Analysis of the Influence Law of Electromagnetic Ultrasonic Testing Echo of High-Temperature Carbon Steel Forgings

WU Jianjian*, LIAO Kaixing, KONG Xianglong, GUAN Yajing, QIU Yunlin, WANG Hongke
(Suzhou Nuclear Power Research Institute Co., Ltd., Suzhou Jiangsu 215004, China)

Abstract: Implementing online defect detection and local dimension measurement during the high-temperature forging process improves the forging quality, economic level, and yield of forgings. Taking high-temperature carbon steel forgings as the testing object, the numerical modeling method and experimental research on the influence law of electromagnetic ultrasonic testing echo of high-temperature carbon steel forgings are carried out. According to the functional relationship between material parameters such as conductivity, permeability, and magnetostrictive piezomagnetic coefficient of carbon steel magnetic materials and temperature, a finite element model of electromagnetic ultrasonic testing process of medium carbon steel is established considering two energy transfer mechanisms of Lorentz force and magnetostrictive effect. The contribution proportion of temperature to Lorentz force and magnetostrictive effect to ultrasonic waves excitation and reception is analyzed. A high-temperature shear wave electromagnetic acoustic transducer (EMAT) is developed. Testing experiments of carbon steel forgings with a thickness of 100 mm at 50 ℃-750 ℃ are carried out, which verify the influence of temperature on electromagnetic ultrasonic testing echo. The results show that when the temperature range of carbon steel forgings is 50 ℃-500 ℃, 500 ℃-627 ℃, 627 ℃-750 ℃ respectively, the electromagnetic ultrasonic testing echo decreases slowly, increases rapidly, and decreases sharply with the increase of temperature. The high-temperature shear wave EMAT developed can achieve a signal-to-noise ratio of 33.9 dB at a high temperature of 750 ℃ and a duration of 10 minutes.

Key words: electromagnetic acoustic transducer; high-temperature carbon steel forgings; temperature; magnetostrictive effect
EEACC: 7810C **doi**: 10.3969/j.issn.1004-1699.2025.10.003

高温碳钢锻件电磁超声检测回波影响规律分析

吴剑剑*, 廖开星, 孔祥龙, 关雅静, 仇云林, 王红珂
(苏州热工研究院有限公司, 江苏 苏州 215004)

摘 要: 在高温锻造过程中实现缺陷的在线检测和局部尺寸测量, 有利于提高锻件的成品率、锻造质量和经济性水平。以高温碳钢锻件为检测对象, 开展高温碳钢锻件电磁超声检测回波影响规律的数值建模方法和实验研究。根据碳钢铁磁性材料的电导率、磁导率及磁致伸缩压磁系数等参数与温度之间的函数关系, 建立考虑洛伦兹力和磁致伸缩效应两种换能机理的碳钢电磁超声检测过程的有限元模型, 分析温度对洛伦兹力和磁致伸缩效应对超声波激励和接收的贡献比例。研制了高温横波电磁超声换能器(Electromagnetic Acoustic Transducer, EMAT), 并开展了 50 ℃~750 ℃高温、厚度为 100 mm 的碳钢锻件检测实验, 验证了温度对电磁超声检测回波的影响规律。研究结果表明, 当碳钢锻件温度范围分别为 50 ℃~500 ℃、500 ℃~627 ℃、627 ℃~750 ℃, 电磁超声检测回波随着温度的增加分别表现为缓慢减小、迅速增加、急剧减小的趋势。所研制的高温横波 EMAT 在 750 ℃高温、持续时间为 10 min 的条件下, 横波的一次底波信噪比可达 33.9 dB。

关键词: 电磁超声换能器; 高温碳钢锻件; 温度; 磁致伸缩效应
中图分类号: TP212 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-1699(2025)10-1741-10

大型铸锻件是电力、石化、航空航天、军工等关系到国家安全和国家经济命脉的战略性产业的关键基础部件。高温连铸和锻造是大型铸锻件的重要加工工艺。在高温连铸过程中, 若能在线监测连铸坯液芯末端位置, 实时调整辊压力和压下位置等工艺参数, 可以避免出现中心偏析、裂纹和松散等问题[1]。在高温锻造过程中, 若能在线检测锻件缺陷, 并据此调整工艺参数, 及时剔除缺陷超标件, 有利于提高锻造质量、经济型水平和成品率。应用于高温制造过程检测的主要方法有目测法、穿刺坯壳

收稿日期: 2023-10-16 **修改日期**: 2023-12-27

法、射钉法、鼓肚法、高能放射辐射法、应变测试法、数学建模、光学检测、涡流检测等,但普遍存在操作难度大、检测成本高、对生态环境破坏大以及检测能力不足等问题。超声检测利用超声波的传播特性对试样的不连续性进行评价,具有较好的检测适用性。

超声检测有压电超声、电磁超声、激光超声、空气耦合超声等。高纯度单晶钛酸铋压电晶片可以实现 1000 ℃长时间检测,但换能效率低、对试样表面光洁度要求高[2]。空气耦合超声仅适用于疏松多空隙材料,例如陶瓷、木材、复合材料等[3]。激光超声和电磁超声具有非接触、无需耦合剂、超声波模式多等优点,被国内外学者一致认为最适合且已经被应用于高温无损检测的关键技术[4-6]。

国内外研究者围绕着高温电磁超声换能器(Electromagnetic Acoustic Transducer,EMAT)已经开展详细的研究,例如,Urayama 等[7]在 EMAT 探头前端设置玻璃纤维隔热板,实现了 285 ℃沸水反应堆厚度体波测量。Hernandez-Valle 等[8-9]研制了脉冲电磁铁式横波 EMAT 探头,在 250 ℃ 高温时,持续检测时间不超过 0.6 min。Kogia 等[10-11]研制了水循环冷却式 SH 导波 EMAT,实现了 500 ℃高温碳钢和不锈钢的检测。Lunn 等[12]采用高居里温度的永磁体,研制了 450 ℃ 高温体波 EMAT 探头。翟国富等[4]研制了耐高温双线圈结构 EMAT,实现了 450 ℃不锈钢试件的在线检测。石文泽等[1,13]将脉冲压缩技术应用于高温电磁超声检测中,可以实现 750 ℃、厚度为 80 mm~100 mm 的高温锻件和铸件快速检测。综上所述,国内外研究成果主要侧重于 EMAT 传感器的耐高温检测能力,但是针对碳钢铁磁性材料中,温度对超声回波影响规律有待进一步研究。

