

碳化硅颗粒增强铝基复合材料有效弹性模量预测

田学亮, 徐 颖

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘要: 为了分析碳化硅颗粒增强铝基复合材料细观结构对其宏观力学性能的影响, 针对无压渗透法制备的 A356/SiCp 复合材料建立了表征其细观结构的 2 维代表性体积单元有限元模型, 以建立复合材料宏观性能与细观结构之间的依赖关系。在周期性边界条件和模拟单轴拉伸边界条件下研究了颗粒的形状(圆形、椭圆形)和体积分数(10%、15%、20%)对其有效弹性模量的影响, 并与无压渗透法制备的 A356/SiCp 复合材料试验值进行比较。结果表明: 在 2 种条件下的预测结果相差不大, 预测误差均不超过 5%; 碳化硅颗粒体积分数对复合材料的力学性能影响显著, 对颗粒形状的影响很小, 在相同边界条件及体积分数下, 圆形和椭圆形颗粒的预测值相差不超过 0.4%。

关键词: 代表性体积单元有限元模型; 碳化硅颗粒增强铝基复合材料; 周期性边界; 单轴拉伸边界; 有效弹性模量; 细观结构; 宏观力学特性; 航空发动机

中图分类号: V257

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2021.05.015

Prediction of Effective Elastic Modulus for SiC Particle Reinforced Aluminium Matrix Composites

TIAN Xue-liang, XU Ying

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to analyze the influence of microstructure on macro mechanical properties for SiC particle reinforced Aluminium matrix composite, a two-dimensional RVE(Representative Volume Element)finite element model was established to characterize the microstructure of A356/SiCp composite prepared by pressureless infiltration method. The relationship between the macro mechanical properties and the microstructure of the composites was established by RVE finite element model. The effects of particle shape (circle, ellipse) and volume fraction (10%, 15%, 20%) on the effective elastic modulus of A356 / SiCp composites were studied under periodic boundary conditions and uniaxial tension boundary condition, and compared with the test values of A356 / SiCp composites prepared by pressureless infiltration method. The results show that the prediction results under the two conditions are almost the same and the prediction error is less than 5%. The volume fraction of SiC particles has a significant effect on the mechanical properties of the composites, but has little effect on the shape of the particles. Under the same boundary conditions and volume fraction, the difference between the predicted values of circular and elliptical particles is not more than 0.4%.

Key words: RVE(Representative Volume Element)finite element mode; SiC particle reinforced Aluminium matrix composites; periodic boundary conditions; uniaxial tension boundary condition; effective elastic modulus; microstructure; macroscopic mechanical property; aeroengine

0 引言

复合材料的颗粒增强是指向基体中引入颗粒增强相以改善其力学性能, 因其制备容易, 效果显著, 有望替代传统制作工艺中制备困难、价格高昂的纤维增强。特别是碳化硅颗粒增强铝基复合材料 SiC_p/Al 不

仅力学性能优异, 而且原材料易于获得, 制备技术相对成熟, 价格低廉, 已逐步替代传统材料被广泛应用于核能、航空航天、电子、军工等领域^[1]。

在研究颗粒增强金属基复合材料有效宏观力学性能时, 常用细观力学方法^[2-3]和有限元数值模拟^[4-5]。

收稿日期: 2019-09-04

作者简介: 田学亮(1995), 男, 在读硕士研究生, 研究方向为先进复合材料的结构设计、强度和疲劳; E-mail: 1757208358@qq.com。

引用格式: 田学亮, 徐颖. 碳化硅颗粒增强铝基复合材料有效弹性模量预测[J]. 航空发动机, 2021, 47(5): 92-97. TIAN Xueliang, XU Ying. Prediction of effective elastic modulus for SiC particle reinforced Aluminium matrix composites[J]. Aeroengine, 2021, 47(5): 92-97.

