研究进展

有限元法在颗粒填充型复合材料结构与力学性能关系研究中的应用

孙小苓，范小平，周家华
（华南农业大学，广州 510642）

摘要：颗粒填充型复合材料在包装中的应用越来越广泛，材料的性能在本质上由其结构决定。从颗粒填充型复合材料的结构模型的建立、边界条件、界面分析和网格划分 4 个角度，对用有限元法研究颗粒填充型复合材料的力学性能进行了介绍与分析。重点对比说明了基于几何建模的周期性单胞单颗粒模型、多颗粒模型和基于实际微观结构的有限元模型，归纳了各种模型的边界条件设置，并讨论说明了界面性质和网格划分对预测复合材料力学性能结果的影响。此外，还展望了有限元法研究其他复合材料力学性能的发展方向。

关键词：颗粒填充型复合材料；力学性能；有限元分析
中图分类号：TB334；TB487　**文献标识码：**A　**文章编号：**1001-3563(2011)19-0115-07

Application of Finite Element Method to Analysis the Relationship between Particle-filled Composites´ Structure and Mechanical Properties

SUN Xiao-ling，*FAN Xiao-ping*，*ZHOU Jia-hua*
(South China Agricultural University，Guangzhou 510642，China)

Abstract：Particle-filled composites are more and more widely in packaging，whose properties are determined by their structure. Finite element simulation of particle-filled composites were introduced and analyzed from four points，which were establishment of the model，boundary condition，interface analysis，and partition of meshes. Single particle cell model，multi-particle cell model，and microstructure-based model were compared. Boundary conditions of all kinds of models were summarized. The effect interface properties and partition of meshes on prediction of the mechanical properties of composites was discussed. The application of finite element analysis in other composites was prospected.

Key words：particle-filled composite；mechanical property；finite element analysis

复合材料由 2 种或 2 种以上的材料构成[1]，颗粒填充是制备复合材料的常用方法之一。颗粒填充型复合材料作为一种具有优越力学性能并具有较好二次加工性能的先进结构材料，在包装、航天航空、机械制造业等得到了广泛应用[2]。在包装中，为了减低成本，改变包装材料的性能，可加入一些其他物质，如一些聚合物与无机粒子的复合包装材料[3-5]。塑料在包装行业中占有重要的地位，随着人们环境保护的增强，可生物降解塑料已成为热门话题，其中对淀粉直接填充型塑料的研究也较多[6-7]，因此，探索颗粒填充型复合材料的结构与性能的关系具有重大意义。

一相与另一相的交界地带，就构成了复合材料的界面。复合材料的界面对复合材料力学性能起着关键作用。复合材料最重要的技术问题就是界面结合的问题。目前，对复合材料界面的研究，用实验去研究影响界面结合的因素的较多，但是对界面的研究不够量化，而其他计算方法研究界面的破坏过程，不能很好地反映界面力的传递过程。

收稿日期：2011-03-30
基金项目：广州市科技计划项目(2007J1-C0391)；国家自然科学基金项目(20776056)
作者简介：孙小苓(1986－)，女，湖南人，华南农业大学硕士生，主攻淀粉基可降解复合材料。
通讯作者：周家华(1968－)，男，湖北人，博士，华南农业大学教授，主要从事食品科学与包装材料的研究。

有限元法与细观力学和材料科学相结合产生了有限元计算细观力学[8-9]。它主要研究组分材料间力的相互作用和定量描述细观结构与性能间的关系。有限元细观计算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,根据复合材料具体的细观结构,建立代表性细观计算体元、界面条件和边界条件,求解受载下体元中具有夹杂的边值问题。然后利用体积平均的概念,求出复合材料的有效刚度系数,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。

目前,对复合材料的制备及其性能的研究较多,从细观角度研究颗粒填充型复合材料的结构与性能的研究也取得了一定成绩。笔者主要综述用有限元法从细观角度研究颗粒填充型复合材料的力学性能的研究。分别从模型建立、边界设定、界面性质、网格划分等方面,综述颗粒填充型复合材料结构与力学性能关系的有限元研究。

