

电爆炸法制备纳米磁性粉体及其吸波性能研究

程红飞^{1,2*}, 赵婉琪¹, 黄大庆¹, 张 桐¹, 刘鹏瑞¹, 王智勇¹

(1.中国航发北京航空材料研究院隐身材料与涂料研究所, 北京市, 100095; 2.北京航空航天大学材料科学与工程学院, 北京市, 100191; *通讯作者, chenghongfei1989@126.com)

摘 要: 采用电爆炸法制备了纳米磁性金属粉体。通过扫描电子显微镜分析了粉体的微观形态, 并对其粒径大小及分布情况进行了统计分析, 结果显示粉体粒径范围为43-75纳米。通过能谱分析和X射线衍射分析, 研究了粉体的元素组成和物相组成, 结果显示, 由高纯金属铁丝、高纯镍丝制备的纳米粉体的成分较为单一, 分别为 α -Fe (Im-3m)、Ni (Fm-3m), 而由铁镍合金丝制备的纳米粉体的物相则包括单质Fe、Ni (Fm-3m)、FeNi₃ (Pm-3m) 和其它杂质。通过测量纳米粉体的磁滞回线, 研究了粉体的饱和磁化强度、矫顽力等磁性能参数, 并探讨了粉体微观形态对磁性能的影响。结果显示, 呈链状结构的纳米铁粉的饱和磁化强度、矫顽力相对较高。使用同轴法测量了铁、钴、镍及铁镍合金粉体在添加量为50%时的电磁参数。结果表明, 在2-18GHz频率范围内, 纳米铁粉的损耗角正切值最大。利用软件CST仿真计算了纳米粉体的吸波性能, 研究了粉体的阻抗匹配特性及反射率, 并通过实验验证了纳米铁粉质量分数50%时的吸波性能。

关键词: 电爆炸法; 吸波材料; 纳米粉体; 电磁参数

引言

吸波材料是实现装备隐身和抗电磁干扰的重要手段之一。追求吸波材料“厚度更薄、重量更轻、吸收频带更宽、吸收强度更高”一直是研究者工作的目标, 其中主要有吸波结构和吸收剂两大发展方向。吸收剂方面, 目前常用的仍以铁氧体类、炭黑、羰基铁粉等材料为主, 但是纳米磁性超细粉金属和金属氧化物也是一种有应用前途的雷达波吸收剂, 磁性金属及化合物的超细粉体具有较高的磁损耗角和介电损耗角 [1], 同时由于纳米颗粒具有较高的比表面积, 它与有机基体能够实现良好的界面结合, 提高材料的强度、韧性等力学性能, 还可以改善基体材料的耐磨、导电、吸波等性能, 从而实现材料的性能增强与功能多样化 [1~3]。

纳米粉体的制备方法主要有化学法、物理法、生物法等, 其中应用较广泛的有物理法中的机械合金化法、磁控溅射法、电爆炸金属丝法等, 以及化学法中的化学气相冷凝法、溶胶凝胶法、模板法、沉淀法等 [4~6]。气相冷凝法的纳米颗粒产物尺寸小, 但投入成本高、且粉体颗粒空隙率高 [7, 8]。机械合金化法的粉体制备步骤相对较简单, 所以成本低, 但是其产物的纯度不高, 在制备过程中容易产生各种杂质, 同时粉体颗粒尺寸也有大有小、分布较宽。沉淀法已被用于氧化锌、二氧化硅、二氧化钛等纳米材料的批量化生产, 其具有产物颗粒尺寸小同时分布均一的优点, 但应用范围较窄 [9]。其它方法如磁控溅射、溶胶凝胶法等也存在着这样或那样的不足。所以虽然纳米粉体的制备方法较多, 但真正适用于制备纳米磁性粉体的方法不多。其中电爆炸金属丝法由于其制备工艺简单、能量转化率高、产量大、产物纯度高的优点, 成为近年来纳米粉体制备及研究采用较多的技术之一, 其原料主要以高纯金属丝为主, 尤其适用于制备纳米磁性材料 [10]。

国际上, 世界主要发达国家如日本、美国、德国等国都进行了电爆金属丝法制备纳米粉体的研究, 近些年国内的中国工程物理研究院、北京理工大学等高校和研究所也进行了相关制备研究。其中大部分方法都是采用强脉冲电流通过金属丝, 使金属丝在短时间内因电阻存在将大量电能转化为热能, 从而产生急剧的升温 and 相变, 金属丝由固体迅速变成等离子体, 等离子体在装置内再迅速冷却并凝固成为尺寸在纳米量级的颗粒 [11~17]。国内外相关研究工作已经对电爆炸法制备纳米粉体的工艺因素、产物的相变过程进行了一些初步的研究, 但纳米粉形成的微观机理和规律仍在探索阶段, 还需要将理论、实验以及仿真计算等手段紧密结合, 以更好地描述粉体形成过程和规律, 从而实现纳米粉体的功能化、工程化应用 [18]。

