第 49 卷第 6 期
2021 年 6 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 6
June，2021

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20200573

高温处理对活性炭纤维毡电磁屏蔽性能的影响

杨 宁[1]，丁冬海[1]，李子沛[1]，肖国庆[1]，于新民[2]，骆吉源[1]，白 冰[1]

(1. 西安建筑科技大学材料科学与工程学院，西安 710055; 2. 航天特种材料及工艺技术研究所，北京 100074)

摘 要：为制备出一种柔性、轻质、高效的电磁屏蔽材料，以密度为 0.055 g/cm^3 的活性炭纤维毡(ACF)为原料，研究了氩气气氛高温处理对 ACF 微观结构和电磁屏蔽性能的影响；借助 X 射线衍射、Raman 光谱及扫描电子显微镜观察和检测了材料的微观结构和物相组成，采用矩形波导法测试了试样在 8.2~12.4 GHz 频率范围内的电磁参数。结果表明：高温处理可以提高 ACF 中碳的有序化程度。经高温处理后的 ACF 与处理前相比，其电导率和电磁屏蔽效能均得到提高，其中 1 400 ℃高温处理后的 ACF，总的电磁屏蔽效能达到 39 dB，比原始 ACF(~16 dB)提高了 23 dB，表明高温处理可明显改善 ACF 的电磁屏蔽性能。

关键词：高温处理；活性炭纤维毡；有序化；电磁屏蔽
中图分类号：TB34　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)06–1143–08
网络出版时间：2021–04–06



Effect of High-Temperature Treatment on Electromagnetic Shielding Performance of Activated Carbon Fiber Felt

Yang Ning[1], *DING Donghai*[1], *LI Zipei*[1], *XIAO Guoqing*[1], *YU Xinmin*[2], *LUO Jiyuan*[1], *BAI Bing*[1]
(1. College of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;
2. Research Institute of Aerospace Special Materials and Processing Technology, Beijing 100074, China)

Abstract: A flexible, lightweight and efficient electromagnetic shielding material was prepared with activated carbon fiber felt (ACF) with the density of 0.055 g/cm^3. The phase compositions and micro-morphology were characterized by X-ray diffraction and scanning electron microscopy, respectively. The electromagnetic parameters of samples at 8.2–12.4 GHz were examined by a rectangular waveguide method. The results show that high-temperature treatment can improve the degree of carbon ordering in ACF. The conductivity and electromagnetic shielding efficiency of ACF are improved after high- temperature treatment. The total electromagnetic shielding effectiveness of ACF is 39 dB after high-temperature treatment at 1 400 ℃, which is 23 dB greater than that of the raw material of ACF (*i.e.*, 16 dB). It is indicated that high-temperature treatment could improve the electromagnetic shielding performance of ACF.

Keywords: high temperature treatment; activated carbon fiber felt; ordering; electromagnetic shielding

随着通信技术的快速发展，各类电子设备的使用更加频繁，由此导致的电磁污染问题日益严重[1]。电磁辐射干扰不仅严重威胁人类健康，而且影响敏感电子设备的可靠性和寿命[2]，较强的电磁干扰甚至会导致系统组件的永久损坏，造成设备运行故障[3]。让电子设备和元器件免受电磁干扰成为制造商们亟待解决的问题。因此，研究高性能的电磁屏蔽材料具有重要的现实意义。

电磁屏蔽是指通过材料表面反射电磁波，或者吸收和耗散进入材料内部的电磁波来最小化透射波。因此，一种材料的总电磁屏蔽效能通常由反射效能(E_R)和吸收效能(E_A)综合表征[4]。屏蔽层必须具

收稿日期：2020–08–04。　修订日期：2020–10–26。
基金项目：国家自然科学基金(51502236，51572212，51772236)；陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(15JS053)。
第一作者：杨 宁(1996—)，女，硕士研究生。
通信作者：丁冬海(1983—)，男，博士，副教授。

Received date: 2020–08–04.　**Revised date:** 2020–10–26.
First author: YANG Ning (1996–), female, Master candidate.
E-mail: yn1547543703@163.com.
Correspondent author: DING Donghai(1983–), male, Associate Professor.
E-mail: dingdongxauat@163. com

有能够自由移动的电荷载体来反射电磁波，因此需要有一定的导电性，一般体积电阻率 1 Ω·cm 就足以满足要求[5]。金属作为传统的电磁屏蔽材料，可以做成全金属，涂层和金属粉末填料。Li 等[6]采用化学镀银技术，成功合成了 Ag/Fe_3O_4 纳米复合材料，在 2~18 GHz 整个频率范围内，电磁屏蔽效能均超过 20 dB。虽然金属作为电磁屏蔽材料具备优良的屏蔽性能，但全金属密度太大且易腐蚀，涂层容易剥落且受到复杂形状的限制，金属粉末填料则需要很高的浓度且成本太高，因此金属作为电磁屏蔽材料具有一定的局限性[7]。通过在高分子基材料中加入碳的同素异形体(如石墨、石墨烯、炭黑、碳纳米管等)制备的聚合物基导电复合材料是另一种常见的电磁屏蔽材料，相比于金属屏蔽材料具有密度低、耐腐蚀、结构特殊、性能优异等特点。Aal 等[8]通过热压成型的方法制备出了导电炭黑/环氧树脂复合材料。研究发现，复合材料在室温下的电荷数、迁移率和导电性与炭黑含量有关，当炭黑含量为 20%(质量分数)时，其电磁屏蔽效能可达 29 dB。Wu 等[9]通过有机溶剂吸收和加热，合成了一种新型的自组装三维石墨烯/聚苯乙烯的体系结构，并研究了它的电磁屏蔽性能。结果表明，当石墨烯含量为 10%，厚度为 2 mm 时，其电磁屏蔽效能可达 20 dB[10]。

