

阻燃高分子材料在工程领域中的应用与市场发展前景

邢小芳(贝欧亿(山东)新材料有限公司, 山东 滨州 256500)

摘要: 阻燃高分子材料是经过特定处理或科学设计, 具备抑制或延缓火焰传播特性的高分子化合物。随着安全标准的提升以及防火要求的不断严格化, 高效阻燃材料的研究与开发已成为材料科学领域关注的焦点。本文对高分子材料的阻燃机制进行分类探讨, 并基于不同种类的阻燃高分子材料, 对当前该领域的研究现状进行阐述, 分析阻燃高分子材料在不同工程领域中的具体应用, 并对其市场发展前景进行展望, 希望为相关领域的从业者提供一定的启示。

关键词: 阻燃高分子材料; 工程领域; 应用; 市场前景

中图分类号: TQ314.24 文献标识码: A 文章编号: 1674-5167(2025)017-0013-03

Application and market development prospect of flame retardant polymer materials in engineering field

Xing Xiaofang(BeyondPoly (Shandong) New Materials Co.,LTD,Binzhou Shandong 256500,China)

Abstract: Flame-retardant polymer materials are polymer compounds that have undergone specific treatment or scientific design and possess the property of suppressing or delaying the spread of flames. With the improvement of safety standards and the continuous strictness of fire protection requirements, the research and development of highly efficient flame-retardant materials have become the focus of attention in the field of materials science. This paper classifies and discusses the flame-retardant mechanisms of polymer materials. Based on different types of flame-retardant polymer materials, it elaborates on the current research status in this field, analyzes the specific applications of flame-retardant polymer materials in different engineering fields, and looks forward to their market development prospects, hoping to provide certain inspirations for practitioners in related fields.

Key words: flame retardant polymer materials; Engineering field; Apply; Market develop

高分子材料具有优异的抗腐蚀性、可调整的分子结构、以及力学特性的稳定性, 故而受到各个研究机构的广泛关注。与此同时, 高分子材料本身阻燃性较差, 为防止其在应用中可能引发的如火灾等安全事件, 必须持续对其进行优化和研究。因此, 提升高分子材料的阻燃性不仅能够拓展其应用范围, 还能够有效提升应用领域的安全性、可靠性与经济性。

1 高分子材料的阻燃机理

1.1 气相阻燃

高分子材料在加工合成中添加的阻燃成分就是所谓的阻燃剂, 在材料遭遇火灾时, 阻燃剂燃烧发生热分解产生出不具有可燃性的CO、HO和NH气体, 这些气态物质的产生会稀释掉高分子材料内的可燃物含量, 通过降低可燃物在空气中的浓度来阻止高分子材料的燃烧, 而阻燃剂在发生热分解的同时还会吸收大量热量, 从而减少燃烧时的温度, 营造出不利于可燃物质燃烧的环境, 可以有效的降低高分子材料的燃烧速度、提高高分子材料防火性能。

1.2 凝聚相阻燃

高分子材料燃烧过程中, 通过防火材料的应用可以在材料上形成一层疏松膨胀的碳化层, 包覆材料,

以防止热传散, 并且能够达到材料防火的效果。材料发生凝聚相阻燃要有良好的成碳基质, 因此, 高分子材料本身的碳化能力对材料的防火性能有极为重大的影响。

1.3 中断热交换阻燃

切断燃烧热传递途径来进行阻燃, 一般情况下燃烧过程需要释放热量, 而且可燃物在此过程中会被持续加热维持燃烧状态。中断热交换阻燃机理就是以加入阻燃剂或其它添加成分, 切断上述过程以实现阻燃效果。添加阻燃剂可以吸收和重新对热能进行转移, 热传递到一定的程度从而达到不能满足可燃物的热分解温度要求, 使得可燃物质无法产生挥发型的物质, 成功抑制了燃烧过程中的链传递过程的形成。中断热传阻燃机理效果取决于阻燃剂材料的类型及阻燃剂的添加比例和分布状态, 以及阻燃剂的阻燃作用机制。

