

橡胶弹热制冷效应的热力学分析与教学设计

翟俊学*, 王一奥, 方艺洁, 王 新

(青岛科技大学高分子科学与工程学院 橡塑材料与工程教育部重点实验室, 青岛 266042)

摘要:橡胶分子链独有的柔顺性和熵弹性特征,使其表现出巨大形变能力和明显的弹热效应。近年来基于橡胶回缩-吸热机理的弹热制冷现象逐渐受到重视,从而为高分子物理学的研究开辟了一个新的方向。本文在“高分子物理学”课程高弹形变和弹热效应的热力学分析基础上,引入橡胶弹热制冷效应的原理与研究进展,设计“基于橡胶熵弹性的弹热制冷效应”的教学目标、教学过程等内容,不仅有助于将抽象的高分子物理学基础理论转化为实际应用范例,提升“高分子物理学”课程的学习质量,还锻炼了大学生跟踪学科前沿、开展创新训练的意识与能力。

关键词:橡胶; 熵弹性; 弹热制冷; 教学设计

教学内容的拓展与升级是教学改革最重要的创新之一。随着高分子材料的广泛应用,高分子物理学等基础研究取得了许多突破,例如以 de Gennes 为代表的科学家提出了高分子材料的软物质特性、熵致相变、单链凝聚态等新概念、新模型,为高分子结构与性能的理解和阐述提供了新的研究方法、研究领域以及人才培养模式^[1~4]。

基于橡胶熵弹性的弹热制冷设计^[5,6],是近期在高分子高弹形变热力学原理与制冷工程复合、交叉领域出现的一种被认为是极具潜力的固体制冷技术。本文在橡胶高弹形变的热力学分析基础上,结合橡胶固体制冷的相关研究前沿热点,尝试设计了“基于橡胶熵弹性的弹热制冷效应”的教学目标、教学过程与实验检验等教学环节,通过将抽象的高分子物理学基础理论形象化、案例化,进一步强化橡胶熵弹性及高弹形变等高分子物理学核心知识的学习质量。

1 橡胶及其熵弹性

1.1 橡胶弹性与高弹形变

轻度交联的橡胶在室温环境中能够表现出典型的高弹性特征,因此高弹性有时被称为橡胶弹性。考古学研究发现,早在 11 世纪人类已经开始使用橡胶;而且南美印第安人能够用天然橡胶树的浆液,制作弹性很好的橡胶球、橡胶鞋、橡胶瓶^[7]。迄今为止,具有良好高弹性的橡胶仍旧在减振、传动、密封、防护等工业领域发挥着不可或缺的作用。

橡胶是高分子物理学最早的研究对象之一。在分子物理学范畴中,橡胶作为一种典型的软物质,结构复杂,性能对结构和外场具有强响应^[8],在链结构、聚集态结构、大分子运动论、高弹性和黏弹性等重点内容中占据重要地位。由于橡胶分子链中碳-碳单键内旋转势垒低,构象改变容易、柔顺性好,而且分子间作用力小、内聚能密度低,因此能够表现出低于室温的玻璃化转变温度,在室温甚至更低温度时链段能够充分运动,模量小、硬度低,在较小外力作用下可发生 100%~1000% 的巨大形变,且该形变能够迅速、大部分回复。

橡胶发生高弹形变时还具有另外几个特点,例如弹性模量在一定范围内随温度升高而升高——热弹现象^[9]、绝热拉伸或快速拉伸时自身放热使温度升高——弹热现象^[10]、形变时伴随力学松弛。这些现象

10.14028/j.cnki.1003-3726.2022.09.014

收稿:2021-08-26;修回:2021-09-10;

基金项目:青岛科技大学教学改革研究项目,山东省高等学校大学生创新创业训练计划项目(编号:S202010426063);

* 通讯联系人:翟俊学, E-mail: zhajunxue@qust.edu.cn.

