

AZ31B 镁合金轴对称件单点无模温 渐进成形新工艺规律

苏春建, 李甜甜

(山东科技大学, 山东 青岛 266590)

摘要: 研究并掌握镁合金板材在不同工艺参数条件下的渐进成形规律对完善镁合金单点温渐进成形工艺有着重要的理论和实际应用价值。以变锥角圆台件为研究对象, 以有限元软件 ANSYS/LS-DYNA 为工具, 以成形件的等效应力、减薄率和板厚变化为研究指标, 研究了不同工艺参数: 成形温度、摩擦条件和工具头直径对 AZ31B 镁合金板材单点温渐进成形的影响。结果表明: 在成形温度为 250 °C, 静摩擦系数为 0.2、动摩擦系数为 0.1, 工具头直径在 10~12 mm 范围内, AZ31B 镁合金板材具有良好的单点渐进成形性能。

关键词: AZ31B 镁合金; 单点温渐进成形; 工艺参数; 数值模拟

中图分类号: TG386

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2015)03-0649-07

镁合金具有优异的物理和机械性能, 被广泛应用于航空航天与军工领域。其在室温下塑性变形能力差, 但在一定温度下具有良好的成形性能。

渐进成形是一种新型的金属板材数字化成形技术, 其采用分层制造思想, 对板材进行逐次局部变形代替整体成形, 最终将板材成形为所需的工件。单点温渐进成形已逐渐进入镁合金薄板类零件成形领域, 其广阔的应用前景和发展潜力, 已引起了国内外学者的高度重视并展开了一定的研究^[1-6]。

Jingee Park 等人研究并利用工具头高速自转局部摩擦产热来实现渐进成形过程^[7]。Y. H. Ji 在加工温度仅为 150 °C 时成功制得了 AZ31 镁合金椭圆形球面^[8]。Otsu Masaaki 等人提出了采用单工步和多工步渐进成形工艺控制工件形状和硬度的思想^[9]。国内学者对渐进成形也进行了一定的研究: 王玉华、高霖等人对 AZ31B 镁合金在不同温度和不同工艺参数条件下的热渐进成形规律进行了探索研究^[10]; 张青来等人对 AZ31B 镁合金板材热渐进成形进行了工艺研究和理论分析^[11]; 冯甜甜等人研究了 AZ31 镁合金板材数控渐进成形过程中的摩擦和润滑机理^[12]。

但是, 镁合金单点温渐进成形技术的研究起步较晚, 仍处于理论和实验研究阶段, 并没有将理论分析、数值模拟和实验研究有机系统的结合起来对镁合金单

点温渐进成形工艺过程进行研究。因此, 本研究对镁合金板材单点温渐进成形工艺过程进行理论解析、数值模拟和实验研究, 其分析研究结果可为镁合金单点温渐进成形实际加工工艺参数的优化提供依据。

1 轴对称件渐进成形理论解析

1.1 轴对称件渐进成形过程建模

镁合金板料数控渐进成形的分层加工过程如图 1 所示。可将其视为一种拉弯变形, 在加工之前由于受夹具对板材的夹紧作用, 板料内存在弹性张力。加工第 1 层时成形压头对板料施加压力, 使板料产生弹塑性拉伸, 变形同时板料沿刀具的半球面弯曲。从加工第 2 层开始, 压头不仅使新的未成形板料产生拉弯变形, 而且使上层已成形板料发生反向拉弯, 如图 2 所示。根据渐进成形层加工的特点, 从第 2 层以后的各层, 依次类推, 均按照第 2 层的变形模式变形。

1.2 成形过程应力和应变分析

数控渐进成形中, 加工第 1 层时变形区的应力应变状态如图 3 所示。图中, ϵ_x 为变形区径向应变, ϵ_y 为变形区切向应变, ϵ_z 为变形区轴向应变。变形区 A 点处, 为两向拉应变 ϵ_x 和 ϵ_y , 以及一向压应变 ϵ_z 。

假定变形区均匀变形, 变形区径向应变 ϵ_x 为:

收稿日期: 2014-03-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51305241); 山东省高等学校科技计划项目 (J12LB03); 教育部大学生创新创业训练计划项目 (201210424019); 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, 山东科技大学机电学院, 山东 青岛 266590, 电话: 0532-86057207, E-mail: suchunjian2008@163.com

$$\varepsilon_x = \ln \frac{\frac{\pi r \theta}{90}}{2\sqrt{r^2 - (r-h)^2}} = \ln \frac{\pi r \theta}{180\sqrt{2rh - h^2}} \quad (1)$$

其中, r 为球形工具头的半径; h 为工具的进给量; θ 为接触点 b 与中心点连线与中心线的夹角。

可以看出, 其他量固定情况下, 当 r 增大时, ε_x 减小; 当 h 增大时, ε_x 变大。

在加工之前, 板材内存在夹具夹紧板材引起的弹性张力。在加工第 1 层时, 板材除受弹性张力作用, 还受到成形工具头对其施加的压力, 从而使板材产生弹塑性拉伸变形, 同时板材沿刀具的半球面弯曲, 其变形区 A 点受拉应力 σ_x , 压应力 σ_z , 如图 3 所示。

第 2 层加工, 变形区的应力应变状态如图 4 所示。假定变形区均匀变形, 变形区沿轴向应变为 ε_z , 那么:

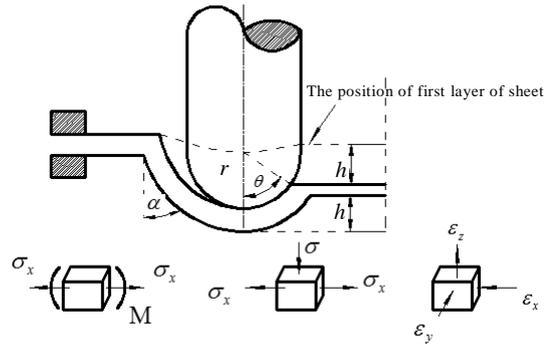


图 4 第 2 层时变形区的应力应变状态

Fig.4 Stress and strain state of the second processing layer

$$\varepsilon_z = \ln \frac{\frac{h}{\cos \alpha} + \frac{\pi r \theta}{90}}{h \tan \alpha + \frac{\pi r \theta}{90}} \quad (2)$$

其中, α 为成形半锥角。

可以看出, 其他量固定情况下, 当 r 增大时, ε_z 减小; 当 h 增大时, ε_z 变大; 当 α 增大时, ε_z 减小。

从加工第 2 层开始, 板材依然主要受弹性张力和成形工具头对其施加的压力作用, 但是工具头不仅使板材新的接触区产生拉弯变形, 而且使板材上层已变形接触区发生反向拉弯, 如图 4 所示。

