

 现代化学专著系列·典藏版 18

聚酰亚胺
——化学、结构
与性能的关系及材料
(第二版)

丁孟贤 编著



科学出版社

现代化学专著系列·典藏版 18

聚酰亚胺

——化学、结构与性能的关系及材料
(第二版)

丁孟贤 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书较为全面地介绍了聚酰亚胺的“化学”、“结构与性能的关系”及“材料”。第1章为绪论,其他内容分成三编。第I编化学包括“由二酐(或四酸)与二胺合成聚酰亚胺”、“由二酸二酯与二胺合成聚酰亚胺”、“以硝基酞酰亚胺或卤代苯酞为原料合成二酐及聚酰亚胺”、“聚酰亚胺的交联”、“由双马来酰亚胺及其衍生物得到的聚酰亚胺”及“聚酰亚胺的分解”6章;第II编结构与性能的关系包括“聚酰亚胺的结构与性能关系概论”、“异构的聚酰亚胺”、“含氟聚酰亚胺”、“含硅聚酰亚胺”、“含磷聚酰亚胺”、“含脂肪单元的聚酰亚胺”、“含六元酰亚胺环的聚合物”、“液晶聚酰亚胺”、“树枝状及超枝化聚酰亚胺”及“共聚酰亚胺和聚酰亚胺共混物”10章;第III编材料包括“薄膜”、“高性能工程塑料”、“泡沫”、“纤维”、“以聚酰亚胺为基体树脂的先进复合材料”、“黏合剂”、“分离膜”、“光敏聚酰亚胺”、“液晶取向排列剂”、“非线性光学材料”、“聚酰亚胺(纳米)杂化材料”、“质子传输膜”、“生物相容材料”及“其他材料”14章。全书共计31章。本书除了尽可能地反映国内外的先进技术和最新进展外,还包括编著者所在集体近五十年来在聚酰亚胺研究工作中的积累。为了便于读者查阅,书末还附有英文缩写与化合物结构对照表。

本书可供从事高分子合成、性能、加工及应用的研究人员和研究生阅读,也可作为从事与高分子材料相关工作的工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

现代化学专著系列:典藏版/江明,李静海,沈家骢,等编著. —北京:科学出版社,2017.1

ISBN 978-7-03-051504-9

I. ①现… II. ①江… ②李… ③沈… III. ①化学 IV. ①O6

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第013428号

责任编辑:杨震刘冉/责任校对:钟洋宋玲玲

责任印制:张伟/封面设计:铭轩堂

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>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年1月第一版 开本:720×1000 B5

2017年1月第一版 印张:58 1/2

字数:1 380 000

定价:7980.00元(全45册)

(如有印装质量问题,我社负责调换)



本书由

深圳惠程电气股份有限公司

董事长吕晓义先生和总经理何平女士

资助出版

再版说明

《聚酰亚胺——化学、结构与性能的关系及材料》一书在 2006 年出版后,得到了读者的厚爱,目前存书已经售罄。随着聚酰亚胺材料在我国研发进程的加速,希望了解聚酰亚胺的读者群也不断扩大。不少读者要求更多地了解单体和聚合物的合成及材料的制备方法。本书的姊妹篇《聚酰亚胺——单体合成、聚合方法及材料制备》已于 2011 年 6 月由科学出版社正式出版发行。考虑到聚酰亚胺材料仍在迅速发展中,对本书初版进行内容上的调整和补充,并对其中的一些错误予以更正是很有必要的,所以决定出版本书第二版。

第二版基本延续了初版的章节结构,但删除了初版的第 1 章“聚酰亚胺的合成方法”,因为该内容已经在《聚酰亚胺——单体合成、聚合方法及材料制备》一书中有更好的体现,另将初版的“生物相容材料”部分内容提取出来单设一章。此外,对各章内容都或多或少地进行了补充和调整。

初版中黄文溪、侯豪情、李悦生、秦宗益和童跃进等参加编写的部分在第二版中仍然保留。第二版第 30 章生物相容材料由马晓野撰写,在此一并表示诚挚感谢!

本书的出版得到深圳惠程电气股份有限公司董事长吕晓义先生和总经理何平女士的资助,本人谨向他们致以由衷的谢意!

