聚乙烯醇薄膜电磁屏蔽与阻燃性能研究进展

周 颖[1,2],艾吉祥[1,2],熊一鸣[1,2],徐定红[1],龙雪彬[1]

(1.贵州省材料产业技术研究院,贵州 贵阳 550014;2.贵州大学材料与冶金学院,贵州 贵阳 550025)

摘 要:在聚乙烯醇(PVA)薄膜中引入导电金属及微/纳米功能粒子,可赋予其电磁屏蔽、导热、导电等多种功能。其中,超薄PVA基电磁屏蔽复合膜在微型电子器件领域具有广阔的应用前景。但是PVA复合材料易燃烧,极限氧指数仅为19.0%。一旦PVA材料接触火源,主链就会迅速分解形成小分子,从而产生严重的熔滴。随着材料应用场景的变化,电磁屏蔽材料也需要具备多种的功能,研究兼具电磁屏蔽性能和阻燃性能的PVA薄膜具有重要意义。文章综述了近年来PVA电磁屏蔽薄膜及其阻燃性能的研究进展,为多功能的电磁屏蔽复合材料的研究提供参考。

关键词:聚乙烯醇;薄膜;电磁屏蔽;阻燃性能

中图分类号:TQ325.9 **文献标志码**:A **文章编号**:1005-3360(2026)08-0178-06

DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.08.031

Research Progress of Electromagnetic Interference Shielding and Flame Retardancy of Polyvinyl Alcohol Films

ZHOU Ying[1,2], AI Jixiang[1,2], XIONG Yiming[1,2], XU Dinghong[1], LONG Xuebin[1]

(1. Guizhou Institute of Materials Industry Technology, Guiyang 550014, China; 2. School of Materials and Metallurgy, Guizhou University, Guiyang 550025, China.)

Abstract: Introducing conductive metals and micro/nano functional particles into polyvinyl alcohol (PVA) films can endow them with multiple functions such as electromagnetic shielding, thermal conductivity, and electrical conductivity. Among them, ultrathin PVA-based electromagnetic shielding composite films have broad application prospects in the field of microelectronic devices. However, PVA composites are readily combustible, with a limiting oxygen index of only 19.0%. Once exposed to an ignition source, the PVA main chain rapidly decomposes into small molecules, leading to severe melt dripping. As application scenarios for materials continue to evolve, electromagnetic interference shielding materials are also required to possess diverse functionalities. Thus, developing PVA films that combine both electromagnetic interference shielding and flame retardancy is of significant importance. The article reviews recent research progress on PVA electromagnetic interference shielding films and their flame-retardant performance, aiming to provide a reference for the development of multifunctional electromagnetic interference shielding composites.

Keywords: PVA; Films; Electromagnetic interference shielding; Flame retardancy

聚乙烯醇(PVA)兼具水溶性、可塑性和可降解性,近年来产量持续增长,相关研究也日益活跃。PVA分子链上的极性基团羟基(—OH)赋予其优异的水溶性,同时其分子链结构规整,成膜性优异,因此常用于制备薄膜材料。随着电子设备和5G技术的蓬勃发展,不可避免地出现了严重的电磁辐射(EMR)。为减少电磁污染,研究人员在开发高效电磁屏蔽(EMI)复合材料的设计策略和屏蔽机理方面开展了大量的研究。其中,导电聚合物复合材料(CPCs)[1-2]凭借其耐腐蚀性、柔韧性、轻质和可加工性等优势,成为该领域的研究热点[3]。在聚合物基体中加入的功能性微/纳米填料,如二维过渡金属碳氮化合物(MXene)[4]、还原氧化石墨烯(rGO)[5-6]、碳纳米管(CNTs)[7-8]、氮化硼纳米片(BNNS)[9]、

收稿日期 Submitted date 2025-09-15;修回日期 Revised date 2025-10-09;录用日期 Accepted date 2025-10-23

基金项目:国家自然科学基金项目(52263007);贵州省科技计划项目(黔科合基础ZK-[2023]一般160号、QKHPTRC-CXTD[2023]012号);贵州省高层次创新型人才计划项目(黔科合人才QCC[2025]004号)

联系人,278907441@qq.com

引用本文:周颖,艾吉祥,熊一鸣,等.聚乙烯醇薄膜电磁屏蔽与阻燃性能研究进展[J].塑料科技,2026,54(8):178-183.

Citation:ZHOU Y, AI J X, XIONG Y M, et al. Research progress of electromagnetic interference shielding and flame retardancy of polyvinyl alcohol films[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(8): 178-183.

