

# 碳系吸波材料研究现状及在建材中的应用展望

何 亮<sup>1</sup>, 谭丹君<sup>1</sup>, 王鹏起<sup>1</sup>, 李珂亿<sup>2</sup>

(1. 北新集团建材股份有限公司, 北京 102208)

(2. 北京林业大学材料科学与技术学院, 北京 100083)



谭丹君

**摘 要:** 随着科学技术的发展, 生活空间中电子产品的增多让人类处于不同程度的电磁辐射环境中, 对人体组织、器官和系统等会造成一定破坏, 其对环境的污染和人体的危害越来越受到人们的重视。目前已有许多关于吸波材料电磁波吸收性能的研究, 但很多是针对军事方面的雷达吸波, 而关于其在民用方面的应用研究较少, 特别是在室内吸波材料及墙体整体结构式防护方面几乎没有, 因此, 开展吸波材料在建筑材料方面应用显得尤为迫切。碳系吸波材料在建材中的推广应用无论是在技术成熟度还是成本方面, 相对于其它吸波材料都均有一定优势, 简述了石墨、炭黑、碳纤维等碳系吸波材料的研究现状及其在建材中的应用情况, 并对吸波材料在建材中的深入应用进行了展望, 提出开发室内建筑吸波材料及墙体结构式防护措施。

**关键词:** 电磁辐射; 建筑材料; 碳系吸波材料; 墙体结构; 防护措施

**中图分类号:** TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2017)07-0583-05

## Research Status of Carbon-Based Microwave Absorbing Materials and Its Application in Building Materials

HE Liang<sup>1</sup>, TAN Danjun<sup>1</sup>, WANG Pengqi<sup>1</sup>, LI Keyi<sup>2</sup>

(1. Beijing New Building Materials Public Limited Company, Beijing 102208, China)

(2. College of Materials Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** With the development of science and technology, the increase of electronic products in the living space, which makes human beings in different degrees of electromagnetic radiation environment, will cause some damage to human tissues, organs and systems. The health hazards and pollution from electromagnetic radiation draws people's more attention. At present, most of the researches are about the absorption properties of absorbing materials and radar absorbing in the military, while the research on civil use is very few, hardly in the field of indoor absorbing materials and the structure of the wall. It is very urgent to carry out the application in building materials. In this paper, the research status of carbon-based microwave absorbing materials, such as graphite, carbon black, carbon fiber, etc., and its application in building materials are briefly introduced. Finally, the prospectives on indoor absorbing building materials and protective measures of wall structures are discussed.

**Key words:** electromagnetic radiation; building materials; carbon-based microwave absorbing materials; wall structure; protective measure

### 1 前 言

地球本身具有电磁场, 人类长期生活在地球上, 在这种磁场环境下完全可以适应。但由于科技的进步, 人

类生活空间中电子产品及设备无处不在, 它们在使用过程中都会产生不同程度电磁辐射, 若所处的空间电磁辐射能量过大或持续时间较长时, 对人体组织、器官和系统会造成一定破坏, 如对心血管、神经系统等<sup>[1-2]</sup>。针对现代生活中无处不在的电磁辐射, 采用增加距离进行电磁防护受到了空间和布局等因素限制, 因此, 将具有吸收电磁波能力的材料分布在建筑空间中是解决电磁波污染最有效的方法之一<sup>[3]</sup>。本文在对吸波材料阐述的基础上, 重点综述了近年来碳系吸波材料的研究和应用, 并展望了建筑吸波材料的发展前景。

收稿日期: 2015-08-26

基金项目: 中国建筑材料集团有限公司自立项目

第一作者: 何 亮, 男, 1987 年生, 工程师

通讯作者: 谭丹君, 女, 1982 年生, 高级工程师, Email: tdj@bncm.com.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2017.07.12

## 2 碳系吸波材料研究现状

碳系材料可以说是吸波材料的起源,在第二次世界大战期间,德国军队在军用潜艇外壳包覆了一层内含有碳粉纸的泡沫塑料,有效阻止雷达的探测,从而带动了吸波材料的广泛研究及应用。

