

# 填充型电磁屏蔽复合材料

孙天厚<sup>1,2</sup> 邓建国<sup>1</sup> 张军华<sup>2</sup>

(1 中国工程物理研究院化工材料研究所新材料研发中心,绵阳 621900)

(2 四川大学高分子材料工程国家重点实验室,成都 610065)

**文 摘** 介绍了电磁辐射的危害以及发展电磁屏蔽材料的意义,阐述了电磁屏蔽的原理。综述了导电填料的种类、形态、填充量、复配、分散与分布等因素对填充型电磁屏蔽复合材料屏蔽效能的影响及研究进展。

**关键词** 导电填料,电磁屏蔽,复合材料

## Filling Type Electromagnetic Shielding Composite

Sun Tianhou<sup>1,2</sup> Deng Jianguo<sup>1</sup> Zhang Junhua<sup>2</sup>

(1 New Materials R & D Center, Institute of Chemical Material, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900)

(2 State Key Laboratory of Polymer Materials Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065)

**Abstract** The harmfulness of electromagnetic radiation and the principle of electromagnetic shielding are introduced in this paper. Influence factor such as the kind, shape, content, combination, distribution and dispersion of the fillers on shielding effect are reviewed for filling type electromagnetic shielding composite.

**Key words** Conductive filler, Electromagnetic shielding, Composite

### 0 引言

随着电子工业的迅速发展以及各种商用、家用通讯设备和电子产品的日益普及,这些产品所产生的电磁波辐射将空间充斥了不同波长和频率的电磁波,使电磁辐射污染越来越严重。电磁波污染不但会干扰邻近运行的计算机、电子电器、通讯设备和医疗仪器,出现误动或图像、声音障碍等;而且还会影响到人们的身体健康。电磁辐射污染已经引起了世界各国的重视,很多国家和国际组织都先后制定了一系列屏蔽电磁波的标准和法规,如美国联邦通讯委员会的 FCC 规定、德国电气技术协会的 VDE 规定、国际电气标准委员会的 CISPR 国际标准等<sup>[1]</sup>。因此,采取措施以减少电磁辐射强度,降低电磁辐射污染,保护环境,保护人体健康具有十分重要的意义。近年来,高分子功能复合材料以其质轻、价廉,易于加工成型等优点在电子工业中广泛应用,尤其是替代电子电器金属外壳更为普遍。但是塑料对于电磁波来说几乎是透明的,毫无屏蔽能力,不具有抗电磁波干扰的性能。所以,如何使塑料壳体具有屏蔽电磁波功能就显得十分迫切。

赋予塑料产品具有屏蔽电磁波功能的方法有很多:合成本征型导电塑料、在塑料表面涂覆导电涂料、表层贴金属箔或表层镀金属等,其中研究最为充分的是聚合物基电磁屏蔽复合材料<sup>[2]</sup>。这类材料不仅具有价格低,成型加工和屏蔽一次性完成的特点,而且屏蔽性能稳定可靠而得到广泛研究。

填充型电磁屏蔽复合材料一般是由聚合物基体、导电填料和各种助剂组成,通过混炼,造粒,并采用注塑成型,挤出成型或模塑成型等方法复合制成的具有电磁屏蔽性能的功能复合材料。导电填料是填充型电磁屏蔽复合材料的重要基元,是影响材料屏蔽效能和各种应用性能好坏的关键所在。本文对导电填料的种类、形态、填充量、复配、分散与分布等因素对电磁屏蔽复合材料屏蔽效能的影响进行了总结,并对填充型电磁屏蔽材料的研究、应用进行了展望。

### 1 电磁屏蔽原理<sup>[1,3-5]</sup>

电磁屏蔽(EMS)即控制电磁波从某一区域向另一区域的辐射传播。电磁屏蔽的原理如图 1 所示,有效的屏蔽材料能够反射大部分入射电磁波并吸收其小部分的入射电磁波,而吸收的这部分电磁波又在屏

