

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20180408002

测量距离对超声表面波评价不同组织的材料表层硬度的影响

门平^{1,2}, 董世运¹, 程志远³, 康学良⁴, 李恩重¹, 闫世兴¹

(1. 陆军装甲兵学院 装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072; 2. 中国人民解放军海军 92601 部队, 广东 湛江 524009; 3. 南昌航空大学 无损检测技术教育部重点实验室, 南昌 330063; 4. 上海大学 材料科学与工程学院, 上海 200444)

摘要: 通过搭建高精度的超声表面波检测系统, 采用双探头法测量不同热处理 45 钢标定试件超声表面波的传播声时和接收声波幅值, 分别计算超声表面波的传播声速和衰减系数; 在测量过程中, 改变发射探头和接收探头之间的距离, 研究不同测量距离及微观组织对超声表面波声速测量的影响, 由此建立材料表层硬度、微观组织及超声表面波特征值之间的映射关系, 得到超声表面波评价 45 钢试件表层硬度指标的标定模型, 并对标定模型进行验证。研究表明, 采用超声表面波声速评价 45 钢表层硬度可行, 标定模型预测硬度误差满足工程应用误差 10% 的要求; 超声表面波衰减系数与材料表层硬度没有明显的映射关系, 不能作为评价 45 钢试件表层硬度指标评价参量。

关键词: 超声表面波; 微观组织; 硬度; 标定模型; 映射关系

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2018)04-0178-10

Effects of Measurement Distance on Hardness Evaluation of Material Surface with Different Microstructure by Acoustic Surface Wave

MEN Ping^{1,2}, DONG Shi-yun¹, CHENG Zhi-yuan³, KANG Xue-liang⁴, LI En-zhong¹, YAN Shi-xing¹

(1. National Key Laboratory for Remanufacturing, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072; 2. 92601 Troops, People's Liberation Army Navy, Zhanjiang 524009, Guangdong; 3. Key Lab of Nondestructive Testing Ministry of Education, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063; 4. College of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444)

Abstract: Employing acoustic surface wave for surface hardness quantitative evaluation faces many challenges now. By setting up high-precision acoustic surface wave detection system, the surface wave amplitude and propagation time of different heat treated 45 steel calibration specimens were measured by double probes method, calculating attenuation coefficient and acoustic surface wave velocity, respectively. The distance between the transmitting and receiving probes changed during the measurement, and the effects of different microstructure and measuring distance for surface wave velocity were studied. The mapping relationship of material surface hardness, microstructure and acoustic surface wave test characteristic value was set up, and a acquiring calibration model for evaluating surface hardness of 45 steel specimens by acoustic surface wave method was acquired and verified. The results show that it is feasible to evaluate the surface hardness of 45 steel by using surface wave velocity, and the predicting hardness error meets the requirement of 10% size for the engineering application. There is no obvious mapping relationship between the attenuation coefficient and the surface hardness, therefore, the attenuation coefficient cannot be used to evaluate the surface hardness of 45 steel specimens.

Keywords: acoustic surface wave; microstructure; hardness; calibration model; mapping relationship

收稿日期: 2018-04-08; 修回日期: 2018-06-11

网络出版日期: 2018-07-02 11:32; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20180702.1132.022.html>

通信作者: 董世运 (1973—), 男 (汉), 研究员, 博士; 研究方向: 激光制造与再制造及其质量无损检测评价; E-mail: syd422@sohu.com

基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFB1100205, 2017YFF0207905); 国家自然科学基金 (51705532)

Fund: Supported by National Key Research and Development Program of China (2016YFB1100205, 2017YFF0207905) and National Natural Science Foundation of China (51705532)

引用格式: 门平, 董世运, 程志远, 等. 测量距离对超声表面波评价不同组织的材料表层硬度的影响[J]. 中国表面工程, 2018, 31(4): 178-187.

MEN P, DONG S Y, CHENG Z Y, et al. Effects of measurement distance on hardness evaluation of material surface with different microstructure by acoustic surface wave[J]. China Surface Engineering, 2018, 31(4): 178-187.

0 引言

表面硬度是材料表面工程研究的重要内容之一, 同时也是材料力学性能指标研究的重要内容, 材料的硬度值可以直观反映材料的硬度指标, 而且可以间接反映材料的强度指标, 对于在役在线核心构件, 其抗磨损性能、抗疲劳性能、抗点蚀及抗应力腐蚀开裂性能均与材料表面硬度息息相关^[1-3]。因此, 评价与表征材料表面硬度指标是材料性能测试的重要内容之一。

材料表面硬度现有的表征方法主要集中在机械压痕测量方法, 其主要缺点: ① 对材料表面造成不同程度的压痕损伤, 即使纳米压痕法也会对材料表面造成微损伤^[4]; ② 对材料表面粗糙度有一定要求, 表面打磨划痕对压痕面积测量有一定影响^[5]; ③ 测量设备较大, 只能在实验室或特定场所离线测量; ④ 由于测量方法和测量设备等原因, 测量前需要制样。因此, 采用机械压痕方法很难实现硬度的在役在线、快速、无损评价与表征。

超声表面波检测技术不仅可以评价材料表面近表面裂纹损伤等宏观缺陷, 还可以通过非线性超声表面波评价材料早期力学性能退化, 包括闭合微裂纹、疲劳-位错早期损伤、辐射损伤和材料热老化导致力学性能退化等^[6-7]; 基于弱声-弹效应, 采用超声表面波技术可以评价材料或构件的残余应力及工作应力^[8-9]; 通过超声表面波声速测量可以实现材料弹性模量的定量评价与表征^[10]。对于材料表面硬度的无损检测, 目前主要集中在磁巴克豪森检测^[11]和涡流检测^[12], 文中基于先进检测系统、计算机软件分析技术、传感器技术和材料微观组织表征技术, 将超声表面波检测技术引入到材料表层硬度检测中, 实现表层硬度指标的无损定量评价与表征, 以满足工程应用的要求。

