

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2107929

高温铸锻件内部温度场电磁超声重构方法研究*

石文泽^{1,2}, 童艳山¹, 卢超^{1,3}, 陈尧¹, 朱颖¹

(1. 南昌航空大学无损检测教育部重点实验室 南昌 330063; 2. 中科院声学研究所声场声信息国家重点实验室 北京 100190; 3. 赣南师范大学江西省数值模拟与仿真技术重点实验室 赣州 341000)

摘要:针对高温严苛条件下铸锻件内部温度场非接触测量困难这一问题,提出了基于弯曲效应和三角形前向展开法的高温铸锻件温度场非接触电磁超声斜入射横波重构方法。结合数值仿真和730℃电磁超声检测实验,对直入射横波的三角形追踪数学模型进行了验证,并研究了声束入射角、温度梯度对斜入射横波的传播路径和渡越时间的影响,比较了不同入射角的斜入射横波的温度灵敏度系数。结果表明:基于三角形前向展开法的高温锻件温度场直入射横波重建误差在3%以内。当采用斜入射横波时,声线传播路径受温度梯度、入射角度的影响较大,且对温度梯度的变化更加敏感,无论使用横波渡越时间还是横波出射点位置偏移量均可重构高温铸锻件的内部温度场。

关键词: 高温铸锻件; 温度场重建; 三角形前向展开法; 电磁超声换能器; 斜入射超声波
中图分类号: TP312 TH878 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

An electromagnetic ultrasonic reconstruction method for internal temperature field of high temperature casting and forging

Shi Wenzhe^{1,2}, Tong Yanshan¹, Lu Chao^{1,3}, Chen Yao¹, Zhu Ying¹

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

Abstract: Aiming at the difficulty of non-contact measurement of the casting and forging's internal temperature field under high temperatures and severe conditions, a reconstruction method for the temperature field of high-temperature castings and forgings with non-contact oblique incident shear wave (S-wave) electromagnetic acoustic transducer (EMAT) based on the bending effect and the triangular forward expansion method is proposed. Combining the numerical simulations and EMAT testing experiments at 730℃, the triangle tracking mathematical model of direct incident S-waves is evaluated. The effects of sound beam incident angle and temperature gradient on the propagation path and flight time of oblique incident S-wave are studied, and the temperature sensitivity coefficients of oblique incident S-wave with different incident angles are compared. Results show that the reconstruction error of direct incident S-waves in the temperature field of the high-temperature forging based on the triangular forward expansion method is within 3%. When the oblique incident S-wave is used, the propagation path of sound ray is greatly affected by the temperature gradient and the incidence angle, and it is more sensitive to the change of temperature gradient. The internal temperature field of high-temperature casting can be reconstructed by the flight time of the S-wave and the offset of the exit point of the S-wave.

Keywords: high-temperature castings and forgings; temperature field reconstruction; triangular forward expansion method; electromagnetic acoustic transducer; oblique incident ultrasound

收稿日期: 2021-05-14 Received Date: 2021-05-14

* 基金项目: 国家自然科学基金(52065049, 12064001, 51705231, 51705232)、江西省自然科学基金(20192ACBL20052)、江西省科技厅科技计划项目(20204BCJL22039, 20192BCD40028)、江西省青年科学基金(20181BAB216020)项目资助

0 引言

温度是高温铸锻造过程中的重要工艺参数,良好精确的温度条件可以有效地避免铸锻件在高温连铸和锻造过程中出现裂纹、气孔、夹杂等缺陷。目前,金属构件内部温度场测量主要依靠内埋式传感器(如热电偶、热电阻)等接触式检测方法,然而,由于铸锻件温度较高,接触式检测方法很难实现铸锻件内部温度场的实时测量。因此,发展新型在线快速声学检测方法,对高温铸锻件的内部瞬态温度场进行精确测量,并根据实测温度及时调整加工工艺参数,可以避免由于温度梯度过大而产生的中心偏析和裂纹等,也可以避免由于温度梯度过小而导致的蠕变鼓胀,具有重要的工程应用价值^[1-3]。

实现高温铸锻件内部温度场的在线声学测量的关键在于高温超声传感技术。压电超声检测通常需要配合高温压电材料和高温楔块或高温耦合剂,但涂覆在高温试样上的耦合剂极易挥发,且对检测试样表面平整度要求较高,因此很难应用于表面粗糙的高温铸锻件的在线快速检测。空气耦合超声一般适用于检测纤维复合材料及多孔隙材料,且接收信号信噪比和超声波频率低^[4-6]。激光超声检测精度高、测量距离远,但检测仪器体积大、价格昂贵、重复频率低,对灰尘防护要求较高,不适用于在线快速检测^[7-8]。与压电超声、激光超声和空气耦合超声相比,电磁超声换能器(electromagnetic acoustic transducer, EMAT)具有无需耦合剂和非接触检测等特点,尤其适合高温、表面粗糙金属铸锻等严苛检测场合^[9-11]。

目前,国内外已经开展了金属构件内部温度场重建方法的研究。石友安等^[12]使用基于EMAT技术的灵敏度法、共轭梯度法对钢材内部温度场进行预测,其中灵敏度法在采用准定常近似后的重建精度与共轭梯度法接近,均小于0.1℃。Dharmaraj等^[13]在摩擦电焊过程中利用超声波对铝合金内部温度进行测量,并且发现了在测温过程中,铝合金的杨氏模量对测温精度具有重要影响。田苗等^[14]将超声脉冲测温技术运用于钨钨合金声速测量中,实现了对不同温度下钨钨合金杆声速的测量,其测量相对误差不超过0.68%。Myres等^[15]根据渡越时间的变化和与温度相关的速度因子来推导铝试样的内部温度场,通过热传导模型和反演算法,初步实现了利用能量平衡对热通量进行测量。肖达等^[16]提出了一种基于Gabor变换和灰度梯度共生矩阵的超声无损测温方法,并对Gabor滤波的优异性能进行了验证。Ihara等^[17]将激光超声技术应用于150℃的铝板和钢板温度场测量,并有效估算了表面和内部温度场。Jia等^[18]提出了提出基于径向基函数逼近和奇异值分解的空气温度场重构方法,对单峰值温度场的重建精度相对误差范围达到了

3.53%~7.45%。张雪岩等^[19]采用等效源法建立了含缺陷叶片的三维热传导模型,将含缺陷叶片的三维热传导方程简化为了各向同性问题,检测精度相比一维提高了10%~31.4%。陈敏鑫等^[20]提出了使用随机森林算法对温度测点进行优化布置的新方法,相比于最小条件数法,重建精度提升了20%以上。崔云先^[21]等研究了一种C/SiC复合材料瞬时表面温度测量方法,能够满足室温~600℃范围内瞬态温度检测。相比于上述温度场重建算法/方法,本文所采用的三角形前向展开算法和非接触电磁超声技术,可以实现高温状态下铸锻件的温度场重建,并具有一定的理论研究价值。

