

张星辰 等编著

离子液体 *Ionic Liquid*

——从理论基础到研究进展



化学工业出版社

张星辰 等编著

离子液体 *Ionic Liquid*

——从理论基础到研究进展



化学工业出版社

·北京·

本书比较系统地介绍了离子液体的理论、制备、性质和应用,反映了最近几年离子液体的最新研究进展。全书共分12章,包括离子液体的特点、定义、分类和发展前景;离子液体的结构和性质;离子液体理论;离子液体的制备;离子液体在有机合成、萃取分离、电化学、纳米材料、清洁燃料生产、环境科学等方面的应用。涵盖了目前国内外有关离子液体的最新研究成果,以及作者所在课题组制备的几种新型的离子液体,内容新颖、翔实。

本书可供化学、化工、材料及相关科学领域从事研究开发、生产的科技及管理人员,以及高等院校师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

离子液体——从理论基础到研究进展/张星辰等编著.
北京:化学工业出版社,2008.6
ISBN 978-7-122-03385-7

I. 离… II. 张… III. 熔融盐电解质-研究 IV. 0646.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第104943号

责任编辑:成荣霞

文字编辑:孙凤英

责任校对:蒋宇

装帧设计:张辉

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:大厂聚鑫印刷有限责任公司

装订:三河市延风印装厂

720mm×1000mm 1/16 印张16½ 字数334千字 2009年1月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:45.00元

版权所有 违者必究

前言

自 20 世纪 80~90 年代以来,世界各国的科学家对离子液体的研究越来越多,原因是离子液体具有零蒸气压、高热稳定性、宽的液态温度范围等许多独特性质。随着对离子液体研究的深入,其种类也逐渐增多。离子液体功能化是离子液体的发展方向,离子液体新品种层出不穷,除咪唑类离子液体外,又制备出胍盐和季铵盐、季磷盐等离子液体。1998 年本书作者制备了尿素-硫脲室温熔盐,在此基础上,1999 年又制备了尿素-硫氰酸铵室温熔盐,随后又制备出尿素-硫氰酸锂、尿素-高氯酸锂室温熔盐。它们实际是两类全新的离子液体,我们把它们命名为超分子离子液体 (Supramolecular Ionic Liquid: SIL) 和配位离子液体 (Coordinated Ionic Liquid: CIL)。可见,离子液体的种类不单单局限于咪唑类离子液体,所以有必要重新认识离子液体。2008 年,编者又制备出乙酰胺-己内酰胺、乙酰胺-尿素、己内酰胺-尿素等由固体制备的分子液体 (Molecular Liquid Prepared by Solid Organic Compounds: MPLS),该类分子液体与离子液体的显著区别是不导电,其余性质与离子液体相似。固体制备的分子液体和离子液体都属于液体的范畴,无论从理论意义上还是实践意义上,它的出现大大扩大了绿色溶剂的范围,开辟了又一个崭新领域。

由于离子液体独特的性质,因而在许多方面可以得到应用,如在分离萃取、有机合成、电化学等方面。已合成的离子液体已达数百种,可以通过选择阴、阳离子及其取代基而改变离子液体的性能,即可以根据需要设计离子液体。对于新出现的离子液体,如超分子离子液体、配位离子液体等,可以改变主、客体来得到需要的离子液体。离子液体是一种新的物质,其未知的方面还很多,尤其是新型离子液体,发展时间也不长,现在急需一本关于这方面的著作,使读者对离子液体加深了解。本书正是为这一需求而编写的。

本书对传统有机离子液体和新型离子液体进行了梳理和分类。按照分类,编排章节,介绍了新型离子液体、配位离子液体和超分子离子液体的制备和应用。另外,本书对离子液体理论方面进行了较系统的介绍,目的在于促进离子液体理论的发展和成熟。全书共分 12 章,第 1 章介绍了离子液体的特点、定义、分类和发展前景;第 2 章介绍了离子液体的结构和性质;第 3 章介绍了离子液体理论;第 4、5 章介绍了普通有机离子液体和超分子离子液体、配位离子液体的制备;第 6~12 章介绍了离子液体在有机合成、萃取分离、电化学、纳米材料、清洁燃料生产、环境科学等方面的应用。本书涵盖了 2008 年 1 月以前国内外有关离子液体的最新研究成果,及我们课题组制备的几种新型的离子液体,内容翔实。

