第 44 卷　第 8 期
2023 年 8 月

仪　器　仪　表　学　报
Chinese Journal of Scientific Instrument

Vol. 44 No. 8
Aug. 2023

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.2311264

基于编码压缩的纤维缠绕气瓶贴附式电磁超声检测方法研究*

孟凌霄[1],石文泽[1],卢　超[1],黄　良[2],凌　建[3]

(1. 南昌航空大学无损检测教育部重点实验室　南昌　330063; 2. 中国特种设备检测研究院国家市场监管重点实验室(氢能储运装备安全)　北京　100029; 3. 中材科技(成都)有限公司　成都　611435)

摘　要:针对电磁超声换能器(EMAT)在纤维缠绕储氢气瓶在线监测中回波信噪比低、洛伦兹力机制失效等问题,提出了基于编码压缩的贴附式电磁超声水平剪切(SH)导波检测方法,通过有限元建模分析了 Barker 编码序列位数和码元载波周期、chirp 信号脉宽和带宽、组合 Barker 码的组合方式对脉冲压缩信号的信噪比和分辨率的影响,并进行了实验验证,最后开展了纤维缠绕储氢气瓶中长 20 mm、宽 0.5 mm、深 2 mm 裂纹检测实验。结果表明,采用金属贴膜方式能有效解决 EMAT 在非金属材料中难以检测的难题;增加 Barker 码的序列位数和载波周期、增大 chirp 脉宽以及减小 chirp 带宽、增加组合 Barker 码的序列长度均可以提高脉压信号信噪比;经优化设计后,相较于传统 Tone-burst 激励方式,脉冲压缩技术可以将缺陷波信噪比至少提高 20.4 dB,在不同编码算法中,chirp 信号激励下的信噪比最高,达到了 23.9 dB,采用 3×13 位组合 Barker 码时,脉压信号的主瓣宽度为 28.8 μs,分辨率最高,但信噪比较低。

关键词: 纤维缠绕气瓶;EMAT;SH 波;脉冲压缩;优化设计

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 the attached electromagnetic acoustic detection method of fiber-wrapped gas cylinder based on coded compression

Meng Lingxiao[1], Shi Wenze[1], Lu Chao[1], Huang Liang[2], Ling Jian[3]

(*1. Key Laboratory of Nondestructive Testing, Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China; 2. Key Laboratory of Safety of Hydrogen Energy Storage and Transportation Equipment for State Market Regulation, China Special Equipment Inspection & Research Institute, Beijing 100029, China; 3. Sinoma Science & Technology (Chengdu) Co., Ltd., Chengdu 611435, China*)

Abstract: To address the problems of low echo signal-to-noise ratio (SNR) and Lorentz force failure in the online monitoring of fiber-wrapped gas cylinder by electromagnetic acoustic transducer (EMAT), an attached EMAT shear horizontal (SH) guided wave detection method based on coding compression is proposed. Through finite element modeling, the effects of Barker code sequence bits and subpulse carrier period, chirp signal pulse width and band width, combined Barker code combination on pulse compression signal SNR and resolution are analyzed and evaluated experimentally. Finally, the 20 mm×0.5 mm×2 mm crack defect of the fiber-wrapped gas cylinder is detected. The results show that the metal attached method can effectively solve the problem of EMAT failure in non-metallic materials. Increasing the sequence bit and carrier period of Barker code, increasing the chirp pulse width, decreasing the chirp band width, and increasing the sequence length of combined Barker code can improve the SNR of pulse compression signals. After optimization design, compared with the traditional Tone-burst excitation method, the SNR of defect echo can be improved by at least 20.4 dB by pulse compression technology. Among different coding algorithms, chirp signal excitation has the highest SNR, reaching 23.9 dB. When 3×13-bit combination Barker code is adopted, the main lobe width of pulse compression signal is 28.8 μs. The resolution is highest, but the SNR is low.

Keywords: fiber-wrapped gas cylinder; EMAT; SH wave; pulse compression; optimized design

收稿日期:2023-04-04　　Received Date: 2023-04-04

*基金项目:国家市场监督管理总局科技计划项目(2021MK168)、中国特检院内部项目(2021 青年 10)、江西省重点研发计划(20212BBE51006, 20223BBE51034)项目资助

0 引　　言

能源危机和环境问题是当前全球面临的两个重要挑战。氢能作为一种可广泛获取、无碳清洁且具备多样应用场景的次生能源,被普遍看作是 21 世纪最有前景的清洁能源之一[1]。根据 2017 年国际氢能源委员会发布的《氢能源未来发展趋势调查报告》,到 2050 年,预计对氢能源的需求量将增加至现在的 10 倍,全球燃料电池乘用车的生产规模将在 2030 年达到 1 000~1 500 万辆。但由于氢气在常温常压下密度极低,且汽车空间有限,需要特定储氢技术才能满足车辆的日常使用需求[2]。传统钢制氢气瓶耐压较小、重量较大、储氢密度一般且造价昂贵、运输成本高,正在被市场淘汰。纤维缠绕高压氢气瓶具备多种优势,包括高承压能力、高储氢密度、强耐腐蚀性、低成本和低能耗等。可以利用减压阀来调节氢气的释放速率,同时具备迅速充、放气的特点。此外,其适用的工作温度范围较广,可在常温至零下几十度的环境下正常运行,因此被广泛用于车载储氢系统[3]。然而气瓶在使用和运输的过程中极易出现纤维划伤,由于在役气瓶的内部压力大部分由外层的纤维承担,在内压的作用下纤维划伤可能发生扩展,导致纤维断裂,严重影响使用安全,故急需一种适用于纤维缠绕气瓶的在线无损监测方法。

针对纤维缠绕气瓶的无损检测方法研究,学者多采用声发射、应变片、压电超声导波等方法。声发射能有效实现气瓶纤维损伤的定位,但是难以判断损伤大小。应变片技术主要通过测量表面的应变变化来获取内部的应变状态。与应变测试技术相比,超声检测能够利用超声波在复合材料中的声速、衰减和幅值等信息,可以采用多个参数表征复合材料的损伤状态。采用水平极化的压电晶片或磁致伸缩材料激发水平剪切(shear horizontal, SH)导波[4],可以用于纤维缠绕气瓶在线监测,但仍存在如下问题:由于气瓶复合材料与上述探头的弹性模量不一致,在多次充气和放气过程中,探头极易与气瓶表面脱开,难以实现永久性监测。另外,探头与气瓶表面贴合困难,表面凹凸不平造成声能传输损失大[5-6]。

电磁超声换能器(electromagnetic acoustic transducer, EMAT)具有无需耦合剂、受试件表面复杂度的影响小、改变线圈和永磁体的配置形式即可实现多模式超声波的激励等优点,已经被广泛应用于工业无损检测领域[7-8]。徐立军等[9]针对管道剩余厚度的精确检测,设计了基于电磁超声横波的非接触式检测系统,厚度误差小于 0.2%。袁阿琳等[10]设计制作了 SH 导波 EMAT,对铝薄板试样中的直裂纹进行了 B 扫成像检测,成功地检出了 3 mm 厚的铝薄板试样中长 10 mm、宽 1 mm、深 2 mm 的人工直裂纹。周恺等[11]设计了 SH 导波 EMAT,精确提取了导波的飞行时间并对缺陷进行定位分析。通过实验计算得到的缺陷与端面的距离和实际距离的相对误差为 2.74% 和 2.24%。吴锐等[12]针对航空不锈钢薄板的裂纹检测,设计并优化了周期性永磁体电磁超声换能器(periodic permanent magnet electromagnetic acoustic transducer, PPM EMAT),结果表明,当 EMAT 的永磁体组合为 6 对、25 mm 长、7 mm 宽时,能够检出长 10 mm、宽 1 mm、垂直深度 0.5 mm 的裂纹缺陷。张金等[13]采用电磁超声 SH 表面波检测方法检测大口径火炮身管药室内膛裂纹,结果表明,当使用 12 对长度为 20 mm 的永磁体制成的 EMAT 时,可以检出长 10 mm、宽 1 mm、深 2 mm 的交叉裂纹,信噪比达 19.38 dB。时亚等[14]结合有限元模型与正交试验法,对多根分裂曲折线圈 EMAT 进行参数优化,优化后的表面波 EMAT 信号幅值提高了 50.8%,成功获取了长 10 mm 的钢轨踏面裂纹信号。刘增华等[15]基于磁致伸缩机制研制了全向性 SH_0 模态传感器,并布置成分布式传感器阵列,结合椭圆成像算法成功对铝板中不同直径的模拟缺陷进行了成像。王晓煜等[16]对传统 EMAT 采用径向开狭缝的优化方式,利用优化后的结构对铝板进行双面激励,得到的超声波位移幅值增加了 68.4%,径向开狭缝的优化方式可有效增强超声波幅值,并且得到单一模态 Lamb 波。

然而,由于 EMAT 换能效率低,超声回波信号信噪比差,这限制了 EMAT 在无损检测领域的广泛应用[16]。气瓶表面的纤维层凹凸不平和气瓶瓶身曲率半径相对较小,导致 EMAT 线圈与金属贴膜存在 0.1 mm 左右的提离,考虑到碳纤维缠绕复合材料中超声波衰减系数较大,因此较小的提离有利于提高 EMAT 检测回波信噪比。鉴于此,希尔伯特黄变换、同步挤压小波变换、脉冲压缩技术等先进信号处理方法能够有效地增强 EMAT 检测回波信噪比。胡松涛等[17]采用同步挤压小波变换对钢轨踏面裂纹 EMAT 检测回波进行去噪和重建,并实现了 B 扫快速成像,处理后的超声回波信噪比至少提高了 8.83 dB。余丽婷等[18]以检测到的钢轨踏面裂纹回波为研究对象,比较了希尔伯特黄方法处理 tone-burst 激励对应的超声回波信号和先同步挤压后脉冲压缩方法对应的降噪能力和超声成像效果。结果表明,希尔伯特黄变换在处理无同步平均的原始超声回波时,由于回波信噪比低,经验模态分解失效。在信号的经验模态分解中,希尔伯特黄变换通常面临模态混叠、包络拟合、端点效应和筛选停止准则等问题[19];当将同步挤压小波变换应用于 EMAT 检测时,滤波后的

信号强度略有损失,极易漏掉幅值较小的缺陷波。脉冲压缩能够在不提高设备发射峰值功率及采用较少的同步平均次数的条件下,获得窄脉冲、高峰值的脉冲信号。将脉冲压缩技术引入 EMAT,可以同时提高回波信噪比和时域分辨率[20-22]。Iizuka 等[23]采用 chirp 作为激励信号的高精度 EMAT 检测系统对高温连铸坯进行在线检测,提离距离可达 5 mm。Han 等[24]采用 Barker 码作为激励信号,利用双探头超声衍射检测方法,能够准确地识别内部斜裂纹的长度和方向,结果表明,仿真的方向误差约为 3.6°,实验结果最大误差为 4.31°。黄祺凯等[25]以 5.6 mm 厚的钢板为检测对象,研究了 Barker 码序列长度以及码元长度对 EMAT 脉压信号的影响。结果表明,与传统 Tone-burst 激励方式相比,采用优化后的 Barker 码激励得到的脉压信号 SNR 增加了 9.69 dB,能够检出 10 mm 长、0.5 mm 深的小裂纹,缺陷波 SNR 为 23.47 dB。

