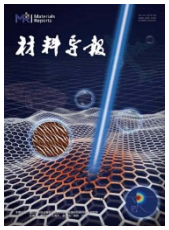

材料导报
Materials Reports
ISSN 1005-023X,CN 50-1078/TB

《材料导报》网络首发论文

题目：　阻燃剂研究与应用进展及问题思考

作者：　徐建林，王涛，康成虎，杨文龙，牛磊

网络首发日期：　2021-11-15

引用格式：　徐建林，王涛，康成虎，杨文龙，牛磊．阻燃剂研究与应用进展及问题思考[J/OL]．材料导报．
https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20211114.1553.018.html

网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

网络首发时间：2021-11-15 13:12:49
网络首发地址：https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1078.TB.20211114.1553.018.html

阻燃剂研究与应用进展及问题思考

徐建林[1,2]，王　涛[1,2]，康成虎[1,2]，杨文龙[3]，牛　磊[1,2]

（1 兰州理工大学材料科学与工程学院，兰州 730050； 2 兰州理工大学省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室，兰州 730050； 3 河西学院物理与机电工程学院，张掖 734000）

聚合物因其优异的特性在诸多领域备受关注。然而，绝大多数聚合物具有可燃和易燃特性，因聚合物燃烧引起的重特大火灾造成群死群伤和重大财产损失的恶性事件时有发生，这导致其在一些领域的应用受到限制。为了解决聚合物材料易燃的缺点、满足人们日常生活安全的需求，新型、高效与环保阻燃剂的研发成为阻燃领域一项重要的研究课题。

目前，阻燃行业正处于蓬勃发展的态势，阻燃剂种类繁多。然而，阻燃剂在使用过程中也凸显出一些问题。如阻燃剂添加量大时，会恶化聚合物复合材料的力学性能，难以实现阻燃性能与力学性能的平衡；阻燃剂在发挥阻燃作用的同时，释放出烟尘、气体给环境造成的污染难以满足环保的要求；阻燃剂在聚合物中难以分散以及与聚合物之间相容性差导致阻燃效率降低；阻燃剂的添加影响聚合物的色泽以及难以满足实际服役条件下对不同性能的需求。

针对以上问题，研究者们致力于开发环保、高效、阻燃-抑烟一体化的新型阻燃剂，从提高阻燃剂在聚合物基体中分散性以及两相界面设计方面着手，通过阻燃剂的复配、阻燃剂纳米化、表面改性技术满足聚合物对阻燃剂的多功能要求，并不断发展分散性、界面相容性的评判理论与关系模型，丰富、有效的定量评价体系将对设计环境友好、阻燃性能和综合性能优异的聚合物复合材料具有现实可行的意义。

本文评述了阻燃剂在环保性、分散性、相容性、阻燃效率和对聚合物综合性能影响方面研究与应用的进展；在此基础上，探讨了阻燃剂所面临的技术问题，论述了相关问题解决的方案与发展趋势。

关键词　阻燃剂　种类与性能　技术问题　发展趋势

通信作者：徐建林，ggdjlxu@sina.com

中图分类号：TB39　　**文献标识码：**A

Research and Applications of Flame Retardants: A Review and Thoughts

XU Jianlin[1,2]，WANG Tao[1,2]，KANG Chenghu[1,2]，YANG Wenlong[3]，NIU Lei[1,2]

1. School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 3. School of Physical and Mechanical Engineering, Hexi University, Zhangye, 734000, China

Polymer materials have been paid attention to in many fields due to their excellent properties. However, most polymer materials are combustible and flammable properties, which lead to a lot of malignant events such as misfire, death and property loss and limits its application in some fields. In order to solve the flame-retardant problem of polymer materials and meet the needs for people's safe lives, the study and development of efficient and environment-friendly flame retardants have become an important research topic.

At present, the flame retardant industry is the stage of vigorous development in China. There are many kinds of flame retardants. However, flame retardants also exposed some problems in the process of their application. For

基金项目：国家自然科学基金（51761025）；甘肃省教育厅创新基金项目(2021A-023)
This work was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (51761025)，Project supported by the Department of Education of Gansu Province Innovation Fund (2021A-023)

example, a large number of flame retardants will deteriorate the mechanical properties of polymer composites, making it difficult to achieve a balance between flame retardancy and mechanical properties; The smoke and gas produced by flame retardants in the process of exerting flame retardancy will cause serious pollution to the environment, which is not consistent with the environmental requirements; The flame retardant effect is reduced because of the difficulty of dispersing in the polymer and the poor compatibility with the polymer; And the addition of flame retardant affects the color of polymer, so that it can not meet the requirements of different properties in actual application.

To solve the above problems, the researchers devoted to the development of the integration of environmental protection, high efficiency, flame retardant and smoke suppression of new flame retardant, and improved the dispersion of flame retardants in polymer matrix and two-phase interface design aspects. Through the combination of flame retardants, nano-treatment of flame retardants, surface modification technology met the requirements of the multi-function of flame retardants of polymer. To set up a rich, effective quantitative evaluation system, researchers need to continuously develop evaluation theory and the relational model of dispersity and interface compatibility. The design of environment-friendly, flame retardant performance, the excellent comprehensive performance of polymer composites has realistic significance.

The research and application progress of flame retardants in environmental protection, dispersion, compatibility, flame retardant efficiency and the influence on the comprehensive performance of polymers are reviewed in the paper. On the basis, some technical problems facing flame retardants are discussed, and then some solutions and development trends of related problems are introduced.

Keywords: Flame retardant, category and performance, technical problems, development trend

Correspondence: JianlinXu, ggdjlxu@sina.com

0 阻燃剂研究与应用的社会与工程背景

随着科学技术的进步与社会的发展，聚合物因其质轻价廉、化学稳定性好、成型性好和原料来源丰富等优点在机械、纺织、建筑材料、汽车、电工电子等领域得到广泛应用，且已渗透到人类的日常生活与生产中。然而，绝大多数的聚合物具有可燃和易燃的特性，聚合物一旦燃烧，熔滴的产生使火势蔓延极快，并可产生烟尘和一些有毒气体，从而造成火势的失控、大量的人员伤亡和巨大的经济损失。2019年我国共接报火灾23.3万起，死亡1335人，直接经济损失达36.12亿元；美国2019年共接报火灾130万起，死亡3700人，财产损失达148亿美元。火灾安全已成为影响社会稳定和经济发展的重大威胁之一。尤其在一些人员密集、不易疏散的场所，由于聚合物燃烧引起的重特大火灾造成群死群伤、重大财产损失的恶性事件时有发生。例如，2010年上海“11.15”特大火灾事故的发生，很大原因是由于建筑用塑料过滤网、泡沫、聚氨酯等燃烧引起的。一幕幕因聚合物燃烧而酿成的火灾事故时刻警醒着人们，采取安全有效的措施和提高聚合物的阻燃性能刻不容缓。为了减少火灾的发生，世界绝大多数国家都制定了聚合物相关的阻燃标准和法律法规。我国于2001年颁布和实施了《消防法》，对防火和阻燃在法律层面上提出了明确的规定和具体要求。此后，公安部也规定，凡是涉及在公共场所使用的阻燃类产品、自2008年7月1日起必须满足《公共场所阻燃制品及组件燃烧性能要求和标识》国家标准的强制性要求，这不仅对聚合物的阻燃性能提出了更高的要求，而且也给新型阻燃剂和阻燃高聚物的研发带来了新的机遇，成为该研究与生产领域发展的最大驱动力。此外，中国共产党的十九大报告明确指出：“树立安全发展理念，弘扬生命至上、安全第一的思想，健全公共安全体系，完善安全生产责任制，坚决遏制重特大安全事故，提升防灾减灾救灾能力”，有关防火和阻燃的安全要求也被提高到了前所未有的高度。

