

DOI: 10.3901/JME.2021.07.194

# 拼接铺层纤维增强复合材料连接结构设计 与离散优化<sup>\*</sup>

聂 昕 南 博

(湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室 长沙 410082)

**摘要:** 多相离散设计是依据零件具体结构, 通过各向异性材料分布, 获得理想的优化设计方法。针对目前离散设计方法中相邻设计域接头间的可靠性连接问题, 提出了一种拼接铺层的结构形式, 为结构件设计域连接提供了一种新的方法。结合复合材料离散设计与拼接铺层结构形式, 综合考虑拼接接头对零件整体性能的影响, 建立复合材料离散铺层优化系统。以汽车后背门模型为例, 试验测试与仿真对比, 验证了所建立优化模型的结果准确性。在优化过程中引入复合材料相关制造约束和材料插值模型, 使优化设计结果兼顾了良好的可实施性。应用该铺层优化设计系统, 相较传统复合材料铺层设计, 汽车后背门在保证零件性能指标的基础之上, 总成零件重量降低 28.0%, 实现了更加理想的轻量化实施效果。

**关键词:** 复合材料; 拼接铺层; 连接结构; 离散设计优化; 轻量化

**中图分类号:** U463

## Ply-overlap Fiber Reinforced Plastic Connection Structure Design and Discrete Optimization

NIE Xin NAN Bo

(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body,  
Hunan University, Changsha 410082)

**Abstract:** Multi-phase discrete design is based on the specific structure of the part, through anisotropic material distribution, to obtain an ideal optimization design method. Aiming at the reliability connection problem between adjacent design domain joints in the current discrete design method, a structure form of splicing ply is proposed, which provides a new method for structural component design domain connection. Combining the discrete materials design and the splicing laminating structure, considering the influence of splicing joints on the overall performance of the parts, a discrete layer optimization system for composite materials is established. Taking the vehicle back door model as an example, the accuracy of the established optimization model is verified by comparison between experiment and simulation. At the same time, through the introduction of composite-related manufacturing constraints and material interpolation models in the optimization process, the optimization design results have a good implementation. Applying this layer optimization design system, the mass of target automobile back door assembly is further reduced by 28.0% compared with the traditional composite material layer design. On the basis of ensuring the performance index of the parts, a more ideal lightweight implementation is realized.

**Key words:** composite materials; ply-overlap; connection structure; discrete design and optimization; lightweight

## 0 前言

汽车的节能减排和低能耗标准不断完善和日益苛刻, 轻质材料在汽车制造和生产上得到了广泛运

用, 为了实现汽车的轻量化, 在保证排放标准基础上降低了能耗, 轻质复合材料的运用正是解决这些困难的重要途径。纤维增强复合材料层合板具有轻质、高强度、耐腐蚀、抗疲劳等诸多优点, 在汽车产品中有广泛的应用前景。与传统材料不同的是, 复合材料零件结构子区域的划分, 提供了更多的设计空间, 保证了每个设计域性能的全面优化, 通过拼接铺层设计, 使得零部件具有更高的机械性能, 整体结构在轻

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金重点(61232014)、湖南省自然科学基金(2020JJ4196)、柳州市科技计划重大专项(柳科攻 2018AA20503)、(柳科攻 2017AA10104)和长株潭标志性工程计划(2019XK2104)资助项目。20200511 收到初稿, 20210118 收到修改稿

量化设计和性能要求方面有着显著提高。

目前拼接板的纤维铺层复合材料拓扑优化, 很多学者针对其结构优化方法和性能等方面做了大量研究。GHIASI 等<sup>[1]</sup>总结了目前复合材料铺层优化刚度变化问题及研究现状。STEGMANN 等和 SØRENSEN 等先后提出了基于梯度的离散材料优化(Discrete material optimization, DMO)方法<sup>[2]</sup>和离散材料与厚度优化(Discrete material thickness optimization, DMTO)方法<sup>[3]</sup>, 考虑到铺层材料各项参数和产品厚度设计优化, 通过对整体区域的划分和各个子区域设计优化, 采用不同纤维取向铺层设计方案, 在各子域设计空间上通过复合材料拼接铺层进行研究。LUND<sup>[4]</sup>基于上述方法, 在优化计算过程中引入材料失效准则, 从设计结构刚度方面考虑, 保证了复合铺层板的整体结构性能, 使结构优化更准确和可靠。KIYONO 等<sup>[5]</sup>把复合材料纤维取向作为研究重点, 通过离散材料铺层计算优化设计变量, 更有利于优化问题的收敛并实现了纤维排列的连续性。

结构件轻量化设计使得复合材料铺层优化方法在拼接板上得到了广泛研究和应用。ZHOU 等<sup>[6]</sup>从不同设计角度提出了一种复合材料铺层优化方案。针对变厚度物理连接约束的铺层顺序优化研究, 在分阶段设计的基础上, IRISARRI 等<sup>[7]</sup>介绍了用于叠层复合结构的堆叠序列表(Stacking sequence table, SST)混合优化方法, 并据此设计了可广泛应用的设计指南, 在满足设计约束的同时取得了良好的轻量化实施效果。JING 等<sup>[8-9]</sup>分别应用顺序排列表(Sequential permutation table, SPT)和全局共享层混合(Global shared-Layer blending, GSLB)方法实现了铺层厚度和堆叠次序优化, 在后续优化设计中引入了制造约束, 并在此基础上应用全局混合模型(Globe bending model, GBM)解决了层添加、层删除和混合问题。ALBAZZAN 等<sup>[10]</sup>对于上述此类采用铺层参数的非常规铺层复合材料优化设计技术进行了综述。根据 DMO 方法, YAN 等<sup>[11]</sup>针对复合材料框架结构的设计优化, 考虑宏观几何参数, 同时结合微观材料纤维取向作为结构优化设计的两个独立设计变量, 获得了较为理想的优化结构模型。针对汽车后背门, WU 等<sup>[12]</sup>基于 DMO 方法, 通过复合材料铺层结构设计, 在整体性能和轻量化方面取得了显著结果, 但是针对产品厚度分布结构设计, 在零件轻量化方面并没有达到理想状态, 仍存在较大的优化空间。

目前针对复合材料离散设计与优化的研究中, 均将零件划分为若干个设计域, 但是关于各设计子

域间的连接研究却很少, 针对不同连接件不能普遍适用<sup>[12]</sup>。而拼接铺层结构的区域划分, 由于各相邻设计子域产生树脂积聚效应, 在离散材料拼接铺层优化计算时, 造成结构件接头刚度弱化, 对零件的整体性能产生较大影响<sup>[13-14]</sup>。

