

超声振动因子对镁合金单点渐进成形板材性能影响规律

苏春建, 张 柯, 姜淑梅, 张 克, 许婷婷, 王 清

(山东科技大学, 山东 青岛 266590)

摘 要: 研究并掌握施加超声振动后镁合金板材在各成形参数下的成形规律, 对解决温渐进成形带来的材料受热不均、随着温度的改变润滑薄膜在局部高温下引起的粘着、模具强度和寿命随温度升高而降低等问题, 完善镁合金超声振动单点渐进成形工艺有着重要的理论和实际应用价值。以方锥盒形件为研究对象, 以最大剪切应力、减薄率和成形精度为指标, 分析不同参数: 工具头尺寸、板厚和振幅对镁合金板材超声振动单点渐进成形性能的影响。结果表明: 施加超声振动后, 最大剪切应力和最大减薄率均有明显的降低, 成形精度有明显的提高且在工具头直径 $D=10$ mm, 板厚 $h=1.0\sim 1.3$ mm, 振幅 $A/2=0.04$ mm, 成形性能改善最为明显。

关键词: 超声振动; 渐进成形; 减薄率; 方锥盒形件

中图分类号: TG386; TG146.22

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)07-2172-07

镁及其合金不仅常温下塑性较低, 中高温下的成形能力也不高, 通常需要对镁合金板材进行等温加热才能获得较好的成形效果^[1-3]。虽然, 对镁合金加热在一定程度上可以改善镁合金板材室温下难以成形的缺陷, 但温热成形也引起了一系列的问题, 如材料受热不均、渐进成形加热速度较慢及模具强度和寿命随温度升高而降低等^[4-6], 为了解决上述问题, 引入超声振动塑性成形技术, 提高镁合金室温下的成形能力。

超声振动是以一种能量形式作用到成形板材上, 产生高频振动, 金属微粒获得能量, 热运动加剧, 进而能够降低板材成形过程中的成形力, 减少模具与工件的摩擦, 并能有效的提高制件的表面质量和尺寸精度^[7,8]。近年来, 众学者研究了在超声振动条件下的拉拔、拉深、镦粗、挤压等塑性成形过程^[9], 还罕有地把超声振动技术引入到镁合金渐进成形中。本研究以方锥盒形件为研究对象, 建立振动单点渐进成形模型, 采用有限元仿真及实验相结合的方法, 分析施加振动前后, 各参数对镁合金板材的最大剪切应力、减薄率和成形精度的具体影响规律, 为丰富和发展金属超声振动塑性成形理论, 促进金属超声振动塑性成形技术的应用提供理论依据。

1 超声振动单点渐进成形理论解析

1.1 超声振动单点渐进成形过程建模

金属板材单点渐进成形技术, 采用“分层制造”的思想, 将复杂的三维零件沿 z 轴, 如等高线一样离散出若干二维层, 再以这些二维层为单位进行逐层的局部塑性加工, 最终将板材加工成所需工件^[10]。超声振动单点渐进成形技术是在传统单点渐进成形技术的基础上引入振动塑性成形理论和非局部摩擦理论, 在成形工具头上施加 $y=A\sin(2\pi ft)$ 的简谐振动。本研究建立了超声振动单点渐进成形模型, 如图 1 所示。

1.2 成形中减薄率和剪切应力的分析

成形工具头在加工某一水平面时, 沿垂直板材的方向以特定振幅和频率做往复运动, 致使成形工具头

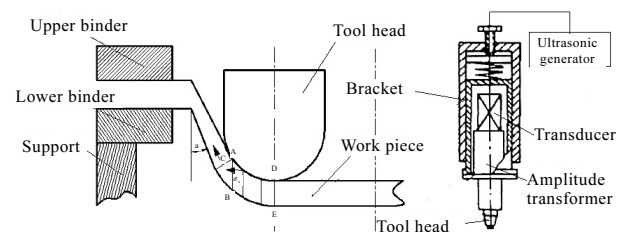


图 1 超声振动单点渐进成形模型

Fig.1 Ultrasonic vibration model of single point incremental forming

收稿日期: 2017-07-08

基金项目: 国家自然科学基金 (51305241); 山东省自然科学基金 (ZR2014JL040); 山东省泰山学者建设工程专项资金 (tshw20130956)

作者简介: 苏春建, 男, 1980 年生, 博士后, 副教授, 山东科技大学机械电子工程学院, 山东 青岛 266590, 电话: 0532-86057207, E-mail: suchunjian2008@163.com

