

采用多元非线性回归模型的无头铆钉 安装干涉量预测

李晓锋¹, 常正平¹, 高雅芝¹, 霍永兴², 宋建生², 王仲奇¹

(1. 西北工业大学机电学院, 710072, 西安; 2. 中航西安飞机工业集团股份有限公司, 710089, 西安)

摘要: 为明晰被连接件材料性能对安装干涉量的影响规律,并进一步为新材料扩展应用提供可靠性预测,在铆接过程有限元仿真数据基础上,提出了一种采用多元非线性回归模型的无头铆钉安装干涉量预测方法。首先,根据实际铆接过程建立有限元仿真模型,通过铆接试验验证模型有效性。然后,采用有限元和正交试验法,研究了被连接件弹性模量、屈服强度、强化系数和应变强度指数及其交互作用对铆接干涉量水平的显著性,明确了各因素对安装干涉量的影响效果。最后,选用幂函数作为多元非线性回归的函数形式,剔除显著性较低因素项,建立了待测位置干涉量回归预测模型。结果表明,在一定铆接工艺条件下,屈服强度和应变强度指数及其交互作用是影响干涉量水平的主要因素。对比模拟值与回归模型预测值发现两者变化趋势一致,且误差不超过10%,表明干涉量多元回归预测模型具有有效性。

关键词: 干涉量;多元非线性回归;无头铆钉;正交试验法

中图分类号: V262.4 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202401015 **文章编号:** 0253-987X(2024)01-0157-10

Predicting Interference of Headless Rivet Using Multiple Nonlinear Regression

LI Xiaofeng¹, CHANG Zhengping¹, GAO Yazhi¹, HUO Yongxing²,

SONG Jiansheng², WANG Zhongqi¹

(1. School of Mechanical Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Company LTD., Xi'an 710089, China)

Abstract: This study proposes a method for predicting the installation interference of headless rivet using a multiple nonlinear regression model based on the finite element simulation data of the riveting process, with the aim to elucidate the influence of material properties on the interference during installation and to provide reliable predictions for the use of new materials. Firstly, a finite element simulation model is established based on the actual riveting process and its validity is verified through riveting experiments. Subsequently, finite element analysis and orthogonal testing techniques are employed to examine the significance of various factors, such as elastic modulus, yield strength, strengthening coefficient, and strain strength index, along with their interactions on installation interference, determining the influence of each factor on the riveting interference. Finally, the multiple nonlinear regression model is formulated using a power func-

tion, and less significant factors are eliminated. The results show that, under specific riveting process conditions, yield strength and strain strength index, as well as their interaction, are the primary factors affecting the interference. By comparing the simulated values and the predicted values of the regression model, it is observed that the two values exhibit consistent variation trends, with errors remaining below 10%, demonstrating the effectiveness of the multiple regression models in predicting riveting interference.

Keywords: interference; multiple nonlinear regression; headless rivet; orthogonal test

无头铆钉是目前飞机壁板自动钻铆装配中采用的主要铆钉类型,具有质量小、结构简单等特点,可形成较均匀分布的干涉量,成倍地提高了连接结构的疲劳寿命,同时具有良好的密封效果,故广泛应用于 Y-20、C919、ARJ21 等飞机装配中^[1-2]。干涉量是评价无头铆钉安装质量的关键指标^[3],干涉量太大会导致构件残余应力变大,甚至引发裂纹等损伤,干涉量太小又难以保证其在提高疲劳寿命及密封性方面的优势,因此开展干涉量分析和预测对提高接头质量及保障可靠性服役至关重要。

在自动钻铆过程中,影响干涉量水平的参数主要有铆接力、铆接过程时间、钉孔配合公差等工艺参数和弹性模量、屈服强度等材料性能参数^[4-6]。De Rijck 等^[3]采用理论分析方法,建立了铆接力与铆钉尺寸间的映射关系,并在多种材料下的进行试验验证。Cheraghi 等^[7]采用有限元仿真分析并结合统计分析方法,研究了铆接力、铆钉尺寸以及钉与孔配合尺寸对铆接质量的影响,发现采用规定的沉头窝深度会导致被连接件间产生间隙,若降低沉头窝深度,在保证铆接质量的情况下可允许更大的钉与孔配合尺寸公差及铆接力范围。刘连喜等^[8]模拟分析了无头铆钉铆接变形形式,同时结合正交试验法研究了多种自动钻铆工艺参数对铆接干涉量的影响,发现压铆力是影响铆接干涉量的主要因素。李超等^[9]采用 BP 神经网络对铆接干涉量均匀性及壁板变形程度进行预测,结合多目标粒子群算法对压铆力、夹紧力和压铆过程参数进行优化,并进行了试验验证。李艳等^[10]研究了铆钉材料对铆接变形的影响,结果发现采用强度比连接件小的铆钉材料可以减小裂纹等损伤出现的概率。Aman 等^[11]分析了铆接顺序、铆钉间距及被连接件间隙对铆接质量的影响,确定了最佳工艺参数组合,采用单一变量控制法进行试验设计,得出残余应力和三者之间的函数关系。陈贵坤等^[12]分析了板厚、板材硬度和铆钉硬度与自冲铆工艺参数的影响效果,结合等高线图研究了两因素交互作用对冲击载荷等工艺参数的显著性

效果。常正平等^[13]研究了铆接力、铆钉伸出量、铆接时间、停留时间及夹紧力对铆接变形的影响,表明铆接力是影响铆接变形的最关键的因素。综上,目前开展的研究主要集中在工艺参数对铆接质量的影响,而对被连接件材料性能参数对干涉量的影响研究较少。

为进一步明晰材料性能对干涉量的影响规律且为新材料扩展应用提供可靠性预测,本文采用有限元与正交试验相结合的方法,研究被连接件材料性能参数及其交互作用对无头铆钉安装干涉量的影响,并建立干涉量的多元非线性回归预测模型,为实际铆接试验提供指导。

