

文章编号: 1673-3193(2024)04-0539-11

## 激光超声时频参数对裂纹试件的温度检测

何力, 郭华玲, 郑宾, 刘辉, 贾庸斌

(中北大学 电气与控制工程学院, 山西 太原 030051)

**摘要:** 为了实现对高温工作环境下含表面裂纹试件的温度测量, 提出了利用激光超声瑞利波的时、频参数实现表面裂纹试件温度测量的新思路。采用稳态解作为瞬态初始值的温度加载方法, 建立了293.15~743.15 K温度范围内结构钢的表面裂纹试件模型, 分析了激光超声瑞利波与表面裂纹的相互作用。在时域上, 利用瑞利反射、透射波的归一化峰值来定义反射率、透射率这两个时域参数, 得出反射率和透射率都与温度成线性增长关系, 反射率和透射率随温度的变化率分别为 $1.45 \times 10^{-3} \text{ dB} \cdot \text{K}^{-1}$ 和 $2.3 \times 10^{-3} \text{ dB} \cdot \text{K}^{-1}$ ; 在频域上, 提出了瑞利波的小波时频分析(TFA)分布下超声能量强度的特征极值点关系法, 得出在特征频率为2.4 MHz时, 能量强度的特征极值随温度的线性增长率为 $2.56 \times 10^{-4} \text{ dB} \cdot \text{K}^{-1}$ ; 实验分析证明了仿真结果的可行性。时、频域的研究结果结合实验分析表明, 利用时、频参数与温度的线性关系和变化率, 可实现表面含裂纹的试件的温度测量表征。

**关键词:** 激光超声; 时频参数; 稳态解; 温度检测; 小波TFA分布; 能量强度

**中图分类号:** TN249

**文献标识码:** A

**doi:** 10.3969/j.issn.1673-3193.2024.04.016

**引用格式:** 何力, 郭华玲, 郑宾, 等. 激光超声时频参数对裂纹试件的温度检测[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2024, 45(4): 539-549.

HE Li, GUO Hualing, ZHENG Bin, et al. Temperature measurement of crack specimen based on laser ultrasonic time and frequency parameters[J]. Journal of North University of China(Natural Science Edition), 2024, 45(4): 539-549.

## Temperature Measurement of Crack Specimen Based on Laser Ultrasonic Time and Frequency Parameters

HE Li, GUO Hualing, ZHENG Bin, LIU Hui, JIA Yongbin

(School of Electrical and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** In order to achieve temperature measurement of specimens with surface cracks in high-temperature working environments, a new approach was proposed to use the time-frequency parameters of laser ultrasonic Rayleigh waves to achieve temperature measurement of surface crack specimens. This article used the steady-state solution as the transient initial value of the temperature loading method to establish a surface crack specimen model of structural steel within the temperature range of 293.15~743.15 K, and analyzed the interaction between laser ultrasonic Rayleigh waves and surface cracks. In the time domain, the normalized peaks of Rayleigh reflection and transmitted waves were used to define the two time-domain parameters of reflectivity and transmittance, and it was found that both reflectivity and

**收稿日期:** 2023-06-20

**基金项目:** 信息探测与处理重点实验室基金(ISPT2020-6)

**作者简介:** 何力(1998-), 男, 硕士生, 主要从事激光超声无损检测的研究。

**通信作者:** 郭华玲(1976-), 女, 副教授, 博士, 主要从事激光超声无损检测的研究。E-mail: guohualing@nuc.edu.cn。

transmittance increase linearly with temperature, and the change rates of reflectivity and transmittance with temperature were  $1.45 \times 10^{-3} \text{ dB} \cdot \text{K}^{-1}$  and  $2.3 \times 10^{-3} \text{ dB} \cdot \text{K}^{-1}$ , respectively; In the frequency domain, the characteristic extreme point relationship method of ultrasonic energy intensity under the wavelet TFA (time-frequency analysis) distribution of Rayleigh wave was proposed, and the linear growth rate of the characteristic extreme value of energy intensity with temperature was  $2.56 \times 10^{-4} \text{ dB} \cdot \text{K}^{-1}$  when the characteristic frequency was 2.4 MHz; experimental analysis proved the feasibility of simulation results. From the research of time and frequency domains combined with experimental analysis, it is shown that the temperature measurement expression of the specimen with surface crack can be realized by using the linear relationship and change rate of time-frequency parameters and temperature.

**Key words:** laser ultrasound; time-frequency parameters; steady-state solution; temperature detection; wavelet TFA distribution; energy intensity

## 0 引言

高温环境下的表面断裂裂纹是金属结构表面在复杂载荷作用下的一种典型缺陷<sup>[1]</sup>。对存在裂纹的工件进行分析时,温度会对裂纹定量表征的精度产生影响,而利用裂纹试件的声波信息可以对温度进行检测。因此,高精度、非接触、可用于含表面裂纹试件温度检测的无损检测方法得到了越来越广泛的重视<sup>[2]</sup>。

激光超声检测技术具有灵敏度高、不使用耦合剂的特点,适用于复杂表面的检测和原位检测<sup>[3]</sup>。同时,激光超声技术还具有与红外、太赫兹技术一样的非接触特性优点<sup>[4]</sup>。激光检测时垂直于被测试样表面,且满足狭窄空间、高温高压等特殊测试条件<sup>[5]</sup>,可用于检测高温条件下复杂工件的表面断裂裂纹。

许多学者对激光超声与温度进行了研究,并取得了一些研究成果。许薇等<sup>[6]</sup>研究了温度对铝合金薄板中零群速度(ZGV)Lam-b波频率的影响,建立了脉冲激光激发不同温度的铝合金薄板中S1-ZGV模式的实验系统,得到铝合金薄板中S1-ZGV模式频率随温度的变化规律。李苏原<sup>[7]</sup>采用激光超声检测技术实现了高温金属厚度的测量,并且分析了纵波在不同温度下的传播性质。Duijster等<sup>[8]</sup>通过获取超声波在模拟钢介质中传播的速度和衰减来研究激光超声波在不同温度下测定钢中晶粒尺寸和相组成的适用性。Yamada等<sup>[9]</sup>提出了一种测量受热材料表面温度分布的激光超声扫描方法。另外,有学者研究了温度影响下材料本身参数的变化以及时域超声波速的改变等因素,通过得出的温度与这些变量的对应关系来达

到温度检测的目的。贾庸斌等<sup>[10]</sup>根据铝块的激光超声温度检测模型,研究了激光激发的超声纵波、表面波波速与温度的相关性。以上研究很少考虑声波本身的一些时、频特征,例如:时域下瑞利反射、透射波的归一化幅值信息,频域下瑞利波TFA分布下的能量强度信息,以及这些时、频信息与温度之间存在的定量关系。

鉴于此,本文建立了有限元模型,对含表面裂纹的试件加载不同温度,分析激光超声瑞利波与表面裂纹的相互作用,再利用瑞利反射、透射波的归一化振幅,结合直达瑞利波定义反射率、透射率(即作为时域参数);频域上根据瑞利波的时频分布,分析超声能量强度的特征极值与温度的对应关系,并研究这两种时、频域下的参数对温度检测的分析表征;最后利用实验来验证仿真结果。