本书对初版中的一些错误进行了更正,但错误、疏漏之处仍难避免,恳切希望读者诸君不吝指正。

丁孟贤

2012 年 5 月

初 版 序

1998年,为配合中国科学院长春应用化学研究所建所50周年的活动,我与我的同事们在仓促间编写了《聚酰亚胺新型材料》一书,承蒙读者厚爱,1500册很快就售完,此后不少读者要求再版,考虑到《聚酰亚胺新型材料》还有许多内容未能包括进去,更主要的是这几年来,聚酰亚胺又有一些重要的进展需要补充,所以在原来资料积累的基础上重新进行补充和调整,希望这本书能够把聚酰亚胺的面貌表达得更为清晰、完整。

本书内容分为化学、结构与性能关系及材料三编,共30章。化学编包括“聚酰亚胺的合成方法”、“由聚酰胺酸合成聚酰亚胺”、“由聚酰胺酯合成聚酰亚胺”、“以硝基苯酞或卤代苯酞为原料合成二酞及聚酰亚胺”、“聚酰亚胺的交联”、“由双马来酰亚胺及其衍生物得到的聚酰亚胺”和“聚酰亚胺的分解”7章。结构与性能关系编包括“结构与性能概论”、“异构聚酰亚胺”、“含氟聚酰亚胺”、“含硅聚酰亚胺”、“含磷聚酰亚胺”、“含脂肪单元的聚酰亚胺”、“含六元酰亚胺环的聚合物”、“树枝状及高枝化聚酰亚胺”、“液晶聚酰亚胺”和“共聚酰亚胺和聚酰亚胺共混物”10章。材料编包括“薄膜”、“高性能工程塑料”、“泡沫”、“纤维”、“以聚酰亚胺为基体树脂的先进复合材料”、“黏合剂”、“分离膜”、“光敏聚酰亚胺”、“液晶取向排列剂”、“非线性光学材料”、“聚酰亚胺(纳米)杂化材料”、“质子传输膜”及“其他材料”13章。另外,由于聚酰亚胺品种繁多,书中不可能对每个单体都使用全称,所以按照习惯,在更多场合都采用缩写,书后附有英文缩写与结构的对照表,以方便读者查阅。

众所周知,聚酰亚胺相关的文献量非常庞大,据不完全统计,已经达到10万篇以上,除了公开发表在期刊上的文章当尽量择要介绍外,数万条专利文献只选择在聚酰亚胺发展过程中意义较大的加以引用。

本书除了尽可能地反映国内外先进技术和最新进展外,还包括了作者所在的集体四十多年来在聚酰亚胺研究工作中的积累,同时也加入了编著者个人的体会。由于水平有限,材料的取舍可能不尽得当,错误也在所难免,恳切欢迎读者指正。

参加本书第3章、第25章、第26章、第27章和第28章编写的还有黄文溪、侯豪情、李悦生、秦宗益和童跃进,编著者在此表示深切的感谢。

本书的出版得到国家自然科学基金委员会出版基金的支持,我们的研究工作也曾得到基金委的多次资助,编著者在此表示最诚挚的感谢。

编著者

2005年6月

目 录

再版说明

初版序

第 1 章 绪论	1
1.1 聚酰亚胺的性能	1
1.2 合成上的多途径	2
1.3 聚酰亚胺的加工	3
1.4 聚酰亚胺的应用	3
1.5 展望	4

第 I 编 化 学

第 2 章 由二酐(或四酸)与二胺合成聚酰亚胺	9
2.1 聚酰胺酸的合成	9
2.1.1 概述	9
2.1.2 二酐和二胺的活性	11
2.1.3 聚酰胺酸与溶剂的复合物	16
2.1.4 形成聚酰胺酸的反应动力学	16
2.1.5 聚酰胺酸的异构化	17
2.1.6 聚酰胺酸的降解过程	19
2.1.7 在其他溶剂中合成聚酰胺酸	22
2.1.8 聚酰胺酸盐	25
2.1.9 “尼龙盐”	26
2.2 聚酰胺酸的酰亚胺化	26
2.2.1 聚酰胺酸的热酰亚胺化	26
2.2.2 聚酰胺酸的化学环化, 异酰亚胺的生成	36
2.2.3 聚异酰亚胺异构化为聚酰亚胺	43
2.2.4 酰亚胺化条件对聚酰亚胺性能的影响	47
2.3 由二酐或四酸和二胺或酰化的二胺一步合成聚酰亚胺	51
2.3.1 在有机溶剂中一步合成聚酰亚胺	51
2.3.2 在水中一步合成聚酰亚胺	52
2.3.3 二酐与酰化二胺的反应	53
2.4 二酐与双(邻位羟基胺)的反应	53
2.5 合成聚酰亚胺过程中各物种的测定	55
2.5.1 红外光谱	55

