苯乙烯系形状记忆聚合物研究进展

王 燕[1],白克铭[2]

(1.西安汽车职业大学,陕西 西安 710600;2.西安微电子技术研究所,陕西 西安 710065)

摘 要: 形状记忆聚合物(SMP)具有优良的形状记忆性能,是继形状记忆合金和形状记忆陶瓷后又一热点研究领域。SMP能够在外部刺激(如热、光、电/磁、pH值等)下回复原始形状,在航空航天、汽车、智能结构及太阳能电池等领域有着重要应用。聚苯乙烯(PS)是一种用于形状记忆纳米复合材料的合成芳香族热塑性聚合物。文章在SMP的基础上,分析苯乙烯系SMP的结构原理,概述功能填料填充SMP的研究进展,如光响应性、磁响应性、电响应性、热响应性及电磁屏蔽等功能,并对其应用前景与发展趋势进行展望。

关键词: 苯乙烯;形状记忆聚合物;响应性;功能材料

中图分类号: TQ325.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3360(2026)08-0201-06

DOI: 10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.08.035

Research Progress on Styrene-based Shape Memory Polymers

WANG Yan[1], BAI Keming[2]

(1. Xi'an Vocational University of Automobile, Xi'an 710600, China; 2. Xi'an Institute of Microelectronics Technology, Xi'an 710065, China)

Abstract: Shape memory polymers (SMP) have excellent shape memory properties, which are another hot research field after shape memory alloys and shape memory ceramics. SMP can restore their original shape under external stimuli (such as heat, light, electricity/magnetism, pH value, etc.), and had important applications in aerospace, automotive, intelligent structures, solar cells and other fields. Polystyrene (PS) is a synthetic aromatic thermoplastic polymer used for shape memory nanocomposites. Based on the SMP, the structure and principle of styrene based SMP were analyzed, and the research progress of functional filler filled SMP was summarized, such as optical responsivity, magnetic responsivity, electrical responsivity, thermal responsivity, electromagnetic shielding and other functions, and its application prospect and development trend were prospected.

Keywords: Styrene; SMP; Responsiveness; Functional materials

形状记忆材料是指可以感应刺激(如电、光、温度、湿度、磁、pH值等),对其参数(如位置、形状、应变等)做出相应调整,最终回复至其预先状态的一类智能材料[1-3]。形状记忆效应首先发现于金属和陶瓷,形状记忆聚合物(SMP)作为重要分支,可以在外部刺激下实现临时变形和原始形状之间的可逆转换[4-5],引起人们的广泛关注。与形状记忆合金[6]和形状记忆陶瓷[7]相比,SMP具有赋形容易、电绝缘性好、形变量大、易加工、质量轻、价格低等优点[7]。SMP可以通过控制结构来调节其形状回复程度[4],可在某些部件上代替形状记忆合金和形状记忆陶瓷[8-10],特别是在航空航天、汽车、智能结构、传感器及太阳能电池等重要领域[11-16]。

单体苯乙烯聚合可合成聚苯乙烯(PS),其强度高、刚性大、玻璃化温度和透明性均较高,耐辐射性能好,是一种用于形状记忆纳米复合材料的合成芳香族热塑性聚合物[3,17]。苯乙烯系SMP有物理交联作固定相的热塑性结构与化学交联为固定相的热固性结构,其在热响应、电活性和光活性等材料中得到广泛应用。此外,功能填料填

收稿日期Submitted date 2025-09-18;修回日期Revised date 2025-10-10;录用日期Accepted date 2025-11-13

基金项目:2024年度陕西省教育厅一般专项科学研究计划项目(24JK0584)

联系人,292272451@qq.com

引用本文:王燕,白克铭.苯乙烯系形状记忆聚合物研究进展[J].塑料科技,2026,54(8):201-206.

Citation: WANG Y, BAI K M. Research progress on styrene-based shape memory polymers[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(8): 201-206.

