

# The Effect of Parameters of the Uniform Pressure Coil Structure to Uniform Magnetic Force Distribution

Fei Feng<sup>1,2</sup>, Yuan Cheng<sup>3</sup>, Shangyu Huang<sup>3</sup>, Xiaohui Cui<sup>4</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Material Processing and Die and Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei

<sup>2</sup>School of Mechanical and Automotive Engineering, Hubei University of Arts and Science, Xiangyang Hubei

<sup>3</sup>School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei

<sup>4</sup>School of Materials and Energy, Guangdong University of Technology, Guangzhou Guangdong

Email: fengfeigood@163.com

Received: Nov. 20<sup>th</sup>, 2016; accepted: Dec. 16<sup>th</sup>, 2016; published: Dec. 23<sup>rd</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

The approximate uniform magnetic field force can be generated by uniform press coil, and the differences of uniform distribution of magnetic field force by different coil structures are significant. In order to study the effect law of coil structure parameters to uniform distribution of magnetic force in electromagnetic sheet forming, the 3D finite element models for electromagnetic field analysis were established by software ANSYS. The structure parameters on the distribution uniformity of the magnetic pressure were analyzed. The method of improving the electromagnetic forming force distribution uniformity of uniform press coil was proposed, which will improve the effect of electromagnetic forming and expand the scope of the application.

## Keywords

Electromagnetic Forming, Uniform Press Coil, Uniform Distribution, Finite Element Analysis

---

# 匀压力线圈结构参数对板料电磁力均匀性分布的影响

冯 飞<sup>1,2</sup>, 程 然<sup>3</sup>, 黄尚宇<sup>3</sup>, 崔晓辉<sup>4</sup>

<sup>1</sup>华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室, 湖北 武汉

<sup>2</sup>湖北文理学院机械与汽车工程学院, 湖北 襄阳

<sup>3</sup>武汉理工大学材料科学与工程学院, 湖北 武汉

<sup>4</sup>广东工业大学材料与能源学院, 广东 广州

Email: fengfeigood@163.com

收稿日期: 2016年11月20日; 录用日期: 2016年12月16日; 发布日期: 2016年12月23日

## 摘要

匀压力线圈能够产生近似均匀的磁场力, 而不同结构电磁力均匀分布的差异较大。本文为研究匀压力线圈结构参数对板料电磁力均匀分布影响规律, 基于ANSYS软件建立了3D电磁场有限元模型, 分析了结构参数对磁压力均匀性分布的影响, 给出了匀压力线圈提高电磁成形力分布均匀性的方法, 对进一步提高电磁成形效果、扩大应用范围具有重要意义。

## 关键词

电磁成形, 匀压力线圈, 均匀分布, 有限元分析

## 1. 引言

电磁成形是金属在强脉冲磁场中受力而发生塑性变形的一种高能高速的成形方法[1]。高成形速率使得很多金属工件的成形性得到提高, 尤其对难成形金属效果明显, 同时电磁成形无接触加工的特点也能回避传统成形工艺中的润滑及模具强度等问题[2] [3]。

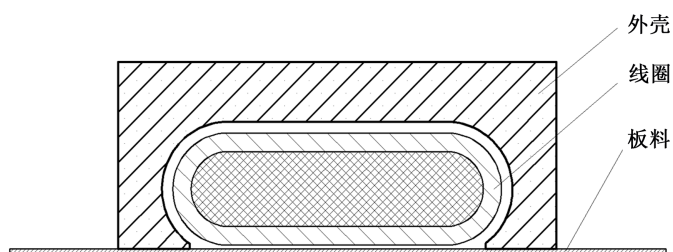
匀压力线圈电磁成形可以用于压印、浮雕及微制造等[4] [5]。线圈结构影响电磁成形过程中成形力分布, 从而影响电磁成形效果[6]。相关研究人员对匀压力线圈做了大量研究, 程然[7]等人对匀压力线圈结构进行了优化, 提高了线圈的使用寿命。崔晓辉[8]等人对匀压力线圈的电磁力分布及板料的变形行为进行了研究。以上研究表明: 匀压力线圈能够产生近似均匀的磁场力, 不同的线圈结构电磁力的分布差异较大。而对如何提高匀压力线圈电磁力的均匀性分布尚未见报导, 线圈结构参数对电磁力均匀性分布具有重要影响, 且均匀分布的电磁力对提高微制造、推广成形工艺、扩大应用范围具有重要作用。本文主要对匀压力线圈的电磁成形进行有限元建模, 分析不同线圈结构参数对板料电磁力均匀性分布的影响, 并对线圈电磁力大小进行研究。

## 2. 电磁场有限元模型

本文采用 ANSYS 进行建模分析, 匀压力线圈示意图如图 1 所示, 其实物图见图 2, 其线圈类似于跑道形, 图 3 为线圈、外壳及板料在 ANSYS 中划分网格后的有限元模型, 图 4 为匀压力线圈电磁场有限元分析图, 空气、线圈和板料采用的单元类型为 solid97, 并且将空气、线圈和板料划分为规则的 6 面体结构来提高分析精度。远场采用 inf111 远场单元类型, 用来描述磁场分析的边界条件。材料为 AZ31B 镁合金板料, 线圈、外壳、板料、空气场及远场的材料特性如表 1 所示。

