

DOI: 10.3901/JME.2022.10.012

# 高温锻件在线快速检测螺旋线圈 EMAT 优化设计<sup>\*</sup>

陈巍巍<sup>1</sup> 石文泽<sup>1,2</sup> 卢超<sup>1,3</sup> 程进杰<sup>1</sup> 陈尧<sup>1</sup> 陈果<sup>1</sup>

- (1. 南昌航空大学无损检测技术教育部重点实验室 南昌 330063;
2. 中国科学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)

**摘要:** 在高温铸造/锻造过程中进行缺陷的检测、控制和修复以及厚度测量, 并据此调整加工工艺参数, 及时剔除缺陷/尺寸超标件, 避免进入下一步工序, 对提高产品合格率、实现环保制造, 具有重要的工程应用价值。针对电磁超声换能器(Electromagnetic ultrasonic transducer, EMAT)在大提离、强环境电磁干扰、高温等严苛条件下对表面粗糙形貌、晶粒粗大的铸锻件进行快速检测时的信噪比和空间分辨率差这一难题, 建立基于 chirp 信号激励的螺旋线圈 EMAT 检测过程的有限元模型, 采用正交试验表, 分析 EMAT 设计参数、chirp 信号带宽、脉宽等因素对脉冲压缩后的回波主瓣峰值和主瓣宽度的影响, 分别获取主瓣峰值/主瓣宽度最佳参数组合, 并通过试验加以验证。设计耐高温 EMAT 探头, 比较单一正弦脉冲激励信号和 chirp 脉冲压缩在 650 °C 以上高温锻件检测的信噪比和主瓣宽度。结果表明, 采用 chirp 脉冲压缩技术, 高温 EMAT 检测的信噪比(Signal-to-noise ratio, SNR)、空间分辨率和检测效率更高。在 720 °C 高温锻件、提离为 3 mm 且无同步平均条件下, 与单一正弦脉冲激励相比, 采用脉冲压缩技术, SNR 提高了至少 5.4 dB, 主瓣宽度减小了 58.8%。

**关键词:** 高温检测; EMAT; 正交试验; 脉冲压缩; 优化设计

**中图分类号:** TB552

## Optimal Design of Spiral Coil EMAT for Online and Rapid Detection of High-temperature Forgings

CHEN Weiwei<sup>1</sup> SHI Wenze<sup>1,2</sup> LU Chao<sup>1,3</sup> CHENG Jinjie<sup>1</sup> CHEN Yao<sup>1</sup> CHEN Guo<sup>1</sup>

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

**Abstract:** To detect, control, and repair the defects or to measure the thickness of castings and forgings in the process of casting and forging with high temperatures is of practical engineering value. Manufacturing process parameters can be adjusted based on the inspection result, and the product with defects and dimensions down to relevant standards can be abandoned, and the product can be prevented to the next manufacturing process step. In this way, the product qualified rate can be enhanced, and environment protection manufacturing is realized. To improve the signal-to-noise ratio(SNR) and range resolution of the electromagnetic ultrasonic transducer(EMAT) for the quick inspection of these castings and forgings with rough surface and coarse grains under the harsh conditions of large lift-off distance, strong electromagnetic noise and high temperature, a finite element model for the testing process

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金(52065049, 51705231, 12064001)、江西省自然科学基金(20192ACBL20052)、江西省科技厅科技计划(20192BCD40028)、江西省研究生创新专项(YC2019-S345)、江西省青年科学基金(20181BAB216020)、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)和江西省教育厅(GJJ170613)资助项目。20210522 收到初稿, 20210920 收到修改稿

of a spiral coil EMAT with a chirp wave transmitting pulse was built. With the orthogonal test table, the influences of EMAT design parameters, bandwidth and pulse width of the chirp signal on both the peak and pulse width of the main lobe of the echoes after pulse compression were analyzed. Optimal parameter combinations for the peak and pulse width of the main lobe were obtained, and they were verified by experiments. A high-temperature resistant EMAT probe was designed, and the SNR and main lobe width between the excitation of tone-burst signal and chirp pulse compression with the object of high-temperature testing of forgings at temperatures exceed 650 °C were compared. Results show that the SNR, range resolution and detection efficiency of high-temperature EMAT testing can be enhanced by pulse compression technology with chirp signal. Besides, at the testing conditions of the forging with a temperature of 720 °C, a lift-off of 3mm, and no synchronous averaging, compared with the excitation of a tone-burst pulse, after pulse compression, the SNR is improved by at least 5.4 dB, and the pulse width can be reduced by 58.8%.

**Key words:** high-temperature detection; EMAT; orthogonal test; pulse compression; optimization design

## 0 前言

随着国内制造业的快速发展,我国对高性能大型铸锻件的需求不断增加。由于铸锻件生产条件、设备、工艺、操作等各种因素的影响,导致铸锻件生产过程中不可避免地出现裂纹、气孔、夹杂等缺陷以及工件厚度难以保证等问题。因此,采用无损检测技术对高温大型铸锻件进行快速、准确地在线缺陷检测和厚度测量,从而及时调整加工工艺参数,修复和抑制缺陷,控制铸锻件尺寸,及时剔除缺陷/尺寸超标件,具有重要的工程应用价值<sup>[1-2]</sup>。

由于传统压电超声一般需要采用耦合剂,且对待测面粗糙度要求较高,不适宜在高温且粗糙表面条件下进行检测<sup>[3]</sup>。空气耦合超声一般适用于纤维增强复合材料、蜂窝夹芯/泡沫夹芯、耐高温陶瓷等疏松多空隙材料,且多采用透射式检测、信噪比低,很难应用于大型高温铸锻件实际检测中<sup>[4-5]</sup>。激光超声可以实现 800~1 000 °C 钢板表面/内部缺陷检测,但是目前仅能检测 30 mm 厚钢板工件,且成本高、体积大<sup>[6-7]</sup>。

与传统压电超声、空气耦合超声、激光超声相比,电磁超声换能器(Electromagnetic ultrasonic transducer, EMAT)具有无需耦合剂、对待测金属表面粗糙度要求不高、易激发各种超声波、可检测较厚金属工件等特点,适合高温、在线、移动等恶劣环境下的无损检测<sup>[8-11]</sup>。在高温铸锻件 EMAT 检测时,由于超声回波幅值和飞行时间随着温度急剧变化、瞬变的外部高温/环境电磁干扰、EMAT 换能效率/信噪比低,以及大型铸锻件形成的超强热辐射,不允许耐高温 EMAT 探头长时间检测;高温铸锻件在移动过程中,探头扫查区域受限等原因,采用多次同步平均来提高高温 EMAT 的信噪比很难实施,因为多次同步平均需要保证高温 EMAT 与锻件较长

