

Raman 光谱对离子液体及其 可支撑离子液体膜的表征

王 锦, 于 洋, 丁 红, 曹百川

(北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘 要:利用 Raman 及其表面增强 Raman 光谱对不同阴离子的 3 种丁基咪唑离子液体及其负载膜的结构进行测定分析表征. 结果表明:3 种离子液体其 $[C_4mim]^+$ 阳离子结构非常相近, 受不同阴离子的影响较小. 在室温常压下阳离子 $[C_4mim]^+$ 同时存在偏移和扭转两种同分异构体. 相比于亲水性支撑离子液体膜, 疏水性 PVDF 可支撑离子液体膜的普通 Raman 难以测定, 采用以银溶胶作为表面增强活性基底的表面增强 Raman 与亲水性可支撑离子液体膜的普通 Raman, 以及纯离子液体的普通 Raman 高度一致, 充分显示出表面增强 Raman 光谱对支撑离子液体膜结构表征的适用性及优越性, 为今后在离子液体膜方面的 Raman 研究开启了新的方向.

关键词:表面增强 Raman 光谱; 咪唑离子液体; 可支撑离子液体膜; 银溶胶; 同分异构体

中图分类号: X830.2

文献标志码: A

Characterization of the Raman spectra for the ionic liquid and the supported ionic liquid membrane

WANG Jin, YU Yang, DING Hong, CAO Baichuan

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: This paper uses Raman spectrum and surface enhanced Raman spectrum to analyze the structure of three different kinds of butyl-imidazolium ionic liquid and their supported ionic liquid membrane (SILM), which is prepared by infiltrating ionic liquids into PVDF microporous membrane. The results show that the Raman spectra of the $[C_4mim]^+$ cation in three ionic liquids are surprisingly alike, which maybe because the influence of different anion is small. Meanwhile, there are two rotational isomers anti-anti conformer and gauche-anti conformer coexisting in the $[C_4mim]^+$ cation under the condition of room temperature and normal pressure. Compared to the hydrophilic PVDF SILM, the hydrophobic SILM is hardly measured by the ordinary Raman. Furthermore, the Ag sol surface enhanced Raman spectroscopy of supported ionic liquid hydrophobic membrane is remarkably similar with the ordinary Raman spectroscopy of supported ionic liquid hydrophilic membrane and that of ionic liquid correspondingly. This fully indicates the advantage and feasibility of the surface enhanced Raman spectra in analyzing the structure characterization of supported ionic liquid membrane.

Key words: surface enhanced Raman spectroscopy; imidazolium ionic liquid; supported ionic liquid membrane; Ag sol; isomer conformer

收稿日期: 2014-12-23

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2015YJS105)

作者简介: 王锦(1973—), 女, 陕西宝鸡人, 教授, 博士, 博士生导师. 研究方向为环境工程理论与技术. email: jwang1@bjtu.edu.cn.

离子液体(IL),又称“室温熔盐”,是在室温及相邻温度下完全由离子组成的有机液体,具有熔点低、不易挥发、液态温度范围宽及电导率高等优良特性,其物化性质可以通过改变阴、阳离子的结构来实现.离子液体的性质稳定,可循环使用,一般不会导致设备腐蚀,其应用领域广阔,可以用作复杂有机反应均相催化剂的溶剂、气液相分离的介质,以及太阳能电池的电解质等,尤其在 CO₂ 捕获和转化方面展现出巨大的潜力^[1].近年来,可支撑离子液体膜(SILM)受到了重视,即将多孔支撑体浸在溶解有载体的膜溶剂中,在表面张力的作用下,膜溶剂充满微孔^[2].将离子液体引入多孔膜制备离子液体支撑液膜可降低离子液体的用量,提高支撑液膜的稳定性,在酸性气体分离等方面呈现了良好的应用^[2].但是,目前针对离子液体及其可支撑离子液体膜的结构研究较少,因此本研究探索通过 Raman 光谱法对离子液体及其可支撑离子液体膜的结构进行分析,以利于后续 CO₂ 吸收机理的研究.

