

板料成形

## 冲击装置对磁脉冲冲击介质成形的影响

徐俊瑞<sup>1,2,3</sup>, 王少博<sup>1</sup>, 王元丰<sup>1</sup>

(1. 内蒙古工业大学 材料科学与工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051;

2. 先进轻金属材料开发与加工防护教育部工程研究中心, 内蒙古 呼和浩特 010051;

3. 内蒙古自治区轻金属材料重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010051)

**摘要:** 针对冲击装置结构, 探究底部直径、台阶直径、锥体底角等参数变化对其几何结构的影响。利用有限元仿真方法, 考虑材料高应变速率和介质超弹性本构关系, 建立磁场和变形场模型, 分析冲击装置的结构参数对成形高度、应变速率和冲击速度的影响。结果表明: 随底部直径减小, 板材的成形高度和冲击装置的冲击速度增加, 无台阶与小台阶下的成形高度接近, 板材中心第1个应变速率峰值增加; 台阶直径减小, 更有利于提高冲击装置的冲击速度, 提升成形高度; 底部直径一定时, 板材的成形高度随着锥体底角的减小趋于增加; 底部直径减小到一定程度时, 锥体底角对成形高度的影响不明显。

**关键词:** 磁脉冲成形; 冲击介质; 冲击装置; 镁合金板材; 底部直径; 台阶直径; 锥体底角

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.04.007

中图分类号: TG316

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 04-0048-08

## Influence of impacting device on impact medium forming for magnetic pulse

Xu Junrui<sup>1,2,3</sup>, Wang Shaobo<sup>1</sup>, Wang Yuanfeng<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China;

2. Engineering Research Center of Ministry of Education of Advanced Light Metal Materials Development and Processing Protection, Hohhot 010051, China;

3. Inner Mongolia Key Laboratory of Light Metal Materials, Hohhot 010051, China)

**Abstract:** For impact device structure, the influences of parameters variation, such as bottom diameter, step diameter and cone bottom angle, on the geometry structure of impact device were researched, and considering the high strain rate of material and the medium hyper-elastic constitutive relationship, the electromagnetic field and deformation field models were built by finite element simulation method. Then, the influences of structural parameters of impact device on the forming height, strain rate and impact velocity were analyzed. The results show that as the bottom diameter decreases, the forming height of sheet and the impact velocity of impact device increase, the forming height of no step is close to that of a small step, and the first strain rate peak value in the center of sheet increases. However, the decrease of step diameter is more conducive to improve the impact velocity of impact device and increase the forming height of sheet. When the bottom diameter is constant, the forming height tends to increase with the decreasing of cone bottom angle. When the bottom diameter is reduced to a certain extent, the influence of cone bottom angle on the forming height is not obvious.

**Key words:** magnetic pulse forming; impact medium; impact device; magnesium alloy sheet; bottom diameter; step diameter; cone bottom angle

磁脉冲成形是一种高速率成形技术, 通过脉冲磁场在导电性良好的板材或者管件上施加电磁力, 使其发生高速塑性变形<sup>[1]</sup>。与传统的板材或管件成形相比, 可显著提高材料成形性能、减小回弹等<sup>[2-4]</sup>。

国内外学者对磁脉冲成形进行了大量研究。Oliveira D A 等<sup>[5]</sup>针对铝合金板材进行了胀形研究, 结果表明, 铝合金板材具有良好的导电性能, 在高速变形中可获得较大程度的变形。Shang J H 等<sup>[6]</sup>的板材磁脉冲辅助冲压成形研究表明, 铝合金板材的成形性较准静态明显提高, 磁脉冲成形改变了应变分布、提高了板材成形性。Ulacia I 等<sup>[7]</sup>利用不同线圈和模具结构对 AZ31 镁合金板材进行了磁脉冲胀形成形性研究。黄亮等<sup>[8]</sup>研究了磁脉冲成形中 2219 铝

收稿日期: 2022-08-16; 修订日期: 2022-11-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51965050); 内蒙古自然科学基金资助项目 (2021MS05004)

作者简介: 徐俊瑞 (1979-), 男, 博士, 教授

E-mail: xujunrui\_hit@163.com

合金板材斜孔翻边的非均匀变形行为，研究发现，90°方向变形最快，180°方向次之，0°方向最后冲击模具。于海平等<sup>[9]</sup>进行了圆管变形为方管的磁脉冲成形研究，发现一次磁脉冲成形的管件直壁部分与模具冲击发生回弹，圆角部位难以填充。

传统磁脉冲成形中，通常采用一次放电，很难实现坯料的贴模成形；进一步放电施加电磁力，也不能够提高坯料成形的贴模性，这是由于第 1 次放电后坯料发生较大塑性形变，坯料与线圈之间的距离较大，进一步放电无法产生足够的电磁力使之发生变形。对于复杂形状的构件，由于线圈结构形状的局限，也难以完成对复杂构件的成形。

针对传统磁脉冲成形问题，徐俊瑞等<sup>[10-12]</sup>提出了磁脉冲冲击介质复合成形工艺，成形中耦合了磁脉冲成形的高速率效应、介质的柔性作用，可实现多次放电成形。

磁脉冲冲击介质成形中冲击装置会影响力的作用，从而影响板材冲击成形效果。本文利用有限元仿真方法，研究了冲击装置的几何结构对磁脉冲冲击介质成形的影响，分析了冲击装置底部直径、台阶直径、锥体底角对成形高度、应变速率、冲击速度的影响规律，明确了成形效果较好的冲击装置结构。

