

管材成形

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

邱 立^{1,2}, 李梦瑶^{1,2}, 汪晨鑫^{1,2}, 刘洪池^{1,3}, 吴伟业^{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. 国网安徽省电力有限公司来安县供电公司, 安徽 滁州 239200)

摘要: 针对管件在电磁胀形过程中因端部效应导致的轴向均匀度差等问题, 提出了一种基于三磁场变换器的管件电磁胀形方法。采用 COMSOL 软件构建管件电磁胀形的电磁-结构耦合仿真模型, 研究管件径向电磁力的分布, 进一步分析了三磁场变换器的结构参数对管件轴向均匀度的影响。研究表明: 与现有技术相比, 基于三磁场变换器的管件电磁胀形技术能够产生凹型分布的电磁力, 进而提高管件的轴向均匀度; 针对特定的待加工管件, 存在最合适的三磁场变换器结构参数。磁场变换器的间距、中部散磁器外壁高度和端部集磁器外壁高度分别为 19.0、19.6 和 6.0 mm 时管件胀形均匀度最佳, 与无磁场变换器的传统线圈管件胀形方式相比, 均匀度提高了 3.20 倍, 与双集磁器管件胀形方式相比, 均匀度提高了 3.04 倍, 与基于散磁器的管件胀形方式相比, 均匀度提高 2.36 倍。

关键词: 管件; 电磁成形; 磁场变换器; 电磁力; 变形均匀度; 电流密度

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.02.014

中图分类号: TM154 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2024) 02-0107-12

Electromagnetic force distribution and axial uniformity of tube electromagnetic bulging based on three-magnetic field converter

Qiu Li^{1,2}, Li Mengyao^{1,2}, Wang Chenxin^{1,2}, Liu Hongchi^{1,3}, Wu Weiye^{1,4}

(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;
3. Jingmen Power Supply Company of State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Jingmen 448124, China;
4. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Lai'an County Power Supply Company, Chuzhou 239200, China)

Abstract: For the problem of poor axial uniformity caused by the end effect during the electromagnetic bulging process of tube fittings, a tube electromagnetic bulging method based on three-magnetic field converter was proposed, and the electromagnetic-structure coupling simulation model for tube electromagnetic bulging was built by software COMSOL. Then, the distribution of radial electromagnetic force on tube fittings was studied, and the influences of structural parameters of three-magnetic field converter on the axial uniformity of tube fittings were further analyzed. The research shows that compared with the existing technology, the tube electromagnetic bulging technology based on three-magnetic field converters can generate concavely-distributed electromagnetic force to increase the axial uniformity of tube fittings. For the specific tube to be processed, there are the most suitable structural parameters of three-magnetic field converter. In this calculation example, the tube bulging uniformity is the best when the spacing of magnetic field converter, the outer wall height of middle magnet diffuser and the outer wall height of end magnet collector are 19.0, 19.6 and 6.0 mm, respectively. Compared with the traditional coil tube bulging method without magnetic field converter, the uniformity is improved by 3.2 times, by 3.04 times compared with the tube bulging method with double magnetic collectors, and by 2.36 times compared with the tube bulging method based on magnetic diffuser.

Key words: tube fittings; electromagnetic bulging; magnetic field converter; electromagnetic force; deformation uniformity; current density

电磁成形技术应用在金属加工领域, 可以提高

金属工件的成形极限, 成形速度快且工件的成形质量高, 近些年来在轻质铝合金加工领域得到广泛应用^[1-2]。1958 年美国学者 Harvey G W 与 Brower D F^[3]首次将脉冲磁场产生的电磁力应用于金属加工, 这也标志着电磁成形技术的诞生。为了满足工业需求, 提升工件成形均匀度, 国内外众多学者采取了优化和调整线圈结构的策略。李奋强等^[4]建立了三维电

收稿日期: 2023-08-13; 修订日期: 2023-11-18

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: 吴伟业 (1997-), 男, 硕士

E-mail: 202008580021195@ctgu.edu.cn

磁-结构耦合模型,详细分析了当金属管件长度小于线圈长度时的均匀度,并结合实际提出相应的均匀性判据。为抑制端部效应,提高管件轴向成形均匀性,邱立和余一杰等^[5-6]对传统的线圈结构进行改进并首次提出了凹型线圈结构。这种线圈结构可以削弱管件中部电磁力,加强管件端部电磁力,有效抑制了管件胀形的端部效应。Khimenko T L 等^[7]首次将磁场变换器应用于电磁成形技术,利用磁场变换器断缝及其内高外低的结构,改变工件特定区域的磁通分布,进而改变工件整体电磁力的大小及分布情况。邱立等^[8-9]除探究了磁场变换器主要用来增大工件特定区域的电磁力之外,对磁场变换器的功能进行拓展,通过磁场变换器外壁高于内壁的结构特征提高了工件的胀形均匀性。此外,还提出了基于双集磁器的管件电磁胀形方法,在管件轴向两端引入两个集磁器加强管件端部的电磁力,通过削弱端部效应达到提高管件胀形均匀度的目的。

基于以上研究可以发现,由于管件的端部效应而造成的管件胀形均匀性不佳的问题,可以通过设计不同的线圈结构得到改善,但相比于通过改变线圈结构来改善管件成形均匀度,引入磁场变换器不需要复杂的线圈绕制工艺,针对不同的加工需求,合理设计磁场变换器的结构参数,便可实现对特定区域的径向电磁力的调控。本文以两种磁场变换器的工作原理为基础,提出了三磁场变换器管件电磁胀形方式,通过构建三磁场变换器管件二维轴对称仿真模型,分别研究磁场变换器间距、端部集磁器和中部散磁器的外壁高度对管件径向电磁力密度和胀形均匀度的影响。对比分析了单线圈无磁场变换器管件电磁胀形与三磁场变换器管件电磁胀形的径向电磁力分布和成形效果,并研究了两者的成形过程,进一步分析了三磁场变换器管件电磁胀形方式与双集磁器管件胀形和基于散磁器的管件胀形相比,径向电磁力分布的区别和成形均匀度的差异,验证了基于三磁场变换器的管件电磁胀形方式可以有效提高管件胀形的均匀性。

1 三磁场变换器的相关理论研究

1.1 磁场变换器的基本工作原理

在电磁成形过程中,受成形系统结构的限制,难以通过移动线圈来缩小线圈与工件的距离。通过引入磁场变换器,可将线圈的能量通过磁场变换器传递到工件。磁场变换器是一种内壁和外壁高度不

同的圆环,存在一条狭窄的断缝。当磁场变换器中通过时变电流时,由于存在趋肤效应,电流大部分将集中于导体的表面,流过内外壁的总电流大小相等、方向相反。由于磁场变换器的内、外壁存在高度差,内壁高于外壁或外壁高于内壁均会使得磁场变换器外壁的电流密度与内壁的电流密度存在差异,因此,磁场变换器可以用来改变成形工件感应涡流和磁场的分布,进而改变管件成形过程中的电磁力分布^[10]。

如图 1 所示,线圈电流与磁场变换器内壁电流方向相反,内壁电流通过磁场变换器的断缝由内壁流向外壁,因此,磁场变换器内、外壁的电流大小相等、方向相反,磁场变换器外壁电流与管件感应涡流方向相反。无磁场变换器管件电磁成形过程中,管件径向的电磁力分布呈凸型分布,管件轴向中部所受的电磁力大,电磁成形端部效应明显,管件的成形均匀性较差。因此,提高管件成形的均匀度需要削弱管件轴向中部的径向电磁力,同时增强管件两端的径向电磁力。

