

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2022.04.008

磁浮列车碳纤维车厢与铝合金夹层结构连接结构设计及优化

李戈辉,杨冰,肖守讷,阳光武,朱涛,王明猛,陈东东
(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610031)

摘要:某型号磁悬浮列车车厢采用碳纤维复合材料,夹层结构采用铝合金,由于两种材料之间存在较大的电位差,易导致机械连接结构发生电化学腐蚀,进而引起连接结构破坏。因此采用共固化的方式对其连接结构进行设计。因碳纤维和铝合金热膨胀系数不同,为缓解温度引发的共固化连接结构内应力,从理论和仿真两个角度对连接结构的热应力进行了分析,并采用基因遗传算法对连接结构的铺层角度进行了优化。优化后连接结构最大应变下降了35.7%。

关键词:磁浮列车;碳纤维复合材料;铝合金;层合板;热应力;基因遗传算法

中图分类号:U270.2 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)04-0030-05

Design and Optimization of Connection Structure between Carbon Fiber Carriage and Aluminum Alloy Sandwich Structure of Maglev Train

LI Gehui, YANG Bing, XIAO Shoune, YANG Guangwu, ZHU Tao, WANG Mingmeng, CHEN Dongdong
(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Certain model of maglev train carriage made of carbon fiber composite material with aluminum alloy sandwich structure, due to the large potential difference between the two materials, tends to cause the electrochemical corrosion of the mechanical connection structure, which brings about the damage to connection structure. Therefore, the co-curing method is applied to design the connection structure. Since the coefficients of thermal expansion of carbon fiber and aluminum alloy are different, the thermal stress of the connection structure is analyzed from theoretical and simulation perspectives to alleviate the internal stress of the connection structure caused by temperature. The stacking angle of the connection structure is optimized by genetic algorithm, which reduces the maximum strain of the joint structure by 35.7%.

Keywords: maglev train; carbon fiber composites; aluminium alloy; laminate; thermal stress; genetic algorithm

0 引言

近年来,随着磁悬浮列车技术的不断发展,碳纤维复合材料(CFRP)和铝合金已成为磁浮车体轻量化设计的主要材料^[1-2]。在车体结构中,碳纤维复合材料与铝合金常用的连接方式有胶粘连接、螺栓连接、铆接和混合连接。不同材料之间存在电位差,导致连接结构易发生电化学腐蚀而引起连接结构破坏。因此在碳纤维与铝合金的连接结构设计时,不能沿用传统的机械连接方式。沈真等^[3-4]在复合材料飞机结构强度设计与验证中认为,碳纤维与铝合金宜采用共固化连接方式。然而,碳纤维复合材料和金属材料的热膨胀系数不同,易导致共固化成型连接结构在热应力的作用下发生断裂^[5],因此应通过优化层合板铺层来减小热应力。

1 碳纤维车厢与铝合金夹层结构连接结构设计

1.1 磁浮列车车体结构分析

磁浮列车车体主要由碳纤维车厢、铝合金夹层结构两部分组成。碳纤维车厢是在原铝合金车厢的基础上优化设计而来的,质量减少了42%,轻量化效果显著。同时为了保证碳纤维车厢能够满足原有的技术条件要求,碳纤维车厢在结构的尺寸上应与铝合金车厢保持一致,与其他结构连接接口保持不变。碳纤维车厢为采用中空吹气成型工艺制造的壳体型腔结构,如图1所示。

夹层结构结构为全铝合金结构,如图2所示。

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51675446);国家重点实验室自主课题资助项目(2019TPL-T13)