本文针对复合材料铺层设计, 提出了一种拼接铺层的结构设计方法, 从结构复杂程度方面, 保证了产品的加工和可制造性, 同时基于传统离散设计技术方案, 针对铺层设计各相邻子域间的连接, 实现了相邻设计域之间的可靠性连接, 采用四点弯曲试验与仿真相结合的方式, 优化设计铺层结构, 研究不同模型的相邻设计域接头刚度对拼接板整体性能的影响。同时基于试验和仿真结果, 引入材料插值模型, 建立铺层复合材料拼接板优化系统, 并运用于汽车结构件设计优化和产品开发, 采用离散设计方法, 将目标汽车后背门根据性能需要划分为若干个不同的设计域, 在满足零件机械性能的同时, 力求通过降低板件铺层厚度, 实现零件的轻量化。

## 1 离散铺层优化设计

### 1.1 优化设计模型

拼接铺层复材优化设计的目标为结构整体重量最轻, 除了力学性能约束外, 更多的是层合板的制造约束, 主要包括 SØRENSEN 等<sup>[15]</sup>工作中提到的邻接约束和 WU 等<sup>[12]</sup>采用的对称约束等。优化问题的数学表述如下

$$\begin{aligned} \min \quad & m \\ \text{s.t.} \quad & u_{\text{tor}} \leq \bar{u}_{\text{tor}} \\ & u_{\text{landscape}} \leq \bar{u}_{\text{landscape}} \\ & \lambda_1 \leq \bar{\lambda}_1 \\ & (\text{MC's}) \\ & \rho_i \in [lb, ub] \quad \forall i \\ & x_{ijc} \in [0, 1] \quad \forall i, j, c \end{aligned} \quad (1)$$

其中, 目标函数  $m$  代表零件总质量, 其表达式如下

$$m = \sum_{i,j} \rho_{ij} V_{ij} \sum_{c=1}^{n_c} x_{ijc} \rho_c = \sum_i \rho_i V_i \rho_0 \quad (2)$$

式中,  $V_i$  为设计子域  $i$  单个铺层的实际体积;  $\rho_c$  为各铺层候选材料密度;  $\rho_i$  同式(1)中所示, 为设计子域  $i$  的铺层数量;  $lb$  和  $ub$  分别为其定义域的上下限。

### 1.2 优化设计参数

在离散材料与厚度优化中, 材料密度参数和铺层取向参数均是独立的优化设计变量。设计自变量在理想条件下均为二元变量, 可作如下表述

$$\rho_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{若子域} i \text{的铺层} j \text{中包含任一材料} \\ 0, & \text{若子域} i \text{的铺层} j \text{中未包含材料} \end{cases} \quad (3)$$

$$x_{ijc} = \begin{cases} 1, & \text{若子域} i \text{的铺层} j \text{选定材料} c \\ 0, & \text{若子域} i \text{的铺层} j \text{未选定材料} c \end{cases} \quad (4)$$

$\rho_{ij}$  为单元密度设计变量,  $x_{ijc}$  为铺层材料设计变量。其中,  $i=1,2,\dots,n^i$  表示各个设计子域;  $j=1,2,\dots,n^j$  表示各个设计铺层;  $c=1,2,\dots,n^c$  表示各个候选材料。对于上式, 有如下基本约束条件

$$\sum_{c=1}^{n^c} x_{ijc} = 1, \quad \forall i, j \quad (5)$$

在材料本构关系中有

$$\sigma = E_c \cdot \varepsilon \quad (6)$$

式中,  $\sigma$  为应力矩阵;  $\varepsilon$  为应变矩阵;  $E_c$  为材料刚度矩阵; 复合材料单层板为典型的正交各向异性材料, 因此  $E_c$  可表述为

$$\bar{E}_c = \bar{E}_s^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{12}}{E_2} & -\frac{\nu_{13}}{E_3} \\ -\frac{\nu_{21}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{23}}{E_3} \\ -\frac{\nu_{31}}{E_1} & -\frac{\nu_{32}}{E_2} & \frac{1}{E_3} \\ & & & \frac{1}{G_{23}} \\ & & & & \frac{1}{G_{31}} \\ & & & & & \frac{1}{G_{12}} \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中, 将材料刚度矩阵用工程弹性常数进行表述, 其中  $E_1$ 、 $E_2$ 、 $E_3$  为材料主向拉伸模量,  $G_{23}$ 、 $G_{31}$ 、 $G_{12}$  为剪切模量;  $\nu_{12}$ 、 $\nu_{21}$ 、 $\nu_{13}$ 、 $\nu_{31}$ 、 $\nu_{23}$ 、 $\nu_{32}$  为泊松比。

结合应力与应变转轴公式, 得到任意取向的材料刚度矩阵为

$$E_c = R_\sigma^{-1} \bar{E}_c R_\varepsilon^{-1} = \begin{pmatrix} l^2 & m^2 & & & & \\ m^2 & l^2 & & & & \\ & & 1 & & & \\ & & l & -m & & \\ & & m & l & & \\ -lm & lm & & l^2 - m^2 & & \\ & & & & -lm & \\ & & & & lm & \\ & & & & & 1 \\ & & & & l & m \\ & & & & -m & l \\ 2lm & -2lm & & & & l^2 - m^2 \end{pmatrix}^{-1} \cdot \bar{E}_c \cdot \begin{pmatrix} l^2 & m^2 & & & & \\ m^2 & l^2 & & & & \\ & & 1 & & & \\ & & l & -m & & \\ & & m & l & & \\ -lm & lm & & l^2 - m^2 & & \\ & & & & -lm & \\ & & & & lm & \\ & & & & & 1 \\ & & & & l & m \\ & & & & -m & l \\ 2lm & -2lm & & & & l^2 - m^2 \end{pmatrix}^{-1} \quad (8)$$

式中,  $l = \cos \theta$ ,  $m = \sin \theta$ ,  $\theta$  为转轴角度。由上述转换结果可知, 偏轴单层板为单对称材料, 故优

