

## 双向加载式管件电磁翻边中的屈曲问题

张无名<sup>1,2</sup>, 张 望<sup>1,3</sup>, 邱 立<sup>1,3</sup>

(1. 三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 国网安徽省电力有限公司太和县供电公司, 安徽 阜阳 236600;  
3. 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:** 与单线圈电磁翻边成形相比, 双向加载式电磁翻边成形的电磁耦合更加复杂, 导致系统的鲁棒性降低, 易出现屈曲问题。为此, 对屈曲现象形成的原因进行分析, 发现轴向线圈在翻边区域产生的磁通的分布差异过大是形成屈曲的主要原因。采用优化轴向线圈结构参数的方法, 建立仿真模型, 设计探究方案, 揭示轴向线圈结构参数对双向加载式电磁翻边成形的影响规律, 而后根据仿真分析结果选择表现较佳的参数组合形成新方案。将原方案与新方案的双向加载式电磁翻边成形结果进行对比, 结果表明: 轴向线圈参数优化后的双向加载式电磁翻边方案在更宽的放电范围内保持成形效果良好, 成形性能得到了改善, 拥有更强的鲁棒性。

**关键词:** 电磁翻边成形; 多线圈系统; 双向加载; 屈曲; 鲁棒性

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.08.016

**中图分类号:** TG391; TM154

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 08-0102-09

## Buckling problem on electromagnetic flanging for pipe under biaxial loading

Zhang Wuming<sup>1,2</sup>, Zhang Wang<sup>1,3</sup>, Qiu Li<sup>1,3</sup>

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Taihe County Power Supply Company, Fuyang 236600, China;

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

**Abstract:** Compared with the electromagnetic flanging of single coil, the electromagnetic coupling of electromagnetic flanging under biaxial loading is more complex, which leads to reduce robustness of the system and it's prone to buckling problems. Therefore, the reasons for the buckling phenomenon were analyzed, and it was found that the main factor for the buckling was excessive difference in the magnetic flux distribution caused by the axial coil in flanging area. Then, by adopting the method of optimizing the structural parameters for the axial coil, the simulation model was established, the exploration scheme was designed, the influence law of the structural parameters for the axial coil on the electromagnetic flanging under biaxial loading was revealed, and a new scheme was formed according to the simulation analysis results to select the better parameters combination. Furthermore, the electromagnetic flanging results of the original scheme and the new scheme under biaxial loading were compared. The results show that the electromagnetic flanging scheme under biaxial loading with optimized axial coil parameters maintains good forming effect in a wider discharge range, the forming performance is improved, and the robustness is stronger.

**Key words:** electromagnetic flanging; multi coil system; biaxial loading; buckling; robustness

电磁成形是将电磁力作为载荷的无接触、高速率成形技术, 具有表面质量好、成形极限高、工装简单、清洁高效等优点<sup>[1-4]</sup>, 在航空航天制造领域有着重要的应用。近十年来, 电磁成形技术取得了

长足进步<sup>[5]</sup>, 在磁场方面的研究重点渐渐转向改善电磁力分布、改变电磁力加载方式、拓展电磁辅助成形和提高电磁工装设备等方面<sup>[6]</sup>。

轴向与径向电磁力对电磁成形的影响差异与作用效果越来越受到关注。改善双向电磁力能够提高材料在成形过程中的塑性流动性, 从而达到更好的成形效果<sup>[7-9]</sup>。通过增设线圈以改善双向电磁力的方法被提出并应用在多种电磁成形工艺中<sup>[10-13]</sup>。为了提高管件胀形效果, 文献 [12] 增设了两个位于管件两端的线圈为胀形提供轴向压缩的电磁力, 使胀形区域的壁厚减薄被明显抑制,

收稿日期: 2021-07-26; 修订日期: 2021-10-28

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

三峡大学学位论文培优基金项目 (2021SSPY061)

作者简介: 张无名 (1997-), 男, 硕士研究生

E-mail: nameless\_zhang@qq.com

通信作者: 邱 立 (1984-), 男, 博士, 副教授

E-mail: Doctor\_QiuL@163.com

管件的胀形深度增加了约 30%。然而该三线圈系统的工装复杂,且易受到管件尺寸与制造成本的限制,于是文献[13]通过优化设计将其改良为双线圈轴向压缩系统,在保持工装简单、操作简易的同时亦能改善壁厚减薄问题,壁厚减薄量较单线圈时减小了 28.2%。但轴向压缩系统的结构精简使其对管件尺寸和其材料参数更加敏感,易出现径向电磁力不均匀分布的问题,导致工件胀形区域中部凸起变形严重<sup>[14]</sup>。为此,文献[14]提出采用凹形线圈结构来替代上述双线圈结构,降低了工装的复杂程度,并有效地解决了成形均匀性问题。

自实验证实了吸引式电磁成形的可行性<sup>[15]</sup>以来,以通过长、短脉冲电流在放电时间上配合而形成吸引电磁力为特点的双线圈吸引式电磁成形方法不断地被提出<sup>[16-17]</sup>。然而,该类方案存在涡流竞争问题,加剧了工件的涡流分布不均程度,易导致工件产生凹痕<sup>[18]</sup>。文献[18]分析了该问题,并从线圈结构参数入手,发现合适的线圈结构参数可以有效地降低涡流竞争带来的影响,最终消除凹痕。

