

吸波型 SiC 陶瓷材料的研究进展

Research Progress of Absorbing SiC Ceramics

西北工业大学超高温结构复合材料重点实验室 张亚君 殷小玮 张立同 成来飞

[摘要] 随着电子产品的广泛应用,电磁波泄露和干扰成为普遍问题,迫切需要发展新一代高性能吸波材料。SiC 陶瓷及陶瓷基复合材料具有耐高温、耐腐蚀、抗氧化、高强度、低密度、介电性能可设计等优异特性,是极具潜力的吸波型热结构材料。化学气相渗透和先驱体转化陶瓷法可实现陶瓷材料的微结构设计,是制备高性能吸波型热结构陶瓷的主要方法,日益受到关注。本文综述了吸波型热结构陶瓷的设计与制备方法及其吸波机理。

关键词: 吸波材料 SiC 陶瓷 微结构设计

[ABSTRACT] With the wide use of electronic products, electromagnetic (EM) wave leakage and interference have been a common problem. High-performance EM absorbing material is then in urgent need. SiC ceramics and ceramic matrix composites possess many advantages, such as high-temperature stability, resistance to corrosion and oxidation, high strength, low density and designable dielectric property, which make them good candidates for EM absorbing thermostructural material. Chemical vapor infiltration and polymer derived ceramics have drawn more and more attention because they can realize the design of microstructures of ceramics, leading them the main methods to fabricate high-performance EM absorbing SiC ceramics. This paper reviewed the design, synthesis and EM absorbing mechanism of EM absorbing SiC ceramics.

Keywords: EM absorbing materials SiC ceramics Microstructural design

现代社会中电子产品得到了前所未有的普及。手机、电视、电脑、雷达等已成为常用设备。随着这些电子设备的应用,电磁波泄露的问题变得日益严重^[1-8]。有电流通过的电路就会产生电磁波,如未采取有效防护会导致电磁泄露^[9]。电磁泄露不但会污染环境,对生物健康产生不可预知的影响,还会对处在其中的其他电路产生影响,致使其不能正常工作^[10]。基于这些实际问题,迫切需要一种能够保护环境和设备免受电磁干扰的材料。因此,电磁屏蔽材料得到了越来越多的关注。

电磁屏蔽主要包括反射和吸收两种机制。传统的电磁屏蔽材料是金属材料。金属因具有高的电导率和复介电常数而具有高的电磁屏蔽效能。由于金属与空气阻抗失配,一次表面反射严重,因此金属材料是以反射为主要机制的屏蔽材料。考虑到对环境的影响,吸收型电磁屏蔽材料(电磁吸收材料)更具应用潜力。除此之外,金属材料还有不可避免的缺点,如密度大、高温稳定性差、抗蠕变性差和耐腐蚀性差等,制约了金属材料在电磁领域和恶劣环境中的应用^[11-13]。陶瓷或陶瓷基复合材料的密度小、强度高、高温稳定性好并且耐腐蚀,有效地克服了金属材料的一系列缺点,有潜力用于高温恶劣环境中^[14-18]。基于现代材料科学结构功能一体化设计思想,陶瓷材料的电磁吸收性能也得到了广泛的探索^[19-24],为吸波型陶瓷材料的发展提供了理论和试验基础。

现代先进陶瓷的制备方法主要有化学气相渗透(CVI)、聚合物转化陶瓷(PDC)和溶胶凝胶法(Sol-Gel)。制备的陶瓷可分为晶态和非晶态。晶态的陶瓷通常介电常数实部偏高,大部分入射电磁波在材料表面被反射,因此吸波效率不高。非晶态的陶瓷虽然介电常数实部较低,但其虚部往往也很低,对电磁波的衰减能力很弱,大部分的入射电磁波可穿过材料而继续传播,即表现为透波性,因此吸波效率也很低。目前改善陶瓷吸波性能的方法主要有两种:阻抗匹配层设计^[25-28]和透吸波复合设计^[29-35]。

本文将对介电型陶瓷的吸波性能表征方法、设计原则加以介绍,在此基础上综述吸波型热结构陶瓷的设计与制备方法及其吸波机理。

1 介电型陶瓷吸波性能的表征

介电型材料的介电性能可通过相对复介电常数(ϵ)来表征。 ϵ 由介电常数实部(ϵ')和介电常数虚部(ϵ'')组成,即 $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$ 。 ϵ' 反映了材料对入射电磁波的一次反射(即表面反射)能力, ϵ' 越大表明一次反射越强; ϵ'' 反映了材料对进入其内的电磁波的损耗能力,即将电磁能转化为其他形式的能量的能力, ϵ'' 越大表明材料对电磁波的损耗越强。为了获得较好的吸收性能,材料应具有低的实部和高的