时间近距离检测。由于上述原因,极大地限制了 EMAT 在高温铸锻件快速在线检测中的应用<sup>[3,12]</sup>。采用脉冲压缩技术对无同步平均的原始超声回波信号进行处理,不仅能提高高温 EMAT 的检测效率,还能降低高温 EMAT 设计时对耐高温能力的要求,而且能够通过增大 chirp 脉宽,达到提高信噪比和空间分辨率的目的。

目前,国内外学者已经针对 EMAT 高温检测开展了广泛的研究。例如,COLE<sup>[13]</sup>开发了一种采用水循环冷却直流电磁铁式表面波 EMAT 探头,并将其用于 1 000 °C 碳钢检测,但其最佳工作温度为 650~900 °C,最佳工作频率为 250 kHz,在 730 °C 时的信噪比为 18 dB,有待加强。BURROWS 等<sup>[14]</sup>利用便携式 Nd:YAG 激光器产生一束激光并穿过水冷式螺旋线圈 EMAT 探头中心孔用以激励超声波,可实现在 800 °C 下对 9 mm 厚 316 不锈钢管道的壁厚检测。KOGIA 等<sup>[15]</sup>通过对高温 EMAT 探头的水冷却方案进行优化设计,分析了在高温环境中永磁体、线圈和试样随温度的变化规律,实现了 600 °C 不锈钢和碳钢的 SH0 导波检测。LUNN 等<sup>[16]</sup>采用耐高温永磁体、陶瓷和不锈钢外壳等设计了一种 450 °C 高温 EMAT 探头,并以 2.6~12 mm 厚度的铝和低碳钢板为检测对象,研究了温度对超声回波幅值、信噪比和衰减系数的影响。REN 等<sup>[17]</sup>研究了温度对碳钢中磁致伸缩系数和磁致伸缩效应贡献比例的影响。邱佳明<sup>[18]</sup>开发了一套用于 600 °C 高温管道测厚的脉冲电磁铁式 EMAT 探头及其检测系统。刘会彬等<sup>[19]</sup>通过试验分析了 15~495 °C 内 304、316、TP347H 三种奥氏体不锈钢的电磁超声声速和回波幅值随温度的变化规律。WU 等<sup>[20]</sup>提出了一种改进的高温超声衰减有限元模型,用于分析 7050 铝合金中温度对超声衰减系数的影响。

20 世纪 90 年代,RAO 等<sup>[21]</sup>首次将脉冲压缩技术运用于医学超声成像中并取得了较好的应用效

果,随后该技术也被应用于压电超声、空气耦合、电磁超声等领域。HO 等<sup>[22]</sup>提出将脉冲压缩技术与电磁超声结合,并将其运用于铝合金、黄铜等薄板内部圆孔的成像检测,指出脉冲压缩技术可提高检测速度、信噪比,还能解决波包混叠问题。IIZUKA 等<sup>[12]</sup>采用 EMAT 双探头透射法对厚度为 250 mm 的不锈钢块进行检测,通过脉冲压缩技术和 16 次同步平均,可以在提高为 7 mm 时将信噪比 (Signal-to-noise ratio, SNR) 提高 24 dB。

国内也已经开展脉冲压缩技术应用于超声检测领域的研究。周正干等<sup>[5]</sup>将脉冲压缩技术和超声 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效果。周正干等<sup>[23]</sup>还提出宽频超声换能器有较好的脉冲压缩性能,且在非金属复合材料超声检测中应用脉冲压缩技术可大幅提高信噪比和缺陷分辨能力。石文泽等<sup>[3]</sup>采用单一变量法,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检测予以验证,但是相关结论无法为脉冲压缩技术应用于较高频率螺旋线圈 EMAT 应用于高温锻件探伤/测厚提供支撑。

为了将脉冲压缩技术更好地应用于高温锻件 EMAT 检测,并进一步提高信噪比、空间分辨率和检测效率,建立基于 chirp 信号激励的螺旋线圈 EMAT 检测过程的有限元模型,采用正交试验表,获取了 EMAT 最佳参数组合,并结合脉冲压缩技术,进行了 650 °C 以上高温锻件检测。

## 1 螺旋线圈 EMAT 检测过程数值建模

### 1.1 螺旋线圈 EMAT 换能机理

螺旋线圈 EMAT 洛伦兹力换能机理如图 1 所示。圆柱型永磁体用于提供垂直于金属试样上表面的静态偏置磁场。当线圈中通有大功率射频脉冲电流时,试样表面会感应出频率相同、方向相反的脉冲电涡流。电涡流在永磁体提供的静态偏置磁场作用下,可产生交变的洛伦兹力。试样表面质点在洛伦兹力作用下产生振动变形,并沿着试样厚度方向以超声波形式进行传播。当激发的超声波沿试样厚度方向传播,遇到端面或缺陷时,将反射回到 EMAT 线圈正下方,试样表面粒子会发生高频振动,在外加偏置磁场作用下,粒子振动会切割磁感

线并在空气中形成动态电磁场,并在线圈中产生开路感生电压。

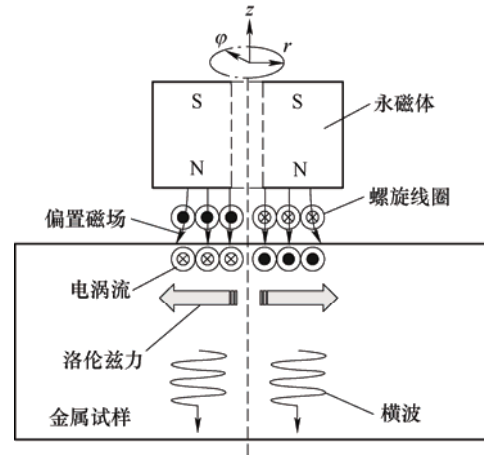


图 1 螺旋线圈 EMAT 洛伦兹力换能机理

对于铁磁性金属材料而言,螺旋线圈 EMAT 换能机理除洛伦兹力外,还有磁致伸缩效应。当温度高于材料居里温度,铁磁性材料将转变为顺磁性,磁致伸缩效应消失,另外,对于螺旋线圈 EMAT,其偏置磁场主要以垂直分量为主,磁致伸缩效应相对洛伦兹力较弱,因此螺旋线圈 EMAT 主要以洛伦兹力激励横波为主。

### 1.2 螺旋线圈 EMAT 检测过程控制方程

永磁体在金属表层形成的静态偏置磁场的控制方程如下<sup>[24]</sup>

$$\mu \nabla^2 \varphi_m = 0 \quad (1)$$

$$\mathbf{H} = -\nabla \varphi_m \quad (2)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} + \mathbf{B}_r \quad (3)$$

式中,  $\mathbf{H}$ 、 $\varphi_m$  分别为磁场强度和标量磁位,  $\mu_r$ 、 $\mu_0$ 、 $\mu$  分别为相对磁导率、空气磁导率和绝对磁导率,  $\mathbf{B}$  为磁感应强度,  $\mathbf{B}_r$  为永磁体的剩余磁感应强度。

