

# Property Analysis of Carbon Nanotube Composites with Agglomerations

Lichun Bian, Zhengmin Xue, Jing Pan, Wei Liu, Shurui Meng

Department of Engineering Mechanics, Yanshan University, Qinhuangdao Hebei  
Email: bianlic@126.com

Received: Nov. 3<sup>rd</sup>, 2016; accepted: Nov. 26<sup>th</sup>, 2016; published: Nov. 29<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

The carbon nanotubes could be the idealized composite reinforcements due to their better mechanics and physical properties. Carbon nanotube reinforced composites can be applied in the high technology fields of electronics and automation systems. But, if the agglomeration of carbon nanotubes induced easily in a matrix cannot be solved, a wide application for carbon nanotubes is impossible. In this paper, based on Mori-Tanaka method, the effects of the waviness and agglomeration on carbon nanotubes are analyzed quantitatively.

## Keywords

Carbon Nanotube, Composite, Effective Modulus, Agglomeration, Mori-Tanka Method

---

## 团聚效应碳纳米管复合材料特性分析

卞立春, 薛正敏, 潘静, 刘伟, 孟淑睿

燕山大学, 工程力学系, 河北 秦皇岛  
Email: bianlic@126.com

收稿日期: 2016年11月3日; 录用日期: 2016年11月26日; 发布日期: 2016年11月29日

---

## 摘要

碳纳米管具有优异的力学和物理性能, 使得碳纳米管成为理想的复合材料增强相。碳纳米管增强复合材

料可以在高端电子领域和自动化系统等领域发挥重要作用，但是如果无法解决碳纳米在基体中易团聚的趋势，碳纳米管的广泛应用将面临严峻的挑战。本文在Mori-Tanaka方法的基础上定量分析了碳纳米管的弯曲效应和团聚效应对碳纳米管的影响。

## 关键词

碳纳米管，复合材料，有效模量，团聚效应，Mori-Tanaka方法

## 1. 引言

碳纳米管具有优异的力学和物理性能，使得碳纳米管成为理想的增强相[1] [2] [3]。碳纳米管增强复合材料可以在高端电子领域和自动化系统等领域发挥重要作用，但是如果无法解决碳纳米在基体中易团聚的趋势，碳纳米管的广泛应用将面临严峻的挑战。碳纳米非常容易出现聚集现象，是由于碳纳米管径表面积和长径比都很大，使得碳纳米管之间的范德华力相对较大，使得它们相互吸引而聚集到一起。碳纳米管在基体中的分布受两种因素影响，第一：在碳纳米管与基体混合的过程中没有足够基体分子使得碳纳米管分离。第二：碳纳米管自身或碳纳米管彼此之间在与基体的混合过程中，由于分子布朗运动或者外力作用会发生团聚现象。因此若想实现碳纳米复合材料在工程上的应用还有大量的工作要做。基于上述原因，有必要探究团聚效应对碳纳米管增强复合材料有效模量的影响[4] [5] [6] [7]。

实验结果表明在制备聚合物基碳纳米管增强复合材料过程中，只有以非常快的冷却速度才能够保证碳纳米管在基体中沿着一个方向均匀分布[6]。事实上以目前的技术水平通常得到的是有明显聚集现象和沿着空间各个方向分布的。

如图 1 所示为高倍电子显微镜下得到的聚合物基碳纳米管增强复合材料从碳纳米管融化状态到最后固体状态复合材料的结构。图 1a 为熔融状态下碳纳米管在基体中的分布情况，图 1b 为中间过程碳纳米管在基体中的分布，图 1c 为最终状态下的碳纳米管的分布状况[8] [9] [10] [11]。

