

[Article]

www.whxb.pku.edu.cn

离子液体[bmim][BF<sub>4</sub>]对联苯甲酰光化学反应影响的瞬态吸收光谱朱光来<sup>1,\*</sup> 吴国忠<sup>2,\*</sup> 崔执凤<sup>1</sup> 许新胜<sup>1</sup><sup>1</sup>安徽师范大学原子与分子物理研究所, 安徽 芜湖 241000; <sup>2</sup>中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201800

**摘要:** 利用纳秒级激光光解瞬态吸收光谱研究了联苯甲酰(BZ)在离子液体1-丁基-3-甲基咪唑四氟硼酸盐([bmim][BF<sub>4</sub>])与乙腈(MeCN)混合体系中的光化学反应行为. 考察了探针分子BZ存在下[bmim][BF<sub>4</sub>]/MeCN比例对体系中化学反应动力学的影响. 实验发现: 在N<sub>2</sub>饱和条件下, BZ溶液经激光辐照后产生的激发三线态<sup>3</sup>BZ'遵循一级反应动力学规律衰减. 离子液体(IL)相对比例增加对<sup>3</sup>BZ'瞬态吸收峰的位置和强度没有产生明显影响. 但离子液体体积分数V<sub>IL</sub>的变化对[bmim][BF<sub>4</sub>]/MeCN混合溶剂中光诱导电子转移的影响却非常显著, 总体上电子转移产生的自由基的表现生成速率常数k<sub>gr</sub>随[bmim][BF<sub>4</sub>]的V<sub>IL</sub>增大而减小. 在[bmim][BF<sub>4</sub>]比例足够大的情况下, <sup>3</sup>BZ'与三乙胺或四甲基对苯二胺之间的电子转移被抑制.

**关键词:** 室温离子液体; 1-丁基-3-甲基咪唑四氟硼酸盐; 联苯甲酰; 激光光解; 光诱导电子转移  
**中图分类号:** O644

Transient Absorption Spectroscopy of the Effects of the Ionic Liquid [bmim][BF<sub>4</sub>] on the Photochemical Reactions of BenzilZHU Guang-Lai<sup>1,\*</sup> WU Guo-Zhong<sup>2,\*</sup> CUI Zhi-Feng<sup>1</sup> XU Xin-Sheng<sup>1</sup><sup>1</sup>Institute of Atomic and Molecular Physics, Anhui Normal University, Wuhu 241000, Anhui Province, P. R. China;<sup>2</sup>Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, P. R. China)

**Abstract:** Using benzil (BZ) as a probe molecule, the photochemical properties of the ionic liquid (IL) 1-butyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate ([bmim][BF<sub>4</sub>]) and its binary mixed solutions with acetonitrile (MeCN) were investigated by nanosecond laser photolysis. We found that the decay of the triplet excited state of benzil (<sup>3</sup>BZ') in a N<sub>2</sub>-saturated solution followed mono-exponential kinetics. Along with the increase in the volume fraction (V<sub>IL</sub>) of [bmim][BF<sub>4</sub>] in the mixed solvents, the absorption peak of <sup>3</sup>BZ' did not change. However, the effect of different V<sub>IL</sub> values on the photoinduced electron transfer process in the mixture of [bmim][BF<sub>4</sub>]/MeCN was obvious. Moreover, the apparent rate constant (k<sub>gr</sub>) of the formed radical decreased obviously with an increase in V<sub>IL</sub>. When the ratio of [bmim][BF<sub>4</sub>] was sufficiently high, the electron transfer reaction between <sup>3</sup>BZ' and triethylamine or N,N,N',N'-tetramethyl-*p*-phenylenediamine was retarded.

**Key Words:** Room temperature ionic liquid; 1-Butyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate; Benzil; Laser photolysis; Photoinduced electron transfer

## 1 引言

与传统的分子溶剂相比, 完全由正负离子组成

的室温离子液体(RTILs, 简称为ILs)具有极低挥发性、高导电性、较好的热稳定性和高黏度等独特性

Received: November 1, 2010; Revised: December 20, 2010; Published on Web: March 10, 2011.

\*Corresponding authors. WU Guo-Zhong, Email: wuguozhong@sinap.ac.cn. ZHU Guang-Lai, Email: zhglai@mail.ahnu.edu.cn.

The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (20673137, 20903004), Science Foundation of the Education Committee of Anhui Province, China (KJ2010A145) and Scientific Research Starting Foundation for Teachers with Ph.D. in Anhui Normal University, China.

