

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905323

# 基于脉冲压缩技术的高温连铸坯壳厚度测量 EMAT 设计及应用\*

石文泽<sup>1,3</sup>, 陈巍巍<sup>1</sup>, 陈尧<sup>1</sup>, 张金<sup>4</sup>, 卢超<sup>1,2</sup>

(1. 南昌航空大学无损检测教育部重点实验室 南昌 330063; 2. 上饶师范学院 上饶 334001;

3. 中科院声学研究所声场声信息国家重点实验室 北京 100190; 4. 中国人民解放军陆军炮兵防空兵学院 合肥 230031)

**摘要:**采用非接触电磁超声技术实现高温连铸坯壳厚度测量,实时调整辊压力、冷却喷水量、压下位置和压下速度等工艺参数,避免出现中心偏析和松散问题,具有重要的工程应用价值。为了进一步提高电磁超声换能器(EMAT)在晶粒粗大和表面振痕的高温铸坯中的信噪比和空间分辨率,建立了基于 Chirp 信号激励的跑道线圈电磁超声检测过程的有限元模型,分析了 EMAT 设计参数、Chirp 信号频宽和脉宽等因素对脉冲压缩后的超声回波信噪比和空间分辨率的影响,并通过实验予以验证。结果表明:经过脉冲压缩后,超声回波的 SNR 提高 19 dB 以上,波包宽度减少 62.4% 以上;Chirp 信号脉宽和永磁体尺寸对信噪比有显著影响,Chirp 信号频宽、永磁体间距和宽度、跑道线圈导线直径及其阻抗匹配参数影响空间分辨率。

**关键词:** 高温连铸坯; EMAT; 脉冲压缩; 信噪比; 空间分辨率

**中图分类号:** TH878 TB552 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.20

## Design and application of an EMAT for solidification shell thickness detection in continuous casting slab based on the pulse compression technique

Shi Wenzhe<sup>1,3</sup>, Chen Weiwei<sup>1</sup>, Chen Yao<sup>1</sup>, Zhang Jin<sup>4</sup>, Lu Chao<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing, Ministry of Education, Nanchang Hangkong

University, Nanchang 330063, China; 2. Shangrao Normal University, Shangrao 334001, China;

3. State Key Laboratory of Acoustic Field and Acoustic Information, Academy of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 4. PLA Army Academy of Artillery and Air Defense, Hefei 230031, China)

**Abstract:** The non-contact electromagnetic ultrasonic technology can be used to measure solidification shell thickness of slab in continuous casting. The casting technical parameters (e.g., rolling force, water sprays control, rolling location and rolling speed) can be adjusted in time to avoid central segregation and loose problems. The listed advantages have important application value for engineering. To improve the range resolution and signal noise ratio (SNR) of the electromagnetic acoustic transducer (EMAT) used in high temperature casting slab with coarse grains and surface oscillation marks, a finite element model for the testing process of a racetrack spiral coil EMAT with a chirp wave transmitting pulse is proposed. The influences of EMAT design parameters, pulse width and bandwidth of the chirp signal on the range resolution and SNR of the received ultrasonic waves after pulse compression are analyzed. Subsequently, simulation results are verified by experiments. Results show that the SNR of the received ultrasonic wave with chirp pulse compression can be improved by approximately 19 dB, and the pulse width is reduced more than 62.4%. Pulse width of chirp wave and magnet dimensions have significant influence on SNR. The range resolution of ultrasonic wave is affected by the bandwidth of chirp wave and magnet spacing and width. In addition, the conductor diameter of the racetrack spiral coil and its impedance matching parameters also affect the range resolution.

**Keywords:** high temperature slab in continuous casting; EMAT; pulse compression; SNR; range resolution

收稿日期:2019-06-30 Received Date:2019-06-30

\* 基金项目:国家自然科学基金(51705231, 51265044, 51705232)、江西省青年科学基金(20181BAB216020)、江西省优势科技创新基金(20171BCB24008)、声场声信息国家重点实验室开放课题(SKLA201912)、江西省研究生创新专项资金(YC2019-S345)、江西省教育厅科技项目(GJJ170613)资助

## 0 引言

准确确定连铸生产过程中高温铸坯的固液界面,实时监测铸坯凝固速度和液芯末端位置,一方面可以避免由于辊压力度不准而造成液芯末端产生裂纹或气孔等缺陷,另外一方面可以提高连铸速率,降低生产线中断事故,进一步控制宏观偏析、热裂纹等冶金缺陷<sup>[1-2]</sup>。

通过配备高温压电探头、高温耦合剂和高温楔块,或者采用干耦合,压电超声可以用于高温检测,例如, Kazys 等<sup>[3]</sup>采用钛酸铋、铌酸锂、磷酸镓单晶等高熔点材料制作压电晶片,仅能实现 450℃ 高温检测, Panametrics 公司最新研发的半固态耦合剂,仅能满足 520℃ 高温检测; Baba 等<sup>[4-5]</sup>采用提拉法晶体生长方法制备高纯度单晶钛酸铋压电探头,并将其封装在耐高温陶瓷层中,可以实现 1 000℃ 长时间检测,但采用却是干耦合,换能效率低,对待测表面光洁度要求很高。由于压电晶片的高温压电效应显著退化、耦合剂在高温状态下迅速(几秒内)失效、待测表面粗糙导致换能效率严重下降等问题,压电超声很难用于含表面振痕和氧化皮、1 200℃ 以上超高温的连铸坯壳厚度在线移动式测量<sup>[6-7]</sup>。

非接触超声检测方法,如空气耦合超声、激光超声和电磁超声等,能有效解决高温在线厚度测量问题。空气耦合超声余振长,而且多使用透射法进行检测,仅适合复合材料、木材、陶瓷等疏松多空材料,很难应用于声阻抗差异大、厚度较大的连铸坯壳厚度测量<sup>[8-9]</sup>。激光超声可以实现 800℃ 钢板表面缺陷检测和 1 000℃ 钢铁厚度(8 mm)检测,但激光所能激励的超声波能量有限,仅能检测尺寸较小工件(对于钢铁,厚度不超过 30 mm),且造价高、体积大<sup>[10-11]</sup>。

与传统压电超声技术、空气耦合超声和激光超声相比,电磁超声换能器(EMAT)由于具有非接触、无需耦合剂易于激励多模式超声波等优点,适合应用于高温、在线、快速、不允许耦合剂、表面粗糙、不方便去除涂层等复杂苛刻检测环境<sup>[1, 12-15]</sup>。因此,将电磁超声非接触检测技术应用于高温连铸坯壳厚度在线实时测量具有重要的工程应用价值<sup>[16]</sup>。然而,由于 EMAT 换能效率低、信噪比低和所需激励功率大等原因,导致其应用领域受限<sup>[17]</sup>,因此有必要在 EMAT 优化设计和降噪算法与信号处理等方面进一步研究,以提高其换能效率和信噪比<sup>[18-20]</sup>。

目前,国内外学者已经将电磁超声技术应用于连铸生产线的高温铸坯厚度/液芯末端检测,例如, JEF 钢铁研究实验室的 Iizuka 等<sup>[16]</sup>将脉冲压缩技术与跑道线圈横波 EMAT 结合起来开展了 1 000℃ 以上高温铸坯液芯末端检测,并采用两个 EMAT 探头在铸坯两侧分别激励和接收超声波,通过判定接收 EMAT 探头是否接收到透射超声波,来验证铸坯中是否有液芯存在。当高温连铸

坯的表面温度为 1 200℃ 以上时,通常认为存在两个坯壳固态区和一个液芯液态区,根据透射超声波经过铸坯的时间,可以间接测量坯壳的厚度,例如,新日本制铁公司的 Kawasaki 等采用两个 EMAT 探头获取铸坯中透射超声波的飞行时间,并结合当前铸坯的总厚度,以及事先测定的高温铸坯中固态区和液态区平均超声声速,来间接估算高温铸坯的坯壳厚度<sup>[21]</sup>。衡阳镭目科技有限责任公司田志恒等开发了基于电磁超声技术的连铸坯液芯凝固末端在线测量系统,通过高温铸坯的两侧布置 2~6 对 EMAT 探头,通过分析透射超声波的有无,从而获取铸坯的液芯凝固末端位置信息<sup>[22]</sup>。