1 模型的建立

建立一个能够正确描述复合材料细观结构的模型,对研究颗粒填充型复合材料的力学性质的研究具有重大意义。颗粒填充型复合材料细观角度的有限元研究,一般是先建立一个代表单元(RVE),该单元要足够大,以便包含复合材料典型的细观结构;又由于代表单元在复合材料结构中代表一物质点,因此它又应足够小,以便整个复合材料结构可以当作一个连续体处理[1]。然后用有限元法应用于代表性体积单元上,并对该单元在外载荷作用下的力学行为进行模拟研究。即用代表性单元的应力-应变的平均值来代替整个复合材料的等效的应力-应变[10]。

1.1 基于几何建模的周期性单胞模型

在代表性体积单元描述复合材料细观结构的模型中,最有代表性和被普遍应用的就是周期性单胞模型。该模型理想化了细观结构,假设增强体颗粒均匀分布在基体中,整个材料是由这样的单胞周期性排列组成。国内外建立的不同的单胞模型,主要可分为单颗粒模型和多颗粒模型[11-21]。

1.1.1 单颗粒模型的研究

单颗粒模型主要从胞体形状(立方体、圆柱体、六棱柱等)和颗粒性质(形状、尺寸大小、体积分数等)来研究其与力学性能的关系。

Guild F J, Young R J[15]等用轴对称单胞和三维体单胞模型,对含立方体分布、圆柱体分布和六面体分布的玻璃球颗粒增强树脂基复合材料轴向刚度的计算结果和实验结果的对比,得出了六方分布的计算结果和实验值吻合的最好。

蔺越国、程小金[16]等人利用三维有限元法,建立了球体、立方体、圆柱体 3 种形状的颗粒模型,对 SiC 颗粒增强铝基复合材料进行了数值模拟。研究发现,球形颗粒模型的剪切模量的计算值与实验值较接近。

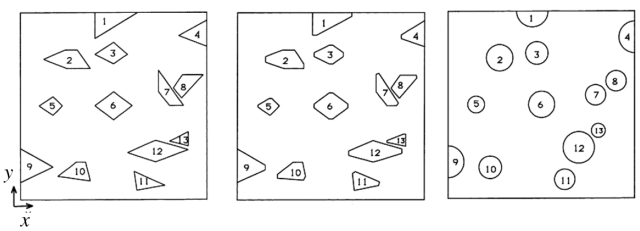
J. Cho, M. S. Joshi[17]等人用球形颗粒夹杂轴对称二维单胞模型,较好地反映了 Al_2O_3 填充乙烯基酯复合材料的力学性能。研究表明,当颗粒粒径为纳米级时,弹性模量和拉伸强度随着粒径的减小而增大,与实验结果一致。

单颗粒模型比较简单,用有限元分析时,计算速度快,也能在一定程度上预测复合材料的力学性质;但此模型忽略了颗粒间的相互作用,对分散不均匀或者颗粒的体积分数较大的复合材料不太适应。

1.1.2 多颗粒模型的研究

国内外对多颗粒模型的研究较多,主要分为 2 个方面:一个是从二维角度建模;另一个是从三维角度建模,用有限元方法模拟颗粒填充型复合材料的力学性能。

C. R. Chen, S. Y. Qin[18]等人用有限元方法,建立了二维多颗粒模型,探索了 SiC 的体积分数为 15% 的 3 种形状的颗粒(见图 1)对 SiC 增强 6061-Al 复合材料应力应变的影响。研究发现,加载相同的力时,带尖角颗粒的模型受到的应力明显比不带尖角的大。这说明带尖角的颗粒结构会降低复合材料的力学性能,圆形的颗粒结构能增强复合材料的力学性能。



