材料、机械工程

文章编号: 1000-8608(2007) 05-0662-05

超声无损表征 30Mn2SiV钢复杂混合组织探讨

林 $\overline{n}^{* 1,2}$,杨 w^2 ,赵建强²,李喜孟^{1,2}

(1.大连理工大学 三束材料改性国家重点实验室,辽宁 大连 116024,2.大连理工大学 材料科学与工程学院,辽宁 大连 116024)

摘要:采用超声水浸线聚焦技术和频谱分析方法,研究了控轧控冷工艺生产的非调质 D级 抽油杆用钢 30Mn2SiV复杂混合组织状态的超声无损表征方法,确定了不同质量分数的珠光 体、铁素体及上贝氏体混合组织的相对衰减系数和相对相速度.含大量上贝氏体组织、珠光 体+铁素体组织以及珠光体球化组织,相对衰减系数按照由大到小顺序变化,而相对相速度 则依次增大.利用该方法可以无损区分 30Mn2SV钢的复杂混合组织.

关键词: 超声参量; 非调质 D级抽油杆用钢; 相对衰减系数; 相对相速度; 混合 组织

中图分类号: TG115.2 文献标识码: A

0 引 言

材料能够通过调整组织来改变其性能.同一 牌号的钢的性能不仅会由于不同批次原料的差异 而发生变化,即使是同一批原料生产出的钢材也 会由于后续的加工变形等因素的影响而出现个别 产品性能的不稳定,而且随着服役时间的不同,钢 材或某些部位的组织和性能也会发生改变^[1],对 于由控轧控冷工艺生产的型材更是如此.目前, 市场竞争激烈,钢铁材料的质量检验与控制技术 的改进已迫在眉睫.因此,有必要开发一套无损 表征系统来监控材料的微观组织状态,由此间接 监控钢材的力学性能.

采用超声波检测技术无损表征材料不同组织 状态的技术路线大都是由无损表征研究逐步过渡 为无损评价的应用技术.对钢铁材料显微组织的 超声表征始于 20世纪 50年代,目前采用较多的 是利用超声波速度或衰减系数等参数来评价材料 的组织状态及其变化规律^[1-4].

声波在材料内的传播速度与其强度、弹性模 量关系密切. 声速有群速度和相速度之分,对于 无频散的各向同性材料,群速度和相速度无差别; 而对于各向异性材料,则相速度由弹性模量确 定^[5 6]. 衰减变化测量的是由于材料的微观组织 状态的不同所感生的对声波能量散射和吸收效应 的变化,通常以衰减系数表示,它与材料的粘塑性 有关^[6 7]. 然而直接测量材料的相速度和衰减系 数存在影响因素多、装置复杂、测量精度低等缺 点.

通过谱分析技术间接求解声波的相速度和衰 减系数,并以此对材料的微观组织进行表征具有 简单易行的特点.另外,目前大多数研究都是建 立在对单一组织状态下的材料无损表征,而且样 品的几何形状多是板状和块状,对复杂混合组织 轧制棒材的无损表征还鲜有报道.

本文针对抽油杆用钢 30M n2SiV 中珠光体、 铁素体及上贝氏体含量不同的混合组织,利用超 声水浸线聚焦技术及频谱分析方法,研究超声相 对衰减系数和相对相速度的变化规律,探讨超声 无损表征混合组织的可行性.

1 实验原理

1.1 脉冲回波信号分析

一般情况下超声无损评价技术均利用超声脉 冲法进行.

作者简介: 林 莉^{*} (1970-), 女, 副教授, 博士生导师, E-mail linli@ dlut.edu.cn.

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

收稿日期: 2006-03-10, 修回日期: 2007-08-02.

一个沿 x轴传播的波在 (x,t)位置的 Fourier 变换式 U(x,t) 可以写做 ^[8 9]

$$U(x,t) = \int u_0(k) e^{i(k(k)x - kt)} dk = \int u_0(k) e^{-T(k)x} e^{i(k'(k)x - kt)} dk = \int u(x,k) e^{i(k'(k)x - kt)} dk$$
(1)

式中 k = 2x f 是角频率, u_0 是幅度,u(x, k) 为波 在 x 位置的幅度谱. k(k) 代表波数,可表示为 k(k) = k'(k) + iT(k). 其实部 k'表示在 x 位置 相位的变化,它是与相速度 v(k) 相关的量,v(k)= k k'(k); 虚部 T为衰减系数,它决定波沿 x 轴 传播时的衰减幅度.

