

聚苯胺复合薄膜的电磁屏蔽及吸波性能

张银玲, 黄英, 吴海伟

(西北工业大学应用化学系, 陕西 西安 710129)

摘要: 电磁屏蔽和吸波是导电高聚物的重要应用领域之一。本文总结了目前聚苯胺复合薄膜的基本制备方法, 如原位聚合法、共混法、层层自组合法, 介绍了表征聚苯胺复合薄膜电磁屏蔽效能和吸波性能的方法, 阐述了其在上述领域中的应用, 指出了聚苯胺复合薄膜未来需要研究与解决的问题。

关键词: 聚苯胺; 复合薄膜; 电磁屏蔽; 吸波

中图分类号: TQ317 文献标识码: A

聚苯胺(PANI)是一类特种功能材料, 俗称导电塑料, 它具有塑料的密度, 又具有金属的导电性和塑料的可加工性, 还具备金属和塑料所欠缺的化学和电化学性能而成为导电高聚物领域的研究热点^[1]。由于聚苯胺粉体难溶难熔, 不易加工, 因此, 研究者开始关注聚苯胺薄膜。制备聚苯胺薄膜有许多方法, 如蘸涂法、滴涂法、旋涂法、氧化还原电化学沉积法、电化学聚合法、等离子体聚合法、辐射聚合法、自组合法^[2, 3]等。

电磁波的吸收和干扰屏蔽一直以来是商业和军事领域非常重要的话题^[4]。由于电子装置的敏感性和密集的便携系统的存在, 电磁干扰(EMI)的屏蔽问题在电子和军事通信领域凸显, 因此对EMI屏蔽的研究在近年来受到越来越多的关注。另一方面, 隐身技术是电磁波吸收技术领域中最典型的一种应用。通过降低飞机或军舰的可探测性—其中降低其雷达散射截面(RCS)就是一种方法, 它们可以躲避雷达的探测, 这不仅影响到任务的成功率, 而且决定了其在敌方领域的生还率。实际上, 隐身技术可分为两种, 一种是优化外型结构使入射电磁波被分散从而使反射波量最小, 另一种是采用电磁波吸收材料和/或结构^[5]。采用电磁波吸收材料和/或结构是比较传统的方法^[6], 研究一直很活跃。聚苯胺复合薄膜作为一种新型EMI屏蔽和微波吸收材

料, 有很大应用潜力^[7]。

1 聚苯胺复合薄膜的制备方法

PANI可与高聚物、金属、无机物等材料复合成膜, 复合薄膜的制备方法主要有原位聚合法、共混法、层层自组合法等。

1.1 原位聚合法

苯胺在化学氧化聚合过程中, 可自发地聚合沉积在不同基体或物质表面, 形成聚苯胺薄膜^[8], 这就是原位聚合法。原位聚合法最先用于在某种基体表面制备透明导电聚苯胺薄膜, 如今也常用于制备聚苯胺复合薄膜。李侃社等^[9]根据石墨的层状结构, 以可膨胀石墨为模板原位聚合制备了PANI/石墨导电复合材料, 结果表明其电导率与单一组分相比有大幅度提高。吴其晔等^[10]采用两步法原位聚合包覆技术首先在反相乳液中制备了FeCoNi金属微粒(粒径为30-40 nm), 然后原位氧化聚合PANI, 制备出了粒径为50-80 nm的FeCoNi/PANI纳米复合微球, 制成屏蔽涂料效果极佳。Khanna P K等^[11]制备的PANI/Ag纳米粒子复合物电导率高达30-50 S/cm, 为PANI电磁屏蔽复合材料的发展打下了基础。董星龙等^[12]制备了核壳结构的纳米镍/PANI复合粒子, 电导率较高, 有望获得性能优良

收稿日期: 2011-05-30

基金项目: 航天科技创新基金(N9XT0001)和西北工业大学2011年度研究生创业种子基金(Z2011021)资助项目。

作者简介: 张银玲, 女, 1987年生, 硕士研究生, E-mail: zhangyinling1987@hotmail.com。

通讯作者: 黄英, 女, 教授, 博导, 主要从事功能材料的研究。E-mail: yingh@nwpu.edu.cn。

的微波吸收剂。

1.2 共混法

共混法也是较常用的制备聚苯胺复合薄膜的方法。赵立群^[13]采用溶液共混与浇铸法制备 PANI/顺丁橡胶复合导电膜,其最高电导率为 5.04 S/cm,在低频范围内具有一定屏蔽效果。袁丰肖等^[14]用共混法制得 PANI/Ni 电磁屏蔽涂料,将高分子材料与金属粉末作为复合导电填料应用于涂料,在 30–1 000 MHz 内屏蔽效能达 60 dB。Lakshmi K 等^[15]以共混法制备的 PANI/PU (聚氨酯) 复合材料在 S 波段和 X 波段都有良好的吸收性能,材料较厚时屏蔽效能达到 20 dB。Sudha J D 等^[16]以纳米 PANI、PANI 粘土纳米复合材料和乙烯醋酸乙烯酯 (EVA) 共混复合得导