在众多碳材料中，碳纤维具有密度低，化学稳定性好、易加工和导电性高等优点，是获得高效、轻质、多功能电磁屏蔽材料的理想选择。Fan 等[11]制备了 T300-3K、T300-6K 和 T700-12K 3 种碳纤维针刺毡/环氧树脂复合材料，发现 3 种复合材料在 8～12 GHz 频率范围内可以实现 99.99%的屏蔽效果，为碳纤维屏蔽材料的研究奠定了基础。通过物理化学改性和改变成型方式等方法，可构建出具有不同形态和功能的炭纤维，从而获得特定的电磁响应[12]。活性炭纤维是经过活化的含碳纤维，将某种含碳纤维的材料，如酚醛基纤维、PAN 基纤维、黏胶基纤维、沥青基纤维等进行一定温度下的活化，然后使其表面产生纳米级的孔径，增加了比表面积，从而改变了其物化特性。碳纤维是以乱层石墨结构形式存在的，而活性炭纤维的结构属于微晶碳系，由石墨微晶、单一平面网状碳和无序碳这 3 部分组成[13]。Naeem 等[14]将丙烯酸纤维从废液中分离出来，然后利用木炭进行不同温度、不同阶段下的物理活化，再利用梳理机和针刺机进行三维编织，最终制备出活性炭纤维网。结果表明，随着碳化温度从 700 ℃上升到 1 100 ℃，活性炭纤维网的碳含量和电导率增加，在 2.45 GHz 下的电磁屏蔽效能从 2.21 dB 提高到 23.71 dB。在文献[15]中，作者测试了 1 200 ℃下制备的活性炭纤维网在低频和高频区域的电磁屏蔽性能，发现在 600 MHz，1.0 GHz 和 1.5 GHz 的频率下，其电磁屏蔽效能分别达到 63.26、66.75 dB 和 75.44 dB。虽然这种方法能够得到具有一定电磁屏蔽效果的柔性碳纤维网，但其制备过程复杂，成本较高，且无法实现全波段稳定高效的屏蔽效能。目前国内外对于 ACF 在柔性轻质电磁屏蔽性能方面的研究主要集中在表面涂覆金属如镍、钴和铜等，这种方法增加了 ACF 的电导率和磁导率，从而改善了电磁屏蔽效能[16]。Junior 等[17]通过电沉积技术制备出一种镀镍活性炭纤维毡(Ni-ACFF)，通过控制沉积时间和电流大小从而控制金属镍的相对含量，实现了在 8.2 GHz 时 93.7%的反射效率。Mao 等[18]通过自聚合作用使石墨毡表面功能化，继而实现材料表面化学镀银，得到的银层表现出良好的导电性，经检测在 100 kHz~3 GHz 范围内材料的电磁屏蔽效能可达到 75 dB~105 dB。但目前 ACF 的化学镀和电镀均存在着镀膜附着力不佳，膜层厚度不均匀等问题，且易造成环境污染。因此本研究旨在寻求一种更加简单且环境友好的方式，在保持 ACF 柔性轻质等特点的同时改善其电性能，从而有效提高材料的电磁屏蔽效能。选用的聚丙烯腈基活性炭纤维毡(PAN-ACF)是由聚丙烯腈原丝(PAN)经一系列工艺活化而成的具有高比表面积的活性碳纤维毡(ACF)，由于其优良的吸附性能，通常用于污水净化，污染气体吸收等领域。然而除了作为吸附剂发挥作用以外，ACF 还具有柔性、质量轻、残碳率高、成本低等优点，因此将其应用于柔性轻质电磁屏蔽材料领域具有一定的潜力[19]。研究发现，ACF 中碳的有序化程度较低，导致其电导率低，对电磁屏蔽性能不利，因此对其进行一定的热处理。ACF 的热处理是其微观结构由无序向有序结构转化的过程，伴随着这一过程，沿着六重环平面的碳团簇间的层间距 d_{002} 减小、表观微晶尺寸 L_a 和石墨层的堆叠层厚度 L_c 增加。

通过将 ACF(密度为 0.055 g/cm^3，电阻率约 0.018 6 Ω·m)在真空环境下经不同温度热处理，提高了碳的有序化程度，改善了其电性能，并进一步探究了不同热处理温度对 ACF 的电磁屏蔽效能的影响，旨在保持其良好柔性的同时获得较高的电磁屏蔽性能，为电磁屏蔽材料的发展提供更多的可能性。

1　实验

1.1　样品制备

以活性炭纤维毡(ACF，南通森友炭纤维有限公司)为原料，其主要元素是碳，碳原子在活性炭纤维中以类石墨微晶的乱层堆积形式存在，三维空间有序性较差，经活化后生成的空隙中，90%以上为微孔，这就为活性炭纤维提供了大量内表面积[20]。研究了氩气气氛下不同热处理温度对 ACF 电磁屏蔽性能的影响。将 ACF 制成 40 mm×40 mm 的块体，依次经丙酮和无水乙醇(分析纯，天津市天力化学试剂有限公司)清洗，再放入烘箱中(70 ℃，6 h)烘干，将烘干后的 ACF 放置在刚玉方舟中，以氩气为保护气氛在管式炉中进行热处理，热处理温度分别为 1 200、1 300、1 400、1 500 ℃和 1 600 ℃，保温时间为 2 h，即可得到最终产物。

