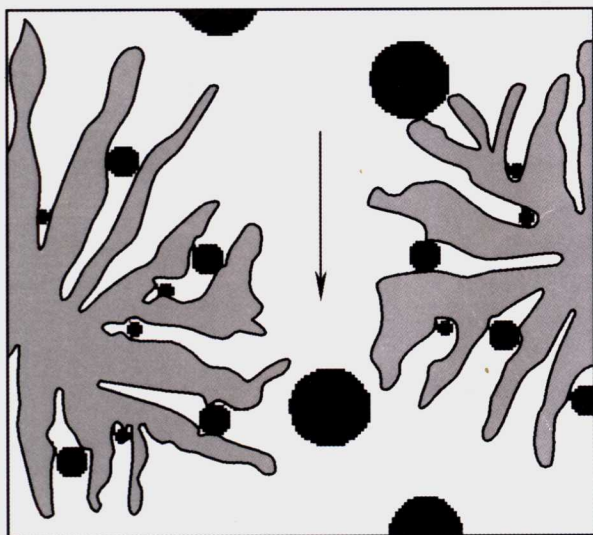


方道斌 郭睿威 哈润华 等编

丙烯酰胺聚合物



CHEMICAL INDUSTRY PRESS



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

丙烯酰胺聚合物

方道斌 郭睿威 哈润华 等编



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

丙烯酰胺聚合物/方道斌, 郭睿威, 哈润华等编.

北京: 化学工业出版社, 2006. 3

ISBN 7-5025-8436-6

I. 丙… II. ①方…②郭…③哈… III. 聚丙烯酰胺
IV. O633. 22

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 025119 号

丙烯酰胺聚合物

方道斌 郭睿威 哈润华 等编

责任编辑: 王苏平

文字编辑: 王琪

责任校对: 王素芹

封面设计: 潘峰

*

化学工业出版社 出版发行
材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京云浩印刷有限责任公司印装

开本 850mm×1168mm 1/32 印张 16½ 字数 458 千字

2006 年 4 月第 1 版 2006 年 4 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8436-6

定 价: 36.00 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

前 言

本书受全国功能高分子行业委员会委托，由国内有关专家共同编写而成。

“丙烯酸胺聚合物”，就其名称看似单一，而就其合成与应用的实际内容却很庞杂。既涉及合成和结构，又涉及性能和应用；既涉及物理和化学等学科的理论，又涉及诸多门类的应用工程。所以一本书难以全面包容。

本书编者试图为读者构筑“合成-结构-性能-应用”之间关系的桥梁，在普及的基础上提高行业人员的专业技术水平。基于这一宗旨本书较为系统地介绍了相关的基础理论，以扩大各个领域的专业人员对于其他不甚了解的方面有些更深入的理解，使经验和理论有机结合，以拓展工作。

在编写过程中对一些章节进行了归纳和串接，以便使各章节间的联系更为紧密，避免重复。

第1章是绪论。对丙烯酸胺聚合物作了较为全面的概述。

第2章到第5章是基础理论及结构表征方法。其中第2章是聚丙烯酰胺的物理性质。系统介绍了聚丙烯酰胺固体及水溶液的性质、聚电解质溶液的性质和聚丙烯酰胺类水凝胶的性质等。这些内容是应用中涉及到的重要物理化学基础理论。第3章和第5章分别对聚丙烯酰胺的化学性质和丙烯酸胺的聚合原理进行了总结。第4章介绍了结构表征及重要参数的测定方法。

第6章是丙烯酸胺的合成及性质。

第7章到第9章是各种聚合实施方法，包括最新的水相中的分散聚合。介绍了各种聚合工艺原理和典型的实例。

第10章是疏水改性聚丙烯酰胺。这是受到人们广泛关注的研究领域。系统介绍了疏水改性聚丙烯酰胺的结构、合成和应用。

第12章到第15章是丙烯酸酯聚合物在工业中的主要应用。系统介绍了每一应用领域的基本概况、原理、规律和典型实例。第16章聚丙烯酰胺在生物医学材料中的应用是全新的总结。各应用章节所涉及的分散稳定作用和絮凝作用在第11章作了简要介绍。