自聚合物材料出现以来，为了解决其易燃的缺点，聚合物阻燃技术的发展一直是人们关注的问题之一。随着研究的深入，提高聚合物材料阻燃性能的技术不断推陈出新，取得了一系列研究成果。根据提高聚合物阻燃性能的方式，通常分为本征阻燃和添加型阻燃两种方式。本征阻燃是将氮、磷、硅等阻燃元素通过化学方法添加到聚合物分子链中，从而达到阻燃的效果。添加型阻燃主要是将阻燃剂添加到聚合物基体中以达到阻燃效果，该方法成本较低，阻燃效果好，易于产业化，是目前最常用的阻燃技术，由此也推动了

阻燃剂的蓬勃发展。目前阻燃剂品种繁多，归纳起来有卤素阻燃剂、无机阻燃剂、膨胀型阻燃剂(IFR)和矿物阻燃剂等类型。卤素阻燃剂由于阻燃效果好，添加量少，对基体材料力学性能影响小，长期作为主要的阻燃剂使用，其主要分为溴系和氯系阻燃剂；无机阻燃剂主要是指金属氢氧化物类、金属氧化物类等，常用的包括氢氧化镁(MH)、氢氧化铝(ATH)、硼酸锌、三氧化二锑(Sb_2O_3)等；膨胀型阻燃剂（IFR）通常是以P、N、C为主要核心成分的复合阻燃剂，其在受热时因发泡膨胀故而得名，IFR可促使聚合物在燃烧时表面形成炭质泡沫层，炭质泡沫层可起到隔热、隔氧、防止熔滴和抑烟的阻燃效果；矿物阻燃剂有普通矿物类、粘土矿物和可膨胀石墨等，其中粘土矿/聚合物阻燃复合体系发展迅速。

目前，阻燃剂已在聚合物中广泛使用，阻燃剂的需求量也在不断上升。据统计，至2014年全球阻燃剂的用量及销售额分别达到262万吨及61亿美元，全球阻燃剂使用量年均增长率约为5%，我国则是全球阻燃剂市场需求增长最快的国家，市场需求量年均增长率约为15%[1]。在蓬勃发展的阻燃领域，将阻燃剂添加到聚合物中好似成为顺理成章的技术，然而，如何使得聚合物具有高的阻燃性能、环保与低的烟尘以及优异的综合性能是需要深入的研究与综合评判的问题。为此，研究人员展开了大量的研究，也取得了丰硕的成果。通过Web of Science数据库，以“flame retardant”、“flame retardancy”、“flame retardance”或“fire retardant”为关键词进行检索，近十年内共发表SCI论文7285篇（其中高被引论文95篇），对于阻燃剂和阻燃性能的研究与日俱增（如图1所示），这即反映了该领域研究的热度，也体现出所取得的丰硕的成果。

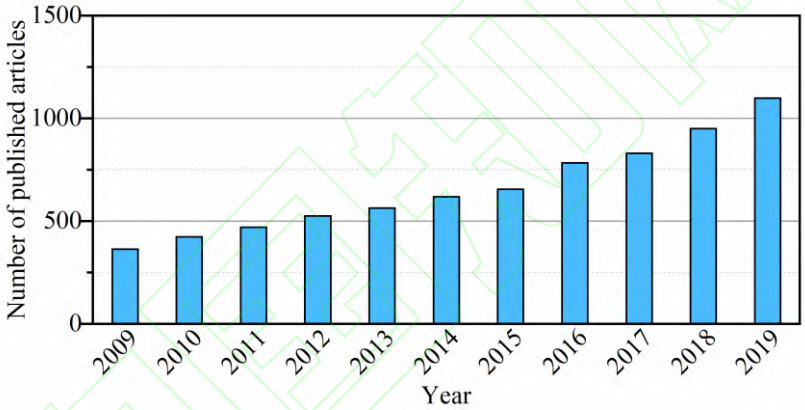

图1　以“阻燃剂”、“阻燃性能”、“阻燃性”或“防火材料”为关键词的SCI论文数量统计图

Fig.1　Statistical chart of the number of SCI papers with “flame retardant”, “flame retardancy”, “flame retardance” and “fire retardant” as Keywords

为了更好的了解近年来阻燃剂的发展现状和理清技术发展思路，本文主要探讨了阻燃剂在环保性、分散性、相容性、阻燃效率和对聚合物材料综合性能影响方面的现状和面临的技术问题，论述了相关问题解决的方案与发展趋势。

1　阻燃剂的环保性

如何解决聚合物易燃的问题是聚合物材料应用过程中的一个热点课题，但随着科学技术的进步和社会的发展，阻燃聚合物材料在燃烧时引起的环境污染问题也日益受到重视。

卤素阻燃剂作为一种传统阻燃剂，长期在聚合物阻燃领域得到广泛应用。然而，卤素阻燃体系在燃烧时会产生有毒烟雾，随着社会的进步和人们的环保意识增强，卤素阻燃剂的使用越来越受到限制。尤其是欧盟先后颁布了 RoHS 指令和 REACH 法规，以及联合国《斯德哥尔摩公约》也提出加强对阻燃剂的管理之后，卤素阻燃剂使用在欧洲和美国大幅减少。同时，世界各大机构纷纷研究开发新品种的阻燃剂及其替代品。其中一些公司开发出十溴二苯醚的替代品——多溴联苯醚阻燃剂，当时认为该产品具有良好的阻燃性能，并且对环境友好。但近年来随着对溴系阻燃剂的深入研究，发现含溴阻燃剂燃烧时可分解出二恶英和呋喃，这两种物质可能引起神经系统损害、先天缺陷和癌症。如多溴联苯醚也因发现具有一定的毒性而

被欧委会新修订的 REACH 法规（EC）No1907/2006 规定使用限制，进而在全球范围内掀起了一股含溴阻燃剂的淘汰浪潮。然而，在此过程中，日本的东京芝蒲公司生产的溴化环氧树脂（BEO）、美国 Ferro 公司和Great Lake公司率先工业化生产的溴化聚苯乙烯（BPS）和美国Albermale推出的十溴二苯乙烷（DBPE）却因为“环境友好型”迅速占领了溴系阻燃剂市场，究其原因是这些阻燃剂没有发现会产生二恶英和呋喃等有害成分，因此在工业生产中这些阻燃剂仍在继续使用。不幸的是国内有一段时间处于“谈溴色变”的状况，因此在新型溴系阻燃剂的研发上滞后，而一些产量较大的、制备工艺陈旧的溴系阻燃剂产品因环保问题却被明确列入禁用名单。近年来，随着市场的需求，BEO、BPS 和甲基八溴醚和溴化丁乙烯/乙烯基芳香共聚物(溴化 SBS)等新型溴系阻燃剂的生产也受到国内企业的重视。然而，仍有一些学者对溴系阻燃剂可能存在的潜在危害表示担忧，因此，阻燃剂“除溴”在一定范围内还是得到认同。著名的商业决策与行业市场研究机构——美国弗里多尼亚集团公司预测未来全球将继续向非卤代阻燃剂转移。由此可见，阻燃剂从有卤阻燃剂到低卤阻燃剂，再到环保无卤阻燃剂的发展正逐步成为现实。

