

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2013.03.006

吸波材料的研究进展

石 亮

(湖南工业大学 包装与材料工程学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 阐述了雷达吸波材料在隐身技术中的重要作用及其吸波原理, 综述了石墨吸波材料、铁氧体吸波材料、陶瓷吸波材料、导电高聚物、视黄基席夫碱材料等的特点及研究现状, 并提出雷达吸波材料未来的研究方向为不同类型吸波材料的复合。

关键词: 隐身技术; 吸波材料; 吸波原理

中图分类号: TB34

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2013)03-0025-05

Research Progress on Wave Absorbing Materials

Shi Liang

(School of Packaging and Material Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: The importance and principle of radar wave absorbing materials in stealth technology are presented. The characteristics and research status of stealth materials such as graphite, ferrite, ceramics, conducting polymers and retinyl schiff based wave-absorbing material are reviewed. The development trend of stealth material research is the composition of different wave absorbing materials.

Key words: stealth technology; wave-absorbing material; wave-absorbing mechanism

1 隐身技术

作为军事上提高武器生存与打击能力的重要电子技术, 隐身技术已成为各军事大国竞相研究的热门课题, 受到世界各国的重视, 获得了飞速的发展。隐身技术又称“低可探测技术”, 是指利用特殊的材料和技术手段, 来改变己方目标的可探测性信息特征, 最大程度地降低被对方探测系统发现的概率, 使己方目标、己方武器装备不被敌方的探测系统发现和探测到, 从而提高己方武器的存活率以及打击敌方目标的能力。隐身技术综合了电子工程学、气动力学、材料学等多种学科, 以及红外、激光、发动机等多种应用技术于一身, 在军事应用中具有重要

地位^[1-2]。

目前, 雷达仍然是探测目标的主要手段。雷达是利用电磁波探测目标的电子设备。为了提高对雷达的隐身能力, 应用的主要隐身技术手段有外形设计、隐身材料、电子对抗等。基于目标外形事实上很难操控及其电磁波对材料的特殊要求, 外形设计和电子对抗成本较高, 而且技术相当复杂, 因此, 发展隐身材料以对抗雷达的探测不失为一种有效的方式^[1-3]。

2 雷达吸波材料的工作原理

通常使用雷达吸波材料以达到对雷达隐身的目

收稿日期: 2013-01-16

作者简介: 石 亮 (1988-), 男, 湖南邵阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为功能材料,

E-mail: ss442120848@126.com

的。雷达吸波材料是指当电磁波入射到材料表面时,能有效地吸收雷达波,从而使目标的回波强度减小的一类功能材料。雷达吸波材料种类繁多,且各具特色。一般通过对吸波材料的吸收剂以及黏结剂进行合理调配,以获得较高的电磁吸波能力,而衡量吸波性能的一个重要参数是雷达散射面积(radar cross-section,简称RCS)。雷达散射面积可以理解为一个等效面积,当这个面积所截获的雷达照射能量各向同性地向周围散射时,在单位立体角内散射的功率恰好等于目标向接收天线方向单位立体角内散射的功率^[4]。

雷达吸波材料通过吸收在介质中传播的电磁波,来有效降低目标的回波强度,从而获得反雷达探测的能力,实现隐身的目的^[5]。影响吸波材料性能的重要因素是材料的匹配特性和衰减特性。当电磁波在介质中传播并入射到材料表面时,考虑到材料的匹配特性,使电磁波尽可能多地进入材料内部,以降低对电磁波的反射;考虑到材料的衰减特性,当电磁波进入到材料内部时,入射电磁波应被有效吸收或衰减^[5-6]。衡量雷达吸波材料的电磁参数有介电常数 ϵ 、磁导率 μ 。对一般材料来讲,其介电常数 ϵ 、磁导率 μ 可用以下公式表示:

$$\begin{aligned}\epsilon &= \epsilon' - i\epsilon''; \\ \mu &= \mu' - i\mu''.\end{aligned}$$

