

航空类新型高温雷达吸波材料研究进展

邓凯文¹, 刘智²

(1. 成都发动机(集团)有限公司 总师办, 成都 610503)

(2. 中国人民解放军驻四二〇厂军事代表室, 成都 610500)

摘要: 受使用条件及环境因素的制约, 航空用雷达吸波材料具有更为严格的使用温度要求。传统高温雷达吸波材料由于存在吸收频段窄、低频吸收性能差、抗氧化性能不佳等缺点, 使用受到限制。本文综述了近年来研究较多的新型高温雷达吸波材料的研究现状, 包括 ZnO 及其复合材料、Ti₃SiC₂ 及其复合材料等, 总结了现阶段高温雷达吸波材料研究中面临的问题, 并对高温雷达吸波材料的发展方向进行了展望。

关键词: 高温雷达吸波材料; ZnO 及其复合材料; Ti₃SiC₂ 及其复合材料

中图分类号: V262

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2016.03.001

Research Progress of High-temperature Radar Absorbing Materials in Aeronautical Field

Deng Kaiwen¹, Liu Zhi²

(1. Chief Engineer Office, Chengdu Engine(Group) Co., Ltd., Chengdu 610503, China)

(2. The Military Representative Office of PLA Residing in No. 420 Factory, Chengdu 610500, China)

Abstract: Restricted by the applied conditions and environments, aeronautical radar absorbing materials(RAMs) require more stringent temperature requirements. Due to the narrow absorbing band, poor radar absorption at lower frequency and poor oxidation resistance property, the applications of traditional high temperature RAMs are limited. In this paper, the research of some new high-temperature RAMs, such as ZnO and its composites, Ti₃SiC₂ and its composites, are reviewed in detail. Problems existed in high-temperature RAMs are summarized and the future developments of high-temperature RAMs are prospected.

Key words: high-temperature radar absorbing materials; ZnO and its composites; Ti₃SiC₂ and its composites

0 引言

在现代电子化战争中, 各类雷达技术的发展和运用, 对航空飞行器和武器的生存构成了严重威胁。根据统计分析, 在各种能够对飞行器构成威胁的探测设备和武器中, 雷达的威胁占 60% 以上。雷达隐身技术是最早受到关注和研究且应用最为成熟的一类隐身技术。隐身技术又称低可探测技术, 是指通过结构或材料的设计对目标的特征信号进行有效控制或抑制的技术, 其根本目的是降低目

标的可探测性, 提高其生存能力。雷达隐身技术主要包括外形设计隐身和雷达吸波材料隐身两类。理论上讲, 材料技术对目标的隐身效果是没有上限的^[1-4]。

受使用条件和环境的制约, 航空产品对其制造材料提出了严格要求。航空材料包括金属材料、无机非金属材料、高分子材料和复合材料四类, 按照功能又可分为结构材料和功能材料两类。对于结构材料, 其最关键的要求是轻质高强和高温耐腐蚀性能, 上述性能也是航空类隐身材料在设计 and 应用过程中所必须考虑的, 是区别于其他隐身材料的关键特征。受使用条件的限制, 航空材料在追求轻质和减重方面可以说是“克克计较”, 飞行器每减重 1 kg

所获得的经济效益与飞行速度的关系如图 1 所示^[5]。各类轻质陶瓷及碳类吸收剂成为雷达隐身材料的首选。

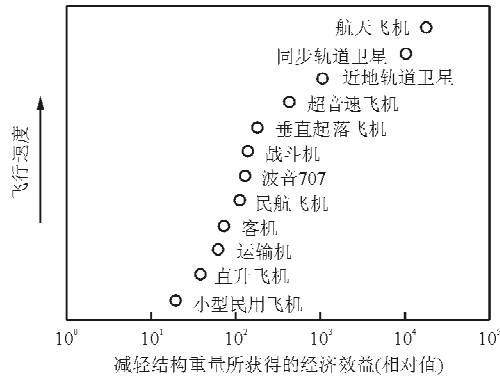


图 1 飞行器每减重 1 kg 所获得的经济效益与飞行速度的关系

Fig. 1 Relations between economic benefits and flight speed with quality of aircraft decreasing 1 kg

高温材料是制约航空产品性能的另一类关键材料。在实际应用中发现,飞机蒙皮的最高温度可以达到 1 000 °C 以上,发动机的工作温度则高达近 2 000 °C^[5],受居里温度的限制,传统磁损耗吸波材料无法应用于此高温条件,故高温吸波材料一般为电损耗吸波材料。单一的电损耗吸波材料存在吸收频带较窄、低频吸波效果较差等缺点。如何提高吸波材料的高温吸波性能是高温隐身材料研究的重点,也是制约航空类雷达吸波材料发展的重要瓶颈。

本文简要介绍了传统高温吸波材料的研究情况,重点综述了近年来各类新型高温吸波剂的研究进展,总结了现阶段高温吸波材料研究中面临的问题,并对高温吸波材料的发展方向进行了展望。

1 传统高温吸波材料

绝大部分磁性吸波材料的居里温度较低,在高温条件下容易失去磁性,进而失去吸波能力,因此磁性吸波材料一般应用于常温或较低温度。高温吸波材料多为陶瓷材料,主要依靠电损耗对电磁波进行吸收。高温吸波材料仅仅具有电损耗,其吸收效率通常低于磁性吸波材料,需要增加厚度以提高其吸波性能。而增加厚度必然导致增加重量,在航空领域的应用中,又对重量有着严格要求,因此在选择航空类高温吸波材料时,必须考虑其厚度和