目前，国内外学者在新型环境友好型无卤阻燃剂研发方面开展了大量的研究工作，其中无机阻燃剂、IFR 和矿物阻燃剂由于环境友好性和良好的阻燃效果成为阻燃剂研究领域的热点。

氢氧化镁、氢氧化铝等金属氢氧化物阻燃剂在受热分解时释放出的结晶水可吸收大量的燃烧热，从而降低聚合物表面温度，阻止聚合物热分解；同时，其脱水生成的金属氧化物能够催化形成炭层；此外，该类阻燃剂在燃烧过程中也不会产生有毒、可燃或腐蚀性的气体。层状双氢氧化物(LDH)在聚合物阻燃领域中的应用研究也是近年来的热点，LDH阻燃剂具有高效和环保等优点，人们已对其在聚丙烯、聚乙烯和聚苯乙烯等塑料中的应用展开了研究。研究结果表明：即使添加少量的LDH阻燃剂，也能提高复合材料的热稳定性和起始分解温度；随着复合材料中LDH含量增加，热释放速率和释热总和得到显著地减小，而且火焰快速燃烧和大面积燃烧的趋势也有明显地减弱[2]。但在聚合物中，无机阻燃剂只有加入量较大时才能达到阻燃效果(例如，$Al(OH)_3$和$Mg(OH)_2$的加入量约为50%(质量分数))，而这同时又会使材料的力学性能下降。另外，无机阻燃剂与聚合物结合力小，相容性差，限制了该类阻燃剂的应用范围[2,3]。

IFR因其环境友好性和良好的阻燃性能，使其一直活跃于环保型阻燃的研究领域。虽然IFR具有环保以及可被用于多种聚合物的阻燃等先天优势，但其自身也需要解决与高聚物相容性较差、吸湿性较大、起始分解温度较低、热稳定性较弱、阻燃剂分散性差以及与高聚物的理论配比等一系列问题[4]。IFR在聚合物阻燃性能方面作用的研究正处于蓬勃发展阶段，新产品和技术不断问世（如Mentedison公司的MF-80、MF-82，Clariant公司的Exolit，Monsoto公司的Spinflam和Great Lake公司的CN-1197、CN-329等产品），但由于价格昂贵等诸多原因，IFR的研究多处于实验室阶段，实现工业化生产的IFR产品的种类并不多[4,5]。由此可见，进一步提高IFR的热稳定性、阻燃效率、与聚合物基材的界面相容性和降低生产成本等要素，将会助推IFR在阻燃领域中的应用。

矿物阻燃剂由于具有环保无毒、资源丰富、价格低等优点，近年来同样受到人们的高度关注。粘土矿物通常以纳米尺度均匀分散在聚合物中，多数粘土矿物的纳米片层在二维方向对聚合物燃烧产生的小分子、可燃蒸气和放出的热量起到阻隔作用，有效地提高了聚合物的阻燃性能。其中研究较多的为可膨胀型的蒙脱土（MMT）和非膨胀型的高岭土。MMT具有双层硅结构，且容易形成插层或剥离型片层结构，可在聚合物中起到一定的阻燃作用。但为了达到较好的阻燃性能，MMT在聚合物中的添加量往往比较大，从而对复合材料的力学性能及MMT在聚合物基体中的分散造成负面影响，这也成为MMT能否更好地应用和发挥其阻燃效率的关键点[6,7]。高岭土的研究相对起步较晚，但发展还算比较快。高岭土在应用时，由于其插层较难进行，所以寻找高效、特定的插层剂仍是高岭土/聚合物复合材料研究的突破点。进一步提高粘土矿物的阻燃效率、降低添加量、提高其与聚合物基材的界面相容性等，仍是粘土矿物阻燃剂使用中需要系统性解决的问题。

总之，环境友好型阻燃剂的发展势在必行，在此过程中也应该意识到不同的阻燃剂有其各自独特的优势，用某一类阻燃剂完全替代另一种阻燃剂并不现实。未来的阻燃剂发展趋势应当是在保证环境友好型的基础上，满足多种功能的需求。

2 阻燃剂的高效性

提高阻燃剂的阻燃效果是阻燃剂应用中始终关注的一个重要因素。提高阻燃剂效率的方法目前主要采用阻燃剂的复配、添加阻燃协效剂和阻燃剂的纳米化三种方法。

2.1 阻燃剂的复配

单一的阻燃剂添加到聚合物中通常难于达到理想的效果，常用方法是将多种阻燃剂复配使其产生协同阻燃作用。如氢氧化物阻燃剂阻燃效率较低，必须大量添加才能得到优异的阻燃效果，但这又会显著恶化聚合物的力学性能。为此，在氢氧化物阻燃剂添加量小的情况下，复配其他阻燃剂便可以获得性能优异的阻燃复合材料。如在聚丙烯中单独以MH做添加剂，即使MH的添加量达到40%（质量分数），聚合物在燃烧时仍会产生熔滴现象，但将MH与含铁蒙脱土（Fe-OMT）复配使用时，聚丙烯复合材料的阻燃性能会得到显著提高[8]。如今随着微胶囊化与核-壳复合颗粒制备技术的飞速发展，将需要复配的各种阻燃剂一体化制备对提高阻燃剂的阻燃效果非常有益，也为阻燃剂的发展带来了新的途径。物理复配阻燃剂是工程上提高阻燃效果的一种常用方式，但其需要建立在大量的实验基础上，存在着一定的偶然性。

从阻燃剂分子结构上进行阻燃元素的组合设计，正成为一种提高阻燃效果行之有效的方法。如Jiahao Zou等人用2-噻吩甲醛、2-氨基苯并噻唑(ABZ)和9,10-二氢-9-氧杂-10-磷杂菲-10-氧化物(DOPO)一锅反应制备出一种新型的含P、N和S的高效阻燃剂TAP。由于TAP在燃烧中可生成一些含S和N的不可燃气体，其可以对可燃气体和氧气起到稀释作用，降低气相燃烧强度。此外，DOPO在高温下分解时产生的含磷自由基可以与高活性自由基结合，可进一步切断燃烧时的链式反应的进行，从而阻止了燃烧，提高了阻燃效果[9]。因此，在阻燃化合物分子结构中加入其它阻燃元素（如P、N、S、Si和Be等元素）成为研发高效阻燃剂的一种有效途径。

2.2 添加阻燃协效剂

阻燃协效剂可有效提高阻燃剂的阻燃性能。例如为了提高卤素阻燃剂的阻燃效率，降低其使用量，常采用氧化锑作为阻燃协效剂；又如为了调高MMT在聚合物中的阻燃性能并同时降低其添加量，可采用MMT与IFR协同阻燃技术[10,11]；再如为了提高IFR的阻燃效率可向基体中添加阻燃协效剂和炭层助剂。如将纳米氢氧化铝（nano-ATH）加入到由聚磷酸铵（APP）和二季戊四醇（DPER）形成的膨胀型阻燃聚丙烯（IFR-PP）中，当nano-ATH取代2%（质量分数）的APP时，材料的LOI从26.6％上升到31.2％，并且样品燃烧等级达到V-0级，燃烧时峰值放热率降低56%，并可形成更加均匀的炭层[12]。世界一些主要公司也不断推出新型阻燃协效剂，如道康宁（陶氏化学公司旗下全资子公司）在Chinaplas2017展会上推出Dow Coming 43-821添加剂，可解决有机磷等传统阻燃添加剂因含量过高造成聚酰胺机械性能下降和降低聚酰胺化合物腐蚀性的问题。

