

文章编号:1004-793x(2000)01-0019-06

超薄覆层低频超声类瑞利波定征方法

张锐¹, 万明习¹, 李刚¹, CAO Wen-wu²

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院生物医学工程系, 陕西西安; 2. Intercollege Materials Research Laboratory, Pennsylvania State University, University Park, PA, 16802)

【摘要】 本文提出低频超声类瑞利波定征方法来估计覆层/基底层状复合结构超薄覆层的纵波声速、横波声速、厚度和密度等参数。这里“超薄”的概念是指覆层厚度 h 远小于覆层中的声波波长 λ , 导致在时域上覆层前后界面的各次回波信号相互混迭。文章采用水楔耦合方式, 利用超声漏类瑞利波频域分析方法获取层状复合结构超声类瑞利波色散曲线, 提出以色散特性为基础的低频超声类瑞利波覆层定征方法和在最小二乘意义下以色散曲线为基础的反向算法对覆层进行了参数估计。文中分析了影响估计准确性的各种因素, 研究了低频超声类瑞利波定征方法对覆层各参数的灵敏度及其在误差传递中的意义。实验结果证实, 对于银箔/玻璃层状复合结构, 该方法能够准确估计厚度小到 $25\mu\text{m}$ 银箔覆层的声学参数。

【关键词】 复合结构; 超声定量无损定征; 超声类瑞利波; 超薄覆盖层

中图分类号: TP33; O426

文献标识码: A

Low Frequency Ultrasonic Rayleigh-like Wave Method for Characterization of the Ultra-thin Coating Layer

ZHANG Rui¹, WAN Min-xi¹, LI Gang¹, CAO Wen-wu²

(1. Department of Biomedical Engineering, Xi'an Jiaotong University, China;

2. Intercollege Materials Research Laboratory, Pennsylvania State University, University Park, PA, 16802)

【Abstract】 A low-frequency ultrasonic Rayleigh-like wave method suitable for characterizing shear and longitudinal wave velocities, thickness and density of ultra-thin coating layer of coating/substrate laminate composite is presented. By "ultra-thin", we mean that the thickness of the plate is only a fraction of the ultrasound wavelength so that the echoes from the front and back surfaces cannot be separated in the time domain. The dispersion curve of the ultrasonic Rayleigh-like wave is obtained by employing the frequency-domain analysis of the leaky ultrasonic Rayleigh-like wave. In conjunction with the method of least square, the secant algorithm is used to estimate the parameters of the coating. The reasons for evaluation error of the parameters and the sensitivity of the method for different parameters are analyzed. Using a pair of broadband longitudinal wave with 2MHz center frequency transducers, we have accurately characterized the

收稿日期: 1999-07-10 修订日期: 1999-09-15

基金项目: 中国国家自然科学基金和美国 Office of Naval Research Grant; #N0014-93-1-0340

作者简介: 张锐(1973—), 男, 获西安交通大学博士学位, 主要从事薄层材料的物性理论研究。

parameters of silver coating, with the thickness of 26 μm , of the silver/glass composite.

【Key words】 composite; ultrasonic QNDE; Rayleigh-like wave; ultra-thin coating

1 引言

近年来,在声学、材料科学、信息科学、生物医学工程等众多领域的多种新型层状信息、功能和智能复合结构被广泛应用与研究。利用超声波对其声学、力学和其它参数进行原位、无损地定量估计日益引起国内外学者的重视,且针对不同的问题产生了许多新的检测方法和技术,目前部分已达到定量检测的水平。