第一作者简介:李戈辉(1994—),男,河南三门峡人,硕士研究生,研究方向为车辆强度与可靠性、碳纤维复合材料结构强度。

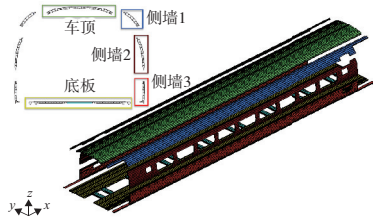


图1 碳纤维车厢结构示意图



图2 铝合金夹层结构结构示意图

1.2 碳纤维车厢与铝合金夹层结构连接结构设计

为了保证碳纤维车厢和铝合金夹层结构间的连接接口与原车体保持一致,连接结构的设计如图3所示。

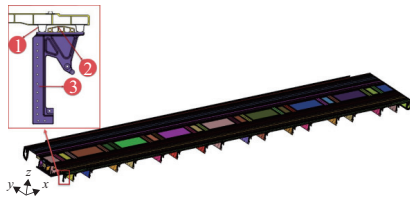


图3 连接结构示意图

如图3所示,部件1是位于碳纤维车厢底板下的燕尾槽结构,该结构与底板采用中空吹气成型工艺一体成型。部件2为铝合金挤压型材,横截面如图3所示,长度与车厢底板相同,位于车体底板下表面的两个燕尾槽之间,增强了连接部位的横向刚度。部件3也是铝合金挤压型材,沿车体纵向等距分布,部件3通过螺栓与部件1、部件2相连,夹层结构其他结构通过螺栓或铆接的方式与部件3连接。由于部件1与部件3直接接触并暴露于空气中,容易发生电化学腐蚀,并且通过初步静强度计算分析发现,碳纤维燕尾槽无法满足强度和刚度要求。因此,为了避免电化学腐蚀,需提高连接结构强度。结构1采用碳纤维复合材料和金属材料共固化的方式,通过中空吹气成型工艺一体成型。具体结构如图4所示,其中深色部位代表铝合金,浅色部位代表碳纤维复合材料。

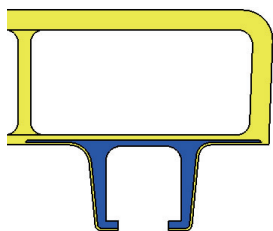


图4 碳纤维-铝合金燕尾槽横断面示意图

2 连接结构热应力分析及有限元仿真

2.1 连接结构热应力理论分析

碳纤维-铝合金燕尾槽由碳纤维复合材料和铝合金材料固化成型。由于两种材料热膨胀系数差异较大,所以应该对碳纤维-铝合金燕尾槽的热应力进行计算和审核。

碳纤维复合材料单层板是正交各项异性材料,材料沿纤维方向和垂直纤维方向具有不同的力学性能。本文以T300碳/环氧纤维复合材料为例,其力学性能参数如表1所示^[6]。

表1 T300碳/环氧纤维复合材料力学性能参数表

E_1/GPa	E_2/GPa	G_{12}/GPa	μ_{12}	$\alpha_1/(10^{-6}\text{K}^{-1})$	$\alpha_2/(10^{-6}\text{K}^{-1})$
181	10.3	7.17	0.28	0.02	22.5

根据表1可得T300碳/环氧纤维复合材料的柔度系数矩阵为

$$S = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\mu_{12}}{E_1} & 0 \\ \frac{\mu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

刚度矩阵 Q 为 S 的逆矩阵,并且通过坐标转换矩阵求得:

$$T = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & (m^2 - n^2) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $m = \cos\theta$, $n = \sin\theta$, θ 为任意方向与纤维主轴方向的夹角,逆时针为正。可以求得任意方向的变换刚度系数矩阵 $\bar{Q} = T^{-1}Q(T^{-1})^T$ 。

碳纤维复合材料层合板由各单层板按照不同角度和顺序粘结组成,根据层合板理论碳纤维层合板的热应力理论计算公式为

$$\begin{bmatrix} N^T \\ M^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon^0 \\ K \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: N^T 为温度引起的合内力; M^T 为温度引起的合内力矩; ε^0 为层合板中面应变; K 为层合板中面曲率; $A_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} (\bar{Q}_{ij})_k dz$; $B_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} (\bar{Q}_{ij})_k z dz$; $D_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} (\bar{Q}_{ij})_k z^2 dz$,其中 $(\bar{Q}_{ij})_k$ 为层合板第 k 层的变换刚度系数。

