

ANSYS Workbench在梯度SiC_P/Al复合材料结构瞬态动力学分析中的应用

宋满新^{1,2}, 田非凡¹, 彭麟辉¹, 余垂有¹, 欧帆¹, 胡娟¹, 彭坤²

¹湖南航天诚远精密机械有限公司, 湖南 长沙

²湖南大学, 材料科学与工程学院, 湖南 长沙

收稿日期: 2023年2月9日; 录用日期: 2023年3月9日; 发布日期: 2023年3月16日

摘要

针对航空航天精密结构件极端环境、极端轻量化和高度集成化的应用需求, 将梯度功能材料设计思想应用于SiC_P/Al复合材料的设计开发。基于材料制备方法、梯度组分变化、宏/微观梯度界面及材料性能等参数, 应用ANSYS Workbench软件建立梯度SiC_P/Al复合材料计算模型, 通过瞬态动力学分析方法预测材料界面与应力的交互作用, 建立梯度结构、材料组分与材料性能的综合评价方法, 为以后的梯度功能结构件的研究和未来航空航天精密结构件的研制提供理论支撑和技术支持。

关键词

梯度SiC_P/Al复合材料, ANSYS Workbench, 瞬态动力学分析

Application of ANSYS Workbench in Transient Structural Analysis of Gradient SiC_P/Al Composite Structure

Manxin Song^{1,2}, Feifan Tian¹, Linhui Peng¹, Chuiyou Yu¹, Fan Ou¹, Juan Hu¹, Kun Peng²

¹Hunan Aerospace Chengyuan Precise Machinery Co., Ltd., Changsha Hunan

²College of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha Hunan

Received: Feb. 9th, 2023; accepted: Mar. 9th, 2023; published: Mar. 16th, 2023

Abstract

Aiming at the application requirements of extreme environment, extreme lightweight and high

文章引用: 宋满新, 田非凡, 彭麟辉, 余垂有, 欧帆, 胡娟, 彭坤. ANSYS Workbench 在梯度 SiC_P/Al 复合材料结构瞬态动力学分析中的应用[J]. 材料科学, 2023, 13(3): 111-121. DOI: 10.12677/ms.2023.133014

integration of Aerospace precision structural parts, the design idea of functionally gradient materials is applied to the design and development of SiC_p/Al composites. Based on the parameters of material preparation method, gradient composition change, macro/micro gradient interface and material properties, the calculation model of gradient SiC_p/Al composites was established by ANSYS Workbench software. The interaction between material interface and stress was predicted by transient dynamic analysis method. The comprehensive evaluation method of gradient structure, material composition and material properties was established, which provided theoretical support and technical support for the future research of gradient functional structural parts and the development of aerospace precision structural parts.

Keywords

Gradient SiC_p/Al Composites, ANSYS Workbench, Transient Structural Analysis

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 概述

铝基碳化硅(SiC_p/Al)复合材料是轻质高强高尺寸稳定性的结构功能材料,其增强体的含量不同,材料性能和功能也具有较大区别[1];当前航空航天高性能精密结构件向着极端环境、极端轻量化、高度集成化的趋势发展,需要在有限的设计空间内实现结构功能一体化的集成,以提高器件的兼容性和环境适用性[2]。

SiC_p/Al 复合材料恰好能够满足航空航天精密结构件性能的同时实现梯度变化的设计需求,不同体分材料间的界面仅有碳化硅粒度和含量的不同,不存在异种材料结合界面不相容的本质性缺陷问题,能够在功能部分采用高体分数 SiC_p/Al 复合材料,主要利用其较低的热膨胀性能,而在结构端使用具有良好力学性能的中低体分 SiC_p/Al 复合材料,中间过渡部分则选用介于二者之间合适体分的 SiC_p/Al 复合材料与两端形成良好结合,在达到结构功能整体设计的同时使整个构件具有优异性能[3]。

本文以 SiC_p/Al 复合材料不同梯度结构为研究对象,利用 ANSYS Workbench 软件中的瞬态动力学分析模块,按照预设的实验测试条件,添加梯度 SiC_p/Al 复合材料所受的约束和载荷,对其进行抗弯强度测试状态下的力学性能模拟分析,得到等效应力、等效应变以及总形变等结果,对材料性能和梯度结构进行仿真计算模拟,建立设计思路和研究方法,达到结构功能一体化设计构想,并作为后续相关材料的研究基础[4]。

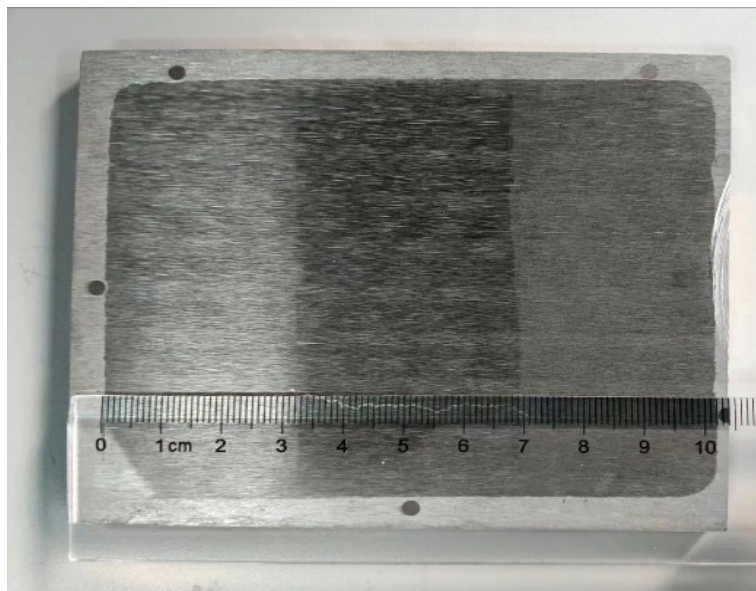
2. 梯度 SiC_p/Al 复合材料概述

(一) 制备方法

本文中的梯度 SiC_p/Al 复合材料的制备技术路线分两部分,首先通过凝胶注模法制备并烧结成型梯度孔隙率的碳化硅预制件,然后对其进行真空压力渗铝近净成形铝基碳化硅梯度材料及器件[5]。