虚部,以保证入射电磁波可进入材料内部并被消耗吸收。但通常随材料组分和环境的变化,介电常数实部和虚部的变化规律是相同的,即实部增大时虚部也增大,反之亦然。为此,引入介电损耗($\tan \delta$)的概念,定义 $\tan \delta = \epsilon'' / \epsilon'$ 。实部越小且虚部越大,则介电损耗越大。因此材料的介电损耗越大说明吸波潜力越大。

为了更直接地表征材料的吸波性能,研究者们广泛使用反射系数(R)的概念^[36-38]。 R 的计算建立在金属背板模型^[39]的基础上,即入射电磁波只能被反射或吸收,而没有透射部分。图1为金属背板模型的示意图。定义 $R=10\log_{10}(P_R/P_I)$ (dB),其中 P_R 代表被反射的电磁波能量, P_I 代表总的入射电磁波能量。可以看出, R 始终为负值,且 R 越小, P_R 占 P_I 的比例就越小,说明入射电磁波被反射的部分越少,即吸波性能越好。

2 介电型陶瓷的设计原则

由上述的材料介电常数变化规律和吸波性能对材料介电常数的要求可知,单相匀质材料难以具备好的

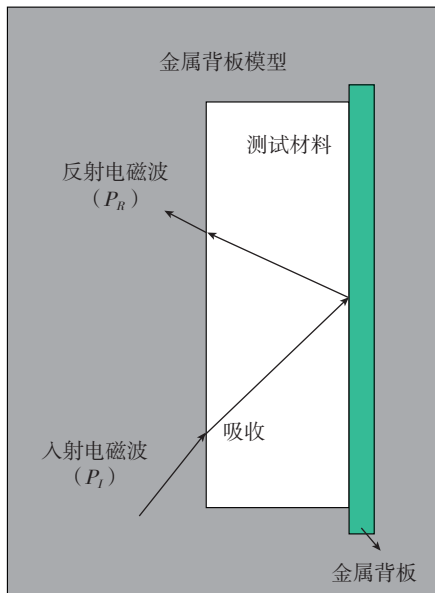


图1 金属背板模型示意图

Fig.1 Schematic of metal back-panel model

吸波性能。介电型材料的阻抗失配是指,材料的介电常数与空气的介电常数差异过大,导致电磁波从空气入射到材料表面时发生强反射。对高介电常数的陶瓷而言,由于其与空气的阻抗失配导致表面反射强烈,因而吸波性能差。对低介电常数的陶瓷而言,由于其对电磁波的损耗吸收能力弱,吸波性能同样无法满足实际需要。因此吸波材料的介电常数应为一个适中的值。通过计算 X 波段 (8.2~12.4GHz) 反射系数与复介电常数的关系^[39],得到如图2所示的结果。可知当材料介电常数实部和虚部分别约为 7.3 和 3.3 时,反射系数可

达到最小值。为此需对材料进行合理的结构设计,使其复介电常数最大程度地接近目标值,以实现其吸波性能的优化。结构设计的方法主要有透波阻抗匹配层设计和透/吸波复合设计两种。

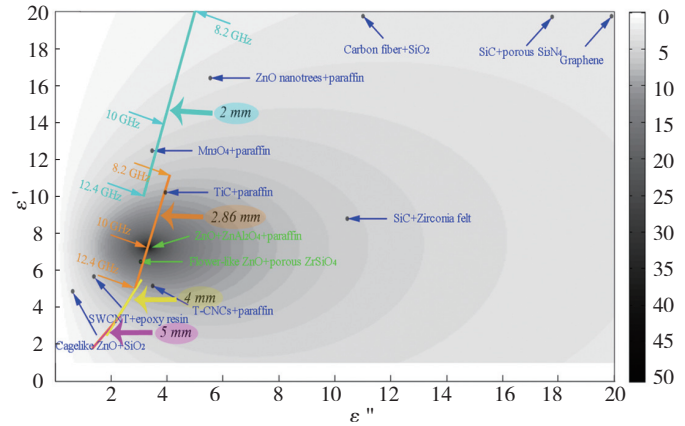


图2 反射系数与复介电常数的关系^[39]

Fig. 2 Relationship between reflection coefficient and complex permittivity^[39]