1928年印度物理学家拉曼(Raman)发现了拉曼散射^[3]现象,即由于入射光与样品分子之间存在着概率很小的非弹性碰撞,发生能量交换,使光子的方向和频率均发生变化,最终导致散射光频率与入射光频率不同且方向改变^[4].但由于常规拉曼灵敏度较低,分子结构信息不能尽可能多的表征出来.1974年,Fleischman等首次发现增强 Raman,将试样吸附在金、银、铜等金属的粗糙表面或胶粒上,从而达到具有表面选择性增强效应的效果^[5].目前,已有学者采用 Raman 光谱法来测定纯离子液体结构的状况,如 Berg 通过 Raman 光谱法比较多种离子液体的结构^[4],Vianney 等采用 Ag 溶胶表面增强 Raman 法对离子液体 BminPF₆ 进行表征^[6].但是,可支撑离子液体膜用 Raman 光谱法测定的研究还未见报道.虽然也有学者采用红外光谱、质谱研究离子液体结构,但是红外光谱是通过振动跃迁过程中偶极矩的净变化来测定的,无法测出对称振动^[7];质谱是将被测物质离子化,按离子的质荷比分离,测量各种离子谱峰的强度而实现分析目的,常用于测定原子及分子质量,无法测出离子液体微观结构的具体改变^[8].拉曼光谱的主要优点是能够提供所谓“分子指纹”的振动峰的信息,从而对离子液体结构的细微变化分析.同时,拉曼光谱可以测量许多不同状态的体系的振动光谱,尤其是反映离子液体中存在的局部结构变化^[7].因此,采用 Raman 光谱法可以更好地了解将离子液体负载在多孔膜后,离子液体微观结构的变化,方便后续离子液体及其膜的

Raman 光谱应用研究.

除了拉曼光谱测定,量子化学中从头计算法和半经验法也成为一种有效的预测分子结构和振动光谱的方法.这些方法主要是利用有效的数学近似以及电脑程序,如计算软件有 Gaussian, Gamess-US, Q-Chem, MOLPR 等,根据最低能量原则来计算分子的结构^[9].Talaty 等根据从头计算法采用 Gaussian 98 在 B3LYP/6-311+G 水平下计算了乙基到丁基的咪唑盐[C₂₋₄mim]的结构,并比较了计算值与红外光谱(IR)、拉曼光谱的实验值^[10].Berg 等利用同样的方法将[C₄mim]⁺的结构计算出来,并结合试验比较了[C₄mim][Cl]、[C₄mim][Br]、[C₄mim][PF₆]、[C₄mim][BF₄]等离子液体的结构区别^[4].Meng 等利用从头计算法和半经验法(AM1 和 PM3)给出了[C₄mim][PF₆]的4种结构^[11].

本文作者通过拉曼光谱对不同阴离子的3种咪唑[C₄mim][PF₆]、[C₄mim][BF₄]、[C₄mim][Tf₂N]离子液体结构进行测定分析,并通过与相关文献计算值的比较,分析 Raman 峰值所代表的分子结构.并首次对这3种离子液体吸附到支撑膜后形成支撑液膜,进行表面增强拉曼表征,以进一步探索表面增强拉曼光谱对支撑离子液体膜的适用性,以及离子液体在液膜中结构的变化.

1 Raman 光谱测定试验方法

1.1 试剂与仪器

实验中不同阴离子的3种咪唑类离子液体分别为1-丁基-3-甲基咪唑六氟磷酸盐[C₄mim][PF₆],1-丁基-3-甲基咪唑四氟硼酸盐[C₄mim][BF₄],1-丁基-3-甲基咪唑双三氟甲磺酰亚胺盐[C₄mim][Tf₂N],均为中国科学院兰州化学物理研究所生产.阳离子[C₄mim]⁺的结构示意如图1所示.

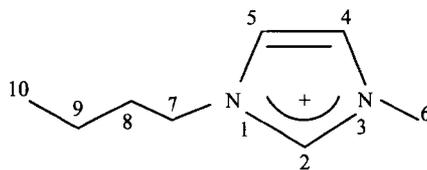


图1 [C₄mim]⁺结构示意图

Fig.1 Structural representation of [C₄mim]⁺

银溶胶制备所需化学试剂均为分析纯,氢氧化钠 NaOH、盐酸羟胺 NH₂OH·HCl、硝酸银 AgNO₃,均为国药集团化学试剂有限公司生产.支撑膜分别采用疏水性和亲水性聚偏氟乙烯 PVDF 膜,膜孔径 0.22 μm,为北京升河诚信膜科技发展中心生产.

