

基于磁场变换器的管件电磁压缩电磁力分布及变形均匀性分析

邱立^{1,2}, 何琴¹, 刘洪池¹

(1. 三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002;

2. 华中科技大学 先进电磁工程与技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 针对传统管件在电磁压缩过程中变形不均匀的问题, 提出了基于磁场变换器的管件电磁压缩新方法, 通过磁场变换器改变传统单线圈的电磁力分布, 进而改善管件的变形均匀性。建立管件电磁压缩的电磁-结构耦合模型, 探究磁场变换器的几何参数对电磁力的影响, 并对比分析了传统单线圈与新方法在电磁力分布和变形均匀性方面的优劣。结果表明: 磁场变换器的引入能够改变电磁力的峰值位置, 其结构参数能够对电磁力的大小和方向进行调控, 管件的变形均匀性较传统线圈提高了4倍。因此, 基于磁场变换器的加载方式能够有效解决管件电磁压缩过程中的变形均匀性问题, 促进了电磁成形的发展。

关键词: 电磁成形; 磁场变换器; 电磁压缩; 电磁力; 变形均匀性

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.05.032

中图分类号: TM154 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2023) 05-0245-09

Analysis on electromagnetic force distribution and deformation uniformity for tube electromagnetic compression based on magnetic field converter

Qiu Li^{1,2}, He Qin¹, Liu Hongchi¹

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

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: For the problem of non-uniform deformation of traditional tube in the process of electromagnetic compression, a new electromagnetic compression method of tube based on magnetic field converter was proposed, which through the magnetic field converter to change the electromagnetic force distribution of the traditional single coil, and then improved the deformation uniformity of tube. The electromagnetic-structure coupling model of electromagnetic compression for tube was established, the influences of the geometric parameters of magnetic field converter on the electromagnetic force were studied, and the advantages and disadvantages of the traditional single coil and the new method in electromagnetic force distribution and deformation uniformity were compared and analyzed. The results show that the magnetic field converter can change the peak position of electromagnetic force, its structure parameters can control the magnitude and direction of electromagnetic force, and the deformation uniformity of tube is four times higher than that of the traditional coil. Therefore, the loading method based on magnetic field converter can effectively solve the problem of deformation uniformity of tube during electromagnetic compression process, and promote the development of electromagnetic forming.

Key words: electromagnetic forming; magnetic field converter; electromagnetic compression; electromagnetic force; deformation uniformity

电磁成形技术因使用脉冲电磁力来加工金属工件而被广泛研究^[1-3], 其脉冲电磁力来源于电磁成

形中的驱动线圈^[4-6]。由于脉冲电磁力属于非接触力, 能够保证工件表面产生较好的成形效果, 且研究表明电磁成形技术能够极大地提高镁铝等材料的成形极限, 因此, 电磁成形技术在工业发展领域具有良好的应用前景^[7-8]。

管件的电磁成形分为电磁压缩和电磁胀形^[9-11], 由于径向电磁力的不均匀分布, 电磁成形过程中会出现轴向变形不均匀的现象^[12-13]。传统方式下, 往

收稿日期: 2021-11-26; 修订日期: 2022-02-16

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: 刘洪池 (1997-), 女, 硕士研究生

E-mail: 844270214@qq.com

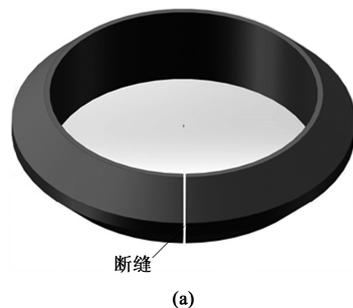
往通过改变驱动线圈的结构参数来改善工件的成形效果^[14-15]。文献 [16] 提出了采用凹型驱动线圈对管件进行加载, 研究表明, 凹型驱动线圈提供的电磁力能够使管件轴向变形的均匀性得到大幅提高, 但存在工装结果复杂等问题。文献 [17] 提出了使用电磁渐进成形技术来提高管件轴向变形均匀性, 具体操作是依次把线圈放置在管件底部、中部、顶部进行放电, 然后研究不同的重叠率在管件电磁渐进成形过程中对变形均匀性的影响, 结果表明, 驱动线圈重叠率存在最优解, 可以使管件变形的均匀效果最佳。文献 [18] 提出了使用双线圈实现管件均匀压缩, 其在管件外部放置对称双线圈, 通过削弱管件中间区域的电磁力来达到均匀压缩的效果。由于管件的电磁压缩过程会出现起皱现象, 文献 [19] 对钢管的电磁压缩进行了模拟与测试, 结果显示, 当外径压缩率小于 5% 时, 管件的起皱可以忽略不计。

综上所述可知, 选择不同结构设计的驱动线圈能够实现工件的良好成形效果, 但驱动线圈的绕线比较困难且绕制成本高。文献 [20] 提出了利用磁场变换器来改变电磁力的分布, 可以在不改变线圈的前提下改善管件轴向胀形不均匀的情况。基于此, 本文提出了基于磁场变换器的管件电磁压缩新方法, 并建立了基于传统单线圈与磁场变换器共同作用的加载模型。在阐述其基本原理的基础上, 建立了电磁-结构耦合有限元模型, 研究了磁场变换器的内、外壁高度对管件径向电磁力和变形行为的影响, 并进一步对比分析了传统单线圈与新方法的优劣性, 结果表明新方法能够达到良好的变形效果, 且工装结构简单。

