

文章编号 1672-6634(2023)03-0050-06

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2022110002

磁控溅射镀镍修饰聚乙烯醇纤维膜的电磁屏蔽性能

谢倩,郝雪卉,赵利民,胡煦煦,战艳虎,李玉超

(聊城大学 材料科学与工程学院,山东 聊城 252059)

摘要 尽管聚合物纤维基电磁屏蔽材料因其优异的柔韧性已广泛应用于可穿戴屏蔽器件领域,但是如何通过结构设计和工艺优化获得高效的屏蔽纤维仍是一个巨大挑战。基于此,利用磁控溅射工艺在静电纺丝制备的聚乙烯醇纤维表面均匀沉积镍层。当磁控溅射时间为50 min时,该材料的导电率和饱和磁化强度分别为47.7 S/cm和16.1 emu/g。由于优异的导电性能和磁性能,对于X波段的电磁波,厚度为1.67 μm 镍修饰的聚乙烯醇纤维膜的电磁屏蔽效能达16 dB,比屏蔽效能(屏蔽效能与厚度之比)为 9.6×10^4 dB/cm。通过屏蔽机理分析可知,该材料是以反射为主的屏蔽材料。制备的纤维膜在屏蔽服、可穿戴电子器件等领域具有潜在的应用前景。

关键词 电磁屏蔽;磁控溅射;静电纺丝;聚乙烯醇

中图分类号 TB34

文献标识码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Electromagnetic Interference Shielding Properties of Poly(Vinyl Alcohol) Fiber Film Decorated by Nickel through Magnetron Sputtering

XIE Qian, HAO Xuehui, ZHAO Limin, HU Xuxu, ZHAN Yanhu, LI Yuchao

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

Abstract Polymer based electromagnetic interference shielding fibers have been applied in the field of wearable shielding devices because of their excellent flexibility. However, it is a tremendous challenge to fabricate fibers with high-performance by structural design and process optimization. Herein, by employing magnetron sputtering approach, nickel coating was decorated uniformly on the surface of poly(vinyl alcohol)(PVA) fiber film which were obtained via electrostatic spinning process. When sputtering time is 50 min, the electrical conductivity and saturation magnetization of poly(vinyl alcohol)/nickel(PVA/Ni) film are up to 47.7 S/cm and 16.1 emu/g, respectively. The excellent conductive properties and magnetic properties endow the resultant PVA/Ni film with the outstanding shielding effectiveness(16.0 dB) and high specific shielding effectiveness(the ratio of shielding effectiveness and thickness) of 9.6×10^4 dB/cm in the frequency of X band. The reflection efficiency is the key factor in the shielding mechanism of PVA/Ni film. The resultant PVA/Ni films have the potential application prospects in the field of shielding clothing and wearable electron device.

Key words electromagnetic shielding; magnetron sputtering; electrostatic spinning; poly(vinyl alcohol)

收稿日期:2022-11-04

基金项目:国家自然科学基金项目(52103054,52177020)资助

通讯作者:战艳虎,男,汉族,博士,副教授,研究方向:功能高分子材料,E-mail:zhanyanhu@lcc.edu.cn.

1 引言

随着无线通讯技术的发展,智能化和高能化电子设备日益普遍。虽然这些电子设备使人类交流变得更加便捷,但是它们发射出来的电磁波严重影响了人类的身体健康。为了消除电磁波的危害,开发 and 设计一系列高性能电磁屏蔽材料成为重中之重^[1]。与金属材料相比,聚合物基电磁屏蔽材料具有很多引人注目的优势,比如抗腐蚀、柔性、易加工、屏蔽性能可调等。更重要的是,聚合物材料更适合作为可穿戴电磁屏蔽材料,因而得到科研界和工业界的青睐^[2,3]。