1. 实验材料与方法

1.1. 实验材料

高纯铁丝，高纯镍丝，北京中诺新材公司生产；铁镍合金丝（型号1J50、1J79、1J85），直径0.2mm、0.3mm，铁钴合金丝（型号4J9），直径0.2mm、0.3mm，上海宝钢公司生产；高纯氩气，北分气体厂制造；改性羰基铁粉，94RC。

1.2. 实验过程及实验方法

1.2.1. 实验装置

实验用电爆炸法装置如图1（a）所示，能够调节脉冲电压大小，调节范围为0~30KV；装置可连接气瓶和压力表，从而调节气压大小；另外爆炸丝的长度也可以调节，调节范围为8~13cm。

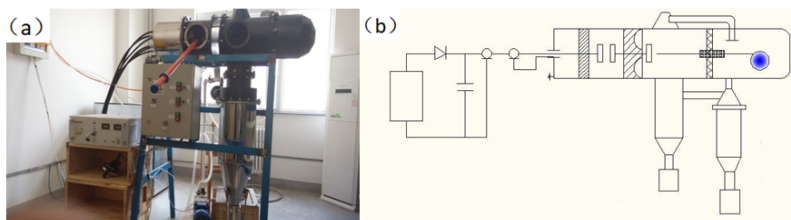


图1 电爆炸法制备纳米粉设备实物及原理图

（a）电爆炸制粉设备 （b）制粉设备原理示意图

1.2.2. 实验过程

用丙酮把设备内腔擦拭干净，关闭腔体，调整放电距离，向装置充入两倍大气压气体以检查装置的气密性；抽真空后打开进气室通入氩气至气压达到需要值，关闭氩气，打开排风机；设定脉冲电压大小电压，然后开始送丝，调节相应的参数（送丝速度、升压速度等）保证爆炸稳定地进行；观察并记录爆炸频率及时间，达到预定时间后关闭升压及送丝；钝化与收集，关闭送丝后待电压下降到安全放电电压时用放电杆将剩余电压放掉，用橡皮锤敲打粉体收集器以保证腔壁上附着的粉体沉降至收集罐内，关闭排风扇，静置10min左右，缓慢打开腔门，使得腔体内的纳米粉体缓慢钝化，卸下收集罐并密封。在设备使用过程中，由于一些合金丝由于延展性不好，对电爆炸装置送丝轨道进行了螺旋形的改进，使得其在通过螺旋形送丝轨道后不易弯曲。

电爆炸法制备的纳米粉体粒径大小及分布受金属丝材质或直径、爆炸气氛的气压、脉冲电压、电流密度、脉宽等因素的影响。为了研究合金丝进行电爆炸前后的成分变化，需对合金丝和粉体产物都作成分分析。为了研究实验条件对产物粒径的影响，选取四个因素两个水平做正交试验。四因素包括金属丝材质、金属丝直径、爆炸气氛的气压、脉冲电压。选取延展性较好的Ni丝和1J50铁镍合金丝作为材质因素的两个水平，选取的电压参数为15KV、30KV，选取的气压参数为1.5atm、3.0atm，选取的直径参数为0.2mm、0.3mm。

1.2.3. 粉体表征测试方法

产物粒径研究方法：利用扫描电镜来观察电爆炸法纳米粉体产物的微观形态，并通过得到的扫描电镜照片、粒径统计及计算软件来统计粒径的大小及分布。扫描电镜为S4800场发射扫描电镜（FESEM）。

产物成分研究方法：利用D/MAX2550型X射线衍射仪、X射线能谱分析仪对粉体样品的元素组成、物相结构进行分析。

产物磁性研究方法：采用Lakeshore7410样品振动磁强计（VSM）测试纳米粉体在常温下的磁滞回线，并得到粉体的矫顽力、饱和磁化强度、剩磁比。

电磁参数测试方法：采用Agilent 8720ET型矢量网络分析仪测定同轴环样品在1~18GHz频率范围内的介电常数和磁导率。为了防止纳米粉体氧化，纳米粉体的开装、电磁参数测量试样的制备均在处于氩气保护氛围下的真空手套箱内进行。同轴环样品是将粉体材料与石蜡按照质量比加热混合均匀，压制冷却而成。其外径7mm，内径3mm，高度2mm。

2. 结果与分析

2.1. 粒径分布与材质、工艺参数

从理论上讲，升高脉冲电压和减小电容都可能会导致能量沉积速率变快，从而导致金属丝汽化能量大，粉体粒径变小，但由于实验条件的不同，在产物的具体性能以及各因素对它的影响大小下可能会有不同。采用图1所示设备在不同的工艺参数下制备了纳米粉体，对粉体的粒径作了统计。统计结果见表1。

