

电磁超声不锈钢测厚技术仿真研究

崔伟超¹ 李腾蛟¹ 孙 宁² 韩煦阳³ 姚思豫⁴

1. 河南省锅炉压力容器检验技术科学研究院 河南 郑州 450016

2. 河南大学物理与电子学院 河南 开封 475004

3. 河南理工大学机械与动力工程学院 河南 焦作 454003

4. 河南大学迈阿密学院 河南 开封 475004

摘要: 针对不锈钢金属板厚度测量, 提出了一种新型的交替式圆形激发—接收线圈, 用于电磁超声换能器 (EMAT) 的电磁超声激发和回波接收, 使用COMSOL有限元分析软件对电磁超声不锈钢测厚技术进行了仿真分析。首先, 研究了电磁超声波在不锈钢试件内部传播特性; 其次, 建立了不锈钢测厚换能器的二维模型, 并进行了电磁耦合分析; 最后, 在激发涡流和不同提高高度下, 对换能器的性能进行了分析研究。仿真结果表明, 在激励线圈的作用下, 试件内部粒子振动产生电磁超声, 进而形成涡流, 且线圈正下方的应力最大; 此外, 新型交替式圆形结构线圈具有较好的电流密度模和提高高度性能。

关键词: 电磁超声; 金属测厚; 涡流; 洛伦兹力

引言

不锈钢金属材料广泛应用于压力容器、石油化工、机械制造等工业领域, 发挥着重要的作用。对于不锈钢类管道、承压设备来说, 由于厚度会随工况变化而减薄, 造成裂纹、断裂等缺陷, 从而导致发生爆炸等危险状况^[1]。因此, 对不锈钢制材的厚度进行检测和监测, 可以早发现各种缺陷和潜在危险。超声测厚技术是一种新型的无损测厚技术, 其基本原理是在被测物体内部产生超声波, 检测超声波反射, 实现对金属材料厚度测量。根据声波激发方法的不同, 超声测厚技术主要包括压电超声、激光超声和电磁超声。与接触式压电超声相比, 非接触式电磁超声检测方法无需耦合剂、适宜粗糙表面^[2]。同时, 电磁超声波具有方向性好、穿透能力强以及能在多种介质中传播等特点, 因此, 电磁超声换能器 (Electromagnetic Acoustic Transducer, EMAT) 可作为测量不锈钢厚度的重要技术方法^[3]。本文提出了一种交替式圆形电磁线圈作为换能器的激发—接收线圈, 开展对不锈钢材料的测厚仿真研究。

1 电磁超声检测原理

电磁超声换能器由偏置永磁铁、激励线圈、接收线圈、不锈钢检测试件组成, 如图1所示。

其中, 永磁铁提供静态偏置磁场; 螺旋激励线圈中要通入高频电流, 试件表面产生感应涡流和洛伦兹力, 形成超声波, 接收线圈接收超声回波产生的动态磁场^[4]。

资助项目: 河南省锅炉压力容器检验技术科学研究院项目 (2022KY16)

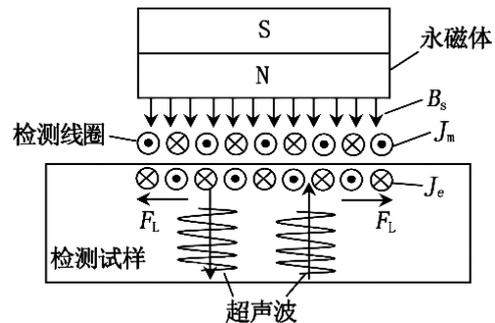


图1 电磁超声换能器

1.1 电磁超声感应机理

圆形线圈EMAT激励与接收超声波的过程可分为静态偏置磁场的产生、电场转化为动态磁场、电磁感应产生洛伦兹力、金属表面粒子在洛伦兹力作用下振动产生超声波、振动的粒子在磁场作用下产生感生电压等五个过程。根据麦克斯韦方程和电磁学基本原理, EMAT中洛伦兹力产生的过程可描述如下:

$$\nabla \times H_d = J_c \quad (1)$$

$$B_d = \mu_m H_d \quad (2)$$

$$\nabla \times E_e = -\frac{\partial B_d}{\partial t} \quad (3)$$

$$J_e = \gamma E_e \quad (4)$$

$$f_l = J_e \times (B_d \times B_s) \quad (5)$$

$$U_e = \int_0^l E_e dl \quad (6)$$

式中, H_d 为激励电流产生的磁场强度; J_c 为激励电流的电流密度; B_d 为激励电流在试件内产生的磁感强度; μ_m

为试件的相对磁导率； E_e 为涡流场的电场强度； γ 为试件的电导率； J_e 为试件的电导率为涡流密； B_s 为永久磁铁提供的偏置磁场； f_l 为洛伦兹力； l 为接收线圈的长度； U_e 为接收线圈的感生电压。

2 电磁超声换能器建模与仿真

本文采用COMSOL仿真分析软件，对电磁超声换能器进行仿真研究。通过仿真量化激励过程中涡流和磁感应强度的变化，得到试件表面洛伦兹力随时间的变化趋势，获得EMAT对不锈钢厚度的测量性能。

本文使用了一种交替式圆形激发—接收线圈，如图2所示，其中，红色线圈为激发线圈，黄色线圈为接收线圈，其排列方式为交替式分布。

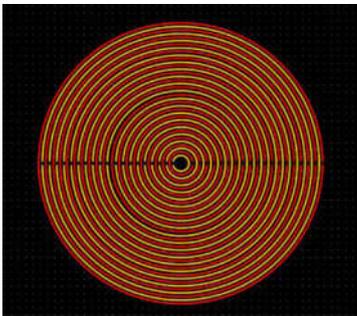


图2 交替式圆形激发—接收线圈

2.1 建立仿真模型

由于磁铁和线圈均为圆形结构，因此，可使用二维模型构建EMAT仿真结构模型，模型由永磁铁、空气域、线圈、测试件等部分组成。其中永磁铁为N38钕铁硼永磁体，圆柱体形状；永磁铁的磁场方向垂直于被测试件表面。激励线圈简化为互不相连的平行导线，匝数为20匝。线圈中激励信号采用电流峰值为10A的正弦信号，持续时间为10E-6s。仿真模型主要设置参数如下：

(1) 几何参数（单位：mm）

空气域（长55×宽80），线圈（长0.04×宽0.1），不锈钢块（长30×宽80），永磁铁（长10×宽30），相邻线圈间距（ $b=0.2$ ），提高高度（ $h=0.1$ ）。

(2) 物理参数

不锈钢块：相对磁导率为1，泊松比为0.33，电导率为3.774E5S/m，杨氏模量为70E9Pa，密度为8.0g/cm³。

线圈：相对磁导率为1，电导率为5.998E7S/m，相对介电常数为1。

空气：相对磁导率为1，相对介电常数为1。

对EMAT进行仿真分析的主要流程为：

(1) 选择物理场。对电磁超声换能过程进行仿真，需要对电磁场和声场进行设定，因此，选择Magnetic Field和Solid Mechanic两个物理场进行耦合分析；

(2) 设置条件参数。主要对边界条件、激励条件、多场耦合条件以及初值条件等进行设置。

(3) 进行网格划分。对换能器不同部位进行不同精度的网格剖分，试件集肤设置网格为0.02×0.02mm，试件其他区域设置网格为0.5×0.5mm，线圈网格设置为0.02×0.02mm，磁铁设置网格为0.2×0.2mm，空气区域则按照自动网格划分设定，如图3所示。