碳化硅(SiC)[10]、黑磷(BP)[11]和液态金属(LM)[12]等，可赋予聚合物优异的EMI性能。同时，超薄的PVA EMI复合膜在微型器件中也得到应用[13]。在阻燃性能方面，PVA因其固有的大分子结构(由碳、氢和氧原子组成)，极易燃烧，极限氧指数(LOI)仅为19.0%。一旦PVA材料接触火源，主链就会迅速分解形成小分子，从而产生严重的熔滴。

为满足PVA阻燃性能的需求，通常需要通过化学接枝、物理共混、包覆等方式引入阻燃剂(FRs)，用以制备阻燃PVA复合膜。EMI性能和阻燃性能研究虽然是两个不同的研究领域，但随着材料应用场景的变化，EMI材料也需要具备多种的功能[14]，开发兼具良好EMI性能和阻燃性能的PVA薄膜仍然具有重要意义。本文对PVA薄膜的EMI性能和阻燃性进行归纳总结，为研究多功能的EMI复合材料提供参考。

1 EMI与阻燃机理

1.1 EMI机理

图1为电磁波与屏蔽体之间的相互作用。根据谢昆诺夫的平面波电磁传输线理论，穿过屏蔽材料的电磁波主要包括透射、吸收、多重反射和反射4种类型[15]。当入射表面被设计成阻抗匹配吸收面时，电磁波可顺利进入EMI材料内部，从而显著降低表面反射。部分进入的电磁波在屏蔽材料内部被吸收或被耗散为热量。如果将另一个表面设计成阻抗失配反射层，则剩余电磁波将被反射回材料内部，最后以热量的形式被重新吸收或耗散。因此，由阻抗匹配吸收层和阻抗失配反射层构成的非对称结构，有利于促进电磁波的衰减，有效抑制二次反射，从而缓解二次电磁污染。总EMI效能(SE_T)的定义是入射电磁波功率(P_0)、电场(E_0)和磁场(H_0)与传输电磁波功率(P_t)、电场(E_t)和磁场(H_t)的对数比值[16]。反射损耗(SE_R)、吸收损耗(SE_A)和多重反射损耗(SE_M)共同构成SE_T。SE_R源于两个传播介质界面的阻抗差。因此，SE_R与材料的电导率直接相关。随着屏蔽层电导率和磁导率的增加，SE_A也会增强。电磁波在屏蔽前后表面之间进行的多重反射，有助于增强SE_T。当SE_T超过15 dB或材料厚度(d)达到甚至超过趋肤深度(δ)时，SE_M可忽略不计。当SE_A超过10 dB时，SE_M同样可以忽略[17]。电磁波在吸收层中的损耗主要以吸收损耗为主，可分为介电损耗和磁损耗。介电损耗(δ_d)取决于复介电常数(ε)，ε由实数部分(ε')、虚数部分(ε'')和介电常数构成($\tan\delta_d=\varepsilon''/\varepsilon'$)。其中，$\varepsilon'$代表能量储存能力，而$\varepsilon''$代表能量耗散功率。介电损耗主要包括传导损耗和极化损耗，前者是电流在介质中的传导过程中造成的能量损耗。后者则分为离子极化、电偶极子极化和界面极化。此外，涡流损耗、尺寸共振损耗等磁损耗在很大程度上受磁导率(μ)的影响。其中，$\mu=\mu'-j\mu''$，μ'和μ''分别为实磁导率和虚磁导率。电磁波被阻抗匹配层吸收后，剩余的电磁波到达反射层。由于反射层和吸收层之间存在较大的阻抗失配，剩余的电磁波会被反射回吸收层。电磁波与材料中自由电荷载流子的相互作用，决定了材料的ε与μ，进而影响其表面阻抗，并最终决定电磁波的反射特性。

