高 分 子 通 报
POLYMER BULLETIN

教育与教学 / Education DOI: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26320

聚硼硅氧烷抗冲击复合材料的制备及其在前沿实验教学应用中的研究

牟静茹 侯雨佳 谢正田 赵伟锋 兀 琪* 吴锦荣*

(四川大学高分子科学与工程学院 先进高分子材料全国重点实验室 成都 610065)

摘 要 高分子前沿实验是连接理论知识与科研实践的关键载体，旨在培养学生的科学思维、动手能力与知识应用能力。剪切硬化超分子聚合物(SSSPs)作为高分子材料的前沿方向，其结构调控与性能优化是提升学生科研素养的重要教学内容。本研究以聚硼硅氧烷(PBS)为典型实例，基于唐纳德·舍恩的“反思性实践者”理论，构建了“理论学习—实践行动—复盘反思—应用拓展”的闭环教学流程。在此框架下，引导学生系统完成碳纳米管(CNT)掺杂PBS复合材料的制备、结构解析、性能表征与构效关系分析，贯通从理论学习、材料制备、仪器分析到应用场景分析的全链条训练。该教学过程注重在实践与反思的循环中深化学生的知识建构，有效锻炼其科学思维与动手操作能力。

关键词 高分子前沿实验；反思性实践者；聚硼硅氧烷；碳纳米管掺杂；剪切硬化

Research on Impact-resistant Composite Based on Carbon Nanotube-polyborosiloxane and Its Application in Advanced Experimental Teaching

Jing-ru Mou, Yu-jia Hou, Zheng-tian Xie, Wei-feng Zhao, Qi Wu*, Jin-rong Wu*

(*College of Polymer Science and Engineering, State Key Laboratory of Advanced Polymer Materials, Sichuan University, Chengdu 610065*)

Abstract Advanced polymer experiments serve as a critical bridge connecting theoretical knowledge with scientific research practice, aiming to cultivate students’ scientific thinking, hands-on skills, and knowledge application abilities. Shear-stiffening supramolecular polymers (SSSPs), as a cutting-edge direction in the field of polymer materials, offer valuable content for teaching structural regulation and performance optimization to enhance students' scientific research literacy. Taking polyborosiloxane (PBS) as a typical example, this study constructs a closed-loop teaching process of “theoretical learning-practical operation-review and reflection-application and expansion” based on Donald Schön’s theory of the reflective practitioner. Within this framework, students are guided to systematically complete the preparation, structural characterization, property testing, and structure-activity relationship analysis of carbon nanotube (CNT)-doped PBS composites, realizing a full-chain training covering theoretical learning, material preparation, instrumental analysis, and application scenario analysis. The teaching process emphasizes deepening students’ knowledge construction through the cycle of practice and reflection, effectively cultivating their scientific thinking and practical operational abilities.

Keywords Advanced polymer experiments; Reflective practitioner; Polyborosiloxane; Carbon nanotube doping; Shear stiffening

2026-07-04 收稿, 2026-08-11 录用

基金项目: 四川省高等教育人才培养质量和教学改革项目(项目号 JG2024-0106, JG2024-0021)

* 通信联系人: 兀琪, E-mail: wuqi57@scu.edu.cn; 吴锦荣, E-mail: wujinrong@scu.edu.cn

引用: 牟静茹, 侯雨佳, 谢正田, 赵伟锋, 兀琪, 吴锦荣. 聚硼硅氧烷抗冲击复合材料的制备及其在前沿实验教学应用中的研究. 高分子通报, doi: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26320

Citation: Mou, J. R.; Hou, Y. J.; Xie, Z. T.; Zhao, W. F.; Wu, Q.; Wu, J. R. Research on impact-resistant composite based on carbon nanotube-polyborosiloxane and its application in advanced experimental teaching. *Polymer Bulletin* (in Chinese), doi: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26320

为响应国家创新型人才培养与前瞻科技发展的重大需求，近年来，四川大学高分子科学与工程学院面向本科生开设了“前沿实验”综合训练课程。该课程旨在突破“纸上得来终觉浅”的传统教学局限，将国际前沿研究成果有机融入实验教学，引导学生接触新材料、新技术，着力培养其创新思维、科学素养与综合实践能力。通过贯通理论学习、材料制备、仪器分析至应用场景的全链条训练，课程致力于培育具备扎实理论基础、优秀科学素养和突出动手能力的卓越工程人才。

在众多前沿实验课程的主题中，抗冲击高分子复合材料的相关实验十分典型，它直接服务于现代社会对高性能防护材料的迫切需求。实验选取剪切硬化超分子聚合物(SSSPs)这一热点研究材料，将前沿科学问题自然地转化为实验教学内容，涵盖了高分子化学、高分子物理、仪器分析和工程应用等知识，让学生能够将不同学科的知识融会贯通。

就实验设计而言，课程从“反思性实践者”概念出发，摒弃单纯理论灌输的教学模式，转而引导学生通过动手操作、数据采集、反思论证等环节，提升科学分析和知识应用的能力。首先，该实验需要打破学生对于传统高分子受冲击或剪切时易发生链解缠结、呈现剪切变稀等现象的常规认知，引出聚硼硅氧烷(PBS)弹性体剪切硬化的机制，让学生深入理解该材料的构效关系。在此基础上，我们鼓励学生自主改进实验，在PBS中掺杂碳纳米管(CNT)，研究CNT如何调控复合材料的性能，进一步探索其在防护等领域的潜在应用，将前沿实验课的人才培养目标落到实处。

