

# 复合材料双钉胶螺混合连接接头多参数优化设计

李明坤 郑艳萍 熊勇坚 黄飞

(郑州大学机械与动力工程学院, 郑州 450001)

**文 摘** 为提高复合材料双钉胶螺混合连接接头的承载能力,本文结合实验和有限元方法,利用ABAQUS建立了有限元模型并验证了其可行性,基于代理模型和遗传算法,对碳纤维复合材料板与钛合金板双钉混合连接结构的板宽、端距和孔距等参数开展了多参数优化设计。结果表明:二次多项式代理模型的预测结果精度最高;与优化前试验得到的常规混合连接接头的载荷性能相比,优化后的结构承载能力提升了44.35%。

**关键词** 碳纤维复合材料,胶螺混合连接,代理模型,遗传算法,多参数优化

中图分类号:TB332

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2022.01.005

## Multi-parameter Optimal Design of Composite Double-bolt Hybrid Bolted/bonded Joints

LI Mingkun ZHENG Yanping XIONG Yongjian HUANG Fei

(School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001)

**Abstract** In order to improve the load-bearing capacity of the composite double-bolt hybrid bolted/bonded joints, model was built on ABAQUS and the feasibility was verified based on experiments and finite element methods. Then, the accuracy of proxy model was studied, and a multi-parameter optimization design was carried out on the plate width, end distance and hole distance of hybrid joints based on genetic algorithm. The results show that the quadratic polynomial surrogate model has the highest accuracy. Compared with the load performance of the conventional double-bolt hybrid bolted/bonded joints obtained in the test, the load-bearing capacity of the structure after parameter optimization has been increased by 44.35%.

**Key words** Carbon fiber composite materials, Rubber-snail hybrid connection, Proxy model, Genetic algorithm, Multi-parameter optimization

### 0 引言

随着复合材料在航空航天领域的应用日益广泛,复合材料接头的优化设计是充分发挥复合材料性能的关键。在目前典型的连接方式中,螺栓连接和胶接连接是最常用的连接方式<sup>[1]</sup>。但是,螺栓连接的连接效率较低,导致连接区域厚度过高,与之相比,胶接连接又因其耐久性较差,对环境因素敏感而无法广泛应用于飞机主承力构件中。而将两种连接技术结合起来发现,混合连接接头具有更高的静态和疲劳强度<sup>[2-5]</sup>。因此,对胶螺混合连接接头进行优

化设计得到承载能力最佳的结构是很有必要的。

胶螺混合连接结构的试验和仿真结果表明,混合连接接头的力学性能与很多因素有关,包括材料参数、制造工艺和结构参数等。Christophe BOIS等<sup>[6]</sup>建立了预测螺栓与胶接接头载荷传递能力的分析模型,该模型可用于快速评估混合接头中涉及的众多几何或材料参数的影响。HOANG等<sup>[2]</sup>对含柔性胶黏剂的单搭接接头和HBB接头进行了二维平面应变和三维有限元模拟,结果表明胶黏剂压缩性对接头刚度和粘结应力分布,特别是剥离应力有显著影响。

收稿日期:2021-02-02

基金项目:河南省高校重点科研项目,碳纤维复合材料混合连接结构损伤失效研究(20A460023);国家自然科学基金,基于飞机CFRP层合板非线性损伤特性的冲击分析与检测研究(U1833116)

第一作者简介:李明坤,1996年出生,硕士研究生,主要从事复合材料结构强度研究工作。E-mail:1123918292@qq.com

通信作者:郑艳萍,1975年出生,副教授,硕士生导师,主要从事复合材料结构强度及损伤检测工作。E-mail:ypzheng\_zzu@126.com

Mustafa OZEN等<sup>[7]</sup>研究了两孔层合板的破坏载荷,对几何参数端径比、宽径比、中心孔距进行优化设计,通过试验研究了预紧力矩对承载力的影响。