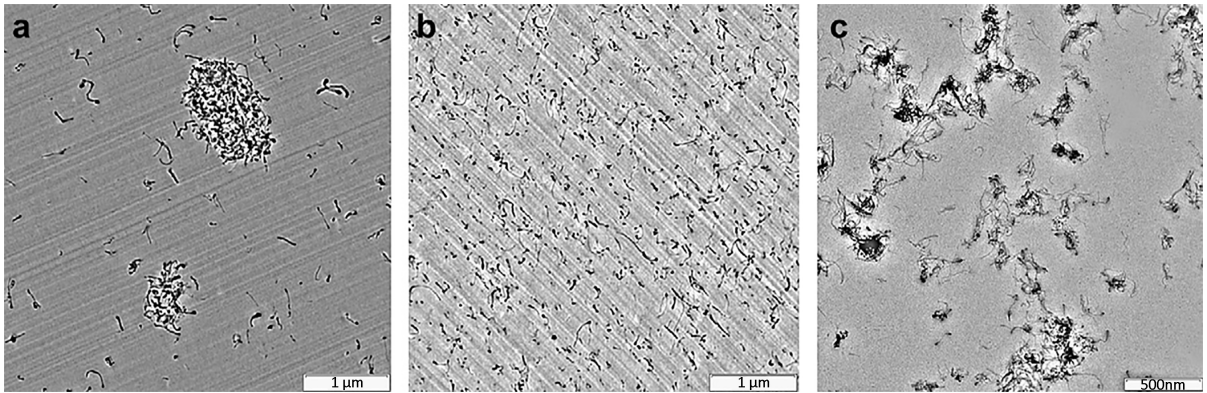
Shi 等[8]将考虑全部碳纳米管发生聚集效应时复合材料的细观结构，将发生团聚的碳纳米管和其包裹影响的基体看成一体，等效为含有球形夹杂[12] [13] [14] [15]。从而将整个复合材料看成是含有球形夹杂的复合材料，然后应用细观力学方法进行计算。

Shady 和 Gowayed [6]结合 Shi 等[8]的思想，认为分布在基体中的碳纳米管只有部分碳纳米管发生了聚集现象，其余的碳纳米管随机的均匀的分布在基体之中[15] [16] [17] [18]。因此可以将发生聚集现象的碳纳米管及被其包裹的基体一同等效为球形夹杂，碳纳米管则可以被看成是纤维状的夹杂，其细观结构示意图如图 2 所示。

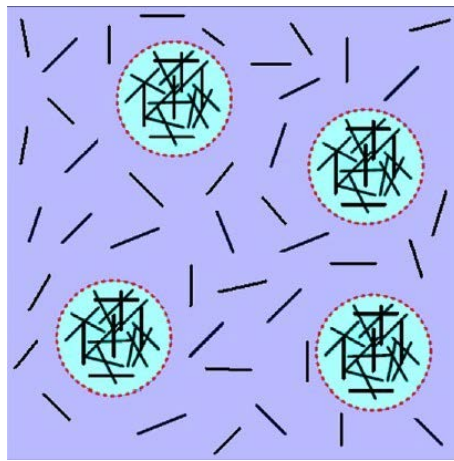
董淑宏和周剑秋[19]采用分级方法结合晶体塑性理论分析了碳纳米管团聚对金属基复合材料弹性和塑性力学行为的影响。结果表明：团聚可以明显降低碳纳米管增强效果，且这种影响与增强相的尺寸相关。

王垚等[20]利用电子显微镜观察了两种碳纳米管团聚体的团聚结构、分散形态及微观结构。研究表明，纳米团聚床催化裂解法制备的碳纳米管具有多级团聚结构，范德华力及缠绕作用共同造成了多级团聚体的形成，细长的碳纳米管分散困难，易絮凝；短小弯曲的碳纳米管易于分散。

Yang Kun 等[21]研究了单笔碳纳米管在阴离子表面活性剂溶液中的分散悬浮和团聚沉降性能。Pallab [22]和 Pan Jing 等[23]采用不同的细观力学模型研究了碳纳米管团聚对纳米复合材料弹性性能的影响。Wang 等[24]研究了碳纳米管的团聚对纳米复合材料渗透阈值和导电性的影响。



**Figure 1.** The microscopic structures of nanomaterials under electron microscope  
**图 1.** 电子显微镜下纳米材料的微观结构



**Figure 2.** The distribution images of straight carbon nanotubes in the matrix  
**图 2.** 直线状碳纳米管在基体中的分布示意图

本文结合上述高倍电子显微镜下碳纳米管的形态和上述两种类型的细观结构模型，得出本文考虑聚集效应下的波形碳纳米管的细观结构模型。图中圆圈内表示发生聚集效果的碳纳米管和其附近的基体共同构成了复合结构中的球形夹杂区域。其余没有发生聚集现象的碳纳米管随机分布在基体之中。此时纳米复合材料可以看成是由基体、球形夹杂和直线型纤维状夹杂三部分构成的复合材料可以应用细观力学方法进行求解。