a 常规带尖角的颗粒 b 常规没有尖角的颗粒 c 球形颗粒

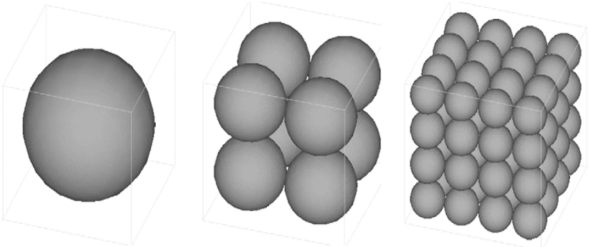
图 1 颗粒增强型复合材料单胞

Fig. 1 The unit models of particle reinforced composites

对颗粒填充型复合材料的三维多颗粒模型研究

较多。利用该模型，已成功研究了颗粒粒径大小、颗粒的体积分数等对复合材料的力学性质的影响。研究发现，颗粒在单胞中的分布情况、颗粒的形状、颗粒数等对模拟复合材料的力学性质有重要影响[14-16]。

Yasuhiro Tanimoto, Tsuyoshi Kitagawa[19]等人研究了相对单颗粒模型，用成倍增加的三维多颗粒模型(见图 2)，来模拟粒径分别为 3.3，4.3，5.9，15.5



a F_1　　b F_8　　c F_{64}

对于每个 F_i，i 代表填充颗粒的数量

图 2　多倍体三维多颗粒模型

Fig. 2 3D polyploidy particles models

μm 的 PLV-4，PLV-6，TB-8，TB-15 来填充质量分数为 60% UDMA 和 40% TEGDMA 的复合材料的弹性模量和抗弯曲强度，探索粒径大小对复合材料抗弯强度的影响。复合材料的抗弯强度随着颗粒粒径的增大而减小。研究还发现，1 倍体模型在界面处的应力有较大集中，而 64 倍体模型的应力分布较为稳定，64 倍体模型应力的计算值与实验值吻合。

Guozheng Kang[20]等人用三维面心体模型(见图 3)，成功预测出了 SiCP/6061Al 复合材料的弹性模量

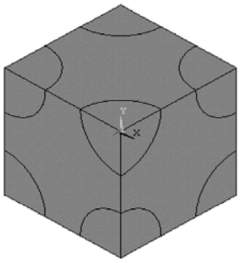


图 3　三维面心体模型

Fig. 3 Three-dimensional sphere-in-cube model

和应力应变关系。在此模型中，其最大轴向应力分布在颗粒与颗粒间平行于加载方向处。

F. R. Liu, K. C. Chan[21]等人用三维有限元方法建立了随机球形颗粒夹杂模型(见图 4)，有效地预测出了质量分数为 25%的 SiCp 增强 Al6092 复合材

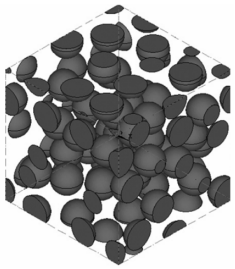


图 4　体积分数为 25%且包含有 50 个颗粒的模型

Fig. 4 Solid model containing 50 spheres and volume fraction 25%

料的应力应变关系。

相比单颗粒模型，多颗粒模型能预测高体积分数的和分布不均匀的复合材料的力学性能[21]；但是，多颗粒模型的计算较复杂，计算机所需消耗的内存很大，计算需要的时间较长。

1.2　基于实际微观结构的有限元模型

基于微观结构的有限元模型是将先进的图像处理技术与有限元模型相结合，能够更加形象真实地反映复合材料内部颗粒的形貌和分布。该方法需要对复合材料进行特殊处理以成像，因此对实验设备和技术具有较高的要求。由于该方法能够真实反映复合材料内部颗粒分布的状态及形貌，因此能更加接近真实材料的情况。