### 2.1 石墨基吸波材料

石墨基复合吸波材料研究主要集中在以下两个方面:一是将石墨加入透波材料中增加电阻型损耗,将电磁波转变为热能;二是将石墨与其它磁损耗吸波剂进行复合,来改变石墨的性能。

冀志江等<sup>[4]</sup>将石墨粉加入到闭孔膨胀珍珠岩和硅酸盐水泥的混合物中制备吸波砂浆。研究表明,在一定范围内,砂浆涂层介电常数随石墨含量增加而升高,在 2~18 GHz 频率范围内吸收峰增多,反射率减小,但当石墨含量过大时,在砂浆中形成导电网络,使复合材料对电磁波的屏蔽效能增强,吸收性能减弱,石墨质量分数为 20%、厚度为 2 mm 的试样吸波性能如图 1 所示。贾兴文等<sup>[5]</sup>将石墨作为吸波剂掺入到泡沫混凝土中制备吸波混凝土外墙。研究表明,在一定范围内,泡沫混凝土电磁波反射率随石墨含量增加逐渐降低,吸波性能逐渐增强,当石墨掺量为 15% 时,反射损耗峰值为 -15.64 dB,低于 -10 dB 的频宽达到 3 GHz。李波等<sup>[6]</sup>将  $\text{Ni}^{2+}$  离子通过  $\text{H}_2$  还原制备了纳米 Ni 颗粒,使其吸附到石墨层间或附着在石墨片层表面制备了 Ni/石墨纳米复合材料,当厚度为 1.5 mm 时,在 300 °C 条件下还原的 Ni/石墨纳米复合材料的微波吸收效果最好,反射损耗峰值为 -17.5 dB,低于 -5 dB 的频宽达到 6 GHz。候进等<sup>[8]</sup>以层状无机物作为吸波剂与石墨吸波剂复合制备了双层复合吸波涂料,当底层层状无机物和表层石墨的质量分数分别为 11% 和 16.6% 时,反射损耗峰值达到 -28 dB,低于 -5 dB 的频宽分别为 5.36 GHz。贾瑛等<sup>[7]</sup>用化学方法在膨胀石墨表面镀纳米镍层、镍钴、镍铁钴层,镀覆镍铁钴涂层厚度为 0.3 mm 时,反射损耗峰值达到 -28 dB,低于 -10 dB 的频宽为 7.5 GHz。

### 2.2 碳纤维基吸波材料

碳纤维吸波材料是将碳纤维进行低温处理,使其结构变得疏散凌乱,通过电损耗和纤维的散射来衰减电磁波。与其他吸波材料相比,碳纤维吸波材料在硬度、热传导率、热膨胀系数和吸收频宽等方面具有很大的优势,该材料是功能和结构的优良结合体,并且拥有承载和吸收电磁波的双重功能。目前研制的新型碳纤维主要有螺旋形碳纤维、改性碳纤维和异形碳纤维。螺旋形碳纤维吸波性能源于其特殊的螺旋几何结构,螺旋线圈将

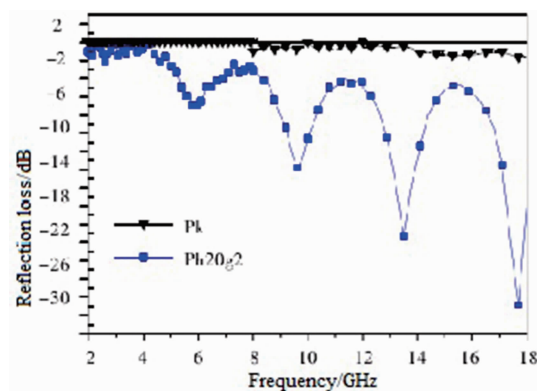


图 1 石墨质量分数为 20% 的石墨粉膨胀珍珠岩砂浆涂层吸波性能<sup>[4]</sup>

Fig. 1 Microwave reflection loss of Ph20g2<sup>[4]</sup>

电磁波能量通过电能转化为热能;改性碳纤维主要是通过掺杂和表面改性处理来提高其磁性能;异形碳纤维通过其特殊的截面形状产生电与磁的耦合效应,具有额外的磁损耗吸收机制<sup>[8]</sup>。