密度。

传统的高温吸波材料是指碳材料和 SiC 材料。碳材料包括碳黑、石墨、碳纤维、碳纳米管、石墨烯等。碳类吸收剂是应用最早、最广泛的一类吸波材料,早在 1936 年,荷兰就有关于碳黑作为吸收剂的报道^[6]。第二次世界大战期间,石墨便被填充在飞机蒙皮的夹层中用来吸收雷达波。同样是在二战时期,德国人为了保护己方潜艇不被联军的机载搜索雷达发现,在潜艇外壳上包覆了一层泡沫塑料、内衬七层含碳粉的纸用来吸收雷达波,此举对保护潜艇不被发现起到了一定作用。20 世纪 60 年代,美国研究人员发现,在环氧树脂中加入碳黑和银粉,可以吸收 90% 的入射电磁波^[7]。近年来,碳纳米管和石墨烯吸波材料成为研究的热点,相关研究报告^[6,8-13]很多,本文不再赘述。

SiC 具有硬度高、高温强度大、抗蠕变性能好、耐磨损、耐化学腐蚀、抗氧化性能好、热膨胀系数小、热传导率高及半导体性等优异性能。SiC 微粉与许多金属和非金属氧化物具有较好的化学相容性,用于制备金属基、陶瓷基和聚合物基复合材料,表现出优异的性能,被认为是最好的高温吸波材料。SiC 吸波材料主要包括 SiC 粉末和 SiC 纤维复合材料。常规方法制备的 SiC 的电导率较低,对电磁波的损耗能力不强,不能直接作为吸波材料使用。目前,对 SiC 吸波材料的研究主要集中在通过掺杂改性或改变 SiC 纤维的表面状态来调节其电导率以获得较好的吸波性能^[14-20]。

2 新型高温吸波材料

由于传统高温吸波材料存在吸收频段窄、低频吸收性能差、抗氧化性能不佳等缺点,近年来,越来越多的新型吸波剂引起了广泛关注。

2.1 ZnO 及其复合材料

ZnO 是一种典型的直接宽禁带 II~IV 族半导体化合物,室温下其禁带宽度为 3.37 eV,具有良好的化学热稳定性。随着材料制备技术的发展,各种特殊形貌和用途的 ZnO 相继被发现,例如 ZnO 纳米阵列、花瓣状 ZnO、梳状 ZnO、ZnO 纳米架、四脚状 ZnO 晶须等。上述 ZnO 具备不同的性能特征,可以应用于不同的技术领域。近年来,由于重量轻、厚度薄、对电磁波吸收性能优异等特点,ZnO

成为吸波材料的研究热点。

张玲等^[21]采用均匀沉淀法制备纳米 ZnO 粉末,其介电性能随热处理温度不同而变化,600 °C 时,粉体与石蜡组成的复相粉体不仅具有较好的频响特性,而且介电常数实部、虚部和损耗值均相对较大,其原因主要是 600 °C 热处理后的 ZnO 颗粒粒径最小,表面缺陷最多,同时,粉体内部存在大量的带电缺陷,致使其介电常数的虚部和损耗最大。Zhou Liang 等^[22-23]采用微弧等离子喷涂技术制备了 ZnO 含量不同的 ZnO/Al₂O₃、ZnO/莫来石吸波涂层,随着 ZnO 含量的提高,涂层的介电常数明显增加;经过 400 °C 热处理后,ZnO/Al₂O₃ 涂层的介电常数较常温增加明显,而经过 700 °C 热处理后,涂层的复介电常数显著降低;由于热处理过程中发生反应,ZnO/莫来石吸波涂层中产生较多低介电相 ZnAl₂O₄、Zn₂SiO₄,使得经过 900 °C 热处理 5 h 后的介电常数显著降低,介电常数虚部几乎降为 0。

制备方法和条件的差异使得 ZnO 颗粒呈现出多种多样的微观结构及性能,导致其对电磁波的吸收性能不同。Yuan Jie 等^[24]采用锌粉燃烧法制备四脚状 ZnO 颗粒,通过冷压成型、700 °C 烧结制备了 T-ZnO/SiO₂ 材料,其中 T-ZnO 的质量分数为 20%;高温介电常数测试结果表明,测试温度从 300 °C 上升至 500 °C 时,复介电常数实部变化不大,约为 2.1,虚部显著增加,即高温条件有利于该材料对电磁波的损耗。Zhuo Renfu 等^[25-27]采用化学气相沉积技术制备了 ZnO 一维纳米棒、二维纳米梳和三维纳米树结构,并将试样与石蜡按质量比 1:1 混合,测试其介电常数,测试发现三维纳米树结构 ZnO 复介电常数及介电损耗最高,二维纳米梳次之,一维纳米棒最低,表明 ZnO 材料固有的介电损耗特性随着形貌和结构的变化而不同,由于介电损耗缘于各个界面极化电荷随着频率变化的迟滞效应,而 ZnO 纳米树相比于纳米梳、纳米棒结构拥有更多复杂的界面,因此具有卓越的对电磁场能量的损耗能力。Yan Junfeng 等^[28]采用水热法合成了不同长径比的菊花状 ZnO 纳米线簇,并将其按 20% 的质量比与石蜡混合,浇铸成 180 mm × 180 mm × 2 mm 的吸波体,测试其吸波性能,测试发现,反射率 R 随 ZnO 样品长径比的增加而减小;介电常数测试结果表明其反射率的减小主要由于

以下五方面原因导致的介电损耗的增加:(1)具有电偶极子性质的 ZnO₄²⁻ 配位四面体的转向弛豫极化;(2)空间导电网络的形成;(3)O 空位缺陷导致的电导损耗;(4)纳米线尖端的耦合作用;(5)界面极化。

