

金属板材渐进成形工艺仿真精度的影响因素

杜顾伟¹, 王 华¹, 吕自贵², 霍智祥²

(1. 南京工业大学 机械与动力工程学院, 江苏 南京 211800; 2. 江苏集萃智能制造技术研究所有限公司, 江苏 南京 211800)

摘要: 通过有限元仿真模拟加工过程来预测实际加工结果, 可避免加工实验材料与能源的浪费, 而有限元仿真精度是保证此项工作的前提。针对金属板材单点渐进成形方法, 选取 1060 铝板设计正交实验, 对每组参数进行实验加工, 并利用 Abaqus 进行有限元仿真, 将仿真结果与实验结果进行对比, 详细分析了成形角度、成形深度、层进给量、初始板厚对仿真精度的影响关系, 包括深度误差、侧壁角度误差和侧壁厚度误差。结果表明: 初始板厚对仿真与实验结果各项误差的影响最为显著, 各因素对深度误差的影响顺序为: 初始板厚>层进给量>成形角度>成形深度; 对侧壁角度误差和侧壁厚度误差的影响顺序为: 初始板厚>成形角度>成形深度>层进给量。

关键词: 单点渐进成形; 1060 铝板; 正交实验; 仿真精度; 显著性分析

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.12.010

中图分类号: TG386

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 12-0068-07

Influencing factors on simulation accuracy of sheet metal incremental forming process

Du Guwei¹, Wang Hua¹, Lyu Zigui², Huo Zhixiang²

(1. College of Mechanical and Power Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China;

2. Jiangsu Jicui Intelligent Technology Research Institute Co., Ltd., Nanjing 211800, China)

Abstract: The waste of processing experiment materials and energy can be avoided by simulating the processing process and predicting the actual processing results through finite element simulation, and the accuracy of finite element simulation is the premise to ensure this work. Therefore, for the single point incremental forming method of metal sheet, the 1060 aluminum sheet was chosen to design the orthogonal experiment, and each group of parameters was processed by experiment. Then, the finite element simulation was carried out by Abaqus, and the simulation results were compared with the experimental results. Furthermore, the influences of forming angle, forming depth, layer feeding amount and initial sheet thickness on the simulation accuracy were analyzed in detail, including depth error, sidewall angle error and sidewall thickness error. The results show that the initial sheet thickness has the most significant influence on the errors between the simulation and experimental results. The order of influence of various factors on the depth error is initial sheet thickness>layer feeding amount>forming angle>forming depth, and the order of influence on the sidewall angle error and the sidewall thickness error is initial sheet thickness>forming angle>forming depth>layer feeding amount.

Key words: single point incremental forming; 1060 aluminum sheet; orthogonal experiment; simulation accuracy; notability analysis

金属板材单点渐进成形技术是一种新兴的无模柔性成形技术, 与传统的板料成形技术相比, 渐进成形技术采用了“分层制造”的思想, 不需要定制模具而改用简单的支撑和夹具^[1-2]。如图 1 所示, 单点渐进成形技术将三维形状按高度方向离散为多个二维曲面, 通过球形工具头, 按照预先编制好的

轨迹在金属板料上进行逐层挤压成形, 能够在局部区域成形出复杂曲面, 节约模具的研发成本, 缩短生产周期, 适用于小批量、多需求的复杂构件的生产。目前, 该技术逐渐被应用于航天和医疗等领域。

在渐进成形中, 成形精度、成形质量等方面存在的问题是制约单点渐进成形工艺发展的关键, 精度不足主要体现在成形轮廓与理想轮廓的不匹配, 同时板料也可能出现过度减薄的情况, 有限元技术的发展可以辅助研究人员观察、分析板材渐进成形的过程, 并针对这些问题展开研究^[3-4]。钟东等^[5]通过有限元仿真对渐进成形轨迹进行优化、研究, 以提高成形效率及表面成形质量。岳太文等^[6]通过

收稿日期: 2022-01-05; 修订日期: 2022-04-07

基金项目: 江苏省重点研发计划项目 (BE2019007-3)

