

焊接裂纹金属磁记忆信号的神经网络识别

邸新杰¹, 李午申¹, 白世武^{1,2}, 刘方明^{1,2}

(1. 天津大学 材料科学与工程学院, 天津 300072;

2. 中国石油天然气管道科学研究院, 河北 廊坊 065000)

摘 要: 金属磁记忆检测技术是一种新型的利用铁磁材料内在信息对材料进行检测和评价的无损检测方法, 对裂纹类缺陷进行早期检测具有潜在的优势。利用小波包分析技术, 对水压试验条件下 API 5L X70 管线钢焊缝中有无焊接裂纹的金属磁记忆信号能量特征进行了分析, 确定了焊接裂纹金属磁记忆信号的小波包能量特征, 并利用其作为输入特征向量建立了 BP(back propagation)神经网络, 对焊缝中是否含有裂纹等缺陷进行智能识别。结果表明, 利用小波包能量和神经网络技术可以较好的实现焊接裂纹的识别。

关键词: 焊接裂纹; 金属磁记忆; 特征提取; 神经网络

中图分类号: TG115.28 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2008)03-0013-04



邸新杰

0 序 言

随着现代工业的不断发展, 油气管道大都在高温、高压、高负载的“三高”条件下运行。在各种因素的影响下, 管道运行过程中也常常会产生裂纹等缺陷, 甚至造成管道崩裂等重大事故, 因此焊接裂纹是油气管道焊接接头失效根源中最常见也是最危险的因素之一。

目前工程上广泛应用的仍然是以探查非允许缺陷为目的的检测方法, 对焊接过程中产生的微观裂纹以及由于缺口效应造成的局部应力集中引起的裂纹源还不能进行检测。这常常导致宏观裂纹的产生, 成为安全生产的一个重大隐患。从设备安全的角度来看, 对焊接裂纹的检测不仅需要能发现宏观的裂纹, 还要能检测到微观的以及萌生状态的焊接裂纹, 才能实现对设备和结构的早期诊断, 防止突发性事故的发生。因此对焊接结构中的裂纹源, 微裂纹及宏观裂纹进行检测和评估一直是无损检测工作者长期努力的目标。

对焊接裂纹等缺陷的检测是通过无损检测(non destructive testing 简称 NDT)的方法来实现的。通过研究各种 NDT 方法的特点可以发现, 金属磁记忆(metal magnetic memory 简称 MMM)检测方法是唯一能够对焊接结构的裂纹等缺陷进行早期诊断的可行

性的方法。但是该方法的问世时间较短, 尚处于研究的初期阶段, 存在很多的科学与技术问题需要进一步深入解决。

利用小波包分析技术, 对 API 5L X70 管线钢焊缝有无焊接裂纹的金属磁记忆信号进行三层小波包能量分析, 然后将归一化的小波包能量作为特征输入量, 利用 BP 神经网络对焊缝中有无焊接裂纹进行了识别。结果表明, 利用小波包能量和神经网络技术可以较好地实现焊接裂纹的识别。

1 金属磁记忆检测原理

研究表明, 在外应力作用下铁磁材料的磁性能会发生变化^[1-4]。处于地球磁场中的铁磁性材料受到外加应力作用时, 会在材料内部的缺陷和微观不连续处产生应力集中。在应力集中区, 铁磁材料的磁畴组织会产生定向且不可逆的重新取向, 表现为该区域的磁场异常, 在金属与空气边界出现磁导率跃变, 从而在铁磁材料表面产生散射磁场, 这个散射磁场不仅在外加应力消除后仍然存在, 而且与最大应力有关, 因此被称为“金属磁记忆”效应^[5-8]。

金属磁记忆检测技术就是通过对铁磁材料表面散射磁场的测量来对材料内部的缺陷进行检测。该技术一经问世就备受关注, 被认为是最具有发展潜力的无损评估技术之一, 在工程实践中具有广阔的应用前景^[4]。但是, 由于该项技术发展时间较短, 目前仅能对设备和构件进行初步的诊断, 发现可疑区

收稿日期: 2007-11-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50475113); 博士后科学基金(200700420115)