由于存在本征缺陷,ZnO 在室温下具有一定的导电性,但是电导率较低。在 ZnO 中引入金属氧化物杂质,例如 Al³⁺ 等,这些高价金属离子能够有效增加载流子浓度,从而大幅提高 ZnO 的电导率和极化能力。姜霞等^[29]采用均匀沉淀法合成了不同掺杂量的掺 Al 氧化锌粉末(ZAO),在 ZAO 粉体中,Al³⁺ 取代了 Zn²⁺ 的位置,形成 Al/ZnO 固溶体,保持了 ZnO 的结构,随着 Al 元素掺杂量的增加,粉体的复介电常数实部和损耗逐步增大;但是当 Al 元素掺入到一定程度趋于饱和时,Al 就会和 ZnO 结合生成铝酸锌,导致 ZAO 粉体中缺陷浓度降低,自由电子数量降低,使粉体复介电常数实部和损耗呈下降趋势。Liu Yi 等^[30]采用无压烧结技术制备了 ZnO/ZrSiO₄ 陶瓷块体,通过添加 Al₂O₃ 调节材料的介电及吸波性能,研究表明当 Al₂O₃ 的添加量为 3 wt% 时,材料的复介电常数达到最大,此时材料在 2.4 mm 厚度时吸波性能达到最佳;继续增加 Al₂O₃ 的含量,更多 Al₂O₃ 与 ZnO 反应生成低介电的 ZnAl₂O₄ 相,导致材料的吸波性能变差。Kong Luo 等^[31]以多孔 ZrSiO₄ 陶瓷为透波基体,采用溶胶-凝胶法制备的 Al 掺杂 ZnO 为吸收剂的复相陶瓷,Al 掺杂量对复相陶瓷吸波性能的影响表现出与文献^[29]相似的规律,当复相陶瓷厚度为 4 mm 时,Al 掺杂含量为 2.5 at% 的样品表现出最优的吸波性能。闫军锋^[32]采用水热法合成 Sb 掺杂的菊花状 ZnO 纳米线簇,并将其按 25% 的质量比与石蜡混合,浇铸成 180 mm × 180 mm × 2 mm 的吸波体,测试其吸波性能。测试发现,Sb 掺杂后的菊花状 ZnO 纳米线簇的反射率峰值较未掺杂前更低,其中 Sb 掺杂量为 3% 时反射率峰值最低。Sb 的掺杂,一方面引入了弛豫过程,增加了介质的电导率,另一方面进入晶格间隙的 Sb³⁺ 诱导了轨道耦合磁矩,因此,3% 的 Sb 掺杂能够引起较强的损耗吸收,拓宽吸收频带。但是,当 Sb 掺杂量增加到有新的物相生成时,Sb³⁺ 破坏了 ZnO 晶格的完整性,导致晶格散射能力增强,其电导率必然减小,最终导致损耗减小,反射率

升高。

ZnO 颗粒作为单一吸收剂制备吸波材料时,由于其电导率较低,导致电损耗较小,通常可以将 ZnO 与电导率较高的吸收剂混合使用,以提高材料整体的吸波性能。Liu Ye 等^[33]采用无压烧结方法制备 MWCNTs 和 ZnO 增强 SiO₂ 材料,与 MWCNT/SiO₂ 材料相比,MWCNT-ZnO/SiO₂ 材料的复介电常数明显升高,当其厚度为 2.25 mm 时,最小反射率为 -21.6 dB,小于 -10 dB 的吸收带宽为 3.2 GHz,该材料的吸波性能明显优于 SiO₂、MWCNT/SiO₂ 材料。Li Huifeng 等^[34]、Qin Hui 等^[35]将四脚状 ZnO 晶须分别与碳纳米管、碳黑复合成吸收剂,以环氧树脂为基体制备复合吸波材料,并研究其介电吸波性能,结果表明,添加碳纳米管和碳黑后,由于吸波材料导电性能、界面极化增强,显著提高了四脚状 ZnO 晶须的介电常数,其吸波性能也大幅提高。Song Weili 等^[36]在 MWCNT 表面以 [0 0 0 2] 择优取向生长了 ZnO 单晶纳米颗粒,颗粒尺寸约为 30~50 nm,其制备过程如图 2 所示。MWCNT 与 ZnO 的界面结构可以看作微型电容器,MWCNT、ZnO 构成电阻-电容结构,该结构有利于对电磁波进行损耗吸收。将 MWCNT/ZnO 样品按质量分数 40% 与石蜡混合,测试其介电常数并计算其不同厚度下的反射率,结果表明,该复合材料在 3~5 mm 厚度范围内表现出优异的吸波性能,其反射率最低可达 -35 dB。



图 2 MWCNT 表面生长 ZnO 纳米颗粒示意图
Fig. 2 Schematic illustration of ZnO nanoparticle immobilizing on MWCNT

2.2 Ti₃SiC₂ 及其复合材料

Ti₃SiC₂ 是一种典型的片层结构三元化合物陶瓷,自 1967 年成功制备以来,引起了广泛关注^[37]。Ti₃SiC₂ 晶体结构为六方晶系,空间群为 P6₃/mmc,晶格参数 $a=0.3068\text{ nm}$, $c=1.7645\text{ nm}$,其理论密度、弹性模量和维氏硬度分别为 4.53 g/cm³、320 GPa 和 4 GPa。由于其结构的特

殊性,Ti₃SiC₂ 材料同时具备金属与陶瓷材料的部分特性。一方面,与金属类似,Ti₃SiC₂ 在常温下具有良好的机械加工性、导热性、导电性、较低的维氏硬度和较高的弹性模量、剪切模量,在高温下具有塑性;另一方面,Ti₃SiC₂ 兼具陶瓷材料的性能,有较高的屈服强度、良好的热稳定性和优异的抗氧化性。Ti₃SiC₂ 的室温电导率为 $4.5 \times 10^6 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$,约为纯 Ti 的 2 倍、TiC 的 4 倍,较高的电导率能够增加材料对电磁波的电导损耗,这对电磁波的吸收是非常有利的;良好的高温抗氧化性能也为其作为高温吸波材料打下了基础^[38]。目前,国内将 Ti₃SiC₂ 作为吸收剂进行研究的主要有清华大学和西北工业大学。

