

基于有限元模拟的铆接工艺参数优化

马兴海^{1,2} 陈文亮¹ 齐振超¹ 李青² 刘涛³ 安立辉⁴

(1 南京航空航天大学, 南京 210016)

(2 首都航天机械有限公司, 北京 100076)

(3 天津航天长征火箭制造有限公司, 天津 300462)

(4 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

文 摘 为提高铆接质量,从分析孔周应力分布与铆接工艺参数规律的角度入手,利用ABAQUS软件对不同铆接工艺参数的压铆过程进行了有限元分析。深入探究了预制孔倒角、下压量、铆接速度等工艺参数对孔周应力的具体影响规律。通过等值线图和望小特性函数等数据分析手段,成功确定了最优的铆接工艺参数组合,并进行了拉伸试验验证。实验结果表明,采用倒角深度为0.3 mm、铆接速度为15 mm/s、下压量为3.2 mm的最优工艺参数组合,可以显著减少连接域的孔周应力,进而提升铆接质量。

关键词 有限元,孔周应力,铆接工艺参数,铆接质量

中图分类号:V19

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2024.04.003

Optimization of Riveting Process Parameters Based on Finite Element Simulation

MA Xinghai^{1,2} CHEN Wenliang¹ QI Zhenchao¹ LI Qing² LIU Tao³ AN Lihui⁴

(1 Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

(2 Capital Aerospace Machinery Corporation Limited, Beijing 100076)

(3 Tianjin Long March Launch Vehicle Manufacturing Co., Ltd., Tianjin 300462)

(4 China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076)

Abstract In order to improve the quality of riveting, the finite element analysis of the press riveting process under different riveting process parameter was carried out by using ABAQUS software from the perspective of analyzing the hole edge stress distribution and the riveting process parameter rules. The specific influence rules of process parameters such as prefabricated hole chamfer, press-down amount, riveting speed, etc. on the hole edge stress were deeply explored. Through data analysis method such as equivalent contour and small characteristic function, the optimal combination of riveting process parameters was successfully determined and verified by tensile test. The results show that the optimal process parameters with a chamfer depth of 0.3 mm, a riveting speed of 15 mm/s, and a downward pressure of 3.2 mm can significantly reduce the hole edge stress distribution in around the connecting domain and improve the riveting quality.

Key words Finite element, Stress around the hole, Riveting process parameters, Riveting quality

0 引言

铆接工艺,以其过程简便、连接强度稳定可靠、易于故障检查和排除,以及适应复杂结构金属和非金属材料间连接的特点,被广泛应用于航空航天领域^[1-4]。在飞行器整体结构力学性能中,铆接质量扮演着举足轻重的角色,因此,确保高质量的铆接至关重要。影响铆接质量的因素众多,包括铆接方式、铆接力、铆钉的几何尺寸、铆钉与被铆接件的材料特性,以及被铆接件铆钉孔的尺寸公差等。近年来,为

深入理解铆接质量的影响机制,众多学者针对不同的铆接方式和工艺参数进行了深入研究。

在国内外,研究者们广泛运用有限元模型对铆接过程进行了深入研究,旨在揭示铆接各阶段中的变形过程、应力场分布以及铆头材料的塑性变形等规律。同时,这些研究还结合了实验验证,以确保仿真结果的准确性。例如,刘平^[5]和杨威^[6]通过有限元软件模拟了压铆的动态过程,基于仿真结果对铆钉及铆接件的受力情况进行了阶段性划分,从而深入

收稿日期:2022-11-25

第一作者简介:马兴海,1981年出生,高级工程师,主要从事自动钻铆技术、数字化装配技术等工作。E-mail:maxh211@163.com

通信作者:陈文亮,1966年出生,教授、博士生导师,主要从事数字化飞机装配技术等工作。E-mail:cwlme@nuaa.edu.cn

揭示了铆钉的变形过程。马运五等人^[7]则探讨了通过仿真方法优化SPR工艺参数的可行性,并分析了模具形貌及板材屈服强度波动对SPR接头内板材应力分布的影响,进一步阐明了应力场对结构件变形的影响机制。同样,应力场也受到多种参数的影响,张洪双^[8]采用有限元方法对比了成型过程中的不同工艺参数,深入分析了这些参数对铆接残余应力的影响。RANS等人^[9]利用三维有限元模型,研究了整体铝板中通用铆钉和埋头铆钉的安装过程,发现铆钉头下方的残余应力主要受到铆接过程中连接板厚度压缩的影响。在对应力场的深入研究中,借助仿真分析,人们对铆钉镦头成型过程的理解日益清晰。例如,张旭等人^[10]建立的具有耦合关系的有限元模型揭示了绝热剪切带产生的原因,即镦头材料在径向塑性流动过程中的不均匀性。