近年来,国内外也有许多学者对胶螺混合连接接头进行了优化。张超禹等<sup>[8]</sup>建立了复合材料层合板-铝板胶螺混合连接结构拉伸强度预测模型,验证了所建模型的可行性。在此基础上,探究了搭接宽度、搭接长度、胶层厚度、接触面摩擦因数和螺栓个数等参数对胶螺混合连接结构拉伸性能的影响,进行了单参数优化。LI等<sup>[9]</sup>对螺栓连接接头、粘接接头和混合连接接头的拉伸性能进行了试验研究,讨论了复合材料层合板的铺层顺序和宽径比对单搭接接头拉伸性能的影响,结果表明拉伸强度随宽径比的增大而增大。TIAN等<sup>[10]</sup>基于遗传算法,结合最速下降法对三维编织复合材料接头进行了优化设计。结果表明优化后结构强度显著提升。胡春幸等<sup>[11]</sup>基于

遗传算法对不同胶接长度和被胶接件宽度  $W$  的 CFRP 层合板单搭接胶接结构进行了试验和数值分析,研究了其力学性能,并基于遗传算法对胶接参数进行了多目标优化,优化结果比常规方案的拉伸强度和剪切强度分别提高了 2.65% 和 17.24%。目前,对于复合材料双钉胶螺混合连接接头的多参数优化问题研究得比较少。本文基于代理模型和遗传算法针对碳纤维/环氧树脂复合材料-钛合金双钉胶螺混合连接结构进行了多参数优化。

本文建立碳纤维/环氧树脂复合材料-钛合金双钉胶螺混合连接结构的数值仿真模型,通过试验验证模型的可行性,探究代理模型的误差。在此基础上,使用遗传算法对代理模型进行函数优化,拟得到双钉胶螺混合连接结构最佳的结构参数。

## 1 CFRP-钛板双钉胶螺混合连接结构

CFRP-钛板双钉胶螺混合连接结构示意图见图1。

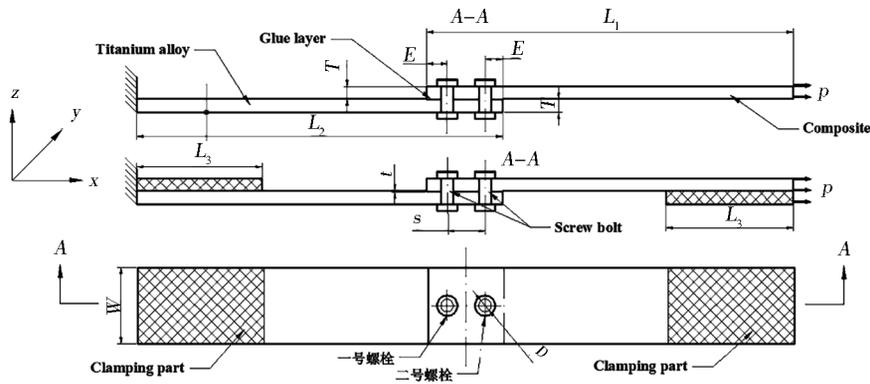


图1 CFRP-钛板双钉胶螺混合连接结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of CFRP-titanium plate double nail glue screw hybrid connection structure

图1中复合材料层合板和钛合金板通过两个螺栓和胶层混合连接,左右两端使用铝板制成的加强片来加强夹持力。复合材料层合板使用的是山东光威公司提供的型号为T300/7901的碳纤维/环氧树脂

复合材料层合板,其铺层方式为 $[45/0/-45/90]_{3s}$ ,单层厚度为0.15 mm,共24层,总厚度为3.6 mm,树脂比重为33%,密度 $\rho$ 为1.792 g/cm<sup>3</sup>。碳纤维复合材料板相关性能参数如下表1所示<sup>[12]</sup>。

表1 T300/7901碳纤维复合材料板性能参数

Tab. 1 Parameters of T300/7901 carbon fiber composite laminate

Young's modulus /GPa		Shear modulus /GPa		Poisson's ratio		Tensile strength /MPa		Compressive strength /MPa		Shear strength /MPa	
$E_1$	$E_2, E_3$	$G_{12}, G_{13}$	$G_{23}$	$\nu_{12}, \nu_{13}$	$\nu_{23}$	$X_t$	$Y_t, Z_t$	$X_c$	$Y_c, Z_c$	$S_{12}, S_{13}$	$S_{23}$
125.9	11.3	5.43	3.98	0.3	0.42	2 000	80	1 100	280	120	120

钛合金(TC4)板厚度为3.6 mm,密度为4.51 g/cm<sup>3</sup>。钛合金相关参数:弹性模量120 GPa,剪切强度665 MPa,泊松比为0.34。

