

# 离子液体——走向工业化的绿色溶剂

李汝雄

(北京石油化工学院化工系, 北京 102617)

**摘要:**介绍了离子液体的种类、特性及其合成方法。论述了离子液体作为溶剂或催化剂的优点及其在化学反应、分离过程、电化学及其他领域中的应用,离子液体在这些领域的应用已取得许多良好的实验结果。指出离子液体在太阳能电池、双电层电容器等电化学方面的应用大有前途,还可用于高离子导电聚合物、万能润滑剂的制备以及纤维素的溶解等应用领域。但是离子液体走向工业化应用尚存在成本高、黏度大、物理性质和毒性数据的缺乏等问题。

**关键词:**离子液体;溶剂;分离;电化学;离子导电聚合物;工业应用

中图分类号:TQ413.15

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2003)10-0017-05

## Ionic liquids: green solvents approaching industrialization

LI Ru-xiong

(Department of Chemical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China)

**Abstract:** The categories, characteristics and synthesis method of room temperature ionic liquids were introduced. The advantages of ionic liquids as either solvents or catalysts and their applications in chemical reactions, separation processes, electrochemistry and other fields in which many good results had been obtained were summarized. Ionic liquids have a number of favorable properties for applications in solar cell and double-layer capacitor and may be also used for the preparation of high ionic conductive polymer and omnipotent lubricant and for the dissolution of cellulose and so on, but it's still a long run to industrialize ionic liquids because of some problems such as high cost, high viscosity, lack of data on physical properties and toxicity, etc.

**Key words:** ionic liquid; solvent; separation; electrochemistry; ionic conductive polymer; industrial application

离子液体即在室温及相邻温度下完全由离子组成的有机液体物质。近年对离子液体作为绿色溶剂的研究蓬勃展开,有些应用已开始进行中试,向工业化迈进<sup>[1-6]</sup>。

## 1 离子液体的种类和性质

### 1.1 种类

离子液体的种类很多,大体可分为  $\text{AlCl}_3$  型、非  $\text{AlCl}_3$  型和其他特殊类型。前 2 种类型离子液体的主要区别在于负离子不同。正离子主要为咪唑离子、吡啶离子和一般的季铵离子,其中最稳定的是烷基取代的咪唑离子, N, N' 取代的咪唑离子记为  $(\text{R}_1\text{R}_3\text{im})^+$ , 如 N-乙基-N'-甲基咪唑离子记为  $(\text{emim})^+$ ; 吡啶离子的 N 原子上有取代基 R 则记为  $(\text{Rpy})^+$ ; 一般的季铵离子如二甲基乙基丁基铵记为  $\text{N}_{1124}^+$ 。

### (1) $\text{AlCl}_3$ 型

自 1982 年 Wikes 等<sup>[7]</sup>发现  $(\text{emim})\text{Cl}-\text{AlCl}_3$  以来,  $\text{AlCl}_3$  型离子液体开始被重视。它主要用于电化学和化学反应中,可同时作溶剂和催化剂,但其热稳定性和化学稳定性较差,且不可遇水,空气中有水蒸气也不行,使用不便。

### (2) 非 $\text{AlCl}_3$ 型

1992 年 Wikes 等<sup>[8]</sup>发现对水、大气稳定且组成固定的  $(\text{emim})\text{BF}_4$  离子液体,其后人们对离子液体的研究迅猛发展,品种已达到几百种,其中研究较多的负离子有  $\text{BF}_4^-$ 、 $\text{PF}_6^-$ 、 $\text{OTf}^-$  ( $\text{CF}_3\text{SO}_3^-$ )、 $\text{NTf}_2^-$  [ $\text{N}(\text{CF}_3\text{SO}_2)_2^-$ ] 等。

### (3) 其他

除上述 2 类常用离子液体外,还不断有性能特殊或成本较低的离子液体被合成和研究。如 Hagiwara 等<sup>[9]</sup>报道合成  $(\text{emim})\text{F}-2.3\text{HF}$ , 298 K 时电导率高达 10 S/m; Macfarlane 等<sup>[10]</sup>报道负离子为

