

论坛七十二：隐身材料论坛

分论坛主席：罗驹华 程俊业

72-01

二维碳化钛陶瓷基电磁功能材料的制备与功能化研究

曾小军

景德镇陶瓷大学

电磁辐射和污染的日益严峻促使电磁波吸收材料的高速发展，开发各种高反射损耗（RL）、宽有效带宽（ $RL < -10$ dB）、薄厚度和低密度的优质电磁波吸收材料是目前主要的发展方向。这类吸波材料可以大幅度消耗电磁波，具有重要的应用和发展前景。其中，碳化钛（ Ti_3C_2 , MXene）陶瓷，一类新型的二维（2D）纳米材料，因具有出色的机械性能、多层结构、亲水性、可调节的电导率、丰富的表面官能团等特点而被开发为高效的电磁波吸收材料。然而，2D 碳化钛陶瓷的高电导率和介电常数限制了其电磁波吸收性能。此外，2D 碳化钛陶瓷的金属性带来很强的表面反射，从而引发阻抗失配。因此，开发高性能的电磁波基电磁波吸收材料具有重要的意义。本文结合刻蚀工艺、剪切工艺和熔盐工艺精准调控 2D 碳化钛陶瓷的形貌（层状、带状、多孔单层状），并复合金属基材料，以实现高效的电磁波吸收特性。

72-02

仿生基元序构吸波材料设计及性能研究

黄灵玺 1*

1 杭州电子科技大学材料与环境工程学院，杭州，310018

吸波材料在雷达隐身和电磁兼容方面发挥着重要作用，本研究以仿生学设计为突破口，将吸波材料与生物模型结合，借助自然界生物亿万年进化而趋于完美的优势，设计并制备仿生吸波材料实现宽带吸收。首先在蛾眼微结构的启发下制备了多级蛾眼仿生吸波材料[1]。其在 1 mm 厚度下将有效吸收带宽（ $RL \leq -10$ dB）从 0 提高到 8.04-17.88 GHz；结合代数拓扑中的 Poincaré-Brouwer 定理说明仿生基元存在电流零点可提高吸收性能，并采用仿真结果进行了证明。为实现材料吸波性能的进一步提高，根据金龟子手性序构材料的旋转极化原理，通过构造螺旋排列来增强吸收及拓展带宽[2]。将非本征手性序构设计为右手螺旋（扭转角 15° ）本征手性后，高频下吸收峰从 -26.36 dB 增强到 -48.83 dB，有效带宽（ $RL \leq -10$ dB）从 13.14-15.96 GHz 扩展到 12.96-18 GHz。并且采用高熵合金制备功能基元，增加了吸波材料设计的自由度。本研究通过将仿生学研究范式引入到吸波材料设计中，以突破吸波材料的性能局限，为完善吸波材料理论提供了基础。

关键词：吸波材料；仿生学；基元序构；宽带吸收

72-03

核壳 BN@C 复合材料的制备及其电磁波吸收性能的研究

张婉钰

西安理工大学

无线通信技术和各种电子设备的日益普及，导致人们非常担心电磁辐射对电子设备的正常运作和人类健康的潜在不利影响。因此，迫切需要能够吸收电磁波的合适材料来减轻辐射污染。本项目制备了核壳 BN@C 复合材料，其中 C 用作导电损耗壳，BN 作为阻抗匹配芯，BN 上紧密连接的碳层在核与壳之间形成了连续的异质界面，由于界面极化效应强，增强了

电磁波的耗散，提高了复合材料的电磁波吸收性能。在 17.4GHz 时，填充石蜡的 BN@C 在 1mm 处的最小反射损耗为-35.5dB，有效吸收带宽为 2.86 GHz（15.14GHz-18GHz）。通过改变样品厚度，可以在宽范围内调整电磁波的吸收性能。具有薄厚度和强吸收的 BN@C 复合材料将成为微波吸收领域一种有前途的新型吸收剂。

72-04

多效协同策略下新型吸波屏蔽材料的优化设计

陆伟

同济大学材料科学与工程学院，上海市金属功能材料开发应用重点实验室

电磁波吸收和屏蔽材料是解决电磁辐射和电磁干扰问题最为重要的科技手段之一。研发兼具“薄、宽、强、轻”特点的高性能吸波与屏蔽材料一直是迫切需要解决的关键科技问题。我们团队以 MXene，金属有机框架，生物遗态碳，铁磁性材料为主要研究对象，通过多组分、多尺度、多维度、多界面多效协同的策略实现了电磁功能材料从电磁参数调控，到电磁性能提升，到多功能集成一体化大三方面的全面优化，对新型高性能吸波屏蔽材料的研制具有重要意义。

