

新型轻质雷达吸波材料的应用研究及进展

Application Research and Prospects of New and Light Mass Radar Absorbing Materials

哈恩华, 黄大庆, 丁鹤雁

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

HA En hua, HUANG Da qing, DING He yan

(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 综述了目前国内外轻质雷达吸波材料的研究动态, 详细介绍了具有发展前景的空心微珠吸波材料、碳纳米管吸波材料、导电高聚物吸波材料、纳米吸波材料和智能隐身材料等新型轻质雷达吸波材料的隐身机理及最新研究状况, 并对雷达隐身材料应用技术的未来做了展望。

关键词: 雷达吸波材料; 空心微珠; 碳纳米管; 导电高聚物; 纳米材料; 智能隐身材料

中图分类号: T B34 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2006)03-0055-05

**Abstract:** Recent developments in the study of radar absorbing materials are reviewed. The stealth mechanism and recent study of new and light mass absorbing materials are summarized, such as cenosphere, carbon nanotubes(CN Ts), conducting polymers, and nanophase microwave absorbing materials. The smart stealth materials and developing prospect of radar absorbing materials are also discussed.

**Key words:** radar absorbing materials; cenosphere; carbon nanotubes; conducting polymers; nanophase materials; smart stealth materials

随着航空电子技术及现代科学技术的发展, 隐身技术在军事以及民用的重要性越来越显著。世界各国在这方面做了许多工作, 并成功地将隐身技术应用于航空、航天等领域。隐身技术包括雷达波、红外、可见光及声隐身等, 由于雷达探测系统的迅猛发展及其探测目标的可靠性, 因此当前重点发展的是雷达波隐身技术。雷达隐身技术是通过减弱、抑制、吸收、偏转目标的雷达波, 降低其雷达散射截面(RCS), 使其在一定范围内难以被敌方雷达识别和发现的技术。其技术途径之一是在雷达探测目标上应用能吸收雷达波的材料, 即利用雷达吸波材料(RAM)降低目标的 RCS。

近 10 年来, 雷达吸波材料逐步应用在各种武器装备上, 例如, B-2 隐身轰炸机 900m<sup>2</sup> 表面喷涂有坚韧的弹性体吸波涂层, F-22 隐身战斗机机身部分金属零件采用吸波涂层, F/A-18E/F 飞机则采用密度很低且耐腐蚀性优良的新型隐身材料<sup>[1]</sup>。随着雷达探测技术的发展, 以及目标外形技术越来越受到战术指标的限制, 原有的雷达隐身材料存在频带窄、效率低、密度大等缺点, 应用范围受到一定限制, 迫切需要开发新型吸波材料和相应的隐身技术。目前, 国内外在进一步提高与改进传统隐身材料的同时正致力于多种新材料的探

索, 碳纳米管材料、导电聚合物材料、纳米材料等逐步应用到雷达波隐身材料中, 从而满足新一代雷达隐身材料要求吸收强、频带宽、质量轻、厚度薄的要求。本文就新型轻质雷达吸波材料中的空心微球吸波材料、碳纳米管吸波材料、导电高聚物吸波材料、纳米吸波材料和智能隐身分别进行了分析评述。

### 1 空心微珠吸波材料

空心微珠按其形成的方式, 可分为人造微珠和粉煤灰空心微珠, 人造空心微珠有玻璃空心微珠、氧化铝空心微珠、空心碳微珠。空心微珠作为一种新型多功能材料, 具有颗粒微细、中空、质轻、耐高温、绝缘、化学性能稳定等特性, 故其用途涉及到各个领域<sup>[2]</sup>。空心微珠的加入不仅会降低材料的密度, 而且会提高材料的刚度、强度、绝缘性等。这种无机粉体与金属粉相比, 密度较小, 如果对其表面进行改性处理, 则有可能解决传统吸波材料存在的密度大、高温性能差、抗氧化、耐酸碱能力差等缺点。