对于不同的阻燃剂和聚合物基体材料，阻燃协效剂的选用也需要区别对待。为了考察阻燃剂与协效剂之间的协同效果，Lewin等[13]提出了协同效应的概念与评估方法，其中最常用的评估指标为协同效应（*SE*）与阻燃效应（EFF），具体计算公式如下：

$$EFF=\Delta LOI/FR(\%) \quad (1)$$

式中，ΔLOI为阻燃复合材料的LOI与基体的LOI之差，FR为阻燃剂含量。EFF值越高，阻燃效果越好。

$$SE=EFF_1/EFF_2 \quad (2)$$

式中，EFF_1为协同体系的阻燃效率，EFF_2为单一阻燃剂的阻燃效率。与EFF类似，SE可用于两种或多种阻

燃剂的比较。通过计算，可以更加优化阻燃剂的添加量，不仅可减少盲目的试验工作，还可优化阻燃剂的配比，降低阻燃剂的添加量，使经济效益最大化。阻燃剂与协效剂相辅相成，只有不断优化阻燃剂与协效剂的配方与比例，才能更好地发挥阻燃剂的阻燃效率。

2.3 阻燃剂纳米化

由于纳米颗粒具有比表面积大、高扩散性和体积效应等特性，以纳米化的阻燃颗粒为阻燃添加剂时，聚合物的阻燃性能会得到明显的提升。如在聚对苯二甲酸丁二醇酯(PBT)中分别添加微米级和纳米级的Sb_2O_3颗粒，纳米级的Sb_2O_3对PBT的阻燃效果明显优于微米级Sb_2O_3的阻燃效果，且达到难燃等级所需要的Sb_2O_3含量也低。同时，纳米Sb_2O_3可有效降低PBT燃烧时的总热释放量和最大热分解速率，并促进成炭，形成的炭层更加致密[14]。又如，Long Yan等[15]将纳米二氧化硅添加到以磷酸(PA)、季戊四醇(PER)和正丁醇(BA)为原料合成的酸式磷酸酯(PEA)中，并与三聚氰胺甲醛树脂共混制备出胶合板防火涂料。研究表明纳米二氧化硅可显著降低防火涂层的失重率、炭化指数、火焰传播率、热释放率、总放热率、发烟率、总发烟量等，纳米二氧化硅不仅提高了涂层的热稳定性和阻燃性能，而且有效地改善了涂料的抑烟性能。当纳米化的阻燃剂颗粒在聚合物中均匀分散时，由于纳米颗粒的高活性，使得其更加容易参与各种阻燃反应，从而获得优异的阻燃效果。经过纳米化后的阻燃剂通常可提高其与聚合物之间的界面相容性，这对聚合物的综合力学性能的提升也是有益的。但是，要想获得分散性优异的纳米聚合物复合材料，必须要克服纳米阻燃剂容易团聚的问题。

3. 阻燃剂与聚合物的相容性

3.1 相容性的提高

阻燃剂作为聚合物基体中的一种添加剂，其与聚合物基体间的结合问题一直以来备受研究者的关注。为了使填料与基体之间形成一个有机整体通常需要依赖两者界面间的相互作用。因此，界面面积和界面结合力是设计添加型阻燃复合材料重点关注的两大结构特性。有机阻燃剂一直以来在阻燃领域发挥着重要的作用，占据重要的市场位置[1]。有机阻燃剂通常加入共聚融合剂型界面相容剂改善复合材料界面，如十溴二苯乙烷、溴化环氧树脂、溴化聚苯乙烯等。无机阻燃填料与聚合物之间的界面相容性及其在聚合物基体当中的分散性是制约该类阻燃复合材料物理、化学性能提高的瓶颈。而且无机阻燃剂难以克服添加量大的缺陷，并且对高分子材料的物理与机械性能影响较大。但随着研究者对复合材料两相界面的控制，对基体和阻燃填料进行改性或引入合适的界面相容剂，促进填料在基体当中良好的分散，使两相之间较好的相容，最终形成稳定、牢固、均匀的界面层。因此，一些具有优良分散性、界面相容性高的新型无机阻燃剂或协同阻燃剂将具有良好的发展前景和市场空间。对于无机颗粒、矿物黏土等无机阻燃添加剂，通常采用表面碱化和酯化预处理、表面接枝改性、浸润处理、表面物理加工、聚合物涂层、添加界面改性剂等方法实现两相界面间的紧密结合。如Zhi-Wang Yang等[16]采用十二烷基胺(N)和硼酸(B)对坡缕石(GPS)表面进行修饰，可明显改善GPS与乙烯醋酸乙烯共聚物(EVA)之间的界面相容性，并且GPS在EVA中具有良好的分散性。将改性坡缕石与EVA和可膨胀石墨(EG)共混制备的EVA/PGS@B–N/EG复合材料不仅具有更优异的阻燃效果，而且也改善了复合材料的韧性。可以预见，通过考察复合材料中界面的形成过程、界面的性质、界面结构及界面作用力最终实现对阻燃复合材料性能的可控调节将成为研究的热点。此外，聚合物的分子链长度也是影响界面区域的关键因素，随着聚合物链分子量的增加，锚固点的数目和聚合物层的密度增大。而且复合材料相互作用强度还可以控制界面区域的聚集态结构，并对阻燃填料周围较大的区域产生影响[17]。为了提高界面相容性，有关界面的理论研究不断深入，并且提出了多种理论，如化学键理论、过渡层理论、浸润性理论、机械互锁理论、摩擦理论、扩散理论、静电理论、酸碱理论等。对于不同的界面体系存在着不同的理论体系，需要对界面体系开展针对性地研究。

3.2 界面特性评价

对于填充型阻燃聚合物而言，阻燃填料与聚合物之间通过界面作用相互结合，两者之间的界面相容性直接影响着复合材料界面的形态、结构、厚度以及分散均匀性，并最终决定复合材料的优劣。因此，客观定量的评价界面特性是制备综合性能优异的复合材料的一项关键技术。复合材料有三种组成单元，即填料、聚合物基体和填料-聚合物界面，每个单元须具有各自独特的性能以及相互协调作用才能促使复合材料表现出优异的综合性能。目前，研究复合材料界面结构的有效手段主要包括傅里叶红外光谱、拉曼光谱、电子显微镜、X射线衍射、X射线光电子能谱、小角中子散射及小角X射线散射等。另外，研究者们也从力学性能、热性能和计算机仿真模拟等方面研究了复合材料的界面作用。由于强弱界面聚合物链的存在方式不同，填料的存在使得聚合物链运动受到限制引起构象变化，形成锚固点的数目和聚合物层的密度不同。鉴于此，Tannenbaum R等[17]基于界面间吸附作用的不同，形成不同的锚点数，通过红外光谱成功研究了聚甲基丙烯酸甲酯/纳米氧化钴复合材料的界面结构。另外，振动光谱是一种强大的、信息丰富的研究阻燃复合界面结合特性手段。采用表面增强技术，能够实现原位和实时获取聚合物分子链发生的微小变化，也可采用拉曼光谱与红外光谱联用技术来研究复合材料界面结构，在此基础上，通过透射电镜与扫描电镜观察填充物在聚合物中的分散性，这对复合材料界面研究起到至关重要的作用[18]。除上述方法以外，还可采用红外光谱、广角X射线衍射以及小角中子散射相联合的方式研究复合材料各相之间的界面结构及其相互作用[19]。也有学者采用原子力显微镜观察复合材料的界面，以此来研究界面形成、相位和厚度变化、剥离和弯曲以及填料在聚合物基体当中吸附、插入和包覆[18]。填料与聚合物基体之间的界面作用对复合材料力学性能有很大的影响。因此，强的界面作用导致复合材料具有较高的储能模量和较低的损耗因子。学者们基于复合材料的力学性能以及动态力学分析，借助Nicolais–Narkis、Halpin–Tsai、Pukànszky模型，计算填料与聚合物基体之间的界面相容性参数[20-22]。强的界面相互作用使填料表面的聚合物链的运动受限，引起材料热分解温度的变化。因此，通过对材料热性能的测试也可反映复合材料的界面作用。近年来，通过计算机仿真模拟也成为考察复合材料界面作用的热点。基于分子动力学模拟，可考察填料与基体之间的相互作用过程以及聚合物分子链的吸附构象[23]。