针对 EMAT 检测回波信噪比低、洛伦兹力机制在纤维缠绕复合材料中失效等问题,建立了基于编码压缩的贴附式电磁超声检测有限元模型,研究了 Barker 码序列长度和载波周期、chirp 信号脉宽和带宽、组合 Barker 码的组合方式对检测回波信噪比和分辨率的影响,并进行实验验证。最后开展了含裂纹的纤维缠绕气瓶的贴附式电磁超声检测实验。

1 基于编码压缩的贴附式电磁超声检测机理

1.1 SH 导波贴附式 EMAT 换能机理

采用 PPM-EMAT 激发 SH 导波,与 Lamb 波相比,SH 导波的面外振动相对较弱,受纤维缠绕气瓶表面形貌和附着的物影响较小,能抑制噪声和杂散信号,且具有较好的穿透能力[4]。贴附式 SH 波 EMAT 配置形式如图 1 所示,基于洛伦兹力机制的贴附式 PPM-EMAT 换能机理示意图如图 2 所示。当高频脉冲电流通过 EMAT 线圈时,金属薄膜的表面会产生频率相同、方向相反的感应电涡流 J_e。J_e 在静态偏置磁场 B_s 作用下,产生洛伦兹力 f_L,并将力耦合至与金属薄膜紧密粘贴的纤维缠绕复合材料试件中,带动被检试件的表面质点振动,在长度方向激发 SH 导波。当超声波传播至 EMAT 线圈下方时,试样表面粒子会发生高频振动,在偏置磁场的作用下,粒子振动切割磁感线在空气中形成动态电磁场,并在线圈中产生开路感生电压。

1.2 脉冲压缩及旁瓣抑制过程

脉冲压缩过程可分为时域法和频域法,时域脉冲压缩过程如式(1)所示[26]。

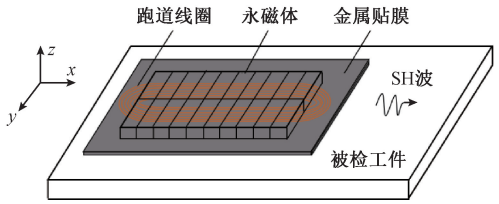


图 1 贴附式 PPM EMAT 的结构

Fig. 1 Structure of attached PPM EMAT

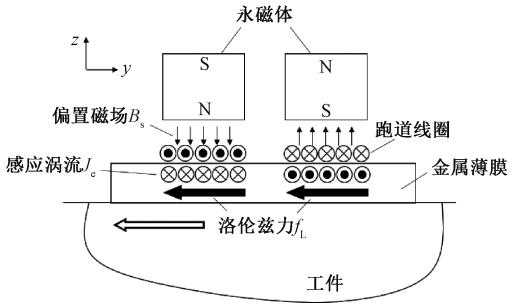


图 2 基于洛伦兹力的贴附式 PPM-EMAT 换能机理

Fig. 2 Attached PPM-EMAT energy exchange principle based on Lorentz force

$$y(n)=s(n)*h(n)=\sum_{i=0}^{N-1}s(i)h(n-i)=\sum_{i=0}^{N-1}h(i)s(n-i) \tag{1}$$

式中:“ * ”为卷积运算法,$y(n)$、$s(n)$、$h(n)$ 分别为匹配滤波器输出序列、接收信号序列以及匹配滤波器脉冲响应序列,N 为采样点数。

1) Chirp 信号

为模拟 EMAT 检测系统的频响特性,引入 Hanning 函数 $f_g(t)$,即 chirp 经加窗函数处理后作为 EMAT 的激励信号,函数表达式[27-28]如式(2)所示。

$$st(t)=\begin{cases}\sin\left(2\pi\left(f_c-\dfrac{B_w}{2}+\dfrac{\mu t}{2}\right)t\right)f_g(t), & 0\leqslant t\leqslant P_w\\ 0, & t>P_w\end{cases} \tag{2}$$

式中:f_c 为信号中心频率,P_w、B_w 分别为的 chirp 信号脉宽和带宽,μ 为频率变化斜率。$f_g(t)$ 表达式[28]如式(3)所示。

$$f_g(t)=\begin{cases}0.5\left(1-\cos\left(2\pi f_c\dfrac{t}{P_w f_c}\right)\right), & 0\leqslant t\ll P_w\\ 0, & t>P_w\end{cases} \tag{3}$$

2) Barker 码及组合 Barker 码信号

Barker 码是单次发射的二相码,是将正弦脉冲串作为 Barker 码序列的码元,目前能够找到的 Barker 码序列

长度有 7 种,最长序列长度为 13,序列为{1,1,1,1,1,-1,-1,1,1,-1,1,-1,1},Barker 码激励信号 $u[m]$ 和码元序列 $v[s]$ 可以表示为[29]:

$$u[m] = \sum_{k=0}^{N-1} C_k v[m - kM], m = 0,1,2,\cdots,LM - 2, NM - 1 \tag{4}$$

$$v[s] = \begin{cases} f\left(\dfrac{sT_c}{M-1}\right), & s = 0,1,2,\cdots,m-2,m-1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \tag{5}$$

式中:L 为 Barker 码码长,M 为子脉冲时间宽度,T_c 为码元持续时间,$C_k = \pm 1$ 为 Barker 码编码序列。

组合 Barker 码即以一种 Barker 码作为另外一种 Barker 码的码元序列构成,图 3 为以 3 位 Barker 码作为 13 位 Barker 码的码元的组合 Barker 码序列。图 3 中,T' 为 3 位 Barker 码的码元宽度,T''为 13 位 Barker 码的码元宽度。

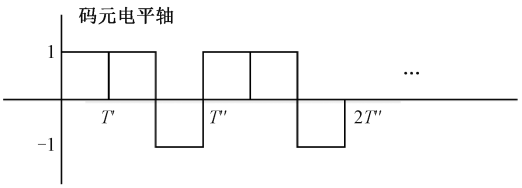


图 3　组合 Barker 码序列示意图

Fig. 3　Diagram of the combined Barker code sequence

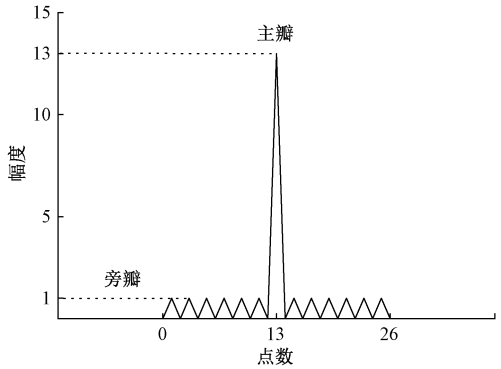
3) 脉压信号旁瓣抑制算法

然而,经过匹配滤波器得到的脉压信号并不是具有极高分辨率的单一窄脉冲信号,往往在主瓣周围存在多个旁瓣,其原因为匹配滤波器在压缩脉冲压缩信号宽度外也会产生响应,从而产生距离旁瓣。当存在多个检测目标时,强目标脉压信号的旁瓣很有可能淹没弱目标信号,导致小目标无法辨别,这对检测规格较小的缺陷极为不利。因此,在实际应用中必须采用加权方法抑制旁瓣,从而更好地定位和分辨不同目标[30-31]。经过旁瓣抑制后的脉压信号 $f(n)$ 表达式[32]如式(6)所示。

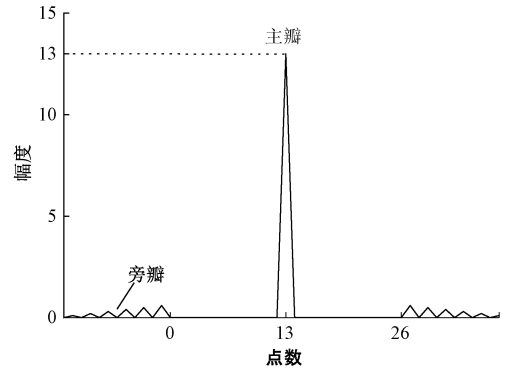
$$f(n) = s(n) * h(n)w(n) \tag{6}$$

chirp 信号的脉压信号主瓣两侧存在数个随着与主瓣距离增大而逐渐递减的旁瓣。因此,需要对输出的脉压信号采用加窗函数的处理方式以满足实际的应用需求。

对于相位编码信号来说,以 13 位 Barker 码信号为例,其脉冲压缩和旁瓣抑制结果如图 4 所示。由图 4 可知,13 位 Barker 码自相关函数中主峰两侧各有 6 个旁瓣,宽度均为 $2T_c$。输入信号经匹配滤波器和加窗处理后,可以将 $|t| < 12T_c$ 区间内的距离旁瓣降为 0。但由图 4(b)可知,这样做会导致新旁瓣在 $|t| > 12T_c$ 的位置出现[33]。通过增加延迟线,可以使旁瓣继续向两侧推移,其推移距离与延迟线数量相关[34]。



(a) 脉冲压缩后
(a) After pulse compression



(b) 旁瓣抑制后
(b) After sidelobe suppression

图 4　13 位 Barker 码脉冲压缩及旁瓣抑制

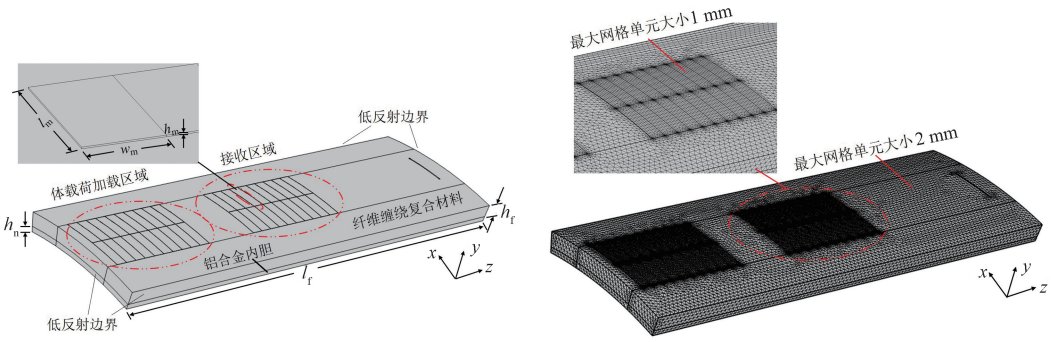
Fig. 4　13-bit Barker code pulse compression and sidelobe suppression

2　纤维缠绕气瓶贴附式电磁超声检测有限元建模

2.1　有限元模型及建模参数

纤维缠绕气瓶贴附式 EMAT 检测有限元模型如图 5 所示,设计参数取值如表 1 所示。采用管状结构的建模方式,为提高计算效率,取 20°即整个圆周的 1/18 进行计算。采用铜作为贴附材料,气瓶内胆为铝合金[31],最小设计壁厚为 5 mm,密度为 2 800 kg/m^3,横波、纵波声速分别为 3 080 m/s、6 300 m/s,内胆内、外半径分别为 186.89、191.89 mm,内、外弧长分别为 65.24、66.98 mm。复合材料由碳纤维材料和环氧树脂构成,其密度为 1 885 kg/m^3[35],厚度为 13.11 mm[36],外半径和外弧长分别为 205、71.56 mm。由于 SH 波主要沿气瓶轴向方向传播,在不同位置测得声速沿气瓶轴向基本一致,即假设

