高 分 子 通 报
POLYMER BULLETIN

教育与教学 / Education DOI: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26343

从相分离到力学性能:“高分子物理”课程中结构–性能关系的教学深化与实践

崔 为* 黄华东 刘正英 冉 蓉*

(四川大学高分子科学与工程学院 成都 610065)

摘 要 相分离是高分子体系中由分子相互作用、混合热力学和链构象熵共同决定的重要物理过程，也是高分子材料形成多尺度聚集态结构并实现力学性能调控的关键机制。在现行“高分子物理”课程体系中，相分离相关内容主要依托“高分子的溶液性质”章节展开，重点围绕Flory-Huggins理论、相平衡和相分离热力学进行讲授。然而，这样的教学安排容易使学生将相分离理解为溶液热力学中的局部知识点，而难以进一步认识相分离结构对高分子材料力学行为的影响。教学实践表明，学生在分别学习聚合物相容性、相图和力学行为等内容后，往往能够掌握单一知识点的基本概念，但难以建立从分子相互作用、相结构演化到应力传递、能量耗散和宏观力学响应的完整结构–性能认知。本研究尝试以“相分离—相结构演化—断裂力学”为主线，对“高分子物理”中相分离相关教学内容进行深化与拓展，结合相分离凝胶等典型案例，探索如何引导学生从热力学相分离出发，理解相结构对弹性模量、屈服行为、拉伸强度和断裂韧性等力学性能的影响，并进一步认识相结构调控材料强韧化的物理机制。该教学设计旨在帮助学生打通溶液热力学与材料力学性能之间的知识壁垒，深化他们对高分子材料结构–性能关系的理解，提升其综合分析能力、工程设计思维与创新实践能力。

关键词 "高分子物理"课程；相分离；结构–性能关系；断裂韧性

From Phase Separation to Mechanical Properties: Pedagogical Deepening and Practice of Structure-Property Relationships in “Polymer Physics” Course

Wei Cui*, Hua-dong Huang, Zheng-ying Liu, Rong Ran*

(*College of Polymer Science and Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065*)

Abstract Phase separation is an important physical process in polymer systems governed by molecular interactions, mixing thermodynamics, and chain conformational entropy, and it is also a key mechanism by which polymer materials form multiscale aggregated structures and achieve regulation of mechanical properties. In the current curriculum system of the “Polymer Physics” course, phase-separation-related content is mainly taught within the chapter on “solution properties of polymers”, with an emphasis on the Flory-Huggins theory, phase equilibrium, and the thermodynamics of phase separation. However, such a teaching arrangement tends to lead students to understand phase separation as a local knowledge point within solution thermodynamics, making it difficult for them to further recognize the influence of phase-separated structures on the mechanical behavior of polymer materials. Teaching practice shows that, after separately learning polymer compatibility, phase diagrams, and mechanical behavior, students are often able to grasp the basic concepts of individual knowledge points, but find it difficult to establish a complete structure-

2026-07-23 收稿, 2026-09-24 录用

基金项目: 四川大学高等教育教学改革工程(第十一期)研究项目(项目号 SCU11280, SCU11042); 2023年四川省第二批省级高分子物理虚拟教研室; 2023年四川省高等教育人才培养和教学改革重大项目(项目号 JG2023-4); 四川省高等学校第二批高阶课程项目

* 通信联系人: 崔为, E-mail: cuiwei@scu.edu.cn; 冉蓉, E-mail: ranrong@scu.edu.cn

property understanding that connects molecular interactions, phase-structure evolution, stress transfer, energy dissipation, and macroscopic mechanical response. This paper attempts to take “phase separation-phase-structure evolution-fracture mechanics” as the main thread to deepen and extend the teaching content related to phase separation in “Polymer Physics”, and, by incorporating typical cases such as phase-separated gels, explores how to guide students to understand, from the perspective of thermodynamic phase separation, the influence of phase structures on mechanical properties such as elastic modulus, yielding behavior, tensile strength, and fracture toughness, and to further recognize the physical mechanisms by which phase structures regulate the strengthening and toughening of polymer materials. This teaching design aims to help students bridge the knowledge gap between solution thermodynamics and the mechanical properties of materials, deepen their understanding of the structure-property relationship of polymer materials, and enhance their comprehensive analytical ability, engineering design thinking, and innovative practical ability.