## 3. 电磁场模拟结果及分析

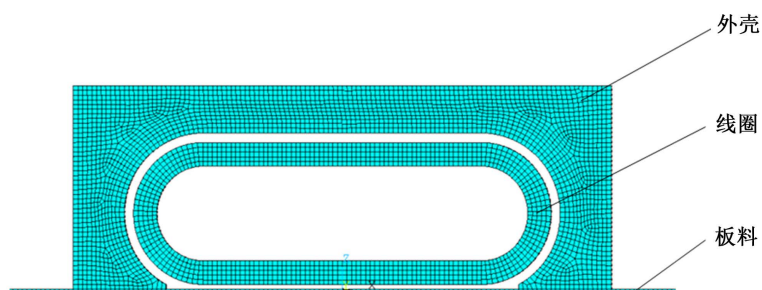
图 5 为匀压力线圈上的电流密度分布图。由图可见, 板料上产生大于线圈电流值的感应电流, 而



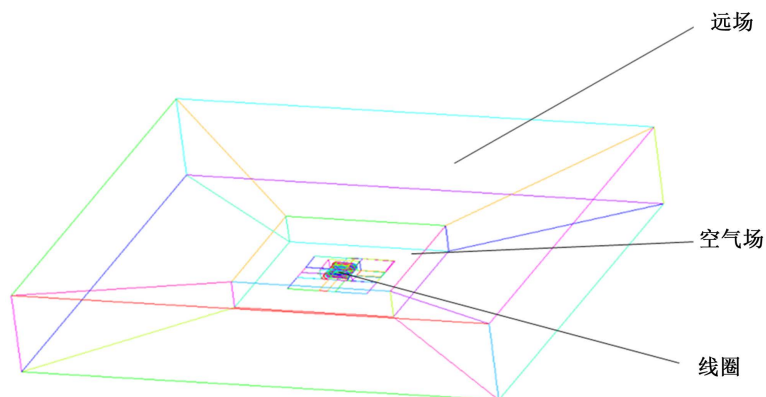
**Figure 1.** Schematic diagram of uniform pressure coil  
**图 1.** 匀压力线圈示意图



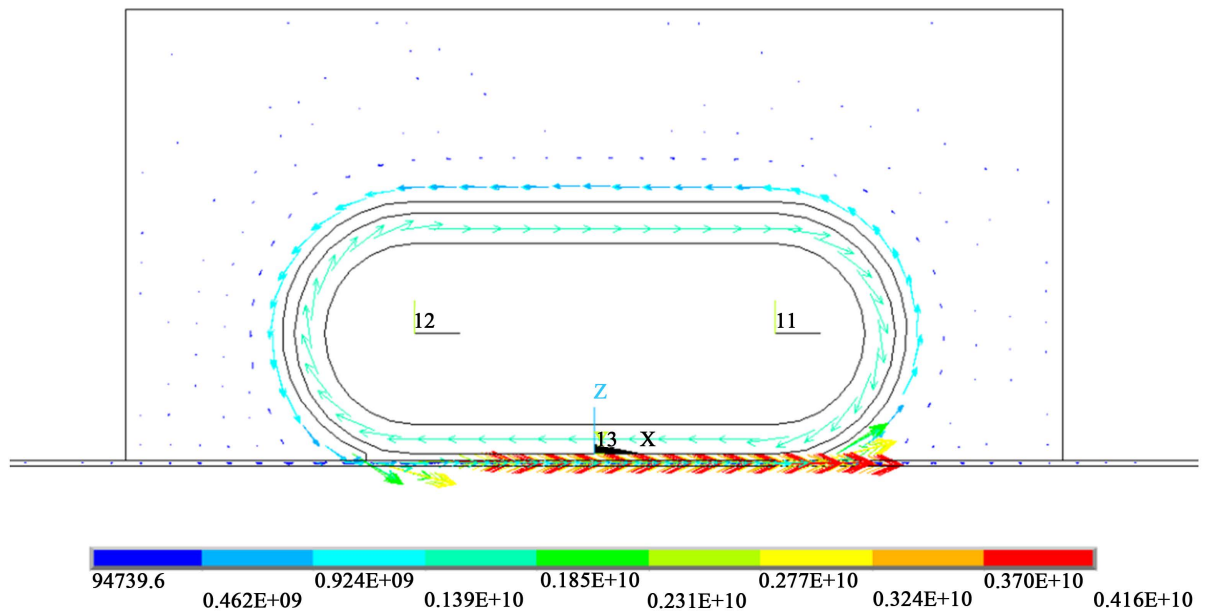
**Figure 2.** The photos of uniform pressure coil  
**图 2.** 匀压力线圈实物图



**Figure 3.** The finite element model of coil, shell and sheet  
**图 3.** 线圈、外壳及板料划分网格后有限元模型



**Figure 4.** The analysis of finite element electromagnetic field with uniform pressure coil  
**图 4.** 匀压力线圈电磁场有限元分析图



**Figure 5.** The current density distribution of electromagnetic forming with uniform pressure coil

**图 5.** 匀压力线圈成形过程电流密度分布

**Table 1.** Element type and material characteristics

**表 1.** 单元类型及材料特性

实体	单元类型	相对磁导率	电阻率
线圈	SOLID97	1	1.673E-8
线圈外壳	SOLID97	1	1.673E-8
板料	SOLID97	1.0002	4.7E-8
空气场	SOLID97	1	-
远场	INFIN111	1	-