针对 SiCp/Al 复合材料的有效弹性模量,采用细观力学方法分析几何结构简单的材料时,预测的宏观性能较为合理,如 Eshelby 等效夹杂理论、Mori-Tanaka 方法、Voigt 和 Reussd 的上下限法等,但不能处理任意微结构的情况,无法描述微结构的应力应变演化,此时一般采用基于单胞模型的有限元方法来预测复合材料的有效性能。Ghosh 等^[6]于 1991 年提出了 Voronoi 单元有限元法(Vornoi Cell Finite Element Method, VC-FEM),在计算时考虑了颗粒的形状、体积分数等因素对复合材料力学性能的影响,与其他计算方法相比具有单元数量少、计算效率高的特点;Ghosh 等^[7]于 1995 年以 Voronoi 单元为基础分析了材料的多尺度问题,研究了颗粒增强复合材料内部夹杂颗粒的应力应变情况;徐佳丽^[8]基于 VCFEM 法与有限元法进行了混合计算,改进了计算程序,解决了原有程序只可以计算颗粒增强复合材料的单一性问题,提升了计算效率和适用性;翁琳^[9]建立了颗粒增强复合材料 3D 周期性有限元分析模型,将扩展应变梯度理论嵌入有限元中进行计算,研究了颗粒大小变化对材料整体性能的影响。

不同制作工艺以及不同材料组分制备的碳化硅颗粒增强铝基复合材料的力学性能差异很大,不可能利用某种建模理论及计算方法对所有复合材料进行计算都能得到较高的预测精度。此前的研究大多针对复合材料的力学性能,没有针对各种制作工艺以及组分材料的特点进行研究并建立相应的计算模型。本文针对适合采用无压渗透法制备的 A356/SiCp 复合材料建立了代表性体积单元(Representative Volume Element, RVE),在不同边界条件下分析不同体积分数、不同夹杂颗粒形状对该材料有效弹性模量的影响。

1 A356/SiCp 复合材料 RVE 有限元模型

根据复合材料真实颗粒大小分布以及界面结合情况,结合无压渗透法制作的颗粒增强铝基复合材料细观结构特点,为探讨颗粒形状、大小对有效弹性模量的影响,对所建立的 RVE 有限元模型做如下假设:

- (1)颗粒呈圆形或椭圆形;
- (2)颗粒与基体结合良好,无中间结合物、缺陷或孔隙。

基于以上假设建立的碳化硅颗粒体积分数为 10% 的 A356/SiCp 复合材料 2 维 RVE 有限元模型如图

1 所示。表征的碳化硅颗粒尺寸为微米级别,铝基体为 $20\text{ }\mu\text{m}\times 20\text{ }\mu\text{m}$ 的正方形,圆形碳化硅颗粒半径为 $0.89\text{ }\mu\text{m}$ 。其中碳化硅颗粒的面积占比为 10%,以此体现碳化硅颗粒的体积分数占比。碳化硅颗粒夹杂在图形中的具体位置采用随机数生成器生成,通过设置随机数产生的范围来避免产生交叉的夹杂颗粒。

碳化硅颗粒增强铝基复合材料由碳化硅颗粒和铝合金基体复合而成,本文采用无压渗透法制备的 A356/SiCp 复合材料典型力学性能作为参考值,其性能参数见表 1。其中铝合金基体为弹塑性材料,碳化硅颗粒为线弹性材料,具体力学性能参数见表 2。

表 1 无压渗透法制备 A356/SiCp 复合材料典型力学性能参数^[10]

铝基体+ SiCp 增强相	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	延伸率/%	弹性模量/ GPa
A356+10%SiCp	283	303	0.6	81
A356+15%SiCp	324	331	0.3	90
A356+20%SiCp	331	352	0.4	97

表 2 A356/SiCp 复合材料组分力学性能参数^[11-12]

材料	弹性模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa
铝基体	72.4	0.33	235
SiCp 增强相	430.0	0.25	

在 ABAQUS 中采用 mesh 模块对所建立的 RVE 有限元模型进行有限元计算网格划分。RVE 有限元模型整体网格尺寸设为 $0.2\text{ }\mu\text{m}$,采用线性四边形网格,设定 4 条边上的单元数为 76。划分情况如图 2 所示。

由此生成的碳化硅颗粒和铝基体的网格采用结点合并的处理方式,即认为在复合材料变形过程中碳化硅颗粒和铝基体不发生脱离,二者之间也不会产生几何位错。而在无压渗透法制备过程中的金属熔体能够很好地与增强体表面融合,使二者的界面结合良