作者简介: 杜顾伟 (1996-), 男, 硕士研究生

E-mail: dguw961214@163.com

通信作者: 王 华 (1978-), 男, 博士, 教授

E-mail: wanghua@njtech.edu.cn

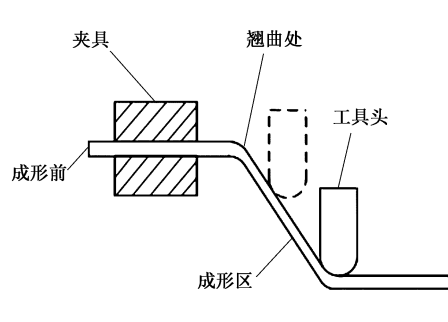


图 1 单点渐进成形原理图

Fig. 1 Principle diagram of single point incremental forming

有限元模型对 6061 铝板进行温控渐进成形工艺多目标优化研究，得出了不同因素对成形力和截面厚度的影响关系。Deokar S U 等^[7]通过 LS-DYNA 软件对单点渐进成形进行回弹及受力分析。Wu J 和 Huang X C^[8]基于 Abaqus 二次开发进行了 CFRP 钢管混凝土参数化建模分析并验证了其可行性。

虽然有限元技术的应用渐广，但是仿真结果存在一定误差，其仿真精度和仿真效率均有待提高。蔡圣等^[9]论述了有限元在渐进成形应用中的关键技术和未来发展趋势，指出其面临的主要问题是效率算法和精度方面的问题。Suresh K 等^[10-11]利用有限元软件进行仿真模拟，论述了网格划分方法对渐进成形仿真的影响，对 EDD 钢的多阶段渐进成形的变形行为进行了初步的有限元研究。目前，渐进成形领域已有对仿真技术的改进研究，但针对仿真结果与实验结果误差上的研究仍较少。本文通过正交实验，利用有限元软件模拟单点渐进成形过程，验证仿真精度，分析不同参数对仿真结果与实验结果之间的成形深度误差、侧壁角度误差、侧壁厚度误差的影响关系，以期参数补偿提升渐进成形仿真精度提供参考。

1 有限元仿真

1.1 有限元模型的建立

本文采用 Abaqus 软件建立有限元模型。由于球形工具头和上压板的模型简单，将其设为解析刚体可以减小计算代价，由于下支撑模型无法用简单的线条构成，将其设为离散刚体。渐进成形的模拟加工存在大变形，是显式、非线性的动力学分析过程，求解器选用动显式，开启并设置合适的质量缩放系数，可以极大提高计算效率并确保结果不出现失真^[12]。加工完成后，需要退刀和拆卸夹具，此时板件会出现一定程度的回弹变形，因此，还需要进行二次仿真，来模拟板件释放约束后的最终状态。不同于加工过程，可以将约束释放过程的仿真看作一

个具有初始应力、应变的结构力学问题，采用隐式算法求解，将板材成形结束后的状态作为该阶段的初始状态进行分析。板材选用 S4R 壳单元进行网格划分，相比于实体单元的优点为厚度方向上不需要划分网格，可以模拟板料厚度方向的应变情况，提高计算效率。下支撑为离散刚体，在 Abaqus 中离散刚体需要划分网格。最终的整体模型如图 2 所示。

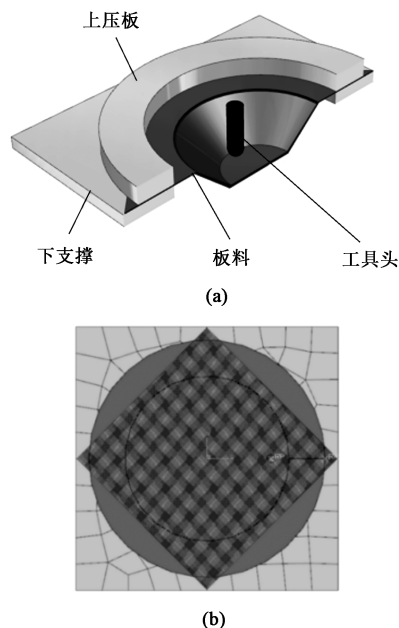


图 2 有限元模型

(a) 三维模型 (b) 网格划分

Fig. 2 Finite element model

(a) Three-dimensional model (b) Meshing

塑性材料的定义需要输入真实应力和对应的真实塑性应变的值，通过材料拉伸实验所得的工程应力、工程应变数据处理转换后能得到该值^[13]。图 3 为实验样件和 1060 铝板的真实应力-真实塑性应变曲线图，具体的转换公式如下。

总体真实应变 ε_t 的表达式为：

$$\varepsilon_t = \ln(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (1)$$

真实应力 σ 的表达式为：

$$\sigma = \sigma_{nom}(1 + \varepsilon_{nom}) \quad (2)$$

真实塑性应变 ε_{pl} 的表达式为：

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon_t - \varepsilon_{el} = \varepsilon_t - \sigma/E \quad (3)$$