1 实验教学设计

1.1 实验目的

本实验课程以美国当代教育家唐纳德·舍恩(Donald Schön)的“反思性实践者”概念为核心，让学生跳出传统的刚性抗冲击材料思维以及对高分子剪切变稀的固有印象，从具有剪切硬化效应的PBS材料入手，了解其合成原理，分析其中的构效关系。指导学生动手操作，学习红外光谱，拉伸、流变与抗冲击性测试等操作，培养学生“在行动中反思”的即时调整能力与“行动后反思”的逻辑复盘能力，并让学生形成“结构—性能—应用”的系统认知，使该课程具备探究性、实践性和前瞻性，契合国家对新材料领域创新型人才的要求。

1.2 理论依据

Schön系统提出了“反思性实践者”的概念[1]，在职业教育与实践教学中意义重大。该概念不拘泥于“技术理性”的教育模式，认为专业能力不体现在单纯的理论知识应用，而重在“行动中反思”与 “对行动的反思”的过程，这与高分子前沿实验“以研促教，以教带学”的内核高度匹配。

这一理论主要包含了2个核心思想：一是在行动中反思，也就是实践者在实施操作的过程中，面对实际情况的复杂性、不确定性、不稳定性等和理论情况存在冲突时，及时分析问题和调整思路的过程。这一过程不依赖已有的理论框架，而是实践者根据实验过程中出现的异常情况或实践结果做出的新判断或结论，这对于参与科研训练的学生来说至关重要。二是对行动的反思，是指在实践过程结束后，回看整个实施过程，将实际结果与理论结果进行对照，评估成败并分析实施过程的改进方案，积累实践经验并自己总结出规律和方法的过程。

在本实验中，以PBS剪切硬化效应机理和CNT掺杂对复合材料性能的影响探究作为实践场景，引导学生将已有的科学知识应用到实际研究当中去，并对操作和实验结果进行分析和反思，实现动手能力与科学思维的共同提升。

1.3 实验原理

1.3.1 PBS的制备方法

聚硼硅氧烷(PBS)的制备根据反应机理和原料体系的不同，主要有3类：第一种是利用硅硼单体缩聚形成Si－O－B交联结构，这是制备PBS最直接的方法。例如，利用硼酸和氯硅烷脱除盐酸(HCl)小分子副产物[2]，或利用硼酸与硅烷的脱氢反应[3]等方法来制备PBS，但是前者可能会产生副产物的污染问题，后者又需要额外加入催化剂且反应周期长。第二种是利用含硼化合物引发聚二甲基硅氧烷(PDMS)的链断裂反应[4]，形成短链并通过Si－O－B或B－O－B键连接，但该反应通常需要在高温下进行。第三种是

利用羟基硅油(PDMS-OH)与含硼小分子的脱水反应来制备PBS，这种方法可以在常温下反应并且能够利用硅油的长链形成拓扑缠结结构，调控PBS的性能[5]，本实验将采用第三种方法来制备PBS。

1.3.2 PBS的超分子结构与剪切硬化机制

20世纪60年代，关于PBS的超分子结构存在争议，一部分人认为由于B原子2p电子轨道为缺电子轨道，并且B的电负性明显小于O，因此B原子就容易与O原子的2p轨道共用电子从而形成B:O配位超分子结构[6]；而另一些人则认为是PBS末端的硼羟基之间的氢键构成了超分子结构[7]。21世纪，人们提出动态配位键和氢键一同构成了PBS的超分子结构[8]。这些配位键和氢键比共价键易断裂，当PBS处于静态或受到低剪切速率时，这些键能够及时响应外界刺激变化而发生断裂，此时材料便可以显出柔软特性；而当材料受到高速冲击时，这些键来不及断裂，应变滞后于应力，材料表现为固态，从而出现特殊的剪切硬化性能和抗冲击性能[9]。

1.3.3 填料改性

由于配位键和非共价键在较低的应变速率或者静止状态下会出现键的动态断裂与重组、分子链的松弛现象，造成结构不稳定的冷流缺陷[10]，这会导致PBS的结构稳定性下降。因此，研究者们提出可以加入无机填料(如碳酸钙、MXene)[11]、泡沫(如聚氨酯)[12]或纤维等，利用所加入材料的物理增强或支撑作用来改善PBS的结构稳定性，减小冷流缺陷，本实验将引导学生探究碳纳米管掺杂对PBS性能的具体影响。

1.4 实验试剂与主要仪器

端羟基聚二甲基硅氧烷(PDMS-OH，平均分子量4200 g/mol)，购自美国陶氏化学公司，硼酸(BA)，购自奥法艾萨(Alfa Aesar)公司，碳纳米管(CNT)，购自成都有机化学有限公司，四氢呋喃(THF)，购自上海泰坦科技股份有限公司。

傅里叶变换红外光谱仪(Thermo Scientific Nicolet iS50，美国赛默飞世尔科技公司(Thermo Fisher Scientific))，流变仪(Anton Paar MCR 302，奥地利安东帕公司)，6.5位高精度台式数字多用表(FLUKE 8846A，美国福禄克公司)，拉伸试验机(CMT 4503，美特斯工业系统(中国)有限公司)。

1.5 样品制备与表征

1.5.1 PBS与PBS-CNT的制备

学生取20.000 g PDMS-OH和0.197 g BA (PDMS-OH与BA的摩尔数比为3:2)，将其室温搅拌预聚12 h，再在80 °C真空环境下反应12 h完成聚合，即通过PDMS-OH与BA的脱水反应制备PBS。之后，学生另取19.000 g PDMS-OH和0.187 g BA，将1.000 g CNT粉末分散于PDMS-OH与BA的混合液中(CNT约占总质量的5%)，室温搅拌24 h充分分散CNT与预聚后，采取上述高温真空方式完成PBS聚合，制备PBS-CNT。