实验过程采用的仪器设备有:电子分析天平

(BS124S,北京陆希科技有限公司),激光 Raman 光谱仪(ProTT-EZRaman-A,美国恩威公司),磁力搅拌器(HJ-3,上海沪粤明科学仪器有限公司),真空干燥箱(DZF-6020,上海一恒科学仪器有限公司),真空泵(2XZ-2型旋片真空泵,天津市津腾实验设备有限公司)。

1.2 离子液体膜及表面增强 Raman 银溶胶制备

离子液体膜的制备:首先将 PVDF 膜片放入真空干燥箱中 1 h,干燥温度 50 ℃,0.09 MPa 负压抽真空,以去除膜孔中的气体和水分。然后将膜片放入培养皿中,用移液枪将定量离子液体均匀滴在膜片表面,直到确定离子液体已完全浸润膜片,然后将浸过离子液体的膜片继续放入真空干燥箱内 48 h,保持温度 50 ℃,抽真空 0.09 MPa。最后,取出膜片用无絮面巾纸轻轻地擦除膜表面未浸入膜中的多余的离子液体,可支撑离子液体膜即制备完成^[12]。

银溶胶的配制:将 4.5 mL 浓度为 0.1 mol/L 的 NaOH 和 5 mL 浓度为 0.06 mol/L 的 $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ 充分混合配制成混合溶液,然后将 90 mL 浓度 1.11×10^{-3} mol/L AgNO_3 倒入洁净的烧杯中,烧杯用锡箔纸覆盖避光,用磁力搅拌器搅拌。在搅拌过程中,用移液枪将混合液以液滴的方式滴入烧杯中,反应 40~50 min 后即可使用。

纯离子液体采用 Raman 光谱直接测定。疏水性可支撑离子液体膜制成后成透明状,如图 2 所示,采用普通 Raman 光谱测出峰不明显,因而采用银溶胶表面增强 Raman 光谱测定。而亲水性可支撑离子液体膜制成后依旧呈白色,如图 3 所示,用普通 Raman 即可表征。

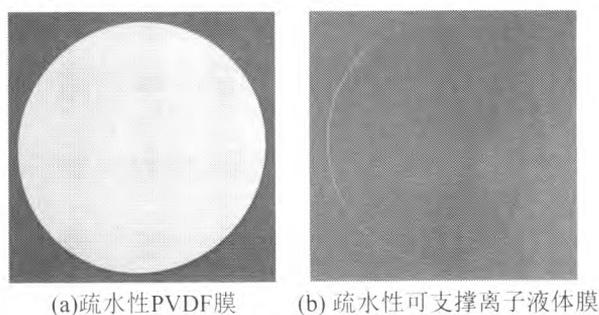
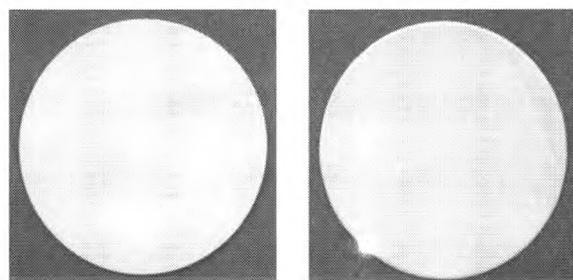


图 2 疏水性 PVDF 膜和疏水性可支撑离子液体膜

Fig. 2 Hydrophobic PVDF membrane and hydrophobic PVDF supported ionic liquid membrane

图 4 为本实验对纯离子液体 $[\text{C}_4\text{mim}][\text{PF}_6]$ 的 Raman 光谱测定值与文献[4]的比较,可以看出,实验数据与文献值具有极好的吻合度,最大偏移在 4 cm^{-1} 以内,因此表明本实验 Raman 光谱测定的准确性。



(a)亲水性PVDF膜 (b)亲水性可支撑离子液体膜

图 3 亲水性 PVDF 膜和亲水性可支撑离子液体膜

Fig. 3 Hydrophilic PVDF membrane and hydrophilic PVDF supported ionic liquid membrane

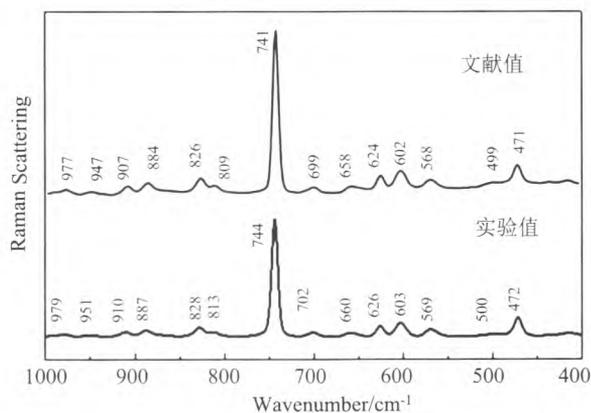


图 4 纯离子液体 $[\text{C}_4\text{mim}][\text{PF}_6]$ 的

Raman 光谱实验值与文献[4]值的比较
Fig. 4 $[\text{C}_4\text{mim}][\text{PF}_6]$ characteristic peak comparison of Raman spectra measured in this experiment with literature [4]