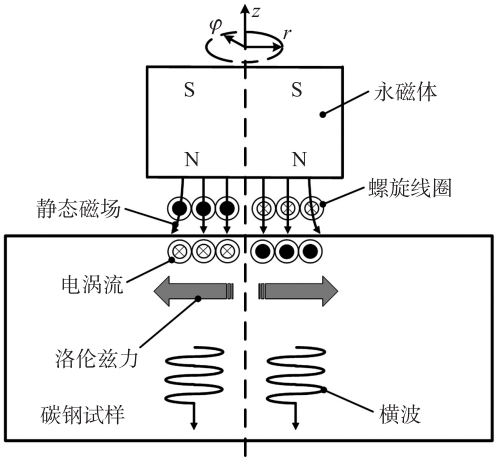
对于碳钢铁磁性材料,EMAT 的换能机理有磁致伸缩、洛伦兹力和磁化力[14-15]。在铁磁性金属材料中,磁致伸缩和洛伦兹力对超声波激励和接收的贡献比例由 EMAT 配置形式和铁磁性材料的电磁学特性和磁致伸缩特性决定[16-17]。不同温度下碳钢的电导率、磁导率和磁致伸缩应变曲线不同,因此,磁致伸缩和洛伦兹力对超声波激励和接收的贡献比例随着温度的变化而变化。在铁磁性金属材料中,EMAT 检测回波随着温度的增加而变化的趋势也受上述因素影响,同时还受高温超声传播衰减系数影响,两者对高温碳钢金属材料的缺陷定量产生重要影响。

为了进一步明晰温度对铁磁性金属材料 EMAT 换能机理的影响机制,建立高温碳钢材料体波 EMAT 检测过程有限元模型,分析不同温度下的洛伦兹力和磁致伸缩对超声波激励/接收效率的贡献比例,并通过实验验证温度对锻件 EMAT 检测回波的影响规律。

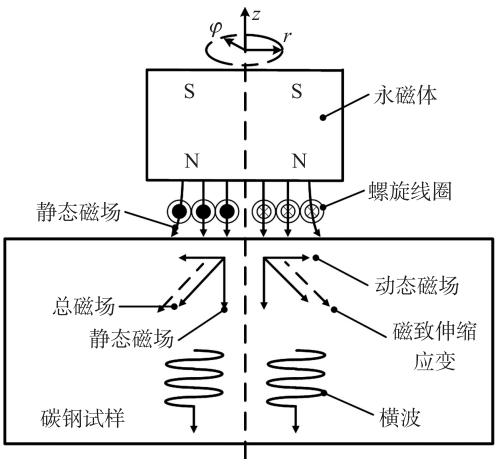
1 高温碳钢电磁超声检测过程有限元模型

1.1 EMAT 换能机理及控制方程

图 1 为螺旋线圈 EMAT 换能机理示意图,其中洛伦兹力机理如图 1(a)所示。通以射频电流的螺旋线圈可以在碳钢试样表面形成电涡流,并在永磁体的偏置磁场作用下,产生洛伦兹力。洛伦兹力带动试样表面粒子振动,形成沿厚度方向传播的超声波。在铁磁性材料中,永磁体的偏置磁场以垂直方向为主,因此超声波主要为横波。磁致伸缩机理如图 1(b)所示,当螺旋线圈通入射频电流脉冲后,可以产生以水平分量为主的交变动态磁场,与以垂直分量为主的静态偏置磁场组合可以形成总磁场。在变化的总磁场作用下,碳钢试样发生周期性形变,并产生超声波。



(a) 洛伦兹力



(b) 磁致伸缩应变

图 1 螺旋线圈 EMAT 换能机理示意图

①洛伦兹力机理控制方程

激励 EMAT 在试样表层的电涡流密度 $\boldsymbol{J}_{\mathrm{i}\varphi}$ 和洛伦兹力 $\boldsymbol{f}_L$ 的控制方程如下[18]:

$$\frac{1}{\mu}\nabla^2\boldsymbol{A}_\varphi-\sigma\frac{\partial A_\varphi}{\partial t}+\frac{\sigma}{S_k}\frac{\partial}{\partial t}\iint_{R_k}\boldsymbol{A}_\varphi\mathrm{d}s=-\frac{\mathrm{st}(t)}{S_k}\tag{1}$$

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{i}\varphi}=-\sigma\frac{\partial\boldsymbol{A}_\varphi}{\partial t}\tag{2}$$

$$\boldsymbol{f}_L=\boldsymbol{J}_{\mathrm{i}\varphi}\times\boldsymbol{B}\tag{3}$$

式中:S_k、R_k、$\mathrm{st}(t)$ 和分别为第 k 匝导线的等效横截面积、横截面区域和电流,$\boldsymbol{A}_\varphi$ 为 φ 方向磁矢势,σ、μ 为电导率、相对磁导率,$\boldsymbol{B}$ 为偏置磁感应强度。

在洛伦兹力 $\boldsymbol{f}_L$ 作用下,超声波传播控制方程如下[19]:

$$\rho\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}-\nabla\times\boldsymbol{T}=\boldsymbol{f}_L\tag{4}$$

式中:ρ、$\boldsymbol{u}$ 和 $\boldsymbol{T}$ 为材料密度、超声波位移矢量和应力张量。

螺旋线圈 EMAT 接收到的开路感生电压 V_{in} 的控制方程如下[20]:

$$\boldsymbol{J}_{\mathrm{e}\varphi}=-\sigma\boldsymbol{v}\times\boldsymbol{B}\tag{5}$$

$$\frac{1}{\mu}\nabla^2\boldsymbol{A}_\varphi-\sigma\frac{\partial\boldsymbol{A}_\varphi}{\partial t}=-\boldsymbol{J}_{\mathrm{e}\varphi}\tag{6}$$

$$V_{\mathrm{in}}=\frac{\int_{R_k}\left(\int_{l_c}-\frac{\partial A_\varphi}{\partial t}\mathrm{d}l\right)\mathrm{d}\Omega}{\int_{R_k}\mathrm{d}\Omega}\tag{7}$$

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

②磁致伸缩机理控制方程

在铁磁性材料中,应变不仅与应力相关,还与外加磁场有关,应变产生的过程以及机械应力改变材料磁特性的过程体现在如下本构方程中[16-17,21]:

$$\boldsymbol{\varepsilon}=\boldsymbol{S}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{\sigma}+\boldsymbol{d}\boldsymbol{H}\tag{8}$$

$$\boldsymbol{B}=\boldsymbol{d}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{\sigma}+\boldsymbol{\mu}\boldsymbol{H}\tag{9}$$