充的SMP也表现出优异的形状回复性能，其在致动器、结构材料、空间展开结构、传感器、太阳能电池、燃料电池、电动汽车及电磁屏蔽功能等方面均有广泛应用[12,16,18]。

基于传统SMP与功能填料填充SMP的对比分析，本文系统综述功能填料填充SMP在光响应性、湿度响应性、磁响应性、电响应性、电磁屏蔽及热响应性等方向的应用研究进展。

1 传统SMP

传统的SMP存在驱动方式单一、强度低、回复力低等缺点，严重影响其应用[19]。添加功能填料可克服这些缺点，从而得到具有不同特性的SMP材料。苯乙烯材料本身强度高，刚性大，玻璃化转变温度(t_g)相对较低，应用相对普遍，这也是其作为形状记忆基底材料的主要原因[20]。

有关SMP的形状记忆机理可从分子结构及其内部相互作用方面进行理解。聚合物在聚合过程中是无规嵌段共聚的，形成的无定形结构聚合物靠玻璃化转变来固定形变[20]。当加热至t_g以上时，分子链运动开始加剧，外力作用使分子链段拉伸定向。在外力存在的情况下降温至t_g以下时，分子链段运动停止，主要是PS链段的玻璃化作用使材料的形状被固定，外力拉伸过程产生的形变被冻结，当再次升温时，分子链段的微布朗运动加剧，原来定向的分子链段回复至其初始状态，表现为材料回复至初始形状[21]。控制共聚单体含量和交联剂用量可使SMP材料具有不同的力学性能、热性能及形状记忆性能，添加不同的功能填料后可制得不同特性的SMP[22]。

2 功能填料改性SMP

2.1 光响应型SMP

LENG等[23]将炭黑(CB)加入SMP中，得到的CB/SMP复合材料在4 000~500 cm^{-1}范围内具有强烈吸收特性，同时能够快速实现光致形状回复，相比于未添加CB的SMP，该材料光致响应速度更快，形状回复率更高。此外，LENG等[24]还将光纤加入苯乙烯基体中，光纤纤芯直接与聚合物基体相连，利用光热转换机制，材料继而回复形状，不受电磁干扰，应用过程不产生电磁波，对机体损害小，可以应用在人体内部，在生物医学方面有广阔的应用前景。

MA等[25]采用具有光热转换性能的SMP，模拟章鱼触手吸盘与肌肉的特性，提出一种刚度可调的光响应智能黏附剂(PSA)。借助SMP的形状记忆性能，PSA能够通过刚度调控实现共形接触、形状锁定及主动释放。同时，其疏水特性使其不仅适用于空气中各种特征表面的操控，还能有效服务于水下环境。研究表明，所提出的PSA在空气和水下环境中的黏附强度分别达到传统章鱼仿生黏附剂的18倍和11倍，同时兼具高效的脱附能力。凭借上述优势，该黏附剂在工业制造与日常应用中展现出广阔前景，为黏附材料的设计提供全新思路。

WANG等[26]将纳米TiO_2加入苯乙烯基体中，制成紫外线驱动型SMP，该SMP有更好的光吸收性，从而在紫外线照射下实现形状回复。

CUI等[27]以羧基接枝聚苯乙烯-*b*-聚(乙烯-丁烯)-*b*-聚苯乙烯(SEBS-*g*-COOH)为基体，以一种合成的偶氮苯衍生物作为功能性填料，在光照下，偶氮苯衍生物小分子通过顺-反异构转变快速液化，所得弹性体颜色也会相应改变。差示扫描量热法和X射线衍射结果显示，光照后偶氮小分子晶区发生破坏，通过光照控制晶区的可逆破坏与重构，进而储存与释放应变，从而实现光响应形状记忆功能。图1为光响应形状记忆过程[27]。

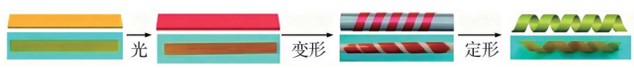


图1 光响应形状记忆过程

Fig.1 Photoresponsive shape memory process

2.2 湿度响应型SMP

很多植物可以根据湿度变化可逆地改变自身的形状，通过材料设计及工艺制备，人工也可以合成湿度响应致动器。CUI等[27]基于酸/碱处理诱导羧基-羧酸根的可逆转变，实现材料表面吸湿性的动态调控，控制湿度响应致动行为。该研究利用形状记忆功能对材料形状进行编程，以实现不同模式的湿度响应复杂三维变形。通过表面酸碱处理调控材料表面吸湿性，可实现可逆的湿度响应弯曲变形。图2为4种预设三维形状的样品在湿度驱动下的复杂致动行为[27]。从图2可以看出，进一步结合形状记忆和可编程湿度响应致动功能，可实现多模式复杂三维变形的能力。

