

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2021.12.010

基于有限元法的碳纳米管增强环氧树脂 复合材料力学性能预测

孙祺, 宋兆波, 李云龙

(汕头大学土木与环境工程系, 广东汕头 515063)

摘要: 通过 Python 二次开发随机吸附性算法 (RSA), 建立三维随机分布碳纳米管增强环氧树脂复合材料的代表体积元有限元模型 (RVE), 采用有限元方法对 RVE 进行均匀化计算, 分别对横观各向同性的纳米填料和各向同性的基体进行材料属性赋予和网格划分, 得到不同纳米填料体积分数的 RVE 的有效拉伸弹性模量及剪切弹性模量, 并与 Mori-Tanaka 方法得到的理论弹性模量对比。结果表明, 该方法可较为准确地预测纳米填料增强复合材料的弹性模量, 误差在 5.4% 以内, 剪切弹性模量预测误差最小值为 0.54%。通过 Abaqus 进行动力学分析, 提取 RVE 的固有频率和振型, 证明 RVE 的固有频率随纳米填料体积分数的提高而上升。RVE 对低体积分数的纳米填料增强复合材料具有较好的预测效果, 为构建纳米填料随机分布的复合材料提供了更为真实有效的模型。

关键词: 纳米填料; 复合材料; 有限元模型; 力学性能; 动力学

中图分类号: TB33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2021)12-0055-06

Prediction of Mechanical Properties of Carbon Nanotube Reinforced Epoxy Resin Composites based on Finite Element Method

Sun Qi, Song Zhaobo, Li Yunlong

(Department of Civil and Environmental Engineering, Shantou University, Shantou 515063, China)

Abstract : The representative volume element finite element model (RVE) of three-dimensional randomly distributed carbon nanotubes reinforced epoxy resin composites was established through Python's secondary development random adsorption algorithm (RSA). The RVE was homogenized by the finite element method, and the material properties and mesh were given to the transversely isotropic nano filler and isotropic matrix respectively, the effective tensile elastic modulus and shear elastic modulus of RVE with different volume fraction of nano filler were obtained and compared with the theoretical elastic modulus obtained by Mori-Tanaka method. The results show that this method can accurately predict the elastic modulus of nano filler reinforced composite, the error is less than 5.4%, and the minimum prediction error of shear elastic modulus is 0.54%. Through the dynamic analysis of Abaqus, the natural frequency and vibration mode of RVE were extracted. It is proved that the natural frequency of RVE increases with the increase of nano filler volume fraction. RVE has a good prediction effect on low volume fraction nano filler reinforced composite, and provides a more real and effective model for the construction of composite with random distribution of nano fillers.

Keywords : nano filler ; composite ; finite element model ; mechanical property ; dynamics

近年来, 纳米材料的出现促进了人们对高性能、多功能复合材料的探索, 纳米增强复合材料具有质轻、强度高特点, 广泛应用于航空航天、汽车制造、电子和化工领域^[1]。由于纳米增强复合材料的

加工制造和实验工序复杂, 有些产品并不符合最初的性能期望^[2-3], 人们需要对复合材料性能有准确的预测, 以此评估并提高产品质量, 预测非均匀材料宏观力学性能的重点在于将其本构模型与细观成分的

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (51903148), 广东省基础与应用基础研究基金项目 (2021A1515012273), 汕头大学科研启动基金项目 (NTF19018)

通信作者: 李云龙, 博士, 从事纳米高分子复合材料多尺度方法开发与应用

收稿日期: 2021-10-14

引用格式: 孙祺, 宋兆波, 李云龙. 基于有限元法的碳纳米管增强环氧树脂复合材料力学性能预测 [J]. 工程塑料应用, 2021, 49(12) : 55-60.

Sun Qi, Song Zhaobo, Li Yunlong. Prediction of mechanical properties of carbon nanotube reinforced epoxy resin composites based on finite element method[J]. Engineering Plastics Application, 2021, 49(12) : 55-60.