电薄膜,其导电性好,热稳定性优良,在 8 GHz 时具有 40–80 dB 的屏蔽效能,是很有前景的电子器件封装屏蔽材料。

1.3 层层自组装法

层层自组装法是一种很有前景的制备超薄膜的方法,近年来发展迅速。与 LB 膜技术相比,自组装法具有以下优点:(1) 基片不受限制,选择更多;(2) 沉积时间与基片面积相互独立,互不干扰;(3) 设备简单,可在实验室操作。Li D^[17]等人用自组装法制备了 PANI/聚丙烯酸 (PAA) 复合薄膜,得到了 PANI 取向排列、电导率很高的纳米级超薄膜。图 1 展示了 PANI/PAA 复合薄膜层层自组装示意图。

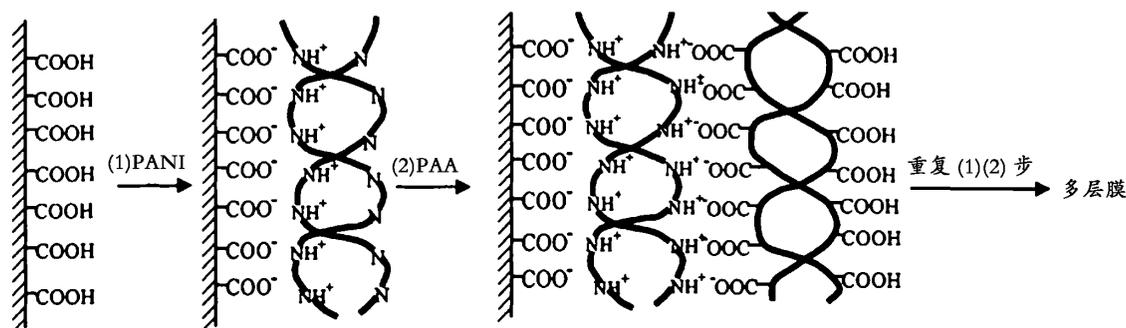


图 1 PANI/PAA 复合薄膜层层自组装示意图

除上述三种常用方法外,还有其他方法可以制得聚苯胺复合薄膜,如 Nastase C 等^[18]用等离子体聚合技术把纳米碳嵌入到 PANI 薄膜中,这种复合材料表现出良好的功能梯度性能、电磁屏蔽等特性。Im Ji Sun 等^[19]在聚苯胺基体纤维上通过电纺技术得到多壁碳纳米管,电导率达到 4.8×10^3 S/cm,电磁屏蔽效能达到 42 dB。Ahmed F 等^[20]用溶液浇铸法在玻璃基片上制得了 PANI/ZnO 复合薄膜,且 ZnO 在 PANI 薄膜基体中分散均匀。

2 聚苯胺复合薄膜的性能表征

对于聚苯胺复合薄膜的性能,研究者可根据需要选择性的表征。He Z F 等人^[21]用 PANI/CIP (羰基铁粉) 复合物和 PANI/Fe₃O₄ 复合物机械共混得到了 PANI/CIP/Fe₃O₄ 复合物,并做了

扫描电镜 (SEM)、X 射线衍射 (XRD)、傅里叶变换红外 (FT-IR) 光谱、振动样品磁强计 (VSM)、矢量网络分析仪 (VNA) 等分析,还用四探针法测定了三种样品的电导率。

图 2 为三种样品的 SEM 照片。从图 2 中可以看出,PANI/CIP 复合物呈球状结构,且表面粗糙,表明其为核壳结构。PANI/Fe₃O₄ 复合物成团聚的片状结构,夹杂着少许棒状颗粒。

图 3 为三种复合物在室温下从 -12 kOe 到 12 kOe 的磁滞回线。从图 3 中可以看出,三种复合物都表现出了很好的软磁性质。从插图中可以看出,PANI/CIP, PANI/Fe₃O₄ 和 PANI/CIP/Fe₃O₄ 复合物的剩余磁化强度分别为 0.74 emu/g、0.15 emu/g 和 0.50 emu/g; 饱和磁化强度分别为 172.0 emu/g、10.0 emu/g 和 123.0 emu/g; 矫顽力分别为 17.3 Oe、10.0 Oe 和 17.9 Oe。

