

基于遗传算法的抽芯铆钉安装工艺参数优化

何彪, 莫宁宁, 冯治国
(贵州大学 机械工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 为了提升 TA1 钛合金薄壁钉套鼓包成形质量, 采用响应面法与遗传算法对抽芯铆钉安装工艺参数进行优化。利用 Box-Behnken 设计法, 分析了夹层厚度 H 、芯杆行程 S 、夹层孔径 D 以及芯杆速度 V 对鼓包直径 L 和芯杆拉力 F 的影响, 并建立了预测鼓包直径 L 和芯杆拉力 F 的回归模型。在保证鼓包直径不小于 6 mm 的情况下, 以芯杆拉力最小为优化目标, 利用遗传算法优化了 TA1 钛合金薄壁钉套的压缩参数。结果表明: 夹层厚度 H 对鼓包直径 L 的影响最为显著, 芯杆行程 S 和夹层孔径 D 较为显著, 芯杆速度 V 不显著; 4 个因素对芯杆拉力 F 的影响均显著, 最终得到了 TA1 钛合金薄壁钉套成形质量最优的工艺参数为: $H=4$ mm, $S=2.9$ mm, $D=\Phi 4.22$ mm 以及 $V=5$ mm \cdot s⁻¹。DEFORM-3D 数值模拟结果也证实了优化的工艺参数组合能够保证鼓包成形质量。

关键词: TA1 钛合金; 薄壁钉套; 鼓包; 遗传算法; 抽芯铆钉

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.12.016

中图分类号: TG146

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 12-0130-07

Optimization on installation process parameters for blind rivet based on genetic algorithm

He Biao, Mo Ningning, Feng Zhiguo
(College of Mechanical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: In order to improve the forming quality of TA1 titanium alloy thin-walled rivet bulge, the installation process parameters of blind rivets were optimized by response surface method and genetic algorithm algorithms, and the influences of interlayer thickness H , core rod stroke S , interlayer aperture D and core rod speed V on bulge diameter L and core rod tensile force F were analyzed by Box-Behnken design method. Then, the regression models were established to predict the bulge diameter L and the core rod tensile force F were analyzed. Furthermore, the compression parameters of TA1 titanium alloy thin-walled rivet bulge were optimized by genetic algorithm with the optimization goal of minimizing the core rod tensile force, while ensuring that the bulge diameter was not less than 6 mm. The results show that the interlayer thickness H has the most significant effect on the bulge diameter L , followed by the core rod stroke S and the interlayer aperture D , while the core rod speed V is not significant. The four factors have the significant influences on the core rod tensile force F . The optimal parameters of $H=4$ mm, $S=2.9$ mm, $D=4.22$ mm, and $V=5$ mm \cdot s⁻¹ for the forming quality of TA1 titanium alloy thin-walled rivet bulge are obtained. The numerical simulation results obtained by DEFORM-3D also confirm that the optimized process parameters combination ensures the bulging quality.

Key words: TA1 titanium alloy; thin-walled rivet; bulge; genetic algorithm; blind rivet

钛及钛合金在工程运用中展现出了优异的综合

性能, 而钛合金抽芯铆钉已经在我国航空飞机中大量应用^[1-3]。TA1 钛合金薄壁钉套作为钛合金抽芯铆钉的关键组成部分, 其鼓包成形的塑性变形行为直接影响着铆接质量。因此, 研究不同条件下 TA1 钛合金薄壁钉套的压缩行为对提高抽芯铆钉的铆接质量有重要意义。

近年来, 国内外许多学者对薄壁管件的压缩行为开展了研究。Wu F 等^[4]以薄壁管和网状管为研究对象, 研究了受冲击之后不同类型管的吸能效应, 并分析了薄壁管受压之后的褶皱现象。陈刘静等^[5]

收稿日期: 2024-04-22; 修订日期: 2024-07-15

基金项目: 贵州省优秀青年人才项目 (黔科合平台人才 [2021] 5617 号); 贵阳市科技人才培养项目 (筑科合同 [2021] 43-1 号); 贵州省科技支撑项目 (黔科合支撑 [2023] 一般 308); 贵大人字合基字 (2022) 09 号