1.2.1　通过 SEM 图像建立的二维有限元模型

该模型的主要方法是通过 SEM 所得的数字图像，导入软件中进行分割处理，转化为矢量图像，然后再导入有限元软件中进行网格剖分和有限元分析。其流程可概括为获取 SEM 图像—分离 SEM 图像—获得量化图—网格划分进行有限元分析[22-24]。

Zhang Peng[25]等人用基于微观结构的二维有限元模型模拟了 SiCP/Al 复合材料的 3 种分布对其应力和应变的影响。研究发现，颗粒聚集型的比随机分布的断裂概率要大，颗粒聚集型会较早产生界面脱粘。

V. Cannillo[26]等人也利用此方法探讨了体积分数为 15%～30 %的钼对钼/ 硼硅酸盐玻璃复合材料力学性质的影响，且预测值与实验值十分接近。

1.2.2　基于微观结构的三维有限元模型

该模型的主要思想是通过连续切片法来获得颗粒增强金属基复合材料的三维细微观结构模型，然后导入有限元分析软件中进行模拟分析[2]，其流程见图

5[27]。该结构相对周期性多颗粒模型更加接近真实

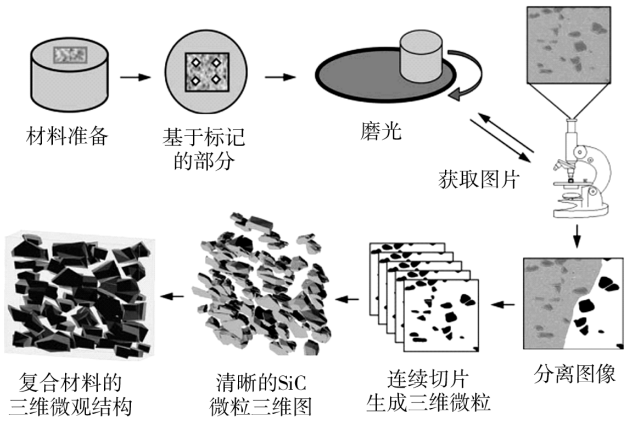


图 5 连续切片法和 3D 结构重构流程

Fig. 5 Flow chart of serial sectioning and 3D reconstruction process

结构,对复合材料力学性能的预测更为准确,但此法相对较为复杂,模型大小也有一定的限制。

N. Chawla[27]等还比较了相同体积分数的 SiC/2080Al 复合材料,在相同分布规律下,颗粒形状为椭球体、球体多颗粒周期性模型、单颗粒模型与基于微观结构的三维有限元模型的弹性模量。研究发现,基于微观结构的三维有限元模型的弹性模量与实验值十分接近。

2 模型的边界条件研究

模型的边界条件影响到整个胞体的受力,因此对颗粒填充性复合材料的力学性质也有重大影响。对于颗粒填充型复合材料的模型,其边界条件的设定主要分为 2 类,分别采用加载位移和加载载荷的方式。

对于单颗粒二维轴对称模型,采用了加载位移的方式,其边界条件的设定如下[28-29],见图 6。

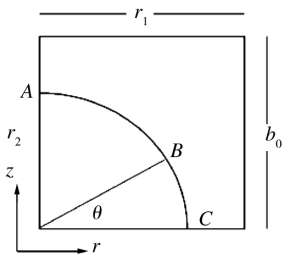


图 6 轴对称单胞

Fig. 6 Axisymmetric unit cell

$v_Z = 0$, on $Z = 0$;(v_Z 为 Z 方向的加载的位移)

$v_Z = V$, on $Z = b_0$;(V 是被定义的常数)

$\sigma_r = 0$, on $r = R$,($r = R$ 的边界初始应力为 0)

对于三维单颗粒胞体,为了简化模型,取胞体的 1/8 进行研究,采用加载载荷的方式,边界条件的设定如下[30]:

$z=0$, 固定; $x = 0$, 固定; $y = 0$,固定;

$z=a$, $\sigma = \sigma_z$, $u_3 = U_3$;

