

离子液体微乳液合成纳米材料的研究进展

周 刚, 罗志刚*

(华南理工大学轻工与食品学院, 广州 510640)

摘 要: 离子液体微乳液法是制备纳米材料的新型方法, 近年来得到了很快的发展。本文阐述了离子液体微乳液的研究现状以及采用离子液体微乳液法合成纳米材料的最新研究进展, 并对离子液体微乳液在合成淀粉纳米材料的应用进行了探讨。

关键词: 离子液体; 微乳液; 纳米材料; 淀粉

Research progress of nanometer materials in ionic liquid microemulsion

ZHOU Gang, LUO Zhi-Gang*

(College of Light Industry and Food Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

ABSTRACT: Ionic liquid microemulsion is a new method for the preparation of nanometer materials. Research status of ionic liquid microemulsion and recent progress of the preparation of nanometer materials through ionic liquid microemulsion method were reviewed in this paper. The applications of ionic liquid microemulsion in the preparation of nanometer materials were discussed.

KEY WORDS: ionic liquid; microemulsions; nanometer materials; starch

微乳液一般是指由表面活性剂、助表面活性剂、油和水等组分在适当比例下形成的透明(或半透明)、热力学稳定的、粒径在 1~100 nm 的分散体系^[1]。由于其粒径小、分布均匀且稳定性高, 目前已被应用于催化剂、磁性材料、纳米材料等多个领域, 尤其是在无机纳米材料、药物载体材料、有机高分子聚合物的制备等方面的研究备受关注。

离子液体(ionic liquids, IL)通常是指在室温或接近室温下呈现液态的、完全由阴阳离子所组成的低熔点盐类。由于它具有导电性、难挥发、电化学稳定电位窗口大、低黏度等优点, 所以有“绿色溶剂”之称,

其优良的特性使得它在电化学、聚合反应及催化反应等多个领域有广泛的应用^[2-3]。通常我们将以离子液体代替传统微乳液中的极性相或非极性相形成的微乳液体系称作离子液体微乳液。通过电导率法或循环伏安法, 离子液体微乳液又可以被划分为离子液体包水型微乳液(W/IL)、水包离子液体型微乳液(IL/W)和双连续型微乳液。离子液体微乳液具有热力学稳定性、可调控性, 因此, 通过采用不同的微乳液体系和调控其结构参数可以得到性能完全不同的纳米材料^[4-5]。目前离子液体微乳液在催化无机纳米材料等领域已获得了广泛的应用^[6-7], 包括电子学、磁性材

基金项目: 国家自然科学基金项目(21376097)、广东省自然科学基金项目(S2013010012318)、华南理工大学中央高校基本科研业务费重点项目(2013ZZ0070)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(21376097), the Guangdong Natural Science Foundation (S2013010012318) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities, SCUT (2013ZZ0070)

*通讯作者: 罗志刚, 副教授, 主要研究方向为功能碳水化合物化学。E-mail: zhgluo@scut.edu.cn

*Corresponding author: LUO Zhi-Gang, Associate Professor, College of Light Industry and Food Science, South China University of Technology, No. 381, Wushan Road, Tianhe District, Guangzhou 510640, China. E-mail: zhgluo@scut.edu.cn

