

“十三五”国家重点出版物出版规划项目



高性能高分子材料丛书

# 聚苯并噁嗪 ——原理·性能·应用

顾宜 冉起超 等著



科学出版社

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

高性能高分子材料丛书

# 聚苯并噁嗪——原理·性能·应用

顾 宜 冉起超 等 著

科学出版社

北 京

## 内 容 简 介

本书为“高性能高分子材料丛书”之一。全书共9章,主要围绕聚苯并噁嗪相关的化学反应、结构与性能关系及高性能化的改性方法而展开。首先概述苯并噁嗪的结构、分类和命名以及聚苯并噁嗪的发展历史和性能特点,然后分章节分别介绍苯并噁嗪的合成反应、苯并噁嗪的聚合反应、聚苯并噁嗪的结构与性能、高耐热聚苯并噁嗪的分子设计与性能、聚苯并噁嗪的共混共聚改性、无机填料杂化/复合改性聚苯并噁嗪、纤维增强苯并噁嗪树脂基复合材料,第9章简要介绍聚苯并噁嗪在工业领域中已经取得的应用成果。

本书是国内第一部关于聚苯并噁嗪的专著,内容系统,提供了许多实用数据,可供从事高性能树脂及其制品的生产、加工、制造等的生产企业的管理和技术人员参考,也可供高等学校和科研院所高性能树脂及其复合材料相关领域的教学和科研人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

聚苯并噁嗪——原理·性能·应用 / 顾宜等著. —北京: 科学出版社, 2019.10

(高性能高分子材料丛书 / 蹇锡高总主编)

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-03-062422-2

I. ①聚… II. ①顾… III. ①苯并噁嗪—研究 IV. ①O626.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第214175号

丛书策划: 翁靖一

责任编辑: 翁靖一 孙 曼 / 责任校对: 杜子昂

责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 东方人华

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019年10月第一版 开本: 720×1000 1/16

2019年10月第一次印刷 印张: 24

字数: 462 000

定价: 148.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

# 高性能高分子材料丛书

## 编 委 会

学 术 顾 问：毛炳权 曹湘洪 薛群基 周 廉 徐惠彬

总 主 编：蹇锡高

常务副总主编：张立群

丛书副总主编(按姓氏汉语拼音排序)：

陈祥宝 李光宪 李仲平 瞿金平 王锦艳 王玉忠

丛 书 编 委(按姓氏汉语拼音排序)：

董 侠 傅 强 高 峡 顾 宜 黄发荣 黄 昊

姜振华 刘孝波 马 劲 王笃金 吴忠文 武德珍

解孝林 杨 杰 杨小牛 余木火 翟文涛 张守海

张所波 张中标 郑 强 周光远 周 琼 朱 锦

## 总 序

自 20 世纪初, 高分子概念被提出以来, 高分子材料越来越多地走进人们的生活, 成为材料科学中最具代表性和发展前途的一类材料。我国是高分子材料生产和消费大国, 每年在该领域获得的授权专利数量已经居世界第一, 相关材料应用的研究与开发也如火如荼。高分子材料现已成为现代工业和高新技术产业的重要基石, 与材料科学、信息科学、生命科学和环境科学等前瞻领域的交叉与结合, 在推动国民经济建设、促进人类科技文明的进步、改善人们的生活质量等方面发挥着重要的作用。