2.5.2	^1H NMR	56
2.5.3	^{13}C NMR	57
2.5.4	^{15}N NMR	58
2.5.5	^{19}F NMR	59
	参考文献	60
第3章	由二酸二酯与二胺合成聚酰亚胺	67
3.1	二酸二酯的合成及其异构体	67
3.1.1	二酸二酯的合成	67
3.1.2	异构的二酸二酯	68
3.1.3	醇中水分对二酐酯化的影响	73
3.2	二酸二酯与二胺的反应	73
3.3	聚酰胺酯(聚酰胺)的合成	75
3.4	聚酰胺酯的热酰亚胺化	79
	参考文献	85
第4章	以硝基酞酰亚胺或卤代苯酐为原料合成二酐及聚酰亚胺	87
4.1	由硝基酞酰亚胺合成二酐和聚酰亚胺	87
4.1.1	硝基苯酐和硝基酞酰亚胺的合成	87
4.1.2	由硝基酞酰亚胺合成二酐	88
4.1.3	由双(硝基酞酰亚胺)合成聚醚酰亚胺	90
4.2	氯代苯酐合成路线评述	92
4.3	由邻二甲苯合成氯代苯酐	98
4.3.1	邻二甲苯的氯代和单氯代物的分离	98
4.3.2	氯代邻二甲苯的氧化及氧化产物的捕集	99
4.3.3	粗氯代苯酐的前处理和异构体的分离	100
4.3.4	3-氯代苯酐的合成	101
4.4	由氯代苯酐合成各种二酐	102
4.4.1	联苯二酐	102
4.4.2	二苯醚二酐	103
4.4.3	二醚二酐	104
4.4.4	硫醚类二酐	104
4.5	由氯代苯酐直接合成聚酰亚胺	105
4.5.1	双(氯代酞酰亚胺)的合成	105
4.5.2	由双(氯代酞酰亚胺)合成聚醚酰亚胺	106
4.5.3	由双(氯酞酰亚胺)合成聚硫醚酰亚胺	107
4.5.4	双(氯代酞酰亚胺)与二氯二苯砜或二氯二苯酮在 Na_2S 作用下得到聚酰亚胺	107
4.5.5	由镍催化偶合制备联苯型聚酰亚胺	108
4.6	硝基酞酰亚胺路线和氯代苯酐路线的比较	110

参考文献	110
第 5 章 聚酰亚胺的交联	113
5.1 双马来酰亚胺	115
5.2 PMR 型聚酰亚胺	115
5.2.1 概论	115
5.2.2 四酸的三元酯和四元酯与胺的反应	116
5.2.3 PMR 体系的固化	118
5.3 带炔基的酰亚胺低聚物	126
5.3.1 以乙炔基封端的酰亚胺低聚物	126
5.3.2 以苯炔基封端的酰亚胺低聚物	128
5.3.3 二苯乙炔与二苯撑的反应	133
5.3.4 其他芳炔基封端的酰亚胺低聚物	133
5.4 以苯并环丁烯作为活性端基	133
5.5 其他热固性聚酰亚胺	134
5.5.1 由烯丙基降冰片烯封端的聚酰亚胺	134
5.5.2 以 2,2-对环芳烃封端的聚酰亚胺	135
5.5.3 以二苯撑封端的聚酰亚胺	135
5.5.4 基于三聚成环概念的活性基团	136
5.5.5 以苯基三氮烯封端的聚酰亚胺	137
参考文献	137
第 6 章 由双马来酰亚胺及其衍生物得到的聚酰亚胺	140
6.1 双马来酰亚胺	140
6.1.1 BMI 的合成	140
6.1.2 BMI 的均聚	146
6.1.3 BMI 与二胺的共聚——Michael 加成反应之一	146
6.1.4 BMI 与硫化氢或二巯基化合物的共聚——Micheal 加成反应之二	151
6.1.5 BMI 与二元酚的共聚——Micheal 加成反应之三	153
6.1.6 BMI 与双氨基化合物的共聚——Micheal 加成反应之四	154
6.1.7 BMI 和烯丙基化合物的共聚物	155
6.1.8 BMI 的 Diels-Alder 共聚物	155
6.1.9 BMI 和环氧树脂的共聚物	155
6.1.10 BMI 与苯并环丁烯的共聚物	156
6.1.11 BMI 与乙烯化合物的共聚	157
6.1.12 BMI 的其他共聚物	159
6.2 双衣康酰亚胺和双柠康酰亚胺	160
参考文献	166
第 7 章 聚酰亚胺的分解	169
7.1 聚酰亚胺的热和热氧化分解	169

