依据，按照相应标准报告结果，并说明结论的适用范围。教师重点考察方案论证是否充分、记录是否完整、数据取舍是否合理以及结果解释是否超出方法边界。这些要求在不同实验中持续使用，使学生在更换材料、仪器和测试方法后，能够重新识别需要控制的条件、需要保留的证据和可以作出的判断，逐步形成可迁移的实验设计与数据分析能力。

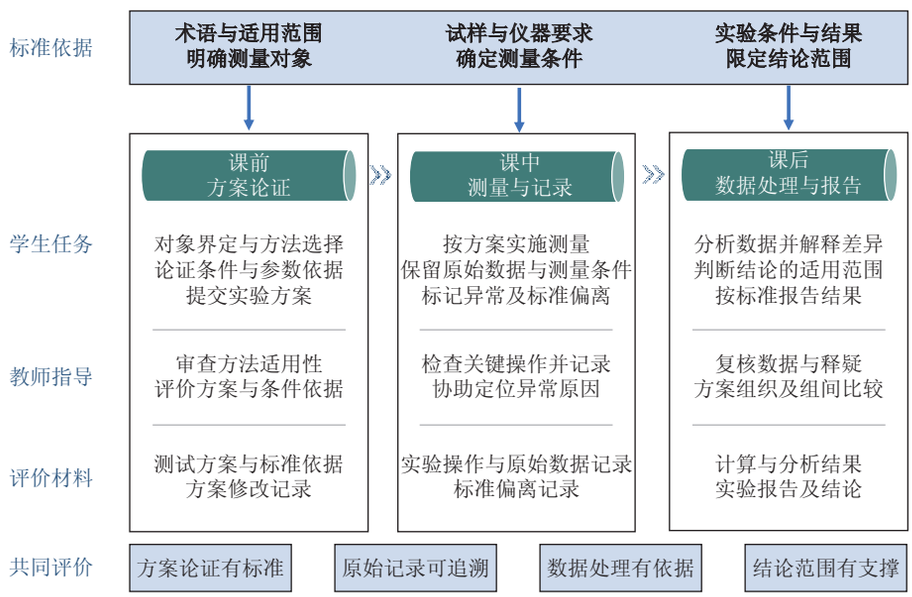

图 1 国家标准融入实验教学的组织与评价框架：课前、课中和课后分别开展方案论证、测量与记录、数据分析与报告；依据学习产出评价结果，并用于方案修订或补充测量

Fig. 1 Framework for integrating national testing standards into the organization and assessment of laboratory teaching. Students justify experimental plans before laboratory sessions, conduct measurements and keep records during the sessions, and analyze data and report results afterward. Learning outcomes are assessed, and the results are used to revise experimental plans or conduct additional measurements

1 偏光显微镜法观察聚合物的球晶形态

球晶是聚合物最常见也是最典型的结晶形态。偏光显微镜法观察聚合物的球晶形态并测定其径向生长速率是一个经典的高分子物理实验。该实验的操作过程相对简单，能够观察到五彩斑斓、互相截顶的球晶结构，深受学生青睐。然而，传统的实验教学多从光学双折射原理入手，解释正交偏振光下非晶区各向同性与结晶区各向异性的明暗区别。教学目标局限于“观察到球晶”“识别黑十字消光现象”“区分不同聚合物的球晶形态差异”，与高分子凝聚态结构的知识及实际工程应用关联较弱。