加工到第 n 层时, 除依然延续新的接触区产生拉弯变形, 上层已变形接触区发生反向拉弯变形外, 未与工具头接触的已变形区, 则只受到拉应力的作用。

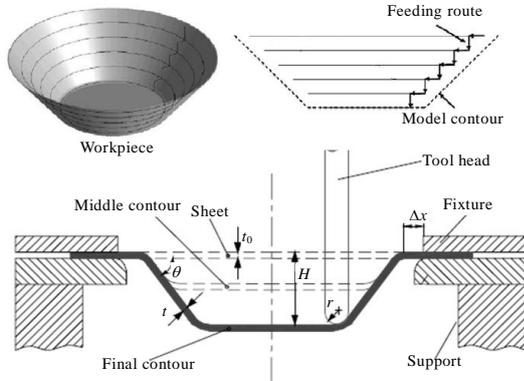


图 1 渐进成形加工过程分析

Fig.1 Process analysis of incremental forming

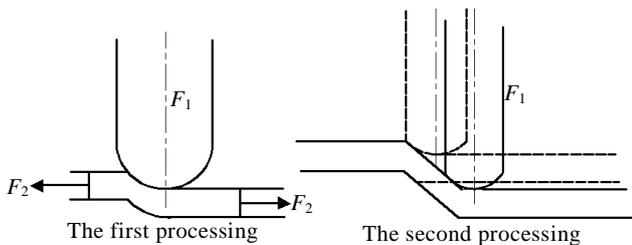


图 2 渐进成形过程精简分析模型

Fig.2 Simplified analysis model of incremental forming process

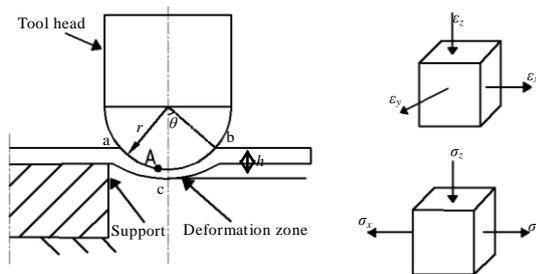


图 3 第 1 层时变形区的应力应变状态

Fig.3 Stress and strain state of the first processing layer

2 镁合金单点渐进成形过程数值模拟

2.1 有限元模型的建立

数值模拟中选用的模型为变角度圆锥台件, 其尺寸形状如图 5 所示。无模单点渐进成形数值模拟过程中, 约束板料四周全部自由度来代替上下压边圈, 成形工具头只保留球头部分, 通过三维软件建立的有限元模型如图 6 所示。

2.2 工艺参数

坯料材料为 AZ31B 镁合金, 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

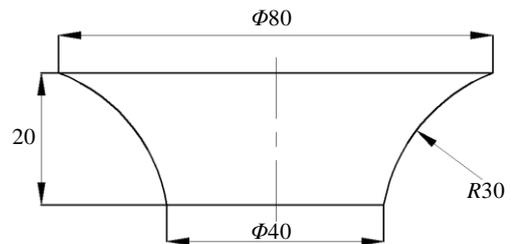


图 5 模拟所用的工件形状及尺寸

Fig.5 Shape and size of parts used in the simulation (mm)

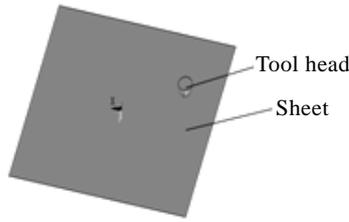


图 6 无模单点渐进成形实体模型

Fig.6 Model of die less single point incremental forming

度为 3000 mm/min, Z 向进给量 $\Delta\delta=1$; 沿壳厚度方向取 5 个积分点, 剪切因子取推荐值 5/6, 罚因子取 0.01; 所需的材料参数通过拉伸试验测量和计算获得, 如表 1 所示。

模拟结果分析中成形件截面取点位置如图 7 所示, 其顺序从左依次往右。

3 镁合金温渐进成形实验研究

为进一步研究镁合金在不同工艺参数条件下的渐进成形规律, 验证数值模拟结果的准确性, 进行了实验研究。实验采用厚度为 1 mm 的 AZ31B 镁合金薄板为材料, 通过拉伸实验测量获取本材料模型对应的各种参数如表 1 所示。

实验设备系统由基于 UG 的数控渐进成形机床、成形辅助支撑装置、加热装置、渐进成形工具头组成, 如图 8 所示。该实验系统首先利用 UG 三维建模后数控编程, 然后再通过 NC 程序控制成形工具头的运动轨迹,

表 1 AZ31B 镁合金板材不同温度下的材料性能参数

Table 1 Material performance parameters of AZ31B magnesium alloy sheet at different temperatures

Temperature/°C	150	200	250	300	
Tensile strength, σ_b /MPa	132	84	55	32	
Yield strength, σ_s /MPa	102	71	48	28	
Elastic modulus, E /GPa	36.555	28.095	12.167	5.048	
Poisson ratio, μ	0.3595	0.3905	0.4375	0.464	
Hardening exponent	0.5002	0.3505	0.269	0.1411	
	0°	70	95	118	200
Ductility, δ /%	45°	61	78	118	211
	90°	49	71	116	144

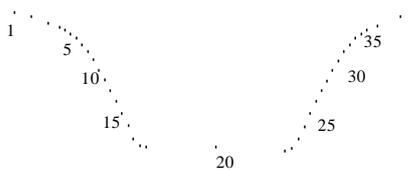


图 7 模拟时成形件截面依次取点位置

Fig.7 The position of the node in the section

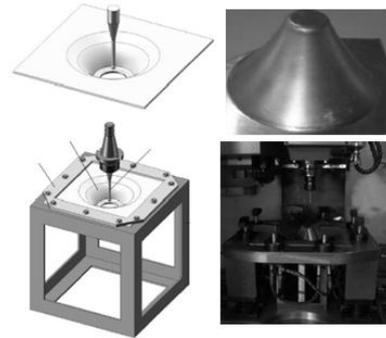


图 8 镁合金板材渐进成形实验设备及加工成形图

Fig.8 Experimental equipment and schematic diagram for incremental forming of magnesium alloy sheet