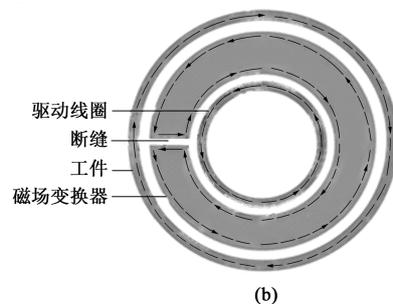
1 管件电磁成形基本原理与磁场变换器设计

1.1 管件电磁成形基本原理

图1为管件电磁压缩的原理图。在电磁成形系



(a)



(b)

图 2 传统磁场变换器的结构图 (a) 和原理图 (b)

Fig. 2 Structure diagram (a) and principle diagram (b) of traditional magnetic field converter

统中, 当驱动线圈流过脉冲电流时, 驱动线圈空间会产生脉冲磁场, 同时在管件表面产生感应脉冲涡流, 这种感应涡流在空间产生感应磁场。空间放电时, 管件内部及线圈外部空间的放电磁场和感应磁场方向相反, 相互抵消; 而管件与线圈之间的空间区域的放电磁场与感应磁场方向相同, 相互叠加, 加强的磁场产生脉冲磁场力, 磁场方向绕线圈呈环形分布。这使得管件外表面受到很强的磁场压力, 当管件受力达到屈服点时, 管件会发生电磁压缩的现象。当线圈被放置在管件内部时, 管件内表面的感应电流方向与线圈内放电电流方向相反, 因而管件表面会受到沿径向向外的磁场力, 管件会发生胀形的现象。

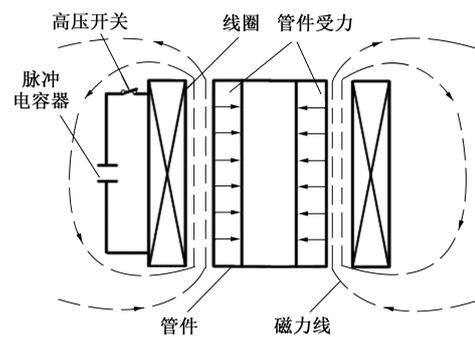


图 1 管件电磁压缩原理图

Fig. 1 Principle diagram of tube electromagnetic compression

1.2 传统磁场变换器基本原理

图 2a 为传统磁场变换器的结构图, 图 2b 为传统磁场变换器的原理图。电容电源给线圈放电, 会在回路中产生逆时针脉冲电流, 根据磁感应定律, 磁场变换器内壁会产生顺时针的感应涡流。由于磁场变换器存在一小段的断缝, 感应电流只能沿磁场变换器表面形成回路, 使外壁上的感应电流为逆时针方向流动。由于磁场变换器的外壁高度远远小于其内壁高度, 且整个回路的总电流大小不变, 因此, 其外壁的磁通密度高于内壁, 致使外壁的电磁力更集中, 能够有效改变局部电磁力。

1.3 基于磁场变换器的管件电磁压缩新方法

图 3a 为传统单线圈系统管件电磁压缩的仿真模型，驱动线圈被放置在管件的外部，管件高度大于线圈高度，由于端部效应，线圈中部的磁感应强度大于两端，使得管件中间区域受到的电磁力更大，导致管件的轴向变形不均匀。

为解决因径向电磁力不均匀导致的管件变形质量差的问题，本文提出了基于双磁场变换器管件电磁压缩的新方法，通过增加管件端部的变形量来提高管件的成形质量，其二维轴对称模型如图 3b 所示。基本思想为：在传统螺旋管线圈电磁压缩的基础上，引入

两个对称的磁场变换器，将其放置于驱动线圈和管件之间。就单个磁场变换器而言，由于磁场变换器的外壁高度大于内壁高度，而流过整个回路的总电流大小不变，所以，磁场变换器内壁的电流密度远远大于其外壁，进而增强了管件端部的磁场强度，引入的双磁场变换器便能够达到增强管件两端磁场强度的效果。此外，驱动线圈中的脉冲电流将会在磁场变换器内产生感应涡流，从而产生脉冲电磁力。通过改变磁场变换器的结构参数，可以对感应涡流进行一定的调控，从而实现不同电磁力分布的加载，最终增加管件端部的径向成形量，达到改善管件均匀性的目的。