激励 EMAT 在试样表层的电涡流密度  $\mathbf{J}_{i\varphi}$  和洛伦兹力  $\mathbf{f}_L$  的控制方程如下<sup>[25]</sup>

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \mathbf{A}_\varphi - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}_\varphi}{\partial t} + \frac{\sigma}{S_k} \frac{\partial}{\partial t} \iint_{R_k} \mathbf{A}_\varphi d\mathbf{s} = -\frac{st(t)}{S_k} \quad (4)$$

$$\mathbf{J}_{i\varphi} = -\sigma \frac{\partial \mathbf{A}_\varphi}{\partial t} \quad (5)$$

$$\mathbf{f}_L = \mathbf{J}_{i\varphi} \times \mathbf{B} \quad (6)$$

式中,  $st(t)$ 、 $R_k$  和  $S_k$  分别为第  $k$  匝导线的电流、

横截面区域和等效横截面积,  $A_\varphi$  为  $\varphi$  方向磁矢量位,  $\sigma$  为电导率。

洛伦兹力所激发的超声波在金属材料中的传播过程可控制方程如下<sup>[26]</sup>

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} - \nabla \cdot \mathbf{T} = \mathbf{f}_L \quad (7)$$

式中,  $\rho$  为材料密度,  $\mathbf{u}$  为横波位移矢量,  $\mathbf{T}$  表示应力张量。

接收 EMAT 的开路感生电压  $V_{in}$  的控制方程如下<sup>[27]</sup>

$$\mathbf{J}_{e\varphi} = -\sigma \mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (8)$$

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \mathbf{A}_\varphi - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}_\varphi}{\partial t} = -\mathbf{J}_{e\varphi} \quad (9)$$

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \mathbf{A}_\varphi - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}_\varphi}{\partial t} + \frac{\sigma}{S_k} \frac{\partial}{\partial t} \iint_{R_k} \mathbf{A}_\varphi d\mathbf{s} = 0 \quad (10)$$

$$V_{in} = \frac{\int_{R_k} \left( \int_{l_c} -\frac{\partial \mathbf{A}_\varphi}{\partial t} d\mathbf{l} \right) d\Omega}{\int_{R_k} d\Omega} \quad (11)$$

式中,  $\mathbf{v}$  为金属试样中粒子的振动速度,  $\mathbf{J}_{e\varphi}$  为试样表层形成的源电流密度,  $l_c$  为 EMAT 接收线圈长度。

### 1.3 螺旋线圈 EMAT 设计参数及有限元模型

图 2 为螺旋线圈 EMAT 的参数示意图, 碳钢试

样半径  $w_m$ 、高度  $h_s$  分别为 60 mm、100 mm, 提高  $h_g$  为 0.5 mm, 线圈导线间距  $d_s$  为 0.05 mm, 铜背板厚度  $h_b$  为 0.2 mm。螺旋线圈和永磁体中心带孔, 用于安装通水铜管对 EMAT 探头的换能区域进行喷水冷却。

EMAT 设计参数及其数值如表 1 所示, chirp 信号中心频率为 1 MHz。以螺旋线圈 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, 分析线圈导线直径  $d_c$ 、螺旋线圈内径  $d_1$  等 9 个参数, 每个因素设置 3 个水平。

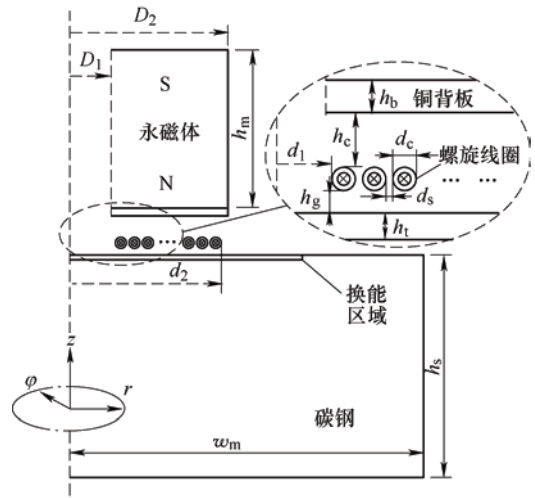


图 2 螺旋线圈 EMAT 设计参数示意图

表 1 螺旋线圈 EMAT 设计参数及其取值

水平	导线直径 $d_c$ /mm	线圈内径 $d_1$ /mm	线圈外径 $d_2$ /mm	磁铁内径 $D_1$ /mm	磁铁外径 $D_2$ /mm	磁铁高度 $h_m$ /mm	带宽 $B_w$ /MHz	脉宽 $P_w$ / $\mu$ s	线圈-铜背板距离 $h_c$ /mm
1	0.25	5	30	6	30	10	0.8	20	1.0
2	0.38	10	35	8	40	20	1.0	30	1.5
3	0.45	15	40	10	50	40	1.2	50	2.0

采用有限元商业软件, 所建立的螺旋线圈 EMAT 检测过程的二维轴对称有限元模型如图 3 所示。永磁体、碳钢试样域采用映射网格, 螺旋线圈、空气域采用自由三角形网格, 螺旋线圈域最大网格单元大小为 0.1 mm, 铜背板的下边界和碳钢试样的上边界均采用边界层网格进行细化。该有限元模型包括 97 593 个域单元和 2 418 个边界元, 计算时间步长为 0.2  $\mu$ s, 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。

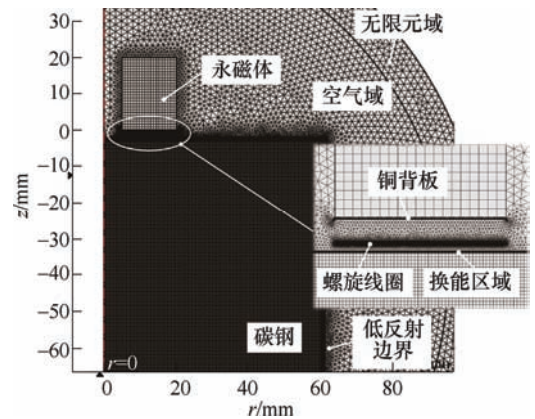


图 3 螺旋线圈 EMAT 有限元模型

表 2 有限元模型中材料电磁学参数

材料	相对磁导率	电导率/ $\times 10^9$ (S/m)	材料	相对磁导率	电导率/ $\times 10^7$ (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

