

高红外发射率和高导电率聚苯胺薄膜的制备*

鞠洪岩^{1,2} 詹磊² 付大光² 李季² 王献红^{2**} 王佛松²

(¹ 中国科学院大学 北京 100039)

(² 中国科学院长春应用化学研究所 生态环境高分子材料重点实验室 长春 130022)

摘要 通过研究无机盐和麦芽糊精(maltodextrin)等助剂对电化学聚合的导电聚苯胺膜的红外发射率和电导率的影响,制备了同时具有高发射率和高电导率的聚苯胺膜.研究表明,采用合适的助剂可以调节聚苯胺膜的粗糙度,进而调节聚苯胺膜的发射率.以体积较小的无机盐(NaCl或LiCl)为助剂时,可在一定程度上增加膜的粗糙度,红外发射率则可增加0.16~0.26,而采用体积较大的有机分子如麦芽糊精为助剂时可大幅增加聚苯胺膜的粗糙度,红外发射率增加了0.53,达到0.84.探讨了采用麦芽糊精(maltodextrin)助剂合成的聚苯胺具有高发射率的原因,指出麦芽糊精中含有不同分子量和体积大分子,使聚苯胺的微孔具有分形结构,有利于吸收不同波长的红外辐射,进而提高了膜的发射率.同时研究了助剂对聚苯胺膜电导率的影响,指出采用麦芽糊精作为助剂时,聚苯胺膜同时具有高发射率($\epsilon = 0.84$)和高电导率($\sigma = 109 \text{ S/cm}$).

关键词 电化学聚合, 聚苯胺, 发射率, 电导率, 助剂

涂层材料的红外发射率是红外隐身、空间热控和节能等领域的重要技术指标^[1-9].在工业生产领域,为了降低的能量损耗,通常将需保温的部位内部涂一层高红外发射率涂层,涂层中的晶格振动及电子跃迁能够对辐射能的波段重新调整,增强热效应波段所占的比例,有利于被加热物的吸收,以达到节能目的.在航空航天领域,为了保证航天器内部设备在适当的温度下工作,需要将多余的热量以红外辐射形式快速高效地辐射出去,以降低基体温度,保证航天器的可靠性.在伪装领域,可以通过改变器件的红外发射率,达到热控和伪装的双重目的.目前高发射率材料通常局限于氢氧化物、过渡金属氧化物等材料,发射率最高可达到0.9左右^[10],但这些材料密度较大,且制备和加工较为困难,限制了其进一步应用.

聚苯胺(polyaniline, PANI)是一类典型的本征型导电高分子材料,由于其原料易得、合成工艺简单、密度低、易实现从绝缘到导电的互相转变以及优异的物理性能等优点获得广泛关注,其潜在的应用涉及二次电池^[11]、金属防腐^[12]、抗静电^[13]、电磁屏蔽^[14]、超级电容器^[15]和空间热控^[16]等多个热点领域.Chandrasekhar^[17]研究了聚苯胺/聚联苯二胺体系的红外发射率变化,研究表

明器件发射率可在0.32到0.79之间变化,当电压分别在 -1.0 V versus SCE和 $+0.8 \text{ V}$ versus SCE时,器件表现出红外透过的特性,而电压在 0 V versus SCE时器件又呈现出很好的红外吸收性质.Li^[18]等研究了硫酸掺杂聚苯胺的红外发射率变化,在红外波长从 $8 \mu\text{m}$ 到 $12 \mu\text{m}$ 时,发射率的变化为0.24,Jia^[19]等用电化学方法合成了苯胺和甲基苯胺的共聚物,并且制作成了变色器件,该变色器件在 1.0 V versus SCE电压下可以达到0.6的发射率,但在 0 V versus SCE电压下发射率则下降为0.21,表现出低发射率特征.

在透过率不变的前提下,根据基尔霍夫定律,材料的红外反射率越高,其红外吸收率越低,所以红外发射率也越低.材料的电导率越高,红外反射率越高,因此高电导率材料通常具有较低的红外发射率,因此很难制备同时具备高发射率和高导电率的材料.另一方面,考虑到材料的红外发射率还与材料表面形态有关,表面越粗糙,吸收率越大,红外发射率也越大,反之亦然.因此对于高电导率材料而言,有可能通过增加膜的粗糙度,增强对光的吸收能力,来获得较高的红外发射率.在导电聚苯胺的研究中,目前几乎都是通过调节电导率来实现红外发射率的变化^[17-19],很少有人通过

* 2013-11-08 收稿,2013-12-03 修稿;国家自然科学基金(基金号 51021003)资助项目.

** 通讯联系人,E-mail:xhwang@ciac.ac.cn

调节表面粗糙程度的方法来控制其红外发射率. 一般而言,通过电化学聚合制备的膜的表面比较平整,呈现低红外发射率特征,在本研究中,通过加入无机盐或有机化合物助剂的方法,控制电化学聚合过程中膜的生长过程,制备具有特殊表面结构的聚苯胺膜,实现对聚苯胺膜的红外发射率控制.

1 实验部分

1.1 主要试剂和仪器

试剂采用苯胺、氯化钠、邻苯二酚、氯化钾、氯化锂和盐酸,均为分析纯,购自北京化工厂;樟脑磺酸(CSA)、麦芽糊精和聚丙烯酸(PAA),均购自Acros. 金电极购于上海辰华,纯度为99.99%.

