

DOI:10.19344/j. cnki. issn1671-5276.2024.04.019

AA2024 铝合金板料敲击式渐进成形性能研究

赵恩迪¹, 陈凯², 叶壮²

(1. 国营芜湖机械厂, 安徽 芜湖 241007; 2. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016)

摘要:为了探究合适的数控渐进成形工艺参数范围, 确定更优的敲击式渐进成形性能方案, 通过单因素试验法研究振幅、频率、工具头直径和层进给量 4 个因素对 AA2024 铝合金板料成形性能的影响规律。试验结果表明: 与传统的增量成形方式相比, 敲击式渐进成形方式会降低板料的成形极限角, 板料的成形性能会有所降低; 当振幅为 5 mm 时, 成形极限角随着频率的增大而增大; 当振幅为 10 mm 时, 成形极限角随着频率的增大而减小, 成形随层进给量增大而增大, 随层工具头直径增大先减小后增大。

关键词:渐进成形; 成形性能; AA2024 铝板; 敲击成形

中图分类号:TG386.3 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2024)04-0101-05

Research on Percussion Incremental Forming Performance of
AA2024 Aluminum Alloy SheetZHAO Endi¹, CHEN Kai², YE Zhuang²(1. Wuhu Machinery Factory, Wuhu 241007, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to explore the appropriate range of NC incremental forming process parameters and determine the better percussion incremental forming performance scheme, by single factor test method, explores the influence of amplitude, frequency, tool head diameter and layer feed on pageon AA2024 aluminum alloy sheet metal forming performance. The experimental results show that compared with the traditional incremental forming method, the percussive incremental forming method can reduce the forming limit angle and the forming property of the sheet metal. When the amplitude is 5 mm, the forming limit angle increases with the increase of frequency. When the amplitude is 10 mm, the forming limit angle decreases with the increase of frequency, the forming increases with the increase of layer feed, and decreases first and then increases with the increase of layer tool head diameter.

Keywords: incremental forming; forming performance; AA2024 aluminum plate; percussion forming

0 引言

渐进成形具有加工成本低、周期短、小批量和多品种等显著优势, 因而在航空航天、车辆、医疗和船舶等科学领域得到了广泛应用^[1]。渐进成形技术除了上述优点外, 也存在着如成形件成形精度不高的缺点。^[2-3]

在传统的渐进成形性能方面, 国内外学者研究较为广泛。王新太等^[4]采用正交试验法探究了各工艺参数对 6061 铝合金板材成形性能的影响。安治国等^[5]探究了在正成形下层进给量、工具头直径、进给速度和成形道次对 1060 铝合金板材成形性能的影响。KUMAR 等^[6]研究了成形刀具形状、刀具直径、成形壁角、层进给量、板材厚度和刀具旋转对 AA2024 铝合金板材成形性的影响。

在敲击式渐进成形性能方面, 国内研究较少。WANG 等^[7]研究了基于正弦波轨的渐进成形方式, 通过对传统的渐进成形轨迹进行正弦波化, 使工具头走出类似于锤击渐进成形的轨迹。ASGARI 等^[8]研究了冲头直径和冲头频率对成形板材力学性能的影响, 并对成形件的力学性能和微观结构进行了分析和讨论。

目前很多学者的主要研究领域集中在传统的渐进成形, 仅有少量的学者研究了点压式的渐进成形, 还未有相关学者对敲击式渐进成形的变形特点进行系统的分析。为此本文通过单因素试验法研究振幅、频率、工具头直径和层进给量 4 个因素来探究对板料成形性能的影响规律, 从而找到合适的工艺参数范围, 确定更优的敲击式渐进成形方案。

第一作者简介: 赵恩迪 (1991—), 男, 安徽淮南人, 高级工程师, 硕士, 研究方向为机体结构, 534694737@qq.com。

1 试验

1.1 试验装置

搭建一套气动敲击系统是进行试验研究的前提。本文通过各个模块的组装和工装部件的设计,并将敲击系统(图1)与渐进成形机床(图2)连接起来,搭建了一套敲击渐进成形系统。渐进成形机床为南京航空航天大学自主研制的 NH-SK1060 三轴数控渐进成形机床。该气动敲击系统与渐进成形机床刚性连接,因此工具头由气缸和机床一起带动来实现敲击式渐进成形。



图1 气动敲击系统



图2 数控渐进成形机床

为了解敲击式渐进成形中板料的塑性变形规律,本试验用 ARGUS 软件对试验件进行应力、应变测试。在板料成形之前先对板料进行网格印刷,形成直径 1 mm、间距 2 mm 规则排列的圆点方阵,如图3所示。



