

神经网络在 20 钢时效组织状态无损识别中的应用

李 萍, 倪 军, 李喜孟, 王 来

(大连理工大学三束材料改性国家重点实验室及原材料特种制备技术实验室,
材料科学与技术学院, 辽宁大连 116024)

摘 要: 通过提取试样超声回波信号的小波系数作为表征组织状态的特征参量, 探讨了 BP 神经网络在 20 钢球化组织状态和 30Mn2SiV 结构钢轧制组织状态无损识别中的应用。结果表明: 构造 BP 型神经网络可实现对 20 钢和 30Mn2SiV 结构钢组织状态的无损识别与分类, 平均识别率可达到 86.6% 和 88.3%, 为钢铁材料组织分析提供了一种先进而有效的新方法。

关键词: BP 神经网络; 无损识别; 组织状态

中图分类号: TP391; TG142.73; TB559 文献标识码: A 文章编号: 1000-3738(2006)12-0033-03

The Application of Artificial Neural Networks to Non-destructive Identification of Microstructure of 20 Steel

LI Ping, NI Jun, LI Xi-meng, WANG Lai

(Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The wavelet coefficient of ultrasonic signal was extracted as the characteristic parameter of microstructure. The application of BP neural networks to the non-destructive identification of spheroidized microstructure of 20 steel and rolled microstructure of 30Mn2SiV was discussed. The BP neural networks is available for non-destructive identification and classification of 20 steel spheroidized microstructure as well as 30Mn2SiV rolled microstructure. The average reliability is 86.6% and 88.3% respectively. It provides an advanced and valid method for analyzing the microstructure of steel.

Key words: BP neural network; non-destructive identification; microstructure

0 引 言

组织状态是决定钢铁材料性能的重要因素之一。就相结构而言, 铁碳合金是由铁素体和渗碳体组成的, 因而其性能不仅与渗碳体的数量有关, 而且与渗碳体的形态、大小及分布密切相关。随着渗碳体的增加, 钢的强度、硬度增加, 塑性、韧性降低^[1]。高温环境下长期使用的 20 钢在服役过程中发生渗碳体球化、石墨化析出等组织转变, 使其韧性、强度等发生变化, 增加了设备发生损坏的几率^[2,3]。这方面的检测方法目前大多是在对材料进行损坏测量的基础上, 且存在周期长、取样过程复杂及观察结果有局限性等不足^[2], 这在一定程度上影响了对钢组织状态的合理评价。研究表明^[3], 在材料组织演变

过程中, 基体连续性的变化将导致超声波在钢中传播速度、衰减系数等参量的改变, 使得超声波技术用于组织状态的无损评价成为可能。鉴于超声回波信号中含有大量与材料组织状态相关的信息, 利用信号分析技术, 从中准确有效地提取与组织状态相关的信息参量, 并给予正确的解释, 是材料超声无损评价的有效途径^[4]。信号分析技术主要有模式识别、分类识别和小波变换等。而小波变换既包括频域分析又包括时域分析, 且可以更好地检测信号的瞬时状态或奇异点等细节特征^[5], 因此它提取的有关组织演变的信息亦更丰富。鉴于利用神经网络来进行分类识别是众多分类识别方法中比较先进的方法, 且效果好、精确度、程序化程度也较高, 为此作者利用小波变换技术从超声信号中提取表征组织状态的特征参量, 通过 BP 神经网络实现对 20 钢球化状态和 30Mn2SiV 结构钢轧制状态进行分类。

收稿日期: 2005-12-26; 修订日期: 2006-03-18

作者简介: 李 萍(1969 —), 女, 辽宁大连人, 副教授, 博士研究生。

导师: 李喜孟教授, 王 来教授

1 工作原理

1.1 小波变换

基于超声回波为非稳时变信号的特点,利用多尺度分解小波变换法提取小波系数。小波变换是求 $x(t)$ 在各个小波函数上投影值的多少,由于每个小波函数均由一个母小波函数经过尺度伸缩 a 与时间平移 τ 得来的,因此,小波变换可以写成如下形式:

$$C(\text{scale}, \text{time-postion}) = \int x(t) \psi(\text{scale}, \tau) d\tau \quad (1)$$

式1所得到的小波变换系数列向量 C , C 中的各个分量表示母小波函数在某一确定尺度(scale)各个时间平移(time-postion)下与原始信号的相似程度,分量值越大表示某一确定尺度母小波与某一时间段的原始信号越相似^[5]。

1.2 BP神经网络

BP神经网络是一种主要用于分类识别、语言综合、语言识别和自适应控制等,采用最小均方差为学习方式的多层映射神经网络模型,它由输入层、输出层以及处在输入输出层之间的隐层构成的^[6,7]。