仪器采用Solartron 1287进行循环伏安电化学聚合;采用场致发射扫描电镜(Philips XL30ESEM-FEG)分析薄膜的微观形貌;采用源表(Keithley 2400)和纳伏表(Keithley 2182)测薄膜电阻,采用美国D&P公司Model102F傅立叶变化红外分析仪测量8~12 μm 范围内薄膜发射率.

薄膜厚度及平均粗糙度由台阶仪(Veeco Dektak 150)测定.

1.2 实验过程

本实验采用三电极系统,以饱和甘汞电极(SCE)作为参比电极,工作电极和对电极都采用金电极,采用循环伏安法在含0.2 mol/L苯胺和0.5 mol/L的樟脑磺酸水溶液中进行电化学聚合,扫描电压范围为-0.2~0.9 V versus SCE,扫描速度为50 mV/s,扫描50圈.

分别在上述电化学聚合溶液中加入一定浓度的氯化钠、氯化锂、邻苯二酚、麦芽糊精作为助剂. 采用上述循环伏安法聚合获得不同表面形态和电导率的樟脑磺酸掺杂的聚苯胺膜,去离子水清洗薄膜后,薄膜在常温下真空干燥至恒重.

1.3 测试与表征

采用傅立叶变换红外分析仪测量发射率,使用四探针法测量电导率,其中膜厚度及平均粗糙度使用台阶仪进行测量. 采用场发射扫描电镜观察微观形貌.

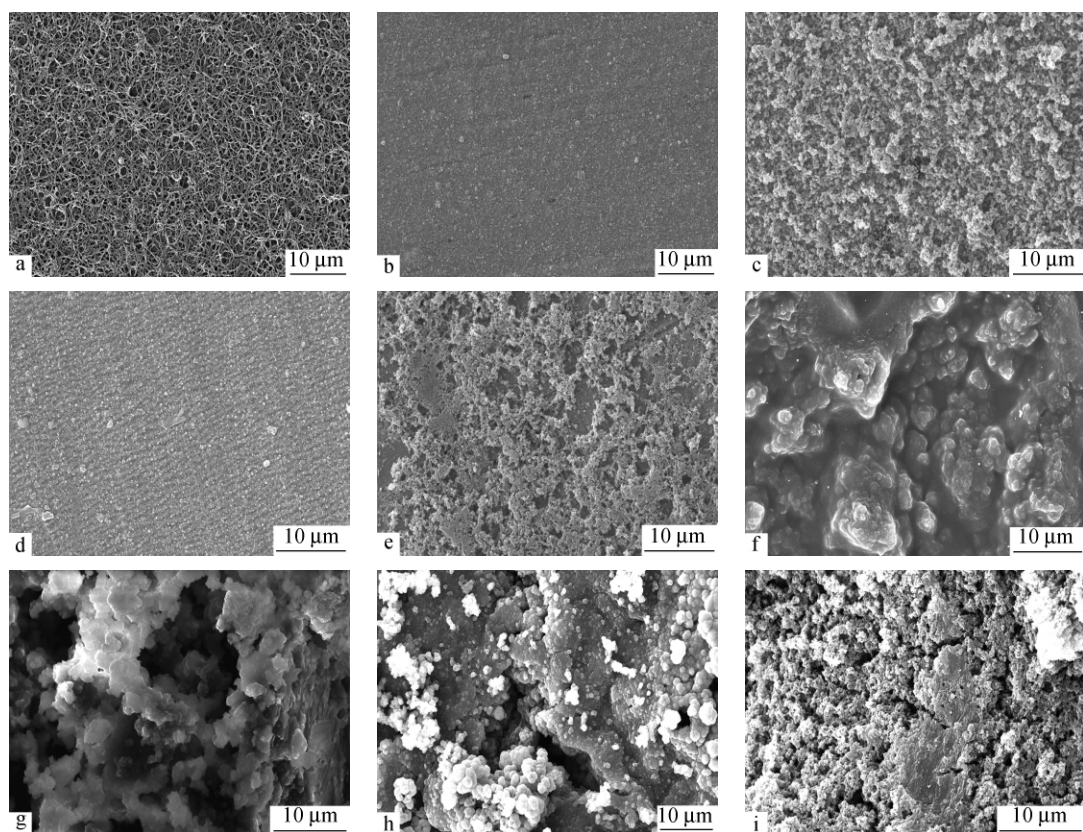


Fig. 1 SEM images of CSA-doped polyaniline films electropolymerized under different additives and concentrations: (a) without any additives, (b) 0.25 mol/L NaCl, (c) 1 mol/L NaCl, (d) 0.25 mol/L LiCl, (e) 1.0 mol/L LiCl, (f) 1.0 mol/L 1,2-Benzenediol, (g) 5.0 mol/L 1,2-benzenediol, (h) 0.25 mol/L maltodextrin and (i) 1.0 mol/L maltodextrin