静电纺丝是一种制备聚合物纤维或无机物纤维的有效方法^[4,5]。到目前为止,已有一些关于静电纺丝制备聚合物基电磁屏蔽材料的报道。周玉嫚等利用该工艺制备了厚度为 0.124 mm,屏蔽效能为 25 dB 的聚吡咯@聚氨酯纳米纤维膜^[6]。Yang 等获得屏蔽效能为 47.8 dB 的聚偏氟乙烯/银纳米线/MXene 复合薄膜^[7]。聚合物基电磁屏蔽材料的屏蔽性能依赖于导电填料的分布状态和导电网络的构建。金属纳米粒子与聚合物的溶液进行静电纺丝,获得的纤维膜只有在金属纳米粒子填充量较高时才能表现出较好的屏蔽效能。然而,在聚合物纤维表面形成一层金属涂层,可以显著降低金属纳米粒子的使用量,利于降低成本。在聚合物纤维表面,构建金属涂层的方法主要包括化学镀和磁控溅射两种工艺。例如, Ji 等利用化学镀工艺在聚丙烯腈纤维的表面构建一层金属涂层,使材料的屏蔽效能达到 90 dB^[8]。众所周知,化学镀工艺虽然具有成本低和适合大面积产品的生产,但是会产生大量的废液,不仅造成贵重金属离子的浪费,而且不符合环保理念。磁控溅射是一种物理气相沉积,不会产生“三废”。磁控溅射工艺的设备虽然昂贵,但是可以精准控制镀膜的厚度。利用磁控溅射工艺可以在聚合物纤维表面形成一层均匀的金属镀层,从而提升材料的电磁屏蔽性能。本课题组利用磁控溅射技术将镍纳米粒子均匀负载在银纳米线的网络表面,有效地降低了银纳米线的接触电阻,提升了材料的屏蔽性能^[1]。该材料在银纳米线的体积含量仅为 0.109%,镍纳米粒子负载量仅为 0.013 mg/cm² 时,屏蔽效能高达 86.7 dB,已经超过已报道的银基电磁屏蔽材料^[1]。尽管已经有利用磁控溅射工艺制备电磁屏蔽材料的相关报道,但是如何通过结构设计和工艺优化获得超薄、高效的电磁屏蔽纤维膜仍是一个巨大挑战。

在前期工作的基础上,本文将静电纺丝工艺与磁控溅射工艺联用,实现了超薄、高效电磁屏蔽纤维膜的制备。利用磁控溅射工艺在静电纺丝制备的聚合物纤维膜(厚度仅为 1.67 μm)的表面构建了一层均匀的金属镍层,获得屏蔽效能为 16 dB 的杂化纤维膜。金属镍具有优异的磁性和导电性,不仅能提升聚合物材料的反射损耗,也能提升其对电磁波的欧姆损失和磁损失,从而使镍/聚合物材料对 X 波段的电磁波具有高效的屏蔽作用。本文制备的纤维膜可以应用于可穿戴电磁屏蔽领域。

2 实验

2.1 实验试剂及材料

聚乙烯醇(PVA,型号为 1788)由上海麦克林生化科技有限公司提供;镍靶(纯度为 99.995%)由中诺新材(北京)科技有限公司提供。

2.2 样品制备

2.2.1 聚乙烯醇纤维膜的制备。将一定质量的 PVA 溶解于 90 $^{\circ}\text{C}$ 的去离子水中,获得质量分数为 15% 的 PVA 溶液;随后,将装有上述溶液的注射器链接在微量注射泵上,以直径为 0.8 mm 的针头为正极,以离型纸覆盖的旋转金属滚筒为负极,以 0.3 mL/h 的注射速度和 10 kV 的负载电压进行静电纺丝。纺丝过程中,正极与负极之间的距离为 12 cm。

2.2.2 镍/聚乙烯醇纤维膜的制备。将 PVA 的静电纺丝膜置于磁控溅射仪的样品台。溅射工艺如下:溅射功率为 50 W、压强为 0.8 Pa、样品台的转速为 5 r/min、氩气的流量为 20 mL/min、温度为 25 $^{\circ}\text{C}$ 、靶材的材质为镍。依据溅射时间的不同,对材料进行命名。PVA/Ni-0, PVA/Ni-25, PVA/Ni-50 三种纤维膜的溅射时间分别为 0、25、50 min。制备流程图如图 1 所示。

