

SMA 复合材料低速冲击数值模拟方法

胡殿印^{1,2}, 彭靖夫¹, 贾 傲¹, 王荣桥^{1,2}

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;
2. 先进航空发动机协同创新中心, 北京 100191)

摘 要: 利用形状记忆合金(shape memory alloy,SMA)独特的超弹性效应,提出一种利用形状记忆合金提高复合材料结构抗低速冲击性能的方法. 基于形状记忆合金的分段化线性简化模型,利用 ABAQUS 有限元软件提供的 VUMAT 子程序编制了 SMA 合金超弹性本构关系并将其引入到复合材料层板低速冲击模型,提出了含 SMA 复合材料低速冲击数值模拟方法. 研究形状记忆合金利用迟滞阻尼特性吸收部分形变能量并加以释放的过程,探讨 SMA 纤维对复合材料层板抗冲击性能的增强规律. 结果表明,随着 SMA 体积分数的提高,复合材料层板的冲击应力峰值和挠度会下降,但在低 SMA 体积分数($<10\%$)情况下,对挠度的改善作用不明显;同时随着 SMA 体积分数增加,单位体积 SMA 的冲击能量吸收率会降低,在 SMA 体积分数为 $5\% \sim 10\%$ 时,SMA 纤维具有最高的能量吸收率. 得出了 SMA 纤维具有改善复合材料抗冲击性能的作用的结论.

关 键 词: 有限元分析; 形状记忆合金; SMA 复合材料; 本构模型; 低速冲击

中图分类号: V231.9; TG139.6 **文献标志码:** A

Numerical simulation method of low-velocity impact on SMA composite material

HU Dian-yin^{1,2}, PENG Jing-fu¹, JIA Ao¹, WANG Rong-qiao^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;
2. Collaborative Innovation Center for Advanced Aero-Engine, Beijing 100191, China)

Abstract: A method of improving the ability of low velocity impact resistance of composite material by using the super elastic property of shape memory alloy (SMA) was proposed. Based on the segmented linearization model of SMA and its simplified assumption, SMA super elastic constitutive model was developed by the VUMAT subroutine of ABAQUS. The numerical simulation model of low velocity impact of SMA reinforced composite material was established by ABAQUS to study how SMA absorb and discharge part of deformation energy by using hysteresis damping. Results show that the peak value of impact stress and the deflection of composite material decrease with the increase of SMA volume fraction, but the improvement of the deflection is not obvious at low SMA volume fraction ($<10\%$). With the increase of SMA volume fraction, the impact energy absorption rate of SMA per unit volume decreases, and the SMA fiber has the highest energy absorption rate in the SMA volume fraction of $5\% - 10\%$. Numerical result shows that SMA fiber can effectively improve low velocity impact response performance of composite material.

Key words: finite element analysis; shape memory alloy; SMA composite material; constitutive model; low-velocity impact

复合材料相比于传统材料具有高比强度,高比刚度,耐腐蚀,低热膨胀系数,低制造成本等优点,近年来在航空航天领域广泛应用^[1],例如,先进航空发动机的外涵机匣等结构。然而,复合材料对冲击载荷尤其是低速冲击载荷十分敏感,抗低速冲击能力较差^[2]。为此,本文提出了一种利用 NiTi 形状记忆合金特有的超弹性效应^[3]提高发动机外涵机匣抗低速冲击损伤的方法。以航空发动机复合材料机匣为载体,提出了低速冲击损伤下 SMA 复合材料的低速冲击损伤数值模拟方法。

目前,国内外学者大都利用有限元技术模拟复合材料低能量冲击行为^[4],但是,由于 NiTi 形状记忆合金复杂的超弹性力学行为,使得其本构关系不能用通常的弹塑性模型来描述^[5],因此材料的本构行为是研究 SMA 复合材料力学行为的难点之一^[6]。为解决这一问题,本文选取基于 Brinson 宏观唯象模型的 SMA 本构模型,并将其固化到 ABAQUS 子程序中。在此基础上,提出了 SMA 复合材料低速冲击损伤数值模拟方法,通过对含 SMA 的复合材料与不含 SMA 的复合材料在相同冲击条件下应力和挠度的变化规律的分析,对比研究了 SMA 提高复合材料结构抗低速冲击性能的可行性。

