

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2024.03.07

超声临界折射纵波定量评定合金钢近表层布氏硬度试验方法的研究

门平¹, 邓丹^{2*}, 吴玲媛^{1*}

(1. 中国人民解放军 92601 部队, 广东 湛江 524009;

2. 中国船级社实业有限公司, 北京 100006)

摘要: 为了解决合金钢构件布氏硬度无损、在线、在役定量监测/检测问题, 构建并使用先进临界折射纵波参量试验装置, 开展了超声临界折射纵波定量评定合金钢近表层布氏硬度的试验, 测量超声临界折射纵波在合金钢标定试件上的传播特性参量, 计算评定布氏硬度所需的检测参量, 即声速及衰减系数。通过改变收、发探头前沿间距和标定试件的显微组织, 观察上述变化对超声波传播特性参量的影响, 遴选并评定合金钢标定试件布氏硬度敏感检测参量, 建立了临界折射纵波定量评定 45# 钢标定试件近表层布氏硬度标定映射关系的数学模型, 并验证其预测准确度。结果表明, 试验所得的临界折射纵波检测参量对标定试件布氏硬度的敏感程度不同, 声速与布氏硬度具有较强的关联性, 且声速预测模型的测量误差为实际应用的 10%, 满足要求; 而衰减系数不能作为评价合金钢近表层布氏硬度性能的检测参量。本研究为采用超声无损检测方法评定合金钢构件布氏硬度提供了一定的借鉴。

关键词: 超声无损检测方法; 布氏硬度; 临界折射纵波; 超声波传播时间; 幅值衰减; 硬度性能测试; 标定映射关系

中图分类号: TG115.28; TG801; TB52 文献标志码: A 文章编号: 1674-5795 (2024) 03-0094-10

Research on the test method of quantitative evaluating near surface region Brinell hardness of alloy steels by ultrasonic critical refracted longitudinal wave

MEN Ping¹, DENG Dan², WU Lingyuan¹

(1. 92601 Troops, PLA, Zhanjiang 524009, China;

2. China Classification Society Industry Corp., Beijing 100006, China)

Abstract: In order to solve the problem of non-destructive, online, and in-service quantitative monitoring / testing of Brinell hardness of alloy steel component, by building and using an advanced critical refractive longitudinal wave parameter testing device, we have carried out experiments on quantitatively evaluating the near surface Brinell hardness of alloy steel using ultrasonic critical refracted longitudinal waves, measured the critical refracted longitudinal wave propagation characteristic parameters in alloy steel calibration specimens, and calculated the detection parameters required for evaluating Brinell hardness, namely acoustic velocity and attenuation coefficient. In the experiment, we altered the front edges

收稿日期: 2024-05-05; 修回日期: 2024-05-28

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2016YFB1100205)

引用格式: 门平, 邓丹, 吴玲媛. 超声临界折射纵波定量评定合金钢近表层布氏硬度试验方法的研究[J]. 计测技术, 2024, 44(3): 94-103.

Citation: MEN P, DENG D, WU L Y. Research on the test method of quantitative evaluating near surface region Brinell hardness of alloy steels by ultrasonic critical refracted longitudinal wave[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(3): 94-103.



distance between the receiving and transmitting probes and the calibrating specimen microstructure, studied the influence of above changes on the ultrasonic propagation characteristic parameters, confirmed the sensitive detecting parameter for evaluating alloy steel calibration specimen Brinell hardness, and finally established the calibration mapping relationship models between the near surface Brinell hardness of 45[#] steel calibration specimens and the critical refractive longitudinal wave characteristic parameters, verified its hardness prediction accuracy. The test result shows that the wave detection parameters are different in sensitivity to the calibrated specimen Brinell hardness, there is a strong correlation relationship between the acoustic velocity and the Brinell hardness, and the error of the establishing Brinell hardness prediction model is less than 10%. The attenuation coefficient cannot be used to evaluate the near surface Brinell hardness of 45[#] steel specimens. This study provides some reference for evaluating the Brinell hardness of alloy steel components by ultrasonic non-destructive testing methods.

Key words: ultrasonic non-destructive testing methods; Brinell hardness; critical refracted longitudinal wave; propagation time of ultrasonic; amplitude attenuation; hardness test; calibration mapping relationship

0 引言

在合金钢力学性能测试与表征中,其硬度性能的测试参数是重要参数之一。合金钢试件硬度测试结果不仅能反映试件抵抗外界拉/压力的侵入能力,而且能间接反映试件其他力学性能指标,如抗拉强度、疲劳强度、冲击强度以及抗腐蚀性能等^[1-3],因此,金属材料硬度新的试验方法是合金钢试件力学性能试验研究的重要方向之一。

当前,合金钢试件硬度的主流测试方法是通过机械压痕法测定试件表面布氏硬度,该方法主要特点是:硬度与试验时施加的试验力、压痕边界精确界定、压痕表面积测量与估算、压头类型等试验条件直接相关。布氏硬度试验前的准备工作较为繁琐,如需要制样、打磨试样表面等;试验结束后,试件表面会引入新的离散点状微缺陷,破坏了成形试件表面完整性,将影响试件后续使用,纳米压痕测试方法也有类似缺点。受试验设备体积、智能化等因素制约,布氏硬度试验一般适用于实验室等固定场所,不适用于合金钢构件在役、在线原位测试或监测。因此压入式的压痕试验方法无法满足合金钢构件硬度的在线、无损、原位、定量评估^[4-5]。