2 阻燃高分子材料的具体分类

对阻燃高分子材料的分类可以从阻燃元素、阻燃剂与材料关系等方面进行分析, 如阻燃高分子材料可根据不同分类标准进行划分: 按阻燃元素分类, 可分为有机磷系、氮系、硼系、卤系等类型; 若按阻燃剂与材料的关系分类, 则可分为反应型阻燃剂和添加型

阻燃剂两大类。在阻燃高分子材料的研究领域中，有许多的学者提出了新的研究成果，其中也包括了磷-氮复合物等新型膨胀型阻燃高分子材料。

2.1 磷系阻燃高分子材料

当前，磷系阻燃高分子材料在阻燃领域占据重要地位，实际应用范围广泛，其突出优势体现在材料燃烧初期的显著阻燃效果。并且这类材料涵盖了多种类型，比如：有机盐类、磷酸酯类及含磷多元醇等阻燃剂体系。

2.2 氟系阻燃高分子材料

卤素型阻燃高分子材料由于阻燃性优良、阻燃剂的投入量较少，在实际施工中使用比较普遍。缺点是，在使用时会产生具有强腐蚀性的卤素，这是由于材料很容易吸收空气中大量的水蒸气，使其转化成具有腐蚀性作用的氢卤酸，并且同时还伴有大量烟气产生。因此如何在保证卤素型阻燃高分子材料良好性能的基础上，开发出多功能复合型阻燃高分子材料，是相关工作人员需要研究的重点。

2.3 本质阻燃高分子材料

由于本质阻燃高分子材料具有独特的化学结构，其固有的阻燃特性展现出抗氧化、耐高温的优良特性，得益于这一优秀的阻燃特性，不需要对其进行后期改性工序。这种新型阻燃材料已引发学术界和产业界的高度重视，但本质阻燃高分子材料的发展仍受限于生产成本高昂、制备工艺繁琐等挑战。尽管如此，本质阻燃高分子材料的实用化及推广，正逐渐成为阻燃高分子材料发展的主要趋势。

2.4 无机阻燃高分子材料

在高温下，无机阻燃高分子材料会分解逸出一些结晶水，在结晶水蒸发时，结晶水与分解逸出的水蒸气一起释放出来，可降低可燃气体的比例达到阻燃的效果。总的来说，无机阻燃高分子材料主要利用阻燃剂吸热分解的反应机制和高比容填料的吸热储热效应，使其远离分解温度，从而达到阻燃的效果。

3 阻燃高分子材料在工程领域中的应用

3.1 阻燃高分子材料在建筑工程领域中的应用

伴随着我国建筑行业的不断发展，人们的物质生活水平得到了持续地提升，建筑材料的防火性能已经成为评定建筑物结构安全的关键标准，甚至影响了人们对房屋的选择与购买。基于这一现实情况，开发商们在建筑工程领域中要积极开发出具有高阻燃性能的高分子阻燃材料，并且在建筑工程的室内外装修以及管道安装过程中进行广泛应用。在保证建筑物的结构安全同时达到降低建筑工程成本的效果。比如利用卡拉胶将聚磷酸铵进行包裹即可制备出具有优异阻燃

性、可阻火防燃的防火涂料，以有效地阻止火源的扩散，维持稳定的温度，为建筑材料提供一层坚固的保护；还可以石墨烯为原料，经过 DOPO 和硅烷偶联剂的一系列反应可得到具有高效阻燃性能的环氧树脂复合阻燃助剂，该材料不仅可以增强其耐热性并且能提高其阻燃性，还可极大地提高其力学性能，在工程建筑领域中，只需适量添加该复合阻燃剂便可提升其阻燃指数，从而可以在保证工程结构安全的同时大幅降低建筑成本。