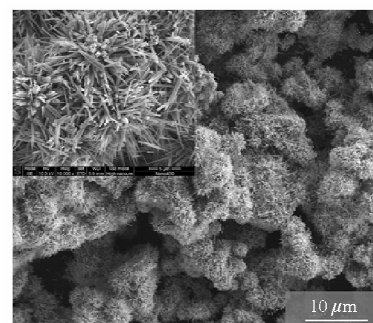
Shi Suilin 等^[38]对热压烧结 Ti₃SiC₂ 块体材料的电导率及屏蔽性能进行了测试,并比较了其电性能与 Ti 材料的差异,结果表明,由于 Ti₃SiC₂ 具有较高的电导率,使其具有较大的介电常数和优异的屏蔽性能;但是,当 Ti₃SiC₂ 作为吸波材料时,较高的电导率使入射电磁波在材料表面以反射为主,导致其吸波性能大幅降低。一般地,可以将电导率高的吸收剂加入绝缘基体中制备成复合材料,通过控制吸收剂的含量调节其电导率以达到吸波材料的要求。Shi Suilin 等^[39-42]将 Ti₃SiC₂ 与聚苯胺、YSZ、羟基磷灰石、Al₂O₃ 混合制备复合材料,研究其电导率随 Ti₃SiC₂ 含量的变化规律,发现随着 Ti₃SiC₂ 含量的升高,复合材料的电导率升高,即可以通过调节复合材料中 Ti₃SiC₂ 的含量来调节其电导率,使之处于半导体范围内,此时复合材料可能具有较好的吸波性能;但是,当 Ti₃SiC₂ 的含量上升到一定程度后,复合材料的电导率发生突变,表现出明显的“逾渗效应”,可以预测此时其吸波性能也会发生较大变化。因此,确定合适的 Ti₃SiC₂ 含量是研究 Ti₃SiC₂ 复合吸波材料的重点。

Su Jinbu 等^[43-44]采用等离子喷涂技术制备了不同喷涂参数、不同 Ti₃SiC₂ 含量的 Ti₃SiC₂/堇青石复合吸波涂层,并研究其介电及吸波性能。反射率计算结果表明,当 Ti₃SiC₂ 含量为 30 wt%、厚度为 2.0 mm 时,吸波涂层的吸波性能达到最佳,反射率峰值为 -39.91 dB,小于 -10 dB 的吸收带宽可达 1.7 GHz。此外,Su Jinbu 等^[45]测试了 Ti₃SiC₂/堇青石复合吸波涂层在 -700 °C 条件下

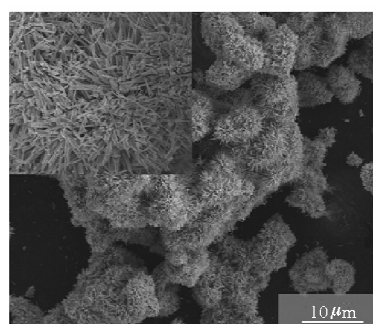
的低温介电常数并模拟计算了其反射率。研究表明, Ti_3SiC_2 /堇青石复合吸波涂层的复介电常数随着温度的升高而增加,其吸波性能在高温条件下依然较好, Ti_3SiC_2 具备成为新一代高温吸收剂的潜力。Mu Yang 等^[46-47]将 Ti_3SiC_2 作为吸收剂添加到 SiCf/SiC 复合材料中研究其室温及高温条件下的屏蔽性能。研究表明,随着 Ti_3SiC_2 含量的增加,复合材料的复介电常数增加;当固定 Ti_3SiC_2 的含量为 9% 时,复合材料的复介电常数、电导率均随着温度的升高而增加,屏蔽效能在 600 °C 时达到最大值,约为 44~46 dB。Liu Yi 等^[48-50]采用热压烧结技术将 Ti_3SiC_2 与 Al_2O_3 、堇青石制备成复合陶瓷,研究其介电吸波性能,并得到与上述研究相似的结论。此外,Liu Yi 等^[51]将不同温度高温热处理后 Ti_3SiC_2 粉末与石蜡混合,测试其复介电常数,并根据测试所得的复介电常数模拟了不同厚度样品的反射率。结果表明,600 °C 热处理 1 h 后,由于 Ti_3SiC_2 的氧化,其复介电常数明显下降,吸波性能变差;但是,当 Ti_3SiC_2 与堇青石经过热压烧结成致密的陶瓷后,再经 1 000 °C 热处理 60 h,其复介电常数及反射率较常温变化不大,其原因主要是氧化生成的 TiO_2 包覆在陶瓷材料表面,有效阻止了氧的扩散^[52],因此, Ti_3SiC_2 作为高温吸收剂使用时,应考虑其高温条件下的氧化问题。Li Zhimin 等^[53]研究发现,20 at% Al 掺杂后的 Ti_3SiC_2 的复介电常数明显升高,为研究 Ti_3SiC_2 材料的吸波性能提出了一个新思路。

2.3 其他吸波材料

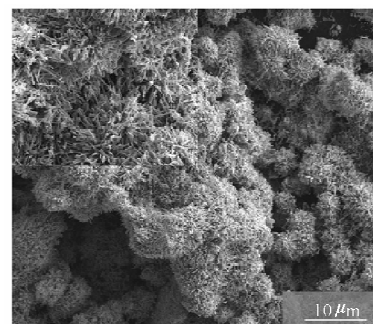
某些陶瓷材料由于电导率较高,对电磁波产生较强的电导损耗,容易具备优异的吸波性能。J. J. Siddiqui 等^[54]采用溶胶-凝胶法制备了纳米尺寸的 $La_{0.8}Sr_{0.2}Mn_{0.8}Fe_{0.2}O_3$ 颗粒,其介电常数测试及反射率计算结果表明,其具有优异的吸波性能。Yang Zhaoning 等^[55]采用等离子喷涂技术制备了 $LaSrMnO_3/Al_2O_3$ 吸波涂层,发现 $LaSrMnO_3$ 含量的增加可以提高涂层的介电常数,当 $LaSrMnO_3$ 的含量为 80 wt% 时,涂层表现出优异的吸波性能。Duan Yuping 等^[56]通过控制反应条件和反应时间,采用水热法制备了不同结构的 $\beta-MnO_2$ 颗粒,其结构如图 3 所示,反射率计算结果表明其具有良好的吸波性能。



