

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2006780

基于脉冲压缩技术的金属锻件缺陷跑道线圈 EMAT 检测方法研究*

石文泽^{1,2}, 陈巍巍¹, 卢超^{1,3}, 张金⁴, 陈尧¹

(1. 南昌航空大学无损检测教育部重点实验室 南昌 330063; 2. 中科院声学研究所声场声信息国家重点实验室 北京 100190; 3. 赣南师范大学江西省数值模拟与仿真技术重点实验室 赣州 341000; 4. 中国人民解放军陆军炮兵防空兵学院 合肥 230031)

摘要:针对电磁超声换能器(EMAT)在高温、大提离、表面粗糙等恶劣环境下对枝晶粗大的铸锻件进行快速、在线检测时,超声回波的信噪比低和空间分辨力差等难题,建立了基于 chirp 信号激励的跑道线圈 EMAT 检测过程的有限元模型,采用正交试验表,分析了 EMAT 设计参数、chirp 信号带宽和脉宽等因素对检测回波脉冲压缩后的主瓣峰值和主瓣宽度的影响,分别获取了主瓣峰值\主瓣宽度最佳的 EMAT 参数组合,并通过实验加以验证。比较了 0.5 MHz 猝发音激励信号在不同同步平均次数条件下,以及 chirp 脉冲压缩在不同提离且无同步平均条件下对 $\Phi 4$ 平底孔的检测能力。结果表明:采用 chirp 脉冲压缩技术在无同步平均条件下, $\Phi 4$ 平底孔的检测回波信噪比较 128 次同步平均的猝发音脉冲信号提高了 6.6 dB;在 EMAT 提离为 3.5 mm 且无同步平均条件下, $\Phi 4$ 平底孔的脉冲压缩后回波信噪比可达 8.0 dB。

关键词:铸锻件;电磁超声换能器;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:** 460.40

Research on racetrack coil EMAT detection technology of metal forging defect based on the pulse compression technique

Shi Wenzhe^{1,2}, Chen Weiwei¹, Lu Chao^{1,3}, Zhang Jin¹, Chen Yao¹

(1. Key Laboratory of Nondestructive Testing, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. State Key Laboratory of Acoustic Field and Acoustic Information, Academy of Acoustics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. Key Laboratory of Simulation and Numerical Modeling Technology of Jiangxi Province, Gannan Normal University, Ganzhou 341000, China; 4. PLA Army Academy of Artillery and Air Defense, Hefei 230031, China)

Abstract: When the electromagnetic ultrasonic transducer (EMAT) is applied to the castings and forgings with coarse grains for fast and online inspection, the signal-to-noise ratio (SNR) and range resolution of the ultrasonic echoes are low due to the influence of harsh environments such as high temperature, large lift-off, and rough surface. To address the above problem, a finite element model for the testing process of a racetrack coil EMAT is formulated, which is based on the chirp signal excitation. The orthogonal test table is used to analyze the influence of EMAT design parameters, bandwidth and pulse width of the chirp signal on the peak and width of the main lobe width of the detected echo after pulse compression. In this way, the optimal combination of EMAT parameters referring to the peak and width of the main lobe are obtained, and they are evaluated by experiments. The detection capability of 0.5 MHz tone burst signal as an excitation with different synchronization averages for $\Phi 4$ flat-bottomed hole is compared with that of chirp pulse compression with different lift-offs and no synchronization averages. Compared with the SNR of the tone burst excitation with 128 synchronization averages, results show that the SNR of the detected echo using the chirp pulse compression technology with no synchronous averaging from the $\Phi 4$ flat-

收稿日期:2020-08-14 Received Date: 2020-08-14

* 基金项目:国家自然科学基金(52065049, 51705231, 12064001)、江西省自然科学基金(20192ACBL20052, 20181BAB216020)、江西省科技厅科技计划(20192BCD40028)、江西省研究生创新专项资金(YC2019-S345)、中科院声学研究所声场声信息国家重点实验室开放课题(SKLA201912)项目资助

bottomed hole is increased by 6.6 dB. In addition, the SNR of the pulse compressed signal from the $\Phi 4$ flat-bottomed hole can reach 8.0 dB with an EMAT's lift-off of 3.5 mm and no synchronization averages.

Keywords: casting and forging; electromagnetic ultrasonic transducer; pulse compression; signal-to-noise ratio; range resolution

0 引 言

大型金属铸锻件广泛应用于核电、船舶、航空航天等领域,其制造能力和检测水平关系着制造业的生产效率和成本,特别是大型关键承载构件服役的安全性和可靠性。为了提高铸锻造生产效率和等级,有必要在高温铸锻造过程中进行缺陷的在线、快速、精准检测^[1-2]。

与压电超声^[3]、空气耦合超声^[4]、激光超声^[5]等超声检测方法相比,电磁超声换能器 (electromagnetic ultrasonic transducer, EMAT) 基于电磁耦合方式激励和接收超声波,同时具备非接触式检测、无需耦合剂、对待测金属工件表面粗糙度要求不高、易激发各种类型超声波、较厚金属工件也可检测等优点^[6-8]。目前,EMAT 已经成为高温、在线、移动、表面油渍等恶劣环境下的重要检测技术,被应用于石油/天然气管道、核电站、航空航天热端金属构件等恶劣复杂检测领域^[9-11]。

然而,当 EMAT 用于高温铸锻件在线检测时,由于大型铸锻件的超强热辐射、高衰减系数、铸锻造现场瞬变的强电磁干扰以及 EMAT 探头与工件的相对移动等因素影响,导致检测过程 EMAT 探头耐热/检测时间有限、换能效率/信噪比低,难以通过增加同步平均次数实现降噪^[12-13]。采用 chirp 脉冲压缩技术,可以在不提高发射功率、激励频率以及采用较少同步平均次数的条件下有效提高检测回波的信噪比及空间分辨率^[14-15]。

目前,脉冲压缩技术已经被应用于压电超声、空气耦合超声、电磁超声等超声检测领域。例如, Lam 等^[16]和 Luo 等^[17]将脉冲压缩技术应用于压电超声,分别进行了复合钢板厚度的透射式检测和铝板的缺陷检测,有效提高了信噪比。Gan 等^[18]将脉冲压缩技术应用于固体材料的空气耦合检测,实现了铝板、黄铜板和纤维增强复合板缺陷的高信噪比成像。周正干等^[19-20]提出宽频超声换能器有较好的脉冲压缩性能,将脉冲压缩技术应用于非金属材料超声检测可大幅提高信噪比和缺陷分辨能力;随后还将脉冲压缩技术与超声 C 扫成像结合起来,应用于蜂窝夹芯复合材料的空气耦合超声检测,验证了脉冲压缩方法在空气耦合检测中的良好效果。在电磁超声检测领域中,脉冲压缩技术被可应用于铝、铜等薄板的厚度检测及内部圆孔缺陷的成像检测^[21],以及 7 mm 大提离下对 250 mm 厚不锈钢块的透射式厚度检测^[13],脉冲压缩技术已被证明在提高检测速度、解决波包混叠问题并提高信噪比等方面具有重要作用。此外, Isla 等^[22-23]

