

# 连铸坯尾端电磁超声横波换能机制分析

王志春, 孙雪冬, 袁 伟

(内蒙古科技大学信息工程学院, 内蒙古包头 014010)

**摘要:** 为了研究电磁超声横波检测表面温度为 500 °C 连铸尾端的坯壳厚度的问题, 分析此温度下电磁超声换能器的换能机制。本文以坯壳厚度为 30 mm 的 Q235 小钢坯为被测对象, 利用有限元软件 COMSOL 建立圆柱形永磁体和螺旋线圈的电磁超声换能器模型。分析在钢坯表面温度为 500 °C 时的换能机制的主导因素, 在相同偏置磁场强度和激发电流下, 通过对比仅考虑洛伦兹力作用下的位移振幅和洛伦兹力与磁致伸缩应力的叠加作用下的位移振幅大小来分析主导因素, 并利用现有的实验条件进行实验验证, 同时分析了激励频率对换能机制的影响。研究结果表明, 当坯壳表面温度为 500 °C 时, 随着频率增大, 横波激发换能机制由两种机制转变成洛伦兹力占主导因素, 且铁磁材料降低了电磁超声换能器的激发难度, 为设计电磁超声换能器系统提供理论基础。

**关键词:** 电磁超声换能器; 洛伦兹力; 磁致伸缩; 激励频率; 高温铁磁材料

中图分类号: TF777

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2019)-05-0532-05

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2019.05.009

## Analysis of transverse wave energy conversion mechanism of electromagnetic ultrasound at the end of continuous casting slab

WANG Zhi-chun, SUN Xue-dong, YUAN Wei

(College of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** In order to study the problem of measuring the thickness of billet shell at the tail end of continuous casting with a surface temperature of 500 °C by electromagnetic ultrasonic shear wave, the energy transfer mechanism of the electromagnetic ultrasonic transducer for this measurement is analyzed. The Q235 billet with 30 mm shell thickness is taken as the research object and the electromagnetic ultrasonic transducer model composed of cylindrical permanent magnet and spiral coil is established by using finite element software COMSOL in this paper. Under the same magnetic field intensity and excitation current, the dominant factors of the energy transfer mechanism at 500 °C slab surface temperature are analyzed by comparing the displacement amplitude under the action of Lorentz force with the displacement amplitude under the superposition of Lorentz force and magnetostrictive stress. The experimental verification is carried out by using the existing experimental conditions. Meantime, the influence of excitation frequency on energy transfer mechanism is analyzed, and the results show that at 500 °C, with frequency increasing, the shear wave excitation mechanism of the electromagnetic ultrasonic transducer is changed from the superposition of Lorentz force and magnetostrictive stress to Lorentz force, and the ferromagnetic material reduces the excitation difficulty of electromagnetic ultrasonic transducer. This study provides a theoretical basis for the design of electromagnetic ultrasonic transducer system.

**Key words:** electromagnetic ultrasonic transducer; lorenz force; magnetostriction; excitation frequency; high temperature ferromagnetic material

## 0 引言

通过在线检测坯壳厚度, 可以准确掌握凝固壳的变化规律和凝固终点的位置, 对优化连铸工艺具有重要意义。电磁超声检测方法具有非接触、无需耦合剂的优点, 主要应用于高温、在线检测等无损

检测领域<sup>[1]</sup>, 恰好满足了坯壳厚度检测的环境要求。

DOBBS<sup>[2]</sup>发现了当静态磁场与工件表面垂直或者平行时, 可以分别激励出横波或纵波, BURROWS 等<sup>[3]</sup>仿真研究温度高达 900 °C 的不锈钢和弹性低碳钢电磁超声 EMAT 厚度检测并进行实验研究。随着温度升高, 铁磁材料磁畴壁发生变化, 当温度超过铁磁材料的居里点, 铁磁性钢坯对外呈现顺磁性, 只需考虑洛伦兹力<sup>[4]</sup>。RIBICHINI R 等<sup>[5]</sup>对电磁超声换能器进行了常温下铁磁材料厚度的检测并建模和定量分析。