域后,尚需用传统的无损检测技术(如超声检测、射线检测等)对检测结果进行验证,这无疑限制了该技术的应用。

2 试验方法及检测结果

2.1 试验材料

试验材料选用国产 $\phi 508\text{ mm}\times 12\text{ mm}\times 500\text{ mm}$ 的 API 5L X70 管线钢直缝钢管。该钢种属于针状铁素体型的高强、高韧性管线钢,在“西气东输”工程中被大量采用。试验用 X70 钢的化学成分见表 1,室温下其屈服强度为 582 MPa,抗拉强度为 656 MPa,断后伸长率为 23 %。

2.2 试验过程

试验共制作了4个试件,编号分别为a, b, c, d,

每个试件包含 2 条焊缝,编号为 1, 2 号焊缝。焊缝由 API 5L X70 焊接螺纹钢管对接产生。坡口形式为 V 形,焊接材料采用 E8010 焊条,每条焊缝对称布置 4 条焊接裂纹(图 1),共计 32 条裂纹,按顺序统一编号。

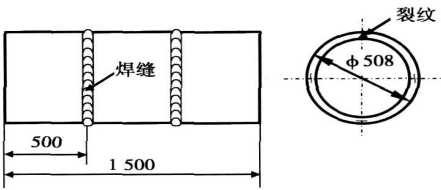


图 1 试件示意图(mm)

Fig 1 Sketch of specimen used in tests

表 1 试验用 X70 管线钢主要合金成分(质量分数, %)

Table 1 Compositions of experimental X70 pipeline steel

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Nb	V	Ti	Cu
0.070	0.240	1.490	0.005	0.002	0.018	0.230	0.210	0.058	0.028	0.012	0.145

为更好地模拟实际工作环境中的裂纹,在预制完成后将试件两端封堵,然后使用 3DY — 400/60 型压力泵对试件增加水压,试验中最大压力为 9.0 MPa。当压力达到最大值时保持压力 30 min,然后利用 TSC — 1M — 4 型金属磁记忆检测仪对包含预制裂纹的焊缝和相邻两裂纹之间的无缺陷焊缝分别进行检测,检测长度为 200 mm,共获得检测数据 64 组。部分检测结果如图 2 所示。

信息的特征信号、低频波动信号和高频噪声等组成的。其中低频波动信号是由环境磁场和检测探头距试件两端位置的变化造成的,高频噪声是由于检测噪声以及探头的振动造成的^[5]。使反映焊接裂纹信息的特征信号淹没其中,因此必须对检测信号进行处理,消除高、低频噪声信号的影响。

3.1 信号的消噪处理

基于小波变换的消噪方法主要有三种^[5-9],即基于模极大值的消噪方法、基于小波系数的消噪方法以及基于小波变换的非线性消噪方法。由于非线性消噪方法简单,效果理想,并且易于 Matlab 软件的实现^[10],故选基于小波变换的非线性消噪。因噪声具有一定的频带宽度,故噪声存在于对应一定范围的尺度参数的分解结果中,选择合适的分解尺度既能保证噪声的完全去除,同时又减少处理的工作量。通过对不同尺度小波消噪的结果进行分析发现,采用 3 尺度分解基本上可消除信号中的噪声。

3.2 磁记忆信号的小波包能量特征

特征提取和模式识别是利用金属磁记忆检测技术对焊缝进行检测的两个重要环节,能否提取出正确的裂纹特征信息,是是否成功对其进行识别的关键。

小波包分析技术^[9]在表征信号特征方面具有独特的优点,它不仅能反映信号的频率成分,而且可以反映信号频率成分变化的趋势和规律,适合作为金属磁记忆信号的特征提取工具^[5,8-10]。

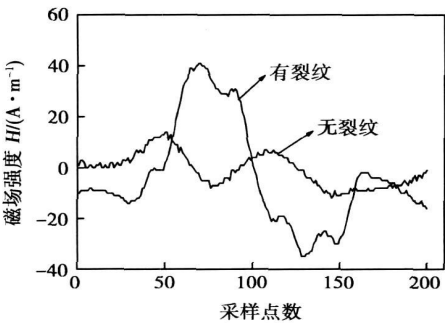


图 2 部分磁记忆检测信号

Fig. 2 Sample of metal magnetic memory signal

3 信号特征提取

焊缝的金属磁记忆检测信号是由反映材料内部

设有金属磁记忆信号 $f(x)$, 则它在 $L^2(R)$ 上满足以下等式关系^[9], 即

$$\int |f(x)|^2 dx = \|f\|_2^2 = \int_R da \int_R \left| \frac{W_f(a,b)}{a} \right|^2 db \tag{1}$$

