

## 平板集磁器对板料小区域电磁成形的影响规律

黄 春, 章争荣, 李 晋, 张 军, 陈超军

(广东工业大学 材料与能源学院, 广东 广州 510006)

**摘要:** 利用装配有集磁器的平板电磁成形系统, 研究了金属板料小区域的电磁成形过程以及集磁器对板料电磁力的分布影响规律。结果表明: 通过集磁器的磁场聚集作用, 板料能够完成小区域的变形, 且成形效果较好, 能够贴紧凸模; 板料的变形主要分为3个阶段, 首先是板料中心区域受到电磁力而发生微小变形, 随着电磁力的增大以及板料获得一定成形速度后, 中心区域快速完成变形, 最后是受力区域向板料外端移动, 在惯性共同作用下发生整体的下移, 完成变形。集磁器能够将板料受力区域集中在中心半径约15 mm的区域内, 板料的成形高度为4 mm。

**关键词:** 电磁成形; 集磁器; 金属板料; 电磁力; 小区域成形

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.01.009

**中图分类号:** TG391

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2023) 01-0072-07

## Influence law of plate magnetic collector on electromagnetic forming in small area of sheet metal

Huang Chun, Zhang Zhengrong, Li Jin, Zhang Jun, Chen Chaojun

(School of Material and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** The electromagnetic forming process of sheet metal in small area and the influence law of magnetic collector on the distribution of electromagnetic force for sheet metal were studied by using the plate electromagnetic forming system with magnetic collector. The results show that the sheet metal can complete the deformation of small area through the magnetic field aggregation of magnetic collector, the forming effect is good, and the sheet metal can cling to the punch. The deformation of sheet metal is mainly divided into three stages. First, the central area of sheet metal undergoes minor deformation due to electromagnetic force. Then, with the increasing of electromagnetic force and a certain forming speed obtained by the sheet metal, the central area rapidly completes deformation. Finally, the force-bearing area moves to the outer end of sheet metal, and under the joint action of inertia, the overall downward movement occurs to complete the deformation. The magnetic collector can concentrate the force-bearing area of sheet metal in an area with a central radius of about 15 mm, and the forming height of sheet metal is 4 mm.

**Key words:** electromagnetic forming; magnetic collector; sheet metal; electromagnetic force; small area forming

随着机械、航天航空、汽车工业、轻化工等领域对零部件轻量化的需求不断增大, 轻质合金材料如铝、镁、钛等合金得到了广泛的应用。电磁成形是一种利用高压脉冲磁场, 使得金属工件在冲击电磁力作用下发生塑性变形的成形工艺, 该工艺有非常高的成形速率, 能够提高轻质合金材料的塑性成形极限<sup>[1]</sup>。

对于金属平板件的电磁成形已有大量的研究, 运用有限元软件对电磁成形过程进行模拟, 可获得成形过程中的电磁力、变形速度、成形极限等数据<sup>[2]</sup>。Cui X H等<sup>[3]</sup>对铝合金板料的电磁成形进行了大量研究, 通过建立薄板胀形的3D有限元模型, 考虑了成形过程中板料与模具的接触及板料变形的影响, 计算得到金属板材电磁成形的能量利用率为3.73%。Cui X H等<sup>[4-5]</sup>还提出了一种电磁增量成形方法, 通过移动线圈的位置对大型金属部件进行局部成形, 累积获得最终的部件形状。Xiong Q等<sup>[6]</sup>设计了一种可轴向移动的电磁成形系统, 成形线圈可跟随板料的变形而移动, 两者始终保持一定的距离, 可将铝合金板材的成形深度由90 mm提高至130 mm。

收稿日期: 2022-02-28; 修订日期: 2022-06-01

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (500210081)