可见,多线圈结构增加了成形系统的灵活性,增强了成形能力,但同时也带来了工装繁琐、成本较高、耦合复杂等方面的新问题,导致其鲁棒性变差。而优化线圈结构参数是改善电磁成形系统鲁棒性的有效途径<sup>[19-21]</sup>。

双向加载式管件电磁翻边方法显著地提升了管件的翻边角度,可以一次性实现 90°翻边<sup>[22]</sup>。但新线圈的引入加深了对磁通密度分布的影响,易导致电磁力分布不一致而出现屈曲现象。为此,本文介绍了该方法的原理,分析了形成屈曲的原因和过程,设计了仿真方案以探究轴向线圈结构参数对翻边成形的影响。据此,优化后的新方案在更大范围的放电电压内消除了屈曲现象,改善了原方案的成形性能,提高了系统的鲁棒性,同时也证明了研究结果的可靠性。

## 1 原理

### 1.1 双向加载式管件电磁翻边系统

双向加载式管件电磁翻边的原理如图 1 所示。其中,  $r$  为径向,  $z$  为轴向,  $F_r$  为径向洛伦兹力密度,  $F_z$  为轴向洛伦兹力密度。在金属管件端口内侧和轴向外侧的两个线圈分别被称为径向线圈和轴向线圈,每个线圈独自与一个放电系统连接。与传统单线圈(仅设有径向线圈)的电磁翻边系统相比,

增设了一个位于端口轴向外侧的线圈(轴向线圈),构成双线圈电磁翻边系统。线圈的放电回路主要由电容器、开关、二极管和续流电阻等构成。线圈放置在翻边区域附近,打开放电开关,导线中将产生脉冲电流。继而,电能转化为磁能,形成脉冲磁场,在工件中会激发感应涡流,产生与原磁场方向相反的磁场。管件材料被电磁力推动,实现翻边变形。

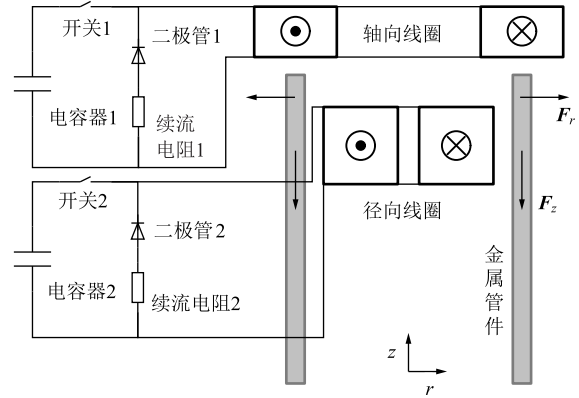


图 1 系统原理图

Fig. 1 Principle diagram of system

翻边过程中的电磁力即为洛伦兹力。有:

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

式中:  $\mathbf{F}$  为洛伦兹力密度;  $\mathbf{J}$  为感应涡流密度;  $\mathbf{B}$  为磁场强度。

可进一步表示为:

$$F_r = J \times B_z \quad (2)$$

$$F_z = J \times B_r \quad (3)$$

式中:  $B_z$  为轴向磁通密度;  $B_r$  为径向磁通密度。

由于径向线圈与轴向线圈分别为  $F_r$  与  $F_z$  的主要贡献者,故可以通过两个线圈的放电电压去控制  $F_r$  与  $F_z$  的大小与比例,以提升电磁翻边的角度与系统灵活性<sup>[23]</sup>。

### 1.2 屈曲现象的形成原因分析

在式(2)与式(3)中,  $J$  相同,影响  $F_r$  与  $F_z$  的主要因素为  $B_r$  与  $B_z$ 。而管件处的  $B_r$  与  $B_z$  来自于线圈,有:

$$B_r = B_{rr} + B_{rz} \quad (4)$$

$$B_z = B_{zr} + B_{zz} \quad (5)$$

式中:  $B_{rr}$  和  $B_{rz}$  分别为径向线圈和轴向线圈产生的径向磁通密度;  $B_{zr}$  和  $B_{zz}$  分别为径向线圈和轴向线圈产生的轴向磁通密度。

由于结构位置、高速变形等原因,使  $B_r$  或  $B_z$  的径、轴向分量在管壁上的分布形势存在差异,而

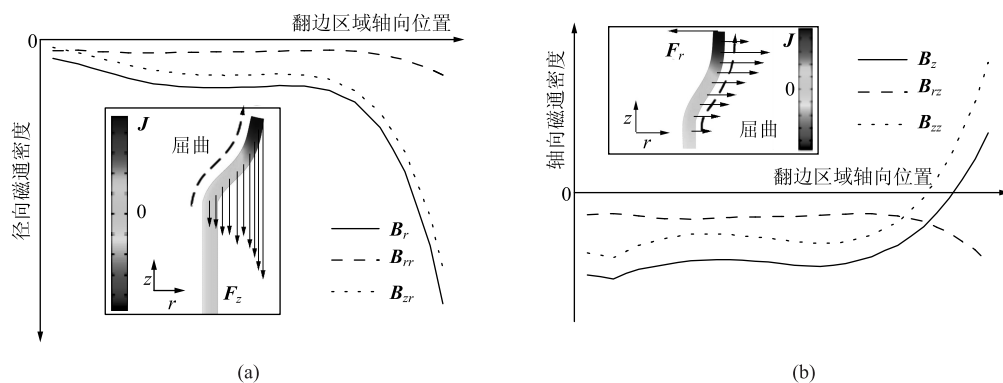


图 2 翻边区域屈曲时的电磁情况示意图

(a)  $B_r$  与  $F_z$  沿轴向的分布情况 (b)  $B_z$  与  $F_r$  沿轴向的分布情况

Fig. 2 Schematic diagrams of electromagnetic conditions during buckling for flanging area