蔽材料内部多次反射过程中被损耗。通常用屏蔽效能( $SE$ )表示电磁屏蔽材料对电磁波的屏蔽效果。

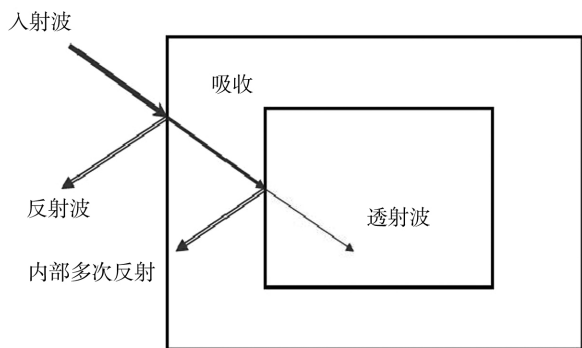


图1 电磁屏蔽的原理示意图

Fig. 1 Sketch map of electromagnetic shielding

根据 Schelkunoff 电磁屏蔽理论,材料的屏蔽效能分为反射消耗、吸收消耗和多重反射消耗3部分,用公式表示为:

$$SE = R + A + B \quad (1)$$

式中, $R$ 为电磁波的反射损耗; $A$ 为电磁波的吸收损耗; $B$ 为电磁波在屏蔽材料内部多次反射过程中的损耗。

一般来说,当 $A > 10$  dB, $B$ 可以忽略不计,所以(1)式可简写为:

$$SE = R + A \quad (2)$$

$$\text{即: } SE = 168 - 10 \lg(f\mu/\sigma) + 1.31t\sqrt{f\mu\sigma} \quad (3)$$

式中, $\mu$ 为材料相对磁导率; $\sigma$ 为材料相对电导率; $f$ 为电磁波的频率; $t$ 为屏蔽材料厚度。

由式(3)可知,在电磁波频率一定的情况下, $SE$ 值随电阻率的降低而增加。也就是说, $SE$ 值随电导率的增加而增加。因此,电磁屏蔽材料的研究要点是提高复合材料的电导率。

## 2 导电填料对屏蔽效能的影响

### 2.1 导电填料的种类

作为电磁屏蔽复合材料的导电填料主要有金属系的金属片、金属粉末或纤维,碳系的石墨、炭黑或碳纤维以及镀金属类的碳纤维、玻璃纤维、云母等。

#### 2.1.1 金属系导电填料

从单一物质导电性来说,金属粉末或金属片具有良好的电导率,部分金属填料还具有较高的磁导率。将金属填料与聚合物共混得到聚合物/金属复合材料,当金属填料达到一定的填充量后,就能在聚合物基体中形成一定结构的导电网络,从而实现有效的电磁屏蔽。用银粉或镀银填料作为电磁屏蔽材料具有

突出的屏蔽效果。如在高分子基体中添加50wt%~55wt%的银粉时,复合材料的体积电阻率约为 $10^{-4}$ ~ $10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$ ,屏蔽效能高达80 dB以上<sup>[6]</sup>。但银属于贵金属,仅限于在某些特殊场合下使用。铜的导电性能良好,价格适中,但铜的密度较大( $8.9 \text{ g/cm}^3$ ),使用时铜粉不易悬浮于聚合物中而下沉,影响填料在聚合物基体中的分散度;其次铜粉容易被氧化而降低其导电性。为了解决这一问题,通常采用抗氧化剂对铜粉进行表面处理,或用较不活泼的金属包覆铜粉表面,如在铜粉上敷一层镍或在铜粉上镀银;或采用铜粉和镍粉、银粉混合使用,均可达到理想的屏蔽效果<sup>[7]</sup>;还有一种方法是在制备铜系导电塑料的过程中,加入还原剂或其他添加剂等成分,从而制得具有一定抗氧化性的导电材料。铝片或铝箔具有密度小( $2.7 \text{ g/cm}^3$ )、颜色浅、价格低等优点,并具有较大的长径比(40:1),容易在聚合物基体中形成导电网络。但铝的导电性不高,如添加30wt%铝箔片到尼龙中,所制得的复合材料表面电阻为 $103 \Omega/\text{cm}$ ,且在0.5~1 000 MHz屏蔽效能仅为18~25 dB<sup>[8]</sup>。

