

镀铝玻璃纤维复合材料的电磁屏蔽性能研究

徐 铭 马眷荣 鲍红权

(中国建筑材料科学研究总院,北京 100024)

摘要 以镀铝玻璃纤维(GF)为导电填料,填充热固性酚醛树脂(PF)制备出PF电磁屏蔽复合材料,并测试了其体积电阻率和电磁屏蔽效能。结果表明,一定长度下以镀铝GF作为导电填料仍然具有渗滤性质,且其质量分数大于40%后材料的屏蔽效能开始保持稳定,同时用经典的同轴线模型公式估算了相同体积电阻下材料的屏蔽效能,发现其值与实测值具有一定偏差,分析了偏差的原因,最后指出材料自身结构亦是获得较高屏蔽效能的重要手段之一。

关键词 电磁屏蔽 复合材料 镀铝玻璃纤维

随着社会的发展及各种电气设备的大量运用,引起了诸如电磁辐射、电磁泄密和电磁污染等一系列社会及安全问题^[1],已经严重影响人们的生活和工作,因此与之密切相关的电磁屏蔽材料成为当今材料研究热点之一。以镀铝玻璃纤维(GF)为导电填充物、酚醛树脂(PF)为基体的电磁屏蔽复合材料,具有导电性能好,屏蔽效能高,质轻价廉等特点。笔者采用镀铝GF和PF树脂为主要材料,通过热压的方法获得了PF树脂基镀铝GF电磁屏蔽复合材料,研究了镀铝GF组成成分及材料结构与屏蔽效能的关系,同时证明了实测结果与经典的传输线原理模型具有一定偏差。

1 实验部分

1.1 主要原材料

镀铝GF:镀铝层厚度2~3 μm ,直径20 μm ,中国建筑材料科学研究总院;

改性镁PF树脂:固含量为60%,秦皇岛科诚复合材料有限公司。

1.2 主要设备、仪器

方块电阻测试仪:ST-20型,安和盟公司;

矢量网络分析仪:HP8753ES型,美国安捷伦公司;

扫描电子显微镜(SEM):S-3500N型,日立公司。

1.3 试样制备

采用溶液混料法,将长GF裁成2~4 mm的小段,选用丙酮作为树脂溶液稀释剂,将纤维和已经稀释过的树脂溶液混合并充分搅拌,随后抽滤、干燥,最后在180℃下热压成型。最终试样外观为圆饼状板材,厚度均为2 mm,直径为115 mm。本实验中物料体系的粘度可调,可满足不同用量GF的均匀分

散要求,且可重复使用。

1.4 性能测试

电磁屏蔽效能按GB/T 6113-1995测试;

导电性能按GB/T 6146-1985测试;

采用SEM对材料微观结构进行观察并拍照。

2 结果与讨论

2.1 镀铝GF用量与材料导电性能及电磁屏蔽效能的关系

填充型电磁屏蔽材料具有一个重要的参数是渗滤阈值^[2],它决定了材料突变为导体性质时的最小填料用量。然而大于阈值点后,随着导电纤维用量的提高,材料的导体性能并不是立即趋于稳定的,它经历了一个“形成→饱和→稳定”的过程,此间其电磁屏蔽效能亦作相应的改变而最终达到稳定。此外作为电磁屏蔽用材料,最重要的指标还是其电磁屏蔽效能,而优良的导电性能只是材料具有较高电磁屏蔽效能(电磁反射)的充分条件,在相同体积电阻情况下材料的结构组成亦是取得较高屏蔽效能的重要原因之一。

增加镀铝GF用量达到其渗滤阈值的阶段,是材料开始具有导体性质的初始阶段,Miyasaka认为这个阶段实际上是一个相变的过程^[3],是由于相变导致了体积电阻的突变。为了获得本材料的渗滤阈值,笔者选取了若干可能出现渗滤阈值的用量作为观察对象,以镀铝GF用量为横坐标,为了方便表示,同时取体积电阻率 ρ 的对数 $\lg \rho$ 作为纵坐标,得到如图1所示的曲线。从图1可以看到,当镀铝GF质量分数低于9%时材料具有很大的电阻值,处于完全绝缘的阶段;当镀铝GF质量分数高于13%后,