2 Raman 光谱测定结果与讨论

2.1 不同阴离子的纯离子液体 Raman 光谱比较

纯离子液体 $[\text{C}_4\text{mim}][\text{X}](\text{X} = \text{PF}_6, \text{Tf}_2\text{N}, \text{BF}_4)$ 在室温下测定的 Raman 光谱如图 5 所示。

从图 5 离子液体的 Raman 光谱测定结果可以看出,不同阴离子的 $[\text{C}_4\text{mim}]$ 的 Raman 光谱非常相近,这可能是由于 $400 \sim 1600 \text{ cm}^{-1}$ 更多表现为阳离子 $[\text{C}_4\text{mim}]^+$ 的光谱图,而对于离子液体阴离子对阳离子的影响较小,因此得出了相似的结果。不相同的峰值代表的是阴离子的振动,如 $[\text{PF}_6]^-$ 的对称拉伸振动为 743 cm^{-1} ,对称弯曲为 470 cm^{-1} ; $[\text{BF}_4]^-$ 的对称拉伸振动为 767 cm^{-1} ,弯曲振动为 523 cm^{-1} ^[13]; $[\text{Tf}_2\text{N}]$ 的振动在 407 cm^{-1} ^[4]。

Ozawa 等^[14]根据密度泛函理论(DFT)采用 Gaussian 98(在 B3LYP/6-31+G 水平)进行计算,结果表明: $[\text{C}_4\text{mim}]^+$ 有偏移构型和扭转构型两种结构。两种构型的不同是由阳离子 $[\text{C}_4\text{mim}]^+$ 中位于丁基的 C7-C8 出现扭转造成的,与偏移构型相比,扭

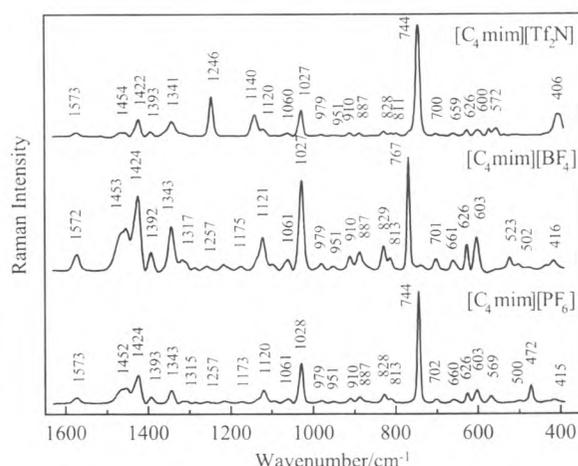


图 5 不同阴离子的纯离子液体 [C₄mim][X] 的 Raman 光谱比较

Fig. 5 Raman spectra comparison of ionic liquid [C₄mim][X] with different anions

转构型中丁基的 C7 - C8 键存在 106.16° 偏转, 两种 [C₄mim] 构型的振动频率代表含义如表 1 所示。

从表 1 可看出, 3 种不同阴离子咪唑盐, 实验测定值和文献值非常吻合。其中, 3 种咪唑盐均测出的实验峰值 603 cm⁻¹、660 cm⁻¹、910 cm⁻¹、979 cm⁻¹、

1 027 cm⁻¹、1 393 cm⁻¹ 与扭转构型计算特征峰值更接近; 3 种咪唑盐均测出的实验峰值 813 cm⁻¹、829 cm⁻¹、951 cm⁻¹、1 061 cm⁻¹ 与偏移构型的计算峰值更接近; 其余峰值也均在两种同分异构体特征谱峰附近。故推测在常压室温条件下, 3 种不同阴离子的 [C₄mim] 离子液体同时存在偏移构型和扭转构型两种同分异构体。同时据相关研究, Hamaguchi^[15] 等认为波长为 500 ~ 800 cm⁻¹ 代表的是 [C₄mim]⁺ 环内振动, 并通过 Gaussian 98 计算 [C₄mim]⁺ 偏移构型和扭转构型的主要计算特征波长分别为 626 cm⁻¹、735 cm⁻¹ 和 596 cm⁻¹、696 cm⁻¹, 造成扭转构型特征峰值变小的主要原因是因 CH₂ 摇摆振动作用到环上, 使环的振动变小^[12]。从图 5 中可看出, [C₄mim][PF₆] 含有 603 cm⁻¹、626 cm⁻¹、702 cm⁻¹ 的特征峰, [C₄mim][BF₄] 含有 603 cm⁻¹、626 cm⁻¹、701 cm⁻¹ 的特征峰, [C₄mim][Tf₂N] 含有 600 cm⁻¹、626 cm⁻¹、700 cm⁻¹ 的特征峰, 分别对应偏移构型和扭转构型中的 596 cm⁻¹、626 cm⁻¹、696 cm⁻¹, 因此进一步表明在室温常压条件下, 3 种离子液体并不只有一种构型, 而是偏移与扭转两种构型均存在。

