

特种成形

## 基于多场耦合仿真的时效态铝合金电磁翻孔成形

王紫旻<sup>1</sup>, 赵 淘<sup>1</sup>, 马伯洋<sup>2</sup>, 罗益民<sup>1</sup>, 李晓龙<sup>1</sup>, 于海平<sup>2</sup>

(1. 上海航天精密机械研究所, 上海 201600; 2. 哈尔滨工业大学 材料科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 针对 T6 态 2219 铝合金壳体电磁翻孔成形, 基于 ANSYS/LS-DYNA 建立了电磁场-结构场耦合模型, 通过数值模拟分析了电磁翻孔过程中板材的变形规律, 研究了放电电压、预制孔直径对不同成形区域的贴模间隙和减薄率的影响。结果表明: 电磁翻孔过程中产生的材料径向应变有利于抑制孔壁减薄; 随着放电电压的增大, 孔壁贴模间隙显著减小, 但凹模圆角处的贴模间隙以及材料最大减薄率增加; 随着预制孔直径的增大, 孔壁贴模间隙有所减小, 凹模圆角处的贴模间隙以及材料最大减薄率小幅增加。通过试验验证了模拟结果, 确定放电电压和预制孔直径分别为 12.75 kV 和  $\Phi 99$  mm 时, 可以得到翻边高度不小于 27 mm 的  $\Phi 120$  mm 的法向翻孔。

**关键词:** 电磁翻孔成形; 2219 铝合金; 贴模间隙; 减薄率; 多场耦合仿真

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.10.026

中图分类号: TG391

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 10-0191-07

## Electromagnetic flanging of aging aluminum alloy based on multi-field coupling simulation

Wang Zimin<sup>1</sup>, Zhao Tao<sup>1</sup>, Ma Boyang<sup>2</sup>, Luo Yimin<sup>1</sup>, Li Xiaolong<sup>1</sup>, Yu Haiping<sup>2</sup>

(1. Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute, Shanghai 201600, China;

2. Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** For the electromagnetic flanging of 2219 aluminum alloy shell in T6 state, a coupling model of electromagnetic field and structural field was established based on ANSYS/LS-DYNA. Then, the deformation rules of plate during the electromagnetic flanging process was analyzed by numerical simulation, and the influences of discharge voltage and preformed hole diameter on the die clearance and thinning rate in different forming areas were studied. The result shows that in the electromagnetic flanging process, the radial strain of material is beneficial to restrain the thinning of hole wall. With the increasing of discharge voltage, the die clearance of hole wall decreases significantly, but both the die clearance at the die fillet and the maximum thinning rate of material increase. With the increasing of preformed hole diameter, the die clearance of hole wall decreases, and the die clearance at the die fillet and the maximum thinning rate of material increase slightly. The simulation results are verified by the test, and when the discharge voltage and the preformed hole diameter are determined to be 12.75 kV and  $\Phi 99$  mm, respectively, a normal flanging hole of  $\Phi 120$  mm with a flanging height of not less than 27 mm can be obtained.

**Key words:** electromagnetic flanging; 2219 aluminum alloy; die clearance alloy; thinning rate; multi-field coupling simulation

随着我国航天事业的迅速发展, 运载火箭结构越来越多地采用大尺寸、半封闭式整体结构设计, 以实现高强度、轻量化的目的, 但这同时也对传统制造工艺造成了诸多挑战。翻孔是运载火箭贮箱壳体与动力管路的重要连接环节, 相比无翻孔的平焊

结构, 采用翻孔的结构形式有利于创造更好的焊接条件, 提供更大的承载能力<sup>[1]</sup>。但翻孔成形对材料的成形性能要求极高, 尤其在小直径翻孔成形中, 通常需要使用退火态材料, 并通过加热来提高材料塑性, 避免发生过度减薄甚至破裂。而在大尺寸构件加工中, 这种常规翻孔工艺不仅需要昂贵的大型设备及工艺装备, 还会极大地增加后续热处理校正以及机加工的难度和成本。因此, 采用一种能够在铝合金人工时效 (T6 态) 后进行翻孔的工艺对于大尺寸铝合金壳体的加工具有重要意义。

电磁成形是一种高速成形方法, 被广泛应用于

收稿日期: 2021-10-11; 修订日期: 2022-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52175304)