2 试样制备与试验方法

2.1 试样制备

取在900~930℃正火处理的20钢管一段,按照GB 223测定其成分(质量分数/%)为:0.19C, 0.46Mn, 0.28Si, 0.009S, 0.217P。将其加工成多个20 mm×30 mm×10 mm的试样,在保证材料不发生相变($t < 727^\circ\text{C}$)的前提下,采用提高时效温度($t = 500^\circ\text{C}$)加热的方法进行材料组织状态模拟试验,按《火电厂用20号钢珠光体球化评级标准》(行业标准号:DL/T 674—1999)进行球化评级。具体时效时间及相应的球化级别与组织状态见表1。测试前试样经磨削加工并具有相互平行的表面,表面粗糙度符合声学试块加工标准要求($R_a < 30 \mu\text{m}$)。

2.2 试验方法

利用脉冲反射回波技术,在同一检测灵敏度条件下,借助CTS-23A型超声波探伤仪获得试样的超声回波信号,由TDS-2012型示波器监视并选择合适的采样信号,通过RS-232型接口将超声信号输送到微型计算机,并直接形成数据文件储存在计算机里,以供后期的数据分析用。在同一测试条件下,每个试样上随机选取25个采样点,每点的超声回波信号是用128次连续采样的平均值描述(该过程由TDS-2012型示波器自动完成)。

表1 球化级别与组织状态

Tab. 1 Spheroidal level and microstructure

时效时间/h	组织状态	球化级别	组织特征
75	未球化	1级	珠光体中碳化物呈片状
650	倾向性球化	2级	珠光体中碳化物开始分散,珠光体形态明显
1 000	轻度球化	3级	珠光体中碳化物开始分散,并开始逐渐向晶界扩散,珠光体尚保留其形态
1 700	中度球化+初期石墨化	4级	珠光体中碳化物已明显分散,并向晶界聚集,珠光体尚保留其形态,同时有少量石墨析出
2 300	完全球化+明显石墨化	5级	大部分碳化物已分布在铁素体晶界上,仅有少量珠光体的痕迹,石墨球大,较分散

3 特征参数提取、优化和神经网络设计、训练

鉴于多尺度分解的低级别小波系数含有较多的高频噪声信号^[6],为了既能有效地获得表征时效组织超声回波信号的特征参量,又能在一定程度上降低噪声信号的影响,作者提取了7~11级小波变换系数。由于特征是每个试样中所确定的与识别有关的因素,为了提高神经网络的识别效率和准确率,使特征更易于被网络接受,需要对获得的小波变换系数进行一定的优化选择。根据式1作者提取7~11级各级小波变换系数列向量中的最大值作为特征参量,由此每个样本均由5个特征量表示。由于时效组织的差别是客观存在的,所以其回波信号与母小波函数波形的相似程度必然存在差别,试验证明各级最大值可以简单、有效和较完整地描述信号与所选择的母小波函数波形的相似程度^[5],进而达到表征不同组织形态特征参量的目的。

网络的具体设计通过Matlab软件实现,利用软件选择回弹算法作为训练方式,权值和偏移为默认值,网络结构采用三层网络,即有一个隐含层。隐含层神经元选取15~20为宜^[8]。根据表2,设计的网络对任意未知样本最终输出结果都代表1~5级球化级别的数字,即“1”,“2”,“3”,“4”,“5”。根据上述数字判断样本组织形态。设计好的网络必须进行训练使其具有稳定性,才能用于识别^[8]。一般说来,网络的训练样本必须满足以下两个条件:(1)训练样本中必须包括全部模式,神经网络是靠已有的经验来进行训练的,使用的经验数据越丰富、越全面,训练过的网络性能才会越好^[9];(2)用于训练网络的

样本数量及每个样本中特征量个数的选择对网络的效率和稳定性影响很大,样本数量及特征量个数越多网络稳定性越好,但是当样本数量及特征量个数超过一定值时,网络效率则大打折扣,反之则可提高网络效率降低稳定性^[8]。如何寻找稳定性与效率之间的平衡点,是训练神经网络的关键。作者在大量的试验测定与分析的基础上,选定 125 个样本(即每类试样 25 个样本),分别从每类试样中随机选定 10 个样本(共计 50 个样本)用于训练网络,其余的样本(共计 75 个样本)用于学习分类。经过 5 000 多次训练学习后网络已经相当稳定,其系统误差维持在 0.01% 左右。

4 试验结果分析

利用上述神经网络对 20 钢五种球化组织形态(各 15 组样本)进行分类,结果见表 2,可见分类效果比较理想,总体识别率达 86.6%。虽然三、四级球化试样的分类识别率最低,但也达到了 80%,分类效果尚可接受。原因分析如下:

由图 1 可见,75 h 时珠光体中渗碳体与铁素体呈层片状分布,650 h 片状渗碳体开始分解,但仍保留完整的珠光体形貌,1 000 h 片状渗碳体发生分解,球状碳化物增加,1 700 h 碳元素扩散聚集长大成石墨球,2 300 h 有少量珠光体的痕迹,石墨球增大,较分散。可见不同时效时间试样的渗碳体球化及石墨化程度不同,渗碳体球化及石墨化将导致材料弹性各向异性值发生变化,而弹性各向异性值是影响超声波衰减的重要因素之一^[10],因此使得到的的小波变化系数有所不同。鉴于探头接收到的回波信号是超声波与声场中所有介质发生相互作用的综合反应^[4],试样中晶粒的大小、珠光体中的片状渗碳体、粒状渗碳体以及石墨化都将导致声波发生散射、干涉及衍射等综合效应的差异。随着时效时间的延长,渗碳体逐渐趋于球化,长宽比减小,致使其特性

表 2 20 钢五种组织状态的分类识别

Tab. 2 Identification of the microstructure of 20 steel

测试项目	样本类别的实际情况				
	一级球化	二级球化	三级球化	四级球化	五级球化
一级球化	14	2	0	0	0
二级球化	1	13	1	0	0
三级球化	0	0	12	2	0
四级球化	0	0	2	12	1
五级球化	0	0	0	1	14
识别率	93%	87%	80%	80%	93%

声阻抗将随之变化。随球化过程的不断深入,使得材料内球/片状渗碳体的比例增大,而且球状渗碳体的体积越来越大,致使声波散射程度增加,使得回波信号中包含的谐波分量增多^[4],因此通过换能器接收到的回波信号的频率、幅值等发生变化。上述组织形态变化给超声回波信号所带来的相应改变都将通过特征参量得到体现。总而言之,球化级别与描述试样的超声回波信号之间存在着某种相关性,通过提取、分析和利用表征不同组织形态超声回波信号的特征参量,能达到对组织形态可靠识别的目的。

为了进一步考察小波变换及神经网络在组织形态无损识别方面的实用性和适用性,又另外选择了 30Mn2SiV 结构钢轧制过程中形成的三种组织形态:珠光体(渗碳体球化)+铁素体、珠光体(层片状)+铁素体和珠光体+铁素体+上贝氏体的试样为研究对象。利用上述试验设备采集各类试样的超声回波信号,并用上述方法提取并优化小波变换系数作为特征参量,构建 BP 神经网络,调整网络参数。选定 150 个样本(即每类试样 50 个样本),分别从每类试样中随机选定 10 个样本(共计 30 个样本)用于训练网络,其余的样本(共计 120 个样本)用于学习分类。分类结果见表 3,120 个样本(每类 40 个)总体识别率可达 88.3%,最低识别率为 80%,分类识别效果比较理想。

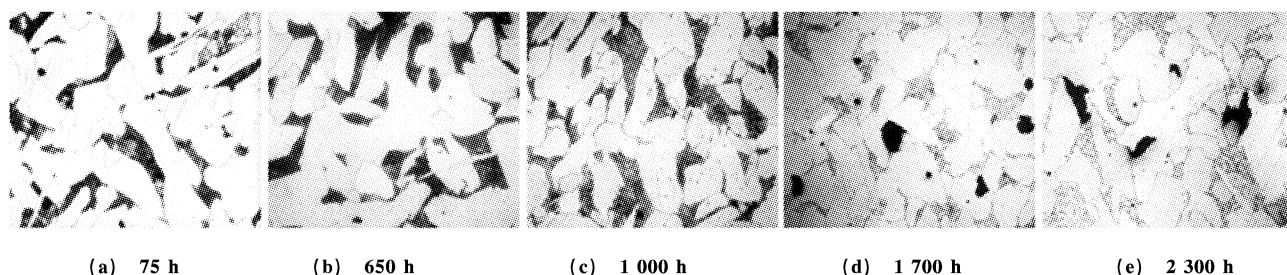


图 1 不同时效时间的显微组织 600×

Fig. 1 Microstructure at different aging-times 600×

(下转第 39 页)

状结构,故而两者 1 道次变形后的硬度值几乎相同。而随着变形道次的增加,两者均承受多道次剪切变形,硬度变化的趋势相同,且硬度值差异不大。因此,如不考虑其它因素,利用 ECAP 变形获得超细晶材料无需对变形前的材料进行复杂的预处理,这样可以在不损失细化效果的前提下简化材料的变形工艺,从而降低成本、提高效率。

