

文章编号: 1000-3851(2010)02-0001-08

颗粒粒度分布对树脂基磁致伸缩复合材料性能的影响

董旭峰^{*1}, 关新春², 欧进萍^{2,3}, 齐 民¹

(1. 大连理工大学 材料科学与工程学院, 大连 116024; 2. 哈尔滨工业大学 土木工程学院, 哈尔滨 150090;
3. 大连理工大学 土木水利学院, 大连 116024)

摘要: 已有研究在 Terfenol-D 颗粒粒径及粒度分布对树脂基磁致伸缩复合材料性能的影响规律上存在分歧。本文中以 Terfenol-D 为磁致伸缩颗粒, 以不饱和聚酯树脂为基体, 采用 5 种窄分布颗粒(30~53 μm 、53~150 μm 、150~300 μm 、300~450 μm 、450~500 μm)和 1 种宽分布颗粒(30~500 μm)制备颗粒体积分数为 20% 的磁致伸缩复合材料, 并测试其动静态磁致伸缩系数、磁机械耦合系数、弹性模量及抗压强度等性能参数。在窄分布颗粒制备的试样中, 以 53~150 μm 制备的复合材料的磁致伸缩性能最佳; 而采用宽分布颗粒制备的试样其性能优于窄分布颗粒制备的试样。该结果表明, 增大颗粒粒径同时具有积极作用与消极作用, 其对复合材料磁致伸缩性能的影响取决于哪一个居主导地位。

关键词: 树脂基磁致伸缩复合材料; Terfenol-D; 粒径分布; 磁致伸缩性能; 单晶

中图分类号: TB332 **文献标志码:** A

Influence of particle size distribution on properties of polymer based magnetostrictive composites

DONG Xufeng^{*1}, GUAN Xinchun², OU Jinping^{2,3}, QI Min¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;
3. School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: To solve the conflict about the effects of particle size on magnetostrictive properties of polymer-bonded Terfenol-D composites studied by different scholars, Terfenol-D/unsaturated polyester resin composites were prepared with 20% volume fraction Terfenol-D powders in six particle-size ranges (30~53 μm , 53~150 μm , 150~300 μm , 300~450 μm , 450~500 μm and 30~500 μm). The static and dynamic magnetostrictive properties, magnetomechanical coupling coefficient, Young's modulus and compressive strength were tested. The results indicate that the composite with particles of 53~150 μm distribution presents the largest static and dynamic magnetostrictive properties among all the five monodispersed distribution samples. The sample with particle size in 30~500 μm shows even larger response than that with 53~150 μm particle size distribution. It indicates that the particle size plays a double-edged sword on magnetostrictive properties of magnetostrictive composites. The existence of the optimal particle size to prepare polymer-bonded Terfenol-D composites results from the competition between the positive effects and negative effects of increasing the particle size.

Keywords: polymer-based magnetostrictive composites; Terfenol-D; particle size distribution; magnetostrictive properties; single-crystal

采用树脂粘结 Terfenol-D 颗粒的方法制备的树脂基磁致伸缩复合材料, 与超磁致伸缩材料 Terfenol-D 合金相比, 具有抗拉强度高、电阻率高、涡流损耗小、适用频率宽、易成型、成本低等优点^[1-6]。

通常制备磁致伸缩复合材料所用的 Terfenol-D 合金颗粒由球磨法制得, 其颗粒呈不规则形状, 如图 1 所示^[7]。Terfenol-D 颗粒的粒径及其粒度分布是影响树脂基磁致伸缩复合材料性能的一个重要因素。英国学者 Hudson 等将颗粒分为 106~

收稿日期: 2009-04-15; 收修改稿日期: 2009-08-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(50478024); 国家 973 计划项目(2007CB714204)

通讯作者: 董旭峰, 博士, 研究方向: 智能材料与结构系统 E-mail: dongxfhit@163.com

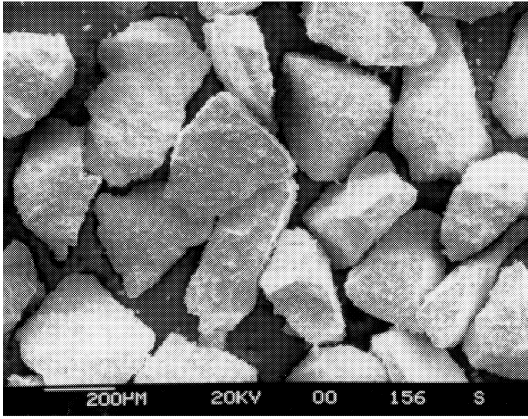


图1 球磨法制备 Terfenol-D 颗粒的形状

Fig. 1 Micrograph of Terfenol-D particle produced by ball-milling (photo taken by Duenas)