1 有限元建模

1.1 模型描述

(1)几何模型建立。由于铆接过程的几何模型结构简单且具有对称性,直接在 ABAQUS 软件中建立模型,结构示意图如图 1 所示,并在分析过程中采用 1/4 模型以减少运算时间^[14]。铆钉选用直径 $d=4.78$ mm、长度 $h=16$ mm 的无头铆钉;钉孔直径为 $D=4.88$ mm;上、下被连接件采用厚度 $t_1=t_2=3$ mm、 $L/2=15$ mm 的铝合金板材;铆模选用平铆模。

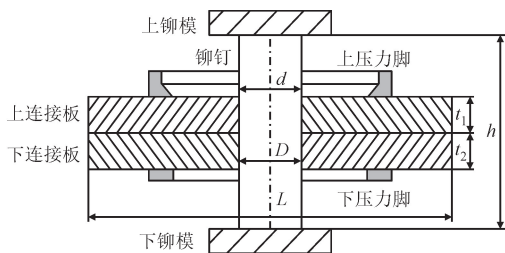


图 1 铆接模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of riveting model

(2)材料属性设定。目前,常用的航空结构件多为 2024-T351、7055-T76511 等型号铝合金材料^[15-17],模型本构关系采用 Johnson-Cook 模型(应力 $\sigma = A + B\epsilon^n$),暂不考虑应变速率以及温度的影响^[18],不同系列铝合金材料密度以及泊松比基本一致。因

此,后续主要研究被连接件材料性能参数中弹性模量 E 、屈服强度 A 、强化系数 B 以及应变强度指数 n 对铆接干涉量的影响,具体材料设定在正交试验部分进行详细描述。铆钉选用 2117-T4 铝合金材料,铆钉及常用航空结构件材料性能参数见表 1。本文

中铆钉材料保持一致,故无需进行材料性能参数变换,直接使用试验得出的应力-应变曲线的离散化数据,塑性阶段材料应力-应变曲线见图 2。上、下铆模刚度相较于铆接及被连接件大很多,为简化计算,设定为刚体。

表 1 常用航空结构件及铆钉材料性能参数
Table 1 Common aviation parts and rivet materials parameters

材料	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	密度/ $(\text{g} \cdot \text{mm}^{-3})$	屈服强度 A/MPa	强化系数 B/MPa	应变强度指数 n
2024-T351	74	0.33	2.8×10^{-3}	280	400.0	0.200 0
2A10	69	0.33	2.8×10^{-3}	243	618.8	0.198 1
7050	70.3	0.33	2.8×10^{-3}	485	175.8	0.416 0
7075-T6	71	0.33	2.8×10^{-3}	473	210.0	0.381 3
2117-T4	69	0.33	2.8×10^{-3}			

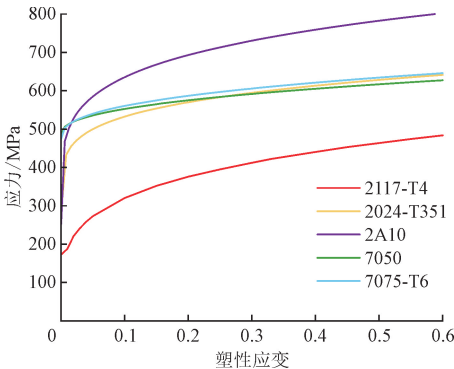


图 2 各材料的应力-应变曲线
Fig. 2 Stress-strain curves of materials

(3)网格划分。网格采用 C3D8R 六面体单元,实行减缩积分,但会导致单元刚度矩阵求解不完全,易出现刚度为零的情况,丧失抵抗变形的能力并使得模型计算发散。为解决上述问题,设置默认的沙漏控制,添加相应的沙漏阻尼,即设定线性体积黏性参数为 0.06,二次体积黏性参数为 1.2。为提高运算效率的同时保证运算精度,仅在孔周变形较大处进行网格加密^[19],如图 3 所示。

(4)接触及摩擦处理。根据各部件表面主从关系设置接触,切向行为采用“罚”接触,摩擦系数为 0.2^[20-21],法向行为采用“硬”接触方式。

(5)载荷及边界条件确定。限制被连接件右端面沿 X 向移动以及后端面沿 Z 向移动;固定上压力脚,限制下压力脚除沿 Y 向移动以外的自由度,并在下压力脚的下表面施加压强载荷;限制铆模除沿 Y 向移动以外的自由度,铆接力施加在与铆模相关联的参考点见图 3。

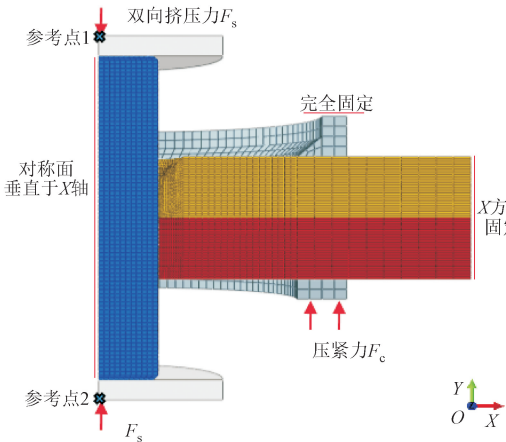


图 3 网格划分及边界条件设置
Fig. 3 Mesh division and setting of boundary conditions

1.2 有限元模型验证

为验证铆接过程有限元模型的模拟效果,选用被连接件材料为 2024-T351 和 7055-T76511 分别进行无头铆钉自动钻铆试验和仿真分析,每种材料设置 3 次重复试验,其中一组试验及对应仿真分析结果如图 4 所示,图中数据代表在相应干涉量测量位置铆钉直径的试验数据和仿真数据。在实际自动钻铆过程中,试件采用的铆接力为 38.4 kN,压紧力为 19.64 MPa,铆窝端的铆头在铆接完成后会被铣平以保证飞机外形的平整性,因此铆接试验中铆头同样被铣平。根据《航空制造工程手册》^[22]干涉量测量要求以及主机厂实际操作规范,干涉量测量部位如图 5 所示,分别用 G_1 、 G_2 、 G_3 和 G_4 表示。采用光学显微镜及相应配套测量软件 Imageview 按照待测位置测量铆接试验干涉量,并与仿真模拟值进行对