## 1 激光超声原理及仿真模型

### 1.1 激光超声热弹性理论

超声波由高功率脉冲激光产生,激发效应主要包括热弹性效应和烧蚀效应。考虑到试件的无损检测要求,本文采用热弹性效应作为激励效应。在热弹性效应下,入射激光的能量会使材料表层温度升高,材料热膨胀从而产生应力和应变,并进一步产生弹性波。因此,热弹性效应下激光产生的超声波模型可以用热传导和热弹性位移方程来描述<sup>[11]</sup>。

$$\rho C_v = \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_v u_1 \nabla T = k \nabla^2 T + Q, \quad (1)$$

$$(\lambda + 2\mu) \nabla (\nabla \cdot u_1) - \mu \nabla \times \nabla \times u_1 - \rho \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2} = \alpha (3\lambda + 2\mu) \nabla T, \quad (2)$$

式中： $\rho$ 和 $T$ 分别为材料的密度和温升； $k$ 和 $\alpha$ 分别为导热系数和线性热膨胀系数； $C_v$ 为恒体积比热； $Q$ 为激光辐照热源的功率密度； $\lambda$ 和 $\mu$ 为材料的拉梅常数； $u_1$ 为热弹性效应引起的位移矢量。对于金属材料，激光能量的吸收只发生在金属的表面层(纳米到亚微米数量级)，材料对激光能量的吸收可以看成是加载在试件表面的边界条件，热源 $Q$ 的边界条件可以表示为<sup>[12]</sup>

$$Q = I_0 A f(r) g(t) \tag{3}$$

激光的时空分布符合高斯分布。 $I_0$ 、 $f(r)$ 和 $g(t)$ 为激光参数，分别表示入射激光最大功率密度、激光脉冲的空间和时间分布。 $A$ 表示材料表面对激光能量的吸收率，数值分析不考虑能量损失则 $A=1$ 。其中， $f(r)$ 和 $g(t)$ 可表示为<sup>[13]</sup>

$$f(r) = \exp\left(-\frac{r^2}{a_0^2}\right) \tag{4}$$

$$g(t) = \frac{t}{t_0} \exp\left(-\frac{t}{t_0}\right) \tag{5}$$

式中： $a_0$ 和 $t_0$ 分别为激光光斑半径和激光脉冲上升时间。

### 1.2 多物理场模型设置

本文利用 COMSOL 仿真软件来模拟激光超声的产生和传播过程以及对含表面裂纹模型的温度检测，材料选用结构钢进行模型建立和仿真，其对应的热应变性质<sup>[14]</sup>如表 1 所示。

表 1 COMSOL 中结构钢的材料系数

Tab. 1 Material coefficient of structural steel in COMSOL

属性	值
恒压热容/(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	475
导热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	44.5
热膨胀系数/K <sup>-1</sup>	12.3×10 <sup>-6</sup>
密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	7 850
杨氏模量/GPa	200
泊松比	0.3

模型设置：1) 材料为各向同性；2) 激光光源在 $y$ 轴方向上均匀分布并趋向于无限长，如图 1(a) 所示，激光超声模型简化为各向同性的平面热-弹耦合模型，如图 1(b) 所示。被测样本 $x$ - $z$ 轴的横截面尺寸为 12 mm×4.5 mm；垂直裂纹宽为 0.05 mm，深为 0.5 mm；激光光斑半径和激光脉冲上升时间分别为 0.1 mm 和 10 ns；激发点处坐标为(0,0)，裂纹左侧面与点 $P_1$ 的距离为 1.5 mm，点 $P_2$ 的坐标为(4.5,0)。

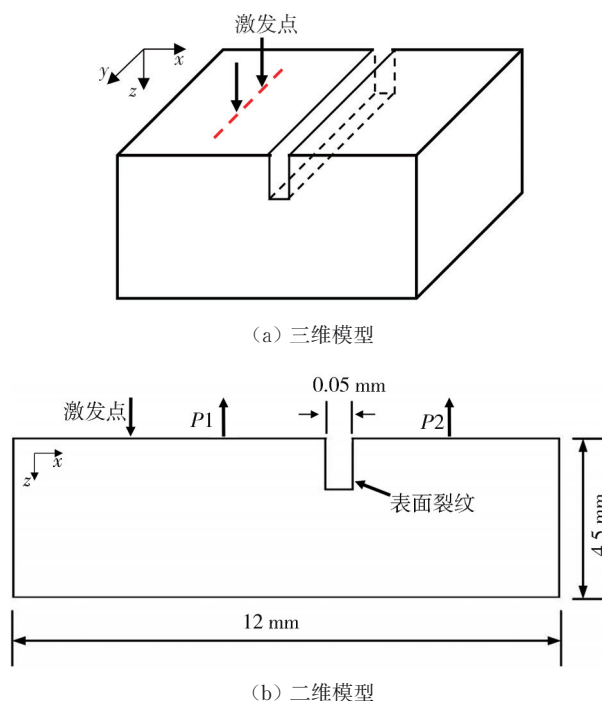


图 1 有限元仿真模型

Fig. 1 Finite element model of simulation

对简化后的二维模型进行网格剖分时，激发点和表面裂纹处采用尺寸渐进的过渡型网格，保证了超声波与裂纹作用的热解析以及数值模拟的计算精度，裂纹处采用自由三角形网格划分，其余部分用自由四边形网格划分；由于要研究瑞利波与表面裂纹的作用，为了避免边界对于信号分析的干扰，模型的两侧和底部设置为低反射边界，上表面设置为自由边界，时间步长为 5 ns，总计算时长为 5 000 ns，仿真模型为半无限模型，如图 2 所示。

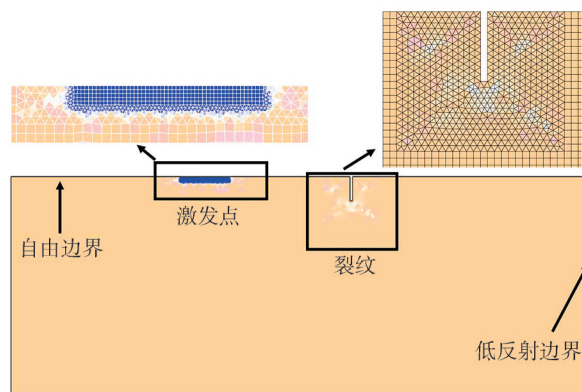


图 2 二维模型的网格剖分

Fig. 2 Mesh generation of two-dimensional model

### 1.3 温度场加载

激光超声的激发和检测是非接触和无损伤的，且结构钢的熔点在 1 500 °C 左右，故加载温度

场时,可在其熔点范围内观察稳态温度场下被测样本的膨胀效果。结构钢的升温受其质量密度 $\rho$ 、导热系数 $\lambda_s$ 、杨氏模量 $E_{SK}$ 、热膨胀系数 $\alpha_s$ 、恒压热容 $C_s$ 等材料参数的影响,而密度变化在COMSOL热力数值仿真中表现为热膨胀应变,忽略其对超声波作用的影响。由于结构钢的导热系数较大并且钢材料构件内部与加温面相垂直方向的温差往往较小,通常认为其均匀升温,则结构钢的热-应耦合材料参数<sup>[15]</sup>的变化关系为

$$\lambda_s = 54 - 33.3 \times 10^{-2} K_s \quad (293.15 \text{ K} \leq K_s \leq 1073.15 \text{ K}), \quad (6)$$

$$E_{SK} = \frac{7K_s - 4780}{6K_s - 4760} E_s \quad (293.15 \text{ K} \leq K_s \leq 873.15 \text{ K}), \quad (7)$$

$$\alpha_s = 0.8 \times 10^{-8} K_s + 1.2 \times 10^{-5} \quad (293.15 \text{ K} \leq K_s \leq 1023.15 \text{ K}), \quad (8)$$

$$C_s = 425 + 7.73 \times 10^{-1} K_s - 1.69 \times 10^{-3} K_s^2 + 2.22 \times 10^{-6} K_s^3, \quad (9)$$

