金属材料的超声衰减特征及辨识的新方法

刘小荣^①, 贺西平^{①*}, 张宏普^①, 贺升平^②, 尼涛^②, 崔东^①, 卢康^①

① 陕西师范大学物理学与信息技术学院, 陕西省超声重点实验室, 西安 710119;

② 宝鸡高新技术研究所, 宝鸡 721013

* 联系人, E-mail: Hexiping@snnu.edu.cn

2015-07-02 收稿, 2015-08-07 修回, 2015-08-21 接受, 2016-01-04 网络版发表

国家自然科学基金(11374201)资助

摘要 利用超声技术研究了辨识金属材料的方法. 以成分相近、热处理温度相同和成分相同但热处理温度不同的多个金属材料为例, 计算了金属材料对不同频率超声波的衰减系数, 分析了同一频率下采样率对超声衰减谱稳定性的影响, 研究了金属材料的微观组织对超声衰减的影响. 结果表明, 采样率越高, 衰减谱的多次实验计算越趋于稳定; 金属材料的超声衰减谱与其微观组织结构密切相关, 其携带有金属材料的微观组织特征信息; 利用金属间超声衰减谱相关系数可辨识金属材料, 对贵重金属、金属文物等的防伪与辨识提供了一定的参考依据.

关键词 金属材料, 超声衰减谱, 相关系数, 微观组织, 防伪, 辨识

金属材料广泛应用于航空、医疗、原子能和机械制造等重要领域, 但经常有劣质、仿造金属材料流入市场, 由于其硬度、疲劳强度、延伸率等力学性能不达标而发生事故, 造成人员伤亡、财产及其他重大损失, 这种现象已引起了人们的高度重视. 目前, 国内外市场受假冒伪劣产品的影响非常严重, 每年全世界假冒伪劣产品的成交额已占贸易总额的10%左右, 特别是金属材料、贵重金属文物及军事装备等重大应用, 需要具备高分辨能力的金属防伪与辨识技术.

超声无损检测技术具有非破坏性特点, 有直接、快速、适用范围广等优点, 利用该技术无损评价金属材料已成为研究的热点^[1-4]. 近来, 以超声背向散射法、衰减法、声速法、超声多尺度衰减法、频谱分析法等研究方法用来无损评价金属材料的晶粒形状、晶粒尺寸及晶粒取向等微观组织特征信息^[5-9], 反映金属材料的力学性能, 提高了金属质量的评价水平. 文献[10]利用超声技术无损表征304不锈钢金属材料的平均晶粒尺寸. 文献[11]利用超声波对铸件的缺陷进

行定位及缺陷评估. 文献[12]利用超声波在金属材料中的底面回波信号, 基于材料呈现出的不同声参量对材质不同的金属材料进行直接和间接识别. 文献[13]研究了多种相结构合金钢不同热处理转变产物的组织特点, 40Cr, 38CrMoAl, GCr15SiMn金属的不同热处理(正火、淬火/退火、淬火+低温回火及淬火+高温回火)转变产物的显微组织不同, 不同热处理产物间的超声衰减系数 α 有差异, 且低温回火产物的衰减系数 α 小于高温回火产物的衰减系数 α , 高温回火产物的衰减系数 α 小于正火产物的衰减系数 α .

超声波在多晶金属材料中传播时, 由于晶粒的各向异性及排列取向的无规律性, 以及晶粒尺寸、晶粒度、相的种类、孔隙率、脱溶物等影响而发生散射衰减. 相关研究表明^[14-16], 散射衰减与材料的微观组织特征密切相关. 为了防止假冒伪劣材料混入市场, 本文基于金属材料的背向散射信号及其金相组织的分析, 从研究金属材料的超声衰减特性的角度, 尝试对金属材料进行无损防伪及辨识. 例如, 对真假相

引用格式: 刘小荣, 贺西平, 张宏普, 等. 金属材料的超声衰减特征及辨识的新方法. 科学通报, 2016, 61: 844-854

Liu X R, He X P, Zhang H P, et al. Ultrasonic attenuation characteristics and a new method of identification of metal materials (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 844-854, doi: 10.1360/N972015-00715

混、外观相同的金属材料或构成某产品中的金属部件,在不破坏原始材料的条件下,准确、无损地辨识出真材料. 这将为金属材料的防伪及辨识技术提供一种新的依据,在一定程度上推进超声应用技术的发展.

