

电磁轴向冲击加载装置管状线圈的有限元分析

姜光路, 刘 军*, 田始军

(宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211)

摘要: 电磁冲击粉末压制工艺中, 电磁线圈是重要的能量载体, 如何提高其转换效率是一个关键问题. 为了探索最佳电磁线圈几何尺寸与形状的关系, 通过 ANSYS 多物理场对管状线圈轴向电磁力进行了有限元分析, 建立了最佳电磁线圈截面的几何形状最佳尺寸计算公式, 发现在有效截面积相同的条件下该梯形线圈比传统矩形线圈的有效电磁力大, 且有效行程长. 当管状线圈横截面积为 360 mm^2 时, 其效率可提高 5.57%, 有效行程可增加 23.07%. 为电磁线圈及电磁轴向冲击加载装置的设计提供了参考.

关键词: 电磁成型; 粉末压制; 电磁线圈; 轴向力; 有限元仿真

中图分类号: TG391

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2018) 02-0024-04

金属粉末成型是将金属粉末混料放在模具中, 在冲压机上压制毛坯料, 在一定温度下使其熔结成整体的工艺过程. 开展相应的金属粉末致密化工艺研究是推动金属粉末成形发展的关键. 目前, 电磁冲击压制技术已被广泛地应用于粉末高速压制、管材、板材成型等领域^[1-2]. 电磁冲击压制工艺是一种高能率成形技术. 根据不同的成形原理, 主要可分为管状类电磁冲击压制成形和板状类电磁冲击压制成形. 管状类电磁冲击压制成形主要是通过管状线圈由驱动金属片感应产生的径向冲击力对粉末体进行径向压实; 板状类电磁冲击压制成形主要是通过平板线圈由驱动金属片感应产生的轴向冲击力对粉末进行轴向压实.

电磁冲击压制过程复杂, 肖师杰^[3]利用有限单元法通过对单个矩形线圈的仿真, 发现板状电磁力较大的区域出现在每匝线圈各个直角边处, 在每匝线圈的直角边过渡处电磁力则相对较小. Cui 等^[4]通过 ANSYS 的电磁分析模块对板状和匀压力线圈进行磁场力计算, 发现虽然匀压力线圈产生的磁场力较为均匀, 但其四周会受到不对称磁场力的作用, 容易使匀压力线圈失效. 由于平板件

电磁冲击压制成形的电磁线圈的磁场分布不均匀^[5], 在进行粉末体压制时可导致粉末体在整个平面的变形量不均匀, 从而影响粉末体的可成形性. 杨勇^[6]从电路的双回路模型出发, 系统地研究了电容、电阻、电感等电参数对平板电磁冲击压制的影响, 发现通过减少电感及电阻值可提升电流值, 从而增加电磁力. 田钰清等^[7]通过模拟矩形线圈的电磁力分布规律, 获取了板料的最佳高度与矩形线圈的关系. 杜冰等^[8]运用薄壳理论通过对管坯材料胀形变形模式的探索, 发现了有关管坯材料长短管变形的几何尺寸的界限划分表达式, 并确定了管坯材料变形的内压力的力学模型.

在电磁成形技术中, 电磁线圈是电磁场能量转化为机械能量的载体, 是粉末体压实的重要部件, 然而电磁线圈形状与几何尺寸的改变可以直接影响到上述能量的转化率. 以往的研究大都未涉及这方面内容. 因此, 本文对电磁成形冲击压制中电磁线圈的形状与几何尺寸的相互作用展开探究, 以使其在给定电磁线圈有效截面积(电磁线圈材料相同)的情况下, 得到最大的轴向电磁力, 以增加粉末体的致密性.

收稿日期: 2017-03-15.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(11372148).

第一作者: 姜光路(1990—), 男, 河南商丘人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 高能率冲击压制技术. E-mail: 1657338002@qq.com

*通信作者: 刘军(1963—), 男, 浙江宁波人, 副教授, 主要研究方向: 高能率冲击压制技术. E-mail: liujun@nbu.edu.cn

1 电磁线圈模型分析

传统密绕管状线圈的横截面一般是矩形, 其自由变量可表示为 a 、 b 。如将矩形线圈扩展为四边形, 使该电磁线圈具有 4 个自由变量, 分别是 a 、 b 、 c 、 d 。为了便于研究电磁线圈形状与其几何尺寸的关系, 对四边形模型进行简化(图 1)。设定 $a=b$, 即为梯形线圈, 在保持电磁线圈有效横截面积一定的情形下, 研究电磁线圈形状与几何尺寸相互作用关系对轴向电磁力的影响。为了更加贴近于梯形的表示法, 本文将图 1(d)选为梯形线圈计算模型, 其中 H 表示梯形线圈宽度, L_1 表示梯形线圈左侧长度, L_2 表示梯形线圈右侧长度。