赵东林等<sup>[9]</sup>采用卧式炉基板法制备出螺旋形碳纤维,并以其为吸波剂制备了 Nomex 蜂窝夹心结构吸波材料,其吸波性能如图 2 所示,复合材料反射损耗峰值可达 -21.62 dB,低于 -10 dB 的频宽为 14.24 GHz。螺旋碳纤维吸收剂是一种非常有发展前景的手性吸波剂,具有较高的介电损耗,电磁参数随频率的增大呈减小的趋势,有利于实现宽频吸波。Ki-Yeon Park 等<sup>[10]</sup>将纳米碳纤维和 FeNi 合金按一定比例混合做成复合材料,当涂层厚度为 1.49 mm 时,在 Ku 频段反射损耗低于 -10 dB 的频宽达到 6 GHz。

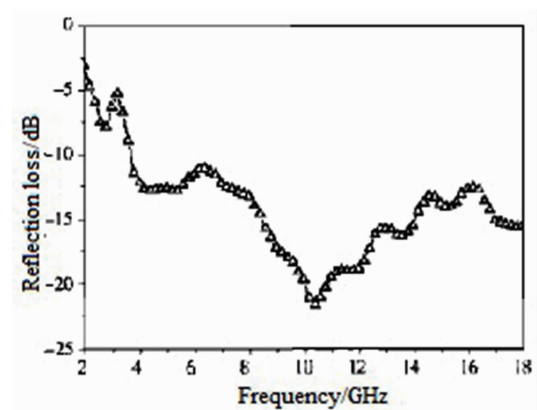


图 2 填充螺旋碳纤维的 Nomex 蜂窝夹心结构材料吸波性能<sup>[9]</sup>

Fig. 2 Microwave reflection loss of Nomex honeycomb sandwich structure materials filled with spiral carbon fibers<sup>[9]</sup>

### 2.3 炭黑吸波材料

炭黑是通过电损耗进行吸波,将其与高分子材料复合,可以达到更好的吸波效果。吴红焕等<sup>[11]</sup>发现在一

定电导率范围内,填充了乙炔炭黑的丁腈橡胶电磁波吸收能力随着电导率的增大而提高。陈晓东等<sup>[12]</sup>研制的炭黑薄膜复合材料,当炭黑包覆层厚度为20 nm,钛酸钡的含量大于20%时,拥有良好的电磁波吸收能力。陈翔凤等<sup>[13]</sup>以碳包覆铁纳米颗粒为填料制备了复合吸波涂料,当涂层厚度为5 mm,反射损耗峰值为-17.2 dB,低于-10 dB的频宽为3.2 GHz。吴友朋等<sup>[14]</sup>将5%的炭黑和50%的碳化硅混合制备的复合材料具有优良吸波

能力,反射损耗在-10 dB以下的频宽为6 GHz,峰值为-40 dB。Wu等<sup>[15]</sup>将炭黑和聚苯胺混合后与环氧树脂复合,制备了吸波材料,当炭黑质量分数为30%时,复合吸波材料吸波性能如图3所示,在2~18 GHz内的反射损耗峰值为-40 dB,低于-5 dB的频宽为4 GHz;在18~40 GHz内,反射损耗峰值随炭黑含量增加向低频移动,炭黑质量分数为20%和30%的反射损耗峰值对应频率为28 GHz和35 GHz。