SH 导波沿气瓶轴向传播为各向同性,因此忽略复合材料各向异性对超声传播的影响。设置横波、纵波声速分别为 1 890、3 910 m/s,裂纹尺寸长 20 mm、宽 0.5 mm、深 2 mm。将 PPM-EMAT 在铜薄膜上形成的洛伦兹力简化为加载方向相反、间距 5 mm 的 20 个体载荷区域,通过有限元商业软件后处理求解器计算瞬态 $\boldsymbol{x}$ 分量位移(如图 5 所示)关于接收区域的积分值即可得到超声回波信号。



(a) 有限元模型
(a) Finite element model

(b) 网格划分
(b) Grid partition

图 5 贴附式电磁超声 SH 导波检测有限元模型及网格划分

Fig. 5 Finite element model of attached EMAT SH guided wave detection

设 f 为激励频率,λ 为波长,d 为永磁体宽度,C_s 为横波声速,由 $f=C_s/\lambda=C_s/2d$ 可得,对应 f 为 0.189 MHz,考虑到电磁超声功率放大器的功率频响特性,即当激励频率小于 0.15 MHz 时,峰值功率输出显著减小,因此对 f 向上微调并选取能量更高的激励频率 0.2 MHz。

采用自由四面体网格进行划分,加载区域与接收区域均为两排 10 个单元,最大网格大小为 1 mm,铝合金内胆与复合材料最大网格单元大小为 2 mm。试件的 4 个侧面均设置为低反射边界,当最大计算时间步长为 0.1 μs 时,有限元计算结果满足收敛要求。

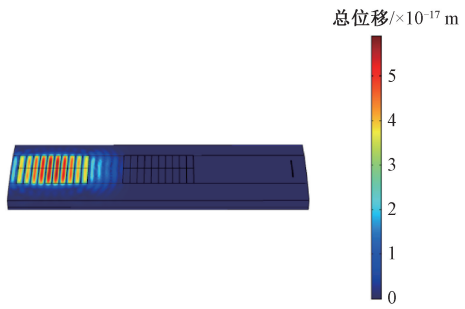
表 1 有限元建模参数

Table 1 Finite element modeling parameters mm

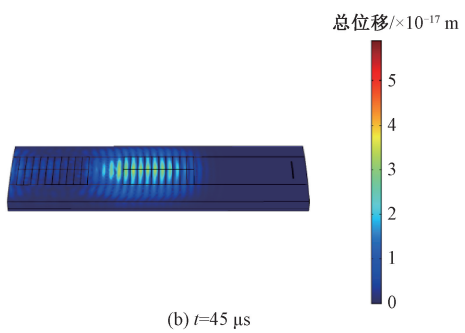
变量	数值
试件长度 l_f	210
铝合金内胆高度 h_n	5
复合材料高度 h_f	13.11
铝合金内胆内半径 r_n	186.89
铝合金内胆外半径 R_n(复合材料内半径 r_f)	191.89
复合材料外半径 R_f	205
铝合金内胆内弧长 l_n	65.24
铝合金内胆外弧长 L_n(复合材料内弧长 l_f)	66.98
复合材料外弧长 L_f	71.56
金属薄膜单元长度 l_m	20
金属薄膜单元宽度 w_m	5
金属薄膜单元高度 h_m	0.1

超声波在纤维缠绕复合材料中的传播云图如图 6 所示,由图 6 可知,贴附式电磁超声激励的 SH 导波沿纤维缠绕复合材料长度方向传播,在 45 μs 左右到达接收端,在 82 μs 左右到达缺陷位置并与缺陷作用从而产生回波,最后被接收端 EMAT 所接收。

在建立的贴附式 EMAT 检测三维有限元模型中,将中心频率为 0.2 MHz 的 Tone-burst 信号作为 EMAT 的脉冲激励信号,在有限元计算结果中添加幅值为 20% 均匀分布的随机噪声以模拟实际检测时的超声 A 扫信号。超



(a) t=18 μs



(b) t=45 μs

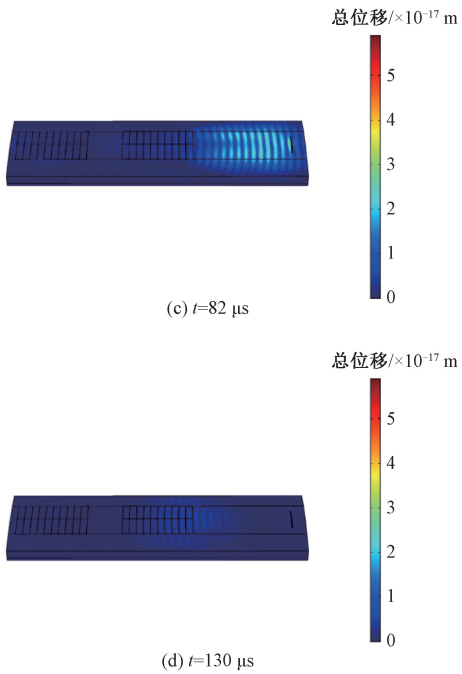


图 6　超声波在纤维缠绕复合材料中的传播云图

Fig. 6　Cloud image of ultrasonic wave propagation in fiber-wrapped composites

声信号信噪比通过 $SNR = 20 \times \lg(A_s/A_n)$ 计算,其中 A_s 和 A_n 分别为信号幅值和噪声幅值,主瓣宽度采用-6 dB 法计算。Tone-burst 激励下的超声 A 扫信号如图 7 所示,由图 7 可知,在 Tone-burst 激励下,超声 A 扫信号仅存在直达波信号,缺陷波信号已被完全淹没在噪声中。

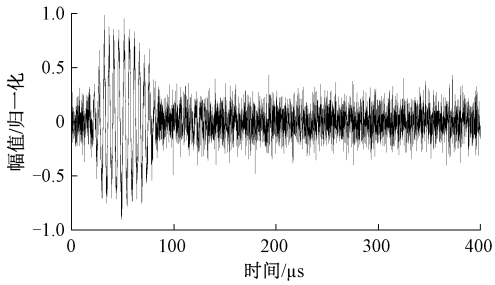


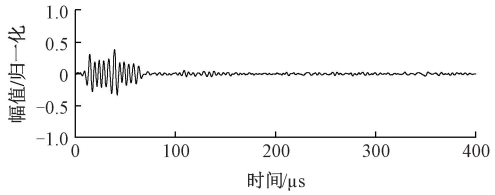
图 7　Tone-burst 激励下的超声 A 扫信号

Fig. 7　Ultrasonic A scanning signal under Tone-burst excitation

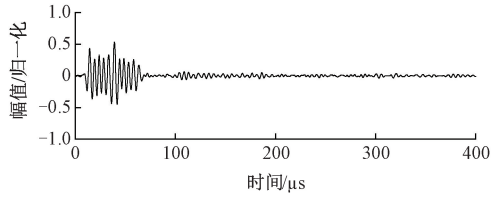
2.2　脉冲压缩技术的优化设计

1）Barker 码序列位数和载波周期

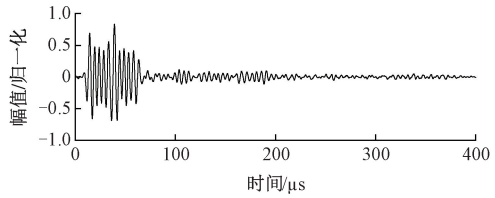
以 EMAT 接收到的直达波为研究对象,将载波周期为 1 的不同序列位数的 Barker 码作为 EMAT 的激励信号,图 8 为序列位数分别为 5、7、11、13 时对应的脉冲压缩信号和不同 Barker 序列位数下的脉压信号信噪比及主瓣宽度。脉冲压缩信号均按照组内最大值进行归一化处理。由图 8 可知,脉压信号的信噪比随 Barker 码序列位数的增加而增大,当载波周期数为 1 时,13 位 Barker 码较 5 位 Barker 码激励下得到的脉压信号信噪比提高了



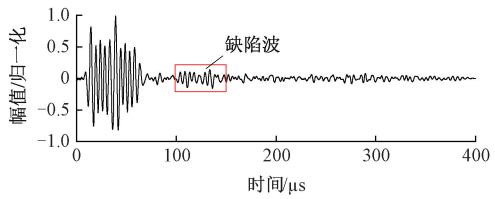
(a) Barker码序列位数为5
(a) Barker code sequencebit number 5



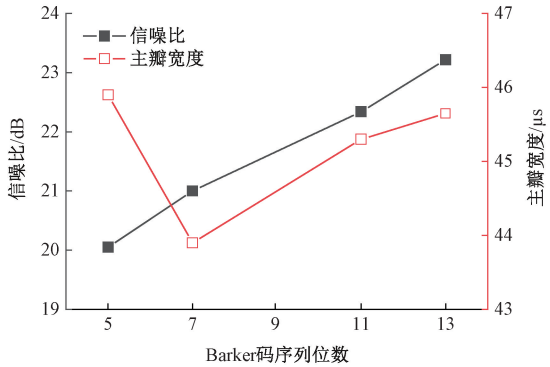
(b) Barker码序列位数为7
(b) Barker code sequence bit numberis 7



(c) Barker码序列位数为11
(c) Barker code sequence bit number 11



(d) Barker码序列位数为13
(d) Barker code sequence bit number 13



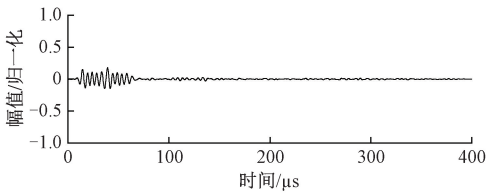
(e) 脉压信号信噪比及主瓣宽度
(e) SNR and main lobe width of pulse compression signals

图 8　不同 Barker 码序列位数下的脉压信号及其对信噪比和主瓣宽度的影响

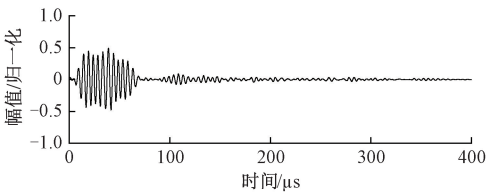
Fig. 8　Pulse compression signals at different Barker bits and its effects on SNR and main lobe width

15.8%，但主瓣宽度变化不明显，基本维持在 45 μs 左右。当 Barker 码序列位数增加至 13 时，可以明显观测到缺陷波。

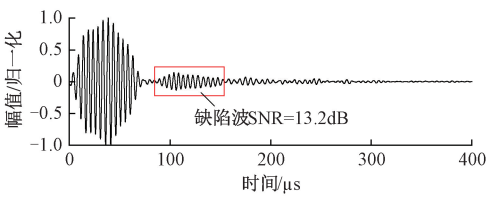
Barker 码序列位数保持 13 位不变，码元载波周期数分别设置为 1、2、3，对应的 EMAT 脉压信号和不同载波周期下的脉压信号信噪比及主瓣宽度如图 9 所示。由图 9 可知，随着载波周期数的增加，脉压信号信噪比和主瓣宽度均逐渐增加。当载波周期数由 1 增加至 3 时，脉压信号信噪比增加了 31.2%，主瓣宽度增加了 10.7%，且当载波周期数为 3 时，缺陷波信噪比达到了 13.2 dB。