超声检测方法通常用来评价构件表面或内部裂纹、孔隙、夹杂等宏观缺陷程度,该方法还可以用来评价构件疲劳、蠕变、辐射损伤等力学性能的退化程度^[6]。北京理工大学徐春广等人采用超声检测技术定量评价试件的工作应力或残余应

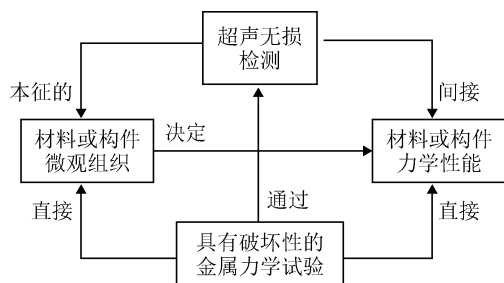
力^[7]。河北工业大学廉玉东等人采用激光超声检测技术对合金钢弹性常数进行定量评价^[8]。目前主要采用微磁检测技术^[9-12]及超声表面波检测技术^[13]对合金钢构件进行硬度评价,但这两种方法的硬度检测深度仅限于构件表层硬度,无法对合金钢近表层梯度硬度进行定量评定与表征。为此,本文利用先进超声检测系统、临界折射纵波传感器和超声声时分析软件,采用合金钢构件微观组织表征技术,精确定量测量了临界折射纵波在合金钢标定试件中的传播声时,计算了相应声速,建立了布氏硬度标定模型并进行了验证。

1 检测方法和试验系统

1.1 合金钢力学性能超声无损检测方法

合金钢及其构件宏观力学性能的超声无损检测方法逻辑图如图1所示^[14],合金钢构件本身的元素构成及外在条件的差异性(热处理、施加的外力等)都会导致其微观组织结构(织构)的不同,宏观上则体现在合金钢硬度、抗拉强度等力学性能指标不同,合金钢硬度等力学性能指标通常采用破坏性的力学试验获得。经热处理的合金钢构件,其微观织构将会影响超声波在其表面或内部的传播特性,即影响超声检测参量的大小。以合金钢本征的微观织构为纽带,可以采用超声检测技术实现合金钢构件力学性能参量的定量无损检测评定,即采用无损检测技术开展合金钢构件力学性能参量的标定试验。

超声临界折射纵波定量检测合金钢试件硬度

图1 合金钢及其构件力学性能超声无损检测方法逻辑图^[14]Fig.1 Logic diagram of ultrasonic non-destructive test method for mechanics performance of the alloy steel and its components^[14]

方法流程图如图2所示,该方法主要包含合金钢试件硬度标定试验和硬度预测模型实际应用两部分,其中标定试验的目的是建立标定试件硬度与超声波检测参量之间的映射关系,红色虚线框的内容为硬度预测模型构建过程,标定过程如下:

1) 参考合金钢过冷奥氏体连续冷却转变曲线,通过不同热处理方法,得到一组标定试验所需硬度范围的差异性合金钢标定试件样本;

2) 采用超声波测量系统对合金钢标定试件声波传播特性参量进行测试和采集,通过相同条件连续测试验证试验数据的重复性,计算对应声波检测参量,如声速、衰减系数等,按照国家标准 GB/T231.1-2018《金属材料布氏硬度试验第1部

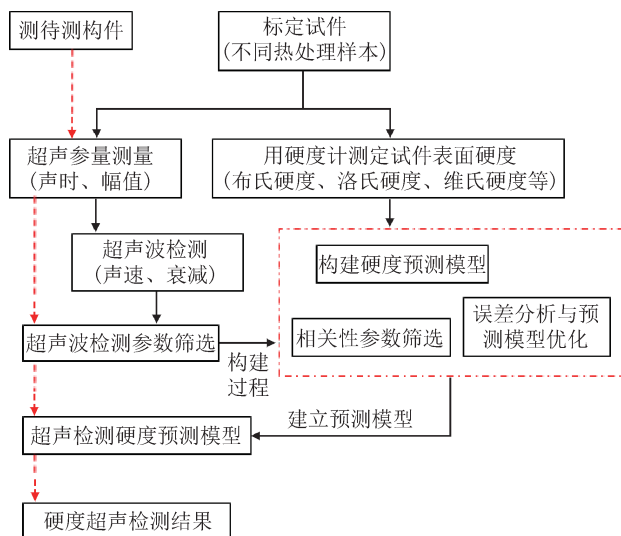


图2 超声临界折射纵波定量检测合金钢试件硬度方法流程图

Fig.2 Flow chart of quantitative detection method for hardness of alloy steel specimens by ultrasonic critical refracted longitudinal wave

分: 试验方法》测试标定试件布氏硬度;

3) 根据超声检测参数与对应试件硬度的相关性、映射关系曲线(线性回归、非线性模型、神经网络模型等)、预测允许误差进行检测参数的遴选,剔除非敏感参数,构建所需的超声检测硬度预测模型;