作者简介: 黄 春 (1997-), 男, 硕士

E-mail: 2111902053@mail2.gdut.edu.cn

通信作者: 章争荣 (1969-), 男, 博士, 教授

E-mail: zzr@gdut.edu.com

在电磁系统中加入集磁器装置,可以达到加强局部区域磁场的作用。张敏<sup>[7]</sup>通过板材电磁成形研究指出,趋肤效应对成形效果的影响很大,当趋肤深度与料厚的比值趋近于 2.0 时,自由拉伸的深度最大。莫健华等<sup>[8]</sup>运用有限元软件对平板电磁成形集磁器的工作原理进行了研究,发现利用带有狭缝的圆台形集磁器,可以将电磁力集中在板料的中心部位,使得板料的成形深度增加一倍。Kumar R 等<sup>[9]</sup>研究了不同截面集磁器对铜铝复合杆压接效果的影响,发现使用阶梯锥形集磁器压接复合杆在接头质量、压缩强度、拉伸强度和总体均匀性等方面的效果较好。Rajak A K 等<sup>[10]</sup>对电磁压接的工艺进行了研究,指出集磁器在 11 kV 的电压下,保持的有效工作高度为 10.5 mm,可获得最大的磁压力,且工作寿命较长。徐佳辉等<sup>[11]</sup>研究了基于集磁器的电磁冲裁工艺,并运用有限元软件进行模拟分析,结果表明,集磁器的应用使得板料上的电流、磁场和电磁力被聚集在一个带状区域,能够优化冲裁断面的质量,强化剪切变形。Zhang H 等<sup>[12]</sup>研究了用于焊接不同金属的平板集磁器,结果表明,随着集磁器中心孔台阶数目的增多,电磁力峰值提高,焊接效果更好,设计出一种具有缓变中心孔的集磁器结构。

目前常见的电磁成形系统,由于其小尺寸线圈加工困难,且强度较低,对于小区域的成形有一定限制。本文通过对配备有集磁器装置的平板电磁成形系统进行有限元模拟研究,利用集磁器配合常规尺寸的线圈,旨在缩小板料的受力区域,运用顺序耦合的模拟计算方式,探究集磁器对板料小区域成形效果及电磁力分布的影响规律。

## 1 有限元模拟研究方案

在 ANSYS 软件中利用顺序耦合的方法进行板料电磁成形过程的数值模拟,构建电磁场模型和结构场模型进行交替耦合计算。板料电磁成形系统为轴对称模型,建立了如图 1 所示的电磁场有限元模型,包括板料、集磁器、线圈、空气以及远场空气。板料、线圈及远场空气划分为四边形单元,空气层为了配合板料变形更新,划分为三角形单元。其中,板料、线圈及空气层采用 Plane13 耦合单元,单元性质设置为轴对称,远场空气采用 Inf110 单元。各单元的材料参数属性以及尺寸如表 1 所示,其中线圈、集磁器和板料之间的距离均设置为 1 mm。

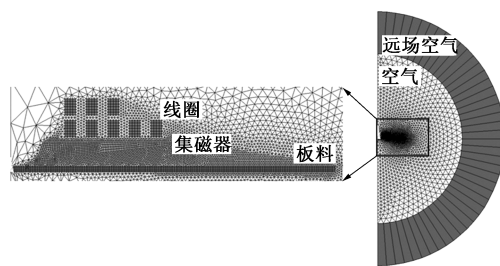


图 1 电磁场模型

Fig. 1 Electromagnetic field model

表 1 有限元模型材料参数及尺寸参数

Table 1 Material parameters and dimension parameters of finite element model

材料	相对磁导率	电阻率/( $\times 10^{-8} \Omega \cdot m$ )	尺寸
空气	1	—	—
线圈	1	1.72	2 mm $\times$ 3 mm
板料	1	2.78	1 mm $\times$ 60 mm
集磁器	1	1.72	R30 mm

图 2 为板料电磁成形系统的结构场模型,包括板料和凸模,凸模中心成形区域的尺寸为 8.66 mm,高度为 5 mm。其中板料转换为 Plane182 结构单元,凸模采用 Plane182 单元,单元性质均设置为轴对称,凸模设置为刚体并约束所有自由度,空气和线圈单元转换为“Null”,不参与结构变形计算。将电磁场中计算得到的板料各节点的电磁力作为载荷施加到结构场中的板料上,计算板料的变形。

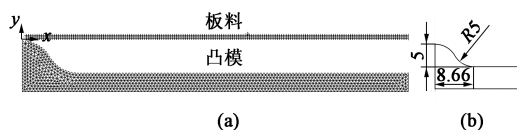


图 2 结构场模型及凸模尺寸示意图

(a) 结构场模型 (b) 凸模尺寸

Fig. 2 Schematic diagrams of structural field model and punch dimensions

(a) Structural field model (b) Punch dimensions

根据电磁成形的高应变速率特点,有限元模型计算时选取了考虑材料应变速率的 Cowper-Symonds 本构方程,如式 (1) 所示:

$$\sigma = \sigma_y \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{p} \right)^m \right] \quad (1)$$