式中： ε_{nom} 为工程应变； σ_{nom} 为工程应力； ε_{el} 为真实弹性应变； E 为弹性模量。

1.2 工具头轨迹规划

本文中采用等高线轨迹控制工具头进行定点逐层下压运动。在数值模拟中，常用的工具头轨迹定义方法有两种：(1) 通过 CAM 软件（如 UG）进行渐进成形模拟加工生成刀轨，将轨迹离散为多个小

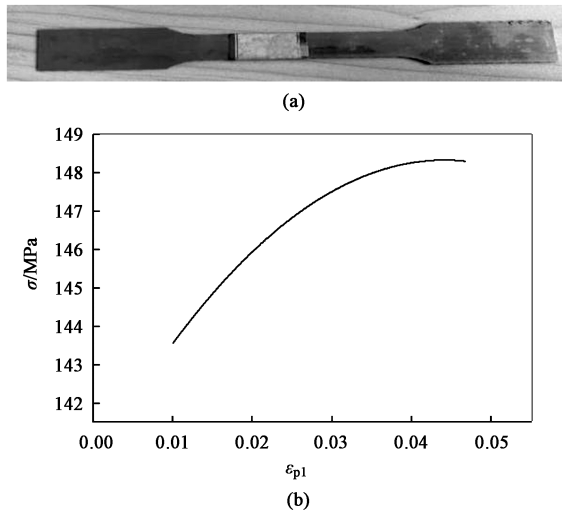


图 3 拉伸试样 (a) 及真实应力-真实塑性应变曲线 (b)

Fig. 3 Tensile specimen (a) and true stress-true plastic strain curve (b)

直线段的形式并编程提取各线段端点关于时间 t 的坐标, 将其输入到仿真软件中^[14]; (2) 直接在仿真软件内以指定位移的方式定义工具头的轨迹^[15]。由于本次多组仿真中成形件的形状均为圆锥台, 第 1 种方法中圆弧轨迹以直线段形式体现, 且经过几次处理, 运用到仿真中会出现轨迹变形失真的情况, 其更适用于螺旋线轨迹的提取。为确保本组仿真中轨迹的精确、连续、平滑, 本文选用第 2 种方式。

编制成形轨迹时需要进行工具头尺寸补偿, 补偿量为 d , 如图 4 所示, 其中, α 为成形角度, R 为球形工具头半径。补偿量为 d 的计算公式如式 (4) 所示:

$$d = R(1 - \cos\alpha)/\sin\alpha \quad (4)$$

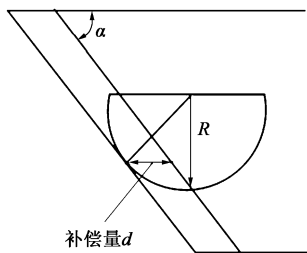


图 4 工具头尺寸补偿示意图

Fig. 4 Schematic diagram of compensation for tool head sizes

板料成形区之外的部分需要进行固定, 在边界条件模块下, 对上压板与下支撑的参考点施加固定约束, 则自由度的约束为 $U_1 = U_2 = U_3 = UR_1 = UR_2 = UR_3 = 0$ (其中, U_1 和 UR_1 分别为 X 方向的平移和旋转自由度, U_2 和 UR_2 分别为 Y 方向的平移和旋转自由度, U_3 和 UR_3 分别为 Z 方向的平移和旋转自由度), 并将夹具与板料之间的摩擦属性设为 ROUGH, 以模拟板料被夹紧的状态。工具头挤压板

料的运动模式如图 5 所示, 根据理想成形角度斜向下进刀到下一层加工面, 然后在当前层做圆周运动挤压板料, 依照该种模式循环运动, 直至完成预设的位移量。仿真中, 工具头的运动轨迹也在边界条件模块下以位移边界条件进行设置, 下压进给运动采用 Smooth 型幅值控制, 可以使其平滑过渡到下一层, 工具头的边界条件为 $U_1 = U_3 = -1$, $U_2 = UR_1 = UR_2 = UR_3 = 0$ 。圆周运动阶段, 工具头的边界条件为 $U_1 = U_2 = 1$, $U_3 = UR_1 = UR_2 = UR_3 = 0$, 由于工具头每层的运动半径不同, 圆周运动的轨迹通过傅里叶级数进行周期型幅值设置, 傅里叶级数的表达式为:

$$\begin{cases} \alpha = A_0 + \sum_{n=1}^N \{A_n \cos[n\omega(t - t_0)] + B_n \sin[n\omega(t - t_0)]\} & t \geq t_0 \\ \alpha = A_0 & t < t_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: n 为傅里叶级数, $n=1, 2, 3, \dots, N$; N 为傅里叶级数的总数; ω 为圆频率; t_0 为起始时间; A_0 为初始幅值; A_n 、 B_n 分别为当前级数的系数。