1 检测方法和检测系统

1.1 检测方法

材料或构件的微观组织决定材料的力学性能, 材料或构件的微观组织决定或者影响超声检测信号特征参量大小, 这样就可以通过超声检测参量来定量评价材料力学性能指标, 材料的微观组织可以作为两者之间的纽带, 从而构建材料或构件力学性能指标-微观组织-超声检测参量之间的映射关系, 如图1所示。

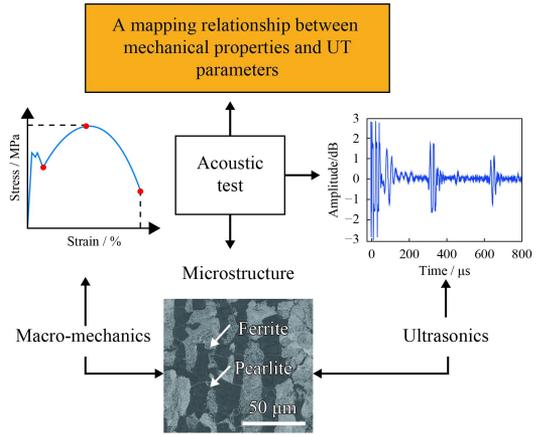


图1 材料力学性能指标-微观组织-超声检测参量之间的关系
Fig.1 Relationship of material mechanics properties, microstructure and ultrasonic testing parameters

通过材料热处理制度, 得到一组具有硬度梯度的标定试件, 标定过程如图2所示^[13]。采用硬度计测试标定试件硬度, 采用超声测试系统测量超声表面波在标定试件上的传播声时和接收声波幅值, 计算相应传播声速和衰减系数, 对标定试件硬度与超声表面波声速、衰减系数进行曲线拟合, 得到硬度预测标定模型, 将相同材质任意试件超声表面波声速、衰减系数代入标定模型, 得到预测硬度, 与硬度计实测硬度相比较,

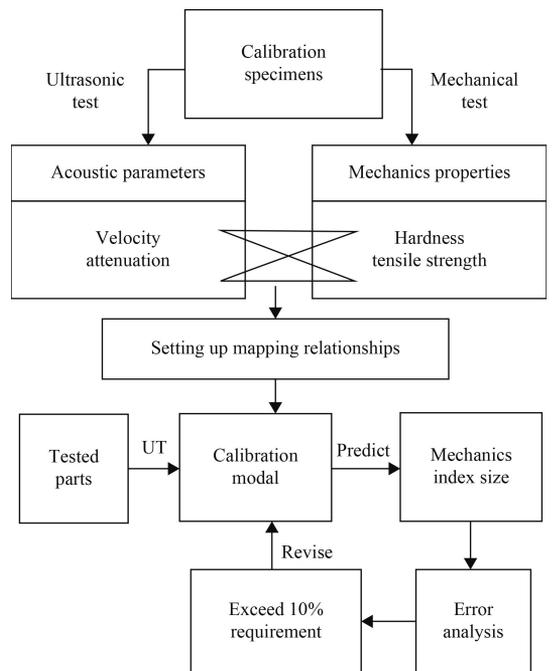


图2 超声检测方法评价材料硬度标定试验框图
Fig.2 Calibration test of the material hardness evaluation by ultrasonic testing method

得到预测硬度误差，如果预测误差不满足所提误差指标要求，则对预测模型进行修正或者重新构建预测模型，直至预测误差满足要求，标定试验完成。

1.2 检测系统

采用超声表面波检测技术评价 45 钢试件表层硬度，检测系统主要包括 RAM-5000 先进测试系统、计算机、测试软件系统、数字示波器、双通道信号选择器 (RITEC RS-5-G2)、50 Ω 负载 (RITEC RT-50)、SIUI5 MHz 超声表面波探头 (5Z10×10BM)，耦合剂机油，45 钢标定试件，试件尺寸为 150 mm×50 mm×19 mm，系统框图如图 3 所示。

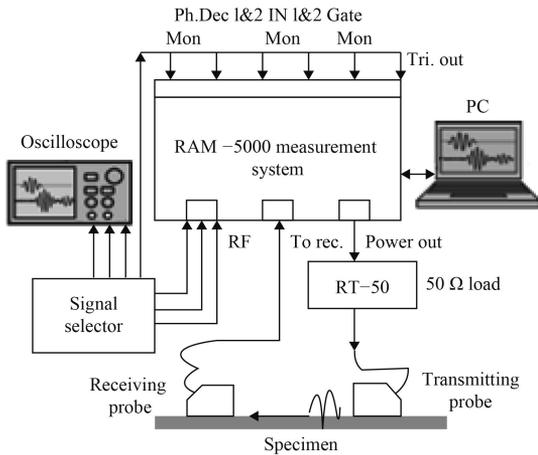


图 3 超声表面波系统框图

Fig.3 Schematic diagram of acoustic surface wave system

1.3 超声表面波参数测量方法

1.3.1 超声表面波声速测量方法

采用双探头法测量超声表面波在试件表面的传播声时，在测量系统中设置门信号的位置，门信号宽度与接收表面波信号持续时间相同，门信号及接收表面波信号如图 4 所示，改变发射探头和接收探头间距，测量不同距离表面波传播声时，探究声程变化对超声表面波声速的影响，探头位置如图 5 所示，接收探头位置保持不变，发射探头前沿与接收探头前沿初始相距 10 mm，发射探头移动 6 次，每移动 1 次，探头间距增加 10 mm，收发探头间距最大为 70 mm，分别记录不同距离超声表面波传播时间，测量精度达到纳秒量级，计算相应声速，计算方法如公式 (1) 所示。

$$c_n = \frac{d_n - d_0}{t_n - t_0} \quad (1)$$

式中， c_n 为不同传播距离超声表面波传播声速； d_0 为发射探头前沿与接收探头前沿的初始间距，10 mm； d_n 为发射探头前沿与接收探头前沿不同间距，分别为 20、30、40、50、60 和 70 mm； t_0 为对应距离 d_0 时超声表面波传播声时； t_n 为对应距离 d_n 时超声表面波传播声时，声时测量 6 次求其平均值， n 的大小取 1 到 6 整数。