(4) 求解有限元模型。求解静态场和瞬态场两个解。

(5) 对求解完成的模型进行分析，提取所需信息结果，主要包括静磁场分布、应力强度等。

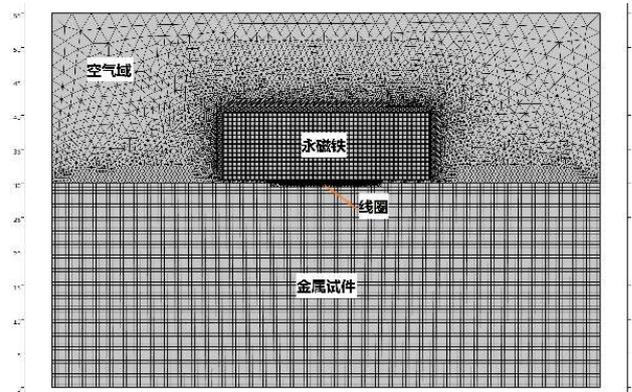


图3 网格划分模型

2.2 仿真计算研究

通过COMSOL对有限元模型进行求解，得到电磁超声的声场分布，如图4所示。

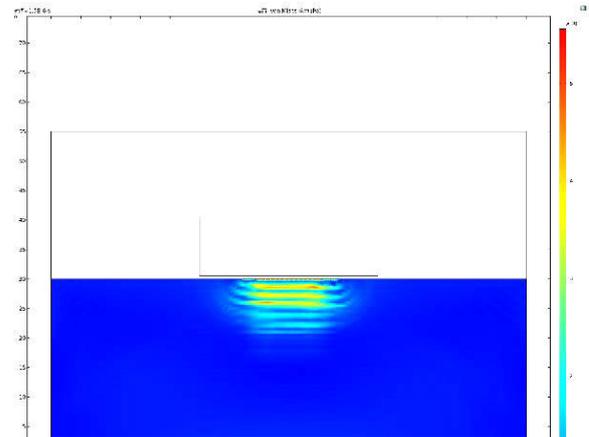


图4 声场分布图

由图4可以清楚观察到该时刻试件的位移情况，在1.5E-6s时刻，试件内部发生应变，产生应力，形成向下传播的超声波，其中发生最大应力为4.7E5 Pa。同时，在1.5E-6s时刻，可得到试件产生的最大电流密度模为1.5E10 A/m²。

对线圈的提高高度进行调节，分别设置提高高度为1mm、2mm，在仿真时设置仿真步长为20，可得到不同

时间段的试件表面最大电流密度模。取其中奇数时间段的时间对应的最大电流密度模,如表1所示。

表1 不同提高高度试件表面最大电流密度模

步数	时间 (s)	提高1mm最大电流密度模 (A/m ²)	提高2mm最大电流密度模 (A/m ²)
1	1.5E-6	5.52E9	3.55E9
3	3.0E-6	5.43E9	3.43E9
5	4.5E-6	5.37E9	3.36E9
7	6.0E-6	5.33E9	3.28E9
9	7.5E-6	5.21E9	3.24E9
11	9.0E-6	5.18E9	3.18E9
13	10.5E-6	2.03E7	1.07E7
15	12.0E-6	1.82E6	1.05E6
17	13.5E-6	6.03E5	3.55E5
19	15.0E-6	2.84E5	2.05E5

由表1中数据可看出,在激励线圈加入高频交变电流的时间段,电涡流值较大,激励线圈放电结束后,随着时间的增长试件产生的电涡流的最大值逐渐减小。接收线圈可通过磁耦合的方式接收不锈钢表面的电涡流产生的动态磁场,从而产生感应电流,根据感应电流的峰峰间距可以计算出不锈钢试件的厚度。由表1还可以看出,提高高度越大,不锈钢试件表面所产生的电涡流密度模越小,而接收线圈所感应的电压与试件表面的电涡流强度成正相关,提高高度越小,接收线圈所感应的电压越大。因此,用于不锈钢测厚时,线圈提高高度应尽可能小。

3 结论

通过对电磁超声波测厚模型的二维仿真及对产生超声波的传播特性的研究得出如下结论:(1)所建的模型中,产生的洛伦兹力主要分布在线圈的正下方,使不锈

钢试件内部产生应变,形成向下传播的超声波。(2)交替式圆形激发—接收线圈能够获得较大的电流密度,随着提高高度增加,电流密度有所下降,但是其下降幅度较小,表明该线圈模型有较好的电磁超声测厚性能。

参考文献

- [1]夏胜.用于电磁超声测厚的脉冲压缩技术研究[D].哈尔滨工业大学,2019.
- [2]李继承,戚政武,苏宇航,等.基于电磁超声技术的管道壁厚检测研究[J].中国特种设备安全,2023,39(S2):52-55,66.
- [3]李继承.电磁超声测厚探头设计参数研究[J].无损探伤,2021,45(05):31-34.
- [4]程进杰,石文泽,卢超,等.脉冲压缩技术的高温连铸电磁超声测厚应用研究[J].机械工程学报,2023,59(08):20-31.