外壳上产生的感应电流值小于线圈电流值，且它们的方向与线圈上激励电流相反。这是因为感应电流所产生的磁场是阻碍原磁通量发生变化的，因此感应电流方向与线圈上激励电流相反。感应电流在外壳的厚度方向上分布不均匀，沿厚度方向由靠近线圈一侧向外衰减，可以看出感应电流几乎只存在于靠近线圈的一层，再向外电流值很小，这是电流的集肤效应造成的。

### 3.1. 匀压力线圈匝间距对电磁力均匀性的影响

图 6 为匝间距为 3 mm 的匀压力线圈示意图，从图 7~9 可以看出，在线圈匝间距为 3 mm 时，板料主要受力区域的节点力大小不是均匀的，不同大小的电磁力相间排列，随着线圈匝间距减小，电磁场产生的节点力大小逐渐分布均匀(图中红色十字叉的分布即为电磁节点力的分布)，这是因为线圈匝间距越小，磁场线分布越均匀，因此产生的电磁力分布越均匀。而且线圈匝间距越小，磁场线分布越密集，磁场强度越大，产生的电磁节点力越大。

### 3.2. 匀压力线圈截面积对电磁力均匀性的影响

图 10 为截面尺寸为 4 mm\*6 mm 的匀压力线圈示意图，在不改变线圈高度，匝间距，及其与外壳和