4) 标定试验完成后,根据具体类型合金钢标定试件硬度试验数据,固化标定试验时超声测量系统设置参数,在实际工程硬度检测时,只需提取超声检测参量并代入相应硬度预测模型进行计算,即可获得待测合金钢构件的硬度值。

超声临界折射纵波在试件近表层传播示意图如图3所示^[15],压电晶片振动产生入射纵波,经斜楔(介质1)入射到被测试件(介质2),在介质2产生折射纵波,随着纵波入射角度的增大,折射角也随之增大,当纵波折射角等于 90° 时,在介质2中便会产生超声临界折射纵波,此时入射角称为第一临界角。由此可知,超声临界折射纵波声场能量主要集中在被测试件近表层区域,由此可以评定声波在试件传播区域内的硬度等力学性能参量。

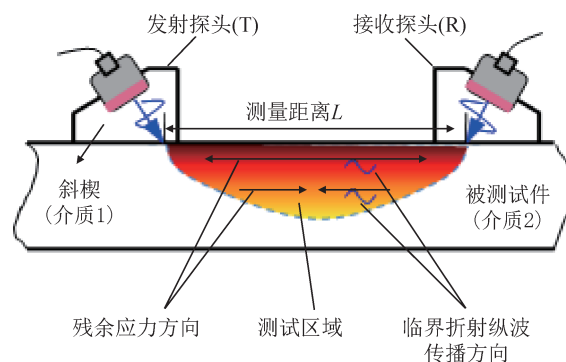


图3 超声临界折射纵波激发及其传播示意图

Fig.3 Schematic diagram of ultrasonic critical refracted longitudinal wave propagation and excitation

1.2 超声临界折射纵波检测参量测量方法

1.2.1 临界折射纵波传播声速测量方法

在试验系统中设置发射探头激发信号参数,使发射探头在标定试件近表层激发出检测临界折射纵波,令接收与发射探头在标定试件表面成一直线状来接收检测声波信号,接收声波信号与系统检测门信号的波形如图4所示,门信号的作用是采集检测声波信号在标定试件上的传播时间(声

时)。检测探头在标定试件上的位置如图5所示,发射和接收探头的最小间距为10 mm,最大间距为70 mm,每次探头之间的间距变化增量为10 mm,试验中共递增6次,目的是通过改变声波传播距离(声程)观察其对检测声波声速的影响,试验系统声时测量准确度为纳秒量级,检测声波的声速按公式(1)计算

$$c_{n-(n-1)} = \frac{d_n - d_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} \quad (1 \leq n \leq 6) \quad (1)$$

式中: $c_{n-(n-1)}$ 为不同声程差的检测声波声速, d_n 、 d_{n-1} 为检测探头间距, t_n 、 t_{n-1} 分别为 d_n 、 d_{n-1} 时的检测声波声时。

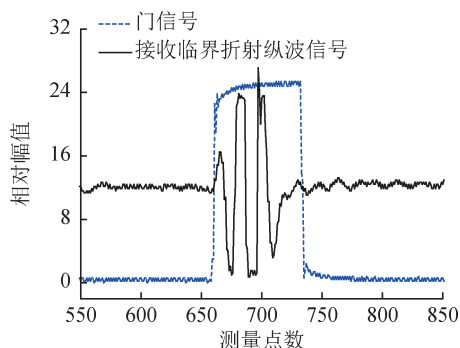


图4 测试门信号与检测声波波形图

Fig.4 Testing gate signal and detecting ultrasonic waveform

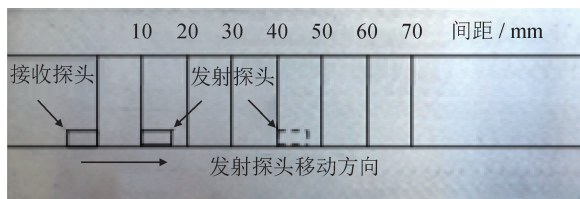


图5 检测探头在标定试件上的位置

Fig.5 Detection probe position on the calibration specimen

1.2.2 临界折射纵波传播衰减系数测量方法

通过上述超声临界折射纵波声速测量试验,明确了临界折射纵波声速测量的最佳声程,通过改变收、发探头之间的间距,得到了不同测量距离下接收临界折射纵波幅值,不同热处理下的合金钢标定试件临界折射纵波衰减系数按公式(2)计算

$$\alpha = \frac{20 \lg(B_n / B_m)}{x} \quad (2)$$

式中: α 为衰减系数, B_n 、 B_m 分别为对应收、发探头间距 d_n 、 d_m 时的接收临界折射纵波幅值, x 为两次检测的声程差。

1.3 试验系统

超声临界折射纵波试验系统如图6所示,其组成主要包括RITEC RAM-5000型高精度声学检测系统、数据采集分析软件、RT-50型匹配电阻、RS-5-G2射频信号功分器(选择器)、用于波形显示的示波器、2个中心频率为2.5 MHz的临界折射纵波探头、超声检测耦合剂、一组具有试验所需硬度梯度范围的45#钢标定试件,试件尺寸依据标定试验的具体需求而定。