从而实现预先被加热板料的逐层局部塑性成形。

4 结果与分析

4.1 成形温度对渐进成形结果的影响

分析成形温度对成形性能影响的模拟及实验条件: 成形温度分别为 150、200、250 和 300 °C, 板料尺寸为 100 mm×100 mm×1 mm, 工具头直径为 10 mm, 进给速度 v 为 3000 mm/min, Z 向进给量 $\Delta\delta$ 为 1 mm。

图 9 为不同成形温度条件下成形工件的等效应力云图。从图中可知, 在不同成形温度条件下, 成形工件的等效应力分布规律基本相似, 其值在工件上檐圆弧处和底部倒角处较大, 工件中间的侧壁处大小基本相同。

图 10 为成形工件的最大等效应力随温度的变化曲线。从图中可知, 成形温度对等效应力的影响显著,

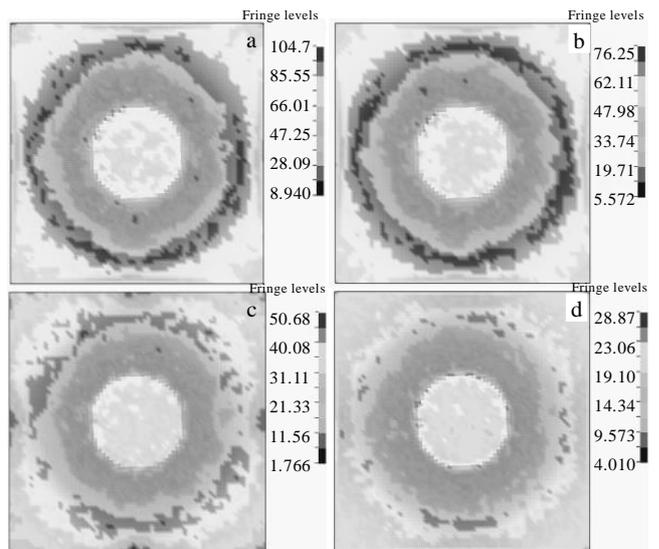


图 9 不同成形温度成形件的等效应力云图

Fig.9 Distribution nephogram of parts' effective stress at different temperatures; (a) 150 °C, (b) 200 °C, (c) 250 °C, and (d) 300 °C

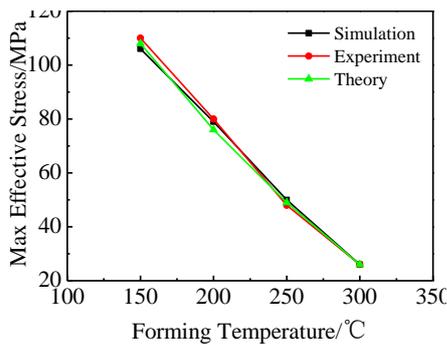


图 10 成形件最大等效应力随温度变化曲线

Fig.10 Changing curves of max effective stress with temperatures

随着成形温度的升高,成形工件的等效应力呈明显减小的趋势。AZ31B 镁合金这种随温度的变化趋势,有利于其渐进成形性能的提高。

图 11 为成形工件最大减薄率随温度变化曲线。从图中可知,随着温度的升高,成形工件减薄率先减小后增大,当成形温度为 250 °C 时,成形工件的减薄率最小。减薄率最小处,工件壁厚发生变化小,不易破裂,易于成形。

随着温度的升高,在 150~250 °C 的温度区间,成形件最大等效应力减小,最大减薄率也减小,成形极限角增大。这主要是由于镁合金的结构为密排六方,滑移系较少,在室温和低温下其塑性变形能力差,随着成形温度的提高,镁合金的棱柱面和棱锥面的滑移系逐渐被激活,从而使得镁合金的塑性增强。

