第 39 卷 第 X 期
2026 年 X 月

高 分 子 通 报
POLYMER BULLETIN

Vol. 39, No. X
XXXX, 2026

·研究论文·

二维氮化硼增强苯乙烯–丙烯腈共聚复合材料及其隔声性能

刘婵玉[1] 李梦莎[1] 宋珍珍[2] 游 峰[1] 刘玉兰[1*] 江学良[1] 姚 楚[1]

([1]武汉工程大学材料科学与工程学院 武汉 430205)
([2]中韩(武汉)石油化工有限公司 武汉 430082)

摘要：采用双轴拉伸工艺制备取向六方氮化硼(h-BN)增强苯乙烯–丙烯腈(SAN)隔声复合材料。系统研究了h-BN填料填充量及h-BN取向状态对SAN/BN复合材料隔声性能的影响规律。通过动态力学性能测试、声传输损失测试及扫描电镜等分析对复合材料进行了系统表征，结果表明：随h-BN含量增加，厚度为1.1 mm的SAN/BN复合材料平均传声损失(STL)呈线性增长，当h-BN添加量为10 wt%时，SAN/BN复合材料的STL可达23.68 dB，较纯SAN提升41.8%，在相同h-BN含量条件下，双轴拉伸SAN/BN复合材料的STL均显著高于仅热压的SAN/BN复合材料，当h-BN添加量为10 wt%时，双轴拉伸SAN/BN复合材料STL从纯SAN的26.32 dB提升至30.21 dB；相同h-BN含量条件下，双轴拉伸后SAN/BN复合材料在玻璃态下的储能模量均显著提升，当h-BN添加量为10 wt%时，双轴拉伸SAN/BN复合材料储能模量为5363 MPa，较仅热压的SAN/BN复合材料4502 MPa提升19%。本研究为高性能轻量化聚合物隔声材料的开发提供了借鉴。

关键词：苯乙烯–丙烯腈共聚物；六方氮化硼；声传输损失；双轴拉伸；储能模量

Two-dimensional Boron Nitride-reinforced Styrene-acrylonitrile Copolymer Composites and Their Sound Insulation Properties

LIU Chan-yu[1], LI Meng-sha[1], SONG Zhen-zhen[2], YOU Feng[1], LIU Yu-lan[1*], JIANG Xue-liang[1], YAO Chu[1]

([1]*School of Materials Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205*)
([2]*SINOPEC-SK (Wuhan) Petrochemical Company Limited, Wuhan 430082*)

Abstract: An oriented hexagonal boron nitride (h-BN) reinforced styrene-acrylonitrile (SAN) composite with high sound insulating properties was fabricated via a biaxial stretching process. The effects of h-BN filler content and orientation state on the sound insulation performance of SAN/BN composites were systematically investigated. Through dynamic mechanical analysis, acoustic transmission loss testing, and scanning electron microscopy (SEM) characterization, it was demonstrated that for specimens with a thickness of 1.1 mm, the average sound transmission loss (STL) of the SAN/BN composites exhibited a linear increase with elevated h-BN content. At an h-BN loading of 10 wt%, the STL attained 23.68 dB, corresponding to an enhancement of 41.8% relative to pristine SAN. Under equivalent h-BN concentrations, the STL of biaxially stretched SAN/BN composites was substantially superior to that of their hot-pressed counterparts; it increased from 26.32 dB for pure SAN to 30.21 dB at 10 wt% h-BN. Furthermore, the glassy-state storage modulus of the biaxially stretched composites showed a pronounced increase under identical h-BN conditions, reaching 5363 MPa at 10 wt%, which constitutes a 19% improvement compared to the value of 4502 MPa for the hot-pressed samples. These results offer significant guidance for the development of high-performance, lightweight polymeric materials for acoustic insulation.

高分子加工专题；2026-07-24 收稿，2026-08-28 录用
基金项目：武汉工程大学研究生创新基金
* 通信联系人：刘玉兰，E-mail: yulan616@wit.edu.cn
doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.26.347

Keywords: Styrene-acrylonitrile copolymer; Hexagonal boron nitride; Sound transmission loss; Biaxial stretching; Storage modulus

引用： 刘婵玉, 李梦莎, 宋珍珍, 游峰, 刘玉兰, 江学良, 姚楚. 二维氮化硼增强苯乙烯–丙烯腈共聚复合材料及其隔声性能. 高分子通报, doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.26.347