2 结果与讨论

2.1 助剂对电化学聚合的聚苯胺膜微观形貌的影响

不同种类和不同浓度助剂下所得聚苯胺膜的场致发射扫描电镜图像 (SEM) 如图 1 所示. 当没有任何助剂时 (图 1(a)), 聚苯胺膜表面为纤维网络结构, 表面较为平整, 当加入助剂后, 聚苯胺膜表面变得粗糙. 对同一种助剂, 随着助剂浓度的增加, 表面粗糙度增加, NaCl (图 1(b), 1(c)) 和 LiCl (图 1(d), 1(e)) 均表现出相似的粗糙度变化. 加入尺寸较大的邻苯二酚时, 所得聚苯胺薄膜的粗糙度变化与以 NaCl 或 LiCl 为助剂时差别很大, 膜的表面形态变化十分显著, 增加邻苯二酚浓度导致聚苯胺膜由平整到粗糙甚至碎裂 (图 1(f), 1(g)). 而采用麦芽糊精为助剂时 (图 1(h), 1(i)), 随浓度的增加薄膜表面形成复杂的多孔结构. 因此, 由于电化学聚合过程所加助剂的不同, 可以控制聚苯胺膜表面的粗糙度. 表面粗糙度的顺序按以下顺序增加: NaCl $\approx$ LiCl < 麦芽糊精

< 邻苯二酚. 因此, 在电化学聚合过程中添加助剂可以获得不同粗糙度的聚苯胺膜.

2.2 不同助剂对电化学聚合的聚苯胺膜发射率的影响

研究了不同助剂下所得聚苯胺膜的红外发射率 (红外波长 8 ~ 12 μm), 如图 2 所示, 随着助剂浓度的增大, 聚苯胺膜红外发射率呈现上升趋势, 当助剂浓度增加到一定值时, 红外发射率趋于稳定, 不再随浓度的增加而变化. 我们将不同助剂和浓度下所合成的聚苯胺膜的红外发射率取平均值, 获得了不同助剂和浓度对红外发射率和电导率的影响情况. 如图 3 所示. 在不添加任何助剂的情况下, 通过循环伏安法制得樟脑磺酸 (CSA) 掺杂的聚苯胺薄膜, 其红外发射率通常在 0.31 左右. 加入 NaCl 可以增大聚苯胺膜的红外发射率 (见图 3(a)), 当 NaCl 浓度达到 1 mol/L 时, 聚苯胺膜的红外发射率可以达到 0.57, 红外发射率增加了 0.26. 但是进一步提高 NaCl 浓度到 2 mol/L, 聚苯胺膜的红外发射率没有明显提高. 采用 LiCl 助剂得到的聚苯胺膜发射率比较低, 当 LiCl