(a) Axial distribution conditions of  $B_r$  and  $F_z$  (b) Axial distribution conditions of  $B_z$  and  $F_r$ 

当差异过大时,会造成严重的电磁力分布不均,导致管壁发生屈曲。

由于线圈放电极快,加载主要在变形初期完成,此时屈曲现象已经开始显现,故主要分析该时期翻边区域的电磁情况,如图 2 所示。因为管件翻边区域整体较靠近径向线圈,所以翻边区域材料轴向位置的  $B_r$  和  $B_z$  分布较均匀;然而,轴向线圈位于管件端口外侧,导致翻边区域各处材料位置与轴向线圈的距离差异明显,又由于管壁变形,翻边区域材料轴向位置的  $B_r$  和  $B_z$  分布十分不均。并且,  $J$  随材料轴向位置的快速变化进一步放大了  $B$  的分布差

异的影响。最终使材料受到的  $F_r$  和  $F_z$  沿翻边区域轴向位置的分布差异巨大,造成材料位移不均匀,形成屈曲。

## 2 仿真方案

### 2.1 仿真方法

本文使用 Comsol Multiphysics 有限元仿真软件进行建模与仿真分析。仿真采用电路-磁场-固体力学模块耦合的方法对电磁翻边进行瞬态分析<sup>[7,14,16]</sup>,其算法流程如图 3 所示。其中,  $t$  为求解时间,  $\Delta t$  为求解时间步进。

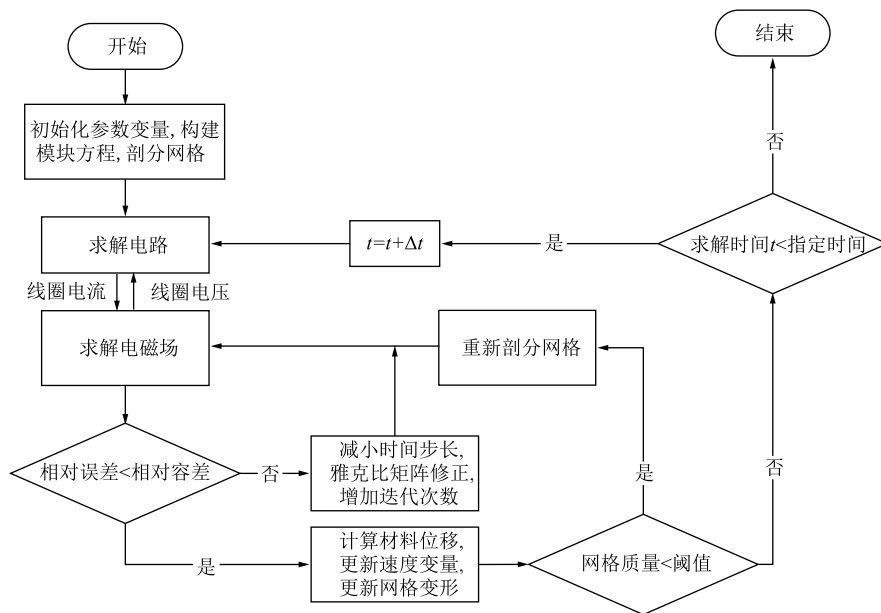


图 3 算法流程图

Fig. 3 Flow chart of algorithm

### 2.2 系统结构与参数

文献 [22] 中的方案在有轴向线圈时的翻边角

度为无轴向线圈时的 3 倍,效果明显,所以参考其系统结构和参数进行方案设计,以确保仿真结果的

可观测性良好。成形系统的二维轴对称几何结构如图 4（已省略远场空气域）所示。其中，有向线段  $l$  的长度为 14 mm（为避免边缘效应干扰，线段端点未取在翻边成形区域的边界上），位于翻边成形区域中央，以便在分析时描述管壁翻边成形区域中轴线处的材料位置。单匝线圈截面的规格为 4 mm×2 mm，横向匝间距为 0.3 mm，轴向匝间距为 0.4 mm，实际线圈匝间填充有加固材料，但因其有用的属性参数与空气相同，故用空气代替。材料参数如表 1 所示。

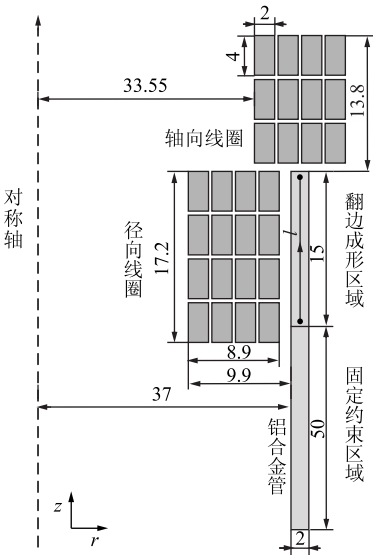


图 4 模型几何结构  
Fig. 4 Geometry structure of model

表 1 模型材料参数

Table 1 Model material parameters		
材料	参数	数值
空气	相对磁导率	1
	相对介电常数	1
	电导率/(s·m <sup>-1</sup> )	0
铜线圈	相对磁导率	1
	相对介电常数	1
	电导率/(s·m <sup>-1</sup> )	5.998×10 <sup>7</sup>
铝合金	相对磁导率	1
	相对介电常数	1
	电导率/(s·m <sup>-1</sup> )	3.6×10 <sup>7</sup>
	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	2750
	杨氏模量/Pa	6.8×10 <sup>10</sup>
	泊松比	0.33