式中:$\boldsymbol{\varepsilon}$ 为应变矩阵,$\boldsymbol{S}^{\mathrm{H}}$ 为物质的柔性系数矩阵,$\boldsymbol{\sigma}$ 为应力矩阵,$\boldsymbol{d}$ 为压磁矩阵,$\boldsymbol{\mu}$ 为磁导率矩阵。

压磁矩阵 $\boldsymbol{d}$ 取决于磁化强度方向。当静态磁场主要分量垂直于被测试件表面,且静态偏置磁场强度远大于动态磁场强度时,压磁矩阵可表示为[16,21]:

$$\boldsymbol{d}=\begin{bmatrix}0&0&0&0&0&d_{61}\\-\frac{d_{22}}{2}&d_{22}&-\frac{d_{22}}{2}&0&0&0\\0&0&0&d_{61}&0&0\end{bmatrix}\tag{10}$$

式中:d_{22} 代表偏置磁场幅值的调整,用铁磁性物质磁致伸缩曲线的斜率进行表示,d_{61} 代表静态偏置磁场方向上的动态调整,两压磁系数在 H_Z 方向上可表示为[17,21]:

$$d_{22}=\left(\frac{\partial\varepsilon_2}{\partial H_2}\right)_{H_Z}\tag{11}$$

$$d_{61}=\frac{3\varepsilon}{H_Z}\tag{12}$$

1.2　有限元建模

螺旋线圈 EMAT 设计参数示意如图 2 所示,其设计参数及其取值如表 1 所示。不同温度下的电导率、相对磁导率、磁致伸缩系数、压磁系数,如表 2 所示。碳钢上端面和线圈导线边界均采用边界层网格进行细化。永磁体和碳钢试样分别采用最大网格单元大小为 0.5 mm 和 0.3 mm 的辐射网格。空气域和线圈分别采用最大网格单元大小为 2 mm 和 0.1 mm 的三角形网格。

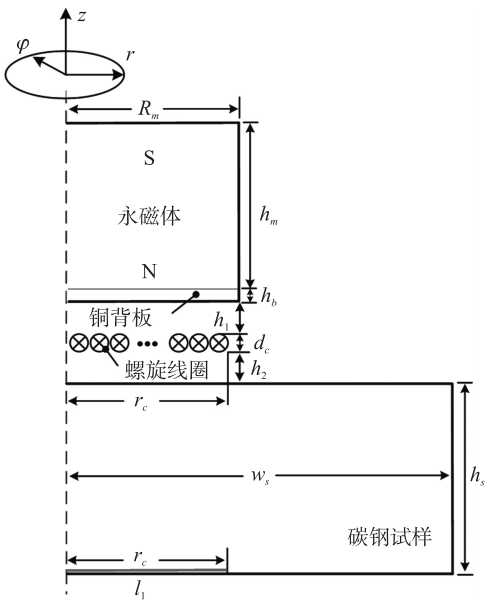


图 2　螺旋线圈 EMAT 有限元模型设计参数示意图

表 1　螺旋线圈 EMAT 设计参数及其取值

参数	取值/mm	参数	取值/mm
磁铁半径 R_m	15	提离距离 h_2	0.1
磁铁高度 h_m	10	铜背板厚度 h_b	0.2
线圈半径 r_c	15	碳钢试样半径 w_m	40
导线直径 d_c	0.35	碳钢试样高度 h_s	40
线圈-铜背板距离 h_1	2		

当温度变化时,碳钢的电导率、磁导率的改变会影响基于洛伦兹力和磁致伸缩力机制的螺旋线圈 EMAT 的激励和接收效率。文献[22-23]给出了不同温度下碳钢的电导率,文献[24]提供了中碳钢在偏置磁场强度 0.1 T 时的磁化率随温度的变化曲

线,如图 3 所示。由图 3 可知,随着温度升高,中碳钢的磁化率迅速减小,当温度达到居里温度附近,磁化率减小为零,即铁磁性材料转变为顺磁性材料。根据图 3,可近似获取不同温度下碳钢试样的相对磁导率如表 2 所示。碳钢在不同温度下的磁致伸缩系数可参考文献[25],如图 4 所示,磁致伸缩系数 λ_r 随温度的上升表现为先振荡增大后急剧减小趋势,其在不同温度下的取值如表 2 所示。文献[21]提供了四种碳钢牌号:EN3、EN24、EN32B、BO1,其中压磁系数最大的为 EN24,其成分与中碳钢最为接近。已知 EN3 钢试样在常温条件下的压磁系数 $d_{61}=1.71$ nm/A,且电流激励频率对压磁系数的影响可忽略不计。根据式(12)中应变与压磁系数关系,则可等比例计算得到不同温度下的压磁系数,对应取值如表 2 所示。

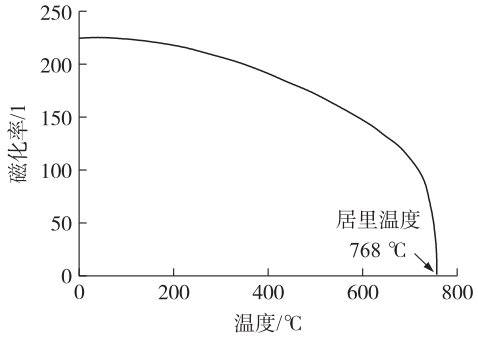


图 3 中碳钢磁化率随温度的变化曲线

表 2 不同温度下的中碳钢电磁学参数和磁致伸缩系数

温度 T/℃	电导率 σ /10^6 S/m	相对磁导率 μ_r/1	磁致伸缩系数 λ_r/10^{-5}	压磁系数 d_{61}/(nm/A)
18	5.96	100	2.27	1.71
100	4.44	99	2.18	1.64
200	3.39	96	2.22	1.67
300	2.52	91	2.51	1.89
400	2.04	84	2.95	2.22
500	1.59	76	3.26	2.46
600	1.31	65	3.23	2.43
700	1.07	49	2.86	2.15
800	0.9	1	0	0