凝胶注模制备时,根据各梯度层的材料性能需求,配置几组不同碳化硅颗粒级配的凝胶混合体,以把控各梯度层的增强体体积分数;注模后,通过碳化硅颗粒的短距离沉降,使分层界面消失,实现梯度界面的自然过渡。在真空压力渗铝时,近净成形工艺可以从结构上缩短铝液的渗透尺寸,使结构件致密度高、性能均匀,同时能够减少结构件的加工量,降低加工难度和加工成本[6]。

所制备的梯度 SiC_p/Al 复合材料样件如下图 1。

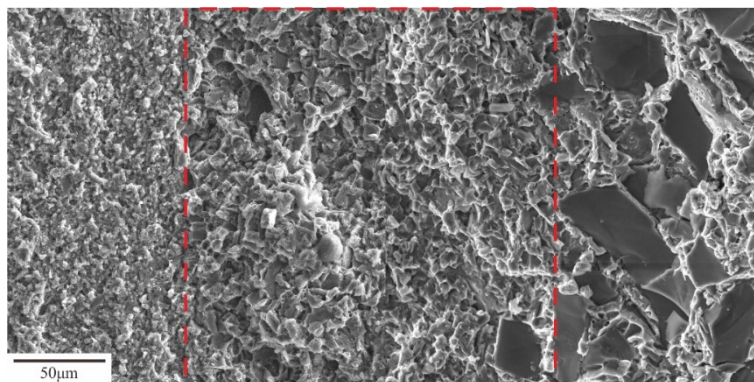


从左至右材料体分由低到高分布

Figure 1. The cross-section of gradient SiC_p/Al composite sample
图 1. 梯度 SiC_p/Al 复合材料样件截面图

(二) 材料表征

为进一步观察梯度 SiC_p/Al 复合材料中各部分界面结合的情况，根据所制备梯度 SiC_p/Al 复合材料样件的微观结构表征结果(图 2)，对材料可能出现的缺陷问题进行改进优化。



从左至右材料体分由低到高分布

Figure 2. Material volume fraction distribution from left to right from low to high
图 2. 梯度 SiC_p/Al 复合材料界面 SEM 镜下照片

由图 2 可见，左侧部分为小粒径 SiC 的 38%.volSiC_p/Al 复合材料部分，中间部位采用 50%.volSiC_p/Al 复合材料作为过渡部分，右侧部分为大粒径 SiC 的 63%.volSiC_p/Al 复合材料部分，整个梯度 SiC_p/Al 复合材料的过渡区域结合均匀紧密，没有明显孔洞、界面分界缺陷，可见采用凝胶注模 + 真空压力渗铝的工艺路线可行，能够制备出组织致密度高、界面结合较好的梯度铝基碳化硅复合材料。

(三) 力学性能测试

通过对梯度 SiC_p/Al 复合材料进行 4 种不同分布结构设计后,分别对单层材料及 4 种梯度材料进行相同条件下的抗弯强度测试,以体现不同结构材料间的力学性能差异(表 1)。

Table 1. Related mechanical properties of gradient SiC_p/Al composites

表 1. 梯度 SiC_p/Al 复合材料相关力学性能

SiC 含量/Vol.%	抗弯强度/MPa	弹性模量/GPa	密度 g/cm ³
38	572	145	2.90
50	509	195	2.95
63	484	225	3.00
左 - 右	507	—	—
前 - 后	416	—	—
(38)上 - 下(63)	393	—	—
(63)上 - 下(38)	651	—	—

由上表 1 可以看出,上 - 下递减梯度结构的抗弯强度最高,为 651 MPa,左 - 右结构的抗弯强度为 507 MPa,与 50%.vol 材料强度接近;而前 - 后结构和上 - 下递增梯度结构的抗弯强度反而远低于强度最低的 63%.vol 材料。由图 2 SEM 照片的组织状态可以排除界面缺陷可能导致材料力学性能降低的因素;同时,综合上述结果也可以发现,通过一般的材料表征及测试方法无法较好的体现梯度 SiC_p/Al 复合材料的层间应力分布等情况,因此通过采用专业模拟软件对梯度铝基复合材料进行抗弯强度测试条件下的模拟仿真,以期解释不同结构间力学性能产生差异的原因[7]。

3. 梯度 SiC_p/Al 复合材料样件三维模型

通过 Solid Works 软件对梯度 SiC_p/Al 复合材料样件进行建模后导入 ANSYS Workbench 软件(图 3),样件长 50 mm,宽 6 mm,整体厚度 6 mm,体积 1.8 cm³,材料平均密度 2.95 g/cm³。样件的基本结构参数为:三种体分材料各占三分之一,下部两支点跨距均为 25 mm,上部压头位于材料中央。