三角形前向展开算法作为温度场重建方法中一种十分重要的方法,在国内外已经进行了较为深入的研究。Yamamoto等^[22]提出了一种二维声线追踪算法,使得声线追踪算法大大简化,提高了运算速度,这种方法即三角形前向展开算法。姜薇等^[23]在三角形前向展开算法的基础上发展了一种三维声线追踪方法-正三棱锥前向伸展算法,明显增强了三维声线追踪算法的运算速度。王明吉等^[24]使用二维空间中的三角形前向展开算法。对声线在温度场中的弯曲理论进行研究,实现了不同角度入射时声线的路径距离以及所用时间的计算。颜华等^[25]先用打靶-插值法确定本征声线出射角,再利用三角形前向展开算法追踪声线,获得温度场的本征声线,从而实现了考虑声线弯曲的最小二乘法重建温度场。上述研究利用三角形前向展开算法实现了非均匀温度场下的声线追踪与气体温度场的重建,但是在基于弯曲效应的高温铸锻件温度场电磁超声斜入射横波的重建方法有待进一步展开研究。

本文建立了基于三角形前向展开算法的碳钢电磁超声声直入射和斜入射横波测温迭代数学模型,并建立了横波在非均匀高温碳钢中传播有限元模型,并结合高温锻件电磁超声检测实验,验证了测温迭代算法的准确性,在此基础上,对入射角度、温度梯度对横波声线弯曲路径和渡越时间的影响规律进行了研究。

1 基于电磁超声的高温铸锻件内部温度场重构方法

1.1 超声测温原理

如图1所示为超声波测量铸锻件温度场原理,超声波在固态介质中的传播规律受介质的温度、密度、泊松比等参数的影响,其声速随着碳钢温度的升高而降低。通过耦合固体力学模块和固体传热模块,建立超声波在高温铸锻件中的传播有限元模型,依次计算铸锻件的温度场和声速场,并将其导入到三角形前向展开法的数值迭代模型中,即可实现超声波在非均匀高温铸锻件中的声线追踪。

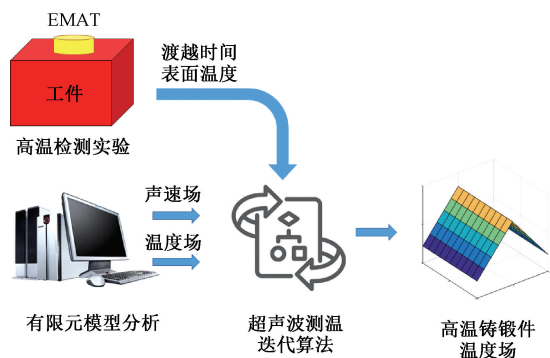


图1 超声波测量铸锻件温度场原理

Fig. 1 Principle of ultrasonic measurement for temperature field of castings and forgings

利用超声波在非均匀温度场中的声速变化以及声线弯曲理论,计算超声波在铸锻件内的渡越时间,并根据实测渡越时间和铸锻件的表面温度实测值,采用三角形前向展开迭代算法对高温铸锻件的芯部温度进行反复迭代,直至计算的渡越时间与实测渡越时间的偏差小于某一绝对误差,从而确定铸锻件内部温度场。

1.2 EMAT 换能机理

1) 直入射横波 EMAT 换能机理

直入射横波 EMAT 换能机理如图 2 所示,直入射横波 EMAT 主要由跑道线圈和一对极性方向相反的永磁体配合磁轭组成。在永磁体正下方,磁场沿垂直方向,洛伦兹力带动质点沿水平方向震动产生横波。在永磁体交界处存在水平方向的磁场,质点沿垂直方向振动产生少量纵波。因此跑道线圈 EMAT 主要以产生横波为主。

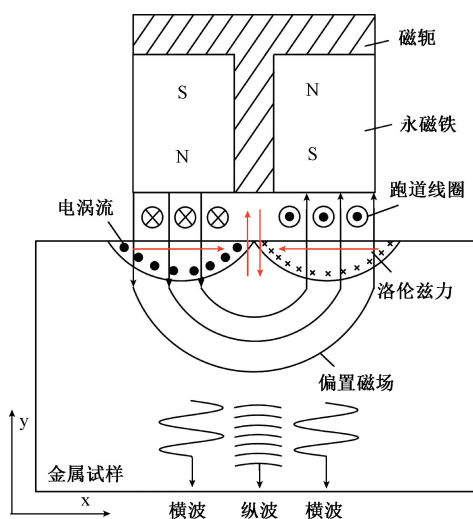


图2 直入射横波 EMAT 换能机理

Fig. 2 Conversion mechanism of normal incident shear wave EMAT

2) 斜入射 SV 波 EMAT 换能机理

基于洛伦兹力的斜入射 SV (shear-vertical) 波 EMAT 换能机理如图 3 所示。斜入射 EMAT 主要由永磁铁和曲折线圈组成,斜入射 SV 波的入射角度 θ 与曲折线圈匝间距 d 满足如下关系^[26]:

$$\sin\theta = c_s/2fd \quad (1)$$

其中, c_s 为试样中的 SV 波声速; f 为超声波频率。

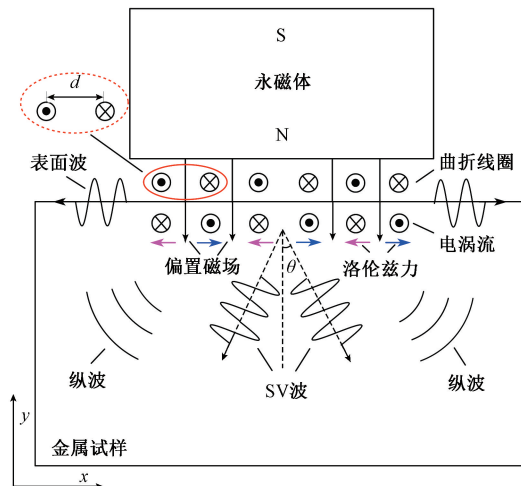


图3 斜入射 SV 波 EMAT 换能机理

Fig. 3 Conversion mechanism of oblique incident SV wave EMAT

直入射和斜入射横波 EMAT 中的永磁体充磁方向为垂直 y 方向,相比于洛伦兹力,磁致伸缩机制贡献比值相对较小,且当高温铸锻件温度在居里温度点以上时,铁磁性材料转变为顺磁性材料,因此直入射和斜入射 SV 波 EMAT 主要以洛伦兹力机制为主^[3]。

1.3 横波在非均匀高温碳钢中传播有限元建模

1) 直入射横波传播有限元模型

直入射横波在非均匀高温碳钢中传播有限元模型如图 4 所示,采用有限元商业软件 COMSOL Multiphysics 中的“传热模块”和“固体力学模块”实现热固耦合,首先,在“传热模块”中,在试样的上下表面和中心设置热源进行稳态热传导计算,构建非均匀温度场,其次,在“固体力学模块”中,在试样边界上设置边界载荷,用于激发超声波。通过将温度-纵波/横波声速函数代入到模型中,可以将温度梯度场转换为超声声速梯度场,也就实现了超声波在非均匀高温碳钢传播的数值建模。为减小计算量,将三维模型转换为二维模型。 T_{edge} 、 T_{center} 分别为碳钢的表面温度和芯部温度。

网格单元大小为 0.23 mm,最大计算时间步长为 0.01 μs ,有限元计算结果收敛。试样材料为 Q235 钢, Q235 材料参数如表 1 所示。试样宽度 D 和高度 h 均为 100 mm,两侧边界为热绝缘、低反射边界,边界载荷施加