国家“十三五”规划显示, 高分子材料作为新兴产业重要组成部分已纳入国家战略性新兴产业发展规划, 并将列入国家重点专项规划, 可见国家已从政策层面为高分子材料行业的大力发展提供了有力保障。然而, 随着尖端科学技术的发展, 高速飞行、火箭、宇宙航行、无线电、能源动力、海洋工程技术等的飞跃, 人们对高分子材料提出了越来越高的要求, 高性能高分子材料应运而生, 作为国际高分子科学发展的前沿, 应用前景极为广阔。高性能高分子材料, 可替代金属作为结构材料, 或用作高级复合材料的基体树脂, 具有优异的力学性能。这类材料是航空航天、电子电气、交通运输、能源动力、国防军工及国家重大工程等领域的重要材料基础, 也是现代科技发展的关键材料, 对国家支柱产业的发展, 尤其是国家安全的保障起着重要或关键的作用, 其蓬勃发展对国民经济水平的提高也具有极大的促进作用。我国经济社会发展尤其是面临的产业升级以及新产业的形成和发展, 对高性能高分子功能材料的迫切需求日益突出。例如, 人类对环境和石化资源枯竭日益严重的担忧, 必将有力地促进高效分离功能的高分子材料、生态与环境高分子材料的研发; 近 14 亿人口的健康保健水平的提升和人口老龄化, 将对生物医用材料和制品有着内在的巨大需求; 高性能柔性高分子薄膜使电子产品发生了颠覆性的变化; 等等。不难发现, 当今和未来社会发展对高分子材料提出了诸多新的要求, 包括高性能、多功能、节能环保等, 以上要求对传统材料提出了巨大的挑战。通过对传统的通用高分子材料高性能化, 特别是设计制备新型高性能高分子材料, 有望获得传统高分子材料不具备的特殊优异性质, 进而有望满足未来社会对高分子材料高性能、多功能化的要求。正因为如此, 高性能高分子材料的基础科学研究和应用技术发展受到全世界各国政府、学术界、工业界的高度重视, 已成为国际高分子科学发展的前沿及热点。

因此,对高性能高分子材料这一国际高分子科学前沿领域的原理、最新研究进展及未来展望进行全面、系统地整理和思考,形成完整的知识体系,对推动我国高性能高分子材料的大力发展,促进其在新能源、航空航天、生命健康等战略新兴领域的应用发展,具有重要的现实意义。高性能高分子材料的大力发展,也代表着当代国际高分子科学发展的主流和前沿,对实现可持续发展具有重要的现实意义和深远的指导意义。

为此,我接受科学出版社的邀请,组织活跃在科研第一线的近三十位优秀科学家积极撰写“高性能高分子材料丛书”,内容涵盖了高性能高分子领域的主要研究内容,尽可能反映出该领域最新发展水平,特别是紧密围绕着“高性能高分子材料”这一主题,区别于以往那些从橡胶、塑料、纤维的角度所出版过的相关图书,内容新颖、原创性较高。丛书邀请了我国高性能高分子材料领域的知名院士、“973”项目首席科学家、教育部“长江学者”特聘教授、国家杰出青年科学基金获得者等专家亲自参与编著,致力于将高性能高分子材料领域的基本科学问题,以及在多领域多方面应用探索形成的原始创新成果进行一次全面总结、归纳和提炼,同时期望能促进其在相应领域尽快实现产业化和大规模应用。

本套丛书于2018年获批为“十三五”国家重点出版物出版规划项目,具有学术水平高、涵盖面广、时效性强、引领性和实用性突出等特点,希望经得起时间和行业的检验。并且,希望本套丛书的出版能够有效促进高性能高分子材料及产业的发展,引领对此领域感兴趣的广大读者深入学习和研究,实现科学理论的总结与传承,科技成果的推广与普及传播。

最后,我衷心感谢积极支持并参与本套丛书编审工作的陈祥宝院士、李仲平院士、瞿金平院士、王玉忠院士、张立群教授、李光宪教授、郑强教授、王笃金研究员、杨小牛研究员、余木火教授、解孝林教授、王锦艳教授、张守海教授等专家学者。希望本套丛书的出版对我国高性能高分子材料的基础科学研究和大规模产业化应用及其持续健康发展起到积极的引领和推动作用,并有利于提升我国在该学科前沿领域的学术水平和国际地位,创造新的经济增长点,并为我国产业升级、提升国家核心竞争力提供该学科的理论支撑。