胶黏剂是LJM-170型环氧树脂基胶膜,弹性模量为1.85 GPa,剪切强度为268 MPa,泊松比为0.3。

## 2 渐进损伤理论

### 2.1 材料损伤准则

Hashin复合材料损伤准则将复合材料的损伤分

为了四种,即纤维拉伸、纤维压缩、基体拉伸、基体压缩四种失效情况,其对应的失效判定为:

纤维拉伸( $\sigma_1 \geq 0$ ):

$$e_{ft} = \left( \frac{\sigma_1}{X_t} \right)^2 \geq 1 \quad (1)$$

纤维压缩( $\sigma_1 < 0$ ):

$$e_{fc} = \left( \frac{\sigma_1}{X_c} \right)^2 \geq 1 \quad (2)$$

基体拉伸 $(\sigma_{22} + \sigma_{33}) \geq 0$ :

$$e_{mt} = \frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{Y_T^2} + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{S_{13}}\right)^2 \geq 1 \quad (3)$$

基体压缩 $(\sigma_{22} + \sigma_{33}) < 0$ :

$$e_{mc} = \frac{1}{Y_c} \left[ \left( \frac{Y_c}{2S_{23}} \right)^2 - 1 \right] (\sigma_{22} + \sigma_{33}) + \frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{4S_{23}^2} + \frac{\sigma_{23}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33}}{S_{23}^2} + \left(\frac{\sigma_{12}}{S_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{13}}{S_{13}}\right)^2 \quad (4)$$

式中,  $\sigma_1$  为正应力,  $\sigma_{ij}$  为切应力,  $X_i, Y_c$  分别为纵向拉伸强度和横向拉伸强度,  $X_c, Y_t$  分别为纵向压缩强度和横向压缩强度,  $S_{12}$  为纵向剪切强度,  $S_{23}$  和  $S_{13}$  为横向剪切强度<sup>[13]</sup>。当失效模型指数是1时, 则认为该处的材料开始失效。

根据渐进损伤理论, Hashin 失效准则仅预测复合材料初始阶段的破坏, 随着破坏的继续产生, 纤维和基体的刚度将会进一步下降, 层合板参数随以下折减模型进行折减。

纤维拉伸、纤维压缩:

$$E_{11}^d = 0.07E_{11} \quad E_{33}^d = 0 \quad G_{13}^d = 0 \quad (5)$$

基体拉伸、基体压缩:

$$E_{22}^d = 0.2E_{22} \quad G_{12}^d = 0.2G_{12} \quad G_{23}^d = 0.2G_{23} \quad (6)$$

公式左边是复合材料层合板失效后的层合板参数, 右边是层合板失效前的参数。

## 2.2 复合材料层间和胶层损伤准则

以内聚力单元模拟复合材料的层间和胶层损伤, 采用二次名义应力准则<sup>[14]</sup>(QUADS), 当函数达到1时, 认为损伤开始。该准则表示为:

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_t}{t_t^0} \right\}^2 = 1 \quad (7)$$

式中,  $t_n^0$  是胶层单元法向强度,  $t_s^0, t_t^0$  是单元剪切强度。胶层单元的渐进损伤过程由商用软件 ABAQUS 中的 B-K 断裂准则模拟。

## 3 可行性验证

为验证模型仿真的准确性, 使用三组试验试件与模型对比, 三组试验试件 A-1、A-2、A-3 的铺层顺序都为  $[45/0/-45/90]_{3s}$ , 孔径  $D$  都为 5 mm, 端径比  $E/D$  都为 1.5, 孔径比  $S/D$  都为 3, 复合材料层合板长度  $L_1$  都为 145 mm, 钛合金板长度  $L_2$  都为 145 mm, 宽径比  $W/D$  分别为 3、4、5。

拉伸试验在万能试验机 WDW-300 上进行, 在每个试件的两端粘上与层合板厚度相同的铝片作为加强片以加强夹持力和避免偏心效应。在进行拉伸试验时,

将试件对中夹持后, 下夹头完全固定, 上夹头以 2 mm/min 的速率对试件进行静拉伸试验。

三组试验试件都分别有 3 个尺寸相同、制作过程相同的试件, 以此来避免偶然误差和可能造成的损伤。以相同试件重复试验得出的失效载荷和位移曲线作为试验结果。

如图 2 所示, A-1、A-2、A-3 试验试件的失效载荷误差分别为 6.74%、7.71%、8.97%; 位移误差分别为 -9.13%、-8.5%、-6.17%。每组试件的试验失效载荷均低于数值仿真的失效载荷, 这是因为在制作过程中试件可能的胶膜损伤和对复合材料打孔时孔周受到了损伤。试验位移均大于数值仿真的位移, 这是因为螺栓装配过程中产生的间隙以及实验过程中夹持端的微量位移。