但制备过程中，学生发现加入CNT后进行搅拌，CNT粉末会发生团聚，他们意识到CNT是一维材料，具有较大的比表面积和高表面能，倾向于聚集成束以减小表面张力，这种团聚可能会造成分散不均匀的情况影响材料质量，因此对课堂上学到的“溶剂表面张力越低，越容易在高表面能的固体表面铺展”这一理论进行了思考，加入了低表面能的四氢呋喃(THF)来浸润高表面能的CNT，并且CNT表面由sp^2杂化的碳原子构成，具有丰富的离域π电子云，而THF的O原子带有负电，可以与CNT表面的π电子云产生偶极–诱导偶极相互作用，减小CNT的分子间相互作用力，从而抑制CNT粉末聚集。这一举措有效增大了CNT的分散均匀性。通过将5 mL THF加入原来含有CNT的混合液共混后，进一步采取上述高温真空方式促进其反应完全，制备PBS-CNT。最后将PBS和PBS-CNT分别置于50和70 °C下热压15 min，制备了纯PBS和PBS-CNT复合材料薄膜(图1)。

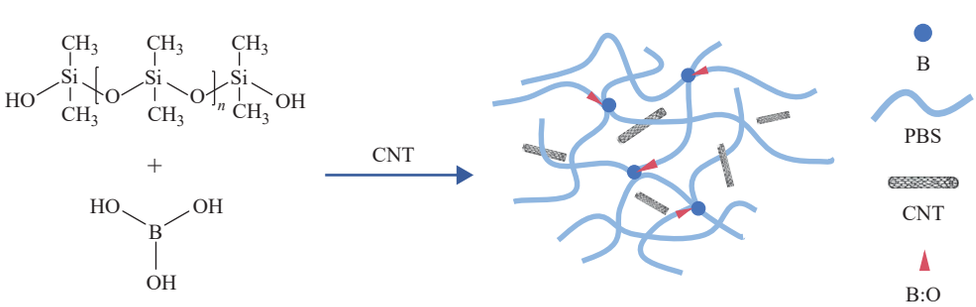

图 1 PBS-CNT的合成示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the synthesis of PBS-CNT

1.5.2 材料的表征

我们指导学生在傅里叶变换红外光谱仪上以衰减全反射模式记录了室温下2种材料的红外光谱；利用流变仪表征材料的储能模量和弹性模量等流变学特征；通过配备有力传感器的落球冲击试验机测量材料的冲击防护性能；利用电阻仪对材料的导电性、电阻等性能进行测量；并将材料制成哑铃型，在拉伸试验机上进行材料的力学性能试验。此时，学生联想到课内学过配位键和非共价键具有缔合和解缔合的性质，猜测本实验所制备的材料理论上应当具有良好的自愈合性，因此选取PBS-CNT的部分拉伸试样从中间部位裁断，并置于室温烘箱中静置2 h，观察其宏观变化。

1.6 结果与讨论

1.6.1 超分子结构探索

傅里叶变换红外光谱(FTIR)光谱可以让学生比较清楚地看到材料中各个基团峰值的有无和具体的位置，从而对PBS的结构有更深刻的了解，并认识到CNT掺杂对合成反应是否有影响。PBS红外光谱于1340 cm^{-1}处出现了峰值，说明缩合反应产生了Si－O－B键，但未在1380 cm^{-1}处观察到B－O－B拉伸带[13]，也未出现超过3000 cm^{-1}的B－OH峰[14]，这些现象表明本次实验中BA基本已经反应完全且几乎没有发生自身缩合反应。此外，PBS-CNT的峰形与PBS基本一致，说明CNT掺杂对合成反应无影响，也未破坏PBS的主体骨架结构(图2a)。