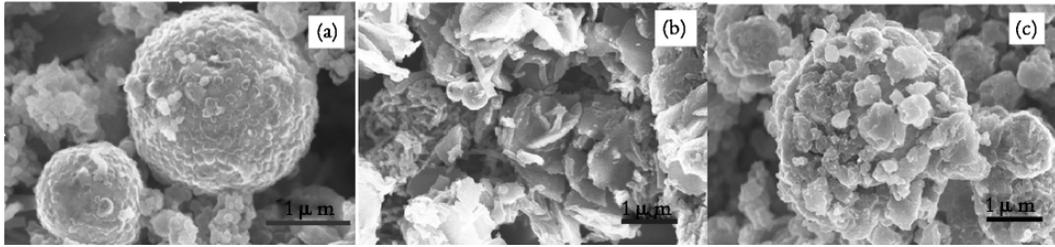


图2 (a) PANI/CIP (b) PANI/Fe₃O₄ (c) PANI/CIP/Fe₃O₄ 的SEM照片

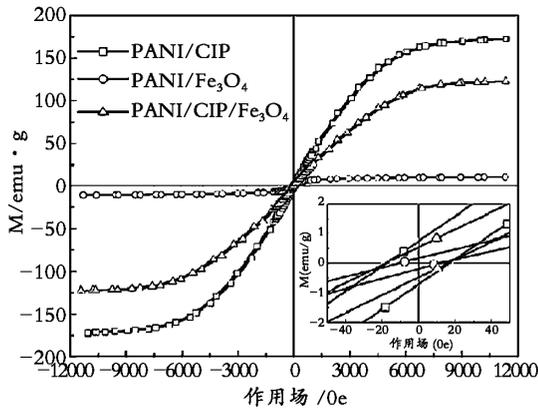


图3 室温下 PANI/CIP PANI/Fe₃O₄ 和 PANI/CIP/Fe₃O₄ 复合物的磁滞回线, 右下角插图为局部放大图

三种样品的反射损耗曲线见图4。从图4中可以看出, 随着复合膜厚度的增加, 反射损耗峰大致向低频方向移动。PANI/CIP 复合物的反射损耗相对较弱, 在 0.5 - 18 GHz 范围内均大于 -10 dB。对于 PANI/Fe₃O₄ 复合物, 微波吸收增强了, 反射损耗均小于 -10 dB, 且在 15.8 GHz 处、膜厚为 1.5 mm 时可达到最小值 -22 dB。对于 PANI/CIP/Fe₃O₄ 复合物, 反射损耗进一步增强了, 在 9.6 GHz 处、膜厚为 1.76 mm 时可达到 -48.3 dB。显然, PANI/CIP/Fe₃O₄ 复合物比其他两种复合物微波吸收更强。

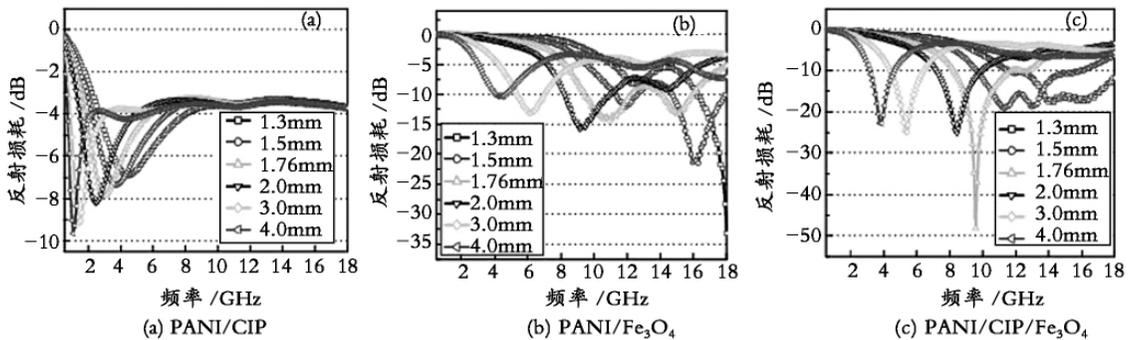


图4 厚度为 1.3 - 4.0 mm 的复合物在 0.5 - 18 GHz 频率范围内的反射损耗曲线

图5为三种样品的介电损耗因子、磁损耗因子和衰减常数随频率的变化曲线。从图5中可以看出, PANI/Fe₃O₄ 复合物的介电损耗最强, 而磁损耗几乎为 0; 相反, PANI/CIP 复合物的磁损耗最强, 但介电损耗相对较弱。而对于 PANI/CIP/Fe₃O₄ 复合物, 磁损耗介于两者之间, 电损耗却是最弱的, 似乎 PANI/CIP 与 PANI/Fe₃O₄ 复合物共混并不能直接增强电损耗或者磁损耗。但是, 显然 PANI/CIP/Fe₃O₄ 复合物对电磁波的吸收大大增强了, 因为 PANI/CIP/Fe₃O₄ 复合物与自由空间的阻抗匹配增强了。