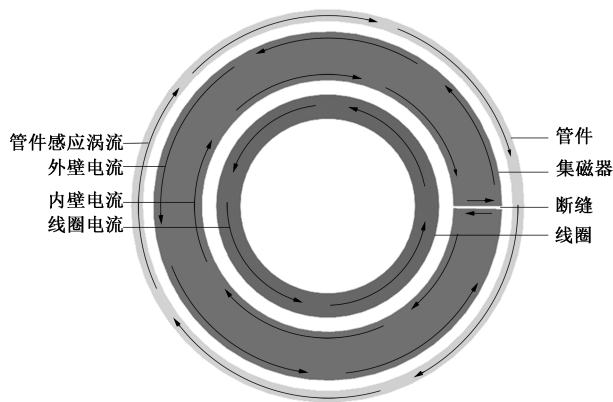


图 1 管件电磁胀形系统涡流分布图

Fig. 1 Eddy current distribution diagram of tube electromagnetic bulging system

为达到上述效果,本文提出了三磁场变换器管件胀形方式,如图 2 所示。图 2a 为散磁器,其内壁高度小于外壁高度,散磁器外壁电流密度小于内壁电流密度,可以用来削弱特定区域电磁力,提高胀形均匀性。图 2c 为集磁器,与散磁器不同,集磁器的内壁高度大于外壁高度,因此,集磁器外壁电流密度大于内壁电流密度。但由于磁场变换器的内部有电流损耗,所以,会出现集磁器外壁感应电流密度小于内壁电流密度的情况,但相对未引入集磁器而言,集磁器依然可以用来增大工件特定区域的电磁力。基于以上两种磁场变换器的特点,将两个集

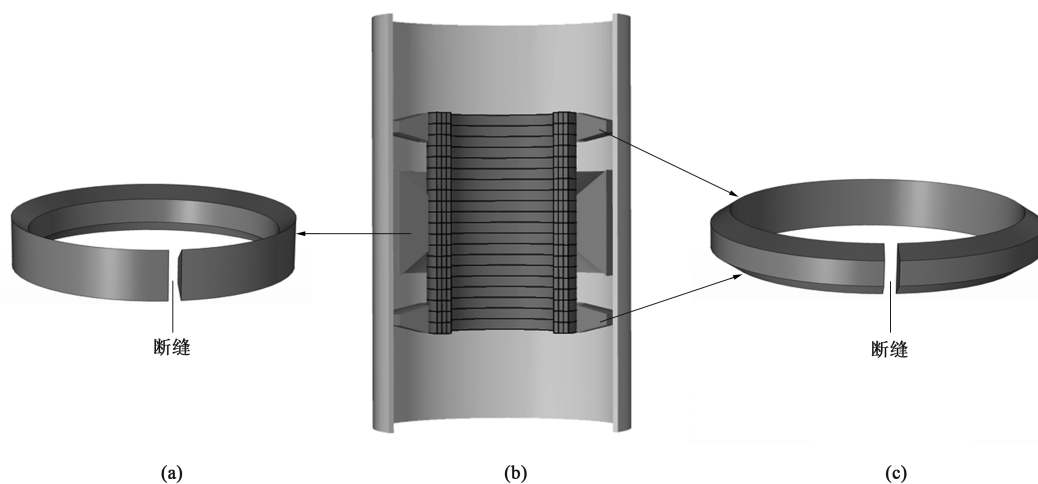


图2 三磁场变换器管件胀形三维示意图

(a) 散磁器 (b) 整体结构图 (c) 集磁器

Fig. 2 3D schematic diagram of tube bulging for three-magnetic field converter

(a) Magnetic diffuser (b) Overall structure diagram (c) Magnetic collector

磁器放置于管件两端，管件端部的电磁力得到增强，而中部采用散磁器，削弱管件轴向中部的径向电磁力。三磁场变换器管件胀形三维示意图如图2b所示。集磁器和散磁器的电流密度分布如图3所示，磁场变换器靠近对称轴的一侧为内壁，远离对称轴的一侧为外壁。从图3中可以看出，两种磁场变换器的内、外壁电流密度方向相反，且集磁器由于电流损耗，外壁电流密度略小于内壁电流密度，外壁电流密度最大值为 $9.68 \times 10^9 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ ，内壁电流密度最大值为 $-1.22 \times 10^{10} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ 。但散磁器由于结构特点和电流损耗，电流密度由内壁的 $-1.02 \times 10^{10} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ 减小至外壁的 $4.14 \times 10^9 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ 。在集磁器和散磁器的共同作用下改善管件的电磁力分布，从而提高管件成形的均匀性。

1.2 电路模块

1.2.1 不含磁场变换器的电路

图4为电磁胀形等效电路图。电容器储能并通过放电电路对驱动线圈放电，驱动线圈中产生脉冲电流，变化的电流会在线圈附近产生磁场进而导致工件中产生感应涡流。在线圈电流和感应涡流之间电磁力的作用下工件受力发生形变。电路中的续流回路可以减少线圈的温升，提高线圈寿命^[11]。

图4中， U_c 为电容器两端电压； I_{coil} 为驱动线圈电流； I_c 为放电回路电流； I_w 为管件的感应涡流； I_d 为续流回路的电流； R_d 为续流回路电阻； R_l 为放电回路电阻； R_w 为管件的电阻； L_l 为放电回路的电感； L_c 为驱动线圈的电感； L_w 为管件电感；

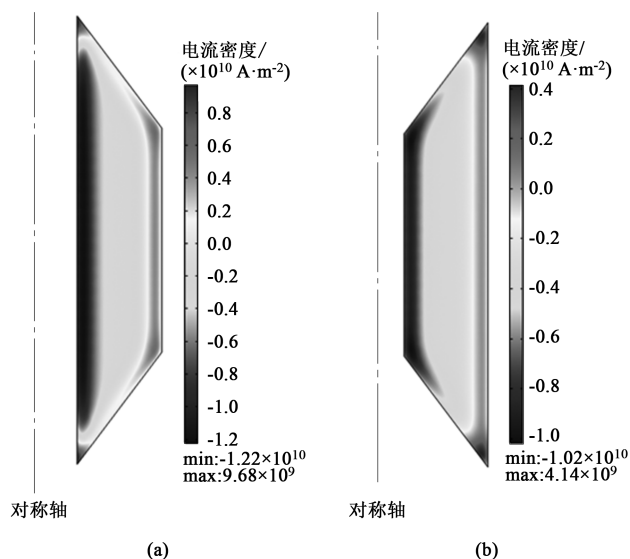


图3 集磁器 (a) 和散磁器 (b) 的电流密度二维分布图

Fig. 3 2D distribution diagrams of current density for magnetic collector (a) and magnetic diffuser (b)

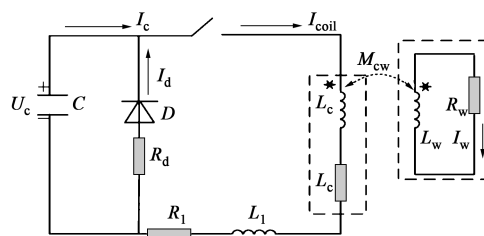


图4 无磁场变换器电磁胀形等效电路图

Fig. 4 Equivalent circuit diagram of electromagnetic bulging for non-magnetic field converter

M_{cw} 为管件和线圈之间的耦合系数； C 为电容器； D 为二极管。

根据基尔霍夫定律可以得到以下电路方程:

$$\begin{cases} I_{\text{coil}}(R_c + R_1) + (L_c + L_1) \frac{dI_{\text{coil}}}{dt} + M_{\text{cw}} \frac{dI_w}{dt} = U_c \\ R_w I_w + L_w \frac{dI_w}{dt} = 0 \\ U_0 - \frac{1}{C} \int_0^t I_c dt = U_c \\ I_c + I_d - I_{\text{coil}} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: t 为时间; U_0 为电容器初始电压; R_c 为驱动线圈的电阻。

续流回路方程为:

$$\begin{cases} I_d = 0, & U_c \geq 0 \\ I_d = \frac{U_c}{R_d}, & U_c < 0 \end{cases} \quad (2)$$