连铸尾端钢坯表面温度为 500 °C, 钢坯表面处于未磁饱和状态。目前, 在学术界内并未发现在此

收稿日期: 2018-09-08; 修回日期: 2018-11-20

基金项目: 国家自然科学基金(61463041)、内蒙古自治区自然科学基金(2018MS06011)资助。

作者简介: 王志春(1972—), 女, 内蒙古包头人, 教授, 研究方向为电涡流无损检测和结晶器传热仿真、电磁超声技术、连铸坯壳测厚。

通讯作者: 孙雪冬, E-mail: 15848223862@163.com

状态下，激发电磁超声横波及其换能机制的研究。连铸生产中二冷区尾端铸坯的壳厚度，连铸工艺设计者仍需获得。因此对温度在 500℃ 左右的钢坯表面的电磁超声换能机制进行了研究。此时钢坯表面还存在磁性，这时不仅考虑洛伦兹力机制，还要考虑磁致伸缩机制。将这两种机制结合，并利用磁致伸缩来提高换能效率，激发超声横波，以达到测量坯壳厚度的目的。

## 1 EMAT 的工作原理及数学模型

### 1.1 EMAT 的工作原理

EMAT 的主要组成部分为圆柱型永磁体、螺旋线圈、被测试件，其结构示意图如图 1 所示。

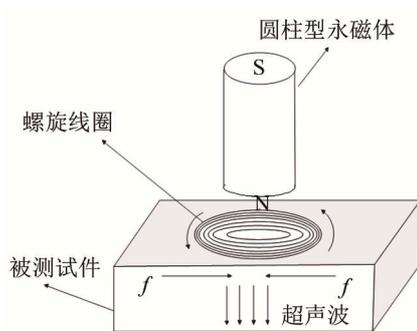


图 1 三维 EMAT 结构示意图  
Fig.1 Schematic diagram of 3D EMAT structure

实际螺旋线圈体波换能器一般采用圆柱型永磁体<sup>[6]</sup>，且为了提高换能效率、减少纵波的干扰，采用厚度与其直径相等的设计原则。对于永磁体与线圈的关系，保持永磁体的直径与换能器线圈的直径比为 1.5~2<sup>[7]</sup>。当永磁体的宽度不够或者厚度不够时，会导致激发不出超声波，因此在设计永磁体时，应该适当增大永磁体的厚度与直径。

对于螺旋线圈的设计，满足线间距为导波的整数倍，这样会使激发的超声波叠加从而增强激发的超声横波模式的信号，同时减弱其他模式的信号。

在外界垂直偏置磁场下，对螺旋线圈输入猝发式高频电流，线圈周围会产生交变的电磁场，并穿透被测试件表面，从而在被测试件表面产生感应涡流，通过其与偏置磁场相互作用，在材料内部产生体积力，该力带动钢坯中的粒子做相同频率的振动，由于粒子高频率的振动，产生超声横波(体波)，实现电-磁-力-声的转换，也实现从电磁到声的能量转换，其接收过程是激发的逆过程。由此可知电磁超声换能器的参数：偏置磁场、激励电流频率、驱动电流幅值。设计电磁超声换能器时也以这三个方面为依据进行优化。

### 1.2 数学模型

偏置磁场提供的静态磁场  $B_s$  表示为

$$B_s = \mu H + \mu_0 M_0 = \mu H + B_r \quad (1)$$

式中， $\mu$  为磁介质的磁导率； $\mu_0$  为真空磁导率； $M_0$  为剩余磁化强度； $B_r$  为剩余磁感应强度。

钢坯中的磁场强度  $B$  是交变磁场  $B_d$  与静态磁场  $B_s$  叠加而成的，其表达式是

$$B = B_s + B_d \quad (2)$$

$B$  与产生感生的涡流  $J_e$  共同作用下产生洛伦兹力  $F_L$ ，即

$$F_L = J_e \times B \quad (3)$$

由式(2)与(3)可知，洛伦兹力与外加磁场强度成正比。而磁致伸缩应变对材料敏感，具有明显的非线性和磁场依赖性<sup>[8]</sup>，因此，选用非线性磁致伸缩模型，此时，应变-位移的本构关系下数学模型为：

