

双板件电磁翻边成形效率研究

邱立^{1,2}, 刘洪池¹, 姜晨非¹, 罗宝妮¹, 李智¹

(1. 三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 针对电磁翻边成形技术成形效率低的问题, 提出了双板件电磁翻边成形技术。在阐明双板件电磁翻边成形原理的基础上, 构建了传统单板和双板件两组仿真模型, 并从驱动线圈电流波形、磁通密度、电磁力、塑性应变能、成形效率5个方面进行对比分析。结果表明: 在相同的放电能量下, 双板件仿真模型的塑性应变能比传统单板提高了52.28%; 在相同的翻边角度下, 双板件仿真模型所需的放电能量仅为传统单板仿真模型两次放电能量的60.60%, 能量利用率提高了39.40%。双板件电磁翻边成形技术可使用单个驱动线圈同时实现两个板件的翻边, 能够有效地解决电磁翻边成形效率低的问题, 促进了电磁翻边成形技术在工业领域的广泛运用。

关键词: 电磁翻边成形; 圆孔翻边; 双板件; 成形效率; 塑性应变能

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.05.015

中图分类号: TM154

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 05-0096-07

Study on forming efficiency of electromagnetic flanging for double-sheet

Qiu Li^{1,2}, Liu Hongchi¹, Jiang Chenfei¹, Luo Baoni¹, Li Zhi¹

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Hubei Provincial Key Laboratory for Operation and Control of Cascaded Hydropower Station, Yichang 443002, China)

Abstract: For the problem of low forming efficiency for electromagnetic flanging technology, the electromagnetic flanging technology of double-sheet was proposed. Then, on the basis of clarifying the principle for electromagnetic flanging of double-sheet, two simulation models of the traditional single-sheet and double-sheet were constructed, and the five aspects of driving coil current waveform, magnetic flux density, electromagnetic force, plastic strain energy and forming efficiency were compared and analyzed. The results show that under the same discharge energy, the plastic strain energy of the double-sheet simulation model is 52.28% higher than that of the traditional single-sheet, and at the same flanging angle, the discharge energy required by the double-sheet simulation model is only 60.60% of the two discharge energies for the traditional single-sheet simulation model, so the energy utilization rate is increased by 39.40%. Obviously, the electromagnetic flanging technology of double-sheet can use a single drive coil to realize the flanging of two sheets at the same time, effectively solves the problem of low forming efficiency for electromagnetic flanging and promotes the wide application of electromagnetic flanging technology in the industry field.

Key words: electromagnetic flanging; round hole flanging; double-sheet; forming efficiency; plastic strain energy

板件翻边越来越广泛地运用于各工业领域, 例如: 航空航天领域中, 在运载火箭的油箱壳体上制造翻边孔, 以方便火箭管道和推进剂油箱之间的焊接^[1]。但随着经济的高速发展, 对航空航天以及汽车等工业领域的需求量和制造技术的要求大大提高。

因此, 提高金属材料的加工效率成为解决制造业效率低下问题的首要任务。相比于传统机械加工方式, 电磁成形的高应变率 ($10^3 \sim 10^5 \text{ s}^{-1}$) 和非接触施力呈现了极大的优势^[2]。

电磁成形为一种利用脉冲电磁力实现材料加工的高速成形技术^[3-5]。电磁成形过程中, 初始能量以电能的形式储存在电容器中。研究发现, 转化为工件成形的能量低于电容器电能的20%。Finkenstein E等^[6]使用弹簧钢制作的线圈进行实验, 结果表明, 电磁成形的效率仅为2%, 线圈与集磁器中的焦耳损耗为能量损耗的主要部分^[7-10]。Psyk V

收稿日期: 2021-11-10; 修订日期: 2022-02-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51877122、51507092)

作者简介: 邱立 (1984-), 男, 博士, 副教授

E-mail: Doctor_QiuL@163.com

通信作者: 李智 (1996-), 男, 硕士研究生

E-mail: 1109910734@qq.com

等^[11]详细地分析了机械能对成形过程的影响,发现了动能、成形能和累积机械能随时间的变化规律。杨军等^[12]研究了电感和电容对电磁成形的影响,结果发现:成形效率随着电感的增强而下降,随着电容的增大先增大,到达一定限度后又迅速下降。Yu H P等^[13]在放电能量一定、线圈和管件给定的情况下,采用顺序耦合的数值仿真方法研究了电流频率对管件压缩的影响,结果发现,存在最佳频率对应管件的最大变形量和最大塑性应变能。朱月亭等^[14]采用实验和模拟分析了不同尺寸的凹模和线圈结构对铝合金板材电磁成形后的轮廓、塑性应变能和能量利用率的影响规律,结果发现,当放电参数一定时,线圈半径接近于凹模半径与圆角半径之和时,铝合金板材的塑性应变能最大,达到 189.92 J,能量利用率达到 4.5%。

