**引文格式**：钟黎明，李洲，杜晓刚，等. $Al_2O_3$/EP复合材料超声波衰减特性研究[J]. 太原理工大学学报，2026，57(5)：1054-1060.

ZHONG Liming，LI Zhou，DU Xiaogang，et al. Key attenuation performance of $Al_2O_3$/EP composite materials in ultrasonic testing[J]. Journal of Taiyuan University of Technology，2026，57(5)：1054-1060.

# $Al_2O_3$/EP复合材料超声波衰减特性研究

钟黎明[1,2]，李　洲[1]，杜晓刚[2]，张婷婷[3]，王文先[1]

（1. 太原理工大学 材料科学与工程学院，山西 太原；2. 国网山西省电力公司电力科学研究院，山西 太原；
3. 太原理工大学 机械与运载工程学院，山西 太原）

**摘　要**：**【目的】**超声波检测技术是当代无损检测领域向定量化无损评价方向发展的研究热点，也是电力行业GIS设备定时巡检的重要手段。但是，GIS设备中盆式绝缘子等材料属性导致的声衰减大、有效检测深度有限是制约其应用推广的关键瓶颈。**【方法】**本文设计并制备了不同含量$Al_2O_3$颗粒相的树脂基复合材料，通过其微观形貌组织观察，解耦了复合材料声学参数演变、微观结构分布规律对超声波检测能量衰减的影响重要因素；测试表征了超声检测声学参数及规律曲线；同时，建立数值仿真探讨了树脂EP基体、$Al_2O_3$颗粒增强相及连接界面对超声衰减特性的影响规律。**【结果】**结果表明：颗粒与连续相的物性差异以及颗粒在连续相中的体积浓度是影响超声波衰减机制的关键，如氧化铝颗粒的模量和声阻抗分别比树脂基体高出97.91 GPa和$3.634\times10^7$ g·s·cm$^{-2}$，3种不同填料浓度的试块声阻抗也从$0.29\times10^6$增加到$0.67\times10^6$ g·s·cm$^{-2}$。仿真发现只有当区域团簇颗粒尺寸为100 μm以上时，模型中出现超声波的散射现象，代表对超声波能量的耗散作用增大。另外试验中探头频率从5 MHz逐渐降至1 MHz，材料超声衰减系数从2.15 dB/mm减少至0.52 dB/mm。本文结合有限元仿真和试验测试结果对复合材料的衰减性能进行讨论，进一步探讨超声波在材料内部的损耗机制。

**关键词**：$Al_2O_3$/EP复合材料；超声波检测；衰减系数；数值仿真

**中图分类号**：TB332　　**文献标识码**：A

**DOI**：10.16355/j.tyut.1007-9432.20240551　　**文章编号**：1007-9432(2026)05-1054-07

# Key Attenuation Performance of $Al_2O_3$/EP Composite Materials in Ultrasonic Testing

**ZHONG Liming[1,2], LI Zhou[1], DU Xiaogang[2], ZHANG Tingting[3], WANG Wenxian[1]**

(1. *College of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi, China*; 2. *State Grid Shanxi Electric Power Research Institute, Taiyuan, Shanxi, China*; 3. *College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi, China*)

**Abstract**: **【Purposes】** Ultrasonic testing technology is a research hotspot in the field of contemporary non-destructive testing, which is developing towards quantitative non-destructive evaluation. It is also an important means of regular inspection of GIS equipment in power industry. However, high acoustic attenuation caused by material properties such as basin insulators in GIS equipment and limited effective detection depth is the key bottleneck restricting the popularization of ultrasonic test-