与待加工板料局部瞬时接触与分离。超声振动单点渐进成形中，板料只存在 z 轴做剪切变形，其简化变形图如 2 所示。

假定变形区为均匀变形，成形中，板料只做轴向滑移，不做周向滑移，减薄率 ψ_t 为：

$$\psi_t = (1 - \sin\alpha) \times 100\% \tag{1}$$

式中， ψ_t 为减薄率； α 为成形倾角。

根据作用于截面 AB 上的全应力 σ 、作用于剪切面 AB 上的应力 σ_x 和平行于剪切面 AB 上的剪切应力 τ_0 关系，如图 3 所示。

可知，平行于剪切面 AB 上的剪切应力 τ_0 为：

$$\tau_0 = \frac{\sigma_s \bar{\epsilon} h \tan\alpha (\Delta h + A \sin(2\pi ft))}{\gamma_0^2 \pi} \times \sqrt{1 + \frac{\frac{1}{16} \pi^2 \cos^4 \alpha}{(\frac{90-\alpha}{360} \pi - \frac{1}{4} \sin 2\alpha)^2}} \tag{2}$$

式中， h 为板料的厚度，mm； Δh 为工具头进给量，mm； r_0 为工具头半径，mm； α 为成形角，(°)； σ_s 为材料的屈服极限强度，MPa； f 为振动频率，kHz； A 为振幅，mm； $\bar{\epsilon}$ 为等效应变； t 为时间，s。

2 振动前后成形性能的有限元分析

2.1 有限元模型的建立

材料采用 AZ31B 镁合金，以方锥盒形件为研究对象，其形状及尺寸如图 4 所示。成形过程中，约束板材四边全部自由度来代替上下压边圈，只保留成形工具头部分，通过三维软件建立有限元模型如图 5 所示。

2.2 工艺参数

坯料材料为 AZ31B 镁合金，板料尺寸为 100 mm×100 mm×1 mm；成形工具头材料为轴承钢，模拟中进给速度为 300 mm/min，厚度方向取 5 个积分点，剪切因子为 5/6，罚因子为 0.01；其他参数视变量情况而定，所需材料参数如表 1 所示。

2.3 超声振动在渐进成形模拟的加载方式

普通单点渐进成形通常是将工具头成形曲线离散成若干小直线，并将每一层离散成一系列坐标点，每

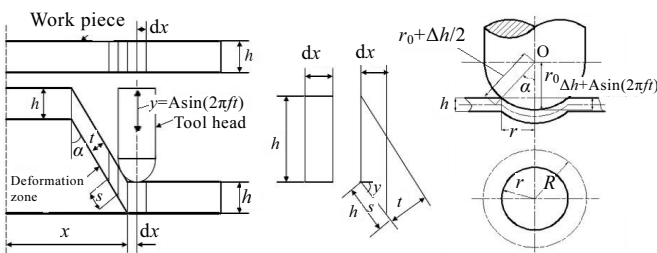


图 2 超声振动单点渐进成形变形过程

Fig.2 Ultrasonic vibration deformation of single point incremental forming process

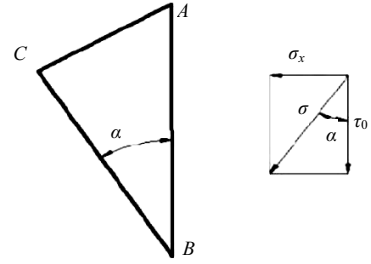


图 3 AB 截面上的应力分析

Fig.3 Stress analysis of AB section

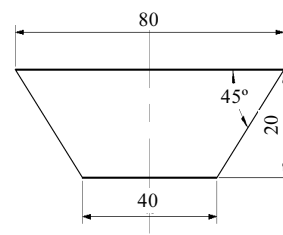


图 4 工件形状及尺寸

Fig.4 Shape and size of parts

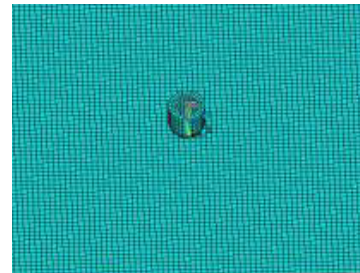


图 5 有限元模型

Fig.5 Finite element model

一个坐标点对应一个时间点，以时间-位移一一对应的方式完成工具头轨迹的动态加载。超声振动单点渐进成形技术是以普通单点渐进成形技术为本体，对所用的工具头额外加载 $y = A \sin(2\pi ft)$ 的简谐振动。因此，需要对数控加工导出的刀位文件中的 z 向的数据，根据所设定的频率和振幅，将 z 向的数据进行处理，重新导出新的 z 向数据。完成上述设置，进行求解设置，生成 K 文件并将其提交 LS-DYNA SOLVER 进行求解。