为了提高板件电磁翻边的成形效率,本文提出了双板件电磁翻边成形技术,采用单个驱动线圈同时使两个板件实现翻边。并在阐述电磁翻边成形基本原理的基础上,建立了无板件、传统单板和双板件电磁翻边成形过程中的电磁结构耦合模型。通过 3 个模型对比 3 种不同状态下工件所处的磁通密度和电磁力分布规律,分析了双板件电磁翻边的成形效率。

1 电磁翻边成形基本原理

电磁翻边成形的基本原理为:电容器对驱动线圈放电产生脉冲强电流,脉冲强电流产生变化的磁场,在工件中产生感应涡流,工件在线圈电流和工件涡流之间的脉冲电磁力驱动下加速变形,最后完成加工过程^[15-18]。

图 1 为无板件即电磁翻边成形空载时的等效电路,其中: U_c 为电容器电压; U_{coil} 为驱动线圈电压; R_0 、 L_0 分别为线路电阻、线路电感; R 、 L 分别为线圈电阻、线圈电感; R_d 为续流回路的续流电阻; I_c 为驱动线圈电流; I_d 为续流回路的电流; C 为电容器电容。其等效电路满足以下方程:

$$\begin{cases} R_0 I_c + L_0 \frac{dI_c}{dt} + U_{coil} = U_c \\ U_{coil} = RI_c + L \frac{dI_c}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中: t 为放电时间。

图 2 为传统单板电磁翻边成形时的等效电路,其中: R_w 、 L_w 为传统单板的电阻和电感; M_{m-w} 为板件与驱动线圈的互感。此时,驱动线圈仅有一侧存在工件,其等效电路满足以下方程:

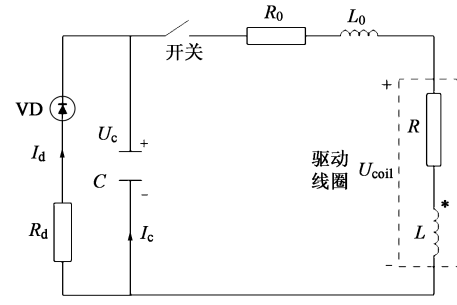


图 1 无板件电磁翻边成形等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of no-sheet electromagnetic flanging

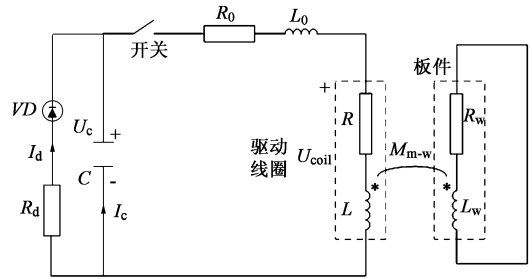


图 2 传统单板电磁翻边成形等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of traditional single-sheet electromagnetic flanging

$$\begin{cases} R_0 I_c + L_0 \frac{dI_c}{dt} + U_{coil} = U_c \\ U_{coil} = RI_c + L \frac{dI_c}{dt} + M_{m-w} \frac{dI_w}{dt} \\ R_w I_w + L_w \frac{dI_w}{dt} + M_{m-w} \frac{dI_c}{dt} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

图 3 为双板件电磁翻边成形时的等效电路,其中: R_f 、 L_f 为双板件中板件 2 的电阻和电感; M_{w-f} 为板件与驱动线圈的互感; M_{w-f} 为两个板件的互感。此时,驱动线圈两侧均放有工件,其等效电路满足以下方程:

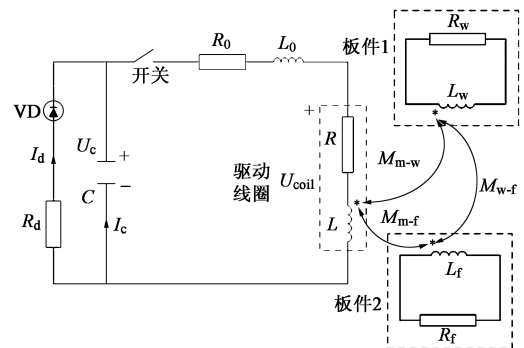


图 3 双板件电磁翻边成形等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit of double-sheet electromagnetic flanging

$$\begin{cases} R_0 I_c + L_0 \frac{dI_c}{dt} + U_{\text{coil}} = U_c \\ U_{\text{coil}} = R I_c + L \frac{dI_c}{dt} + M_{m-w} \frac{dI_w}{dt} + M_{m-f} \frac{dI_f}{dt} \\ R_w I_w + L_w \frac{dI_w}{dt} + M_{m-w} \frac{dI_c}{dt} + M_{w-f} \frac{dI_f}{dt} = 0 \\ R_f I_f + L_f \frac{dI_f}{dt} + M_{m-f} \frac{dI_c}{dt} + M_{w-f} \frac{dI_w}{dt} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: I_w 、 I_f 分别为两个板件中各自的感应电流。

双板件电磁翻边成形的模型中, 由于整个放电回路中的等效电感较传统单板的更小, 故放电电流的等效脉宽减小。

为了分析和比较板件电磁翻边成形的效率, 设定一个合理的判据具有重要的作用和意义。电磁翻边成形过程中发生了复杂的能量转换: 首先, 用于电磁翻边成形的能量以电能储存在电容器组中; 然后, 在完成电磁翻边成形过程中, 一部分电能转化为塑性应变能用以翻边, 一部分转化为热能损失掉, 能量的损失是由于放电回路线路损耗、开关中能量损耗的存在导致电容器中储存的电能仅部分转移至线圈中, 而线圈的温升与漏磁现象产生的能量损耗进一步地减少了可利用的磁场能量; 最后, 由于板件中涡流引起的温升以及未利用的磁场能量导致转化为板件塑性应变能的能量更少。本文提出针对电磁翻边成形效率的衡量标准, 即成形效率 η , 等于板件塑性应变能 E_p 与电容器中的初始电能 E_0 之比。

$$E_p = \frac{1}{2} \bar{\sigma} \bar{\varepsilon} V \quad (4)$$

$$E_0 = \frac{1}{2} C U_c^2 \quad (5)$$

式中: $\bar{\sigma}$ 为平均应力; $\bar{\varepsilon}$ 为平均应变; V 为工件体积。

2 电磁翻边成形仿真模型

电磁翻边成形过程涉及电磁场与结构场互相耦合的问题。采用有限元法是分析这一物理过程的重要手段。本文采用 Comsol 商用有限元软件建立传统单板和双板件电磁翻边成形过程的电磁-结构耦合二维轴对称模型, 其流程图如图 4 所示。其中: t_0 为当前计算时间, Δt 为时间元, t_{end} 为计算终止时间。该模型主要包括 4 个模块。

(1) “全局常微分和微分代数方程” 模块

用于模拟放电回路的放电过程, 计算出驱动线

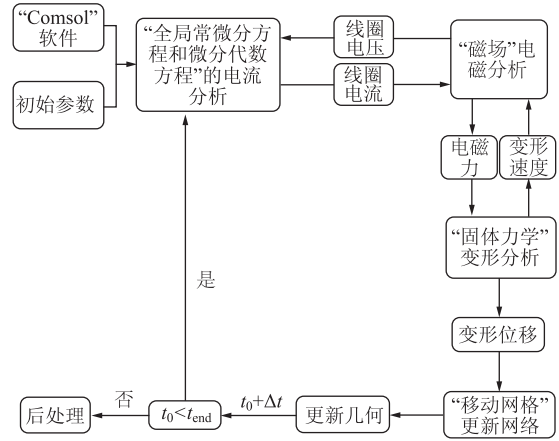


图 4 电磁翻边成形仿真流程图

Fig. 4 Flow chart of electromagnetic flanging simulation

圈中的电流, 具体方程如式 (1) ~ 式 (3) 所示, 该模块通过驱动线圈电流和驱动线圈电压实现场路耦合。

(2) “磁场” 模块

主要用于计算空间域内的磁通密度与感应涡流以及电磁力分布。同时, 为“固体力学”模块提供电磁力载荷。脉冲电流流入驱动线圈后, 对引起的磁场变化进行分析, 计算瞬时变化的磁通密度与板件所受的电磁力。忽略螺旋管线圈轴向渐进螺旋线的影响, 将其等效为多个封闭的圆环; 此时, 驱动线圈的结构和载荷具有轴对称性, 可简化为二维轴对称模型。该模型中, 感应电场强度 E 与感应涡流密度 J 只存在环向 φ 的分量 E_φ 和 J_φ , 磁通密度 B 可分解为径向 r 和轴向 z 的分量 B_r 和 B_z , 麦克斯韦方程二维轴对称形式为:

$$\nabla \times E_\varphi = -\frac{\partial B_z}{\partial t} + \nabla \times (v_z \times B_r) \quad (6)$$

$$J_\varphi = \gamma E_\varphi \quad (7)$$

式中: ∇ 为麦克斯韦方程组算子; v_z 为板件速度在轴向的分量; γ 为板件的电导率; $-\frac{\partial B_z}{\partial t}$ 、 $\nabla \times (v_z \times B_r)$ 分别为因磁通密度变化和圆孔板件运动产生的感应电场强度的旋度源。

板件受到的电磁力 F 由感应涡流密度和磁通密度共同决定:

$$F_z = J_\varphi \times B_r \quad (8)$$

$$F_r = J_\varphi \times B_z \quad (9)$$

式中: F_z 、 F_r 分别为板件在轴向和径向受到的电磁力。

板件翻边过程中, 其电磁力载荷主要以轴向电磁

力 F_z 为主。由式 (8)~式 (9) 可知, F_z 正比于 J_φ 和 B_r 。 J_φ 与 E_φ 成正比, E_φ 与 B_z 和 B_r 相关, 因此, 板件电磁翻边成形过程中, B_r 对工件成形效果起主要影响作用, 分析 B_r 的时空分布显得尤为关键。

(3) “固体力学”模块

主要用于模拟板件在电磁力驱动下发生塑性变形的过程。同时, 通过将形变反馈至“磁场”模块, 实现电-磁结构耦合。

当板件受到电磁力时, 根据牛顿定律, 板件受力和位移之间满足以下关系:

$$\nabla \cdot \sigma + F = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} \quad (10)$$

式中: σ 为应力张量; ρ 为板件密度; \mathbf{u} 为位移矢量。

由于电磁成形属于高应变率成形, 所以, 需要考虑高应变率对材料的影响。本文采用 Cowper-Symonds 模型来模拟板件塑性变形行为, 其本构方程如下:

$$\sigma = \left[1 + \left(\frac{\varepsilon_{pe}}{G} \right)^m \right] \sigma_{ys} \quad (11)$$

式中: σ_{ys} 为准静态条件下的流动应力; ε_{pe} 为有效塑性应变; m 为应变率硬化参数; G 为粘性参数。此处, $G=6500$, $m=0.25$ 。

(4) “移动网格”模块

用于更新板件附近的空气域网格, 增加计算精度。

3 结果与讨论

本文采用厚度为 2 mm、内径为 $\Phi 40$ mm、外径为 $\Phi 150$ mm 的 AA1060 铝合金板件进行仿真^[19-20]。此电路模型除基本的 RLC 放电回路之外, 增加了续流回路来减少系统中热量的积累, 从而延长电容器与驱动线圈的寿命。放电系统和板件的具体参数如表 1 所示。

3.1 数据分析

本文分别讨论传统单板单独电磁翻边成形和双板件同时电磁翻边成形两种情况, 且进一步把传统单板电磁翻边成形分为上板和下板来研究, 即上板与下板以驱动线圈的中心点成轴向对称, 使得数据更加直观、明确。

传统单板电磁翻边成形的几何模型如图 5a 所示; 双板件同时电磁翻边成形的几何模型如图 5b 所示。

在电磁翻边成形过程中, 放电系统对驱动线圈产生脉冲强电流, 并产生一个巨大的磁场, 为工件提供洛伦兹力用来加速变形。图 6 为 3 组模型的驱

表 1 放电系统和板件的基本参数

Table 1 Basic parameters of discharge system and sheet

参数	数值
放电电容 $C/\mu\text{F}$	320
放电电压 U_c/kV	3.5
线路电感 $L_0/\mu\text{H}$	6.5
线圈电阻 $R_0/\text{m}\Omega$	25
续流电阻 $R_d/\text{m}\Omega$	20
板件密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2710
板件电导率 $\gamma/(\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	3.72×10^7
板件初始屈服应力 σ_s/MPa	98
板件泊松比 γ	0.33
板件杨氏模量 W/GPa	69

