

SiO_{2f}/SiO₂ 织物复合材料变形及弹性常数研究^{*}

刘晓宇, 李 哲, 翟奋楼

(北京市计算中心, “互联网+”智能装备云服务技术北京市工程实验室, 北京 100094)

[摘要] 以溶胶-凝胶法制备的层状 SiO_{2f}/SiO₂ 织物复合材料为研究对象, 采用试验和数值方法研究了材料的变形机制和弹性常数。首先, 采用试验方法测量了材料沿纤维方向的弹性模量; 其次, 采用代表性体积单元法建立材料的胞元模型, 并基于周期性边界条件, 得到材料的等效杨氏模量, 与通试验结果相比较, 验证有限元模型的可靠性; 最后, 通过有限元方法分析胞元在不同拉伸载荷、剪切载荷作用下的变形, 从而得到材料的等效拉伸模量、剪切模量和泊松比共 9 个弹性常数。研究表明: 基于周期性边界条件的代表性体积单元法解决了胞元变形不协调问题, 可用于预测材料的弹性常数模量, 分析结果与试验测试结果相吻合, 能够正确反映 SiO_{2f}/SiO₂ 复合材料的力学行为。研究结果可为材料的结构设计和优化提供参考。

关键词: SiO_{2f}/SiO₂ 织物复合材料; 层状; RVE; 周期性边界条件; 等效弹性模量

Research of Deformation Behavior and Elastic Properties of SiO_{2f}/SiO₂ Composite

LIU Xiaoyu, LI Zhe, ZHAI Fenlou

(Beijing Engineering Laboratory on Cloud Computing Service of Internet Plus Intelligent Equipment,
Beijing Computing Center, Beijing 100094, China)

[ABSTRACT] Experimental and numerical methods were employed to study deformation mechanism and elastic properties of the plain woven SiO_{2f}/SiO₂ composite which was prepared by conventional sol-gel process. Firstly, the elastic modulus along the fiber direction was measured experimentally; Secondly, the representative volume element (RVE) method was used to set up the cell model in ABAQUS software. Equivalent elastic modulus of the material was obtained based on periodical boundary condition, and was compared with experiment data to verify the reliability of numerical method. Finally, the nine equivalent elastic constants of SiO_{2f}/SiO₂ composites were calculated based on FEM analysis results, including Young's modulus, shear modulus and Poisson ratio. The conclusions can be drawn that the RVE method based on boundary condition can solve the deformation compatibility of RVE method, and be used to predict the elastic property of material and deformation behavior. The prediction equivalent elastic constants agree with the test result and can contribute to structure design and optimization of the advanced SiO_{2f}/SiO₂ composites.

Keywords: SiO_{2f}/SiO₂ plain woven composites; Laminates; RVE; Periodical boundary condition; Equivalent elastic modulus

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.09.092

SiO₂ 是一种轻质、化学性质稳定的陶瓷材料, 具有良好的隔热性和抗烧蚀能力, 广泛应用在航空航天飞行器结构设计中。SiO₂ 力学性能较差, 强度较低, 在工程应用中可与 SiO₂ 增强纤维复合制备成 SiO_{2f}/SiO₂ 复合材料, 以获得良好的力学、介电、隔热等性能。

目前对 SiO_{2f}/SiO₂ 复合材料的制备方法、微观结构、编织结构方面有较多的研究成果, 如朱建军等^[1] 制备了 5 种纤维增强型二氧化硅气凝胶复合材料并表征了材料的收缩率、透明度、疏水性能, Xu 等^[2] 分析了烧结温度、