微观非均匀性联系起来^[4]。

以碳纳米管为例,碳纳米管作为一种常用的纳米材料,具有良好的力学、导电、导热性能及热稳定性等,与环氧树脂基质混合后,能显著提高其拉伸性能和弯曲性能。但是纳米材料的实验表征复杂、过程较长且成本较高^[5-6],同一种纳米材料的力学性质并不统一,例如碳纳米管的轴向拉伸弹性模量在0.3~4.0 TPa之间,同一材料的力学性能实验结果通常与理论有出入^[7],给预测复合材料力学性能带来困难。

传统多相复合材料弹性模量的预测理论有Mori-Tanaka法(简称M-T法)^[8]、Halpin-Tsai半经验法^[9]、自洽法^[10]等,学者们在进行复合材料分析设计时,如果把微观尺度的填料组分看作宏观组分研究,将带来巨大的计算量,甚至无法分析。因此,基于填料和基体的微观布局方式,建立各组分参数微观的本构关系,进而将微观代表体积元的应力和应变平均化处理,获得平均意义上的宏观等效性能。但是,一方面,传统细观力学理论对于不同体积分数、不同填料分布等情况,应当对应不同的模型,不具有普遍适用性;另一方面,不能通过理论方法得到材料细观层次的应力和应变分布及其它动力学等特征,计算结果精度有限,对于复杂微观结构或者是非线性问题,难以提供有效预测精度。虽然自洽模型和M-T法都具有数学上的完美性,但是它们都假设夹杂形状为椭球体,这对于工程实际是一个很强的制约。

随着计算能力的提高,有限元理论作为一种更通用的工具已被广泛应用于预测性能。更重要的是,随着建模精度的提高,有限元法对复合材料性能的预测精度能得到明显提高。另外,有限元模拟结果还可以提供复合材料的微观结构状态。但是,以往的一些复合材料模型,忽略了纳米填料的横观各向同性力学性质,将纳米填料与基体都视为各向同性材料来计算复合材料的弹性模量,不具有代表性。

笔者研究的目的是实现纳米复合材料更真实地建模,以研究其弹性性能。通过开发随机吸附性算法(RSA)^[11-15],改进球形概率空间,生成纳米填料增强复合材料代表体积元(RVE)的有限元模型。选取适当尺寸的RVE模型,设立六种静力加载工况,分别对应X、Y、Z三个方向的拉伸和XY、YZ、ZX三个面向的剪切。通过对均匀应力、应变边界条件的对比,验证了RVE收敛性与边界条件和RVE尺

寸之间的关系。计算得到了RVE的拉伸弹性模量、剪切弹性模量,并与M-T理论计算的弹性模量结果进行了对比。最后,通过动力学分析了不同纳米填料含量对RVE固有频率和振型的影响。

1 有限元模型的构建

利用有限元方法构造复合材料RVE模型是模拟其性能的有力工具,这种方法为实现不同复合材料的复杂形貌和微观结构提供了通用性。为了对碳纳米管增强环氧树脂进行计算实验,笔者构建了一系列三维RVE模型,将复合材料的几何参数、纤维数量、材料的本构关系作为输入参数。采用RSA方法构建了随机分布纳米填料增强复合材料的有限元模型(RVE)。在主算法下,取模型内一随机数坐标(x, y, z)作为纤维起点,生成随机方向向量(a, b, c),通过点和角度在给定直径的圆形截面扫过点阵以生成新纤维。通过子程序判断与已放置的纤维是否相交,如果相交则删除纤维并重新生成,直到纤维不再相交为止。为了实现具有几何周期性的RVE模型,即单胞中纤维从边界伸出的同时又会在对立边界伸进单胞,先以单胞模型为中心,生成 $3 \times 3 \times 3$ 个重复单胞模型,接着将中心单胞模型周围的26个单胞删除,通过截断纤维并组装纤维和基体,以此生成RVE模型,其流程图如图1所示。引入最近邻约定来实现周期性相交判断,即任意一个点,只与一个“最近邻”的点或邻近周期的点发生相交判断,其是通过判断离谁的距离更近来实现的。设元胞边长为 m ,当在同一元胞中的两根纤维之间最小距离 $l > (m/2)$ 时,则令纤维相交判断距离 $L=m-l$,否则仍然为 $L=l$ 。再判断纤维相交判断距离是否小于两倍纤维半径,如果是,则纤维相交。以此可以在满足几何周期性条件下实现纤维的相交判断。在确定纤维随机方向时,采用传统立方体概率空间生成随机方向向量,这样使得纤维朝向立方体对角线处的概率增大。采用球形概率空间生成随机方向向量,使得纤维朝向所有方向的概率相等。最终生成的RVE模型如图2a所示。