化设计中的各种候选材料, 均可通过全局坐标系下共 13 个独立参数组成的  $\mathbf{R}^{6 \times 6}$  材料刚度矩阵进行描述。

在基于密度法的优化方法中, 设计子域  $i$  铺层  $j$  的材料基本性能参数由下式定义

$$E_{ij} = E_0 + \sum_{c=1}^{n^c} x_{ijc} \Delta E_c \quad (9)$$

式中,  $\Delta E_c = E_c - E_0$  为各个候选材料的刚度性能参数;  $E_0 > 0$  代表空材料<sup>[16]</sup>。

### 1.3 设计敏感性分析

半解析计算方法目前是解决设计敏感性分析的主要手段, 兼顾了设计敏感性分析结果的准确性, 是一种理想高效的解析方法。用  $z_h$  统一表示设计变量  $\rho_i$  和  $x_{ijc}$ ,  $h=1,2,\dots,n^i+n^j$ 。关于目标函数的敏感性  $dm/dz_h$ , 能够通过材料密度和零件几何尺寸参数比较直接得到, 故其计算过程省略。设计敏感性分析过程主要约束函数包括结构刚度与特征频率, 其敏感性分析计算过程如下。

用  $\varphi_r$  统一表示位移设计响应  $u_{tor}$  和  $u_{landscape}$ , 则响应表达式可以写为

$$\varphi_r = \varphi_r(u^N(z_h), z_h) \quad (10)$$

$u^N$  为节点位移矢量, 设计响应是自变量的隐函数, 故对上式求微分, 得到设计敏感性为

$$\frac{d\varphi_r}{dz_h} = \frac{\partial \varphi_r}{\partial z_h} + \frac{\partial \varphi_r}{\partial u^N} \frac{du^N}{dz_h} \quad (11)$$

为求得上式未知量  $du^N/dz_h$ , 将有限元基本方程改写为以下形式

$$F^N = -\int_{V^0} \beta_N : \tau^c dV^0 + \int_S N_N^T \cdot t dS + \int_V N_N^T \cdot f dV \quad (12)$$

式中,  $\beta_N$  为运动学变量-应变变量转换矩阵, 其取决于当前节点位置参数;  $\tau^c$  为对应应力参数;  $S$  和  $V$  为当前结构所占据的空间及空间表面;  $t$  和  $f$  分别为面内任一点的单位面积力和体积内任一点的单位体积力;  $N_N^T$  为插值转换函数, 其值取决于当前材料坐标系。假设上式中各参数均与设计变量  $z_h$  相关, 则将式(11)、(12)对自变量求微分得

$$K_{NM} \frac{du^N}{dz_h} = -\frac{\partial F^M}{\partial z_h} \quad (13)$$

式中,  $K_{NM}$  为切线刚度矩阵,  $\partial F^M/\partial z_h$  为伪载荷。

未知量  $du^N/dz_h$  应用直接差分法(DDM)计算。以中心差分为例, 设目标函数为  $A(x)$ , 则其对设计变量  $z_h$  的敏感性定义为

$$\frac{dA}{dz_h} = \frac{A(z_h + \delta z_h) - A(z_h - \delta z_h)}{2\delta z_h} \quad (14)$$

将式(13)代入式(11)并整理, 可以得到合位移 DSA 问题的表达式为

$$\frac{d\varphi_r}{dz_h} = \frac{\partial \varphi_r}{\partial z_h} - \frac{\partial \varphi_r}{\partial \Delta u^N} K^{NM} \frac{\partial F^M}{\partial z_h} \quad (15)$$

在频率敏感性分析中, 特征值问题的基本方程如下

$$(K^{NM} - \lambda M^{NM})\psi_N = 0 \quad (16)$$

式中,  $K^{NM}$  为刚度矩阵;  $\lambda$  为特征值;  $M^{NM}$  为质量矩阵;  $\psi_N$  为特征矢量。将该方程对设计变量  $z_h$  求微分得

$$(K^{NM} - \lambda_\alpha M^{NM}) \frac{d\psi_\alpha^M}{dz_h} = \left( \frac{DK^{NM}}{Dz_h} - \lambda_\alpha \frac{DM^{NM}}{Dz_h} \right) \psi_\alpha^M - \frac{d\lambda_\alpha}{dz_h} M^{NM} \psi_\alpha^M \quad (17)$$

角标  $\alpha$  表示特定模态值, 将式(16)代入上式并整理得到特征值敏感性表达

$$\frac{d\lambda_\alpha}{dz_h} = \frac{\psi_\alpha^N \left( \frac{DK^{NM}}{Dz_h} - \lambda_\alpha \frac{DM^{NM}}{Dz_h} \right) \psi_\alpha^M}{\psi_\alpha^N M^{NM} \psi_\alpha^M} \quad (18)$$

式中, 仅质量微分  $DM^{NM}/Dz_h$  与刚度微分  $DK^{NM}/Dz_h$  为未知量, 将此两者应用前述式(14)的差分方法, 即可得出频率敏感性的数值解。

## 2 拼接层合板刚度预测

### 2.1 拼接铺层结构形式

基于离散材料优化, 考虑到材料的厚度以及多相材料间的拼接铺层结构设计, 进而衍生出离散材料和厚度拓扑优化新方法, 该方法主要对设计区域进行多子域划分, 在满足性能的前提下, 针对各个子区域进行不同设计, 通过对每个子区域的性能优化, 提高整体区域的结构性能要求, 达到拼接铺层离散材料结构的最优化设计。可是各个划分的子域间的连接过渡却也成了难点, 在现有离散优化方法的研究中, 很多往往并没有考虑相邻设计子域连接形式对结构整体性能的影响, 因此得到的优化计算结果并不十分可靠。

在此首先提出一种可广泛应用于相邻铺层区域的交错铺层连接形式, 具体连接方式在图 1 中以方

板为例作以说明。

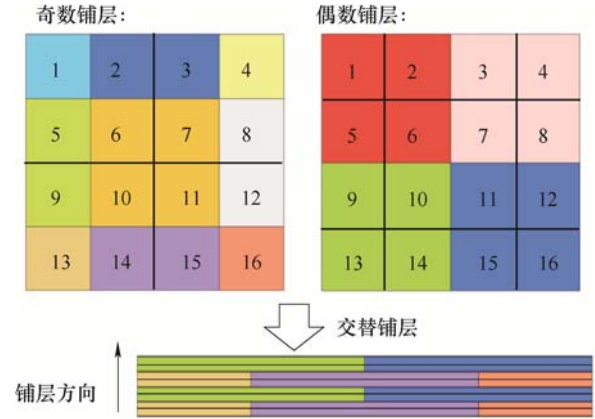


图 1 交错铺层形式

按图中编号所示, 上图中方板被划分为 16 个设计域, 称之为厚度设计域, 相异厚度设计域铺层数量由独立的厚度变量决定。奇数铺层为 9 个设计域, 偶数铺层为 4 个设计域, 将此 13 个设计域称之为材料设计域。在法向空间上, 一个厚度设计域由奇数与偶数铺层在同一位置的材料设计域交替组合而成, 如厚度设计域 13 在法向上是由奇数铺层中设计域 13 组成的材料设计域和偶数铺层上设计域 9、10、13、14 组成的材料设计域交替布置而成。