近年来,金属纤维填充高分子复合材料得到了很大的发展。与金属粉末相比,金属纤维有较大的长径比和接触面积,因此在相同填充量的情况下,金属纤维较易形成导电网络,其电导率较高,屏蔽效能较好<sup>[9]</sup>。常用的金属纤维有黄铜纤维、铁纤维和不锈钢纤维等<sup>[4,10]</sup>。近年来采用不锈钢纤维填充制成的导电复合材料具有很好的屏蔽效果。美国 Brunswick 公司用直径为 $7 \mu\text{m}$ 的不锈钢纤维做导电填料,填充量为6.25%制成的屏蔽材料屏蔽效果较好,其 $SE$ 值可达40 dB<sup>[11]</sup>。Richard T. Fox 等<sup>[12]</sup>采用不锈钢纤维和镀镍碳纤维分别填充聚碳酸酯,对其制得的复合材料进行研究。结果发现,填充了相同含量,且直径、长径比相同的不锈钢纤维和镀镍碳纤维,经过干混法及熔融混合法所制得的导电复合材料中,对比镀镍碳纤维,不锈钢纤维保持了一定的长径比,且制备出的复合材料屏蔽效能较好。这主要是因为不锈钢纤维本身具有良好的延展性和韧性,经过混炼后纤维可以通过扭曲而不断裂保持一定的长径比,进而形成有效的三维导电网络。而镀镍碳纤维则呈脆性,很容易断裂成长径比较小的纤维碎片,导电网络不易形成,如图2所示。总之,金属纤维系列填充复合型屏蔽材料具有优良的导电性能,屏蔽效能高,力学性能及其他综合性能好,是一类很有发展前途的电磁屏蔽材料<sup>[13]</sup>,特别是采用不锈钢纤维作为导电填料制备电磁屏蔽复合材料是一个很好的选择。

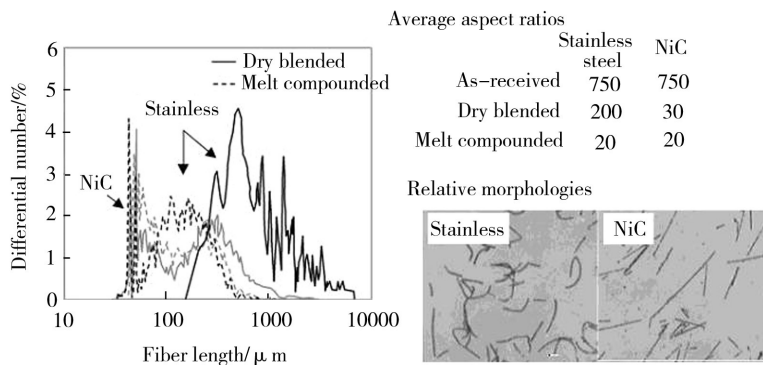


图2 在不同加工方法下的纤维长度分布和长径比以及相对纤维形态特征对比图

Fig. 2 Fiber length distributions and aspect ratios following differing processing routes and relative fiber morphology characteristics contrasted in micrographs

### 2.1.2 碳系导电填料

炭黑来源丰富具有容易加工、控制添加量能得任意的导电率、对塑料有补强作用等特点是早期主要的填料。但炭黑的导电性较差,电导率  $10^{-4} - 10^1$  S/cm,复合的导电材料的屏蔽效果不理想。因此用于屏蔽复合材料的报道较少。另外炭黑填充的高分子材料多为深黑色也限制了它的应用范围。

石墨导电性较炭黑高很多,室温下电导率在  $10^3$  S/cm 左右,且密度小,熔点高,热胀系数小,耐高温。早在第一次世界大战期间,德国和俄国生产了石墨填充高分子电加热涂料来防止飞机机翼结冰,但由于石墨导电性能不稳定,使用时间较短。随着纳米技术的发展,将石墨纳米材料与高分子材料复合制得导电塑料在性能上有较大提高。陈国华实验小组<sup>[14-15]</sup>选用纳米石墨微片作为填料,与树脂复合所得复合材料渗透值在 1wt% 左右,在 1.5 GHz 处最佳屏蔽效果可以达到 40 dB。

