复合材料学报 Acta Materiae Compositae Sinica
第30卷 第3期 6月 2013年
Vol. 30 No. 3 June 2013

文章编号：1000-3851(2013)03-0225-08

考虑界面效应的复合泡沫塑料弹性性能数值仿真预测与试验研究

喻 明[1]，朱 平*[1]，马颖琦[2]
（1. 上海交通大学 振动与冲击国家重点实验室，上海 200240；2. 上海市材料研究所，上海 200437）

摘 要： 通过对不同空心陶瓷微珠含量的环氧基复合泡沫塑料进行准静态拉伸实验，研究了填充微珠的体积分数对复合泡沫塑料弹性模量和泊松比的影响。基于其细观结构特征，利用三维立方单胞有限元模型模拟了细观应力/应变场；将内聚力单元引入细观有限元模型，以此来模拟空心微珠与基体材料之间界面相的力学行为。将有限元预测结果以及两种传统的细观解析法与实验数据对比，发现基于界面理想粘接假设的有限元模型和传统细观解析法均过高估计了复合泡沫塑料的弹性模量和泊松比；复合泡沫塑料的弹性性能强烈地依赖于界面相的力学性质，只有考虑界面效应的细观有限元模型才能给出较为精确的预测，从而验证了文中细观建模方法的合理性。

关键词： 复合泡沫塑料；计算细观力学；界面相；内聚力单元；有限元法
中图分类号： TB330.1 **文献标志码：** A

Experimental study and numerical prediction of the elastic properties of syntactic foams considering the interfacial effect

YU Ming[1], ZHU Ping*[1], MA Yingqi[2]
(1. State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Shanghai Research Institute of Materials, Shanghai 200437, China)

Abstract: Quasi-static tensile experiments were performed on the epoxy-based syntactic foams filled by hollow ceramic microspheres with different volume fractions in this study. The effects of microspheres volume fraction on the Young's modulus and Poisson's ratio of syntactic foams were investigated. Microstructure based three-dimensional unit cell models were constructed to capture the stress/strain fields in mesoscale. Cohesive elements were introduced to the FE model to simulate the mechanical behavior of the interface between the microspheres and the matrix material. To verify the validity of the proposed model considering the interface effect, numerical results and two classical analytical methods were compared with the experimental data. It can be found that the ideal interfacial bonding hypothesis based FE model and the classical analytical methods seriously overestimates the experimentally determined Young's modulus and Poisson's ratio. The elastic properties of syntactic foams heavily depend on the mechanical properties of the interface, and only the results obtained by the FE model considering the interfacial effect are much closer to the experimental values and thus provide more accurate predictions.

Keywords: syntactic foams; computational mesomechanics; interface; cohesive element; finite element method

复合泡沫塑料是通过在树脂基体中填充空心微球而形成的一种新型的结构和功能型复合材料。与通过纯发泡工艺制备的普通泡沫塑料相比，由于空心微珠的增强作用，复合泡沫塑料在具有低密度的同时还具有较高的比强度和比刚度，并且具有更好的热稳定性、绝缘性、耐腐蚀性等优点。因此，其在航空航天、汽车工业、深海作业等工程领域得到了广泛的应用[1]。

作为一种多相材料，复合泡沫塑料具有明显的细观结构特征，其力学性能会随着组分选择和细观结构参数变化而发生明显变化。国内外很多学者都对复合泡沫塑料力学性能随细观结构的变

收到初稿日期： 2012-04-34；**收到修改稿日期：** 2012-06-14；**网络出版时间：** 2013-01-19 15:34:04
网络出版地址： http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20130109.1534.013.html
基金项目： 上海市科委专项科研项目(10dz1120600)
通讯作者： 朱 平，教授，博士生导师，主要从事复杂产品CAE分析、复合材料计算细观力学研究 E-mail：pzhu@sjtu.edu.cn

化规律进行了实验研究[2-7]。近年来，细观力学已经快速发展成为复合材料力学性能预测的有效手段。传统的细观力学方法，包括 Mori-Tanaka 估计法、Hashin-Shtrikman 界限、自洽方法等，都是基于界面理想粘接假设，并没有考虑界面效应，其预测结果往往与实际值之间存在很大偏差[8-9]。袁应龙和卢子兴[10]、Marur[11]分别提出了几种考虑界面效应的细观解析模型，并对复合泡沫塑料的等效模量进行了预测研究，所得的预测结果优于传统的细观解析法。尽管细观解析法简单且大多具有显示表达式，但其对填充相的几何形状和位置分布有特殊的假定，并且不能给出细观尺度下应力-应变场的细节。而将有限元仿真技术与传统细观力学相结合形成的计算细观力学克服了细观解析法不能处理复杂细观结构的缺陷，随着有限元方法的完善和计算机硬件水平的不断提升，计算细观力学已经成为复合材料性能预测的发展方向。

复合泡沫塑料的弹性模量和泊松比是工程界十分关心的两个基础弹性参数，已有文献对复合泡沫塑料弹性性能的实验研究大多集中于测量其弹性模量，对于泊松比的测量数据尚不多见。此外，相对于由空心玻璃微珠填充的复合泡沫塑料，针对由其他类型微珠颗粒填充的复合泡沫塑料的研究还很匮乏。本文作者对一种由空心陶瓷微珠填充的环氧基复合泡沫塑料进行了准静态下的拉伸实验，研究弹性模量和泊松比随微珠体积分数的变化规律，并提出一种考虑界面效应的细观有限元建模方法，以此来预测复合泡沫塑料的弹性性能。