拼接铺层在传统离散设计基础之上, 考虑到拼接铺层板的厚度因素和性能要求, 进行不同子区域设计和划分, 保证了结构的可实施性, 拼接铺层设计也相对简便, 并未增加各子域间的连接复杂度, 对整体结构而言, 满足其优良性能<sup>[18]</sup>。如图 1 中交错铺层结构所示, 同一设计域相互连接, 由连续材料组成, 并以交错拼接的方式实现了相邻设计区域之间的结构连续性。

### 2.2 接头刚度试验与分析

通过离散材料和厚度拓扑优化方法, 考虑到拼接铺层板局部发生刚度弱化现象, 针对接头刚度试验分析, 研究区域间的树脂积聚效应。因此基于传统离散设计的连接形式, 采用本文所设计的拼接铺层结构, 通过四点弯曲试验和仿真模拟该拼接铺层板的硬度弱化现象, 研究弱化效应对该结构件的整体性能影响, 进而为后续的拼接铺层板的结构优化设计提供参考。

MALKIN 等<sup>[19]</sup>针对四点弯曲试验, 采用碳纤维复合材料拼接板, 研究相邻拼接板对其接头刚度的影响, 本次通过拼接铺层结构设计, 在此试验基础上进行进一步结构优化和整体性能完善。试验采用的样条基本参数如图 2 所示。

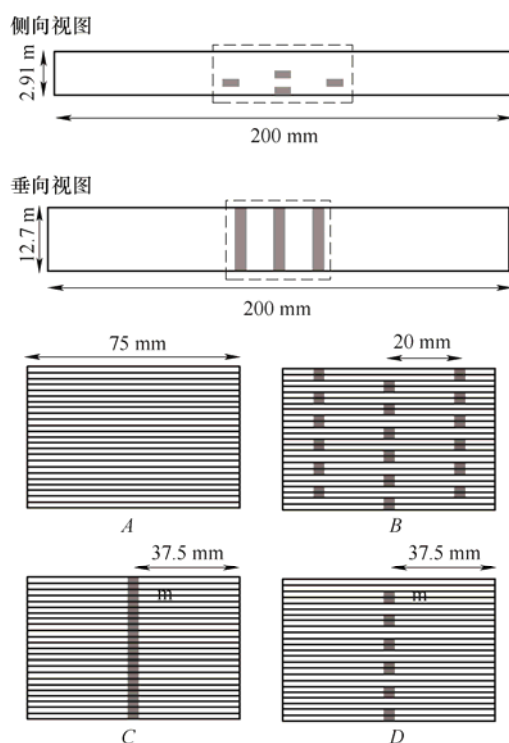


图 2 拼接层合板性能试验样条

上图中, 样条 *A* 表示理想状态下不考虑接头失效模型, 该模型下结构性能处于最优状态; 样条 *B* 表示考虑接头树脂积聚效应, 但相邻接头位置较实际状态下更加接近, 因受到相邻接头性能退化的影响, 该模型下结构性能处于最恶劣状态。对上述两种上下限极端条件模型分别进行试验和仿真, 所建立有限元模型如图 3 所示, 其中 *A*、*B*、*C*、*D* 分别对应图 2 中的 4 种样条形式。本实验主要针对拼接板的静刚度性能展开, 探究其接头刚度, 因此不考虑拼接板厚度分布材料的分层失效过程, 在本次仿真模拟实验中, 采用两层壳单元模拟碳纤维层合板(上下层), 单元类型采用四节点减缩积分壳单元 S4R, 支架的 1~6 个自由度均被约束。图中箭头所示为基体材料模拟的接头处积聚的树脂囊结构。

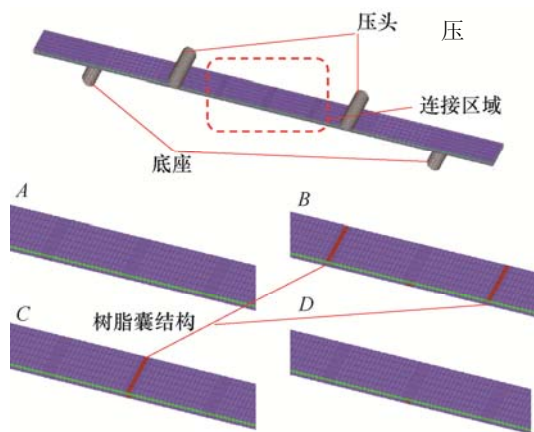


图 3 四点弯曲试验有限元模型

试验与仿真结果对比如下表 1 中所示。

表 1 拼接板刚度性能试验与仿真对比

样条模型	仿真结果 $K/(N/mm)$	试验结果 $K/(N/mm)$	误差 $e(\%)$
A	95.45	93.24	2.37
B	64.96	64.62	0.53

通过拼接板刚度性能试验与仿真结果对比可知, 极端状态下样条模型 *A*、*B* 所得到实验结果和仿真对比, 验证了其仿真结果的准确性, 因此在此基础上, 进一步对模型 *C* 进行仿真分析和拓展优化。采用模型 *C* 的拼接板连接方式, 仿真刚度结果为 69.19 N/mm, 与最差极端模型 *B* 结果接近, 因此这是一种比较不理想连接实施方式。

在实际拼接层合板中, 平面方向上相邻接头区域往往相隔有较远的距离, 如本文汽车后背门模型中, 设计子域最小宽度, 即相邻接头最小距离基本保持在 100~200 mm 之间, 数值远大于板件厚度, 故在平面方向, 可以忽略其相邻树脂积聚效应对接头刚度的影响, 只用考虑在拼接板厚度方向上, 针对单组接头相邻树脂间的积聚所造成的接头刚度弱化效应, 进而对建立的接头刚度模型进行修正和优化, 如图 2 中样条模型 *D* 所示。模型 *D* 仿真刚度结果为 82.98 N/mm, 满足其结构性能要求, 相较理想模型 *A* 仅下降了 13.06%, 且该方案并不增加额外的连接结构, 比较有利于具体实施。