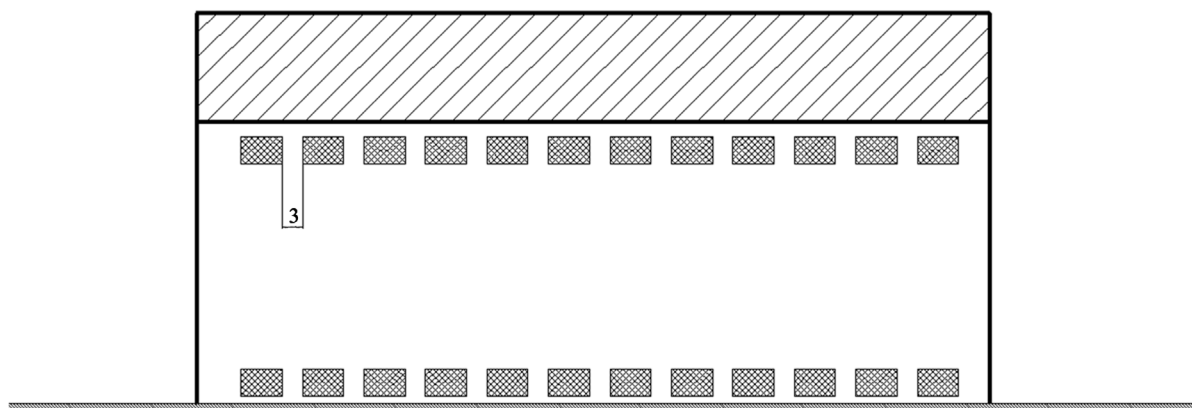


Figure 6. The 3 mm turn spacing with the uniform pressure coil

图 6. 匝间距为 3 mm 的匀压力线圈

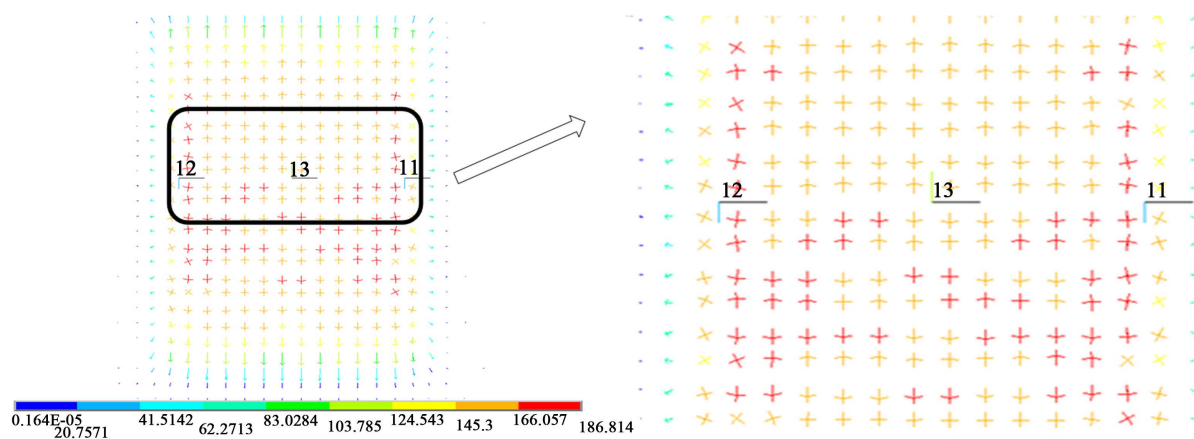


Figure 7. The distribution of electromagnetic force with 3 mm turn spacing

图 7. 匝间距 3 mm 时电磁节点力分布

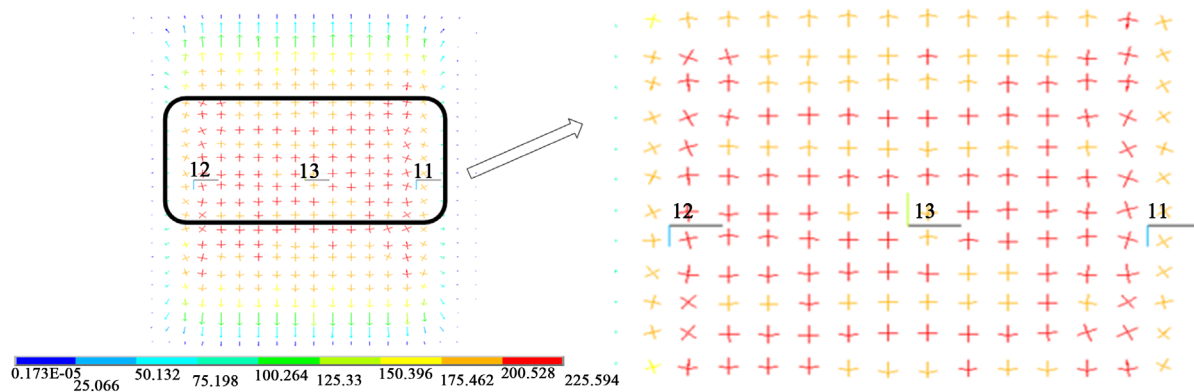
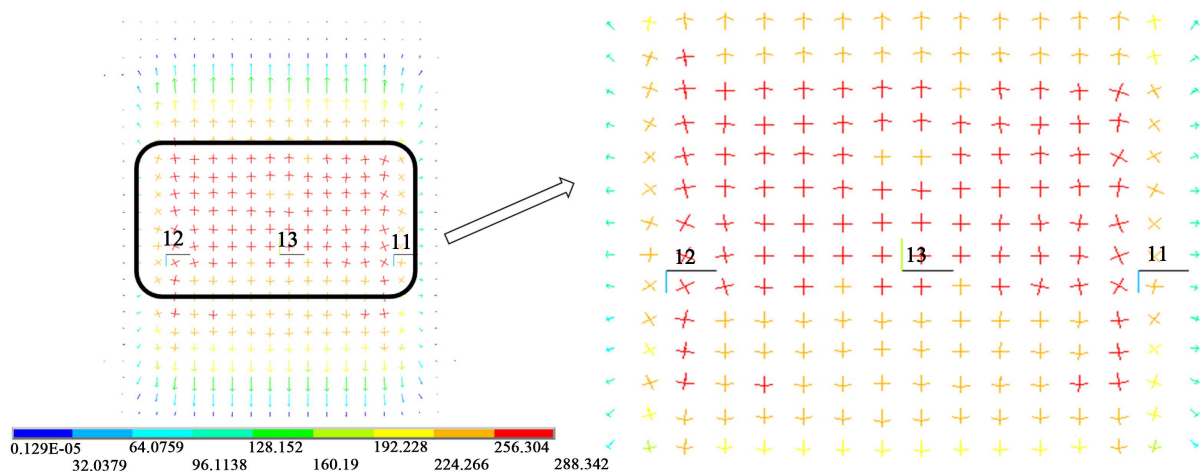


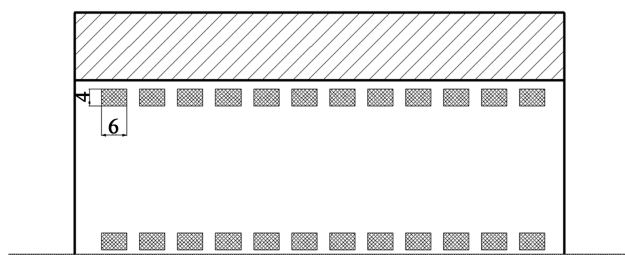
Figure 8. The distribution of electromagnetic force with 2 mm turn spacing