环境温度及预处理对单向 SiO_{2f}/SiO₂ 复合材料微观结构的影响。对材料力学性能方面的研究则集中在不同结构材料的强度测量, 如 Li 等^[3-4] 测量了三维七向编织 SiO_{2f}/SiO₂ 复合材料的弯曲强度和弹性模量, Prasad 等^[5-6] 获得了 2D 编织 SiO_{2f}/SiO₂ 复合材料的断裂能量释放率, 郭瑞彦等^[7] 测量了 2.5D 衬经纱角联锁织物的拉伸性能, 刘勇^[8] 研究了 2.5D 浅交弯联、直联、3D 四向和五向四种 SiO_{2f}/SiO₂ 复合材料的拉伸性能、弯曲性能, 张敬义等^[9] 分析了纤维弯曲对 SiO_{2f}/SiO₂ 复合材料拉伸强度和断裂过程的影响, 唐亮^[10] 测量二氧化硅/环氧树脂复合材料的拉伸强度, 杨秋红等^[11] 研究了角联锁结构对 2.5 维

^{*} 基金项目: 北京市科技计划项目“京冀汽车模具协同设计云服务平台建设”。

织物复合材料冲击性能的影响, Liu 等^[12-13]研究了编织结构 SiO_{2f}/SiO₂ 复合材料机械性能和微观断裂行为的影响等。目前对于层状烧结结构的 SiO_{2f}/SiO₂ 织物复合材料力学性能的研究较少。

本文通过试验测量了材料在纤维方向的拉伸模量, 并与采用 RVE 方法和周期性边界条件得到的有限元结果对比, 验证数值方法的可靠性, 进而得到材料的弹性模量 E_i 、剪切模量 G_{ij} 和泊松比 ν_{ij} 共 9 个等效弹性常数, 为材料的工程的应用提供参考。

1 试验及方法

采用溶胶-凝胶工艺制备 SiO_{2f}/SiO₂ 复合材料: 9 层平纹编织二氧化硅纤维布在 XZ 平面内叠好(如图 1 所示), 放入 SiO₂ 胶体溶液中浸泡后, 在 120℃ 环境下干燥 3h, 最后在 1200℃ 温度下进行烧结, 时间为 30min。

表 1^[14] 给出了两种组分材料的基本力学性能和物理参数。二氧化硅纤维的维拉伸强度为 3.6GPa, 密度为 2.2g/cm³, 纤维直径 7.5~10.5 μm。二氧化硅粉末平均粒径为 3.8 μm, 纯度(质量百分数)为 99.9%。

制备的 SiO_{2f}/SiO₂ 复合材料拉伸试样如图 2 所示, 试样长 90mm × 宽 10mm, 沿铺层方向厚度为 5mm, 纤维含量约为 42%, 密度为 1.6g/m³。

按照 GB/T1040 推荐的拉伸试验方法, 开展纤维增强复合材料在常温环境下的拉伸试验, 并采用电测法测

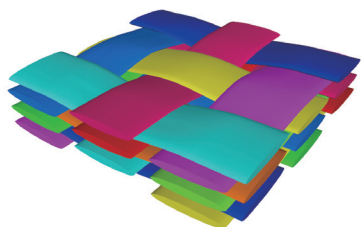


图1 SiO_{2f}/SiO₂ 织物复合材料结构
Fig.1 Structure of the plain woven SiO_{2f}/SiO₂ composite

表1 组分材料的物理性质及力学性能

成分	弹性模量 E_{11} /GPa	弹性模量 $E_{22}=E_{33}$ /GPa	剪切模量 $G_{12}=G_{13}$ /GPa	剪切模量 G_{23} /GPa	泊松比 $\nu_{12}=\nu_{13}$	泊松比 ν_{23}
SiO _{2f} 纤维	78.0	48.0	31.0	20.6	0.22	0.16
SiO ₂ 基底	48.0	/	31.0	/	0.17	/

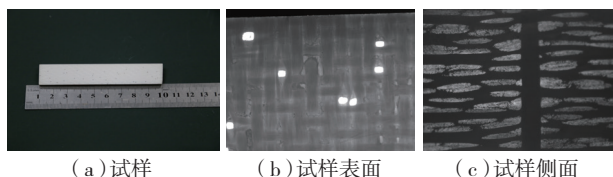


图2 凝胶溶胶法制备的 SiO_{2f}/SiO₂ 复合材料
Fig.2 SiO_{2f}/SiO₂ composite prepared by sol-gel method