为打破这一教学局限，将实验教学从聚合物晶体形态的单纯观察拓展至结构分析与方法比较，通过自制聚丙烯、聚乙烯等规聚苯乙烯、聚对苯二甲酸乙二醇酯和尼龙1010等典型结晶聚合物的球晶试样供学生观察。在此基础上，要求学生在若干设定的等温结晶温度下测定球晶径向生长速率，借此增强对Lauritzen-Hoffman结晶动力学模型的理解。依据GB/T 24665—2009对仪器提出的技术要求，在实验前须完成起偏镜与检偏镜振动方向严格正交的消光质量检查、物镜的相差校正以及补偿器的安装校验。在夯实了理论解析与标准化操作规范后，针对特殊的环带球晶，指导学生利用载物台倾斜法观察明暗环带的移动方向，判断片晶在生长过程中的周期性扭转现象；进一步引导学生使用一级红补偿器，根据干涉色的变化来准确判断球晶的正负光性。通过分析最大折射率方向与分子链排列的几何关系，学生能够深刻理解为何不同的聚合物会呈现出不同的光学性质，从而将宏观的双折射现象与微观的分子链排布紧密联系起来。

实验教学的另一个关键落脚点在于建立工程规范意识。实际上，聚合物的结晶不仅是一种静态的物

理形态，更是一个受热历史严格控制的动力学过程。将具有双折射结晶相的聚合物置于显微镜的起偏镜和检偏镜之间，以可控的升温速率加热，通过记录聚合物结晶相光学各向异性消失时的温度，即可测量部分结晶聚合物的熔融行为。在涉及结晶聚合物表征的GB/T 16582—2008中，对试样的制备和偏光显微镜的使用有着明确且严格的工程操作要求。例如，除粉末状试样外，模塑料、颗粒料、薄膜和片材等试样必须在载玻片和盖玻片间进行预熔处理，压制成厚度为0.01~0.04 mm的薄膜。这一规定并非单纯为了满足透光性需要，其更核心的目的在于消除由于取向或内应力而产生的双折射现象，同时降低试样氧化的风险，提高测量的再现性。指导学生根据国家标准使用加热台对试样逐渐升温，记录双折射消失时的温度，从而确定试样的熔融温度，与前述等温结晶实验形成“结晶温度—生长速率—熔融温度”的闭环。将国家标准中的规范要求融入偏光显微镜实验，对标真实生产的教学模式，用于锻炼学生利用精密光学仪器解决工程问题的能力，也培养了其对现代工程工具适用范围与局限性的判断力，高度契合工程教育认证关于“研究”与“使用现代工具”的培养理念。

2 聚合物的示差扫描量热分析

示差扫描量热法(DSC)通过测量程序控温过程中试样与参比之间的热流率差，表征聚合物熔融、结晶等过程的热效应，是理解高分子凝聚态结构与热转变行为的重要实验方法。该实验首先要求识别熔融吸热峰和结晶放热峰，将热分析曲线与晶体结构的形成和熔融过程相联系。在此基础上，进一步讨论熔融温度的判定及其对测试条件的依赖。如果教学仅停留在调用软件、读取峰值温度，学生容易忽略热程序和试样状态对曲线的影响，也难以解释同一种聚合物在不同测量条件下出现的结果差异。因此，教学改革在保留基本实验训练的基础上，进一步加强热历史分析、熔融判据辨析及不同表征结果的比较。

将DSC实验与偏光显微镜观察球晶形态联动开展，并通过同批材料在预设结晶条件下的形态与熔融行为分析建立联系。偏光观察提供球晶形成、生长及取向结构的信息，DSC则反映试样结晶与熔融过程的热效应。教学中由球晶观察进一步提出“不同结晶条件形成的结构具有怎样的熔融特征”等问题，引导学生区分球晶整体尺寸与片晶厚度、完善程度，认识球晶尺寸、熔融温度和熔融焓所反映的结构信息，避免将球晶较大直接理解为熔融温度较高或结晶程度较高。

热历史分析以GB/T 19466.3—2025为依据，将标准的热循环要求与试样结构的变化相联系。首次升温反映既有加工和热处理经历的影响，经过充分熔融与受控冷却后，第二次升温用于考察重新形成的结晶结构。学生需说明两次升温数据的用途，并结合材料的热转变区间论证程序设置。与球晶制样条件相对应的分析应保留首次升温曲线，比较统一热历史下的材料行为则采用相应的再次升温结果，使学生理解热历史控制的目的，而非机械执行“消除热历史”的步骤。