尽管这些研究显著提升了铆接质量控制水平,但其主要焦点仍集中在电磁铆接、特殊结构及航空领域应用上^[11-12]。相较于飞机制造中广泛研究的铆接工艺,运载火箭由于长期以来的一次性发射特性,其箭体结构壳段的铆接技术相对受到忽视。然而,随着运载火箭重复使用需求的增加,以及自动压铆等先进工艺技术的引入,迫切需要更为科学的理论及试验支撑来推动这一领域的发展。

本文利用有限元软件ABAQUS对压铆过程进行模拟,通过正交设计,进行不同铆接工艺参数的仿真实验。旨在探究预制孔倒角、下压量及铆接速度等关键工艺参数对典型运载火箭叠层结构孔周应力的影响规律。

1 有限元仿真计算

1.1 试件尺寸及材料属性

为探明预制孔倒角、下压量、铆接速度等参数对孔周应力的影响,开展针对典型叠层铆接件的仿真实验研究。参考铆接标准QJ782A—2007,紧固件选用 $\Phi 4$ mm的半圆头铆钉,材料为铝合金2A10。由镦头的高度和直径计算公式(1)和(2)确定半圆头铆钉的钉杆长度为11 mm,直径为4 mm。

$$h_{\min} = 0.4d \quad (1)$$

$$D = (1.5 \pm 0.1)d \quad d \leq 5 \quad (2)$$

Johnson-Cook模型能有效反映应变率以及温度对动态应力应变曲线的影响,且模型中各个参数相对独立容易得到,因此采用该模型来描述材料的本构关系^[12]。铝合金材料2A10的Johnson-Cook模型参数如表1所示。

叠层板的材料为铝合金2A12,单层厚度为3/4铆钉直径,即3 mm,长和宽分别为120、20 mm,叠层板

表1 2A10的Johnson-Cook模型参数

Tab. 1 Johnson-Cook Model parameters of 2A10

材料	A/MPa	B/MPa	n	C	m
2A10	369	684	0.73	0.008 3	1.7

总厚度为6 mm。合金板上的孔直径 $D=4.15$ mm,孔倒角角度为 45° ,倒角深度和实验方案保持一致,试样尺寸如图1所示。铝合金材料2A12的Johnson-Cook模型参数如表2所示。

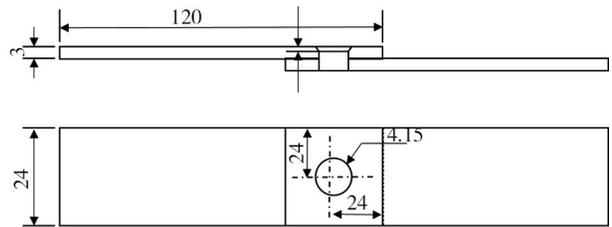


图1 试件尺寸

Fig. 1 Specimen size

表2 2A12的Johnson-Cook模型参数

Tab. 2 Johnson-Cook Model parameters of 2A12

材料	A/MPa	B/MPa	n	C	m
2A12	370.4	1 798.7	0.733 15	0.012 8	1.528 2

1.2 有限元模型

采用ABAQUS软件进行有限元模拟。整个仿真模型的建立过程主要包括几何建模、网格划分、材料定义、分析步设置、接触摩擦处理、边界条件确定和载荷施加,仿真模型如图2所示。为了提高运算速度和仿真精度,铆钉杆与被连接件孔壁周围网格划分较细,其他部位网格划分较粗。网格单元采用八节点六面体实体单元,网格单元数为1 037个,如图3所示。