## 1 数值仿真模型建立

### 1.1 冲击装置几何结构

为了提高磁脉冲冲击能力，将放大器结构<sup>[13]</sup>引入到磁脉冲冲击介质成形中，冲击装置采用了放大器的基本几何参数，其几何结构见图 1。结构中包含冲击装置的底部直径  $D$ 、台阶直径  $d$ 、台阶高度  $h$ 、锥体底角  $\alpha$ ，总高度  $H$ ，并设  $\beta=D/h$ 、 $\gamma=D/d$ 。

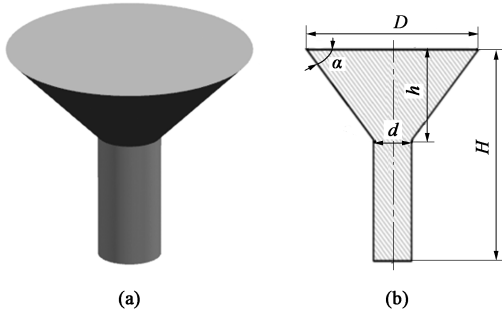


图 1 冲击装置几何结构示意图  
(a) 三维结构 (b) 二维剖面

Fig. 1 Schematic diagrams of geometry structure for impact device  
(a) Three-dimensional structure (b) Two-dimensional profile

依据线圈尺寸，初始底部直径  $D$  设为  $\Phi 208$  mm，逐渐改变底部直径，分析其对成形结果的影响；依据冲击空间的高度，将冲击装置总高度  $H$  确定为 130 mm，初始台阶直径  $d$  设定为  $\Phi 30$  mm。具体冲击装置的尺寸参数见表 1。

表 1 冲击装置几何尺寸

Table 1 Geometry dimensions of impact device

$D/\text{mm}$	$h/\text{mm}$	$\beta$	$d/\text{mm}$	$\gamma$	$\alpha/(\text{^\circ})$	$H/\text{mm}$
$\Phi 208$	89.0	2.33	$\Phi 30$	6.93	45	130
$\Phi 160$	65.0	2.46	$\Phi 30$	5.33	45	
$\Phi 120$	45.0	2.67	$\Phi 30$	4.00	45	
$\Phi 100$	35.0	2.86	$\Phi 30$	3.33	45	
$\Phi 80$	25.0	3.20	$\Phi 30$	2.67	45	
$\Phi 75$	22.5	3.33	$\Phi 30$	2.50	45	
$\Phi 60$	15.0	4.00	$\Phi 30$	2.00	45	
$\Phi 40$	5.0	8.00	$\Phi 30$	1.33	45	
$\Phi 30$	0.0	—	$\Phi 30$	1.00	—	
$\Phi 80$	30.0	2.67	$\Phi 20$	4.00	45	
$\Phi 60$	20.0	3.00	$\Phi 20$	3.00	45	
$\Phi 40$	10.0	4.00	$\Phi 20$	2.00	45	
$\Phi 20$	0.0	—	$\Phi 20$	1.00	—	
$\Phi 80$	32.5	2.46	$\Phi 15$	5.30	45	
$\Phi 60$	22.5	2.67	$\Phi 15$	4.00	45	
$\Phi 40$	12.5	3.20	$\Phi 15$	2.67	45	
$\Phi 30$	7.5	4.00	$\Phi 15$	2.00	45	
$\Phi 15$	0.0	—	$\Phi 15$	1.00	—	
$\Phi 80$	35.0	2.28	$\Phi 10$	8.00	45	
$\Phi 60$	25.0	2.40	$\Phi 10$	6.00	45	
$\Phi 40$	15.0	2.67	$\Phi 10$	4.00	45	
$\Phi 20$	5.0	4.00	$\Phi 10$	2.00	45	
$\Phi 10$	0.0	—	$\Phi 10$	1.00	—	

### 1.2 磁场模型

基于 ANSYS 仿真软件的 ANSYS Mutiphysics 模块，对磁脉冲冲击介质成形的磁场部分进行仿真分析。磁场模型中包括线圈、铜驱动板、近场空气和远场空气，具体有限元模型见图 2。

电流作为边界条件激励施加于线圈模型，调整放电能量，可改变加载电流的大小。线圈中通过瞬间变化的电流，周围产生变化的磁场；靠近线圈的铜驱动板中产生变化的感应电流，其周围同样产生变化的磁场；两个磁场之间产生强大的洛伦兹力作用，利用洛伦兹力推动铜驱动板在变形场中实现冲

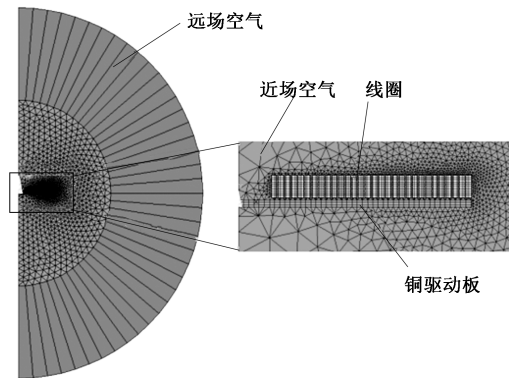


图 2 磁场有限元模型  
Fig. 2 Finite element model of magnetic field

击作用。加载的电流变化曲线可由式（1）~式（3）进行描述：

$$I(t) = \frac{U_c}{\omega L} e^{-\rho t} \sin \omega t \tag{1}$$

$$\beta = \frac{R}{2L} \tag{2}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}} \tag{3}$$