$x=a$, $y = a$, 自由。

即在边长为 a 的胞体上表面施加 σ_z 的应力。U_3 为单胞上表面的位移量, u_1, u_2, u_3 分别为单元胞体在 x, y, z 方向的位移。

对于多颗粒模型,其边界条件的设定如下[31-33],先设定一个周期为 L 边界条件。

$$u(x_1, x_2, 0) - u_3 = u(x_1, x_2, L)$$

$$u(x_1, 0, x_3) - u_2 = u(x_1, L, x_3)$$

$$u(0, x_2, x_3) - u_1 = u(L, x_2, x_3)$$

x_1, x_2, x_3 分别代表 x, y, z 方向的坐标;u_1, u_2, u_3 分别为单元胞体在 x, y, z 方向的位移。

然后对单元胞体上的面进行约束。

$$\int_\Omega \sigma_1 \mathrm{d}\Omega = 0, \text{on} \quad x_1 = L$$

$$\int_\Omega \sigma_2 \mathrm{d}\Omega = 0, \text{on} \quad x_2 = L$$

即 $x_1 = L$ 平面沿 x_1 方向的初始应力为 0,$x_2 = L$ 的平面沿 x_2 方向的初始牵引力为 0。再对 $x_3 = 0$ 的平面加以 x_1 方向的位移载荷 u,表达式为 $u_3 = (u, 0, 0)$;$u_1 = u_2 = (0, 0, 0)$。

对于基于实际微观结构的有限元模型,边界采用加载载荷方式,其边界条件设定如下[34]:

$x = 0$, $u_x = 0$(胞体在 $x=0$ 的面约束 x 方向的位移为 0);$x = a$, $\sigma_x = \sigma_0$(对胞体 $x=a$ 的面加载 x 方向的载荷为 σ_0)。

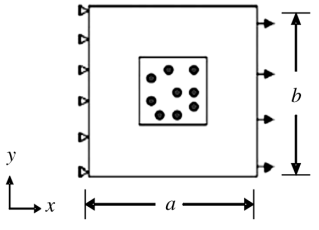


图 7 运用于基于实际微观结构的有限元模型的边界条件

Fig. 7 Boundary conditions of FEA model based on real microstructure

3　界面对复合材料力学性质的影响研究

相关研究表明,复合材料两相间的界面对预测颗粒填充型复合材料力学性能有重大影响[20,35-36]。从界面的研究又大体可分为 3 类:界面的有无、界面的厚度、界面的强度对预测复合材料力学性质的影响。对界面的研究,由于多颗粒模型的界面较多,多简化为单颗粒胞体的界面来探讨。

Guozheng Kang[20]等人发现,SiCP/6061Al 复合材料间有界面的模型比没有考虑界面的模型预测复合材料的力学性质要合理。有界面的模型,受到的最大应力分布在界面层和靠近界面处;而无界面模型的最大应力分布在基体和两颗粒间与加载方向平行的位置。最大应力分布处,是复合材料最先断裂或破坏的地方。同时,还研究了界面厚度对复合力学性能的影响。复合材料的弹性模量随着界面厚度的增加而减小,故需要选取较合适的界面厚度的模型来反映材料的力学性能。

张亚芳、唐春安[37]等人研究了界面强度的柔颗粒增强复合材料破裂特性的影响。结果表明,当界面结合较强时,复合材料主要发生穿晶破坏,材料韧性较好但强度较差;当界面结合较弱时,复合材料主要产生沿晶破坏,材料韧性较差而强度较好。

4　模型网格划分的研究

网格的划分也是有限元预测复合材料的力学性质的重要影响因素。目前国内外学者分别用自适用网格生产法、节点连元法、三维推进波前法(AFT)法等对多颗粒模型进行了网格划分[38]。