式中: ϵ' 为介电常数实部; ϵ'' 为介电常数虚部; μ' 为磁导率实部; μ'' 为磁导率虚部。

当电磁波在介质中传播并入射到材料表面时,如果材料的波阻抗与电磁波介质的波阻抗达到相匹配的状态,则电磁波无损耗。事实上,这种情况只存在于理想状态下,实际情境中一般表现为不相匹配。这种不匹配的系数越大,反射系数就越大。当电磁波透过材料的表面,进入材料内部,材料的介质损耗和磁滞损耗使电磁波能量转化为热能或其他形式的能量。材料复介电常数 ϵ'' 和复磁导率 μ'' 越大,其复波数越大,材料对电磁波的吸收就越强。

3 吸波材料的研究现状

3.1 石墨吸波材料

石墨属于碳基吸波材料的一种,碳基吸波材料一般包括石墨、炭黑、碳纤维、碳纳米管等。石墨是最早被应用的吸波材料之一,炭黑、碳纤维、碳纳米管等在吸波领域中也较有广泛的应用。

二战期间,为了加强对雷达波的吸收率,美国相关研究者们以纳米石墨为吸收剂,制得石墨-热塑

性复合材料和石墨-环氧树脂复合材料,这在当时引起了不小的轰动,并被冠以“超黑粉”。这种纳米石墨吸波材料在低温下仍能保持较高的韧性,拓展了其在隐身材料方面的应用^[7-9]。

王晨等^[10]采用超声波和酸处理方法,将膨胀处理的石墨剥离成尺度在纳米范围的薄片,并利用简单的共沉积和退火还原工艺,使铁钴镍磁性合金粒子沉积在石墨薄片上,制得 $\text{Fe}_3\text{Co}_6\text{Ni}$ /石墨复合材料。作为吸波剂,此复合薄片在退火温度为 $600\text{ }^\circ\text{C}$,复合材料的频率为 12.6 GHz 时,对入射电磁波的最大吸收可达 -24 dB ,而有效吸收宽带($<-5\text{ dB}$)可达 8 GHz 。

周明善等^[11]采用膨化二茂铁和可膨胀石墨混合物的方法,在膨胀石墨表面沉积制得铁氧化物。该铁氧化物的主要成分为 Fe_2O_3 , Fe_3O_4 ,随着铁氧化物在复合材料中含量的增加,其平均电导率下降,磁化强度逐渐变强,复合材料显示为亚铁磁性;吸波性能检测显示,膨胀石墨的电损耗未受到复合材料的影响,反而增加了复合材料的磁损耗吸收能力,而复合材料的波动态衰减效果明显优于单一的膨胀石墨,当可膨胀石墨和二茂铁的质量比为 $2:3.5$ 时, $3, 8\text{ mm}$ 波动态衰减能力最强。

张倩等^[12]利用膨化多壁碳纳米管和可膨胀石墨混合的方法,在高温条件下,制得一种 8 mm 波的高电导率干扰性材料。采用 8 mm 波二维静态衰减性能对其进行检测,结果表明:碳纳米管的结构在高温热处理下发生了变化,呈现为熔融状态,熔融的碳纳米管呈膜状分布于膨胀石墨的表面层以及层与层之间的孔隙中;随着碳纳米管含量的不断增加,膨胀石墨对表面电导率以及电磁波的衰减有所增加,但并未改变膨胀石墨的抗磁特性,此复合材料对电磁波的吸收能力仍主要表现为电损耗和散射。检测结果还显示,该复合材料 8 mm 波二维静态衰减效果明显优于纯碳纳米管,当碳纳米管的添加质量分数为 29% 时,复合材料的衰减能力最强(达 11.68 dB);当碳纳米管的添加质量分数继续增大时,复合材料的波衰减能力呈现降低趋势。

作为碳基吸波材料的一种,石墨具有优异的介电性能与低密度特性,这使其成为应用最为广泛的吸波材料之一,受到广大研究者的关注。然而单纯的碳材料本身的磁损耗表现不明显或无磁损耗,这限制了其吸波性能的提高。因此,通过对材料进行改性或将碳材料与其他材料复合,制得碳基吸波材料,以提高材料的吸波性能,将成为今后石墨吸波材料研究的重点^[13]。

