

碳钢焊缝组织石墨化显微图像的自动测量

王雅生, 刘晓平, 蔡洪能

(西安交通大学焊接研究所, 710049, 西安)

摘要: 针对压力锅炉、中温中压机组主蒸汽管道碳钢部件焊缝处金相组织石墨化程度的检测问题, 将数字图像处理 and 模式识别技术运用于显微金相组织测量之中, 选择适合的算法, 通过用 Visual Basic. Net 编程, 建立了一套对石墨进行形状表征和粒度测量的图像检测系统. 系统利用扫描仪将金相照片转换为可进行图像分析的格式, 或用 CCD 摄像机经光学显微镜获取数字化金相图像; 针对石墨化部位原始图片灰度区间窄的特征, 预处理着重进行全域线性灰度变换, 使图像清晰, 突出石墨组织; 采用基于二维直方图 Fisher 线形分割的图像分割方法选取二值化阈值, 能够更好地分开不同的聚类, 且计算量小; 图像识别采用边缘检测区域的办法, 可提取出要检测的粗大呈黑色的石墨组织. 该系统实现了对碳钢石墨化组织中石墨的定量化测量, 对石墨各项指标的测量值为精确的数字结果, 且检测速度快(不超过 5 min), 效率高. 实测结果表明, 自动检测系统与金相分析法的分析结果完全吻合.

关键词: 石墨化组织; 数字图像处理; 图像测量; 定量分析

中图分类号: TN91 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253 - 987X(2004)03 - 0282 - 04

Auto-Measurement of Digital Image for Graphite in Carbon-Steel Welding Microstructure

Wang Yasheng, Liu Xiaoping, Cai Hongneng

(Welding Research Institute, Xi an Jiaotong University, Xi an 710049, China)

Abstract: On the basis of digital image processing and pattern recognizing techniques, a quantitative auto-measurement system was developed to diagnose the graphitization degree of carbon steel welding microstructure for pressure vessel and main steam pipeline after long-time running under middle temperature and middle pressure. A graphic measurement system was programmed for the shape attribute and the granularity of graphite by using Visual Basic. Net and choosing appropriate algorithms. The system can transform the picture into the mode of graphic analysis by using CCD camera, and can pretreat the pictures focusing on full-linear-gray-transformation to make the picture with narrow gray-level range of the original graphite structure clear and the graphite overhanging. The different clustering can be classified with less calculation by choosing the threshold based on the 2-D histogram. The image recognition can pick the coarse and black graphite structure by using the edge-measuring method. The experiments show that the measurement time is less than 5 minutes and the results have a good agreement with those obtained from metal-microstructure analysis.

Key words: graphite microstructure; digital image processing; image measurement; quantitative analysis

压力锅炉、中温中压机组的主蒸汽管道、过热器、水冷壁、阀门、三通及高温高压机组的有关部件等普遍采用碳钢材料制造, 长期服役后会发生石墨

化转变, 导致管道材质变脆, 最终发生爆管等事故, 因此监督和检测石墨化状况将是一项重要工作. 现行的碳钢石墨化检验及评级标准中, 采用人工目测

收稿日期: 2003 - 07 - 04. 作者简介: 王雅生(1946~), 男, 教授.

试样并与标准图谱相对照的方式进行石墨化评级,误差很大,平均误差为 0.5 级,人为因素多且重复性不好。

随着图像处理和模式识别技术的不断发展和完善,虽然各种自动化测量仪相继问世,但碳钢部件焊缝处的石墨金相组织检测一直以来都采用传统金相法和密度法,精度差,效率低。为此,我们运用图像处理和模式识别技术^[1],在分析数学模型与算法的基础上,选择适合计算机定量计算并能满足实践要求的算法,运用 Visual Basic. Net^[2]编程,实现了对石墨化碳钢焊缝组织中石墨的自动化定量测量。