1.2.2 含磁场变换器的电路

引入磁场变换器作为电磁成形辅助, 其电路如图 5 所示。其中, I_f 为磁场变换器的感应电流; R_f 为磁场变换器的电阻; L_f 为磁场变换器的电感; M_{cf} 为磁场变换器与线圈之间的互感系数; M_{fw} 为磁场变换器与管件之间的互感系数。管件胀形系统相关电路参数见表 1。 M_{cw} 为管件和线圈之间的耦合系数忽略不计。磁场变换器与驱动线圈产生耦合关系, 进而通过磁场变换器将驱动线圈产生的能量传递到管件上, 忽略管件和驱动线圈之间的耦合, 式 (1) 可更改为式 (3)。续流回路方程不变。

$$\begin{cases} I_{\text{coil}}(R_c + R_1) + (L_c + L_1) \frac{dI_{\text{coil}}}{dt} + M_{\text{cf}} \frac{dI_f}{dt} = U_c \\ R_w I_w + L_w \frac{dI_w}{dt} = 0 \\ R_f I_f + L_f \frac{dI_f}{dt} = 0 \\ U_0 - \frac{1}{C} \int_0^t I_c dt = U_c \\ I_c + I_d - I_{\text{coil}} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

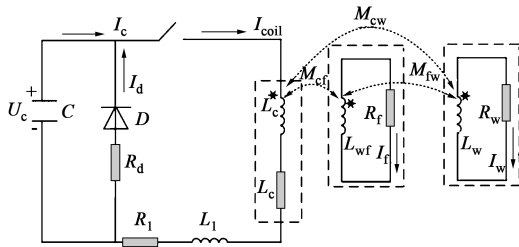


图 5 基于磁场变换器的电磁胀形等效电路图

Fig. 5 Equivalent circuit diagram of electromagnetic bulging based on magnetic field converter

表 1 管件胀形系统的电路参数

Table 1 Circuit parameters of tube bulging system

参数	数值
电容器初始电压 U_0/kV	9.3
续流回路电阻 $R_d/\text{m}\Omega$	267
放电回路电阻 $R_1/\text{m}\Omega$	35
放电回路电感 $L_1/\mu\text{H}$	12
电容 $C/\mu\text{F}$	320

2 电磁-结构耦合仿真模型

采用 COMSOL 软件建立电磁胀形过程电磁场和结构场等多物理场的有限元仿真二维轴对称模型。传统单线圈管件电磁胀形不含有磁场变换器, 可直接简化为二维轴对称模型。在三磁场变换器管件电磁胀形中, 由于磁场变换器中“断缝”的存在, 使得胀形系统在几何结构上失去了原本的轴对称性。为将含磁场变换器的管件胀形系统由三维模型简化为二维轴对称模型, 本文将 3 个磁场变换器的边界条件设置为截面电流为 0 A, 通过磁场变换器内、外壁感应涡流的反耦合效果来模拟涡流回路, 这种建模方法下磁场变换器表面磁通密度和感应涡流的分布规律和数值均基本与三维模型相同^[10-11]。

仿真流程图如图 6 所示, 其中, t 为当前时间, Δt 为时间步长, t_{end} 为结束时间。该仿真模型主要包含 4 个模块: 全局常微分方程和微分代数方程模块、电磁场模块、固体力学模块和“移动网格”模块^[12]。

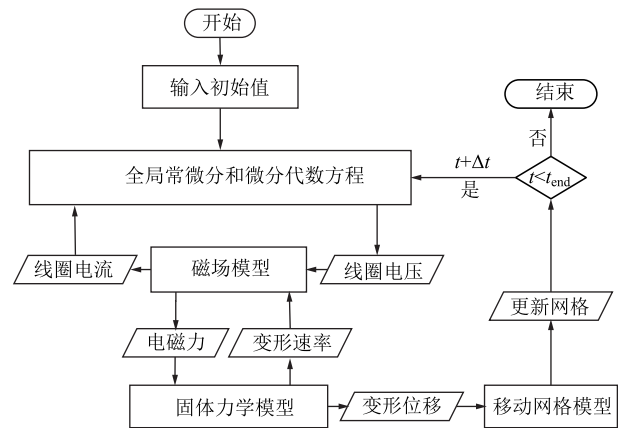


图 6 管件电磁胀形仿真流程图

Fig. 6 Simulation flow chart of tube electromagnetic bulging

(1) 全局常微分方程和微分代数模块: 用于计算流经驱动线圈的放电电流。无磁场变换器时, 对

应式 (1) 和式 (2); 引入磁场变换器后, 对应式 (2) 和式 (3)。

(2) 磁场模块: 用于获得磁场和电磁力分布, 并将获得的电磁力传递给固体力学模块。工件内的感应涡流主要为环形分量, 磁场可用麦克斯韦方程表示^[13]:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (4)$$

$$\nabla \times \mathbf{E}_\varphi = -\frac{\partial \mathbf{B}_z}{\partial t} + \nabla \times (\mathbf{v}_z \times \mathbf{B}_r) \quad (5)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = 0 \quad (6)$$

$$\mathbf{J}_\varphi = \frac{\mathbf{I}_c}{S} = \gamma_w \mathbf{E}_\varphi \quad (7)$$

式中: \mathbf{E} 为电场强度; \mathbf{B} 为磁通密度; \mathbf{v} 为管件速度; ∇ 为麦克斯韦方程组算子; \mathbf{H} 为磁场强度; S 为驱动线圈导线截面积; \mathbf{J} 为感应涡流密度; γ_w 为管件电导率; 下标 r , φ 和 z 分别表示矢量的径向、环向和轴向分量。

$$\mathbf{F}_r = \mathbf{J}_\varphi \times \mathbf{B}_z \quad (8)$$

$$\mathbf{F}_z = \mathbf{J}_\varphi \times \mathbf{B}_r \quad (9)$$

式中: \mathbf{F}_r 为管件所受径向电磁力; \mathbf{F}_z 为管件所受轴向电磁力; \mathbf{J}_φ 为环向感应涡流密度。

管件所受的电磁力由管件磁通密度和自身的感应涡流共同决定, 对于管件电磁胀形系统来说, 工件周围的磁场主要以轴向分布, 故而工件的成形过程主要依靠径向电磁力驱动, 轴向电磁力通常情况下可以忽略不计。

(3) 固体力学模块: 当管件受到电磁力时, 根据牛顿定律, 管件受力和位移之间满足以下关系:

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

式中: $\boldsymbol{\sigma}$ 为管件的应力张量; \mathbf{F} 为电磁力密度; ρ_w 为管件密度; \mathbf{u} 为管件位移。

本文采用 AA5083-O 管件进行模拟^[14-16], 其本构方程为:

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

式中: $\boldsymbol{\sigma}_{ys}$ 为管件的初始屈服应力; m 为应变率硬化参数; $\boldsymbol{\varepsilon}_{pe}$ 为塑性应变速率; G 为粘性密度。

本文中, $G=6500$, $m=0.25$ ^[17]。仿真模型中的其他材料参数见表 2。

(4) “移动网格”模块: 用于更新管件周围的空气网格, 提高仿真精度^[18-19]。

表 2 仿真模型中的材料参数

Table 2 Material parameters in simulation model

组件	参数	数值
管件	密度 $\rho_w / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2700
	电导率 $\gamma_w / (\text{S} \cdot \text{m})$	3.03×10^7
	泊松比 σ_w	0.33
	杨氏模量 E_w / GPa	70
磁场变换器	电导率 $\gamma_t / (\text{S} \cdot \text{m})$	5.998×10^7
	密度 $\rho_t / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	8700
	泊松比 σ_t	0.33
	杨氏模量 E_t / GPa	110
驱动线圈	密度 $\rho_c / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	8700
	电导率 $\gamma_c / (\text{S} \cdot \text{m})$	5.998×10^7
	泊松比 σ_c	0.33
	杨氏模量 E_c / GPa	110