150 μm 、150 ~ 212 μm 、212 ~ 300 μm 、300 ~ 500 μm 、500 ~ 710 μm 等 5 级, 研究了 Terfenol-D 颗粒粒径对磁致伸缩复合材料磁机械耦合系数和弹性模量的影响规律, 认为磁机械耦合系数和弹性模量与颗粒尺寸的关系不大^[8]。韩国的 Lim 等将颗粒按粒度分布划分为 <45 μm 、45 ~ 75 μm 、75 ~ 100 μm 、100 ~ 125 μm 、125 ~ 150 μm 、150 ~ 180 μm 等 6 级, 从磁致伸缩系数、最大压磁系数、抗压强度以及涡流损耗等 4 种性能参数来研究合金颗粒平均粒径的影响问题, 结果表明, 磁致伸缩系数和最大压磁系数随着颗粒平均粒径增大而增大, 而在平均粒径为 112.5 μm 时材料的抗压强度最大, 同时涡流损耗达到最小^[9-10]。解伟和张羊换以及南昌大学江民红等的研究表明, 采用大粒径的 Terfenol-D 颗粒所制备的磁致伸缩复合材料其磁致伸缩系数明显优于采用小粒径颗粒制备的材料^[11-13]。闫久春等将颗粒按粒度分布划分为 44 ~ 76 μm 、76 ~ 100 μm 、100 ~ 150 μm 、150 ~ 200 μm 等 4 级, 研究表明, 磁致伸缩复合材料的抗压强度和电阻率均随颗粒平均粒径的增大而减小, 而磁致伸缩系数则随粒径增大而先增大后减小, 当平均粒径为 125 μm 时达到最大磁致伸缩系数^[14]。

以上研究工作均以平均粒径为研究对象, 而忽略了粒度分布形态对磁致伸缩复合材料性能的影响。美国加州大学洛杉矶分校的 Duenas 和 Carman 分别对宽粒度分布颗粒 (<106 μm 、<212 μm 、<300 μm) 和窄粒度分布颗粒 (<45 μm 、90 ~ 106 μm 、250 ~ 300 μm) 所制备的磁致伸缩复合材料的磁致伸缩系数进行了研究, 结果表明, 复合材

料的饱和磁致伸缩系数随粒径增大而增大, 而采用双分布颗粒 (18.7% (45 ~ 90 μm) + 81.3% (250 ~ 300 μm)) 得到的复合材料由于填充密度更大其性能最优^[15]。

由此可见, 目前学者们在关于颗粒粒径及粒度分布对树脂基磁致伸缩复合材料性能的影响规律存在一些小的分歧。大部分学者认为复合材料的饱和磁致伸缩系数随颗粒粒径的增大而增大, 并给出了如下解释: 小颗粒更易氧化, 氧化越严重, 颗粒中不具有磁致伸缩性能的无效成分越大; 小颗粒更易发生粘结不紧密而留下空洞, 从而影响磁致伸缩效应的传递; 同质量颗粒, 其表面积随其粒径减小而增大, 由于静电力的作用, 导致小颗粒复合材料的填充密度较小。而闫久春的实验表明存在着使磁致伸缩系数最大的最优粒径范围。此外, 王建冲、周寿增等也指出, 粒径较小的颗粒群中, 单晶颗粒出现的几率非常大, 制备复合材料过程中施加磁场可以使这些单晶在 <111> 方向一致取向, 从而使得小颗粒复合材料具有更好的磁致伸缩性能^[16]。

本文作者旨在通过实验, 重新对颗粒粒度分布对树脂基磁致伸缩复合材料磁致伸缩性能的影响进行研究, 以解决前人研究中的分歧, 并给出相应的解释。

1 不饱和聚酯树脂基磁致伸缩复合材料制备

1.1 原材料性能

磁致伸缩颗粒采用甘肃天星稀土功能材料有限公司生产的 Terfenol-D 粉末, 其成分为 $\text{Tb}_{0.3}\text{Dy}_{0.7}\text{Fe}_2$ 。颗粒的粒径分布由粒度分布仪 Mastersizer 2000 测得, 如图 2 所示。可见, 颗粒的

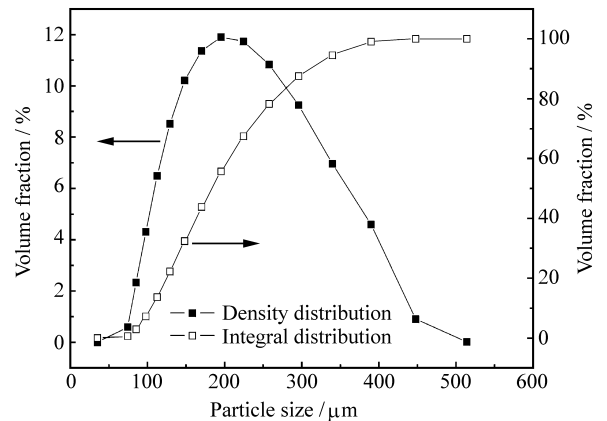


图2 Terfenol-D 颗粒粒径分布

Fig. 2 Particle size distribution of Terfenol-D

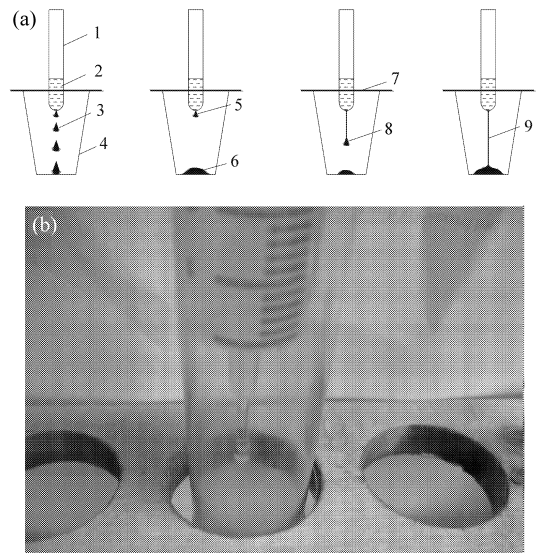
粒径在 $30\sim 500\ \mu\text{m}$ 之间。对初始宽分布的颗粒过筛后,得到 5 种窄分布的颗粒: $30\sim 53\ \mu\text{m}$ 、 $53\sim 150\ \mu\text{m}$ 、 $150\sim 300\ \mu\text{m}$ 、 $300\sim 450\ \mu\text{m}$ 、 $450\sim 500\ \mu\text{m}$ 。基体材料采用不饱和聚酯树脂,其各组分质量比为不饱和聚酯树脂(FL-883):固化剂(过氧化甲乙酮溶液):促进剂(萘酸钴)=1000:10:3。