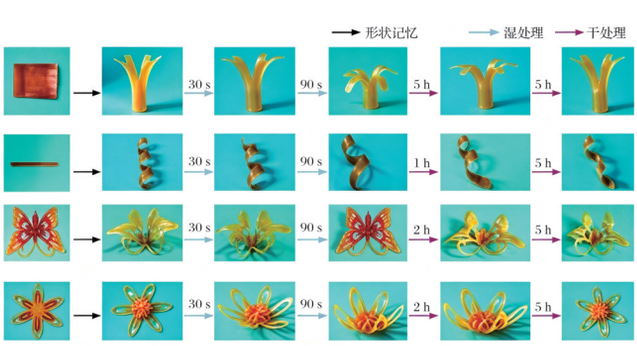


图2 4种预设三维形状的样品在湿度驱动下的复杂致动行为

Fig.2 Complex moisture-driven actuating behaviors of four samples with programmed 3D shapes

2.3 磁响应型SMP

添加特定功能填料也可实现SMP的磁响应特性。KHAN等[28]将磁铁Fe_3O_4纳米粒子填充至苯乙烯基体中，所制备的复合材料具有磁场感应驱动特性。其原理基于磁场感应加热使材料升温，进而触发形状回复，该材料可实现快速形状回复。当Fe_3O_4添加质量分数为5%时，在磁场感应加热下仅需45 s即可回复至其初始形状。同时，该复合材料在室温下的剪切强度和伸长率也显著提高。

张大伟[16]将镍粉填充进苯乙烯基体中，得到的材料也

具有良好的磁场响应特性。该复合材料可以在磁场作用下进行预变形与形状固定，再由磁驱动使其回复至初始形状，完成一个记忆循环。同时，通过磁场的反复通断，还可实现材料的双向驱动。经表面处理后，镍粉表面化学吸附偶联剂分子。在树脂固化的过程中，偶联剂分子与树脂基体发生化学反应形成化学键，从而将聚合物与镍粉紧密联结为一个整体。此时，镍粉在聚合物中充当新的交联点，借助表面处理和超声分散技术，镍粉和苯乙烯基体之间形成良好的黏接，在提升SMP力学性能的同时，也增强其对磁场的响应灵敏度。

2.4 电响应型SMP

传统SMP材料的电绝缘性限制其应用，添加特定填料后不仅能够实现导电性，还能实现材料的电响应形状记忆回复，扩大其应用范围。

LENG等[29]研究SMP在可展开变形结构中的应用，所设计的变形结构由SMP填料、金属骨架和SMP板三部分组成。图3为可展开变形结构[29]。将PS与固化剂按质量比28∶1混合，在75 ℃下固化24 h，得到SMP填料和SMP板。结果表明：碳纤维和碳纳米管(CNTs)的填充可改善SMP的导电性和机械性能；添加特定含量CB与碳纤维填料的PS可以感知温度和应变的变化，可用来制作响应温度变化和机械负载变化的传感器。

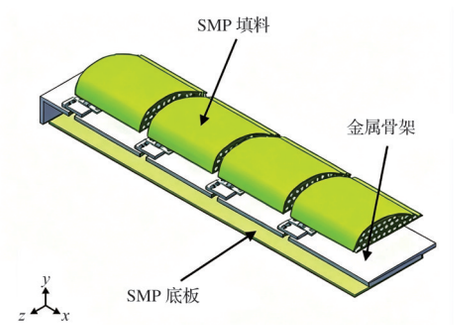


图3 可展开变形结构

Fig.3 Deployable deformable structure

LENG等[30]将体积分数为10%的CNTs填充PS中，所得复合材料具有良好的导电性能，在30 V电压下，该材料即可实现电致形状记忆回复效应。图4为30 V电压下电响应形状记忆照片[30]。