中国工程院院士  
大连理工大学教授

## 前 言

聚苯并噁嗪是高性能高分子材料大家庭中的一个年轻成员，是一种新型的高性能热固性树脂。苯并噁嗪化合物是 20 世纪 40 年代为人们所知的。但是，直至 20 世纪 90 年代，苯并噁嗪聚合反应的研究才取得实质性进展，并在苯并噁嗪树脂合成及其玻璃纤维复合材料的制备和工业应用方面取得突破。近 30 年来，随着研究工作在全球广泛深入开展，人们逐渐发现，在性能方面，除了树脂开环聚合无小分子物质释放及具有传统的高强度、高模量、耐高温特性外，聚苯并噁嗪还具有许多独特的优良性能，包括固化过程中近似零收缩、高热态强度、低热膨胀系数、阻燃性、低介电常数、低表面能、低吸水性等。在聚合反应方面，通过分子设计或调控苯并噁嗪树脂体系中的化学反应，可以改变聚合物的化学交联结构、氢键结构以及相分离结构，进一步实现材料的高性能化及功能化。在应用方面，作为高性能新材料，苯并噁嗪树脂基复合材料已作为耐高温电绝缘材料、无卤阻燃印制电路板、高性能机器零件实现工业化应用。另外，它在航空、航天领域展现出广阔的应用前景，未来还有更多的领域可待开发。因此，加强聚苯并噁嗪的基础性研究，推动技术创新和新材料开发具有重要的现实意义。

作者课题组于 1993 年启动聚苯并噁嗪的研究，至今已有 26 年，在国内外该领域研究中具有较大的影响。26 年来，课题组先后有 10 名教师、18 名博士研究生、52 名硕士研究生、100 多名本科生参与了聚苯并噁嗪项目的研究；课题组先后承担了各种科研项目 30 余项，包括国家重点科技攻关专题 2 项，国家自然科学基金项目 8 项，其他纵向类项目、国际合作项目及企业合作开发和技术转让项目 20 余项。研究成果包括：发表中英文期刊论文 200 余篇，获授权中国发明专利 10 项，获部省级奖励 4 项，并且多项技术成果已实现工业应用。这些研究成果为本书的撰写积累了大量的素材，奠定了良好的基础。

本书是国内第一部关于聚苯并噁嗪的专著，是一部以原理、性能、应用为主题的聚苯并噁嗪专著，特征鲜明。本书强调基础性研究与应用紧密结合，在理论方面，从化学基本原理出发，以结构与性能的关系为主线，系统论述苯并噁嗪合成反应、开环聚合反应、共聚反应的机理和动力学问题，讨论影响因素和控制方法；详细论述聚苯并噁嗪的化学结构和氢键与聚合物性能之间的关系。在应用方面，详细论述聚苯并噁嗪高性能化的改性方法，讨论苯并噁嗪树脂基高性能复合材料的成型工艺，介绍在工业领域中已经取得的应用成果。本书大部分内容源自

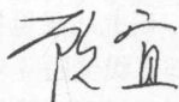
作者所在课题组研究生的学位论文和已发表的期刊论文，部分素材来源于国内外公开发表的期刊论文以及作者在这一领域多年的研究积累。

本书是作者课题组的集体研究成果的总结，8名博士研究生参与了本书的撰写工作。全书由顾宜策划，拟定编写思路和详细编写大纲并统稿和定稿，由冉起超协助编辑加工及全面审校。其中，第1章和第9章由顾宜主笔，第3章和第8章由冉起超主笔，第2章由邓玉媛主笔，第4章由杨坡主笔，第5章由徐艺主笔，第6章由王智主笔，第7章由李晓丹主笔；此外，赵培撰写了6.1.2节、6.2.2节和6.2.3的第2小节，李晓丹撰写了6.1.4节、6.1.5节和6.2.3的第3小节，杨坡撰写了3.4节、5.3.1~5.3.3节和6.3节，冉起超撰写了4.4.2节和4.4.3节，王宏远撰写了3.3节。

本书撰写过程中得到了“高性能高分子材料丛书”总主编蹇锡高院士及编委会专家的鼓励和指导，在此深表感谢；责任编辑翁靖一女士在本书的组织和编写过程中付出了巨大的努力，在此特别致谢。此外，感谢科学出版社的相关领导和编辑对本书出版的支持和帮助。感谢课题组老师和同学们多年来的辛苦付出，以及同行和朋友们长期以来的关心和支持。

最后，诚挚感谢“九五”国家重点科技攻关专题(编号96-120-05-01和96-120-05-02)、国家自然科学基金面上项目(编号59573008, 1996年; 编号20774060, 2008年; 编号50873062, 2009年; 编号21174093, 2012年; 编号51273119, 2013年)、国家自然科学基金重大研究计划面上项目(编号90405001, 2005年)、国家自然科学基金青年基金项目(编号21104048, 2012年; 编号21204053, 2013年)对作者长期从事聚苯并噁嗪基础研究和应用技术开发的支持。正是因为有这些项目的支持，本书成果才得以形成并出版发行。