超“薄”覆层/基层复合结构是层状复合结构中的一类,应用极为广泛,覆层可以对基层起到保护、增强和绝缘、绝热等作用,这里“薄”的概念是指覆层厚度 h 小于其中的超声波波长 λ ,以致采用传统的超声波纵波方法对其纵波声速和厚度参数进行原位测试时,无法在时域上区分材料前后界面的各次回波信号,以往的单载频脉冲重合法、共振法以及脉冲一回波等方法受原理的限制,也只适用于测试 $h > \lambda$ (h 为材料厚度, λ 为测量声波在材料中的波长) 的样本^[1-3]。虽然可以使用频带更宽和频率更高的单脉冲超声波来测量厚度越来越小的样品^[4],例如,当覆层厚度为 10 μm 左右时,使用频率为 150MHz 以上的超声波进行检测,但是如此高频率的超声波检测系统,需要使用特制的高频换能器和相应的宽带处理设备,从而使检测系统的成本大大提高,另外,材料中的各种微结构对超声波的散射将干扰回波信号,使声学参数的测量变得困难,国内外学者已经分别提出了低频频域定征方法和低频直接测量方法来对厚度小到 0.01 λ 的超薄覆层进行参数定征,但由于只激发了单一模式的体积波,因此只能估计材料纵波声速^[5-13]。我们希望寻找一种方便准确的低频超声波多参数定征方法,能够对超薄覆层状材

料进行更为全面的估计。

与传统体积波方法对应,具有多种传播模式和色散特性,沿覆层传播的类瑞利波是一种超声波波,其传播特性与材料的纵波声速、横波声速、厚度和密度等多种参数有着直接的关系,信号中蕴涵的信息远多于传统体积波方法,可以用来对超薄覆层进行多参数的定征^[14-16]。本文提出以低频超声类瑞利波色散特性为基础的超薄覆层定征方法和在最小二乘意义下以低频类瑞利波色散曲线为基础的反向算法对超薄覆层的纵波声速、横波声速、厚度和密度等参数进行估计,并分析了影响估计准确性的各种因素,研究了低频超声类瑞利波定征方法对覆层各参数的灵敏度及其在误差传递中的意义,实验结果与理论符合的非常好。

2 低频类瑞利波覆层定征方法

2.1 超薄覆层参数反演方法

如图 1 所示为覆层/基层复合结构中超声类瑞利波传播示意图,假设层状复合结构在 y 方向上无限延伸并且位移梯度为零。为了确定覆层/基层复合结构中超声类瑞利波的传播特性,根据该坐标系建立波动方程和位移解的通解形式,综合六个边界条件,可以确定初始位移解中的待定参量,同时得到描述沿覆层/基层复合结构表面传播的超声类瑞利波色散特性的色散方程。这六个边界条件分别是在 $Z=0$ 平面上,覆层与基层沿 X 方向的剪切应力与位移相等、沿 Z 方向的正应力与位移相等、在 $Z=h$ 平面上,覆层沿 X 方向的剪切应力与正应力为零。

在紧密粘贴情况下,沿覆层/基层复合结构表面传播的超声类瑞利波的色散特性由如下式所示的色散方程决定^[14-17]:

$$f_s(\hat{v}_z, \hat{v}_x, \hat{k}, \hat{\rho}, \hat{v}_z, \hat{v}_x, \hat{\rho}, \hat{\omega}, \hat{v}) = \begin{vmatrix} b^{(1)} & -1 & -b^{(2)} & -1 & -b^{(3)} & 1 \\ -1 & -b^{(2)} & -1 & b^{(2)} & 1 & b^{(4)} \\ c^{(1)} & 2b^{(2)} & c^{(2)} & -2b^{(2)} & -rc^{(3)} & -2rb^{(4)} \\ 2b^{(1)} & -c^{(1)} & -2b^{(1)} & -c^{(1)} & -2rb^{(3)} & rc^{(3)} \\ c^{(1)}d^{(1)} & 2b^{(2)}d^{(2)} & c^{(1)}/d^{(1)} & -2b^{(2)}/d^{(2)} & 0 & 0 \\ 2b^{(1)}d^{(1)} & -c^{(1)}d^{(2)} & -2b^{(1)}/d^{(1)} & -c^{(1)}/d^{(2)} & 0 & 0 \end{vmatrix} = 0 \quad (1)$$