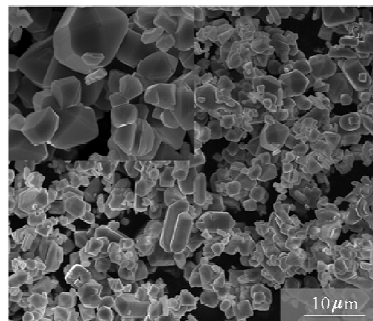
(a) 120 °C



(b) 140 °C



(c) 160 °C



(d) 200 °C

图 3 不同条件下合成的 $\beta-MnO_2$ 颗粒形貌
Fig. 3 Morphologies of $\beta-MnO_2$ synthesized at different conditions

Guan Hongtao 等^[57]采用水热法制备了 α -

MnO_2 纳米线和 $\beta\text{-MnO}_2$ 纳米棒,并将其按 25% 的质量分数与石蜡混合,测试其在 2~12 GHz 频率范围内的复介电常数。研究表明,反应时间对复介电常数影响较大,复介电常数在反应时间为 24 h 时达到最大,实部在 10~14 附近,虚部在 2~5 附近,其反射率在厚度为 4 mm 时达到最佳。Chen Tingting 等^[58]采用溶剂热法合成 $\text{CoZr}_4(\text{PO}_4)_6$ 微球,并测试了不同温度烧结后 $\text{CoZr}_4(\text{PO}_4)_6$ 粉末的反射率,表明当烧结温度为 900 °C 时其反射率最佳,在 8.5 GHz 处达到 -31.8 dB。 $\text{CoZr}_4(\text{PO}_4)_6$ 微球合成过程示意图如图 4 所示。

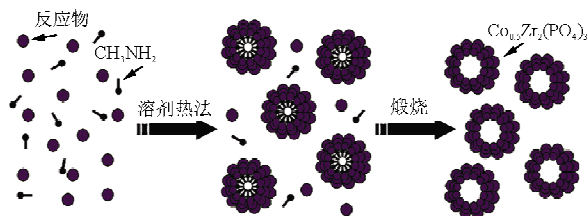


图 4 $\text{CoZr}_4(\text{PO}_4)_6$ 微球合成过程示意图

Fig. 4 Schematic representation of formation mechanism of the $\text{CoZr}_4(\text{PO}_4)_6$ microspheres

通常,金属材料由于电导率太高导致其复介电常数虚部过高,可以将金属添加到绝缘陶瓷基体中降低复合材料的电导率以达到降低复介电常数虚部的目的,这样做符合阻抗匹配条件,复合材料更易具备良好的吸波性能。Zhao Dong 等^[59]采用反应等离子喷涂技术喷涂 $\text{Al}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ 粉末制备了 $\text{Fe}/\text{FeAl}_2\text{O}_4$ 涂层,研究表明随着喷涂喂料中 Al 含量的增加,涂层的复介电常数逐渐增加,由于阻抗失配,模拟反射率结果表明吸波涂层的吸波性能不佳。Zhou Liang 等^[60]采用微弧等离子喷涂技术、内送粉方式制备了不同 Nb 含量的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Nb}$ 复合涂层,由于空间电荷极化和电导损耗,复合吸波涂层复介电常数的实部和虚部都随着 Nb 含量的增加而增加;反射率计算结果表明,当 Nb 含量为 10%、涂层厚度为 1.5 mm 时,复合吸波涂层在 10.0~11.8 GHz 频率范围内反射率损耗小于 -10 dB。李鹏等^[61]采用热压烧结方法,以氧化钇部分稳定氧化锆(Y-PSZ)粉体及不同粒径的金属 Ni 为原料,制备了 Ni/ZrO_2 复合材料,由于在烧结过程中 Ni 粉形貌发生变化,较大粒径 Ni 粉的掺入使复合材料具有较高的介电常数和电损耗。

3 结束语

区别于传统的吸波材料,航空类雷达吸波材料在降低材料重量和提高高温性能等方面具有更严苛的要求。近年来,如何提高传统吸波材料的高温使用性能和寻求新型高温吸波材料成为隐身材料研究的热点和难点,世界各国均进行了大量研究。尽管关于高温雷达吸波材料的研究很多,但是在实际应用中,高温吸波材料还面临氧化、化学反应及扩散等诸多问题,可能导致吸波材料的吸波性能显著下降甚至消失,上述问题是高温吸波材料研究中必须面对的问题。总之,在未来高温雷达吸波材料的研究中,一方面要考虑材料本身的吸波性能,另一方面还要对材料应用过程中面临的诸多问题进行研究。