1 SMA 超弹性本构模型

1.1 本构模型的分段线性化

自 20 世纪 70 年代形状记忆合金被人们发现以来,国内外专家已经提出了多种形式的形状记忆合金的本构关系^[7],归纳起来,目前建立的本构模型分为 4 类:以热力学和相变动力学为基础的宏观唯象模型,塑性力学本构模型,微观力学本构模型以及基于混合物理论模型^[8]。

在这其中,基于自由能驱动力建立起来的 Tanaka 系列宏观唯象模型^[9],由于其形式简单,参量适用于工程计算的特点,被广泛用于实际智能结构中。

最初 Tanaka 基于能量守恒及 Clausius 不等式提出了 SMA 的一维本构模型^[10],紧接着, Liang-Rogers 又定义了 3 个状态变量,即:等效应变、绝对温度和马氏体体积分,得到了全量型的本构关系^[11]

$$\sigma - \sigma_0 =$$

$$D(\varepsilon - \varepsilon_0) + \Theta(T - T_0) + \Omega(\varphi_m - \varphi_{m,0}) \quad (1)$$

式中 σ 为第 2 类 Kirchhoff 应力张量, T 为温度, D 为弹性张量, ε 为 Green 应变张量, Θ 为热弹性模量, Ω 为相变张量, φ_m 为马氏体体积分,下标 0 表示初始状态量。

假设初始条件 $\sigma_0, \varphi_0, T_0, \varphi_{m,0}$ 均为零,令温度高于马氏体相变结束温度,此时 SMA 合金处于完全奥氏体状态,保持温度不变,本构模型可简化为

$$\sigma = D\varepsilon + \Omega\varphi_m \quad (2)$$

根据相变特征点,将应力-应变关系进行分段线性拟合^[12],进一步简化的拉伸时的本构模型如图 1 所示。图中, ad 段为完全奥氏体相,其斜率为 E_a (奥氏体相合金的弹性模量); $ab'b$ 段为应力诱发马氏体的正相变段; $b''bc$ 段为完全马氏体相,其斜率为 E_m (马氏体相合金的弹性模量); cd 段与 $c'd$ 段为应力诱发马氏体的逆相变段; $b'c'$ 段表示马氏体正相变未完成时的应力卸载线; bb'' 段表示马氏体相变结束后,若变形继续增加时的加载路线。

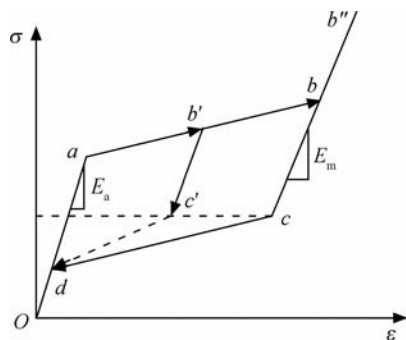


图 1 SMA 分段化线性模型

Fig. 1 Segmented linearization model of SMA

忽略应力卸载段 bc 弹性模量与加载段 ab 弹性模量的差别,统一设为 E_a ,并且考虑到 $ab'b$ 段的斜率与 cd 段的斜率之间的差别并不大,在有关 SMA 的超弹性迟滞阻尼的研究中,其差异可忽略不计^[13],统一应用模量折减系数 α 乘以 E_a 表示其斜率。认为 SMA 超弹性本构模型的压缩模式与拉伸模式存在对称^[14],对拉伸模型进行对称化处理,则得到图 2 所示的双旗形本构模型。