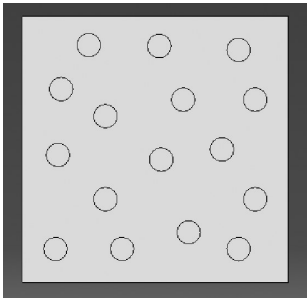


图 1 A356/SiCp 复合材料 RVE 有限元模型

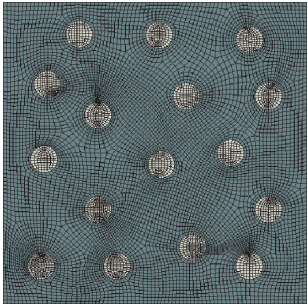


图 2 RVE 有限元模型 网格划分

好,不易发生脱黏现象^[13-14]。故采用结点合并的方式能够有效模拟无压渗透工艺下复合材料的界面结合情况。

2 周期性边界条件和模拟单轴拉伸边界条件

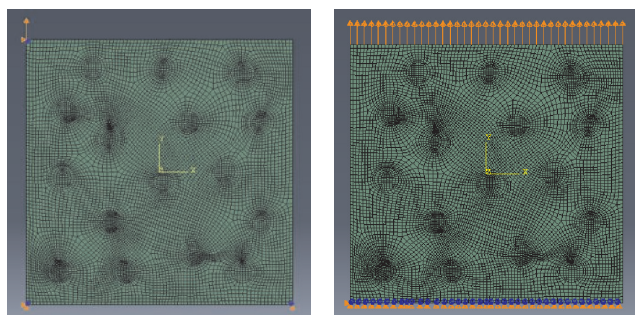
周期性边界条件可使每个代表性体积单元相对面上的节点位移相互对应,从而保证变形的周期性和连续性^[15]。Xia等^[16]总结了周期性边界条件的一般表示方法,其形式为

$$u_i^{j+} - u_i^{j-} = \bar{\varepsilon} \Delta x_k^j \quad (i, k = x, y, z) \quad (1)$$

式中:上标 j^- 表示沿 x_j 负方向;上标 j^+ 表示沿 x_j 正方向; $\bar{\varepsilon}$ 为RVE模型的平均应变; Δx_k^j 为相对面之间距离。

参考翁晶萌等^[17]施加的周期性边界条件,在ABAQUS中通过施加多点约束方程,并结合相应子程序,完成对RVE有限元模型周期性边界条件的施加。为了使计算得以进行,还需设置与周期性边界条件相一致的节点载荷以及边界条件,其具体设置情况如图3(a)所示。2维模型左下角节点固定,限制其 U_1 、 U_2 、 U_{R3} ;限制平面模型右下角节点 U_2 、 U_{R3} ;限制2维模型左上角节点 U_1 、 U_{R3} ;于2维模型左上角节点施加载荷,载荷步的幅值设为 $0.020 \mu\text{m}$,初始载荷步以及最大载荷步设为 $0.004 \mu\text{m}$ 。

模拟单轴拉伸边界条件如图3(b)所示。2维模型左下角节点固定,限制其 U_1 、 U_2 、 U_{R3} ,以此限制计算模型的刚体位移,防止计算过程中出现数值奇异,且不会对计算模型产生过大影响。限制底边节点 U_2 、 U_{R3} 。对顶边节点施加位移载荷,载荷步幅值为 $0.020 \mu\text{m}$,初始载荷步以及最大载荷步设为 $0.004 \mu\text{m}$ 。



(a) 周期性边界条件 (b) 模拟单轴拉伸边界条件

图3 2种边界条件设置

施加周期性边界条件的RVE有限元模型 U_1 位移如图4所示。位移云图的颜色深浅代表了节点位移的大小,选取2维模型上 $y=0$ 、 $y=20$ 时不同 x 坐标位置

