

管材成形

基于 T 型线圈的双管件电磁翻边能量利用率研究

张锦荣¹, 邱立^{1,2}, 李梦瑶¹, 刘洪池³, 汪晨鑫^{1,4}

(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;

3. 国网湖北省电力有限公司荆门供电公司, 湖北 荆门 448124;

4. 国网湖北省电力有限公司当阳市供电公司, 湖北 宜昌 444100)

摘要: 针对传统线圈管件电磁翻边能量利用率低和轴向电磁力较小等问题, 提出一种基于 T 型线圈的双管件电磁翻边方法。利用 Comsol 软件建立了基于传统线圈管件、凸型线圈管件以及 T 型线圈双管件电磁翻边 3 组对比模型, 分析了管件翻边区域的磁通密度分布、电磁力分布以及塑性应变能和能量利用率, 并进一步研究了相同翻边角度下 T 型线圈提高的能量利用率。结果表明: 在相同的放电电压下, T 型线圈双管件电磁翻边的塑性应变能最大, 能量利用率大幅提升, 较传统线圈和凸型线圈管件电磁翻边分别提升了 69.75% 和 31.89%; 在 3 组模型均达到最佳翻边效果 (翻边角度为 90°) 时, T 型线圈双管件翻边模型所需的放电能量最少, 仅为 1.39 kJ, 且相较传统线圈和凸型线圈管件电磁翻边, 能量利用率分别提升了 49.82% 和 37.67%。基于 T 型线圈的双管件电磁翻边技术解决了电磁翻边能量利用率低的问题, 为电磁翻边的工业应用提供了新的研究思路。

关键词: 电磁翻边; 电磁力; T 型线圈; 塑性应变能; 轴向线圈; 能量利用率

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.02.010

中图分类号: TM154

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2025) 02-0065-10

Research on energy utilization rate for dual tube fittings electromagnetic flanging based on T-coil

Zhang Jinrong¹, Qiu Li^{1,2}, Li Mengyao¹, Liu Hongchi³, Wang Chenxin^{1,4}

(1. College of Electrical 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;

3. State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Jingmen Power Supply Company, Jingmen 448124, China;

4. State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Dangyang County Power Supply Company, Yichang 444100, China)

Abstract: For the problems of low energy utilization rate and weak axial electromagnetic force in the traditional coil tube fittings electromagnetic flanging process, a dual tube fittings electromagnetic flanging method based on T-coil was proposed, and three comparison models of electromagnetic flanging based on traditional coil tube fittings, convex coil tube fittings and T-coil dual tube fittings were established by using software Comsol. Then, the magnetic flux density distribution, electromagnetic force distribution, plastic strain energy and energy utilization rate in the flanging area of the tube fittings were analyzed, and the improved energy utilization rate of T-coil under the same flanging angle was further studied. The results show that under the same discharge voltage, the plastic strain energy of T-coil dual tube fittings electromagnetic flanging is the highest, and the energy utilization rate is greatly improved. Compared with traditional coil and convex coil tube fittings electromagnetic flanging, the energy utilization rate is improved by 69.75% and 31.89%, respectively. When all tube fittings of three models achieve the best flanging effect (flanging angle of 90°), the flanging model of T-coil dual tube fittings requires the least discharge energy, only 1.39 kJ, and compared with the traditional coil and convex coil tube fittings electromagnetic flanging, the energy utilization rate is increased by 49.82% and 37.67%, respectively. The T-coil dual tube fittings electromagnetic flanging technology solves the problem of low energy utilization rate, providing new research ideas for the industrial applications of electromagnetic flanging.

Key words: electromagnetic flanging; electromagnetic force; T-coil; plastic strain energy; axial coil; energy utilization rate

电磁成形是一种利用脉冲电磁力实现高应变率

成形的坯料加工方法^[1]。根据具体的加工工艺, 电磁成形可包括电磁胀形、电磁翻边和电磁焊接等多种技术。与传统的机械翻边相比, 电磁翻边具备诸多优势, 如较短的加工周期、简化的工艺流程、较小的回弹量, 以及提升工件表面翻边质量的有效性等^[2]。因此, 电磁翻边技术在近几年得到了广泛应用。近年来, 随着中国的经济发展和国家对“碳达峰

收稿日期: 2024-04-29; 修订日期: 2024-08-02

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

作者简介: 张锦荣 (1996-), 男, 硕士研究生

E-mail: 1833634574@qq.com

通信作者: 邱立 (1984-), 男, 博士, 副教授

E-mail: qiuli@ctgu.edu.cn

峰、碳中和”的号召,轻质合金因为减轻了汽车、飞机、船舶等工业产品的质量而起到了节能减排的作用,市场需求量大大提升。因此,一方面应提高轻质合金的供应量,满足日益增长的市场需求;另一方面应改善加工技术,使得工件供应量提高的同时能量利用率也得以提升,进一步降低能耗、减少碳排放。所以,提高金属加工的能量利用率对于解决金属材料制造业供应量不足的问题具有重要的作用和意义^[3-5]。

目前,在电磁翻边领域,国内外学者主要围绕改善翻边质量和提高能量利用率进行研究。Xiong Q 等^[6]提出了双线圈电磁成形方法,利用两个不同电源控制的驱动线圈对同一管件进行加工,通过控制放电时间来获得预期大小的吸引力,从而实现对小管件的翻边。但传统线圈轴向电磁力较小的缺陷导致管件翻边角度达到 90° 所需的电压过高,能耗过大。为此,张无名等^[7]通过双线圈加载提高了轴向电磁力的大小,并通过控制放电时序改善了轴向和径向电磁力的分布。在此基础上,邱立等^[8]通过引入轴向线圈将传统线圈改进为凸型线圈,结果显示,因为轴向线圈的存在,管件翻边区域受到的轴向电磁力相比传统线圈提高了 2.78 倍,最大径向位移提高了 1.27 倍,最大轴向位移提高了 2.52 倍。显然,双向电磁力加载相对传统线圈而言其翻边质量有所改善。与此同时,为了满足材料制造业大批量生产的需求,Li Z 等^[9]提出用单个驱动线圈同时实现管件胀形和管件压缩的方法。通过多模型的成形数据对比得出结论:此方法一定程度上解决了电磁成形能量利用率低的问题。并在初始能量相同的前提下,通过调控电容和放电电压来改变电流脉宽进行研究,得出了最优脉宽与系统的最佳能量利用效率相对应的结论。邱立等^[10]提出了基于三磁场变换器的电磁成形方法,结果表明,磁场变换器的引入大大改善了电磁力的分布,使管件的均匀度更高、成形质量更好。在最大变形量相同的情况下,采用三磁场变换器管件胀形结构,与传统线圈管件胀形方法相比,管件的均匀度增大了 3.2 倍。由此可见,磁场变换器对于改善管件表面质量的重要性。