结果分析着重讨论测量值与判定依据的关系。半结晶聚合物通常在一定温度范围内熔融，结合标准引导学生辨认熔融峰值温度与外推起始温度，并与热台偏光观察中的双折射消失温度进行比较。讨论时先核对试样状态、温度过程及判据，说明光学响应与热效应的区别，不以2种方法所得温度是否一致判断其准确性。利用代表性曲线说明基线和积分区间对熔融焓计算的影响，区分转变温度与转变过程中吸收的热量。结晶度估算列为拓展内容，另行说明参考焓、试样组成及冷结晶的处理依据，帮助学生区分测量结果与附加条件下的推算结果。

教学组织上，各组完成一种预设条件下的基础测量，通过共享球晶图像和DSC曲线开展比较，减少重复测试。综合讨论以制样热历史、球晶形态和熔融特征为依据，评价学生能否解释条件选择、辨析温度判据并说明结论的适用范围。实验报告按照标准保留必要的条件记录和原始数据，对程序偏离及其可能影响作出说明。由此，将球晶观察中的直观认识延伸至热转变行为的分析，并将物理原理的理解落实到测试条件论证和测量结果的规范表达。

3 稀溶液黏度法测定聚合物的分子量

聚合物稀溶液的黏度与其分子量密切相关，主要反映了聚合物分子链之间因流动或相对运动所产生的内摩擦阻力。黏度法是一种利用黏度特性测定聚合物分子量的相对方法，适用于测量相对分子量在10^4~10^7范围内的聚合物，是一个非常重要的高分子物理实验，也是对基本理论与操作能力要求都较高的实验。该实验为传统的验证型实验，聚合物、溶剂和测试温度多为教师预先设定，学生所需完成的只是按浓度序列测取流出时间，继而代入公式、作图外推、根据 Mark-Houwink 参数计算得出黏均分子量。实验过程中往往只掌握操作，难以理解实验原理与数据处理逻辑。

以国家标准GB/T 1632.1—2024和GB/T 30514—2014为依据，可将稀溶液黏度法由传统的验证性分子量测定实验扩展为国家标准驱动的综合探究式实验。实验前设置标准研读任务，将标准中涉及的实验原理逆向还原为物理问题，让学生回答几个关键问题：为什么溶剂流出时间不能过短，为什么溶液必须处于稀溶液区并且相对黏度须落在规定区间，为什么温度控制会直接影响分子量结果，为什么不同毛细管黏度计规格对应不同黏度范围，为什么同一组流出时间数据不能无条件代入Mark-Houwink方程。通过对标准的解读，强调对不同黏度物理量的规范化表达，将相对黏度、增比黏度、比浓黏度、对数黏度、特性黏数和黏均分子量等高分子物理概念与毛细管流出时间、空白溶剂、浓度梯度和外推模型逐一对应，转化为可执行、可记录、可判定的实验规范。在这一过程中，特别强调对术语和定义的对照：高分子物理教材所称的“比浓黏度”在标准体系中对应“黏数”，符号为J，常用单位为mL/g；教材中所称的“特性黏数”在标准中对应“极限黏数”；而教材中惯用的dL/g与标准常用的mL/g之间相差百倍。引导学生发现并解释这一差异，进而追问在撰写检测报告或与企业技术交流时应当采用哪一套表述，使学生在报告中统一术语、符号和单位并核对参数的单位约定。通过标准驱动的实验教学改革，让学生理解标准要求与物理模型的关系，并据此选择和控制测试条件，从而弥合了课堂理论与工程测试之间的差异。

在此基础上，将测量条件这一最关键的变量交还学生，实验不再提供既定方案，而是提供多个待测聚合物、可选溶剂和不同毛细管内径规格乌氏黏度计。学生须依据国家标准提交测试方案，逐项给出方法适用性判断、溶剂与温度选定、黏度计规格选型、浓度梯度设计、恒温条件设定、重复测量要求与数据有效性判据的标准依据。教师仅审核方案的科学合理性、标准适用性和实施可行性，学生按自己的方案实施测量，引导学生明确高分子物理理论模型中的限制条件。