3.2 阻燃高分子材料在汽车工程中的实际应用

在经济、科技的快速发展及人们的出行需求下，以汽车为出行交通工具的需求日益增多，汽车的应用形态呈多样化特点，近年来，新能源汽车的生产技术日益成熟，市场占有率持续提升，在新能源汽车组装部件中，所使用的电池、汽车承重等重要零部件，都会使用到以聚烯烃为主体的高分子材料，辅以少量聚氨酯、聚碳酸酯的混合物，在此应用过程中，均不具备良好的阻燃效果，难以满足实际使用中的安全要求。尤其是在遇到交通事故的时候，由于材料受热时易出现热解、燃烧状况，存在着极大的安全风险。因此，在材料防火阻燃性方面，应当基于汽车本身的安全需要实现材料的阻燃效果。在此现实要求情况下，通过在汽车工程实践中应用阻燃高分子材料，在很大程度上实现了阻燃的效果。例如，在汽车实际应用过程中，将苯二甲酸乙二胺与磷酸盐阻燃剂以 1:4 的混合配比形成氮、磷的复合型阻燃剂应用到热塑性工程塑料混合物中，便可借助氮、磷共同起到阻燃功效的方式实现热塑性工程塑的制作，使制成的热塑性工程塑料产生了相应的阻燃功能，在不添加氮、磷复合阻燃剂的情况下，热塑性工程塑料的极限氧指数通常为 18.0%；而当加入 1:4 配比的氮、磷复合阻燃剂以后，其极限氧指数显著提升至 25.2%，表明阻燃性能获得了明显改善。

3.3 阻燃高分子材料在电气工程中的应用

将交联聚乙烯(XLPE)和氢氧化镁作为复配体系应用于地铁牵引电缆产品中，其氧指数可达到 38 以上，远远高于传统的材料，可有效地降低在隧道中发生火灾时火势蔓延的风险。采用阻燃高分子复合材料能为地铁提供可靠的电缆方案，确保发生火灾时，火势蔓延速度得到有效控制，给乘客和相关人员提供逃生时间，保障人们的生命安全。

将阻燃高分子材料应用于电器外壳及部件。如将 PMMA 阻燃材料应用到微型断路器中，能够有效提升微型断路器的阻燃耐温能力，使其在 70℃高温环境下不发生变形或者破损，且体积电阻率可达或优于

$1 \times 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$, 从而保证电器产品在运行中的安全可靠性。将阻燃高分子材料应用至新能源装备中的动力电池模组上。采用聚氨酯(PU)/碳纳米管复合隔膜能够使得穿刺强度 $\geq 300 \text{ gf}/\mu\text{m}$, 通过UL2149(5V/m火花测试无起火); 将阻燃高分子材料应用至光伏逆变器上。将导热系数 $12 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 的环氧树脂基复合材料应用到SiC器件散热模块中, 能够使阻燃等级达到UL94V-2。

利用阻燃高分子材料替换电力变压器及油浸设备中的油, 特别是在替代变压器油方面, 利用生物基环氧树脂(TGIC固化)的固体绝缘材料达到的击穿场强在 35 kV/mm 左右, 是传统变压器油浸纸绝缘材料的2倍。这大大增强电力设备的绝缘能力, 为电力变压器油开发拓宽了思路。

3.4 阻燃高分子材料在其他工程领域中的应用

随着现代科学技术的发展, 以及对高分子阻燃材料研究的持续推进, 这类材料在通信设备和新能源等新兴领域的应用日益扩大, 其卓越的阻燃性能得到了充分展现。特别是在电子通信行业, 虽然高分子树脂作为电子覆铜板的核心基础材料具有悠久的使用历史, 但其在实际应用中仍面临着抗剥离强度和玻璃化转变温度等方面的影响和技术挑战。因此, 部分研究人员抓住这一机会, 使用具有优良阻燃、耐火等性能的双马来酰亚胺树脂作为有机基体成功制得适合电子通信设备所用的覆铜板, 以提升电子设备使用的安全性。