图 8. 匝间距 2 mm 时电磁节点力分布

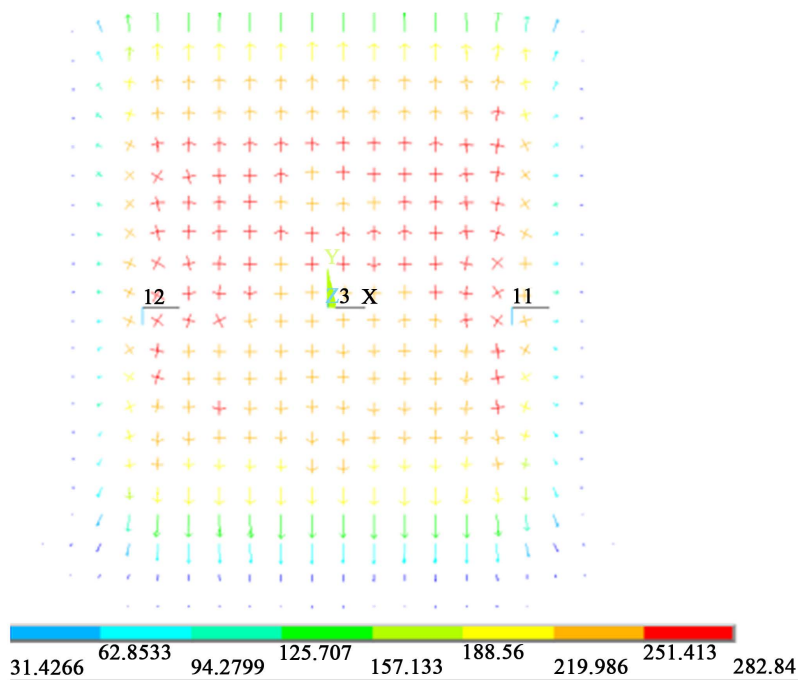
板料间隙的条件下, 只对线圈截面形状进行调整, 分别对截面为 4 mm\*6 mm, 5 mm\*6 mm, 7 mm\*6 mm 的长方形和截面为 6 mm\*6 mm 的正方形的线圈进行模拟分析。从图 11~14 可以看出, 在线圈厚度尺寸不变条件下, 随着长度方向尺寸增加, 一定区域内电磁场节点力分布逐渐均匀化(从图中的红色十字叉的



**Figure 9.** The distribution of electromagnetic force with 1 mm turn spacing  
**图 9.** 匝间距 1 mm 时电磁节点力分布



**Figure 10.** The section size of 4 mm\*6 mm with the uniform pressure coil  
**图 10.** 截面尺寸为 4 mm\*6 mm 的匀压力线圈



**Figure 11.** The distribution of electromagnetic force with 4 mm\*6 mm of the section size  
**图 11.** 截面尺寸为 4 mm\*6 mm 节点力分布

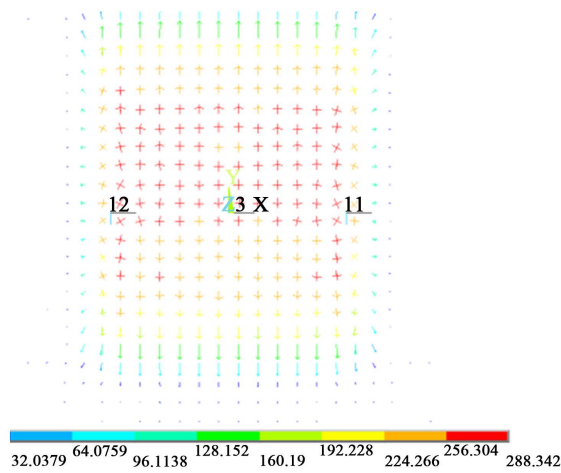


Figure 12. The distribution of electromagnetic force with 5 mm\*6 mm of the section size  
图 12. 截面尺寸为 5 mm\*6 mm 节点力分布

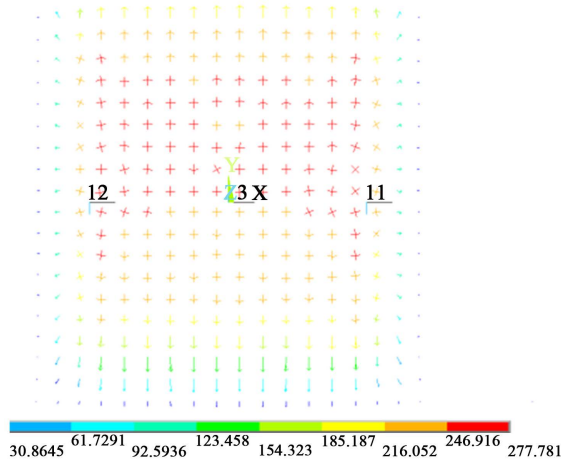


Figure 13. The distribution of electromagnetic force with 6 mm\*6 mm of the section size  
图 13. 截面尺寸为 6 mm\*6 mm 节点力分布

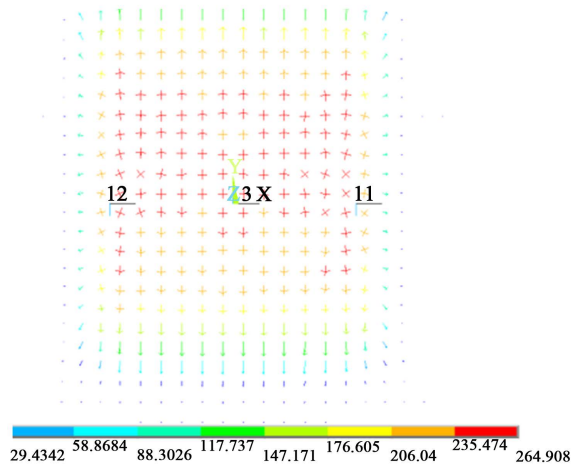


Figure 14. The distribution of electromagnetic force with 7 mm\*6 mm of the section size  
图 14. 截面尺寸为 7 mm\*6 mm 节点力分布