72-05

多孔碳吸波剂的微结构设计及其介电性能

Microstructure design and dielectric property of porous carbonaceous microwave absorbers

西北工业大学凝固技术国家重点实验室

许海龙，卿玉长，陈强，罗发

随着多站点、多频段雷达探测技术的发展，对武器装备的隐身性能提出了更高的要求。业界公认，吸波材料需要满足“宽”、“强”、“轻”、“薄”的要求，此外，隐身战机用吸波材料的服役环境要求其具有高低温协同隐身性能。电导损耗类碳材料具有耐高温、轻质、微观结构与介电性能可调等优点，是目前设计吸波材料的热门备选材料。本文从协调电导损耗和极化损耗机制出发，以电导损耗为主的多孔碳吸波剂为研究对象，通过不同的微结构设计方式，在多孔碳材料中设计纳米级、微米级、纳米/微米多级异质界面来增强极化损耗（界面极化），通过热处理工艺来调控电导损耗，系统研究多孔碳吸波剂的微结构对其不同服役温度下的电磁损耗机制（极化损耗和电导损耗）及电磁隐身性能的影响规律。

72-06

多功能 SiC 陶瓷气凝胶的微结构设计及吸波性能优化

范冰冰，宋礼猛

郑州大学

随着现代信息技术的飞速发展，高性能电磁波（EMW）吸收材料越来越受到重视。然而，当前多数 EMW 吸收材料通常功能单一，热稳定性和化学稳定性较差，严重阻碍了这些材料的实际应用。在此，我们通过溶胶-凝胶法和后续的碳热还原反应过程制备了具有优异的高温热稳定性、低导热率和高效 EMW 吸收的轻质 SiC 纳米片气凝胶。该 SiC 气凝胶由大量相互连接的二维 SiC 纳米片组成，具有丰富的微纳米孔隙，有利于阻抗匹配，使气凝胶获得了良好的电磁波吸收性能。在 7.80 GHz 处获得的最小反射损耗值为-45.31 dB，厚度仅为 1.5 mm，有效吸收带宽达到了 8.50 GHz。

为了进一步拓宽 SiC 陶瓷气凝胶在电磁波吸收材料的应用领域，我们采用化学气相沉积法（CVD）制备了多功能 SiC 纳米纤维气凝胶（SiC NFA）。该气凝胶获得了超低密度（~9 mg cm⁻³），优异的机械性能、抗疲劳性、耐火性能、高温热稳定性和隔热性能。SiC NFA 还实现了较好的 EMW 吸收，厚度为 1.9 mm 时，在 7.04 GHz 处最小反射损耗值为-39.37

dB。然而，SiC NFA 仅具有较窄的有效吸收带宽，这阻碍了其实际应用。

我们通过热处理工艺制造了三维多孔交联的 SiC@SiO₂ 纳米纤维气凝胶（SiC@SiO₂ NFA），所制备的 SiC@SiO₂ NFA 同样具有优异的多功能性能。此外，SiC@SiO₂ NFA 表现出了更加优异的电磁波吸收性能，最小反射损耗值为-50.36 dB，最大有效吸收带宽高达 8.6 GHz。这种多功能气凝胶材料的成功制备为尖端陶瓷材料的设计和制造提供了广阔的前景。

关键词：电磁波吸收材料；溶胶-凝胶；SiC 纳米片气凝胶；化学气相沉积；SiC 纳米纤维气凝胶

72-07

MOFs 衍生碳基复合电磁波吸收剂的设计及应用研究

王连军 1,2, 郑琦 1, 江莞 1,3

（1.纤维材料改性国家重点实验室，东华大学材料科学与工程学院，上海 201620；2.先进玻璃制造技术教育部工程研究中心，上海 201620；3.东华大学功能材料研究中心，上海 201620）

开发能抵御或削弱电磁波辐射的高性能电磁波吸收材料对环境可持续发展、人民健康生活、国防安全等方面具有重要的意义。金属-有机框架（MOFs）是一类有机-无机杂化有序晶态多孔材料，以其为前驱体和自模板衍生获得的纳米多孔碳不仅保留了 MOFs 高比表面积和丰富的孔结构，同时原位形成的金属、金属氧化物等组分提供了多重损耗机制，可协同优化多孔碳复合材料的吸波性能。然而，目前已探索的 MOFs 前驱体类型仍非常有限；此外，仍需开发高效的合成策略有效调控复合材料的多级结构和多种组分以达到性能最优化。本工作发展了系列高效合成及结构调控策略，如多组分复合、配体后修饰以及连续刻蚀等，开发了系列 MOFs 衍生的具有电磁双重损耗机制、多级结构和多重界面的纳米多孔碳复合吸波材料，实现复合材料纳米组织和多级结构的调控；通过优化电磁参数调控方法，构建了高效电磁谐振，增强了多组分复合吸波材料的电磁衰减和阻抗匹配，实现了高强和宽频的电磁波吸收，并探讨了多组分协同、界面效应和多重损耗机制对吸波性能的影响规律。