本书第1~3章由张星辰编写，第4、11章由刘宝友编写，第5章由刘会茹、史兰香编写，第6、7、10章由赵地顺编写，第8章由刘会茹编写，第9章由吕立强编写，第12章由张雪红、姚清国编写。本书的编写工作由张星辰负责，最后亦由张星辰统稿、定稿。

由于离子液体是一类新的物质，其应用领域十分广泛，涉及的学科众多，近年迅猛发展，虽然笔者尽可能采用最新文献，但涵盖的可能不全，另外由于笔者水平有限，书中定有许多缺陷和不足，恳请读者批评指正。

编著者
2008年6月

目 录

第一篇 离子液体及相关理论

第 1 章 离子液体概述	3
1.1 液体、分子液体、离子液体和电解质溶液	3
1.2 离子液体的特点	4
1.3 离子液体的历史及现状	5
1.4 离子液体的定义和分类	8
1.4.1 离子液体的定义	8
1.4.2 离子液体的分类	9
1.5 离子液体的发展前景	11
1.5.1 离子液体理论要有新突破	11
1.5.2 功能化离子液体方兴未艾	11
1.5.3 离子液体新品种层出不穷	12
1.5.4 低成本、安全、绿色化是离子液体发展方向	12
参考文献	13
第 2 章 离子液体结构与性质	16
2.1 离子液体的结构	16
2.1.1 有机离子液体结构	16
2.1.2 配位离子液体结构	18
2.1.3 超分子离子液体结构	18
2.2 离子液体的性质	19
2.2.1 离子液体的熔点	19
2.2.2 离子液体的密度	22
2.2.3 离子液体的黏度	23
2.2.4 离子液体的表面张力	24
2.2.5 离子液体的溶解性	27
2.2.6 离子液体的导电性和电化学性能	31
参考文献	35
第 3 章 离子液体理论	37
3.1 静电理论	37
3.2 分子轨道理论	37
3.3 配位场理论	39
3.4 超分子理论	40

3.5 空隙模型	41
3.6 离子液体的分子模拟	41
3.6.1 分子力场	42
3.6.2 分子动力学	42
3.7 离子液体 QSPR 研究	44
参考文献	45

第二篇 离子液体的制备

第4章 有机离子液体的制备及表征	51
4.1 普通有机离子液体的制备	51
4.1.1 一步法	51
4.1.2 两步法	52
4.1.3 辅助合成技术	52
4.1.4 一锅法制备离子液体	53
4.2 功能化离子液体的制备	53
4.2.1 阳离子烷基侧链的功能化	54
4.2.2 阴离子的功能化	61
4.2.3 双官能团的功能化离子液体	63
4.3 手性离子液体的制备	64
4.3.1 由手性原料制备含有手性阳离子的离子液体	64
4.3.2 由手性原料制备含有手性阴离子的离子液体	66
4.3.3 由非手性原料制备手性离子液体	66
4.4 有机离子液体的结构表征	67
4.4.1 离子液体结构分析	67
4.4.2 X 射线衍射	70
4.4.3 其他分析方法	72
4.5 本章小结	72
参考文献	72
第5章 配位离子液体和超分子离子液体制备与表征	77
5.1 配位离子液体和超分子离子液体的制备	77
5.1.1 使用手套箱合成法	77
5.1.2 乙醇回流法	78
5.2 配位离子液体和超分子离子液体的表征	78
5.2.1 物性的测定	78
5.2.2 结构的分析	82

5.2.3 电化学性质	88
参考文献	90

第三篇 离子液体的应用

第6章 离子液体在有机合成中的应用	93
6.1 离子液体中的单步有机合成反应	93
6.1.1 Friedel-Crafts 反应	93
6.1.2 <i>N</i> -烷基化反应	95
6.1.3 氧化反应	95
6.1.4 还原反应(氢化反应)	97
6.1.5 加成反应	97
6.1.6 C—C 键形成的反应	98
6.1.7 Knoevenagel 缩合反应	100
6.1.8 Aldol 缩合反应	101
6.1.9 亲核取代反应	101
6.1.10 氢甲酰化反应	102
6.1.11 酯化反应	103
6.1.12 硝化反应	104
6.1.13 聚合反应	104
6.1.14 重排反应	105
6.2 离子液体中的串联有机合成应用	106
6.2.1 两步反应	106
6.2.2 三步反应	111
6.2.3 三步以上反应	111
6.2.4 一锅三组分反应	112
6.2.5 一锅四组分反应	114
参考文献	115
第7章 离子液体在萃取分离中的应用	120
7.1 离子液体在萃取中的应用	120
7.1.1 离子液体在液-液萃取中的应用	120
7.1.2 离子液体萃取的机理	124
7.1.3 离子液体萃取的缺陷及克服方法	127
7.2 离子液体在液相微萃取中的应用	128
7.3 离子液体在固相微萃取中的应用	129
7.4 离子液体在超临界 CO ₂ 萃取中的应用	129