其中, $b^{(1)} = +i[1 - (v/\hat{v}_z)^2]^{1/2}$, $b^{(2)} = +i[1 - (v/\hat{v}_x)^2]^{1/2}$, $b^{(3)} = -i[1 - (v/v_z)^2]^{1/2}$, $b^{(4)} = -i[1 - (v/v_x)^2]^{1/2}$, $c^{(1)} = 1 - (b^{(1)})^2$, $c^{(2)} = 1 - (b^{(2)})^2$, $d^{(1)} = \exp(ikb^{(1)}h)$, $d^{(2)} = \exp(ikb^{(2)}h)$, $r = \rho v_z^2 / \hat{\rho} \hat{v}_z^2$, $k = \frac{2\pi f}{v}$, k 是超声波波数,

ω 是检测超声波频率, i 是虚部符号, $\tilde{v}_z, \tilde{v}_x, \tilde{h}$ 和 $\tilde{\rho}$ 分别是超薄覆层的纵波声速、横波声速、厚度和密度, v_z, v_x 和 ρ 分别是基层的纵波声速、横波声速和密度, v 代表沿层状复合结构表面传播的类瑞利波声速。

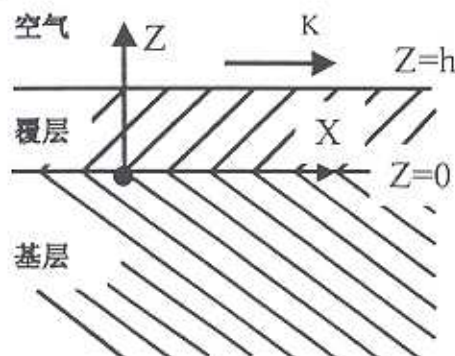


图1 覆层/基层复合结构中超声类瑞利波传播示意图

在覆层/基层层状复合结构中, 超声类瑞利波可以多种模式传播, 但由于本文使用低频超声类瑞利波对超“薄”覆层进行定征, 在复合结构样品的表面上实际上只会产生最低阶模式的超声类瑞利波, 即一阶超声类瑞利波。低频超声类瑞利波覆层参数定征方法即是通过在最小二乘误差意义上层状复合结构一阶低频超声类瑞利波色散曲线与理论色散特性曲线的比较, 估算出覆层的声学参数值, 覆层参数的实验估计值应使下式取得最小值:

$$E(\rho) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N |f_j(\tilde{v}_z, \tilde{v}_x, \tilde{h}, \tilde{\rho}, v_z, v_x, \rho, \omega, v)|^2 \quad (2)$$

其中 $j=1 \dots N$, N 是超薄覆层厚度与换能器频宽乘积带内对应的速度扫描点数, 其意义在实验部分讨论, ρ 为 $\tilde{v}_z, \tilde{v}_x, \tilde{h}$ 和 $\tilde{\rho}$ 其中之一。

2.2 反向估值计算方法

在正确测量超声类瑞利波色散曲线之后, 本文使用割线法解出使公式(2)中 $E(\rho)$ 为最小的覆层参数值, 迭代初值为覆层参数的预估值, 在覆层参数真值的约 $\pm 30\%$ 范围内。

3 实验方法

3.1 实验系统与样品

实验测试系统如图2所示, 一对精密匹配、中心频率为 2MHz 的纵波宽带压电换能器, T 和 R, 相对倾斜地放置于待测材料的同侧, 发射换能器 T 的入

射角度、接收换能器 R 的接收角度、换能器之间及它们与材料之间的距离、以及兰姆波的传播方向都由一套精密机械控制装置控制, 角度分辨率为 0.5° 。换能器与待测样品之间通过水楔耦合, 测量系统在计算机的控制下, 触发脉冲发生器 CTS-5 产生尖脉冲激励发射换能器, CTS-5 将接收换能器收到的信号经内部放大器预放后送至 TDS-724C 型数字示波器进行采样, 示波器的采样频率 $S_r = 100\text{MHz}$ 是预先设定的。为了减小随机噪声对实验结果的影响, 数字示波器进行持续 5 分钟的多次采样, 并且一边采样, 一边将采样信号进行平均, 最后, 平均后的采样信号通过 GPIB (IEEE-488) 总线送入计算机做进一步分析。