关键词：吸波材料；碳基复合材料；金属-有机框架（MOFs）；多重损耗

72-08

石墨烯基磁性/介电复合材料的制备及吸波性能调控

随着电子设备的大量应用和 5G 通讯技术的快速发展，电磁干扰和电磁辐射污染问题日渐突出。电磁吸波材料通过传导损耗、介电损耗和磁损耗等损耗机制，将入射电磁能转化为热能，可以有效解决电磁干扰和电磁辐射污染问题。因而，设计开发具有“宽、薄、轻、强”综合优异性能的吸波材料成为当前材料科学领域的研究热点。还原氧化石墨烯（RGO）是一种二维片状碳纳米材料，具有低密度、大比表面积、高宽厚比和电荷载流子迁移率，已被广泛应用于微波吸收领域。然而，单一的微波衰减机制和较差的阻抗匹配使得 RGO 的吸波性能难以满足实际应用需求。研究发现，合理的结构设计和电磁参数调控可以有效改善 RGO 阻抗失配问题，并增强其对微波的衰减损耗能力。本文基于电磁阻抗匹配与衰减损耗原理、复合材料的界面效应与协同作用，通过组分结构设计、杂原子掺杂、界面工程等策略调控石墨烯基磁性/介电复合材料的电磁参数与吸波性能，结合电磁理论与仿真分析揭示了复合材料对微波的衰减损耗机制，获得系列不同维度的石墨烯基高性能复合吸波材料，为新型轻质高性能碳基吸波材料的研制提供一定的参考价值。

72-09

过渡金属氧化物表/界面结构调控与电磁波吸收特性研究

谢阿明，蒋莱，高如如，李伟金，程思瑶

南京理工大学
江苏省南京市玄武区孝陵卫 200 号, 210094
通讯邮箱: xieaming@njjust.edu.cn

过渡金属氧化物 (TMO) 由于其特殊的物理和化学性质在多个科学领域都受到广泛的重视。但是纯的 TMO 材料由于其导电性差在电磁波吸收领域中没有优势。调控 TMO 的表/界面电子结构可以改变材料的能带结构, 增强其缺陷程度, 改善材料的电导率, 有利于增强其吸波性能。本项目提出了四种 TMO 材料的表/界面电子调控的方法: (1) 质子氢化过渡金属氧化物; (2) 电驱动氢化过渡金属氧化物; (3) NaBH₄ 研磨法调节 VO₂ 材料表面的氧空位; (4) 复合方法调节 V₂O₃ 的界面结构。这四种方法有效提高了 TMO 材料的电导损耗和极化损耗, 扩大的 TMO 材料的电磁波吸收领域的应用范围。

关键词: 过渡金属氧化物、表/界面电子结构、缺陷程度、电导损耗、极化损耗

72-10

石墨烯基气凝胶吸波材料研究

黄啸谷

南京信息工程大学

轻质石墨烯基气凝胶在微波吸收领域受到广泛关注。然而, 可控的合成具有定制孔结构的还原氧化石墨烯(rGO)气凝胶以实现高性能电磁波吸收是一个重大挑战。在此, 通过冻融自组装策略实现了对还原氧化石墨烯气凝胶孔结构的剪裁, 该策略包括预还原、冻融、再还原和冷冻干燥过程。通过调整预还原时间, 超轻(5.83 mg/cm³)和多孔(94.9%)的 rGO-60 气凝胶形成了均匀的蜂窝状结构, 最大限度地增加了电磁波在微孔自由空间中的多次反射和散射, 在实现超低填充量(0.74 wt%)的同时获得了 -61.63 dB 的最小反射损耗和 7.8 GHz 的有效吸收带宽。雷达截面(RCS)模拟进一步证实了 rGO-60 气凝胶可以衰减更多的电磁能量。同时, 优异的隔热和抗冻性能表明在寒冷和潮湿的环境中有很好的应用前景。