材料的电阻率降到了较低水平,此时材料表现出了导体的性质;所以,在镀铝 GF 质量分数为 9% ~ 13% 内,材料的体积电阻率发生了急剧的变化,其渗透阈值约为 11%。

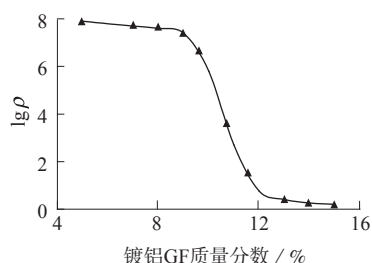
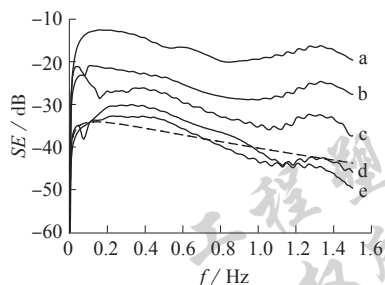


图1 材料体积电阻率随镀铝 GF 用量的变化

虽然材料在镀铝 GF 质量分数约为 11% 时就已经表现为导体的性质,但此时材料的屏蔽效能还是很低的,如图 2 所示,其中, SE 为材料的屏蔽效能, f 为频率。



镀铝 GF 质量分数: a—13%; b—20%; c—30%; d—40%; e—55%

图2 镀铝 GF 质量分数高于渗透阈值时材料的 SE 随 f 的变化曲线

从图 1 和图 2 可以看出,随着镀铝 GF 用量的增加,体积电阻率的变化速率进一步降低,但降速缓慢,然而与此同时相对应的材料的屏蔽效能的变化却有一个明显的过程,从渗透阈值点开始到 40% 用量下,其屏蔽效能差异最大可达 28 dB 之多,因此这种变化在体积电阻率上虽然表现得微不足道,但在屏蔽效能上如此大的差异是不能被忽略的,直至镀铝 GF 质量分数高于 40% 后材料的屏蔽效能才基本保持稳定。

从图 2 还可以看出,镀铝 GF 质量分数低于 40% 时,相邻两曲线间的屏蔽效能差异越大,这种差异在镀铝 GF 质量分数达到 40% 后不再明显,其与镀铝 GF 质量分数为 55% 时的屏蔽效能最大差值仅约 4 dB,且之后继续增加镀铝 GF 用量这种差别越小。这可能与相变后材料内部导电网络的平均接触点数有关^[4],材料在达到渗透阈值时虽然具有了一定导电能力,但此时内部各处的电阻值差异很大,而材料的屏蔽效能又是由材料内部电阻值最高的部分决定的,因此在这个阶段平均电阻率相差无几的材

料表现出的屏蔽效能差异却很大。随着镀铝 GF 用量的继续增加,实际上提高了形成导电网络需要的有效接触点的几率,之后材料内部导电网络结构更加完善,其体积电阻率的梯度变得较小,最终材料的平均电阻率更接近极值,所以屏蔽效能的差异也更小。

图 2 中虚线表示的是在镀铝 GF 质量分数为 55% 时,通过测定体积电阻率并运用经典同轴线模型经验公式计算出的 SE 曲线^[5]。从图 2 可以看出,计算值与 SE 实测值存在偏差,特别是频率较高时,实测值高于公式模型计算值。

由于在绝大多数情况下仍然运用经典的同轴线模型来处理电导率高的填充型屏蔽材料,因而体积电阻率成为了衡量屏蔽效能的唯一指标,忽略了材料自身结构等因素带来的影响,以上计算结果就证明了频率较高时,在相同体积电阻率下,有着特殊结构的填充型电磁屏蔽复合材料相对于无限大且处处连续导电的平板结构屏蔽材料具有屏蔽效能增益的优势。