Citation: Liu, C. Y.; Li, M. S.; Song, Z. Z.; You, F.; Liu, Y. L.; Jiang, X. L.; Yao, C. Two-dimensional boron nitride-reinforced styrene-acrylonitrile copolymer composites and their sound insulation properties. *Polym. Bull.* (in Chinese), doi: 10.14028/j.cnki.1003-3726.2026.26.347

随着城市化进程的加快，交通、施工及生活噪声已广泛渗透城市居民的日常生活环境[1,2]。研究表明，噪声污染已成为影响公共健康的重要环境问题，每年导致全球范围内数百万人健康受损。长期曝露于高噪声环境中，不仅增加儿童发育缺陷的发生风险，亦显著增加成年人罹患各类慢性病的风险，已成为当前亟需综合治理的环境与公共卫生难题[3]。传统隔声材料如岩棉制品、金属板材及橡塑制品，常存在密度大、成型加工性差、耐候及耐腐蚀性能薄弱等问题，难以适配当前装备轻量化、构件集成化与长效服役的工程需求[4~6]。聚合物基复合材料凭借质轻、柔韧、易成型以及微观结构与性能可设计性强等优势，正逐步成为噪声防控领域的核心材料[7~9]。因此开发兼具优异隔声性能与结构稳定性的新型改性聚合物复合材料，具有重要的工程实用价值。

苯乙烯–丙烯腈共聚物(SAN)综合力学强度高、加工流动性好且化学稳定性佳，是一种制备功能复合材料的理想树脂基体，其在耳机、微型扬声器、车载音响等消费级声学产品领域具有较高的实用价值。然而，纯SAN树脂的阻尼损耗因子较低，固有隔声性能有限，难以满足产品在特定应用场景下对隔声性能的需求。因此，需对纯SAN树脂进行改性。其中引入无机填料进行填充改性，是提升其综合性能的常见手段之一。本研究选用六方氮化硼(h-BN)作为SAN基体的增强填料，h-BN具有高模量、高界面阻隔性能，能在聚合物基体内部构建多级声能反射与损耗路径，提升复合材料的阻尼性能与隔声性能[10~12]。无机填料对聚合物基体的隔声增效机制不但与其在聚合物基体中的含量与分散性有关，更依赖于填料片层在基体中的取向分布。基体中随机取向的BN片层对声波传输路径的阻挡效率有限，对BN进行面内取向处理，可增强其对声波的反射与散射效应，延长声波在基体中的传播路径，进而提升隔声性能[13,14]。填料在基体中实现取向的主要技术手段包括外加场诱导取向、剪切流场取向、机械拉伸取向、定向冷冻铸造以及原位生长自组装等。本研究采用操作简便、可控性强的双轴拉伸技术，对分散于SAN基体中的BN填料进行取向处理。

目前，双轴拉伸工艺虽已被用于改善聚丙烯/蒙脱土、PET/石墨烯等体系的阻隔或力学性能[15~17]，但将其用于调控复合材料声学性能的研究较为少见。因此，本研究以SAN为基体、BN为功能填料，通过熔融共混与双轴拉伸工艺制备了取向型SAN/BN复合材料。研究旨在探索拉伸作用下BN填料在SAN基体中的取向变化，系统表征复合材料的隔声性能，并建立微观取向结构与隔声性能之间的构效关系，为高性能轻质聚合物基隔音复合材料的研发与工程应用提供新的借鉴。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

苯乙烯–丙烯腈共聚物(SAN)，购于中国宁波太化塑料有限公司；六方氮化硼(h-BN，99.9%)，购于山东晶易新材料有限公司；蒸馏水，实验室自制。

PolyLabQC型转矩流变仪，美国赛默飞世尔科技有限公司；R-3202型热压机，武汉启恩科技发展有限公司；FOCI-04S型薄膜双轴拉伸机，广州市普同实验分析仪器有限公司；JSM5510LV型扫描电子显微镜(SEM)，日本电子株式会社公司；STA449F3型热重分析仪，德国耐驰仪器制造有限公司；D8 Advance型X射线衍射仪，德国布鲁克公司；SW477型麦克风阻抗管(STL)，北京声望声电技术有限公司；DMA-Q800型动态力学分析仪(DMA)，美国沃特世公司。

1.2 SAN/BN复合材料的制备及双轴热拉伸

SAN/BN复合材料采用转矩流变仪熔融共混法制备，在转矩流变仪温度为165 ℃、转速60 r/min条件下，设定h-BN质量分数梯度为0%、1%、5%、

7%、10%、13%，按照既定比例投入总质量为50 g的SAN、h-BN，熔融共混10 min得到均匀SAN/BN共混物；进一步将SAN/BN共混物于热压机170 ℃、20 MPa热压15 min，经热压成型得到直径为30 mm、厚度为1.1 mm的仅热压处理的SAN/BN圆形复合材料，以备性能测试。