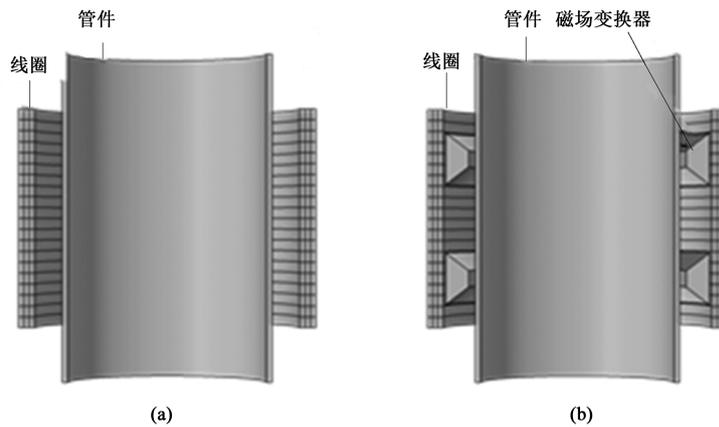


图 3 管件电磁压缩仿真模型

(a) 单线圈系统 (b) 新方法

Fig. 3 Simulation models of tube electromagnetic compression

(a) Single coil system (b) New method

2 管件电磁压缩的电磁-结构耦合模型

在电磁成形中，电磁场、结构场和温度场具有很强的耦合性。因此，有限元分析法可以用来精确模拟电磁成形过程。在之前的实验研究中，文献 [21] 对管件电磁胀形进行了仿真与实验，如图 4

所示，该模型能准确地反应实验结果。本文使用同样的仿真方法，采用 COMSOL 有限元仿真软件建立了电磁-结构耦合轴对称模型。其电磁压缩仿真流程图如图 5 所示，主要包括磁场模型、固体力学、全局常微分方程和移动网络 4 个模块。其中， t 为当前计算时间， Δt 为时间元， t_{end} 为终止计算时间。

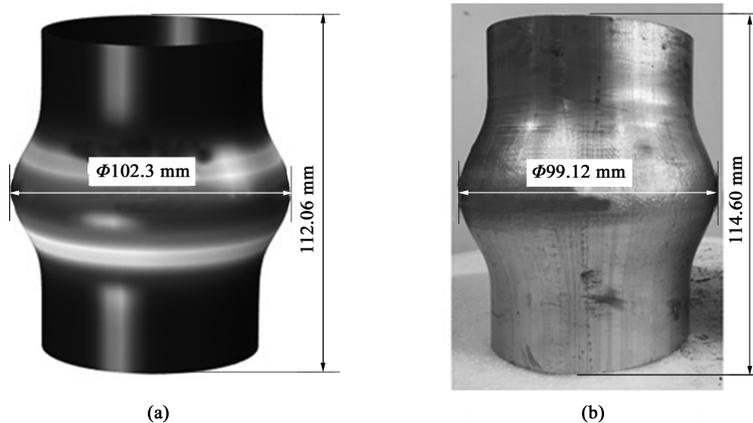


图 4 管件胀形的仿真 (a) 和实验 (b) 效果图

Fig. 4 Effect diagrams of simulation (a) and experiment (b) for tube bulging

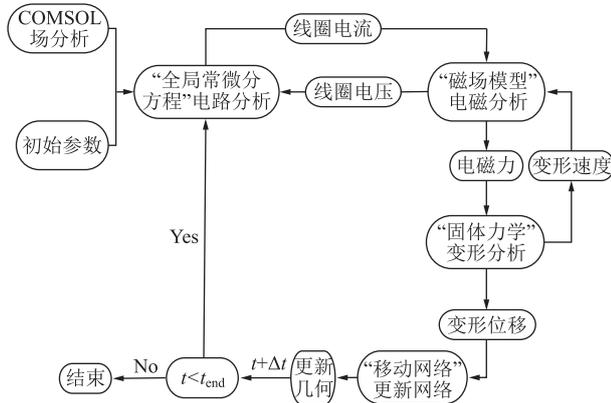


图 5 管件电磁压缩仿真流程图

Fig. 5 Flow chart of tube electromagnetic compression simulation

线圈、管件以及磁场变换器的二维几何结构如图 6 所示，其具体的几何参数如下。

(1) 线圈的几何参数：图 6a 为传统单线圈系统管件电磁压缩的二维尺寸图，该线圈为 3 层，每层 20 匝，共 60 匝，线圈内半径为 52 mm，外半径为 58 mm；图 6b 为引入磁场变换器的管件电磁压缩新方法的二维尺寸图，与单线圈系统一样，线圈匝数、内外半径均不变。线圈为铜导线，单匝线圈的截面积为 (2 mm×4 mm)，线圈高度为 80 mm。

(2) 双磁场变换器的几何参数：双梯形磁场变换器的内半径为 42 mm、外半径为 51 mm，厚度保持 9 mm 不变，双磁场变换器的内壁高度 H_i 、外壁高度 H_o 及双磁场变换器间距 H_d 均为本文研究的参数变量，它的材质为高电导率的青铜或紫铜。

(3) 管件的几何参数：管件内半径为 37.5 mm，外半径为 39.5 mm，高度为 120 mm，材质为铝合金材料。

2.1 等效电路分析

管件电磁压缩过程中的电磁分析可以基于等效电路法进行。当电容器组对驱动线圈进行放电时会使线圈温升较高，因此，本文采用含有续流电阻的放电回路，通过续流电阻转移线圈的温升。管件电磁压缩过程的放电回路为二阶 RLC 零输入电路，具体参数为：电容器电压 U_c 和电流 I_c ，电容器初始电压 U_0 ，驱动线圈电压 U_m 、电阻 R_m 、电感 L_m 和电流 I_m ，线路电压 U_1 、电阻 R_1 、电感 L_1 ，耦合管件电阻 R_w 、电感 L_w 和感应涡流 I_w ，磁场变换器管件电阻 R_f 、电感 L_f 和流经磁场变换器的电流 I_f ，电容 C ，续流电阻 R_d 和续流回路电流 I_d ，铜线截面积 S 。表 1 为部分参数值，其余参数均为动态变量。