1 石墨检测系统原理

石墨测量软件基本上由数字图像采集、图像预处理、图像测量和统计评级几部分组成,如图 1 所示。

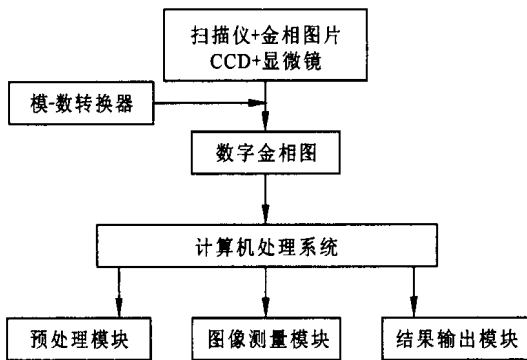


图 1 石墨检测系统原理图

获得金相数字图像有两种方法,即:利用台式扫描仪将已有的金相照片按一定的扫描分辨率和模式转换为可以进行图像分析的格式;利用 CCD 摄像机通过光学显微镜直接对光学金相图像进行数字化处理,在进行视频采集时,可做多帧以去除随机噪声,提高图像清晰度。

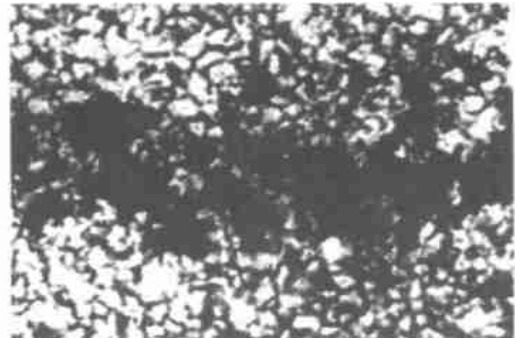
2 图像处理

2.1 图像预处理

在前处理中,需要对图像进行彩色-灰度变换,将彩色图像转变为灰度图像以便于统计分析。图像预处理的主要目的是从晶粒的数字图像中提取出用于测量的、与原始晶粒图像相吻合的清晰图像,进行图像的平滑与锐化处理以改善图像质量,进行图像的腐蚀与扩张以去除分析相中的孤立点。

一般情况下,原始图像的灰度区间比较窄,尤其是在石墨化部位,如图 2 所示,而且由于各种因素的

影响,图像经常含有噪声,石墨形态特征有时会被湮没。运用全域线性灰度变换,可增强缺陷与背景的反差,使图像清晰,特征明显,提高图像的对比度^[3]。灰度变换前的图像及其直方图如图 2 所示。经灰度变换后,图像的对比度得到了增强。灰度变换后的图像及对应的直方图如图 3 所示。



(a) 灰度变换前的图像 ×200



(b) 灰度变换前的直方图

图 2 灰度变换前的图像和直方图

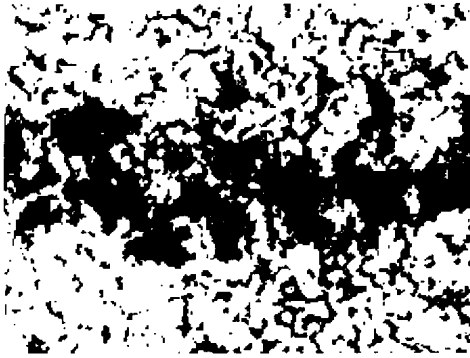
2.2 图像二值化

图像经预处理后,石墨区域已经明显,但在自动识别前须进行图像分割。图像分割方法中的阈值化法因易于实现、计算量小及性能较稳定而被广泛使用。这里采用单一阈值,设 $f(i, j)$ 为原图像的灰度值, $g(i, j)$ 为阈值图像的灰度值, T 为阈值,则

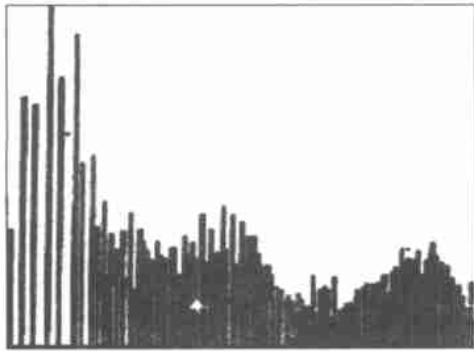
$$g(i, j) = \begin{cases} 255, & f(i, j) > T \\ f(i, j), & f(i, j) \leq T \end{cases}$$