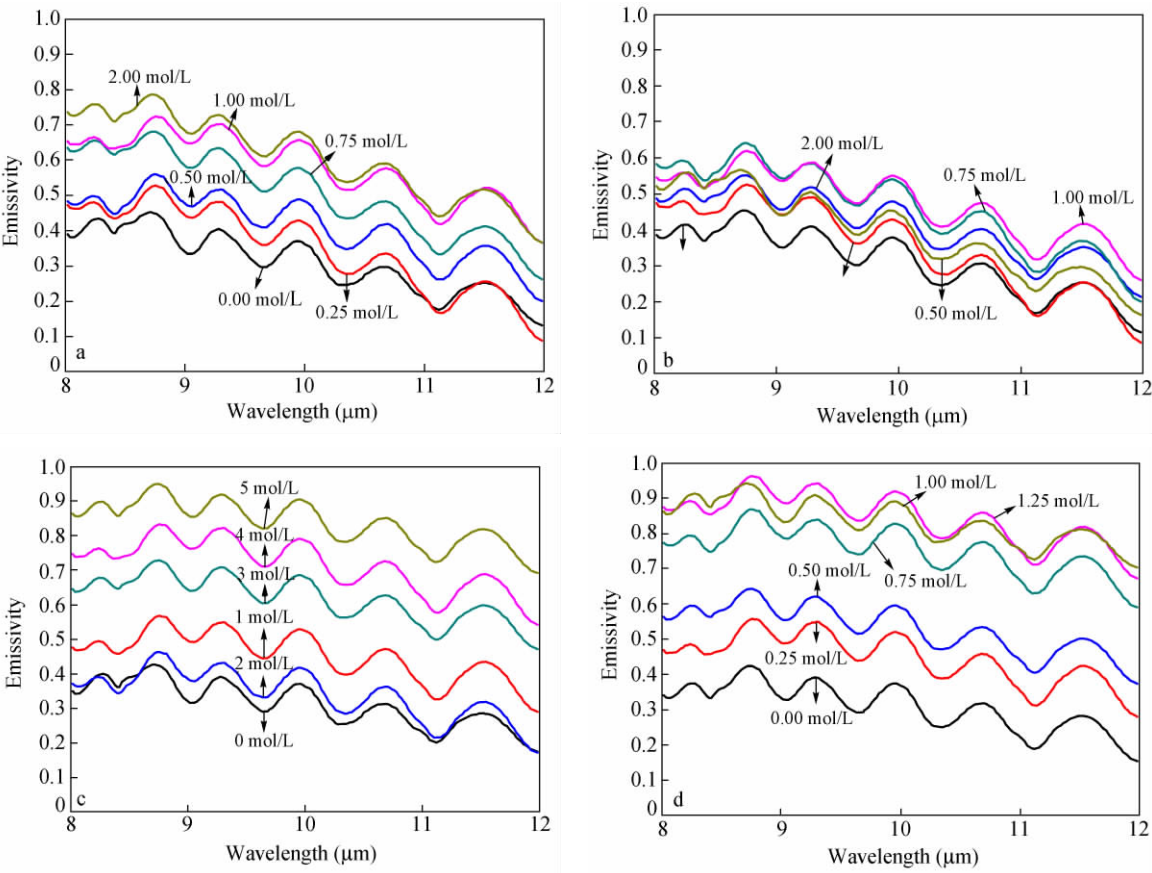


Fig. 2 Influences of additives and their concentrations on the infrared emissivities (8 ~ 12 μm) of polyaniline films: (a) NaCl, (b) LiCl, (c) 1,2-benzenediol and (d) maltodextrin

浓度达到 0.8 mol/L 时(图 3(b)),聚苯胺膜的红外发射率可以达到 0.47,发射率只增加了 0.16,随后即使浓度提高到 2 mol/L,聚苯胺膜的红外发射率也没有明显提高.

当采用邻苯二酚为助剂时(图 3(c)),可以获得高红外发射率的聚苯胺薄膜,且薄膜的红外发射率随着邻苯二酚浓度的增大而一直增大,当浓度为 5 mol/L 时,红外发射率达到 0.84,红外发

射率提高了 0.53.而使用麦芽糊精为助剂时(图 3(d)),即使在较低的麦芽糊精的浓度时也可得到较高红外发射率的聚苯胺膜.如当麦芽糊精的浓度仅为 1 mol/L 时,聚苯胺膜的红外发射率就可达到 0.84,红外发射率变化 0.53,而继续增加助剂浓度,红外发射率也没有明显变化.因此,相对于邻苯二酚,麦芽糊精对聚苯胺膜的红外发射率的调控更为有效.

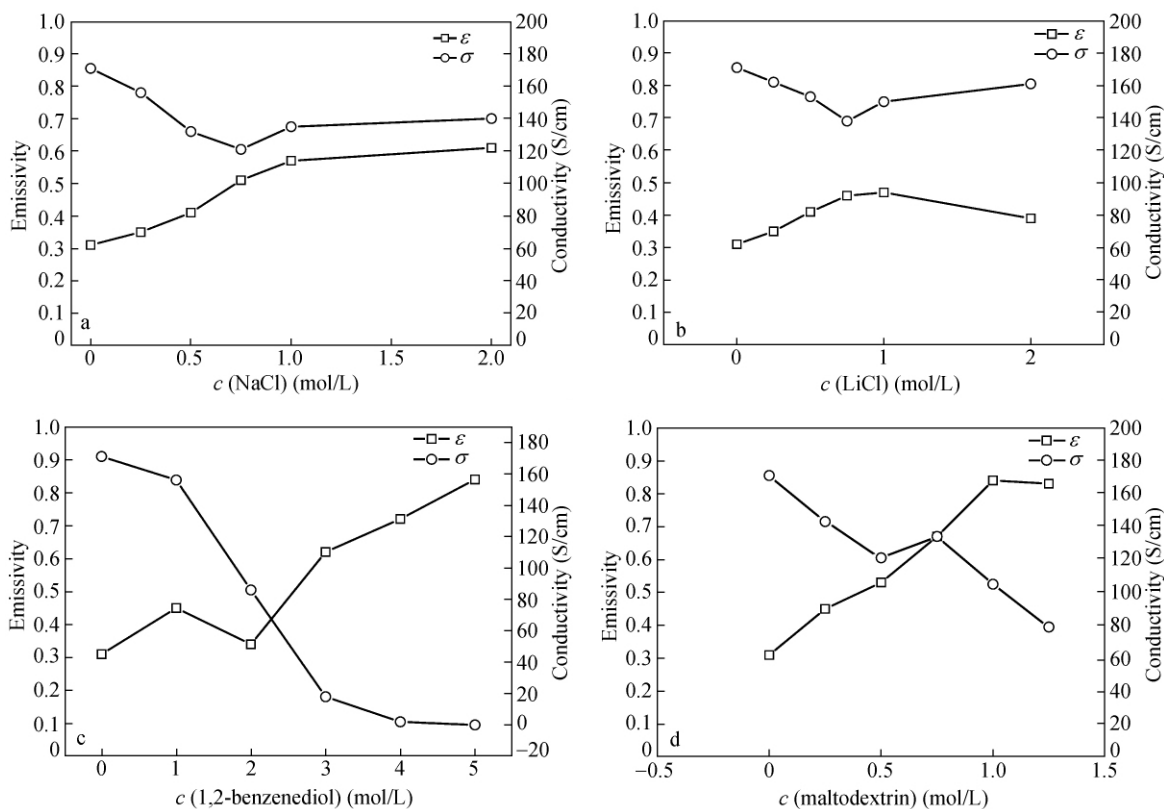


Fig. 3 Influences of additives and their concentrations on the infrared emissivities and conductivities of polyaniline films: (a) NaCl, (b) LiCl, (c) 1,2-benzenediol and (d) maltodextrin
 ε is emissivity, and σ is conductivity.