在长度为 2 mm 的线段上,用于模拟如图 2 所示的直入射横波 EMAT 在工件表面产生的洛伦兹力。碳钢试样温度场控制方程为:

$$h\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \mathbf{q} = hQ_w + q_0 \quad (2)$$

$$\mathbf{q} = -hk_z \nabla T \quad (3)$$

式中: h 为试样高度; C_p 为恒压热容; $\mathbf{u}$ 为位移矢量; ρ 、 k_z 、 $\mathbf{q}$ 为材料的密度、导热系数和热通量矢量; T 为温度; q_0 为面外热通量; Q_w 为热源总功率。边界载荷函数为^[3]:

$$f_x = \begin{cases} 0.5(1 - \cos((2\pi t)/P_w)) \cdot \sin(2\pi ft), & 0 < t < P_w \\ 0, & t > P_w \end{cases} \quad (4)$$

其中,脉冲宽度 P_w 为 $5/f$ 。

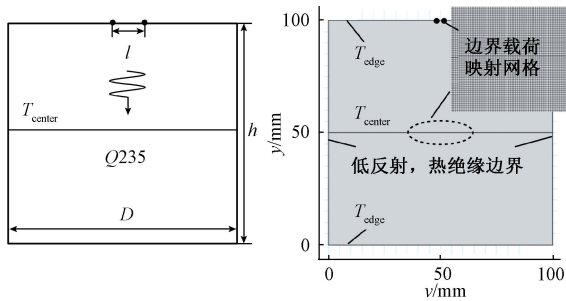


图 4 直入射横波在非均匀高温碳钢传播有限元模型

Fig. 4 Finite element model of normal incident shear wave propagation in non-uniform high temperature carbon steel

表 1 Q235 材料参数

Table 1 Q235 material parameters

参数	数值	单位
密度	7 900	kg/m ³
导热系数	44.5	W/(m·K)
恒压热容	475	J/(kg·K)

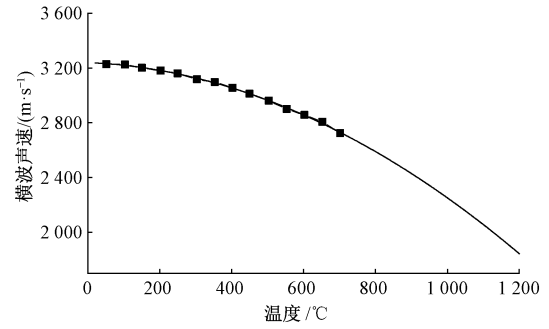
对碳钢不同温度下的横波声速^[27]和纵波声速^[28]分别进行函数拟合,得到的碳钢超声波声速与温度的变化曲线如图 5 所示。

得到的横波声速 c_s 和纵波声速 c_l 与温度 T 的拟合函数为:

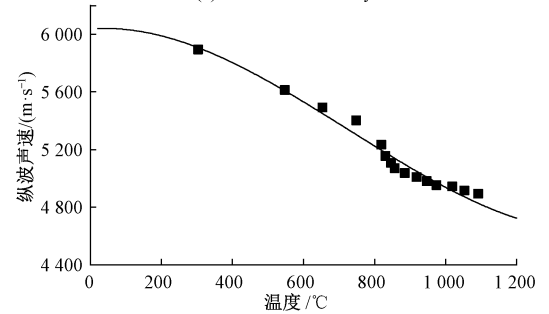
$$\begin{cases} c_l = 6\,035.9 + 0.2T - 2.4 \times 10^{-3}T^2 + 1.1 \times 10^{-6}T^3 \\ c_s = 3\,240.5 - 0.1T - 8.8 \times 10^{-4}T^2 \end{cases} \quad (5)$$

2) 斜入射 SV 波传播有限元模型

斜入射 SV 波在非均匀高温碳钢传播有限元模型如图 6 所示。试样材料为 Q235 钢,主要参数如表 1 所示。模型宽度 D 和高度为 h 分别为 150 mm、100 mm,线载荷与左边界距离 s 为 12.3 mm,与右边界距离 k 为 125 mm。



(a) 横波声速
(a) Shear wave velocity



(b) 纵波声速
(b) Longitudinal wave velocity

图 5 不同温度对应的碳钢超声波声速

Fig. 5 Ultrasonic velocity in carbon steel with various temperatures

试样左右边界均为热绝缘、低反射边界。加载区域为 16 段线载荷,相邻载荷的受力相反,分别向左或向右,用于模拟如图 3 所示的斜入射 SV 波 EMAT 在工件表面产生的洛伦兹力。

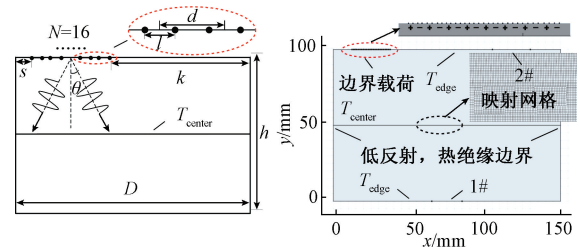


图 6 斜入射 SV 波在非均匀高温碳钢传播有限元模型

Fig. 6 Finite element model of oblique incident SV wave propagation in non-uniform high temperature carbon steel

1.4 三角形前向展开算法追踪声线原理

三角形前向展开原理如图 7 所示。在已知声速场和温度场的情况下,二维空间内该区域的线形近似声速场可以由 3 个已知声速的点确定,因此介质网格划分选用三角形。在追踪过程中,依次向前展开一个等边三角形区域,利用 Snell 法则可求得偏转半径,进而得到声线在该局部空间内的传播路径、出射点及出射方向^[24],由此依次向前展开即可得到声线在该介质空间中,实际情况

下的声线传播路径以及所用的时间、所行进的路程。

设入射点坐标为 (X_{in}, Y_{in}) , 入射的方向矢量为 (A_x, A_y) , 以入射点为顶点、入射方向向量为三角形的高的方向做一个高为 h_t 的等边三角形, 可求得另外两个底角的坐标。根据 3 个顶点坐标可以求得 3 个顶点的声速, 只要三角形足够小, 此时的声速场方程可以视为线性声速场, 从而求出三角形区域内的声速场方程。

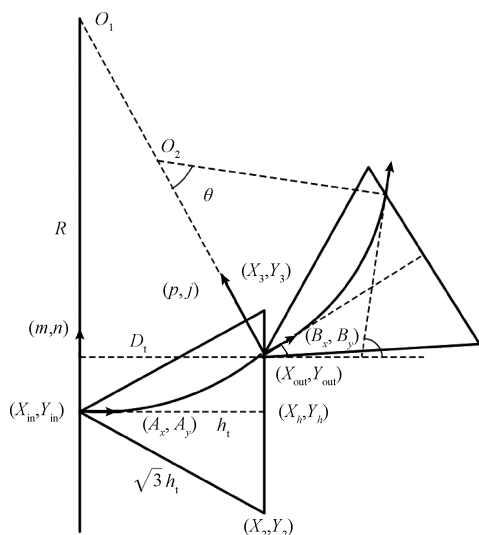


图7 三角形前向展开原理

Fig. 7 Forward deploying triangles principle

其线性声速场方程可表示为:

$$C(x, y) = ax + by + c \quad (6)$$

线性声速场中的声线路径为圆弧曲线, 由 Snell 法则可以求出圆弧半径 R 为:

$$R = \frac{C_{in} \sqrt{3} h_t}{|C_3 - C_2|} \quad (7)$$

圆心 O_1 为 $0 = ax + by + c$ 与 $y - Y_{in} = -A_x/A_y(x - X_{in})$ 方程组的解。 θ_1 为入射方向与 x 轴的夹角, θ_2 为出射方向与 x 轴的夹角, θ 为声线在三角形内偏转的角度, D_t 为出射点到 y 轴距离为:

$$D_t = R - \sqrt{R^2 + h_t^2} \quad (8)$$

$(m, n) = (-A_y, A_x)$ 为垂直于入射方向的点, 由此可得出射点 (X_{out}, Y_{out}) 与出射向量 (B_{x1}, B_{y1}) 的表达式为:

$$\begin{cases} X_{out} = X_{in} + A_x h_t + D_t m \\ Y_{out} = Y_{in} + A_y h_t + D_t n \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} B_{x1} = \frac{h_t m}{R} + \left(1 - \frac{D_t}{R}\right) A_x \\ B_{y1} = \frac{h_t n}{R} + \left(1 - \frac{D_t}{R}\right) A_y \end{cases} \quad (10)$$