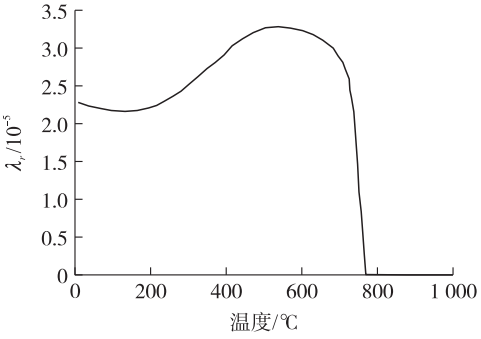


图 4 中碳钢磁致伸缩系数随温度的变化曲线

2 温度对碳钢 EMAT 换能效率的影响

2.1 温度对 EMAT 激励效率的影响

取超声波位移的水平分量沿碳钢试样下端面的接收/加载区域(如图 5 所示,位移接收/加载区域与螺旋线圈半径相同)的线积分值,可以获取洛伦兹力单独作用、磁致伸缩单独作用、洛伦兹力和磁致伸缩共同作用时对应的激励超声波位移信号。不同温度下洛伦兹力激发的超声波位移信号如图 6 所示,当温度由 18 ℃增加至 800 ℃,一次透射横波的幅值由 4.12×10^{-15} m 减小至 2.5×10^{-15} m。总体来看,温度对由洛伦兹力激发的超声波幅值影响较小,这是因为洛伦兹力在碳钢表面的总感生电流受碳钢的电导率和相对磁导率影响较小[16]。不同温度下磁致伸缩激发的超声波位移信号如图 7 所示,当碳钢温度范围为 20 ℃~700 ℃,随着温度的增加,磁致伸缩激发的超声波幅值显著增加。当温度由 18 ℃

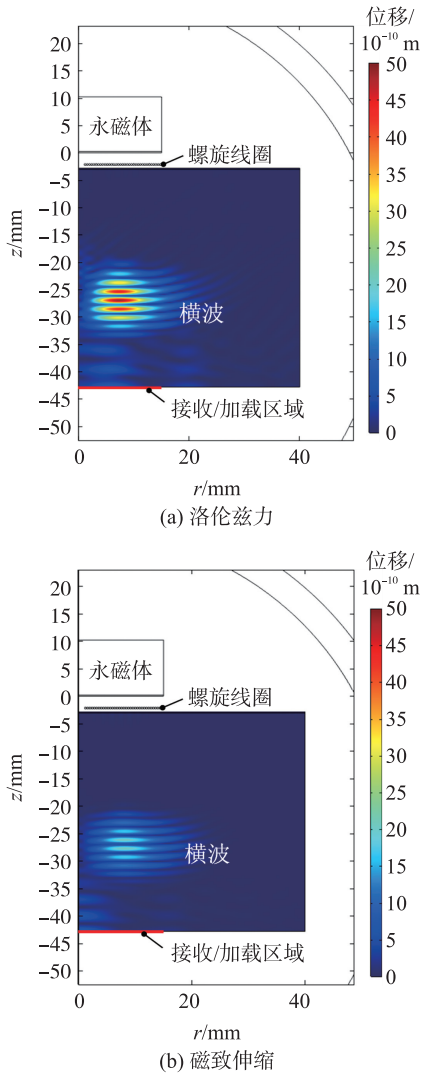


图 5 螺旋线圈 EMAT 激发的超声波在 18 ℃碳钢中的传播云图

增加至 700 ℃,一次透射横波的幅值由 2.78×10^{-15} m 改变至 3.25×10^{-13} m,增加了 117 倍。当碳钢温度为 800 ℃时,碳钢由铁磁性材料转为顺磁性材料,磁致伸缩对超声波激发的贡献作用消失。