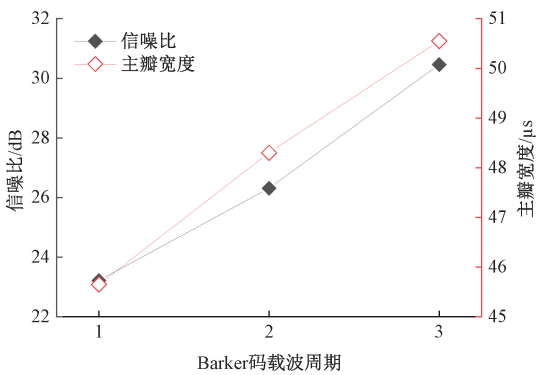
(a) Barker码序列载波周期为1
(a) The carrier period of Barker code 1



(b) Barker码序列载波周期为2
(b) The carrier period of Barker code 2



(c) Barker码序列载波周期为3
(c) The carrier period of Barker code 3



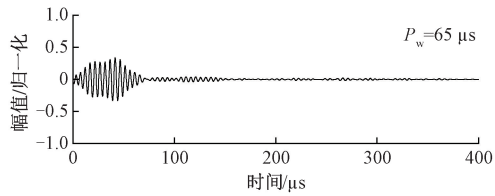
(d) 脉压信号信噪比及主瓣宽度
(d) SNR and main lobe width of pulse compression signals

图 9 不同 Barker 码载波周期下的脉压信号及其对信噪比和主瓣宽度的影响

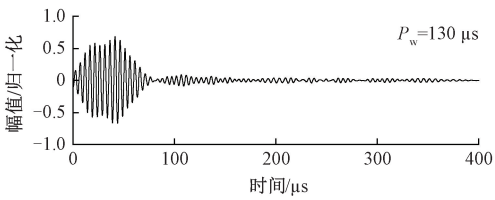
Fig. 9 Pulse compression signals at different carrier periods and its effects on SNR and main lobe width

2）Chirp 信号的脉宽和带宽

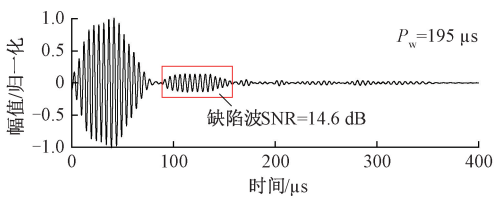
带宽为 0.1 MHz，脉冲宽度分别设置为 65、130、195 μs，对应的脉压信号和不同脉冲宽度下的脉压信号信噪比及主瓣宽度如图 10 所示。由图 10 可知，随着 chirp 信号脉宽的增大，脉压信号信噪比和主瓣宽度均增加，相较于脉冲宽度为 65 μs 的 chirp 信号，195 μs 脉宽的信号激励下的信噪比增加了 25.1%，但主瓣宽度也增加了 11.4%。同时，缺陷波信噪比最大达到了 14.6 dB。原因在于，当激励信号时宽增加时，时宽带宽积 D 也相应增大，这意味着 chirp 信号具有更多的信号能量，能够增加检测距离，因此时宽较大的 chirp 信号获得的回波信噪比较高。



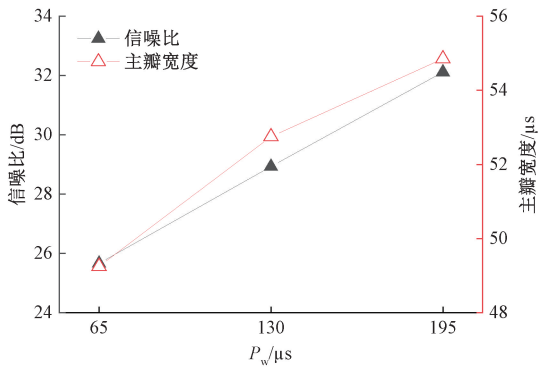
(a) Chirp信号脉宽为65 μs
(a) Chirp signal pulse width 65 μs



(b) Chirp信号脉宽为130 μs
(b) Chirp signal pulse width 130 μs



(c) Chirp信号脉宽为195 μs
(c) Chirp signal pulse width 195 μs

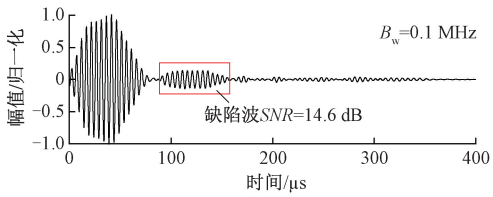


(d) 脉压信号信噪比及主瓣宽度
(d)SNR and main lobe width of pulse compression signals

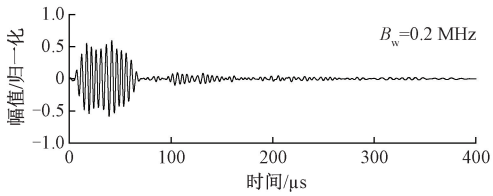
图 10 不同 chirp 信号脉宽下的脉压信号及其对信噪比和主瓣宽度的影响

Fig. 10 Pulse compression signals at different pulse width and its effects on SNR and main lobe width

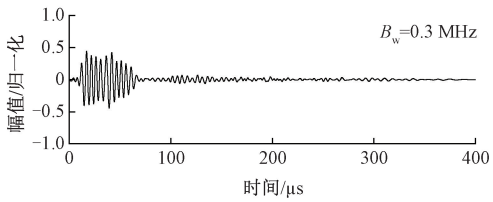
Chirp 信号脉冲宽度为 195 μs,带宽分别设置为 0.1、0.2、0.3 MHz,对应的 EMAT 脉压信号和不同带宽下的脉压信号信噪比及主瓣宽度如图 11 所示。由图 11 可知,当 chirp 信号脉冲宽度为 195 μs 时,脉压信号信噪比随着带宽的增加而减小。主瓣宽度也随之减小,但变化不大。故针对 chirp 信号脉冲压缩技术,为尽量提高信号目标分辨力,其参数选取应遵循大时宽、小带宽的原则。



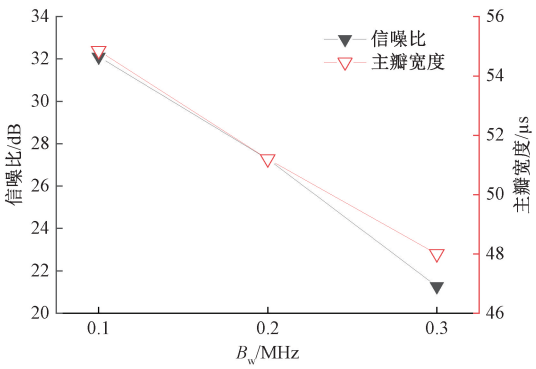
(a) Chirp信号带宽为0.1 MHz
(a) Chirp signal bandwidth 0.1 MHz



(b) Chirp信号带宽为0.2 MHz
(b) Chirp signal bandwidth 0.2 MHz



(c) Chirp信号带宽为0.3 MHz
(c) Chirp signal bandwidth 0.3 MHz



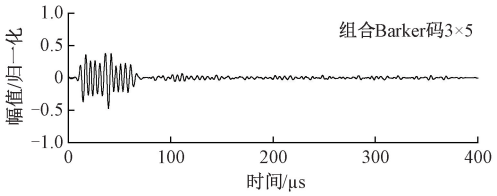
(d) 脉压信号信噪比及主瓣宽度
(d) SNR and main lobe width of pulse compression signals

图 11　不同 chirp 信号带宽下的脉压信号及其对信噪比和主瓣宽度的影响

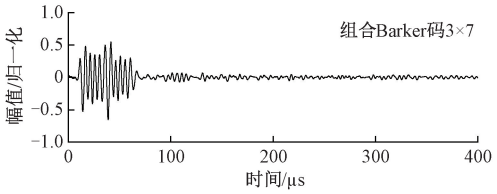
Fig. 11　Pulse compression signals at different band width and its effects on SNR and main lobe width

3）组合 Barker 码序列的组合方式

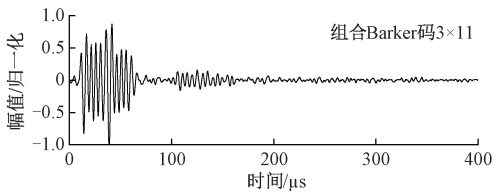
设置 4 种组合方式的组合 Barker 码,分别为 3×5 位、3×7 位、3×11 位和 3×13 位组合 Barker 码,对应的 EMAT 脉压信号和不同组合方式下的脉压信号信噪比及主瓣宽度如图 12 所示。由图 12 可知,当组合 Barker 码的位数越多时,编码序列的长度就越长,故信噪比增加。与 3×5 位组合 Barker 码相比,3×13 位组合 Barker 码的脉压信号