为使读者阅读顺畅，正文中缩写符号的注释移至附录中。

本书由方道斌、郭睿威、哈润华、姚芳莲、董岸杰、桑恩典、王丕新、罗健辉和王平美、顾平和张颖、谢来苏、曹旂、顾汉卿和高景恒等编写。

借本书出版之际，感谢我们的恩师——天津大学聚丙烯酰胺研究室创始人胡金生教授的长期栽培。

本书恳请曹同玉、刘庆普、张乃莉、王高升、孙希明和邓联东等教授、专家审阅，得到严瑞瑄和曹竹安教授的帮助。他们对本书的编写提出了许多建设性的宝贵意见。在此一并致谢。

书中不妥之处在所难免，诚盼读者的批评指正。希望本书能为本行业专业水平的提高起到一定的作用。

编 者

2006年1月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 定义和分类	1
1.1.1 离子型聚丙烯酰胺	1
1.1.2 支化型和交联型聚丙烯酰胺	3
1.1.3 疏水缔合型聚丙烯酰胺	5
1.2 丙烯酰胺聚合物的结构与性质	5
1.3 产品剂型与聚合方法	8
1.4 丙烯酰胺聚合物的应用与消费	9
1.5 聚丙烯酰胺的毒性与安全	11
1.6 回顾、现状与展望	12
参考文献	14
第 2 章 聚丙烯酰胺的物理性质	16
2.1 固体聚丙烯酰胺的物理性质	16
2.1.1 固体聚丙烯酰胺的一般物理性质	16
2.1.2 溶解特点与速溶问题	17
2.1.3 聚丙烯酰胺的稳定性	19
2.2 聚丙烯酰胺水溶液的性质	19
2.2.1 聚丙烯酰胺水溶液的一般性质	19
2.2.2 聚丙烯酰胺水溶液的依时性	20
2.3 聚丙烯酰胺水溶液的黏度及其预测	23
2.3.1 黏度的定义及流动的类型	23
2.3.2 临界剪切速率	25
2.3.3 零剪切黏度的预测	27
2.3.4 表观黏度的预测	30
2.4 聚电解质溶液的性质	31
2.4.1 聚电解质概述	31
2.4.2 聚电解质的溶解	32

2.4.3	聚电解质的离解和离解常数	33
2.4.4	聚电解质溶液的黏度和特性黏数	36
2.4.5	聚电解质溶液的渗透压和唐南平衡	39
2.4.6	两性聚电解质的溶液性质	41
2.5	聚丙烯酰胺类水凝胶的性质	45
2.5.1	水凝胶的定义	45
2.5.2	膨胀-收缩行为	46
2.5.3	体积相转变和刺激响应	48
2.5.4	凝胶的筛分作用	52
2.5.5	力学性能	53
	参考文献	54
第3章 聚丙烯酰胺的化学性质		57
3.1	水解反应	57
3.1.1	酸性水解	58
3.1.2	碱性水解	59
3.1.3	热促水解	62
3.1.4	聚丙烯酰胺共聚物的水解	62
3.2	羟甲基化反应	64
3.3	胺甲基化反应	66
3.4	磺甲基化反应	71
3.5	霍夫曼降解反应	73
3.6	交联反应	77
3.7	老化	81
3.7.1	生物降解	82
3.7.2	化学降解	83
3.7.3	机械降解	86
	参考文献	89
第4章 丙烯酰胺聚合物的结构表征与测定		93
4.1	丙烯酰胺聚合物的化学结构表征	93
4.1.1	红外光谱	93
4.1.2	核磁共振谱法	95
4.1.3	元素分析	102
4.2	丙烯酰胺聚合物的离子性质表征	104
4.2.1	基于酸碱滴定的化学滴定	105

4.2.2 胶体滴定	109
4.3 聚丙烯酰胺分子量的表征	112
4.3.1 黏度法	112
4.3.2 光散射法	123
4.3.3 凝胶渗透色谱法	129
4.4 聚丙烯酰胺产品的一般物性	134
4.5 聚合物有效浓度的测定	135
4.5.1 凝胶渗透色谱法	135
4.5.2 浊度法	136
4.5.3 <i>N</i> -溴代酰胺法	138
4.5.4 荧光分光光度法	139
参考文献	139

