



·脉冲功率技术·

## 带集磁器的吸引式电磁力小管件翻边方法<sup>\*</sup>

李盛飞<sup>1,2</sup>, 朱险峰<sup>3</sup>, 刘子伟<sup>3</sup>, 熊 奇<sup>1,2</sup>, 李 哲<sup>3</sup>, 李彦昕<sup>1,2</sup>

(1. 三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡大学 湖北省输电线路工程技术研究中心, 湖北 宜昌 443002;  
3. 国网湖北省电力有限公司宜昌供电公司, 湖北 宜昌 443000)

**摘 要:** 针对微小铝合金管件电磁翻边工艺, 现有方法将驱动线圈置于管件端部外侧, 利用双频电流法产生吸引式电磁力实现翻边。然而其翻边能力不强, 基于此提出一种带集磁器的吸引式电磁力翻边方法。在现有方法基础上引入集磁器, 利用其能够改变磁场位形的特点, 优化电磁力分布并增大轴向电磁力, 达到增强翻边效果的目的。为验证该方法的可行性, 通过搭建管件翻边过程的电磁-结构全耦合有限元仿真模型, 对比引入不同集磁器后的翻边效果, 同时分析了不同工况对电磁力分布、电磁力密度以及磁场和涡流的影响。得出阶梯型集磁器效果最佳, 结果表明, 该方法下管件翻边角度从 38° 增大到 90°。进一步分析表明, 其磁通密度径向分量和涡流密度环向分量分别增大到 164% 和 135%, 作用在管件上的电磁力分布改变, 峰值时刻轴向电磁力体密度明显加强, 增大到 211%。该方法进一步完善了对微小铝合金管件的电磁翻边成形, 对拓展电磁成形技术在铝合金管件翻边上的应用具有一定意义。

**关键词:** 微小铝合金管件; 电磁翻边; 吸引式电磁力; 集磁器

中图分类号: TG391

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202335.220281

## Attractive electromagnetic force flanging method for small tube fittings with magnetic field shaper

Li Shengfei<sup>1,2</sup>, Zhu Xianfeng<sup>3</sup>, Liu Ziwei<sup>3</sup>, Xiong Qi<sup>1,2</sup>, Li Zhe<sup>3</sup>, Li Yanxin<sup>1,2</sup>

(1. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;  
2. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;  
3. State Grid Yichang Power Supply Company, Yichang 443000, China)

**Abstract:** Aiming at the electromagnetic flanging process for small aluminum alloy tube fittings, the driving coil is placed on the outside of the end of the tube, and the dual-frequency discharge current method is used to generate the attractive electromagnetic force to realize flanging in the existing method. However, its flanging ability is not strong, under this background, an attractive electromagnetic force flanging method with a magnetic field shaper is proposed. On the basis of the existing method, a magnetic field shaper is introduced, which can change the magnetic field configuration, optimize the electromagnetic force distribution and increase the axial electromagnetic force, so as to achieve the purpose of enhancing the flanging effect. To verify the feasibility of this method, firstly, the electromagnetic-structural fully coupled finite element simulation model of the tube flanging process was built, and the flanging effects after introducing different magnetic field shaper were compared, and it is concluded that the stepped magnetic field shaper has the best effect. The flanging process were analyzed under the working conditions with stepped magnetic field shaper and without magnetic field shaper. The results show that the flanging angle of the tube fittings is increased from 38° to 90° compared with the case without the magnetic field shaper. Further analysis shows that the radial component of the magnetic flux density and the annular component of the eddy current density increase to 164% and 135%, respectively. The distribution of the electromagnetic force acting on the pipe fittings changes, and the density of the axial electromagnetic force increases significantly at the peak time, increasing to 211%. The method further improves the electromagnetic flanging forming of small aluminum alloy tube fittings, and it has a certain

\* 收稿日期: 2022-09-06; 修订日期: 2023-01-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51707104); 武汉强磁场学科交叉基金项目 (WHMFC202121)

联系方式: 李盛飞, ctgu\_lishengfei@163.com。

通信作者: 李彦昕, 2623994229@qq.com。

significance for expanding the application of electromagnetic forming technology in aluminum alloy tube flanging.

**Key words:** small alloy tube fittings, electromagnetic flanging, attractive electromagnetic force, magnetic field shaper.

铝合金管件的电磁翻边原理为:脉冲电源系统产生的脉冲电流通入驱动线圈,从而产生脉冲磁场,变化的磁场在铝合金管件中产生感应涡流,线圈磁场和管件的感应涡流相互作用形成洛伦兹力,继而实现铝合金管件的翻边<sup>[1-2]</sup>。与传统冲压翻边工艺相比,电磁翻边工艺成形速率快<sup>[3-4]</sup>,能提高工件的成形极限与延伸率<sup>[5-6]</sup>,实验结果表明,电磁翻边可将极限翻边系数提高 17%~26%,可使铝合金的极限延伸率由 14% 增加到 31.7%<sup>[7]</sup>。且针对一些特别的工件<sup>[8-9]</sup>,用电磁翻边来实现效果更为理想。因此很多学者对电磁翻边工艺展开了一系列研究。

现有研究中,大多采用排斥式电磁力对管件进行电磁翻边成形。李彦涛在基于单线圈的管件电磁翻边研究中发现,当放电电压不变时,适当增加线圈匝数,可优化翻边角度。此外,他还发现在管件电磁翻边过程中,轴向电磁力对翻边效果起到决定性作用,而非径向电磁力<sup>[10]</sup>。在此基础上,张望等提出了一种基于轴-径双向电磁力同时加载的管件电磁翻边方法,通过引入轴向线圈增大轴向电磁力,使得翻边角度是单线圈翻边模式下的 3 倍<sup>[11]</sup>。然而,排斥式电磁力翻边的方法必须将驱动线圈置于管件内,这导致线圈结构受到限制,然而小尺寸、高强度的驱动线圈目前尚不能制造,所以此方法不适用于小管件的翻边。

为实现小管件的翻边,熊奇等在小管件吸引力胀形的基础上<sup>[12-13]</sup>,提出了一种双线圈双电源系统的小管件翻边方法。该方法采用吸引式电磁力,将两个独立供电的驱动线圈放置于管件端部,通过调节电源放电时间来控制电磁力的作用时间,实现了小管件电磁翻边<sup>[14]</sup>。但相比于单线圈翻边系统,该系统控制配合复杂,工装繁琐。