1 实验方法

1.1 信号采集及实验样品

超声信号采集系统如图1所示. Olympus 5077PR超声脉冲发射/接收仪发射超声信号于收发一体式探头,声波通过试样底面反射后再由探头接收. 探头频率分别为2.25, 3.5, 5, 7.5, 10和20 MHz, 水作为耦合剂. TektronixDPO5034B示波器在短时间内5000次累计采样作为一次均值信号输出,可得到比较稳定、准确的波形,将得到的不同金属材料的声信号输入计算机,利用MATLAB软件编辑程序进行信号相关计算及分析.

选用牌号为1Cr17Ni2, 2Cr13和3Cr13的不锈钢金属作为实验对象. 将直径为50 mm的不锈钢金属材料切割成厚度为15 mm的胚料,再按表1中的条件进行热处理. 其中, 1#, 2#, 3#试样是成分相近且热处理温度相同的金属, 4#, 5#, 6#试样为成分相同、热处理温度不同的金属.

1.2 衰减谱计算

以1#试样1Cr17Ni2为例, 计算金属材料的衰减谱, 探头频率为10 MHz, 采样率为500 MS/s, 采集超声波在金属试样中的回波波形如图2所示. 超声波在金属材料中传播, 随着距离的增加, 会因散射衰减、吸收衰减、扩散衰减、表面反射衰减及耦合层衰减, 声波能量逐渐衰减. 其中扩散衰减与传播波形、探头直径和传播距离有关, 与传播介质无关; 表面反射衰减和

表1 材料信息

Table 1 The information of material

试样编号	金属牌号	热处理温度(℃)	加热温度(℃/min)	保温时间(h)	试样厚度(mm)
1#	1Cr17Ni2	852	5	3	15.0
2#	2Cr13	852	5	3	15.1
3#	3Cr13	852	5	3	15.0
4#	3Cr13	259	5	3	15.2
5#	3Cr13	555	5	3	15.1
6#	3Cr13	970	5	3	15.2

图2 材料的超声回波波形

Figure 2 The ultrasonic echo signal of material

耦合层衰减取决于试样表面的粗糙度和耦合层对声能的损耗. 因此, 对于多晶体金属材料, 测试条件相同时, 声波能量的衰减主要为散射衰减, 其仅受传播介质的物理性质影响. 对时域信号加窗截取一次和二次底面回波信号, 分别记为 $U_1(t)$ 和 $U_2(t)$, 则金属的声衰减系数可表示为^[6,7,15~17]

$$\alpha = \frac{1}{2d} 20 \lg \frac{\max(|U_1(t)|)}{\max(|U_2(t)|)}, \quad (1)$$

式中, d 为试样的厚度. (1)式利用超声信号在金属材料中的两个回波信号的峰值数据计算了材料的衰减系数, 主要研究所发射超声信号的整体衰减程度. 而对于只存有细微差别的金属材料的研究, 仅选用信号的两个回波峰值数据已不能满足要求. 超声波传播于材料中, 与复杂的组织结构相互作用后发生散射衰减, 散射信号携带有金属材料的更多特征信息^[1], 可以对背向散射信号进行分析获得更多的有用

图1 (网络版彩色)超声信号采集系统示意图

Figure 1 (Color online) Schematic diagram of acquisition system of ultrasonic signal

数据. 因此, 提高信号采集精度后图2中一次和二次回波间完整的背向散射信号如图3(a)所示, 用矩形窗函数截取中间局域背向散射信号如图3(b)所示, 并记为 $f(t)$, 长度为 N . 图3(b)已对截取的局域背向散射信号两等份后记为 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$, 分别表示超声信号在材料中传播相邻等距离 Δd 后的背向散射信号, 信号长度均为 $N/2$. 将 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 代入(1)式可得到

$$\alpha(t_i) = \frac{2}{\Delta d} \lg \frac{f_1(t_i)}{f_2(t_{i+1})}, \quad (2)$$