图3 印刷后的板料

1.2 试验方案

在板料加工领域中,板料成形性能的优劣通常由板料的成形极限进行表征,这直接反映出板料是否容易成形。因此板料成形性能的研究也变得极为重要。在敲击式渐进成形过程中,工具头与板料属于非连续接触,因此在成形过程中工具头与板料之间的摩擦力会大大降低,而这可能会增大板料的可成形性。但是成形时工具头对板料有一定的冲击力,会导致板料在成形过程中受到震动以及交变载荷的作用。从这个角度看,板料的成形性会因此降低。所以敲击式渐进成形工艺对板料成形性能的具体影响还是一个未知数。为此本文将使用成形极限角来表征材料的成形性能,并且使用 Hussion 提出的变角度杯试验模型来测量板料的成形极限角。试验成形所用的变角度杯的三维模型及尺寸如图4所示。成形角度为 $30^{\circ} \sim 90^{\circ}$,在成形时,杯壁面如果破裂,则破裂点的法线与水平面的夹角 θ 即为最大成形极限角。试验完成之后将成形件反向装夹,用高度尺测量破裂处高度 H 。具体形状如图5所示。

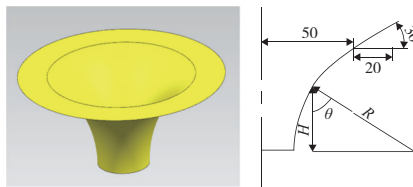


图4 变角度杯三维模型及尺寸图

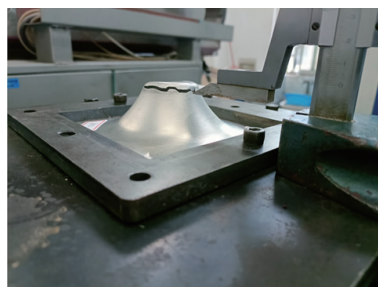


图5 高度测量

成形极限角的计算公式如下:

$$\theta = \cos^{-1}(H/R)$$

式中 R 为圆锥台母线半径。

本次试验采用单因素试验法,选取了振幅(即气缸冲程,振幅越大敲击力越大)、频率(单位时间内成形工具头敲击次数)、工具头直径、层进给量4个工艺参数,探究各工艺参数对板料成形极限角的影响规律。试验板料选用经退火处理的

(120 mm×120 mm×1 mm) AA2024 铝合金,材料参数如表 1 所示。成形刀具为球头刀具。润滑方式为普通机油润滑。机床的进给速度为 360 mm/min,气缸气压保持在 0.4~0.45 MPa 之间。试验完成后计算成形极限角。试验方案如表 2 所示。

表 1 AA2024 铝合金板材材料参数

弹性模量 E/GPa	屈服强度 $\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	泊松比 μ	强度 系数 k	硬化 指数 n
73.7	138.2	0.3	133.033	0.714

表 2 单因素试验方案

试验编号	振幅/mm	频率/Hz	层进给 量/mm	工具头 直径/mm
1	5	4	1.0	10
2	5	6	1.0	10
3	5	8	1.0	10
4	10	4	1.0	10
5	10	6	1.0	10
6	10	8	1.0	10
7	15	4	1.0	10
8	15	6	1.0	10
9	15	8	1.0	10
10	0	0	1.0	10
11	10	6	1.0	6
12	10	6	1.0	14
13	10	6	0.5	10
14	10	6	1.5	10

2 试验结果及分析

2.1 频率和振幅对板料成形极限角的影响

分别改变频率和振幅的值来进行成形试验,试验件如图 6 所示。

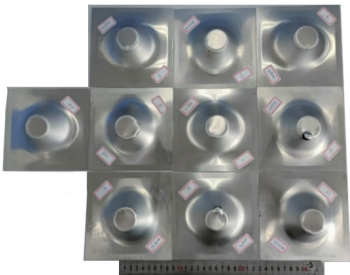


图 6 不同频率和振幅试验件

成形极限角随频率和振幅变化如表 3 和图 7 所示。

表 3 频率和振幅对成形极限角的影响

试验 编号	振幅/ mm	频率/ Hz	层进给 量/mm	工具头 直径/mm	破裂 高度/mm	成形极 限角/(°)
1	5	4	1	10	32.30	68.34
2	5	6	1	10	33.14	69.14
3	5	8	1	10	33.18	69.17
4	10	4	1	10	33.92	69.87
5	10	6	1	10	33.52	69.49
6	10	8	1	10	33.02	69.02
7	15	4	1	10	34.08	70.02
8	15	6	1	10	34.18	70.11
9	15	8	1	10	33.02	69.02
10	0	0	1	10	35.78	71.61