作者简介: 何彪 (1977-), 男, 硕士, 讲师

E-mail: 458500012@qq.com

通信作者: 冯治国 (1978-), 男, 博士, 教授

E-mail: zgfeng@gzu.edu.cn

将钛管进行轴压实验。沈柳峰^[6]研究了变壁厚管的力学性能和轴向压缩行为。吴秀敏^[7]研究了非均匀温度场下薄壁管的轴向压缩失稳过程。

上述文献分别以不同类型的薄壁管为研究对象，主要研究了薄壁管的轴向压缩褶皱现象和吸能作用，但对薄壁钉套在夹层约束下的压缩行为需进一步研究。因此，本文以 TA1 钛合金薄壁钉套为研究对象，利用响应面法重点研究不同控制参数对鼓包直径和芯杆拉力的影响，并通过遗传算法进行安装参数的优化。通过上述研究有效地控制鼓包的成形质量，进而为企业提高抽芯铆钉铆接质量提供理论支撑。

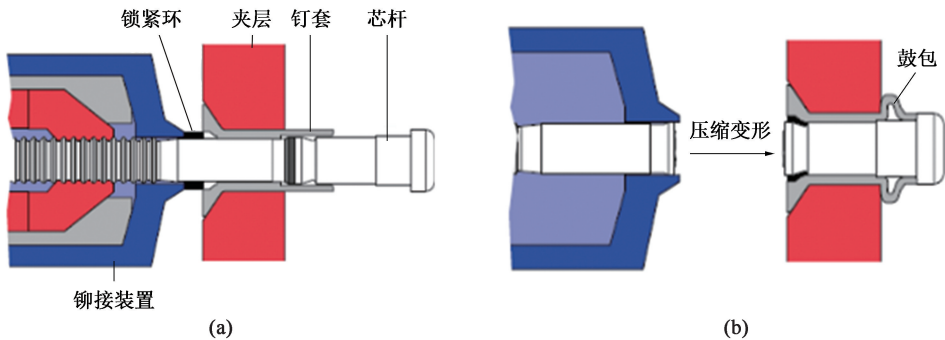


图 1 TA1 钛合金抽芯铆钉示意图
(a) 安装 (b) 鼓包成形
Fig. 1 Schematic diagram of TA1 titanium alloy blind rivet
(a) Installation (b) Bulge forming

赖钉套的轴向压缩变形形成鼓包从而对夹层进行机械锁紧，因而薄壁钉套的鼓包塑性变形行为对抽芯铆钉铆接的可靠性有较大的影响。故研究不同参数条件下的薄壁钉套压缩为鼓包的变形行为是确保抽芯铆钉铆接质量的重要保证。

1.2 材料属性

TA1 钛合金薄壁钉套是拉拔态的 TA1 钛合金丝材，先通过多工位冷加工方式，最后通过局部感应加热退火制得的。TA1 钛合金的化学成分如表 1 所示。图 2 为硬度检测仪器与钉套轴向硬度分布示意图。对薄壁钉套按轴向测量维氏硬度值，每隔 0.5 mm 测量 1 个点，载荷为 0.1 kg，加载时间为 4 s，保持时间为 10 s，卸载时间为 4 s。为了保证测量的准确性，重复测量 3 次并取平均值。由图 2 可知，钉套取样点 7~10 区域的维氏硬度值为 120~130 HV，该区域为钉套的主要局部退火区域。取样点 16 附近区域的维氏硬度值略有降低，其主要受该区域冷加工方式的影响。钉套头部和底端的维氏硬度值较高，为非退火区域。

1 有限元模型的建立

1.1 鼓包成形过程

抽芯铆钉主要由芯杆、钉套、锁紧环等组成，如图 1a 所示。钉套鼓包的拉铆成形主要依靠铆接设备对芯杆的轴向拉力。芯杆在拉力作用下轴向运动并对钉套产生轴向压力。在芯杆的作用下，钉套被轴向压缩，当抽芯铆钉钉套铆接变形区材料突破屈服极限失稳后，钉套铆接变形区径向起皱，并最终形成鼓包^[8]。由图 1b 可知，铆接过程中主要依

表 1 TA1 钛合金的化学成分（%，质量分数）
Table 1 Chemical compositions of TA1 titanium alloy
(%, mass fraction)

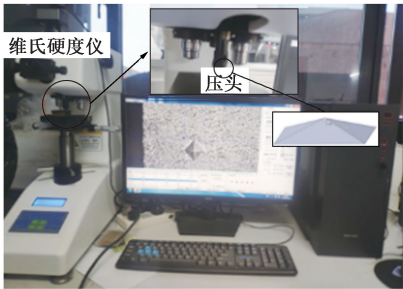
Fe	C	N	H	O	其他元素	Ti
0.25	0.1	0.03	0.015	0.2	单个<0.1	余量