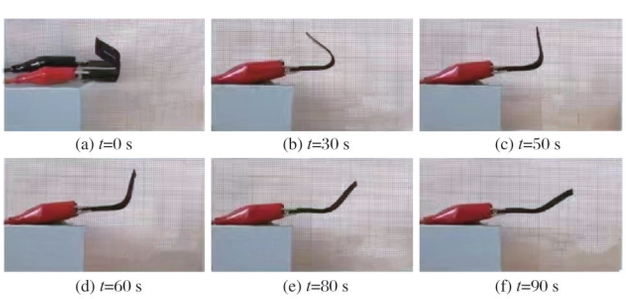


图4 30 V电压下电响应形状记忆照片

Fig.4 Electrical response shape memory images at a voltage of 30 V

虽然添加CNTs和导电纤维的SMP具有电响应特性，但这些填料的分散状态会抑制材料的形状回复性能。为此，LU等[31]采用多壁碳纳米管纸包覆于SMP表面的方法。该方法不仅显著提升SMP的导电性和热传导效率，还能实现材料的高速电驱动效应。

通过添加石墨烯、CNTs等碳纳米颗粒及无机纳米颗粒(如二氧化钛、硅胶和金属纳米颗粒)，材料会展现形状记忆效应。KAUSAR等[22]以反式-1,4-聚异戊二烯和PS为基体，制备出具有热、电及辐射多重响应性的纳米复合材料。根据纳米颗粒的类型、含量及其与聚合物网络的相互作用，能够观察到其优异的形状记忆效应。含有碳纳米颗粒(如CNTs、石墨烯或CB)的反式-1,4-聚异戊二烯表现出高达95%~99%的形状回复率。反式1,4-聚异戊二烯的共聚物和共混物纳米复合材料也展现出高达100%的形状回复能力。PS及其与不同类型纳米颗粒的共混物和共聚物的形状记忆纳米复合材料，呈现出有效的热、电响应形状记忆行为。因此，优异的形状记忆效应归因于纳米颗粒的均匀分散以及活性聚合物链切换所形成的网络结构。

CHERAGHI等[32]研究CNTs对PS/乙烯-辛烯共聚物(EOC)形态以及力学性能、电学性能和形状记忆性能的影响，利用扫描电镜对质量比分别为80∶20和50∶50的PS/EOC共聚物进行形态学表征。结果表明，当CNTs添加量为0.05~1.50 phr时，体系结构从基质-分散相转变为共连续形态。流变学测试结果表明，该纳米复合材料在低频区呈现类似固态行为，主要是因为CNTs在PS相内形成三维网络。电导率测量结果表明，添加1.50 phr的CNTs可使电导率提升9个数量级。此外，因为CNTs三维网络对界面弹性的协同增强，PS/EOC/CNTs纳米复合材料表现出100%的形状保持率与回复率。通过调控CNTs添加量，可优化材料的导电性、形状记忆效应及机械性能，为功能材料的设计提供了依据。

2.5 电磁屏蔽型SMP

SMP本身不具备电磁屏蔽功能，但通过添加导电填料，可赋予其电磁屏蔽功能。李岳[33]采用PS模板法和室温干燥法，制备具有导电性和电磁屏蔽性能的高密度三维石墨烯。同时，以PS微球体为模板，通过水热反应和热烘干法构建3D石墨烯纳米结构，得到密度为0.146 g/cm^{3}的高导电/电磁屏蔽效能三维石墨烯(RGM)。RGM与石蜡复合后，显示出高达343.7 S/m的电导率以及在X波段57.1 dB的优异电磁屏蔽性能。该新型电磁屏蔽材料可用于智能汽车，避免数据丢失或通信中断等问题。

传统电磁屏蔽材料防护频带较窄，牟欣雨等[34]利用磷钨酸($H_3PW_{12}O_{40}$，PW_{12})和二甲亚砜(DMSO)复合得到高导电性、高柔韧性与高机械强度的聚(3,4-乙烯二氧噻吩)-聚苯乙烯磺酸(PEDOT∶PSS)基电磁屏蔽水凝胶(PWDPG)。PWDPG在X波段(8.2~12.4 GHz)和Ku波段(12.4~18.0 GHz)的比电磁屏蔽效能分别为236.22 dB/mm和