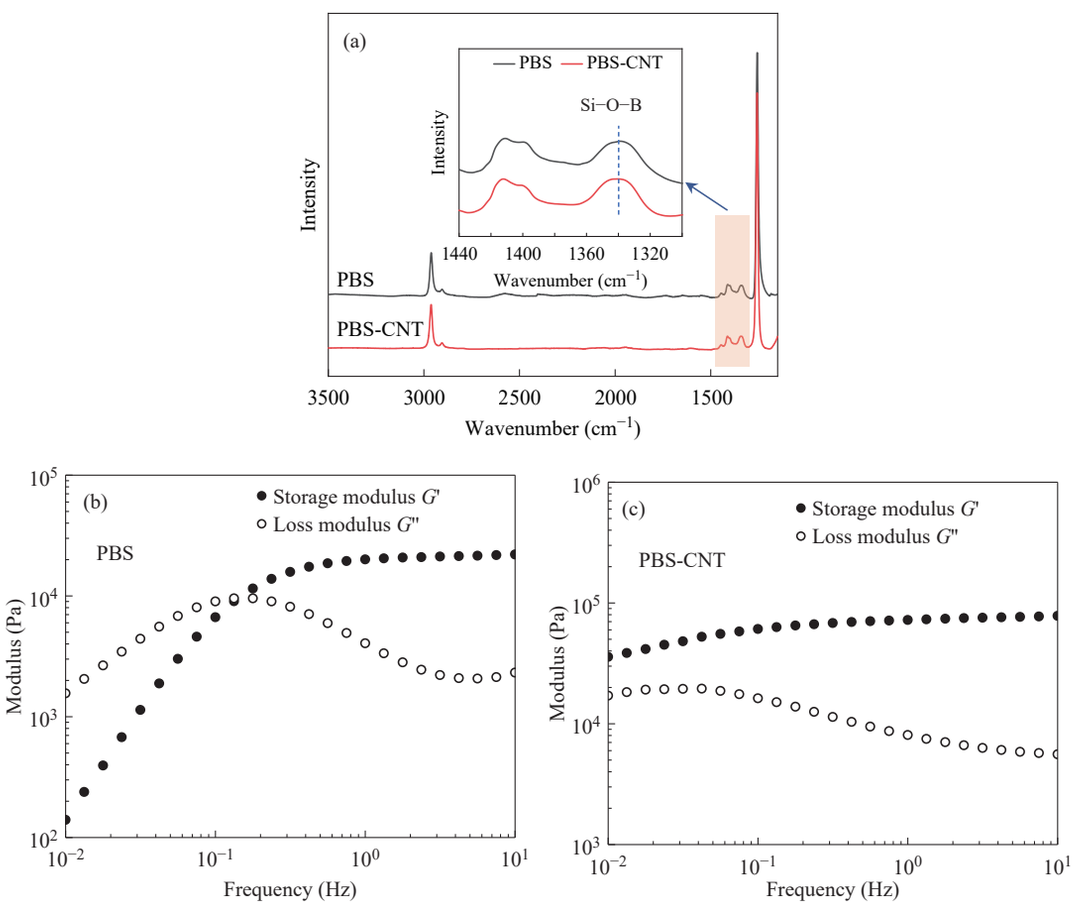

图 2 (a) PBS与PBS-CNT的(FTIR)光谱；PBS (b)和PBS-CNT (c)的流变扫频曲线

Fig. 2 (a) FTIR spectra of PBS and PBS-CNT; Frequency dependent rheological curves of PBS (b) and PBS-CNT (c)

1.6.2 材料流变性分析

在0.01~10 Hz的范围当中对2种材料进行频率振荡扫描，从测试图中可以看出，纯PBS在低频区(f < 0.144 Hz)的储能模量(G')低于损耗模量(G'')，呈现黏性的类液态，说明此时动态B:O配位键处于解离–重组的“松弛态”，且松弛时间(τ_c)较短，约1.105 s (图2b)；而在高频区转为弹性的类固态($G' > G''$)，动态键来不及解离，形成临时交联网络。这一“液–固转变”让学生对硼氧配位键的解离–重组行为有了微观层面的理解。

从CNT掺杂改性实验中，学生了解到PBS-CNT复合材料在全频段下均表现为类固态特征(图2c)，所

以学生能更深刻地认识到纳米填料凭借物理交联和界面相互作用来抑制动态网络松弛的机理。

1.6.3 CNT掺杂对力学性能的影响

当学生尝试对PBS进行拉伸实验时，发现其厚度测量不准，无法向计算机录入厚度数据，导致测试失败。通过对这次失败的分析和反思，学生认识到该结果是PBS的冷流缺陷造成的，因此需要对材料进行改进。对填充改性的PBS-CNT复合材料进行测试，发现其厚度测试结果几乎不变，在保持500 mm/min拉伸速率不变的情况下，对其进行多次拉伸测试(图3a)，其平均拉伸强度约为(0.14±0.02) MPa，平均最大应变高达(1122±326)% (图3b)。因此，归纳得出CNT纳米填料掺杂引起的物理交联，以及CNT与PBS分子链的界面相互作用有效抑制了PBS的冷流行为，显著提升了其结构稳定性与力学性能的结论。

为了量化材料的抗冲击性能，学生利用质量为16 g的钢球，对3种样品进行了对比测试：(1)空白对照：厚度为0.15 mm的PTFE薄膜(标记为blank)；(2)PBS样品：PTFE膜上垫有1 mm厚的PBS凝胶；(3)PBS-CNT样品：PTFE膜上垫有1 mm厚的PBS-CNT凝胶。记录不同跌落高度(10, 20, 30 cm)下冲击力随时间的变化曲线，并对其进行对比分析。

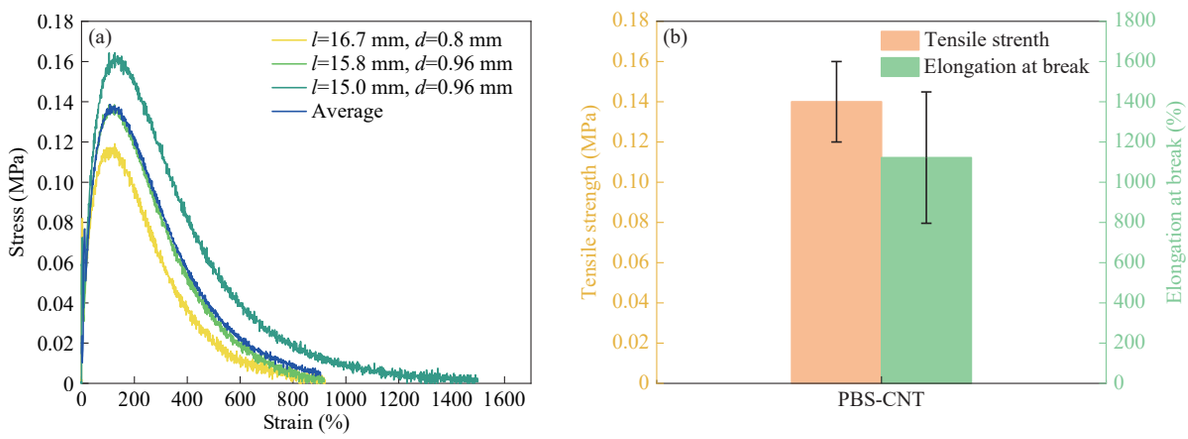

图 3 (a)PBS-CNT的应力–应变曲线；(b)PBS-CNT的拉伸强度与断裂伸长率

Fig. 3 (a) Tensile stress-strain curves of PBS-CNT; (b) Tensile strength and elongation at break of PBS-CNT