1.3 数值模拟设置

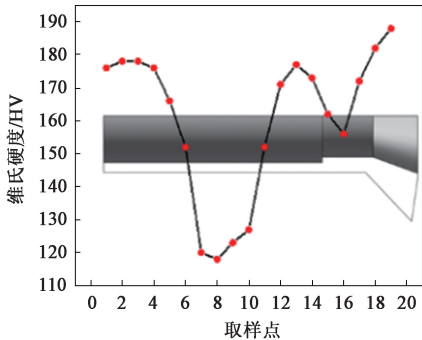
采用 Deform-3D 有限元软件对 TA1 钛合金薄壁钉套进行轴向压缩数值模拟，薄壁钉套压缩模型为轴对称模型，为了减少数值模拟的计算量，只建立该模型的 1/6 进行数值模拟计算。利用 SolidWorks 三维建模软件分别建立薄壁钉套、芯杆以及夹层的实体模型，其中夹层零件示意图如图 3 所示，其中， D 为夹层孔径， H 为夹层厚度。然后将 3 个零件按配合关系装配，最后将模型以 STL 格式保存并载入有限元软件中。

本文采用 Ludwik 本构模型来描述 TA1 钛合金的塑性变形行为^[9]，模型表达式如式（1）所示。该模型同时考虑了应变和应变率对参数 C 的影响，详见式（2）。本文忽略温度对 TA1 钛合金薄壁管流动行为的影响。

特种成形栏目由中国机械总院集团北京机电研究所有限公司赞助刊出



(a)



(b)

图 2 局部感应退火钉套硬度测试装置 (a) 及硬度分布 (b)

Fig. 2 Hardness testing device (a) and hardness distribution (b) of localized induction annealed rivet

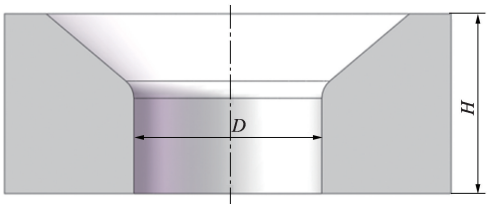


图 3 夹层零件示意图

Fig. 3 Schematic diagram of sandwich part

$$\sigma = (R_{eL} + K\varepsilon^n) \left[1 + C(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) \ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \right] \quad (1)$$

$$C(\varepsilon, \dot{\varepsilon}) = 0.19392\varepsilon + 0.0295\dot{\varepsilon}^{0.1047} \quad (2)$$

式中: σ 为流动应力; R_{eL} 为屈服强度; K 为应变硬化系数; n 为应变硬化指数; ε 为应变; $\dot{\varepsilon}$ 为应变率; $\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率。

为简化模型, 不考虑夹层与芯杆的影响, 故芯杆和夹层设置为刚体, 薄壁钉套为塑性体, 芯杆运动速度设置为 $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。薄壁钉套网格划分采用绝对大小网格划分, 设置网格大小为 0.055, 生成的网格数目为 165448 个, 设置体积补偿, 摩擦因数为 0.08, 设置芯杆行程为 3.1 mm。有限元模型如图 4 所示, 其中, a 为 TA1 钛合金薄壁钉套, 钉套头部轴向固定, b 为芯杆, 箭头方向为芯杆运动方向, c 为夹层。钉套头部固定, 随芯杆轴向运动, 钉套薄壁区域受压产生塑性变形, 最终形成鼓包。

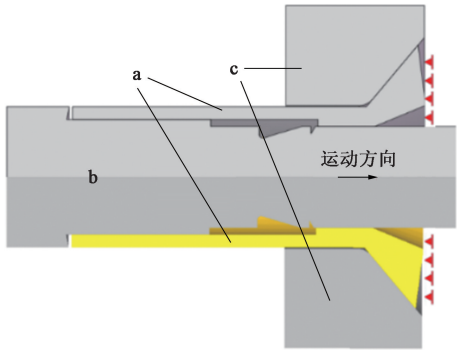


图 4 薄壁钉套有限元模型

Fig. 4 Finite element model of thin-walled sleeve

力太小导致鼓包直径不达标)。为了探究影响鼓包成形区域材料流动情况的因素, 分别取夹层厚度 H 、芯杆行程 S 、夹层孔径 D 以及芯杆速度 V 共 4 个因素, 设计 Box-Behnken 响应实验, 实验因素水平如表 2 所示^[10]。