参考文献

- [1] Eugene F Knott, John F Shaeffer, Michael T Tuley. Radar cross section[M]. 2nd ed. NC, Raleigh: SciTech Publishing Inc., 2004: 63.
- [2] 周万城,王婕,罗发,等. 高温吸波材料研究面临的问题[J]. 中国材料进展, 2013, 32(8): 463-472.
Zhou Wancheng, Wang Jie, Luo Fa, et al. Problems faced with high-temperature microwave absorbing materials[J]. Materials China, 2013, 32(8): 463-472. (in Chinese)
- [3] 尚守堂,曹茂国,邓洪伟,等. 航空发动机隐身技术研究及管理工作探讨[J]. 航空发动机, 2014, 40(2): 6-9.
Shang Shoutang, Cao Maoguo, Deng Hongwei, et al. Discuss on aeroengine stealth technology research and management[J]. Aeroengine, 2014, 40(2): 6-9. (in Chinese)
- [4] 罗发,周万城,焦桓,等. 高温吸波材料研究现状[J]. 宇航材料工艺, 2002, 32(1): 8-11.
Luo Fa, Zhou Wancheng, Jiao Huan, et al. Current study of high temperature radar absorbing materials[J]. Aerospace Materials and Technology, 2002, 32(1): 8-11. (in Chinese)
- [5] 李成功,傅恒志,于翹. 航空航天材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 5-6.
Li Chenggong, Fu Hengzhi, Yu Qiao. Aerospace materials [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002: 5-6. (in Chinese)
- [6] Qin F, Brosseau C. A review and analysis of microwave absorption in polymer composites filled with carbonaceous particles[J]. Journal of Applied Physics, 2012, 111(6): 061301-061324.
- [7] 张月芳,郝万军. 吸波材料研究进展及其对军事隐身技术的影响[J]. 化工新型材料, 2012, 40(1): 13-15.

- Zhang Yuefang, Ilao WanJun. Absorbing material advance and influence to military stealth technology[J]. *New Chemical Materials*, 2012, 40(1): 13-15. (in Chinese)
- [8] Dai Yawen, Sun Mingqing, Liu Chenguo, et al. Electromagnetic wave absorbing characteristics of carbon black cement-based composites[J]. *Cement & Concrete Composites*, 2010, 32(7): 508-513.
- [9] Park Ki-Yeon, Han Jae-Hung, Lee Sang-Bok, et al. Fabrication and electromagnetic characteristics of microwave absorbers containing carbon nanofibers and NiFe particles[J]. *Composites Science and Technology*, 2009, 69(7/8): 1271-1278.
- [10] Kong I. B, Li Z W, Liu L, et al. Recent progress in some composite materials and structures for specific electromagnetic applications [J]. *International Materials Reviews*, 2013, 58(4): 203-259.
- [11] Jean-Michel Thomassin, Christine Jérôme, Thomas Pardoën, et al. Polymer/carbon based composites as electromagnetic interference(EMI) shielding materials[J]. *Materials Science and Engineering Reports*, 2013, 74(7): 211-232.
- [12] Kong Luo, Yin Xiaowei, Yuan Xiaoyan, et al. Electromagnetic wave absorption properties of graphene modified with carbon nanotube/poly(dimethyl siloxane) composites[J]. *Carbon*, 2014, 73(3): 185-193.
- [13] 胡小赛, 沈勇, 王黎明, 等. 石墨烯基吸波材料研究新进展[J]. *宇航材料工艺*, 2015, 45(6): 1-7.
Hu Xiaosai, Shen Yong, Wang Liming, et al. Research progress of graphene-based microwave absorbing composite materials[J]. *Aerospace Materials and Technology*, 2015, 45(6): 1-7. (in Chinese)
- [14] Yin Xiaowei, Kong Luo, Zhang Litong, et al. Electromagnetic properties of Si-C-N based ceramics and composites [J]. *International Materials Reviews*, 2015, 59(6): 326-355.
- [15] Yang Huijing, Cao Maosheng, Li Yong, et al. Enhanced dielectric properties and excellent microwave absorption of SiC powders driven with NiO nanorings[J]. *Advanced Optical Materials*, 2014, 2(3): 214-219.
- [16] Duan Wenyan, Yin Xiaowei, Li Quan, et al. Synthesis and microwave absorption properties of SiC nanowires reinforced SiOC ceramic[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2014(34): 257-266.
- [17] Abhishek Kumar, Vijaya Agarwala, Dharmendra Singh. Effect of milling on dielectric and microwave absorption properties of SiC based composites[J]. *Ceramics International*, 2014, 40(1): 1797-1806.
- [18] Song Huihui, Zhou Wancheng, Luo Fa, et al. Temperature dependence of dielectric properties of SiC/PyC/SiC composites[J]. *Materials Science and Engineering B*, 2015, 195: 12-19.
- [19] Li Quan, Yin Xiaowei, Duan Wenyan, et al. Improved dielectric and electromagnetic interference shielding properties of ferrocene-modified polycarbosilane derived SiC/C composite ceramics[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2014, 34(10): 2187-2201.
- [20] Yuan Xiaoyan, Cheng Laifei, Zhang Yajuan, et al. Fedoped SiC/SiO₂ composites with ordered inter-filled structure for effective high-temperature microwave attenuation [J]. *Materials and Design*, 2016, 92: 563-570.
- [21] 张玲, 周万城, 陈黄鹂, 等. 热处理温度对纳米 ZnO 微波介电性能的影响[J]. *陕西科技大学学报: 自然科学版*, 2007, 25(3): 36-38.
Zhang Ling, Zhou Wancheng, Chen Huangli, et al. Preparation of nano-ZnO and its microwave dielectric properties [J]. *Journal of Shaanxi University of Science and Technology: Natural Science Edition*, 2007, 25(3): 36-38. (in Chinese)
- [22] Zhou Liang, Zhou Wancheng, Liu Tao, et al. Influence of ZnO content and annealing temperature on the dielectric properties of ZnO/Al₂O₃ composite coatings[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, 509(19): 5903-5907.
- [23] Zhou Liang, Zhou Wancheng, Su Jinbu, et al. Effect of composition and annealing on the dielectric properties of ZnO/mullite composite coatings[J]. *Ceramics International*, 2012, 38(2): 1077-1083.
- [24] Yuan Jie, Song Weili, Fang Xiaoyong, et al. Tetra-needle zinc oxide/silica composites: high-temperature dielectric properties at X-band [J]. *Solid State Communications*, 2013, 154(1): 64-68.
- [25] Zhuo Renfu, Feng Haitao, Cheng Jiangtao, et al. Multi-step synthesis, growth mechanism, optical, and microwave absorption properties of ZnO dendritic nanostructures[J]. *Journal of Physics Chemistry C*, 2008, 112(31): 11767-11775.
- [26] Zhuo Renfu, Feng Haitao, Qian Liang, et al. Morphology-controlled synthesis, growth mechanism, optical and microwave absorption properties of ZnO nanocombs[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008, 41(18): 185405-185418.
- [27] Zhuo Renfu, Liang Qiao, Feng Haitao, et al. Microwave absorption properties and the isotropic antenna mechanism of ZnO nanotrees[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 104(9): 094101-094105.
- [28] Yan Junfeng, Zhang Zhiyong, You Tianguai, et al. Hydrothermal synthesis and dielectric properties of chrysanthemum-like ZnO particles[J]. *Chinese Physics B*, 2009, 18(9): 4019-4024.
- [29] 娄霞, 朱冬梅, 张玲, 等. Al 掺杂含量对纳米 ZAO 粉体性能的影响[J]. *功能材料*, 2008, 39(4): 667-669.
Lou Xia, Zhu Dongmei, Zhang Ling, et al. Influence of the Al content on properties of nanometer ZAO powder[J]. *Journal of Functional Materials*, 2008, 39(4): 667-669. (in Chinese)