作者简介: 王紫旻 (1992-), 男, 硕士, 工程师

E-mail: onemoln2o4@163.com

通信作者: 于海平 (1974-), 男, 博士, 副教授, 博士生导师

E-mail: haipingy@hit.edu.cn

弯曲<sup>[2]</sup>、胀形<sup>[3]</sup>、翻边<sup>[4]</sup>等钣金成形领域。该方法利用线圈释放强电流,在工件内部产生感应电流,使其在电磁力的作用下发生高速变形<sup>[5]</sup>。得益于高速变形时的惯性效应,电磁成形可以有效地提高材料的成形极限<sup>[6]</sup>,这使得人工时效强化后的铝合金板材的成形具备可行性<sup>[7]</sup>。

目前,许多学者已开展了电磁翻孔的相关研究。孙圣朋<sup>[8]</sup>以铜片为驱动片进行了 TC4 钛合金电磁辅助冲压翻孔研究,研究了电压对成形效果的影响;于志达<sup>[1]</sup>进行了 5A06 铝合金和 QCr0.8 铜合金圆孔电磁成形试验,研究了工艺参数和变形情况;马伯洋等<sup>[9]</sup>针对 LF21 防锈铝多通管件,进行了管件侧壁电磁翻孔成形的工艺参数及润滑条件研究,大幅降低了极限翻孔系数;王煜等<sup>[10]</sup>在 T4 态 2219 铝合金和 2A14 铝合金推进剂贮箱壁板试验件上开展了试验研究,发现其成形精度高、表面质量好。可见,

电磁翻孔是一种极具潜力的翻孔成形工艺。

本文针对 T6 态、厚度为 6 mm 的 2219 铝合金壳体,开展了  $\Phi 120$  mm 电磁翻孔成形的多场耦合仿真和试验,研究了不同放电电压和预制孔直径条件下,板料的应变分布和减薄规律,并在试验中确定了工艺参数的优化值,为生产应用提供指导。

## 1 多场耦合仿真模型

### 1.1 结构场模型的建立

为实现电磁场和结构场的有效耦合,仿真在 ANSYS/LS-DYNA 中进行。仿真中,电磁翻孔装置由线圈、板材、凹模 3 个部件组成,其几何尺寸和结构场有限元模型的装配关系如图 1 所示。其中,线圈与板材使用实体正六面体单元,凹模采用壳单元,线圈和凹模均设置为刚性。

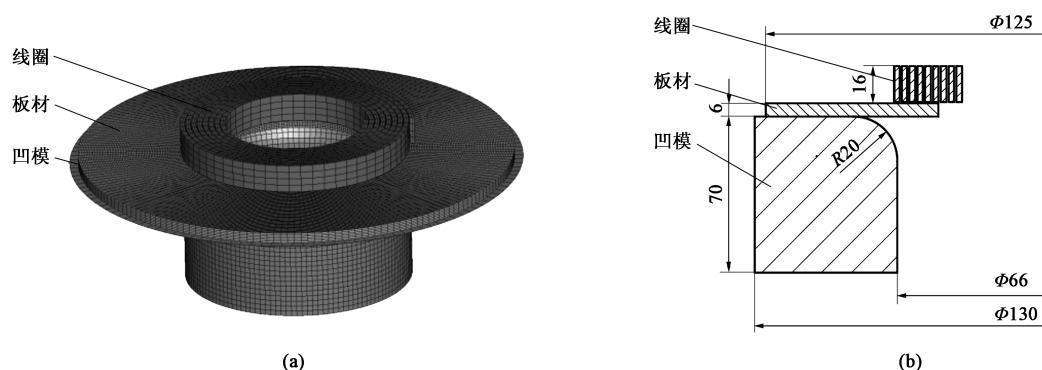


图 1 结构场有限元模型

(a) 有限元模型 (b) 模型几何尺寸

Fig. 1 Finite element model of structural field

(a) Finite element model (b) Geometry sizes of model

板材预制孔尺寸根据准静态下预制孔的计算公式确定初步范围,详见式 (1)<sup>[1]</sup>:

$$d_0 = D_1 - 2H + 0.86r + 1.44t_0 \quad (1)$$

式中:  $d_0$  为预制孔直径;  $D_1$  为翻边孔中径;  $H$  为翻边高度;  $r$  为内弯曲半径;  $t_0$  为初始板材厚度。

本文以运载火箭燃料箱为背景,选取厚度为 6 mm 的 T6 态 2219 铝合金为试验材料,目标翻孔中径为  $\Phi 126$  mm、翻边高度不小于 27 mm、内弯曲半径为 20 mm,则计算得到预制孔直径为  $\Phi 97.84$  mm。仿真中,预制孔直径以该值为基础取整并适当缩放,以研究其大小变化对成形的影响。