2.2 材料结构对电磁屏蔽效能的影响

由于笔者采用的是镀铝 GF 作为导电填料,在保持导电性的同时增加了电磁波的散射界面;且采用加热固化成型的方法,使得该材料产生了明显的分层结构,如图 3 所示(镀铝 GF 质量分数为 55%)。

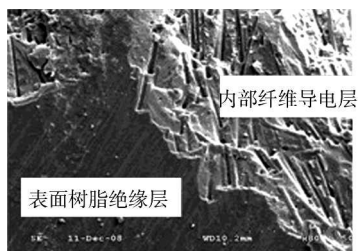


图3 材料层状结构 SEM 照片

从图 3 可以看出,表面树脂层部分几乎没有导电纤维分布,其体积电阻率和绝缘体相当;导电纤维分布在材料内部,随着向芯部的靠近,导电纤维在树脂中的分布更加密实,此时体积电阻率迅速下降,材料呈现为导体性质。图 4 为材料体积电阻率随材料厚度的变化曲线,其中 ρ 为体积电阻率, t 为测试处距材料表面的距离。

材料具有的这种宏观层状结构,可以用图 5 中的等效结构图表示,其中 SE_{Triple} 为三层结构材料的总电磁屏蔽效能, R_1 、 R_2 、 R_3 为三层结构材料内部各界面的电磁屏蔽效能, SE_{Triple} 为 R_1 、 R_2 、 R_3 的矢量和。

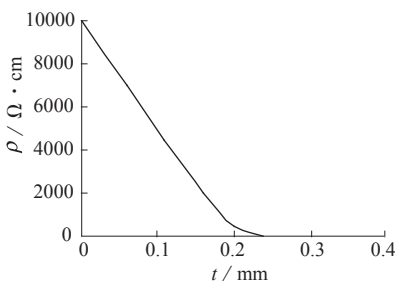


图4 材料体积电阻率随材料厚度的变化曲线

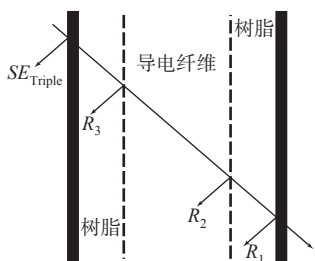


图5 材料内部等效结构图

根据 Schelkunoff 多层材料屏蔽效能公式^[6], 当镀铝 GF 质量分数为 55% 时, 测量表层树脂厚度约为材料总厚度 L 的 0.1 倍 (即 0.2 mm), 可以推导出如式 (1) 的公式。

$$\Delta SE = SE_{\text{Triple}} - SE_{\text{Single}} = 20 \lg \left[\frac{2 \sqrt{\epsilon_r}}{2 + \sqrt{\epsilon_r}} \cdot \sqrt{2 \left(\frac{2\pi^2 L}{10^2} \frac{\sqrt{f/\rho_B}}{\sqrt{\mu_0}} + \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{1}{2}} \right] \quad (1)$$

式中: SE ——三层结构材料与单层结构材料在相同纤维用量下的电磁屏蔽效能之差;

SE_{Single} ——单层结构材料的电磁屏蔽效能;

ϵ_r ——树脂相对介电常数;

L ——材料厚度;

f ——测试频率;

ρ_B ——体积电阻率;

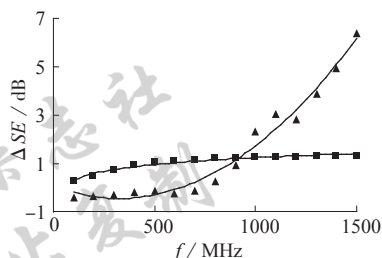
μ_0 ——相对磁导率。

当镀铝 GF 质量分数为 55% 时, 认为纤维间已经相互搭接形成丰富导电网络, 此时屏蔽机制主要为电磁反射, 因此可忽略材料内部的介电损耗机制及认为中间导电层为密实良导体, 此时 ΔSE 只与 ϵ_r 、 L 、 f 、 ρ_B 以及 μ_0 有关。改性镁 PF 树脂的 ϵ_r 为 4, μ_0 可看作 1, 代入式 (1) 可得式 (2)。

$$\Delta SE = 20 \lg \sqrt{2 \left(\frac{2\pi^2 L}{10^2} \frac{\sqrt{f/\rho_B}}{\sqrt{\mu_0}} + \frac{1}{2} \right)^2 + \frac{1}{2}} \quad (2)$$