国家自然科学基金(20673137, 20903004), 安徽高校省级自然科学研究重点项目(KJ2010A145)及安徽师范大学博士启动基金资助

© Editorial office of Acta Physico-Chimica Sinica

质,<sup>1-3</sup> 逐渐引起了光化学工作者的兴趣, 采用红外光谱、拉曼光谱、荧光光谱以及核磁共振等测量手段开展了大量研究, 以揭示其结构、物理和化学性质。<sup>4-8</sup> 稳态荧光和分子动力学模拟结果表明, 离子液体尽管在宏观尺度上呈现均匀液体状态, 但在分子、纳微尺度上可能呈现静态或动态的不均匀结构。<sup>4-5,9</sup> 在离子液体与分子溶剂混合体系中, 离子液体比例的变化除了引起溶剂的极性、黏度等变化外, 还会导致混合体系局部微观结构的变化, 形成离子液体阴、阳离子之间的簇集体或者类似胶束的簇集体,<sup>10</sup> 产生特殊的溶剂效应, 从而影响离子液体的物理化学性质和反应性能。瞬态吸收光谱技术有助于深入研究溶液反应体系中出现瞬态粒子及其动力学行为。<sup>11</sup> 近几年来, 激光光解、脉冲辐解和时间分辨荧光等瞬态光谱技术开始应用于离子液体体系中的化学反应动力学研究, 初步揭示了一些典型离子液体的光化学特性, 表明离子液体确实可作为产生和表征光谱自由基的优良介质。<sup>12-17</sup>

光诱导电子转移反应(PET)是太阳能转化、光敏催化、光化学反应设计、分子开关和分子器件的开发等许多应用领域的核心过程。<sup>18</sup> 理论研究表明, 对于烷基链较短的咪唑离子液体, Marcus 电子转移理论仍然是适用的, 但阳离子具有长链在离子液体中显示出较慢的动力学特征, 可能是由于不同的聚集体的存在使得其中的氧化还原过程变得更加复杂。<sup>19</sup> 已有的一些对于离子液体中 PET 过程的研究着重从溶剂极性和粘度等方面比较了离子液体中的电子转移反应与传统溶剂中的异同。<sup>20-25</sup> Marquis 等<sup>23</sup> 探讨了离子液体中的 PET 现象, 结果表明三重态和阳离子自由基在离子液体中的寿命虽然比沸石中的短, 但相对其他溶剂寿命也相当长。Paul 和 Samanta<sup>24</sup> 结合激光光解和荧光手段研究发现, 相对传统分子溶剂, ILs 的高黏度所引起的“笼效应”使得逆向电子转移几率增加, 电子转移反应速率和电子转移产物的量子产额降低。Miyasaka 等<sup>25</sup> 研究了联二葱在咪唑离子液体中的超快电荷转移过程, 推断离子液体中能量弛豫过程比电荷转移慢。美国马里兰大学的 Vieira 与 Falvey<sup>26</sup> 采用一种吡啶离子液体作为 PET 反应的溶剂来调控反应过程中的电子传递过程, 使 PET 反应速率及效率都得到了提高。

联苯甲酰是一种重要的化工原料, 是很多有机合成的重要反应中间体, 它的结构式如图 1 所示。激光光解瞬态吸收光谱和时间分辨电子顺磁共振技

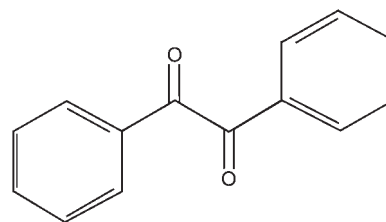


图 1 联苯甲酰的化学结构  
Fig.1 Chemical structure of benzil

术研究均证实 BZ 的激发态可与三乙胺(TEA)之间发生光诱导电子转移反应。<sup>27-28</sup> BZ 的阴离子与 BZ 激发三线态的瞬态吸收谱明显不同, 而 TEA 的阳离子在仪器的检测范围内没有吸收, 因此该体系适合用来研究环境变化引起的电子转移产物的变化。<sup>29-30</sup> 我们前期研究了憎水性咪唑离子液体[bmim][PF<sub>6</sub>]对光敏探针分子的瞬态吸收光谱以及分子之间光诱导电子转移的影响, 发现了很多有趣现象。<sup>31-32</sup> 为了进一步深入研究咪唑离子液体对瞬态反应尤其是光诱导电子转移的影响, 本文选择亲水性的离子液体[bmim][BF<sub>4</sub>]为对象, 研究其对 BZ 光化学反应动力学的影响。