式中:  $\sigma$  为动态流动应力;  $\sigma_y$  为准静态流动应力;  $\dot{\epsilon}$  为塑性应变速率;  $p$ 、 $m$  为材料常数,对于铝合金材料,  $m=0.25$ ,  $p=6500 \text{ s}^{-1}$ <sup>[13]</sup>。

电磁成形过程的脉冲电流为逐渐衰减的正弦交变电流,相关研究表明,只有第 1 半波对成形过程有影响<sup>[14-15]</sup>,板料的变形主要发生在脉冲电流的第

1 半波。模拟中对线圈施加的电流如图 3 所示, 选取实验所测得的第 1 半波电流, 数值模拟计算设置的时长为  $256\ \mu\text{s}$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 磁力线和板料电磁力分布

图 4 为电磁场模型的磁力线分布图。图 4 左侧为整个电磁场的磁力线分布图, 可以看到磁力线围绕线圈组向外扩散, 磁力线在下层线圈的位置最密集。图 4 右侧为板料与集磁器的磁力线分布图, 可以看到磁力线主要在集磁器上部, 靠近线圈位置最密集, 其次是集磁器下部区域与正对的板料区域。图 5a 为板料所受电磁力的矢量分布图, 电磁力主要集中在距板料中心区域约  $15\ \text{mm}$  的区域内, 与磁力线的分布相对应, 电磁力由中心区域向外端减小, 最大电磁力值为  $56\ \text{N}$ 。这是由于集磁器部件改变了

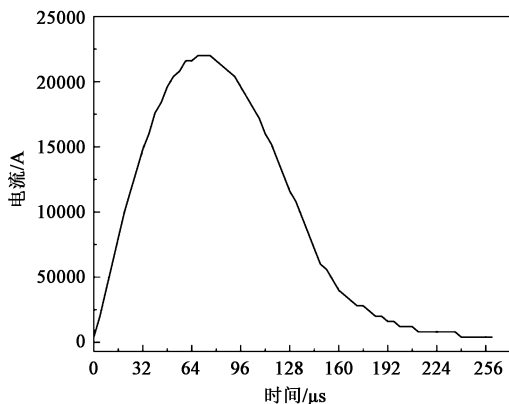


图 3 电流变化图

Fig. 3 Current variation diagram

感应电流的分布位置, 使得感应电流在集磁器下部产生聚集加强, 板料对应位置的感应电流也增强, 如图 5b 所示, 板料上的最大感应电流值为  $-3.70 \times 10^9\ \text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ , 其中负号表示感应电流的方向。