式中： $I(t)$  为时间  $t$  下的电流； $U_c$  为放电电压； $\rho$  为放电电流的衰减系数； $\omega$  为角频率； $L$  为电感； $R$  为电阻； $C$  为电容。

在磁场模拟中，线圈、铜驱动板和近场空气均选用 PLANE13 单元，远场空气选用 INFIN110 单元，具体参数见表 2。

表 2 磁场模拟参数  
Table 2 Simulation parameters of magnetic field

参数	数值
电容/ $\mu\text{F}$	100
额定电压/ $\text{kV}$	20
电感/ $\text{H}$	$70.8 \times 10^{-6}$
电阻/ $\Omega$	$2.838 \times 10^{-2}$
线圈	2 mm×10 mm/30 匝， 匝间距为 1 mm
驱动板材料	紫铜
驱动板厚度/ $\text{mm}$	3
线圈、铜驱动板、近场空气单元	PLANE13
远场空气单元	INFIN110
线圈与铜驱动板电阻率/ $(\Omega \cdot \text{m})$	$1.72 \times 10^{-8}$
相对空气磁导率	1

1.3 变形场模型

变形场利用 ANSYS Mutiphysics/LS-DYNA 模块进行分析。有限元模型中包含线圈、铜驱动板、冲击装置、压板、压边圈、板材、凹模和介质，如图 3 所示。采用 Johnson-Cook（JC）模型描述板材的材料本构关系，本文所采用的板材为 AZ31 镁合金板材。JC 模型的方程表达式如式（4）~式（6）所示：

$$\sigma = (R_{eL} + B\varepsilon^n)(1 + C\ln\dot{\varepsilon}^*)(1 - T^{*m}) \tag{4}$$

$$\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0 \tag{5}$$

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \tag{6}$$

式中： $\sigma$  为流动应力； $R_{eL}$  为选定的参考温度与参考应变率下试验材料的屈服强度； $B$  为试验材料的应变硬化系数； $\varepsilon$  为等效塑性应变； $n$  为试验材料的应变硬化指数； $C$  为材料的应变率强化参数； $\dot{\varepsilon}^*$  为无纲量的应变速率； $T^*$  为无纲量的温度； $m$  为材料的热软化参数； $\dot{\varepsilon}$  为试验应变速率； $\dot{\varepsilon}_0$  为参考应变速率，一般取  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ ； $T$  为试验温度； $T_m$  为试验材料的熔点； $T_r$  为选定的参考温度。

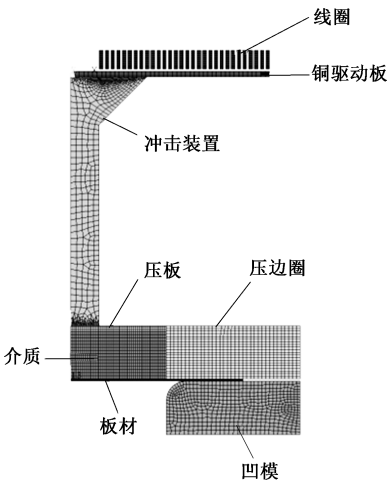


图 3 变形场有限元模型  
Fig. 3 Finite element model of deformation field

AZ31 镁合金板材的 JC 模型参数见表 3<sup>[11]</sup>。

表 3 AZ31 镁合金板材的 JC 模型参数  
Table 3 JC model parameters of AZ31 magnesium alloy sheet

参数	$R_{eL}/\text{MPa}$	$B/\text{MPa}$	$n$	$C$	$m$
数值	176	332.270	0.448	0.0198	1.468

介质为粘性介质（甲基乙烯基硅橡胶），对于相对大变形具有非线性应力应变特性，通常视为不

可压缩材料。本文采用 Mooney-Rivlin 理论建立超弹性材料模型<sup>[14]</sup>, 具体表达方程为:

$$\sigma = \frac{\partial W}{\partial \varepsilon_{ij}} \quad (7)$$

$$W = C_1(\bar{I}_1 - 3) + C_2(\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{D_1}(J - 1)^2 \quad (8)$$

式中:  $W$  为参考体积每单位体积应变能;  $\varepsilon_{ij}$  为应变张量;  $i, j$  为分量方向;  $\bar{I}_1$  和  $\bar{I}_2$  为偏应变不变量;  $J$  为体积变化;  $C_1$ 、 $C_2$  和  $D_1$  为材料常数, 其中,  $C_1$  和  $C_2$  描述偏分量,  $D_1$  描述压缩性。

对于完全不可压缩性材料, 泊松比  $\mu$  为 0.49, 其  $D_1$  为 0, 此时式 (8) 可简化。采用的模型参数见表 4<sup>[14-15]</sup>。

表 4 介质模型参数  
Table 4 Parameters of medium model

参数	数值
弹性模量 $E/\text{MPa}$	0.057
泊松比 $\mu$	0.490
$D_1$	0
$C_1/\text{MPa}$	1.000
$C_2/\text{MPa}$	0.900