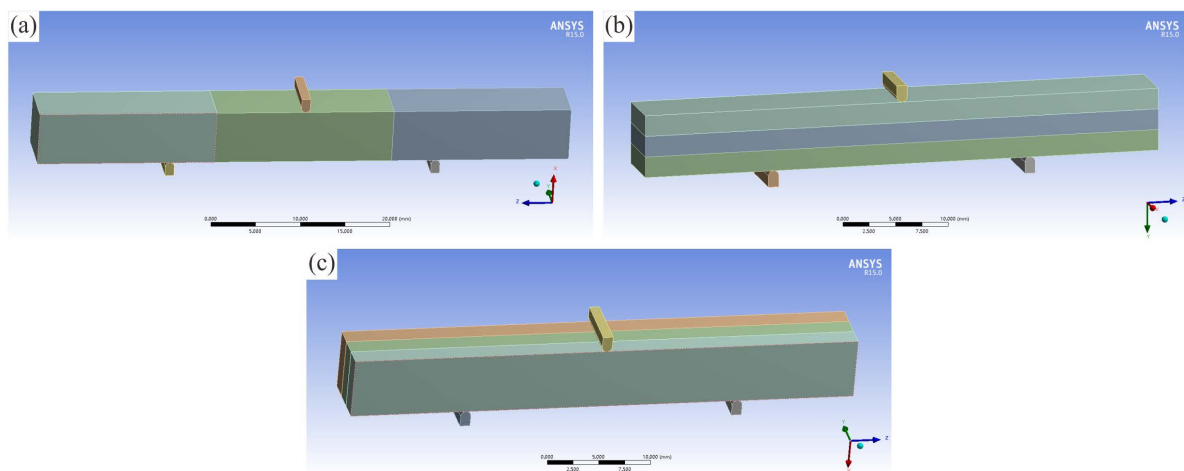


Figure 3. Different structural of gradient SiC_p/Al composite sample schematic diagram; (a) Left-right structural; (b) Upper-lower structural; (c) Front-back structural

图 3. 不同结构梯度 SiC_p/Al 复合材料样件示意图; (a) 左 - 右结构; (b) 上 - 下结构; (c) 前 - 后结构

为方便进行模拟仿真和载荷施加且不影响整体结构和施力,在每种样件上部施力部位和下部的两个支撑部位共添加三根长 6 mm,宽 1 mm,厚 1.58 mm,密度为 7.85 g/cm^3 的材质为结构钢的条形结构,以模拟抗弯强度测试时样件放置情况。

(一) 建立梯度 SiC_p/Al 复合材料样件有限元模型

首先将材料属性设置为铝基,然后将下表 2 中单层 SiC_p/Al 复合材料相关力学属性输入 ANSYS Workbench 材料属性设置界面,材料抗弯强度数据为单层 SiC_p/Al 复合材料的抗弯强度实测结果。其次梯度 SiC_p/Al 复合材料样件采用六面体网格划分法,有限元网格划分单元尺寸 0.3 mm,单元数 85,928,节点数 365,278。

Table 2. Related mechanical properties of SiC_p/Al composites

表 2. SiC_p/Al 复合材料相关力学性能

SiC 含量/Vol.%	抗弯强度/MPa	弹性模量/GPa	密度 g/cm^3
38	572	145	2.90
50	509	195	2.95
63	484	225	3.00

(二) 瞬态动力学分析

在 Transient Structural 瞬态动力学分析前根据梯度 SiC_p/Al 复合材料样件的测试情况,对下部 2 个支脚施加 Fixed Support 固定约束,对上部的 1 个主要受力区域施加 Force 受力(图 4);再通过对 4 种不同结构形式的梯度 SiC_p/Al 复合材料样件所受应力、应变和总变形进行求解,得到 Equivalent Stress 等效应力、Equivalent Elastic Strain 等效应变及 Total Deformation 总变形量相关数据。

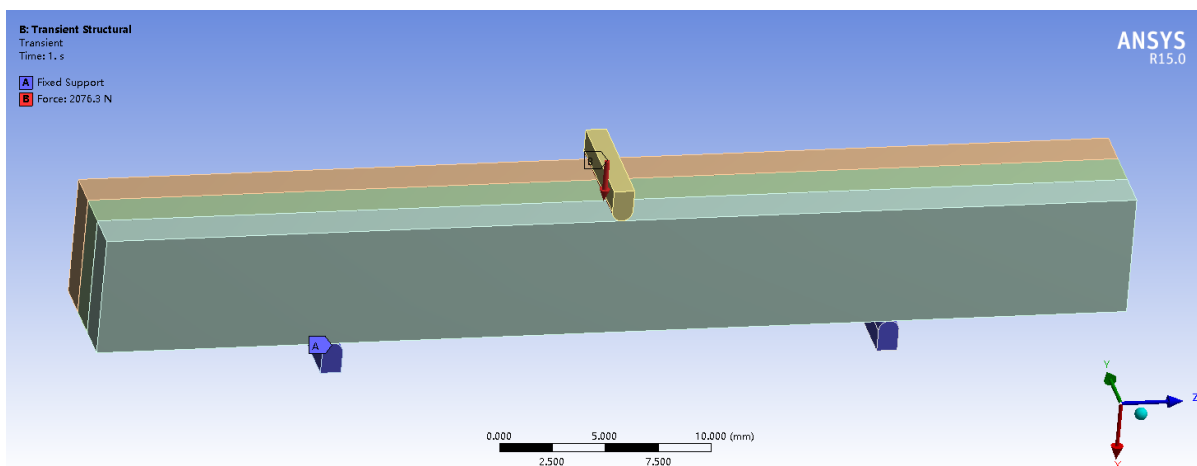


Figure 4. Constraints and stress diagrams of gradient SiC_p/Al composites

图 4. 梯度 SiC_p/Al 复合材料约束及受力图

为准确得到模拟时对 4 种梯度 SiC_p/Al 复合材料所施加的载荷受力,由于实际测试时的样件尺寸各有不同,最大载荷需对应材料建模尺寸进行相应换算,即模拟施加载荷 = [最大载荷/(实际厚度*实际宽度)]*(建模厚度*建模宽度),其中建模厚度和建模宽度均为 6 mm(表 3)[8]。

在抗弯测试时,随着上部压头缓慢下降对试样施力,通常是试样背面先出现裂痕并发生整体断裂(图 5),此时仪器记录断裂瞬间的最大载荷并计算出抗弯强度,而下部的跨距支架则对试样主要产生较大的压应力,因此在模拟时主要观测上部压头接触部位所受应力及梯度界面的应力和应变情况。