T6 态 2219 铝合金的材料力学性能由准静态拉伸试验和动态拉伸试验获取 (图 2),弹性模量为 73.1 GPa,泊松比为 0.33。

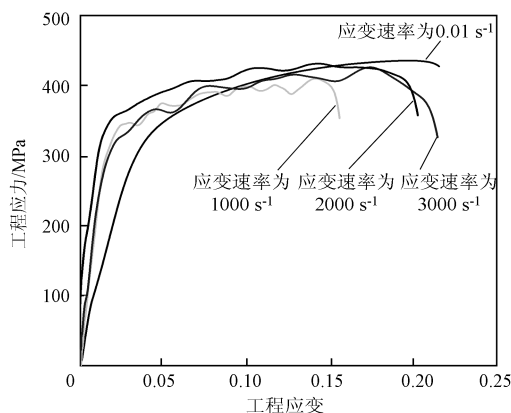


图 2 T6 态 2219 铝合金的工程应力-工程应变曲线

Fig. 2 Engineering stress-engineering strain curves of 2219 aluminum alloy in T6 state

由于电磁成形属于高速率成形范畴，模拟中采用 Johnson-Cook (J-C) 模型，以反映高速变形下的应变、应变率硬化效应<sup>[11]</sup>。考虑到前期试验中发现的电磁翻孔过程中材料的温度变化较小，因此，模拟中不考虑温度场的影响，将 J-C 模型简化为式 (2)。

$$\sigma = (R_{cl} + B\varepsilon^n) \cdot (1 + C \ln \dot{\varepsilon}^*) \quad (2)$$

式中： $\sigma$  为材料的流动应力； $\varepsilon$  为等效塑性应变； $\dot{\varepsilon}^* = \dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0$ ； $\dot{\varepsilon}$  为应变速率； $\dot{\varepsilon}_0$  为参考应变速率； $R_{cl}$  为屈服强度； $B$ 、 $C$  和  $n$  为与材料自身性质相关的系数， $B$  和  $n$  分别为材料应变硬化模量和硬化指数， $C$  为应变率强化参数。

根据 T6 态 2219 铝合金板材准静态和动态拉伸的试验数据，拟合出式 (3) 所示的 J-C 模型：

$$\sigma = (345 + 635.55\varepsilon^{0.125}) \cdot (1 + 0.003 \ln \dot{\varepsilon}^*) \quad (3)$$

## 1.2 电磁场模型的建立

电磁场模型中，T6 态 2219 铝合金的电导率为  $1.718 \times 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ ，线圈材料为紫铜，其电导率为  $5.710 \times 10^7 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ <sup>[12]</sup>。模拟采用试验电压下实测电流拟合曲线作为输入，以保证模拟结果的可靠性。在前期模拟过程中发现，翻孔成形在电流半周期内完成，为提高计算效率，取电流周期的一半作为求解的时间，步长取  $1 \mu\text{s}$ 。

T6 态 2219 铝合金的电磁翻孔数值模拟中，电流流入、流经、流出截面以及边界约束面的示意图如图 3 所示，板材外侧即为边界约束面，该面上所有节点限制 6 个自由度。

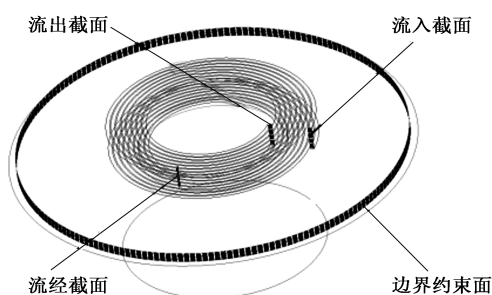


图 3 电路输入与约束条件

Fig. 3 Current input and constraint conditions

## 2 仿真结果分析

### 2.1 变形分析

对放电电压为 13 kV、预制孔直径为  $\Phi 95 \text{ mm}$  条件下的电磁翻孔成形进行变形行为分析。图 4 为板材在不同时刻下的变形情况，其中  $t$  为成形时间。可以看出：板材的塑性变形首先发生于凹模圆角的相邻区域，形成了小幅弯曲，此时内孔区域的材料