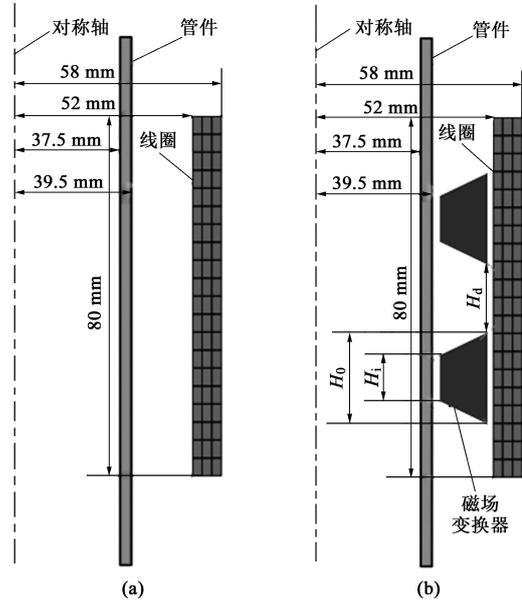


图 6 单线圈系统 (a) 和新方法 (b) 的二维尺寸图

Fig. 6 Two-dimensional diagrams of single coil system (a) and new method (b)

表 1 电路参数

Table 1 Circuit parameters

参数	数值
U_c/kV	3.3
$C/\mu F$	266
$R_d/m\Omega$	267
$R_1/m\Omega$	35
$L_1/\mu H$	12
S/mm^2	2×4

未引入磁场变换器时，放电回路图如图 7 所示，其中 U_m 为驱动线圈的电路电压， M_{m-w} 为管件与驱动线圈之间的互感。

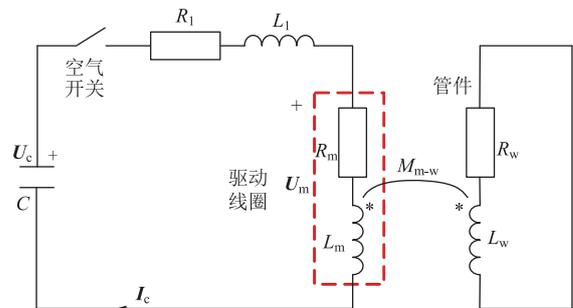


图 7 单线圈系统放电回路图

Fig. 7 Discharge circuit diagram of single coil system

根据基尔霍夫定律，此时放电回路方程如式 (1) ~ 式 (3) 所示：

$$\begin{cases} U_1 + U_m = U_c \\ R_1 I_c + L_1 \frac{dI_c}{dt} = U_1 \\ R_m I_c + L_m \frac{dI_c}{dt} + M_{m-w} \frac{dI_w}{dt} = U_m \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} I_m + I_c - I_d = 0 \\ R_w I_w + L_w \frac{dI_w}{dt} + M_{m-w} \frac{dI_c}{dt} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} I_d = 0 \quad (U_c \geq 0) \\ I_d = \frac{U_c}{R_d} \quad (U_c < 0) \end{cases} \quad (3)$$

引入磁场变换器后，放电回路图如图 8 所示，其中， M_{m-f} 为驱动线圈与磁场变换器之间的互感、 M_{w-f} 为磁场变换器与管件之间的互感。

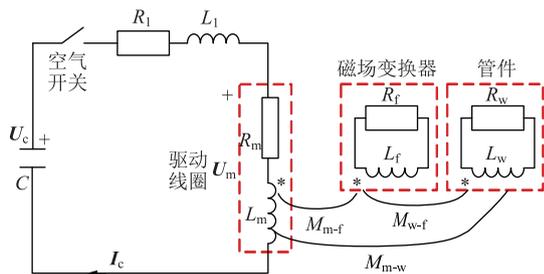


图 8 新方法的放电回路图

Fig. 8 Discharge circuit diagram of new method

根据基尔霍夫定律，式 (2) 被改写，此时放电回路方程如式 (4) 所示：

$$\begin{cases} R_f I_f + L_f \frac{dI_f}{dt} + M_{m-f} \frac{dI_c}{dt} + M_{w-f} \frac{dI_w}{dt} = 0 \\ R_w I_w + L_w \frac{dI_w}{dt} + M_{w-f} \frac{dI_f}{dt} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