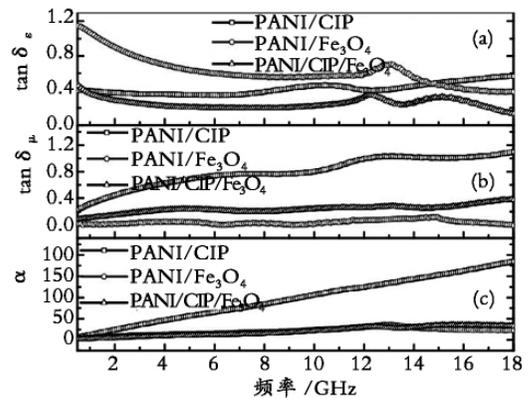


图5 三种样品的介电损耗因子、磁损耗因子和衰减常数随频率的变化曲线

总之,由于 PANI/CIP 与 PANI/Fe₃O₄ 复合物的协同效应,使得 PANI/CIP/Fe₃O₄ 复合物具有合适的电磁阻抗匹配,从而增强了其对电磁波的吸波。

研究聚苯胺复合薄膜的 EMI 屏蔽特征时,也常需测量电导率和屏蔽效能 [7]。Bhadra 等人 [22] 研究了 PANI 和乙烯-1-辛烯共聚物 (EN) 共混所得复合物的 EMI 屏蔽效能 (SE)。图 6 为含不同重量分数的 PANI 和 EN 组成的复合物的屏蔽效能随频率的变化曲线图,其中,EN 表示不含 PANI; EN-P(20) 表示当 EN 重量分数为 100% 时, PANI 重量分数为 20% 依此类推。需要特别说明的是,EN-P(60)-EBR 表示 EN 重量分数为 100% 时, PANI 重量分数为 60%,并用电子束照射过。从图 6 中可以看出,随着 PANI 重量分数的增加,屏蔽效能呈上升趋势。研究还表明,电导率和 EMI 屏蔽效能大致呈线性关系。

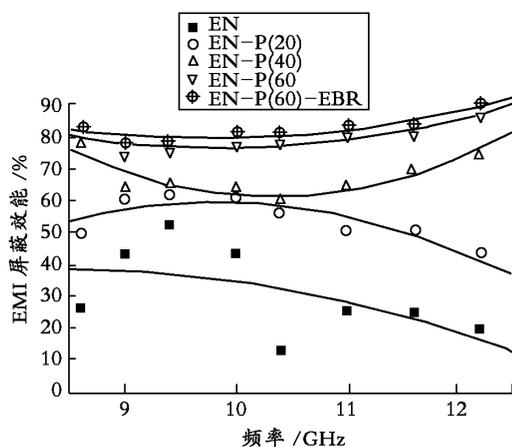


图 6 EN-P 复合物的 EMI 屏蔽效能随 X-波段微波频率的变化曲线

3 聚苯胺复合薄膜在电磁屏蔽及吸波材料方面的应用

聚苯胺具有高电导率、高介电常数、比重小、韧性好、耐腐蚀、价格低、易加工的优点,已被证明是一种良好的电磁波屏蔽材料 [23]。有人计算了一些结构型导电高分子材料的电磁屏蔽效能 (SE) 值,发现聚苯胺的屏蔽效果最好 [24]。

聚苯胺粉体机械性能差、脆,且不易加工,因

此,常将其涂覆在基体上以改善其性能。

聚(2-丙烯酰胺-2-甲基丙磺酸)-聚苯胺共聚物膜在国内尚没有人进行深入研究,国外 Hechavarría 等人 [25] 曾报道该共聚物膜结构可形成一个较大的共轭 π 键,端基不易形成支链,因此聚苯胺的电导率可以大大提高。

Geetha [26] 报道, Kathirgamanathan 做了 3mm 厚的聚苯胺包覆镍炭黑与乙烯-丙烯共聚物的复合膜,在 10KHz - 100MHz 频率范围内屏蔽效能高于 20dB,可满足大部分屏蔽应用的需要。Lee 等人 [27] 发现,聚苯胺与导电粉末(例如银、石墨、炭黑)的混合物在 10MHz - 1GHz 频率范围内具有电磁屏蔽效能,屏蔽效能随着直流导电性的增加而增加,电磁辐射屏蔽效能会随着化学掺杂和导电粉末的加入而增加。Wessling [28] 报道,将聚苯胺分散在某些高分子基质中,电导率可达到 20 S/cm,甚至可高达 100 S/cm,例如聚氯乙烯 (PVC)、聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA) 等,屏蔽效能可高达 25 dB,比与炭黑复合还高。但是,若作商用,机械性能和电导率还有待提高。