图 12 为不同成形温度条件下成形件中截面厚度变化曲线。从图中可明显看出工件的厚度变化基本符合正弦定律:在 150 °C 时,工件厚度较薄且厚度变化趋势有所偏离正弦轨迹;在 200 °C 时,厚度曲线开始变得光滑平滑,厚度开始增大;在 250 °C 时,工件壁厚变化曲线光滑平滑,更接近正弦曲线;成形温度增加至 300 °C 时,厚度变化规律开始偏离理论轨迹。

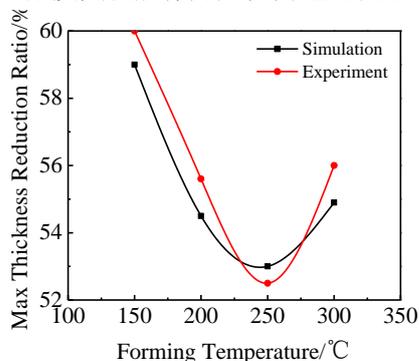


图 11 成形件最大减薄率随温度变化曲线

Fig.11 Changing curves of max thickness reduction ratio with temperatures

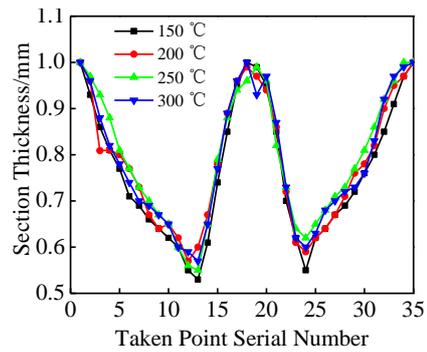


图 12 不同温度条件下成形件中截面厚度变化曲线

Fig.12 Thickness curves of cross section at different temperatures

由以上分析可知,在 200~250 °C 的成形条件下,AZ31B 镁合金板材的塑性成形能力明显提高,成形后工件的厚度较大,厚度变化趋势可平滑光滑的遵循正弦规律,此温度范围可作为 AZ31B 镁合金板材单点温渐进成形模拟和实验的最佳成形温度。

4.2 摩擦条件对渐进成形结果的影响

分析摩擦条件对成形性能影响的模拟及实验条件:其他参数不变,分别设静摩擦系数为 0.1、0.2、0.3,同时动摩擦系数设为 0.05、0.1、0.15。

图 13 为不同摩擦条件下,成形件的等效应力分布云图。由图可知,不同摩擦系数条件下,成形件的等效应力分布基本相似,成形件的等效应力最大处集中在工件上檐圆弧过渡处及底部倒角变形较大、易发生破裂的区域。

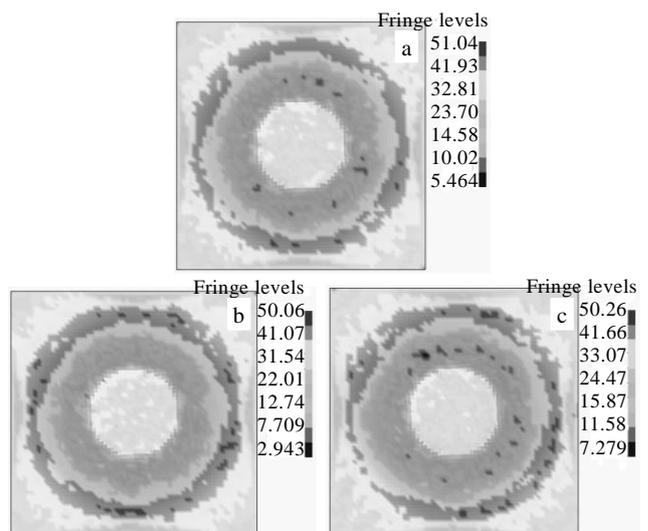


图 13 不同摩擦条件成形件的等效应力分布云图

Fig.13 Distribution nephogram of parts' effective stress and under different friction conditions: (a) static friction 0.1, dynamic friction 0.05; (b) static friction 0.2, dynamic friction 0.1; (c) static friction 0.3, dynamic friction 0.15