从图 4 可以看出,随着助剂浓度的增加,聚苯胺膜的粗糙度逐渐增加,不同助剂对粗糙度的影响程度不同,伴随粗糙度的增加,聚苯胺膜发射率增加.因此粗糙度对聚苯胺膜的发射率有着一定的影响.

苯胺的电化学聚合过程首先是苯胺单体在阳极被氧化成阳离子自由基,溶液中的对阴离子起着稳定阳离子自由基的作用,阳离子自由基形成二聚体后,二聚体或新的单体氧化生成的阳离子自由基再形成分子量更大的低聚体.类似的过程使聚苯胺分子链不断增长,最终沉积在基体电极上^[20].在电化学聚合的溶液中添加不同尺寸的无

机或有机助剂后,随着电化学聚合的进行,粒子被包覆在聚苯胺膜内部,粒子的尺寸效应导致聚苯胺膜表现出不同的粗糙度.

NaCl 和 LiCl 做为助剂具有相似的作用,在聚苯胺聚合过程中,NaCl 和 LiCl 不可避免地被聚苯胺纤维缠绕包覆而留在了聚苯胺膜中,通过洗涤后得到多孔的聚苯胺膜.但是 NaCl 和 LiCl 具有相近的粒子尺寸,而且尺寸直径较小,膜的表面虽然有很多突起,但整体仍然比较平整,因此膜的红外发射率较低(图 3(a),3(b),图 1(b),1(c),1(d),1(e),图 4(a),4(b)).当采用邻苯二酚为助剂时(图 1(f),1(g)),邻苯二酚由于更大的尺

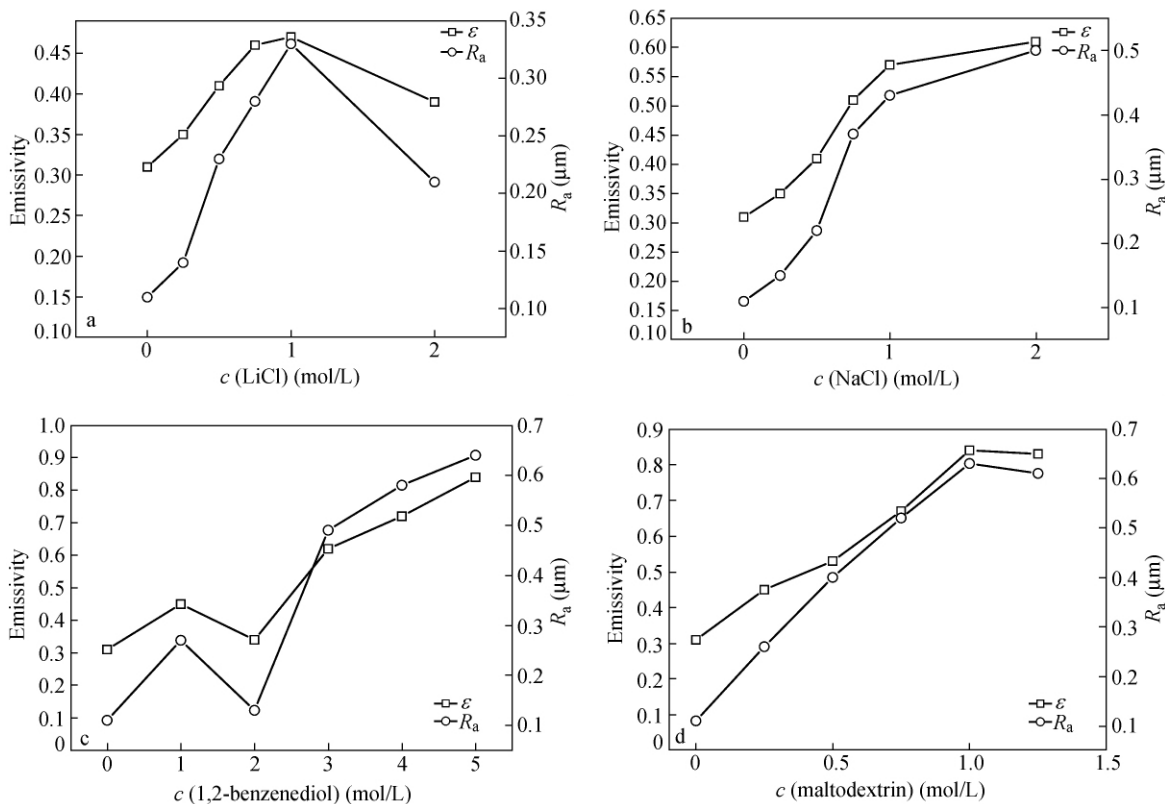


Fig. 4 Influences of additives and their concentrations on the infrared emissivities and average roughness of polyaniline films: (a) LiCl, (b) NaCl, (c) 1,2-benzenediol and (d) maltodextrin
Where ϵ is emissivity, and R_a is average roughness.