使用两个放电系统分别对径、轴线圈放电，调节放电电压并进行仿真实验，选择刚好能够实现 90°翻边的放电电压作为常用的放电电压。除两个系

统的放电电压不同外，其他电路参数均相同，如表 2 所示。

表 2 电路参数  
Table 2 Circuit parameters

参数	数值
径向线圈放电电压/kV	4.2
轴向线圈放电电压/kV	5.2
电容值/μF	160
导线电阻/Ω	0.04
导线电感/μH	20
续流电阻/Ω	0.2

电磁成形为高速率应变过程，而通常的拉伸实验测得的是材料准静态变形（速度很慢）时的应力-应变曲线，所以有学者提出通过式（6）<sup>[24]</sup>将其修正为更加适合高速率的情况。

$$\sigma = \sigma_{qs} \left[ 1 + \left( \frac{\varepsilon_p}{P} \right)^m \right]$$

(6)

式中： $\sigma$  为修正后的应力，MPa； $\sigma_{qs}$  为准静态应力，为 181ε<sup>0.08</sup> MPa； $\varepsilon$  为塑性应变； $\varepsilon_p$  为塑性应变率； $P$ 、 $m$  为 Cowper-Symonds 本构模型中的常量参数，对于铝合金材料，参数  $P$  取 6500 s<sup>-1</sup>，参数  $m$  取 0.25。

3 轴向线圈结构参数对双向加载式电磁翻边成形的影响

原方案（图 4）中的轴向线圈截面径向有 3 匝，轴向有 4 匝，内半径为 33.55 mm，外半径为 42.45 mm，高度为 12.8 mm。通过改变线圈截面的径向或轴向匝数，分别单独调整线圈的内半径、外半径或高度，分析内径、外径和高度的变化对磁通密度分布和材料位移的影响。

3.1 内径对双向加载式电磁翻边的影响

在轴向线圈电流的峰值时刻，随着内半径的改变，线段  $l$  上的磁通密度分布情况如图 5 所示。随着线圈内半径的减小， $B_r$  先增大后减小，其分布的均匀程度先降低后提高。在内半径为 33.55 mm 时， $B_r$  分布最不均匀。 $B_z$  随内径的减小在轴向负向减小、正向增大，其分布均匀程度也随之减小。可见， $B_r$  的分布均匀性比  $B_z$  的分布均匀性对内径变化更加敏感。

不同内半径的情况下，线段  $l$  上的材料位移分布情况如图 6 所示。随着内半径的减小，材料的径向位移先增大，而后在内半径小于 35.85 mm 时保持稳定。曲线均较为平直，只在内半径小至 26.65 mm

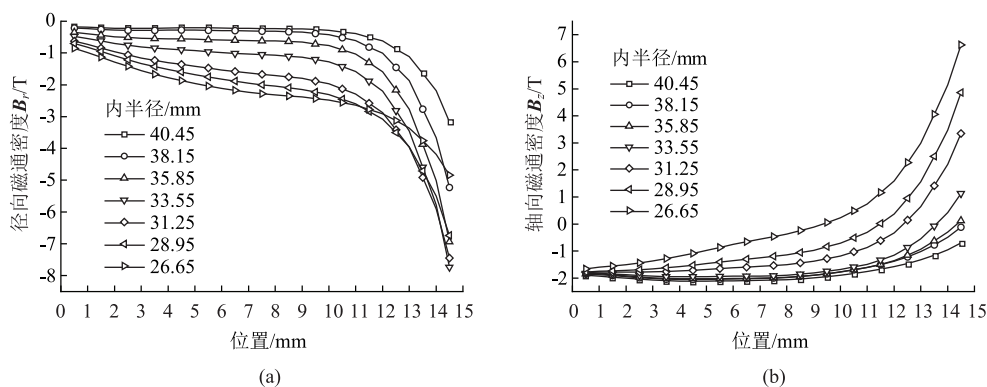


图 5 线圈内半径对磁通密度分布的影响

(a) 径向 (b) 轴向

Fig. 5 Influences of coil inner radius on magnetic flux density distribution

(a) Radial direction (b) Axial direction

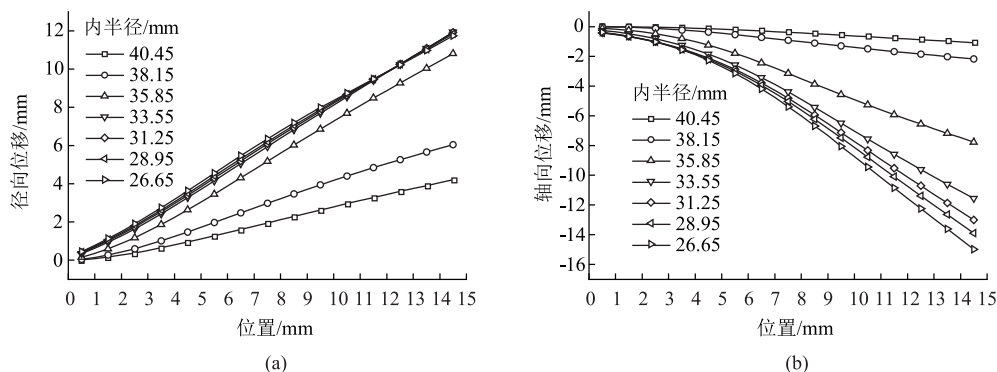


图 6 线圈内半径对材料位移的影响

(a) 径向 (b) 轴向

Fig. 6 Influences of coil inner radius on material displacement

(a) Radial direction (b) Axial direction

时稍有扭曲。轴向位移随着内半径的减小而增大, 且在内半径为 35.85 mm 附近时变化较快; 在小于 33.55 mm 时, 曲线平直部分快速减短, 但仍不失线性。说明内径变化主要影响材料的位移大小, 对其变形平滑程度的影响较小。