Table 3. Related mechanical properties of gradient SiC_p/Al composites

表 3. 梯度 SiC_p/Al 复合材料载荷受力

材料体分	平均实际厚度/mm	平均实际宽度/mm	平均抗弯强度/MPa	平均最大载荷/N	模拟施加载荷/N
左 - 右	5.19	6.28	508	1881.2	2076.3
前 - 后	5.27	5.88	416	2215.8	2570
(38)上 - 下(63)	6.2	6.41	394	2155	1951.6
(63)上 - 下(38)	6.17	6.41	651	3529.2	3213.5

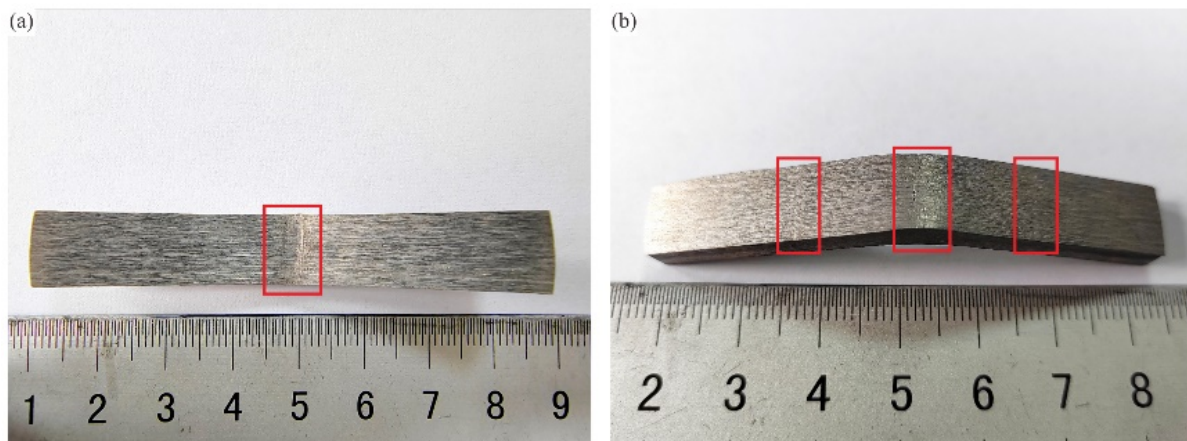


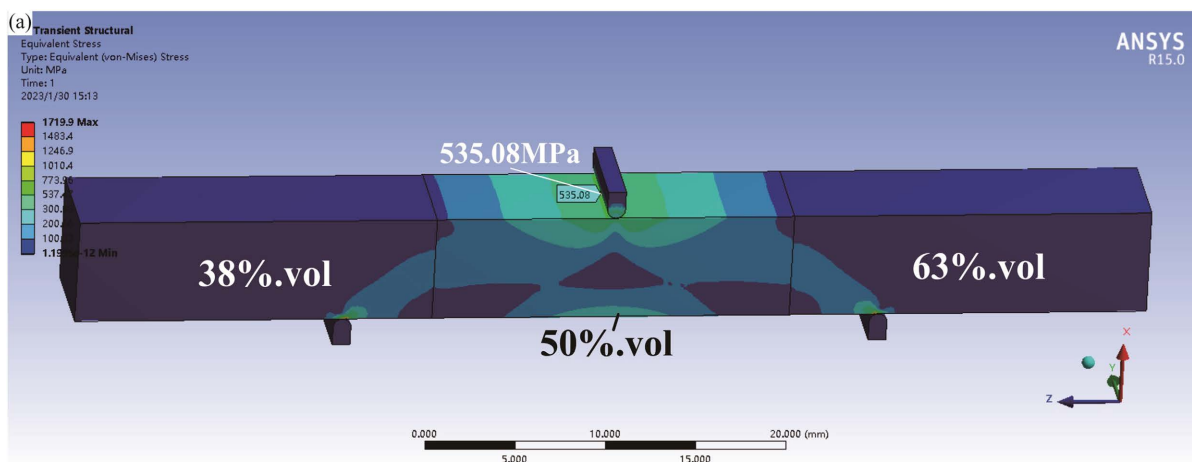
Figure 5. The actual situation of flexural strength test of flexural specimens; (a) Frontal indentation; (b) Back indentation and fracture

图 5. 抗弯试样抗弯强度测试实际情况; (a) 正面压痕; (b) 背面压痕及断裂

4. 梯度 SiC_p/Al 复合材料样件三维模型模拟结果分析

(一) 左 - 右梯度结构

由图 6 左 - 右梯度结构的模拟结果图可以看出, 上部压头接触主体为 50%.volSiC_p/Al 部分, 且与两侧梯度界面相距较远, 因此更多的体现了 50%.vol 材料自身性能; 模拟数据显示压头接触中间部位材料受应力 535 MPa, 大于 50%.volSiC_p/Al 材料本身的抗弯强度 509 MPa, 大于左 - 右梯度 SiC_p/Al 材料的抗弯强度 507 MPa, 可见对于此梯度结构来说, 梯度界面的应力集中对材料整体强度影响不大, 最大变形