为解决上述问题,本文提出一种带集磁器的吸引式电磁力小管件翻边方法,该方法在单线圈双电源系统的基础上引入一个集磁器,利用集磁器能够加强特定区域磁场的特点<sup>[15-18]</sup>,增大翻边过程中的轴向电磁力,以达到取代提供轴向电磁力线圈的效果。该方法弥补了单线圈系统中轴向电磁力不足的问题,简化了双线圈系统中工装复杂等问题。且集磁器相比于线圈制作简单,成本较低,灵活度高,通过更换不同的集磁器,就可对不同尺寸的管件进行电磁翻边,缩短了制造周期,更利于批量生产。为验证该方法的可行性,本文建立了电磁-结构全耦合的有限元仿真模型,并进行了系统的仿真和对比分析。

## 1 原 理

### 1.1 吸引式电磁力原理

吸引式电磁力管件翻边装置通过两套独立的脉冲电源系统接入驱动线圈,使驱动线圈置于管件端部外侧,如图 1 所示。其原理为脉冲电源系统产生的脉冲电流流经驱动线圈,在驱动线圈周围产生时变的磁场。根据电磁感应定律和楞次定律,时变的磁场在管件中产生感应涡流,磁场与涡流相互作用产生脉冲电磁力,其电磁力密度可表示为<sup>[19-20]</sup>

$$\mathbf{f} = \mathbf{J}_e \times \mathbf{B} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{J}_e$ 为管件中的感应涡流密度, $\mathbf{B}$ 为管件中的磁通密度。电磁力是驱动管件翻边的主要载荷,由于管件与驱动线圈的装配方式符合轴对称结构,为便于分析电磁翻边过程中管件的受力变化,电磁力密度可沿管件轴向和径向分解为轴向电磁力密度 $f_z$ 和径向电磁力密度 $f_r$ ,分别表示为

$$f_z = \mathbf{J}_e \times \mathbf{B}_r \quad (2)$$

$$f_r = \mathbf{J}_e \times \mathbf{B}_z \quad (3)$$

式中: $\mathbf{B}_r$ 为磁通密度的径向分量, $\mathbf{B}_z$ 为磁通密度的轴向分量。通入驱动线圈的脉冲电流与电磁力密度存在如下关系<sup>[21]</sup>

$$\mathbf{f} = -\alpha \frac{di}{dt} \mathbf{e} \times \mathbf{B} \quad (4)$$

式中: $i$ 为流经驱动线圈的脉冲电流, $\alpha$ 为比例系数, $\mathbf{e}$ 为环向单位矢量。电磁力与驱动线圈中电流的变化率成正比,线圈电流变化率越大,电磁力相应越大。本文约定以背离管件中轴线的方向为正方向。当 $di/dt > 0$ 时,驱动线圈中的电流随时间增加, $f_r < 0$ ,方向指向管件中轴线,此时为排斥式电磁力;反之,当 $di/dt < 0$ 时, $f_r > 0$ ,方向背离

管件中轴线,则为吸引式电磁力。

由上述分析可知,可通过改变放电电路的拓扑结构,构造放电电流波形产生吸引式电磁力。本文采用文献 [22] 中提出的双频电流法,利用该方法得到一个随时间增大较慢、急剧减小的放电电流波形,在此波形下可有效产生较大的吸引式电磁力。

### 1.2 集磁器原理

集磁器是电磁成形过程中加强特定区域磁场的常用辅助配件,其利用趋肤效应和其独特的结构(空气间隙)相互配合,使驱动线圈磁场的分布情况发生改变,进而达到改变电磁力分布的目的。

在管件翻边过程中,增大轴向电磁力有利于提升成形效果<sup>[8]</sup>,本文将集磁器置于管件与驱动线圈之间,三者的电流分布如图 2 所示。当驱动线圈中通入脉冲电流时,集磁器中会产生感应涡流,集磁器中的空气间隙阻断了电流在集磁器体上的流通,且受趋肤效应的影响,感应电流只会集中在集磁器表面流动,故集磁器中的感应电流的方向为由上表面流向下表面,并形成闭合回路。由于流经集磁器的感应电流值不会改变,而下表面面积比上表面面积小,所以下表面的感应区域电流密度要大得多,该附近区域内产生的磁场会相对较强。且集磁器中的感应电流在管件中产生感应涡流,该部分涡流产生的磁场与驱动线圈电流产生的磁场也会相互加强。综上,磁场在集磁器的下表面与管件间的区域内加强,进而实现电磁力的增强。

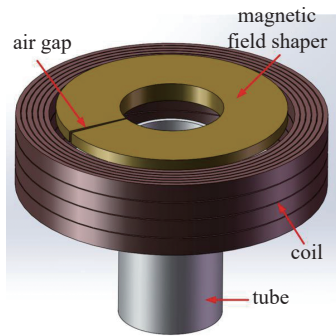


Fig. 1 Structural schematic diagram of suction type electromagnetic force tube flanging device

图 1 吸引式电磁力管件翻边装置结构示意图

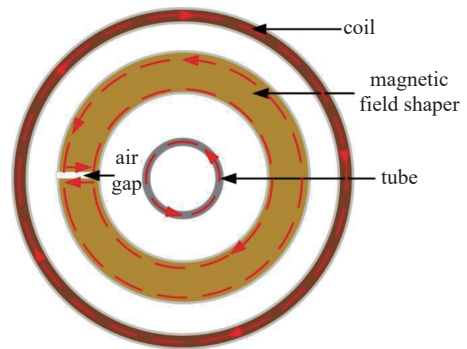


Fig. 2 Current distribution diagram of flanging system with magnetic field shaper structure

图 2 带集磁器结构的翻边系统电流分布图

集磁器所产生的磁场会与驱动线圈产生的磁场相互增强,所以最终产生的合成磁场可由下列电磁场方程(5)确定。

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \\ \mathbf{J}_e = \sigma_e \mathbf{E} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{E}$  为电场强度,  $\mathbf{v}$  为管件位移速度,  $\sigma_e$  为管件电导率。

## 2 仿 真

为分析该方法的可行性,本文采用文献 [23] 中的有限元仿真软件及仿真方法,搭建了电磁-结构全耦合分析模型,该方法经过大量研究工作的检验,其结果可信度较高<sup>[24-26]</sup>。本文采用的模型参数如表 1 所示。建模中保持电源参数、线圈和工件的结构参数不变,分别建立带集磁器工况下和无集磁器工况下的吸引式电磁力小管件翻边系统的二维轴对称模型,对比两种模型下管件翻边的效果,分析集磁器对管件翻边的影响。