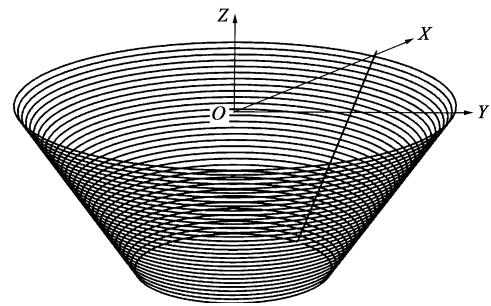


图 5 工具头的运动轨迹

Fig. 5 Motion trajectory of tool head

所以, 当 $N=1$ 、 $t_0=0$ 、 $\omega=2\pi$ 时, 工具头做每一层的圆周运动过程中, 其在 X 方向和 Y 方向关于时间 t 的坐标函数 x 、 y 可以表示为:

$$x = A_0 + A_1 \cos(2\pi t) \quad (6)$$

$$y = B_1 \sin(2\pi t) \quad (7)$$

式中: A_0 、 B_1 为初始幅值, 此处即为每层圆的半径值; A_1 值为 0。

2 正交实验设计

2.1 渐进成形实验设备

渐进成形加工设备采用 FANUC M-900iB700 机械臂, 将球形工具头安装在机械臂末端, 板材采用专用夹具装夹在工作台上, 如图 6 所示。实验材料选用尺寸为 $140 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$ 的不同厚度的 H24 态 1060 铝板, 材料的各项性能参数见表 1。该实验系

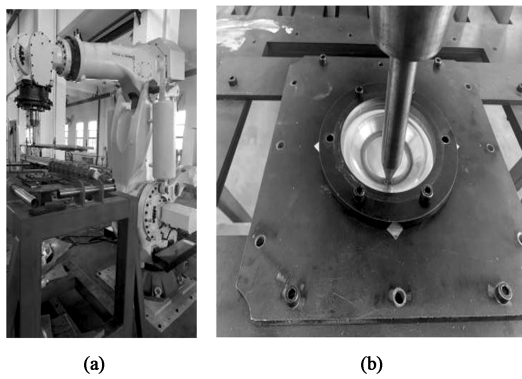


图 6 实验设备及加工过程
(a) FANUC 机械臂 (b) 渐进成形加工过程

Fig. 6 Experimental equipment and processing process

(a) FANUC robotic arm (b) Incremental forming processing process

统采用机械臂 Z 向进给，在 XOY 平面内做圆周运动，成形出开口半径为 50 mm 的圆锥台，工具头的运动路径采用机械臂现场示教编程来制定。

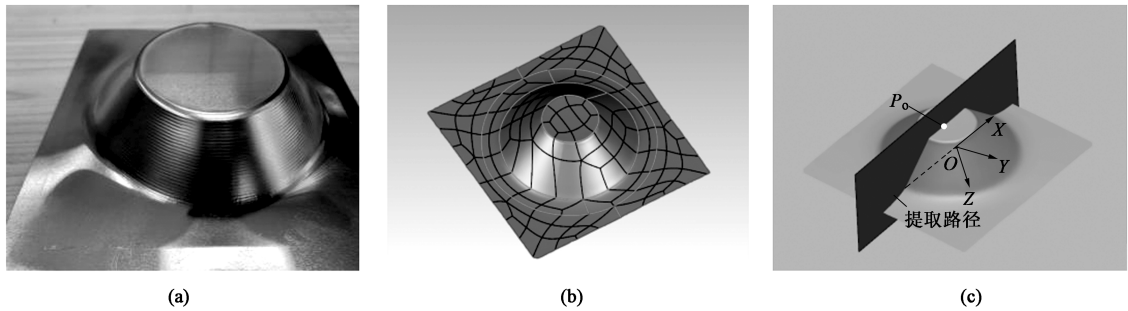


图 7 实验制件及扫描处理结果
(a) 成形件 (b) NURBS 曲面拟合 (c) 截面轮廓提取位置

Fig. 7 Experimental workpiece and scan processing results

(a) Formed part (b) NURBS surface fitting (c) Extraction location of section contour

有限元仿真与实验同样进行 25 组仿真，对应不同的参数组合，得到等效应力、等效应变、厚度等的分布云图。根据仿真结果发现，不同组别间的等效应力、等效应变、厚度沿截面点提取路径的分布情况一致：等效应力最大处在底部凸台边缘加工路径处，等效应变最大处在工具头下压点形成的压痕处，成形件厚度最小处在侧壁中偏上部位。按照指定路径，每 1 mm 定间隔提取对应节点坐标，得到截面轮廓（图 7c），仿真结果云图与截面轮廓对比图如图 8 所示。