表 2 Box-Behnken 实验的因素与水平

Table 2 Factors and levels of Box-Behnken experiment

因素	取值
夹层厚度 H/mm	4、5、6
芯杆行程 S/mm	2.9、3.0、3.1
夹层孔径 D/mm	$\Phi 4.14$ 、 $\Phi 4.21$ 、 $\Phi 4.28$
芯杆速度 $V/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	5、10、15

2 响应曲面实验设计及建模分析

2.1 实验方案

鼓包成形过程发生较大的塑性变形, 鼓包直径可用于衡量材料径向流动的程度, 芯杆拉力可以间接反映鼓包成形质量 (力太大导致鼓包过度变形,

2.2 结果讨论分析

2.2.1 实验结果

将 Box-Behnken 响应实验因素水平参数输入到 Design Expert (实验设计软件), 选择相应的 Box-Behnken 响应实验模块, 进行响应实验的设计, 4 因素的响应实验一共 29 组 (最后 5 组为重复实验, 目

的是为了检测数据的可靠性^[11]), 如表 3 所示。按照有限元模型建立的方法, 在有限元软件中分别建立 29 组数值模拟实验, 数值模拟结果完成后, 分别测量 29 组实验的鼓包直径 L 以及查看芯杆拉力 F_L , 其结果如表 3 所示。

表 3 Box-Behnken 实验设计方案及结果

Table 3 Design schemes and results of Box-Behnken experiment

方案	H/mm	S/mm	D/mm	$V/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	L/mm	F_L/kN
1	4	2.9	$\Phi 4.21$	10	$\Phi 6.165$	5.95
2	6	2.9	$\Phi 4.21$	10	$\Phi 6.101$	11.50
3	4	3.1	$\Phi 4.21$	10	$\Phi 6.217$	8.65
4	6	3.1	$\Phi 4.21$	10	$\Phi 6.153$	12.90
5	5	3.0	$\Phi 4.14$	5	$\Phi 5.921$	21.90
6	5	3.0	$\Phi 4.28$	5	$\Phi 5.973$	14.00
7	5	3.0	$\Phi 4.14$	15	$\Phi 5.938$	23.00
8	5	3.0	$\Phi 4.28$	15	$\Phi 5.985$	14.60
9	4	3.0	$\Phi 4.21$	5	$\Phi 6.177$	7.10
10	6	3.0	$\Phi 4.21$	5	$\Phi 6.135$	12.00
11	4	3.0	$\Phi 4.21$	15	$\Phi 6.202$	8.19
12	6	3.0	$\Phi 4.21$	15	$\Phi 6.143$	13.10
13	5	2.9	$\Phi 4.14$	10	$\Phi 5.951$	20.70
14	5	3.1	$\Phi 4.14$	10	$\Phi 5.962$	24.00
15	5	2.9	$\Phi 4.28$	10	$\Phi 5.972$	13.60
16	5	3.1	$\Phi 4.28$	10	$\Phi 5.993$	14.30
17	4	3.0	$\Phi 4.14$	10	$\Phi 6.147$	11.90
18	6	3.0	$\Phi 4.14$	10	$\Phi 6.122$	23.10
19	4	3.0	$\Phi 4.28$	10	$\Phi 6.183$	9.84
20	6	3.0	$\Phi 4.28$	10	$\Phi 6.104$	8.54
21	5	2.9	$\Phi 4.21$	5	$\Phi 5.991$	13.30
22	5	3.1	$\Phi 4.21$	5	$\Phi 6.009$	15.40
23	5	2.9	$\Phi 4.21$	15	$\Phi 5.999$	14.50
24	5	3.1	$\Phi 4.21$	15	$\Phi 6.010$	16.48
25	5	3.0	$\Phi 4.21$	10	$\Phi 6.009$	15.00
26	5	3.0	$\Phi 4.21$	10	$\Phi 5.999$	15.00
27	5	3.0	$\Phi 4.21$	10	$\Phi 6.015$	15.10
28	5	3.0	$\Phi 4.21$	10	$\Phi 6.012$	15.00
29	5	3.0	$\Phi 4.21$	10	$\Phi 6.017$	15.09