7.1.1	聚酰亚胺的热分解和热氧化分解	170
7.1.2	聚酰亚胺炭化产物	185
7.2	聚酰亚胺的水解	188
7.3	聚酰亚胺的辐射分解	192
7.3.1	光分解	192
7.3.2	高能辐射分解	194
7.4	原子氧对聚酰亚胺的作用	199
7.5	聚酰亚胺的其他分解反应	200
	参考文献	201

第Ⅱ编 结构与性能的关系

第8章	聚酰亚胺的结构与性能关系概论	207
8.1	聚酰亚胺的分子结构	207
8.1.1	典型的酰亚胺单元的结构参数	207
8.1.2	各种连接基团的平均键长和键角	208
8.1.3	分子间和分子内的作用力	209
8.2	耐热性	210
8.3	热稳定性	215
8.4	溶解性	219
8.4.1	引入含氟、硅、磷的基团或羟基	220
8.4.2	引入“圈”型结构	221
8.4.3	引入侧基	223
8.4.4	使大分子链弯曲	225
8.4.5	引入脂肪结构	227
8.5	力学性能	227
8.6	光学性能	227
8.7	电学性能	232
	参考文献	235
第9章	异构的聚酰亚胺	238
9.1	由异构的二酐得到的聚酰亚胺	239
9.1.1	异构二酐的合成和结构	240
9.1.2	MPDA与二胺的反应	251
9.1.3	环状聚酰亚胺的生成	252
9.1.4	由异构二酐得到的聚酰亚胺的溶解性能	256
9.1.5	由异构二酐得到的聚酰亚胺的热性能	260
9.1.6	由异构二酐得到的聚酰亚胺的机械性能	267
9.1.7	由异构二酐得到的聚酰亚胺的流变性能	268
9.1.8	由异构二酐得到的聚酰亚胺的气体透过性能	270

9.1.9	由异构二酐得到的聚酰亚胺的透光性能	271
9.1.10	一些由异构二酐得到的聚酰亚胺的特性	272
9.2	由异构的二胺得到的聚酰亚胺	277
9.2.1	由异构二胺得到的聚酰亚胺的溶解性能	278
9.2.2	由异构二胺得到的聚酰亚胺的热性能	280
9.2.3	由异构二胺得到的聚酰亚胺的机械性能	286
9.2.4	由异构二胺得到的聚酰亚胺的介电常数	288
9.2.5	由异构二胺得到的聚酰亚胺的气体分离特性	288
9.3	手性聚酰亚胺	291
9.4	结论	300
	参考文献	300
第 10 章	含氟聚酰亚胺	304
10.1	含氟聚酰亚胺的性能特点	304
10.2	主链上含有全氟脂肪链的聚酰亚胺	306
10.3	含三氟甲基及六氟丙基的聚酰亚胺	308
10.4	芳核上的氢被氟所取代的聚酰亚胺	312
10.5	含氟代脂肪侧链的聚酰亚胺	315
10.6	全氟聚酰亚胺	317
10.7	含氟聚酰亚胺的应用	317
	参考文献	318
第 11 章	含硅聚酰亚胺	320
11.1	主链上含硅的聚酰亚胺	320
11.1.1	由含硅的二胺合成的聚酰亚胺	320
11.1.2	由含硅的二酐合成的聚酰亚胺	331
11.2	侧链上含硅的聚酰亚胺	336
11.3	含 POSS 的聚酰亚胺	339
	参考文献	344
第 12 章	含磷聚酰亚胺	346
12.1	含磷单体	346
12.1.1	磷的氧化物类单体	346
12.1.2	膦腈类单体	347
12.2	含磷聚酰亚胺的性能	349
	参考文献	361
第 13 章	含脂肪单元的聚酰亚胺	362
13.1	由脂肪二胺和芳香二酐合成的聚酰亚胺	362
13.1.1	由含脂肪链的二胺和芳香二酐合成的聚酰亚胺	362
13.1.2	由含脂环二胺与芳香二酐得到的聚酰亚胺	366
13.1.3	由带螺环二胺合成的聚酰亚胺	371