式中, $1 \leq i \leq N$. 上式的计算利用了材料相邻局域的背向散射信号, $\alpha(t_i)$ 表示超声波在材料中局域衰减的相对幅度. 由于背向散射信号的测试会受材料厚度 d 的影响, 故(2)式对厚度相同材料的相同局域背向散射信号的研究才有意义, 这时 Δd 为常数. 将(2)式称为金属材料的时域衰减谱. 时域和频域是对信号分析基本方法, 信号的频域往往也含有丰富的信息. 对(2)式中局域背向散射信号 $f_1(t)$ 和 $f_2(t)$ 通过加窗函数、FFT变换得到频域幅度谱 $F_1(\omega)$ 和 $F_2(\omega)$, 如图4所示,

则(2)式可表示为

$$\alpha(\omega_i) = \frac{2}{\Delta d} \lg \frac{f_1(\omega_i)}{f_2(\omega_{i+1})}. \quad (3)$$

上述(2)和(3)式均表示超声波在材料局域的相对衰减, 是金属材料在时域和频域的相对衰减谱, 文中均称为衰减谱. 衰减谱对金属组织非常敏感, 组织有细微差异的金属, 其衰减谱也有明显的区别.

对试样进行金相处理, 分析超声衰减与金属材料的微观组织的关系. 以衰减谱作为金属材料的防伪信息, 建立一种算法与系统对不同金属材料进行辨识.

2 结果与分析

2.1 衰减谱相关系数

以1#金属材料的衰减谱 $\alpha_1(\omega)$ 和2#金属材料的衰减谱 $\alpha_2(\omega)$ 为例. 这两者之间的衰减谱相关系数的表达式可表示为

图3 材料的超声背向散射信号. (a) 背向散射信号; (b) 局域背向散射信号

Figure 3 The backscattered wave of material. (a) The backscattered wave; (b) the local backscattered wave

图4 $f_1(t)$ (a)和 $f_2(t)$ (b)在频域中的幅度谱

Figure 4 The relative amplitude of $f_1(t)$ (a) and $f_2(t)$ (b) in frequency domain

$$r[\alpha_1(\omega), \alpha_2(\omega)] = \frac{\sum \alpha_1(\omega) \cdot \alpha_2(\omega) - \frac{\sum \alpha_1(\omega) \cdot \sum \alpha_2(\omega)}{n}}{\sqrt{\left\{ \sum [\alpha_1(\omega)]^2 - \frac{[\sum \alpha_1(\omega)]^2}{n} \right\} \cdot \left\{ \sum [\alpha_2(\omega)]^2 - \frac{[\sum \alpha_2(\omega)]^2}{n} \right\}}}, \quad (4)$$

式中, n 为衰减谱数据点的个数.

2.2 衰减谱的稳定性分析

以1#金属试样1Cr17Ni2为例分析采样率对衰减谱的影响, 探头频率为10 MHz. 利用相关性分析时域和频域衰减谱计算的稳定性. 在同一采样率下, 以上述超声信号采集系统对1#金属试样采集15次背向散射信号, 计算相应衰减谱, 并将这15次衰减谱的均值作为该金属试样的标准衰减谱, 再对1#试样独立采集5次信号并分别计算衰减谱, 然后计算这5次衰减谱与标准衰减谱间的相关系数, 最后以衰减谱相关系数的波动性分析衰减谱计算的稳定性, 波动范围为

$$\phi = \max(\alpha_1(\omega), \alpha_2(\omega), \dots, \alpha_j(\omega)) - \min(\alpha_1(\omega), \alpha_2(\omega), \dots, \alpha_j(\omega)), \quad (5)$$

式中, j 表示第 j 次计算, $j=1, 2, 3, 4, 5$. 对于同一采样率, 若多次独立测试后计算的衰减谱相对于标准衰减谱的波动范围 ϕ 越小, 则认为在该采样率下衰减谱的计算越稳定, 实验的可重复性越好. 用不同采样率采集信号, 1#金属试样衰减谱相关系数计算的波动范围 ϕ 与采样率的关系如图5所示. 由图可见, 探头频率为10 MHz时, 采样率的高低对衰减谱的稳定性有一定影响. 采样率低于200 MS/s时, 多次测试计算的衰减谱相关系数的波动性较大, 随着采样率提高, 衰减谱相关系数的波动范围减小, 衰减谱趋于稳定. 采样率高于500 MS/s时, 衰减谱基本稳定, 频域衰减谱相关系数的波动范围保持0.02左右, 时域衰减谱相关系数的波动范围保持0.04左右, 频域和时域实验结果均有很好的可重复性. 因此, 实际中可选用高采样率, 以使衰减谱的计算有更好的稳定性.