式中: $K_s$ 为加载的环境温度; $E_s$ 为常温下钢的弹性模量, $E_s = 2 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 。

数值计算过程中,首先要加载温度场,设置温度初始值 $K_s$ 的范围为293.15~743.15 K,将不同初始值 $K_s$ 代入到结构钢的导热系数 $\lambda_s$ 、杨氏模量 $E_{SK}$ 、热膨胀系数 $\alpha_s$ 、恒压热容 $C_s$ 等材料参数的计算公式中,即式(6)~式(9)。实际工程中材料的温度并不是瞬间到达某一值,而是基于室温,随着工件的使用产生了热量,热能在工件内部传导使材料逐渐达到某个温度。所以,本文温度的加载设计为从室温到设定温度的稳态过程,该过程的设置使温度从室温均匀变化到设定温度,再在该温度下处于一段时间的稳态,本文设置1 s的稳态时间,因为模型较小,且模型内波形传播的时间在微秒级,故1 s相对超声传播是一个较长时间的稳态。接着用模型在该设定温度下的稳态解作为瞬态求解的初始值,再提取该温度下产生的各种模式波。以上求解稳态解的步骤,可避免某一设定温度值的瞬间加载对模型瞬态求解过程的影响,也使得模型内部结构在一个均匀变化的稳态过后趋于稳定,便于提取有效的信息。

考虑到结构钢表面的受热损伤阈值,调节模型表面的激光辐射功率密度为 $2 \times 10^8 \text{ W/cm}^2$ 。当加载温度为743.15 K时,超声激发点处的温度变化如图3所示,其峰值未达到结构钢的受热损伤阈值,显然当温度初始值最低为293.15 K时,

其峰值也未达到受热损失阈值,因此,模型在数值分析过程中发生了热弹性应变。

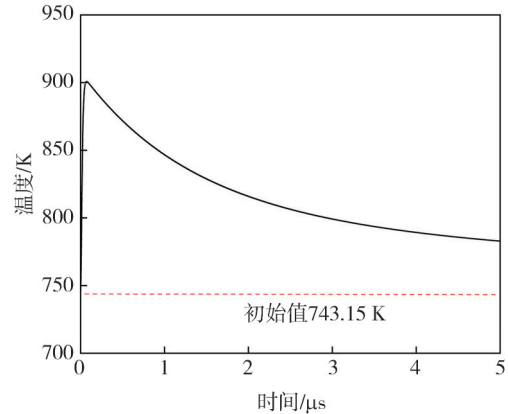


图3  $K_s = 743.15 \text{ K}$ 时超声激发点的温度变化

Fig. 3 Temperature change of the ultrasonic excitation point at initial value of 743.15 K

## 2 数值模型的仿真波形

常温下初始值 $K_s$ 为293.15 K,激光激发的超声波速度场如图4所示。介质中激光超声各模式波的速度公式为<sup>[16]</sup>

$$V_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E_{SK}(1 - \sigma)}{\rho(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}}, \quad (10)$$

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E_{SK}}{2\rho(1 + \sigma)}}, \quad (11)$$

$$V_R = \frac{0.87 + 1.12\sigma}{1 + \sigma} V_S, \quad (12)$$

式中: $\sigma$ 为泊松比; $V_L$ 为纵波波速; $V_S$ 为横波波速; $V_R$ 为瑞利波波速。

计算出激光激发的这3种模式波速度,可根据波速的不同识别出模式波的类型。图4分别为550, 1335, 1445和1750 ns时各模式波的传播云图。根据上述3种模式波波速,从图4(a)中可以识别出直达瑞利波R,横波S,纵波L,其中R波到达裂纹位置处,一部分能量向后传播形成反射瑞利波rR,一部分瑞利波继续透过裂纹向前传播为透射瑞利波tR,rR波和tR波根据裂纹位置处反射和透射的R波波速确定。一部分R波从裂纹位置向下传播到裂纹左侧底端点处发生模式转换,根据惠更斯原理并结合上述3种模式波波速,分析出转换前后波速不同,进而识别出各类转换模式波,其中,在底端点处一部分R波转换为横波RS向后传播,一部分转换为横波tRS透过缺陷继续向前传播。与裂纹作用之后的瑞利反射、透射

波继续沿表面传播,其他模式转换波到达材料表面后继续沿表面传播。当加载不同的温度时,声波的传播状态同常温下一致。

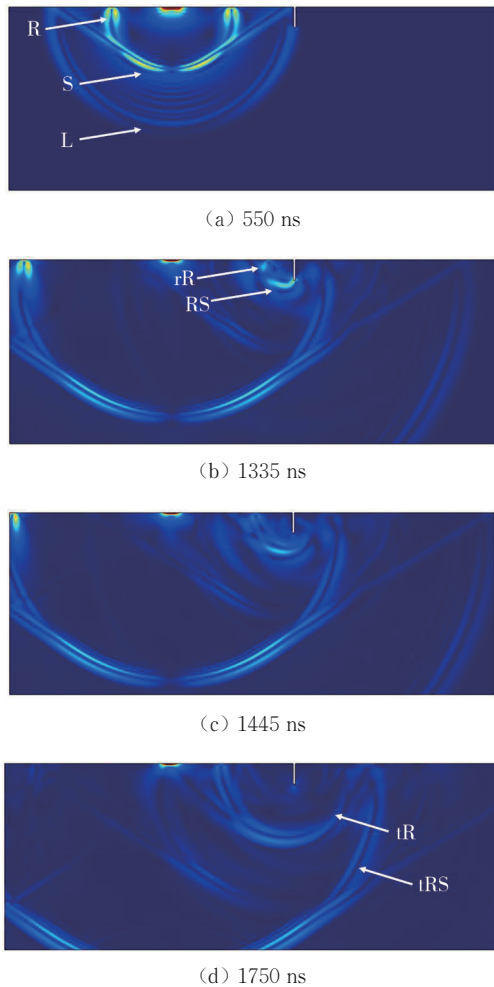
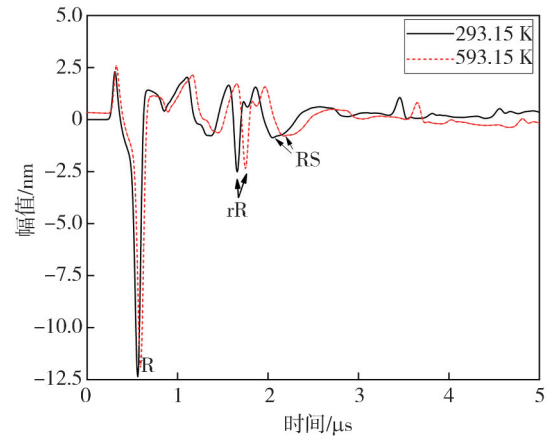