阻抗匹配层设计,即为高介电常数的陶瓷制备低介电常数的阻抗匹配层,从而改善其与空气的阻抗匹配性,减少表面反射,从而提高材料的吸波性能。常用的阻抗匹配层制备方法有氧化法、CVD、化学气相沉积(CVD)和物理气相沉积(PVD)等。这种方法适用于改善高介电常数材料的吸波性能。阻抗匹配层保证了弱的表面反射,即良好的阻抗匹配,同时高介电的原陶瓷基体充当了损耗相,使电磁波被损耗吸收。因此阻抗匹配层设计是一种可行的改善吸波性能的方法。

透/吸波复合设计,即通过在低介电常数陶瓷中添加高介电常数相,提高其介电常数,增强其对电磁波的衰减能力,从而提高其吸波性能。通过原位自生或外加吸波剂等方法将高介电常数的第二相引入并弥散分布于原基体材料中,使单相匀质材料转变为复相材料。这种方法适用于改善低介电常数材料的吸波性能。复相结构中的基体材料由于具有低介电常数,保证了弱的一次反射,同时高介电常数的第二相保证了材料对电磁波的消耗衰减能力,使材料宏观表现出较好的吸波性能。复相结构可表示为 $A+B$ 型^[40-41],其中 A 代表透波的基体相, B 代表高介电相。最近,我们提出 $A+B+C$ 型^[39]复相结构,其中 C 代表中介电相(介电常数介于 A 、 B 之间), C 相通常包裹着 B 相以实现 A 相与 B 相间介电常数的梯度变化,降低 B 相表面对电磁波的反射,从而进一步提高材料整体的吸波性能。图3为上述2种复相结构的示意图。

3 介电型陶瓷的吸波性能

3.1 阻抗匹配层对陶瓷吸波性能的影响

3.1.1 表面氧化法制备阻抗匹配层

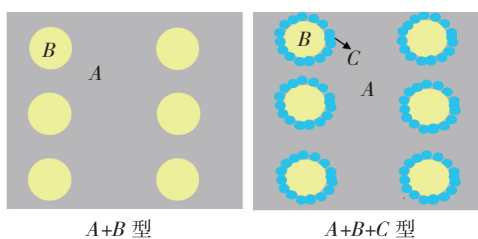
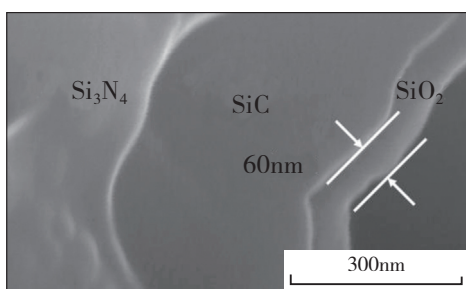


图3 复相结构两种类型的示意图

Fig.3 Schematic of two kinds of composite microstructure

对非氧化物陶瓷而言,如SiC陶瓷,通过表面氧化可在陶瓷表面形成一层氧化膜。当这种氧化膜具有低介电常数时即可充当阻抗匹配层。以多孔 Si_3N_4 为基片,通过CVI沉积SiC得到 Si_3N_4 -SiC复相陶瓷。由于CVI SiC是一种半导体,具有较高的复介电常数,与空气的阻抗不匹配,因而吸波效率不高。为了改善其吸波性能,继而通过高温氧化法在CVI SiC表面制备出一层致密的 SiO_2 ,得到 Si_3N_4 -SiC/ SiO_2 复相陶瓷^[42]。该复相陶瓷的微结构如图4所示。由于 SiO_2 具有低的电导率和复介电常数,随着 SiO_2 层厚度的增加即氧化时间的增加, Si_3N_4 -SiC/ SiO_2 复相陶瓷的复介电常数逐渐降低但仍保持较高的介电损耗。计算表明 Si_3N_4 -SiC/ SiO_2 的反射系数较 Si_3N_4 -SiC有明显降低。这个结果说明,表面氧化制备的 SiO_2 层改善了CVI SiC与空气的阻抗匹配特性,从整体上提高了材料的吸波性能。

可见,对某些材料通过表面氧化法制备阻抗匹配层可有效改善材料与空气的阻抗匹配性,使更多入射电磁波进入材料内部,从而被内部的高介电常数相损耗吸收,从整体上表现为材料吸波性能的提高。

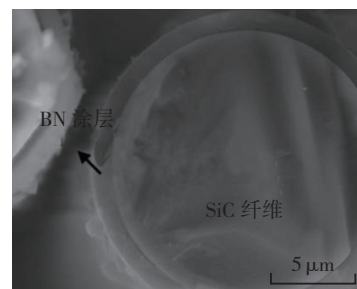
图4 Si_3N_4 -SiC/ SiO_2 复相陶瓷微结构的SEM照片^[42]Fig.4 SEM picture of microstructure of Si_3N_4 -SiC/ SiO_2 composite ceramic^[42]