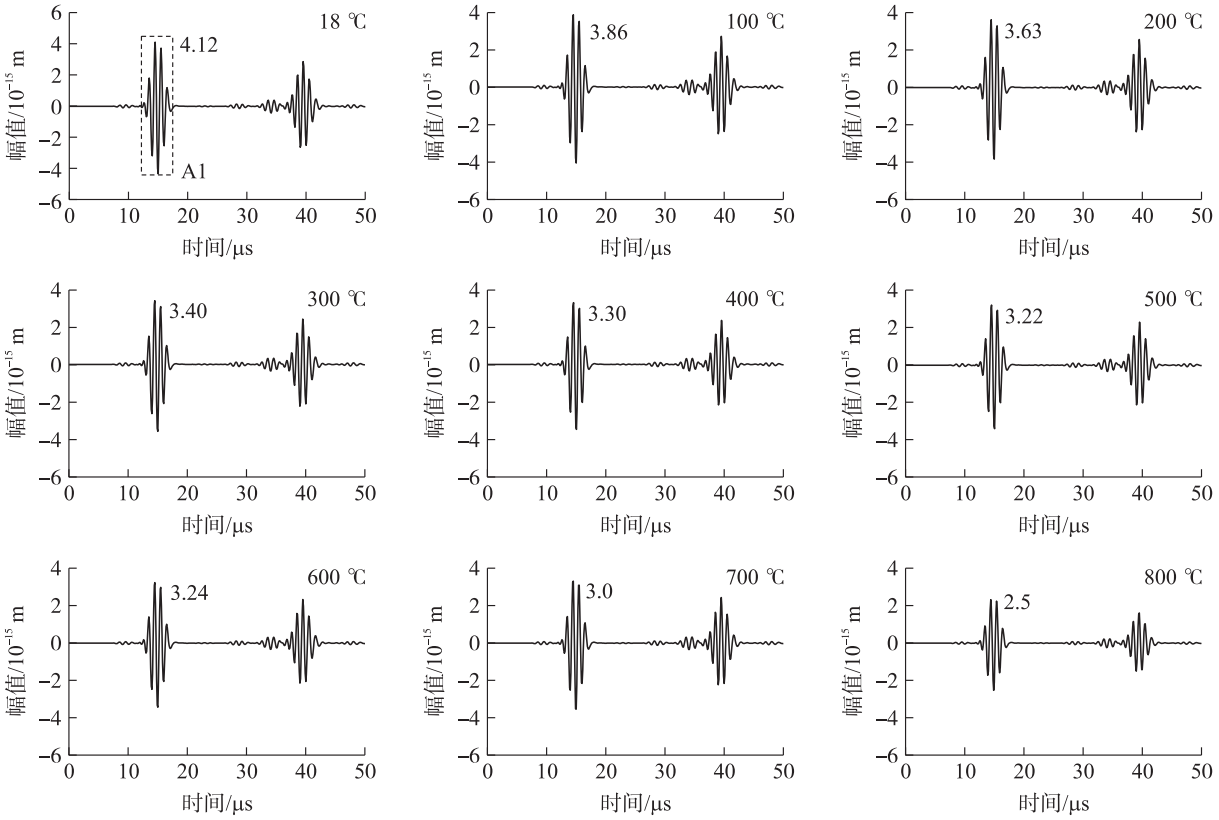


图 6　不同温度下洛伦兹力激发的超声波位移信号

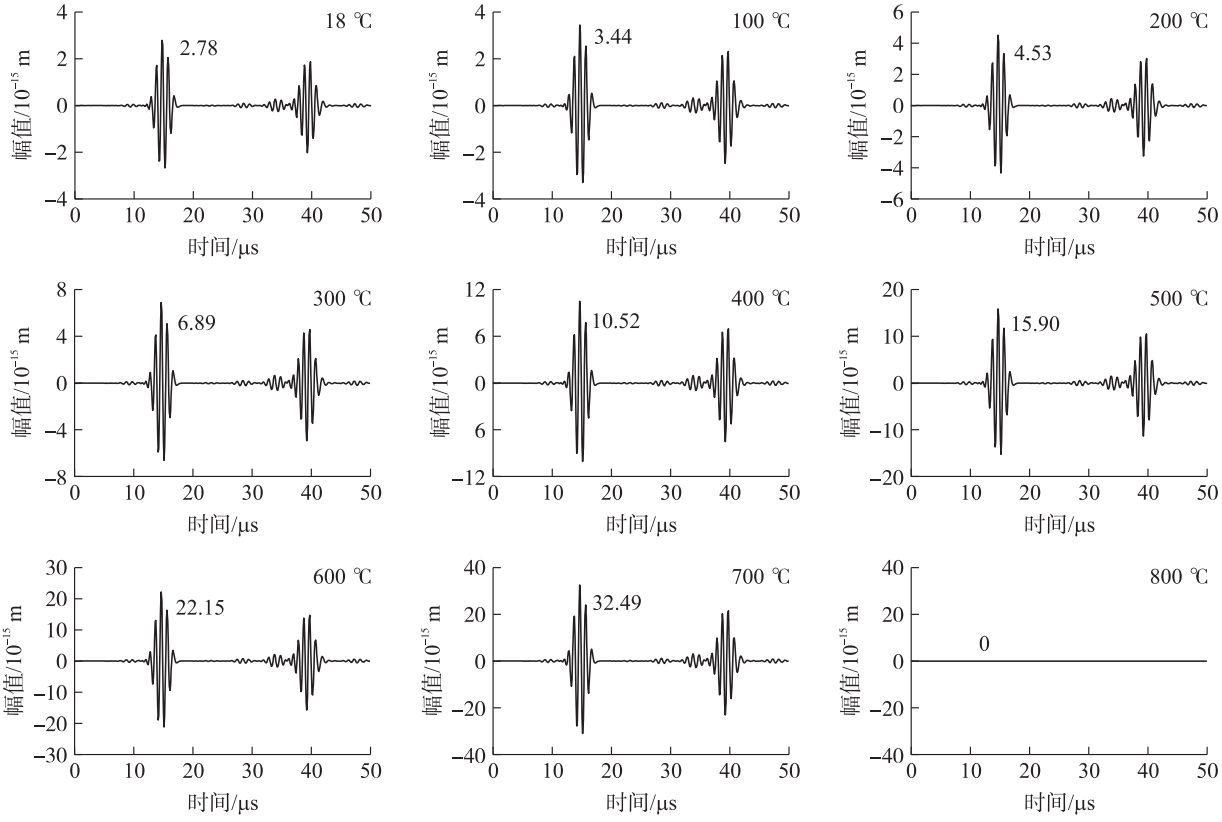


图 7　不同温度下磁致伸缩激发的超声波位移信号

当碳钢温度不同时,洛伦兹力与磁致伸缩对超声波激励的贡献比例如图 8 所示。由图 8 可知,当碳钢温度变化范围为 18 ℃~700 ℃时,洛伦兹力对激励超声波的贡献比例随着温度的增加而逐渐减小,磁致伸缩对激励超声波的贡献比例逐渐增加。当碳钢温度为 800 ℃时,只有洛伦兹力用于激励超声波。磁致伸缩对超声波的激励效率与碳钢试样表面的总动态磁感应强度和磁致伸缩系数成正比,随着碳钢试样温度的增加,其相对磁导率呈减小趋势,试样表面的总动态磁感应强度呈增加趋势。因此,碳钢试样 700 ℃时对应的总动态磁感应强度大于 600 ℃时对应的总动态磁感应强度,但是根据图 4,碳钢试样 600 ℃时对应的磁致伸缩系数大于 700 ℃时对应的磁致伸缩系数。由此可见,当碳钢试样的温度范围为 600 ℃至 700 ℃时,此时磁致伸缩对激励超声波的贡献比例最大,EMAT 激发超声波的能量达到最大。

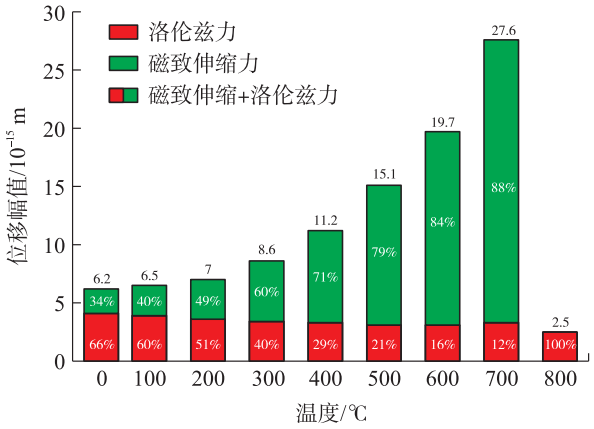


图 8 不同温度下洛伦兹力和磁致伸缩对激励超声波幅值的贡献比例

2.2 温度对 EMAT 接收效率的影响

在有限元模型中,在碳钢试样下端面的接收/加载区域(如图 5 所示,位移接收/加载区域与螺旋线圈半径相同)施加 Tone-burst 信号来模拟激发的超声波位移信号,激励频率 f 为 1 MHz,周期数为 5,幅值为 1 N/m^2。取螺旋线圈接收到的开路感生电压信号,可以获取洛伦兹力单独作用、磁致伸缩单独作用、洛伦兹力和磁致伸缩共同作用时对应的接收超声波电压信号,用于评估洛伦兹力和磁致伸缩对接收超声波幅值的贡献比例。不同温度下洛伦兹力和磁致伸缩对应的接收透射横波电压幅值如图 9 所示,温度变化对洛伦兹力所接收到的超声波幅值影响较小,但对磁致伸缩所接收到的超声波幅值影响显著。随着温度增加,洛伦兹力对应的接收超声波幅值逐渐减小,但是变化趋势较为缓慢。磁致伸缩对应的接收超声波幅值在 18 ℃~700 ℃范围内急剧增加,在温度大于 700 ℃时,则显著减小为 0。