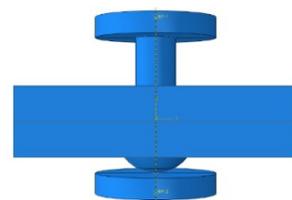


图2 铆接仿真模型

Fig. 2 Simulation model of riveting

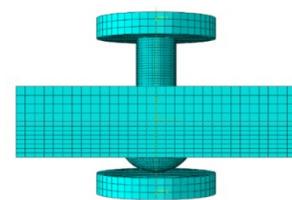


图3 模型网格划分

Fig. 3 Simulation model cells

1.3 仿真实验方案

为降低实验方案复杂性的同时保证实验的可靠性,

针对孔倒角、铆接速度、下压量三个参数建立五水平三因素的正交实验方案,进行孔周应力分析,探究各因素对孔周应力的影响,从而确定优化方案,如表3所示。

表3 正交实验设计表

Tab. 3 Orthogonal experimental design table

方案	倒角深度/mm	速度/(mm·s ⁻¹)	下压量/mm	方案	倒角深度/mm	速度/(mm·s ⁻¹)	下压量/mm
1	0	5	3.2	14	0.2	20	3.2
2	0	10	3.4	15	0.2	25	3.4
3	0	15	3.6	16	0.3	5	3.8
4	0	20	3.8	17	0.3	10	4.0
5	0	25	4.0	18	0.3	15	3.2
6	0.1	5	3.4	19	0.3	20	3.4
7	0.1	10	3.6	20	0.3	25	3.6
8	0.1	15	3.8	21	0.4	5	4.0
9	0.1	20	4.0	22	0.4	10	3.2
10	0.1	25	3.2	23	0.4	15	3.4
11	0.2	5	3.6	24	0.4	20	3.6
12	0.2	10	3.8	25	0.4	25	3.8
13	0.2	15	4.0				

针对正交实验的孔倒角、下压量、铆接速度优化方案,将铆接速度为5、10、15、20、25 mm/s;铆接下压量为2.4、2.6、2.8、3.0、3.2 mm;孔倒角深度为0、0.1、0.2、0.3、0.4 mm作为实验参数,进行实验设计,共进行25组实验。

1.4 仿真结果分析

按照上述正交实验方案开展有限元模拟实验,依据仿真实验结果,绘制倒角、铆接速度、铆接下压量两两之间与最大孔周应力的等值线图与响应曲面图,分析最大孔周应力与倒角、铆接速度、铆接下压量之间的交互关系。