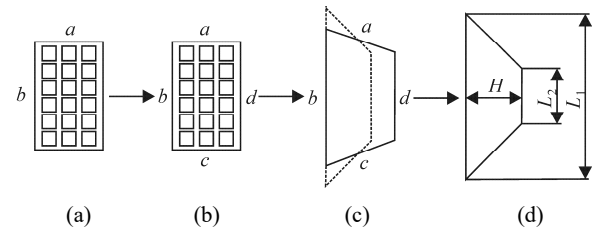


图 1 线圈演变

2 线圈参数对电磁力的影响

通过 ANSYS/Multiphysics 对电磁线圈进行有限元仿真, 影响电磁力的因素很多, 本文主要研究宽度及左右侧长度比对电磁力的影响。

2.1 线圈驱动边界条件及有限元模型的建立

由于结构的对称性, 取其 1/2 对称模型进行分析。施加远场单元 INFIN110 来模拟无限远边界条件, 铁芯、电磁线圈及其空气区域采用 PLANE53 单元。另外, 铁芯区域为导磁性材料, 选用硅钢, 相对磁导率为 8 000, 线圈及其空气区域磁导率与真空近似相等, 可以设定其相对磁导率为 1。依据磁场分析特点, 管状线圈有限元分析 2D 模型(图 2)及有关边界条件为^[9-10]: (1)笛卡尔坐标系下, $y=0$ 上磁感应强度 B 与之垂直; (2)笛卡尔坐标系中, $x=0$ 上磁感应强度 B 与之平行; (3)柱坐标中, 在 $R_1=2R_2$ 处建立无穷远标示; (4)对每匝线圈的电流自由度进行耦合处理, 在线圈上施加电压 $U=1\ 000\ \text{V}$ 作为激励电压。

表 1 为电磁驱动 ANSYS 模型分析参数, 其中 a 为单匝线圈高度, d 为单匝线圈宽度, L 为铁芯高度, W 为铁芯宽度, H 为电磁线圈宽度, ρ 为电阻率,

L_1 为左侧长度, L_2 为右侧长度, μ_r 为相对磁导率, R_2 为有限元边界。通过创建相关物理环境, 建立相应的有限元分析模型, 并赋予不同区域材料特性, 划分有限元网格(图 3), 加载载荷和边界条件, 最后求解运算, 其磁力线分布如图 4 所示。

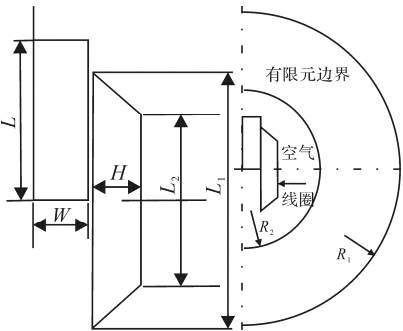


图 2 电磁线圈 2D 模型及其局部放大

表 1 电磁驱动 ANSYS 模型分析参数

线圈				空气		铁芯			
μ_r	$\rho/(\Omega \cdot \text{m})$	a/m	d/m	μ_r	$\rho/(\Omega \cdot \text{m})$	μ_r	W/m	L/m	R_2/m
1	1.75×10^{-8}	0.003	0.008	1	4.8×10^{-7}	8 000	0.01	0.03	0.045

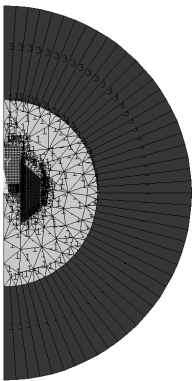


图 3 电磁驱动有限元网格

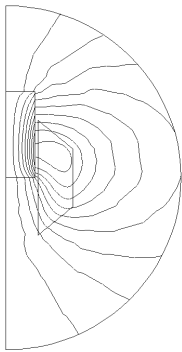


图 4 电磁驱动磁力线分布

2.2 轴向力分析

当铁芯相对于电磁线圈位置一定时, 电磁线

圈几何尺寸变化对轴向电磁力的影响会受到外在激励的干扰. 为此保持电压激励 $U=1\ 000\text{ V}$, 研究线圈几何尺寸对轴向电磁力的影响.

表 1 给出了线圈数据, 在线圈横截面 $S=360\text{ mm}^2$ 时, 探究不同宽度 H 的轴向电磁力随左右侧长度比 L_1/L_2 的变化情况. 分别取 H 为 9、10、11、12、13、14、15 mm, 对铁芯 y 方向力进行分析. 模拟结果见表 2 和图 5. 图 6 为宽度为 13 mm, 左右侧长度比为 2 (最佳梯形线圈) 的 ANSYS 结果.