空心微珠本身不具备吸收电磁波的特性, 因此, 空心微珠表面金属化成为能否取得良好吸波效果的关键。

键。而材料表面化学镀改性是一种简单易行的方法。在空心微珠表面沉积  $\text{Ni-P}$ ,  $\text{Co-P}$ ,  $\text{Co-Ni-P}$ ,  $\text{Co-W-P}$ ,  $\text{Co-Ni-W-P}$  等磁性膜和纳米复合磁性膜等,可以在很宽范围内调整电导率和磁导率,实现对电磁波的宽频强吸收,在高频电磁场作用下,由于材料的涡流损耗和磁损耗,使得材料对电磁波具有一定的吸收损耗作用。空心微珠与磁性金属膜的复合恰好能够充分发挥两种材料的优势。空心微珠表面附着一定厚度的磁性材料,将会改变其表面特性,使得空心微珠成为导电导磁的小球,当这些小球在涂料中的填充量达到较高的比例时,与颗粒接触的概率增大,有利于材料微观导电网络的形成,使材料在宏观上导电率增加,在吸波材料中形成传导电流。传导电流引起的电磁场能量的损耗就是材料所吸收的电磁波能量,材料的吸波性能随着传导电流的增加而提高。另一方面,由于改性的空心微珠颗粒尺寸与电磁波的波长相比很小,电磁波与颗粒表面的散射作用也会损耗掉部分电磁波能量<sup>[3]</sup>。上述综合效应使得改性后的空心微珠对电磁波具有较好的吸收特性。利用化学镀金属对空心微珠表面进行改性,能够使其成为一种性能较好的吸波材料。

近年来,国外对空心微珠开展了较多研究,美国以  $3\mu\text{m}$  左右玻璃球为载体,镀上以  $\text{Ni}$ ,  $\text{Al}$ ,  $\text{W}$  等为损耗层的  $10\text{nm}$  左右薄膜。当采用厚度为  $2\text{nm}$  的球形多层颗粒膜时,在  $8\sim 18\text{GHz}$  频率范围厚度为  $2.5\text{mm}$  时,吸收率可达  $-20\text{dB}$ <sup>[4]</sup>。徐坚等<sup>[5]</sup>采用化学镀法,以  $\text{AgNO}_3$  取代  $\text{PdCl}_2$  作为活性剂,利用  $\text{H}_2\text{PO}_2^-$  的还原性完成活化过程,制备了  $\text{NiCoP}$  合金包覆的空心微珠粉末,SEM 分析表明  $\text{NiCoP}$  合金包覆在空心微珠表面。葛凯勇等<sup>[2]</sup>利用化学镀镍对空心微珠表面进行镀镍改性,改性后的微珠表面均匀的附着金属镍,用其制备的吸波材料在  $16.6\sim 18\text{GHz}$  波段吸收率小于  $-10\text{dB}$ ,最大吸收率可达  $-13\text{dB}$ 。

## 2 碳纳米管吸波材料

碳纳米管( $\text{CNTs}$ )是由碳原子组成,似石墨原子层弯曲构成管状结构,管子一般由单层或多层管组成,直径在几纳米到几十纳米之间,长度可达数微米<sup>[6]</sup>。近年来,研究发现由于碳纳米管特殊的微结构和几何构形,使得碳纳米管的电磁特性明显不同于其他已知的碳结构<sup>[7,8]</sup>。碳纳米管碳不但具有较高的电损耗正切角,依靠介质的电子极化或界面极化衰减,吸收电磁波,而且由于量子限域效应,电子在碳纳米管中的运动是沿轴向的,由于电子能量和波矢之间的关系,碳纳米管表现出金属或半导体特性<sup>[9]</sup>。特别是,碳纳

米管拥有特殊的螺旋结构和手征性,这将导致特殊的电磁效应<sup>[10]</sup>。碳纳米管表现出优良的吸波性能,同时具有质量轻、兼容性好、吸波频带宽等特点,是新一代最具发展潜力的吸波材料,其吸波性能的研究也取得了积极的成果。