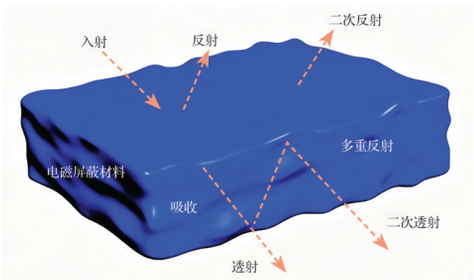


图1 电磁波与屏蔽体之间的相互作用

Fig.1 Interaction between electromagnetic wave and shield

1.2 阻燃机理

燃烧的4个关键因素分别为燃料、氧气、热量和链式反应[18]。因此，阻燃必须阻断燃烧过程中的一个或多个因素。大多数聚合物在250~450 ℃的温度范围内分解，而FRs的作用是抑制和阻止火焰蔓延。FRs主要在气相或凝聚相中发挥阻燃作用。在气相中，FRs的分解会释放出一些自由基、惰性气体及蒸气。能量较低的自由基可以清除初始燃烧时产生的不稳定的—OH和氢自由基(H·)，从而中止链的断裂[19]。惰性气体可以稀释O_2的浓度，蒸气可以吸收燃烧中的热量。在凝聚相中，FRs的一些分解基团会与基体发生反应，形成更多的碳层，从而阻碍热量和O_2的传递。近年来，多种聚合物用FRs已被开发，出于对环境安全考虑，无卤FRs更受青睐[20]，包括含磷/氮(P/N)[21]、硅(Si)[22]、硼(B)的化学品[23]。目前，多种新型FRs得到快速发展[24]。这些FRs主要通过化学接枝和物理混合的方式与聚合物结合在一起。

鉴于不同PVA复合材料在制备工艺和应用领域的多样性，尤其在EMI领域，应谨慎选择和设计FRs的种类及加工方法，以确保PVA薄膜的综合性能[25]。

2 PVA薄膜的EMI性能与阻燃性能研究现状

2.1 EMI填料在PVA薄膜中的应用

水溶性PVA适合用水溶液浇铸成薄膜，已广泛应用于外包装、建筑装饰、电子电器及EMI方面。多层结构PVA EMI膜的制备方法主要包括溶液浇铸法、真空抽滤法、静电纺丝法等。用于EMI的多层PVA薄膜，往往需要添加MXene、CNTs、银纳米线(AgNWs)、LM等导电功能微/纳米填料。

2.1.1 MXene填料

MXene作为一种新兴的二维材料，具有很高的导电性，已被广泛应用于EMI复合材料中。由于MXene和空气之间的阻抗不匹配，MXene表面上的大量电荷载流子会导致电磁波反射。自由电荷载流子与电磁波之间的相互作用会产生电流和偶极子，分别造成欧姆损耗和极化损耗。MXene纳米片在水和一些极性有机溶剂中形成稳定的分散体，因此溶液加工技术已成为MXene最常用的

加工方法。利用真空过滤、浸涂、喷涂、旋涂及界面组装等多种加工策略来制备具有多层结构的MXene/PVA复合材料。DONG等[26]采用逐层涂布方法来制备高度取向的MXene/PVA薄膜。在逐层涂布过程中，MXene/PVA基体受到强烈的剪切作用，导致MXene纳米片沿着刀片运动方向有序排列。结果表明，制备的MXene/PVA薄膜的力学性能和SE_T与其取向成正比，最佳拉伸强度为145.5 MPa，断裂应变为19.6%，SE_T为36.70 dB。JIN等[27]通过多层浇铸制备了交替多层结构的PVA/MXene薄膜。结果表明：连续的MXene层提供一个用于传导热量和电子的紧凑网络，使多层膜同时具有出色的SE_T；当d为27 μm时，质量分数为19.5%的MXene的PVA/MXene多层膜显示出44.40 dB的最大SE_T；多层体系结构赋予了膜出色的抗滴落性能。WANG等[28]构建了纳米结构的PVA/MXene膜。结果表明：该膜表现出优异的机械强度和阻燃性能。其中，拉伸强度比PVA高约3倍，峰值热释放率比纯PVA降低80%。膜内随机分布的导电网络赋予其出色的EMI屏蔽效能，比传统复合材料高出近41 dB，满足高效EMI的应用要求。

2.1.2 CNTs填料

CNTs具有高导电性和大长径比，已被广泛应用于制造EMI复合材料。然而，CNTs容易在聚合物基体中团聚，导致复合材料的导电性和机械性能下降。研究人员致力于CNTs的表面改性，促进CNTs在聚合物基体中的分散，从而有利于构建三维非对称导电网络，获得优异的EMI性能。康永[29]采用溶液浇铸法制备CNTs/PVA复合膜材料，由于多壁碳纳米管的小尺寸效应与表面效应的共同作用，复合材料显示出良好的吸波性能。余正萍[30]通过熔融共混、流延成膜法制备MWCNTs/PVA复合材料，复合材料EMI性能随其导电性的增强而提高，当MWCNTs质量分数为1.2%时，SE_T为36.80 dB。