都促使人们从热力学角度分析橡胶弹性的内在原因。

1.2 橡胶弹性制冷效应的热力学分析

自从发现并使用天然橡胶开始,人类对高弹形变的热力学特征开展了详细的研究,发现基于链段运动的熵弹性是橡胶产生大形变的关键原因,熵变引起的热交换还能解释橡胶形变时伴随的热效应——拉伸放热、回缩吸热。因此橡胶弹性的热力学分析曾被认为是高分子物理学的诞生标志^[11]。

不过高弹形变的吸热效应与橡胶的动态生热(影响汽车的油耗、输送带的耗电量等)相比,远未受到传统工业界的广泛关注。当氟利昂被发现对臭氧层存在巨大危害,各种固体制冷材料应运而生后,基于橡胶熵弹性的弹热制冷效应作为一种高效率、长寿命、低成本的制冷现象,尤其是橡胶形变时产生的十几摄氏度温差,才重新唤起科学家们的研究热情^[5,6]。

选取轻度交联的橡胶试样,进行平衡态高弹形变的热力学分析,主要是根据缓慢拉伸时橡胶内能变化与功交换、热交换符合热力学第一定律,以及恒温可逆过程中热交换与熵变符合热力学第二定律,从而将橡胶应力与熵变和内能变化联系起来(橡胶拉伸时体积几乎不变,因此当拉伸 dl 较小时可视为恒温、恒容过程):

$$\begin{cases} dU = dQ - dW \\ dQ = T dS \\ dW = P dV - f dl \\ P dV = 0 \end{cases} \Rightarrow dU = T dS + f dl \tag{1}$$

上式中, U —橡胶体系的内能, Q —体系与外界的热交换, W —体系与外界的功交换, S —体系的熵, f —橡胶形变时的张力, l —橡胶形变时的长度, P —体系的压力, V —橡胶的体积。

在恒温恒容条件下,上式两边对 l 取微商,可得:

$$f = \left(\frac{\partial U}{\partial l}\right)_{T,V} - T \left(\frac{\partial S}{\partial l}\right)_{T,V} \tag{2}$$

对于不存在分子间和分子内作用力的理想橡胶,形变时内能不变,则得到橡胶等温拉伸的热力学方程:

$$f = -T \left(\frac{\partial S}{\partial l}\right)_{T,V} \tag{3}$$

因此理想橡胶等温拉伸时,其弹性回复力由体系熵变贡献,故而认为橡胶弹性的本质是熵弹性。当柔顺性极好的橡胶分子链经过拉伸取向,从无规卷曲状态变为充分伸展状态时,不仅能够发生极大的形变,而且有序度显著增加、体系熵减小;一旦撤出外力则在分子热运动的驱使下,能够自发回复到熵增方向的初始状态——形变可逆且迅速回复。此外,根据热力学第二定律分析,在拉伸熵减过程中 $dQ = T dS < 0$,即拉伸时橡胶会放热,反之则回缩熵增时橡胶会吸热。

若形变过程可逆绝热,则在恒温下的拉伸放热必然会使材料的温度升高,反之回缩吸热会降低温度。根据热力学第二定律有 $dQ = T dS$,可得到形变过程的温度变化:

$$\Delta T = -\frac{T_0}{C} \int_{l_0}^l \left(\frac{\partial S}{\partial l}\right)_T dl \tag{4}$$

由于 $\left(\frac{\partial S}{\partial l}\right)_T$ 无法用实验方法直接测量,因此需要对上述公式进行如下变换。

已知 f 是 T 的函数:

$$f = \left(\frac{\partial U}{\partial l}\right)_{T,V} - T \left(\frac{\partial S}{\partial l}\right)_{T,V} \tag{5}$$

上式两侧分别对 T 取微分,可以得到材料的弹热系数 β :

$$\beta = \left(\frac{\partial f}{\partial T}\right)_{l,V} = 0 - \left(\frac{\partial S}{\partial l}\right)_{T,V} = -\left(\frac{\partial S}{\partial l}\right)_{T,V} \tag{6}$$