13.1.4	由含圈型结构的二胺合成的聚酰亚胺	372
13.2	由脂肪二酐和芳香二胺合成的聚酰亚胺	377
13.2.1	由含脂肪链的二酐和芳香二胺合成的聚酰亚胺	377
13.2.2	由含脂环的二酐和芳香二胺合成的聚酰亚胺	379
13.2.3	由含螺环的二酐合成的聚酰亚胺	389
13.2.4	由带圈型结构的二酐合成的聚酰亚胺	393
13.3	由脂肪二酐和脂肪二胺合成的全脂肪聚酰亚胺	395
	参考文献	404
第 14 章	含六元酰亚胺环的聚合物	407
14.1	萘的六元环酐与伯胺反应形成酰亚胺的过程	407
14.2	含六元酰亚胺环的聚合物	413
	参考文献	420
第 15 章	液晶聚酰亚胺	422
15.1	“纯粹”的液晶聚酰亚胺	422
15.2	液晶聚酯酰亚胺	422
15.3	液晶聚碳酸酯酰亚胺	430
15.4	液晶聚酰胺酰亚胺	432
15.5	含醚链的液晶聚酰亚胺	434
15.6	侧链液晶聚酰亚胺	435
15.7	液晶聚酰胺酯	435
	参考文献	436
第 16 章	树枝状及超枝化聚酰亚胺	438
16.1	枝化度的测定	438
16.2	树枝状聚酰亚胺	439
16.3	超枝化聚酰亚胺	443
16.4	结束语	462
	参考文献	462
第 17 章	共聚酰亚胺和聚酰亚胺共混物	464
17.1	共聚酰亚胺	464
17.1.1	交替共聚酰亚胺	464
17.1.2	嵌段共聚酰亚胺	472
17.2	聚酰亚胺共混物	475
17.2.1	聚酰亚胺与聚酰亚胺的共混物	476
17.2.2	聚醚酰亚胺与聚醚酮的共混物	481
17.2.3	聚酰亚胺与聚醚砜的共混物	486
17.2.4	互穿网络聚酰亚胺	488
17.2.5	聚酰亚胺与液晶聚合物(LCP)的共混物	496
17.2.6	聚酰亚胺与聚苯并咪唑的共混物	499

17.2.7 聚酰亚胺与聚苯胺的共混物	502
参考文献	503

第Ⅲ编 材 料

第 18 章 薄膜	509
18.1 影响薄膜性能的诸因素	509
18.1.1 化学结构	509
18.1.2 溶剂	512
18.1.3 干燥条件	513
18.1.4 牵伸	514
18.1.5 酰亚胺化条件	516
18.1.6 聚酰亚胺与基底的黏结性	522
18.2 聚酰亚胺薄膜和柔性覆铜板的制造	523
18.3 有关薄膜及覆铜板的性能指标	524
18.4 商品聚酰亚胺薄膜	525
18.4.1 Kapton 薄膜	526
18.4.2 Apical 薄膜	528
18.4.3 Upilex 薄膜	529
18.4.4 热塑性聚酰亚胺薄膜	530
18.5 气相沉积成膜方法	531
参考文献	533
第 19 章 高性能工程塑料	535
19.1 对作为工程塑料的聚酰亚胺的基本要求	535
19.1.1 耐热性	535
19.1.2 可加工性	535
19.1.3 结晶性	536
19.2 热塑性聚酰亚胺工程塑料	536
19.2.1 Vespel 聚酰亚胺	536
19.2.2 Ultem 聚酰亚胺	538
19.2.3 Torlon 聚酰胺酰亚胺	541
19.2.4 UPIMOL 聚酰亚胺	543
19.2.5 Aurum 聚酰亚胺	544
19.2.6 Ratem(雷泰)聚酰亚胺	547
19.2.7 HI 系列聚酰亚胺	549
19.2.8 YZPI 聚酰亚胺	551
19.2.9 由 3,4'-BPDA 得到的聚酰亚胺	553
19.2.10 其他热塑性聚酰亚胺	554
19.3 热固性聚酰亚胺工程塑料	557