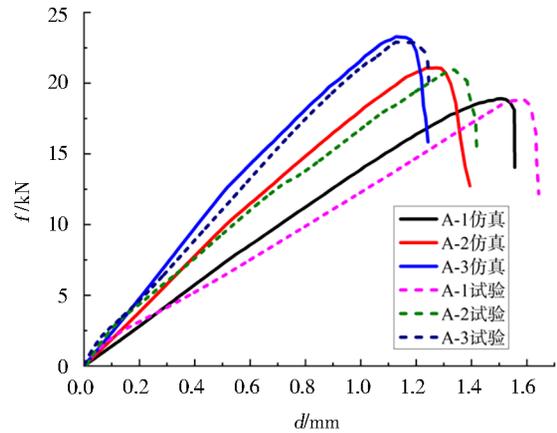
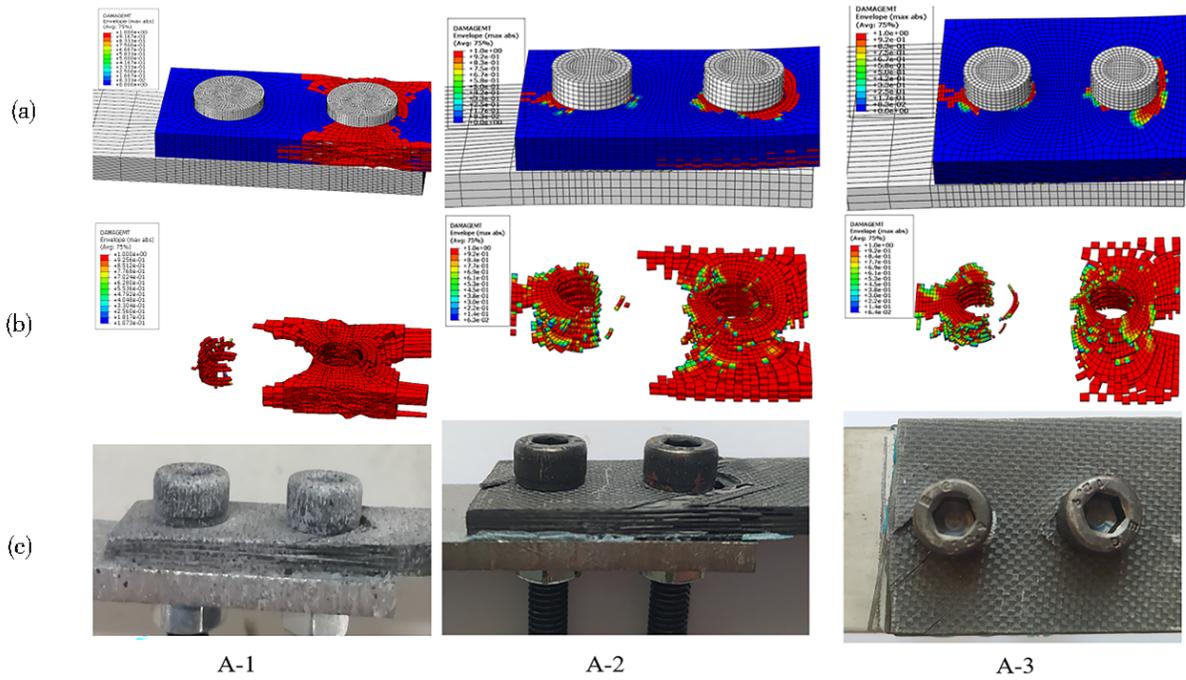