3.2 铁氧体吸波材料

铁氧体吸波材料是一种双复介质的磁性材料,即复介电常数和复磁导率。铁氧体是应用较早的电磁波吸收剂,主要包括尖晶石型、磁铅石型和石榴石型3种类型,使用较多的是尖晶石型铁氧体。铁氧体吸波材料的合成方法主要有水热合成法、溶胶凝胶法、固相合成法和化学共沉淀法等。

汪忠柱等^[14]采用水热法,在180℃条件下,合成了纳米级的尖晶石 NiZn 铁氧体纳米粉体,并对其进行检测。研究表明,镍锌铁氧体的饱和磁化强度和矫顽力分别为11.9 emu/g和7.44 kA/m。杨柯等^[15]采用 KClO_3 作为内氧化剂,在空气中使用自蔓延法高温合成了锰锌铁氧体粉料,并检测了粉料的性能。检测结果表明,当反应放热供氧系数为0.54、反应控制放热系数为0.6、燃烧合成速度为1.93 mm/s、燃烧温度为1593 K时,可制备出性能优良的锰锌铁氧体粉料,其比饱和磁化强度为64.44 $\text{A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$,剩磁强度为1.349 $\text{A}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$,矫顽力为0.24 kA/m,平均粒径为1.42 μm 。

铁氧体吸波材料具有强吸收能力,受到了各国学者们的关注,并研制出一系列性能优异的雷达吸波材料。不足之处是其复介电常数实部 ϵ' 和复磁导率实部 μ' 较小,密度大,饱和磁化强度低,居里温度低,高温稳定性能差,因此其应用范围受到限制。为了弥补铁氧体吸波材料的以上缺陷,可以从纳米化、合金化、纤维化以及添加其他磁性金属微粉等方面进行研究,以改善其吸波性能^[16]。

3.3 陶瓷吸波材料

陶瓷吸波材料属于介电损耗型吸波材料。在众多的吸波材料中,陶瓷吸波材料的吸波性能优于铁氧体以及金属粉末吸波材料,吸波范围广泛,不仅对雷达波具有损耗作用,而且可以减弱红外辐射信号。陶瓷吸波材料除了碳化硅、 Si_3N_4 等之外,金属微粉和陶瓷微粉共烧而成的金属陶瓷也属于此列。陶瓷吸波材料主要以热能的形式来吸收雷达波^[17]。

孙良奎等^[18]采用同轴静电纺丝法,制备了苯胺/ SiO_2 同轴复合纤维。经过炭化处理及预氧化处理,得到1 μm 的C/ SiO_2 同轴纤维。并采用X射线衍射分析仪、扫描电子显微镜以及傅里叶红外光谱分析仪,对所得纤维的同轴纤维结构和纤维截面形貌进行了表征。结果表明,通过同轴静电纺丝技术制备的 SiO_2 涂层较好地涂敷在碳纤维上。采用网络分析仪,研究了同轴复合纤维的电磁性能。结果显示,纤维质量分数为20%时,该复合材料的介电常数实部与虚部均比未涂层的碳纤维低。而根据电磁参数,采用

RAMCAD软件,计算了3 mm厚材料的反射率,在2~18 GHz的频率范围内,材料的最低反射率达-17 dB,对应的频率为12 GHz,而小于-10 dB的宽带为3.3 GHz。热重分析表明,复合材料的抗氧化性能优于单一的碳纤维。

3.4 导电高聚物

导电高聚物属于电损耗型吸波材料,影响其吸波性能的因素主要有介电常数以及电导率。这类物质具有物理和化学性质独特、密度小、加工性能好、结构多样等优点,但存在高温条件下不稳定的缺点。导电高聚物的导电性不高,但可通过化学或电化学方法进行掺杂处理后,利用其共轭主链上的大 π 键增强其电导率。由于其链结构上存在自由基、对称偶极子或孤子,共轭链与掺杂剂之间发生电子转移而产生新的载流子,电导率剧增,可达到半导体甚至金属的电导率范围^[19]。

