

·教育与教学·

Lake-Thomas 理论：高分子断裂能本质的教学深化与拓展

崔 为 黄华东 刘正英 肖 明 冉 蓉*

(四川大学高分子科学与工程学院 成都 610065)

摘要：断裂韧性是高分子材料的重要力学性能，直接决定其在实际使用过程中的承载极限与服役寿命。Lake-Thomas 理论作为高分子断裂力学中最具代表性的经典模型，从分子尺度揭示了橡胶及弹性体材料断裂韧性的物理本质。尽管该理论在分子断裂研究中具有里程碑意义，其在现行“高分子物理”课程教学中尚鲜见系统引入，难以引导学生从化学键能和分子结构层面理解宏观断裂机理。教学实践表明，学生在学习完高分子材料的应力-应变行为后，普遍对极限断裂的分子机制产生强烈兴趣。本研究以 Lake-Thomas 理论为主线，系统梳理其发展脉络，重构其推导逻辑，并结合双网络水凝胶等复杂体系，探讨其适用边界与扩展模型。通过橡胶撕裂实验的教学案例，展示如何在课堂中以“发明者视角”引导学生从能量观出发理解分子链断裂的本质，从而深化其对高分子材料断裂行为的理解，促进理论与实践的有机结合，提升综合分析与创新思维能力。

关键词：“高分子物理”课程；Lake-Thomas 理论；断裂能；橡胶断裂

The Lake-Thomas Theory: Pedagogical Deepening and Extension on the Molecular Essence of Polymer Fracture Energy

CUI Wei, HUANG Hua-dong, LIU Zheng-ying, XIAO Ming, RAN Rong*

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

Abstract: Fracture toughness is a crucial mechanical property of polymer materials, directly determining their load-bearing limits and service lifetimes in practical applications. As one of the most representative classical models in polymer fracture mechanics, the Lake-Thomas theory elucidates the molecular origin of toughness in rubbers and elastomers. Despite its landmark significance in polymer fracture research, this theory has not yet been systematically incorporated into the current teaching of “Polymer Physics”, making it difficult for students to understand macroscopic fracture mechanisms from the perspective of chemical bond energy and molecular structure. Teaching practice shows that after studying the stress-strain behavior of polymers, students exhibit strong curiosity about the molecular mechanism underlying the ultimate fracture. Taking the Lake-Thomas theory as the central theme, this paper systematically reviews its historical development, reconstructs its derivation logic, and explores its application and extended models in complex polymer systems such as double-network hydrogels. Through a teaching case based on rubber-tear experiments, this study demonstrates how adopting an “inventor’s perspective” in the classroom can guide students to understand the energetic essence of molecular chain rupture, thereby deepening their comprehension of polymer fracture behavior, promoting the integration of theoretical knowledge with practical application, and enhancing their analytical and innovative thinking abilities.

Keywords: “Polymer Physics” course; Lake-Thomas theory; Fracture energy; Rubber fracture

2025-10-20 收稿, 2025-12-17 录用, 2026-01-28 网络出版

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(课程名称: 高分子物理)

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

doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2025.25.306

引用: 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.

Citation: Cui, W.; Huang, H. D.; Liu, Z. Y.; Xiao, M.; Ran, R. The Lake-Thomas theory: pedagogical deepening and extension on the molecular essence of polymer fracture energy. *Polym. Bull.* (in Chinese), 2026, 39(4), 653–658.

“高分子物理”作为高分子材料专业的核心基础课程, 其中的高分子材料力学章节是连接微观结构与宏观性能的关键内容。现行教材与教学体系主要聚焦于高分子的单向拉伸破坏、黏弹性松弛行为以及时-温等效原理等内容^[1], 这些内容侧重描述高分子材料对外部载荷的响应现象。然而, 针对高分子材料的断裂与抗疲劳行为, 教材内容深度仍显不足, 尤其是经典断裂力学理论的引入往往止步于Griffith模型的宏观能量平衡, 缺少对高分子特有分子尺度断裂机制的深入探讨。这一教学现状造成了显著的理论断层: 一方面, 学生在实验中观察到高分子材料的实际断裂能 G_c 远高于其理论表面能 G_0 , 对两者巨大的能量差异感到困惑; 另一方面, 教材未能提供一个系统的理论框架来阐释这种能量差异。高年级学生在进一步学习高分子工程应用(如高强度复合材料或结构胶黏剂设计)时, 常对“材料断裂的本质是什么”“如何从分子层面提升韧性”等问题产生强烈求知欲, 渴望掌握将宏观力学参数与微观化学结构联系起来的理论依据与严谨推导过程。