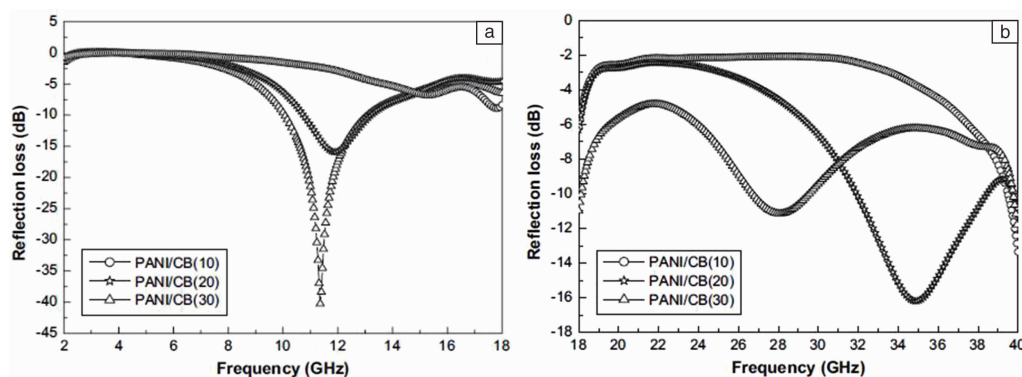


图3 炭黑包覆聚苯胺环氧树脂复合物吸波性能<sup>[15]</sup>

Fig. 3 Microwave reflection loss of PANI/CB composites<sup>[15]</sup>

## 2.4 碳纳米管吸波材料

碳纳米管除具有金属或半导体特性外,还具有良好兼容性和较宽吸波频带,加上特殊螺旋结构和手征性,使其具有优良吸波性能,但其存在着生长机理研究不足、产品纯度不高及无法大规模生产等发展瓶颈。孙晓刚等<sup>[16]</sup>研制的阵列式碳纳米管环氧树脂基复合材料,在2~18 GHz具有较强吸波能力,当纳米碳管薄膜厚度为0.2 mm时,反射损耗峰值为-15.8 dB,低于-5 dB频宽为6.4 GHz。华绍春等<sup>[17]</sup>制备的碳纳米管/纳米 $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{TiO}_2$ 复合粉末对电磁波的反射损耗峰值随碳纳米管质量分数和厚度增加呈现先增加后减小趋势,采用微弧等离子喷涂制备的复合吸波涂层厚度为2 mm时,反射损耗峰值为-20 dB,低于-10 dB频宽为3.6 GHz。Lee等<sup>[18]</sup>制备了多壁碳纳米管/环氧树脂复合材料,对复合材料微观结构和介电性质的研究表明其适合用于雷达吸波,在X波段的反射损耗低于-10 dB。Fan等<sup>[19]</sup>采用多壁碳纳米管和质量分数为4%和8%的PET/PP/varnish三种有机聚合物制备了复合吸波材料,其吸波性能如图4所示,其反射损耗低于-5 dB的频宽分别为13, 10和6 GHz,反射损耗峰值在15.3 GHz下达到-24.27 dB。