$N(CN)_2$  的离子液体的黏度都较低;还有 N-烷基-N-乙烯基-2-吡咯烷酮(亦称  $\gamma$ -丁内酰胺)的  $Br^-$  或  $BF_4^-$  盐的离子液体,成本低;用新的负离子  $CF_3SO_2NCOCF_3^-$  (缩写为  $TSAC^-$ ) 与小分子季铵(烷基碳均不大于 3)形成的离子液体,  $TSAC^-$  具有降低熔点与黏度的作用。用过渡金属铌(Nb)、钽(Ta)制得的  $(emim)NbF_6$  和  $(emim)TaF_6$ , 可用于金属的沉积或作催化剂;由手性化合物合成的 4 种手性离子液体,可用于手性化合物的合成和分离;合成含金的  $(bmTZ)AuBrCl_3$  ( $bmTZ$  为 3-丁基-4-甲基噻唑),作为苯乙炔加水合成苯甲酮的催化剂等。

## 1.2 特性

离子液体适合作溶剂的特性如下:①几乎无蒸气压,在使用、贮藏中不会蒸发散失;可循环使用,不污染环境。②有高的热稳定性和化学稳定性,在宽广的温度范围内处于液体状态;但  $AlCl_3$  型离子液体热稳定性较差,且不可遇水和大气;而非  $AlCl_3$  型离子液体如  $(emim)N(CF_3SO_2)_2$  可在  $400^\circ C$  仍为稳定的液体,对水和空气稳定;许多离子液体的液体状态的温度超过  $300^\circ C$ 。③无可燃性,无着火点。④离子电导率高,分解电压(也称电化学窗口)高达  $3 \sim 5 V$ 。⑤热容量较大。部分室温离子液体的制法及性质见表 1。

表 1 一些室温离子液体的制法及性质

阳离子	阴离子	反应物	溶剂	熔点/K	密度/( $g \cdot cm^{-3}$ )	黏度/( $10^{-3} Pa \cdot s$ )	电导率/( $S \cdot m^{-1}$ )
mim <sup>+</sup>	$F(HF)_n^-$	mimCl + HX	HF		1.20	8.9	
emim <sup>+</sup>	$BF_4^-$	emimI + AgX	$CH_3OH, H_2O$	288	1.24	37.7(295 K)	1.4
		emimCl + AgX	$(CH_3)_2CO$	285.1	1.3	43	1.3(295 K)
		emimCl + $NH_3X$	$CH_3CN, HF$	285.6	1.279	31.8	1.36
		emimCl + AgX + $BF_3$	$C_2H_5OH/H_2O$	284			
emim <sup>+</sup>	$(CF_3SO_2)_2N^-$	EmimBr + LiX	$H_2O$	270	1.520	34(293 K)	0.88
		EmimCl + LiX	$CHCl_3$	257	1.518	28	0.84
				258		40.7	0.57
bmim <sup>+</sup>	$BF_4^-$	bmimCl + NaX	$CH_3CN$	192	1.17	233	0.173
		bmimCl + AgX	$H_2O$	192	(303)	(303 K)	
bmim <sup>+</sup>	$PF_6^-$	bmimCl + NaX	$CH_3CN$	212	1.37(303 K)	312(303 K)	0.116
bmim <sup>+</sup>	$F(HF)_n^-$	bmimCl + HX	$H_2O$		1.08	19.6	3.3

注:密度、黏度和电导率未标注温度者均为 298 K。

$AlCl_3$  型离子液体的使用不方便,目前仅在一些必要场合可考虑使用,如以离子液体为催化剂同时作溶剂时。对于常用的非  $AlCl_3$  型离子液体如  $(bmim)PF_6$ , 则应降低生产成本,进一步研究其物理化学性质,以便投入工业应用。近来不断有一些新型离子液体被合成,或者成本较低,或者具有更好的物化性质(如低黏度、高电导率),或者有特殊的结构因而有特殊的用途,能更好地发挥离子液体的特点。