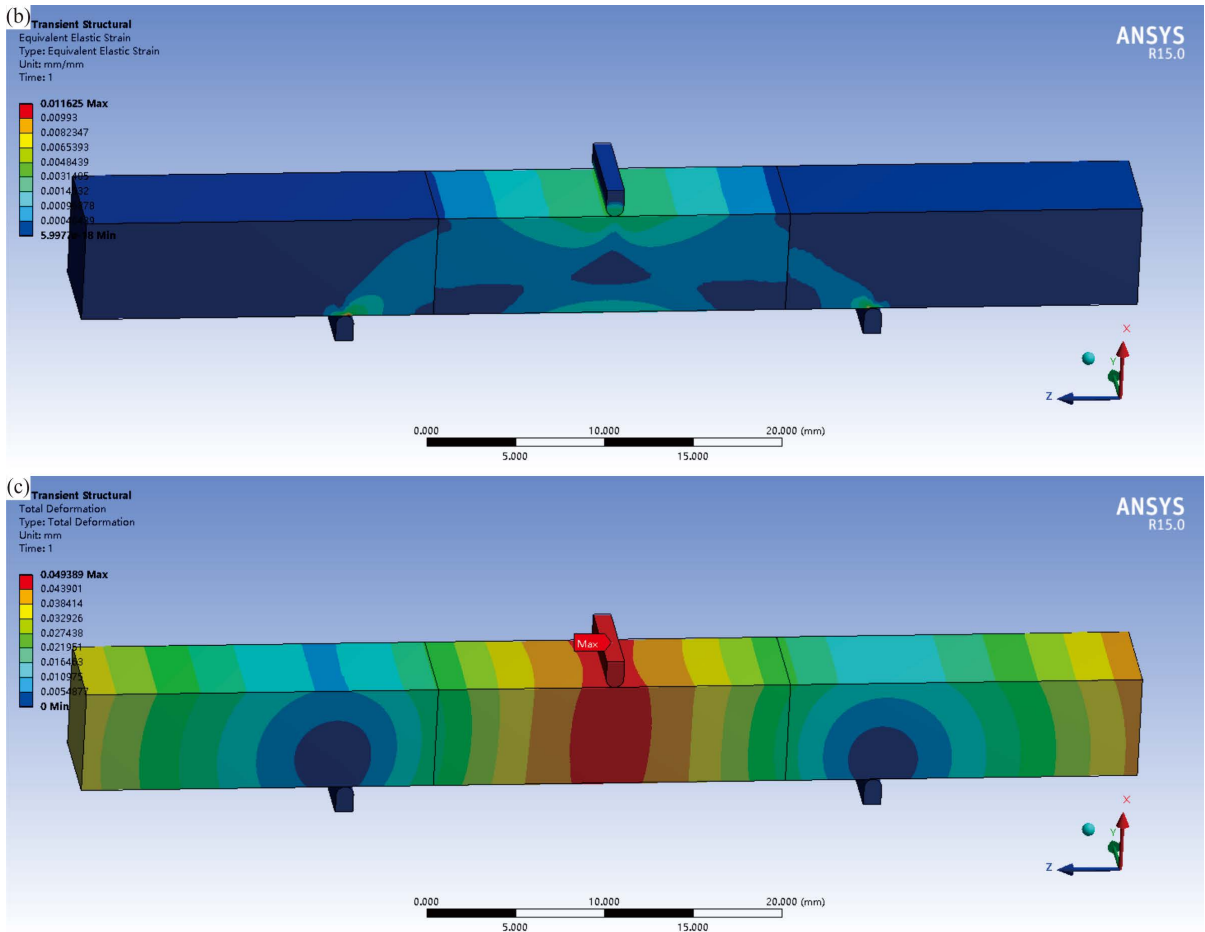
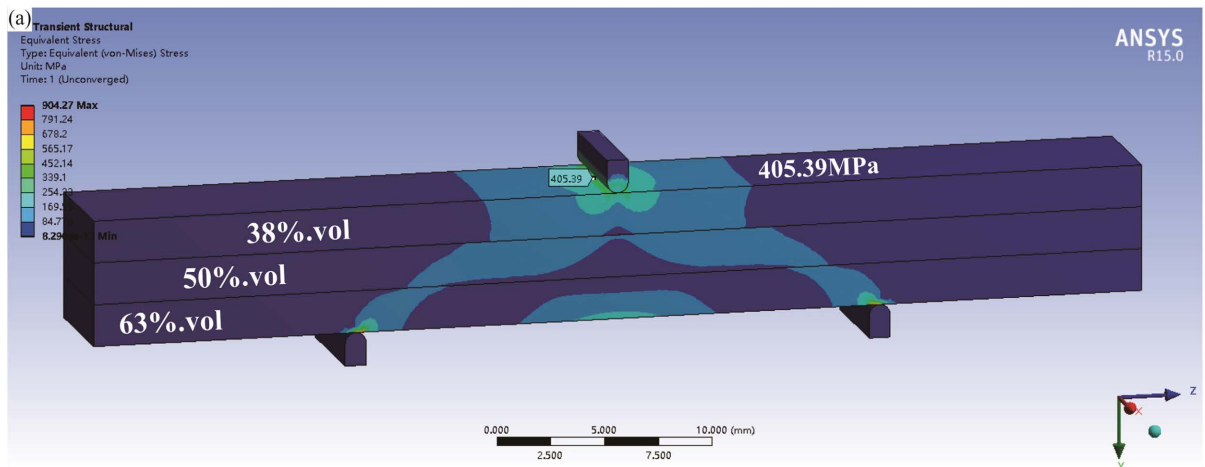


Figure 6. Left-right gradient transient structural simulation results; (a) Equivalent stress; (b) Equivalent strain; (c) Total deformation

图 6. 左 - 右梯度结构瞬态动力学模拟结果; (a) 等效应力; (b) 等效应变; (c) 总形变量

部位在试样中央断裂区域。图 6(b)则显示等效应变分布趋势与应力分布趋势基本一致，说明根据弹性模量相关定义，在受相同应力时的弹性模量小的部分等效应变的数值和影响范围较大，形变量则相对较小。