## 2. 团聚效应的公式推导

基体中的碳纳米管可以分为两个部分：在基体之中自由分布的和团聚在球形夹杂之中的。

$$V_r = V_{ir} + V_{mr} \quad (1)$$

$$f_r = \frac{V_r}{V} \quad (2)$$

式中： $V_r$ ——表示碳纳米管的总体积；

$V_{ir}$ ——表示在球形夹杂区域内的碳纳米管的体积；

$V_{mr}$ ——表示在除去球形夹杂内之外的碳纳米管的体积；

$f_r$ ——表示碳纳米管的体积分数；

为方便描述问题，本文引入标识团聚效应的两个参数  $\mu$  和  $\xi$ ，其具体表达式为(3)、(4)。

$$\mu = \frac{V_i}{V} \quad (3)$$

$$\xi = \frac{V_{ir}}{V} \quad (4)$$

式中： $V$ ——表示代表性体积单元的总体的积；

$V_i$ ——表示代表性体积单元中球形夹杂的总体积；

$\mu$ ——表示包含聚集碳纳米管的球体与总体积之比；

$\xi$ ——表示发生聚集的碳纳米管的体积与碳纳米管的总体积之比。

当  $\mu=0$  时，弯曲碳纳米管全部以自由形态分布在基体之中，基体之中不包含球形夹杂。当  $\mu=1$  时，弯曲碳纳米管均匀分布在基体中，没有发生团聚现象。当  $0 < \mu < 1$  时部分弯曲碳纳米管发生团聚现象，部分碳纳米管仍然均匀分布在基体中。当  $\xi=0$  时， $0 < \xi < 1$  弯曲碳纳米管全部以自由形态分布在基体之中，基体之中不包含球形夹杂。当  $\xi=1$  时弯曲碳纳米管全部分布在球形夹杂之中，没有自由散落在基体之中的单个碳纳米管。当  $0 < \mu < 1$  时部分弯曲碳纳米管发生团聚现象，部分碳纳米管仍然均匀分布在基体中。

如图 3 所示对发生团聚现象的波形碳纳米管增强复合材料其模型可以简化为三个部分：直线代表的是自由弯曲碳纳米管轴向方向增强效果的直纤维，小圆代表自由弯曲碳纳米管垂直轴向平面内的径向增强效果的圆形小薄片。大圆则代表发生了团聚现象的碳纳米管及其周围的基体所形成的圆形夹杂。得直纤维的体积分数和小圆片的体积为：

$$f_1 = f_r \frac{(1-\xi)}{1+\delta} \quad (5)$$

$$f_2 = f_r \frac{\delta(1-\xi)}{1+\delta} \quad (6)$$

球形夹杂的等效弹性模量可以由如下公式(7)、(8)求得：

$$K_i = K_m + \frac{f_r \xi (\delta_r - 3K_m \alpha_r)}{3(\mu - f_r \xi + f_r \xi \alpha_r)} \quad (7)$$

$$G_i = G_m + \frac{f_r \xi (\eta_r - 2G_m \beta_r)}{2(\mu - f_r \xi + f_r \xi \alpha_r)} \quad (8)$$

式中： $K_i$ ——表示夹杂的等效体积模量；

$K_m$ ——表示基体的体积模量；

$G_i$ ——表示夹杂的等效体积模量；

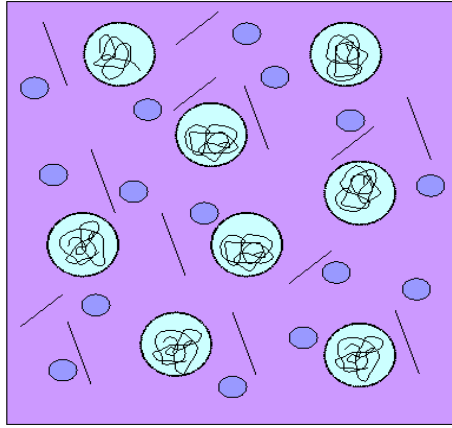
$G_m$ ——表示基体的体积模量；

$f_r$ ——表示碳纳米管在基体中的体积分数；

其中表示碳纳米管的相关系数为：

$$\alpha_r = \frac{3(G_m + K_m) + k_r + l_r}{3(G_m + k_r)} \quad (9)$$

$$\beta_r = \frac{1}{5} \left[ \frac{4G_m + 2k_m + l_m}{3(G_m + k_m)} + \frac{4G_m}{G_m + p_r} + \frac{2[G_m(G_m + 3K_m) + G_m(7G_m + 3K_m)]}{G_m(G_m + 3K_m) + m_r((7G_m + 3K_m))} \right] \quad (10)$$