### 3.2 外径对双向加载式电磁翻边的影响

在轴向线圈电流的峰值时刻, 随着线圈外半径的改变, 线段  $l$  上的磁通密度分布情况如图 7 所示。 $B_r$  随着外半径的增加而增大, 分布均匀性逐渐变差; 在外半径到达 40.15 mm 后, 变化减缓, 分布

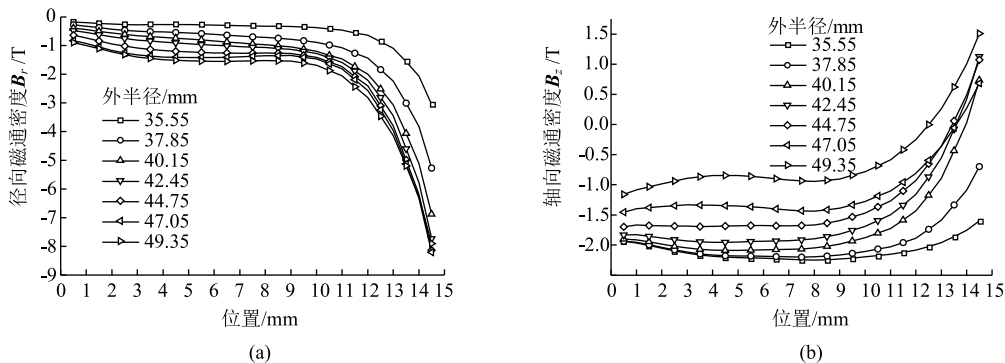


图 7 线圈外半径对磁通密度分布的影响

(a) 径向 (b) 轴向

Fig. 7 Influences of coil outer radius on magnetic flux density distribution

(a) Radial direction (b) Axial direction



均匀性开始稳定。 $B_z$  随着外半径的增加在轴向负向越来越小、在轴向正向越来越大,但其分布均匀程度先降低后有所改善;在外半径为 40.15 ~ 42.45 mm 附近时,其分布均匀性最差。可见,外径变化可以同时影响  $B_r$  和  $B_z$  的分布均匀性,并且能够显著影响  $B_z$  的大小。