2.1.3 AgNWs填料

AgNWs除具有银的优良导电性之外，还兼具纳米级别的尺寸效应和优异的透光性等。此外，由于AgNWs的大长径比效应，将其引入PVA复合膜后，相互搭接可形成三维导电网络，进而赋予复合材料优异的导电性能和EMI性能。YU等[31]使用聚(3,4-亚乙基二氧噻吩)、聚(苯乙烯磺酸盐)(PEDOT∶PSS)和AgNWs作为导电填料，通过蒸发法制备机械性能优异的高性能EMI膜。通过在PVA/PEDOT∶PSS复合材料中加入质量分数为1.38%的AgNWs，得到d约为20 μm、SE_T达到33.00 dB的薄膜。DING等[32]提出一种简单的交替真空辅助过滤方法来制备三明治结构的PVA/MXene/AgNWs/PCCs复合薄膜，该薄膜将相变微胶囊(PCCs)的热管理与MXene和AgNWs的EMI性能相结合，得到的薄膜保持高焓值(165.7 J/g)。同时，在X波段表现出优异的EMI性能，SE_T达到69.24 dB。JIANG等[33]制备一种芳纶纳米纤维(ANFs)-PVA/AgNWs(APAg)自支撑超薄三明治结构薄膜，该薄膜在EMI性能和阻燃方面表现出卓越的性能。内部引入AgNWs层后，在X波段频率下产生显著的EMI效能，在0.10 mg/cm^{2}的负载下即可实现47.01 dB的SE_T，有效阻挡99.99%的电磁波。采用ANFs-PVA层作为柔性外层，芳纶纳米纤维(ANF)的高耐热性以及ANFs和PVA之间的氢键相互作用赋予薄膜优异的阻燃性能和良好的机械性能。该薄膜在垂直燃烧测试中表现出自熄行为，达到V-0的阻燃等级。陈璇[34]通过静电纺丝、喷涂和热压技术，成功制备出具有优异EMI性能和力学性能的超薄PVA/Fe_3O_4@AgNW复合薄膜，复合膜具有导电AgNWs和磁性Fe_3O_4的交替多层结构，在两者的协同作用下，SE_T达到80.80 dB。同时，该复合膜具有较高的拉伸强度、断裂应变和韧性。孙德帅[35]通过真空抽滤制备MXene/AgNWs/PVA复合膜，MXene/AgNWs/PVA质量比为5.0∶2.5∶1.0。该复合膜在X波段的SE_T高达61.50 dB，其拉伸强度为43.1 MPa，断裂伸长率为2.81%。

2.1.4 LM填料

LÜ等[36]通过静电纺丝和模压制备具有梯度结构的PVA/LM/氮化硼(BNNS)/蚕丝纤维素(SF)复合膜，由于梯度结构和PVA/LM含量的增加，PVA/LM/BNNS/SF膜在X波段的SE_T最高可达75.00 dB，反射损耗(R)也高达0.951，这表明PVA/LM/BNNS/SF复合材料的屏蔽机理以反射为主。LM颗粒之间的欧姆损耗以及LM与PVA界面处的界面极化损耗可将电磁波能量转化为PVA/LM顶层的热量。然后，由于LM连续导电通路带来的高阻抗失配，大部分电磁波在顶层和中层之间的界面上发生反射。此外，顶层PVA/LM层和中间LM层之间的多次反射会进一步耗散或吸收电磁波。

多层PVA薄膜正反面的结构、填充物及导电性等方面存在差异，其入射面和反射面的导电性可调，从而赋予其在EMI领域的性能优势。表1为用于EMI的PVA复合膜。

表1 用于EMI的PVA复合膜

Tab.1 PVA composite films for EMI

材料组成	SE_T/dB	文献来源
PVA/MXene	36.70	DONG等[26]
PVA/MXene	44.40	JIN等[27]
PVA/MXene	41.00	WANG等[28]
PVA/CNTs	36.80	余正萍[30]
PVA/PEDOT：PSS/AgNWs	33.00	YU等[31]
PVA/MXene/AgNWs/PCCs	69.24	DING等[32]
ANFs-PVA/AgNWs	47.01	JIANG等[33]
PVA/Fe_3O_4@AgNW	80.80	陈璇[34]
PVA/MXene/AgNWs	61.50	孙德帅[35]
PVA/LM/BNNS/SF	75.00	LÜ等[36]

2.2 阻燃填料在PVA薄膜中的应用

热界面材料的相关应用对PVA薄膜的阻燃要求很高，

这是由于d小于0.5 nm的PVA薄膜一旦接触火源，就特别容易被点燃，而且火焰传播速度非常快，会导致严重变形和熔滴。FRs通常与其他功能性填料一起在浇铸前加入PVA溶液中，从而制备兼具阻燃和其他功能的PVA薄膜复合材料。为了保证PVA薄膜具有良好的阻燃性能、较高的透明度和强度，PVA薄膜中使用的FRs具有特别的要求。LIU等[37]通过化学接枝法在PVA表面引入含有反应性磷/硅的FRs。同时，纳米无机颗粒，如MoS_2[38]、氧化石墨烯(GO)[39]、BNNS[40]及MXene，均陆续应用于阻燃PVA薄膜中。