回归方程可以通过数学模型量化各因素之间相互作用对目标的影响规律^[12-13]。根据表 3 的数据, 拟合了鼓包直径 L 和芯杆拉力 F_L 的响应回归方程,

如式 (3) 和式 (4) 所示。

$$\begin{aligned}
 L = & -130.53278 - 0.533774H + 1.88893S + \\
 & 63.81375D + 0.039262V - 1.17556 \times 10^{-12}HS - \\
 & 0.264286HD - 0.000850HV + 0.357143SD - \\
 & 0.003500SV - 0.003571DV + 0.162883H^2 - \\
 & 0.536667S^2 - 7.52381D^2 - 0.000415V^2 \quad (3) \\
 F_L = & 9816.19603 + 250.63571H + 567.32143S - \\
 & 5317.04898D + 3.50711V - 3.3HS - 44.57143HD + \\
 & 0.006HV - 92.14286SD - 0.09SV - 0.771429DV - \\
 & 5.068H^2 - 25.3S^2 + 684.59184D^2 + 0.00458V^2 \quad (4)
 \end{aligned}$$

2.2.2 方差分析

方差分析可以评估实验结果和回归方程的准确性^[14-15]。鼓包直径 L 和芯杆拉力 F_L 的方差分析结果如表 4 和表 5 所示。鼓包直径和芯杆拉力回归模型均是显著的 (P 值小于 0.05)。鼓包直径回归响应模型的 F 值为 75.82, P 值小于 0.0001, 该模型可信度较高。 H 、 S 、 D 、 H^2 和 D^2 对鼓包直径的影响最为显著。失拟项的 P 值为 0.0566 (>0.05), 其失拟项不显著, 表明该模型对鼓包直径的拟合效果较好。芯杆拉力回归响应模型的 F 值为 5280.84, P 值小于 0.0001, 该模型可信度较高。 H 、 S 、 D 、 V 、 HS 、 HD 、 SD 、 DV 、 S^2 、 H^2 和 D^2 对芯杆拉力的影响最为显著。失拟项的 P 值为 0.0995 (>0.05), 其失拟项不显著, 表明该模型对芯杆拉力的拟合效果较好。

2.2.3 回归模型精度

为了定量评估鼓包直径和芯杆拉力回归模型的准确性, 采用了绝对平均相对误差 $AARE$ 和相关系数 R 来评估预测精度。 $AARE$ 和 R 的计算公式为^[16-17]:

$$AARE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\sigma_{\text{exp}i} - \sigma_{\text{pi}}}{\sigma_{\text{exp}i}} \right| \times 100\% \quad (5)$$

式中: $\sigma_{\text{exp}i}$ 为第 i 个实验值; σ_{pi} 为第 i 个预测值; N 为总数据量。

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (\sigma_{\text{exp}i} - \bar{\sigma}_{\text{exp}})(\sigma_{\text{pi}} - \bar{\sigma}_{\text{p}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (\sigma_{\text{exp}i} - \bar{\sigma}_{\text{exp}})^2 \sum_{i=1}^N (\sigma_{\text{pi}} - \bar{\sigma}_{\text{p}})^2}} \quad (6)$$

式中: $\bar{\sigma}_{\text{exp}}$ 为平均实验值; $\bar{\sigma}_{\text{p}}$ 为平均预测值。

模型预测相关性结果如图 5、图 6 所示, 鼓包直径回归模型的 $AARE$ 为 0.13%, R 为 0.993; 芯杆拉力回归模型的 $AARE$ 为 0.40%, R 为 0.999。故鼓包直径和芯杆拉力的回归模型的预测结果均较为准确。