Park [29] 等人制备了包含导电的多壁碳纳米管的玻璃纤维/环氧树脂复合物作为电屏蔽材料,其电性能是用阻抗分析仪在 300 MHz - 1 GHz 范围内测得的,这种复合屏蔽外壳的屏蔽能力 90% 以上都在微波频率范围内。Pant [30] 等人,在不导电的聚乙烯醇基质中合成了不同浓度的磁流体/导电聚苯胺复合物,研究发现,增加磁流体浓度,屏蔽效能也会增加。

Koul [31] 等人用丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物 (ABS) 制得了 PANI 复合体系,采用了对甲苯磺酸 (PTSA) 和十二烷基苯磺酸 (DBSA) 的混合有机酸掺杂剂体系,并研究了导电复合物在 101GHz 时的电磁干扰响应。研究表明,复合物体系中 PANI 的装填水平越高,屏蔽效能越高,可达 60dB,而当 PANI 含量较低时 (PANI/ABS: 10:90),屏蔽效能只有 -11dB。较高 PANI 装在水平的复合物可在 101GHz 时用作电磁干扰屏蔽材料。Gangopadhyay [32] 等人在聚乙烯醇的水溶液中合成了盐酸掺杂的聚苯胺,并研究了其在 8.2 - 12 GHz 频段内的屏蔽效能。这些复合物的屏蔽效能与电导率和样品厚度有关,屏蔽效能相当可观,详见表 1。

表1 聚苯胺复合物的电磁屏蔽效能

材 料	频率范围	屏蔽效能/dB	参考文献
PANI 包覆镍球/炭黑/乙烯-丙烯共聚物复合物	10KHz - 100MHz	> 20	27
PANI/导电粉末银、石墨和炭黑	10MHz - 1GHz		28
PANI/石墨		- 27	
PANI/银		- 46	
掺杂聚苯胺混合物/银粉		- 46	
PANI/PVC/PMMA 复合物	1GHz	40 - 75	29
PANI/CSA/间甲酚自支撑膜	1GHz	39	34
PANI/丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物/对甲苯磺酸和十二烷基苯磺酸	101GHz	60	32

Satheesh^[33]等人以 PTSA 或樟脑磺酸(CSA) 为一次掺杂剂,以氯甲基苯酚为二次掺杂剂,制得了不同厚度的自支撑导电聚苯胺膜。这种柔韧的自支撑膜不仅可用在电磁屏蔽方面,还能用在分子导线、电池、化学传感器、抗静电剂等方面。电磁屏蔽效能见表2。

表2 PANI-PTSA/CMC 和 PANI-CSA/CMC 复合物自支撑膜的电磁屏蔽效能

频率 /MHz	电磁屏蔽效能/dB	
	PANI - PTSA/氯甲 苯酚复合物(0.6mm)	PANI - CSA/氯甲 苯酚复合物(0.6mm)
0.1	33	17
1	37	18
10	39	18
100	37	16
1000	45	19

国内市场上的电磁屏蔽涂料以银系、镍系、铜系为主,银系涂料虽然导电、抗氧化、屏蔽效果好,其昂贵的价格致使成本大幅增加,难以得到广泛的应用^[34]。PANI 以其诸多的优势成为近年来应用前景十分广阔的电磁屏蔽材料。其一, PANI 具有较高的电导率和介电常数;其二, PANI 不仅能通过反射损耗而且还能通过吸收损耗来达到电磁屏蔽的目的;其三, PANI 质量轻、环境稳定性好、价廉易得。所以,近年来人们在该领域取得了很多突破性的进展。井新利等^[35]用对甲苯磺酸掺杂 PANI 作为导电组分制成涂层,发现在 14 KHz - 1 GHz 电磁波范围内该涂层的屏蔽效能为 40 - 77 dB,屏蔽效果远优于常用金属

系 EMI 屏蔽涂料,完全可以满足工业和军事方面的要求。宋月贤等^[36]通过溶液法制备了樟脑磺酸掺杂 PANI 自支撑膜,并研究了其 EMI 屏蔽性能,发现 PANI 膜的 EMI 屏蔽效能随膜厚度的增加而增大,当 PANI 膜厚度超过 20 μ m 时,其屏蔽效能大于 40 dB。