双轴热拉伸SAN/BN复合材料的制备过程如下：将转矩流变仪密炼后的SAN/BN共混物于热压机170 ℃、20 MPa热压15 min，经热压成型制备规格为9 cm × 9 cm × 2 mm的薄板；进一步通过薄膜双轴拉伸试验机对薄板在150 ℃下进行双轴拉伸处理，设定拉伸倍率为1.5，拉伸速率为5 mm/s，将经过拉伸处理的薄板切割成直径30 mm，厚度1.1 mm，得到双轴拉伸SAN/BN复合材料，待性能测试。

1.3　测试与表征

1.3.1　热重分析

在程序控温条件下，以3 ℃/min的升温速率从室温升至800 ℃，记录SAN/BN复合材料质量随温度的变化曲线，用以表征复合材料的热分解行为。

1.3.2　扫描电子显微镜表征

在液氮环境中低温脆断处理SAN/BN复合材料，使用扫描电子显微镜在15 kV的加速电压下对样品的断面形貌进行观察与分析。

1.3.3　X射线粉末衍射

采用配备波长λ=0.154 nm Cu Kα辐射源的X射线衍射仪，在反射模式下以5°~80°的扫描范围和3 (°)/min的扫描速率，对SAN/BN复合材料中h-BN的取向程度进行表征。

1.3.4　声传输损失测试

根据ASTM E1050标准，使用四麦克风阻抗管对SAN/BN复合材料进行声传输损失测试。测试样品直径为30 mm，厚度为1.1 mm。每个样品进3次测试，结果以1/6倍频程带宽值形式呈现(1200~5600 Hz)。隔声性能通过STL进行表征，各样品的平均传声损失(STL)值以各频率点隔声性能的算术平均值表示，其计算公式如下：

$$\mathrm{STL}=10\lg\left(1/\tau\right) \tag{1}$$

式中，τ为透过材料的声能透射系数。

1.3.5　动态力学性能测试

采用动态力学分析仪的拉伸模式，在频率1 Hz、升温速率3 ℃/min的条件下从30 ℃扫描至160 ℃，测试SAN/BN复合材料的动态力学性能。

2　结果与讨论

2.1　SAN/BN复合材料的热学性能

采用热重分析仪对纯SAN、h-BN以及不同h-BN添加量的SAN/BN复合材料进行热稳定性分析，结果如图1所示。对比各组分热重曲线，纯SAN材料于374.2 ℃发生热分解，449.2 ℃时质量损失趋于完全，700 ℃时残余质量趋近于0；h-BN为1 wt%时，最终残炭率约1.8 %；当h-BN达到10 wt%时，复合材料的起始分解温度向高温方向偏移、最大失重速率降低，700 ℃时残余质量为12.1%。上述结果表明，h-BN能够有效提升SAN的热稳定性，且提升效果随填料含量的增加而愈加显著，残炭质量与h-BN填料含量呈正向关联，说明h-BN在SAN基体中发挥了物理屏障作用，一定程度上能促进成炭过程，提升SAN基体的高温热稳定性。

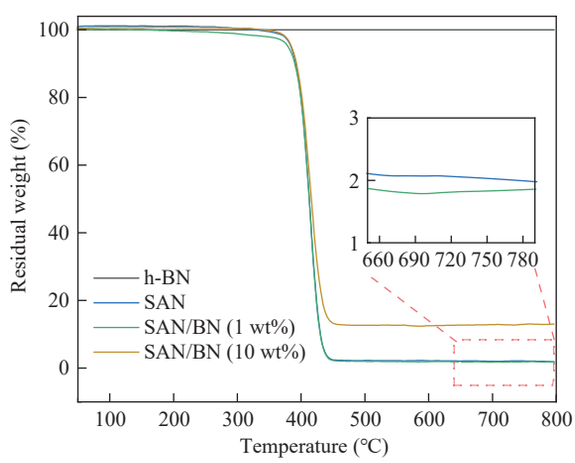

图 1　h-BN、SAN 及 SAN/BN 复合材料热重曲线

Figure 1　TGA curves of h-BN, SAN and SAN/BN composite materials

2.2　SAN/BN复合材料隔声性能分析

隔声的基本原理是利用材料在声波传播路径上进行阻隔，从而降低声能传递。在隔声性能分析中，STL被视为评估隔音效果的关键定量参数[18]。双轴拉伸对不同h-BN含量下SAN/BN复合材料隔声性能的影响如图2所示。声传输损失曲线(图2a)显示，在中低频段(1000~3000 Hz)，SAN/BN复合材料的STL值呈现出明显的波动特征；声传输损失曲线(图2c)显示，双轴拉伸SAN/BN复合材料的STL曲线表现为“V”形，在