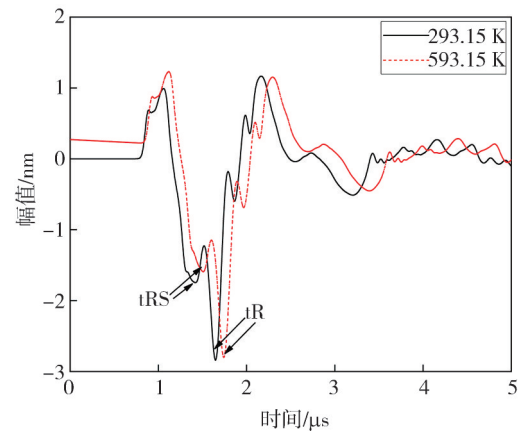
图 4 不同时刻超声波的传播云图  
Fig. 4 Cloud image of ultrasonic propagation at different time

为了研究瑞利波的时、频参数与温度的定量关系,需选用具有时、频特征信息的瑞利模式波,并对与裂纹作用后的瑞利波信号进行分析。如图 1(b)所示,点  $P_1$  接收反射回波,采用回波法研究反射瑞利波;点  $P_2$  接收透射波,采用穿透法研究透射瑞利波。设置加载温度为 293.15 K 和 593.15 K,图 5 为不同温度下点  $P_1$  和点  $P_2$  接收的瑞利反射、透射波的时域波形,图 6 为点  $P_2$  处接收的透射瑞利波的频谱图。时域上,当模型温度由 293.15 K 均匀增温到 593.15 K 并达到稳态时,结构钢会受热膨胀,为了更清晰地比较 293.15 K 和 593.15 K 时的波形信息,采用去除时域波形线性趋势项的方法,对接收到的不同温度初始值下的瑞利反射、透射波进行信号提纯,以

减少后续的分析误差,图 5 中 593.15 K 对应的曲线即为去除趋势项之后的时域波形。波信号处理之后,图 5 中信号幅值较大的声波成分为 R、rR、RS、tR 和 tRS 波,RS 波、tRS 波为瑞利波与裂纹作用后出现的新的波形成分,这两种波形信号属于模式转换波,不能用于单一模式的瑞利波对反射率和透射率的定义。故在第 3 节的时域参数分析中主要提取 rR 波的幅值作为反射率的特征量,tR 波的幅值作为透射率的特征量。



(a) 点  $P_1$  处的反射瑞利波



(b) 点  $P_2$  处的透射瑞利波

图 5 不同温度下点  $P_1$ 、点  $P_2$  处的接收声波

Fig. 5 Sound waves are received at point  $P_1$  and  $P_2$  with different temperature

频域上,由于点  $P_1$  接收的反射瑞利波的频谱图中,特征频率不清晰,没有明显的波峰,故分析点  $P_2$  接收的透射瑞利波的频谱图,如图 6 所示。由图 6 可以看出,在 2.4 MHz 处出现波峰,以波峰对应的频率作为特征频率,但是不同温度的频率波峰变化不明显,不能用峰值来研究频域参数与温度的关系,故在本文第 3 节中提出了 TFA 分布下能量强度的特征极值点关系法。

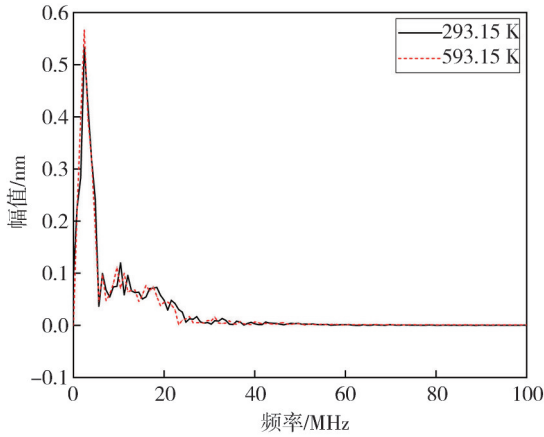


图6 不同温度下点P2接收的透射瑞利波的频谱图

Fig. 6 The spectrum of Rayleigh transmission wave received at P2 at different temperatures

### 3 时频参数对温度的检测分析

#### 3.1 时域反射率、透射率-温度分析

通过上面的研究,初步分析了声波与裂纹的相互作用,时域上选取rR波和tR波的幅值作为与温度分析的特征量参数。设置模型的温度加载范围为293.15~743.15 K,温度加载间隔为50 K,表2中为归一化的幅值数据,图7为归一化的声波幅值-温度曲线关系图。

表2 不同温度下反射和透射声波的归一化振幅

Tab. 2 Normalized amplitudes of reflected and transmitted sound waves at different temperatures

温度/K	$A_{rR}$ 归一化	反射率/dB	$A_{tR}$ 归一化	透射率/dB
293.15	1.558 3	-24.373	1.277 5	-24.704
343.15	1.547 8	-24.353	1.245 5	-24.482
393.15	1.554 6	-24.263	1.224 5	-24.317
443.15	1.566 7	-24.219	1.210 4	-24.176
493.15	1.563 5	-24.128	1.185 7	-24.059
543.15	1.574 9	-23.979	1.171 3	-23.925
593.15	1.578 1	-23.919	1.152 3	-23.877
643.15	1.568 3	-23.882	1.124 2	-23.795
693.15	1.540 9	-23.807	1.088 8	-23.705
743.15	1.484 9	-23.795	1.041 8	-23.609

由图7可以看出,温度与反射波幅值之间不存在单调对应关系,故不能用声波幅值定量检测温度。因此,为了研究反射波与温度的定量关系,定义反射瑞利波的反射率作为时域参数,即图5中反射瑞利波rR的幅值与直达瑞利波R的幅值之比

$$\beta_r = 20 \ln \left( \frac{A_{rR}}{A_R} \right), \quad (13)$$

式中: $A_{rR}$ 为反射瑞利波幅值; $A_R$ 为直达瑞利波幅值; $\beta_r$ 为反射率。

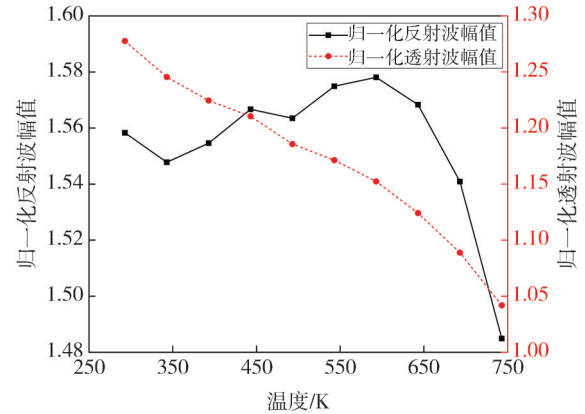


图7 反射、透射波幅值与温度的关系

Fig. 7 Relation between amplitude of reflection and transmission wave and temperature