当橡胶拉伸长度一定时 β 为常数,可由实验确定^[12,13]:在某个恒定温度下,将橡胶试样拉伸到一定长度 l ,测量试样在该长度时的拉应力,然后依次改变试样温度并测试其拉伸到相同长度 l 时的应力变化,由应力-温度曲线线性关系的斜率可以分析体系熵变对弹性拉应力的贡献(熵弹性),以及材料的弹热系数——受力拉伸时产生的热量。

当拉伸长度 l 一定时,进一步可以得到橡胶弹热效应的表达式^[14]:

$$\Delta T = -\frac{T_0}{C} \int_{l_0}^l \left(\frac{\partial S}{\partial l} \right)_T dl = \frac{T_0}{C} \int_{l_0}^l \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right)_l dl = \frac{T_0}{C} \beta \int_{l_0}^l dl = \frac{T_0}{C} \beta (l - l_0) = \frac{T_0}{C} \beta l_0 \epsilon \quad (7)$$

即橡胶形变温差:

$$\Delta T = \frac{T_0}{C} \beta l_0 \epsilon \quad (8)$$

其中 ΔT 为橡胶形变产生的温差, T_0 为橡胶试样的初始温度, C 为橡胶试样的比热容, β 为橡胶试样的弹热系数, l_0 为橡胶试样的初始长度, ϵ 为橡胶试样的形变。

制冷系数(Coefficient of performance, COP)表示单位功耗所能获得的制冷量,可以通过相同单位的输入功率与制冷功率的比值来表示。在橡胶弹热制冷过程中,制冷系数等于体系吸热量与外力做功的比值,即

$$\text{COP} = \frac{\int dW}{\int dQ} = \frac{\int f dl}{C \Delta T} = \frac{W}{C \Delta T} = \frac{W}{T_0 \beta l_0 \epsilon} \quad (9)$$

由此可见,当 $\epsilon < 0$ 即预拉伸橡胶发生回缩时,温差 $\Delta T < 0$ 、试样温度降低;如果回缩前试样的温度与环境温度相等,则能够在回缩时对外吸热,从而降低环境温度。这种基于橡胶熵弹性的弹热制冷现象不仅具有明确的热力学基础,更具有其他材料不能比拟的环境友好、材料成本低和使用寿命长等优势,从而有希望开拓成为一种非常有前景的新型固体制冷技术。

2 橡胶弹热制冷的研究进展

传统制冷技术主要采用空气压缩机将氟利昂等制冷剂压缩,然后氟利昂汽化吸热从而实现降温。但是其能耗高、制冷效率低,而且氟利昂会破坏臭氧层,对地球环境的危害极大。因此,能够代替氟利昂的新型制冷材料,尤其是基于固体材料热效应的新型制冷技术逐渐受到广泛关注,具体包括以磁热效应、电热效应、压热效应和弹热效应为制冷原理,分别通过移除磁场、电场、流体静压力和弹性应力后材料的等温熵变或绝热温差来实现制冷。目前商业化固体制冷材料的代表是以稀土元素为主的磁热材料。固态弹热制冷因其潜在的高效率、易获得,被认为是能够替代蒸汽压缩制冷、最具潜力的新型制冷技术,其制冷原理通常包括利用金属基形状记忆合金(Shape memory alloy, SMA)中马氏体逆相变的吸热冷效应^[15]和基于橡胶熵弹性的回缩吸热效应^[14,16,17]。