一般认为,声速和衰减系数是依赖于频率和 传播介质的微观组织状态的量.通过 Fourier变 换式 U(x,t),可以从相位谱的偏离程度 $\Delta Q(f)$ 获 得相速度 v(f):

$$\Delta O(f) = k'(f)\Delta x = \frac{2}{v(f)}\Delta x$$

故

$$v(f) = \frac{2 f \Delta x}{\Delta Q(f)}$$
(2)

从对数幅度谱中求得衰减系数 T(f):

$$T(f)\Delta x = \ln \left| \frac{U(x_0, f)}{U(x, f)} \right|$$
(3)

其中 $\Delta x = x - x_0$ 为两次回波在介质中传播的距离差.

1.2 相对衰减系数及相对相速度

材料的声速和超声衰减系数在无损表征中占 有重要地位,然而衰减系数和相速度绝对值的测 量既繁琐又困难,如试块的制作、测量技术和声场 补偿等.尤其是对具有复杂混合组织状态的轧制 棒材而言,参量绝对值的测试将更难.因此在进 行参量测定时必须选用合适的测定方法.

从测量技术的观点来看,可把超声参量的测 定目的大致分为下面两种:

(1)作为材质差异或变化的检测手段而进行 参量测定,在这种情况下,测量超声参量的绝对值 并无必要,重要的是其相对值;

(2) 如为根据缺陷的反射波高度评价缺陷的 大小,或欲了解超声参量与频率的关系,必须测量 参量的绝对值.

为无损区分不同组织与超声波衰减系数和相速度之间的关系,并易于工程实施,以评价产品合格与否,本研究采用了以标准试件获得的参考信号为基准,通过计算相对于标准试件的衰减系数

和相速度的方法对其进行评定分析.

实验采用的标准试件与被测样品具有相同的 化学成分和几何形状,但其组织为经退火处理的 片状珠光体+ 铁素体,组织内外均匀,珠光体含 量为 43.68%,形貌如图 1所示.故样品的相对衰 减系数 ^T(*f*)和相对相速度 *v*['](*f*)可表示为

$$\mathbf{T}'(f) = \frac{1}{d} \ln \left| \frac{U_0(x, f)}{U(x, f)} \right| \tag{4}$$

$$v'(f) = \frac{\mathbf{\hat{x}} f}{\Delta O(f)} d \tag{5}$$

其中 $\Delta Q(f) = Q(f) - Q(f), \oplus Q(f)$ 和 U(x, f)为被测样品底面反射回波经 Fourier变换后的相 位谱和幅度谱, Q(f)和 U(x, f)为参考信号的相 位谱和幅度谱, d为棒状样品直径.



图 1 标准试件的微观组织形貌 Fig. 1 SEM image of standard specimen

2 实验材料与方法

由于实验对象为控轧控冷的棒材,本研究采 用水浸线聚焦方法对样品进行超声测试,测试系 统如图 2所示.在 500 mm× 500 mm× 400 mm 的水槽中设置一可水平移动的样品架,在垂直于 样品架中心上方安装探头架,超声波探头与被测 样品之间的垂直距离可调,水槽水温控制在(23 ± 0.5)[℃]. 窄脉冲线聚焦超声波探头的标称频率



图 2 小直径棒材超声回波信号检测系统示 意图



testing system

4-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

为 1 M Hz 晶片直径为 20 mm 聚焦晶片曲率半 径为 12.5 mm.为获得较强的样品下表面回波信 号,令探头与样品上表面之间的有效距离为固定 值.将样品的反射信号直接送至 TDS2012型数 字示波器,并按设定的采样频率将模拟信号转换 成数字信号.为了降低随机噪声对实验结果的影 响,测量信号进行 128次平均处理,它可以使信噪 比以 N^{1/2}的规律予以改善(N为采样次数)^[10].然 后,将采集的数字信号输入计算机进一步分析.

研究所用的 D级抽油杆用钢 30Mn2SiV为由 控轧控冷工艺生产的连轧棒材,表面经过统一的 加工处理,具有相同的几何尺寸和表面粗糙度,直 径为 O18.7± 0.07 mm,其化学成分如表 1所示. 实验中分别取若干根不同炉次轧制后未经热处理 及轧制后经 500℃ 回火处理的棒材进行拉伸实 验.根据加工处理状态和金相分析结果,将棒材 依次编号分组:I-轧制后 500℃ 回火处理样品、 II-轧制后无贝氏体样品、III-轧制后含贝氏体样 品.并在每组中选取有代表性的拉伸试样 4根, 分别截取长 20 mm和 100 mm的短棒.前者用做 金相分析样品,微观组织观察在 SEM-5600LV型 扫描电镜上进行;后者为超声测试样品.为使超 声波测试的实验数据真实反映样品特征,每个样 品均采集 75个数据点用于数据分析.

