

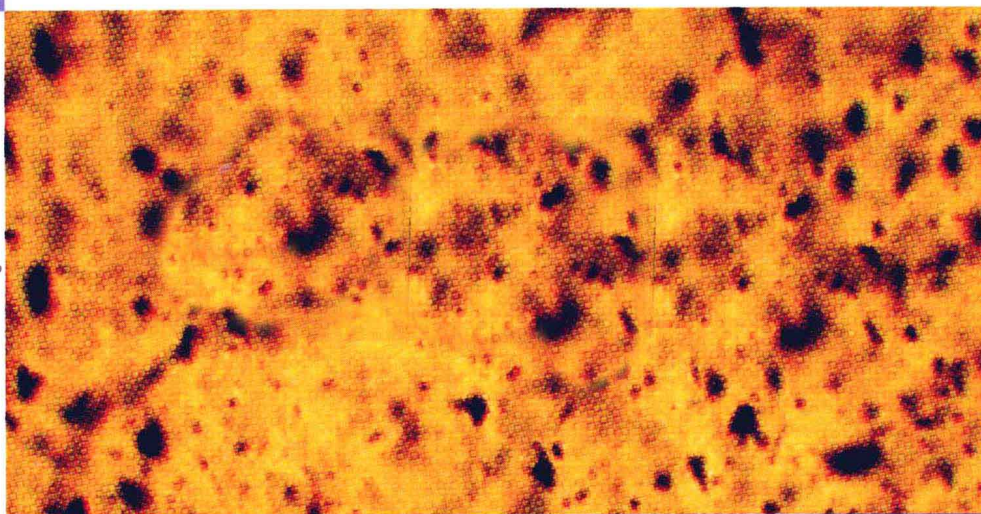
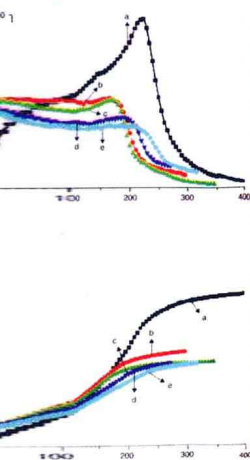
[美]A.B.Morgan & C.A.Wilkie

欧育湘 李建军 叶南飏

主译

# 阻燃聚合物 纳米复合材料

Flame Retardant  
Polymer  
Nanocomposites



国防工业出版社

National Defense Industry Press

著作权合同登记 图字:军-2010-056

图书在版编目(CIP)数据

阻燃聚合物纳米复合材料/(美)摩根(Morgan, A. B.), (美)威  
克(Wilkic, C. A.)著;欧育湘,李建军,叶南飙译. —北京:国防工  
业出版社,2011.2

书名原文:Flame Retardant Polymer Nanocomposites

ISBN 978-7-118-07116-0

I. ①阻… II. ①摩… ②威… ③欧… ④李… ⑤叶…  
III. ①高分子材料:防火材料:纳米材料 IV. ①TB383

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第008686号

Translation from the English language edition:

*Flame Retardant Polymer Nanocomposites* by A. B. Morgan & C. A. Wilkie

Copyright © 2007 John Wiley & Sons

All Rights Reserved.

This translation published under license.

版权所有,侵权必究。

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

\*

开本710×960 1/16 印张21½ 字数392千字

2011年2月第1版第1次印刷 印数1—4000册 定价65.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

# 序

(原书主编为中译本写的序)

首先,向中国从事聚合物纳米复合材料及阻燃研究的同仁问好!我们非常高兴你们将我们主编的专著译成中文出版。我们希望,中国同仁会发现本专著对你们研发新阻燃材料是很有裨益的。

当2007年4月本专著问世时,它是第一本全面论述阻燃聚合物纳米复合材料的著作;而且直至今天,它仍然可能是此领域内的唯一专著。当然,现在已有一些综述性论文和某些著作中的章节,论述了这一领域的研究进展,但仍仅有本书内容涵盖了阻燃聚合物纳米材料的所有方面,如材料的合成、性能及检测等。