**Figure 3.** The distribution images of equivalent inclusion in the matrix

**图 3.** 等效夹杂在基体中的分布示意图

$$\delta_r = \frac{1}{3} \left[ n_r + 2l_r + \frac{2(k_r + l_r)(3K_m + 2G_m - l_r)}{G_m + 3K_m + 2k_r} \right] \quad (11)$$

$$\eta_r = \frac{1}{5} \left[ \frac{2(n_r - 2l_r)}{3} + \frac{8G_m k_r}{G_m + k_r} + \frac{2(n_r - 2l_r)(2G_m + l_r)}{3(G_m + k_r)} \right] \quad (12)$$

其中单壁碳纳米管的希尔弹性常数:  $n_r = 450$  GPa、 $k_r = 30$  GPa、 $m_r = p_r = 1$  GPa、 $l_r = 10$  GPa。

对于球形夹杂来说, 可得它的应变将集中张量为:

$$\delta_3 = \frac{K_m}{K_m + \alpha(K_i - K_m)} \quad (13)$$

$$\beta_3 = G \frac{G_m}{K_m + \beta(G_i - G_m)} \quad (14)$$

其中:

$$\alpha = \frac{3K_m}{3K_m + 4G_m}$$

$$\beta = \frac{6(K_m + 2G_m)}{5(5K_m + 4G_m)}$$

将(7)、(8)分别带入(13)、(14)分别得:

$$\delta_3 = \frac{K_m}{K_m + \frac{\alpha f_r \xi (\delta_r - 3K_m \alpha_r)}{3(\mu - f_r \xi + f_r \xi \alpha_r)}} \quad (15)$$

$$\beta_3 = \frac{G_m}{G_m + \frac{\beta f_r \xi (\eta_r - 2G_m \beta_r)}{2(\mu - f_r \xi + f_r \xi \alpha_r)}} \quad (16)$$

由 Mori-Tanaka 方法可得聚集效应影响下的复合材料的有效模量。

$$K_t = K_m + (1 - \xi) f_1 (K_1 - K_m) \cdot 3\delta_1 + (1 - \xi) f_2 (K_2 - K_m) \cdot 3\delta_2 + \xi f_3 (K_3 - K_m) \cdot 3\delta_3 \quad (17)$$

$$G_r = G_m + (1 - \xi) f_1 (G_1 - G_m) \cdot 2\beta_1 + (1 - \xi) f_2 (G_2 - G_m) \cdot 2\beta_2 + \xi f_3 (G_3 - G_m) \cdot 2\beta_3 \quad (18)$$

### 3. 团聚效应数值结果分析

图4表示体积分数不同时,为含部分团聚碳纳米管增强复合材料的杨氏模量 $E$ 随参数 $\xi$ 的变化情况。随着 $\xi$ 的增加,即发生团聚效应的碳纳米管越来越多,复合材料的杨氏模量 $E$ 不断下降。从图中可以看到当碳纳米管从没有发生团聚效应到全部发生团聚效应时,下降趋势和发生团聚现象的碳纳米管总的体积分数关系密切。碳纳米管总的体积分数越大复合材料的有效杨氏模量 $E$ 下降越迅速。

例如:当 $\xi = 0.1$ ,  $f_r = 0.2$ 时,复合材料的杨氏模量 $E$ 为19 GPa,当 $\xi = 0.4$ ;  $f_r = 0.2$ 时复合材料的杨氏模量 $E$ 为12 GPa;即碳纳米管的团聚效应增加了30%,其增强效果下降了36.84%左右;当 $\xi = 0.1$ ;  $f_r = 0.15$ 时,复合材料的杨氏模量 $E$ 为17 GPa;当 $\xi = 0.4$ ;  $f_r = 0.15$ 时,复合材料的杨氏模量 $E$ 为11.5 GPa。即碳纳米管的团聚效应增加了30%,其增强效果下降了32.35%左右;