根据上述假设,可得材料处于拉伸情况下本

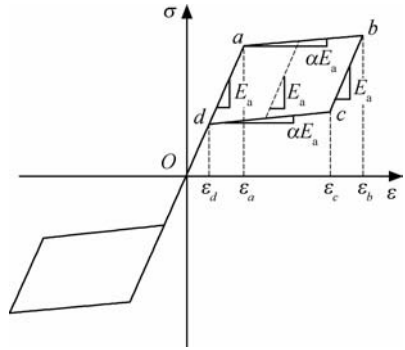


图 2 双旗形 SMA 本构模型

Fig. 2 Two-flag SMA constitutive model

构模型关系式. 对于外力加载时,有

$$\sigma = \begin{cases} E_a \epsilon & \epsilon \leq \epsilon_a \\ E_a \epsilon_a + \alpha E_a (\epsilon - \epsilon_a) & \epsilon_a < \epsilon \leq \epsilon_b \end{cases} \quad (3)$$

卸载时,有

$$\sigma = \begin{cases} E_m (\epsilon - \epsilon_b) + \sigma_b & \epsilon_c < \epsilon \leq \epsilon_b \\ \alpha E_a (\epsilon - \epsilon_d) + E_a \epsilon_d & \epsilon_d < \epsilon \leq \epsilon_c \\ E_a \epsilon & \epsilon \leq \epsilon_d \end{cases} \quad (4)$$

其中 α 为假设的模量折减系数, $\epsilon_a, \epsilon_b, \epsilon_d$ 分别为 a, b, d 三个相变特征点的应变值.

综合起来,考虑模型有以下 4 种情形:加载情形,卸载情形,卸载后加载的情形与加载后卸载的情形.

加载时

- 1) 第一加载段, oa 段按 E_a 斜率加载;
- 2) 第二加载段, ab 段按 αE_a 斜率加载.

卸载时

- 1) 第一卸载段, bc 段按 E_a 斜率卸载;
- 2) 第二卸载段, cd 段按 αE_a 斜率卸载;
- 3) 第三卸载段, do 段按 E_a 斜率卸载.

卸载后加载时

- 1) 如卸载终止于第一卸载段,则材料将按照 bc 段斜率 E_a 加载;
- 2) 如卸载终止于第二卸载段,则材料先按照 ad 段斜率加载,待进入 ab 段后,再按照 ab 段加载;
- 3) 如卸载终止于第三卸载段,则重新按照纯奥氏体本构行为进行加载.

加载后卸载时

- 1) 如材料未进入第二加载段,则材料将按照奥氏体弹性本构行为卸载,斜率为 E_a ;
- 2) 如材料已经进入第二加载段,则材料先按照 bc 段斜率卸载,待进入 cd 段后,再按照 cd 段卸载.

1.2 形状记忆合金 VUMAT 本构实现及验证

本文以复合材料层板为研究对象,通常属于薄板类型,因此可以应用相应的薄板应力应变假设,即在第 3 方向上应力应变均为零^[13]

$$\epsilon_{33} = \epsilon_{13} = \epsilon_{23} = 0 \quad (5)$$

$$\sigma_{33} = \sigma_{13} = \sigma_{23} = 0 \quad (6)$$

将 SMA 形状记忆合金作为复合材料的增强纤维,在整个研究过程中,均只有纤维方向上的拉伸或者压缩应力,因此只考虑一维本构模型^[15],计算其纤维方向上的应力应变. 其中 SMA 本构模型的材料参数如表 1 所示.

表 1 VUMAT 材料参数

Table 1 Material parameters of VUMAT

E_a/GPa	α	ϵ_a	ϵ_b	ϵ_d
70	0.043	0.0038	0.067	0.00028

本构模型在有限元中的实现通过主程序确定应力,应变以及应变增量,判断材料处于拉伸/压缩状态以及属于加载还是卸载状态,进而根据相应的应力应变本构模型给出应力更新算法,返回主程序相应的变量值,具体算法如图 3 所示.