自适用网格法简便,对几何形状无限制,同时可以控制网格的参数,但是它生成的是非结构化网格,不能控制单元分布。国内外许多文献都采用此法对模型进行网格化分。

Romina B. Barello[39]等人研究了网格自由度数对复合材料整体应力的影响。研究表明,复合材料体积分数为 10%,包含 10 个球体颗粒的胞体,划分的网格达到 3×10^6 个自由度时,模拟其应力时就能取得较好的效果。

节点连元法一般分为 2 步:在物体的边界和有效区域内按照网格密度的要求均匀布点;根据一定的准则将这些节点连接成三角形或四面体网格。该方法不能保证布点的均匀性,同时为了确定可用节点,要进行点距检查和多次试探,算法效率低。

F. Fritzen[40]等人探究了节点数对用有限元分析 SiCp 颗粒填充 Al 基复合材料的力学性能的影响,以及 3 种体积分数下,节点数的多少对复合材料力学性能的影响。研究发现,10 万个节点的效果跟 30 万个节点的效果相差不大。

AFT 方法[41]是将实体的边界都向域内移动一段距离,在 2 个边之间形成网格单元。该法产生的网格质量较高,网格是边界灵敏的,方向不灵敏;己有的表面网格可以应用,因此和相邻的实体具有最大的相容能力;输入独立于几何体,所以像大多数四面体网格化一样,在网格化过程中不需要几何算子。但该方法还不够成熟,且网格划分耗时过长。

高巧红[42]在基于映射法的颗粒表面有限元网格生成算法中,通过扫描线布点和局部连接技术,较好地解决了网格极化现象;采用改进的 AFT 方法生成基体的四面体(三角形)网格,并利用 AFT 特性一次生成所有颗粒夹杂的面体(三角形)网格。

5　颗粒填充型复合材料在包装上的应用

填充改性可提高材料的阻隔性能和力学性能。通过改性,填充材料与基体树脂间的界面相容性、反应性、润湿性可大大增强,填料的分散性也可显著提高。从而界面结合力得以强化,分相程度减小[43]。

填充物目前主要有颗粒尺度和纳米尺度的有机物或无机物(如 $CaCO_3$ 和 TiO_2、云母、蒙脱土、凸凹棒土等)以及分子级高分子。现阶段,聚合物/无机纳米复合材料研究的最多,进展也最快,并已成为国内外包装材料研究的主要方向和热门课题,应用范围也不断拓宽。

云母是理想的 PE 类树脂的填充物,分散性也很好,其膜制品可具有很高的红外线阻隔性能,折光率极高。

二氧化钛填充聚乙烯材料用作酸奶的包装,具有较好的隔光性,还能有效延长酸奶的保质期。

淀粉填充型塑料如 PP 和 PE 等,作为一种可生物降解材料,在包装上也得到了一定运用。

6 研究展望

1）有限元分析颗粒填充型复合材料的力学性质已经进行了较多研究，但大多数都是以金属基复合材料为研究对象。用于生产生活的复合材料较多，有一些是具有特定功能性的复合材料。今后可在更多的领域发展该研究方法。

2）对颗粒填充型复合材料的研究大多是局限在两相的复合材料，可以拓展为对三相复合材料力学性能的研究。三相复合材料克服了其组分组成不完备性，能有效提高精度。

3）对颗粒填充性复合材料的研究可以深入到更微观的角度研究，进一步探讨界面结合对复合材料宏观性能的影响。

4）对于包装材料，有限元法不仅可以预测颗粒填充型复合材料，如用于酸奶包装的二氧化钛填充聚乙烯材料等的力学性能，还可用来预测含多层材料的复合材料，如铝箔纸、多层复合的塑料膜等的力学性能。

参考文献：

[1] 沈观林，胡更开. 复合材料力学[M]. 北京：清华大学出版社，2006.

[2] 邵军超，刘越. 颗粒增强金属基复合材料力学行为有限元模拟研究现状[J]. 材料导报，2007，21(9)：111－115.

[3] 郭玉花，滕立军. PE/$CaCO_3$ 保鲜膜研制及其在小油菜保鲜中的应用[J]. 包装工程，2006，27(4)：59－61.