**收稿日期**：2024-07-11；**修回日期**：2024-08-20

**基金项目**：国网山西省电力公司科技项目（项目编号52053023000Q）

**第一作者**：钟黎明，硕士研究生，(E-mail)zhongliming83403@163.com

**通信作者**：王文先，博士，二级教授，博士生导师，研究方向为先进材料制备与加工，(E-mail)wwx960@126.com.

ing.【**Methods**】In this work, resin epoxy composites with different contents of $Al_2O_3$ particle phases were designed and prepared. By observing the microstructure of composite materials, important factors affecting the energy attenuation of ultrasonic testing, such as the evolution of acoustic parameters and the distribution of microstructure, were decoupled; And the acoustic parameters and regular curves of ultrasonic test were characterized. At the same time, numerical simulations were established to explore the influence of EP resin matrix, $Al_2O_3$ particle reinforcement phase, and connection interface on the ultrasonic attenuation characteristics.【**Results**】The results show that the physical differences between particles and continuous phase, and the volume fraction of particles in continuous phase are the keys to influence the ultrasonic attenuation mechanism, e.g., the modulus and acoustic impedance of $Al_2O_3$ particles are higher than those of resin matrix by 97.91 GPa and 3.634 $\times$ $10^7$ g·s·cm$^{-2}$, respectively, and the acoustic impedance of the specimen with three different filler concentrations also increases from 0.29$\times10^6$ to 0.67 $\times10^6$ g·s·cm$^{-2}$. According to the simulation, only when the size of regional cluster particles is 100 μm or more, the scattering of ultrasound appears in the model, which represents an increase in the dissipation of ultrasound energy. In addition, the probe frequency gradually reduces from 5 to 1 MHz in the test, and the material ultrasonic attenuation coefficient reduces from 2.15 to 0.52 dB/mm. This paper utilizes a combination of finite element simulation and experimental testing to discuss the attenuation properties of $Al_2O_3$/EP composite materials, which supplements the study of ultrasonic loss mechanism within the material.

**Keywords**: $Al_2O_3$/epoxy resin composites; ultrasonic testing; attenuation coefficient; numerical simulation

近年来，超声技术在无损评价（Non-Destructive Evaluation，简称NDE）、结构健康监测（Structural Health Monitoring，简称SHM）等传统工业中获得了广泛的应用[1]。超声波衰减是指超声波无损检测中声波能量逐渐降低的效应，符号为$\alpha$，单位为dB/mm。该现象是不可避免的且有多种衰减形式，其中散射衰减和吸收衰减由材料本身的物理性质与结构决定，扩散衰减则与波阵面的几何形状和超声波的传播距离有关。

环氧树脂（Epoxy resin，简称EP）高分子材料柔性较好，声阻抗较低，可增加复合材料的弹性柔顺性，常被用作聚合物基体[2]。在树脂中添加$Al_2O_3$，可以提升复合材料力学和导热性能，并保证绝缘性能[3]，这些复合材料被广泛作为电力绝缘材料。随着材料服役环境越来越苛刻，树脂基复合材料的厚度不断增加，且内部组织结构呈现多相、多界面、非均质等特点。目前超声检测是树脂基复合材料最有效的无损检测方法[4]。但是大厚度和新工艺制备的树脂复合材料会使超声波信号产生严重衰减[4]。相比较超声波检测技术应用最广的钢制工件，该环氧复合材料的衰减系数大约是钢制材料的21倍。从理论角度来看，这种超声波衰减损耗机制的相对影响还没有得到充分的探讨。本研究对环氧树脂基体、氧化铝填料颗粒度与添加比例对复合材料的超声波衰减特性的影响机理进行了研究。

## 1　实验材料及建模

本研究从电网绝缘盆式绝缘子材料中截取了环氧复合材料喷金试样，采用ZEISS Geimini SEM 300扫描电子显微镜对环氧复合材料内部微观形貌进行分析，再通过图像分析软件ImageJ得到颗粒的粒径分布以及$Al_2O_3$颗粒填料与EP在复合材料中的体积浓度。图1(a)为环氧复合材料内部微观组织，可知该材料是由微米级$Al_2O_3$颗粒和EP基体构成的非均质介质，$Al_2O_3$颗粒形状不规则，多数弥散分布在树脂基体中，红圈处的颗粒也存在团聚的现象，颗粒在复合材料中的体积浓度约为60%。图1(b)是统计得到的$Al_2O_3$填料粒径分布图，可知粒径大小分布在3～55 μm之间。

考虑到该材料中存在团聚颗粒情况，为了研究超声波在材料内部传播时异质界面的尺寸大小对散射作用的影响，本研究提出了颗粒增强体的区域团簇增强结构[5]，并研究其与复合材料中超声波衰减性能的关系。图2中将团簇的$Al_2O_3$颗粒视为一个大小各异的圆形颗粒，球形团簇直径分别为50、100、150、200 μm。