图 4 为螺旋线圈 EMAT 在碳钢试样中激发的超声波传播瞬态云图。从图 4 可以看出, 螺旋线圈 EMAT 主要以激励横波为主。

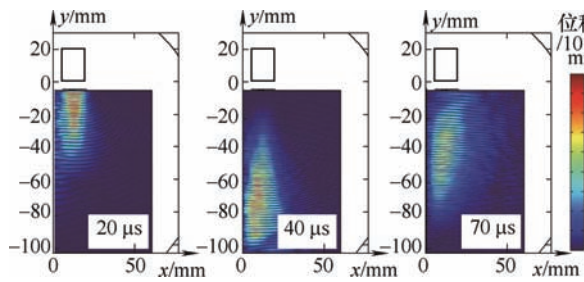


图 4 超声波在碳钢中传播瞬态云图

#### 1.4 chirp 脉冲压缩算法实现

采用脉冲 chirp 信号作为螺旋线圈 EMAT 的激励信号, 函数如下<sup>[3,13]</sup>

$$st(t) = \begin{cases} \sin\left(2\pi\left(C_f - \frac{B_w}{2} + \frac{B_w}{2P_w}t\right)t\right)f_g(t) & 0 \leq t \leq P_w \\ 0 & t \geq P_w \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $C_f$ 、 $B_w$  和  $P_w$  分别为 chirp 信号的中心频率、带宽和脉宽。

$f_g(t)$  为汉宁窗函数, 用于降低脉冲压缩后波形的旁瓣电平, 以提高主瓣分辨力, 函数如下<sup>[3]</sup>

$$f_g(t) = \begin{cases} \frac{1}{2}\left(1 - \cos\left(2\pi C_f \frac{t}{P_w C_f}\right)\right) & 0 \leq t \leq P_w \\ 0 & t \geq P_w \end{cases} \quad (13)$$

图 5a 是  $C_f=1$  MHz,  $B_w=1.2$  MHz,  $P_w=50$  μs 的 chirp 信号。图 5b 为 EMAT 有限元模型计算得到的开路感生电压信号, 可以作为超声波的 A 扫信号。图 5c、5d 分别为脉冲压缩后的信号和横波一次底波经脉冲压缩后的主瓣上包络线。对图 5d 的主瓣取 -6 dB 对应的时间差计算得到脉宽为 3.08 μs。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。文中所指的主瓣宽度、主瓣峰值为脉冲压缩后时域波形的主峰时宽、主峰幅值。

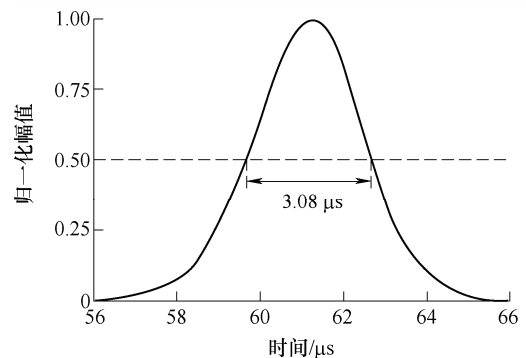
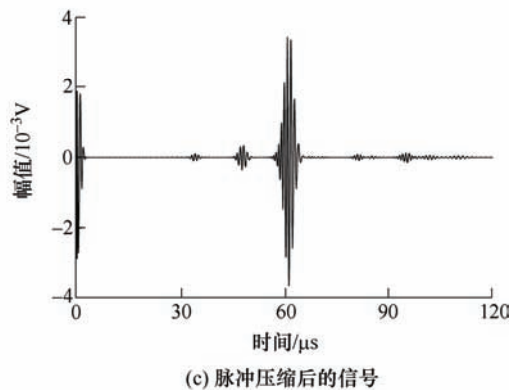
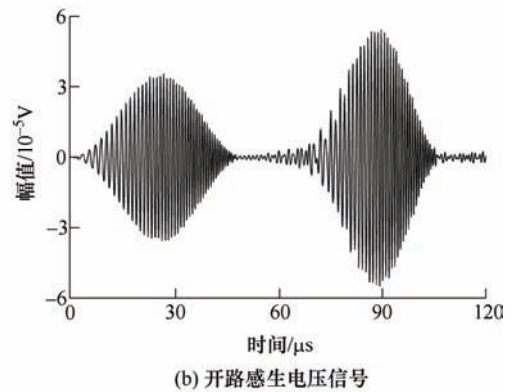
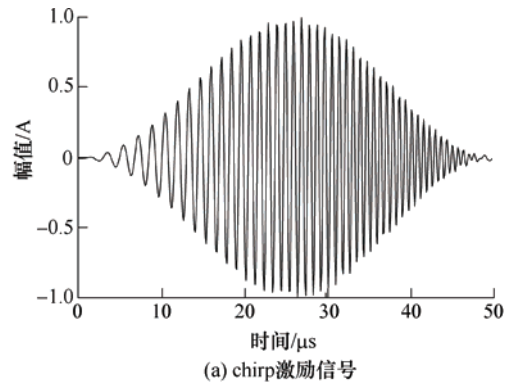


图 5 螺旋线圈 EMAT 开路感生电压信号经脉冲压缩处理前后对比



## 2 螺旋线圈 EMAT 优化设计

采用正交表 L27(3<sup>9</sup>) 进行正交试验, 对应的仿真结果如表 3 所示。螺旋线圈导线直径  $d_c$ 、线圈内径  $d_1$  等 9 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 和表 4 所示。由图 6 可知: 导线直径对主瓣峰值的影响最大, 导线直径越

小, 主瓣峰值越大; 其次为磁铁高度, 磁铁越高, 主瓣峰值随之增强; 脉宽对幅值的影响也较大, 脉宽越大, 幅值越强; 主瓣峰值随磁铁外径和线圈-铜背板距离的增大均表现为先剧增后缓增的趋势; 主瓣峰值随线圈外径的增加而增大; 但线圈内径、磁铁内径和带宽对主瓣峰值的影响较小。由表 4 可知, 9 个设计参数对主瓣峰值的影响次序为  $d_c > h_m > P_w > D_2 > d_2 > h_c > B_w > d_1 > D_1$ 。