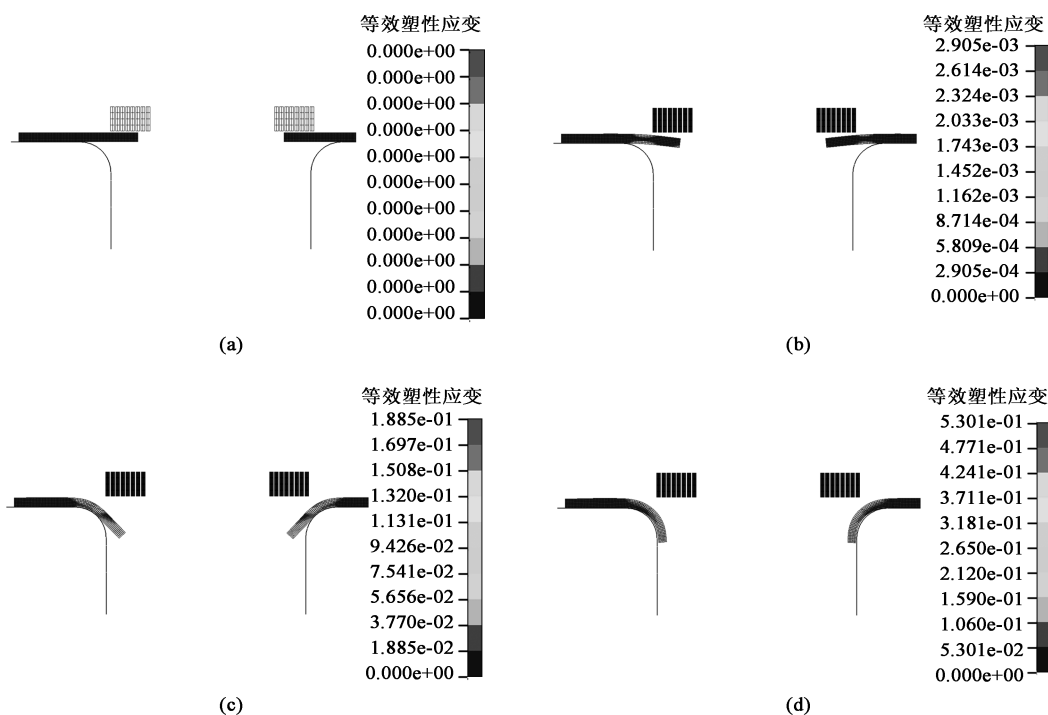


图 4 电磁翻孔过程中的等效塑性应变分布

(a)  $t=0 \mu\text{s}$  (b)  $t=44 \mu\text{s}$  (c)  $t=99 \mu\text{s}$  (d)  $t=150 \mu\text{s}$

Fig. 4 Equivalent plastic strain distributions in electromagnetic flanging process

并未发生明显的塑性变形；随后在磁场力的作用下，板坯逐步贴合凹模轮廓并形成了翻孔直壁，并因与凹模碰撞产生了反弹。翻孔过程中内孔区域材料的塑性变形显著加剧，观察图 4c 和图 4d 可知，成形过程中的最大等效塑性应变位置由凹模圆角区域转移至孔口区域。

根据以上变形过程，在翻孔内表面的圆角起始区、变形区和孔口区选取 3 个典型单元进一步分析，如图 5a 所示。其中， $Z$  轴为高度方向， $X$  轴为环向， $Y$  轴为径向。在单元 1 和单元 2 处，径向应变均为最大应变，且存在较大增幅，环向应变接近零，因此，该区域主要为径向拉伸变形和厚度方向减薄，环向变形很小。而在单元 3 处，环向应变为最大应

变，该区域材料的塑性变形表现为环向伸长、厚度方向减薄，以及径向收缩变形。从 3 个单元的应变分布可以看出，大部分凹模圆角区域均接近平面应变状态，孔口区域则近似单向拉伸的应变状态。这说明相对于钢模翻孔中较少的径向拉伸变形，在电磁翻孔的变形过程中，大部分区域均存在较大的径向拉应力。钢模翻孔时，材料径向仅受到与凸模之间的摩擦力，不足以产生较大的径向拉应力；对于高速率变形的电磁翻孔，沿凹模翻边的板材受到较大的惯性力，对更外侧的材料产生了拖曳效应，因而产生的径向拉应力远大于钢模翻孔。较大的径向拉应力有利于材料沿凹模圆角径向流动，对孔口材料的变形进行补料，有助于达到更小的极限翻孔系数。