72-11

拓扑绝缘体碲化铋纳米材料的电输运、介电、吸波及光电特性

侯志灵*

北京化工大学数理学院

随着 5G 通信技术的发展, 智能设备受到了广泛关注, 非线性电气传输材料被认为是智能设备的重要推动力。同时, 电磁污染问题也日益严重。拓扑绝缘体材料具有表面导电而体相绝缘的特性, 该材料表现出了良好的非线性电输运特性和介电可调性能。本研究利用无模板法制备了不同尺寸的 Bi₂Te₃ 纳米棒材料。由于纳米棒无序分布引起了有效栅极电压导致材料的费米能级发生变化, Bi₂Te₃ 纳米材料以及其纳米复合材料均表现出强烈的非线性电输运行为, 在 1 V/mm 的电场变化范围内观察到电导率变化为 400%, 并且多次实验均表现出良好的重复性。独特的非线性电传输行为导致了偏置依赖的独特介电性能, Bi₂Te₃ 纳米复合材料表现出 800% 的可调电容特性 (0-10 V)。这种优异的电场调控的电输运特性, 使 Bi₂Te₃ 纳米在智能器件及存储器方面具有广阔的应用前景。同时, 该复合材料在 1.6 mm 厚度下, 有效微波吸收带宽达到 6.8 GHz, 在超薄吸波方面具有明显优势。光源输出光功率为 10 mW/cm² 时, 该材料响应度为 4 mA/W, 探测率达 1.93×10⁷ Jones, 通过简单结构设计, 可以表现出选择性红外光电响应。

关键字 拓扑绝缘体; 电输运性能; 介电性能; 吸波性能; 光电特性

72-12

72-13

新型结构功能一体化吸波材料研究

刘一杰

南京航空航天大学

随着电子信息技术的迅速发展,微波设备的广泛应用,电磁环境越来越复杂,由此导致的微波干扰及电磁兼容(EMC)问题也愈发突出。传统的微波吸收材料以涂层的形式应用,涂敷在装备的表面来起到吸波的作用。然而涂层易脱落起包,生产和维护成本高,对不同位置的应用适应性差。因此,设计制备新型结构功能一体化吸波材料,在军事及民用领域具有重要的现实意义。我们基于多尺度设计的理念来设计新型结构功能一体化吸波材料。首先从微观形貌出发,关联微观结构与电磁特性,针对性提高对于特定频段电磁波的响应能力。其次对粉体进行改性,确保能与基体更好的结合。最后通过宏观超材料结构设计,实现对电磁波宽频宽角度的吸收。我们制备的新型结构功能一体化吸波材料,不仅具有优异的吸波性能,而且具有适应不同环境的多种功能,在可穿戴设备,可变形机器人,飞机智能蒙皮等领域具有非常大的潜在应用。

72-14

仿生基元序构吸波材料设计及性能研究

黄灵玺 1*

1 杭州电子科技大学材料与环境工程学院, 杭州, 310018

*Email: lxhuang@hdu.edu.cn

吸波材料在雷达隐身和电磁兼容方面发挥着重要作用,本研究以仿生学设计为突破口,将吸波材料与生物模型结合,借助自然界生物亿万年进化而趋于完美的优势,设计并制备仿生吸波材料实现宽带吸收。首先在蛾眼微结构的启发下制备了多级蛾眼仿生吸波材料[1]。其在1 mm厚度下将有效吸收带宽($RL \leq -10$ dB)从0提高到8.04-17.88 GHz;结合代数拓扑中的Poincaré-Brouwer定理说明仿生基元存在电流零点可提高吸收性能,并采用仿真结果进行了证明。为实现材料吸波性能的进一步提高,根据金龟子手性序构材料的旋转极化原理,通过构造螺旋排列来增强吸收及拓展带宽[2]。将非本征手性序构设计为右手螺旋(扭转角 15°)本征手性后,高频下吸收峰从-26.36 dB增强到-48.83 dB,有效带宽($RL \leq -10$ dB)从13.14-15.96 GHz扩展到12.96-18 GHz。并且采用高熵合金制备功能基元,增加了吸波材料设计的自由度。本研究通过将仿生学研究范式引入到吸波材料设计中,以突破吸波材料的性能局限,为完善吸波材料理论提供了基础。

关键词: 吸波材料; 仿生学; 基元序构; 宽带吸收

72-15

基于德拜弛豫模型的吸波材料设计与电磁参数调控

钟博

哈尔滨工业大学(威海)材料学院

电损耗吸波材料的吸波性能由介电常数决定,而介电常数通过德拜弛豫方程与材料的本征参量(如电导率、极化弛豫时间等)相联系,因此基于德拜弛豫模型调控电磁参数是吸波材料设计的基本思路之一。本项目基于德拜弛豫模型,对碳材料、SiO₂、BN、MXene等材料的介电常数进行了调控,研究了介电常数与吸波性能的关系,阐明了电损耗吸波机制,并介绍了新型吸波材料的典型应用。