第5章 丙烯酰胺聚合反应化学

5.1 丙烯酰胺自由基聚合机理	143
5.2 丙烯酰胺自由基聚合的引发方法	145
5.2.1 单组分引发剂	146
5.2.2 氧化还原引发体系	151
5.2.3 复合引发剂体系	153
5.2.4 光及辐射引发	154
5.3 丙烯酰胺聚合反应动力学	155
5.3.1 丙烯酰胺单体浓度和引发剂浓度对聚合反应速率的影响	156
5.3.2 介质 pH 值对丙烯酰胺聚合动力学的影响	157
5.3.3 有机溶剂对丙烯酰胺聚合动力学的影响	158
5.3.4 无机盐对丙烯酰胺聚合动力学的影响	159
5.3.5 表面活性剂对丙烯酰胺聚合动力学的影响	160
5.4 丙烯酰胺自由基聚合的相对分子质量	160
5.4.1 单体浓度与聚丙烯酰胺相对分子质量的关系	161
5.4.2 引发剂的类型及用量对聚丙烯酰胺相对分子质量的影响	162
5.4.3 聚合体系 pH 值对聚丙烯酰胺相对分子质量的影响	163
5.4.4 聚合温度对聚丙烯酰胺相对分子质量的影响	163
5.4.5 聚合体系中的杂质对 PAM 相对分子质量的影响	164
5.4.6 链转移剂的应用	166
5.5 丙烯酰胺衍生物的聚合	167
5.6 丙烯酰胺共聚合反应	168

5.6.1	丙烯酸酯共聚反应原理	168
5.6.2	丙烯酸酯类无规共聚物	172
5.6.3	丙烯酸酯类接枝共聚物的制备	176
5.6.4	丙烯酸酯类嵌段共聚物	180
	参考文献	181
第6章	丙烯酸酯的合成及性质	183
6.1	丙烯酸酯的制法	183
6.1.1	丙烯腈硫酸水合法	183
6.1.2	丙烯腈铜催化水合法	184
6.1.3	丙烯腈生物酶催化水合法	185
6.2	丙烯酸酯的性质	189
6.2.1	固体丙烯酸酯的物理性质	189
6.2.2	丙烯酸酯水溶液的物理性质	190
6.2.3	丙烯酸酯的化学性质	191
6.3	丙烯酸酯的毒性与安全	193
	参考文献	196
第7章	丙烯酸酯水溶液聚合	198
7.1	水溶液聚合制备聚丙烯酰胺水溶胶	199
7.2	水溶液聚合制备聚丙烯酰胺干粉	200
7.2.1	带式片状聚合工艺	201
7.2.2	釜式大块聚合工艺	209
7.3	水溶液共聚合	212
7.3.1	丙烯酸酯与阴离子单体共聚合	213
7.3.2	丙烯酸酯与阳离子单体共聚合	214
7.3.3	丙烯酸酯水溶液共聚合制备交联聚合物	215
7.4	由聚合物水溶液制备聚丙烯酰胺衍生物	215
7.4.1	聚丙烯酰胺水解的阴离子型聚合物	215
7.4.2	磺甲基聚丙烯酰胺阴离子型聚合物产品	220
7.4.3	胺甲基聚丙烯酰胺阳离子型聚合物产品	220
7.5	丙烯酸酯水溶液聚合技术展望	221
	参考文献	224
第8章	丙烯酸酯的反相乳液聚合与反相微乳液聚合	227
8.1	丙烯酸酯的反相乳液聚合和聚丙烯酰胺反相胶乳	227
8.1.1	丙烯酸酯反相乳液的稳定	228

8.1.2	丙烯酰胺的反相乳液聚合原理	232
8.1.3	聚丙烯酰胺反相胶乳的提浓方法	239
8.2	丙烯酰胺的反相微乳液聚合	241
8.2.1	微乳液的形成、结构和稳定	242
8.2.2	丙烯酰胺的反相微乳液聚合原理	247
8.2.3	丙烯酰胺反相微乳液聚合动力学	252
8.2.4	反相微乳液聚合展望	253
	参考文献	253
第9章	丙烯酰胺在水相中的分散聚合	257
9.1	分散聚合的一般介绍	257
9.1.1	非水溶剂中的分散聚合	258
9.1.2	水介质中的分散聚合及工艺	259
9.2	水相中分散聚合体系的组成	260
9.2.1	分散介质	261
9.2.2	单体	261
9.2.3	分散稳定剂	262
9.2.4	引发剂	263
9.3	物性及分析方法	264
9.4	聚合物的合成方法	265
9.4.1	丙烯酰胺与各种乙烯基单体的反应性能	265
9.4.2	阳离子型聚合物的合成方法	265
9.4.3	阴离子型聚合物的合成方法	267
9.4.4	两性离子型聚合物的合成方法	269
9.5	应用简介	270
9.5.1	废水处理中的沉淀剂和脱水剂	270
9.5.2	纸张增强剂	271
9.5.3	固化剂	271
9.6	展望	272
	参考文献	272
第10章	疏水改性聚丙烯酰胺	274
10.1	概述	274
10.1.1	疏水改性聚丙烯酰胺的结构	275
10.1.2	疏水改性聚丙烯酰胺的合成	277
10.2	胶束共聚	280