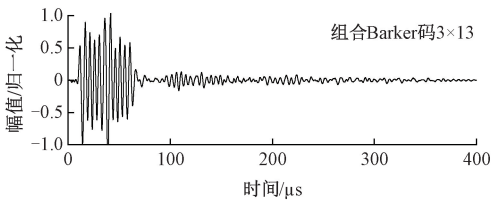
(a) 组合方式3×5
(a) The combination 3×5



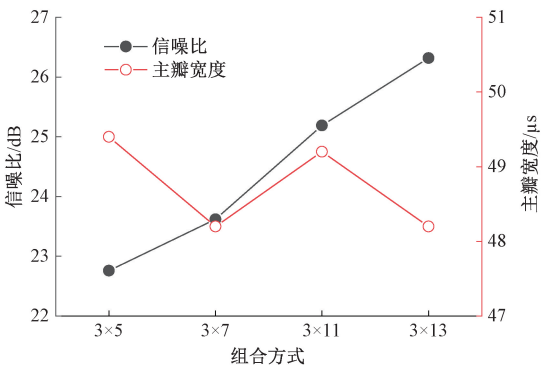
(b) 组合方式3×7
(b) The combination 3×7



(c) 组合方式3×11
(c) The combination 3×11



(d) 组合方式3×13
(d) The combination 3×13



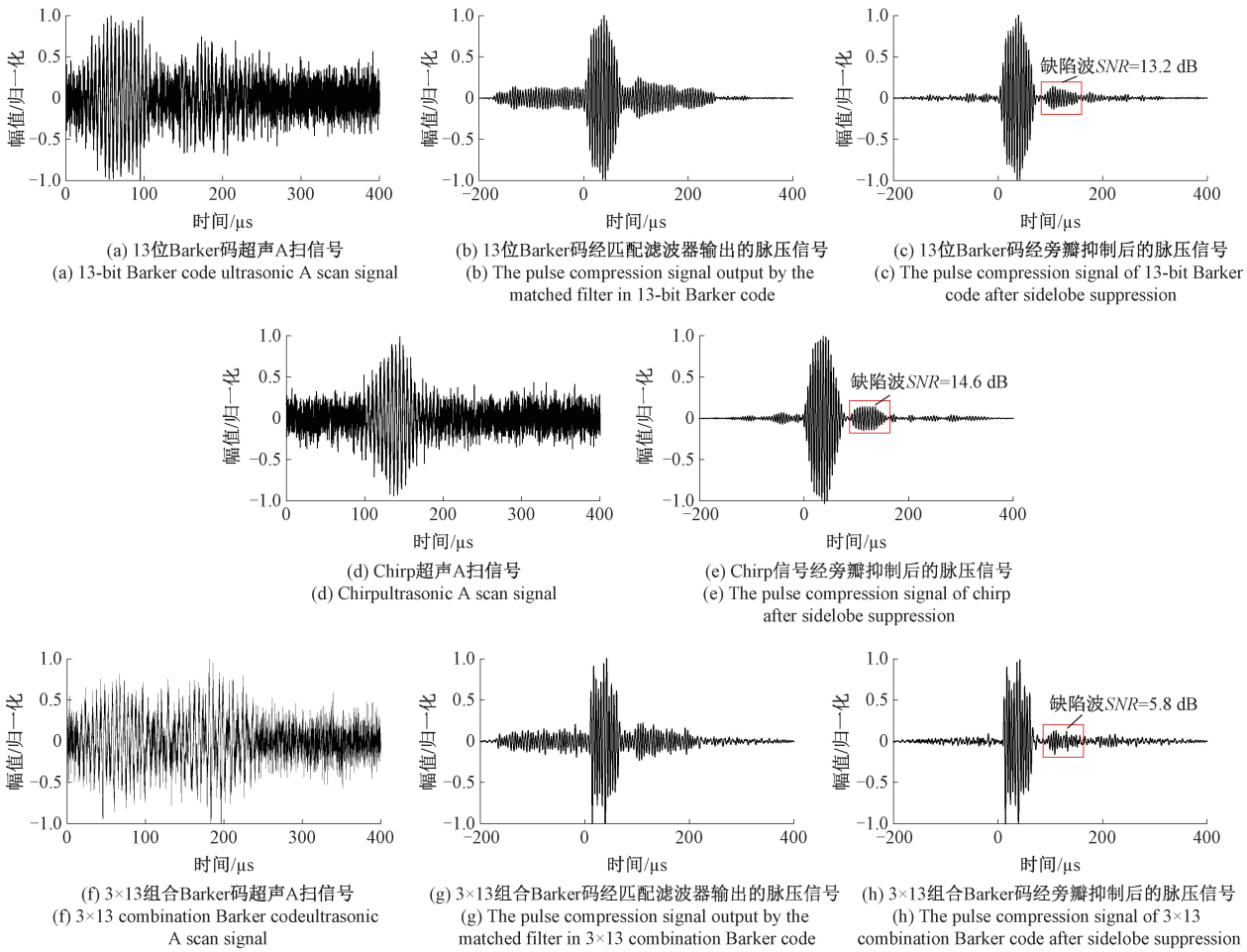
(e) 脉压信号信噪比及主瓣宽度
(e) SNR and main lobe width of pulse compression signals

图 12　不同组合方式下的脉压信号及其对信噪比和主瓣宽度的影响

Fig. 12　Pulse compression signals at different combinations and its effects on SNR and main lobe width

信噪比增加了 15.1%。当组合方式为 3×13 位时,其脉压信号主瓣宽度达到最小值 48.2 μs,相比于 chirp 信号和 Barker 编码序列,组合 Barker 码激励方式能获得更小的主瓣宽度,拥有最佳的目标分辨力。

不同编码信号激励对应的 A 扫信号、匹配滤波器输出的脉压信号和旁瓣抑制后的脉压信号如图 13 所示,脉压信号信噪比和主瓣宽度如表 2 所示。由图 13 可知,不同编码信号激励下的 A 扫信号经脉冲压缩后,均可观测到明显的缺陷波,相比于 Tone-burst 激励,脉冲压缩信号的信噪比大大提升。由表 2 可知,在 13 位 Barker 码、chirp 信号以及 3×13 组合 Barker 码信号三种激励方式中,chirp 信号的脉压信号信噪比最高,较信噪比最差的 3×13 组合 Barker 码高 7.4 dB,但组合 Barker 码的主瓣宽度最小,多目标分辨力较强,相较于主瓣宽度最大的 chirp 信号,组合 Barker 码的主瓣宽度减少了 6.7 μs。



(a) 13位Barker码超声A扫信号
(a) 13-bit Barker code ultrasonic A scan signal

(b) 13位Barker码经匹配滤波器输出的脉压信号
(b) The pulse compression signal output by the matched filter in 13-bit Barker code

(c) 13位Barker码经旁瓣抑制后的脉压信号
(c) The pulse compression signal of 13-bit Barker code after sidelobe suppression

(d) Chirp超声A扫信号
(d) Chirpultrasonic A scan signal

(e) Chirp信号经旁瓣抑制后的脉压信号
(e) The pulse compression signal of chirp after sidelobe suppression

(f) 3×13组合Barker码超声A扫信号
(f) 3×13 combination Barker codeultrasonic A scan signal

(g) 3×13组合Barker码经匹配滤波器输出的脉压信号
(g) The pulse compression signal output by the matched filter in 3×13 combination Barker code

(h) 3×13组合Barker码经旁瓣抑制后的脉压信号
(h) The pulse compression signal of 3×13 combination Barker code after sidelobe suppression

图 13 不同激励信号下的超声 A 扫信号及脉压信号

Fig. 13 Ultrasonic A scanning signal and pulse compression signal under different excitation signals

表 2 不同编码信号激励下的缺陷波信号信噪比和主瓣宽度

Table 2 SNR and main lobe width of defect echo under excitation of different coded signals

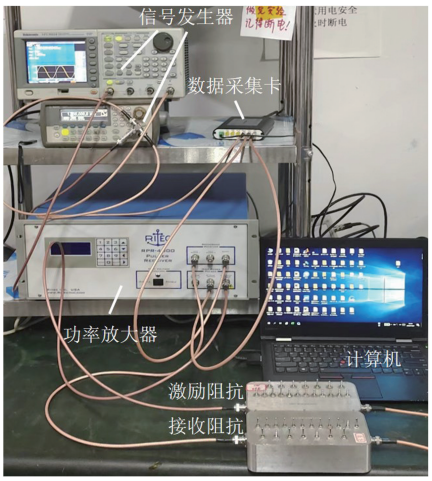
激励方式	SNR/dB	主瓣宽度/μs
13 位 Barker 码	13.2	50.6
Chirp 信号	14.6	54.9
3×13 组合 Barker 码	5.8	48.2

3 实验验证

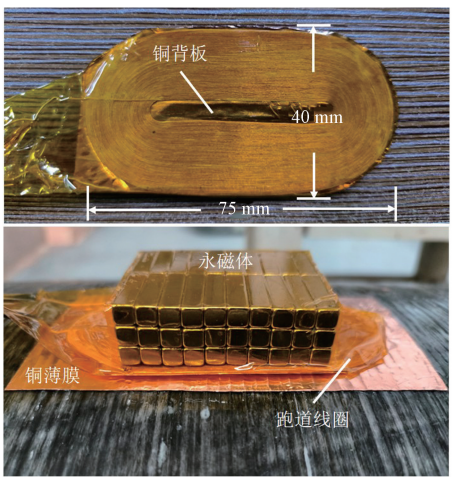
3.1 纤维缠绕气瓶贴附式电磁超声检测系统

气瓶试样由中材科技(成都)有限公司提供,直径为 410 mm,长为 1 800 mm。纤维缠绕气瓶贴附式电磁超声检测系统如图 14 所示,Tektronix AFG3022B 和 Agilent 33220A 两款信号发生器配合使用,产生中心频率为 0.2 MHz 的激励信号,经 RPR-4000 功率放大器和阻抗匹配后,激励端 EMAT 获得较大能量从而激

发超声波,接收端 EMAT 经阻抗匹配后,通过 NET8544 数据采集卡在 PC 机上的 LabVIEW 界面显示并存储数据。激励和接收 EMAT 由铜箔、永磁体及跑道线圈组成。铜箔厚度为 0.1 mm,并采用粘合剂作为背衬,在柔软、可弯曲的基础上还兼顾了贴合能力,在检测时能够牢牢地粘贴在气瓶表面而不脱落。永磁体 3 层 10 对共 60 个,单个尺寸为长 20 mm、宽 5 mm、高 5 mm。跑道线圈匝数为 72,导线直径为 Φ0.25 mm,线圈长度为 75 mm、宽 40 mm,底部附有铜背板以防止在永磁体内部产生超声波。为避免电磁串扰信号对检测结果的影响,激励 EMAT 与接收 EMAT 的间距设置为 450 mm。



(a) 电磁超声监测系统
(a) EMAT monitoring system



(b) 电磁超声探头
(b) EMAT probe

(c) 纤维缠绕气瓶
(c) Fiber-wrapped gas cylinder

图 14　纤维缠绕气瓶贴附式电磁超声监测系统及 EMAT 探头

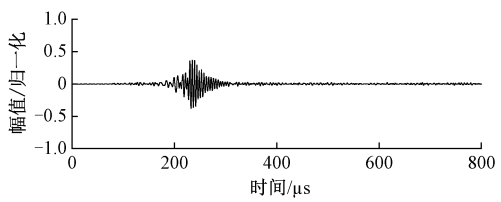
Fig. 14　Fiber-wrapped gas cylinder attached EMAT monitoring system and EMAT probe

3.2　编码信号参数对回波信噪比和分辨率的影响

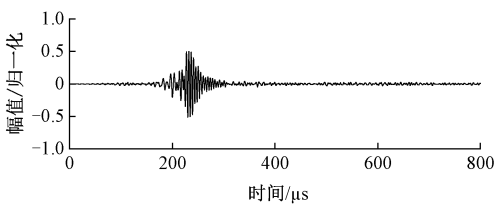
1）Barker 码序列位数及载波周期影响规律分析

以 EMAT 接收到的直达波为研究对象,Barker 码载波周期为 1,不同序列位数下的脉压信号如图 15 所示,对应的脉压信号信噪比及主瓣宽度如表 3 所示。由表 3 可知,随着 Barker 码序列位数的增加,EMAT 脉冲压缩信号信噪比也随之增加。当载波周期为 1 时,Barker 码序列位数由 5 增加至 13 的过程中,脉压信号信噪比提高了 4.8 dB,但主瓣宽度的变化较不明显,基本维持在 27~28 μs 之间。

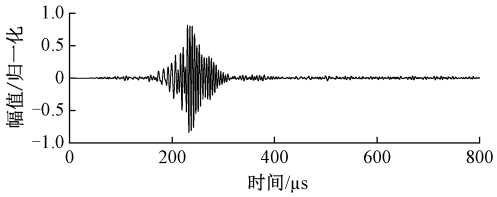
Barker 码序列位数为 13,不同载波周期下的脉压信号如图 16 所示,对应的脉压信号信噪比和主瓣宽度如表 4 所示。由表 4 可知,13 位 Barker 码序列载波周期由 1 增加至 3 时,脉压信号信噪比提高了 6 dB。相比于载波周期为 1 的脉压信号,载波周期为 3 时,脉压信号主瓣宽度增加了 5.9%,信噪比增加但多目标分辨力下降。



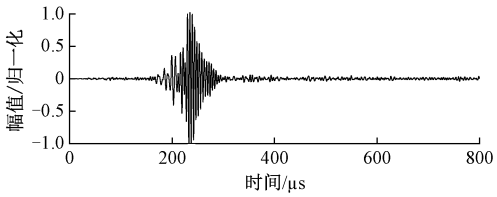
(a) Barker码序列位数为5
(a) Barker code sequence bit number5