处节点位移值 U_1 ,结果见表3。从表中可见,对应节点的 U_1 相等,即此模型保证了对应边上的位移连续性要求,对此RVE有限元模型成功施加了周期性边界条件。

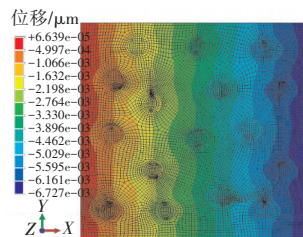


图4 周期性边界条件下RVE有限元模型 U_1 位移

表3 周期性边界条件下RVE有限元模型 U_1 的位移 μm

底边 $y=0$	0	-0.0004	-0.0008	-0.0012	-0.0014	-0.0018	-0.0024	-0.0045	-0.0066
顶边 $y=20$	0	-0.0004	-0.0008	-0.0012	-0.0014	-0.0018	-0.0024	-0.0045	-0.0066

3 有效弹性模量计算

采用载荷施加边上的平均弹性模量值作为复合材料的有效弹性模量,方便快捷且综合考虑了所有增强颗粒对复合材料的作用效果,通过实际计算发现该处理方式不会产生较大的误差,在工程计算上是可行的。采用周期性边界条件计算得到的RVE有限元模型 S_{22} 的应力如图5所示。在ABAQUS后处理中创建场输出变量,导出2维模型顶边所在单元的积分点处应力 S_{22} ,并通过式(2)求得有效弹性模量。模拟单轴拉伸边界条件的单RVE有限元模型亦采用此方法获得有效弹性模量。载荷步幅值为 $0.020 \mu\text{m}$,2维模型边长为20,故可知模型平均应变为0.001。

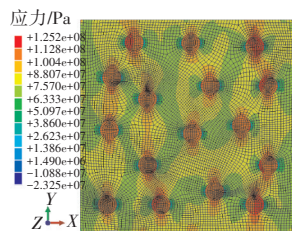


图5 RVE有限元模型 S_{22} 应力分布(周期性边界条件)

$$E = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_i}{0.001} \quad (2)$$

4 不同体积分数、颗粒形状、边界条件对有效弹性模量的影响

4.1 表征不同细观结构的RVE有限元模型建立

颗粒增强复合材料的颗粒体积分数对其有效弹性模量的影响显著,且颗粒的形状、大小也会对其有效弹性模量产生一定的影响^[18-20]。据此建立了表征圆形和椭圆形颗粒不同体积分数(10%、15%、20%)的RVE有限元模型,对比了不同边界条件下的计算结果,并与相应体积分数的A356/SiCp复合材料的典型力学性能进行比较分析。模型中圆形和椭圆形颗粒的中心坐标相同,通过改变圆形颗粒的半径以达到不

同的圆形颗粒体积分数占比,具体尺寸见表 4,建立的模型如图 6 所示。椭圆形颗粒的方向随机,不同体积分数的椭圆形颗粒方向相同。

表 4 圆形、椭圆形颗粒的体积分数及其尺寸

体积分数/%	圆形颗粒尺寸/ μm	椭圆形颗粒尺寸/ μm	
	半径	半长轴	半短轴
10	0.89	1.26	0.63
15	1.09	1.54	0.77
20	1.26	1.78	0.89