1.2　性能测试

采用日本 D/max-2400 型 X 射线衍射仪(XRD，Cu，K_α，λ=0.154 06 nm)分析产物的物相组成，工作电压 50 kV，电流 100 mA，扫描范围 10°~90°，扫描速度 2 (°)/min，步长 0.02°。采用 Invia 型显微共焦激光 Raman 光谱仪(空间分辨率：横向 1 μm，纵向 2 μm；扫描范围：100～1 400 cm^{-1}；激发波长 532 nm；最小步长 0.1 μm)来进行碳特征峰的表征。采用 SU 6 600 型场发射扫描电子显微镜(SEM)观察产物的微观形貌。将高温处理后的样品，用熔融石蜡进行浇铸，石蜡在加热熔融成为液态后流动性好，在无外界压力条件下可缓慢浸润多孔试样。所使用的 ACF 虽孔隙率高但是结构具有连续性，因此石蜡的浸润不会对材料的结构造成破坏。并且石蜡介电常数值较低(复介电常数实部约为 2.1，虚部约为 0.1)，几乎无介电损耗能力，因此对于介电试样的测试结果不会造成干扰。将浇铸好的试样进行切割和打磨，再将样品先后用 800 目和 2 000 目的砂纸抛光，直至试样大小为 22.86 mm(长)×10.16 mm(宽)×2.00 mm(厚)，且表面光滑平整。采用矩形波导法测试材料的散射参数 S_{11} 和 S_{21}，再通过得到的反射系数(R)和透射系数(T)计算出反射效能(E_R)和吸收效能(E_A)以及总的电磁屏蔽效能(E_T)。具体的计算公式如下[21]：

$$E_R(\mathrm{dB}) = -10\lg(1-R) \tag{1}$$

$$E_A(\mathrm{dB}) = -10\lg(T/1-R) \tag{2}$$

$$E_T(\mathrm{dB}) = E_R + E_A \tag{3}$$

其中 T 和 R 的计算公式如下：

$$R = |S_{11}|^2 = |S_{22}|^2 \tag{4}$$

$$T = |S_{21}|^2 = |S_{12}|^2 \tag{5}$$

通常情况下，电磁屏蔽材料的屏蔽机理由反射、吸收及多重反射 3 种因素构成。然而当吸收效能大于 10 dB 时，多重反射就可以被忽略，因为大部分多重反射最终都会被吸收掉。热处理后 ACF 的吸收效能均在 10 dB 以上，因此总的电磁屏蔽效能主要取决于反射效能和吸收效能。当一种屏蔽材料的总屏蔽效能达到 20 dB 时，就说明有 99%的入射电磁波被阻挡。

为了更好的探究材料的电磁特性，需要对其电导率进行测试和计算。材料的电导率 σ 根据公式(6)计算：

$$\sigma = 1/\rho = L/RS \tag{6}$$

其中：ρ 为电阻率；R 为与纬向平行的电阻；S 为材料的截面积；L 为材料的长度。

2　结果与讨论

2.1　高温处理对 ACF 物相组成的影响

图 1 为 ACF 在不同温度下进行热处理后的 XRD 谱。图 1 中的原料为未经高温处理的原始 ACF。可以看出，每个衍射谱均可以观察到 2 个峰，在 2θ=23°附近出现了 1 个强衍射峰，在 2θ=44°附近则出现 1 个较弱的衍射峰，这 2 个峰分别对应石

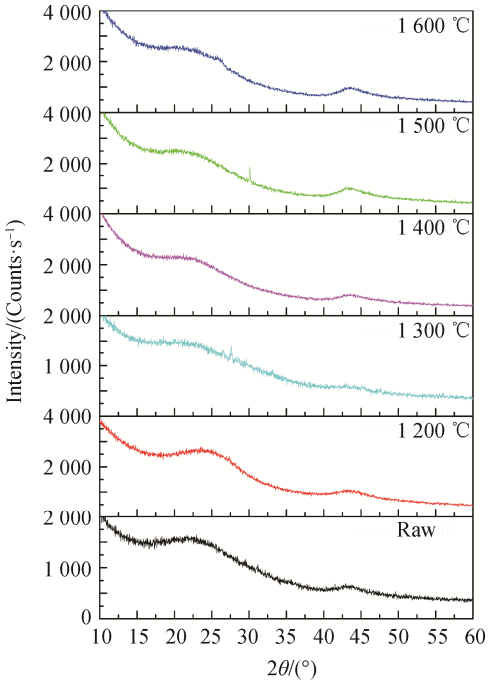


图 1　不同温度热处理后 ACF 的 XRD 谱

Fig. 1　XRD patterns of ACF treated at different temperatures

墨微晶的(002)面和(100)面。两个衍射峰的峰形较宽，表明 ACF 是一种无定型的碳材料，微观上呈现乱层石墨堆积的结构。经 1 200 ℃热处理后的 ACF 试样(002)面的衍射峰位向大的衍射角方向移动 1.8°，表明 d_{002} 层面间距变小，结构更加规整化，(100)面的衍射峰强度提高了 2/3，表明自由碳的结晶度不断提高，ACF 中碳的有序化程度在热处理后有所提高。

Raman 光谱是表征碳的有效方法之一，特别是关于其在高温下的结构演化。一阶 Raman 光谱中自由碳的典型信号是在约 1 350 cm^{-1} 和 1 580 cm^{-1} 处识别出的 D 峰和 G 峰。D 峰是缺陷诱导峰，对应于具有 A_{1g} 对称性的石墨晶格振动模式，是石墨晶体颗粒减小而出现的无序态或缺陷态的特征峰，其峰的强度是无定形活性炭原子多少的量度。G 峰是 sp^2 杂化碳原子在理想石墨晶格基面上的伸缩振动引起的，其强度可用来表征 sp^2 杂化碳原子结构的完整程度，一般在高度取向的多晶石墨或晶粒尺寸 L_a 大于 100 nm 的单晶石墨晶体中较为明显[22]。