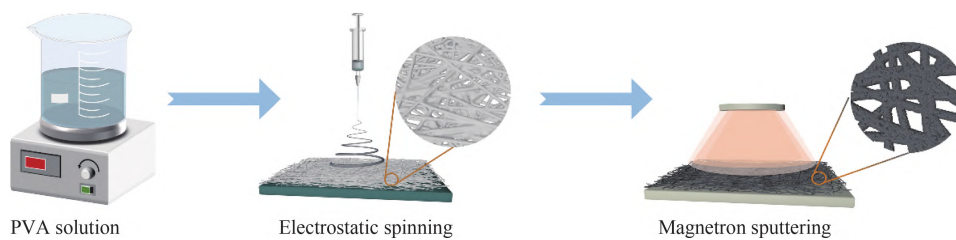


图1 PVA/Ni 纤维膜的制备流程图

2.3 测试与表征

利用场发射扫描电子显微镜(SEM, Zeiss, Ultra 55)表征材料的微观结构和 EDS 图谱。使用 X 射线衍射仪(日本理学, SmartLab 9 kW)测试材料的结晶行为。利用美国 LakeShore 公司 7404 型 VSM 测试纤维膜的磁滞回线。利用热重分析仪(Netzsch STA 449 F5)测试纤维膜的热分解温度,并计算镍的负载量。使用 Keithley 2450 源表测试材料的电阻,并通过电阻与导电率的关系式计算材料的导电率。利用矢量网络分析仪(安捷伦, N5247A)测试样品在 X 波段(8.2~12.4 GHz)内的电磁屏蔽性能。材料对电磁波反射系数(R),吸收系数(A)和透过系数(T)通过公式(1)~(3)进行计算。总的屏蔽效能(SE_T)代表输入功率(P_{in})和输出功率(P_{out})的对数比,也等于反射损耗(SE_R)、吸收损耗(SE_A)和多重反射损耗(SE_M)之和,如公式(4)所示。一般而言,当 SE_T 大于 10 dB 时, SE_T 近似等于 SE_A 和 SE_R 之和,如公式(5)。 SE_A 和 SE_R 能利用公式(6)和(7)进行计算。

$$R = |S_{11}|^2, \quad (1)$$

$$T = |S_{21}|^2, \quad (2)$$

$$A = 1 - R - T, \quad (3)$$

$$SE_T = -\lg\left(\frac{P_{out}}{P_{in}}\right) = SE_R + SE_A + SE_M, \quad (4)$$

$$SE_T = SE_R + SE_A, \quad (5)$$

$$SE_R = -10\lg(1 - R), \quad (6)$$

$$SE_A = -10\lg\left(\frac{T}{1 - R}\right). \quad (7)$$

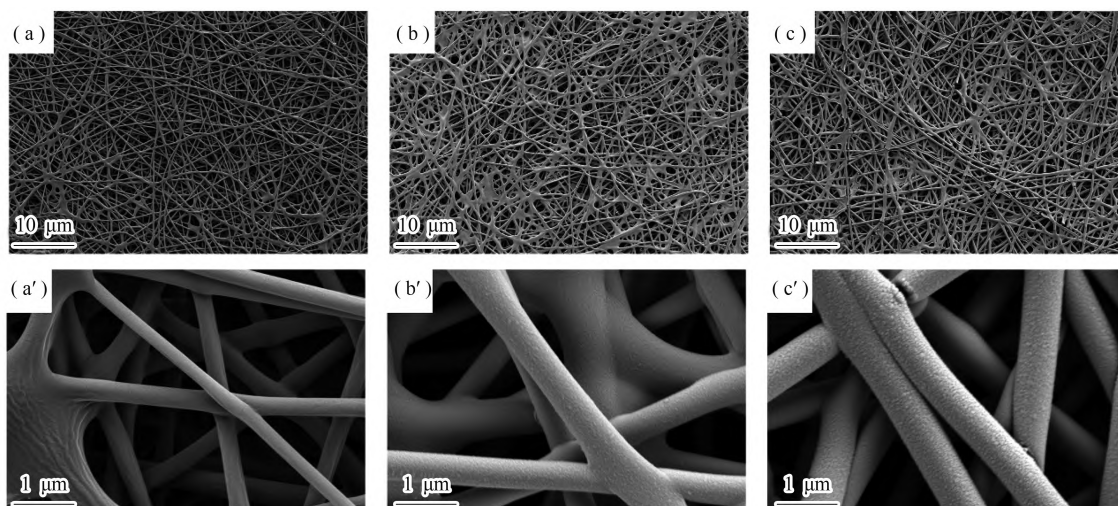


图2 (a,a')PVA/Ni-0 纤维膜;(b,b')PVA/Ni-25 纤维膜;(c,c')PVA/Ni-50 纤维膜的 SEM 图

3 结果与讨论

3.1 结构与形貌分析

图2是磁控溅射镀镍前后聚乙烯醇纤维膜的微观形貌图。静电纺丝的聚乙烯醇纤维膜在室温干燥过程

中,相邻的聚乙烯醇纤维搭接黏连在一起,形成具有孔洞结构的纤维膜,如图2(a,a')所示。由图2(a')可知,聚乙烯醇纤维的表面非常光滑。经过溅射镀镍后,聚乙烯醇纤维表面负载了均匀的镍层[图2(b,b',c,c')],并且聚乙烯醇纤维搭接黏连处也形成均匀的镍层。这种结构有助于形成优异的导电通路。图2(b',c')表明随着溅射时间的增加,镍纳米聚集体的数量逐渐增加。为了进一步确认金属镍的分布,本文表征了材料的EDS和元素分布,如图3所示。由图可知,溅射后,EDS曲线中有很强的镍元素吸收峰,并且元素分布图证实镍元素均匀分布在纤维的表面。图4是磁控溅射镍前后纤维膜的XRD衍射谱图。从图中可以看出,2 θ 在43.5°~46.0°范围内,纯聚乙烯醇纤维膜没有衍射峰,然而在溅射镀镍后,PVA/Ni纤维膜存在Ni的(111)衍射峰^[9]。该衍射峰的强度随着溅射时间的增加而增强。PVA/Ni纤维膜的结构与形貌结果充分证明了镍纳米粒子已成功地负载在聚乙烯醇纤维膜上。