还通过随机收发编码形式的脉冲压缩从低信噪比信号中还原出有效信号,达到降低 EMAT 发射电压的目的。

上述研究阐明了脉冲压缩技术在超声无损检测领域的良好应用,但要实现将脉冲压缩技术更好地应用于高温铸锻件电磁超声检测中,仍需对脉冲压缩效果的影响因素展开进一步研究。石文泽等^[12]通过仿真和实验分析了 0.3 MHz 低频跑道线圈 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,并通过室温下的连铸坯厚度检测予以验证。但是,并未就 chirp 信号频宽和脉宽以及跑道线圈 EMAT 的组合参数对脉冲压缩效果进行分析,将脉冲压缩技术应用于缺陷电磁超声检测效果也未进行实验验证。

因此,本文针对低频跑道线圈 EMAT 应用于高温铸锻件缺陷检测时信噪比低、分辨率差等问题,建立基于 chirp 信号激励的跑道线圈 EMAT 检测过程的有限元模型,采用正交试验表,通过仿真和实验,获取了 chirp 带宽、脉宽与 EMAT 设计参数的最佳组合,并进行了跑道线圈 EMAT 在大提离、无同步平均条件下的 $\Phi 4$ 平底孔检测实验。

1 跑道线圈 EMAT 检测过程数值建模

1.1 跑道线圈 EMAT 配置形式

跑道线圈 EMAT 配置形式如图 1 所示。由图 1 可知,永磁体主要以垂直方向的磁场为主,两永磁体之间也存在部分水平方向的磁场。因此,该跑道线圈 EMAT 配置形式可同时激励出横波和纵波,但主要以激励横波为主。在永磁体上方配置磁轭,可提高偏置磁场强度。当跑道线圈载以高频脉冲电流时,可在金属试样近表层产生与激励电流频率相同、方向相反的电涡流。在永磁体提供的静态偏置磁场作用下,形成洛伦兹力,产生高频振动并沿金属试块厚度方向以超声波形式进行传播。当超声波遇到端面或缺陷等时,超声波将携带声阻抗差异信息进行反射。同理,根据逆洛伦兹力机理可实现对差异性介质超声波信息的接收。跑道线圈 EMAT 检测过程相关的详细控制方程可参考文献[24-27]。

跑道线圈 EMAT 具有宽频特性 (0.1 ~ 50 MHz), 适合激励和接收低频超声波。采用低频频带、大时宽带宽积的 chirp 信号作为激励信号进行脉冲压缩处理,可将幅值低、时宽大的信号压缩成幅值大、时宽小的信号,从而获得较高的分辨率和信噪比,更易实现对较小缺陷及距

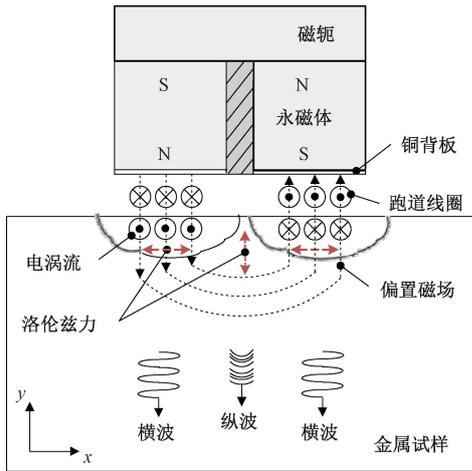


图1 跑道线圈 EMAT 配置形式与洛伦兹力换能机理
Fig.1 Configuration and the lorentz force conversion mechanism of the EMAT with a racetrack coil

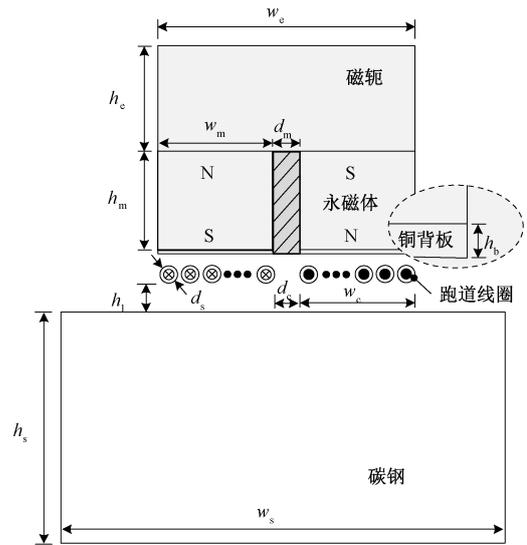


图2 跑道线圈 EMAT 设计参数示意图
Fig.2 Diagrammatic sketch for design parameters of the EMAT with a racetrack coil

工件端面较近的缺陷检测,特别是高超声衰减系数和高温金属材料的检测。通过对跑道线圈的单边宽度和内侧间距、永磁体尺寸和水平排列间距以及 chirp 信号带宽、脉宽等参数进行优化设计,获得更适合实施 chirp 脉冲压缩技术的跑道线圈 EMAT 参数组合,使 EMAT 与 chirp 信号之间实现更好的频谱匹配,从而提高 EMAT 脉冲压缩以后的超声回波的信噪比和分辨率。

1.2 跑道线圈 EMAT 设计参数及有限元模型

图2所示为跑道线圈 EMAT 的设计参数示意图,碳钢试样宽度 w_s 、高度 h_s 分别为 120 和 100 mm,线圈提高 $h_1=0.5$ mm,铜背板厚度 $h_b=0.2$ mm,跑道线圈导线直径 $d_s=0.3$ mm。EMAT 设计参数、chirp 信号参数及其数值如表1所示,chirp 信号中心频率为 0.5 MHz。以跑道线圈 EMAT 接收的开路感生电压信号经过脉冲压缩后的主瓣峰值和主瓣宽度为研究对象,采用正交表 L27(3⁷) 进行正交试验,选取永磁体宽度 w_m 、永磁体高度 h_m 等 7 个参数,每个因素设置 3 个水平。永磁体上方放置的磁轭宽度 $w_e=2w_m+d_m$,磁轭高度 $h_c=w_m$ 。其中,永磁体组合中的两永磁体之间填充非金属隔板,用以控制两永磁体间距。

表1 跑道线圈 EMAT 和 chirp 信号的设计参数及其取值
Table 1 Design parameters and their values of the racetrack coil EMAT and the chirp signal

永磁体水平	永磁体宽度 w_m/mm	永磁体高度 h_m/mm	永磁体间距 d_m/mm	线圈单边宽度 w_c/mm	线圈内侧间距 d_c/mm	chirp 信号带宽 B_w/MHz	chirp 信号脉宽 $P_w/\mu s$
1	20	10	2	15	5	0.3	30
2	30	20	6	25	10	0.4	40
3	40	30	10	35	15	0.5	60