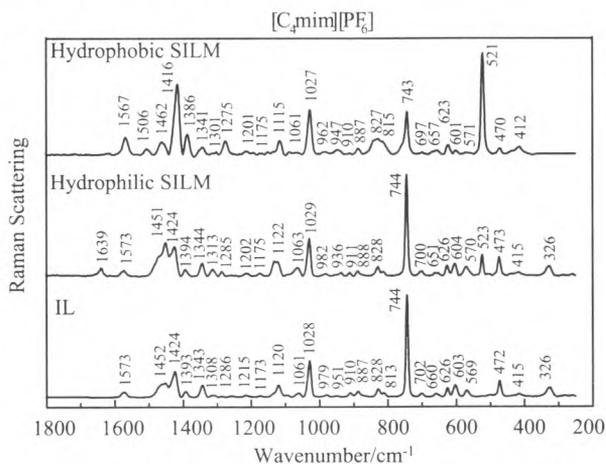
表 1 阳离子 [C₄mim]⁺ 偏移构型和扭转构型的 Raman 计算结果与实验测定值的比较

Tab. 1 Comparison of Raman calculation with experimental results for anti-anti and gauche-anti conformer in [C₄mim]⁺ cation

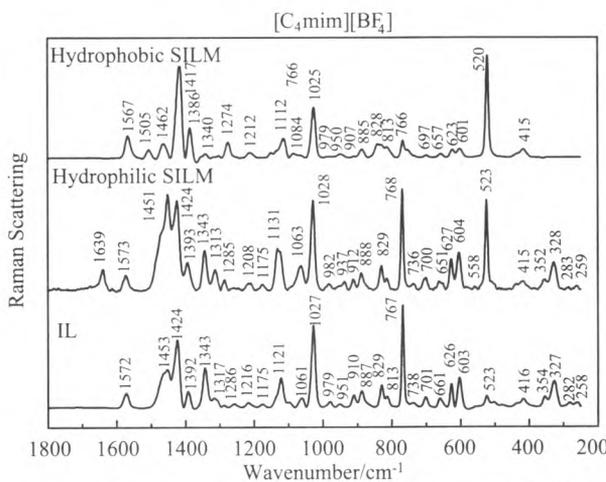
计算值/cm ⁻¹	偏移构型 代表含义	计算值/cm ⁻¹	扭转构型 代表含义	离子液体的 Raman 实验测定值/cm ⁻¹		
				[C ₄ mim][PF ₆]	[C ₄ mim][BF ₄]	[C ₄ mim][TF ₂ N]
407.0	环扭转 + C7H ₂ 摆动 + C6H ₃ 摆动	418	环扭转 + C7H ₂ 摆动 + N - C6H ₃ 面内摆动	415	416	406
619.6	环面外拉伸 + C7H ₂ 摆动 + C7 - C8 - C9 弯曲	603.9	N - C6 N - C7 对称拉伸 + 环面外拉伸 + C8H ₂ 摆动 + N - C7 - C8 弯曲	603	603	600
636.2	环拉伸 + N - C6 N - C7 对称拉伸 + C7H ₂ 摆动 + C7 - C8 - C9 弯曲	622.8	N - C6 N - C7 对称拉伸 + 环面外拉伸 + C8H ₂ 摆动 + N - C7 - C8 弯曲	626	626	626
670.2	N - C6 拉伸 + 环拉伸 + C8H ₂ 摆动 + N - C7 - C8 弯曲	662.8	环拉伸 + C8H ₂ 摆动 + N - C7 - C8 弯曲	660	661	659
725.5	环 C - H 面内弯曲	712.8	N - C6 N - C7 环面内拉伸 + C8H ₂ 摆动	700	701	702
813.7	C4 - H C5 - H 环面外反对成弯曲	811.5	C4 - H C5 - H 环面外反对成弯曲	813	813	813
819.3	碳链 CH ₂ 剪切	853.9	碳链 CH ₂ 剪切	828	829	828
				887	887	887
945.3	碳链拉伸 + C10H ₂ 摆动	912.4	碳链拉伸 + C10H ₂ 摆动	910	910	910
				951	951	951
969.8	碳链拉伸 (CH ₂ 剪切 + 摆动)	981.5	碳链拉伸 (CH ₂ 剪切 + 摆动)	979	979	979
1043.6	环拉伸 + 链拉伸	1025.7	环拉伸 + 链拉伸	1 027	1 027	1 028
1057.3	环拉伸 + N - C6 拉伸 + C4 - H C5 - H 面内对称弯曲	1051.9	环拉伸 + N - C6 拉伸 + N - C7 拉伸 + C7 - C8 拉伸	1 061	1 061	1 060
1128.4	C6H ₃ 面内摆动 + 环拉伸	1127.4	C6H ₃ 面内摆动 + 环拉伸	1 120	1 121	1 120
1176.9	C6H ₃ 拉伸 (面外摆动)	1176.4	C6H ₃ 拉伸 (面外摆动)	1 173	1 175	—
1318.4	环上 CH 面内对称弯曲 + 碳链上 CH ₂ 摆动	1311.0	环上 CH 面内对称弯曲 + 碳链上 CH ₂ 摆动	1 315	1 316	—
1353.0	碳链 CH ₂ 拉伸 + 环上 CH 面内对称弯曲	1362.5	碳链 CH ₂ 拉伸	1 343	1 343	1 341
1388.9	环反对称运动 + C7H ₂ 摆动	1393.3	环反对称运动 + C7H ₂ 摆动	1 393	1 392	1 393
1413.6	C7H ₂ + C ₉ H ₂ 扭转	1416.7	C7H ₂ 扭转	1 424	1 424	1 422
1450.6	环反对称拉伸 + C7H ₂ 摆动 + C6H ₃ 拉伸	1456.1	环反对称拉伸 + C7H ₂ 摆动 + C6H ₃ 拉伸	1 452	1 453	1 454
1566.6	碳链 CH ₂ 弯曲 (剪切)	1565.4	C8H ₂ + C9H ₂ + C10H ₂ 弯曲 (剪切)	1 573	1 572	1 573