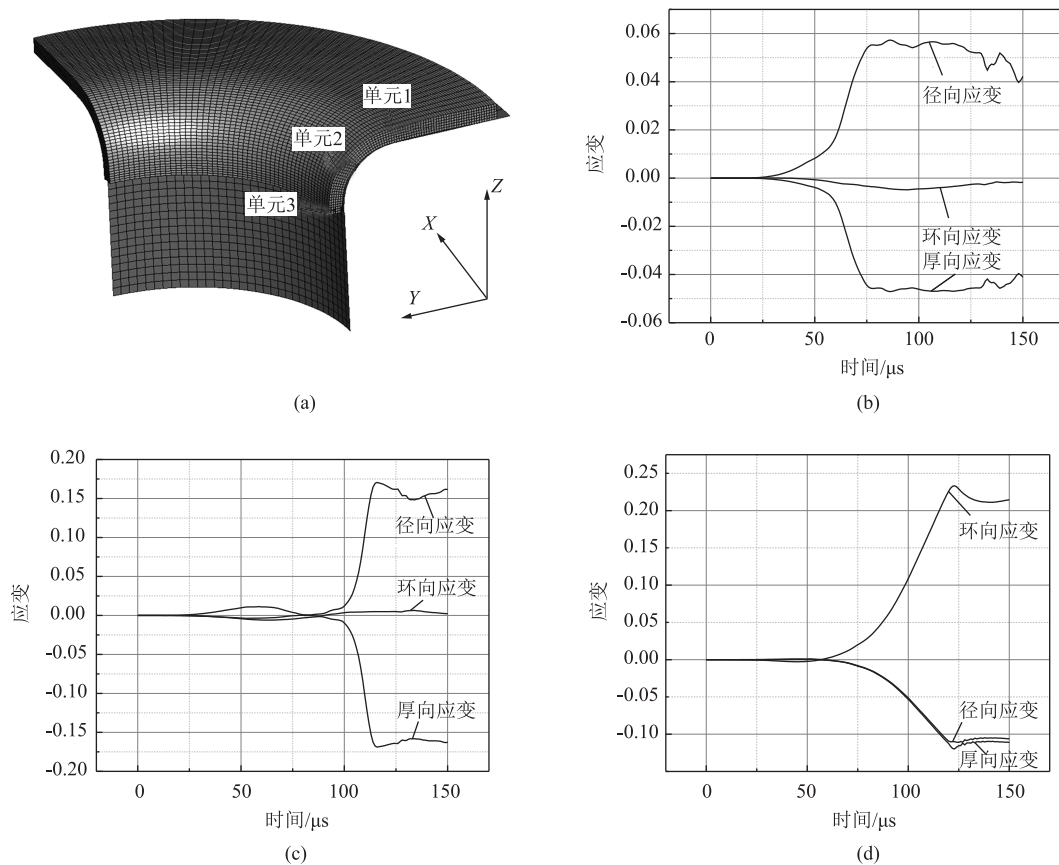


图 5 不同单元的应变变化曲线  
(a) 单元位置 (b) 单元 1 (c) 单元 2 (d) 单元 3

Fig. 5 Strain changing curves of different elements

(a) Element location (b) Element 1 (c) Element 2 (d) Element 3

## 2.2 放电电压分析

对翻孔外表面取点，以翻孔径向为横轴、圆心为横轴零点作剖视图。保持其他条件不变，不同放电电压对成形的影响如图 6 所示。由图 6 可见，放电电压较小时，板材在凹模圆角处贴合较好，但直

壁处间隙偏大，放电电压为 11 kV 时，甚至存在明显的斜角现象。这是由于低电压时的成形力小，内圈材料运动过程中受到的惯性力也较小，因此，径向拉应力作用下的材料流动并不显著，凹模圆角处板材以弯曲变形为主，材料紧贴凹模。靠近孔口处，

由于低电压下的成形力不足以完全克服变形抗力, 因而间隙较大。随着放电电压的增大, 孔口处成形充分, 直壁处的贴模度得到了显著提升; 凹模圆角处的材料则由于径向的拖曳效应流动加剧, 一定程度上沿切向脱离了与模具的接触, 故而间隙变大。因此, 成形贴模度与放电电压并非简单的线性关系, 要达到较好的综合贴模度, 存在合适的电压范围, 在本试验条件下, 放电电压选择在 12~13 kV 之间为宜。

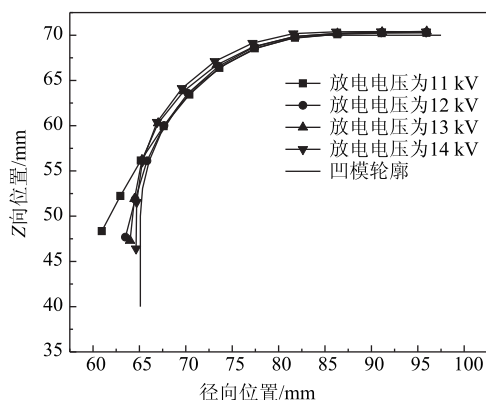


图6 不同放电电压下翻孔外表面轮廓曲线

Fig. 6 Outside surface contour curves of flanging at different discharge voltages