表 4 鼓包直径的方差分析结果
Table 4 Variance analysis results of bulge diameter

来源	自由度	平方和	均方	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值	显著性
模型	0.224460185	14	0.01603287	75.82175127	< 0.0001	显著
<i>H</i>	0.00924075	1	0.00924075	43.70083661	< 0.0001	—
<i>S</i>	0.00226875	1	0.00226875	10.72924525	0.005524583	—
<i>D</i>	0.002380083	1	0.002380083	11.25575661	0.004717184	—
<i>V</i>	0.000420083	1	0.000420083	1.986634539	0.180518737	—
<i>HS</i>	1.924E-09	1	1.924E-09	0.0003	0.9858	—
<i>HD</i>	0.000729	1	0.000729	3.447545912	0.084510158	—
<i>HV</i>	7.225E-05	1	7.225E-05	0.341680648	0.568161625	—
<i>SD</i>	2.5E-05	1	2.5E-05	0.118228598	0.736073259	—
<i>SV</i>	1.225E-05	1	1.225E-05	0.057932013	0.813283824	—
<i>DV</i>	6.25E-06	1	6.25E-06	0.029557149	0.865959304	—
<i>H</i> ²	0.168589061	1	0.168589061	797.2819328	< 0.0001	—
<i>S</i> ²	0.000133305	1	0.000133305	0.630416186	0.440454038	—
<i>D</i> ²	0.00963125	1	0.00963125	45.54756944	< 0.0001	—
<i>V</i> ²	0.000589521	1	0.000589521	2.787928328	0.117174829	—
残差	0.002960367	14	0.000211455	—	—	—
失拟项	0.002761167	10	0.000276117	5.544511379	0.056620118	不显著
纯误差	0.0001992	4	4.98E-05	—	—	—
总计	0.227420552	28	—	—	—	—

表 5 芯杆拉力的方差分析结果
Table 5 Variance analysis result of spindle tension

来源	自由度	平方和	均方	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值	显著性
模型	622.37	14	44.46	5280.84	< 0.0001	显著
<i>H</i>	72.57	1	72.57	8620.59	< 0.0001	—
<i>S</i>	12.36	1	12.36	1468.57	< 0.0001	—
<i>D</i>	206.01	1	206.01	24471.52	< 0.0001	—
<i>V</i>	3.17	1	3.17	376.85	< 0.0001	—
<i>HS</i>	0.4225	1	0.4225	50.19	< 0.0001	—
<i>HD</i>	39.06	1	39.06	4640.24	< 0.0001	—
<i>HV</i>	0.0000	1	0.0000	0.0030	0.9573	—
<i>SD</i>	1.69	1	1.69	200.76	< 0.0001	—
<i>SV</i>	0.0036	1	0.0036	0.4276	0.5237	—
<i>DV</i>	0.0625	1	0.0625	7.42	0.0164	—
<i>H</i> ²	164.05	1	164.05	19487.35	< 0.0001	—
<i>S</i> ²	0.3005	1	0.3005	35.70	< 0.0001	—
<i>D</i> ²	71.06	1	71.06	8440.73	< 0.0001	—
<i>V</i> ²	0.0327	1	0.0327	3.88	0.0688	—
残差	0.1179	14	0.0084	—	—	—
失拟项	0.1070	10	0.0107	3.93	0.0995	不显著
纯误差	0.0109	4	0.0027	—	—	—
总计	622.49	28	—	—	—	—

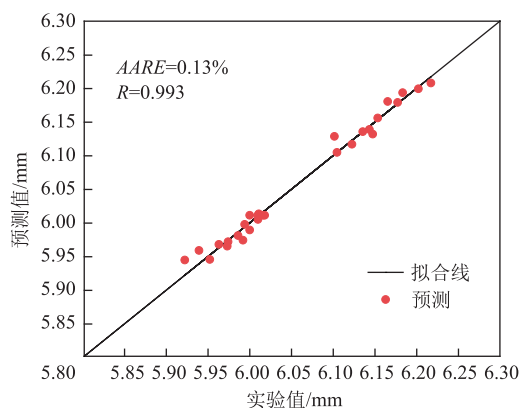


图 5 鼓包直径预测模型的相关性

Fig. 5 Correlation of predictive model for bulge diameter

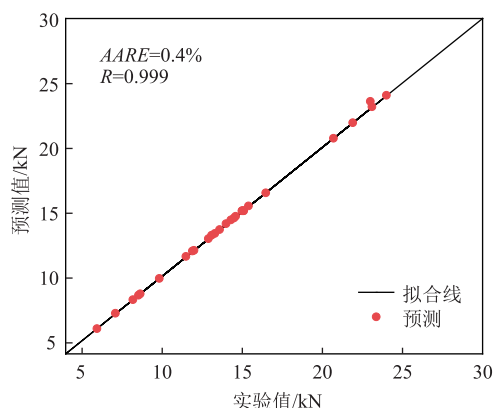


图 6 芯杆拉力预测模型的相关性

Fig. 6 Correlation of predictive model for spindle tension

3 遗传算法优化与验证

3.1 遗传算法优化

遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 得益于自然界的生物进化理论, 通过模拟自然界物种的进化过程对目标进行优化。该算法通过选择、交叉、变异 3 种算子不断提高子代种群的适应度, 在选择操作中, 被选中的概率与个体的适应度值有关, 适应度值越高, 被选中的概率越大。最后, 通过交叉和变异产生更好的个体。以这种方式更新迭代并最终满足迭代计算的终止条件^[18]。遗传算法流程图如图 7 所示。本文利用遗传算法以芯杆拉力最小为优化目标进行参数优化, 目标函数如式 (7) 所示:

$$\text{Min} = F \quad (7)$$

其约束条件如式 (8) 所示:

$$\begin{cases} L(H, S, D, V) \geq \Phi 6 \text{ mm} \\ 4 \text{ mm} \leq H \leq 6 \text{ mm} \\ 2.9 \text{ mm} \leq S \leq 3.1 \text{ mm} \\ \Phi 4.14 \text{ mm} \leq D \leq \Phi 4.28 \text{ mm} \\ 5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} \leq V \leq 15 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} \end{cases} \quad (8)$$

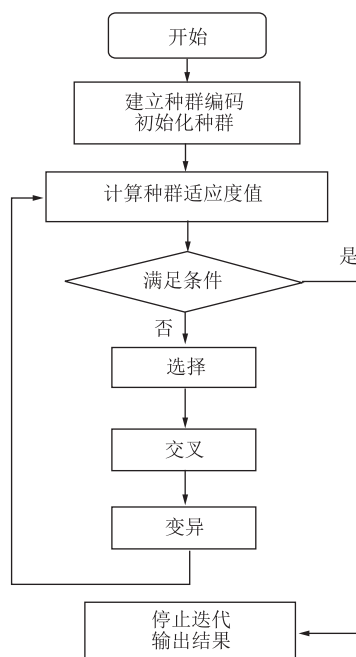


图 7 算法流程图

Fig. 7 Algorithm flow chart

利用遗传算法对上述目标进行优化。将 BP 神经网络预测的芯杆拉力最小为适应度值, 再通过遗传算法寻找非线性映射关系的全局最优值。利用遗传算法寻求目标函数的全局最优, 随着迭代次数增加, 适应度值趋于稳定, 即在满足约束条件下, 得到最小芯杆拉力为 5.498 kN, 所对应的因素分别为 $H = 4 \text{ mm}$, $S = 2.9 \text{ mm}$, $D = \Phi 4.22 \text{ mm}$, $V = 5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

3.2 有限元模拟验证

建立夹层厚度 H 为 4 mm、芯杆行程 S 为 2.9 mm、夹层孔径 D 为 $\Phi 4.22 \text{ mm}$ 、芯杆速度 V 为 $5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的薄壁钉套压缩有限元模型。利用 Deform-3D 有限元软件进行验证, 模拟结果如图 8 所示。鼓包直径 L 达到 $\Phi 6.16 \text{ mm}$ (大于 $\Phi 6 \text{ mm}$), 芯杆拉力 F 为 5.56 kN (与模型预测结果的误差为 1% 左右), 并且鼓包成形质量较好, 无二次鼓包产生 (图 8 中线框所示区域中薄壁钉套材料发生径向流动不明显), 这表明经遗传算法优化所得到的 TA1 钛合金薄壁钉套压缩参数可以保证鼓包的成形质量。

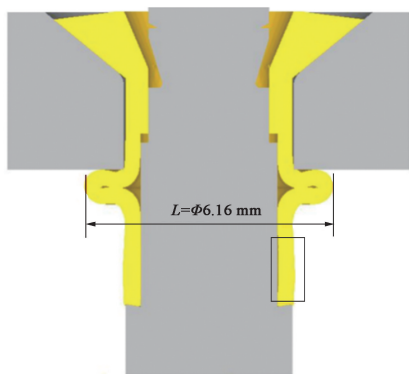


图 8 最优参数下的鼓包成形示意图

Fig. 8 Schematic diagram of bulge forming under optimal parameters

4 结论

(1) 利用方差分析, 得出了夹层厚度 H 对鼓包直径 L 的影响最为显著, 芯杆行程 S 和夹层孔径 D 的影响较为显著, 芯杆速度 V 的影响不显著。4 个因素对芯杆拉力的影响均显著。

(2) 建立了描述 TA1 钛合金薄壁钉套鼓包直径 L 和芯杆拉力 F 的回归预测模型。其中, 鼓包直径预测模型的相关系数 $R=0.993$, 绝对相对误差 $AARE=0.13\%$; 芯杆拉力预测模型的相关系数 $R=0.999$, 绝对相对误差 $AARE=0.4\%$

