

仿真模拟多技术辅助作用下的单点增量成形力

王肖烨^{1,2}, 李春磊^{1,2}

(1. 宝鸡文理学院机械工程学院, 721016, 陕西宝鸡;
2. 陕西省机器人关键零部件先进制造与评估省市共建重点实验室, 721016, 陕西宝鸡)

摘要: 为研究多技术辅助作用下的单点增量成形力变化情况,以静压支撑和超声振动两个技术同时辅助单点增量成形为例,对其成形力进行仿真模拟。以圆锥台为目标制件,利用 ABAQUS 对板料、夹具和工具头进行造型装配、材料定义、网格划分和边界约束,借助设定均布载荷和周期幅值,引入静压支撑载荷和超声振动轨迹,建立考虑静压支撑和超声振动的单点增量成形过程有限元仿真模型。仿真模拟成形力发现:垂向力 F_z 整体呈现阶梯式增大变化规律, F_x 与 F_y 整体呈现正弦交错式周期波动规律;垂向力 F_z 远大于水平力 F_x 与 F_y ,是主要成形力;垂向力 F_z 随静压的增大而增大,随振幅和频率增大呈现先减小后增大的变化规律。为验证仿真模拟结果,设计相应的实验方案,结果与仿真结果趋势一致,验证了仿真模拟的正确性。该研究解决了多技术辅助单点增量成形在仿真模拟方面的不足,具有一定的参考和借鉴性。

关键词: 多技术辅助;成形力;仿真模拟

中图分类号: TG386 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202012021 **文章编号:** 0253-987X(2020)12-0176-09



OSID 码

Simulation for Single Point Incremental Forming Force Under Multiple Assistive Technologies

WANG Xiaoye^{1,2}, LI Chunlei^{1,2}

(1. College of Mechanical Engineering, Baoji University of Arts and Science, Baoji, Shaanxi 721016, China;
2. Shaanxi Key Laboratory of Advanced Manufacturing and Evaluation of Robot Key Components, Baoji, Shaanxi 721016, China)

Abstract: To evaluate the change of single point incremental forming force under the multiple assistive technologies, two technologies of static pressure support and ultrasonic vibration simultaneously assisted single point incremental forming are taken as an example to simulate the forming force. The truncated cone is used as the target part, and ABAQUS is used to perform modeling assembly, material definition, meshing and boundary constraints for the sheet metal, fixture and tool head. Under the assumption of uniform load and periodic amplitude setting, the static pressure support load and ultrasonic vibration track are introduced to establish a finite element simulation model of the single point incremental forming process considering hydrostatic support and ultrasonic vibration. The following laws are found in simulating the forming force: The vertical force F_z obeys a stepwise increase change law as a whole, and F_x and F_y obey a sinusoidal staggered periodic fluctuation law as a whole; The vertical force F_z is much larger than the horizontal forces F_x and F_y , indicating that F_z is the main forming force; The vertical force

F_z increases with the increasing static pressure, and the vertical force F_z first decreases and then increases with the increasing amplitude and frequency. To verify the simulative results, a corresponding experimental program is designed, and the obtained results coincide well with the trend of the simulative ones.

Keywords: multi-technical assistance; forming force; simulation

单点增量成形(SPIF)是关于板料塑性成形的新型技术,通过特定工具头对被悬空加持的板料进行局部动态加载,使得板料在无模具无约束的状态下产生整体累积变形,最终得到目标制件^[1]。以典型圆锥台件为例,SPIF 技术成形原理如图 1 所示。其借鉴“分层制造”的思想,根据目标制件的形貌生成分层离散的成形轨迹,工具头以速度 V_1 沿着该轨迹对板料进行逐层挤压成形。待成形板料被上压板和支撑板(下压板)悬空夹持在机床的工作台上,初始板料的厚度为 t_0 ,经直径为 D 的工具头累积成形后的制件厚度为 t_1 ,逐层累积成形时的层间距为 Δz ,目标制件的成形角为 α 。

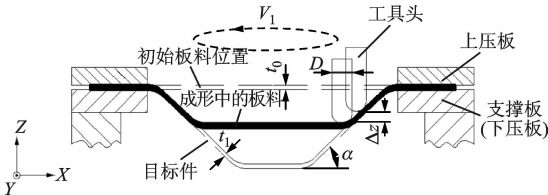


图 1 单点增量成形技术原理图

由于特定工具头是由数控机床进行驱动的,所以该技术能够成形复杂外形的薄壁构件,具有柔性、绿色、快速、低成本等优势。然而,该技术的工具头局部加载特性和板料悬空夹持特性使得成形过程容易发生失稳和制件容易产生回弹,降低制件成形精度、表面质量和成形极限^[2]。为此,该领域的科研工作者做了大量的尝试来研究并提高制件成形质量。文献[3]利用实验加热的方式对制件的回弹区域进行处理,实践表明该方法具有一定的效果。文献[4]对成形板料进行提前预热,消除材料晶体结构中的缺陷,匀化晶粒尺寸与分布,经预热后的板料所成形的制件精度明显提高,壁厚分布更加均匀。文献[5]对成形工具施加轴向高频率低振幅超声振动,通过单点增量对 1050 铝板进行直槽成形,验证了超声振动降低成形力,提高成形性的效果。文献[6]对铝合金、钢、钛 3 种材料薄板进行超声振动单点增量成形实验发现,超声振动可以显著提高成形件几何精度和成形极限。此外,国内外学者还提出了高压水射流单点增量成形^[7]、电辅助单点增量成形^[8]、激光辅