图7为不同放电电压下材料的厚度减薄率变化, 减薄率根据单元对应关系被投影至预制孔状态。由图7可知, 随着放电电压由 11 kV 增加至 14 kV, 主要成形区域的厚度减薄率显著上升。孔口区域由于成形力的增加, 孔径和翻边高度均有所增加 (图6), 材料变形幅度更大, 减薄率更高; 圆角区域材料受径向拉应力增加的影响, 减薄率也大幅增加。凹模圆角处的材料减薄率在低电压时存在明显的先下降后上升的趋势, 这是由于低电压下材料紧贴模

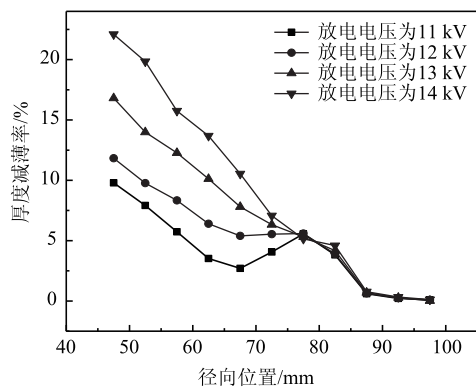


图7 不同放电电压下翻孔的减薄率变化

Fig. 7 Thinning rate changes of flanging at different discharge voltages

具弯曲, 材料径向流动受限, 加之圆角内侧材料成形不到位, 因此, 圆角外侧材料流动至圆角处时速度放缓, 形成了局部补料效果。而靠近孔口处时, 材料又因为应变状态由接近平面应变转为单向拉伸, 变形幅度更大, 因此减薄率重新上升。可以发现, 当放电电压增加至 13 kV 时曲线转折消失, 结合图6可知, 圆角处的板材脱离了与模具的接触, 材料受径向拉应力作用流动至圆角内侧, 不再于圆角处堆积。

### 2.3 预制孔影响分析

保持其他条件不变, 预制孔直径分别为  $\Phi 85$ 、 $\Phi 90$ 、 $\Phi 95$  和  $\Phi 100$  mm 时, 翻孔外表面轮廓曲线如图8所示, 可见, 随着预制孔直径的增大, 翻孔直壁的贴模度提高, 圆角处的贴模度小幅下降。图9为不同预制孔直径下的减薄率变化, 随着预制孔直径的增大, 最大减薄率增大, 圆角处的曲线转折消失。这是由于预制孔直径增大, 板材变形面积减小, 变形抗力也减小, 在相同的放电电压下, 成形力相

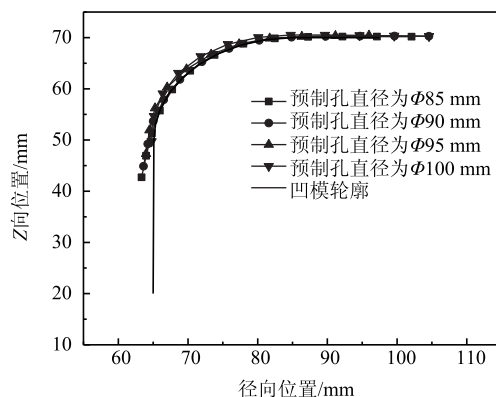


图8 不同预制孔直径下翻孔外表面轮廓曲线

Fig. 8 Outside surface contour curves of flanging with different preformed hole diameters

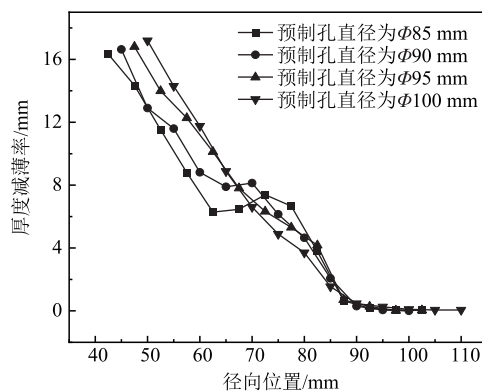


图9 不同预制孔直径下的翻孔减薄率变化

Fig. 9 Thinning rate changes of flanging with different preformed hole diameters

对更为充足。因此,增大预制孔直径时,贴模度和减薄率出现了与2.2节中提高放电电压时相似的变化趋势。同时,翻边高度的大幅减小降低了惯性力引起的拖曳效应,这也是预制孔增大时,进入圆角区域的减薄率低于小预制孔状态,而圆角靠内侧减薄率更大的原因之一。