### 2.1 电路

根据双频电流法的电路拓扑,本文设计了脉冲电源系统,其结构如图 3 所示,相关参数如表 2 所示。

该脉冲电源系统由相对独立的快速放电电源系统和慢速放电电源系统组合而成。每套电源系统中都有一个由电阻和二二极管组成的续流回路,并通过晶闸管作为导通开关控制电流通入驱动线圈的时间。两套放电系统反向连接后接入驱动线圈分别产生两个不同脉宽的脉冲电流。

脉冲电源系统产生的长短脉宽电流可由下列微分方程组(6)、(7)确定。

表 1 材料参数及其几何结构参数

Table 1 Material parameters and geometric structure parameters of the model

object	parameter	value
AA1060 aluminum alloy tube fitting material parameters	density/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	2710
	conductance/( $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ )	$3.76\times 10^7$
	relative magnetic permeability	1
	relative dielectric constant	1
	Poisson's ratio	0.33
material parameters of coil and magnetic field shaper (copper)	initial yield stress/MPa	98
	density/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	8930
	conductance/( $\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$ )	$5.99\times 10^7$
	relative magnetic permeability	1
	relative dielectric constant	1
geometric dimensions of the tube fitting	the height of the tube fitting/mm	40
	width of the tube fitting/mm	1
	inner diameter of the tube fitting/mm	10
	outer diameter of the tube fitting/mm	11
geometric dimensions of the coil	height of a single turn coil/mm	4
	width of a single turn coil/mm	1
	inner diameter of the coil/mm	26
	outer diameter of the coil/mm	32
	the number of turns of the coil	$4\times 6$
geometric dimensions of the magnetic field shaper	height of the magnetic field shaper/mm	4
	inner diameter of the magnetic field shaper/mm	11
	outer diameter of the magnetic field shaper/mm	24.5

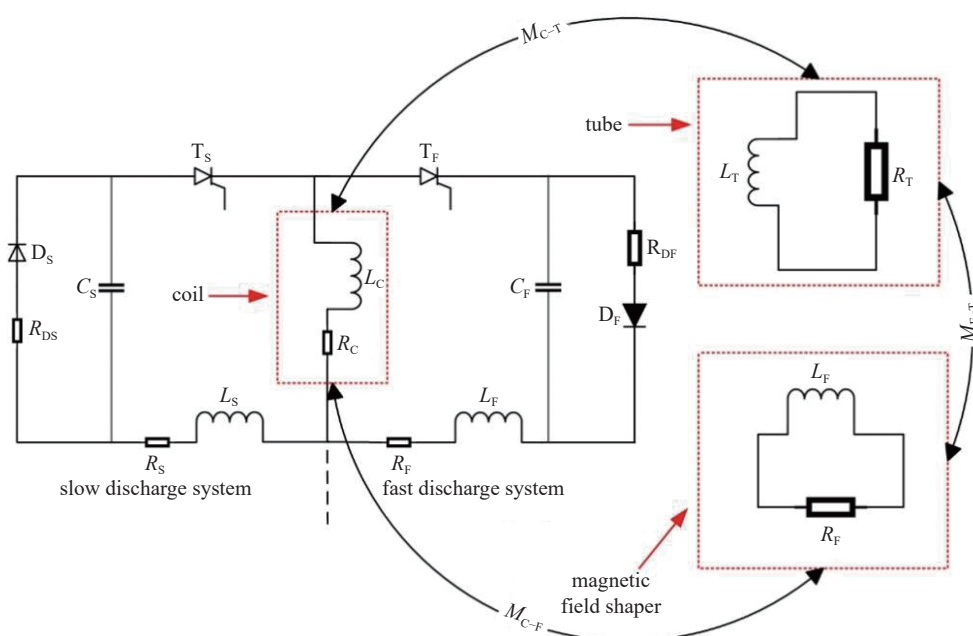


Fig. 3 Circuit topology diagram of pulse power system

图 3 脉冲电源系统电路拓扑结构图



表 2 脉冲电源系统参数  
Table 2 Pulse power system parameters

parameter	slow discharge system		fast discharge system	
	symbol	value	symbol/unit	value
capacitance	$C_S/\mu\text{F}$	3200	$C_F/\mu\text{F}$	200
initial discharge voltage	$U_S/\text{kV}$	8	$U_F/\text{kV}$	6.75
equivalent resistance	$R_S/\Omega$	0.10	$R_F/\Omega$	0.09
freewheeling diode	$R_{DS}/\Omega$	0.02	$R_{DF}/\Omega$	0.02
equivalent inductance	$L_S/\text{mH}$	0.60	$L_F/\mu\text{H}$	5

$$\begin{cases} L_{S(F)} \frac{dI_{S(F)}}{dt} + R_{S(F)} I_{S(F)} + V_C = U_{S(F)} \\ U_{S(F)} = U_{S0(F0)} - \frac{1}{C_{S(F)}} \int_0^t (I_{S(F)} + I_{DS(DF)}) dt \\ I_{DS(DF)} = \begin{cases} 0 & (U_{S(F)} \geq 0) \\ U_{S(F)}/R_{DS(DF)} & (U_{S(F)} < 0) \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

$$V_C = \frac{dL_C I_{S(F)}}{dt} + \frac{dM I_T}{dt} + R_C I_{S(F)} \quad (7)$$

式中：下角标S、F分别代表慢速放电系统和快速放电系统，由基尔霍夫定律可知，两个脉冲电源系统产生的两个脉冲电流的微分方程形式相同；以慢速放电系统为例， $I_S$ 是驱动线圈中的长脉宽放电电流； $I_{DS}$ 是续流回路中的电流； $I_T$ 是管件中的感应电流； $V_C$ 是时变磁场在驱动线圈中产生的感生电动势； $U_{S0}$ 是电容器的放电电压； $L_C$ 是驱动线圈的等效电感； $M$ 是驱动线圈与管件间的互感。

本文中两套脉冲电源装置在驱动线圈中分别产生了长脉宽电流、短脉宽电流，再通过晶闸管控制电流通入时间进行时序配合<sup>[27]</sup>，产生的合成电流如图4所示。首先控制长脉宽导通的开关导通产生长脉宽电流，其时间常数  $\tau_1=4.84$  ms，在 2.10 ms 后短脉宽电流通入，其时间常数  $\tau_2=0.38$  ms，两电流并联形成合成电流。