10.2.1	胶束共聚操作方法	280
10.2.2	胶束共聚的机理	281
10.2.3	疏水改性聚丙烯酰胺的结构特征	284
10.3	疏水改性聚丙烯酰胺的结构表征	287
10.3.1	化学结构的表征	287
10.3.2	水溶液聚集结构的表征	290
10.4	疏水改性聚丙烯酰胺水溶液的流变行为	293
10.4.1	疏水缔合型聚合物的溶解性	293
10.4.2	疏水缔合聚丙烯酰胺水溶液的流变特性	294
10.4.3	水溶液流变行为的影响因素	297
10.5	疏水改性聚丙烯酰胺的应用	306
	参考文献	307
第 11 章 丙烯酰胺聚合物的稳定作用和絮凝作用		310
11.1	分散体系的稳定性概念	310
11.2	静电稳定作用	312
11.2.1	粒子界面电荷的来源	313
11.2.2	双电层	313
11.2.3	DLVO 理论	315
11.2.4	电解质的聚沉作用	316
11.3	位阻稳定作用	317
11.3.1	高分子在分散体上的吸附	318
11.3.2	位阻稳定理论	321
11.3.3	高分子分散剂的结构特点	322
11.4	高分子的絮凝作用	323
11.4.1	絮凝的基本机理	323
11.4.2	高分子絮凝剂的结构特点	324
11.4.3	高分子絮凝剂品种、性能和特点	325
	参考文献	332
第 12 章 丙烯酰胺聚合物在油气田工业中的应用		333
12.1	在钻井中的应用	333
12.1.1	降滤失剂	334
12.1.2	絮凝剂	338
12.1.3	页岩抑制(防塌)剂	339
12.1.4	稀释剂(降黏剂)	340

12.1.5	堵漏剂	341
12.2	在固井中的应用	341
12.2.1	水泥浆缓凝剂	342
12.2.2	水泥浆减阻剂	342
12.2.3	水泥浆降滤失剂	342
12.2.4	水泥浆堵漏剂	343
12.3	在完井和修井中的应用	343
12.3.1	降滤失剂	343
12.3.2	增黏剂	343
12.3.3	黏土稳定剂	344
12.4	在压裂中的应用	344
12.4.1	压裂液用稠化剂	345
12.4.2	压裂液用黏土稳定剂	345
12.5	在酸化中的应用	345
12.5.1	酸化缓速剂	346
12.5.2	酸化黏土稳定剂	346
12.5.3	酸化用暂堵(转向)剂	346
12.6	在注水(油田水处理)中的应用	347
12.6.1	聚丙烯酰胺类除油剂	347
12.6.2	聚丙烯酰胺类絮凝剂	349
12.6.3	聚丙烯酰胺类防垢剂	349
12.6.4	聚丙烯酰胺类黏土稳定剂	350
12.7	在堵水调剖中的应用	351
12.7.1	聚丙烯酰胺类凝胶型堵水调剖剂	352
12.7.2	聚丙烯酰胺胶态分散凝胶深部调剖体系	354
12.7.3	聚丙烯酰胺弱凝胶深部调剖体系	355
12.7.4	预交联(体膨型)丙烯酸胺聚合物颗粒堵水调剖剂	357
12.7.5	丙烯酸胺类聚合物与木质素磺酸盐复合凝胶型堵水 调剖剂	357
12.7.6	丙烯酸胺聚合物与膨润土复合型堵水调剖剂	358
12.7.7	丙烯酸胺类地下聚合体系堵水调剖剂	358
12.7.8	泡沫型堵水调剖剂	358
12.7.9	泡沫凝胶型堵水调剖剂	359
12.7.10	丙烯酸胺聚合物与水玻璃复合交联凝胶型堵水调剖剂	359