从不同温度热处理后 ACF 的 Raman 光谱(图 2)中可以看出，热处理前后均出现了 D 峰和 G 峰这两个特征峰。原始 ACF 中两峰的峰形较宽，导致两谱线发生严重的交叠，这表明其自由碳的晶粒尺寸较小，有序度较低[23]。随着热处理温度由 1 200 ℃上升到 1 600 ℃，D 峰的峰面急剧变窄，两谱线中间重叠部分减少，两峰变得尖锐和清晰，表明 ACF 中游离碳的结构发生了变化，从二维乱层结构逐渐向三维有序结构转变。

为了进一步研究晶粒尺寸的变化，利用 Tuinstra and Koening(TK)公式对 ACF 中石墨微晶的晶粒尺寸 L_a 进行了计算，此公式要求激发波长在 400 nm<λ<700 nm 范围内，可以验证的最小 L_a 为 2 nm，应用于纳米晶石墨。TK 表达式为[24]：

$$I_D / I_G = C_\lambda / L_a \quad (7)$$

式中：C_λ(488 nm)≈4.4 nm；$R=I_D/I_G$，是 Raman 光谱中 D 峰与 G 峰谱线拟合后的积分强度比。研究表明，TK 公式会因为小晶粒尺寸占主导而使计算结果偏小，因此使用峰面积比更为准确[25]。

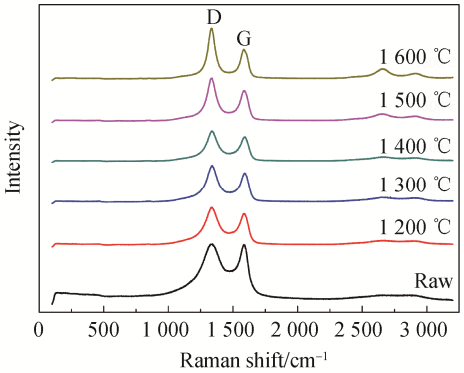


图 2 不同温度热处理后 ACF 的 Raman 谱

Fig. 2 Raman spectra of ACF treated at different temperatures

表 1 给出的是通过式(7)计算出的原始 ACF 及其在不同温度热处理后的 Raman 光谱数据。Raman 光谱中的 D 峰和 G 峰的积分强度之比 I_D/I_G 是游离碳的无序结构的量度，比值越高，无序度越高。无序化可归因于 3 点：1) 石墨层中存在边缘；2) 石墨层的平面性偏差；3) sp^3 杂化碳原子的存在[24]。由表 1 可知，随着热处理温度的升高，两谱线的半高宽(FWHM)均减小，且 D 谱线的 FWHM 值减小幅度大于 G 谱线。研究表明，D 峰半高宽比 G 峰半高宽对晶粒尺寸 L_a 的减小更为显著[25]。L_a 值可以反映出石墨微晶的结晶程度。由表 1 可知，对 ACF 进行不同程度的热处理后，R 值减小，L_a 值增大，说明石墨微晶的生长减少了晶体缺陷，同时边缘无序排列和低对称结构碳组分减小，使其结构更加规整[26]。结合 XRD 和 Raman 结果不难看出，热处理温度的升高可以促进自由碳晶粒生长，并使得 ACF 中碳的有序化程度提高。

表 1 不同温度热处理后 ACF 的 Raman 谱数据

Table 1 Raman data of ACF treated at different temperatures

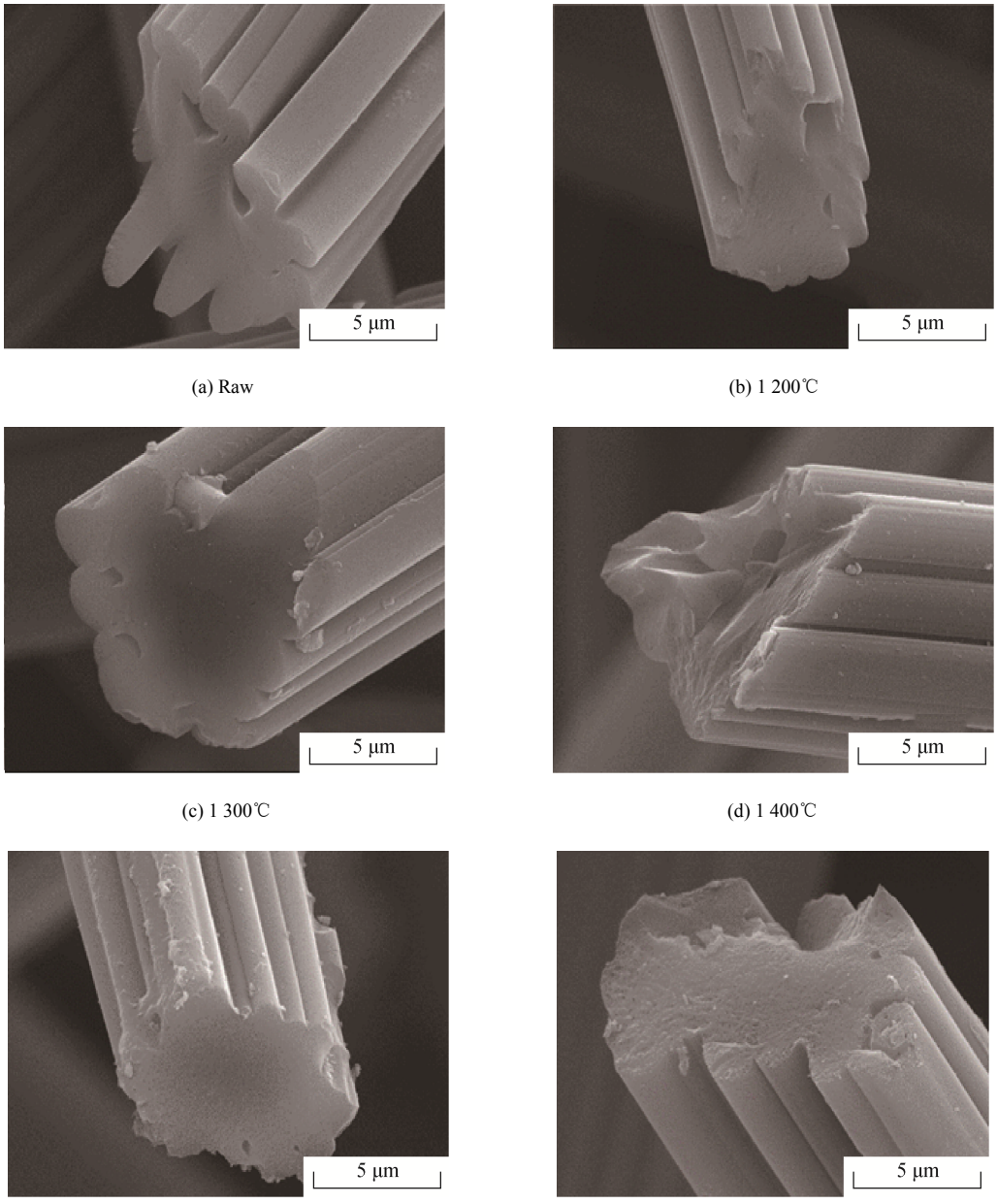
Pyrolysis temperature/℃	Position		FWHM		I_D/I_G	L_a/nm
	D-peak/cm^{-1}	G-peak/cm^{-1}	D-peak/cm^{-1}	G-peak/cm^{-1}		
	1 341	1 581	257.3	98.7	2.72	1.62
1 200	1 330	1 586	170.3	101.5	1.90	2.31
1 300	1 331	1 587	149.1	98.3	1.80	2.44
1 400	1 335	1 591	143.3	98.8	1.71	2.57
1 500	1 335	1 586	113.1	91.4	1.67	2.63
1 600	1 335	1 581	60.5	70.9	1.26	3.49