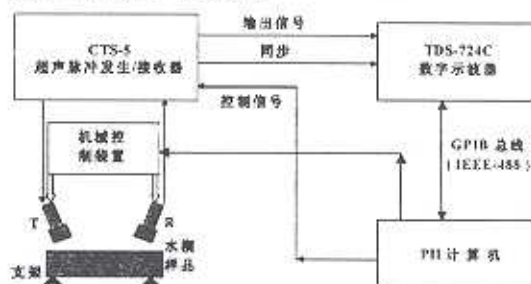


图2 实验测量系统原理框图

实验的测试材料基层为玻璃, 覆层为不同厚度的铝箔、铝箔和金箔, 覆层与基层的纵波、横波声速、厚度和密度参数的参考值是在美国宾夕法尼亚州购买时由商家提供的, 我们使用电子测厚仪对厚度参数进行了校准, 仪器的测量误差是 $\pm 2.54\mu\text{m}$ 。各样品的参数值在实验结果的表中附带给出。整个实验在恒温环境中进行, 吸水水槽内的水温控制在 $22 \pm 0.1^\circ\text{C}$ 。

3.2 漏类瑞利波频域分析方法

通过分析接收信号的频谱, 可以发现, 由于传感器波束宽度与发射信号带宽的影响, 接收到的漏类瑞利波信号也是宽带信号, 并且在频域上存在一些峰值点, 这些谱峰即意味着此频率处的漏类瑞利波信号的声速是发射信号主轴方向与材料表面的临界角对应的超声类瑞利波声速。所以, 漏类瑞利波频域分析的核心是控制入射及接收角度以选择和决定类瑞利波以多大的速度沿弹性薄层传播, 再确定此速度的类瑞利波对应的频率成分。精确控制入射波入射角度, 在一段角度范围内以一定角度间隔改变入射角, 并记录不同入射角处的频率峰值点, 就可以得到覆层/基层复合结构的超声类瑞利波色散曲线。

以银/铜层状复合结构为例, 其色散曲线如图 3

所示,其中的星号点是实验测量类瑞利波色散曲线数值。

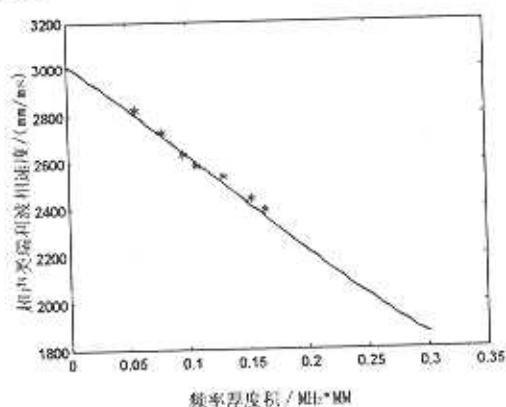


图3 超声类瑞利波色散特性实验数据
(覆层材料:银, $v_L = 3.558 \text{ mm}/\mu\text{s}$,
 $v_T = 1.650 \text{ mm}/\mu\text{s}$, $h = 54 \mu\text{m}$
基层材料:铜, $v_L = 5.579 \text{ mm}/\mu\text{s}$,
 $v_T = 3.319 \text{ mm}/\mu\text{s}$.)