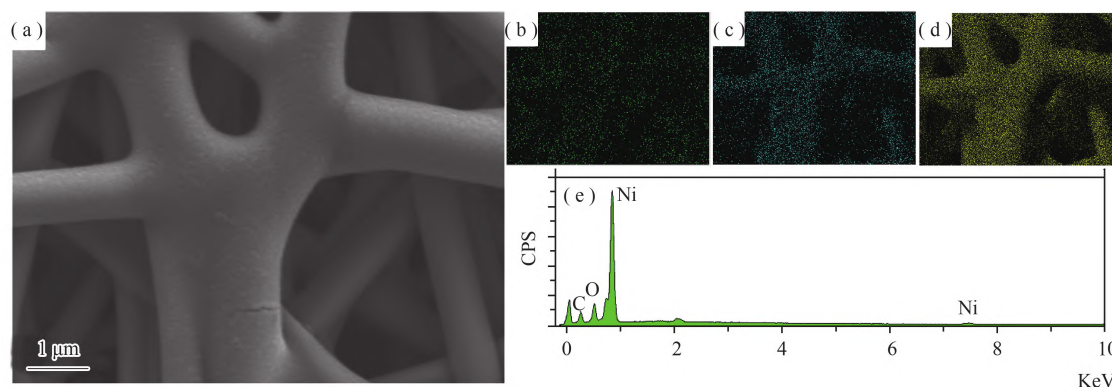


图3 (a)PVA/Ni-50纤维膜的SEM图;(b)、(c)和(d)依次为碳、氧和镍元素的分布图;(e)PVA/Ni-50纤维膜的EDS图谱

3.2 磁性能分析

磁性是决定电磁屏蔽性能的一个重要因素^[10]。一般而言,材料的饱和磁化强度(M_s)和矫顽力(H_c)越高越有利于材料对电磁波的磁损失。图5是在-30 000~30 000 Oe磁场范围内PVA/Ni-0纤维膜和PVA/Ni-50纤维膜的磁滞回线图。由图可知,随着磁场强度的变化,PVA/Ni-0纤维膜的磁化强度始终为零,而PVA/Ni-50纤维膜的磁化强度呈现出典型的S型磁滞回线,表明通过溅射镍赋予聚乙烯醇纤维膜优异的铁磁性。PVA/Ni-50纤维膜的剩余磁化强度(M_r)和饱和磁化强度分别为1.5和16.1 $\text{emu} \cdot \text{g}^{-1}$ 。另外,该材料的矫顽力高达62.3 Oe,表明除去磁场后该材料仍具有较强磁性。磁性能分析数据表明该材料能用于电磁屏蔽领域。

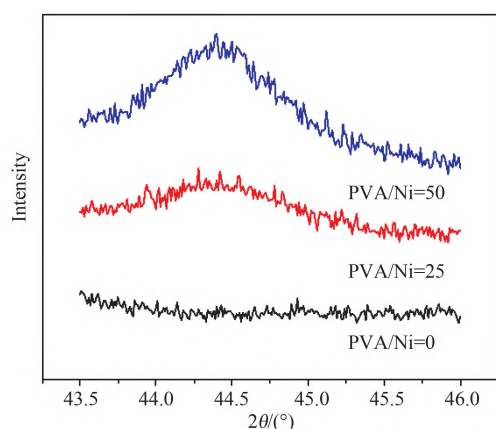


图4 溅射时间对PVA/Ni纤维膜XRD衍射峰的影响

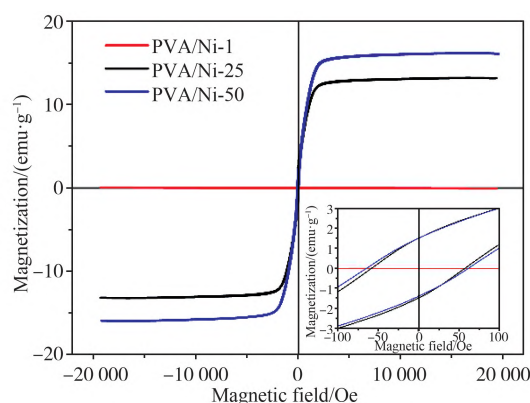


图5 PVA/Ni纤维膜的磁滞回线

3.3 导电性能分析

优异的导电性是材料具有高效电磁屏蔽性能的先决因素^[11,12]。导电性越高,材料的电磁屏蔽效能就越高。聚乙烯醇纤维膜是一种绝缘材料,该材料的电阻已经超过 Keithley 2450 源表的量程,因此本文没有测试PVA/Ni-0纤维膜的导电率。图6是溅射时间与聚乙烯醇纤维膜导电率的关系图。由图可知,当溅射时