在上述电路分析的基础上，由于本文引入了集磁器，会改变驱动线圈与管件间的互感  $M$ 。此时，令驱动线圈与管件的耦合等效电感为  $M_{C-T}$ ；驱动线圈与集磁器的耦合等效电感为  $M_{C-F}$ ；管件与集磁器之间的耦合等效电感为  $M_{T-F}$ 。将集磁器引入电磁翻边系统后时变磁场在驱动线圈中产生的感生电动势  $V_C$  为

$$V_C = \frac{dL_C I_{S(F)}}{dt} + \frac{dM_{C-F} I_F}{dt} + \frac{dM_{C-T} I_T}{dt} + R_C I_{S(F)} \quad (8)$$

两套脉冲电源系统产生的长脉宽和短脉宽脉冲电流在驱动线圈中的合成后的脉冲电流为

$$I_{\text{coil}} = I_S + I_F \quad (9)$$

## 2.2 不同结构集磁器及其位置关系

图5(a)为无集磁器工况下的吸引式电磁力小管件翻边系统二维轴对称模型图。在此基础上，本文分别引入了平板集磁器、阶梯型集磁器、梯形集磁器等较为常见的三种不同结构的集磁器置于管件和驱动线圈之间，其二维轴对称结构及其引入翻边系统后的相对位置如图5(b)、(c)、(d)所示，分别比较了上述四种工况下管件的翻边效果。

## 2.3 固体力学与材料属性

磁场和涡流相互作用形成的电磁力作用在管件上时，管件会经过弹性阶段、塑性形变阶段，其形变产生的位移可以由下列方程(10)确定。

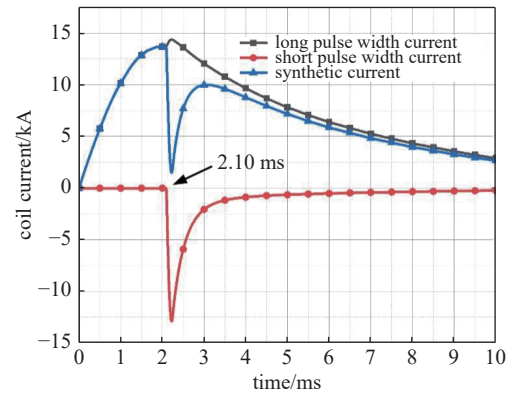


Fig. 4 Coil current  
图 4 线圈电流

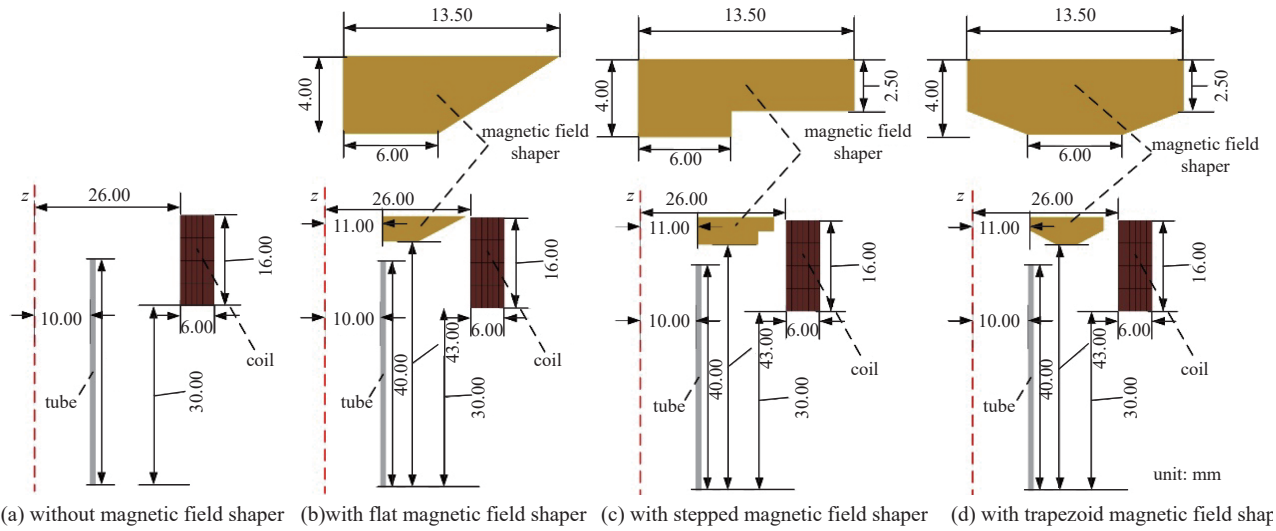


Fig. 5 2D axisymmetric model diagram of small-size tube flanging system

图 5 小管件翻边系统二维轴对称模型图

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} - \nabla \sigma = \mathbf{f} \quad (10)$$

式中： $\rho$ 为管件密度， $\mathbf{u}$ 为管件的矢量位移， $\sigma$ 为管件的应力张量，在初始状态下， $\mathbf{u} = 0$ 。此外，管件在在电磁翻边过程中，其应力和应变状态由其自身的本构方程决定。但由于管件翻边时发生形变时速度快，应变率高，在本构方程中还需考虑高应变率的影响。本文采用 Cowper-Symonds 本构方程，该模型可以较准确的模拟不用应变率下的材料自身的应力、应变关系，其表达式如下<sup>[28]</sup>

$$\sigma = \sigma_y \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^m \right] \quad (11)$$

式中： $\sigma_y$ 表示屈服应力， $\dot{\epsilon}$ 表示塑性应变速率， $C$ 为粘性参数， $m$ 为应变率硬化参数。本文管件的材质为 AA1060 铝合金， $C$ 为  $6500 \text{ s}^{-1}$ ， $m$ 为 0.25。

