

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2016.08.029

雷达吸波聚合物基体材料研究概况

郭宇¹,贾晓敏²,张源昆¹,王明¹,王雯¹,厉宁¹,刘永峙¹,于万曾¹

(1. 山东非金属材料研究所, 济南 250031; 2. 方圆标志认证集团山东有限公司, 济南 250014)

摘要:介绍了雷达吸波材料吸波原理,归纳总结了近几年雷达吸波聚合物基体材料的研究现状,主要介绍了涂覆型、贴片型和结构型三种类型聚合物基体材料的研究概况及其优缺点,并在此基础上指出了今后吸波聚合物基体材料的发展方向。

关键词: 雷达吸波; 聚合物基体材料; 研究概况

中图分类号: TQ132 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2016)08-0133-05

Research Situation of Radar Wave-absorbing Polymer Matrix Material

Guo Yu¹, Jia Xiaomin², Zhang Yuankun¹, Wang Ming¹, Wang Wen¹, Li Ning¹, Liu Yongzhi¹, Yu Wanzeng¹

(1. Shandong Non-metallic Materials Institute, Jinan 250031, China; 2. China Quality Mark Certification Group Shandong Co. Ltd., Jinan 250014, China)

Abstract: The absorbing mechanism of wave-absorbing materials was introduced, the current research status of the radar wave-absorbing polymer matrix materials in recent years was summarized. The research situation, merits and drawbacks of three types of polymer matrix materials including coating type, patch type and structure type were mainly introduced. On this basis, the development direction of the wave-absorbing polymer matrix materials in the future was pointed out.

Keywords: radar wave-absorbing; polymer matrix material; research situation

随着雷达探测技术和无线电通讯技术的快速发展,电子通信设备朝着高频、密集以及多样化的方向发展,产生了越来越严重的电磁污染问题,例如电磁辐射、电磁干扰、信息泄露等。因此,吸波材料的应用已经不再局限于军事领域,而更广泛地应用于人防、通信等领域用作电磁兼容和屏蔽、防信息泄露等多方面。吸波材料由吸收剂与基体材料复合制备而成,吸收剂决定材料电磁参数,而基体材料决定了材料的结构形式、制备方法及填充性、耐候性、耐温性、力学性能等。吸波材料相关的文献报告主要集中在吸收剂的制备和表征等方面,而有关基体材料的研究概况较少。笔者概述了雷达吸波聚合物基体材料的应用情况与研究现状,对其未来的发展方向提出了展望。

1 雷达吸波材料的吸波机理

雷达吸波材料的吸波机理是吸波层对入射的电磁波进行有效吸收,将电磁波能量转换为热能或者其它形式的能量消耗掉。入射电磁波进入吸波材料时会发生反射、透过以及吸收,该过程遵循能量守恒定律^[1],图1为电磁波与雷达吸波材料作用示意图。

雷达吸波材料应该具备两个特性,即波阻抗匹配特性和衰减特性^[2]。波阻抗匹配特性是指当电磁波从空气入射到材料表面,尽可能地使入射电磁波在材料表面发生最小反射,而更多地透射进入介质内部,这就要求材料的相对介

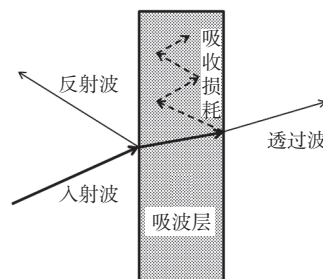


图1 雷达吸波材料作用机理示意图

电常数和相对磁导率大小尽量接近。衰减特性是指电磁波进入到材料内部后可以被迅速的衰减损耗掉,这就要求材料具有足够强的磁损耗、介电损耗和电阻损耗。要提高材料的吸波性能,在满足波阻抗匹配条件的基础上,复磁导率和复介电常数的虚部越大,损耗就越大,材料的吸波性能越好。