图2 混合连接结构仿真与试验对比

Fig. 2 Comparison between simulation and test of hybrid connection structure

图3(a)、(b)为层合板基体拉伸失效时的损伤图, (c)为试验拉伸失效图。对比可以看出, 试件 A-1、A-2 为二号孔的孔周损伤沿板宽方向扩展而断裂失效, A-3 为层合板在一号孔处发生挤压破坏而失效。随着板宽的增加, 混合连接接头的失效形式也发生改变。当宽径比  $W/D$  为 3、4 时, 两个螺栓提供的挤压力和胶层剪切力的合力大于层合板的承载力, 这时混合连接接头在二号孔处沿板宽方向断裂失效; 当宽径比  $W/D$  为 5 时, 随着接头宽度的增加, 层合板的承载力增大, 这时一号孔处承受的挤压力增加到极限, 从而受到挤压破坏而失效。通过仿真分析和试验试件失效形式的对比, 认为能够对混合连接接头的失效形式进行较为准确的预测。基于渐进损伤理论对复合材料双钉胶螺混合连接接头进行了数值仿真, 其仿真结果的失效载荷和位移与试验结果具有很高的相关性, 结构失效形式一致, 失效载荷和位移的误差都低于 10%, 因此认为能够对混合连接结构的失效载荷进行较为准确的预测, 证明了模型的有效性。



注:(a) 基体拉伸损伤;(b) 基体拉伸损伤在70%~100%的区域;(c) 试验试件失效。

图3 仿真模型与试验试件损伤失效结果对比图

Fig. 3 Comparison of damage and failure results between the simulation model and the specimen

#### 4 复合材料双钉胶螺混合连接接头多参数优化

如果想要考虑多个参数对搭接结构进行优化设计,则首先需要解决多参数优化的问题。因为搭接结构相关参数有多种参数组合,想要在众多的参数组合对应的目标值中找出其中最优化,不管是试验的方法还是仿真的办法都是较为困难的。因此,提出用代理模型解决这一问题。

代理模型就是使用有限的样本点和样本点结果构造出近似的数学模型,利用该模型去求出最优解,最优解与数值仿真或者试验得到的结果相近。本文使用多项式响应面法来解决复合材料双钉胶螺混合连接接头多参数优化问题。

选取的混合连接结构的参数包括板宽 $W$ 、端距 $E$ 、孔距 $S$ ,其中板宽的取值范围为15~30 mm,端距的取值范围为5~20 mm,孔距的取值范围为10~25 mm。在建立代理模型之前,首先要确定代理方程的次数,

$$p_3 = [p_1, p_2, p_3, \dots]^T = [1, c_1, c_2, c_3, c_1 c_2, c_1 c_3, c_2 c_3, c_1^2 c_2, c_1^2 c_3, c_1^2 c_2 c_3, c_1^2 c_2^2, c_1^2 c_3^2, c_1^2 c_2 c_3^2, c_1^2 c_2^2 c_3, c_1^2 c_2^2 c_3^2, c_1^2 c_2 c_3^3, c_1^2 c_2^3, c_1^2 c_3^3]^T \quad (10)$$

四次代理模型的基向量为:

$$p_4 = [p_1, p_2, p_3, \dots]^T = [1, c_1, c_2, c_3, c_1 c_2, c_1 c_3, c_2 c_3, c_1^2 c_2, c_1^2 c_3, c_1^2 c_2 c_3, c_1^2 c_2^2, c_1^2 c_3^2, c_1^2 c_2 c_3^2, c_1^2 c_2^2 c_3, c_1^2 c_2^2 c_3^2, c_1^2 c_2 c_3^3, c_1^2 c_2^3, c_1^2 c_3^3, c_1^2 c_2 c_3^4, c_1^2 c_2^2 c_3^4, c_1^2 c_2^3 c_3^4, c_1^2 c_2^4, c_1^2 c_3^4]^T \quad (11)$$

使用MATLAB软件来拟合代理模型,一次代理模型拟合的系数矩阵如式(12)所示,使用方差分析来判断拟合出的模型是否可信,其检测的显著性水平 $P$ 值为0.008,显然小于0.05,说明该模型是可信的;二次代理模型拟合的系数矩阵如式(13)所示,显著性水平 $P$ 值

$$a_2 = [15.0689 \quad 1.0603 \quad -1.0679 \quad -0.6775 \quad 0.0244 \quad 0.0444 \quad 0.0137 \quad -0.0385 \quad 0.0167 \quad -0.0064] \quad (13)$$