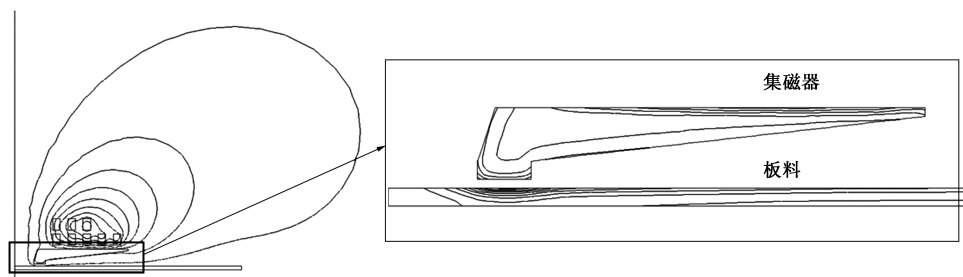


图 4 电磁场磁力线分布图

Fig. 4 Distribution diagram of magnetic force line in electromagnetic field

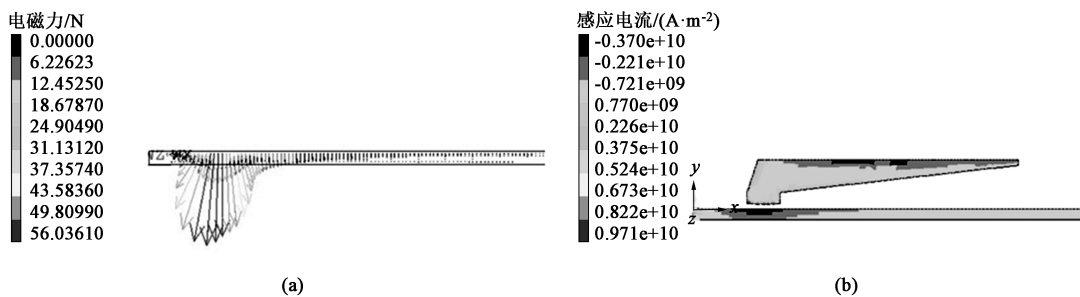


图 5 电磁力矢量分布图及感应电流云图

(a) 板料电磁力矢量分布图 (b) 板料与集磁器的感应电流云图

Fig. 5 Electromagnetic force vector distribution map and induction current cloud map

(a) Distribution map of electromagnetic force vector in sheet metal (b) Cloud map of induction current for sheet metal and magnetic collector

### 2.2 板料不同时刻的变形规律

#### 2.2.1 板料变形过程分析

图 6 为板料在不同时刻的结构变形图。在  $0 \sim 64\ \mu\text{s}$  之间, 板料的变形量较小, 其原因是线圈加

载的电流较小, 产生的电磁力也较小, 所以变形量小。板料中心区域的变形主要发生在  $64 \sim 112\ \mu\text{s}$  之间, 随着电流增大和板料获得一定的成形速度, 在这两者共同作用下, 板料中心区域迅速发生并完成

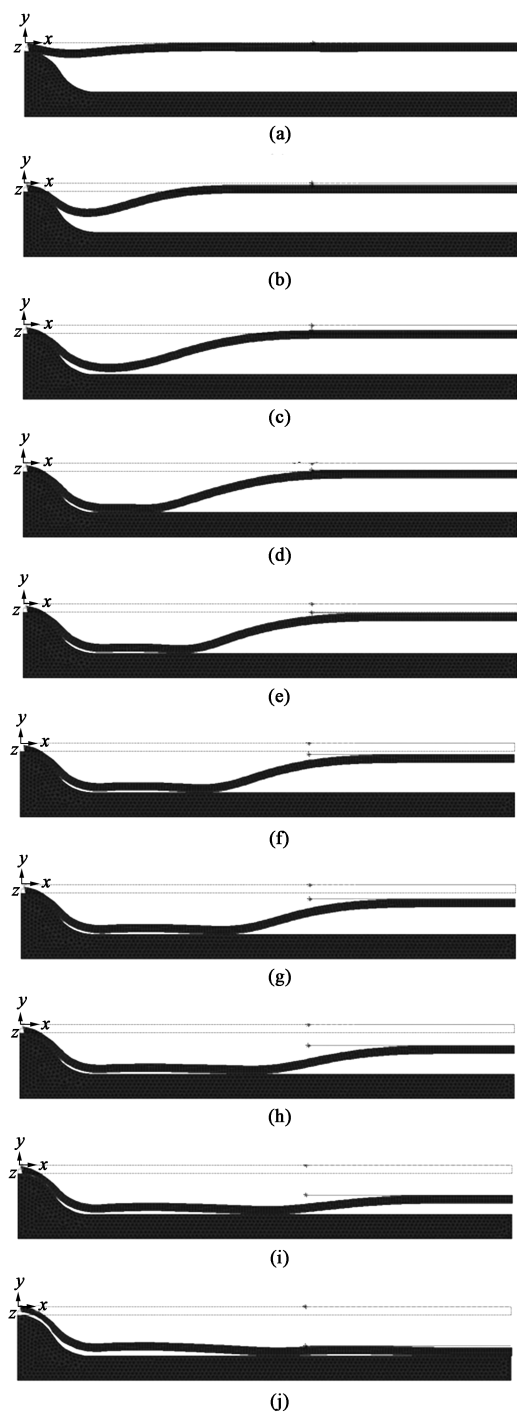


图6 板料电磁成形中不同时刻的结构变形图

(a) 32  $\mu\text{s}$  (b) 64  $\mu\text{s}$  (c) 96  $\mu\text{s}$  (d) 112  $\mu\text{s}$  (e) 128  $\mu\text{s}$   
 (f) 144  $\mu\text{s}$  (g) 160  $\mu\text{s}$  (h) 192  $\mu\text{s}$  (i) 224  $\mu\text{s}$   
 (j) 256  $\mu\text{s}$