在复杂零件结构中, 理想模型在建模效率上具有显著优势, 考虑各个子区域之间的连接对整体刚度性能的影响, 基于离散优化分析结果, 在后续的拓扑优化过程中, 将各相邻子域间的树脂积聚效应对接头刚度的影响转化为刚度修正系数引入计算。

### 3 汽车后背门优化算例

#### 3.1 数值模型与试验验证

后背门刚度试验包括图 4a 扭转工况和图 4b 横向工况, 两工况条件下均约束后背门铰链安装点 1~6 方向自由度, 与单侧缓冲块安装点 1~3 方向自由度。扭转工况在非约束侧缓冲块对应外板位置, 沿后背门旋转切线方向施加 540 N 载荷, 位移监测点为加载侧缓冲块安装点; 横向工况在后背门锁芯安装点位置, 沿整车 *Y* 向施加 500 N 载荷, 测点同样位于锁芯加载点位置。



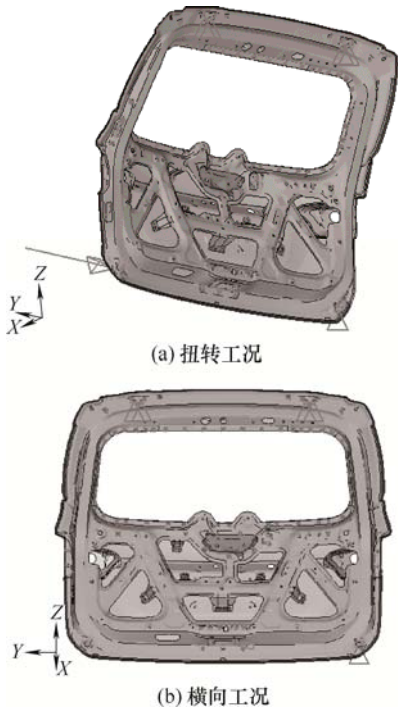


图 4 后背门模型加载工况

通过后背门扭转刚度和横向刚度两种工况加载，测量实际汽车后背门外板刚度性能(图 5)，试验中约束与加载情况与仿真模型中描述一致。

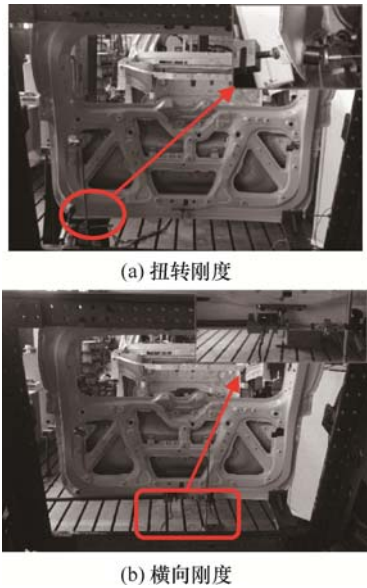


图 5 后背门刚度试验

根据对应测点最大的位移量，评价后背门外板刚度，结果对比见表 2 所示。数值模型在扭转刚度和横向刚度测量的两工况加载条件下，实验结果与仿真结果保持良好的一致性，两者误差在可接受范围内，具有较高的准确度，因此拼接铺层板仿真模型的建立及其计算方法的运用和优化过程具有良好可信度。

表 2 刚度试验与仿真结果对比

	试验结果 x/mm	仿真结果 x/mm	误差对比 e(%)
扭转工况	53.949	54.167	0.40
横向工况	8.770	9.141	4.2

3.2 优化设计系统

本研究中，优化设计目标从设计结构轻量化考虑，主要是使拼接板整体结构重量在满足性能要求下最大化减轻，从零件的基本性能指标出发，通过测量点位移来验证拼接板相邻接头间的刚度，测量一阶自由模态值，同时从结构复杂程度上约束复合拼接板设计制造，详细请看式(1)、(2)。其中，由于本研究候选材料为不同纤维取向的同一材料，故其具有相同的材料密度，统一用  $\rho_0$  表示；而需考虑零件表面连续性的需求，内外板区域均定义  $lb=4$ ,  $ub=32$ 。

优化设计采用纤维铺层复合材料取代传统的各向同性材料，以纤维取向  $0^\circ$  的碳纤维 T700/M21 复合材料单层板为例，其材料性能参数如表 3 中所示<sup>[20]</sup>。

表 3 CFRP 单层板材料参数

性能指标		数值
拉伸模量 $E/\text{GPa}$	$E_{11}$ $E_{22}=E_{33}$	130 7.7
剪切模量 $G/\text{GPa}$	$G_{12}=G_{13}$ $G_{23}$	4.8 3.81
泊松比 $\nu$	$\nu_{12}=\nu_{13}$ $\nu_{23}$	0.30 0.35
密度 $\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	$\rho_0$	1 600
厚度 $t/\text{mm}$	$t$	0.2

为了更好地评估后背门的整体性能，以后背门外板设计加工和工程应用中的主要工况条件为依据。整体刚度性能指标评价用扭转和横向工况下对应测量点的位移  $u_{tor}$  和  $u_{landscape}$  表示， $\lambda_1$  为零件自由状态下的一阶特征频率，其对应的评价指标分别为  $\bar{u}_{tor}$ 、 $\bar{u}_{landscape}$  和  $\bar{\lambda}_1$ 。

$$\begin{pmatrix} \bar{u}_{tor} \\ \bar{u}_{landscape} \end{pmatrix} = \frac{1}{\eta} \cdot \begin{pmatrix} u_{tor0} \\ u_{landscape} \end{pmatrix} \quad (19)$$

$u_{tor0}$  和  $u_{landscape0}$  为第 3.1 节中依据试验得到的连续结构后背门模型中扭转刚度和横向刚度评价指标； $\eta$  为零件刚度修正系数，结合第 2.2 节中的分析结论，在交错铺层离散结构模型中  $\eta=86.94\%$ ，在原始离散设计模型中  $\eta=72.49\%$ 。

MC 表示复合材料层合板在生产制造过程中需要考虑的各种制造约束。 $x_{jc}$  同式(2)中所述，表示设计子域  $i$  铺层  $j$  设计空间内，候选材料  $c$  的权重系数，定义域在  $[0,1]$  范围内。