跑道线圈 EMAT 检测过程的二维有限元模型如图3所示。该有限元模型包括 112 518 个域单元和 3 533 个边界元,计算时间步长为 0.2 μs ,有限元计算结果满足收敛要求。有限元模型中的金属材料电磁学参数如表2所示。

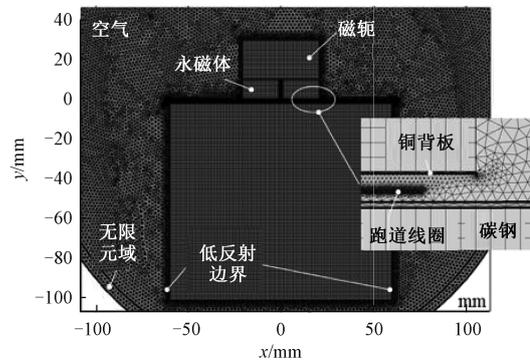


图3 跑道线圈 EMAT 有限元模型
Fig.3 Finite element model of the EMAT with a racetrack coil

表2 有限元模型中材料电磁学参数
Table 2 Electromagnetic properties of materials used in the finite element model

材料	磁导率/ μ	电导率/ $(10^6 S/m)$	材料	磁导率/ μ	电导率/ $(10^7 S/m)$
碳钢	100	4.03	铜导线	1.0	6.00
永磁体	1.04	0.71	铜背板	1.0	6.00

有限元仿真计算得到跑道线圈 EMAT 在碳钢中超声

波传播过程的部分瞬态云图如图 4 所示。由图 4 可知,跑道线圈 EMAT 主要以激发横波为主。

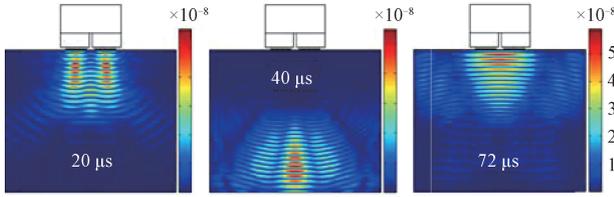


图 4 超声波在碳钢中传播瞬态云图

Fig. 4 Transient contours of ultrasonic propagation in the carbon steel specimen

1.3 Chirp 脉冲压缩算法实现

采用 chirp 信号经加窗处理作为跑道线圈 EMAT 的激励信号,函数表达式如下^[12,28]:

$$st(t) = \begin{cases} \sin(2\pi(f_c - B_w/2)t + \pi\mu t^2)f_h(t), & 0 \leq t \leq P_w \\ 0, & 0 \geq P_w \end{cases} \quad (1)$$

式中: f_c 、 B_w 和 P_w 分别为 chirp 信号的中心频率、带宽和脉宽。 μ 是调频速率, $\mu = B_w/P_w$ 。

$f_h(t)$ 为海宁窗函数,用于模拟 EMAT 检测系统的频响特性,公式如下^[12,18]:

$$f_h(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} \times \left(1 - \cos\left(2\pi \times f_c \times \frac{t}{P_w \times f_c}\right)\right), & 0 \leq t \leq P_w \\ 0, & 0 \geq P_w \end{cases} \quad (2)$$

脉冲压缩过程是 EMAT 检测回波与参考信号的卷积运算,公式如下^[13,29]:

$$y(t) = x(t) \times st(t) \quad (3)$$

式中: $x(t)$ 为跑道线圈 EMAT 接收信号; $st(t)$ 为参考信号; $y(t)$ 为脉冲压缩处理后信号。

图 5(a) 所示为 $f_c = 0.5$ MHz, $B_w = 0.5$ MHz, $P_w = 60$ μ s 的 chirp 激励信号。图 5(b) 所示为为跑道线圈 EMAT 有限元模型计算得到的开路感生电压信号,可以作为超声波 A 扫信号。图 5(c) 所示为为开路感生电压经脉冲压缩后的信号,用以进行主瓣峰值/主瓣宽度的研究分析。图 5(d) 所示为为横波一次反射底波经脉冲压缩后的主瓣上包络线,采用 -6 dB 法,计算得到主瓣宽度为 5.23 μ s。由图 5 可知,脉冲压缩技术可使回波幅值增大,主瓣宽度变窄。

2 跑道线圈 EMAT 优化设计

通过正交试验仿真计算,得到的结果如表 3 所示。

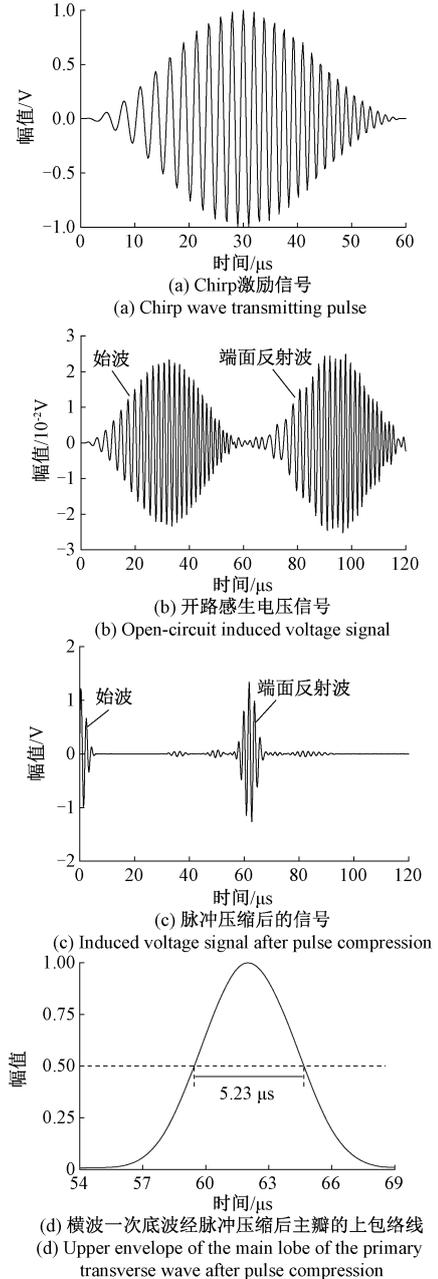


图 5 跑道线圈 EMAT 开路感生电压信号经脉冲压缩处理前后对比

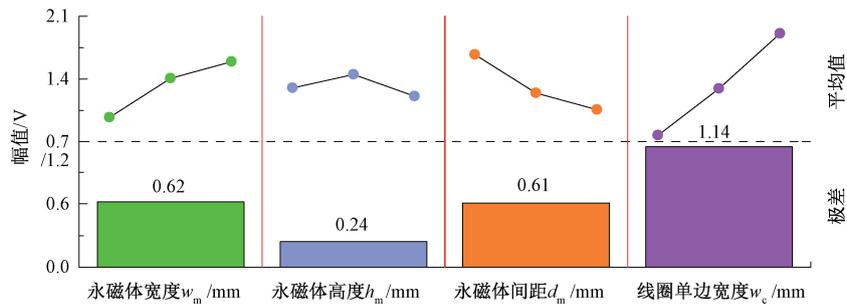
Fig. 5 Comparison of open-circuit induced voltage signals before and after pulse compression from the racetrack coil EMAT