间为 25 min 时, PVA/Ni-25 纤维膜的导电率为 39.5 S/cm; 当溅射时间为 50 min 时, 其导电率增加至 47.7 S/cm。这归因于随着溅射时间的增加, 金属镍纳米粒子在聚乙烯醇纤维表面的沉积量增加, 形成更有效的导电网络结构。

3.4 电磁屏蔽性能分析

PVA/Ni 纤维膜具有优异的导电性能和磁性能, 预示着该材料具有高效的屏蔽性能。图 7(a) 是该材料对 X 波段电磁波的屏蔽效能图。由图可知, 在 X 波段, PVA/Ni 纤维膜的屏蔽效能与电磁波的频率无关, 只与溅射镍的时间有关。因为 PVA/Ni-0 纤维膜是绝缘材料, 并且不具有磁性, 所以该材料的屏蔽效能几乎为零。随着溅射时间的增加, PVA/Ni 纤维膜的导电率和磁性增加, PVA/Ni 纤维膜的电磁屏蔽性能显著提升。当溅射时间从 25 min 增加到 50 min 时, PVA/Ni 纤维膜对 X 波段电磁波的平均电磁屏蔽效能由 12.9 dB 上升至 16.0 dB。对于薄膜材料, 计算比屏蔽效能(电磁屏蔽效能与厚度之比)更具有实际意义。由于 PVA/Ni-50 纤维膜的厚度仅为 1.67 μm , 所以该材料的比屏蔽效能为 9.6×10^4 dB/cm。尽管本文制备的纤维膜的屏蔽效能低于商业标准(≥ 20 dB, X 波段), 但是该材料显示出超高的比屏蔽效能, 因而在可穿戴电磁屏蔽领域应用时可以通过简单的叠加层数的方法获得所需要的屏蔽效能。

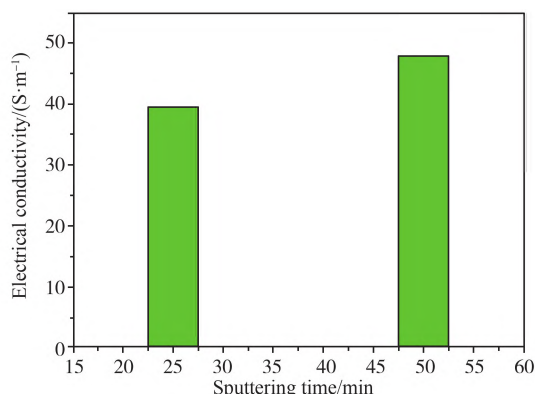


图 6 溅射时间与聚乙烯醇纤维膜导电率的关系

根据电磁屏蔽机理, 材料对电磁波的屏蔽主要有两种形式, 即反射损失和吸收损失^[13-15]。反射损失是由材料表面与空气之间的界面阻抗决定的, 与材料的导电率(σ)和磁导率(μ)有关, 数学表达式为 $SE_R = 39.5 + 10 \lg \frac{\sigma}{2\pi f \mu}$, 简化为 $SE_R \propto \frac{\sigma}{\mu}$ 。吸收损耗与欧姆损失、磁损失和极化损失有关, 数学表达式为 $SE_A = 1.31t \sqrt{f \sigma \mu}$, 简化为 $SE_A \propto \sigma \mu$ ^[16-20]。图 7(b) 为溅射时间对 SE_T , SE_A 和 SE_R 的影响。由图可知, 随着溅射时间的增加, SE_T , SE_A 和 SE_R 的数据均显著增加。这表明材料的导电性是影响吸收损耗、反射损耗和屏蔽效能的关键因素。PVA/Ni-50 纤维膜的 SE_T , SE_A 和 SE_R 依次为 16.0, 11.3 和 4.7 dB。为了明确 PVA/Ni 纤维膜的屏蔽机理, 本文计算了材料对电磁波的吸收系数、反射系数和透过系数, 如图 7(c) 所示。溅射镍纳米粒子后, 材料的反射损耗均超过了 0.5, 证实了该材料是以反射机理为主的屏蔽材料。当溅射时间为 50 min 时, 材料的吸收系数、反射系数和透过系数分别为 0.316, 0.659 和 0.025。这些数值表明: 当电磁波经过 PVA/Ni-50 纤维膜时, 65.9% 的电磁波被反射, 31.6% 的电磁波被吸收, 只有 2.5% 的电磁波透过样品。

