http://pmse.scu.edu.cn

二维纳米材料在聚合物中的阻燃机理与多功能协同应用

毕 雪, 张泽祺, 宋昆朋, 李佳乐, 潘也唐, 何吉宇, 杨荣杰
(北京理工大学 材料学院, 北京 100081)

摘要:二维纳米材料因其独特的物理化学特性,在阻燃聚合物领域展现出前所未有的潜力。文中系统综述了石墨烯、二维过渡金属碳氮化物、六方氮化硼、二维金属有机框架及层状双氢氧化物等典型二维材料在聚合物基体中的阻燃机理,并综述了其对材料力学性能的影响及其多功能协同效应。通过分析二维材料的结构特性与阻燃行为的构效关系,揭示了其在物理屏障构建、催化成炭、自由基淬灭等方面的独特作用机制,进一步讨论了其在复杂应用场景中的界面调控策略。最后,从热管理、环境耐受性、智能响应及电磁功能与阻燃性能集成等方面概述了二维材料在阻燃多功能材料的研究进展和发展潜力。

关键词:二维材料;聚合物阻燃;阻燃性能;阻燃机理;力学性能
中图分类号:TB383 **文献识别码:**A **文章编号:**1000-7555(2026)03-0180-11

聚合物材料因其轻质、易加工及多功能特性,在航空航天、新能源装备、智能电子等高端领域占据不可替代的地位。然而,其本征易燃性导致材料在高温或明火环境中易发生剧烈燃烧并释放有毒烟雾,严重威胁人员安全与生态环境,极大限制了其在极端工况下的工程化应用[1~3]。高分子材料的易燃性是制约其高端化应用的核心挑战之一。传统阻燃剂虽能通过物理隔离或化学抑制延缓燃烧过程,但其环境毒性、力学性能劣化及不可回收等问题日益凸显[4,5]。尤其在“双碳”目标与循环经济背景下,开发兼具高效阻燃、环境兼容及力学稳定的新型阻燃体系迫在眉睫。

近年来,以石墨烯、二维过渡金属碳氮化物(MXene)、六方氮化硼(h-BN)为代表的二维纳米材料,凭借其原子级厚度、超高比表面积及可调控的表面化学特性,为阻燃聚合物的设计提供了全新视角。这类材料不仅突破了传统阻燃技术单一作用模式的局限,更通过纳米限域效应、界面协同作用及多尺度结构设计,实现了阻燃性能、力学强度与环境耐受性的多维协同提升。还可通过表面官能团或缺陷位点实现催化与吸附功能的协同,突破传统阻燃技术的性能提升瓶颈。例如,石墨烯的二维蜂窝状晶格可通过层间滑动形成致密炭化屏障,反射热辐射并阻隔氧气扩散[6,7];MXene 表面丰富的含氧官能团可催化聚合物交联成炭,同时通过类金属电子结构促进毒性气体的深度氧化[8,9];h-BN 凭借高热稳定性与各向异性热传导特性,在燃烧初期快速耗散热量以延缓热解进程[10~12]。此外,二维金属有机框架(MOFs)与共价有机框架(COFs)的多孔结构为热解产物的吸附与催化转化提供了理想平台,其可设计的孔道系统与活性位点分布进一步强化了阻燃效率与选择性抑烟能力[5,13~15]。

本文从火灾安全和力学性能等角度,系统剖析了二维纳米材料的阻燃机制与性能优化路径,为相

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2026.0049
收稿日期: 2025-04-10
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(22375023); 重庆市自然科学基金资助项目(CSTB2024NSCQ-MSX0452); 河北省自然科学基金资助项目(E2024105006); 北京理工大学研究生科研水平和创新能力提升专项计划(2024YCXY043)
通讯联系人: 何吉宇, 主要从事阻燃、高温烧蚀材料及特种功能材料的研究, E-mail: hejiyu@bit.edu.cn;
杨荣杰, 主要从事高性能固体推进剂、阻燃材料和功能高分子材料的研究, E-mail: yrj@bit.edu.cn

关领域的研究提供了系统性参考。

1　二维纳米材料的阻燃作用机制

二维纳米材料的阻燃性能源于其独特的物理化学特性以及在聚合物燃烧过程中的多尺度相互作用机制。不同种类的二维材料因其组成、结构及表面性质的差异,阻燃作用机制呈现出多样化的功能路径[16]。以下从材料本征特性出发,系统解析了石墨烯、MXene、h-BN、MOFs 及层状双氢氧化物(LDH)在聚合物阻燃中的核心作用机制[17~19]。

1.1　石墨烯:物理屏障与自由基猝灭效应

石墨烯的二维蜂窝状晶格结构赋予其超高的面内热导率与力学强度。在聚合物燃烧过程中,石墨烯片层通过 π-π 相互作用迅速迁移至材料表面,形成连续致密的炭化屏障。这种物理屏障不仅能通过反射红外辐射降低热反馈强度,还能有效阻隔挥发性热解产物的逸出。更为重要的是,石墨烯的表面缺陷(如空位、褶皱)可作为活性位点捕获燃烧链式反应中的自由基(如·H,·OH)。其离域 π 电子体系能够通过电荷转移机制中和自由基的未配对电子,从而抑制气相燃烧反应的传播。此外,石墨烯的高比表面积可吸附熔融聚合物分子,延缓其流动和滴落行为,进一步降低二次引燃风险[20]。

Zhang 等[21]采用简单的两步法设计并合成了一种新型的三元杂化纳米片,以提高聚乳酸(PLA)的阻燃性能。他们使用“接枝”和共沉淀法构建了一种基于苯基次膦酸、ZIF-8 和氧化石墨烯薄片的新型三元杂化阻燃剂(GPZ)。Fig.1(a)和 Fig.1(b)分别为 GPZ 的扫描电镜(SEM)和透射电镜(TEM)图像,证实了层状杂化材料的成功合成。通过这种三元杂化策略,制备的 GPZ 可以综合更多的阻燃元素,从而达到高效阻燃的目的。

结果表明,与纯 PLA 相比,当 GPZ 的质量分数为 2.0% 时,PLA 复合材料的峰值热释放速率(pHRR)降低了 39.5%(Fig.2)。极限氧指数(LOI)提高到 27.0%。采用热重-红外(TG-IR)分析了 PLA 复合材料热解产物的组成和强度。结果表明,GPZ 的加入抑制了热解产物的挥发。