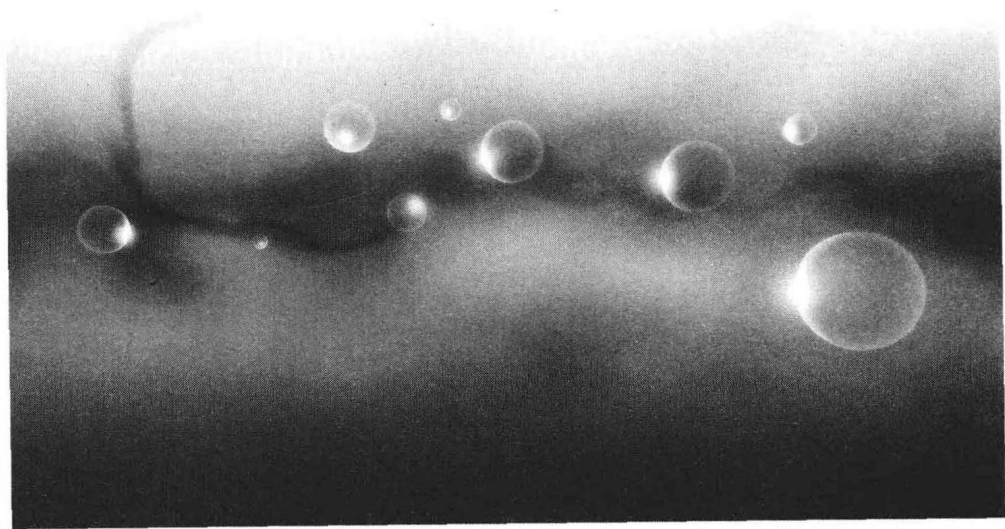
7.5	离子液体在毛细管电泳中的应用	130
7.5.1	在非水毛细管电泳中的应用	130
7.5.2	在水相毛细管电泳中的应用	130
7.5.3	在胶束电动色谱中的应用	131
7.6	室温离子液体在液相色谱中的应用	131
7.6.1	作液相色谱流动相添加剂	131
7.6.2	作液相色谱固定相	132
7.6.3	作液相色谱样品前处理技术中的介质	133
7.7	室温离子液体在气相色谱中的应用	133
7.8	室温离子液体在质谱和光谱中的应用	134
7.9	结论与展望	135
	参考文献	135
第8章	离子液体在电化学中的应用	140
8.1	离子液体的电化学窗口和离子电导率	140
8.1.1	离子液体的电化学窗口	140
8.1.2	离子液体的电导率	142
8.2	离子液体用作锂二次电池电解液的研究	145
8.2.1	普通离子液体	145
8.2.2	离子液体-聚合物电解质	149
8.2.3	配位离子液体	150
8.3	离子液体用作无汞电池电解液的研究	151
8.4	离子液体在染料敏化纳米薄膜太阳能电池中的应用	153
8.4.1	离子液体作为 DSSC 液态电解质的应用研究	153
8.4.2	离子液体作为 DSSC 准固态和固态电解质的应用研究	155
8.5	离子液体在燃料电池中的应用	157
8.6	离子液体在电化学沉积中的应用	159
8.6.1	金属在离子液体中的电化学沉积	159
8.6.2	合金在离子液体中的电化学沉积	162
8.6.3	半导体材料在离子液体中的电化学沉积	163
8.7	离子液体用作有机合成的研究	164
8.7.1	环状碳酸酯的电合成	164
8.7.2	电聚合反应	165
8.7.3	电解氟化和有机硅氧烷的合成	165
8.8	离子液体在化学传感器中的研究	166
8.9	结论与展望	167