若想实现第1个特性,就要创造特殊边界条件使入射波最大程度地进入材料内部而不在材料介质表面被反射。最简单的模型是当电磁波从自由空间垂直入射到介质的表面,对于单层吸波材料而言,当平面波垂直照射到单层吸波材料表面时,在界面会发生入射和反射现象,反射系数 Γ 可以表示为:

联系人: 郭宇, 硕士, 副研究员, 主要从事电磁波吸收材料的研究
收稿日期: 2016-06-10

$$\Gamma = \frac{Z_0 - Z_{in}}{Z_0 + Z_{in}} \quad (1)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}} \quad (2)$$

$$Z_{in} = \frac{E}{H} = \sqrt{\frac{\mu_r \mu_0}{\epsilon_r \epsilon_0}} \quad (3)$$

式中: Z_0 ——自由空间波阻抗;

Z_{in} ——介质波阻抗;

μ_0 ——自由空间的磁导率,为一常数;

ϵ_0 ——自由空间的介电常数,为一常数;

E ——外电场强度;

H ——外磁场强度;

μ_r ——材料的相对磁导率;

ϵ_r ——材料的相对介电常数。

第2个特性的实现则需要吸波材料具有较高的电磁损耗性能,即电磁波入射到材料内部后会被迅速吸收并发生衰减,这与材料自身的特性有关。

通常采用反射率 R (单位为 dB) 来表示材料的吸波性能大小。一般以 $R < -10$ dB 的频带宽度来表征材料的吸波性能。根据传输线理论^[3],当电磁波从自由空间(阻抗为 Z_0)垂直入射到介质表面(阻抗为 Z_{in})时,其反射率的表达式为:

$$R = 20 \lg \left| \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0} \right| \quad (4)$$

$$Z_{in} = Z_0 \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}} \tanh \left[j \frac{2\pi}{c} \sqrt{\mu_r \epsilon_r} f d \right] \quad (5)$$

式中: h, j ——正整数;

c ——光速;

f ——电磁波频率;

d ——吸波材料厚度。

根据式(4)和式(5)可得出材料的吸波性能与其自身的电磁参数、吸波层厚度以及入射电磁波的频率相关。而且材料反射率的绝对值越大则表明电磁波入射到材料表面后的反射越少,同时材料吸收损耗的能量越多,则材料吸波性能就越好。

2 雷达吸波聚合物基体材料研究现状

通常来说,吸收剂不能单独使用,需要与基体材料一起制备成一定的吸波结构才能使用。基体在吸波结构中起载体的作用,它是影响吸波材料物理化学性能的重要组成部分。为了获得性能优异的雷达吸波材料,科研人员在研究新型吸波结构和高性能吸收剂的同时,也开始逐渐关注基体材料尤其是聚合物基体材料方面的研究。

选择基体材料时需要考虑基体材料的制备难易程度、热膨胀系数、力学性能、耐候性、耐化学腐蚀及填充率等因

素;另外还要考虑的是基体应在最大程度上不影响吸收剂的性能,即最大程度地保持吸收剂原有的性能;并且要结合具体使用环境中的要求对基体材料进行改性,比如增强耐磨损性、附着力、耐老化性能等。结合实际使用中的需求,根据最终吸波材料的成型状态,可以将吸波材料做成涂覆型、贴片型以及结构型等多种形态。

2.1 涂覆型聚合物基体材料

树脂常被用作涂覆型吸波材料中的基体材料,起到成膜粘合固定吸收剂及其它填料的作用,并且其还能够决定吸波涂层的一些物理化学性能。雷达吸波喷涂材料制备施工方便、适用性强,且不受所喷涂工件形状大小限制,是最常用的武器装备隐身材料。为了获得一定的吸波性能,雷达吸波喷涂材料的涂层所需厚度比面漆大得多,吸收剂比例也非常高,这就要求涂层具有良好的附着力和一定的韧性,以便于涂刷和机械加工。