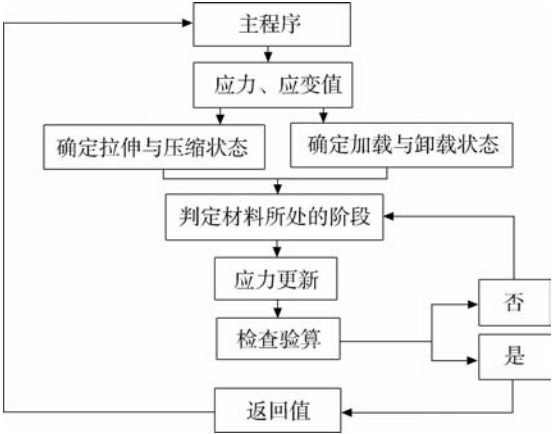


图 3 SMA 本构模型算法

Fig. 3 Algorithm of SMA constitutive model

在本构算法中,通过 VUMAT 主程序读取应力、应变值,以应变是否大于零确定拉伸与压缩状态,以应变增量是否大于零确定加载与卸载阶段,以 a, b, c, d 四个关键点的应力应变值作为材料所处阶段的判断依据.

本构模型算法实现方式如下:

- 1) ABAQUS 主程序在计算更新应力时,寻找材料子程序接口,对于子程序相关的材料部件,

输入对应节点的上一步应力计算值、应变计算值以及这一步预估的应变增量；

2) 子程序根据目前材料节点的应力、应变值自动判断 SMA 材料纤维所处状态；

3) 根据 SMA 纤维所处状态,子程序确定此增量步所处的应力-应变本构模型区域位置,再根据相应的分段线性模型计算更新后的材料应力并进行验算,防止其超过相变点特征值；

4) 验算未出现溢出问题则返回相应的变量值给主程序,结束本增量步,验算不通过则根据相变情况重新计算模型的应力值直至符合设计要求。

之后建立了复合材料单层板模型^[16],复合材料基体为石墨/环氧树脂材料(AS4/3501-6),将 SMA 材料单元通过 embedded region 的方式嵌入到层合板中,有限元模型如图 4 所示。采取 4 个侧面固支的边界条件,载荷条件为随时间变化的面压力载荷,在复合材料层合板外表面的以正中心为原点、半径为 25 mm 的圆形区域内施加压力。

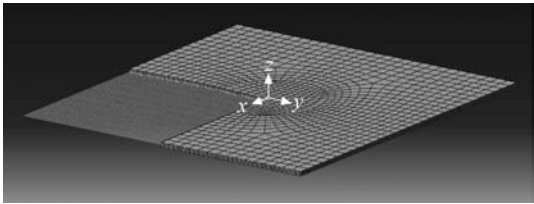


图 4 复合材料层板冲击验证模型

Fig. 4 Impact validation model of composite material laminate

从 ABAQUS 中提取出 SMA 纤维在复杂载荷下的应力-应变数据,并绘制出低速冲击下应力-应变本构曲线如图 5 所示。可以看出,不同阶段点的应力-应变相应分析结果均与本构模型很

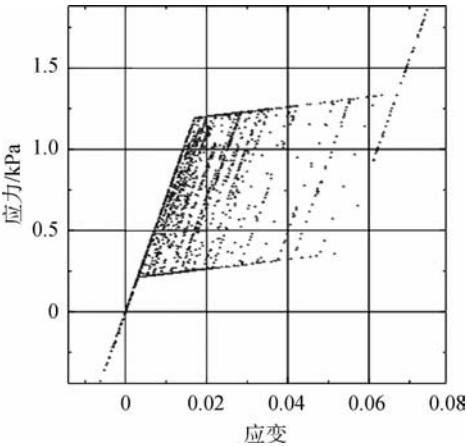


图 5 SMA 纤维应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of SMA fiber

好符合,验证了 SMA 本构模型的合理性。

2 SMA 复合材料层板的低速冲击响应数值模拟

2.1 SMA 复合材料层板的有限元建模

根据 ASTM (American society for testing and materials) 冲击试验的数据^[10],冲头采用半圆形重物,直径为 16 mm;复合材料层板几何尺寸为 150 mm×2 mm,材料牌号为 AS4/3501-6,材料参数见表 2。