4 结果与讨论

本文使用低频超声类瑞利波定征方法对覆层为下表1中的材料,基层为铜的层状复合结构进行了测量与参数估计,表中有“*”号上标的参数为各覆层参数的标称值。

由表1可以看出,超声低频类瑞利波定征方法能够对超薄覆层的纵波、横波速度、厚度和密度参数进行定征,具有较高的准确度。仔细分析比较可以看出,该方法对覆层密度参数定征的准确度最好,对声速定征的准确度次之,总体误差小于2%。但是对厚度的定征误差较大,而且随着厚度的减小,呈现逐渐增大的趋势,经过分析发现,低频类瑞利波定征方法对超薄覆层参数的估计误差主要是由换能器角度分辨率决定的类瑞利波速度测量误差引起的,如图4所示为超声波在不同入射角度时可能带来的类瑞利波速度测量误差。由于实验中待测覆层/基层层状

表1 低频类瑞利波定征方法对覆层纵波声速、横波声速、厚度和密度参数的估计结果

样品	覆层	h^* Mm	ρ^* g/mm ³	v_L^* mm/ μ s	v_T^* mm/ μ s	h		ρ		v_L		v_T	
						μm	Err (%)	g/mm ³	Err (%)	mm/ μ s	Err (%)	mm/ μ s	Err (%)
1	银	26	10.25	3.558	1.650	27.1	3.9	10.32	0.7	3.508	-1.4	1.625	-1.5
2	银	54	10.25	3.558	1.650	55.5	2.8	10.41	1.5	3.490	-1.9	1.619	-1.7
3	银	162	10.25	3.558	1.650	159.6	-1.5	10.19	-0.5	3.592	1.0	1.668	1.1
4	铝	89	2.69	6.206	3.045	91.6	2.9	2.72	1.3	6.089	-1.9	2.991	-1.8
5	铝	176	2.69	6.206	3.045	179.3	1.9	2.70	0.5	6.080	-2.0	3.006	-1.3
6	金	66	19.13	3.338	1.211	64.2	-2.7	18.92	-1.1	3.381	1.3	1.221	0.9

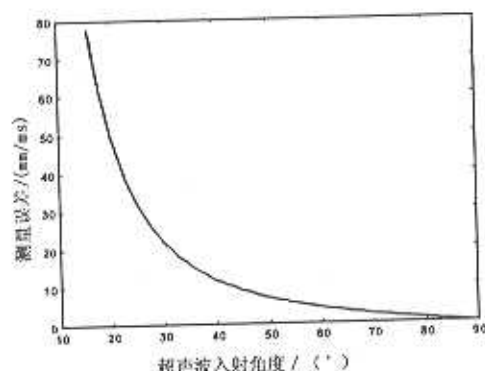


图4 不同入射角对应的类瑞利波速度测量误差
(传感器角度分辨率为 0.5°)

结构在频率厚度积很小的条件下,超声类瑞利波速度对应的角度范围大致在 30° 左右,可以看出在此范围内,存在约 1~2% 的超声类瑞利波速度测量误差。

图5为低频超声类瑞利波定征方法对覆层各声学参数的估计误差曲线。从(a)图可以看出当存在超声类瑞利波声速测量误差时,超声类瑞利波的测量误差与横波测量误差之间存在着近似线性的关系。而且,超声类瑞利波定征方法对纵波速度进行定征的灵敏度从总体上来讲稍大于对横波速度定征的灵敏度,即在同样的超声类瑞利波声速测量误差条件下,对横波速度的反演误差较大。结合(b)图发现,超声类瑞利波定征方法对密度的定征灵敏度最大,而