当 $\xi = 0.1$ ;  $f_r = 0.1$ 时,复合材料的杨氏模量 $E$ 为13.5 GPa;当 $\xi = 0.4$ ;  $f_r = 0.1$ 时,复合材料的杨氏模量 $E$ 为9.6 GPa。即碳纳米管的团聚效应增加了30%,其增强效果下降了28.9%左右;当 $\xi = 0.1$ ;  $f_r = 0.05$ 时,复合材料的杨氏模量 $E$ 为10.1 GPa;当 $\xi = 0.4$ ;  $f_r = 0.05$ 时,复合材料的杨氏模量 $E$ 为7.7 GPa。即碳纳米管的团聚效应增加了30%,其增强效果下降了23.7%左右;

显然上述结果的出现是由于随着碳纳米管体积分数的增加,其团聚影响外围不断扩大的结果。这再一次说明了在制备碳纳米管增强复合材料的过程中应该尽量实用各种机械手段或改进制造工艺减少团聚效应的发生,才能更好的发挥碳纳米管的是完美增强相的效果。

图5表示体积分数不同时,为含部分团聚碳纳米管增强复合材料的剪切模量 $G$ 随参数 $\xi$ 的变化情况。随着 $\xi$ 的增加,即发生团聚效应的碳纳米管越来越多,复合材料的剪切模量 $G$ 不断下降。从图中可以看到当碳纳米管从没有发生团聚效应到全部发生团聚效应时,下降趋势和发生团聚现象的碳纳米管总的体积分数关系密切。碳纳米管总的体积分数越大复合材料的有效剪切模量 $G$ 下降越迅速。

例如:当 $\xi = 0.1$ ,  $f_r = 0.2$ 时,复合材料的剪切模量 $G$ 为8.7 GPa,当 $\xi = 0.4$ ;  $f_r = 0.2$ 时复合材料的剪切模量 $G$ 为5 GPa;即碳纳米管的团聚效应增加了30%,其增强效果下降了42.52%;当 $\xi = 0.1$ ;  $f_r = 0.15$ 时,复合材料的剪切模量 $G$ 为7.2 GPa;当 $\xi = 0.4$ ;  $f_r = 0.15$ 时,复合材料的剪切模量 $G$ 为4.85 GPa。即碳纳米管的团聚效应增加了30%,其增强效果下降了32.63%;

当 $\xi = 0.1$ ;  $f_r = 0.1$ 时,复合材料的剪切模量 $G$ 为5.7 GPa;当 $\xi = 0.4$ ;  $f_r = 0.1$ 时,复合材料的剪切模量 $G$ 为4.3 GPa。即碳纳米管的团聚效应增加了30%,其增强效果下降了24.56%左右;当 $\xi = 0.1$ ;  $f_r = 0.05$ 时,复合材料的剪切模量 $G$ 为4.2 GPa;当 $\xi = 0.4$ ;  $f_r = 0.05$ 时,复合材料的剪切模量 $G$ 为2.9 GPa。即碳纳米管的团聚效应增加了30%,其增强效果下降了30.9%左右;

显然这是由于随着碳纳米管体积分数的增加,其团聚影响外围不断扩大的结果。这再一次说明了在制备碳纳米管增强复合材料的过程中应该尽量减少团聚效应的发生。

图6表示体积分数不同时,为含部分团聚碳纳米管增强复合材料的体积模量 $K$ 随参数 $\xi$ 的变化情况。随着 $\xi$ 的增加,也就是发生团聚效应的碳纳米管越来越多是,复合材料的体积模量 $K$ 不断下降。从图中可以看到当碳纳米管从没有发生团聚效应到全部发生团聚效应时,下降趋势和发生团聚现象的碳纳米管总的体积分数关系并不像杨氏模量 $E$ 和剪切模量 $G$ 那样密切。不同体积分数对下应的 $\xi$ 与体积模量 $K$ 的变化趋势几乎一致。当 $\xi$ 相同时,碳纳米管的体积分数越大时,剪切模量越大。