将出射坐标归一化得:

$$\begin{cases} B_x = B_{x1} / \sqrt{B_{x1}^2 + B_{y1}^2} \\ B_y = B_{y1} / \sqrt{B_{x1}^2 + B_{y1}^2} \end{cases} \quad (11)$$

路程 S 的计算公式以及时间 Q 的计算公式如下所示^[24]:

$$S = \sum R(\theta_2 - \theta_1) = \sum R\theta \quad (12)$$

$$Q = \sum \frac{1}{2\sqrt{a^2 + b^2}} \left| \ln \left(\frac{1 + \cos \theta_1}{1 - \cos \theta_1} \cdot \frac{1 - \cos \theta_2}{1 + \cos \theta_2} \right) \right| \quad (13)$$

2 直入射横波在非均匀高温铸锻件中的传播规律研究

2.1 超声波测温迭代算法

基于三角形追踪的测温迭代算法程序流程如下: 首先我们需要设定实际测得的渡越时间来与计算的渡越时间进行对比, 因为随着温度的升高, 超声波的渡越时间会逐渐增加, 当实际渡越时间大于计算的渡越时间时, 内部温度值减小。重新计算渡越时间后, 再进行比较, 直到两者插值小于最小误差 ε , 则可以近似的对试样芯部温度进行估计。

2.2 直入射测温迭代算法计算结果

迭代三角形的高 h_t 决定了迭代计算的精度, 理论上迭代三角形高度设置的越小, 其计算精度越高, 但相应的计算速度将会变慢, 一般取追踪步长在 1.5% ~ 3%^[25], 设置 h_t 为 0.1 mm。将表面温度固定为 450℃, 芯部温度在 850℃ 的基础上依次增加 10℃, 设置试样高度为 100 mm, 得到边界温度 $T_{edge} = 450^\circ\text{C}$ 时, 不同芯部温度 T_{center} 对应的渡越时间如表 2 所示。

表2 边界温度 $T_{edge} = 450^\circ\text{C}$ 时, 不同芯部温度 T_{center} 对应的渡越时间

Table 2 Time-of-flight for different core temperatures T_{center} with the 450°C boundary temperature T_{edge}

$T_{center}/^\circ\text{C}$	渡越时间/ μs	$T_{center}/^\circ\text{C}$	渡越时间/ μs
850	71.962	870	72.548
860	72.154	880	72.751

如图 8 所示为边界温度 T_{edge} 为 450℃, 芯部温度 T_{center} 为 950℃ 时直入射横波在非均匀高温碳钢中的传播声线路径, 传播路径为 200 mm, 渡越时间为 74.104 μs 。由图 8 可知, 入射路径与反射路径完全重合, 这是由于垂直入射的超声在非均匀高温金属材料中不会发生弯曲。

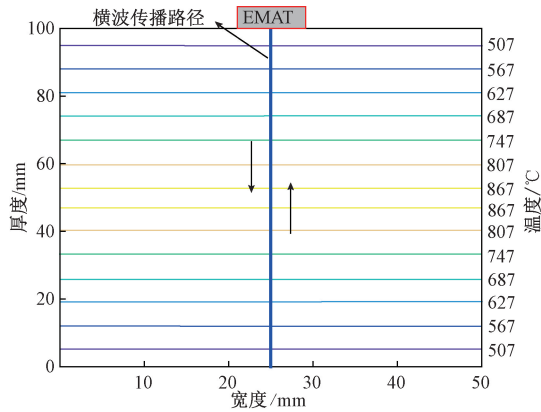


图 8 直入射横波在非均匀高温碳钢中的传播声线路径
Fig. 8 Propagation paths of normal incident shear wave in non-uniform high temperature carbon steel

2.3 高温锻件内部温度场直入射横波测量结果对比

高温锻件 EMAT 检测实验系统组成如图 9(a) 所示。信号发生器产生频率为 1 MHz 的单一频率脉冲串, 经过 RITEC GA-2500A 功率放大器进行电流放大, 并作用在 EMAT 线圈上, 用于产生超声波。使用阻抗匹配器对线圈与功率放大器的阻抗进行共轭匹配用以提高传输功率的能量。使用前置放大器以及无源滤波器对接收到的超声波信号经过放大和滤波处理后, 经过数据采集卡将采集到的模拟信号转换成数字信号, 并传输至 PC 机。

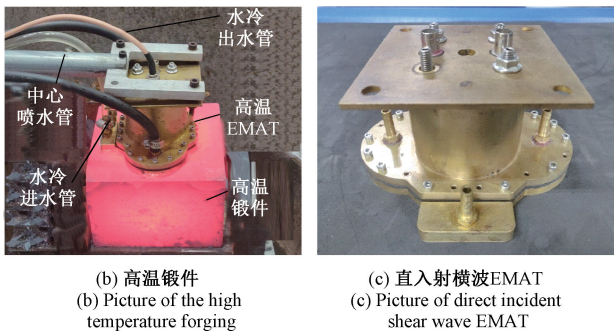
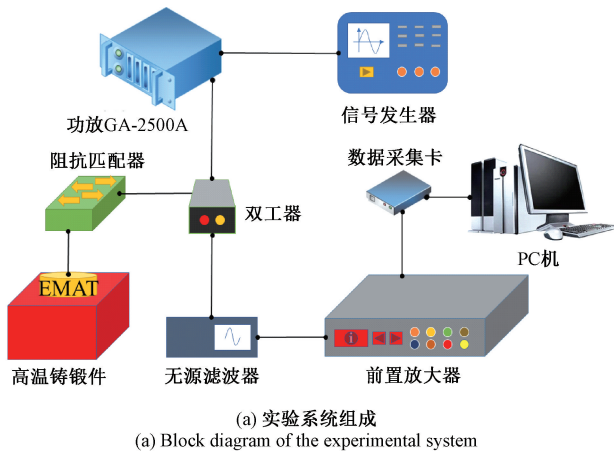


图 9 高温锻件 EMAT 检测实验系统

Fig. 9 EMAT testing experiment system for high-temperature forgings

如图 9(b) 所示为待测高温锻件, 采用如图 9(c) 所示高温 EMAT, 对厚度为 100 mm 的高温锻件在 1 000℃ 高温加热炉中长时间 (>2 h) 加热, 在表面温度为 100℃、200℃、300℃、400℃、500℃、600℃、730℃ 时进行检测, 获取 100℃ 和 730℃ 时的超声回波如图 10(a)、(b) 所示。由图 10 可知, 随着温度升高, 超声波的渡越时间逐渐增加。