比分析,分析结果如表 2 所示。其中,在测量前要先进行尺寸标定以确保测量精度,并将小数点后万分位作为估读位,结果对比中实验数据为 3 次重复试验的均值。

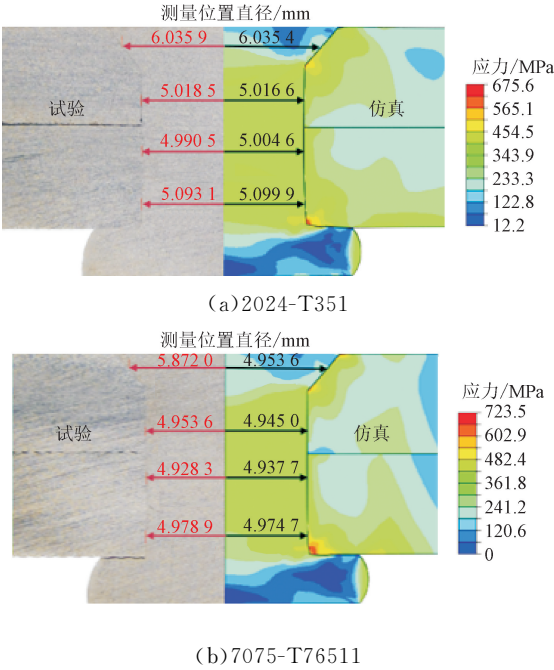


图 4 铆接试验结果与仿真结果的对比
Fig. 4 Riveting test and simulation results

从表 2 中可以得出,无头铆钉铆接过程仿真结果与试验数据在 G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 的误差均在 10% 以内,且最大误差为 0.014 mm,在工程应用接受范围内,因此建立的有限元模型可用于铆接过程模拟,可作为后续研究被连接件材料性能对干涉量影响的基础模型。

2 正交试验设计

采用有限元正交模拟方法,研究材料性能参数中弹性模量 E 、屈服强度 A 、强化系数 B 、应变强度指数 n 对 4 个测量位置干涉量的影响。通过本文选用的 Johnson-Cook 本构可以看出, E 、 A 、 B 、 n 之间存在耦合作用,因此除了考虑 4 个因素的独立影响外,还需考虑两因素间的交互作用,用 $E \times A$ 、 $E \times B$ 、 $E \times n$ 、 $A \times n$ 、 $A \times B$ 以及 $B \times n$ 形式表示。

由于受到标准正交表及其相应交互作用表的限制,同时又为了确保所选水平数能够真实反映各因素对铆接干涉量的影响,本文采用五水平-无交互作用及两水平-有交互作用两种正交试验设计方案,探究各因素及其交互作用对干涉量的影响程度。

2.1 无交互作用的正交试验

2.1.1 试验方案设计

根据相关文献以及材料实际应用场景,确定铝合金材料性能参数范围,选取 E 、 A 、 B 和 n 四因素五水平数据值,选用 $L_{25}(5^4)$ 标准正交表进行正交试验,试验方案如表 3 所示。

2.1.2 无交互作用正交试验结果分析

按照设计的正交试验方案进行有限元分析,仿真结果见表 3 所示。可以看出,靠近铆头的位置 (G_1 和 G_4) 干涉量相较于其他的两处位置 (G_2 和 G_3) 更大。这是由于在无头铆钉铆接过程中,上、下端伸出的钉杆部分先被铆粗,造成膨胀处与钉孔发生接触,严重阻碍了铆钉材料向中间流动,因此在铆头附近会更易得到较大的干涉量。

采用 Minitab 软件对以上数据结果进行极差分析,确定各材料参数对 G_1 、 G_2 、 G_3 和 G_4 影响程度的相对大小。五水平-无交互作用正交试验的极差 R 分析结果如表 4 所示。由表 4 中可以看出,针对 G_1 、 G_2 、 G_3 和 G_4 待测干涉量,屈服强度 A 的极差值均为最大值,弹性模量 E 的极差值均为最小值,表明屈服强度对无头铆钉安装干涉量的影响最大,弹性模量的影响最小。各因素间按影响从大到小的主次顺序为屈服强度、应变强度指数、强化系数、弹性模量。

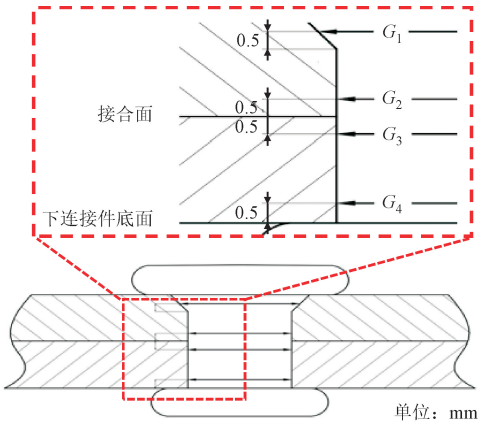


图 5 干涉量测量位置示意图
Fig. 5 Diagram of interferometric measurement position

表 2 仿真与试验结果对比

Table 2 Comparison of simulation and test data

干涉量	2024-T351			7055-T76511		
	实验	仿真	误差	实验	仿真	误差
G_1 /mm	0.275 0	0.286 2	0.011 2	0.111 6	0.115 9	0.004 3
G_2 /mm	0.150 1	0.136 6	0.013 5	0.069 0	0.065 0	0.004 0
G_3 /mm	0.121 1	0.124 6	0.003 4	0.056 5	0.057 7	0.001 2
G_4 /mm	0.217 0	0.219 9	0.002 0	0.103 2	0.094 7	0.008 5