1　实　验

1.1　材料制备

实验所用复合泡沫塑料的基体采用环氧树脂 E51；固化剂为二氨基二苯基甲烷和聚酰胺 651；树脂与两种固化剂的质量比为 100∶25∶7；填充相选用澳大利亚 Envirospheres 公司的 E-SPHERES 空心陶瓷微珠。该种陶瓷微珠的主要成分为 SiO_2，其微观图像和物理性质分别如图 1 和表 1 所示。通过调整陶瓷微珠的加入量，分别制备微珠体积分数为 10%、20%、30%、40%、50%五种不同的复合泡沫塑料，加上环氧基体材料共六种材料用于实验研究。

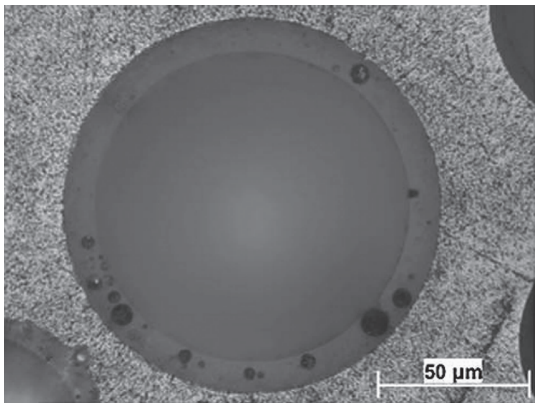

图 1　空心陶瓷微珠微观图

Fig. 1　Micrograph of hollow ceramic microspheres

表 1　空心陶瓷微珠物理性质

Table 1　Properties of hollow ceramic microspheres

Technical specification	Value
Particle size range/μm	20－300
Mean diameter/μm	130
Relative density/(g·cm^{-3})	0.6－0.8
Average thickness/μm	13
Young's modulus/GPa	74
Poisson's ratio	0.18

单向拉伸实验采用标准[12]中推荐的试件形状和尺寸，具体如图 2 所示。实验样件采用注模成型工艺制备而成，并通过机械加工去掉表皮，保证加工完的试样表面平整、无裂纹、无明显加工损伤等缺陷。

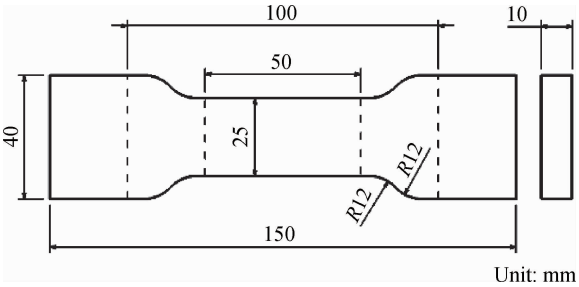

图 2　拉伸试件形状和尺寸

Fig. 2　Shape and dimensions of test specimen

根据测量加工完成后试件的质量，计算其密度，并采用下式计算复合泡沫塑料中的气孔体积分数：

$$V_v = \frac{(\rho_T - \rho_M)}{\rho_T} \tag{1}$$

式中：ρ_M 为复合泡沫塑料的实测密度；ρ_T 为理论密度，可通过混合法则由下式计算：

$$\rho_T = (1 - V_f)\rho_m + V_f\rho_f \tag{2}$$

式中：V_f 为微珠体积分数；$\rho_m = 1.01\ g \cdot cm^{-3}$，为

基体密度；$\rho_f = 0.7\ g \cdot cm^{-3}$，为微珠的表观密度。不同微珠体积分数复合泡沫塑料的密度及气孔含量如表 2 所示。

表 2　不同微珠体积分数复合泡沫塑料密度及气孔体积分数

Table 2　Densities and void volume fractions of syntactic foams with different volume fractions of microsphere

V_f/%	Density / ($g \cdot cm^{-3}$)		Void volume fraction/%
	Theoretical	Measured	
10	0.979	0.958	2.1
20	0.948	0.925	2.4
30	0.917	0.888	3.2
40	0.886	0.846	4.5
50	0.855	0.814	4.8

V_f—Volume fraction of microspheres.

1.2　拉伸实验

分别对环氧基体和五种不同微珠体积分数的复合泡沫塑料进行室温下的准静态单向拉伸实验，每种材料各测量 5 个有效数据。实验中采用位移控制，加载变形速率保持恒定的 0.3 mm/min，对应的工程应变率为 0.0001 s^{-1}。为获取材料的弹性模量和泊松比，必须同时测量试件承受拉伸载荷以后纵向和横向两个方向上的应变值。纵向应变采用美国 Epsilon 公司的 50M－050－ST 型轴向引伸计测量；横向应变采用美国 EIR 公司的 LE－05 型激光引伸计测量，该引伸计测量分辨率可达 0.001 mm，由于采用的是非接触式测量，避免了由机械式引伸计夹持或者应变片的粘贴所带来的弹性因素的干扰，保证了横向变形的测量精度。具体的实验装置如图 3 所示。