1.4.1 应力云图

当倒角深度分别为0、0.1、0.2、0.3、0.4 mm时,不同铆压速度和下压量对应得到的仿真应力云图,分别如图4~图8所示。

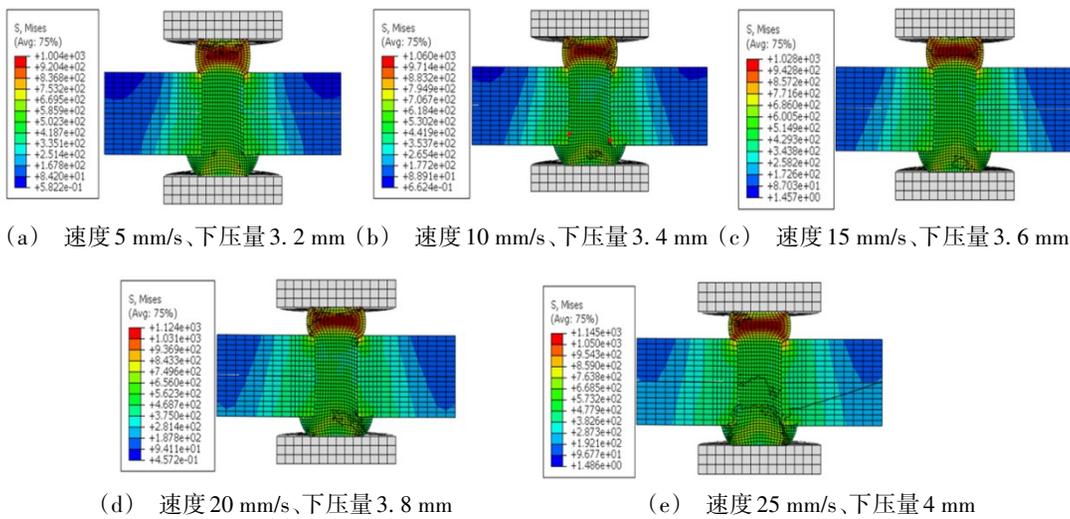


图4 倒角深度为0 mm时的应力云图

Fig. 4 Stress nephogram at a chamfer depth of 0 mm

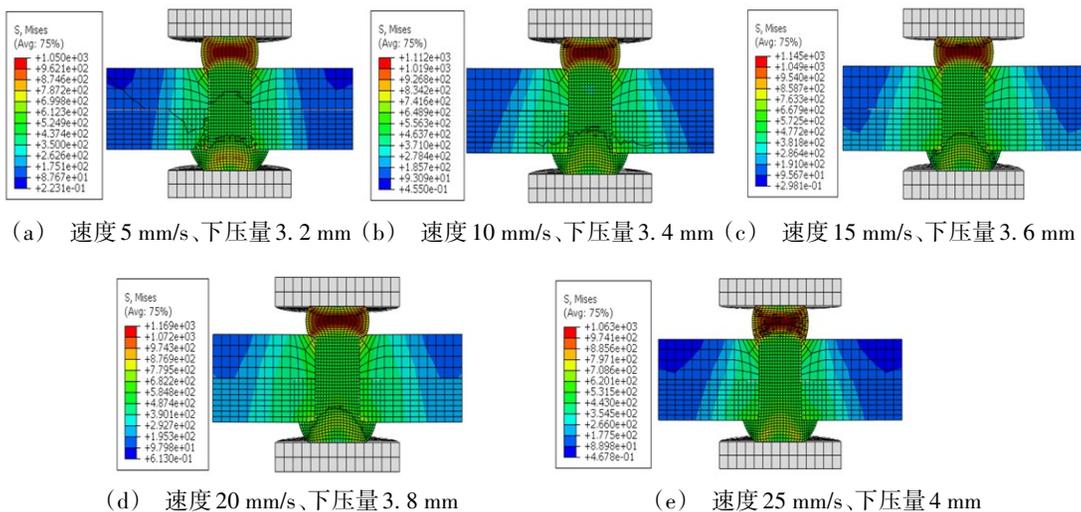
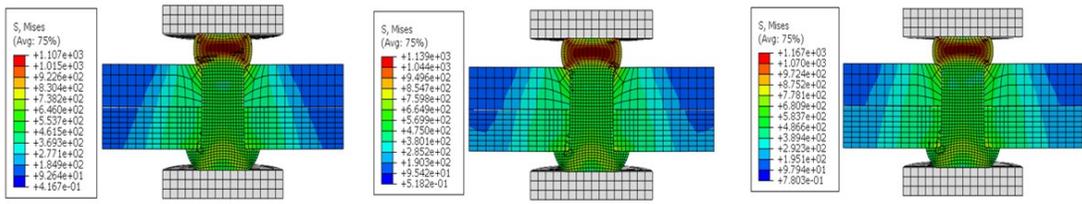
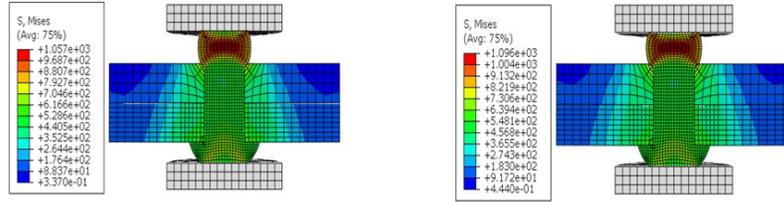


图5 倒角深度为0.1 mm时的应力云图

Fig. 5 Stress nephogram at a chamfer depth of 0.1 mm



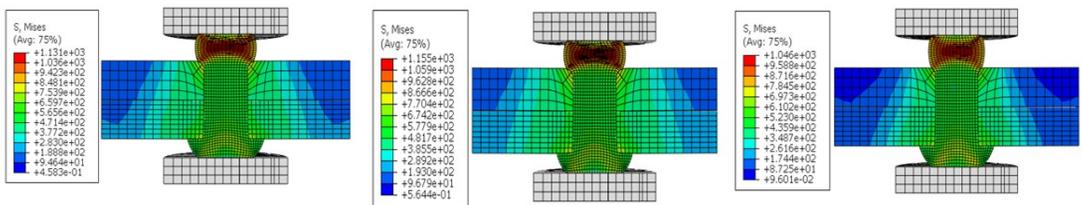
(a) 速度 5 mm/s、下压量 3.2 mm (b) 速度 10 mm/s、下压量 3.4 mm (c) 速度 15 mm/s、下压量 3.6 mm



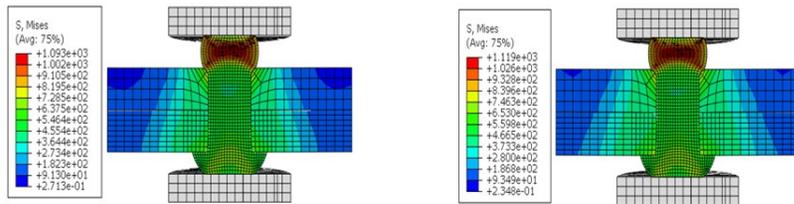
(d) 速度 20 mm/s、下压量 3.8 mm (e) 速度 25 mm/s、下压量 4 mm

图 6 倒角深度为 0.2 mm 时的应力云图

Fig. 6 Stress nephogram at a chamfer depth of 0.2 mm



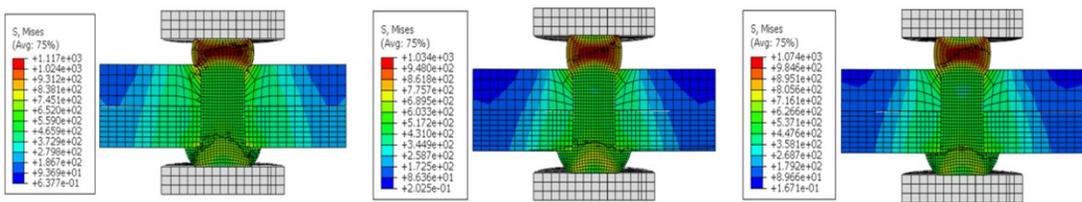
(a) 速度 5 mm/s、下压量 3.2 mm (b) 速度 10 mm/s、下压量 3.4 mm (c) 速度 15 mm/s、下压量 3.6 mm