不同外半径情况下,线段  $l$  上的材料位移分布情

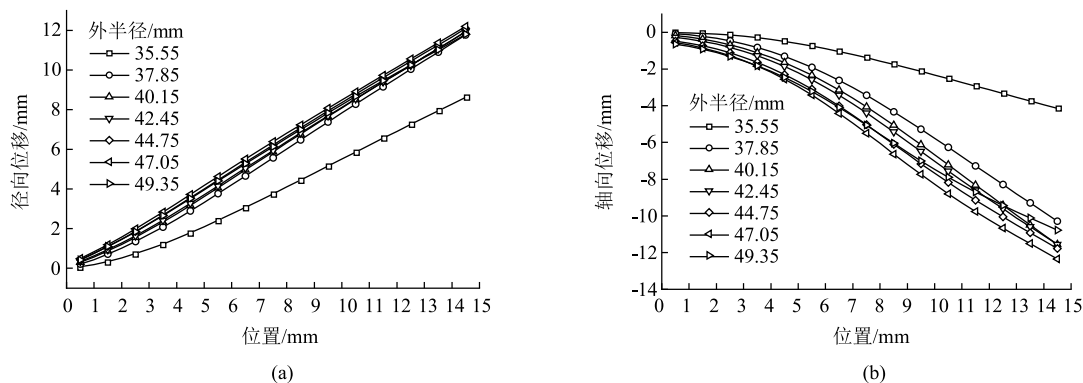


图8 线圈外半径对材料位移的影响

(a) 径向 (b) 轴向

Fig. 8 Influences of coil outer radius on material displacement

(a) Radial direction (b) Axial direction

### 3.3 高度对双向加载式电磁翻边的影响

在轴向线圈电流的峰值时刻,随着线圈高度的改变,线段  $l$  上的磁通密度分布情况如图 9 所示。 $B_r$  随着高度的增加先增大后减小,其均匀程度先降

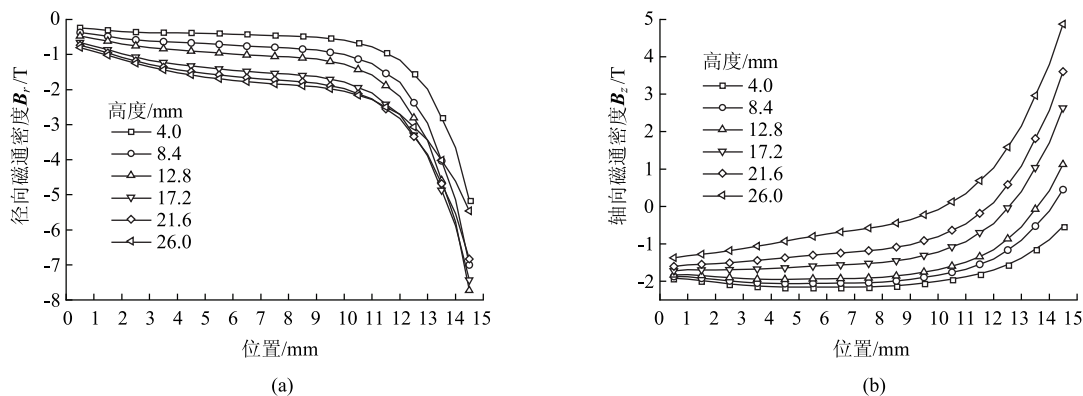


图9 线圈高度对磁通密度分布的影响

(a) 径向 (b) 轴向

Fig. 9 Influences of coil height on magnetic flux density distribution

(a) Radial direction (b) Axial direction

不同高度情况下,线段  $l$  上的材料位移分布情况如图 10 所示。随着高度的增大,材料的径、轴向位移增加迅速,但很快便稳定在极值附近,在高度为 17.2 mm 时达到最大值;径、轴向位移的曲线均较为平直。说明高度主要影响位移大小,对变形平滑程度的影响很小。

况如图 8 所示。随着外半径的增大,材料的径、轴向位移增加迅速并在外半径到达 40.15 mm 后开始稳定。但是,除外半径为 49.35 mm 时的径向位移曲线稍扭曲外,其余径向位移曲线均比较平直,而轴向位移曲线自外半径大于 40.15 mm 后逐渐失去线性。说明材料位移大小对外径变化十分敏感,并且材料的轴向位移线性比径向位移线性更易受到外径的影响。

低后提高,在高度为 12.8 mm 附近达到极值。 $B_z$  随着高度的增加在轴向负向不断减小、正向不断增大,其分布均匀性不断降低。可见高度变化对磁通密度的影响与内径相似,但内径变化的影响更深。

### 3.4 优化前、后方案的成形性能对比

结合上文的分析,按照以下 3 个标准选择最佳参数值:(1) 保证较强的翻边能力(较大位移);(2) 材料变形较平滑;(3) 取值适中,以求稳定。于是,得到新的轴向线圈的结构参数为:内半径为 33.55 mm,外半径为 40.15 mm,高度为

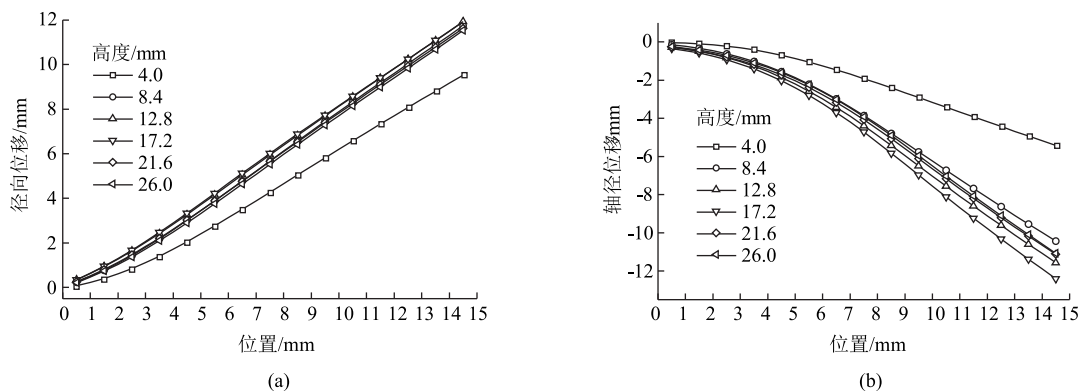


图 10 线圈高度对材料位移的影响

(a) 径向 (b) 轴向

Fig. 10 Influences of coil height on material displacement

(a) Radial direction (b) Axial direction

17.2 mm, 以此替代原方案中的轴向线圈, 形成新的翻边方案。

改变轴向线圈的放电电压, 原方案与新方案的材料位移变化如图 11 所示。采用原方案时, 在轴向线圈的放电电压到达 5.5 kV 之后, 材料的径向位移曲线开始出现扭曲, 并随着电压的增高变得更加明

显; 材料轴向位移的均匀程度有些许改善。在新方案中, 轴向放电电压达到 5.5 kV 后, 材料径向位移曲线的大部分依旧保持较平直; 材料轴向位移的均匀性受影响很小。图 12 对比了两种方案的翻边效果, 可见相同放电电压时, 虽然原方案更能促进材料的轴向位移, 其翻边角度更大, 但是翻边