## 2 实验部分

联苯甲酰和四甲基对苯二胺(TMPD)购自 Sigma 公司, 光谱纯试剂; 三乙胺与乙腈购自上海国药公司, HPLC 级试剂。以上试剂均未经进一步处理直接使用。光解实验用离子液体[bmim][BF<sub>4</sub>] (纯度 99%) 购自 Arcos 公司, 使用前样品经真空烘箱干燥处理, 以除去水分及挥发性有机物, 最后将纯化后的离子液体存储于干燥器中备用。

所用溶液在实验前分别采用 99.99% 高纯氮气或氧气鼓泡 20 min, 所有实验均在室温下(约 25 °C) 进行。

激光光解实验装置采用 Nd:YAG 激光器(NL303HT, 立陶宛 EKSPLA 公司)作为激励光源, 激光波长为 355 nm, 脉冲宽度 6 ns, 单脉冲能量约为 80 mJ, 分析光源采用 300 W 氙灯并在检测瞬间进行加亮, 分析光与激光垂直透过 1 cm 石英样品池, 经单色仪分光后使用 R955 光电倍增管(Hamamatsu)检测, 其有效检测范围为 280–750 nm, 最后信号由 HP 54510B 数字示波器转换成数字信号, 并以自编软件在计算机上进行动力学数据分析处理, 实验装置及实验方法详见文献。<sup>33</sup>

### 3 结果与讨论

#### 3.1 [bmim][BF<sub>4</sub>]对联苯甲酰瞬态吸收光谱的影响

在N<sub>2</sub>饱和条件下, 保持BZ浓度为 $2 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ 不变, 通过改变IL/MeCN混合溶液的比例, 经355 nm激光激发后得到一系列瞬态吸收光谱. 在未加[bmim][BF<sub>4</sub>]的纯MeCN中观察到最大吸收峰位于480 nm处, 在N<sub>2</sub>饱和条件下, 其衰减很好地遵循一级动力学规律, 而且能够被氧气有效猝灭, 因此它可以归属为联苯甲酰激发三线态(<sup>3</sup>BZ\*)的瞬态吸收光谱.<sup>27-29</sup> 在N<sub>2</sub>饱和条件下, <sup>3</sup>BZ\*的衰减主要通过自猝灭完成,



其中, ISC为系间窜跃. 随溶液中离子液体体积分数( $V_{\text{IL}}$ )增加, BZ溶液的瞬态吸收峰位置没有发生明显变化. <sup>3</sup>BZ\*特征吸收峰(480 nm)的衰减曲线在离子液体的体积分数为0.5以前也没有明显变化, 即使在离子液体的体积分数达到0.8时, 也只能观察到少许变化, 如图2及其插图所示. 这与先前研究的离子液体[bmim][PF<sub>6</sub>]对醌类分子瞬态吸收光谱的影响明显不同,<sup>31,32</sup> 可能是由于溶质与溶剂间相互作用不同而导致的.

#### 3.2 BZ与TEA在[bmim][BF<sub>4</sub>]/MeCN混合溶剂中的光诱导电子转移反应

##### 3.2.1 <sup>3</sup>BZ\*与TEA在乙腈溶液中的电子转移(ET)反应

$1 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  TEA的乙腈溶液在355 nm光

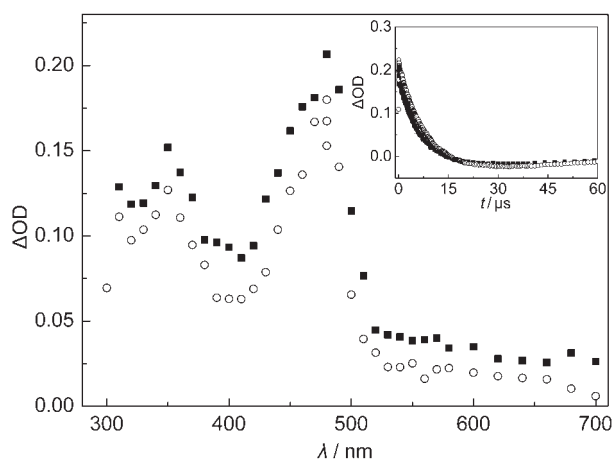


图2 N<sub>2</sub>饱和下BZ的IL/MeCN溶液在激光激发后0.1 μs的瞬态吸收光谱

Fig.2 Transient absorption spectra of BZ in N<sub>2</sub>-saturated IL/MeCN solution recorded at 0.1 μs after laser excitation

inset: decay time profiles monitored at 480 nm;  $V_{\text{IL}}$ : (○) 0, (■) 0.8;  $c(\text{BZ}) = 2 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ ; BZ: benzil; OD: optical density