使用商业有限元软件Abaqus进行模拟,采用二次四面体网格(C3D10)对有限元模型进行网格划分,经过试验,采用直径为10 nm、长度为400 nm的碳纳米管在尺寸为400 mm×400 mm×400 mm的环氧树脂基体中能够得到稳定、均质且易于划分的网格,种子密度取15~30 nm,生成200万~600万个单元,划分网格后如图2b所示。RVE的弹性

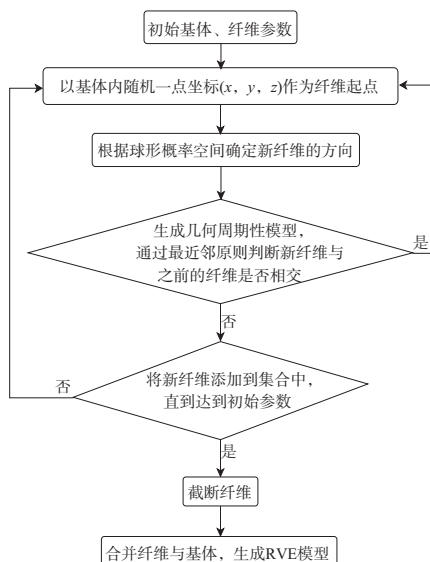
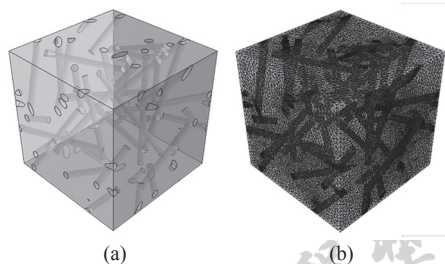


图1 RSA算法生成RVE模型流程图



a—RVE模型; b—C3D10网格划分后的RVE模型

图2 RVE模型及C3D10网格划分后的RVE模型

模量计算是通过建立耦合节点来实现的。对于弹性模量,在特定表面上指定耦合节点,并在耦合节点处施加位移,耦合点处的反作用力是在受影响边界节点处产生的相关方向边界节点力的总和。将反作用力除以受影响表面的面积,得到与规定应变相对应的应力,然后用得到的应力除以已知应变来计算拉伸弹性模量。对于剪切弹性模量,通过将剪应力除以对应方向的剪应变得到,在这里,剪应力是通过从任意一个面上指定的耦合点反作用力中提取相关方向边界节点力之和除以影响面积来计算得到的。由于碳纳米管是随机分布的横观各向同性材料,其刚度矩阵会随着不同碳纳米管的朝向而随坐标系发生变换。在赋予材料属性时,通过Python,根据碳纳米管朝向为每根碳纳米管定义单独的局部坐标系。当纳米管的方向改变时,相同的横观各向同性刚度矩阵被定义在不同碳纳米管的局部坐标系上,以此赋予碳纳米管横观各向同性材料的属性。