通常来说,树脂类材料是涂覆型的,通过在树脂基体中均匀地加入吸收剂制备而成。目前,常用的性能较好、制备技术成熟且价格低廉的吸波树脂有3种:丙烯酸树脂、环氧树脂和聚氨酯^[4]。

环氧树脂涂层具有较高附着力、较好填充性,另外还具有防腐蚀和耐水性等优点。但在实际使用过程中须采用双组分体系,加入相应的固化剂,才能成膜固化,固化剂种类的选择在环氧树脂体系配方技术中起到关键作用。

在实际使用中,环氧树脂基吸波材料的应用形式很多。L. W. Nam等^[5]通过压延机辊压的方式将环氧树脂/碳纳米管复合材料板压制成薄膜,然后将制备好的薄膜逐层堆叠最终获得一种多层结构的雷达波吸收材料。李华展等^[6]采用真空袋工艺制备了环氧树脂/单向碳化硅纤维复合材料,其中碳化硅纤维体积分数为10%~40%,研究了其力学性能和电磁性能,计算其吸波性能和反射率。研究表明,在纤维体积分数10%~25%范围内,随着碳化硅纤维体积分数的增加,吸波材料介电损耗的实部、虚部及损耗角正切值均增大,吸波能力增强;当纤维体积分数高于25%之后,在吸波性能方面,存在着最优的纤维体积分数;当纤维体积分数固定之后,在吸波性能方面,也存在着最佳的吸波层厚度;当复合材料的碳化硅纤维体积分数为25%、厚度为3 mm时,其在X波段内的反射率均低于-5 dB,最低为-9.9 dB,平均值为-7.8 dB。陈兆晨等^[7]采用碳化硅和碳纳米管为原料制备环氧树脂基吸波材料,结果表明,碳纳米管的质量分数为12%时性能最佳,其有效带宽达到7.04 GHz,最大反射衰减为-27.3 dB;当再继续加入质量分数为6%的碳化硅后,复合材料吸波性能可以得到进一步提高。

聚氨酯作为吸波基体材料而被广泛应用。当需要在现

场快速制备吸波材料时,由于聚氨酯具有原料易于携带、实际操作较方便等优点,无疑是一种比较好的选择。吴广利等^[8]采用羰基铁和炭黑为吸收剂,以聚氨酯作为基体材料,制备出了厚度 1.1 mm 的微波吸收涂层。实验结果表明,相比于单一吸收剂作为填料的吸波材料,采用两种吸收剂共混时制备的吸波材料的性能最佳,其中炭黑、羰基铁和聚氨酯质量比为 0.1:3:1。但是在 8~18 GHz 频率范围内该吸波涂层的反射率 <-4 dB 时的带宽仅为 4.3 GHz,所以吸波效果并不理想。冀鑫炜等^[9]以羰基铁粉、石墨为吸收剂,并通过掺杂钴来调节体系的电磁参数,制备出了以聚氨酯为基体的多层吸波材料。所制备吸波材料的面密度为 2.73 kg/m²,当涂层厚度为 1.02 mm 时,反射率 <-10 dB 的带宽为 5.45 GHz。但该方法存在的不足是其喷涂制备过程仅制备一层涂层就需要 9 h 以上的时间。

2.2 贴片型聚合物基体材料

贴片型吸波材料是将吸收剂均匀分散在基体材料中,通过辊压的方式压制成薄片,然后将薄片粘贴到需防护的物体表面,从而达到电磁吸波的目的。橡胶弹性体类材料一般为贴片型,贴片型吸波材料最大的特点是厚度可以准确的控制,并且形状可以任意剪裁,但是对于外形太过复杂或者表面不平整的物体来说,使用并不方便。常用的橡胶弹性体类基体主要有氯丁橡胶、丁腈橡胶、硅橡胶和三元乙丙橡胶,其中目前研究最多的是硅橡胶和三元乙丙橡胶。