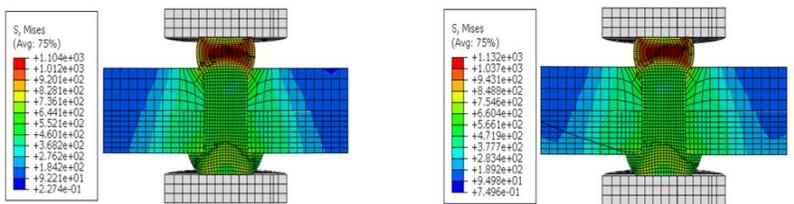
(d) 速度 20 mm/s、下压量 3.8 mm (e) 速度 25 mm/s、下压量 4 mm

图 7 倒角为 0.3 mm 时的应力云图

Fig. 7 Stress nephogram at a chamfer depth of 0.3 mm



(a) 速度 5 mm/s、下压量 3.2 mm (b) 速度 10 mm/s、下压量 3.4 mm (c) 速度 15 mm/s、下压量 3.6 mm



(d) 速度 20 mm/s、下压量 3.8 mm (e) 速度 25 mm/s、下压量 4 mm

图 8 倒角为 0.4 mm 时的应力云图

Fig. 8 Stress nephogram at a chamfer depth of 0.4 mm

1.4.2 孔周应力分析

记录下不同工艺参数组仿真结果中的最大孔周应力,结果记录在表4中。然后绘制倒角、铆接速度、铆接下压量两两之间与最大孔周应力的等值线图与响应曲面图,如图9~图11所示,进一步分析最大孔周应力与倒角、铆接速度、铆接下压量之间的交互关系。然后,利用望小特征函数对最大孔周应力与倒角、铆接速度、铆接下压量进行分析,确定最大孔周应力最小时倒角尺寸、铆接速度、铆接下压量的水平值。

图9显示,当铆接下压量为3.6 mm时,在铆接速度恒定的条件下,最大孔周应力随倒角增大主要呈现单一变化趋势。当倒角深度为0~0.3 mm时,最大孔周应力随倒角增大而减小;但在0.3~0.4 mm内,最大孔周应力则缓慢增大。而当倒角固定时,最大孔周应力则随铆接速度的增大而增大,特别是在倒角深度为0.3~0.4 mm时,倒角对孔周应力的影响明显大于铆接速度。综合分析,最大孔周应力主要集中在倒角深度为0~0.02 mm、铆接速度为20~25 mm/s。

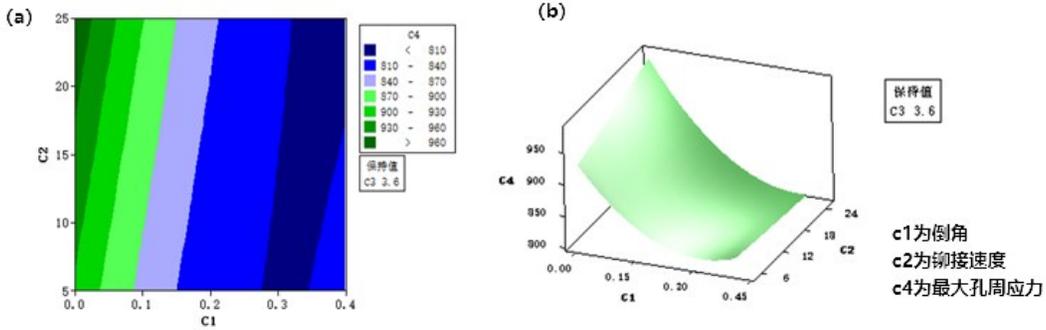


图9 铆接下压量为3.6 mm时最大孔周应力与铆接速度和倒角的等值线图和响应曲面图

Fig. 9 Contour map and response surface map of the maximum hole edge stress with a rivet pressing depth of 3.6 mm and the riveting speed and chamfer