将二十多年的研究工作提炼总结，无疑是一件十分困难的事情，加之作者水平有限，书中难免存在疏漏或不妥之处，敬请广大读者批评指正。



2019年8月于四川大学

# 目 录

第 1 章 概述	1
1.1 苯并噁嗪的定义、结构及表征	1
1.1.1 苯并噁嗪的定义及化学结构	1
1.1.2 苯并噁嗪分子的空间结构	2
1.1.3 苯并噁嗪的化学结构表征	2
1.2 苯并噁嗪的分类和命名	3
1.2.1 按照单体的化学结构命名	3
1.2.2 按照合成原料化学结构命名	4
1.2.3 按照单体中特殊组成结构分类命名	5
1.2.4 按噁嗪环的数目分类命名	6
1.2.5 按苯并噁嗪聚合物链形态分类命名	6
1.2.6 苯并噁嗪交联聚合物的命名	7
1.2.7 典型结构苯并噁嗪的化学结构、命名和缩写	8
1.3 聚苯并噁嗪的发展历史	11
1.4 聚苯并噁嗪的性能特点	13
参考文献	15
第 2 章 苯并噁嗪的合成反应	21
2.1 苯并噁嗪的合成和表征	21
2.1.1 苯并噁嗪的合成路线	21
2.1.2 苯并噁嗪的合成方法	26
2.1.3 苯并噁嗪合成产物的表征	27
2.2 伯胺路线合成苯并噁嗪的反应机理	29
2.2.1 伯胺路线合成苯并噁嗪中的组成、结构及含量变化	29
2.2.2 伯胺路线合成苯并噁嗪的主反应历程和竞争反应	33
2.2.3 伯胺路线合成苯并噁嗪的基元反应	34
2.3 伯胺路线合成苯并噁嗪的反应动力学	40
2.3.1 Mannich 碱与甲醛的反应动力学	40
2.3.2 伯胺/苯酚/甲醛水溶液体系中的反应动力学	42
2.3.3 伯胺/苯酚/多聚甲醛体系中的反应动力学	46
2.4 伯胺路线合成苯并噁嗪的影响因素	46

2.4.1	酚类化合物结构的影响	46
2.4.2	伯胺化合物结构的影响	48
2.4.3	反应温度和反应时间的影响	49
2.4.4	反应介质的影响	51
2.4.5	体系 pH 的影响	52
2.4.6	加料方式的影响	53
2.5	苯并噁嗪合成实例	54
2.6	总结	57
	参考文献	57
<b>第 3 章</b>	<b>苯并噁嗪的聚合反应</b>	<b>60</b>
3.1	苯并噁嗪的热聚合反应	60
3.1.1	苯并噁嗪热聚合行为及表征	60
3.1.2	苯并噁嗪的热聚合反应机理	63
3.1.3	苯并噁嗪的热聚合反应动力学	71
3.1.4	取代基电子效应对苯并噁嗪热聚合反应的影响	75
3.1.5	氢键对苯并噁嗪热聚合反应的影响	79
3.2	苯并噁嗪树脂的催化聚合反应	82
3.2.1	酸性催化剂及催化聚合反应机理	82
3.2.2	碱性催化剂(固化剂)及催化聚合反应机理	86
3.3	苯并噁嗪聚合过程中的链增长模型	91
3.3.1	概述	91
3.3.2	逐步聚合反应	93
3.3.3	活性连锁聚合	98
3.3.4	非活性连锁聚合	101
3.4	苯并噁嗪聚合过程中的体积变化	103
3.4.1	苯并噁嗪热聚合过程中的体积变化	103
3.4.2	苯并噁嗪催化聚合过程中的体积变化	110
3.4.3	胺的化学结构对聚苯并噁嗪体积膨胀效应的影响	112
	参考文献	113
<b>第 4 章</b>	<b>聚苯并噁嗪的结构与性能</b>	<b>116</b>
4.1	聚苯并噁嗪的化学交联结构	116
4.1.1	聚苯并噁嗪的化学结构	116
4.1.2	聚苯并噁嗪单链空间结构模型	117
4.1.3	聚苯并噁嗪无定形结构模型	119
4.1.4	聚苯并噁嗪交联结构的表征方法	119
4.2	聚苯并噁嗪的氢键	124

