

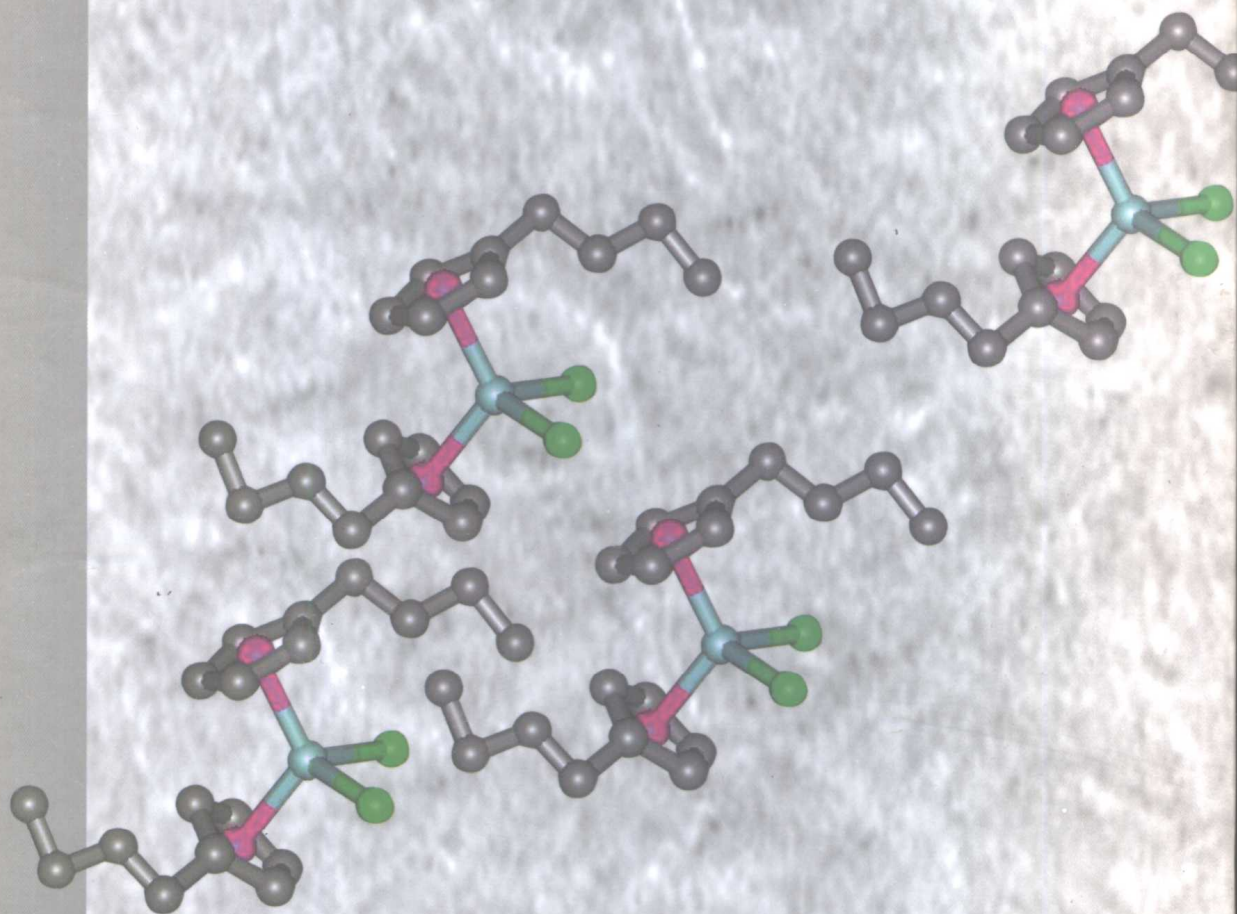


“九五”国家重点图书

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

茂金属催化剂 及其烯烃聚合物

黄葆同 陈 伟 主编



化学工业出版社

“九五”国家重点图书
国家科学技术学术著作出版基金资助出版

茂金属催化剂及其烯烃聚合物

黄葆同 陈 伟 主编

化学工业出版社
·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

茂金属催化剂及其烯烃聚合物/黄葆同 陈伟主编.
—北京:化学工业出版社, 2000
ISBN 7-5025-3009-6

I. 茂… II. 黄… III. 金属催化剂-基本知识
IV. TQ426.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 51812 号

茂金属催化剂及其烯烃聚合物

黄葆同 陈 伟 主编
责任编辑: 郎红旗 张文虎
责任校对: 蒋 宇
封面设计: 于 兵

*

化学工业出版社出版发行
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)
发行电话: (010) 64982511
<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
北京市云浩印制厂印刷
三河市东柳装订厂装订