永磁体宽度 w_m 、永磁体高度 h_m 等 7 个参数对 EMAT 开路感生电压经过脉冲压缩后的主瓣峰值的影响如图 6 所示。由图 6 可知:跑道线圈单边宽度对主瓣峰值的影响最大,线圈单边宽度越大,主瓣峰值越大;其次为 chirp 信号脉宽和永磁体宽度,主瓣峰值随脉宽和永磁体宽度的增加均表现为增大趋势;但主瓣峰值随永磁体间距、跑道线圈内侧间距和 chirp 信号带宽的增加表现为减小趋势;主瓣峰值随永磁体高度的增大表现为先增后减趋势。由

图6中极差值可知:7个设计参数对主瓣峰值的影响次序为 $w_c > P_w > w_m > d_m > d_c > B_w > h_m$ 。

表3 EMAT 7因素3水平的正交试验
Table 3 Orthogonal test table of EMAT 7 factors and 3 levels

序号	永磁体宽度 w_m/mm	永磁体高度 h_m/mm	永磁体间距 d_m/mm	线圈单边 宽度 w_c/mm	线圈内 侧间距 d_c/mm	chirp 信号 带宽 B_w/MHz	chirp 信号 脉宽 $P_w/\mu s$	主瓣峰值 U_{PP}/V	主瓣宽度 (-6 dB) $T/\mu s$
1	20	10	2	15	5	0.3	30	0.91	8.25
2	20	10	2	15	10	0.4	40	0.67	6.43
3	20	10	2	15	15	0.5	60	0.65	5.12
4	20	20	6	25	5	0.3	30	0.90	8.22
5	20	20	6	25	10	0.4	40	1.01	6.37
6	20	20	6	25	15	0.5	60	1.04	5.21
7	20	30	10	35	5	0.3	30	1.00	8.11
8	20	30	10	35	10	0.4	40	1.19	6.36
9	20	30	10	35	15	0.5	60	1.34	5.23
10	30	10	6	35	5	0.4	60	2.93	6.43
11	30	10	6	35	10	0.5	30	1.27	5.06
12	30	10	6	35	15	0.3	40	1.48	8.21
13	30	20	10	15	5	0.4	60	1.07	6.51
14	30	20	10	15	10	0.5	30	0.51	5.10
15	30	20	10	15	15	0.3	40	0.56	8.28
16	30	30	2	25	5	0.4	60	2.49	6.41
17	30	30	2	25	10	0.5	30	1.08	5.09
18	30	30	2	25	15	0.3	40	1.27	8.26
19	40	10	10	25	5	0.5	40	1.17	5.19
20	40	10	10	25	10	0.3	60	1.74	8.24
21	40	10	10	25	15	0.4	30	0.92	6.51
22	40	20	2	35	5	0.5	40	2.55	5.11
23	40	20	2	35	10	0.3	60	3.66	8.36
24	40	20	2	35	15	0.4	30	1.77	6.21
25	40	30	6	15	5	0.5	40	0.87	5.30
26	40	30	6	15	10	0.3	60	1.20	8.33
27	40	30	6	15	15	0.4	30	0.46	6.26



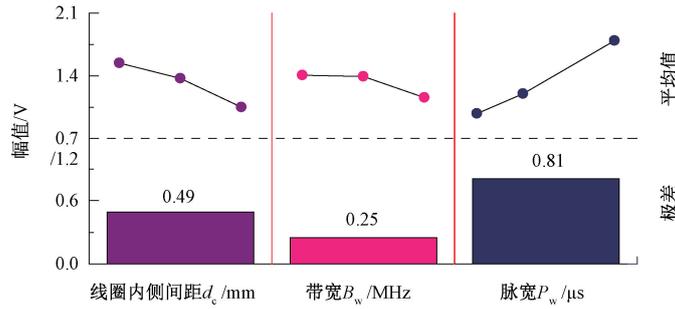


图 6 EMAT 和 chirp 信号的设计参数对脉冲压缩后主瓣峰值的影响

Fig. 6 Influence of the design parameters of the EMAT and the chirp signal on the peak value of the main lobe after pulse compression

根据图 6, 分别选出主瓣峰值最大/最小对应的 EMAT 和 chirp 信号参数组合, 如表 4 所示。由于正交试验的 27 组组合中均无此主瓣峰值最大和最小参数组合, 故选用上述两组参数组合分别进行数值计算。如表 4 可知, 正交试验中 27 组参数组合对应的主瓣峰值均小于

主瓣峰值最大参数组合对应的幅值 (4.11 V), 均大于主瓣峰值最小参数组合对应的幅值 (0.39 V), 验证了正交试验分析得到的 chirp 脉冲压缩后信号主瓣峰值计算结果的可靠性。

表 4 主瓣峰值最大/最小的 EMAT 和 chirp 信号的设计参数组合

Table 4 Combination parameters of the EMAT and the chirp signal with the main lobe of the maximum and minimum peak

主瓣峰值	永磁体宽度 w_m /mm	永磁体高度 h_m /mm	永磁体间距 d_m /mm	线圈单边宽度 w_c /mm	线圈内侧间距 d_c /mm	chirp 信号带宽 B_w /MHz	chirp 信号脉宽 P_w / μ s	主瓣峰值 U_{pp} /V
最大	40	20	2	35	5	0.3	60	4.11
最小	20	30	10	15	15	0.5	30	0.39

跑道线圈 EMAT 探头和 chirp 信号的设计参数对主瓣宽度的影响如图 7 所示。由图 7 可知, 脉冲压缩后的主瓣宽度主要受 chirp 带宽影响, 主瓣宽度随着 chirp 带