## 2 结果与分析

### 2.1 底部直径 $D$ 对成形高度的影响

设定放电电压为 15 kV, 保持放电电压不变, 研究冲击装置底部直径对磁脉冲冲击介质成形的影响。图 4 为台阶直径为  $\Phi 30$  mm 时不同底部直径下镁合金板材中心位置高度 (成形高度) 随时间的变化曲线。从图 4 中可以看出, 底部直径在  $\Phi 208 \sim \Phi 40$  mm 范围内, 底部直径越大, 越不利于板材成形高度的增加, 换言之, 底部直径逐渐减小, 可提升板材的成形高度。 $D = \Phi 208$  mm 时的成形高度约为 4 mm,  $D = \Phi 40$  mm 时的成形高度增加至约为 12 mm。 $D = \Phi 30$  mm (底部直径与台阶直径相等, 即台阶高度  $h = 0$ ) 和  $D = \Phi 40$  mm (台阶高度  $h = 5$  mm) 时的成形高度曲线基本重合, 表明无台阶与小台阶成形效果非常接近。

图 5 为  $\beta$  值、 $\gamma$  值与成形高度峰值的关系。从图 5 中可以看出,  $\beta$  值增大与  $\gamma$  减小均有利于成形高度峰值增加。 $\gamma = 1$  时,  $h = 0$ , 成形高度峰值达到最大, 约为 12.8 mm。

分别将台阶直径固定为  $d = \Phi 20$ 、 $\Phi 15$  和

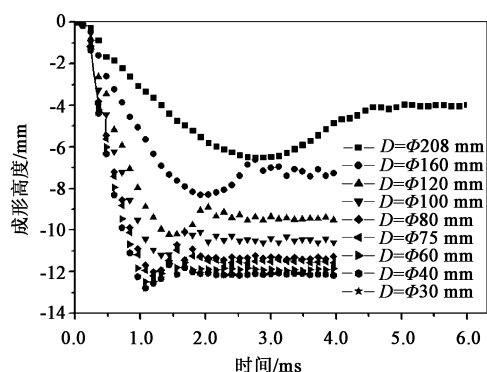


图 4 不同  $D$  下的成形高度随时间的变化曲线

Fig. 4 Variation curves of forming height with time under different  $D$

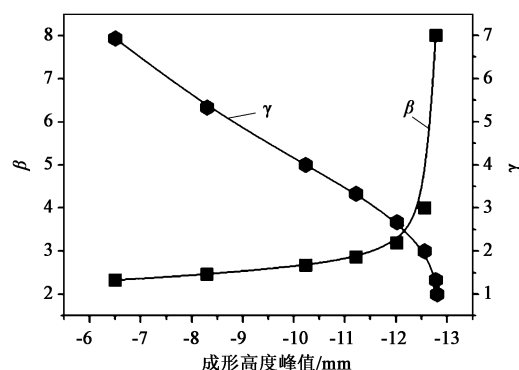


图 5  $\beta$ 、 $\gamma$  与成形高度峰值之间的关系

Fig. 5 Relationships of  $\beta$ ,  $\gamma$  and peak values of forming height

$\Phi 10$  mm, 改变底部直径, 板材的成形高度变化曲线如图 6 所示。从图 6 中可以看出, 成形高度的变化规律与  $d = \Phi 30$  mm (图 4) 时相同, 均出现随着底部直径的减小成形高度增加的现象, 且无台阶与小台阶的成形情况非常接近, 几乎重合 (图 6a 中  $D = \Phi 20$  mm 和  $D = \Phi 40$  mm、图 6b 中  $D = \Phi 15$  mm 和  $D = \Phi 30$  mm、图 6c 中  $D = \Phi 10$  mm 和  $D = \Phi 20$  mm)。

### 2.2 底部直径 $D$ 对冲击速度和应变速率的影响

冲击装置底部直径的变化影响冲击装置施加的冲击速度。图 7 为不同底部直径下冲击装置的冲击速度变化 (台阶直径为  $\Phi 30$  mm)。图 7 中开始出现的波谷部分为冲击装置施加冲击速度的过程, 速度变化的后面部分为冲击装置受反弹作用产生的, 对成形无实际意义。随底部直径减小, 冲击速度不断增加; 无台阶与小台阶冲击装置下 ( $D = \Phi 30$  mm 和  $D = \Phi 40$  mm), 冲击速度变化曲线基本重合。

板材中心单元的应变速率变化如图 8 所示。底部直径较大时, 板材中心单元的应变速率较低, 如图 8a~图 8b 所示; 随着底部直径的减小, 板材中心单元的应变速率增加, 如图 8c~图 8d 所示。 $D = \Phi 30$  mm 和  $D = \Phi 40$  mm 时应变速率曲线的第 1 个波