191.72 dB/mm，具有宽频、高效的电磁屏蔽性能，可更好地用于柔性电子器件的电磁防护领域。

2.6 热响应型SMP

传统基于SMP的智能模具虽能通过刺激响应实现主动脱模，但在制造大腔体部件时面临变形能力受限与成型过程易爆裂的瓶颈。为解决这一问题，DU等[35]利用自由基聚合，设计刚性-柔性交联网络结构，得到热固性形状记忆苯乙烯材料，该材料可实现高达370%的大变形。此外，在基体中±45°定向铺设尼龙-氨纶弹性纤维，形成增强复合材料，该纤维不仅能有效阻碍基体裂纹扩展，还能提升复合材料的变形能力。将可编程复合材料应用于可重复使用的形状记忆智能模具，可实现从二维平面到三维结构的转变以及从三维模具到四维变形组件的转换。研究结果为智能模具开辟新的道路。

DU等[36]模拟一种具有双向形状记忆效应的双层SMP复合板，其中两种SMP以平行方式组装，具有明显分离的t_g。研究采用有限元软件ABAQUS模拟形状回复步骤中的双向形状记忆效应，并用带有Williams-Landel-Ferry方程的广义Maxwell模型来表征SMP双层板的温度依赖特性。该研究重点考察轴向预变形、热膨胀系数和板厚等因素对SMP双层板的双向形状记忆行为的影响，提出一种由4个SMP复合板组成的智能夹持器，以实现一步和分阶段加热回复的抓取和释放功能。此研究结果可应用于未来柔性智能结构设计和优化。

AZIZUL等[37]通过动态流变测试(0.1~100.0 rad^{-1})分析聚乳酸/苯乙烯-丁二烯-苯乙烯(PLA/SBS)共混物的热响应形状记忆行为。结果表明：70PLA/30SBS体系表现出适中的存储模量和损耗模量，同时显示出最佳的形状固定比(R_f)和形状回复比(R_r)；随着PLA添加量的增加，材料拉伸强度和拉伸模量增加，而断裂伸长率下降，其中50PLA/50SBS由于形成共连续形态，性能变化显著；SBS添加量对PLA的t_g没有显著影响，但结晶度随着SBS的增加略有增加；70PLA/30SBS呈现海-岛形态，其中SBS在PLA连续相中形成液滴，实现优异的拉伸性能和形状记忆性能。

AZIZUL等[38]比较PLA与不同结构的SBS[包括线性SBS (L-SBS)和放射状SBS (R-SBS)]混合后的热性能、机械性能和形状记忆行为。在180 ℃条件下，添加质量分数为10%~70%的L-SBS和R-SBS，混合后压缩成型。结果表明：在所有组成范围内，复合材料结晶度提高，但转变温度变化不明显，PLA/L-SBS混合物的拉伸强度和拉伸模量均高于PLA/R-SBS混合物；PLA/L-SBS的R_f和R_r均高于PLA/R-SBS，其中PLA70/SBS30形状记忆效应最好。

2.7 SMP的其他改性

SMP可以与形状记忆合金协同发挥作用。SMP变形能力大，回复力小，而形状记忆合金材料则具有较大的回复力。为此，CORTES等[39]将形状记忆合金材料复合于SMP表面，结合形状记忆合金的大回复力与SMP的大变形能力，使所制得的形状记忆复合材料具有更大的应用范围。

在实际应用中，紫外线会导致SMP老化，严重影响其使用寿命。WONG等[40]在PS中添加纳米氧化锌颗粒，以吸收紫外线。当纳米氧化锌质量分数为4%时，紫外退化对SMP的影响可降至最低，材料的形状记忆效应能实现快速且完全的回复。

白克铭等[41]将SBS与低密度聚乙烯(PE-LD)共混，以过氧化二异丙苯(DCP)为引发剂，选用3种不同的多官能团单体作为强化交联剂，使其交联形成网状结构。结果表明，多官能团单体的加入可提高SBS/PE-LD交联共混物的交联程度，同时其形状固定率和形状回复率均可达到100%。