### 3 分 析

为验证带集磁器的吸引式电磁力小管件翻边方法的可行性，本节对管件翻边效果，电磁力分布以及磁场分布进行了一系列仿真。

#### 3.1 不同结构集磁器对翻边效果的影响

本文首先对无集磁器工况下以及分别对带三种不同结构集磁器工况下的翻边系统进行仿真，其翻边效果如图 6 所示。

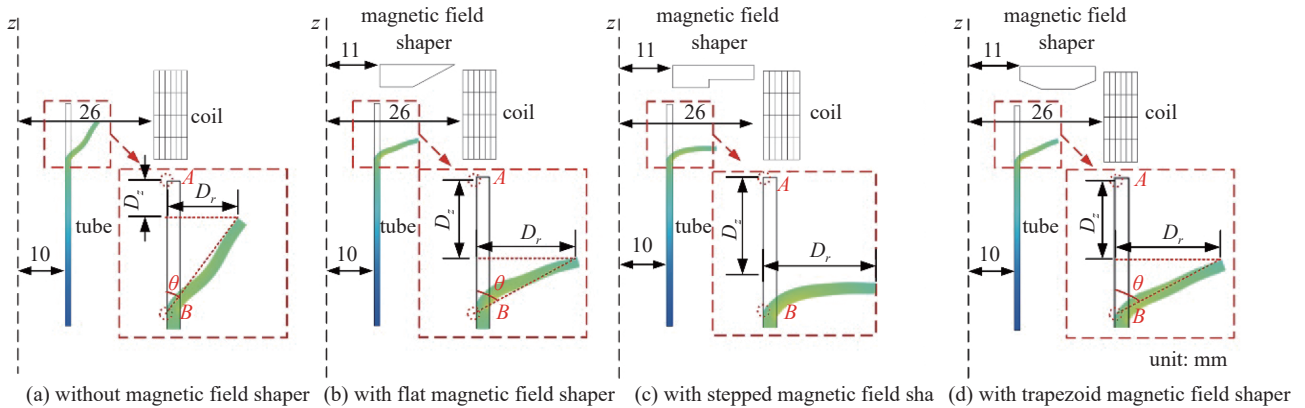


Fig. 6 Comparison of flanging effects

图 6 翻边效果对比图

由于管件翻边角度可直观地体现管件的翻边效果，所以可通过衡量翻边角度大小来确定管件翻边的优劣。本文采用文献 [13] 中的方法定义管件的翻边角度，其计算公式为

$$\begin{cases} \theta = 90^\circ, & |D_z| = 7.60 \text{ mm} \\ \theta = \arctan \frac{|D_r|}{|10 - D_z|}, & |D_z| < 7.60 \text{ mm} \\ \theta > 90^\circ, & |D_z| > 7.60 \text{ mm} \end{cases} \quad (12)$$

如图6所示,式中 $D_z$ 为A点的轴向位移, $D_r$ 为A点的径向位移,B点为管件的约束点。根据式(12)中的计算方法分别测出图6中4种不同工况下的翻边角度,其结果如表3所示。可以看出,引入集磁器后很大程度上加大了A点的位移,改善了翻边角度。并且集磁器种类差异对管件翻边程度也有影响,引入平板集磁器、阶梯型集磁器、梯形集磁器的翻边角度分别为 $64^\circ$ 、 $90^\circ$ 和 $68^\circ$ 。故阶梯型集磁器后的翻边效果最佳,为更具体的分析集磁器对吸引式电磁力小管件翻边的作用,下文就引入阶梯型集磁器工况下和无集磁器工况下进行对比,分别对其电磁力分布以及磁场分布的变化进行了分析。

表3 不同工况下的A点位移及管件翻边角度

Table 3 Displacement of point A and flange angle of tube fittings under different working conditions

working condition	$D_z/\text{mm}$	$D_r/\text{mm}$	$\theta/(\circ)$
without magnetic field shaper	2.94	5.52	38
with flat magnetic field shaper	6.27	7.88	64
with stepped magnetic field shaper	7.60	8.20	90
with trapezoid magnetic field shaper	5.85	7.65	68

### 3.2 阶梯型集磁器与无集磁器工况下翻边效果对比

阶梯型集磁器的引入很大程度上增加了管件的翻边角度,改善了翻边效果,翻边角度由 $38^\circ$ 增加到 $90^\circ$ ,是不带集磁器工况下的2.37倍。为直观反映两种模式下的翻边效果,其三维模拟变形图如图7所示,图中以颜色来区分管件端部位移的大小。

### 3.3 阶梯型集磁器对电磁力分布的影响

在电磁翻边过程中,电磁力驱动管件发生塑性形变,故电磁力的分布规律是影响电磁翻边效果的主要因素,通过对比分析不同时刻管件形变程度及受力情况,可分析出集磁器对管件电磁翻边影响的力学机理。

选取主要形变发生的典型时刻1.50、2.09、2.11、2.16、2.22及4.00 ms来分析两模型下管件端部电磁力矢量分布图。如图8所示,红色箭头代表作用在管件中心线上的电磁力,其中线的大小反映力的大小。

可以看出,两模型中的管件起初都受到排斥式电磁力作用,管件端部向内部发生轻微缩径,该阶段集磁器对管件所受的电磁力分布和其形变的影响较小。在2.10 ms后管件所受到的电磁力方向发生反向,管件端部在吸引式电磁力的作用下向外翻折,对比这一阶段时刻的电磁力矢量分布可以发现,带集磁器结构的管件端部所受到的轴向电磁力更强,其受到轴向向下的力更加明显,使得管件在形变过程中端部的轴向位移相对更大,这有益于管件的翻边。在4.00 ms后,管件受到微弱电磁力的影响,几乎不再发生形变。管件所受的电磁力可分解为轴向和径向两个分量。

为分析管件翻边过程中电磁力的变化过程,选取图6中A点作为参考点,计算出带集磁器与无集磁器两种工况下电磁力体密度大小的变化规律,如图9所示。

可以看出,在2.10 ms前的排斥式电磁力作用阶段,管件仅受到较小的径向电磁力,几乎不受到轴向电磁力的作用,且集磁器在该阶段对电磁力的影响不大。在2.10 ms后,带集磁器模型管件上的电磁力明显增大,且峰值时刻的径向电磁力体密度为 $1.24 \times 10^{10} \text{ N/m}^3$ ,轴向电磁力体密度为 $1.16 \times 10^{10} \text{ N/m}^3$ ,而无集磁器模型中峰值时刻的径向电磁力体密度为 $9.77 \times 10^9 \text{ N/m}^3$ ,轴向电磁力体密度为 $5.51 \times 10^9 \text{ N/m}^3$ 。对比两模型数据,可以得到:集磁器的引入,使峰值时刻径向电磁力体密度增大到127%,轴向电磁力体密度增大到211%。