高温连铸坯厚度电磁超声在线测量技术实现的难点,主要体现在 EMAT 探头的超高温耐受能力有限、高温 EMAT 换能效率低、材料的高温衰减、粗大晶粒造成的超声散射、超声波在铸坯固态区和液态区的传播规律尚不清楚等方面。高温连铸坯表面温度通常在 1 200℃ 以上,超过居里温度,EMAT 在超过居里温度的金属材料中主要依靠洛伦兹力机理实现超声波的激励和接收,因此高温 EMAT 换能效率低<sup>[23]</sup>。为了进一步提高高温 EMAT 信噪比,可以通过必要的同步触发平均次数来达到抑制随机噪音的目的,但是由于超声回波的飞行时间和幅值随着检测环境(高温、移动)或对象电磁学和声学特性急剧变化,增加平均次数,将可能导致检测时间过长或者无法准确地、可靠地获取超声波信号。将脉冲压缩技术应用应用于高温 EMAT,不仅可以在较短的时间内完成噪音的滤除,减小平均次数,而且还可以进一步提高超声波的时间分辨率和信噪比<sup>[16]</sup>。

脉冲压缩技术已经被应用于超声检测中,例如,周正干等<sup>[24]</sup>将脉冲压缩技术和超声 C 扫成像技术结合起来,应用于蜂窝夹芯复合材料的空气耦合超声检测中,验证了基于相位编码的脉冲压缩方法在空气耦合检测中的良好应用效果。曹玉龙等<sup>[25]</sup>设计了基于 FPGA 的线性调频脉冲发射和压缩系统,实现了浅表器官 B 型超声波扇扫扫描仪的实时性需求。Mohamed 等<sup>[26]</sup>将脉冲压缩技术应用应用于高衰减厚聚合物厚度的低频压电超声检测,采用 0.3 MHz 超声频率实现了自然气泡和人工平底孔缺陷的成像检测。Ho 等<sup>[27]</sup>将脉冲压缩技术应用应用于 6 mm 铝合金薄板内部圆孔的成像检测,提出脉冲压缩方法可以减少平均次数,能满足在线快速检测的要求。

综上所述,基于脉冲压缩技术的电磁超声技术已经被应用于高温连铸坯壳厚度测量,并取得了一定的应用效果,但尚无文献对跑道线圈 EMAT 设计参数、Chirp 信号带宽和脉宽等因素对脉冲压缩后的超声回波信噪比和空间分辨率的影响规律进行深入分析。因此,本文以表面振痕、粗晶的连铸坯为检测对象,建立基于 Chirp 信号激励的横波电磁超声检测过程的有限元模型,分析 EMAT 线圈和

永磁体设计参数、Chirp 信号特征等因素对脉冲压缩后的超声回波信噪比和空间分辨率的影响,从而为基于脉冲压缩技术的高温连铸坯壳厚度测量 EMAT 设计提供指导。

## 1 面向脉冲压缩技术的 EMAT 检测过程的有限元建模

### 1.1 跑道线圈 EMAT 组合形式及换能机理

跑道线圈横波 EMAT 配置形式如图 1 所示。由图 1 可知,横波 EMAT 主要由一对垂直方向充磁的永磁体和跑道线圈组成,在永磁体上方增加磁轭,可以增强金属试样表面形成的偏置磁感应强度。当大功率射频脉冲电流通过跑道线圈时,将在金属试样表面形成方向相反、频率相同的脉冲电涡流。电涡流与永磁体提供的静态偏置磁场相互作用,便可以在试样表面形成洛伦兹力。试样表面质点在洛伦兹力的作用下,产生动态振动变形,并以超声波的形式沿厚度方向传播。由于在永磁体的正下方,主要以垂直方向的磁场为主,而在两永磁体中间正下方,存在部分水平方向的磁场,因此跑道线圈横波 EMAT 能够同时产生纵波与横波,但是以横波为主。

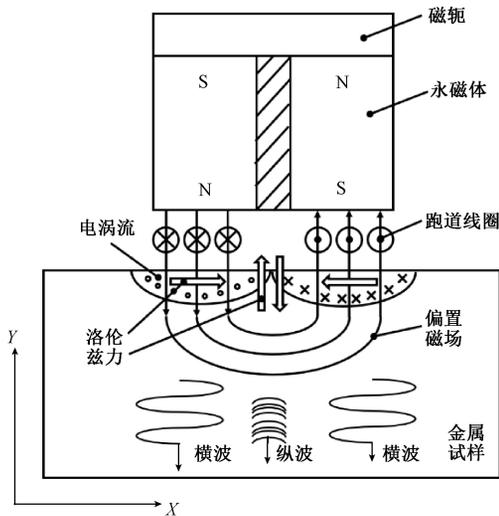


图 1 跑道线圈横波 EMAT 组合形式及换能机理

Fig.1 Configuration and conversion mechanism of a shear wave EMAT with a racetrack spiral coil

高温连铸坯的表面温度通常在 1 200℃ 以上,超过居里温度,因此在高温状态下,跑道线圈横波 EMAT 主要以洛伦兹力为主。跑道线圈 EMAT 具有宽带宽特性 (0.1~50 MHz),可以产生 0.1~0.5 MHz 低频横波,适合于粗晶、高衰减系数的高温连铸坯厚度在线测量。

### 1.2 Chirp 脉冲压缩算法实现

为了对超声波信号进行脉冲压缩处理,可以采用 Chirp 线性调频信号作为 EMAT 的脉冲激励信号。线性

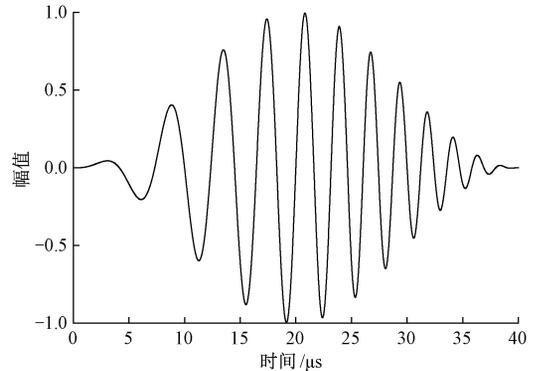
Chirp 信号是指在一定的时间内,信号的频率随着时间线性变化,数学描述如下<sup>[16, 28]</sup>:

$$st(t) = \begin{cases} \sin\left(2\pi\left(C_f - \frac{B_w}{2} + \frac{B_w}{2} * t\right) * t\right) \\ * f_g(t), 0 \leq t \leq P_w \\ 0, 0 > P_w \end{cases} \quad (1)$$

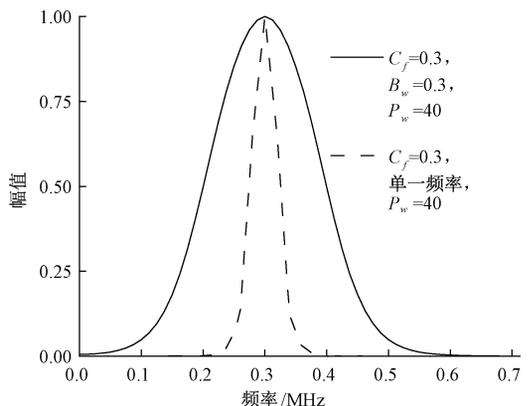
式中:  $C_f, P_w$  和  $B_w$  分别代表 Chirp 信号的中心频率,脉宽和带宽。 $f_g(t)$  考虑了脉冲功率放大器和含阻抗匹配网络的 EMAT 激励电路的响应特性,在有限元模型中,可以采用海宁窗来近似表示,表述如下:

$$f_g(t) = \begin{cases} 0.5 * \left(1 - \cos\left(2\pi * C_f * \frac{t}{P_w * C_f}\right)\right) \\ 0 \leq t \leq P_w, \\ 0, 0 > P_w \end{cases} \quad (2)$$