对厚度参数最不灵敏,也就意味着该方法对横波速度的反演误差最大。

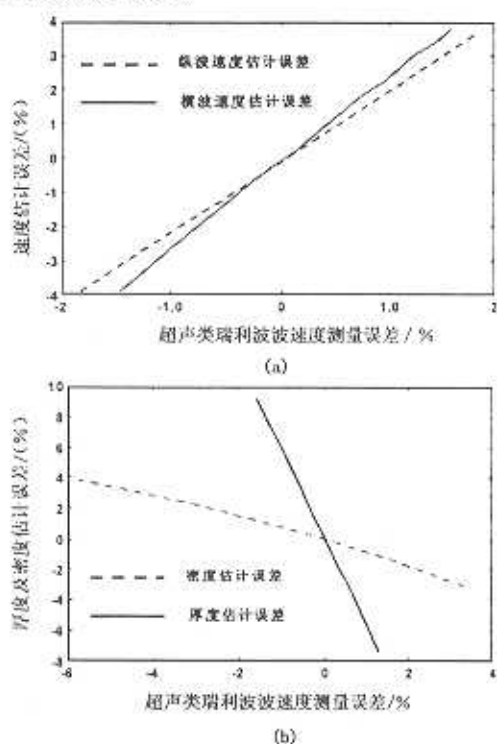


图5 低频超声类瑞利波定征方法对超薄覆层声学参数估计误差
(a)纵波及横波速度估计误差
(b)厚度及密度估计误差

覆层材料:银, $v_l = 3.558 / (\text{mm}/\mu\text{s})$,
 $v_t = 1.850 / (\text{mm}/\mu\text{s})$, $h = 54 \mu\text{m}$
 基层材料:铜, $v_l = 5.579 / (\text{mm}/\mu\text{s})$,
 $v_t = 3.319 / (\text{mm}/\mu\text{s})$

5 结 语

本文通过理论分析和实验验证,证实了一种新的低频超声波无损估计超薄覆层参数方法的有效性,该方法得到如下结论:

1. 低频超声类瑞利波定征方法可以用来对超薄覆层的纵波速度、横波速度、厚度和密度参数进行定征。
2. 低频超声类瑞利波定征方法对覆层密度参数的定征最为准确,对厚度参数的定征存在较大误差。
3. 对银质覆层/玻璃复合结构而言,该方法可以有效地对厚度小至百分之一纵波波长的超薄覆层

进行定征,定征误差在 2% 左右。

4. 该定征方法的定征精度和发射、接收换能器角度分辨率、波束特性、频带特性和覆层/基层复合结构超声类瑞利波的色散特性等因素有密切的关系。

参 考 文 献

- [1] E. P. Papadakis, "Ultrasonic velocity and attenuation; Measurement methods with scientific and industrial applications, in Physical Acoustics Principles and Methods," [C], (vol. 12), W. P. Mason and R. N. Thurston, eds, (Academic Press, New York, 1975), pp. 277~374
- [2] J. Krautkramer, and M. Krautkramer, Ultrasonic testing of materials, [C], 4th fully revised edition, Springer Verlag (1990)
- [3] G. M. Light, G. P. Singh, F. D. McDaniel, "Ultrasonic and x-ray fluorescence measurement of the thickness of metal foils," [J], Materials Evaluation, 1989, 47, 322~330
- [4] H. L. Meksimin, "pulse superposition method for measuring the velocity of sound in solids," [J], J. Acoust. Soc. Am., 1961, 33(1), 12~16
- [5] F. H. Chang, J. C. Couchman, and B. G. W. Yee, "Ultrasonic resonance measurements of sound velocity in thin composite laminates," [J], J. Composite Material, 1974, 8(10), 356~363
- [6] R. E. Challis, T. Alper, R. J. Freemantle, G. Crean and D. Zhang "Acoustic wave velocities in ceramics and other material measured by a broadband goniometric method," [J], Ultrasonics, 1993, 33(4), 311~319
- [7] V. K. Kinra and V. R. Iyer, "Ultrasonic measurement of the thickness, phase velocity, density or attenuation of a thin-viscoelastic plate. Part I; the forward problem," [J], Ultrasonics, 1995, 33(2), 95~110
- [8] V. K. Kinra and V. R. Iyer, "Ultrasonic measurement of the thickness, phase velocity, density or attenuation of a thinviscoelastic plate. Part II; the inverse problem," [J], Ultrasonics, 1995, 33(2), 111~112
- [9] V. K. Kinra, and C. Zhu, "Time-domain ultrasonic NDE of the wave velocity of a sub-half-wavelength elastic layer," [J], J. of Testing and Evaluation, 1993, 21(1), 29~35
- [10] C. Zhu and V. K. Kinra, "Use of phase spectra for