表1 镍丝、铁镍合金丝采用不同工艺参数的平均粒径统计

实验序号	材质	电压/KV	气压/atm	直径/mm	平均粒径/nm
1	Ni	15	1.5	0.2	71.40
2	Ni	15	1.5	0.3	74.09
3	Ni	30	3	0.2	58.88
4	Ni	30	3	0.3	61.41
5	Fe-Ni	15	3	0.2	43.44
6	Fe-Ni	15	3	0.3	65.73
7	Fe-Ni	30	1.5	0.2	46.92
8	Fe-Ni	30	1.5	0.3	49.99

从表1中粒径统计数据可以看出，通过调节金属丝材质、金属丝直径，以及脉冲电压、气压等工艺参数，该电爆炸法制粉设备所得到的粉体产物平均粒径在43~75nm之间，表明使用该设备制备的纳米粉体粒径较稳定，制备工艺参数对其粉体尺寸的影响较小，因此在制备粉体过程中，不需要过份关注该制备方法工艺参数的控制与调节，可以获得该粒径范围的纳米金属粉。

2.2. 纳米金属粉体的表征

2.2.1. 粉体元素组成

为了对粉体产物的成分进行表征，实验中采用了X射线能谱分析和X射线衍射分析方法，对制备的铁、镍、铁镍合金丝三种粉体的元素和物相组成进行了分析。能谱分析结果见表2。

X射线能谱分析表明，各种金属丝制备的纳米粉除了含有铁、镍、铬成分之外，还含有少量的C、N、O、Si等元素，这些有可能是由于金属丝自身带的微量元素或设备内清洗不彻底、取粉之后粉体氧化、以及粉体在进行表征的制样环节中引入杂质等因素造成的。

表2 铁、镍、铁镍合金丝制备粉体的EDS分析结果

金属丝名称	粉体元素组成 (Wt.%)							
	C	O	Al	Si	Cl	Mn	Fe	Ni
Fe	0.57	3.43	0.14	0.16	0.11	0.62	94.97	/
Ni	2.17	1.07	/	/	/	/	96.76	
Fe-Ni	0.41	2.12	0.15	0.1	0.21	0.42	47.5	49.1

图2 (a)、(b) Fe、Ni纳米粒子的X射线衍射图。从图中可以看到 (a) Fe纳米粒子中峰分别对应着的 α -Fe (111)的标准衍射图谱，(b) 镍纳米粒子XRD图谱上的峰对应着Ni (111)标准衍射图谱。但从表2铁、镍纳米粒子X射线能谱分析得知Fe、Ni纳米粉末中存在着氧化物，但在 (a)、(b) 中没有看到氧化物的特征峰，原因可能为氧化物均匀地包覆于纳米粒子表面，由于纳米粒子比表面积大，所以它的厚度非常小，计算得到其厚度约只有不到1纳米，所以不易被X射线衍射法探测到。结合表2和图2 (c) 分析，铁镍合金丝粉体产物XRD图谱上的峰对应着FeNi₃ (111)，Ni (111)，以及其它杂质。

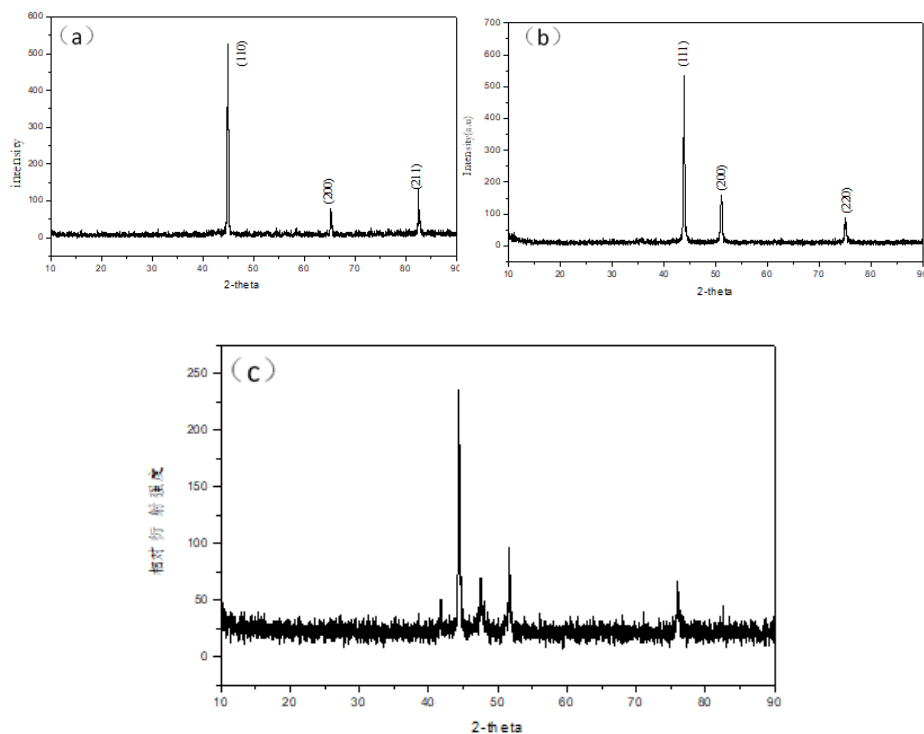


图2 纳米粉X射线衍射图

(a) 纳米铁粉的 (b) 纳米镍粉 (c) 纳米铁镍合金粉

利用Scherrer公式 $D=0.9\lambda/\beta\cos\theta$ 来计算纳米粒子的晶粒大小。其中， D 是晶粒大小（单位nm）， λ 是X射线的波长，选用CuK α 射线， $\lambda=0.15418\text{nm}$ ， β 是衍射峰半高宽， θ 是衍射角，计算得到的晶粒大小约为52.4nm，与扫描电镜统计的颗粒尺寸结果较为相近。