由式(3)可知,当已知由温度引起的合内力和合内力矩时,可以求出层合板的中面应变和中面曲率,进而可以求得各层的应力和应变。

当只有温度变化时,单层板主轴方向的应变为

$$\begin{cases} \varepsilon_1^T = \alpha_1 \times \Delta T \\ \varepsilon_2^T = \alpha_2 \times \Delta T \\ \gamma_{12}^T = 0 \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)根据应变的坐标转换关系可以求出任意方向的应变为:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x^T \\ \varepsilon_y^T \\ \gamma_{xy}^T \end{bmatrix} = T_e^{-1} \begin{bmatrix} \varepsilon_1^T \\ \varepsilon_2^T \\ \gamma_{12}^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{bmatrix} \times \Delta \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m^2 \alpha_L + n^2 \alpha_T \\ n^2 \alpha_L + m^2 \alpha_T \\ 2mn(\alpha_L - \alpha_T) \end{bmatrix} \quad (6)$$

由式(5)、式(6)可求得各单层板任意角度的应力。因为合内力和合内力矩是由各单层板沿厚度积分而来。所以由温度引起的合内力和合内力矩计算公式为:

$$N = \int_{-h/2}^{h/2} \bar{Q}_k \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{bmatrix}_k \Delta T dz = \sum_k (\bar{Q}_{ij})_k \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{bmatrix}_k (z_k - z_{k-1}) \Delta T \quad (7)$$

$$M = \int_{-h/2}^{h/2} \bar{Q}_k \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{bmatrix}_k \Delta T z dz = \frac{1}{2} \sum_k (\bar{Q}_{ij})_k \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{bmatrix}_k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \Delta T \quad (8)$$

对于碳纤维复合材料和铝合金共固化形成的层合板而言,可将铝合金看作层合板中特殊的一层,并根据层合板理论进行计算。6005-T6 型铝合金的材料参数如表 2 所示。

表 2 6005-T6 型铝合金材料力学性参数表

材料牌号	E/GPa	μ	$\alpha / (10^{-6} \text{K}^{-1})$
6005-T6 型铝合金	70	0.34	23.5

使用 T300 碳/环氧纤维复合材料和 6005-T6 型铝合金的材料参数,根据层合板理论计算,铺层角度和顺序为铝合金 1 mm+碳纤维 $[0^\circ]_{10}$ s₂ mm+铝合金 1 mm 三明治式的层合结构在 $\Delta T = 40^\circ\text{C}$ 时中间层的应变为 $\varepsilon_1 = 2.6408 \times 10^{-4}$, $\varepsilon_2 = 1.10 \times 10^{-3}$ 。

2.2 基于有限方法的热应力仿真

通过有限元方法对碳纤维复合材料和铝合金共固化形成的层合板进行热应力分析,首先在有限元分析软件中建立图 5 所示的碳纤维复合材料-铝合金层合板试件。

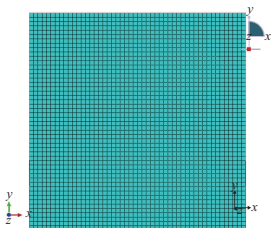


图 5 层合板试件尺寸示意图

试件铺层角度和顺序与理论计算模型一致,有限元模型堆叠方式如图 6 所示。

在有限元软件中对试件设置 $\Delta T = 40^\circ\text{C}$ 的温度场。划分有限元网格,网格尺寸设置为 2 mm,单元类型选择 S4R

单元。S4R 单元是 4 节点四边形有线薄膜应变线性减缩积分壳单元性能稳定适宜各项异性材料^[7]。试件有限元模型如图 7 所示。

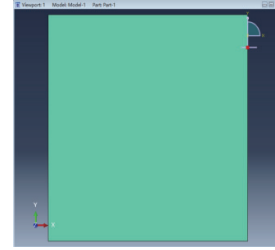


图 6 层合板试件铺层示意图

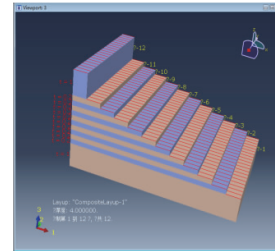


图 7 试件有限元模型

通过有限元软件仿真分析得到试件的中层的应变为 $\varepsilon_1 = 2.641 \times 10^{-4}$, $\varepsilon_2 = 1.11 \times 10^{-3}$ 。试件应变云图如图 8、图 9 所示。