在阻燃PVA薄膜的研究中，FRs引入的途径主要有两种。部分研究采用表面化学接枝方法，多数研究则通过溶液物理混合法直接添加FRs。在溶液物理混合法制备PVA薄膜过程中，使用最多的阻燃添加剂是层状材料，其次是传统填料和生物基材料。传统阻燃填料通过纳米技术及氢键作用均匀分散在PVA薄膜中。一些改性生物质不仅可以提高PVA薄膜的炭化性能，同时可以改善其生物降解性能。

2.2.1 无机纳米填料

用于PVA的传统FRs包括氢氧化镁(MH)/氢氧化铝(ATH)、含P的FRs[41]及含Si的FRs。FRs的添加量相对较高时，阻燃性能可以得到保证，但力学性能会降低，尤其是在薄膜产品中。对填料进行表面改性可避免团聚，有利于实现均匀分散，从而提高阻燃性以及填料与基体之间的界面相容性。要想达到理想的阻燃水平，MH的质量分数需要高达50~70%，这也会显著降低基体的综合性能。而添加少量无机纳米填料即可取得较好的阻燃性能。因此，多数无机FRs均被加工成纳米级颗粒。值得注意的是，使用偶联剂进行表面处理可以避免小粒径在分散过程中造成的团聚[42]。WANG等[43]通过表面涂覆硅烷和六偏磷酸钠(SHMP)获得水性透明MH纳米晶体(NMH)，即使添加33% NMH，PVA薄膜看起来仍然是透明的。而薄膜的LOI达到28.3%，测试后形成一层连续而致密的炭层，PVA样品的峰值热释放速率(PHRR)从453 W/g降至332 W/g，从而有效地阻隔更多的热量、烟雾和烟尘。

2.2.2 二维分层填料

具有导电功能的二维分层填料，如二硫化钼(MoS_2)、六方氮化硼(h-BN)、GO、MXene等，常与PVA复合制备EMI复合膜材料。此类二维分层填料往往兼具有阻燃性能，聚合物链在纳米片中受到保护，形成一道物理屏障，有效阻挡热量、烟雾和火焰传播。

(1) MoS_2。

对PVA/MoS_2薄膜进行表面改性，可以提高其阻燃性能及机械性能，以确保MoS_2在PVA中的剥离分布。ZHOU等[44]在剥离的MoS_2纳米片上共轭了3-巯丙基三甲氧基硅烷(MTS)。得到的MoS_2-MTS均匀地分散在PVA薄膜中。动态力学测试表明，PVA与MoS_2-MTS的界面黏附力很强。质量分数为1%的MoS_2-MTS使材料的PHRR降低52.5%，拉伸强度提高98.4%。

(2) h-BN。

分层结构的h-BN具有良好的润滑性、耐化学腐蚀性、电绝缘性及导热性。其良好的分散性有利于与炭渣形成有效的保护屏障，提高复合材料的阻燃性。WANG等[45]通过水热反应制备h-BN@$ZnFe_2O_4$。该混合物提高了PVA的热稳定性，PVA/5% hBN@$ZnFe_2O_4$的5%和50%热分解温度分别提高56 ℃和32 ℃。锥形量热测试显示，PHRR、总热释放量(THR)和总产烟量(TSP)分别降低46.3%、14.5%和13.1%。这归因于$ZnFe_2O_4$产生的Zn和Fe氧化物的催化作用以及h-BN的物理阻隔作用。

(3) GO。

GO作为一种二维纳米片层材料，由于其高比表面积、良好的热稳定性和导热性，已被视为聚合物中有效的协同FRs。GO的阻燃贡献主要归因于其层状结构的物理屏障效应及催化碳化作用。然而，由于GO分子结构中缺乏阻燃元素或阻燃基团，对点火时间和火焰传播速度的抑制效果有限。因此，需要用一些反应性阻燃化合物对GO进行改性，以提升其阻燃效率[46]。

(4) MXene。

新兴的MXene由于其优异的光学、电学和机械性能，已被越来越多地应用于EMI、电池和储能等领域[47]。PAN等[48]研究发现，MXene可改善PVA薄膜的热稳定性、可燃性和机械性能，延缓PVA的热降解。此外，PVA/MXene的断裂伸长率和拉伸强度均高于对照PVA。这是因为MXene与PVA之间形成的氢键增强了界面相互作用，从而促进了应力传递。