2 结果与讨论

2.1 边界条件对比

目前,有三种广泛使用的边界条件可用于计

算均匀化过程,线性位移(LD)边界条件、均匀应力(UT)边界条件和周期性(PR)边界条件,根据细观力学均匀化方法得到:

$$u_i(S) = \varepsilon_{ij}^0 x_j \quad (1)$$

$$T_i(S) = \sigma_{ij}^0 n_j \quad (2)$$

式中: $u_i(S)$, $T_i(S)$ ——分别为边界 S 的位移、面力;

ε_{ij}^0 , σ_{ij}^0 ——常数;

x_j ——长度坐标;

n_j ——边界 S 的外法线向量;

i, j ——1, 2, 3。

式(1)、式(2)分别代表均匀应变边界条件和均匀应力边界条件。

在研究中,分别对边长为 400 nm, 600 nm, 800 nm 的 RVE 模型施加 LD 和 UT 两种边界条件,边界条件对比如图 3 所示。可以看出,随着 RVE 尺寸的增加,LD 和 UT 对应的弹性模量逐渐靠近并趋于同一值。由文献 [16] 可知,LD 和 UT 可以分别提供弹性材料常数的上限和下限,该结果显示 LD 和 UT 提供的纳米复合材料弹性模量的上限和下限非常接近,小于最大许可误差 δ (5%),故在 LD 和 UT 方法下得到的弹性模量数值接近于理想的周期性边界条件。考虑到 RVE 内含纳米填料多且贯穿基体边界,划分网格后节点数目过多,无法做到节点一一对应,而对于低体积分数的代表体积元,LD 和 UT 方法提供了足够的计算精度,因此不需要应用周期性边界条件^[17]。为划分网格方便,RVE 尺寸设定为 400 nm × 400 nm × 400 nm。

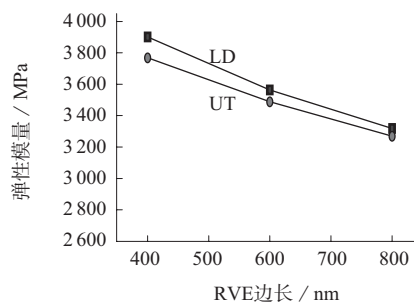


图3 不同基体尺寸下边界条件对比

2.2 弹性模量对比

弹性模量的有限元模拟在六种静力工况下进行,在计算拉伸弹性模量时,施加单轴 2.5% 的宏观应变,取三个方向弹性模量的平均值作为代表弹性模量。计算剪切弹性模量时,通过模拟纯剪切试验,在相对四个面分别施加 2.5% 的均匀应变边界条件,得到其中任意一个耦合点的节点反力,通过与整

体模型应变的比值得到剪切弹性模量。基于细观力学 M-T 理论,通过碳纳米管的五个独立弹性常数、环氧树脂弹性常数、碳纳米管的长径比、体积分数及三维随机分布,分别得到不同体积分数下复合材料弹性模量。细观组分材料参数见表 1。

表 1 细观组分材料参数

材料	E_1 / TPa	ν_{12}	G_{12} / TPa	K_{23} / TPa	G_{23} / TPa
碳纳米管	0.952	0.165	0.31	0.265	0.105
环氧树脂	0.003				

注: E_1 为轴向拉伸弹性模量, ν_{12} 为泊松比, G_{12} 为轴向剪切弹性模量, K_{23} 为体积弹性模量, G_{23} 为面内剪切弹性模量。

碳纳米管的工程常数可以通过式 (3)~式 (5) 计算^[18]:

$$E_2 = E_3 = \frac{4G_{23}K_{23}}{K_{23} + \psi G_{23}} \quad (3)$$

$$\nu_{23} = \frac{K_{23} - \psi G_{23}}{K_{23} + \psi G_{23}} \quad (4)$$

$$\psi = 1 + \frac{4K_{23}\nu_{12}^2}{E_1} \quad (5)$$

式中: $E_2=E_3$ ——径向拉伸弹性模量;