助单点增量成形^[9]等技术,以期通过改变成形力大小和作用方式来提高制件质量。

在众多的辅助成形技术中,超声振动(UV)可以有效提高制件的成形极限^[10]和径向精度^[11],静压支撑(SPS)可以有效提高和改善制件的轴向精度^[12]和壁厚减薄率^[13]的分布情况。施加超声振动和静压支撑的单点增量成形原理如图 2 所示^[14],在单点增量成形技术的基础上,对工具头赋予纵向超声振动,对板料背部施加静压支撑。超声振动是由超声波发生器、换能器、变幅杆等实现的,换能器和变幅杆封在主轴外壳内,与工具头通过螺纹连接组成振动工具头,将工具头对板料的持续碾压接触变为高频交变接触,改变了成形力的大小和作用方式。静压支撑是由密封圈、溢流阀、液压阀、压力表、油箱、止回阀等实现的。油箱中的液压油在液压泵的作用下进入密封夹具中,在溢流阀的调控下使得整个成形过程板料背部的支撑压力始终保持恒定。为便于研究,将板料所受的支撑静压力理想化为向上的恒定支撑力,如图 2 中所示,据此所建的仿真模型将与板料实际所受的静压力存在偏差,但该偏差对成形力的变化趋势影响不大。为保持恒定压力,溢流阀会随着板料的成形而实时调节密封夹具内的静压力。尤其当工具头在层间进给时,溢流阀的阀芯在压差作用下,会打开阀口实现溢流,此时液压油的稳定性会有一个较小的波动。因工具头的进给层间距一般不超过 1 mm,每次溢流调节的油量很小,故液压油的波动对成形影响可忽略不计。

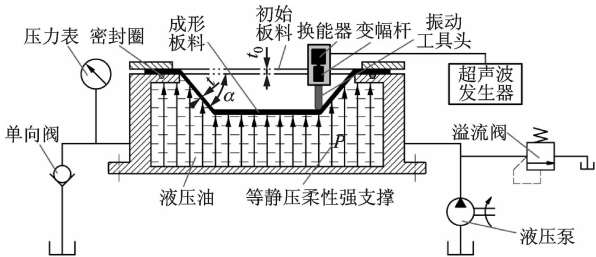


图 2 静压支撑-超声振动单点增量成形原理

目前,关于 SPIF 技术的各类辅助工艺多是以实验为主的探索尝试类研究,仿真模拟的理论研究相对较少。另外,采用计算机仿真模拟可以实现

SPIF 技术的虚拟成形,能够完成大量的重复实验,节省人力和物力成本。相比理论解析,简化和假设大大减少,更贴近实际成形过程,研究更深入。相比实验研究,仿真模拟范畴更加宽泛,能够完成实验暂时无法进行的内容。已有多位学者对 SPIF 成形过程中的成形力做了仿真模拟研究。文献[15]通过 ABAQUS/explicit 对成形过程中轴向力和切向力的变化规律进行了数值模拟,发现相比切向力,轴向力数值较大且对成形的影响更显著。文献[16-18]利用 ABAQUS/Explicit 对成形过程进行模拟,分析了制件在成形过程中成形力、应力应变以及壁厚的变化规律以及不同成形角和成形力之间的影响关系。为进一步模拟复杂制件,文献[19-20]将成形过程数控代码生成的轨迹节点导入到仿真软件中进行模拟,该方法不仅接近实验,而且方便建模。

基于目前辅助 SPIF 技术的研究现状和仿真模拟手段的相对优势,本文利用 ABAQUS 仿真分析软件对静压支撑-超声振动单点增量成形过程进行建模,系统研究静压支撑和超声振动同步作用下单点增量成形力的变化情况,以及静压参数和振动参数对成形力的影响规律,并通过相应的实验验证仿真模拟结果。

1 有限元建模

静压支撑-超声振动单点增量成形过程的 ABAQUS 数值模拟可分为前处理、仿真计算及后处理,具体如图 3 所示。首先,前处理的目的是对实际成形过程中的几何造型、部件装配、材料属性、载荷工况、边界约束等进行准确描述,以建立准确、合理、有效的仿真模型。然后,将前处理所建模型输入

到求解器中进行仿真计算。最后,对仿真全过程的数据进行后处理,得到各类显示结果。

建立静压支撑和超声振动辅助的单点增量成形过程仿真模型,几何造型如图 4 所示。成形板料为一圆板,直径 Φ 为 160 mm,厚度 t_0 为 1 mm。夹具被简化为上下圆环压板,内径均为 130 mm,外径均为 160 mm,厚度均为 1 mm。成形工具为圆柱半球形工具头,球头尺寸为 $\Phi 10$ mm。