对其冲击力–时间曲线(图4a~4c)的数据进行整理，可以发现纯PTFE膜在冲击下的峰值力极高，且最大冲击力($F_{max,Force}$)随高度增加而急剧上升；但覆盖PBS凝胶后，材料的F_{max}明显降低；且PBS-CNT样品的F_{max}在各个高度下均低于PBS (图4d)。

同时，学生为了展示这一缓冲效果随时间的变化情况，自主提出了“缓冲持续性”的概念，定义衰减时间($t_{1/2}$，从峰值力衰减至一半所需时间)和力衰减率(与纯PTFE膜相比，材料冲击峰值力降低的百分比)，发现$t_{1/2}$顺序为PBS-CNT > PBS > PTFE (图4f)。且与PBS相比，PBS-CNT的力衰减率在不同冲击能量下都更高且基本保持稳定(图4e)。

结合课堂所学的“动态B－O配位键”理论，学生对该现象给出了合理的解释。PBS的动态网络可通过键的解离来耗散冲击能量，而加入的CNT既作为物理交联点增强了网络刚性，又由于与PBS链的界面吸附抑制了链段的剧烈运动，有效防止应力集中，从而更均匀地分散了冲击载荷。这一过程有助于锻炼学生用控制变量、量化分析的方法解决复杂工程问题的能力。

1.6.4 掺杂引起的导电性能

在完成上述各类表征后，引导学生进一步探索CNT掺杂可能带来的附加功能。学生在课堂上了解到CNT本身是具有导电特性的纳米材料，于是利用电阻仪对尺寸相同的PBS和PBS-CNT进行电阻测量，发现前者的电阻超过仪器量程，无法读数；而后者则测得了有效电阻值(2.16 MΩ)。学生通过对这一结果的反思认识到，可能是因为分散在PBS基体中的CNT相互接触或接近，形成了贯穿材料的网络通路，为电子迁移提供了通道，从而显著提高了材料导电性。