量试样中心点在拉伸载荷作用下的应变变化, 从而得到材料的弹性模量。试验机拉伸速率为 0.02mm/min。

采用代表性体积单元法(RVE)分析材料的力学性能。在有限元软件中建立如图 3 所示的胞元模型, 胞元为 1.67mm × 1.67mm × 0.5mm 的六面体, 由 4 条椭圆形截面的 SiO₂ 纤维(图 3 (a))和填充纱线空隙的 SiO₂ 基底(图 3 (b))组成。

二氧化硅纤维为横观各向同性材料。胞元中纤维路径为正弦波变化, 纤维主方向也同步变化。在有限元分析中设置的纤维材料方向如图 4 所示, 方向 1 为纤维主方向, 沿纱线走向方向, 方向 2 以及方向 3 在纤维截面内, 与方向 1 垂直, 方向 1、2、3 符合右手定则。

胞元在空间上具有周期性和对称性, 设置周期性边界条件以控制胞元每组相对面上对应单元变形协调性。

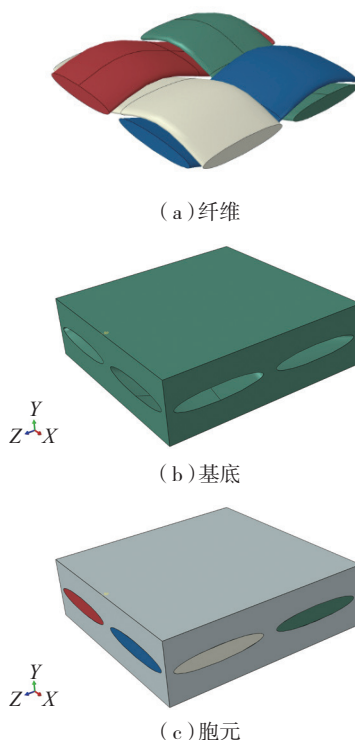


图3 SiO_{2f}/SiO₂ 复合材料胞元模型
Fig.3 Unit cell model of SiO_{2f}/SiO₂ composite

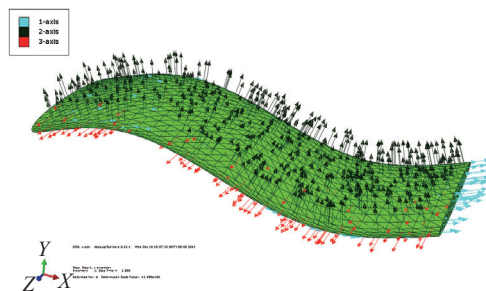


图4 局部坐标系下 SiO_{2f} 编织纱线材料方向
Fig.4 Material direction of SiO_{2f} fiber in local coordinate

基于有限元分析结果,材料等效弹性常数计算过程如下:

假设胞元 X 、 Y 、 Z 向的尺寸分别为 a 、 b 、 c ,对胞元施加 Z 向位移载荷 δ_z ,则胞元的平均应变 ε_z 为:

$$\varepsilon_z = \frac{\delta_z}{c} \quad (1)$$

胞元产生 Z 向支反力 F_z ,则 Z 向平均应力 σ_z 为:

$$\sigma_z = \frac{F_z}{ab} \quad (2)$$

根据胡克定律, Z 方向上的拉伸弹性模量 E_z 为:

$$E_z = \frac{\sigma_z}{\varepsilon_z} = \frac{F_z \cdot c}{ab\delta_z} \quad (3)$$

同理,可以得到材料 E_x 、 G_{yz} 、 G_{yx} 等以及泊松比等。

2 结果与讨论

拉伸试验测得材料的载荷 - 位移及应力 - 应变曲线如图 5 所示。从图 5 (a)可知,材料在拉伸载荷作用下发生脆性断裂,断裂强度约为 79MPa;从图 5 (b)可