3.1.2 CVI/CVD法制备阻抗匹配层

SiC纤维具有高的介电常数,是电磁波的强反射体,而BN具有很低的介电常数和介电损耗^[43]。因此,可在SiC纤维表面制备BN阻抗匹配层,从而降低SiC纤维对入射电磁波的反射,提高其吸波性能。采用CVI法可在SiC纤维表面制备BN涂层,得到BN-

SiC纤维^[44]。BN-SiC纤维的断口SEM照片如图5所示,可以看出SiC表面均匀地包覆了一层BN涂层。试验测试结果显示BN-SiC的复介电常数较SiC有明显降低。反射系数的计算结果表明BN-SiC纤维的吸波性能较原始SiC纤维具有明显提高。这些结果均说明BN涂层可有效改善SiC纤维的阻抗匹配性,降低纤维对电磁波的反射从而提高纤维的吸波性能。

类似地,在多孔 Si_3N_4 基片上通过CVI法得到的PyC- Si_3N_4 复相陶瓷,由于PyC的介电常数高,与空气阻抗失配,因此在其表面通过CVD法制备低介电常数的 Si_3N_4 层作为阻抗匹配层^[45]。 Si_3N_4 层因降低了PyC

图5 BN-SiC截面SEM照片^[44]Fig. 5 SEM picture of BN-SiC cross section^[44]

对入射电磁波的一次反射而使PyC- Si_3N_4 复相陶瓷的吸波性能得到改善。

由此可见,通过CVI/CVD法可在高介电常数的纤维或块体陶瓷表面制备不同的低介电常数的阻抗匹配层,改善原始材料与空气的阻抗匹配性,通过减少表面对入射电磁波的反射而使材料的宏观吸波性能得到提高。

3.1.3 其他阻抗匹配层

Sung-soo Kim等人^[46]通过磁控溅射法在具有高介电常数的铁电体表面制备了具有低介电常数的ITO($\text{In}_{2-x}\text{Sn}_x\text{O}_3$)涂层,涂层厚度为入射波长的1/4。当薄层电阻为 $377\ \Omega/\text{sq}$ 时反射系数最小值达到了 -20dB 。可见ITO涂层有效改善了铁电体与空气的阻抗匹配程度,使其电磁吸收性能得到了很大的提高。Xin Tang等^[47]通过原位聚合在钽铁氧体表面制备了聚苯胺层,也使原始材料的反射系数显著降低,改善了材料的吸波性能。

上述结果均表明,通过表面氧化、CVI/CVD、磁控溅射等多种涂层制备方法均可实现在高介电常数相表面制备具有低介电常数的阻抗匹配层,使电磁波进入材料内部被高介电常数相消耗吸收。因此,制备阻抗匹配层是改善材料吸波性能的一个有效途径。

3.2 透/吸波复相结构设计对陶瓷吸波性能的影响

3.2.1 外加纳米吸波剂法

具有宽禁带半导体特性的纳米 SiC 颗粒是常用的纳米吸波剂^[48-49],将纳米 SiC 引入 PDCs-SiBCN 中,随 SiC 含量的逐渐增加, SiC-SiBCN 复相陶瓷的介电常数也逐渐增加,导致反射系数降低,即陶瓷的吸波性能得到提高^[50]。SiC 与陶瓷基体间形成大量的纳米界面,界面电荷在磁场作用下发生松弛极化而消耗电磁波能量。

多壁碳纳米管(MWCNTs)是常用的纳米形核剂,可促进非晶态向晶态的转变^[51-54]。将 MWCNTs 引入 PDCs-SiBCN 中,由于 MWCNTs 具有形核剂的作用,促进了陶瓷基体中 SiC 纳米晶的形成^[55]。同时, MWCNTs 是晶态的导电相,和半导体的 SiC 共同组成导电网络并在陶瓷基体中形成了大量的纳米界面,致使材料在电磁场中的界面极化效应增强,更有效地改善了 PDCs-SiBCN 的吸波性能。通常商业获得的 MWCNTs 管壁外存在一层无定型碳,增大了碳管间的接触电阻,不利于导电性的提高。为此将 MWCNTs 和 ZnO 同时引入 SiO₂ 陶瓷基体。MWCNTs 管壁外的无定型碳与 ZnO 中的 O 原子结合,使无定型碳被消耗的同时在 ZnO 中留下了氧空位^[56]。这个反应使 MWCNTs 间的接触电阻减小,同时使 ZnO 中载荷子的浓度增加,更有效地增大了复相陶瓷的导电性,从而增强了材料对电磁波的损耗吸收能力,提高了陶瓷的吸波性能。