- [30] Liu Yi, Luo Fa, Su Jinbu, et al. Enhanced mechanical, dielectric, and microwave absorption properties of ZnO/Zr-SiO₄ composite ceramics by adding Al₂O₃ powders [J]. *Physics Status Solidi A*, 2014, 211(11): 2574-2579.
- [31] Kong Luo, Yin Xiaowei, Zhang Litong, et al. Effect of aluminum doping on microwave absorption properties of ZnO/ZrSiO₄ composite ceramics[J]. *Journal of the American Ceramics Society*, 2012, 95(10): 3158-3165.
- [32] 闫军锋. 菊花状 ZnO 纳米线簇的制备及其吸波性能研究 [D]. 西安: 西北大学, 2009.
Yan Junfeng. Preparation and wave-absorbing properties of chrysanthemum-like ZnO nanowire clusters [D]. Xi'an: Northwest University, 2009. (in Chinese)
- [33] Liu Ye, Yin Xiaowei, Kong Luo, et al. Electromagnetic properties of SiO₂ reinforced with both multi-wall carbon nanotubes and ZnO particles[J]. *Carbon*, 2013, 64(9): 537-556.
- [34] Li Hui Feng, Wang Jian, Huang Yunhua, et al. Microwave absorption properties of carbon nanotubes and tetrapod-shaped ZnO nanostructures composites[J]. *Materials Science and Engineering B*, 2010, 175(1): 81-85.
- [35] Qin Hui, Liao Qingliang, Zhang Guangjie, et al. Microwave absorption properties of carbon black and tetrapod-like ZnO whiskers composites [J]. *Applied Surface Science*, 2013, 286(4): 7-11.
- [36] Song Weili, Cao Maosheng, Wen Bo, et al. Synthesis of zinc oxide particles coated multiwalled carbon nanotubes; dielectric properties, electromagnetic interference shielding and microwave absorption[J]. *Materials Research Bulletin*, 2012, 47(7): 1747-1754.
- [37] Jeitschko W, Nowotny H. The crystal structure of Ti₃SiC₂ — a new type of complex carbide[J]. *Monatsh Chemistry*, 1967, 98(2): 329-332.
- [38] Shi Suilin, Zhang Lingzhen, Li Junshou. Ti₃SiC₂ material; An application for electromagnetic interference shielding [J]. *Applied Physics Letters*, 2008, 93(3): 172903-172906.
- [39] Shi Suilin, Pan Wei, Fang Minghao, et al. Electrical and dielectric behaviors of Ti₃SiC₂/yttria-stabilized zirconia composites[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, 87(17): 172902-172904.
- [40] Shi Suilin, Pan Wei, Han Ruobing, et al. Electrical and dielectric behaviors of Ti₃SiC₂/hydroxyapatite composites [J]. *Applied Physics Letters*, 2006, 88(5): 052903-052905.
- [41] Wu Ruifen, Pan Wei, Shi Suilin, et al. Critical behaviors of the conductivity and dielectric constant of Ti₃SiC₂/Al₂O₃ hybrids[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 102(5): 056104.
- [42] Shi Suilin, Zhang Lingzhen, Li Junshou. Complex permittivity and electromagnetic interference shielding properties of Ti₃SiC₂/polyaniline composites[J]. *Journal of Materials Science*, 2009, 44(6): 945-948.
- [43] Su Jinbu, Zhou Wancheng, Liu Yi, et al. Effect of Ti₃SiC₂ addition on microwave absorption property of Ti₃SiC₂/cordierite coatings[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2015, 270(11): 39-46.
- [44] Su Jinbu, Zhou Wancheng, Wang Hongyu, et al. Effect of critical plasma spray parameters on microstructure and microwave absorption property of Ti₃SiC₂/cordierite coatings [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2016, 25(4): 639-649.
- [45] Su Jinbu, Zhou Wancheng, Liu Yi, et al. High-temperature dielectric and microwave absorption property of plasma sprayed Ti₃SiC₂/cordierite coatings[J]. *Journal of Materials Science; Materials in Electronics*, 2016, 27(3): 2460-2466.
- [46] Mu Yang, Zhou Wancheng, Hu Yang, et al. Improvement of mechanical and dielectric properties of PIP-SiCf/SiC composites by using Ti₃SiC₂ as inert filler[J]. *Ceramics International*, 2015, 41(2): 4199-4206.
- [47] Mu Yang, Zhou Wancheng, Wan Feng, et al. High-temperature dielectric and electromagnetic interference shielding properties of SiCf/SiC composites using Ti₃SiC₂ as inert filler[J]. *Composites; Part A*, 2015, 77(7): 195-203.
- [48] Liu Yi, Luo Fa, Wang Yuan, et al. Influences of milling on the dielectric and microwave absorption properties of Ti₃SiC₂/cordierite composite ceramics[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 629(3): 208-213.
- [49] Liu Yi, Luo Fa, Su Jinbu, et al. Enhanced mechanical, dielectric and microwave absorption properties of cordierite based ceramics by adding Ti₃SiC₂ powders[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 619(8): 854-860.
- [50] Liu Yi, Luo Fa, Su Jinbu, et al. Mechanical, dielectric, and microwave-absorption properties of alumina ceramic containing dispersed Ti₃SiC₂[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2015, 44(3): 867-873.
- [51] Liu Yi, Luo Fa, Su Jinbu, et al. Influence of oxidation on the dielectric and microwave absorption properties of the milled Ti₃SiC₂ powders[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 644(10): 404-410.
- [52] Liu Yi, Luo Fa, Su Jinbu, et al. Dielectric and microwave absorption properties of Ti₃SiC₂/cordierite composite ceramics oxidized at high temperature[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 632(4): 623-628.
- [53] Li Zhimin, Luo Fa, He Chuangchuang, et al. Improving the microwave dielectric properties of Ti₃SiC₂ powders by Al doping[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, 618(9): 508-511.
- [54] Siddiqui J J, Zhu K, Qiu J, et al. Sol-gel synthesis, characterization and microwave absorbing properties of nano sized spherical particles of La_{0.8}Sr_{0.2}Mn_{0.8}Fe_{0.2}O₃[J]. *Materials Research Bulletin*, 2012, 47(8): 1961-1967.