2.2.3 有机磷化合物接枝

PVA中的醇羟基可以通过适当的引发剂与某些官能团发生化学键合。PVA可以通过化学接枝达到持久稳定的内在阻燃性，从而使PVA薄膜的原生透明性和柔韧性几乎保持不变。因此，可在PVA薄膜表面接枝一些活性含磷FRs，如9,10-二氢-9-氧杂-10-磷菲-10-氧化物-(2,3-环氧丙氧基)丙基三甲氧基硅烷(DPP)、氯磷酸二乙酯(DECP)和含磷丙烯酸(AOPA)。PENG等[49]通过与丙烯酸(AOPA)接枝制备类似的PVA薄膜。PVA/30% AOPA达到VTM-V0级，LOI为27.3%，通过凝聚相机制将PHRR从344 W/g降至209 W/g。PVA/30% AOPA薄膜的透射比维持在纯PVA薄膜的95%，结晶度降低，柔韧性增加。受蜘蛛丝中多个氢键的启发，XIE等[50]设计了一种新型的含磷和氮的化合物N,N',N-"三(2-氨基乙基)磷三酰胺(TE)。该化合物具有阻燃性和多个氢键反应位点，通过TE和PVA之间的氢键自组装实现阻燃性的超分散，从而获得高性能的阻燃PVA。仅添加质量分数为10%的TE，d为0.15 mm的PVA膜即可达到UL94 V-0等级，其拉伸强度、延展性和初始分解温度分别提高33%、15%及12%。

3 结论

本文综述了近年来PVA薄膜EMI与阻燃性能的研究进展。具有多层结构的PVA EMI复合膜可满足低厚度和高SE_T的要求，尤其适合微型电子产品的应用。随着应用场景需求的改变，EMI复合薄膜的阻燃性能也逐渐成为重要的性能指标。合理添加及复合导电填料和FRs是提高PVA复合膜EMI性能和阻燃性能的有效方法。目前，提高PVA的阻燃性的有效方法是通过化学接枝、物理共混、包覆等方式引入FRs。对于PVA薄膜，为了保留其力学和透明性能等，通常选用化学接枝和物理混合的方式。在PVA薄膜的溶液混合中，使用最多的阻燃添加剂是层状材料，其次是传统填料和生物基材料。传统阻燃填料通过纳米技术或氢键作用均匀分散在PVA薄膜中。一些改性生物质不仅提高PVA薄膜的炭化性能，同时改善其生物降解性能。具有EMI性能和阻燃性能的PVA复合膜在结构、性能以及应用方面均表现出可扩展的价值。随着研究的不断深入，PVA EMI复合材料结构设计的创新与新型纳米填料的开发，有望为兼具优异的EMI性能与阻燃性能的材料体系注入新的活力。

参考文献

[1] ZHANG Y L, GU J W. A perspective for developing polymer-based electromagnetic interference shielding composites[J]. Nano-Micro Letters, 2022, 14(1): 89.

[2] HAN Y X, RUAN K P, GU J W. Janus (BNNS/ANF)-(AgNWs/ANF) thermal conductivity composite films with superior electromagnetic interference shielding and Joule heating performances[J]. Nano Research, 2022, 15(5): 4747-4755.

[3] WEN C Y, ZHAO B, LIU Y H, et al. Flexible MXene-based composite films for multi-spectra defense in radar, infrared and visible light bands [J]. Advanced Functional Materials, 2023, 33(20): 2214223.

[4] SUN R H, ZHANG H B, LIU J, et al. Highly conductive transition metal carbide/carbonitride (MXene)@polystyrene nanocomposites fabricated by electrostatic assembly for highly efficient electromagnetic interference shielding[J]. Advanced Functional Materials, 2017, 27(45): 1702807.

[5] QU Q W, LIU A L, LIU C Y, et al. Electromagnetic shielding properties of Cu/rGO composite materials synthesized by electroless plating[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1044: 184346.

[6] SUN X, WU Y, CHEN S Z, et al. Absorption dominated broadband terahertz electromagnetic shielding properties of ultrathin rGO paper[J]. Carbon, 2024, 229: 119476.

[7] KANG J S, ZHANG H X, YOON K B. Hybrid rGO-CNT/epoxy nanocomposites as electromagnetic interference shielding materials[J]. ACS Applied Nano Materials, 2024, 7(9): 10770-10778.

[8] FENG W D, ZOU L H, LAN C T, et al. Core-sheath CNT@MXene fibers toward absorption-dominated electromagnetic interference shielding fabrics[J]. Advanced Fiber Materials, 2024, 6(5): 1657-1668.

[9] 贾海香, 张志毅. 氧化石墨烯负载氮化硼/天然橡胶复合材料的制备及性能研究[J]. 橡胶工业, 2024, 71(9): 663-668.

[10] ZHANG X Y, ZHANG B, WEI Z L, et al. SiC skeleton-reinforced highly oriented graphite with good thermophysical and electromagnetic shielding properties[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2024, 107(6): 3945-3958.