自本书出版以来,阻燃聚合物纳米材料的研发已有一些新的进展,但这并不影响本书的完整性和全面性,而仅深化了本书的个别部分。上述的新进展之一是在聚合物中采用新的纳米材料以使基材获得阻燃性,这类新填料包括层状双羟基化合物(LDH)、碳纳米管(CNT)、石墨烯、有机改性磷酸酯(和有关材料)、层状氧化物、硫化物及其他等。

美国及中国都已研究过LDH的应用,LDH的优点是它与多种聚合物优良的粘着力,且人们能通过改变阴离子的用量和价态,获得调整材料配方的很大空间。LDH的缺点是,要使LDH在聚合物中良好分散,似乎比MMT难得多,但LDH即使在聚合物中分散欠佳,也能赋予基材阻燃性。

CNT已为Takashi Kashiwagi广泛研究(他是这方面的领军人物),他的研究结果表明,对单层碳纳米管(SWCNT),即使聚合物中的含量低至0.1%,也具有阻燃作用。当撰写这篇前言时,石墨烯正被媒体广为报道,因为石墨烯的杰出研究者之一已被授予了本年度诺贝尔奖金。据我们所知,还没有人采用石墨烯作为聚合物的阻燃剂,但随石墨烯的研究进展,这只是时间早晚的问题。其他用做聚合物阻燃剂的碳纳米材料还有碳纳米纤维、富勒烯和氧化石墨。

中国科学技术大学的胡源曾采用过层状磷酸铝作为聚合物阻燃剂,此填料的优点之一是,因为它是合成的,所以可通过改变制备工艺以获得不同长径比的材料,因而可探求某些结构—性能的关系。

此外,还有一些新材料,如层状氧化物和硫化物,如果它们对阻燃有效,到时也会被采用。值得庆幸的是,尽管在聚合物中加入上述新纳米填料还没有研发出什

么产品,但人们采用的第一个纳米材料 MMT,已经取得了重要的成果。而且我们深信,未来必将有越来越多的产品应用上述新的纳米填料。

尽管上述新纳米填料已在阻燃领域内为人研究,但自本书于 2007 年出版以来,关于阻燃聚合物纳米材料研究的主流仍未改变。对于 MMT,为了发挥它的阻燃效率,必须令 MMT 的纳米质点在基材中分散良好,以形成真正的纳米复合材料结构。这种结构一旦形成,就会降低材料燃烧时的质量损失速率,并从而降低释热速率。但如上文所提及的,对于某些新的纳米填料,则不一定要形成纳米复合材料,也能提高材料的阻燃性。

本书已使读者受益良多,且即使现在,本书不仅对新入门者,而且对于业内专家,仍然是纳米复合材料领域内一本获得基础知识和深入了解的优良著作和读本。

当然,自本书问世以来,阻燃聚合物纳米复合材料方面又取得了一些新的重要进展,当我们为本书再版时,我们肯定会在书中补充所有新进展。最后,我们希望,阅读本书的很多中国读者也将在纳米复合材料领域中有创新,我们怀着愉快的心情,等待着在新的一年里能看到你们的成果。

感谢出版社购买本书的版权,感谢译者将本书译成中文出版。希望在不久的将来,在国际阻燃会议上再次见到你们。

Alexander B. Morgan

Charles A. Wilkie

2010 年 11 月

欧育湘译

2010 年 12 月

## 译者前言

由美国 A. B. Morgan 教授及 C. A. Wilkie 教授主编 Wiley 出版社出版的《阻燃聚合物纳米复合材料》(Flame Retardant Polymer Nanocomposites) 是系统论述聚合物纳米复合材料阻燃性及阻燃机理的专著。全书可分为三部分。第一部分是阻燃聚合物纳米复合材料的基础理论和原理,论述燃烧及阻燃机理、聚合物纳米复合材料的原理及阻燃性、火灾条件下高聚物纳米复合材料的热降解模型、特定高聚物纳米复合材料的燃烧行为、测定材料性能的新技术及分子模型等。第二部分是具体的阻燃聚合物纳米复合材料,包括热塑性的及热固性的,特别是评述了膨胀型的及含有多种新型纳米粒子(如碳纳米管)的材料。第三部分是阻燃聚合物纳米复合材料目前的应用领域及未来研究方向。这部分不仅对阻燃聚合物纳米复合材料进行了极富前瞻性的述评,详细阐明了该领域一些亟待解决的理论及技术关键问题,并预示了解决这些问题的方法与途径。