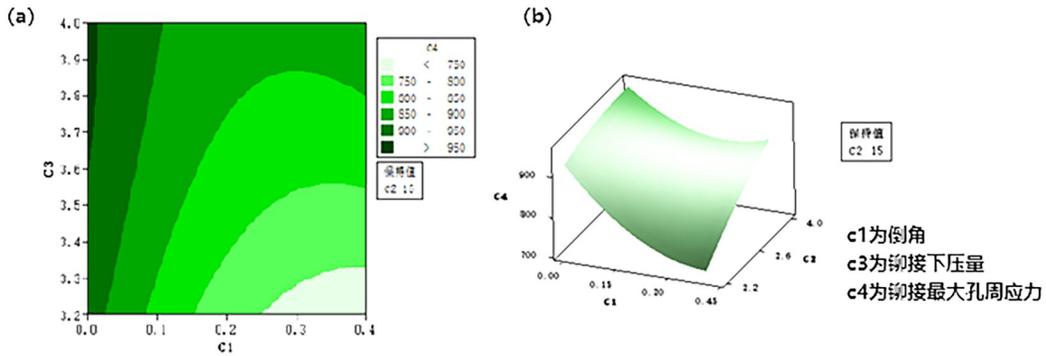


图10 铆接速度为15 mm/s时最大孔周应力与铆接下压量和倒角的等值线图和响应曲面图

Fig. 10 Fig. 11 Contour map and response surface map of the maximum hole edge stress with a riveting speed of 15 mm/s and the riveting speed and chamfer

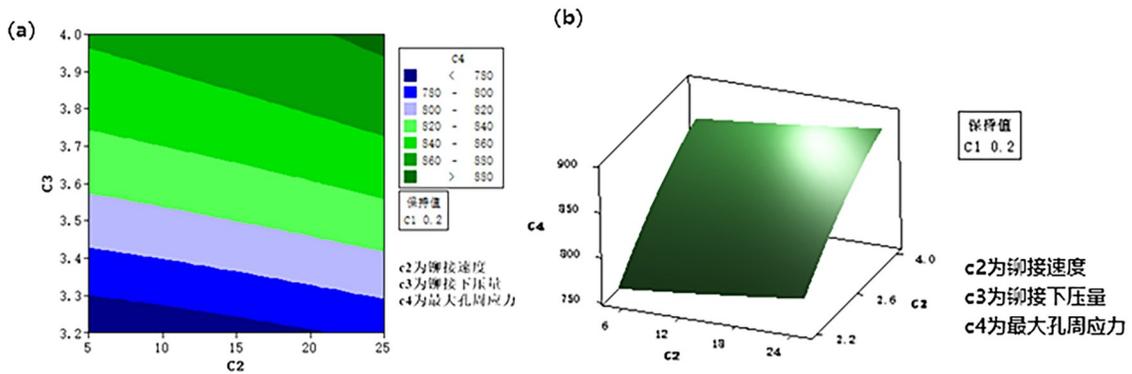


图11 倒角深度为0.2 mm时最大孔周应力与铆接下压量和铆接速度的等值线图和响应曲面图

Fig. 11 Contour map and response surface map of the maximum hole edge stress with a chamfer depth of 0.2 mm and the riveting speed and chamfer

表4 不同方案组的最大孔周应力值

Tab. 4 Maximum hole edge stress of different scheme groups

倒角深度/mm	铆接速度/(mm·s ⁻¹)	下压量/mm	最大孔周应力/MPa	倒角深度/mm	铆接速度/(mm·s ⁻¹)	下压量/mm	最大孔周应力/MPa
0	5	3.2	922.9	0.2	20	3.2	679.3
0	10	3.4	920	0.2	25	3.4	748.1
0	15	3.6	918.8	0.3	5	3.8	870.6
0	20	3.8	967.7	0.3	10	4.0	920.8
0	25	4.0	989.6	0.3	15	3.2	784.3
0.1	5	3.4	840.1	0.3	20	3.4	917.7
0.1	10	3.6	910.8	0.3	25	3.6	856
0.1	15	3.8	941.8	0.4	5	4.0	890.8
0.1	20	4.0	960.1	0.4	10	3.2	693.8
0.1	25	3.2	890.6	0.4	15	3.4	736.9
0.2	5	3.6	783.5	0.4	20	3.6	804
0.2	10	3.8	781.1	0.4	25	3.8	805.7
0.2	15	4.0	785.5				

在铆接速度为 15 mm/s 的条件下,图 10 表明,当倒角固定时,最大孔周应力随下压量的增大呈现单一减小趋势;而下压量恒定时,最大孔周应力则随倒角的增大而减小。根据响应曲面分析,孔倒角对孔周应力的影响显著大于下压量。综合分析,最大孔周应力主要集中在倒角深度为 0~0.01 mm、下压量为 3.6~4.0 mm 的范围内。

由图 11 可以看出,当铆接速度保持不变时,最大孔周应力随下压量增大呈现出单一变化趋势,最大孔周应力随下压量的增大而增大;当下压量保持不变时,最大孔周应力随铆接速度增大也呈现出单一变化趋势,最大孔周应力随倒角增大而增大;由相应曲面分析结果可知,下压量对孔周应力影响的显著性大于铆接速度。综合分析得出:最大孔周应力集中在铆接速度为 22~25 mm/s、下压量为 3.95~4.00 mm。