## 2 合成方法

### 2.1 两步法

多数离子液体的合成采取两步法,即先由叔胺类与卤代烷合成季铵的卤化物盐,再将卤负离子交换为所要的负离子。

第一步合成季铵的卤化物盐,如  $mim + EtBr \longrightarrow (emim)Br$ , 反应须有机溶剂、过量的卤代烷,加热回

流数小时,反应结束后蒸发除去有机溶剂和剩余的卤代烷。Varma 等<sup>[11]</sup>将其改在微波炉中进行,不用溶剂,反应物不过剩,仅 1 h 即可(第二步亦可)。

第二步为离子交换,将季铵的卤化物盐与  $AlCl_3$  按要求的摩尔比混合反应即可生成  $AlCl_3$  类离子液体。非  $AlCl_3$  类离子液体的离子交换可采用银盐法( $AgCl$ )、非银盐法( $LiCl, HCl$ )及离子交换树脂法(限水溶性的)等。

### 2.2 一步法

Hirao 等<sup>[12]</sup>报道用叔胺与酸反应生成离子液体的方法,称中和法,反应一步完成,因无副产物,产物提纯简单,但季铵离子上少 1 个烷基多 1 个氢,用这种方法已合成 100 多种离子液体,如  $(mim)BF_4$  的熔点为  $-5.9^\circ C$ 。还有用叔胺与酯反应生成季铵类离子液体的方法,如  $mim + ROTf \longrightarrow (Rmim)OTf$ 。

一些常用的离子液体在一些欧美国家能够买

到,但太贵,合成离子液体的原料如(mim)和HPF<sub>6</sub>也很贵,这是离子液体走向工业应用和进一步研究的障碍之一,解决的办法就是研究出一些简单有效的合成方法。在两步合成方法中,用无溶剂微波合成也许是最好的,产品纯度高,反应时间短。现在国内研究离子液体的单位也多起来了,达数十家,国内试剂厂商可组织生产离子液体及其原料,不要放过商机,这也有利于离子液体走向工业应用。

### 3 在化学反应中的应用

离子液体除具有前述的特性之外,作为化学反应的溶剂还可有如下优点:收率高,选择性好,反应条件温和,产品易分离,不需要其他有机溶剂,催化效率高,催化剂不流失,离子液体和催化剂可循环使用,反应的危险性降低,可进行在传统溶剂中不能进行的反应等。

#### 3.1 应用方法

离子液体作为反应溶剂可以有如下几种相态的反应系统:将催化剂和反应基质溶解于离子液体中形成单相反应系统;既作为溶剂又作为催化剂的单相反应系统;催化剂溶解于离子液体、反应基质和产物在另一相中的两相反应系统;离子液体的负离子作为均相催化的配体而形成的单相或两相反应系统;由离子液体、水、有机溶剂组成的三相系统;固定化离子液体催化技术。

Mehnert等<sup>[13]</sup>及Wolfson等<sup>[14]</sup>报道了固定化离子液体催化技术,先在硅胶等表面固定离子液体基团(如咪唑阳离子),然后在表层附着含催化剂的多层离子液体,已成功用于1-己烯的氢甲酰化反应。这种方法的优点是使用离子液体量大减少,且有均相催化的高效率和多相催化的接触面大、易分离等特点。

#### 3.2 反应产物的分离

对多相系统可通过简单相分离将离子液体与产物分开,催化剂可随离子液体一起循环使用。对单相系统:若产物是挥发性的,可以通过蒸馏将离子液体与产物分离;若产物是不挥发性的或热稳定性差的,可以通过溶剂萃取进行分离。Brennecke等<sup>[15]</sup>提出的用超临界CO<sub>2</sub>从离子液体中萃取,分离的产物很纯净,已经是比较成熟的绿色化学方法。还可用透过蒸发法从离子液体中分离有机物。