参考文献	168
第 9 章 离子液体在纳米材料制备中的应用	175
9.1 离子液体在纳米无机物制备中的应用	175
9.2 离子液体在纳米金属氧化物及纳米金属制备中的应用	177
9.2.1 离子液体在纳米金属氧化物制备中的应用	177
9.2.2 离子液体在纳米金属制备中的应用	177
9.3 离子液体在特殊形貌的纳米材料制备中的应用	182
9.3.1 TiO_2 中空微球的制备	182
9.3.2 锐钛矿型纳米晶体的合成及介孔球的自组装	183
9.3.3 不同形貌的纳米氧化锌的合成	183
9.4 离子液体在纳米材料功能化修饰中的应用	185
9.5 配位离子液体体系在纳米材料中的潜在应用	189
9.5.1 配位离子液体体系作为反应物和溶剂	190
9.5.2 配位离子液体体系作为修饰稳定剂	191
参考文献	191
第 10 章 离子液体在清洁燃料生产中的应用	197
10.1 离子液体在天然气净化中的应用	197
10.1.1 离子液体用于天然气 CO_2 的吸收	197
10.1.2 离子液体用于天然气 H_2S 的吸收	198
10.2 离子液体在制备燃油中的应用	198
10.2.1 离子液体对燃油中含硫化合物的萃取	198
10.2.2 离子液体脱除直馏柴油中碱性氮化物	202
10.2.3 离子液体改进汽油安定性的研究	202
10.2.4 离子液体在油品中脱酸的应用	204
10.3 离子液体在制备生物燃料中的应用	204
10.4 结论与展望	205
参考文献	206
第 11 章 离子液体在环境科学中的应用	208
11.1 离子液体的生物毒性研究	208
11.1.1 离子液体在分子和细胞水平的毒性研究	208
11.1.2 离子液体对微生物的毒性研究	209
11.1.3 离子液体对低等动物的毒性研究	209
11.1.4 离子液体对植物的毒性研究	210
11.1.5 离子液体对高等动物的毒性研究	210
11.2 离子液体的降解性研究	210

11.2.1	离子液体的降解性研究	210
11.2.2	几种低毒和易降解的离子液体设计	211
11.3	离子液体在污染物治理中的应用	211
11.3.1	离子液体在水污染治理中的应用	212
11.3.2	离子液体在固废处理中的应用	213
11.3.3	离子液体在气体污染治理中的应用	214
11.4	离子液体在环境监测中的应用	215
11.4.1	环境污染物样品制备	215
11.4.2	电化学传感器分析	218
11.4.3	其他分析应用	219
11.5	结论与展望	219
	参考文献	220
第 12 章	离子液体在其他方面的应用	224
12.1	离子液体在催化科学领域的应用	224
12.1.1	固载化离子液体的制备	225
12.1.2	催化领域的应用	229
12.2	离子液体在纤维素研究中的应用	233
12.2.1	纤维素在离子液体中的溶解	234
12.2.2	纤维素在离子液体中的再生及功能化改性	235
12.2.3	纤维素/离子液体应用于生物酶催化反应	236
12.3	离子液体在能源元器件及分析仪器中的应用	237
12.3.1	离子液体在能源元器件中的应用	237
12.3.2	离子液体在分析仪器中的应用	237
12.4	离子液体在功能材料方面的应用	238
12.5	离子液体在香料工业中的应用	240
12.6	离子液体在石油化工与能源领域中的应用	241
12.7	离子液体在生物催化上的应用	242
12.7.1	生物催化的特点	242
12.7.2	离子液体在生物催化中的特点	242
12.7.3	离子液体在生物催化中的应用	244
12.7.4	生物催化反应中离子液体的回收与纯化	246
	参考文献	247