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \nabla \cdot \sigma + F_v \\ \sigma = E^H \varepsilon \\ \varepsilon = \frac{1}{2} [(\nabla u)^T + \nabla u] \end{cases} \quad (4)$$

式中， $u$  为位移； $T$  表示转置； $\rho$  为材料密度； $E^H$  为恒磁场作用下的杨氏模量， $F_v$  为洛伦兹力体载荷，即式(3)的  $F_L$ 。

## 2 电磁场二维建模及仿真分析

### 2.1 模型的建立

本文为减少计算，使用二维仿真模型代替三维模型，永磁体尺寸设计为直径 30 mm，厚度 30 mm。对于钢这类铁磁性材料，达到磁饱和需要 1.6 T 以上的磁场强度。所以为了保证钢板内的磁致伸缩效应的存在，在选择永磁铁时，需要保证其剩磁在 1.6 T 以下<sup>[9]</sup>。选用永磁体磁场强度为 1.2 T，永磁体的内禀矫顽力为 927 kA·m<sup>-1</sup>，相对磁导率为 1，提供相对于被测试件垂直的磁场方向。螺旋线圈线半径为 0.3 mm，线间距为 0.3 mm，提离距离为 0.4 mm。EMAT 二维建模示意图如图 2 所示。

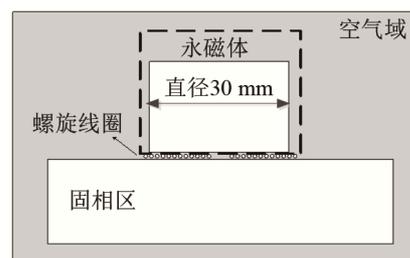


图 2 EMAT 二维建模示意图  
Fig.2 Schematic diagram of 2D EMAT modeling

COMSOL 仿真软件中采用磁致伸缩模型为非线性模型,通过磁畴旋转模型解释非线性磁致伸缩系数  $\lambda$  与磁化强度  $M$  的关系<sup>[10]</sup>为

$$\lambda = \frac{3}{2} \lambda_s \frac{M^2}{M_s^2} \quad (5)$$

式中,  $\lambda_s$  为饱和磁致伸缩系数;  $M_s$  为饱和磁化强度。由式(5)可知,磁致伸缩系数  $\lambda$  仅与  $M^2$  有关。但随着温度的升高,磁畴结构发生变化,饱和磁化强度也随之减弱。对于 Q235 号钢,当温度升到 800℃时,磁畴瓦解,由铁磁性变成顺磁性。此时换能机制发生转变,由洛伦兹力与磁致伸缩两种机制共同作用转变成洛伦兹力一种机制发生作用。由文献[10]可知,饱和磁化强度与温度的关系,如图 3 所示。

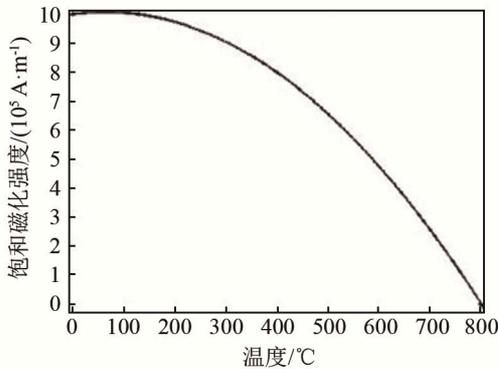


图 3 饱和磁化强度与温度关系图<sup>[10]</sup>  
Fig.3 Relationship between saturation magnetization and temperature<sup>[10]</sup>

同时由文献[11]求出 500℃时对应的饱和磁化强度为  $6.6 \times 10^5 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ 。钢板在 500℃时的参数如表 1 所示。

表 1 钢板 500℃参数设置<sup>[11]</sup>  
Table 1 Parameter setting of steel plate at 500℃<sup>[11]</sup>