#### 3.3 应用情况

近年应用离子液体作为反应溶剂(及催化剂)研究的反应很多,每年有数百篇论文发表。所用AlCl<sub>3</sub>

型离子液体以(emim)Cl-AlCl<sub>3</sub>应用最多,非AlCl<sub>3</sub>型离子液体中应用最多的为(bmim)PF<sub>6</sub>、(bmim)BF<sub>4</sub>、(emim)BF<sub>4</sub>等。根据反应的关键步骤,可将这些反应划分为3类:加氢和重排反应,包括烯烃、芳烃等的加氢和Beckmann重排;C—C、C—O键的断裂反应,如聚乙烯裂解、醚和环醚的酰化开裂、油页岩和重油的溶解以及环氧化物的不对称开环;C—C、C—杂原子键的偶合反应,包括Friedel-Crafts烷基化、酰基化反应,Diels-Alder反应,二聚、齐聚、聚合反应,烷基化如线性烷基苯的合成,烯丙基化,Heck反应、Suzuki交叉偶合反应、Trost-Tsuji C—C偶合反应,氢甲酰化反应,氧化反应,亲核取代反应,芳烃的亲电硝化反应,自由基反应,芳卤化物的羰基化反应,醛还原反应,Zn试剂的合成及反应,Claisen重排与环化反应,丙烯氧化物与CO<sub>2</sub>环加成反应,Wittig反应,Stille偶合反应,杂环化合物的还原反应,醇解、胺解、氧化氢解反应,酯交换反应,Baylis-Hillman反应以及不对称合成和生化反应等。

人们对离子液体中的化学反应已有很多的研究,其中一些有明显的优点,一方面要继续研究开发新的化学反应,另一方面要集中力量对有一定生产规模且优势明显的化学反应进行深入研究,不但要研究合成条件、产率,还要研究反应动力学,相应的产品分离,离子液体及催化剂的回收循环方法等,以期走向实用。在反应技术中,固定化离子液体催化反应技术所需的离子液体和催化剂很少,而效率高,这是很有前途的方法。

### 4 在分离过程中的应用

#### 4.1 液液萃取

用离子液体萃取挥发性有机物时,因离子液体无蒸气压又耐热,所以萃取结束后可通过加热萃取相将萃取物赶出去,并循环使用。最早进行离子液体萃取研究的是美国Alabama大学Rogers领导的小组<sup>[16]</sup>,他们用憎水的(bmim)PF<sub>6</sub>从水中萃取苯的衍生物,认为应选择在水中溶解度小的离子液体。

用普通的离子液体萃取水中金属离子,如不采取任何措施,则金属离子的分配系数(物质在离子液体中的浓度与在水中的浓度之比)小于1。提高分配系数的方法有2种:在离子液体阳离子的取代基上引入配位原子或配位结构;加入萃取剂<sup>[17-18]</sup>。

#### 4.2 气体的吸收分离

许多离子液体有吸湿性,可以从气体混合物中有效去除水蒸气。Scurto等<sup>[19]</sup>研究表明CO<sub>2</sub>在离子

液体中的溶解度非常大,如 40℃、5 MPa 下 CO<sub>2</sub> 在 (bmim)PF<sub>6</sub> 中的摩尔分数达 0.5,而甲烷与 CO<sub>2</sub> 在 (bmim)PF<sub>6</sub> 中的亨利系数比约为 10 000:32,可用 (bmim)PF<sub>6</sub> 从天然气中除去 CO<sub>2</sub>。气体在离子液体中的溶解度可通过选择阴、阳离子及其取代基而调节。

Branco 等<sup>[20]</sup>报道离子液体可用于固定化液膜,用于气体的分离。而传统的固定化液膜由于蒸发损失而使性能降级,因离子液体是不挥发的,所以可作成非常稳定的固定化液膜。