橡胶拉伸放热或回缩吸热统称为橡胶的弹热效应(Elastocaloric or thermoelastic effect),早在 1805 年被 Gough 发现^[10]、1859 年被 Joule 证实^[18]。自从 Katz 等在 1925 年发现橡胶的应变诱导结晶现象^[19~21]后,研究热点更多地集中于拉伸结晶机理而非弹热现象,弹热制冷相关的报道更少。例如 Dart 等^[22]在 1942 年发现未硫化的天然橡胶在 674% 伸长率时的温升为 13.7℃,初次拉伸时温升最高,拉伸后保持时间越长则回缩时的温变越大。Mitchell 等^[23]在 1968 年发现硫化天然橡胶在伸长率为 520% 时的温升为 9.1℃。Xie 等^[24,13]在近期发现天然橡胶薄片预拉伸后的绝热温度变化为 4.3℃。将橡胶弹热效应用于制冷技术,是近几年开始的研究,例如 Wang 等^[6]采用天然橡胶或钓鱼线、合金线等材料开发了一种扭热制冷(Torsional refrigeration)技术,降温可达 16.4℃,制冷卡诺效率超过空气压缩制冷效率。Greibich 等^[5]综合考虑天然橡胶熵弹性和应变诱导结晶对制冷效率的影响,并设计了更高制冷功率的冷却系统,能够降温 7.9℃。

3 “橡胶熵弹性的制冷效应”教学设计

3.1 教学理念

围绕橡胶熵弹性与弹热制冷知识,坚持以马克思主义基本原理、中国特色社会主义理论为指导,通过创新驱动的弹热制冷教学设计,培养关于橡胶熵弹性与弹热制冷的科学思维、创新精神和实证意识,培养高分子科学与制冷工程复合交叉专业能力和素养。通过设计理论+实验一体化高分子物理课堂,开展现象式、案例式、讨论式教学活动和课创融合教学活动;引导学生跟踪学科前沿,在实践中运用基于橡胶熵弹性的弹热制冷原理,设计科学研究方案,剖析高分子结构与制冷效率的关系;鼓励自主原创、提倡团队协作,引导学生在弹热制冷领域发现问题、分析问题、解决问题并认真总结、大胆创新。

3.2 学情分析

(1) 学生基础

2020、2021年,国内分别有186、181所高等学校的高分子材料与工程专业进行招生^[25,26],主要集中在普通高校,学生基础参差不齐,就业压力不容乐观。此外,学生接触高分子科学尤其“高分子物理学”课程的时间通常较晚,一般是第二、三学年开始学习,因此部分优质学生资源被忽视、浪费,难以吸引到高分子物理学、高分子科学中来,是目前高分子学科教育的一大痛点。

高分子材料应用广泛,学好高分子物理、化学能够帮助学生顺利就业。在众多高分子物理知识中,高弹性是高分子材料的独有特征,其研究历史悠久、理论分析成熟,因此本专业学生可以通过多种渠道去了解高弹形变及其弹热效应。尤其在全球环境保护和能量短缺的严峻形势下,当碳达峰、碳中和、节能减排理念深入人心时,橡胶的弹热效应与制冷现象作为一种最具潜力的固体制冷技术来源,已经成为一个新的教学关注热点。

(2) 教学内容

在本校高分子材料与工程专业多达50余门课程或教学环节中,高分子物理学是连接高分子基础原理与工程实践的最重要内容。在分子物理的知识框架中,多分散、多尺度的高分子结构,在内外环境因素下发生不同层次的运动和转变,表现出千差万别的热、机械、光电性能。如此复杂而且抽象的学习内容,使得高分子物理的学习难度较高。

橡胶弹性是高分子物理学“高弹性与黏弹性”中的内容,主要学习“高分子材料的高弹性及其热力学分析和分子理论”,其中橡胶弹热效应的热力学分析是整门课程的重点和难点。本节课程的先修知识主要包括高分子运动特点和力学状态等内容^[4],学生已经掌握了高分子运动与结构单元、温度、时间的关系,会用分子运动观点解释高弹态高分子的应变、应力、模量等力学性质,但是普遍对高弹态的具体特征和科学原因不够明确,尤其是对高弹态与橡胶的前沿应用理解不透彻,学习热度不高。而橡胶弹热现象及其弹热制冷效应的应用案例,能够紧密结合学科前沿与工程应用,进行理论分析与实验设计,引导学生建立“柔性链段-取向/解取向-弹热制冷”的理解思路,养成“实践-认识-实践”的科学思维和创新思路。