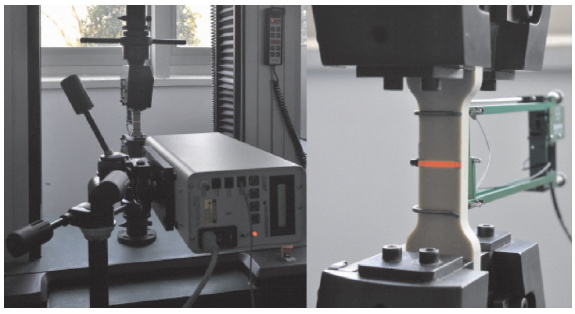

图 3　拉伸实验机及应变测量装置

Fig. 3　Tensile testing machine and strain measuring devices

1.3　实验结果

试件的拉伸破坏形貌如图 4 所示，试件在拉伸直至断裂的过程中没有出现颈缩现象，大部分是垂直于拉伸方向的突然断裂，断面较为平整，材料表现出很强的脆性。当陶瓷微珠的体积分数达到 40%甚至更高的时候，一些试件的断裂面不再与拉伸方向垂直，且断口凹凸不平，这种情况可能是由微珠含量过高导致的微珠团聚现象引起的。

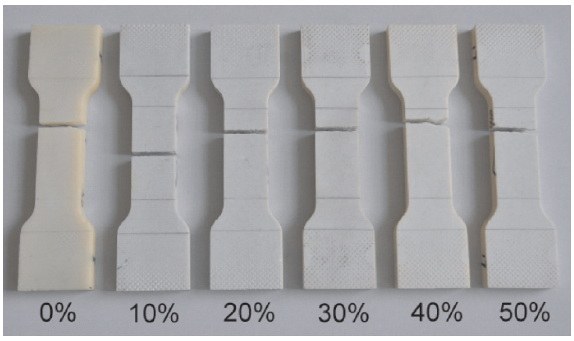

图 4　不同微珠体积分数复合泡沫塑料试件拉伸破坏形貌

Fig. 4　Tensile failure morphology of syntactic foam specimens with different volume fractions of microsphere

取纵向应变 0.2%以前的数据点做线性拟合，将拟合所得直线的斜率作为材料的弹性模量；泊松比的计算参考 ASTM E132－04 标准，利用最小二乘法拟合如图 5 所示的纵向应变-加载力、横向应变-加载力直线。计算两条直线斜率的比值，进而得到材料的泊松比：

$$\nu = (d\varepsilon_t/dp)/(d\varepsilon_l/dp) \tag{3}$$

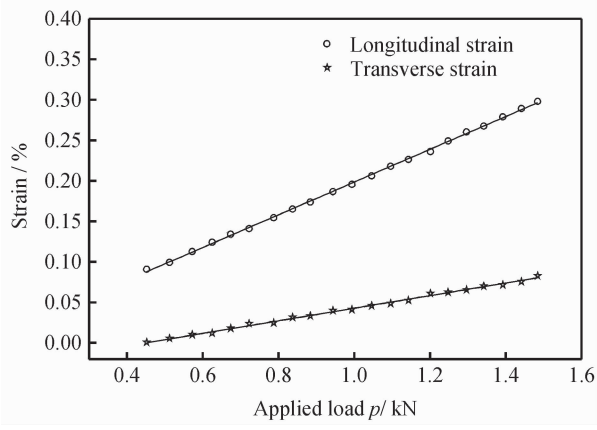

图 5　环氧基体纵向和横向应变随拉伸加载力变化的拟合直线

Fig. 5　Plot of longitudinal and transverse strains versus applied tensile load of the epoxy matrix

分别对六组试样的有效数据求平均值和标准差，得到弹性模量和泊松比的实验结果如表 3 所示。实验所测复合泡沫塑料的弹性模量随微珠体积分数的升高而上升，微珠体积分数为 50%的复合泡

沫的弹性模量相对于环氧基体只增加了 33%，说明陶瓷微珠与环氧基体之间处于一种弱粘接状态，微珠对基体的增强作用并不十分明显；实验所测复合泡沫塑料的泊松比随着微珠体积分数的升高而降低，微珠体积分数为 50%的复合泡沫的泊松比相对于环氧基体降低了 29%。

表 3　不同微珠体积分数复合泡沫塑料弹性模量和泊松比实验数据

Table 3　Experimental data of Young's modulus and Poisson's ratio of syntactic foams with different filler volume fractions

V_f/%	E_c/GPa	Std/GPa	ν_c	Std
0	2.061	0.015	0.384	0.0035
10	2.215	0.024	0.367	0.0047
20	2.376	0.028	0.346	0.0044
30	2.513	0.035	0.324	0.0053
40	2.638	0.032	0.301	0.0068
50	2.743	0.035	0.274	0.0059

V_f — Volume fraction of microspheres; E_c — Young's modulus of syntactic foam; ν_c — Poisson's ratio of syntactic foam; Std — Standard deviation.