2.3 金属材料的超声衰减谱与微观组织特征

探头频率为10 MHz, 测试各金属试样的局域背向散射信号 $f(t)$ 并进行衰减谱计算, 成分相近、热处理温度相同的1#, 2#, 3#金属试样、成分相同但热处理温度不同的4#, 5#, 6#金属试样的衰减谱如图6所示.

图5 衰减谱的稳定性与采样率的关系

Figure 5 The relationship between ϕ and the sampling rates

选用2.25, 3.5, 5, 7.5, 10和20 MHz探头频率, 分别计算成分相近金属1#, 2#, 3#的超声衰减系数, 超声衰减系数与探头频率的拟合曲线如图7所示. 计算3Cr13金属经259, 550, 852, 970℃热处理后(即3#, 4#, 5#, 6#金属)的超声衰减系数, 对应超声衰减系数与热处理温度的关系如图8所示.

对上述各金属试样留余的材料进行小样切割、镶嵌、打磨处理, PG-2型金相试样抛光机抛光, 配置浸蚀剂对该小样的抛光面进行浸蚀, 再用LWD300LCS型金相显微镜对各小样进行金相分析, 得到各金属试样的金相图如图9所示.

在多晶材料中, 声波与晶粒的平均相互作用长度有关^[18], 金属组织对热处理温度有一定的依赖关系^[19,20]. 晶粒的形状及取向对声波的衰减也有一定的影响, 声波能量在这些不同组织中的衰减程度不同^[21]. 由图6可见, 同一探头频率, 成分相近金属试样的衰减谱有明显的区别. 对于同一金属3Cr13, 热处理温度不同时, 衰减谱也不同; 由图7可见, 对于3Cr13金属, 探头频率不同时, 金属材料的超声衰减系数不同, 且探头频率越高, 超声衰减系数越大. 由图8可见, 同一金属, 热处理温度不同, 金属材料的超声衰减系数也不一样.

金属随热处理温度的升高, 合金元素易于扩散, 高温不仅促使碳化物的转变, 也加速了贫铬区含铬

图6 各金属材料衰减谱

Figure 6 The ultrasonic attenuation spectrum of metal materials

图7 超声衰减系数与探头频率的关系

Figure 7 The relationship between the central frequencies and ultrasonic attenuation coefficients

图8 超声衰减系数与热处理温度的关系

Figure 8 The relationship between heat treatments temperature and ultrasonic attenuation coefficients

量向平衡状态的转变, 发生奥氏体、屈氏体、珠光体等组织的转变^[22]; 随着碳含量的增加, 渗碳体相也相应增加. 金属材料的热处理温度不同, 机械性能也有相应的变化, 得到的显微组织也不一样^[23]. 1#, 2#

和3#试样为热处理温度相同但成分相近的马氏体不锈钢, 由图9可以看出, 它们的显微组织有一定差异, 通过每种金属独特的金相图可以反映该金属的组织信息^[24]. 相对于2#和3#金属, 1#金属的晶粒尺寸较

图9 (网络版彩色)各金属试样的金相图

Figure 9 (Color online) OM images of all metal samples

大,且组织中的碳化物颗粒明显多且粗大,声能衰减较大,声衰减系数较大. 3#, 4#, 5#, 6#金相图分别表示3Cr13金属经852, 259, 550, 970℃热处理后的显微组织. 3Cr13金属的含碳量比较高,组织中的碳化物比较多,是一种过饱和的固溶体,因为它溶解了大量的碳,力学性能表现出很高的硬度^[25]. 热处理温度为259℃左右时,3Cr13金属处于残余奥氏体转变期,这时,部分碳从过饱和固溶体中共格析出形成了过渡型碳化物,大量的铬仍保持在固溶体中,晶格的正方度因碳化物的析出而减小,析出的碳化物不多,声能

在该组织中的衰减相对较小. 热处理温度为550℃左右时,残余奥氏体已经分解为 α 相和合金碳化物(Cr_7C_3),这时,铁素体中的位错密度降低,剩下的位错通过重排,多边化形成位错网络,将铁素体晶粒分割成许多亚晶粒,铁素体基体内分布着细小的粒状碳化物,形成屈氏体,但仍属于马氏体组织^[26,27],金属的强度、塑性及冲击韧性的配合最佳,耐腐蚀性能也较高. 合金元素Cr的扩散能力加强,析出的合金碳化物较多且聚集长大,声能在该组织中的衰减比较严重,超声衰减系数较大. 随着热处理温度的升高,