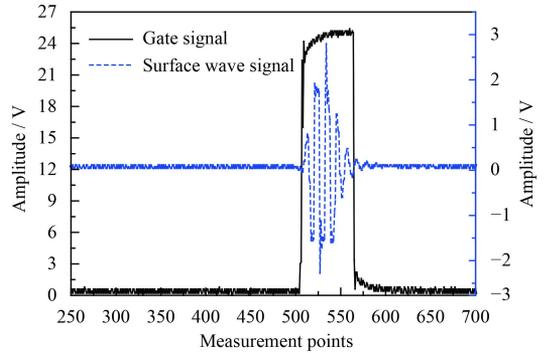


图 4 测量门信号与接收表面波信号位置

Fig.4 Position between the gate signal and the received acoustic surface wave signal

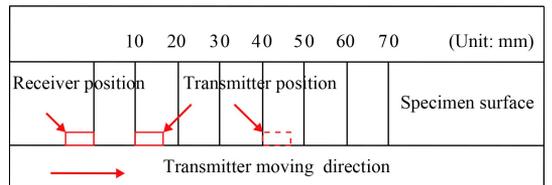


图 5 超声表面波探头检测位置

Fig.5 Detection positions of acoustic surface wave probe

1.3.2 超声表面波衰减系数测量方法

选取超声表面波发射探头与接收探头前沿分别相距 $d_0=10$ mm 和 $d_6=70$ mm 的波幅 B_0 和 B_6 作为计算衰减系数的幅值，衰减系数计算方法如公式 (2) 所示。

$$\alpha = \frac{20 \lg(B_0/B_6)}{x} \quad (2)$$

式中， α 为超声表面波的衰减系数， x 为两次接收超声表面波声程差，即 $d_6-d_0=60$ mm。

2 标定过程及结果分析

2.1 标样的显微组织及硬度

采用 45 钢制作一组 6 个标定试件，根据 45 钢 CCT 曲线确定热处理制度最高升温为 850 ℃ + 保温 0.5 h，而后试件分别进行退火 (Annealing,

A)、正火 (Normalizing, N)、淬火 (Water quenching, WQ), 淬火后不同温度回火 (Tempering, T)、回火包括 600 °C 高温回火、400 °C 中温回火和 200 °C 低温回火, 目的是通过不同热处理制度改变标定试件的微观组织, 得到一组具有硬度梯度的标定试件, 为后续标定实验和相关性分析做准备, 这里所说的硬度梯度是指 6 个标定试件进行不同热处理后硬度不同, 每个试件不同深度硬度相同。采用 HBE-3000A 电动布氏硬度计测量标定试件硬度, 表 1 为 45 钢标定试件热处理制度及硬度值。

采用 4% 硝酸酒精对抛光 45 钢试件表面腐蚀 10 s, 采用 Quanta200 型场发射扫描电镜观察试件微观组织, 不同热处理标定试件微观组织如图 6 所示, 由于热处理 45 钢标定试件为各向同性材质, 表面微观组织和内部微观组织相同, 图 6(a) 为试件退火后得到铁素体加珠光体组织; 图 6(b) 为试件正火后得到铁素体加珠光体组织, 区别是

表 1 标定 45 钢试件热处理制度及布氏硬度

Table 1 Heat treatment methods and Brinell hardness of calibration 45 steel specimens

Heat treatment	Cooling medium	Holding time / min	Hardness / HBW
A	Furnace		129
N	Air		155
600T	Air	30	192
400T	Air	30	340
200T	Air	30	489
WQ	Water		522

正火组织中的珠光体含量更高; 试件淬火后经低温、中温、高温回火, 马氏体组织表面不同程度析出碳化物, 图 6(c) 为试件高温回火得到的索氏体组织; 图 6(d) 为试件中温回火得到的屈氏体组织; 图 6(e) 为试件低温回火得到的回火马氏体组织; 图 6(f) 为试件水冷得到的马氏体加残余奥氏体组织。

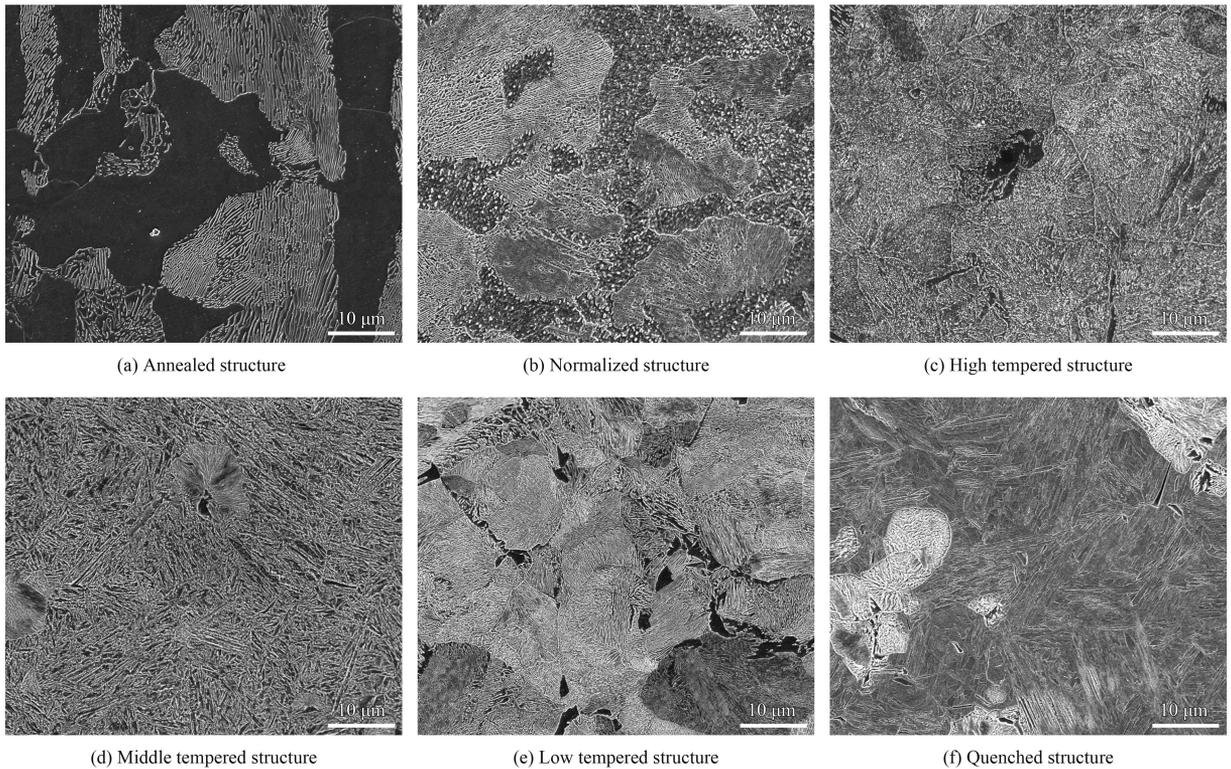


图 6 不同热处理标定 45 钢试件的微观组织

Fig.6 Microstructure of calibrated 45 steel specimens with different heat treatment