将Lake-Thomas理论引入教学正是针对这一问题的有效补充。该理论诞生于20世纪60年代, 旨在揭示橡胶撕裂能的分子本质^[2]。Griffith在20世纪20年代提出的能量平衡理论能够解释脆性材料的断裂条件^[3], 即当系统释放的弹性能等于新生断裂面形成所需表面能时, 裂纹便开始扩展。然而, 对于高分子网络材料而言, 表面能的概念显然不足以解释其高韧性来源。Lake与Thomas以橡胶为研究对象, 提出撕裂能不仅包括断裂面形成的能量, 更取决于跨越裂纹面分子链被拉断所需的能量。他们将链断裂能与有效链密度的乘积取代了Griffith方程中的表面能, 从而将能量平衡从宏观尺度拓展至分子尺度。这一理论首次建立了断裂力学参数与高分子结构参数(如交联密度、链长、模量)的直接关系, 也为理解能量耗散、疲劳裂纹增长等复杂现象奠定了基础。在教学中引入Lake-Thomas理论, 不仅能够满足学生对高阶知识的探究需求, 更重要的是, 它将高

分子力学的学习从“宏观现象描述”提升到“微观物理本质分析”的层面, 有助于培养学生以物理化学本质思维理解材料力学性能的高阶分析能力。

1 以发明者视角重构的Lake-Thomas模型推导过程

为了使學生深刻理解Lake-Thomas理论的物理本质, 教学中应当模拟发明者的研究思路, 详细梳理并推导出宏观断裂能的物理下限。Lake与Thomas的研究出发点, 是将Griffith能量平衡思想在分子尺度上重新进行描述。Griffith模型认为, 当裂纹前进时, 系统释放的弹性能量与生成新断裂面所需的表面能相平衡。然而, 对于橡胶这类高伸长率高分子网络材料, 实验测得的临界能量释放率 G_c (J/m^2) 远高于表面能的数量级, 说明裂尖区域存在额外的能量耗散通道。Lake与Thomas意识到, 橡胶的断裂过程并非仅涉及“表面形成”, 而是由大量跨越裂纹面的分子链被逐条拉至极限并断裂所主导(图1)。于是, 他们提出将裂纹扩展单位面积所需能量重新定义为这些链断裂能的总和。假设每条被拉断分子链的断裂能为 U_b (J), 而单位断裂面上需被拉断的有效链数密度为 n_s (m^{-2}), 则裂纹推进所需的能量释放率 G_c 为:

$$G_c = n_s \times U_b \quad (1)$$

这一简洁的式子蕴含3条关键假设: (1) 裂纹尖端过程区足够狭窄, 可认为断裂主要由链拉断主导; (2) 有效链在断裂前能被充分拉伸至其最大链长; (3) 黏弹耗散、局部屈服等附加机制可忽略。

在教学中, 可先回顾Griffith的能量平衡公式, 指出其中“表面能”的概念对橡胶并不适用, 因为高分子网络的断裂面并非真正的分子表面, 而是断裂链群形成的新界面。随后引入Lake-Thomas的设想: 将能量释放率 G_c 理解为“生成 1 m^2 新断裂面所需的链断裂能”, 即自然可得到式(1)。