1.2　MXene:表面功能可调性与催化成炭作用

MXene 的阻燃机制与其表面丰富的官能团

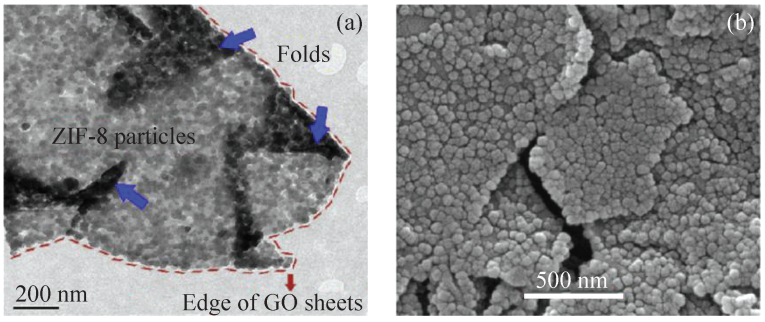


Fig. 1　(a) TEM and (b) SEM image of GPZ[21]

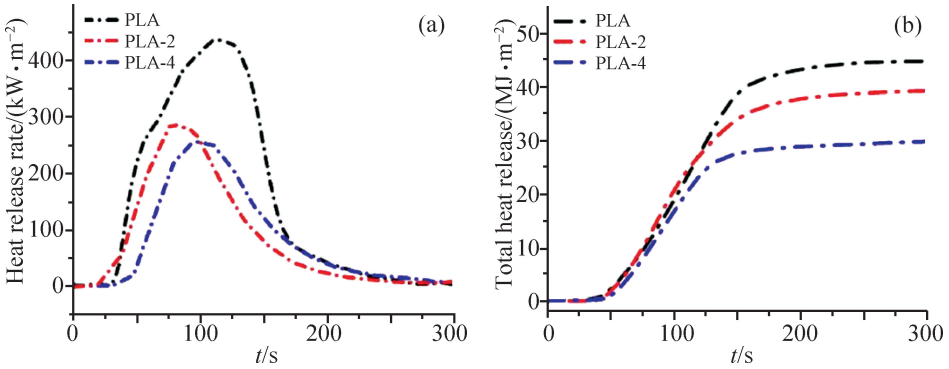


Fig. 2　(a) Heat release rate (HRR) and (b) total heat release (THR) curves of PLA and PLA composites[21]

(—OH，—F)及类金属导电性密切相关。在热解初期，MXene 表面的羟基基团可促进聚合物分子链脱水交联，加速致密炭层的形成。其类金属电子结构能够降低聚合物热解产物的氧化活化能，催化不完全燃烧产物(如 CO、醛类)向 CO_2 和水转化。MXene 的层间限域效应还可约束热解气体的扩散，延长其在高温区的停留时间以促进充分氧化。值得注意的是，MXene 表面的极性基团可通过氢键作用增强其与磷氮阻燃剂之间的协同效应，在凝聚相中构建磷-氮-钛多元素协同的阻燃网络，从而显著提升炭层的抗氧化性和热稳定性[22]。

Zhang 等[23]提出了一种具有热敏性火灾报警响应和火焰诱导自切割性能的阻燃纸。其由形状记忆热塑性聚氨酯(SMPU)和 MXene 通过简单的静电纺丝和真空过滤工艺制备而成，可用作火灾早期警报。通过明火测试评估 SMPU/MXene 纸在实际火灾环境中的潜在阻燃性能。与火焰接触后，SMPU 纸(20 mm×15 mm)立即点燃并迅速收缩，随后在 2 s 内被快速传播的火焰吞噬，并在 6 s 内燃烧殆尽，无残留，并严重滴落。相比之下，SMPU/MXene 纸(20 mm×15 mm)表现出自熄行为，并保持其原始形状，没有熔融滴落(Fig.3)。

Bi 等[24]将 MXene 与 ZIF-67 结合，在体系中引入一维碳化硅(SiC)，轻松实现了 MXene 的剥离改性。之后，根据前期工作在 ZIF-67 表面原位生长聚苯胺(PANI)，获得了单层/少层的二维杂化材料(MXene@SiC@PANI)，如 Fig.4 所示。其对热塑性聚氨酯(TPU)具有良好的降低火灾风险的效果。与纯 TPU 相比，TPU 复合材料的 pHRR 和总热释放量(THR)分别降低了 71.4% 和 34.6%。其中二维分层结构产生的“迷宫效应”有效延长了热解气体的传输路径。燃烧过程中产生的 NH_3 等不可燃气体起到了

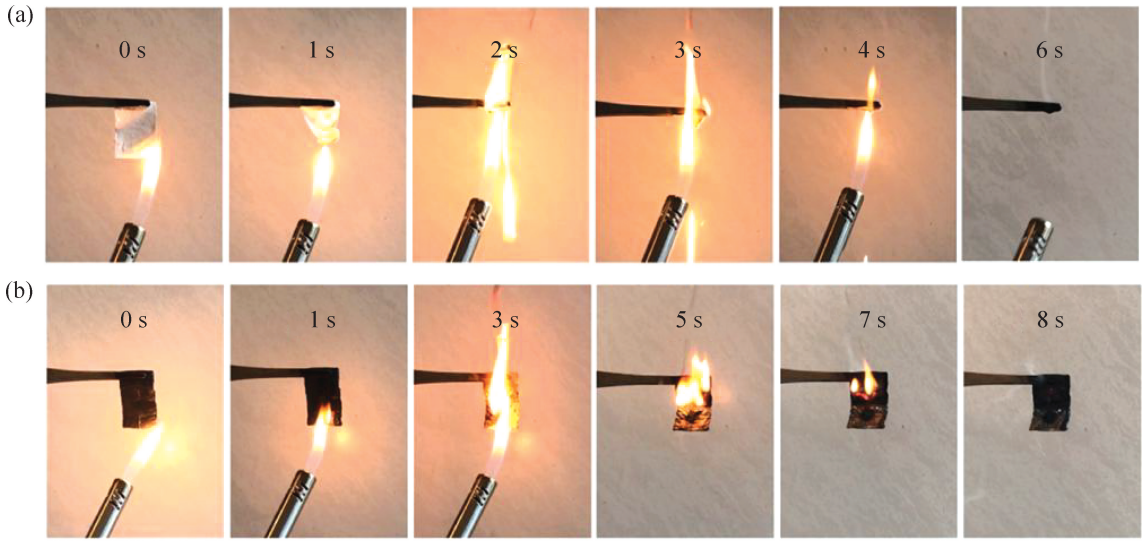


Fig. 3 Snapshots of the flame processes of (a) SMPU paper and (b) SMPU/MXene paper[23]