基于此,为了解决管件电磁翻边过程中能量利用率低的问题,本文提出了一种基于 T 型线圈双向加载的双管件电磁翻边技术。并根据该问题模拟构建了传统线圈管件、凸型线圈管件和 T 型线圈双管件的 3 组电磁翻边模型。通过对比 3 组不同模型下的电流波形、电磁力、塑性应变能、电磁成形系统

的能量利用率等数据,验证了该方法的有效性。

1 基础理论

1.1 基于传统线圈的管件电磁翻边基本原理

图 1 为传统线圈加工管件的电路原理图,由 1 个续流回路和 1 个放电回路组成,引入续流回路的目的是为了降低线圈的温升,从而延长驱动线圈的寿命。其中,VD 为二极管, R_d 为续流回路的续流电阻, i_d 为续流回路的电流; R_1 、 L_1 分别为线路电阻、线路电感, C 为电容器电容, U_c 为电容器电压, i_c 为电容器放电电流, i_1 为驱动线圈电流。首先,通过电源对电容器充电,充电结束后,闭合开关连通电容器与驱动线圈形成放电闭合回路。此时,电容器作为放电电源,在电路中产生脉冲电流流过线圈,变化的电流在线圈周围产生磁场并在管件中感应出环向涡流。在感应涡流与线圈产生的脉冲强电磁场相互作用下,管件将受到脉冲强电磁力的驱动而发生变形。此过程中可通过模具和电磁力的加载实现不同的管件翻边。

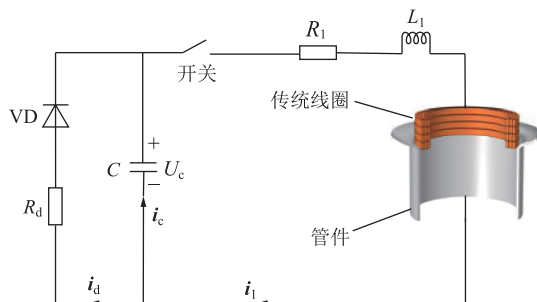


图 1 基于传统线圈的管件电磁翻边电路原理图

Fig. 1 Circuit principle diagram of electromagnetic flanging for tube fitting based on traditional coil

1.2 基于凸型线圈的管件电磁翻边基本原理

凸型线圈的管件电磁翻边原理图如图 2 所示,相比于传统线圈,凸型线圈多了一个轴向线圈^[8]。

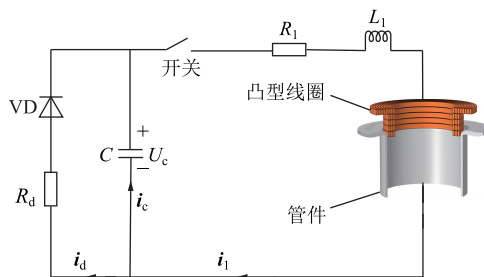


图 2 基于凸型线圈的管件电磁翻边电路原理图

Fig. 2 Circuit principle diagram of electromagnetic flanging for tube fitting based on convex coil

1.3 基于T型线圈的双管件电磁翻边基本原理

管件翻边区域受到的电磁力计算可表示为：

$$\mathbf{F}_z = \mathbf{J}_\phi \times \mathbf{B}_r \quad (1)$$

$$\mathbf{F}_r = \mathbf{J}_\phi \times \mathbf{B}_z \quad (2)$$

式中： \mathbf{B}_z 、 \mathbf{B}_r 分别为轴向磁通密度和径向磁通密度； \mathbf{F}_z 、 \mathbf{F}_r 分别为电磁力体密度的轴向分量和径向分量； \mathbf{J}_ϕ 为管件的感应涡流密度。

在传统线圈管件电磁翻边过程中，管件翻边区域主要受到涡流和轴向磁通密度产生的径向电磁力的胀形作用，轴向电磁力很小。这种电磁力加载方式下管件翻边到预期效果需要的能量较大，能量利用率很低。

凸型线圈中引入轴向线圈增强了翻边区域的径向磁通密度，进而增大了作用在管件上的轴向电磁力，提高了管件的翻边质量，使得翻边角度更容易达到 90° ，对于管件的能量利用率有所提升，但仍难以满足材料制造业大批量的生产需求。

基于此，为了解决电磁翻边过程中轴向电磁力过小导致翻边角度不理想和电磁翻边能量利用率低的问题，本研究改善了线圈结构，利用T型线圈产生双向电磁力加载，同时对两个管件进行电磁翻边。T型线圈双管件电磁翻边的原理图如图3所示，T型线圈的基本结构主要由径向线圈1、径向线圈2和轴向线圈3部分组成。径向线圈1主要用于下管件翻边区域产生轴向磁通密度，驱动下管件翻边区域径向翻折。同理，径向线圈2主要提供上管件径向翻折的电磁力，通过调控径向线圈的匝数和层数可以实现对两个不同半径的管件翻边。轴向线圈主要用来在中间的翻边区域产生径向磁通，驱动两个管件轴向翻折，以此来提高管件翻边的能量利用率。

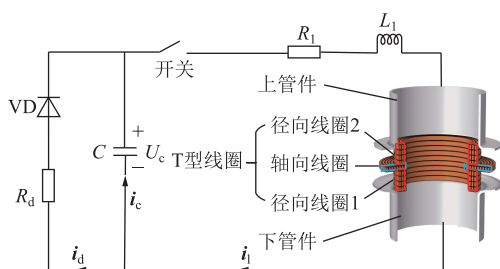


图3 基于T型线圈的双管件电磁翻边电路原理图

Fig. 3 Circuit principle diagram of electromagnetic flanging for dual tube fittings based on T-coil

在管件电磁翻边过程中，能量的转换是一个复杂的过程。最初，用于翻边的能量以电能的形式存储在电容器中^[11]。然而，由于电路和开关中也会消耗能量，使得部分能量以热能的形式损耗在放电电

