

板料成形

1060 铝板圆台件凸模支撑渐进成形临界成形角的研究

金志浩¹, 高锦张¹, 郑璐恺²

(1. 东南大学 材料科学与工程学院 江苏省先进金属高技术重点实验室, 江苏 南京 211189;

2. 南京工程学院 机械工程学院, 江苏 南京 211189)

摘要: 基于 ANSYS/LS-DYNA 分析平台构建凸模支撑单道次渐进成形圆台件的有限元模型, 利用数值模拟和实验方法研究凸模支撑渐进成形圆台件的壁厚均匀临界成形角。以高径比为 0.5 的圆台件为对象, 研究不同圆台直径和原始坯料厚度的圆台件的临界成形角, 分析了圆台直径和原始坯料厚度对临界成形角的影响。结果表明, 随着圆台直径增大, 其临界成形角逐渐减小; 随着原始坯料厚度增大, 其临界成形角逐渐增大。通过多元线性回归求解临界成形角关于原始坯料厚度和圆台直径的推算公式, 经实验验证依据该公式可在一定范围内快速获得圆台临界成形角, 为实际生产中获得壁厚分布均匀的制件的工艺设计提供依据。

关键词: 圆台件; 渐进成形; 凸模支撑; 临界成形角; 圆台直径

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.06.014

中图分类号: TG379.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 06-0099-08

Study on critical forming angle in progressive forming with punch support for 1060Al plate conical frustum parts

Jin Zhihao¹, Gao Jinzhang¹, Zheng Lukai²

(1. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Metallic Materials, School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. College of Mechanical Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211189, China)

Abstract: Based on ANSYS/LS-DYNA analysis platform, the finite element model of punch supported single pass progressive forming conical frustum part was established, and its critical forming angle of wall thickness uniformity was studied by numerical simulation and experimental methods. Then, for the conical frustum part with the height diameter ratio of 0.5, the critical forming angles with different conical frustum diameters and original blank thicknesses were studied, and the influences of conical frustum diameter and original blank thickness on the critical forming angle were analyzed. The results show that the critical forming angle decreases gradually with the increasing of original conical frustum diameter and increases with the increasing of blank thickness. The calculation formula of critical forming angle with respect to original blank thickness and conical frustum diameter is solved by multiple linear regression. According to the experiment verification, the critical forming angle of conical frustum can be quickly obtained within a certain range, which provides a basis for process design of parts with uniform wall thickness distribution in actual production.

Key words: conical frustum part; progressive forming; punch support; critical forming angle; conical frustum diameter

板料渐进成形利用分层制造的思想, 将三维数值模型沿轮廓离散成一系列等高线, 成形工具的水平方向沿等高线运动, 对坯料进行逐点成形, 最终将二维平面坯料成形出三维的产品, 能最大限度地发挥坯料的塑性, 无需专用的模具^[1-3]。

近年来, 众多学者对圆台件的渐进成形过程进行了研究。耿佩等^[4]通过凸模支撑单道次渐进成形较大成形角的圆台件, 发现当成形角大于某一极限角时, 圆台将在口部产生破裂。徐伟等^[5]提出了分阶段扰动粒子群算法来优化圆台件渐进成形的影响因素 (工具头直径、板料厚度、加工层间距等), 明显降低了制件的壁厚减薄率。Mostafanezhad H 等^[6]研究了 1050 铝板凸模支撑渐进成形圆台件时成形角对圆台壁厚分布的影响。目前, 国内外的研究主要集中在成形工艺参数 (成形工具头半径、轴向进给量、成形速度等) 对圆台件渐进成形壁厚分布规律的影响上, 但少有学者研究圆台几何尺寸和坯

收稿日期: 2021-05-14; 修订日期: 2021-08-23

基金项目: 先进数控技术江苏省高校重点建设实验室开放基金资助项目 (KXJ05017)

作者简介: 金志浩 (1996-), 男, 硕士研究生

E-mail: jzh192039@sina.com

通信作者: 高锦张 (1963-), 男, 硕士, 副教授

E-mail: 101005299@seu.edu.cn

料厚度对圆台壁厚分布的影响,本文以 1060 铝板为研究对象,研究圆台件凸模支撑渐进成形过程中圆台直径和原始坯料厚度对成形临界角的影响。

1 圆台件凸模支撑渐进成形理论壁厚

利用凸模支撑渐进成形圆台件的原理如图 1 所示,上、下压板夹持住板料,凸模支撑在板料正下方,成形工具头按照等高线轨迹运动,上、下压板随着工具头同步向下运动,成形出目标制件^[7]。

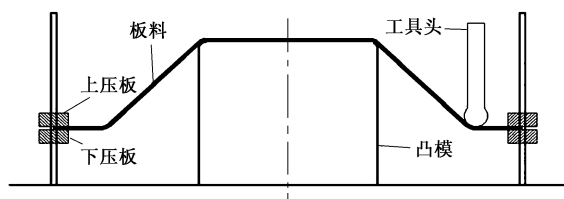


图 1 凸模支撑渐进成形过程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of progressive forming process with punch support