[11] 许文. 应变诱导二维黑磷奇异物性的第一性原理研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2024.

[12] SAMBYAL P, IQBAL A, HONG J, et al. Conductive MXene composites with liquid metal for high-performance electromagnetic interference shielding[J]. Materials Chemistry and Physics, 2023, 295: 127184.

[13] ZHOU Y, XUE B, XIE L, et al. Recent advances in asymmetric structural composites for excellent electromagnetic interference shielding: A review[J]. Chinese Journal of Polymer Science, 2024, 42 (6): 693-710.

[14] LIU S J, ZHANG T Y, TAN B W, et al. Dual-network aramid nanofibers/cellulose nanofibers/MXene aerogels for lightweight, pulse electromagnetic interference shielding[J]. Composites Science and Technology, 2025, 272: 111373.

[15] GU T, ZENG Z, WU S, et al. Poly(*L*-lactic acid)/graphene composite films with asymmetric sandwich structure for thermal management and electromagnetic interference shielding[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 466: 143190.

[16] LU X, ZHENG Y F, YANG J L, et al. Multifunctional paraffin wax/carbon nanotube sponge composites with simultaneous high-efficient thermal management and electromagnetic interference shielding efficiencies for electronic devices[J]. Composites Part B: Engineering, 2020, 199: 108308.

[17] WANG L, CHEN L X, SONG P, et al. Fabrication on the annealed $Ti_3C_2T_x$ MXene/Epoxy nanocomposites for electromagnetic interference shielding application[J]. Composites Part B: Engineering, 2019, 171: 111-118.

[18] CHAI W H, SU X Y, XIA Y R, et al. Construction of a novel halogen-free and phosphorus-free and synergistic flame retardant system with low addition in simultaneously improving the flame retardancy, water resistance and mechanical properties for silicone rubber[J]. Applied Clay Science, 2023, 238: 106926.

[19] LIU B W, CHEN L, GUO D M, et al. Fire-safe polyesters enabled by end-group capturing chemistry[J]. Angewandte Chemie International Edition, 2019, 58(27): 9188-9193.

[20] CHEN H, HU Y L, LI Y Y, et al. Research progress in halogen-free flame-retardant nylon 6 fiber[J]. Journal of Industrial Textiles, 2025, DOI:10.1177/1528083725137926.

[21] LIU H Y, ZHENG P L, LI J W, et al. *In-situ* formation of macromolecule P/N/Si flame retardant for epoxy resin with low smoke toxicity and excellent flame-retardancy[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2023, 140(23): e53926.

[22] ZHOU F S, TANG W, XI W, et al. Improving the fracture toughness, flame retardancy and smoke suppression of ABS by core-shell elastic flame retardant particles with P/Si synergistic effect[J]. Polymer Degradation and Stability, 2024, 228: 110893.

[23] TAWIAH B, ZHOU Y Y, YUEN R K K, et al. Microporous boron based intumescent macrocycle flame retardant for poly(lactic acid) with excellent UV protection[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 402: 126209.

[24] MENG P, XIAO H R, ZHANG F, et al. Green facile fabrication of halogen-free flame-retardant ABS with high mechanical performance

[J]. RSC Advances, 2025, 15(24): 19456-19467.

[25] GAO R Y, YI X D, LIU X Y, et al. Phosphorus-doped carbon dots as an effective flame retardant for transparent PVA composite films with enhanced UV shielding property[J]. Reactive and Functional Polymers, 2024, 197: 105877.

[26] DONG J Y, LI Z Y, LIU C Q, et al. Highly oriented MXene/polyvinyl alcohol films prepared by scalable layer-by-layer blade coating for efficient electromagnetic interference shielding and infrared stealth[J]. Nano Research, 2024, 17(6): 5651-5660.

[27] JIN X X, WANG J F, DAI L Z, et al. Flame-retardant poly(vinyl alcohol)/MXene multilayered films with outstanding electromagnetic interference shielding and thermal conductive performances[J]. Chemical Engineering Journal, 2020, 380: 122475.

[28] WANG W, YUEN A C Y, LONG H, et al. Random nano-structuring of PVA/MXene membranes for outstanding flammability resistance and electromagnetic interference shielding performance[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 224: 109174.

[29] 康永. 碳纳米管/聚乙烯醇复合材料电磁屏蔽性能研究[J]. 橡塑技术与装备, 2022, 48(10): 29-36.

[30] 余正萍. 多壁碳纳米管/聚乙烯醇复合材料电磁屏蔽性能研究[J]. 化工新型材料, 2020, 48(3): 55-59.