料、纳米半导体材料^[8-11]等多个领域。本文系统阐述了离子液体微乳液的研究现状及在合成纳米材料的应用, 以拓展其应用领域, 促进其快速发展。

1 离子液体微乳液的研究现状

1.1 离子液体作为极性相形成的微乳液

以离子液体取代传统微乳液中的极性相参与构建离子液体微乳液是目前研究的热点。这类离子液体微乳液因没有水的参与, 常可以用来作为多种反应的反应媒介, 而且相对于传统含水微乳液而言, 容易形成更大极性的反相微乳液区域^[12]。咪唑类离子液体应用较为广泛, 这类离子液体一般在较低的温度下就能达到熔融状态, 而且这类离子液体参与形成的离子液体微乳液能够克服一些其他种类离子液体的溶解局限性, 所以以这类离子液体作为极性相制备离子液体微乳液是目前广泛研究的一个领域。近些年, 已有很多课题组对这类离子液体微乳液展开了研究。2004年, 韩布兴等^[13]利用测电导率的方法划分了[Bmim]BF₄/TX-100/环己烷这种微乳液体系的3种类型(O/IL、双连续相、IL/O), 并利用激光粒度分布仪和冷冻蚀刻电镜技术考察了微乳液液滴的粒径大小及分布情况。研究结果表明, 当离子液体[Bmim]BF₄的含量在一定范围内增加时, [Bmim]BF₄/环己烷型微乳液液滴的平均粒径逐渐增大, 这表明[Bmim]BF₄/环己烷型微乳液有着与传统水/油微乳液相似的溶胀特性。对于[Bmim]BF₄/TX-100/环己烷这种体系, Eastoe等^[14]的小角中子散射实验结果也显示, 随着离子液体含量的增加微乳液液滴的平均粒径逐渐增大, 并且该离子液体微乳液体系的相行为与传统的油包水(W/O)微乳液体系一致。Sarkar等^[15]对[Bmim][BF₄]/TX-100/环己烷微乳液体系极性做了研究, 用荧光探针技术考察了[Bmim]BF₄/环己烷型微乳液中香豆素153的转动弛豫和溶剂化动力学特性。对于[Bmim]BF₄/TX-100/环己烷体系, Voigt等^[16]研究发现, 当[Bmim]BF₄含量过高时, 过多的[Bmim]BF₄会导致微乳液液滴相互融合簇集形成粒径高达320 nm的液滴。此外, Bhattacharyya等^[17,18]对1-戊基-3-甲基咪唑四氟硼酸盐[Pmim]BF₄/TX-100/苯三元体系以及[Pmim]BF₄/苯型微乳液体系进行了详细的研究。除了咪唑类离子液体以外, Atkin等以硝基乙胺(ethylammonium nitrate, EAN)作为极性相, 烷烃作为

油相在非离子表面活性剂的作用制备出了微乳液并对其相行为及微乳液粒径做了进一步研究^[19]。Koetz等^[20,21]还研究了离子液体1-乙基-3-甲基咪唑乙基硫酸盐([Emim]EtOSO₃)或1-乙基-3-甲基咪唑己基硫酸盐([Emim]HexOSO₃)、甲苯、表面活性剂十六烷基三甲基溴化铵(cetyl trimethyl ammonium bromide, CTAB)和助表面活性剂戊醇的形成的微乳液, 并对该体系的这性质做了进一步研究, 结果显示, 形成的微乳液区域相对于用水作为极性相时要大, 而且该微乳液液滴的平均粒径较小。

1.2 离子液体作为非极性相形成的微乳液

以离子液体取代传统微乳液中的非极性相参与构建微乳液也是近些年来的研究热点, 但是相比离子液体作为极性相而言, 这类研究报道相对较少。由于离子液体替代了传统的有机溶剂油相, 所以这类离子液体微乳液被认为是一种绿色环保体系。韩布兴等^[13]研究了水/TX-100/[Bmim]PF₆三元体系, 采用循环伏安法划分了[Bmim]PF₆/水、双连续、水/[Bmim]PF₆3种类型微乳液, 并证明了水/[Bmim]PF₆型微乳液的形成及水核的存在。动态光散射(dynamic light scattering, DLS)结果表明, 随着[Bmim]PF₆含量的增加, [Bmim]PF₆/水微乳液平均粒径增大, 表现出溶胀特性。并通过UV-vis实验以MO为探针进一步证明了水/[Bmim]PF₆型微乳液的形成。Mourchid等^[22]绘制出了水/TX-100/[Bmim]PF₆微乳液体系的鱼形相图并考查了该体系下离子液体含量及温度对微乳液相行为的影响。此外, Sarkar等^[18]对水/[Bmim]PF₆型微乳液体系中香豆素的转动弛豫和溶剂化动力学展开了研究。实验表明, 随着离子液体[Bmim]PF₆含量的增加, 香豆素153和香豆素149两种探针的弛豫时间变化不同, 增溶位置也不同。

1.3 离子液体作为表面活性剂形成的微乳液

通常, 我们把同时具有亲油基和亲水基的两亲分子称为表面活性剂。而离子液体表面活性剂是指同时具有疏水基和亲水基的离子液体, 这类离子液体往往拥有较长疏水碳链。有研究^[23,24]报道, 离子液体表面活性剂更容易形成胶束、吸附效率和吸附效能大, 而且认为拥有长链的咪唑类离子液体表面活性剂在水中的表面活性比传统表面活性剂要好。Texter等^[25]研究了离子液体表面活性剂1-(2-丙烯酰氧基十一烷基)-3-甲基咪唑溴/水/异丙酯三元体系, 并利用