Feng Yongbao 等^[10]采用氮气雾化的方法制备了 FeNi 合金,与硅橡胶共混制备吸波材料。FeNi 合金具有低矫顽力和高磁饱和强度等特点。吸波材料的介电常数实部、磁导率实部和虚部随频率增大而减小,介电常数虚部随频率增大而增大。当复合材料的填料体积分数为 48%,厚度为 2.5 mm 时,反射率在 5.1 GHz 处达到最低的 -9.5 dB,小于 -8 dB 的吸收带宽为 5.1 GHz。将颗粒状的 FeNi 合金球磨制成片状 FeNi 合金后,FeNi 合金的磁晶各向异性场强提高,涡流损耗减小,磁导率提高。

李淑环等^[11]以甲基乙烯基硅橡胶作为基体,分别研究了锆铁氧体和羰基铁粉两种磁性吸收剂用量不同时对吸波材料吸波性能和力学性能的影响。研究结果表明,随着吸收剂含量增加,羰基铁粉和锆铁氧体两种吸波橡胶片的吸波性能变化趋势基本相同,吸收峰向低频段移动,材料的力学性能下降。铁氧体具有吸波性能强(其最大吸收峰 >-30 dB)、吸收频带宽(反射率 <-10 dB 的带宽高达 9 GHz)等特点,适用于高频雷达波 X, Ku 波段(8~12GHz);而羰基铁的吸波强度则相对较小(最大吸收峰为 -16 dB),吸收频带宽度也较窄(反射率 <-10 dB 的带宽都小于 4 GHz),适合用于低频吸收 S, C 波段(2~8 GHz)。

王志强等^[12]研究了在 2~18 GHz 范围内三元乙丙橡胶/碳纳米管复合吸波材料的吸波收性能,并研究了碳纳米管含量对于其吸波性能的影响,研究结果表明,在 5~18 GHz 范围内,该材料呈现良好的微波吸收性能;当材料中碳纳米管的质量分数大于 40% 时,材料呈现出对电磁波的反射性能。

2.3 结构型聚合物基体材料

吸波材料是以涂覆型吸波材料的形式开始发展起来的。通过上述介绍可知涂覆型和贴片型吸波材料虽然有诸多优点,但是在设计和实际使用过程中仍然存在耐热性差、附着性差等无法彻底避免的问题。

为克服前两种类型吸波材料的缺点,同时实现多功能一体化,兼顾承载和吸波双重功能,结构型吸波材料得到了迅速的发展。结构型吸波材料是将吸收剂均匀添加到载体结构中,它既能在承载的同时又可以减小目标的雷达散射截面,同时也能满足材料多种功能一体化的发展要求。结构型吸波材料因厚度结构可调而具有宽吸波频带、可设计性,就整体而言,达到了减重、增强适应性的目的,可避免再使用表面涂层。常用的结构型吸波聚合物基体材料主要有泡沫、纤维两种,它们都有各自的优缺点和特定的使用环境。

(1) 结构型吸波泡沫材料。

结构型吸波泡沫及其夹层材料作为一种重要的结构/隐身功能一体化复合材料,在电磁波吸收与屏蔽方面很早就得到广泛应用,是新一代武器装备实现隐身化不可或缺的重要材料。

国内在软质或非承载吸波泡沫方面的研究报道较多,技术较为成熟,其应用形式以尖劈、角锥为主。在吸波泡沫中,硬质结构吸波泡沫技术研究起步相对较晚,但在电磁吸收与屏蔽方面也取得一定成果。用于结构吸波泡沫及夹层结构隐身材料的泡沫基体材料主要有聚氨酯、聚酰亚胺(PI)、聚碳酸酯、可发性聚苯乙烯等,随着武器装备对材料吸波性能、耐热性能、力学性能、宽频吸收等要求的不断提高,一些新型结构泡沫材料已开始大量使用[如聚醚酰亚胺,聚甲基丙烯酸酯亚胺(PMI)等]。因此,发展具有更好耐热性能、力学性能,同时可与多种吸收剂复合的结构吸波泡沫材料将成为未来的研究热点。