金属中合金碳化物聚集长大的速度更快并且球化,弥散强化的作用逐渐减小直至消失,基体 α 相再结晶完全,位错密度低的等轴状 α 相逐步取代回复后针状组织.热处理温度为852℃左右时,组织仍由铁素体和粒状碳化物组成,但碳化物颗粒已明显粗化,出现珠光体,超声衰减相对降低.热处理温度为970℃左右时,碳化物较少,声能损耗减少,衰减系数相对偏小.该分析结果与图8中的关系相符,说明超声波传入金属后,与金属的微观组织相互作用,其衰减谱携带有金属材料的微观组织特征信息,对金属组织的改变非常敏感.金属微观组织发生很小的改变,其衰减谱也有比较明显的变化,且不同金属间的衰减谱的差别很大,利用衰减谱相关系数的计算可实现金属材料的辨识.

3 金属辨识

3.1 辨识系统

根据衰减谱的稳定性分析,采样率确定为500 MS/s.实验选择探头频率为10 MHz,对成分相近金属和成分相同、热处理温度不同的多个金属材料的衰减谱进行相关系数计算和分析.把已知的、需要辨识的金属材料规定为标准试样,将未知的、相混的金属材料称为待辨识试样.以3#金属作为标准试样,按上述采集信号的方法对标准试样采集 n 次超声信号,并获取其局域背向散射信号 $f(t)$.以频域为例,计算相应衰减谱 $\alpha(\omega)$,分别记为 $\alpha_1(\omega), \alpha_2(\omega), \dots, \alpha_m(\omega)$,其中 m 表示第 m 次计算的结果, $m=1,2,\dots,n$,并将这 n 次衰减谱的均值 $\alpha_{3\#}(\omega)$ 作为3#金属的标准衰减谱(即3#金属的防伪信息),其中 $\alpha_{3\#}(\omega)$ 表示为

$$\alpha_{3\#}(\omega) = \frac{1}{n} \sum_{m=1}^n \alpha_m(\omega), \quad (6)$$

n 越大,得到试样的标准衰减谱越准确,这里取 $n=15$.标准衰减谱与标准试样多次实验计算所得衰减谱的相关系数范围为 $r_{\min} \sim r_{\max}$,规定标准试样的衰减谱相关系数为 $r=(r_{\min}+r_{\max})/2$,金属辨识的阈值为 $\Delta=(r_{\max}-r_{\min})/2$.将标准试样的标准衰减谱作为防伪信息,具体流程如图10所示.标准试样的衰减谱 $\alpha(\omega)$ 与待辨识试样的衰减谱 $\alpha_k(\omega)$ 的相关系数为 r_k ,若 $r-r_k \leq \Delta$,认为这两种金属为同种金属,否则为异种金属,且金属间的衰减谱相关系数越大,认为其组织结构越相近.辨识流程如图11所示.

3.2 辨识

以辨识3#金属为例,将3#金属作为标准试样,获得3#金属的防伪信息后与其余5种金属试样相混乱作为待辨识试样,将混乱的6种金属试样随机重新编号为a#, b#, c#, d#, e#, f#,实验需要从相混的待辨识试样中找出3#金属试样.

首先,在时域和频域中,按上述方法对3#金属试样计算标准衰减谱,并留作该金属的防伪信息.

其次,对该金属采集15次局域背向散射信号 $f(t)$,计算 r 和 Δ .时域中,15次计算的衰减谱与标准衰减谱的相关系数分别为0.8923, 0.9465, 0.9521, 0.9086, 0.9462, 0.9025, 0.9248, 0.9439, 0.9169, 0.94461, 0.9515, 0.9005, 0.9358, 0.9456, 0.9359,则3#金属的时域衰减谱相关系数 r 为0.9222,辨识阈值 Δ 为0.0299;频域中,各次计算的衰减谱与标准衰减谱的相关系数分别为0.8365, 0.8267, 0.8457, 0.8326, 0.8167, 0.8254, 0.8394, 0.8037, 0.8301, 0.8298, 0.8069, 0.8106,

图10 获取金属材料防伪信息的流程图

Figure 10 The flow chart of anti-counterfeiting information of materials

图11 辨识流程图

Figure 11 The flow chart of identification

0.8267, 0.8427, 0.8365, 则3#金属的频域衰减谱相关系数 r 为0.8242, 辨识阈值 Δ 为0.021.