### 4. 结论

本文定量分析了影响碳纳米管复合材料有效弹性模量的一些重要因素,包括碳纳米管弯曲、团聚效

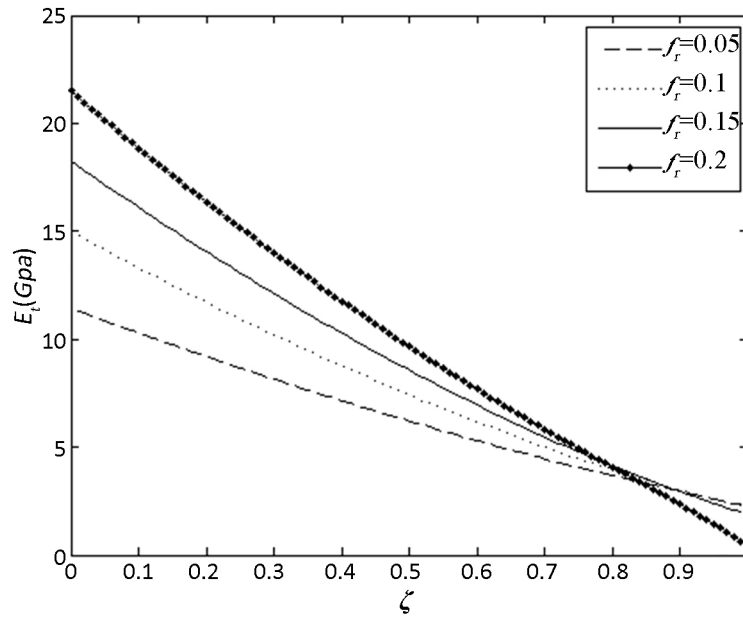


Figure 4. Variation of effective Young's modulus with  $\zeta$  for different volume fractions

图 4. 不同体积分数下杨氏模量随  $\zeta$  的变化

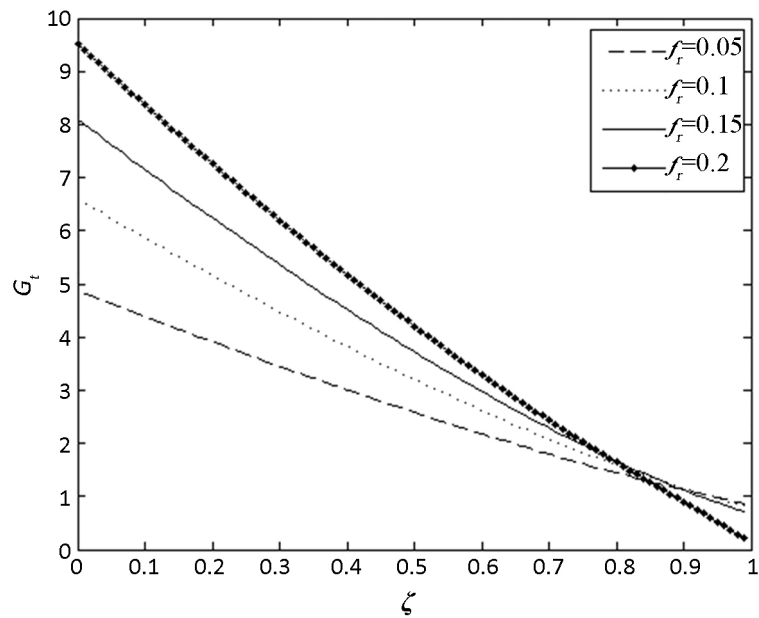
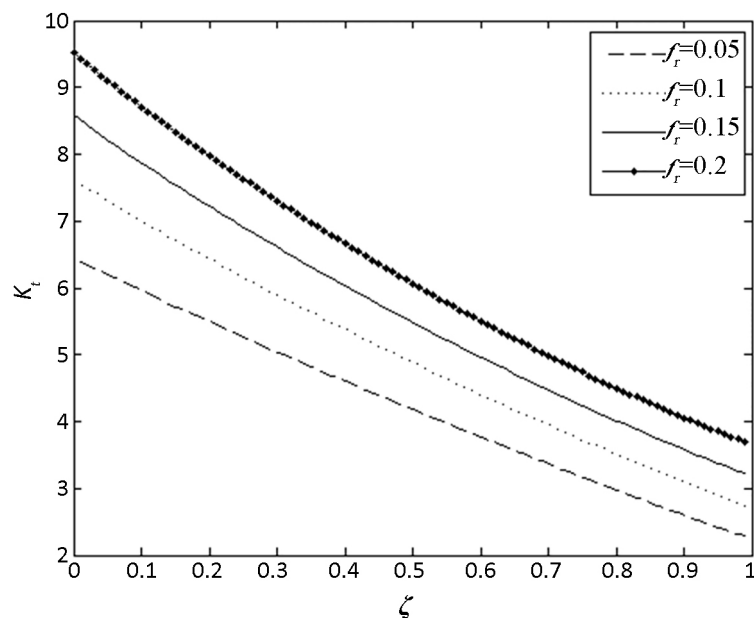