本文对渐进成形圆锥台的仿真结果与实验结果中的深度、侧壁实际成形角度、侧壁厚度进行对比，其中深度取圆锥台开口到底部的最大深度值作为深度测量结果。圆锥台的侧壁夹角不能直接测量，需要将侧壁两边翘曲部分以下的点拟合为两条直线计算出其夹角，进而得到圆锥台侧壁的实际成形角度。采用 ST600A 超声波测厚仪测量出侧壁最薄部位的

表 1 1060 铝板材料性能参数

Table 1 Material performance parameters of 1060 aluminum sheet

参数	弹性模量/ GPa	泊松比	密度/ (g · cm ⁻³)	屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa
数值	60.7	0.33	2.71	136.19	143.37

2.2 实验方案

为研究不同因素对仿真件与实验件的深度误差、侧壁角度误差和侧壁厚度误差的影响关系，选取初始板厚 s 、成形角度 α 、成形深度 h 、层进给量 z 共 4 个参数，设计 4 因素 5 水平正交实验。制件的测量采用 HEXAGON RA-SEI 三维激光扫描仪进行测量。将采集好的上表面轮廓数据导入 Geomagic-Studio 软件中，完成数据的整合后对模型进行封装处理，生成 NURBS 曲面，再按指定路径每隔 1 mm 等间距提取指定方向上的点坐标，可得截面轮廓，如图 7 所示，其中， P_0 为提取路径的中点。

厚度，进行对比分析可得结果。实验组别及最终得到的深度、侧壁角度、侧壁厚度误差如表 2 所示。

2.3 结果对比分析

需要分析出各因素对仿真与实验结果之间误差影响的显著性程度，区分主要因素和次要因素，确定实验范围内各因素的最佳组合。表 3 为极差分析表，其中 R_1 、 R_2 、 R_3 分别为各因素对于仿真与实验结果之间的深度、侧壁角度、侧壁厚度误差的极差值。图 9 为极差分析图，分析可得，当成形角度为 42.5°、成形深度为 24 mm、初始板厚为 1.2 mm、层进给量为 1.0 mm 时，仿真结果与实验结果的深度误差最小；当成形角度为 45°、成形深度为 32 mm、初始板厚为 0.8 mm、层进给量为 0.8 mm 时，仿真结果与实验结果的侧壁成形角度误差最小；当成形角度为 50°、成形深度为 20 mm、初始板厚为 0.5 mm、层进给量为 0.8 mm 时，仿真结果与实验结果的厚度误差最小。

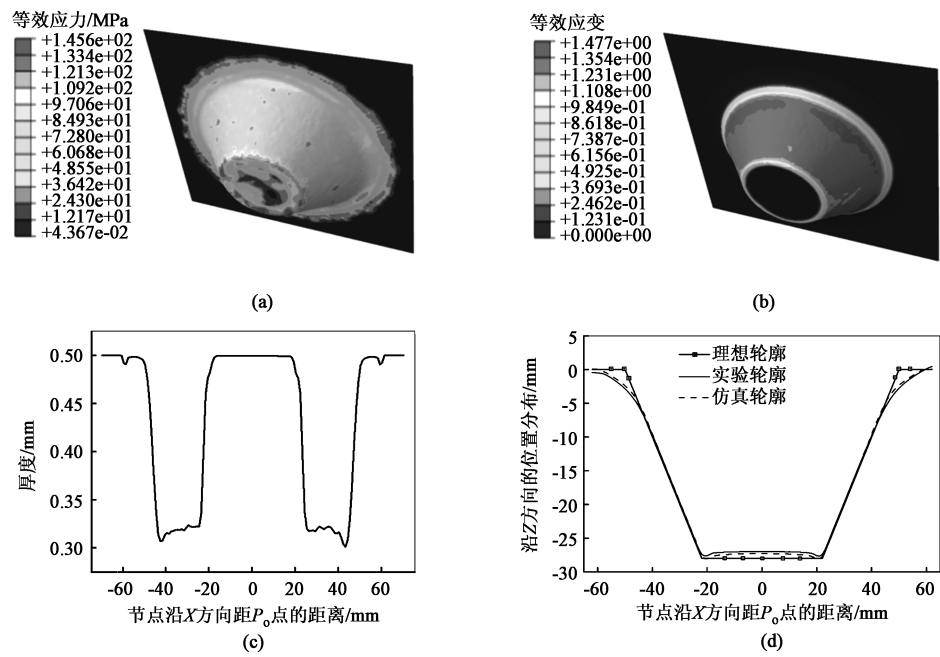


图 8 仿真模拟结果
(a) 等效应力云图 (b) 等效应变云图 (c) 厚度分布图 (d) 截面轮廓对比图

Fig. 8 Numerical simulation results

(a) Equivalent stress nephogram (b) Equivalent strain nephogram (c) Thickness distribution diagram (d) Section contour comparison diagram