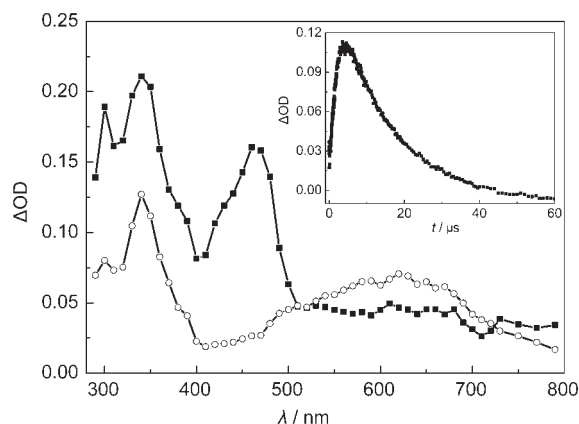
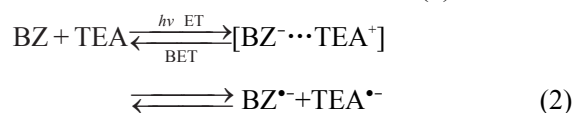


图3 N<sub>2</sub>饱和下BZ/TEA的乙腈溶液在激光激发后0.1 μs (■)与5 μs (○)测得的瞬态吸收光谱

Fig.3 Transient absorption spectra of BZ/TEA in N<sub>2</sub>-saturated MeCN solution recorded at 0.1 μs (■) and 5 μs (○) after laser excitation

inset: time profile observed at 630 nm for BZ\*;  $c(\text{BZ}) = 2 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ ;  $c(\text{TEA}) = 1 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ ; TEA: triethylamine

激发下没有明显瞬态吸收. 图3显示了将 $1 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  TEA加入到 $2 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  BZ的乙腈溶液经355 nm光激发后的瞬态吸收光谱. 从图中可以看出, 在激光激发0.1 μs以后, 体系的瞬态吸收光谱主要是<sup>3</sup>BZ\*在480 nm处的特征吸收; 在激光激发1 μs以后, <sup>3</sup>BZ\*在480 nm的特征吸收逐渐减弱, 出现了以630 nm为中心的一个很宽的新吸收带, 结合文献<sup>28</sup>判断这是阴离子自由基BZ<sup>-•</sup>的特征吸收峰. 到5 μs时, <sup>3</sup>BZ\*的吸收峰已完全消失, 而BZ<sup>-•</sup>的特征吸收峰则达到最大值. 以上现象可以由式(2)来表达:



<sup>3</sup>BZ\*与TEA遭遇时发生电子转移形成一个接触离子对, 这个接触离子对进一步解离就形成了溶剂分散的离子自由基BZ<sup>-•</sup>和TEA<sup>+•</sup>. 同时, 这个接触离子对也可能通过逆向电子转移(BET)而还原为母体.

选取BZ<sup>-•</sup>在630 nm处的吸收作动力学分析, 可以看到在5 μs以前有明显生成, 根据数据分析系统的拟合可知其符合一级生成规律.

##### 3.2.2 [bmim][BF<sub>4</sub>]对<sup>3</sup>BZ\*/TEA电子转移反应的影响

在相同的浓度和气氛条件下, 进一步研究不同体积分数 $V_{\text{IL}}$ 的离子液体对<sup>3</sup>BZ\*与TEA之间电子转移过程的影响. 图4是离子液体体积分数为0.8时该体系的瞬态吸收光谱. 与图3比较可以看出, 与相同时间下得到的瞬态吸收光谱有着明显的区别. 在激

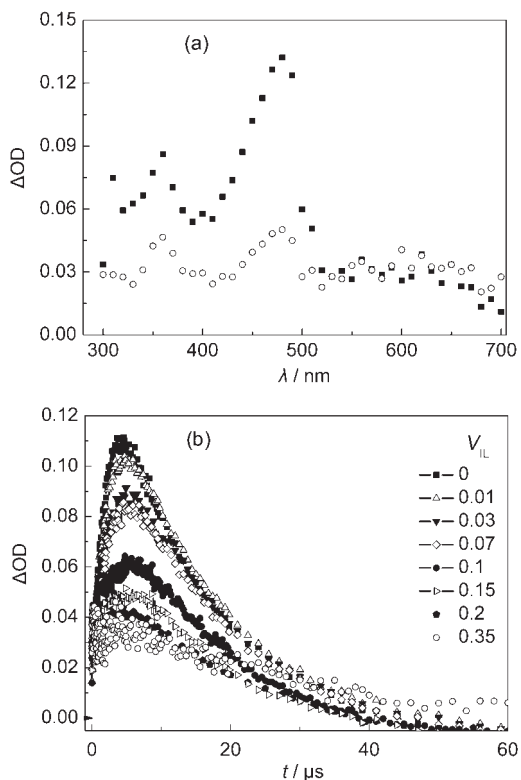


图4 (a)  $N_2$ 饱和下BZ/TEA在体积分数 $V_{IL}=0.35$ 的IL/MeCN混合溶剂中激光激发后1  $\mu s$  (■)与5  $\mu s$  (○)测得的瞬态吸收光谱; (b) 不同 $V_{IL}$ 值的溶液中 $BZ^{\bullet-}$ 在630 nm处的时间曲线