望小特性^[13]就是不取负值,希望越小越好的计量值质量特性(如:轴套类机械零件的不同心度;零件的摩擦表面的磨损量;测量误差;有害成分含量等均是望小特性值)。望小特征函数的定义为:

$$L(y) = Ky^2 \quad (3)$$

对于望小特征而言,一般规定一个功能上限(记为 $USL=\Delta_0$),当超过功能上限 Δ_0 时,损失为 A_0 。望小特征系数 $K = (A_0/\Delta_0^2)y^2$ 。

对于 n 件产品的质量损失评价问题,其数学表达式为:

$$L(y) = KV_T \quad (4)$$

上式 $L(y)$ 为 n 件产品的质量水平,实质是 n 件产品

质量损失的平均值。 V_T 为望小特性, $V_T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2$ 。

望小特性 SN 比(信噪比)定义如下:

$$Z = -10 \lg(V_T) \quad (5)$$

由式(3)-式(4)变换得

$$V_T = 10^{-Z/10} \quad (8)$$

即:

$$V_T = 10^{-\eta/10} \quad (9)$$

由式(9)可知,SN 比越大,质量损失越小,对于本实验孔周应力值分析,质量损失越小,即孔周应力值越小,波动越小,越稳定。

信噪比主效应如图 12 所示,分析图 12 可得到孔周应力最小方案:倒角为 0.3 mm,速度为 15 mm/s,下压量为 3.2 mm。

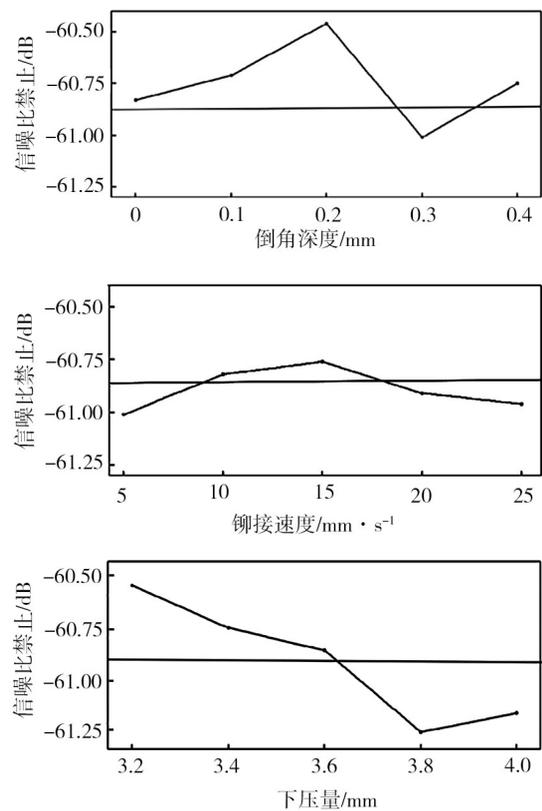


图 12 信噪比主效应图

Fig. 12 Main effect diagram of signal-to-noise ratio

2 结果分析及讨论

仿真分析结果表明:孔倒角对孔周应力影响的显著性大于下压量、下压速度。孔周应力值越小,波动小,越稳定。为进一步获得最佳工艺参数,通过固定铆接速度、铆接下压量工艺参数,调整孔倒角制作铆接试片进行拉伸试验,测量其与拉伸性能的相关性,以进一步选取最佳的孔倒角值。

结合信噪比主效应分析所得孔周应力最小方案,试验选取铆接速度 15 mm/s、铆接下压量 3.2 mm,孔倒角深度为 0.0、0.1、0.2、0.3、0.4 mm。五组不同孔倒角的试件,每组试验分别做三次,以便减少误