2.2 表面波参数测量

2.2.1 表面波探头幅频特性

采用的超声表面波探头已经标出中心频率, 但是在超声表面波声速测定之前, 先要测试探头

的幅频特性, 确定超声表面波探头的检测能力以及探头激发信号的频率, 图 7 为中心频率为 5 MHz 超声表面波探头的实测幅频特性图。

从探头的幅频特性可知, 探头的中心频率并

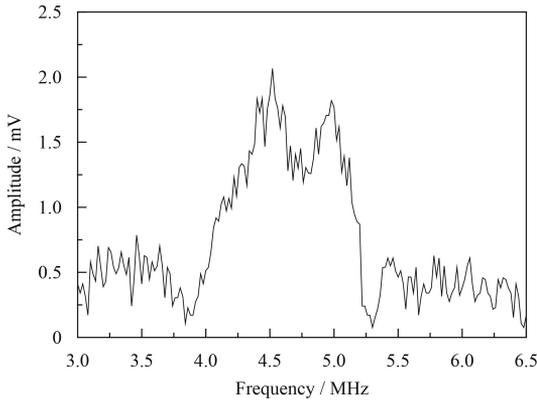


图7 超声表面波探头幅频特性

Fig.7 Amplitude-frequency characteristic of acoustic surface wave probe

非在 5.0 MHz，其主要峰值有两个，分别为 4.52 和 4.98 MHz，峰值分别为 0.002 066 和 0.001 820 V，所以依据探头的幅频特性，探头激发信号的频率选择 5 MHz，探头中心频率越高，波声场指向性越好，检测精度越高，探头激励信号选择正弦波激励信号，周期设置为 1 个周期。

2.2.2 表面波声时测量及声速计算

根据公式 (1) 计算超声表面波声速，观察不同测量距离对超声表面波声速的影响，为超声表面波声速测量距离的选择提供依据。同时根据超声表面波在不同热处理 45 钢标定试件声速的变化情况，构建材料硬度、微观组织及超声表面波声速之间的映射关系，建立标定模型，并对标定模型

进行验证。

检测系统参数设置为：激发信号中心频率设置为 5.0 MHz，周期 0.2 μs ，输出电压水平 10 V，扫频范围设置为 4.8~5.2 MHz，步进 0.001 MHz，信号增益为 40dB，测量门信号宽度设置为 1.2 μs ，依据所采用超声表面波探头的中心频率，滤波器高通截止频率设置为 4 MHz，低通截止频率设置为 20 MHz。

不同热处理 45 钢试件测量数据如表 2 所示，声时差 $\Delta t = t_n - t_0$ ，声程差 $d_n - d_0$ 依次为 10、20、30、40、50 和 60 mm， E_t 为相应测量声时均方根误差，依据公式 (1) 分别计算相应的超声表面波声速 c_n 。45 钢标定试件超声表面波声时测量均方根误差如图 8 所示，可以看出，在整个测量范围内，测量误差波动极小，均控制在纳秒量级，声时测量误差满足超声表面波声速精确测量要求。

图 9 为 45 钢标定试件超声表面波声速随传播距离的变化曲线，不同热处理 45 钢标定试件超声表面波声速随声程增加变化趋势一致，声程较小时，表面波声速波动较大，随着声程的增加， $d_n - d_0 = 30$ mm 时，超声表面波声速趋于稳定，主要原因在于随着声程的增加，声程测量引入的相对误差随声程的增加而变小，对超声表面波声速计算的影响变小；从声速变化曲线还可以看出，随着不同热处理 45 钢试件硬度的增加，超声表面波声速依次降低，这就为采用超声表面波评价材料表层硬度提供了试验依据。

表 2 热处理 45 钢标定试件测量数据

Table 2 Measurement data of heat treated 45 steel calibration specimens

Heat treatment	Measurement parameters									
	$t_0 / \mu\text{s}$	$t_n / \mu\text{s}$	$t_n - t_0 / \mu\text{s}$	$c_n / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$t_0 / \mu\text{s}$	$t_n / \mu\text{s}$	$t_n - t_0 / \mu\text{s}$	$c_n / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$t_0 / \mu\text{s}$	$t_n / \mu\text{s}$
A	22.605	26.018	29.287	32.657	3.413	6.682	10.052	2 930	2 993	2 984
		36.027	39.376	42.702	13.422	16.771	20.097	2 980	2 981	2 986
N	22.633	26.040	29.359	32.689	3.407	6.726	10.056	2 935	2 974	2 983
		36.055	39.393	42.725	13.422	16.759	20.092	2 980	2 983	2 986
600T	22.654	26.063	29.393	32.701	3.409	6.739	10.047	2 933	2 968	2 986
		36.064	39.415	42.754	13.410	16.716	20.100	2 983	2 983	2 985
400T	22.663	26.100	29.416	32.724	3.437	6.753	10.061	2 909	2 961	2 981
		36.088	39.441	42.774	13.425	16.778	20.108	2 979	2 980	2 983
200T	22.694	26.121	29.448	32.789	3.427	6.754	10.095	2 918	2 961	2 971
		36.158	39.497	42.863	13.464	16.803	20.169	2 970	2 975	2 974
WQ	22.722	26.165	29.488	32.869	3.443	6.766	10.147	2 904	2 956	2 957
		36.253	39.573	42.981	13.531	16.851	20.259	2 956	2 967	2 962