寸效应导致聚苯胺膜形成更加粗糙的表面(图4(c)),因此表现出高红外发射率(0.84)。

麦芽糊精作为助剂时,所得的聚苯胺膜的表面起伏远大于 NaCl 助剂下所得的聚苯胺膜表面起伏(图1,图4(d)),因此具有高红外发射率(0.84)。不同于只有单一离子体积的 NaCl 或 LiCl 体系,麦芽糊精中存在不同分子量的大分子成分,具有不同的体积,一方面可以有效的吸附、聚集在电极表面,同时又能够使部分电极裸露,使得在电极表面形成不规则的电活性中心。而且这种作用在电化学聚合过程中也一直存在,促使聚苯胺膜形成了特殊的微观形貌。这种微观形貌同 NaCl、邻苯二酚等做助剂合成的聚苯胺膜表面差异明显。使用麦芽糊精做助剂合成的聚苯胺膜表面在较低的放大倍数下(1000 倍以下),可以观察到一些 20 μm 尺寸的如“丘陵”般的凸起斑块,这些斑块又可以组成更大一些的凸起斑块,最大的可以达到 100 μm 宽的“山脊”斑块形态(图5(a))。在较高的放大倍数下(2000 ~ 30000 倍),表面显现的是深入膜内部的粗糙“洞穴”(图5(d)),洞内

壁的结构仍然是突兀的粗糙墙体。这种特殊结构使得红外光不但能够很好地被“丘陵”和“山脊”散射,而且还能在膜内部的粗糙“洞穴”内产生多次反射,从而形成更好的吸收效果,使得材料显现出高红外发射率的特征。在这种特殊的形貌中,形成的斑块尺度大小不一,较小的凸起斑块生长在较大的丘陵上,较大的丘陵则生长在更大的山脊上。这种具有特殊的复杂微观形貌的结构,能够更好地吸收不同波长的红外辐射,从而形成高发射率的聚苯胺膜。

2.3 不同助剂下的聚苯胺膜电导率的变化

从图3中还可以看到,不添加任何助剂时,聚苯胺膜的电导率较高,达到 171 S/cm。随着助剂浓度的增加,聚苯胺膜的电导率逐渐下降。不同的助剂下电导率下降的程度各不相同,对 NaCl 而言(图3(a)),当 NaCl 浓度达到 0.8 mol/L 时,膜的电导率为 117 S/cm,NaCl 浓度继续增加,电导率变化不明显。当采用 LiCl 为助剂时(图3(b)),LiCl 含量对电导率的影响与 NaCl 相似,在 LiCl 浓度达到 0.8 mol/L 时,膜的电导率降低到 140

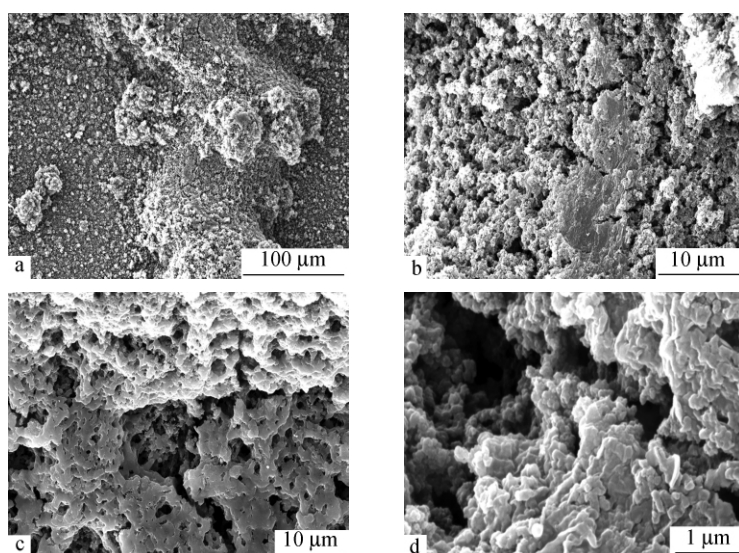


Fig. 5 SEM images of CSA-doped polyaniline films in 1 mol/L maltodextrin electrolyte with different magnifications

S/cm, LiCl 浓度继续增加, 电导率的变化不明显. 当采用邻苯二酚为助剂时(图 3(c)), 薄膜的电导率随邻苯二酚浓度的增加而迅速下降, 当邻苯二酚的浓度超过 3 mol/L 时, 膜的电导率已经低于 10 S/cm. 但是使用麦芽糊精为助剂时(图 3(d)), 当浓度增加到 0.5 mol/L 时, 聚苯胺膜仍然具有 105 S/cm 的较高电导率, 浓度增加到 0.8 mol/L 时, 下降到 79 S/cm.

采用 NaCl 和 LiCl 做为助剂, 由于 NaCl 和 LiCl 在水溶液中不会吸附在电极表面, 所以对电化学聚合过程影响较小, 电导率下降不明显, 仅仅下降 40 ~ 50 S/cm. 而邻苯二酚和麦芽糊精会吸附在电极表面, 影响电化学聚合过程. 尤其是邻苯二酚, 还可以在电极表面被氧化成醌式结构而大大降低阳离子自由基的效率, 导致电导率大幅下降, 直至失去导电性. 麦芽糊精是一系列多糖和低聚糖的混合物, 其具有较大的分子体积, 只吸附在电极表面, 不直接影响阳离子自由基的生成, 因此对电导率的影响比 NaCl 大, 比邻苯二酚小. 在具有相同的高发射率时, 如发射率同为 0.84, 麦芽

糊精为助剂时膜的电导率较高, 达 105 S/cm; 而邻苯二酚为助剂时膜电导率最低, 下降到 10 S/cm; NaCl 为助剂时膜电导率最高, 为 140 S/cm.

