标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

钢材硬度涡流无损检测技术的研究

吴步宁
(湖北汽车工业学院电气工程系, 湖北十堰 442002)
陈志祥
(华中理工大学机械科学与工程学院, 湖北武汉 430074)

摘 要 讨论当前钢材硬度涡流无损检测面临的两个难点, 提出了一个新的检测方法, 即使用Fourier系数的均方差构成决策图, 并用多频涡流的方法, 对钢材硬度进行分类检测。

主题词 涡流检验 硬度 概率 分类检测

RESEARCH ON EDDY CURRENT NONDESTRUCTIVE TESTING OF STEEL HARDNESS

Wu Buning
(Hubei Automotive Industries Institute)
Chen Zhixiang
(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan)

Abstract Two difficulties in eddy current nondestructive testing of steel hardness were discussed. A new method was put forward that the decision-plane formed by the average square error of Fourier coefficient and multi-frequency eddy current method were used to classify steels by hardness.

Keywords Eddy current testing Hardness Probability Classification inspection

多年来, 人们致力于用涡流方法进行钢材硬度无损检测的研究工作, 并取得了大量成果。然而有两个难点使这种技术无法在生产实际中应用推广, 即① 作为检出值的涡流阻抗值与钢材硬度值之间存在较严重的非线性。② 相同牌号不同炉号钢材的电磁特性相差较大。为解决这两个难点, 本文分析了标准试件比较法存在的问题, 提出了一个新方法——群样本比较法, 并介绍了此方法的理论基础。

1 标准试件比较法及其存在的问题

标准试件比较法检测线路如图1所示, 具体方法是在检测前, 先在同炉号被检试件中用硬度计打硬度的方法找出标准试件和确定合格试件的硬度范围。在检测过程中, 如被检试件的涡流响应信号在此硬度范围内, 认为是合格件, 否则为不合格件。从理论上看, 这种方法是可行的, 但实际上行不通。首先标准试件和边界条件试件难以找出, 其次由于金属材料硬度与涡流响应信号之间存在严重的非线性, 致使在实际检测中无法判别材料硬度。尽管文献[1]认为调整检测参数(激励电流和频率的大小)可得到近似的线性关系, 但由于同牌号不同炉号钢材的电磁特性相差较大, 且无规律, 因此每更换一次炉号都要做大量的实验, 所以用这种检测方式设计的检测仪无法在实际检测中使用, 而只能在实验室中用来做实验。

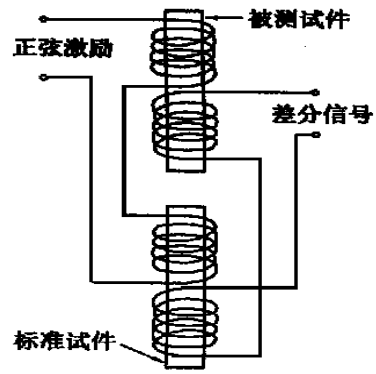


图1 标准试件比较法检测示意图

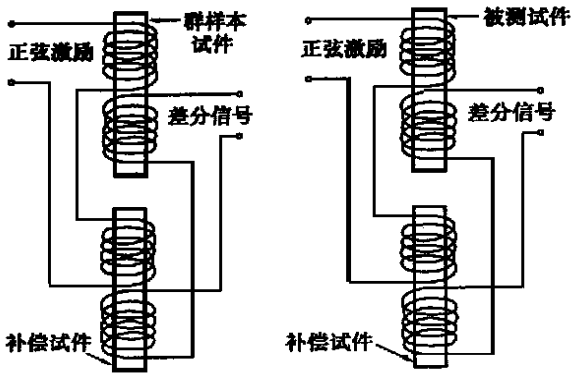
2 群样本试件比较法

群样本试件比较法检测线路如图2所示。该方法分两步进行, 第一步在同一炉号的被检试件中任选一个作为补偿试件, 其主要作用是补偿磁场、化学以及热处理方面的干扰。然后取出一批试件用硬度

© 1995-2004 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

计打硬度的方法选出一定量的合格试件作为群样本。按图 2a 所示的方法检测出每个合格件的涡流阻抗值, 并按一定算法构成决策带; 第二步按图 2b 所示方法进行, 当被测试件的阻抗值在决策带范围内时, 为合格品, 否则为不合格品。



(a) (b)

图 2 群样本检测线路图

3 钢材硬度的检测与分类

对钢材硬度的分类只需作出是“合格”还是“不合格”的判别。这在数学上可归为多元统计数据分析中的判别分析问题, 具体说是两总体判别问题, 即判别一个样本究竟属于已知的两个总体 G_1 和 G_2 中的哪一个。