此外，GB/T 1632.1—2024的附录A误差来源中指出，黏度计最主要的误差来源包括：表面张力、黏度计的倾斜度、蒸发损失、浓度和流经时间的测量误差、温度稳定及测量误差、动能等。例如，温度对聚酯溶液黏度的测定特别敏感，测试温度上升0.02 °C，特性黏度下降0.4 mL/g；如测试温度上升0.08 °C，特性黏度则进一步下降2.1 mL/g，该误差对黏均分子量的计算会产生明显的误差[4]。因此，在国家标准中对恒温浴温度的测量装置精度(±0.02 °C)和测量误差(±0.05 °C)都做出了明确的要求。关于流出时间，引导学生由带动能修正的黏度关系式出发，认识到动能项的相对贡献与流出时间的平方成反比，将流出时间由50 s延长至100 s可使该项贡献降至原来的四分之一，这也是标准规定溶剂流出时间下限的原因。针对上述误差来源，在实验报告中设置“标准偏离报告”作为评分项。学生若发现某一浓度点相对黏度低于合理范围、溶剂流出时间过短、恒温波动过大、两次流出时间偏差异常、溶液过滤不充分或存在气泡，应记录相应的实验条件，判断是否偏离标准要求，并说明数据保留、剔除或补充测量的依据。避免实验报告单一追求数据是否“好看”“套公式求结果”的评价倾向，转而训练学生解释异常数据、判断方法适用范围、解释偏离原因的高阶能力，培养学生的标准意识、记录意识、误差意识和责任意识。使学生从“按步骤测出一个分子量”转向“依据标准判断一个分子量是否可信”，从而实现高分子物理基础知识、实验技能和工程标准素养的深度融合。

4 旋转黏度计测定聚合物浓溶液的表观黏度

现行的GB/T 40280—2021规定了使用单筒式旋转黏度计测量表观黏度的方法。在高分子物理实验中，该实验是流体黏性阻力的入门实验，教学重点往往集中在Ostwald-de Waele幂律方程的数学表达。使用数显式黏度计进行测量时，学生只需将转子浸入待测聚合物溶液并读取读数，就能得到黏度数值。在这种简化模型下，学生容易将表观黏度误认为与转子和转速无关的材料常数。实际上，该国家标准在注释中明确指出：“对于非牛顿流体，表观黏度取决于剪切速率”。实验应引导学生结合扭矩响应、转子几何和转速理解读数的含义，并明确不同测量结果的可比条件。由于单筒式旋转黏度计是利用两个同心圆筒的环形间隙测定物料的黏度，转子表面各点的速度梯度并不完全相同。因此，非牛顿流体的测量结果并不是严格意义上的“真实黏度”，而只是局部地测量到流变的真实参量，所以被称为表观黏度。这种高分子物理中“黏度”概念上的表述差异，与单筒旋转黏度计的测量原理直接相关，也形成了实验教学重构的切入点。