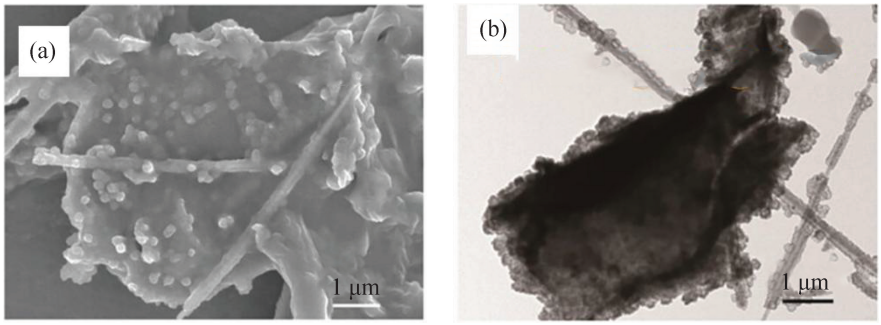


Fig. 4 (a) SEM image of MXene@SiC@ZIF; (b) TEM image of MXene@SiC@PANI[24]

稀释可燃气体的作用。此外,在凝聚相中,过渡金属元素的催化炭化和二维材料的物理屏障作用为 TPU 基体提供了坚固而致密的炭层。

1.3　h-BN:热稳定性与界面催化活性

h-BN 的类石墨烯结构和强共价键特性使其在高温环境中(>800 ℃)仍能维持结构完整性。其阻燃作用主要体现在 3 个方面,首先,h-BN 纳米片在燃烧过程中通过层间滑动形成具有各向异性热传导特性的屏障层,沿面内方向快速传导热量以降低局部温升,同时在垂直方向维持高热阻以抑制深层热解;其次,h-BN 表面暴露的硼、氮原子可作为路易斯酸-碱对,催化聚合物分子链的环化反应和芳构化过程,促进生成石墨化程度更高、热稳定性更强的炭层;最后,h-BN 的宽禁带特性使其能够吸收紫外辐射能量,抑制聚合物的光氧化降解,从而提升材料在长期户外使用中的阻燃耐久性[25]。

Zhang 等[26]在不牺牲力学性能的情况下,利用 BN 提高环氧树脂(EP)的阻燃性能。首先,使用生物基单宁酸辅助策略同步剥离改性 BN,然后利用 MOFs 衍生的蚀刻转换模式,在活化的 BN 表面引入了一种空间可调的层状 NiCo-LDH。添加质量分数 6%阻燃剂的 EP 复合材料达到了 UL-94 V-1 等级,pHRR 降低了 30.0%(Fig.5)。NiCo-LDH 通过界面炭化形成致密和连续的炭层结构,从而获得较好的阻燃性能。

1.4　二维 MOFs:多孔限域与金属催化效应

二维 MOFs(如 Zn-ZIF,Co-MOF)的阻燃性能源于其独特的孔道结构和金属-有机配位特性。其微孔结构(0.5~2 nm)可物理吸附热解产生的小分子气体(如烷烃、烯烃),延长其在燃烧区的停留时间并促进完全氧化。在高温热解过程中,MOFs 的有机配体炭化形成导电网络,而金属节点(如 Zn,Co)则转化为高分散的金属氧化物纳米颗粒。这些纳米颗粒不仅通过异相催化作用加速炭层的石墨化,其表面氧空位还可激活氧气分子生成活性氧物种(如 O^-,O_2^-),促进 CO 等毒性气体的深度氧化。此外,MOFs 的层状结构可通过插层作用抑制聚合物的熔融滴落,而其可调的孔径与表面化学为阻燃-抑烟功能的精准设计提供了可能[27]。

Hou 等[28]利用席夫碱基结构的有机配体成功合成了 Co-MOF 纳米片,并采用 9, 10-二氢-9-氧杂-10-磷菲-10-氧化物(DOPO)对 Co-MOF 进行改性,得到如 Fig.6 所示的 DOPO@Co-MOF 杂化填料,以进一步提高其阻燃效率。pHRR(27%)、峰值烟生成速率(56%)和总 CO 产率(20%)值的明显下降证实 PLA 复合材料的火安全性增强。层状 Co-MOF 能促进形成良好稳定的炭层,进一步阻挡热量的传递和分解产物的逸出。此外,热解生成的 CoO 可以促进 CO 催化氧化。

1.5　LDH:层状结构可调性与阻燃-抑烟协同效应

LDH 是一类应用前景广阔的阴离子化合物,在阻燃领域显示出巨大的潜力。LDH 的阻燃效果主要是源于其独特的层状结构和热响应行为。LDH 加热到一定温度时分解,包括层间水、羟基脱水和新相生成等步骤。这一过程会吸收大量的热量,有助于降低材料的表面温度。同时,LDH 层间的阴离子具有

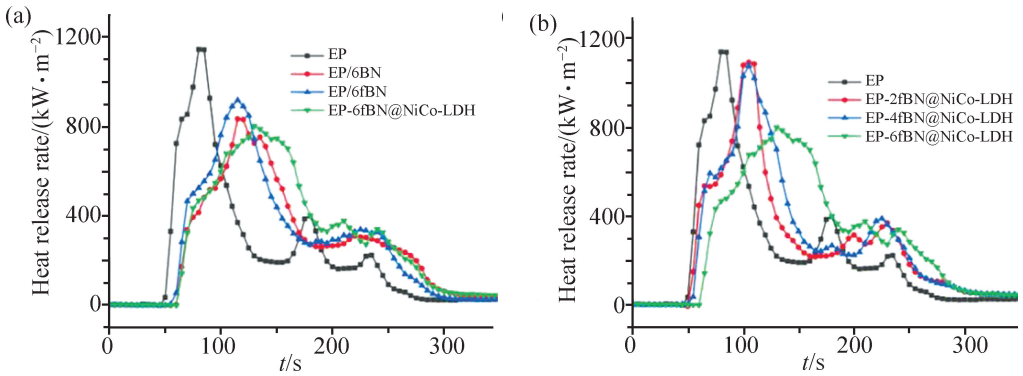


Fig. 5　(a) HRR curves of EP, EP/6BN, EP/6fBN and EP/6fBN@NiCo-LDH; (b) HRR curves of EP, EP/2fBN@NiCo-LDH, EP/4fBN@NiCo-LDH and EP/6fBN@NiCo-LDH[26]