2　考虑界面效应的细观有限元建模

有限元计算细观力学应用于复合材料力学行为数值模拟的本质，是将有限元计算技术与细观力学和材料学相结合，根据复合材料细观结构建立代表性体积单元和边界条件，求解受载下体元中具有夹杂的边值问题，从而建立起细观局部场量与宏观平均场量间的关系，最终获得复合材料的宏观力学响应。相对于传统的细观解析法，有限元计算细观力学的最大优点在于它对增强相的几何形状没有特殊假定，能够描述复合材料复杂的细观结构，并且能够给出细观尺度下完整的应力-应变场。对于复合泡沫塑料，已有文献常采用基于理想界面假设的单胞模型作为其代表性体积单元，如轴对称二维单胞、三维体心立方、三维面心立方、三维简单立方[13-15]。

2.1　基于理想界面的弹性性能预测

采用基于理想界面假设的不含界面相的有限元模型和两种常用的细观解析法：基于复合球体集（composite sphere assemblage，CSA）的 Mori-Tanaka 估计法和广义自洽法[15]来预测复合泡沫塑料的弹性性能。对于多相复合材料而言，由于二维单胞模型过于简化，其仿真结果往往不够理想。因此，本文中的代表性体积单元选用三维立方单胞，

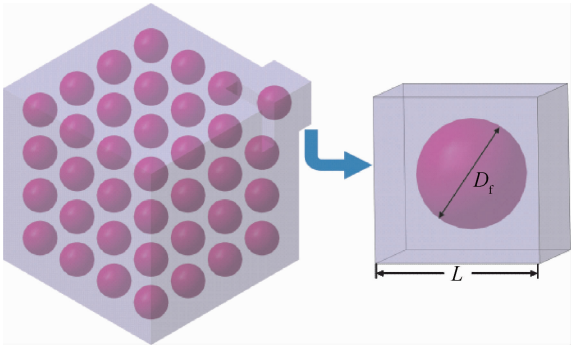

图 6　复合泡沫理想化细观结构和三维立方单胞

Fig. 6　Schematic of idealized microstructure of syntactic foam and a 3D cubic unit cell

该模型基于如图 6 所示的理想化周期性细观结构。由于对称性，只取模型的 1/8 进行分析。微珠体积分数 V_f 可通过下式计算：

$$V_f = \frac{\pi}{6}\left(\frac{D_f}{L}\right)^3 \tag{4}$$

式中：D_f 为微珠直径；L 为单胞模型的边长。

利用有限元软件 ABAQUS 6.9 对单胞模型进行六面体网格划分，单元类型选择 C3D8I。不同微珠体积分数单胞模型的平均单元数量为 22320，对于弹性预测而言，该模型已经足够精细。环氧基体和陶瓷微珠均视为各向同性弹性材料，陶瓷微珠的弹性参数参照表 1 给出的值：$E_f = 74$ GPa，$\nu_f = 0.18$；对于基体材料，为了在仿真模拟中考虑气孔因素的影响，将含有气孔的环氧树脂视为“等效基体”，并参考文献[17]提出的基于三相球模型的解析方法确定“等效基体”的弹性常数。首先，根据式(5)和式(6)计算等效体积模量 K_m^* 和等效剪切模量 μ_m^*：

$$K_m^* = 4K_m\mu_m(1-c)/(4\mu_m + 3K_m c) \tag{5}$$

$$A\left(\frac{\mu_m^*}{\mu_m}\right)^2 + 2B\left(\frac{\mu_m^*}{\mu_m}\right) + C = 0 \tag{6}$$

式中：c 为基体的空隙比，对应表 2 给出的气孔体积分数；K_m 和 μ_m^* 分别为不含气孔的基体材料的体积模量和剪切模量，可由表 3 给出的基体实验数据计算获得；式(6)中方程系数 A、B、C 的具体计算公式可参照文献[17]。将“等效基体”视为各向同性材料，根据等效体积模量和等效剪切模量，可通过如下公式确定等效弹性模量 E_m^* 和等效泊松比 ν_m^*：

$$E_m^* = 9K_m^*\mu_m^*/(3K_m^* + \mu_m^*) \tag{7}$$

$$\nu_m^* = (3K_m^* - 2\mu_m^*)/(6K_m^* + 2\mu_m^*) \tag{8}$$

考虑气孔因素以后，计算所得的不同微珠体积

分数复合泡沫塑料基体的等效弹性常数如表 4 所示。

表 4　不同微珠体积分数复合泡沫塑料考虑气孔含量的“等效基体”弹性常数

Table 4　Elastic constants of the “effective matrix” of syntactic foams with different filler volume fractions considering void content

V_f / %	Void / %	E_m^* / GPa	ν_m^*
10	2.1	1.977	0.3792
20	2.4	1.965	0.3786
30	3.2	1.934	0.3768
40	4.5	1.884	0.3740
50	4.8	1.873	0.3734

利用 ABAQUS-Standard 求解器来计算模拟材料在单向拉伸载荷下的弹性响应。为了满足对称性和周期性，对有限元模型施加如图 7 所示的边界条件：(1) 对三个对称面施加对称边界条件；(2) 选择剩余三个面中的其中一个作为承载面，施加均匀的法向位移载荷；(3) 利用多点约束方程对剩余两个面做节点耦合，使其在法向始终保持为平面，以此来满足周期性假设。