单筒旋转黏度计的测量原理本质上是基于库埃特(Couette)流动模型。仪器的电动机主轴并不直接带动转子，而是通过一根游丝(扭簧)与转子相连。如

图2(a)所示，当转子浸入试样并以角速度 Ω 稳定旋转时，作用于转子的黏性阻力矩与游丝的弹性恢复力矩达到平衡，转子相对于主轴滞后一个扭转角 θ，即扭矩$M = D\theta$ (D为游丝的扭转系数)。仪器直接测得的物理量是扭转角，其本质是扭矩，而并非黏度。黏度计显示的黏度数值(η)是仪器依据预设的换算关系 $\eta = k\theta$ 由扭矩换算而来的结果，仪器系数 k 由游丝扭转系数、转子几何尺寸与转速共同决定。这也解释了为何对于非牛顿流体，“黏度”不是一个可由单次读数确定的常数，而是一个依赖于测量条件的“表观”量。对半径为 r、转子高度为 l 的任一同心圆柱转子作力矩平衡(图2b~2c)，可得 $M = 2\pi r^2 l\tau(r)$，即剪切应力沿径向按$\tau(r) = M/(2\pi l r^2)$ 衰减，与半径的平方成反比。对于牛顿流体，即 $\tau = \eta\dot{\gamma} = \eta r(\mathrm{d}\omega/\mathrm{d}r)$ ($\dot{\gamma}$为剪切速率，ω为角速度)，代入上式并以 $r = R_\mathrm{i}$ (R_i为转子半径)处$\omega = \Omega$、$r = R_0$ (R_0外筒半径)处ω=0 为边界条件积分，即得同轴圆筒黏度计的基本关系式——马居尔(Margules)方程：$\eta = M/(4\pi l\Omega)\ (1/R_\mathrm{i}^2 - 1/R_0^2)$。相应地，转子表面处的剪切速率为$\dot{\gamma}_\mathrm{i} = 2\Omega R_0^2/(R_0^2 - R_\mathrm{i}^2)$[5]。由于单筒式黏度计并不设置外筒，而是将转子直接浸没于高脚烧杯之中，其内径远大于转子半径，相当于R_0趋向于∞。此时，马居尔方程简化为：$\eta = M/(4\pi l R_\mathrm{i}^2\Omega) = D\theta/(4\pi l R_\mathrm{i}^2\Omega)$(其中，仪器系数$k = D/(4\pi l R_\mathrm{i}^2\Omega)$)。这意味着剪切变形几乎全部集中在紧贴转子的薄层之内，稍远处的流体近乎静止。因此，单筒法所给出的并非整个试样在某一确定剪切速率下的响应，而只是转子附近局部流场的一个加权结果。有了这一测试原理铺垫，标准与仪器操作规程中若干看似经验性的要求，便可被逐条还原为可推导的物理结论。首先，由$\eta \propto 1/(lR_\mathrm{i}^2\Omega)$可知，仪器的满量程与转速成反比、与转子的特征尺寸 lR_i^2 成反比。这正是“转子—转速组合表”中转速减半则量程加倍、转子越细小则量程越高的由来。其次，单筒式黏度计对扭转角的分辨力是固定的，显示值的相对不确定度约与 $1/\theta$ 成正比，因而当读数落在满量程较低区段时，其相对误差将成倍放大。这也是标准要求读数处于满量程有效区间之内的计量依据，也说明“换一个转子—转速组合重测”并不是操作上的反复，而是确保测量落入可信区间的必要步骤。再次，转子上下端面同样受到黏性作用，仪器系数k 只有在规定的浸没深度、容器尺寸与转子形状下才成立。因此，标准对待测液面须与转子细颈刻槽对齐、盛样容器内径与液层深度提出严格要求。最后，仪器的水平度直接影响转子的同轴度与浸没的对称性，一旦转子偏心，环隙沿周向不再均匀，使实际测量条件偏离模型或校准条件，因而须在测量前以水平仪校准。

基于此，首要的实验任务是结合测量条件设计比较不同转速下的表观黏度，分析其条件依赖性。要求学生对聚合物溶液在恒温条件下依次改变转子型号与转速，获得不同的转子—转速组合的读数。学生将发现同一试样可以给出相差数倍的“黏度值”，从而否定“表观黏度是物性常数”的先入观念。此时，引导学生结合扭矩测量原理，说明转子几何、转速及读数换算关系对测量结果的影响，并检查读数差异是否还与温度、浸没深度或测量时间有关。随后，引导学生依据标准的规定确认落在满量程有效区间之内