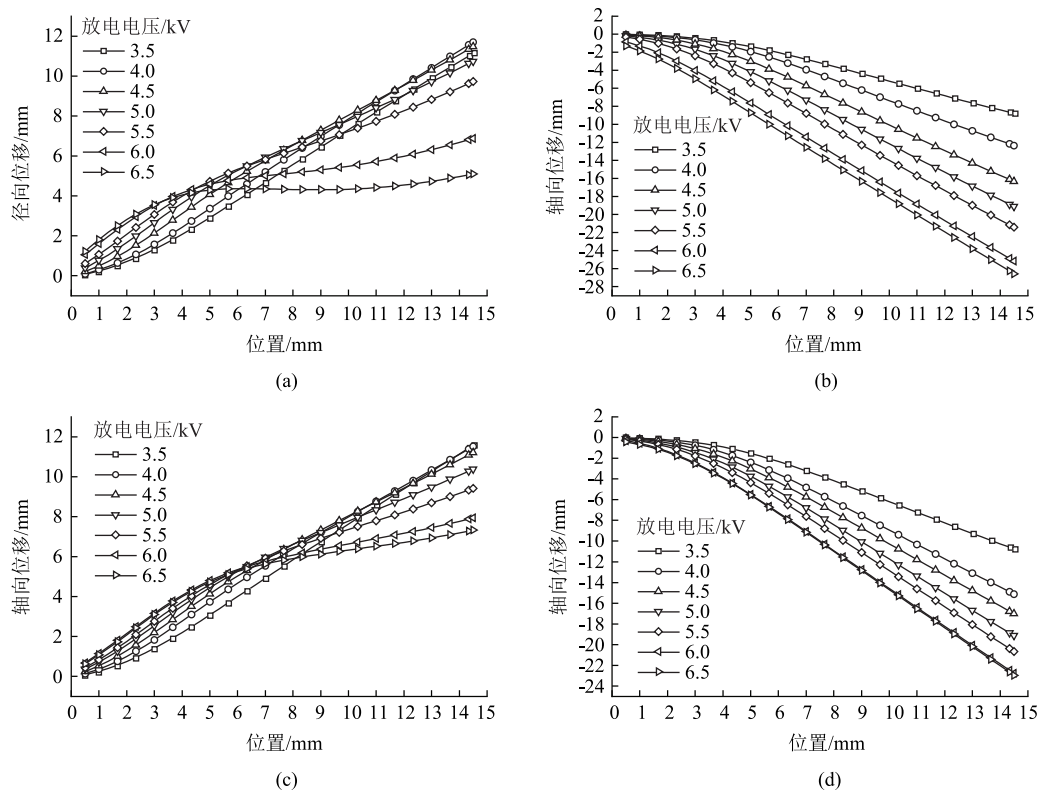


图 11 轴向线圈放电电压对材料位移的影响

(a) 原方案材料的径向位移 (b) 原方案材料的轴向位移 (c) 新方案材料的径向位移 (d) 新方案材料的轴向位移

Fig. 11 Influences of discharge voltage for axial coil on material displacement

(a) Radial displacement of material in original scheme (b) Axial displacement of material in original scheme

(c) Radial displacement of material in new scheme (d) Axial displacement of material in new scheme

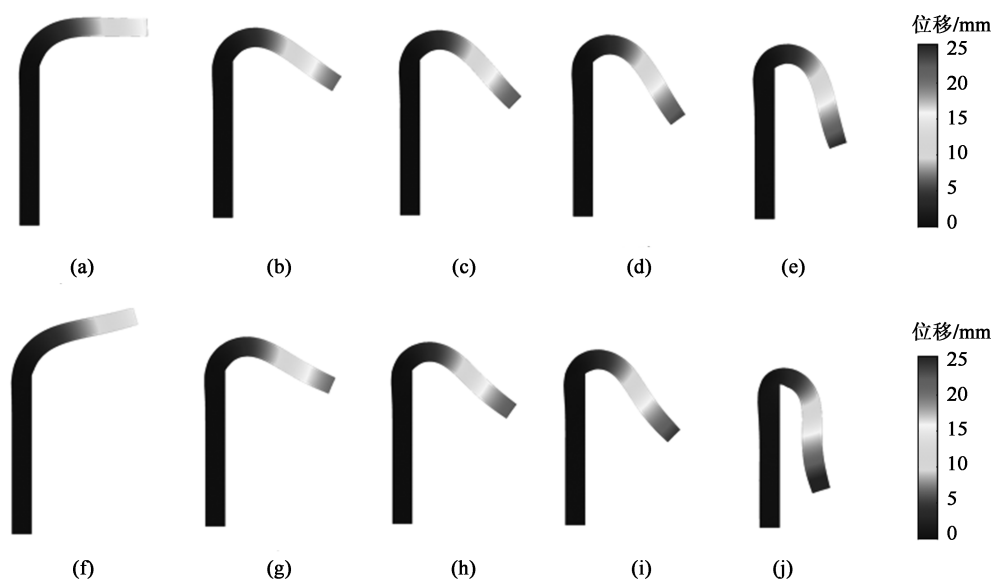


图 12 不同轴向线圈放电电压新方案与原方案的翻边效果对比

(a) 新方案, 3.5 kV (b) 新方案, 4.0 kV (c) 新方案, 5.0 kV (d) 新方案, 5.5 kV (e) 新方案, 6.5 kV

(f) 原方案, 3.5 kV (g) 原方案, 4.0 kV (h) 原方案, 5.0 kV (i) 原方案, 5.5 kV (j) 原方案, 6.5 kV

Fig. 12 Comparison of flanging effect between new scheme and original scheme under different discharge voltages for axial coil

(a) New scheme, 3.5 kV (b) New scheme, 4.0 kV (c) New scheme, 5.0 kV (d) New scheme, 5.5 kV

(e) New scheme, 6.5 kV (f) Original scheme, 3.5 kV (g) Original scheme, 4.0 kV (h) Original scheme, 5.0 kV