进行线性拟合时,式(11)中皮尔森相关系数 $r$ 描述为相对正相关,而判定系数 $R^2$ 评价模型的拟合优劣好坏时,若模型中增加变量时,它的值不会减少,因此有一定的局限性。故需对其校正,调整后为 $R_{adj}^2$ ,表示拟合优劣。

$$r = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (14)$$

$$R_{adj}^2 = 1 - \frac{(1 - R^2)(n - 1)}{n - p - 1}, \quad (15)$$

式中: $n$ 为需要拟合的数据点数量; $X_i$ 和 $Y_i$ 为数据点对应的坐标值; $\bar{X}$ 和 $\bar{Y}$ 为坐标值的平均量; $p$ 为特征数量。

反射率随加载温度的变化曲线如图8所示,由图8获得反射率随温度变化的线性关系为

$$y(K_s) = -24.82387 + 0.00145K_s,$$

$$R_{adj}^2 = 0.97. \quad (16)$$

由图8可以看出:温度从293.15 K逐渐增加到443.15 K的过程为阶段1,反射率的增长趋势缓慢,线性拟合斜率为0.001;温度从443.15 K逐渐增加到593.15 K的过程为阶段2,反射率增长趋势较快,线性拟合斜率为0.002;温度从593.15 K逐渐增加到743.15 K的过程为阶段3,增长趋势又逐渐缓慢,反射率逐渐增大到稳定。因为温度单位设置为K,所以斜率的数值显得很小。钢的膨胀导致钢内部结构应力变化,而超声波属于应力波,导致反射波的幅值也发生变化。图8中,阶段1时,钢由常温开始加载温度,稳态的膨胀数值变化使得钢膨胀变化缓慢,斜率变化

较缓;阶段2加载的温度初始值为中间数值,钢结构变化稳定,反射率几乎线性地从-24.2 dB增加到-23.9 dB;阶段3后斜率又趋于平缓变化达到稳定值。由反射率-温度的变化关系曲线可以看出,反射率的变化范围较小,最大值为-23.8 dB,最小值为-24.3 dB,但总体规律呈现为单调递增变化关系,即温度每变化 100 K,反射率增长  $1.45 \times 10^{-2}$  dB。随着温度增大到一定数值,裂纹对声波的反射能力达到最大值,最后反射率趋于稳定值,反射率与温度梯度之间存在单调对应关系,可实现裂纹反射率对温度的定量表示。

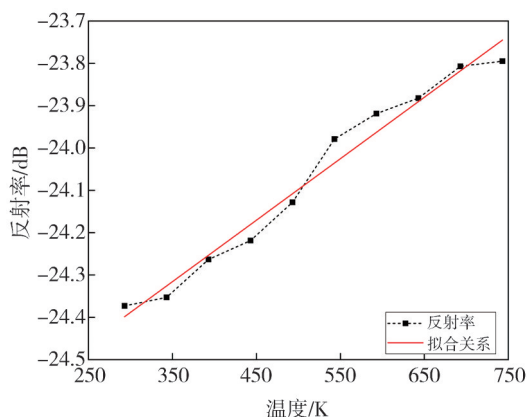


图 8 反射率与温度初始值的关系曲线

Fig. 8 The relationship between reflectivity and initial temperature

在相同条件下,为了研究透射瑞利波与温度的定量关系,定义另一个时域参数透射率,即图 5 中裂纹透射瑞利波 tR 的幅值与直达瑞利波 R 的幅值之比。

$$\beta_t = 20 \ln \left( \frac{A_{tR}}{A_R} \right), \quad (17)$$

式中:  $A_{tR}$  为透射瑞利波幅值;  $A_R$  为直达瑞利波幅值;  $\beta_t$  为透射率。透射率与温度变化的关系曲线如图 9 所示,得到透射率随温度变化的线性关系为

$$y(K_s) = -25.25388 + 0.0023K_s, \quad (18)$$

$$R_{adj}^2 = 0.96。$$

图 9 中,随着加载温度的增加,透射率也逐渐增大,上升趋势由稳定递进到平稳再到稳定递增,趋势变化阶段同反射率一致,在 3 个阶段中,曲线变化趋于不同的线性斜率。温度加载到第三阶段时,温度变化对结构钢的膨胀影响相较于前两阶段已趋于稳定,稳定的钢膨胀使得透射波的幅值也趋于稳定变化,从透射率-温度曲线可看出,第三阶段几乎为单调递增,结合第三阶段稳定的单调关系,采用线性拟合,总体规律呈现为

单调递增变化关系,即温度每变化 100 K,透射率增长  $2.3 \times 10^{-2}$  dB。由透射率-温度的变化关系曲线可以看出,透射率的变化范围也较小,最大值为-23.6 dB,最小值为-24.2 dB。

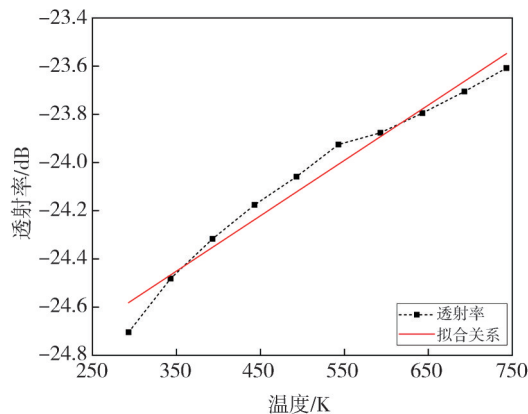


图 9 透射率与温度初始值的关系曲线

Fig. 9 The relationship between transmittance and initial temperature

以上对反射率和透射率这两个时域参数与温度的关系进行了分析,可知时域参数与温度有较强的线性关系,可实现对裂纹试件的温度定量表征,因此可以用时域参数实现对温度的检测。在模型建立和分析过程中,裂纹不同宽度和深度不会影响 rR 波和 tR 波的峰值,故不会影响反射率和透射率对温度的表征。

### 3.2 频域 TFA 能量强度-温度分析

从频域对不同加载温度下的反射和透射瑞利波进行分析时,上文图 6 提到传统频谱无法辨别信号的频域峰值信息与温度的关系;另一方面,不能把握加载温度与局部时间范围内的频率的细节关系。故引入一种窗口固定但形状和尺度可变的时频局部细节化的小波,其 TFA 分布下超声能量强度的特征极值点关系法的时域定义为<sup>[17]</sup>

$$W(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) h_{a,b}^*(t) dt, \quad (19)$$

式中:  $W$  为 TFA 后的波信号;  $a$  为尺度因子;  $b$  为时移因子;  $s(t)$  为信号函数。将  $h_{a,b}(t)$  命名为母小波,取不同的  $a$  和  $b$  可得

$$h_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} h \left( \frac{t-b}{a} \right), \quad (20)$$

式中:  $h$  为平方积分函数。 $b$  也可以表示为小波在  $h_{a,b}(t)$  中的位置  $b(t)$ , 而尺度因子  $a$  决定其频率。相反,对于  $|a| \gg 1$ , 小波  $h_{a,b}(t)$  被极大地展开,得到大

部分低频。因此,小波是一种有用的方法,在高频率下比在低频率下需要更好的时间分辨率。因此,采用小波变换对激光超声信号进行TFA分析,可以得到信号在接收点的能量强度、频率和时间分布。选择合适的尺度参数,以保证TFA图像的时、频域分辨率都处于良好的状态。图10为293.15K时反射、透射瑞利波的TFA图像。