即探究几次的代理模型的精度最高。

本文使用拉丁超立方抽样方法(LHS)在整个数值域范围内进行基向量的随机抽样,得到了60个混合连接结构参数构成的基向量 $C$ ,根据每个样本点的板宽 $W$ 、端距 $E$ 、孔距 $S$ 数据进行有限元仿真计算,得到60个基向量的仿真失效载荷,将60个基向量分为两组,一组用来拟合代理模型,另一个组用来预测失效载荷和计算误差。探究了一次、二次、三次、四次代理模型的拟合情况和误差,基向量如下所示。

一次代理模型的基向量为:

$$p_1 = [p_1, p_2, p_3, \dots]^T = [1, c_1, c_2, c_3]^T \quad (8)$$

二次代理模型的基向量为:

$$p_2 = [p_1, p_2, p_3, \dots]^T = [1, c_1, c_2, c_3, c_1 c_2, c_1 c_3, c_2 c_3, c_1^2 c_2, c_1^2 c_3]^T \quad (9)$$

三次代理模型的基向量为:

为0.0001;三次代理模型拟合的系数矩阵如式(14)所示,显著性水平 $P$ 值为0.0003;四次代理模型拟合的系数矩阵如式(15)所示,显著性水平 $P$ 值为0.0411。

系数矩阵:

$$a_1 = [-1.0869 \quad 0.5538 \quad 0.2744 \quad 0.3466] \quad (12)$$

$$a_3 = [-199.7028 \ 26.5475 \ 4.2297 \ 1.1941 \ -0.4438 \ 0.2118 \ 0.2256 \ -1.1366 \ -0.0879 \ -0.3148 \\ 0.0098 \ -0.0058 \ 0.0059 \ 0.0050 \ 0.0041 \ -0.0054 \ -0.0079 \ 0.0163 \ -0.0034 \ 0.0063] \quad (14)$$

$$a_4 = [885.1830 \ -81.0538 \ -211.2914 \ 31.1318 \ 17.2256 \ -14.9276 \ 5.8736 \ 6.9388 \ 7.3811 \\ 5.0750 \ -0.7647 \ 0.3914 \ -0.1244 \ 0.0243 \ 0.3327 \ -0.4652 \ 0.1428 \ -0.1842 \ -0.3535 \\ -0.2434 \ 0.0002 \ -0.0079 \ 0.0005 \ 0.0060 \ -0.0056 \ 0.0000 \ 0.0093 \ -0.0030 \ -0.0003 \\ 0.0041 \ -0.0017 \ 0.0090 \ 0.0015 \ 0.0059 \ 0.0026] \quad (15)$$

系数矩阵求出之后,代理模型可以对失效载荷进行预测,将第二组数据代入可得预测结果,将预测结果与第二组的仿真结果进行比对并计算方差,以预测的精度为评价代理模型优劣的标准。因此,一次代理模型的方差为3.198 516;二次代理模型的方差为1.818 163;三次代理模型的方差为4.912 386;四次代理模型的方差为16.329 37,如图4所示。

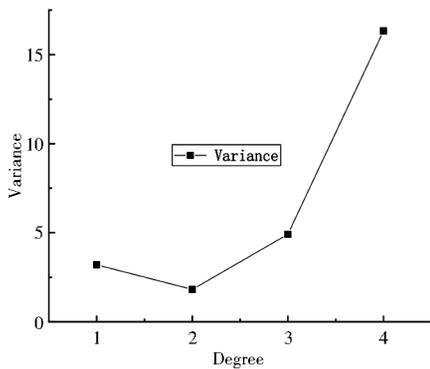


图4 代理模型的方差

Fig. 4 Variance of surrogate model

显然,二次代理模型预测失效载荷误差最小,选取二次代理模型对复合材料双钉胶螺混合连接结构进行预测和优化。随机选取12个样本点在ABAQUS中进行数值仿真,得到相应的失效载荷,如表2所示。

表2 混合连接结构参数及其相对应的失效载荷值

Tab. 2 Structural parameters and corresponding failure loads of hybrid connections

板宽/mm	端距/mm	孔距/mm	失效载荷/kN
19.80	9.50	21.46	22.069 8
20.93	15.91	10.02	19.325 9
23.74	13.49	11.50	21.114 6
29.46	17.77	24.47	29.414 4
25.23	19.61	10.43	20.708 6
26.15	8.16	15.30	15.369 9
24.54	16.13	23.41	24.838 8
15.02	12.77	20.90	15.174 2
23.34	10.25	12.06	20.340 2
16.35	16.97	15.78	18.723 5
22.17	6.83	19.61	22.262 5
15.57	10.43	23.99	15.837 4