3.3 界面调控问题

阻燃聚合物复合材料中通常需要加入多种阻燃剂和协同剂，使得复合材料的界面结构较为复杂。界面层的化学结构、界面层的厚度、界面粗糙度、界面润湿性均为影响复合材料界面相容性的关键因素[18]。阻燃复合材料界面结构的复杂性以及界面反应难以调控的特点使得针对界面的研究方法存在着一定的局限性，需要多种方法相配合才能完成。目前，主要依靠经验模型来实现对复合材料界面的评价，界面性质的变化对材料失效的影响作用仍不够明确，界面结合状况对材料性能影响的评价仍有不足，用于评价阻燃复合材料界面性能的测试手段能否真正达到预期目标，还需进一步深入探讨。当前的测试方法缺乏对界面的定量分析，而想要凭借现有的实验方法和技术对聚合物与阻燃填料之间的界面作用进行深入研究仍然存在一定的难度。而对于界面反应等较为复杂的体系，现有的研究方法更加难以清楚地探究。如何确定测试手段的有效性和准确性是目前一个难解的问题[1]。因此，寻求表征界面结构的新方法，如荧光光谱、荧光共振能量转移测量、荧光各向异性测量、荧光相关光谱、导热、导电间接界面测试以及激光共聚焦扫描显微镜等，是研究阻燃聚合物复合材料界面作用的关键。建立材料表面与界面的数学模型、微观关系与宏观性能的关系模型以及建立阻燃复合材料界面结构与性能之间的关系也是目前研发高性能阻燃复合材料亟需解决的关键问题。总之，阻燃聚合物复合材料所涉及到的界面相容性理论错综复杂、属于多学科交叉研究领域。对具体的界面现象与特性由定性描述发展到定量评判，还需进一步丰富和发展界面相关理论，使其更加系统和完善。

4 阻燃剂在聚合物中的分散性

4.1 分散性的提高

阻燃剂在聚合物中的分散性是影响复合材料阻燃效率以及力学性能的关键因素，对阻燃剂分散性的研究已经成为科学界、产业界关注的热点。目前，提高阻燃剂的分散均匀性主要是通过增加共混过程的机械力与适当地表面处理来实现，具体的方法有湿法研磨、机械分散法、静电抗团聚分散法、冷冻干燥粉末分散法、超声波分散技术等。采用不同混合方法制备的复合材料，其性能不尽相同，并且分散机制也有所差异。如Aso O等[24]阐述了填料在聚合物中的分散是强迫混合物熔体通过窄间隙获得高剪切来完成的，填料在基体中的分散效果除了剪切速率外，还与塑料熔体的黏度、粒子间的距离和粒子材料的特性有关。此外，阻燃填料与基体的界面相容不好也会导致颗粒的团聚并在聚合物中形成空洞。决定阻燃填料在基体中分散效果的因素很多，大致可分为内因与外因两大类。内因主要是阻燃填料的表面自由能、表面特性、形状、粒径及基体本身特性等；外因主要是材料制备工艺与装备，如通过熔融共混的方式制备复合材料所涉及的影响分散性的因素有螺杆结构、螺杆转速、熔融温度等。因此，为了获得较好的分散状态，填料与基体之间需要相互润湿，然后才能在机械作用下最终达到分散稳定的效果。在改善填料分散性的同时，学者们也提出了一些分散理论，如双电层排斥理论、空间位阻稳定机制、静电位阻稳定机制等[25]。

4.2 分散性评价

提高阻燃剂在聚合物基体中分散性的同时，还需对其分散性进行客观和准确的评价，这也是研究复合材料性能的一个关键因素。阻燃剂分散性的表征可分为直接表征和间接表征。直接表征主要是基于显微照片对阻燃剂的颗粒形态和分散状况进行分析；间接表征主要是通过对材料有关力学性能、电学性能、热性能等进行测定来确定阻燃剂的分散性。对阻燃剂颗粒在聚合物基体中的分散性进行定量表征的方法主要有颗粒面积分数法、偏态样方法、分散度*D*法以及材料分形法等。分散度*D*法如图2所示。Luo和Koo等[26]采用自由路径法，通过统计粒子间的表面间距，并获得概率密度函数，最终提取出分散指数。又如D. Liu等[27]通过测量颗粒中心间距，比较实际填料间距与理论间距之间的差距，评估填料在基体当中的分散性。Glaskova等[28]采取同样的方法对颗粒的粒径进行了统计计算，并得到了粒径的概率分布图。这些方法主要是对获得的显微图像进行分析，为了获得客观的分散指数，常需借助相关图像处理软件对显微照片进行滤波、二值化、轮廓提取等处理。也有学者基于复合材料的力学性能，借助模型假设，对填料的分散性进行有效评估。