表 2 中 E_1 为纤维方向弹性模量, E_2 为垂直纤维方向弹性模量, ν 为泊松比, G_{12} 为切变模量, ρ 为材料密度。

表 2 AS4/3501-6 材料参数

Table 2 Material parameters of AS4/3501-6

E_1 /GPa	E_2 /GPa	ν	G_{12} /GPa	ρ /(g/cm ³)
114.8	9.65	0.3	3.45	2.5

应用软件 ABAQUS/Explicit 显示分析模块建立复合材料层板剖面的低速冲击有限元模型,如图 6 所示。设冲头弹性变形很小,以刚体方式建模;复合材料层板采用细分的 CPS4R 四结点线性平面应变四边形单元进行网格划分;SMA 形状记忆合金纤维选取 T2D2 两结点二维桁架单元,采用嵌入的约束条件埋入复合材料中。

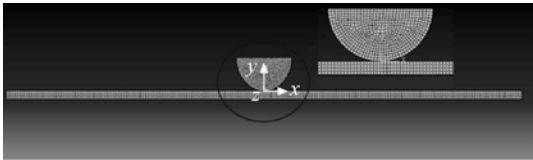


图 6 SMA 复合材料层板低速冲击有限元模型

Fig. 6 Finite element model of low velocity impact on SMA composite material laminates

2.2 SMA 复合材料层板低速冲击数值模拟结果

对整个模型截取 0~0.003 s 的冲击过程,采样为 3000 个点时间均匀化分布,研究 SMA 体积分数(SMA 所占体积与模型体积之比)分别为 5%,10%,20%,30%,40% 的 SMA 复合材料层合板低速冲击数值模拟。

在弹头以 10 m/s 速度下落冲击的情况下,接触层板在接触面上产生相应的接触压应力。其数值反映了整个冲击过程中的能量转化情况与板的响应情况。通过对有限元模型的接触面节点接触

应力累加,得到低速冲击下不同 SMA 体积分数(φ_{sma})的接触应力曲线,如图 7 所示。

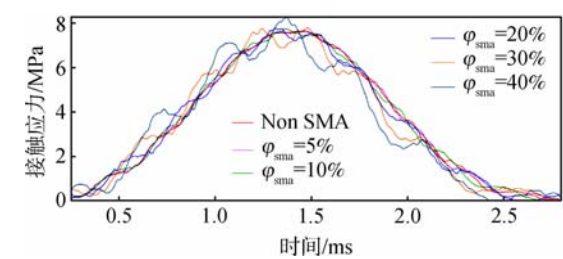


图 7 低速冲击下的接触应力-时间曲线
Fig. 7 Low-velocity impact contact stress-time curves

从图 7 中可以看出,复合材料板都表现出了很好的弹性特征,即抛物线形接触力曲线,通过接触作用,接触压应力达到峰值,随后接触力回落.从低速冲击下的接触力平滑曲线可以明显看出,随着 SMA 体积分数的增大,复合材料层板接触应力响应的波动性增大。

2.3 复合材料层板平均应力分布规律

复合材料结构的应力从内部响应的角度反映了其冲击响应性能。为此,对整个复合材料层板剖面应力进行累加并且求均值,得到图 8 所示复合材料在各个 SMA 体积分数下的 von Mises 应力变化曲线。

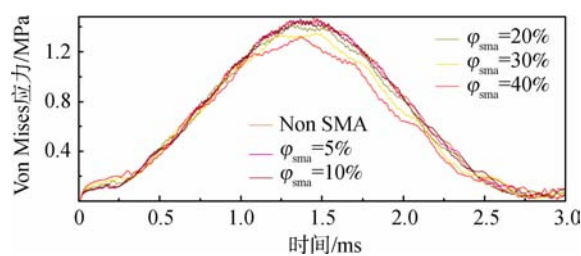


图 8 低速冲击下的 von Mises 应力-时间曲线
Fig. 8 Low-velocity impact von Mises stress-time curves

可以看出,随着 SMA 体积分数的增高,复合材料板的应力峰值有所降低,并且波动时间变短.这主要因为 SMA 纤维吸收了冲击能量,提高了复合材料抗冲击性能.值得注意的是,其应力曲线出现了折线式的增长与降低,这非常类似于 SMA 纤维的应力加载曲线.这种不连续性是由 SMA 纤维相变的前后模量不连续性造成的,这说明随着 SMA 体积分数在复合材料层板中的提高,其本构行为影响度也在迅速增大。