聚苯胺具有酸掺杂简便易行、化学稳定性好、易合成和高的导电性等优点,因此,对其研究较多。苏碧桃等^[20]采用原位聚合法,在聚苯胺的表面包覆经过 HNO_3 处理的 CoFe_2O_4 磁性纳米粒子,制备了具有电磁功能的聚苯胺/ CoFe_2O_4 纳米复合材料。该复合材料的饱和磁化强度随着 CoFe_2O_4 含量的增加而降低,矫顽力均高于单一的 CoFe_2O_4 。同时,采用化学法,制备了盐酸掺杂聚苯胺以及聚苯胺/二氧化锰复合粒子。研究显示,聚苯胺具有较好的掺杂特性,采用化学氧化法制备的盐酸掺杂聚苯胺具有一定的结晶度,所生成的微观形貌近似成球形,提高结晶度有利于提高其电导率。对聚苯胺进行电磁参数测量,结果表明其具有良好的导电性和电磁性能。在聚苯胺/硅橡胶复合材料中,聚苯胺的添加质量分数为50%时,复合材料的电导率达1.93 S/cm,在0.13~1.5 GHz内,平均屏蔽效能达-26 dB,是一种良好的民用屏蔽材料。盐酸掺杂聚苯胺属于介电损耗材料,在2~18 GHz内,具有良好的吸波性能。

3.5 视黄基席夫碱

视黄基席夫碱材料是美国卡耐基-梅隆大学最早研制的一种吸波材料。由于其吸波性能优异,对雷达波的衰减可达80%以上,而其质量仅为铁氧体的1/10,具有质量小、带宽、吸波性能优良的优点。国内外许多学者对视黄基席夫碱及其配合物的吸波性能进行了研究。

王少敏等^[21]利用维生素A醋酸酯水解后氧化成视黄醛,再分别与对苯二胺、乙二醛反应,然后与 FeCl_3 反应,生成相应的视黄基席夫碱配合物,利用波导法,在接近实际电磁环境的X波段(8.2~12.4 GHz)

测试其复介电常数、复磁导率,电磁参数计算结果显示,反射率小于 -9 dB的频带为 $8.2\sim 10.7$ GHz。王蓓^[22]将碳纤维与视黄基席夫碱盐复合,发现视黄基席夫碱盐明显地提高了碳纤维的吸波性能。丁春霞等^[23]合成了一种视黄基席夫碱的配合物,在 $2\sim 18$ GHz范围内测试发现,在 $5.6\sim 7.7$ GHz频带范围内,其反射率小于 -10 dB,反射率最佳值位于 -16 dB。王少敏等^[24]利用三聚氰胺、对苯二甲酰氯、三氯化铁、视黄醛和三氯化铁反应,合成大分子视黄基席夫碱铁配合物,并对其介电常数、磁导率进行了测试。结果显示,在 $9.0\sim 12.1$ GHz频带范围,其反射率小于 -11 dB,同时发现芳香族视黄基席夫碱配合物的吸波性能优于脂肪族,由此认为芳香族的大 π 键参与共轭反应,使化合物具有更多的 π 电子,电子离域程度更大,电损耗增大,并形成较理想的共平面络合物,从而提高了复合材料的吸波性能。

4 结语

作为传统的吸波材料,石墨吸波材料、铁氧体吸波材料、陶瓷吸波材料、导电高聚物、视黄基席夫碱材料等在吸波领域已有广泛的应用,但也存在诸多的缺点。现代战争中,对武器隐身技术的要求已由传统的强吸收向“薄、宽、轻、强”的综合要求转变。根据目前吸波材料的发展现状,单一类型的材料很难满足日益提高的隐身技术所提出的“薄、宽、轻、强”的综合要求,需要将多种材料进行各种形式的复合,以获得具有最佳吸波效果的材料^[25]。因此,不同类型吸波材料的复合将是未来吸波材料的主要发展趋势。

参考文献:

- [1] 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, Hao Wanjuan. Absorbing Material Advance and Influence to Military Stealth Technology[J]. New Chemical Materials, 2012, 40(1): 13-15.
- [2] [佚名].隐身技术[EB/OL]. [2012-12-10]. <http://baike.baidu.com/view/262616.htm>.
[Anon]. Stealth Technology[EB/OL]. [2012-12-10]. <http://baike.baidu.com/view/262616.htm>.
- [3] 董杰涛.隐身复合材料的研究与展望[J].中国科技财富,2011(19):121.
Dong Jietao. Stealth Composites and Prospects[J]. Fortune World, 2011(19): 121.
- [4] [佚名].雷达散射面积[EB/OL]. [2012-12-10]. [- \[baike.baidu.com/view/2130206.htm\]\(http://baike.baidu.com/view/2130206.htm\).
\[Anon\]. The Radar Scattering Area\[EB/OL\]. \[2012-12-10\]. <http://baike.baidu.com/view/2130206.htm>.
 - \[5\] 张政权,李铁虎,经德齐.雷达吸波材料的研究现状及其进展\[J\].材料导报,2007,21\(增刊1\):307-309.
Zhang Zhengquan, Li Tiehu, Jing Deqi. Present Status and Perspectives of the Radar Absorbing Material\[J\]. Materials Review, 2007, 21\(S1\): 307-309.
 - \[6\] 李金镭,陈康华,范令强,等.雷达吸波材料的研究进展\[J\].功能材料,2005,36\(8\):1151-1154.
Li Jinlei, Chen Kanghua, Fan Lingqiang, et al. Current Status and Developments in Radar Absorbing Materials\[J\]. Journal of Functional Materials, 2005, 36\(8\): 1151-1154.
 - \[7\] 邢雨英.隐身材料\[M\].北京:化学工业出版社,2004:43-48.
Xing Liying. Stealth Material\[M\]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 43-48.
 - \[8\] 吴红焱,王晓艳,张玲,等.碳纤维吸波材料的研究进展\[J\].材料导报,2007,21\(5\):115-117,124.
Wu Honghuan, Wang Xiaoyan, Zhang Ling, et al. Present Development of Absorbing Composites Containing Carbon Fibers\[J\]. Materials Review, 2007, 21\(5\): 115-117, 124.
 - \[9\] 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\(1\):8-11.
Luo Fa, Zhou Wancheng, Jiao Huan, et al. Current Study of High Temperature Radar Absorbing Materials\[J\]. Aerospace Materials & Technology, 2002\(1\): 8-11.
 - \[10\] 王晨,康飞宇,顾家琳.铁钴镍合金粒子/石墨薄片复合材料的制备与吸波性能研究\[J\].无机材料学报,2010,25\(4\):406-410.
Wang Chen, Kang Feiyu, Gu Jialin. Synthesis and Microwave Absorbing Properties of FeCoNi Alloy Particles/Graphite Flaky Composites\[J\]. Journal of Inorganic Materials, 2010, 25\(4\): 406-410.
 - \[11\] 周善明,李澄俊,徐铭,等.膨胀石墨复合材料的电磁特性及其 \$3\$ mm, \$8\$ mm波动态衰减性能研究\[J\].无机材料学报,2007,22\(3\):509-513.
Zhou Shanming, Li Chengjun, Xu Ming, et al. Electromagnetism Characteristics and \$3\$ mm· \$8\$ mm Wave Dynamic Attenuation Performance of Expanded Graphite Composite \[J\]. Journal of Inorganic Materials, 2007, 22\(3\): 509-513.
 - \[12\] 张倩,焦清介,宣兆龙,等.碳纳米管/膨胀石墨复合材料制备及其 \$8\$ mm波衰减性能\[J\].兵工学报,2011,32\(12\):1510-1513.
Zhang Qian, Jiao Qingjie, Xuan Zhaolong, et al. Preparation of Carbon Nanotube/Expanded Graphite Composite Material and Its \$8\$ mm Wave Attenuation Properties\[J\]. Journal of Ordnance, 2011, 32\(12\): 1510-1513.
 - \[13\] 李斌鹏,王成国,王雯.碳基吸波材料的研究进展\[J\].材料导报,2012,26\(4\):9-14.](http://

</div>
<div data-bbox=)