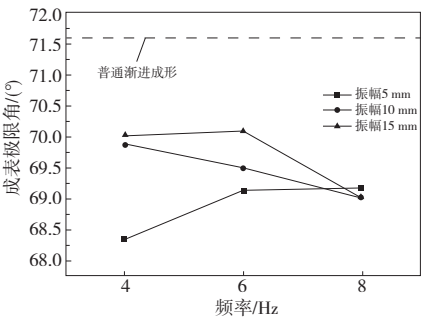


图 7 成形极限角随频率和振幅变化点线图

从图 7 中可以看出,当振幅为 5 mm 时,成形极限角随着频率的增加而增加。这时工具头对板料的冲击力不是很大,因此成形件侧壁难以因震动而发生失稳。频率增大,工具头与板料接触的次数增加,板料的变形越充分,成形极限角越大。当振幅为 10 mm 时,成形极限角随着频率的提高呈现出下降的趋势。当振幅为 15 mm 时,成形极限角随着频率的增加先略微增大然后呈现出大幅度下降的趋势。这是因为振幅增大的同时,工具头对板料的冲击力也会随之增大,这时成形件侧壁会因受到震动而发生失稳的情况。随着频率增大,工具头和板料接触的次数越多,板料受到的震动也越来越剧烈,从而导致板料因侧壁震动而发生失稳的现象越严重。当频率为 8 Hz 时,3 个不同振幅对应的成形极限角反而相差不大。这是因为当频率达到一定的程度时,其对板料的影响已经超过振幅的影响。这个时候频率成为影响成形

极限角大小的主要因素。

从图 7 还可以看出,相较于普通渐进成形方式成形出来的成形件,用敲击式渐进成形方式成形出来的成形极限角大小明显更低。这主要是因在敲击式渐进成形中,成形件的侧壁不断地受到循环往复的锤击力,主要变形表现为厚度上的减薄,致使加工硬化现象更加严重。然而加工硬化现象严重会导致材料的塑性进一步降低。同时成形件的侧壁又不断受到循环往复的锤击力,进一步导致侧壁不断的震动,加剧了材料失稳现象的发生,因此敲击式渐进成形方式相较于普通渐进成形会降低材料的成形性能。

2.2 工具头直径对板料成形极限角的影响规律

成形极限角随工具头直径变化如表 4 和图 8 所示。

表 4 工具头直径对板料成形极限角的影响

试验 编号	振幅/ mm	频率/ Hz	层进给 量/mm	工具头 直径/mm	破裂 高度/mm	成形 极限角/(°)
11	10	6	1	6	37.1	72.8
5	10	6	1	10	33.5	69.5
12	10	6	1	14	37.6	73.3

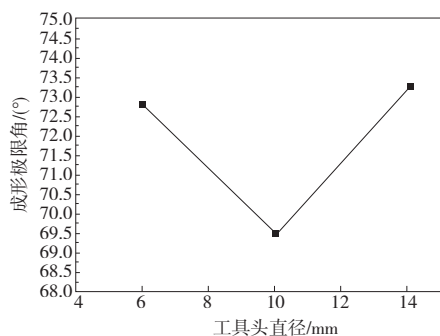


图 8 成形极限角随工具头直径变化点线图

从图 8 中可以看出,当振幅和频率一定时,成形极限角随着工具头直径的增大呈现出先减小后增大的趋势。相对于直径 10 mm 工具头,工具头直径较小或者较大时,成形极限角都有所提升,但工具头直径小一点有利于复杂性零件的加工,因此保证成形性能的情况下可优先选取小一点的工具头直径。

2.3 层进给量对板料成形极限角的影响规律

成形极限角随层进给量变化如表 5 和图 9 所示。

表 5 层进给量对板料成形极限角的影响

试验 编号	振幅/ mm	频率/ Hz	层进给 量/mm	工具头 直径/mm	破裂 高度/mm	成形 极限角/(°)
13	10	6	0.5	10	30.9	67.0
5	10	6	1.0	10	33.5	69.5
14	10	6	1.5	10	34.9	70.8

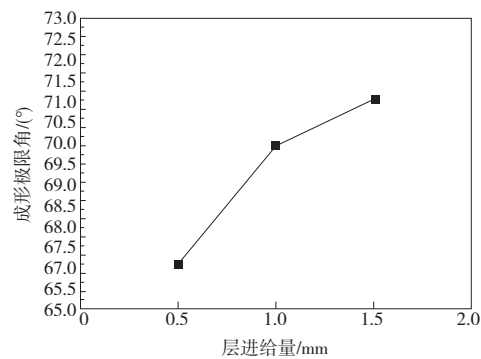


图 9 成形极限角随层进给量变化点线图

从图 9 中可以看出,当振幅和频率一定时,成形极限角随着层进给量的增大呈现出增大的趋势。对于大多数传统的增量成形来说,一般成形件的成形极限角是随着层进给量的增大而减小,而在敲击式渐进成形中却呈现出相反的趋势。这是因为在敲击式渐进成形过程中,层进给量越小,表明在成形相同深度的时候,承受来自工具头的锤击次数就越多,成形件的侧壁要承受更长时间震动,侧壁也会受到更长时间的循环载荷,因此就更容易发生失稳断裂。