在制备磁致伸缩复合材料时,在树脂体系凝胶过程中沿试样轴向施加一定的取向磁场可以使磁致伸缩颗粒的易磁化方向向磁场方向旋转并形成链状的伪 1-3 型构型。已有研究表明,施加取向磁场可以有效地提高磁致伸缩复合材料的性能^[17-19]。上述工艺流程实现的关键是准确地测定树脂体系的凝胶时间:如果未等树脂凝胶即撤消取向磁场,则颗粒取向的有序结构不能保持,且沉降严重;如果在树脂凝胶长时间后仍未将复合体系转入固化炉中,则达不到高温固化的目的。常用测定树脂体系凝胶时间的方法主要包括仪器法、搅拌法和手动拉丝法。这些方法存在操作复杂或所测定凝胶时间粗糙的缺点。周祖福等基于 GB 7193.6-87 标准的理论基础,提出了一种简单易行的测定凝胶时间的方法^[20],其装置如图 3 所示。称取适量树脂体系,置于底部有小孔的管状容器中,使胶液在自重作用下沿小孔滴出。出现如图 3 所示的 3 种情况(胶液刚出小孔不再下落,液滴带动上部凝胶物形成丝线悬在空中不再下落,液滴与滴落在下容器中的凝胶物连成线不再移动)之一,即认为达到凝胶终点,从胶液配好凝胶终点的时间即为凝胶时间。经上述方法测定,本实验所采用的树脂体系其室温下凝胶时间为 30 min。

1.2 试样制备

根据实验目的,分别采用 5 种窄分布的颗粒($30\sim 53\ \mu\text{m}$ 、 $53\sim 150\ \mu\text{m}$ 、 $150\sim 300\ \mu\text{m}$ 、 $300\sim 450\ \mu\text{m}$ 、 $450\sim 500\ \mu\text{m}$)和 1 种宽分布的颗粒($30\sim 500\ \mu\text{m}$)制备颗粒体积分数为 20% 的不饱和聚酯树脂基磁致伸缩复合材料。

在制备材料前,将 Terfenol-D 颗粒置于丙酮溶液中采用超声分散,烘干待用。然后将颗粒与低黏度的树脂体系混合均匀并转入模腔尺寸为 $\Phi 10\ \text{mm}\times 25\ \text{mm}$ 的硬铝模具,通过电磁场系统沿其轴向施加 $30\ \text{kA/m}$ 的取向磁场,直到复合体系中的树脂凝胶。此时,由于树脂黏度迅速增大,撤消磁场后,分散于其中的 Terfenol-D 颗粒也无法旋转或沉降,混合体系基本稳定。然后将稳定的复



1—Tubular container with a small pore on its bottom;
2—Liquid resin system; 3—Dropping liquid resin;
4—Container; 5—Gelled resin droplet; 6—Gelled resin;
7—Isolation board; 8—Gelled resin droplet suspended in air;
9—Gelled resin line.

图 3 凝胶装置(b)及凝胶终点情况(a)

Fig. 3 Gel time testing system (b) and various cases of gel point sketch map (a)

合体置于烘箱中高温固化。一定时间后取出,待冷却后脱模,制得树脂基磁致伸缩复合材料。在试样纵向两侧粘贴 $1\ \text{mm}\times 1\ \text{mm}$ 的电阻应变片,以测定材料的磁致伸缩应变,如图 4 所示。

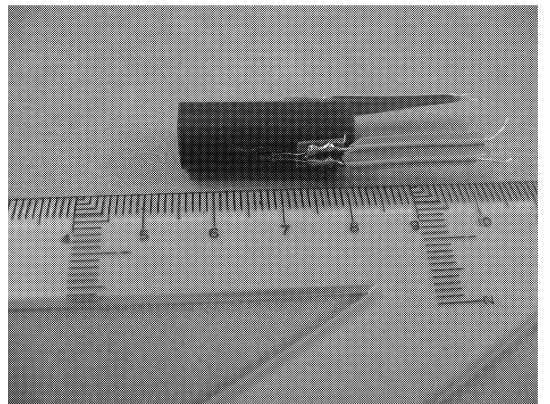
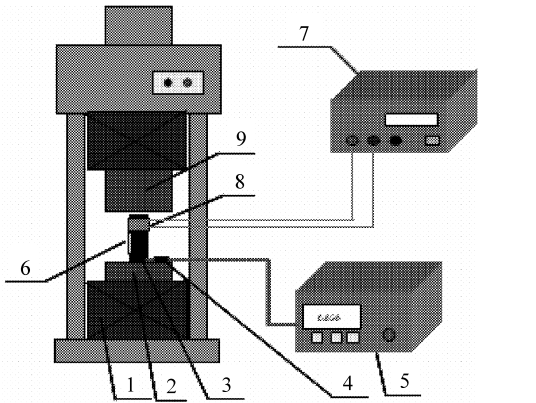


图 4 磁致伸缩复合材料试件照片

Fig. 4 Photo of magnetostrictive composites specimen

2 树脂基磁致伸缩复合材料性能参数及其测量

磁致伸缩复合材料的静态磁致伸缩系数 λ 可由应变仪直接测得^[21]。测试装置如图 5 所示,包括 PEM-1022LS 磁场系统、YE2537 程控静态应变



1—Electric coil; 2—Specimen; 3—Lower magnetic pole;
4—Hole probe; 5—Magnetometer; 6—Strain gauge;
7—Magneto flux meter; 8—Search coil; 9—Upper magnetic pole.