表 3 五水平-无交互作用正交试验方案及仿真结果

Table 3 Five levels-no interaction orthogonal test scheme and simulation results

试验编号	正交试验方案				仿真结果			
	E/GPa	A/MPa	B/MPa	n	G_1/mm	G_2/mm	G_3/mm	G_4/mm
1	60	300	300	0.20	0.246 9	0.120 4	0.109 9	0.194 4
2	60	350	360	0.25	0.185 6	0.096 8	0.087 7	0.150 3
3	60	400	420	0.30	0.151 2	0.083 4	0.075 3	0.124 5
4	60	450	480	0.35	0.129 2	0.073 3	0.065 7	0.108 6
5	60	500	540	0.40	0.113 8	0.066 7	0.059 7	0.097 7
6	63	300	360	0.30	0.285 7	0.136 0	0.124 3	0.220 6
7	63	350	420	0.35	0.212 0	0.107 1	0.097 1	0.170 3
8	63	400	480	0.40	0.167 2	0.088 8	0.080 2	0.135 1
9	63	450	540	0.20	0.086 7	0.054 9	0.049 4	0.081 8
10	63	500	300	0.25	0.105 8	0.062 1	0.055 4	0.091 6
11	66	300	420	0.40	0.328 7	0.153 3	0.140 8	0.250 6
12	66	350	480	0.20	0.125 7	0.071 1	0.063 9	0.105 6
13	66	400	540	0.25	0.115 5	0.066 1	0.058 9	0.097 3
14	66	450	300	0.30	0.132 6	0.072 1	0.064 1	0.105 8
15	66	500	360	0.35	0.112 2	0.063 7	0.056 6	0.094 1
16	69	300	480	0.25	0.182 7	0.095 4	0.086 2	0.145 3
17	69	350	540	0.30	0.151 6	0.082 1	0.074 0	0.122 9
18	69	400	300	0.35	0.176 0	0.088 9	0.079 6	0.137 9
19	69	450	360	0.40	0.138 0	0.074 0	0.066 0	0.110 4
20	69	500	420	0.20	0.079 5	0.049 8	0.043 9	0.073 0
21	72	300	540	0.35	0.228 6	0.114 7	0.104 4	0.182 2
22	72	350	300	0.40	0.260 4	0.119 6	0.108 7	0.206 6
23	72	400	360	0.20	0.117 9	0.065 4	0.057 6	0.094 9
24	72	450	420	0.25	0.101 6	0.058 6	0.052 0	0.086 4
25	72	500	480	0.30	0.090 7	0.053 9	0.047 6	0.079 7

表 4 无交互作用正交试验极差分析

Table 4 Range analysis of no interaction orthogonal test

因素	极差 R/mm			
	G_1	G_2	G_3	G_4
E	0.025 9	0.011 8	0.011 4	0.022 0
A	0.154 1	0.064 7	0.060 5	0.111 4
B	0.045 3	0.016 1	0.014 8	0.032 4
n	0.070 3	0.028 2	0.026 1	0.050 1
主次顺序	$A \rightarrow n \rightarrow B \rightarrow E$			

根据无交互作用正交试验极差分析结果,各因素对所有待测位置干涉量的影响效果主次顺序是一致的。为了更加清晰、直观地表达各因素对整体干涉量的影响效果,将平均干涉量作为各因素对干涉量影响效果图的纵坐标,其中平均干涉量表示为某一水平条件下 G_1 、 G_2 、 G_3 和 G_4 的均值。图 6 中各

因素与整体干涉量影响效果曲线的斜率表示该因素对无头铆钉安装干涉量的影响程度,斜率越大,影响越大。从图 6 可以明显看出,屈服强度 A 对铆接干涉量的影响最大,应变强度指数 n 次之,弹性模量 E 和强化系数 B 的影响程度相近。其中,应变强度指数 n 跟铆接干涉量呈正相关,而屈服强度 A 跟铆接干涉量呈负相关。原因在于,铆接过程中,无头铆钉受力膨胀对钉孔形成挤压,而干涉量的形成主要依靠材料的塑性变形。当铆钉受到一定铆接力时,被连接件屈服强度决定其产生屈服变形的难易程度,屈服强度越大,产生屈服变形越难,导致干涉量变小。根据 Johnson-Cook 本构和指数函数相关性质,当 $0 < n < 1$ 时, n 越大, ϵ^n 的上升敏感性越小,函数增长趋势越平缓,即在受到一定铆接力的情况下, n 越大,所得到的塑性阶段的应变越大,从而导致干涉量变大。

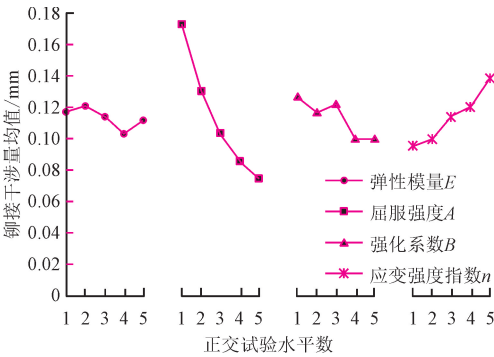


图 6 各因素对干涉量的影响效果

Fig. 6 The effect of factors on the riveting interference

2.2 考虑因素间交互作用的正交试验

2.2.1 试验方案设计

在 2.1 节的基础上,综合考虑因素间的交互作用对铆接干涉量的影响,试验方案遵循存在交互作用的正交表选用原则进行设计,即正交表总自由度大于等于各独立因素自由度和交互作用项自由度之和,公式如下