表 2 实验方案及结果

Table 2 Experimental schemes and results

组别	成形角度 $\alpha/(\circ)$	成形深度 h/mm	初始板厚 s/mm	层进给量 z/mm	深度误差/ mm	侧壁角度误差/ (\circ)	侧壁厚度误差/ mm
1	45.0	20	1.2	1.0	0.3410	0.2265	0.112
2	45.0	32	1.0	0.2	-0.4059	0.3010	0.064
3	45.0	24	0.8	0.4	-0.5106	0.2228	0.064
4	50.0	20	0.8	0.8	-0.4463	0.5596	0.059
5	42.5	20	1.5	0.5	0.5205	1.5258	0.031
6	42.5	36	0.8	0.2	-0.5931	0.2377	0.060
7	42.5	28	0.5	0.4	-0.8379	0.3227	0.030
8	47.5	28	1.2	0.2	-0.2025	0.3662	0.070
9	45.0	36	0.5	0.5	-0.8559	0.0909	0.022
10	50.0	24	1.5	0.2	0.1650	1.3390	0.028
11	50.0	28	1.0	0.5	-0.3218	0.4727	0.039
12	47.5	20	1.0	0.4	-0.1986	0.6677	0.059
13	50.0	32	0.5	1.0	-0.5739	0.3953	0.009
14	47.5	24	0.5	0.8	-0.7219	0.1921	0.020
15	47.5	32	0.8	0.5	-0.4729	0.1222	0.045
16	42.5	24	1.0	1.0	0.2860	0.5379	0.035
17	47.5	36	1.5	1.0	0.8034	1.3971	0.039
18	50.0	36	1.2	0.4	-0.2938	1.0926	0.075
19	40.0	24	1.2	0.5	0.2794	0.3440	0.129
20	45.0	28	1.5	0.8	0.4189	0.6599	0.078
21	40.0	28	0.8	1.0	-0.2626	0.2069	0.070
22	40.0	32	1.5	0.4	0.3805	0.4664	0.076
23	42.5	32	1.2	0.8	0.2838	0.0462	0.048
24	40.0	36	1.0	0.8	-0.1630	-0.1503	0.060
25	40.0	20	0.5	0.2	-0.7986	0.6774	0.035

表 3 极差分析结果

Table 3 Range analysis results				
极差值	成形角度/ (°)	层进给量/ mm	初始板厚/ mm	成形深度/ mm
R_1	0.226	0.486	1.216	0.141
极差顺序	3	2	1	4
R_2	0.472	0.322	0.808	0.465
极差顺序	2	4	1	3
R_3	0.033	0.009	0.064	0.011
极差顺序	2	4	1	3

由方差分析结果可以清晰地确定各因素对仿真结果与实验结果之间误差影响的显著性程度（显著性对应数值越小，影响程度越显著）以及是否具有统计学意义。由表 4 可得，初始板厚、层进给量、成形角度对仿真与实验结果之间的深度误差的影响显著，是主要因素，成形深度是次要因素，主次顺序为：初始板厚>层进给量>成形角度>成形深度。仿真与实验结果之间的最大成形深度误差的平均值为 1.6%，初始板厚、层进给量与成形深度误差明显呈线性关系，随着初始板厚、层进给量的增加，