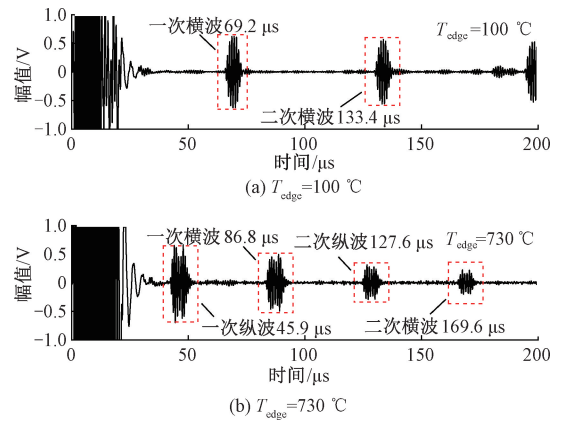


图 10 不同温度下的锻件脉冲回波

Fig. 10 Ultrasonic echoes of forgings with different temperatures

三角形追踪法计算得到的芯部温度与实测温度对比如图 11 所示。由图 11 可知, 迭代算法得到的芯部温度重建误差均在 3% 以内。

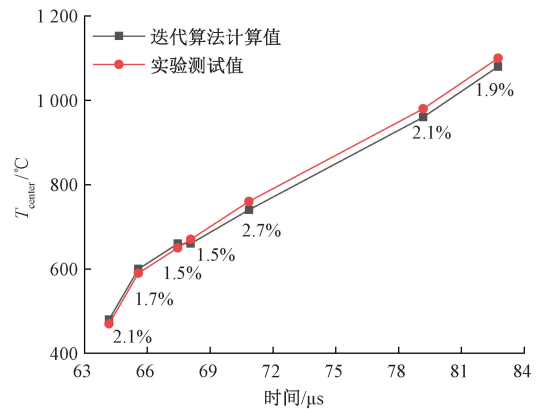


图 11 三角形追踪法计算得到的芯部温度与实测温度对比
Fig. 11 Comparison of core temperatures calculated by triangle tracing method and measured by experiments

2.4 直入射超声波传播有限元计算结果

EMAT 换能区域相对于高温锻件的检测面很小, 在 x 轴方向上的非均匀温度场可近似认为均匀分布。当金属试样上下表面边界温度均为 100℃, 芯部温度为 470℃, 高温锻件内部温度场有限元计算结果如图 12 所示。

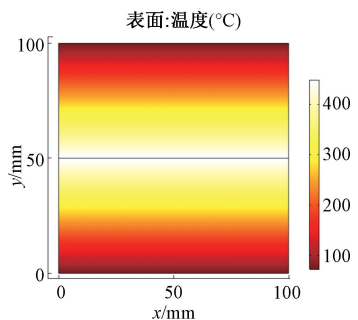


图 12 高温锻件内部温度场有限元计算结果
Fig. 12 Finite element calculation results of internal temperature field of the high temperature forging

直入射超声波在非均匀高温锻件中的传播瞬态云图如图 13 所示。锻件 T_{center} 、 T_{edge} 分别为 470℃、100℃ 时的超声波回波如图 14 所示。由图 14 可知,当 T_{center} 、 T_{edge} 分别为 470℃、100℃ 时,直入射横波的渡越时间为 66.2 μs 。

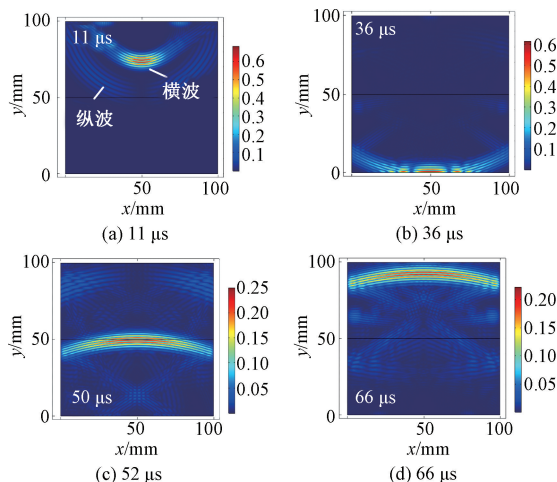


图 13 直入射超声波在非均匀高温锻件中的传播瞬态云图
Fig. 13 Transient nephogram of direct incident ultrasonic wave propagation in the non-uniform high-temperature forging

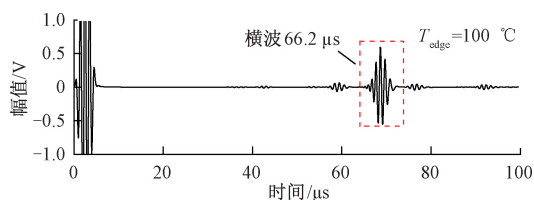


图 14 锻件 T_{center} 、 T_{edge} 分别为 470℃、100℃ 时的超声波回波
Fig. 14 Ultrasonic echo from the forging when T_{center} and T_{edge} are respectively 470℃ and 100℃

2.5 直入射横波测温迭代算法验证

有限元计算、实验测试与三角形迭代算法对应的横波渡越时间对比如图 15 所示。由图 15 可知,同一温度

场条件下三角形迭代算法计算的渡越时间、有限元计算的渡越时间与实验测试的渡越时间三者最小偏差为 0.28%,最大偏差为 4.1%。由此可见,直入射横波测温迭代法达到了有限元计算的精度,验证了基于三角形追踪法的直入射横波测温迭代算法的准确性。

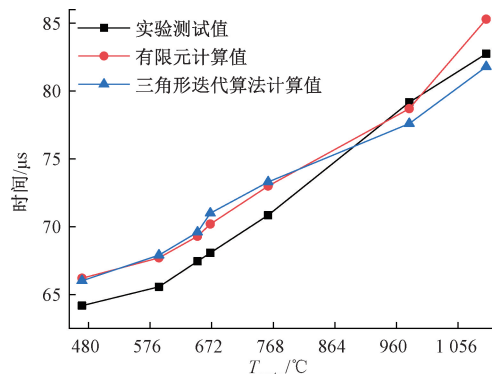


图 15 有限元计算、实验测试与三角形迭代算法对应的横波渡越时间对比

Fig. 15 Comparison of S wave's time-of-flight from the experimental measurement, finite element method and triangle tracing method

3 斜入射 SV 波在非均匀高温铸锻件中的传播规律

3.1 斜入射 SV 波在高温铸锻件非均匀温度场下的声线弯曲效应

对非均匀高温铸锻件的斜入射 SV 波声线路径进行追踪,设置锻件中的非均匀高温温度场函数为:

$$T = \begin{cases} \frac{2x(T_{\text{center}} - T_{\text{edge}})}{h} + T_{\text{edge}}, & 0 < x < \frac{h}{2} \\ \frac{2x(T_{\text{edge}} - T_{\text{center}})}{h} + 2T_{\text{center}} - T_{\text{edge}}, & \frac{h}{2} < x < h \end{cases} \quad (14)$$