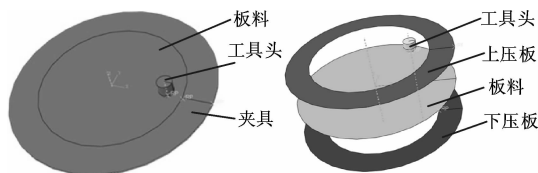


图 4 成形过程几何造型

选用 Al 1060 铝合金板料作为成形材料,设为可变形体,将工具头及上、下压板设为解析刚体。在其材料属性定义时,各属性参数由深圳市東胜金属材料有限公司生产的 Al 1060 铝合金板料制成的试样测试获取,与实验验证所用材料一致。为考虑板料轧制方向对材料各向异性的影响,截取与轧制方向保持 0° 、 45° 、 90° 的 3 组试样,以其均值作为 Al 1060 铝合金板料的材料属性参数。上海倾技仪器仪表科技有限公司生产的 HT2402 型电子拉伸实验机中对试样进行拉伸实验,试样的拉伸过程如图 5 所示。定义材料属性实质上是定义材料在载荷作用下应力-应变的本构关系,即材料对于载荷的响应情况。通过拉伸实验就能够获得板料的工程应力-应变数据,拉伸实验中材料的应变率与 SPIF 成形时板料的应变率接近,都属于准静态变形,不用考虑

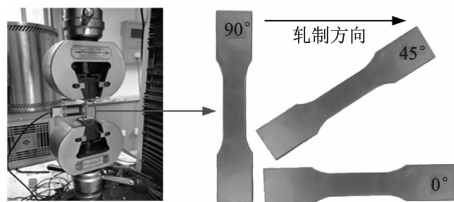


图 5 试样在电子拉伸实验机中的拉伸过程

材料的惯性效应,故不需建立本构方程,可直接在软件 ABAQUS 中设置。但是,ABAQUS 中材料模型的定义是基于真实应力-应变曲线的,故需在设置前将工程应力 σ_{now} 和工程应变 ϵ_{now} 转化为真实应力 σ 和真实应变 ϵ ,转化关系下

$$\sigma = \sigma_{\text{now}}(1 + \epsilon_{\text{now}}); \epsilon = \ln(1 + \epsilon_{\text{now}}) \quad (1)$$

经转化后得到 Al 1060 铝合金板料轧制方向 0° 、 45° 、 90° 的真实应力-应变曲线如图 6 所示,因 3

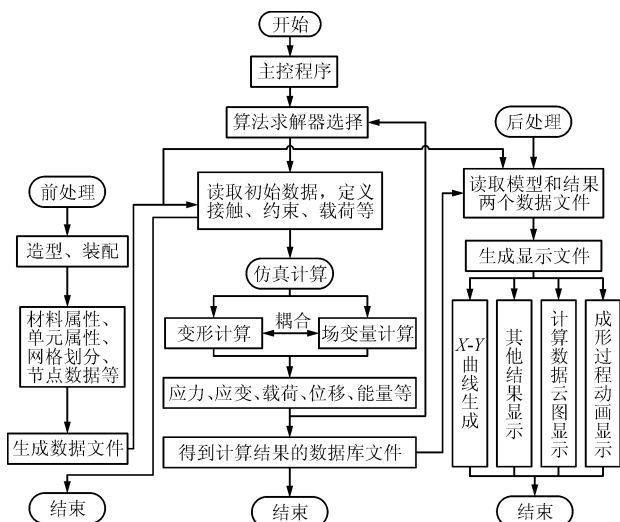


图 3 成形过程仿真流程图

条拟合曲线相距过近,故只给出了 45° 曲线的数据点。将所得各项基本性能参数和应力-应变曲线输入到 ABAQUS 中,定义板料的材料属性参数。

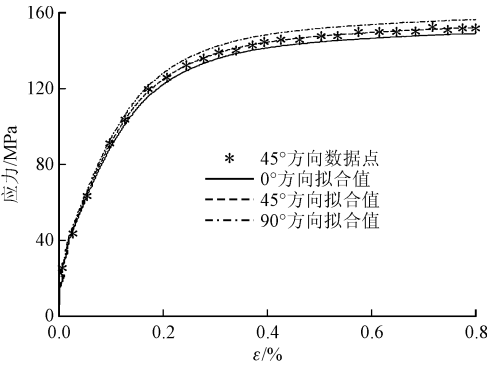


图 6 Al 1060 铝合金板料真实应力-应变曲线

测试过程中加载速度为 1.5 mm/min,温度为室温(25℃),得到 Al 1060 铝合金板料的各项材料性能参数如表 1 所示。

表 1 Al 1060 铝合金板料性能参数

参数	数值
弹性模量/MPa	138
屈服强度/MPa	59 000
抗拉强度/MPa	145
密度/(kg·m ⁻³)	2 712
泊松比	0.30

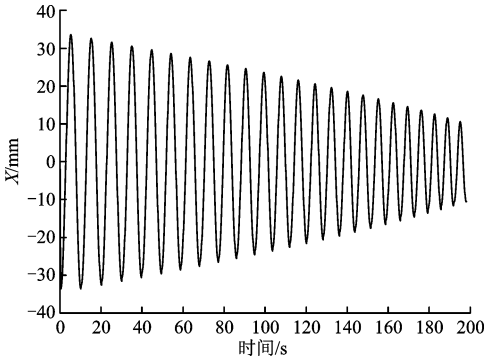
在 ABAQUS 中选择 8 节点 6 面体线性减缩积分实体单元 C3D8R,该单元设置了减缩积分,相比其他类型实体单元在各方向上均少了一个积分点,计算所需时间较少,不易发生剪切自锁,仿真结果准确度较高,且在网格发生扭曲变形时依然能够保证计算精度。对圆板外径进行网格布种,在壁厚方向划分网格,网格尺寸为 1 mm×1 mm×0.25 mm,网格数量为 69 336。静压支撑-超声振动单点增量成形过程涉及到 5 个接触面和 3 个接触对,如表 2 所示。选择 ABAQUS/Explicit 动力显式求解算法,对静压支撑-超声振动单点增量成形过程进行数值模拟计算。