余弦定律可用于凸模支撑单道次渐进成形圆台件壁厚分布的预测,如图 2 所示,选取一段长度为 dx 的矩形板料 $abcd$,原始坯料厚度为 t_0 ,假设板料仅发生了剪切变形,未出现径向流动,经过变形后得到平行四边形 $a'b'c'd'$,边长为 L ,根据体积不变原理可得到式 (1) 和式 (2):

$$t_0 dx = tL \quad (1)$$

$$dx = L \cos \theta \quad (2)$$

式中: θ 为成形角; t 为变形后的厚度。

将式 (1) 代入式 (2) 可得:

$$tL = t_0 L \cos \theta \quad (3)$$

即可得到:

$$t = t_0 \cos \theta \quad (4)$$

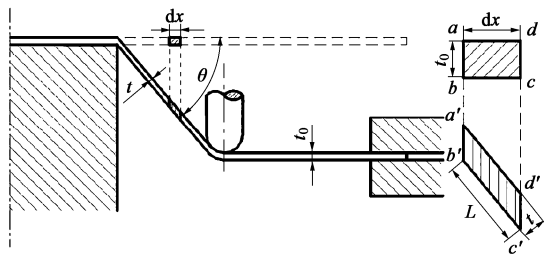


图 2 凸模支撑渐进成形板料变形示意图

Fig. 2 Schematic diagram of sheet deformation in progressive forming with punch support

2 有限元模型的建立

利用 ANSYS 的前处理模块建立如图 3 所示的有

限元模型。理想成形状态下仅板料发生塑性变形,因此,支撑凸模、压板和成形工具头均采用 Solid164 单元,定义为刚体 (Rigid)。板料模型采用 Shell163 单元,选用 3-Parameter Barlat 指数硬化模型。板料的参数如表 1 所示^[8-9]。

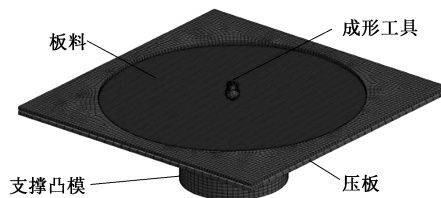


图 3 凸模支撑渐进成形有限元模型

Fig. 3 Finite element model of progressive forming with punch support

表 1 1060 铝板料参数

Table 1 Parameters of 1060 aluminum sheet

参数	数值
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	2700
弹性模量/MPa	55940
泊松比	0.324
硬化指数	0.12
屈服强度/MPa	116

模拟实验中,共有 3 个接触对,分别为工具头-板料、板料-压板、板料-凸模。板料与成形工具之间存在润滑剂,摩擦类型属于边界摩擦,经验证本实验中所用润滑剂获得的实验结果与摩擦因数设置为 0.15 时的模拟结果最为接近^[10]。板料与支撑凸模、板料与上下压板之间的摩擦状态为干摩擦,摩擦因数由材料自身属性决定。

3 临界成形角

在凸模支撑单道次渐进成形圆台件时,凸模上方的材料不参与变形的为圆台底部,在加工过程中,接近加工区域的未变形区会有部分材料流入变形区。因此,在未变形区和稳定变形区之间会有形成壁厚锐减的过渡变形区。以板料中心为起始点,沿直线每隔 4 mm 设置 1 个单元编号,得到圆台件 1 个截面上的壁厚分布曲线图,如图 4 所示,通常以稳定变形区的壁厚分布来判断制件壁厚的均匀性。

一般情况下,单道次渐进成形后制件的壁厚与余弦定律理论厚度并不完全吻合,其主要原因为实际过程中毛坯材料在径向上会产生流动,因此,一般在判断制件是否存在过度减薄时,只要成形后稳定变形区壁厚与余弦定律理论壁厚值的误差在 $\pm 10\%$ 以内,即满足式 (5),则认为制件没有出现过度减

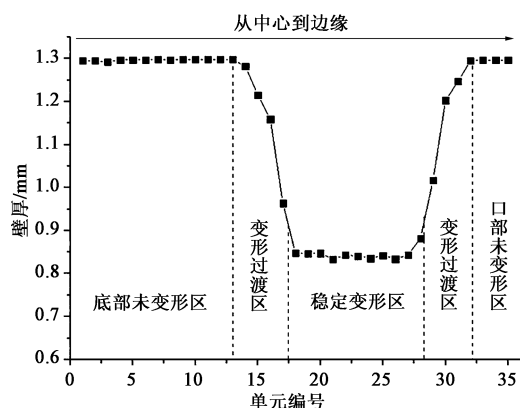


图4 圆台件壁厚分布图

Fig. 4 Wall thickness distribution diagram of conical frustum parts

薄, 近似看为壁厚分布均匀。

$$0.9t_0\cos\theta < t < 1.1t_0\cos\theta \quad (5)$$

圆台件的成形角是影响成形后壁厚分布的重要因素, 将壁厚均匀临界成形角 $\theta_{\text{临界}}$ 定义为不出现过度减薄的最大成形角。当成形角为 $\theta_{\text{临界}}$ 时, 制件稳定变形区域的壁厚满足式 (5); 而当成形角为 $\theta_{\text{临界}} + 1^\circ$ 时, 制件稳定变形区域的壁厚不满足式 (5), 则

此时成形角 θ 即为壁厚均匀临界成形角^[11-12], 简称为临界角, 具体确定壁厚均匀临界成形角的方法见下文。

以图5所示的圆台件尺寸为例, 圆台底部的直径 D 为 $\Phi 120$ mm, 高径比 $H/D=0.5$ (H 为圆台高度), 使用厚度为 1.3 mm 的 1060 铝板为坯料, 其中 θ 分别为 50° 、 55° 和 60° 。加工过程使用的球形工具头直径为 $\Phi 10$ mm、加工层间距为 0.5 mm、进给速度为 $2000 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, 工艺参数在后续研究中保持不变, 利用所建立的有限元模型对圆台件的成形过程进行数值模拟, 并对模拟结果进行后处理, 所得制件的壁厚分布情况如图6所示。