2.2　高温处理对 ACF 微观形貌的影响

从物相结果可以看出，ACF 在经过高温处理之后，除了其中的自由碳逐渐有序化，并无其它相生成。对其进行了微观结构分析，结果如图 3 所示。从图 3 可以看出，原始 ACF 纤维表面光滑，经过高温处理之后，表面变得粗糙，附着少量结晶物质，纤维间沟槽变得不明显，说明高温处理使得非碳杂质原子从表面去除[27]，自由碳晶粒生长，碳的结晶程度有所提高。

2.3　高温处理对 ACF 电磁屏蔽性能的影响

经检测未经热处理的 ACF 的电导率仅为 53.8 S/m，这是由于原始 ACF 的导电载体迁移率很低。高温热处理过程使得 ACF 中残留的氢原子脱离电子陷阱，其中大部分位于六边形碳层的边缘，这使得费米能级降低，空穴浓度增加，引起 ACF 电性能的变化[28]。图 4 为热处理温度从 1 200 ℃上升到 1 600 ℃过程中 ACF 电导率的变化，可以看出，相比于原始 ACF，1 200 ℃热处理之后电导率提高了 2 倍，随着热处理温度的升高，ACF 的电导率呈上升趋势，分析原因主要有以下 3 个方面：1) 热处理后 ACF 表面影响电导率的杂质不断分解去除，这些杂质的存在会在一定程度上影响炭纤维



(a) Raw　(b) 1 200℃　(c) 1 300℃　(d) 1 400℃　(e) 1 500℃　(f) 1 600℃

图 3　不同温度热处理后 ACF 的 SEM 照片

Fig. 3　SEM micrographs of ACF treated at different temperatures

毡的导电能力；2) 石墨微晶的生长和完善，使形成大 π 键的非定域区变大，微晶沿 *a* 轴的层面逐渐发达，沿 *c* 轴的层间堆叠规则性有所改善，层间距变小，禁带宽度变窄，电荷载流子浓度增加，电导率变大；3) ACF 中的自由碳从二维乱层结构向三维有序结构的转变，使得电子和空穴在传输过程中受到结构缺陷的散射几率减小[1,28–29]，从而使得 ACF 的导电性能得到明显提高。

碳材料的屏蔽效果主要取决于电荷载流子(电子或空穴)和入射电磁场的电矢量之间的相互作用，由 2 部分构成：一部分是载流子从入射波吸收能量并响应于电磁波而移动；另一部分是自由移动的电荷载流子引起的电磁场产生感应场，感应场又与入射电磁波相互作用[1]。