3 超声振动单点渐进成形实验研究

为了进一步研究施加振动前后各参数对镁合金超声振动单点渐进成形性能的影响规律，验证模拟的准确性，借助镁合金板材超声振动单点渐进成形实验系统，开展相关实验研究。

表 1 AZ31B 镁合金板材性能参数

Table 1 Performance parameters of AZ31B magnesium alloy sheet

Material	Density, $\rho / \times 10^6 \text{ kg}\cdot\text{mm}^{-3}$	Elastic modulus, $E / \times 10^{10} \text{ Pa}$	Poisson ratio, μ	Hardening exponent, n	Width-to-thickness ratio			Strain hardening coefficient, K
					0°	45°	90°	
AZ31B	1.77	4.5	0.35	0.15	1.596	1.617	1.773	1.5×10^8

实验系统主要包括普通数控渐进机床、成形工具头、超声激振系统和成形辅助支撑装置，其中超声激振系统装置主要包括：超声波发生器、超声波换能器、超声波变幅杆以及相应的支架。实验结果如图 6 所示。

4 结果与分析

4.1 工具头对单点渐进成形结果影响的分析

分析工具头对成形性能影响的模拟及实验条件如表 2 所示，表中的动静摩擦系数分别为实验获得。其中，A 组没有施加振动，B 组施加振动，AS 表示没有施加振动的模拟结果，AE 表示没有施加振动的实验结果，BS 表示施加振动的模拟结果，BE 表示施加振动的实验结果。A、B 2 组板厚均取 $h=1 \text{ mm}$ ，工具头半径 $R=3, 4, 5, 6, 7, 8 \text{ mm}$ 。图 7 为部分不同半径工具头成形件的剪切应力分布云图。

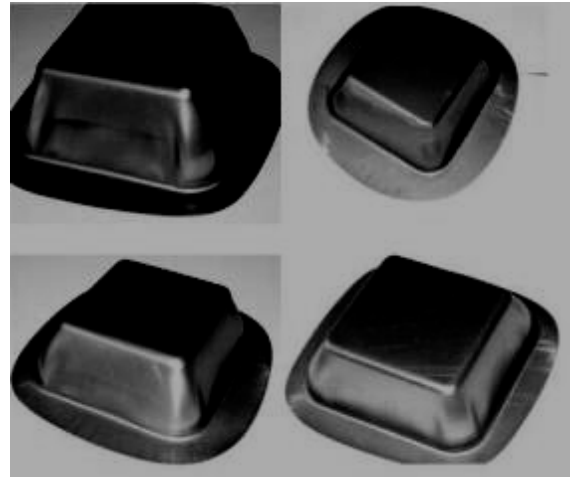


图 6 实验结果

Fig.6 Experimental results

表 2 模拟条件

Table 2 Simulation conditions

Part	Amplitude, $A/2/\text{mm}$	Frequency, f/kHz	Sheet size/ mm	Feed speed, $V/\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$	Layer feed/mm	Working depth/ mm	Static friction coefficient	Dynamic friction coefficient
A	0	0	$100 \times 100 \times 1$	300	0.7	20	0.2	0.1
B	0.04	20	$100 \times 100 \times 1$	300	0.7	20	0.2	0.1