4 结 论

(1) 虽然铸态与轧制态的原始组织差别较大,但在相同的条件下经过 8 道次 ECAP 变形后均形成了等轴细晶组织,且晶粒尺寸差别不大,同时材料的性能相当。这说明初始状态对 ECAP 变形后的组织和性能影响不大。

(2) 1 道次变形时,在强烈的剪切应变作用下,在原始的粗大晶粒内形成了一系列具有小角度晶界的亚晶带。随着变形道次增加,亚晶发生转动,亚晶之间的取向差增大,逐渐形成大角度晶界。可认为在此过程中发生了连续动态再结晶。

(3) 纯铝原始晶粒尺寸为 1.5 mm 的铸锭经 8 道次变形后获得等轴细晶组织,晶粒尺寸为 1.4 μm 。同时,变形后材料的硬度增加。1 道次变形后硬度增大尤为明显,随后硬度增大的趋势变缓。

参考文献:

- [1] Valiev R Z, Islamgaliev R K, Alexandron I V. Bulk nano-structured materials from severe plastic deformation[J]. Progress in Materials Science, 2000, 45: 103—189.
- [2] Iwahash Y, Horita Z, Nemoto M, *et al.* The process of grain refinement in equal-channel angular pressing[J]. Acta Mater, 1998, 46(9): 3317—3331.
- [3] 程永奇,陈振华,夏伟军. 镁合金等径角挤压的研究与发展[J]. 机械工程材料, 2005, 29(9): 1—4.
- [4] 吴世丁,李强,姜传斌,等. 铜单晶 ECAP 过程的剪切特征[J]. 金属学报, 2000, 36(6): 602—607.
- [5] Zhu Y T, Lowe T C. Observations and issues on mechanisms of grain refinement during ECAP process[J]. Mater Sci Eng, 2000, A291: 46—53.
- [6] Iwahashi Y, Wang J, Horita Z, *et al.* Principle of equal channel angular pressing for the processing of ultrafine-grained materials[J]. Scripta Mater, 1996, 35(2): 143—146.
- [7] 林肇琦. 有色金属材料学[M]. 沈阳: 东北工学院出版社, 1986.
- [8] 林均品,安希塘,雷廷权. 铝合金动态再结晶模型[J]. 北京科技大学学报, 1993, 15(3): 262—266.
- [9] 周建. 7075 铝合金在锻造过程中显微组织的演变和工艺模拟[D]. 沈阳: 东北大学, 2003.
- [10] Gourdet S, Montheillet F. An experimental study of the recrystallization mechanism during hot deformation of aluminum[J]. Mater Sci Eng, 2000, A283: 274—288.

(上接第 35 页)

表 3 30Mn2SiV 结构钢三种组织状态的分类识别
Tab. 3 Identification of the microstructure of 30Mn2SiV steel

测试项目	样本类别实际情况球化		
	P+F	片状 P+F	P+F+B _上
正确识别的组数	32	36	38
错误识别的组数	8	4	2
识别率/%	80	90	95

5 结 论

(1) 利用小波变换提取特征参量,基于 BP 神经网络对 20 钢高温时效组织状态和 30Mn2SiV 结构钢三种组织状态进行无损识别是可行的,总体识别率达到 86.6%和 88.3%。为钢铁材料组织分析提供了一种先进而有效的新方法。

(2) 利用小波变换提取的特征参量对 BP 神经网络具有较强的适应性。

参考文献:

- [1] 章启贞. 金属材料的组织与性能的关系[J]. 龙岩师专学报, 1996, 14(3): 58—59.
- [2] 李萍,李喜孟,王来,等. 时域特征用于 20# 钢球化组织状态无损评价[J]. 石油化工高等学校学报, 2004, 17(2): 72—74.
- [3] 李萍,李喜孟,谭家隆,等. 信号特征在 20# 钢高温时效组织状态无损评价中的应用[J]. 机械工程材料, 2004, 28(12): 23—25.
- [4] 李萍,李喜孟,谭家隆,等. 基于贝叶斯方法无损识别 20# 钢高温时效状态[J]. 石油化工设备, 2004, 33(4): 8—10.
- [5] 飞思科技产品研发中心. 辅助小波分析与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [6] 袁曾任. 人工神经网络及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.
- [7] 高隽. 人工神经网络原理及仿真实例[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [8] 飞思科技产品研发中心. 辅助神经网络分析与设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [9] 刘镇清,张海燕. 人工神经网络及其在超声检测中的应用[J]. 无损检测, 2001, (5): 221—225.
- [10] 林莉,李喜孟,张俊善,等. 超声波无损评价 40Cr 钢显微组织的探讨[J]. 无损探伤, 2000, (4): 28—30.