$C_f$  为 0.3 MHz,  $B_w$  为 0.45 MHz,  $P_w$  为 40  $\mu$ s 的 Chirp 信号见图 2(a),单一频率猝发音和 Chirp 信号的频谱分析结果见图 2(b)。由图 2 可知,Chirp 信号的频率随着时间的增加而增加,而且 Chirp 信号的频谱宽度远大于单一频率猝发音。



(a) Chirp 激励信号  
(a) Chirp wave transmitting pulse



(b) Chirp 信号与单一频率猝发音的频谱成分比较  
(b) Comparison of frequency spectrum between a chirp wave and a tone-burst pulse

图 2 Chirp 激励信号及其频谱

Fig.2 Chirp wave transmitting pulse and its frequency spectrum

当跑道线圈 EMAT 通以脉冲 Chirp 电流时,将可以在待测碳钢试样表面激发超声波,并沿着试样厚度方向传播,当遇到缺陷或者试样底面时,将返回至跑道线圈 EMAT 的正下方,获得一个代表超声波的电压信号  $x_i(t)$ ,经过脉冲压缩以后的超声波信号  $y_i(t)$  如下<sup>[16]</sup>:

$$y_i(t) = \int_0^T st(t)x_i(t + \tau) d\tau \quad (3)$$

### 1.3 跑道线圈 EMAT 检测过程控制方程

跑道线圈横波 EMAT 激励过程有限模型主要用于求解永磁体和激励线圈在待测金属表层形成的磁感应强度  $B_s$  和脉冲电涡流密度  $J_{ez}$ ,并最终获取试样表面的洛伦兹力  $f_{Ls}$ ,相关的控制方程如下<sup>[29-30]</sup>:

$$\mu \nabla^2 \varphi_m = 0 \quad (4)$$

$$\mathbf{H}_s = -\nabla \varphi_m \quad (5)$$

$$\mathbf{B}_s = \mu_r \mu_0 \mathbf{H}_s + \mathbf{B}_{sr} \quad (6)$$

$$dv \frac{1}{\mu} \text{grad} A_z - \sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} + \frac{\sigma}{S_k} \frac{\partial}{\partial t} \iint_{R_k} A_z ds = -\frac{st(t)}{S_k} \quad (7)$$

$$\mathbf{J}_{iz} = -\sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} \quad (8)$$

$$\mathbf{f}_{Ls} = \mathbf{J}_{iz} \times \mathbf{B}_s \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{H}_s$ 、 $\varphi_m$  分别为磁场强度和标量磁位;  $\mu_r$ 、 $\mu_0$ 、 $\mu$  为相对磁导率、空气磁导率和绝对磁导率;  $\mathbf{B}_{sr}$  是永磁体的剩余磁感应强度;  $R_k$ 、 $S_k$  和  $\sigma$  分别为第  $k$  匝导线的截面区域、等效截面积和电导率。式(4)~(6)用于求解永磁体形成的偏置磁场,式(7)~(9)用于求解金属试样表层的洛伦兹力。

洛伦兹力所激发的超声波在金属材料中的传播过程可以利用式(10)表示<sup>[31]</sup>:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} - \nabla \cdot \mathbf{T} = \mathbf{f}_{Ls} \quad (10)$$

式中:  $\rho$  为材料密度;  $\mathbf{u}$  为位移矢量;  $\mathbf{T}$  表示应力张量。

跑道线圈横波 EMAT 接收过程有限模型,除了求解永磁体产生的磁感应强度  $\mathbf{B}_s$  外,还要求解试样表面质点振动引起的动态磁场,并被 EMAT 线圈接收所得到的开路感生电压  $V_{in}$ ,相关的控制方程如下<sup>[32]</sup>:

$$\mathbf{J}_{ez} = -\sigma v \times \mathbf{B}_s \quad (11)$$

$$dv \frac{1}{\mu} \text{grad} A_z - \sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} = -\mathbf{J}_{ez} \quad (12)$$

$$dv \frac{1}{\mu} \text{grad} A_z - \sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} + \frac{\sigma}{S_k} \frac{\partial}{\partial t} \iint_{R_k} A_z ds = 0 \quad (13)$$

$$V_{in} = \frac{\int_{R_k} \left( \int_{l_i} -\frac{\partial A_z}{\partial t} dl \right) d\Omega}{\int_{R_k} d\Omega} \quad (14)$$

式中:  $v$  是超声波在传播过程中引起试样表面质点的振动速度,其中横波以面内速度  $v_r$  为主,纵波以面外速度  $v_z$

为主;  $\mathbf{J}_{ez}$  为试样表层形成的源电流密度,  $l_i$  为接收线圈的长度。

### 1.4 跑道线圈 EMAT 设计参数及有限元模型

图3所示为跑道线圈横波 EMAT 的设计参数示意图,其参数取值如表1所示。有限元模型中的金属材料电磁学参数如表2所示。碳钢和磁轭的磁导率随着永磁体提供的偏置磁场强度变化而改变,本文假定磁导率为固定值,即忽略两对永磁体参数变化对磁导率的影响。

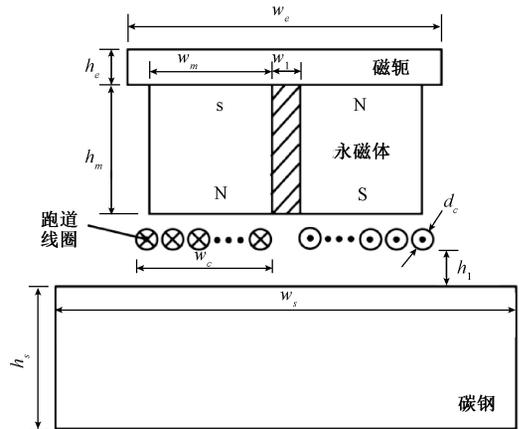


图3 跑道线圈横波 EMAT 设计参数示意图

Fig.3 Diagrammatic sketch for design parameters of the shear wave EMAT with a racetrack spiral coil

表1 跑道线圈 EMAT 设计参数及其取值

Table 1 Design parameters of the bulk wave EMAT and their values

变量	数值/mm	变量	数值
磁轭宽度/ $w_e$	66	碳钢宽度/ $w_m$	100 mm
磁轭高度/ $h_e$	10	碳钢高度/ $h_m$	100 mm
永磁体宽度/ $w_m$	20~35	提高高度/ $h_1$	0.5 mm
永磁体高度/ $h_m$	10~30	线性扫频中心频率/ $C_f$	0.3 MHz
永磁体间距/ $w_1$	2~10	线性扫频带宽/ $B_w$	0.3~0.45 MHz
跑道线圈宽度/ $w_c$	20	线性扫频持续时间/ $P_w$	20~70 $\mu$ s
线圈导线直径/ $d_c$	0.2~0.7		

表2 有限元建模中材料电磁学参数

Table 2 Electromagnetic properties of materials used in the finite element model

材料	磁导率	电导率/(S/m)	材料	磁导率	电导率/(S/m)
碳钢	100	$4.03 \times 10^6$	永磁体	1.04	$7.14 \times 10^5$
铜导线	1.0	$6.00 \times 10^7$	磁轭	400	$1.12 \times 10^7$

在有限元商业软件中,可以建立基于脉冲 Chirp 激励的横波电磁超声检测过程的二维有限元模型,如图4所示。磁轭、永磁体和碳钢试样采用映射网格,跑道线圈、空

气等采用三角形网格,在跑道线圈和碳钢试样的局部边界采用边界层网格进行局部细化,共有 72 284 个网格单元,计算时间步长为 0.002  $\mu\text{s}$ ,有限元计算结果满足收敛要求。