Keywords “Polymer Physics” course; Phase separation; Structure-property relationship; Fracture toughness

引用: 崔为, 黄华东, 刘正英, 冉蓉. 从相分离到力学性能：“高分子物理”课程中结构–性能关系的教学深化与实践. 高分子通报, doi: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26343

Citation: Cui, W.; Huang, H. D.; Liu, Z Y.; Ran, R. From phase separation to mechanical properties: pedagogical deepening and practice of structure-property relationships in “Polymer Physics” course. *Polymer Bulletin* (in Chinese), doi: 10.11687/j.issn1003-3726.2026.26343

“高分子物理”是高分子材料相关专业本科教学中的核心基础课程，其重要任务不仅在于讲授高分子链结构、聚集态结构、溶液性质与力学行为等基本知识，更在于帮助学生建立从分子结构到宏观性能的多尺度认知框架。近年来，围绕“高分子物理”课程建设和课程内容重构，已有研究进行了积极探索，为本课程教学深化提供了重要参考[1,2]。在高分子材料的学习过程中，“结构决定性能”是贯穿课程始终的核心思想。其中相分离和力学性能分别是理解高分子材料结构形成与服役行为的2个重要内容。前者揭示高分子体系在分子相互作用、混合热力学和链构象熵共同作用下形成多相结构的物理机制，后者则直接关系到材料在实际应用中的承载极限和使用寿命。但在现有教学体系中，相分离与力学行为往往分属于不同知识板块进行讲授，学生容易将相分离理解为溶液热力学中的局部知识点，难以进一步认识相结构对材料宏观力学行为的重要影响。

以目前广泛使用的何曼君等编著、复旦大学出版社出版的《高分子物理》第三版教材为例[3]，相分离相关内容主要依托第三章“高分子的溶液性质”展开，重点围绕Flory-Huggins理论、相平衡、相图判读和相分离热力学进行讲授。该部分内容对于学生理解高分子体系相容性、混合自由能变化以及相分离发生条件具有重要意义，也为后续认识高分子多相结构奠定了必要基础。但从结构-性能关系教学的角度看，现有教学更多关注“为什么发生相分离”和“如何判断相分离条件”，而对“相分离之后形成的结构如何影响材料力学性能”讨论相对不足。因此，学生往往能够利用热力学理论和相图判断体系是否发生相分离，却难以从相结构角度解释高分子材料的力学调控机制。

实际上，相分离并不是停留在溶液热力学层面的孤立问题，而是连接高分子聚集态结构与宏观力学性能的重要桥梁。特别是对于凝胶、弹性体等软材料体系，相分离所形成的贫富聚合物相及界面结构，不仅决定了材料的微观形貌，也会在形变过程中影响局部应力分布和能量耗散方式。若能以断裂力学为分析入口，引导学生从裂纹尖端行为反观相结构的力学作用，将有助于学生把相分离热力学、聚集态结构和断裂韧性等分散知识点联系起来。基于这一思路，本文尝试构建从相分离热力学到相结构演化，再到断裂韧性调控的递进式教学路径。通过结合相分离凝胶等典型案例，探索如何在课堂中帮助学生建立从分子相互作用、相结构演化到宏观力学调控的结构-性能认知路径。

1 相分离教学现状与拓展

从教学功能看，现有“高分子物理”课程中相分离相关内容已经为学生理解高分子多相结构提供了2个重要入口：一是以Flory-Huggins理论为代表的热力学入口，二是以多组分体系和嵌段共聚物微相分离为代表的形貌学入口。前者回答“体系为什么会发生相分离”，后者回答“相分离发生后会形成怎样的结构”。对于高分子材料相关专业的学生而言，仅理解相分离的发生条件和形貌特征仍然不够，更重要的是进一步理解这些相结构如何影响材料的服役行