碳纤维(CF)具有良好的电性能,且纤维易形成导电网络,因而在导电聚合物和电磁屏蔽聚合物中应用广泛。N. C. Das 等<sup>[16]</sup>研究了炭黑和短碳纤维(SCF)填充的三元乙丙橡胶(EPDM)、EVA 及 EVA/EPDM 复合材料的 SE。研究发现,复合材料的 SE 值随电磁波频率增加而提高,同时 SE 值随填料含量的增加而增加,SCF 填充的复合材料 SE 值明显高于炭黑填充的复合材料。Wu Junhua 等<sup>[17]</sup>研究了 ACF (Activated Carbon Fiber, 活性碳纤维)填充复合材料,发现在 1.0-1.5 GHz 频段,填充 35vol% 的 ACF 所制的复合材料的 SE 为 39 dB,而填充相同含量未处理的 CF 的复合材料 SE 为 30 dB。这主要是由于 ACF 具有优越的孔隙结构和形态,而孔隙结构对提高多次反射衰减有利,使得电磁屏蔽作用得到加强,同时有效地降低了填充量。

普通碳纤维用作电磁屏蔽聚合物材料的填料虽然得到了广泛的应用,但是其填充量高、密度大、SE

较低。近年来在 CF 表面涂覆导电聚合物或金属薄层的方法得到发展,该方法不仅降低了复合材料的电阻率,提高其 SE 值,而且还能降低 CF 的填充量。Lee 等<sup>[18]</sup>用聚吡咯涂覆 SCF,并将处理后的 SCF 与聚合物共混得到电磁屏蔽复合材料。结果表明,聚吡咯涂覆 SCF 的屏蔽效果较好,SE 值可达 80 dB,并且具有相对较高的吸收性和低的反射性,可作为电磁屏蔽材料使用。M. Paligove 等<sup>[19]</sup>在 SCF 表面涂覆聚苯胺(SCF-PANI),并将 SCF-PANI 与环氧树脂共混得到电磁屏蔽复合材料,在 0.01-1.3 GHz 具有高的交流电导率和低的直流电导率。该材料制得的产品可用于保护高频信号并屏蔽低频信号。

碳纳米管(CNT)具有良好的导电性能和比强度,加入到聚合物中制得的复合材料具有优良的电性能和力学性能。J. C. Grunlan 等<sup>[20]</sup>研究表明,碳纳米管作为导电填料,其渗透值很低,在 0.1vol% 以下。与炭黑相比,达到同样的屏蔽效果,炭黑的填充分数是 CNT 的 100 倍左右。但是,碳纳米管价格昂贵,限制了它的应用。

### 2.1.3 镀金属类导电填料

镀金属填料类,如镀镍碳纤维和镀镍石墨纤维,镀镍云母等也有很好的导电性能。利用这类复合填料制备的电磁屏蔽材料不仅可以降低成本,而且还克服了用纯金属作填料时所造成的材料密度过大的缺点。Chiang 等<sup>[21]</sup>将表面镀镍的短碳纤维(SCF-Ni)与 PC/ABS 共混得到具有电磁屏蔽作用的 PC/ABS 复合材料,其 SE 值可达 50 dB,用钛酸酯偶联剂处理 SCF-Ni 后,得到的复合材料力学性能更好。Lu Guanghong 等<sup>[22]</sup>采用镀镍碳纤维和碳纤维分别填充 ABS 制备了电磁屏蔽复合材料。研究表明,无论采用溶液混合法混料还是用流变仪混料,所制备的复合材料体积电阻率均随纤维填料含量的增加而降低。并且当填充相同体积分数的碳纤维和镀镍碳纤维到 ABS 中,镀镍碳纤维填充 ABS 制的复合材料体积

电阻率比碳纤维填充的要降 1-2 个数量级。镀镍碳纤维填充 ABS 复合材料的屏蔽性能最好可达到 50 dB。复合材料达到相同的导电性,用镀镍碳纤维作为导电填料,可以大大减少纤维填料的用量。Huang 等<sup>[23]</sup>将表面分别沉积有 Ni 和 Ni/P 薄膜层的短碳纤维(SCF)填充 ABS 制得的电磁屏蔽复合材料力学性能优良,并且还发现,SCF-Ni/P 的屏蔽效果比 SCF-Ni 好,其 SE 值可超过 50 dB。

美国氰胺公司开发的镀镍石墨纤维屏蔽材料,在 ABS 树脂中填充 20vol% 直径为 7  $\mu\text{m}$ ,镀镍厚度为 0.5  $\mu\text{m}$  的石墨纤维,在 1 GHz 时,SE 值高达 80 dB。镀镍石墨纤维不仅导电性能好,而且还能提高复合材料的力学性能<sup>[4]</sup>。