将离子液体用于液液萃取(有机物、金属离子),虽然进行了许多有益的工作,但从现状来看,交叉污染问题还没有好的解决办法,暂时难以实用。用于气体混合物的分离,要进一步开展气体溶解度及传质方面的研究。从离子液体中分离萃取物或分离反应混合物的方法中,对难以分离或热敏感系统采用超临界 CO<sub>2</sub> 是一种较好的方法。

## 5 在电化学中的应用

### 5.1 电池

小浦延幸等<sup>[21]</sup>开发成功 Al/AlCl<sub>3</sub>-bPyCl/Pan 二次电池,其中 bPyCl 为氯化丁基吡啶,Pan 为聚苯胺,电解液为 AlCl<sub>3</sub>(摩尔分数为 66%)和 bPyCl(摩尔分数为 33.3%)的离子液体。香港的 Fung 等<sup>[22]</sup>将 (emim)Cl-AlCl<sub>3</sub> 用于锂离子二次电池及其电极,也取得了较好的结果。

### 5.2 太阳电池

Kubo 等<sup>[23]</sup>使用 (C<sub>6</sub>mim)I 与低分子凝胶化剂作电解质,所得色素增感太阳电池的光电转换效率为 5%,在 85℃ 工作 1 000 h,转换效率不变;而用有机溶剂电解质的电池的初始光电转换效率虽为 7.9%,但下降很快。

### 5.3 双电层电容器

双电层电容器是一种新的储能装置,是 21 世纪新的绿色能源。对双电层电容器电解液性能的要求主要是:电导率要高,分解电压要宽,使用温度范围要宽,寿命要长。西野敦<sup>[24]</sup>认为与水溶液、非水溶液、固体电解质等电解质相比,离子液体用于双电层电容器的性能较好,尤其是近年又发现了大批新的离子液体及含离子液体的高分子,其性能更加突出,为制造高性能双电层电容器提供了条件。

### 5.4 金属电沉积

作为金属电沉积的电解质,水溶液受电化学窗口限制,熔盐则温度高,离子液体是合适的选择。岩

岸哲也等<sup>[25]</sup>研究了以 (emim)Br-ZnBr<sub>2</sub>-乙二醇三元液体为电解液,即使电流密度高达 300 A/m<sup>2</sup>,电流效率也可以达到 100%,沉积的 Zn 表面光滑,呈银色,状态良好。另外,Ag、Fe、Li、Cu、Cd 等在 (emim)BF<sub>4</sub> 中的电化学行为均得到了一定的研究。

Koronaos 等<sup>[26]</sup>报道在酸性 (emim)Cl-AlCl<sub>3</sub> 中加入过量碱金属(Li、Na)的溴化物或碘化物得到的缓冲液,可用于 Li 的沉积,并可能用于电池。

### 5.5 有机电合成

离子液体是适合有机电合成的导电介质。石井英树等<sup>[27]</sup>进行了一系列电解氟化反应研究,用耐氧化的离子液体氟化物盐在无其他有机溶剂情况下进行氟化反应。AlNashief 等<sup>[28]</sup>报道在离子液体中的过氧化电化学反应,表明在 (bmim)BF<sub>4</sub> 中由 O<sub>2</sub> 电化学生成的 O<sub>2</sub><sup>-</sup> 离子是稳定的,与 CO<sub>2</sub> 反应有羧酸化作用,有可能开辟新的有机电合成路线。

总之,离子液体在太阳电池和双电层电容器中应用,使其优点更能得到体现。最近开发了一些新的黏度低、电导率高的离子液体,进一步拓宽了选择范围。

## 6 其他应用

高分子固体电解质使用方便,因其具有高分子的机械性质且易于制成各种形状。为得到高离子导电聚合物,人们开展了在聚合物中引入离子液体的研究。目前主要有 3 种方法:①用全氟化聚合物膜与离子液体形成复合体的高温质子导电膜<sup>[29]</sup>;②在离子液体中将适当的单体聚合,使离子液体与聚合物生成离子胶<sup>[30]</sup>;③在单体或齐聚物中引入离子液体的结构(通常为阳离子),得到离子导电性高分子,还可以在在其中再渗一些无机盐以提高电导率<sup>[31]</sup>。