为。这正是现有教学中有待深化的环节。

在热力学层面，Flory-Huggins理论能够从物理层面揭示高分子体系相分离的根本原因。对于二元高分子体系，混合自由能可表示为[4]

$$\Delta G_{\mathrm{m}} = NkT\left(\frac{\varphi_1}{x_1}\ln\varphi_1 + \frac{\varphi_2}{x_2}\ln\varphi_2 + \chi\varphi_1\varphi_2\right) \tag{1}$$

式中，ΔG_{m} (J)为混合自由能，N为总格位数，k (J·K^{-1})为玻尔兹曼常数，T (K)为绝对温度，φ_1和φ_2为两组分体积分数，x_1和x_2为两组分聚合度，χ为Flory-Huggins相互作用参数。

式(1)表明，高分子体系的混合自由能由混合熵和混合焓共同决定。由于高分子链的聚合度一般较大，混合熵中与1/x相关的贡献显著降低，导致混合熵对体系稳定性的贡献被削弱，因此体系相容性对χ值变化更加敏感。这也是高分子体系相比小分子体系更容易发生相分离的重要原因。

为便于分析相稳定性，可将式(1)除以NkT，得到无量纲混合自由能：

$$g = \frac{\Delta G_{\mathrm{m}}}{NkT} = \frac{\varphi_1}{x_1}\ln\varphi_1 + \frac{\varphi_2}{x_2}\ln\varphi_2 + \chi\varphi_1\varphi_2 \tag{2}$$

体系稳定性可由自由能曲线的曲率判断。当体系满足

$$\frac{\partial^2 g}{\partial\varphi^2} > 0 \tag{3}$$

时，体系处于稳定状态。其中，φ为任一组分的体积分数，即$\varphi = \varphi_1$或φ_2。而当

$$\frac{\partial^2 g}{\partial\varphi^2} = 0 \tag{4}$$

时，对应旋节线条件。对于二元高分子体系，还可进一步得到临界相互作用参数：

$$\chi_{\mathrm{c}} = \frac{1}{2}\left(\frac{1}{\sqrt{x_1}} + \frac{1}{\sqrt{x_2}}\right)^2 \tag{5}$$

式(5)能够帮助学生更直观地理解聚合度与相分离倾向之间的关系，即随着聚合度增大，体系的临界χ_{c}降低，较弱的链段相互作用差异也可能诱导相分离。因此，式(1)~式(5)不仅是相图判读的理论基础，也隐含了高分子体系形成多相结构的内在原因。

然而，如果教学仅止步于“是否发生相分离”的热力学判据，学生容易把相分离理解为单纯的相容性判断问题，而难以进一步认识其结构和力学意义。事实上，式(1)中的χ、φ和x并不只是热力学变量，也可以进一步转化为结构调控变量。χ决定相分离驱动力强弱，φ影响不同相的体积分数和连续性，x则影响链段迁移、相区粗化和网络尺度结构的形成。对于凝胶、弹性体等软材料而言，这些因素最终会表现为贫富聚合物相、软硬相以及界面结构等聚集态特征。

在形貌学层面，多组分体系和嵌段共聚物微相分离的教学已使学生认识到，相分离可以形成球状、柱状、层状或双连续等多种结构。然而，这些结构在常规教学中更多被作为形貌结果进行讨论，其力学含义尚未充分展开。实际上，相区尺寸、相区连续性和界面强度会直接影响材料在外力作用下的应力传递、局部变形和破坏方式。因此，相分离结构并不是静态的形貌结果，而是材料服役过程中参与承载和耗散的结构单元。

从热力学和形貌学两方面的分析来看，相分离相关内容的教学拓展不应是简单增加新知识点，而需要在已有热力学和形貌学教学基础上，引入面向力学性能的第3个分析维度。通过将Flory-Huggins理论、微相分离形貌和断裂力学思想联系起来，帮助学生建立更加完整的认知链条，即分子相互作用决定相分离倾向，相分离过程决定多尺度相结构，而相结构进一步影响材料的破坏行为和能量耗散机制。这样相分离就不再只是相图中的热力学问题，而成为理解高分子材料结构–性能关系以及力学性能调控的重要教学主线。