Fig.4 (a) Transient absorption spectra of BZ/TEA in  $N_2$ -saturated IL/MeCN solution with  $V_{IL}=0.35$  recorded at 1  $\mu s$  (■) and 5  $\mu s$  (○) after laser excitation; (b) Time profiles of  $BZ^{\bullet-}$  observed at 630 nm in the solutions with different volume fractions  $V_{IL}$

$c(BZ)=2 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ ;  $c(TEA)=1 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$

光激发5  $\mu s$ 后,  $BZ^{\bullet-}$ 的特征吸收仍然不明显, 而 $^3BZ^*$ 在480 nm处的吸收峰也在10  $\mu s$ 后才完全消失. 这表明在一定比例的IL/MeCN混合体系中电子转移过程变慢, 量子产额降低.

选择630 nm处的吸收进行动力学分析, 发现自由基的表现生成速率常数 $k_{gr}$ 随离子液体比例增加而减小, 混合体系中 $k_{gr}$ 的值总是小于乙腈溶液中的 $k_{gr}$ . 在 $V_{IL}>0.35$ 时,  $k_{gr}$ 已经无法用动力学分析的方法得到.

### 3.3 BZ与TMPD在[bmim][BF<sub>4</sub>]/MeCN混合溶剂中的光诱导电子转移反应

#### 3.3.1 $^3BZ^*$ 与TMPD在乙腈溶液中的电子转移反应

$1 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  TMPD的乙腈溶液在355 nm光激发下没有明显的瞬态吸收. 图5是将 $1 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  TMPD加入到 $2 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$  BZ的乙腈

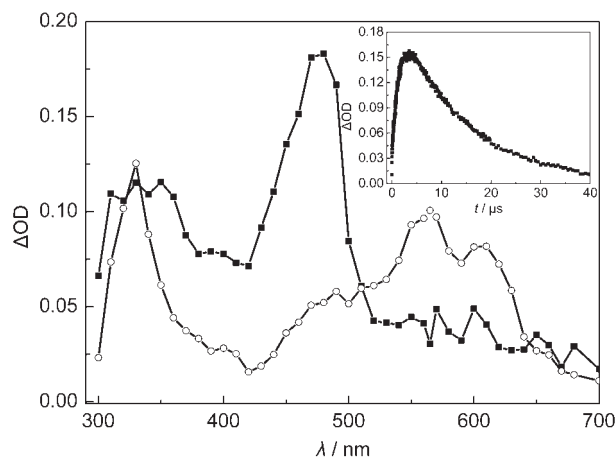
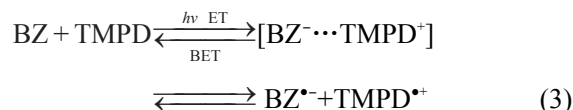


图5  $N_2$ 饱和下BZ/TMPD的乙腈溶液在激光激发后0.1  $\mu s$  (■)与3  $\mu s$  (○)测得的瞬态吸收光谱

Fig.5 Transient absorption spectra of BZ/TMPD in  $N_2$ -saturated MeCN solution recorded at 0.1  $\mu s$  (■) and 3  $\mu s$  (○) after laser excitation

inset: time profile observed at 565 nm;  $c(BZ)=2 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$ ;  $c(TMPD)=1 \times 10^{-4} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$

溶液经355 nm光激发后的瞬态吸收光谱. 对比不同延时下的瞬态吸收谱, 发现在光激发0.1  $\mu s$ 以后,  $^3BZ^*$ 在480 nm的特征吸收逐渐减弱, 而565和610 nm处新出现的吸收逐渐增强, 说明 $^3BZ^*$ 与TMPD两者之间发生了电子转移, 生成 $TMPD^{\bullet+}$ 和 $BZ^{\bullet-}$ .<sup>34,35</sup>到3  $\mu s$ 时,  $^3BZ^*$ 的吸收峰基本消失, 而 $TMPD^{\bullet+}$ 的特征吸收峰则达到最大值. 值得注意的是, 这里得到的565和610 nm吸收峰也是一个很宽的吸收带, 这是因为由前面BZ/TEA体系的光诱导电子转移已经知道,  $BZ^{\bullet-}$ 在500–750 nm之间有一很宽的瞬态吸收. 该体系反应机理与BZ/TEA体系类似, 如式(3)所示:



$^3BZ^*$ 与TMPD遭遇时发生电子转移形成一个接触离子对, 这个接触离子对进一步解离就形成了溶剂分散的离子自由基 $BZ^{\bullet-}$ 和 $TMPD^{\bullet+}$ .