虽然导电性能测试简单，但能让学生在动手操作的过程中深刻地认识到纳米填料的引入不仅能改善力学性能，还可赋予其新的功能，这也是多功能材料设计的核心思想之一。

1.6.5 自愈合性能

将PBS-CNT制成哑铃形样品，沿其中间横截面实施切断处理后，立即将两新鲜断裂端面对接复位，并置于25 °C恒温干燥箱中静置2 h (图5)。随后肉眼

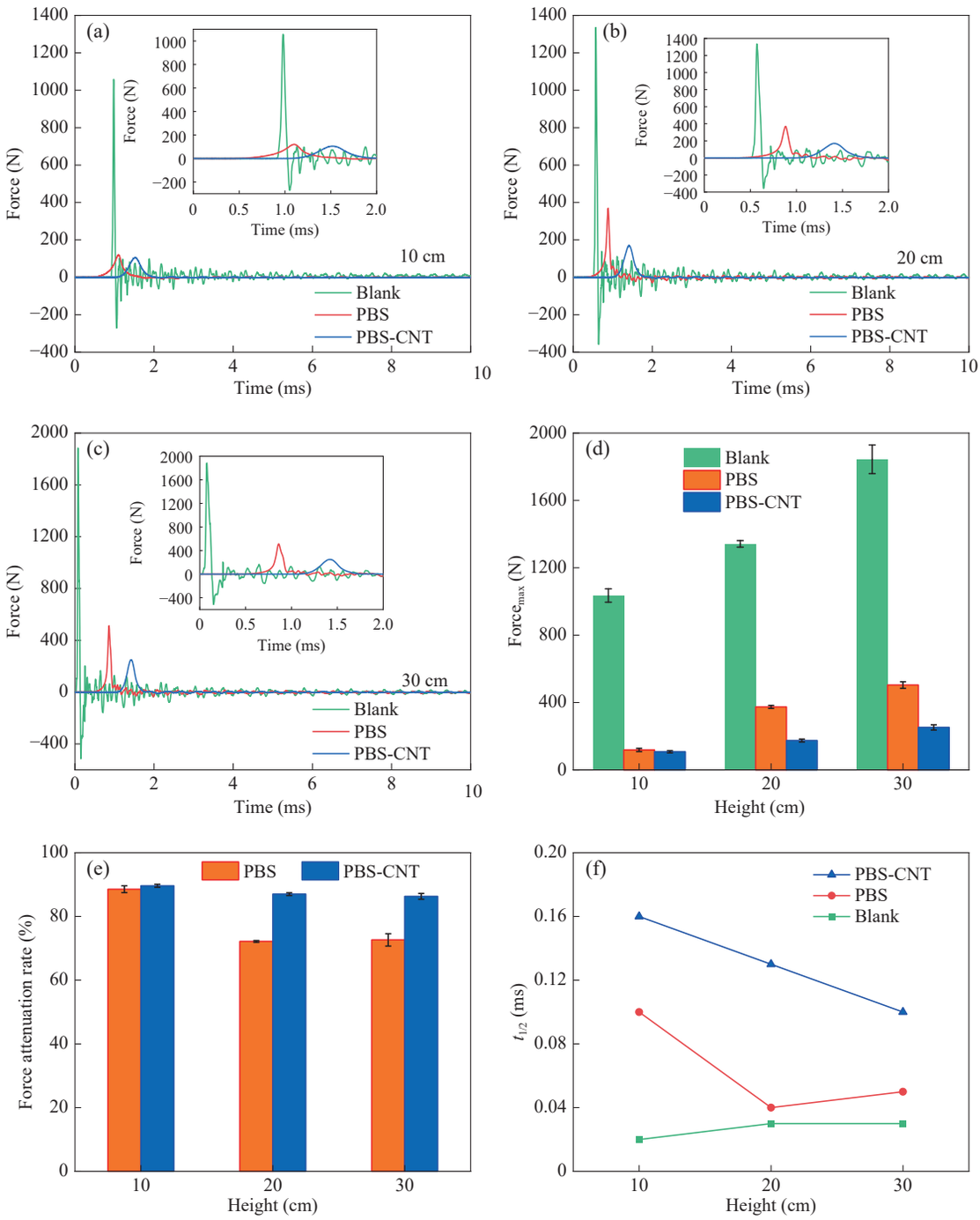

图 4 不同材料在 (a) 10 cm、(b) 20 cm和(c) 30 cm高度的落球冲击实验中力–时间变化图($m_{钢球}$ = 16 g); (d)不同落球高度的最大冲击力变化图; (e)不同落球高度的力衰减率; (f)不同样品的力衰减时间

Fig. 4 Force-time curves of different materials in ball drop impact experiments at heights of (a) 10 cm, (b) 20 cm, and (c) 30 cm ($m_{steel\ ball}$ = 16 g); (d) Maximum impact force at different drop heights; (e) Force attenuation rate at different drop heights; (f) Force decay time for different samples

即可观察到断口处已实现充分愈合，样品宏观形态恢复如初。这一直观现象不仅生动展示了材料的自修复功能，也为引导学生从微观层面探析其愈合机理提供了良好的切入点。

进一步分析可知，愈合过程中断面处的配位键与氢键等非共价相互作用发生动态重组，该过程伴随聚合物链段跨界面扩散与再缠结，使原本断裂的两部分在界面区域重新构建为连续、动态的高分子网络，最终使材料恢复其原有的结构完整性与宏观外形。这充分反映出PBS-CNT材料具有智能响应行为，启发学生对动态高分子网络结构与宏观性能之间的内在关联进行深入思考。

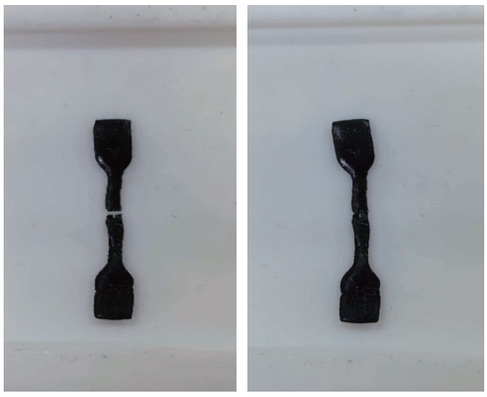

图 5 切断样品(a)和对接后愈合样品(b)的照片

Fig. 5 Photographs of the cut sample (a) and the healed sample (b)

1.6.6 潜在应用分析与思考

(1)柔性防护材料。PBS独特的“液–固转变”剪切硬化特性，配合CNT掺杂带来的稳定性与缓冲增强，让PBS-CNT弹性体成为柔性防护领域的理想候选材料。学生结合这些特性提出可以将PBS-CNT弹性体用到护膝、头盔内衬等护具中，利用其常态柔软、冲击硬化的特点增强护具的舒适度与防护力。

(2)剪切速率传感器。电阻测试中PBS-CNT呈现的导电性与动态超分子网络的可逆变形能力，自然而然地引出了学生对柔性传感应用研究的探索。例如，低剪切速率下动态键断裂、导电网络被破坏，都可能导致电阻增大；受到撞击时动态键来不及断裂，故电阻几乎没有变化，可以根据这一特点来设计开发人体运动监测传感器等等。

(3)自修复材料。材料借助动态键重组实现了自愈合性能，这激发了学生对聚硼硅氧烷这类材料耐久性及生物应用方面的讨论。例如，可以用该材料为软体机器人设计耐反复撞击、能自主修复的表层材料，即仿生机器人皮肤；也适合用来制造医疗辅助器具，从而延长器具的使用寿命。

学生们对PBS-CNT复合材料在防护、传感、愈合等领域的应用做了十分清晰且可行的分析，并且进一步做了跨学科联想与设计，培养了从实验室性能向实际应用转化的创新思维，这些过程都很好地契合了前沿实验课程教学“以研促创”的教学理念。

2 教学评价与课程优化

2.1 教学效果评价

由于要对聚硼硅氧烷–碳纳米管(PBS-CNT)复合材料的前沿实验课程教学效果做系统、严谨的评价，本课程在高分子科学与工程专业的部分本科学生中开展了试点教学。我们以学生能力提升、教师教学反馈二者相结合的方式，从学生的知识掌握、实践操作能力和思维培养3个维度分析教学效果，进而制定比较有针对性的课程优化方案。