路中。同样，在管件电磁翻边过程中，管件的涡流损耗以及线圈的漏磁、温升等因素导致线圈中的能量也只能部分转化为塑性应变能，用于完成管件的翻边。为了研究管件电磁翻边的能量利用率，本文使用了一个合理的评价指标——能量利用率 η ^[12]，即管件的塑性应变能 E_p 与电容器中初始能量 E_0 的百分比值。

$$E_p = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon V \quad (3)$$

$$E_0 = \frac{1}{2} C U_0^2 \quad (4)$$

式中： σ 、 ε 分别为管件变形过程中的应力、应变； V 为管件的体积； U_0 为放电电压。

2 仿真模型

2.1 仿真流程

为了模拟管件电磁翻边的过程，本研究通过Comsol 模拟仿真软件建立了二维轴对称模型，实现了电磁场和结构场的耦合。模型包括电路模型、电磁场模块和固体力学模块，并根据边界条件进行输入，仿真流程如图4所示，通过时间步进进行计算。其中， t 为当前时间， Δt 为时间步长， t_{end} 为计算结束时间。电路模型通过计算初始参数，得到流入驱动线圈的瞬时电流；磁场模型包括空气域、管件域和线圈域，可以得到作用在金属管件上的电磁力和瞬间变化的磁场；固体力学模型可以计算出金属管件的变形速度和位移；移动网格通过更新电磁翻边后的有限元网格，使管件电磁翻边过程的计算精度得到提高。

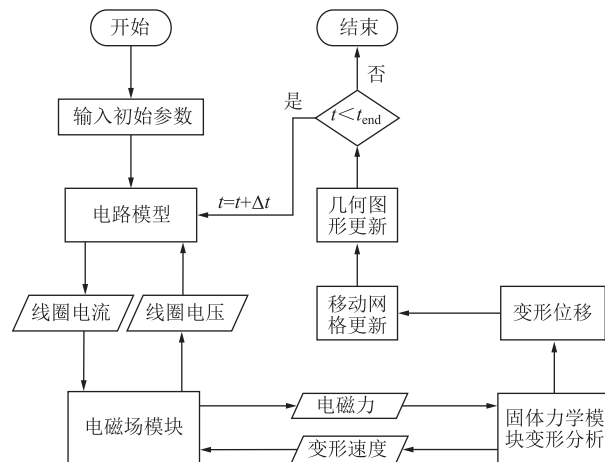


图4 管件电磁翻边仿真流程图

Fig. 4 Flow chart of simulation on electromagnetic flanging of tube fittings

2.2 电路模型

图 5 为本文所采用的 T 型线圈双管件电磁翻边等效电路图^[13]。本研究通过 Comsol 软件中的全局常微分和微分代数方程模块对放电电路进行模拟,计算出管件翻边电磁耦合过程中线圈的脉冲电流 i_1 。图 5 中, R 为驱动线圈电阻, L 为驱动线圈电感; 右边部分为电磁场耦合等效电路, 其中 L_w 、 R_w 分别为上管件的等效电感和等效电阻, L_f 、 R_f 分别为下管件的等效电感和等效电阻; M_{w-f} 为上管件与下管件的互感, M_{m-w} 为驱动线圈与上管件的互感, M_{m-f} 为驱动线圈与下管件的互感。由等效电路图和基尔霍夫定律可得, 其等效电路模型满足式 (5)~式 (10)。

$$R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + U_{\text{coil}} = U_c \quad (5)$$

$$R i_1 + L \frac{di_1}{dt} + M_{m-w} \frac{di_w}{dt} + M_{m-f} \frac{di_f}{dt} = U_{\text{coil}} \quad (6)$$

$$R_w i_w + L_w \frac{di_w}{dt} + M_{m-w} \frac{di_1}{dt} + M_{w-f} \frac{di_f}{dt} = 0 \quad (7)$$

$$R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} + M_{m-f} \frac{di_1}{dt} + M_{w-f} \frac{di_w}{dt} = 0 \quad (8)$$

$$U_c = U_0 - \frac{1}{C} \int_0^t (i_1 + i_d) dt \quad (9)$$

$$i_d = \begin{cases} 0, & U_c \geq 0 \\ \frac{U_c}{R_d}, & U_c < 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: U_{coil} 为驱动线圈电压瞬时值; i_w 为上管件中的电流; i_f 为下管件中的电流。

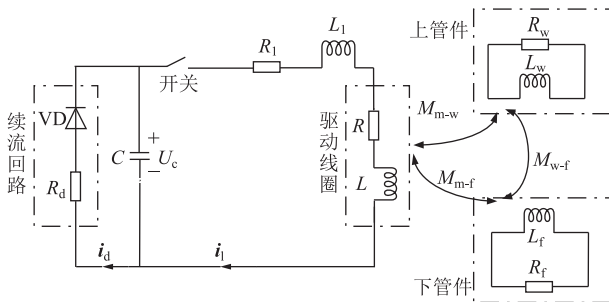


图 5 基于 T 型线圈的双管件电磁翻边等效电路图

Fig. 5 Equivalent circuit diagram of electromagnetic flanging for dual tube fittings based on T-coil

本文等效电路参数见表 1。

2.3 电磁场模块

通过对空间域内实时变化的涡流和磁通密度进行电磁场模块计算,可以推导出管件上的电磁力分布。在忽略螺线管线圈轴向渐进螺旋线影响的情况下,线圈和管件的几何结构以及磁场呈空间轴对称

表 1 等效电路参数

Table 1 Equivalent circuit parameters

参数	数值
电容 $C/\mu\text{F}$	320
放电电压 U_0/kV	2.8
线路电阻 $R_1/\text{m}\Omega$	25
线路电感 $L_1/\mu\text{H}$	6.5
续流电阻 $R_d/\text{m}\Omega$	100

分布,为了简化计算,将本研究中的线圈与管件均简化为二维轴对称模型。麦克斯韦方程组二维轴对称形式为:

$$\nabla \times \mathbf{E}_\varphi = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (11)$$

$$\mathbf{J}_\varphi = \gamma \mathbf{E}_\varphi \quad (12)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = 0 \quad (13)$$

式中: \mathbf{E}_φ 和 \mathbf{J}_φ 分别为感应电场强度和感应涡流密度的环向分量; \mathbf{B} 为磁通密度; ∇ 为麦克斯韦方程组算子; \mathbf{v} 为管件的成形速度; γ 为管件电导率; \mathbf{H} 为磁场强度。

2.4 固体力学模块

通过该模块对电磁场和结构的耦合进行仿真,模拟管件翻边的变形过程,并将计算的变形结果导入到电磁场模块中。根据力学运动规律,管件的电磁力和其位移之间满足如下关系式:

$$\nabla \times \sigma_t + \mathbf{F} = \rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} \quad (14)$$