图 14 为成形件最大等效应力随摩擦条件变化曲线。由图可直观的了解到, 在静摩擦系数为 0.2, 动摩擦系数为 0.1 的情况下, 成形后工件的等效应力最小。

图 15 为成形件最大减薄率随摩擦条件变化曲线。由图可知, 板料的减薄率随着摩擦系数的增大而增大。

在进行单点渐进成形时, 由于成形工具头相对板料尺寸较小, 因此成形工具头与板料的接触面积较小, 这就导致了在每一点处的压强较大, 因此必须控制摩擦力的大小, 降低摩擦的有害影响。由图 14 和 15 可以看出, 随着摩擦系数的增加等效应力值随之增大, 最大减薄率也在不断增大, 因为摩擦系数越大, 成形时产生的摩擦阻力就越大, 对成形工具的表面磨损也越大, 要达到板料变形所需的压应力, 需提供更大成形力, 会造成较大的应力集中, 从而导致成形后的等效应力较高。因此在单点渐进成形过程中, 要控制摩擦条件在一定的范围内, 才能达到最好的成形效果。

图 16 为不同摩擦条件成形件中截面厚度变化曲线。由图可知, 不同摩擦条件下成形件中截面厚度变化曲线基本符合正弦定律, 且不同条件下, 板料的厚度差别不明显, 最小厚度随着摩擦系数的增大略有减小。

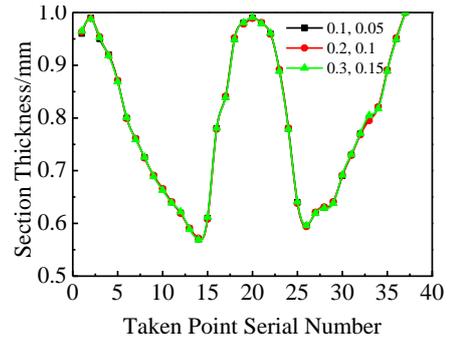


图 16 不同摩擦条件成形件中截面厚度变化曲线

Fig.16 Thickness curves of parts cross section under different friction conditions

由以上分析结果可知, 在静摩擦系数为 0.2, 动摩擦系数为 0.1 时, 成形件的应力最小; 最大减薄率随摩擦系数的增大而增大; 板料厚度随着摩擦系数的变化差别较小。因此, 在板料厚度和减薄率允许的范围, 应选择静摩擦系数为 0.2、动摩擦系数为 0.1。

4.3 工具头直径对渐进成形结果的影响

分析工具头直径对成形性能影响的模拟及实验条件: 成形温度为 250 °C, 静摩擦系数 0.1, 动摩擦系数 0.2, 加工深度 20 mm, 工具头直径 D 分别取 8、10 和 12、16 mm, 其他参数不变。

图 17 为不同工具头直径下, 成形件的等效应力分布云图。由图可知, 不同工具头直径下工件的等效应力分布规律大致相似, 在工件上檐圆弧处应力分布最大。

从图 18 成形件最大等效应力随工具头直径变化曲

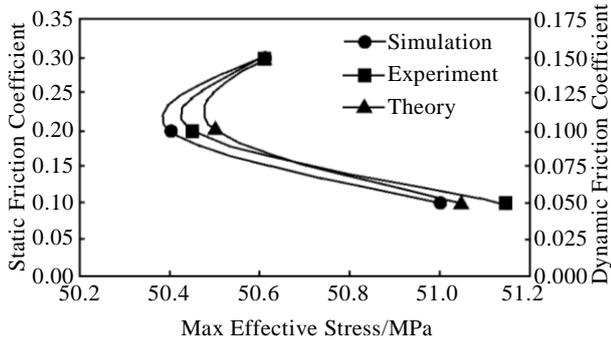


图 14 摩擦系数随成形件最大等效应力变化曲线

Fig.14 Curves of friction coefficient changing with max effective stress

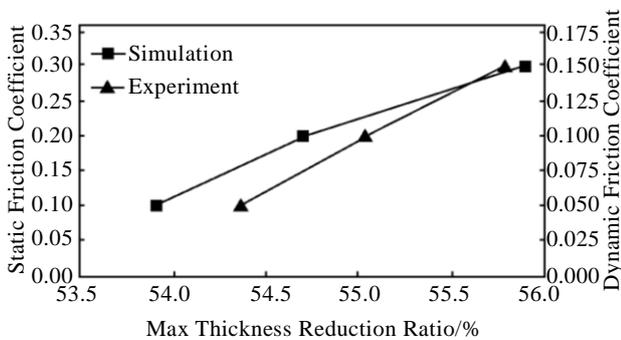


图 15 摩擦系数随成形件最大减薄率变化曲线

Fig.15 Curves of parts' friction coefficient changing with max thickness reduction ratio