马科峰等^[13]采用导电炭黑作为吸收剂制备了耐高温的 PMI 吸波泡沫。研究结果表明,炭黑吸收剂对聚合与发泡过程无不利影响,随着导电炭黑用量及泡沫厚度的增加,PMI 泡沫的吸波性能逐渐提高。当泡沫厚度为 20 mm 时最小反射率为 -4.14 dB,40 mm 厚的多层泡沫最小反射率可达 -20 dB,但达到 -8 dB 吸收的带宽较窄,吸波性能变差。

聚氨酯泡沫作为基体材料具有较强的附着力,且具有

耐腐蚀、耐磨损、制备工艺简单、使用便捷、方便调节形状和厚度等优点,但是同时也存在吸波带宽较窄、吸波性能不强、面密度过大等一些缺点。A. Hunyek 等^[14]在聚氨酯泡沫材料中填充钴/铁氧体,并研究了它在低频段的电磁性能,研究表明,该结构型吸波材料的磁化饱和强度与钴/铁氧体含量成正比,仅在钴/铁氧体质量分数为45%,即最大填充量时,聚氨酯泡沫材料磁导率实部才会出现激增。

A. R. Shafieizadegan-Esfahani 等^[15-16]采用层状石墨作为吸收剂,对一系列密度、厚度不同的聚氨酯泡沫吸波材料进行了研究,分析了不同参数的聚氨酯泡沫结构对雷达波吸波性能的影响。实验结果表明,具有粗孔厚壁的聚氨酯泡沫结构具有更高的电磁参数,相应的吸波性能更好。

PI具有耐温性优异、耐辐射、耐磨、力学性能好、化学稳定性好、阻燃以及电绝缘等特点,目前已被广泛应用于多种领域。S. Takano 等^[17]分别采用经验方程和遗传算法,以PI泡沫为基材,通过填充炭黑吸波剂,设计了单层和双层结构的吸波材料,并对其在毫米波段的吸波性能进行了测量和表征。结果表明,采用单层结构的吸波材料在26 GHz处的反射率 <-40 dB,反射率 <-10 dB的带宽为13 GHz,双层结构吸波材料反射率 <-20 dB的频带宽度可达到19.7 GHz,测量结果和理论结果非常接近。该文献还给出了一种使吸波材料达到最佳吸波性能的设计方法,该方法可行性强,具有重要的参考价值。

(2) 结构型纤维类吸波材料。

一般将长径比大于1000且具有一定柔韧性和力学性能的纤细物质统称为纤维,通常绝大多数纤维的截面为圆形。与圆形截面纤维相比,异形截面纤维具有更大的比表面积,因此除了具有优异的力学性能以外,还具有某些特殊的电磁特性。

根据此前的研究结果,通过改变碳纤维的截面形状和大小,可以有效的改变雷达波吸收效果,由此可见异形截面碳纤维将会是一种非常前途的结构型吸波材料。目前,美、日两国在异形截面碳纤维方面的研制处于世界领先地位。其中美国的F-117, F-2, B-2飞机机身都大量使用了该种碳纤维,从而获得了优异的雷达隐身性能^[18]。

异形截面碳纤维的制备方法目前主要是采用熔融纺丝法,经过特定形状的喷丝孔喷出后制备而成。王应德等^[19]采用不同规格的异形喷丝孔,以聚碳硅烷作为原料,经熔融纺丝及后期高温处理后,分别制备出了截面形状为三叶形、四叶形、五叶形以及条形、“C”形和中空的SiC纤维,通过表征纤维的表面形貌以及测量不同规格异形纤维的电磁参数,发现在相同的比表面积条件下,当纤维含量增加时,叶片型SiC纤维介电常数随着叶片数的增加而增大,“C”形纤维的