图10(a)中出现了两个清晰的峰,较高的为直达瑞利波峰,较低的为反射瑞利波峰,图10(b)的时间范围内出现了一个清晰的透射波峰,这个清晰的峰包含了TFA信息,则定义包含TFA信息的峰值为超声能量强度的特征极值,即频域参数。由于反射回波峰值较小,时频信息不明显,选用透射波的TFA分布进行分析。

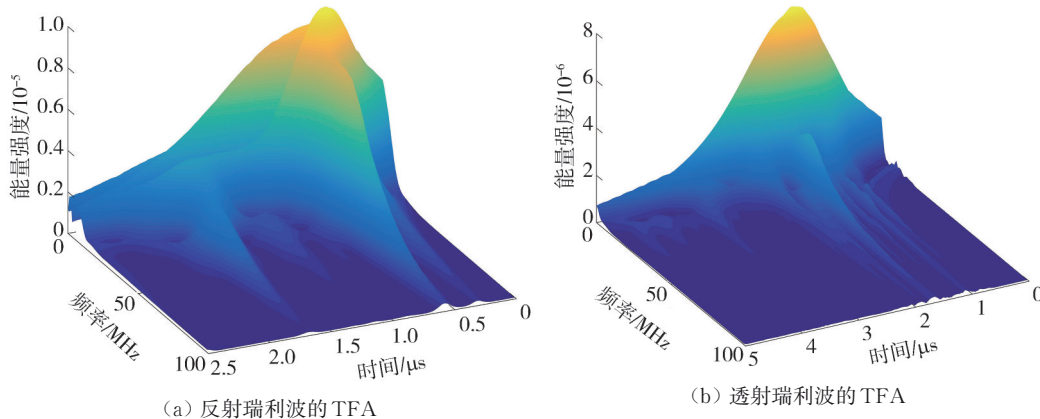
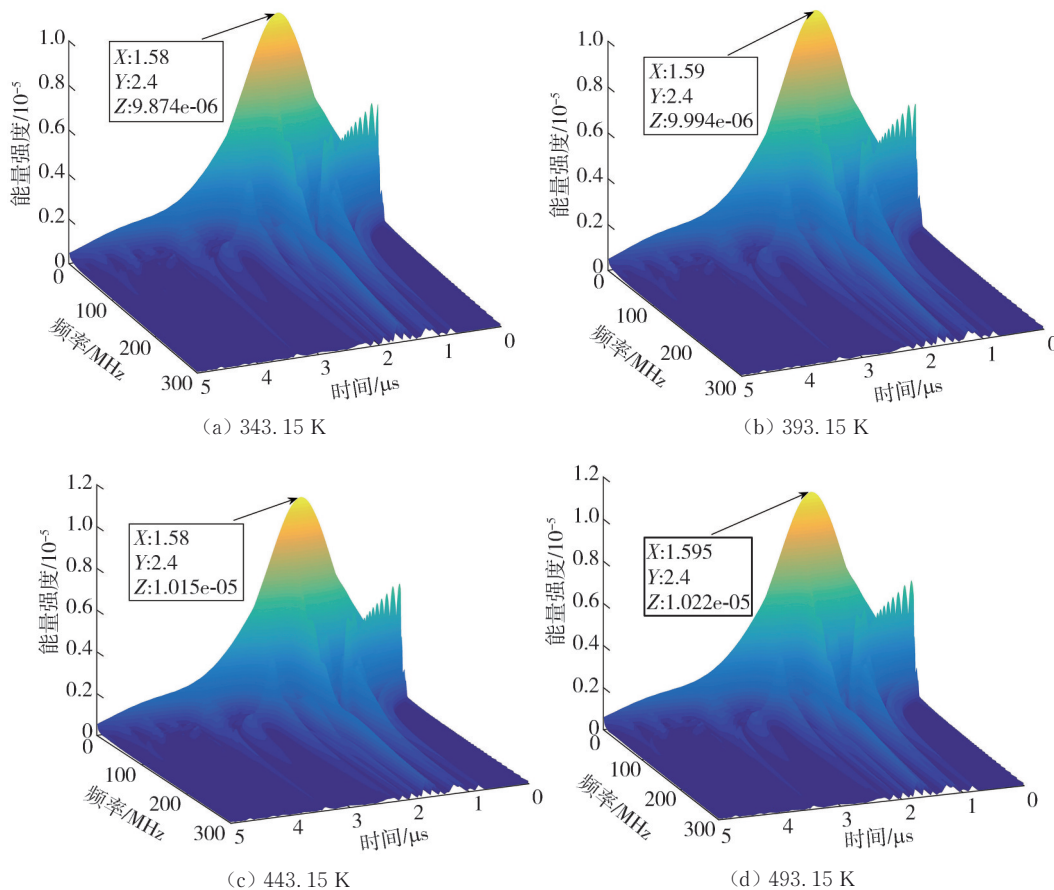


图10 293.15 K时反射和透射瑞利波局部信号的TFA图像

Fig. 10 TFA image of reflected and transmitted Rayleigh wave local signals at 293.15 K

对接收到的透射波信号使用小波分析,将不同加载温度下的裂纹模型进行TFA特征提取,绘

制不同温度下TFA的能量强度分布,如图11所示。



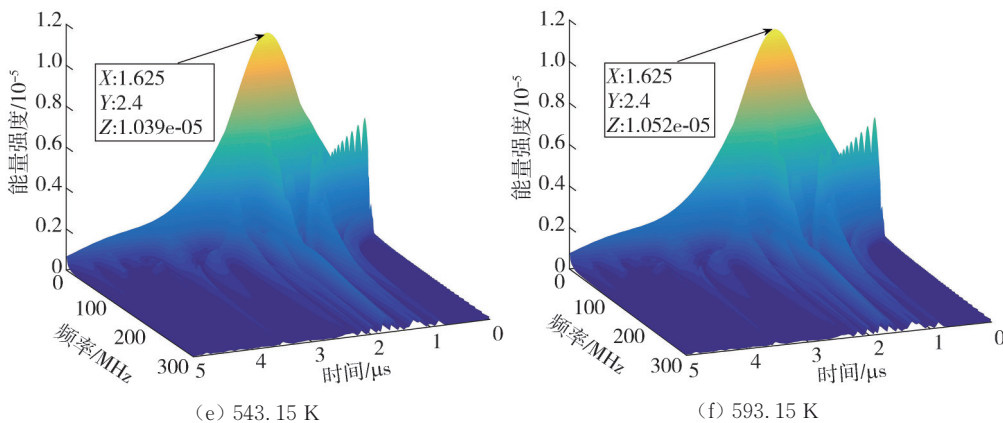


图 11 不同温度下 TFA 的能量强度分布

Fig. 11 Energy intensity distribution of TFA at different temperatures

由图 11 可以发现, 343.15~593.15 K 的温度范围内, 不同温度下的透射波对应的特征频率都为 2.4 MHz, 所以仅用频域的特征频率无法分析出温度与频域信息之间的关系, 而采用 TFA 下的波峰作为能量强度的特征极值, 可以用能量强度建立与温度之间的关系, 实现用频域参数表征温度变化。不同温度对应的能量强度分别为 9.874, 9.994, 1.015, 1.022, 1.039, 1.052, 拟合关系为

$$y(K_s) = 0.8991 + 2.5646 \times 10^{-4} K_s, \quad R_{adj}^2 = 0.99. \quad (21)$$