由式 (2) 可得出理论值, 其与 ΔSE 实测值的差异如图 6 所示。由图 6 可以看出, 在 f 较低时, 两种

材料结构带来的 ΔSE 差异较小, 此时材料的结构因素影响不明显, 但当 f 升高时, ΔSE 实测值上升明显, 随频率的升高增加更快, 这表明具有四反射界面的结构因素在高频状态下发挥了作用。造成这种差别的原因很可能是由于经典的同轴线理论公式侧重于宏观界面的变化, 而模糊处理层内的电阻率跳跃性, 即忽略树脂与金属镀层、金属镀层与 GF 之间及混料非均匀性带来电阻的差异。所以此类材料 ΔSE 实测值在高频阶段通常比理论计算值高。但随着 f 的升高, 实测相同体积电阻率的材料因结构带来的差异可达 6 ~ 8 dB 以上, 这和图 2 中虚线与镀铝 GF 质量分数为 55% 以下的实测曲线走势符合得较好。

图6 ΔSE 实测值与理论值的差异

3 结论

(1) 以镀铝 GF 为导电纤维制备了 PF 电磁屏蔽复合材料, 证实了该导电纤维也具有粉体填料一样的渗滤性质, 并且由实验得出渗滤阈值为 11%。

(2) PF 电磁屏蔽复合材料的屏蔽效能并非在镀铝 GF 用量达到阈值后即保持稳定, 而存在一个由“形成到饱和”的过程, 该饱和阶段的镀铝 GF 下限用量为 40%。

(3) 具有类似层状结构的多界面填充型电磁屏蔽材料若用同轴线屏蔽模型经验公式进行屏蔽效能计算会有较大误差, 通过计算和实测数据证实了该判断的正确性。

(4) 当入射电磁波频率逐渐升高时, 具有多界面层状结构的电磁屏蔽材料的电磁屏蔽效能高于同体积电阻下的单一结构材料的效能, 通过计算获得了两种结构带来的电磁屏蔽效能差值随频率变化的趋势, 并用实验验证了这种趋势的正确性。

参考文献

- [1] 何宏, 张宝峰, 张大建, 等. 电磁兼容与电磁干扰[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 1-5.
- [2] Da He, Ekere N N. Effect of particle size ratio on the conducting percolation threshold of granular conductive-insulating composites [J]. J Phys D: Appl Phys, 2004, 37: 1 848 - 1 852.
- [3] Miyasaka K, Watanabe K, Jojima E, et al. Electrical conductivity of

carbon-polymer composites as a function of carbon content[J] .

Journal of Materials Science, 1982, 17: 1510 - 1616.

- [4] Vilcakova J, Saha P, Quadrat O. Electrical conductivity of carbon fibres/polyester resin composites in the percolation threshold re-

gion[J] . European Polymer Journal, 2002, 38: 2343 - 2347.

- [5] 张佐光. 功能复合材料[M] . 北京: 化学工业出版社, 2004: 23.

- [6] Schelkunoff S A. Electromagnetic Waves[M] . Princeton, NJ: D Van Nostrand, 1943.

RESEARCH OF ELECTROMAGNETIC SHIELDING OF Al-GLASS FIBER COMPOSITE MATERIALS

Xu Ming, Ma Juanrong, Bao Hongquan

(China Building Materials Academy, Beijing 100024, China)

ABSTRACT Phenolic electromagnetic shielding composite was prepared by using glass fiber electroplated by Al(Al-GF) as conductivity filler to fill thermosetting phenolic resin. The volume resistivity and electromagnetic shielding efficiency of the composite was tested. The results indicated that the composite had percolating property when using the Al-GF with certain length as conductivity filler and the shielding efficiency would remain stable only when the content of fiber reached 40%. Meanwhile, the electromagnetic shielding efficiency of the composite with same volume resistivity was estimated by using schelkunoff formula and it was found that the value was different from the measured data, then the reason of differences between the estimated value and the measured data was analysed. at last it was pointed out that the structure of the material was one of the important means to gain higher shielding efficiency.