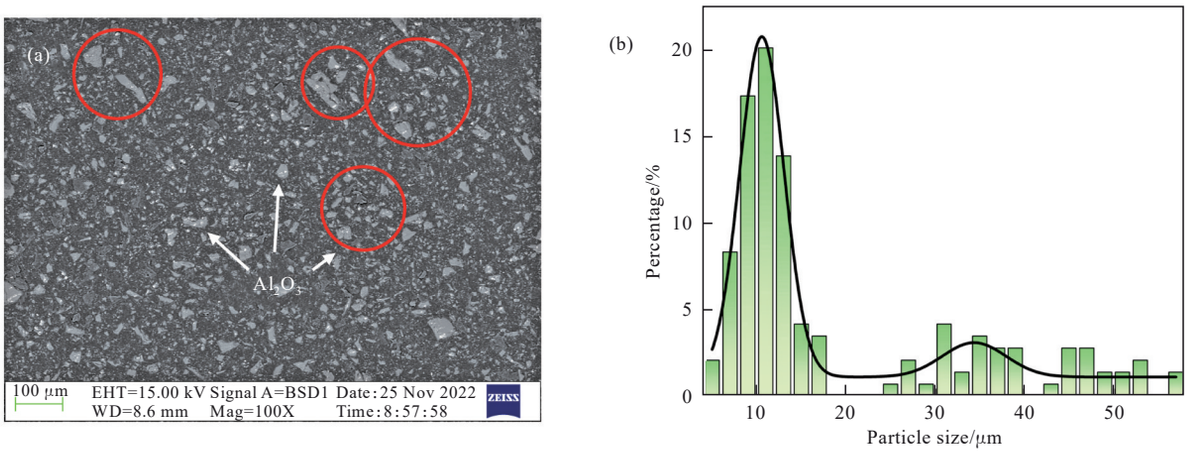
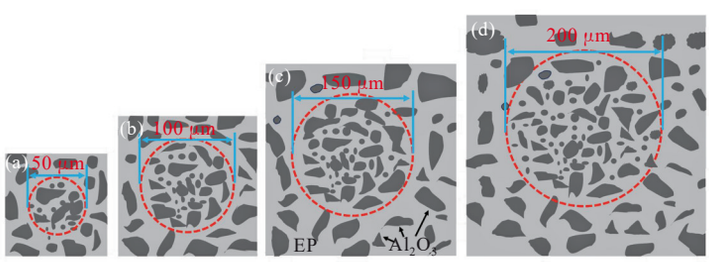



**图1** (a) $Al_2O_3$/EP复合材料SEM图; (b) $Al_2O_3$颗粒尺寸分布图

Fig. 1 (a) SEM image of $Al_2O_3$/EP composite; (b) Particle size distribution of $Al_2O_3$




直径(a)50 μm;(b)100 μm;(c)150 μm;(d)200 μm

**图2 颗粒增强体的区域团簇增强结构**

Fig. 2 Regional cluster enhancement structures of particle reinforcement

超声波在模型介质中传播时,应力-应变关系满足广义胡克定律。为了简化计算,本研究选择平面应变作为二维近似条件,该条件假设总应变的所有平面外应变分量为零[6]。因此,模型中二维平面应变的超声波方程可以写成如下[7]:

$$\rho\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}=\nabla\cdot\sigma+F\,. \tag{1}$$

$$\sigma=c\varepsilon\,. \tag{2}$$

$$\boldsymbol{C}_{klmn}=\begin{bmatrix}\lambda+2u & \lambda & 0\\ \lambda & \lambda+2u & 0\\ 0 & 0 & u\end{bmatrix}. \tag{3}$$

$$\boldsymbol{\sigma}_{kl}=\begin{bmatrix}\sigma_{xx} & \sigma_{yy} & \sigma_{xy}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}. \tag{4}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{mn}=\begin{bmatrix}\varepsilon_{xx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{xy}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}. \tag{5}$$

$$\varepsilon_{kl}=\frac{1}{2}\left(u_{k,l}+u_{l,k}\right). \tag{6}$$

$$\lambda=\rho\cdot\left(c_L^2-2\cdot c_s^2\right). \tag{7}$$

$$\mu=\rho\cdot c_s^2\,. \tag{8}$$

其中,$F$是每单位面积的外力;$\sigma$和$\varepsilon$分别是应力和应变值;$c$为刚度系数;$\lambda$和$\mu$是lame常数,$c_L$和$c_s$分别是材料的纵波速度和横波速度;$u_{k,l}$和$u_{l,k}$表示位移矢量的一阶梯度;$\rho$为材料密度。

基于上述超声波方程,将2D模型简化为一个圆形的单位周期性结构,该模型代表了样品的轴向截面。有限元模型如图3所示,其中灰色区域为EP基体,绿色圆圈表示$Al_2O_3$颗粒。假设如下:1)颗粒都均匀随机地分布在基体中;2)颗粒都是相同大小的圆形;3)采用团簇$Al_2O_3$颗粒平均粒径的结构模型。超声波纵波垂直施加在左侧[8]。

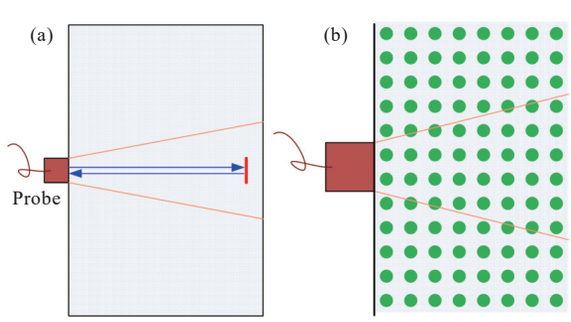



**图3** (a) $Al_2O_3$/EP复合材料的超声检测示意图;(b) 超声波与颗粒作用放大示意图

Fig. 3 (a) Schematic diagram of ultrasonic testing for $Al_2O_3$/EP composites; (b) Amplification of interaction between ultrasound and particles