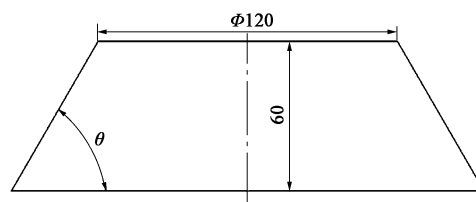
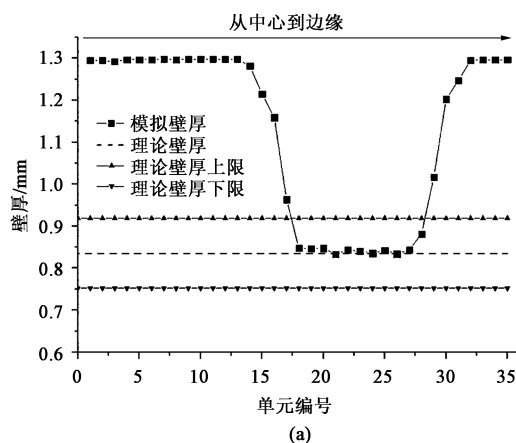
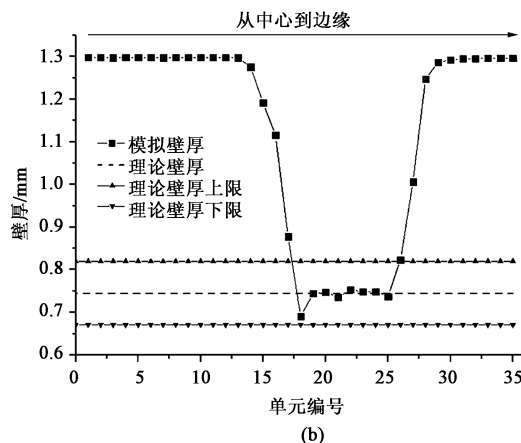


图5 目标圆台件尺寸

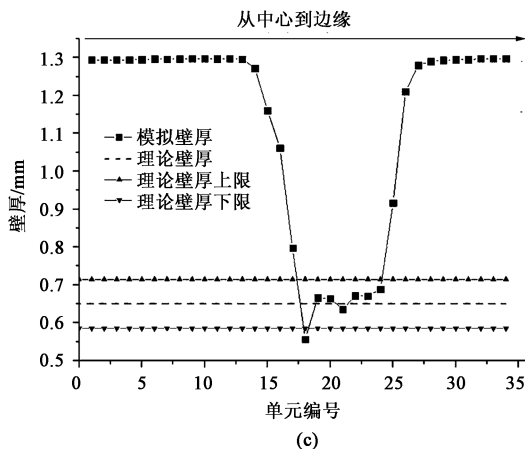
Fig. 5 Sizes of target conical frustum table part



(a)



(b)



(c)

图6 不同成形角下圆台件壁厚分布

(a) $\theta=50^\circ$ (b) $\theta=55^\circ$ (c) $\theta=60^\circ$

Fig. 6 Wall thickness distributions of conical frustum parts under different forming angles

图 6a 和图 6b 表明, 当 $\theta = 50^\circ$ 和 $\theta = 55^\circ$ 时, 制件的稳定变形区的壁厚值均在壁厚均匀范围以内; 图 6c 表明, 当 $\theta = 60^\circ$ 时, 在制件的稳定变形区内出现了过度减薄区域, 壁厚最小值落在理论壁厚下限以下。因此, 可以确定凸模支撑单道次渐进成形圆台件的壁厚均匀临界成形角在 $55^\circ \sim 60^\circ$ 之间。

重复上述模拟过程进一步寻找临界角所处范围, 经模拟发现稳定变形区的壁厚分布一般情况下均在理论壁厚上限以下, 临界角的判断条件可简化为确定壁厚最小值落在理论壁厚下限以上。如图 7 所示, 当 $\theta = 56^\circ$ 时, 制件的稳定变形区的最小壁厚值在理论壁厚下限以上; 当 $\theta = 57^\circ$ 时, 最小壁厚值在理论壁厚下限以下。因此, 根据临界角定义, 可以确定坯料厚度为 1.3 mm 的 1060 铝板在凸模支撑渐进成形底部直径为 $\Phi 120$ mm 圆台件时, $\theta_{\text{临界}} = 56^\circ$ 。

4 临界成形角的影响因素

针对凸模支撑单道次渐进成形所得的圆台件的壁厚分布是否受到圆台几何参数影响的问题, 本文在圆台高径比保持 0.5 不变的情况下, 探究圆台直径和原始坯料厚度变化对圆台件壁厚均匀成形临界

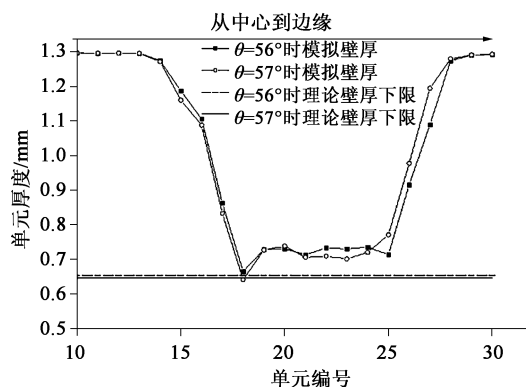


图 7 $\theta = 56^\circ$ 和 $\theta = 57^\circ$ 时圆台件壁厚分布

Fig. 7 Wall thickness distribution of conical frustum parts at $\theta = 56^\circ$ and $\theta = 57^\circ$