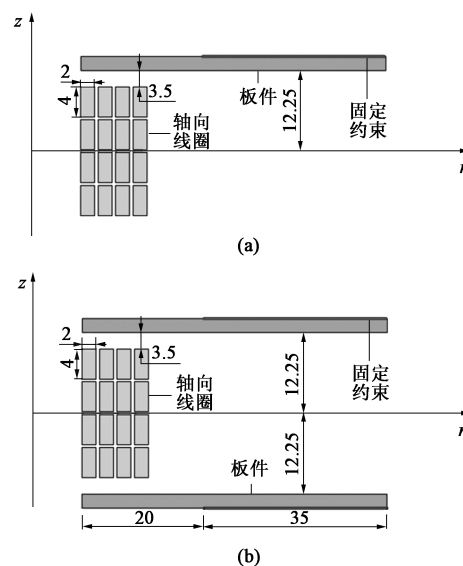


图 5 电磁翻边成形数值仿真的几何模型

(a) 传统单板 (b) 双板件

Fig. 5 Geometric models of numerical simulation for electromagnetic flanging

(a) Traditional single-sheet (b) Double-sheet

动线圈电流波形, 可以看出: 双板件电磁翻边成形仿真模型的电流峰值略高于传统单板, 同时电流脉宽会略小于传统单板。这是因为: 双板件模型中的耦合作用会使电路等效电感降低。此外, 上板单独电磁翻边成形与下板单独电磁翻边成形使得线圈中的电流基本相同。

磁通密度是影响电磁力的重要参数, 本文选取板件与驱动线圈之间的间隙处中点的磁通密度作为模型中的分析点, 具体位置如图 7 中 a 点与 b 点所示。

由于板件翻边与板件胀形不同, 翻边不仅需要轴向电磁力向上胀形, 还需要径向电磁力再次进行翻折, 因此, 需要分析轴向、径向双向的磁通密度。图 8a 为 3 组模型中 a 点与 b 点的轴向磁通密度, 双

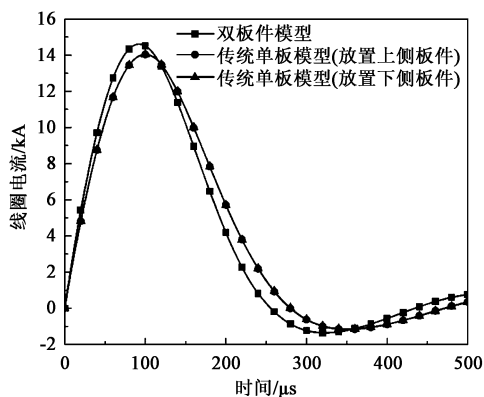
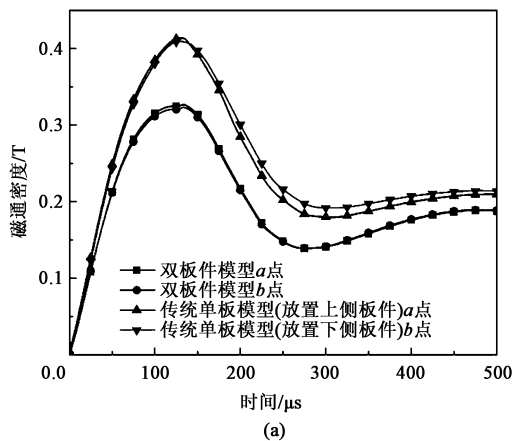


图 6 3 组模型的驱动线圈的电流波形

Fig. 6 Current waveforms of driving coil for three models

板件电磁翻边成形模型中的 a 点和 b 点的轴向磁通密度峰值均为 0.32 T, 轴向磁通密度曲线基本重合; 上板单独电磁翻边成形和下板单独电磁翻边成形模型中的 a 点和 b 点的轴向磁通密度峰值均为 0.41 T, 且脉宽基本相同。造成双板件电磁翻边成形时的轴向磁通密度低于传统单板的原因: 在双板件电磁翻边成形时, 两个板件相互有耦合作用, 板件上的



(a)

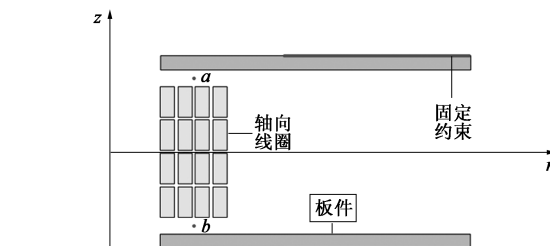
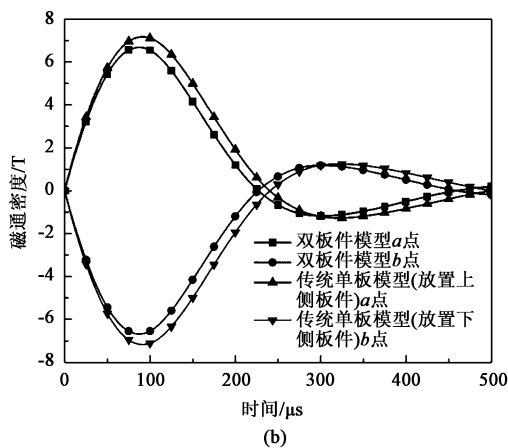