ν_{23} ——泊松比。

获得的碳纳米管的 9 个工程常数分别为: $E_1=0.952$ TPa, $E_2=E_3=0.272\ 178$ TPa, $\nu_{12}=\nu_{13}=0.165$, $\nu_{23}=-0.296\ 1$, $G_{12}=G_{13}=0.31$ TPa, $G_{23}=0.105$ TPa。碳纳米管的密度为 2.1 kg/m^3 。环氧树脂采用牌号 E51, 拉伸弹性模量为 3 GPa, 泊松比为 0.35, 密度为 1.16 kg/m^3 。

基于 M-T 理论,实际 RVE 中的每个夹杂物的行为就像它在实际基体中被分离一样,材料是无限大的,且施加了和远程应变一样的平均基体应变。M-T 模型在预测两相复合材料的有效性能方面非常成功。理论上,它仅限在夹杂物体积分数小于 25% 情况下给出良好预测。复合材料的刚度张量由式 (6)、式 (7) 确定^[19]。

$$L = L_1 + \nu_2(L_2 - L_1)T(\nu_1 I + \nu_2 T)^{-1} \quad (6)$$

$$T = [I + SL_1^{-1}(L_2 - L_1)]^{-1} \quad (7)$$

式中: L, L_1, L_2 ——分别代表复合材料、基体、纳米填料的刚度张量;

ν_1, ν_2 ——分别代表基体和纳米填料的体积分数;

I ——四阶单位张量;

T ——代表稀释应变集中张量;

S ——Eshelby 张量。

当在定义的主方向获得整体刚度矩阵后,通过转换矩阵获得其它方向纳米填料复合材料的刚度矩

阵,纳米填料随机分布的复合材料的均匀弹性各向同性刚度矩阵 L^* 按 (8) 式计算。

$$L^* = N_\theta^T N_\varphi^T L N_\varphi N_\theta \quad (8)$$

式中: θ, φ ——定义纳米填料方向的欧拉角;

N_φ, N_θ ——转换矩阵。

建立不同纳米填料含量的 RVE 模型,纳米填料长度均为 400 nm,直径 10 nm。因为碳纳米管是随机分布于单胞模型中,填料位置、取向和角度都具有随机性,所以 RVE 模型可以近似作为均匀各向同性材料。通过有限元分别计算不同填料体积分数下 RVE 的拉伸弹性模量和剪切弹性模量,填料体积分数为 0.49%,0.98%,1.47%,1.96% 时, RVE 计算的拉伸弹性模量分别为 3 432.48,3 801.09,4 205.60,4 531.92 MPa, 剪切弹性模量分别为 1 224.4,1 329.5,1 553.03,1 635.78 MPa; M-T 理论得到的拉伸弹性模量分别为 3 329.5,3 659.7,3 991.5,4 323.8 MPa,剪切弹性模量分别为 1 238.9,1 367.5,1 497,1 627 MPa。将 RVE 结果与 M-T 结果进行对比,结果如图 4 和图 5 所示。

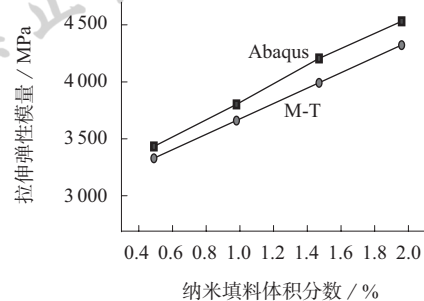


图 4 不同纳米填料体积分数的 RVE 和 M-T 拉伸弹性模量对比

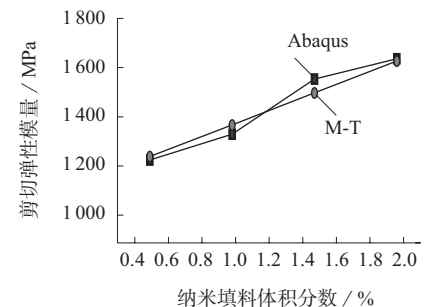


图 5 不同纳米填料体积分数的 RVE 和 M-T 剪切弹性模量对比

由图 4 可以看到,随着体积分数的增加,拉伸弹性模量呈线性上升,误差最小处为 3.09%,最大处为 5.36%。另外,随着体积分数增加, RVE 计算结果与 M-T 计算结果的误差逐渐增大,这是因为均匀应变边界条件下得到的拉伸弹性模量的代表值略高于周期边界条件下的代表值,且随机分布次数较少会造成误差,以及 M-T 计算结果随着纳米填料体积分数