Fig. 6 Structural deformation diagrams of sheet metal in electromagnetic forming at different time

变形,中心区域紧贴圆头形凸模。在128~256  $\mu\text{s}$ 内,由于线圈电流减小以及板料与集磁器的距离增大,板料上的电磁力逐渐减弱,板料变形区向外端

移动,在后续的电磁力作用下发生整体的下移,与凸模平面接触,完成变形。

## 2.2.2 板料受力分析

板料所受电磁力主要为轴向方向,图7为板料上各位置轴向电磁力随成形时间的变化图,板料上的电磁力主要集中在中心区域15 mm范围内,并向板料外端逐渐减小。在成形时间16~48  $\mu\text{s}$ 内,随着线圈电流的升高,板料上的电磁力增大,在48  $\mu\text{s}$ 时达到最大值270 N;在64~80  $\mu\text{s}$ 内,板料上的电磁力下降,且分布区域向外端扩大至30 mm范围,这是由于板料中心区域发生变形,增大了与集磁器之间的距离,产生了一个电磁力低谷期;随后在80~128  $\mu\text{s}$ 内,随着线圈电流的增大,板料上的电磁力增大,板料中心区域发生较大变形;在128~256  $\mu\text{s}$ 内,随着线圈电流开始下降,且板料与集磁器的距离增加,板料上的电磁力逐渐减小,进入成形后期。在前128  $\mu\text{s}$ 内,板料的电磁力主要受到线圈电流和板料与集磁器的距离的影响,随着线圈电流的增加,电磁力整体呈现上升趋势,在64~80  $\mu\text{s}$ 内,板料与集磁器的距离的影响超过了线圈电流的影响,造成了电磁力出现低谷;在后续128~256  $\mu\text{s}$ 的变形中,电磁力主要受到线圈电流的影响,随着线圈电流的下降而减小。

## 2.2.3 板料应力分布分析

如图8a所示,选取板料中心区域的4个节点编号为1、2、3、4,绘制其第一主应力大小随成形时间变化的曲线图,如图8b所示。可以看到,板料第一主应力的变化规律受到板料电磁力分布的影响,节点1位于板料中心受力区域,在前96  $\mu\text{s}$ 内受到较大的电磁力,有较大的第一主应力值,随后受力区域向外端移动,中心区域电磁力减小,第一主应力随之减小,在中心区域完成变形后保持稳定;节点2位于板料弯曲变形位置,第一主应力值先随板料电磁力的增加而增加,最大第一主应力值与节点1相近,在完成弯曲变形后,第一主应力值随板料电磁力的下降而减小;节点3位于板料弯曲末端,第一主应力值先随板料电磁力的增加而增加,最大主应力值小于节点1、2,在弯曲变形完成后,随着板料电磁力的下降而减小,随后保持稳定;节点4位于板料与凸模平面接触的区域,第一主应力值随板料电磁力的增加而增加,在中心区域完成变形后,随板料电磁力的减小而减小,然后保持稳定。