成形角的影响规律。

4.1 圆台直径的影响

首先研究在同一板料厚度下不同圆台直径 ($D = \Phi 40$ 、 $\Phi 60$ 、 $\Phi 80$ 、 $\Phi 100$ 和 $\Phi 120$ mm) 的圆台件 ($H/D = 0.5$) 的壁厚均匀临界成形角。根据上述临界成形角的定义, 寻找成形不同圆台直径的圆台件的临界成形角。图 8 为原始坯料厚度为 1.3 mm 时不同圆台直径的圆台件的壁厚分布。如图 8a 所示,

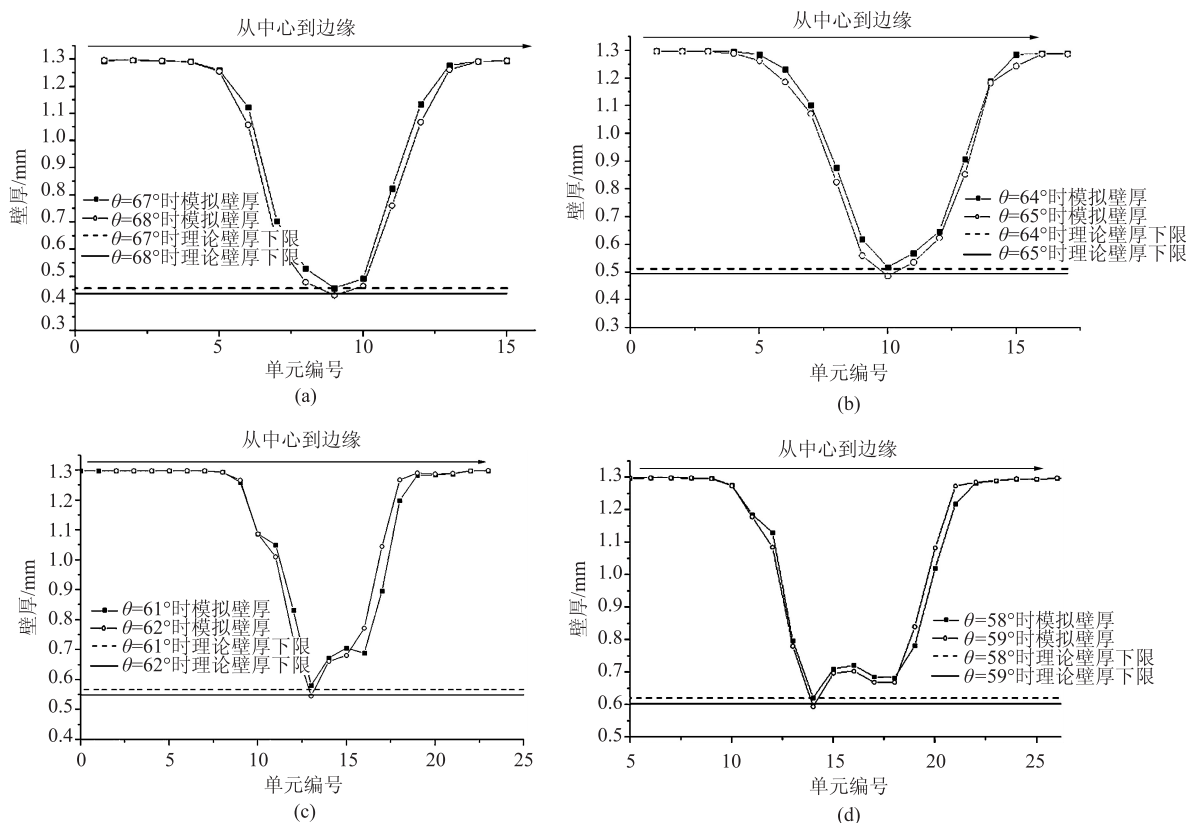


图 8 原始坯料厚度为 1.3 mm 时不同圆台直径时圆台件的壁厚分布

(a) $\Phi 40$ mm (b) $\Phi 60$ mm (c) $\Phi 80$ mm (d) $\Phi 100$ mm

Fig. 8 Wall thickness distributions of conical frustum parts under different diameters with original blank thickness of 1.3 mm

当圆台直径为 $\Phi 40$ mm 时, 成形角为 67° 的圆台件的最小壁厚为 0.464 mm, 位于理论壁厚下限 (0.457 mm) 以上; 而成形角为 68° 的圆台件的最小壁厚为 0.435 mm, 小于理论壁厚下限 (0.438 mm), 因此, 1.3 mm 原始坯料厚度下圆台直径为 $\Phi 40$ mm 的圆台件的临界成形角为 67° 。同理, 可得到圆台直径为 $\Phi 60$ 、 $\Phi 80$ 和 $\Phi 100$ mm 的圆台件的临界成形角分别为 64° 、 61° 和 58° 。绘制如图 9 所示临界成形角变化曲线图, 由图 9 可知, 使用原始坯料厚度为 1.3 mm 的 1060 铝板为坯料时, 圆台件凸模支撑单道次渐进成形圆台件的壁厚均匀临界成形角随着圆台直径的增大而减小, 且大致呈线性关系。