4.2.1	聚苯并噁嗪结构中的氢键类型	124
4.2.2	聚苯并噁嗪结构中氢键的强度与影响因素	127
4.3	聚苯并噁嗪的交联结构与性能	129
4.4	典型聚苯并噁嗪浇铸体或薄膜的性能	130
4.4.1	聚合收缩率	131
4.4.2	热稳定性及热解机理	131
4.4.3	燃烧特性及阻燃方法	143
4.4.4	力学性能及耐热性	144
4.4.5	介电性能	150
4.4.6	表面能	152
4.4.7	吸水性	153
4.4.8	耐腐蚀性	154
	参考文献	156
<b>第 5 章</b>	<b>高耐热聚苯并噁嗪的分子设计与性能</b>	<b>159</b>
5.1	增加分子结构中噁嗪环数量	159
5.1.1	双环苯并噁嗪	159
5.1.2	多环苯并噁嗪	166
5.2	引入多种反应性官能团	173
5.2.1	醛基官能化苯并噁嗪	173
5.2.2	炔基官能化苯并噁嗪	179
5.2.3	醛基、炔基双官能化苯并噁嗪	182
5.2.4	氰基官能化苯并噁嗪	185
5.2.5	烯丙基官能化苯并噁嗪	188
5.2.6	羟基官能化苯并噁嗪	190
5.3	引入更多的芳杂环结构	192
5.3.1	含苯并噁唑结构的苯并噁嗪	192
5.3.2	含苯并咪唑结构的苯并噁嗪	195
5.3.3	含酚酞结构的苯并噁嗪	197
5.3.4	含吡啶结构的苯并噁嗪	202
5.3.5	含茈萘基的苯并噁嗪	206
	参考文献	208
<b>第 6 章</b>	<b>聚苯并噁嗪的共混共聚改性</b>	<b>213</b>
6.1	苯并噁嗪/热固性树脂共混体系中的竞争反应及性能	213
6.1.1	苯并噁嗪/酚醛树脂共混体系	213
6.1.2	苯并噁嗪/环氧树脂共混体系	219
6.1.3	苯并噁嗪/双马来酰亚胺体系	246

6.1.4	苯并噁嗪/氰酸酯二元共混体系	256
6.1.5	苯并噁嗪/环氧/氰酸酯三元共混树脂	262
6.2	苯并噁嗪共混树脂体系中的相分离及增韧	269
6.2.1	苯并噁嗪/橡胶体系	270
6.2.2	苯并噁嗪/热塑性树脂共混体系	272
6.2.3	苯并噁嗪/热固性树脂共混体系的反应诱导相分离	287
6.3	引入额外氢键受体或供体调控聚苯并噁嗪的氢键作用	312
6.3.1	线型聚苯并噁嗪/4,4'-联吡啶共混体系	312
6.3.2	双酚 A-苯胺型聚苯并噁嗪/4,4'-联吡啶共混体系	314
6.3.3	线型聚苯并噁嗪/吡啶酰胺共混体系	315
6.3.4	双酚 A-苯胺型聚苯并噁嗪/聚丙烯酸共混体系	316
	参考文献	319
<b>第 7 章</b>	<b>无机填料杂化/复合改性聚苯并噁嗪</b>	<b>324</b>
7.1	层状硅酸盐/苯并噁嗪复合体系	324
7.1.1	蛭石/苯并噁嗪复合体系及其摩擦性能	324
7.1.2	滑石粉/苯并噁嗪复合体系及其力学性能	328
7.2	多面体低聚倍半硅氧烷/苯并噁嗪复合体系	331
7.2.1	苯并噁嗪基 POSS 的合成与表征	331
7.2.2	BZPOSS/BA-a/BADCy 复合体系及其介电性能	333
7.2.3	BZPOSS/BADCy 复合体系及其介电性能	334
7.3	过渡金属氧化物/苯并噁嗪复合体系	337
7.3.1	过渡金属氧化物在苯并噁嗪树脂中的分散性	337
7.3.2	过渡金属氧化物的表面接枝改性研究	337
7.3.3	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /不同结构苯并噁嗪复合体系	338
7.3.4	不同过渡金属氧化物/二胺型苯并噁嗪树脂复合体系的研究	343
7.4	金属氢氧化物/苯并噁嗪体系	344
7.5	总结	346
	参考文献	346
<b>第 8 章</b>	<b>纤维增强苯并噁嗪树脂基复合材料</b>	<b>348</b>
8.1	复合材料成型加工性	348
8.1.1	层压成型工艺	348
8.1.2	树脂传递模塑成型工艺	350
8.1.3	拉挤成型工艺	352
8.1.4	模压成型工艺	353
8.2	复合材料的性能	353
8.2.1	玻璃布层压板的性能	353