镀镍云母片也可与 ABS、PBT、PP 等树脂复合制成屏蔽材料。将镀镍率为 50% 的云母片与 PP 复合,当填充量为 25vol% 时,其屏蔽效能在 0.5-1 GHz 为 45-30 dB。若采用镀镍率为 25% 加镀铜率 25% 的云母片,则当填充量为 17.5vol% 时,在 0-1 GHz 的屏蔽效能可达 40-60 dB,即在高频区域屏蔽效能尤为明显<sup>[24]</sup>。

## 2.2 导电填料的形态

导电填料的形态(形状、长径比、粒径等)对高分子导电复合材料的屏蔽效能有显著的影响。

填料的形状对复合材料电导率有较大的影响,如采用三维结构的氧化锌晶须作导电填料时能形成非常有效的导电通路,因而能高效率地赋予复合材料导电性<sup>[25]</sup>;树枝状填料一般情况下末端结构比球状及片状粒子发达,配位原子数相应较多,在复合材料中形成网络结构时相对密集、完整,所以电导率相应较高。对于金属填充复合型导电高分子材料,如用金属薄片作填料,其电导率会显著提高,金属薄片越薄其导电性越好;H. S. Goxturx 等<sup>[26]</sup>研究了四种不同形态填料:镍粉、镍长丝、镍片和镀镍石墨纤维填充低密度聚乙烯所制成的复合材料的电磁性能。结果表明,复合材料的表面电阻率和体积电阻率都随导电填料含量的增加而下降,尤其是对不对称填料(如:纤维或片状),达到渗滤阈值所需的体积分数小于球形粒子填料。在提高复合材料导电性方面,纤维和片状填料比粉末填料更有效。

导电填料的长径比越大,复合材料的导电性越好。填充型电磁屏蔽复合材料的屏蔽效能取决于导电填料的导电性及相互之间的接触程度,导电填料的长径比越大,形成导电通路的概率也就越大,因而可以获得较好导电性能。用较少的填充量就可以得到较好的屏蔽效果。W. S. Jou 等<sup>[27]</sup>将长碳纤维(LCF)和短碳纤维(SCF)分别与 PA66 共混制备了

<http://www.yhclgy.com> 宇航材料工艺 2010 年 第 5 期

PA66/CF 复合材料,通过对该材料的电磁屏蔽特性研究发现,相同填充量的 PA66/LCF 的 SE 值高于 PA66/SCF,无论是 LCF 或是 SCF,填充量越高,复合材料的 SE 值越大,在 0.03-1 GHz 内,SCF 质量分数为 30% 的 PA66/SCF 材料的 SE 值最大,可达 50 dB。由此可见,增大导电填料的长径比对提高屏蔽材料的屏蔽效能是有利的。D. D. L. Chung<sup>[28]</sup>发现,为了使填加的导电填料发挥更高的性能,应该偏向选择那些小尺寸(相对于制件厚度来说)高导电性、高长径比的填料,所以纤维以其高的长径比而被广泛关注和应。同时研究还发现,在相同体积分数含量下,采用碳长丝(直径 0.1  $\mu\text{m}$ )制得的复合材料比传统短碳纤维填充的复合材料屏蔽效能好。例如:在热塑性塑料中填充 19vol% 的碳长丝,所制的复合材料屏蔽效能在 1 GHz 时达 74 dB<sup>[29]</sup>,而填充 20vol% 的传统碳纤维,材料的屏蔽效能在 1 GHz 时只有 46 dB<sup>[30]</sup>。