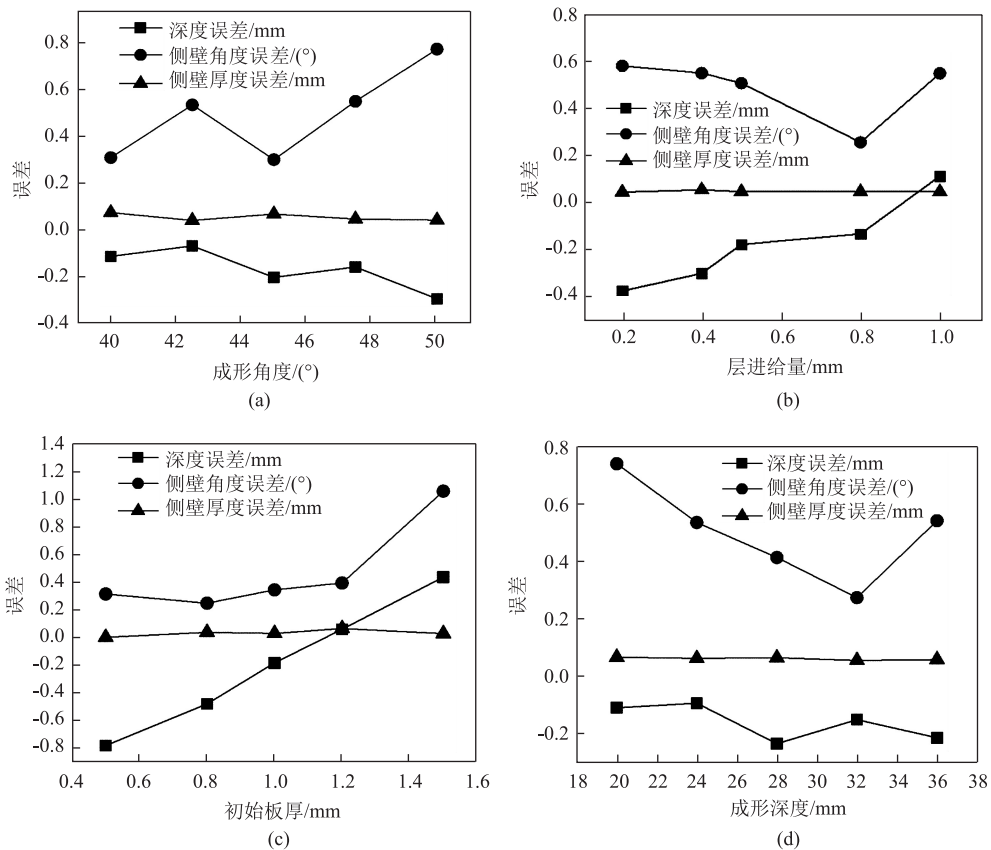


图 9 极差分析图

(a) 成形角度 (b) 层进给量 (c) 初始板厚 (d) 成形深度

Fig. 9 Diagrams of range analysis

(a) Forming angle (b) Feeding amount in each layer (c) Thickness of initial sheet (d) Forming depth

表 4 成形深度方差分析结果

Table 4 Variance analysis results of forming depth					
误差来源	平方和	自由度	均方和	F	显著性
成形角度	0.151	4	0.038	4.910	0.027
层进给量	0.695	4	0.174	22.602	2.04×10^{-4}
初始板厚	4.425	4	1.106	143.87	1.75×10^{-7}
成形深度	0.077	4	0.019	2.510	0.125
误差	0.062	8	0.008		
总计	5.410	24			

仿真模型与实验件的最大成形深度误差逐渐减小。

由表 5 可得，初始板厚对仿真与实验的侧壁角度误差的影响显著，是主要因素，成形角度、成形深度、层进给量是次要因素，主次顺序为：初始板厚>成形角度>成形深度>层进给量，仿真与实验结果之间的角度误差的平均值为 1.06%。由表 6 可得，初始板厚对仿真与实验的侧壁厚度误差的影响显著，是主要因素，成形角度、成形深度、层进给量是次要因素，主次顺序为：初始板厚>成形角度>成形深

表 5 侧壁成形角度的方差分析结果

Table 5 Variance analysis results of sidewall forming angle

误差来源	平方和	自由度	均方和	F	显著性
成形角度	0.768	4	0.192	2.722	0.106
层进给量	0.348	4	0.087	1.233	0.370
初始板厚	1.293	4	0.548	7.770	0.007
成形深度	0.594	4	0.148	2.103	0.172
误差	0.564	8	0.071		
总计	4.467	24			

表 6 侧壁厚度的方差分析结果

Table 6 Variance analysis results of sidewall thickness

误差来源	平方和	自由度	均方和	F	显著性
成形角度	0.005	4	0.001	3.577	0.059
层进给量	2.76×10^{-4}	4	6.91×10^{-5}	0.204	0.929
初始板厚	0.10	4	0.003	7.664	0.008
成形深度	3.94×10^{-4}	4	9.86×10^{-5}	0.291	0.876
误差	0.003	8	3.38×10^{-4}		
总计	0.019	24			