本书是国内外第一本阻燃聚合物纳米复合材料的专著,其中有关的部分内容只散见于国内外近期发表的论文,但就系统性、全面性、深入性而言,均远不能与本书相比。本书中有很多关于阻燃机理的理论阐释都出自著者个人的独创性见解,很多测试阻燃性的新技术,更是以前文献未报道过的。一些新型纳米粒子材料(如多面体低聚倍半硅氧烷、碳纳米管、氧化石墨等)也都是在书中首次系统而全面地论述。

此两位主编均系阻燃材料领域内享誉国际的学者,近十几年来致力于阻燃聚合物纳米复合材料的研究(这类材料在 1997 年才开始为人瞩目),Wilkie 教授曾三次受聘来中国讲学及主持国际阻燃会议(2007 年、2008 年和 2010 年)。参与该书撰写的有近 20 名全球知名的阻燃专家,如其中的 J. W. Gilman 博士(美国国家技术及标准研究院),是阻燃聚合物纳米复合材料方面公认的权威,T. Kashiwagi 是新型粒子阻燃聚合物纳米复合材料的杰出科学家,提出过一些该类材料阻燃机理新观点。编撰者们根据多年的实践经验,加上雄厚的专业基础理论,以及他们拥有的广博的信息量,使本书既有对基础理论精湛而严谨的论述,又反映了编撰者多年专业研究的实践成果,给读者描绘了阻燃纳米复合材料的现代全貌及未来前景,是一本有价值的阻燃专著。

为推动我国阻燃聚合物纳米复合材料的发展及扩大和加强与国外同行学者的技术交流,在总装备部“国防科技图书出版基金”和金发科技股份有限公司的资助下,在国防工业出版社的指导、帮助和支持下,经 Wiley 出版公司的许可和授权,我们组织翻译了此书,现以中文版简体字出版。我们希望读者能从书中领略阻燃聚合物纳米复合材料的精彩世界,并从中获益。

在此,对中译本还有几点说明:① 文中涉及某物质的用量及浓度时,所言百分数均系质量百分数(有注明者除外);② 采用法定计量单位及相应的表示法;③ 文中涉及的通用高聚物和阻燃剂及阻燃术语名称,在绝大多数情况下均用缩写字及首字母缩写词,其全称见书前附录。

本书由欧育湘、李建军、叶南飏主译和审校,译者还有赵毅、郎柳春和孙晓丽。

值此本书中译本出版之际,我们要感谢本书的译者,感谢他们两年来所付出的艰辛劳动和坚持不懈的努力;还要特别感谢金发科技股份有限公司,该公司一贯致力于阻燃高分子材料的研发和生产,对本书中译本的出版始终表现了很大的热情,给予了充分的关注、指导和帮助(包括财政资助),有利地促进了本书如期付梓。

限于译者的水平,加上书中涉及的知识面广而新,译文中不妥之处实难避免,恳请读者斧正。

欧育湘 李建军 叶南飏  
2010 年 12 月于北京

## 原 书 前 言

自 20 世纪 90 年代初,有关聚合物纳米复合材料的研究即明显增多,现在已成为高分子材料研究的主要领域之一。据人们所知,高聚物纳米复合材料早在 90 年代初正式获得此命名前就已经有所应用。事实上,早在 1961 年便有有关著作出版,而专利则可以追溯到 20 世纪 40 年代。这些著作和专利表明,少量的层状硅酸盐(或黏土)可以与高聚物复配,从而形成性能大为改善的复合新材料。但直到 20 世纪 90 年代的出版物才恰当地将添加黏土的聚合物称之为聚合物纳米复合材料,并激起了当今广泛对其研究的热潮。有人可能认为高聚物纳米复合材料只是纳米技术发展的一部分,但事实并非仅此而已。我们需要从根本上了解为什么纳米量级复配的材料与以宏观尺度复配的材料在性能上具有如此巨大的差别。因此,有关聚合物纳米复合材料的研究并不是猎取新奇和赶时髦的纳米科技,而是要系统研究结构与性能之间的关系以及分子量级和大分子量级的界面科学。