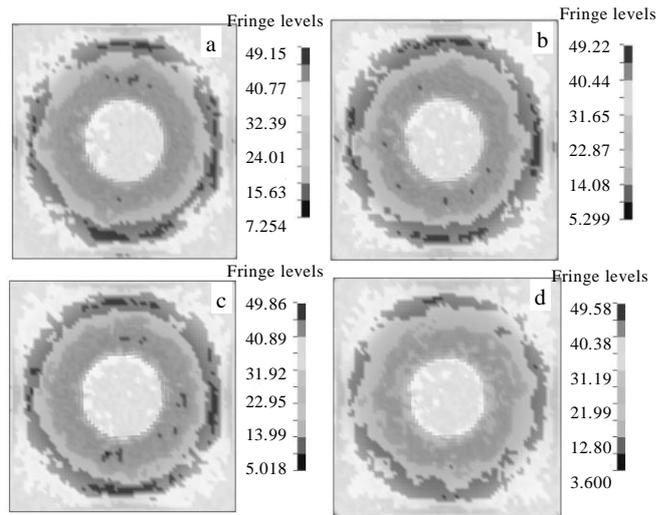


图 17 不同工具头直径成形件的等效应力分布云图

Fig.17 Distribution nephogram of parts' effective stress in different tool head diameters: (a) 8 mm, (b) 10 mm, (c) 12 mm, and (d) 16 mm

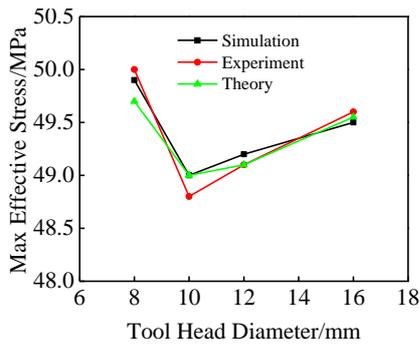


图 18 成形件最大等效应力随工具头直径变化曲线

Fig.18 Curves of max effective stress changing with different tool head diameters

线可知,随着成形工具头直径的增大,等效应力有先减小后增大的趋势,但是受工具头尺寸变化的影响不大。

从图 19 成形工件减薄率随工具头直径变化曲线可知,随着工具头直径的增大,成形工件减薄率减小,减薄率越小,越有利于成形的均匀化,降低发生破裂的可能性。

根据第 1 节的分析,得出 r 越大, ϵ_z 越小,由于渐进成形是剪切变形,厚度应变 $\epsilon_x = -\epsilon_z$,因而厚度应变也越小。图 19 即验证了这一理论。在工具进给量 h 和成形半锥角 α 相同的情况下,成形工具头直径越大,工具头与板料的接触范围也随着增大,使板料在成形过程中局部受力均匀,这在一定程度上可减小成形中板料的应力集中,有利于板料成形的均匀化。但并不是工具头直径越大接触应力越小,若成形工具头直径过大,工具头与板料接触的变形区面积就越大,变形所需的成形力越大,成形后工件的应力也越大。因此,工件的等效应力存在随着工具头直径的增大而增大的趋势。但是,由于渐进成形的成形力本身就比较小,因此工具头半径的大小对成形力的影响不会很大。图 18 成形件最大等效应力随工具头直径变化曲线图即验证了这一理论。