2.4 复合材料层板挠度变化规律

对于复合材料的挠度(y 方向上的位移),选

取板中央最大挠变点的挠度值,得到图 9 所示复合材料层板最大挠度随时间变化关系。

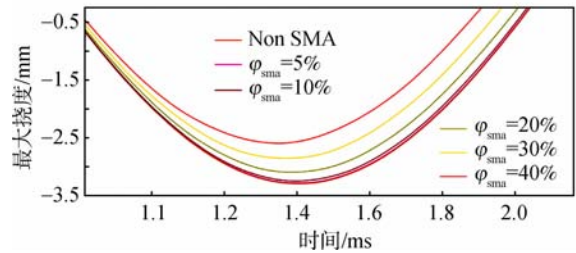


图 9 低速冲击下最大挠度-时间曲线
Fig. 9 Low-velocity impact maximum deflection-time curves

从挠度图形上能很清楚的看见,随着时间的推移,SMA 体积分数的复合材料层板剖面最大位移的出现提前,并且数值明显小于小体积分数的 SMA 的最大位移.说明 SMA 纤维削弱冲击影响的效果十分明显.而对于小 SMA 体积分数(5%,10%)的复合材料板,其性能提升不明显,但是仍有改善。

2.5 SMA 纤维能量吸收规律

通过研究 SMA 纤维的应力应变状况,确定 SMA 体积分数与能量吸收之间的关系,对 SMA 纤维单元的应力-应变绘制出本构曲线图,如图 10 所示。

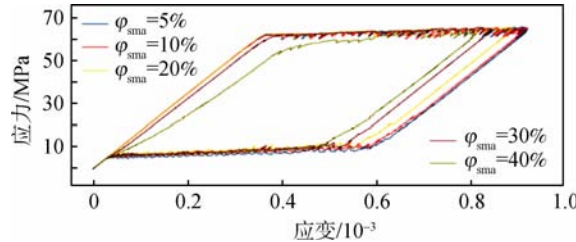


图 10 SMA 纤维应力-应变本构曲线
Fig. 10 Stress-strain constitutive curves of SMA fiber

随着 SMA 体积分数的增加,复合材料层板的抗冲击性能增强,挠度值减小,嵌入到复合材料的 SMA 纤维的位移同步于其复合材料母体,应变也随之减小,纤维开始出现不发生相变或者相变延迟的情况,从而导致本构模型曲线发生扭曲。

图 10 中曲线所围成的面积为 SMA 超弹性形状记忆合金所吸收的冲击能量,面积越大所吸收的能量越多,可得单位体积 SMA 纤维吸收能量从大到小对应的 SMA 体积分数为 5%,10%,20%,30%和 40%。层板的应变越大,相变反应发生的越完全,吸收的能量也越多.从图中可以看出

名义体积分数为 5% 与 10%, 已经几乎重叠, 说明了曲线已经趋近于完全相变的本构模型, 单位吸收能量达到了最大值。

从能量吸收的角度考虑, 尽管 SMA 体积分数增加, 抗冲击性能随之增加; 但是并不能达到较高的 SMA 纤维利用率。如何根据需要调整 SMA 体积分数以达到较高纤维利用依然值得研究。

3 结 论

1) 本文提出了一种利用形状记忆合金超弹性来吸收形变能量, 用以提高复合材料的抗低速冲击损伤的方法。

2) 实现了 SMA 复合材料低速冲击损伤数值模拟。在 ABAQUS 子程序 VUMAT 中建立了 SMA 形状记忆合金双旗形分段线性模型, 并将其应用到 SMA 对复合材料抗低速冲击性能的研究中, 建立了含 SMA 复合材料低速冲击损伤数值模拟方法。

3) 将含 SMA 纤维与不含 SMA 纤维的复合材料层板进行对比, 探讨其抗冲击规律, 确定 SMA 纤维有抗冲击性能; 通过对不同 SMA 体积分数下接触应力、层板挠度等参数的分析, 发现随 SMA 体积分数增加, 应力峰值与最大挠度均降低, 即抗冲击性能增加。

4) 探讨了 SMA 体积分数对能量吸收的影响, 发现可以根据需要调整 SMA 体积分数, 达到较高的纤维利用率。

参考文献:

[1] 杨乃宾, 章怡宁. 大飞机复合材料结构设计导论[M]. 北京: 航空工业出版社, 2009.