### 3 工艺试验

电磁翻孔成形的试样材料为T6态2219铝合金,厚度为6 mm,尺寸为250 mm×250 mm,型面为贮箱箱底翻孔处的局部椭球型面,曲率较小,接近平板状态。成形的翻孔内径为 $\Phi 120$  mm,翻边高度不小于27 mm。试验所用电磁成形机的额定储能为50 kJ,最高放电电压为18 kV,试验所用的凹模和线圈组装后的装置见图10。



图10 试验装置

Fig. 10 Experimental equipment

根据仿真分析,试验放电电压选择在12~13 kV,预制孔直径选择在 $\Phi 95 \sim \Phi 100$  mm。试验初始参数设置为:放电电压为13 kV,预制孔直径为 $\Phi 95$  mm,随后根据试验结果调整参数。试验中,当预制孔直径 $\leq \Phi 97$  mm时,试样均出现了破裂。与钢模翻孔常见的孔口径向裂纹不同,电磁翻孔时更容易产生如图11所示的圆角环向裂纹。同时,发现圆角处呈明显的变曲率弯曲,这与之前的仿真分析中,圆角处材料存在较大的径向应变,且随着放电电压的增大,该处贴模度降低、材料减薄率明显增加的现象相一致,因此,通过减小放电电压将有助于消除这两种缺陷。



图11 凹模圆角处裂纹

Fig. 11 Crack at fillet of die

调整放电电压至12.75 kV、预制孔直径为 $\Phi 99$  mm成形,所得翻孔经荧光检测成形完好,最低高度为27.5 mm,符合要求,见图12。试样圆角处的棱边基本消失,过渡更为圆滑,可知在仿真分析所确定的工艺参数范围内可以完成 $\Phi 120$  mm翻孔的成形,且成形结果与仿真结果的一致性较高。为保证良好的贴模度和翻边高度,不再进行更低电压和更大预制孔条件下的试验。

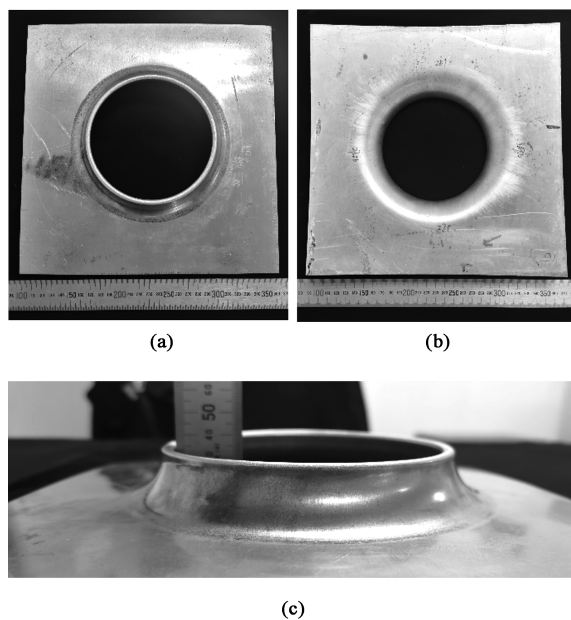


图12  $\Phi 120$  mm翻孔试样

(a) 试样正面 (b) 试样反面 (c) 试样侧面

Fig. 12 Flanging specimen with diameter of  $\Phi 120$  mm

(a) Front of specimen (b) Back of specimen (c) Side of specimen

### 4 结论

(1) 通过仿真分析了电磁翻孔中的变形行为,

凹模圆角处材料的径向应变最大,表明在高速率成形中该处受到了较大的径向拉应力,其引起的材料径向流动有利于对孔口材料形成补偿。

(2) 材料的贴模程度受放电电压和预制孔直径的明显影响,放电电压和预制孔直径过小时,翻孔内圈材料受到的成形力小于变形抗力,造成孔口处成形不充分,贴模效果不佳;放电电压和预制孔直径过大时,径向拉应力带来的拖曳效应显著,材料进入圆角时沿切向流动剧烈,会降低圆角处的贴模度。