对非陶瓷的基体也可通过外加纳米吸波剂的方法改善其吸波性能。将 ZnO/ZnAl₂O₄ 加入石蜡中制成复合材料,电损耗相的 ZnO 被纳米颗粒状的中等损耗相 ZnAl₂O₄ 包裹,并弥散分布于电绝缘的石蜡基体中,形成 A+B+C 型的吸波材料微结构^[39]。测试结果表明 ZnO/ZnAl₂O₄-石蜡复合材料的介电常数相比石蜡具有明显的提高,反射系数计算结果表明复合材料的吸波性能相比石蜡得到了很大的提升。将氧化铁改性的还原态氧化石墨烯(γ -Fe₂O₃/RGO)掺入石蜡中可制成 γ -Fe₂O₃/RGO-石蜡复合材料^[57]。其中 γ -Fe₂O₃/RGO 充当了高介电常数的 B 相,石蜡充当了透波的 A 相,形成 A+B 型的吸波材料微结构。石墨烯的电损耗和 γ -Fe₂O₃ 纳米颗粒间的界面极化对电磁波产生了强烈的衰减。测试结果显示该复合材料的反射系数最小值达到了 -59.6dB 且吸波频带宽,具有良好的吸波性能。

总之,向透波基体中外加纳米吸波剂,使吸波剂弥散分布于基体中,可形成 A+B 或 A+B+C 型的符合吸波材料结构设计原则的微结构,从而有效改善了材料的吸波性能。

3.2.2 CVI 共沉积法

CVI 是将一种或几种烃类气体混合物经高温分解、缩聚之后的产物沉积在多孔介质内部使材料致密化的方法,是近年来发展起来的制备无机材料的新技术。共沉积是通过对气相反应物的设计,在多孔介质内部同时生成多种不同相的一种沉积方法。

试验表明,通过 CH₃SiCl₃-C₃H₆-NH₃-H₂-Ar 体系可共沉积 C、SiC 和 Si₃N₄,即 CVI SiCN。以多孔 Si₃N₄ 为基片经 CVI SiCN 后,可制备出 Si₃N₄-SiCN 复相陶瓷^[58]。Si₃N₄-SiCN 之所以具有良好的吸波性能是因为其特殊的微结构。Si₃N₄ 具有很低的复介电常数,是良好的透波载体。C 和 SiC 具有高的复介电常数,是良好的电损耗相,C 和 SiC 弥散分布在 Si₃N₄ 中形成 A+B 型微结构,使得 Si₃N₄-SiCN 既与空气具有良好的阻抗匹配特性又对进入其内的电磁波具有较好的损耗吸收能力。试验测试结果表明 Si₃N₄-SiCN 的复介电常数明显高于 Si₃N₄,反射系数计算结果显示 Si₃N₄-SiCN 的吸波性能较 Si₃N₄ 具有显著提高。

以多孔 Si₃N₄ 为基片,通过 CVI 的方法还可实现共沉积 SiC 和 B₄C,即 CVI SiBC,制备出 Si₃N₄-SiBC 复相陶瓷^[59]。其中 Si₃N₄ 基片充当了透波的 A 相, SiC 和 B₄C 充当了电损耗的 B 相,形成 A+B 型吸波微结构。沉积前 Si₃N₄ 的介电常数实部、虚部和介电损耗分别为 3.4、0.01 和 0.004,沉积后 Si₃N₄-SiBC 的介电常数实部、虚部和介电损耗分别为 4.7、3.5 和 0.8。可以看出,沉积后陶瓷的介电常数实部增大并不多,而虚部却提升了 2 个数量级,这表明沉积后的陶瓷既与空气具有良好的阻抗匹配特性又对电磁波具有很大的衰减能力,具有很大的吸波潜力。反射系数的计算结果表明最小值达到了 -28dB。可见 CVI SiBC 对多孔 Si₃N₄ 的介电性能具有显著的影响。