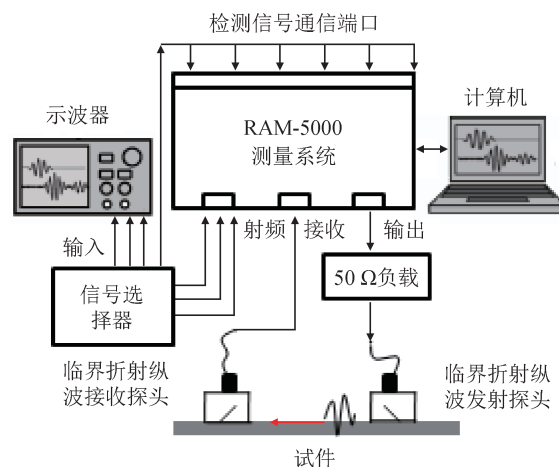


图6 标定试验声学系统

Fig.6 Calibration test acoustic system

2 标定试验过程及分析

2.1 合金钢标定试件布氏硬度及显微组织

采用超声临界折射纵波定量评定合金钢近表层硬度试验的核心步骤是标定试件的设计与制作,本试验使用的试件是经过不同热处理后具有所需布氏硬度梯度范围的45#钢标定试件,参考45#钢过冷奥氏体连续冷却转变曲线确定其奥氏体转变温度为850℃,采用热处理炉加热45#钢试件至预定温度后持续保温0.5 h,对不同试件进行炉冷退火(Annealing, A)、空冷正火(Normalizing, N)、水冷淬火(Water Quenching, WQ)等处理,接着对淬火件再次使用加热炉加热至高温600℃、中温400℃、低温200℃后保温0.5 h空冷,最后形成不同回温调制后的回火(Tempering, T)件。经过上述热处理方法后,得到一组6个具有不同布氏硬度的45#钢标定试件,其试验参数见表1,显微组织图如图7所示。

表1 45#钢标定试件试验参数

Tab.1 45#steel calibration specimen testing parameters

热处理方法	冷却方法	保温时间 / min	布氏硬度 / HBW	组织成分
A	炉冷	—	129	铁素体、珠光体
N	空冷	—	155	铁素体、珠光体(含量更高)
600T	空冷	30	192	索氏体
400T	空冷	30	340	屈氏体
200T	空冷	30	489	回火马氏体
WQ	水冷	—	522	片状马氏体

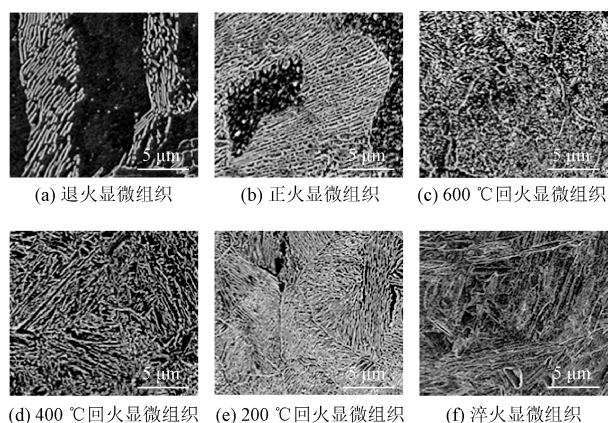


图7 6种不同热处理45#钢标定试件显微组织图

Fig.7 45#steel calibration specimen microstructures with six different heat treatments

2.2 超声临界折射纵波评定参量的测量及分析

2.2.1 超声检测探头频谱的分析

为评定超声临界折射纵波探头的实际检测能力,需要获取探头频谱,试验时在声学检测系统中设置超声检测探头激发信号参数,根据探头标注的2.5 MHz中心频率,设置探头激发信号频率带宽为0.5~4.5 MHz,数据采集频率步进增量为0.01 MHz,数据长度为401个,通过声学系统分析软件中的频谱分析功能,绘制探头频谱曲线,如图8所示。

由图8可知,探头频率覆盖范围较大,最大幅度峰值0.007 679 V对应的频率点为2.67 MHz,与探头标注的中心频率基本一致,通过软件系统中的带通滤波参数调节功能,可以基本消除低频和高频旁瓣对中心频率信号的影响,在超声检测试验中,发射探头激发信号中心频率可以设置在2.4~2.7 MHz范围内。

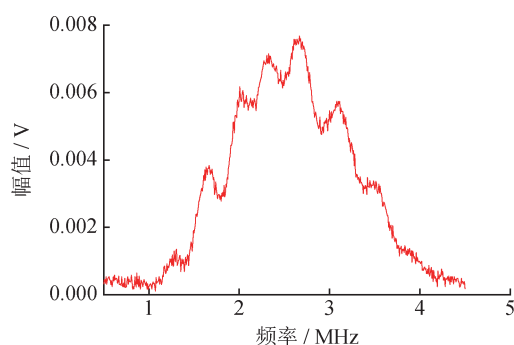


图8 超声临界折射纵波探头频谱

Fig.8 Spectrum of ultrasonic critical refractive longitudinal wave probe

2.2.2 标定试件检测超声波传播时间的测量和声速计算

根据上述超声临界折射纵波探头频谱分析结果,设置声学检测系统参数,在发射探头处输入1个周期中心频率为2.5 MHz的正弦波信号,增益为40 dB,系统扫频范围为 (2.5 ± 0.2) MHz,频率步进增量为0.001 MHz,数据长度为401个,带通滤波器截止频率为1~20 MHz,检测对象选择退火处理45#钢标定试件,根据接收临界折射纵波宽度,门信号脉冲宽度设置为1.5 μ s。