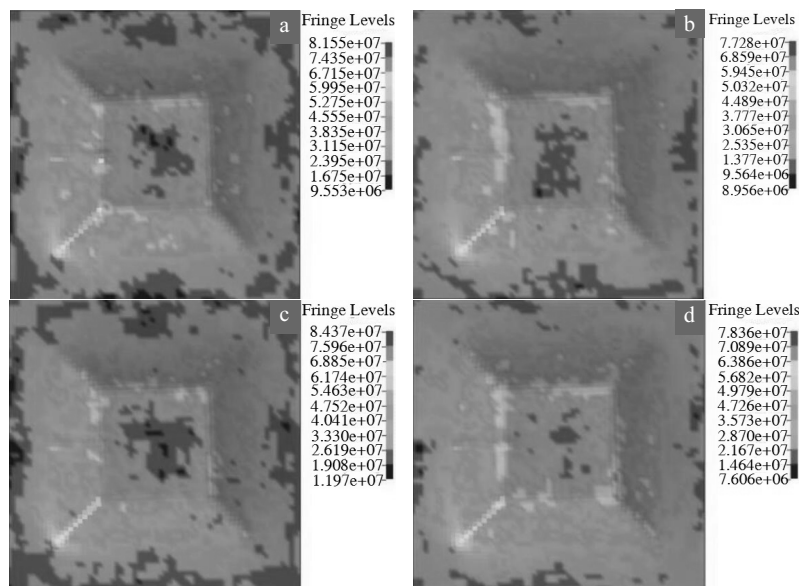


图 7 不同工具头半径成形件的剪切应力云图

Fig.7 Forming shear stress nephograms of forming parts with different tool radii: (a) A, $R=3 \text{ mm}$; (b) B, $R=3 \text{ mm}$; (c) A, $R=5 \text{ mm}$; (d) B, $R=5 \text{ mm}$

由图 7 可知，施加振动前后，随工具头尺寸的增大，成形件剪切应力分布规律基本类似，最大剪切应力分布在成形件底部直边处。图 8 和图 9 为不同工具头半径在模拟和实验中得到的最大剪切应力和减薄率的变化曲线。

由图 9 可知，施加振动后，模拟得到的最大剪切应力随工具头尺寸的增大而增大，成形工具头半径增大，与板料的接触面积增大，发生塑性变形的单元也就越多，所需的剪切应力也就越大，与实验得到的结果相符。成型件的减薄率随着工具头的增大而减小，工具头半径增大，板材受力均匀，破裂的可能性降低。施加振动前，成形件减薄率较大，存在较大成形隐患，施加振动后，模拟的减薄率降低了 3%，实验的减薄率略有增大，但比施加振动前要低，有效的降低了工件发生破裂的可能性（理论减薄率为 30%左右）。采用正交实验法，选取工具头半径 $R=3, 5, 7$ mm，进行相关实验验证，图 10、图 11 和图 12 为不同工具头尺寸下模拟与实验的成形件中截面。

由图 10~图 12 可知，模拟与实验所得成形件中截面规律一致，施加振动前后，随成形工具头尺寸的减

小，所得模拟与实验成形件中的截面整体上更接近目标成形件，但当工具头尺寸过小时易发生应力集中和切削现象，致使板材产生破裂；当成形工具头过大时，如图 12 所示，局部成形加工不到位，致使板材成形质量较差。

4.2 板厚对单点渐进成形结果影响的分析

分析板厚对成形性能影响的模拟条件：其他参数保持不变，成形工具头半径 $R=5$ mm，板厚 $h=1.0、1.1、1.2、1.3、1.5$ mm 进行相关模拟。图 13 为施加振动前后，不同板厚下所得成形件的剪切应力云图。