2.1.1 学生能力提升

我们围绕实验课程设定的知识、实践、综合素养目标，设计了综合测评问卷与考核任务，对参与该课程的同学们开展能力测评与体验满意度调查，核心考察了理论知识理解度、仪器操作熟练度、反思性思维养成度、课程整体满意度、课程设计前瞻度等5个维度(图6)。



图 6 学生能力提升与课程评估思维导图

Fig. 6 Mind map of student competency development and course evaluation

通过课程前后的对比调查了解到学生在仪器操作熟练度、反思性思维养成度等方面完成情况较好，课程整体满意度和课程设计的前瞻性也较高，大部分学生能够独立完成红外光谱仪、流变仪等精密仪器的基础操作，又能针对实验中所遇到的CNT粉末团聚、PBS冷流导致测试失败等问题，主动思考、小组讨论，提出切实可行的解决方案，这些都很好地检验了课程在培养实践技能与问题解决能力上的目标达成度；更重要的是，相关应用的创新性联想还让学生看到了该复合材料未来的广阔前景。

为了进一步培养学生的实验反思能力，使学生建立起科研数据意识，教师们在实验过程当中引导学生进行重复实验，对多次实验结果进行均值和标准差的误差分析，并在对应实验中由学生自主绘制了包含误差棒的统计图。例如，学生在对PBS和PBS-CNT等样品的冲击性能稳定性的评估中发现，3次实验得到的最大冲击力误差分别不超过8.1%和6.3% (图4d)，力衰减率误差分别低于2.7%和1.1% (图4e)，这些数据让学生认识到实验结果较好的复现性和材料的性能稳定性，同时也表明学生具备了严谨的研究思维和对实验数据的可靠性进行定量分析和复盘反思的能力。

但是部分学生反应对理论原理还没有完全掌握清楚，因此不能就CNT掺杂对PBS材料微观结构、交联状态的具体影响形成直观、明确的认知，也因而不能建立起掺杂量与材料结构、性能之间的定量关系，

反映出课程在该部分的问题上仍然存在需要改进的地方。

2.1.2 教师教学反馈

研究小组先与前沿实验课程授课老师交流，据此收集反馈意见。教师们一致认为课程具有较高的前沿性和实践性，把CNT改性PBS高分子的前沿研究方向自然转化为实验教学内容，让学生亲身经历了从材料制备、性能表征、构效关系分析到应用探索的完整流程，很好地弥补了传统实验教学中学科前沿衔接较为薄弱的问题，也十分契合新材料领域专业人才的培养需求。此外，部分教师指出课程虽然已经较好地融入了“反思性实践者”理论，有利于帮助学生形成对反常现象进行批判性思考的能力，但也客观地指出学生在实验条件控制中仍会出现精度问题，需要予以更充分、更细致的指导。

2.2 课程优化方案

2.2.1 增设可视化辅助教学模块

用分子动力学模拟动画直观、清楚地展示动态键的动态断裂和重组过程，帮助学生建立宏观性能与微观结构的直观联系。并在之后的原理探究方面设计多组对比实验：考察不同CNT掺杂量、不同反应温度对PBS性能的影响，并对各参数变化后的样品做SEM测试与对比分析，帮助学生更深入、定量地进行实验探究。

2.2.2 开展跨学科合作教学

设置开放性课题，与其他课题组或相关学院合作，让学生体验尝试具有实用性的材料器件的设计制作，如“PBS-CNT复合材料在柔性防护装备中的优化设计”“基于PBS-CNT的智能传感器的开发”，鼓励学生结合材料特性开展跨学科的创新设计，进一步丰富和增强学生的体验感受和创新能力。

3 前沿实验教学创新点

3.1 教育理念创新

本课程跳出了传统实验“按步骤验证”的框架，按照舍恩的反思性实践理论，把反思分析的过程贯穿实验全过程。尤其是面对实验中的反常结果时，引导学生主动分析问题，复盘思路，而不是机械地执行操作。真正实现了“动手”与“动脑”的结合，也贴合高分子前沿实验培养科研创新人才的目标。

3.2 实验设计创新

本课程实验不再拘泥于单一学科研究，而是融合了高分子化学、流变学、材料表征等多学科内容，并通过落球冲击、导电性测试和力学性能测试等，将抽象的“动态超分子网络”变成能测量的现象，让学生在实验中串联起不同学科的知识。

3.3 材料与功能创新

本实验引入的PBS-CNT材料具有剪切硬化、自愈合、导电等多种功能，CNT掺杂既抑制了材料的冷流问题又增添了新的功能应用，让学生能完整体验从结构设计到性能调控，再到实际应用的探索，也契合新材料领域对创新型人才的需求。

4 实验安全性评估

本实验涉及多种化学试剂与高温操作，学生全程在具备通风、以及防火防爆设施的化学实验室中进行，为了落实实验教学当中的安全管理要求，在教学流程当中，对于实验室准入、过程监控以及应急处理等方面都做好了准备，确保学生在动手操作前已建立安全意识与规范操作习惯。

首先，在教学管理上，要求所有学生在进入实验室前先学习实验室安全知识，并通过准入考试后方可进入实验室操作。所有实验过程中均有安全指导老师监督完成，确保了操作空间的充足与应急通道通畅。本实验所用的主要试剂的安全风险与防护措施如下：硼酸属于低毒刺激性的化学品，要求学生在称量时全程佩戴丁腈手套与护目镜，避免粉尘与皮肤的直接接触。此外，四氢呋喃是高度易燃有机溶剂，学生全程均在通风橱内操作，并且远离明火和热源，现场也配备有二氧化碳灭火器等，其中废液统一回收到专用的有机废液桶里面。端羟基聚二甲基硅氧烷的化学惰性较好，但仍需避免长期接触皮肤，称量过程中学生全程佩戴手套。本实验还使用到了碳纳米管粉末，具有较高的吸入风险，我们要求学生全程佩戴口罩与丁腈手套进行称量与分散，并在通风橱内进行，洒落的粉末用湿巾收集，严禁学生吹气清扫，避免吸入造成肺部损伤。