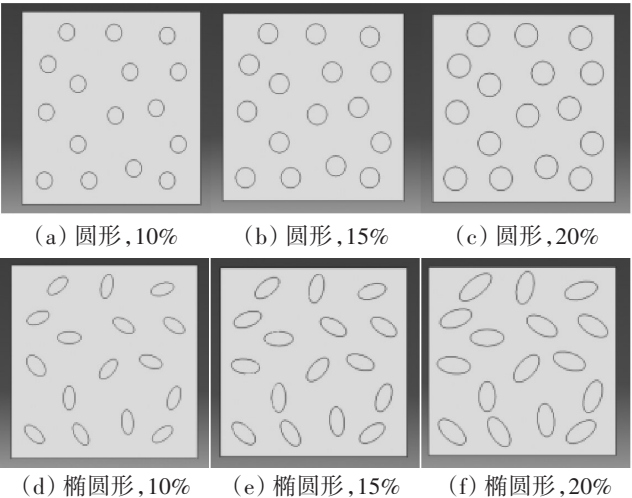


图 6 不同形状和体积分数的 RVE 有限元模型

4.2 不同颗粒形状及边界条件下有效弹性模量对比分析

4.2.1 颗粒中应力分布规律分析

不同颗粒形状及边界条件下 RVE 有限元模型米塞斯应力如图 7 所示。

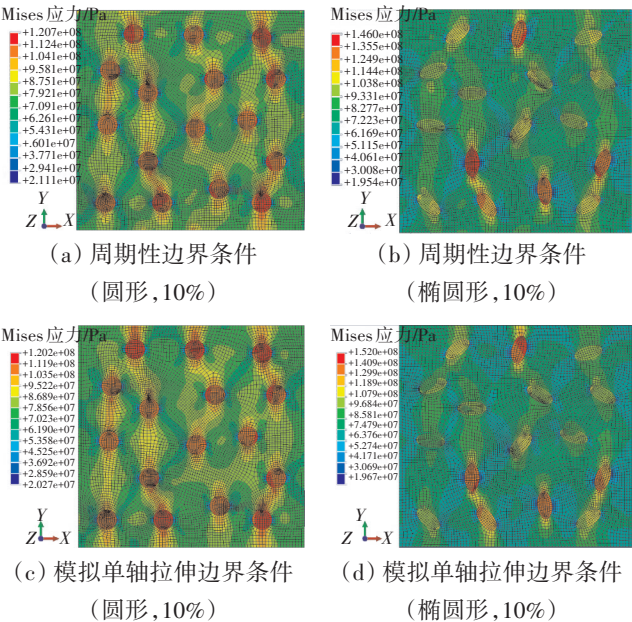


图 7 不同颗粒形状及边界条件下 RVE 有限元模型米塞斯应力

根据计算结果可知:

(1)无论是在周期性边界条件还是模拟单轴拉伸边界条件下,椭圆形颗粒的半长轴方向与y轴夹角较小,在受载方向上的投影面积较小时,其应力较大,即椭圆形颗粒的应力水平随椭圆半长轴的方向不同而有所不同;而圆形颗粒在受载方向上的投影面积相等,所以不同圆形颗粒的应力水平相差不大。

(2)无论是圆形颗粒还是椭圆形颗粒,在 2 种边界条件下的应力水平都相当。圆形颗粒的应力水平为 110 MPa 左右,椭圆形颗粒的应力水平为 94~140 MPa。

4.2.2 有效弹性模量对比分析

在不同边界条件下有效弹性模量的计算结果见表 5、6。从表中数据可知:

(1)在 2 种边界条件下 RVE 有限元模型均能有效预测 A356/SiCp 复合材料的有效弹性模量,且达到了较高的预测精度,其预测误差都不超过 5%。

(2)在 2 种边界条件下得到的计算结果相差不大。在 2 维 RVE 有限元模型中可利用简单的模拟单轴拉伸边界条件代替周期性边界条件,所得计算结果相差不超过 0.324%。

(3)在 2 种边界条件下,圆形、椭圆形颗粒复合材料有效弹性模量差别不大,相差不超过 0.4%,即颗粒形状对复合材料的力学性能影响不显著,这与王文明等^[21]的试验研究结果相符合。

表 5 周期性边界条件下增强相颗粒 RVE 有限元模型有效弹性模量计算值与试验值的比较

铝基体+	试验值/ GPa	计算值/GPa		误差/%	
		圆形增强相	椭圆形增强相	圆形增强相	椭圆形增强相
SiCp 增强相					
A356+10%SiCp	81	81.3	81.5	0.37	0.62
A356+15%SiCp	90	86.6	86.7	-3.78	-3.67
A356+20%SiCp	97	92.6	92.8	-4.54	-4.33

注:误差为计算值相对试验值的误差百分比。

表 6 模拟单轴拉伸边界条件下增强相颗粒 RVE 有限元模型有效弹性模量计算值与试验值的比较

铝基体+	试验值/ GPa	计算值/GPa		误差/%	
		圆形增强相	椭圆形增强相	圆形增强相	椭圆形增强相
SiCp 增强相					
A356+10%SiCp	81	81.4	81.5	0.49	0.62
A356+15%SiCp	90	86.5	86.8	-3.89	-3.56
A356+20%SiCp	97	92.9	93.1	-4.32	-4.02