表 2 左右侧长度比和宽度与轴向力

L_1/L_2	H/mm						
	9	10	11	12	13	14	15
0.5	0.908 55	0.957 16	0.960 47	0.969 27	0.946 80	0.910 79	0.872 15
1.0	0.990 46	1.047 60	1.073 10	1.078 20	1.048 80	1.018 30	0.980 15
1.5	1.016 00	1.081 60	1.099 10	1.114 80	1.101 50	1.075 40	1.040 80
2.0	0.998 17	1.078 80	1.106 50	1.126 20	1.138 20	1.099 10	1.068 80
2.5	0.980 97	1.067 30	1.102 20	1.125 90	1.133 50	1.109 60	1.084 40
3.0	0.955 84	1.054 40	1.097 00	1.124 50	1.129 30	1.106 60	1.074 40
3.5	0.935 36	1.036 70	1.089 70	1.124 10	1.128 40	1.101 00	1.051 70
4.0	0.920 21	1.028 20	1.081 30	1.123 00	1.126 40	1.093 40	1.036 00

注: y 方向力单位为 10^8 N .

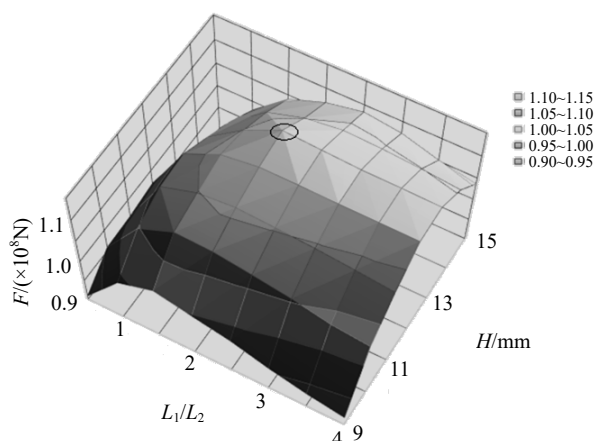


图 5 电磁线圈几何尺寸与电磁力曲面

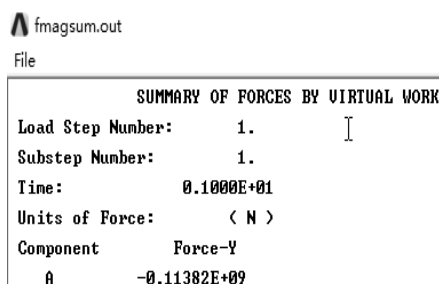


图 6 最佳梯形线圈 ANSYS 结果

由表 2 可知, 当 L_1/L_2 不变时, 轴向电磁力会随 H 的增加先上升, 后下降. 其原因是当 H 较小时, 轴向尺寸大, 磁路路径长, 磁阻力大, 能量转化率低; 随着 H 的增加, 轴向、径向尺寸趋于均衡, 磁阻力减少, 能量转化率提高; 随着 H 的进一步增加, 导致径向尺寸增大, 磁阻力增加, 能量转化率减少. 当 H 不变时, 铁芯所受的轴向电磁力会随着 L_1/L_2 的增加先上升后下降. 当 H 不变时, L_1/L_2 的变化也会导致轴向和径向的尺寸发生改变, 使其轴向电磁力发生变化. 当 H 增大时, 最佳 L_1/L_2 比值增加, 此时轴向电磁力的增长趋于平缓. 由有限元仿真可知, 当 $L_1/L_2=1$ 时, 电磁线圈是矩形线圈, 当 $H=12\text{ mm}$ 时, 矩形线圈会出现最大的轴向电磁力 $F=1.078\ 2\times 10^8\text{ N}$; 当 $L_1/L_2=2$ 时, 电磁线圈为梯形, 线圈宽度为 $H=13\text{ mm}$ 时, 梯形线圈会有最佳的轴向电磁力 $F=1.138\ 2\times 10^8\text{ N}$.

为了更好地探索最佳电磁线圈几何尺寸与形状的关系, 取线圈横截面积 S 为 90、180、270、450、540、630、720 mm^2 . 从 ANSYS 有限元计算可知, 不同横截面下的最佳矩形线圈和最佳梯形线圈的轴向电磁力结果如图 7 所示. 由图 7 可知, 最佳梯形线圈的轴向电磁力要比最佳矩形线圈大.