3 仿真结果及分析

3.1 仿真结果与分析

管件所受电磁力的大小和分布情况与三磁场变换器的结构参数密切相关, 本文从径向电磁力密度和管件径向位移量两方面对管件胀形情况进行定性和定量分析。在保持管件和线圈的位置、结构和材料属性不变的情况下, 研究三磁场变换器相关结构参数对管件成形均匀性的影响。在保持其他两个结构参数不变时, 分别研究磁场变换器的间距 H_a 、中部散磁器外壁高度 H_b 和端部集磁器外壁高度 H_c 对管件成形均匀性的影响。管件电磁胀形模型的几何结构如图 7 所示, 磁场变换器与线圈之间的距离为 3.5 mm, 与管件之间的距离为 2.5 mm。管件厚度为 2.0 mm。

3.1.1 磁场变换器的间距 H_a

分析不同磁场变换器间距对管件胀形均匀性的影响, 保持中部散磁器外壁高度和端部集磁器外壁高度不变, 即分别为 18.1 和 4.0 mm; 取 7 组不同的磁场变换器间距, 从 16 mm 到 22 mm, 步长为 1 mm。图 8 为不同 H_a 情况下的磁通密度的分布图。随着 H_a 的增加, 耦合到端部集磁器的能量逐渐减少, 磁通密度也随 H_a 的增大而减小。图 9 为不同 H_a 情况下 A 点的电流密度, 从图 9 中可以看出, 电流密度的峰值也随 H_a 增大呈减小的趋势。图 10a 中管件的径向电磁力密度峰值大小由 $4.70 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$ 减小到 $3.15 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$, 管件电磁力的峰值在管件两端部, 且两径向电磁力密度峰值出现的位置距离管件轴向中心处越来越远, 分别从 44

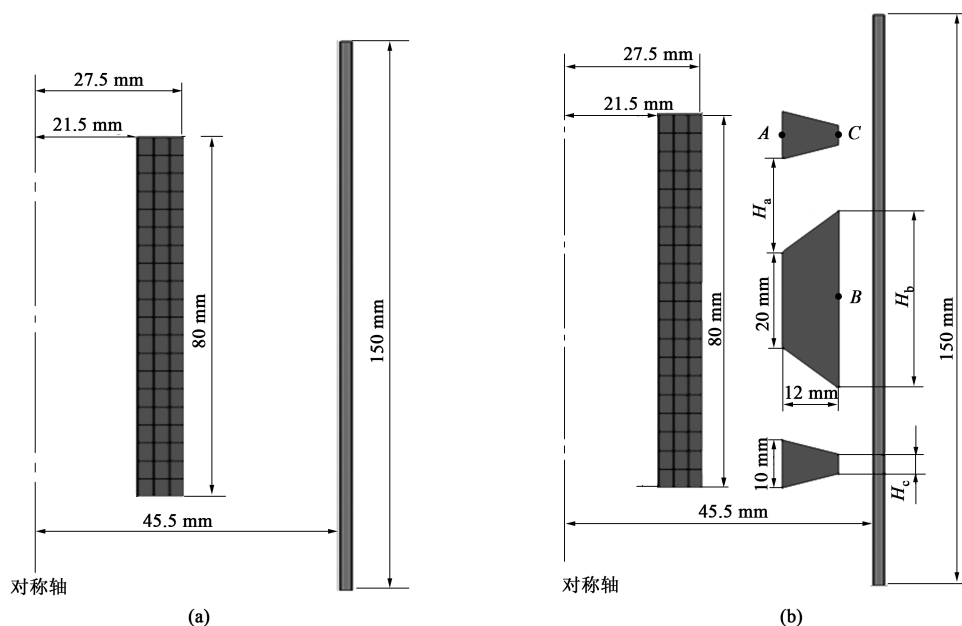


图 7 管件电磁胀形数值仿真结构参数图

(a) 无磁场变换器 (b) 三磁场变换器

Fig. 7 Structure and parameter diagrams of numerical simulation for tube electromagnetic bulging

(a) No magnetic field converter (b) Three-magnetic field converter

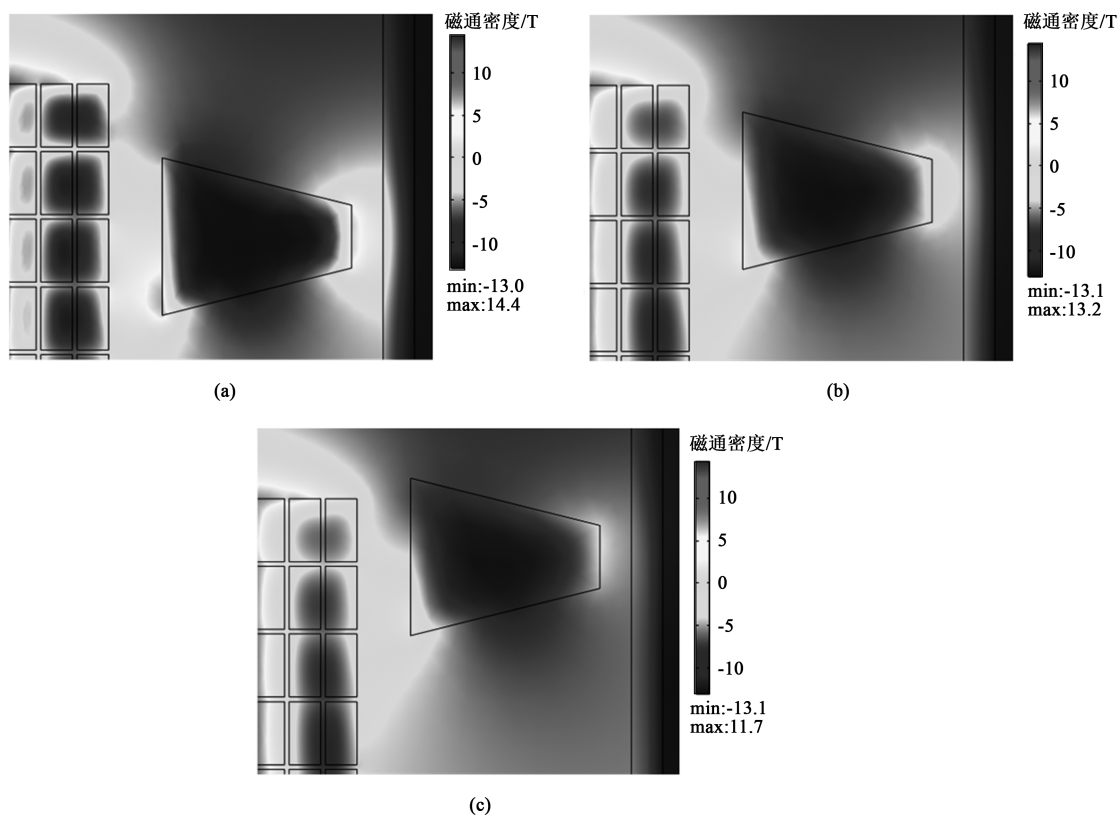


图 8 不同磁场变换器间距下的磁通密度二维分布图

(a) $H_a = 16 \text{ mm}$ (b) $H_a = 19 \text{ mm}$ (c) $H_a = 22 \text{ mm}$

Fig. 8 2D distribution diagrams of magnetic flux density with different magnetic field transformer spacing