根据电磁屏蔽机理, 材料对电磁波的屏蔽主要有两种形式, 即反射损失和吸收损失^[13-15]。反射损失是由材料表面与空气之间的界面阻抗决定的, 与材料的导电率(σ)和磁导率(μ)有关, 数学表达式为 $SE_R = 39.5 + 10 \lg \frac{\sigma}{2\pi f \mu}$, 简化为 $SE_R \propto \frac{\sigma}{\mu}$ 。吸收损耗与欧姆损失、磁损失和极化损失有关, 数学表达式为 $SE_A = 1.31t \sqrt{f \sigma \mu}$, 简化为 $SE_A \propto \sigma \mu$ ^[16-20]。图 7(b) 为溅射时间对 SE_T , SE_A 和 SE_R 的影响。由图可知, 随着溅射时间的增加, SE_T , SE_A 和 SE_R 的数据均显著增加。这表明材料的导电性是影响吸收损耗、反射损耗和屏蔽效能的关键因素。PVA/Ni-50 纤维膜的 SE_T , SE_A 和 SE_R 依次为 16.0, 11.3 和 4.7 dB。为了明确 PVA/Ni 纤维膜的屏蔽机理, 本文计算了材料对电磁波的吸收系数、反射系数和透过系数, 如图 7(c) 所示。溅射镍纳米粒子后, 材料的反射损耗均超过了 0.5, 证实了该材料是以反射机理为主的屏蔽材料。当溅射时间为 50 min 时, 材料的吸收系数、反射系数和透过系数分别为 0.316, 0.659 和 0.025。这些数值表明: 当电磁波经过 PVA/Ni-50 纤维膜时, 65.9% 的电磁波被反射, 31.6% 的电磁波被吸收, 只有 2.5% 的电磁波透过样品。

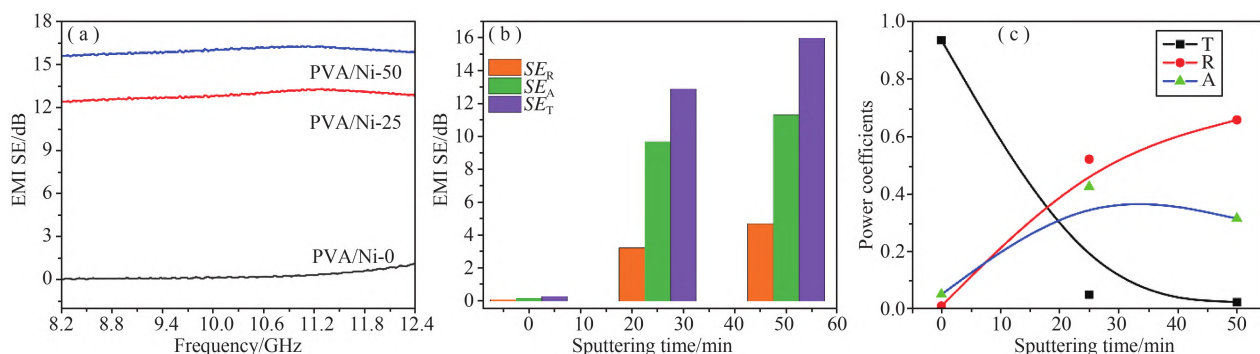


图 7 (a) 溅射时间对 PVA/Ni 纤维膜电磁屏蔽效能的影响; (b) 溅射时间与 SE_A , SE_R 和 SE_T 的关系;

(c) 溅射时间对吸收、反射和透过系数的影响

3.5 热性能分析

图 8 是 PVA/Ni 纤维膜的热重曲线。在 220~370 $^{\circ}\text{C}$ 范围内, 聚乙烯醇侧链的降解导致 76.2% 的重量损失; 在 370~490 $^{\circ}\text{C}$ 范围内, 聚乙烯醇的主链分解导致 14.0% 的重量损失^[21,22]。由于镍原子能加速聚乙烯醇侧链的分解, 导致溅射镍纳米粒子后聚乙烯醇侧链分解温度显著提前。值得注意的是, 随着溅射时间的增

加,残余固体的质量增加。通过计算可知,溅射时间为 25 和 50 min 时,金属镍的负载质量比分别为 35.4% 和 47.1%。

4 结论

利用磁控溅射技术将镍纳米粒子均匀负载在聚乙烯醇的静电纺丝膜表面,形成具有磁性和导电性的金属层。随着溅射时间的增加,镍纳米粒子沉积量增加,使得聚乙烯醇/镍纤维膜的导电率、磁性和电磁屏蔽性能均显著增加。当溅射时间为 50 min 时,聚乙烯醇/镍纤维膜的导电率、饱和磁场强度和电磁屏蔽效能分别达到 47.7 S/cm、16.1 emu/g 和 16.0 dB。厚度仅为 1.67 μm 的纤维膜的比屏蔽效能就能达到 9.6×10^4 dB/cm。由于聚乙烯醇/镍纤维膜的反射损耗超过了 0.5,所以该材料是以反射机理为主的屏蔽材料。本文制备的纤维膜能广泛应用于可穿戴电子器件等领域。