在两总体的情况下, 距离判别法[2]较为直观, 假设有两个总体 G_1 和 G_2, $x \in R^p$ (R^p 为实数空间) 是一个新样本点, 定义 x 到 G_1 和 G_2 的距离分别为 $d(x, G_1)$ 和 $d(x, G_2)$, 则可用如下规则进行判别

$$\begin{cases} x \in G_1, d(x, G_1) < d(x, G_2) \\ x \in G_2, d(x, G_2) < d(x, G_1) \\ \text{要另行判别}, d(x, G_1) = d(x, G_2) \end{cases}$$

在判别分析中常采用马氏(Mahalamobis)距离, 其主要优点是可以克服变量之间的相关性干扰, 并可消除各变量量纲的影响。其基本假设是 G_1 和 G_2 均为正态总体, 这时

$$d^2(x, G_1) = (x - m^{(1)})^T \sum_1^{-1} (x - m^{(1)})$$

$$d^2(x, G_2) = (x - m^{(2)})^T \sum_2^{-1} (x - m^{(2)})$$

式中 $m^{(1)}, m^{(2)}$ ——G_1 和 G_2 的均值

$\sum_1^{-1}$, $\sum_2^{-1}$ ——G_1 和 G_2 协方差阵的逆矩阵

由文献[3]可知其涡流阻抗图能用 Fourier 级数来描述, 将其进行适当变换, 并取其有限项, 则表达式为

$$u(l) = \sum_{k=1}^{n} A_k \cos\left(\frac{2\pi n l}{L} - \alpha_k\right)$$

式中 A_k, α_k ——第 k 次谐波的幅值和相位

L ——围线的总长度

由 Fourier 级数的代数性质, 可重构出原涡流阻抗图, 因而提供了信号分类的基础。

Fourier 级数表达式的幅值系数包含有涡流阻抗图的图形信息, 这些系数可用来对涡流阻抗图的图形进行分类。直接比较可知, 它们之间的差提供了信号分类的基础。但实际上并不是直接比较 Fourier 系数而是将其构成特征矢量, 即将 Fourier 系数作为 n 维矢量的元素, 则这个矢量的幅值就成为信号间进行比较的判据。若记单个特征矢量元素为 a_k, 则特征矢量的幅值定义为

$$\| a \| = \left[\sum_{k=1}^{n} a_k^2 \right]^{1/2}$$

上式也是 n 维空间一点到原点的欧几里德距离。这样用七个 Fourier 幅值系数和一个三次谐波的相位元素组成八个元素的特征矢量, 以此来对信号类型进行比较鉴别。

由于合格品的样本容易取得, 因此取合格品的涡流信号来产生一组原型矢量(即群样本)。对每一个合格品, 在固定的频率下计算它的七个 Fourier 幅值系数和一个三次谐波的相位, 构成原型特征矢量。这个特征矢量描述的是八维特征空间中的一个点, 其坐标为

$$a = (a_1, a_2, a_3, \cdots, a_8)$$

一般情况下, 各合格品的特征矢量是有差别的, 这些特征矢量的样本可构成一个集合, 称为训练集。它将围绕一个中心点, 该中心点可由各特征矢量元素的均值计算出来, 即

$$a = (\bar{a}_1, \bar{a}_2, \cdots, \bar{a}_8)$$

式中 $\bar{a}_1, \cdots, \bar{a}_8$ —— 各原型特征矢量的坐标值的均值

训练集中各点与中心点的距离很容易计算出来, 一般欧几里德 n 维空间中两点间的距离公式为

$$D(a, b) = \| a - b \| = \left[\sum_{k=1}^{n} (a_k - b_k)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

上式可用来对涡流信号进行分类。由于金属材料的组织结构和化学成分不会完全相同, 因而训练集中各点与中心点间的距离也不相同, 这样可在各点与中心点距离统计知识的基础上构成一个决策带。对于所有信号, 其距离在决策带内为合格, 否则为不合格。决策过程见图 3, 图中用两个特征量进行描述(实际是用八个特征量), 用九个合格件作为原

© 1995-2004 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

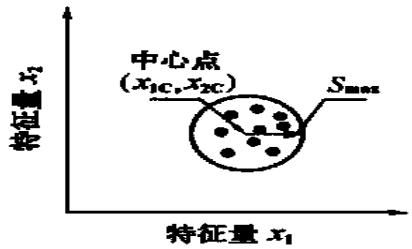


图 3　二维特征空间分类图

合格品类 $S \leq S_{max}$; 不合格品类 $S > S_{max}$

$S = [(x_{1C} - x_1)^2 + (x_{2C} - x_2)^2]^{1/2}$

型矢量, 由于信号间的轻微差别, 在二维特征空间中形成了九个分离的点, 构成训练集。以这九个点的平均坐标值作为中心点, 以训练集中与中心点距离最大的点为半径作一个圆, 作出的圆周线就是决策带。对于任意一个涡流信号, 其特征矢量与中心点间的距离用式(1)计算, 若距离小于或等于某个设定值 S_{max}, 则信号被分类为合格, 否则为不合格。