图 7 磁通密度分析点示意图

Fig. 7 Schematic diagram of analysis points for magnetic flux density

感应涡流产生的磁场与驱动线圈产生的磁场方向相反, 因此, 双板件电磁翻边成形时会抵消 a 点与 b 点的轴向磁通密度。

图 8b 为 3 组模型中 a 点和 b 点的径向磁通密度, 径向磁通密度是影响板件翻边的主要参数。双板件电磁翻边成形模型中 a 点和 b 点的径向磁通密度峰值为 6.68 T; 上板单独电磁翻边成形时 a 点和下板单独电磁翻边成形时 b 点的径向磁通密度峰值均为 7.17 T, 且方向相反, 达到峰值的时间和脉宽基本相同。导致双板件电磁翻边成形模型的径向磁通密度略低于传统单板的原因与轴向的相同。



(b)

图 8 3 组模型的磁通密度

(a) 轴向 (b) 径向

Fig. 8 Magnetic flux densities of three models

(a) Axial direction (b) Radial direction

驱动线圈的磁通密度影响作用于板件的电磁力, 电磁力将直接影响板件翻边的成形效率, 轴向电磁力是板件翻边的主要作用力。图 9a 为 3 组模型的轴向电磁力, 可以看出: 双板件电磁翻边成形模型的轴向电磁力略低于传统单板, 且上板和下板的轴向电磁力分别为 26798.48 和 26740.20 kN, 传统单板的上板和下板的轴向电磁力分别为 32924.00 和 32974.49 kN。

图 9b 为 3 组模型的径向电磁力。从图 9b 中可以看出: 双板件电磁翻边成形模型中的径向电磁力略低于传统单板, 且上板和下板的径向电磁力分别为 14756.48 和 14950.54 kN, 脉宽和达到峰值的时间也基本相同; 传统单板电磁翻边成形模型中上板和下板的径向电磁力均为 20909.00 kN。

3.2 成形效率分析

3 组模型的塑性应变能如图 10 所示, 双板件电

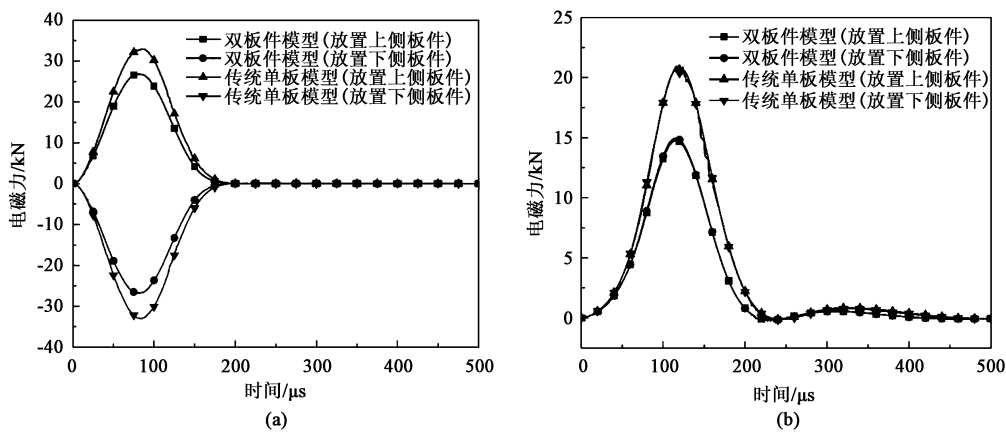


图 9 3 组模型的电磁力
(a) 轴向 (b) 径向
Fig. 9 Electromagnetic forces of three models
(a) Axial direction (b) Radial direction