19.3.1	PMR-15 和 PMR-II	557
19.3.2	Kinel	558
19.3.3	HI-C-01	558
	参考文献	559
第 20 章	泡沫	560
20.1	主链酰亚胺泡沫	560
20.1.1	Solimide 聚酰亚胺泡沫	560
20.1.2	TEEK 聚酰亚胺泡沫	562
20.1.3	由二酐与二异氰酸酯得到的聚酰亚胺泡沫	563
20.2	侧链酰亚胺泡沫——聚甲基丙酰亚胺	564
20.3	纳米泡沫	565
20.4	气凝胶	567
	参考文献	569
第 21 章	纤维	571
21.1	由聚酰胺酸溶液纺得的纤维	573
21.2	由聚酰亚胺溶液纺得的纤维	581
21.3	由熔融法纺得的纤维	588
21.4	由电纺丝得到的纳米纤维	589
	参考文献	591
第 22 章	以聚酰亚胺为基体树脂的先进复合材料	593
22.1	引言	593
22.1.1	先进复合材料发展的推动力	593
22.1.2	适合于超音速客机使用的先进复合材料	595
22.2	以双马来酰亚胺为基体树脂的复合材料	596
22.3	PMR-15 复合材料	601
22.3.1	PMR-15 预浸料的制备	601
22.3.2	PMR-15 复合材料的制备	602
22.3.3	PMR-15 复合材料的性能	603
22.3.4	以异丙酯代替甲酯制备 PMR 树脂	607
22.3.5	PMR-15 复合材料存在的问题	607
22.4	其他 PMR 复合材料	608
22.4.1	PMR-15 的变种	608
22.4.2	LaRC-160	610
22.4.3	由 ODPA 和 BPDA 代替 BTDA 的 PMR 聚酰亚胺树脂及复合材料	610
22.4.4	PMR-II	611
22.4.5	LaRC-RP46	612
22.4.6	AFR-700B	613
22.4.7	V-CAP	613

22.4.8 以含氟二胺来提高 PMR 的加工性	614
22.5 以热塑性聚酰亚胺为基体树脂的复合材料	614
22.5.1 Skybond/Pyralin	614
22.5.2 Avimid K III	615
22.5.3 Avimid N	615
22.5.4 LaRC-TPI	616
22.5.5 Matrimid 5218	617
22.5.6 LaRC-8515	617
22.5.7 LaRC-IA	619
22.5.8 LaRC-CPI	621
22.5.9 LaRC-SCI	622
22.5.10 LaRC-SI	623
22.5.11 LaRC-ITPI	625
22.5.12 聚醚酰亚胺	626
22.5.13 聚酰胺酰亚胺	626
22.6 由乙炔封端的聚酰亚胺为基体树脂的复合材料	627
22.7 以苯炔基封端的聚酰亚胺为基体树脂的复合材料	628
22.7.1 PETI	628
22.7.2 PPEI	629
22.7.3 PTPEI	630
22.7.4 PETI-1	632
22.7.5 Triple-A	632
22.7.6 以氟代 PEPA 为封端剂	635
22.7.7 以 PMDA 为二酐与非平面结构二胺 <i>p</i> -ODA 得到的树脂	636
22.7.8 以 PERA-1 作为 PETI-5 的活性添加剂的树脂	637
22.7.9 LaRC MPEI-1	639
22.7.10 可以进行 RTM 加工的 PETI 类树脂	641
22.7.11 以 2,3,3',4'-联苯二酐为基础的基体树脂	644
参考文献	647
第 23 章 黏合剂	649
23.1 聚酰亚胺对聚合物的黏合	649
23.2 聚酰亚胺对无机基底的黏合	652
23.3 聚酰亚胺对金属的黏合	653
23.3.1 印刷线路板用的黏合剂	654
23.3.2 高温结构胶黏剂	659
23.4 黏合促进剂	670
参考文献	671