以退火标定试件为测量对象,精确测量超声临界折射纵波在标定试件上不同传播距离时的声时 t_n 及均方根误差 E_r ,测量6次后求平均值,结果见表2。要获得检测声波声速,需先计算不同声程差算法对应的声时差,得到声时差矩阵,其结果见表3。按公式(1)计算不同声时差对应的超声临界折射纵波在标定试件上的传播声速,得到声速矩阵,其结果见表4。由表4可知,标定试件声速总体上先减小后增大,收、发探头间距分别为40 mm

和 50 mm 时的声程差对应的计算声速 c_{4-3} 为声速变化临界值, 其大小与超声纵波在钢中的传播声速相当, 因此本次标定试验选择收、发探头间距为 40 mm 作为计算声速的参考声程。

表 2 退火 45# 钢标定试件测量声时及均方根误差
Tab.2 The wave time and its root mean square error of annealing 45# steel calibration specimens

d_n / mm	$t_n / \mu\text{s}$	$E_t / \mu\text{s}$
10	18.446	0.002
20	19.623	0.014
30	21.212	0.020
40	22.661	0.007
50	24.294	0.005
60	25.900	0.001
70	27.483	0.001

表 3 不同声程差对应的声时
Tab.3 The wave time corresponding to different propagation distance

声时差算法	测量声时差 / μs					
$t_{n-0} = (t_n - t_0), n \geq 1$	1.177	2.766	4.215	5.848	7.454	9.037
$t_{n-1} = (t_n - t_1), n \geq 2$	—	1.589	3.038	4.671	6.277	7.860
$t_{n-2} = (t_n - t_2), n \geq 3$	—	—	1.449	3.082	4.688	6.271
$t_{n-3} = (t_n - t_3), n \geq 4$	—	—	—	1.633	3.239	4.822
$t_{n-4} = (t_n - t_4), n \geq 5$	—	—	—	—	1.606	3.189
$t_{n-5} = (t_n - t_5), n \geq 6$	—	—	—	—	—	1.583

表 4 超声临界折射纵波声速的变化
Tab.4 The change of ultrasonic critical refractive longitudinal wave velocity

声速算法	计算临界折射纵波声速 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)						声速变化趋势
$c_{n-0}, n \geq 1$	8496	7231	7117	6840	6708	6639	↓
$c_{n-1}, n \geq 2$	—	6293	6583	6423	6372	6361	↓
$c_{n-2}, n \geq 3$	—	—	6901	6489	6399	6378	↓
$c_{n-3}, n \geq 4$	—	—	—	6124	6175	6221	↑
$c_{n-4}, n \geq 5$	—	—	—	—	6227	6272	↑
$c_{n-5}, n \geq 6$	—	—	—	—	—	6317	↑

超声临界折射纵波在 45# 钢标定试件上的测量声速产生上述变化的原因可以从测量声时和接收临界折射纵波幅值两方面进行分析。首先, 测量声时量级越小, 测量声程越短, 声时测量相对误差就越大, 测量声时均方根误差随声程变化曲线如图 9 所示, 均方根误差先急剧增大后急剧减小并在声程大于 60 mm 后稳定, 可以看出 40 mm 声程点是其均方根误差变化的临界点。其次, 接收临界折射纵波幅值变化同样随声程增加先增大后减小, 40 mm 声程点也是幅值变化的临界点, 如图 10 所示。后续其他标定试件声速计算, 声程选择 d_3 和 d_4 , 其中, $d_3 = 40 \text{ mm}$ 为参考声程。

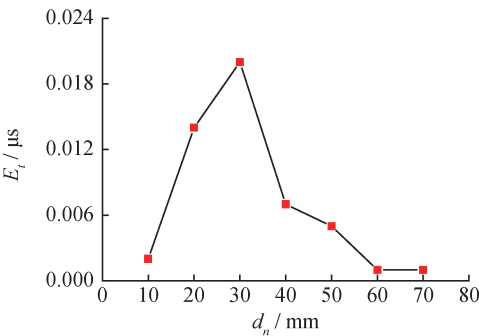


图 9 测量声时均方根误差随声程变化曲线
Fig.9 Variation of the root mean square error of wave measuring time with measuring distance

2.2.3 接收临界折射纵波幅值的测量及衰减系数的计算

选择收、发探头间距 $d_3 = 40 \text{ mm}$ 和 $d_5 = 60 \text{ mm}$ 时的接收声波相对幅值 B_3 和 B_5 , 代入公式(2)计算声波衰减系数, d_3 时的接收声波相对幅值为参考幅值。测得的 45# 钢标定试件接收临界折射纵波幅值及计算的衰减系数见表 5。