## 2 测试材料声学参数

材料的超声参量主要由特性阻抗、声速和衰减系数三个声学参数来表征。本研究实测了$Al_2O_3$/

EP复合材料的声速、密度和衰减系数，并且为了便于后续仿真设置材料参数，测试了纯EP和$Al_2O_3$试块的声速和密度。声阻抗与材料本身性质有关，表征材料对于超声波的振动的抵抗程度，可通过材料的声速与密度的乘积计算求得介质的声阻抗。

采用UNION数字超声检测仪（型号为PXUT-330N）在样品内的来回反射和自发自收功能，完成声速和声衰减系数的测量与计算，并且要求试块上下底面互相平行，表面光洁[9]。工作原理见图4，图中1st pulse-echo为第一次底面回波，对应时刻为$t_1$，2nd pulse-echo为第二次底面回波，对应时刻为$t_2$。经计算$Al_2O_3$/EP复合材料声速为2 906 m/s，纯EP和$Al_2O_3$的声速分别为2 440和9 900 m/s。

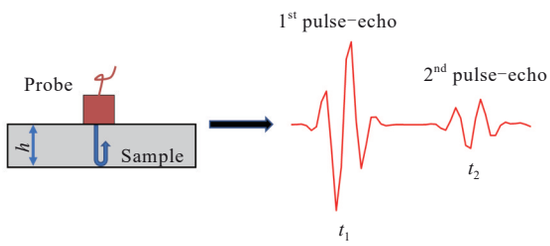



**图4　测量材料衰减系数的实验原理示意图**

Fig. 4　Schematic diagram of experimental principle for material attenuation coefficient measuring

采用群隆MH-100E型电子固体密度计分别测试纯EP、$Al_2O_3$和环氧复合材料的体积密度，结果分别为1.18、3.7和2.259 g·cm$^{-3}$。进而得到纯EP与$Al_2O_3$的声阻抗分别为0.288×10$^6$ g·s·cm$^{-2}$和3.663×10$^7$ g·s·cm$^{-2}$，可知$Al_2O_3$颗粒与EP基体连续相的声阻抗差异达到约3.634×10$^7$ g·s·cm$^{-2}$。

测定衰减系数时，使用直探头放在试块表面，使声波在上下表面来回反射，由于介质衰减和反射损失，仪器示波屏上出现高度逐渐降低的多次底波。由于$Al_2O_3$/EP复合材料的衰减较为严重，根据第一、第二次底波高度$E_1$、$E_2$来测定衰减系数$\alpha_L$，计算公式如下[9]：

$$\alpha_L=\frac{20\lg\left(\frac{E_n}{E_{n+1}}\right)-\delta}{2h}. \tag{9}$$

其中，$E_n$是第$n$个底波高度，$h$是试块厚度，$\delta$是反射损耗，每个反射损耗约为0.5～1.0 dB。

经试验测得4组不同频率时的超声衰减系数，结果见表1。

**表1　$Al_2O_3$/EP复合材料中衰减系数与超声频率的关系**

Table 1　Relationship between attenuation coefficient and ultrasonic frequency in $Al_2O_3$/EP composites

| 频率/MHz | 一次底波$E_1$ | 二次底波$E_2$ | 衰减系数/(dB·mm$^{-1}$) |
|---|---|---|---|
| 1.00 | 80.0% | 6.5% | 0.52 |
| 1.25 | 80.0% | 8.0% | 0.95 |
| 2.50 | 81.0% | 6.0% | 1.08 |
| 5.00 | 80.5% | 0.5% | 2.15 |

## 3　衰减性能研究

### 3.1　EP基体的声波衰减研究

EP是一种热固性树脂，具有机械强度高、稳定性好、黏结强度高等一系列优点，可以作为聚合物基体的一个理想选择[10]。但是树脂基体大分子链网络的变形、松弛和再生引起的黏弹性决定了材料的阻尼性能。聚合物复合材料的超声衰减特性在很大程度上受到其组成相黏弹性的影响。如图5所示，超声波在两相聚合物共混物传播时，会遇到基体中不规则颗粒对声波传播方向的改变，其效果相当于在超声束流中移去入射声波，同时黏弹性对波衰减的影响和散射的影响一样重要。