RAHIM等[42]将PLA与SBS以质量比为70∶30进行混合，并添加氧化铒(Er_2O_3)、高岭土纳米管(HNT)和碳化钨(WC_2)等填料，研究不同填料对材料性能的影响。结果表明：HNT的管状结构在变形阶段浸泡时间较长时导致R_f降低；Er_2O_3的存在提高了R_r；与HNT混合的材料具有最高的黏度；与70PLA/30SBS-Er_2O_3混合的材料显示出比未填充混合物更低的黏度；所有填充混合物均表现出海-岛结构，其中SBS液滴在PLA连续相中；填料的存在会限制分子链的运动，而导热填料的加入对形状记忆性能的改善效果并不显著。

单向热塑性SMP作为自折叠折纸的驱动器，通常是一次性使用的材料，在完成任务目标后将退役。因此，存在大量未被利用的、单一用途的SMP废弃物。NELSON等[43]采用热机械回收方法回收SMP，通过傅里叶变换红外光谱、差示扫描量热法和动态力学分析来表征回收后聚合物的化学结构、黏弹性特性和形状回复响应的变化。结果表明：在1~6次回收循环过程中，材料的物理外观出现劣化，回收材料的黏弹性及形状回复性能几乎没有变化，使该材料可在太空环境就地资源利用中得以应用。

TIAN等[44]将苯乙烯-丙烯腈共聚物(SAN)和聚脲(PUA)复合，利用反应性增塑和诱导相分离技术，结合超临界CO_2发泡方法，制备一种具有优异压缩性能的聚合物纳米复合泡沫。结果表明：在形成的纳米结构中，交联的PUA尺寸为10~40 nm，分散在SAN基质中；SAN/PUA纳米复合泡沫具有热固性聚合物及热塑性聚合物的性能，同时表现出优异的形状记忆性能。

XIE等[45]在羧基末端聚丁二烯和苯乙烯-乙烯吡啶共聚物之间引入金属配位，制备一种具有形状记忆和自愈性能的弹性体，通过添加氧化碳纳米洋葱(O—CNO)增强弹性体机械和自愈性能。结果表明：在85 ℃条件下，添加质量分数为0.5%的O—CNO，弹性体修复6 h后，其拉伸强度能回复到原始样品的(83±10)%。通过金属配位相互作用能够得到形状记忆自愈橡胶弹性体，形状记忆辅助自愈效应为快速自修复严重裂纹的应用提供思路。

液体在固体表面附着力的智能控制在润湿性领域中起着重要作用。YU等[46]采用静电纺丝制备一种由具有水响应形状记忆的聚氨酯-纤维素纳米晶体复合纤维基体和超疏水PS纺锤状纤维组成的形状记忆复合膜。在拉伸-回复形状记忆循环过程中，PS纺锤状纤维微结构疏密切换，从而实现了超疏水高-低附着力的智能控制。该形状记忆复合膜在无损液滴转移、多液滴选择性操作和智能检测中也得以应用。这种复合膜在智能平台、微流体系统和可穿戴领域具有应用潜力。

3 结论

在阐明形状记忆机理的基础上，当前针对SMP的研究已从保持形状记忆特性转向借助多种改性手段制备具有差异化性能的新型SMP材料，从而拓展其应用范围。在实际应用中，不同的服役环境对材料性能提出了多样化的要求，因此通过添加功能填料来赋予SMP特定性能的研究，仍有待进一步深入。

参考文献

[1] MING G Q, LI F F, XU M M, et al. Shape memory cyclic behavior and mechanical durability of woven fabric reinforced shape memory polymer composites[J]. Composites Science and Technology, 2024, 258: 110866.

[2] SUN Y X, SANG M, LI W W, et al. Multi-stimulus responsive soft actuator with thermotropic shape memory and local magnetic programming properties[J]. Composites Part B: Engineering, 2026, 308: 112964.

[3] KAUSAR A. Shape memory polystyrene-based nanocomposite: Present status and future opportunities[J]. Journal of Macromolecular Science, Part A, 2021, 58(3): 182-191.

[4] CHEN J Y, WANG Z F, YAO B W, et al. Ultra-highly stiff and tough shape memory polyurea with unprecedented energy density by precise slight cross-linking[J]. Advanced Materials, 2024, 36(27): e2401178.

[5] 任天宁, 朱光明, 聂晶. 形状记忆聚合物复合材料可展开结构的研究进展[J]. 航空材料学报, 2018, 38(4): 47-55.