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 22½ 字数 395 千字
2000 年 11 月第 1 版 2000 年 11 月北京第 1 次印刷
印 数: 1—2500

ISBN 7-5025-3009-6/TQ·1314

定 价: 56.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

《茂金属催化剂及其烯烃聚合物》

主 编 黄葆同 陈 伟

顾 问 闵恩泽 徐 僖 沈之荃 洪定一

景振华 李永经 胡汉杰

编 委 会(按姓名笔画序)

王玉庆 王建明 王洪涛 付 强

吕立新 朱博超 刘 宇 许学翔

李永经 李 兵 杨继钢 何家松

谷育生 闵恩泽 沈之荃 张立基

张宏炎 张 勇 陈 伟 金国新

封麟先 赵旭涛 胡汉杰 胡 杰

钟国平 洪定一 钱延龙 徐 僖

黄葆同 黄 强 景振华 焦宁宁

编写人员(按姓名笔画序)

王建明 付 强 朱博超 刘 宇

许学翔 张宏炎 陈 伟 金国新

焦宁宁

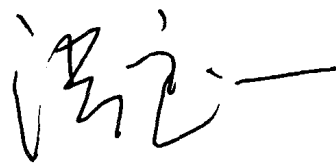
序

1980年，德国汉堡大学高分子研究所 W.Kaminsky 教授发明了举世闻名的茂金属催化体系，这一体系在催化乙烯和丙烯配位聚合方面表现出极高的活性和令人惊喜的单一活性中心性能，开创了高分子合成科学和高分子合成工业的新纪元，其科学意义与由诺贝尔化学奖获得者德国弗莱堡大学 Staudinger 教授针对错误的高分子胶体学说所创立的高分子聚合科学相比毫不逊色，其实用经济价值与诺贝尔化学奖获得者德国煤炭科学研究所 Ziegler 教授和意大利米兰工学院 Natta 教授发明的烯烃聚合 Ziegler-Natta 催化体系相比亦可媲美。这种新颖的催化体系由主催化剂茂锆或茂钛等有机过渡金属络合物与助催化剂甲基铝氧烷 (MAO) 配合构成，其组成和结构显然不同于传统的 Ziegler-Natta 催化体系，即由 Ziegler 于 1953 年发明的乙烯聚合用的 TiCl_4 /烷基铝催化体系和 Natta 于 1954 年发明的丙烯等规聚合用 TiCl_3 /烷基铝催化体系。Kaminsky 的核心贡献是发现松散的 MAO 低分子量齐聚物阴离子稳定了茂金属阳离子，形成了烯烃配位插入反应活性中心。Kaminsky, Brintzinger, Ewen 随后相继发现了对丙烯等规聚合有高活性的桥联 (ansa) 茂锆催化剂，这种结构具有 C_2 对称；随后 Ewen 又发现了具有 C_s 对称的桥联取代茂锆结构对丙烯间规聚合具有高活性。80 年代后期，Dow 化学公司的 J.Stevens 发现了受限几何构型单茂钛金属催化剂，对 α -烯烃与乙烯共聚合具有高活性，并据此开发了相关的 Insite 工艺，合成出几个新的聚烯烃新产品。由于茂金属络合物中具聚合活性的过渡金属阳离子的周围环境由茂环 (环戊二烯) 或取代茂环所修饰，故仅具有一种活性位和对单体存在很强的立体结构选择性，因而，采用茂金属催化剂可以合成出具有定制结构的均聚和共聚聚烯烃树脂。最突出的聚合特性为聚合活性高、聚合物具有窄分子量分布、高的共聚单体均匀结合性能、好的氢调敏感性以及罕见的间规聚合特性所赋予的传统催化剂难以胜任的合成间规聚丙烯和间规聚苯乙烯的能力。