## 2.5 碳化硅吸波材料

碳化硅纤维可调的电阻率、优良的力学性能和良好的

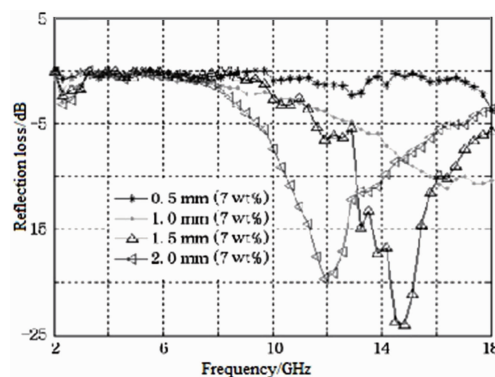
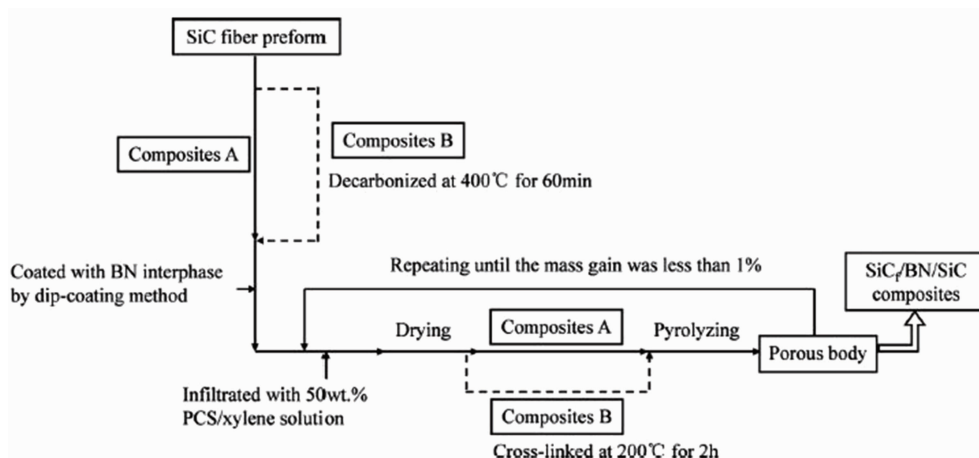
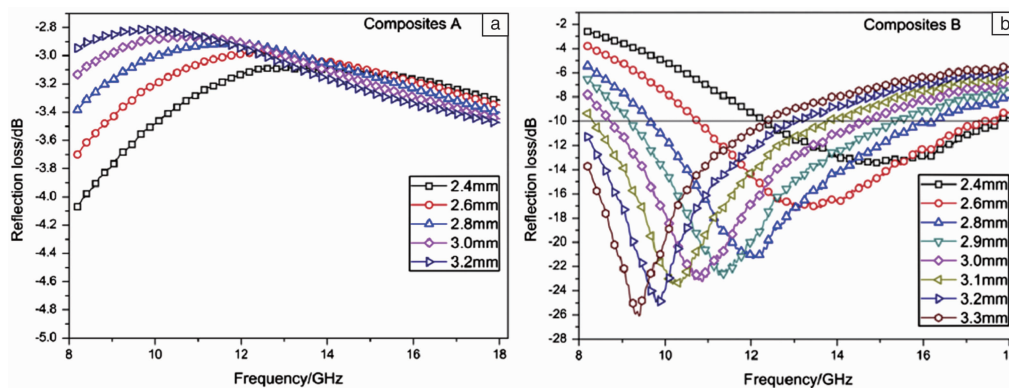


图4 不同厚度的含7wt%碳纳米管的复合涂层吸波性能<sup>[17]</sup>

Fig. 4 Microwave reflection loss of composites of different thickness with 7 wt% CNTs<sup>[17]</sup>

耐高温特性,是制备吸波材料的重要组分,但是单一的碳化硅吸波效果一般,需要进行表面处理、掺杂改性等来增强其对电磁波吸收能力。葛凯勇等<sup>[20]</sup>采用超细金属镍粉掺杂碳化硅粉末制备了吸波涂层,当掺入10%镍粉后,涂层的反射损耗峰值变大,由-14.8 dB提高到-23.59 dB,对应的频率向低频方向移动,由17.83 GHz移动至11.35 GHz。Mu等<sup>[21]</sup>采用聚碳硅烷前驱体法制备了 $\text{SiC}_f/\text{SiC}$ 复合材料,其制备过程和不同厚度涂层吸波性能分别如图5和图6所示,在涂层厚度为3.1 mm时,反射损耗峰值为-23.5 dB,低于-10 dB的频宽为5.9 GHz。



图 5  $\text{SiC}_f/\text{SiC}$  复合吸波材料制备路线<sup>[21]</sup>Fig. 5 Preparation route of the PIP- $\text{SiC}_f/\text{SiC}$  composites<sup>[21]</sup>图 6  $\text{SiC}_f/\text{SiC}$  复合吸波材料吸波性能<sup>[21]</sup>Fig. 6 Microwave reflection loss of  $\text{SiC}_f/\text{SiC}$  composites<sup>[21]</sup>