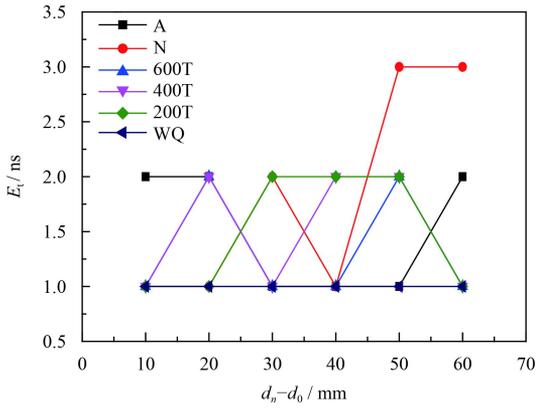


图8 超声表面波声时测量均方根误差随测量距离的变化

Fig.8 Root mean square errors of surface wave propagation time varied with measuring distance

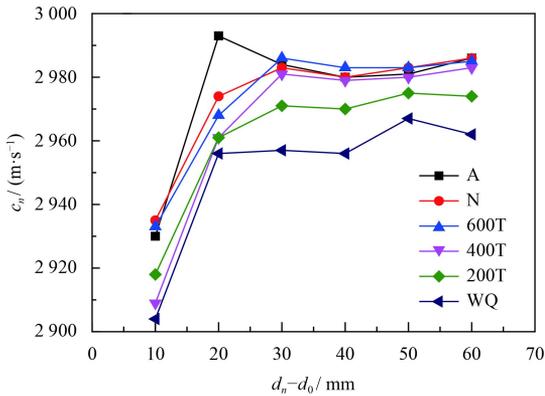


图9 热处理45钢标定试件超声表面波声速随声程的变化

Fig.9 Surface wave velocity varied with measuring distance for heat treated 45 steel calibration specimens

2.2.3 表面波衰减系数测量

不同热处理45钢标定试件接收超声表面波信号幅值及衰减系数如表3所示, 选取超声表面波发射探头与接收探头间距为 $d_0=10$ mm和 $d_6=70$ mm的波幅 B_0 和 B_6 作为计算衰减系数的幅值, 代入公式(2)计算衰减系数。

表3 热处理45钢标定试件超声表面波衰减参数

Table 3 Surface wave attenuation parameters of heat treated 45 steel calibration specimens

Heat treatment	Measurement parameters		
	B_0 / V	B_6 / V	$\alpha / (\text{dB} \cdot \text{mm}^{-1})$
A	2.68	1.80	0.057 6
N	2.64	1.76	0.058 7
600T	2.76	2.60	0.008 6
400T	2.32	1.84	0.033 6
200 T	1.84	1.36	0.043 8
WQ	1.72	1.32	0.038 3

图10为热处理45钢标定试件超声表面波衰减系数随硬度的变化曲线, 在回火阶段, 随着硬度的增加, 超声表面波衰减系数相应增加, 但是整个变化曲线没有明显的变化规律, 所以超声表面波衰减系数不能作为评价45钢硬度指标的评价参数。

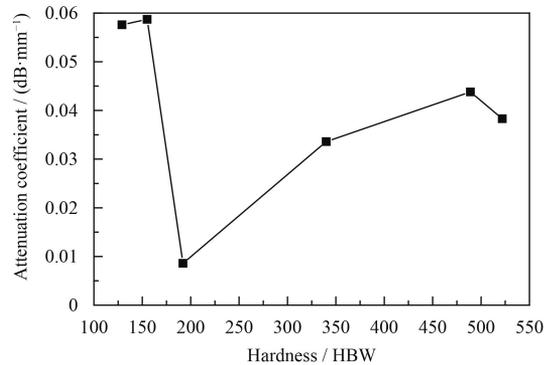


图10 热处理45钢标定试件超声表面波衰减系数随硬度的变化
Fig.10 Surface wave attenuation coefficient varied with hardness for heat treated 45 steel calibration specimens

2.3 建立标定模型

由上述内容可以, 超声表面波声速可以作为评价45钢硬度指标的评价参数, 而衰减系数不能作为评价参量, 所以选择超声表面波声速建立45钢表层硬度指标定量评价的标定模型。通过研究声程变化对热处理45钢标定试样超声表面波声速的影响, 可以确定声程差最小不能小于30 mm, 这样选择 $d_n-d_0=40$ mm作为标定模型声速计算的声程差, 不同热处理标定试件超声表面波声时测量6次求其平均值, 计算标定试件超声表面波声速分别为: 2975、2974、2973、2965、2961和2950 m/s, 建立超声表面波声速与标定试件布氏硬度之间的映射关系。

图11为不同热处理45钢试件超声表面波平均声速随硬度的变化拟合曲线, 拟合曲线的精度由拟合度表示, 拟合度越接近于1, 拟合度越高, 标定模型拟合度 R^2 为0.884 3, 拟合度较高, 但拟合度与1还有一定差距, 分析其误差来源主要有: ①测量45钢布氏硬度时, 测量压痕直径读数引入的误差; ②试件表面粗糙度影响压痕直径测量引入的误差; ③测量超声表面波传播时间引入的误差; ④测量超声表面波传播距离引入的误差。拟合函数如公式(3)所示。

$$y = 2982.74899 - 0.05391x \quad (3)$$

式中, x 表示材料的布氏硬度, y 表示超声表面波声速。

为进一步验证图 11 拟合的精确度, 实测 760 °C 淬火、300 °C 回火 45 钢试件硬度分别为 254、401 HBW, 测量超声表面波声速分别为 2970 和 2962 m/s, 代入拟合公式 (3) 计算硬度分别为 236、385 HBW, 预测硬度与实测硬度误差分别为 7.09%、3.99%, 满足 10% 的工程误差指标要求。