导电填料的粒径对塑料的屏蔽效能也有影响,导电粒子的粒径过大,会造成粒子间的孔隙增大,接触点减少,导电网络的网眼增大,使得塑料电阻率增高,并且粒子在塑料中的沉降速度加快,影响塑料的导电性及加工性。相反,导电粒子的粒径减少,比表面积增大,形成导电网络的可能性增大。但粒径过小,金属粉末容易被氧化,导电性能就会变差。Shen Chunhui 等<sup>[31]</sup>研究了导电填料的粒径大小对复合材料的导电性和弯曲强度的影响。研究表明,当导电填料含量一定时,填料的粒径越大,复合材料的导电性就越高,产生这一现象的原因是在相同导电填料含量时,填料粒径越大,填料粒子的数量就减少,也就是说,填料粒子间的接触点减少,进而使得填料粒子间的接触电阻减小,因为在含有大量导电填料的导电复合材料中,填料粒子间的接触电阻对复合材料的导电性有巨大的影响。并且还根据粒子堆积理论,推导出粒子尺寸的级配理论,指出两种不同粒径大小的粒子配合使用时,当小尺寸粒子与大尺寸粒子直径比在 0.154-0.414 时,粒子的配合效应最好。

## 2.3 导电填料的复配

一些研究表明,如果采用不同填料或者不同形貌、尺寸的填料复合使用时,这些不同的填料可能会产生协同作用,达到比单一填料更优越的性能。

文献[32]报道了铁电性陶瓷粉末可以提高复合材料的电磁屏蔽效能。在 10wt% 的不锈钢纤维填充 ABS 树脂中,添加一定量的铁电性陶瓷粉末后,复合材料的屏蔽效能在 50-1 000 MHz 从 21.6-52.5 dB 增长到 29.7-61.7 dB。刘帅等<sup>[33]</sup>选用导电性和导磁性较好的镍粉和不锈钢纤维作导电填料,经钛酸酯偶联剂处理后,填充到 LDPE 中,制成金属填充聚合物



电磁屏蔽复合薄膜。结果表明,填充镍粉和不锈钢纤维的复合薄膜的电磁屏蔽性能要优于分别单独添加镍粉和不锈钢纤维的复合材料薄膜。Wu Junhua 等<sup>[34]</sup>采用少量导磁和大量导电填料的组合填充聚合物制得电磁屏蔽复合材料,并研究导磁和导电填料对复合材料屏蔽效能的影响。研究发现,高导磁填料(镍铁高导磁合金)和高导电填料配合使用添加到聚合物中所制得的复合材料比单一采用高导磁填料或高导电填料所制成的复合材料有着更好的电磁屏蔽效能。

## 2.4 导电填料的分布与分散

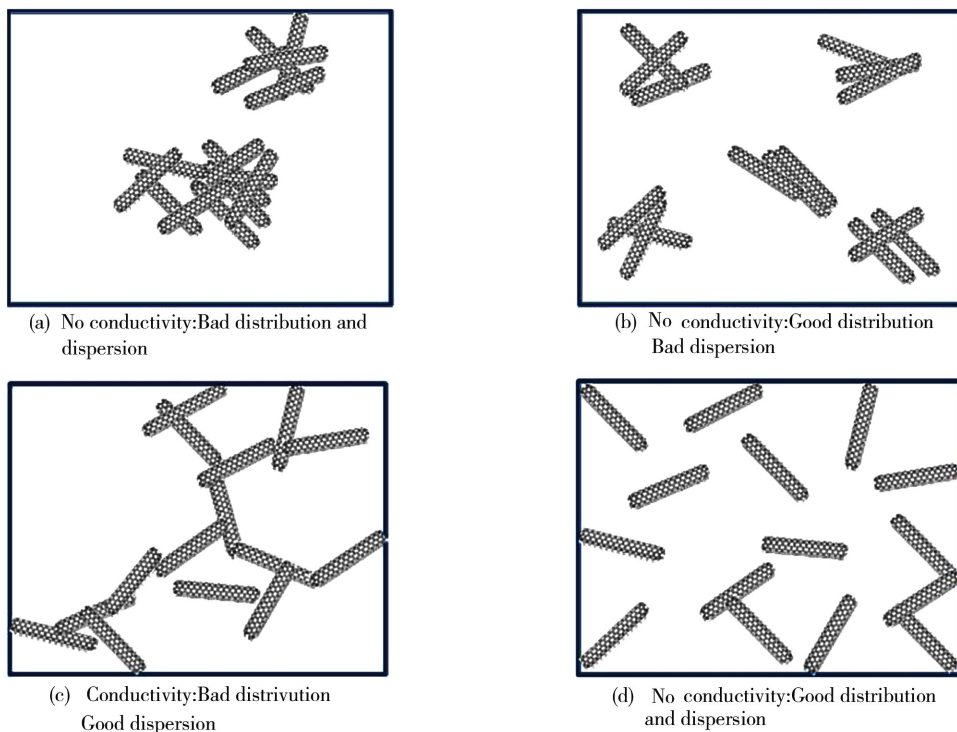


图3 填料一维分布与分散对聚合物基复合材料导电性能的影响

Fig. 3 Schematic sketches showing effect of 1D filler on conductivity of polymer composite