然后, 分别采集各待辨识试样的局域背向散射信号 $f(t)$, 计算相应衰减谱, 再计算标准衰减谱与各金属衰减谱的相关系数 r_k , 其中 k 表示编号为 k #金属,

$k=1,2,3,\dots,6$. 5次实验后各金属试样与标准试样间时域和频域衰减谱相关系数如表2所示.

由表2的数据可见, 编号为c#的金属试样的衰减谱与标准衰减谱的相关系数最大, 说明c#金属的组织特征与标准试样相同. 另外, 相对于其他金属试

表2 标准试样与各金属试样间的衰减谱相关系数

Table 2 The correlation coefficient of ultrasonic attenuation spectrum between standard sample and others

实验次数		时域					频域				
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
试样编号	a#	0.2245	0.2229	0.2086	0.2654	0.2238	0.1952	0.2065	0.2163	0.1934	0.2236
	b#	0.4352	0.4615	0.4758	0.4608	0.4830	0.4433	0.4368	0.4268	0.4309	0.4291
	c#	0.9294	0.9442	0.9334	0.9020	0.9381	0.8361	0.8219	0.8301	0.8109	0.8264
	d#	0.6351	0.6362	0.6354	0.6530	0.6710	0.3626	0.3862	0.3629	0.3706	0.3739
	e#	0.5120	0.5325	0.5494	0.5488	0.5434	0.4495	0.4409	0.4539	0.4364	0.4513
	f#	0.6569	0.6109	0.6116	0.6145	0.6192	0.4076	0.4138	0.3967	0.4210	0.4107

图12 (网络版彩色)标准试样与各金属试样间的辨识结果. (a) 时域辨识; (b) 频域辨识

Figure 12 (Color online) The identification between standard sample and others. (a) Time domain; (b) frequency domain

样, d#金属试样与标准试样的组织更为相近, 即d#金属与标准试样更相近.

最后, 利用衰减谱相关系数与阈值的关系辨识金属材料. 当 $r-r_k > \Delta$ 时, 为异种金属材料, $r-r_k \leq \Delta$ 即为同种金属材料. 各金属试样与标准试样间5次实验计算的时域辨识结果如图12(a), 频域辨识如图12(b)所示, 图中横坐标为待辨识材料的编号, 纵坐标为 $r-r_k$, 图中虚线表示阈值 Δ .

依据上述的辨识方法, 由图12可明显看出, c#金属与标准金属之间满足 $r-r_k < \Delta$, 则待辨识金属试样中编号为c#的金属为我们寻找的3#金属试样, 时域和频域的辨识结果均正确, 且5次实验辨识结果一致, 各金属间的辨识效果很好.

4 结论

对成分相近的1Cr17Ni2, 2Cr13, 3Cr13不锈钢和3Cr13不锈钢经不同温度热处理后的组织特征及超声衰减特性做了研究, 得到以下结论.

(1) 衰减谱对金属材料的成分及热处理温度的改变非常敏感, 与金属材料的金相显微组织结构密切相关. 对于某一组织, 高频时声衰减较大; 同一材质, 随着热处理温度的升高, 其组织转变材料的超声衰减系数变化很大.

(2) 低采样率采样时, 金属间衰减谱相关系数计算结果的波动性大. 选用较高的采样率, 衰减谱相关系数的多次实验计算结果的波动性小, 实验有较好的可重复性.

(3) 对于金属材料, 超声波在其中的传播受其微观组织结构的影响很大. 各金属材料的衰减谱携带有其微观组织特征信息. 对于成分相近的金属、成分相同但热处理温度不同的金属, 衰减谱有明显的差异, 衰减谱间的相关系数相差很大, 有很好的区分度. 实验结果表明, 金属间的时域和频域衰减谱的区分度良好, 将衰减谱作为金属材料的防伪信息, 以衰减谱相关系数的计算可辨识不同金属材料. 可对贵重金属材料、金属文物等的防伪与辨识提供一定的参考依据.