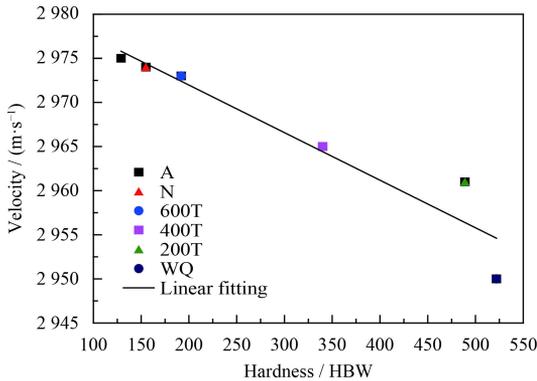


图 11 标定试件硬度与超声表面波声速线性拟合

Fig.11 Linear fitting between calibration hardness of specimen and wave velocity of acoustic surface

2.4 相关性分析

从标定试验可以看出, 不同热处理 45 钢标定试件超声表面波声速不同, 退火件超声表面波声速最快, 之后依次为正火件、高温回火件、中温回火件、低温回火件, 淬火件超声表面波声速最慢, 从显微组织和应力角度分析, 退火试件为铁素体和珠光体组织, 铁素体含量较高, 铁素体组织为等轴晶, 晶粒尺寸较大, 珠光体片层间距较大, 铁素体比珠光体的弹性模量大^[14], 弹性模量越大, 声速越快, 退火同时消除试件内部残余应力, 这些因素综合影响使得超声表面波声速最快; 依据标样显微组织, 对于正火试件, 其微观组织由铁素体和珠光体组织组成, 不同的是正火件比退火件珠光体组织含量更高, 铁素体含量减少, 且珠光体组织片层间距更小, 珠光体比铁素体组织弹性模量小, 这些因素综合导致正火件比退火件超声表面波声速慢; 淬火试件为马氏体组织, 组织内部由于晶格体积发生变化产生大量晶界、高密度位错以及很高的内部张力和残余应力, 同时马氏体组织的弹性模量比铁素体和珠光

体组织的弹性模量低, 这些因素综合导致淬火试件超声表面波声速最慢; 对于不同温度的回火试件, 超声表面波声速比淬火试件有不同程度的增加, 这是由于回火过程不同程度释放了马氏体相变的组织应力, 增加了组织的弹性模量, 缓解了晶格畸变程度, 即释放了晶格内部残余应力, 随着回火温度的升高, 200 °C 低温回火试件马氏体组织转变为针状的回火马氏体, 400 °C 中温回火试件中马氏体针状形态逐渐消失, 转变为回火屈氏体组织, 600 °C 高温回火试件组织转变为具有良好强度和韧性的调质组织, 即回火索氏体组织, 其基体上分布细小颗粒的碳化物, 导致超声表面波声速降低, 比正火组织超声表面波声速低。

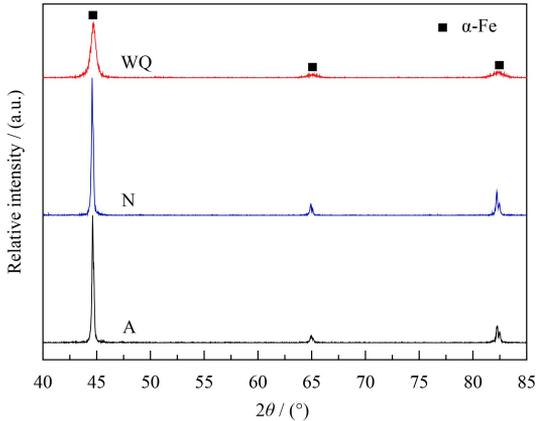
标定试验采用的试件热处理时奥氏体化温度和保温时间相同, 从而保证了初始奥氏体晶粒尺寸一致, 因此只从微观应力角度考虑对 X 射线衍射峰半高宽的影响, 即晶格畸变程度对半高宽的影响, 如公式 (4) 所示^[15]。

$$\text{Strain} \left(\frac{\Delta d}{d} \right) = \frac{FW(S)}{4 \tan \theta} \quad (4)$$

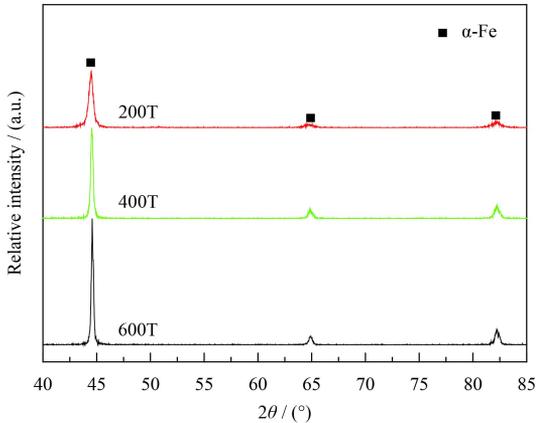
式中, $\text{Strain}(\Delta d/d)$ 为微观应变, 表示晶格应变变量与晶格面间距的比值, 用百分数表示, 即晶格畸变程度, Δd 为晶格应变变量, d 表示晶格面间距, $FW(S)$ 为试样衍射峰宽化 (rad), θ 为衍射角度。

图 12 为标定 45 钢试件 X 射线衍射图, 从图中可以看出, 不同热处理试件 X 射线衍射峰角度基本没有变化, 但是衍射峰宽化发生变化, 说明晶格畸变程度各异。

表 4 为不同热处理 45 钢标定试件晶格畸变程度, 通过 Jade 分析软件所得, 从分析结果可以看出, 退火和正火试件晶格畸变程度差异不是很明显, 这是由于两者组织类型相同, 差别在于后者比前者珠光体含量更高, 片层间距更小, 铁素体较珠光体比体积更小; 随着回火温度的升高, 晶格畸变程度逐渐减小, 这是由于回火不同程度释放了由于快冷产生的晶格畸变引起的残余应力; 淬火试件晶格畸变程度最大, 过冷奥氏体快速冷却, 由面心立方结构的奥氏体非扩散相变转变为体心正方的马氏体, 晶粒尺寸发生变化产生大量位错和内部应力。由于上述原因, 不同热处理标定试件微观组织晶格畸变程度的差异性导致宏观硬度的差异性, 图 13 为标定试件硬度随晶格畸变