和 106 mm 移至 38 和 111 mm; 管件中部的径向电磁力基本不变, 管件所受径向电磁力整体沿轴向呈

“凹型”分布。 H_a 对管件成形均匀性的影响如图 10b 所示, 随着 H_a 的增大, 管件径向电磁力密度的

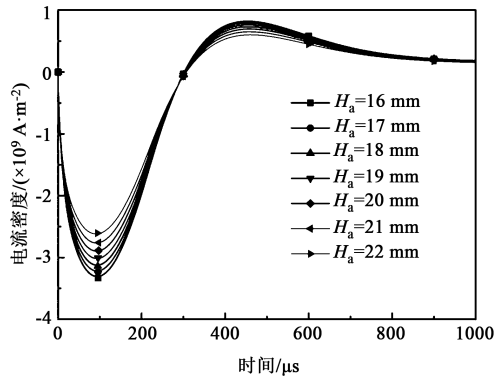
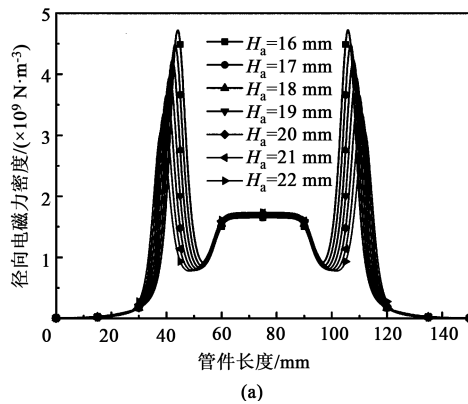
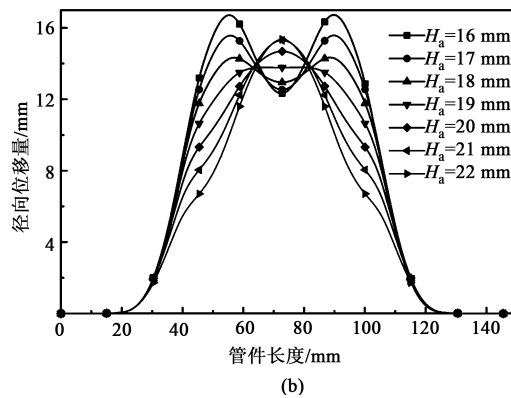


图9 不同磁场变换器间距下的端部集磁器内壁电流密度

Fig. 9 Current density of inner wall for end magnetic collector with different magnetic field transformer spacing



(a)



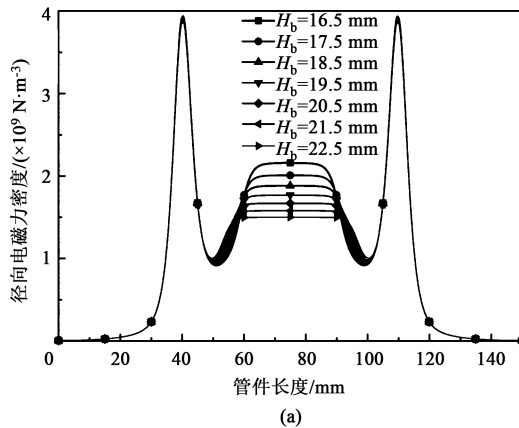
(b)

图10 磁场变换器间距对管件胀形的影响

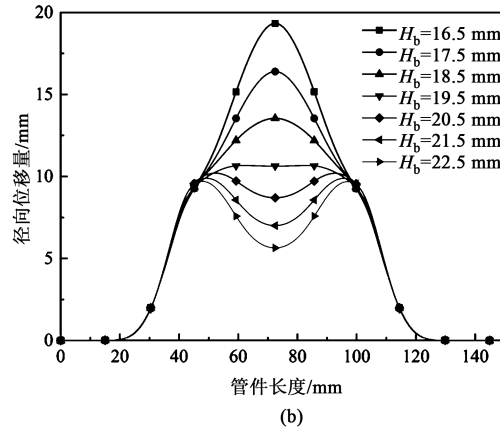
(a) 径向电磁力密度 (b) 径向位移量

Fig. 10 Influence of magnetic field converter spacing on tube electromagnetic bulging

(a) Radial electromagnetic force density (b) Radial displacement



(a)



(b)

图11 中部散磁器外壁高度对管件电磁胀形的影响

(a) 径向电磁力密度 (b) 径向位移量

Fig. 11 Influence of outer wall height of middle magnetic diffuser on tube electromagnetic bulging

(a) Radial electromagnetic force density (b) Radial displacement

所受的径向电磁力密度依然呈凹型分布。随着 H_b 的增大, 管件轴向中心所受电磁力密度由 $2.2 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$ 减小至 $1.53 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$ 。从图 12 中 B

峰值逐渐远离管件中心, 管件中心径向位移量由 12.3 mm 增大至 15.35 mm, 管件胀形轮廓从“凹型”向“凸型”过渡, 当管件胀形轮廓呈“凹型”过渡到“凸型”的临界点处时成形均匀性最好, 在本文中这一临界值为 19 mm。

3.1.2 中部散磁器外壁高度 H_b

分析不同中部散磁器外壁高度对管件胀形均匀性的影响特征, 保持磁场变换器间距和端部集磁器外壁高度不变, 即分别为 20 和 4 mm; 取 7 组不同的中部散磁器外壁高度 H_b , 从 16.5 mm 增大到 22.5 mm, 步长为 1 mm。 H_b 对径向电磁力密度和成形均匀度的影响如图 11 所示。如图 11a 所示, 管件

点的电流密度随 H_b 的增大而减小可以看出, 这是由于散磁器内壁的电流密度不变, 外壁的高度变大导致外壁电流密度变小, 因此, 管件轴向中心所受的电磁

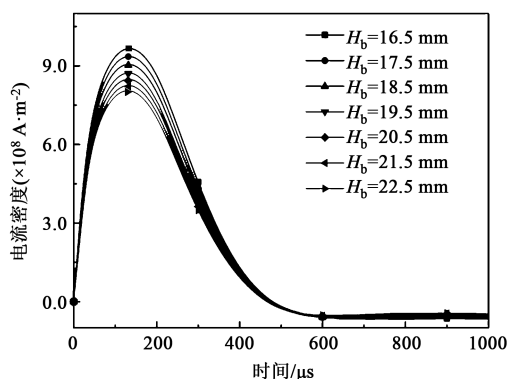
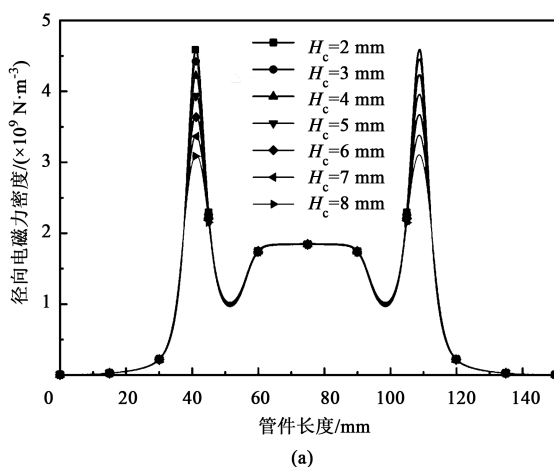


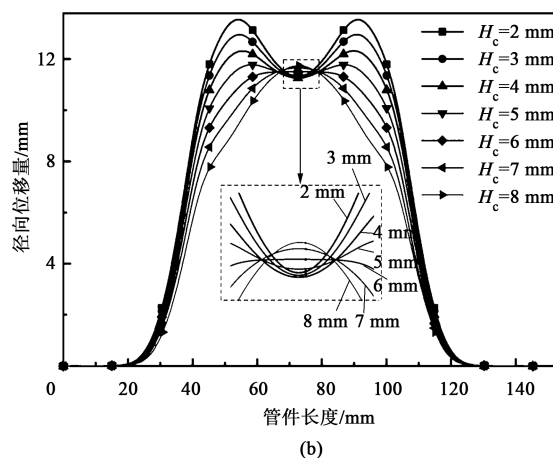
图 12 中部散磁器外壁高度对其电流密度的影响

Fig. 12 Effect of outer wall height of middle magnetic diffuser on its current density