差。利用电子万能试验机进行拉伸试验

将五组由拉伸试验获取的应变和应力数据进行处理,拟合成曲线,如图13所示。

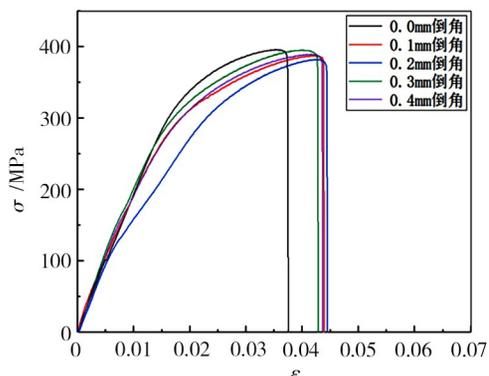


图13 不同实验组的应变-应力曲线

Fig. 13 The stress-strain curves of different experimental groups

所有组拉伸实验破坏形式均为铆钉钉杆被剪断,如图14所示。



图14 单个钉杆被剪断试件

Fig. 14 The specimen with single nail cut

如图13所示,随着孔倒角深度的增大,试样铆钉断裂时拉力先增大后减小,从0.1 mm到0.2 mm增大,0.3 mm到0.4 mm开始减小,不同倒角试件断裂最大拉力值介于0.2 mm和0.3 mm倒角之间。除此之外,结合拉伸应变情况,0.2 mm倒角的试样变形位移较大。综合应力与变形位移曲线图,0.2 mm倒角深度试样的抗拉强度较好。相比于无倒角试样,有倒角的试样孔壁变形位移较大。

3 结论

(1)结合倒角、铆接速度、铆接下压量两两之间与最大孔周应力的等值线图与响应曲面图,借助望小特征函数和信噪比分析,得到铆接件孔周应力最小工艺参数方案:倒角为0.3 mm,速度为15 mm/s,下压量为3.2 mm。

(2)通过对不同倒角的铆接件拉伸实验分析可知:0.2 mm倒角深度试样的抗拉强度较好。相比于无倒角试样,有倒角的试样孔壁变形位移较大。

参考文献

[1] 王珉,薛少丁,蒋红宇,等. 飞机大部件对接自动化制孔单向压紧力分析[J]. 南京航空航天大学学报,2012,44(4): 553-558.

WANF M, XUE S D, JIAN H Y, et al. One-side pressure-force analysis of automatic drilling of aircraft fuselage section-joint

assembly [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012, 44(4): 553-558.

[2] 方俊,曹增强,陈允全,等. 钛合金结构干涉配合铆接工艺研究[J]. 航空制造技术,2015(10):66-78.

FANG J, CAO Z Q, CHEN Y Q, et al. Study on interference-fit riveting process on titanium alloy structure [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(10):66-78.

[3] 李杰. 2A10铝合金铆钉电磁铆接工艺试验及数值模拟研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.

LI J. Experiment and Numerical Simulation of Electromagnetic Riveting on 2A10 Aluminum Alloys Rivet [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.

[4] URBAN M R. Analysis of the fatigue life of riveted sheet metal helicopter airframe joints [J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25(9/11): 1013-1026.

[5] 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 P, ZHANG K F, LI Y. Rivet deformation and its FE analysis [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2008(22): 94-97.

[6] 杨威,崔俊佳,张旭,等. 基于钉杆变形均匀性的锥形半圆头铆钉优化设计研究[J]. 精密成形工程,2021,13(4):85-91.

YANG W, CUI J J, ZHANG X, et al. Dynamic tensile response and failure mechanism of hi-lock bolt joint [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13(4): 85-91.

[7] 马运五,楼铭,李永兵. 铝合金高强度自冲铆接工艺仿真研究[J]. 汽车工艺与材料,2017(8):11-19.

MA Y W, LOU M, LI Y B. Simulation research on self-pierce riveting process of aluminum alloy to high strength steel [J]. Automobile Technology & Material, 2017(8): 11-19.

[8] 张洪双. 铆接工艺参数分析[J]. 机械设计与制造,2011(6):241-243.

ZHANG H S. Analysis of Riveting Process Parameters [J]. Machinery Design and Manufacturing, 2011(6): 241-243.

[9] RANS C, STRAZNICKY P V, ALDERLIESTEN R. Riveting process induced residual stresses around solid rivets in mechanical joints [J]. Journal of Aircraft, 2007, 44(1): 323-329.

[10] 张旭. 电磁铆接过程铆钉动态塑性变形行为及组织性能研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016:61-89.

ZHANG X. Research on Dynamic Plastic Deformation Behavior and Microstructure and Mechanical Properties of Rivets in Electromagnetic Riveting [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016:61-89.

[11] 齐振超,王珉,陈文亮,等. 飞机框间单向压紧制孔预紧固件布置优化[J]. 航空制造技术,2019,62(20):58-63.

QI Z C, WANG M, CHEN W L, et al. Optimization of pre-tightening of arrangement for one-side pressed hole making between aircraft frames [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(20):58-63.

[12] 郭鸯鸯. 电磁铆接铆钉变形及铆模结构优化的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.

GUO Y Y. Research of rivet deformation and structural optimization of riveting die with electromagnetic riveting [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.

[13] 王更新,韩之俊. 望大特性与望小特性的质量损失与信噪比的关系[J]. 机械科学与技术,2000(2):236-238.

WANG G X, HAN Z J. Relationship between SN ratio and quality loss of product in case of LTB and STB [J]. Mechanical Science and Technology, 2000(2): 236-238.