第一篇

离子液体及相关理论



第1章

离子液体概述

1.1 液体、分子液体、离子液体和电解质溶液

一般物质存在形式有三种状态：气态、液态和固态。三种状态之间随温度和压力而变化。液体是指在常温常压下能够流动，倒入敞开容器中不向空中扩散，随容器形状而改变的一类物质。即液体是指物质在特定的温度和压力范围存在状态为液态的一类物质，一般分为天然液体（Natural Liquid）和人工合成液体（Manufactured Liquid）。水是自然界中大量存在的天然液体，也是人类最早利用的液体。随着人类经验的积累，人们学会了榨油和提纯酒精。到19世纪，人们开始大量制备有机液体，绝大多数有机液体是人工合成液体。众所周知，水是极性溶剂，能够溶解无机盐和极性有机物，有机溶剂多数为非极性或弱极性溶剂，用来溶解有机物，但大多数有机溶剂易挥发，对环境有污染。从宏观上讲，液体是在常温常压下自由流动的物质，从微观上讲，组成液体的质点并不相同，有分子和离子，所以液体根据组成成分分为分子液体（Molecular Liquid）和离子液体（Ionic Liquid）。分子液体的最小移动质点为分子，水和乙醇、苯等各种有机溶剂都是分子液体；离子液体的最小移动质点为离子。1914年P. Walden等^[1]制备出第一个离子液体[硝酸乙基胺（EAN），熔点12℃]，离子液体的出现为人类解决环境污染问题开辟了一条新的途径。人们通常认为离子液体是由有机阳离子和无机或有机阴离子构成的、在室温或室温附近温度下呈液体状态的盐类，通常也称室温离子液体（Room Temperature Ionic Liquid; RTIL; Ambient-Temperature Ionic Liquid; ATIL），或室温熔盐（Room Temperature Molten Salts; RTMS; Room Temperature Fused Salts; RTFSs），或离子熔液（Ionic Liquid; IL），或有机离子液体（Organic Ionic Liquid; OIL），简称离子液体（Ionic Liquid; IL）。一般把熔点在100℃以下低温熔盐称为离子液体^[2~4]。离子液体是因为阴、阳离子体积差异大，结构不对称，阴、阳离子之间静电引力小，离子在室温下能够自由移动而呈液态的。最近，本书作者^[5]以固体乙酰胺和己内酰胺为原料制备的物质室温下呈液态。这是又一类新的液体，根据其液体微粒存在状态，我们把它命名为固体制备的分子液体（Molecular Liquid Prepared by Solids; MLPS）。乙酰胺和己内酰胺都是极性分子，它们都是靠氢键规则排列成一定形状的固体，当两种固体按照一定比例混合加热后，原来分子内氢键被破坏，乙酰胺和己内酰胺之间形成新的氢键，或者说乙酰胺和己内

酰胺之间形成超分子 (Supermolecule), 从而减弱了原来固体化合物的分子内作用力, 使得新形成的超分子可以自由移动。更确切地说分子液体可以分为普通分子液体和超分子分子液体。苯等非极性有机溶剂是普通分子液体, 其最小自由移动质点为独立分子; 水则为超分子分子液体, 因为多个水分子可以凭借氢键形成超分子, 水的最小自由移动粒子主要是超分子, 独立水分子和超分子之间存在动态平衡和变化。同理, 固体制备的分子液体也是超分子分子液体。离子液体和固体制备的分子液体不但丰富了液体的种类, 而且也加深了对液体的认识。液体并不是没有结构的, 液体的结构因粒子不同而不同, 离子液体内存在离子对和自由离子, 分子液体内存在自由分子, 超分子液体内存在超分子和自由分子, 但这些粒子之间的结构是随机的、变化的, 可以达到动态平衡。而固体的结构是排列规则的, 不随时间变化的固定结构, 所以液体的结构与固体的结构不同。液体内粒子间的作用力与固体也不同, 液体粒子间作用力小于粒子平动能, 否则, 液体内粒子就不能自由移动, 而固体粒子间作用力远远大于其平动能, 或者说, 固体粒子的平动能为零, 粒子只能振动不能自由移动。所以制备新型液体的原则是减小固体质点之间的作用力, 增加其平动能。

电解质溶液是电解质溶解在液体溶剂中形成的混合物, 电解质阴、阳离子在溶剂的作用下发生电离, 克服离子晶格能, 脱离原来离子晶体, 生成溶剂化离子, 溶剂化离子可以在溶剂分子中自由移动。例如电解质水溶液的制备, 固体电解质放入水中, 水和电解质的阴、阳离子发生水合作用, 释放出水合能, 克服固体电解质晶格能, 形成水合离子而溶解。阴、阳离子都有水合层, 一层、两层, 甚至多层。水合离子中第一水合层主要是水分子对离子的配位, 第二水合层是和第一水合层之间形成氢键, 多层水合层之间也是靠氢键结合, 大量的水分子将阴、阳离子隔开。离子液体与电解质溶液的区别在于前者无溶剂, 后者有溶剂, 而且溶剂是在室温呈液态的分子。将电解质溶于固体制备的分子液体中, 阴、阳离子在固体制备的分子液体中也发生溶剂化, 生成自由移动的溶剂化离子, 它是完全不同于一般电解质溶液的新型电解质溶液, 其性质和结构有待于进一步研究。