沈增民等<sup>[11]</sup>用竖式炉浮游法制备的碳纳米管的外径为  $40\sim 70\text{nm}$ ,内径为  $7\sim 10\text{nm}$ ,长度为  $50\sim 1000\mu\text{m}$ ,碳纳米管呈直线状,用化学镀方法在碳纳米管的表面镀上一层均匀的过渡金属镍。碳纳米管吸波涂层在厚度为  $0.97\text{mm}$  时,在  $8\sim 18\text{GHz}$ ,反射率  $< -10\text{dB}$  的频宽为  $3.0\text{GHz}$ ,反射率  $< -5\text{dB}$  的频宽为  $4.7\text{GHz}$ 。镀镍碳纳米管吸波涂层在厚度为  $0.97\text{mm}$  时,  $R < -10\text{dB}$  的频宽为  $2.23\text{GHz}$ ,反射率  $< -5\text{dB}$  的频宽为  $4.6\text{GHz}$ 。曹茂盛等<sup>[12]</sup>添加质量分数为  $8\%$  碳纳米管的吸波材料在  $8\sim 40\text{GHz}$  波段有明显的吸收。随着材料厚度的增加,吸收峰移到  $14\text{GHz}$ ,吸收峰向低频移动。厚度为  $5.5\text{mm}$  的吸波试样,对应于频率为  $10\text{GHz}$  的反射率为  $-8\text{dB}$ 。碳纳米管良好的吸波特性,意味着可以设计出既吸收厘米波又吸收毫米波的雷达波吸收材料。刘云芳等<sup>[13]</sup>采用竖式催化裂化解法制备出碳纳米管,然后采用  $\text{KOH}$  进行活化,使碳纳米管的比表面积从  $24.5\text{m}^2/\text{g}$  提高到  $360.1\text{m}^2/\text{g}$ ,而且碳纳米管的各种类型的空结构都得到增加;微波吸收性能的研究表明,采用  $\text{KOH}$  进行活化碳纳米管的吸收性能优于未活化碳纳米管的吸收性能,活化还可以使碳纳米管的微波吸收能力加强、吸收频率宽化。

## 3 导电高聚物吸波材料

导电高聚物是由具有共轭  $\pi$  键的高聚物经化学或电化学“掺杂”使其由绝缘体转变为导体的一类高分子材料,其导电机制一般认为是掺杂导电高聚物的载流子是孤子、极化子和双极化子等<sup>[14-16]</sup>。构成共轭高聚物主链的碳原子有 4 个价电子,其中 3 个为  $\sigma$  电子,余下的一个价电子为  $\pi$  电子轨道,与聚合物所组成的平面相垂直。随  $\pi$  体系的扩大,被电子占据的  $\pi$  成键轨道和空的  $\pi$  反键轨道之间的能隙减小,经过掺杂,形成激发态,受电场的作用时电子定向极化形成电流。

导电高聚物有相对高的电导率( $\sigma$ )和介电常数( $\epsilon$ )以及易于通过化学加工来控制  $\sigma$  和  $\epsilon$ ,电导率可在绝缘体、半导体和金属态范围内变化,电磁参量依赖于高聚物的主链结构、室温电导率、掺杂剂、掺杂度、合成方法和条件等因素。导电高聚物的吸波性能与其电磁参数如介电常数、电导率等因素有关,其对电磁波的吸

收主要是依靠电损耗和介电损耗。导电高聚物在雷达波的作用下,一方面材料被反复极化,分子电偶极子力图跟上场的振荡而受到分子摩擦;另一方面由于材料导电率不为零,在材料中形成感应电流而产生焦耳热,从而使得电磁波能量被耗散。材料良好的导电率有利于电磁波的吸收,但高的导电率同时会增加材料表面对电磁波的反射。导电高聚物的导电率通过化学方法极易调节,可获得吸波材料所需的最佳电导率<sup>[14-22]</sup>。