优化设计系统将有限元仿真与优化设计通过模块化组合的方式实现, 利于该优化实施方法的广泛应用。优化系统整体流程如图 6 所示。由于在优化过程中需要反复读取 ABAQUS 的输出数据库(ODB)文件, 因此使用 python 语言编写的二次开发插件在每一轮优化迭代完成时自动读取当前迭代步的约束函数和各约束函数关于自变量的敏感性信息, 提供给 Matlab 执行优化计算。

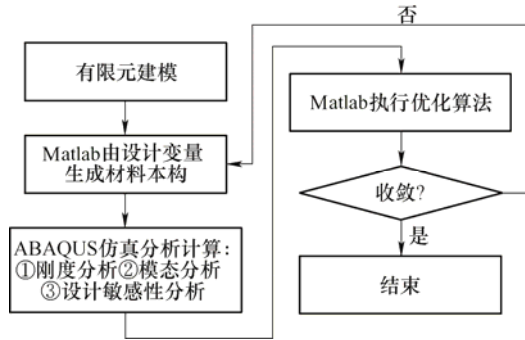


图 6 离散材料厚度拓扑优化流程图

### 3.3 设计域划分

在后背门模型中, 为体现复合材料在变厚度设计上的优势和优化设计的效果, 将后背门模型的板件数量进行简化, 使原结构中的众多加强板合并为内板和外板两个整体结构。结合合并后内外板的具体结构, 按 2.1 节中的设计域划分思想, 对内外板进行设计域划分。模型共划分为 63 个厚度设计域和 55 个取向设计域, 由于厚度设计域几何尺度相对较小, 故图 7 中设计域划分结果以厚度设计域为基准进行表示。

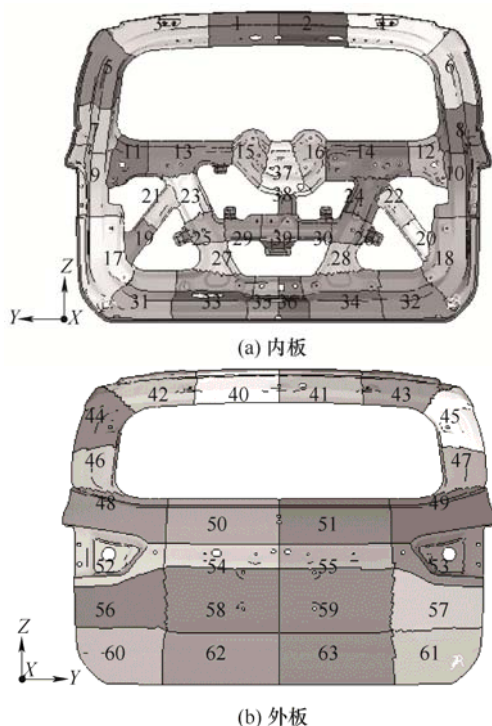


图 7 设计域划分结果图

为保证车门产品的性能对称性, 铺层设计结果也应关于整车  $x-z$  平面保持对称。本例中, 为实现这一设计目标, 将后背门左右两侧对应位置的设计变量予以合并, 如 55 个材料取向设计变量可合并为 31 个, 同时也实现了对计算模型的简化, 其简化过程的数学表述为

$$\mathbf{E}_{left} = \mathbf{E}_0 + x_{ij1}(\mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_0) + x_{ij2}(\mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_0) + x_{ij3}(\mathbf{E}_3 - \mathbf{E}_0) + x_{ij4}(\mathbf{E}_4 - \mathbf{E}_0) \quad (20)$$

$$\mathbf{E}_{right} = \mathbf{E}_0 + x_{ij1}(\mathbf{E}_4 - \mathbf{E}_0) + x_{ij2}(\mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_0) + x_{ij3}(\mathbf{E}_3 - \mathbf{E}_0) + x_{ij4}(\mathbf{E}_1 - \mathbf{E}_0) \quad (21)$$

上两式中,  $\mathbf{E}_{left}$  和  $\mathbf{E}_{right}$  是两个关于  $x-z$  平面对称位置的材料刚度矩阵,  $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2, \mathbf{E}_3, \mathbf{E}_4$  分别为纤维取向为  $-45^\circ, 90^\circ, 0^\circ, 45^\circ$  的复合材料单层板在全局坐标下的材料刚度矩阵。

同理, 对于铺层厚度变量也做相同处理, 可将厚度变量由 63 个简化至 33 个, 其简化过程比较简单, 故此予以省略。

由于在板件的设计域划分过程中, 每一种材料取向设计子域在厚度分布上包含有若干个区域, 考虑设计域和材料属性之间的内在联系, 将材料取向设计域与厚度设计域在几何上的从属关系在下表 4 中做出表述。为观察方便起见, 表中厚度设计域编号仍以图 7 中为准, 但变量数量已做出简化, 简化过程以模型左半侧为基准。

表 4 设计域从属关系

材料设计域	所包含厚度设计域	材料设计域	所包含厚度设计域	材料设计域	所包含厚度设计域
1	40,42	12	62,63	23	1,2
2	44,46	13	1,3	24	3,5
3	48,50,52,54	14	5,7	25	7,9,11
4	56,58,60,62	15	9,17	26	13,21,23
5	40,41	16	11,13,15	27	15,37,38
6	42,44	17	37	28	17,19,31
7	46,48	18	19,21	29	25,29,39
8	50,51	19	23,25,27	30	27,33
9	52,56	20	29	31	35,36
10	54,55,58,59	21	38,39		
11	60	22	31,33,35		