选取 $TMPD^{\bullet+}$ 在565 nm处的吸收作动力学分析, 可以看到有明显的生成过程, 根据数据分析系统的拟合, 其符合一级生成规律.

#### 3.3.2 [bmim][BF<sub>4</sub>]对 $^3BZ^*$ /TMPD电子转移反应的影响

在相同的浓度和气氛条件下, 进一步研究了不同体积分数 $V_{IL}$ 的离子液体对 $^3BZ^*$ 与TMPD之间电子转移过程的影响. 选择565 nm处的吸收进行动力

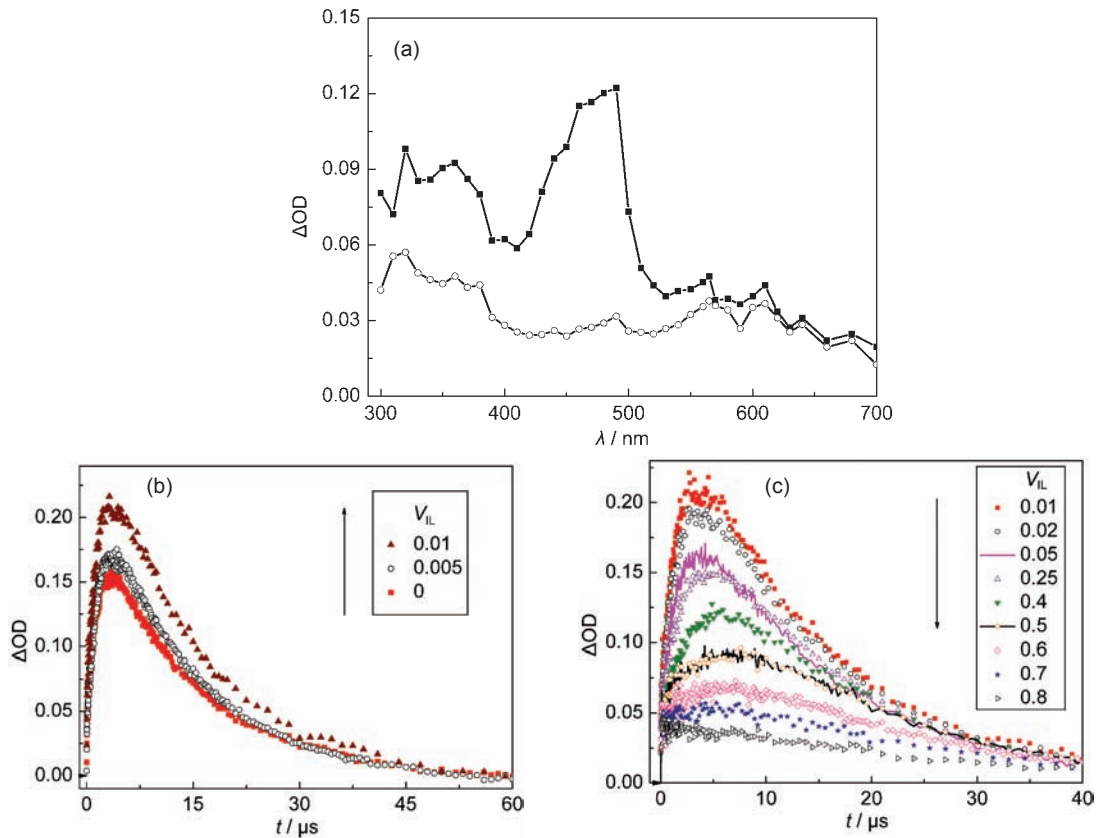


图6 (a) N<sub>2</sub>饱和下BZ/TMPD在V<sub>IL</sub>=0.8的IL/MeCN混合溶剂中激光激发后3 μs (■)与10 μs (○)的瞬态吸收光谱;  
(b, c) 不同V<sub>IL</sub>值下565 nm处的时间曲线

Fig.6 (a) Transient absorption spectra of BZ/TMPD recorded at 3 μs (■) and 10 μs (○) after laser excitation in N<sub>2</sub>-saturated IL/MeCN solution with V<sub>IL</sub>=0.8; (b, c) Time profiles observed at 565 nm in the solutions with different V<sub>IL</sub> values  
c(BZ)=2×10<sup>-4</sup> mol·dm<sup>-3</sup>; c(TMPD)=1×10<sup>-4</sup> mol·dm<sup>-3</sup>

学分析. 虽然这里会有BZ<sup>•</sup>吸收峰的叠加, 但由于TMPD<sup>•+</sup>和BZ<sup>•</sup>的生成是同步的, 所以并不影响我们分析得到离子液体对该体系电子转移影响的趋势.