4.2 原始坯料厚度的影响

探究在同一圆台直径、不同坯料厚度 (0.84、1.10、1.30、1.60 和 2.00 mm) 下圆台件的临界成形角。图 10 为圆台直径为 $\Phi 120$ mm 时不同原始坯料厚度的圆台件的壁厚分布, 圆台成形高度为 60 mm, 即高径比 $H/D=0.5$ 。如图 10a 所示, 当原始坯料厚度为 0.84 mm 时, 成形角为 54° 的圆台件最小壁厚为 0.450 mm, 位于理论壁厚下限值

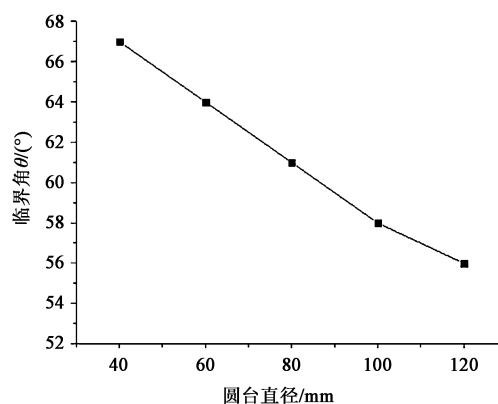


图 9 临界成形角随圆台直径的变化曲线

Fig. 9 Change curve of critical forming angles with diameter for conical frustum

(0.444 mm) 之上, 而成形角为 55° 的圆台件的最小壁厚为 0.429 mm, 小于理论壁厚下限值 (0.433 mm), 因此, 圆台直径为 $\Phi 120$ mm 下使用 0.84 mm 厚度的坯料成形的圆台件的临界成形角为 54° 。同理, 如图 10b、图 10c 和图 10d 所示, 使用此方法可得到原始坯料厚度为 1.10 mm、1.60 mm 和 2.00 mm 的圆台件的临界成形角分别为 55° 、 58° 和 59° 。绘制如图 11 所示临界成形角变化曲线图, 由

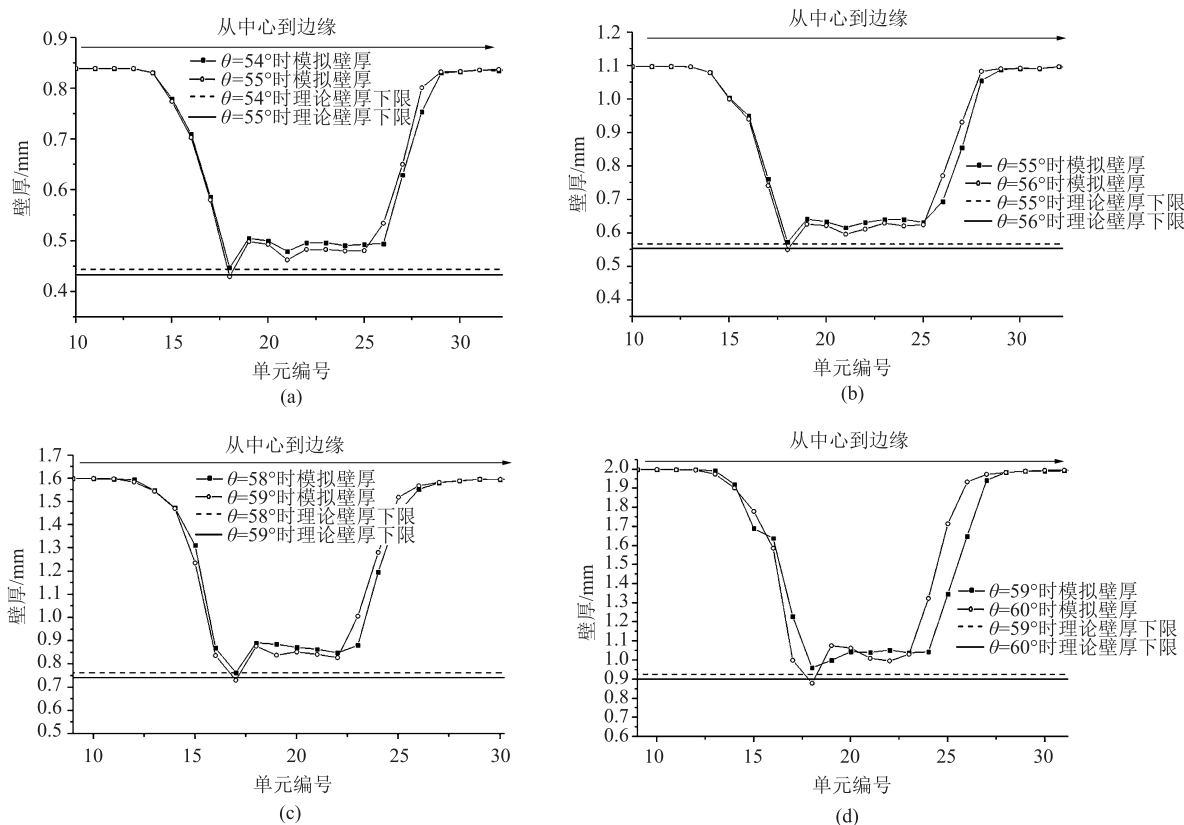


图 10 圆台直径为 $\Phi 120$ mm 时不同原始坯料厚度下的圆台件壁厚分布

(a) $t_0 = 0.84$ mm (b) $t_0 = 1.1$ mm (c) $t_0 = 1.6$ mm (d) $t_0 = 2.0$ mm

Fig. 10 Wall thickness distributions of conical frustum parts under different original blank thicknesses with conical frustum diameter of $\Phi 120$ mm