- Li Binpeng, Wang Chengguo, Wang Wen. Progress of Electromagnetic Wave Absorbing Materials Based on Carbon [J]. *Materials Review*, 2012, 26(4): 9-14.
- [14] 汪忠柱, 谢延玉. 纳米晶 $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ 铁氧体的水热合成与磁性[J]. *安徽大学学报: 自然科学版*, 2010, 34(6): 49-52.
- Wang Zhongzhu, Xie Yanyu. Hydrothermal Synthesis and Magnetic Properties of $Ni_{1-x}Zn_xFe_2O_4$ Ferrite Nano-Crystalline[J]. *Journal of Anhui University: Natural Science Edition*, 2010, 34(6): 49-52.
- [15] 杨柯, 郭至猛, 郝俊杰, 等. 自蔓延高温合成锰锌铁氧体粉料[J]. *北京科技大学学报*, 2007, 29(11): 1118-1122.
- Yang Ke, Guo Zhimeng, Hao Junjie, et al. Self-Propagating High-Temperature Synthesis of MnZn-Ferrite Powder[J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2007, 29(11): 1118-1122.
- [16] 王磊, 朱保华. 磁性吸波材料的研究进展及展望[J]. *电工材料*, 2011(2): 37-40.
- Wang Lei, Zhu Baohua. Research Progress and Prospects of Magnetic Absorbing Materials[J]. *Electrical Engineering Materials*, 2011(2): 37-40.
- [17] 李伟平. 导电聚苯胺的制备及其电磁性能的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- Li Weiping. The Research on Preparation and Electromagnetic Characters of Polyaniline[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2008.
- [18] 孙良奎, 程海峰, 楚增勇, 等. C/SiO₂ 同轴复合纤维的制备及性能研究[J]. *无机材料学报*, 2009, 24(2): 310-314.
- Sun Liangkui, Cheng Haifeng, Chu Zengyong, et al. Preparation and Properties of C/SiO₂ Coaxial Fibers[J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2009, 24(2): 310-314.
- [19] 杨磊, 张长森, 罗驹华. 无机-有机复合吸波材料研究进展[J]. *化工新型材料*, 2011, 39(4): 29-31, 39.
- Yang Lei, Zhang Changsen, Luo Juhua. Recent Progress in the Development of Inorganic-Organic Composite Absorbing Materials[J]. *New Chemical Materials*, 2011, 39(4): 29-31, 39.
- [20] 苏碧桃, 左显维, 胡常林, 等. 导电聚苯胺与磁性 $CoFe_2O_4$ 纳米复合物的合成及其电磁性能[J]. *物理化学学报*, 2008, 24(10): 1932-1936.
- Su Bitao, Zuo Xianwei, Hu Changlin, et al. Synthesis and Electromagnetic Properties of Polyaniline/ $CoFe_2O_4$ Nanocomposite[J]. *Acta Physico-Chemica Sinica*, 2008, 24(10): 1932-1936.
- [21] 王少敏, 高建平, 于九皋, 等. 视黄基席夫碱盐的合成及其吸波性能[J]. *应用化学*, 1999, 16(6): 42-45.
- Wang Shaomin, Gao Jianping, Yu Jiugao, et al. Synthesis and Microwave Absorbability of Retinyl Schiff Base Salts [J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 1999, 16(6): 42-45.
- [22] 王蓓. 视黄基席夫碱盐的制备及毫米波衰减性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- Wang Bei. Retinyl Schiff Base Salts Preparation and Millimeter Wave Attenuation Performance[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2009.
- [23] 丁春霞, 范丛斌, 章洛汗, 等. 新型视黄基席夫碱盐的合成与吸波性能研究[J]. *化工工业与工程技术*, 2006, 27(4): 4-6.
- Ding Chunxia, Fan Congbin, Zhang Luohan, et al. Study on Synthesis of New-Type Retinyl Schiff Base Salts and Microwave Absorbing Performance[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2006, 27(4): 4-6.
- [24] 王少敏, 高建平, 于九皋, 等. 大分子视黄基席夫碱盐微波吸收剂的制备[J]. *宇航材料工艺*, 2000(2): 41-43, 54.
- Wang Shaomin, Gao Jianping, Yu Jiugao, et al. Preparation of Macromolecule Retinyl Schiff Base Salt as Microwave Absorbents[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2000(2): 41-43, 54.
- [25] Reagan P. A New Process for the Low-Coast Production of Ceramic[J]. *Material Technology*, 1994(3): 32-38.

(责任编辑: 徐海燕)