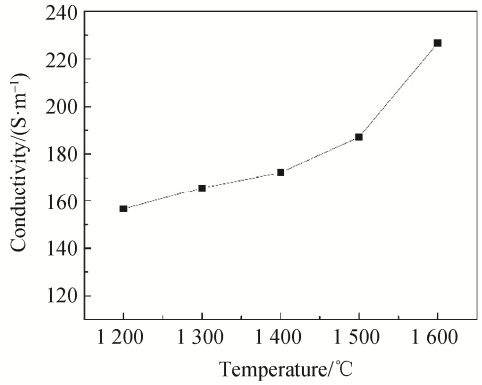
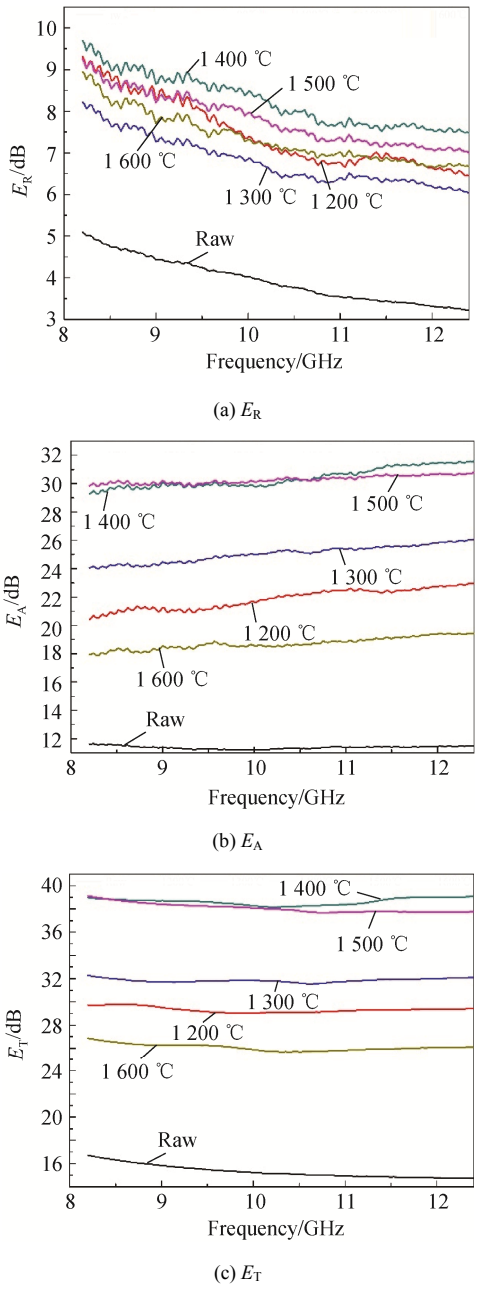


图 4 不同热处理温度后 ACF 的电导率

Fig. 4 Conductivity of ACF after heated at different temperatures

热处理后 ACF 的电磁屏蔽效能示于图 5，由图 5a 和图 5b 可以看出，经高温处理后，ACF 的 E_R 比热处理前最高提升了 4.5 dB，且随着频率的增加而降低，呈现出一定的频散效应。反射效能主要受导电性能的影响，热处理后 ACF 中碳的有序化程度提高，石墨微晶结构重排和生长，使得载流子数量增多，其在电磁场作用下可以形成连续传导的电流，使得材料成为电磁波的优良反射体，从而使得反射效能得到提升；E_A 相比热处理前最高提升了 20 dB，且随着热处理温度的升高先增大后减小，在 1 400 ℃时最高可达到 31.5 dB，吸收频带包含整个 X 波段，表明此时有 99.99%的电磁波被吸收，可以完全满足商业要求(≥20 dB)。吸收效能主要取决于电导损耗，随着碳的有序度和结晶程度提高，载流子数量也会随之增加，同时由电磁波产生的涡流强度也会增大，从而增加了对入射电磁波的衰减效应[30]，加上 ACF 为多孔材料，丰富的微孔结构为电磁波在内部的多次反射吸收提供了条件，使得吸收效能得到提升。从图 6c 可以看出，E_T 从原始的 16 dB 最高提升到 1 400 ℃热处理之后的 39 dB，相比之前有较为明显的提高，且其变化趋势与吸收效能一致，说明总电磁屏蔽效能中吸收效能占主导。结合之前的物相分析结果可以得出，热处理温度在 1 200 ℃~1 400 ℃时，随着 ACF 中碳的有序化程度提高，载流子密度增大并在电磁场作用下形成导电网络，从而提升了以反射为主的屏蔽效能和以损耗为主的吸



E_R is reflective effectiveness; E_A is absoption effectiveness; E_T is total effectiveness.

图5 热处理后ACF的电磁屏蔽效能

Fig. 5 Electromagnetic shielding effectiveness of ACF after heat treatment

收效能。随着热处理温度的继续升高，反射效能变化不大，总电磁屏蔽效能取决于电导损耗，而由于过高的电导率会引起材料表面与自由空间之间的阻抗失配[31]，减少材料对电磁波的吸收，从而降低了吸收效能，导致总的电磁屏蔽效能受到影响。两种因素共同作用使得 1 400 ℃热处理后的 ACF 具有最佳的电磁屏蔽性能。

图 6 总结了一些碳基屏蔽材料在相同厚度，各自密度下最优的电磁屏蔽性能[32–43]。利用碳的各种同素异形体如石墨烯、碳纳米管、炭黑等制备出的复合材料由于其优异的性能被广泛应用于电磁屏蔽领域。屏蔽材料的厚度、密度和结构影响材料的电导率、介电常数，进而关系到电磁屏蔽效能的优劣。因此，实现这些因素之间的平衡对于制备具有高效屏蔽效能的轻质电磁屏蔽材料具有重要意义[44]。为了更科学的衡量屏蔽材料的屏蔽效能，首先计算了屏蔽材料在单位厚度(mm)下的屏蔽效能，再引入屏蔽效能评估指标(S_E=E/ρ)来综合衡量屏蔽材料在单位密度、单位厚度下的屏蔽性能[7]。通过对比单位厚度不同密度下碳系材料的电磁屏蔽效能(图 6)可以看出，相比其他碳基泡沫/海绵/气凝胶复合材料，在相同厚度下，高温处理 ACF(1 400 ℃)具有比金属掺杂碳基复合材料和聚合物基导电复合材料更低的密度，且具有比石墨烯泡沫，碳气凝胶及碳纳米管海绵等多孔复合材料更为优异的电磁屏蔽性能[45]。表明高温处理 ACF 在轻质高效电磁屏蔽材料领域具有一定的竞争力。