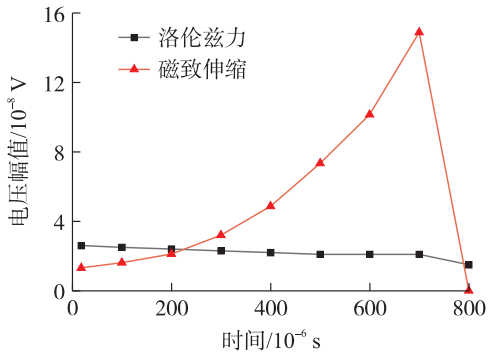


图 9 不同温度下洛伦兹力和磁致伸缩接收的透射横波电压幅值

当碳钢温度不同时,洛伦兹力与磁致伸缩对超声波接收的贡献比例如图 10 所示。由图 10 可知,当碳钢温度变化范围为 18 ℃~700 ℃时,洛伦兹力对接收超声波的贡献比例随着温度的增加而逐渐减小,磁致伸缩对接收超声波的贡献比例逐渐增加。当碳钢温度为 800 ℃时,只有洛伦兹力用于接收超声波。温度对洛伦兹力和磁致伸缩对超声波接收的贡献比例与对激励超声波的贡献比例一致。根据逆洛伦兹力和逆磁致伸缩是洛伦兹力和磁致伸缩的逆过程,可以推测:当碳钢试样的温度范围为 600 ℃至 700 ℃时,此时磁致伸缩对接收超声波的贡献比例最大,EMAT 接收超声波的效率达到最大。

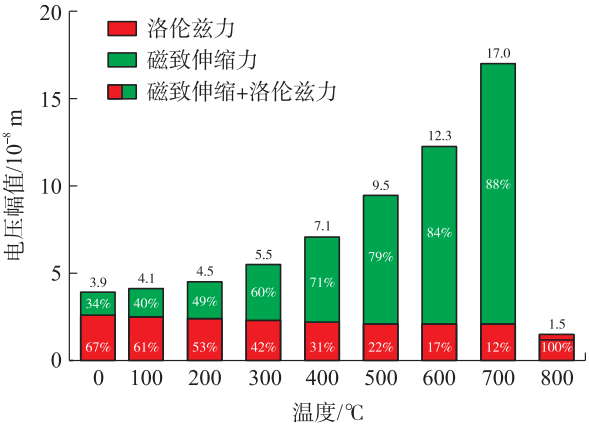
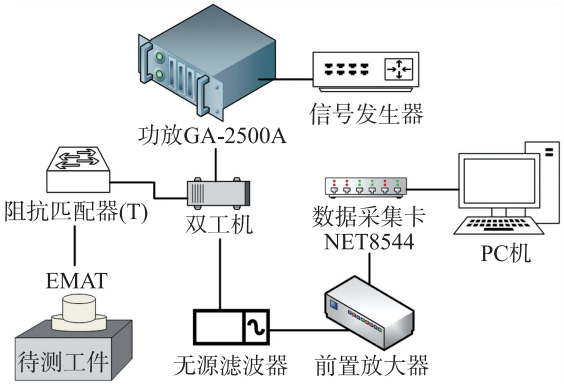


图 10 不同温度下洛伦兹力和磁致伸缩对接收超声波幅值的贡献比例

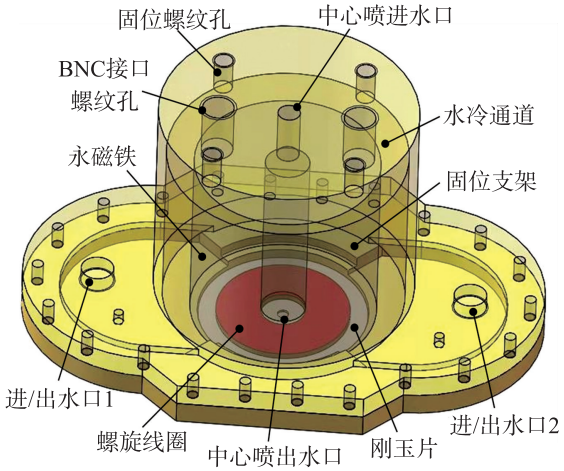
3 高温碳钢锻件 EMAT 检测结果分析

3.1 实验系统

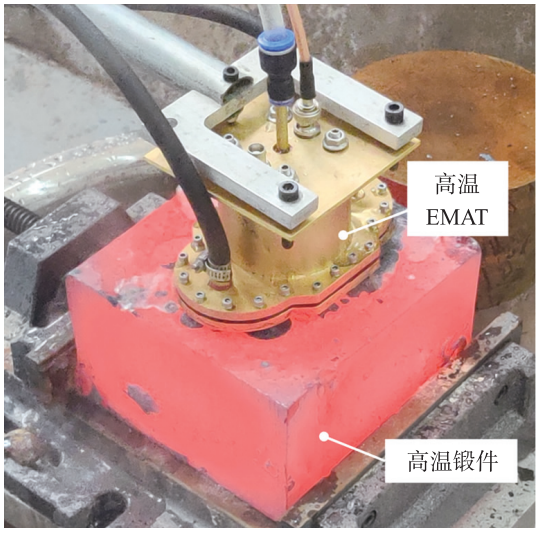
高温 45#碳钢 EMAT 检测实验系统如图 11 所



(a) 系统组成框图



(b) EMAT设计图



(c) 高温检测实物图

图 11　高温碳钢锻件 EMAT 检测实验系统

示，其中图 11（a）为系统组成框图，图 11（b）为 EMAT 设计图，图 11（c）为高温锻件和高温 EMAT 探头实物图。实验系统主要由信号发生器、脉冲功率放大器 GA-2500、双工机、阻抗匹配器、高温 EMAT 探头、前置放大器和数据采集卡等部分组成。螺旋线圈导线直径为 Φ0.25 mm、外径为 Φ25 mm。永磁体为钐钴永磁体，直径为 Φ50 mm，高度为 50 mm。待测碳钢锻件尺寸为 150 mm×160 mm×100 mm。由于碳钢锻件在高温状态下急剧氧化，易产生氧化铁皮层，造成锻件表面粗糙度较大，使得探头底座与高温锻件的距离为 2 mm，因此螺旋线圈距工件表面的提离为 3 mm。