(二) 上 - 下梯度形式



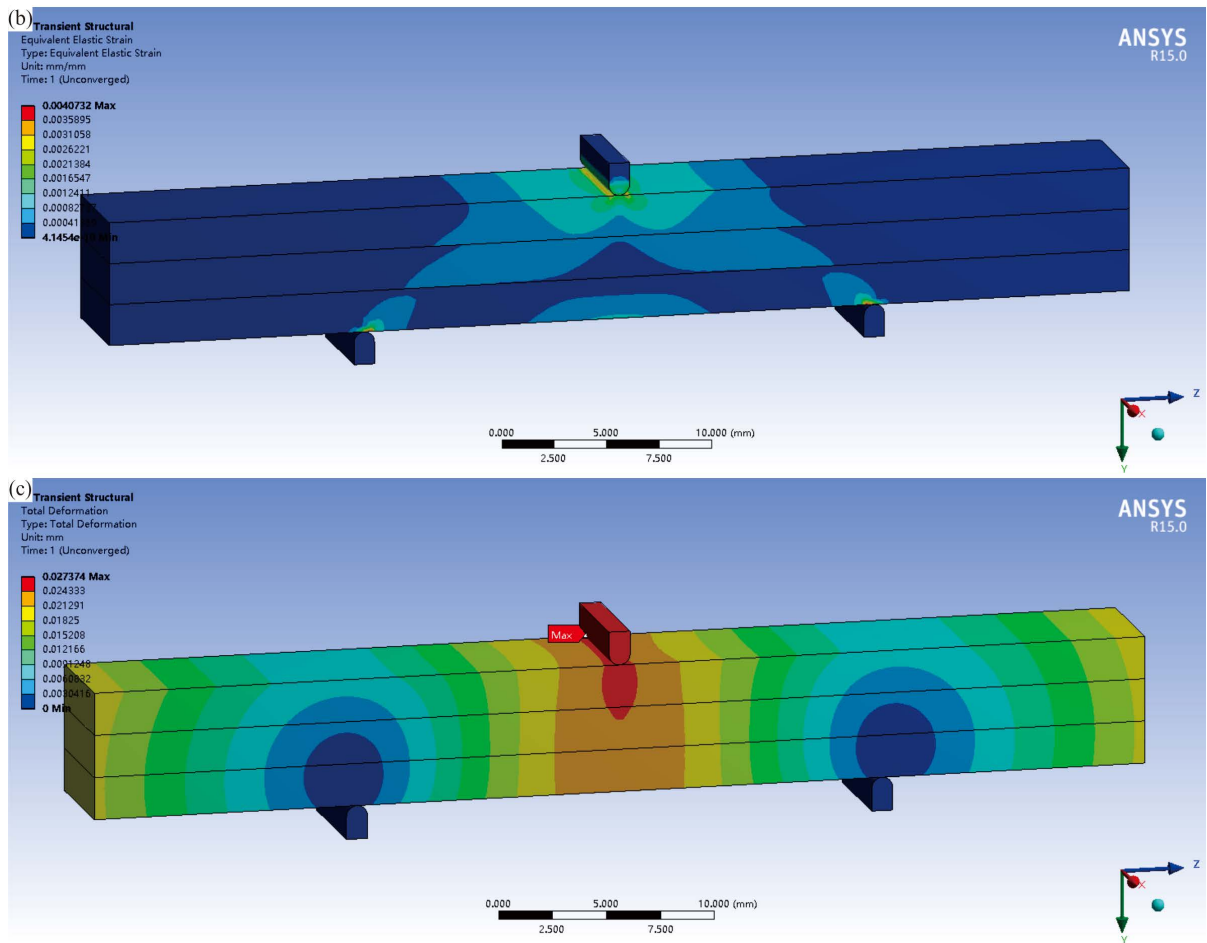


Figure 7. Upper-lower increasing gradient transient structural simulation results; (a) Equivalent stress; (b) Equivalent strain; (c) Total deformation

图 7. 上 - 下递增梯度结构瞬态动力学模拟结果; (a) 等效应力; (b) 等效应变; (c) 总形变量

1) 上 - 下递增梯度结构

由图 7 上 - 下递增梯度结构的模拟结果图可以看出，上部压头所接触部位主要为 38%.vol 部分，图中(a)显示压头接触中间部位材料受应力 405 MPa，远小于各体分 SiC_p/Al 材料自身的抗弯强度(572 MPa, 509 MPa, 484 MPa)，较大于上 - 下递增梯度 SiC_p/Al 材料平均抗弯强度 393 MPa，可见梯度界面的应力集中对梯度材料整体性能影响较大，最大形变部位在试样中央受力断裂处。

其中，38%.volSiC_p/Al 由于弹性模量较小(145 GPa)，受到同样的应力时，产生的应变和形变量相对较大，继续受力情况下，应变和变形量快速向下传递，而最下层 63%.volSiC_p/Al 的弹性模量(225 GPa)与最上层差距较大，在同样的应变或者变形量的时候受应力大，更容易发生应力集中，而其材料强度最低，无法承受与最上层相同的应变和形变量，因此递增梯度结构材料的力学性能低于单层材料，相比单一体分材料更容易发生断裂。

2) 上 - 下递减梯度结构

由图 8 上 - 下递减梯度结构的模拟结果图可以看出，上部压头所接触部位主要为 63%.vol 部分，图中(a)显示压头接触中间部位材料受应力 729 MPa，远大于各体分 SiC_p/Al 材料自身的抗弯强度(572 MPa, 509 MPa, 484 MPa)，大于该梯度结构 SiC_p/Al 材料抗弯强度 651 MPa，可见梯度界面的应力分布对材料力学性能影响较大，最大形变部位在试样中央断裂处。