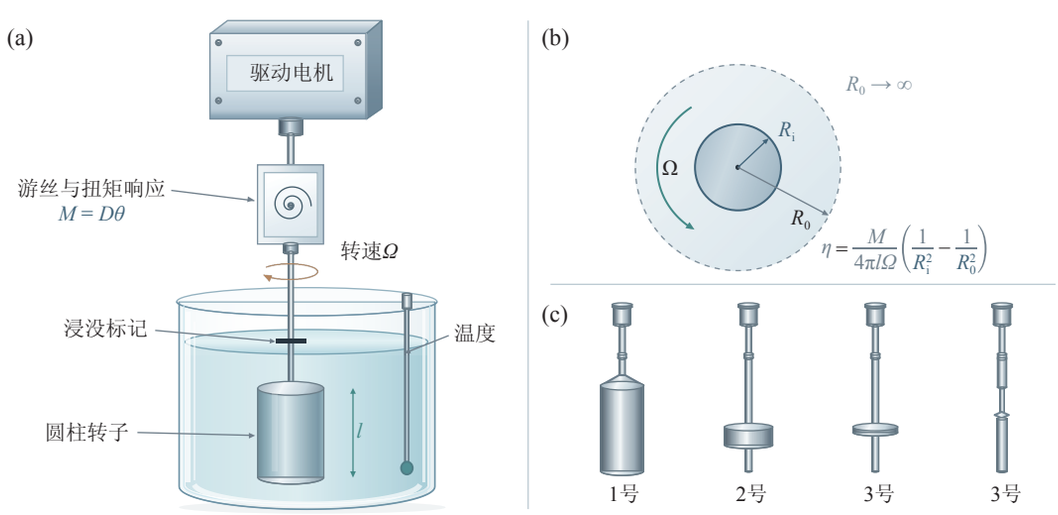

图 2 (a)以圆柱转子为例示意驱动、扭矩响应与试样的旋转黏度计测量过程；(b)理想圆柱转子计算原理；(c)常用转子形状示意

Fig. 2 (a) Schematic of a rotational viscometer with a cylindrical spindle, showing the drive mechanism and torque response during sample measurement; (b) Idealized cylindrical spindle model and the corresponding equations; (c) Common spindle geometries

的合格测量，并完善转子号、转速、温度与恒温时间等测量条件，明确不同测试条件下表观黏度的可比范围。在剪切速率明确的测量模式下测定表观黏度随剪切速率的变化，以双对数坐标作图，由直线斜率求非牛顿指数 n、由截距求稠度系数 K，从而完成Ostwald-de Waele 幂律方程的参数化，并据此讨论所测体系属于假塑性、牛顿型还是膨胀性流体，以及剪切变稀的流变学机制。在此基础上设置改变温度的拓展任务，由黏度对数与温度倒数的线性关系求黏流活化能，讨论柔性链与刚性链、氢键体系与非氢键体系的差异。经过上述重构，实验从一次简单的读数操作转变为一次完整的流变学测量设计与操作训练，学生获得的不仅是幂律方程的两个参数，也形成了同时报告黏度值及测量条件的习惯。教师据此评价学生对仪器读数、测量条件与流变模型之间关系的理解。

5 热塑性塑料熔体流动速率的测定

该高分子物理实验在教学中长期被称为“熔融指数”实验，而这一俗称恰恰是最需要由标准加以规范。国家标准GB/T 3682.1—2018规定的规范术语是熔体质量流动速率(g/10min)以及熔体体积流动速率(cm^3/10min)。“熔融指数”一词既未反映被测量的物理内涵，也掩盖了该物理量对试验条件的依赖性。实际上，高分子物理的许多关键物理量并非等待被测的本征常数，而是由测量方法与条件共同定义的条件量。MFR和MVR这2个熔体流动指标正是这样一个典型：同一材料在不同温度、不同负荷下会得到不同数值，脱离测试条件谈论“指数”没有物理意义。