另外,由于聚合物基电磁屏蔽复合材料是由导电填料和聚合物基体等多种组分按一定工艺复合而成的,除了导电填料的性质、形态、填充量及分散程度等因素外聚合物基体的种类,添加剂以及复合工艺等其他因素在一定程度上也会影响复合材料的屏蔽效能。

## 3 结语

填充型电磁屏蔽复合材料得到国内外学者的广泛重视,并取得了大量的研究成果。但是这一领域仍然存在很多问题需要解决,如金属填充型电磁屏蔽材料加工过程中的防金属氧化问题;导电填料在聚合物中的分散与分布问题;在导电填料用量较大的情况下而不影响复合材料的力学和加工性能问题。聚合物基电磁屏蔽复合材料具有良好的发展前景,利用数学建模来描述不同类型聚合物电磁屏蔽复合材料作用机理,并对屏蔽过程进行模拟,从而实现对电磁屏蔽

导电填料在基体中的分散状态也会影响复合材料的屏蔽效果。Mohammed H. Al-Saleh 等<sup>[35]</sup>指出在绝缘高聚合物中填充较低浓度的导电填料时,导电网络的形成并不需要填料有很好的分散效果,而取决于导电填料分布与分散的良好配合。如图3所示,图3(a)和3(b)显示出导电填料较差的分布阻碍导电网络的形成;而图3(d)显示出导电填料较好的分散和分布效果,填料间的距离增大,导电通路很难形成;只有图3(c)填料的分布与分散达到良好配合,很容易形成导电网络。

复合材料的结构设计,该方法将成为未来电磁屏蔽复合材料领域研究的热点。填充型电磁屏蔽复合材料将向屏蔽效能更高、屏蔽频率更宽、综合性能更优良的方向发展。

## 参考文献

- [1] 尹波,于润泽,杨鸣波. 电磁屏蔽聚合物材料的研究进展[J]. 中国塑料,2006,20(3):14-19
- [2] Chung D D L. Materials for electromagnetic interference shielding[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2000,9(3):350-354
- [3] 靳武钢. 碳纤维在电磁屏蔽材料中的应用研究[J]. 高科技纤维与应用,2003,28(4):9-13
- [4] 杜仕国,李文钊. 聚合物基电磁屏蔽复合材料[J]. 磁性材料及器件,2000,31(5):40-44
- [5] Huang Janchan. EMI shielding plastics: A review[J]. Advances in Polymer Technology,1995,14(2):137-150