Scott 等<sup>[32]</sup>用 (bmim)PF<sub>6</sub> 作为聚甲基丙烯酸甲酯的增塑剂,所得聚合物具有与使用传统增塑剂相当的物理性质,但高温热稳定性要好得多。Ye 等<sup>[33]</sup>用 (C<sub>6</sub>mim)BF<sub>4</sub>、(C<sub>6</sub>eim)BF<sub>4</sub> 作为万能润滑剂,可减少摩擦,降低磨损,有承担高负荷的能力,而现在不同的界面要用不同的专用润滑剂。Anderson 等<sup>[34]</sup>用离子液体作为气相色谱固定相,具有双重性质,如可分离烷烃混合物,也可分离醇混合物<sup>[35]</sup>。此外,它也可在质谱中应用。

纤维素是可再生资源,Swatloski 等<sup>[36]</sup>用离子液体溶解纤维素,其中溶解度最大的是在 (emim)Cl 中,可得到质量分数为 25% 的溶液。在溶液中加水或其他沉淀剂如乙醇,可使纤维素沉淀再生,此再生纤

纤维素拥有优良的性质。

离子液体作为一类新的化学物质,其新的用途正被不断开发,前景广阔。但这些分散的应用领域,被研究的还不够充分,前景好的用途应继续加强研究。

## 7 存在问题及发展方向

离子液体具有品种多、可设计、性能独特、应用领域广泛的特点,其应用前景乐观。离子液体的大规模工业应用,应逐步解决以下问题:①大幅度降低成本,其解决办法是选用好的合成方法,选用低成本的离子液体,国内厂家应自己生产离子液体的主要品种及其原料;②离子液体的黏度较大,可以选用或研制黏度小的离子液体,或者稍微提高使用温度(其黏度随着温度升高下降很快);③实验数据缺乏,一方面要不断积累,还要发展理论的及经验的关联预测方法;④现在比较缺乏离子液体对环境的影响及毒性数据,要加强这方面的工作;⑤有关离子液体的研究,在品种和应用领域两方面都比较分散,应集中力量对前景好的少数项目,包括工程应用开展研究,以便取得突破。这些问题正在逐步加以解决<sup>[37]</sup>。

离子液体正在走向工业应用。比如英国 Queen's 大学的 K. R. Seddon 教授领导的实验室,正与数家化学公司合作,将离子液体的应用推向中试规模,其中与英国 BP 公司合作以离子液体为介质生产线性烷基苯<sup>[38]</sup>。