3 结语

通过一系列的实验证明,与传统的增量成形方式相比,敲击式渐进成形方式会降低板料的成形极限角,板料的成形性能会有所降低。

1) 在较低的频率条件下,选用大振幅的条件会提高板料的成形性能,然而在较高频率下不同振幅对板料的成形性能影响就会变得不明显。但是在较高频率下仍需选用大振幅的成形条件,因为低振幅会出现敲击力不够而成形失败的情况。在低振幅下选用较高频率会提高板料的成形性能,在大振幅下低频率会提高板料的成形性能。

2) 工具头直径较小或者较大都能提升成形性能,实际加工中可根据需求选用,需加工小角度等复杂形状时优先选取合适的小工具头直径,在符合加工工艺情况下,可优先选取合适的大直径工

具头以提升加工效率。

3)层进给量增大,会提高板料的成形性能。但随着层进给量增大,成形力也会随之增大,需要相应地提高振幅。

4)较优的敲击式渐进成形工艺参数为:振幅 15 mm、频率 16 Hz、工具头直径 6 mm、层进给量 1.5 mm。

参考文献:

- [1] 鲁世红,付婧颐,丁腾飞,等. 金属板料数控渐进成形工艺的研究现状[J]. 锻压技术,2022,47(10):1-11.
- [2] 谷岩波,王辉,王会廷,等. AA5754 铝合金板材渐进成形壁厚均匀性研究[J]. 锻压技术,2018,43(1):33-41.
- [3] BEHERA A K, SOUSA R D, INGARAIO 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.
- [4] 王新太,王进,顾宁,等. 渐进成形工艺参数对 6061 铝合金板材成形性能的影响[J]. 锻压技术,2019,

44(7):29-33,46.

- [5] 安治国,庞鹏辉,陈科衡,等. 有模单点渐进成形工艺参数对 1060 铝合金成形性能的影响[J]. 锻压技术,2017,42(11):94-98,171.
- [6] KUMAR A, GULATI V, KUMAR P, et al. Parametric effects on formability of AA2024 - O aluminum alloy sheets in single point incremental forming[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(1):1461-1469.
- [7] WANG J, LI L H, JIANG H S, et al. Incremental sheet punching on the base of sinusoidal tool path[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 89(9):3527-3534.
- [8] ASGARI A, SEDIGHI M, RIAHI M. Investigation of punching parameters effect on mechanical properties of Al - 1100 - O in incremental sheet metal hammering process [J]. Strength of Materials, 2015, 47(6):882-889.

收稿日期:2022-11-25

(上接第 70 页)

4 结语

本文提出了一种基于自注意机制胶囊网络故障诊断方法,由实验所得结论如下:

1)在数据样本不足的情况下,自注意机制胶囊网络分类准确率明显优于其他模型,证明所提方法故障诊断性能极佳;

2)t-SNE 可视化结果表明,自注意机制胶囊网络能更好地捕获易于区分的故障特征,在特征学习方面更加高效智能。

参考文献:

- [1] 邱星辉,韩勤锴,褚福磊. 风力机行星齿轮传动系统动力学研究综述[J]. 机械工程学报,2014,50(11):23-36.
- [2] 陈雪峰,郭艳婕,许才彬,等. 风电装备故障诊断与健康监测研究综述[J]. 中国机械工程,2020,31(2):175-189.
- [3] HAN T, LIU C, WU L, et al. An adaptive spatiotemporal feature learning approach for fault diagnosis in complex systems[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019, 117:170-187.
- [4] INCE T, KIRANYAZ S, EREN L, et al. Real-time motor

fault detection by 1-D convolutional neural networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(11):7067-7075.

- [5] XU Z, LI C, YANG Y. Fault diagnosis of rolling bearing of wind turbines based on the variational mode decomposition and deep convolutional neural networks[J]. Applied Soft Computing, 2020, 95:106515.
- [6] 余传粮,梁睿君,冉文丰,等. 基于 STFT 和 CNN 的齿轮箱故障诊断[J]. 机械制造与自动化,2022,51(3):152-154,195.
- [7] HAN T, MA R, ZHENG J. Combination bidirectional long short-term memory and capsule network for rotating machinery fault diagnosis [J]. Measurement, 2021, 176:109208.
- [8] LI D C, ZHANG M, KANG T B, et al. Fault diagnosis of rotating machinery based on dual convolutional - capsule network (DC-CN) [J]. Measurement, 2022, 187:110258.
- [9] SABOUR S, FROSST N, HINTON G E. Dynamic routing between capsules [EB/OL]. (2017-11-07) [2022-11-25]. <https://arxiv.org/abs/1710.09829>. pdf.

收稿日期:2022-11-25