## 4 结果与讨论

### 4.1 优化结果

在基于密度法的拓扑优化方法中, 通过引入一种假想的参数可变材料, 解决拓扑优化中的材料最

优分布问题。同时, 为了使得优化结果更为理想, 考虑到中间变量的数目, 采用材料插值模型, 有效保证了优化过程中较少的中间变量, 在密度法基础之上, 从实际问题出发, 提高优化过程, 获得更为理想的二次化结果。常用的材料插值模型有材料属性有理近似模型(Rational approximation of material properties, RAMP)和各向同性惩罚微结构法 (Solid isotropic microstructure with penalization, SIMP)两种, 且优化实施效果并无明显差异。此次采用 SIMP 模型方案进行计算, 该插值模型为指数函数

$$z'_h = (z_h)^p \quad (22)$$

优选定义惩罚因子  $p=3$ , 应用第 3.2 节中建立的 DMTO 优化设计系统进行铺层取向与厚度优化, 结果见图 8。

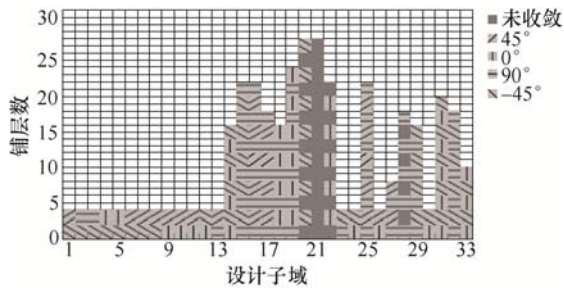


图 8 优化计算结果

拼接铺层区域的划分, 使得不同拼接板层上的各个子域的设计优化结果具有最优化和次优化取向, 采用两层壳单元模拟碳纤维层合板, 提高优化过程计算效率, 针对划分的各个子域, 降低结构设计复杂程度的前提下, 简化铺层取向的设计空间, 在拼接铺层板厚度分布上只选择提供两个典型的候选材料, 简化取向结果, 获得交替分布的铺层结构。

#### 4.2 比较与讨论

针对汽车后背门模型, 传统离散设计的铺层方式结果如图 9 所示。根据传统经验, 在铺层子域上选择按一定顺序的纤维取向连接, 在拼接板厚度方向上, 根据现有内外板及加强板厚度来决定厚度方向上的铺层数目。

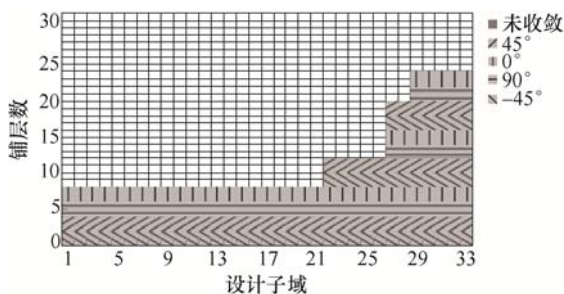


图 9 传统经验设计结果

依据传统经验和铺层结构设计, 采用 DMO 方法, 仅在铺层平面上进行纤维取向优化设计, 优化设计结果如图 10 所示。

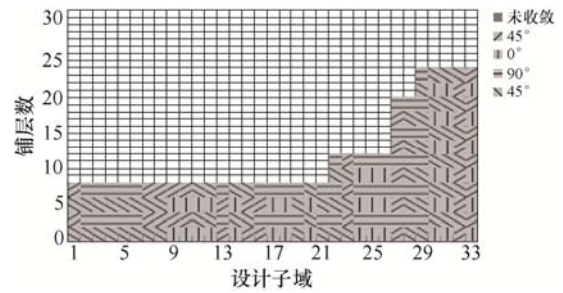


图 10 传统经验设计结果

将第 4.1 节中的优化结果, 在零件质量、横向刚度、扭转刚度等方面与传统经验铺层结构设计和 DMO 方法拼接板性能参数对比情况结果见表 5。

表 5 设计结果对比

性能指标	DMTO 优化设计	DMO 优化设计	经验设计	设计指标
取向收敛比例(%)	90.32	—	—	—
零件质量/kg	6.05	8.40	8.40	14.95
横向刚度/mm	9.13	8.76	7.03	9.14
扭转刚度/mm	51.52	54.08	43.39	54.17
一阶模态/Hz	39.66	42.68	43.65	27.21

根据不同设计结果对比, 拼接铺层设计在零件重量大幅度降低。依据经验设计的铺层结构, 零件重量降低 43.8%; DMO 优化方案显示, 较多的制造约束制约下, 各项设计指标均有所下降, 但仍可以满足设计指标; 而 DMTO 优化模型, 兼具制造约束和性能指标要求, 产品重量进一步降低 28.0%, 达到较好的轻量化设计。

拼接铺层板厚度分布结构优化上, 可以看出后背门外板为非承力结构, 因此在厚度设计优化上可以降至最低值。而内板区域, 厚度变量优化结果与原始钢结构模型中加强板的布置位置对比如图 11 所示, 基于拼接铺层优化设计, 图 11b 显示优化结果中结构件不同厚度区间的铺层厚度子域, 用不同颜色灰度显示优化后后背门板的厚度分布情况。

由图 11 中对比可知, 内板中部的梁结构区域由于需要承载一定的应力传递, 且在整体重量中所占的比例较低, 导致优化铺层厚度结果普遍较大; 底部横梁两侧位置承担较大载荷, 采用固定约束加载, 与原钢结构加强板布置位置对比, 优化模型此处铺层厚度也明显较大, 进而验证了优化方案的可靠性。



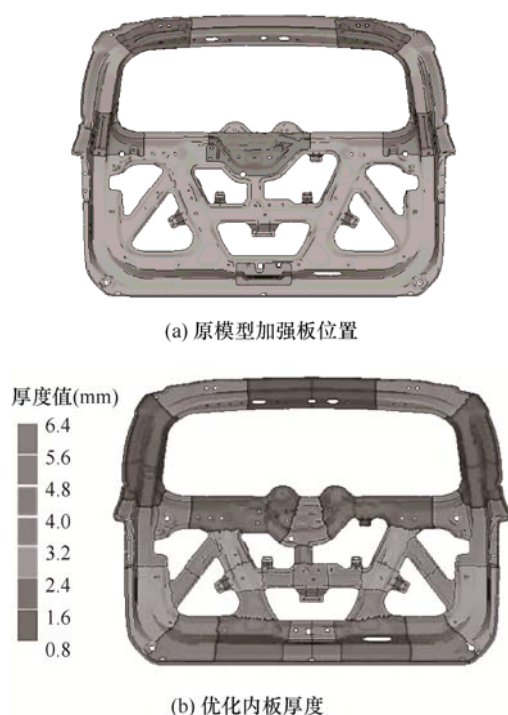


图 11 内板结构对比图

引入材料插值模型,使得优化结果有了明显区分,并在后续处理中,针对材料厚度参数,舍去小数部分,模型性能结果指标变化如表 6 所示。

表 6 后处理性能指标变化

性能指标	后处理模型	优化结果模型	变化幅度 (%)
板件质量 /kg	5.95	6.05	-1.6
横向刚度 /mm	9.24	9.13	1.2
扭转刚度 /mm	49.87	51.52	-3.2
一阶模态 /Hz	39.85	39.66	0.5