表 3 EMAT 9 因素 3 水平的正交试验表

导线直径 $d_c/\text{mm}$	线圈内径 $d_1/\text{mm}$	线圈外径 $d_2/\text{mm}$	磁铁内径 $D_1/\text{mm}$	磁铁外径 $D_2/\text{mm}$	磁铁高度 $h_m/\text{mm}$	带宽 $B_w/\text{MHz}$	脉宽 $P_w/\mu\text{s}$	线圈-铜 背板距离 $h_c/\text{mm}$	主瓣峰值 $U_{PP}/10^{-5}\text{V}$	主瓣宽度 (-6 dB) $T/\mu\text{s}$
0.25	5	30	6	30	10	0.8	20	1.0	11.93	3.52
0.25	5	30	6	40	20	1.0	30	1.5	50.06	3.24
0.25	5	30	6	50	40	1.2	50	2.0	140.6	3.13
0.25	10	35	8	30	10	0.8	30	1.5	24.93	3.69
0.25	10	35	8	40	20	1.0	50	2.0	169.6	3.19
0.25	10	35	8	50	40	1.2	20	1.0	54.94	3.03
0.25	15	40	10	30	10	0.8	50	2.0	37.7	3.72
0.25	15	40	10	40	20	1.0	20	1.0	59.34	3.02
0.25	15	40	10	50	40	1.2	30	1.5	191.2	2.60
0.38	5	35	10	30	20	1.2	20	1.5	13.69	3.11
0.38	5	35	10	40	40	0.8	30	2.0	70.69	3.61
0.38	5	35	10	50	10	1.0	50	1.0	22.04	3.13
0.38	10	40	6	30	20	1.2	30	2.0	24.57	3.10
0.38	10	40	6	40	40	0.8	50	1.0	112.3	3.49
0.38	10	40	6	50	10	1.0	20	1.5	22.01	3.00
0.38	15	30	8	30	20	1.2	50	1.0	15.48	3.14
0.38	15	30	8	40	40	0.8	20	1.5	17.58	2.69
0.38	15	30	8	50	10	1.0	30	2.0	8.83	3.17
0.45	5	40	8	30	40	1.0	20	2.0	18.18	3.25
0.45	5	40	8	40	10	1.2	30	1.0	17.91	2.87
0.45	5	40	8	50	20	0.8	50	1.5	89.14	3.46
0.45	10	30	10	30	40	1.0	30	1.0	11.12	3.23
0.45	10	30	10	40	10	1.2	50	1.5	12.74	3.11
0.45	10	30	10	50	20	0.8	20	2.0	10.79	3.70
0.45	15	35	6	30	40	1.0	50	1.5	27.29	3.20
0.45	15	35	6	40	10	1.2	20	2.0	9.64	3.01
0.45	15	35	6	50	20	0.8	30	1.0	20.19	3.51

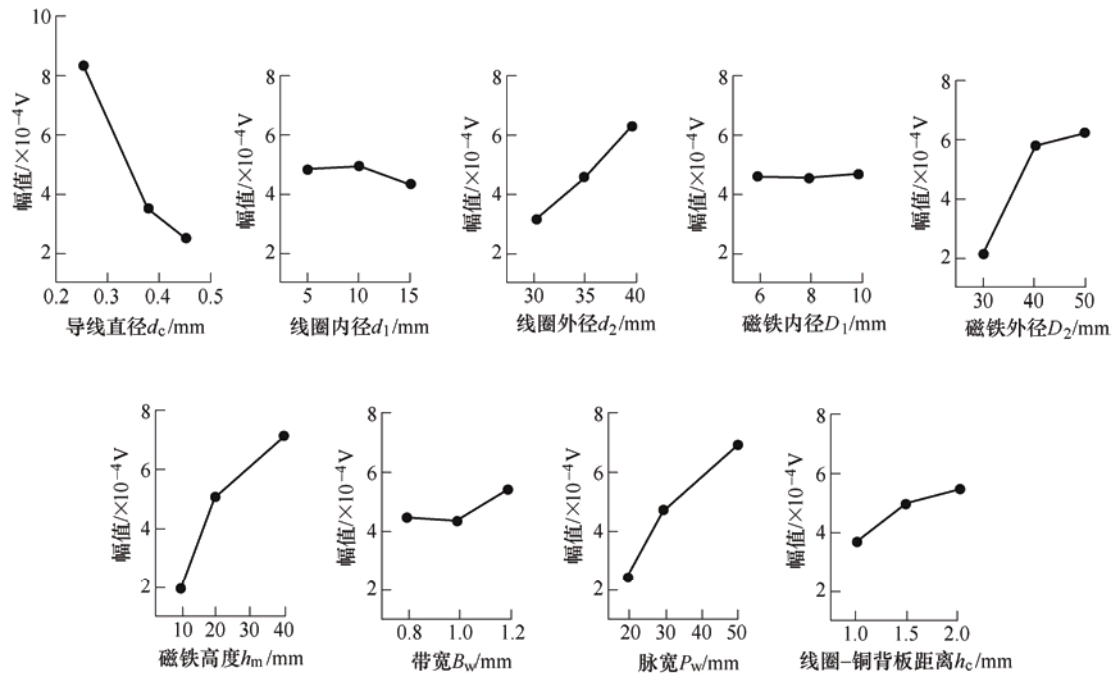


图 6 EMAT 设计参数对脉冲压缩后主瓣峰值的影响

表 4 EMAT 正交试验主瓣峰值结果分析

水平	导线直径 $d_c$ /mm	线圈内径 $d_1$ /mm	线圈外径 $d_2$ /mm	磁铁内径 $D_1$ /mm	磁铁外径 $D_2$ /mm	磁铁高度 $h_m$ /mm	带宽 $B_w$ /MHz	脉宽 $P_w$ /μs	线圈-铜背板距离 $h_c$ /mm
1	82.25	48.25	31.02	46.51	20.54	18.64	43.91	24.23	36.14
2	34.13	49.22	45.89	46.28	57.76	50.31	43.16	46.61	49.85
3	24.11	43.02	63.59	47.70	62.19	71.54	53.42	69.35	54.51
Delta	58.14	6.19	32.57	1.41	41.65	52.90	10.26	45.42	18.37
排序	1	8	5	9	4	2	7	3	6

根据图 6 和表 4, 分别选出主瓣峰值最大/最小的两组参数组合, 如表 5 所示。由于正交试验的 27 组组合中均没有此最佳和最差参数组合, 故选用上述两组参数组合分别进行数值计算。仿真结果如表 5 所示, 正交试验中 27 组主瓣峰值均小于主瓣峰值最大组合对应的幅值( $3.83 \times 10^{-3}$  V), 均大于主瓣峰值最小参数组合对应的幅值( $3.19 \times 10^{-5}$  V)。

EMAT 设计参数对主瓣宽度的影响如表 6 和

图 7 所示。由表 6 可知, 9 个设计参数对主瓣宽度的影响次序为  $B_w > h_c > D_2 > d_1 > P_w = h_m > d_2 > d_c > D_1$ 。由图 7 可知, 主瓣宽度随着导线直径、磁铁内径、磁铁外径和线圈-铜背板距离的增大均表现为先减后增的趋势。主瓣宽度随着线圈内径、线圈外径和磁铁高度的增大均表现为先增后减的趋势。主瓣宽度随着 chirp 带宽的增加而减小, 随着 chirp 脉宽的增加而增大。

表 5 EMAT 正交试验主瓣峰值最大/最小参数组合

主瓣峰值	导线直径 $d_c$ /mm	线圈内径 $d_1$ /mm	线圈外径 $d_2$ /mm	磁铁内径 $D_1$ /mm	磁铁外径 $D_2$ /mm	磁铁高度 $h_m$ /mm	带宽 $B_w$ /MHz	脉宽 $P_w$ /μs	线圈-铜背板距离 $h_c$ /mm	主瓣峰值 $U_{PP}/10^{-5}$ V
最大	0.25	10	40	10	50	40	1.2	50	2.0	383
最小	0.45	15	30	8	30	10	1.0	20	1.0	3.19