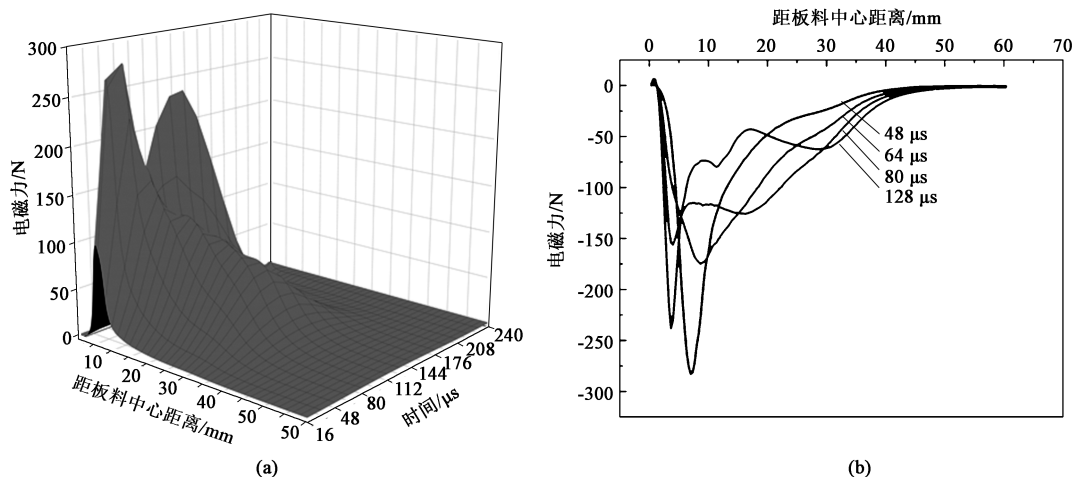


图7 板料轴向电磁力随成形时间的变化图

(a) 3D图 (b) 2D图

Fig. 7 Change diagrams of axial electromagnetic force for sheet metal with forming time

(a) 3D diagram (b) 2D diagram

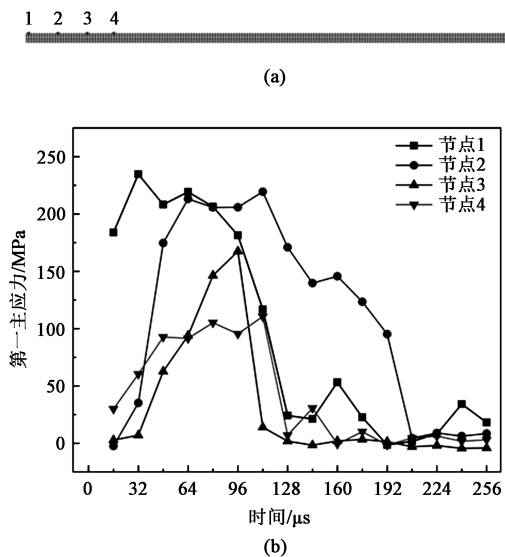


图8 特定节点的第一主应力随成形时间变化图

(a) 特定节点的位置 (b) 第一主应力随成形时间变化图

Fig. 8 Change diagram of the first main stress with forming time for selected nodes

(a) Locations of selected nodes (b) Change diagram of the first main stress with forming time

### 2.3 实验结果与模拟结果对比

实验中使用 EMPF-50 电磁成形机 (图 9a), 其最大放电能量为 50 kJ, 输出电压为 10 kV, 电容量为 1000  $\mu\text{F}$ ; 电磁成形装置如图 9b 所示, 使用其进行了板料小区域的电磁成形实验, 实验中放电电压为 2.5 kV。

图 10a 为实验得到的板料的结构变形图, 主要

成形区域大小约为 15 mm, 截面成形高度为 4 mm, 成形形状与凸模一致。图 10b 为实验结果与模拟结果的截面轮廓尺寸比较, 两者的成形轮廓形状相同, 成形区域大小一致, 验证了有限元模拟的可行性。在板料中心位置处实验与模拟的成形高度相同, 两者的成形轮廓曲线一致; 在凸模圆角位置处实验的成形高度比模拟结果小 0.4 mm, 实验的轮廓曲线位于上方。

### 3 结论

(1) 采用配备集磁器的平板电磁成形系统, 研究了集磁器对板料小区域成形效果的影响规律, 模拟结果与实验结果一致。集磁器装置可以加强局部的磁场, 改变电磁力的分布位置, 进行板料局部的变形。

(2) 板料的成形过程主要分为 3 个阶段: 首先, 板料中心区域发生微小变形和成形速度的积累; 然后, 板料中心区域获得一定的成形速度, 随着电磁力的增大发生进一步变形, 完成对凸模头部的贴合; 最后, 变形区域向外端移动, 板料发生整体下移, 与凸模平面部分接触。集磁器能够将板料受力区域集中在距中心区域 15 mm 的范围内, 板料电磁力随着成形高度的增加而减小。