2.2 磁场分析

线圈的脉冲电流由式 (1) ~ 式 (4) 决定，当一个时变的脉冲电流通过驱动线圈时，驱动线圈附近就会产生一个时变磁场。由麦克斯韦方程组可知，系统包括的参数为：感应磁场强度 H ，感应电场强度 E ，磁通密度 B ，感应涡流密度 J ，磁场矢量 A ，管件的电导率 γ ，电磁力密度 F ，麦克斯韦方程组算子 ∇ ，管件速度 v 磁场方程为：

$$\nabla \times H = J \quad (5)$$

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

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (7)$$

$$J_\varphi = \frac{I_m}{S} = \gamma E_\varphi \quad (8)$$

电磁力密度的计算公式为：

$$F = J \times (\nabla \times A) \quad (9)$$

$$F_z = J_\varphi \times B_r \quad (10)$$

$$F_r = J_\varphi \times B_z \quad (11)$$

式中：下角标 r 、 φ 、 z 分别表示系统的矢量参数在径向、环向和轴向的分量。

2.3 力学场分析

当脉冲电流通过驱动线圈时，感应涡流与感应磁场共同作用产生电磁力，使管件发生电磁压缩的现象。因此，有必要对力学场进行分析。本文采用的管件属于纯铝合金材质。管件材料的主要参数包括：管件的内半径 R_{in} 、外半径 R_{out} 和高度 H_w ，电导率 γ ，相对磁导率 μ_r ，相对介电常数 ε ，杨氏模量 E' ，泊松比 μ ，管件密度 ρ ，初始屈服应力 σ_s ，管件材料应力张量 σ_w ，管件位移矢量 U ，电磁力密度 F 。材料参数值如表 2 所示。

表 2 管件的材料参数

Table 2 Material parameters of tube

参数	数值
R_{in}/mm	37.5
R_{out}/mm	39.5
H_w/mm	120
$\gamma/(\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	3.03×10^7
μ_r	1
ε	1
E'/Pa	70×10^9
μ	0.33
$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2700
σ_s/MPa	32.6

力学场的计算公式为：

$$\rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - \nabla \cdot \sigma_w = F \quad (12)$$

值得注意的是，管件在室温下进行电磁压缩时，由于铝合金的材料属性是随应变率的变化而变化的，且电磁成形是高速率及高应变率的^[22]，因此，有必要考虑高速率和高应变率对管材属性的影响。本文采用 Cowper-Symonds 模型来模拟 AA1060 铝合金管材^[23]，其本构方程为：

$$\sigma = \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}_{pe}}{p} \right)^m \right] \sigma_{ys} \quad (13)$$

式中： σ_{ys} 为管件的准静态应力； σ 为管材高速变形时的流动应力； ε_{pe} 为有效塑性应变； m 为应变率硬化参数； p 为粘度。

在多数电磁成形数值分析中，通常取 $p = 6500$ ， $m = 0.25$ [23]。

3 仿真结果与分析

磁场变换器的引入改变了线圈与管件之间的磁场分布，进而影响了管件的成形效果。本节主要研究了磁场变换器的几何参数对管件电磁力和变形行为的影响，对传统单线圈系统和新方法的电磁成形性能进行对比分析。

3.1 磁场变换器的参数对管件电磁压缩过程中径向电磁力及变形均匀性的影响

3.1.1 磁场变换器内壁高度 H_i 对管件径向电磁力及变形均匀性的影响

图 9 为磁场变换器内壁高度 H_i 与管件径向电磁力分布的关系图。由图 9 可知，径向电磁力的分布特性主要在于管件的中间区域及其两端之间的两个峰值。管件径向电磁力呈“凹”形分布，明显可知，管件中间区域的径向电磁力被削弱。此外， H_i 的增大只会增大径向电磁力的大小，并不会改变径向电磁力的峰值位置。图 10 为磁场变换器内壁高度 H_i 与管件径向位移的关系图，与图 9 所示结果吻合，随着内壁高度 H_i 的增加，径向电磁力的两个峰值变得更大，导致管件的变形行为由“凸”向“凹”变换。当内壁高度 H_i 达到临界值时，随着内

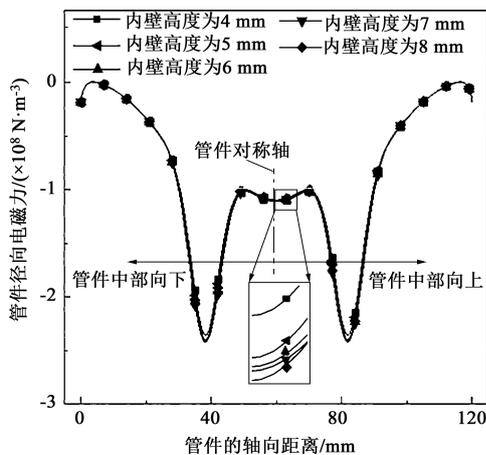


图 9 内壁高度 H_i 对管件径向电磁力的影响

Fig. 9 Influence of inner wall height H_i on radial electromagnetic force of tubes