## 参考文献

- [1] Welton T. [J]. Chem Rev, 1999, 99(8): 2071 - 2083.
- [2] Hagiwara Rika, Ito Yasuhiko. [J]. J Fluorine Chemistry, 2000, 105(2): 221 - 227.
- [3] 大野弘幸, 吉泽正博. [J]. 电气化学および工业物理化学(日), 2002, 79(2): 136 - 140.
- [4] Dupont J, de Souza R F, Suarez P A. [J]. Chem Rev, 2002, 102(10): 3667 - 3692.
- [5] Sheldon R. [J]. Chem Commun, 2001, (23): 2399 - 2407.
- [6] Zhao Dongbin, Wu Min, Kou Yuan, et al. [J]. Catalysis Today, 2002, 74(1 - 2): 157 - 189.
- [7] Wiles J S, Levisky J A, Wilson R A, et al. [J]. Inorg Chem, 1982, 21: 1263.
- [8] Wiles J S, Zaworotko M J. [J]. Chem Commun, 1992, (10): 965 - 967.
- [9] Hagiwara R, Hirashige T, Tsuda T, et al. [J]. J Electrochem Soc, 2002, 149: 1 - 6.
- [10] Macfarlane D R, Golding J, Forsyth S, et al. [J]. Chem Commun, 2001, (16): 1430 - 1431.
- [11] Varma R S, Namboodiri V V. [J]. Chem Commun, 2001, (7): 643 - 644.
- [12] Hirao M, Sugimoto H, Ohno H. [J]. J Electrochem Soc, 2000, 147(11): 4168 - 4172.
- [13] Mehnert C P, Cook R A, Dispenziere N C, et al. [J]. J Am Chem Soc, 2002, 124(44): 12932 - 12933.
- [14] Wolfson I F, Vankelecom J, Jacobs P A. [J]. Tetrahedron Letters, 2003, 44: 1195 - 1198.
- [15] Blanchard L A, Hancu D, Beckman E J, et al. [J]. Nature, 1999, 399: 28 - 29.
- [16] Huddleston J G, Willauer H D, Swatloski R P, et al. [J]. Chem Commun, 1998, (16): 1765 - 1766.
- [17] Visser A E, Swatloski R P, Reichert W M, et al. [J]. Ind Eng Chem Res, 2000, 39(10): 3596 - 3604.
- [18] Visser A E, Swatloski R P, Griffin S T, et al. [J]. Separ Sci Technol, 2001, 36(5 - 6): 785 - 804.
- [19] Scurto A M, Aki S N V K, Brennecke J F. [J]. J Am Chem Soc, 2002, 124(35): 10276 - 10277.
- [20] Branco L C, Crespo J G, Afonso C A M. [J]. Chem Eur J, 2002, 8(15): 3865 - 3871.
- [21] 小浦延幸, 江藤惠子, 井手本康, 等. [J]. 表面(日), 2001, 139(11): 445.
- [22] Fung Y S, Zhu D R. [J]. J Electrochem Soc, 2002, 149(3): 319 - 324.
- [23] Kubo Wataru, Kitamura Takayuki, Hanabusa Kenji, et al. [J]. Chem Commun, 2002, (4): 374 - 375.
- [24] 西野敦. [J]. 化学总说(日), 2001, 49: 219 - 222.
- [25] 岩岸哲也, 中冢优弥, 原田谕, 等. [J]. 电气化学および工业物理化学(日), 2002, 70(11): 863 - 868.
- [26] Koronaios P, Osteryoung R A. [J]. J Electrochem Soc, 2001, 148: E483 - 488.
- [27] 石井英树, 渊上寿雄. [J]. 电气化学および工业物理化学(日), 2002, 79(2): 46 - 50.
- [28] AlNashef I M, Leonard M L, Matthews M A, et al. [J]. Ind Eng Chem Res, 2002, 41(8): 4475 - 4478.
- [29] Doyle M, Choi S K, Proulx G. [J]. J Electrochem Soc, 2000, 147: 34 - 37.
- [30] Noda A, Watanabe M. [J]. Electrochim Acta, 2000, 45: 1265 - 1270.
- [31] Yoshizawa M, Ohno H. [J]. Electrochim Acta, 2001, 46: 1723 - 1728.
- [32] Scott M P, Brazel C S, Benton M G, et al. [J]. Chem Commun, 2002, (13): 1370 - 1371.
- [33] Ye Chengfeng, Liu Weimin, Chen Yunxia, et al. [J]. Chem Commun, 2001, (21): 2244 - 2245.
- [34] Anderson J L, Ding J, Welton T, et al. [J]. J Am Chem Soc, 2002, 124(47): 14247 - 14254.
- [35] Armstrong D W, Zhang Likang, He Lingfeng, et al. [J]. Anal Chem, 2001, 73(15): 3679 - 3686.
- [36] Swatloski R P, Spear S K, Holbrey J D, et al. [J]. J Am Chem Soc, 2002, 124(18): 4974 - 4975.
- [37] Brennecke J F, Maginn E J. [J]. AIChE J, 2001, 47(11): 2384 - 2389.
- [38] Ritter S K. [J]. C&EN, 2001, 79(3): 27 - 34. ■