自20世纪90年代开始,美、法、日等国相继开展了导电高聚物雷达吸收材料的研究,设想将其作为未来隐身战斗机及侦察机的“灵巧蒙皮”,及巡航导弹头罩上的可逆智能隐身材料等<sup>[23,24]</sup>。法国Laruent<sup>[26]</sup>研究了聚吡咯、聚苯胺、聚3-辛基噻吩在0~20GHz内的雷达波吸收性能,发现吸波性能随雷达波频率变化而变化,平均衰减值为-8dB,最大衰减値可达到-36.5dB,且频宽为3.0GHz。Wong等人<sup>[26]</sup>成功地用化学氧化法在纸基上制备大面积的聚吡咯膜,该膜具有很好的柔韧性,在雷达波X波段表现了极好的吸收性能和宽频吸收特性,材料阻抗和吸波特性随频率和入射角变化。Franchitto等人<sup>[27]</sup>利用十二烷基苯磺酸掺杂的聚苯胺与乙丙橡胶共混制成的复合材料,厚度3mm,在X波段反射率低于-6dB,峰值达到-15dB。

导电高聚物作为一种新型的吸波材料,具有质量轻、力学性能好、组成与结构容易控制、导电率变化范围很宽,在电磁波吸收方面显示出很强的设计适应性。在较早的研究中表明<sup>[28-30]</sup>,单独的导电聚合物材料吸收频带较窄,为适应未来的隐身材料高效、宽带、质量轻、适应性强的特点,还需改善导电高聚物的磁损耗性能。Pant等人<sup>[31]</sup>发现可以将导电高聚物与无机磁损耗物质复合来提高导电高聚物的磁损耗性能,使其兼具电损耗与磁损耗的性能,展宽吸收频带。另外,导电高聚物放置在大气中,它的室温电导率会随时间而逐渐降低,而且掺杂剂本身不稳定,也影响了导电高聚物的适用温度范围。

4 纳米吸波材料

近年来随着对纳米材料研究的不断深入,特别是有关纳米吸波材料具有良好的吸波性能的同时,兼备了质量轻、宽频带、兼容性好厚度薄等特点,引起各国军界研究人员的极大兴趣,并开始以纳米材料为新一代隐身材料的探索和研究工作。

纳米薄膜一般具有薄膜和纳米的两重性,是由纳米晶粒组成的准二维系统,它具有约占50%的界面组

元,因而显示出与晶态、非晶态物质均不同的崭新性质,如吸收能力、室温电导率、热稳定性、掺杂效应等均有很大改观。目前,国内外研究的纳米薄膜吸收剂主要包括纳米金属膜(Fe, Ni, Co等及各种合金)和绝缘介质膜(碳、碳化物、氧化物等与磁性纳米粒子结合)。

纳米金属膜/合金膜一般为多晶薄膜或非金属薄膜,金属如Fe, Ni, Co等本身具有一定的电磁特性,加工至纳米尺寸后,兼具纳米吸波材料的特性;而绝缘介质膜多为电损耗材料和磁损耗材料在纳米尺寸复合而成,弥补了单一材料在电损耗或损耗衰减上的不足,并且可能表现出两种复合组分都不具有的综合效应,提高了材料微波吸收性能。所以,纳米薄膜或纳米多层膜材料具有优异的电磁特性,其高频(从超高频到微波频段)复数磁导率实部( $\mu'$ )可在 $10^0 \sim 10^2$ 范围内调解。法国最新研制成功一种宽频吸波涂层,它由粘接剂和纳米微屑填充材料构成。纳米级微屑由超薄不定形磁性薄层及绝缘层堆叠而成,磁性层厚为3nm,绝缘层厚为5nm,这种多层薄膜叠合而成的夹层结构具有很好的微波磁导率,其磁导率的实部和虚部在0.1~10GHz宽频带内均大于6。与粘接剂复合成的吸波涂层在50MHz~50GHz频率范围内具有良好的吸波性能<sup>[32]</sup>。