成形轨迹取决于相应的数控代码(NC),因其无法直接加载于 ABAQUS 中,需利用 MATLAB 对 NC 进行修正转化,转化后的 NC 可以实现工具头轨迹的动态加载。以成形角为 45° 的圆锥台件为例,ABAQUS 中工具头动态加载空间坐标与时间的关系如图 7 所示。

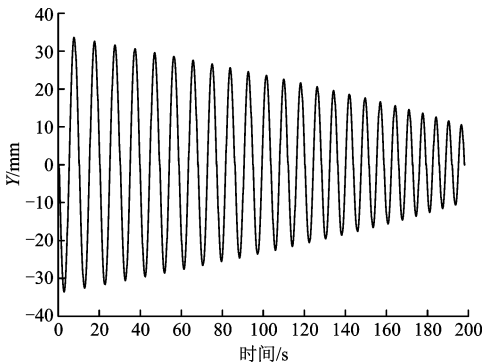
静压支撑是通过在板料背部施加向上的均布载

表 2 设置的接触面和接触对

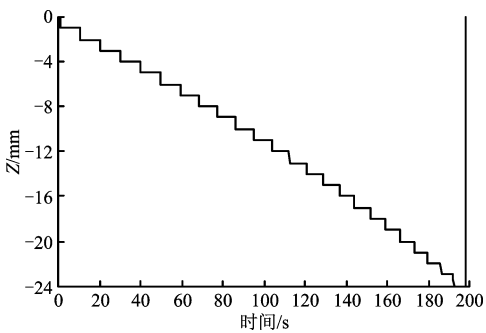
5 个接触面	工具头外表面:Surface-tool	
	上压板下表面:Surface-up hold	
	板料上表面:Surface-up sheet	
	板料下表面:Surface-down sheet	
	下压板上表面:Surface-down hold	
3 个接触对	板材—上压板	主面:Surface-up hold 从面:Surface-up sheet
	板材—下压板	主面:Surface-down hold 从面:Surface-down sheet
	板材—工具头	主面:Surface-tool 从面:Surface-up sheet



(a) X 方向位移



(b) Y 方向位移



(c) Z 方向位移

图 7 工具头成形路径位移-时间图

荷实现的,如图8所示。均布载荷参数在设定时不能过大,过大则容易造成板料整体鼓凸预变形,如图9所示,其均布载荷为0.12 MPa(即静压支撑参数为0.12 MPa)。

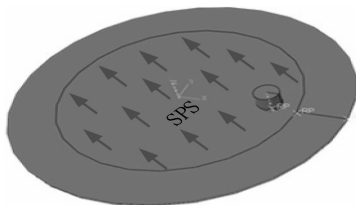


图8 施加向上的均布载荷

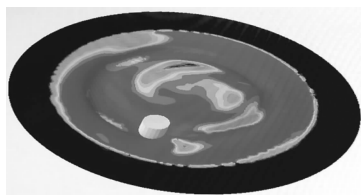


图9 板料鼓包

超声振动是通过设定周期幅值实现的,本文的研究对象为圆锥台件,工具头逐层成形的轨迹都是圆形,故将每层的X和Y方向的运动幅值设定为周期型幅值,用傅里叶级数表示

$$\alpha = A_0 + \sum_{n=1}^N [A_n \cos n\omega(T_1 - T_0) + B_n \sin n\omega(T_1 - T_0)] \quad (2)$$

式中: A_0 为初始幅值; N 为傅里叶级数的项数; ω 为圆频率; T_0 为初始时间; T_1 为自变量时间; A_n 和 B_n 分别为 $\cos$ 项和 $\sin$ 项的系数。通过傅里叶级数可以实现工具头在X和Y方向的位移如下

$$X = R_{yd} \cos 2\pi T_1 \quad (3)$$

$$Y = R_{yd} \sin 2\pi T_1 \quad (4)$$

式中: R_{yd} 为每层轨迹圆的运动半径; T_1 为各层轨迹的运动时间。将X和Y方向的轨迹合成,即可得到工具头在各层的运动轨迹。

具备超声振动的工具头相对板料做短位移高频交变运动,因此工具头Z方向的运动可以表示为

$$Z = A \sin[2\pi f(t_{zd})] \quad (5)$$

式中: A 和 f 为超声振动参数中的振幅和频率。当 $f=20$ kHz、 $A=0.03$ mm时,圆频率 $2\pi f(t_{zd})$ 的值为125 600 rad/s,则在ABAQUS中的设定如图10所示。利用上述的仿真模拟方法,对典型圆锥台制件(直径为90 mm,深度为20 mm,成形角为45°)的辅助单点增量成形过程进行模拟,静压 p 设为0.06 MPa,振幅设为0.03 mm,频率设为30 kHz,其仿真结果的应力云图如图11所示。提取成形过程各向