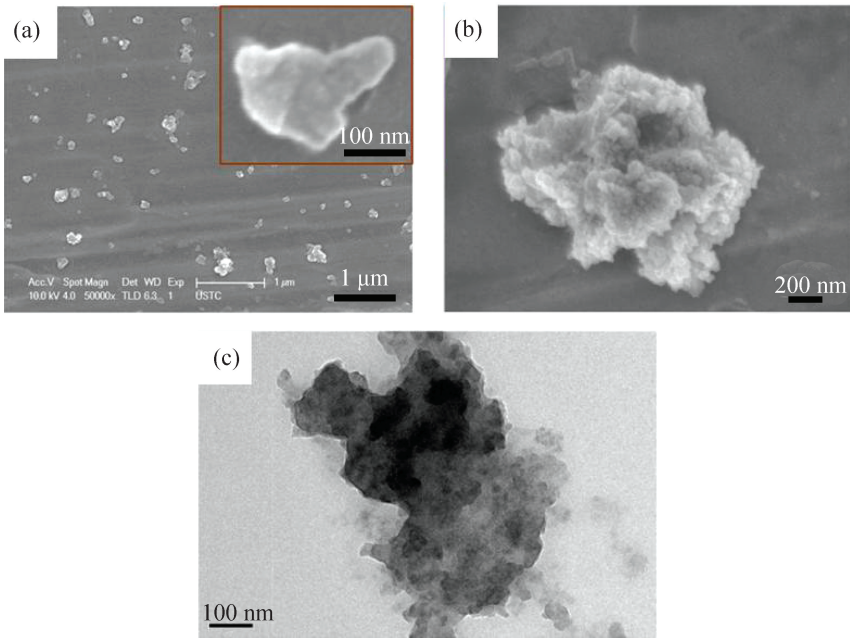


Fig. 6 (a) SEM images of layered Co-MOF, (b) SEM and (c) TEM images of DOPO@Co-MOF hybrids[28]

可互换性,通过引入功能离子可实现分子功能设计,从而进一步增强其阻燃性能。近年来,许多研究表明,改性后的 LDH 与高分子材料结合,可以显著提高材料的阻燃性能。通过有机插层改性,LDH 可以更有效地分散在聚合物基体中,提高材料的热稳定性和炭化效率,降低燃烧速率。此外,LDH 与其他阻燃剂的协同作用也表现出优异的阻燃效果,为开发高效环保的阻燃材料提供了新的思路。因此,研究 LDH 的阻燃潜力对阻燃材料的发展具有重要意义。

Song 等[29]采用简单的一锅法,分别以 ZIF-67 和尿素为模板和蚀刻剂,开发了一种独特的多蛋黄壳结构。其杂化材料由 2 种钴基异构体组成,即 Co-LDH 组装的纳米笼和由碱性碳酸钴组成的蛋黄。同时,将磷系阻燃剂磷酸三苯酯(TPP)引入内腔和通道,得到 m-CBC@LDH 纳米杂化阻燃剂(Fig.7)。

添加质量分数 5% m-CBC-P@LDH 的聚脲(PUA)复合材料 LOI 值提高到 22.6%,pHRR 和 THR 分别降低了 41.7% 和 20.6%(Fig.8)。m-CBC@LDH 可以将

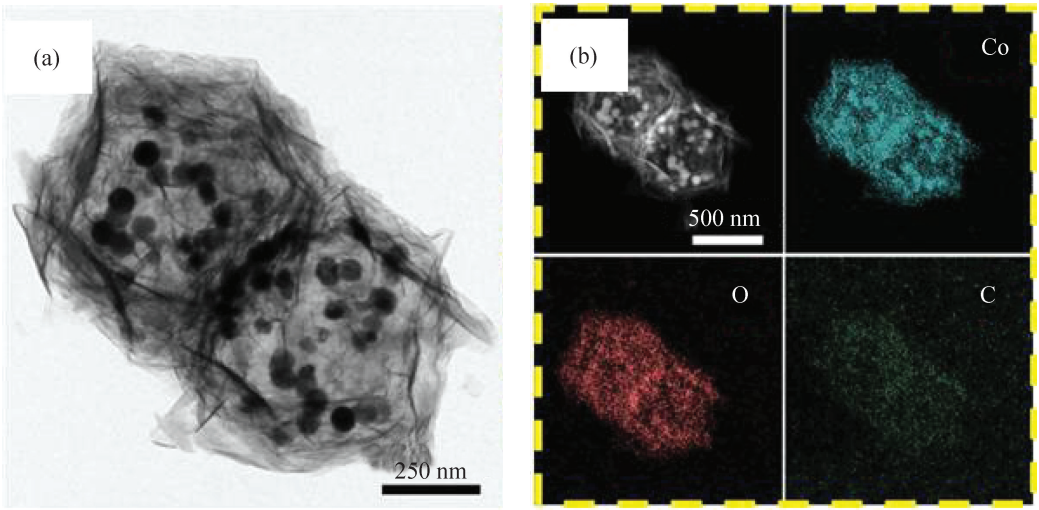


Fig. 7 (a) TEM image and (b) EDS elemental mapping of m-CBC@LDH[29]

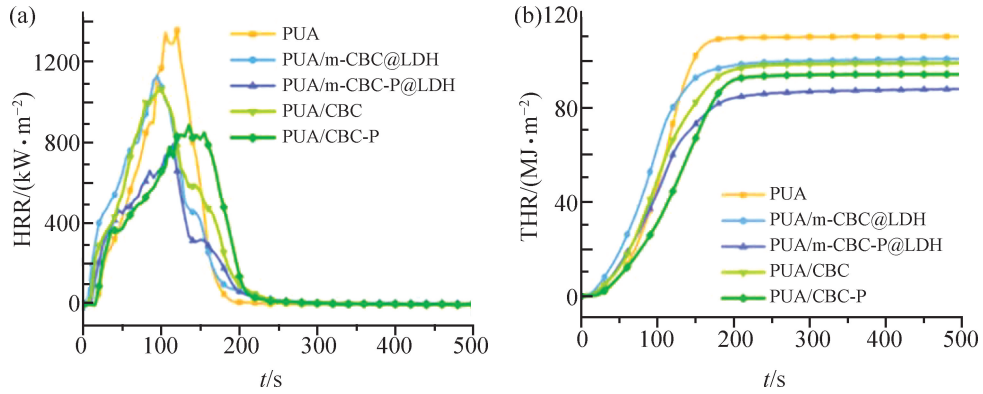


Fig. 8　(a) HRR and (b) THR curves of PUA and composites[29]