力密度减小; 管件径向电磁力密度峰值位于管件的端部, 峰值大小和位置主要取决于端部集磁器, 基本不会因 H_b 的减小而发生变化。 H_b 对管件成形均匀性的影响如图 11b 所示, 由于管件中部所受的径向电磁力密度随着 H_b 的增大而逐渐减小, 管件中部径向位移量的最大值逐渐由 19.3 mm 减小至 5.6 mm; 管件胀形轮廓从“凸型”向“凹型”过渡, 当管件胀形轮廓在呈“凸型”过渡到“凹型”的临界点处时成形均匀



(a)



(b)

图 13 端部集磁器外壁高度对管件电磁胀形的影响

(a) 径向电磁力密度 (b) 径向位移量

Fig. 13 Influence of outer wall height of end magnetic collector on tube electromagnetic bulging

(a) Radial electromagnetic force density (b) Radial displacement

3.2 对比分析

3.2.1 无磁场变换器与三磁场变换器胀形效果对比

为体现三磁场变换器对管件胀形均匀度的改良效果, 本文利用无磁场变换器管件胀形方法和三磁场变换器管件胀形方法分别对同一个管件进行加工, 分析对比两种方式下电磁力密度的分布, 并对其管件成形均匀性进行对比。保持两种成形方式下管件

性最好, 在本文中这一临界值为 19.5 mm。

3.1.3 端部集磁器外壁高度 H_c

分析不同端部集磁器外壁高度对管件胀形均匀性的影响特征, 保持磁场变换器间距和中部散磁器外壁高度不变, 即分别为 19 mm 和 19.5 mm; 取不同的端部集磁器外壁高度 H_c , 从 2 到 8 mm, 步长为 1 mm, 其中 H_c 对径向电磁力密度的影响如图 13a 所示。随着 H_c 的增大, 管件端部所受电磁力密度从 $4.3 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$ 逐渐减小至 $3 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$ 。从图 14 中可以看出, C 点的电流密度随 H_c 的增大而减小, 这是由于集磁器内壁的感应电流密度不变, 但是外壁的面积变大导致外壁感应电流密度变小。因此, 管件端部所受的电磁力密度减小且峰值轴向跨度的长度略有增加, 管件中部电磁力的密度和分布取决于中部散磁器, 因此, 管件中部的径向电磁力密度基本不会因为 H_c 的增大而发生变化, 管件的径向电磁力密度整体上依然呈“凹型”分布。 H_c 对变形均匀度的影响如图 13b 所示。随着 H_c 的增加, 管件最大胀形部位从两端逐步向中部过渡, 管件成形轮廓也从“凹型”逐步过渡为“凸型”, 当 H_c 为 6 mm 时, 管件成形均匀度最佳。

胀形的最大胀形量为 12 mm, 设置无磁场变换器管件电磁胀形的电压 U_0 为 4.6 kV, 三磁场变换器管件电磁胀形的电压 U_0 为 9.3 kV。

两种加载方式下管件径向电磁力密度分布如图 15a 所示。基于单线圈的无磁场变换器管件电磁胀形中, 管件轴向中部所受的径向电磁力密度最大; 而采用三磁场变换器管件胀形结构时, 管

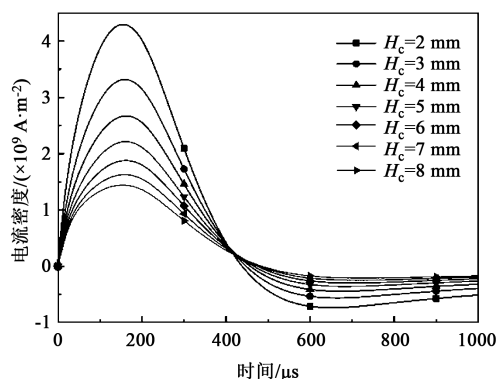
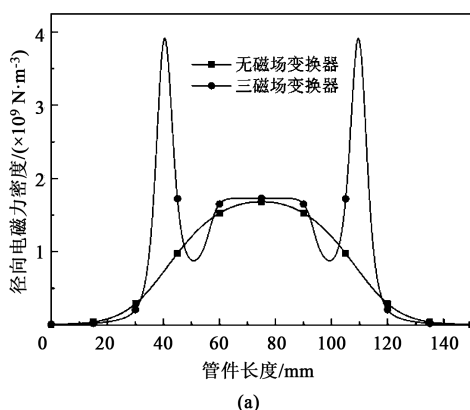
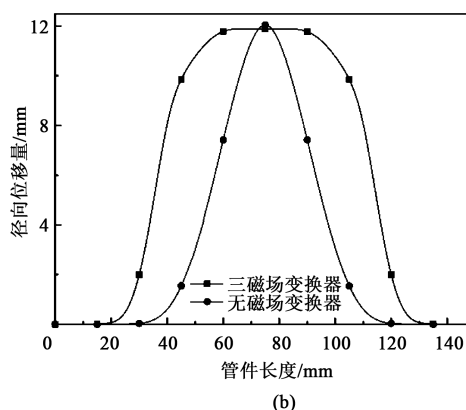


图14 端部集磁器外壁高度对其电流密度的影响

Fig. 14 Influence of outer wall height of end magnetic collector on its current density



(a)



(b)

图15 两种胀形方式下径向电磁力密度 (a) 和径向位移量 (b) 对比

Fig. 15 Comparison of radial electromagnetic force density (a) and radial displacement amount (b) under two bulging modes

图16呈现了两种胀形方式下不同时间点管件表面的电磁力密度分布情况。可以看出,在无磁场变换器的管件胀形中,电磁力主要集中在管件中部,在200 μs 时管件开始发生胀形,在500 μs 时管件胀形基本结束,电磁力和变形主要集中在中部。在三磁场变换器管件胀形中,在200 μs 之前电磁力主要集中在管件端部;在100 μs 时管件端部发生变形;在200 μs 后管件中部电磁力开始增大,但依然以端部电磁力为主,管件中部在电磁力和端部的“拉动”下开始发生变形;在300 μs 后管件中部在电磁力的作用下进一步胀形;在400 μs 时端部电磁力在管件上分布的不再明显,主要以中部电磁力为主,在500 μs 时管件胀形基本结束。

图17为管件胀形三维轮廓图,为比较两种胀形方法下管件的胀形均匀性,将变形量大于等于95%最大变形量的轴向长度定义为 D_r , D_r 越大,证明管件胀形均匀性越好^[9]。无集磁器管件胀形的 D_r 为10 mm,三集磁器管件胀形的 D_r 为42 mm,对比可

件端部电磁力密度增强,电磁力密度不再集中于管件中部,径向电磁力密度总体呈“凹型”分布。管件的径向位移量如图15b所示,本文定义胀形量大于1 mm的管件胀形区域为胀形范围 L_z 。三磁场变换器管件胀形结构由于引入了端部集磁器,端部电磁力得到增强,因此,管件的胀形范围大于无磁场变换器的管件胀形结构胀形范围,分别为96和70 mm。无磁场变换器管件电磁胀形系统中,管件的径向位移集中在管件的轴向中心,最终管件中部的胀形量明显大于其他区域;而在基于三磁场变换器的管件电磁胀形系统中,“凹型”分布的径向电磁力密度使得管件端部的胀形量增加,通过端部带动轴向中部胀形,因此胀形更加平整且均匀。

以得出,利用三磁场变换器管件胀形的管件均匀度提高了3.2倍。

3.2.2 三磁场变换器与其各组成部分胀形效果对比

为进一步体现三磁场变换器胀形方式的优越性,将三磁场变换器管件胀形结构分为仅含两端集磁器的双集磁器管件胀形结构和仅含中部散磁器的基于散磁器的管件胀形结构。构建双集磁器管件胀形结构和基于散磁器的管件胀形结构模型,其几何结构如图18所示。对于双集磁器管件胀形结构和基于散磁器的管件胀形结构,磁场变换器与线圈和管件之间的距离均分别为3.5和2.5 mm。