标定试件布氏硬度与临界折射纵波计算衰减系数之间的变化关系曲线如图 11 所示, 由图 11 可知, 两者之间没有明显的单调变化规律, 因此本文不选择临界折射纵波计算衰减系数的方法来评定 45# 钢标定试件布氏硬度。

2.3 构建验证检测声速与标定试件布氏硬度映射关系模型

通过上述检测参数筛选, 可以看出检测声波计算声速与标定试件布氏硬度关联性较强, 试验得出了检测超声波传播时间采集的合理声程, 则

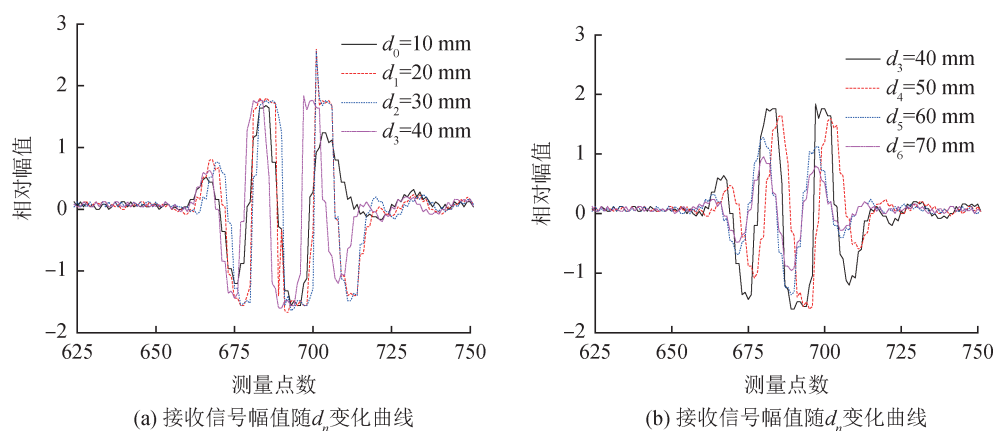


图10 接收声波幅值随声程变化曲线图

Fig.10 The variation of received wave amplitude with measurement distance

表5 标定试件临界折射纵波测量参数

Tab.5 The critical refractive longitudinal wave measuring parameters of the calibration specimens

热处理方法	相对波幅 B_3	相对波幅 B_5	衰减系数 $\alpha / (\text{dB} \cdot \text{mm}^{-1})$
A	1.76	1.28	0.1383
N	1.76	1.24	0.1521
600T	1.76	1.32	0.1249
400T	1.80	1.36	0.1217
200T	1.80	1.28	0.1481
WQ	1.80	1.28	0.1481

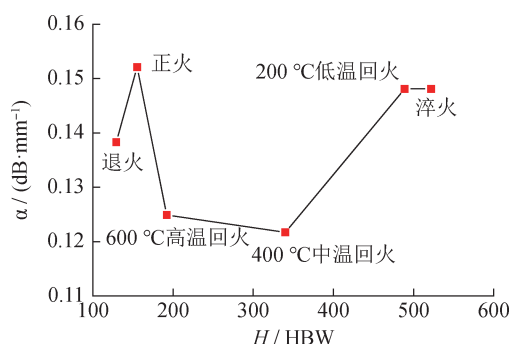


图11 计算衰减系数随布氏硬度变化曲线

Fig.11 Variation curve of the calculating attenuation coefficient with Brinell hardness

计算声速公式(1)可以变换为公式(3), 后续采用公式(3)计算不同热处理条件下标定试件临界折射纵波的传播声速。

$$c_{4-3} = \frac{d_4 - d_3}{t_4 - t_3} \quad (3)$$

通过超声检测, 可获得标定试件临界折射纵波在指定声程的传播时间 t_3 和 t_4 , 按公式(3)计算采用淬火、低温回火、中温回火、高温回火、正火、退火条件处理的标定试件检测声波声速, 分别为 5938、6002、6050、6061、6083、6124 m/s。图12展示了计算声速随标定试件不同热处理方法的变化曲线, 该曲线近似呈线性单调减小状, 表明计算声速与标定试件热处理方法具有明显的关联性。

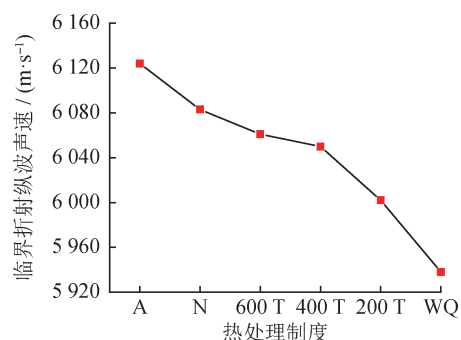


图12 计算声速与标定试件热处理方法关系曲线

Fig.12 Curve of relationship between the calculating ultrasonic velocity and the calibrated specimen heat treatment methods