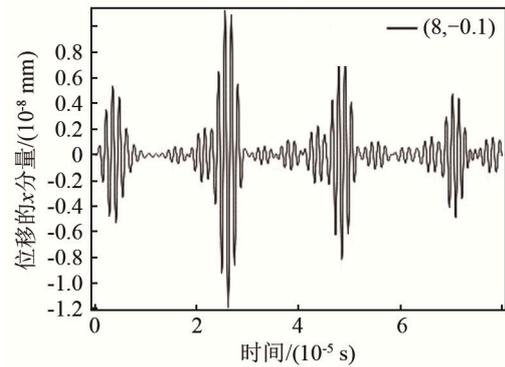
泊松比	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	饱和磁致伸缩系数
0.33	7850	$4.17 \times 10^{-6}$
初始磁化系数	相对介电常数	相对磁导率
215	1	148

在横波传播过程中,密度、泊松比可看成常量<sup>[12]</sup>。传播速度速主要是由杨氏模量决定,同时通过式(4)可知杨氏模量决定了磁致伸缩效应作用下应力大小,但由于研究的是钢坯表面的换能机制与两种机制作用下的位移振幅大小,因此只设置在 500℃时杨氏模量为  $1.46 \times 10^{11} \text{ Pa}$ <sup>[13-14]</sup>,忽略钢坯内部的杨氏模量变化,不考虑横波传播速度的变化。

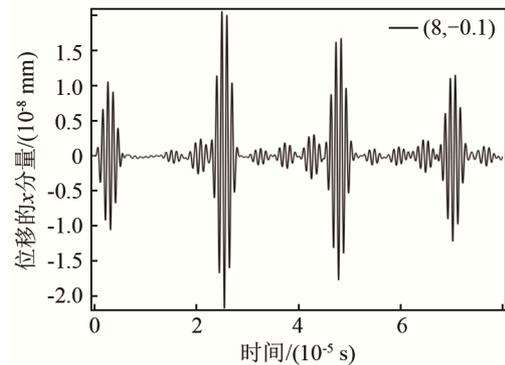
### 2.2 模型验证及分析

为了研究 500℃时钢坯表面的激发横波的换能机制,首先对相对磁导率不同,不加载磁致伸缩部

分,仅考虑洛伦兹力作用下的位移振幅大小进行比较。由于产生的是超声横波,洛伦兹力的  $x$  分量远远大于  $y$  分量,因此在比较波的位移振幅大小时,只比较位移的  $x$  分量。保证相同的激励电流强度、磁场强度与猝发周期下,分别仿真被测试件相对磁导率为 1(代表无磁性金属材料)、148 时,洛伦兹力增强引起的位移变化情况。此时超声横波在  $x$  分量上的传播情况,如图 4 所示(图 4 中的(8, -0.1)表示采样坐标为 8 mm, -0.1 mm,下同)。



(a) 相对磁导率为 1

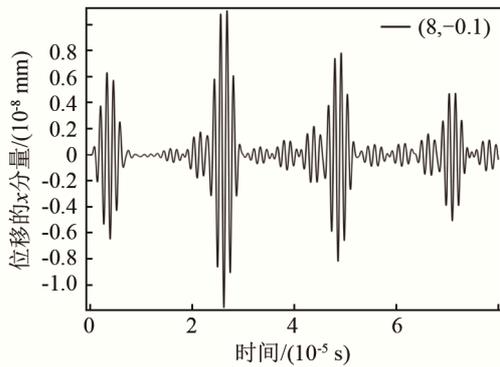


(b) 相对磁导率为 148

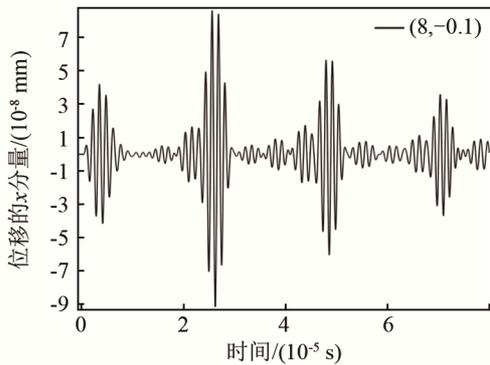
图 4 不同相对磁导率下横波  $x$  分量位移对比图  
Fig.4 Contrast diagram of displacement in the  $x$  direction of shear wave under different relative permeabilities