接下来可引导学生思考: n_s 与网络结构参数之间有什么联系? 若平均网孔尺寸为 ζ (m), 则单位面积上跨越裂纹面的链条数为

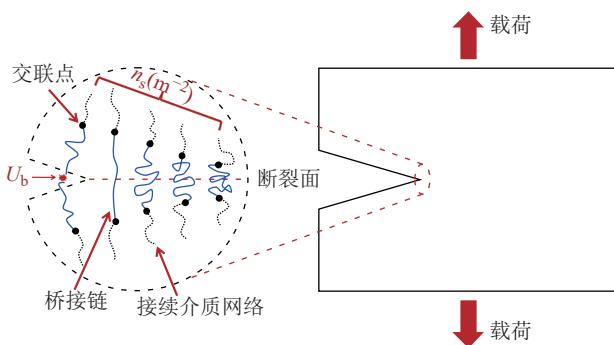


图1 Lake-Thomas 理论中橡胶裂纹尖端微观结构示意图

Figure 1 Schematic illustration of the microscopic structure at the rubber crack tip in the Lake-Thomas theory

$$n_s \sim \frac{1}{\xi^2} \quad (2)$$

又因网孔尺寸与有效交联密度 ν (m^{-3}) 的统计关系为

$$\xi \sim \nu^{-\frac{1}{3}} \quad (3)$$

可得

$$n_s \sim \nu^{\frac{2}{3}} \quad (4)$$

将式(4)代入式(1)可得

$$G_c \sim \nu^{\frac{2}{3}} U_b \quad (5)$$

这便是Lake-Thomas模型的核心标度关系, 揭示了断裂能与交联密度的定量关联: 网络越致密, 跨裂纹面被拉断的链越多, 断裂能越高。若结合橡胶弹性理论^[4]:

$$\mu \sim \nu kT \quad (6)$$

则可得

$$G_c \sim \left(\frac{\mu}{kT}\right)^{\frac{2}{3}} U_b \quad (7)$$

其中, μ (Pa) 为剪切模量, k (J/k) 为玻尔兹曼常数, T (K) 为温度。

这一结果为课堂教学提供了重要便利: 模量可通过实验直接测得, 学生据此对实验数据进行拟合, 检验 G_c 对 μ 的 $2/3$ 次方依赖关系, 即可完成对模型的验证。

在课堂上, 还可通过数量级估算帮助学生建立定量感。假设单条链包含 N 个主链键, 单键断裂能约为数百 kJ/mol, 则单链断裂能 U_b 约为 $10^{-18} \sim 10^{-17}$ J; 若单位断裂面有效链密度 $n_s \sim 10^{16} \text{ m}^{-2}$, 则理论断裂能下限为 $G_0 = n_s U_b \sim 10^{-2} \sim 10^{-1} \text{ J/m}^2$ 。这一数量级并非随意假设, 而是可以由实际橡胶网络参数加以佐证。例如, 对于剪切

模量 μ 为 $0.5 \sim 1.0 \text{ MPa}$ 的橡胶材料, 按式(6)可估算其有效交联密度 ν 约为 10^{25} m^{-3} , 进一步由式(4)估算可得 n_s 约为 10^{16} m^{-2} , 与上述取值在数量级上一致。相比之下, 实际橡胶的断裂能通常为 $10^2 \sim 10^3 \text{ J/m}^2$, 远高于上述理论下限。这一对比清楚表明, G_0 仅代表理想情况下由链断裂贡献的最小能量。教学中可借此启发学生思考: 为何实验值高出几个数量级? 这促使他们认识到, 真实材料中的断裂不仅涉及链断裂, 还包含黏弹耗散等额外能量通道。

从“发明者视角”来看, Lake与Thomas的推导实质上揭示了高分子断裂能的物理极限: 在不考虑任何其他耗散机制的理想条件下, 裂纹扩展所需的最小能量完全由链断裂能决定。这为后续研究提供了基准能量 G_0 , 并奠定了多尺度断裂模型的出发点。

2 Lake-Thomas模型的适用边界与拓展

Lake-Thomas理论作为第一个从分子层面定量预测断裂能下限的模型, 其历史贡献和教学意义是毋庸置疑的, 但正如所有理论模型一样, 它有着明确的适用边界。在教学中, 必须清晰地指出该模型的局限性, 才能引导学生批判性地将理论应用于更复杂的实际体系, 并为后续的理论拓展奠定基础。Lake-Thomas模型严格意义上仅适用于高度交联的弹性体, 以及在高应变速率或低温下接近脆性断裂的材料, 在这些条件下, 黏弹性耗散被降至最低, 实际断裂能 G_c 才可能接近理论下限 G_0 。近年来, 针对Lake-Thomas理论仅考虑局部单分子链断裂的假设, 已有研究从分子统计与连续介质力学耦合的角度提出了非局部本征