现在已知,将黏土或其他纳米粒子添加到高聚物中形成的高聚物纳米复合材料,具有许多潜在的应用。第一个广为人知的工业应用是 Toyota 研发的应用于汽车工业的聚酰胺 6[聚(己内酰胺)或尼龙 6]复合材料。由于纳米复合材料有较高的热变形温度而可应用于发动机,这可降低汽车的重量。早期的其他应用包括提高气体阻隔性(饮料和食品包装)、提高电磁材料的导电性、提高工程材料的机械强度和韧性。高聚物/黏土纳米复合材料在阻燃方面的应用则发现得稍晚,且只是在最近才找到其工业应用的途径。由于纳米复合材料较传统阻燃材料不仅能提高阻燃性能,也能改善其他性能(如力学性能),因此高聚物纳米复合材料在阻燃方面的应用前景是很诱人的,并且可能成为真正意义上的多功能材料。

多功能材料,即一种材料具有多种功能,因而由于它们多方面的应用而可有效地简化材料科学与工程,所以极有发展前景。例如,对应用于电子设备外壳的塑料有多种性能要求:力学性能(如模量、冲击强度)、热性能(如正常使用条件下不能熔化或松弛)、阻燃性(符合火灾安全规范)和电磁性(如频率屏蔽性)。此外,工业化产品还要考虑其成本、密度、颜色和可循环性。因此,很难找到一种材料能同时满足如此多的要求。例如,聚碳酸酯可以满足力学和热性能要求,并且添加少量的添加剂即能使其阻燃性、密度和颜色也令人满意。而为了降低成本,通常将聚碳酸酯与丙烯腈-丁二烯-苯乙烯(ABS)共聚物共混,而这种共混物用作电子设备外

壳时就达不到所要求的电磁屏蔽性;而为了满足产品(如电脑)应用需求须使用特种涂料,这显而易见增加了成本,且限制了颜色的选择,并导致回收困难。通常在研发领域,很难找到普遍适用的材料配方,而工程师力所能及的是采取折中方案,而这往往又带来其他问题。如果一种材料便能满足所有要求,零部件和商品的制造将变得简单化,成本可能会有所降低,并且提供更多的创新机会。而最有可能使材料有效多功能化的便是高聚物纳米复合材料。

众所周知,高聚物纳米复合材料较传统复合材料具有更优异的力学性能、热性能、气体阻隔性、导电性、阻燃性、电磁屏蔽性等,这已引起人们对其广泛而深入的研究。至今,已有数本重要的专著和文献将高聚物纳米复合材料作为一个整体或是针对其特殊性能予以阐述,但是还没有著作是侧重于纳米复合体系阻燃性能的。如前所述,人们最近才获知纳米复合材料的结构是材料性能,尤其是阻燃性能得到改善的主要原因。所以直到现在,出版关于高聚物纳米复合材料阻燃性能的专著才有足够的研究成果支撑。目前,火安全法规的重大变化和人们对现有阻燃剂的认识,促进了人们对高分子材料阻燃的重视。而且,在提高材料阻燃性能的同时,还要顾及到终端产品的环境友好性,及材料前述各性能之间的平衡,这是特别困难的。因为高聚物纳米复合材料与传统材料相比可提高体系的阻燃性、力学性能、热性能及其他性能,因而人们可满怀希望,高聚物纳米复合材料不仅能满足而且能超越现有的阻燃要求,可用来制造大量既防火又改善了其他性能的消费品。

本书的研究重点是高聚物纳米复合材料在阻燃方面的应用,并提供了关于这方面的一些重要的理论与实践支撑。根据特定的研究主题将本书分成三部分:理论和基础研究、具体的阻燃体系、目前的应用和未来展望,以利于阻燃及纳米复合材料领域的新入门者阅读。