### 3 碳系吸波材料在建材中的应用

建筑吸波材料可以分为涂覆型和纤维/粉末掺杂型，其侧重于吸收较低频率的电磁波，同时受实际应用环境的影响，除了要求在较宽频带内对电磁波具有良好吸收能力外，还要考虑材质重量、抗腐蚀性、耐高温性和防潮性。涂覆型建筑吸波材料一般是将合成树脂、导电填料、溶剂复合制备成涂料，对施工对象的外形结构没有特殊要求，能够对传统建筑物进行有效电磁防护<sup>[22]</sup>；纤维/粉末掺杂是直接吸波材料掺杂在建筑材料中，应用范围会根据产品质量、形状等要求受到一定限制。目前关于建筑吸波材料的研究几乎都处于实验阶段，并且在应用方面主要偏向于外墙，而关于室内建筑吸波材料的研究和其在建筑方面的应用研究较少。

日本是最早研究吸波材料在建筑上应用的国家，并已取得一定成果，如碳纤维混凝土板、铁氧体外墙板、

碳纤维编织布水泥等系列建筑材料，如 TDK 公司生产了系列化的吸波材料，产品材质包括铁氧体、碳、导电纤维等，在 0.03 ~ 4 GHz 范围内吸波损耗大于 20 dB。俄罗斯捷科公司成功研制了能吸收电磁辐射的系列油漆产品，将该漆刷涂在金属或钢筋混凝土结构上，不仅能保护内部房间不受电磁辐射，而且可防止自身结构金属腐蚀。

由于吸波涂层具有容易剥落和耐候性差的缺点，国内建筑吸波材料侧重于研究结构型建筑外墙吸波材料。黄煜鎔等<sup>[23]</sup>以高铁粉煤灰颗粒为吸波剂制备了复合水泥基吸波材料，反射损耗低于 -5 dB 的频宽为 8.5 GHz，损耗峰值为 -11 dB。丁庆军等<sup>[24]</sup>选用玄武岩纤维、膨胀珍珠岩及石墨与水泥复合，通过配合比设计，研究了膨胀珍珠岩颗粒直径、掺量对水泥基吸波材料吸波性能的影响。吕述平等<sup>[25]</sup>将碳粉加入珍珠岩载体中与空心砖复合制备吸波材料，当碳粉含量为 6% 时，在 2.4 ~

3.85 GHz 频段内反射损耗均低于-25 dB。这种结构型建筑外墙吸波材料生产工艺简单适用,适合批量生产,可广泛用于砖混结构领域。

## 4 展 望

开展吸波材料从军用向民用转化是吸波材料的研究趋势,而碳系吸波材料无论是从技术借鉴角度还是从符合建筑材料实际情况来看,相比于金属微粉、导电高分子等其它吸波材料具有显著优势。从技术角度看,石墨等碳系吸波材料是最早应用于军事领域的材料,技术成熟度高、应用经验丰富;在建筑材料开发和使用成本方面,碳系吸波材料来源广泛、成本低廉,适应人们的生活水平。

虽然目前已开展了碳系吸波材料在建材方面的应用研究,但是基本都是关于建筑外墙,并且吸波剂的载体多数为水泥基体。随着家用电器的增多,室内产生的电磁辐射对人类健康影响越来越大,因此,应注重开发室内建筑吸波材料,如吊顶、隔墙等装修材料。另外,现有的应用大多集中在涂覆型吸波涂料和复合吸波板材,一般采取多种吸波剂复合、改性等手段来提高吸波性能,这些手段势必会增加成本。因此,在应用方面,应根据周围环境和生活空间不同功能进行整体防护,特别是利用结构复合,如将吸波材料与装配式墙体进行复合,利用吸波材料本身性能和复合形成的多孔结构对电磁波进行全方位吸收。