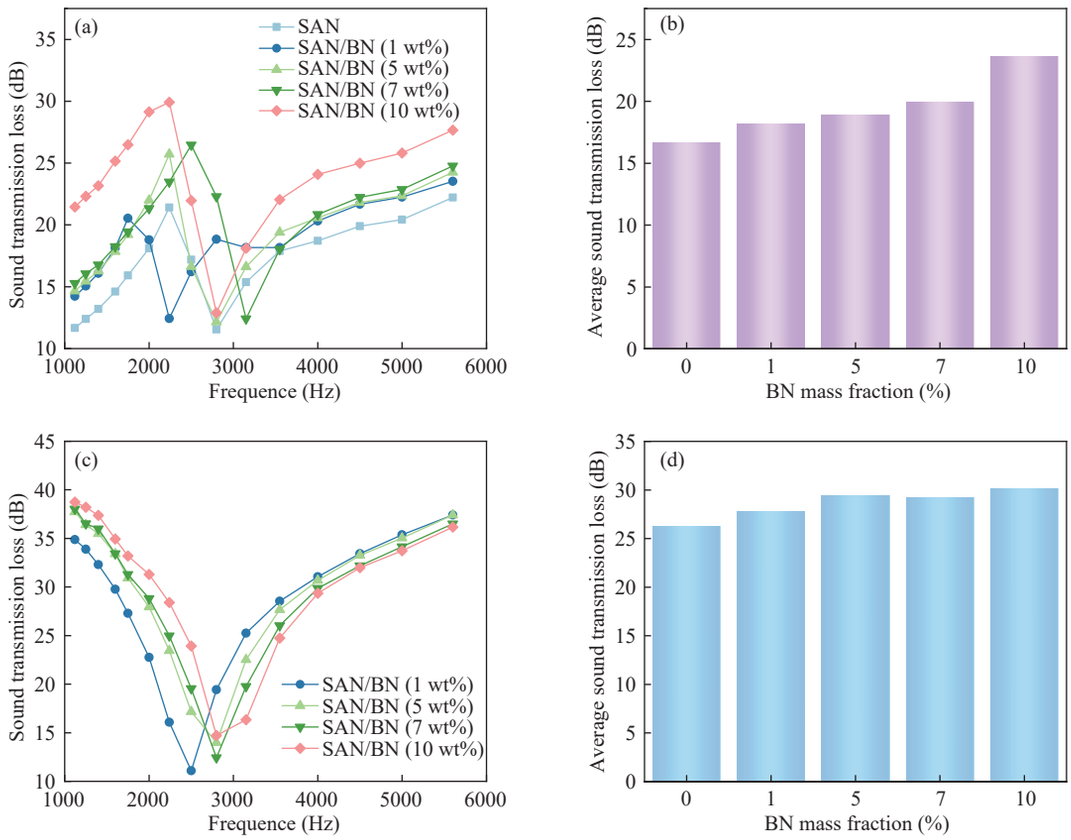

图 2 SAN/BN 及双轴拉伸 SAN/BN 隔声性能：(a，c)传声损失；(b，d)平均传声损失

Figure 2 Sound insulation performance of SAN/BN and biaxially drawn SAN/BN: (a, c) STL; (b, d) Average STL

2500~3000 Hz频率范围内STL呈现谷值，随后随频率升高而持续上升，但在整个测试频段内，双轴拉伸SAN/BN复合材料的STL值均显著高于同h-BN含量下仅热压成型SAN/BN复合材料的STL值，尤其在高频段优势更为明显。图2(b)为仅热压SAN/BN复合材料平均声传输损失图，图中可以看出，SAN/BN复合材料的平均STL随h-BN含量增加呈线性增加，当h-BN为10 wt%时，SAN/BN复合材料的平均STL为23.68 dB，较纯SAN的STL值16.70 dB提升率达到41.8%；图2(d)为双轴拉伸SAN/BN复合材料的平均声传输损失图，双轴拉伸SAN/BN复合材料的平均STL随h-BN含量增加而提高，从纯SAN的26.32 dB提升至h-BN为10 wt%时的30.21 dB，整体较仅热压SAN/BN的STL进一步提升。