(3) 利用遗传算法优化理论可得, $H=4\text{ mm}$ 、 $S=2.9\text{ mm}$ 、 $D=\Phi 4.22\text{ mm}$ 、 $V=5\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 鼓包直径 L 不小于 $\Phi 6\text{ mm}$, 且 TA1 薄壁钉套压缩成形质量较好, 二次鼓包现象不明显。

参考文献:

- [1] Li S P, Zhang S G, Li H, et al. Numerical and experimental investigation of fitting tolerance effects on bearing strength of CFRP/Al single-lap blind riveted joints [J]. Composite Structures, 2022, 281: 115022.
 - [2] Qin Y F, Liao Y X, Li G Y, et al. Numerical simulation and parameter analysis of electromagnetic riveting process for Ti-6Al-4V titanium rivet [J]. Coatings, 2021, 11 (8): 878.
 - [3] Wang S, Li Y, Yang Y, et al. Resistance element welding of 7075 aluminum alloy to Ti6Al4V titanium alloy [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 70: 300-306.
 - [4] Wu F, Chen Y T, Zhao S Q, et al. Compression and energy absorption characteristics of additively manufactured reticulated tubes filled with spherical reticulated shells under axial crushing [J]. Composite Structures, 2022, 288: 115415.
 - [5] 陈刘静, 李兰云, 李霄, 等. 厚壁钛管轴向压缩塑性的应力-应变关系 [J]. 中国有色金属学报, 2016, 26 (10): 2093-2101.
- Chen L J, Li L Y, Li X, et al. Plastic stress-strain relationship of thick-walled titanium alloy tube under compressive stress state [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26

(10): 2093-2101.

- [6] 沈柳峰. 退火工艺对 CR235LA 变壁厚薄壁管力学性能和轴向压溃性能影响 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2022.
- [7] 吴秀敏. 非均匀温度场下薄壁管材轴压失稳起皱行为研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2022.
- [8] 黄伟, 古忠涛, 陈薄, 等. TC4 钛合金连接板抽芯铆接数值模拟 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (11): 95-103.
- [9] 邓将华, 唐超, 李春峰, 等. TA1 本构模型的确定 [J]. 塑性工程学报, 2012, 19 (6): 114-117.
- [10] Patnaik L, Maity S R, Kumar S. Modeling of wear parameters and multi-criteria optimization by Box-Behnken design of AlCrN thin film against gamma-irradiated Ti6Al4V counterbody [J]. Ceramics International, 2021, 47 (14): 20494-20511.
- [11] Algin H M. Optimised design of jet-grouted raft using response surface method [J]. Computers & Geotechnics, 2016, 74 (4): 56-73.
- [12] Zhao X D, Zhang X J, Cheng B, et al. Co-optimization of magnetic abrasive finishing behaviors of zirconium tube surfaces with Fe-6.5 wt% Si/SiC abrasives using BP neural network and response surface methodology [J]. Materials Today Communications, 2024, 38: 107901.
- [13] Selvarajan L, Venkataramanan K, Senthilkumar T S. Experimental investigation and optimization of EDM performance measures of MoSi2-SiC intermetallic ceramic composite using RSM with regression equations [J]. Silicon, 2023, 15 (4): 1747-1769.
- [14] Bindhushree S B, Shanmuganathan P S, Saravanabavan D, et al. An investigation of process parameter influences on dissimilar friction stir welding of cast aluminum alloy joints [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2024, 39 (2): 188-206.
- [15] Saran Raj I, Ganesan S. Process parameter analysis of deep cryogenic treated EN 52 Silicon chromium valve steel through Taguchi technique [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2022, 37 (16): 1805-1811.
- [16] Wei G, Peng X, Hadadzadeh A, et al. Constitutive modeling of Mg-9Li-3Al-2Sr-2Y at elevated temperatures [J]. Mechanics of Materials, 2015, 89: 241-253.
- [17] Xu H Z, Zhao B, Lu X, et al. A modified Johnson-Cook constitutive model for the compressive flow behaviors of the snsbu alloy at high strain rates [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28 (11): 6958-6968.
- [18] Hossein M G, Majid M, Shamsi A S, et al. Investigation of the effects of process parameters on hydrodynamic deep drawing of AL-1050 sheet with indentations using genetic algorithm-based optimization [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 129 (9-10): 3949-3964.