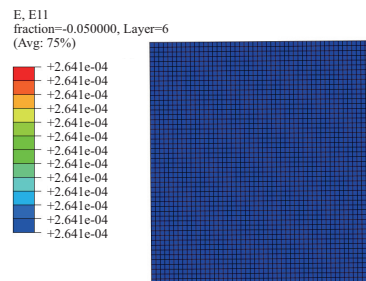


图 8 x 方向应变云图

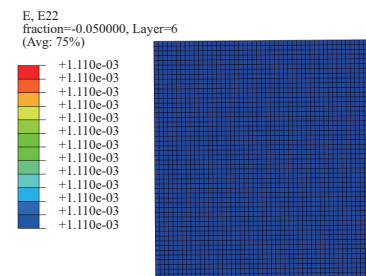


图 9 y 方向应变云图

由有限元方法得到的中层应变值与理论计算值误差如表 3 所示,证明了有限元仿真方法的准确性。

表 3 理论值与有限元仿真值对比表

应变	$\varepsilon_1 \times 10^{-4}$	$\varepsilon_2 \times 10^{-4}$
理论值	2.640 8	1.10
仿真值	2.641 0	1.11

ε_1 的误差为 0.007 57%; ε_2 的误差为 0.91%。

3 遗传算法的实现与优化

3.1 遗传算法的实现

因碳纤维层合板的模量、泊松比、热膨胀系数等力学性能受铺层角度、铺层顺序的影响,而且层合板一般由单层板堆叠而成并且各层的铺层角度各自独立,增加了层合板设计的复杂性。为了能够对层合板的铺层角度进行合理的设计和优化,GHIASI H 等^[8-9]总结了遗传算法在层合板铺层优化中的应用。

遗传算法是一种模仿自然界优胜劣汰进化法则的搜索算法,自从 60 年代第一次提出遗传算法的概念到现在,遗传算法的思想已被人们广泛应用于各个领域^[10]。碳纤维层合板的优化设计可以采用遗传算法得到有效的解决。遗传算法主要包括基因、个体、种群 3 个概念。基因用来定义基因类型,个体用来实现基因的适应度表达,是基因交叉遗传,也是基因突变的对象。种群由多个个体组成,在种群内对个体进行优胜劣汰。

3.2 遗传算法的优化

对于碳纤维复合材料层合板的铺层优化问题需要在遗传算法的基础上进行相应的改进,以提高计算效率。对层合板而言,由于各层的铺层角度受制作工艺的影响不可能取任意实数,在工程应用中常见的铺层角度有 $\pm 45^\circ$ 、 0° 、 90° ,因此采用整数浮点型基因。为了方便计算,设置基因的上下为 $[-2, 2]$ 。层合板个体通过基因串来表现,如层合板共有 10 层,则个体表现为(A B C D E F G H I J K),其中字母代表一个铺层角度,每个铺层角度由一个基因决定,铺层角度等于基因乘以 45° 。这样就通过基因表达了个体的形状,并且限制个体的铺层角度只能取 $(\pm 45^\circ, 0^\circ, 90^\circ)$ 中的任意一个。

个体适应度设置是遗传算法中最核心的步骤,针对本文所研究的层合板热应力的问题,通过 Python 语言对有限元分析软件进行二次开发^[7],将有限元分析的结果作为适应度函数值。在有限元软件中设置 $\Delta T=40^\circ\text{C}$ 的温度场,将连接结构放置于温度场进行计算。将计算得到的最大应变值作为适应度函数,遗传算法默认适应度函数值越小个体的适应度越高。

遗传算法在对个体的适应度函数值进行排序时,是通过调用适应度函数进行计算后再进行排序的。对于本文来说,就是通过有限元软件对个体进行一次仿真计算,如果每次调用适应度值都需要进行一次计算会极大地增加算法运行时间。所以本文设置了一个储存变量来记录每次有限元分析得到的适应度函数值,如果后续出现相同基因的个体就不需要进行有限元仿真计算而是直接调用储存变量作为适应度值。