2 相分离与力学性能的教学设计

基于前述教学现状分析，我们进一步将相分离相关内容重构为“相分离—相结构演化—断裂力学”的递进式教学路径(图1)。这样设计的教学目的并非替代原有Flory-Huggins理论、相图判读和微相分离形貌等经典内容，而是在已有知识基础上继续向结构–性能关系延伸，使学生能够从“相分离是否发生”进一步走向“相分离形成何种结构”，再进一步理解“相分离如何影响材料力学性能”。

为使上述教学目标更加具体化和可评价化，可将该教学模块的目标转化为可观察的学习成果。完成该模块学习后，学生应能够实现以下几个层次的能力提升：(1)能够根据Flory-Huggins理论、自由能曲线和相图判断体系是否具有相分离倾向，并说明相互作用参数、组成和聚合度对相分离行为的影响；(2)能够根据显微形貌图或结构示意图识别相区尺寸、相区连续性、软硬相模量差和界面结构等关键结构特征；(3)能够结合裂纹尖端应力场、断裂能分解关系和力学模型，解释不同相结构对能量耗散和断裂韧性的影响；(4)能够分析不同相分离程度对材料性能的可能影响。上述学习成果可通过课堂提问、课后作业、结构–性能案例分析报告等方式进行评价，从

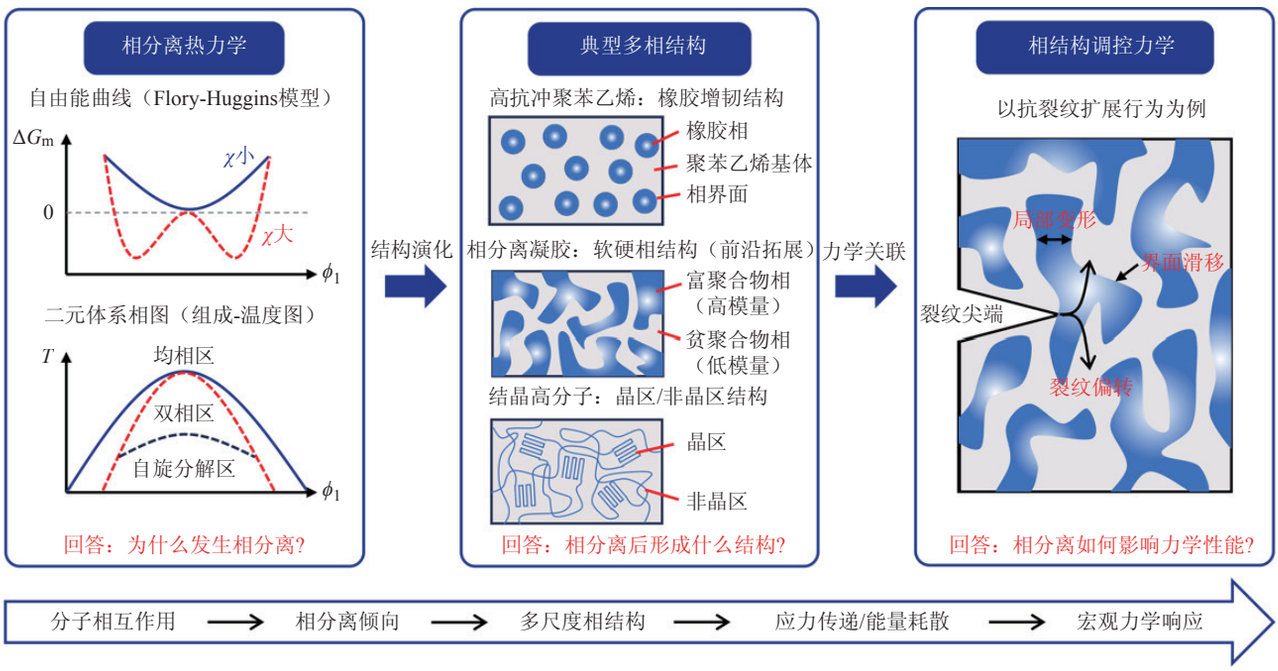

图 1 从相图判读到结构–性能关联的相分离教学深化路径

Fig. 1 Teaching deepening pathway of phase-separation instruction from phase-diagram interpretation to structure-property correlation