TPP 分子牢牢地锚定在其通道和空腔中,随着 m-CBC@LDH 骨架在高温坍塌,锚定的 TPP 会在短时间内迅速释放,从而通过多种阻燃机制实现协同阻燃。

此外,他们还利用 Co-LDH 作为牺牲模板和载体原位构建了有缺陷的 Co-LDH@ZIF-67(d-LDH@ZIF)异质结构。有效改善了 Co-LDH 低比表面积的缺陷,获得了具有阻燃功能的多孔液体(PLs-d-L@Z)。PUA 复合材料的 pHRR 降低了 40.4%,试样 2 次点火后可在 2 s 内自熄,产生的熔滴可带走火焰而不引燃脱脂棉,达到 UL-94 V-0 等级(Fig.9)[30]。

2　二维材料对聚合物力学性能的调控机制

阻燃性能的提升往往以牺牲力学性能为代价,而二维纳米材料为解决这一矛盾提供了新思路。其力学增强效应主要依赖于以下几个机制,首先,二维材料的高模量特性可有效传递并分散外部应力。h-BN 纳米片在环氧树脂中的定向排列可形成类“砖-泥”结构,通过片层滑动耗散能量,从而同步提高材料的刚性与韧性。

Jiang 等[31]通过单向冷冻技术制造了一种具有明确垂直排列的开放结构和可控壁厚度的 3D BN 框架(BNF),并用其改善了聚乙二醇(PEG)的力学性能。Fig.10(a~c)显示了 BNF/PEG 复合材料和纯 PEG 的力学性能。垂直排列结构的引入没有破坏 PEG 的力学性能,取而代之的是应力、弹性模量和韧性的明显改善。这归因于应力能够有效地传递到垂直排列的 BNF 上,从而避免了应力集中。因此,聚合物复合材料的力学性能具有很强的壁密度依赖性。通过控制壁厚,可以根据需求提升材料的力学性能。

其次,二维材料表面的化学官能团(如 MXene

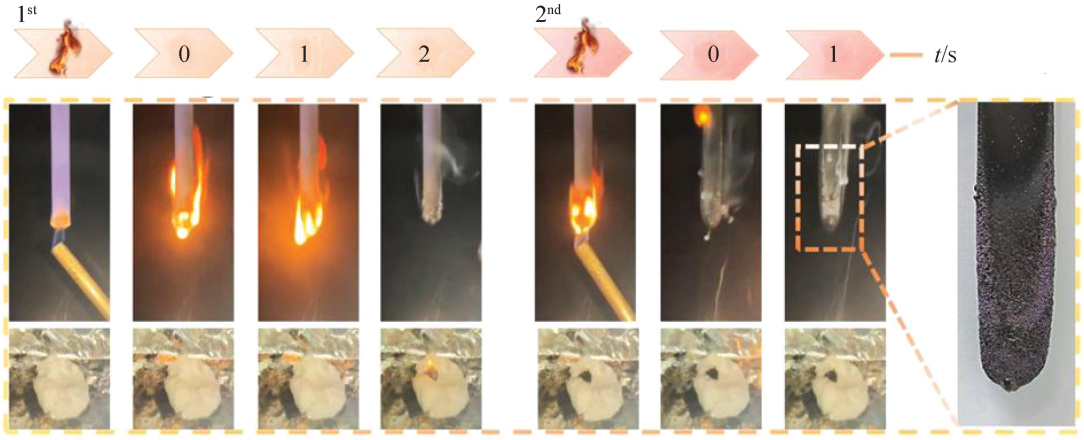


Fig. 9　Video screenshots of the PUA/PLs-d-L@Z-15 specimens in the UL-94 test[30]

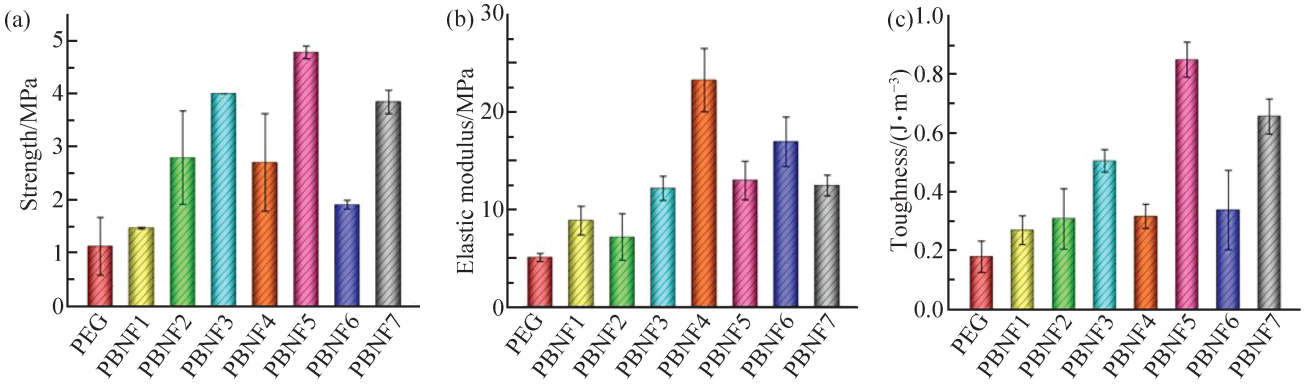


Fig. 10 (a) Strength, (b) elastic modulus and (c) toughness of PBNF composites with different wall densities[31]

的—OH,石墨烯的—COOH)可与聚合物基体形成强界面相互作用。这种界面结合不仅能抑制裂纹扩展,还能通过应力再分布缓解局部应力集中。然而,材料分散不均导致的应力集中仍是关键挑战。未经改性的石墨烯易在非极性聚合物(如聚乙烯)中发生团聚,形成力学薄弱点。为此,研究者开发了多种界面修饰策略,采用硅烷偶联剂功能化 MXene 表面可增强其与聚酰胺的相容性,利用 π-π 共轭作用将 COFs 锚定在聚苯乙烯分子链上,可实现纳米片的稳定分散。

考虑到 MXene 表面大量的—OH 基团,含有丰富酰胺键的 TPU 可以满足与 MXene 氢键的位点锚定。Jia 等[32]通过仿生方法获得了具有一维-二维分层结构的章鱼吸盘式 MXene@碳纳米管(M@CN)纳米杂化物,并制备了 TPU/M@CN-3 纳米复合材料。与纯 TPU 相比,复合材料的拉伸强度和断裂伸长率分别提高了 79.5% 和 113.5%,表明复合材料具有良好的弹性。Fig.11(a~c)显示了纳米复合材料内部结构横截面的 SEM 图像。未受力状态下,CNT-NH_2 随机分散在 MXene 纳米片上。当拉伸发生时,CNT-NH_2 表面的胺基与 TPU 基体的硬段形成氢键,将 TPU 链从弯曲状态拉直,从而固定了 TPU 分子链,避免了其被破坏,进而提高了 TPU 复合材料的拉伸强度和断裂伸长率。