此微乳液体系成功制备出聚合物纳米颗粒。Zheng 等^[26]研究发现,在吸附效率和降低表面张力的能力方面,离子液体表面活性剂 $C_n\text{mimBr}$ ($n=12,14,16$) 要明显优于同碳原子数的传统表面活性剂。柴金岭等^[27]也对离子液体表面活性剂 $C_n\text{mimBr}$ 进行了相关研究,绘制了 ϵ - β 鱼状相图并研究了该表面活性剂形成的微乳液的相行为和增溶能力。实验发现, $C_n\text{mimBr}$ 的分子碳链越长,越容易形成单向微乳液。

1.4 离子液体同时作为极性相和非极性相形成的微乳液

离子液体的理化性质可以通过改变阴阳离子进行调节,因而被称作“可设计型溶剂”。所以,我们可以利用不同种类的离子液体同时替代传统微乳液中的极性相和非极性相构建离子液体包离子液体型(IL/IL)微乳液。但是这方面的研究目前鲜有报道。韩布兴等^[28]以 $[\text{Bmim}]\text{PF}_6$ 作为非极性相,甲酸丙基铵(propyl ammonium formate, PAF)作为极性相, AOT 为表面活性剂制备了 $[\text{Bmim}]\text{PF}_6/\text{PAF}$ 型微乳液并对其性质进行了相关研究。关于此类离子液体微乳液的应用尚未见报道,但由于此种离子液微乳液的各组分均没有挥发性,所以在一些特殊反应中将会有潜在的应用。

2 离子液体微乳液在纳米材料制备中的应用

纳米材料的制备方法包括物理方法和化学方法,主要有模板法、微波法、沉淀法和反相微乳液法等。其中,反相微乳液法是目前应用较多的一种,而且我们可以通过调节微乳液自身结构参数而得到不同粒径大小和形貌的纳米颗粒从而扩大其应用范围,因此微乳液法被认为是制备纳米材料较理想的方法之一^[29]。但是,传统微乳液法制备纳米材料过程中需要使用大量的易挥发的有机溶剂容易造成环境的污染^[30]。离子液体具有可回收性特点,并且可以取代易挥发的有机溶剂,从而制备离子液体微乳液并以此作为合成纳米材料的反应体系。通过研究离子液体微乳液中纳米材料的合成,有利于为纳米材料的制备开辟出一条新的途径。目前,以离子液体微乳液作为反应介质来合成纳米材料的相关研究并不多,还处于初级阶段。

2.1 离子液体微乳液在无机纳米材料中的应用

目前,将离子液体应用在无机纳米材料的制备

中已成为一个研究热点。但是,关于以离子液体微乳液作为反应介质制备无机纳米材料的报道却不多。对于 $\text{H}_2\text{O}/\text{TX-100}/[\text{Bmim}]\text{PF}_6$ 微乳液反应体系, Zhang 等^[6, 7]研究了 $\text{H}_2\text{O}/[\text{Bmim}]\text{PF}_6$ 微乳液体系中 Pd 纳米颗粒的合成情况,并在该体系下对 Heck 反应做了进一步研究。结果显示,该微乳液体系下可成功制得平均粒径在 3 nm 左右的 Pd 纳米颗粒,且粒度分布显示其具有相对窄的尺寸分布范围。此外,他还利用此种微乳液体系成功合成了 PcUAu 双金属纳米颗粒、单分散的 Pd_4Au 双金属纳米颗粒和 Pd/Graphene 的纳米复合材料。滕燕等^[31]以离子液体氯化-1-十二烷基甲基咪唑($\text{C}_{12}\text{mimCl}$)为表面活性剂,甲基丙烯酸甲酯(methyl methacrylate, MMA)和丙烯酰胺(acrylamide, AM)混合物为油相构筑的反相微乳液合成了 AgCl 纳米粒子。研究结果表明,纳米 AgCl 粒子的平均粒径和粒子数随微乳液中 AgNO_3 浓度的增大明显增加;增加微乳液中 $\text{C}_{12}\text{mimCl}$ 浓度,有利于形成数量较多、平均粒径较小的纳米 AgCl 粒子。