由于茂金属催化剂具有上述杰出特性，企业界对其表现出莫大的兴趣，Exxon, Dow 化学等众多石化公司相继已在茂金属催化剂开发上投入近 30 亿美元，申请了众多专利，相继突破了工业化应用过程中遇到的粘釜、负载化、低铝/锆比下仍要保持高活性和窄分子量分布聚烯烃加工等一系列技术难题，使茂金属催化剂以 “drop in” 的方式在已有的聚乙烯、聚丙烯工业装置上得到

了应用，尤其是茂金属催化剂对气相聚乙烯超冷凝模式起到的强大的支撑作用更是令人瞩目。茂金属催化剂的工业应用也为市场带来一系列聚烯烃新产品、新牌号。据估计，未来 10 年之内，50% 的聚烯烃将采用茂金属催化剂来生产。在这方面，必须要提及的是我国最大的石化企业集团中国石化集团公司非常重视茂金属这一聚烯烃领域的划时代创新技术，投入了大量的人力和资金，已取得较好的中试结果，2001 年即可在气相聚乙烯上工业应用，所研究成功的新型茂金属加合物于 2000 年 5 月获得中国和美国专利授权。这一专利的主要发明人正是本书的作者之一陈伟博士，目前他正在和他所在的中国石化集团公司的同事一起，从事茂金属催化剂合成聚乙烯的工业化应用研究，我预祝他们取得成功。

本书对茂金属催化剂技术进行了综合性的叙述，包括茂金属的结构、共聚单体的加入、聚合机理和聚合条件、反应器结构、与传统聚烯烃的比较、茂金属聚烯烃产品的加工性能及应用领域等。应当说，这是一本迄今为我所知的由中国学者撰写的系统介绍茂金属催化剂及其应用和近期进展的专著，可以预计，它的出版将对我国的茂金属聚烯烃事业起到重要的促进作用。

A handwritten signature in black ink, appearing to be '陈伟' (Chen Wei), followed by a horizontal line.

2000 年 11 月

前 言

20 世纪 90 年代世界聚烯烃工业最重要的技术进展之一，就是将茂金属催化剂用于乙烯等烯烃聚合物的合成。国际上以 Univation 公司（Exxon 公司和 UCC 公司合资）、Dow 化学品公司以及 Targor 公司（Hoechst 公司和 BASF 公司合资）为代表的大型石油化工公司已经取得了令人瞩目的关于茂金属聚烯烃的工业化成果。国家科技部、国家自然科学基金委员会、中国石化集团公司以及中国石油天然气集团公司也从不同层次组织了众多国内单位从事茂金属催化剂及其烯烃聚合物的科研与开发，取得了一定的进展。毋庸置疑，茂金属催化剂不但以它显著的催化特性正在占领越来越大的市场份额，同时也从催化剂的分子设计以及聚烯烃材料的结构性能方面极大地丰富了金属有机化学、高分子化学以及高分子物理基础学科的内涵。

尽管对茂金属聚烯烃的发展前景普遍乐观，但一些问题仍有待解决。例如，在一些现有大规模烯烃聚合工艺中，如气相流化床聚乙烯反应器，使用茂金属催化剂并非易事。另外，还有像降低茂金属催化剂的成本问题，解决茂金属聚烯烃的加工问题等。所以，尽管目前世界上宣布的茂金属聚烯烃的年生产能力已超过 300 万吨，但实际产量却很低。此外，茂金属催化剂领域已变得十分拥挤，特别是许多商家都在竞相追逐基本相同的市场，捷足者已经掌握控制了专利技术，因而并非每家公司都能取得成功。为收回已用于开发茂金属催化剂的数十亿美元的投入，茂金属聚烯烃工业要度过一个较为困难的时期。

后过渡非茂金属催化剂是近年来受到广泛关注的一种新型烯烃聚合催化剂，将成为继茂金属催化剂之后的又一研究开发热点。然而，这种催化剂目前尚处于早期探索阶段，需要进行大量的基础与应用研究，以进一步阐明反应机理、优化催化体系以及促使反应向所需方向进行。可以预言，后过渡非茂金属催化剂将成为新一代烯烃催化剂，对聚合物的生产必将产生重要的影响。