因此,拟合出的混合连接结构的多项式代理模型为:

$$y = 15.068 9 + 1.060 3W - 1.067 9E - 0.677 5S + \\ 0.024 4W \times E + 0.044 4W \times S + 0.013 7E \times S - \\ 0.038 5W^2 + 0.016 7E^2 - 0.006 4S^2 \quad (16)$$

式中, $y$ 为失效载荷值, $W$ 为板宽值, $E$ 为板端值, $S$ 为孔距值。

可将复合材料双钉胶螺混合连接结构的多参数优化问题转化成多项式代理模型的函数优化问题。使用遗传算法(Genetic Algorithm, GA)对代理模型进行优化,由于遗传算法只需要确定目标函数和相应的适应度函数,不需要其他梯度信息等知识,因此在复合材料结构优化等领域受到了广泛的应用<sup>[16-17]</sup>。

基于遗传算法通过MATLAB对代理模型进行优化,以式(16)的代理模型为目标函数,板宽的取值范围为15~30 mm,端距的取值范围为5~20 mm,孔距的取值范围为10~25 mm。因是求取最大值的问题,代理模型的失效载荷值都为非负值,所以其适应度函数也为代理模型,即个体的适应度越大,个体遗传的概率就越大。使用MATLAB画出图像,最后可以得出整个值域范围内所有数值点对应的失效载荷值,如图5所示。

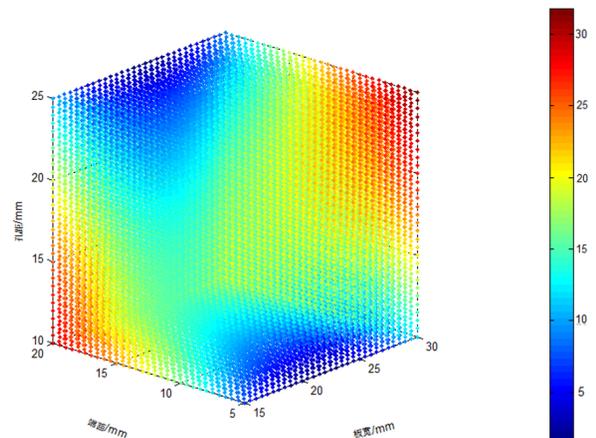


图5 代理模型在值域空间内各个点的失效载荷数值分布

Fig. 5 The numerical distribution of the failure load at each point of the surrogate model in the range space

如图5所示,红色越深则表示失效载荷越高,因此最优解为:板宽为28 mm、端距为8.5 mm、孔距为22.5 mm,其对应的失效载荷为29.49 kN,优化前试验得到的混合连接接头的失效载荷平均值为20.43 kN,载荷性能提升了44.35%。因此,对复合材料双钉混合连接接头进行多参数优化能够显著提高结构的载荷性能。

## 5 结论

(1)基于渐进损伤理论,建立了复合材料双钉胶螺混合连接结构的数值仿真模型,通过试验对比验证了模型的可行性,能够对混合连接结构的失效载荷进行准确地预测。

(2)探究了代理模型的精度问题,使用拉丁超立方抽样方法随机抽取了60组混合连接结构参数组合,分别进行数值仿真,分为两组进行拟合和预测,分别拟合了一、二、三和四次的多项式响应面代理模型,其显著性水平都小于0.05,计算了四个代理模型对混合连接结构失效载荷预测的方法,发现以二次多项式响应面方法建立的代理模型的精度最高。

(3)为解决复合材料双钉胶螺混合连接结构的多参数优化问题,使用二次多项式响应面的方法建立了混合连接结构的代理模型,使用遗传算法对代理模型进行了函数优化,得到了最佳的搭接结构。与常规混合连接结构的载荷性能相比,优化结果的载荷性能提升了44.35%。