位移与时间的关系,得到图12,X方向和Y方向的运动轨迹为圆形,Z方向的运动在宏观上保持匀速向下,3个运动轨迹反证了所建模型轨迹的正确性。

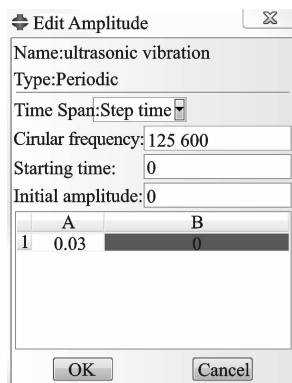


图10 超声振动幅值设置界面

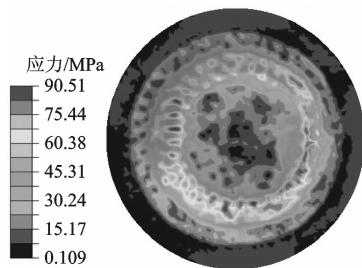


图11 圆锥台制件应力云图

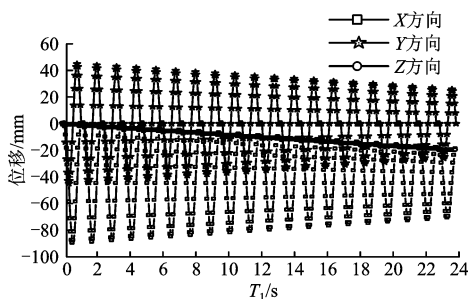


图12 工具头时间-位移曲线

2 仿真模拟

首先,仿真模拟静压支撑和超声振动同步作用下单点增量成形力的变化情况。调试仿真模型中辅助参数设定,取静压为0.06 MPa、振幅为0.03 mm、频率为30 kHz,其他成形参数见表3。模拟该工况下的静压支撑-超声振动单点增量成形力,提取ABAQUS/Explicit中成形力的X-Y结果曲线,对数据曲线进行处理,得到成形力随时间的变化规律,如图13所示。由图可以看出,在静压支撑和超声振动双辅助技术作用下,垂向力 F_z 最高峰值为600 N左右,整体呈现阶梯式增大的变化规律, F_x 与 F_y

整体呈现正弦交错式周期波动变化规律。由图 13 可知,垂向力 F_z 远大于水平力 F_x 与 F_y ,是主要成形力。然后,采用控制变量法仿真模拟不同静压参数和振动参数对垂向力 F_z 的影响规律,其结果如图 14 所示。

表 3 仿真模型中的成形参数

参数	数值
板料初始厚度 t_0/mm	1
成形角 $\alpha/(\text{^\circ})$	45
工具头直径 D/mm	10
进给速度 $v_2/(\text{mm}\cdot\text{min}^{-1})$	200
层进给量 $\Delta z/\text{mm}$	1

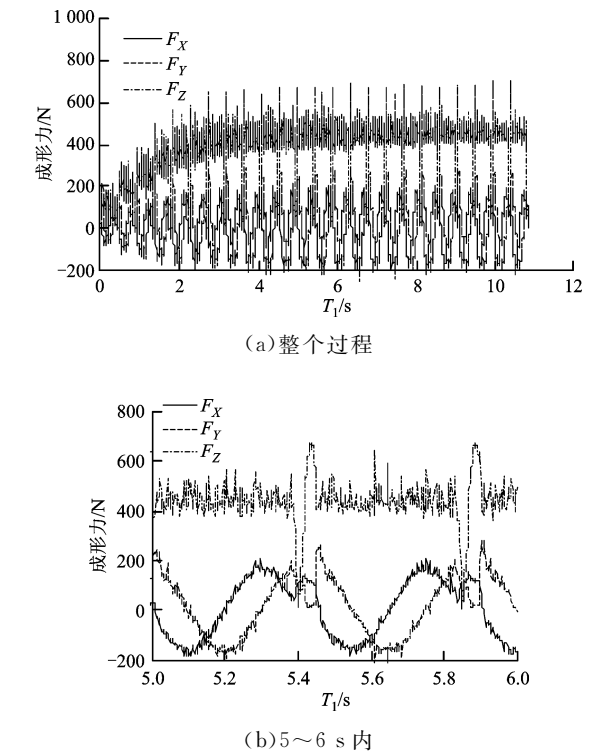


图 13 成形力随时间的变化规律

在图 14a 中,保持振幅 0.03 mm 和频率 30 kHz 不变,静压分别取 0、0.02、0.04、0.06、0.08、0.10、0.12 MPa 进行仿真,提取 X-Y 结果曲线,经计算拟合得到垂向力 F_z 随静压变化的仿真结果。从中可以看出,垂向力随静压的增大而增大,这是因为静压支撑为板料提供向上支撑力,而静压越大单位面积板料发生变形所需的变形能越大。此外,静压在 0.06 MPa 附近时曲线的增大幅度较缓,此时板料背部的柔性支撑效果最好,既能较好地改善制件的悬空夹持状态,又不会因支撑过大导致成形力增大。