在实验操作流程方面，学生要进行80 °C的真空抽气与70 °C的热压成型，这些环节都存在烫伤或者是真空系统破裂的可能风险，我们要求学生全程佩戴隔热手套取放模具，并且真空泵在运行的时候禁止学生打开真空腔体，所有的电热设备均接地，并且配备了漏电保护，以保证学生的安全。

5 结语

以唐纳德·舍恩的“反思性实践”理论为指引，以此为基础构建了聚硼硅氧烷–碳纳米管(PBS-CNT)复合材料的前沿实验教学方案。课程成功打破了单一的理论知识灌输和传统实验课中按步骤验证的教学

模式，进行了“制备—表征—反思—应用”一体化的实验设计，成功地将国际前沿的剪切硬化超分子聚合物这一研究成果转化为实验教学内容。这种教学模式不仅让学生掌握了高分子材料中动态超分子网络的结构与性能调控原理，也潜移默化地培养了学生在复杂问题中进行反思、挖掘创新应用的能力。

今后本课程计划向多功能材料设计、智能传感的交叉领域延伸，进一步完善评价体系，切实贯彻“以研促学，以教促学”的教学理念，为新材料领域的人才培养提供可复制、可推广的教学范式。

参 考 文 献

1 Schon, D. A.; DeSanctis, V. The reflective practitioner: how professionals think in action. *J. Contin. High. Educ.*, **1986**, 34(3), 29−30.

2 Shariaty, D. A.; Qian, D. L.; Cheng, Y. T.; Odom, S. A. Application of cross-linked polyborosiloxanes and organically modified boron silicate binders in silicon-containing anodes for lithium-ion batteries. *J. Electrochem. Soc.*, **2018**, 165(5), A731−A735.

3 Rubinsztajn, S.; Chojnowski, J.; Mizerska, U. Tris(pentafluorophenyl)borane-catalyzed hydride transfer reactions in polysiloxane chemistry: Piers-rubinsztajn reaction and related processes. *Molecules*, **2023**, 28(16), 5941.

4 Liu, Z.; Picken, S. J.; Besseling, N. A. M. Polyborosiloxanes (PBSs), synthetic kinetics, and characterization. *Macromolecules*, **2014**, 47(14), 4531−4537.

5 Tang, M.; Wang, W. T.; Xu, D. H.; Wang, Z. G. Synthesis of structure-controlled polyborosiloxanes and investigation on their viscoelastic response to molecular mass of polydimethylsiloxane triggered by both chemical and physical interactions. *Ind. Eng. Chem. Res.*, **2016**, 55(49), 12582−12589.

6 Zinchenko, G. A.; Mileshkevich, V. P.; Kozlova, N. V. Investigation of the synthesis and hydrolytic degradation of polyborodimethylsiloxanes. *Polym. Sci. U S S R*, **1981**, 23(6), 1421−1429.

7 Vale, R. L. The synthesis and irradiation of polyborosiloxanes. *J. Chem. Soc.*, **1960**, 2252.

8 Zepeda-Velazquez, L.; MacPhail, B.; Brook, M. A. Spread and set silicone-boronic acid elastomers. *Polym. Chem.*, **2016**, 7(27), 4458−4466.

9 Jiang, W. F.; Gong, X. L.; Wang, S.; Chen, Q.; Zhou, H.; Jiang, W. Q.; Xuan, S. H. Strain rate-induced phase transitions in an impact-hardening polymer composite. *Appl. Phys. Lett.*, **2014**, 104(12), 121915.

10 Kurkin, A.; Lekina, Y.; Bradley, D. G.; Seah, G. L.; Tan, K. W.; Lipik, V.; Hanna, J. V.; Zhang, X.; Tok, A. L. Y. Unravelling the dynamic crosslinking mechanism in polyborosiloxane. *Mater. Today Chem.*, **2023**, 33, 101677.

11 Milkin, P.; Danzer, M.; Ionov, L. Self-healing and electrical properties of viscoelastic polymer–carbon blends. *Macromol. Rapid Commun.*, **2022**, 43(19), 2200307.

12 Wang, S.; Xuan, S. H.; Wang, Y. P.; Xu, C. H.; Mao, Y.; Liu, M.; Bai, L. F.; Jiang, W. Q.; Gong, X. L. Stretchable polyurethane sponge scaffold strengthened shear stiffening polymer and its enhanced safeguarding performance. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2016**, 8(7), 4946−4954.

13 Wu, Q.; Xiong, H.; Peng, Y.; Yang, Y.; Kang, J.; Huang, G. S.; Ren, X. C.; Wu, J. R. Highly stretchable and self-healing “solid–liquid” elastomer with strain-rate sensing capability. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2019**, 11(21), 19534−19540.

14 Wu, Q.; Peng, Y.; Xiong, H.; Hou, Y. J.; Cai, M. J.; Wang, Y.; Zhao, L. J.; Wu, J. R. A novel shear-stiffening supramolecular material derived from diboron structure. *Sci. China Mater.*, **2023**, 66(11), 4489−4498.