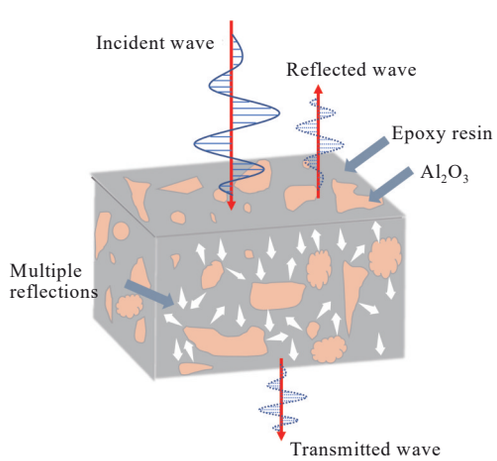



**图5　超声波在EP基体复合材料中的传播示意图**

Fig. 5　Schematic diagram of ultrasonic propagation in $Al_2O_3$/EP composites

阻尼性能是环氧树脂类材料形变性质的重要特征，其作用机理直接与聚合物动态力学松弛性质有关，当聚合物与振动物体相接触时，必然吸收一定量的振动能量，使之变成热能，使振动受到阻尼作用[11]。聚合物阻尼作用的大小取决于其受力形变时滞后现象的大小，正是由于这种特有的滞后现象，聚合物的拉伸-回缩循环变化均需要克服其本身的高分子链段之间的内摩擦阻尼而产生内耗[12]。在声波作用下，材料的分子链产生链段运动，重新构象有驰豫作用，损耗了一部分能量，同时，由于材料黏性内摩擦的存在，将部分弹性能转化为热能，由此引起损耗声能，即吸声作用[12]。传播中的超声波振幅衰减起因于介质对声波的吸收，即介质内部由于结构相变、位错运动等因素使得能量不断转换

为其他形式的能量，使声波能量不断减弱。

### 3.2 不同氧化铝含量的声波衰减研究

本研究制作了4种$Al_2O_3$含量分别为0（纯EP）、20%、40%和60%的试块来进行衰减机理研究，试块大小为100 mm×300 mm×400 mm，其中$Al_2O_3$颗粒平均直径为40 μm。试块是在真空环境下将脱气处理过的树脂和填料混合物浇注到模具中并固化成型而得。

图6为4种试块的密度、声速和声阻抗随$Al_2O_3$含量变化的曲线图。在图6中，当树脂基体中加入$Al_2O_3$固体填料时，随着$Al_2O_3$含量从0、20%、40%增加到60%，复合材料的密度从1 187.5 kg/m$^3$单调增加到2 296 kg/m$^3$，复合体系的声阻抗从0.29×$10^6$ g·s·cm$^{-2}$增加到0.67×$10^6$ g·s·cm$^{-2}$。由此可见，声波被散射的程度与增强体的含量正相关。材料的不均匀性将导致超声波的散射，该散射由周围介质的密度和弹性模量的差异决定[2]。以类似的方式，聚合物基质中的填料取决于颗粒尺寸、形状和相对于聚合物基质的声阻抗而有助于衰减。经分析，声波在不同媒质中传播，会引起体积的膨胀和压缩，发生媒质的黏滞损耗和热传导损耗。对于黏弹性高分子材料，其主要方式为高分子材料分子链段运动或材料中的微粒对材料作相对运动所引起的摩擦损耗和声波对粒子散射引起的能量损耗。

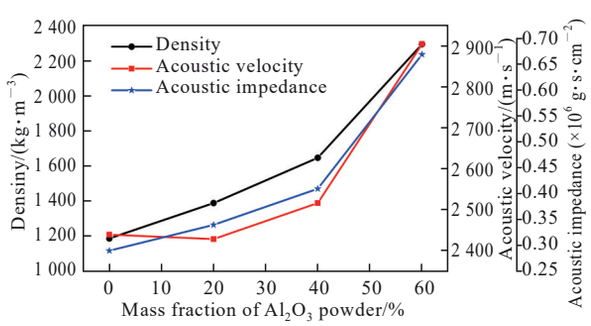



**图6 不同质量分数$Al_2O_3$的树脂基复合材料声学参数变化**

Fig. 6 Acoustic parameters of composite materials with different mass fractions of $Al_2O_3$

### 3.3 区域团簇$Al_2O_3$颗粒微结构的声波衰减机理分析

由于采用实验方法对团簇颗粒微结构的超声波传播研究难度较大，因此数值仿真方法就显得极为重要，该方法具有方便、准确度高等优点，吸引了越来越多学者致力于该方面的研究[1]。