超声能量强度的极值点分布随温度的线性增长率为  $2.56 \times 10^{-4} \text{ dB} \cdot \text{K}^{-1}$ , 拟合关系如图 12 所示。

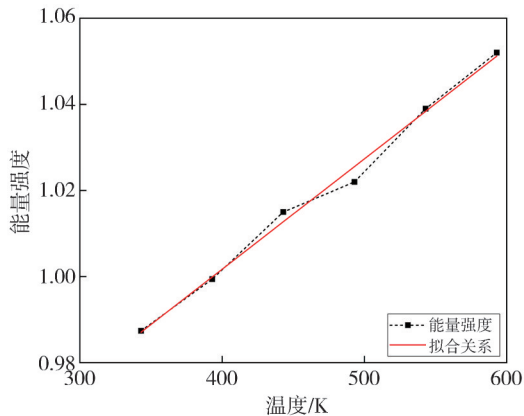


图 12 透射瑞利波在 TFA 下的能量强度与温度的拟合曲线  
Fig. 12 Fitting curve of energy intensity and temperature of transmitted surface wave under TFA

随着温度的增加, 钢的膨胀也加剧, 而裂纹的左右侧会向外膨胀, 导致裂纹间距变窄, 直达瑞利波透过裂纹的能量损失也随着间距的变窄而变小, 则透射瑞利波有逐渐递增的能量变化趋势。因此, 通过小波 TFA 分析可以得出, 能量强度与温度有较强的线性增长关系, 从而得到局部时间范围内时频关系下的能量强度的特征极值点与温

度的定量关系, 说明能量强度作为时频参数可以实现对温度的定量检测。

### 3.3 实验验证

为了对仿真数据得出的结论进行验证, 在实验室搭建了基于温度加载控制装置、亚纳秒高能量激光器、激光非线性干涉仪的完全非接触式激光超声温度检测系统, 图 13 为实验装置结构图。为了得到准确的精度, 在实验中设置一个 40 cm×20 cm 的表面凹槽钢板, 凹槽距离右侧边界 10 cm, 距离左侧边界 30 cm。激光激发点设在距左侧边界 5 cm 处, 使用激光干涉仪在距激发源 25 cm 设置接收点 1, 在 35 cm 处为接收点 2, 凹槽深度为 1 mm, 间隔为 0.1 mm, 示波器采样参数设为采样率 500 MHz, 采样时间 2 000 μs, 共采集 1 000 000 点。

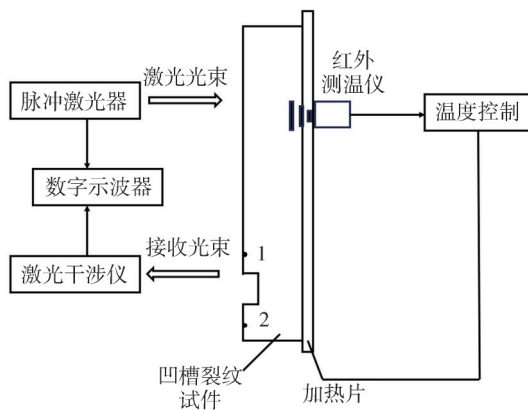


图 13 实验装置结构图

Fig. 13 Experimental device structure diagram

由于温度加载过程中, 温度散射不太稳定, 取特定加载温度的特征波形信息时, 取该温度  $\pm 2 \text{ K}$  范围内的平均幅值来计算。如图 14 为 293.15 K 和 393.15 K 温度下接收点 1 处的波形信号, 如图有两个明显的特征信号, 根据波速分析为 R 波和 rR 波,

提取幅值信息并根据3.1节分析得到如图15的反射率与各加载温度的拟合关系。

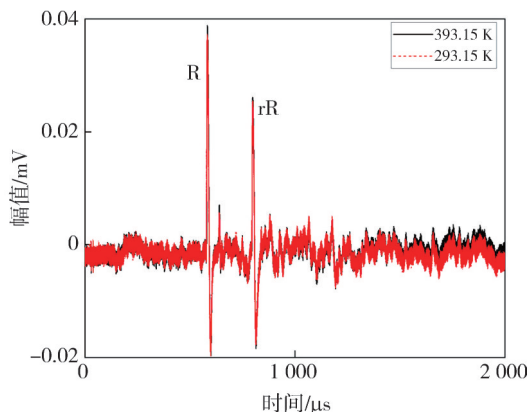


图14 接收点1处不同温度下的波形

Fig. 14 Waveforms at different temperatures at acceptance point 1

图15中拟合曲线为

$$y(K_s) = -24.82279 + 0.00146K_s, \quad R_{\text{adj}}^2 = 0.96. \quad (22)$$

由此可知其斜率为0.00146,与仿真结果相差0.7%,拟合优度也仅相差0.01,故反射率与温度的定量关系得到验证。

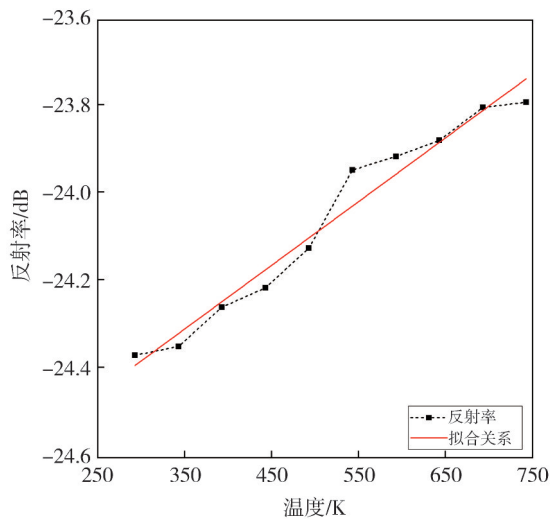


图15 反射率与温度的关系

Fig. 15 The relationship between reflectivity and temperature

图16为293.15 K和393.15 K温度下接收点2处的波形信号,如图有一个明显的特征信号,根据波速分析为tR波,提取不同温度下的透射波幅值信息得到如图17的透射率与各加载温度的拟合关系。