磁翻边成形模型中的上板塑性应变能为 0.151 kJ，下板为 0.149 kJ，总塑性应变能为 0.300 kJ。传统单板电磁翻边成形模型的上板塑性应变能为 0.199 kJ，下板为 0.197 kJ。初始电容器的电能 E_0 为 1.960 kJ，根据本文提出的成形效率标准，计算得到双板件模型的成形效率为 15.31%，传统单板模型的上板成形效率为 10.15%，下板为 10.05%，上板与下板的成形效率基本相同。使用双板件模型翻边较使用传统单板模型的成形效率提高了 52.28%。显然，本文所提出的双板件电磁翻边成形模型大大地提高了板件的成形效率。

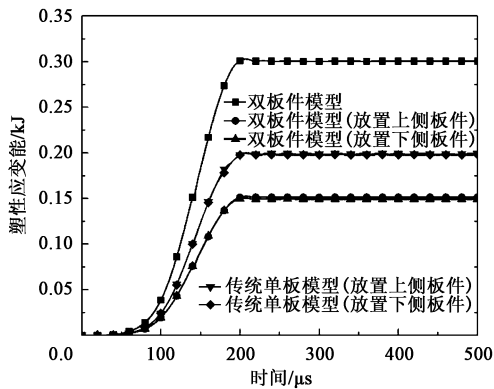


图 10 3 组模型的塑性应变能
Fig. 10 Plastic strain energies of three models

3.3 放电能量分析

在仿真过程中，发现在相同放电条件下，使用双板件电磁翻边成形模型实现板件翻边得到的翻边角度小于传统单板电磁翻边成形模型。为了进一步地验证双板件模型能够极大地提高板件翻边的效率，

本节内容将分别使用双板件电磁翻边成形模型和传统单板电磁翻边成形模型使板件得到相同的翻边角度，分别计算两个模型所需的放电能量，通过对比放电能量的大小来分析成形效率的提高。表 2 为两个模型的板件达到 3 个不同的翻边角度时分别需要的放电能量以及提高的能量利用率。

表 2 两个模型的板件达到不同翻边角度需要的放电能量及提高的能量利用率

Table 2 Discharge energies required by two models of sheets reaching different flanging angles and improved energy utilization			
翻边角度/ (°)	双板件模型所需 能量/kJ	传统单板模型 所需能量/kJ	提高的能量 利用率/%
90	3.03	2.50	39.40
60	1.84	1.59	42.14
45	1.44	1.22	40.98

图 11 为两组模型的板件均达到相同的翻边角度 (90°) 的三维仿真结果图。通过 3 组不同的翻边角度和各自所需的能量可以看出：能量利用率均提高了 40% 左右，显然，使用双板件模型在很大程度上减少了能量的消耗，提高了成形效率。

4 结语

针对传统单板翻边成形效率低的问题，本文提出了双板件电磁翻边成形技术，有效地减少了放电能量的消耗以及提高了翻边的成形效率，能够解决

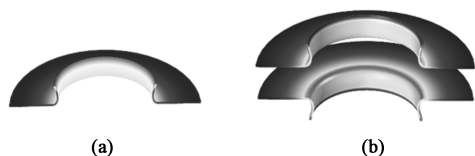


图 11 板件翻边的三维图形

(a) 传统单板模型 (b) 双板件模型

Fig. 11 Three-dimensional graphics of sheet flanging

(a) Traditional single-sheet model (b) Double-sheet model

实际生产中产量低的问题。结果表明,在传统单板模型中,板件的成形效率仅为 10.15%;在双板件模型中,两个板件的成形效率达到了 15.31%,成形效率提高了 52.28%。在两个模型的板件达到相同的成形效果时(翻边角度为 90°),使用双板件电磁翻边成形模型所需的放电能量仅为传统单板电磁翻边成形模型两次放电能量的 60.60%,能量利用率提高了 39.40%,很大程度上减小了能量的损耗。显然,双板件电磁翻边成形模型的提出在一定程度上解决了板件成形效率低的问题,推动了电磁成形技术的进程。

参考文献:

- [1] 张文沛,李欢欢,胡志力,等. 车用轻量化铝合金材料本构关系研究进展 [J]. 材料导报, 2017, 31 (7): 85-89, 112.
Zang W P, Li H H, Hu Z L, et al. Progress in constitutive relationship research of aluminum alloy for automobile lightweighting [J]. Materials Reports, 2017, 31 (7): 85-89, 112.
- [2] 邱立,李彦涛,苏攀,等. 电磁成形中电磁技术问题研究进展 [J]. 电工技术学报, 2019, 34 (11): 2247-2259.
Qiu L, Li Y T, Su P, et al. Study on electromagnetic problems in electromagnetic forming process [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34 (11): 2247-2259.
- [3] Qiu L, Deng K, Yang X S, et al. Electromagnetic force distribution and forming performance in electromagnetic tube expansion with axial compression [J]. IEEE Access, 2020, 8: 134514-134523.
- [4] 初红艳,费仁元,陆辛. 脉冲电流频率对电磁成形板料变形高度的影响 [J]. 北京工业大学学报, 2003, 29 (3): 273-277.
Chu H Y, Fei R Y, Lu X. Effect of impulse current frequency on sheet metal deformation height in electromagnetic forming [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2003, 29 (3): 273-277.
- [5] Qiu L, Wang Y D, Zhang W, et al. Electromagnetic force distribution and axial deformation uniformity analysis of dual-coil electromagnetic tube compression method [J]. IEEE ACCESS, 2020, 8: 143502-143508.
- [6] Bühler H, Finkenstien E. Hochgeschwindigkeitsumformung rohrförmige werkstücke durch magnetische kräfte [J]. Bänder, Bleche und Rohre, 1966, 3: 115-123.
Bühler H, Finkenstien E. High speed forming tubular workpieces through magnetic forces [J]. Ribbons, Sheets and Pipes, 1966, 3: 115-123.
- [7] Li Z, Abu-Siada A, Zhu H Y, et al. Study on the efficiency of simultaneous tube compression and expansion electromagnetic forming [J]. IEEE Access, 2021, 9: 30035-30042.
- [8] Qiu L, Zhang W, Abu-Siada A, et al. Electromagnetic force distribution and wall thickness reduction of three-coil electromagnetic tube bulging with axial compression [J]. IEEE Access, 2020, 8: 21665-21675.
- [9] Qiu L, Wang B, Abu-Siada A, et al. Research on forming efficiency in double-sheet electromagnetic forming process [J]. IEEE Access, 2020, 8: 19248-19255.
- [10] Qiu L, Zhang W, Abu-Siada A, et al. Analysis of electromagnetic force and formability of tube electromagnetic bulging based on convex coil [J]. IEEE Access, 2020, 8: 33215-33222.
- [11] Psyk V, Risch D, Kinsey B L, et al. Electromagnetic forming-A review [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211 (5): 787-829.
- [12] 杨军,陈文峰. 电磁成形中成形效率的探讨 [J]. 电加工与模具, 2003, (4): 30-31, 58-62.
Yang J, Chen W F. The discussion of efficiency in electromagnetic forming [J]. Electromachining & Mould, 2003, (4): 30-31, 58-62.
- [13] Yu H P, Li C F. Effects of current frequency on electromagnetic tube compression [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209 (2): 1053-1059.
- [14] 朱月亭,莫健华,崔晓辉,等. 线圈和模具结构对板材电磁脉冲成形效率的影响 [J]. 锻压装备与制造技术, 2015, 50 (3): 94-99.
Zhu Y T, Mo J H, Cui X H, et al. Effects of the die radius and coil structures on electromagnetic pulsed forming [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2015, 50 (3): 94-99.
- [15] Qiu L, Deng K, Abu-Siada A, et al. Construction and analysis of two-dimensional axisymmetric model of electromagnetic tube bulging with field shaper [J]. IEEE Access, 2020, 8: 113713-113719.
- [16] Kleiner M, Beerwald C, Homberg W. Analysis of process parameters and forming mechanisms within the electromagnetic forming process [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2005, 54 (1): 225-228.
- [17] Jablonski J, Winkler R. Analysis of the electromagnetic forming process [J]. International Journal Mechanical Sciences, 1978, 20 (5): 315-325.
- [18] Zhang H, Murata M, Suzuki H. Effects of various working conditions on tube bulging by electromagnetic forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 48 (1-4): 113-121.
- [19] 靳舜尧,唐振宇,黄重国. 5A02 铝合金薄壁异形管内高压成形数值模拟及试验 [J]. 稀有金属, 2020, 44 (11): 1121-1128.
Jin S Y, Tang Z Y, Huang Z G. Numerical simulation and experiment of internal high pressure forming (IHPF) of 5A02 aluminum alloy thin-walled shaped tubes [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2020, 44 (11): 1121-1128.
- [20] 靳舜尧,黄重国,李升. 固溶热处理对新型核用 FeCrAl 合金包壳管组织和力学性能的影响 [J]. 稀有金属, 2021, 45 (1): 10-18.
Jin S Y, Huang Z G, Li S. Microstructure and mechanical properties of a new nuclear FeCrAl alloy cladding tubes with solution heat treatment [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2021, 45 (1): 10-18.