知,材料的应力 - 应变关系近似为线性,线性拟合后得到 Z 向弹性模量 $E_z=49.9\text{GPa}$ 。

图 6 给出了胞元在 Z 拉伸载荷 ($\varepsilon_z=0.01$) 作用下的位移、应力分布。从图 6 可知,胞元 Z 向位移连续变化, X 、 Y 向变形与编织结构有密切关系,纤维界面上应力较大。

胞元在 X 、 Y 、 Z 3 个面上的支反力 RF_1 、 RF_2 、 RF_3 分别为 95.8N、304.5N 和 472.0N。根据等效弹性常数原理可得 $E_z=52.7\text{GPa}$ 。与试验结果相比,误差为 5.6%,在误差允许范围内,验证了 RVE 和周期性边界条件设置的合理性。

在不同方向拉伸及剪切载荷作用下,胞元各面上产生的支反力如表 2 所示。

基于弹性常数的计算方法,可以得到平纹织物 $\text{SiO}_2/\text{SiO}_2$ 复合材料的 9 个弹性常数,如表 3 所示。

从表 3 可知,二氧化硅纤维性能及织物面内结构对称的影响,弹性模量 $E_x=E_z$,且略高于 Y 向的弹性模量 E_y ,同理,剪切模量也符合相同规律。

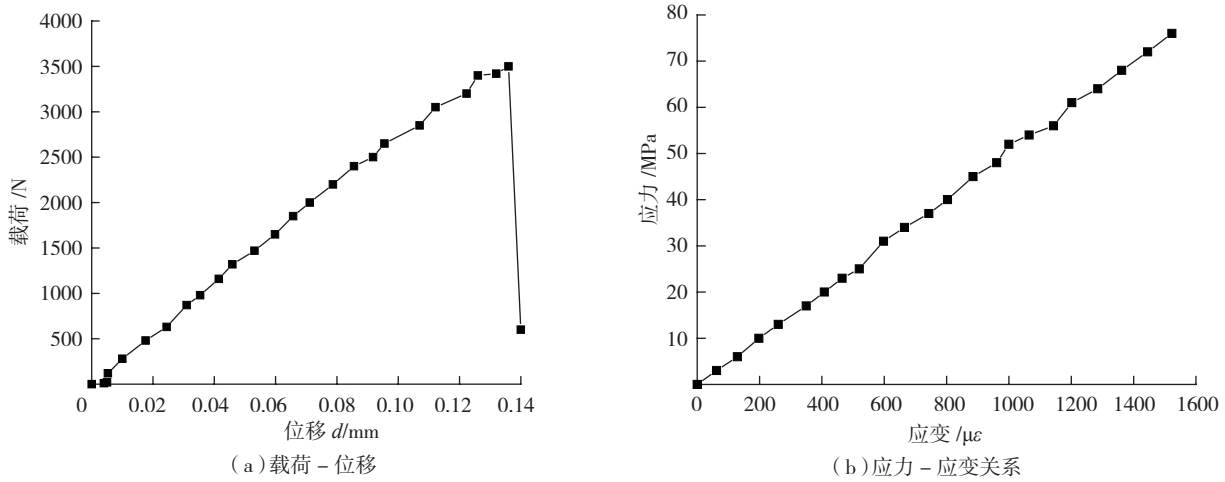


图5 拉伸载荷作用下材料的变形曲线
Fig.5 Deformation curves of the material under tensile load

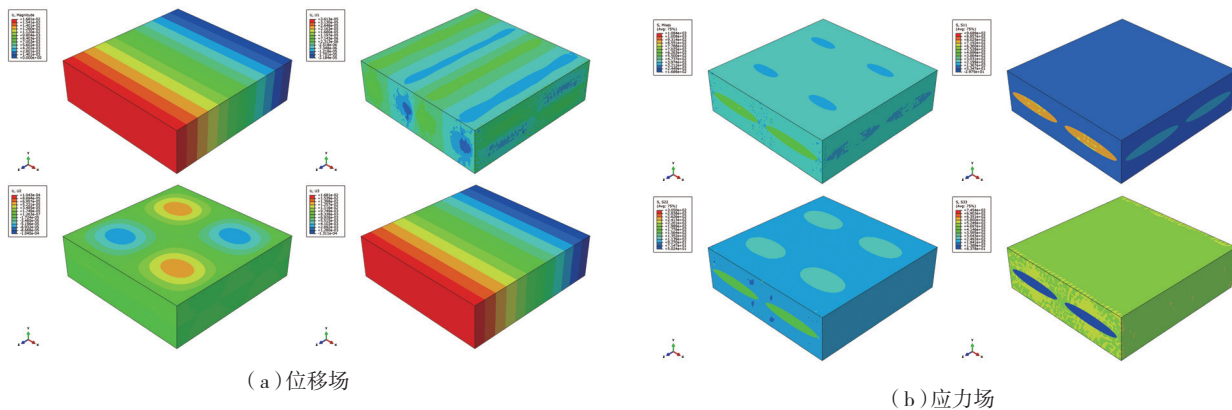


图6 周期性边界条件下胞元的变形云图
Fig.6 Contour of the cell deformation under periodical boundary condition

表2 拉伸及剪切载荷作用下胞元表面的支反力

施加载荷	RF ₁ /N	RF ₂ /N	RF ₃ /N
$\varepsilon_z=0.01$	95.8	304.5	472.0
$\varepsilon_y=0.01$	91.3	1458.6	91.3
$\varepsilon_x=0.01$	472.0	304.5	95.8
$\gamma_{xy}=0.005, \gamma_{yx}=0.005$	182.3	607.7	0
$\gamma_{yz}=0.005, \gamma_{zy}=0.005$	0	607.7	182.3
$\gamma_{xz}=0.005, \gamma_{zx}=0.005$	197.2	0	197.2

表3 复合材料胞元的弹性常数预测结果

$E_x=E_z$ /GPa	E_y /GPa	$G_{xy}=G_{yz}$ /GPa	G_{xz} /GPa	$\nu_{12}=\nu_{13}$	ν_{23}