2.2 离子液体微乳液在有机纳米材料中的应用

有机纳米材料是纳米材料中重要的一类,其应用越来越受到重视。由于它具有独特的尺寸效应、量子效应及局域场效应,在某些特殊的电、力、磁等性能上表现优异。然而,相对于无机纳米材料,采用离子液体微乳法合成有机纳米材料的研究较少。郑利强等^[32]利用 $[\text{Bmim}][\text{PF}_6]/\text{Tween}20/\text{H}_2\text{O}$ 微乳液体系成功合成了具有纳米结构的致密 PEDOT 薄膜。Texter 课题组^[33, 34]在制备出的 a-Br/水/甲基异丁烯酸酯(methylmethacrylate, MMA), b-Br/水/MMA 和 IL- $\text{BF}_4/\text{水}/\text{MMA}$ 3 种微乳液体系下进行聚合反应,制备出凝胶和多微孔的纳米聚合物材料。此外,张国平课题组^[35]采用阳极极化和循环伏安法研究了吡咯的电化学聚合行为,并采用 $\text{H}_2\text{O}/[\text{Bmim}]\text{PF}_6$ 微乳液制备出了聚吡咯薄膜,SEM 结果表明合成的膜表面平滑且由致密微球构成,微球的平均粒径约为 100 nm。

3 离子液体微乳液在纳米材料领域的应用前景

虽然离子液体有“绿色溶剂”之称,但阴阳离子的选择会导致离子液体带有毒性,其安全性问题依然存在一定争议,因此在离子液体微乳液体系下制备的纳米材料的安全性能值得引起重视,尤其是有

机纳米材料在生物、医药领域的应用面临着挑战。但是离子液体具有可设计性, 所以无毒离子液体可通过人为地选择无毒、生物相容的阴阳离子来合成。Petkovic 等^[36]用内源性化合物顺利合成了离子液体氯化胆碱, 这种离子液体因毒性小得到广泛使用; Weaver 等^[37]也通过选择无毒的阴阳离子合成了无毒、生物相容性较好的离子液体。此外有报道^[38]称, 和许多药用辅料一样, 离子液体在低浓度下并不会产生毒性, 对人体无碍。所以, 相信离子液体及其形成的微乳液在生物、医药等领域的发展应用会越来越快。

尽管离子液体微乳液在纳米材料合成中的研究非常有限, 但是, 离子液体微乳液作为新型微乳液, 有诸多优良性质, 可实现多种化学反应, 无疑可为有机、无机纳米材料及复合材料的开发开辟新的途径。目前, 已有文献报道^[5, 35]离子液体微乳液可用来作为无机纳米材料、纳米聚合物薄膜的反应体系。然而, 关于有机纳米载体材料的制备大多通过传统微乳液法完成, 很少有通过离子液体微乳液法制备有机纳米载体材料的研究报道。近年来大量文献报道^[39, 40]多种离子液体对淀粉、纤维素等有机高分子有着很好的溶解能力。Luo 等^[41, 42]研究发现, 多种离子液体对有机高分子(如淀粉)具有较好的溶解性能, 这将大大拓展含淀粉离子液体微乳液的研究, 也将有助于有机高分子纳米材料的研究及应用。此外, 通过传统油包水(W/O)微乳液法制备淀粉纳米材料的研究也越来越多^[30]。相信随着科技的发展以及科研工作者的不懈努力, 离子液体微乳液在合成纳米材料尤其是有机高分子纳米材料(如纳米淀粉)等领域会有很好的发展前景。