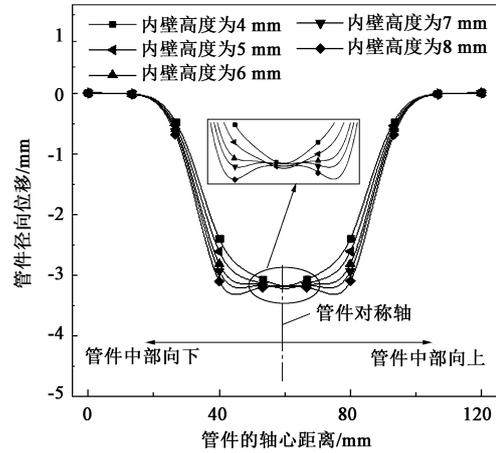


图 10 内壁高度 H_i 对管件径向位移的影响

Fig. 10 Influence of inner wall height H_i on radial displacement of tubes

壁高度的继续增大，管件的变形行为变成“凹”形。由仿真结果得知，此临界值为 6 mm，即 $H_i = 6$ mm 时，管件的变形行为最佳。

3.1.2 磁场变换器外壁高度 H_o 对管件径向电磁力及变形均匀性的影响

图 11 为磁场变换器外壁高度 H_o 与管件径向电磁力分布的关系图。由图 11 可知，径向电磁力依然呈“凹”形分布，随着磁场变换器外壁高度 H_o 增大，管件的径向电磁力也随之增大，但径向电磁力的峰值位置并没有改变。图 12 为磁场变换器外壁高度 H_o 与管件径向位移的关系图，其与电磁力分布图的影响效果吻合，且伴随着管件的变形区域变宽的现象。随着外壁高度 H_o 的增加，管件中部的变形区域变宽，磁场也随之减弱，管件的变形行为由“凸”向“凹”变化，当到达临界值时，管件两端

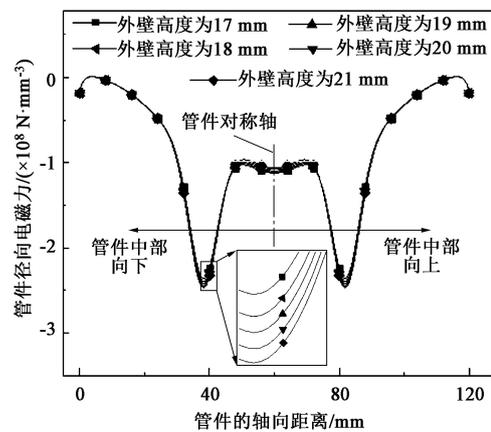


图 11 外壁高度 H_o 对管件径向电磁力的影响

Fig. 11 Influence of outer wall height H_o on radial electromagnetic force of tubes

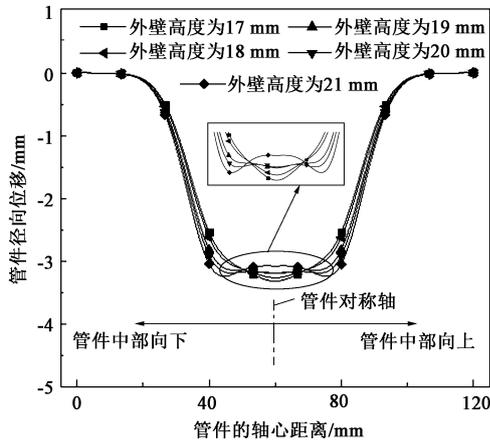


图 12 外壁高度 H_o 对管件径向位移的影响

Fig. 12 Influence of outer wall height H_o on radial displacement of tubes

的径向电磁力进一步增大，导致管件向“凹”继续变化。由仿真结果得知，此临界值为 19 mm，即 $H_o = 19$ mm 时，管件的变形行为最佳。

3.1.3 磁场变换器间距 H_d 对管件径向电磁力及变形均匀性的影响

图 13 为磁场变换器间距 H_d 与管件径向电磁力分布的关系图。由图 13 可知，径向电磁力依然呈“凹”形分布，其峰值位置位于管件的两端。随着间距 H_d 的增大，径向电磁力的峰值逐渐减小。与此同时，驱动线圈中间区域的电磁力较大，致使管件中部的电磁力逐步增强。图 14 为磁场变换器间距 H_d 与管件径向位移的关系图。由图 14 可知，随着 H_d 的增大，管件中部的径向电磁力越来越大，管件的变形轮廓变得越来越凸，此过程有一个临界值，对应的变形行为最佳。由仿真结果得知，此临界值为 24 mm，即 $H_d = 24$ mm 时，管件的变形最均匀。

由以上分析结果可知，通过改变双梯形磁场变

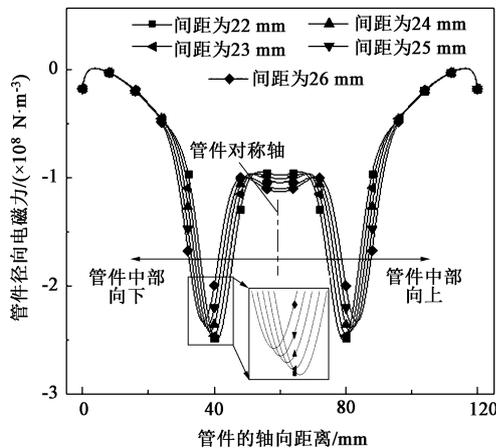


图 13 间距 H_d 对管件径向电磁力的影响

Fig. 13 Influence of spacing H_d on radial electromagnetic force of tubes

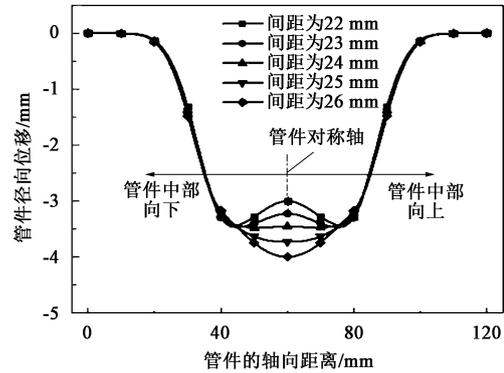


图 14 间距 H_d 对管件径向位移的影响

Fig. 14 Influence of spacing H_d on radial displacement of tubes

换器的结构参数，可以有效改变管件电磁压缩过程中感应涡流的分布，从而改变径向电磁力的分布，使管件电磁压缩的变形效果达到最佳。综上所述，引入的磁场变换器能够使管件在轴向上的变形更加均匀。由仿真结果可知，最佳内壁高度 H_i 为 6 mm，最佳外壁高度 H_o 为 19 mm，最佳间距 H_d 为 24 mm。