通过优化后的系统模型,后背门外板在质量上明显减轻,零件的横向刚度、扭转刚度以及一阶模态值相对变化不大,优化后的零件主要性能参数未发生较大改变。针对传统铺层设计对工程经验的依赖,以及人为因素带来结果的不确定性,优化系统模型结果表现出极大优越性,拼接铺层结构设计优化也更加可靠。

## 5 结论

(1) 基于传统离散材料结构优化,根据传统经验,考虑到相邻子域间连接形式,设计新型拼接铺层结构方法,改善拼接板整体性能,解决相邻设计域连接问题,采用四点弯曲试验与仿真相结合的手段,研究四种不同拼接层样条模型的相邻设计域接头刚度对拼接板整体性能的影响,并在后续的拓扑

优化过程中,将各相邻子域间的树脂积聚效应对接头刚度的影响引入相应修正系数。

(2) 根据离散材料结构设计和优化,建立了铺层复合材料仿真与优化系统。基于半解析法进行设计敏感性分析研究,优化模型和设计参数,获得参数梯度信息,为拼接铺层复合材料板多变量条件下的结构优化提高了计算效率。模块化系统模型的运用,简单的操作即可获得理想的优化结果,更有利于实现工程方面应用价值。

(3) 传统铺层结构优化设计过程中更多的依赖于工程经验,在保证复合材料拼接板整体性能基础上,考虑到复合拼接铺层板的多目标优化以及加工制造,针对目标拼接板的主要性能和优化指标,基于优化系统模型,能够快速直接的得到比较成熟的拼接铺层设计结构优化方案。

(4) 材料插值模型的运用,使得设计优化结果与实际情况保持良好的一致性,在拼接铺层材料结构设计和各相邻子域间接头刚度方面,验证了优化系统模型的准确。针对拼接板的多目标参数和性能指标优化,与传统复合材料铺层结构相比,优化模型下的拼接板重量下降 28.0%,较钢结构模型下降 59.5%,在复合材料拼接铺层结构上,实现了良好的轻量化设计。

## 参 考 文 献

- [1] GHIASI H, FAYAZBAKSH 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.
- [2] STEGMANN J, LUND E. Discrete material optimization of general composite shell structures[J]. Int. J. Numer. Methods Eng., 2005, 62(14): 2009-2027.
- [3] SØRENSEN S N, SØRENSEN R, LUND E. DMTO - a method for discrete material and thickness optimization of laminated composite structures[J]. Struct. Multidisc Optim., 2014, 50(1): 25-47.
- [4] LUND E. Discrete material and thickness optimization of laminated composite structures including failure criteria[J]. Structural & Multidisciplinary Optimization, 2018, 57(6): 2357-2375.
- [5] KIYONO C Y, SILVA E C N, REDDY J N. A novel fiber optimization method based on normal distribution function with continuously varying fiber path[J]. Composite Structures, 2017, 160: 503-515.
- [6] ZHOU M, FLEURY R, KEMP M. Optimization of composite - recent advances and application[C]// Aiaa/issmo Multidisciplinary Analysis Optimization

- Conference. 2010. Optimization of Composite-Recent Advances and Application, 2010.
- [7] IRISARRI F X, LASSEIGNE A, LEROY F H, et al. Optimal design of laminated composite structures with ply drops using stacking sequence tables[J]. *Compos. Structures*, 2014, 107: 559-569.
- [8] JING Z, SUN Q, SILBERSCHMIDT V V. A framework for design and optimization of tapered composite structures. Part I: From individual panel to global blending structure [J]. *Composite Structures*, 2016, 154: 106-128.
- [9] JING Z, SUN Q, CHEN J Q, et al. A framework for design and optimization of tapered composite structures. Part II: Enhanced design framework with a global blending model[J]. *Composite Structures*, 2018, 188: 531-552.
- [10] ALBAZZAN M A, HARIK R, TATTING B F, et al. Efficient design optimization of nonconventional laminated composites using lamination parameters: A state of the art[J]. *Composite Structures*, 2019, 209: 362-374.
- [11] YAN J, DUAN Z, LUND E, et al. Concurrent multi-scale design optimization of composite frames with manufacturing constraints[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2017, 56(3): 519-533.
- [12] WU C, GAO Y K, FANG J G, et al. Discrete topology optimization of ply orientation for a carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminate vehicle door[J]. *Material and Design*, 2017, 128: 9-19.
- [13] AHAMED J, JOOSTEN M, CALLUS P, et al. Ply-overlap hybrid technique for joining dissimilar composite materials[J]. *Materials and Design*, 2016, 100: 157-167.
- [14] CZÉL G, PIMENTA S, WISNOM M R, et al. Demonstration of pseudo-ductility in unidirectional discontinuous carbon fibre/epoxy prepreg composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2015, 106: 110-119.
- [15] SØRENSEN R, LUND E. Topology and thickness optimization of laminated composites including manufacturing constraints[J]. *Struct. Multidisciplinary Optim.*, 2013, 48(2): 249-265.
- [16] BOGOMOLNY M, AMIR O. Conceptual design of reinforced concrete structures using topology optimization with elastoplastic material modelling[J]. *Int. J. Number, Methods Eng.*, 2012, 90(13): 1578-1597.
- [17] Abaqus 6.13 online documentation, Dassault Systèmes, [EB/OL]. 2013. <http://130.149.89.49:2080/v6.13/books/gsa/default.htm>.
- [18] BAUCOM J N, THOMAS J P, POGUE III W R, et al. Tiled composite laminates[J]. *Journal of Composite Materials*, 2010, 44(26): 3115-3132.
- [19] MALKIN R, YASAEI M, TRSAK R S, et al. Bio-inspired laminate design exhibiting pseudo-ductile (graceful) failure during flexural loading[J]. *Composites: Part A*, 2013, 54: 107-116.
- [20] ROZYLO P, DEBSKI H, KUBIAK T. A model of low-velocity impact damage of composite plates subjected to compression-after-impact (CAI) testing[J]. *Composite Structures*, 2017, 181: 158-170.

---

作者简介: 聂昕, 男, 1982 年出生, 博士, 副研究员, 硕士研究生导师。主要研究方向为汽车车身新材料、新结构、新工艺及汽车车身质量控制。E-mail: niexinpiero@163.com

南博, 男, 1993 年出生, 硕士研究生。主要研究方向为汽车新材料、新结构和新工艺。E-mail: nanbo3166@163.com