2.4 高电导率和高发射率聚苯胺膜的制备

虽然采用麦芽糊精为助剂可以制得导电性能优良的高红外发射率聚苯胺膜. 但是由于膜在生成过程中包覆了不同尺寸的分子, 导致电极上生成的聚合物膜容易脱落、开裂, 甚至碎裂成屑(图 6(a)). 在麦芽糊精聚合溶液中加入少量聚丙烯酸可以有效解决碎裂问题, 如在 1 mol/L 的麦芽糊精聚合溶液中加入 0.3×10^{-3} mol/L 的聚丙烯酸, 可制备表观连续的聚苯胺膜(图 6(b)), 同时我们发现随着聚丙烯酸含量的增加, 聚苯胺膜仍然表现出高红外发射率的特性, 不过聚苯胺膜的导电性略有降低(图 7), 原因在于聚丙烯酸也是聚苯胺的掺杂剂, 同樟脑磺酸存在竞争关系. 但在 1 mol/L 麦芽糊精和 0.3×10^{-3} mol/L 聚丙烯酸的电解质溶液中, 采用循环伏安法可以制备表观连续的聚苯胺膜, 红外发射率为 0.84, 电导率高达 109 S/cm.

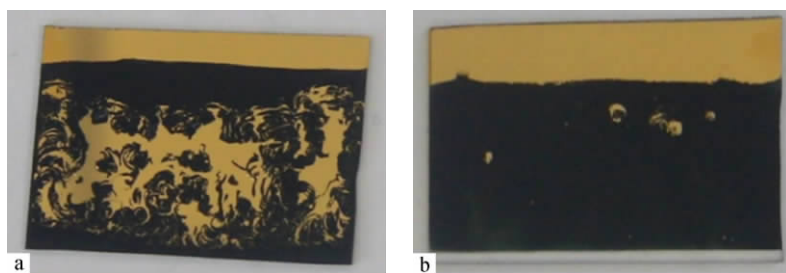


Fig. 6 Photos of CSA-doped polyaniline films in 1 mol/L maltodextrin electrolyte: (a) maltodextrin and (b) 1 mol/L maltodextrin/ 0.3×10^{-3} mol/L polyacrylic acid

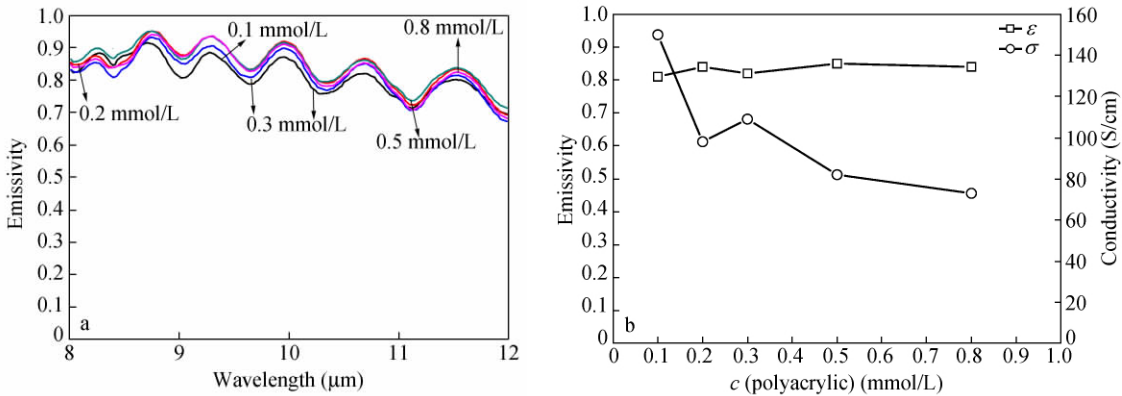


Fig. 7 The effect of polyacrylic acid (PAA) on the emissivity and conductivity of PANI films electropolymerized in 1 mol/L maltodextrin: (a) emissance spectra and (b) PAA concentration dependence of conductivity and emissivity

Where ϵ is emissivity; and σ is conductivity.

3 结论

通过添加不同种类和浓度的助剂,可以有效地控制电化学聚合的聚苯胺的表面形貌,从而制备出不同发射率的樟脑磺酸掺杂的聚苯胺膜。邻苯二酚或麦芽糊精是有效提高发射率的助剂,当邻苯二酚浓度为 5 mol/L,或者麦芽糊精浓度为 1.0 mol/L 时,平均红外发射率可到达 0.84。添加麦芽糊精还可以在保证聚苯胺膜的高红外发射率的同时保证高电导率,1 mol/L 麦芽糊精和 0.3 ×

10⁻³ mol/L 聚丙烯酸的电解质溶液中,采用循环伏安法可以制备表面连续的聚苯胺膜,红外发射率为 0.84,电导率高达 109 S/cm。这种聚苯胺膜具有特殊的微观形貌,表面呈现出布满深入膜体内部的粗糙“洞穴”的结构,同时这些“洞穴”生长在更大尺寸的“丘陵”和“山脊”上,形成一种特殊的复杂结构,这种特殊的表面形态使得聚苯胺膜即使在高电导率的条件下也能够具有高发射率的性质。