分布可以看出), 而当截面尺寸为正方形时, 电磁节点力均匀性分布进一步增加。因此, 匀压力线圈正方形截面尺寸能够提高电磁力均匀性。

### 3.3. 匀压力线圈高度对电磁力均匀性的影响

图 15 匀压力线圈高度示意图, 在不改变线圈截面积, 匝间距及外壳与线圈间距条件下, 只对线圈高度调整, 分别对线圈高度为 20 mm、30 mm、40 mm、50 mm 和 60 mm 进行模拟分析。从图 16~20 中可以看出, 随着线圈高度的增加, 在一定区域内电磁节点力均匀性逐渐提高, 电磁节点力的大小也逐渐增大, 这是由于随着线圈高度增加, 磁场线的分布更加均匀, 环形跑道式的线圈形状逐渐向圆形线圈转变, 电磁节点力大小更加趋向一致。因此, 节点力分布更加均匀。并且随着线圈高度增加, 电磁节点力的大小逐渐增大。

### 3.4. 线圈与外壳间距对电磁力均匀性的影响

图 21 为匀压力线圈外壳与线圈间距示意图, 在不改变线圈高度、匝间距及截面积, 只对外壳与线圈间距调整, 分别对线圈高度为 2 mm、3 mm、4 mm、和 5 mm 进行模拟分析。从图 22~25 中可以看出, 随着线圈与外壳间距的增加, 在一定区域内电磁节点力均匀性逐渐降低, 其大小也在逐渐减小, 这是由于随着线圈与外壳间距增加, 作用在外壳上的感应电流逐渐减小, 磁感应线分布越稀疏, 节点力分布均匀性降低, 电磁节点力大小减小。

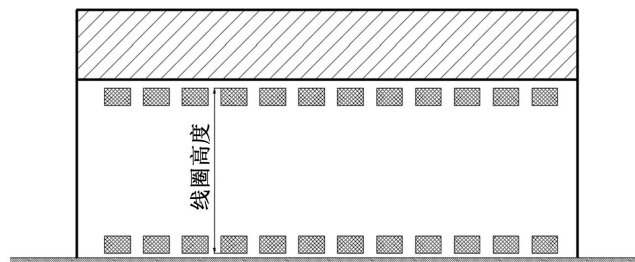


Figure 15. Schematic diagram of uniform pressure coil height

图 15. 匀压力线圈高度示意图

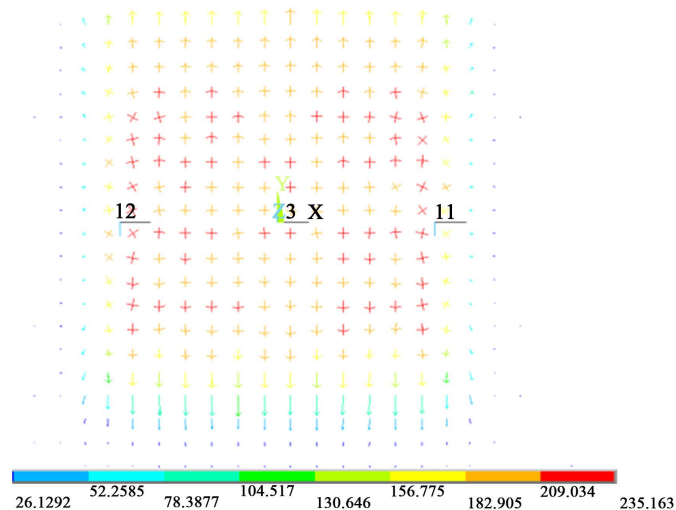
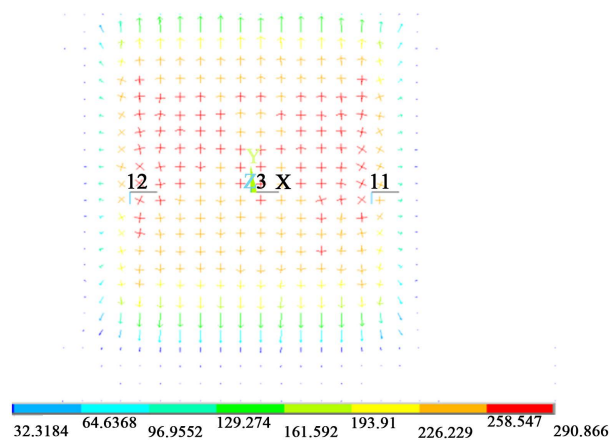


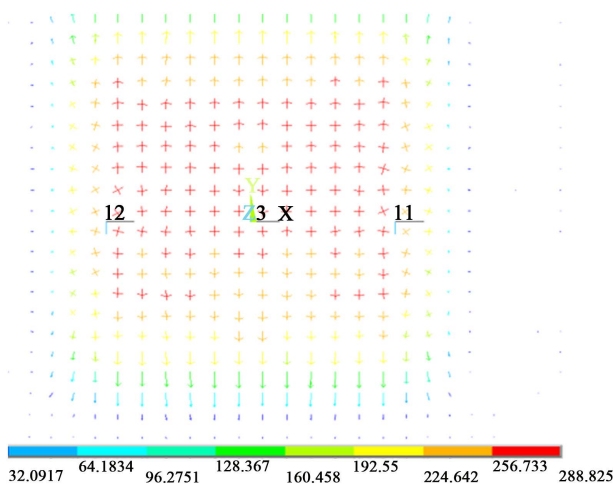
Figure 16. The distribution of electromagnetic force with 20 mm coil height