当 T_{center} 为 1 400℃, T_{edge} 为 790℃ 时, h 为 100 mm 时得到的高温锻件的非均匀温度场如图 16 所示。

如图 17(a)、(b) 所示为 $T_{\text{edge}} = 517^\circ\text{C}$, 且 T_{center} 分别为 1 047℃、1 127℃ 时的不同入射角斜入射 SV 波对应的声线路径图。入射角变化区间为 $10^\circ \sim 40^\circ$, 依次增加 5° 。由图 17 可知,当入射方向与梯度温度场等温线不垂直时,声线向低温区弯曲,在铸锻件中心 (50 mm) 声线的弯曲方向发生了转变,且随着入射角的增加,横波传播路程也逐渐增加,其主要原因是由于碳钢材料在不同温度时对应的横波声速也不同,碳钢内部温度梯度的变化导致其内部声阻抗分布不均匀,根据 Snell 定律,超声波在不同声阻抗的分界面将发生折射现象,因此超声波传播声

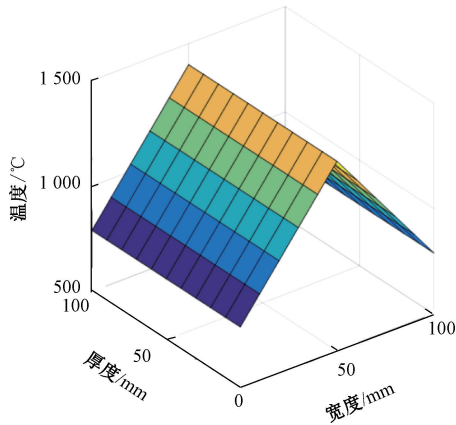


图 16 高温锻件的非均匀温度场
Fig. 16 Non-uniform temperature field of high-temperature forging

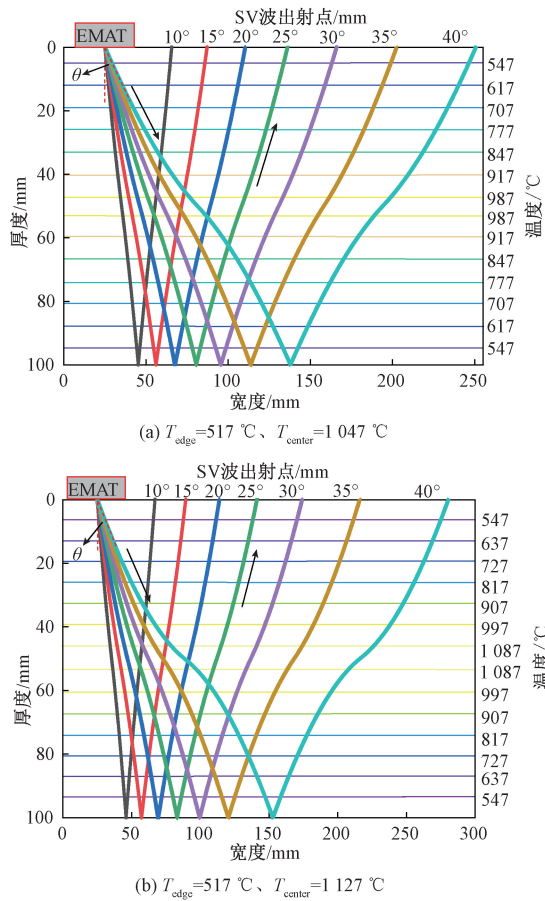


图 17 斜入射 SV 波在非均匀高温碳钢中的传播声线路径
Fig. 17 Propagation path of oblique incident SV wave in inhomogeneous high temperature carbon steel

束将由高温区向低温区弯曲,从而表现为声线弯曲效应。不同入射角和 T_{center} 对应的渡越时间如表 3 所示。由表 3 可知:斜入射 SV 波的渡越时间随着入射角和芯部温度的

增加而增加。当芯部温度为 1 047℃ 时,入射角由 10° 增加至 40°,渡越时间增加 50%。当入射角为 30° 时,芯部温度由 1 047℃ 增加至 1 127℃,渡越时间增加 5.7%。

表 3 不同入射角和 T_{center} 对应的渡越时间

Table 3 Time-of-flight corresponding to different incident angles and T_{center}

入射角度/(°)	渡越时间/ μs	
	$T_{\text{center}} = 1\ 047^\circ\text{C}$	$T_{\text{center}} = 1\ 127^\circ\text{C}$
10	79.331	81.972
15	81.465	84.363
20	84.604	88.003
25	89.241	93.319
30	95.625	101.03
35	104.93	112.91
40	119.07	134.73

3.2 声束入射角对 SV 波声线路径的影响

为了定量分析声束入射角对声线路径的影响规律,探究入射角度与 SV 波渡越时间的关系,对不同入射角度时的渡越时间进行多项式拟合。入射角变化区间为 10°~40°,依次增加 5°, $T_{\text{edge}} = 517^\circ\text{C}$ 与 $T_{\text{center}} = 1\ 047^\circ\text{C}$ 保持不变,如图 18 所示为入射角度 θ 与渡越时间 t_{tof} 的拟合曲线,拟合函数为:

$$t_{\text{tof}} = 82.13 - 0.58\theta + 3.23 \times 10^{-2}\theta^2 \quad (15)$$

式 (15) 的拟合相关系数为 0.997 38,可以很好的描述 SV 波渡越时间与入射角度的变化趋势。

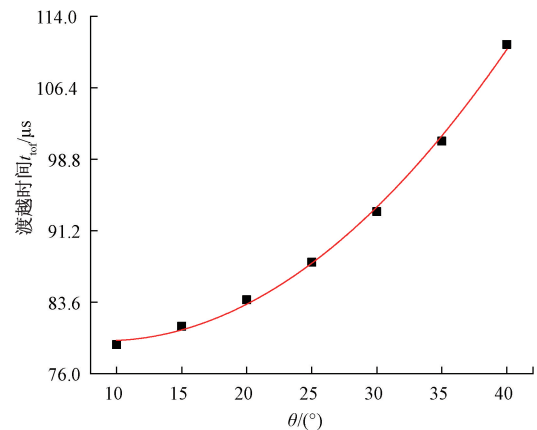


图 18 入射角度 θ 与渡越时间 t_{tof} 拟合曲线
Fig. 18 Fitting curve of incident angle θ and time-of-flight t_{tof}

3.3 温度梯度对声线路径的影响

引入 S_e ,并定义为非均匀温度场和均匀温度场对应的 SV 波出射点的位置偏差。设置入射角度为 10°,保持

$T_{\text{edge}} = 517^\circ\text{C}$ 不变,使其 T_{center} 分别为: $1\ 127^\circ\text{C}$ 、 $1\ 027^\circ\text{C}$ 、 927°C 、 827°C 、 727°C 、 627°C , 计算其路径。如图 19 所示为 $T_{\text{edge}} = 517^\circ\text{C}$ 时不同 T_{center} 的斜入射 SV 波传播路径,由图 19 可知, S_c 随着芯部温度的上升呈非线性增加趋势,相邻两条声线出射点的偏差距离由 0.8 mm 增加至了 1.4 mm ,增加了 75%。

