

激光超声测量金属材料弹性常数实验与有限元分析

战宇¹, 林中亚¹, 刘常升²
(1. 东北大学理学院, 辽宁沈阳 110819; 2. 东北大学材料科学与工程学院, 辽宁沈阳 110819)

摘 要: 利用激光诱导产生的多种模态超声波的波速反演金属铝板的弹性常数. 实验中将脉冲激光聚焦成线源在铝板表面诱导超声波, 采用双通道非接触接收表面波的时域信息并测算其速度. 在有限元分析中, 将激光等效为时间和空间上均满足高斯分布的脉冲载荷, 建立热力耦合分析模型对激光诱导超声波的过程进行模拟, 提取超声信号的时域信息并计算表面波和纵波速度, 利用声弹性方程得到铝的弹性常数. 数值结果与理论值相吻合, 表明建立的激光超声力学模型能够有效模拟激光诱导超声波的物理过程, 为进一步利用激光超声技术研究材料力学性能提供了依据.

关 键 词: 激光超声; 弹性常数; 有限元模拟; 表面波; 纵波

中图分类号: O 341 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2018)09-1363-06

Experiment and Finite Element Simulation for Laser Ultrasonic Measurement of the Elastic Constants of Metal Materials

ZHAN Yu¹, LIN Zhong-ya¹, LIU Chang-sheng²
(1. School of Sciences, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. School of Materials Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: LIU Chang-sheng, E-mail: csliu@mail.neu.edu.cn)

Abstract: The elastic constants of aluminum plates were inversed by the wave velocity of various modal ultrasonic waves induced by lasers. In the experiment, the pulse laser was focused into the line source to induce the ultrasonic wave on the surface of the aluminum plate, and the dual channel non-contact method was used to receive the time domain information of the surface wave and then its velocity was measured. In the finite element analysis, the laser was equivalent to the pulse load that is satisfied with the Gaussian distribution both in time and space. A thermal coupling analysis model was built to simulate the process of laser induced ultrasonic. The time domain information of the ultrasonic signals were received to calculate the surface wave's and longitudinal wave's velocities. Then the elastic constants of aluminum plates were obtained by using the acoustic elastic equation. The numerical results agreed with the theoretical values, which indicates that the established laser ultrasonic model can effectively simulate the physical process of ultrasonic induced by lasers, and provide the basis for further studies on the mechanical properties of the materials by laser ultrasonic techniques.

Key words: laser ultrasonic; elastic constants; finite element simulation; surface wave; longitudinal wave

弹性常数作为表征材料力学性质的基本参数,代表了材料力学性能的综合情况,其精确测定对于材料的无损评价至关重要. 现阶段材料弹性常数测量方法主要有机械法(拉伸试验)、表面声

波技术、纳米压痕技术^[1]、声显微镜技术^[2-3]、激光超声技术^[4-6]等. 传统机械测量方法由于测量过程繁琐、对特殊环境的适应能力差,且不可避免地对材料产生破坏性,已不能满足生产实践的要求;表面声波技术作为传统的超声方法,对高温高压、有毒等特殊环境的适应能力较差;而纳米压痕技术和声显微镜技术主要用于微纳米材料的弹性常数测量且花费昂贵. 探索新的材料力学性能测试方法已成为国内外学者的研究热点.

激光超声是超声学和激光技术相结合形成的一门新兴交叉学科,具有非接触、高精度、无损伤等许多传统方法不可比拟的优点^[7],且利用激光超声源能够同时激发多种模态的超声波^[8],因此受到了国内外学者的广泛关注. Lowe 等^[9]对利用激光激发导波检测绝热管道内部缺陷进行了理论和实验研究,建立了缺陷尺寸和反射波强度之间的关系. Sun 等^[10]利用激光超声波对层状各向异性复合材料内部分层进行检测,通过理论和实验分析得出了激光参数对复合材料内部分层检测的影响. 潘永东等^[11]研究了利用激光超声检测铝合金材料上的残余应力分布的方法,证实了残余应力分布可引发声表面波速度的相对变化. Sanderson 等^[12]利用激光超声技术进行了钢板残余应力研究,给出了声表面波速度与残余应力之间的关系. 文献[13-14]研究利用激光超声技术得到纵波、横波波速测定材料弹性常数;董利明等^[8]提到由于横波难以精确测量,利用纵波和表面波波速测算材料弹性常数更容易实现.

本文通过对激光超声纵波与表面波波速进行高精度测量,进而求得材料的弹性常数. 实验方面,利用激光超声实验系统,将调 Q 脉冲激光器产生的脉冲激光聚焦成线源作用在样品表面,诱导产生超声波,使用多普勒振动计和光电探测器,提取不同位置处表面波的时域信息,根据表面波的传播距离和时间采用时差法计算表面波速度. 有限元分析中,将激光等效为高斯分布的力源,建立有限元模型,对激光在铝板中诱导产生超声波的过程进行顺序热力耦合分析,提取模型表面方向和厚度方向的时域信息,计算表面波和纵波波速. 将所得的表面波和纵波波速导入声弹性方程即可得到铝的弹性常数.

1 理论基础

激光超声测量材料的弹性常数是建立在固体力学理论上,材料内部超声波传播速度与材

料的弹性常数和密度有关,可用如下方程表示^[15]:

$$c_r = \frac{0.87 + 1.12\mu}{1 + \mu} \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \mu)}}; \tag{1}$$

$$c_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \mu)}}; \tag{2}$$

$$c_l = \sqrt{\frac{E(1 - \mu)}{\rho(1 + \mu)(1 - 2\mu)}}. \tag{3}$$

式中: c_r 为表面波波速; c_l 为纵波波速; c_s 为横波波速; ρ 为材料密度; μ 为材料泊松比; E 为材料的弹性模量. 通过测算材料中表面波波速 c_r 和纵波波速 c_l ,在材料密度已知的条件下,可由式(1)和式(3)求得材料的弹性常数 E 和 μ .

2 实验测量及结果

2.1 实验原理

激光激发超声波的机制一般可分为热弹性激发机制^[16]和烧蚀激发机制^[17]. 烧蚀激发机制对材料表面不可避免地产生破坏,并非严格意义上的无损检测,热弹性激发机制对材料表面仅会造成微量损伤,且能同时激发产生多种模态的超声波. 本实验采用热弹机制在样品中激发超声波,原理如图 1 所示.

当入射脉冲激光功率密度较小不足以使工件表面融化时,材料表层由于吸收能量产生几十到几百度的局部升温,同时激发产生横波、纵波、表面波. 材料表层的局部升温并没有导致材料产生具有破坏性的变形,因而具有严格无损的特点^[18].

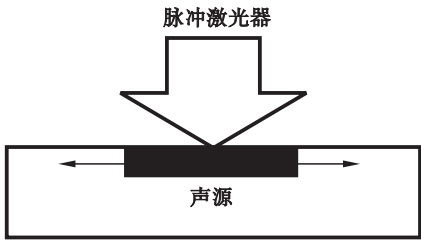


图 1 热弹性激发机制
Fig. 1 Thermo-elastic excitation mechanism

2.2 实验系统

激光超声无损检测系统如图 2 所示, Dawa-100 型脉冲激光器产生的脉冲激光,其波长为1 064 nm,脉宽为 8 ns,单脉冲能量 100 mJ,经柱面镜聚焦为半宽为 0.5 mm 的激光线源作用在规格为 300 mm×200 mm×2 mm 的 7075 铝合金板表面. 铝板表面由于吸收激光能量导致局部

升温产生振动信息, LV - S01 - DB 型多普勒测振仪探测声表面波信号, 光电探测器接收时间同步信号, 同时传输至示波器, 即可提取得到超声表面波完整的时域信息。

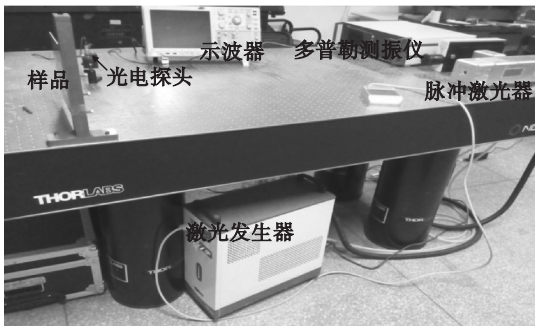


图 2 激光超声实验系统

Fig. 2 Laser ultrasonic testing system

2.3 实验结果和讨论

实验中, 固定脉冲激光激发位置, 沿铝板的轴向移动探测激光的位置, 提取不同接收距离的 7 个点的表面波信号的时域信息. 图 3 为经由示波器可视化后的超声表面波时域信号, ①信号为多普勒测振仪接收的表面波振动信号, 具有明显的对心、双极特性, 为典型的激光激发的声表面波信号; ②信号为光电探测器得到的时间信号, 记录脉冲激光开始照射样品表面的时刻。

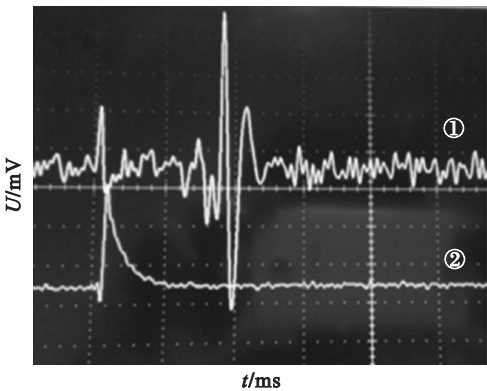


图 3 表面波波形

Fig. 3 Surface waves

分别测量 7 个接收点与激光线源激发中心之间的距离 $s_i (i = 1, 2, \dots, 7)$, 结合已知的表面波时域信息, 得到对应距离下表面波的传播时间 $t_i (i = 1, 2, \dots, 7)$, 数据记录见表 1。

为避免由于激光光斑大小和距离测量所带来的误差以及实验系统固有误差, 采用逐差法计算表面波波速, 得到拟合曲线:

$$s_i = 2\,861.80t_i - 2\,762.9. \tag{4}$$

该拟合曲线的拟合度达到 0.99, 表明了实验系统的稳定性. 易知距离 s_i 与时间 t_i 的比值即是

速度, 即铝板表面传播的表面波波速 $c_r = 2\,861.80\text{ m/s}$, 与理论表面波波速 $2\,906\text{ m/s}$ 之间的误差为 1.52%, 表明该实验系统测量超声波波速具有很高的精确度。

表 1 距离 - 时间表
Table 1 Table of distance-time

测量点号	s_i/mm	t_i/ms
1	15.10	0.970 70
2	27.08	0.974 60
3	40.90	0.979 60
4	59.92	0.987 00
5	100.06	1.000 50
6	115.30	1.005 60
7	161.60	1.021 80

3 有限元分析

本文采用有限元方法建立热力耦合分析模型, 对激光在铝板中诱导产生超声波的过程作进一步研究。

3.1 有限元模型的建立

考虑一个各向同性的均质薄板模型, 如图 4 所示, 脉冲激光线源沿着 z 方向具有对称性, 故该三维问题可简化为平面应变问题来分析. 建立有限元模型, 尺寸为 $200\text{ mm} \times 2\text{ mm}$, 模型的材料参数与上述实验中 7075 铝合金的材料参数保持一致, 即弹性模量 $E = 68.5\text{ GPa}$, 泊松比 $\mu = 0.34$, 密度 $\rho = 2\,700\text{ kg/m}^3$, 热传导率 $\lambda = 217.7\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, 热膨胀系数 $\alpha = 2.36\text{e-}5$, 比热容 $c = 946\text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$ 。

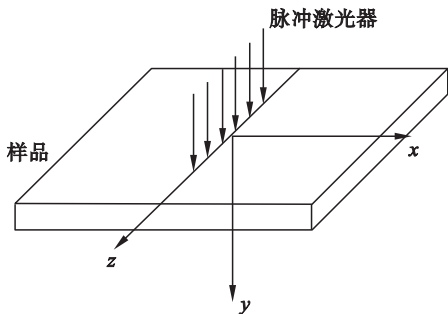


图 4 脉冲激光辐照示意图

Fig. 4 Sketch of pulsed lasers irradiation

建立有限元模型时为保证计算精度, 网格尺寸应小于弹性波波长的 1/4, 同时考虑模型大小、计算效率等因素, 设置网格大小为 $0.04\text{ mm} \times 0.01\text{ mm}$. 本文采用 Abaqus/Explicit 分析步对模型进行顺序热力耦合分析, 热分析过程分为两步,

首先进行脉冲激励过程分析,设定时长 8 ns,固定增量步 0.4 ns,而后进行热传导过程模拟,设置最大增量步 5×10^{-7} s,总时长 2.5×10^{-5} s.最后,将热分析计算结果的 INP 文件作为初始条件作用在模型上进行力学分析.

激光超声数值模拟中,脉冲激光对样品作用的等效处理及检测点有效时域信息的提取对准确检测材料弹性常数是非常关键的.将激光等效为时间和空间上均满足高斯分布的脉冲载荷,建立激光超声热力耦合分析模型,得到良好的超声高频信号.激光随时间和空间高斯分布的力源分布函数为

$$Q(I_0, r, z, t) = I_0 A(T) f(r) g(t) . \quad (5)$$
式中: I_0 为单脉冲激光的能量密度; $A(T)$ 为材料表面吸收率; $f(r)$ 为激光的空间分布函数; $g(t)$ 为激光的时间分布函数,并有

$$\left. \begin{aligned} f(r) &= \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right), \\ g(t) &= \frac{5t}{t_0} \exp\left(-\frac{5t}{t_0}\right). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中: r_0 为激光加载的半径; t_0 为激光脉冲的上升时间. 模拟过程中仍取 $I_0 = 100$ mJ, $r_0 = 0.5$ mm, $t_0 = 8$ ns.

3.2 表面波和纵波测量

3.2.1 热分析计算

在模型表面沿 x 轴选取 4 个节点,提取每个节点的温度随时间的变化曲线.由图 5 可以看出,激光作用区域温度瞬间上升,而后温度较为缓慢地下降,且距离激光加载中心越近的区域温度上升越大.

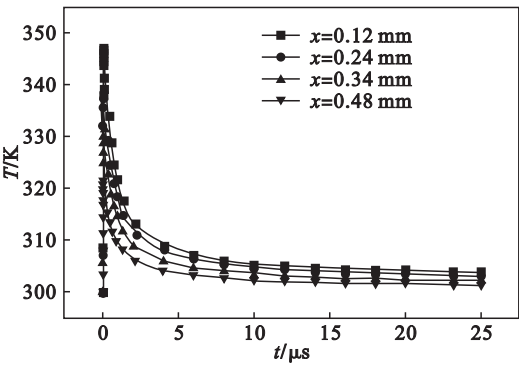


图 5 表面节点温度随时间的变化曲线
Fig. 5 Variation curve of surface node temperature with time

3.2.2 表面波测量

将热分析计算结果的 INP 文件作为初始条件作用在模型上进行力学分析,计算超声波波速.从近场到远场在模型表面选取 6 个节点,节点距

激光作用中心的距离分别为 $x_1 = 6.5$ mm, $x_2 = 7.5$ mm, $x_3 = 8.5$ mm, $x_4 = 9.5$ mm, $x_5 = 10.5$ mm, $x_6 = 11.5$ mm.图 6 为 $x_1 = 6.5$ mm 点提取得到的应力随时间变化的曲线.

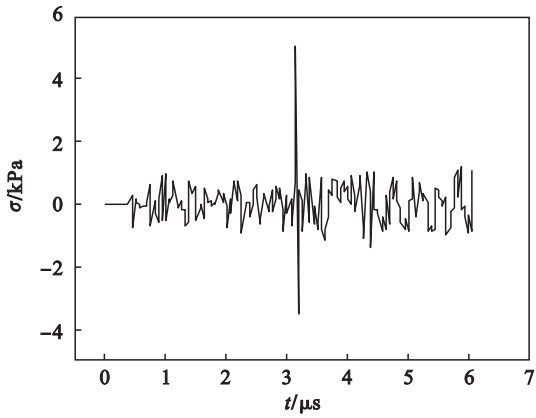


图 6 $x_1 = 6.5$ mm 点应力 - 时间曲线
Fig. 6 Stress-time curve of $x_1 = 6.5$ mm

根据节点的应力 - 时间曲线得到表面波的传播时间 t_i ,采用逐差法计算表面波波速,对各个节点对应的 $x_i - t_i$ 进行线性拟合,得到拟合直线如图 7 所示,拟合度达 0.99,拟合方程为

$$x_i = 2\,871.86 t_i - 2\,477.35 . \quad (7)$$

图 7 中拟合点均匀分布在直线两侧, x_i 与 t_i 满足线性分布关系的预期一致,二者比值即为表面波波速,等于拟合直线的斜率,即 $c_r = 2\,871.86$ m/s,这与实验值之间的误差为 0.35%,表明有限元法计算超声波波速的可行性.

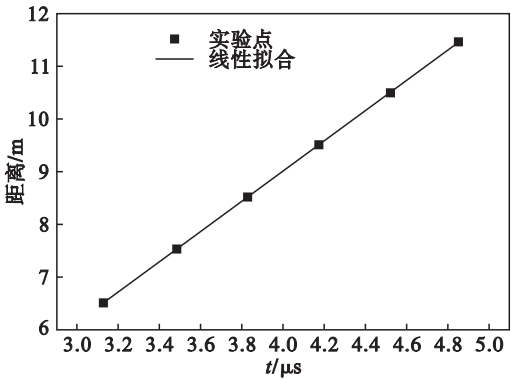


图 7 $x_i - t_i$ 拟合曲线
Fig. 7 Fitting curve of $x_i - t_i$

3.2.3 纵波测量

同样,在沿激光作用中心的正下方由近场到远场取 6 个节点 $y_1 = 0.359\,29$ mm, $y_2 = 0.479\,42$ mm, $y_3 = 0.598\,80$ mm, $y_4 = 0.718\,56$ mm, $y_5 = 0.838\,32$ mm, $y_6 = 0.958\,08$ mm.图 8 为 $y_4 = 0.718\,56$ mm 点的应力随时间的变化曲线.

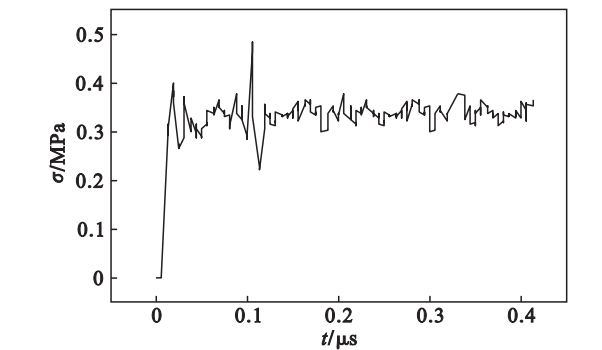


图8 $y_4=0.71856\text{ mm}$ 点应力-时间曲线
Fig. 8 Stress-time curve of $y_4=0.71856\text{ mm}$

采用同样的方法计算纵波的速度,得到 y_i-t_i 拟合直线表达式为

$$y_i=6\,347.12t_i-200.5\tag{8}$$

即纵波波速 $c_1=6\,347.12\text{ m/s}$,与纵波波速理论值 $6\,412\text{ m/s}$ 之间的的误差为 1.01% .

3.3 结果及讨论

将有限元分析中得到的表面波波速 $c_r=2\,871.86\text{ m/s}$ 和纵波波速 $c_1=6\,347.12\text{ m/s}$ 代入方程(1)和(3)可以得到弹性常数 E 和 μ ,计算结果如表2所示.由表2可知,利用激光超声方法测量材料的弹性常数时,弹性模量与泊松比的测量精度基本相当.

表2 铝的弹性常数 Table 2 Elastic constants of aluminum			
变量	计算结果	理论结果	误差 /%
E/GPa	67.93	68.5	0.832
μ	0.337 2	0.34	0.824

4 结 语

本文利用自主研发的激光超声实验系统,将脉冲激光聚焦成线源诱导产生高信噪比的超声表面波,对不同接收点的超声表面波振动信息和波传播时间信息进行双通道非接触接收,提取得到了表面波的时域信息并精确测算得到了超声表面波波速.数值计算中,采用修正的高斯分布的力源作为脉冲激光的等效载荷,建立热力耦合分析模型模拟激光在金属铝板中诱导产生超声波,分别在模型表面和厚度方向提取表面波和纵波信号的时域信息,测算得到表面波和纵波波速.将表面波和纵波波速导入声弹性方程反演得到样品的弹性常数.计算结果与理论值吻合良好,为激光超声技术在材料力学性能的高精度无损检测提供依据.

参考文献:

[1] Radovic M,Lara-Curzo L,Riester L. Comparison of different experimental techniques for determination of elastic properties of solids [J]. *Materials Science and Engineering: A*,2004,368(1/2):56-70.

[2] Bamber M J, Cooke K E, Mann A B, et al. Accurate determination of Young's modulus and Poisson's ratio of thin films by a combination of acoustic microscopy and nano-indentation [J]. *Thin Solid Films*,2000,398/399:299-305.

[3] Comte C,Von S J. Microprobe-type measurement of Young's modulus and Poisson coefficient by means of depth sensing indentation and acoustic microscopy[J]. *Surface and Coatings Technology*,2002,154(1):42-48.

[4] Kim K Y,Scribar R,Saches W. Analytical and optimization for determination of all elastic constants of anisotropic solids from group velocity data measured in symmetry plans [J]. *Journal of Applied Physics*,1995,77(11):5589-5600.

[5] Schneider W C, Burton C J. Determination of the elastic constants of solids by ultrasonic methods [J]. *Journal of Applied Physics*,1949,20(1):48-58.

[6] 何存富,周辛庚,戴福隆. 一种非接触式测定材料弹性常数的新方法[J]. *力学学报*,1997,29(6):720-725.
(He Cun-fu,Zhou Xin-geng,Dai Fu-long. A new non-contact method for measuring the elastic constants of materials [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*,1997,29(6):720-725.)

[7] 施德恒,陈玉科,孙金峰,等. 激光超声技术及其在无损检测中的应用概况[J]. *激光杂志*,2004,25(5):1-4.
(Shi De-heng,Chen Yu-ke,Sun Jin-feng, et al. A review on laser ultrasonic technique and its applications in non-destructive testing [J]. *Laser Journal*,2004,25(5):1-4.)

[8] 董利明,倪辰荫,沈中华,等. 基于激光激发多模态超声波速测量的材料弹性常数测定[J]. *中国激光*,2011,38(4):209-214.
(Dong Li-ming, Ni Chen-yin, Shen Zhong-hua, et al. Determination of elastic constants of materials based on the velocity measurement of laser-generated multi-mode ultrasound [J]. *Chinese Journal of Lasers*,2011,38(4):209-214.)

[9] Lowe M J S, Alleyne D N, Cawley P. Defect detection in pipes using guided waves [J]. *Ultrasonics*, 1998,36(1):147-154.

[10] Sun G K,Zheng Z G. Non-contact detection of delamination in layered anisotropic composite materials with ultrasonic waves generated and detected by lasers [J]. *International Journal for Light and Electron Optics*,2016,127(16):6424-6433.

[11] 潘永东,钱梦驿,徐卫疆,等. 激光超声检测铝合金材料的残余应力分布[J]. *声学学报*,2004,29(3):254-257.
(Pan Yong-dong, Qian Meng-lu, Xu Wei-jiang, et al. Residual stress profiling of an aluminum alloy by laser ultrasonic [J]. *Acta Acustica*,2004,29(3):254-257.)

[12] Sanderson R M, Shen Y C. Measurement of residual stress using laser-generated ultrasound [J]. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*,2010,87(12):762-765.

[13] Bresse L F, Hutchins D A, Lundgren K. Elastic constant determination using generation by pulsed lasers [J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*,1988,84(5):1751-1757.

- [14] Scruby C B, Moss B C. Non-contact ultrasonic measurements on steel at elevated temperature [J]. *NDT&E International*, 1993, 26(4): 177–188.
- [15] Markham M F. Measurement of elastic constants by the ultrasonic pulse method [J]. *British Journal of Applied Physics*, 1957, 8(sup 6): 35–40.
- [16] Arias I, Achenbach J D. Thermoelastic generation of ultrasound by line focused laser irradiation [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2003, 40(25): 6917–6935.
- [17] Mi B, Ume I C. Parametric studies of laser generated ultrasonic signal in ablative regime: time and frequency domains [J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2002, 21(1): 23–33.
- [18] Achenbach J D. The thermos elasticity of laser-based ultrasonics [J]. *Journal of Thermal Stresses*, 2005, 28(6): 713–727.

(上接第 1362 页)

源损耗的敏感性。研究表明,心理资本能够调节组织公平感在强制性公民行为与员工工作倦怠之间的中介作用,即心理资本水平高的个体能够更好地应对工作倦怠等消极状态,使组织的调整措施事半功倍。心理资本往往不是天生的,而是通过后天的培养得以提升的,因此组织应针对性地对员工的心理资本进行培养,如根据员工的特点有针对性地制定心理资本培训和干预计划,在公司内部设立积极的反馈制度等。

参考文献:

- [1] Organ D W. Organizational citizenship behavior: the good soldier syndrome [M]. Lexington, MA: Lexington Books, 1988.
- [2] Vigoda-Gadot E. Redrawing the boundaries of OCB? An empirical examination of compulsory extra-role behavior in the workplace [J]. *Journal of Business and Psychology*, 2007, 21(3): 377–405.
- [3] Maslach C, Jackson S. The measurement of experience burnout [J]. *Journal of Occupational Behavior*, 1981, 2(2): 99–113.
- [4] Zhao H, Peng Z, Chen H K. Compulsory citizenship behavior and organizational citizenship behavior: the role of organizational identification and perceived interactional justice [J]. *The Journal of Psychology*, 2014, 148(2): 177.
- [5] Nobuko M. Same behavior, different consequences: reactions to men's and women's compulsory citizenship behaviors [D]. Cleveland: Cleveland State University, 2012.
- [6] Heather K, Spence L, Roberta F. A time-lagged analysis of the effect of authentic leadership on workplace bullying, burnout, and occupational turnover intentions [J]. *European Journal of Work and Organizational Psychology*, 2014, 23(5): 739–753.
- [7] Cropanzano R, Mitchell M S. Social exchange theory: an interdisciplinary review [J]. *Journal of Management: Official Journal of the Southern Management Association*, 2005, 31(6): 874–900.
- [8] 李超平, 时勘. 分配公平与程序公平对工作倦怠的影响 [J]. *心理学报*, 2003, 35(5): 677–684.
(Li Chao-ping, Shi Kan. The effect of distributive justice and procedural fairness on job burnout [J]. *Journal of Psychiatry*, 2003, 35(5): 667–684.)
- [9] 任皓, 温忠麟, 陈启山, 等. 工作团队领导心理资本对成员组织公民行为的影响机制: 多层次模型 [J]. *心理学报*, 2013, 45(1): 82–93.
(Ren Hao, Wen Zhong-lin, Chen Qi-shan, et al. The influence mechanism of psychological capital of working team leaders on the citizenship behavior of member organizations: a multi-level model [J]. *Journal of Psychiatry*, 2013, 45(1): 82–93.)
- [10] Neto M, Carvalho V S, Chambel M J, et al. Work-family conflict and employee well-being over time: the loss spiral effect [J]. *Journal of Occupational & Environmental Medicine*, 2016(58): 429–435.
- [11] Niehoff B P, Moorman R M. Justice as a mediator of the relationship between methods of monitoring and organizational citizenship behavior [J]. *Academy of Management Journal*, 1993(36): 327–336.
- [12] 李超平. 心理资本: 打造人的竞争优势 [M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2008.
(Li Chao-ping. Psychological capital: create a competitive advantage [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2008.)