图 16. 线圈高度 20 mm 时电磁节点力分布

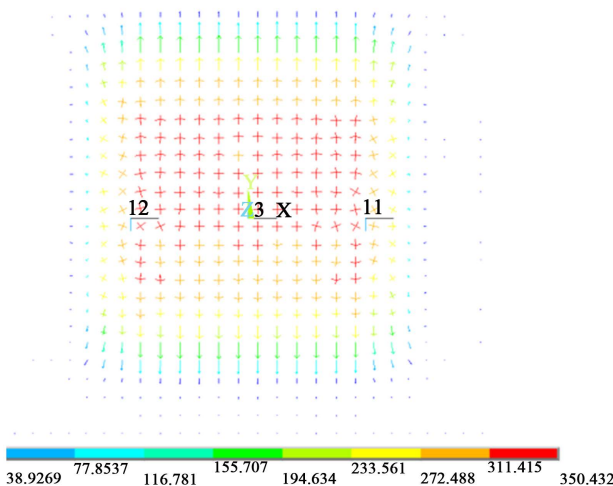




**Figure 17.** The distribution of electromagnetic force with 30 mm coil height  
**图 17.** 线圈高度 30 mm 时电磁节点力分布



**Figure 18.** The distribution of electromagnetic force with 40 mm coil height  
**图 18.** 线圈高度 40 mm 时电磁节点力分布



**Figure 19.** The distribution of electromagnetic force with 50 mm coil height  
**图 19.** 线圈高度 50 mm 时电磁节点力分布

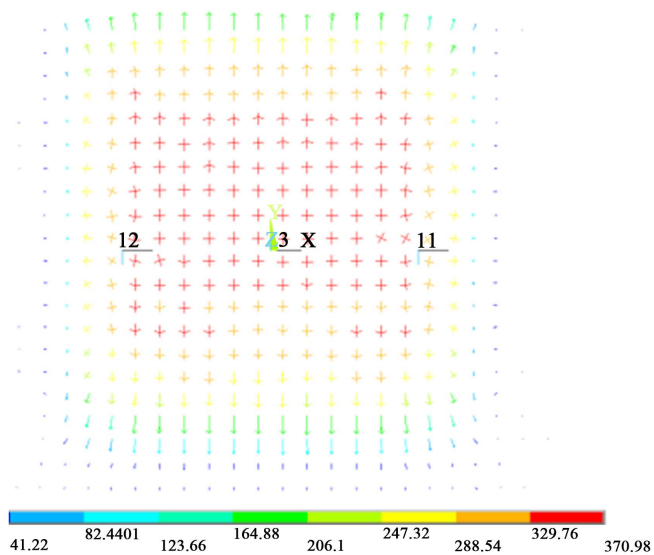


Figure 20. The distribution of electromagnetic force with 60 mm coil height  
图 20. 线圈高度 60 mm 时电磁节点力分布

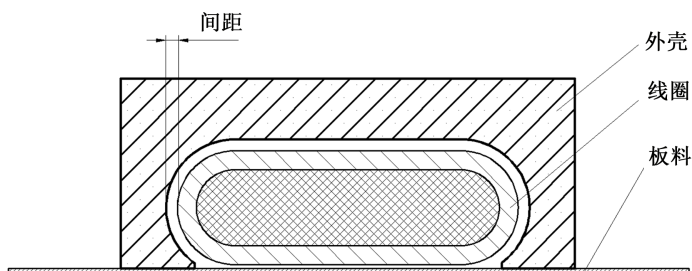


Figure 21. The schematic diagram of distance of shell and coil  
图 21. 匀压力线圈外壳与线圈间距示意图