式中: \mathbf{u} 为位移矢量; σ_t 为管件所受的应力张量; \mathbf{F} 为电磁力体密度; ρ 为管件密度。

本研究中均使用 AA1060-O 铝合金管材和铜导线线圈进行仿真,材料的基本参数详见表 2。

表 2 管件的材料参数

Table 2 Material parameters of tube fittings

参数	数值
管件密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2710
杨氏模量 E/GPa	69
泊松比 μ	0.33
初始屈服应力 σ_{ys}/MPa	98
电导率 $\gamma/(\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	3.72×10^7

本文采用 Cowper-Symonds 模型来模拟管件电磁翻边的塑性变形行为,因为考虑了高应变率对材料的影响,所以大大提高了计算精度。其本构方程如

式 (15) 所示^[14-15]。

$$\sigma = \left[1 + \left(\frac{\varepsilon_{pe}}{G} \right)^m \right] \sigma_{ys} \quad (15)$$

式中： σ_{ys} 为准静态条件下的初始屈服应力； ε_{pe} 为塑性应变； G 为粘性参数，本文中 $G = 6500 \text{ s}^{-1}$ ； m 为应变率硬化参数，本文取 $m = 0.25$ 。

3 结果与讨论

为了便于分析讨论 T 型线圈双管件电磁翻边对于能量利用率的提升效果，本文中的管件均采用内径为 $\Phi 39 \text{ mm}$ 、外径为 $\Phi 41 \text{ mm}$ 、厚度为 2 mm 的 AA1060 铝合金管件。3 组模型的二维轴对称几何结构如图 6 所示^[16]，双管件采用相同的尺寸规格并相对于线圈同轴对称分布。凸型线圈采用相同匝数和层数的轴向线圈和径向线圈对下管件进行翻边，传统线圈采用相同匝数和层数的径向线圈对下管件进行翻边。采用空间结构的同一点 a 点进行相应的磁通密度分析， a 点位置如图 6 所示。

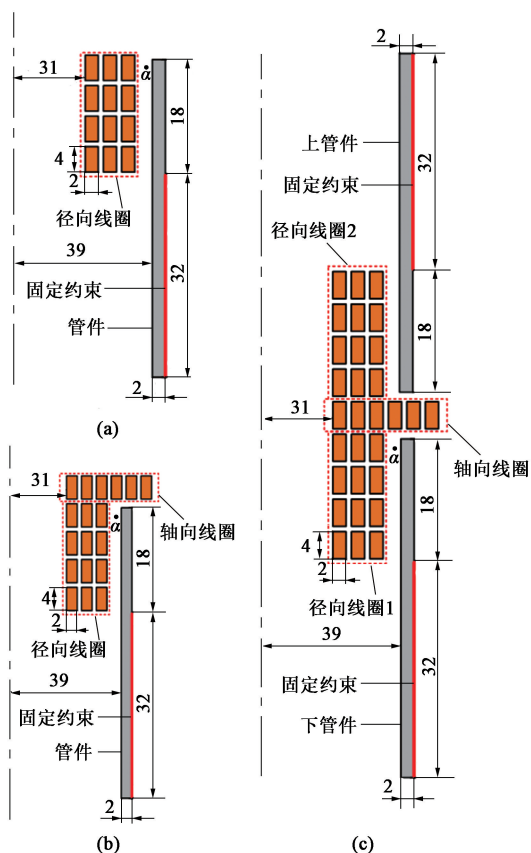


图 6 3 组模型的二维轴对称几何结构

(a) 传统线圈 (b) 凸型线圈 (c) T 型线圈

Fig. 6 2D axisymmetric geometry structures for three sets of models

(a) Traditional coil (b) Convex coil (c) T-coil

3.1 T 型线圈结构分析

首先，为了验证 T 型线圈结构中相对于传统线圈加入的轴向线圈对于翻边效果和能量利用率提升的有效性，在表 1 所示的电路参数下分析了 T 型线圈轴向线圈的不同绕组层数对管件翻边的影响。考虑到 T 型线圈模型的上下对称性，选取下管件进行观察。本文规定径向电磁力向外为正方向，轴向电磁力向上为正方向。

根据图 7，当改变轴向线圈绕组层数时，可以观察到管件受到的电磁力发生了变化。当轴向线圈的绕组层数由 3 层递增至 7 层时，径向电磁力的峰值开始逐渐变小；而轴向电磁力峰值先增大后减小，绕组层数为 6 层时达到最大值。图 8 为不同轴向线圈绕组层数时的双管件翻边效果图，当轴向线圈绕组层数为 5 层和 6 层时，翻边效果最佳，翻边角度最大。当轴向线圈绕组层数为 3 层时，轴向线圈和径向线圈层数相同，T 型线圈双管件电磁翻边即为 3 (层数) × 9 (匝数) 的双管件电磁翻边模型^[17]，其轴向电磁力最小、翻边角度最小。可见 T 型线圈对管件的翻边质量有较为显著的改善。后续章节中均取 T 型线圈的轴向线圈绕组层数为 6 层进行研究。

3.2 翻边数据对比分析

相同放电电压下，3 组模型线圈电流随时间变化的曲线见图 9。从图 9 中可以看出，当放电电压相同时，T 型线圈双管件电磁翻边的电流峰值最小、脉宽最大，传统线圈的电流峰值最大、脉宽最小，凸型线圈的电流峰值和脉宽介于二者之间。这是因为：线圈匝数的增加，会导致线圈的等效电感增大，所以导致电流减小，同时脉宽略微增大。

由式 (1) 和式 (2) 可知，在管件电磁翻边过程中，径向电磁力取决于轴向磁通密度，使管件发生胀形，轴向电磁力主要取决于径向磁通密度，其使得翻边区域轴向翻折的角度更大，因此，需要分析轴向和径向双向的磁通密度。为了便于分析和对比模型中的磁通密度大小，本文考虑到 T 型线圈模型的上下对称性，上管件区域的磁通密度与下管件区域对称位置的磁通密度大小相等、方向相反，因此，选取位于下管件端部变形区域和管件内壁外侧 a 点 (图 6) 作为磁通密度的分析点，在传统线圈模型和凸型线圈模型中取同空间位置的 a 点，使得对比结果更加直观明确。图 10a 为 3 组模型的轴向磁通密度对比图，传统线圈管件电磁翻边的轴向磁通密度峰值为 -4.30 T ，凸形线圈管件电磁翻边的轴向磁通密度峰值达到了 -4.20 T ，相对而言 T 型线圈