(b) Barker码序列位数为7
(b) Barker code sequence bit number7



(c) Barker码序列位数为11
(c) Barker code sequence bit number11



(d) Barker码序列位数为13
(d) Barker code sequence bit number13

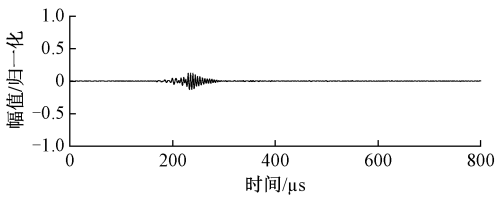
图 15 不同序列位数下的脉压信号

Fig. 15 Pulse compression signals under different sequence bits

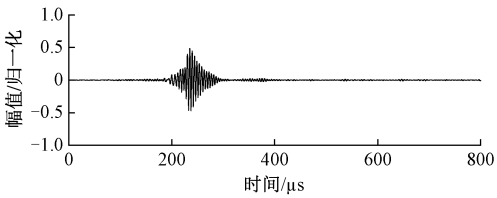
表 3 不同序列位数下的 Barker 码脉压信号信噪比及主瓣宽度

Table 3 SNR and main lobe width of Barker code pulse compression signals at different sequence bits

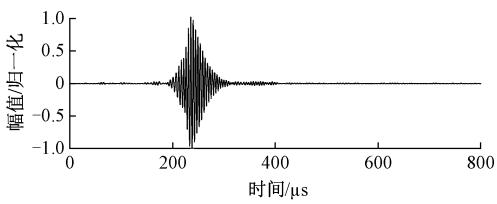
激励方式	Barker 编码序列			
	5 位(25 μs)	7 位(35 μs)	11 位(55 μs)	13 位(65 μs)
信噪比/dB	21.8	22.5	23.1	26.6
主瓣宽度/μs	28.0	27.5	27.0	27.2



(a) Barker码序列载波周期为1
(a) The carrier period of Barker code 1



(b) Barker码序列载波周期为2
(b) The carrier period of Barker code 2



(c) Barker码序列载波周期为3
(c) The carrier period of Barker code 3

图 16 不同载波周期下的脉压信号

Fig. 16 Pulse compression signals under different carrier periods

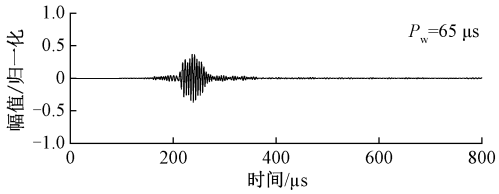
表 4 不同载波周期下的 Barker 码脉压信号信噪比及主瓣宽度

Table 4 SNR and main lobe width of Barker code pulse compression signals at different carrier periods

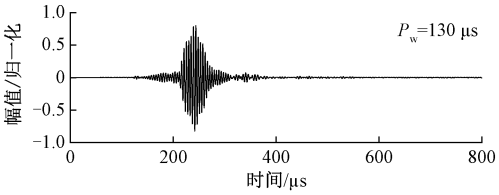
激励方式	Barker 编码序列		
	1 周期(65 μs)	2 周期(130 μs)	3 周期(195 μs)
信噪比/dB	26.6	30.3	32.6
主瓣宽度/μs	27.2	28.0	28.8

2）Chirp 信号脉宽及带宽影响规律分析

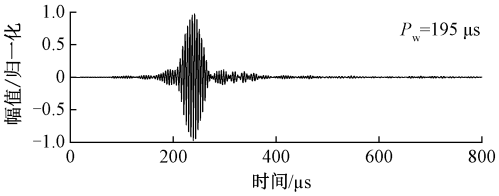
Chirp 信号 f_c = 0.2 MHz, B_w = 0.1 MHz,不同 P_w 下的脉压信号如图 17 所示,表 5 为其对应的信噪比及主瓣宽度。由表 5 可知,chirp 脉宽由 65 μs 增加至 195 μs 时,超声信号的信噪比由 24.8 dB 增加至 34.0 dB,主瓣宽度也从 27.9 μs 增加至 28.6 μs。



(a) Chirp信号脉宽为65 μs
(a) Chirp signal pulse width 65 μs



(b) Chirp信号脉宽为130 μs
(b) Chirp signal pulse width 130 μs



(c) Chirp信号脉宽为195 μs
(c) Chirp signal pulse width 195 μs

图 17 不同脉宽下的脉压信号

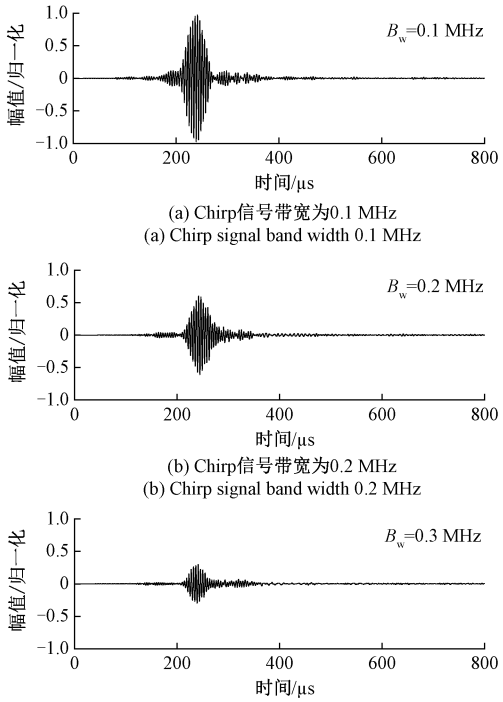
Fig. 17 Pulse compression signals under different pulse widths

表 5 不同脉宽下的脉压信号信噪比及主瓣宽度

Table 5 SNR and main lobe width of pulse compression signals at different pulse widths

激励方式	Chirp 信号(B_w = 0.1 MHz)		
	65 μs	130 μs	195 μs
信噪比/dB	24.8	27.4	34.0
主瓣宽度/μs	27.9	28.0	28.6

Chirp 信号 f_c = 0.2 MHz, P_w = 195 μs,不同 B_w 下的脉压信号如图 18 所示,对应的信噪比及主瓣宽度如表 6 所示。由表 6 可知,当 chirp 信号脉宽不变时,其脉压信号信噪比和主瓣宽度随着带宽的增加而减小,带宽由 0.1 MHz 增加至 0.3 MHz 时,其信噪比减小了 11.7 dB,主瓣宽度减小了 0.9 μs。



(a) Chirp信号带宽为0.1 MHz
(a) Chirp signal band width 0.1 MHz
(b) Chirp信号带宽为0.2 MHz
(b) Chirp signal band width 0.2 MHz
(c) Chirp信号带宽为0.3 MHz
(c) Chirp signal band width 0.3 MHz

图 18　不同带宽下的脉压信号

Fig. 18　Pulse compression signals under different band widths

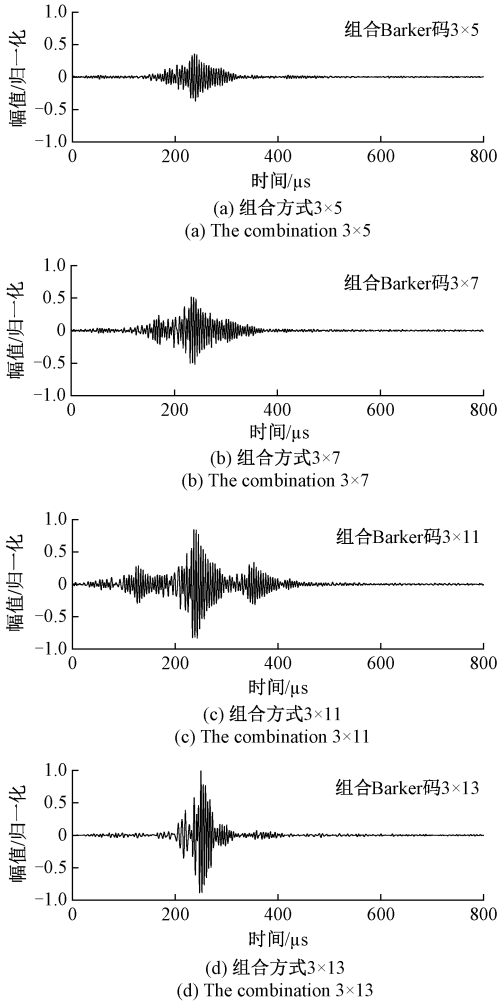
表 6　不同带宽下的脉压信号信噪比及主瓣宽度

Table 6　SNR and main lobe width of pulse compression signals at different band widths

激励方式	Chirp 信号(P_w = 195 μs)		
	0.1 MHz	0.2 MHz	0.3 MHz
信噪比/dB	34.0	29.2	22.3
主瓣宽度/μs	28.6	28.0	27.7

3) 组合 Barker 码组合方式影响规律分析

组合 Barker 码载波周期为 1,不同组合方式下的脉压信号和对应的信噪比及主瓣宽度如图 19 及表 7 所示。由表 7 可知,随着组合 Barker 码序列长度的增加,脉压信号信噪比逐渐增大,3×13 组合方式下得到的脉压信号较 3×5 激励得到的信噪比提高了 19.1%。在针对纤维缠绕气瓶的 EMAT 脉冲压缩技术应用中,相比于 Barker 码和 chirp 信号激励,组合 Barker 码激励下的脉压信号信噪比并不高,但它的主瓣宽度较另外两种激励信号小,当组合方式为 3×13 时,脉压信号的主瓣宽度达到最小值 27.0 μs。



(a) 组合方式3×5
(a) The combination 3×5
(b) 组合方式3×7
(b) The combination 3×7
(c) 组合方式3×11
(c) The combination 3×11
(d) 组合方式3×13
(d) The combination 3×13

图 19　不同组合方式下的脉压信号

Fig. 19　Pulse compression signals under different combinations

表 7　不同组合方式下的脉压信号信噪比及主瓣宽度

Table 7　SNR and main lobe width of pulse compression signals at different combinations

激励方式	组合 Barker 码			
	3×5 (75 μs)	3×7 (105 μs)	3×11 (165 μs)	3×13 (195 μs)
信噪比/dB	23.6	25.4	26.9	28.1
主瓣宽度/μs	28.6	27.9	27.9	27.0

4　基于脉冲压缩的贴附式 EMAT 在纤维缠绕气瓶缺陷检测中的应用

含缺陷的纤维缠绕气瓶 EMAT 检测示意图如图 20 所示,裂纹采用盘型铣刀加工,垂直切入深度 2 mm、弧长 20 mm、宽 0.5 mm。激励探头与接收探头相距 80 mm,且

布置在缺陷的同一侧以便接收缺陷反射波，分别采用中心频率为 0.2 MHz 的 Tone-burst 信号、chirp 信号、Barker 码信号、组合 Barker 码 4 种激励信号进行实验。其中，chirp 信号 B_w = 0.1 MHz、P_w = 195 μs，Barker 信号为 13 位 3 周期的编码序列，组合 Barker 码为 3×13 位编码序列，脉冲宽度均为 195 μs。