关于理论和基础方面,本书有五章内容:可燃性基础、纳米复合材料原理、纳米复合材料对阻燃性的影响、火条件下的热降解模型以及某些高聚物的可燃性。

关于具体阻燃体系的章节旨在提供详细的信息来源,以便于读者查找相关阻燃高聚物体系的基本情况。由于阻燃方案的确定与被阻燃聚合物及其应用领域或相应的测试规范有关,故很难囊括所有相关阻燃复合体系的信息。本书是根据阻燃剂的类别进行论述的,且每类都有纳米复合材料与传统阻燃剂复配的详细讨论。各章分别阐述纳米复合材料与膨胀体系、无机添加剂、卤系和磷系阻燃剂的复配应用;这部分的最后一章讨论阻燃热固性纳米复合材料,而该章与其他章分开编排的原因是:热固性塑料的制备方法与热塑性塑料的制备方法大有不同,而且于火条件下的燃烧行为也是大相径庭的。

本书的最后一部分阐述了阻燃聚合物纳米材料领域的最新研究进展,并且汇总了纳米复合材料在阻燃方面的应用,同时展望了该领域的未来动向。由于高聚

物纳米复合材料依然是较为新颖的研究课题,今后将不断有新的研究成果发表,包括新型的纳米量级材料。本书的大部分研究系基于高聚物层状硅酸盐(黏土)纳米复合材料,但第10章综述了碳纳米管、纳米纤维和无机胶体粒子改善高聚物的阻燃性能的研究成果。第11章主要是讨论高聚物纳米复合材料在特定领域的应用、优势与不足。最后一章则是当今阻燃聚合物纳米材料研究工作的概述,并指明了该领域的未来发展方向。本章也可看作是对未来该领域应深入研究内容的一个前瞻性陈述,详细阐述了一些未知的和亟待人们探索的技术与原理问题,并且预示了解决这些问题以发展阻燃聚合物纳米材料的方法与路径。

十分感谢各章作者为提供阻燃纳米复合材料研究领域的最新研究成果所付出的努力。我们坚信,本书将会为在全球范围内增进人们对阻燃聚合物纳米复合材料的了解作出贡献。衷心感谢 UDRI 的 Don Klosterman 和 Lynn Bowman 分别在整理纳米增强复合材料和纳米粒子健康与安全性资料方面所提供的帮助;感谢 Dow 化学公司的 Anteneh Worku 博士在参考文献和综述方面所提供的帮助;最后,感谢我们二人的妻子 Julie Ann Morgan 与 Nancy Wilkie,感谢他们一贯的与不知疲倦的支持。

ALEXANDER B. MORGAN  
CHARLES A. WILKIE

# 原书主编及各章作者

## 主 编

**Alexander B. Morgan**

美国 Dayton 大学研究院 (UDRI)  
非金属材料部  
Dayton, 300 College Park  
OH 45429, USA

**Charles A. Wilkie**

Marquette 大学  
化学系  
Milwaukee, WI 53201, USA

## 各 章 作 者

**Günter Beyer**

Kabelwerk Eupen AG  
Malmedyer Strasse 9  
B-4700 Eupen, Belgium  
(第 7 章)

**Jeffrey W. Gilman**

美国国家标准及技术研究院 (NIST)  
Gaithersburg, MD 20899-8665, USA  
(第 3 章)

**Serge Bourbigot**

功能涂层设计制造实验室  
LSPES UMR/ CNRS 8008  
国立 Lille 高等化学学院  
F-59652 Villeneuve d'Ascq Cedex, France  
(第 6 章)

**M. J. Heidecker**

Pennsylvania 州立大学  
材料科学与工程系  
University Park, PA 16802, USA  
(第 2 章)

**Sophie Duquesne**

功能涂层设计制造实验室  
LSPES UMR/ CNRS 8008  
国立 Lille 高等化学学院  
F-59652 Villeneuve d'Ascq Cedex, France  
(第 6 章)

**A. Richard Horrocks**

Bolton 大学  
材料研究与创新中心  
阻燃材料实验室  
BL3 5AB Bolton, UK  
(第 11 章)