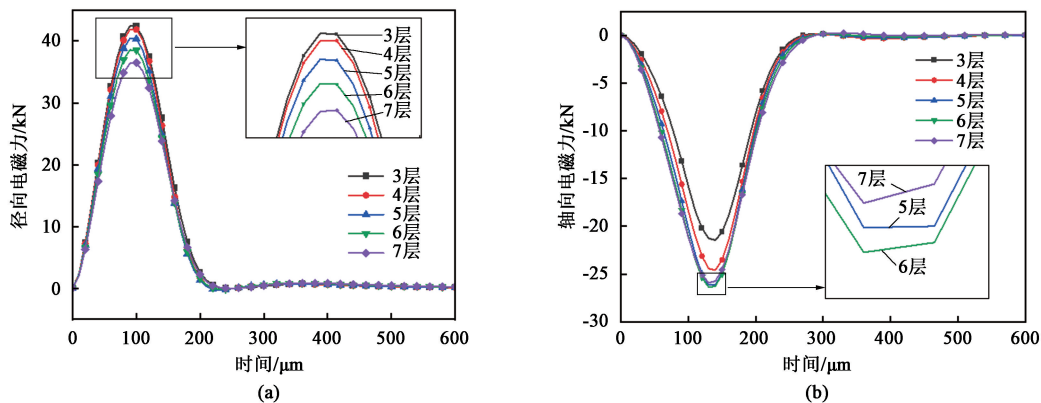


图 7 改变轴向线圈绕组层数时的电磁力变化

(a) 径向电磁力 (b) 轴向电磁力

Fig. 7 Changes of electromagnetic force when changing number of axial coil winding layers

(a) Radial electromagnetic force (b) Axial electromagnetic force

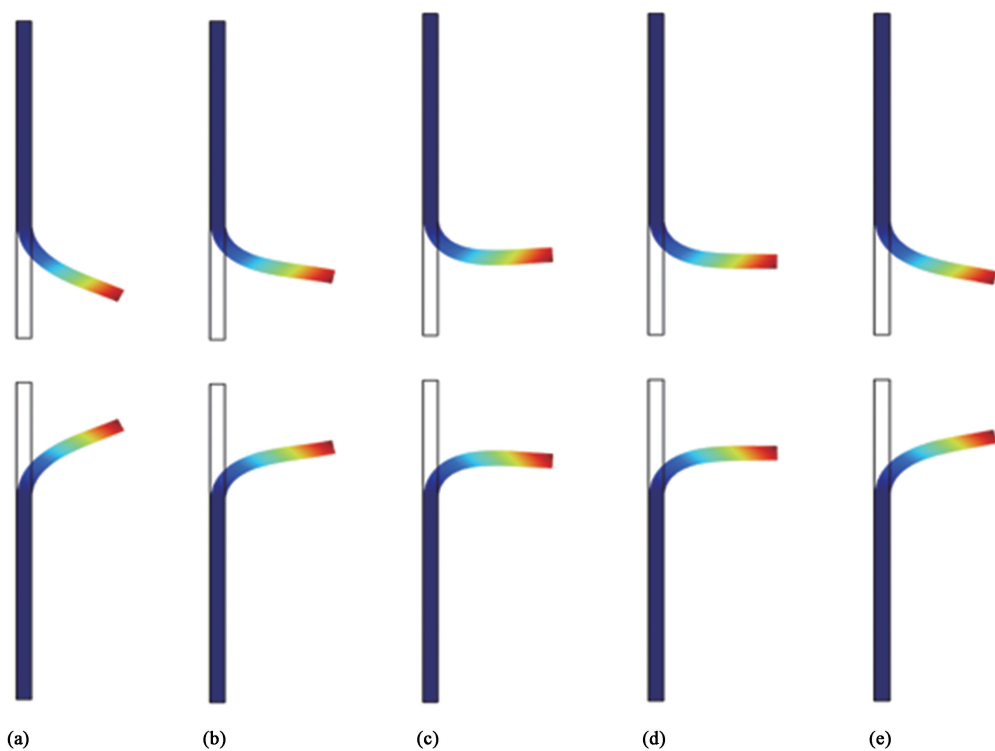


图 8 改变轴向线圈绕组层数时的双管件翻边效果图

(a) 3 层 (b) 4 层 (c) 5 层 (d) 6 层 (e) 7 层

Fig. 8 Flanging effect diagrams of dual tube fittings when changing number of axial coil winding layers

(a) 3 layers (b) 4 layers (c) 5 layers (d) 6 layers (e) 7 layers

双管件电磁翻边的轴向磁通密度峰值略小，为 -3.65 T 。图 10b 为径向磁通密度对比图，传统线圈管件电磁翻边的径向磁通密度峰值最小，仅为 -1.10 T ；因为有轴向线圈的存在，T 型线圈和凸型线圈产生的径向磁通密度远大于传统线圈，其峰值分别达到了 -2.75 和 -3.90 T 。驱动线圈中的电流是磁通密度的源，因此，脉宽也符合驱动线圈电流的

变化规律。相比于传统线圈管件电磁翻边，T 型线圈双管件电磁翻边的径向磁通密度更大，轴向磁通密度略小；相比于凸型线圈管件电磁翻边，T 型线圈双管件电磁翻边的双向磁通密度均略小一些。这是因为：T 型线圈同时对两个管件进行翻边，加工的管件越多，管件与线圈之间的电磁耦合作用越强，而根据磁场变化规律，管件涡流感应出的磁场总是