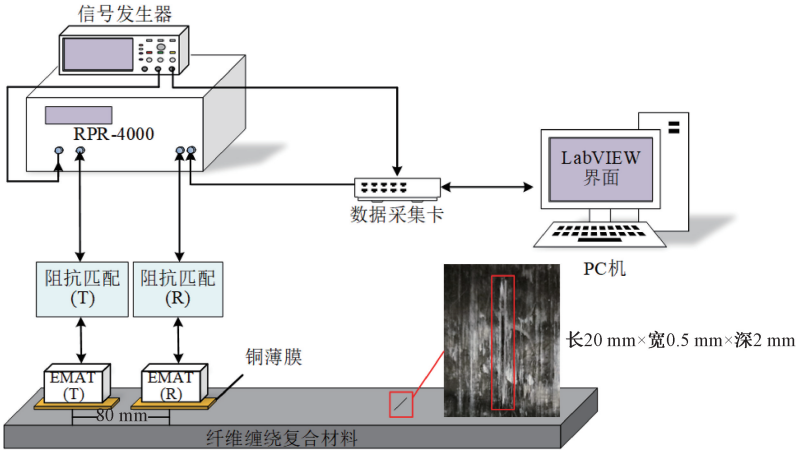
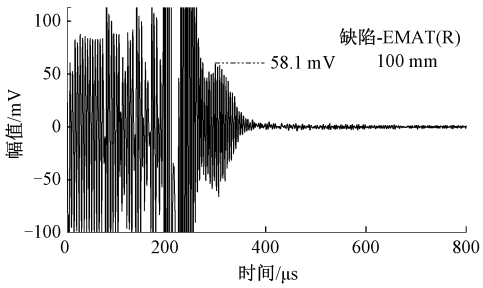


图 20 含缺陷的纤维缠绕气瓶电磁超声检测示意图

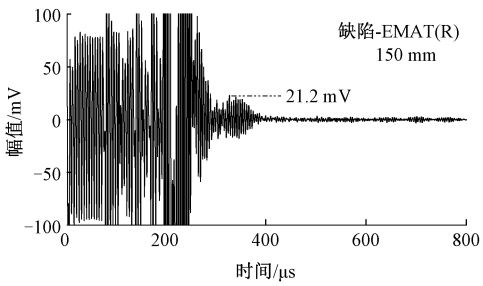
Fig. 20 Diagram of EMAT detection of fiber-wrapped gas cylinder with defect

16 次同步平均次数下，改变 EMAT 与缺陷的距离，得到的 Barker 码对应的 A 扫信号如图 21 所示，未经过脉冲压缩和旁瓣抑制处理。由图 21 可知，当缺陷与接收端 EMAT 距离 100 mm 时，缺陷波与始波重叠，幅值达到了 58.1 mV，随着缺陷与接收端 EMAT 距离逐渐变远，缺陷波的位置后移，幅值变小，当二者距离为 180 mm 时，缺陷波幅值已减小到 9.8 mV。



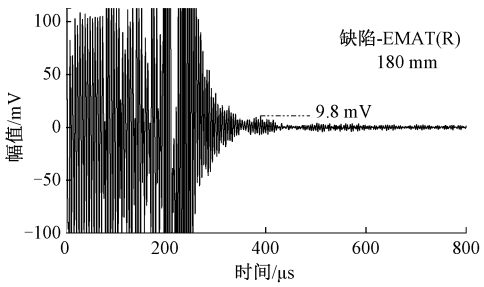
(a) 缺陷与接收端EMAT距离100 mm

(a) The distance between the defect and the receiving EMAT 100 mm



(b) 缺陷与接收端EMAT距离150 mm

(b) The distance between the defect and the receiving EMAT 150 mm



(c) 缺陷与接收端EMAT距离180 mm

(c) The distance between the defect and the receiving EMAT 180 mm

图 21 不同缺陷-EMAT 距离下的 Barker 码 A 扫信号

Fig. 21 Barker code A scanning signal under different distance between defect and EMAT

当 EMAT 与缺陷的距离为 180 mm 时，Tone-burst 激励得到的超声 A 扫信号如图 22 所示，由图 22 可知，在 Tone-burst 激励下，仅能识别 EMAT 直达波，缺陷波信号已完全淹没在噪声中。

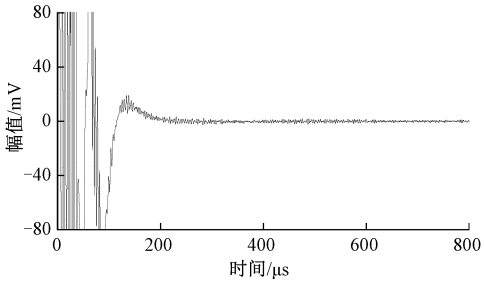
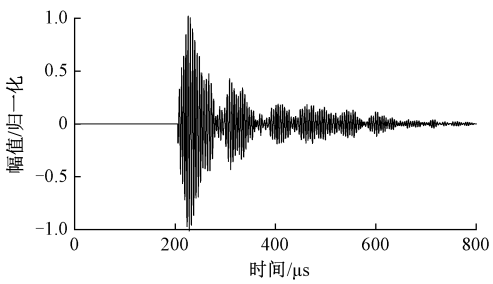


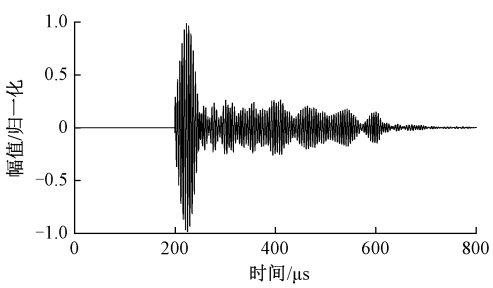
图 22 Tone-burst 激励下的超声 A 扫信号

Fig. 22 Ultrasonic A scanning signal under Tone-burst excitation

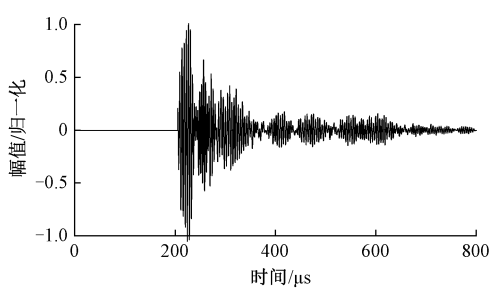
在采集到的超声 A 扫信号中去除电磁串扰信号和直达波信号以防止二者对缺陷波脉冲压缩效果的影响,不同激励信号的脉压信号如图 23 所示。Tone-burst 及不同脉压信号的缺陷波信噪比及主瓣宽度如表 8 所示,由表 8 可知,相较于 Tone-burst 信号,脉冲压缩技术可以将缺陷波信号信噪比至少提高 20.4 dB;不同编码信号中,chirp 信号激励下的脉压信号信噪比最高,达到了 23.9 dB,较 Barker 码信号和组合 Barker 码激励下的脉压信号分别提高了 11.7%、17.2%,但主瓣宽度也最宽,达到了 31.2 μs;当组合 Barker 码作为激励信号时,脉压信号信噪比较 Barker 码信号和 chirp 信号小,仅为 20.4 dB,但分辨率最高,主瓣宽度为 28.8 μs,较 Barker 码和 chirp 信号激励下的脉压信号分别降低了 1.7%、7.7%。究其原因,相较于 Barker 码和组合 Barker 码,chirp 信号的频谱分布更宽,包含更多的频带信息,在纤维缠绕复合材料中,高频超声衰减较大,chirp 信号拥有更多的低频部分,有利于增强在高衰减复合材料中的超声传播能量,提升信噪比。另外,chirp 信号主要通过加窗函数来抑制旁瓣,而 Barker 码信号及组合 Barker 码是采用增加延迟线推移旁瓣的方式,对旁瓣的对称性要求较高,在纤维缠绕复合材料贴附式 EMAT 检测中,由于金属薄膜面积较小且厚度较薄,其接地效果可能较差,导致外部电磁干扰严重、噪声大,破坏了旁瓣的对称性,故 Barker 码信号和组合 Barker 码信号对应的主瓣信噪比低。此外,较 3 周期 13 位 Barker 码信号而言,采用 3×13 位组合 Barker 码激励时,其载波子脉冲为单周期信号,当采用较低频率进行检测时,单周期的组合 Barker 码脉冲能量较弱,故信噪比较差[37-38]。



(a) Barker码激励得到的脉压信号
(a) Pulse compression signal under Barker code excitation



(b) Chirp信号激励得到的脉压信号
(b) Pulse compression signal under chirp signal excitation



(c) 组合Barker码激励得到的脉压信号
(c) Pulse compression signal under combined Barker code excitation

图 23　不同激励信号下脉压信号

Fig. 23　Pulse signal under different excitation signals

表 8　不同激励信号下的缺陷波脉压信号信噪比及主瓣宽度

Table 8　Defect echo pulse compression signal SNR and main lobe width of different excitation signals

激励方式	SNR/dB	主瓣宽度/μs
Tone-burst	0	–
13 位 Barker 码	21.4	29.3
Chirp 信号	23.9	31.2
3×13 组合 Barker 码	20.4	28.8

5　结　　论

本文针对纤维缠绕气瓶的纤维断裂类型缺陷检测,采用了金属贴膜式的 EMAT 检测方法,并结合脉冲压缩技术,获得了良好的检测效果,本文主要结论如下:

1)采用金属贴膜的电磁超声检测方法,可以有效地解决 EMAT 无法应用于非金属材料无损监测领域的问题。编码压缩技术能够显著提高超声信号的信噪比和分辨率。

2)增加 Barker 码的序列长度和载波周期、增大 chirp 时宽以及减小 chirp 带宽、增加组合 Barker 码的序列长度均可以提高脉压信号信噪比。

3)针对纤维缠绕气瓶弧长 20 mm、宽 0.5 mm、垂直切入深度 2 mm 的裂纹,分别采用 Tone-burst 信号、Barker 编码序列、chirp 信号、组合 Barker 码信号激励。经优化设计后,与传统 Tone-burst 激励方式相比,脉冲压缩技术可以将缺陷波信噪比至少提高 20.4 dB。在不同编码算法中,chirp 信号激励下的脉压信号信噪比最高,达到了 23.9 dB,采用 3×13 位组合 Barker 码时,脉压信号主瓣宽度为 28.8 μs,分辨率最高,但信噪比较低。

本研究能够检出纤维缠绕气瓶瓶身纤维层的纤维断裂、划伤缺陷,对于铝合金内胆、气瓶封头以及其他类型损伤的检测能力仍需进一步探究。未来将采用贴附式 EMAT 针对不同类型的缺陷如分层、冲击损伤进行检测,并在气瓶冲压泄压的过程中进行损伤在线监测,分析含

损伤的气瓶的失效机理及其在不同损伤状态下的超声导波信号特征的变化规律。

参考文献

[1] CHEN S, WANG Y, LANG X, et al. Rapid and high hydrogen storage in epoxycyclopentane hydrate at moderate pressure[J]. Energy, 2023: 126638.

[2] 吕洪, 黄港淇, 沈亚皓, 等. 燃料电池汽车车载高压Ⅳ型储氢瓶耐火烧性能仿真[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(12): 4637-4647.
LYU H, HUANG G Q, SHEN Y H, et al. Numerical simulation of fire resistance performance of high-pressure type IV hydrogen storage tank for fuel cell vehicle[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(12): 4637-4647.

[3] 刘培启, 杨帆, 黄强华, 等. T700 碳纤维增强树脂复合材料气瓶封头非测地线缠绕强度[J]. 复合材料学报, 2019, 36(12): 2772-2778.
LIU P Q, YANG F, HUANG Q H, et al. Non-geodetic winding strength of T700 carbon fiber reinforced resin composite cylinder head[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2019, 36(12): 2772-2778.