1.2 离子液体的特点

离子液体是可设计的液体^[6], 它们具有传统溶剂所没有的很多特殊性能, 可以作为绿色溶剂。

(1) 较宽的液体稳定范围

通过调节阴、阳离子的大小及结构, 可以使离子液体在室温或低于室温的条件下呈液体状态, 液体范围大约为 $-90 \sim 400^{\circ}\text{C}$ ^[7]。除四烷基铵盐之外, 大多数离子液体都能在 300°C 左右保持稳定, 如 $[\text{Emim}]\text{BF}_4$ 的稳定温度可达 300°C , $[\text{Emim}](\text{CF}_3\text{SO}_2)_2\text{N}$ 的稳定温度可达到 400°C 。四烷基铵盐稳定性较低是因为 Hoffmann 消除而发生分解。离子液体较高的稳定性, 使得其和水的 100°C 沸点相

比有着很大的利用空间。对于那些容易分解、歧化、降解的反应物,可在低温下利用离子液体来溶解它们。由于其较宽的液体温度范围,对于在其中进行的反应,可以进行较大程度的动力学控制。在应用室温离子液体时我们不必考虑像有机溶剂通常具有的易燃性,大大提高了实验室和工业应用中的安全性和可操作性,减少了不必要投资。

(2) 较强溶解能力

离子液体能溶解许多有机、无机、金属有机化合物和高分子材料,并能获得很高的浓度。由于它们有较强的离子环境,可以延长许多离子的寿命,如 $[\text{RuCl}_6]^{3-}$ 、 $[\text{ZrCl}_6]^{2-}$ 、 $[\text{HfCl}_6]^{2-}$ 等,这些离子在传统的分子溶剂中是不稳定的。离子液体也能够溶解某些气体,如对 H_2 、 O_2 、 CO 或 CO_2 的溶解性很好,这使它成为催化加氢反应、羰基化反应、加氢醛化反应、氧化反应等很好的溶剂。

(3) 较低的蒸气压

虽然在离子液体中阴、阳离子间的库仑力较弱,但和一般分子溶剂的分子间作用力相比,它显然要大得多,因此即使在较高的温度下,它们也不易挥发,蒸气压几乎为零,故它们可用于高真空体系,在化学实验过程中也不会产生对大气造成污染的有害气体。

(4) 较合适的黏度

由于离子液体中阴、阳离子之间静电作用力较大,所以离子液体的黏度较大,可用作高效液相色谱的固定相。离子液体的黏度对有机溶剂非常敏感,加入少量的有机溶剂,黏度就会明显降低。

(5) 较高的导电性

由于离子液体全部是由离子组成,具有良好的导电性,可作为许多物质的电化学研究的电解液,实现了室温条件下的电解,而且它们的电化学窗口很宽,有的高达 4~6V。

(6) 较强的催化活性

很多离子液体具有很强的催化活性,在有机合成反应中,离子液体既可以作为溶剂,又可以作为催化剂来催化有机反应,并且可循环使用。离子液体可以设计为酸性或碱性离子液体、代替传统酸碱催化剂。离子液体也可以作为相转移催化剂,可以溶解于不同溶剂,所以可以在不同溶剂之间携带催化剂进行相转移催化。离子液体可以溶解金属配合物,作为配位催化剂。鉴于离子液体的可设计性,通过化学键合将催化基团锚链到离子液体结构上,将其应用到有机合成反应中,不仅使催化剂与反应体系易分离,而且实现了均相催化。离子液体有时既可作为溶剂又可作为催化剂,有可能使原先不能进行的化学反应能够进行,或者能使催化剂的活性及选择性提高。离子液体的以上特性可以总结为:热稳定性好;溶解能力强;零蒸气压;黏度合适;电导率高;催化性强。

1.3 离子液体的历史及现状

1914 年, P. Walden 等报道了第一个离子液体——硝酸乙基胺 ($[\text{EtNH}_3]$)