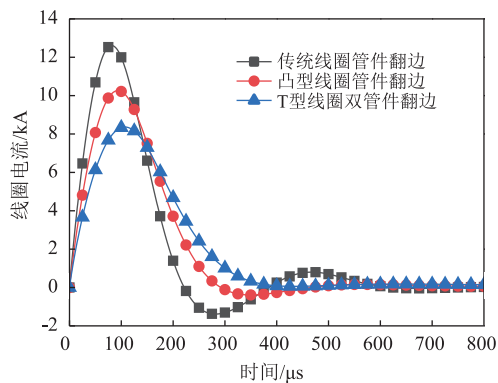


图9 线圈电流随时间的变化曲线

Fig. 9 Changing curves of coil current with time

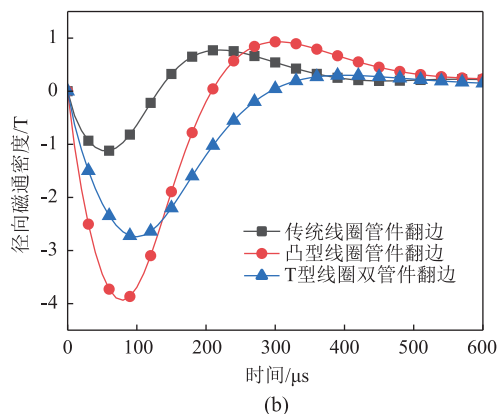
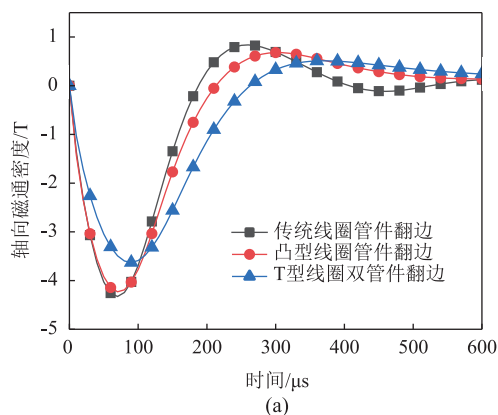


图10 磁通密度随时间的变化曲线

(a) 轴向磁通密度 (b) 径向磁通密度

Fig. 10 Changing curves of magnetic flux density with time

(a) Axial magnetic flux density (b) Radial magnetic flux density

阻碍驱动线圈主磁场的变化,因此,合成磁场在管件位置会有所削弱。

驱动线圈的磁通密度是影响管件电磁力的主要因素,而电磁力和成形系统的能量利用率息息相关。图11为3组模型管件的电磁力随时间变化曲线,可以看出:T型线圈双管件电磁翻边的径向电磁力低于传统线圈管件翻边,但因为轴向线圈的存在,轴

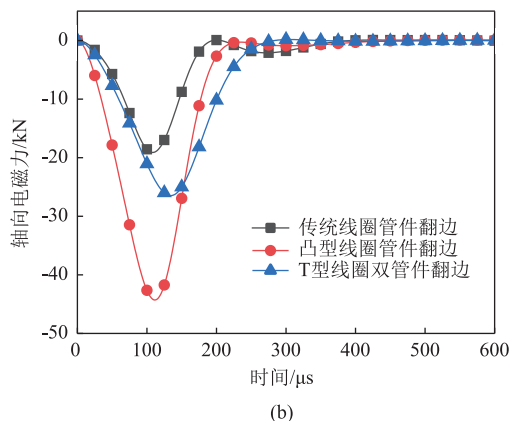
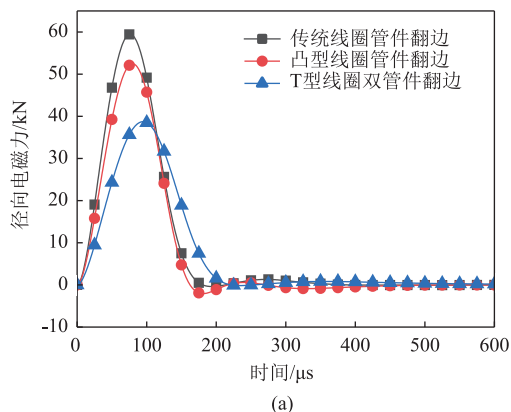


图11 电磁力随时间变化曲线

(a) 径向电磁力 (b) 轴向电磁力

Fig. 11 Changing curves of electromagnetic force with time

(a) Radial electromagnetic force (b) Axial electromagnetic force

向电磁力相对于传统线圈管件电磁翻边大大提升,其双向电磁力峰值分别达到了38.7和-26.5 kN,传统线圈管件电磁翻边的径向和轴向电磁力峰值分别达到了59.4和-19.1 kN。本文提出的T型线圈双管件电磁翻边比传统线圈管件电磁翻边双向电磁力的加载更加均衡。凸型线圈管件电磁翻边的径向和轴向电磁力峰值分别达到了52.2和-44.1 kN,虽然凸型线圈管件电磁翻边的轴向电磁力最大,实现了更均衡的双向加载,但由于凸型线圈不能像T型线圈一样同时加工两个管件,成形系统的总能量利用率会远低于T型线圈双管件电磁翻边模型。

3.3 能量利用率分析

3组模型的管件塑性应变能如图12所示,传统线圈管件电磁翻边的塑性应变能为0.164 kJ,凸型线圈管件电磁翻边的塑性应变能为0.211 kJ,T型线圈双管件电磁翻边的总塑性应变能为0.279 kJ,其中上、下管件的基本一致,均为0.1395 kJ。电容器中初始能量 E_0 为1.254 kJ,计算得到传统线圈管件电磁翻边的能量利用率为13.06%,凸型线圈管

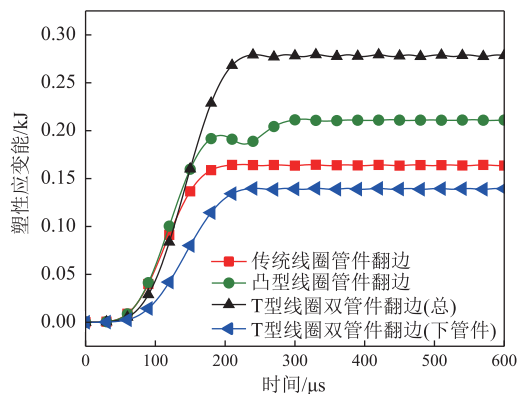


图 12 塑性应变能对比图

Fig. 12 Comparison diagram of plastic strain energies

件电磁翻边的能量利用率为 16.81%，而 T 型线圈双管件电磁翻边系统的能量利用率则达到了 22.17%，使用 T 型线圈双管件电磁翻边较使用传统线圈和凸形线圈管件电磁翻边的能量利用率分别提升了 69.75% 和 31.89%，显然 T 型线圈双管件电磁翻边系统的能量利用率显著提升。