$$f_z \geq f_c + f_D + f_E + \cdots + f_{c \times D} + \cdots \quad (1)$$

表 5 二水平-有交互作用的正交试验方案及仿真结果

Table 5 Two levels-interaction orthogonal test scheme and simulation results

试验 编号	正交试验方案							仿真结果						
	<i>E</i> /GPa	<i>A</i> /MPa	<i>E</i> × <i>A</i> 水平数	<i>B</i> /MPa	<i>E</i> × <i>B</i> 水平数	<i>A</i> × <i>B</i> 水平数	<i>n</i>	<i>E</i> × <i>n</i> 水平数	<i>A</i> × <i>n</i> 水平数	<i>B</i> × <i>n</i> 水平数	<i>G</i> ₁ /mm	<i>G</i> ₂ /mm	<i>G</i> ₃ /mm	<i>G</i> ₄ /mm
1	60	300	1	300	1	1	0.2	1	1	1	0.246 9	0.120 4	0.109 9	0.194 4
2	60	300	1	300	1	1	0.4	2	2	2	0.410 9	0.182 8	0.167 1	0.301 1
3	60	300	1	540	2	2	0.2	1	1	2	0.166 8	0.092 1	0.083 7	0.130 1
4	60	300	1	540	2	2	0.4	2	2	1	0.289 9	0.143 5	0.131 6	0.223 9
5	60	500	2	300	1	2	0.2	1	2	1	0.101 1	0.061 1	0.054 8	0.090 5
6	60	500	2	300	1	2	0.4	2	1	2	0.129 4	0.072 4	0.064 6	0.104 9
7	60	500	2	540	2	1	0.2	1	2	2	0.087 9	0.052 0	0.046 4	0.079 0
8	60	500	2	540	2	1	0.4	2	1	1	0.113 8	0.072 5	0.059 7	0.097 7
9	72	300	2	300	2	1	0.2	2	1	1	0.224 8	0.107 7	0.097 6	0.178 3
10	72	300	2	300	2	1	0.4	1	2	2	0.390 8	0.169 2	0.154 8	0.289 7
11	72	300	2	540	1	2	0.2	2	1	2	0.142 6	0.083 0	0.075 4	0.117 5
12	72	300	2	540	1	2	0.4	1	2	1	0.271 3	0.130 5	0.119 5	0.211 6
13	72	500	1	300	2	2	0.2	2	2	1	0.089 0	0.053 0	0.046 9	0.077 6
14	72	500	1	300	2	2	0.4	1	1	2	0.114 4	0.063 1	0.055 7	0.093 2
15	72	500	1	540	1	1	0.2	2	2	2	0.069 4	0.045 2	0.039 9	0.066 1
16	72	500	1	540	1	1	0.4	1	1	1	0.099 9	0.057 5	0.051 1	0.087 0

2.2.2 交互正交试验方差分析

为了提高分析效率,避免重复计算,在五水平-无交互作用正交实验中采用了简单方便的极差分析方

$$f_z = N - 1 \quad (2)$$

$$f_c = f_D = f_E = M - 1 \quad (3)$$

$$f_{c \times D} = f_c \times f_D \quad (4)$$

式中: f_z 为正交表总自由度; f_c 、 f_D 、 f_E 为各因素自由度, $f_{c \times D}$ 表示因素 C 和因素 D 的交互作用自由度。 N 为正交试验方案总试验数; M 为各因素水平数。

由于受到标准正交表及相应交互作用表的限制,无法得到四因素五水平(含交互作用项)的标准正交表,因此本小节 4 个因素均选用两水平,同时为消除各因素水平取值对后续分析结果的干扰,选用 2.1 节中各因素水平的最大值和最小值作为试验的水平数据。

参照式 (1)~(4),本次考虑交互作用的正交试验 E 、 A 、 B 、 n 4 个因素的自由度均为 1,交互作用项 $E \times A$ 、 $E \times B$ 、 $E \times n$ 、 $A \times B$ 、 $A \times n$ 、 $B \times n$ 的自由度均为 1。因此,选择 $L_{16}(2^{15})$ 正交表进行正交试验设计,同时根据交互作用表^[23]确定各相互作用列在正交表中的位置,最终确定的正交试验方案如表 5 所示。其中,交互作用项并不作为仿真试验输入变量,只用于进行后续数据分析。

法来获取各因素影响效果。对考虑交互作用的正交试验仿真结果选用方差分析方法实现更加精确地定量分析,不仅可以验证极差分析结果的有效性,而且

能进一步提高本文两次正交实验分析结果的可靠性,为后续建立干涉量预测模型奠定理论基础。考虑交互作用的正交实验方差分析结果如表 6 所示。可以看出,针对所有的待测位置,屈服强度 A 与应变强度指数 n 的交互作用 $A \times n$ 对铆接干涉量的影响最大, $A \times B$ 次之,其余 4 个交互作用因子对干涉量基本没有影响。其中,交互作用 $A \times n$ 对 G_1 的影响略小于单因素 B ,而对于 G_2 、 G_3 和 G_4 的影响均大于单因素 B ,同时屈服强度 A 与强化系数 B 的交互作用 $A \times B$ 对 G_1 、 G_2 、 G_3 和 G_4 的影响大于单因素 E ,表明在无头铆接安

装过程中各材料参数间的交互作用不能被忽略。

由显著性分析可知, A 、 B 、 n 、 $A \times n$ 、 $A \times B$ 对铆接干涉量的影响都表现为高度显著性, E 对 G_1 的影响表现为显著,对 G_2 、 G_3 和 G_4 表现为高度显著,而其余 4 个交互作用因子 $E \times n$ 、 $E \times A$ 、 $B \times n$ 和 $E \times B$ 的影响作用均不显著,在后续预测模型建立中将不考虑其对干涉量的影响。因此,综合上述分析可以得到主要的干涉量影响因素从大到小的顺序为 A 、 n 、 $A \times n$ 、 B 、 $A \times B$ 、 E ,单因素间的主次顺序与无交互作用的极差分析结果一致。

