

管坯电磁胀形磁场特性及磁压力分布*

赵志衡

(哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院 哈尔滨 150001)

李春峰 李建辉 邓将华

(哈尔滨工业大学材料科学与工程学院 哈尔滨 150001)

摘要: 电磁成形理论涉及电磁学与塑性动力学, 磁压力研究是其理论研究的基本问题之一。采用有限元法是提高磁压力求解精度的有效途径, 而确定求解区域及其边界上的磁场特性又是有限元方法的关键问题。采用解析方法求解管坯与线圈同轴放置时的磁场, 确定了有限元的求解区域及该求解区域边界上的磁场特性。在此基础上通过有限元计算得到了螺线管线圈和阶梯形线圈胀形时的磁场场景和磁压力分布, 并通过管坯自由胀形试验验证了磁压力分布。

关键词: 电磁胀形 有限元法 磁场特性 磁压力分布

中图分类号: TG391

0 前言

电磁成形属于高能率成形技术, 具有成形迅速, 成形后零件弹复小, 材料极限变形能力高以及利于实现复合工艺等特点^[1,2]。管坯电磁胀形工艺适用于航空、航天和兵器制造等领域中复杂曲面零件的成形, 以及大尺寸筒零件的精密校形, 尤其适合钛合金、铝合金等塑性较差管材的加工。求解成形过程中的磁压力是电磁成形理论研究的基本问题之一。磁压力的计算结果直接用于坯料的变形分析, 影响变形计算的求解精度。磁压力的计算可采用电路归算法^[1]、磁路等效法^[3]、解析法^[4]及数值模拟^[5,6]等方法。目前多采用磁路等效法近似求解磁压力。这种方法的前提是假设线圈与管坯均为无限长, 因而得到的只是作用于管坯上磁压力的平均值, 无法获得磁压力的分布, 且其值误差也较大^[5], 给下一步的变形分析带来困难。近年来有限元法在电磁成形磁压力的求解中得到应用, 有效地提高了求解精度^[5,6]。有限元法的关键问题是确定求解区域, 给出相应的边界条件^[7]。从磁场的基本理论出发分析管坯电磁胀形时磁场的对称性, 确定求解区域, 进而讨论求解区域边界上的磁场特性, 给出边界条件。最后采用有限元法分别求解螺线管线圈和阶梯形线圈电磁胀形时的磁场特性及磁压力分布, 并通过管坯自由胀形实验验证模拟结果。研究结果对于提高复杂曲面管类零件的成形精度和成形效率、控制磁

压力分布, 实现无模成形具有重要意义。

1 管坯电磁胀形时磁场的对称性

磁场具有叠加性, 所谓磁场的叠加性是指如果产生磁场的电流分布在两个互不重叠区域, 则空间任意一点的磁感应强度等于这两个区域内电流分别产生的磁感应强度之和^[8]。根据磁场的叠加性, 管坯电磁胀形时所受到的磁压力是成形线圈中流过的放电电流和管坯中感应电流产生磁场叠加后的作用结果。电磁成形用成形线圈通常是圆柱形结构, 流过感应电流的管坯也可视为单匝圆柱线圈, 因此圆柱线圈的磁场性质是研究电磁胀形磁场特性的基础。

对于圆柱形线圈, 根据 Biot-Savart 定律, 以柱坐标表示的空间任意一点处的磁感应强度 B 为^[9]

$$B(\mathbf{r}, \mathbf{j}, z) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int \frac{J R_0}{R^2} dV = B_r e_r + B_f e_f + B_z e_z$$

式中 dV —— 电流点源周围的体积元, 该点源的电流密度是 J

R —— 电流点源到该任意点的距离

R_0 —— 电流点源指向该任意点的单位矢量

V —— 电流分布区域

μ_0 —— 真空磁导率

e_r, e_f, e_z —— 柱坐标系单位方向矢量

计算可得, 柱坐标系下磁感应强度三个方向的分量满足如下的解析表达式^[9]

$$B_r(\mathbf{r}, \mathbf{j}, -z) = -B_r(\mathbf{r}, \mathbf{j}, z)$$

$$B_z(\mathbf{r}, \mathbf{j}, -z) = B_z(\mathbf{r}, \mathbf{j}, z)$$

$$B_f(\mathbf{r}, \mathbf{j}, z) = 0$$

* 国防科技预研基金资助项目(00J184.5HT0132)。20040719 收到初稿, 20041108 收到修改稿

$$\frac{\partial B_r}{\partial j} = 0 \quad \frac{\partial B_z}{\partial j} = 0$$