3.2 引入磁场变换器的新方法与传统单线圈系统的对比分析

为提高对比的可靠性，将单线圈系统与新方法的最大位移形变量控制在 3.3 mm，这是因为：当压缩量小于 5% 时管件不会发生起皱现象。在该条件下，单线圈系统中的电压为 3.0 kV，新方法的电压为 3.3 kV。相比单线圈系统，新方法需要的电压更大，这是由于新方法需要更大的电压来实现相同的变形量，但是整个系统产生脉冲电流的时间极短，因此并不会产生能量浪费。

图 15 为单线圈系统与新方法下管件的径向电磁力分布图。可以看出，单线圈系统下径向电磁力峰值处于管件的中间位置，这使得管件中间区域的变形量大于端部，管件将出现变形不均匀的情况；而

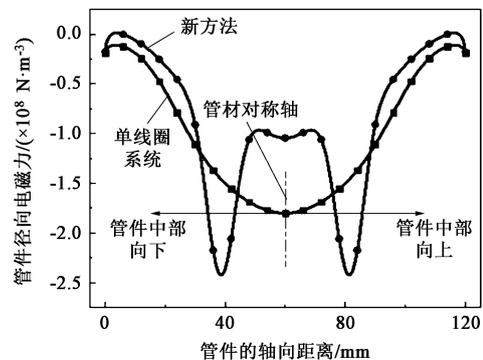


图 15 单线圈系统与新方法下的径向电磁力分布

Fig. 15 Radial electromagnetic force distributions for single coil system and new method

新方法的径向电磁力峰值则位于管件两端，这就增强了管件端部的径向电磁力。图 16 为单线圈系统与新方法下管件的径向压缩位移图，不难看出，单线圈系统下管件电磁压缩的均匀长度远远小于新方法的均匀长度。图 17 为管件电磁压缩三维仿真模型对比图，由图 17 可知，单线圈系统下管件电磁压缩的最大变形区域为 9.5 mm，新方法下为 37.5 mm。

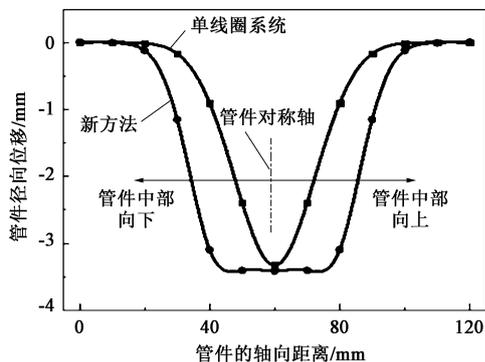


图 16 单线圈系统和新方法下的径向位移

Fig. 16 Radial displacements for single coil system and new method

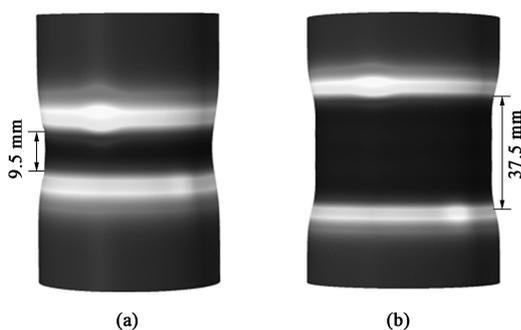


图 17 单线圈系统 (a) 和新方法 (b) 的管件三维轮廓图

Fig. 17 Three-dimensional outline diagrams of tubes in single coil system (a) and new method (b)

4 结语

针对管件电磁压缩过程中变形不均匀的问题，本文提出了基于对称磁场变换器的管件电磁压缩新方法，构建了单线圈加载和基于磁场变换器线圈加载的两组模型，分别探究了管件的电磁力分布特性和变形均匀性。由仿真结果可知，传统线圈加载方式下，管件所受电磁力的峰值位于管件的中间区域，而基于磁场变换器的加载方式下，管件受到的径向电磁力集中在管件两端，而中间区域受到的影响较小。在电路参数保持不变的情况下，存在一个合适的磁场变换器结构参数，使得管件电磁成形均匀性最佳。当管件压缩深度相同时，本文提出的方法能