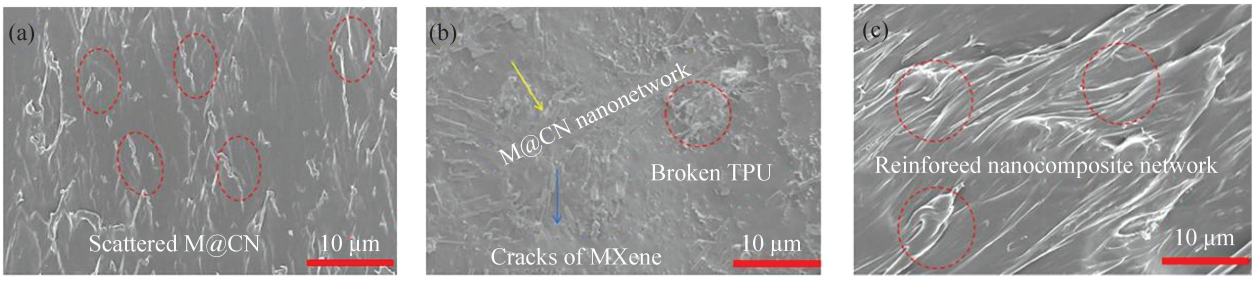


Fig. 11 (a) Cross-sectional SEM picture of TPU/M@CN-3; (b, c) inner structure of TPU/M@CN-3 after stretching damage[32]

Orikasa 等[33]通过冷冻干燥和真空辅助渗透开发了一种柔性二硫化钨泡沫-聚二甲基硅氧烷(PDMS)复合材料。不仅克服了聚合物基体中纳米材料的团聚倾向和沉降问题,还实现了独特的填料增强泡沫设计。结果表明,在 PDMS 中添加二硫化钨后,弹性模量比纯 PDMS 高 1.56 倍。

MXene 表面丰富的基团为构建 MXene 基分级结构纳米材料提供了巨大的潜力和便利。Lu 等[34]利用氢键相互作用,通过仿生方法在 MXene 纳米片上原位合成了羟基锡酸锶纳米棒(MSSO)。TPU-2.0MSSO 的拉伸强度和韧性分别提高了 46% 和 126%,并且在拉伸过程中表现出叶脉状的层次结构,断裂伸长率提高了 55%。总体而言,氢键和仿生结构的设计显著增强了 TPU 复合材料的力学性能。

此外,二维材料的多功能协同效应对力学性能具有深远影响。MOFs 衍生的多孔碳/金属氧化物异

质结构不仅能通过催化成炭提升阻燃性,其三维互联网络还可作为弹性骨架吸收冲击能量。这种“阻燃-增强”一体化设计为开发极端环境适用材料指明了方向。

3　二维阻燃体系的多功能化拓展

现代工程应用对材料性能的要求已从单一阻燃向多功能集成方向发展,二维纳米材料凭借其独特的物理化学特性及可设计性,为阻燃体系的功能拓展提供了可靠的解决方案。通过精准调控二维材料的界面特性与多尺度组装行为,研究者成功实现了阻燃性能与热管理、环境耐受性、智能响应及电磁功能的高度协同,有望推动阻燃材料从被动防护向主动调控转变。

3.1　各向异性导热设计及热管理应用

在电子器件微型化与高功率化趋势下,阻燃材料的热管理能力成为保障设备安全运行的关键。以 h-BN 与石墨烯为代表的二维材料,通过异质结构设计构建各向异性导热网络[35,36]。h-BN 的面内高导热性能够快速传递局部热点热量,避免热积累引发的热失控;而垂直方向的低导热特性则通过限制热量向基体深层扩散,维持局部热阻屏障,从而在阻燃与散热之间实现动态平衡。在环氧树脂基体中,h-BN/石墨烯复合体系通过取向排列形成梯度导热路径,既能在高温时通过快速导热延缓基体热分解,又能通过垂直方向的热阻效应抑制火焰蔓延。这种各向异性导热策略在 5G 通信基板、动力电池封装等场景中展现出独特优势,为高集成度电子设备的防火-散热一体化设计提供了新思路。

3.2　环境耐受性的动态修复与长效防护

复杂工况下的环境耐受性是阻燃材料工程化应用的核心挑战之一。MXene 材料因其表面自修复氧化层的独特性质,为这一难题提供了创新解决方案。在湿热或盐雾环境中,MXene 表面的部分氧化钛层可通过动态氧空位迁移机制实现微裂纹的自主修复[37]。这一过程不仅能够实现材料的物理屏障功能,同时原位生成的钛氧羟基化合物可通过路易斯酸催化作用,驱动燃烧过程中聚合物分子链的二次交联,从而显著提升炭层的抗氧化性与热稳定性。MXene/聚酰亚胺复合材料在 200 次热循环后几乎没有相变焓损失,具有良好的热稳定性和重复利用性,可以满足太阳能储能应用的要求[38]。良好的自修复特性显著延长了材料在海洋装备、户外电力设施等严苛环境中的服役寿命。

3.3　智能响应型阻燃体系的构建与应用

智能响应型阻燃体系通过感知外部刺激(如温度、应力、pH)实现功能的动态调控,代表了阻燃材料的前沿发展方向。例如,将竹纤维、羧甲基纤维素和石墨烯制成柔性薄膜,其薄膜可在接触火焰后迅速触发警报,即使在反复烧焦后响应仍然灵敏[39]。此外,由摩擦纳米发电机(TENG)构建的可穿戴设备已成为监测多种身体指标的新型工具。例如在火灾紧急情况下,实时监测消防员在火场中的各项身体机能参数,对于最大限度减少伤亡至关重要。得益于 TENG 传感器优异的耐热性,它能够在极端环境中稳定运行,从而为消防员提供有效的安全保障。一系列专为能量收集和高温传感而设计的柔性 TENG 成为可穿戴电子设备和高温人机交互的有前途的候选者[40]。此类智能材料在智能建筑、新能源汽车电池包等场景中也具有重要应用潜力。