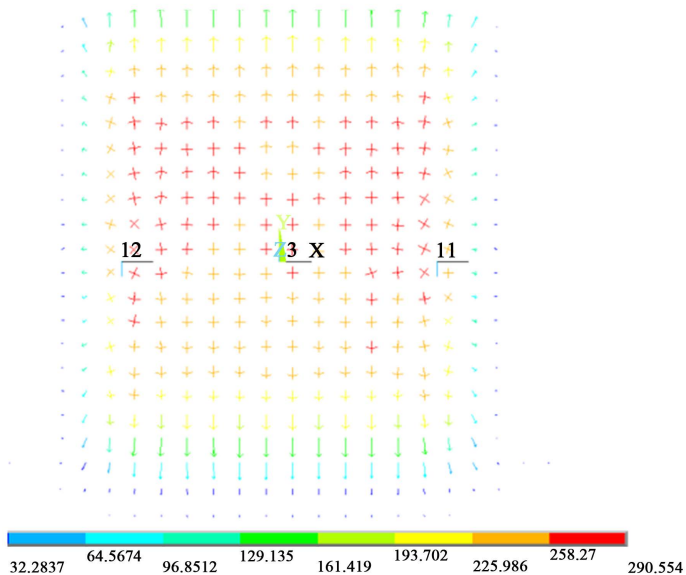
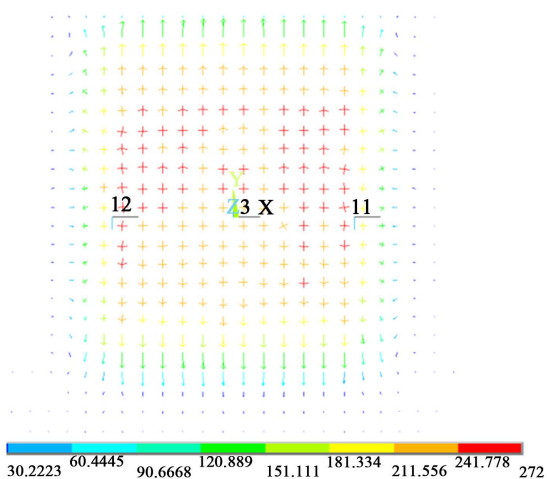
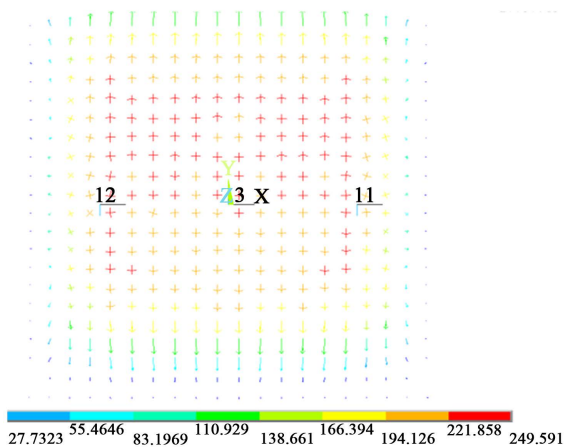


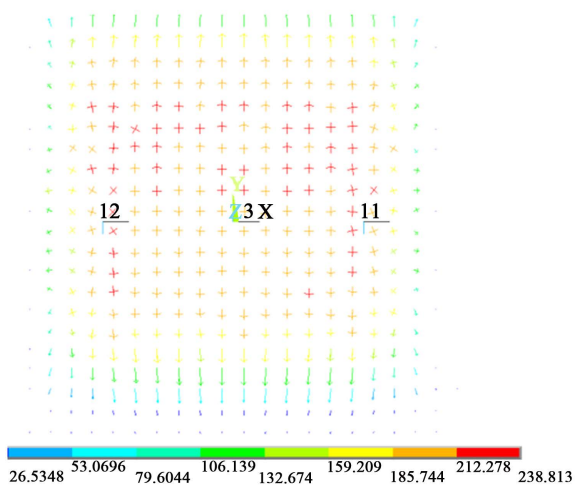
Figure 22. The distribution of electromagnetic force with 2 mm distance  
图 22. 间距 2 mm 时电磁节点力分布



**Figure 23.** The distribution of electromagnetic force with 3 mm distance  
**图 23.** 间距 3 mm 时电磁节点力分布



**Figure 24.** The distribution of electromagnetic force with 4 mm distance  
**图 24.** 间距 4 mm 时电磁节点力分布



**Figure 25.** The distribution of electromagnetic force with 5 mm distance  
**图 25.** 间距 5 mm 时电磁节点力分布

## 4. 结论

1) 随着线圈匝间距减小, 电磁场产生的节点力大小逐渐分布均匀, 磁场线分布越密集, 磁场强度越大, 电磁节点力值越大。

2) 在线圈厚度尺寸不变条件下, 随着长度方向尺寸增加, 一定区域内电磁场节点力分布逐渐均匀化, 当截面尺寸为正方形时, 电磁节点力均匀性分布增加。

3) 随着线圈高度的增加, 电磁节点力均匀性逐渐提高, 电磁节点力的大小也逐渐增大。而当线圈与外壳间距增加, 在一定区域内电磁节点力均匀性逐渐降低, 电磁节点力大小逐渐减小。

## 参考文献 (References)

- [1] 韩飞, 莫健华, 黄树槐. 电磁成形技术理论与应用的研究进展[J]. 锻压技术, 2006, 31(6): 4-8.
- [2] Seth, M. (2006) High Velocity Formability and Factors Affecting It. Ph.D. Thesis, Ohio State University, Ohio.
- [3] 舒行军, 余本刚, 张棋飞. 电磁成形放电电流及磁场的计算机仿真[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 24(1): 47-50.
- [4] Kristin, E. and Banik, B.S. (2008) Factors Effecting Electromagnetic Flat Sheet Forming Using the Uniform Pressure Coil. Ph.D. Thesis, The Ohio State University, Ohio.
- [5] 吕书林, 黄尚宇, 刘鹏. 电磁成形线圈的结构及应用[J]. 锻压技术, 2008, 33(4): 74-78.
- [6] 张守彬. 电磁成形几个影响因素的研究[J]. 锻压技术, 1988, 13(1): 2-29.
- [7] 程然. 板料电磁温热成形均匀压力线圈结构及参数优化研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [8] 崔晓辉, 健华飞, 师杰. 平板电磁成形时匀压力线圈及板料受力研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2011, 9(2): 61-63.

### 期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [meng@hanspub.org](mailto:meng@hanspub.org)