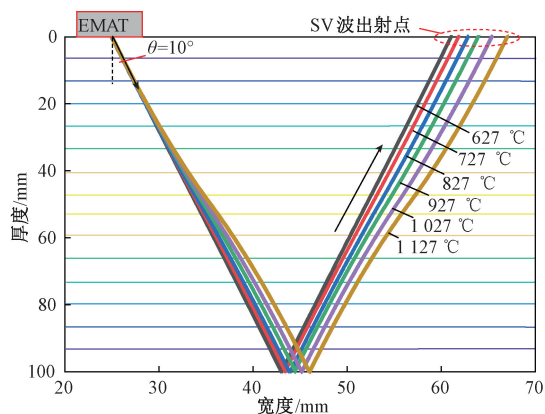


图 19 $T_{\text{edge}} = 517^\circ\text{C}$ 时不同 T_{center} 的斜入射 SV 波传播路径

Fig. 19 Propagation paths of angled SV wave with different T_{center} at $T_{\text{edge}} = 517^\circ\text{C}$

如图 20(a) 所示为 SV 波出射点位置偏差 S_c 与芯部温度 T_{center} 的拟合曲线,其拟合函数为:

$$S_c = 0.83 - 5.79 \times 10^{-4} T_{\text{center}} - 9.46 \times 10^{-7} T_{\text{center}}^2 \quad (16)$$

式(16)的拟合相关系数为 0.999 41,可以很好的反映出出射点位置偏差 S_c 与 T_{center} 之间的变化趋势。

采用渡越时间 t_{tof} 来求解 T_{center} ,其拟合函数为:

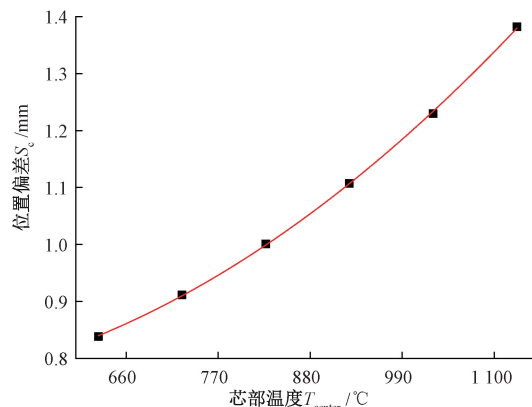
$$t_{\text{tof}} = 67.33 + 5.32 \times 10^{-3} T_{\text{center}} + 5.68 \times 10^{-6} T_{\text{center}}^2 \quad (17)$$

图 20(b) 所示为入射角度为 10° 下渡越时间 t_{tof} 与 T_{center} 之间的拟合曲线,拟合曲线的相关系数为 0.999 92。由图 20(a)、(b) 可知,无论是采用 SV 波出射点位置偏差 S_c 还是渡越时间 t_{tof} 均可以很好的重构出芯部温度 T_{center} 。

3.4 声束入射角对温度灵敏度的影响

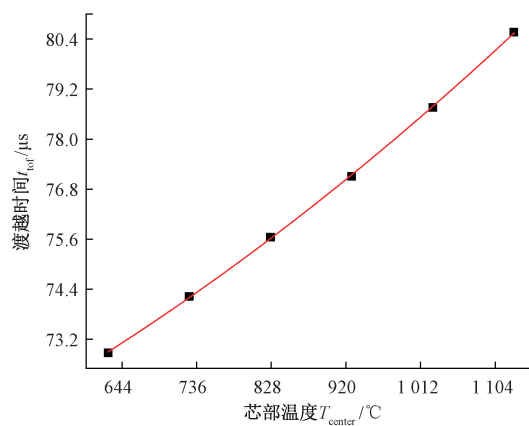
为了探究声束入射角对温度灵敏度 S_{tof} 的影响规律,将入射角度区间设置为 $0^\circ \sim 40^\circ$,依次增加 10° ,计算在 $T_{\text{edge}} = 517^\circ\text{C}$ 时的不同温度梯度下的渡越时间,并采用线性拟合的斜率计算不同入射角度下的温度灵敏度如图 21 所示。由图 21 可知,随着入射角度的逐渐增加,温度灵敏度参数 S_{tof} 呈非线性增加趋势。当入射角度由 0° 增加至 40° , S_{tof} 增加了 193%。

由于在实际高温铸锻件温度场重构中,EMAT 换能区域相对于高温大型铸锻件的检测面较小,因此本文假



(a) T_{center} 与出射点位置偏差 S_c 的关系

(a) Relationship between T_{center} and exit point deviation S_c



(b) T_{center} 与渡越时间 t_{tof} 的关系

(b) Relationship between T_{center} and time-of-flight t_{tof}

图 20 温度梯度对声线路径的影响

Fig. 20 Effect of temperature gradient on wave propagation path

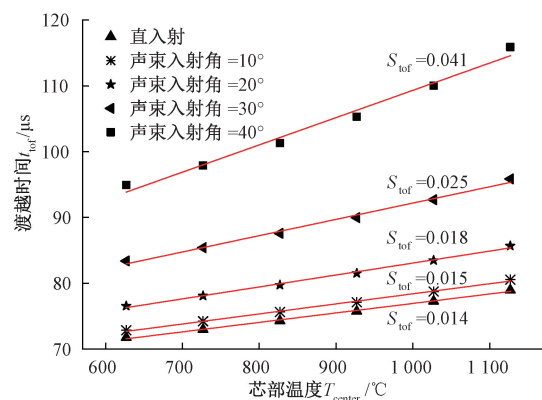


图 21 声束入射角对温度灵敏度的影响

Fig. 21 Influence of temperature sensitivity on incident angle of sound beam

设高温铸锻件在长度方向为无穷长,且高温铸锻件内部瞬态温度场为线性分布。若高温铸锻件检测面相对于 EMAT 换能区域较小时,其内部瞬态温度场可能为单峰

场或多峰场^[24-25],但只要确定其内部温度场分布函数,本文算法均可以在保证重建精度的前提下,实现高温铸锻件内部瞬态温度场的重建。

4 结 论

本文在三角形前向展开算法的基础上发展了基于三角形前向展开算法的直入射和斜入射横波测温迭代算法。利用该算法可以在高温铸造过程中实现温度场的重构,对制造工艺参数进行实时调整,避免由于温度超标而产生的缺陷。利用测温迭代算法对超声波在高温铸锻件中的传播规律进行分析,并根据渡越时间和表面温度,给出了铸锻件芯部温度的计算公式,同时还为高温铸锻件的内部缺陷定位分析与补偿提供了一定的数据支撑。

利用基于三角形前向展开算法的直入射横波测温迭代算法能够有效重建高温锻件温度场,相对误差在3%以内,通过快速数值计算使内部温度场的重建具有时效性,简易性,不需要直接接触高温铸锻件,有效地避免了采用热电偶直接测温所带来的不方便和测点布置困难。

采用直入射横波测温迭代算法重建高温铸锻件内部温度场相比斜入射SV波更加容易实现,但斜入射横波测温迭代算法对高温铸锻件温度梯度变化更加敏感,所建立的声线弯曲规律经验公式拟合相关系数在0.99以内,可信度较高。

斜入射横波测温方法可以通过两对曲折线圈EMAT探头来实现高温铸锻件内部温度测量,由激励曲折线圈EMAT产生一定入射角的斜入射SV波,通过伺服控制电机带动接收曲折线圈EMAT探头沿水平方向进行移动,直到找到最大回波。通过计算当前接收曲折EMAT探头位置的出射点偏差和SV波的渡越时间来计算高温铸锻件芯部温度。开发上述高温曲折线圈EMAT及其检测系统是后期研究的重点。