由上述结果可知,在多孔透波基体上通过 CVI 共沉积电损耗相和透波相,形成 A+B 的微结构,满足吸波材料对微结构的要求,可使基体的吸波性能显著提升。

3.2.3 PDC 热处理法

近年来,由聚合物先驱体经交联固化和裂解而得的聚合物转化陶瓷(PDCs)引起了广泛的关注。通过聚合物先驱体的合理设计可制备出任意组成的陶瓷,具有分子级的可设计性。PDCs 相比传统陶瓷材料具有许多优点,例如优良的热稳定性^[60]、良好的高温力学性能^[61]、抗腐蚀和氧化性等^[62-65]。同时,由于聚合物先驱体的液态特性,使其在许多方面都具有极大的应用潜力,例如制备连续纤维增韧陶瓷基复合材料的基体,陶瓷纤维,陶瓷涂层和陶瓷粉末等^[66-71]。PDCs 还可应用于陶瓷连接件的防松^[72]。裂解态的 PDCs 为非晶态,

具有低的复介常数,是良好的透波载体,通过热处理可使其中析出晶态的纳米颗粒,从而形成符合吸波材料结构设计原则的 $A+B$ 型微结构,在电磁吸收领域具有极大的潜力和可设计性。

通过裂解聚硅氮烷可制备出 $PDC-SiCN$ ^[73]。裂解态的 $PDC-SiCN$ 是非晶的,其介电常数实部和虚部都很低,虽然与空气具有良好的阻抗匹配性,但材料本身对电磁波的衰减能力很弱,因此吸波性能较差。当热处理温度足够,原子或分子的热能足以克服能垒在陶瓷内部进行迁移时,短程有序单元逐渐形核、长大,稳定的纳米晶粒便开始形成。图 6 是热处理 $PDC-SiCN$ 的 HRTEM 照片,可以看出 SiC 和 Si_3N_4 纳米晶粒均已形成且分布在无定型的基体中。这个结果说明热处理可使非晶态 $PDC-SiCN$ 中形成弥散分布的纳米晶粒,形成 $A+B$ 型吸波微结构。介电性能测试结果显示随热处理温度的升高,陶瓷复介电常数逐步增大。介电实部的增大主要归因于界面极化的增强:随热处理温度的升高,晶粒逐渐增多,界面数量随之增多,当材料处于电磁场时界面极化也随之增强。介电虚部的增大主要归因于陶瓷电导率的提高:晶态物质的电导率高于非晶态,热处理温度越高晶粒数量越大,陶瓷整体的电导率就越高。根据自由电子理论,介电常数虚部与材料电导率成正比,因而虚部增大。反射系数的计算结果表明热处理对减小陶瓷的反射系数具有积极作用,即促进了材料吸波性能的提高,这主要归因于 $A+B$ 型吸波微结构的形成。

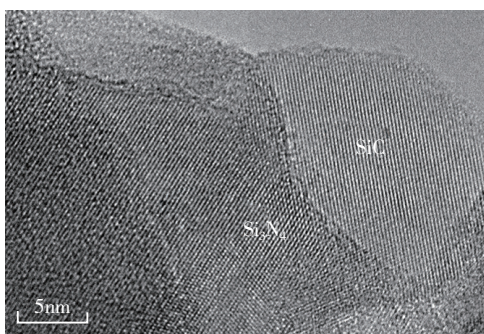


图6 处理PDC-SiCN的HRTEM照片^[73]

Fig.6 HRTEM picture of heat treated PDC-SiCN^[73]

通过热处理还可使非晶态 $PDC-SiBCN$ 中析出 SiC 纳米晶,也形成了 $A+B$ 型微结构^[74]。测试结果表明陶瓷的介电常数显著增大,反射系数显著降低,吸波性能得到了提高。

可见,热处理可使非晶态的 $PDCs$ 中析出弥散分布的晶态纳米颗粒,形成符合吸波材料结构设计原则的 $A+B$ 型微结构,使 $PDCs$ 的吸波性能得到有效改善。

3.2.4 自生一维纳米吸波剂法

直接掺入的纳米相,如纳米管、纳米线和晶须等,通常会发生团聚现象,使纳米相的纳米效应被削弱。团聚严重时还可能破坏基体陶瓷力学性能。对由液态先驱体转化而来的陶瓷,可加入分散剂利用溶液混合方法将纳米相引入陶瓷中。这种方法可缓和团聚现象但还是未能彻底解决纳米相团聚的问题。原位自生的纳米相通过催化剂的催化作用,在陶瓷内部原位生长,有效地解决了纳米相的团聚。从力学性能的角度分析,原位自生的一维纳米相,如纳米管和纳米线,还可起到增强陶瓷的作用。当基体和纳米相的结合力适当时,陶瓷可将外力传递给纳米相。通常纳米相由于缺陷少其力学性能可达到很高的值^[75-76],这样纳米相就可承担一定的载荷而使陶瓷的强度增大。同时,当陶瓷中出现裂纹时,纳米管或线还可起到桥连裂纹的作用,抑制裂纹扩展或使裂纹偏转,从而使陶瓷的韧性提高。从吸波材料的角度分析,原位自生的纳米相可充当 B 相,非晶的陶瓷基体充当 A 相,形成 $A+B$ 型的吸波材料微结构。纳米相在基体中产生大量界面,在电磁场作用下,界面电荷松弛极化和纳米相自身电损耗均可发生,从而消耗电磁波能量起到吸波的效果。