茂金属催化剂和后过渡非茂金属催化剂现已统称为“单活性位”（single site）催化剂。越来越多的科技工作者以及企业的管理和生产销售人员涉及该领域的工作。针对“单活性位”催化剂及烯烃聚合物所发表的论文和综述文章已成为众多期刊杂志录用频率较高的文献。在化学工业出版社的大力支持下，我们及时编写出版这本《茂金属催化剂及其烯烃聚合物》专著，目的之一就是要为广大读者全面、系统地介绍有关茂金属催化剂的开发历程、发展现状及趋

势；指出茂金属催化剂对聚烯烃工业所产生的影响，包括所出现的新牌号树脂的结构与性能；提出在生产这些新牌号产品的过程中必须解决的各种问题，包括催化剂对现有聚合工艺的适应性，即“drop-in”技术；以及要满足将这些新材料加工成为市场接受的商品所涉及的对树脂加工成型技术的革新。

在编著过程中，我们着重强调了全书的系统性和茂金属催化剂的优点及其烯烃聚合物有别于传统聚烯烃材料的特性。本书的导论给出了茂金属及后过渡非茂金属催化剂的定义、催化特性、历史沿革及发展趋势。在第二章中首先介绍了有关茂金属催化剂的合成、结构和催化性能。正是由于甲基铝氧烷(MAO)的发现，才开拓了茂金属催化剂在烯烃聚合领域中的应用，因此在第二章中系统地总结了甲基铝氧烷及硼化物作为助催化剂的作用机理、合成工艺及表征方法。均相催化剂的负载化是实现催化剂适应一些现有聚合工艺“drop-in”技术的桥梁。第二章同时强调了负载化的重要性并介绍了各种负载化工艺。在第二章的最后还涉及到了后过渡非茂金属催化剂。本书的第三章是关于茂金属聚烯烃产品的内容，既包括大家熟悉的聚乙烯（塑性体和弹性体、EPR 橡胶）、聚丙烯（等规、间规、嵌段）、间规聚苯乙烯，还包括了乙烯与环烯烃、苯乙烯、一氧化碳及其他极性单体的共聚物以及双烯烃聚合物等。本章力求突出茂金属催化剂聚烯烃的特性（优点），避免与通用树脂共性内容的重复；在产品的合成上结合催化剂的分类，关联催化剂结构与聚合物性能的关系，同时强调了催化剂的开发必须结合聚合工艺和聚合物产品性能的要求，形成一个有机的整体。树脂的加工成型关系到新型聚烯烃材料的应用及市场需求。本书第四章以茂金属聚乙烯为例系统地介绍了该类产品的性能和加工成型技术。技术经济分析作为本书的附录放在最后供参考。本书力求既充分体现当前国际上的先进成果和研究方向，又客观反映国内的研究和开发水平，最终立足于茂金属聚烯烃工业的产业化。

本书由中国科学院长春应用化学研究所黄葆同院士、中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院陈伟博士共同组织主编。参加编写的成员相对年轻，都有多年从事相关领域的研究开发或专职信息收集的经验，他们有陈伟博士、王建明高级工程师、金国新博士、焦宁宁高级工程师、朱博超高级工程师、张宏炎教授、许学翔博士、付强博士、刘宇博士等。闵恩泽院士、徐儋院士、沈之荃院士以及中国石油化工股份有限公司科技部主任洪定一博士、中国石油化工股份有限公司石油化工科学研究院副院长景振华教授、中国石油天然气股份有限公司兰州石化分公司副经理李永经教授、国家自然科学基金委员会高分子学科主任胡汉杰教授作为顾问在全书的编写过程中给予了许多指导。华东理工大学的钱延龙教授、浙江大学的封麟先教授、北京化工研究院的吕立新

教授以及中国科学院化学研究所的何家松教授花费了大量的精力审阅书稿。为了本书的出版，石油化工科学研究院的徐歆、郭子方和兰州石化公司的郝萍等同志对本书的录排做了大量的工作，在此一并表示衷心的感谢！

对于国家科学技术学术著作出版基金的资助和科技部“国家重点基础研究发展规划”项目的支持，谨致诚挚的谢意。

特别感谢洪定一博士为本书作序。感谢兰州石化公司研究院为本书出版所给予的支持。

对于书中出现的错误和不妥之处，希望广大读者指正！

黄葆同 陈 伟

2000 年 3 月

内 容 提 要

茂金属烯烃聚合催化剂自 20 世纪 50 年代发现, 到 80 年代由 Kamin-sky 等人奠基开始, 在国际上一直是化学催化和高分子材料领域的研究前沿。我国于 80 年代后期组织开展对茂金属催化剂的系统研究, 陆续取得了一批成果, 为我国在这一新兴科技领域取得一席之地打下了基础。