**Yuan Hu**

中国科学技术大学  
火科学国家重点实验室  
合肥, 230026 安徽, 中国  
(第 8 章)

**Baljinder K. Kandola**

Bolton 大学  
材料研究与创新中心  
阻燃材料实验室  
BL3 5AB Bolton, UK  
(第 11 章)

**Takashi Kashiwagi**

美国国家标准及技术研究院(NIST)  
火研究部  
Gaithersburg, MD 20878-8665, USA  
(第 10 章)

**Sergei V. Levchik**

美国 Supresta 有限公司, LLC  
Ardsley, 430 Saw Mill River Road  
NY 10502, USA  
(第 1 章)

**E. Manias**

Pennsylvania 州立大学  
材料科学与工程系  
University Park, PA 16802, USA  
(第 2 章)

**Alexander B. Morgan**

美国 Dayton 大学研究院(UDRI)  
非金属材料部  
Dayton, 300 College Park  
OH 45429, USA  
(第 12 章)

**H. Nakajima**

Pennsylvania 州立大学  
材料科学与工程系  
University Park  
PA 16802, USA  
(第 2 章)

**Marc R. Nyden**

美国国家标准及技术研究院(NIST)  
Gaithersburg, MD 20899-8665, USA  
(第 4 章)

**G. Polizos**

Pennsylvania 州立大学  
材料科学与工程系  
University Park, PA 16802, USA  
(第 2 章)

**Bernhard Schartel**

德国联邦材料研究与测试研究所  
材料研究与测试联邦委员会(BAM)  
Unter den Eichen 87  
12205 Berlin, Germany  
(第 5 章)

**Lei Song**

中国科学技术大学  
火科学国家重点实验室  
合肥,230026 安徽,中国  
(第 8 章)

**Stanislav I. Stoliarov**

SRA 国际公司  
Egg Harbor Township, NJ 08234, USA  
(第 4 章)

**Charles A. Wilkie**

Marquette 大学  
化学系  
Milwaukee, WI 53201, USA  
(第 12 章)

**Mauro Zammarano**

美国国家标准及技术研究院(NIST)  
建筑与火研究实验室  
Gaithersburg, MD 20899-8665, USA  
NIST 客座研究员,原单位:  
Cim 工艺实验室  
34012 Trieste, Italy  
(第 9 章)

# 缩 写 词

| 缩写      | 英文名称                                      | 中文名称           |
|---------|-------------------------------------------|----------------|
| 一、聚合物   |                                           |                |
| ABS     | acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer | 丙烯腈—丁二烯—苯乙烯共聚物 |
| EVA     | ethylene-vinyl acetate copolymer          | 乙烯—乙酸醋酸酯共聚物    |
| DGEBA   | bisphenol A diglycidyl ether              | 双酚 A 二缩水甘油醚    |
| HDPE    | high-density polyethylene                 | 高密度聚乙烯         |
| LDPE    | low-density polyethylene                  | 低密度聚乙烯         |
| PA6     | polyamide 6                               | 聚酰胺 6          |
| PA66    | polyamide 66                              | 聚酰胺 66         |
| PA12    | polyamide 12                              | 聚酰胺 12         |
| PAN     | polyacrylonitrile                         | 聚丙烯腈           |
| PBT     | polybutylene terephthalate                | 聚对苯二甲酸丁二醇酯     |
| PC      | polycarbonate                             | 聚碳酸酯           |
| PCL     | polycaprolactone                          | 聚己内酯           |
| PDMS    | polydimethylsiloxane                      | 聚二甲基硅氧烷        |
| PE      | polyethylene                              | 聚乙烯            |
| PE-g-MA | polyethylene-graft-maleic anhydride       | 马来酸酐接枝聚乙烯      |
| PET     | polyethylene terephthalate                | 聚对苯二甲酸乙二醇酯     |
| PLA     | polylactic acid                           | 聚乳酸            |
| PMMA    | polymethyl methacrylate                   | 聚甲基丙烯酸甲酯       |
| POM     | polyoxymethylene                          | 聚甲醛            |
| PP      | polypropylene                             | 聚丙烯            |