	表	1	30	Mn2Si	V钜	1化:	学成分	
Tab. 1	Ch	iemi	cal	compos	itior	ı of	30M n2SiV	st

			w 1%					
С	Si	M n	Ti	V	Р	S	Ni+ Cr	Cu
0. 30~ 0. 34	0.90~ 1.05	1.28~ 1.42	0.02~ 0.05	0. 08~ 0. 13	< 0. 025	< 0. 025	< 0. 25	< 0.25

3 实验结果与讨论

3.1 微观组织

扫描电镜观察的轧制棒材样品微观组织形貌 如图 3所示,通过 MIATS图像分析系统计算各 组成体的质量分数见表 2. 从图 3可见,由于钢材 在轧制过程中变形量、在线水冷程度及后续的热 处理过程的差异,产生了不同的微观组织状态;而 且在同一样品上由于冷却速率的变化,从棒材中 心向外在径向的不同位置,其组织状态也有很大 区别.为比较同一样品上不同区域各组成体的质 量分数,按照拉伸试样断口的形貌特征,以 3 mm 为半径,将样品沿截面分为中心区域、中间区域和 边缘区域.本文对样品中心区域和边缘区域的组 织进行了比较.



(d) II 类样品边缘区域

域 (e) III 类样品中心区域 (f) III 类样品边缘区域 图 3 30Mn2SiV 钢棒样品的微观组织形貌 Fig. 3 SEM images of 30Mn2SV steel rod specimen

?1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

第 5期

I类样品轧制后经 500[℃]回火处理中心区域 得到不完全球化珠光体 + 铁素体组织,而边缘的 珠光体已大部分发生球化:

II类样品中心区域的组织由片状珠光体(不规则白色图案)和细小的块状铁素体(黑色部分)两相组成,且珠光体和铁素体所占比例基本相等, 而边缘区域组织虽也为片状珠光体+ 铁素体,但 珠光体含量明显增加:

III类样品的组织则由于在轧制过程中加热 温度过高并以较快速度冷却,出现了大量上贝氏 体组织,样品中心区域的块状铁素体和珠光体的 总量略低于 50%,而边缘区域则大部分为上贝氏 体组织.

从表 2中还可以发现,即使是同一类样品,组 织组成虽然一致,但是珠光体和铁素体的含量仍 略有差异.

表 2 30M n 2SiV 钢棒各样品组织组成体的含量

Tab. 2 Microstructure content of 30Mn2SiV steel rod specimen

样品编号		w 1%					
		珠光体	铁素体	上贝氏体			
I–1	心部	44.51	55. 49	_			
	边缘	53.72	46.28	—			
I-2	心部	46.14	53.86	-			
	边缘	50.13	49.87	—			
II–1	心部	47.79	52, 21	_			
	边缘	55.05	49.95	—			
11.0	心部	44.84	55.16	_			
11–2	边缘	52.61	47. 39	_			
III–1	心部	33. 33	10.04	56.63			
	边缘	22.50	2. 53	74. 97			
III–2	心部	23.56	8.97	67.47			
	边缘	15.63	3. 52	80. 85			

3.2 超声表征

针对在每个样品上测得的 75个数据,借助于快速傅里叶变换(FFT)所得相位和幅度谱,计算 出材料经过统计估计后的相对衰减系数 T'(f) 和 相对相速度 v'(f),得到如图 4和图 5的结果.

由于计算所得的相对衰减系数值很小,不利 于比较,对每个样品的衰减系数均进行了加权处 理.图4为不同类样品加权后主频率下(0.855 MHz)相对衰减系数关系对比图.可见,对于同 类样品,虽然各组成体所占比例略有差异,但所获 得的相对衰减系数值的分布基本趋于一致,即在 同类样品中,珠光体含量较高的样品,其相对衰减 系数值较小;比较不同类样品的相对衰减系数值 发现 译、II类与 III类样品之间存在明显的差别, 而 I类和 II类样品之间则不太明显,并有部分的 重叠区.三类样品的相对衰减系数值分布规律由 大到小依次为 III > II.> I.



- 图 4 0.855 M Hz频率下 30Mn2SiV钢棒三 类样品组织的相对衰减系数 T['](f)
- Fig. 4 T'(f) of three kinds of 30Mn2SiV steel specimens (f = 0.855 M Hz)

图 5为不同类样品组织在主频率下(0.855 MHz)相对相速度.由图可见,同类样品所获得 的相对相速度仍然差别不大,但珠光体含量较高 的样品,其相对相速度的值也较大.不同类样品 的相对相速度则存在明显分界,其中珠光体不完 全球化的 读样品和片状珠光体+ 铁素体样品组 成的 II类样品的值较为接近,而形成了大量上贝 氏体组织的 III类样品则与 I类 II类相差甚远. I 类样品相对相速度最大,在 6400~ 6700 m/s; II 类样品在 0.855 MHz频率下的相对相速度次之, 而 III类样品的相对相速度最小,其值仅在 4 200 ~ 4 600 m/s.