本书内容共分 4 章。分别介绍了茂金属催化剂的定义、催化特性和发展状况, 茂金属催化体系的组成、结构、催化机理和负载化过程, 茂金属烯烃聚合物的聚合工艺、工业化现状和聚合物性能, 第四章以茂金属聚乙烯为例介绍了成型加工和应用技术。有关茂金属催化剂及其烯烃聚合物的生产成本和市场需求的技术经济分析作为附录放在最后供参考。另外, 书中对近年来受到广泛关注的另一种单活性位新型催化剂——后过渡非茂有机金属烯烃聚合催化剂也进行了介绍(第二章第四节)。

全书突出“系统介绍一个新领域, 推动产业化和市场发展”的主题, 希望能对我国高分子化学、有机金属化学、高分子材料科学, 尤其是茂金属聚烯烃的科研和工业化产生积极的推动作用。

本书的读者对象主要是化学催化、烯烃聚合和高分子材料加工领域的科研人员、企业开发人员和高级管理人员、信息研究人员, 以及大学相关专业的高年级学生、研究生。

目 录

第一章 导论	1
第一节 茂金属催化剂的定义	1
第二节 对茂金属催化剂特性的客观认识	1
第三节 茂金属催化剂及其聚合物的发展	4
一、历史沿革	4
二、发展前景	11
参考文献	12
第二章 茂金属烯烃聚合催化体系	14
第一节 茂金属烯烃聚合主催化剂	14
一、IVB族茂金属催化剂	14
（一）不含桥基的茂金属催化剂	14
（二）含有桥基的茂金属催化剂	33
（三）茂金属催化剂催化烯烃聚合的机理	44
二、IVB族单茂结构烯烃聚合催化剂	50
三、稀土有机配合物与均相催化聚合	56
（一）稀土有机配合物的特征	56
（二）催化应用	57
第二节 茂金属烯烃聚合助催化剂	63
一、助催化剂的作用机理	64
二、助催化剂的分类	67
（一）烷基铝氧烷	67
（二）有机硼化合物	69
三、助催化剂的合成方法	70
（一）烷基铝氧烷的合成方法	70
（二）有机硼化合物的合成方法	83
四、助催化剂的表征	84
（一）烷基铝氧烷的表征	84
（二）有机硼化合物的表征	93
第三节 茂金属烯烃聚合催化剂的负载化	93

一、负载化的目的	94
二、载体的种类	95
三、选择载体的基本原则	96
四、载体的表征方法	98
五、负载化的机理探究	99
六、负载化工艺	103
第四节 非茂有机金属烯烃聚合催化剂	104
一、非茂有机金属烯烃聚合催化剂的合成	106
(一) 中心原子为钛、锆的配合物	106
(二) 中心原子为后过渡金属的配合物	111
二、非茂有机金属催化剂的聚合特性	114
(一) 活性聚合	115
(二) 合成具有高支化度的低密度烯烃均聚物	116
(三) 催化烯烃与极性单体共聚	116
三、催化剂的聚合能力	117
(一) 催化乙烯聚合	117
(二) 催化丙烯聚合	118
(三) 催化苯乙烯间规聚合	119
(四) 催化乙烯与极性单体共聚	120
(五) 催化乙烯齐聚反应	122
参考文献	124
第三章 茂金属烯烃聚合物	134
第一节 茂金属聚乙烯	134
一、茂金属聚乙烯的工业化现状	134
二、mPE 的聚合工艺及工艺参数	137
三、mPE 对现有工艺的适应性	143
四、流化床超冷凝态工艺与茂金属催化剂	143
五、mPE 的结构和性能	145
(一) mLLDPE 的结构特点	145
(二) mLLDPE 的热性能	146
(三) mLLDPE 的结晶性能	147
(四) mPE 的力学性能	147
六、mLLDPE 的主要商业产品	149
(一) Exact	149