(a) Annealed, normalized and quenched specimens



(b) Tempered specimens

图 12 不同热处理 45 钢试件的 XRD 图谱

Fig.12 XRD patterns of 45 steel specimens with different heat treatment

表 4 不同热处理 45 钢标定试件晶格畸变程度

Table 4 Lattice distortion degree of 45 steel calibration specimens with different heat treatment

Heat treatment	A	N	600T	400T	200T	WQ
Strain/%	0	0.033	0.094	0.168	0.369	0.509

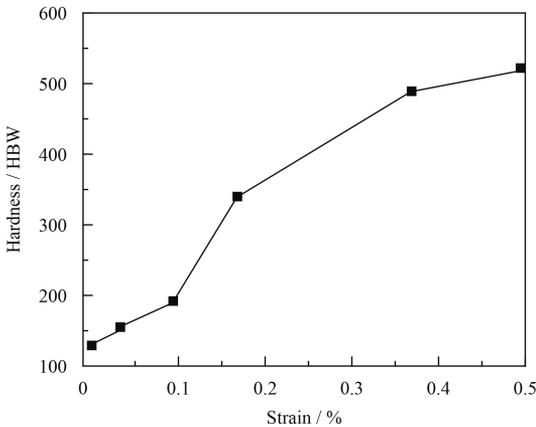


图 13 标定试件硬度随晶格畸变程度的变化

Fig.13 Hardness of calibration specimens varied with the degree of lattice distortion

程度的变化曲线,从图 13 中可以看出,其变化基本呈递线性关系。

不同热处理 45 钢标定试件,由于晶格应力等因素导致晶格畸变程度不同,宏观表现就是标定试件硬度不同,进而导致检测参量超声表面波声速的变化,在受到压力作用下,介质中超声横波与应力的关系如公式 (5) 所示^[16],超声表面波声速与横波声速如公式 (6) 所示^[17]。

$$\rho_0 c_{13P}^2 = \mu - \frac{P}{3K_0} \left[3m - \frac{n}{2} + 3\lambda + 6\mu \right] \quad (5)$$

$$c_R = \frac{0.87 + 1.12\nu}{1 + \nu} c_{13P} \quad (6)$$

式中, P 为材料所受压应力,压力 P 为正, ρ_0 材料发生变形前的密度, λ 和 μ 为材料的二阶弹性系数, m 和 n 为三阶弹性系数, $K_0 = \lambda + 2\mu/3$, c_{13P} 为沿任意方向传播的横波声速, c_R 为超声表面波声速, ν 为材料泊松比。由上述公式可知,超声横波声速随应力的增加而减小,超声表面波声速与横波声速呈正比例关系,由此可知,超声表面波声速随应力的增加而减小。

图 14 为标定试件超声表面波声速随晶格畸变程度的变化曲线,可以看出两者之间的变化基本呈递线性关系,结合图 13 可知,超声表面波声速与材料硬度呈递线性关系,由此验证了所建材料硬度标定模型的合理性,需要说明的是,这里涉及的晶格畸变程度是作为所测标样硬度与标样表面波声速的联系参量,从晶格畸变程度的角度讲,随着晶格畸变程度的增加,标定试件硬度

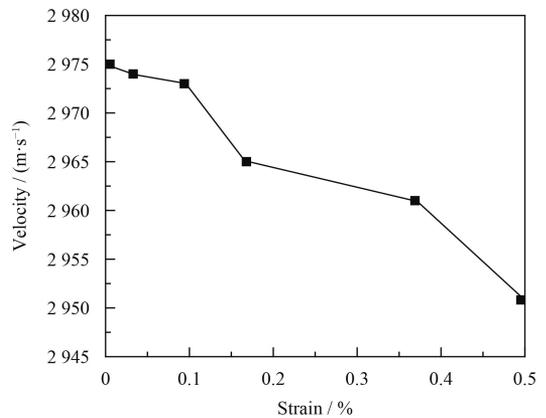


图 14 标定试件超声表面波声速随晶格畸变程度的变化

Fig.14 Acoustic surface wave velocity of calibration specimens varied with the degree of lattice distortion

相应增加, 超声表面波声速相应减小, 通过上述变化关系, 建立不同热处理 45 钢表层硬度指标-晶格畸变程度-超声表面波声速之间的线性映射关系, 为采用超声表面波声速评价材料表层硬度指标提供实验依据和理论基础。

综上所述, 不同热处理 45 钢标定试件微观组织不同, 宏观表现在材料硬度的不同, 反映在检测参数超声表面波声速的不同, 通过建立材料表层硬度指标、材料晶格畸变程度及超声表面波声速之间的映射关系, 将材料的力学性能指标、微观组织及超声检测参数联系起来, 最终建立材料表层硬度指标与超声表面波声速之间的定量映射关系, 得到标定模型, 通过测量被测试件超声表面波声速, 实现 45 钢表层硬度指标的定量表征与预测, 晶格畸变程度及微观组织起着中间桥梁作用。

3 结 论

(1) 通过高精度声时测量系统测量不同热处理 45 钢标定试件超声表面波声时和接收信号幅度, 计算相应声速和衰减系数, 超声表面波声速随着材料的硬度增加而减小, 针对每个标定试件, 当收发探头前沿距离与探头初始前沿距离差大于 30 mm 时, 测量超声表面波声速趋于稳定, 衰减系数与硬度的变化曲线没有明显的变化规律, 因此超声表面波衰减系数不能作为评价材料硬度指标的超声检测参量。

(2) 通过测量不同热处理 45 钢标定试件超声表面波传播声时, 计算相应声速, 建立了超声表面波声速评价材料表层硬度指标的标定方法和标定模型, 预测硬度误差分别为 7.09% 和 3.99%, 满足工程应用误差 10% 的要求。

(3) 通过所提标定方法建立的 45 钢标定模型, 构建 45 钢试件表层硬度指标-材料微观组织-超声表面波声速之间的定量映射关系, 从材料微观组织和晶格畸变程度两个角度解释超声表面波声速随试件硬度的变化关系, 为采用超声表面波声速无损、定量、快速评价材料表层硬度指标提供理论基础和试验支撑。

参考文献

[1] ZHENG L, WU J, ZHANG S, et al. Bionic coupling of hardness gradient to surface texture for improved anti-wear prop-