由此可见，圆柱线圈产生的磁场具有如下特点。

(1) 无周向分量，即 $B_\theta(r, \theta, z) = 0$ 。

(2) 径向分量 B_r 是关于 z 的奇函数，轴向分量 B_z 是关于 z 的偶函数。

(3) 所有分量均与坐标分量 θ 无关。

因此，对圆柱线圈磁场有限元求解时可以建立 2D 模型。根据磁场分量的对称性，只要分析其纵剖面的 1/4 场域即可推出其他任意位置的磁场。

管坯电磁胀形时，线圈与管坯均可视为圆柱形线圈且同轴对称放置。因此，将坐标系建立在线圈—管坯系统的几何中心，应用有限元方法求解磁压力时，依据磁场的叠加性质，只须建立 2D 有限元模型，分析其纵剖面的 1/4 场域即可。图 1 为管坯电磁胀形 2D 示意图，图中的第一象限部分即为求解区域。

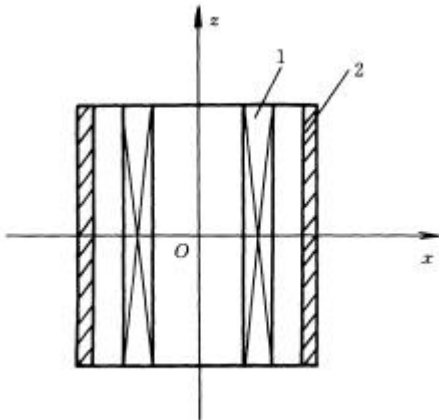


图 1 管坯电磁胀形 2D 示意图
1. 胀形螺线管线圈 2. 管坯

2 边界条件

边界条件即指图 1 中 z 轴、 x 轴上的磁场特性，下面的论述中，将 z 轴称为对称轴， x 轴称为对称平面。

2.1 对称轴上边界条件

根据磁场的叠加性，电磁胀形线圈和管坯所产生的磁场也可以等效成多个同轴放置的圆环线圈磁场的叠加，圆环线圈是指以线电流分布的单匝圆形回路。

从有关的磁场分析可知^[9]，圆环线圈磁场在对称轴上的矢量磁位等于 0。胀形时线圈—管坯系统可以看成是多个圆环线圈的叠加，因而当线圈、管坯同轴对称放置时，对称轴上仍具有 $A(0, f, z) = 0$ 的特性。

2.2 对称平面磁场特性

电磁胀形线圈和管坯所产生的磁场还可以等效成多个同轴放置的单层螺线管线圈的叠加。

螺线管线圈磁场在对称平面上的磁感应强度(柱坐标表示)具有如下特点^[9]。

(1) $B_r(r, j, 0) = 0$ 。

(2) $B_\theta(r, j, 0) = 0$ 。

即螺线管线圈产生的磁场在对称平面($z = 0$)上磁感应强度的 B_r 、 B_θ 分量均为零，而只有磁感应强度的 B_z 分量，也即在对称平面上磁感应强度与之垂直。由磁场的叠加性可知，管坯电磁胀形时，如果线圈与管坯同轴对称放置，那么在对称平面上就具有只含 B_z 分量这一特性。

3 管坯电磁胀形时的磁压力分布

分别进行螺线管线圈和阶梯形线圈胀形时的磁压力有限元模拟。螺线管线圈的有限元模型示意图如图 2 所示，图 2 中 A_1 为胀形螺线管线圈， A_2 为管坯， A_3 为 ANSYS 有限元分析中特有的远场区， A_4 为近场区。以四边形八节点单元为主对该求解区域剖分，阶梯形线圈结构如图 3 所示。