图17中拟合曲线为

$$y(K_s) = -25.19033 + 0.00219K_s, \quad R_{\text{adj}}^2 = 0.96. \quad (23)$$

由此可知其斜率为0.00219,与仿真结果相差4%,拟合优度都为0.96,故透射率与温度的定量关

系也得到验证。

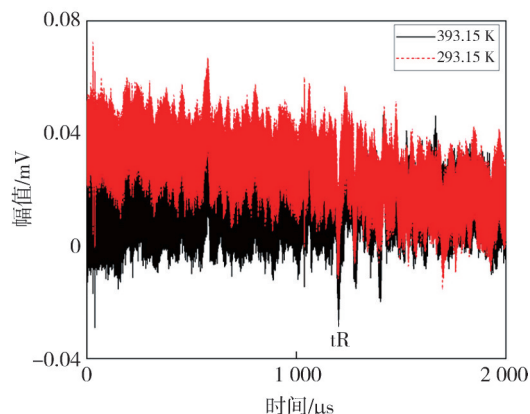


图16 接收点2处不同温度下的波形

Fig. 16 Waveforms at different temperatures at acceptance point 2

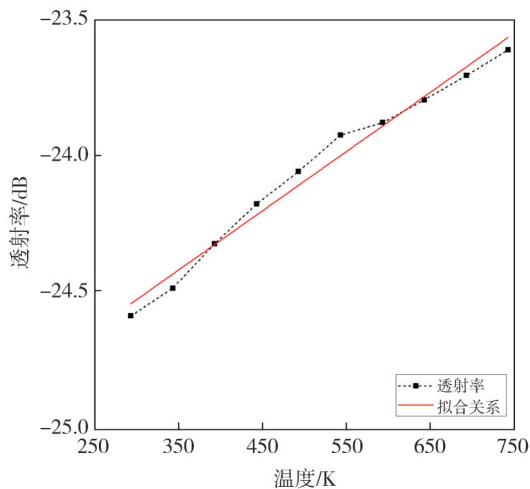


图17 透射率与温度的关系

Fig. 17 The relationship between transmittance and temperature

进行TFA分析时,由于干涉仪本身灵敏度较低,接收到的透射波所伴随的噪声太大,一些特征信号淹没在噪声中,因此,得到少于仿真数的特征温度值的特征值,但可定性分析出这些温度值的拟合关系是线性的,虽然噪声的影响对于拟合关系式不具有泛化性,但是与仿真结果都存在线性递增的变化关系,定性地说明了TFA实验分析同仿真结果一致。

实验研究分析所得结果与仿真结果一致,证明了仿真结果的可行性,故可用时、频参数进行试件温度的定量检测。

## 4 结论

本文基于激光超声热弹性理论,采用稳态解作为瞬态初始值的温度加载方法,建立了293.15~743.15 K温度范围内结构钢的激光超声温度检测模型,并结合实验结果分析得出以下结论:

1) 时域参数分析上, 采用 rR、tR 波的特征量定义反射率、透射率, 得出激光超声瑞利波的反射率和透射率都与温度成线性增长关系, 反射率、透射率随温度的变化率分别为  $1.45 \times 10^{-3} \text{ dB} \cdot \text{K}^{-1}$  和  $2.3 \times 10^{-3} \text{ dB} \cdot \text{K}^{-1}$ , 利用不同温度下反射率和透射率实现对温度的定量检测。

2) 频域参数分析上, 得出透射波的频谱在特征频率为 2.4 MHz 条件下, 超声能量强度的极值点分布随温度的线性增长率为  $2.56 \times 10^{-4} \text{ dB} \cdot \text{K}^{-1}$ , 且有极强的线性相关性, 可利用 TFA 分布下的能量强度实现对温度的检测。

综上, 反射率、透射率作为时域参数, 能量强度作为频域参数, 采用激光超声时、频参数可实现对裂纹试件的温度测量。

#### 参考文献:

- [1] 张佳明, 王文瑞, 王刚. 基于接触式高温应变测试试验的涡轮叶片强度分析[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2020, 33(2): 25-29.  
ZHANG Jiaming, WANG Wenrui, WANG Gang. Strength analysis of turbine blade based on contact high temperature strain test experiment [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2020, 33(2): 25-29. (in Chinese)
- [2] 李辉, 张丽, 张洋洋, 等. 激光超声检测技术在异种钢对接焊缝检测中应用[J]. 电力安全技术, 2023, 25(3): 62-64.  
LI Hui, ZHANG Li, ZHANG Yangyang, et al. Application of laser ultrasonic testing technology in dissimilar steel butt weld inspection [J]. Electric Safety Technology, 2023, 25(3): 62-64. (in Chinese)
- [3] 杜丽婷, 刘松平. 激光超声检测技术[J]. 无损探伤, 2011, 35(5): 1-4.  
DU Liting, LIU Songping. Laser ultrasound testing technology [J]. Nondestructive Testing Technology, 2011, 35(5): 1-4. (in Chinese)
- [4] 张辉, 宋雅男, 王耀南, 等. 钢轨缺陷无损检测与评估技术综述[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2): 11-25.  
ZHANG Hui, SONG Yanan, WANG Yaonan, et al. Review of rail defect non-destructive testing and evaluation [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(2): 11-25. (in Chinese)
- [5] 郑杰. 基于激光超声技术的裂纹闭合模拟研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.
- [6] 许薇, 沈中华, 倪辰荫, 等. 温度对薄板中零群速度 Lamb 波的影响[J]. 中国激光, 2019, 46(12): 87-92.  
XU Wei, SHEN Zhonghua, NI Chenyin, et al. Influence of temperature on zero-group-velocity Lamb waves of thin plate [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(12): 87-92. (in Chinese)
- [7] 李苏原. 激光超声非接触式高温金属厚度检测技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
- [8] DUIJSTER A, VOLKER A, VAN D B F, et al. Estimation of grain size and composition in steel using laser ultrasonics simulations at different temperatures [J]. Applied Sciences, 2023, 13(2): 1121.
- [9] YAMADA H, KOSUGI A, IHARA I. Noncontact monitoring of surface temperature distribution by laser ultrasound scanning [J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2011, 50(7): 07HC06.
- [10] 贾庸斌, 郭华玲, 郑宾, 等. 不同特征下激光超声温度测量研究[J]. 激光与红外, 2023, 53(3): 362-369.  
JIA Yongbin, GUO Hualing, ZHENG Bin, et al. Research on laser ultrasonic temperature measurement under different characteristics [J]. Laser & Infrared, 2023, 53(3): 362-369. (in Chinese)
- [11] FENG Q, BING L, LEI C, et al. Interaction analysis of different defects with laser ultrasonic sound waves and defect characterization [J]. Optics and Laser Technology, 2023, 157: 108630.
- [12] HAN S W, LIAN Y D, XIE L Y, et al. Numerical simulation of angled surface crack detection based on laser ultrasound [J]. Frontiers in Physics, 2022, 10: 767.
- [13] DAI L N, NI C Y, YING K N, et al. Defect imaging based on laser ultrasonic frequency domain synthetic aperture focusing technology with separated generation - detection and 2-D equivalent velocity mapping [J]. Optics and Laser Technology, 2022, 156: 108485.
- [14] SCRUBY C B, MOSS B C. Non-contact ultrasonic measurements on steel at elevated temperatures [J]. NDT & E International, 1993, 26(4): 177-188.
- [15] LI W, KOU H, ZHANG X, et al. Temperature-dependent elastic modulus model for metallic bulk materials [J]. Mechanics of Materials, 2019, 139: 103194.
- [16] 陈世涛, 徐志东. 金属材料中声速随温度变化规律的探讨[C]//中国数学力学物理学高新技术交叉研究会第 11 届学术研讨会论文集. 成都: 西南交通大学出版社, 2006: 327-329.
- [17] ZHU Z, SUI H, YU L, et al. Effective defect features extraction for laser ultrasonic signal processing by using time-frequency analysis [J]. IEEE Access, 2019, 7: 128706-128713.