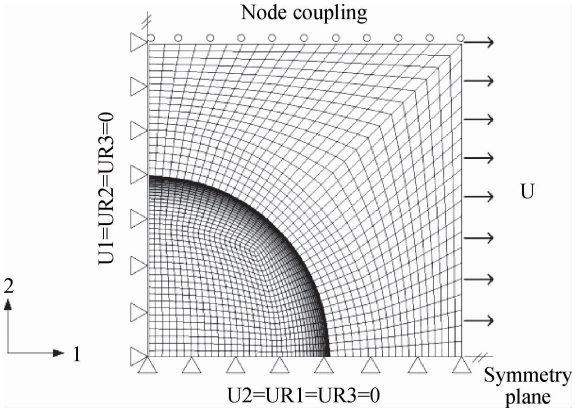

图 7　有限元单胞模型周期性边界条件二维示意图

Fig. 7　2D schematic of periodic boundary conditions of the finite element unit cell model

作为一种宏观尺度上均匀，细观尺度上非均匀的材料，复合泡沫的力学性能是宏观上的等效值。基于细观力学均匀化方法，将细观尺度下应力 σ_{ij} 和应变 ε_{ij} 的体积平均值分别视作其宏观等效应力 Σ_{ij} 和等效应变 E_{ij}：

$$\Sigma_{ij} = \frac{1}{V}\int_V \sigma_{ij}\,\mathrm{d}V = \frac{1}{V}\sum_{m=1}^{N}\sigma_{ij}^{(m)}V^{(m)} \tag{9}$$

$$E_{ij} = \frac{1}{V}\int_V \varepsilon_{ij}\,\mathrm{d}V = \frac{1}{V}\sum_{m=1}^{N}\varepsilon_{ij}^{(m)}V^{(m)} \tag{10}$$

$$V = \sum_{m=1}^{N}V^{(m)} \tag{11}$$

式中：V 为代表性体积单元总体积；N 为代表性体积单元中总的积分点个数；$\sigma_{ij}^{(m)}$、$\varepsilon_{ij}^{(m)}$、$V^{(m)}$ 分别代表第 m 个积分点上的细观场应力、应变及该积分点的体积权重。复合泡沫塑料的弹性模量 E_c、泊松比 ν_c 可由下式确定：

$$E_c = \frac{\Sigma_{ii}}{E_{ii}},\ \nu_c = -\frac{E_{jj}}{E_{ii}} \tag{12}$$

式中：i、j 分别为代表性体积单元的加载方向和与之正交的方向。

基于理想界面假设的弹性常数预测值与实验数据的对比如图 8 所示。可以看出，不含界面相的有限元模型、Mori-Tanaka 估计法和广义自洽法三者的预测值均严重高估了复合泡沫塑料的弹性模量和泊松比。并且预测误差会随着微珠体积分数的上升

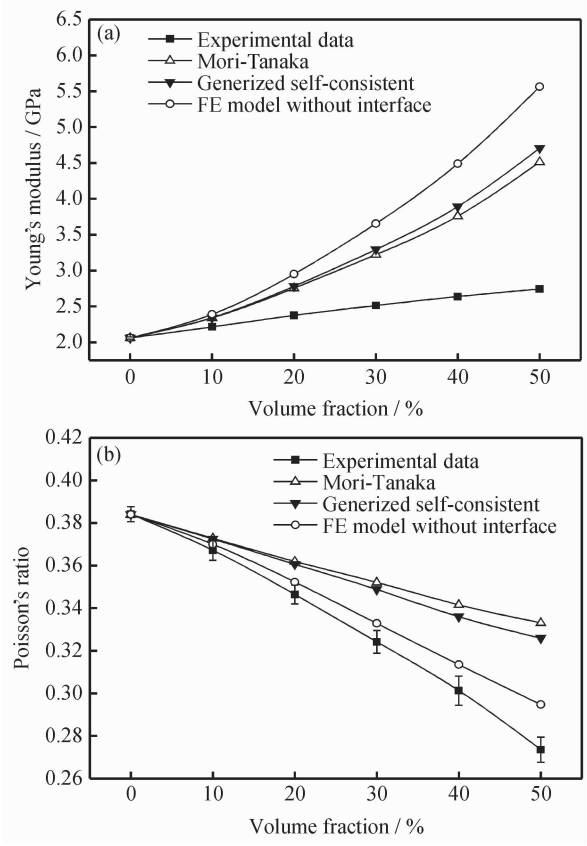

图 8　不同微珠含量复合泡沫塑料基于理想界面假设的弹性常数预测

Fig. 8　Predictions of the elastic constants of syntactic foams with different filler volume fractions based on perfect interficial bonding assumption

而增加，当 $V_f=50\%$时，三种模型对弹性模量和泊松比预测的相对误差最小值分别为 64%和 8%。因此，对于复合泡沫塑料，尤其是高微珠含量的复合泡沫塑料，基于理想界面的弹性预测模型是不适用的。

2.2　界面相的引入

如前所述，复合泡沫塑料的力学性能不仅取决于基体和微珠的性能，在很大程度上还依赖于基体与微珠之间的界面性质。为了考虑界面效应，本文中将复合泡沫塑料视为由基体、微珠和界面相组成的三相材料，并在细观代表性体积单元中引入一层内聚力单元，使其位于基体与微珠之间，以此来模拟界面相的力学行为。包含界面相的细观有限元模型如图 9 所示。