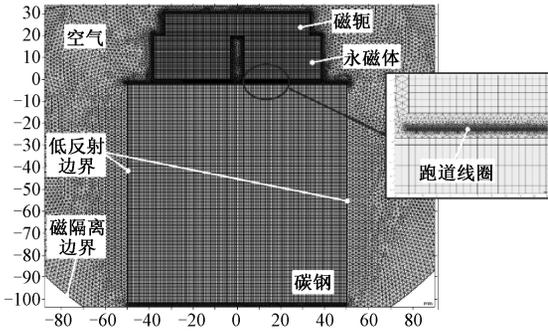


图 4 跑道线圈横波 EMAT 有限元模型

Fig.4 Finite model of a shear wave EMAT with a racetrack spiral coil

EMAT 中永磁体在碳钢试样中形成的磁感应强度分布如图 5 所示。跑道线圈中左起第 18 匝导线正下方、碳钢表面的瞬态电涡流和洛伦兹力如图 6 所示。由图 6 可知:瞬态电涡流和洛伦兹力曲线与图 2(a) 所示的 Chirp 信号类似,由于碳钢试样表面的 Y 向偏置磁感应强度大于 X 向分量,因此 X 向洛伦兹力大于 Y 向分量。

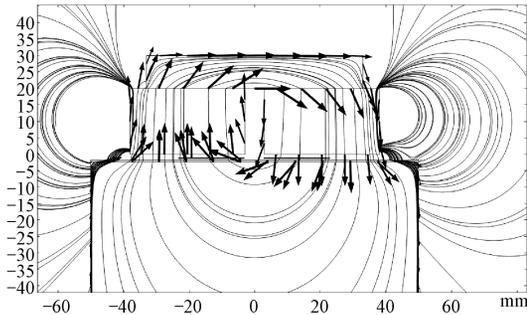


图 5 碳钢试样中的偏置磁场分布

Fig.5 Magnetic field in the carbon steel sample

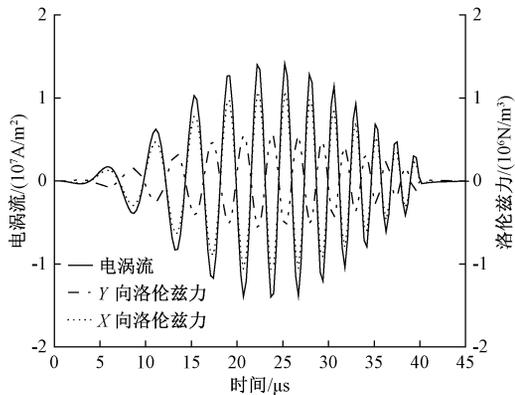


图 6 碳钢试样表面的瞬态电涡流和洛伦兹力

Fig.6 Transient eddy current and Lorentz force in the surface of the carbon steel sample

跑道线圈横波 EMAT 在碳钢中激发的横波传播瞬态云图如图 7 所示。由图 7 可知:在跑道线圈 EMAT 激励的过程中,随着 Chirp 信号频率的增加,横波的波长随之减小,声束的发散角也依次减小。

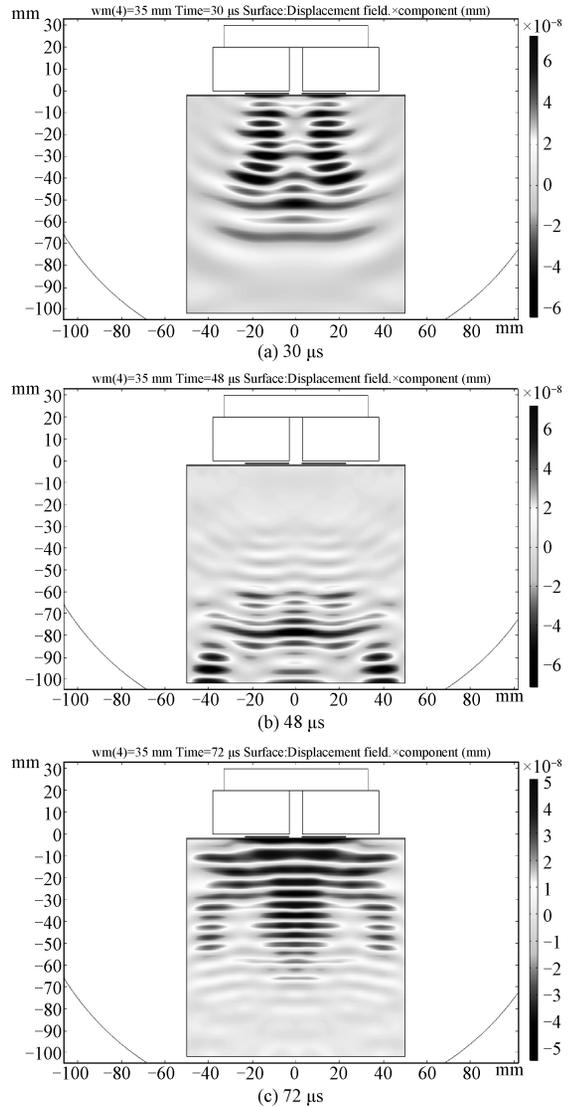


图 7 基于 Chirp 信号激励的横波在碳钢中传播瞬态云图

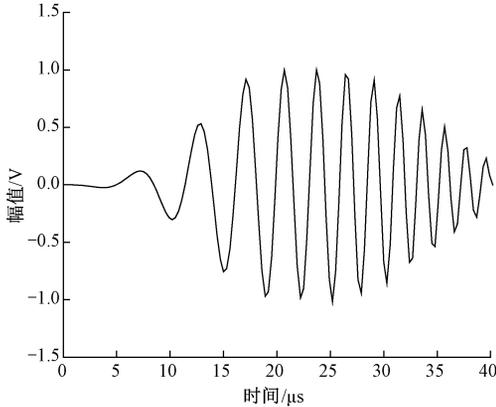
Fig.7 Transient contours of shear wave propagation in the carbon steel sample with the transmitting chirp wave pulse

## 2 脉冲压缩处理后主瓣峰值及波包宽度的影响因素分析

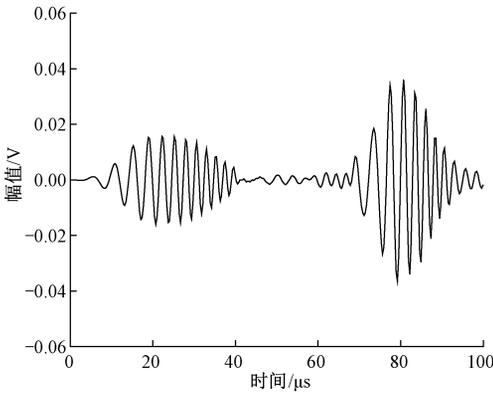
### 2.1 脉冲压缩处理前后对比

将如图 8(a) 所示的 Chirp 信号作为激励电流,通过有限元模拟计算,可以得到跑道线圈 EMAT 的开路感生电压如图 8(b) 所示,并在感生电压信号中添加均匀分布

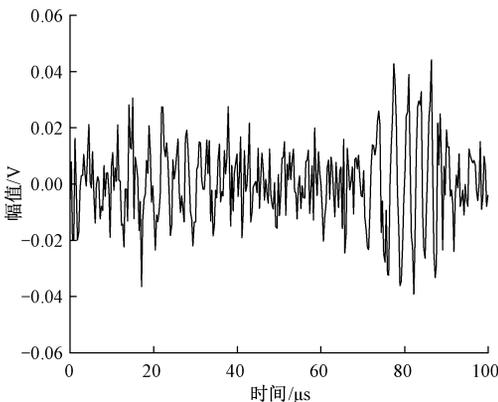
噪音信号如图 8(c) 所示。通过对图 8(c) 所示的信号进行脉冲压缩处理,可以得到如图 8(d) 所示的波形。对比图 8(c) 和图 8(d) 可知,经过脉冲压缩处理后,EMAT 的感生电压信号的信噪比和空间分辨率均得到了较大程度的改进。