参考文献

- [1] 陈宗淇, 郭荣. 微乳液的微观结构[J]. 化学通报, 1994(2): 22–25.
Chen ZQ, Guo R. Microstructure of the microemulsion [J]. Chem Bull, 1994(2): 22–25.
- [2] Wei D, Ivaska A. Applications of ionic liquids in electrochemical sensors [J]. Anal Chim Acta, 2008, 607(2): 126–135.
- [3] Lu J, Yan F, Texter J. Advanced applications of liquids in polymer science [J]. Polym Sci, 2009, 34(5): 817–848.
- [4] Gao YA, Zhang J, Xu HY, *et al.* Structural studies of 1-Butyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate/TX-100/p-xylene ionic liquid microemulsions [J]. Chem Phys Chem, 2006, 7(7): 1554–1561.
- [5] Yu SM, Yan F, Zhang XW, *et al.* Polymerization of ionic liquid-based microemulsions: a versatile method for the synthesis of polymer electrolytes [J]. Macromolecules, 2008, 41(10): 3389–3392.
- [6] Zhang GP, Zhou HH, Hu JQ, *et al.* Pd nanoparticles catalyzed ligand-free Heck reaction in ionic liquid microemulsion [J]. Green Chem, 2009, 11(9): 1428–1432.
- [7] Zhang GP, Zhou HH, An CL, *et al.* Bimetallic palladium-gold nanoparticles synthesized in ionic liquid microemulsion [J]. Colloid Polym Sci, 2012, 290(14): 1435–1441.
- [8] Toshiyuki M, Kazuyasu F, Yumin P. Characterization and catalytic properties of CeO₂-ZrO₂ ultrafine particles prepared by the microemulsion method [J]. J Alloys Compd, 1998, 269(12): 116–122.
- [9] Curri ML, Agostiano A, Mavelli F. Reverse micellar systems: self-organized assembly as effective route for the synthesis of colloidal semiconductor nanocrystals [J]. Mater Sci Eng, 2002, 22(2): 423–426.
- [10] Chen DL, Gao L. Novel synthesis of well-dispersed crystalline SnO₂ nanoparticles by water-in-oil microemulsion-assisted hydrothermal process [J]. J Colloid Interface Sci, 2004, 279(1): 137–142.
- [11] Meldrum M, Haglund RF, Boatner LA. Nanocomposite materials formed by ion implantation [J]. Adv Mater, 2001, 13(19): 1431–1433.
- [12] Li JC, Zhang JL, Gao HX, *et al.* Nonaqueous microemulsion-containing ionic liquid [Bmim][PF₆] as polar microenvironment [J]. Colloid Polym Sci, 2005, 283(12): 1371–1375.
- [13] Gao HX, Li JC, Han BX, *et al.* Microemulsions with ionic liquid polar domains [J]. Chem Phys, 2004, 6(11): 2914–2916.
- [14] Eastoe J, Gold S, Roger SE, *et al.* Ionic liquid-in-oil microemulsions [J]. J Am Chem Soc, 2005, 127(20): 7320–7303.
- [15] Gao YA, Voigt A, Hilfert L, *et al.* Nanodroplet cluster formation in ionic liquid microemulsion [J]. Chem Phys Chem, 2008, 9(11): 1603–1609.
- [16] Seth D, Chakraborty A, Setua P, *et al.* Interaction of ionic liquid with water with variation of water content in 1-butyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate ([Bmim][PF₆])/TX-100/water ternary microemulsions monitored by solvent and rotational relaxation of coumarin 153 and coumarin 490 [J]. J Chem Phys, 2007, 126(22): 224512.
- [17] Adhikari A, Sahu K, Dey S, *et al.* Femtosecond solvation dynamics in a neat ionic liquid and ionic liquid microemulsion: excitation wavelength dependence [J]. J Phys Chem B, 2007, 111(44): 12809–12816.
- [18] Adhikari A, Das DK, Sasmal DK, *et al.* Ultrafast FRET in a room temperature ionic liquid microemulsion: a femtosecond excita-