在 $PDC-SiOC$ 基体中通过二茂铁催化可原位自生出 SiC 纳米线^[77],使陶瓷的介电常数实部和虚部分别从 3.63 和 0.14 增大到 10.72 和 12.17。最小反射系数从 -1.22dB 降低到 -20.01dB ,说明原位自生 SiC 纳米线可有效改善非晶态陶瓷基体的吸波性能。在 PyC/Si_3N_4 中通过纳米镍颗粒催化可原位自生出 $CNTs$ ^[78],试验结果显示陶瓷的吸波性能得到明显改善。图 7 为自生 $CNTs$ 的 SEM 照片, $CNTs$ 均匀分布于陶瓷基体中,无团聚现象。

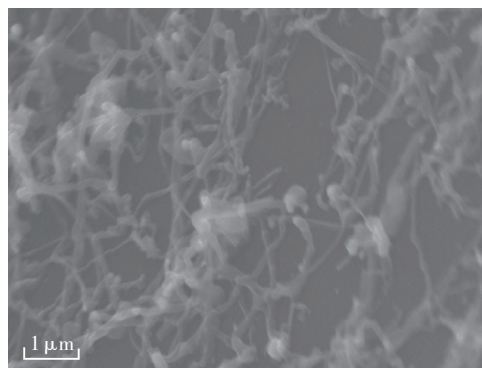


图7 含1.25%镍颗粒的酚醛树脂裂解后的SEM照片^[78]

Fig.7 SEM picture of as-pyrolyzed phenolic resin with 1.25% nickel particles^[78]

4 结论

对高介电常数的陶瓷,通过在其表面制备低介电

常数的阻抗匹配层来缓和陶瓷基体与空气的阻抗失配问题,达到了改善吸波性能的目的;对低介电常数的陶瓷,通过微结构设计使纳米级高介电常数相弥散分布于低介电的陶瓷基体中,有效改善了材料的吸波性能。其中通过微结构设计形成的透/吸波复合结构具有更大的可设计性和吸波潜力。

在 $A+B$ 型复合结构的基础上发展起来的 $A+B+C$ 型复合结构,由于中介电常数的 C 相减小了 A 、 B 相间的介电常数梯度,因而更加显著地提高了材料的吸波性能。CVI 和 PDC 工艺可设计陶瓷的微结构,有希望促进 $A+B+C$ 型复合结构在吸波型陶瓷中的应用。陶瓷材料作为优异的高温结构材料,在吸波领域同样具有极大的潜力,是有希望的结构功能一体化材料。