(二) Exceed	151
(三) Affinity	152
(四) Elite	153
(五) Evolve	155
七、国内研究开发现状	156
第二节 茂金属聚烯烃弹性体	161
一、POE 的特性	161
二、POE 的应用	163
(一) 聚丙烯的抗冲击改性剂	163
(二) 热塑性弹性体材料	163
(三) 电线电缆护套	163
(四) 散热软管	165
第三节 茂金属乙丙橡胶	166
一、Ziegler-Natta 催化剂体系与茂金属催化剂体系的特征	166
二、mEPDM 的合成工艺	168
三、EPDM 的微观结构	169
四、EPDM 的宏观结构	170
五、mEPDM 的性能	174
第四节 茂金属等规聚丙烯	175
一、茂金属等规聚丙烯 (iPP) 的合成	175
二、茂金属等规聚丙烯的聚合机理与结构缺陷	179
三、茂金属等规聚丙烯的性能	181
四、茂金属等规聚丙烯的应用	185
(一) 高熔体流动纤维级均聚物用于纺粘和熔融吹塑无纺布	185
(二) 高级 α -烯烃无规共聚物用于高质量流延膜	186
(三) 均聚物和无规共聚物用于双向拉伸薄膜 (BOPP)	187
(四) 高熔体流动成核注塑均聚物用于薄壁注塑品	187
(五) 注塑无规共聚物用于薄壁注塑品	187
第五节 茂金属间规聚丙烯	188
一、间规选择性茂金属催化剂	188
(一) 间规选择性茂金属催化剂的发展	188
(二) 间规选择性茂金属/MAO 催化体系	191
(三) 间规选择性茂金属/硼化合物催化体系	194
二、茂金属催化剂催化丙烯间规选择性聚合机理	195

三、丙烯均聚反应动力学和 sPP 微观结构	195
四、间规聚丙烯的性能及应用	202
(一) sPP 的基本特性	202
(二) sPP/iPP 复合树脂的特性	205
(三) sPP 的应用	206
第六节 立构嵌段聚丙烯	210
第七节 茂金属间规聚苯乙烯	214
一、间规聚苯乙烯的合成	214
二、苯乙烯间规聚合机理	219
(一) 引发活性中心的形成	219
(二) 链引发、链转移和链终止	220
(三) 聚合动力学	221
三、聚合反应工程	222
四、间规聚苯乙烯工业化生产技术	223
五、间规聚苯乙烯的特性及用途	224
(一) sPS 的性能	224
(二) sPS 的成型加工	230
(三) sPS 的应用	231
第八节 环烯烃均聚物与共聚物	231
一、环烯烃聚合反应	232
二、乙烯/降冰片烯共聚物的制备工艺	235
三、乙烯/降冰片烯共聚物 (COC) 的性能	236
四、乙烯/降冰片烯共聚物的用途	238
五、乙烯/苯基降冰片烯共聚物	239
六、乙烯/苯基 DMON 共聚物	241
七、乙烯/降冰片烯/乙烯基降冰片烯三元共聚物	244
第九节 乙烯/苯乙烯共聚物	245
一、ESI 的结构	245
二、ESI 的性能和应用	247
第十节 烯烃/一氧化碳交替共聚物	249
一、烯烃/CO 交替共聚物的合成	250
(一) 乙烯/CO 交替共聚物的合成	250
(二) 丙烯/CO 交替共聚物的合成	255
二、烯烃/CO 共聚合反应机理	255

(一) 乙烯/CO 共聚合反应机理	255
(二) 丙烯/CO 共聚合反应机理	259
三、聚酮的性能和应用	260
第十一节 丙烯酸类弹性体	263
一、稀土类金属配合物	263
二、甲基丙烯酸甲酯聚合	264
三、丙烯酸酯聚合	265
四、甲基丙烯酸酯和丙烯酸酯共聚合	267
(一) 无规共聚	267
(二) 嵌段共聚	269
五、内酯聚合	272
(一) 内酯均聚合	272
(二) 内酯无规共聚合	272
(三) 内酯和极性单体的嵌段共聚合	273
(四) 内酯聚合的催化机理	274
六、异氰酸酯聚合	274
第十二节 双烯烃聚合物	277
一、丁二烯聚合物	277
二、异丁烯聚合物	280
三、丁二烯和异丁烯与苯乙烯共聚	280
(一) 丁二烯和苯乙烯共聚物	280
(二) 异丁烯和苯乙烯共聚物	283
(三) 催化体系产生的共聚性	283
参考文献	284
第四章 茂金属聚乙烯的性能、加工和应用	292
第一节 茂金属聚乙烯的性能	292
一、茂金属聚乙烯的结晶性能	292
(一) 晶胞参数与支化含量	292
(二) 支化非均匀性与结晶分级原理	293
(三) 结晶动力学	296
(四) 晶体形貌	298
(五) 晶体熔点与结晶度	300
二、茂金属聚乙烯的物理机械性能	303
(一) 透明性高	303