图5 动静磁致伸缩性能测试装置

Fig. 5 Sketch of magnetostrictive properties testing system

仪、CST-II A 型特斯拉计和数字磁通计。PEM-1022LS 磁场系统由电磁铁和稳恒电流源两部分组成。电磁铁采用四柱、水冷式结构，其主要技术参数如下：极面直径 80 mm；工作气隙 0~60 mm 连续可调；工作电流 0~15 A。

动态磁致伸缩系数可由下式求得：

$$d_{33} = \left(\frac{\partial \lambda}{\partial H} \right)_\sigma \quad (1)$$

式中： λ 为磁致伸缩应变； H 为磁场强度。式(1)表明， d_{33} 可由 $\lambda-H$ 曲线求导获得^[22]。

磁机械耦合系数是评估磁致伸缩复合材料的重要参数之一，其物理意义为输出机械能与输入磁场能的比值。根据定义可以推得磁机械耦合系数

$$k_{33}^2 = \frac{\text{输出机械能}}{\text{输入磁场能}} = \frac{d_{33}^2}{S^H \mu_{r33} \mu_0} \quad (2)$$

式中： S^H 为样品的柔顺系数； μ_0 为真空磁导率(取 $4\pi \times 10^{-7}$ A/m)； μ_{r33} 为试样相对增量磁导率。此方法需要测定电磁场与应力场共同作用下的其它参数，因此测量过程比较复杂，误差大。

对于本文中的棒状样品，其磁机械耦合系数亦可由共振频率法简便测得^[23]，即

$$k_{33} = \sqrt{\frac{\pi^2}{8} \left(1 - \frac{f_r^2}{f_a^2} \right)} \quad (3)$$

式中： f_r 、 f_a 分别为材料轴向共振频率与反共振频率，可由阻抗频率谱分析得到。采用的仪器为 SII260 阻抗分析仪。将材料置于双螺线管中，其中，内螺线管内径为 12 mm，长度为 60 mm，在其上缠绕单层 80 匝的线圈，接阻抗分析仪，扫频电流为 1 mA，扫频步长为 50 Hz；外螺线管内径为 18 mm，外径为 66 mm，长度为 60 mm，在其上缠绕 830 匝线圈，通过直流电源来提供一定的偏磁场。

磁致伸缩复合材料在无磁场条件下的弹性模量及抗压强度在小型材料力学性能实验机上测得。

3 实验结果

3.1 磁致伸缩性能

图 6 为采用不同粒度分布颗粒所制备的磁致伸缩复合材料磁致伸缩系数与磁场强度关系曲线及饱和磁致伸缩系数。由图 6(a)可以看出，5 种窄分布颗粒中，颗粒粒径在 53~150 μm 之间的试样具有最大的静态磁致伸缩系数。而采用宽分布的颗粒

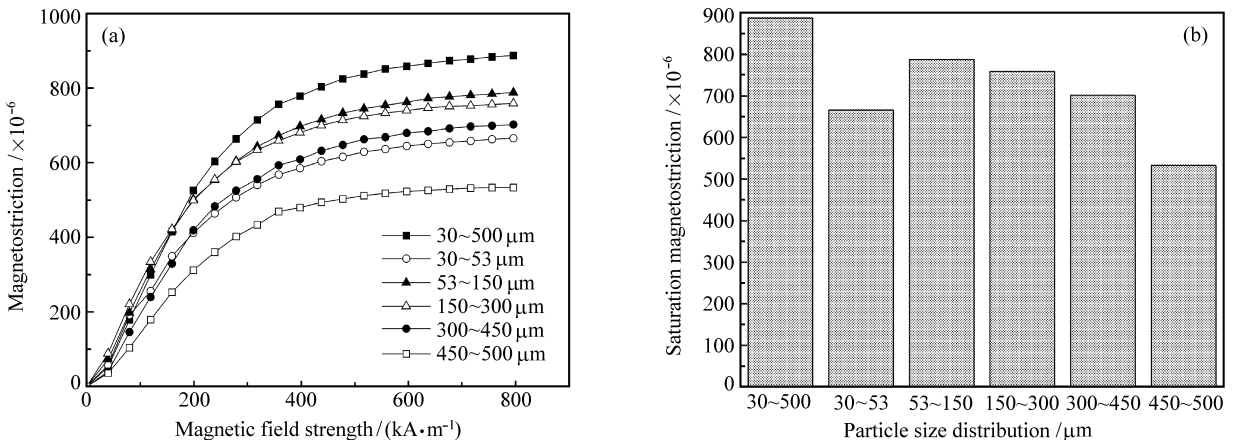


图6 采用不同粒度分布颗粒所制备的磁致伸缩复合材料的静态磁致伸缩性能

Fig. 6 Static magnetostrictive properties of specimens prepared with particles of different size distributions