参考文献

- [1] Yang Y, Gupta M C. Novel carbon nanotube-polystyrene foam composites for electromagnetic interference shielding. *Nano Lett*, 2005; 5(11): 2131-2134.
- [2] Wua Z P, Lia M M, Huc Y Y, et al. Electromagnetic interference shielding of carbon nanotube macrofilms. *Scr Mater*, 2011, 64(9): 809-812.
- [3] Abbas S M, Chatterjee R, Dixit AK, et al. Electromagnetic and microwave absorption properties of $(\text{Co}^{2+}\text{-Si}^{4+})$ substituted barium hexaferrites and its polymer composite. *J Appl Phys*, 2007, 101.
- [4] Dhawan S K, Singh N, Rodrigues D. Electromagnetic shielding behavior of conducting polyaniline composites. *Sci Technol Adv Mater*, 2003, 4:105-113.
- [5] Wilson P F, Ma M T, Adams-I J. Techniques for measuring the electromagnetic shielding effectiveness of materials: far-field source simulation. *IEEE Trans Electromagn Compat*, 1988,30(3):239-250.
- [6] Chung D D L. Materials for electromagnetic interference shielding. *J Mater Eng Perform*, 2000,9(3):350-354.
- [7] Devender, Ramasamy S R. Review of EMI shielding and suppression materials//IEEE proc int conf electromagnetic interference and compatibility, Piscataway (New Jersey, USA), 1997: 459-466.
- [8] Singh A P, Garg P, Alam F, et al. Phenolic resin-based composite sheets filled with mixtures of reduced graphene oxide, $\text{c-Fe}_2\text{O}_3$ and carbon fibers for excellent electromagnetic interference shielding in the X-band. *Carbon*. 2012, 50: 3868-3875.
- [9] Wang L L, Tay B K, See K Y, et al. Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon-based materials prepared by screen printing. *Carbon*. 2009, 47: 1905-1910.
- [10] Das NC, Chaki TK, Khastgir D, et al. Electromagnetic interference shielding effectiveness of ethylene vinyl acetate based conductive composites containing carbon fillers. *J Appl Polym Sci*. 2001, 80: 1601-1608.
- [11] Lee C Y, Song H G, Jang K S, et al. Electromagnetic interference shielding efficiency of polyaniline mixtures and multilayer films. *Synth Met*. 1999,102: 1346-1349.
- [12] Han E G, Kim E A, Oh K W. Electromagnetic interference shielding effectiveness of electroless Cu-plated PET fabrics. *Synth Met*, 2001,123: 469-476.
- [13] Xiang C, Pan Y, Guo J. Electromagnetic interference shielding effectiveness of multiwalled carbon nanotube reinforced fused silica composites. *Ceram Int*, 2007,33: 1293-1297.
- [14] Niihara K. New design concept of structural ceramics - ceramic nanocomposites. *J Ceram Soc Jpn*, 1991, 99: 974-982.
- [15] Mitomo M, Hirosaki N, Nishimura T, et al. Microstructure control in silicon nitride ceramics — a review. *J Ceram Soc Jpn*, 2006, 114: 867-872.
- [16] Riley F L. Silicon-nitride-and-related-materials. *J Am Ceram Soc*, 2000,83: 245-265.
- [17] Hirano T, Niihara K. Microstructure and mechanical-Properties of $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiC}$ Composites. *Mater Lett*, 1995, 22: 249-254.
- [18] Hua H L, Yao D X, Xia Y F, et al. Fabrication and mechanical properties of SiC reinforced reaction-bonded silicon nitride based ceramics. *Ceram Int*, 2014,40: 4739-4743.
- [19] Kim S S, Kim S T, Ahn J M, et al. Magnetic and microwave absorbing properties of Co - Fe thin films plated on hollow ceramic microspheres of low density. *J Magn Magn Mater*, 2004,271(1): 39-45.
- [20] Xia T K, Stroud D. Nonlinear electrodynamics and nonresonant microwave absorption in ceramic superconductors. *Phys Rev B*, 1989,39(7): 4792.
- [21] Ghasemi A, Hossienpour A, Morisako A, et al. Electromagnetic properties and microwave absorbing characteristics of doped barium hexaferrite. *J Magn Magn Mater*, 2006,302(2): 429-435.
- [22] Tan E, Kagawa Y, Dericicoglu A F. Electromagnetic wave absorption potential of SiC-based ceramic woven fabrics in the GHz range. *J Mater Sci*, 2009,44(5): 1172-1179.
- [23] Cao M S, Song W L, Hou Z L, et al. The effects of temperature and frequency on the dielectric properties, electromagnetic interference shielding and microwave-absorption of short carbon fiber/silica composites. *Carbon*, 2010,48(3): 788-796.
- [24] Yin X, Xue Y, Zhang L, et al. Dielectric, electromagnetic absorption and interference shielding properties of porous yttria-stabilized zirconia/silicon carbide composites. *Ceram Int*, 2012,38(3): 2421-2427.
- [25] Cao M, Qin R, Qiu C, et al. Matching design and mismatching analysis towards radar absorbing coatings based on conducting plate. *Mater Des*, 2003,24: 391-396.
- [26] Cao M, Zhu J, Yuan J, et al. Computation design and performance prediction towards a multi-layer microwave absorber. *Mater Des*, 2002,23: 557-564.
- [27] Cao M, Zhu J, Yuan J, et al. Simulation of multiple composite coatings based on conducting plate and investigation of microwave reflectivity. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2002.
- [28] Qing Y, Zhou W, Luo F, et al. Optimization of electromagnetic matching of carbonyl iron/BaTiO₃ composites for microwave absorption. *J Magn Magn Mater*, 2011, 323: 600-606.
- [29] Qing y, Zhou W, Luo F, et al. Epoxy-silicone filled with multi-walled carbon nanotubes and carbonyl iron particles as a microwave absorber. *Carbon*, 2010,48: 4074-4080.

本文共有参考文献78篇,因篇章有限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 亦非)