在图 14b 中,保持静压 0.06 MPa 和频率 30

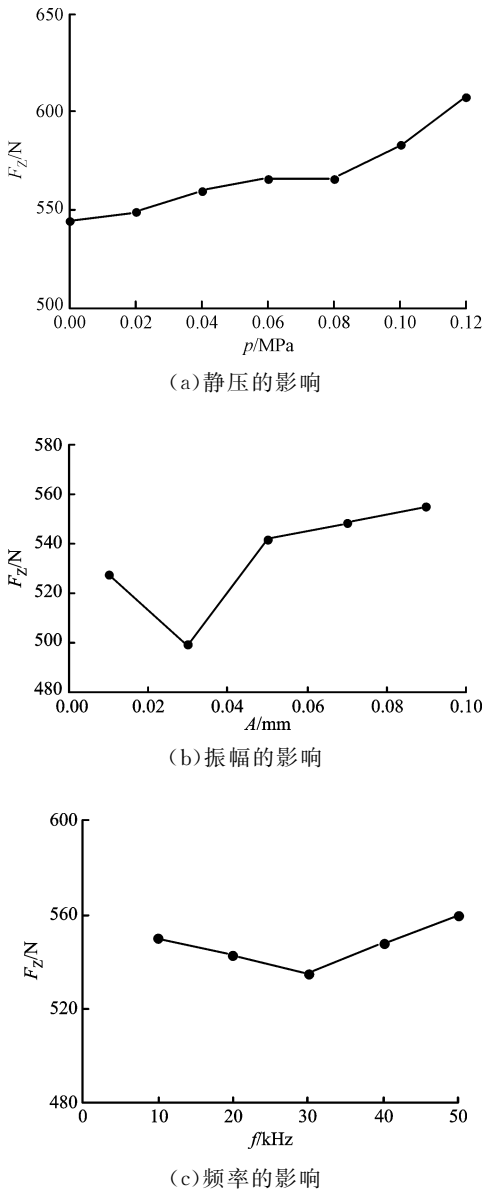


图 14 静压支撑和超声振动对垂向力 F_z 的影响

kHz 不变,振幅分别取 0.01、0.03、0.05、0.07、0.09 mm 进行仿真,提取 X-Y 结果曲线,经计算拟合得到垂向力 F_z 随振幅变化的仿真结果曲线。从中可以看出,垂向力随振幅增大呈现而先减小后增大的变化规律。当 A 小于 0.03 mm 时,板料未完全发生塑性屈服,工具头与板料分离瞬间,弹性能得到释放使得板料与工具头持续接触,进而增大垂向力;当 A 在 0.03 mm 附近时,工具头对板料的振动冲击超过了材料的屈服极限,对回弹有较为积极的抑制作用,工具头与板料可以实现瞬间分离,故垂向力较小;当 A 大于 0.03 mm 时,工具头与板料振动接触时的瞬时下压量增大,使得垂向力增大。

在图 14c 中,保持静压 0.06 MPa 和振幅 0.03 mm 不变,频率分别取 10、20、30、40、50 kHz 进行仿

真,提取 X-Y 结果曲线,经计算拟合得到垂向力 F_z 随频率变化的仿真结果。可以看出,垂向力与频率非线性相关。当 $f < 30$ kHz 时,随着频率的升高,板料吸收的超声能量就会增多,使得板料发生软化效应,垂向力就会越来越低;当 $f > 30$ kHz 时,板料内部的位错滑移增多,导致位错相互掣肘难以继续变形,需要更多的变形能才可以打破这种掣肘效应,故垂向力就会越来越大。

3 实验验证

实验平台选用秦川 MVC510 立式加工中心,成形工具选用由 X210CrW12 钨系高速钢磨削制成的半球形工具头,其较高的刚度和硬度以及耐磨性,可以有效保证制件的表面质量和避免工具头变形对制件精度的干扰。选用由深圳市東胜金属材料有限公司生产的 Al 1060 铝合金作为成形板料,尺寸为 $\Phi 160$ mm。润滑剂采用适用于铝合金拉伸的 Fuchs Renoform Fw50s 金属成形润滑油,目标制件圆锥台深度为 24 mm。

静压支撑装置如图 15 所示,主要包含监测、夹具和液压 3 大组成部分。监测装置包括 KISTLER 9257B 三向测力传感器、电荷放大器、北京波普采集仪及终端电脑,负责监测成形过程中板料的受力情况,以确保成形过程的稳定性。夹具由密封螺纹盖和支撑密封腔组成,支撑密封腔具有足够的空间容纳液压油和目标件。液压装置由压力表、溢流阀、止回阀、液压泵、油箱等组成。将监测装置和夹具装置固定在实验平台上,通过油管将两者相连形成回路。

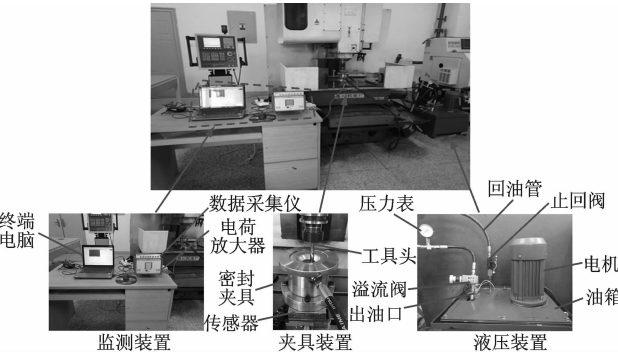


图 15 静压支撑系统实验平台

超声振动装置如图 16 所示,换能器和变幅杆安装在主轴外壳内构成超声波振子,其上与机床刀柄通过特定联轴器连接,下与工具头通过防松螺母固定连接,与超声波发生器共同构成超声振动装置系统。此外,联轴器的尺寸依据机床刀柄和超声波振子尺寸进行设计加工,与刀柄旋紧固定,与超声波振

子通过均布的 4 个紧定螺钉进行固定。图 17 为利用上述实验装置所成形的典型圆锥台制件,圆锥台直径为 90 mm,深度为 20 mm,成形角为 45° 。成形参数见表 3,所选静压力为 0.06 MPa,振幅为 0.03 mm,频率为 30 kHz。