(3) 模拟结果与实验结果吻合, 板料的变形主要集中在距中心区域 15 mm 以内, 成形高度为 4 mm。

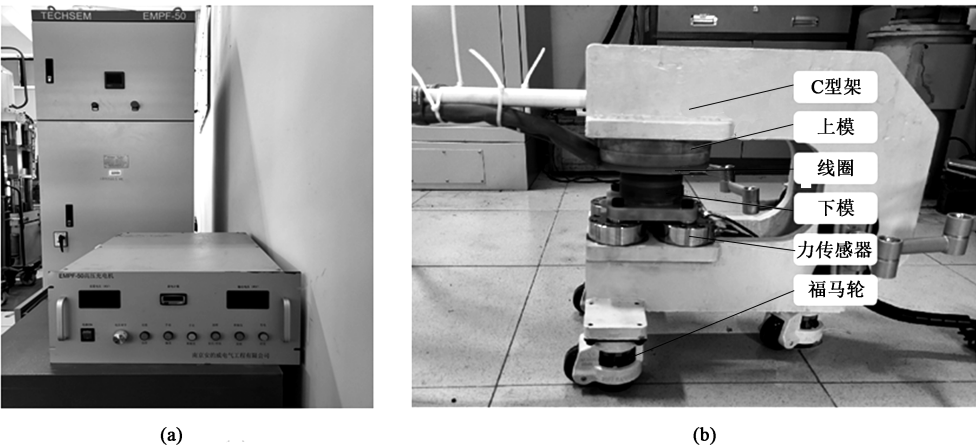


图 9 实验设备  
(a) EMPF-50 电磁成形机 (b) 电磁成形装置  
Fig. 9 Experimental equipment  
(a) EMPF-50 electromagnetic forming machine (b) Electromagnetic forming device

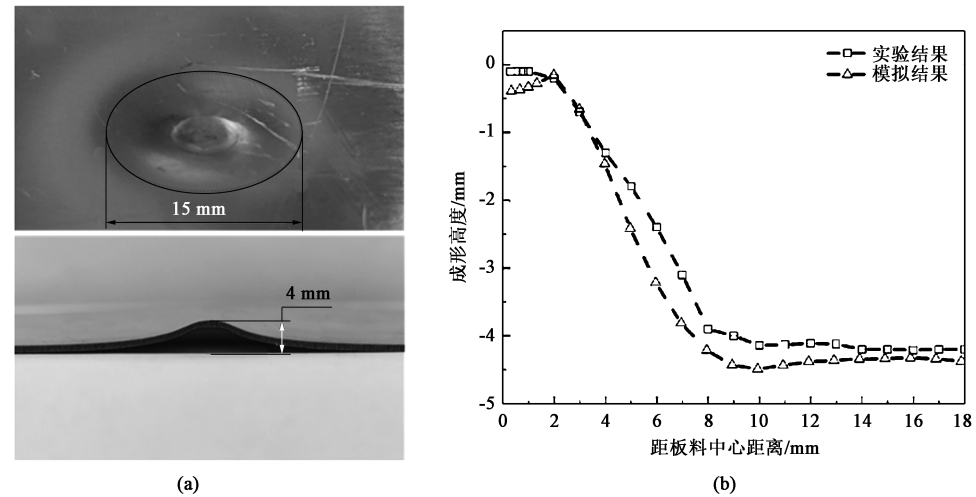


图 10 板料结构变形 (a) 及截面轮廓对比图 (b)  
Fig. 10 Structural deformation of sheet metal (a) and profile comparison diagram of sections (b)

参考文献：

[1] 熊奇,唐红涛,王沐雪,等. 2011 年以来电磁成形研究进展 [J]. 高电压技术, 2019, 45 (4): 1171-1181.  
Xiong Q, Tang H T, Wang M X, et al. Research progress of electromagnetic forming technique since 2011 [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45 (4): 1171-1181.

[2] Lee M G, Lee S H, Kim S, et al. Electromagnetic forming process analysis based on coupled simulations of electromagnetic analysis and structural analysis [J]. Journal of Magnetics, 2016, 21 (2): 215-221.

[3] Cui X H, Mo J H, Zhu Y. 3D modeling and deformation analysis for electromagnetic sheet forming process [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22 (1): 164-169.

[4] Cui X H, Mo J H, Li J J, et al. Electromagnetic incremental forming (EMIF): A novel aluminum alloy sheet and tube forming technology [J]. Journal of Materials Processing Tech., 2014, 214 (2): 409-427.

[5] Cui X H, Li J, Mo J, et al. Investigation of large sheet deformation process in electromagnetic incremental forming [J]. Materials & Design, 2015, 76 (1): 86-96.

[6] Xiong Q, Cao Q, Han X, et al. Axially movable electromagnetic forming system for large-scale metallic sheet [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26 (4): 1-4.