研究结果表明，h-BN的引入与双轴拉伸处理均能够显著提升SAN基体的声学性能，主要归因于两个因素：首先，h-BN的引入增强了SAN基体的刚度，一定程度上提高了复合材料对声波的反射率；其次，通过双轴拉伸工艺，h-BN片层沿垂直于声波传播方向发生取向排列，进一步优化了复合材料对声波的反射效果，作用机制如图3所示。

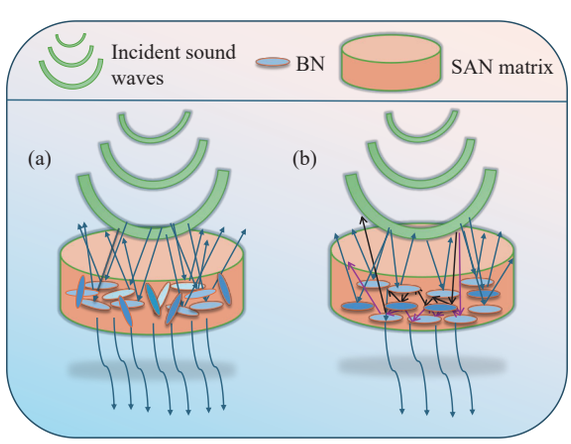

图 3 声波传播路径耗散机制分析：(a) SAN/BN，(b)双轴拉伸 SAN/BN

Figure 3 Dissipation mechanism analysis of sound wave propagation path: (a) SAN/BN, (b) bia-xially drawn SAN/BN

图2 SAN/BN复合材料的STL曲线中，共振峰与谷值主要出现在2000~3500 Hz的频率范围内。通过图3对声波传播路径耗散机制的分析，

共振峰的形成可归因于h-BN颗粒在SAN基体中的随机分散，其尺寸与形貌分布的不均匀性可诱发局部共振现象，进而导致能量耗散增强与反射系数上升[19]。同时，h-BN在基体中可能形成特定的共振结构，随着填料含量的增加，填料间距离的减小会导致材料刚度发生变化，从而出现共振谷。此外，基于匹配效应，填料的引入亦会显著增加界面数量。因此，填料-基体界面在声波和振动作用下通过摩擦和滑动消耗能量，阻尼效果增强，且随着填料含量的增加，共振谷特征逐渐减弱。

2.3　SAN/BN复合材料微观形貌分析

图4为SAN/BN复合材料断面微观形貌的SEM图像。由从图4(a)和4(b)可以看出，SAN/BN复合材料呈现典型的层状堆叠形貌，BN片层以“砖–泥”结构分散于SAN基体中，当BN从5 wt%增至10 wt%时，填料片层堆叠更为致密，片层间间隙显著减小，表明高含量BN片层更易形成连续层状网络。从图4(c)和4(d)可以看出，双轴拉伸SAN/BN复合材料片层沿拉伸方向高度取向，层间排列更规整，形成明显的“层状定向结构”，对比图4(a)和4(b)可知，双轴拉伸后片层间间隙经拉伸流场压实，孔隙率降低，复合材料整体更为致密。结果表明，双轴拉伸不仅诱导BN片层取向排列，还优化了基体与填料间的界面结合。

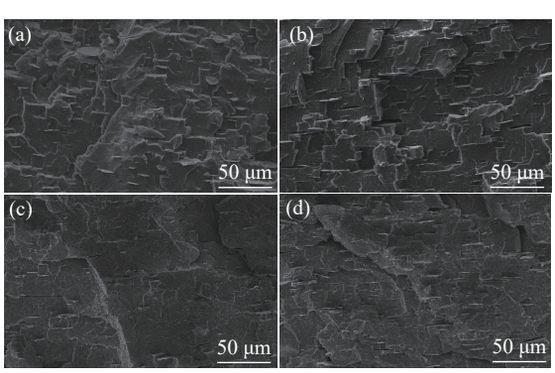

图4　复合材料SEM形貌：(a) SAN/BN (5 wt%)，(b) SAN/BN (10 wt%)，(c)双轴拉伸SAN/BN (5 wt%)，(d)双轴拉伸SAN/BN (10 wt%)

Figure 4　SEM images of the composites: (a) SAN/BN (5 wt%), (b) SAN/BN (10 wt%), (c) biaxially stretched SAN/BN (5 wt%), (d) biaxially stretched SAN/BN (10 wt%)