宽的增加而减小; 永磁体宽度、永磁体高度等 6 个因素对脉冲压缩后的主瓣宽度影响较小, 其主瓣宽度基本保持不变。

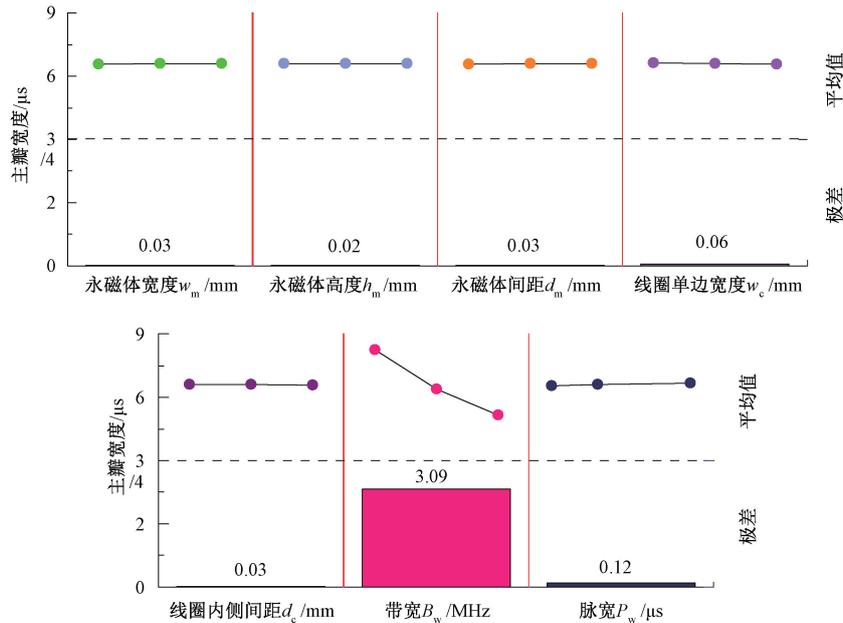


图 7 EMAT 和 chirp 信号的设计参数对脉冲压缩后主瓣宽度的影响

Fig. 7 Influence of the design parameters of the EMAT and the chirp signal on main lobe width after pulse compression

选取脉冲压缩后主瓣宽度的最大/最小参数组合进行计算,得到如表5所示结果。由表5可知,经过脉冲压缩后主瓣宽度最大参数组合对应的波宽为 $8.56\ \mu\text{s}$,大于正交试验中27组参数组合对应的主瓣宽度;主瓣

宽度最小参数组合对应的波宽为 $4.99\ \mu\text{s}$,小于正交试验中27组参数组合对应的主瓣宽度,验证了正交试验分析得到的 chirp 脉冲压缩后信号主瓣宽度计算结果的可靠性。

表5 主瓣宽度最大/最小的 EMAT 和 chirp 信号的设计参数组合

Table 5 Combination parameters of the EMAT and the chirp signal with the main lobe of the maximum and minimum width

主瓣宽度	永磁体宽度 w_m/mm	永磁体高度 h_m/mm	永磁体间距 d_m/mm	线圈单边宽度 w_c/mm	线圈内侧间距 d_c/mm	chirp 信号带宽 B_w/MHz	chirp 信号脉宽 $P_w/\mu\text{s}$	主瓣宽度(-6 dB) $T/\mu\text{s}$
最大	40	10	10	15	5	0.3	60	8.56
最小	20	30	2	35	15	0.5	30	4.99

3 实验验证

3.1 实验系统

跑道线圈 EMAT 检测实验系统如图8所示。信号发生器 AFG2021 用以产生猝发音脉冲串或脉冲 chirp 信号,由 RITEC GA-2500A 功率放大器实现功率放大。

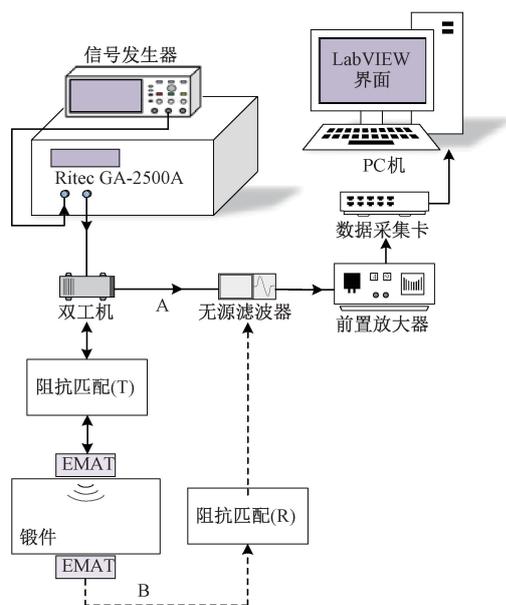


图8 跑道线圈 EMAT 实验系统

Fig. 8 Experimental system of the EMAT with a racetrack coil

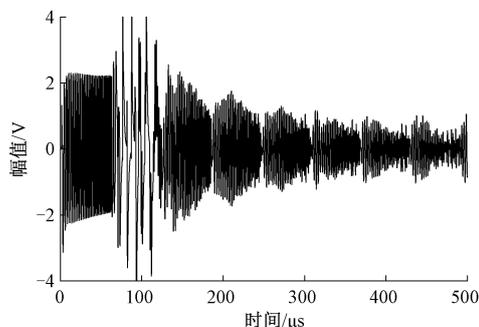
由图8可知,采用单个跑道线圈 EMAT 探头配合双工机使用,可以实现锻件脉冲反射式检测。接收到的微弱超声波信号由线路A经过,通过无源滤波器和前置放大器分别实现滤波与信号放大后,由数据收集卡传至上位PC机。由于采用单个跑道线圈 EMAT 进行脉冲反射式检测时,对应的信噪比较差和快速恢复

时间过长,因此采用两个跑道线圈 EMAT 探头,通过线路B,对锻件中 $\Phi 4$ 平底孔进行透射式检测。有/无含 $\Phi 4$ 平底孔的中碳钢试块尺寸均为 $160\ \text{mm} \times 160\ \text{mm} \times 100\ \text{mm}$,平底孔埋深为 $20\ \text{mm}$ 。对于高温碳钢试样,由于超声衰减系数随着温度和激励频率的增加而急剧增加,因此很难采用较高频率的横波实现缺陷检测。因此,本文中采用中心频率为 $0.5\ \text{MHz}$ 的猝发音脉冲串和 chirp 信号。

3.2 跑道线圈 EMAT 和 chirp 信号的设计参数组合实验验证

采用表4和5给出的4组参数组合,制作 EMAT 探头并进行实验验证,实验中均未对超声回波信号进行同步平均降噪。

图9(a)所示为主瓣峰值最大的 EMAT 和 chirp 信号的参数组合对应的原始超声 A 扫信号,经过脉冲压缩后的信号如图9(b)所示。图9(c)所示为经过脉冲压缩后的主瓣峰值最小的 EMAT 和 chirp 信号的参数组合对应的信号。由图9(b)和9(c)可知:取脉冲压缩后的横波二次底波进行比较,与主瓣峰值最小的 EMAT 和 chirp 信号的参数组合相比,主瓣峰值最大 EMAT 和 chirp 信号参数组合对应的信噪比提高了 $14.5\ \text{dB}$ 。



(a) 主瓣峰值最大参数组合对应的无同步平均原始A扫信号
(a) A-scan signal with no synchronized average referring to the combination parameters with the main lobe of a maximum peak