而使教学目标由一般性能力培养转化为可反馈且可改进的教学评价依据[5]。

在课堂上，首先应引导学生认识到，相分离不是热力学判断的终点，而是聚集态结构形成的起点。当体系进入热力学不稳定区后，组成涨落会不断放大，并伴随相区形成、界面产生和形貌演化。为了帮助学生从混合自由能曲线自然过渡到相结构形成过程，可在教学中适当引入Cahn-Hilliard型自由能表达[6]：

$$F[c]=\int_V [f(c)+\kappa(\nabla c)^2]\mathrm{d}V \tag{6}$$

式中，$F[c]$(J)为体系总自由能，$f(c)$ (J·m^{-3})为局部自由能密度，c为组成或浓度变量，κ (J·m^{-1})为梯度能系数，$\kappa(\nabla c)^2$ (J·m^{-3})表示由空间组成不均匀所产生的梯度能贡献。

式(6)能够使学生认识到相分离并不是简单地由单相变成两相，而是一个同时受到局部相分离驱动力和界面能约束的结构演化过程。其中，$f(c)$倾向于驱动体系形成不同组成的相区，以降低局部自由能，而梯度能则对浓度剧烈变化和界面形成施加能量代价，使体系倾向于形成具有一定尺度的相界面。

在此基础上，可进一步引导学生比较不同相分离路径对相结构的影响。对于处于亚稳区的体系，相分离通常通过成核生长进行，容易形成分散相结构。而当体系进入旋节分解区域时，微小组成涨落可自发放大，进而形成连续或双连续结构。对于嵌段共聚物、凝胶和弹性体等体系，共价连接、网络拓扑约束和溶剂环境还会限制相区的无限长大，使体系形成微相分离或多尺度非均匀结构。

接下来，需要将相结构从“形貌单元”进一步转化为“力学单元”。在传统教学中，相分离结构通常被作为多组分高分子体系的聚集态形貌进行描述。而在结构–性能关系教学中，应进一步引导学生思考这些相结构在材料受力、变形和破坏过程中如何发挥作用。对于含有裂纹的材料，裂纹尖端附近存在高度集中的局部应力场，其应力分布可用线弹性断裂力学中的近似形式表示[7]：

$$\sigma_{ij}(r,\theta)=\frac{K}{\sqrt{2\pi r}}f_{ij}(\theta) \tag{7}$$

式中，σ_{ij} (Pa)为裂纹尖端的应力分量，K (Pa·m$^{1/2}$)为应力强度因子，r (m)为距裂纹尖端的距离，$f_{ij}(\theta)$为与裂纹尖端角度有关的函数。

尽管凝胶和弹性体等软材料往往具有大变形、黏弹性和非线性形变特征，不能完全等同于理想线弹性材料，但式(7)在教学中已经具备重要的启发意义，即裂纹尖端是应力高度集中的区域，因此任何能够改变局部应力分布、裂纹路径和耗散方式的相结构，都可能显著影响材料的断裂行为。

由此可将相分离结构的力学作用具象化。细小

而均匀的相区有利于分散局部应力，降低裂纹尖端的应力集中；连续或双连续结构有利于应力传递和耗散区扩展；过度粗大的相区或弱界面则可能成为裂纹快速扩展的低能通道，导致材料脆化。因此，相分离对力学性能的影响并不取决于“是否相分离”这一判断，而取决于相区尺度、相区连续性、界面强度和软硬相差异等结构因素的协同作用。

最后，再将上述结构分析转化为断裂韧性的定量认识。对于高分子软材料而言，断裂韧性通常可用临界能量释放速率G_c (J·m^{-2})表征，其物理意义是裂纹扩展单位面积所需消耗的能量。在教学中，可将相分离结构对断裂韧性的贡献概括为[8]

$$G_c = G_0 + G_d \tag{8}$$

式中，G_0 (J·m^{-2})表示均一网络或本征链断裂所贡献的断裂能，一般数值较低；G_d (J·m^{-2})表示由相分离结构引入的附加耗散能。

若将裂纹尖端能量耗散看作发生在具有特征尺寸l_T (m)的过程区内，则可进一步写作[9]：

$$G_d = W l_T \tag{9}$$

式中，W (J·m^{-3})为单位体积能量耗散密度。

式(8)和式(9)能够帮助学生将相结构与断裂韧性建立直接联系：相分离若能通过相区破坏、富聚合物相链段拉伸等机制提高W，或通过多尺度结构扩大l_T，就能显著提升G_c (图2)。