参考文献

- Li J, Yang L, Rokhlin S I. Effect of texture and grain shape on ultrasonic backscattering in polycrystals. *Ultrasonics*, 2014, 54: 1789–1803
- Thompson R B, Margetan F J, Haldipur P, et al. Scattering of elastic waves in simple and complex polycrystals. *Wave Motion*, 2008, 45: 655–674
- Yang L, Li J, Rokhlin S I. Ultrasonic scattering in polycrystals with orientation clusters of orthorhombic crystallites. *Wave motion*, 2013, 50: 1283–1302
- Du H L, Turner J A. Ultrasonic attenuation in pearlitic steel. *Ultrasonics*, 2013, 54: 882–887
- Barguet L, Pezerat C, Bentahar M, et al. Ultrasonic evaluation of the morphological characteristics of metallic powders in the context of mechanical alloying. *Ultrasonics*, 2015, 60: 11–18
- Badidi B A, Lebaili S, nchaala A. Grain size influence on ultrasonic velocities and attenuation. *NDT&E Int*, 2003, 36: 1–5
- İsmail H, Sarpün M, Kılıçkaya S. Mean grain size determination in marbles by ultrasonic first backwall echo height measurements. *NDT&E Int*, 2006, 9: 82–86
- Zhang H D, Ma S W. Ultrasonic nondestructive evaluation of average grain size of Cr-Mo steel (in Chinese). *J Shanghai Univ (Natural Science Edition)*, 2006, 2: 164–165 [张洪达, 马世伟. Cr-Mo 钢平均晶粒尺寸的超声无损评价. 上海大学学报(自然科学版), 2006, 2: 164–165]
- He X P, Tian Y P, Zhang H P. Ultrasonic nondestructive evaluation on the grain size of metal materials (in Chinese). *Tech Acoust*, 2013, 32: 445–451 [贺西平, 田彦平, 张宏普. 超声无损评价金属材料晶粒尺寸的研究. 声学技术, 2013, 32: 445–451]
- Li P, Cheng X M, Li A A, et al. Ultrasonic nondestructive characterization of average grain size in 304 stainless steel solution treatment products. *J Mater Eng*, 2013, 3: 77–81
- Feng X P, Yang F, Li Y W, et al. Ultrasonic testing analysis of castings (in Chinese). *Hot Working Tech*, 2014, (3): 79–80, 97 [冯小平, 杨峰, 李亚维, 等. 铸件的超声波检测分析. 热加工工艺, 2014, (3): 79–80, 97]
- Tian Y P, He X P, Zhang H P, et al. The acoustic parameters of preliminary research on the identification of metal materials (in Chinese). *J Shaanxi Normal Univ (Natural Science Edition)*, 2014, 42: 34–40 [田彦平, 贺西平, 张宏普, 等. 基于声参量的金属材料辨识方法. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2014, 42: 34–40]
- Lin L. Ultrasonic nondestructive characterization of microstructures of alloy steels (in Chinese). Dissertation for Doctor Degree. Dalian: Dalian University of Technology, 2003 [林莉. 合金钢显微组织超声无损表征研究. 博士学位论文. 大连: 大连理工大学, 2003]