- tion wavelength dependence study [J]. *J Phys Chem A*, 2009, 113(16): 3737–3743.
- [19] Atkin R, Warr GG. Phase behavior and microstructure of microemulsions with a room-temperature ionic liquid as the polar phase [J]. *J Phys Chem B*, 2007, 111(31): 9309–9316.
- [20] Rabe C, Koetz J. CTAB-based microemulsions with ionic liquids [J]. *Colloids Surf A*, 2010, 354(1–3): 261–267.
- [21] Rojas O, Koetz J, Kosmella S, *et al.* Structural studies of ionic liquid-modified microemulsions [J]. *J Colloid Interface Sci*, 2009, 333(2): 782–790.
- [22] Anjum N, Stubenrauch C, Mourchid A, *et al.* Phase behavior and microstructure of microemulsions containing the hydrophobic ionic liquid 1-butyl-3-methylimidazolium hexafluorophosphate [J]. *J Phys Chem B*, 2009, 113(1): 239–244.
- [23] Dong B, Li N, Zheng LQ, *et al.* Surface adsorption and micelle formation of surface active ionic liquids in aqueous solution [J]. *Langmuir*, 2007, 23(8): 4178–4182.
- [24] Dong B, Zhang J, Zheng LQ, *et al.* Salt-induced viscoelastic wormlike micelles formed in surface active ionic liquid [J]. *J Colloid Interface Sci*, 2008, 319(1): 338–343.
- [25] Feng Y, John T. Surfactant ionic liquid-based microemulsions for polymerization [J]. *Chem Commun*, 2006, 12(25): 2696–2698.
- [26] Dong B, Zhao XY, Zheng LQ, *et al.* Aggregation behavior of long-chain imidazolium ionic liquids in aqueous solution: micellization and characterization of micelle microenvironment [J]. *Colloid Surf A*, 2008, 317(1–3): 666–672.
- [27] Qin CK, Chai JL, Chen JF, *et al.* Studies on the phase behavior and solubilization of the microemulsion formed by surfactant-like ionic liquids with ϵ - β fish-like phase diagram [J]. *Colloid Polym Sci*, 2008, 286(5): 579–586.
- [28] Cheng SQ, Zhang JL, Zhang ZF, *et al.* Novel microemulsions: ionic liquid-in-ionic liquid [J]. *Chem Commun*, 2007, 10(24): 2497–2499.
- [29] Jose GT, Elisa V, Elvira G. synthesis and characterization of Co@Ag core-shell nanoparticles [J]. *J Nanopart Res*, 2010, 12(6): 2189–2199.
- [30] Shi AM, Li D, Wang LJ, *et al.* Preparation of starch-based nanoparticles through high-pressure homogenization and miniemulsion cross-linking: Influence of various process parameters on particle size and stability [J]. *Carbohydr. Polym.*, 2011, 83(4): 1605–1610.
- [31] 滕燕, 王挺, 杜春慧, 等. 离子液体微乳液中纳米 AgCl 的合成及 AgCl/poly(MMA-co-AM)杂化膜的渗透汽化分离[J]. *复合材料学报*, 2012, 6(29): 42–49.
- Teng Y, Wang T, Du CH, *et al.* Synthesis of AgCl nanoparticles in ionic liquid microemulsion and pervaporation of AgCl/poly(MMA-co-AM) hybrid membranes [J]. *Acta Mater*, 2012, 6(29): 42–49.
- [32] Dong B, Zhang SH, Zheng LQ, *et al.* Ionic liquid microemulsions: A new medium for electropolymerization [J]. *J Electroanal Chem*, 2008, 620(7): 193–196.
- [33] Yan F, Texter J. Surfactant ionic liquid-based microemulsions for polymerization [J]. *Chem Commun*, 2006, 8(25): 2696–2698.
- [34] Yan F, Texter J. Solvent-reversible poration in ionic liquid copolymers [J]. *Angew Chem Int Ed*, 2007, 46(14): 2440–2443.
- [35] Qiu RH, Zhang GP, Zhu YY, *et al.* Synthesis and structure of an extremely air-stable binuclear hafnocene perfluorooctanesulfonate complex and its use in lewis acid-catalyzed reactions [J]. *Chem Eur J*, 2009, 15(26): 6488–6494.
- [36] Petkovic M, Ferguson JK, Gunaratne HQN, *et al.* Novel biocompatible cholinium-based ionic liquids-toxicity and biodegradability [J]. *Green Chem*, 2010, 12(4): 643–649.
- [37] Weaver KD, Kim HJ, Su J, *et al.* Cyto-toxicity and biocompatibility of a family of choline phosphate ionic liquids designed for pharmaceutical applications [J]. *Green Chem*, 2010, 12(3): 507–513.
- [38] Coleman D, Gathergood N. Biodegradation studies of ionic liquids [J]. *Chem Soc Rev*, 2010, 39(2): 600–637.
- [39] Li WY, Jin AX, Liu CF, *et al.* Homogeneous modification of cellulose with succinic anhydride in ionic liquid using 4-dimethylaminopyridine as a catalyst [J]. *Carbohydr Polym*, 2009, 78(3): 389–395.
- [40] Xie WL, Shao L, Liu YW. Synthesis of starch esters in ionic liquids [J]. *J Appl Polym Sci*, 2009, 116(1): 218–224.
- [41] Luo ZG, Lu XX, Kong XL, *et al.* Physicochemical properties of starch dispersed in 1-allyl-3-methylimidazolium chloride [J]. *Ind Crop Prod*, 2013, 46: 197–204.
- [42] Luo ZG, Zhou ZD. Homogeneous synthesis and characterization of starch acetates in ionic liquid without catalysts [J]. *Starch/Stärke*, 2012, 64(1): 37–44.

(责任编辑: 周盼虹)

作者简介



周刚, 硕士研究生, 主要研究方向为功能碳水化合物。
E-mail: zg1988817@163.com



罗志刚, 副教授, 主要研究方向为功能碳水化合物化学。
E-mail: zhgluo@scut.edu.cn