2.2 亲水和疏水性支撑离子液体膜 Raman 光谱

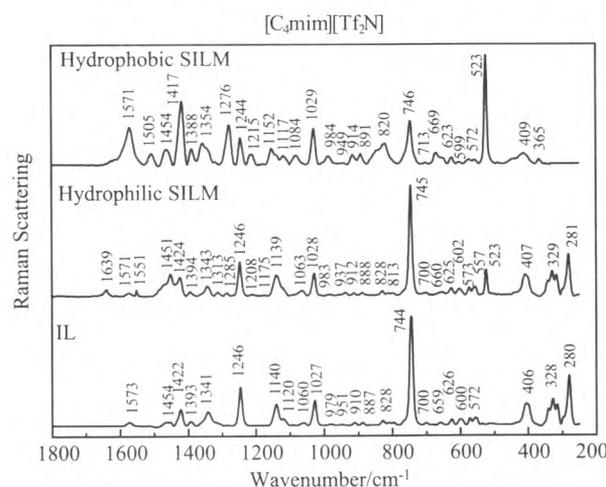
$[\text{C}_4\text{mim}][\text{PF}_6]$ 、 $[\text{C}_4\text{mim}][\text{BF}_4]$ 、 $[\text{C}_4\text{mim}][\text{Tf}_2\text{N}]$ 3 种离子液体及亲水性支撑离子膜的普通 Raman 光谱与疏水性支撑离子膜的增强 Raman 光谱比较如图 6 所示。



(a) 离子液体 $[\text{C}_4\text{mim}][\text{PF}_6]$ 及其液膜的 Raman 光谱比较



(b) 离子液体 $[\text{C}_4\text{mim}][\text{BF}_4]$ 及其液膜的 Raman 光谱比较



(c) 离子液体 $[\text{C}_4\text{mim}][\text{Tf}_2\text{N}]$ 及其液膜的 Raman 光谱比较

图 6 离子液体及其液膜的 Raman 光谱比较

Fig. 6 Raman spectra comparison of hydrophobic and hydrophilic SILM with ionic liquid correspondingly