断裂能概念,指出真实聚合物网络的断裂区并非仅包含单层链的断裂,而是涉及多个特征尺度上的链协同断裂、链段解缠结与构象重排过程,从而导致本征断裂能显著高于经典模型的理论预测^[5]。这一理论进展表明,Lake-Thomas模型更应被理解为高分子断裂能的分子尺度下限,而非对复杂体系断裂能的完整描述。其核心局限在于,它仅考虑了化学键的断裂,而完全忽略了裂纹尖端材料在宏观大变形过程中产生的黏弹性耗散和塑性变形所消耗的巨大能量。因此,理解Lake-Thomas模型的适用边界,对于正确认识其物理意义与教学延伸至关重要。

在非理想橡胶或复杂网络中,裂纹尖端过程区往往并非单一的链断裂层,而是由多重能量耗散区构成。例如,在含有强界面相互作用的填充橡胶中,裂纹传播会伴随填料脱黏与界面滑移能耗;而在结晶型弹性体中,结晶区可进一步吸收能量,提高断裂韧性。这些附加能量通道使得实际断裂能 G_c 要比 G_0 高出几个数量级。按照Lake-Thomas的计算框架, G_0 描述的是在理想条件下由跨裂纹面的桥链被拉断时所需的最小能量,此后大量研究据此将 G_0 视为高分子断裂能的“下限”,而实际材料的 G_c 则需在此基础上叠加黏弹耗散、结晶等额外机制的贡献。

为了在教学中更好地连接经典理论与现代高分子力学前沿,有必要以Lake-Thomas框架为基础,对复杂高分子体系的断裂行为进行模型拓展,其中最具代表性的案例便是双网络水凝胶^[6]。传统单网络水凝胶断裂能极低,通常仅为 10 J/m^2 左右,而双网络水凝胶的断裂能可以高达 10^3 J/m^2 ,实现了超高韧性,完美体现了 G_0 与 G_c 巨大差异的工程应用。双网络水凝胶体系通常由两种网络构成:第一网络通常为高交联、低伸长率的网络;第二网络则为低交联、高伸长率的网络。

在双网络水凝胶的断裂过程中,Lake-Thomas理论的精髓得到了巧妙的拓展与应用:当裂纹扩展至裂纹尖端时,应力高度集中。首先发生断裂的是脆性的第一网络。其通过在裂纹尖端发生大量、可控的分子链断裂,将裂纹尖端的高应力松弛到周围的第二网络中。这些断裂的第一网络分子链扮演了“牺牲键”的角色,它们断裂所消耗的能量 G_d 构成了材料主要的耗散通道。而第二网络作为主要的承载网络,将宏观应力传递至更广

阔的区域并进一步耗散能量(图2)。这一机制正是对Lake-Thomas思想的宏观延伸:裂纹扩展所需的能量不仅来自链断裂本身,还包括裂尖周围“能量耗散区”的逐级传递与释放。

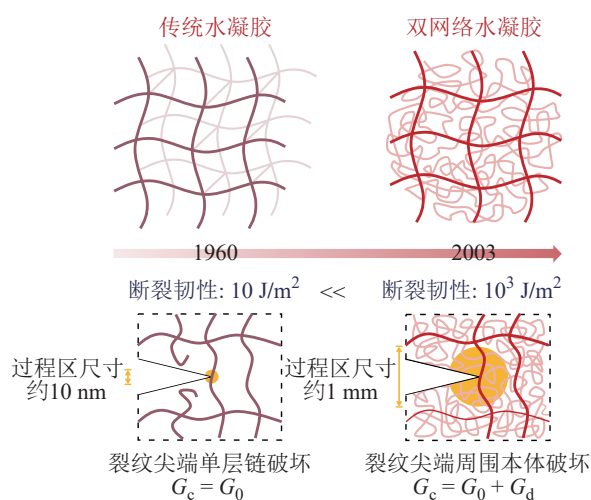


图2 传统单网络与双网络水凝胶的断裂能差异及裂纹尖端能量耗散机制示意图

Figure 2 Schematic illustration of the difference in fracture energy and crack-tip energy dissipation mechanisms between conventional single-network and double-network hydrogels