52.78	48.97	43.74	47.32	0.161	0.173

另外,从载荷-位移曲线可得到材料的拉伸强度约为 78MPa,远低于 SiO₂ 纤维的拉伸强度极限。采用溶胶凝胶法制备材料时,由于有机物的挥发裂解等使得材料内部孔隙增多导致材料结构疏松、实际承载面积减小,导致材料强度较低。

3 结论

基于周期性边界条件,采用有限元方法分析了编织 SiO_{2f}/SiO₂ 复合材料胞元在拉伸及剪切载荷作用下的变形特征,并预测了材料的 9 个弹性常数,主要的结论如下:

(1) 采用周期性边界条件很好地解决了胞元分析过程中边界变形不协调问题,能够正确反映胞元的变形规律;

(2) 通过拉伸试验验证了有限元方法预测 SiO_{2f}/SiO₂ 复合材料弹性常数的可靠性,能较为准确地预测材料的 9 个弹性常数;

(3) SiO₂ 纤维自身的力学特性和材料编织结构使 SiO_{2f}/SiO₂ 复合材料的弹性模量 $E_x=E_z$,略高于 Y 向的弹性模量 E_y ,同理,剪切模量也符合相同规律;

(4) 制备 SiO_{2f}/SiO₂ 复合材料时采用的烧结工艺,会使材料内部产生孔隙,影响材料的强度。考虑随机孔隙的影响,有助于提高有限元模拟结果的可靠性。

参考文献

- [1] 朱建军,姜德立,魏巍,等. 纤维增强型二氧化硅气凝胶复合材料常压制备及表征[J]. 无机盐工业, 2014, 46(3): 23-40.
- ZHU Jianjun, JIANG Deli, WEI Wei, et al. Preparation and characterization of fiber-reinforced silica aerogel composites at ambient pressure[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2014, 46(3): 23-40.
- [2] XU C M, WANG S W, HUANG X X, et al. Processing and properties of unidirectional SiO_{2f}/SiO₂ composites[J]. Ceramics International, 2007, 33: 669-673.
- [3] LI B B, ZHU J X, JIANG Y, et al. Processing and flexural

properties of 3D seven-directional braided (SiO_{2f})/SiO₂ composites prepared by silica sol-infiltration-sintering method[J]. Ceramics International, 2012, 38(3): 2209-2212.