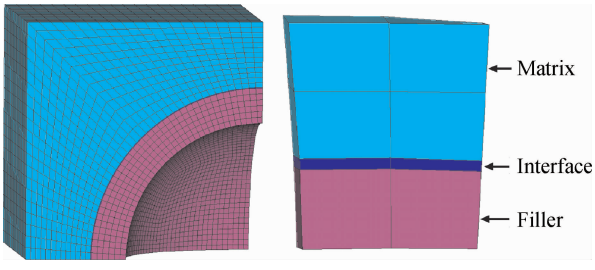

图 9　复合泡沫塑料包含界面相的有限元单胞模型

Fig. 9　Finite element unit cell model with interface of syntactic foam

内聚力单元的力学行为通过与之对应的内聚力本构关系，即张力-位移曲线来描述。常用的内聚力本构模型有双线性、二次函数、梯形函数、指数函数等[18]。本文中采用如图 10 所示的双线性张力-位移本构关系来描述界面相的力学性能。图中的 A 点代表初始损伤点，A 点以前的区域为弹性段，A 点以后为损伤演化段；内聚力单元的变形包

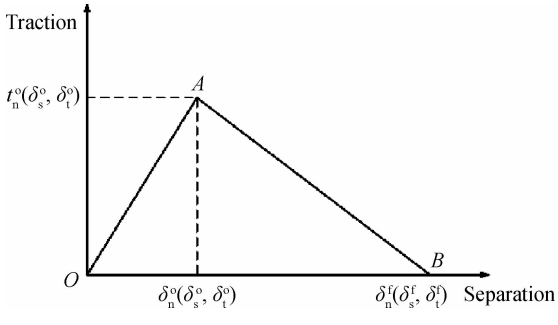

图 10　内聚力单元双线性张力-位移曲线

Fig. 10　Bilinear traction－separation law for cohesive element

含一个沿厚度方向的法向位移和两个切向位移，分别用 δ_n、δ_s、δ_t 表示；用 T_i代表内聚力单元的厚度，名义应变可定义为

$$\varepsilon_n=\frac{\delta_n}{T_i},\ \varepsilon_s=\frac{\delta_s}{T_i},\ \varepsilon_t=\frac{\delta_t}{T_i} \tag{13}$$

因此，内聚力单元弹性段的本构关系可写为

$$\boldsymbol{t}=\begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix}=\begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} & K_{nt} \\ K_{ns} & K_{ss} & K_{st} \\ K_{nt} & K_{st} & K_{tt} \end{bmatrix}\begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix}=\boldsymbol{K\delta} \tag{14}$$

式中：$\boldsymbol{t}$ 为名义应力向量，包含了 t_n、t_s、t_t 三个分量，分别代表法向应力和两个切向应力；$\boldsymbol{K}$ 为单元刚度矩阵。

界面相建模的难点在于界面力学性能参数的确定。已有的实验方法，如单丝拉伸、纳米压痕等，往往只适用于测量纤维增强的复合材料的界面性质。对于复合泡沫塑料这种由空心球形颗粒填充的复合材料，目前几乎没有实验方法适用于测量其界面参数。为简化问题，本文中采用如下两个假设：(1) 复合泡沫塑料的界面相力学性能不随微珠含量的不同而发生变化，界面相厚度 T_i为一定值，且界面力学性质在整个厚度范围内保持一致；(2) 界面相刚度矩阵非对角元素为 0，即法向与切向解耦，且两个切向刚度相等 $K_{ss}=K_{tt}$。基于这两点假设，需要确定的界面相参数共只有 3 个，即厚度、法向刚度和切向刚度。通过多轮反复计算，本文中选取如下值：$T_i=0.68\ \mu m$，$K_{nn}=105.2\ GPa\cdot mm^{-1}$，$K_{ss}=51.6\ GPa\cdot mm^{-1}$。

3　结果和讨论

以微珠体积分数 20%的复合泡沫塑料为例，图 11给出了不含界面相和包含界面相的两种代表性体积单元在承受单向拉伸载荷下的细观场应力云图。可以看出：基体与微珠刚度的差异导致了基体与微珠位置的应力值差别很大，细观应力场表现为非均匀；两种模型应力分布的整体趋势接近，但包含界面相的模型弱化了微珠与基体之间的粘接状态，在相同载荷下，其应力值低于不含界面相的模型；由图 11(b)可以观察到，由于界面相的引入，基体与微珠之间的法向相对位移和切向滑移能够通过内聚力单元得以很好地模拟。

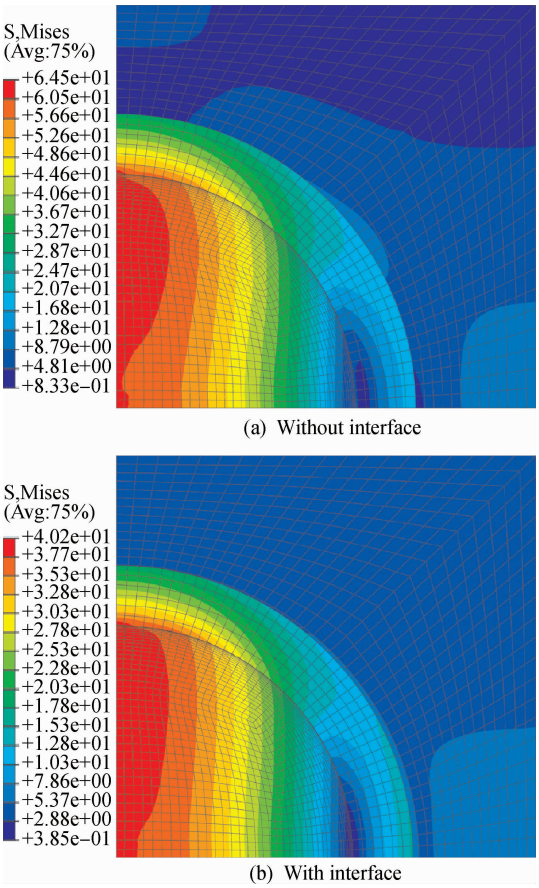

图 11　单向拉伸载荷下复合泡沫塑料单胞应力云图(微珠体积分数 20%)