软磁铁氧体是电磁波吸收剂的首选材料^[37,38]。但是,由于对多晶铁氧体高频磁导率的限制^[39],人们不得不设计一种新型的分散区域在微波和毫米波范围内的铁磁性材料,尤其是在 1 - 3GHz 频率范围内。Kazantseva N E^[40]等人将锰锌铁氧体与聚苯胺复合成核壳结构,研究表明,复合体系的磁导率出现在 1 MHz - 10 GHz 频率范围内,锰锌铁氧体颗粒表面高聚物纳米层的形成改变了磁导率的频率分布特征。共振频率从 MHz 到 GHz 的改变与锰锌铁氧体和聚苯胺纳米膜之间的界面效应有关,而这种效应取决于复合体系的比表面积和 PANI 覆盖层的性质。

4 结 论

近年来以 PANI 为主体开发低成本、无污染、质量轻、频带宽和性能好的电磁屏蔽复合材料受到了众多研究者的广泛关注。PANI 的密度小、电导率可调、电磁吸收性能好等优点,使其在电磁屏蔽领域将有着更广阔的应用前景。但目前聚苯胺的研究主要集中在制备及其在抗静电剂、二次电池材料、电致变色材料等方面的应用,而对其吸波性能研究较少。另外,对聚苯胺粉体材料研究较多,而薄膜材料研究相对薄弱。笔者认为,今后的研究可从以下几方面着手:

(1) 如何提高聚苯胺及其复合材料的吸波性能, 加宽吸收频带仍是研究的重点, 对其吸波机理及结构参数等方面也需要进一步的理论研究, 同时, 需开发适应苛刻环境如耐高温和耐腐蚀等领域的应用, 以加速推动该领域的研究成果向工业生产转化。

(2) 解决 PANI 的溶解性和加工性是实现 PANI 用作电磁屏蔽材料应用的关键技术之一。PANI 复合改性最初就是为克服其较差的加工性能, 但 PANI 的结晶程度、形态及导电 PANI 在复合材料中的分布等对 PANI 复合材料的性质有着至关重要的影响。PANI 电磁屏蔽复合材料的另一缺点是使用温度偏低和力学性能偏低, 这也限制了其广泛应用。通过改善 PANI 的结构, 提高复合材料的使用温度和力学性能也是未来发展趋势。如何调节好 PANI 和复合基体的比例及复合基体在其中的分布等, 从而有效地发挥两者的协同作用, 也是亟待解决的问题。

(3) 通过细化的纳米级 PANI 与母体材料更好地复合, 并以极少的 PANI 获得电性能高、吸波性能优异且力学性能良好的复合材料, 借助纳米材料特殊的表面效应和体积效应有望成为获得高效能电磁屏蔽材料的手段。

(4) 目前, 有两种以上功能性组分形成的复合物已成为研究热点。可进一步开展聚苯胺/无机物纳米复合材料的研究。

上述方面的深入研究将为 PANI 作为电磁屏蔽复合材料与吸波材料的使用奠定基础。相信聚苯胺会是未来导电聚合物中最有商业应用前景的材料。

参考文献:

- [1] 袁程程, 吴广峰, 张会轩. 高电导率聚苯胺的合成 [J]. 化工新型材料, 2010, 38(7): 129-130.
- [2] 马占东, 刘萍云, 冯坚, 等. 交替沉积自组装法制备聚苯胺复合薄膜的研究 [J]. 化工新型材料, 2006, 34(10): 53-54.
- [3] 王素敏, 王奇观, 森山広思. C60/聚苯胺自组装薄膜的制备及性能研究 [J]. 现代化工, 2010, 30(8): 49-51.
- [4] Oh Jung-Hoon, Oh Kyung-Sub, Kim Chun-Gon, *et al.* Design of radar absorbing structures using glass/epoxy composite containing carbon black in X-band frequency ranges [J]. Composites: Part B, 2004, 35: 49-56.
- [5] Park Ki-Yeon, Lee Sang-Eui, Kim Chun-Gon, *et al.* Fabrication and electromagnetic characteristics of electromagnetic wave absorbing sandwich structures [J]. Composites Science and Technology, 2006, 66: 576-584.
- [6] Jang Hong-Kyu, Lee Won-Hun, Kim Chun-Gon. Design and fabrication of a microstrip patch antenna with a low radar cross section in the X-band [J]. Smart Materials and Structures, 2011, 20: 1-8.
- [7] Kim B R, Lee H K, Park S H, *et al.* Electromagnetic interference shielding characteristics and shielding effectiveness of polyaniline-coated films [J]. Thin Solid Films, 2011, 519: 3492-3496.
- [8] 陶雪钰, 陈骁, 熊忠, 等. 原位聚合沉积透明导电聚苯胺薄膜的研究进展 [J]. 化学推进剂与高分子材料, 2005, 3(6): 23-26.
- [9] 李侃社, 邵水源, 闫兰英, 等. 聚苯胺/石墨导电复合材料的制备与表征 [J]. 高分子材料科学与工程, 2002, 18(5): 92-95.
- [10] 吴其晔, 方鲲, 崔陇兰, 等. 两步连续反相微乳液法原位合成铁钴镍/聚苯胺核-壳型纳米复合微粒 [J]. 青岛科技大学学报, 2003, 24(1): 37-41.
- [11] Khanna P K, Narendra Singh, Shobhit Charan, *et al.* Synthesis of Ag/polyaniline nanocomposite via an in situ photo-redox mechanism [J]. Materials Chemistry and Physics, 2005, 92: 214-219.
- [12] 董星龙, 左芳, 钟武波, 等. 纳米镍/聚苯胺复合粒子的制备与表征 [J]. 功能材料, 2005, 10: 1558-1560.
- [13] 赵立群, 李刚, 牛继辉, 等. 聚苯胺/顺丁橡胶复合导电膜的制备与性能 [J]. 分子科学学报, 2005, 21(5): 29-34.
- [14] 袁丰肖, 朱国辉, 毛卫民, 等. PANi/Ni 电磁屏蔽复合材料的研究 [J]. 屏蔽技术与屏蔽材料, 2006, 4: 91-93.
- [15] Lakshmi K, Honey, Mathew K T, *et al.* Microwave absorption, reflection and EMI shielding of PU-PANI composite [J]. Acta Materialia, 2009, 57: 371-375.
- [16] Sudha J D, Sivakala S, Prasanth R, *et al.* Development of electromagnetic shielding materials from the conductive blends of polyaniline and polyaniline-clay nanocomposite-EVA: Preparation and properties [J]. Composites Science and Technology, 2009, 69: 358-364.
- [17] Li D, Jiang Y, Li C, *et al.* Self-assembly of polyaniline/polyacrylic acid films via acid-base reaction induced deposition [J]. Polymer, 1999, 40: 7065