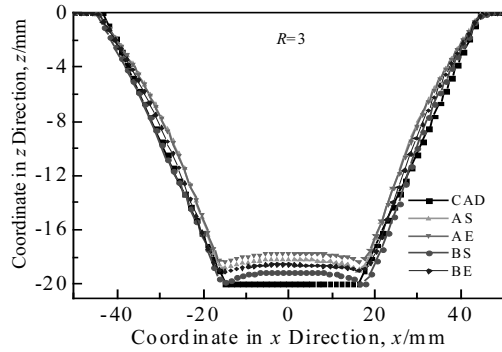


图 10 工具头 $R=3$ mm 得到的成形件中截面

Fig.10 Cross section of forming part under tool head of $R=3$ mm

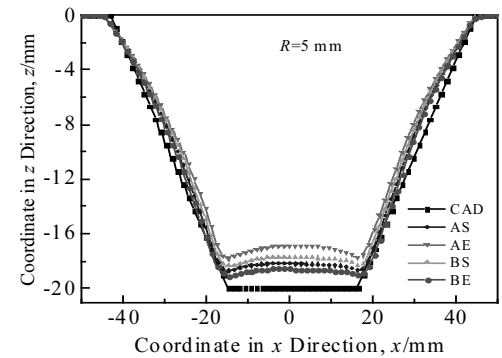


图 11 工具头 $R=5$ mm 得到的成形件中截面

Fig.11 Cross section of forming part under tool head of $R=5$ mm

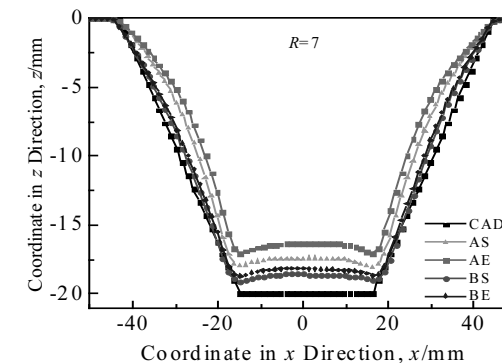


图 12 工具头 $R=7$ mm 得到的成形件中截面

Fig.12 Cross section of forming part under tool head of $R=7$ mm

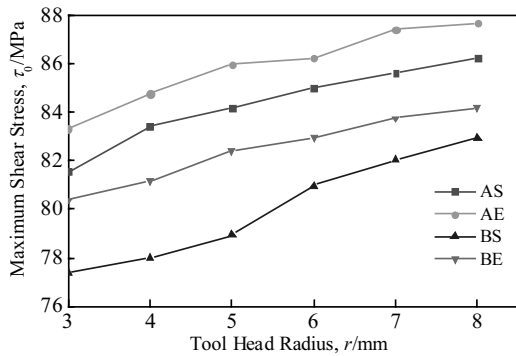


图 8 最大剪切应力随工具头尺寸变化的曲线

Fig.8 Curves of maximum shear stress changing with tool head size

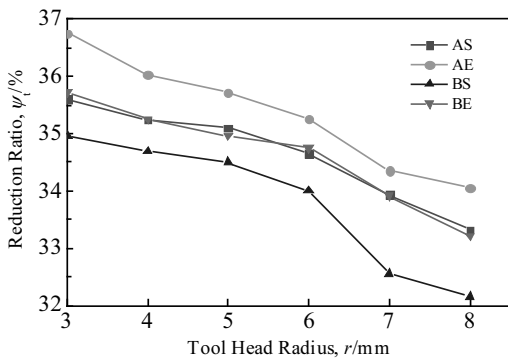


图 9 不同工具头尺寸成形件减薄率的曲线

Fig.9 Thinning rate curves of tool head forming part with different sizes

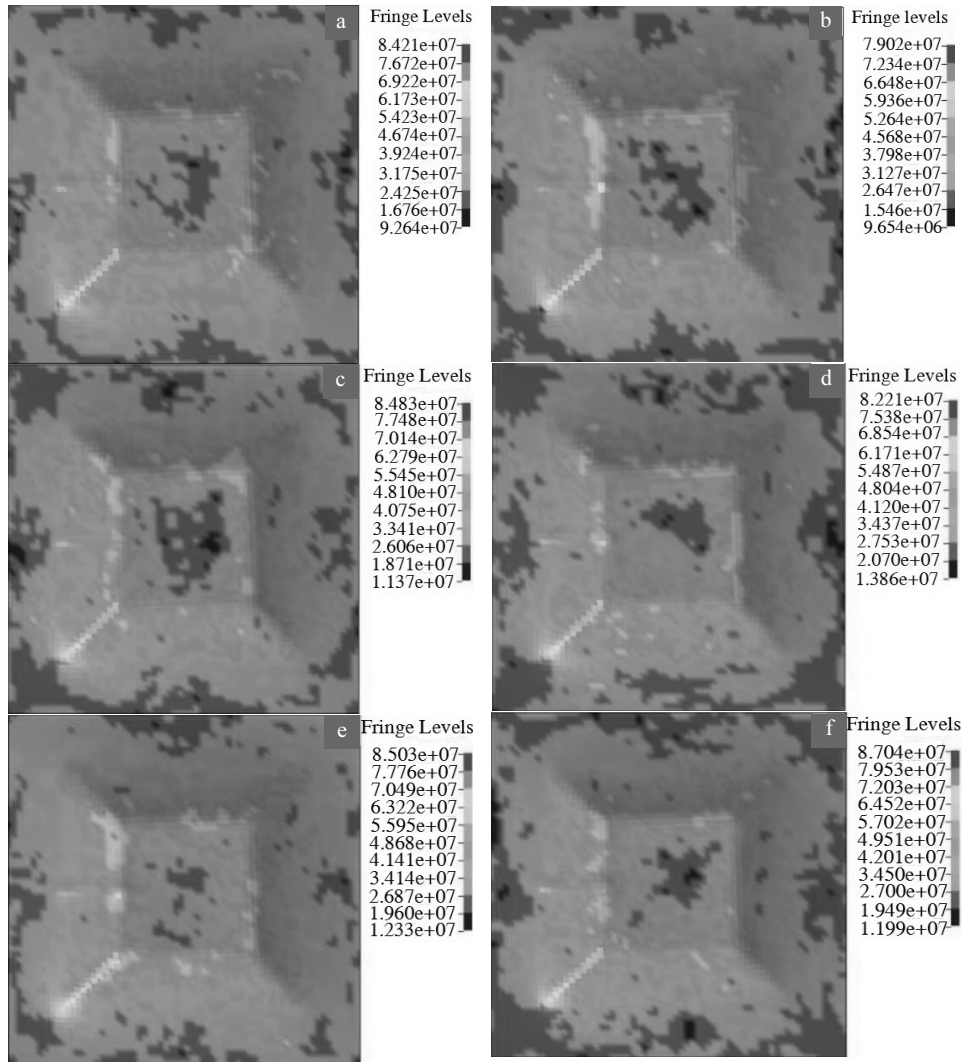


图 13 不同板厚成形件的剪切应力云图