4　误判的概率估计[2]

实际上无论用什么方法, 都会有误判的可能, 所以检验误判概率是评价判别是否有效的一个依据。

一种统计误判率的简单方法是建立分类矩阵。设有 K 个总体 $G_1, G_2, \cdots, G_k$, 共有样本点数 $n = n_1 + n_2 + \cdots + n_k$。当利用这些样本数据建立判别函数和判别规则后, 再将这 n 个样本点回代到判别函数中, 如某个样本点原属于 G_I 总体, 而通过判别规则判断, 它却属于 G_J 总体 $(I \neq J)$, 这就属于误判。各总体的误判情况见附表, 其中误判率 p 的估计量为

$$p = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{k}\sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{k} m_{ij} = \frac{1}{n}\left(n - \sum_{i=1}^{k} m_{ii}\right)$$

$$p(j \mid i) = \frac{m_{ij}}{n_i}$$

式中　$p(j \mid i)$ —— 原为第 i 总体的样本, 而被误判为第 j 总体的概率

则误判率估计量可由试验数据得到。

在上述信号分类方法中, 还可能存在综合误差。这些误差可能是由于训练集中原型矢量的数量有限或特征矢量选取不当等造成。解决的方法之一是选择一个合适的阈值, 对误差进行合理的修正。

附表　概率分布

原始分类	判别分类				样本数
	G_1	G_2	…	G_k	
G_1	m_{11}	m_{12}	…	m_{1k}	n_1
G_2	m_{21}	m_{22}	…	m_{2k}	n_2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
G_k	m_{k1}	m_{k2}	…	m_{kk}	n_k

分别对合格品原型矢量和不合格品信号矢量到中心点的距离进行计算、统计, 构成概率分布函数。如图 4 所示, 合格品信号距离范围为 0.01< S < 0.23, 最大概率值在 S = 0.035 处。不合格品信号距离范围为 0.08< S < 3.0。而且两类信号有重叠部分, 不能无误差地将它们分开, 为此, 选择一个阈值为 S = 0.08(图 4 虚线), 可见, 这样有可能将合格品信号误判为不合格, 但这个误判率可以估计出来, 即为在 0.08≤S ≤0.15 范围内合格品信号概率分布面积与曲线下总面积的比值, 结果为 5%。

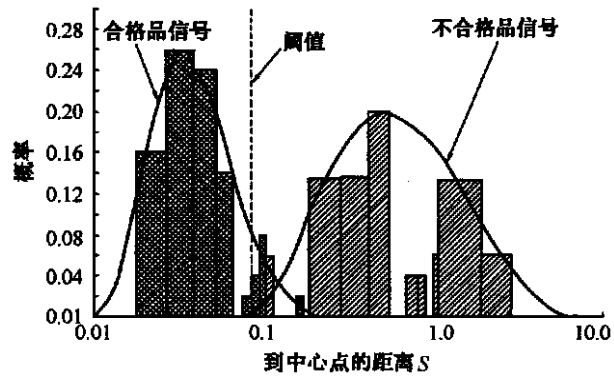


图 4　合格和不合格信号的概率分布

以上所述是在单一固定频率下进行的, 而实际中采用多频涡流技术, 可进一步减少误差。根据以上原理设计的涡流检测仪可预先选择八个频率, 这样, 对于一批合格品信号的原型矢量, 就可构成八个训练集。在硬度检测中, 被检件经过八个频率的检测, 当与八个频率对应的矢量点均落在各自对应的八个训练集中时, 该被检件才判定为合格品; 只要有一个矢量点不在对应的训练集中, 就为不合格品。八个频率的选择原则是, 最高频率与最低频率的比值尽可能取大一些, 一般为 800～1 000。如最高频率为 10kHz, 则最低频率可取 10～15Hz。可见, 采用多频涡流技术, 减少了误判, 提高了检测的准确性。

5　实例

根据上述原理设计了一台多频涡流检测仪(EDDY-1 型), 用于对锻造厂生产的汽车连杆进行硬度分类试验。材料为 40MnB, 热处理采用锻造余热淬火, 回火后的合格表面硬度要求为 HB302～255(Φ10mm 钢球的 3 000kg 负荷, 压痕 3.5～3.8mm), 检测时选用八个频率(25Hz～125kHz)。检

(下转第 268 页)