通过图 4(a)、4(b)对比可知,横波位移的  $x$  分量振幅增大,当仅考虑相对磁导率变化时,相对磁导率增大,被测物件中的磁化强度增强,通过式(1)、(3)可知洛伦兹力增强,此时洛伦兹力的  $x$  分量也随之增大,从而使得位移的  $x$  分量振幅增大。

进一步分析,对于电磁换能器检测铁磁材料来说,位移振幅增大,可以适当降低电磁换能器的激发电流强度。用 COMSOL 仿真软件进行验证。保持相同的磁场强度与猝发周期,对比位移的  $x$  分量上振幅大小。采用常温下相对磁导率为 200、电流为 10 A,与相对磁导率为 1、电流为 15 A 进行比较,对比横波位移的  $x$  分量下振幅大小,结果如图 5 所示。



(a) 相对磁导率为 200，电流为 10 A



(b) 相对磁导率为 1，电流为 15 A

图 5 不同相对磁导率和不同电流强度下横波位移  $x$  分量对比图  
Fig.5 Contrast diagram of displacement in the  $x$  direction of shear wave under different relative permeabilities and current intensities

由图 5(a)、5(b)对比可知，电流为 10 A 时位移的  $x$  分量振幅比电流为 15 A 时大，因此当被测物为铁磁性物时，可以适当降低电磁换能器的激发电流强度。

由于 Q235 号钢在温度 500℃时并没有消磁，饱和磁化强度、相对磁导率以及杨氏模量降低，磁致伸缩系数发生变化，但仍为磁性材料，对比图 4(b)加入磁致伸缩部分，比较此时的位移振幅大小。在保证激励电流强度、磁场强度与猝发周期相同的前提下，相对磁导率为 148 时，磁致伸缩机制与洛伦兹力这两种机制叠加，此时产生的横波在  $x$  分量测量坯壳厚度的传播情况如图 6 所示。

与图 4(b)对比后发现，在横波的  $x$  分量的位移振幅进一步增强。此时主要是由于在考虑磁致伸缩后，由交变电流产生的交变磁场作用于铁磁材料时，引起机械振动<sup>[15]</sup>，从而使得超声横波的振幅在  $x$  分量上增强。

为了在磁致伸缩与洛伦兹力共同作用下，为了提高换能效率，通过仿真不同频率下位移振幅的大小，得到在两种机制作用下位移振幅的最佳效果。采用 COMSOL 软件进行仿真验证，并结合 Matlab 软件将 COMSOL 软件仿真数据进行绘图，得到如

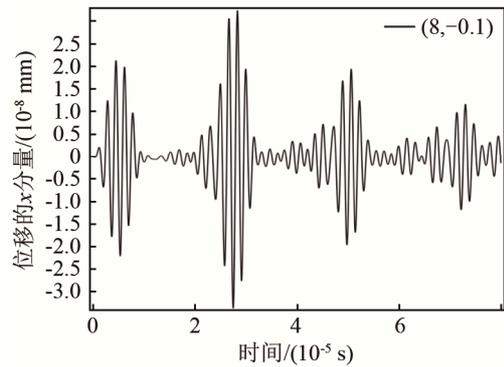


图 6 磁致伸缩与洛伦兹力这两种机制叠加时的横波  $x$  分量位移图

Fig.6 Displacement in the  $x$  direction of shear wave under the superposition of two different mechanisms: magnetostrictive stress and Lorentz force

图 7 所示不同频率的位移变化图。

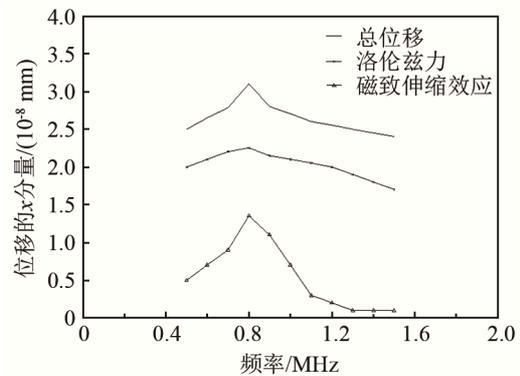


图 7 横波位移  $x$  分量随频率的变化图

Fig.7 Variation of the displacement in the  $x$  direction of shear wave with frequency