注:误差为计算值相对试验值的误差百分比。

4.2.3 误差分析

除体积分数为 10% 的有效弹性模量预测值较真

实值偏高外,其他的预测值都偏低,造成此现象的原因可能有如下3点:

(1)未考虑复合材料制备过程中残余应力带来的影响,致使预测结果偏低^[19]。

(2)有限元模型计算网格划分采用碳化硅颗粒与铝基体结点合并的方式,致使在材料变形过程中无几何位错产生,从而缺少了几何位错带来的强化效果^[22]。但当复合材料处于弹性阶段时,由此带来的影响可忽略。

(3)实际复合材料中碳化硅颗粒大小具有一定的分布特性,不同体积分数的复合材料区别在于所含颗粒数量不同,颗粒数量越多意味着体积分数越高,颗粒和基体的接触面积也就越大,由此带来的强化效果也就越明显。通过改变颗粒大小来改变体积分数的方式对接触面积的增大效果不如增加颗粒数量的方式明显,从而使预测结果偏低。

5 结论

(1)采用碳化硅颗粒和铝基体材料之间结点合并的方式能有效模拟无压渗透法制备的 A356/SiCp 复合材料的界面结合情况,对复合材料有效弹性模量的预测误差不超过5%,满足一般工程上的精度要求。

(2)对比了周期性边界条件和模拟单轴拉伸边界条件下2维RVE有限元模型,2种边界条件下所得复合材料有效弹性模量计算结果相差不超过0.324%,因此在2维RVE有限元模型中可利用简单的模拟单轴拉伸边界条件代替周期性边界条件。

(3)通过细观结构分析发现碳化硅颗粒的体积分数对复合材料力学性能的影响显著,而颗粒形状的影响很小,在相同体积分数下圆形和椭圆形颗粒的计算结果相差不超过0.4%。

参考文献:

- [1] 张广杰.VCFEM在颗粒增强复合材料大规模数值计算中的应用[D]. 昆明:昆明理工大学, 2012.
ZHANG Guangjie.The large scale numerical simulation in particle reinforced composites with Voronoi cell finite element method[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)
- [2] Kontou E.Micromechanics model for particulate composites[J].Mechanics of Materials, 2007, 39(7): 702-709.
- [3] Guiot B, Nadot-Martin C, André D.Towards a non-linear micromechanics-based analysis for particulate composites[J]. Composites Science and Technology, 2006, 66(15): 2726-2735.
- [4] Mishnaevsky L, Derrien K, Baptiste D. Effect of microstructure of particle reinforced composites on the damage evolution: probabilistic and numerical analysis[J].Composites Science and Technology, 2004, 64(12): 1805-1818.
- [5] Kenesei P, Borbély A, Biermann H.Microstructure based three-dimensional finite element modeling of particulate reinforced metal - matrix composites[J]. Materials Science and Engineering: A, 2004, 387-389: 852-856.
- [6] Ghosh S, Mukhopadhyay S N. Material based finite element analysis of heterogeneous media involving dirichlet tessellations[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1993, 104(2): 211-247.
- [7] Ghosh S, Moorthy S.Elastic-plastic analysis of arbitrary heterogeneous materials with the Voronoi cell finite element method[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1995, 121(1-4): 373-409.
- [8] 徐佳丽.VCFEM法与有限元法混合计算的数值模拟[D]. 昆明:昆明理工大学, 2013.
XU Jiali.Mix up the VCFEM and finite element method to numerical simulation[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [9] 翁琳.基于微观结构的颗粒增强复合材料力学性能数值分析[D]. 上海:上海交通大学, 2015.
WENG Lin. Numerical analysis about effects of microstructure on mechanical properties of particle reinforced composites[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2015. (in Chinese)
- [10] 王行, 谢敬佩, 郝世明, 等. 碳化硅颗粒增强铝基复合材料研究现状与展望[J]. 稀有金属与硬质合金, 2013, 41(3): 50-53.
WANG Hang, XIE Jingpei, HAO Shiming, et al.The latest development and prospect of SiC particle reinforced Al-based composite[J]. Rare Metals and Cemented Carbides, 2013, 41(3): 50-53. (in Chinese)
- [11] 黄永霞, 郭然, 李伟. 颗粒增强复合材料有效模量的Voronoi单元有限元法分析[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2016, 39(5): 63-72.
HUANG Yongxia, GUO Ran, LI Wei. Finite element method based on Voronoi cell for the effective modulus of particle reinforced composites[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2016, 39(5): 63-72. (in Chinese)
- [12] 中国航空材料手册编委会. 中国航空材料手册(3)[M]. 北京: 中国标准出版社, 1987: 123-124.
Editorial Board of China Aeronautical Materials Handbook. China aeronautical materials handbook (3) [M]. Beijing: Standards Press of China, 1987: 123-124. (in Chinese)
- [13] 张少卿, 崔岩. 无压浸渗制备的SiC/Al复合材料的微观组织研究[J]. 材料工程, 2000(10): 3-6.
ZHANG Shaoqing, CUI Yan. Microstructural study of SiCp/Al composite prepared by pressureless infiltration[J]. Journal of Materials Engineering, 2000, 66(15): 2726-2735.