[4] 王茹，许文才，李东立. SiO_2 对低密度聚乙烯摩擦性能与力学性能影响的研究[J]. 包装工程，2008，29(10)：93－95.

[5] 吴成宝，盖国圣，李建波. PP/无机粒子复合材料拉伸强度的预测模型及影响因素分析[J]. 合成材料老化与应用，2009，38(4)：25－30.

[6] 滕立军，王高升. 淀粉-聚乙烯生物降解塑料薄膜的性能研究[J]. 包装工程，2004，25(6)：63－65.

[7] 聂柳慧，韩永生. 壳聚糖-淀粉共混薄膜的制备与研究[J]. 包装工程，2005，26(6)：73－75.

[8] DAWSON P R, NEEDLEMAN A. Issues in the Finite Element Modeling of PolyPhases Plastieity[J]. Mater Sci Eng A，1994，175：43－80.

[9] BASKES M I, HOAGLAND R G, NEEDLEMAN A. Summary Report: Computational Issues in the Mechanical Behavior of Metals and Intermetallics[J]. Mater Sci Eng A，1992，159：1－34.

[10] 赵秀阳. 复合材料三维重构及力学性能的有限元数值分析[D]. 济南：山东大学，2006.

[11] LEON L, MISHNAEVSKY Jr. Three-dimensional Numerical Testing of Microstructures of Particle Reinforced Composites[J]. Acta Materialia，2004，52：4177－4188.

[12] RAJLAKSHMI N, TARKES D P. A Computational and Experimental Investigation on Thermal Conductivity of Particle Reinforced Epoxy Composites[J]. Computational Materials Science，2010，48：576－581.

[13] MEIJER G, ELLYIN F. Aspects of Residual Thermal Stress/strain in Particle Reinforced Metal Matrix Composites[J]. Composites，2000，31：29－37.

[14] KARI S, BERGER H. Computational Evaluation of Effective Material Properties of Composites Reinforced by Randomly Distributed Spherical Particles[J]. Composite Structures，2007，77：223－231.

[15] GUILD F J, YOUNG R J. A Predictive Model for Particulate-filled Composite Materials[J]. J Mater Sci，1989，24：298－306.

[16] 蔺越国，程小金. 颗粒增强铝基复合材料拉伸性能研究[J]. 复合材料学报，2005(12)：23－26.

[17] CHO J, JOSHI M S. Effect of Inclusion Size on Mechanical Properties of Polymeric Composites with Micro and Nano Particles[J]. Composites Science and Technology，2006，66：1941－1952.

[18] CHEN C R, QIN S Y. Finite Element Analysis about Effects of Particle Morphology on Mechanical Response of Composites[J]. Materials Science and Engineering，2000，A278：96－105.

[19] TANIMOTO Y, KITAGAWA T. Experimental and Computational Approach for Evaluating the Mechanical Characteristics of Dental Composite Resins with Various Filler Sizes[J]. Acta Biomaterialia，2006(2)：633－639.

[20] KANG G Z, SHAO X J. Effect of Interfacial Bonding on Uniaxial Ratchetting of SiCP/6061Al Composites: Finite Element Analysis with 2-D and 3-D Unit Cells[J]. Materials Science and Engineering，2008，A487：431－444.

[21] LIU F R, CHAN K C. Numerical Modeling of the Thermo-mechanical Behavior of Particle Reinforced Metal Matrix Composites in Laser Forming by Using a Multi-particle cell model[J]. Composites Science and Technology，2008，68：1943－1953.

[22] GANESH V V, CHAWLA N. Effect of Particle Orientation Anisotropy on the Tensile Behavior of Metal Matrix Composites: Experiments and Microstructure －

based Simulation[J]. Mater Sci Eng,2005,391:342.