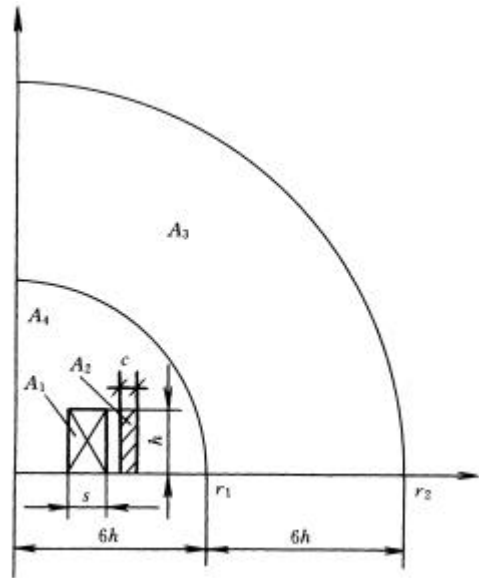


图 2 螺线管线圈磁场有限元模拟模型示意图

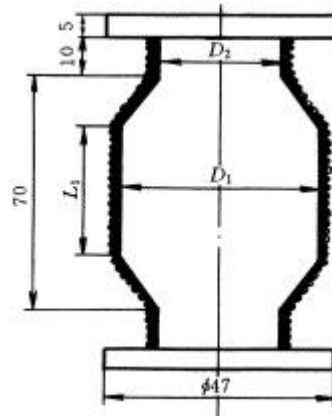


图 3 阶梯形线圈结构图

由前面的讨论可知，螺线管线圈电磁胀形时，可建立如下边界条件及激励。

(1) 直角坐标下， $y=0$ 上 B (磁感应强度)与之垂直。

(2) 直角坐标下， $x=0$ 上 A (矢量磁位)等于 0。

(3) 极坐标下， $r=12h$ 处建立无穷远标记。

(4) 线圈电流 93 kA，频率 10 kHz(电磁成形机储能电容值 192 μ F，充电电压 1 kV 时的实测放电电流值)。

有限元计算得到的螺线管线圈胀形时的磁力线分布如图 4 所示，可见，放电瞬间磁力线均被约束在线圈与管坯之间的间隙内，且在端部具有发散现象。磁力线发散，意味着磁压力在管坯上并不是相等的，端部磁压力将小于中部。

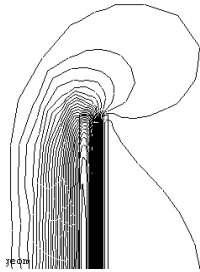


图 4 管坯电磁胀形的磁力线分布

计算得到的管坯上磁压力分布曲线如图 5 所示，图 5 中横坐标(距管坯中央位置)是指距管坯长度方向对称中心的位置。由图 5 可见，管坯受磁压力由中部向端部基本相等，在端部区域磁压力明显减小。

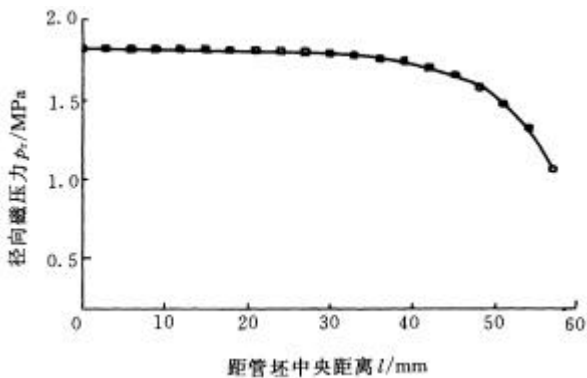


图 5 螺线管线圈胀形时的磁压力曲线

电磁成形机储能电容值 192 μ F，充电电压 5 kV 时进行螺线管线圈胀形试验，胀形后得到的管坯照片如图 6 所示。由图 6 可见管坯变形均匀，只是在靠近线圈端部的部分变形较小，经实测管坯外廓线与模拟得到的磁压力分布基本一致。因受测试装置量程的限制，模拟与工艺试验时的充电电压值不同，