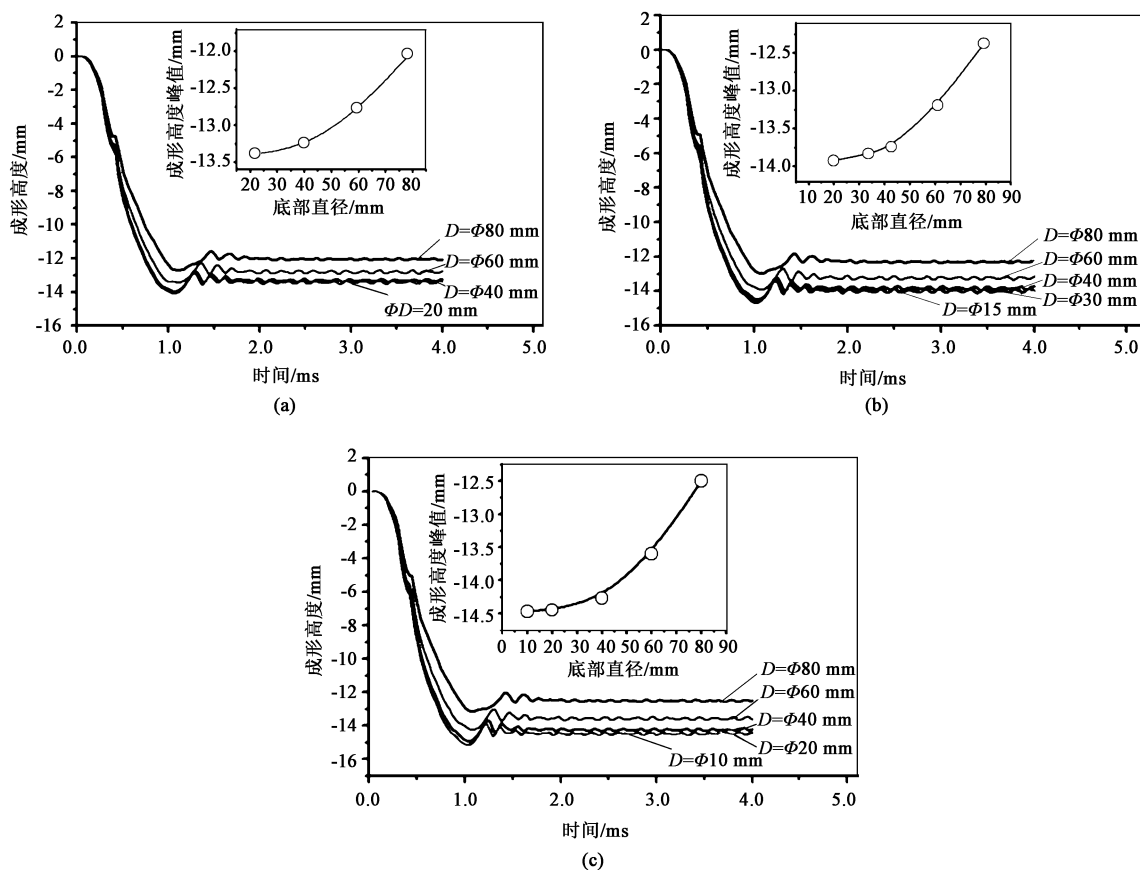
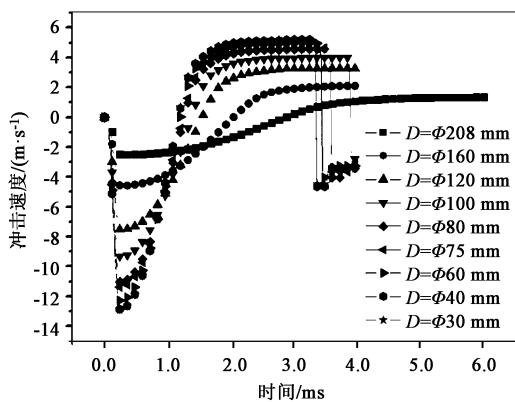


图 6 不同底部直径对成形高度的影响

(a)  $d = \Phi 20$  mm (b)  $d = \Phi 15$  mm (c)  $d = \Phi 10$  mm

Fig. 6 Effects of different bottom diameters on forming height

图 7 不同  $D$  下冲击装置的冲击速度变化Fig. 7 Impact velocity variation of impact device under different  $D$ 

动峰值较为接近,均高于其他底部直径下产生的峰值。针对应变速率曲线的第 2 个波峰, $D = \Phi 60$  mm 和  $D = \Phi 80$  mm 时产生的应变速率峰值最高且两者较接近, $D = \Phi 30$ 、 $\Phi 40$ 、 $\Phi 100$  mm 时的应变速率峰值次之。从模拟结果中可知,最大应变速率分布在约  $160 \sim 220 \text{ s}^{-1}$  范围内。

### 2.3 台阶直径 $d$ 的影响

不同台阶直径下,板材成形高度峰值变化如图 9 所示。底部直径一定时,随台阶直径减小,成形高度峰值增加;台阶直径与底部直径均减小,更有利于成形高度峰值的进一步提升。图 9 中虚线区域可以表示为小台阶和无台阶对应成形区域,以下为相对大台阶对应成形区域。

不同台阶直径下的冲击装置施加的冲击速度峰值如图 10 所示。台阶直径增大时,冲击装置的冲击速度峰值逐渐减小,表明减小台阶直径有利于提高冲击装置的冲击速度。台阶直径为  $\Phi 30$  mm (底部直径为  $\Phi 80 \sim \Phi 30$  mm) 时,冲击速度峰值分布范围约为  $11 \sim 13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;台阶直径为  $\Phi 20$  mm (底部直径为  $\Phi 80 \sim \Phi 20$  mm) 时,冲击速度峰值分布范围约为  $12.7 \sim 16.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;台阶直径为  $\Phi 15$  mm (底部直径为  $\Phi 80 \sim \Phi 15$  mm) 时,冲击速度峰值分布范围约为  $13.4 \sim 17.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;台阶直径为  $\Phi 10$  mm (底部直径为  $\Phi 80 \sim \Phi 10$  mm) 时,冲击速度峰值分布范围约为  $13.9 \sim 18.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