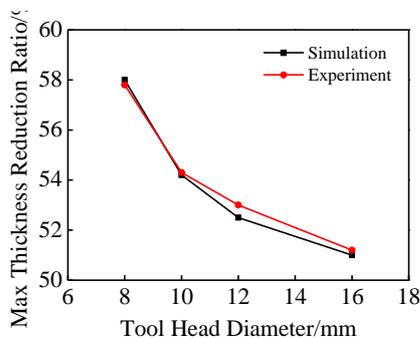


图 19 成形件最大减薄率随工具头直径变化曲线

Fig.19 Curves of parts' max thickness reduction ratio in different tool head diameters

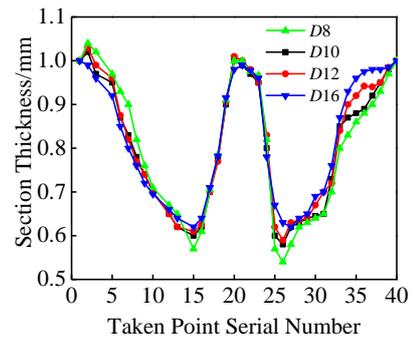


图 20 成形工件横截面厚度随工具头直径变化的曲线

Fig.20 Thickness curves of parts' cross section in different tool head diameter

从图 20 成形工件横截面厚度随工具头直径变化的曲线可知,在不同工具头直径下加工出的成形件壁厚变化规律基本符合正弦定律,模拟结果与理论研究相符。

从以上分析可知,工具头直径在 10~16 mm 范围内,都可用于 AZ31B 镁合金单点温渐进成形的加工。

5 结 论

- 1) 在 250 °C 时,板材呈现出相对较好的成形状态。
- 2) 摩擦条件对板厚的影响不明显,在静摩擦系数为 0.2,动摩擦系数为 0.1 时,成形件的应力最小,板材的成形性相对较好。
- 3) 在一定程度上增大成形工具头直径,有利于板材成形的均匀性、减小应力集中,降低破裂的可能性。

参考文献 References

[1] 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

[2] Zhong Min(钟敏), Tang Weicui(唐伟翠), Li Dayong(李大永) et al. *Journal of Plasticity Engineering*(塑性工程学报)[J], 2011, 18(5): 59

[3] Yi S, Bohlen J, Heinemann F et al. *Acta Mater*[J], 2010, 58: 592

[4] Bambach M. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2010, 210(12): 1562

[5] Joost Dufloy R, Joris D'hondt. *Procedia Engineering*[J], 2011, 9: 528

[6] Cui Zhen, Xia Z Cedric, Ren Feng et al. *Journal of Manufacturing Processes*[J], 2013, 15: 236

[7] Park Jingee, Kim Jeounghan, Park Nhokwang et al. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*[J], 2010, 41(1): 97

- [8] Ji Y H, Park J J. *Materials Science and Engineering A*[J], 2008, 485(1): 299
- [9] Otsu Masaaki, Katayama Yosuke *et al. Key Engineering Materials*[J], 2014(622-624): 390
- [10] Wang Yuhua(王玉华), Gao Lin(高霖), Wang Hui(王辉). *Materials for Mechanical Engineering*(机械工程材料)[J], 2009, 33(7): 95
- [11] Zhang Qinglai(张青来), Hu Yongxue(胡永学), Wang Lili(王粒粒). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(4): 678
- [12] Feng Tiantian(冯甜甜), Zhang Qinglai(张青来), Xiao Fugui(肖富贵) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2012, 22(1): 45

Rules of New Single Point Incremental Forming without Mould for AZ31B Magnesium Alloy Axisymmetric Parts

Su Chunjian, Li Tiantian

(Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: It is very important to study and master the rule of incremental forming of magnesium alloys under different process parameters for theoretical and practical application. Therefore, the effects of different possessing parameters including the forming temperature, friction condition and the tool head diameter on the hot single point incremental forming of AZ31B magnesium alloys were studied using the variable angle cone piece as the research object, and the parts' effective stress, as well as the max thickness reduction ratio and thickness changes as research target by the finite element software ANSYS/LS-DYNA. The results show that the AZ31B magnesium alloy exhibits good single point incremental forming ability when the forming temperature is 250 °C, the static friction coefficient 0.2, the kinetic friction coefficient 0.1 and the tool head diameter in the range of 10~12 mm.

Key words: AZ31B magnesium alloy; single point incremental forming; processing parameters; numerical simulation

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