Fig.13 Shear stress nephograms of forming parts with different thickness: (a) A, $h=1.0$ mm; (b) B, $h=1.0$ mm; (c) A, $h=1.2$ mm; (d) B, $h=1.2$ mm; (e) A, $h=1.5$ mm; (f) B, $h=1.5$ mm

由图 13 可知，板材厚度在 1.0~1.5 mm 范围内施加振动前后，剪切应力分布在成形件底边中间及周边。

由图 14 和图 15 可知，结合模拟和实验来看，总体上最大剪切应力随着板厚的增加成上升的趋势，板厚增加，所需的成形力增大，剪切应力也会随之增大。施加振动后，最大剪切应力在 1.0~1.3 mm 内改善较为明显，下降 3~5 MPa；当板材厚度超过 1.3 mm，施加振动后，板厚对最大剪切应力的改善效果不明显。但就总体而言，施加振动后，最大减薄率变化更加平稳，基本维持在 34%~35%之间。

由图 16 不同板厚模拟和试验成形时得到的中截面图，可以看出模拟和实验结果拟合性很高，在板材厚度为 1.2 mm 时，与预期成形最为接近。

4.3 振幅对单点渐进成形结果影响的分析

模拟时其他参数保持不变，成形工具头半径 $R=5$ mm，材料板厚 $h=1$ mm，变量参数改为振幅，将振动频率设为 20 kHz，振幅分别选取 0、 $A/4$ 、 $A/3$ 、 $A/2$ 、 A 和 $2A$ ，其中 $A=0.08$ mm，分析振幅对单点渐进成形性能的影响。图 17 为振幅为 $A/2$ 和 $A/4$ 下剪切应力及减薄率的云图。

由图 17 可知，随振幅的增大，最大剪切应力均分布在成形件底部直边及进退刀点处。

由图 18 和图 19 可知，最大剪切应力随振幅的增大整体上呈下降的趋势。在 0~0.08 mm 内时，减薄率变化不大，围绕 36% 上下浮动；当振幅为 0.16 mm 时，减薄率变化较大，减薄率接近 38%，易发生破裂。图 20 为模拟与实验所得成形件中截面。