2.2.2. 微观形态分析

图3（a）、（b）分别为铁、镍纳米颗粒的SEM图，可以看出，铁纳米粒子呈明显的链状排布，这应该是纳米颗粒的磁性导致的。超微粒子的聚合状态与超微粒子的静磁相互作用密切相关。当超微粒子在单畴临界尺寸附近时，存在表面磁场，颗粒间的静磁相互作用使微粒容易排成链状，微粒为多畴或为超顺磁性时易聚集成网状链，微粒为单畴时易排成直链。

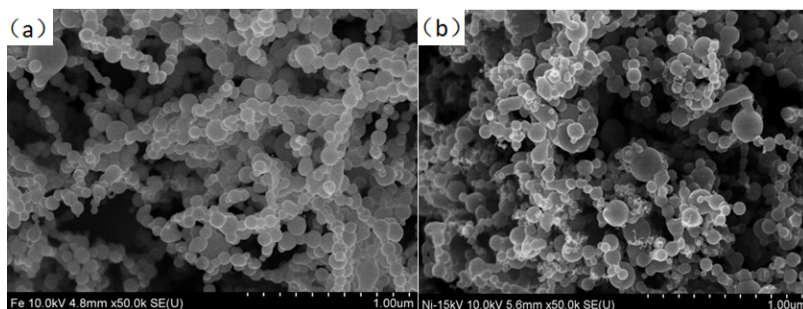


图3 纳米铁粉和镍粉扫描电镜图

(a) 纳米铁粉 (b) 纳米镍粉

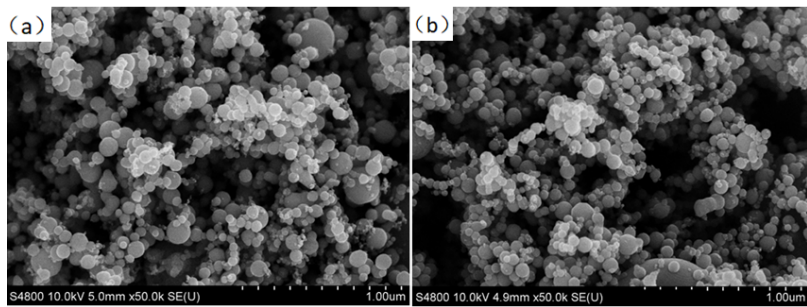


图4 纳米铁镍合金粉和铁钴合金粉扫描电镜图；

(a) 纳米铁镍合金粉； (b) 纳米铁钴合金粉

根据铁镍合金1J50和铁钴合金4J9粉体产物的SEM图片可以看出（如图4），两者的微观形态较为相似，合金粉体没有像单质铁粉和镍粉那样成明显棒状的现象，但仍然有一定的成链状的趋势，这可能由于该合金粉体成分的多样造成的，有的成分磁性较强，有的磁性弱，以致无法形成规则链状结构。

2.2.3. 磁性能表征

铁、钴、镍都属于本征铁磁性材料。磁性是运动电荷的作用结果，电子的轨道运动和自旋运动是物质的宏观磁现象的来源。磁性材料中的每一个磁畴都有自己的磁场，当磁化磁场做周期的变化时，铁磁性材料的磁感应强度和磁场强度的关系曲线是一条闭合线，即B-H磁滞回线，其中闭合线的面积是一个周期变化过程后铁磁性材料的能量损耗。

研究粉体的磁滞回线，对于弄清它们对电磁波能量的作用，从而研究其作为吸收剂的损耗能力，具有重要的意义。由于纳米铁、镍粉体都属于磁损耗吸收剂，为了研究它们的损耗能力，我们也对采购的微米级球形羰基铁粉吸收剂（94RC）的磁滞回线进行了测量，并由此将它们的饱和磁化强度、矫顽力、剩磁比等磁性参数进行比较。采用振动样品磁强计测试了三种粉体室温下的磁滞回线，结果如图5所示。