## 参考文献 References

- [1] Xi Jianglin(奚江琳), Huang Qianqian(黄茜茜). *Sichuan Architecture* (四川建筑) [J], 2014, 34(1): 38-39.
- [2] Dou Danruo(窦丹若). *China Non-Metallic Mining Industry* (中国非金属矿工业导刊) [J], 2004 (5): 21-23.
- [3] Zhang Yuping(张玉萍). *Physics and Engineering* (物理与工程) [J], 2003, 13(6): 25-28.
- [4] Ji Zhijiang(冀志江), Han Bin(韩 斌), Hou Guoyan(侯国艳), et al. *Materials Science and Technology* (材料科学与工艺) [J], 2011, 19(2): 15-19.
- [5] Jia Xingwen(贾兴文), Zhang Yajie(张亚杰), Qian Jueshi(钱觉时), et al. *Function Materials* (功能材料) [J], 2012, 17(43): 2397-2401.
- [6] Li Bo(李 波), Zou Yanhong(邹艳红), Liu Hongbo(刘洪波), et al. *Carbon Techniques* (炭素技术) [J], 2007, 26(4): 6-11.
- [7] Jia Ying(贾 瑛), Ren Fuqiang(任强富), Li Zhipeng(李志鹏), et al. *Journal of Materials Protection* (材料保护) [J], 2009, 42(8): 1-4.
- [8] Xie Wei(谢 炜), Chen Haifeng(程海峰), Chu Zengyong(楚增勇), et al. *Materials Review: A Review* (材料导报: 研究篇) [J], 2007, 21(9): 40-43.
- [9] Zhao Donglin(赵东林), Gao Yunlei(高云雷), Shen Zengmin(沈曾民). *Safety & EMC* (安全与电磁兼容) [J], 2009(6): 60
- [10] Suzuki M, Hasegawa Y, Aizawa M. *J Am Ceram Soc* [J]. 1995, 78 (1): 83.
- [11] Wu Honghuan(吴红焕). *Dissertation for Master* (硕士论文) [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007.
- [12] Chen Xiaodong(陈晓东), Wang Guiqin(王桂芹), Duan Yupin(段玉平), et al. *Journal of the Chinese Ceramic Society* (硅酸盐学报) [J], 2006, 34(12): 1446-1451.
- [13] Chen Xiangfeng(陈祥凤), Huang Hao(黄 昊), Lv Bo(吕 波), et al. *Materials Review: A Review* (材料导报: 研究篇) [J], 2009, 23 (5): 45-47.
- [14] Wu Youpeng(吴友鹏), Liu Xiangxuan(刘祥萱), Zhang Zeyang(张泽洋). *Surface Technology* (表面技术) [J], 2010, 39(5): 58-60.
- [15] Wu K H, Ting T H, Wang G P, et al. *Polymer Degradation and Stability* [J], 2008, 93: 483-488.
- [16] Sun Xiaogang(孙晓刚), Chen Li(程 利), Du Guoping(杜国平). *Journal of Synthetic Crystals* (人工晶体学报) [J], 2009, 38(5): 1114-1118.
- [17] Hua Shaochun(华绍春), Wang Hangong(王汉功), Wang Liuying(汪刘应), et al. *Electroplating & Finishing* (电镀与涂饰) [J], 2010, 29(9): 56-59.
- [18] Lee S E, Kang J H, Kim C G. *Composite Structure* [J], 2006, 76: 397-405.
- [19] Fan Z J, Luo G H, Zhang Z F, et al. *Materials Science and Engineering B* [J], 2006, 132: 85-89.
- [20] Ge Kaiyong(葛凯勇), Wang Qunzhang(王群张), Xiao Ning(晓宁), et al. *Journal of Functional Materials and Devices* (功能材料与器件学报) [J], 2002, 8(3): 263-266.
- [21] Mu Y, Zhou W C, Hua Y, et al. *Journal of Alloys and Compounds* [J], 2015, 637: 261-266.
- [22] Li Liguang(李丽光), Li Wenyan(李文远). *Advanced Materials Industry* (新材料产业) [J], 2010, 12: 32-36.
- [23] Huang Yubin(黄煜宾), Qian Jueshi(钱觉时), Zhang Jianye(张建业), et al. *Journal of China Coal Society* (煤炭学报) [J], 2010, 35 (1): 135-139.
- [24] Ding Qingjun(丁庆军), Hu Shuguang(胡曙光). *Journal of Building Materials* (建筑材料学报) [J], 2010, 13(3): 295-299.
- [25] Lv Shuping(吕述平), Liu Shunhua(刘顺华), Zhao Yanbo(赵彦波). *Journal of Microwaves* (微波学报) [J], 2006, 6(22): 199-201.

(编辑 惠 琼)