2.4　SAN/BN复合材料XRD分析

SAN/BN复合材料的X射线衍射图谱如图5所示。仅热压SAN/BN复合材料及双轴拉伸SAN/BN复合材料两组XRD谱图均在2θ=26.7°附近观察到h-BN的(002)晶面特征衍射峰，在55°~60°范围内观察到h-BN的(100)晶面弱衍射信号。随着h-BN从1 wt%增至10 wt%，h-BN (002)衍射峰的强度显著增强，表明h-BN在SAN基体中具有较好的分散性。h-BN呈现出典型的层状结构，其平行与垂直方向分别对应于(002)和(100)晶面的衍射峰[20]，XRD分析可用于表征h-BN在SAN基体中的取向程度。通过对比表1中双轴拉伸前后(002)和(100)衍射峰的强度比值[$R = I(002)/I(100)$]，能够定量表征h-BN片层在SAN基体中的取向排列情况，其中R值越高，表明h-BN片层沿平面方向的取向程度越高[21]。结果显示，双轴拉伸后复合材料的R_2值较R_1值显著提升，说明双轴拉伸过程能够有效诱导h-BN片层发生水平取向，且XRD分析结果与SEM观察结果一致。

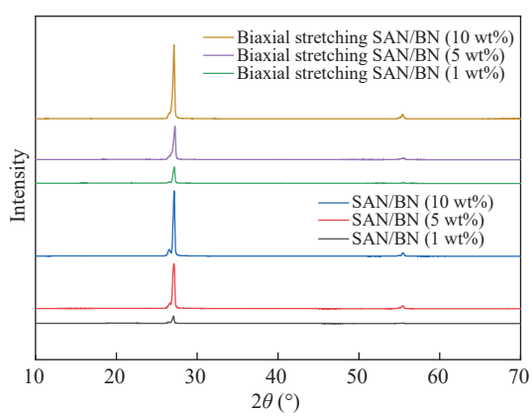

图5　SAN/BN的XRD图谱

Figure 5　XRD patterns of SAN/BN

表1　SAN及SAN/BN复合材料中$I(002)$与$I(100)$的比值

Table 1　Ratio of $I(002)/I(100)$ for SAN and SAN/BN composites

BN质量分数	SAN/BN $R_1(I(002)/I(100))$	双轴拉伸SAN/BN $R_2(I(002)/I(100))$	R[a]
1 wt%	89.29	135.04	1.51
5 wt%	335.84	347.25	1.03
10 wt%	485.06	621.80	1.28

[a] $R = R_2/R_1$

2.5　SAN/BN复合材料动态力学性能分析

采用动态力学分析法对SAN、SAN/BN复合材料的储能模量(E')与玻璃化转变温度(T_g)进行表征，结果如图6(a)所示。在玻璃态区域(温度低于100 ℃)，SAN/BN复合材料的储能模量随h-BN填料含量的增加而呈现上升趋势。其中，h-BN为

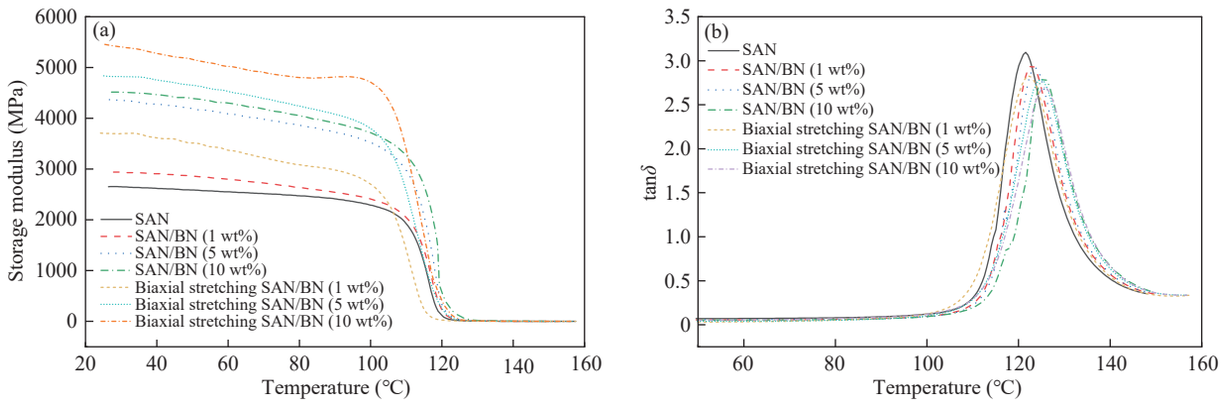

图 6 SAN 及 SAN/BN 的 DMA 图：(a)储能模量随温度的变化关系；(b)动态力学分析曲线

Figure 6 DMA curves of SAN and SAN/BN: (a) Storage modulus as a function of temperature; (b) Dynamic mechanical analysis curves