如果以Lake-Thomas模型为出发点,可在教学中引导学生将双网络水凝胶的总断裂能表达为

$$G_c = G_0 + G_d \quad (8)$$

其中, G_0 为第二网络提供的最小断裂能下限(可近似用Lake-Thomas公式计算); G_d 为第一网络牺牲键断裂所提供的巨大耗散能,单位均为 J/m^2 。实际上,可以借助双网络水凝胶极其独特的应力-应变行为(图3a)进行 G_d 的估算。当该材料达到拉伸屈服点时,第一网络开始断裂并发生显著能量耗散,随着变形至细颈结束,第一网络逐渐完全破坏,而第二网络则维持整体结构的完整性。同时,该体系的裂纹尖端过程区在相差显微镜下可以被直接观察并定量表征(图3b)^[7]。因此,在课堂教学中,教师可引导学生通过简单的能量估算计算第一网络破坏所耗散的能量:

$$G_d = \sigma_c \varepsilon_c h \quad (9)$$

其中, σ_c (Pa)为屈服应力, ε_c 为细颈结束(即第一网络完全破坏)时的应变, h (m)为裂纹尖端过程区尺寸。通过计算可得,双网络水凝胶的 G_c 基本只由 G_d 贡献,其中 G_0 仅占总能量的1%~5%。这一结果让学生能够直观理解:Lake-Thomas模型

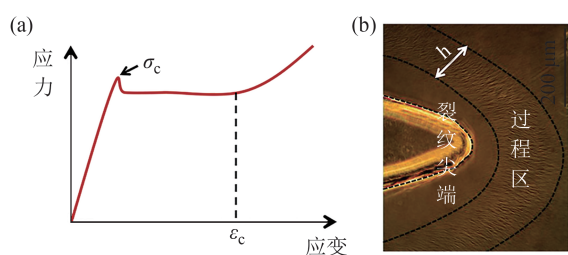


图3 (a)经典双网络水凝胶的拉伸应力-应变曲线;(b)双网络水凝胶裂纹尖端的相差显微镜照片^[6](2011 美国化学会版权许可)

Figure 3 (a) Tensile stress-strain curve of a typical double-network hydrogel; (b) Phase-contrast microscopic image of the crack tip region in a double-network hydrogel (Reprinted with permission from Ref. [6]; Copyright (2011) American Chemical Society)

提供了分子能量的“基准面”，而真实材料的韧性依赖于能量耗散机制的构建。

通过这一例子，学生不仅能够厘清 Lake-Thomas 理论的适用边界，还能够理解现代高分子力学设计策略的本质，即并非简单地提高 G_0 ，而是在 G_0 的基础上，可控地引入耗散机制 G_d 。这不仅可以深化学生对 Lake-Thomas 理论的理解，更能使其掌握将分子设计原理应用于解决实际工程问题的能力，实现理论到创新的提升。在教学中，教师还可进一步设置开放性讨论环节，引导学生举一反三的思考。例如：若在裂纹尖端人为引入结晶相或强界面填料，相较于单一弹性网络，材料的断裂能又将发生怎样的变化？这些附加结构中的能量主要通过何种机制被耗散？通过上述问题的讨论，学生通常能够进一步认识到：真实高分子材料的高韧性并非由单一分子链断裂机制所决定，而是源于多种耗散过程在裂纹尖端的协同作用。