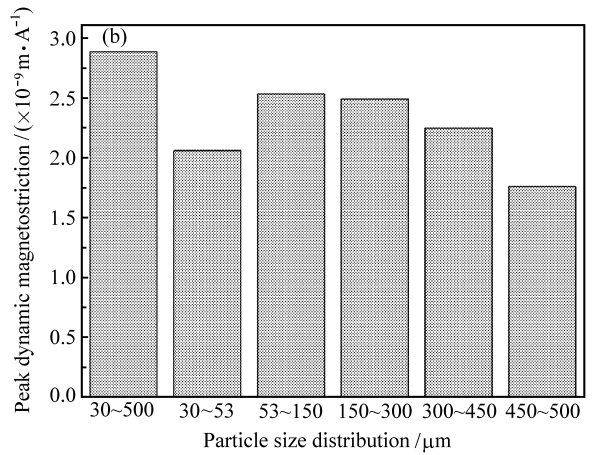
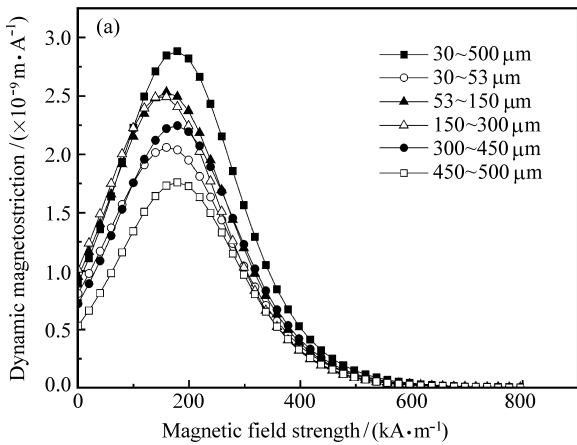


图7 采用不同粒度分布颗粒所制备的磁致伸缩复合材料的动态磁致伸缩性能

Fig. 7 Dynamic magnetostrictive properties of specimens prepared with particles of different size distributions

(30~500 μm)所制备的试样其磁致伸缩系数大于所有采用窄分布颗粒所制备的试样。各试样饱和磁致伸缩系数的比较如图 6(b)所示, 由图 6(b)可以更明显地看出这一规律。就平均粒径而言, 由 5 种窄分布颗粒复合材料对比看出, 饱和磁致伸缩系数随平均粒径的增大而先增大后减小, 当平均粒径为 102 μm (粒度分布为 53~150 μm)时达到最大。

图 7 为各试样动态磁致伸缩系数随磁场强度的变化曲线及最大动态磁致伸缩系数比较。由图 7(a)可以看出, 窄分布颗粒复合材料中, 采用 53~150 μm 颗粒制备的复合材料其峰值动态磁致伸缩系数最大。而采用宽分布颗粒所制备的试样, 其峰值动态磁致伸缩系数优于所有采用窄分布颗粒所制备的试样。图 7(b)更明显地反应了这一规律。

3.2 磁机械耦合系数

图 8 为采用不同粒度分布颗粒所制备磁致伸缩复合材料在 42 kA/m 偏磁场下磁机械耦合系数对比。由图 8 可以看出, 5 种采用窄分布颗粒的试样中, 采用 150~300 μm 颗粒所制备的复合材料其磁机械耦合系数最大, 采用宽分布颗粒所制备的复合材料其磁机械耦合系数略小于该试样。

3.3 力学性能

采用不同粒度分布颗粒所制备的磁致伸缩复合材料其力学性能不同, 如图 9 所示。由图 9(a)可以看出, 窄分布颗粒复合材料试样中, 采用粒径在 450~500 μm 之间的颗粒所制备的试样具有较大的弹性模量。而由图 9(b)可以看出, 采用不同粒度分布的颗粒所制备的磁致伸缩复合材料其抗压强度相差不大。

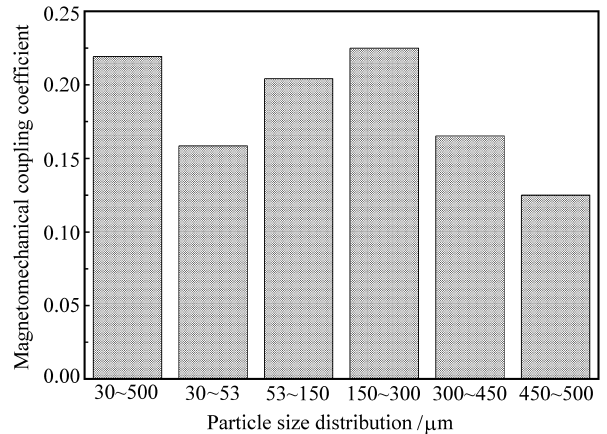


图8 采用不同粒度分布颗粒所制备的磁致伸缩复合材料在 42 kA/m 偏磁场下磁机械耦合系数

Fig. 8 Magnetomechanical coupling coefficient of magnetostrictive composites prepared with particles of different size distributions at bias field of 42 kA/m