为更好地描述 T 型线圈双管件电磁翻边系统能量利用率的提升，在同一线路参数下，通过改变放电电压来调节电容器中的初始能量，比较 3 组模型下管件塑性应变能的大小。图 13 为 3 组模型下的管件塑性应变能随放电电压的变化曲线，可见在不同的放电电压下塑性应变能均遵循相同的变化趋势。传统线圈管件电磁翻边的塑性应变能最小，凸型线圈管件电磁翻边由于双向电磁力的加载，使得其塑性应变能大于传统线圈管件电磁翻边，T 型线圈双管件电磁翻边由于其双向电磁力加载以及双管件同时成形的优点，其塑性应变能远大于前两者。如图 14 所示，柱状图为不同放电电压下 3 组模型的能量利用率，折线图为 T 型线圈双管件电磁翻边相对于传统线圈管件电磁翻边和凸型线圈管件电磁翻边的能量利用率提升率。从图 14 中可以看出，3 组模型下，随着放电电压的上升，塑性应变能基本上呈现出稳步提升的“准线性关系”，能量利用率也逐步提升，但在某个放电电压区间内，随着放电电压的上升，塑性应变能呈现出保持稳定甚至略微降低的变化规律，且对应放电电压区间内的能量利用率存在峰谷，本文称这种现象为饱和现象，该放电电压区间为饱和电压区间，饱和电压区间对应的管件电磁翻边角度为最佳翻边角度（90°左右）。传统线圈管件、凸型线圈管件与 T 型线圈双管件电磁翻边角度为最佳翻边角度时所对应的能量利用率分别为 11.86%、14.53% 和 22.42%。产生饱和现象的原因

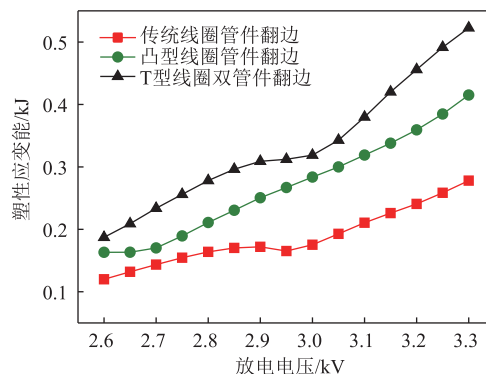


图 13 3 组模型的塑性应变能随放电电压变化曲线

Fig. 13 Changing curves of plastic strain energy of three sets of models with discharge voltage

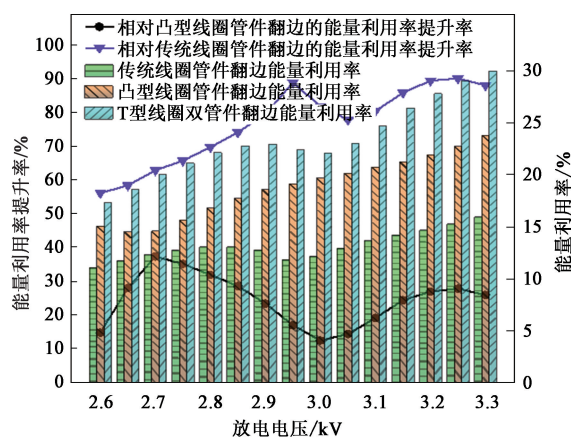


图 14 3 组模型的能量利用率和 T 型线圈的能量利用率提升率

Fig. 14 Energy utilization rate of three sets of models and energy utilization rate improvement rate of T-coil

为材料的回弹能量与塑性应变能之间存在竞争关系。管件的翻边角度越大，塑性变形越大，回弹性能越明显，当管件翻边角度达到 90° 时，管件的径向位移达到最大，此时转化为回弹能量的塑性应变能最大，管件最终的塑性应变能比成形过程中的最大塑性应变能小很多。可见如何抑制管件电磁翻边过程中的回弹是提高管件电磁翻边能量利用率的关键研究方向之一^[18]。

为了进一步研究在相同翻边角度下 3 组模型的能量利用率，继续分析了他们处于相同翻边角度下所需的放电电压，从初始能量的角度来评估其能量利用率。图 15a~图 15c 分别展示了 3 组模型在达到 90° 翻边角度时的三维仿真图，即管件翻边后相较翻边前各位置径向位移的大小，由 3 组对比模型最终得到 4 个翻边角度、径向位移和成形效果均基本相同的变形管件。表 3 为加工管件至某一翻边角度下时，各个模型所需要的初始能量和 T 型线圈双管件

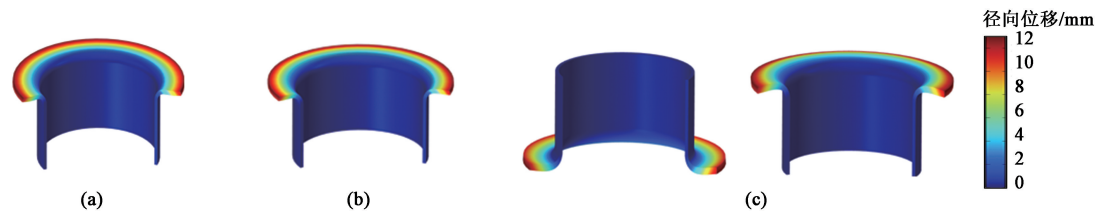


图 15 翻边角度为 90°时管件翻边的三维仿真图

(a) 传统线圈 (b) 凸型线圈 (c) T 型线圈

Fig. 15 Three-dimensional simulation diagrams of tube fittings flanging with flanging angle of 90°

(a) Traditional coil (b) Convex coil (c) T-coil

表 3 不同翻边角度时各模型所需的初始能量及 T 型线圈的能量利用率提升率

Table 3 Required initial energy and improvement rate of utilization rate of T-coil for three models under different flanging angles

翻边角度/ (°)	所需的初始能量/kJ			相对传统线圈模型的能 量利用率提升率/%	相对凸型线圈模型的能 量利用率提升率/%
	传统线圈管件电磁翻边	凸型线圈管件电磁翻边	T 型线圈双管件电磁翻边		
30	1. 95	1. 59	1. 01	48. 21	36. 48
45	2. 26	1. 81	1. 13	50. 00	37. 57
60	2. 47	2. 00	1. 25	49. 39	37. 50
75	2. 65	2. 15	1. 33	49. 81	38. 14
90	2. 77	2. 23	1. 39	49. 82	37. 67

模型相对传统线圈和凸型线圈管件模型提高的能量利用率。通过 5 组不同的翻边角度，对比 3 组模型各自所需的初始能量可以看出：本文提出的 T 型线圈双管件电磁翻边模型相对传统线圈和凸型线圈管件电磁翻边能量利用率分别提高了 49.82% 和 37.67%。显然从塑性应变能和能量利用率的角度均可得出：使用 T 型线圈双管件电磁翻边模型大大减少了能量的消耗，提高了管件翻边的能量利用率。

4 结语

针对管件电磁翻边中能量利用率低的问题，本文提出基于 T 型线圈双管件同时加工的电磁翻边技术。构建了传统线圈管件电磁翻边、凸型线圈管件电磁翻边和 T 型线圈双管件电磁翻边 3 组对比模型。研究表明：T 型线圈双管件电磁翻边具有能量利用率高的优点，当放电电压相同时，其相对于传统线圈管件电磁翻边的能量利用率提升率达到了 60% 以上，相对于同样能够提供双向电磁力加载的凸型线圈管件电磁翻边则提升了 30% 左右；当 3 组模型均达到最优翻边效果即翻边角度为 90° 时，T 型线圈双管件电磁翻边模型所需的初始放电能量最少，仅为 1.39 kJ。传统线圈和凸型线圈管件电磁翻边需要进行两次放电，相比之下，T 型线圈模型的能量利用率

分别提高了 49.82% 和 37.67%。显然，基于 T 型线圈的双管件电磁翻边能够提高管件电磁翻边的能量利用率，为电磁翻边技术的发展提供了新思路。

参考文献：

[1] 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. Research on electromagnetic problems in electromagnetic forming process [J]. Journal of Electrotechnical Technology, 2019, 34 (11): 2247-2259.