为使该实验真正进入流变学的知识框架，首先引导学生由标准规定熔体流动速率仪的几何参数出发进行推导。依据标准，料筒内径为 9.550 mm、口模内径($2R$)为 2.095 mm、口模长为 8.000 mm，由2.16 kg常规负荷产生的活塞压力经口模几何换算，可得毛细管壁面剪切应力约为 19.4 kPa。进一步，若由MVR换算体积流率Q，并按圆管表观剪切速率公式$\dot{\gamma} = 4Q/\pi R^3$估算，对于MVR在1~30 cm^3/10 min范围内的常见热塑性塑料，表观剪切速率约在1.85~55.4 s^{-1}之间，即主要在10^0~10^1 s^{-1}量级。这表明熔体流动速率实验本质上是一种低剪切应力、低剪切速率下的流动表征。这一推导将标准中的几何参数转化为流变学中的应力与应变速率，使学生从“按标准操作”上升到“按原理理解”。

在此基础上，将实验从“按流程测试”转变为“按材料选条件”。传统教学中温度与负荷由教师预设，学生只需装料、预热、切样、称重。重构后，实验仅提供若干未标明牌号的试样，如聚乙烯、聚丙烯、聚苯乙烯、丙烯腈–丁二烯–苯乙烯共聚物和聚碳酸酯，要求学生依据标准自行选定条件代号，并依据标准关于切样时间间隔应与预期流动速率相匹配的规定，反推合理的切样间隔与装料量。若首次试测中挤出物流出过快导致无法完成有效切样，或过慢导致料筒内停留时间过长，学生须依据标准调整负荷等级或切样间隔并说明理由。此外，依据标准中对精密度的要求，汇总全班各组对同一试样的测定结果，计算重复性标准差与变异系数，并与标准给出的精密度指标比对，识别组间差异，并回溯可能的操作与条件因素。教师借此引入实验室间比对与能力验证的概念，使学生初次接触“数据的可信性由统计证据确立”这一质量观。在完成基础测定后，可结合GB/T 25278—2010设置流变学拓展任务，比较熔体流动速率与流动曲线所提供的信息。学生利用具有压力、流量和口模尺寸记录的数据，计算表观剪切应力、表观剪切速率及表观黏度，并在满足相应几何和测量条件时讨论入口压力修正与非牛顿剪切速率修正的必要性。该拓展任务用于理解单一工况指标与一定剪切速率范围内流动曲线的区别，为后续毛细管流变测量及加工流动分析做准备。

最后，结合材料检验与牌号评价，讨论数据记录和实验报告的职业规范。熔体质量流动速率是聚乙烯、聚丙烯等通用塑料模塑与挤出材料标准中用于牌号分级的核心指标，一个实验数据由此直接进入贸易合同与质量鉴定，学生因而能够逐步形成对数据真实性、结果准确性及分析结论可靠性的责任意识。与之相应，高温料筒的清理、口模不得使用金属工具刮擦、熔体接触部位的防烫防护等操作要求，均须作为不可省略的规范加以强调，使安全意识与仪器责任意识在操作中自然养成。经过上述重构，该实验从一个测定单一数值的验证型实验，转变为串联术语规范、条件设计、机制实证、流变推导与质量统计的综合型实验。

6 教学实施成效

上述教学改革实施后，学生对国家标准的认识首先由操作依据转向测量知识体系，实验操作也由执行既定步骤逐步转向自主设计和证据判断。实验方案不再只有教师预设的唯一答案，学生必须在方法适用范围内作出选择，并对选择所产生的实验结

果负责。学生能够完整报告标准编号、试样状态和关键测试条件，依据材料状态和标准适用范围自主选择实验条件并作出合理说明，实验方案一次审核通过率为86%。这一变化使实验课由操作训练进一步转向包含方案设计、条件优化和结果论证的综合研究过程，改善了学生使用国家标准设计实验的能力。学生对实验数据的处理方式也发生了较为明显的变化。改革前，部分学生倾向于删除偏离拟合直线的数据，或反复测量直至获得接近参考值的结果。引入标准偏离报告后，学生需要记录实验偏离发生的环节，并结合流出时间、恒温波动、气泡、试样厚度、转子浸没深度和熔体停留时间等因素，说明数据保留、剔除或重新测量的依据。原始记录完整的学生和能够对异常数据作出合理判断的学生明显增加，误差意识、原始记录意识和科研诚信教育落实到了每一次数据取舍和结论表达之中。