增加导致计算结果偏小^[20]。由图 5 可以看到, RVE 计算的剪切弹性模量与 M-T 理论结果较为符合, 误差最小处为 0.54%, 最大处为 3.74%。综上所述, RVE 模型能够有效预测复合材料的弹性模量, 具有一定的精度, 能为较低体积分数的纳米填料增强复合材料弹性性能提供有效预测。

2.3 固有频率及振型

与传统材料相比, 复合材料具有高比强度、高比刚度等优点, 对其动力学进行分析具有重要的工程意义。结构振动的固有频率与初始条件无关, 而仅与其固有特性有关。当外界振动与固有频率相等时会出现共振, 损坏复合材料结构, 因此固有频率是一个必须考虑的重要因素。复合材料的固有频率越高, 其在脉冲荷载作用下抵抗变形的能力就越强。另外, 纳米填料含量对固有频率有较大影响。当提高复合材料中纳米填料的含量时, 可以明显提高复合材料的固有频率, 从而提高复合材料构件抵抗脉冲荷载变形的能力, 并且使其能在更高激励频率环境下工作而不易发生共振。

通过 Lanczos 特征值求解器计算尺寸为 $400\text{ cm} \times 400\text{ cm} \times 400\text{ cm}$ 的 RVE 模型的前 30 阶振型以及固有频率, 对模型底部施加固支边界条件, 对比不同纳米填料体积分数对固有频率的影响。不同纳米填料体积分数下 RVE 的前 30 阶固有频率如图 6 所示。

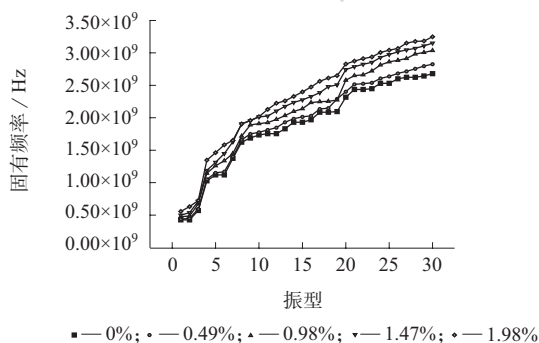
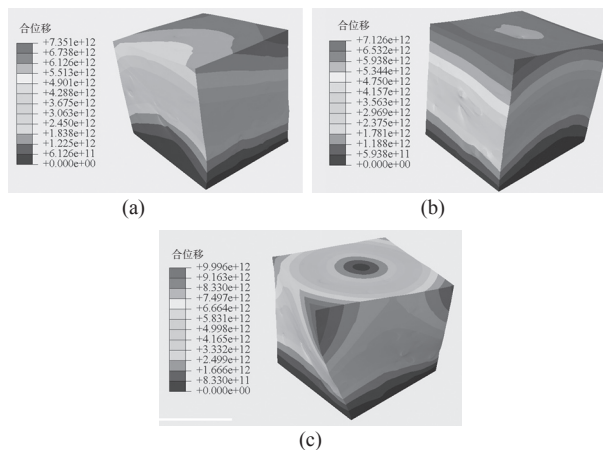