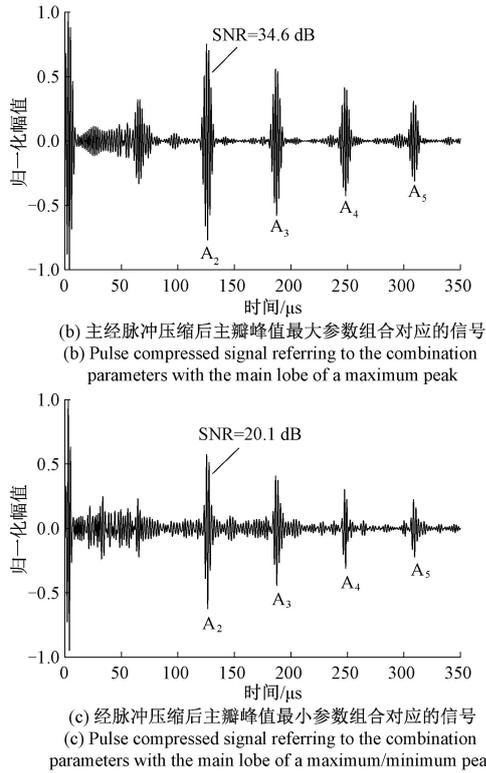


图 9 主瓣峰值最大\最小的 EMAT 和 chirp 信号的参数组合对应的检测信号

Fig. 9 Comparison of the experimental signals referring to combination parameters of the EMAT and the chirp signal with the main lobe of a maximum/minimum peak

分别取主瓣宽度最小/最大的 EMAT 和 chirp 信号的参数组合对应横波二次底波经脉冲压缩后波包的上包络线, 并进行归一化处理如图 10 所示。由图 10 可知: 与主瓣宽度最大的 EMAT 和 chirp 信号参数组合对应的横波二次底波主瓣宽度 $6.65 \mu\text{s}$ 相比, 主瓣宽度最小参数组合对应的主瓣宽度可以减小 44.5%。

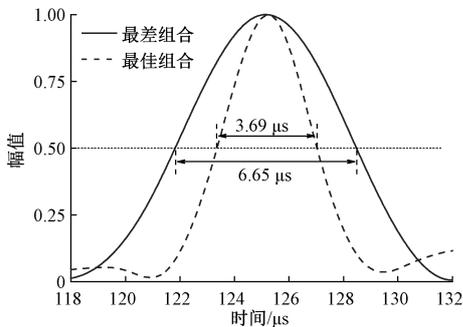


图 10 主瓣宽度最大\最小的 EMAT 和 chirp 信号参数组合的实验结果对比

Fig. 10 Comparison of the experimental results referring to the combination parameters of the EMAT and the chirp signal with the main lobe of a maximum/minimum width

不同的 EMAT 参数组合出现主瓣峰值和主瓣宽度的最大/最小值的原因: 永磁体的尺寸差异造成偏置磁场强度和偏置磁场垂直/水平分量不同, 同时影响着跑道线圈的有效换能区域、chirp 信号带宽和脉宽, 从而造成换能效率的差别。另外, chirp 信号作为宽频带信号, EMAT 跑道线圈设计参数影响着其等效阻抗, 因此所选取的阻抗匹配网络类型和阻抗匹配参数不同, EMAT 检测系统的频带特性也会改变。由此可见, 对 EMAT 中永磁体、跑道线圈以及 chirp 信号脉宽等参数进行优化, 使 chirp 信号与 EMAT 频响特性相匹配, 可减小频谱成分的缺失, 避免有效带宽的损失, 可以提高 EMAT 超声回波的信噪比和分辨率。

4 锻件 EMAT 检测实验结果分析

4.1 猝发音脉冲/chirp 信号两种激励方式比较

激励信号脉宽为 $10 \mu\text{s}$ 时, 对应的无同步平均的透射式锻件 (不含缺陷) 检测回波信号如图 11 所示。

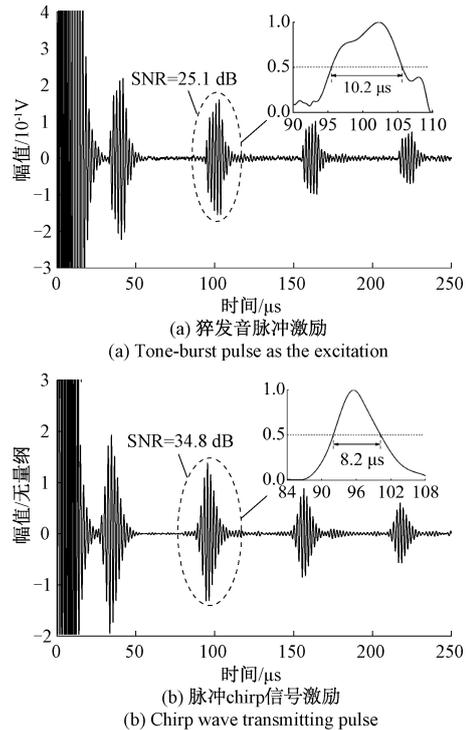


图 11 脉宽相同时猝发音脉冲/chirp 激励对应的实验结果对比

Fig. 11 Comparison of the experimental results referring to the excitations methods of tone burst and chirp signals with the same excitation duration

图 11(a) 为 0.5 MHz 猝发音脉冲串激励时的 A 扫信号, 图 11(b) 为中心频率 0.5 MHz 且带宽为 0.3 MHz 的 chirp 信号激励时对应的经过脉冲压缩后的信号。由

图 11(a)和(b)可知:当猝发音脉冲与 chirp 信号激励脉宽均为 $10\ \mu\text{s}$ 时,采用 chirp 脉冲压缩技术得到的回波信噪比和空间分辨率更高,信噪比提高了至少 $9.7\ \text{dB}$,主瓣宽度减小了 19.6% 。

$10\sim 60\ \mu\text{s}$ 脉宽激励信号对应的无同步平均的锻件(不含缺陷)透射式检测回波信号如图 12 所示。由图 12 可知,采用 $0.5\ \text{MHz}$ 猝发音脉冲串激励,主瓣宽度随脉宽增加而增大,但信噪比保持不变;chirp 信号激励时,经过脉冲压缩后的透射波信号的信噪比随脉宽增加而增大,但主瓣宽度基本保持不变。因此,采用 chirp 信号脉冲压缩技术,信噪比和空间分辨率均高于猝发音脉冲信号。

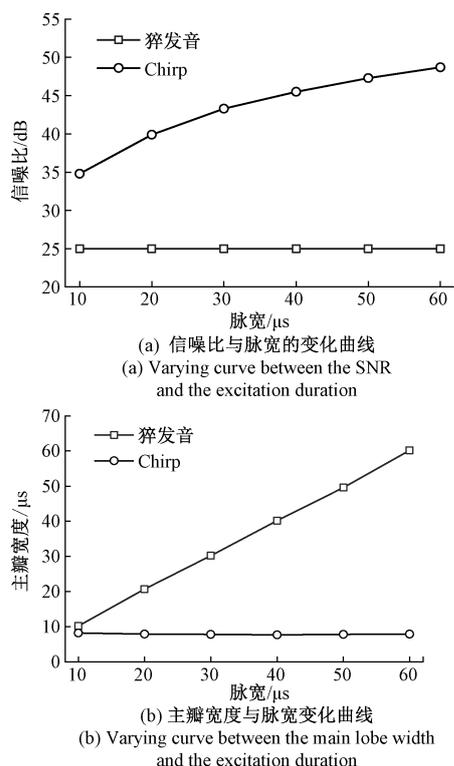


图 12 不同脉宽的猝发音脉冲/chirp 激励对应的的实验结果对比

Fig. 12 Comparison of the experimental results referring to the excitations methods of tone burst and chirp signals with different excitation durations.