REFERENCES

1 Jian Y, He X D, Sun Y, Yao L. Appl Surf Sci, 2007, 253: 4361 ~ 4366

2 He X D, Li Y B, Wang L D, Sun Y, Zhang S. Thin Solid Films, 2009, 517: 5120 ~ 5129

3 Wang Z W, Wang Y M, Liu Y, Xu J L, Guo L X, Zhou Y, Ouyang J H, Dai J M. Curr Appl Phys, 2011, 11: 1405 ~ 1409

4 Zhao X, He X D, Sun Y, Wang L D. Mater Lett, 2011, 65: 2592 ~ 2594

5 Huang Z B, Zhou W C, Tang X F, Zhu D M, Luo F. Thin Solid Films, 2011, 519: 3100 ~ 3106

6 Cockeram B V, Measures D P, Mueller A J. Thin Solid Films, 1999, 17: 355 ~ 356

7 Geraldine J H, Nozawa M. Chem Eng Sci, 2004, 59: 5657 ~ 5662

8 Staggs J E J, Phylaktou H N. Fire Saf J, 2008, 43: 1 ~ 10

9 Zhang Z T, Gao Y F, Luo H J, Kang L T, Chen Z, Du J, Kanehira M, Zhang Y Z, Wang Z L. Energy Environ Sci, 2011, 4: 4290 ~ 4297

10 Lu Chenyu (刘晨宇), Xu Yongjun (徐用军), Jiang Zhaohua (姜兆华), Zhang Zhenwen (张振文), Wang Zhijiang (王志江). Energy Conservation Technology (节能技术), 2013, (4): 307 ~ 309

11 Lu Qi (路崎), Zhao Qiang (赵强), Zhang Hongming (张红明), Li Ji (李季), Wang Xianhong (王献红), Wang Fosong (王佛松). Acta Polymerica Sinica (高分子学报), 2013, (8): 1080 ~ 1084

12 Lu J L, Liu N J, Jing X B, Wang F S. Synth Met, 2003, 135(1-3): 237 ~ 238

13 Kaiser A B, Subramaniam C K, Gilbert P W, Wessling B. Synth Met, 1995, 69: 197 ~ 200

14 Trivedi D C, Dhawan S K. Synth Met, 1993, 59: 267 ~ 272

15 Zhang Hongming (张红明), Chen Yu (陈宇), Wang Xianhong (王献红), Li Ji (李季), Wang Fosong (王佛松). Acta Polymerica Sinica (高分子学报), 2012, (5): 498 ~ 502

16 Wu S, Jia C Y, Fu X Q, Weng X L, Zhang J Q, Deng L J. Electrochimica Acta, 2013, 88: 322 ~ 329

17 Chandrasekhara P, Zaya B J, McQueeney T, Birurb G C, Sitaram V, Menon R, CovielloPhysical M. Synthetic Metals, 2005, 3(155): 623 -

- 18 Li H, Xie K, Pan Y, Yao M, Xin C. *Synthetic Metals*, 2009, 159: 1386 ~ 1388
- 19 Wu S L, Jia C Y, Fu X Q, Weng X L, Zhang J Q, Deng L J. *Electrochimica Acta*, 2013, 88: 322 ~ 329
- 20 Genies E M, Syed A A, Tsintavis C. *Mol Cryst Liq Cryst*, 1985, 121: 181 ~ 186

Preparation of Polyaniline Films with High Infrared Emissivity and High Electrical Conductivity

Hong-yan Ju^{1, 2}, Lei Zhan², Da-guang Fu², Ji Li², Xian-hong Wang^{2*}, Fo-song Wang²

(¹ *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*)

(² *Key Laboratory of Polymer Ecomaterials, Changchun Institute of Applied Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022*)

Abstract High-infrared emissivity and high-electrical conductivity polyaniline (PANI) films were prepared by electrochemical deposition of aniline in aqueous solution of camphorsulfonated acid (CSA) in the presence of additives such as the inorganic salt or maltodextrin, *etc.* The roughness and emissivity of PANI films can be adjusted by addition of a suitable additive. When small size inorganic salts like NaCl or LiCl were used as additives, the roughness of PANI films was enhanced accompanied with 0.16 ~ 0.26 increase in infrared emissivity. Large size organic molecules such as maltodextrin can significantly enhance the roughness of PANI films, and infrared emissivity can reach 0.84 with an increment of 0.53. The increasing emissivity of PANI films may be attributed to the particular surface morphology, where deep-cave structure exists, accompanied by hill-like and ridge-like patterns. The particular surface morphology of PANI films formed by the maltodextrin molecules with different molecular weight and size was beneficial for the absorption of infrared radiation with different wavelengths, and thereby the emissivity of films increased. Considering that high concentrations of maltodextrin may destroy the intactness of films rendering films fracture and low electrical conductivity, polyacrylic acid was chosen as the second additive. In an electrolyte consisting of 1 mol/L maltodextrin and 0.3×10^{-3} mol/L polyacrylic acid, intact PANI film with emissivity of 0.84 and conductivity of up to 109 S/cm can be prepared.

Keywords Electrochemical polymerization, Polyaniline, Emissivity, Conductivity, Additive

* Corresponding author; Xian-hong Wang, E-mail: xhwang@ciac.ac.cn