通过函数关系匹配法, 采用线性回归函数对计算声速和45#钢标定试件布氏硬度之间的关系进行拟合, 拟合曲线如图13所示, 拟合所建映射关系数学模型见公式(4), 式中 H 为45#钢标定试件预测布氏硬度。

$$c_{4-3} = -0.35289H + 6150.45574 \quad (4)$$

验证试件为760 °C 淬火45#钢试件, 在相同条件下, 根据式(3), 通过超声试验系统, 测试声波在验证试件声程分别为 d_3 和 d_4 时对应的声时 t_3 和 t_4 ,

t_3 和 t_4 分别为22.674 μs 和24.325 μs ,代入式(3)计算验证试件的计算声速为6057 m/s,通过式(4)获得验证试件声学预测布氏硬度为264.8 HBW,用布氏硬度计实试验验证试件的布氏硬度为254 HBW,得到映射关系模型预测硬度相对误差为4.25%,满足工程应用中10%的允许误差要求。

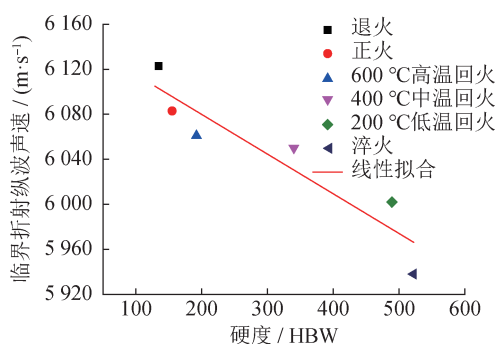


图13 标定试件硬度与超声临界折射纵波声速线性拟合曲线

Fig.13 The linear fitting between calibration specimen hardness and critical refractive longitudinal wave velocity

2.4 试验结果分析

从合金钢试件力学性能标定试验可看出,不同热处理后45#钢标定试件的临界折射纵波计算声速不同,如图12所示,退火试件声速最快,之后依次为正火试件、高温回火试件、中温回火试件、低温回火试件,淬火试件最慢。不同热处理标定试件对应不同的布氏硬度,同步反映在超声声速上。

图7中,从标定试件显微组织定性分析,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,与珠光体组织相比,铁素体组织弹性模量大^[16],声速与弹性模量大小呈单调增减变化关系。退火处理极大消除了组织内部应力,最终导致退火试件测试布氏硬度最小、计算声速最大,试件拉伸断口呈现明显的蜂窝状韧性断裂特征。

正火试件的显微组织仍由铁素体和珠光体组

织构成,与退火试件相比,正火试件珠光体组织含量更高,铁素体组织含量减少,且珠光体组织片层间距减小,珠光体比铁素体组织弹性模量小。此外,正火试件比退火试件冷却速度快,晶粒尺寸变大,同时晶粒内部产生残余应力,这些因素综合导致正火试件比退火试件超声声速慢,同时布氏硬度有所增加,但拉伸断裂断口仍为韧性断裂。

对于不同温度的回火试件,声速比淬火试件快,随着回火温度的增加,试件晶粒尺寸变大,声速逐渐变快,但仍然比正火试件声速慢,这是由于回火处理使试件不同程度地释放了马氏体相变引起的组织应力,增加了组织的弹性模量,缓解了晶格微观应变,即释放了晶格内部残余应力。回火试件布氏硬度较淬火试件不同程度的降低,但比正火试件大,随着回火温度的上升,200 °C低温条件下的回火试件马氏体组织转变为针状的回火马氏体,拉伸断裂断口为脆性断裂;400 °C中温条件下回火试件中的马氏体针状形态逐渐消失,转变为回火屈氏体组织,拉伸断裂断口转变为韧性断裂;600 °C高温条件下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,组织基体上分布着细小的碳化物颗粒,其声速进一步变快,布氏硬度进一步降低,试件韧性增强,拉伸断裂断口为韧性断裂。

对于淬火试件,显微组织为马氏体组织,组织内部由于晶格体积发生变化而产生大量晶界、高密度位错以及极高的内部张力和残余应力,马氏体组织的弹性模量比铁素体、珠光体、不同回火温度组织的弹性模量小,淬火冷却速率最快,晶粒尺寸最小,这些因素综合导致淬火试件声速最慢,而布氏硬度最大,拉伸断裂为典型的脆性断裂。

通过上述定性分析,基本理清了合金钢显微组织对不同热处理合金钢试件布氏硬度-临界折射纵波声速之间定量映射关系影响的变化规律,变化规律如图14所示,从图14中可以看出,随着标

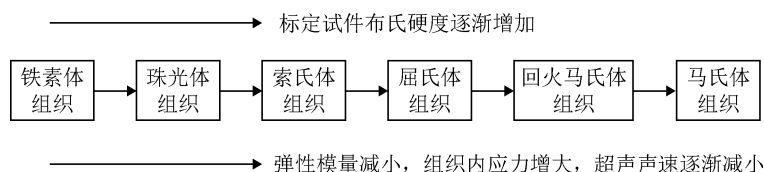


图14 标定试件布氏硬度及测量声速随微观组织的变化规律

Fig.14 The variation law of Brinell hardness and measured wave velocity with microstructure for the calibration specimens

定试件的显微组织由铁素体最终转变为马氏体,组织的弹性模量减小,计算超声声速减小,标定试件宏观布氏硬度增大。上述变化规律从标定试件微观特性的角度,定性解释了所建合金钢布氏硬度-声速关系模型的合理性。