式中: $W_f(a,b)$ 为信号 $f(x)$ 在尺度因子 a 和空间因子 b 的小波分解系数。选取各个频带内信号小波系数的平方和作为能量的标志, 则子空间 W 的能量为

$$E = \sum_{k=1}^{2^j} |w(k)|^2 \tag{2}$$

式中: $w(k)$ 为空间 w 内的第 k 个重构磁记忆信号 $f(x)$ 的元素。

对金属磁记忆信号进行 3 尺度小波包分解后, 得到 8 个频带的能量 E_{3j} , 即

$$E_{3j} = \int |f(x)|^2 dx = \sum_{k=1}^n |x_{jk}|^2 \tag{3}$$

式中: $x_{jk} (j=0, 1, \cdots, 7; k=1, 2, \cdots, n)$ 表示重构磁记忆信号 $f(x)$ 的离散点的幅值。由于 E_{3j} 是一个较大的数值, 因此将其进行归一化处理。令 $E = \left(\sum_{j=0}^7 |E_{3j}|^2 \right)^{1/2}$, 则向量 $\{E_{3j} - E, j=0, 1, \cdots, 7\}$ 即为归一化后的能量特征向量。

利用 Matlab 软件的小波包分析工具箱, 分别计算 32 条有焊接裂纹(检测长度为 200 mm)和 32 条无焊接裂纹(检测长度为 200 mm)磁记忆曲线的小波包能量在 8 个频带的能量分布, 并以归一化后的能量组成特征向量。表 2 列出了部分样本数据的特征向量。

表 2 部分 BP 神经网络训练样本

Table 2 Part of training sample for BP neural network

有裂纹特征向量	无裂纹特征向量
[0.990 8 0.009 2 0.028 6 0.010 7 0.114 8 0.046 9 0.038 7 0.021 8]	[0.870 8 0.066 7 0.114 2 0.050 7 0.293 2 0.229 3 0.246 0 0.149 9]
[0.932 2 0.263 2 0.174 0 0.067 5 0.087 4 0.064 4 0.102 0 0.069 4]	[0.839 6 0.086 9 0.198 9 0.146 7 0.351 6 0.212 8 0.163 7 0.175 1]
[0.969 5 0.109 0 0.075 2 0.111 2 0.093 4 0.062 1 0.103 8 0.083 0]	[0.876 6 0.073 9 0.150 6 0.098 6 0.351 6 0.203 6 0.141 8 0.092 6]
[0.995 8 0.036 1 0.045 6 0.018 1 0.030 3 0.031 1 0.035 6 0.038 9]	[0.894 1 0.094 1 0.196 4 0.132 8 0.169 1 0.167 6 0.167 5 0.225 2]
[0.962 2 0.053 1 0.079 7 0.104 7 0.161 6 0.112 7 0.069 6 0.101 7]	[0.916 8 0.047 8 0.167 3 0.063 0 0.262 1 0.099 4 0.136 9 0.166 9]
[0.956 7 0.139 2 0.069 1 0.064 7 0.050 7 0.114 0 0.176 3 0.098 4]	[0.843 7 0.079 8 0.160 7 0.112 6 0.290 1 0.184 2 0.154 9 0.132 4]

4 基于 BP 神经网络的焊接裂纹识别

研究的目的在于利用 BP 神经网络对焊接裂纹进行识别, 文献[10, 11] 对 BP 神经网络的特点及对磁记忆信号识别的优势做了详细的说明, 此处不再赘述。

由 BP 定理, 对给定的任意 $\epsilon > 0$ 和任意函数 $f: [0, 1]^2 \rightarrow R^m$, 存在一个三层 BP 神经网络, 它可在任意 ϵ 平方误差精度内逼近 f 。对于有无焊接裂纹的分类识别, 建立三层结构的 BP 神经网络如图 3 所示。其中 x_i 为第 i 个输入神经元, y_j 为第 j 个输出神经元。

利用 a, b, c 试件的焊缝检测结果共计 42 组数据作为训练样本, 训练后利用 a, b, c 试件焊缝剩余的 6 组检测结果进行测试, 并且用 d 试件的 16 组检测数据对网络的有效性进行检验, 检验结果如表 3 所示。