度>层进给量,仿真与实验结果之间的侧壁厚度的平均误差为 9.1%。

3 结论

(1) 对仿真与实验的深度误差的影响顺序为:初始板厚>层进给量>成形角度>成形深度,其中初始板厚、层进给量、成形角度是主要因素,仿真与实验的最大深度的平均误差为 1.6%。随着初始板厚、层进给量值的增加,仿真件与实验件的最终成形深度值越接近,即误差越小。

(2) 对仿真与实验的侧壁角度误差的影响顺序为:初始板厚>成形角度>成形深度>层进给量,其中初始板厚是主要因素,仿真与实验的侧壁成形角度的平均误差为 1.06%。

(3) 对仿真与实验度的侧壁厚度误差的影响顺序为:初始板厚>成形角度>成形深度>层进给量,其中初始板厚是主要因素,仿真与实验的侧壁厚度的平均误差为 9.1%。

参考文献:

- [1] 李燕乐,陈晓晓,李方义,等. 金属板材数控渐进成形工艺的研究进展 [J]. 精密成形工程, 2017, 9 (1): 1-9.
Li Y L, Chen X X, Li F Y, et al. Research development on incremental sheet metal forming process [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2017, 9 (1): 1-9.
- [2] 莫健华,韩飞. 金属板材数字化渐进成形技术研究现状 [J]. 中国机械工程, 2008, (4): 491-497.
Mo J H, Han F. State of the arts and latest research on incremental sheet NC forming technology [J]. China Mechanical Engineering, 2008, (4): 491-497.

- [3] Naranjo J, Miguel V, Martínez-Martínez A, et al. Analysis and simulation of single point incremental forming by ansys [J]. Procedia Engineering, 2015, 132: 1104-1111.
- [4] 叶又,汪锦成,刘亿. 金属板材渐进成形工具头运动策略与成形质量分析 [J]. 精密成形工程, 2020, 12 (4): 139-145.
Ye Y, Wang J C, Liu Y. Toolpath strategies and quality of incremental sheet metal forming [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12 (4): 139-145.
- [5] 钟东,魏目青,王华毕. 金属板料单点渐进成形轨迹优化及模拟研究 [J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2018, 41 (10): 1315-1319, 1371.
Zhong D, Wei M Q, Wang H B. Trajectory optimization and numerical simulation on metal sheet single point incremental forming [J]. Journal of Hefei University of Technology: Natural Science, 2018, 41 (10): 1315-1319, 1371.
- [6] 岳太文,陈晓辉,门正兴,等. 6061 铝合金板数控单点渐进温成形工艺多目标优化 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (12): 59-64.
Yue T W, Chen X H, Men Z X, et al. Mult-objective optimization on NC single point incremental warm forming process for 6061 aluminum alloy sheet [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (12): 59-64.
- [7] Deokar S U, Jain P K, Tandon P, et al. Analysis of springback and force behavior in single point incremental sheet forming through FEA [J]. Materials Today: Proceedings, 2019, 18: 3330-3339.
- [8] Wu J, Huang X C. Parametric modeling of cfrp steel tube concrete based on abaqus secondary development [J]. Journal of Progress in Civil Engineering, 2020, 2 (7).
- [9] 蔡圣,刘欣梅,陈军. 薄板渐进成形数值仿真研究进展 [J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (4): 1-12.
Cai S, Liu X M, Chen J. Research progress on numerical simulation of incremental sheet forming [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (4): 1-12.
- [10] Suresh K, Regalla S P. Effect of mesh parameters in finite element simulation of single point incremental sheet forming process [J]. Procedia Materials Science, 2014, 6: 376-382.
- [11] Suresh K, Regalla S P, Kotkunda N. Finite element simulations of multi stage incremental forming process [J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 5 (2): 3802-3810.
- [12] Hadoush A, Boogaard A H V D. Time reduction in implicit single point incremental sheet forming simulation by refinement-derefinement [J]. International Journal of Material Forming, 2008, 1 (1): 1167-1170.
- [13] 王元清,关阳,刘明,等. 基于钢材真实应力应变关系的研究 [J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2018, 34 (6): 961-970.
Wang Y Q, Guan Y, Liu M, et al. Research on the relationship between real stress and strain of steel [J]. Journal of Shenyang Architecture University: Natural Science Edition, 2018, 34 (6): 961-970.
- [14] Suresh K, Khan A, Regalla S P. Tool path definition for numerical simulation of single point incremental forming [J]. Procedia Engineering, 2013, 64: 536-545.
- [15] 雷奇红. 金属板料单点渐进成形数值模拟及成形缺陷的研究 [D]. 西安: 陕西科技大学, 2017.
Lei Q H. Research on Numerical Simulation and Forming Defect in Single Point Incremental Sheet Metal Forming [D]. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2017.