够有效改变管件的感应涡流分布，使得管件电磁压缩的最大变形区域由 9.5 mm 提升至 37.5 mm。显然，本文提出的基于磁场变换器加载方式下的管件电磁压缩新方法能够在一定程度上解决管件电磁成形的变形均匀性问题，促进了电磁成形技术的发展。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Cao Q L, Du L M, Li Z H, et al. Investigation of the lorentz-force-driven sheet metal stamping process for cylindrical cup forming [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 271: 532-541.
- [3] 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.
- [4] Psyk V, Risch D, Kinsey B L, et al. Electromagnetic forming-A review [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2011, 211 (5): 787-829.
- [5] Qiu L, Yu Y J, Wang Z W, et al. Analysis of electromagnetic force and deformation behavior in electromagnetic forming with different coil systems [J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2018, 57 (3): 337-345.
- [6] Qiu L, Yi N X, Abu-Siada A, et al. Electromagnetic force distribution and forming performance in electromagnetic forming with discretely driven rings [J]. *IEEE Access*, 2020, 8: 116166-116173.
- [7] Liu N, Lai Z P, Cao Q L, et al. Investigation of accurate forming of a semi-ellipsoidal shell part by an electromagnetic forming method [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 105 (1): 1113-1128.
- [8] Qiu L, Deng K, Li Y T, et al. Analysis of coil temperature rise in electromagnetic forming with coupled cooling method [J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2020, 63 (3): 1-14.
- [9] 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: 309-316.
- [10] 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.
- [11] 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 (1): 102-115.
- [12] 赵健, 莫健华, 崔晓辉, 等. 管件电磁渐进胀形的数值模拟及成形均匀性 [J]. *塑性工程学报*, 2012, 19 (5): 92-99. Zhao J, Mo J H, Cui X H, et al. Research on numerical simula-

- tion and forming uniformity of electromagnetic incremental tube bulging [J]. Journal of Plastic Engineering, 2012, 19 (5): 92-99.
- [13] 李春峰, 赵志衡, 李忠, 等. 管坯电磁胀形磁场特性及磁压力分布 [J]. 机械工程学报, 2005, 41 (4): 185-188.
Li C F, Zhao Z H, Li Z, et al. Magnetic field characteristics and magnetic pressure distribution in tube electromagnetic expansion [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41 (4): 185-188.
- [14] 欧阳伟, 黄尚宇. 电磁成形技术的研究与应用 [J]. 塑性工程学报, 2005, 12 (3): 35-40.
Ouyang W, Huang S Y. Investigation and application on electromagnetic forming technology [J]. Journal of Plastic Engineering, 2005, 12 (3): 35-40.
- [15] 邱立. 脉冲强磁场成形制造技术研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
Qiu L. Research on Pulsed High Magnetic Field Forming and Manufacturing Technology [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [16] Qiu L, Li Y T, Yu Y J, et al. Electromagnetic force distribution and deformation homogeneity of electromagnetic tube expansion with a new concave coil structure [J]. IEEE Access, 2019, 7: 117107-117114.
- [17] 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 Technology, 2014, 214 (2): 409-427.
- [18] Qiu L, Wang Y D, Wang Z, et al. Electromagnetic force distribution and axial deformation uniformity analysis of dual-coil electromagnetic tube compression method [J]. IEEE Access, 2020, 8: 143502-143508.
- [19] Vivek A, Kim K H, Daehn G S, et al. Simulation and instrumentation of electromagnetic compression of steel tubes [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211 (5): 840-850.
- [20] 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.
- [21] Qiu L, Li Y T, Yu Y J, et al. Electromagnetic force distribution and deformation homogeneity of electromagnetic tube expansion with a new concave coil structure [J]. IEEE Access, 2019, 7: 117107-117114.
- [22] Cao Q L, Hao X T, Lai Z P, et al. Analysis and reduction of coil temperature rise in electromagnetic forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 225: 185-194.
- [23] 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.

《锻压技术》杂志敬告新老广告客户

2023年广告征集工作火热进行中。本刊主要承接锻造、冲压、旋压、辊锻、摆辗、斜轧、横轧和楔横轧设备及锻压辅助设备, 仪器、仪表、模具工业、工业加热设备、热处理设备、加热技术、摩擦与润滑、工艺材料和锻件、冲压件、管件及其特种成形件(旋压、辊锻、摆辗、斜轧、横轧和楔横轧)等广告; 各科研院所科技成果转让、企业介绍等与本行业相关的广告。您选择《锻压技术》进行广告宣传的理由:

(1) 平台大, 宣传效果好:

- 全国中文核心期刊, 全国锻压行业会刊, 是锻压领域知名、精品期刊;
- 与中国机械总院集团北京机电研究所有限公司、中国机械工程学会塑性工程分会、全国锻压标准化技术委员会密切合作;
- 报道内容全, 发行量大。

(2) 服务全, 广告费用低:

立体式全方位宣传, 杂志、网站和微信等纸媒和数字媒体宣传渠道。

请登录本刊网站, 点击“广告合作”查询具体广告价目。

为了使您的产品能够保持畅销的势头, 不断占领国内外市场, 请您抓紧时间安排贵公司在本刊刊登的广告计划。欢迎广大新老客户踊跃咨询、积极预定。需刊登广告者, 敬请与本刊联系。

愿我们真诚的服务能为您创造良好的效益。

地址: 北京市海淀区学清路18号《锻压技术》编辑部 广告部 邮编: 100083

联系人: 林玉彤 手机: 18811346037 E-mail: fst_linyutong@163.com

电话: 010-62920652 Http: //www.fstjournal.net