- ultrasonic NDE of thin rubber coatings," [C], NCA-Vol. 16/AMD-Vol. 172, Dynamic Characterization of Advanced Materials, ASME 1993
- [11] Mingxi, Wan, B. Jiang and Wenwu, Cao, "Direct measurement of ultrasonic velocity of thin elastic layers," [J], J. Acoust. Soc. Am., 1997; 101(1): 626-628
- [12] Qian Ming, Wan Mingxi and CaoWenwu, "Ultrasonic Characterization of ultra-thin elastic layer using retrieve function," [J], Chinese Journal of Acoustic, 1998; 17(4): 329-340
- [13] 张锐, 万明习, 钱明, 超薄弹性层低超声测定方法, [J], 计量学报, 1998; 19(4): 291-298
- [14] J. S. Lowe and P. Cawley, "Comparison of reflection coefficient minimum with dispersion curves for ultrasonic waves in the embedded layers," [J], Rev. In progress of QNDE, 1995; 14: 1505
- [15] Elena Biagi, Ada Fort and Valerio Vignoli "Guided acoustic wave propagation for procelain coating characterization," [J], IEEE Trans. Ultrason., Ferroelect., Contr., 1997; 44(4): 909-916
- [16] g. W. Farnell and E. L. Adler, "Elastic wave propagation in thin layers," [C], (vol. 9), W. P. Mason and R. N. Thurston, eds. (Academic Press, New York, 1976), pp. 35-127
- [17] Viktorov, I. A., "Rayleigh and Lamb wave: physical theory and application," [M] Plenum Press, New York, 1967; 117-121

(上接第 49 页)

表 3 时效及淬火温度对钢力学性能的影响

时效温度 / °C	$\sigma_{0.2}$	σ_s	K_{IC}	δ	ψ	淬火温度 / °C	$\sigma_{0.2}$	σ_s	K_{IC}	δ	ψ
458	1613	1890	95.4	13.2	64.5	835	1605	1857	139.5	15.0	58.0
471	1601	1829	122.3	13.9	66.1	858	1616	1830	145.5	14.4	64.0
485	1621	1800	147.0	13.9	67.9	880	1621	1801	146.8	13.9	67.9
499	1596	1727	169.7	13.1	68.0	902	1622	1768	144.2	13.5	70.3
513	1539	1614	176.3	14.1	69.4	924	1621	1731	138.7	12.6	71.9

3.2 热处理温度对钢力学性能的影响

仍从表 1 中带 * 的样本出发, 分别改变时效及淬火温度, 网络预测结果列于表 3。可见随时效温度的提高, 强度下降, 韧性提高, 时效温度对延伸率及面缩影响较小。淬火温度提高可以增加钢的抗拉强度, 对屈服强度几乎没有影响, 延伸率及面缩略有降低。这一结果同实验相符。

4 结 论

材料的力学性能受成分, 结构和工艺等诸多因素影响, 致使数学模型在材料力学性能预测方面受到很大限制。我们用人工神经网络对高 Co-Ni 二次硬化钢的力学性能的变化规律进行了研究, 并与实验结果进行比较, 得到了满意的效果。说明人工神经网络在材料力学性能变化规律研究及成分设计方面

的应用具有很大的潜力。

参 考 文 献

- [1] P P Sinha et al. [J], Mater. Sci., 1991, 26: 4155
- [2] M W Garrison et al. Metal. Trans. A, 1987; 18A: 1257
- [3] 苏杰, 李荣, 吴宝榕. [J], 钢铁研究学报, 1995, 7(4): 67
- [4] 何明一. 神经计算原理, 语言, 设计, 应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1992: 3-10
- [5] 唐波, 钦佩, 初妙修等[J], 金属学报, 1995, 31(b): B284
- [6] A s Fraser, [J], Austrial J of Biol. Sci., 1957, 10: 484
- [7] S Kirkpatrick, C. D. Gelatt, M. P. Vecchi. [J], Science, 1983, 220: 671
- [8] G R Speich et al. [J], Metall. Trans., 1973, 1: 303