KEYWORDS electromagnetic shielding, composite, glass fiber electroplated by Al

ColorMatrix 领先 PET 添加剂技术亮相

全球领先的塑料着色剂和添加剂系统创新者 ColorMatrix 在广州举办的 2011 年中国国际包装展 SinoPack 上展出了各项提高聚对苯二甲酸乙二酯(PET) 加工可持续性的最新技术。ColorMatrix 利用在 PET 加工领域的全面技术, 审视

PET 加工链的每一个环节, 从而开发出有助于减低碳足印的技术。重点推介技术包括: PET 树脂添加剂, 用于提升能源和加工效率; JouleRHB 加热剂, 可显著改良多程循环再造; Amosorb 除氧剂和紫外线屏蔽剂 Ultimate 及 Lactra, 可减轻容器质量, 同时又能维持屏蔽功能。(中塑橡网)

优惠销售 2000 ~2010 年中国工程塑料加工应用技术研讨会《论文集》及论文集光盘

中国工程塑料工业协会加工应用专委会为了配合 2000 ~2010 年先后召开的中国工程塑料加工应用技术研讨会共编辑、出版了 11 本《论文集》。其内容涉及工程塑料及通用塑料的合成与改性、加工、应用、测试、模具、设备新技术, 以及文献综述、评论等, 尤其突出了我国工程塑料行业发展规划、热点分析, 应对 REACH、RoHS 的对策等行业规则、政策。现尚有部分《论文集》, 以及应广大读者要求加工制作的论文集光盘, 以优惠价格(含邮费) 销售, 欢迎订阅。

1. 《论文集》, 优惠价 280 元/套, 单册价格如下:

《2010 年中国工程塑料复合材料技术研讨会论文集》, 论文 100 篇, 正文 371 页, 50 元/册;

《2009 年中国工程塑料复合材料技术研讨会论文集》, 论文 100 篇, 正文 351 页, 45 元/册;

《2008 年中国工程塑料复合材料技术研讨会论文集》, 论文 100 篇, 正文 351 页, 40 元/册;

《2007 年中国工程塑料复合材料技术研讨会论文集》, 论文 100 篇, 正文 343 页, 35 元/册;

《2006 年中国工程塑料加工应用技术研讨会论文集》, 论文 100 篇, 正文 346 页, 含中国工程塑料工业“十一五”发展规划, 30 元/册;

《2005 年中国工程塑料复合材料技术研讨会论文集》, 论文 100 篇, 正文 338 页, 25 元/册;

《2004 年中国工程塑料加工应用技术研讨会论文集》,

论文 100 篇, 正文 337 页, 20 元/册;

《2003 年塑料助剂和塑料加工应用技术研讨会论文集》, 论文 105 篇, 正文 373 页, 20 元/册;

《2002 年中国工程塑料加工应用技术研讨会论文集》, 论文 100 篇, 正文 351 页, 20 元/册;

《2001 年中国工程塑料加工及模具技术研讨会论文集》, 论文 80 篇, 正文 270 页, 20 元/册;

《2000 年中国工程塑料加工应用技术研讨会论文集》, 论文 100 篇, 正文 339 页, 20 元/册。

2. 论文集光盘, 优惠价 190 元/盘。

本光盘除收录上述 11 本《论文集》的全部内容外, 还包括约 2200 人次的会议代表通讯录。

凡需购买《论文集》或论文集光盘的读者, 请尽快办理邮购手续。汇款时请注明“论文集”或“论文集光盘”。

邮局汇款

收款单位: 山东济南市 108 信箱杂志社 邮编: 250031

电话: (0531) 85878057 85878223 85878278

传真: (0531) 85947355 85878057

银行汇款

户 名: 中国兵器工业集团第五三研究所

开户银行: 济南市工商银行经十一路支行

帐 号: 1602001229014425546

网上订购 <http://www.epa1973.com>