[2] Lai Z P, Cao Q L, Han X T, et al. Investigation on plastic deformation behavior of sheet workpiece during radial lorentz force augmented deep drawing process [J]. Journal of Materials Processing Tech., 2016, 245: 193-206.

[3] Parse E, Rosa P A R, Geier M, et al. An analysis of electromagnetic sheet metal forming process [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 526: 9-14.

[4] 邱立, 李玉田, 张望, 等. 基于匀压力驱动管加载的管件电磁胀形电磁力与成形特性分析 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (5): 98-108.
Qiu L, Li Y T, Zhang W, et al. Analysis of electromagnetic force and forming characteristics in tube electromagnetic bulging based on uniform pressure driving tube loading [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (5): 98-108.

[5] 姜晨非, 邱立, 刘洪池, 等. 板件与管件同时加工的电磁成形能量利用率研究 [J]. 塑性工程学报, 2022, 29 (7): 58-65.
Jiang C F, Qiu L, Liu H C, et al. Study on energy using efficien-

- cy of electromagnetic forming for simultaneous machining of plate and tube [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2022, 29 (7): 58-65.
- [6] Xiong Q, Huang H, Xia L Y, et al. A research based on advance dual-coil electromagnetic forming method on flanging of small-size tubes [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 102 (5): 4087-4094.
- [7] 张无名, 邱立, 张望, 等. 放电时序对双向加载式管件电磁翻边的影响 [J]. 精密成形工程, 2021, 13 (5): 84-91.
Zhang W M, Qiu L, Zhang W, et al. Influence of discharge timing on electromagnetic flanging of tube with bidirectional loading [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13 (5): 84-91.
- [8] 邱立, 罗宝妮, 何琴, 等. 基于凸型线圈双向电磁力加载的管件电磁翻边成形 [J]. 热加工工艺, 2024, 53 (9): 152-158.
Qiu L, Luo B N, He Q, et al. Electromagnetic flanging forming of pipe fitting based on bidirectional electromagnetic force loading of convex coil [J]. Hot Working Technology, 2024, 53 (9): 152-158.
- [9] Li Z, Siada A 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.
- [10] 邱立, 李梦瑶, 汪晨鑫, 等. 基于三磁场变换器的管件电磁胀形电磁力分布与轴向均匀度 [J]. 锻压技术, 2024, 49 (2): 107-118.
Qiu L, Li M Y, Wang C X, et al. Electromagnetic force distribution and axial uniformity of tube electromagnetic bulging based on three-magnetic field convert [J]. Forging & Stamping Technology, 2024, 49 (2): 107-118.
- [11] 熊奇, 金柯威, 阎诺, 等. 电磁成形过程中能量动态转换机制 [J/OL]. 中国电机工程学报, 1-12 [2023-10-23]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.psee.231542>.
Xiong Q, Jin K W, Yan N, et al. Dynamic energy conversion mechanism during electromagnetic forming [J/OL]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 1-12 [2023-10-23]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.psee.231542>.
- [12] 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.
- [13] 张龙. 基于有限元分析的电磁成形电路优化方法研究 [J]. 电子设计工程, 2020, 28 (6): 101-106.
Zhang L. Research on optimization method of electromagnetic forming circuit based on finite element analysis [J]. Electronic Design Engineering, 2020, 28 (6): 101-106.
- [14] 严思梁, 胡磊, 张晓丽, 等. 电磁成形中材料本构模型研究进展 [J]. 塑性工程学报, 2023, 30 (6): 10-21.
Yan S L, Hu L, Zhang X L, et al. Investigation progress of material constitutive model for electromagnetic forming [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2023, 30 (6): 10-21.
- [15] 谢冰鑫, 黄亮, 黄攀, 等. 铝合金板料电磁翻边全流程工艺研究 [J]. 中国机械工程, 2021, 32 (2): 220-226.
Xie B X, Huang L, Huang P, et al. Research on whole process route of electromagnetic flanging of aluminum alloy sheets [J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32 (2): 220-226.
- [16] Lubin T, Mezani S, Rezzoug A. 2-D exact analytical model for surface-mounted permanent-magnet motors with semi-closed slots [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47 (2): 479-492.
- [17] 尹朋磊, 邱立, 王斌. 双管件电磁翻边的电磁力分布与成形性能 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (7): 107-114.
Yin P L, Qiu L, Wang B. Electromagnetic force distribution and forming performance for double-tube electromagnetic flanging [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (7): 107-114.
- [18] 杜志浩, 杨欢, 崔晓辉, 等. 预变形与电磁成形对铝合金曲面件回弹的影响 [J]. 航空制造技术, 2022, 65 (21): 143-149.
Du Z H, Yang H, Cui X H, et al. Influence of predeformation and electromagnetic forming on springback of aluminum alloy curved parts [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2022, 65 (21): 143-149.

《锻压技术》郑重声明

为充分尊重作者权益, 坚决抵制学术不端行为, 积极倡导优良学风, 努力为学术创新营造良好氛围, 本刊郑重声明: 对一稿多投, 重复发表, 存在署名有争议, 引用他人著述未注明出处, 抄袭、剽窃、弄虚作假, 或以上情况的变相形式等学术不端行为的文章, 坚决拒绝刊登。一经发现, 立即撤稿, 并由本刊视情节轻重给予书面警告、拒绝刊登有其署名的稿件、通知其所在单位等处理。轻者给予 3~5 年不允许刊发其论文的处罚, 情节严重者, 将以适当方式予以公布, 该作者的论文永久不得刊用。

《锻压技术》编辑部

《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