图 6 不同纳米填料体积分数下 RVE 的前 30 阶固有频率

从图 6 可以看出, 随着纳米填料体积分数的增加, RVE 的固有频率增大。例如, 在纳米填料体积分数为 1.96% 时, RVE 的前两阶固有频率分别为 $5.58 \times 10^8\text{ Hz}$ 和 $6.30 \times 10^8\text{ Hz}$, 纯基体的前两阶固有频率为 $4.27 \times 10^8\text{ Hz}$, 相比于纯环氧树脂, 复合材料的第一阶频率基体提高 30.7%, 第二阶频率提高 47.5%。因此, 碳纳米管体积分数对复合材料固有频率影响较大, 能显著改善脉冲荷载下抵抗变形的能力。

当碳纳米管体积分数为 1.96% 时, RVE 的前三阶振型图如图 7 所示。



a—第一阶振型图; b—第二阶振型图; c—第三阶振型图

图 7 纳米填料体积分数为 1.96% 的 RVE 的前三阶振型图

从图 7 可以看到, 当固有频率较小时, 第一、二阶振型图以垂直弯曲为主, 顶部位移较大, 随着固有频率升高, 第三阶振型图体现为绕 Y 轴扭转。

3 结论

基于细观力学均匀化理论结合有限元算法, 建立了预测纳米填料增强复合材料宏观力学参数的均匀化有限元计算方法, 通过 RVE 模型的建立, 能够更直观地看到复合材料的微观结构以及应力、应变分布, 并对不同体积分数的随机纳米填料增强复合材料宏观弹性力学参数进行计算, 得到以下结论:

(1) 纳米填料增强复合材料的宏观力学参数受纳米填料体积分数的影响较大, 均匀化有限元方法可以有效地表征代表体元元的拉伸弹性模量、剪切弹性模量, 计算结果较为准确。

(2) 在纳米填料体积分数较小情况下, RVE 与 M-T 计算结果接近, 能为较低体积分数的纳米填料增强复合材料弹性性能提供有效预测。

(3) 复合材料的固有频率随纳米填料体积分数增加有较大提升, 提高了其抵抗脉冲荷载变形能力。

(4) 均匀化有限元方法操作简便, 计算结果可靠, 能够适用于不同的填料和基体, 对不同种类的纳米填料增强复合材料的研究与弹性性能预测具有普遍适用性, 可为今后复合材料的多尺度分析奠定基础, 对工程材料的设计应用具有重要的参考价值。

参考文献

- [1] Pan Yi, Iorga L, Pelegri A A. Numerical generation of a random chopped fiber composite RVE and its elastic properties[J]. Composites Science and Technology, 2008, 68(13):2 792-2 798.
- [2] Alishahi E, Shadlou S, Doagou-Rad S, et al. Effects of carbon