4.2 锻件 EMAT 缺陷检测结果分析

当采用 $0.5\ \text{MHz}$ 猝发音脉冲串激励信号,EMAT 线圈提离距离为 $0.1\ \text{mm}$ 时, $\Phi 4$ 平底孔的检测回波如图 13 所示。由图 13 可知,无同步平均时,缺陷波信号完全淹没于噪音中,无法识别;128 次同步平均时,缺陷回波的信噪比提升至 $20.1\ \text{dB}$ 。增加同步平均次数可以提高信噪比。对于猝发音脉冲串激励方式,若不增加平均次数,则较难实现缺陷检测。

当采用中心频率为 $0.5\ \text{MHz}$ 、带宽 $0.3\ \text{MHz}$ 、脉宽

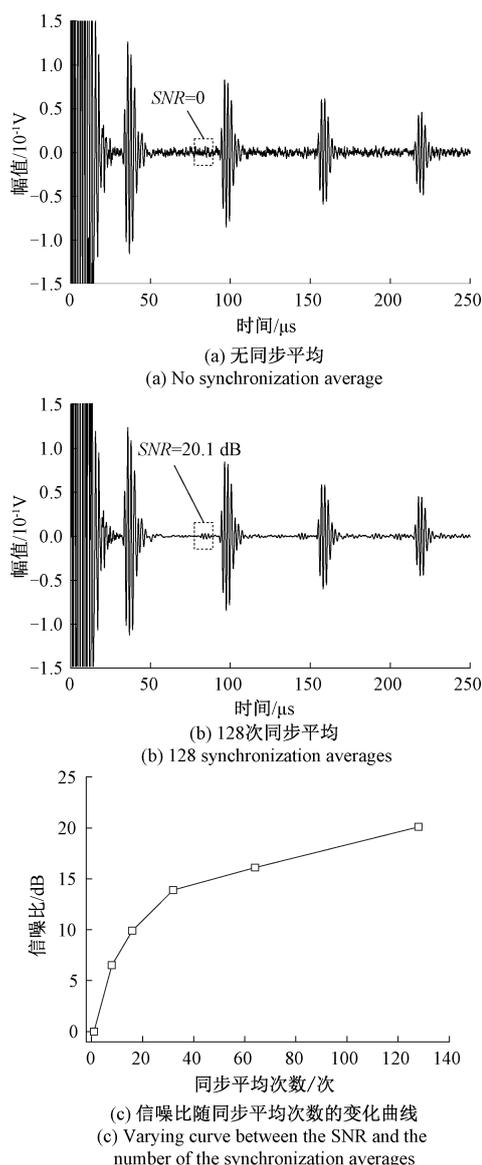
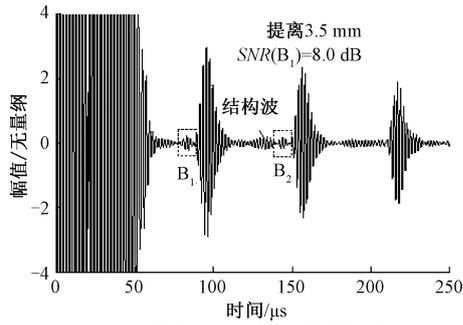


图 13 提离 $0.1\ \text{mm}$ 时猝发音脉冲信号激励对应的 $\Phi 4$ 平底孔检测结果

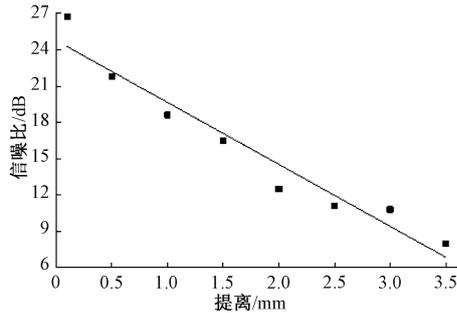
Fig. 13 Testing results of $\Phi 4$ flat-bottomed hole by the excitation of a tone-burst pulse when lift-off is $0.1\ \text{mm}$

$60\ \mu\text{s}$ 的 chirp 激励信号,经过脉冲压缩后对应的 $\Phi 4$ 平底孔的检测回波如图 14 所示。图 14(a)中 B_1 、 B_2 分别为横波透射法检测到的一次、二次缺陷回波,其中,一次缺陷回波的信噪比为 $8\ \text{dB}$ 。由图 14 可知,采用 chirp 脉冲压缩技术,可在激励和接收 EMAT 探头提离均为 $3.5\ \text{mm}$ 且无同步平均条件下,检测出 $\Phi 4$ 平底孔;缺陷波的信噪比随提离增加近似表现为线性递减关系。当提离由 $0.1\ \text{mm}$ 增加至 $3.5\ \text{mm}$,缺陷回波信噪比由 $26.7\ \text{dB}$ 降为 $8.0\ \text{dB}$ 。



(a) 提高3.5 mm时超声检测信号

(a) Ultrasonic detected signal when the lift-off is 3.5 mm



(b) 缺陷波信噪比与提高大小关系

(b) Relationship between the SNR of the detected signal and the lift-off

图 14 不同提高且无同步平均条件下 chirp 信号激励对应的 $\Phi 4$ 平底孔检测结果

Fig. 14 Testing results of $\Phi 4$ flat-bottom hole referring to the excitation of the chirp signal with different lift-off and no synchronous average

5 结 论

跑道线圈 EMAT 设计参数和 chirp 信号参数对脉冲压缩后的主瓣峰值起着重要作用, chirp 信号的带宽对主瓣宽度起着主要作用。有必要根据实际检测情况,在提高信噪比的同时增加 chirp 带宽以提高空间分辨率。采用 chirp 脉冲压缩技术,并结合基于正交试验设计的跑道线圈 EMAT 设计参数优化,可以极大程度地提高检测回波信噪比和分辨率,为研制适宜于高温高衰减铸锻件缺陷快速检测的 EMAT 探头提供理论指导。