表 3 训练和测试及检验结果

Table 3 Result of training, test and verify

样本	识别成功率 (%)	误差 (%)
训练样本 42 个	100	0
测试样本 6 个	100	0
检验样本 16 个	81.3	18.7

作为测试样本的 6 组数据全部成功识别, 在 16 组检验样本中, 有 2 组不包含裂纹的数据被误判为包含裂纹, 有 1 组包含裂纹的数据被误判为不包含裂纹, 检测样本的平均正确识别率为 81.3%。

后对所有焊缝的金属磁记忆检测部位进行 X 射线检测, 发现被漏判的 1 组预制裂纹在试验条件下未扩展, 而其它 31 条焊接裂纹均产生了扩展, 这可能就是该组裂纹被漏判的原因。被误判的无裂纹部位射线检测并未发现裂纹产生, 但是由于焊接是

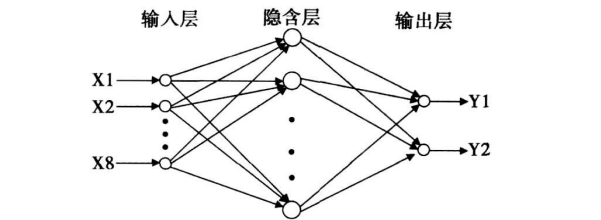


图 3 BP 神经网络模型

Fig 3 Model of BP neural network used intest

一个不均匀的热循环和组织转变过程, 该部为可能产生了严重的应力集中甚至出现了微观裂纹, 在实际检测中应对该部进行重点监测。

5 结 论

- (1) 通过铁磁性材料表面的金属磁记忆信号对材料内部是否存在裂纹等缺陷进行评估是可行的。
- (2) 利用 BP 神经网络技术, 将铁磁性材料金属磁记忆信号的小波包能量作为特征向量, 可以较好地实现对焊缝中是否存在焊接裂纹的识别。
- (3) 研究是基于试验条件下 API 5L X70 管线钢进行的, 尚缺少管道实际运行条件下的相关数据, 对于其它类型的铁磁性材料仅具有参考价值。

参考文献:

[1] Jiles D C. Theory of magnetomechanical effect[J] . Journal of Physics D: Applied Physics, 1995, 28(8): 1537—1546.
[2] Jiles D C, Li L. A new approach to modeling the magnetomechanical effect[J] . Journal of Applied Physics, 2004, 95(11): 7058—7060.
[3] Liu T, Kikuchi H, Ara K. *et al.* Magnetomechanical effect of low

carbon steel studied by two kinds of magnetic minor hysteresis loops [J] . NDT & E International, 2006, 39(5): 408—413.
[4] Wushen LI, Xinjie DI, Shiwu BAI *et al.* Feature analysis of metal magnetic memory signals for weld cracking-based on wavelet energy spectrum [J] . INSIGHT: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring, 2006, 48(7): 426—429.
[5] 邱新杰, 李午申, 白世武, 等. 焊接裂纹的金属磁记忆信号量化评价研究[J] . 材料工程, 2006(7): 56—60.
[6] 邱新杰, 李午申, 严春妍, 等. 焊接裂纹金属磁记忆信号的特征提取与应用[J] . 焊接学报, 2006, 27(2): 19—22.
[7] 张 军, 王 彪, 计秉玉. 基于小波变换的套管金属磁记忆检测信号处理[J] . 石油学报, 2006, 27(2): 137—140.
[8] 张亚梅. 油气管道的磁记忆检测技术应用及其对比性定量的初探[D] . 天津: 天津大学, 2004.
[9] 彭玉华. 小波变换与工程应用[M] . 北京: 科学出版社, 1999.
[10] Christen R, Bergamini A. Automatic flaw detection in NDT signals using a panel of neural networks[J] . NDT & E International, 2006, 39(7): 547—553.
[11] 邱新杰. 焊接裂纹金属磁记忆信号量化特征研究[D] . 天津: 天津大学, 2007.