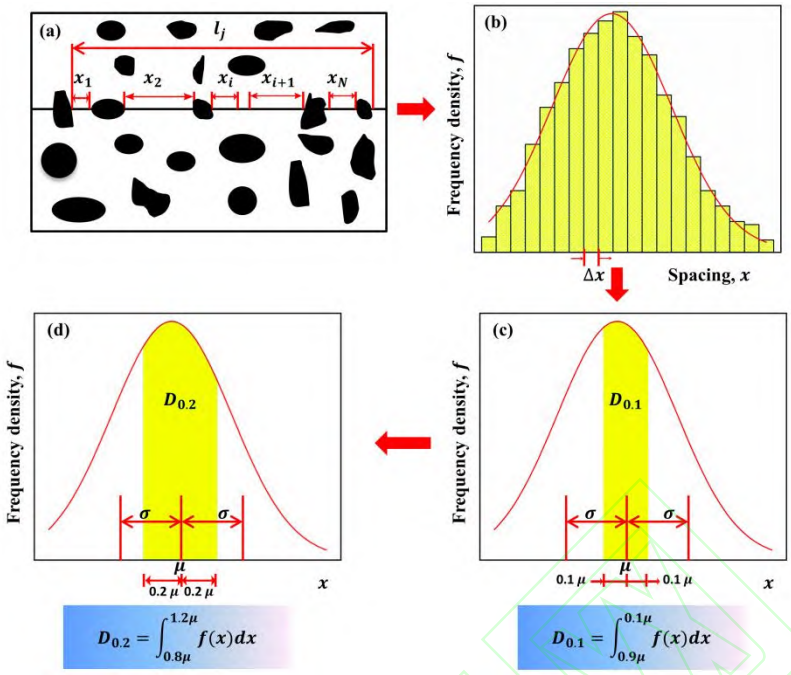

图2　分散度*D*法示意图

Fig.2　A schematic of the dispersion *D* method

4.3　分散性评判问题

目前，对阻燃剂分散性研究与表征仍存在一些问题。提高复合材料阻燃效率的主要方法之一是对阻燃剂进行细化处理，而在细化过程中由于阻燃剂出现较强的表面效应，导致其容易发生团聚，使得细化后的阻燃剂的均匀分散变得困难。阻燃剂有效均匀的分散成为发挥材料阻燃效率和获得优异力学性能的保障。另外，基于显微图像对颗粒分散性进行评估，会受到图像像素、放大倍数选取等因素的影响，评判结果也会受到观察者主观意识的影响。而且，常规获得的显微图像仅可以反映二维平面的相关信息，并不能完全表示阻燃剂颗粒在三维空间上分布的结构特征，从而影响了对分散性的准确评价，因此，通过二维平面所获得的阻燃剂颗粒尺寸、颗粒间距、颗粒分布并不能完全反映阻燃剂填料的分散特征。体视学是一种将二维截面所获得的组织测量值，通过一定的数学方法转换成该组织在三维空间上的描述，其已在定量金相中得到应用，如能将体视学的有关技术引入到阻燃剂分散性的评价体系中将会发挥积极的助推作用。总之，针对阻燃剂颗粒的分散效果，如何建立客观、准确和定量的评价体系是阻燃剂分散性研究的一个重要问题。

5　满足聚合物综合性能要求的阻燃剂的研发

5.1　减小对聚合物力学性能的影响

聚合物的力学性能是影响其被用作结构材料的一个主要因素。因此，在使用阻燃剂以提高聚合物的阻燃性能的同时，还需确保聚合物具有优异的力学性能。为使聚合物达到良好的阻燃等级，通常需要在聚合物中添加大量的阻燃剂，如当$Al(OH)_3$和$Mg(OH)_2$做阻燃剂时，其添加比例需高达50%（质量分数）左右才能达到阻燃效果，如此高比例的添加量，一方面使聚合物复合材料产品的力学性能大幅下降，难于满足一些行业实际应用的要求；另一方面，增加了聚合物复合材料制备的难度与成本。为了消除大量添加阻燃剂而引起聚合物性能下降的问题，通常采用减小阻燃剂添加量的方法来降低阻燃剂对材料性能的不利影响，但为了保证聚合物复合材料拥有优异的综合性能，通常将阻燃效率、阻燃剂与聚合物的相容性、阻燃剂在聚合物中的分散状态、辅助添加剂的种类和含量等诸多因素综合考虑。因此，减小阻燃剂添加量不是一种简单的物理手段，是需要综合考虑各方面因素的一个系统性问题。为此，研究人员进行了不懈的努力，探

索了一些行之有效的方法。

近年来随着粉体超细化，甚至纳米化的发展需求，阻燃剂超细化、纳米化的进程也不断加快。研究已表明，减小阻燃剂的粒度，不仅可提高阻燃剂在基体材料中的分散性和阻燃效果，而且也可提高聚合物的力学性能。因此，阻燃剂的细化成为提高聚合物力学性能的有效方法。然而，在纳米阻燃剂实际应用过程中，将其简单的添加并不能获得令人满意的效果。研究发现，纳米阻燃剂对聚合物力学性能的有益作用往往存在一定的质量分数或体积分数范围。当纳米阻燃剂添加量过低时，其阻燃效果和强化聚合物力学性能的效果均不明显，而当添加量过高时，虽然阻燃效果提高了，但对聚合物力学性能的恶化现象也更明显，随着阻燃剂添加量的增大，其对基体材料力学性能恶化的现象越显著。此外，也存在纳米阻燃剂在合理的添加范围内可提高聚合物的拉伸强度，但同时也降低聚合物韧性的现象。纳米阻燃剂对聚合物增强和增韧主要通过微裂纹、剪切屈服、联合界面假说或空洞化等理论方式来实现。其中剪切屈服理论被广泛用来解释纳米粒子的增韧作用，其增韧过程被Zuiderduin概括为三个过程，包括应力集中、脱黏过程和剪切屈服[29]。由此可知，若要使纳米阻燃剂对聚合物同时起到增强和增韧的作用，首先要保证纳米阻燃剂在聚合物中均匀分散，分散均匀的纳米阻燃剂通过分散外界应力来提高材料的强韧性。同时，还要放置纳米阻燃剂产生团聚，团聚的阻燃剂很容易造成聚合物产生内部缺陷，从而导致聚合物基体在外力作用下因应力集中而发生开裂，严重恶化了聚合物复合材料的力学性能[30]。所以借助阻燃剂的超细化，甚至纳米化来提高聚合物的力学性能时，需要从纳米阻燃剂的粒径、添加量、在聚合物中的分散性和阻燃剂与聚合物的界面相容性多方面综合考虑。

在阻燃聚合物中添加增强纤维也是提高聚合物力学性能的一种有效方法，传统所用的纤维有玻璃纤维(GF)和芳纶纤维等，现在所用的新型纤维有碳纤维(CF)、玄武岩纤维和天然纤维等。利用纤维来提高聚合物力学性能时，两者的相容性与界面问题是需要关注的重要问题。提高相容性可通过纤维表面改性等技术来实现，但纤维界面微观结构的定量描述以及纤维界面的力学行为等问题还需要深入研究。尽管强度较高且与基体相容性较好的纤维对提高聚合物的力学性能有利，但很多纤维本身容易燃烧，燃烧后火焰传播速度较快，而且当添加纤维后的聚合物在燃烧时，会出现“烛芯效应”使得聚合物材料的阻燃性能下降。为了解决这一问题，可采用以下两种方法：一是对一些易燃纤维本身进行阻燃处理，如棉纤维等表面可涂覆混合凝胶涂层来实现其阻燃效果，但表面涂覆处理也可能会使一些纤维失去拉伸强度，变得更加坚硬，使纤维在聚合物不能起到增强和增韧的目的。同时，还需要考虑如何提高纤维表面与聚合物相容性和降低“烛芯效应”的问题。二是可对纤维/聚合物复合材料加入阻燃添加剂进行阻燃处理。在此过程中，需要考虑阻燃剂与基体和纤维的协同效果，即选择的阻燃添加剂不仅要对基体阻燃，还需对纤维进行阻燃，更要避免“烛芯效应”。Wenhua Chen等[31]采取了一种界面碳化法，来解决PA6聚合物阻燃性的这一重要难题。项目组在聚合物基体中加入磷系阻燃剂并使其均匀分布，阻燃剂释放的酸源在界面处形成连续致密的碳酸盐层，有效地阻止了PA6熔体在玻璃纤维表面的吸附、润湿、扩散和流动，消除了“烛芯效应”。总之，利用纤维提高阻燃聚合物力学性能的同时，需综合考虑多种组分之间的阻燃协效性问题。

改善阻燃聚合物的力学性能还可向聚合物基体中加入其他类型的聚合物，使之形成聚合物合金体。不同类型的聚合物进行共混时，首先应当考虑它们之间的相容性，并且各组分聚合物的性质、形态、比例和界面特性以及共混工艺（如机械共混、化学共混和胶乳共混等）都对聚合物合金体的性能有着重要影响。当对阻燃聚合物进行改性时，应根据其所需改善的某方面性能来合理地选择可共混的聚合物，例如常用天然橡胶、聚氨酯等弹性体来改善阻燃聚合物的韧性。在使用聚磷酸铵提高聚乳酸(PLA)阻燃效果的过程中，材料的力学性会得到相应的下降，为此，Meng Ma等[32]选择了一种超增韧聚乳酸/聚己内酯共混物，以4，4'-二苯甲烷二异氰酸酯为添加剂，聚磷酸铵为阻燃剂，制备了兼具韧性和阻燃性的高性能PLA基复合材料，但是该方法的缺点是在提高阻燃PLA韧性的同时会降低材料的拉伸强度。新的聚合物的引入，不仅需要考