4 结果分析与讨论

通过实验可知, 对采用窄分布颗粒所制备的磁致伸缩复合材料, 其动态磁致伸缩系数随颗粒平均粒径增大而先增大后减小。而 Lim 等学者认为磁致伸缩复合材料的饱和磁致伸缩系数随颗粒粒径的增大而增大。事实上, 得出以上结论的学者们所采用的颗粒粒径较小, 而本文中实验证明, 在小粒径范围内, 磁致伸缩系数确实随颗粒平均粒径的增大而减小。其实在 Lim 的实验中, 采用平均粒径为 165 μm 颗粒所制备的试样其饱和磁致伸缩系数及动态磁致伸缩系数均小于采用平均粒径为 125 μm

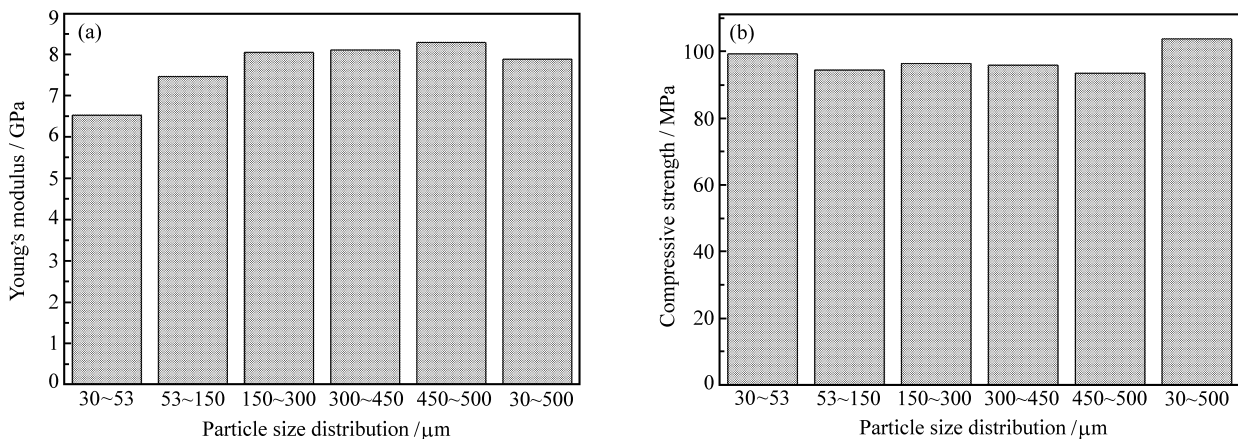


图9 采用不同粒度分布颗粒所制备的磁致伸缩复合材料弹性模量及抗压强度比较

Fig. 9 Mechanical properties of magnetostrictive composites prepared with particles of different size distributions

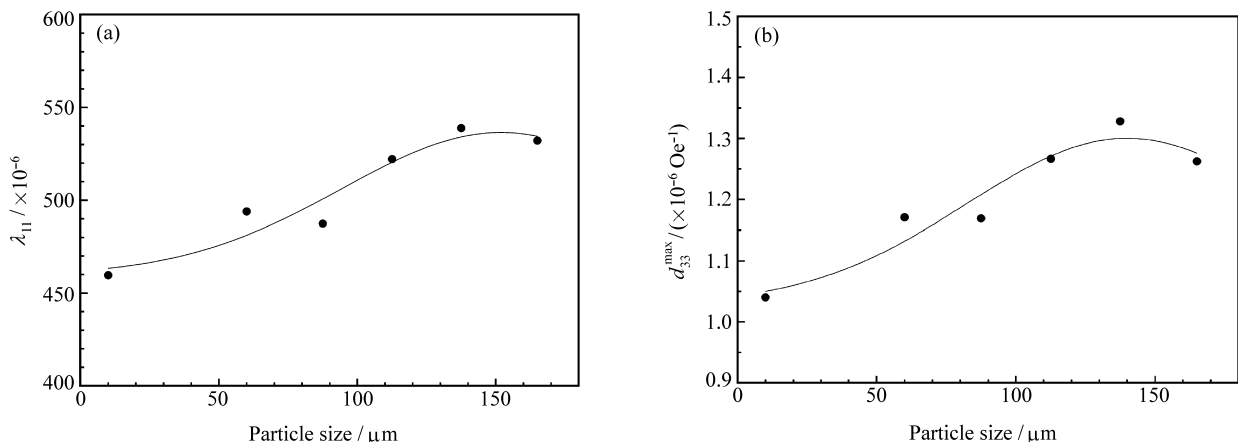


图10 文献[6]中动静磁致伸缩系数随颗粒平均粒径的变化

Fig. 10 Dependence of dynamic and static magnetostriction on average particle size in reference [6]

颗粒所制备的试样(如图10所示),而这一点在实验结果分析中被他们忽略了^[9]。

曾有学者指出颗粒粒径的增大对提高复合材料的磁致伸缩系数等具有积极的作用,但他们忽视了粒径增大亦有一些消极的作用:(1)大粒径颗粒的长径比较小,如图11所示,而理论分析表明长径比越小,磁致伸缩复合材料的磁致伸缩系数越小;(2)对于 $\text{Tb}_x\text{Dy}_{1-x}\text{Fe}_2$ 合金颗粒,当Tb的比例(x)大于0.3时,在粒径较小的颗粒群中单晶颗粒出现的几率非常大,制备复合材料过程中施加磁场可以使这些单晶在 $\langle 111 \rangle$ 方向一致取向,从而使复合材料具有更好的磁致伸缩性能。