亲水和疏水性 PVDF 膜的 Raman 光谱如图 7 所示。

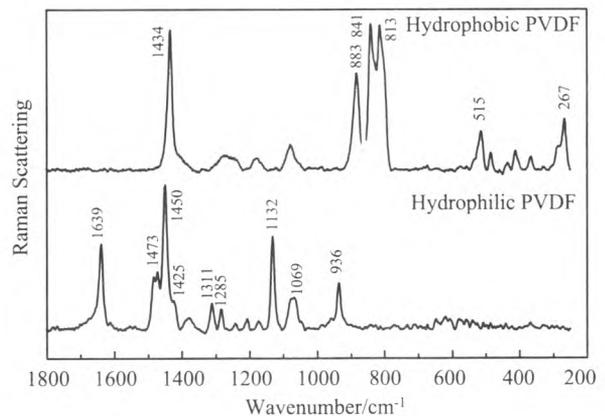


图 7 PVDF 膜的 Raman 光谱图

Fig. 7 Raman spectra comparison of hydrophobic and hydrophilic PVDF membrane

图 6 中与纯离子液体相比,3 种支撑离子液体的疏水膜和亲水膜所新出现的 523 cm^{-1} 、 521 cm^{-1} 、 520 cm^{-1} 峰非常明显,它是支撑膜测定时硅垫片振动的结果.图 7 表明,单独测定疏水性 PVDF 膜的明显特征峰为 813 cm^{-1} 、 841 cm^{-1} 、 883 cm^{-1} 以及亲水性 PVDF 膜的明显特征峰为 1639 cm^{-1} 、 1450 cm^{-1} 、 1132 cm^{-1} 和 936 cm^{-1} 等,一方面这些峰与离子液体的诸多特征峰相重合,另一方面可能是 PVDF 膜完全被离子液体所浸润,PVDF 支撑离子液体液膜的 Raman 光谱图中对 PVDF 膜的特征峰表现并不明显.图 6 中相比于离子液体和疏水性支撑液体膜,亲水性支撑离子液体膜中均出现了亲水性膜的特征峰 1639 cm^{-1} .

图 6 表明:3 种离子液体疏水性支撑膜的增强 Raman 光谱,与离子液体的普通 Raman 谱图非常接近,表明银溶胶表面增强 Raman 光谱对支撑离子液体膜表征的有效性.相比于离子液体的普通 Raman 光谱,疏水性可支撑离子液体膜的表面增强 Raman 谱图中出现了少量新峰,新峰的出现很可能是由于银溶胶的表面增强作用,使原来振动较弱的离子液体特征峰能够被进一步测出来.如: $[\text{C}_4\text{mim}][\text{PF}_6]$ 增加的特征峰为 1275 cm^{-1} 、 1506 cm^{-1} , $[\text{C}_4\text{mim}][\text{BF}_4]$ 增加的特征峰为 1505 cm^{-1} , $[\text{C}_4\text{mim}][\text{Tf}_2\text{N}]$ 增加的明显峰值特征峰为 470 cm^{-1} 、 1276 cm^{-1} 、 1616 cm^{-1} .根据量子化学计算结果, 471 cm^{-1} 是指 N—C7 面外弯曲和 N—C7—C8—C9 弯曲; 1506 cm^{-1} 是指 C_6H_3 像伞一样的拉伸振动, 1275 cm^{-1} 是指环 CH 面内对称弯曲和碳链 CH_2 的拉伸振动, 1616 cm^{-1} 是 C4—C5 环的拉伸以及 C4

-H、C5-H 面内对称弯曲振动。

3 结论

1) 3 种不同阴离子的丁基咪唑离子液体其 $[C_4mim]^+$ 阳离子结构非常相近, 受不同阴离子 $[PF_6]^-$ 、 $[BF_4]^-$ 和 $[TF_2N]^-$ 的影响较小, 与文献值一致。

2) 在室温常压下阳离子 $[C_4mim]^+$ 同时存在偏移和扭转两种同分异构体。

3) 以 Ag 溶胶作为表面增强活性基底的疏水性 SILMs 表面增强 Raman 及亲水性 SILMs 普通 Raman、与纯 ILs 普通 Raman 图高度一致, 充分显示表面增强 Raman 光谱对支撑离子液体膜结构表征的适用性及优越性, 有助于今后在离子液体膜方面的 Raman 研究。

3) 实验室正在采用表面增强 Raman 分析离子液体膜对温室气体的吸收, 深入理解离子液体作为绿色溶剂的吸收机理, 有助于后续离子液体的扩大应用与规模化。

参考文献 (References):