3 结论

通过45°钢布氏硬度标定试验,明确了影响超声临界折射纵波在合金钢标定试件传播声速的因素:检测声波的传播声程和标定试件本征的微观特性,其中试件的微观特性对声速的影响起着决定性作用。临界折射纵波声速测量时声程的临界值为40 mm;试验所建45°钢试件布氏硬度标定模型,验证试件布氏硬度的预测误差为4.25%,满足实际工程应用要求;试验所得检测声波衰减系数与标定试件布氏硬度没有明显的单调变化关系,因此不选择检测声波衰减系数参量进行合金钢布氏硬度评定。

通过高准确度临界折射纵波声时测量技术和标定试件微观组织表征技术,建立了超声临界折射纵波声速定量评定合金钢布氏硬度的超声无损检测硬度试验方法。试验结果表明,该方法可行的,为其他类型合金钢硬度超声评定和合金钢其他力学性能参数超声无损评定提供了可借鉴的方法,具有很强的实际工程应用推广价值,特别适合应用于装备构件硬度的在线或在役监/检测。

参考文献

- [1] 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(特邀)[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(4): 1-9.
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 (invited) [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(4): 1-9. (in Chinese)
- [2] PAULO M, MÁRIO M, RUI P S, et al. Microstructure and hardness properties of a S690QL steel welded joint [J]. Procedia Structural Integrity, 2024, 54(1): 340-353.
- [3] AFFANDIA, IQBALT, ARYARN, et al. The effect of the tempering process on the hardness and impact strength on NS 4340 steel [J]. AIP Conference Proceedings, 2023, 2702(1): 1-4.
- [4] JOSHI V, NAGDEVE L, MOONA G, et al. Mechanical testing of hybrid LM30 metal matrix composite fabricated through stir casting route[J]. Indian Journal of Pure & Applied Physics, 2023, 61(1): 33-42.
- [5] HUSSAIN A, KHAN S A, SUDARSHAN K, et al. Influence of defect dynamics on the nanoindentation hardness in NiCoCrFePd high entropy alloy under high dose Xe+3 irradiation[J]. Materials Science & Engineering A, 2023, 863: 1-5.
- [6] 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)
- [7] 徐春广,栗双怡,黄院生,等. 基于扭矩法和超声法检测螺栓预紧力的误差分析[J]. 电子机械工程, 2023, 39(2): 1-4.
XU C G, SU S Y, HUANG Y S, et al. Error analysis of bolt pre-tightening force detection based on torque and ultrasonic method [J]. Electro-Mechanical Engineering, 2023, 39(2): 1-4. (in Chinese)
- [8] LIAN Y, DU F, XIE L, et al. Application of laser ultrasonic testing technology in the characterization of material Properties: A review [J]. Measurement, 2024, 234(1): 114855-114859.
- [9] LIU X C, ZHANG R H, WU B, et al. Quantitative prediction of surface hardness in 12CrMoV steel plate based on magnetic barkhausen noise and tangential magnetic field measurements [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2018, 37(2): 38-45.
- [10] 程志远,宋凯,门平,等. 磁巴克豪森噪声重构磁滞参数的硬度测定方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(10): 117-125.
CHENG Z Y, SONG K, MEN P, et al. Hardness determination method based on reconstructed magnetic hysteresis parameters with magnetic Barkhausen noise [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(10): 117-125. (in Chinese)
- [11] 张猛,刘秀成,王建国,等. 列车车轮钢表面硬度的微磁定量检测方法[J]. 实验力学, 2023, 38(4): 425-434.
ZHANG M, LIU X C, WANG J G, et al. Micromagnetic and quantitative evaluation method for surface hardness of

- train wheel steel [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2023, 38(4): 425-434. (in Chinese)
- [12] 谭君洋, 夏丹, 董世运, 等. 特征参量选择对磁巴克豪森噪声评价材料硬度的影响[J]. 中国表面工程, 2021, 34(1): 8-15.
- TAN J Y, XIA D, DONG S Y, et al. Influence of characteristic parameter selection on material hardness evaluation by magnetic Barkhausen noise [J]. China Surface Engineering, 2021, 34(1): 8-15. (in Chinese)
- [13] 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. (in Chinese)
- [14] 李家伟, 陈积懋. 无损检测手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 224-226.
- LI J W, CHEN J M. Handbook of nondestructive testing [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2002: 224-226. (in Chinese)
- [15] SONG W T, XU C G, PAN Q X, et al. Nondestructive testing and characterization of residual stress field using an ultrasonic method [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2016, 29(2): 365-371.
- [16] ELRAYES M M, ELDANAF E A, ALMAJID A A. Ultrasonic characterization of heat-treatment effects on SAE-1040 and -4340 steels [J]. Journal of Materials Process-

ing Technology, 2015, 216(1): 188-198.

(本文编辑: 刘宇轩, 米若鑫)



第一作者: 门平(1983—), 男, 高级工程师, 博士, 主要研究方向为军事计量技术与管理, 装备构件无损检测评价与表征。



通信作者: 邓丹(1987—), 女, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为无损检测技术与管理, 包括多种先进检测技术理论与实验研究、无损检测技术相关标准制定研究。



通信作者: 吴玲媛(1998—), 女, 助理工程师, 本科, 主要研究方向军事计量技术及管理、脉冲及时频理论与检测技术研究。