[6] 张明会, 张华丽, 郑磊, 等. 用于细胞分选的形状记忆合金微阀芯片设计[J]. 机械设计与制造, 2025(9): 78-81.

[7] 陈龙, 胡贵, 刘庆, 等. LDPE/SEBS/CB电致形状记忆复合材料的结构与性能[J]. 塑料科技, 2010, 38(5): 31-35.

[8] GU J P, ZHANG Y C, DUAN H, et al. Constitutive model for hygro-thermo-mechanical responses of carbon fiber reinforced shape memory polymer composites: Thermodynamic formulation and bending/buckling applications[J]. Mechanics of Materials, 2025, 210: 105476.

[9] OH S M, OH K M, DAO T D, et al. The modification of graphene with alcohols and its use in shape memory polyurethane composites[J]. Polymer International, 2013, 62(1): 54-63.

[10] VOIT W, WARE T, GALL K. Radiation crosslinked shape-memory polymers[J]. Polymer, 2010, 51(15): 3551-3559.

[11] LENG J S. Active moving polymers and multifunctional composites: Shape the future structures[J]. Advanced Materials Research, 2013, 745: 129-134.

[12] 袁航. 基于双反蛋白石光子晶体的乙醇浓度比色传感研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2024.

[13] BASAK S, BANDYOPADHYAY A. Styrene-butadiene-styrene-based shape memory polymers: Evolution and the current state of art[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2022, 33(7): 2091-2112.

[14] LIU P X, ZHENG Y X, LIU Z J, et al. Shape-persistent tetraphenylethylene macrocycle: Highly efficient synthesis and circularly polarized luminescence[J]. Materials, 2025, 18(1): 200.

[15] WU X, LIU Y, LENG J. Study on shape recovery speed of SMP, SMP composite, and SMP foam[C]//The International Society for Optical Engineering. Conference on Nanosensors and Microsensors for Bio-Systems 2008. San Diego, California, USA, 2008.

[16] 张大伟. 苯乙烯形状记忆聚合物及其光、磁驱动特性的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.

[17] 贾宇宇. 苯乙烯类热塑性弹性体的环化和性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2023.

[18] MAJI P, NASKAR K. Styrenic block copolymer-based thermoplastic elastomers in smart applications: Advances in synthesis, microstructure, and structure-property relationships: A review[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2022, 139(39): e52942.

[19] ZHOU B, LAN X, LIU Y J, et al. Modeling thermo-mechanical behaviors of reinforced shape memory polymer under cyclic loads[J]. Second International Conference on Smart Materials and Nanotechnology in Engineering, 2009, 7493: 749336.

[20] 杜晓宇. 弹性纤维增韧形状记忆聚苯乙烯的制备及性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.

[21] 朱丽倩, 肖扬可, 王文俊, 等. 嵌段型热塑性弹性体: 现状与进展[J]. 高分子学报, 2025, 56(9): 1463-1479.

[22] KAUSAR A. Shape memory behaviour of nanoparticle reinforced trans-1, 4-polyisoprene and polystyrene nanocomposites: Aspects and advancements[J]. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2025, 38(3): 1184-1207.

[23] LENG J S, WU X L, LIU Y J. Infrared light-active shape memory polymer filled with nanocarbon particles[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2009, 114(4): 2455-2460.

[24] LENG J S, ZHANG D W, LIU Y J, et al. Study on the activation of styrene-based shape memory polymer by medium-infrared laser light [J]. Applied Physics Letters, 2010, 96(11): 111905.

[25] MA H Y, WU C, MA H X, et al. Octopus-inspired smart adhesive with adjustable stiffness for adhesion on uneven surfaces in air and underwater[J]. Small, 2025, 21(41): e05795.

[26] WANG W X, LIU Y J, LENG J S. Influence of the ultraviolet irradiation on the properties of TiO_2-polystyrene shape memory nanocomposites[J]. Fourth International Conference on Smart Materials and Nanotechnology in Engineering, 2013, 8793: 879315.

[27] CUI X X, SHANG L, LIU Z W, et al. A composite elastomer with photo-responsive shape memory and programmable hygroscopic actuation functionalities[J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2024, 42(10): 1470-1478.