表 6 EMAT 正交试验主瓣宽度结果分析

水平	导线线径 $d_c/\text{mm}$	线圈内径 $d_1/\text{mm}$	线圈外径 $d_2/\text{mm}$	磁铁内径 $D_1/\text{mm}$	磁铁外径 $D_2/\text{mm}$	磁铁高度 $h_m/\text{mm}$	带宽 $B_w/\text{MHz}$	脉宽 $P_w/\mu\text{s}$	线圈-铜背 板距离 $h_c/\text{mm}$
1	3.24	3.26	3.21	3.24	3.33	3.25	3.49	3.15	3.22
2	3.16	3.28	3.28	3.17	3.14	3.27	3.16	3.22	3.12
3	3.26	3.12	3.17	3.25	3.19	3.14	3.01	3.29	3.32
Delta	0.10	0.16	0.11	0.08	0.19	0.14	0.48	0.14	0.20
排序	8	4	7	9	3	5	1	5	2

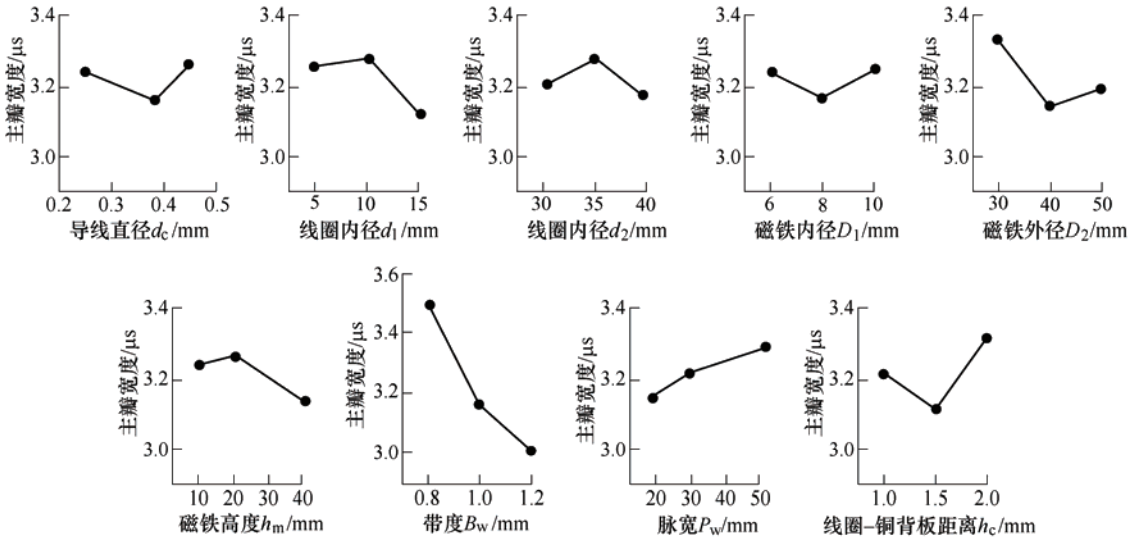


图 7 EMAT 设计参数对脉冲压缩后主瓣宽度的影响

选取脉冲压缩后主瓣宽度的最大/最小参数组合进行计算，得到的结果如表 7 所示。由表 7 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 3.73  $\mu\text{s}$ ，主瓣宽度最小参数组合对应的波宽为 2.76  $\mu\text{s}$ ，两者相差 0.97  $\mu\text{s}$ 。

表 7 EMAT 正交试验主瓣宽度最大/最小参数组合

主瓣宽度	导线直径 $d_c/\text{mm}$	线圈内径 $d_1/\text{mm}$	线圈外径 $d_2/\text{mm}$	磁铁内径 $D_1/\text{mm}$	磁铁外径 $D_2/\text{mm}$	磁铁高度 $h_m/\text{mm}$	带宽 $B_w/\text{MHz}$	脉宽 $P_w/\mu\text{s}$	线圈-铜背 板距离 $h_c/\text{mm}$	主瓣宽度 (-6 dB) $T/\mu\text{s}$
最小	0.38	15	40	8	40	40	1.2	20	1.5	2.76
最大	0.45	10	35	10	30	20	0.8	50	2.0	3.73

3 试验验证

3.1 试验系统

为了验证有限元计算的准确性，所搭建的螺旋线圈 EMAT 试验系统框图如图 8 所示。由信号发生器 AFG2021 产生 1 MHz 的单一频率正弦脉冲串或中心频率为 1 MHz 且带宽、脉宽不同的脉冲 chirp 信号，经过 RITEC GA-2500A 功率放大器进行功率放大。激励阻抗匹配器用以实现功率放大器和激励 EMAT 线圈等效阻抗之间的共轭匹配。接收到的微弱超声波信号经过无源滤波器和前置放大器后，由数据采集卡传送至计算机，通过 LABVIEW 软件界面实现超声回波信号的显示和存储。采用单个螺旋

线圈 EMAT 探头配合双工机使用，可以实现对 160 mm×宽 160 mm×高 100 mm 的中碳钢锻件的脉冲反射式检测。

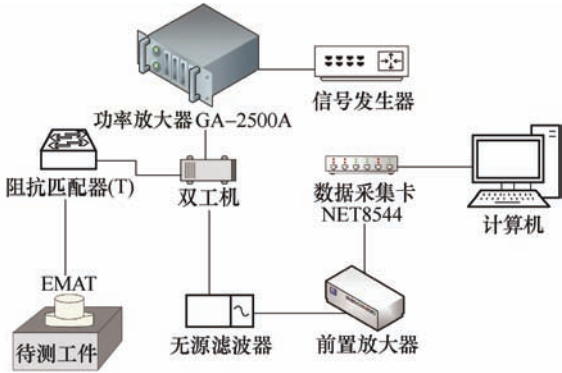


图 8 螺旋线圈 EMAT 试验系统框图



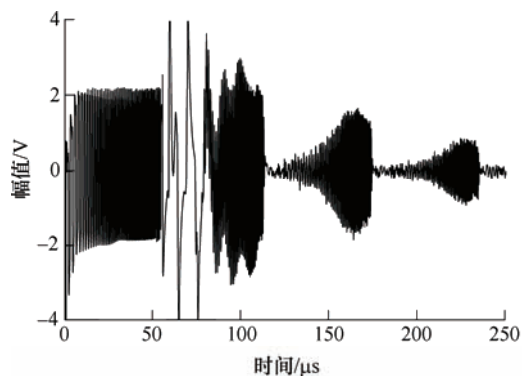
### 3.2 螺旋线圈 EMAT 参数组合试验验证

采用表 5 和表 7 给出的四组参数组合, 制作 EMAT 探头。四组 EMAT 探头对应的阻抗匹配参数、硬件滤波、前置放大器增益参数等如表 8 所示, 且超声回波信号不进行同步平均降噪。