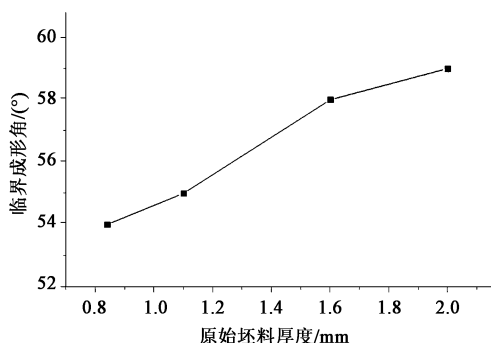


图 11 临界成形角随原始坯料厚度的变化曲线

Fig. 11 Change curve of critical forming angle with original blank thickness

图 11 可知, 成形同一圆台直径的圆台件时, 其临界成形角随着选用坯料厚度的增大而增大, 且大致呈线性关系。

5 临界成形角推算公式

通过上述寻找临界成形角的方法, 由大量模拟实验获得不同圆台直径和原始坯料厚度下圆台件的临界成形角, 如表 2 所示, 并绘制如图 12 所示的临界成形角变化曲线。

表 2 不同圆台直径和原始坯料厚度下圆台件的临界成形角 (°)

Table 2 Critical forming angles of conical frustum parts with different conical frustum diameters and original blank thicknesses (°)

圆台直径/ mm	原始坯料厚度/mm				
	0.84	1.10	1.30	1.60	2.00
Φ40	64	66	67	68	69
Φ60	61	63	64	65	66
Φ80	59	60	61	63	64
Φ100	56	57	58	59	60
Φ120	54	55	56	58	59

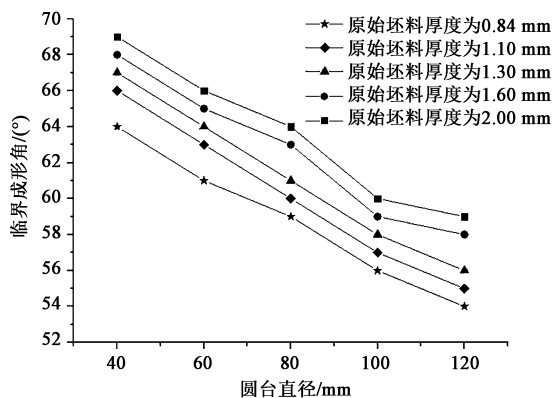


图 12 临界成形角变化曲线

Fig. 12 Change curves of critical forming angles

由图 12 可知, 高径比为 0.5 的圆台件的凸模支撑渐进成形的临界角大致与原始坯料厚度和圆台直径具有线性关系, 即存在如式 (6) 所示两元线性方程:

$$\theta_{\text{临界}} = k_1 t_0 + k_2 D + C \quad (6)$$

式中: $\theta_{\text{临界}}$ 为因变量; 原始坯料厚度 t_0 和圆台直径 D 为自变量; k_1 、 k_2 和 C 为待求解参数。

通过 Origin 软件进行多元线性回归, 可得: $k_1 = 4.176$, $k_2 = -0.133$, $C = 66.206$ 。

即临界成形角的推算公式为:

$$\theta_{\text{临界}} = 4.176 t_0 - 0.133 D + 66.206 \quad (7)$$

式 (7) 的相关系数 $R^2 = 0.98294$, 推算公式较为精确。

式 (7) 表示对于高径比为 0.5 的圆台件, 其圆台直径尺寸范围在 Φ40~Φ120 mm 内, 将使用厚度在 0.84~2.00 mm 的 1060 铝板作为坯料, 若已知圆台直径和所用坯料厚度, 则可以依据图 12 或式 (7) 快速获得其临界成形角。圆台件临界成形角的推算公式可以在一定范围内快速获得临界成形角, 为实际生产中获得壁厚分布均匀的圆台件的工艺设计提供依据。另外, 对于以圆台形状为基础的制件, 比如筒形件, 可以为其多次路径设计提供一定思路。

部分实验方案如表 3 所示, 使用厚度为 1.0 mm 的坯料成形直径为 Φ60 mm 的圆台件, 经临界成形角推算公式计算临界成形角为 62°; 使用厚度为 1.5 mm 的坯料成形直径为 Φ80 mm 的圆台件, 经临界成形角推算公式计算临界成形角为 62°。