第 24 章 分离膜	673
24.1 气体分离膜	673
24.1.1 均质膜的气体分离原理	673
24.1.2 对聚合物的气体透过性能的预测	674
24.1.3 聚酰亚胺结构与气体分离性能的关系	675
24.1.4 由聚酰胺酸盐得到的分离膜	688
24.1.5 交联对聚酰亚胺膜的气体透过性能的影响	688
24.1.6 含硅氧烷的聚酰亚胺分离膜	695
24.1.7 对不饱和及饱和低级烃类的分离	698
24.1.8 聚酰亚胺膜在使用过程中的变化	699
24.2 用于气体分离的聚酰亚胺炭分子筛膜	702
24.3 渗透汽化膜	713
24.4 超滤膜	725
24.5 纳滤膜	728
24.6 聚酰亚胺反渗透膜	729
参考文献	731
第 25 章 光敏聚酰亚胺	734
25.1 负性光敏聚酰亚胺	735
25.1.1 酯型光敏聚酰亚胺	735
25.1.2 离子型负性光敏聚酰亚胺	740
25.1.3 酰亚胺型负性光敏聚酰亚胺	742
25.1.4 使用水系显影液的负性光敏聚酰亚胺	743
25.2 正性光敏聚酰亚胺	746
25.2.1 自感光型正性光敏聚酰亚胺	747
25.2.2 混合型正性光敏聚酰亚胺	750
25.2.3 异构型正性光敏聚酰亚胺	752
25.3 化学增幅型光敏聚酰亚胺	754
25.4 结束语	759
参考文献	760
第 26 章 液晶取向排列剂	763
26.1 引言	763
26.2 液晶在分子膜表面的取向排列机制	764
26.3 聚酰亚胺的结构与预倾角的关系	766
26.3.1 引入短小的取代基	766
26.3.2 引入长、大的取代基	766
26.3.3 引入含氟单元	772
26.3.4 引入脂肪单元	774
26.4 影响液晶分子取向排列预倾角的因素	774

26.5	非摩擦液晶取向剂	778
26.5.1	聚酰亚胺 LB 膜作液晶取向层	778
26.5.2	聚酰亚胺光控液晶取向材料	780
26.6	铁电液晶显示器用取向排列剂	785
26.6.1	表面双稳态铁电液晶显示器用取向排列剂	785
26.6.2	反铁电液晶显示器用取向排列剂	786
	参考文献	788
第 27 章	非线性光学材料	791
27.1	引言	791
27.2	主-客体型 NLO 聚酰亚胺	793
27.3	侧链型 NLO 聚酰亚胺	797
27.4	主链型 NLO 聚酰亚胺	812
27.5	交联型 NLO 聚酰亚胺	813
27.6	无机/聚酰亚胺 NLO 体系	814
27.7	多功能 NLO 聚酰亚胺	815
	参考文献	816
第 28 章	聚酰亚胺(纳米)杂化材料	818
28.1	聚酰亚胺在(纳米)杂化材料制备中的特点	818
28.2	聚酰亚胺-无机物杂化材料	818
28.2.1	无机物及其前体	818
28.2.2	聚酰亚胺-无机物杂化材料的合成方法	819
28.2.3	聚酰亚胺-无机物杂化材料的形态结构	822
28.2.4	聚酰亚胺-无机物杂化材料的性能	823
28.3	聚酰亚胺-金属杂化材料	831
28.3.1	金属掺杂剂	831
28.3.2	掺杂方法	832
28.3.3	聚酰亚胺-金属杂化材料的形态结构	833
28.3.4	聚酰亚胺-金属杂化材料的性能	834
	参考文献	843
第 29 章	质子传输膜	846
29.1	由 1,4,5,8-萘四酸二酐(NTDA)与磺化二胺得到的聚酰亚胺	847
29.2	磺化聚酰亚胺对水的稳定性	861
	参考文献	867
第 30 章	生物相容材料	869
30.1	聚酰亚胺的生物适应性	869
30.2	聚酰亚胺封装	873
30.3	聚酰亚胺多孔膜	878
30.4	聚酰亚胺复合材料生物应用	880