纳米薄膜吸收剂作为新型吸收剂的优势在于制备方法的多样化,可选材料种类繁多,可以将不同吸波机理、不同吸波频段的吸波材料进行复合,形成纳米多晶膜或纳米粒子薄膜,实现材料的多种吸波机理、宽频段的高性能吸收。

纳米粉体的颗粒小于100nm,纳米粉体所具有的小尺寸效应、表面效应和量子尺寸效应,使纳米粉体具有一系列优异的物理、化学特性。金属和金属氧化物在细化为纳米粒子时,比表面积增大,处于颗粒表面的原子数越来越多,悬挂键增多,界面极化和多重散射成为重要的吸波机制。金属纳米粉对电磁波特别是高频至光波频率范围内的电磁波具有优良的衰减性能。陈利明<sup>[33]</sup>研究了平均粒径大小为10nm的 $\gamma$ -(Fe, Ni)合金的微观结构和微波吸收特性,该材料在厘米波段和毫米波段均具有优异的吸收性能,最高吸收率可达99.95%;同时,金属Al, Co, Ti, Cr, Nd, Mo等的超细粉屑作为微波吸收剂也有报道。高勇<sup>[34]</sup>用沉淀-氧化法合成了粒晶在20~80nm范围内的,粒晶可调、分布窄的聚合物包覆的 $Fe_3O_4$ 微球,并对其性能和应用进行了探索,进一步研究了 $Fe_3O_4$ /聚苯胺纳米复合材料的微波吸收性能。黄婉霞<sup>[35]</sup>对粒晶为10nm和100nm两种 $Fe_3O_4$ 微粒在1MHz~1GHz频

率范围内的电磁波吸收性能进行了研究,认为随着微波频率的增加,纳米级  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的吸波能力逐渐增加,但 10nm  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  的吸波能力大于 100nm 的吸波能力,且粒度越小,磁损耗越大,吸波效能越高。

### 5 智能隐身材料

智能材料是近年来发展起来的新型的高科技材料,它是将驱动件和传感件紧密融合在结构中,同时也将控制电路、逻辑电路、信号处理器、功率放大器等集成在结构中,通过机械、热、光、化学、电、磁等激励和控制,使智能材料不仅具有承受载荷的能力,还具有识别、分析、处理及控制等多种功能,并能进行数据的传输和多种参数的检测,而且还能动作,具有改变结构的应力分布、形状、电磁场、光学性能、化学性能等多种功能,从而使结构材料本身具有自诊断、自适应、自学习、自修复、自增值、自衰减等能力<sup>[36]</sup>。智能材料这种能够根据外界环境变化调节自身的结构和性能,并对环境作出最佳响应为隐身材料的设计提供了一种全新的思路和方法,使智能隐身目标的实现成为可能。

美国是最早研究智能隐身材料的国家之一,西屋公司从事智能飞机蒙皮的研究是用嵌入蒙皮的共形系统来代替天线和黑箱,与常规的飞机雷达天线相比,共形系统的优点是它可以安装在飞机上像翼尖这样通常难以安装的部位,通过定向操作达到隐身的目的<sup>[37]</sup>。目前美国空军正在研究采用光纤传感器作隐身飞机灵巧蒙皮。其方法是在光纤灵巧蒙皮内嵌入保型雷达、导航设备、目标搜索和各种传感器件,使光纤数字电路遍布飞机机翼内,这种战斗机不仅可以隐身,而且灵敏度高,易操作。智能隐身材料的应用降低了电子系统本身的质量和成本,智能光纤代替传统的铜线减少至少 80% 的质量。用智能纤维增强的聚合物作隐身的结构材料,不仅降低了雷达的散射截面,同时把飞机的质量也减轻 50 % 。

### 6 结束语

随着探测系统性能的提高和种类的繁多,武器装备面临的战争威胁更加恶劣,对其隐身性能的要求更高,相应的对目标雷达特征抑制的主要手段之一的雷达隐身材料提出了更高的要求。传统的雷达隐身材料已经很难满足隐身材料“薄、轻、宽、强”的要求,空心微珠吸波材料、碳纳米管吸波材料、导电高聚物吸波材料、纳米吸波材料和智能隐身技术由于质轻以及其特殊的吸波性能,将是今后的重点研究发展方向。

### 参考文献

[ 1 ] 胡传忻.隐身涂层技术[ M]. 北京: 化学工业出版社, 2004. 192– 195.