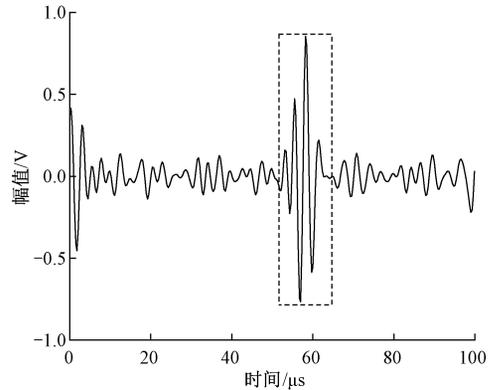
(a) 中心频率和带宽均为 0.3 MHz, 脉宽为 40  $\mu\text{s}$  的 Chirp 激励信号  
(a) Transmitting Chirp signal with a center frequency of 0.3 MHz, a bandwidth of 0.3 MHz and a pulse width of 40  $\mu\text{s}$



(b) 仿真得到的瞬态感生电压信号  
(b) Transient induced voltage signal by simulation



(c) 含噪音的感生电压信号  
(c) Induced voltage signal with noise



(d) 经过脉冲压缩处理以后的感生电压信号  
(d) Induced voltage signal after pulse compression

图 8 脉冲压缩处理前后对模拟感生电压信号的影响对比

Fig.8 Comparison of simulated induced voltage signals before and after pulse compression

## 2.2 跑道线圈 EMAT 设计参数影响规律分析

跑道线圈 EMAT 设计参数以及 Chirp 信号的频宽和脉宽对经过脉冲压缩后的横波一次反射波的影响如图 9 所示。由图 9(a) 可知,随着线圈导线直径的增加,脉冲压缩后主瓣峰值随之而减小,但对波包宽度的影响可以忽略不计。这是因为,跑道线圈 EMAT 有限模型中加载的脉冲电流幅值是固定的,随着导线直径的增加,导线截面的电流密度反而减小,从而导致待测试样表面的电涡流减小。

取不同永磁体宽度对应的脉冲压缩后的横波反射波的上包络曲线,并按照各自最大值分别进行归一化如图 9(b) 所示。由图 9(b) 可知,脉冲压缩后主瓣峰值随着永磁体宽度的增加而增加,但是增加的趋势逐渐变缓,同时,脉冲压缩后的波包宽度随着磁体宽度增加而减小,当永磁体宽度由 10 mm 增加至 35 mm,波包宽度减小 0.6  $\mu\text{s}$ ,其中波包宽度均采用 -6 dB 法获取。因此,需要综合考虑脉冲压缩后的主瓣峰值和波包宽度,选择接近最优的永磁体宽度。当永磁体宽度与跑道线圈单边宽度均为 20 mm 时,主瓣峰值和波包宽度接近最优。

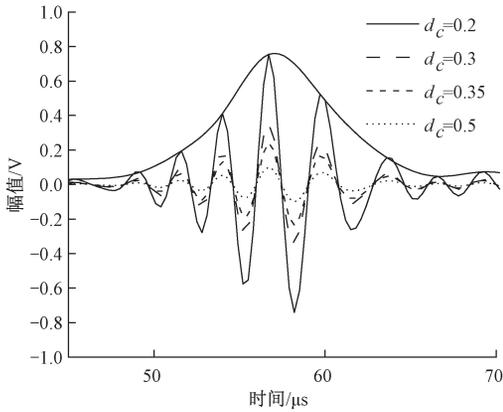
由图 9(c) 可知,主瓣峰值随着永磁体高度的增加而增加,但是当磁体高度达到一定的数值以后,磁体高度增加对主瓣峰值的加强作用有限。

由图 9(d) 可知,主瓣峰值随着两磁铁间距的增加表现为先增加后减小的趋势,而且随着两永磁体间距的增加,脉冲压缩以后的波包宽度变大。当两永磁体间距由 2 mm 增加为 10 mm,波包宽度增加 0.8  $\mu\text{s}$ ,主瓣峰值减小 11.4%。

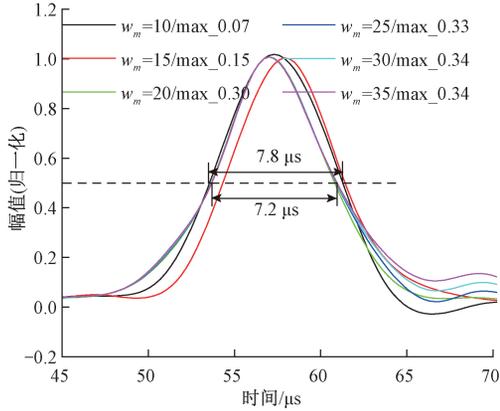
由图 9(e) 可知,主瓣峰值随着 Chirp 信号频宽的增加而减小,但脉冲压缩后的波包宽度随着频宽的增加而减小。当 Chirp 信号频宽由 0.3 MHz 增加为 0.5 MHz 时,主瓣峰值减小 39.8%,波包宽度仅减小 0.7  $\mu\text{s}$ 。因

此, 为了实现信噪比和波包的空间分辨率的提升, 有必要选择合适的 Chirp 频宽。频宽过大虽然能够轻微改善波包的空间分辨率, 但是将会导致主峰峰值比较明显的下降。

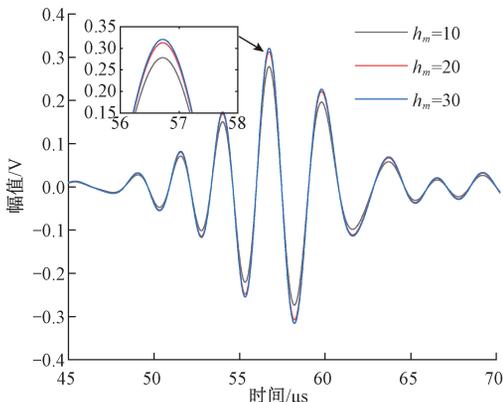
由图 9(f) 可知, 主瓣峰值随着 Chirp 信号脉宽的增加而增加, 但对脉冲压缩后的波包宽度影响不大。当 Chirp 信号脉宽由  $20 \mu\text{s}$  变为  $70 \mu\text{s}$  时, 脉冲压缩后的主瓣峰值增加了 264.4%。因此, 为了实现信噪比的提高, 有必要尽可能增加 Chirp 脉宽。



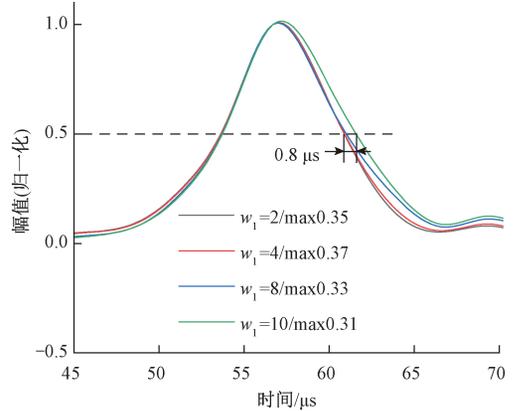
(a) Conductor diameter of a racetrack spiral coil  $d_c$



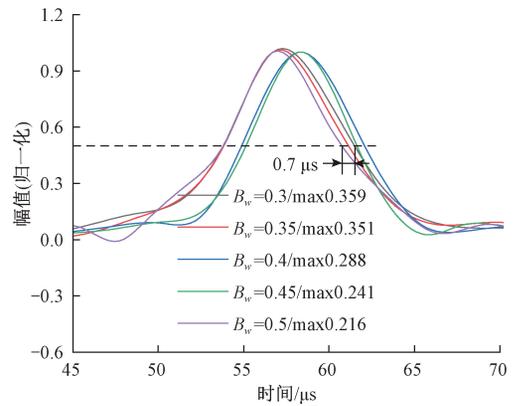
(b) Magnet width  $w_m$



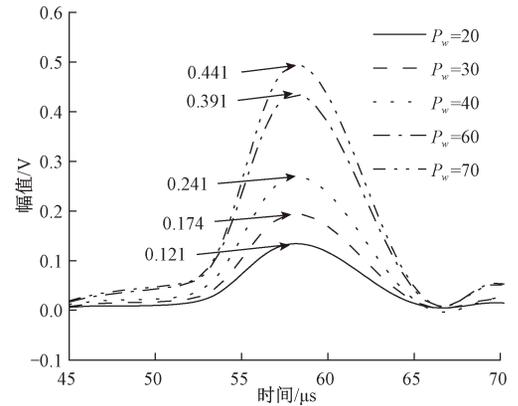
(c) Magnet height  $h_m$



(d) Magnet spacing  $w_1$



(e) Bandwidth of the chirp wave  $B_w$



(f) Pulse width of the chirp wave  $P_w$

图 9 EMAT 设计参数和 Chirp 信号对脉冲压缩后超声波的主瓣峰值和波包宽度的影响

Fig.9 Influence of EMAT design parameters and chirp wave on main lobe peak and pulse width of ultrasonic signals after pulse compression