Fig. 11　Stress contour plot of the unit cell for syntactic foam under uniaxial tensile load (20% volume fraction of microspheres)

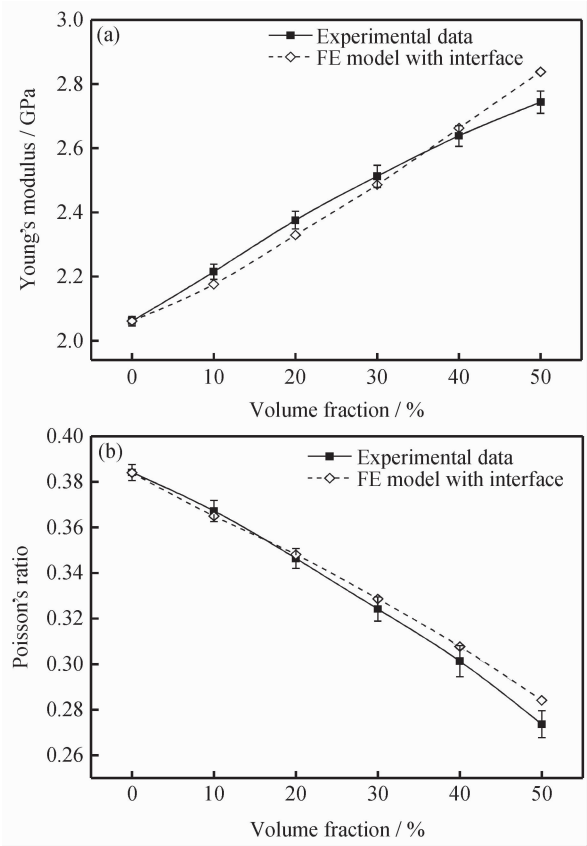

图 12　不同微珠含量复合泡沫塑料考虑界面效应的弹性常数预测

Fig. 12　Predictions of the elastic constants of syntactic foams with different filler volume fractions considering interfacial effect

考虑界面效应的复合泡沫塑料弹性常数的预测结果如图 12 所示。可以看出，由于界面相的引入，大大提高了有限元模型的预测精度，无论是弹性模量还是泊松比，仿真预测值都与实验数据较为接近。这就验证了本文中所提出的细观建模方法的合理性，即通过内聚力单元模拟的界面相能够有效表征基体与微珠之间的弱粘接状态，从而可提供更精确的弹性预测结果。

表 5 给出了五种不同微珠含量复合泡沫塑料弹性常数的预测结果及预测相对误差。应该指出，即使是考虑了界面效应的有限元模型，其对于弹性模量和泊松比的预测结果与实验值之间依然存在一定差距，尤其对于高微珠含量的复合泡沫塑料。造成这种误差的原因一方面是复合泡沫塑料的界面力学参数无法通过实验获得，在实际情况中，微珠与基体之间的粘接状态有可能会随着微珠体积分数的变

表 5　不同微珠含量复合泡沫塑料考虑界面效应的弹性常数预测值及相对误差

Table 5　Predictions and relative errors of the elastic constants of syntactic foams with different filler volume fractions considering interfacial effect

V_f/%	Young's modulus			Poisson's ratio		
	Experiment/GPa	Prediction/GPa	Error/%	Experiment	Prediction	Error /%
10	2.215	2.176	1.76	0.367	0.365	0.60
20	2.376	2.330	1.94	0.346	0.348	0.46
30	2.513	2.486	1.07	0.324	0.328	1.17
40	2.638	2.663	0.95	0.301	0.308	2.12
50	2.743	2.838	3.46	0.274	0.284	3.80

化而变化。另一方面，对于高微珠含量的复合泡沫塑料，微珠的分布不可能绝对均匀，微珠团聚现象的产生也可能对复合泡沫塑料的弹性性能造成影响。因此，为了使包含界面相的细观有限元模型提供更为精确的预测结果，后续的工作将集中于复合泡沫塑料界面相力学参数的确定，通过实验或者数值手段得到更为可靠的界面参数用于仿真模拟。

4　结　论

（1）空心陶瓷微珠填充的环氧基复合泡沫塑料在准静态拉伸载荷下表现出很强的脆性，破坏形式为脆性断裂，没有出现颈缩现象，断口垂直于载荷方向，断面较为平整。

（2）实验所测复合泡沫塑料的弹性模量随微珠体积分数的升高而上升，$V_f=50\%$的复合泡沫塑料的弹性模量相对于环氧基体增加了33%；泊松比随着微珠体积分数的升高而降低，$V_f=50\%$的复合泡沫塑料的泊松比相对于环氧基体降低了29%；陶瓷微珠对基体的增强作用不明显，微珠与基体之间处于弱粘接状态。