阶梯型集磁器的应用,一方面增大了吸引式电磁力轴向与径向分量,使得管件端部的形变更加明显;另一方

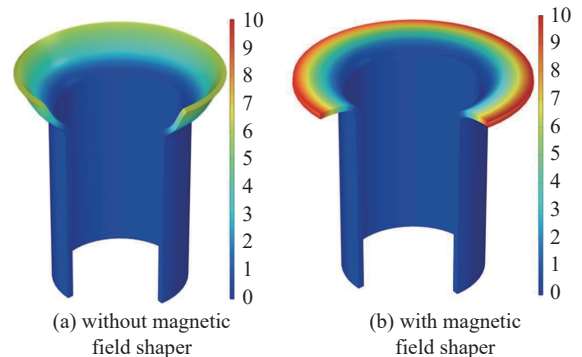


Fig. 7 3D deformation map for numerical simulation

图7 数值仿真的三维变形图

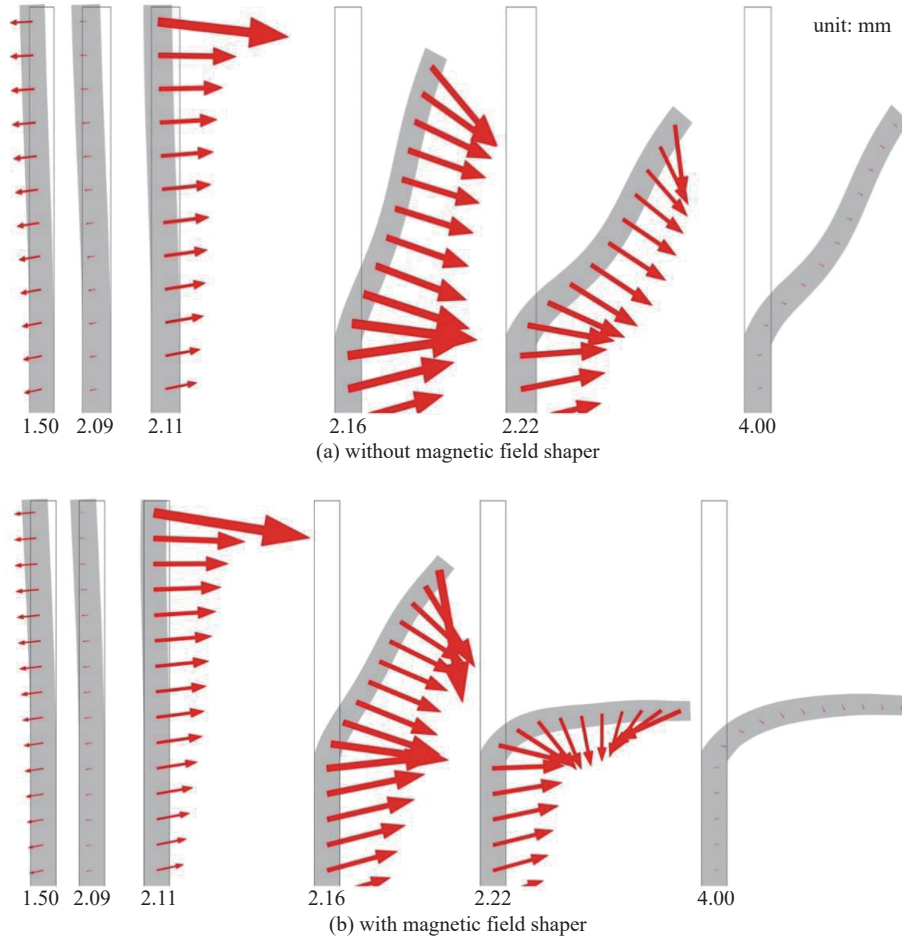


Fig. 8 Comparison diagram of electromagnetic force vector distribution at the end of tube fittings

图 8 管件端部电磁力矢量分布对比图

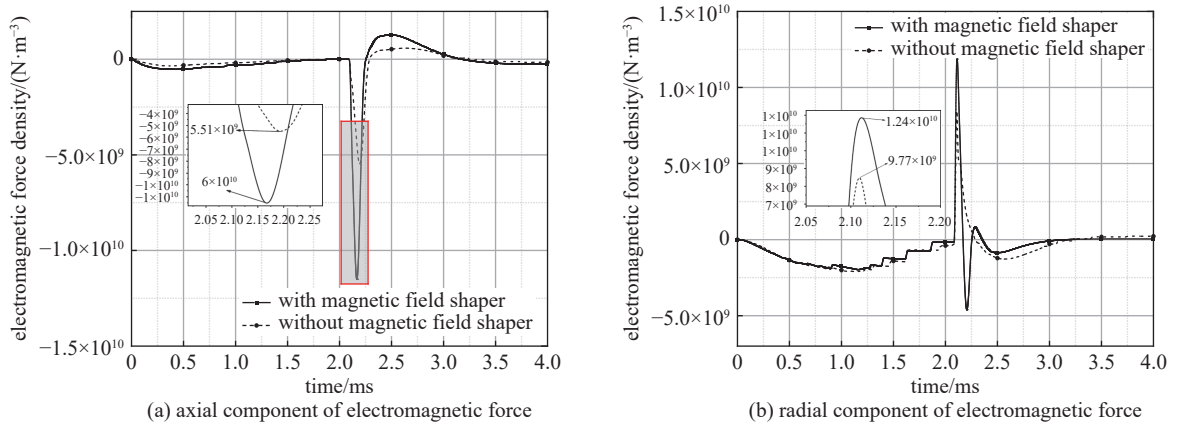


Fig. 9 Electromagnetic force density comparison chart

图 9 电磁力体密度对比图

面,正因为力的分量大小发生变化,且其轴向电磁力变化幅度更大,导致电磁力的作用方向发生改变,管件轴向向上的受力增大,这使得管件的翻边角度更大。

### 3.4 阶梯型集磁器对磁场和涡流的影响

文献 [9] 表明轴向电磁力的大小是电磁翻边效果改善的主要因素,且由上节可知,集磁器的引入对轴向电磁力的影响更大。通过式(2)可知,轴向电磁力由涡流密度环向分量和磁通密度径向分量决定,为探讨集磁器对电磁力影响的根本原因,本文计算出管件翻边过程中 A 点的磁通密度和涡流密度如图 10 所示。