### 3 连铸坯 EMAT 测厚实验结果分析

#### 3.1 EMAT 探头及实验系统

连铸坯厚度横波 EMAT 测量实验系统框图如图 10 所示,其中 Chirp 信号可以由任意波形信号发生器 AFG2021 产生。铸坯是在连铸生产线截取获得,尺寸为 100 mm×90 mm×85 mm,其中 100 mm 对应的两端为检测面。铸坯试样上有明显的表面振痕和氧化皮,因此 EMAT 探头距离铸坯试样的提高至少为 2 mm。与锻造后的碳钢相比,连铸坯柱状枝晶组织发达、晶粒粗大,因此对应的传播衰减系数大。

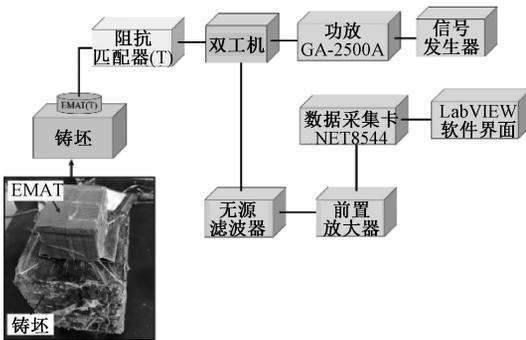


图 10 连铸坯厚度横波 EMAT 测量实验系统框图  
Fig.10 Block diagram of thickness detection experimental system for continues casting slab with shear wave EMAT

采用单个跑道线圈 EMAT 配合双工机,可以实现铸坯厚度的脉冲反射式检测,得到的超声回波信号如图 11 所示,其中,Chirp 信号中心频率为 0.325 MHz,频宽为 0.2 MHz,脉宽为 30 μs。图 11 中波包“a”为初始激励形成的电磁串扰信号,波包“b”、“c”、“d”、“e”和“f”分别代表横波经过铸坯底面的 1 次、2 次、3 次、4 次和 5 次反射波。

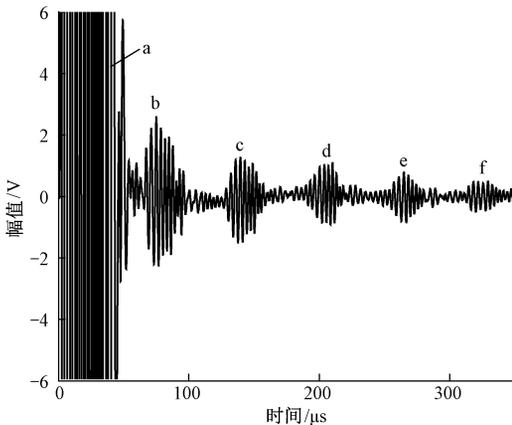
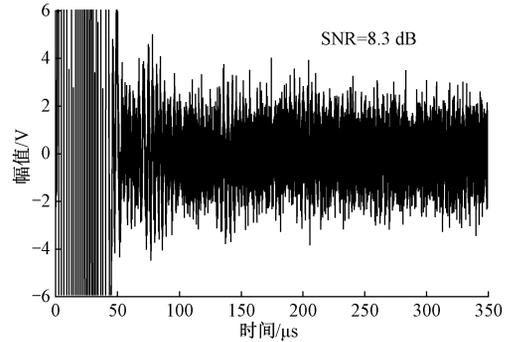


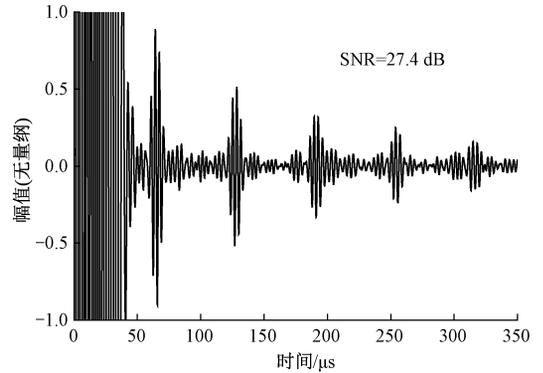
图 11 连铸坯的脉冲反射式超声回波信号  
Fig.11 Ultrasonic signals with pulse-echo operation mode from continuous casting slab

#### 3.2 超声回波经脉冲压缩处理前后对比

在图 11 所示的超声回波信号中,加入幅值为 1 V 的均匀分布噪音,如图 12(a)所示,经过脉冲压缩处理后得到的信号如图 12(b)所示。由图 12(a)和(b)可知:经过脉冲压缩后,信噪比至少提高 19.1 dB 以上,波包宽度由 22.1 μs 减小为 8.3 μs。



(a) 加入 1V 均匀分布噪音  
(a) Adding uniform-distributed noise with an amplitude of 1 V



(b) 脉冲压缩后超声信号  
(b) Ultrasonic signal after pulse compression

图 12 实验超声回波信号经过脉冲压缩处理前后对比  
Fig.12 Comparison of experimental ultrasonic signals before and after pulse compression

#### 3.3 跑道线圈导线直径对脉冲压缩后的主瓣峰值及波包宽度的影响

不同导线直径的跑道线圈对应的经脉冲压缩后的超声回波及其包络曲线如图 13 所示。由图 13 可知,与导线直径 Φ0.5 mm 相比,导线直径为 Φ0.35 mm 的跑道线圈对应的主瓣峰值可以提高 33%,波包宽度也由 12.5 μs 减小为 8.6 μs。这是因为导线直径不同,对应的跑道线圈阻抗也不同,与线圈阻抗相匹配的阻抗匹配元器件参数也不同,而这些都是都将影响 EMAT 的频带特性,因此选择合适的导线直径及其阻抗匹配参数可以很大程度的改善脉冲压缩后的波包宽度。