由此可见, T 的选择很重要:若阈值选得过低,会将目标物体的像素误归为背景;若阈值选得过高,则背景难以去除。

阈值的选取方法很多,在近 30 多年中,国内外学者提出了 10 类共计 50 余种方法。这里采用自动阈值选取,以适应不同图像。常用的直方图方法以直方图中双峰间谷底处的灰度值作为阈值,直观而且快速。但是,焊缝石墨图像的直方图上双峰不明



(a) 灰度变换后的图像 ×200



(b) 灰度变换后的直方图

图 3 灰度变换后的图像和直方图

显,故经过实验,采用一种基于二维灰度直方图 Fisher 线形分割的图像分割方法. 这种方法的优点是相对于一维灰度直方图来说,能够更好地分开不同的聚类,而且是在一维信息中寻优,计算量小. 它既达到了二维分割的精度,又有一维寻优的速度,总体性能明显优于现有的两类方法^[4]. 具体算法如下.

(1) 根据

$$g(i, j) = \frac{1}{9} \sum_{s=-1}^1 \sum_{t=-1}^1 f(i+s, j+t)$$

计算各点的 3 × 3 邻域的平均灰度值,得出邻域平均灰度直方图.

(2) 对邻域平均灰度直方图,用改进的 Otsu 法求得阈值 T .

Otsu 法是 1978 年提出的最大类间方差法,是在判决分析和最小二乘原理的基础上推导出来的,经实验,对于一般实时应用效果较好. 这种方法不管直方图有无明显双峰,都能得到较满意的结果,但它采用原始的穷举搜索法,计算时间长. Reddi 利用梯度概念,改进了 Otsu 法^[5]. 其算法如下.

计算阈值

$$k_c = \left(\sum_{l=0}^{255} h(l) \cdot l \right) / \sum_{l=0}^{255} h(l) = m_0$$

式中: l 为灰度级数; m_0 为灰度平均值; c 为迭代次数; $h(l)$ 为各灰度级出现的频数. 给定允许误差 ϵ , 令 $c=0$ 时可算得初始阈值 k_0 .

计算梯度

$$e_c = \frac{m(0, k_c) + m(k_c, 255)}{2} - k_c$$

判断是否满足 $|e_c| < \epsilon$, 若满足则转至步骤 3, 否则继续.

令 $k_{c+1} = k_c + e_c$.

令 $c = c + 1$, 转至步骤 2.

输出 k_c 作为阈值.

(3) 对图像进行阈值化处理, 图像灰度值大于阈值的像素置为白, 小于阈值的像素不变. 图 4 所示图像分割的阈值取为 130.

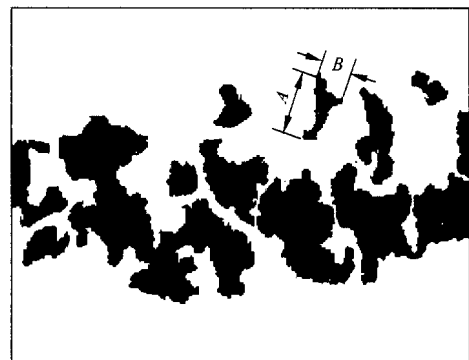


图 4 阈值处理后的二值化图像 ×200

2.3 石墨与机体组织的图像识别

图像处理,重要的是进行识别. 为区分石墨和机体组织,主要考虑两个方面: 从灰度上讲,石墨呈黑色,碳钢机体组织大体呈灰白色; 从几何形状上看,石墨相对机体组织来说更粗大,因此区分它们可用尺寸来进行.

采用边缘检测区域的办法提取出要检测的粗大呈黑色的石墨组织. 由于边缘是图像的灰度阶跃部分,所以通过一次微分就可得到该处的拐点

$$f(x, y) = \{ [f(x+1, y) - f(x, y)]^2 + [f(x, y+1) - f(x, y)]^2 \}^{1/2}$$

对每个点寻找其附近的梯度时,在边界附近一定能找出其极大值,将所有梯度为极大值的点连接起来,就可得到边界线.

3 石墨形态各参数指标的测量

采用标号法对二值图像中不同的石墨区域进行

标号. 所谓标号法,就是指图像中不同的物体(即目标物)都有惟一识别的号码,在同一物体中,所有像素点的标号都是一致的,而在不同的物体之间标号则完全不同. 这样,就可以对每一个颗粒进行检测,同时计算出每一个颗粒的参数指标.