要保证对超声波进行仿真的准确性，首先要设置正确的超声波激励信号，当正弦或者余弦等周期力作用于弹性材料时，在材料边界将激发出超声波并在材料中传播。通过COMSOL软件中的固体力学模块可以模拟超声波在环氧树脂复合材料中的传播。对于环氧树脂复合材料的应力边界问题在COMSOL中可以由纽曼条件来设置，其表达式为：

$$F_A=\sigma\cdot\vec{n}\,. \tag{10}$$

式(10)中，$F_A$为施加的应力载荷，$\sigma$为应力，$\vec{n}$为单位外法向量。

把经过汉宁窗调制的周期正弦波的脉冲信号作为超声波无损检测仿真的激励源信号，设置激励源长度，施加一均匀力载荷在激励源边界上，该激励源边界的长度即为超声波纵波换能器的直探头的晶片直径。之所以使用汉宁窗来调制是因为通过这种方式可以消除超声脉冲信号的高频干扰和能谱泄露，更加符合实验中的超声换能器探头的超声场[13]。经过汉宁窗调制后的激励信号的表达式为：

$$P(t)=\left[\frac{1}{2}\left(1-\cos\frac{2\pi f_c t}{n}\right)\right]\cdot\sin\left(2\pi f_c t\right)\left(0\leqslant t\leqslant\frac{n}{f_c}\right). \tag{11}$$

式(11)中，$P(t)$为设置的超声波激励源信号，$n$为周期个数，$f_c$为中心频率。

图7为有限元模型，试样的尺寸设定为20 mm×25 mm。为了确保计算效率，将在样本内进行二维(2D)超声有限元模拟[14]。超声波纵波是通过在$y$方向上施加经过三个汉宁窗口周期的脉冲位移分量而产生的[15]。

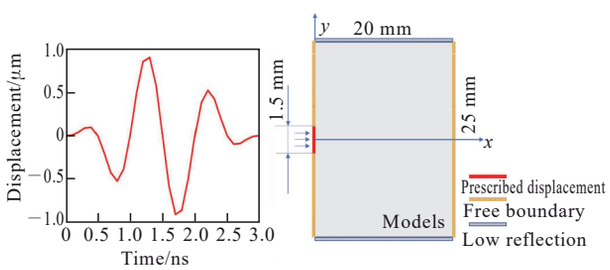



**图7 模型边界条件设置**

Fig. 7 Model boundary condition settings

超声波在非均质复合材料中的传播过程是复杂的，因此利用COMSOL数值模拟来研究超声波的传播过程，仿真模型建立后，设置的材料参数如表2所示。

由于在固体中，纵波的声速往往大于其他类型声波的声速，而且纵波的稳定性更高，不易与其他类型的声波发生干扰，同时具有较高的穿透性，故采用纵波垂直入射来进行超声无损检测。超声波作用于材料底面时会出现反射波，返回传播时被声