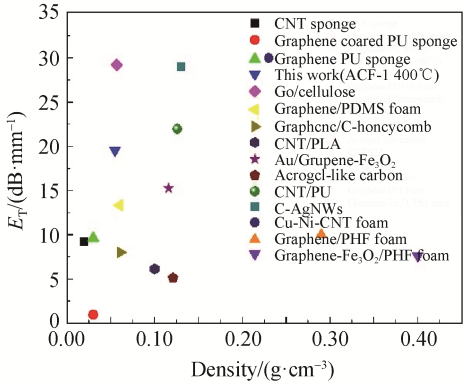


图 6　单位厚度不同密度下碳系材料的电磁屏蔽效能比较

Fig. 6　Comparison of electromagnetic shielding effectiveness among carbon materials with different densities under unit thickness

3　结论

1) 采用活性炭纤维毡(ACF，0.055 g/cm^3)为原料，研究了氩气气氛高温处理对 ACF 的物相组成和微观结构的影响。结果表明，高温处理能提高 ACF 中碳的有序化程度。

2) 随着热处理温度的升高，ACF 的电导率呈上升趋势。热处理后 ACF 的电磁屏蔽吸收效能和反射效能均得到提升。总电磁屏蔽效能在 1 400 ℃时最高，可达 39 dB，其中吸收效能可达 31.5 dB，表明高温处理可以显著改善 ACF 的电磁屏蔽性能。

参考文献:

[1] SYKAM N, RAO G M. Lightweight flexible graphite sheet for high-performance electromagnetic interference shielding[J]. Mater Lett, 2018. 230: 59–62.

[2] YANG Fei, LIANG Mei, YAN Liwei, et al. Co/C@cellulose nanofiber aerogel derived from metal-organic frameworks for highly efficient electromagnetic interference shielding[J]. Chem Eng J, 2020, 392: 124815.

[3] SINGH A K, SHISHKIN A, KOPPEL T, et al. Porous materials for EMI shielding[C]//JOSEPHK, WILSONR, GEORGE G, eds. Materials for Potential EMI Shielding Applications. Elsevier, 2020: 287–314.

[4] XING D, LU L, TANG W, et al. An ultra-thin multilayer carbon fiber reinforced composite for absorption-dominated EMI shielding application[J]. Mater Lett, 2017, 207: 165–168.

[5] MUNALLI D, DIMITRAKIS G, CHRONOPOULOS D, et al. Electromagnetic shielding effectiveness of carbon fibre reinforced composites[J]. Compos Part B-Eng, 2019, 173: 106906.

[6] LI S, ZHOU Z, ZHANG T, et al. Synthesis and characterization of Ag/Fe_3O_4 electromagnetic shielding particles[J]. J Magn Magn Mater, 2014, 358: 27–31.

[7] KONDAWAR S B, MODAK P R. Theory of EMI shielding [M]// JOSEPHK, WILSONR, GEORGE G, eds. Materials for Potential EMI Shielding Applications. Elsevier, 2020: 9–25.

[8] AAL N A, EL-TANTAWY F, AL-HAJRY A, et al. New antistatic charge and electromagnetic shielding effectiveness from conductive epoxy resin/plasticized carbon black composites[J]. Polym Composite, 2008, 29(2): 125–132.

[9] WU F, WANG Y, WANG M. Using organic solvent absorption as a self-assembly method to synthesize three-dimensional (3D) reduced graphene oxide(RGO)/poly (3,4-ethylenedioxythiophene) (PEDOT) architecture and its electromagnetic absorption properties[J]. RSC Adv, 2014, 4(91): 49780–49782.

[10] KIM J T, PARK C W, KIM B J. A study on synergetic EMI shielding behaviors of Ni-Co alloy-coated carbon fibers-reinforced composites[J]. Synthetic Met, 2017,223: 212–217.

[11] FAN W, LI D, LI J, et al. Electromagnetic properties of three-dimensional woven carbon fiber fabric/epoxy composite[J]. TEXT RES J, 2018, 88(20): 2353–2361.

[12] 李星宇. 基于石墨烯的高性能电磁屏蔽膜的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2019.
LI Xingyu. Research on graphene-based high-performance electromagnetic shielding film (in Chinese, dissertation). Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2019.

[13] SUZUKI M. Activated carbon fiber: fundamentals and applications[J]. Carbon, 1994, 32(4): 577–586.

[14] NAEEM M S, HASSAN S Z, JAVED Z, et al. Electromagnetic shielding effectiveness of high loft activated carbon web prepared by using acrylic waste[J]. Mater Sci Eng, 2018, 414(1): 012048.

[15] NAEEM S, BAHETI V, TUNAKOVA V, et al. Development of porous and electrically conductive activated carbon web for effective EMI shielding applications[J]. Carbon, 2017, 111: 439–447.

[16] KIM B J, KIM K W. Carbon fiber-reinforced composites for EMI shielding[M]// JOSEPHK, WILSONR, GEORGE G, eds. Materials for Potential EMI Shielding Applications. Elsevier, 2020: 213–225.

[17] JUNIOR M, MARCUZZO J S, PINHEIRO B, et al. Study of reflection process for nickel coated activated carbon fiber felt applied with electromagnetic interference shielding[J]. J Mater Res Technol, 2019, 8(5): 4040–4047.

[18] MAO Y, ZHANG S, WANG W, et al. Electroless silver plated flexible graphite felt prepared by dopamine functionalization and applied for electromagnetic interference shielding[J]. Colloid Surf A, 2018, 558: 538–547.

[19] HASSAN M F, SABRI M A, FAZAL H, et al. Recent trends in activated carbon fibers production from various precursors and applications—A comparative review[J]. J Anal Appl Pyrol, 2020,145: 104715.