从工程角度来看，高分子材料断裂通常还需通过多尺度本构模型与有限元数值模拟进行定量描述。针对填充橡胶等复杂网络体系，研究者已建

立了从分子统计理论出发的超弹性、黏弹性及热-力耦合本构模型，并发展了与有限元分析相容的数值实现方法，用于预测复杂载荷下的疲劳寿命与裂纹演化行为^[8]。这类研究同样表明，宏观断裂不仅取决于分子链断裂本身，还与网络结构演化、填料-基体界面及能量在多尺度上的传递密切相关。

3 基于橡胶撕裂实验的 Lake-Thomas 模型验证

橡胶撕裂实验是高分子断裂力学中最为经典和直观的教学案例，它为 Lake-Thomas 理论的教学提供了理想的实验平台。在教学设计中，可选裤腿撕裂实验(图 4a)作为核心案例。该实验几何简单，便于量化分析，是连接理论与实践的理想范例。实验步骤如下：将橡胶薄带制成带裂口的裤腿形试样，用万能拉伸测试机固定两臂，以恒速拉伸，当撕裂前沿稳定推进时，记录撕裂力 F (N)。根据能量平衡，撕裂能可由下式计算：

$$G = \frac{2F}{t} \quad (10)$$

其中， t (m) 为试样厚度，系数 2 代表撕裂过程中产生了 2 条裂纹面(图 4b)。

在一次课堂教学实践中，使用了 5 种不同交联度的未填充天然橡胶样品。通过小应变测试得到剪切模量分别为 0.45、0.62、0.85、1.10、1.55 MPa，稳态撕裂力分别为 4.8、6.2、7.5、8.4、10.1 N，按式(10)计算得对应的断裂能分别约为 960、1240、1500、1680、2020 J/m²。将 $\lg G$ 与 $\lg \mu$ 作图，线性回归得到斜率约 0.68，与式(7)理论预测的 2/3 接近。学生据此认识到，模型不仅在定性上正确，在数量级上也能与实验吻合。

进一步地，教师引导学生讨论偏差来源。部分样品的撕裂能明显高于拟合值，经分析发现这些样品在制备中含少量填料，产生额外黏弹耗散；另有部分样品在低温测试时撕裂能升高，是因为

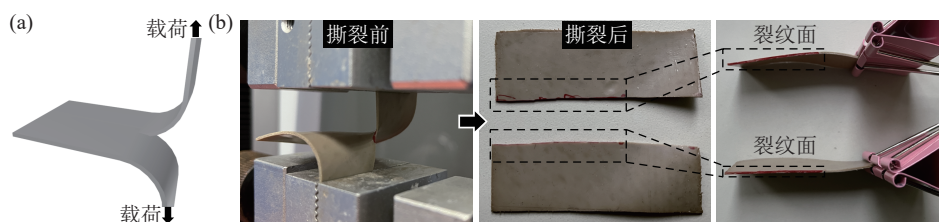


图4 裤腿撕裂实验的原理示意图(a)及实际操作场景(b) (撕裂过程中形成的2条裂纹面由黑色虚线框标出)

Figure 4 Schematic illustration of the trouser-tear test (a) and its experimental operation in practice (b) (The two fracture surfaces generated during tearing are highlighted by black dashed boxes.)

链段松弛受限,等效单链断裂能 U_b 增大。通过这一过程,学生理解到理论并非万能公式,而是一种理想化近似,实际系统往往受多种机制共同影响。

教学反馈表明,当学生亲手处理数据并验证理论时,他们对公式的理解远胜于死记硬背。多数学员能在作业中自发讨论“链断裂与黏弹耗散”等问题,体现出深层次的概念迁移能力。教师在讲评中进一步强调,Lake-Thomas模型奠定了高分子断裂力学的分子化框架,后来的Gent模型乃至现代多尺度仿真研究,都可视为在此基础上发展的延伸。

为深化学生理解,课堂中引入了对比材料:以相同几何参数的高密度聚乙烯样品进行测试。其撕裂能约为 $1 \times 10^4 \sim 3 \times 10^4 \text{ J/m}^2$,比天然橡胶高出约2个数量级。通过比较,学生可以理解不同聚合物中链结构与能量耗散机制的差异:橡胶依赖分子链的可伸展性与链断裂能,而聚乙烯的高韧性则来自结晶区形变与层片拔出等额外能量吸收机制,其断裂能的考量需要回到等式(8)的形式。此时,教师可以顺势引入“疲劳断裂”的讨论,让学生思考在循环载荷下能量释放率的变化,为后续课程做铺垫。