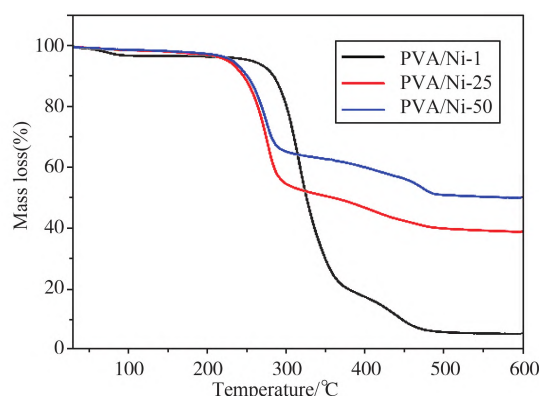


图8 PVA/Ni 纤维膜的热重曲线

参 考 文 献

- [1] ZHAN Y,HAO X,WANG L,JIANG X,et al.Superhydrophobic and flexible silver nanowire-coated cellulose filter papers with sputter-deposited nickel nanoparticles for ultrahigh electromagnetic interference shielding[J].ACS Applied Material & Interfaces,2021,13: 14623-14633.
- [2] XU X,WANG G,ZHANG X,LUO J,et al.Preparation of a strong soy protein adhesive with mildew proof,flame-retardant,and electromagnetic shielding properties via constructing nanophase-reinforced organic-inorganic hybrid structure[J].Chemical Engineering Journal,2022,447: 137536.
- [3] UDDIN A,KHATOON R,ESTEVEZ D,et al.Waste paper cellulose based-MoS₂ hybrid composites: Towards sustainable green shielding [J].Materials Today Communications,2022,31: 103858.
- [4] QU L,ZHANG W,ZHAO G,et al.Design of a ductile carbon nanofiber/ZrB₂ nanohybrid film with entanglement structure fabricated by electrostatic spinning[J].Ceramics International,2021,47(11): 15114-15120.
- [5] 王喜花,刘涛,黄丽,等.静电纺丝技术制备复合纳米纤维电磁屏蔽及吸波材料的研究进展[J].复合材料学报,2023,(40)3:1300-1310.
- [6] 周玉嫚,郭朝忠,廖焕如,等.PPy@PU 纳米纤维膜的制备及其电磁屏蔽和应变传感性能[J].上海纺织科技,2022,50(3): 10-14+29.
- [7] YANG S,YAN D X,LI Y,et al.Flexible poly(vinylidene fluoride)-mxene/silver nanowire electromagnetic shielding films with joule heating performance[J].Industrial & Engineering Chemistry Research,2021,60(27): 9824-9832.
- [8] JI H,ZHAO R,ZHANG N,et al.Lightweight and flexible electrospun polymer nanofiber/metal nanoparticle hybrid membrane for high-performance electromagnetic interference shielding[J].NPG Asia Materials,2018,10(8): 749-760.
- [9] PATI J,PRIYADARSHINEE S,MAHAPATRA R,et al.Nickel substituted manganese oxide: Synthesis and characterization[J].Materials Today: Proceedings,2022,67(8): 1080-1084.
- [10] ZHAO Y,HAO L,ZHANG X,et al.A novel strategy in electromagnetic wave absorbing and shielding materials design: multi-responsive field effect[J].Small Science,2022,2(2): 2100077.
- [11] XIE Z,CAI Y,WEI Z,et al.Robust and self-healing polydimethylsiloxane/carbon nanotube foams for electromagnetic interference shielding and thermal insulation[J].Composites Communications,2022,35: 101323.
- [12] XIE Z,CAI Y,ZHAN Y,et al.Thermal insulating rubber foams embedded with segregated carbon nanotube networks for electromagnetic shielding applications[J].Chemical Engineering Journal,2022,435: 135118.
- [13] WANG J,LIU B,CHENG Y,et al.Constructing a segregated magnetic graphene network in rubber composites for integrating electromagnetic interference shielding stability and multi-sensing performance[J].Polymers,2021,13(19): 3277.
- [14] WANG W,BING X,ZHOU Y,et al.Tunable electromagnetic interference shielding ability of MXene/chitosan/silver nanowire sandwich films[J].Functional Materials Letters,2021,14: 215104.