[20] HUANG Y, PENG L, LIU Y, et al. Biobased nano porous active carbon fibers for high-performance supercapacitors[J]. ACS Appl Mater Inter, 2016, 8(24): 15205–15215.

[21] AL-SALEH M H, SAADEH W H, SUNDARARAJ U. EMI shielding effectiveness of carbon based nanostructured polymeric materials: A comparative study[J]. Carbon, 2013, 60: 146–156.

[22] FEI Y, LU J, LI H, et al. Influence of heat treatment temperature on microstructure and thermal expansion properties of 2D carbon/carbon composites[J]. Vacuum, 2014, 102: 51–53.

[23] FENG L, LI K, XUE B, et al. Optimizing matrix and fiber/matrix interface to achieve combination of strength, ductility and toughness in carbon nanotube-reinforced carbon/carbon composites[J]. Mater Design, 2017, 113: 9–16.

[24] WEN Q, YU Z, RIEDEL R. The fate and role of *in situ* formed carbon in polymer-derived ceramics[J]. Prog Mater Sci, 2020, 109: 100623.

[25] FERRARI A C. Raman spectroscopy of graphene and graphite: Disorder, electron–phonon coupling, doping and nonadiabatic effects[J]. Solid State Commun, 2007, 143(1/2): 47–57.

[26] WANG P, ZHANG S, LI H, et al. Variation of thermal expansion of carbon/carbon composites from 850 to 2500° C[J]. Ceram Int, 2014, 40(1): 1273–1276.

[27] TESSONNIER J P, ROSENTHAL D, HANSEN T W, et al. Analysis of the structure and chemical properties of some commercial carbon nanostructures[J]. Carbon, 2009, 47(7): 1779–1798.

[28] INAGAKI M. Carbon Materials Science and Engineering: From Fundamentals to Applications[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.

[29] 贺福. 碳纤维及石墨纤维[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.

[30] AMELI A, JUNG P U, PARK C B. Electrical properties and electromagnetic interference shielding effectiveness of polypropylene/carbon fiber composite foams[J]. Carbon, 2013, 60: 379–391.

[31] YANG W, ZHAO Z, WU K, et al. Ultrathin flexible reduced graphene oxide/cellulose nanofiber composite films with strongly anisotropic thermal conductivity and efficient electromagnetic interference shielding[J]. J Mater Chem C, 2017, 5(15): 3748–3756.

[32] CRESPO M, GONZÁLEZ M, ELIAS A L, et al. Ultra-light carbon nanotube sponge as an efficient electromagnetic shielding material in the GHz range[J]. Phys Status Solidi-R, 2014, 8(8): 698–704.

[33] SHEN B, LI Y, ZHAI W, et al. Compressible graphene-coated polymer foams with ultralow density for adjustable electromagnetic interference (EMI) shielding[J]. ACS Appl Mater Inter, 2016,8(12): 8050–8057.

[34] WAN C, LI J. Graphene oxide/cellulose aerogels nanocomposite: Preparation, pyrolysis, and application for electromagnetic interference shielding[J]. Carbohyd Polym, 2016, 150: 172–179.

[35] CHEN Z, XU C, MA C, et al. Lightweight and flexible graphene foam composites for high-performance electromagnetic interference shielding[J]. Adv Mater, 2013, 25(9): 1296–1300.

[36] CUI C, YAN D, PNAG H, et al. A high heat-resistance bioplastic foam with efficient electromagnetic interference shielding[J]. Chem Eng J, 2017, 323: 29–36.

[37] ZENG Z, CHEN M, PEI Y, et al. Ultralight and flexible polyurethane/silver nanowire nanocomposites with unidirectional pores for highly effective electromagnetic shielding[J]. ACS Appl Mater Inter, 2017, 9(37): 32211–32219.

[38] LI Y, SAMAD Y A, POLYCHRONOPOULOU K, et al. Lightweight and highly conductive aerogel-like carbon from sugarcane with superior mechanical and EMI shielding properties[J]. ACS Sustain Chem Eng, 2015, 3(7): 1419–1427.

[39] ZENG Z, JIN H, CHEN M, et al. Lightweight and anisotropic porous MWCNT/WPU composites for ultrahigh performance electromagnetic interference shielding[J]. Adv Funct Mater, 2016, 26(2): 303–310.

[40] YUAN Y, SUN X, YANG M, et al. Stiff, thermally stable and highly anisotropic wood-derived carbon composite monoliths for electromagnetic interference shielding[J]. ACS Appl Mater Inter, 2017, 9(25): 21371–21381.

[41] JI K, ZHAO H, ZHANG J, et al. Fabrication and electromagnetic interference shielding performance of open-cell foam of a Cu–Ni alloy integrated with CNTs[J]. Appl Surf Sci, 2014, 311: 351–356.

[42] LING J, ZHAI W, FENG W, et al. Facile preparation of lightweight microcellular polyetherimide/graphene composite foams for electromagnetic interference shielding[J]. ACS Appl Mater Inter, 2013, 5(7): 2677–2684.

[43] SHEN B, ZHAI W, TAO M, et al. Lightweight, multifunctional polyetherimide/graphene@ Fe_3O_4 composite foams for shielding of electromagnetic pollution[J]. ACS Appl Mater Inter, 2013, 5(21): 11383–11391.

[44] GUPTA S, TAI N H. Carbon materials and their composites for electromagnetic interference shielding effectiveness in X-band[J]. Carbon, 2019, 152: 159–187.

[45] 徐文韬, 丁东海, 于新民, 等. 熔盐辅助燃烧合成碳泡沫及其电磁屏蔽性能[J]. 硅酸盐学报. 2020, 48(5): 768–776.
XU Wentao, DING Donghai, YU Xinmin, et al. J Chin Ceram Soc, 2020, 48(5): 768–776.