可以看出, 在离子液体比例较高的情况下, 电子转移反应受到抑制. 图6显示的是离子液体体积

分数为0.8时该体系的瞬态吸收光谱. 与图5比较, TMPD<sup>•+</sup>的特征吸收峰在激光激发3 μs后不是很明显, 但在10 μs时仍然能观察到, 而<sup>3</sup>BZ<sup>•</sup>在480 nm处的吸收峰也是到10 μs时才变得非常微弱. 这表明在一定比例IL/MeCN的混合体系中, 电子转移过程变慢.

图7显示了565 nm处一级表观生成速率常数k<sub>gr</sub>与V<sub>IL</sub>的关系. 当离子液体浓度非常稀时(V<sub>IL</sub><0.01), k<sub>gr</sub>随着离子液体比例的增加而增大; 而在V<sub>IL</sub>>0.01以后, k<sub>gr</sub>随着离子液体比例的增加而减小.

#### 4 结论

利用激光光解技术研究了亲水性离子液体[bmim][BF<sub>4</sub>]对联苯甲酰的光化学行为和光诱导电子转移过程的影响. 实验结果表明: [bmim][BF<sub>4</sub>]的存在对联苯甲酰激发三线态<sup>3</sup>BZ<sup>•</sup>的瞬态吸收峰无显著影响, 没有出现光谱移动, 说明[bmim][BF<sub>4</sub>]与<sup>3</sup>BZ<sup>•</sup>之间的作用不强, 不会与阳离子产生质子或电

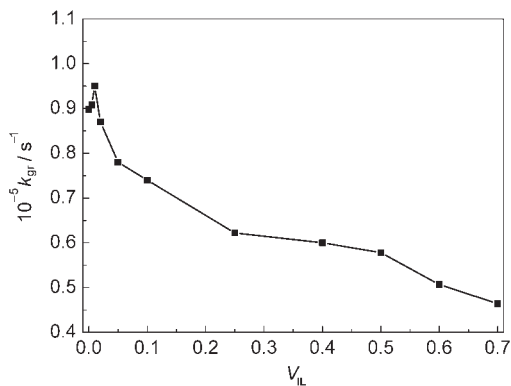


图7 TMPD<sup>•+</sup>在565 nm处的表观生成速率常数与[bmim][BF<sub>4</sub>]体积分数的关系

Fig.7 Dependence of observed apparent growth rate constant of TMPD<sup>•+</sup> on V<sub>IL</sub> of [bmim][BF<sub>4</sub>] at 565 nm

子转移. 而[**bmim**][**BF<sub>4</sub>**]对**BZ/TEA**及**BZ/TMPD**体系的光诱导电子转移过程影响很大, 虽然两体系稍有不同, 但总的趋势是类似的, 在离子液体比例足够大的情况下, 联苯甲酰三线态<sup>3</sup>**BZ**与**TEA**及**TMPD**间的电子转移均被抑制, 这与已有研究中咪唑类离子液体中光诱导电子转移的速率和效率都会降低的结论是一致的. 但也必须看到, 不同离子液体对同一过程或者同一离子液体对不同体系和过程的影响是不同的, 说明离子液体对光化学过程尤其是光诱导电子转移过程的影响非常复杂.