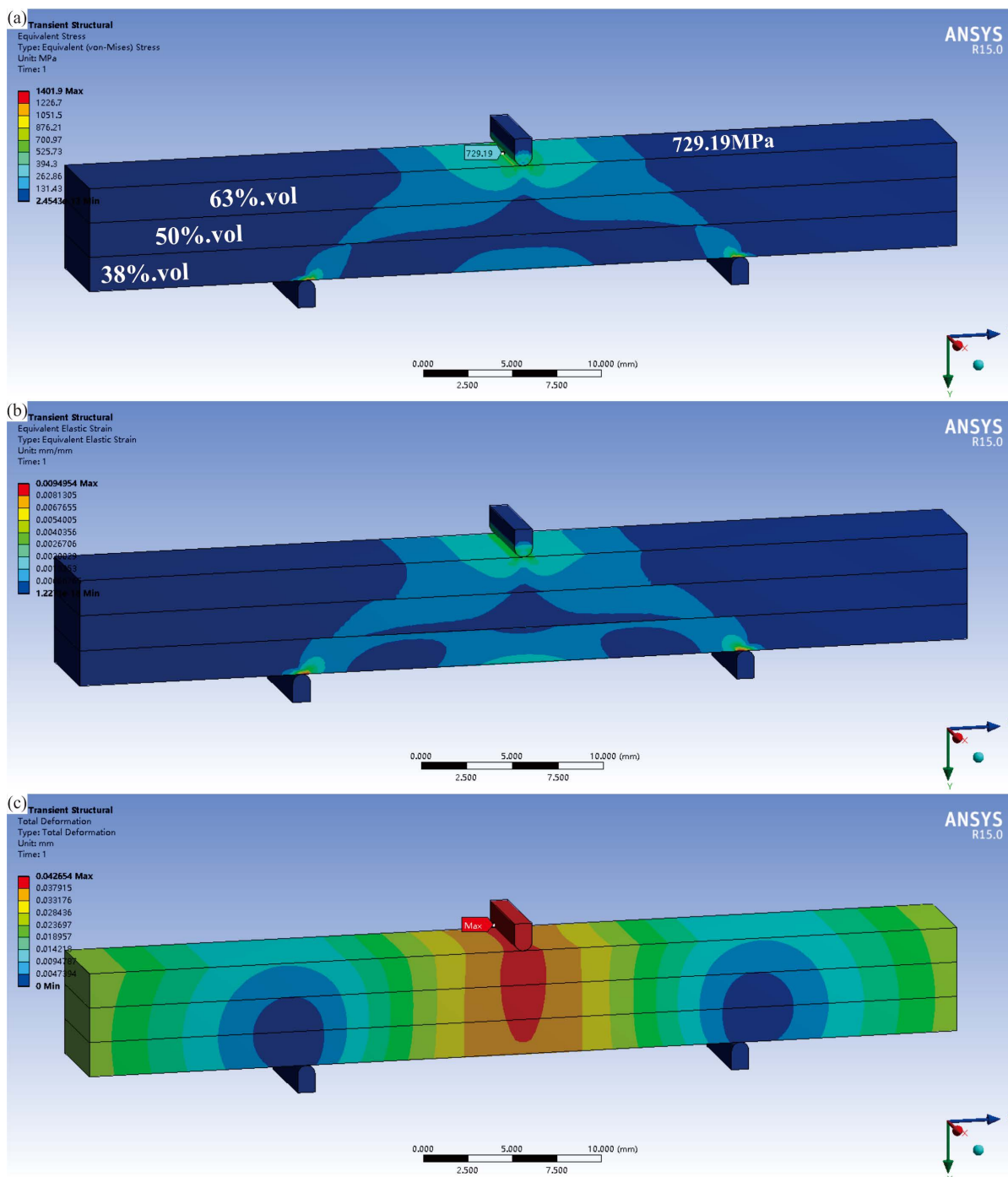


Figure 8. Upper-lower decreasing gradient transient structural simulation results; (a) Equivalent stress; (b) Equivalent strain; (c) Total deformation

图 8. 上 - 下递减梯度结构瞬态动力学模拟结果; (a) 等效应力; (b) 等效应变; (c) 总形变量

其中, 虽然位于最上层的 63%.volSiC_p/Al 的抗弯强度相对较低, 但其弹性模量(225 GPa)较大, 载荷施加时所产生的应变和形变量较小, 在应力向下传递过程中, 对传递的应变和形变具有良好的吸收作用, 传递给下部 38%.volSiC_p/Al 材料的等效应力和形变量会相对延迟, 而由于下部 50%.vol~38%.volSiC_p/Al 材料的强度逐渐较高, 断裂应变较大, 能够有效支撑上部 63%.volSiC_p/Al 材料的“塌陷”, 能够起到