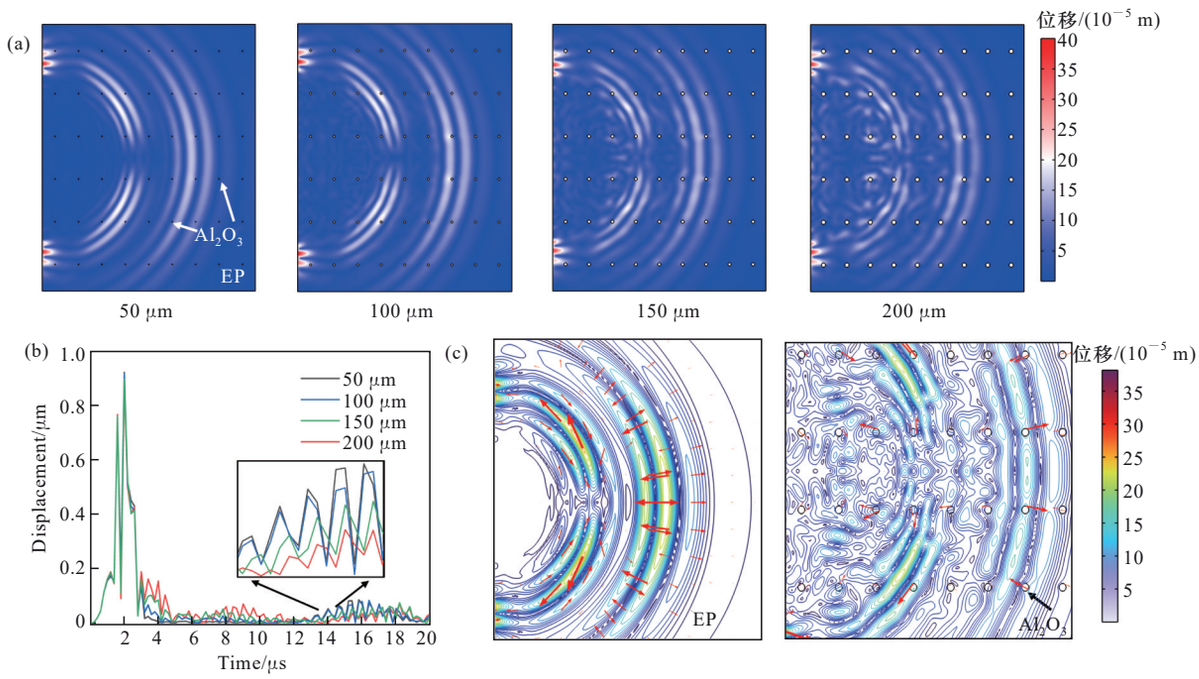
**表 2　环氧树脂和 $Al_2O_3$ 的材料参数**

Table 2　Material parameters of epoxy resin and $Al_2O_3$

| 材料参数 | 环氧树脂 | $Al_2O_3$ |
|---|---|---|
| 密度/(g·cm$^{-3}$) | 1.18 | 3.7 |
| 纵波声速/(m·s$^{-1}$) | 2 440 | 9 900 |
| 声阻抗/(g·s·cm$^{-2}$) | $0.288\times10^6$ | $3.663\times10^7$ |
| 杨氏模量/GPa | 13.17 | 111.08 |
| 泊松比 | 0.35[16] | 0.23 |

学换能器接收。

在图 8(a)中，树脂基体中添加的 $Al_2O_3$ 颗粒尺寸分别为 5、100、150 和 200 μm，观察同一时刻超声波的传播变化情况。发现颗粒尺寸为 100 μm 以上时，模型中出现超声波的散射现象，代表对超声波能量的耗散作用增大。在模型发射声波处设置声波接收器，得到 4 个模型的声波衰减波型图，见图 8(b)。由图 8(b)可知，4 个模型的超声波始波高度相同，而底波高度随着颗粒尺寸增大而降低。在 3～6 μs 之间，150 μm 和 200 μm 两个模型接收器收到的杂波信号高度高于前两个模型。




（a）颗粒尺寸分别为 50，100，150 和 200 μm 的模型在同一时刻时超声传播情况（b）4 种模型中声源信号和一次底波信号的对比；（c）环氧树脂与加入颗粒后的声场对比

**图 8　不同尺寸 $Al_2O_3$ 颗粒的超声波传播情况示意图**

Fig. 8　Ultrasonic propagation performance of composites with $Al_2O_3$ particles of different sizes

通过比较接收信号与源信号的幅值谱，根据公式(9)计算 4 种模型的衰减系数，结果分别为 0.53、0.54、0.62 和 0.76 dB/mm。在图 8(c)中，左侧环氧树脂中超声传播具有方向性，而在右图基体中添加颗粒后，造成声波的杂乱无章，引起声波能量的散射衰减，可知声波与颗粒的相互作用及在基体中传播路径的延长，增强了基体对声波的衰减。

### 3.4　超声波频率对声波衰减研究

采用汕头超声 CTS-PA32 超声波检测仪器和不同频率的直探头对 $Al_2O_3$/EP 复合材料进行检测试验，测试材料内部传播衰减规律。将探头放置在不同厚度的环氧复合材料样件表面，记录不同厚度的底面回波达满屏 80% 时的增益值。调节仪器增益按钮使噪声达到满屏 80%，并与上述记录的底波回波相差，得到信噪比，通过各个回波的信噪比分析声波衰减规律。图 9 为以 130 mm 深处噪声为基准，噪声增益至满屏 80% 时的增益值，为 80 dB。