优化后的基于层合板在温度场下的铺层优化遗传算法流程如图 10 所示。

4 连接结构优化分析

4.1 磁浮列车车体静强度仿真

为了对连接结构进行铺层优化,首先要对整车模型进

行静强度计算,得到连接结构的边界条件。

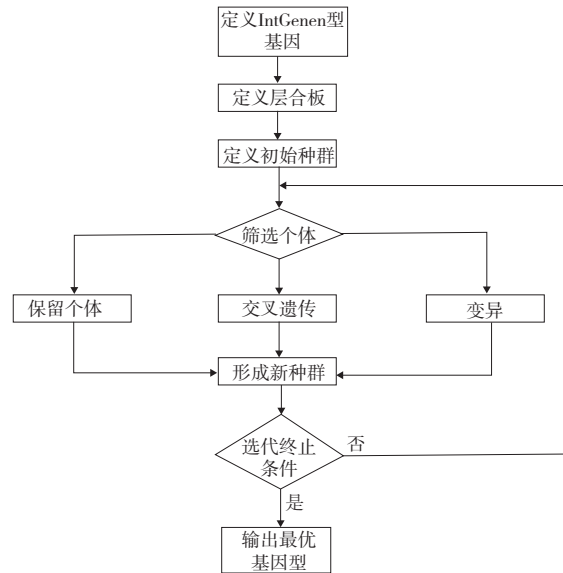


图 10 优化后的遗传算法流程图

建立整车有限元模型,考虑到车体结构及设备安装纵向不具有完全对称性,为保证计算结果的有效性,采用完整车体计算模型。根据车体结构的特点,将车体结构用薄板组合结构来模拟。车体中具有明确安装位置及质心的车窗、车门以集中质量的形式施加在各自的质心位置,车门质量 0.21 t,车窗口质量 0.07 t,质心为几何形心,计算模型包括:5 551 026 个节点和 2 584 855 个单元。整车有限元模型如图 11 所示。

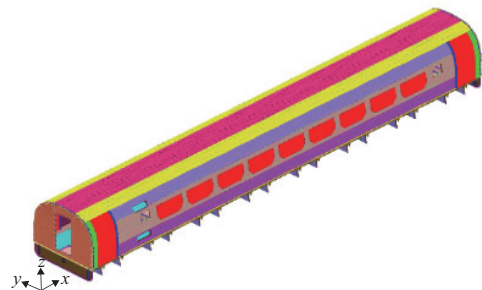


图 11 整车有限元模型示意图

根据静强度载荷和车体边界条件对有限元模型进行静强度仿真计算,应变、应力云图如图 12、图 13 所示。可见车体结构满足静强度要求,可从车体计算结果中提取连接结构的边界载荷。

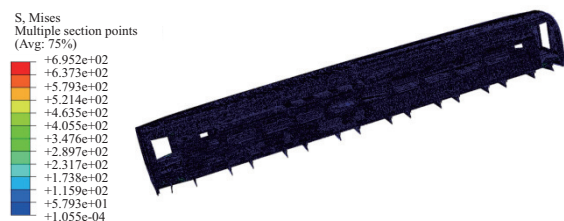


图 12 整车应力云图

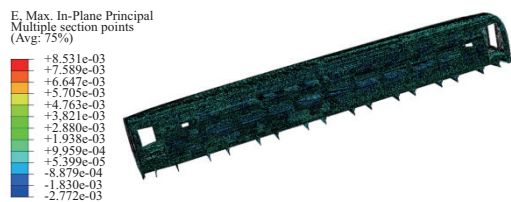


图 13 整车应变云图

4.2 子模型法提取连接结构

使用遗传算法对连接结构进行铺层优化需要对连接结构进行上千次的建模和计算。如果每次都对整个模型进行计算,计算量极大,甚至难以实现。同时,为了更加准确地得到连接结构的边界载荷,本文采用子模型法从整车模型的计算结果中提取连接结构的边界条件,作为连接结构的边界载荷,随后仅针对连接结构进行优化设计。

子模型法的分析过程包括以下步骤:1)建立全局整车有限元模型,定义整车模型的边界条件和工况条件,将连接结构单独分组便于后续操作,计算整车模型;2)检查整车模型的计算结果,避免在子模型边界区域出现不合理的现象;3)建立子模型,为了保证子模型的边界与全局模型对应的位置在单元尺寸和节点编号上保持一致,本文直接将整车模型除连接结构外的其他单元删除,只保留连接结构作为子模型;4)给子模型施加边界条件,在子模型的载荷模块选择子模型,自由度选择6个自由度,然后在模型属性中设置读取整车模型的计算结果;5)运算子模型,得到子模型计算结果。