同时，教学重构也推动了师生角色和评价重点的转变。教师不再提供全部实验参数和唯一判断结论，而是通过审核方案、追问标准依据和组织组间数据比较，引导学生识别理想模型与真实测量之间的差异。学生则由操作步骤的执行者逐步转变为测量方案的设计者、异常数据的解释者和检测结果的责任承担者。实验报告平均成绩由15.3分提高至16.8分，课程目标中与“研究”和“使用现代工具”相关指标的达成度分别由0.722和0.740提高至0.831和0.878。与单纯比较课程总评成绩相比，这些基于实验行为和学习产出的指标更直接地反映了学生在测量设计、证据判断和方法边界认识方面的变化。特别是在涉及材料牌号判定、质量检验和实验室间比对时，学生能够认识到一个未经条件限定或缺少质量控制的数据可能直接导致错误的工程判断。标准意识、安全意识与质量责任由此不再依赖抽象说教，而是建立在具体测量后果之上。该教学改革在国家标准与实验教学之间建立联系，使学生既能够规范实施测量，也能够判断标准方法能够说明什么、不能说明什么。

总体来看，该教学模式促进了学生由关注实验结果向关注证据质量转变，由机械遵循步骤向理解测量约束条件转变，由完成课程任务向承担工程数据责任转变。国家标准的教学功能也由外部操作约束拓展为连接物理原理、测量方法和工程责任的认知框架。上述成效为工程教育专业认证中“研究”“使用现代工具”和“工程伦理和职业规范”等毕业要求提供了较为具体、可观察和可追溯的评价证据。

7 结语

国家标准引领下的高分子物理实验教学重构，关键不在于增加标准条款的讲解数量，而在于利用标准重新建立高分子物理理论、测量方法与工程实践之间的联系。本研究围绕球晶形态观察、聚合物的示差扫描量热分析、稀溶液黏度法测定分子量、浓溶液表观黏度测定和熔体流动速率测定等五项实验，将标准中的术语定义、适用条件、仪器要求、误差控制和结果表达转化为可推导、可设计和可验证的教学问题，形成了“标准条款—物理原理—条件设计—实验测量—证据判定—工程表达”的教学链条。

经过重构，学生获得的不再只是球晶图像、熔融温度、黏均分子量、表观黏度或熔体流动速率等若干孤立结果，而是对测量对象如何定义、实验条件如何影响结果以及数据为何可信的完整认识。利用国家标准建立实验操作与高分子物理概念之间的联系，实验课程也由验证教材结论逐步转向分析方法边界、解释异常现象和解决工程测量问题。后续教学中还需结合课程目标达成度、实验方案合格率、报告规范性、异常数据判断能力和学生反馈等证据，对改革效果开展持续评价，并及时将标准修订、行业案例和实验室质量管理要求纳入课程内容，使课程始终保持与材料检测技术和工程实践同步。

参 考 文 献

1 张来英, 吴伟泰. 化学“101计划”化学测量学实验中高分子物理实验模块的设计与建设. 大学化学, **2026**, 41(6), 185−195.

2 中国工程教育专业认证协会. 工程教育认证标准: T/CEEAA 001-2022[S]. 北京: 中国工程教育专业认证协会, **2024**.

3 李艳凯, 战艳虎, 滕谋勇, 李光, 李玉超, 谢倩, 邓爱霞, 王双双. 工程教育认证背景下《高分子材料与工程综合实验》依托产品标准的整合优化探究. 高分子通报, **2024**, 37(5), 701−706.

4 朱宗锐. 温度对聚酯切片粘度测定的影响. 合成纤维, **1993**, (1), 49−50.

5 Morris, A. S., Langari, R. *Measurement and Instrumentation: Theory and Application*. 2nd ed. Amsterdam: Academic Press, **2016**, 637−678.