虑对原有材料阻燃性能的影响，也需要考虑对其他性能的影响，因此，应该将其作为系统性问题来对待。此外，进一步提高各种组分的界面相容性、分散性与协同性是获得阻燃聚合物优异力学性能的基础。

5.2 适用聚合物色泽要求的阻燃剂

在工业生产中，对于有色泽要求的阻燃聚合物，还需考虑阻燃剂对聚合物色泽影响的问题。最典型的是红磷、可膨胀石墨，由于其颜色深，难以满足一些聚合物制品对颜色的需要。为此，常采用微胶囊包覆技术来降低此类阻燃剂的颜色，如朱超等[33]采用有机、无机双层包覆对红磷表面进行包覆，进而获得了白度化的微胶囊红磷阻燃剂。白度化的微胶囊红磷阻燃剂不仅可以克服红磷对聚合物制品颜色的影响，而且也防止了红磷易吸湿、易氧化、甚至易爆炸的应用难题。但是，深色阻燃剂的包覆效果通常并不理想，因此只能将其应用于对色泽要求不高的聚合物中。此外，还有一些阻燃剂耐高温性能较差，在聚合物加工过程中易分解生成小分子物质，从而改变聚合物的颜色。为此，需要改善阻燃剂的热稳定性。如郭岳等[34]采用原位聚合方法制备了不同酚醛含量的酚醛包覆红磷，提高了红磷的热稳定性。除了改善原有阻燃剂的色泽问题，新型有色或透明阻燃剂也在不断推陈出新。如日本帝人公司研发的新型磷系阻燃剂的色母粒型，具有阻燃性和透明性、着色性兼备的作用，在高阻燃性的装饰领域具有很好地应用前景；奥地利Gabriel Chemie研发出的非六溴环十二烷阻燃剂浓缩物色母粒，在挤塑聚苯乙烯(XPS)制成的泡沫绝缘板上得到应用；美国FRX Polymers公司开发了一种透明、韧性好，而且与聚碳酸酯(PC)具有良好的相容性的新型磷酸酯类阻燃剂，该阻燃剂对PC制品不仅具有阻燃和增韧的作用，而且对PC的透明性影响也小。

5.3 抑烟性能优异的阻燃剂

聚合物在燃烧时会产生大量的烟雾，甚至有毒烟雾，火灾中多数死亡是由于烟雾窒息造成的，因此，降低产烟量也成为阻燃中需同时考虑的一个关键问题。常用的抑烟添加剂有金属氢氧化物、层状双金属氢氧化物、其他金属氧化物和无机磷系列化合物等物质。目前，为减少添加剂的含量，降低对聚合物基体材料性能的影响，广泛使用具有阻燃和抑烟双重效果的添加剂，如ATH、MH、MMT等添加剂。但这种方式所获得的阻燃抑烟效果取决于添加剂本身的阻燃和抑烟特性，其效果和应用范围都受到限制。为此，研究者也在不断探索其它有效的方法来实现聚合物燃烧所需的高效抑烟剂。①.抑烟剂的纳米化和表面改性处理，可提高抑烟剂在聚合物中的分散性，这对降低聚合物燃烧时的发烟量具有较好的效果，同时体系配比合适时还可提高基体的力学性能；②.辅以抑烟协效剂。如在软质聚氯乙烯中添加ATH和氧化锌时，由于氧化锌的协效作用，相比于仅添加ATH的聚合物其阻燃性能和抑烟性能均得到了提高[35]。诚然，对主添加剂和辅添加剂以及体系添加物而言，其添加量通常有适宜的区间范围，超出该范围，不仅无法得到合格的阻燃与抑烟效果，还会恶化聚合物的力学性能；此外，抑烟协效剂具有配对性，即抑烟协效剂需与阻燃剂和基体配合使用，如金属化合物常与IFR协效抑烟，硼酸锌常与ATH、MH在PP中协效抑烟，因此抑烟协效剂的选择需视阻燃剂和基体的情况而定。③.阻燃抑烟一体化添加剂研发。为了进一步提高阻燃与抑烟效果，改善添加剂与聚合物的相容性与分散性，近年来，核壳结构的阻燃剂孕育而出。如Yinghao Song等[36]以碳微球为核材，以聚磷酸铵(APP)为壳材，制备了具有核壳结构的新型的阻燃剂(CA)，然后采用3-甲基丙烯酰氧丙基三甲氧基硅烷(γ-MPS)对CA进行改性以提高CA与PET基体的相容性。结果表明：CA赋予了PET优异的阻燃和抑烟性能，其极限氧指数(LOI)提高到28.6%，阻燃等级达到V-0级，总烟气生成量（TSP）下降了18.8%。可以预见，研发具有阻燃、抑烟等多功能一体化的添加剂是未来一个很有潜力的发展方向。④.新型阻燃抑烟剂的研发。近年来，碳纳米管(CNT)、石墨烯(GR) 等材料的出现和推广应用，也受到阻燃领域的关注，它们所具有的阻燃性能等也逐步得到证实，并且基于这些新型材料制备出了一些新型高效的阻燃抑烟剂。如Benjamin Tawiah等[37]采用经3-氨基苯硼酸改性的氧化石墨烯(RGO-AZOB)与偏硼酸钠(SMB)复合制成的RGO-AZOB/SMB阻燃剂，将其添加到PLA后形成的复合材料表现出优异的阻燃性和抑烟性，同时PLA的拉

伸强度和杨氏模量分别提高了49.1%和34.9%。又如，基于碳纳米管类似结构的聚磷腈纳米管也被改性，在阻燃剂包覆的基础上获得了功能化聚磷腈纳米管(FR@PZS)，其具有优异的阻燃与抑烟效果[38]。

5.4 满足其他性能要求的阻燃剂

聚合物材料在实际的服役条件下，还会有一些其他性能的要求。如在温度相对比较高的环境中需要考虑阻燃剂自身的热稳定性以及对聚合物热稳定性的影响，如Xiaowei Shi等[39]采用缩聚法合成了一种含磷、氮的阻燃剂（PCNFR），该阻燃剂不但自身具有较高的热稳定性，而且可有效提高PLA的热稳定性，促进炭化，进而提高了PLA的阻燃性能。在电子封装领域，阻燃聚合物还要求具有较高的散热性能，为此还需要克服聚合物材料导热性能差的问题。如宁廷州等[40]采用三聚氰胺-甲醛树脂预聚体（MF）修饰的石墨烯（G）与磷烯（BP）制成一种具有阻燃和导热功能的纳米填料，将其添加到环氧树脂（E51）中可起到很好地阻燃效果，而且其导热系数提升至0.257 W/(m·K)。纺织物常制成衣服和床上用品，纺织物易燃成为住宅火灾蔓延的主要推手。由于纺织物在使用中经常水洗，因此在制备阻燃纺织品时需要考虑水洗对阻燃性能的影响。总之，聚合物材料由于使用场合的不同，对其性能要求也不同，这就要求阻燃剂应根据聚合物材料的使用状况而具有不同的性能。