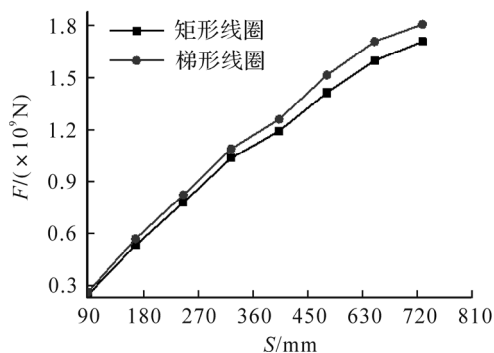


图 7 最佳梯形线圈与最佳矩形线圈的轴向力对比

以电磁线圈横截面 $S=360\text{ mm}^2$ 为例进行分析, 由表 2 可知, 当左右侧长度比为 2, 宽度为 13 mm 时轴向电磁力最大, 此时线圈宽度约为左右侧长度和的 $1/4$. 由计算可知, 梯形线圈的最佳电磁轴向力比矩形线圈增加 5.57%, 即成效率增加了 5.57%. 此时矩形线圈的左侧边长 $L_1=30\text{ mm}$, 梯形线圈的左侧边长 $L_1=37\text{ mm}$, 即梯形线圈的有效行程比矩形线圈增加了 23.07%.

综上所述发现, 在面积一定的情况下, 最佳梯

形线圈几何形状参数之间有一定的关系, 即当电磁线圈宽度为左右侧长度和的 $1/4$ 时, 左右侧长度比为 2, 可出现最佳的轴向电磁力, 有:

$$S = (1/2)(L_1 + L_2)H,$$

$$L_1 / L_2 = 2, L_1 + L_2 = 4H,$$

所以有 $H = \sqrt{S/2}$, $L_1 = 4\sqrt{2S}/3$, $L_2 = 2\sqrt{2S}/3$ 时, 电磁力会有比较理想的取值.

3 结论

本文运用 ANSYS 多物理场对电磁轴向冲击加载装置的电磁线圈进行了有限元分析, 探究了电磁线圈左右侧长度比及宽度尺寸等参数对铁芯轴向力的影响, 为后续电磁线圈的设计开发提供了理论基础. 主要结论有:

(1) 梯形线圈的长边一侧靠近铁芯, 这有利于轴向电磁力的增加. 经过对比可知, 梯形线圈比矩形线圈电磁轴向力要大, 有效行程要长. 当管状线圈横截面为 360 mm^2 时, 成形效率可增加 5.57%, 有效行程增加 23.07%.

(2) 发现了最佳梯形线圈公式, 确定了梯形线圈横截面积与各几何尺寸的关系, 为以后管状线圈的设计提供了参考.

参考文献:

- [1] Seth M, Vohonout V J, Daehn G S. Formability of steel sheet in high velocity impact[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2005, 168:390-400.
- [2] 于海平, 李春峰, 邓将华. Cu 粉末电磁脉冲压实试验研究[J]. 材料科学与工艺, 2006, 14(6):588-591.
- [3] 肖师杰. 平板电磁成形有限元模拟方法研究与线圈的设计和分析[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2012.
- [4] Cui X H, Mo J H, Xiao S J, et al. Magnetic force distribution and deformation law of sheet using uniform pressure electromagnetic actuator[J]. Transactions of Non-ferrous Metals Society of China, 2011(21):2484-2489.
- [5] 陈玉珍, 李春峰, 董国庆. 平板件电磁成形磁场力研究[J]. 锻压装备与制造技术, 2008, 43(1):92-95.
- [6] 杨勇. 基于集磁器的脉冲粉末压制的机理研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2013.
- [7] 田钰清, 张敏, 魏巍, 等. 矩形线圈电磁成形磁场力数值模拟分析[J]. 锻压技术, 2015, 40(6):165-170.
- [8] 杜冰, 赵长财, 刘一江, 等. 管材内高压成形变形模式研究[J]. 机械工程学报, 2014, 50(16):126-134.
- [9] 王剑中, 薛立鹏, 冉振华, 等. 基于 ANSYS Multiphysics 的电磁阀电磁力仿真分析[J]. 导弹与航天运载技术, 2014(6):65-68.
- [10] 周晓, 刘军. 电磁冲击加载平板线圈的有限元分析[J]. 机械科学与技术, 2013, 32(2):209-212.

Finite element analysis of electromagnetic tubular coil with axial impact loading system

LOU Guang-lu, LIU Jun*, TIAN Shi-jun

(Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In the electromagnetic impact pressing process, electromagnetic coil is an important energy carrier. How to improve the conversion efficiency is a key issue. In this paper, in order to explore how to achieve the best electromagnetic coil geometry size and shape, the electromagnetic force of the tubular coil is simulated based on the ANSYS Multi/physics field. The optimum parameters in the computational formula of geometry are established in a bid to identify the best electromagnetic coil sectional area. It is found that, under the condition of equal effective sectional area, the axial electromagnetic force of trapezoidal coil is larger and effective stroke of trapezoid coil is longer than those of the conventional rectangular coil. When the cross-sectional area of the tubular coil reaches 360 mm^2 , the efficiency rises by 5.57% and effective travel increases by 23.07%. The findings may provide reference for the design of the electromagnetic coil and the electromagnetic axial impact loading device.

Key words: electromagnetic forming; powder compaction; electromagnetic coil; axial force; finite element simulation

(责任编辑 史小丽)