- 14 Wang X, Su M X, Cai X S. Effects of material viscosity on particle sizing by ultrasonic attenuation spectroscopy. *Procedia Eng*, 2015, 102: 256–264
- 15 Gao X J, Zhang Z. Research of the relationship between pore morphology and ultrasonic attenuation coefficient in CFRP (in Chinese). *J Mater Eng*, 2012, 7: 59–63, 70 [高晓进, 张峥. CFRP 中孔隙几何形貌与超声衰减系数关系的研究. *材料工程*, 2012, 7: 59–63, 70]
- 16 Li X B, Song Y F, Liu F, et al. Evaluation of mean grain size using the multi-scale ultrasonic. *NDT&E Int*, 2015, 72: 25–32
- 17 Liu X R, He X P, Cui D, et al. Measurement of acoustic attenuation coefficient of material with the stepped sample (in Chinese). *J Shaanxi Normal Univ (Natural Science Edition)*, 2015, 43: 38–41 [刘小荣, 贺西平, 崔东, 等. 阶梯形试样测量材料的声衰减系数. *陕西师范大学学报(自然科学版)*, 2015, 43: 38–41]
- 18 Lobkis O I, Yang L, Li J, et al. Ultrasonic backscattering in polycrystals with elongated single phase and duplex microstructures. *Ultrasonics*, 2012, 52: 694–705
- 19 Kotian R, Mariam S, Naik S, et al. Effect of heat treatment on the microstructure and hardness of Ni-Cr base metal alloys. *J Indian Prosthodont Society*, 2008, 8: 17–21
- 20 Mujahid M, Qureshi M I, Ali M. Development of microstructure during heat treatment of high carbon Cr-Mo steel. *Mater Sci Tech*, 1999, 15: 391–396
- 21 Yang L, Lobkis O I, Rokhlin S I. Shape effect of elongated grains on ultrasonic attenuation in polycrystalline materials. *Ultrasonics*, 2011, 51: 697–708
- 22 Yao K F, Qian B, Shi W, et al. Experimental study and numerical prediction of phase transformation evolution during tempering process of martensite (in Chinese). *Acta Metall Sin*, 2003, 39: 892–896 [姚可夫, 钱滨, 石伟, 等. 马氏体回火过程中组织转变量预测的实验研究. *金属学报*, 2003, 39: 892–896]
- 23 Nurbanasari M, Tsakiroopoulos P, Palmiere E J. Microstructural evolution of a heat-treated H23 tool steel. *Int J Miner Metall Mater*, 2015, 22: 272–284
- 24 Li L F, Xia Y Q, Sun Z Q, et al. Dynamic recrystallization of in a medium-carbon steel with tempered martensite structure during hot deformation (in Chinese). *Acta Metall Sin*, 2010, 46: 19–26 [李龙飞, 夏杨青, 孙祖庆, 等. 中碳钢回火马氏体热变形过程中的铁素体动态再结晶. *金属学报*, 2010, 46: 19–26]
- 25 Hu D L. *Metal Science and Heat Treatment* (in Chinese). Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 1995. 286–287 [胡德林. *金属学及热处理*. 西安: 西北工业大学出版社, 1995. 286–287]
- 26 Gu N J, Song X Y, Ma Z H, et al. Crystallographical analysis on martensite transformation and martensitic morphology. *ISIJ Int*, 1997, 37: 914–920
- 27 Meng Q P, Rong Y H, Xu Z Y. Nucleation of martensitic transformation (in Chinese). *Acta Metall Sin*, 2004, 40: 337–341 [孟庆平, 戎咏华, 徐祖耀. 马氏体相变的形核问题. *金属学报*, 2004, 40: 337–341]

Ultrasonic attenuation characteristics and a new method of identification of metal materials

LIU XiaoRong¹, HE XiPing¹, ZHANG HongPu¹, HE ShengPing², NI Tao², CUI Dong¹ & LU Kang¹

¹ Shaanxi Key Laboratory of Ultrasonic, College of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China;

² Baoji Research Institute of High Technology, Baoji 721013, China

Metallic materials are widely used in aerospace, medical, nuclear energy, mechanical manufacturing and other critical areas. For security applications, it needs to use qualified metallic materials. Therefore, it requires an extremely high resolution security identification technology. In addition, there needs to be an identification of the precious metallic cultural relics and metallic materials used in military equipment. Firstly, the effects of sampling rate on the stability of attenuation spectrum are discussed at the same frequency, and the effects of microstructure characteristics of metal materials on ultrasonic attenuation coefficient also are studied. Tests and calculations show that the more stable ultrasonic attenuation spectrums can be obtained at the higher sampling rates. Secondly, a new method to identify metallic materials using ultrasonic technology is developed in this paper. Taking some metallic materials with similar ingredients at the same heat treatment temperature and some of the other metallic materials with the same ingredients but at different heat treatment temperature for examples, the method for identification of metallic material based on the calculation of correlation coefficient of the attenuation spectrums between two metallic materials is investigated. The results show that the correlation coefficient of the attenuation spectrums in between of the same metallic materials is greater than that of in between of different ones. As a result, a conclusion can be drawn that the correlation coefficient of ultrasonic attenuation spectrums is applicable for identification of metallic materials. Compared with the conventionally physical and chemical identification methods, the proposed method for identification of metallic materials in this paper is nondestructive, accurate, rapid, and pollution-free.

metal material, ultrasonic attenuation spectrum, correlation coefficient, microstructure, anti-counterfeiting, identification

doi: 10.1360/N972015-00715