6 结语与展望

随着科技的进步和人类对阻燃聚合物材料性能要求的日益提高，阻燃剂的发展日趋蓬勃，阻燃剂面临着新的机遇与挑战：

（1）阻燃剂从有卤、低卤，到无卤化已成为一种发展趋势，研发绿色高阻燃效率的新型阻燃剂是实现聚合物阻燃无污染化的一项具有广阔应用前景的技术，积极开展相关研究是大势所趋；

（2）制备阻燃性能、力学性能以及其他性能俱佳的阻燃聚合物，是实现阻燃聚合物广泛应用的物质基础，研发具备多种功能的新型阻燃剂仍是研究者不断追求的目标；

（3）普通且单一的阻燃剂添加到聚合物中通常难以达到理想的阻燃效果，阻燃剂的复配、添加阻燃协效剂和阻燃剂的纳米化是提高阻燃效果的有效方法。但是，如何改善阻燃剂性能、优化阻燃剂配方、提高性价比、获得良好的分散性、降低添加量以及在提升其阻燃效率的同时又不恶化力学等性能的相关技术的研究，对阻燃聚合物的开发和应用具有重要的理论和现实意义，为此也需要针对不同的阻燃体系开展系统与深入的研究；

（4）采用阻燃剂的表面改性技术、阻燃剂纳米化、改善阻燃剂与聚合物界面相容性、提高阻燃剂在聚合物的均匀分散性仍是推动阻燃剂在聚合物中应用的有效途径。然而，由于阻燃剂的种类、聚合物的特性和制备工艺等因素的复杂综合影响，需要对不同阻燃体系的相关问题及有效性进行有针对性和系统性的深入研究。

参考文献：

1 Wang Y Z, Chen L. New flame retardant materials[J],*New Industrialization Straregy*, 2016,6(1), 38 (in Chinese).

王玉忠，陈力.*新型工业化*, 2016,6(1), 38.

2 Costa F R, Wagenknecht U, Heinrich G, et al. *Polymer Degradation and Stability*, 2007,92(10), 1813.

3 Nyambo C, Wilkie C A. *Polymer Degradation and Stability*, 2009, 94(4), 506.

4 Bao Z Y, Dong Y M. *Intumescent flame retardant technology and application*, Harbin Institute of Technology Press, China, 2005(in Chinese).

鲍治宇，董延茂. *膨胀阻燃技术及应用*. 哈尔滨工业大学出版社,2005.

5 Peng H Q. Synthesis of phosphorus-containing bicyclic caged flame retardants and their application in intumescent flame retardant polypropylene systems. Ph.D. Thesis, Sichuan University, China, 2007(in Chinese).

彭华乔. 不同结构的双环笼状含磷阻燃剂的合成及其在聚丙烯阻燃改性中的应用[D].博士学位论文，四川大学, 2007.

6 Reza A, Harintharavimal B, Azman H, et al. *Fibers and Polymers*, 2018, 19(4), 914.

7 Suparanon T, Surisaeng J, Phusunti N, et al. *Chinese Journal of Polymer Science*, 2018,36(5), 620.

8 Kong Q, Wu H, Zhang H, et al. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2016, 16(8), 8287.

9 Zou J H, Duan H J, Chen Y S, et al. *Composites Part B: Engineering*, 2020,199, 108228.

10 Jiang Y, Li J, Li B, et al. *Polymer Degradationand Stability*, 2015,115, 110.

11 Xu W, Wang G J, Zheng X R, et al. *Polymer Degradationand Stability*, 2015, 111, 142.

12 Qin Z L, Li D H, Li Q, et al. *Materials andDesign*, 2016, 89, 988.

13 Chow W S, Chang L N, Jaafar M, et al.. *Journal of Composite Materials*, 2015, 49(12), 1471.

14 Xu J L, Ma B X, Kang C H, et al. *Journal of Lanzhou University of Technology*, 2020, 46(2), 24(in Chinese).

徐建林，马冰雪，康成虎，等. *兰州理工大学学报*, 2020,46(2), 24.

15 Yan L, Xu Z S, Wang X H, et al. *Progress in Organic Coatings*,2017,112, 319.

16 Yang Z W, Liang X X, Xu X Q, et al. *RSC Advances*,2016, 6, 65921.

17 Tannenbaum R, Zubris M, David K, et al. *The Journal of Physical Chemistey*, 2006, 110(5), 2227.

18 Wu Y K, Ma J Z, Bao Y et al. *Materials Reports*, 2018, 32(03), 434(in Chinese).

吴英柯,马建中,鲍艳,等.*材料导报*, 2018,32(03), 434.

19 Zaman I, Phan T T, Kuan H C, et al. *Polymer*, 2011, 52(7), 1603.

20 Zare Y. *Journalof Colloid and Interface Science*, 2016,470, 245.

21 Zare Y, Yasser. *InternationJournal of Adhesion and Adhesives*, 2016, 70, 191.

22 Chopra S, Deshmukh K A, Peshwe D,et al. *Mechanics of Materials*, 2017, 109, 11-17.

23 Li J, Yang Y Q, Luo X, et al. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2013, 42(3), 644(in Chinese).

李健，杨延清，罗贤，等. *稀有金属材料与工程*, 2013,42(3), 644.

24 Aso O, Eguiazabal J I, Nazabal J, et al. *Composites Science andTechnology*,2007, 67(13), 2854.

25 Xu J L, Kang C H, Niu L, et al. *Materials Research Express*,2019, 6(9), 950.

26 Luo Z P, Koo J H. *Journal of Microscopy*, 2007, 225(2), 118.

27 Liu D, Pourrahimi A M, Olsson R T, et al. *European Polymer Journal*,2015, 66, 67.

28 Glaskova T, Zarrelli M, Borisova A, et al. *Composites Science and Technology*, 2011, 71(13), 1543.

29 Zuiderduin W C J, Westzaan C, Huétink J, et al. *Polymer*, 2003, 44(1), 261.

30 Yang W L, Xu J L, Niu L, et al. *Journal of Adhesion Science & Technology*,2017, 32(7), 739.

31 Chen W, Liu P, Liu Y, et al. *Polymer Chemistry*, 2015, 6(24), 4409.

32 Ma M, Wang X P, Liu K, et al.*Polymer International*, 2020, 69(10), 985.

33 Zhu C, Li H P, Chen S C, et al.*Modern Chemical Industry*, 2015, 35(4), 116 (in Chinese).

朱超，李惠萍，陈世军，胡子昭.*现代化工*, 2015, 35(4), 116.

34 Guo Y, Li Q. *Sichuan Chemical Industry* 2015, 18(4), 4(in Chinese).

郭岳,李谦. *四川化工*, 2015,18(4), 4.

35 Qu H Q, Wu W H, Jiao Y H, et al.*Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2006,57(5), 1259 (in Chinese).

屈红强，武伟红，焦运红，等.*化工学报*. 2006, 57(5), 1259.

36 Song Y, Xue B, Wang J. et al.*Journal of Polymer Research.* 2020,27, 2.

37 Tawiah B, Yu B, Yuen R K K, et al. *Carbon*, 2019, 150, 8.

38 Qiu S, Wang X, Yu B, et al.*Journal of Hazardous Materials*,2017, 325, 327.

39 Shi X, Liao F, Ju Y, et al. *Fire and Material*s, 2017, 41, 362.

40 Ning T Z, Fu N, Zhang J Z, et al. *Packaging Engineering*, 2020,41(3), 156 (in Chinese).

宁廷州，付玲，张敬芝,等. *包装工程*, 2020,41(3), 156.