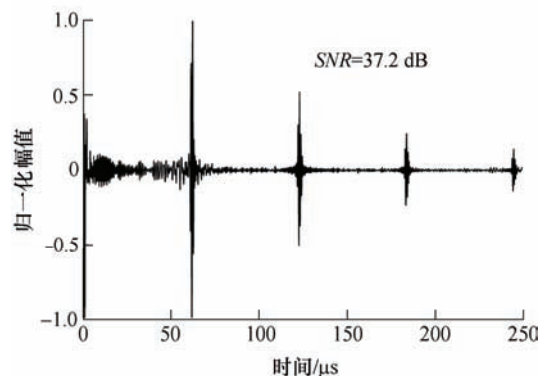
表 8 螺旋线圈 EMAT 验证试验参数设置

组合	阻抗匹配参数	硬件/软件滤波参数/MHz	前置放大器增益/dB
主瓣峰值最大	0.3 $\mu$ H+1 nF	0.1~3	46
主瓣峰值最小	2.8 $\mu$ H+10 nF	0.1~3	46
主瓣宽度最大	0.3 $\mu$ H+3 nF	0.1~3	56
主瓣宽度最小	0.3 $\mu$ H+5.2 nF	0.1~3	56

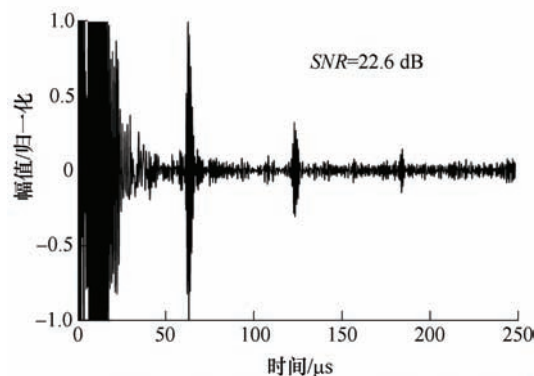
图 9a 为主瓣峰值最大参数组合 EMAT 对应的原始超声 A 扫信号, 经过脉冲压缩且对一次底波进行归一化处理后的信号如图 9b 所示。图 9c 为经过脉冲压缩后的主瓣峰值最小参数组合对应的归一化处理后的信号。由图 9b、9c 可知, 取脉冲压缩后的横波一次底波进行比较, 与主瓣峰值最小参数组合的回波信噪比相比, 主瓣峰值最大参数组合对应的信噪比提高了 14.6 dB。



(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



(b) 经脉冲压缩后主瓣峰值最大参数组合对应的信号



(c) 经脉冲压缩后主瓣峰值最小参数组合对应的信号

图 9 主瓣峰值最大\最小参数组合 EMAT 对应的试验信号对比

分别取主瓣宽度最小/大参数组合 EMAT 对应横波一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: 与主瓣宽度最大参数组合 EMAT 对应的横波一次底波主瓣宽度 2.81  $\mu$ s 相比, 主瓣宽度最小参数组合对应的主瓣宽度可以减小 40.2%。

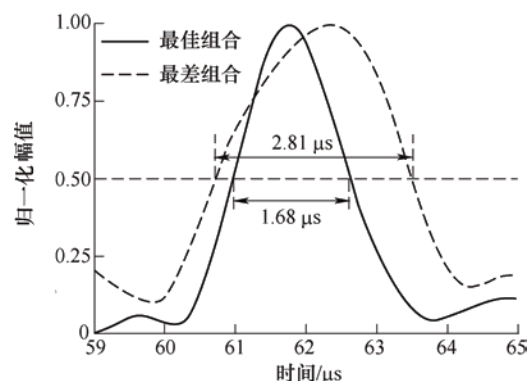


图 10 主瓣宽度最大\最小参数组合 EMAT 对应的试验横波经脉冲压缩后波包对比

## 4 高温锻件 EMAT 检测试验结果分析

### 4.1 高温螺旋线圈 EMAT 探头

如图 11 所示, 探头外壳采用黄铜, 探头底部放置刚玉片, 刚玉片上方为单层螺旋线圈(中心带圆孔), 线圈上方安装有中心带通孔的圆柱型钕铁硼永磁铁。探头外壳两侧分别设置了进/出水口, 用于对探头内部线圈和永磁铁冷却。探头底部中心可喷水, 能对换能区域局部冷却。高温锻件与第 3.2 节中所采用的常温锻件为同一检测对象。高温 EMAT 探头的设计参数为表 5 中给出的主瓣峰值

最大参数组合。分别采用单一频率 1 MHz 正弦脉冲信号和中心频率为 1 MHz 的 chirp 扫频信号作为螺旋线圈 EMAT 的激励信号进行高温试验，且超声回波信号不进行同步平均降噪。其中，探头底座与高温锻件的距离为 2 mm，螺旋线圈距工件表面的距离为 3 mm。

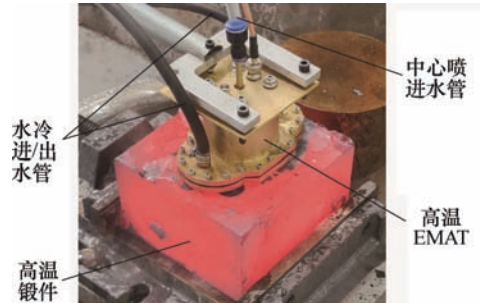


图 11 高温 100 mm 厚锻件 EMAT 检测实物图

#### 4.2 高温 EMAT 测厚结果分析

720 °C 高温锻件 EMAT 检测时对应的无同步平均的原始超声回波如图 12 所示。图 12a 为单一频率正弦脉冲串激励时的 A 扫信号，图 12b 为 chirp 信号激励时对应的经过脉冲压缩且对一次底波进行归一化后的信号。由图 12a、12b 可知，与单一频率正弦脉冲串激励方式相比，采用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 5.4 dB，主瓣宽度减小了 58.8%。

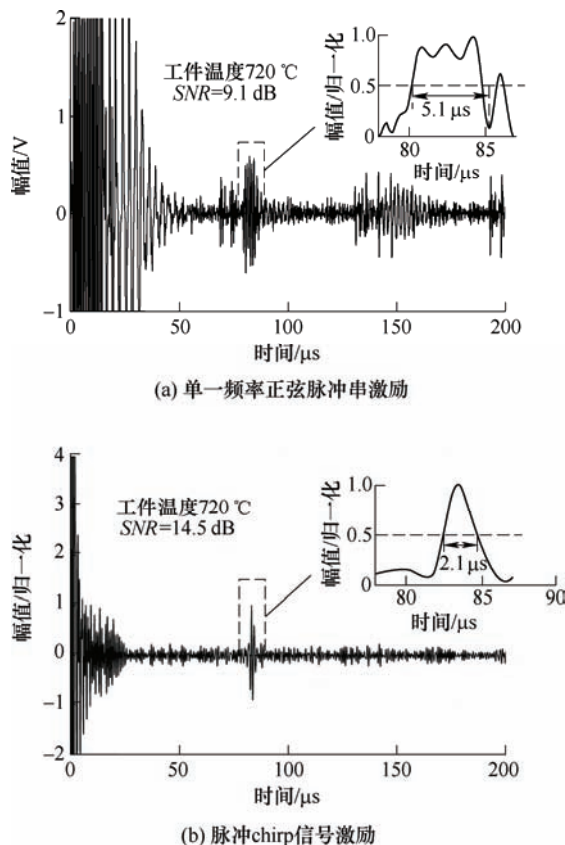


图 12 720 °C 高温锻件 EMAT 检测试验结果对比

650 °C 至 720 °C 时高温锻件对应的试验结果如表 9 所示。由表 9 可知，当锻件的温度范围为 650 °C 至 720 °C，与单一频率脉冲串激励方式相比，采用脉冲压缩技术，信噪比至少提高了 5.4 dB，波包宽度至少减少了 41.2%。当锻件温度为 650 °C 时，采用脉冲压缩技术可以将信噪比提高 10.5 dB。