4 阻燃高分子材料的市场发展前景

4.1 环保型阻燃高分子材料

水性磷系阻燃剂如聚磷酸铵(APP), 在聚碳酸酯(PC)基材中的应用已显示出其显著的环保效益。依据生命周期评估(Life Cycle Assessment,LCA)数据, 应用该阻燃剂可显著降低产品全生命周期碳排放量, 最高可达到42%。本研究结果显著展示了水性磷系阻燃剂在降低环境影响方面的巨大应用潜力, 并进一步强调在材料科学领域, 通过精心挑选合适的添加剂以优化产品环境性能的重要性, 同时具有极为可观的市场应用潜力。

微胶囊化的红磷材料应用, 其分散度在95%以上, 材料的力学性能衰减控制在5%以内, 通过ASTMD648热形变验证, 很好的证实了微胶囊化红磷能使材料获得更高的性能。

4.2 多功能复合改性阻燃高分子材料

4.2.1 协同作用

石墨烯加入EVA后, 当其用量为3wt%时, EVA的各项性质都有所改善, 其中在2.5mm厚情况下极限

氧指数高达32, 使得阻燃性更好, 同时其导热能力也有了极大改善, 导热率提高至 $6.8 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

4.2.2 防菌阻燃共性

聚丙烯(PP)材料利用季铵盐改性之后, 获得了超凡的防菌能力, 对金黄色葡萄球菌的抑制率达99%以上, 且经改性之后的聚丙烯已经满足严格的EN467阻燃标准, 能够对材料实现双重保护。

4.3 智能响应类阻燃高分子材料

温敏型阻燃涂层: 是由石蜡和膨胀石墨体系组成, 在 180°C 的温度下, 体积膨胀率可以达到200%以上; 其明显的体积膨胀作用能够起到及时阻断火焰传播的作用, 有较好的阻燃效果, 市场应用前景广阔。

利用现代化光电导纤维集成材料构建具备极高的灵敏度和准确性的火灾早期预警系统。火灾早期预警系统响应时间小于30s, 在火灾刚萌发时就可以及时发出有效报警, 误报率小于0.1%, 降低了不必要的慌乱和骚扰, 确保了警报的可靠性, 且成本效益显著。

5 结语

加强阻燃高分子材料的研究具有重要价值, 将为工程领域的安全与性能产生深远影响, 本文通过对阻燃高分子材料的阻燃机理的探究, 分析阻燃高分子材料的分类, 对阻燃高分子材料在工程领域中的具体应用展开了具体的探究, 为相关工程的顺利开展及更加广泛的市场应用提供一定的参考。

参考文献:

- [1] 单春燕, 秦舒浩, 胡智, 刘琪, 庞会霞, 龙丽娟, 向宇姝. MOFs阻燃高分子材料应用研究进展[J]. 工程塑料应用, 2024, 52(12):171-176.
- [2] 杨滨, 杨劲松. 阻燃高分子材料在工程领域中的应用进展研究[J]. 聚酯工业, 2024, 37(2):53-55.
- [3] 杜逸纯, 王新颖. 本征型阻燃高分子材料的研究进展[J]. 弹性体, 2021, 31(6):88-92.
- [4] 马殿普, 李俊, 袁英杰, 覃德清, 潘飞, 符泽卫, 何棋. 汽车零部件用阻燃高分子材料的应用研究进展[J]. 云南化工, 2021, 48(9):1-7.
- [5] 姜存华. 阻燃高分子材料的研究进展及其在工程领域的应用[J]. 化工设计通讯, 2020, 46(8):101-101+109.
- [6] 王瀚文, 安世杰, 徐菲, 马文静, 朱志国. 生物降解高分子材料阻燃改性研究进展[J]. 棉纺织技术, 2024, 52(4):92-98.
- [7] 田强, 王桂珍. 阻燃高分子材料在建筑工程中的应用及其研究进展综述[J]. 合成材料老化与应用, 2021, 50(2):155-157.
- [8] 曹周员. 建筑工程领域中高分子合成材料阻燃性能改善与应用研究进展[J]. 塑料助剂, 2022(4):62-64.