保持3种方式下管件胀形的最大胀形量均为12 mm,双集磁器管件胀形结构、基于散磁器的管件胀形结构以及三磁场变换器管件胀形结构电压分别设置为7.02、8.68和9.3 kV。双集磁器管件胀形结构、基于散磁器的管件胀形结构以及三磁场变换器管件胀形结构沿管件的径向电磁力密度如图19a所示。双集磁器管件胀形结构与三磁场变换器管件

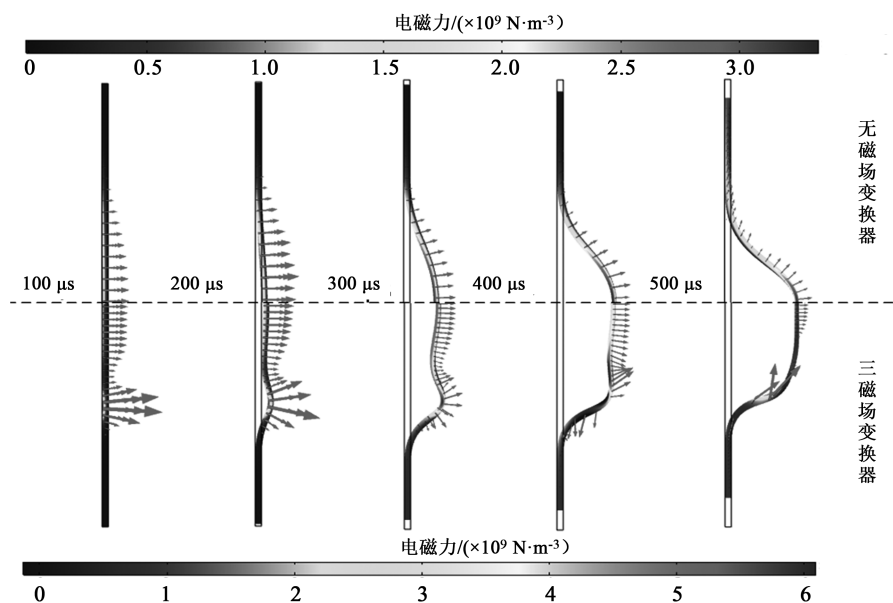


图 16 两种胀形方式下电磁力动态分布规律

Fig. 16 Dynamic distribution law of electromagnetic force under two bulging modes

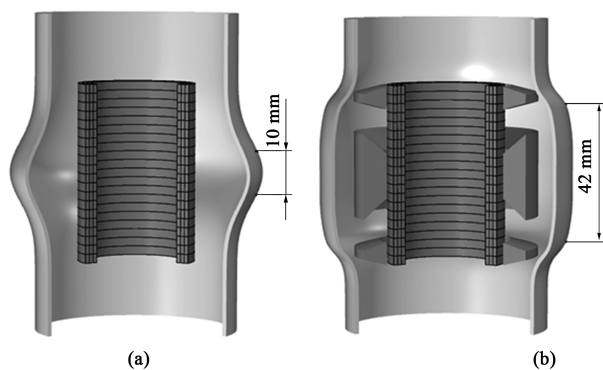


图 17 基于无磁场变换器 (a) 和三磁场变换器 (b) 管件三维成形效果图

Fig. 17 3D forming effect diagrams of tube based on no magnetic field converter (a) and three-magnetic field converter (b)

胀形结构相比, 由于均引入了端部集磁器, 管件端部电磁力得以增强, 峰值位于端部集磁器所处的位置, 且由于两种胀形方式下的集磁器位置相同, 电磁力密度峰值的位置也相同, 为管件轴向 35.3~45.3 mm 和 94.7~104.7 mm。双集磁器管件胀形结构的管件中部电磁力呈凸型分布, 管件中心存在的电磁力密度峰值为 $1.75 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$, 但小于端部集磁器位置的峰值 $2.3 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

基于散磁器的管件胀形结构与三磁场变换器管件胀形结构相比, 由于都在中部引入了散磁器, 因此, 对于管件中部而言都起到了“削峰”的作用, 散磁器所在的位置, 即管件轴向 56~94 mm 处, 电磁力呈直线分布, 且由于散磁器的结构和位置相同,

因此, 两种胀形结构管件中部呈直线分布的电磁力的范围相同, 且大小都为 $1.75 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

图 19b 为 3 种管件胀形结构下管件的径向位移量。由于双集磁器管件中部仍存在峰值, 因此, 与基于散磁器的管件胀形结构和三磁场变换器管件胀形结构相比, 管件最终胀形量更集中在管件中心。双集磁器管件胀形结构由于引入了端部集磁器, 端部电磁力得到增强, 因此, 管件的胀形范围比基于散磁器的管件胀形结构胀形范围要大, 双集磁器管件胀形结构的 L_z 为 80 mm, 基于散磁器的管件胀形结构的 L_z 为 75 mm。且在管件轴向 25~35 mm 的范围内, 双集磁器胀形方式的胀形量大于基于散磁器的管件胀形方式的胀形量, 例如在轴向 35 和 45 mm 处, 基于散磁器的管件胀形方式的胀形量为 0.5 和 1.5 mm, 双集磁器管件胀形方式下胀形量为 0.9 和 2.0 mm。

基于散磁器的管件胀形结构由于引入了中部散磁器, 管件中部电磁力被削弱, 与双集磁器管件胀形结构相比, 中部胀形更为平整, 在相同最大胀形量的情况下, 双集磁器的管件胀形结构的 D_r 为 10.4 mm, 基于散磁器的管件胀形结构的 D_r 为 12.5 mm, 最终成形效果如图 20 所示。

三磁场变换器管件胀形结构结合了以上两种管件胀形结构的优点, 增大了管件端部的胀形量以及管件轴向胀形的范围, 同时削弱了管件中部的电磁力, 使得管件胀形更加均匀。在相同最大胀形量的

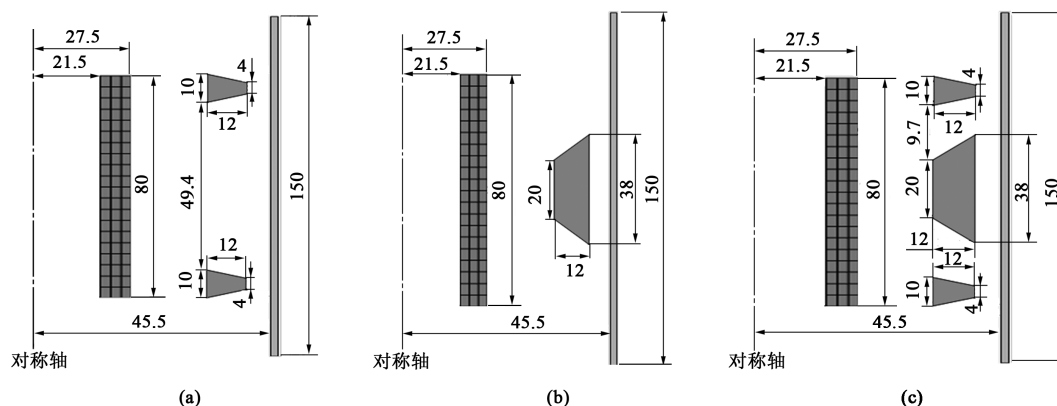


图 18 3 种方式下管件胀形数值仿真的几何结构 (mm)

(a) 双集磁器 (b) 散磁器 (c) 三磁场变换器

Fig. 18 Geometric structures of numerical simulation for tube bulging under three modes (mm)