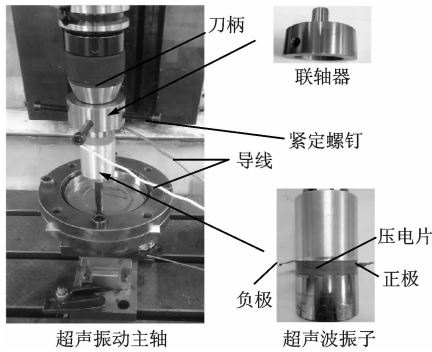


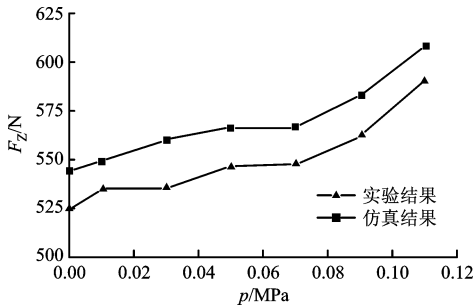
图 16 超声振动装置



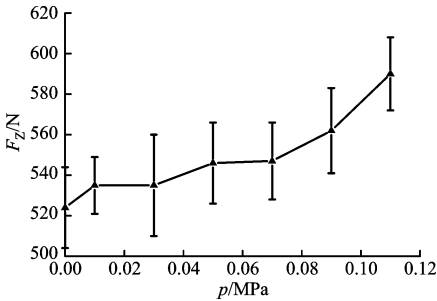
图 17 圆锥台实验制件

利用本文实验装置系统,通过调试溢流阀和超声波发生器来改变静压参数和振动参数,验证仿真模拟结果。实验所用的参数与图 14 中的仿真参数保持一致,经对实验数据进行整理,得到实验与仿真关于垂向力的对比结果以及实验结果的误差棒图,如图 18~图 20 所示。

由图 18~图 20 可以看出,静压参数和振动参数对垂向力的影响都是非线性的,实验采集的垂向力波动趋势跟仿真垂向力趋势类似,整体误差在 5% 左右,验证了仿真结果的正确性。因仿真建模过程中存在部分理想化设定,如认定工具头和夹具为解析刚体无任何变形、成形过程板料无温度变化等,

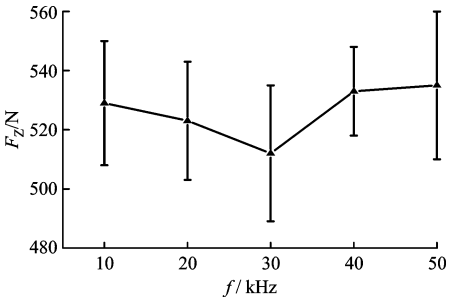


(a) 实验与仿真结果对比



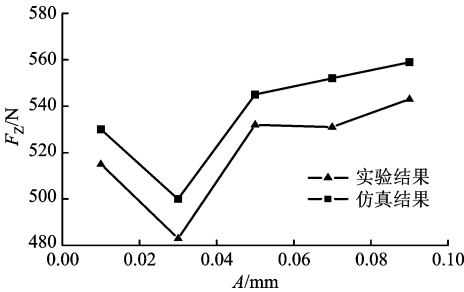
(b)实验结果的误差棒

图 18 实验垂向力和仿真垂向力关于静压的变化

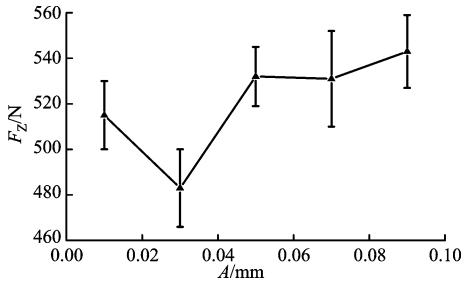


(b)实验结果的误差棒

图 20 实验垂向力和仿真垂向力关于频率的变化



(a)实验与仿真结果对比



(b)实验结果的误差棒

图 19 实验垂向力和仿真垂向力关于振幅的变化

4 结 论

本文根据静压支撑-超声振动单点增量成形技术的特点,发挥仿真模拟的相对优势,建立了成形过程的仿真模型,解决了辅助 SPIF 技术在仿真模拟方面的不足。据本文研究内容,得到以下结论。

(1)在静压支撑和超声振动双辅助技术作用下,垂向力 F_z 整体呈现阶梯式增大变化规律, F_x 与 F_y 整体呈现正弦交错式周期波动变化规律,垂向力 F_z 远大于水平力 F_x 与 F_y ,是主要成形力。

(2)垂向力 F_z 随静压的增大而增大,静压在 0.06 MPa 附近时板料背部的柔性支撑效果最好;垂向力 F_z 随振幅增大呈现而先减小后增大的变化规律;垂向力 F_z 与频率非线性相关。

(3)根据实验结果与仿真结果的对比发现,垂向力 F_z 关于静压参数和振动参数的实际变化趋势与仿真模拟结果趋于一致,证实了仿真模拟的正确性。

参考文献:

[1] BEHERA A K, DE SOUSA R A, INGARAO G, et al. Single point incremental forming: an assessment of the progress and technology trends from 2005 to 2015 [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 27: 37-62.

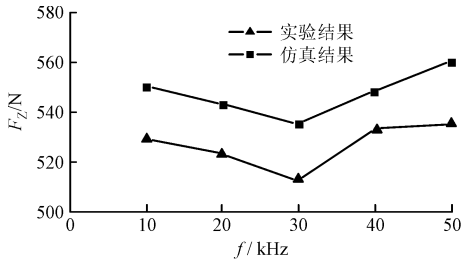
[2] DUFLOU J R, HABRAKEN A M, CAO Jian, et al. Single point incremental forming: state-of-the-art and prospects [J]. International Journal of Material Forming, 2018, 11(6): 743-773.