[ 2 ] 葛凯勇, 王群, 毛倩瑾, 等. 空心微珠表面改性及其吸波特性[ J]. 功能材料与器件学报, 2003, 9( 1): 67– 70.

[ 3 ] KOLAY P K, SINGH D N. Physical, chemical, mineralogical and thermal properties of cenospheres from an ash lagoon[ J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31: 539– 542.

[ 4 ] SUZUKI M. Synthesis of silicon carbide/silicon nitride composite ultrafine particles using a CO<sub>2</sub> laser[ J]. Am Ceram Soc, 1993, 76 ( 5): 195– 199.

[ 5 ] 徐坚, 熊惟皓, 曾爱香, 等. NiCoP 合金包覆空心微珠粉体的制备[ J]. 宇航材料与工艺, 2004, 5: 49– 52.

[ 6 ] DRESSLHAUS M S. Down the straight and narrow[ J]. Nature, 1992, 358: 195– 198.

[ 7 ] JEROEN W G, WILDER J W. Electronic structure of atomically resolved carbon nanotubes [ J]. Nature, 1998, 391: 59– 62.

[ 8 ] SANDLER J, SHAFFER M S P, PRASSE T. Development of a dispersion process for carbon nanotubes in an epoxy matrix and the resulting electrical properties[ J]. Polymer, 1999, 40: 5967– 5971.

[ 9 ] JOSE K A, VASU ADARA V, VIJARY K V. Free space *vs* on e horn interferometer techniques for radar absorber measurements [ J]. Microwave Journal, 1998, 41( 9): 148– 154.

[ 10 ] SLEPYAN G Y, MAKSIMENKO S A, LAKHTAKIA A. Electromagnetic response of carbon nanotubes and nanotube ropes [ J]. Synthetic Metals, 2001, 124: 121– 123.

[ 11 ] 沈增民, 赵东林. 镀镍碳纳米管的微波吸收性能研究[ J]. 新型碳材料, 2001, 16( 1): 1– 4.

[ 12 ] 曹茂盛, 高正娟, 朱静. CNTs/ Polyester 复合材料的微波吸收特性研究[ J]. 材料工程, 2003, ( 2): 34– 36.

[ 13 ] 刘云芳, 沈增民, 于建民. 活化碳纳米管的孔结构及微波吸收性能的研究[ J]. 炭素, 2005, ( 1): 3– 6.

[ 14 ] HUANG J, WAN M. Temperature and pressure dependence of conductivity of polyaniline synthesized by *in situ* doping polymerization in the presence of organic function acid as dopants[ J]. Solid State Communications, 1998, 108( 4): 255– 259.

[ 15 ] CHANDRAKANTHI N, CAREEM M A. Preparation and characterization of fully oxidized form of polyaniline[ J]. Polymer Bulletin, 2000, 45: 113– 120.

[ 16 ] 陈其道, 卢建平, 洪啸吟. 导电高分子材料的新进展[ J]. 材料研究学报, 1997, 11( 6): 587– 592.

[ 17 ] CAO Y, SMITH P, HEEGER A J. Counter ion induced processibility of conducting polyaniline and of conducting polyblends of polyaniline in bulk polymers[ J]. Synthetic Metals, 1992, 48: 91– 97.

[ 18 ] MACDIARMID A G, EPSTEIN A J. Secondary doping in polyaniline[ J]. Synthetic Metals, 1995, 69: 85– 92.

[ 19 ] DHAWAN S K, SINGH N, VENKATACHLAM S. Shielding behaviour of conducting polymer coated fabrics in X-band, W-band and radio frequency range[ J]. Synthetic Metal, 2002, 129: 261– 267.