图 10(a)对比了两种工况下磁通密度径向分量,可以看出,引入集磁器后,磁通密度径向分量的大小明显增加,



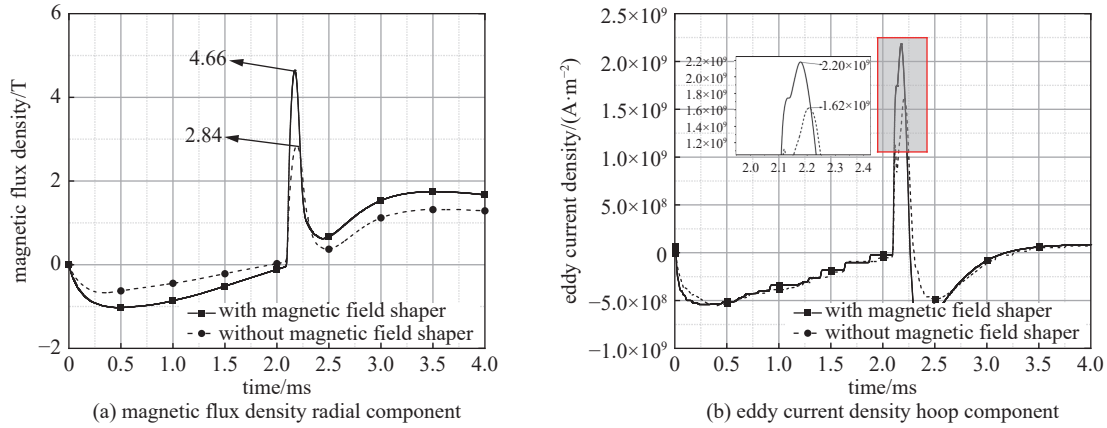


Fig. 10 Comparison of changes in magnetic flux density and eddy current density

图 10 磁通密度与涡流密度变化对比图

在 2.17 ms 时达到峰值,其大小为 4.66 T,而不带集磁器结构的模型在 2.19 ms 达到峰值,其大小为 2.84 T。

图 10(b)对比了两种工况下涡流密度的环向分量,可以看出,在排斥式电磁力作用阶段(2.10 ms 前),集磁器对管件中涡流的影响不明显。在 2.10 ms 后,两种工况下管件中的涡流都急剧上升,但带集磁器工况下的涡流变化幅度更大,在 2.17 ms 达到峰值,其大小为  $2.20 \times 10^9$  A/m<sup>2</sup>,而无集磁器工况下的涡流变化幅度较小,在 2.19 ms 达到峰值,其大小为  $1.62 \times 10^9$  A/m<sup>2</sup>。

综上,集磁器的引入,使管件端部 A 点的磁通密度径向分量增大到 164%,涡流密度的环向分量增大到 135%。而集磁器之所以能够增大磁通密度,本质是其改变了磁场的位形。而涡流增大是由于集磁器对管件产生的涡流与驱动线圈对管件产生的涡流叠加导致。磁通密度与涡流密度的共同作用,使管件端部轴向电磁力增大,从而改善了管件的翻边角度。

### 3.5 不同电压等级下阶梯型集磁器对翻边效果的影响

为进一步验证阶梯型集磁器在吸引式电磁翻边中对小管件的作用,改变脉冲电源系统中快速放电系统的初始放电电压  $U_F$  大小,保持其他参数不变,如图 11 所示,分别选取  $U_F=5.75$ 、6.00、6.25、6.50 kV,对比无集磁器工况下和带阶梯型集磁器工况下的翻边效果。并根据式(12)计算出其翻边角度,如表 4 所示。

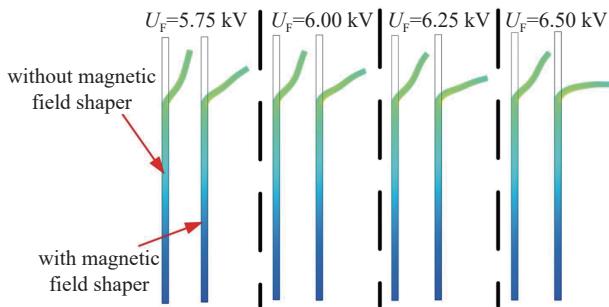


Fig. 11 Flanging effect under two working conditions at different initial discharge voltages

图 11 不同初始放电电压时两种工况下翻边效果

表 4 不同初始放电电压时两种工况下的翻边角度

Table 4 Flanging angles under two working conditions at different initial discharge voltages

initial discharge voltage/kV	flanging angle without magnetic field shaper/(°)	flanging angle with magnetic field shaper/(°)
5.75	25	51
6.00	30	56
6.25	34	64
6.50	36	73

可以看出,在不同初始放电电压下,带阶梯型集磁器工况下的翻边效果要优于无集磁器工况下的翻边效果,其翻边角度约为无集磁器工况下的 2 倍,因此引入阶梯型集磁器可以在吸引式电磁翻边中实现增强翻边效果的目的。

## 4 结论

本文提出了一种针对小管件的吸引式电磁力翻边的优化方法,该方法创新性地引入一阶梯型集磁器,通过建立了电磁-结构全耦合的有限元仿真模型,对比分析了引入集磁器后对管件翻边的影响,其结果表明:

(1)引入集磁器可以改善翻边效果且不同结构的集磁器对其翻边效果的影响不同,引入阶梯型集磁器后的翻边效果最好。



(2)引入阶梯型集磁器后,与在无集磁器工况下相比,磁通密度径向分量与涡流密度环向分量的增加显著,分别增大到164%和135%,这导致在峰值时作用在管件上轴向电磁力体密度增大到211%,径向电磁力体密度增大到127%。因此集磁器的引入,增大了电磁力的大小并改变了管件受力方向,有助于增大管件的形变量。

(3)引入阶梯型集磁器后,在不同初始放电电压下均可增强翻边角度,当初始放电电压 $U_F=6.75$  kV时翻边效果最好,翻边角度由 $38^\circ$ 增加到 $90^\circ$ ,管件的电磁翻边效果明显改善。