10 wt%的复合材料展现出最高的储能模量，而纯SAN的储能模量最低，这归因于刚性h-BN填料的引入有效增强了SAN基体的荷载传递能力。当温度上升至玻璃化转变区域(100~120 ℃)时，所有样品的储能模量均出现急剧下降。进入高弹态后，模量进一步降低并逐渐趋近于0。通过对比不同处理条件下复合材料的模量曲线可知，在相同h-BN含量下，经双轴拉伸处理的SAN/BN复合材料在玻璃态下的储能模量得到显著提升。具体而言，当h-BN均为10 wt%时，双轴拉伸处理后复合材料的储能模量约为5363 MPa，相较于仅经过热压处理的样品(4502 MPa)提升了约19%。这表明，双轴拉伸工艺在促使h-BN填料沿特定方向取向排列的同时，还有效提升了复合材料的刚性及热稳定性。

损耗因子(tanδ)峰值对应于SAN的玻璃化转变温度(T_g)，如图6(b)所示，纯SAN的T_g为121.6 ℃；加入h-BN填料后，T_g向高温区发生轻微偏移(h-BN为10 wt%时对应125.6 ℃)，同时峰值高度降低，结果表明h-BN填料对SAN分子链的运动起到限制作用，能够提升材料的热稳定性。对比曲线峰值可发现，经双轴拉伸处理后，tanδ峰值进一步向高温方向移动(h-BN为10 wt%时对应126.1 ℃)，且峰值宽度增加、高度下降。由此可见，拉伸诱导分子链沿拉伸方向取向，促进其规整有序排列，链段运动所受约束程度进一步增加，材料的综合性能得到提升。

3 结论

采用熔融共混–热压工艺制备了系列不同填料含量的SAN/BN复合材料，并进一步通过双轴拉伸工艺实现h-BN片层在SAN基体中的定向排列。热重分析结果表明，引入h-BN填料可有效提升SAN基体的热稳定性，且随着填料含量增加，材料的起始分解温度升高，最大失重速率降低。SEM与XRD分析结果相互印证：双轴拉伸处理诱导h-BN片层沿拉伸方向取向，在SAN基体中形成规整的“层状定向结构”。动态力学分析结果表明，h-BN填料的引入导致SAN基体的玻璃化转变温度向高温方向移动，损耗因子峰宽增大、峰值降低，材料的综合力学性能及热稳定性均增强。

声传输损失测试结果表明，SAN/BN复合材料的隔声性能与h-BN填料含量呈正相关关系。当h-BN质量分数为10 wt%时，SAN/BN复合材料的平均STL为23.68 dB，较纯SAN的16.70 dB提升约41.8%。双轴拉伸处理后，复合材料的隔声性能得到进一步增强，h-BN质量分数为10 wt%时，双轴拉伸处理的SAN/BN复合材料平均STL值为30.21 dB，较纯SAN提升80.9%，较仅热压处理的SAN/BN复合材料提升约27.6%。

参考文献

1 Wang, W. K.; Ma, H.; Wang, C. The impact of non-acoustic factors on Chinese community response to noise: a systematic review. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, **2025**, 22(4), 651.

2 Xu, Z. Y.; Hu, R.; Su, H. R.; Wang, Z. X. The hidden cost of urban noise: spatiotemporal heterogeneity, environmental burden, and economic valuation across major Chinese cities. *Environ. Monit. Assess.*, **2026**, 198(5), 487.

3 Razai, M. S.; King, E.; Majeed, A.; James, P. The impact of noise pollution on health. *Bmj*, **2025**, 391, e081193.

4 梁李斯，郭文龙，张宇，李林波，杜金晶，刘漫博，臧旭媛. 新型吸声材料及吸声模型研究进展. 功能材料, **2020**, 51(5), 5013–5019.

5 Duan, Y. Y.; Chen, X. Y.; Xia, H. Y.; Liu, Y. Y.; You, F.; Jiang, X. L.; Ren, L.; Zhou, D. F. Fabrication, structural regulation and future applications of acoustic polymer materials: A review. *Appl. Mater. Today*, **2025**, 44, 102709.