3.2　高温 EMAT 检测结果分析

为了获取高温螺旋线圈 EMAT 对铁磁性碳钢锻件的检测回波随温度的变化规律，进行了常温至 750 ℃高温锻件检测实验，不同温度下锻件 EMAT 检测回波如图 12 所示。其中，A1 表示横波一次底波，A2 表示横波二次底波。由图 12 可知，当锻件温度为 50 ℃至 450 ℃时，检测回波中主要为横波。当锻件温度为 450 ℃以上时，明显出现模态转换波（横波转纵波）；当锻件温度为 600 ℃以上时，出现小幅值的纵波。在 750 ℃高温条件下，仍有横波一次底波和二次底波，并出现比较明显的纵波一次底波和二次底波，但纵波幅值大于横波幅值。在高温检测过程中，由于纵波的出现将容易引起缺陷的误判，因此需要可靠掌握温度对纵波幅值的影响规律。当碳钢温度为 600 ℃至 650 ℃，可以获得较高的检测回波，且信噪比较为理想。所研制的高温横波 EMAT 在 750 ℃高温、持续时间为 10 min 的条件下，横波的一次底波信噪比可达 33.9 dB。

在碳钢锻件温度为常温至 700 ℃，进行多次重复实验，得到高温 EMAT 探头检测回波中的横波一次底波随温度的变化趋势，如图 13 所示。由图 13 可知，高温 EMAT 检测回波中的横波幅值随着温度的增加表现为先增加后减小的趋势。当锻件温度在 475 ℃以下，检测回波的横波幅值随温度的升高而减小，这是因为在该温度范围内，螺旋线圈 EMAT 主要以洛伦兹力换能机制为主，另外材料衰减系数随温度的升高而变大。当锻件温度由 475 ℃升至 627 ℃时，横波幅值逐渐增加，这是因为在该温度范围内，螺旋线圈 EMAT 主要以磁致伸缩机制为主，且锻件表面温度在居里温度附近时，磁致伸缩机制作用效果达到最佳。当锻件温度在 627 ℃以上时，横波幅值急剧减小，这是因为在居里温度以上，磁致伸缩力作用机制急剧减弱并消失，且材料衰减系数急剧增大。