- 7070.
- [18] Nastase C , Nastase F , Dumitru A *et al.* Thin film composites of nanocarbons-polyaniline obtained by plasma polymerization technique [J]. *Composites: Part A* ,2005 ,36: 481 - 485.
- [19] Im Ji Sun , Kim Jong Gu , Lee Sei-Hyun *et al.* Enhanced adhesion and dispersion of carbon nanotube in PANI/PEO electrospun fibers for shielding effectiveness of electromagnetic interference [J] . *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* ,2010 ,364: 151 - 157.
- [20] Ahmed F , Kumar S , Arshi N *et al.* Preparation and characterizations of polyaniline (PANI) /ZnO nanocomposites film using solution casting method [J]. *Thin Solid Films* 2011 519: 8375 - 8378.
- [21] He Z F , Fang Y , Wang X J *et al.* Microwave absorption properties of PANI/CIP/Fe₃O₄ composites [J]. *Synthetic Metals* ,2011 ,161: 420 - 425.
- [22] Bhadra S ,Singha N K , Khastgir D. Dielectric properties and EMI shielding efficiency of polyaniline and ethylene 1-octene based semi-conducting composites [J]. *Current Applied Physics* ,2009 ,9: 396 - 403.
- [23] 吕生华 ,王飞 ,周志威 . 聚苯胺导电聚合物应用新进展 [J]. *化工新型材料* 2008 ,36(4) : 7 - 9.
- [24] 马荣 ,刁训刚 ,舒远杰 . 聚(2-丙烯酰胺-2-甲基丙烯酸) 聚苯胺共聚物膜电磁屏蔽性能 [J]. *宇航材料工艺* 2008(2) : 21 - 25.
- [25] Hechavarría Liliána , Hu Hailin , Rincón Marina E. Polyaniline-poly (2-acrylamido-2-methyl-1-propano-sulfonic acid) composite thin films: structure and properties [J]. *Thin Solid Films* ,2003 ,441: 56 - 62.
- [26] Geetha S , Satheesh Kumar K K , Rao Chepuri R K , etc. EMI shielding: methods and materials—a review [J]. *Journal of Applied Polymer Science* , 2009 , 112: 2073 - 2086.
- [27] Lee C Y , Song H G , Jang K S *et al.* Electromagnetic interference shielding efficiency of polyaniline mixtures and multilayer films [J]. *Synthetic Metals* , 1999 ,102: 1346 - 1349.
- [28] Wessling B. Dispersion as the link between basic research and commercial applications of conductive polymers (polyaniline) [J]. *Synthetic Metals* , 1998 ,93: 143 - 154.
- [29] Park Ki-Yeon , Lee Sang-Eui , Kim Chun-Gon *et al.* Application of MWNT-added glass fabric/epoxy composites to electromagnetic wave shielding enclosures [J]. *Composite Structures* ,2007 ,81: 401 - 406.
- [30] Pant R P , Dhawan S K , Kataria N D *et al.* Investigations on ferrofluid-conducting polymer composite and its application [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* ,2002 ,252: 16 - 19.
- [31] Koul S , Chandra R , Dhawan S K. Conducting polyaniline composite for ESD and EMI at 101 GHz [J]. *Polymer* ,2000 ,41: 9305 - 9310.
- [32] Gangopadhyay Rupali , De Amitabha , Ghosh Goutam. Polyaniline-poly (vinyl alcohol) conducting composite: material with easy processability and novel application potential [J]. *Synthetic Metals* , 2001 ,123: 21 - 31.
- [33] Satheesh K K K , Geetha S , Trivedi D C. Freestanding conducting polyaniline film for the control of electromagnetic radiations [J]. *Current Applied Physics* ,2005 ,5: 603 - 608.
- [34] 吴丹 ,朱超 ,强骥鹏 ,等 . 聚苯胺的掺杂及其应用 [J]. *工程塑料应用* 2006 ,34(9) : 70 - 73.
- [35] Jing X L , Wang Y Y , Zhang B Y. Electrical conductivity and electromagnetic interference shielding of polyaniline/polyacrylate composite coatings [J]. *Journal of Applied Polymer Science* ,2005 ,98: 2149 - 2156.
- [36] 宋月贤 ,王红理 ,郑元锁 ,等 . 高导电聚苯胺薄膜的制备及其电磁屏蔽性能的研究 [J]. *高分子学报* 2002(1) : 92 - 95.
- [37] Nakamura T , Miyamoto T , Yamada Y. Complex permeability spectra of polycrystalline Li-Zn ferrite and application to EM-wave absorber [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* ,2003 ,256: 340 - 347.
- [38] Yusoff A N , Abdullah M H. Microwave electromagnetic and absorption properties of some LiZn ferrites [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* , 2004 ,269: 271 - 280.
- [39] Nakamura T. Snoek's limit in high-frequency permeability of polycrystalline Ni-Zn , Mg-Zn , and Ni-Zn-Cu spinel ferrites [J]. *Journal of Applied Physics* , 2000 ,88(1) : 348 - 353.
- [40] Kazantseva N E , Bespyatykh Y I , Sapurina I *et al.* Magnetic materials based on manganese-zinc ferrite with surface-organized polyaniline coating [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic materials* , 2006 , 301: 155 - 165.

- [23] 龙国荣, 肖忠芬, 王兆明. NOMEX 蜂窝夹层结构方向舵的制造 [J]. 洪都科技, 1995, 1: 6 - 11.
- [24] 邢丽英, 刘俊能. 蜂窝夹层结构吸波材料浸渍胶液体系的研究 [J]. 航空材料学报, 1993, 13: 44 - 51.
- [25] 郭春艳, 孙占红, 孟凡涛. 蜂窝夹层结构吸波性能的试验研究 [J]. 航空工艺技术, 1997, 3: 8 - 10.

Research Progress of Aramid Paper Honeycomb and sandwich structure

HAO Wei¹, MA Ke-feng¹, LUO Yu-qing¹, ZHANG Guang-cheng²

(1. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;

2. Department of Applied Chemistry, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The preparation, properties and application research progress of the aramid paper honeycomb and sandwich structures are reviewed and the wide use in industries for its excellent performance and gradually becoming one of the indispensable materials are pointed out.

Keywords: Aramid paper; Honeycomb; Sandwich structure; Research progress

(编辑: 张迎元)

(上接第 80 页)

The Electromagnetic Interference Shielding and Wave-absorbing Properties of Polyaniline Composite Films

ZHANG Yin-ling, HUANG Ying, WU Hai-wei

(Department of Applied Chemistry, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

Abstract: The methods to prepare polyaniline composite films were summarized, polymerization, mechanical mixing and layer-by-layer self-assembling *et al.* The characterization methods and applications of electromagnetic interference shielding and wave-absorbing polyaniline composite films were also introduced, and the problems and resolutions are pointed out.

Keywords: Polyaniline; Composite films; Electromagnetic interference shielding; Wave-absorbing

(编辑: 张迎元)