6 Arjunan, A.; Baroutaji, A.; Robinson, J.; Vance, A.; Arafat, A. Acoustic meta-materials for sound absorption and insulation in buildings. *Build. Environ.*, **2024**, 251, 111250.

7 Tang, X. N. Progress on the sound absorption of viscoelastic damping porous polymer composites. *Macromol. Rapid Commun.*, **2025**, 46(2), 2400646.

8 Suresh, S.; Amal Raj, R. B.; Parol, M. A.; Gowd, E. B. Gradient pore-structured polymeric fibrous aerogels for effective low-frequency noise absorption. *ACS Appl. Polym. Mater.*, **2024**, 6(16), 9995–10005.

9 Yang, Y. L.; Liu, S. S.; Li, Y.; Gao, T.; Pan, Y. D.; Li, Y.; Jin, Y. B. Broadband low-frequency sound absorption of multifunctional composite metastructure. *Sci. China Technol. Sci.*, **2025**, 68(2), 1220206.

10 Meng, W. J.; Huang, Y.; Fu, Y. Q.; Wang, Z. F.; Zhi, C. Y. Polymer composites of boron nitride nanotubes and nanosheets. *J. Mater. Chem. C*, **2014**, 2(47), 10049–10061.

11 Orikasa, K.; Benedetti, L.; Chu, S. H.; Dolmetsch, T.; Jimenez, A.; John, D.; Smith, T.; Thomas, T.; Boesl, B.; Park, C.; Agarwal, A. The shape effect: influence of 1D and 2D boron nitride nanostructures on the radiation shielding, thermal, and damping properties of high-temperature epoxy composites. *Compos. Sci. Technol.*, **2025**, 261, 110995.

12 Kumar, A.; Seelaboyina, R.; Jana, S.; Laha, T.; Keshri, A. K. Development of macroporous silicone rubber composites by internal emulsion templating for acoustic applications. *J. Polym. Res.*, **2024**, 31(3), 78.

13 Rasul, M. G.; Kiziltas, A.; Arfaei, B.; Shahbazian-Yassar, R. 2D boron nitride nanosheets for polymer composite materials. *npj 2D Mater. Appl.*, **2021**, 5, 56.

14 Jia, L. C.; Liang, Y.; Meng, F. S.; Wang, Z. H.; Zhang, G. J.; Wang, R. X.; He, C. D.; Yang, Y. H.; Cui, J. G.; Zhang, W. D. Research on acoustic impedance matching method of CMUT sensor based on PDMS/BN particles. *IEEE Sens. J.*, **2024**, 24(15), 24622–24629.

15 张佳佳，张晓朦，李姜，郭少云. 聚丙烯/蒙脱土和聚丙烯/石墨烯交替多层材料的结构与气体阻隔性能. 高分子材料科学与工程, **2017**, 33(9), 35–38.

16 Chen, X. Y.; Xiang, D.; Zhou, Z. X.; Wu, Y. P.; Li, H.; Zhao, C. X.; Li, Y. T. Biaxial stretching of polymer nanocomposites: a mini-review. *Front. Mater.*, **2021**, 8, 725422.

17 Wang, X. G.; Li, X.; Cui, L. N.; Liu, Y. J.; Fan, S. H. Improvement of gas barrier properties for biodegradable poly(butylene adipate-co-terephthalate) nanocomposites with MXene nanosheets *via* biaxial stretching. *Polymers*, **2022**, 14(3), 480.

18 Zhang, G. S.; Zheng, H.; Mi, Y. Z.; Li, F. C. Soundbox-based sound insulation measurement of composite panels with viscoelastic damping. *Int. J. Mech. Sci.*, **2024**, 283, 109663.

19 胥强荣, 沈承, 韩峰, 卢天健. 一种准零刚度声学超材料板的低频宽频带隔声行为. 物理学报, **2021**, 70(24), 157–168.

20 Huang, J. Z.; Songfeng, E.; Li, J. Y.; Jia, F. F.; Ma, Q.; Hua, L.; Lu, Z. Q. Ball-milling exfoliation of hexagonal boron nitride in viscous hydroxyethyl cellulose for producing nanosheet films as thermal interface materials. *ACS Appl. Nano Mater.*, **2021**, 4(12), 13167–13175.

21 Zhu, K. L.; Li, M. S.; Liu, D. X.; Jiang, X. L.; You, F.; Duan, J. Y.; Zhao, P. Remarkably enhanced the sound insulation properties of polyvinyl chloride *via* simultaneously using polymethyl methacrylate and functionalized boron nitride nanosheets. *Mater. Today Chem.*, **2025**, 48, 102967.