对于单一频率猝发音脉冲激励信号,增加同步平均次数可提高信噪比,但信噪比与脉宽无关,且空间分辨率随脉宽增加而变差。对于 chirp 脉冲信号,脉宽越大,脉冲压缩后信噪比越高,但空间分辨率保持不变。

在无同步平均条件下,基于 chirp 脉冲压缩技术的 EMAT 检测信号的信噪比和空间分辨率更高。采用中心频率为 0.5 MHz 的 chirp 信号能够检测出埋深 20 mm、直径为 $\Phi 4$ 的平底孔,且缺陷回波信噪比最高可达 26.7 dB;当双 EMAT 探头提高增至 3.5 mm 时,脉冲压缩后的缺陷波信噪比可达 8 dB。

由于配合双工机使用的单个跑道线圈 EMAT 的检测盲区大和信噪比差,碳钢中缺陷的脉冲反射式检测仍存在一定问题,有待在后期研究中解决。但是,通过双 EMAT 探头透射式检测,采用中心频率为 0.5 MHz 的 chirp 信号进行缺陷检测,验证了低频 chirp 脉冲压缩技术在 $\Phi 4$ 平底孔电磁超声检测的可行性,对实现在高温、大提高条件下铸锻件缺陷的快速在线检测具有重要参考价值。

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 electromagnetics ultrasonic testing method for determining solidified shell thickness during continuous casting [C]. The 30th Chinese Control and Decision Conference, 2018:913-918.
- [3] 沈意平,唐斌龙,王送来,等. 压电纤维布置结构对 Lamb 波方向识别的影响研究 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(1):154-161.
SHEN Y P, TANG B L, WANG S L, et al. Study on the influence of piezoelectric fiber configurations on Lamb wave direction identification [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(1):154-161.
- [4] ARNO R, ROMAN F, URS S, et al. Air coupled ultrasonic defect detection in polymer pipes [J]. NDT & E International, 2019, 102:244-253.
- [5] PEI C X, YI D CH, LIU T H, et al. Fully noncontact measurement of inner cracks in thick specimen with fiber-phased-array laser ultrasonic technique [J]. NDT & E International, 2020, 113:1-9.
- [6] 石文泽,陈巍巍,卢超,等. 高温铝合金电磁超声检测回波特性及因素分析 [J]. 航空学报, 2020, 41(12):396-409.
SHI W Z, CHEN W W, LU CH, et al. Characteristics and factor analyses for electromagnetic ultrasonic detection echoes in high-temperature aluminum alloy [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(12):396-409.
- [7] 黄松岭,王哲,王琿,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.

- [8] 唐志峰, 孙兴涛, 张鹏飞, 等. 测厚与导波检测于一体的复合式电磁超声换能器研究 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(9):98-109.
TANG ZH F, SUN X T, ZHANG P F, et al. Research on composite electromagnetic ultrasonic transducer integrating thickness measurement and guided wave detection [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(9):98-109.
- [9] REN W P, XU K, DIXON S, et al. A study of magnetostriction mechanism of EMAT on low-carbon steel at high temperature [J]. NDT & E International, 2018, DOI:10.1016/j.ndteint.2018.10.001.
- [10] JOAQUIN G G, ROBERTO G P, MANUEL R Z, et al. Smart sound processing for defect sizing in pipelines using EMAT actuator based multi-frequency lamb waves [J]. Sensors, 2018, 18(3):802-819.
- [11] CHOI S, CHO H, LINDSEY M S, et al. Electromagnetic acoustic transducers for robotic nondestructive inspection in harsh environments [J]. Sensors, 2018, 18(1):193-205.
- [12] 石文泽, 陈巍巍, 陈尧, 等. 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 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(8):119-130.
SHI W Z, CHEN W W, CHEN Y, et al. Design and application of an EMAT for solidification shell thickness detection in continuous casting slab based on the pulse compression technique [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(8):119-130.
- [13] 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(1):0120111-0120114.
- [14] FU Y J, PAN R Y. Research on pulse compression technology of linear frequency modulation signal [C]. International Conference on Industrial Control & Electronics Engineering, IEEE, 2012:1131-1133.
- [15] 郑阳, 周进节, 张宗健, 等. 电磁超声检测频率自适应优化方法研究 [J]. 机械工程学报, 2019, 55(14):11-18.
ZHENG Y, ZHOU J J, ZHANG Z J, et al. Research on frequency adaptive optimization method of electromagnetic acoustic testing [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(14):11-18.
- [16] LAM F, SZILARD J. Pulse compression techniques in ultrasonic non-destructive testing [J]. Ultrasonics, 1976, 14(3):111-114.
- [17] LUO ZH, LIN J, ZENG L, et al. Mode purification for ultrasonic guided waves under pseudo-pulse excitation [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2015, 628:012123-012130.
- [18] GAN T H, HUTCHINS D A, BILLSON D R, et al. The use of broadband acoustic transducers and pulse compression techniques for air-coupled ultrasonic imaging [J]. Ultrasonics, 2001, 39(3):181-194.
- [19] 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.
- [20] 周正干, 张宏宇, 魏东. 脉冲压缩技术在超声换能器激励接收方法中的应用 [J]. 中国机械工程, 2010, 21(17):115-119.
ZHOU ZH G, ZHANG H Y, WEI D. Applications of pulse compression in ultrasonic transducers excitation and receiving [J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(17):115-119.
- [21] 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(1):39-55.
- [22] ISLA J, CELGA F. The use of binary quantization for the acquisition of low SNR ultrasonic signals: A study of the input dynamic range [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2016, 63(9):1474-1482.
- [23] ISLA J, CELGA F. Coded excitation for pulse-echo systems [J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 2017, 64(4):736-748.
- [24] HAO K S, 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.
- [25] 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.
- [26] KOZYREFF G. Applied solid mechanics [M]. Edinburgh:Cambridge University Press, 2009.

- [27] 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.
- [28] COLE P T. The generation and reception of ultrasonic surface waves in mild steel at high temperatures [J]. *Ultrasonics*, 1978, 16(4):151-155.
- [29] 王好贞, 杨媛, 魏小源, 等. Barker 编码激励超声导波在断轨检测中的应用 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2020, 34(8):101-108.
- WANG H ZH, YANG Y, WEI X Y, et al. Application of Barker code excited ultrasonic guided waves in broken rail detection [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2020, 34(8):101-108.

作者简介



石文泽, 2009 年于内蒙古工业大学获得学士学位, 2011 年于中南大学获得硕士学位, 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.



陈巍巍, 2018 年于南昌航空大学获得学士学位, 现为南昌航空大学硕士研究生, 主要研究方向为电磁超声检测。

E-mail: 2843533124@qq.com

Chen Weiwei received his B.Sc. degree from Nanchang Hangkong University in 2018.

He is currently a master student 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: luchao@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.