12.7.11	丙烯酰胺聚合物桥键吸附技术	360
12.7.12	改进的聚丙烯酰胺凝胶技术	361
12.8	在三次采油中的应用	361
12.8.1	聚合物驱油和三元复合驱油机理	363
12.8.2	聚丙烯酰胺在三次采油中的应用实例	364
12.8.3	三次采油用聚合物评价应重视的问题	367
12.8.4	聚丙烯酰胺耐温抗盐性能差的原因分析	369
12.8.5	三次采油用耐温抗盐聚合物分析	369
	参考文献	375
第 13 章	聚丙烯酰胺在水处理中的应用	378
13.1	概述	378
13.1.1	聚丙烯酰胺在水处理中的应用现状	378
13.1.2	聚丙烯酰胺在水处理中的主要作用	378
13.1.3	影响混凝的主要因素	379
13.2	聚丙烯酰胺在给水处理中的应用	381
13.2.1	给水处理工艺概述	381
13.2.2	聚丙烯酰胺在给水中的投加方式及投加量	382
13.2.3	不同给水水质的处理	383
13.3	聚丙烯酰胺在污水处理中的应用	386
13.3.1	对含金属废水的处理	387
13.3.2	有机废水的处理	390
13.3.3	无机废水的处理	398
13.3.4	工程应用实例	401
13.4	聚丙烯酰胺在污泥处理中的应用	404
13.4.1	给水污泥处理	405
13.4.2	污水污泥处理	407
13.4.3	工程应用实例	408
	参考文献	409
第 14 章	丙烯酰胺聚合物在造纸工业中的应用	412
14.1	概述	412
14.1.1	造纸工业的现状和前景	412
14.1.2	现代造纸工业的基本过程	413
14.1.3	纸料中的静电荷	413
14.1.4	聚丙烯酰胺在造纸过程中的主要用途	415

14.1.5	聚丙烯酰胺分子量和电荷与其用途的关系	416
14.1.6	21世纪聚丙烯酰胺在制浆造纸工业中的应用所面临的 任务	418
14.2	纸张增干强剂	418
14.2.1	纸张增干强剂的重要性与增干强机理	418
14.2.2	增干强剂的分类及主要品种	420
14.2.3	聚丙烯酰胺增干强剂	420
14.3	湿增强剂	428
14.4	造纸助留剂	429
14.4.1	助留剂的作用和品种	430
14.4.2	聚丙烯酰胺助留剂	432
14.4.3	多元助留系统和助留机理	433
14.5	助滤剂	436
14.5.1	助滤剂的品种和作用	436
14.5.2	聚丙烯酰胺助滤剂	437
14.5.3	聚丙烯酰胺与聚乙烯亚胺配合使用	438
14.5.4	海德罗科尔系统的助滤作用	438
14.6	纤维分散剂	439
14.7	分散松香胶中性施胶沉淀剂	440
14.8	造纸废水处理剂	441
14.8.1	造纸废水水质及治理	441
14.8.2	高分子絮凝剂	444
14.9	表面施胶	446
	参考文献	447

第15章 丙烯酰胺聚合物在矿冶、纺织、建材和农业等

	工业中的应用及其展望	449
15.1	矿冶	449
15.1.1	脱水和强化脱水	449
15.1.2	过滤脱水的强化	452
15.2	纺织印染	457
15.3	建筑材料	458
15.3.1	装饰黏结剂	459
15.3.2	水泥添加剂	459
15.3.3	水下浇筑抗分散混凝土	460

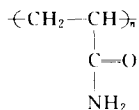
15.3.4	夹层防火玻璃	462
15.3.5	陶瓷分散剂	464
15.4	农林	464
15.4.1	防治水土流失	464
15.4.2	保水剂	469
15.5	食品	470
15.5.1	制糖业	470
15.5.2	发酵业	471
15.6	应用展望	472
15.6.1	调湿材料	473
15.6.2	纳米复合阻燃材料	474
15.6.3	电化学聚合复合镀	475
15.6.4	功能性侧链液晶	476
15.6.5	光致变色复合物	476
	参考文献	477
第 16 章 聚丙烯酰胺水凝胶在医学上的应用		479
16.1	概述	479
16.1.1	聚丙烯酰胺水凝胶临床应用的历史回顾	479
16.1.2	医用生物材料的安全性	480
16.1.3	医用生物材料与组织的相互作用	482
16.2	聚丙烯酰胺水凝胶的生物医学性能	483
16.2.1	理化性能和残余单体的测定	483
16.2.2	医用聚丙烯酰胺水凝胶的安全性评价	485
16.3	聚丙烯酰胺水凝胶的临床应用	490
16.3.1	在整形外科的应用	490
16.3.2	临床应用的禁忌证、并发症及其防治	495
16.3.3	聚丙烯酰胺凝胶作为栓塞剂的医学应用	497
16.3.4	聚丙烯酰胺作为药物缓释剂的临床应用	498
16.3.5	聚丙烯酰胺凝胶临床应用展望	502
	参考文献	505
附录 主要缩写符号的中英文名称		507