| 缩写      | 英文名称                                 | 中文名称           |
|---------|--------------------------------------|----------------|
| PP-g-MA | polypropylene-graft-maleic anhydride | 马来酸酐接枝聚丙烯      |
| PS      | polystyrene                          | 聚苯乙烯           |
| PTFE    | polytetrafluoroethylene              | 聚四氟乙烯          |
| PU      | polyurethane                         | 聚氨酯            |
| PVC     | polyvinyl chloride                   | 聚氯乙烯           |
| SAN     | styrene-acrylonitrile copolymer      | 苯乙烯—丙烯腈共聚物     |
| SBS     | styrene-butadiene-styrene copolymer  | 苯乙烯—丁二烯—苯乙烯共聚物 |
| TPU     | thermoplastic polyurethane           | 热塑性聚氨酯         |

## 二、阻燃剂

|      |                                                       |                            |
|------|-------------------------------------------------------|----------------------------|
| AO   | antimony oxide                                        | 三氧化二锑                      |
| APP  | ammonium polyphosphate                                | 聚磷酸铵                       |
| ATH  | aluminum hydroxide (also known as alumina trihydrate) | 氢氧化铝(三水合氧化铝)               |
| BFR  | bromine-containing flame retardant                    | 含溴阻燃剂                      |
| CPW  | chlorinated paraffin wax                              | 氯化石蜡                       |
| DB   | decabromodiphenyl oxide                               | 十溴二苯醚                      |
| DOPO | 9,10-dihydro-9-oxa-10-phosphaphenanthrene-10-oxide    | 9,10-二氢-9-氧杂-10-磷杂菲-10-氧化物 |
| MCA  | melamine cyanurate                                    | 三聚氰胺氰尿酸盐                   |
| MH   | magnesium hydroxide                                   | 氢氧化镁                       |
| MPP  | melamine polyphosphate                                | 聚磷酸三聚氰胺                    |
| NFR  | nitrogen-containing flame retardant                   | 含氮阻燃剂                      |
| PER  | pentaerythritol                                       | 季戊四醇                       |
| PFR  | phosphorus-containing flame retardant                 | 含磷阻燃剂                      |
| RDP  | resorcinol diphosphate                                | 间苯二酚双(二苯基磷酸酯)              |
| TCP  | tricresyl phosphate                                   | 磷酸三(甲苯)酯                   |
| TPP  | triphenyl phosphate                                   | 磷酸三苯酯                      |
| TXP  | triethyl phosphate                                    | 磷酸三(二甲苯)酯                  |

## 缩写

## 英文名称

## 中文名称

## 三、锥形量热仪/可燃性测试

|                     |                                        |                    |
|---------------------|----------------------------------------|--------------------|
| <b>FIGRA</b>        | fire growth rate                       | 燃烧增长速率             |
| <b>HRR/RHR</b>      | heat release rate/rate of heat release | 热释放速率              |
| <b>LOI</b>          | limiting oxygen index                  | 极限氧指数              |
| <b>MLR</b>          | mass loss rate                         | 质量损失速率             |
| <b>SEA</b>          | specific extinction area               | 比消光面积              |
| <b>THR/THE</b>      | total heat release/total heat evolved  | 总释热量               |
| <b>Tign/TTL/tig</b> | time to ignition                       | 点燃时间               |
| <b>UL-94</b>        | Underwriter's laboratory test#94       | (美国)保险业实验室 UL94 测试 |
| <b>VSP</b>          | volume of smoke production             | 产烟量                |

## 四、纳米复合材料分析技术

|                   |                                                                    |                |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------|
| <b>AFM</b>        | atomic force microscopy                                            | 原子力显微镜         |
| <b>CP-MAS-NMR</b> | cross-polarization-magic angle spinning-nuclear magnetic resonance | 固态交叉极化魔角旋转核磁共振 |
| <b>DMA</b>        | dynamic mechanical analysis                                        | 动态力学分析         |
| <b>DSC</b>        | differential scanning calorimetry                                  | 差示扫描量热法        |
| <b>DTA</b>        | differential thermal analysis(derivative of TGA curve)             | 差热分析(TGA 微分曲线) |
| <b>NMR</b>        | nuclear magnetic resonance                                         | 核磁共振           |
| <b>SEM</b>        | scanning electron microscopy                                       | 扫描电子显微镜        |
| <b>TEM</b>        | transmission electron microscopy                                   | 透射电子显微镜        |
| <b>TGA</b>        | thermogravimetric analysis                                         | 热失重分析          |
| <b>XRD</b>        | X-ray diffraction                                                  | X 射线衍射         |