表 9 650~720 °C 高温锻件试验结果分析

温度 /°C	信噪比/dB			波包宽度/μs		
	单一频率	Chirp 信号	提高幅度	单一频率	Chirp 信号	减小幅度(%)
650	10.2	20.7	10.5	5.1	2.5	50.9
690	9.9	15.7	5.8	5.1	3.0	41.2
720	9.1	14.5	5.4	5.1	2.1	58.8

## 5 结论

(1) EMAT 设计参数和 chirp 激励参数对脉冲压缩后的主瓣峰值和主瓣宽度起到重要作用。合适的 EMAT 参数组合有利于提高信噪比和分辨率，而且有必要根据实际检测中对信噪比和空间分辨率不同的要求，选择不同的 EMAT 参数组合。

(2) 在无同步平均且距离为 3 mm 时的高温检测条件下，基于脉冲压缩技术的 EMAT 检测信号的信噪比和空间分辨率更高。720 °C 时，其信噪比较 1 MHz 单一频率正弦脉冲串激励方式提高至少 5.4 dB，主瓣宽度减小了 58.8%。

(3) 将脉冲压缩技术应用于高温铸锻件的在线、快速检测具有重要的工程应用价值。理由如下：温度越高，锻件内部组织晶粒越大，材料吸收衰减现象越明显，检测回波信号逐步减小，采用脉冲压缩技术可以在不提高激励功率的条件下提高信噪比；脉冲压缩技术可以减小同步平均次数，从而减少 EMAT 探头的持续近距离检测时间，提高检测效率；采用脉冲压缩技术可以提高空间分辨率，通过增加 chirp 信号的脉宽，可以增强超声波激励能量，进一步提高信噪比。

## 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 (2018CCDC), June 9-11, 2018, Shenyang: IEEE, 2018: 913-918.
- [3] 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 Wenze, CHEN Weiwei, CHEN Yao, 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.
- [4] ROMMELER A, FURRER R, SENNHAUSER U, et al. Air coupled ultrasonic defect detection in polymer pipes[J]. NDT & E International, 2019, 102: 244-253.
- [5] 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 Zhenggan, MA Baoquan, SUN Zhiming, 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.
- [6] 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 Wei, WANG Haitao, TIAN Guiyun, 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.
- [7] 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 Guangkai, QU Daoming, ZHOU Zhenggan. Robot assistant laser ultrasonic test system and its parameter matching method[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(8): 1961-1969.
- [8] 何存富, 邓鹏, 吕炎, 等. 一种高信噪比电磁声表面波传感器及在厚壁管道检测中的应用[J]. 机械工程学报, 2017, 53(4): 59-66.
- HE Cunfu, DENG Peng, LÜ Yan, et al. A new surface wave EMAT with high SNR and the application for defect detection in thick-walled pipes[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(4): 59-66.
- [9] 黄松岭, 王哲, 王琄, 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 Songling, WANG Zhe, WANG Shen, 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.
- [10] 蔡瑞, 李勇, 刘天浩, 等. 金属小径管损伤电磁超声导波检测的高效混合仿真方法及导波换能器可行性研究[J]. 机械工程学报, 2020, 56(10): 34-41.
- CAI Rui, LI Yong, LIU Tianhao, et al. A hybrid method for efficient simulation and feasibility study of guided-wave electromagnetic acoustic transducers for inspection of metallic tubes with small diameters[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(10): 34-41.
- [11] 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 Yang, ZHOU Jinjie, ZHANG Zongjian, et al. Research on frequency adaptive optimization method of electromagnetic acoustic testing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(14): 11-18.
- [12] 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.
- [13] COLE P T. The generation and reception of ultrasonic surface waves in mild steel at high temperatures[J]. Ultrasonics, 1978, 16(4): 151-155.
- [14] BURROWS S E, FAN Y, DIXON S. High temperature thickness measurements of stainless steel and low carbon steel using electromagnetic acoustic transducers[J]. NDT & E International, 2014, 68: 73-77.
- [15] 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.
- [16] LUNN N, DIXON S, POTTER M D G. High temperature EMAT design for scanning or fixed point operation on magnetite coated steel[J]. NDT & E International, 2017, 89: 74-80.
- [17] 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.

- [18] 邱佳明. 用于高温管道测厚的脉冲电磁铁电磁超声换能器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- QIU Jiaming. Design of pulsed electromagnet EMAT using for high temperature pipeline thickness gauging[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018.
- [19] 刘会彬, 郑阳, 王锋淮, 等. 温度对奥氏体不锈钢材料电磁超声检测的影响研究[J]. 测试技术学报, 2018, 32(4): 329-334.
- LIU Huibin, ZHENG Yang, WANG Fenghuai, et al. Effect of temperature on electromagnetic acoustic transducer inspecting of austenitic stainless steel[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2018, 32(4): 329-334.
- [20] WU Yunxin, HAN Lei, GONG Hai, et al. A modified model for simulating the effect of temperature on ultrasonic attenuation in 7050 aluminum alloy[J]. AIP Advances, 2018, 8(8): 0850031-08500314.
- [21] RAO N, MEHRA S. Medical ultrasound imaging using pulse compression[J]. Electronics Letters, 1993, 29(8): 649-951.
- [22] 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.
- [23] 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 Zhenggan, ZHANG Hongyu, WEI Dong. Applications of pulse compression in ultrasonic transducers excitation and receiving[J]. China Mechanical Engineering, 2010, 21(17): 115-119.
- [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 Wenzhe, WU Yunxin, GONG Hai, 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]. London: Cambridge University Press, 2009.
- [27] WANG Shujuan, LI Zhichao, LI Pengzhan, 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: 陈巍巍, 男, 1995 年出生。主要研究方向为电磁超声检测。

E-mail: 2843533124@qq.com

石文泽, 男, 1986 年出生, 博士, 讲师, 硕士研究生导师。主要研究方向为超声检测新技术。

E-mail: 70658@nchu.edu.cn

卢超(通信作者), 男, 1971 年出生, 博士, 教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为声学检测技术及检测信号处理等。

E-mail: luchaoniat@163.com