由式(4)、(5)可知杨氏模量、相对磁导率及饱和磁化强度的改变，导致磁致伸缩效应也会相应发生改变。随着频率升高，交变磁场强度增强，磁致伸缩效应下位移振幅也快速增大。当超过 0.8 MHz 时，由于磁致伸缩效应不能与激励频率保持一致，此时磁致伸缩效应下的位移振幅大小快速降低，超过 1 MHz 时磁致伸缩效应引起的改变很小，此时洛伦兹力占主导因素。

由以上仿真分析可知，电磁换能器的换能机制由被测物决定。在 500℃时，Q235 号钢由于还存在磁性，仍为铁磁材料材料，因此换能机制包含洛伦兹力与磁致伸缩效应。洛伦兹力的大小不仅与激励电流频率、驱动电流幅值有关，还与磁场强度有关。材料为铁磁性，不仅两种换能机制同时存在，并且材料带磁性时还增加了应变力的大小。

### 3 实验验证

本文主要研究温度为 500℃时，磁性钢坯表面

的换能机制。同时验证当其他条件相同时,铁磁性材料能否使得回波信号增强。使用汕头超声 CTS-409 设备进行测厚,电磁超声换能器采用单发工作模式,设置横波检测,频率为 0.8 MHz,被测物厚度均为 30 mm,进行激发与接收。检测无磁性的物质 304 不锈钢和有磁性物质 235 号钢的回波信号,并进行波峰对比,得到的 304 不锈钢和 235 号钢的回波波形如图 8 所示,图中 30 mm 为被测物厚度。

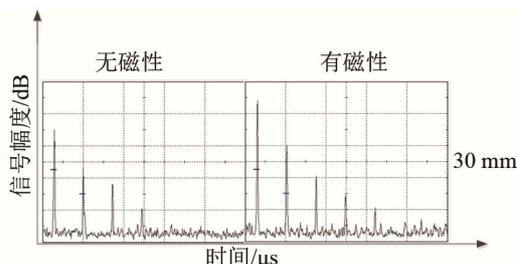


图 8 有或无铁磁性材料横波检测的实验对比图

Fig.8 Experimental contrast diagram of shear wave detection for the material with and without ferromagnetism

由图 8 可知,在相同环境下,铁磁性材料会使电磁超声换能器的回波信号增强,因此电磁换能器检测铁磁性材料的激发电流大小与频率可以适当降低,与仿真结果一致。

## 4 结 论

本文通过实验与仿真验证,得出以下结论:当被测物体存在铁磁性时,电磁超声换能器中激发电流大小与永磁体磁场强度可以适当降低,对其激发电路设计有利,使得电磁超声换能器的激发难度降低。在频率较低时,洛伦兹力与磁致伸缩效应两种换能机制共同存在,当激发频率升高到 0.8 MHz 时激发效果最好。两种机制共同存在,可以提高换能效率、激发超声横波,进行测厚。在整个频率变化过程中,洛伦兹力作用下的位移振幅始终大于磁致伸缩效应作用下的位移振幅。