(二) 韧性高·····	304
(三) 热密封起始温度低、热封强度高·····	305
(四) 清洁度高·····	305
三、茂金属聚乙烯的流变和加工行为·····	306
(一) 熔体流动性差·····	306
(二) 熔体强度低·····	306
(三) 加工行为·····	306
第二节 茂金属聚乙烯的加工和应用·····	308
一、茂金属聚乙烯的吹膜和流延膜加工·····	308
二、茂金属聚乙烯的主要应用领域——薄膜·····	314
三、茂金属聚乙烯的其他应用开发·····	315
四、结束语·····	318
参考文献·····	318
附录 茂金属催化剂及烯烃聚合物的技术经济分析·····	320
一、主催化剂生产成本·····	320
(一) LLDPE 用茂金属催化剂生产成本 ·····	320
(二) PP 用茂金属催化剂生产成本 ·····	323
(三) EPDM 用茂金属催化剂生产成本 ·····	326
二、助催化剂生产成本·····	326
(一) MAO 生产成本 ·····	326
(二) 改性 MAO 生产成本·····	330
(三) $B(C_6F_5)_3$ 生产成本 ·····	331
三、茂金属烯烃聚合物生产成本·····	332
(一) mLLDPE 生产成本 ·····	332
(二) 茂金属 iPP 生产成本 ·····	334
(三) mEPDM 生产成本 ·····	337
四、茂金属烯烃聚合物生产能力及预测·····	339
五、茂金属烯烃聚合物需求量及预测·····	341
参考文献·····	342

第一章 导 论

第一节 茂金属催化剂的定义

烯烃聚合用茂金属催化剂通常指由茂金属化合物作为主催化剂和一个路易斯酸作为助催化剂所组成的催化体系,其催化聚合机理现已基本认同为茂金属与助催化剂相互作用形成阳离子型催化活性中心。

茂金属化合物一般指由过渡金属元素(如IVB族元素钛、锆、铪)或稀土金属元素和至少一个环戊二烯或环戊二烯衍生物作为配体组成的一类有机金属配合物。而助催化剂主要为烷基铝氧烷或有机硼化合物。

现已知茂金属催化剂为单活性中心催化剂。后者还包括非环戊二烯型含有氮、磷、氧等元素的配体与过渡金属或后过渡金属(如钛、锆、铪、镍、钼、铁、钴等)组成的配合物。

第二节 对茂金属催化剂特性的客观认识

茂金属催化剂与一般传统的 Ziegler-Natta 催化剂比较具有如下特点。

(1) 茂金属催化剂,特别是茂锆催化剂,具有极高的催化活性,含 1g 锆的均相茂金属催化剂能够催化 100t 乙烯聚合^[1]。由于有如此高的活性,催化剂可以允许保留在聚烯烃产品中。烯烃的插入时间极快,链增长过程中每个烯烃分子插入的时间约为 10^{-5} s,这与生物酶催化反应相当。

但是,对于茂金属催化剂的活性应该有一个客观的认识:活性高达 10^{10} —般是指均相聚合中的茂金属催化剂而言,这时助催化剂用量相当大,如铝、锆的物质的量之比 $[Al]/[Zr] > 2000$,这在实际工业生产中意义不大。工业上现有的聚乙烯工艺,除溶液法外,一般要求将均相茂金属催化剂进行负载化,而且助催化剂用量必须较低,如 $[Al]/[Zr] < 500$ 。工业上考察催化剂活性往往是以每克负载催化剂生产多少克聚合物来表示。对聚合物中催化剂残留灰分要求应很低,否则需增加脱灰工艺。高 $[Al]/[Zr]$ 比虽有利于活性发挥,但也增加灰分,因此必须调节负载催化剂配方,达到既能充分发挥茂金属活性中心的催化活性,又能保持较低灰分的优化平衡。另一方面,现工业上的淤浆聚