- [6] 杜仕国,王保平,曹营军. 导电高分子复合材料的电磁屏蔽效能分析[J]. 玻璃钢/复合材料,2000(6):19-21
- [7] 管登高,黄婉霞,蒋渝,等. 镍基电磁波屏蔽复合涂料制备及在 EMC 中的工程应用[J]. 电子元件与材料,2004,23(2):41-43
- [8] 王光华,董发勤,司琼. 电磁屏蔽导电复合塑料的研究现状[J]. 材料导报,2007,21(2):22-25
- [9] 邴华兴,王松林,彭少贤,等. 金属填充导电高分子材料研究进展[J]. 中国塑料,1999,13(1):18-21
- [10] 杜仕国,施冬梅,邓梅. 金属聚合物屏蔽 EMI 包装塑料[J]. 包装工程,2000,21(4):19-21
- [11] Arie Hochberg, Johan Versieck. Shielding for EMI and antistatic plastic resins with stainless steel fibers[J]. *Plastics Additives & Compounding*, 2001,3(3):24-28
- [12] Fox R T, Vijay Wani, Howard K E, et al. Conductive polymer composite materials and their utility in electromagnetic shielding applications[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2008,107, 2558-2566
- [13] 陈永东,杨桂生. 热塑性导电塑料在屏蔽电磁波干扰中的应用[J]. 现代塑料加工应用,2002,14(5):28-30
- [14] Wang Wengui, Chen Guohua, Wu Dajun. Transport properties of electrically conducting nylon6/foiled graphite nanocomposites[J]. *Polymer*,2005,46:6250-6257
- [15] Chen Guohua, Weng Wengui, Wu Dajun, et al. PM-MA/graphite nanosheets composite and its conducting properties [J]. *European Polymer Journal*, 2003,39:2329-2335
- [16] Das N C, Khastgri D, Chaki T K, et al. Electromagnetic interference shielding effectiveness of hybrid conductive polymer composite[J]. *Journal of Elastomers and Plastics*,2002,34(3):199-223
- [17] Wu Junhua, Chung D D L. Increasing the electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon fiber polymer-matrix composite by using activated carbon fiber[J]. *Carbon*, 2002,40:445-467
- [18] Lee C Y, Lee D E, Jeong C K, et al. Electromagnetic interference shielding by using conductive polypyrrole and metal compound coated on fabrics[J]. *Polymers for Advanced Technologies*,2002,13(8):577-583
- [19] Paligove M, Vilcakova J, Saha P, et al. Electromagnetic shielding of epoxy resin composites carbon fibers coated with polyaniline base[J]. *Physics A: Statistical Mechanics and Its Applications*,2004,335(3/4):421-429
- [20] Grunlan J C, Mehrabi A R, Bannon M V, et al. Water-based single-wall nanotube-filled polymer composite with an exceptionally low percolation threshold[J]. *Advanced Materials*, 2004,16:150-153
- [21] Chiang W Y, Chiang Y S. Effect of titanate coupling agent on electromagnetic interference shielding effectiveness and mechanical properties of PC-ABS-NCF composites[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 1992,46(4):673-681
- [22] Lu Guanghong, Li Xiaotian, Jiang Hancheng. Electrical and shielding properties of ABS resin filled with nickel-coated carbon fibers[J]. *Composites Science and Technology*,1996,56:193-200
- [23] Huang C Y, Mo W W. The effect of attached fragments on dense layer of electroless Ni/P deposition on the electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon fiber/acrylonitrile-butadiene-styrene composites[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2002,154(1):55-62
- [24] 杜仕国. 电磁屏蔽材料的现状与发展[J]. 化工新型材料,1995,23(4):12-16
- [25] 张玉龙. 高技术复合材料制备手册[M]. 北京:国防工业出版社,2003
- [26] Goxturx H S, Fisse T J, Kalyon D M. Electric and magnetic properties of low density polyethylene filled with nickel powders, fibers and flakes[J]. *ANTEC92-Shaping the Future*, 1992,1:491-494
- [27] Jou W S, Wu T L, Chiu S K, et al. Electromagnetic shielding of nylon-66 composites applied to laser modules[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2001,20(10):1287-1293
- [28] Chung D D L. Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon materials[J]. *Carbon*, 2001,39:279-285
- [29] Shui X, Chung D D L. Nickel filament polymer-matrix composites with low surface impedance and high electromagnetic interference shielding effectiveness[J]. *Journal of Electronic Materials*,1997,26(8):928-934
- [30] Li L, Chung D D L. Electrical and mechanical properties of electrically conductive polyethersulfone composite [J]. *Composites*,1994,25(3):215-224
- [31] Shen Chunhui, Pan Mu, Yuan Runzhang. The effect of particle size gradation of conductive fillers on the conductivity and the flexural strength of composite bipolar plate[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*,2008,33:1035-1039
- [32] Ceramic powders can enhance electromagnetic shielding of composites[J]. *Additives for Polymers*,2006,12:8-9
- [33] 刘帅,焦清介,臧充光,等. 金属填充 LDPE 薄膜电磁屏蔽性能研究[J]. 北京理工大学学报,2007,27(5):467-470
- [34] Wu Junhua, Chung D D L. Combined Use of Magnetic and Electrically Conductive Fillers in a Polymer Matrix for Electromagnetic Interference Shielding[J]. *Journal of Electronic Materials*, 2008,37(8):1088-1094
- [35] Al-Saleh M H, Uttandaraman Sundararaj. A review of vapor grown carbon nanofiber/polymer conductive composites[J]. *Carbon*,2009,47:2-22

(编辑 李洪泉)