[4] LI B B, LIN L, ZHU J X, et al. Directionality effect on mechanical properties of 3D n-directional braided (SiO_{2f})/SiO₂ composites prepared by silica sol-infiltration-sintering method[J]. Ceramics International, 2012, 38(5): 4017-4021.

[5] PRASAD N E, LOIDL D, VIJAYKUMAR M, et al. Elastic properties of silica-silica continuous fibre-reinforced, ceramic matrix composites[J]. Scripta Materialia, 2004, 50: 1121-1126.

[6] PRASAD N E, KUMARI S, KAMAT S V, et al. Fracture behaviour of 2D-weaved, silica-silica continuous fibre-reinforced, ceramic-matrix composites (CFCCs)[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2004, 71 (18): 2589-2605.

[7] 郭瑞彦,张国利,王志鹏,等. 2.5D 织物增强复合材料结构与拉伸性能研究[J]. 天津纺织科技, 2017(1): 18-21.

GUO Ruiyan, ZHANG Guoli, WANG Zhipeng, et al. Investigation on structure and tensile properties of 2.5D fabric reinforced composites[J]. Tianjin Textile Science & Technology, 2017(1): 18-21.

[8] 刘勇. 石英纤维织物结构对二氧化硅基复合材料力学性能影响研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.

LIU Yong. Influence of quartz fabric structure on the mechanical properties of silica matrix composites[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.

[9] 张敬义,范锦鹏,杜雪菲,等. 弯曲纤维对 SiO_{2f}/SiO₂ 复合材料拉伸强度的影响[J]. 宇航材料工艺, 2017, 47(4): 48-50.

ZHANG Jingyi, FAN Jinpeng, DU Xuefei, et al. Effect of bending fiber on tensile strength of SiO_{2f}/SiO₂ composites[J]. Aerospace Materials & Technology, 2017, 47(4): 48-50.

[10] 唐亮. 二氧化硅/环氧树脂复合材料的制备与性能研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2012.

TANG Liang. Preparation and performance study of SiO₂/epoxy composite materials[D]. Xi'an: Shanxi University of Science & Technology, 2012.

[11] 杨秋红,王瑞,徐磊. 织物结构对 2.5 维织物复合材料冲击动态力学性能的影响[J]. 玻璃钢/复合材料, 2010(3): 44-47.

YANG QiuHong, WANG Rui, XU Lei. Effect of fabric structure on the impact dynamic mechanical properties of 2.5D fabric reinforced composites[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2010(3): 44-47.

[12] LIU Y, CHEN Z F, ZHU J X, et al. Comparison of 3D four-directional and five-directional braided SiO_{2f}/SiO₂ composites with respect to mechanical properties and fracture behavior[J]. Materials Science & Engineering A, 2012, 558: 170-174.

[13] LIU Y, ZHU J X, CHEN Z F, et al. Mechanical behavior of 2.5D (shallow straight-joint) and 3D four-directional braided SiO_{2f}/SiO₂ composites[J]. Ceramics International, 2012, 38(5): 4245-4251.

[14] 宋阳曦. 二维石英纤维织物增强宽频透波陶瓷基复合材料的制备及性能研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.

SONG Yangxi. Preparation and properties for broadband wave-transparent two dimensional silica fiber reinforced ceramic matrix composites[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2010.

通讯作者: 刘晓宇, 博士后、副研究员, 研究方向为复合材料力学、断裂力学、有限元仿真, E-mail: lxygicc@163.com.

(责编 大漠)