[23] CHAWLA N,DENG X,SCHNELL D R M. Thermal Expansion Anisotropy in Extruded SiC Particle Reinforced 2080 Aluminum Alloy Matrix Composites[J]. Mater Sci Eng,2006,426:314.

[24] CHAWLA N,SIDHU R S,GANESH V V. Three-dimensional Visualization and Microstructure Based Modeling of Deformation in Particle-reinforced Composites [J]. Acta Mater,2006,54:1541.

[25] ZHANG P. Effects of Particle Clustering on the Flow Behavior of SiC Particle Reinforced Al Metal Matrix Composites[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2010,39(9):1525－1531.

[26] CANNILLO V. Mechanical Performance and Fracture Behavior of Glass-matrix Composites Reinforced with Molybdenum Particles[J]. Composites Science and Technology,2005,65:1276－1283.

[27] CHAWLA N. Three-dimensional Visualization and Microstructure-based Modeling of Deformation in Particle-reinforced Composites[J]. Acta Materialia, 2006, 54: 1541－1548.

[28] 张茵,卢锡年.球形粒子填充复合材料微观应力场的有限元分析[J].复合材料学报,1995,12(4):90－92.

[29] GHASSEMIEH E. Micro-mechanical Analysis of Bonding Failure in a Particle-filled Composite[J]. Composites Science and Technology,2002,62:67－82.

[30] TSUI C P, TANG C Y. Finite Element Analysis of Polymer Composites filled by Interface Coated Particles[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001,117: 105－110.

[31] GONZALEZ C,SEGURADO J,LLORCA J. Numerical Simulation of Elasto-plastic Deformation of Composites: Evolution of Stress Microfields and Implications for Homogenization[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids,2004,52:1573－1593.

[32] LLORCA J,SEGURADO J. Three-dimensional Multiparticle Cell Simulations of Deformation and Damage in Sphere-reinforced Composites[J]. Materials Science and Engineering, 2004,A365:267－274.

[33] PIERARD O,LLORCA J. Micromechanics of Particle-reinforced Elasto-viscoplastic Composites: Finite Element Simulations Versus Affine Homogenization[J]. International Journal of Plasticity,2007,23:1041－1060.

[34] SOZHAMANNAN G G,BALASIVANANDHA P S. Failures Analysis of Particle Reinforced Metal Matrix Composites by Microstructure Based Models[J]. Materials and Design,2010,31:3785－3790.

[35] RJAFIALLAH S,GUESSASMA S. Effect of Surface Etching on Interphase and Elastic Properties of a Biocomposite Reinforced Using Glass-silica Particles[J]. Composites Science and Technology, 2010, 70: 1272－1279.

[36] QU S,SIEGMUND T. A Study of Particle Size Effect and Interface Fracture in Aluminum Alloy Composite via an Extended Conventional Theory of Mechanism-based Strain-gradient Plasticity[J]. Composites Science and Technology,2005,65:1244－1253.

[37] 张亚芳,唐春安.界面强度对柔颗粒增强复合材料破裂特性的影响[J].中山大学学报(自然科学版),2007,46(1):36－39.

[38] 古成中,吴新跃.有限元网格划分及发展趋势[J].Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2008:248－256.

[39] BARELLO R B. Comparison between the Relaxation Spectra Obtained from Homogenization Models and Finite Elements Simulation for the Same Composite[J]. International Journal of Solids and Structures, 2008, 45: 850－867.

[40] FRITZEN F. Periodic Three-dimensional Mesh Generation for Particle Reinforced Composites with Application to Metal Matrix Composites[J]. International Journal of Solids and Structures,2010,48:1－13.

[41] 李笑牛,赵伟.六面体有限元网格生成方法综述[J].大连民族学院学报,2003,5(3):1－2.

[42] 高巧红.复合材料设计有限元网格模型的自动生成[D].大连:大连理工大学,2005.

[43] 共混合填充技术在包装材料中的应用[EB/OL].(2006-10-11). http://www. chemhello. com/consult/html/171. html.