8.2.2 碳纤维单向板的性能·····	357
参考文献·····	357
<b>第9章 聚苯并噁嗪的应用</b> ·····	<b>359</b>
9.1 苯并噁嗪树脂基复合材料的研究及其在真空泵上的应用·····	359
9.2 聚苯并噁嗪在电工绝缘材料上的应用·····	360
9.3 聚苯并噁嗪在覆铜板行业的应用·····	362
9.4 聚苯并噁嗪在航空航天材料上的应用·····	363
9.5 总结·····	365
关键词索引·····	367



## 1.1 苯并噁嗪的定义、结构及表征

### 1.1.1 苯并噁嗪的定义及化学结构

苯并噁嗪是一类含有氮、氧六元杂环的苯并稠环化合物，氮原子、氧原子位置及取代基个数不同，苯并噁嗪表现出的性质和作用不同。1,3-苯并噁嗪中氧原子在1位，氮原子在3位；1,4-苯并噁嗪中氧原子在1位，氮原子在4位。在1,3-苯并噁嗪中，按照噁嗪环上取代基所处位置和数量不同，主要有3,4-二氢-3-取代-2*H*-1,3-苯并噁嗪（简称3-取代苯并噁嗪）<sup>[1]</sup>、3,4-二取代-2*H*-1,3-苯并噁嗪（简称3,4-二取代苯并噁嗪）<sup>[2]</sup>和3,4-二氢-2,3-二取代-2*H*-1,3-苯并噁嗪（简称2,3-二取代苯并噁嗪）<sup>[3]</sup>三类（图1.1）。其中，3-取代苯并噁嗪已获得较为广泛和深入的研究和应用，并被人们直接简称为苯并噁嗪。在加热和/或催化剂的作用下，3-取代苯并噁嗪发生开环聚合反应，生成含氮且类似酚醛树脂的网状结构——聚苯并噁嗪，也称为开环聚合酚醛树脂。其合成及开环聚合的反应路线见图1.2<sup>[1]</sup>。



图 1.1 1,3-苯并噁嗪的化学结构

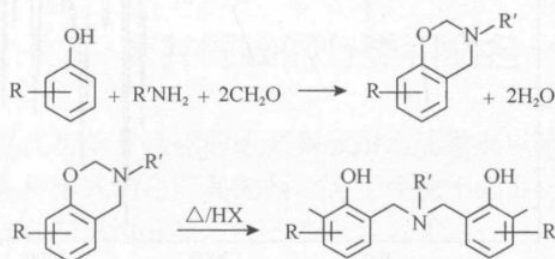


图 1.2 苯并噁嗪合成和开环聚合反应路线

## 1.1.2 苯并咪唑分子的空间结构

苯并咪唑分子中含有 N 和 O 两个杂原子。N 和 O 在元素周期表中的位置接近，电负性较大，这种含有杂原子的咪唑环结构具有较大的环张力，其六个原子不处于一个平面(其中：C5、C6、C8 和 O 四个原子在一个平面内，而 C7 和 N 两个原子分别位于平面的上下两侧)，空间呈畸形的椅式构象，这一点已从 6,8-二氯-3-苯基-1,3-苯并咪唑单晶的 X 射线衍射结果和分子模拟的结果得到了证实<sup>[4]</sup>，如图 1.3 所示。正是由于存在较大的环张力，咪唑环在一定条件下开环，进而发生聚合反应。