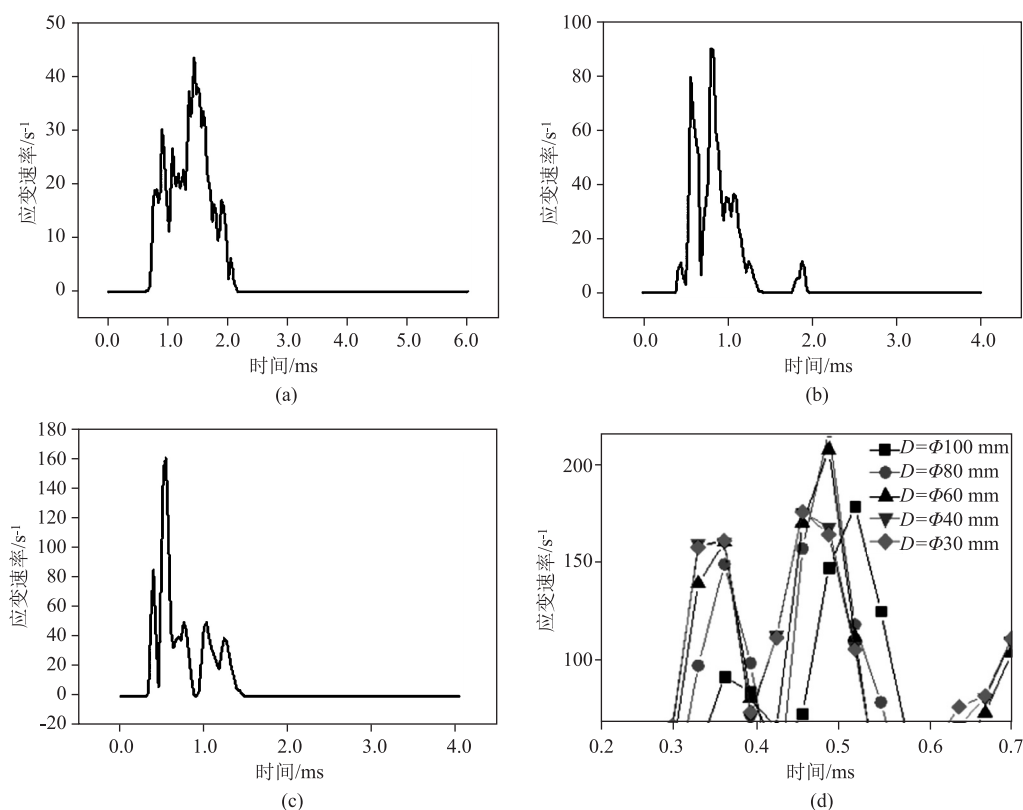


图8 板材中心单元的应变速率变化

(a)  $D = \Phi 208 \text{ mm}$  (b)  $D = \Phi 160 \text{ mm}$  (c)  $D = \Phi 120 \text{ mm}$  (d) 对比图

Fig. 8 Change of strain rates at center element of sheet

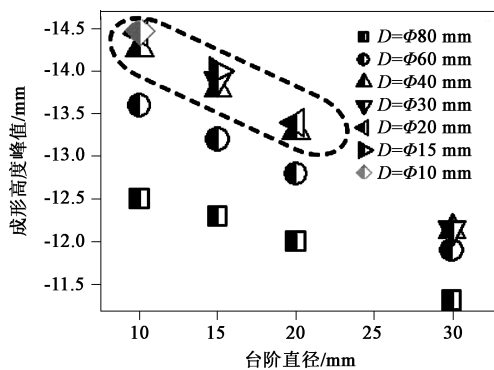
(a)  $D = \Phi 208 \text{ mm}$  (b)  $D = \Phi 160 \text{ mm}$  (c)  $D = \Phi 120 \text{ mm}$  (d) Comparison diagram

图9 不同台阶直径下的板材成形高度峰值

Fig. 9 Peak values of forming height for sheet under different step diameters

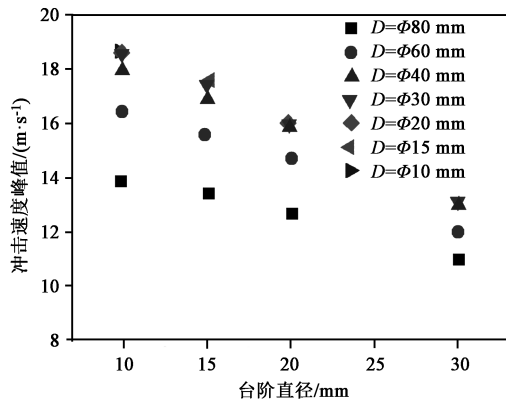


图10 不同台阶直径下的冲击装置的冲击速度峰值

Fig. 10 Peak values of impact velocity for impact device under different step diameters

图11为不同台阶直径下板材中心单元应变速率的峰值变化。总体上,台阶直径 $d = \Phi 10$ 、 $\Phi 15$ 和 $\Phi 20 \text{ mm}$ 下的第1、第2波峰峰值均明显高于 $d = \Phi 30 \text{ mm}$ 下相对应的值。对于第1个波峰峰值,台阶直径 $d = \Phi 10 \text{ mm}$ 、底部直径减小至 $D = \Phi 20$ 和 $\Phi 10 \text{ mm}$ 时,应变速率峰值明显高于其他台阶直径对应的峰值。台阶直径 $d = \Phi 15$ 和 $\Phi 20 \text{ mm}$ ,底部直