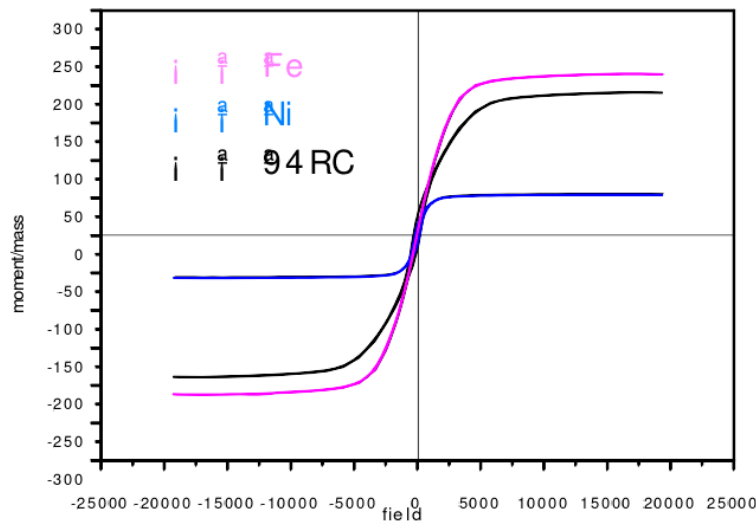


图5 纳米铁粉、纳米镍粉和羰基铁粉94RC的磁滞回线图

根据纳米铁粉、纳米镍粉、羰基铁粉94RC的磁滞回线得出的三者的矫顽力、饱和磁化强度、剩磁比的数值，见表3。

表3 纳米铁粉、镍粉及羰基铁粉94RC的磁性能参数

各项参数	纳米Fe粉	纳米Ni粉	羰基铁粉94RC
矫顽力Hc (Oe)	249.92	173.91	7.9748
饱和磁化强度Ms (emu/g)	213.97	55.603	189.82
剩磁比Mr/Ms	21.055/213.97 =0.0984	12.730/55.603 =0.2289	0.5812/189.82 =0.00306

材料的磁性能受其微观结构、晶粒形状及尺寸等因素的影响,通过分析材料的微观形态可以研究其与磁性能参数(如饱和磁化强度)之间的关系[19]。

纳米晶体颗粒一般具有较大的表面活化能,所以表面极易氧化,同时其表面一般为无规则排序,这些因素都会导致纳米磁性材料总磁矩降低,从而导致其饱和磁化强度低于本体磁性材料。另外,从纳米颗粒聚集形态来说,直链状聚集形态(见图3a)相对于网状链聚集形态(见图4)使材料更具有各向异性,这种形状上的特点可以使得纳米材料在其易磁化方向以外的其它方向不易被磁化,增高矫顽力的值[21]。

对比三种粉体的磁性能可以看出,纳米铁粉的饱和磁化强度、矫顽力比纳米镍粉的都要高,而剩磁比则偏低。此外,纳米铁粉的磁滞回线的面积也要比纳米镍粉较大,但均小于羰基铁粉94RC,纳米磁性粉体矫顽力远远高于颗粒为微米级的羰基铁粉94RC,说明纳米粉都呈现明显的硬磁性特征。这可能是因为具有直链或网状结构的材料都具有一定的外形各向异性,尤其是纳米铁粉,其长径比可以达到10~20,这种各向异性对磁滞回线和矫顽力的影响很大,这有利于提高矫顽力值。而羰基铁粉饱和磁化强度则相对并不大。其剩磁比仅仅是纳米粉几百分之一。

2.2.4. 纳米粉体电磁参数

采用同轴法测试了纳米铁粉、纳米钴粉、纳米镍粉、纳米铁镍合金粉在质量分数50%的情况下的电磁参数(复介电常数和复磁导率),并绘制了四种纳米粉体的介电常数实部和虚部、磁导率实部和虚部随频率变化的比较曲线,如图6所示。

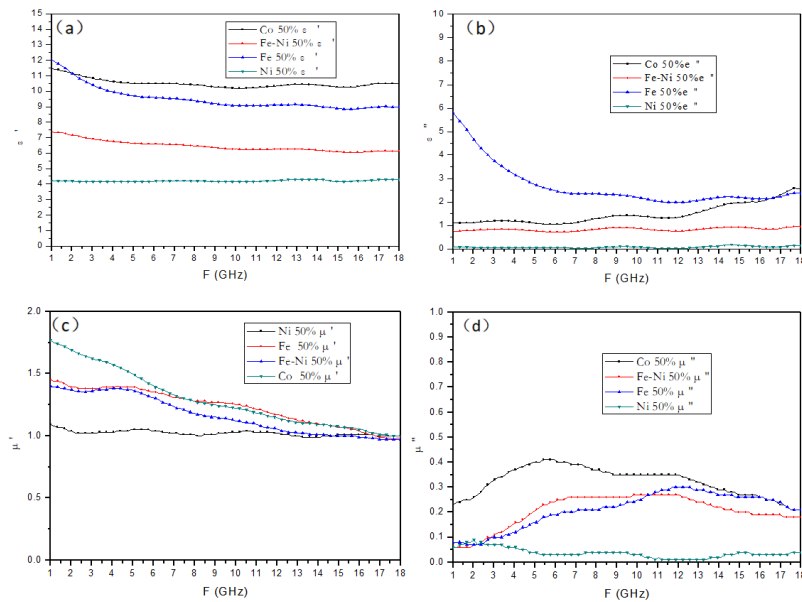
图6 纳米铁、钴、镍、铁镍合金粉 (50wt%) (a) ϵ' (b) ϵ'' (c) μ' (d) μ''

