

文章编号: 1001-3806(2010)06-0753-04

环状激光作用于薄管产生温度场的有限元模拟

曹豆豆, 王开圣, 杨雁南*

(南京航空航天大学 应用物理系, 南京 210016)

摘要: 为了提高激光在管道中激发超声波的效率, 基于激光超声的热弹激发理论, 建立了环状激光源作用于薄管中的有限元模型, 采用有限元方法, 数值模拟了环状激光脉冲作用于铝管内壁时产生的瞬态温度场, 得到了铝管内部温度随时间变化的曲线和不同时刻温度沿径向、轴向的变化曲线, 并进一步分析了铝管内温度梯度的形成及随时间、沿径向的变化规律。结果表明, 激光产生的瞬态温度场建立极其迅速, 整个过程仅持续几十纳秒, 该过程产生的温度梯度非常大, 因此环状激光源可在铝管中激发很强的超声波; 同时, 由于温度梯度分布在整个圆周上, 因而形成的导波衰减慢, 可在周向、轴向上实现大范围超声检测。该结果对热弹条件下激光在管道中激发超声导波的研究有一定参考作用。

关键词: 激光技术; 激光超声; 有限元; 温度场; 环状光源

中图分类号: TN249 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.06.010

Finite element simulation of temperature field of thin tubes irradiated by ring lasers

CAO Dou-dou, WANG Kai-sheng, YANG Yan-nan

(Department of Applied Physics, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of ultrasound excited by pulsed laser in a thin tube, a laser-ultrasonic model of an aluminum tube irradiated by a ring laser was established based on thermo-elastic theory of laser-ultrasound. The transient temperature field of the interior surface of the aluminum tube irradiated by a pulse ring laser was simulated by means of finite element method. Then the evolution curves of the temperature with time, radial and axial variables were obtained. Furthermore, the formation and variation of temperature gradient in the interior of aluminum tubes was analyzed. Results show that transient temperature field can be set up in a few tens of nanoseconds under the irradiation of a pulsed ring laser. Enormous temperature gradient produces in this process and a very strong ultrasonic wave appears subsequently in the aluminum tube. Because temperature gradient distributes on the entire circle, the ultrasonic wave spreading in tube attenuates slowly, which is useful for ultrasonic detection on large region along circle and axis of the tube. The results may provide valuable reference for the laser-generated thermo-elastic ultrasonic guided wave pipeline.

Key words: laser technique; laser-ultrasonic; finite element; temperature field; ring laser source

引言

管道系统在化工、石油以及电力等工业中有广泛应用, 定期对管材进行检测非常重要, 否则可能导致严重损失^[1], 因此, 超声导波在管道和管路中的传播一直是力学和超声检测领域的研究热点^[2-3], 特别是周向和纵向模态的导波检测技术, 更是受到人们的极大关注。近年来, 由于激光超声技术的迅速发展, 利用激光超声技术对管道进行无损检测的研究也多有报道^[4-6]。由于导波具有多模和色散特性, 目前人们对超声导波

在管道中传播和散射的特性尚未完全了解, 从激光在管道内激发超声的原理出发对此问题进行研究, 有助于从本质上加深对这一问题的理解。

激光超声技术是一种很实用的无损检测技术^[7-9], 它不仅具有非接触的优点, 而且还可以通过改变作用在样品上激光源的形状来改变激发超声导波的模式, 以提高激发效率^[10-12]。关于激光超声技术用于管道检测的研究, TANG 等人^[3]利用本征函数展开法详细讨论了有限长管道中导波的激光激发, 给出了4个能量相等的脉冲激光轴对称地打在管外壁上时, 管外壁各点振动的瞬态解。GAO 等人^[13]用脉冲激光光源作为表面加载, 从实验上得到了薄铝管表面探测点的位移随时间的变化, 以及有缺陷和无缺陷薄铝管表面的波形比较。ZHAO 等人^[4, 14]采用有限元法对线光源在

作者简介: 曹豆豆(1984-), 女, 硕士研究生, 主要从事激光超声技术的研究。

* 通讯联系人。E-mail: yangyn@nuaa.edu.cn

收稿日期: 2009-11-20; 收到修改稿日期: 2010-02-23

管道内激发的周向导波进行了理论研究。

因热弹条件下的激光超声是样品吸收激光能量,从而温度上升而产生热膨胀,因此,研究管状材料中激光超声导波的前提是得到管状材料中的瞬态温度场。作者首先分析了环状光源在管状材料中激发超声导波的优势及可行性,随后以薄铝管为例,建立了环状激光激发源作用在铝管中的有限元模型,并数值计算了该条件下铝管中的温度场分布,分析了温度和温度梯度的变化规律。所得结果对管道系统的导波研究具有实际意义。

1 环状光源激发薄铝管中的超声导波的优势及可行性分析

从目前的相关报道看,利用激光超声技术对管道进行无损检测时,激发源的选取主要有沿轴向的线状光源^[13-14]和沿周向的环状(或弧形)光源^[5,11]。激光束经柱状透镜会聚可直接得到线状光源。环状光源的获取如图1所示。激光通过扩束器扩束后,照射在置

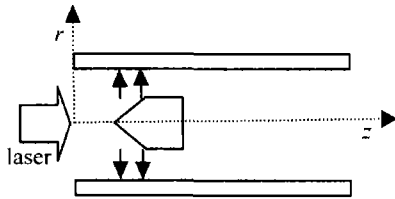


Fig. 1 Configuration for the tube irradiated by a ring laser

于管材内部轴线处的锥形反射镜上,随后被反射到管材的内表面,形成环状激光激发源。在参考文献[11]中,LEE等人从实验上测量比较了环阵列和线阵列激发源在管材中激发超声波的效率,结果表明:与线状光源相比,环状光源对管道的检测有其独特优势。线状光源在管中主要激发周向导波,由于其宽度有限,温度在周向上衰减很快,因此,线光源激发的超声波只局限一定区域内。而由于环状激光光源对管的照射具有轴对称性,使得管整个圆周上具有相同的温度分布,产生的超声波在整个圆周上也具有相同的强度分布,超声纵波沿圆管轴向可传播较长距离,因此超声检测效率较高。为了理解环状激光光源激发超声波的传播规律,本文中采用有限元方法,模拟了环状激发源在铝管中形成的温度场分布,分析了温度和温度梯度的变化规律,从理论上研究了环状激发源激发超声导波的本质。

2 有限元理论模型

2.1 热传导理论

不失一般性,作者以各向同性的铝材圆管为例,入射激光能量在空间的分布具有如图1所示的轴对称性,采用柱坐标系,取管中心线为 z 轴,半径方向为 r

轴。环状激光源能量沿环周向均匀分布,产生的温度场沿周向无梯度、无热量流动。在此坐标系下管内的2维热传导方程为:

$$\rho c_p \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \kappa \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\kappa \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \right] \quad (1)$$

式中, $T(r, z, t)$ 为 t 时刻的温度分布; ρ, c_p 和 κ 分别为铝材的密度、比定压热容和热导率。

在激光辐照下,材料表面吸收激光能量温度升高,之后热量由表及里扩散。激光的热作用作为模型的边界条件。在激光辐照区热流的边界条件为:

$$-\kappa \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \Big|_{r=r_1, z_1 \leq z \leq z_2} = I_0 A(T) f(z) g(t) \quad (2)$$

式中, $A(T)$ 为材料表面的吸收率, r_1 为圆管内半径, (z_1, z_2) 为轴向上激光的加载区域, I_0 为脉冲激光的峰值能量密度。设脉冲激光能量的时、空分布函数均为高斯型:

$$\begin{cases} f(z) = \exp\left[-\frac{(z-z_1)^2}{R_c^2}\right] \\ g(t) = \frac{t}{t_0} \exp\left(-\frac{t}{t_0}\right) \end{cases} \quad (3)$$

式中, z_1 为激光强度最大处的轴向坐标,它对应于由锥形反射镜顶点反射到铝管内径处的轴向坐标, R_c 是高斯型激光源的半峰全宽, t_0 为激光脉冲的上升时间。除加载激光处,样品其它表面与外界的热交换可忽略,故设其边界条件为绝热。

2.2 有限元模型

热传导方程的有限元形式:

$$CT + \dot{K}T = P_1 + P_2 \quad (4)$$

式中, C 为热容量矩阵, K 为热传导矩阵, P_1, P_2 分别为热流和内热源矢量。本文中激光为表面加载,无内热源矢量。 T, \dot{T} 分别为温度矩阵和温度随时间的变化率矢量。其中,温度可写为:

$$T(r, z, t) = \sum_{j=1}^M N_j(r, z) T_j(t) \quad (5)$$

式中, $N_j(r, z)$ 为节点 j 的插值函数。为求解(4)式,可对时间进行积分,积分步长取 Δt ,温度及其1次导数根据参考文献[14],可表示成:

$$T \Big|_i = \frac{1}{2} (T_{i+1} + T_i) \quad (6)$$

$$\frac{dT}{dt} \Big|_i = \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta t} \quad (7)$$

式中, $T_{i+1} = T(t + \Delta t), T_i = T(t)$,将(5)式~(7)式代入(4)式得到:

$$\left(\frac{2C}{\Delta t} + K\right)T_{t+\Delta t} = \left(\frac{2C}{\Delta t} - K\right)T_t + P \quad (8)$$

式中, $P = P_1 + P_2$ 。上式形成一个可执行的静态代数问题, 每一个时间步的温度都能得到, 从而可得到温度的时间历史曲线。

3 数值模拟的参量及结果

3.1 激光及材料的有关参量

基于上述模型, 本文中取如图2所示的轴截面图

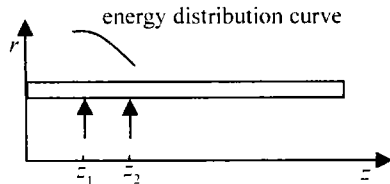


Fig. 2 Computation module

形作为计算区域, 计算了铝管内表面的温度场分布。其中, 铝管长度 20mm, 厚度 0.5mm, 半径 2mm; 初始温度 $T_0 = 300K$, 激光脉宽 10ns, 激光能量 100mJ, 光源照射区域 $z_1 = 2mm, z_2 = 3.5mm$ (此处激光能量密度下降为 z_1 处的 e^{-1}), 即环光源宽度为 1.5mm。

铝材料的热物理参量如下:

$$\kappa(T) = \begin{cases} 292.6, & (T < 200) \\ 249.45 - 0.085T, & (200 \leq T \leq 730) \\ 198.47 - 0.014T, & (730 < T < T_m) \end{cases} \quad (9)$$

比定压热容为:

$$c_p(T) = \begin{cases} 3.971T, & (T < 200) \\ 780.27 + 0.488T, & (200 \leq T < T_m) \end{cases} \quad (10)$$

密度为:

$$\rho = 2769 - 0.22T, \quad (300 \leq T < T_m) \quad (11)$$

吸收率为:

$$A(T) = 5.2 \times 10^{-2} + 3 \times 10^{-3}(T - 300) \quad (12)$$

式中, T 为材料中的温度 (K), T_m 为铝的熔点。

3.2 数值结果及讨论

由于温度场是超声场产生的根源, 因此, 本文中首先计算了环状激光与铝管相互作用产生的瞬态温度场。

图3分别为在轴向坐标 z_1, z_2 位置, 铝管不同半径处的温度随时间变化的规律。由此可以看出, 当激光辐照在管材内表面时, 铝管吸收激光能量, 其表面温度上升迅速, 在激光脉冲结束时, 内表面达到最高温度。同时, 由于热扩散热量不断向铝管内部传递, 使其内部不同厚度处陆续达到最高温度。被激光照射的内表面温度在 50ns 内变化剧烈, 之后温度及温度变化率逐渐减小。而离辐照面 $5\mu m$ 处的温度明显低于辐照面的温度。在 z_1, z_2 位置上, 温度随时间的变化规律相同,

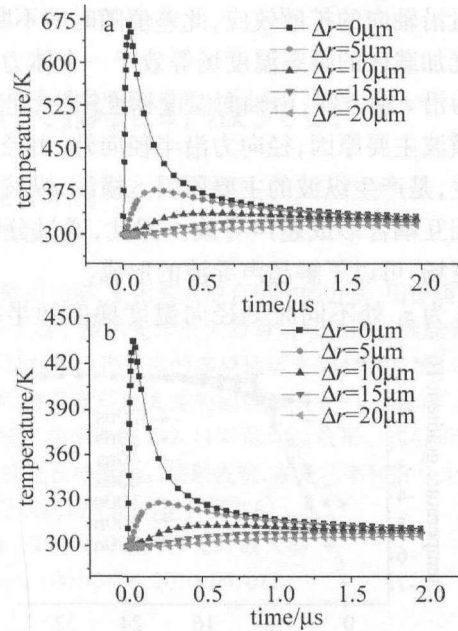


Fig. 3 Temperature versus time at various radius in the axial coordinates
a— z_1 position b— z_2 position

只是由于加载激光在轴向上的半高斯分布, 使得 z_2 处的温度明显低于 z_1 处的温度。

图4分别为不同时刻铝管内 z_1 处温度沿径向的

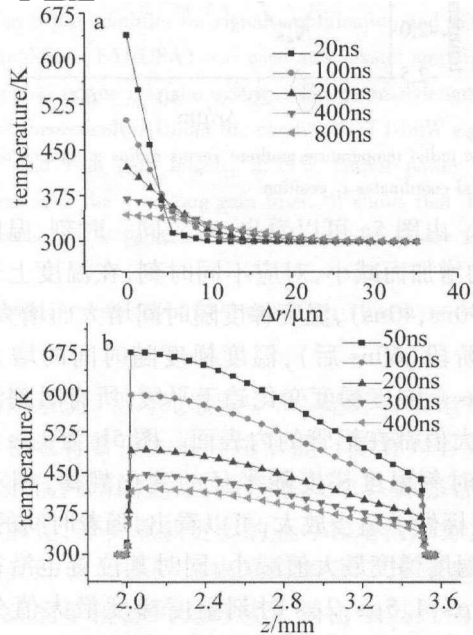


Fig. 4 Temperature distribution at various time
a—radial orientation b—axial orientation

变化规律和加载区域 (z_1, z_2) 范围内温度沿轴向的变化规律。由图4a可知, 径向上温度扩散的有效长度随时间不断增大, 但温度的变化率随时间不断减小, 在离内表面 $25\mu m$ 处已不存在有意义的温升。由图4b可知, 由于在此区域加载的热流密度成半高斯分布, 故温度沿轴向各点的温升明显不同, 在激光作用终止后不太长的时间内, 温度沿轴向的分布也呈半高斯型。在 50ns 时, 激光加载区域最高、最低温度相差约 250K, 且

由于热量沿轴向的扩散效应,此差值随时间不断减小。

激光加载区的瞬态温度场等效于一个体力源。其中轴向力沿 z 轴方向,由轴向温度梯度产生,是产生表面波和横波主要原因;径向力沿半径向外,由径向温度梯度产生,是产生纵波的主要原因。横波、纵波在传播过程中相互耦合形成超声导波。因此,通过分析瞬态温度梯度场,可以了解超声导波的形成。

图 5 为 z_1 处不同时刻径向温度梯度随半径的变

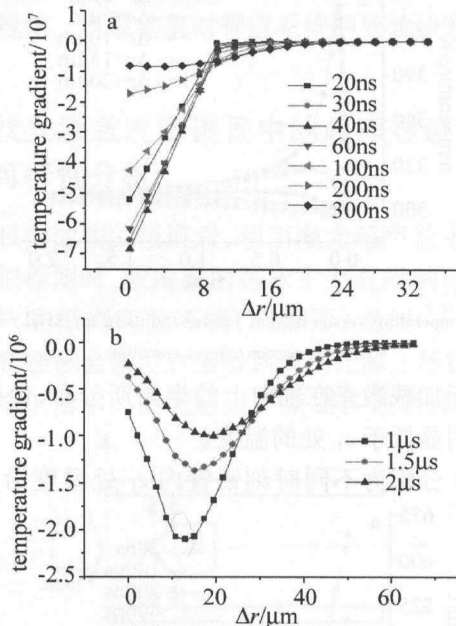


Fig. 5 The radial temperature gradient versus radius at various time in the axial coordinates z_1 position

化规律。由图 5a 可以看出,对应同一时刻,温度梯度随 Δr 的增加而减小,对应不同时刻,在温度上升阶段(20ns,30ns,40ns),温度梯度随时间增大而增大,在温度下降阶段(60ns 后),温度梯度随时间的增大而减小,300ns 后温度梯度变化趋于平缓,所有时刻温度梯度的最大值都在铝管的内表面。图 5b 为 $1\mu s$ 后的 3 个不同时刻温度梯度随半径的变化规律,相对于图 5a,纵坐标做了适当放大,可以看出,随着时间的推移,不仅有温度梯度最大值减小,同时其位置也沿径向转移,在 $1\mu s, 1.5\mu s, 2\mu s$ 时刻温度梯度最大值分别为 $0.99 \times 10^6, 1.36 \times 10^6, 2.1 \times 10^6$,它们离表面的距离则分别为 $13\mu m, 15\mu m, 19.5\mu m$ 。此外,数值模拟结果还表明,在 $z_1 \sim z_2$ 间的任意位置上温度梯度随半径变化的规律相同,只是温度梯度的大小不同,这与轴向坐标 z_1, z_2 处温度随半径的变化规律类似。

4 结 论

鉴于环状激光源在铝管中激发超声导波的优势及可行性,作者采用有限元方法,数值模拟了环光源作用

于铝管时产生的温度场分布,分析了温度和温度梯度的变化规律。结果表明,激光产生的瞬态温度场建立极其迅速,整个过程仅持续几十纳秒,该过程产生的温度梯度非常大,这正是环形激光激发源可在铝管中激发很强超声波的原因。同时,由于温度梯度分布在整个圆周上,因而形成的导波衰减较小,可在周向、轴向上实现大范围的超声检测。作者对温度场及温度梯度场的分析结果可为热弹条件下激光在管道中激发超声导波的研究提供理论参考。

参 考 文 献

- [1] ROSE J L, HE C F, WU W B. Ultrasonic waves in solid media[M]. Beijing: Science Press,2004:125-128(in Chinese).
- [2] TA D A, LIU Zh Q, TIAN G Ch. Propagation characteristics of ultrasonic guided-waves in pipes[J]. Technical Acoustics,2001, 20(3): 131-134(in Chinese).
- [3] TANG L G, CHENG J Ch, WANG J L. Theoretical investigation of the laser-generated guided waves in hollow cylinders[J]. Acta Acustica, 2001,26(6):489-496(in Chinese).
- [4] ZHAO Y, SHEN Zh H, LU J, et al. Finite element simulation of laser-generated circumferential waves in hollow cylinder[J]. Acta Physica Sinica,2007, 56(1):321-325(in Chinese).
- [5] SONG B M, KIM J H, LEE J H. Application of laser-generated ultrasound to evaluate wall thinned pipe[J]. Nondestructive Testing in Progress,2007,5(1):187-195.
- [6] JHANG K Y, KIM H M. Automatic inspection of pipe using non-contact guided wave technique with enhanced mode-selectivity[J]. Material Science Forum,2006,505/507(2):973-978.
- [7] ZHANG Sh Y. Laser ultrasound and materials nondestructive evaluation[J]. Applied Acoustics,1992,11(4):1-6(in Chinese).
- [8] WANG J J, SHEN Zh H, NI X W, et al. Numerical simulation of laser-generated ultrasonic by finite element method in the transparent coating-substrate system[J]. Laser Technology, 2006,30(2):177-180(in Chinese).
- [9] XU B Q, SHEN Zh H, NI X W, et al. Time-frequency analysis of laser-generated ultrasonic wave in coating-substrate systems[J]. Laser Technology,2004,28(6):609-612(in Chinese).
- [10] NOROY M H, ROYER D, FINK M. The laser-generated ultrasonic phased array: analysis and experiments[J]. J Acoust Soc Amer, 1993,94(4):1934-1943.
- [11] LEE T H, CHOI I H, JHANG K Y. Single-mode guided wave technique using ring-arrayed laser beam for thin-tube inspection[J]. Nondestructive Testing and Evaluation International,2008,41(8): 632-637.
- [12] JHANG K Y, SHIN M J, LIM B O. Application of the laser generated focused-Lamb wave for non-contact imaging of defects in plate[J]. Ultrasonics,2006,44(11):1265-1268.
- [13] GAO W M, GLORIEUX Ch, THOEN J. Study of circumferential waves and their interaction with defects on cylindrical shells using line-source laser ultrasonics[J]. J A P,2002,91(9):6114-6119.
- [14] HE Y J, ZHU R H, SHEN Zh H, et al. Numerical simulation of laser-induced transient temperature field in cylindrical shell[J]. Laser Technology, 2005,29(4):386-388(in Chinese).