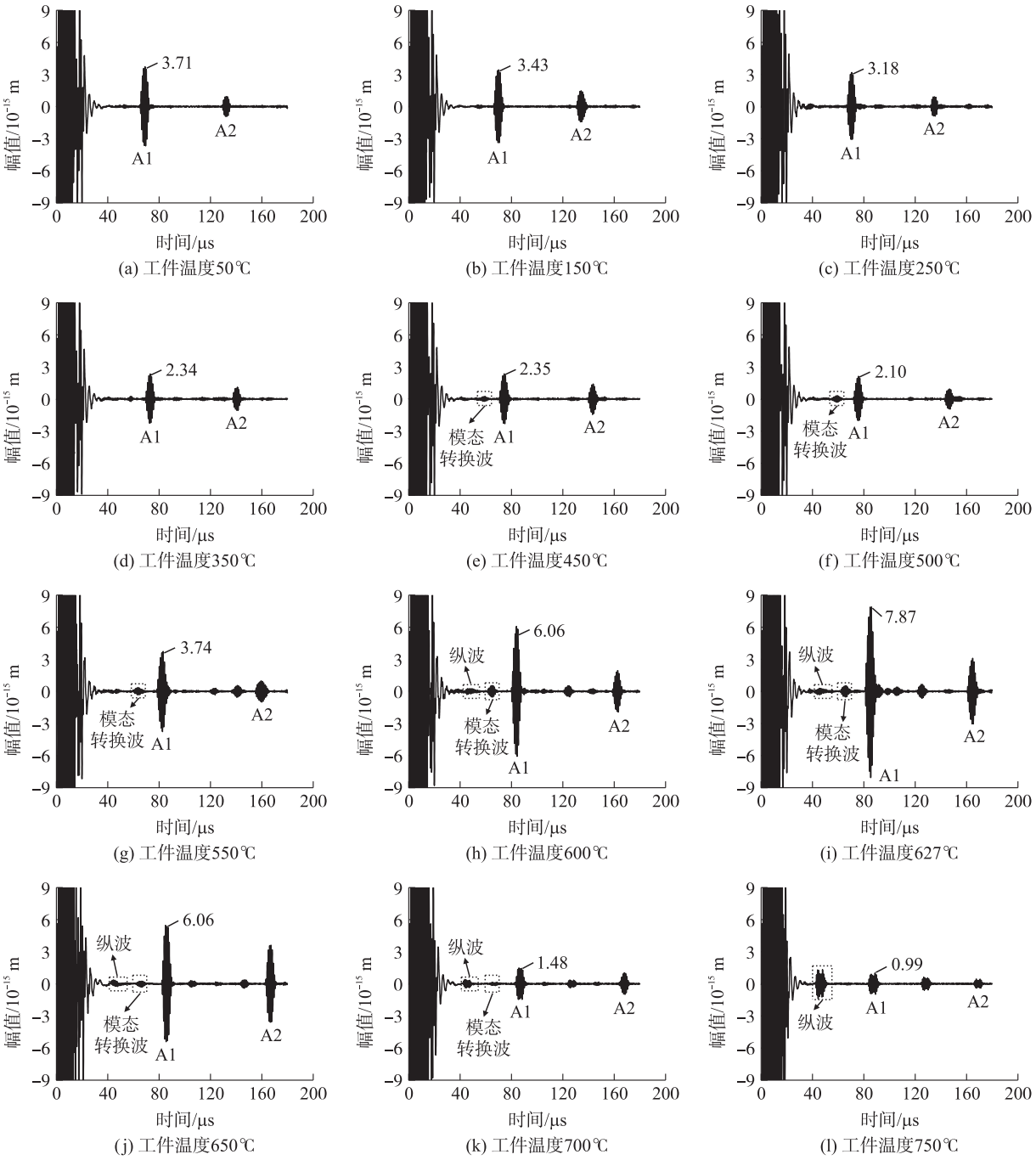


图 12　不同温度下锻件 EMAT 检测回波

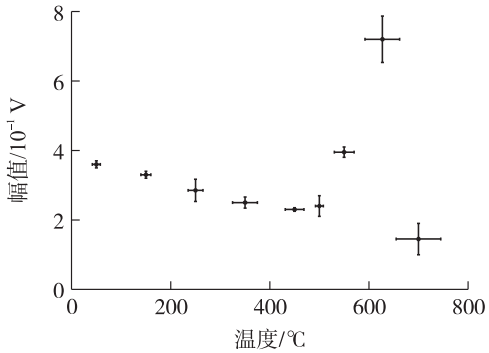


图 13　高温锻件检测信号随温度变化趋势

4　结论

①本研究通过数值建模和实验研究,分析了温度对碳钢铁磁性锻件中电磁超声检测回波的影响规律,分析温度对洛伦兹力和磁致伸缩效应对超声波激励和接收的贡献比例。

②当锻件温度在 475 ℃以下,检测回波的横波幅值随温度的升高而减小,这是因为在该温度范围内,螺旋线圈 EMAT 主要以洛伦兹力机制为主。当锻件温度由 475 ℃增加至 627 ℃时,横波幅值逐渐

增加,这是因为在该温度范围内,EMAT 主要以磁致伸缩机制为主。当锻件温度在 627 ℃以上时,横波幅值急剧减小,这是因为在居里温度以上,磁致伸缩力作用机制急剧减弱并消失。当碳钢试样的温度为 600 ℃至 700 ℃时,此时磁致伸缩对激励和接收超声波的贡献比例最大,EMAT 换能效率达到最大。

③所研制的高温横波 EMAT 在 750 ℃高温、持续时间为 10 min 的条件下,横波的一次底波信噪比可达 33.9 dB。

④对于高温 45#碳钢锻件,当锻件温度为 627 ℃ 时,磁致伸缩效应对超声波激励和接收的贡献比例最大。当实际锻件温度远高于 627 ℃时,可以通过表面瞬态水冷技术,将温度降低至 627 ℃,以提高超高温锻件的 EMAT 检测能力。

参考文献:

[1] 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.

[2] Baba A,Searfass C T,Tittmann B. R. High Temperature Ultrasonic Transducer up to 1000 ℃ Using Lithium Niobate Single Crystal[J]. Applied Physics Letters,2010,97(23):232901.

[3] Zhou Z,Ma B,Jiang J,et al. Application of Wavelet Filtering and Barker-Coded Pulse Compression Hybrid Method to Air-Coupled Ultrasonic Testing[J]. Nondestructive Testing and Evaluation,2014,29(4):297-314.

[4] 翟国富,梁宝,邓超然,等. 耐高温双线圈结构电磁超声换能器设计[J]. 中国电机工程学报,2021,41(11):3943-3951.

[5] 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.

[6] He P,Shi W Z,Lu C,et al. Optimisation of Rayleigh Wave Laser-EMAT with the Application of Surface Constraint Mechanism[J]. Nondestructive Testing and Evaluation,2023,38(6):931-965.

[7] Urayama R,Uchimoto T,Takagi T. Application of EMAT/EC Dual Probe to Monitoring of Wall Thinning in High Temperature Environment[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics,2010,33(3-4):1317-1327.

[8] Hernandez-Valle F,Dixon S. Pulsed Electromagnet EMAT for Ultrasonic Measurements at Elevated Temperatures[J]. Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring,2011,53(2):96-99.

[9] Hernandez-Valle F,Dixon S. Initial Tests for Designing a High Temperature EMAT with Pulsed Electromagnet[J]. NDT & E International,2010,43(2):171-175.

[10] Kogia M,Gan T H,Balachandran W,et al. High Temperature Shear Horizontal Electromagnetic Acoustic Transducer for Guided Wave Inspection[J]. Sensors,2016,16(4):582.

[11] Kogia M,Cheng L,Mohimi A,et al. Electromagnetic Acoustic Transducers Applied to High Temperature Plates for Potential Use in the Solar Thermal Industry[J]. Applied Sciences,2015,5(4):1715-1734.

[12] 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.

[13] Shi W Z,Chen W W,Lu C,et al. Application of Chirp Pulse Compression Technique to a High-Temperature EMAT with a Large Lift-Off[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics,2021,65(1):181-196.

[14] Jian X,Dixon S,Grattan K T V,et al. A Model for Pulsed Rayleigh Wave and Optimal EMAT Design[J]. Sensors and Actuators A:Physical,2006,128(2):296-304.

[15] Ribichini R,Cegla F,Nagy P B,et al. Quantitative Modeling of the Transduction of Electromagnetic Acoustic Transducers Operating on Ferromagnetic Media[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics,Ferroelectrics,and Frequency Control,2010,57(12):2808-2817.

[16] Ribichini R,Cegla F,Nagy P B,et al. Experimental and Numerical Evaluation of Electromagnetic Acoustic Transducer Performance on Steel Materials[J]. NDT & E International,2012,45(1):32-38.

[17] Ribichini R,Nagy P B,Ogi H. The Impact of Magnetostriction on the Transduction of Normal Bias Field EMATs[J]. NDT & E International,2012,51:8-15.

[18] Shi W,Wu Y,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.

[19] Howell P,Kozyreff G,Ockendon J. Applied Solid Mechanics[M]. Cambridge,UK:Cambridge University Press,2009:25-30.

[20] Wang S,Li Z,Li P,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.

[21] Ribichini R. Modelling of Electromagnetic Acoustic Transducers[D]. London,UK:Imperial College London,2011.

[22] Michael B,Eric W,David R,et al. Handbook of Optics:Properties of Metals[M]. New York,NY,USA:McGraw-

Hill,1995:34-36.

[23] Sun Y F,Niu D J,Sun J. Temperature and Carbon Content Dependence of Electrical Resistivity of Carbon steel[C]// 2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications,Xi'an,China,2009:368-372.

[24] Cole P T. The Generation and Reception of Ultrasonic Surface Waves in Mild Steel at High Temperatures[J]. Ultrasonics,1978,16(4):151-155.

[25] Thompson R B. Physical Principles of Measurements with EMAT Transducers[A]//Thurston R N,Pierce A D. Physical Acoustics[M]. San Diego,CA,USA:Academic Press,1990,19:157-200.

吴剑剑(1989—),男,高级工程师,硕士,主要研究方向为新能源风机主体结构病害监测、检测与治理技术,734351652@qq.com。