本节内容导图如图1所示。

3.3 教学目标

学习基于橡胶弹热制冷的目标,包括知识、能力、情怀三方面,具体可分为主要特征、热力学分析、实验检验和工程应用四个层次:(1)分析弹热效应与弹热制冷的原理;(2)建立弹热制冷现象的热力学模型,推导其制冷温差和制冷系数;(3)学会设计弹热制冷实验,测试制冷温差和制冷系数;(4)运用弹热效应原理,设计新型高效低碳环保制冷方案,强化创新设计思维和生态保护理念。

3.4 教学活动与创新

根据学情分析和教学目标,参考BOPPPS方法^[27,28]开展以下教学活动:

(1)课程导入:以橡皮筋拉伸放热、回缩吸热为例,掌握橡胶的热弹/弹热效应等基础原理,掌握橡胶

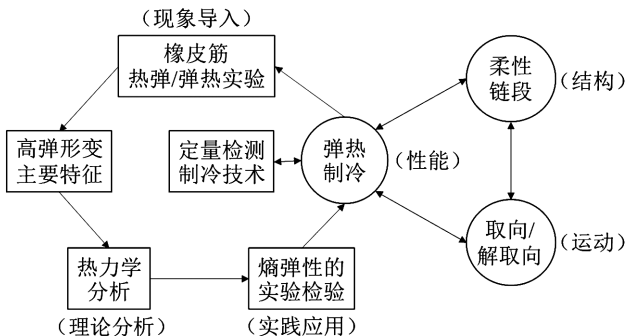


图 1 弹热制冷教学内容导图

Figure 1 Teaching content of elastocaloric cooling

熵弹性的制冷效应等学科前沿知识,了解固体制冷技术等工程应用背景。

(2)学习目标:围绕弹热效应基础知识、弹热制冷设计能力、环保意识和家国情怀制定学习目标,培养学生的知识储备、科学创新和工程实践能力。

(3)课前测验:通过课堂实验中橡皮筋热弹/弹热效应与轮胎生热/滚动阻力的对比、分析,用实际案例代替抽象理论进行课前测验,以便掌握学生关于大分子运动及其典型应用的认识程度。

(4)参与式教学:根据学生的知识基础和关注热点,分别以能量守恒定律引入的弹热效应热力学分析、热弹/弹热效应的检测方法、弹热制冷技术的设计方案分别作为专题,组织学生进行分组研讨,确保每个学生充分参与教学。重点围绕弹热温差的测试方法(热电偶测温、红外测温、红外热成像)和大形变小体积弹热制冷装置的设计方案,以及橡胶熵弹性的影响因素,组织学生分组讨论、查阅文献、提出解决方法,从而加深对橡胶高弹形变、熵弹性及其弹热效应的理解。

(5)课后测验:用天然橡胶、丁苯橡胶以及聚氨酯弹性体等实际案例,从机械能-热能转换的角度,解析影响热弹/弹热效率的结构与外界因素,提高学生分析问题、解决问题的能力。

(6)思政融入:在知识点总结时,从弹力球、弹热现象、热力学分析、实验验证、热力学分析的改进、指导弹热制冷效应的应用,运用马克思主义哲学和毛泽东思想,归纳出弹热效应“实践、认识、再实践、再认识,循环往复”的一般规律。针对橡胶熵弹制冷的优点,展望其对生态文明建设的潜在贡献,提升学好科学知识、坚持绿色发展、坚持为人民谋福祉的历史使命感和责任担当。

(7)教学总结:通过对弹热制冷效应的体验式研究与教学,与学生共同进行教学总结,鼓励学生换位思考、体验翻转课堂,共同反思如何设计教学环节来提高学习参与度和学习效果。