- 767-783.
- [9] Luo H, Baum J D, Löhner R. Fast p -multigrid discontinuous Galerkin method for compressible flows at all speeds [C]. AIAA Journal, 2008, 46(3): 635-652.
- [10] 郝海兵, 杨永. 非结构网格上 p 型多重网格法流场数值模拟[J]. 计算力学学报, 2011, 28(3): 360-365.
Hao Haibing, Yang Yong. The research of p -multigrid solution for discontinuous Galerkin method[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2011, 28(3): 360-365. (in Chinese)
- [11] 郝海兵, 杨永, 左岁寒. 高阶间断 Galerkin 方法求解三维欧拉方程的研究[J]. 西北工业大学学报, 2011, 29(1): 128-132.
Hao Haibing, Yang Yong, Zuo Suihan. Effectively applying high-order discontinuous Galerkin method (DGM) to solving 3-D Euler equations on unstructured grids[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2011, 29(1): 128-132. (in Chinese)
- [12] Jameson A, Yoon S. Lower-upper implicit schemes with multiples grids for the Euler equations[J]. AIAA Journal, 1987, 25(7): 929-935.
- [13] Saad Y, Schultz M H. GMRES: a generalized minimal residual algorithm for solving non-symmetric linear systems [J]. SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing, 1986, 7(3): 856-869.
- [14] Barth T J. A 3-D upwind Euler solver for unstructured meshes[C]. AIAA-91-1548-CP, 1991.

作者简介:

李广佳(1979—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:计算流体力学、飞行器设计。

郝海兵(1981—),男,博士,高级工程师。主要研究方向:理论与计算流体力学、气动优化设计。

陈智(1986—),女,工程师。主要研究方向:计算流体力学。

张强(1979—),男,博士,副教授。主要研究方向:理论与计算流体力学。

(编辑:马文静)

(上接第 272 页)

- [55] Yang Zhaoning, Luo Fa, Xu Jiansheng, et al. Dielectric and microwave absorption properties of $\text{LaSrMnO}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ ceramic coatings fabricated by atmospheric plasma spraying [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 662(7): 607-611.
- [56] Duan Yuping, Pang Huifang, Zhang Yahong, et al. Morphology-controlled synthesis and microwave absorption properties of $\beta\text{-MnO}_2$ microncube with rectangular pyramid [J]. Materials Characterization, 2016, 112(5): 206-212.
- [57] Guan Hongtao, Chen Gang, Zhang Shubo, et al. Microwave absorption characteristics of manganese dioxide with different crystalline phase and nanostructures [J]. Materials Chemistry and Physics, 2010, 124(1): 639-645.
- [58] Chen Tingting, Sun Genban, Ma Shulan, et al. Solvothermal synthesis of monodispersed $\text{CoZr}_4(\text{PO}_4)_6$ microspheres and their application as microwave absorber[J]. Materials Research Bulletin, 2012, 47(3): 602-607.
- [59] Zhao Dong, Luo Fa, Zhou Wancheng, et al. Microwave absorption properties and complex permittivity of $\text{Fe}/\text{FeAl}_2\text{O}_4$ coatings deposited by reactive plasma spraying $\text{Al}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ powders[J]. Surface & Coatings Technology, 2011, 205(17): 4254-4259.
- [60] Zhou Liang, Zhou Wancheng, Chen Malin, et al. Dielectric and microwave absorbing properties of low power plasma sprayed $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Nb}$ composite coatings[J]. Materials Science and Engineering B, 2011, 176(18): 1456-1462.
- [61] 李鹏, 周万城, 李玉琴, 等. Ni/ZrO_2 复合材料力学及介电性能研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(11): 1934-1937.
Li Peng, Zhou Wancheng, Li Yuqin, et al. Mechanical and microwave dielectric properties of Ni/ZrO_2 composite [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(11): 1934-1937. (in Chinese)

作者简介:

邓凯文(1983—),女,工程师。主要研究方向:航空发动机材料与制造。

刘智(1980—),男,硕士,工程师。主要研究方向:航空发动机制造技术。

(编辑:马文静)