3.4　电磁功能拓展与结构健康监测

二维材料的本征电磁特性为阻燃体系的功能集成开辟了新维度。通过将磷酸化 MXene 涂覆在聚丙烯(PP)纳米纤维织物上,并经过热压处理,可制备磷酸化 MXene/PP 复合材料。热压过程确保了 MXene 相和 PP 相之间形成互锁结构,同时保持了 MXene 导电网络的完整性,从而提高了复合材料的导电性。与纯 PP 相比,复合材料的热稳定性和阻燃性显著提升,并且在 8~12 GHz 的频率范围内表现出高导电性和良好的屏蔽性能。有望为复杂环境中工作的下一代电子设备提供可靠保护[41]。石墨烯/聚氨酯复合材料在低频段表现出良好的电磁屏蔽效果,且具有较好的阻燃性和良好的柔韧性[42]。此外,在航空复合材料中嵌入传感层,可通过阻抗谱分析无损检测结构完整性,同时其阻燃特性为极端工况下的安全防护提供了双重保障。

4　挑战与展望

尽管二维纳米材料在阻燃聚合物领域取得了显著进展,但仍有许多问题需要深入探索。首先,大规

模制备中的结构一致性控制仍然是一个瓶颈。溶液剥离法容易引入边缘缺陷,而化学气相沉积法则面临成本高和基底限制等问题。其次,复杂服役环境中的长效稳定性亟待提升。湿热循环、紫外老化等条件可能导致二维材料的层间剥离或表面氧化,从而引起性能衰减。未来的研究应聚焦于以下几个方面:发展原位表征技术,以揭示燃烧过程中二维材料的结构演化与界面动力学行为;借助机器学习优化材料设计与工艺参数,实现阻燃、力学和环境性能的多目标平衡;探索闭环回收工艺,通过选择性解聚实现二维材料与聚合物的高效分离与再生。此外,深度融合仿生学理念,设计具有自适应阻燃特性的智能复合材料,可能是下一代阻燃技术的发展方向。

参考文献:

[1] Li Q, Han Z, Song X, *et al*. Enhancing char formation of flame retardant epoxy composites: onigiri-like ZIF-67 modification with carboxymethyl β-cyclodextrin crosslinking[J]. Carbohydrate Polymers, 2024, 333: 121980.

[2] Zhang Z, Bi X, Zhang W, *et al*. A novel phosphorus/nitrogen-containing vinyl imidazolium ionic liquid for improving flame retardancy and mechanical properties of vinyl ester resin, and its carbon fiber composites[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2024, 180: 108092.

[3] Song X, Li Q, Han Z, *et al*. Synchronous modification of ZIF-67 with cyclomatrix polyphosphazene coating for efficient flame retardancy and mechanical reinforcement of epoxy resin[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2024, 667: 223-236.

[4] Song K, Bi X, Yu C, *et al*. Structure of metal-organic frameworks eco-modulated by acid-base balance toward biobased flame retardant in polyurea composites[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2024, 16: 15227-15241.

[5] Cao J, Chen S, Han Z, *et al*. Covalent metal-organic porous polymer on ZIF-67 realize anti-UV and highly stressed flame retardant epoxy composites[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 501: 157758.

[6] 刘江涛, 唐浩龙, 杨元峰, 等. 石墨烯气凝胶阻燃涤纶织物的构建及性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2022, 38(6): 79-86.
Liu J T, Tang H L, Yang Y F, *et al*. Construction and performance of graphene aerogel flame retardant polyester fabric[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2022, 38(6): 79-86.

[7] Dong L, Hu C, Song L, *et al*. A large-area, flexible, and flame-retardant graphene paper[J]. Advanced Functional Materials, 2016, 26: 1470-1476.

[8] 关玉, 王冬, 郭一凡, 等. MoS_2/MXene 阻燃气敏棉织物的制备及其性能[J]. 纺织学报, 2024, 45(12): 159-165.
Guan Y, Wang D, Guo Y F, *et al*. Preparation and properties of MoS_2/MXene gas-retardant cotton fabrics[J]. Journal of Textile Research, 2024, 45(12): 159-165.

[9] Wang N N, Wang H, Wang Y Y, *et al*. Robust, lightweight, hydrophobic, and fire-retarded polyimide/MXene aerogels for effective oil/water separation[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11: 40512-23.

[10] 林黎明, 王正洲. 阻燃功能化氮化硼杂化物的制备及其在环氧树脂中的性能[J]. 复合材料学报, 2025, 42(2): 737-746.
Lin L M, Wang Z Z. Preparation of flame retardant functionalized boron nitride hybrids and their properties in epoxy resins[J]. Journal of Composite Materials, 2025, 42(2): 737-746.

[11] Cai W, Mu X, Pan Y, *et al*. Facile fabrication of organically modified boron nitride nanosheets and its effect on the thermal stability, flame retardant, and mechanical properties of thermoplastic polyurethane[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2018, 29: 2545-2552.

[12] Cai W, Wang B, Liu L, *et al*. An operable platform towards functionalization of chemically inert boron nitride nanosheets for flame retardancy and toxic gas suppression of thermoplastic polyurethane[J]. Composites Part B: Engineering. 2019, 178: 107462.

[13] 杜栩烨, 林健, 杨宕莎, 等. MOF-74(Ni)@聚磷酸铵的制备及对环氧树脂阻燃性能的影响[J]. 高分子材料科学与工程, 2023, 39(6): 64-70.
Du X Y, Lin J, Yang D S, *et al*. Preparation of MOF-74(Ni)@ammonium polyphosphate and its effect on the flame-retardant properties of epoxy composites[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2023, 39(6): 64-70.

[14] Bi X, Song K, Pan Y T, *et al*. Hollow superstructure in situ assembled by single-layer Janus nanospheres toward electromagnetic shielding flame-retardant polyurea composites[J]. Small, 2023, 20: 2307492.

[15] Bi X, Song K, Zhang H, *et al*. Dimensional change of red phosphorus into nanosheets by metal-organic frameworks with enhanced dispersion in flame retardant polyurea composites[J]. Chemical Engineering Journal. 2024, 482: 148997.

[16] Bi X, Hou Y, Pan Y T, *et al*. Metal-organic frameworks meet two-dimensional materials in polymer matrices for flame retardant and sensor applications[J]. Small Science, 2025, 5: 2400611.

[17] Cao B, Liu H, Zhang X, *et al*. MOF-derived ZnS nanodots/$Ti_3C_2T_x$ MXene hybrids boosting superior lithium storage performance[J]. Nano-Micro Letters, 2021, 13: 202.

[18] Cao M, Cai Y, He P, *et al*. 2D MXenes: electromagnetic property for microwave absorption and electromagnetic interference shielding[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 359: 1265-1302.