3.5 教学评价与反思

上述教学环节,是按照“实践-认识-实践”的辩证关系,从橡胶弹热效应及其实验方法入手,将橡胶拉伸放热、回缩吸热这一形象的案例通过能量守恒定律凝练为热力学理论,然后将其用于指导新型固体制冷技术的设计与应用,因此能够帮助学生认真学习基础知识,努力跟随学科前沿,思考如何将知识转化为生产力。各种科研前沿和工程应用的实际案例,不仅能够提高学生的学习兴趣,改变学生对物理学抽象而且枯燥的错误理解,还能培养学生勇于创新、学以致用能力。

主要问题与困难集中在两个方面:一是如何组织教学活动,提高所有学生的参与度;二是如何设计教学过程,引导学生理解科研热点与系统性基础原理的关系。前者可通过线上课后测验的分析与针对性布置课后作业进行改善,而后者可作为拓展性知识根据基础原理进行说明与讲解。组织学生利用弹热制冷原理开展课外学术研究,是更受欢迎的教学活动,不仅可以跳出说教、主动帮助学生检验高弹性基础原理的真伪,让学生能够充分认识到高分子物理基础原理的重要性,还能进一步强化学生的创新理念和工程能力,主动寻找基础原理的创新性应用领域,从而为高分子物理的发展提供更加宽厚的基础素材。

3.6 创新点

本文从高分子热力学原理和制冷工程复合交叉的角度,重新理解和认识橡胶形变过程的能量转换与守恒、橡胶熵弹性及其弹热效应,将其用于制冷领域并寻找提高弹热制冷效率的方法。

从教学实践来看,上述教学设计的学习效果良好,已有两个小组在学习弹热效应之后,选择弹热制冷等课题进行课外研究,按照上述设计方案参加了青岛科技大学和山东省的大学生创新创业训练(1项已结题,申请1篇专利);此外还有一名学生根据文献分析选择导热橡胶的制备与弹热制冷研究作为本科毕业论文题目,并顺利毕业。

4 结论

橡胶高弹形变时表现出大的可逆形变、热弹效应、弹热效应和力学松弛等特征。其中弹热制冷效应的热力学分析与实验验证,能够将复杂、抽象的经典高分子物理学知识具象化、创新化改进,从而降低学习难度、提高学习参与度,有效改善开课时间晚等原因对高分子物理课程学习效果的影响。

参考文献:

- [1] 薛其坤. 清华大学教育研究, 2021, (3): 1~6.
- [2] 安立佳, 陈尔强, 崔树勋, 董侠, 傅强, 韩艳春, 何嘉松, 胡文兵, 胡祖明, 江明, 李宝会, 李良彬, 李林, 李卫华, 林嘉平, 吕中元, 门永锋, 沈志豪, 孙平川, 童真, 王笃金, 武培怡, 谢续明, 徐坚, 徐志康, 薛奇, 闫寿科, 杨玉良, 俞炜, 俞燕蕾, 张广照, 张军, 张俐娜, 张平文, 张文科, 赵江, 郑强, 周东山. 高分子学报, 2019, 50(10): 1047~1067.
- [3] 何平笙, 杨海洋, 朱平平. 高分子通报, 2018, (7): 1~7.
- [4] 吴其晔, 张萍, 杨文君, 林润雄. 高分子物理学. 北京: 高等教育出版社, 2011: 14.
- [5] Greibich F, Schwödiauer R, Mao G, Wirthl D, Drack M, Baumgartner R, Kogler A, Stadlbauer J, Bauer S, Arnold N, Kaltenbrunner M. Nat Energy, 2021, (6): 260~267.
- [6] Wang R, Zhang M, Xiao Y, Gao E, Jiang N, Li Y, Mou L, Shen Y, Zhao W, Li S, Fonseca A F, Galvão D S, Chen M, He W, Yu K, Lu H, Wang X, Qian D, Aliev A E, Li N, Haines C S, Liu Z, Mu J, Wang Z, Yin S, Lima M D, An B, Zhou X, Liu Z, Baughman R H. Science, 2019, 366(6462): 216~221.
- [7] 杨清芝. 现代橡胶工艺学. 北京: 中国石化出版社, 1997: 2~4.
- [8] de Gennes P G. Scaling concepts in polymer physics. Ithaca: Cornell University Press, 1985; 中译本, 高分子物理学中的标度概念. 吴大诚, 刘杰, 朱谱新, 译, 北京: 化学工业出版社, 2002: 235~242.
- [9] Meyer H, Ferri C. Helv Chim Acta, 1935, 18(1): 570~589.
- [10] Gough J. Memoirs of the Literary Philosophical Society of Manchester 1 (2nd Series), 1805: 288~295.
- [11] 杨玉良, 张红东. 高分子学报, 2020, 51 (1): 87~91.
- [12] Guyomar D, Li Y, Sebald G, Cottinet P, Ducharne B, Capsal J. Appl Therm Eng, 2013, 57(1/2): 33~38.
- [13] Xie Z, Sebald G, Guyomar D. Appl Phys Lett, 2016, 108(4): 041901.
- [14] 李天颖. 不同橡胶材料的弹热效应研究. 天津: 天津商业大学, 2019.
- [15] Uchil J, Mahesh K K, Kumara K G. J Phys-Condens Mat, 2001, 305: 1~9.
- [16] 钱苏昕, 袁丽芬, 晏刚, 鱼剑琳. 制冷学报, 2018, 39(1): 1~12.
- [17] 王孟, 廖云. 高分子材料科学与工程, 2014, 30(8): 115~118.
- [18] Joule J P. Philos T, 1859, 149: 91~131.
- [19] Katz J R. Colloid Polym Sci, 1925, 36(5): 300~307.
- [20] Trabelsi S, Albouy P A, Rault J. Macromolecules, 2002, 35(27): 10054~10061.
- [21] Zhang H P, Niemczura J, Dennis G, Ravi-Chandar K, Marder M. Phys Rev Lett, 2009, 102(24): 245503.
- [22] Dart S L, Anthony R L, Guth E. Ind Eng Chem, 1942, 34(11): 1340~1342.
- [23] Mitchell J C, Meier D J. Rubber Chem Technol, 1969, 42(5): 1420~1432.
- [24] Xie Z, Sebald G, Guyomar D. Appl Phys Lett, 2015, 107(8): 980.
- [25] 2020 高考志愿填报指南, https://www.eol.cn/e_html/gk/gkzytbzn/index.shtml.
- [26] 2021 高考志愿填报指南, https://gkcx.eol.cn/special/161?special_type=3&sort=1.
- [27] 袁丽雯, 杨坤. 物理通报, 2020, (12): 24~27.

[28] 董黎明, 陈艳, 喻桂朋, 宫贵贞, 王士凡. 高分子通报, 2019, (12): 52~59.

Thermodynamic Analysis and Teaching Design of Elastocaloric Cooling

ZHAI Jun-xue, WANG Yi-ao, FANG Yi-jie, WANG Xin

(Key Laboratory of Rubber-plastics, Ministry of Education, School of Polymer Science and Engineering, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266042, China)

Abstract: Due to the unique flexibility and entropy elasticity of molecular chain, rubber shows great deformability and obvious caloric effect. In recent years, the research of elastocaloric refrigeration based on rubber stretch-removal endothermic mechanism has attracted more and more attention, which opens up a new direction for the research of polymer physics. Based on the thermodynamic analysis of high elastic deformation and elastocaloric effect in the course of "Polymer Physics", this paper introduces the principle and research progress of rubber elastocaloric refrigeration effect, and designs the teaching objectives and teaching process of "refrigeration effect of rubber entropy elasticity". It not only helps to transform the abstract basic theory of polymer physics into practical application examples, improving the learning quality of polymer physics, but also exercises the consciousness and ability of college students to track the frontier of disciplines and carry out innovative training.

Key words: Rubber; Entropy elasticity; Elastocaloric refrigeration; Teaching design