作者简介: 邱新杰, 男, 1973 年出生, 博士。主要从事无损检测方面的科研工作。发表论文 10 余篇。

Email: welding_dxj@yahoo.com.cn

MAIN TOPICS, ABSTRACTS & KEY WORDS

In situ synthesis of Co_p/Cu composite coating by laser cladding

HE Yizhu¹, LU Yun² (1. School of Materials Science and Technology, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, Anhui, China; 2. Anhui Key Laboratory of Materials and Processing, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, Anhui, China). p1—4

Abstract: Uniform Co_p/Cu composite coatings were fabricated by laser cladding and rapid solidification technique, and the influences of processing parameters on microstructure were investigated by scanning electron microscope and energy dispersive spectroscopy. The results showed that high undercooling in the laser melting pool was helpful to the liquid phase separation of Cu-Co alloy. Co_p/Cu composite coating with smooth surface can be successfully in situ synthesized when the processing conditions were well controlled. The as-solidified microstructures were characterized by a distribution of small spherical Co-rich particles homogeneously dispersed in the Cu-rich matrix. Co_p/Cu coating was consisted of γ -Co and Cu-rich solution. With the decreasing of laser heat input, the diameters of spherical particles in coating decreased. The microstructural evolution and refining mechanism of the Co_p/Cu coatings were also discussed.

Key words: laser cladding; liquid phase separation; coating; microstructure

Development of wear resisting surfacing electrode with high efficiency, high hardness and low cost

ZHANG Qinghui, XIAO Yifeng, GONG Jianxun (School of Mechanical Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, Hunan, China). p5—8

Abstract: A new type of wear-resisting surfacing electrode with high efficiency, high hardness and low cost was developed. A large number of iron powders, proper graphite, without any ore powders and little or without expensive components were added in electrode coating by systematically adjusting coating compositions and alloy constituents. This improved the combination properties of the electrode as well as reduced cost. Results show that the usability of the electrode are well. The melting efficiency, deposition efficiency and recovery factor of the electrode are up to 3 Kg/h, 226.9% and 80%, respectively. The hardness of single layer deposited metal reaches 67 HRC, the wear resistance is 1.52 times of a commercial high chromium casting iron electrode and the crack resistance is better at the same time.

Key words: surfacing electrode; wear; high efficient; high hardness; low cost

Study on PWHT improving toughness at IRCGHAZ of WB36 steel

WANG Xue¹, CHANG Jianwei², CHEN Fangyu³, QIU Minglin² (1. School of Power and Mechanics, Wuhan University,

Wuhan 430072, China; 2. Henan No. 1 Power Construction Company, Pingdingshan 467031, Henan, China; 3. Technology Centre, Wuhan Iron and Steel Corporation, Wuhan 430080, China). p9—12

Abstract: This study is concerned with the effect of post welding heat treatment (PWHT) on the microstructure and properties at the intercritical reheated coarse-grained heat-affected zone (IRCGHAZ) of WB36 steel, and investigated whether the PWHT could reduce IRCGHAZ embrittlement. The results showed that the hardness at IRCGHAZ has little change, but the toughness exhibited significance increase after PWHT at the temperature of 590 °C for 2 h, with the Charpy impact toughness increasing 85 percent comparing with the as welded IRCGHAZ. Fractographs of IRCGHAZ is found to be changed from the mixed fractographs of quasi-cleavage facets and microvoids to purely microvoids after PWHT. Enhancement of toughness at IRCGHAZ is caused by the decomposition of M-A constituents at the lath martensite boundaries occurred during the PWHT, and lath martensite in the matrix of IRCGHAZ is showed little change, which have little influence on the toughness.

Key words: low alloy high strength steel; intercritical reheated coarse-grained heat-affected zone; post welding heat treatment; M-A constituent; embrittlement

Metal magnetic memory signal recognition by neural network for welding crack

DI Xinjie¹, LI Wushen¹, BAI Shiwu^{1,2}, LIU Fangning^{1,2} (1. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Research Institute of Pipeline, China Petroleum Corporation, Langfang 065000, Hebei, China). p13—16

Abstract: Metal magnetic memory (MMM) is one of non-destructive testing method which inspection or evaluation ferromagnetic material used the inner magnetic information. It has been considered as a potential predominance for early diagnosis of crack. The wavelet analysis is employed to extract the MMM signal energy feature with or without welding crack for API 5L X70 pipeline steel at the condition of hydraulic pressure, and then the back propagation (BP) neural network is used to distinguish the weld with crack from free crack that energy feature is used as input eigenvector. The result shows that used the wavelet analysis and BP neural network can recognize the welding crack preferable.

Key words: welding crack; metal magnetic memory; feature extraction; neural network

Grain refinement of heat affected zone of high strength low alloy steel by large heat input welding

YU Shengfu¹, YANG Ke¹, LEI Yi², YANG Hua¹ (1. School of Material Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan