Journal of Applied Acoustics

◇研究报告 ◇

一种新的超声表面波测温方法研究*

王瑾珏†张金高望

(中国人民解放军陆军军官学院 合肥 230000)

摘要 在材料科学和材料工程领域,对受热材料温度分布测量的需求一直在持续增长。这主要是因为对于材料的各种特性和行为,温度都是其重要参量。以往的声表面波温度计依然需要敏感元件基片与被测区域达到 热平衡才能测量,在时间上有一定的滞后性,在反映快速变化的温度场时缺陷明显。本文设计一种新的声表面 波测量方法测量在加热或冷却过程中的材料表面的温度梯度。这种方法涉及到超声波回波测量和导热反问题 的分析方法来得到材料中沿超声传播方向的一维温度场分布,不依赖敏感元件测温。使用激光超声设备激励 和检测超声波,对铝块和铝板分别进行了测温实验,得到了理想的结果。超声测温技术作为一种新型的热点技 术,配合非接触式的超声激光方法,在材料高温处理领域前景可观。 关键词 声表面波,温度场成像,铝板,激光-超声

中图分类号: TH811.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-310X(2015)03-0278-05 DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2015.03.015

Study on a new method for heated material temperature measuring

WANG Jinjue ZHANG Jin GAO Wang

(Army Officer Academy, Hefei 230000, China)

Abstract There is an increasing demand for temperature measurement of heated material in fields like material science and engineering. Temperature is one of the most important parameters for exploring features or behaviors of the heated material. Traditional methods for temperature measurements require a temperature-sensitive element. However, long measurement time is needed for the temperature-sensitive element and the target environment to obtain a thermal equilibrium. When target environment changes continuously, they may not give accurate temperature measurements. This paper offers a new method based on SAW (Surface acoustic wave) to measure temperature gradient directly on the surface of heated material, and it can avoid the usage of temperature-sensitive element and overcome the thermal equilibrium difficulty in the traditional temperature measurement methods. Experiments on Al material are showed and the expected results are achieved. With a new technology of laser-ultrasonics, acoustic thermometry as a new developed remote thermometry technology shows its apparent capability in high-temperature operation on material.

Key words SAW, Temperature profile, Aluminum plate, Laser-ultrasonics

²⁰¹⁴⁻⁰⁷⁻¹³ 收稿; 2015-01-30 定稿

^{*}装备预研基金 (914A17050312JB91202)

作者简介:王瑾珏(1990-),男,河南安阳人,硕士研究生,研究方向:武器检测技术。

[†]通讯作者 E-mail: leave_day@hotmail.com

1 引言

在科学实验研究及工程应用领域,温度的测量 是当今最基础也是最热点的问题之一。尤其随着材 料科学的发展,在材料高温加工处理过程中,任何一 部分微小的温度改变都将影响到最终生产出产品 质量及产量。故在此过程中精准的动态温度控制以 及静态、动态温度测量显得尤为迫切和重要^[1-2]。

常见的温度测量手段如热电偶,尽管拥有不错 的温度响应,但是因其安装困难,在材料科学、工程 材料加工的高温工作环境中很难得到应用。另外常 见热电偶的时间响应特性不足以满足实时测控的 需求,这就限制了其在需要实时测控的各种环境中 的应用。对于表面温度测量,热电偶的表现依然不 尽人意,这主要是大气效应的影响以及材料表面热 电偶的安装困难造成的^[3]。在此领域广为人知的另 外一种测温方法——红外热成像法,因其非接触式 测温特性,较易应用在在线测温领域。然而背景环 境复杂的折射率与反射率制约着其测量精度,使其 很难在精确测控中有很大发展。超声波在固体表面 传播形成声表面波,其速度也可以反映物体表面温 度信息,并且在测量精度上远高于红外技术温度测 量^[4]。超声波测温被誉为是当今时代温度测量最精 确的手段。故近年来很多专家学者投入此领域进行 研究^[5-7]。

传统的超声表面波测温方法始终无法脱离敏 感元件与待测环境之间的热平衡前提。而敏感元件 与待测环境的热平衡将会带来两个问题,首先热平 衡会在一定程度上影响待测环境的整体温度分布, 敏感元件的置入本身会吸收或散发一部分热量;其 次热平衡的形成需要时间,所以这种方法的快速响 应能力较弱,无法对快速变化的温度进行很好地跟 踪。本文将提出一种新的基于超声表面波的测温方 法,能够很好地解决以上两个问题。

2 方法

2.1 超声波测温原理

声波在介质中传播速度受到介质温度的影响, 当这种影响可以被提取时,就使得新的温度测量方 法成为可能。

假设一个介质中只存在一维的温度梯度,表面 波在其表面传播速度有

$$v = \alpha \sqrt{\frac{\mu'}{\rho_0}},\tag{1}$$

式中:*α*——约为0.93;*µ*′——拉梅常数。

其中拉梅常数和密度显然都是温度的函数。超 声波回波穿越介质温度梯度方向的传播时间*t_L*可 以由下式给出:

$$t_L = \int_0^L \frac{1}{v(T)} \mathrm{d}x,\tag{2}$$

式中: L——超声回波传播距离; v(T)——超声波速度, 温度T的函数。

超声波传播速度随温度的改变与介质的材料 特性有关,在特定的温度区间内可以用一个简单的 线性或二次方程来表示^[2]。若测量区间跨度较大, 则可以事先用试块进行速度-温度标定,绘制超声声 速-温度拟合曲线。介质中的一维温度分布*T*(*x*,*t*) 是位置和时间的函数,受到被加热物质边界条件的 影响。因此根据(2)式,只要合理地列出热控制方程 并找出合适的边界条件和初始条件,通过测量超声 波传播时间*t*,即可得到被测物体的温度分布。

2.2 有限差分计算与热传导分析方法的结合

在实际加热或冷却过程中,边界条件并不总是 一成不变的,更多时候是随时间在不停变化的,是很 难准确描述的,是几乎无法得到的。所以通过以上 方式来求得温度场梯度的想法几乎无法实现。为了 克服以上问题,本文提出了一种新的可以有效测量 声波路径上温度场分布的方法。这种方法主要包括 超声脉冲回波的测量、热传导理论方法以及一维有 限差分方程计算。这种方法的优势是不需要知道边 界条件。

一维有限差分模型主要由非常多的微小元素 结构体组成,用来分析薄板材料中的温度传导,如 图1所示。



图1 超声波测温示意图

Fig. 1 Diagram of acoustic thermometry

使用梯形积分法, (1) 式中的飞行时间 t_L 可以通过(3) 式确定:

$$t_L = h\left(\frac{1}{v_1^n} + \frac{1}{v_N^n}\right) + 2h\sum_{i=2}^{N-1}\frac{1}{v_i^n},\qquad(3)$$

279

式中:*h*——积分步长;*N*——总步数;*v_iⁿ*——表示声速在每个网格中的传播速度,其中*i*,*n*分表代表网格的编号和时间。

假设整个材料在n时刻有均匀的初始温度 T_i^n , 并在此刻与一热源接触发生热交换,在极短的下一 个时刻n+1,温度可以表示为

$$T_{i}^{n+1} = \begin{cases} T_{i}^{n} + r(T_{i+1}^{n} + T_{i-1}^{n+1} - 2T_{i}^{n}) \\ (i = 2) \\ T_{i}^{n} + r(T_{i+1}^{n} + T_{i-1}^{n} - 2T_{i}^{n}) \\ (i = 3, \cdots, N - 2) \\ T_{i}^{n} + r(T_{i+1}^{n+1} + T_{i-1}^{n} - 2T_{i}^{n}) \\ (i = N - 1) \end{cases}$$

$$(4)$$

其中 $r = \alpha \tau / h^2$,且根据冯诺依曼稳定判据,其值必须小于0.5。 τ 表示时间步长。

假设加热面元i = 1,在无法明确边界条件的 情况下,通过联立有限差分方程与超声渡越时间方 程,依然可以解得待测平面上的一维温度场分布。 在n+1时刻,被加热单元的温度 T_1^{n+1} 可以表示为

$$T_1^{n+1} = -\frac{1}{A} \left(\frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} - B \right), \quad (5)$$

$$a = r \left(\frac{d}{h} - \frac{1}{v_3^{n+1}}\right),\tag{6}$$

$$b = \left(\frac{d}{h} - \frac{1}{v_3^{n+1}}\right) \left[(1 - 2r) \, v_2^n + r v_3^n \right] - (r+2), \tag{7}$$

$$c = -(2-2r)v_2^n + rv_3^n, (8)$$

$$d = t_L - 2\left[\frac{1}{2}h\left(\frac{1}{v_3^{n+1}} + \frac{1}{v_N^{n+1}}\right) + h\sum_{i=4}^{N-1}\frac{1}{v_i^{n+1}}\right],$$
(9)

其中t_L为n+1时刻测得的时渡越时间。

以上推导表明,在假设SAW 传播速度与介质 温度成线性关系时,只要确定了任意时刻(初始时 刻)待测面的温度分布*T_iⁿ*,通过测量SAW 在待测面 上的渡越时间,即可求得下一时刻待测面的温度分 布。只要持续不间断测量SAW 信号,即可求得任意 时刻的待测面温度分布。

2.3 激光-超声原理简介

激光-超声作为一种声源,其主要基于热弹效 应。以图2中铝块为例,其表面受到激光脉冲照射, 较低的吸收效率下,表面吸收的热能使局部区域向 空气界面短暂地自由弹性膨胀,之后收缩,形成应 力波。

对于自由截面而言,纵波的传播方向并不沿垂 直界面的方向传播,而是在延半顶角为 α 度的锥形 中传播;横波延半顶角为 β 的锥形传播。通常情况 下 $\alpha > \beta$,其值与界面材料有关,两者叠加形成延截 面传播的表面波。

激光干涉仪作为超声检测设备,其主要基于多 普勒效应。当其接收到经检测面反射回来的激光束 时,经检测面反射和散射的激光束由于检测面的振 动发生了频率的变化。加载了检测面振动频率信 息的反射光束被转换为光强的变化,再经过一系列 的处理手段,最终在示波器上以电信号的形式表现 出来。

这种基于多普勒效应的激光干涉仪也叫速度 干涉仪,对检测面的振动非常敏感,对微振动有很好 的检测能力^[8]。

3 实验及结果

3.1 使用激光-超声方法测量表面温度

图2是实验用到的系统结构图,系统中既包含 了声表面波温度测量模块,又包含了红外热成像 模块,实验样品选用一块30 mm厚的铝板。激光脉 冲发生器(工作波长1064 nm,单脉冲功率200 mJ, 脉冲宽度5 ns)发射激光脉冲透过偏振片经分光镜 分为两路,分别在点A和点B激励表面波。在C位 置处使用基于光折变二波耦合的干涉仪(工作波长 532 nm,功率200 mW)检波。与此同时,铝板的下 表面由一个300 °C的加热炉加热。通过笔者之前所 做高精度时间测量方案^[9]测出声表面波1和声表 面波2到达C处的时间延迟,即可计算出表面波从 A传播至B处所需时间。







在本次实验中,表面波传播距离取50 mm,选 用红外热成像仪做标准测量得到表面温度分布参 考值。表面波回波由上位机实时监测系统每0.1 s 监 测一次,采样频率为100 MHz。图3显示了用超声测 温法以及红外成像法测得的铝板表面温度分布对 从加热起始计算的时间的变化,取0 s,5 s,15 s,40 s 和90 s时刻分别做了温度分布曲线。超声声速随温 度的变化由v(T) = -0.7560T + 2981.7 (m/s)^[6]确 定,铝板初温与环境温度相同均为23.5°C。



图3 激光-超声技术与红外测温技术对加热铝板 测温结果对比图

Fig. 3 Contrast of laser-ultrasonic method and IR method

从图3还可以看出两种算法求的表面温度场分 布基本吻合,但是可以从个别点较大的温度偏差看 到该方法的鲁棒性有待提高。根据理论计算,时间 测量2 ns左右的偏差将会使测温结果相差1°,激光 干涉仪检测超声波要求待测物固定良好,本次试验 15 s边缘一个数据点的5°误差应该就是待测件未 能良好地固定所导致的。但是总体上良好的一致性 依然可以说明超声测温法可以很好地完成表面温 度测量的任务。

3.2 二维表面温度测量

由于对二维平面上的表面温度测量和一维表 面温度场的测量同样重要,我们对此也做了尝试性 的研究。如图4所示,用激光脉冲发生器照射点A₁ 至A₁₃从而激发声表面波,在B点处使用激光干涉 仪接收从前面这些点处传来的声表面波,对所有路 径做导热反问题分析,这样我们就得到了一个平面 内数条直线上的温度分布情况,进而通过这些路径 上的温度分布来构建整个平面的温度场分布情况。



图4 声表面波测量表面二维温度场分布原理图 Fig. 4 2D temperature distribution on the surface of a Al plate measured by SAW



图 5 加热铝板超声测温和红外热成像结果对比图 (图 5(a)~图 5(d) 左侧为超声测温结果图, 右侧为红外 成像测温结果图)

Fig. 5 Comparison of heated Al plate acoustic thermometry and infrared thermal imaging (The left is heated Al plate acoustic thermometry, the right is IR thermometry in $(a)\sim(d)$)

为了验证这种方法的可行性,我们做了一个实 验,选用一块30 mm厚的铝板作为实验样本。如 图5所示,铝板左边通过一个300°C的加热炉加热, 使用激光脉冲发生器(工作波长1064 nm, 单脉冲功 率200 mJ, 脉冲宽度3 ns)通过二维检流计扫描器 不间断扫描A1到A13激励声表面波,在B处用上文 提到的激光干涉仪采集声表面波信号。用这种方法 我们可以得到介质表面60 mm×60 mm区域内沿 多条不同路径传播的声表面波。激光脉冲照射点离 散间隔设定为10 mm,每秒钟对上述13点完成一轮 扫描。通过自动互相关处理,在B点处得到沿不同 路径传播的精确的声表面波传播时间信息,进而通 过导热反问题分析方法解出在每条路径上的物体 表面温度场一维分布 (A₁-B, A₂-B, ..., A₁₃-B)。得 到的13条超声路径上的物体表面一维温度场分布 情况通过一种插值重构算法进而接触在任意瞬间 求解平面的表面温度场分布情况。

通过图5结果可以看出,超声测温法与热成像 测温法两种方法测得的物体表面温度场分布情况 随时间的变化基本一致,求解过程中所用铝表面波 声速随温度变化函数为 $v = -0.7560T + 2981.7^{[3]}$, 单位为m/s。

4 结论

本文提出了一种新的基于超声表面波的受热 材料温度场分布测量方法。这种方法包括超声脉冲 回波测量以及导热反问题分析方法来求的沿声波 传播路径上的一维温度场分布。通过对铝块和铝板 的实验证明了此方法是可行的。尽管还有进一步研 究以提高鲁棒性和精确度的需求,但是这种方法作 为工业高温材料处理过程中的现场或在线温度检 测技术在将来有很大的应用潜力。

该方法的测温精度取决于时间差测量精度,随 测量区域大小而改变。待测区域的增加相当于时间 信号的放大,从而获得更高的温度测量精度。笔者 通过设计一种基于Xilinx Virtex-5的高精度时间电 压转换器,时间测量精度可以达到80 ps^[9-10],在这 种时间测量精度条件下的温度测量理论精度能够 达到0.02°。 **致谢** 本文中的工作是在装备预研基金项目 914A17050312JB91202的支持下完成的。感谢在 项目研究中张金教授所给予的点拨与意见。同样感 谢所有在论文写作过程中帮助过作者的人,谢谢大 家的宝贵意见和建议,才让这篇文章得以完成。

- TAKAHASHI M, IHARA I. Ultrasonic determination of temperature distribution in thick plates during single sided heating[J]. World Scientific, 2008, 22(11): 971–976.
- [2] IHARA I, YAMADA H, KOSUGI A, et al. New ultrasonic thermometry and its applications to temperature profiling of heated materials[C]. 2011 Fifth International Conference on Sensing Technology, 2011.
- [3] IHARA I, YAMADA H, KOSUGI A, et al. Noncontact temperature profiling of rotating cylinder by laserultrasonic sensing[C]. 2013 Seventh International Conference on Sensing, 2013.
- [4] SCHMIDT P L, GREG D, YUHAS D J, et al. Thermal measurements using ultrasonic acoustical pyrometry[J]. Ultrasonics, 2014, 54(4): 1029–1036.
- [5] TSAI W Y, CHEN H C, LIAO T L. An ultrasonic air temperature measurement system with self-correction function for humidity[J]. Meas. Sci. Technol., 2005, 16(2): 548–555.
- [6] TAKAHASHI M, IHARA I. Ultrasonic monitoring of internal temperature distribution in a heated material[J]. Jpn. J. App. Phys., 2008, 47(5): 3894–3898.
- [7] KATHRYN J, ALVIN M, George E. Ultrasonic thermometry for friction stir spot welding[J]. Measurement, 2014, 49(3): 226–235.
- [8] 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 tech-

nology[J]. Nondestructive Test, 2011, 35(5): 1–4.

- [9] 张金, 王伯雄, 崔园园, 等. 高精度回波飞行时间测量方法及 实现 [J]. 兵工学报, 2011, 32(8): 970–974.
 ZHANG Jin, WANG Boxiong, CUI Yuanyuan, et al. High precision echo flight time measurement method and its implementation[J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(8): 970–974.
- [10] 张金, 崔园园, 吴学伍, 等. 基于时间放大技术的新型时间电 压转换器 [J]. 光学精密工程, 2013, 21(12): 3223-3230.
 ZHANG Jin, CUI Yuanyuan, WU Xuewu, et al. Time to voltage converter based on time amplifiers[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(12): 3223-3230.