当然，相结构对力学性能的影响并不局限于断裂韧性，而是可以体现在不同变形阶段和不同力学参数中。在小变形阶段，材料的弹性模量与不同相的模量差、体积分数和连续性密切相关。在较大变形阶段，相区尺寸、界面强度和软硬相协同作用会影响材料的屈服行为和拉伸强度。此外，在冲击过程中，相结构还可通过裂纹钝化、裂纹偏转、界面滑移、银纹化和剪切屈服等机制影响冲击韧性。因此，在教学中应引导学生认识到，相分离结构与力学性能之间并非单一对应关系，而是涉及弹性响应、屈服变形、强度保持和断裂耗散等多个层次。

通过上述重构，学生可以形成一条更加完整的学习路径。一方面，他们可以掌握分子相互作用和混合热力学决定相分离倾向，相分离过程决定相区形貌和界面结构。另一方面，也可以理解相结构进一步调控裂纹尖端应力分布、过程区尺度和能量耗散机制。这样，相分离教学便不再停留于相图判读和形貌描述，而可以进一步延伸到力学性能调控和材料强韧化设计。

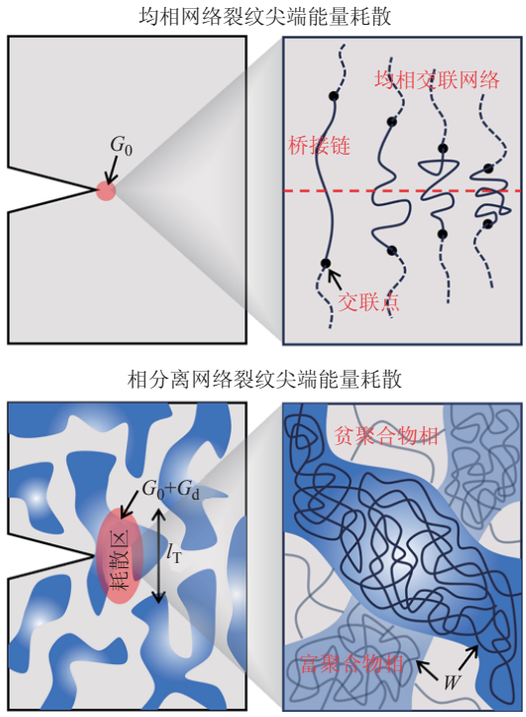

图 2 均相网络与相分离网络裂纹尖端能量耗散机制示意图

Fig. 2 Schematic illustration of crack-tip energy dissipation mechanisms in homogeous and phase-separated networks

3 多相高分子材料教学案例

典型多相高分子材料是开展“相分离—相结构演化—力学性能”教学深化的理想案例。与均相高分子材料相比，多相高分子体系内部通常存在组成、模量、尺度和界面性质不同的相结构，这些结构因素会显著影响材料的力学性能。因此，在教学设计中，可选择具有广泛应用背景的高抗冲聚苯乙烯(HIPS)作为基础案例，并结合相分离凝胶等前沿软材料案例进行拓展，引导学生从教材中的相图判读进一步走向结构–性能关联分析。该教学设计也与近年来“高分子物理”课程改革中强调案例式教学、工程问题导向和结构-性能主线贯通的教学思路一致[10]。

HIPS是典型的橡胶增韧塑料，其基本设计思想是在脆性的聚苯乙烯基体中引入与之不完全相容的橡胶相，从而形成具有明显相分离特征的多相体系。对于学生而言，HIPS案例的教学价值在于，它能够把“相分离是否发生”这一热力学问题转化为“相分离结构如何改善材料韧性”这一工程问题。教师可首先引导学生思考：聚苯乙烯基体本身较脆，为什么引入橡胶相后材料抗冲击性能明显提高？这一问题能够自然引出相结构对力学性能的影响。进而，教师可协助学生从结构层面进行分析：HIPS中橡胶相的体积分数、粒子尺寸、粒子间距、界面结合强度以及橡胶