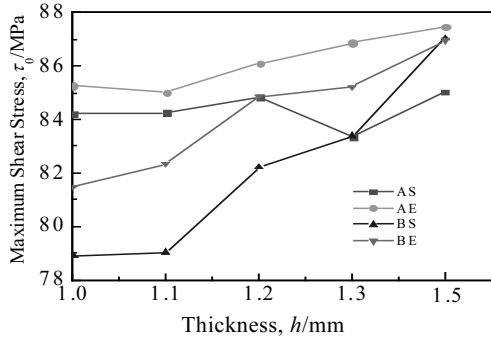


图 14 不同板厚成形件最大剪切应力的曲线

Fig.14 Maximum shear stress curves of forming part with different thickness

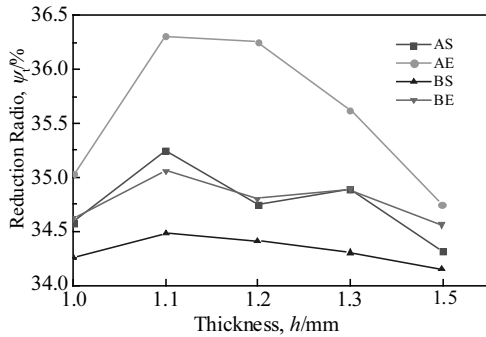


图 15 不同板厚成形件最大减薄率的曲线

Fig.15 Maximum thinning rate curves of forming part with different thickness

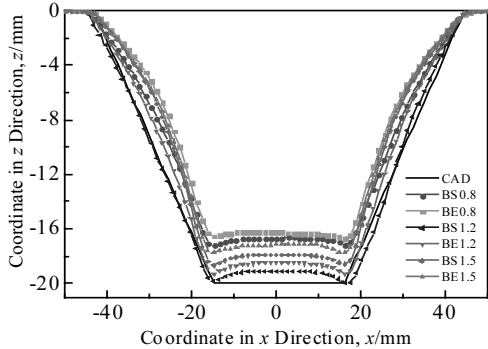


图 16 不同板厚模拟和试验成形时得到的中截面

Fig.16 Cross section of forming part with different thickness in the simulation and experiment

由图 20 可知，随着振幅的增大，所得试样中截面与模拟中截面整体趋势大致相同，当振幅为 0.04 mm 时，所得试样中截面与目标成形件最为接近，模拟结果和实验结果都是在振幅为 0.04 mm 时，成形质量较好。施加振动后，板材的成形力和减薄率都有所降低，

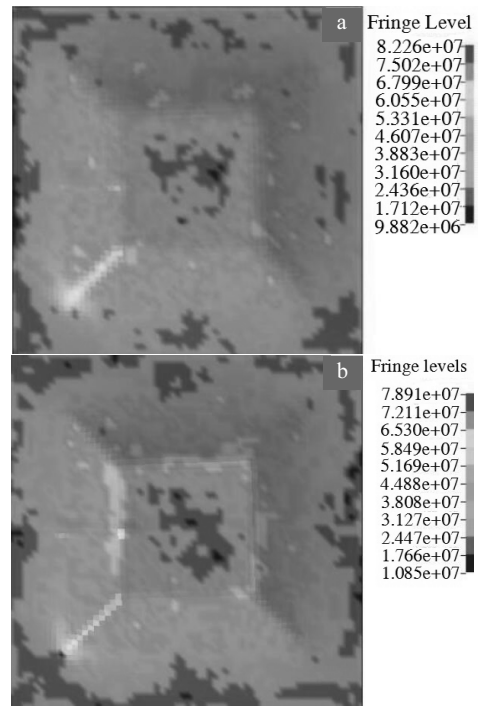


图 17 不同振幅下成形件剪切应力云图

Fig.17 Shear stress nephograms of forming part with different amplitudes: (a) A/4 and (b) A/2