- erties[J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2016, 13(3): 406-415.
- [2] LIANG Y L, ZHONG L Q, YAN Z. Influence of shot peening on the surface hardness of TC11 titanium alloy after high cycle fatigue test[J]. *Materials Science Forum*, 2016, 849: 302-308.
- [3] NATISHAN P M, BAYLES R A, RAYNE R, et al. Interstitial hardening of type 316L stainless steel to improve corrosion resistance and mechanical properties[J]. *Corrosion*, 2012, 68(7): 638-644.
- [4] WASEEM O A, JEONG J R, PARK B G, et al. Hardness of AISI type 410 martensitic steels after high temperature irradiation via nanoindentation[J]. *Metals & Materials International*, 2017, 23(6): 1257-1265.
- [5] MASLENIKOV I, USEINOV A, BIRYKOV A, et al. Reducing the influence of the surface roughness on the hardness measurement using instrumented indentation test[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, 256(1): 012003.
- [6] LU C, MEN P, LI L. An experimental study of EMAT ultrasonic surface waves modes in railhead[J]. *International Journal of Applied Electromagnetics & Mechanics*, 2010, 33(3): 1127-1133.
- [7] 门平, 董世运, 康学良, 等. 材料早期损伤的非线性超声诊断[J]. *仪器仪表学报*, 2017, 38(5): 1101-1118.
- MEN P, DONG S Y, KANG X L, et al. Material early damage diagnosis with nonlinear ultrasound[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(5): 1101-1118 (in Chinese).
- [8] 董世运, 闫晓玲, 徐滨士. 微观组织及残余应力对瑞利波评价激光熔覆层应力的影响[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(24): 50-56.
- DONG S Y, YAN X L, XU B S. Influence of microstructure and residual stress on surface stress measurement of laser cladding layer by Rayleigh wave[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(24): 50-56 (in Chinese).
- [9] JUNGE M, QU J, JACOBS L J. Relationship between Rayleigh wave polarization and state of stress[J]. *Ultrasonics*, 2006, 44(3): 233-237.
- [10] GARNIER V, CORNELOUP G. Determining the evolution of the elasticity modulus by surface waves according to the depth in a nitrated layer[J]. *Ultrasonics*, 1996, 34(2-5): 401-404.
- [11] FRANCO F A, GONZÁLEZ M F R, CAMPOS M F D, et al. Relation between magnetic barkhausen noise and hardness for jominy quench tests in SAE 4140 and 6150 steels[J]. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2013, 32(1): 93-103.
- [12] MERCIER D, LESAGE J, DECOOPMAN X, et al. Eddy currents and hardness testing for evaluation of steel decar-

- burizing[J]. NDT & E International, 2006, 39(8): 652-660.
- [13] 徐滨士, 董世运, 门平, 等. 激光增材制造成形合金钢件质量特征及其检测评价技术现状[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(4): 401001-0401001.
- XU B S, DONG S Y, MEN P, et al. Quality characteristics and nondestructive test and evaluation technology for laser additive manufacturing alloy steel components[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(4): 401001-0401001 (in Chinese).
- [14] RAYES M M E, EL-DANAF E A, ALMAJID A A. Ultrasonic characterization of heat-treatment effects on SAE-1040 and-4340 steels[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 216: 188-198.
- [15] 周玉. 材料分析方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 40-54.
- ZHOU Y. Material analysis method[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2011: 40-54 (in Chinese).
- [16] 罗斯. 固体中的超声波[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 242-247.
- ROSE J L. Ultrasonic waves in solid media[M]. Beijing: Science Press, 1999: 242-247 (in Chinese).
- [17] 柴华友, 吴慧明, 张电吉, 等. 弹性介质中的表面波理论及其在岩土工程中应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 57-60.
- CHAI H Y, WU H M, ZHANG D J, et al. Surface wave theory in elastic media and its application in geotechnical engineering[M]. Beijing: Science Press, 2008: 57-60 (in Chinese).

(责任编辑: 王文宇)

• 本刊讯 •

《中国表面工程》关于参考文献著录的要求

本刊参考文献符合国标 GB/T7714—2015, 采用顺序编码著录, 依照其在文中出现的先后顺序用阿拉伯数字标出, 并将序号置于方括号内, 排列于文后。参考文献应尽量引用国内外正式公开发表的引文且各项信息齐全, 作者的英文名采用姓前名后格式, 姓用全称且全部字母大写, 名用缩写且保留首字母大写, 作者在3名以上只列前3名, 后加“等”; 题名后应标注文献标识类型; 期刊名称(包括英文期刊)采用全称; 著录期刊的年、卷、期信息应齐全。具体格式如下:

- ① 期刊: [序号]作者. 题名[J]. 刊名, 出版年, 卷(期): 起止页码.
- ② 论文集: [序号]作者. 题名[C]. 编者. 文集名, 出版地: 出版者, 出版年.
- ③ 学位论文: [序号]作者. 题名[D]. 保存地: 学位授予单位, 授予年份.
- ④ 专著: [序号]著者. 书名[M]. 版本. 出版地: 出版者, 出版年: 起止页码.
- ⑤ 报告: [序号]作者. 报告题名[R]. 出版地: 出版者, 出版年.
- ⑥ 标准: [序号]著者. 标准名: 标准顺序号-发布年[S]. 出版地: 出版者, 出版年, 起止页码.
- ⑦ 专利: [序号]专利所有者. 专利题名: 专利号[P]. 公告日期或公开日期.
- ⑧ 报纸: [序号]作者. 题名[N]. 报纸名, 出版日期(版次).
- ⑨ 电子文献: [序号]作者名. 题名[J/OL] ([EB/OL]或[DB/OL]). 发表或更新日期[引用日期]. 获取和访问路径.

另为适应国际数据库的要求, 从2014(6)期开始, 本刊要求原属中文的参考文献需同时标出其对应的英文格式。例如:

- [1] 何家文. 追溯历史评表面形变纳米化[J]. 中国表面工程, 2014, 27(5): 1-13.
- HE J W. Comments on nano-treatment of surface attrition via historical review[J]. China Surface Engineering, 2014, 27(5): 1-13 (in Chinese).

(本刊编辑部 供稿)