(i) Original scheme, 5.5 kV (j) Original scheme, 6.5 kV

区域出现严重屈曲现象;而新方案在兼顾翻边能力的同时,消除了屈曲现象,改善了系统的成形性能,使其在更宽的放电范围内成形良好,提高了系统的鲁棒性。

## 4 结论

(1) 轴向线圈内径的减小使材料的位移增大,而对成形均匀性的影响有限。

(2) 轴向线圈外径显著影响材料的径、轴向位移和轴向位移分布均匀性,随其减小更易抑制屈曲现象。

(3) 随着轴向线圈高度的增加,材料位移增大,而轴向线圈高度对成形均匀性的影响很小。

(4) 合适的轴向线圈参数可以有效地改善翻边系统的成形性能,提高系统的鲁棒性。

### 参考文献:

- [1] 李春峰,于海平. 电磁成形技术理论研究进展 [J]. 塑性工程学报, 2005, 12 (5): 1-7.  
Li C F, Yu H P. State of the art of study of electromagnetic forming theory [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2005, 12 (5): 1-7.
- [2] 张文忠,陈浩,董占国,等. 基于磁脉冲技术的铝合金板材圆

孔翻边工艺研究 [J]. 航天制造技术, 2009, (4): 5-7, 16.  
Zhang W Z, Chen H, Dong Z G, et al. Research on formability of aluminum alloy flanged hole by EMF [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2009, (4): 5-7, 16.

- [3] Yu H P, Zheng Q L, Wang S L, et al. The deformation mechanism of circular hole flanging by magnetic pulse forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 257: 54-64.
- [4] Yu H P, Jiang H W, Li C F. Investigations on flanging of aluminum alloy tube under pulsed magnetic force [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2012, (S1): 438-441.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Lai Z P, Cao Q L, Han X T, et al. Radial-axial force controlled electromagnetic sheet deep drawing: Electromagnetic analysis [J]. Procedia Engineering, 2014, 81: 2505-2511.
- [8] Cui X H, Mo J H, Li J J, et al. Tube bulging process using multi-directional magnetic pressure [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 90 (5): 2075-



- 2082.
- [9] 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 Technology, 2017, 245: 193-206.
- [10] Lai Z P, Cao Q L, Zhang B, et al. Radial Lorentz force augmented deep drawing for large drawing ratio using a novel dual-coil electromagnetic forming system [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 222: 13-20.
- [11] Zhang X, Ouyang S W, Li X X, et al. Effect of pulse width of middle-coil current on deformation behavior in electromagnetic tube forming under two-stage coils system [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 110 (5-6): 1139-1152.
- [12] Zhang X, Cao Q L, Han X T, et al. Application of triple-coil system for improving deformation depth of tube in electromagnetic forming [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26 (4): 1-4.
- [13] 邱立, 杨新森, 常鹏, 等. 双线圈轴向压缩式管件电磁胀形电磁力分布规律与管件成形性能研究 [J]. 电工技术学报, 2019, 34 (14): 2855-2862.
- Qiu L, Yang X S, Chang P, et al. Electromagnetic force distribution and forming performance in electromagnetic tube expansion process with two coils [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34 (14): 2855-2862.
- [14] 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 L, Yu Y J, Nie X P, 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.
- [15] Cao Q L, Lai Z P, Xiong Q, 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 (1-4): 309-316.
- [16] 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 (9-12): 4087-4094.
- [17] Ouyang S W, Li X X, Li C X, et al. Investigation of the electromagnetic attractive forming utilizing a dual-coil system for tube bulging [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 49: 102-115.
- [18] 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 Q, Yang M, Zhou L J, 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.
- [19] Yu H P, Chen J, Liu W, et al. Electromagnetic forming of aluminum circular tubes into square tubes: Experiment and numerical simulation [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 31: 613-623.
- [20] Liu N, Lai Z P, Cao Q L, et al. Effects of the inner/outer diameters of flat spiral coils on electromagnetic sheet metal formation [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 109 (5-6): 1541-1551.
- [21] Huang L T, Zhang J, Zou J H, et al. Effect of equivalent radius of drive coil on forming depth in electromagnetic sheet free bulging [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2019, 61 (3): 377-389.
- [22] 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.
- [23] 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.
- Li Y T. Research on Electromagnetic Tube Flanging with Radial-axial Electromagnetic Force Loading [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2020.
- [24] Mamalis A G, Manolacos D E, Kladas A G, et al. Electromagnetic forming tools and processing conditions: Numerical simulation [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2006, 21 (4): 411-423.

### 警惕不法网站，保障投稿安全

近期，本刊接到多名作者投诉，网络上出现冒充《锻压技术》杂志官方网站的伪网站，如 [www.dyjszz.cn](http://www.dyjszz.cn)，这些网站盗用本杂志官网内容及相关行业信息，误导和欺骗广大投稿作者，骗取文章版面费、套取作者文章及个人信息，侵犯了广大作者的切身利益。

特此声明，本刊唯一官方网站为 [www.fstjournal.net](http://www.fstjournal.net)，投稿方式为网站注册登录投稿，不接受邮箱投稿。请作者投稿时务必认准杂志官方网站，谨防受骗。

本刊郑重警告伪网站相关人员尽快停止违法行为，否则将严肃对待，并将运用一切法律手段维护本刊的权利。

请广大读者协助本刊监督网络上的不法行为，一经发现，请联系本刊，本刊将及时处理，共同努力营造良好的期刊网络氛围。

《锻压技术》杂志联系方式：[fst@263.net](mailto:fst@263.net)；010-62920652。

《锻压技术》编辑部