图6 (a)、(b)、(c)、(d)分别为纳米铁粉、钴粉、镍粉、铁镍合金粉四种不同的纳米粉体材料电磁参数。在质量分数达到50%时,四种纳米粉体的电磁参数已经有较为明显的差别。在1-18GHz频率范围内,纳米Co粉的介电常数实部最大,其它三者由大到小依次为纳米铁粉、铁镍合金粉、纳米镍粉。在1-18GHz范围,纳米Co粉、铁镍合金粉、镍粉的介电常数实部基本没有变化,呈现水平的曲线,而纳米铁粉的介电常数虚部在1-5GHz范围曲线是呈陡峭型的,结合磁导率参数比较可以得出,纳米铁粉在较宽的频带范围具有相对较高的的损耗角正切值。

2.3. 电爆炸法制备的纳米磁性金属粉体吸波性能研究

2.3.1. 纳米粉体的阻抗匹配性

根据等效媒质理论，阻抗匹配公式可以由下面的公式计算：

$$Z/Z_0 = \sqrt{\frac{(1 + S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1 - S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad (1)$$

式中：Z为吸波材料中的波阻抗， Z_0 为自由空间波阻抗， S_{21} 为透过系数， S_{11} 为反射系数。

因为背板为金属材料，所 S_{21} （传输系数）参数为 0，把 S_{11} （反射系数）参数带入公式（1），以同一工艺参数条件下制得的纳米铁粉、纳米镍粉、1J50铁镍合金粉，以3mm反射系数为例，计算得到在电磁波1-18GHz范围内其相对阻抗变化曲线分别如图7所示。

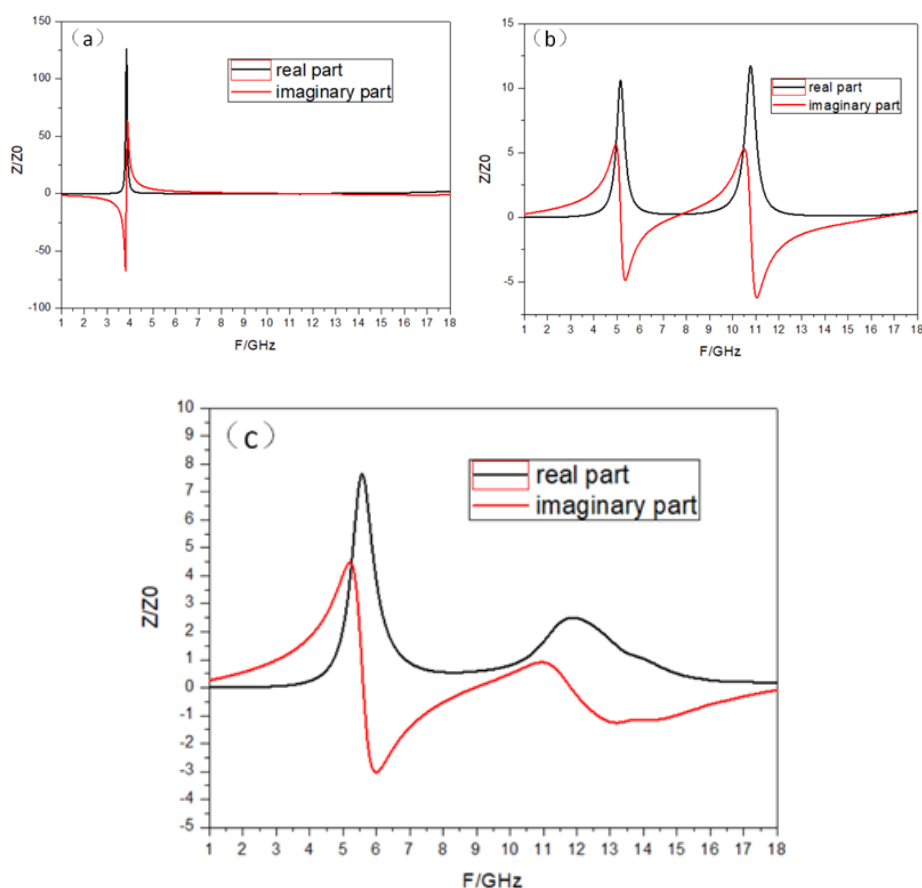


图7 纳米铁、镍、铁镍合金粉体材料相对阻抗数值

(a) 纳米铁粉 (b) 纳米镍粉 (c) 纳米铁镍合金粉

图7 为铁、镍、合金粉体相对阻抗的实部与虚部同电磁波频率的关系。从图可以看出，纳米铁粉除在 3.8GHz 附近外，其余频段其相对阻抗均比较接近 1，具有相对良好的阻抗匹配特性。铁镍合金粉阻抗匹配性不如纳米铁粉，但相较镍粉而言阻抗匹配较好。