径减小,产生的第1个波峰较为接近。第2波峰值中,随底部直径减小,峰值并无随之增大的规律,如台阶直径 $d = \Phi 15 \text{ mm}$ 、底部直径 $D = \Phi 40 \text{ mm}$ 时的第2个波峰峰值最大约为 $311 \text{ s}^{-1}$ ;台阶直径 $d = \Phi 10 \text{ mm}$ 、底部直径 $D = \Phi 60 \text{ mm}$ 时的第2个波峰峰值最大约为 $299.4 \text{ s}^{-1}$ 。应变速率的大小为单位时间

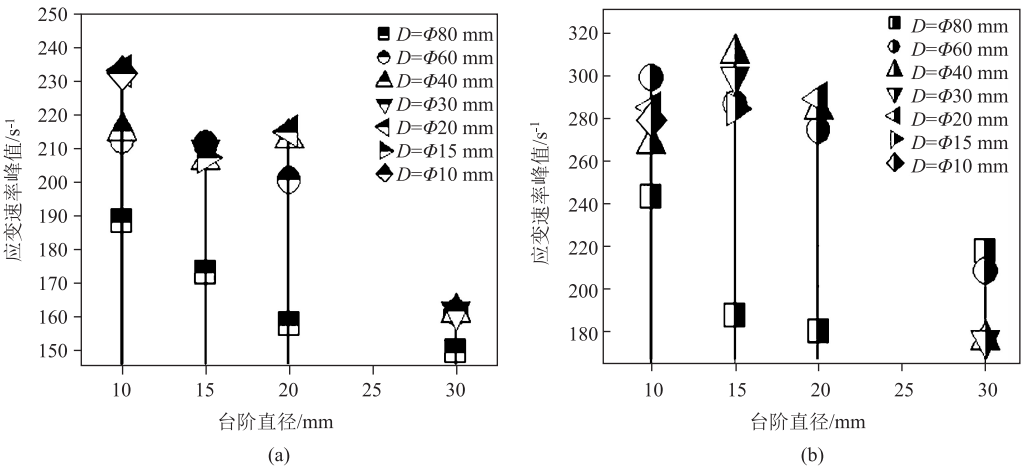


图 11 不同台阶直径下板材中心单元的应变速率峰值  
(a) 第 1 个波峰 (b) 第 2 个波峰

Fig. 11 Peak values of strain rate at center element of sheet under different step diameters  
(a) The first wave peak (b) The second wave peak

内的应变变化，不同的台阶直径与底部直径会影响冲击装置的几何结构，从而影响冲击变形过程中应变在单位时间内变化的阶段。台阶直径减小，底部直径减小，即小台阶和无台阶情况下，虽然在第 2 波波峰的应变速率峰值不能取得最大，但最终成形高度具有明显优势，表明第 1 个波峰的应变速率影响更大。

2.4 锥体底角  $\alpha$  的影响

固定台阶直径  $d$ ，分析锥体底角  $\alpha$  对磁脉冲冲击介质成形的影响。以台阶直径  $d=\Phi 15\text{ mm}$  为例进行研究。表 5 为台阶直径  $d=\Phi 15\text{ mm}$ ，锥体底角设定为  $20^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $50^\circ$ 、 $60^\circ$  和  $70^\circ$ ，不同底部直径对应的参数。随锥体底角  $\alpha$  值增加，冲击装置的台阶高度  $h$  显著增加，如  $\alpha=20^\circ$  时，底部直径  $D=\Phi 80\text{ mm}$  对应台阶高度  $h=11.8\text{ mm}$ ，而  $\alpha=70^\circ$  时，底部直径  $D=\Phi 80\text{ mm}$  对应台阶高度为  $89.3\text{ mm}$ 。

图 12 为不同锥体底角对板材成形高度峰值的影响。底部直径为  $\Phi 80$  和  $\Phi 60\text{ mm}$  时，锥体底角从  $70^\circ$  减小至  $20^\circ$ ，成形高度峰值增加；当底部直径减小至  $40\text{ mm}$  时，锥体底角减小引起的成形高度峰值变化逐渐缩小；底部直径为  $\Phi 30\text{ mm}$  时，不同锥体底角下成形高度峰值非常接近，且峰值均高于其他底部直径下对应的峰值；当锥体底角减小至  $0^\circ$  时，对应峰值为  $14\text{ mm}$ 。可见，底部直径减小到一定程度时，锥体底角  $\alpha$  对成形高度峰值的影响不明显。

表 5 不同底部直径和锥体底角对应的台阶高度  
Table 5 Step heights corresponding different bottom diameters and cone bottom angles

$d/\text{mm}$	$D/\text{mm}$	$\alpha/(\text{ }^\circ)$	$h/\text{mm}$
$\Phi 15$	$\Phi 80$	11.8	20
$\Phi 15$	$\Phi 60$	20	8.2
$\Phi 15$	$\Phi 40$	20	4.5
$\Phi 15$	$\Phi 30$	20	2.7
$\Phi 15$	$\Phi 80$	30	18.8
$\Phi 15$	$\Phi 60$	30	13.0
$\Phi 15$	$\Phi 40$	30	7.2
$\Phi 15$	$\Phi 30$	30	4.3
$\Phi 15$	$\Phi 80$	45	32.5
$\Phi 15$	$\Phi 60$	45	22.5
$\Phi 15$	$\Phi 40$	45	12.5
$\Phi 15$	$\Phi 30$	45	7.5
$\Phi 15$	$\Phi 80$	45	32.5
$\Phi 15$	$\Phi 80$	50	38.7
$\Phi 15$	$\Phi 60$	50	26.8
$\Phi 15$	$\Phi 40$	50	14.9
$\Phi 15$	$\Phi 30$	50	8.9
$\Phi 15$	$\Phi 80$	60	56.3
$\Phi 15$	$\Phi 60$	60	39.0
$\Phi 15$	$\Phi 40$	60	21.7
$\Phi 15$	$\Phi 30$	60	13.0
$\Phi 15$	$\Phi 80$	70	89.3
$\Phi 15$	$\Phi 60$	70	65.0
$\Phi 15$	$\Phi 40$	70	34.3
$\Phi 15$	$\Phi 30$	70	20.6
$\Phi 15$	$\Phi 15$	0	0.0