### References

- (1) Welton, T. *Chem. Rev.* **1999**, *99*, 2071.
- (2) Rogers, R. D.; Seddon, K. R. *Science* **2003**, *302*, 792.
- (3) Dupont, J. J. *Braz. Chem. Soc.* **2004**, *15*, 341.
- (4) Dupont, J.; de Souza, R. F.; Suarez, P. A. Z. *Chem. Rev.* **2002**, *102*, 3667.
- (5) Paul, A.; Mandal, P.; Samanta, A. *Chem. Phys. Lett.* **2005**, *402*, 375.
- (6) Yuan, L. Y.; Peng, J.; Li, J. Q.; Zhai, M. L. *Acta Phys. -Chim. Sin.* **2010**, *26*, 981. [袁立永, 彭静, 李久强, 翟茂林. 物理化学学报, **2010**, *26*, 981.]
- (7) Talaty, E. R.; Raja, S.; Storhaug, V. J.; Dolle, A.; Carper, W. R. *J. Phys. Chem. B* **2004**, *108*, 13177.
- (8) Marcinek, A.; Zielonka, J.; Gebicki, J. J. *J. Phys. Chem. A* **2001**, *105*, 9305.
- (9) Lopes, J. N. A. C.; Pádua, A. A. H. *J. Phys. Chem. B* **2006**, *110*, 3330.
- (10) Wang, J.; Wang, H.; Zhang, S.; Zhang, H.; Zhao, Y. *J. Phys. Chem. B* **2007**, *111*, 6181.
- (11) Cheng, L.; Wang, M.; Zhao, P.; Zhu, H.; Zhu, R.; Sun, X.; Yao, S.; Wang, S. *Spectrochimica Acta Part A* **2009**, *73*, 268.
- (12) Ingram, J. A.; Moog, R. S.; Ito, N.; Biswas, R.; Maroncelli, M. *J. Phys. Chem. B* **2003**, *107*, 5926.
- (13) Wishart, J. F.; Neta, P. *J. Phys. Chem. B* **2003**, *107*, 7261.
- (14) Baker, S. N.; Baker, G. A.; Kane, M. A.; Bright, F. V. *J. Phys. Chem. B* **2001**, *105*, 9663.
- (15) Samanta, A. *J. Phys. Chem. B* **2006**, *110*, 13704.
- (16) Grodkowski, J.; Neta, P. *J. Phys. Chem. A* **2002**, *106*, 5468.
- (17) Gordon, C. M.; McLean, A. J. *Chem. Commun.* **2000**, 1395.
- (18) Michael, R. W. *Chem. Rev.* **1992**, *92*, 435.
- (19) Lynden-Bell, R. M. *J. Phys. Chem. B* **2007**, *111*, 10800.
- (20) Ito, N.; Arzhantsev, S.; Maroncelli, M. *Chem. Phys. Lett.* **2004**, *396*, 83.
- (21) Alvaro, M.; Garcia, H. *Chem. Phys. Lett.* **2002**, *362*, 435.
- (22) Katoh, R.; Yoshida, Y.; Katsumura, Y.; Takahashi, K. *J. Phys. Chem. B* **2007**, *111*, 4770.
- (23) Marquis, S.; Ferrer, B.; Alvaro, M.; Garcia, H.; Roth, H. D. *J. Phys. Chem. B* **2006**, *110*, 14956.
- (24) Paul, A.; Samanta, A. *J. Phys. Chem. B* **2007**, *111*, 1957.
- (25) Nagasawa, Y.; Itoh, T.; Yasuda, M.; Ishibashi, Y.; Ito, S.; Miyasaka, H. *J. Phys. Chem. B* **2008**, *112*, 15758.
- (26) Vieira, R. C.; Falvey, D. E. *J. Am. Chem. Soc.* **2008**, *130*, 1552.
- (27) Mukai, M.; Yamauchi, S.; Hirota, N. *J. Phys. Chem.* **1992**, *96*, 3305.
- (28) Encinas, M. V.; Scaiano, J. C. *J. Am. Chem. Soc.* **1979**, *101*, 7740.
- (29) Mohapatra, G. K. D.; Bhattacharya, J.; Bandopadhyay, J.; Bera, S. C. *J. Photochem.* **1987**, *40*, 47.
- (30) Okutsu, T.; Ooyama, M.; Tani, K.; Hiratsuka, H. *J. Phys. Chem. A* **2001**, *105*, 3741.
- (31) Zhu, G. L.; Xu, J. J.; Wu, G. Z.; Zhu, H. P.; Long, D. W.; Chen, S. M.; Yao, S. D. *Int. J. Mol. Sci.* **2006**, *7*, 590.
- (32) Zhu, G. L.; Wu, G. Z.; Sha, M. L.; Long, D. W.; Yao, S. D. *J. Phys. Chem. A* **2008**, *112*, 3079.
- (33) Zuo, Z. H.; Yao, S. D.; Luo, J.; Wang, W. F.; Zhang, J. S.; Lin, N. Y. *J. Photochem. Photobiol. B- Biol.* **1992**, *15*, 215.
- (34) Fujita, S.; Steenken, S. *J. Am. Chem. Soc.* **1981**, *103*, 2540.
- (35) Lu, C. Y.; Liu, Y. Y. *Biochim. Biophys. Acta* **2002**, *1571*, 71.