- nanoreinforcements of different shapes on the mechanical properties of epoxy-based nanocomposites[J]. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2013, 298(6):670–678.
- [3] Doagou-Rad S, Islam A, Jensen J S. Influence of processing conditions on the mechanical behavior of MWCNT reinforced thermoplastic nanocomposites[J]. *Procedia CIRP*, 2017, 66:131–136.
- [4] Pan Yi, Iorga L, Pelegri A A. Analysis of 3D random chopped fiber reinforced composites using FEM and random sequential adsorption [J]. *Computational Materials Science*, 2008, 43(3):450–461.
- [5] Peng Bei, Locascio M, Zapol P, et al. Measurements of near-ultimate strength for multiwalled carbon nanotubes and irradiation-induced crosslinking improvements[J]. *Nat Nanotechnol*, 2008, 3(10):626–631.
- [6] Ding Weiqiang, Calabri L, Kohlhaas K M, et al. Modulus, fracture strength, and brittle vs. plastic response of the outer shell of arc-grown multi-walled carbon nanotubes[J]. *Experimental Mechanics*, 2006, 47(1):25–36.
- [7] Thostenson E T, Chou T-W. On the elastic properties of carbon nanotube-based composites:modelling and characterization[J]. *Journal of Physics D:Applied Physics*, 2003, 36(5).doi:10.1088/0022-3727/36/5/323.
- [8] Mori T, Tanaka K. Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions[J]. *Acta Metallurgica*, 1973, 21(5):571–574.
- [9] Fuchs C, Bhattacharyya D, Friedrich K, et al. Application of Halpin–Tsai equation to microfibril reinforced polypropylene/poly(ethylene terephthalate) composites[J]. *Instrumentation Science & Technology*, 2006, 13(4-6):331–344.
- [10] Hill R. A self-consistent mechanics of composite materials[J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1965, 13(4):213–222.
- [11] Pontefisso A, Mishnaevsky Jr L. Nanomorphology of graphene and CNT reinforced polymer and its effect on damage: Micromechanical numerical study[J]. *Composites Part B:Engineering*, 2016, 96:338–349.
- [12] Mishnaevsky Jr L, Dai Gaoming. Hybrid and hierarchical nano-reinforced polymer composites:Computational modelling of structure–properties relationships[J]. *Composite Structures*, 2014, 117:156–168.
- [13] Dai Gaoming, Mishnaevsky Jr L. Fatigue of multiscale composites with secondary nanoplatelet reinforcement:3D computational analysis[J]. *Composites Science and Technology*, 2014, 91:71–81.
- [14] Mishnaevsky Jr L, Dai Gaoming. Hybrid carbon / glass fiber composites: Micromechanical analysis of structure-damage resistance relationships[J]. *Computational Materials Science*, 2014, 81:630–640.
- [15] Pontefisso A, Zappalorto M, Quaresimin M. Effectiveness of the random sequential absorption algorithm in the analysis of volume elements with nanoplatelets[J]. *Computational Materials Science*, 2016, 117:511–517.
- [16] Almasi A, Silani M, Talebi H, et al. Stochastic analysis of the interphase effects on the mechanical properties of clay / epoxy nanocomposites[J]. *Composite Structures*, 2015, 133:1 302–1 312.
- [17] Fankhänel J, Arash B, Rolfes R. Elastic interphase properties of nanoparticle / epoxy nanocomposites:A molecular dynamics study[J]. *Composites, Part B:Engineering*, 2019, 176.doi:10.1016/j.compositesb.2019.107211.
- [18] Kundalwal S I, Choyal V. Transversely isotropic elastic properties of carbon nanotubes containing vacancy defects using MD[J]. *Acta Mechanica*, 2018, 229(6):2 571–2 584.
- [19] Benveniste Y. A new approach to the application of Mori-Tanaka's theory in composite materials[J]. *Mechanics of Materials*, 1987, 6(2):147–157.
- [20] 朱合华, 陈庆. 多相材料有效性能预测的高精度方法 [J]. *力学学报*, 2017, 49(1):41–47.
- Zhu Hehua, Chen Qing. An approach for predicting the effective properties of multiphase composite with high accuracy[J]. *Chinese Journal of Theoretical & Applied Mechanics*, 2017, 49(1):41–47.

优惠销售中国工程塑料复合材料技术研讨会《论文集》及论文集光盘

中国合成树脂供销协会加工与应用分会为了配合 2000 ~ 2019 年先后召开的中国工程塑料复合材料技术研讨会, 共编辑、出版了 20 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, 突出了我国工程塑料行业发展规划、热点分析。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, 现以优惠价格 (含邮费) 销售, 欢迎订阅。

1. 2004 ~ 2019 年中国工程塑料复合材料技术研讨会《论文集》, 优惠价 400 元 / 套。

2. 2000 ~ 2019 年中国工程塑料复合材料技术研讨会论文集光盘, 优惠价 300 元 / 盘。本光盘除收录 2000 ~ 2019 年 20 本《论文集》的全部内容外, 还包括约 3 300 人次的会议代表通讯录。

邮局汇款

收款地址: 山东济南市天桥区田庄东路 3 号

收款单位: 《工程塑料应用》编辑部

邮 编: 250031

电 话: (0531)85878223 85878057 85878278

传 真: (0531)85947355

银行汇款

户 名: 山东非金属材料研究所

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>