[31] YU J W, GU W H, ZHAO H Q, et al. Lightweight, flexible and freestanding PVA/PEDOT：PSS/Ag NWs film for high-performance electromagnetic interference shielding[J]. Science China Materials, 2021, 64(7): 1723-1732.

[32] DING Y, LU X, LIU S, et al. Sandwich-structured multifunctional composite films with excellent electromagnetic interference shielding and light/electro/magnetic-*to*-thermal conversion and storage capabilities[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2022, 163: 107178.

[33] JIANG Z Q, ZHANG H, GAO D, et al. Self-supporting ultra-thin sandwich-structured ANFs-PVA/AgNWs films with flame-retardant and electromagnetic interference shielding performance[J]. Progress in Organic Coatings, 2024, 197: 108801.

[34] 陈璇. 聚乙烯醇电磁屏蔽材料的结构设计及其性能研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2024.

[35] 孙德帅. 轻质柔性MXene/Ag NW/PVA复合薄膜的制备及电磁屏蔽性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.

[36] LÜ Z, KONG L J, SUN P Q, et al. Dual-functional eco-friendly liquid metal/boron nitride/silk fibroin composite film with outstanding thermal conductivity and electromagnetic shielding efficiency[J]. Composites Communications, 2023, 39: 101565.

[37] LIU L, LIU Y S, LIU Y, et al. Efficient flame retardant polyvinyl alcohol membrane through surface graft method[J]. RSC Advances, 2016, 6(41): 35051-35057.

[38] CHEN C L, REN B B, XIAO G Q, et al. Inorganic-organic nano-hierarchical structure of MoS_2 nanoflowers/phosphorus-grafted high-nitrogen PDA nanosheets enhancing the fire resistance of water-based epoxy coatings[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2026, 728: 138524.

[39] WANG P J, ZHANG M Y, LIU Y, et al. One-step synthesis of hydrophilic graphene-Fe_3O_4-PVA composite film: Micromorphology and performance[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2019, 136 (44): 48174.

[40] CHEN Q, WANG Z Z. A copper organic phosphonate functionalizing boron nitride nanosheet for PVA film with excellent flame retardancy and improved thermal conductive property[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2022, 153: 106738.

[41] XU W Z, ZHANG Y, LIU J L, et al. Flame retardant polyvinyl alcohol composite with excellent comprehensive properties prepared using Cu_2O/chitosan and phosphorus-based flame retardants[J]. Iranian Polymer Journal, 2024, 33(10): 1381-1394.

[42] YANG T Y, QIAN X Y, DAI J Y, et al. Combustion performance of aluminum modified boron nanoparticles coated with silane coupling agent[J]. Combustion and Flame, 2024, 264: 113442.

[43] WANG M, HAN X W, LIU L, et al. Transparent aqueous $Mg(OH)_2$ nanodispersion for transparent and flexible polymer film with enhanced flame-retardant property[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2015, 54(51): 12805-12812.

[44] ZHOU K Q, GAO R, GUI Z, et al. The effective reinforcements of functionalized MoS_2 nanosheets in polymer hybrid composites by sol-gel technique[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2017, 94: 1-9.

[45] WANG X D, YIN Y J, LI M L, et al. Hexagonal boron Nitride@$ZnFe_2O_4$ hybrid nanosheet: An ecofriendly flame retardant for polyvinyl alcohol [J]. Journal of Solid State Chemistry, 2020, 287: 121366.

[46] ABRISHAMKAR S, MOHAMMADI A, DE LA VEGA J, et al. Layer-by-layer assembly of calixarene modified GO and LDH nanostructures on flame retardancy, smoke suppression, and dye adsorption behavior of flexible polyurethane foams[J]. Polymer Degradation and Stability, 2023, 207: 110242.

[47] LIU J, ZHANG H B, SUN R H, et al. Hydrophobic, flexible, and lightweight MXene foams for high-performance electromagnetic-interference shielding[J]. Advanced Materials, 2017, 29(38): 1702367.

[48] PAN Y, FU L, ZHOU Q W, et al. Flammability, thermal stability and mechanical properties of polyvinyl alcohol nanocomposites reinforced with delaminated $Ti_3C_2T_x$ (MXene) [J]. Polymer Composites, 2020, 41 (1): 210-218.

[49] PENG S, ZHOU M, LIU F Y, et al. Flame-retardant polyvinyl alcohol membrane with high transparency based on a reactive phosphorus-containing compound[J]. Royal Society Open Science, 2017, 4(8): 170512.

[50] XIE W, BAO Q R, LIU Y, et al. Hydrogen bond association to prepare flame retardant polyvinyl alcohol film with high performance[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(4): 5508-5517.