介电常数大于中空形的,损耗角正切低于中空形。通过进一步测试吸波性能发现,将不同形状的SiC纤维进行阻抗匹配可有效提高该吸波材料的吸波性能。

为了获得更宽的带宽,可以采用多种纤维混合以及多层结构的方式。张政权等^[20]采用纳米碳管、碳纤维、玻璃纤维以及环氧树脂制备了一种结构型吸波材料。通过实验表征和模拟计算研究了纳米碳管含量不同时,层结构吸波材料的吸波性能的变化以及双层结构吸波材料层间排列方式不同时对吸波性能的影响。当采用单层结构时,纳米碳管的质量分数达到9%时吸波效果最佳,吸收率 <-10 dB的带宽为5.4 GHz;当采用双层结构,层与层间碳纳米管的质量分数分别为15%和3%,总体质量分数保持不变时,吸收率为39.3 dB,吸收率 <-10 dB的有效带宽为6.5 GHz,覆盖了整个12~18 GHz频段。由此可见,采用多种纤维混合以及多层结构进行合理层间排列,通过控制吸波剂的含量,可以有效实现吸波材料在更宽频率范围内都具有较好的吸波效果。

3 结语

当前,雷达吸波材料的发展除了实现“薄、轻、宽、强”以外,还呈现出“实用化、多功能、智能化”的特点。“实用化”体现在材料的低成本、易生产施工、方便后期维护等方面;“多功能”体现在战场环境复杂多变对武器装备要求越来越高的情况下,例如除了隐身功能之外还要求具备耐高温、防弹、抗核加固等额外功能;“智能化”则主要表现在隐身材料由过去的“被动隐身”转变为“主动隐身”、“自动响应”等,例如电致变色、电致变发射率等特点。而实现上述一系列特点的关键条件之一就是选择特定的聚合物基体材料。各种类型的聚合物基体材料都有各自的优点和缺点,以及特定的使用条件。以后科研的方向是在进一步挖掘各类雷达吸波聚合物基体材料潜力的基础上,积极开展在新材料、新工艺等方面的探索研究。

参考文献

- [1] 刘顺华,等. 电磁屏蔽和吸波材料[M]. 北京:化学工业出版社,2006:315.
Liu Shunhua, et al. Electromagnetic shielding and absorbing materials[M]. Beijing:Chemical Industry Press,2006:315.
- [2] 丁冬海,等. 无机材料学报,2014,29(5):461-469.
Ding Donghai, et al. Journal of Inorganic Materials,2014,29(5):461-469.
- [3] 陈雪刚,等. 无机材料学报,2011,26(5):449-457.
Chen Xuegang, et al. Journal of Inorganic Materials,2011,26(5):449-457.
- [4] 邢丽英. 隐身材料[M]. 北京:化学工业出版社,2004:95-96.
Xing Liying. Stealth Materials[M]. Beijing:Chemical Industry Press,2004:95-96.