2.3.2. 纳米粉体涂层反射率计算及实验验证

采用三维电磁软件CST仿真计算涂层的反射率，计算频率为1-18GHz，选择开放式边界条件，材料参数选择纳米铁粉质量分数为50%的电磁参数，厚度1-5mm。

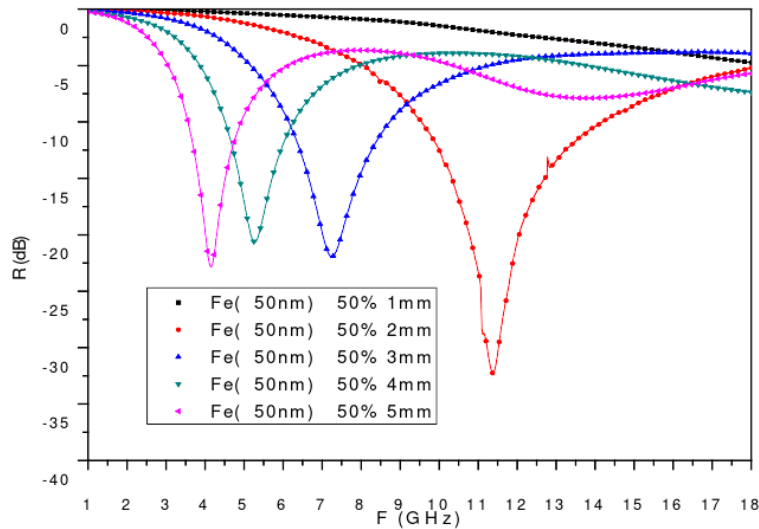


图8 涂层反射率计算结果

图8为纳米铁粉50%的吸波材料在厚度为1-5mm的反射率仿真计算结果。表明随着厚度的增加，吸收峰向低频方向移动，吸收峰的峰值在厚度2mm左右时达到最大值（11.37GHz，-32.25dB），随着厚度继续增大到3mm以上后，吸收峰的峰值减小。吸收峰出现在相应的频率点，是由于在该频率点出现了厚度与电磁波波长匹配。由材料在每个频率点的相对介电常数和相对磁导率以及电磁波的波长，根据公式（2）可以计算得到涂层的匹配厚度，还可以计算某种材料在形成一定厚度的涂层时其匹配波长，也即其吸收峰所对应的频率。

$$L = \frac{\lambda_0}{4\sqrt{\epsilon\mu}} \quad (2)$$

式中：L为吸波材料厚度， λ_0 为波长， ϵ 和 μ 分别为相对介电常数和相对磁导率。

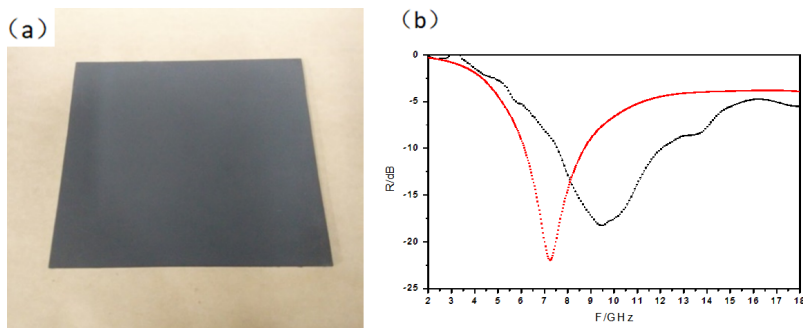


图9 实验结果及实物图 (a) 实物图 (b) 计算与测量结果对比

以环氧树脂为基体、纳米铁粉填充质量分数为50%制备了吸波涂层，如图9（a），涂层厚度3.0mm。为了对仿真结果进行实验验证，用弓形法测试了纳米铁粉涂层的反射率，测试频率2~18GHz，由图9（b）的对比可以看出，测试结果吸收峰在8~12GHz频段，理论仿真的结果与实物测试结果在吸收峰的位置较为接近。吸收峰的变化是由于涂层厚度不均匀、铁粉分散的方法与测电磁参数制样所用的分散方法不同所造成的，而吸