参考文献

- [1] KOJIMA F. Inverse problem for internal temperature distribution of metal products using pulser-receiver EMAT [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2019, 59(4): 1451-1457.
- [2] OUYANG Q, HU M, ZHANG X, et al. Study on electromagnetics ultrasonic testing method for determining solidified shell thickness during continuous casting [C]. The 30th Chinese Control and Decision Conference, 2018, 913-918.
- [3] 石文泽, 陈巍巍, 陈尧, 等. 基于脉冲压缩技术的高温连铸坯壳厚度测量 EMAT 设计及应用 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(8): 119-130.
- SHI W Z, CHEN W W, CHEN Y, et al. Design and application of an EMAT for solidification shell thickness detection in continuous casting slab based on the pulse compression technique [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(8): 119-130.
- [4] ROMMELER A, FURRER R, SENNHÄUSER 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优选 [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.
- [6] 武玉鹏, 张博, 李经明, 等. 航空发动机整体叶环中纤维断丝超声检测方法 [J]. 金属学报, 2020, 56(8): 1175-1184.
- WU Y P, ZHANG B, LI J M, et al. Ultrasonic detection for fiber broken in aero-engine integral bladed ring [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(8): 1175-1184.
- [7] 曾伟, 王海涛, 田贵云, 等. 基于能量分析的激光超声波缺陷检测研究 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(3): 650-655.
- ZENG W, WANG H T, TIAN G Y, et al. Research on laser ultrasonic defect signal detection technology based on energy analysis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(3): 650-655.
- [8] 孙广开, 曲道明, 周正干. 机器人辅助激光超声检测系统及参量匹配方法 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(8): 1961-1969.
- SUN G K, QU D M, ZHOU ZH G. Robot assistant laser ultrasonic test system and its parameter matching method [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(8): 1961-1969.
- [9] 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 C F, DENG P, LYU Y, 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.
- [10] 黄松岭, 王哲, 王琬, 等. 管道电磁超声导波技术及其应用研究进展 [J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(3): 1-12.
- HUANG S L, WANG ZH, WANG K, 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.
- [11] CAI Z, CHENG H, LIU C. Nonlinear electromagnetic acoustic testing method for tensile damage evaluation [J]. Journal of Sensors, 2018, 2018: 1745257;1-1745257;11.
- [12] 石友安, 魏东, 桂业伟, 等. 固体结构内部瞬态非均匀温度场的重建方法研究 [J]. 兵工学报, 2016, 37(12): 2347-2355.
- SHI Y AN, WEI D, GUI Y W, et al. Reconstruction of transient nonuniform temperature field in solid structures using inverse methods [J]. Acta Armamentarii, 2016, 37(12): 2347-2355.
- [13] DHARMARAJ K, COX C, STRAUSS A, et al. Ultrasonic thermometry for friction stir spot welding [J]. Measurement, 2014, 49: 226-235.
- [14] 田苗, 王高, 刘争光, 等. 超声脉冲测温技术初步研究 [J]. 声学技术, 2017, 36(1): 27-31.
- TIAN M, WANG G, LIU ZH G, et al. A preliminary study of pulse-echo ultrasonic thermometry [J]. Technical Acoustics, 2017, 36(1): 27-31.
- [15] MYRES M R, WALKER D G, YUHAS D E, et al. Heat flux determination from ultrasonic pulse measurements [C]. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 2008, 48715: 739-743.
- [16] 肖达, 王润民, 邹孝, 等. 基于 Gabor 变换和灰度梯度共生矩阵的超声无损测温研究 [J]. 传感技术学报, 2017, 30(11): 1684-1688.
- XIAO D, WANG R M, ZOU X, et al. A noninvasive temperature measurement based on Gabor transform and gray level gradient co-occurrence matrix using ultrasound [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2017, 30(11): 1684-1688.
- [17] IHARA I, TAKAHASHI M, YAMADA H. A non-contact temperature sensing with ultrasound and the potential for monitoring heated materials [C]. Sensors, 2009: 1709-1714.
- [18] JIA R X, XIONG Q Y, XU G Y, et al. A method for two-dimensional temperature field distribution reconstruction [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 111: 961-967.
- [19] 张雪岩, 周勃, 李鹤. 基于三维热传导模型的风力机叶片缺陷深度检测 [J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(1): 174-182.
- ZHANG X Y, ZHOU B, LI H. Wind turbine blade defect depth detection based on three-dimensional heat conduction model [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(1): 174-182.
- [20] 陈敏鑫, 刘石, 孙单勋, 等. 随机森林算法在温度分布重建中的应用 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(11): 173-180.
- CHEN M X, LIU SH, SUN D X, et al. Application of random forest algorithm in temperature distribution reconstruction [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(11): 173-180.
- [21] 崔云先, 杨琮, 薛生俊, 等. C/SiC 复合材料表面高温瞬态温度传感器的研究 [J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(3): 163-171.
- CUI Y X, YANG C, XUE SH J, et al. Study on high temperature transient temperature sensor on C/SiC composite surface [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(3): 163-171.
- [22] YAMAMOTO H, TABEI M, UEDA M. Acoustic ray tracing in discrete wave velocity by deployed triangle [J]. Electronics and Communications in Japan, 1991, 74(2): 59-69.
- [23] 姜薇, 李太宝. 三维声线追踪的正三棱锥前向伸展算法 [J]. 声学学报, 2005, 30(5): 404-408.
- JANG W, LI T B. A three-dimensional sound ray tracing method by deploying regular tetrahedrons [J]. Acta Acustica, 2005, 30(5): 404-408.
- [24] 王明吉, 王瑞雪. 利用三角形前向展开法追踪温度梯度场中的声线路径 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(5): 29-33.
- WANG M G, WANG R X. Acoustic ray tracing in two-dimensional temperature gradient field by deploying triangles [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(5): 29-33.
- [25] 颜华, 王善辉, 刘丽钧, 等. 一种考虑声线弯曲的温度场重建算法 [J]. 声学学报, 2014, 39(6): 705-713.
- YAN H, WANG SH H, LIU L J, et al. A reconstruction algorithm of temperature field taking into account the bending of sound wave paths [J]. Acta Acustica, 2014, 39(6): 705-713.
- [26] 唐琴, 石文泽, 卢超, 等. 曲面构件斜入射 SV 波 EMAT 辐射声场特性分析 [J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(5): 221-233.
- TANG Q, SHI W Z, LU CH, et al. Analysis on the radiated sound field characteristics of angled SV wave EMATs operated on a curved surface component [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(5): 221-233.
- [27] IDRIS A, EDWARDS C, PALMER S B. Acoustic wave measurements at elevated temperature using a pulsed laser generator and an electromagnetic acoustic transducer

detector [J]. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 1994, 11: 195-213.

- [28] 川島捷宏, 中森幸雄, 室田昭治, 等. 連続铸造スラブの凝固シェル厚みのオンライン非破壊測定 [J]. *鉄と鋼*, 1981, 67(9): 1515-1522.

KATSUHIRO K, YUKIO N, SHOJI M, et al. On-line non-destructive measurement of solidification shell thickness of continuous casting steel slabs [J]. *The Iron and Steel Institute of Japan*, 1981, 67(9): 1515-1522.

作者简介



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

E-mail: 70658@nchu.edu.cn

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



童艳山, 2020 年于华北水利水电大学获学士学位, 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: 582695456@qq.com

Tong Yanshan received his B.Sc. degree from North China University of Water Resources and Electric Power in 2020. He is currently a master student at Nanchang Hangkong University. His main research interest is electromagnetic acoustic testing.



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

E-mail: luchao@163.com

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