[ 20 ] PRIGODIN V N, EPSTEIN A J. Nature of insulator metal transition and novel mechanism of charge transport in the metallic state of highly doped electronic polymers[ J]. Synthetic Metals,

2002, 125: 43– 53.

[ 21 ] SONAR P, SHARMA A L, CHANDRA A. Synthesis and study of conductivi y behaviour of blended conducting polymer films ir- radiated with swift heavy ions of silicon[ J]. Current Applied Physics, 2003, ( 3 ): 247– 250.

[ 22 ] DHAWAN S K, SINGH N, RODRIGUES D. Electromagnetic shiel- ding behaviour of conducting polyaniline composites[ J]. Science and Technology of Advanced Materials, 2003, ( 4 ): 105– 113.

[ 23 ] ZHANG W D, FENG FENG X Y, MENG X L. Status and devel- opment of foreign study on new stealthy materials[ J]. Aerospace Materials & Technology, 2000, ( 3 ): 1– 4.

[ 24 ] 万梅香. 导电高分子[ J]. 高分子通报, 1999, ( 3 ): 47– 53.

[ 25 ] 秦嵘, 陈雷. 隐身技术的研究进展[ J]. 宇航材料工艺, 1997, 27 ( 4 ): 17– 19.

[ 26 ] WONG P T C, CHAMBERS B, ANDERSON A P. Large area cor- ducting polymer composites and their use in microw ave absorbing ma- terial[ J]. Electronics Letters, 1992, 28( 17 ): 1651– 1653.

[ 27 ] FRANCHITTO M, FAEZ R, ORLANDO A J F. Electromagnetic behavior of radar absorbing materials based on conducting poly- mers[ DB/OL]. http://ieeexplore.ieee.org, 2001– 08– 10/2002 – 10– 09.

[ 28 ] COURRIC S, TRAN V H. The electromagnetic properties of po- ly( p phenylene vinylene) derivatives[ J]. Polymer, 1998, 39( 12 ): 2399– 2408.

[ 29 ] EPSTEIN A J, MACDIARMID A G. Polyanilines: from solitons

to polymer metal, from chemical curiosity to technology[ J]. Synt- hetic Metals, 1995, 69: 179– 182.

[ 30 ] HOURQUEBIE P, BLONDEL B, DHUME S. Microwave and optical properties of soluble conducting polymers[ J]. Sythetic Metals, 1997, 85: 1437– 1438.

[ 31 ] PANT R P, DHAWAN S K, KATARIA N D. Investigations on fer- rofluid conducting polyaniline polymer and its application[ J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2002, 252: 16– 19.

[ 32 ] 徐生求, 段永法. 新型吸波材料的研究现状与进展[ J]. 空军雷 达 学院学报, 2001, 15( 1 ): 45– 48.

[ 33 ] 陈利明. 纳米  $\gamma$ -( Fe, Ni) 合金颗粒的微观结构及其微波吸收特性 [ J]. 兵器材料科学与工程, 1999, ( 4 ): 2– 5.

[ 34 ] 高勇. 纳米材料的性能与制备技术[ J]. 兵器材料科学与工程, 1997, ( 6 ): 64– 67.

[ 35 ] 黄婉霞. 纳米级  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  对电磁波的吸收效能研究[ J]. 功能材料, 1999, 30( 1 ): 105– 107.

[ 36 ] 陶宝祺. 智能材料结构[ M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.

[ 37 ] 孟新强. 隐身技术的研究与应用现状[ J]. 雷达与对抗, 1999, ( 3 ): 1– 5.