[2] 王心美, 岳珠峰, 王亚芳, 等. NiTi 合金的超弹性力学特性及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.

[3] Elmarakbi A M, Hu N, Fukunaga H. Finite element simulation of delamination growth in composite materials using LS-DYNA[J]. Composites Science and Technology, 2009, 69(14): 2383-2391.

[4] Marco A, Luigi M L C, Fabio I, et al. A survey of numerical models for hail impact analysis using explicit finite element codes[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 31(8): 929-944.

[5] Hu N, Zemba Y, Okabe T, et al. A new cohesive model for simulating delamination propagation in composite laminates under transverse loads[J]. Mechanics of Materials, 2008, 40(11): 920-935.

[6] ZHANG Yan, ZHU Ping, LAI Xinmin. Finite element

analysis of low-velocity impact damage in composite laminated plates[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006, 40(8): 1348-1353.

[7] Batral R C, Gopinath G, Zheng J Q. Damage and failure in low energy impact of fiber-reinforced polymeric composite laminates[J]. Composite Structures, 2012, 94(2): 540-547.

[8] 曾攀, 杜泓飞. NiTi 形状记忆合金的本构关系及有限元模拟研究进展[J]. 锻压技术, 2011, 36(1): 1-6.

ZENG Pan, DU Hongfei. Research progress on constitutive models and finite element analysis of NiTi shape memory alloy[J]. Stamping Technology, 2011, 36(1): 1-6. (in Chinese)

[9] 钱辉, 李宏男, 宋钢兵, 等. 基于塑性理论的形状记忆合金本构模型、试验和数值模拟[J]. 功能材料, 2007, 38(7): 1114-1118.

QIAN Hui, LI Hongnan, SONG Gangbing, et al. Constitutive model of shape memory alloy based on plastic theory: experiment and simulation[J]. Journal of Functional Materials, 2007, 38(7): 1114-1118. (in Chinese)

[10] 吴永东. 利用形状记忆合金提高复合材料结构低速冲击响应性能研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2003.

WU Yongdong. Research on the low speed impact response of composite structures with shape memory alloy [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2003. (in Chinese)

[11] Patoor E, Lagoudas D C, Entchev P B, et al. Shape memory alloys: Part I general properties and modeling of single crystals[J]. Mechanics of Materials, 2006, 38(5): 391-429.

[12] Saint-Sulpice L, Chirani S A, Calloch S. A 3D super-elastic model for shape memory alloys taking into account progressive strain under cyclic loadings[J]. Mechanics of Materials, 2009, 41(1): 12-26.

[13] Lagoudas D, Hartl D, Chemisky Y, et al. Constitutive model for the numerical analysis of phase transformation in polycrystalline shape memory alloys [J]. International Journal of Plasticity, 2012, 32/33(3): 155-183.

[14] 刘芹, 任建亭, 姜节胜, 等. SMA 本构模型及其应用的研究进展[J]. 力学进展, 2007, 37(2): 189-204.

LIU Qin, REN Jianting, JIANG Jiesheng. An overview of the constitutive model of shape memory alloy and their applications[J]. Advances in Mechanics, 2007, 37(2): 189-204. (in Chinese)

[15] 杜晓伟, 孙国钧. 粘弹基体形状记忆合金梁弯曲的仿真分析[J]. 复合材料学报, 2004, 21(2): 76-80.

DU Xiaowei, SUN Guojun. Simulation analysis of bending of a viscoelastic matrix shape memory alloy[J]. Journal of Composite Materials, 2004, 21(2): 76-80. (in Chinese)

[16] 李相麟. 复合材料单层板损伤分析[J]. 南昌大学学报: 理科版, 2005, 29(3): 240-241.

LI Xianglin. Damage analysis of composite laminate [J]. Journal of Nanchang University: Natural Science, 2005, 29(3): 240-241. (in Chinese)