- 图 5 0.855 M Hz频率下 30Mn2SiV钢棒三 类样品组织的相对相速度 v'(f)
- Fig. 5 v'(f) of three kinds of 30Mn2SiV steel specimens (f = 0.855 M Hz)

分析认为,对于经控轧控冷工艺生产的具有 混合组织状态的棒材,超声脉冲在非均匀介质中 传播时,在材料中不同组分的边界上发生反射,折 射和散射,与材料的物质结构(晶粒,织构等),相 互作用虽然比均匀组织复杂得多,但是其物理过 程以不同的频率 相位叠加为接收信号,该接收信 号必然含有反映材料内部组织的特征,造成了经 过不同组织状态的超声信号之间的差异.提取这 些特征参量并加以分析,能够对不同组织状态进 行识别.

4 结 论

(1) 对于经控轧控冷工艺生产的具有复杂混 合组织状态的 D级抽油杆用钢 30M n 2SiV,测量 超声波在其复杂混合组织中传播的信号,对信号 进行谱分析并计算相对衰减系数值和相对相速度 值,建立相对衰减系数和相对相速度与其组织的 结构特征的相关性,是对不同组织状态和分布情 况进行区分的有效途径.

(2)用相对衰减系数对 D级抽油杆用钢 30Mn2SiV的不同复杂混合组织加以区分,其相 对衰减系数值分布规律由大到小依次为含大量上 贝氏体组织 > 珠光体 + 铁素体组织 > 珠光体球 化组织.

(3)用相对相速度法对 D级抽油杆用钢
 30M n2SiV的不同复杂混合组织加以区分,其相
 对相速度值由大到小依次为含大量上贝氏体组织
 < 珠光体 + 铁素体组织 < 珠光体球化组织.

参考文献:

 GUR C H, TUNCER B O. Characterization of microstructural phases of steels by sound velocity measurement [J]. **Mater Charact**, 2005, **55**(2): 160–166

- [2] 刘镇清,陈 广.超声无损检测中的谱分析技术 [J]. 无损检测, 2001, 23(2): 85-88
- [3] PETERS F, PETIT L. A broad band spectroscopy method for ultrasound wave velocity and attenuation measurement in dispersive media [J]. Ultrasonics, 2003, 41(5): 357-363
- [4] MURAV E V. Interrelationship of the Velocity of An Ultrasonic Wave in Steels and Their Heat Treat Cycles [M]. New York: Plenum Publishing Corp, 1989 135–137
- [5] 李家伟,陈积懋.无损检测手册[M].北京:机械工业 出版社,2002 224-237
- [6] REYNOLDS W N, SMITH R L. Ultrasonic wave attenuation spectra in steels[J]. J Phys D Appl Phys, 1984, 17(1): 109–116
- [7] NICOLETTI D, ANDERSON A. Determination of grain-size distribution from ultrasonic attenuation Transformation and inversion [J]. J Acoust Soc Amer, 1997, 101(2): 686-689
- [8] GAO W M, GLO RIEUX C, KRUGER S E. Investigation of the microstructrue of cast iron by laser ultrasonic surface wave spectroscopy [J]. Mater Sci Eng, 2001, A313 170-179
- [9]苏 勇,林维正.用信号分析技术检测材料的声速和 衰减[J].建筑材料学报,2001,4(1):65-69
- [10] HAINES N F, BELL J C, M CLN TYRE P J. The application of broadband ultrasonic spectroscopy to the study of layered media [J]. J Acoust Soc Amer, 1978, 64(6): 1645-1651

Investigation on ultrasonic nondestructive characterization of mixed microstructures of 30Mn2SiV steel

LIN $Li^{*1,2}$, YANG Bing², ZHAO Jian qiang², LI Xi-meng^{1,2}

(1.State Key Lab. for Mater. Modif., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China;
2.School of Mater. Sci. and Technol., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China)

Abstract Mixed microstructures of as-rolled and tempered 30Mn2SiV steel for D-level sucker rod were nondestructively characterized using ultrasonic immersion beam focus technique and spectral analysis. The relative attenuation coefficient and relative phase velocity are investigated for the microstructures with different content of pearlite, ferrite and upper bainite. The results show that, according to the sequence of main upper bainite, lamellar pearlite plus ferrite, and globular pearlite, the relative attenuation coefficient decreases and the relative phase velocity increases gradually. The presented method could be used to nondestructively characterize the mixed microstructures of 30Mn2SiV steel.

Key words ultrasonic characterization; as-rolled and tempered steel for D-level sucker rod; relative ?1994-2014 tenuation coefficient; relative phase velocity; mixed microstructure. http://www.cnki.net