4.3 连接结构铺层优化

通过子模型法,采用 Python 联合有限元分析软件,以铺层角度作为变量,结构最大应变值作为优化目标,通过上文的遗传算法对连接结构进行铺层优化。为了更加直观地展示优化过程,以种群平均适应度函数值为纵坐标,以进化代数作为横坐标,得到种群进化过程如图 14 所示。

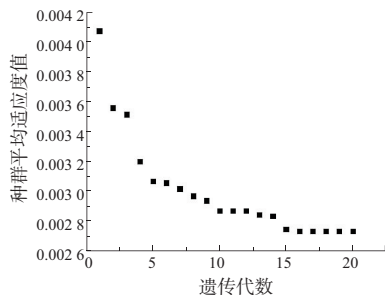


图 14 遗传算法优化过程图

由图 14 可知,随着迭代代数的增加,种群平均适应度函数值从 0.004 2 逐渐下降到 0.002 7,即连接结构的最大

应变从 0.004 2 下降为 0.002 7,降幅达 35.7%。得到的最优铺层设计为 $[0/-45/0/45/0/45/-45/90/-40/0]_{s_2}$ 。

5 结语

1)对磁浮列车碳纤维车厢与铝合金夹层结构的连接结构进行设计,采用中空吹气成型工艺共固化成型碳纤维-铝合金燕尾槽。

2)对碳纤维-铝合金层合板在 $\Delta T=40\text{ }^\circ\text{C}$ 时的热应力从理论和仿真角度进行分析:理论分析值为 $\varepsilon_1=2.640\ 8\times 10^{-4}$, $\varepsilon_2=1.10\times 10^{-3}$,有限元仿真值为 $\varepsilon_1=2.641\times 10^{-4}$, $\varepsilon_2=1.11\times 10^{-3}$ 。

3)采用有限元仿真结果作为适应度函数,设计了基于连接结构铺层优化的遗传算法,并对算法进行优化提高计算效率。

4)对磁浮列车进行静强度分析得到整车的计算结果,采用子模型法提取碳纤维-铝合金燕尾槽结构的边界载荷对其进行单独分析。

5)采用本文设计的基因遗传算法对碳纤维-铝合金燕尾槽结构进行铺层优化,优化后的最大应变为 0.002 7。最优铺层角度为 $[0/-45/0/45/0/45/-45/90/-40/0]_{s_2}$ 。

参考文献:

- [1] 蔡继文,贡智兵,陶杨洋.基于 ABAQUS 的碳纤维复合材料轨道车辆车门设计[J].机械制造与自动化,2020,49(6):124-127.
- [2] 王明猛,肖守讷,阳光武,等.碳纤维复合材料在高速列车头罩上的应用研究[J].电力机车与城轨车辆,2015,38(增刊1):53-57.
- [3] 沈真,张晓晶.复合材料飞机结构强度设计与验证概论[M].上海:上海交通大学出版社,2011.
- [4] 赵峻峰,李三平,李强.民用飞机机体结构静强度验证[J].民用飞机设计与研究,2020(2):1-5.
- [5] 王培吉,范素华.纤维复合材料的热膨胀系数[J].复合材料学报,2002,19(3):124-126.
- [6] 陈建桥.复合材料力学[M].武汉:华中科技大学出版社,2015.
- [7] 张强,马永,李四超.基于 Python 的 ABAQUS 二次开发方法与应用[J].舰船电子工程,2011,31(2):131-134.
- [8] GHIASI H, PASINI D, LESSARD L. Optimum stacking sequence design of composite materials part I: constant stiffness design[J]. Composite Structures, 2009, 90(1): 1-11.
- [9] GHIASI H, FAYAZBAKHS K, PASINI D, et al. Optimum stacking sequence design of composite materials Part II: Variable stiffness design[J]. Composite Structures, 2010, 93(1): 1-13.
- [10] 余有明,刘玉树,阎光伟.遗传算法的编码理论与应用[J].计算机工程与应用,2006,42(3):86-89.

收稿日期:2021-03-04