[28] KHAN F, KOO J H, MONK D, et al. Characterization of shear deformation and strain recovery behavior in shape memory polymers [J]. Polymer Testing, 2008, 27(4): 498-503.

[29] LENG J S, YU K, SUN J, et al. Deployable morphing structure based on shape memory polymer[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2015, 87(3): 218-223.

[30] LENG J S, LAN X, LIU Y J, et al. Electroactive thermoset shape memory polymer nanocomposite filled with nanocarbon powders[J]. Smart Materials and Structures, 2009, 18(7): 074003.

[31] LU H B, GOU J H, LENG J S, et al. Magnetically aligned carbon nanotube in nanopaper enabled shape-memory nanocomposite for high speed electrical actuation[J]. Applied Physics Letters, 2011, 98(17): 174105.

[32] CHERAGHI M S, PIRCHERAGHI G. Simultaneous enhancement of electrical conductivity and shape memory behavior of polystyrene/ethylene octene copolymer blend nanocomposites by CNTs through double percolation[J]. Materials Today Communications, 2023, 37: 107209.

[33] 李岳. 基于聚苯乙烯微球模板的电磁防护材料制备与性能研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2018.

[34] 牟欣雨, 张英汉, 郑琦, 等. 高导电聚(3, 4-乙烯二氧噻吩)-聚苯乙烯磺酸基水凝胶的构筑及其电磁屏蔽性能[J]. 东华大学学报(自然科学版), 2025, 51(5): 18-25.

[35] DU X Y, ZHANG F H, HU L K, et al. Adjustable-stiffness and programmable shape memory polystyrene composites with elastic fibers for complex structure smart molds[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2025, 190: 108595.

[36] DU H Y, YAO Y T, ZHOU X L, et al. Two-way shape memory behavior of styrene-based bilayer shape memory polymer plate[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2023, 34(1): 252-260.

[37] AZIZUL RAHIM F H, RUSLI A. Rheological and thermoresponsive shape memory properties of polylactic acid (PLA) and styrene-butadiene-styrene (SBS) copolymer blends[J]. Journal of Polymer Research, 2022, 29(11): 452.

[38] AZIZUL RAHIM F H, SALEH A A, SHUIB R K, et al. Thermo-responsive shape memory properties based on polylactic acid and styrene-butadiene-styrene block copolymer[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2021, 138(39): 51000.

[39] CORTES P, MCCLUNG A J W, SAKULICH J, et al. The relationship between constituent property and bending actuation of shape memory composites[J]. Behavior and Mechanics of Multifunctional Materials and Composites 2012, 2012, 8342: 834214.

[40] WONG T T, LAU K T, TAM W Y, et al. Degradation of nano-ZnO particles filled styrene-based and epoxy-based SMPs under UVA exposure[J]. Composite Structures, 2015, 132: 1056-1064.

[41] 白克铭, 朱光明, 王燕, 等. SBS/PE-LD共混物的强化辐射交联研究[J]. 中国塑料, 2016, 30(11): 13-18.

[42] RAHIM F H A, RUSLI A. Thermoresponsive shape memory polymer based on polylactic acid/styrene-butadiene-styrene blends with different inorganic metal fillers[J]. Materials Science Forum, 2023, 1102: 11-19.

[43] NELSON M A, SIWAKOTI M, CARDON R, et al. Effects of recycling on polystyrene shape memory polymers for *in-situ* resource utilization [J]. Smart Materials and Structures, 2023, 32(9): 095037.

[44] TIAN M, YOU J G, QIU J, et al. Unexpected super anti-compressive styrene-acrylonitrile copolymer/polyurea nanocomposite foam with excellent solvent resistance, re-processability and shape memory performance[J]. Composites Part B: Engineering, 2023, 264: 110908.

[45] XIE F, PING Z X, XU W T, et al. A metal coordination-based supramolecular elastomer with shape memory-assisted self-healing effect[J]. Polymers, 2022, 14(22): 4879.

[46] YU X, FAN W Q, WANG Y Z, et al. Shape memory surface adhesion control based on PU-CNC/PS electrospun composite films[J]. Textile Research Journal, 2024, 94(5/6): 671-681.