[4] MIAO H, LI F. Shear horizontal wave transducers for structural health monitoring and nondestructive testing: A review[J]. Ultrasonics, 2021, 114: 106355.

[5] 王奕首, 王明华, 刘德博, 等. 声发射在复合材料贮箱上的应用研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(4): 1-17.
WANG Y SH, WANG M H, LIU D B, et al. Research progress on the application of acoustic emission to composite tanks [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(4): 1-17.

[6] JIAN X, BAILLIE I, DIXON S. Steel billet inspection using laser-EMAT system [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2007, 40(5): 1501-1506.

[7] 石文泽, 陈巍巍, 卢超, 等. 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[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(2): 86-97.
SHI W Z, CHEN W W, LU CH, et al. Research on racetrack coil EMAT detection technology of metal forging defect based on the pulse compression technique [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(2): 86-97.

[8] 邢燕好, 王振宇, 张佳, 等. 电磁超声全向导波换能器辐射控制方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(10): 74-85.
XING Y H, WANG ZH Y, ZHANG J, et al. Research on the radiation control method of electromagnetic ultrasonic omnidirectional guided wave transducer [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(10): 74-85.

[9] 徐立军, 刘福禄, 丁一清, 等. 基于电磁超声横波的管道剩余厚度检测[J]. 北京航空航天大学学报, 2022, 48(9): 1767-1773.
XU L J, LIU F L, DING Y Q, et al. Residual thickness detection of pipeline based on electromagnetic ultrasonic shear wave [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2022, 48(9): 1767-1773.

[10] 袁阿琳, 赖迎庆, 石剑, 等. 铝薄板裂纹电磁超声导波 B 扫描检测实验研究[J]. 声学技术, 2022, 41(2): 211-219.
YUAN A L, LAI Y Q, SHI J, et al. Experimental research on B-scan detection of electromagnetic ultrasonic guided wave for aluminium sheet cracks[J]. Technical Acoustics, 2022, 41(2): 211-219.

[11] 周恺, 张睿哲, 叶宽, 等. 基于同步压缩小波变换的接地扁钢缺陷电磁超声 SH 导波检测方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(12): 2013-2020.
ZHOU K, ZHANG R ZH, YE K, et al. Electromagnetic ultrasonic SH guided wave detection method for grounded flat steel defects based on synchrosqueezed wavelet transforms[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2022, 62(12): 2013-2020.

[12] 吴锐, 石文泽, 卢超, 等. 航空不锈钢薄板电磁超声 SH 导波检测定量分析方法[J]. 航空学报, 2022, 43(9): 735-748.
WU R, SHI W Z, LU CH, et al. Quantitative analysis method for electromagnetic ultrasonic SH guided wave detection of aerospace stainless steel sheet [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43 (9): 735-748.

[13] 张金, 王学彬, 石文泽, 等. 大口径火炮身管药室内膛裂纹电磁超声表面水平剪切波检测方法[J]. 兵工学报, 2021, 42(8): 1763-1770.
ZHANG J, WANG X B, SHI W Z, et al. Detection method for chamber of large-caliber artillery barrel based on electromagnetic ultrasonic surface SH-wave[J]. Acta

Armamentarii, 2021, 42(8): 1763-1770.

[14] 时亚, 石文泽, 陈果, 等. 钢轨踏面检测电磁超声表面波换能器优化设计[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(8): 239-249.
SHI Y, SHI W Z, CHEN G, et al. Optimized design of surface wave electromagnetic acoustic transducer for rail tread testing [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(8): 239-249.

[15] 刘增华, 钟栩文, 李欣, 等. 基于全向性 SH_0 模态磁致伸缩贴片型传感器阵列的铝板缺陷成像研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(14): 8-15.
LIU Z H, ZHONG X W, LI X, et al. Research on damage imaging based on omnidirectional SH_0 mode magnetostrictive patch transducers array in aluminum plates[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(14): 8-15.

[16] 王晓煜, 高斯佳, 范振全. 基于激励单一模态 Lamb 波磁致伸缩换能器的结构优化仿真分析[J]. 应用力学学报, 2020, 37(5): 2190-2196, 2333.
WANG X Y, GAO S J, FAN ZH Q, et al. Structural optimization of single mode Lamb wave transducer[J]. Chinese Journal Ofapplied Mechanics, 2020, 37(5): 2190-2196,2333.

[17] 胡松涛, 石文泽, 卢超, 等. 钢轨踏面裂纹电磁超声表面波同步挤压小波快速成像检测研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(1): 35-46.
HU S T, SHI W Z, LU CH, et al. Research on rapid imaging detection of electromagnetic ultrasonic surface wave synchrosqueezed wavelet for rail tread cracks[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(1): 35-46.

[18] 余丽婷, 卢超, 石文泽, 等. 基于同步挤压小波和脉冲压缩的钢轨踏面裂纹电磁超声表面波检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(11): 229-241.
YU L T, LU CH, SHI W Z, et al. Research on the electromagnetic ultrasonic surface wave detection method of railtread crack based on synchrosqueezed wavelet transform and pulse compression[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(11): 229-241.

[19] 张涛, 丁碧云, 赵鑫. 采用改进的希尔伯特黄变换的损伤检测特征提取方法[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(10): 16-23.
ZHANG T, DING B Y, ZHAO X. A feature extraction method of defect detection using improved hilbert-huang transform[J]. Journal of Xi′an Jiaotong University, 2018, 52(10): 16-23.

[20] FU Y J, PAN R Y. Research on pulse compression technology of linear frequency modulation signal[C]. International Conference on Industrial Control and Electronics Engineering, 2012: 1131-1133.

[21] 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.

[22] 王军, 李强鑫, 吴寅, 等. 脉冲压缩的木材空气耦合超声检测研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(3): 47-52.
WANG J, LI Q X, WU Y, et al. Air-coupled ultrasonic testing of wood based on pulse compression technology[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentationc, 2022, 36(3): 47-52.

[23] IIZUKA Y, AWAJIYA Y. High sensitivity EMAT system using chirp pulse compression and its application to crater end detection in continuous casting[C]. Journal of Physics: Conference Series, 2014, 520(1): 012011.

[24] HAN Q, WANG P, ZHENG H. Modified ultrasonic time-of-flight diffraction testing with Barker code excitation for sizing inclined crack [J]. Applied Acoustics, 2018, 140: 153-159.

[25] 黄祺凯, 石文泽, 卢超, 等. 基于编码压缩的钢板电磁超声 Lamb 波检测方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(2): 117-127.
HUANG Q K, SHI W Z, LU CH, et al. Research on the detection method of the steel plate with Lamb wave EMATs based on phase coded pulse compression[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(2): 117-127.

[26] 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.

[27] 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): 2127-2131.
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): 2127-2131.

[28] 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.

[29] 石文泽, 黄祺凯, 卢超, 等. 脉冲压缩在钢板腐蚀电磁超声 SH 导波检测中的应用[J]. 北京航空航天大学学报, 2023, 49(2): 324-334.
SHI W Z, HUANG Q K, LU CH, et al. Application of pulse compression technique in steel plate corrosion detection with SH guided wave EMATs[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 49(2): 324-334.

[30] AITTOMÄKI T, KOIVUNEN V. Mismatched filter design and interference mitigation for MIMO radars[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016, 65(2): 454-466.

[31] 石文泽, 程进杰, 胡硕臻, 等. 脉冲压缩在铝薄板电磁超声导波检测中的应用[J]. 航空学报, 2022, 43(3): 517-528.
SHI W Z, CHENG J J, HU SH ZH, et al. Application of pulse compression in electromagnetic ultrasonic guided wave detection of aluminum sheet[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(3): 517-528.

[32] 程进杰, 石文泽, 卢超, 等. 脉冲压缩技术在高温连铸电磁超声测厚应用研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59(8): 20-31.
CHENG J J, SHI W Z, LU CH, et al. Application of pulse compression technology in electromagnetic ultrasonic thickness measurement of high-temperature continuous casting[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(8): 20-31.

[33] 王强, 毛捷, 丁晓东, 等. 衰减匹配的超声 Barker 码激励方法[J]. 声学学报, 2020, 45(2): 227-234.
WANG Q, MAO J, DING X D, et al. Ultrasonic Barker-coded excitation method with attenuation matching[J]. Acta Acustica, 2020, 45(2): 227-234.

[34] RIHACZEK A W, GOLDEN R M. Range sidelobe suppression for Barker codes[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1971(6): 1087-1092.

[35] 李紫伦, 杨安坤, 覃小红, 等. 三维编织玻璃纤维/环氧树脂复合材料薄壁管轴向压缩性能的温度效应[J]. 复合材料学报, 2023, 40(10): 4963-4976.
LI Z L, YANG AN K, QIN X H, et al. Temperature effect on axial compressive properties of three-dimensional glass fiber/epoxy resin braided composite thin-walled tubes[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2023, 40(10): 4963-4976.

[36] 骆辉, 李桐, 黄强华, 等. 基于声发射技术的大容积玻璃纤维缠绕气瓶冲击损伤评定[J]. 振动与冲击, 2023, 42(5): 143-149.
LUO H, LI T, HUANG Q H, et al. Impact damage evaluation of large volume glass fiber wrapped gas cylinder based on AE technology[J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(5): 143-149.

[37] FAN H, REN L, MAO E, et al. A high-precision phase-derived velocity measurement method for high-speed targets based on wideband direct sampling LFM radar[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(12): 10147-10163.

[38] ARAB H, DUFOUR S, MOLDOVAN E, et al. Accurate and robust CW-LFM radar sensor: Transceiver front-end design and implementation[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 19(5): 1943-1950.

作者简介

孟凌霄,2021 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: MongLX@88.com

Meng Lingxiao received his B. Sc. from Nanchang Hangkong University in 2021. He is currently a master student at Nanchang Hangkong University. His main research interest is electromagnetic acoustic testing.

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,现为南昌航空大学副教授,主要研究方向为电磁超声检测。

E-mail: 70658@ nchu. edu. cn

Shi Wenze 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 an associate professor at Nanchang Hangkong University. His main research interest is electromagnetic acoustic testing.

卢超,1995 年于江西师范大学获得学士学位,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,现为南昌航空大学校长、教授,主要研究方向为超声检测及仪器。

E-mail: luchaoniat@ 163. com

Lu Chao 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. from China Academy of Railway Sciences in 2009. He is currently the headmaster and a professor at Nanchang Hangkong University. His main research interests include ultrasonic non-destructive testing and instrument design.

黄良(通信作者),2002 年于南昌航空工业学院获得学士学位,现为中国特种设备检测研究院高级工程师,主要研究方向为氢能装备检验检测与安全评价。

E-mail: 33656582@ qq. com

Huang Liang (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Nanchang Institute of Aeronautical Technology in 2002. He is currently a senior engineer at China Special Equipment Inspection and Research Institute. His main research interests include hydrogen energy equipment inspection and safety evaluation.

凌建,2008 年于东北林业大学获得学士学位,现为中材科技(成都)有限公司质量管理部部长、工程师,主要研究方向为车用金属内胆高压复合材料氢气瓶质量检测。

E-mail: ljnefu@ 126. com

Ling Jian received his B. Sc. degree from Northeast Forestry University in 2008. He is currently the director and an engineer of quality management Department of Sinoma Technology (Chengdu) Co., Ltd. His main research interest is quality inspection of high pressure composite hydrogen cylinder for metal inner liner for vehicle.