© 1995-2004 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

标准分享网 www.bzfxw.com 免费下载

一种孤立夹渣则限制更严, 当管外径> 60.3mm ($2\frac{3}{8}$ in)时, 孤立夹渣最大宽度≤3.17mm (1/8in), 在304.8mm (12in)长的焊缝中, 孤立夹渣总长度≤12.7mm (1/2in), 且规定了在同一方向上宽度为3.17mm (1/8in)的孤立夹渣总数不超过4个。这意味着API 1104标准对于体积型缺陷控制较严。而JB 4730标准将长宽比> 3的夹渣列为条状夹渣评定范围, 而条状夹渣的允许长度主要是以所占壁厚比作为控制长度, 同时规定了最小壁厚时允许的最大尺寸, 以及最大壁厚时允许的最大尺寸。笔者认为JB 4730标准对夹渣的评定方面较之API 1104标准更易于执行, 不但考虑了长度限量, 同时也考虑了壁厚的影响, 更省却了对夹渣分类的繁琐。

2.6 气孔

API 1104标准首先将气孔分为四类, 即球形气孔、密集气孔、虫形气孔和链状气孔, 对不同类型的气孔有不同的评定要求, 与夹渣一样执行起来较为繁琐, 在气孔分类的界定方面, 争议也较大。唯一比较宽松的是在盖帽焊中发现的密集气孔, 允许其最大面积≤12.7mm (1/2in), 限制条件是其中任一气孔的最大尺寸≤1.59mm (1/16in)。JB 4730标准对气孔的评定方面就较简单, 易于执行, 首先将长宽比≤3的缺陷定义为圆形缺陷, 无需再对其性质详细界定; 其二对分散圆形缺陷划定评定区域, 限制其总点数, 同时限制了最大单个圆形缺陷尺寸(< $T/2$), 执行起来确实方便得多, 当然也较为宽松。如ϕ114mm ×6mm管对接焊缝, Ⅰ级焊缝允许1点, Ⅱ级焊缝允许3点, Ⅲ级焊缝允许6点, 超过6点者判为Ⅳ级。而API 1104标准对于同样规格的管对接焊缝, 只允许存在≤1.5mm的球形气孔或虫形气孔, 否则应予判废。

3 建议

综上所述, 美国API 1104标准在未熔合、未焊透和内凹等缺陷评定方面较之JB 4730标准更客观、更易于执行, 同时将咬边列为评定项目, 无疑对提高焊口质量是有益的, 但对于夹渣和气孔类缺陷评定较之JB 4730标准, 则显得过于繁琐, 且难于界定, 不便于执行。虽然这两个标准分属于不同的标准体系, 但作为探伤人员则更希望我国现行的探伤标准向国际公认的标准靠拢, 同时希望标准执行起来更为方便, 为此提出几点建议, 供标准制订者在修改标准时参考。

(1) 管口焊缝中应允许限量未熔合和弧口裂纹存在, 这种规定反而有利于控制焊口质量。

(2) 对于未焊透或内凹等缺陷应取消其自身深度的限制条件。

(3) 应增加对咬边缺陷的限制, 这无疑对提高焊口质量有积极意义。

(4) 不计点数的圆形缺陷, 由限制点数改为限制其面积则更加客观, 且便于执行。

参 考 文 献

1 API 1104—95 管道焊接和有关设备标准
2 JB 4730—94 压力容器无损检测

收稿日期: 1999-11-01

(上接第245页)

测分为两步, 第一步从生产线任意选取187个同炉号连杆, 用硬度计打硬度, 其中合格件数178, 不合格件中有六个偏软, 三个偏硬。任选一个连杆作为补偿件(压痕3.7mm), 用30个合格件形成决策带, 将剩下的156个进行三次重复试验, 结果都是合格的140个, 不合格的16个, 误判率4.48%。误判是将合格件判为不合格件, 而在合格件中没有误判。第二步决策带不变, 选不同炉号的连杆87个进行检测, 结果误判率达32.18%。由此可见, 不同炉号的连杆不能用同一决策带进行分类, 因为不同炉号钢材的电磁特性相差较大。所以要重新确定决策带。尽管上述实例的误判率约为5%, 但有两方面的原因使该方法可实际用于工业, 其一是在合格区域内没有误判, 误判发生在将合格品判为不合格品; 其二是采用群样本方法避免了不同炉号钢材的非线性校正(多频率方法)。因此, 该方法能满足工业生产的需要, 可实现对钢材硬度100%检测, 保证产品的出厂质量。

参 考 文 献

1 万庆国, 樊景云. 结构钢硬度电磁无损检测的研究. 金属热处理, 1996(4): 5-7, 26
2 任若恩, 王惠文. 多元统计数据分析——理论、方法、实例. 北京: 国防工业出版社, 1997.
3 Udpa SS, Lord W. A Fourier descriptor classification scheme for differential probe signals. Materials Evaluation, 1984, 42(8): 1136-1141

收稿日期: 1999-08-10

© 1995-2004 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.