本文中的实验结果证明,颗粒粒径对复合材料磁致伸缩性能的影响取决于颗粒增大两方面的作用哪一个居于主导。在小粒径范围内,随颗粒平均粒

径增大,空隙率减少、氧化成分减少等积极作用居于主导地位,导致复合材料的磁致伸缩性能在此范围内随粒径增大而增大;在大粒径范围内,随颗粒平均粒径增大,单晶颗粒减少、颗粒长径比减少等消极作用居于主导地位,导致复合材料的磁致伸缩性能在此范围内随粒径增大而减少。至于采用宽分布的颗粒具有更优的磁致伸缩性能,其原因可能是综合了不同粒径颗粒的优点,且多种粒径的颗粒有利于磁致伸缩颗粒更充分地弥散于基体材料中,最大限度地减少孔隙率^[15]。

颗粒粒径对磁机械耦合系数的影响比较复杂。这是因为由式(3)可知,磁机械耦合系数受复合材料动态磁致伸缩系数、柔顺系数及磁导率的影响,而这3个参数均受偏磁场的影响。

颗粒粒径对磁致伸缩复合材料弹性模量和抗压

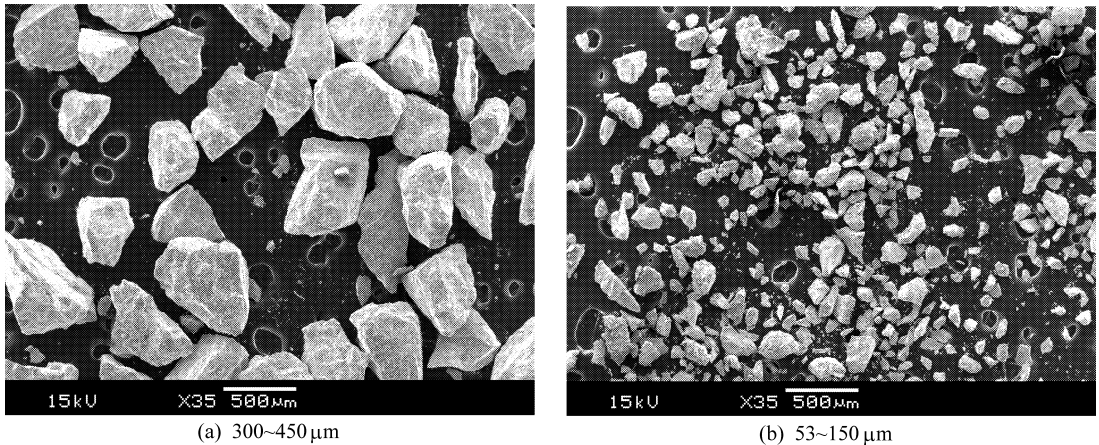


图 11 不同粒度分布颗粒的形态

Fig. 11 Micrograph of magnetostrictive particles of different size distributions

强度的影响无明显的规律性。采用不同粒径颗粒所制备的复合材料其力学性能相差不大。

5 结论

(1) 对采用窄分布 $Tb_{0.3}Dy_{0.7}Fe_2$ 颗粒制备的颗粒体积分数为 20% 的树脂基磁致伸缩复合材料, 其动静态磁致伸缩系数随颗粒平均粒径增大而先增大后减小, 颗粒粒径在 $53 \sim 150 \mu m$ 之间的试样具有最大的静态磁致伸缩系数, 为 788×10^{-6} 。

(2) 采用宽分布颗粒 ($30 \sim 500 \mu m$) 所制备的试样其磁致伸缩系数大于所有采用窄分布颗粒所制备的试样, 为 887×10^{-6} 。

(3) 颗粒粒径增大既具有积极作用也具有消极作用, 其对复合材料磁致伸缩性能的影响取决于哪一个居于主导地位。

参考文献:

- [1] Sandlund L, Fahlander M, Clark A E. Magnetostriction, elastic moduli, and coupling factors of composite Terfenol-D [J]. *J Appl Phys*, 1994, 75(10): 5656-5659.
- [2] Manwaring C A F, Jones D G R, Ruiz de Angulo L, Harris I R. Hydrogen absorption characteristics of the giant magnetostrictive compound $Tb_{0.27}Dy_{0.73}Fe_2$ [J]. *Z Phys Chem Bd*, 1993, 179(1/2): 133-135.
- [3] Anjanappa M, Wu Y. Magnetostrictive particulate actuators: Configuration, modeling and characterization [J]. *Smart Mater Struct*, 1997, 6(4): 393-402.
- [4] 关新春, 董旭峰, 欧进萍. 热残余应力对树脂基磁致伸缩复合材料动静态磁致伸缩性能的影响 [J]. *复合材料学报*, 2008, 25(1): 11-16.
Guan Xinchun, Dong Xufeng, Ou Jinping. Effects of thermal

stress on magnetostrictive properties of polymer-bonded Terfenol-D composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2008, 25(1): 11-16.