表 3 实验验证方案

Table 3 Experimental verification schemes

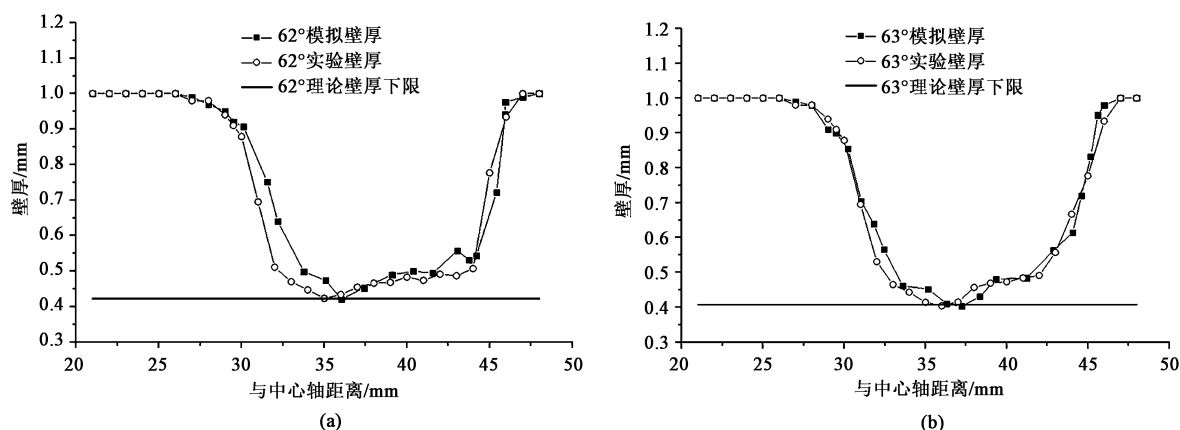
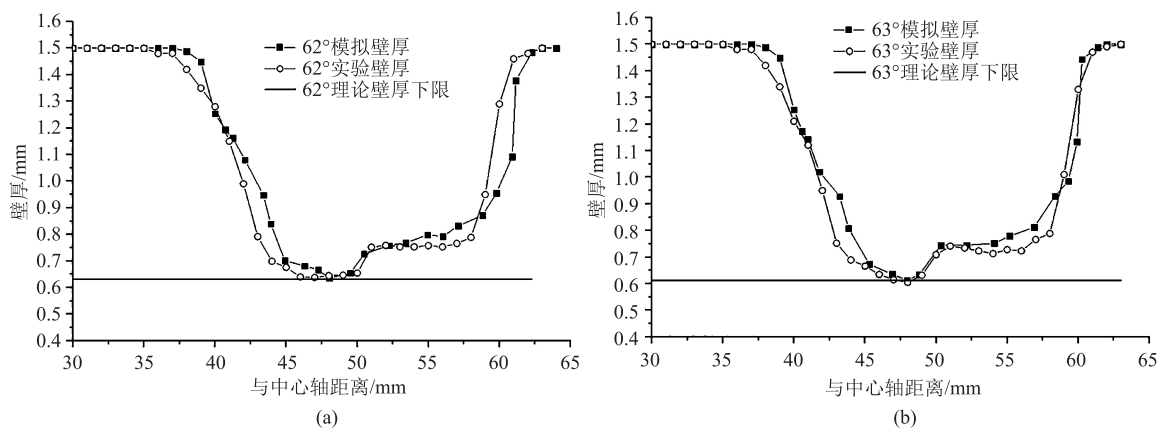
圆台直径/mm	坯料厚度/mm	临界成形角/(°)
Φ60	1.0	62
Φ80	1.5	62

在渐进成形机床上成形出目标制件, 将制件沿轴线切割, 如图 13 所示, 取中心轴作为起始线, 沿水平方向每隔 1 mm 设置壁厚测量点, 绘制如图 14 和图 15



图 13 实物剖面图

Fig. 13 Physical section draw

图 14 圆台直径为 $\Phi 60$ mm 的圆台件的壁厚分布图(a) $\theta = 62^\circ$ (b) $\theta = 63^\circ$ Fig. 14 Distribution diagrams of wall thickness for conical frustum parts with conical frustum diameter of $\Phi 60$ mm图 15 圆台直径为 $\Phi 80$ mm 的圆台件的壁厚分布图(a) $\theta = 62^\circ$ (b) $\theta = 63^\circ$ Fig. 15 Distribution diagrams of wall thickness for parts with conical frustum diameter of $\Phi 80$ mm

所示的壁厚分布曲线,并与数值模拟结果相比较,根据理论壁厚下限判断临界成形角。

由图 14 和图 15 可知,实验测得的壁厚曲线大致与模拟壁厚曲线吻合,模拟实验可信,圆台直径为 $\Phi 60$ 和 $\Phi 80$ mm 的圆台件在成形角为 62° 时的最小壁厚处于理论壁厚下限以上,在成形角为 63° 时最小壁厚小于理论壁厚下限,根据临界成形角定义可知, 62° 为此两种尺寸圆台件在对应坯料厚度下的临界成形角,验证了临界成形角推算公式。

6 结论

(1) 若圆台件的成形角小于临界成形角,则采用凸模支撑单道次渐进成形即可获得壁厚均匀的制件。

(2) 在高径比保持不变的情况下,随着圆台直径增大,临界成形角逐渐减小;坯料厚度增大,临

界成形角逐渐增大。

(3) 通过多元线性回归求解出高径比为 0.5 的圆台件临界成形角的推算公式,在一定范围内可快速获得圆台件临界成形角,为实际生产中获得壁厚分布均匀的圆台件的工艺设计提供依据。

参考文献:

- [1] 高锦张. 板料数控渐进成形技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
Gao J Z. NC Incremental Sheet Forming Technology [M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [2] Basak S, Prasad K S, Mehto A, et al. Parameter optimization and texture evolution in single point incremental sheet forming process [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2020, 234 (1-2): 126-139.
- [3] 阮健斌. 板料成形有限元数值模拟相关技术研究及其在柔性渐进成形中的应用 [D]. 北京: 中国石油大学(北京),