相在聚苯乙烯基体中的分散状态，都会影响外力作用下HIPS的局部应力分布和变形方式。当材料受到冲击或拉伸时，橡胶粒子可诱导基体发生银纹化、剪切屈服、界面脱粘和局部空穴化等变形过程，使原本集中在裂纹尖端附近的能量释放转化为更大范围的塑性变形和界面耗散[11]。由此，学生可以认识到，相分离结构并不只是显微形貌上的两相共存，而是可以通过改变应力传递路径和延缓裂纹扩展来提高材料韧性。

此外，相分离凝胶还可以作为教学案例的前沿拓展。与HIPS中“刚性基体–软橡胶相”的结构类似，相分离凝胶中也能形成贫富聚合物相或软硬相。已有研究表明，聚两性电解质水凝胶内部可形成由硬相和软相组成的双连续结构，并在拉伸过程中通过离子键断裂、硬相破坏和软相应力传递实现能量耗散[12]。

进一步，从更广义的相结构形成角度来看，高分子结晶也可作为相分离相关教学内容的案例。聚烯烃、聚酯等常见结晶高分子材料在冷却或加工过程中，聚合物链段可由无序熔体逐步形成晶区、非晶区以及晶区-非晶区界面等多尺度结构。虽然结晶过程与液-液相分离或嵌段共聚物微相分离在热力学驱动力和结构有序性方面并不完全相同，但从结构–性能教学的角度看，二者都体现了分子链相互作用和链段运动能力对多相结构形成的调控作用。以聚乙烯、聚丙烯或聚酯为例，结晶度、晶粒尺寸、球晶形貌和晶区–非晶区界面会显著影响材料的弹性模量、屈服行为、拉伸强度和断裂韧性。晶区通常提高材料刚度和强度，非晶区则提供链段变形和能量耗散空间。若球晶过大或晶区界面缺陷明显，则可能引发应力集中并降低材料韧性。通过这一拓展案例，学生可以进一步认识到，相结构对力学性能的影响并不限于橡胶增韧塑料或相分离凝胶，而是广泛存在于结晶高分子等工程材料体系中。

通过上述案例的对照，学生可逐渐理解相分离结构对弹性模量、屈服行为、拉伸强度和冲击韧性等力学性能的重要影响，其学习目标也可以从“会判断相分离是否发生”扩展到“会分析相分离如何影响材料性能”，并进一步形成从相图判读、形貌识别到力学性能预测的结构–性能关联思维。

为进一步检验该教学设计的可实施性，我们在“高分子物理”相关教学环节中进行了初步教学实践。教学对象为高分子材料相关专业学生，教学内容围绕“相图判读—相结构分析—力学性能关联”展开。课堂实施过程中，首先要求学生根据Flory-Huggins理论和相图判断体系是否具有相分离倾向。随后结合相分离结构示意图和典型材料案例，引导学生识别相区尺寸、相区连续性、软硬相模量差和界面结构等关键因素。最后要求学生利用断裂能分解关系分析不同相结构对裂纹尖端能量耗散和断裂韧性的影响。

在教学效果评价方面，采用课堂提问、课后作业和案例分析报告相结合的方式进行。评价重点不再局限于学生能否正确判读相图，而是进一步考察其能否从相结构角度解释材料性能变化。教学实践表明，经过该模块学习后，学生能够较好地完成从“相分离是否发生”到“相结构如何影响性能”的分析转变。在课后作业中，多数学生不仅能够判断相分离体系可能形成多相结构，还能进一步从相区尺寸、界面作用、软硬相模量差和能量耗散等角度讨论材料断裂韧性的变化。部分学生还能够认识到，相分离增韧并不是简单的“有相分离就一定更强”，而是取决于相区尺度、模量差、界面强度和网络连续性之间的协同平衡。