收稿日期: 2005-05-11; 修订日期: 2005-09-05

作者简介: 哈恩华( 1974– ), 男, 硕士, 工程师, 主要从事隐身材料研究, 联系地址: 北京 81 信箱 9 分箱( 100095)。

( 上接第 54 页)

( 2) 以乙二醇为溶剂, 以硝酸锆为锆源, 无需稳定剂, 采用改进工艺, 可得到稳定溶胶, 在 650 ℃烧结 2h, 完全获得单相钙钛矿型 PZT 纳米晶, PZT 纳米晶粒 径为 20~ 40nm。其粉体颗粒比较均匀, 分散性好, 粉 体粒径尺寸在 50~ 100nm 左右。

参考文献

[ 1 ] SUNG G L, YOUNG H L. Dielectric properties of sol gel derived PZT( 40/ 60)/ PZT( 60/ 40) heterolayered thin films[ J]. J Thin Solid Films , 1999, 353( 1 ): 244– 248.

[ 2 ] HAERTLING G H. Ferroelectric ceramics: history and technolo- gy [ J]. J Am Ceram Soc, 1999, 82 ( 4 ): 797– 800.

[ 3 ] BOLTEN D, BOTTGER U, WASER R. Reversible and irreversi- ble piezoelectric and ferroelectric response in ferroelectric ceramics and thin films[ J] J Eur Ceram Soc, 2004, 24( 5 ): 725– 732.

[ 4 ] SHROUT T R, PAPET P, KIM S, LEE G S. Conventionally pre- pared submicrometer lead based perovskite powders by reactive calci- nations[ J]. J Am Ceram Soc, 1990, 73( 7 ): 1862– 1867.

[ 5 ] KONG L B, MA J, ZHU W, TAN OK. Highly enhanced sinter- ability of commercial PZT powders by high energy ball milling [ J]. Mater Lett, 2000, 46( 5 ): 274– 280.

[ 6 ] DAS R N, PATHAK A, PRAMANIK P. Low-temperature preparation of nanocrystalline lead zirconate titanate and lead lan- thanum zirconate titanate powders using triethanolamine[ J]. J Am Ceram Soc, 1998, , 81( 12 ): 3357– 3360.

[ 7 ] THOMSON J J. Chemical preparation of PLZT powders from a

queous nitrate solutions [ J]. Am Ceram Soc Bull, 1974, , 53 ( 5 ): 421– 427.

[ 8 ] RAO K R M, RAO A V P, KOMARNENIS. Reactive PZT pre- cursor powder by coprecipitation[ J]. Mater Lett, 1996, , 28( 4 ): 463– 467.

[ 9 ] GAJBHIYE N S, SANJAY, VENKATARAMANI P S. Fabrica- tion of PZT materials from nanostructured powders[ J]. Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials, 2002, 44( 3 ): 127– 131.

[ 10 ] LIU D, ZHANG H, CAI W, et al. Synthesis of PZT nanocrys- talline powder by a modified sol gel process using zirconium ox ynitrate as zirconium source [ J]. Mater Chem Phys, 1997, , 51 ( 2 ): 187– 189.

[ 11 ] CHENG H, MA J, ZHU B, CUI Y. Reaction mechanisms in the formation of lead zirconate solid solutions under hydrother- mal conditions [ J]. J Am Ceram Soc, 1993, , 76( 3 ): 625– 628.

[ 12 ] TEXIER N, COURTOIS C, TRAIANIDIS M, et al. Powder process influence on the characteristics of Mn, W, Sb, Ni doped PZT[ J]. J Eur Ceram Soc, 2001, , 21( 10 ): 1499– 1502.

[ 13 ] 蔡伟, 刘大格, 张洪喜, 等. 以硝酸氧 锆为锆源溶胶-凝胶合成 PZT 纳米晶的研究[ J]. 硅酸盐学报, 1998, , 26( 3 ): 313– 318.

基金项目: 863 计划( 2002AA305509); 海军装备十五计划( 401050301); 黑龙江省科技计划(GB02A302)

收稿日期: 2005-08-22; 修订日期: 2005-11-10

作者简介: 刘红梅( 1976– ), 女, 讲师, 博士研究生, 研究方向: 纳米粉体 合成及功能复合材料, 联系地址: 黑龙江大学 130 信箱( 150080)。