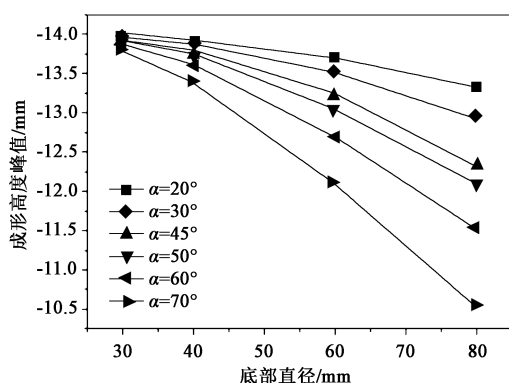


图12 不同锥体底角对成形高度峰值的影响

Fig. 12 Effects of different cone bottom angel on peak value of forming height

### 3 结论

(1) 保持放电能量不变, 底部直径  $D = \Phi 208 \sim \Phi 40$  mm 范围内, 底部直径越大, 成形高度越小; 无台阶与小台阶下的成形高度非常接近;  $\beta$  值增大与  $\gamma$  值减小有利于变形增加。底部直径逐渐减小, 冲击装置的冲击速度不断增加, 无台阶与小台阶冲击装置的冲击速度变化基本一致。冲击作用下, 板材中心应变速率出现两个明显的波峰, 第1个峰值基本呈现出冲击装置底部直径减小, 峰值增加的规律。

(2) 台阶直径不变, 底部直径减小, 板材获得更高的成形高度峰值。底部直径不变, 减小台阶直径, 板材成形高度峰值增加。小底部直径与  $\gamma = 1$  时的板材成形高度峰值接近。减小台阶直径, 更有利于提高冲击装置的冲击速度。

(3) 锥体底角影响冲击装置的台阶高度, 锥体底角增大, 台阶高度增加。总体上, 底部直径一定时, 板材成形高度峰值随锥体底角的减小而增加; 底部直径减小到一定程度时, 锥体底角对成形高度峰值的影响不明显。

#### 参考文献:

- [1] Verena P, Risch D, Brad K, et al. Electromagnetic forming-A review [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211 (5): 787-829.
- [2] Xu J R, Xie X Y, Wen Z S, et al. Deformation behaviour of AZ31 magnesium alloy sheet hybrid actuating with Al driver sheet and temperature in magnetic pulse forming [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2019, 37: 402-412.
- [3] Xu J R, Zhou Y Q, Cui J J, et al. Effects of temperature and driver sheet for magnesium alloy sheet in magnetic pulse forming [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 95: 3319-3333.
- [4] Cui X H, Du Z H, Xiao A, et al. Electromagnetic partitioning forming and springback control in the fabrication of curved parts [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 288: 116889.
- [5] Oliveira D A, Worswick M J, Finn M, et al. Electromagnetic forming of aluminum alloy sheet: Free-form and cavity fill experiments and model [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 170: 350-362.
- [6] Shang J H, Glenn D. Electromagnetically assisted sheet metal stamping [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211: 868-874.
- [7] Ulacia I, Hurtado I, Imbert J, et al. Experimental and numerical study of electromagnetic forming of AZ31B magnesium alloy sheet [J]. International Steel Research, 2009, 8 (5): 344-350.
- [8] Su H J, Huang L, Li J J, et al. Inhomogeneous deformation behaviors of oblique hole-flanging parts during electromagnetic forming [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 52: 1-11.
- [9] Yu H P, Chen I, Liu W, et al. Electromagnetic forming of aluminum circular tubes into square tubes: Experiment and numerical simulation [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 31: 613-623.
- [10] Xu J R, Hua M X, Feng Y H, et al. Electromagnetic impacting medium forming (EIMF) for aluminum alloy tube by using flat spiral coil [J]. International Journal of Material Forming, 2021, 14: 607-622.
- [11] Xu J R, Wang Y Y, Wen Z S, et al. Electromagnetic impacting medium forming (EIMF): A new method forming process for magnesium alloy sheet [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 109: 553-563.
- [12] 徐俊瑞, 李毅, 谢雪云, 等. 基于磁脉冲冲击弹性介质的5052铝合金板材胀形试验研究 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (5): 226-233.
- [13] Xu J R, Li Y, Xie X Y, et al. Experimental research for magnetic pulse impacting elastic medium bulging of 5052 aluminum alloy sheet [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (5): 226-233.
- [14] Cao Z Q, Zuo Y J. Electromagnetic riveting technique and its applications [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33 (1): 5-15.
- [15] Liu J G, Wang Z J. Prediction of wrinkling and fracturing in viscous pressure forming (VPF) by using the coupled deformation sectional finite element method [J]. Computational Materials Science, 2010, 48: 381-389.
- [16] Shergold O A, Fleck N A, Radford D. The uniaxial stress versus strain response of pig skin and silicone rubber at low and high strain rates [J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 32 (9): 1384-1402.