为使评价结果更加具体，还可将学生的学习成果划分为3个层次：第一层次为相图判读能力，即学生能够判断体系是否具有相分离倾向。第二层次为结构识别能力，即学生能够根据形貌图或示意图分析相区尺寸、连续性和软硬相差异。第三层次为结构–性能关联能力，即学生能够结合断裂能模型解释相结构对能量耗散和断裂韧性的影响。通过这一评价方式，可以更加直观地反映学生从知识记忆向结构化分析和材料设计思维转变的过程。

4 结语

相分离是“高分子物理”课程中的重要基础内容，也是理解高分子材料多尺度聚集态结构形成的重要物理机制。传统教学中，相分离相关知识主要服务于相平衡、相容性、相图判读和多组分体系形貌分析，对于学生掌握高分子体系热力学基础具有重要作用。然而，若教学仅停留在“为什么相分离”和“形成何种相结构”层面，学生仍难以进一步理解相结构在材料服役过程中的力学意义，尤其难以从裂纹扩展和能量耗散角度解释高分子材料强韧化的结构来源。本研究围绕“高分子物理”课程中相分离与力学性能之间的知识贯通问题，尝试构建“相分离—相结构演化—断裂力学”的教学深化路径。通过在Flory-Huggins理论和相稳定性判据基础上，引入Cahn-Hilliard型自由能表达、裂纹尖端应力场分析和断裂

能分解模型，引导学生从热力学驱动力出发，进一步理解相区尺寸、相区连续性、软硬相模量差和界面结构等因素如何影响裂纹尖端耗散区、能量耗散方式和断裂韧性。该教学重构有助于将相分离从相图中的热力学问题拓展为连接分子相互作用、聚集态结构和宏观力学性能的重要桥梁。

参 考 文 献

1 李振华, 沈雷. “科教深度融合”的高分子物理教学探索与实践. 高分子通报, **2023**, 36(12), 1740−1744.

2 冉蓉, 刘正英, 崔为, 黄华东, 秦家强, 曾科, 邓华, 肖明. “高分子物理”一流课程建设探索与实践. 高分子通报, **2026**, 39(2), 300−305.

3 何曼君, 张红东, 陈维孝, 董西侠. 高分子物理. 3版. 上海: 复旦大学出版社, **2007**.

4 卢大伟, 徐渤钧. 对高分子物理学中混合自由能-组成曲线与相图的讨论. 高分子通报, **2023**, 36(10), 1356−1361.

5 沙野, 赵呈孝, 曹绪芝, 雷文, 罗振扬. 基于工程教育认证的专业核心课程复杂工程问题案例式教学模式探究: 以《高分子物理》为例. 高分子通报, **2023**, 36(4), 529−534.

6 王杰, 李欣凯, 刘畅, 石以诺. 材料微结构演化的相场模拟. 固体力学学报, **2016**, 37(1), 1−33.

7 Williams, M. L. On the stress distribution at the base of a stationary crack. *J. Appl. Mech.*, **1957**, 24(1), 109−114.

8 崔为, 黄华东, 刘正英, 肖明, 冉蓉. Lake-Thomas理论: 高分子断裂能本质的教学深化与拓展. 高分子通报, **2026**, 39(4), 653−658.

9 Cui, W.; King, D. R.; Huang, Y. W.; Chen, L.; Sun, T. L.; Guo, Y. Z.; Saruwatari, Y.; Hui, C. Y.; Kurokawa, T.; Gong, J. P. Fiber-reinforced viscoelastomers show extraordinary crack resistance that exceeds metals. *Adv. Mater.*, **2020**, 32(31), 1907180.

10 高粱. 高分子物理的“理-实-智”一体化课程改革探索: 以聚乙烯醇缩丁醛合成-结构-性能为课程载体. 高分子通报, **2025**, 38(6), 972−981.

11 杨军, 刘万军, 刘景江. 高抗冲聚苯乙烯的增韧机理. 高分子通报, **1997**, (1), 43−48.

12 Cui, K. P.; Sun, T. L.; Liang, X. B.; Nakajima, K.; Ye, Y. N.; Chen, L.; Kurokawa, T.; Gong, J. P. Multiscale energy dissipation mechanism in tough and self-healing hydrogels. *Phys. Rev. Lett.*, **2018**, 121(18), 185501.