- neering, 2000(10):3-6. (in Chinese)
- [14] 边涛,潘颐,崔岩,等.金属基复合材料的自发浸渗制备工艺[J].材料导报,2002,16(1):21-24.
- BIAN Tao, PAN Yi, CUI Yan, et al. Fabricating metal matrix composites by spontaneous infiltration technique[J]. Materials Reports, 2002, 16(1):21-24. (in Chinese)
- [15] 徐少斌.针刺炭/炭复合材料多尺度单胞模型及低速冲击损伤仿真研究[D].武汉:华中科技大学,2016.
- XU Shaobin. Research on multi-scale unit cells and simulation of low velocity impact damage of needled Carbon/Carbon composites[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2016. (in Chinese)
- [16] Xia Z H, Zhang Y F, Ellyin F D. A unified periodical boundary conditions for representative volume elements of composites and applications[J]. International Journal of Solids and Structures, 2003, 40(8): 1907-1921.
- [17] Weng J, Wen W, Cui H, et al. Micromechanical analysis of composites with fibers distributed randomly over the transverse cross-section[J]. Acta Astronautica, 2018, 147: 133-140.
- [18] 原国森,李明科,王振永,等.碳化硅体积分数对SiCp/6061Al复合材料组织和性能的影响[J].热加工工艺,2018,47(16):130-132.
- YUAN Guosen, LI Mingke, WANG Zhenyong, et al. Effect of SiC volume fraction on microstructure and properties of SiCp/6061Al composite[J]. Hot Working Technology, 2018, 47(16):130-132. (in Chinese)
- [19] 于敬宇. SiCp/Al 动态力学性能的数值模拟和试验研究[D]. 西安:西北工业大学,2006.
- YU Jingyu. Numerical simulation and experimental study on dynamic mechanical properties of SiCp/Al composites[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2006. (in Chinese)
- [20] 游江. 粉末挤压成形 SiCp/2024 铝基复合材料的显微组织和力学性能[D]. 广州:华南理工大学,2014.
- YOU Jiang. Microstructures and mechanical properties of powder extruded SiCp/2024 aluminium matrix composites[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [21] 王文明,潘复生,LU Yun,等.颗粒增强铝基复合材料弹性模量的影响因素[J].重庆大学学报(自然科学版),2006,29(7):64-68.
- WANG Wenming, PAN Fusheng, LU Yun, et al. Influence factors of elastic modulus of particle reinforced aluminum matrix composites[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2006, 29(7):64-68. (in Chinese)
- [22] 叶想平,李英雷,翁继东,等.颗粒增强金属基复合材料的强化机理研究现状[J].材料工程,2018,46(12):28-37.
- YE Xiangping, LI Yinglei, WENG Jidong, et al. Research status on strengthening mechanism of particle-reinforced metal matrix composites [J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 46(12):28-37. (in Chinese)

(编辑:刘 静)