4 结语

经过2个学期的教学实践,我们发现将Lake-Thomas理论以“历史—推导—验证”三步法融入“高分子物理”课程,有助于显著提高学生对断裂与韧性的整体理解。课堂前测中,只有约20%的学生能正确区分撕裂能与应力-应变面积的概念;而在引入Lake-Thomas模型教学后,课堂测验正确率提升至80%以上。更重要的是,学生在作业中普遍表现出对公式来源的兴趣与主动查阅文献的行为,说明他们的学习兴趣被有效激发。从教师角度看,这一教学模块不仅丰富了课程体系,也帮助教师在讲授黏弹与断裂之间建立自然过渡。通过介绍Lake-Thomas理论,教师可以将抽象的“能量释放率”具体化为“被拉断链的能量”,使学生感受到高分子力学的可视化与可计算性。同时,推导与实验结合的方式也培养了学生的数量级估算能力和模型验证意识。该教学改革的核心经验在于:要让学生真正理解一个复杂理论,就必须让他们看到理论的诞生过程,而不仅是结果。Lake-Thomas模型的魅力不在于公式本身,而在于它如

何从问题出发、在实验与推理中逐步成形。通过在课堂上重演这一过程,学生能感受到科学思维的逻辑链条:从能量守恒到结构推断,从实验现象到数学表述。

Lake-Thomas理论作为高分子断裂力学的基石,不仅揭示了橡胶撕裂的分子本质,也为教学提供了理想的案例。将其引入“高分子物理”课堂,既能补充教材在断裂力学方面的空白,又能满足学生对知识体系完整性的需求。通过从Griffith能量平衡到链断裂模型的逻辑递进,学生学会以能量观点理解材料行为;通过实验的实际验证,他们获得将理论转化为可测量物理量的能力。教学实践表明,这一改革能有效提升学生的理论理解深度与科学探究能力,使课堂从“记忆结论”转向“重建推理”。后续教学中,计划进一步将该模块与疲劳断裂、黏弹耗散模型相结合,构建完整的“高分子断裂行为”教学体系,使学生的学习中逐步形成从分子结构到宏观性能的多尺度认知框架。这一教学改革的意义不仅在于传授一个模型,更在于通过模型让学生理解科学发现的过程,这是高分子物理教育中最宝贵的精神财富。

参考文献

- 1 何曼君,张红东,陈维孝,董西侠. 高分子物理,第3版. 上海:复旦大学出版社,2006. 196–258.
- 2 Lake, G. J.; Thomas, A. G. The strength of highly elastic materials. *Proc. R. Soc. Lond. Ser. A Math. Phys. Sci.*, **1967**, 300(1460), 108–119.
- 3 Griffith, A. A. The Theory of Rupture. Delft, Netherlands: International Congress for Applied Mechanics, **1924**.
- 4 Treloar, L. R. G.; 王迪珍. 橡胶弹性理论. 上海:世界橡胶工业出版社, **1981**. 5–8.
- 5 Deng, B. L.; Wang, S.; Hartquist, C.; Zhao, X. H. Nonlocal intrinsic fracture energy of polymerlike networks. *Phys. Rev. Lett.*, **2023**, 131(22), 228102.
- 6 Gong, J. P.; Katsuyama, Y.; Kurokawa, T.; Osada, Y. Double-network hydrogels with extremely high mechanical strength. *Adv. Mater.*, **2003**, 15(14), 1155–1158.
- 7 Liang, S. M.; Wu, Z. L.; Hu, J.; Kurokawa, T.; Yu, Q. M.; Gong, J. P. Direct observation on the surface fracture of ultrathin film double-network hydrogels. *Macromolecules*, **2011**, 44(8), 3016–3020.
- 8 危银涛,方庆红,金状兵,冯希金. 填充橡胶本构模型研究进展. 高分子通报, **2014**, (5), 15–21.