Figure 5. Variation of the shear modulus with  $\zeta$  for different volume fractions

图 5. 不同体积分数下剪切模量随  $\zeta$  的变化

应，建立了对应的细观力学模型，即正弦状碳纳米管弯曲模型和等效夹杂团聚模型。选取一个代表性体积胞元，它包含正弦状弯曲的碳纳米管和球形夹杂被包裹在无限大基体中。可以用沿碳纳米管轴线方向的长纤维模型和一个圆形小薄片来取代。这样基体内部就存在三种不同形状的夹杂：球形夹杂、长纤维状夹杂和硬币状夹杂。

理论分析以及计算结果表明团聚效应大大降低了碳纳米管的增强能力。所以要想得到性能优异的碳



**Figure 6.** Variation of the bulk modulus with  $\xi$  for different volume fractions

**图 6.** 不同体积分数下体积模量随  $\xi$  的变化

纳米管复合材料，应该尽可能使碳纳米管在复合材料中保持直线状，避免碳纳米管在基体中发生弯曲或者团聚现象，使之尽可能均匀分布。

## 基金项目

河北省自然科学基金资助项目，编号 A2014203139。

## 参考文献 (References)

- [1] Thostenson, E.T, Li, C. and Chou, T.W. (2005) Nanocomposites in Context. *Composites Science and Technology*, **65**, 491-516. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.11.003>
- [2] Qian, D, Wagner, G.J., Liu, W.K., Yu, M.F. and Ruoff, R.S. (2002) Mechanics of Carbon Nanotubes. *Applied Mechanics Reviews*, **55**, 495-533. <https://doi.org/10.1115/1.1490129>
- [3] Srivastava, D., Wei, C. and Cho, K. (2003) Nanomechanics of Carbon Nanotubes and Composites. *Applied Mechanics Reviews*, **56**, 215-230. <https://doi.org/10.1115/1.1538625>
- [4] Luo, D, Wang, W.X. and Takao, Y. (2007) Effects of the Distribution and Geometry of Carbon Nanotubes on the Macroscopic Stiffness and Microscopic Stresses of Nanocomposites. *Composites Science and Technology*, **67**, 2947-2958. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2007.05.005>
- [5] Feng, Q.P., Xie, X.M., Liu, Y.T., Gao, Y.F., Wang, X.H. and Ye, X.Y. (2007) Length Sorting of Multi-Walled Carbon Nanotubes by High-Speed Centrifugation. *Carbon*, **45**, 2311-2313.
- [6] Shady, E. and Gowayed, Y. (2010) Effect of Nanotube Geometry on the Elastic Properties of Nanocomposites. *Composites Science and Technology*, **70**, 1476-1481. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2010.04.027>
- [7] Liu, Y.J. and Chen, X.L. (2003) Evaluation of the Effective Mechanical Properties of Single Walled Carbon Nanotubes Using a Spring Based Finite Element Approach. *Mechanics of Materials*, **35**, 69-81. [https://doi.org/10.1016/S0167-6636\(02\)00200-4](https://doi.org/10.1016/S0167-6636(02)00200-4)
- [8] Shi, D.L., Feng, X.Q., Huang, Y.G.Y., Hwang, K.C. and Gao, H.J. (2004) The Effect of Nanotube Waviness and Agglomeration on the Elastic Property of Carbon Nanotube-Reinforced Composites. *Journal of Engineering Materials and Technology*, **126**, 250-257. <https://doi.org/10.1115/1.1751182>
- [9] Fisher, F. (2002) Nanomechanics and the Viscoelastic Behavior of Carbon Nanotube-Reinforced Polymers. Northwestern University, Evanston.