表 6 考虑交互作用的正交试验方差分析结果($P=0.05$)
Table 6 Variance analysis of orthogonal experiment considering interaction ($P=0.05$)

因素	f	G_1 方差分析		G_2 方差分析		G_3 方差分析		G_4 方差分析	
		F 值	P 值	F 值	P 值	F 值	P 值	F 值	P 值
E	1	12.43	0.017	24.77	0.004	35.17	0.002	31.21	0.003
A	1	1 168.97	<0.001	988.80	<0.001	1617.24	<0.001	2789.78	<0.001
B	1	143.66	<0.001	76.11	<0.001	123.63	<0.001	309.52	<0.001
n	1	314.59	<0.001	248.31	<0.001	371.08	<0.001	698.49	<0.001
$E \times A$	1	0.64	0.460	0.28	0.621	1.04	0.355	0.06	0.824
$E \times B$	1	<0.01	0.998	0.00	0.989	0.21	0.666	0.04	0.851
$E \times n$	1	0.01	0.937	0.65	0.458	0.29	0.611	0.22	0.656
$A \times B$	1	71.95	<0.001	38.13	0.002	53.04	0.001	183.73	<0.001
$A \times n$	1	140.16	<0.001	91.88	<0.001	159.34	<0.001	348.90	<0.001
$B \times n$	1	3.12	0.137	0.59	0.478	1.63	0.258	1.32	0.302

注: $P>0.05$ 表明该因素影响不显著; $0.01<P<0.05$ 表明该因素具有显著性; $P<0.01$ 表明该因素具有高度显著性。

3 无头铆钉安装干涉量预测建模

3.1 多元非线性回归预测模型构建

多元非线性回归预测模型是通过样本数据进行非线性函数拟合,再采用拟合函数来达到预测响应值的目的,常用的函数形式有幂函数、指数函数、对数函数等。由于幂函数具有较强的泛化能力^[12,24-25],本研究选用其作为预测模型的函数形式,基本形式如下

$$y = a_0 + a_1x_1^{b_1} + \cdots + c_1x_1x_2 + \cdots \tag{5}$$

根据正交试验分析结果可知, A 与 B 对干涉量的影响较大呈负相关, n 呈正相关,故 A 与 B 处于最小值, n 处于最大值时。此时该组合处于极限位置状态,会导致干涉量急剧增大,与其余大多数参数组合结果相差较大,反之亦然。在实际的工程应用当中,不存在铝合金材料处于极限参数状态,因此在建立数据集时将极限状态组合剔除,以防止产生的异常数据对预测模型产生干扰。表 3 中的 25 组正交

试验数据并不存在极限参数组合,将其作为样本数据,利用 MATLAB 中的 nlinfit 函数建立非线性回归模型。根据第 2.2.2 节显著性分析结果,将显著性较低项进行剔除,即 $E \times n$ 、 $E \times A$ 、 $B \times n$ 和 $E \times B$ 4 个交互作用项,得到 G_1 、 G_2 、 G_3 、 G_4 铆接干涉量多元非线性回归预测模型如下

$$G_1 = -1.802\,2 + 8.035\,3x_1^{-0.282\,1} + 91.891\,6x_2^{-0.956\,5} + 5.942\,7x_3^{-0.302\,4} + 1.079\,5x_4^{0.951\,5} - 1.340\,7 \times 10^{-6}x_2x_3 - 0.001\,9x_2x_4 \tag{6}$$

$$G_2 = -1.715\,3 + 3.437\,4x_1^{-0.215\,1} + 206.163\,7x_2^{-1.314} + 1.645\,5x_3^{-0.288\,2} + 0.388\,7x_4^{0.932\,3} + 3.721\,3 \times 10^{-7}x_2x_3 - 6.563 \times 10^{-4}x_2x_4 \tag{7}$$

$$G_3 = -0.719\,7 + 3.391\,7x_1^{-0.236\,7} + 60.223\,3x_2^{-1.053\,9} + 2.090\,7x_3^{-0.322\,2} + 0.357\,4x_4^{0.820\,2} + 4.602\,2 \times 10^{-7}x_2x_3 - 6.161\,9 \times 10^{-4}x_2x_4 \tag{8}$$

$$G_4 = -1.365\,3 + 6.233x_1^{-0.283\,8} + 87.275\,1x_2^{-1.022\,7} + 5.097x_3^{-0.312\,3} + 0.979\,9x_4^{1.068\,7} + 1.164\,2 \times 10^{-6}x_2x_3 - 0.001\,8x_2x_4 \tag{9}$$

式中： x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 分别代表 E 、 A 、 B 和 n 的数据值。

3.2 多元非线性回归预测模型验证

通过建立的 4 个多元非线性预测模型,可以求出在确定工艺条件下 G_1 、 G_2 、 G_3 和 G_4 无头铆钉安装干涉量的预测值。由于预测模型是基于五水平-无交互作用正交试验数据建立的,因此本节选用另一组二水平-有交互作用的正交试验数据进行验证分析,其中试验 2、7、10 和 15 中的材料参数组合处于极限位置状态,将其剔除。

利用有限元分析得到的正交试验数据与通过回归模型求出的预测数据进行对比,结果见图 7。由图 7 可以看出,回归模型预测值与仿真模拟值趋势变化一致,且预测误差都不超过 10%,表明建立的多元非线性回归模型可以有效预测 G_1 、 G_2 、 G_3 和 G_4 无头铆钉安装干涉量水平。本文预测模型可以通过输入连接件材料参数得到相应的干涉量预测值,若在铆接过程中铆钉材料或工艺条件发生变化,只需在有限元建模过程中对铆钉材料属性及载荷设定进行相应地改变,并重复正交实验以及预测模型构建过程即可得到相应的无头铆钉安装干涉量预测模型。这表明本文预测方法具有较高普适性。