[3] EDWARDS W L, GRIMM T J, RAGAI I, et al. Optimum process parameters for springback reduction of single point incrementally formed polycarbonate [J]. Procedia Manufacturing, 2017, 10: 329-338.

[4] SHRIVASTAVA P, KUMAR P, TANDON P, et al. Improvement in formability and geometrical accuracy of incrementally formed AA1050 sheets by microstruc-

导致两者的垂向力存在一定偏差。

随着静压力的增大,垂向力并不会持续线性增大,当静压力超过 0.06 MPa 时,会使板料产生向上的预变形,导致垂向力突变增大。当振幅处于 0.03 mm 附近时,工具头的冲击力刚好超过板料的屈服极限,此时的垂向力最低。当频率处于 30 kHz 附近时,材料的软化效果最好,此时的垂向力最低。



(a)实验与仿真结果对比

- ture and texture reformation through preheating, and their FEA and experimental validation [J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2018, 40(7): 335-350.
- [5] AMINI S, HOSSEINPOUR GOLLO A, PAKTINAT H. An investigation of conventional and ultrasonic-assisted incremental forming of annealed AA1050 sheet [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90(5/6/7/8): 1569-1578.
- [6] OBIKAWA T, HAYASHI M. Ultrasonic-assisted incremental microforming of thin shell Pyramids of metallic foil [J]. Micromachines, 2017, 8(5): 142.
- [7] 李赳华, 何凯, 罗群, 等. 一种基于高压水射流的金属板材柔性渐进成形技术 [J]. 集成技术, 2012, 1(3): 42-46.
- LI Jiuhua, HE Kai, LUO Qun, et al. A new method for incremental sheet metal forming using water jet technology [J]. Journal of Integration Technology, 2012, 1(3): 42-46.
- [8] LIU Runze, LU Bin, XU Dongkai, et al. Development of novel tools for electricity-assisted incremental sheet forming of titanium alloy [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(5/6/7/8): 1137-1144.
- [9] MOHAMMADI A, VANHOVE H, BAEL A, et al. Towards accuracy improvement in single point incremental forming of shallow parts formed under laser assisted conditions [J]. International Journal of Material Forming, 2016, 9(3): 339-351.
- [10] 杨明顺, 肖旭东, 姚志远, 等. 1060 铝板超声振动单点增量成形极限研究 [J]. 兵工学报, 2019, 40(3): 601-611.
- YANG Mingshun, XIAO Xudong, YAO Zhiyuan, et al. Research on forming limit of 1060 aluminum sheet in ultrasonic vibration-assisted single point incremental forming [J]. Acta Armamentarii, 2019, 40(3): 601-611.
- [11] YANG Mingshun, BAI Lang, LIN Yunbo, et al. Research on the radial accuracy of ultrasonic vibration-assisted single point incremental forming parts [J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2019, 2019: 1-9.
- [12] 姚志远, 杨明顺, 郑海洋, 等. 静压支撑单点增量成形精度研究 [J]. 兵器材料科学与工程, 2019, 42(1): 41-47.
- YAO Zhiyuan, YANG Mingshun, ZHENG Haiyang, et al. Accuracy of single point incremental forming of hydraulic support [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2019, 42(1): 41-47.
- [13] 林允博, 李言, 杨明顺, 等. 静压支撑-单点增量成形制件减薄率研究 [J]. 宇航材料工艺, 2020, 50(1): 37-43.
- LIN Yunbo, LI Yan, YANG Mingshun, et al. Study on thinning rate of static pressure support-single point incremental forming parts [J]. Aerospace Materials & Technology, 2020, 50(1): 37-43.
- [14] BAI Lang, LI Yan, YANG Mingshun, et al. Modeling and analysis of single point incremental forming force with static pressure support and ultrasonic vibration [J]. Materials, 2019, 12(12): 1899.
- [15] EYCKENS P, DUFLOU J, BAEL A, et al. The significance of friction in the single point incremental forming process [J]. International Journal of Material Forming, 2010, 3(1): 947-950.
- [16] NETO D M, MARTINS J M P, OLIVEIRA M C, et al. Evaluation of strain and stress states in the single point incremental forming process [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2016, 85(1/2/3/4): 521-534.
- [17] 马琳伟, 莫健华. 基于实体单元的板材渐进成形数值模拟分析 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2008, 36(4): 76-79, 114.
- MA Linwei, MO Jianhua. Numerical simulation of the sheet metal incremental forming process using solid elements [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Nature Science), 2008, 36(4): 76-79, 114.
- [18] BOUFFIOUX C, LEQUESNE C, VANHOVE H, et al. Experimental and numerical study of an AlMgSc sheet formed by an incremental process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(11): 1684-1693.
- [19] ROBERT C, DAL SANTO P, DELAMÉZIÈRE A, et al. On some computational aspects for incremental sheet metal forming simulations [J]. International Journal of Material Forming, 2008, 1(1): 1195-1198.
- [20] ROBERT C, AYED L B, DELAMÉZIÈRE A, et al. On a simplified model for the tool and the sheet contact conditions for the SPIF process simulation [J]. Key Engineering Materials, 2009, 410/411: 373-379.

(编辑 杜秀杰)