（3）基于理想界面假设的有限元模型和传统细观解析法忽视了界面效应，其预测结果都严重高估了复合泡沫塑料的弹性模量和泊松比，且预测误差会随着微珠体积分数的上升而增加，当$V_f=50\%$时，三种模型对弹性模量和泊松比预测的相对误差最小值分别为64%和8%。因此，对于复合泡沫塑料，尤其是高微珠含量的复合泡沫塑料，基于理想界面的弹性预测模型不适用。

（4）考虑了界面效应的细观有限元模型的预测结果与实验数据接近，说明复合泡沫塑料的弹性性能严重依赖于界面相的力学性质。要准确预测复合泡沫塑料的弹性性能，细观有限元模型中必须包含界面相的几何及弹性属性。本文中采用的内聚力单元能够有效模拟基体与微珠颗粒之间界面相的力学行为。

参考文献：

[1] 卢子兴. 复合泡沫塑料力学行为的研究综述 [J]. 力学进展，2004，34(3)：341-348.
Lu Zixing. A review of studies on the mechanical behavior of syntactic foamed plastics [J]. Advances in Mechanics，2004，34(3)：341-348.

[2] Wouterson E M，Boey F Y C，Hu X，et al. Specific properties and fracture toughness of syntactic foam：Effect of foam microstructures [J]. Composites Science and Technology，2005，65：1840-1850.

[3] Kishore，Shankar R，Sankaran S. Effects of microballoons' size and content in epoxy on compressive strength and modulus [J]. Journal of Material Science，2006，41：7459-7465.

[4] 卢子兴，邹　波，李忠明，等. 空心微珠填充聚氨酯泡沫塑料的力学性能 [J]. 复合材料学报，2008，25(6)：175-180.
Lu Zixing，Zou Bo，Li Zhongming，et al. Mechanical properties of polyurethane foams filled by micro-spheres [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2008，25(6)：175-180.

[5] 胡传群，曾黎明，周建刚. 改性空心玻璃微珠/环氧树脂复合材料力学性能研究 [J]. 热固性树脂，2008，23(6)：21-23.
Hu Chuanqun，Zeng Liming，Zhou Jiangang. Study on mechanical properties of modified hollow glass bead/epoxy resin composites [J]. Thermosetting Resin，2008，23(6)：21-23.

[6] 余　为，李慧剑，何长军，等. 空心玻璃微珠填充环氧树脂复合材料力学性能 [J]. 复合材料学报，2010，27(4)：190-194.
Yu Wei，Li Huijian，He Changjun，et al. Mechanical properties of epoxy resin filled with hollow glass bead [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2010，27(4)：190-194.

[7] Gupta N，Ye R，Porfiri M. Comparison of tensile and compressive characteristics of vinyl ester/glass microballoon syntactic foams [J]. Composites：Part B，2010，41：236-245.

[8] Marur P R. Effective elastic moduli of syntactic foams [J]. Materials Letters，2005，59：1954-1957.

[9] Bhuiyan M A，Pucha R V，Karevan M. Tensile modulus of carbon nanotube polypropylene composites：A computational study based on experimental characterization [J]. Computational Materials Science，2011，50：2347-2353.

[10] 袁应龙，卢子兴. 含涂层空心球复合泡沫塑料的模量预测及讨论 [J]. 应用数学和力学，2004，25(5)：482-487.
Yuan Yinglong，Lu Zixing. Modulus prediction and discussion of reinforced syntactic fomns with coated hollow spherical inclusions [J]. Applied Mathematics and Mechanics，2004，25(5)：482-487.

[11] Marur P R. Influence of imperfect interface on the elastic moduli of syntactic foams [J]. Computational Materials Science，2009，46：327-332.

[12] British Standards Institution. ISO 1926：2005 Rigid cellular plastics—Determination of tensile properties [S]. London，England：British Standards Institution，2005.

[13] Vesenjak M，Fiedler T，Ren Z，et al. Behaviour of syntactic and partial hollow sphere structures under dynamic loading [J]. Advanced Engineering Materials，2008，10(3)：185-191.

[14] Marur P R. Numerical estimation of effecttive elastic moduli of syntactic foams [J]. Finite Elements in Analysis and Design，2010，46：1001-1007.

[15] Antunes F V，Ferreira J A M，Capela C. Numerical modeling of the Young's modulus of syntactic foams [J]. Finite Elements in Analysis and Design，2011，47：78-84.

[16] Bardella L，Genna F. On the elastic behavior of syntactic foams [J]. International Journal of Solids and Structures，2001，38：7235-7260.

[17] 卢子兴，黄筑平，王　仁. 基于三相球模型确定泡沫塑料有效模量 [J]. 固体力学学报，1996，17(2)：95-102.
Lu Zixing，Huang Zhuping，Wang Ren. Determination of effective moduli for foam plastics based on three phase spheroidal model [J]. Acta Mechanica Solida Sinica，1996，17(2)：95-102.

[18] Alfano G. On the influence of the shape of the interface law on the application of cohesive-zone models [J]. Composites Science and Technology，2006，66：723-730.