- [10] Fisher, F.T., Bradshaw, R.D. and Brinson, L.C. (2003) Fiber Waviness in Nanotube-Reinforced Polymer Composites: I. Modulus Predictions Using Effective Nanotube Properties. *Composites Science and Technology*, **63**, 1689-1703. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00069-1](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00069-1)
- [11] Bradshaw, R.D., Fisher, F.T. and Brinson, L.C. (2003) Fiber Waviness in Nanotube-Reinforced Polymer Composites: II. Modeling via Numerical Approximation of the Dilute Strain Concentration Tensor. *Composites Science and Technology*, **63**, 1705-1722. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00070-8](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00070-8)
- [12] Shokrieh, M.M. and Rafiee, R. (2010) Investigation of Nanotube Length Effect on the Reinforcement Efficiency in Carbon Nanotube Based Composites. *Composite Structures*, **92**, 2415-2420. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2010.02.018>
- [13] Bogetti, T.A., John, G.J.W. and Lamontia, M.A. (1992) Influence of Ply Waviness on the Stiffness and Strength Reduction on Composite Laminates. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, **5**, 344-369. <https://doi.org/10.1177/089270579200500405>
- [14] Hsiao, H.M. and Daniel, I.M. (1996) Elastic Properties of Composites with Fiber Waviness. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, **27**, 931-941. [https://doi.org/10.1016/1359-835X\(96\)00034-6](https://doi.org/10.1016/1359-835X(96)00034-6)
- [15] Telegadas, H.K. and Hyer, M.W. (1992) The Influence of Layer Waviness on the Stress State in Hydrostatically Loaded Cylinders: Failure Prediction. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **11**, 127-145. <https://doi.org/10.1177/073168449201100202>
- [16] Chun, H.J., Shin, J.Y. and Daniel I.M. (2001) Effect of Material Geometric Nonlinearities on the Tensile and Compressive Behavior of Composite Materials with Fiber Waviness. *Composites Science and Technology*, **61**, 125-134. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(00\)00201-3](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(00)00201-3)
- [17] Jortner, J. (1984) A Model for Predicting Thermal and Elastic Constants of Wrinkled Regions in Composite Materials. *American Society for Testing and Materials*, 217-236. <https://doi.org/10.1520/stp30206s>
- [18] Chou, T.W. and Takahashi, K. (1987) Non-Linear Elastic Behavior of Flexible Fiber Composites. *Composites*, **18**, 25-34. [https://doi.org/10.1016/0010-4361\(87\)90004-8](https://doi.org/10.1016/0010-4361(87)90004-8)
- [19] 董淑宏, 周剑秋. 团聚碳纳米管增强金属基复合材料的力学行为[J]. 南京工业大学学报, 自然, 2015, 37(6): 6-12.
- [20] 王垚, 吴珺, 魏飞, 蹇伟中, 余皓. 碳纳米管团聚结构的电镜研究 电子显微学报 2002, 21(4): 422-428.
- [21] Yang, K., Yi, Z.L., Jing, Q.F. and Lin, D.H. (2014) Dispersion and Aggregation of Single-Walled Carbon Nanotubes in Aqueous Solutions of Anionic Surfactants. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering)*, **15**, 624-633. <https://doi.org/10.1631/jzus.A1400113>
- [22] Barai, P. and Weng, G.J. (2011) A Theory of Plasticity for Carbon Nanotube Reinforced Composites. *International Journal of Plasticity*, **27**, 539-559. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2010.08.006>
- [23] Pan, J., Bian, L.C., Zhao, H.C. and Zhao, Y. (2016) A New Micromechanics Model and Effective Elastic Modulus of Nanotube Reinforced Composites. *Computational Materials Science*, **113**, 21-26. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2015.11.009>
- [24] Wang, Y., Shan J.W. and Weng, G.J. (2015) Percolation Threshold and Electrical Conductivity of Graphene-Based Nanocomposites with Filler Agglomeration and Interfacial Tunneling. *Journal of Applied Physics*, **118**, 065101. <https://doi.org/10.1063/1.4928293>

**期刊投稿者将享受如下服务：**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[ms@hanspub.org](mailto:ms@hanspub.org)