3.1 测量参数的选取

(1) 面积 S : 主要是对相同标号的对象进行统计,得到每个对象的像素点的总和,将像素点总数乘以单个像素点的面积,即可得到每一个石墨区域的面积.

(2) 周长 L : 对于二值图像来说,通常情况下是对图像的边缘像素作出标记,然后累计所标记的像素个数,再乘以单个像素点的边长,所得就是图像的周长.

(3) 等效面积 S/L : 面积与周长之比.

(4) 长径 A 和短径 B : 通过对黑色区域(在本例中即为要测量的石墨对象)进行边缘跟踪,可以确定其大小. 边缘跟踪时记下边缘坐标,找出最长两点间的距离,即为所测石墨对象的长轴;找出垂直于长轴方向的最大距离,即为该石墨区域的短轴.

(5) 圆形度 M : 周长平方与面积之比.

3.2 测量实例及统计评级

上面图 2a 为对某电站已累计运行 32 万 h 机组的蒸汽管道进行割管石墨化检查时,在弯管焊缝处割取的试样图片. 该机组的运行参数为:蒸汽温度 450,蒸汽压力 3.8 MPa,主蒸汽管道材质为 20 号碳钢,规格为 $\varnothing 219 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$. 测量是在未浸蚀的试样上进行的,放大倍数为 200 倍,测定其中最长的 3 条石墨的长度平均值作为被观察视场的石墨长度. 单个石墨长度的计算仍利用边缘跟踪法找出长轴. 在所取视场的石墨化最严重的部位,最大石墨颗粒的主要参数如下:面积 S 为 $1\,350 \mu\text{m}^2$,周长 L 为 $166 \mu\text{m}$,长径 A 为 $65 \mu\text{m}$,短径 B 为 $12 \mu\text{m}$,等效面积 S/L 为 8.1,圆形度 M 为 20.1.

可以利用计算机处理速度快、重复性好的特点,采集不同视场、不同颗粒进行多次测量,统计测量值并对其进行适当处理,从而获得所需的参数. 根据中华人民共和国电力行业标准《碳钢石墨化检验及评级标准》(DL/T 786 - 2001)^[6],将石墨化程度分为 4

个等级,我们所选焊缝处金相组织的石墨化已呈明显的链状分布,石墨化级别为 4 级,为严重的石墨化. 这些链状石墨的存在,相当于在焊缝热影响区附近生成了一条脆弱的环带,破坏了管道局部横截面的连续性,会使管道最终发生脆性爆破.

测试结果表明,石墨测量系统与金相分析法的分析结果是完全吻合的.

4 结 论

从本文的理论分析和实际检测可以看到,用计算机来处理灰铁的金相图片是可行的. 计算机辅助金相分析与传统检验方法的显著区别在于它对石墨长度、面积及基体组织所给出的测量值是精确的数字结果,而不是模糊的等级判别,从而可根据所测得的石墨参数指标对石墨化程度进行更准确的评定. 图像处理和图像测量程序都用 Visual Basic. Net 编写,界面友好. 由于 Visual Basic. Net 的完全面向对象特点,使得软件在二次开发上具有组成灵活、扩充方便的优点,根据不同测试要求,对软件稍作修改或功能组合就能适应实际测量的要求,提高了测试精度、速度和计算的准确性,提高了碳钢石墨化的检测效率.

参考文献:

- [1] 李兰友,李 玮. Visual Basic. Net 图形图像编程与实例详解[M]. 北京:电子工业出版社,2002.
- [2] 吴巧泉,肖 林,林满山. Visual Basic. Net 实用全书[M]. 北京:电子工业出版社,2002.
- [3] 王积分,张新荣. 计算机图像识别[M]. 北京:中国铁道出版社,1988.
- [4] 龚 坚,李立源,陈维南. 基于二维直方图 Fisher 线性分割的图像分割方法[J]. 模式识别与人工智能,1997,10(1):1~7.
- [5] Reddi S S, Rudin S F, Keshavan H R. An optimal multiple threshold schema for image segmentation[J]. IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics,1984,14(4):661~665.
- [6] DL/T 786 - 2001. 碳钢石墨化检验及评级标准[S].

(编辑 葛赵青)