- [5] Nam L W, et al. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2011, 42(9): 1110–1118.
 - [6] 李华展, 等. 功能材料, 2016, 47(4): 4006–4011.
Li Huazhan, et al. Functional Materials, 2016, 47(4): 4006–4011.
 - [7] 陈兆晨, 等. 功能材料与器件学报, 2011, 17(3): 258–261.
Chen Zhaochen, et al. Journal of Functional Materials and Devices, 2011, 17(3): 258–261.
 - [8] 吴广利, 等. 安全与电磁兼容, 2011(1): 41–43.
Wu Guangli, et al. Safety & EMC 2011(1): 41–43.
 - [9] 冀鑫伟, 等. 兵器材料科学与工程, 2012, 35(6): 35–38.
Ji Xinwei, et al. Ordnance Material Science and Engineering, 2012, 35(6): 35–38.
 - [10] Feng Yongbao, et al. J Alloys Compd, 2012, 513: 455–459.
 - [11] 李淑环, 等. 特种橡胶制品, 2009, 30(1): 19–23.
Li Shuhuan, et al. Special Rubber Products, 2009, 30(1): 19–23.
 - [12] 王志强, 等. 材料导报, 2010, 24 (14): 26–28.
Wang Zhiqiang, et al. Materials Review, 2010, 24 (14): 26–28.
 - [13] 马科峰, 等. 应用化工, 2011, 40(1): 38–40.
 - [14] Hunyek A, et al. Plastics, Rubber and Composites, 2013, 42(3): 89–92.
 - [15] Shafieizadegan-Esfahani A R, et al. Polymer Composites, 2012, 33(3): 397–403.
 - [16] Shafieizadegan-Esfahani A R, et al. Composites Science and Technology, 2012, 72(3): 382–389.
 - [17] Takano S, et al. Optimum design of wave absorbers using foamed polyimide containing carbon black based on genetic algorithm[C]// Proceedings of 2011 international conference on electromagnetics in advanced applications (ICEAA). New York: IEEE, 2011: 664–667.
 - [18] 吴红焕, 等. 材料导报, 2007, 21(5): 115–117.
Wu Honghuan, et al. Materials Review, 2007, 21(5): 115–117.
 - [19] 王应德, 等. 功能材料, 2011, 8(2): 20–24.
Wang Yingde, et al. Functional Materials, 2011, 8(2): 20–24.
 - [20] 张政权, 等. 炭素技术, 2011, 30(1): 32–34.
Zhang Zhengquan, et al. Carbon Techniques, 2011, 30(1): 32–34.
 - [21] 高霞, 等. 西南科技大学学报, 2015(2): 17–22.
Gao Xia, et al. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2015(2): 17–22.
 - [22] Iijima S. Nature, 1991, 354: 56–58.
 - [23] Bandarian M, et al. Polymer International, 2011, 60(3): 475–482.
 - [24] Liang Kaiwen, et al. Key Engineering Materials, 2010, 419: 477–480.
 - [25] Yan Dingxiang, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2011, 120(5): 3014–3019.
 - [26] Balandin A A, et al. Nano Letters, 2008, 8(3): 902–907.
 - [27] Yan Dingxiang, et al. Polymer International, 2012, 61(7): 1107–1114.
 - [28] Khanna S K, et al. Journal of Engineering Materials and Technology, 2015, 137(2): 021005.
 - [29] 高霞, 等. 西南科技大学学报, 2015(2): 17–22.
Gao Xia, et al. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2015(2): 17–22.
 - [30] 李雅迪, 等. 岩土工程学报, 2016(S1): 83–86.
Li Yadi, et al. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016(S1): 83–86.
 - [31] 黄瑞娇, 等. 化工新型材料, 2015(1): 151–155.
Huang Ruijiao, et al. New Chemical Materials, 2015(1): 151–155.
 - [32] Ying Luhua, et al. Progress in Natural Science Materials International, 2013, 23(2): 170–173.
 - [33] 周成飞. 化工技术与开发, 2014, 43(6): 45–50.
Zhou Chengfei. Technology & Development of Chemical Industry, 2014, 43(6): 45–50.
 - [34] Yang Zhenguo, et al. Journal of Applied Polymer Science, 2004, 92(3): 1493–1500.
 - [35] Liu Jie, et al. Science, 1998, 280: 1253–1256.
 - [36] Marotta E, et al. US, 7160209[P]. 2007-01-09.
 - [37] Jing Qifei, et al. Materials & Design, 2015, 85: 808–814.
 - [38] 崔立志, 等. 工程塑料应用, 2014, 42(5): 20–24.
Cui Xingzhi, et al. Engineering Plastics Application, 2014, 42(5): 20–24.
 - [39] 沙金, 等. 中国塑料, 2011, 25(8): 28–33.
Sha Jin, et al. China Plastics, 2011, 25(8): 28–33.