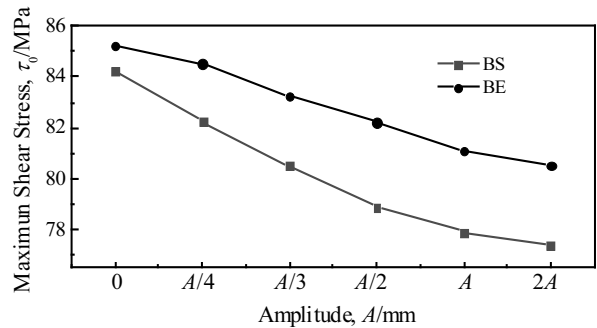


图 18 成形工件的最大剪切应力随振幅变化的曲线

Fig.18 Curves of maximum shear stress varying with the amplitude

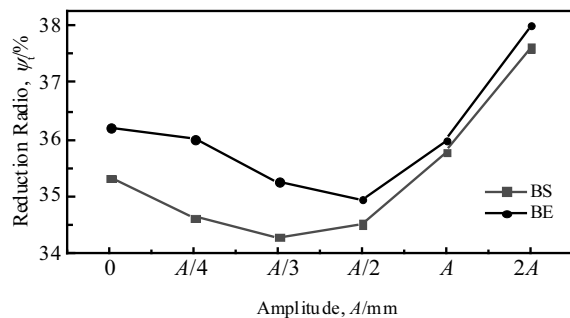


图 19 成形工件的最大减薄率随振幅变化的曲线

Fig.19 Curves of reduction ratio varying with the amplitude

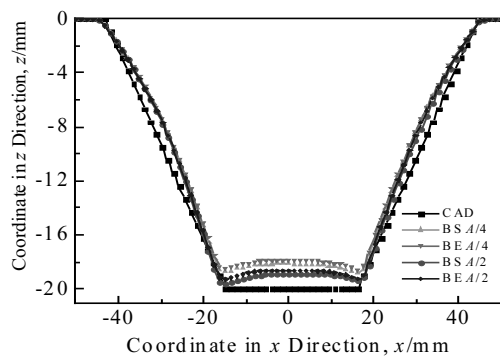


图 20 不同振幅得到的成形件中截面

Fig.20 Cross section of forming parts with different amplitudes

振幅越大,提供的振动能量越大,工具头与板材接触单元越容易发生塑性变形,既降低了成形力,也提高了材料的塑性流动,致使材料发生“软化”现象。但振幅达到某个临界值 A 时,“软化”机制就会转化为“硬化”,不利于板料的成形,反映在减薄率值较大,板材容易破裂,此结论与文献[8]相类似。

5 结 论

1) 施加振动前后,随工具头半径、板厚和振幅的改变成形件剪切应力分布规律基本一致,成形件最大剪切应力都分布在底边中间及 4 个成形角斜边处。

2) 施加振动后,当工具头直径为 10 mm、板材厚度为 1.0~1.3 mm、振幅为 $A/2=0.04$ mm 时,最大剪切应力和减薄率等均有改善,“软化”机制较为明显,成形精度较高。

Rules of Impact of Ultrasonic Vibration Factor on Performance of Magnesium Alloy Sheet in Single Point Incremental Forming

Su Chunjian, Zhang Ke, Lou Shumei, Zhang Ke, Xu Tingting, Wang Qing
(Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: It is very important to research and master the rule of incremental forming of magnesium alloys with ultrasonic vibration under different process parameters for theoretical and practical application. This has significant value of theory and engineering application to solve the deficiencies, such as plate uneven heating and heating slower, adhesion of the lubricant film caused by partial higher temperature with the changing temperature, the decline of mold strength and service life with the increase of temperature, and to improve the progress of the magnesium alloy plate ultrasonic vibration single point incremental forming. We took the square pyramid box for research, and the maximum shear stress, reduction ratio, forming accuracy as indexes to analyze the influence of different parameters on the magnesium alloy plate ultrasonic vibration single point incremental forming, including the tool head size, the thickness, and the amplitude. The results show that the maximum shear stress and the maximum reduction are obviously reduced after applying ultrasonic vibration, and the forming accuracy is markedly improved; when the tool head diameter is 10 mm, thickness is 1.0~1.3 mm, and the amplitude ($A/2$) is 0.04 mm, the forming properties are improved most significantly.

Key words: ultrasonic vibration; single point incremental forming; reduction ratio; square pyramid box

Corresponding author: Su Chunjian, Postdoctor, Associate Professor, College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, P. R. China, Tel: 0086-532-86057207, E-mail: suchunjian2008@163.com

参考文献 References

- [1] Cao Xiaoqing, Xu Pingping, Ma Hongwei *et al.* *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2016, 26(9): 2426
- [2] Luo Renping(罗仁平), Huang Lei(黄雷), Dai Xuan(戴僦) *et al.* *Journal of Plasticity Engineering(塑性工程学报)*[J], 2015, 22(1): 82
- [3] Su Chunjian(苏春建), Li Tiantian(李甜甜). *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属工程材料)*[J], 2015, 44(3): 649
- [4] Ambrogio G, Filice L, Gagliardi F *et al.* *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2012, 58(9-12): 941
- [5] Fu Zemin(付泽民), Gong Pan(龚攀). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology(国际先进制造技术)*[J], 2014, 71(1): 357
- [6] Cao Xiaoqing(曹晓卿), Liu Yi(刘毅), Wang Jingwei(王敬伟) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering(稀有金属材料与工程)*[J], 2013, 42(3): 550
- [7] Abdul A S, Lucas M. *Applied Mechanics and Materials*[J], 2010, 24(25): 311
- [8] Wen Tong(温彤), Chen Xia(陈霞). *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering(机械科学与技术)*[J], 2013, 32(2): 221
- [9] Zhong Chongkai(仲崇凯), Guan Yanjin(管延锦). *Journal of Net Shape Forming Engineering(精密成形工程)*[J], 2015, 7(1): 29
- [10] Ambrogio G, Filice L, Manco G L. *CIRP Annals- Manufacturing Technology*[J], 2008, 57(3): 257