收深度的变浅是由于软件的拟合造成的，实际的测量不可能出现在仿真结果的吸收峰深度。排除这些因素的影响，可以说实验结果较好的验证了计算结果。

3. 结论

纳米粉体在制备新型轻质强韧性结构吸波材料方面有比较明确的发展前景，通过对电爆炸法制备的纳米磁性粉体进行吸波性能的研究，可以得出如下结论：单质铁丝、镍丝通过电爆炸法制备的纳米金属粉体主要为 α -Fe ($Im-3m$)、Ni ($Fm-3m$)，合金丝制得的粉体成分较为复杂。电爆炸法制备的纳米铁粉、纳米镍粉的形态呈现明显的链状结构，而制备的铁镍合金粉、铁钴合金粉则大部分呈球形颗粒。纳米铁粉的饱和磁化强度、矫顽力比纳米镍粉的都要高，而剩磁比则偏低；纳米铁粉的磁滞回线的面积也要比纳米镍粉较大，软磁性相较于传统羰基铁粉94RC较弱；此外，纳米铁粉的损耗角正切值比其它粉体高，同时阻抗匹配性更好。总体而言，电爆炸法制备纳米金属粉领域目前还存在着未知，需要做更多的工作才能够了解纳米粉形成的机理，而只有清楚的知道这一过程，才能为控制和制造出理想粒径和形状的纳米颗粒做准备。为满足工程需要，还需要进行高性能纳米磁粉的工程量化研究。另外纳米金属粉体在粘稠树脂中的分散工艺仍然有待于改善，纳米粉体的界面增强也要同时进行，这些都将直接影响纳米粉体在树脂基体中的应用以及最终目标的实现。

参考文献

- [1] SURESHKUMAR, RADHAKRISHNA, CONG, et al. Nanoparticle array comprising distributed nanoparticles: US, 9540235 [P]. 2017.
- [2] Zhou Z H, Zhao Y, Wang Z Y, et al, The design and fabrication of a broadband metamaterial absorber based on a double-layer ring structure [J], Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2023(586), 171203.
- [3] 罗江山. 纳米金属功能材料研究进展 [J].中国工程物理研究院科技年报,2009(1):22-25.
- [4] 铁生年,马丽莉. 纳米粉体材料应用技术研究进展 [J].青海师范大学学报(自科版),2011(4):10-20.
- [5] 孙丹,李伟,刘峥. 二维纳米材料MXene及其在锂离子电池中的应用研究进展 [J].材料导报,2021,35(15):10.
- [6] POURNADERI S,MAHDAVI S,AKHLAGHI F.Fabrication of Al/Al₂O₃ composites by in-situ powder metallurgy (IPM) [J].Powder Technology, 2012 (5): 276- 284.
- [7] 陈少杰,张教强,郭银明. 纳米复合材料制备方法的研究进展 [J].玻璃钢/复合材料,2008(5):6.
- [8] 安振华. 气相燃烧法在纳米粉体制备中的应用研究综述 [J].中国粉体工业,2023(2):28-31.
- [9] 梁冬冬,赵美琦,王祉诺,等. TiO₂纳米粉体沉淀法制备与其性能 [J].2022(1).
- [10] 牟世娟,韩炜,牟世霞. 浅谈电爆炸金属丝制备纳米金属粉体 [J].中国高新技术企业,2012(6):75-76.
- [11] 毛志国,邹晓兵,王新新. 电爆金属丝产生纳米粉体 [J].强激光与粒子束,2010, 24(3):76-79.
- [12] 彭楚才. 电爆炸法制备纳米粉体及其机理研究 [D].南京理工大学,2018.
- [13] 武友成,, 邓建军,郝世荣,等. 电爆炸丝法制备纳米Al₂O₃粉体 [J].强激光与粒子束, 2005, 17(11):1753-1756.
- [14] 朱亮,魏风波,罗仁昆. 金属丝直径和长度对电爆铜丝制备超细粉体的影响 [J].兰州理工大学学报,2007,33(5):21-24.
- [15] YILMAZ F,LEE D J,SONG J W,et al. Fabrication of cobalt nano-particles by pulsed wire evaporation method in nitrogen atmosphere [J].Powder Technology, 2013(235): 1047-1052.
- [16] BEKETOV I V,SAFRONOV A P,BAGAZEEV A V,et al. In situ modification of Fe and Ni magnetic nanopowders produced by the electrical explosion of wire [J].Journal of Alloys and Compounds, 2014(586): 483-488.
- [17] ZOU X B, MAO Z G, WANG X X, et al.Nanopowder production by gas-embedded electrical explosion of wire [J].Chin. Phys.B, 2013(4): 1-1.
- [18] 彭楚才,王金相,童宗保. 电爆炸法制备纳米粉体材料的研究进展 [J].材料科学与工程学报,2013,31(4):608-613.
- [19] ZHANG H, WU G, CHEN X, et al. Synthesis and magnetic Properties of nickel nanocrystals [J]. Mater.Res. Bull. 2006, 41: 495-501.
- [20] ZHU L, XIAO H, FU S. Surfactant Assisted Synthesis and Characterization of Novel Chain-Like Co-Ni Alloy assemblies.Eur.J.Inorg. Chem., 2007, 3947-3951.
- [21] WANG J, CHEN Q W, ZENG C, et al. Magnetic-field-induced growth of single-crystalline Fe₃O₄ nanowires. Adv.mater.2004, 16: 137-140.