[19] Chen W, Han B, Xie Y, *et al*. Ultrathin Co-Co LDHs nanosheets assembled vertically on MXene: 3D nanoarrays for boosted visible-light-driven CO_2 reduction[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 391: 123519.

[20] Ge Q, Chu J, Cao W, *et al*. Graphene-based textiles for thermal management and flame retardancy[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32: 2270237.

[21] Zhang M, Ding X, Zhan Y, *et al*. Improving the flame retardancy of poly(lactic acid) using an efficient ternary hybrid flame retardant by dual modification of graphene oxide with phenylphosphinic acid and nano MOFs[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 384: 121260.

[22] Ma L, Wang Y D, Zhu Z M. Interface engineering of MXene containing phosphorus towards for enhancing the flame retardance and toughness of epoxy resins[J]. Progress in Organic Coatings, 2024, 191: 108414.

[23] Zhang L, Huang Y, Dong H, *et al*. Flame-retardant shape memory polyurethane/MXene paper and the application for early fire alarm sensor[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 223: 109149.

[24] Bi X, Song K, Zhang Z, *et al*. Joint exfoliation of MXene by dimensional mismatched SiC/ZIF-67 toward multifunctional flame retardant thermoplastic polyurethane[J]. Small, 2024, 20: 2403375.

[25] Bi X, Hu J, Zhang Z, *et al*. Fire-safe polymer composites enabled by a nature inspired MOF-derived single atom catalysis strategy for thermal management with recyclability[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2025, 13: 15240-15256.

[26] Zhang X D, Li Z, Jiang L Y, *et al*. Osteoarticular-inspiring manipulation of bio-based exfoliated boron nitride for fire-safe, strong yet tough epoxy[J]. Applied Surface Science, 2023, 615: 156316.

[27] Pan Y T, Zhang Z, Yang R. The rise of MOFs and their derivatives for flame retardant polymeric materials: a critical review[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 199: 108265.

[28] Hou Y, Liu L, Qiu S, *et al*. DOPO-modified two-dimensional co-based metal-organic framework: preparation and application for enhancing fire safety of poly(lactic acid)[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10: 8274-8286.

[29] Song K, Zhang H, Pan Y T, *et al*. Metal-organic framework-derived bird's nest-like capsules for phosphorous small molecules towards flame retardant polyurea composites[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2023, 643: 489-501.

[30] Song K, Bi X, Wang D, *et al*. Porous liquids assisted in-situ generated Co-LDH@MOF heterostructure with abundant defects for flame retardant and mechanical enhancement in polyurea composites[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 495: 153850.

[31] Jiang F, Song N, Ouyang R, *et al*. Wall density-controlled thermal conductive and mechanical properties of three-dimensional vertically aligned boron nitride network-based polymeric composites[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13: 7556-7566.

[32] Jia P, Lu J, He R, *et al*. Octopus sucker-inspired hierarchical structure MXene@carbon nanotubes enhancing the mechanical properties and fire safety of thermoplastic polyurethane composites through the interfacial engineering[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 450: 138184.

[33] Orikasa K, Nisar A, Dey P, *et al*. Exploring thermal and in-situ mechanical properties of flexible 2D tungsten disulfide foam-polymer composite for thermal management[J]. Composites Part B: Engineering, 2024, 284: 111743.

[34] Lu J, Jia P, Liao C, *et al*. Leaf vein-inspired engineering of MXene@$SrSn(OH)_6$ nanorods towards super-tough elastomer nanocomposites with outstanding fire safety[J]. Composites Part B: Engineering, 2022, 228: 109425.

[35] Sun Y, Zhou L, Han Y, *et al*. A new anisotropic thermal conductivity equation for h-BN/polymer composites using finite element analysis[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 160: 120157.

[36] Sharma V, Kagdada H L, Jha P K, *et al*. Thermal transport properties of boron nitride based materials: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 120: 109622.

[37] Zarepour A, Ahmadi S, Rabiee N, *et al*. Self-healing MXene- and graphene-based composites: properties and applications[J]. Nano-Micro Letters, 2023, 15: 100.

[38] Cao Y, Weng M, Mahmoud M H H, *et al*. Flame-retardant and leakage-proof phase change composites based on MXene/polyimide aerogels toward solar thermal energy harvesting[J]. Advanced Composites and Hybrid Materials, 2022, 5: 1253-1267.

[39] Han X, Lu T, Wang H, *et al*. Flame-retardant bamboo fiber-based films for high-performance fire sensors[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 303: 140651.

[40] Zhao J, Wang Y, Chen J, *et al*. Flame-retardant textile based triboelectric nanogenerators for energy harvesting and high-temperature sensing[J]. Nano Energy, 2024, 131: 110210.

[41] Tang T, Wang S, Jiang Y, *et al*. Flexible and flame-retarding phosphorylated MXene/polypropylene composites for efficient electromagnetic interference shielding[J]. Journal of Materials

Science & Technology, 2022, 111: 66-75.
[42] Yao Y, Jin S, Ma X, *et al*. Graphene-containing flexible polyurethane porous composites with improved electromagnetic shielding and flame retardancy[J]. Composites Science and Technology, 2020, 200: 108457.

Flame Retardant Mechanism and Multifunctional Synergistic Application of Two-Dimensional Nanomaterials in Polymers

Xue Bi, Zeqi Zhang, Kunpeng Song, Jiale Li, Yetang Pan, Jiyu He, Rongjie Yang
(*School of Materials, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China*)

ABSTRACT: Due to their unique physicochemical properties, two-dimensional (2D) nanomaterials have shown unprecedented potential in the field of flame retardant polymers. This paper provided a systematic review of the flame-retardant mechanisms of typical 2D materials, such as graphene, 2D transition metal carbonitrides, hexagonal boron nitride, 2D metal-organic frameworks, and layered double hydroxides, in polymer matrices. The effects of two-dimensional materials on the mechanical properties of polymers and their multifunctional synergistic effects were summarized in this review. By analyzing the structure-activity relationship between structural properties and flame retardant behavior of 2D materials, the unique mechanism of action in physical barrier construction, catalytic carbonization, and free radical quenching was revealed. The interface control strategy in complex application scenarios was further discussed. Finally, the 2D materials were summarized from the aspects of thermal management, environmental tolerance, intelligent response, and integration of electromagnetic function and flame retardant properties, which provides a research scheme for the development of flame retardant multifunctional materials.

Keywords: two-dimensional materials; polymer flame retardancy; flame-retardant properties; flame-retardant mechanism; mechanical properties