缓解因受力而产生断裂的趋势，因此上-下递减梯度结构在力学性能方面产生了良好的“1+1+1>3”的梯度材料受力效果。

(三) 前-后梯度形式结构

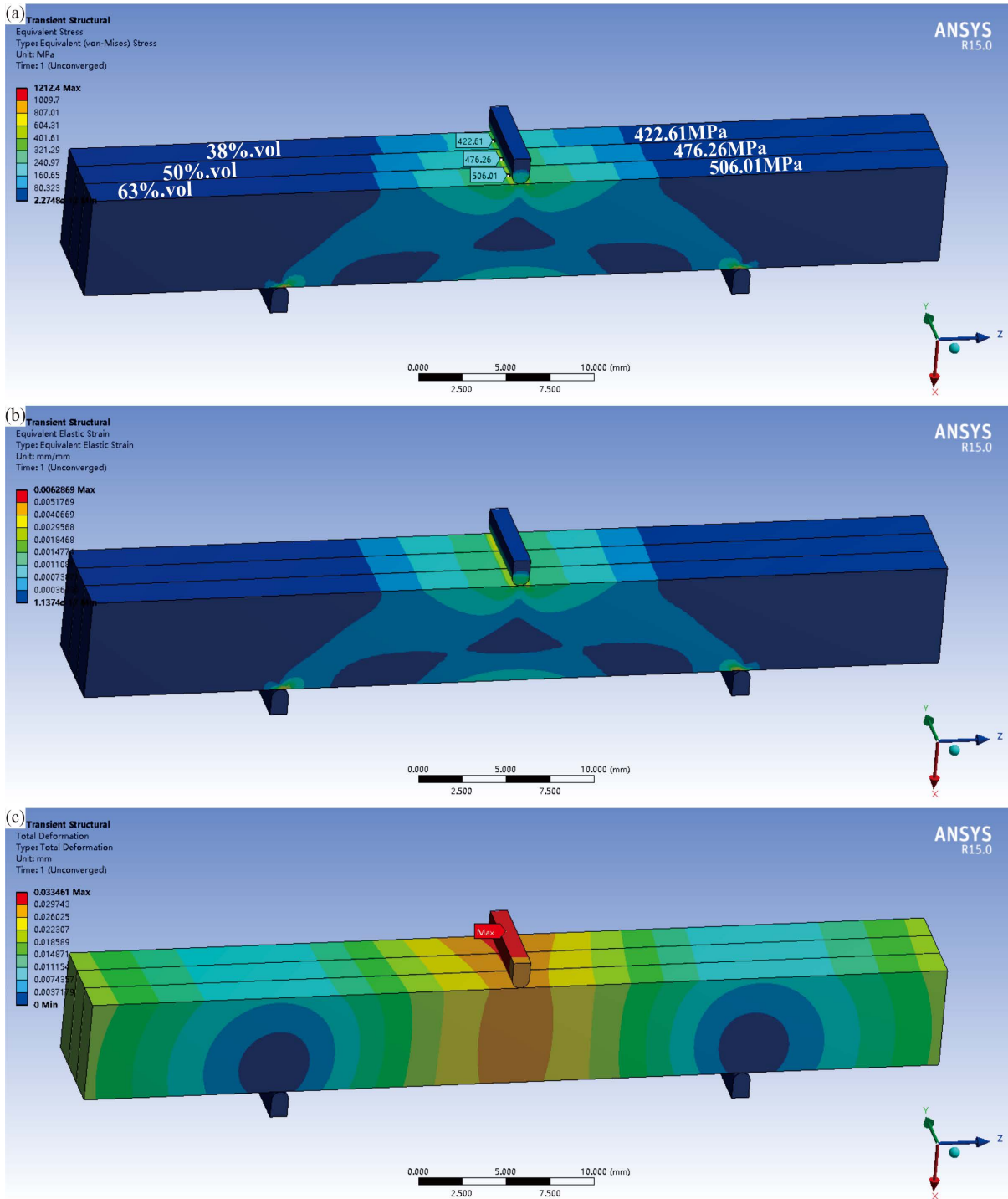


Figure 9. Forward-backward gradient transient structural simulation results; (a) Equivalent stress; (b) Equivalent strain; (c) Total deformation

图 9. 前-后梯度结构瞬态动力学模拟结果; (a) 等效应力; (b) 等效应变; (c) 总形变量

由图9前-后梯度结构的模拟结果图可以看出,上部压头同时均等接触三种体分SiC_p/Al材料,因此图中(b)显示接触面的三种体分材料的等效应变分布趋势相同;而图中(a)则说明各层材料由于自身性能差异,在受相同载荷时的应力分布趋势不同,在梯度层间产生了明显的应力集中现象。

由于上部压头同时对三层梯度部分施力,因此各层应变分布趋势相等,但63%.volSiC_p/Al材料弹性模量较大,在产生相同应变时其等效应力相对较大,而其材料强度最低,63%.volSiC_p/Al材料部分会引起应力集中,当超过最大载荷时会从结构背部63%.vol材料部分开始断裂,然后裂纹向前部和其他部位引起试样断裂,相当于引发了“短板效应”,也是前-后梯度结构抗弯强度较低的原因。

5. 结论

1) 本文制备了一种碳化硅体积占比为38%.vol~63%.vol的梯度SiC_p/Al复合材料,并表征其微观组织和测试其力学性能,结果表明该梯度材料组织致密、界面结合良好。

2) 本文利用ANSYS Workbench软件对左-右梯度、上-下递增梯度、上-下递减梯度、前-后梯度等4种梯度结构模式进行瞬态动力学分析,得到不同梯度结构的模拟数据与其相应的实测数据的变化规律一致。

3) 本文结合实际的检测数据与模拟计算得出的应力-应变等力学结果,分析了不同梯度结构SiC_p/Al复合材料的力学行为和可能引起其断裂失效的受力模式,为设计和使用梯度结构SiC_p/Al复合材料提供理论参考依据。

参考文献

- [1] 董翠鸽,王日初,彭超群,王小锋. SiC_p/Al 复合材料研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(11): 3161-3181.
- [2] 周亦人,沈自才,齐振一,薛玉雄,贺洪波,王胭脂. 中国航天科技发展对高性能材料的需求[J]. 材料工程, 2021, 49(11): 41-50.
- [3] 闫春泽,刘桂宙,王长顺,杨潇,史玉升. 一种高比功能梯度铝基碳化硅复合材料及其制备方法[P]. 中国专利, CN114480908A. 2022-05-13.
- [4] 武敏,谢龙汉. ANSYS Workbench 有限元分析及仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2014.
- [5] 胡娟,宋满新,李纯良,何芳,杨杰,余垂有. 一种铝碳化硅复合材料的凝胶注模材料组合物及预制件和结构件的制备方法[P]. 中国专利, CN111995425A. 2020-11-27.
- [6] 张振,周玖,周婕,朱军,王安哲,周琦. 金属陶瓷层状复合材料制备工艺与失效机制研究进展[J]. 航空材料学报, 2020, 40(6): 33-44.
- [7] 王尧. 梯度结构金属材料强韧化与失效机理数值研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- [8] 程军,王淑军. SiC/Al 梯度功能材料紧凑拉伸试件裂纹扩展分析[J]. 力学季刊, 2007(4): 583-591.