## 五、纳米粒子/纳米复合材料术语

|                  |                                               |                 |
|------------------|-----------------------------------------------|-----------------|
| <b>CNF/VGNCF</b> | carbon nanofiber/vapor grown carbon nanofiber | 纳米碳纤维/气相生长纳米碳纤维 |
| <b>CNT</b>       | carbon nanotubes                              | 碳纳米管            |
| <b>FSM</b>       | fluorinated synthetic mica                    | 氟化合成云母          |
| <b>GO</b>        | graphite oxide                                | 氧化石墨            |

| 缩写                | 英文名称                                                             | 中文名称            |
|-------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------|
| <b>LDH</b>        | layered double hydroxide                                         | 层状双氢氧(羟基)化物     |
| <b>MMT</b>        | montmorillonite                                                  | 蒙脱土             |
| <b>MWNT/MWCNT</b> | multiwall carbon nanotubes                                       | 多层碳纳米管          |
| <b>o-MMT/OMMT</b> | organically modified montmorillonite                             | 有机改性蒙脱土         |
| <b>PLS/PLSN</b>   | polymer layered-silicate/polymer-layered silicate nano-composite | 聚合物/层状硅酸盐纳米复合材料 |
| <b>POSS</b>       | polyhedral oligomeric silsesquioxanes                            | 多面体低聚倍半硅氧烷      |
| <b>SWNT/SWCNT</b> | single-wall carbon nanotubes                                     | 单层碳纳米管          |

# 目 录

|                            |    |                                |    |
|----------------------------|----|--------------------------------|----|
| 1. 阻燃性与聚合物可燃性导论            | 1  | 2.3 纳米填料对材料性能的影响               | 36 |
| 1.1 引言                     | 1  | 2.3.1 对聚合物结晶性的影响               | 36 |
| 1.2 聚合物燃烧与测试               | 2  | 2.3.2 对力学性能的影响                 | 41 |
| 1.2.1 可燃性的实验室测试            | 3  | 2.3.3 对阻隔性的影响                  | 45 |
| 1.2.2 聚合物的燃烧               | 4  | 2.4 展望                         | 48 |
| 1.3 阻燃                     | 5  | 参考文献                           | 49 |
| 1.3.1 一般阻燃作用机理             | 5  | 3. 聚合物/黏土纳米复合材料                |    |
| 1.3.2 各类阻燃机理               | 6  | 阻燃机理                           | 56 |
| 1.3.3 阻燃剂的选择标准             | 16 | 3.1 引言                         | 56 |
| 1.3.4 高分散阻燃剂               | 16 | 3.2 阻燃机理                       | 57 |
| 1.4 结论与展望                  | 17 | 3.2.1 聚苯乙烯/黏土纳米复合材料            | 57 |
| 参考文献                       | 18 | 3.2.2 聚丙烯/黏土纳米复合材料             | 64 |
| 2. 聚合物纳米复合材料技术             |    | 3.2.3 聚合物/黏土纳米复合材料的分析          | 68 |
| 基础                         | 25 | 3.3 结论与展望                      | 69 |
| 2.1 引言                     | 25 | 参考文献                           | 70 |
| 2.2 聚合物纳米复合材料原理            | 26 | 4. 聚合物/碳纳米管复合材料热力学稳定性的分子力学计算方法 | 74 |
| 2.2.1 纳米填料分散性的热力学分析        | 26 | 4.1 引言                         | 74 |
| 2.2.2 纳米复合材料的制备方法          | 29 | 4.2 研究背景和相关内容                  | 75 |
| 2.2.3 分散特征:测定分散性的通用技术及其局限性 | 34 |                                |    |