本文所提出的方法对电磁成形技术的工业化应用具有借鉴作用。

#### 参考文献:

- [1] 邱立, 田茜, 吴伟业, 等. 基于磁场变换器的双向加载式管件电磁翻边成形效果研究[J]. 精密成形工程, 2022, 14(3): 17-24. (Qiu Li, Tian Xi, Wu Weiye, et al. Electromagnetic flanging forming effect of bidirectional loading tube fittings based on magnetic field shaper[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14(3): 17-24)
- [2] 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 Wuming, Qiu Li, Zhang Wang, 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)
- [3] 熊奇, 唐红涛, 王沐雪, 等. 2011年以来电磁成形研究进展[J]. 高压技术, 2019, 45(4): 1171-1181. (Xiong Qi, Tang Hongtao, Wang Muxue, et al. Research progress of electromagnetic forming technique since 2011[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(4): 1171-1181)
- [4] Qiu Li, Yu Yijie, Xiong Qi, et al. Analysis of electromagnetic force and deformation behavior in electromagnetic tube expansion with concave coil based on finite element method[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28(3): 1-5.
- [5] 熊奇, 杨猛, 周丽君, 等. 双线圈吸引式板件电磁成形过程中的涡流竞争问题[J]. 电工技术学报, 2021, 36(10): 2007-2017. (Xiong Qi, Yang Meng, Zhou Lijun, et al. Eddy currents competition in electromagnetic forming process of plates by double-coil attraction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(10): 2007-2017)
- [6] 邱立, 余一杰, 聂小鹏, 等. 管件电磁胀形过程中的材料变形性能问题与电磁力加载方案[J]. 电工技术学报, 2019, 34(2): 212-218. (Qiu Li, Yu Yijie, Nie Xiaopeng, et al. Study on material deformation performance and electromagnetic force loading in electromagnetic tube expansion process[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(2): 212-218)
- [7] 杨澍. 管件磁脉冲侧翻边工艺研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 6-8. (Yang Shu. Research on technologies of tube magnetic pulse flanging[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011: 6-8)
- [8] 白雪山, 尹延广, 赵天章. 航空5A02铝合金T型三通管翻边电磁成形[J]. 塑性工程学报, 2021, 28(4): 24-29. (Bai Xueshan, Yin Yanguang, Zhao Tianzhang. Electromagnetic flanging of 5A02 aluminum alloy T-shaped tube for aviation[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28(4): 24-29)
- [9] 欧航, 安浩, 孙式进, 等. 5182铝合金椭圆孔电磁翻边数值模拟研究[J]. 精密成形工程, 2021, 13(4): 9-15. (Ou Hang, An Hao, Sun Shijin, et al. Numerical simulation study on oblique hole-flanging with 5182 aluminum alloy produced by electromagnetic forming (EMF)[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13(4): 9-15)
- [10] 李彦涛. 基于径向—轴向电磁力加载式管件电磁翻边成形研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2020: 30-37. (Li Yantao. Research on electromagnetic tube flanging with radial-axial electromagnetic force loading[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2020: 30-37)
- [11] 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 Wang, Wang Yudong, Li Yantao, 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)
- [12] Xiong Qi, Tang Hongtao, Deng Changzhen, et al. Electromagnetic attraction-based bulge forming in small tubes: fundamentals and simulations[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 28: 0600505.
- [13] Xiong Qi, Tang Hongtao, Wang Muxue, et al. Design and implementation of tube bulging by an attractive electromagnetic force[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 273: 116240.
- [14] Xiong Qi, Huang Hao, Xia Liangyu, 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(9): 4087-4094.
- [15] Xiong Qi, Gao Dun, Li Zhe, et al. Electromagnetic attraction bulging of small aluminum alloy tube based on a field shaper[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 117(1): 511-521.
- [16] Xiong Qi, Li Zhe, Tang Jianhua, et al. A flexible and economical method for electromagnetic flanging of tubes with field shapers[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 116(3/4): 1169-1177.
- [17] 熊奇, 李青山, 李哲, 等. 集磁器对电磁成形驱动线圈发热影响及机理[J]. 电工技术学报, 2020, 38(2): 285-296. (Xiong Qi, Li Qingshan, Li Zhe, et al. Influence and mechanism of field shaper on heating of electromagnetic forming drive coil[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 38(2): 285-296)
- [18] Xiong Qi, Song Xianqi, Yang Meng, et al. Future trends in magnetic source device design for magnetic targeted drug delivery system[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2021, 67(3): 261-277.
- [19] 邱立, 何晨骏, 张望. 双管件电磁约束成形的电磁分布与均匀性变形研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(11): 128-135. (Qiu Li, He Chenjun, Zhang Wang. Study on electromagnetic force distribution and axial uniform deformation of dual-tube electromagnetic constraint forming[J]. Electrical Measurement &

- Instrumentation, 2021, 58(11): 128-135)
- [20] 张重远, 芮皓然, 刘贺晨, 等. 高压单芯电缆单相接地故障护套过电压特性仿真分析[J]. 电测与仪表, 2018, 55(11): 115-119. (Zhang Zhongyuan, Rui Haoran, Liu Hechen, et al. Simulation analysis of sheath overvoltage characteristic for single-phase ground fault in high voltage single-core cable[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(11): 115-119)
- [21] 唐红涛. 基于吸引式电磁力的金属管件电磁胀形设计与实现[D]. 宜昌: 三峡大学, 2019: 16-17. (Tang Hongtao. Design and implementation of tube bulging by an attractive electromagnetic force[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2019: 16-17)
- [22] Cao Quanliang, Lai Zhipeng, Xiong Qi, et al. Electromagnetic attractive forming of sheet metals by means of a dual-frequency discharge current: design and implementation[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90(1): 309-316.
- [23] 黄浩. 基于集磁器的板材电磁成形校形研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2019: 24-25. (Huang Hao. Research on electromagnetic calibration of the sheet metal based on the field shaper[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2019: 24-25)
- [24] 黎镇浩, 曹全梁, 赖智鹏, 等. 电流丝法在电磁成形线圈电流和工作件电磁力计算中的应用[J]. 电工技术学报, 2018, 33(18): 4181-4190. (Li Zhenhao, Cao Quanliang, Lai Zhipeng, et al. Application of current filament method on the calculation of current and force in electromagnetic forming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(18): 4181-4190)
- [25] Cao Quanliang, Han Xiaotao, Lai Zhipeng, et al. Analysis and reduction of coil temperature rise in electromagnetic forming[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 225: 185-194.
- [26] Du Limeng, Xia Liangyu, Li Xian, et al. Adjustable current waveform via altering the damping coefficient: a new way to reduce Joule heating in electromagnetic forming coils[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 293: 117086.
- [27] 杨猛. 基于双线圈的吸引式板件电磁成形规律研究[D]. 宜昌: 三峡大学, 2021: 21-22. (Yang Meng. Research on electromagnetic forming law of attracting sheet metal based on dual-coil[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2021: 21-22)
- [28] Xiong Qi, Yang Meng, Liu Xin, et al. A dual-coil method for electromagnetic attraction forming of sheet metals[J]. IEEE Access, 2020, 8: 92708-92717.