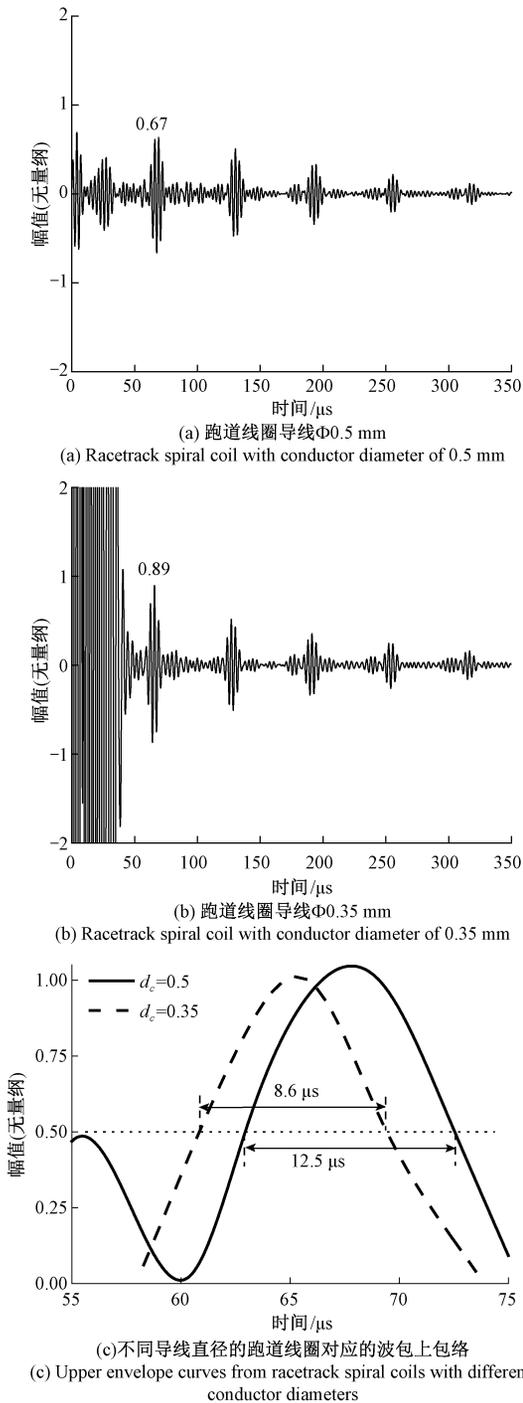


图 13 跑道线圈参数对脉冲压缩后的超声回波信号影响  
Fig.13 Influence of racetrack spiral coil parameters on ultrasonic signals after pulse compression

### 3.4 Chirp 信号频宽和脉宽对脉冲压缩后的主瓣峰值及波包宽度的影响

当 Chirp 信号中心频率为 0.325 MHz, 频宽为 0.25 MHz, 不同脉宽的超声回波信号的对应的脉冲压缩波形如图 14 所示。由图 14(a) 和 (b) 可知, 当 Chirp 信号

脉宽为 30 μs 时, 初始脉冲和端面一次反射波可以区分, 但是当脉宽为 50 μs 时, 初始脉冲与端面一次反射波无法分开。

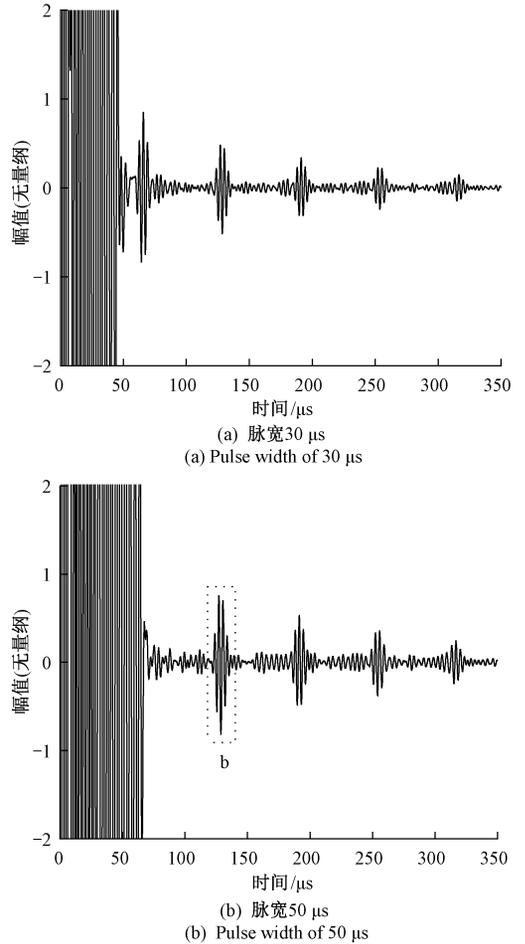


图 14 Chirp 信号脉宽对脉冲压缩后的超声回波信号影响  
Fig.14 Influence of pulse width of chirp wave on ultrasonic signals after pulse compression

以经过脉冲压缩后的二次反射超声回波(如图 14(b)中“b”波包所示)为研究对象, 当 Chirp 信号中心频率为 0.325 MHz 时, 不同 Chirp 信号频宽和脉宽对应的主瓣峰值和波包宽度如表 3 所示, 其中波包宽度是采用 -6 dB 法计算。

由表 3 可知, 当频宽为 0.2 MHz 时, 脉宽由 30 μs 增至 50 μs, 幅值可以增加 50%, 但是波包宽度保持 10.0 μs 左右。当频宽为 0.25 MHz 时, 脉宽由 30 μs 增至 50 μs, 幅值可以增加 64%, 但是波包宽度保持 8.6 μs 左右。

Chirp 信号频宽对经脉冲压缩以后的波包宽度影响不大, 当频宽由 0.2 MHz 增加至 0.25 MHz, 波包宽度仅减小 1.4 μs 左右。Chirp 信号频宽的增加将导致主峰峰值一定程度的下降, 在脉宽为 30 μs 时, 频宽由 0.2 MHz 变为 0.25 MHz, 主峰峰值由原来的 0.68 下降为 0.51, 即减少 25%。

**表3 Chirp 信号频宽和脉宽对二次回波的脉冲压缩后主瓣峰值和波包宽度的影响**

**Table 3 Influence of pulse width and bandwidth of chirp wave of on the second bottom-reflected ultrasonic waves after pulse compression**

序号	频宽/MHz	时宽/ $\mu\text{s}$	主瓣峰值/无量纲	波包宽度/ $\mu\text{s}$
1	0.20	30	0.68	9.4
2	0.20	40	0.74	10.8
3	0.20	50	1.02	9.8
4	0.25	30	0.51	8.5
5	0.25	40	0.64	8.8
6	0.25	50	0.82	8.5

## 4 结 论

本文以高温连铸坯壳厚度测量为研究对象,通过建立 Chirp 信号激励的跑道线圈横波电磁超声检测过程的有限元模型,分析了 EMAT 设计参数、Chirp 信号的脉宽和频宽等因素对脉冲压缩后的超声回波信噪比和空间分辨率的影响规律,主要结论如下:

1) 由于跑道线圈横波 EMAT 具有宽带激励/接收 (0.1~50 MHz) 的特性,因此将脉冲压缩技术应用于 EMAT,进一步提高换能效率和空间分辨率,能够进一步拓展 EMAT 的应用场合。

2) Chirp 信号的脉宽和频宽对超声回波信号的信噪比和空间分辨率起着重要的作用。主瓣峰值随着脉宽的增加而增加,但是脉宽对波包宽度影响不大。频宽越大,空间分辨率越好,但是将导致主瓣峰值降低。

3) EMAT 设计参数对脉冲压缩后的主瓣峰值和空间分辨率也起着关键性作用。其中,跑道线圈导线直径、永磁体高度、永磁体宽度和两永磁体间距对主瓣峰值有影响,其中永磁体宽度和两永磁体间距对空间分辨率有影响。

4) 超声回波的 SNR 与 Chirp 信号脉宽的平方根基本成正比,因此提高 Chirp 信号的脉宽,可以提高信噪比,但是脉宽过大将导致端面一次反射波与始波无法区分,因此 Chirp 信号脉宽范围为最大时间宽度的 80~120%。下一步可以从线圈阻抗、阻抗匹配电路和高通滤波等方面开展工作,进一步减小初始电磁串扰的持续时间,并寻找改善脉冲压缩后超声波空间分辨率的方法。

## 参考文献

[1] KOJIMA F. Inverse problem for internal temperature distribution of metal products using pulser-receiver

EMAT[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2019, 59(4): 1451-1457.

[2] OUYANG Q, HU M, ZHANG X, et al. Study on electromagnetic ultrasonic testing method for determining solidified shell thickness during continuous casting[C]. The 30th Chinese Control and Decision Conference (2018 CCDC), 2018: 913-918.

[3] KAZYS R, VOLEISIS A, SLITERIS L, et al. High temperature ultrasonic transducers for imaging and measurements in a liquid Pb/Bi eutectic alloy[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2005, 52(4): 525-537.

[4] BABA A, SEARFASS C T, TITTMANN B R. High temperature ultrasonic transducer up to 1000 degrees C using lithium niobate single crystal[J]. Applied Physics Letters, 2010, 97, 2329011-2329013.