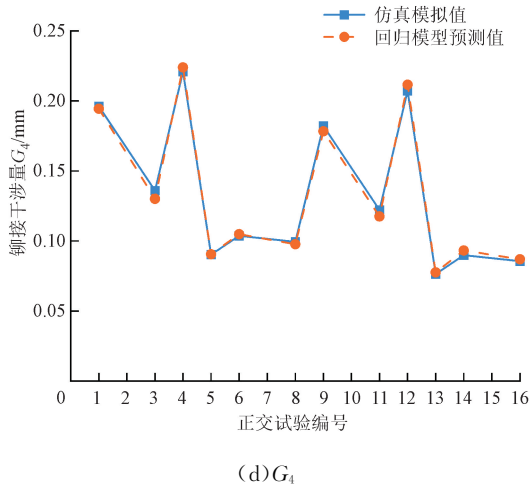
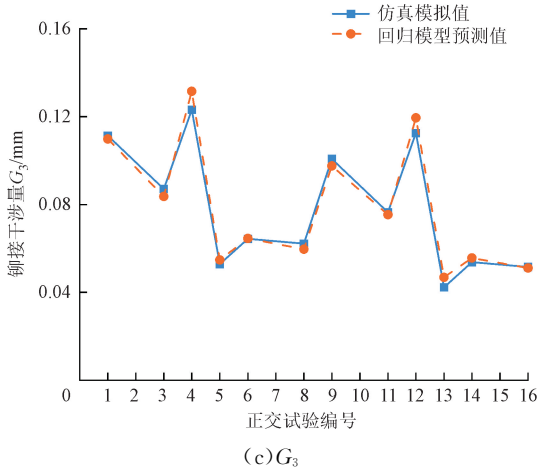
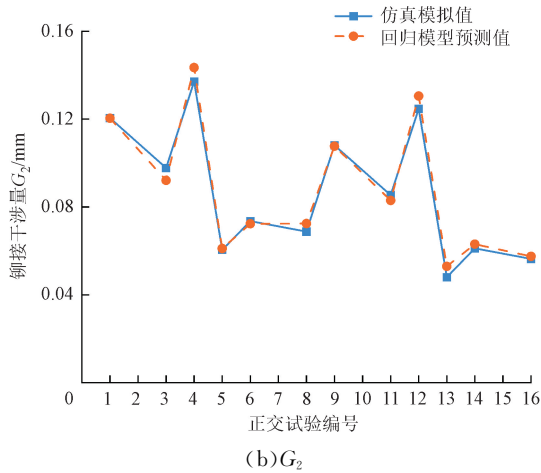
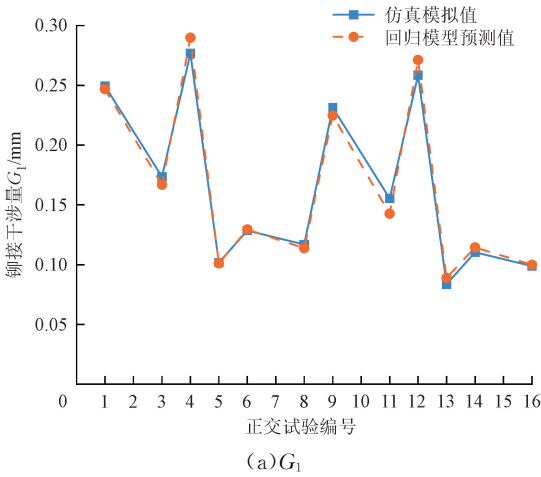


图 7 铆接干涉量预测值和模拟值对比

Fig. 7 Comparison of the predicted and simulated values of riveting interference

4 结 论

本文采用有限元正交模拟方法研究了被连接件材料性能参数对干涉量的影响规律,建立了无头铆钉安装干涉量多元非线性回归预测模型,研究的主要结论如下。

(1)在确定铆接工艺条件下,屈服强度对干涉量的影响最大且呈负相关,应变强度指数影响次之且呈正相关,而弹性模量和强化系数相较于屈服强度来说影响较弱。

(2)在两因素交互影响中,屈服强度跟应变强度指数和强化系数的交互作用影响具有高度显著性,甚至高于个别单一因素的影响作用。因此,在进行铆接干涉量的影响研究时,不应忽略各因素间的交互作用。

(3)基于显著性分析研究结果建立了 G_1 、 G_2 、 G_3

和 G_4 干涉量回归预测模型,验证结果表明,模拟值与预测值之间趋势变化一致,误差范围小于 10%,表明回归预测模型对干涉量预测具有有效性,为实际铆接试验提供了理论指导。

参考文献:

- [1] 吕九九,张秀艳,马兴海,等. 无头铆钉双面鼓形镦头成形工艺与性能分析 [J]. 机械工程与技术, 2018, 7(5): 344-355.
LÜ Jiujie, ZHANG Xiuyan, MA Xinghai, et al. Forming technology and performance analysis of headless rivet with double drum upsetting head [J]. Mechanical Engineering and Technology, 2018, 7(5): 344-355.
- [2] 王仲奇,常正平,郭飞燕,等. 大型飞机壁板无头铆钉干涉连接技术 [J]. 航空制造技术, 2015(4): 34-39.
WANG Zhongqi, CHANG Zhengping, GUO Feiyan, et al. Interference fit technology of slug rivet in large aircraft panel [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(4): 34-39.
- [3] DE RIJCK J J M, HOMAN J J, SCHIJVE J, et al. The driven rivet head dimensions as an indication of the fatigue performance of aircraft lap joints [J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29(12): 2208-2218.
- [4] KIM K Y, SIM J, JANNAT N E, et al. Challenges in riveting quality prediction: a literature survey [J]. Procedia Manufacturing, 2019, 38: 1143-1150.
- [5] 曹增强,冯东格. 理想干涉配合铆接 [J]. 航空科学技术, 2012(4): 84-86.
CAO Zengqiang, FENG Dongge. Ideal interference fit riveting [J]. Aeronautical Science & Technology, 2012(4): 84-86.
- [6] PAN Minghui, TANG Wencheng, XING Yan, et al. Numerical simulation analysis for deformation deviation and experimental verification for an antenna thin-wall parts considering riveting assembly with finite element method [J]. Journal of Central South University, 2018, 25(1): 60-77.
- [7] CHERAGHI S H, KRISHNAN K, BAJRACHARYA B. Effect of variations in the riveting process on the quality of riveted joints [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 39(11): 1156-1156.
- [8] 刘连喜,李西宁,王仲奇,等. 无头铆钉自动钻铆工艺试验研究 [J]. 西北工业大学学报, 2013, 31(1): 77-82.
- LIU Lianxi, LI Xining, WANG Zhongqi, et al. Semi-empirical research on automatic drilling and riveting process of headless rivet [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2013, 31(1): 77-82.
- [9] 李超,王仲奇,常正平,等. 基于BP神经网络和多目标粒子群算法的自动钻铆工艺参数优化方法 [J]. 航空制造技术, 2021, 64(23): 94-102.
LI Chao, WANG Zhongqi, CHANG Zhengping, et al. Automatic drilling and riveting process parameter optimization method based on BP neural network and multi-objective particle swarm optimization algorithm [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2021, 64(23): 94-102.
- [10] 李艳,于克杰,李小雷. 铆钉材料对铆接变形影响的有限元分析 [J]. 机床与液压, 2013, 41(4): 50-52.
LI Yan, YU Kejie, LI Xiaolei. Finite element analysis for the influence of rivet materials on rivet deformation [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2013, 41(4): 50-52.
- [11] AMAN F, CHERAGHI S H, KRISHNAN K K, et al. Study of the impact of riveting sequence, rivet pitch, and gap between sheets on the quality of riveted lap joints using finite element method [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67(1): 545-562.
- [12] 陈贵坤,曾凯,邢保英,等. 铝合金自冲铆工艺参数的多元非线性回归模型 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(22): 227-234.
CHEN Guikun, ZENG Kai, XING Baoying, et al. Multiple nonlinear regression model of process parameters for aluminum alloy self-piercing riveting [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(22): 227-234.
- [13] CHANG Zhengping, WANG Zhongqi, ZHANG Jinming, et al. Investigation of riveting parameters influence on the riveted joints deformation during slug rivet installation [C]//ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. New York, NY, USA: ASME, 2016: V002T02A027.
- [14] 陈超,赵升吨,崔敏超,等. 铆压重塑形工艺的铆钉优化与试验研究 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(3): 94-100.
CHEN Chao, ZHAO Shengdun, CUI Minchao, et al. Rivet optimization and experimental research on the reshaping method [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(3): 94-100.
- [15] 王雷,李玉龙,索涛,等. 航空常用铝合金动态拉伸力学性能探究 [J]. 航空材料学报, 2013, 33(4): 71-77.

- WANG Lei, LI Yulong, SUO Tao, et al. Mechanical behavior of commonly used aeronautical aluminum alloys under dynamic tension [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2013, 33(4): 71-77.
- [16] 王运, 张昌明, 张昱. 航空 Al7050 合金的静动态力学特性研究及 JC 本构模型构建 [J]. *材料导报*, 2021, 35(10): 10096-10102.
- WANG Yun, ZHANG Changming, ZHANG Yu. Study on static and dynamic mechanical properties of aviation Al7050 alloy and construction of JC constitutive model [J]. *Materials Reports*, 2021, 35(10): 10096-10102.
- [17] 冯振宇, 李恒晖, 刘义, 等. 中低应变率下 7075-T7351 铝合金本构与失效模型对比 [J]. *材料导报*, 2020, 34(12): 12088-12093.
- FENG Zhenyu, LI Henghui, LIU Yi, et al. Comparison of constitutive and failure models of 7075-T7351 alloy at intermediate and low strain rates [J]. *Materials Reports*, 2020, 34(12): 12088-12093.
- [18] BLANCHOT V, DAIDIE A. Riveted assembly modeling: study and numerical characterisation of a riveting process [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 180(1/3): 201-209.
- [19] 常正平, 王仲奇, 张津铭, 等. 采用局部-整体映射模型的壁板铆接变形预测 [J]. *西安交通大学学报*, 2018, 52(1): 115-122.
- CHANG Zhengping, WANG Zhongqi, ZHANG Jinming, et al. Prediction of riveting deformation of aircraft panel using local-global mapping approach [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2018, 52(1): 115-122.
- [20] 常正平, 王仲奇, 王斌斌, 等. 基于铆头不均匀变形的压铆力建模 [J]. *航空学报*, 2016, 37(7): 2312-2320.
- CHANG Zhengping, WANG Zhongqi, WANG Binbin, et al. Riveting force computation model based on formed head inhomogeneous deformation [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2016, 37(7): 2312-2320.
- [21] 刘平, 张开富, 李原. 铆接变形及其有限元分析 [J]. *航空制造技术*, 2008(22): 94-97.
- LIU Ping, ZHANG Kaifu, LI Yuan. Rivet deformation and its FE analysis [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2008(22): 94-97.
- [22] 袁立. 航空制造工程手册: 飞机装配 [M]. 2 版. 北京: 航空工业出版社, 2010: 248-264.
- [23] BOX G E P, HUNTER J S, HUNTER W G. Statistics for experimenters: design, innovation, and discovery [M]. 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley-Interscience, 2005.
- [24] 魏世丽. 直接观测值回归与间接观测值回归方法的应用研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
- [25] 马涛, 马源, 黄晓明. 基于多元非线性回归的智能压实关键参数最优解 [J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2023, 53(7): 2067-2077.
- MA Tao, MA Yuan, HUANG Xiaoming. Optimal combination of key parameters of intelligent compaction based on multiple nonlinear regression [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2023, 53(7): 2067-2077.

(编辑 杜秀杰)