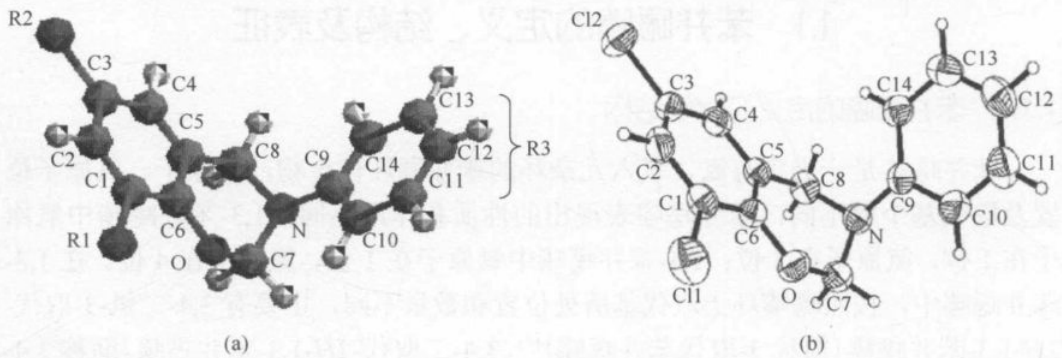


图 1.3 苯并咪唑分子模拟结构(a)和单晶的 X 射线衍射结构(b)<sup>[4]</sup>

## 1.1.3 苯并咪唑的化学结构表征

苯并咪唑单体化学结构的表征手段主要有傅里叶变换红外光谱 (FTIR)、核磁共振氢谱 ( $^1\text{H}$  NMR)、差示扫描量热分析 (DSC)、质谱 (MS)、元素分析等。以双酚 A/苯胺型苯并咪唑为例，图 1.4 和图 1.5<sup>[5]</sup>分别是其红外吸收光谱和核磁共振氢谱。表 1.1 列出了该苯并咪唑结构中主要特征官能团的红外吸收峰位置。

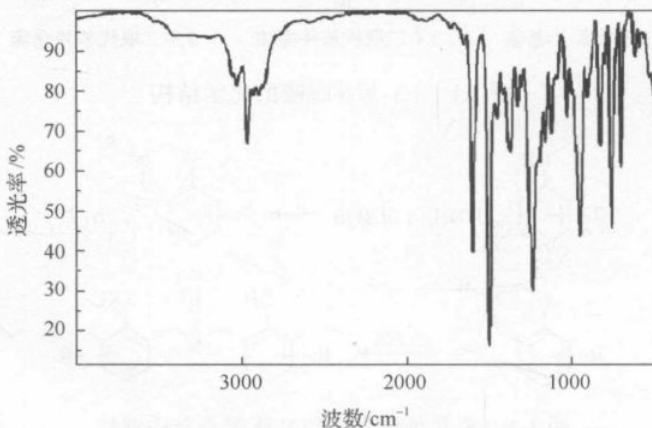


图 1.4 双酚 A-苯胺型苯并咪唑化合物的红外吸收光谱图

表 1.1 双酚 A-苯胺型苯并咪唑化合物的红外吸收峰归属

红外特征吸收峰位置/cm <sup>-1</sup>	归属
1498,1598	苯环的骨架振动
816,758	苯环上 C—H 弯曲振动
945	咪唑环的特征振动
1031,1228	咪唑环上醚键的对称和反对称伸缩振动
1155,1367	C—N—C 的对称和反对称伸缩振动