[5] KAZYS R, VOLEISIS A, VOLEISIENE B. High temperature ultrasonic transducers: review [J]. Ultrasonics (ULTRASOUND), 2008, 63(2): 7-17.

[6] CANELLAG, MONTI F. Ultrasonic inspection of hot thick steel products[J]. NDT & E International, 1980, 13(1): 10-14.

[7] CEGLA F B, CAWLEY P, ALLIN J, et al. High-temperature (> 500 degrees c) wall thickness monitoring using dry-coupled ultrasonic waveguide transducers[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2011, 58(1): 156-167.

[8] ROMMELER A, FURRER R, SENNHAUSER U, et al. Air coupled ultrasonic defect detection in polymer pipes[J]. NDT & E International, 2019, 102: 244-253.

[9] 周正干,魏东. 空气耦合式超声波无损检测技术的发展[J]. 机械工程学报. 2008, 44(6): 10-14.

ZHOU ZH G, WEI D. Progress of air-coupled ultrasonic non-destructive testing technology[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(6): 10-14.

[10] 曾伟,王海涛,田贵云,等. 基于能量分析的激光超声波缺陷检测研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(3): 650-655.

ZENG W, WANG HAI T, TIAN G Y, et al. Research on laser ultrasonic defect signal detection technology based on energy analysis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(3): 650-655.

[11] 孙广开,曲道明,周正干. 机器人辅助激光超声检测系

- 统及参量匹配方法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(8): 1961-1969.
- SUN G K, QU D M, ZHOU ZH G. Robot assistant laser ultrasonic test system and its parameter matching method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(8): 1961-1969.
- [12] CAI ZH C, CHENG H, LIU CH CH. Nonlinear electromagnetic acoustic testing method for tensile damage evaluation[J]. Journal of Sensors, 2018: 1-11.
- [13] 黄松岭, 王哲, 王坤, 等. 管道电磁超声导波技术及其应用研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(3): 1-12.
- HUANG S L, WANG ZH, WANG SH, et al. Review on advances of pipe electromagnetic ultrasonic guided waves technology and its application[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(3): 1-12.
- [14] REN W, XU K, DIXON S, et al. A study of magnetostriction mechanism of EMAT on low-carbon steel at high temperature[J]. NDT & E International, 2019, 101: 34-43.
- [15] 杨理践, 吕瑞宏, 高松巍, 等. 基于 SH 导波的防腐层能量密度检测机理研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 17(5): 1101-1109.
- YANG L J, LV R H, GAO S W, et al. Research on the detection mechanism of energy density in pipeline coating based on SH wave[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 17(5): 1101-1109.
- [16] IIZUKA Y, AWAJIYA Y. High sensitivity emat system using chirp pulse compression and its application to crater end detection in continuous casting[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2014, 520: 0120111-0120114.
- [17] ISLA J, CEGLA F. Coded excitation for pulse-echo systems[J]. IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, 2017, 64(4): 736-748.
- [18] TKOCZ J, GREENSHIELDS D, DIXON S. High power phased EMAT arrays for nondestructive testing of as-cast steel[J]. NDT and E International, 2019, 102: 47-55.
- [19] 刘增华, 谢穆文, 钟翎文, 等. 超声导波电磁声换能器的研究进展[J]. 北京工业大学学报, 2017, 43(2): 192-202.
- LIU Z H, XIE M W, ZHONG X W, et al. Research progress of electromagnetic acoustic transducers for ultrasonic guided waves inspection[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2017, 43(2): 192-202.
- [20] KOGIA M, GAN T, BALACHANDRAN W, et al. High temperature shear horizontal electromagnetic acoustic transducer for guided wave inspection[J]. Sensors, 2016, 16(4): 582-598.
- [21] ATSUMI, T, FUKUDA, T, YOSHIDA, T, et al. On-line measurement of solidification shell thickness and estimation of crater-end shape of CC-slabs by electromagnetic ultrasonic method[J]. Tetsu-to-Hagane, 1984, 9(70): 1123-1130.
- [22] 田志恒, 田陆, 田立, 等. 基于电磁超声的连铸坯液芯凝固末端位置在线测量[C]. “第十届中国钢铁年会”暨“第六届宝钢学术年会”, 2015: 1-6.
- TIAN ZH H, TIAN L, TIAN L, et al. Online measurement of solidification end point of casting slabs based on the electromagnetic acoustic transducer[C]. “Tenth China Iron and Steel Annual Conference” and “Sixth Baosteel Academic Annual Conference”, 2015: 1-6.
- [23] OGATA S, UCHIMOTO T, TAKAGI T, et al. Development and performance evaluation of a high-temperature electromagnetic acoustic transducer for monitoring metal processing[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2018, 58(3): 309-318.
- [24] 周正干, 马保全, 孙志明, 等. 空气耦合超声检测中脉冲压缩方法的参数选优[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(1): 1-7.
- ZHOU ZH G, MA B Q, SUN ZH M, et al. Parameter optimization of pulse compression method in air-coupled ultrasonic testing[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(1): 1-7.
- [25] 曹玉龙, 郑政. 线性调频超声信号脉冲压缩的实时实现[J]. 上海理工大学学报, 2015, 37(3): 295-300.
- CAO Y L, ZHENG ZH. Real time pulse compression of chirp ultrasound signal[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2015, 37(3): 295-300.
- [26] MOHAMED I, HUTCHINS D, DAVIS L, et al. Ultrasonic NDE of thick polyurethane flexible riser stiffener material[J]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2017, 32(4): 343-362.
- [27] HO K S, GAN T H, BILLSON D R, et al. Application of

pulse compression signal processing techniques to electromagnetic acoustic transducers for noncontact thickness measurements and imaging [ J ]. Review of Scientific Instruments, 2005, 76(5) : 549021-549028.

- [ 28 ] TAMURA A, ZHONG C, CROXFORD A J, et al. A feasibility study of noncontact ultrasonic sensor for nuclear power plant inspection [ J ]. Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science, 2017, 3 ( 2 ) : 0210031-0210039.
- [ 29 ] HAO K SH, HUANG S L, ZHAO W, et al. Modeling and finite element analysis of transduction process of electromagnetic acoustic transducers for nonferromagnetic metal material testing [ J ]. Journal of Central South University of Technology, 2011, 18(3) : 749-754.
- [ 30 ] SHI W Z, WU Y X, GONG H, et al. Enhancement of lift-off performance and conversion efficiency using a copper backplate for a spiral coil EMAT in generating and receiving shear waves [ J ]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2018, 56(2) : 173-194.
- [ 31 ] KOZYREFF G. Applied Solid Mechanics [ M ]. The Edinburgh Building, UK: Cambridge university press, 2009.
- [ 32 ] WANG S J, LI ZH CH, LI P ZH, et al. Numerical and experimental evaluation of the receiving performance of meander-line coil EMATs[ J ]. Nondestructive Testing and Evaluation, 2014, 29(4) : 269-282.

## 作者简介



**石文泽**, 2009 年于内蒙古工业大学获学士学位, 2011 年于中南大学获硕士学位, 2017 年于中南大学获得博士学位, 现为南昌航空大学讲师, 主要研究方向为电磁超声检测。

E-mail: 70658@nchu.edu.cn

**Shi Wenzhe** received his B. Sc. degree from Inner Mongolia University of Technology in 2009, and received his M. Sc. degree and Ph. D. degree both from Central South University in 2011 and 2017. He is currently a lecturer at Nanchang Hangkong University. His main research interest is electromagnetic acoustic testing.



**卢超**(通信作者), 1995 年于江西师大获学士学位, 1998 年于中国科技大学获硕士学位, 2009 年于中国铁道科学研究院获博士学位, 现为南昌航空大学教授, 主要研究方向为超声检测及仪器。

E-mail: luchaoniat@163.com

**Lu Chao** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Jiangxi Normal University in 1995, received his M. Sc. degree from University of Science and Technology of China in 1998, and received his Ph. D. degree from China Academy of Railway Sciences in 2009. He is currently a professor at Nanchang Hangkong University. His main research interests include ultrasonic non-destructive testing and instrument design.