- [5] 胡 渊, 龚国斌, 曹东升, 江洪建, 万建国. 压电/磁致伸缩/环氧树脂层复合材料的磁电效应及其频响特性 [J]. *复合材料学报*, 2007, 24(4): 29-33.
Hu Yuan, Gong Guobin, Cao Dongsheng, Jiang Hongjian, Wan Jianguo. Magnetolectric effect and its frequency response for PZT/Terfenol-D/epoxy laminate composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2007, 24(4): 29-33.
- [6] 江民红, 顾正飞, 成 钢. 树脂基稀土-铁系超磁致伸缩复合材料的磁致伸缩及其高频磁性 [J]. *复合材料学报*, 2008, 25(4): 73-77.
Jiang Minhong, Gu Zhengfei, Cheng Gang. Magnetostriction and its high frequency magnetic properties for polymer-matrix Re-Fe giant magnetostrictive composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2008, 25(4): 73-77.
- [7] Duenas T A, Carman G P. Experimental results for magnetostrictive composites [J]. *American Society of Mechanical Engineers, Aerospace Division (Publication) AD*, 1998, 57(1): 63-71.
- [8] Hudson J, Busbridge S C, Piercy A R. Magnetomechanical coupling and elastic moduli of polymer-bonded Terfenol-D composites [J]. *J Appl Phys*, 1998, 83(11): 7255-7257.
- [9] Lim S H, Kim S R, Kang S Y. Magnetostrictive properties of polymer-bonded Terfenol-D composites [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1999, 191(1/2): 113-121.
- [10] Pasquale M, Lim S H. High frequency magnetic properties of polymer-bonded Terfenol-D composites [J]. *J Appl Phys*, 1999, 85(8): 4633-4635.
- [11] 江民红, 徐 鹏, 顾正飞, 成 钢. 超磁致伸缩复合材料的静态弹性模量及抗压强度 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2005, 34(6): 912-915.
Jiang Minhong, Xu Peng, Gu Zhengfei, Cheng Gang. Static elastic modulus and compressive strength of giant

- magnetostrictive composites [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2005, 34(6): 912-915.
- [12] 张羊换, 王国清, 陈梅艳, 解伟, 江丽萍. 粘结 TbDyFe 合金的组织及磁致伸缩性能 [J]. *包头钢铁学院学报*, 2002, 21(1): 23-25.
Zhang Yanghuan, Wang Guoqing, Chen Meiyuan, Xie Wei, Jiang Liping. Microstructure and magnetostrictive property of bonding TbDyFe alloy [J]. *Journal of Baotou University of Iron and Steel Technology*, 2002, 21(1): 23-25.
- [13] 梁伟, 刘冬欢. 磁致伸缩铺层阻尼板壳结构的振动分析 [J]. *复合材料学报*, 2006, 23(6): 186-191.
Liang Wei, Liu Donghuan. Vibration analysis of laminated shells with magnetostrictive and viscoelastic layers [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2006, 23(6): 186-191.
- [14] 闫久春. Terfenol-D 复合材料磁致伸缩效应数值模拟及定量评价 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2002: 68-80.
Yan Jiuchun. Numerical simulation and quantitative evaluation for magnetostrictive effect of Terfenol-D composites [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2002: 68-80.
- [15] Duenas T A, Carman G P. Particle distribution study for low-volume fraction magnetostrictive composites [J]. *J Appl Phys*, 2001, 90(5): 2433-2439.
- [16] 王建冲, 张茂才, 周寿增. 巨磁致伸缩合金 Tb-Dy-Fe 近似单晶颗粒在磁场中的取向 [J]. *中国稀土学报*, 2006, 24(1): 148-150.
Wang Jianchong, Zhang Maocai, Zhou Shouzheng. Orientation of approximate single-crystal particles of giant magnetostrictive alloy Tb-Dy-Fe in magnetic field [J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 2006, 24(1): 148-150.
- [17] Or S W, Nersessian N, Carman G P. Dynamic magnetomechanical behavior of Terfenol-D/epoxy 1-3 particulate composites [J]. *IEEE Transaction on Magnetics*, 2004, 40(1): 71-77.
- [18] 董旭峰, 关新春, 欧进萍. 1-3 型环氧基磁致伸缩复合材料性能 [J]. *复合材料学报*, 2008, 25(3): 45-50.
Dong Xufeng, Guan Xinchun, Ou Jinping. Static and dynamic properties of Terfenol-D/epoxy 1-3 magnetostrictive composites [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2008, 25(3): 45-50.
- [19] Duenas T A, Carman G P. Large magnetostrictive response of Terfenol-D resin composites [J]. *J Appl Phys*, 2000, 87(9): 4696-4700.
- [20] 徐任信, 周祖福, 王金钧. 测定凝胶时间的新方法 [C]// 玻璃钢学会第十三届全国玻璃钢/复合材料学术年会论文集. 苏州: 中国硅酸盐学会, 1999: C9.
Xu Renxin, Zhou Zufu, Wang Jinjun. New method to determine gel time [C]// 13th Annual Academic Conference on FRP/CM. Suzhou, China: The Chinese Ceramic Society, 1999: C9.
- [21] 王博文, 张智祥, 翁玲, 等. 巨磁致伸缩材料磁机械耦合系数的测量 [J]. *河北工业大学学报*, 2002, 31(4): 1-4.
Wang Bowen, Zhang Zhixiang, Weng Ling, et al. Measurement of magnetomechanical coupling coefficient for giant magnetostrictive materials [J]. *Journal of Hebei University of Technology*, 2002, 31(4): 1-4.
- [22] Nersessian N, Or S W, Carman G P. Magneto-thermo-mechanical characterization of 1-3 type polymer-bonded Terfenol-D composites [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2003, 263(1/2): 101-112.
- [23] Or S W, Carman G P. Dynamic magnetoelastic properties of epoxy-bonded Terfenol-D particulate composite with a preferred [112] crystallographic orientation [J]. *IEEE Transaction on Magnetics*, 2005, 41(10): 2790-2792.