- 2018.
- Ruan J B. Research on Related Technology of Finite Element Numerical Simulation of Sheet Metal Forming and Its Application in Flexible Incremental Forming [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2018.
- [4] 耿佩, 崔玉琦, 党杰, 等. 板材单点渐进成形破裂模拟优化与实验验证 [J]. 锻压装备与制造技术, 2017, 52 (4): 68-70.
- Geng P, Cui Y Q, Dang J, et al. Simulation optimization and experimental verification of fracture during single point incremental forming process for sheet metal [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2017, 52 (4): 68-70.
- [5] 徐伟, 万轶, 沙鑫美. 渐进成形工艺参数的分阶段扰动粒子群算法优化 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (12): 116-121.
- Xu W, Wan Y, Sha X M. Optimization on incremental forming process parameters based on staged perturbation particle swarm algorithm [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (12): 116-121.
- [6] Mostafanezhad H, Menghari H G, Esmaili S, et al. Optimization of two-point incremental forming process of AA1050 through response surface methodology [J]. Measurement, 2018, 127: 21-28.
- [7] 张沈杨. 筒形件凸模支撑渐进成形工艺研究 [D]. 南京: 东南大学, 2020.
- Zhang S Y. Study on Incremental Sheet Forming of Punch Support for Cylindrical Parts [D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [8] 庞鹏辉. 铝合金板料有模单点渐进成形工艺数值模拟及优化 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2018.
- Pang P H. Numerical Simulation and Optimization of Single Point Incremental Forming Process for Aluminum Alloy Sheets [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.
- [9] 赵伟, 朱虎, 李吉龙. 面向板料姿态多方位调整式数控渐进成形的成形轨迹生成 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (8): 56-61.
- Zhao W, Zhu H, Li J L. Forming toolpath generation for CNC incremental forming based on sheet posture multi-directional adjustment [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (8): 56-61.
- [10] 蒋松. 金属板料渐进成形过程的数值模拟 [D]. 南京: 东南大学, 2010.
- Jiang S. Numerical Simulation of Incremental Metal Forming Process [D]. Nanjing: Southeast University, 2010.
- [11] 丁奇, 章珈彬, 张春. 基于响应面法的多道次单点渐进成形径向尺寸的控制 [J]. 锻压技术, 2020, 45 (7): 89-94.
- Ding Q, Zhang J B, Zhang C. Radial dimension control on multi-pass single point incremental forming based on response surface method [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (7): 89-94.
- [12] 柏朗, 李言, 杨明顺, 等. 工业纯铝 1060 板料单点增量成形极限实验研究 [J]. 机械科学与技术, 2017, 36 (2): 314-318.
- Bai L, Li Y, Yang M S, et al. Experimental investigation of forming limit in single point incremental forming of 1060 aluminum sheet [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2017, 36 (2): 314-318.
- +++++
- (上接第 92 页)
- Jia L L. Extrusion Technology and Die [M]. Beijing: China Machine Press, 2004.
- [7] 曹金豆. 直齿圆柱齿轮连续冷挤压工艺及模具技术研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- Cao J D. Clod Extrusion Process and Die Design for Spur Gear of Camion [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [8] 张莉, 李升军. DEFORM 在金属塑性成形中的应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- Zhang L, Li S J. Application of DEFORM in Metal Plastic Forming [M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [9] 翟继强. 车轮锻造过程数值模拟及锻造模具 CAD 系统 [D]. 济南: 山东大学, 2012.
- Zhai J Q. Wheel Forging Process Numerical Simulation and Forging Die CAD System [D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [10] 孟丽芬, 胡成亮, 赵震. 金属塑性成形中摩擦模型的研究进展 [J]. 模具工业, 2014, 40 (4): 1-7.
- Meng L F, Hu C L, Zhao Z. Research progress of friction model in metal plastic forming [J]. Die and Mould Industry, 2014, 40 (4): 1-7.
- [11] 谷志飞, 吴伯杰. 滑动叉无飞边锻造工艺有限元模拟研究 [J]. 塑性工程学报, 2005, 12 (5): 38-42.
- Gu Z F, Wu B J. The research of flashless forging of aslide fork [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2005, 12 (5): 38-42.
- [12] 李凤仙, 王春伟. 基于 DYNIFORM 的汽车横梁模具型面的参数化设计与工艺分析 [J]. 模具制造, 2008, 8 (9): 8-13.
- L F X, Wang C W. Parametric design and process design of automobile transom die forming surface based on DYNIFORM [J]. Die and Mould Manufacture, 2008, 8 (9): 8-13.
- [13] 白代平, 李艳芹, 段红杰, 等. 汽轮机叶片高温变形中数值模拟组织演化规律研究 [J]. 现代制造工程, 2015, (6): 104-109.
- Bai D P, Li Y Q, Duan H J, et al. Microstructure evolution numerical simulation law research of turbine blade in the high temperature [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2015, (6): 104-109.
- [14] 莫惟高. 铝合金板温成形中的摩擦理论与实验研究 [D]. 南昌: 南昌航空大学, 2007.
- Mo W G. Experimental Study on Warming Forming Friction Theory of Aluminium [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2007.
- [15] 张效迅. 大锻件锻造过程中内部空洞型缺陷演化规律的研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2009.
- Zhang X X. Study on the Evolution Rule of Internal Cavity Defect in Forging Process of Large Forgings [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009.
- [16] 成大先. 机械设计手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- Cheng D X. Manual of Mechanical Design [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.