[7] 张敏. 板材电磁成形的试验研究 [D]. 北京: 中国机械科学研究院集团有限公司, 2005.  
Zhang M. Experiment Research on EMF of Sheet Metal [D]. Beijing: China Academy of Machinery Science and Technology Group, 2005.

[8] 莫健华,王波,崔晓辉,等. 板料电磁成形集磁器工作原理的模拟 [J]. 塑性工程学报, 2011, 18 (1): 36-42.

Mo J H, Wang B, Cui X H, et al. Simulation on the principle of field shaper in electromagnetic sheet metal forming [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2011, 18 (1): 36-42.

[9] Kumar R, Kore S D. Experimental studies on the effect of different field shaper geometries on magnetic pulse crimping in cylindrical configuration [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 105 (6): 4677-4690.

[10] Rajak A K, Kumar R, Kore S D. Designing of field shaper for the electro-magnetic crimping process [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019, 33 (11): 5407-5413.

[11] 徐佳辉, 黄亮, 李建军, 等. 基于集磁器的电磁冲裁工艺的设计与模拟 [J]. 中国机械工程, 2020, 31 (11): 1368-1377.

Xu J H, Huang L, Li J J, et al. Design and simulation of electromagnetic blanking processes based on field shaper [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31 (11): 1368-1377.

[12] Zhang H, Liu N, Li X, et al. A novel field shaper with slow-varying central hole for electromagnetic pulse welding of sheet metal [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 108 (7-8): 2595-2606.

[13] Yu H P, Li C F, Deng J H. Sequential coupling simulation for electromagnetic mechanical tube compression by finite element analysis [J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2009, 209 (1): 707-713.

[14] Lee S H, Lee D N. A finite element analysis of electromagnetic forming for tube expansion [J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 1994, 116 (2): 250-254.

[15] Li Z, Li C F. Simulation of electromagnetic tube bulging based on loose coupling method [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 19 (4): 566-569.

(上接第 65 页)

中国机械工程学会塑性工程分会 2023 年活动计划 (续)

序号	活动类别	活动名称	活动组织者	时间/地点	联系人信息
6	学术交流	钛合金结构成形及焊接技术交流会暨超塑性学术研讨会	中国航空工业集团公司制造技术中心、中国航空学会制造工程分会、塑性成形技术航空科技重点实验室、航空焊接与连接技术航空科技重点实验室、国防科技工业特种焊接技术研究应用中心、中国航空制造技术研究院、中国机械工程学会塑性工程分会(超塑性论坛)	9/10 月 地点待定	杜立华 中国航空制造技术研究院 电话: 010-85701416 邮箱: quietness2007@126.com
7	学术交流	第十届中国压铸、挤压铸造及半固态加工年会	中国机械工程学会铸造分会、中国兵工学会材料科学与技术专业委员会、中国机械工程学会塑性工程分会(半固态加工论坛)	10/11 月 地点待定	姜巨福 哈尔滨工业大学 电话: 18746013176 邮箱: jiangjufu@hit.edu.cn
8	学术交流	塑性工程分会(锻压学会)成立 60 周年纪念活动	中国机械工程学会塑性工程分会	待定	秦思晓、周林 塑性工程分会 电话: 15201461873; 13811919643 邮箱: duanya@cmes.org
9	展览展会	2023 上海锻压技术与装备展	中国机械工程学会塑性工程分会、中国机械总院集团北京机电研究所有限公司	6 月 11-14 日 上海	林玉彤、秦思晓、周林 塑性工程分会 电话: 18811346037 邮箱: duanya@cmes.org
10	工程能力评价	材料锻压工程师(含见习)工程能力评价	中国机械工程学会塑性工程分会	全年	李佳盈、周林 塑性工程分会 电话: 15711032068; 13811919643 邮箱: duanya@cmes.org
11	技术培训	锻压技术相关主题培训	中国机械工程学会塑性工程分会	4/7/11 月 地点待定	
12	工作会议	理事长办公会	中国机械工程学会塑性工程分会	待定	
13	工作会议	十二届五次常务理事会议	中国机械工程学会塑性工程分会	待定	秦思晓、周林 塑性工程分会 电话: 15201461873; 13811919643 邮箱: duanya@cmes.org
14	工作会议	十二届四次理事(扩大)会议暨十三届一次理事会议	中国机械工程学会塑性工程分会	待定	