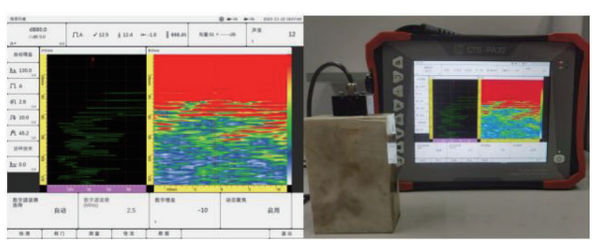


**图 9　噪声增益测试**

Fig. 9　Noise gain test

逐步记录不同厚度试块的底面回波，并计算信噪比最终得到图 10 的结果曲线。可见低频探头在超声波穿透厚度 100 mm 以上高衰减的环氧复合材料时，

仍具有60 dB的信噪比。但是2.5 MHz和5 MHz探头最厚只能穿透90 mm厚度左右的环氧复合材料。

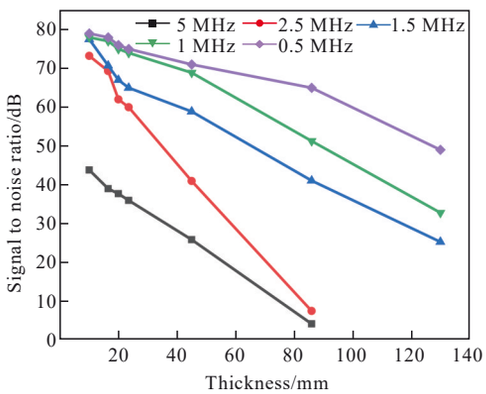



**图10 不同频率情况下超声波信噪比随穿透试块厚度变化图**

Fig. 10 Variations of ultrasonic signal-to-noise ratio with the thickness of penetration test block with different frequency conditions

## 4 结论

本文主要研究树脂基复合材料的高声衰减机理，发现以下结论：

1）传播中的超声波衰减起因于EP介质对声波的吸收，即介质内部由于结构相变、位错运动等因素使得能量不断转换为其他形式的能量，导致声波不断减弱。

2）仿真结果表明，$Al_2O_3$团簇颗粒尺寸达到100 μm以上，才会产生散射衰减，而且随着颗粒尺寸从50 μm变化到200 μm，材料衰减系数从0.53 dB/mm增加到0.76 dB/mm。

3）在树脂基复合材料中，颗粒与连续相的物性差异以及颗粒在连续相中的体积浓度是影响超声波衰减机制的关键。如氧化铝颗粒的模量和声阻抗分别比树脂基体高出$3.6\times10^7$ GPa和$3.634\times10^7$ g·s·cm$^{-2}$。而且随着氧化铝填料在树脂基体中的质量分数从20%增加到60%，复合体系的声阻抗从$0.29\times10^6$ g·s·cm$^{-2}$增加到$0.67\times10^6$ g·s·cm$^{-2}$。

4）对于高衰减材料的超声波检测，应选择低频探头。频率从5 MHz逐渐降至1 MHz，材料超声衰减系数从2.15 dB/mm减少至0.52 dB/mm。

**参考文献：**

[1] 艾春安，韩兆林，李剑，等.基于有限元方法的超声波仿真研究[J].电声技术，2015，39(8)：39-41，47.
[2] 牛今丹.超声换能器声匹配层设计方法及其声学特性研究[D].哈尔滨：哈尔滨工业大学，2014.
[3] 白德鹏，贺云逸，李亭，等.氧化铝填料含量和粒径对环氧树脂复合材料力学性能的影响[J].西安交通大学学报，2021，55(4)：181-188.
[4] 高晓进，周金帅，龚文化.高声衰减树脂基复合材料超声检测方法[J].玻璃钢/复合材料，2018(9)：52-57.
[5] 蔡庆.区域微结构SiC/Al复合材料制备及热性能研究[D].上海：上海交通大学，2016.
[6] Maio L，Fromme P.On ultrasound propagation in composite laminates：Advances in numerical simulation[J].Progress in Aerospace Sciences，2022，129：100791.
[7] Chang J，Zheng C，Ni Q Q.The ultrasonic wave propagation in composite material and its characteristic evaluation[J].Composite Structures，2006，75：451-456.
[8] Geng X，Zhang C，Zhou B，et al.Experiment and simulation for ultrasonic wave propagation in multiple-particle reinforced composites[J].Ultrasonics，2023，132：106971.
[9] 李建慧，王善林，王志刚，等.CNTs/Al复合材料搅拌摩擦加工质量的超声衰减评价[J].失效分析与预防，2016，11(2)：82-87.
[10] 郭红红.环氧树脂基轻质吸声材料[D].杭州：浙江大学，2007.
[11] 石琢.纤维/颗粒-树脂基层合复合材料的吸声性能研究[D].杭州：浙江理工大学，2010.
[12] 张友南，杨军，贺才春，等.阻尼材料的研究与应用[J].噪声与振动控制，2006，26(2)：38-41.
[13] 范中岚.铝基复合材料界面结合状态的超声波无损检测研究[D].广州：广东工业大学，2021.
[14] Wang J，Lai Q，Xu C，et al.High-frequency ultrasound-based thickness measurement of highly attenuating materials[J].Measurement Science and Technology，2023，34(3)：035004.
[15] Guo Z，Song Y，Li X.Numerical analysis of ultrasonic wave propagation and scattering in oligo-crystalline materials[J].Wave Motion，2022，115：103048.
[16] Singh S K，Singh D，Kumar A，et al.An analysis of mechanical and viscoelastic behaviour of nano-$SiO_2$ dispersed epoxy composites[J].Silicon，2020，12(10)：2465-2477.

（编辑：贾丽红）