### 参 考 文 献

- [1] 杨理践,李春华,高文凭,等. 铝板材电磁超声检测中波的产生与传播过程分析[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(6): 1218-1223.  
YANG Lijian, LI Chunhua, GAO Wenping, et al. Analysis of wave generation and propagation in electromagnetic ultrasonic testing of aluminum sheet[J]. Acta Instrumentalis Sinica, 2012, 33(6): 1218-1223.
- [2] DOBBS E R. Electromagnetic generation of ultrasonic waves in metals[J]. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 1970, 31(8): 1657-1667.
- [3] BURROWS S E, FAN Y, DIXON S. High temperature thickness measurements of stainless steel and low carbon steel using electromagnetic acoustic transducers[J]. NDT and E International, 2014, 68: 73-77.
- [4] 王志春,袁伟. 基于 COMSOL 连铸坯壳测厚横波 EMAT 优化[J]. 声学技术, 2018, 37(3): 237-242.  
WANG Zhichun, YUAN Wei. COMSOL based shear wave EMAT optimization for thickness measurement of continuous casting shell[J]. Technical Acoustics, 2018, 37(3): 237-242.
- [5] RIBICHINI R, CEGLA F, NAGY P B, et al. Quantitative modeling of the transduction of electromagnetic acoustic transducers operating on ferromagnetic media[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics & Frequency Control, 2010, 57(12): 2808-2817.
- [6] MAXFIELD B W, FORTUNCO C M. Design and use of electromagnetic acoustic wave transducers(EMATs)[J]. Materials Evaluation, 1983, 41(12): 1399-1408.
- [7] 翟国富,汪开灿,王亚坤,等. 螺旋线圈电磁超声换能器解析建模与分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(18): 147-154.  
ZHAI Guofu, WANG Kaican, WANG Yakun, et al. Analytical modeling and analysis of spiral coil electromagnetic ultrasonic transducer[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2013, 33(18): 147-154.
- [8] 丁秀莉,武新军,赵昆明,等. 基于磁场空间分布的 EMAT 磁致伸缩激励理论[J]. 无损检测, 2015, 37(5): 1-6.  
DING Xiuli, WU Xinjun, ZHAO Kunming, et al. EMAT magnetostrictive excitation theory based on magnetic field spatial distribution[J]. Nondestructive testing, 2015, 37(5): 1-6.
- [9] 梁震. 薄钢板电磁超声板波探伤技术的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2012.  
LIANG Zhen. Research on electromagnetic ultrasonic plate wave flaw detection of thin steel sheet[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2012.
- [10] 金亮,寇晓斐,郭富坤,等. 基于电磁超声换能器的铁磁材料电磁声发射检测方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(18): 98-105.  
JIN Liang, KOU Xiaofei, GUO Fukun, et al. Electromagnetic acoustic emission detection of ferromagnetic materials based on electromagnetic ultrasonic transducer[J]. Journal of Electrical Technology, 2017, 32(18): 98-105.
- [11] 宋小春,王亚午,李羽可. 力磁耦合作用下电磁超声换能器换能效率仿真分析[J]. 制造业自动化, 2014, 36(15): 102-105.  
SONG Xiaochun, WANG Yawu, LI Yuke. Simulation and analysis of transducer efficiency of electromagnetic ultrasonic transducer under the action of force-magnetic coupling[J]. Manufacturing Automation, 2014, 36(15): 102-105.
- [12] HERNANDEZ-VALLE F, DIXON S. Pulsed electromagnet EMAT for ultrasound measurements at elevated temperatures. Insight, 2011, 53(2): 96-99.
- [13] 关卫和,阎长周,陈文虎,等. 高温环境下超声波横波检测技术[J]. 压力容器, 2004, 21(2): 4-6.  
GUAN Weihe, YAN Changzhou, CHEN Wenhui, et al. Ultrasonic shear wave testing under high temperature environment[J]. Pressure Vessel Technology, 2004, 21(2): 4-6.
- [14] 付建勋,李京社,汪春雷,等. Q235 钢杨氏弹性模量的研究[J]. 材料导报, 2009, 23(18): 68-70.  
FU Jianxun, LI Jingshe, WANG Chunlei, et al. Study on Young's modulus of elasticity of Q235 steel[J]. Materials Report, 2009, 23(18): 68-70.
- [15] 刘素贞,武云海,张闯,等. 静态偏置磁场强度对铁磁材料电磁超声换能机制的影响[J]. 电工技术学报, 2018, 33(9): 2148-2154.  
LIU Suzhen, WU Yunhai, ZHANG Chuang, et al. Effect of static biased magnetic field intensity on electromagnetic ultrasonic transduction mechanism of ferromagnetic materials[J]. Journal of Electrical Technology, 2018, 33(9): 2148-2154.