- [1] 张锁江, 刘晓敏, 姚晓倩, 等. 离子液体的前沿、进展及应用[J]. 中国科学(B辑:化学), 2009, 39(10): 1134 - 1144.
ZHANG Suojiang, LIU Xiaomin, YAO Xiaoqian, et al. The forefront, progress and application of Ionic liquids[J]. Science in China(Series B Chimica), 2009, 39(10): 1134 - 1144. (in Chinese)
- [2] 沈江南, 阮慧敏, 吴东柱, 等. 离子液体支撑液膜的研究及应用进展[J]. 化工进展, 2009, 28(12): 2092 - 2098.
SHEN Jiangnan, RUAN Huimin, WU Dongzhu, et al. Progress of supported liquid membrane with ionic liquids [J]. Progress in Chemical Industry, 2009, 28(12): 2092 - 2098. (in Chinese)
- [3] 伍林, 欧阳兆辉, 曹淑超, 等. 拉曼光谱技术的应用及研究进展[J]. 光散射学报, 2005, 17(2): 180 - 186.
WU Lin, OUYANG Zhaohui, CAO Shuchao, et al. Research development and application of Raman scattering technology[J]. Chinese Journal of Light Scattering, 2005, 17(2): 180 - 186. (in Chinese)
- [4] Berg R W. Raman spectroscopy and Ab-Initio model calculations on ionic liquids[J]. Monatshefte für Chemie-Chemical Monthly, 2007, 138(11): 1045 - 1075.
- [5] 骆智训, 方炎. 表面增强拉曼散射光谱的应用进展[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(2): 358 - 364.
LUO Zhixun, FANG Yan. Progress of surface-enhanced Raman scattering spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2006, 26(2): 358 - 364. (in Chinese)
- [6] Santos V O, Alves M B, Carvalht M S, et al. Surface-enhanced Raman scattering at the silver electrode/ionic liquid (BMIPF₆) interface[J]. J Phys Chem B, 2006, 110(41): 20379 - 20385.
- [7] 张力群, 李浩然. 利用红外光谱和拉曼光谱研究离子液体结构与相互作用的进展[J]. 物理化学学报, 2010, 26(11): 2877 - 2889.
ZHANG Liqun, LI Haoran. Progress of investigations on structures and interactions of ionic liquids by infrared spectroscopy and Raman spectroscopy [J]. Acta Phys-Chim Sin, 2010, 26(11): 2877 - 2889. (in Chinese)
- [8] 吴芹, 董斌琦, 韩明汉, 等. 新型 Brønsted 酸性离子液体的合成与表征[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(10): 2027 - 2031.
WU Qin, DONG Binqi, HAN Minghan, et al. The synthesis and characterization of new Brønsted acidic ionic liquids Brønsted [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 27(10): 2027 - 2031. (in Chinese)
- [9] 余秋雁, 张正富, 伍林. 量子化学方法在化学计算方面的应用[J]. 材料导报, 2009, 23(21): 21 - 23.
YU Qiuyan, ZHANG Zhengfu, WU Lin. Applications of calculation methods of quantum chemistry in field of chemistry calculation[J]. Materials Reviews, 2009, 23(21): 21 - 23. (in Chinese)
- [10] Talaty E R, Raja S, Storhaug V J, et al. Raman and infrared spectra and ab initio calculations of C_{2.4}MIM imidazolium hexafluorophosphate ionic liquids [J]. J Phys Chem B, 2004, 108(35): 13177 - 13184.
- [11] Meng Z, Dölle A, Carper W R. Gas phase model of an ionic liquid: semi-empirical and ab initio bonding and molecular structure[J]. Journal of Molecular Structure: THEOCHEM, 2002, 585(1/3): 119 - 128.
- [12] 严伟恒. 可支撑离子液体膜吸收 CO₂ 性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
YAN Weiheng. Performance study of CO₂ gas absorbability for supported ionic liquid membranes[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012. (in Chinese)
- [13] Berg R W, Deetlefs M, Seddon K R, et al. Raman and ab initio studies of simple and binary 1-Alkyl-3-methylimidazolium ionic liquid [J]. J Phys Chem B, 2005, 109(40): 19018 - 19025.
- [14] Ozawa R, Hayashi S, Saha S, et al. Rotational isomerism and structure of the 1-Butyl-3-methylimidazolium cation in the ionic liquid state[J]. Chem Lett, 2003, 32(10): 948 - 949.
- [15] Hamaguchi H, Ozawa R. Structure of ionic liquid and ionic liquid compounds: are ionic liquids genuine liquids in the conventional sense[J]. Adv Chem Phys, 2005, 131: 85 - 104.