### 参考文献

- [1] RAJU K P, BODJONA K, LIM G H, et al. Improving load sharing in hybrid bonded/bolted composite joints using an interference-fit bolt [J]. *Composite Structures*, 2016, 149: 329-338.
- [2] HOANG-NGOC C T, PAROISSIEN E. Simulation of single-lap bonded and hybrid (bolted/bonded) joints with flexible adhesive [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2010, 30(3):117-129.
- [3] KELLY G. Quasi-static strength and fatigue life of hybrid (bonded/bolted) composite single-lap joints [J]. *Composite Structures*, 2006, 72:119-129.
- [4] DI FRANCO G, FRATINI L, PASTA A. Pasta analysis of the mechanical performance of hybrid (SPR/bonded) single-lap joints between CFRP panels and aluminum blanks [J]. *Int. J Adhes Adhes*, 2013, 41:24-32.
- [5] MARANNANO G, ZUCCARELLO B. Numerical experimental analysis of hybrid double lap aluminum-CFRP joints [J]. *Compos. B Eng.*, 2015, 71:28-39.
- [6] BOIS C, WARGNIER H, WAHL J C, et al. An analytical model for the strength prediction of hybrid (bolted/bonded) composite joints [J]. *Composite Structures*, 2013, 97:252-260.
- [7] OZEN M, SAYMAN O. Failure loads of mechanical fastened pinned and bolted composite joints with two serial holes [J]. *Composites Part B Engineering*, 2011, 42(2):264-274.
- [8] 张超禹,郑艳萍,熊勇坚,等. CFRP与铝板胶螺混合连接结构拉伸性能研究 [J]. *复合材料科学与工程*, 2020(8):12-17.

ZHANG C Y, ZHENG Y P, XIONG Y G, et al. Tensile properties analysis of CFRP-aluminum bonded-bolted hybrid joint [J]. *Composites Science and Engineering*, 2020(8):12-17.

[9] LI X, TAN Z Y, WANG L C, et al. Experimental investigations of bolted, adhesively bonded and hybrid bolted/bonded single-lap joints in composite laminates [J]. *Materials Today Communications*, 2020, 24:101244.

[10] TIAN Z Y, YAN Y, HONG Y, et al. Improved genetic algorithm for optimization design of a three-dimensional braided composite joint [J]. *Composite Structures*, 2018, 206: 668-680.

[11] 胡春幸,侯玉亮,铁瑛,等. 基于遗传算法的碳纤维增强树脂复合材料层合板单搭胶接结构的多目标优化 [J]. *复合材料学报*, 2021, 38(6):1847-1858.

HU C X, HOU Y L, TIE Y, et al. Multi-objective optimization of adhesively bonded single-lap joints of carbon fiber reinforced polymer laminates based on genetic algorithm [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2021, 38(6):1847-1858.

[12] TIE Y, ZHANG Q S, HOU Y L, et al. Impact damage assessment in orthotropic CFRP laminates using nonlinear Lamb wave: Experimental and numerical investigations [J]. *Composite Structures*, 2020, 236:111869.

[13] 杨本宁,郑艳萍,李成,等. 复合材料胶接单搭接连接强度与失效模式研究 [J]. *玻璃钢/复合材料*, 2019(2):26-32.

YANG B N, ZHENG Y P, LI C, et al. Study on strength and failure mode of adhesively bonded single lap joints of composite material [J]. *Composites Science and Engineering*, 2019(2):26-32.

[14] 梁祖典,燕瑛,张涛涛,等. 复合材料单搭接胶接接头试验研究与数值模拟 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2014, 40(12):1786-1792.

LIANG Z D, YAN Y, ZHANG T T, et al. Experimental investigation and numerical simulation of composite laminate adhesively bonded single-lap joints [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2014, 40(12):1786-1792.

[15] 俸翔,廖强,何安荣,等. 复合材料螺栓连接失效的数值模拟 [J]. *宇航材料工艺*, 2013, 43(4):87-90.

FENG X, LIAO Q, HE A R, et al. Numerical Failure Simulation of Composite Bolted Joint [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2013, 43(4):87-90.

[16] GHARSALLI L, GUERIN Y. Mechanical sizing of a composite launcher structure by hybridizing a genetic algorithm with a local search method [J]. *Composites Part C: Open Access*, 2021 (5):100125.

[17] NARAYANA NAIK G, GOPALAKRISHNAN S, GANGULI R. Design optimization of composites using genetic algorithms and failure mechanism based failure criterion [J]. *Composite Structures*, 2008, 83(4):354-367.