(3) 试验中板材的成形情况与仿真结果的一致性较高,采用12.75 kV的放电电压、 $\Phi 99$  mm的预制孔,可以有效避免开裂,成形出符合要求的 $\Phi 120$  mm翻孔。

#### 参考文献:

- [1] 于志达. 板材磁脉冲翻孔成形与变形规律研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.  
Yu Z D. Experiments and Deformation Law of Magnetic Pulse Flanging of Sheet Metal [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [2] 蔡恒. 铝合金曲面面板电磁成形回弹实验研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.  
Cai H. Experimental Study of Electromagnetic Forming in Spring-back of Aluminum Alloy Curved Surface [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [3] 周海洋, 莫建华, 李建军, 等. 钛合金 TC4 室温下电磁胀形的工艺分析 [J]. 塑性工程学报, 2013, 20 (3): 76-81.  
Zhou H Y, Mo J H, Li J J, et al. Experimental and numerical analysis of electromagnetic bulging process of titanium alloy TC4 under room temperature [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2013, 20 (3): 76-81.
- [4] 张望, 王于东, 李彦涛, 等. 基于双向电磁力加载的管件电磁翻边理论与实验 [J]. 电工技术学报, 2021, 36 (14): 2904-2911.  
Zhang W, Wang Y D, Li Y T, et al. Theory and experiment of tube electromagnetic flanging based on bidirectional electromagnetic force loading [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36 (14): 2904-2911.
- [5] 洪秀冬, 黄亮, 李建军, 等. 大口径铝合金波纹管电磁胀形数值模拟 [J]. 精密成形工程, 2016, 7 (4): 1-7.  
Hong X D, Huang L, Li J J, et al. Numerical simulation of electromagnetic bulging of large diameter aluminum alloy bellows [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2016, 7 (4): 1-7.
- [6] 金淳, 黄亮, 李建军, 等. 不同热处理状态下成形速率对2219 铝合金成形极限的影响 [J]. 塑性工程学报, 2017, 24 (1): 125-132.  
Jin C, Huang L, Li J J, et al. Influence of forming rate on forming limit of 2219 aluminum alloy under different heat treatment conditions [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2017, 24 (1): 125-132.
- [7] Jin Y Y, Yu H P. Enhanced formability and hardness of AA2195-T6 during electromagnetic forming [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 890: 161891.
- [8] 孙圣朋. 钛合金板材及管件电磁成形技术的研究 [D]. 沈阳: 沈阳航空航天大学, 2016.  
Sun S P. Research on the Electromagnetic Forming Technology of Titanium Alloy Sheet and Pipe Fitting [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2016.
- [9] 马伯洋, 杨澍, 李春峰, 等. 铝合金管等径孔电磁脉冲翻孔实验研究 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (4): 191-198.  
Ma B Y, Yang S, Li C F, et al. Experimental research on equal diameter hole flanging by electromagnetic pulse for aluminum alloy tube [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (4): 191-198.
- [10] 王煜, 张松, 龚雄, 等. 电磁脉冲成形技术在铝合金壁板翻边孔上的应用与研究 [J]. 制造业自动化, 2021, 43 (1): 1-3, 11.  
Wang Y, Zhang S, Gong X, et al. Application and research of electromagnetic pulse forming used on flanging hole of aluminum alloy panels [J]. Manufacturing Automation, 2021, 43 (1): 1-3, 11.
- [11] 柳爱群, 黄西成. 高应变率变形的 Johnson-Cook 动态本构模型参数识别方法 [J]. 应用数学和力学, 2014, 35 (2): 219-225.  
Liu A Q, Huang X C. Identification of high-strain-rate material parameters in dynamic Johnson-Cook constitutive model [J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2014, 35 (2): 219-225.
- [12] 黄伯云. 中国材料工程大典: 第4卷 有色金属材料工程 (上) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.  
Huang B Y. Chinese Material Engineering Canon: Volume 4 Non-ferrous Metal Material Engineering (Part I) [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.

#### 《锻压技术》读者信息反馈卡声明

《锻压技术》杂志自2008年起设立“读者信息反馈卡”,旨在加强刊物与读者的交流,促进刊物质量的提高,并竭诚为读者服务。反馈卡填写要求:内容填写完整、没有遗漏,提供的信息准确、详细,字迹书写清晰、整洁。如收到的反馈卡内容填写不完整,字迹不清、无法辨认,通讯地址模糊、不详细等,编辑部将不予邮寄杂志,特此声明。

“读者信息反馈卡”1~12期刊登,位置在正文后,请读者注意查看,以免遗漏。

《锻压技术》编辑部