第 1 章 绪 论

1.1 定义和分类

丙烯酰胺聚合物 (acrylamide polymers) 是丙烯酰胺的均聚物及其共聚物的统称。工业上凡是含有 50% 以上丙烯酰胺 (AM) 单体结构单元的聚合物, 都泛称聚丙烯酰胺。其他单体结构单元含量不足 5% 的通常都视为聚丙烯酰胺的均聚物。

聚丙烯酰胺, polyacrylamide (PAM), CAS RN: [9003-05-8], 结构式为:



n 是聚合度。 n 的范围很宽, 数量级为 $10^2 \sim 10^5$, 相应的相对分子质量由几千到上千万。在本书的正文中把相对分子质量简称为分子量, 而且在全书没有特定说明时共聚物的分子量皆指表观值。有关真实分子量和表观分子量的详细叙述见第 4 章 4.3.1 节。

分子量是 PAM 的最重要的结构参数。按其值的大小有低分子量 ($< 100 \times 10^4$)、中等分子量 ($100 \times 10^4 \sim 1000 \times 10^4$)、高分子量 ($1000 \times 10^4 \sim 1500 \times 10^4$) 和超高分子量 ($> 1700 \times 10^4$) 四种。不同分子量范围的 PAM 有不同的应用性质和用途。

1.1.1 离子型聚丙烯酰胺

按照 PAM 在水溶液中的电离性可将其分为非离子型、阴离子型、阳离子型和两性型。非离子型聚丙烯酰胺 (NPAM) 的分子链上不带有可电离的基团, 在水中不电离; 阴离子型聚丙烯酰胺 (APAM) 的分子链上带有可电离的负电荷基团, 在水中可电离成

聚阴离子和小的阳离子 [见图 1-1 (a)]; 阳离子型聚丙烯酰胺 (CPAM) 的分子链上带有可电离的正电荷基团, 在水中可电离成聚阳离子和小的阴离子 [见图 1-1 (b)]; 而两性聚丙烯酰胺 (AmPAM 或 ZPAM) 的分子链上则同时带有可电离的负电荷基团和正电荷基团, 在水中能电离成聚阴离子和聚阳离子, ZPAM 的电性依溶液体系的 pH 值和何种类型的电荷基团多寡而定。PAM 的电性称谓与所带电荷基团解离后的电性称谓相同。

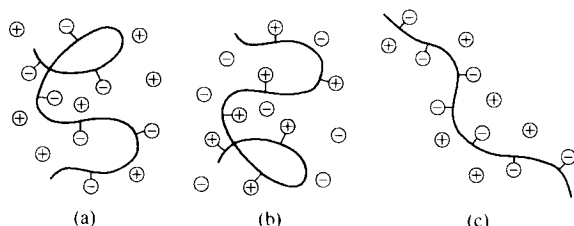


图 1-1 离子型聚丙烯酰胺及在水中的电离

(a) APAM; (b) CPAM; (c) APAM 在稀水溶液中链的静电扩张

PAM 通常是离子型的, 即使是非离子型的聚丙烯酰胺也因酰氨基极易水解, 而具有阴离子型的电性, 因此常将聚丙烯酰胺也归入聚电解质一类。

离子型聚丙烯酰胺的水溶液呈现聚电解质的溶液性质, 详见第 2 章 2.4 节。离子型聚丙烯酰胺中离子结构单元数占总结构单元数的摩尔 (或质量) 分数称为摩尔 (或质量) 离子度。按摩尔离子度的大小可将离子型聚丙烯酰胺分为低离子度 (摩尔离子度 $< 10\%$)、中离子度 (摩尔离子度 $10\% \sim 25\%$) 和高离子度 (摩尔离子度 $> 25\%$) 三种。

离子性及其离子度是离子型聚丙烯酰胺的重要结构参数, 也是影响其性能与应用的重要结构因素。离子度与性能间的关系见表 1-1。引入离子基团最显著的作用是: (1) 在水溶液中, 它们可使分子链扩张 [见图 1-1 (c)], 增大分子链的流体力学体积 (以特性黏数表征), 提高其水溶液的黏度; (2) 提高聚合物的亲水性和在水中的溶解速率; (3) 它们能与应用体系中粒子上的电荷产生静电