(下转第 63 页)

- [7] XIANG J F, CHANG C X, YUAN L J, et al. A simple and effective strategy to synthesize Al_2O_3 -coated $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$ cathode materials for lithium ion battery[J]. *Electrochemistry Communications*, 2008, 10(9): 1360-1363.
- [8] CHEN Y P, ZHANG Y, WANG F, et al. Improve the structure and electrochemical performance of $\text{LiNi}_{0.6}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_2$ cathode material by nano- Al_2O_3 ultrasonic coating[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, 611: 135-141.
- [9] HUANG B, ZHAO Z Y, SUN Y Z, et al. Lithium-ion conductor LiAlO_2 coated $\text{LiNi}_{0.8}\text{Mn}_{0.1}\text{Co}_{0.1}\text{O}_2$ as cathode material for lithium-ion batteries[J]. *Solid State Ionics*, 2019, 338: 31-38.
- [10] DING G Y, YAN F Q, ZHU Z, et al. Mussel-inspired polydopamine-assisted uniform coating of Li^+ conductive LiAlO_2 on nickel-rich $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$ for high-performance Li-ion batteries[J]. *Ceramics International*, 2022, 48(4): 5714-5723.
- [11] TANG W J, CHEN Z X, HUANG H J, et al. PVP-bridged γ - LiAlO_2 nanolayer on $\text{Li}_{1.2}\text{Ni}_{0.182}\text{Co}_{0.08}\text{Mn}_{0.538}\text{O}_2$ cathode materials for improving the rate capability and cycling stability[J]. *Chemical Engineering Science*, 2021, 229: 116126.
- [12] SHU Y, XIE Y, YAN W C, et al. Tuning the ratio of Al_2O_3 to LiAlO_2 in the composite coating layer for high performance $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ materials[J]. *Ceramics International*, 2020, 46(10): 14840-14846.
- [13] DONG S D, ZHOU Y, HAI C X, et al. Enhanced cathode performance: mixed Al_2O_3 and LiAlO_2 coating of $\text{Li}_{1.2}\text{Ni}_{0.13}\text{Co}_{0.13}\text{Mn}_{0.54}\text{O}_2$ [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(34): 38153-38162.
- [14] ZENG X F, JIAN T Z, LU Y, et al. Enhancing high-temperature and high-voltage performances of single-crystal $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$ cathodes through a $\text{LiBO}_2/\text{LiAlO}_2$ dual-modification strategy[J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, 8(16): 6293-6304.
- [15] CUI S H, WEI Y, LIU T C, et al. Optimized temperature effect of Li-ion diffusion with layer distance in $\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z)\text{O}_2$ cathode materials for high performance Li-ion battery[J]. *Advanced Energy Materials*, 2016, 6(4): 1501309.
- [16] 房迎春. 锂离子电池正极材料 $\text{LiNi}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2$ 的制备及其包覆改性研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2017.
- [17] 王连亮, 张琨, 张丽娟, 等. LiFePO_4 的电化学性能和锂离子扩散研究[J]. *盐湖研究*, 2009, 17(1): 52-57.
- [18] SUN Y K, HAN J M, MYUNG S T, et al. Significant improvement of high voltage cycling behavior AlF_3 -coated LiCoO_2 cathode[J]. *Electrochemistry Communications*, 2006, 8(5): 821-826.

(责任编辑:蒲锡鹏)

(上接第 55 页)

- [15] ZHAN Y, CHENG Y, YAN N, et al. Lightweight and self-healing carbon nanotube/acrylic copolymer foams: Toward the simultaneous enhancement of electromagnetic interference shielding and thermal insulation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 417: 129339.
- [16] IQBAL A, SAMBYAL P, KOO C. 2D MXenes for electromagnetic shielding: A review[J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(47): 2000883.
- [17] ZHAO B, HAMIDINEJAD M, WANG S, et al. Advances in electromagnetic shielding properties of composite foams[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2021, 9: 8896-8949.
- [18] YUN T, KIM H, IQBAL A, et al. Electromagnetic shielding of monolayer Mxene assemblies[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(9): 1906769.
- [19] 刘希艳, 党艺旋, 刘昱君. 碳系填充型电磁屏蔽复合材料研究进展[J]. *纺织科技进展*, 2021, 12: 8-12.
- [20] 王柳思. 石墨烯泡沫的制备及其复合材料在电磁屏蔽中的应用进展[J]. *广州化学*, 2021, 46(6): 1-10.
- [21] SINGH M, CHAUHAN D, DAS A K, et al. PVA/PMMA polymer blended composite electrospun nanofibers mat and their potential use as an anti-biofilm product[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2021, 138: 50340.
- [22] REGUIEG F, RICCI L, BOUYACOU N, et al. Thermal characterization by DSC and TGA analyses of PVA hydrogels with organic and sodium MMT[J]. *Polymer Bulletin*, 2020, 77: 929-948.

(责任编辑:蒲锡鹏)