(a) Double-magnetic collector (b) Magnetic diffuser (c) Three-magnetic field converter

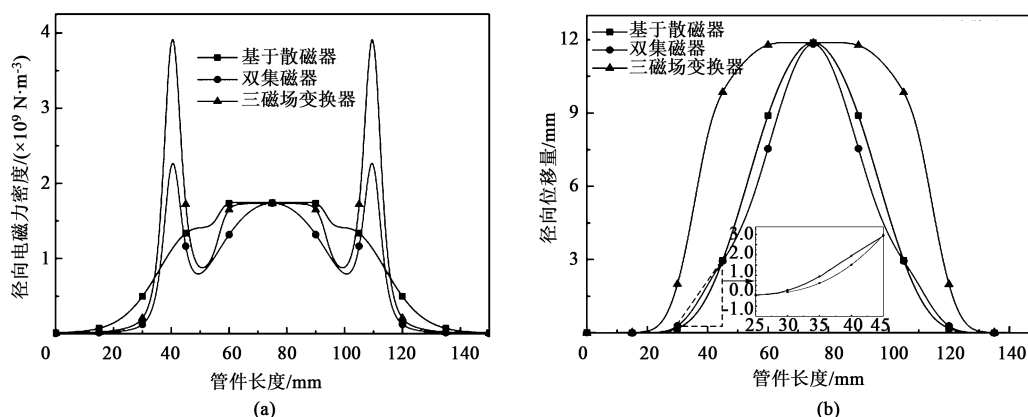


图 19 3 种胀形方式下径向电磁力密度 (a) 和径向位移量 (b) 对比

Fig. 19 Comparison of radial electromagnetic force density (a) and radial displacement amount (b) under three bulging modes

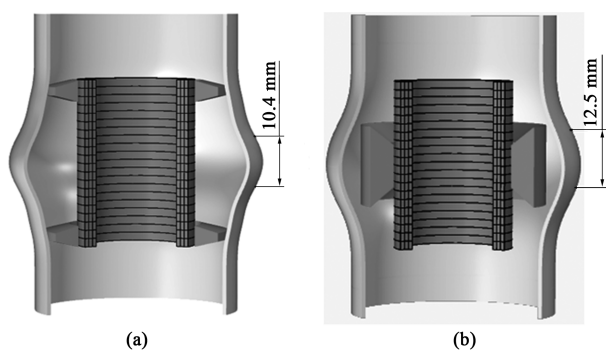
图 20 基于双集磁器 (a) 和散磁器 (b) 管件
三维成形效果图

Fig. 20 3D forming effect diagrams of tube based on double-magnetic collector (a) and magnetic diffuser (b)

情况下, 三磁场变换器管件胀形结构的 L_z 为 96 mm, D_r 为 42 mm。三磁场变换器对比仅含端部集磁器的双集磁器的管件胀形结构, 均匀度提高了

3.04 倍, 对比基于散磁器的管件胀形结构, 均匀度提高了 2.36 倍, 进一步证明了三磁场变换器管件胀形结构的优越性。

4 结语

针对管件电磁胀形过程中管件轴向均匀度差这一问题, 本文提出了一种基于三磁场变换器的管件电磁胀形方法, 利用内壁高于外壁的集磁器增大端部特定区域的电磁力, 外壁高于内壁的散磁器进一步削弱了管件中部电磁力, 使得管件径向电磁力呈“凹型”分布, 提高了管件成形的均匀度。通过对三磁场变换器的管件胀形研究得出, 在保持线圈和管件结构、系统放电参数不变的情况下, 存在最合适的磁场变换器间距、中部散磁器外壁高度和端部集磁器外壁高度, 使得管件胀形的均匀度最佳。

在最大胀形量相同的情况下,采用三磁场变换器管件胀形结构,与无磁场变换器的传统线圈管件胀形方式相比,管件的均匀胀形范围增大了 3.2 倍,与双集磁器管件胀形方式相比,均匀度提高了 3.04 倍,与基于散磁器的管件胀形方式相比,均匀度提高 2.36 倍,证明三磁场变换器管件胀形结构可在一定程度上提高管件胀形的均匀度。

参考文献:

- [1] 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,2023,38(2):285-296.
Xiong Q, Li Q S, Li Z, et al. Influence and mechanism of magnetic collector on heating of electromagnetic forming drive coil [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38 (2): 285-296.
- [2] 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,(5):1-7.
Li C F, Yu H P. Theoretical research progress of electromagnetic forming technology [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2005, (5): 1-7.
- [3] Harvey G W, Brower D F. Metal forming device and method [P]. America: US2976907, 1961.
- [4] Li F Q, Fang Y, Zhu Y, et al. Study on the homogeneity of deformation under electromagnetic expansion of metal tube [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2013, 42 (1): 13-25.
- [5] 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: 2923264.
- [6] 余一杰.基于凹型线圈的管件电磁胀形电磁力分布与成形均匀性研究[D].宜昌:三峡大学,2019.
Yu Y J. Study on Electromagnetic Force Distribution and Forming Uniformity of Electromagnetic Bulging of Pipe Fittings Based on Concave Coils [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2019.
- [7] Khimenko T L, Mezhev T A, Legeza V A, et al. Inductor for forming metals by the pressure of a pulsed magnetic field [P]. America: US4143532, 1979.
- [8] Qiu L, Wang C L, Abu-Siada A, et al. Numerical analysis of tube expansion by electromagnetic forming using magnetic field shaper [J]. IEEE Access, 2020, 8: 196253-196263.
- [9] 邱立,王成林.基于双集磁器结构的管件电磁胀形研究[J].智慧电力,2021,49(10):97-103.
Qiu L, Wang C L. Study on electromagnetic bulging of pipe fittings based on double magnetic collectors [J]. Smart Power, 2021, 49 (10): 97-103.
- [10] 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.
Huang H. Research on Electromagnetic Forming Correction of Sheet Metal Based on Magnetic Collector [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2019.
- [11] 王成林.基于集磁器的管件电磁胀形电磁力分布规律与管件成形均匀度研究[D].宜昌:三峡大学,2022.
Wang C L. Study on the Distribution Law of Electromagnetic Force and the Forming Uniformity of Pipe Fittings Based on Magnetic Collector [D]. Yichang: China Three Gorges University, 2022.
- [12] 邱立,刘洪池,姜晨非,等.双板件电磁翻边成形效率研究[J].锻压技术,2022,47(5):96-102.
Qiu L, Liu H C, Jiang C F, et al. Study on the forming efficiency of electromagnetic flanging of double-plate parts [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (5): 96-102.
- [13] 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 L, Tian X, Wu W Y, et al. Research on electromagnetic flanging forming effect of bi-directional loaded pipe fittings based on magnetic field converter [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2022, 14 (3): 17-24.
- [14] Li Q, Bin W, Abu-Siada A, et al. Research on forming efficiency in double-sheet electromagnetic forming process [J]. IEEE Access, 2020, 8: 19248-19255.
- [15] Nassiri A, Chini G, Kinsey B. Spatial stability analysis of emergent wavy interfacial patterns in magnetic pulsed welding [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2014, 63 (1): 245-248.
- [16] Yu H P, Li C F, Zhao Z H, et al. Effect of field shaper on magnetic pressure in electromagnetic forming [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 168 (2): 245-249.
- [17] 邱立,何琴,刘洪池.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[J].锻压技术,2023,48(5):245-253.
Qiu L, He Q, Liu H C. Analysis of electromagnetic force distribution and deformation uniformity in electromagnetic compression of pipe fittings based on magnetic field transformer [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (5): 245-253.
- [18] 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 electromagnetic flanging of pipe fittings based on bidirectional electromagnetic force loading [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36 (14): 2904-2911.
- [19] 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 bidirectional loading pipe fittings [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13 (5): 84-91.