[NO₃]^[1]，由于硝酸乙基胺容易爆炸，很快就被人们遗忘了。1948年，美国 F. H. Hurley 和 T. P. Wier^[8~10] 将三氯化铝和卤化乙基吡啶混合加热后得到无色透明液体。这是第一代离子液体，称为氯铝酸盐离子液体。这类离子液体遇水容易分解变质。20世纪60年代，美国空军研究院希望合成一类熔点较低的熔盐来代替热电池中的电解质（LiCl/KCl 熔点：355℃），他们对氯铝酸烷基吡啶离子液体进行了系统研究，在 R. A. Osteryoung 和 L. L. Miller^[11] 的努力下，于1975年合成了 *N*-烷基吡啶氯铝酸盐离子液体。但此离子液体遇水反应，限制了其应用。1982年 J. S. Wilkes 等^[12] 制备了性能稳定的氯铝酸二烷基咪唑离子液体。1,3-二烷基咪唑氯铝酸盐比 *N*-烷基吡啶氯铝酸盐具有更负的电化学还原电位，此离子液体大量被应用在电化学、反应介质和催化剂。与此同时，K. R. Seddon 和 C. L. Hussey 等人^[13,14] 开始把氯铝酸离子液体当作一类非水极性溶剂用于化学研究。他们研究了不同过渡金属配合物在氯铝酸离子液体中的电化学行为、谱学性质和有关的化学反应^[15]。可以说，正是由于 K. R. Seddon 的工作，离子液体才逐渐被人们所认识。

美国阿拉巴马大学的 R. D. Rogers 教授也开展了离子液体在绿色生产方面的研究，并取得令人瞩目的进展。1992年，美国空军研究院 J. S. Wilkes^[16] 领导的研究小组合成出抗水性、稳定性强的二烷基咪唑类四氟硼酸、六氟磷酸、三氟甲基磺酸、酒石酸、醋酸等对水和空气稳定的离子液体，这一类新型的离子液体非常适合于作为反应介质，用于均相过渡金属催化的反应过程。它标志着第二代离子液体的诞生，该代离子液体的特点是耐水，从此以后，离子液体的研究才迅速发展起来。1996年，P. D. Bonhote 等人^[17] 首次报道了含 $[\text{N}(\text{CF}_3\text{SO}_2)_2]^-$ 的咪唑类离子液体。这种离子液体不仅对水稳定，不溶于水，还兼具低黏度、低熔点、高导电性的优点。2001年，J. Golding 等^[18] 报道了具有配位能力的 $[\text{N}(\text{CN})_2]^-$ 类新离子液体，配位能力的证据来自于它们能够溶解 CuCl₂、CoCl₂，却不能溶解相应的 CuCl₂ · 2H₂O 和 CoCl₂ · 6H₂O。此后 $[\text{N}(\text{CF}_3\text{SO}_2)_2]^-$ 和 $[\text{N}(\text{CN})_2]^-$ 成为被广泛采用的离子液体。2000年，A. E. Visser 等^[19] 首次报道了含异噻啉类阳离子的离子液体，它们在芳香族化合物的萃取分离方面具有很大潜力。同年，J. H. Davis 工作组^[20] 报道了含氟取代烷烃链的离子液体。它们可作为表面活性剂将全氟取代烃（即氟碳化合物）分散于离子液体中，这一发现无疑将推动两种新型绿色溶剂在应用中的结合。2002年，P. Wasserscheid 等^[21] 通过常见的手性原料合成了三种含手性阳离子的离子液体。2003年，浙江大学包伟良等（W. L. Bao）^[22] 报道了从天然氨基酸中制备出稳定的手性咪唑阳离子。手性离子液体综合了离子液体与手性物质两方面的优点和特性，可以作为手性溶剂或手性诱导剂，在手性合成、手性分离和手性催化等方面具有很大的应用潜力^[23]。手性的引入将为离子液体的发展注入新的活力，因此它的研究就显得格外有吸引力。手性离子液体属于第三代离子液体——功能化离子液体（Task Specific Ionic Liquid 或 Functionalized Ionic Liquid）。离子液体被称为“设计者的溶剂”（Designer Solvent）^[25]，这种经设计而满足专一性要求的离子液体就是功能化的离子液体，近年来人们越来越关注离子液体的功能