其余电参数均相同。

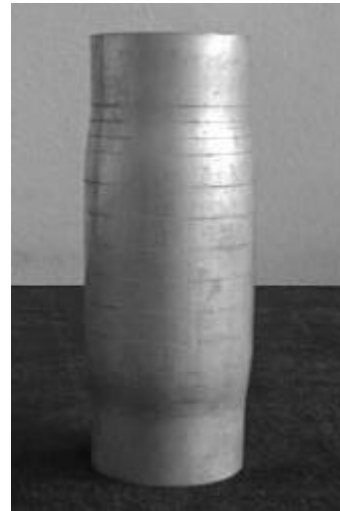


图 6 螺线管线圈胀形后工件照片

有限元计算得到阶梯形线圈胀形时的磁力线分布如图 7 所示。管坯长度方向上所受到的磁压力分布如图 8 所示，具有两个明显的峰值。



图 7 阶梯形线圈电磁胀形的磁力线分布

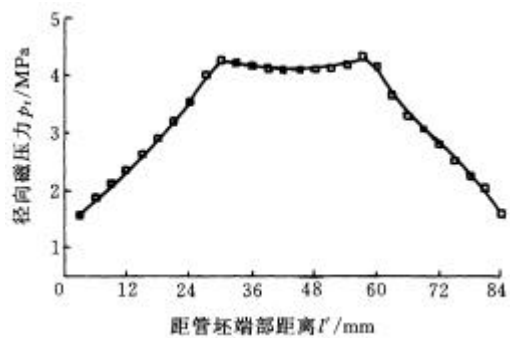


图 8 阶梯形线圈胀形时磁压力曲线

电磁成形机储能电容值 192 μ F，充电电压 5 kV 时进行阶梯形线圈胀形试验，胀形后的管坯照片如图 9 所示，可明显看到有两个区域变形量较大，出现驼峰。经实测管坯外廓线与模拟得到的磁压力分布曲线基本一致。受测试装置量程的限制，模拟与工艺试验时的充电电压值不同，其余电参数均相同。



图 9 阶梯形线圈胀形后工件照片

4 结 论

(1) 采用有限元法研究管坯电磁胀形的磁压力时, 如果线圈与管坯同轴对称放置, 那么只要建立 2D 模型, 分析其纵剖面的 1/4 场域即可。

(2) 管坯电磁胀形时, 其磁场在对称轴上具有 $A=0$ 的特性, 在对称平面上具有磁感应强度与之垂直的特性。

(3) 采用有限元法可以得到管坯电磁胀形时的磁压力分布。计算得到的磁压力分布与试验所得管坯自由胀形后的外廓线基本吻合。磁压力分布的获得对于下一步的磁压力分布控制和坯料变形分析都是非常重要的。

参 考 文 献

- 1 佐野利男. 电磁力超高速塑性加工法. 常乐译. 国外金属加工, 1988(2): 20~25
- 2 根岸秀明. 电磁冲击塑性加工技术. 林川译. 国外金属加工, 1988(2): 26~31
- 3
- 4 黄尚宇, 常志华. 管件电磁成形电磁力分布特性分析. 塑性工程学报, 2000, 7(2): 30~33
- 5 Lee S H. A finite element analysis of electromagnetic forming for tube expansion. Journal of Engineering Materials and Technology, 1994, 116(4): 250~254

- 6 Lee S H, Lee D N. Estimation of magnetic pressure in tube expansion by electromagnetic forming. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 57: 311~315
- 7 周克定. 工程电磁场数值计算的理论方法及应用. 北京: 高等教育出版社, 1994
- 8 冯慈璋. 电磁场. 北京: 高等教育出版社, 1983
- 9 雷银照. 轴对称线圈磁场计算. 北京: 中国计量出版社, 1991

MAGNETIC FIELD CHARACTERISTIC AND MAGNETIC PRESSURE DISTRIBUTION IN TUBE ELECTROMANETIC EXPANSION

Zhao Zhiheng

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Li Chunfeng Li Jianhui

Deng Jianghua

(School of Materials Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

Abstract: The theory research on electromagnetic forming is related to electromagnetics and plasticity dynamics. Of all the problems, magnetic pressure calculation is the basic one. FEM (Finite element method) is an effective method in enhancing the accuracy of magnetic pressure calculation. But for the FEM, how to confirm the solving area and magnetic field characteristic on the boundary is the key problem. The symmetry of magnetic field characteristic in the condition that workpiece and forming coil are placed coaxially is calculated by analysis. According to the result of magnetic field characteristic, the solving area of FEM is decided and the magnetic field characteristic on the boundary is presented. Then, the magnetic field and magnetic pressure distribution of solenoid coil and echelon coil are simulated by means of FEM and the magnetic pressure distribution is verified by electromagnetic bulging experiment.

Key words: Electromagnetic bulging Finite element method
Magnetic field characteristic
Magnetic pressure distribution

作者简介: 赵志衡, 男, 1971 年出生, 博士。主要研究方向为电磁成形。

E-mail: zzh_hit@sina.com