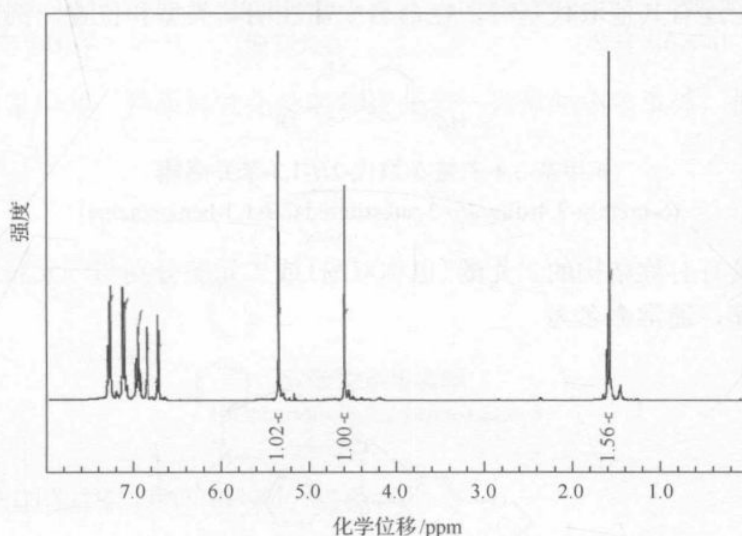


图 1.5 双酚 A-苯胺型苯并咪唑化合物的核磁共振氢谱

图 1.4 中位于红外光谱中波数  $945\text{cm}^{-1}$  附近的吸收峰是咪唑环的特征吸收峰。图 1.5 中, 由于咪唑环结构中两类亚甲基质子( $-\text{CH}_2-$ )所处的化学环境不同, 因而产生不同的化学位移, 与 N、O 原子相连的亚甲基质子的核磁共振峰出现在  $\delta=5.3\text{ppm}$  ( $1\text{ppm}=1\times 10^{-6}$ ) 处, 与 N、苯环相连的亚甲基质子的核磁共振峰出现在  $\delta=4.57\text{ppm}$  处。另外,  $\delta=1.6\text{ppm}$  处为双酚 A 上异丙基的甲基质子峰,  $\delta=6.7\sim 7.8\text{ppm}$  处为苯环上的质子吸收峰。利用核磁共振氢谱可以计算苯并咪唑的环化率。

## 1.2 苯并咪唑的分类和命名

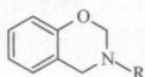
自 20 世纪 90 年代初苯并咪唑的研究和应用迅速发展以来, 相关苯并咪唑单体和聚合物出现了多种形式的命名和缩写。为了避免不必要的混乱, 本书按照近年来国际上的相关规则和习惯分类, 统一了命名方式。

### 1.2.1 按照单体的化学结构命名

这是采用国际纯粹与应用化学联合会 (IUPAC) 所制定的方法, 按照化合物的

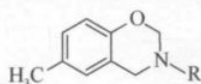
化学结构对苯并噁嗪单体进行命名。

例如，苯并噁嗪基本结构命名为



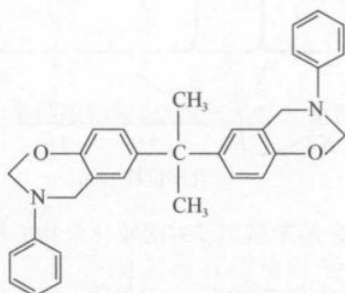
3,4-二氢-3-取代-2H-1,3-苯并噁嗪  
(3,4-dihydro-3-substituted-2H-1,3-benzoxazine)

当酚核上连有其他取代基时，在命名中需注明其类型和位置，例如

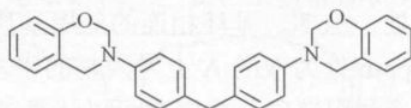


6-甲基-3,4-二氢-3-取代-2H-1,3-苯并噁嗪  
(6-methyl-3,4-dihydro-3-substituted-2H-1,3-benzoxazine)

对于由具有对称结构的二元酚(也称双酚)或二元胺分别与一元胺或一元酚合成的苯并噁嗪，通常命名为



双-(3,4-二氢-3-苯基-2H-1,3-苯并噁嗪)异丙烷  
[bis-(3,4-dihydro-3-phenyl-2H-1,3-benzoxazine) isopropane]



4,4'-双-(3,4-二氢-2H-1,3-苯并噁嗪-3-基)苯基甲烷  
[4,4'-bis-(3,4-dihydro-2H-1,3-benzoxazin-3-yl)phenyl methane]

在本书中，合成后纯化的产物统称为苯并噁嗪单体，简称苯并噁嗪(benzoxazine)，缩写为BZ。另外，合成后未纯化的产物统称为苯并噁嗪树脂(benzoxazine resin)，简称BZ树脂。

### 1.2.2 按照合成原料化学结构命名

在实际应用中，常常采用合成所用原料酚类化合物和伯胺化合物的化学名称此为试读，需要完整PDF请访问：[www.ertongbook.com](http://www.ertongbook.com)