

基于 ICT 的石墨密度均匀性检测方法研究

李俊杰, 韩 焱, 王黎明

(中北大学 电子测试技术国家重点实验室, 太原 030051)

摘 要:针对工程中石墨密度检测的难点,提出一种基于 CT 的石墨密度均匀性检测方法。该方法通过石墨投影数据的重建,对 CT 切片进行圆区域的平均灰度值统计,求出各切片层的相对密度,并以 3σ 标准对其评判。实验表明,该方法可以有效地求出石墨制品内部密度的均匀程度,并对其制品密度的疏松或密集处作出准确判断。

关键词:X 射线工业计算机断层扫描成像技术;相对密度;疏松;密集

中图分类号:TP391;TH145.1+3

文献标识码:A

文章编号:1000-6656(2008)03-0163-02

Study on the Method of Graphite Density Uniformity Inspection Based on X-Ray ICT

LI Jun-Jie, HAN Yan, WANG Li-Ming

(National Key Laboratory For Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The difficulties of graphite density examination technology were introduced. A graphite density uniformity inspection method based on X-Ray industry computed tomography(ICT) was proposed. It carried on the average gray level statistics in the round region to the ICT slices and extracted the relative density of the various slices level through data reconstruction of graphite projection, and then evaluated them by 3σ standard. The experiment indicated that it could effectively extract the uniformity level of graphite product interior density and get the accurate judgment of the loose and dense place of the product density.

Keywords:X-Ray industry computed tomography; Relative density; Loose; Dense

石墨材料由于具有化学稳定性好、耐高温、耐腐蚀及自润滑性、弹性模量低和导电良好等特性,被广泛应用于国防科技、军工产品、航空航天和有色冶金等领域^[1]。无损检测技术是石墨材料能否有效和扩大应用的关键^[2]。与金属材料相比,石墨制品内部结构具有晶粒粗大、密度不均和各向异性强的特点,使得反映其本质特征的确定性信息被湮没在噪声中,而且检测信号的信噪比一般较低。因此到目前为止,对于大规模石墨制品内部缺陷检测与密度均匀性判别的相关文献尚未见报道。如何加深对石墨制品内部缺陷和密度分布的认识,合理采用现代化的检测技术,稳定和提高石墨制品质量,是一个重要

的研究课题。

笔者在了解石墨材料组织结构特性及实验的基础上,以环形石墨块制品为实验对象,采用 X 射线工业计算机断层扫描成像技术(X-ICT)对石墨制品内部密度的检测进行研究。最终确立了一种石墨密度均匀性检测方法,检测结果可基本达到测量精度的要求。

1 实验原理

1.1 ICT 原理简介^[3]

当一束单能 X 射线透射过物质后,其衰减规律服从比尔定律:

$$I = I_0 \exp[-d(\mu_1 + \mu_2 + \cdots + \mu_i + \cdots)] \quad (1)$$

式中 I ——射束穿过物质后的强度;

I_0 ——射线入射端初始强度;

μ_i ——射线穿过不同物质的线衰减系数;

d ——射线穿过被检物各体元的长度。

收稿日期:2007-06-01

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60602041);山西省自然科学基金资助项目(2006021018)

作者简介:李俊杰(1982—),男,硕士研究生,主要从事信息识别与无损检测、数字图像处理方面的研究。

式(1)中 I, I_0, d 为已知量, μ_i 是未知量。

实际检测中,被检物的断层是一个有一定层厚的薄片体,故可把薄片体认为是由 $m \times n$ 个体素组成,每一个体素对应一个 μ 值。ICT 通过扫描探测可得到 $m \times n$ 个 I 值,通过计算机按一定的图像重建算法,即可重建出具有 $m \times n$ 个 μ 值组成的二维灰度图像,这就是 ICT 的工作原理。

1.2 密度均匀性检测原理

由重建得到的二维灰度图像,能得到图像的像素值(即灰度值),灰度值 $f(x, y)$ 与小体内材料衰减系数 μ 值的平均值成比例。由于衰减系数 μ 与材料的物理密度 ρ 成近似比例关系,通过一定的标定技术可建立灰度值与物理密度之间的对应关系:

$$\rho = k \cdot \bar{f}(x, y) \quad (2)$$

式中 k ——比例系数;

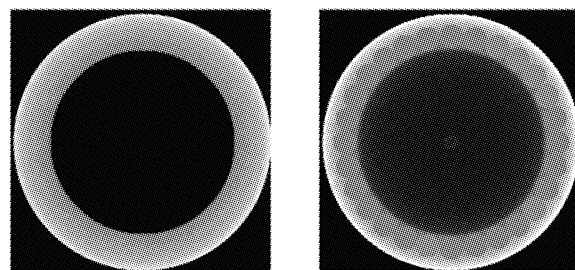
$\bar{f}(x, y)$ ——平均灰度值。

通过式(2)可得到对石墨制品内部密度均匀性的检测方法。该方法检测思想为:鉴于实验中采用的石墨制品是环形件,射线穿过其长度的变化率很大。由比尔定律可知,重建图像的灰度变化率也很大,不利于作密度检测。因此采用划区域求平均的方法对圆环内侧进行统计分析。首先,通过 FDK 算法(Feldkamp-Davis-Kress)对石墨制品的多层投影数据进行重建,再在重建图像的圆环上划取大小相同且相互外切的小圆,并对小圆内的平均灰度值进行统计,算出各层的期望和标准差,求平均。最后选取离平均值最近的一层为标准层,用其它层与该层进行比较,判断两者之差是否满足工业评定的 3σ 标准。如符合 3σ 标准,则认为该石墨层密度均匀。反之,认为其不均匀。

2 实验结果与讨论

实验采用 115 kV, 4.5 mA 的 X 射线源;探元大小为 0.4 mm;采用的探测器为 X-Scan 410;数据类型为 unsigned short;A/D 转换为 14 bit;射线源-石墨制品-探测器间距为 200~800 mm;探测器大小为 1×1024 探元;重建图像大小为 402×402 像素;采集层数为 20 层。图 1a 为某一切层的重建图像,图 1b 为在重建图像上划取小圆的图像。

图 1 可知,小圆是一组以 18 为半径,点 $(201 + 162\cos\theta, 201 + 162\sin\theta)$ 为圆心的圆,其中 θ 为 $0 \sim 2\pi$,正好可划取 28 个相互外切的小圆。对小圆内的灰度值求和取平均,得出的平均灰度值用来代替该区域的灰度值。表 1 是第 10 层重建图像上的 28 个



(a) 某一切层的重建图像 (b) 划取小圆的图像

图 1 检测图像

表 1 第 10 层重建图像上的 28 个小圆平均灰度统计表

序号	平均灰度值	序号	平均灰度值	序号	平均灰度值
1	3 797.60	11	3 798.16	21	3 794.16
2	3 799.00	12	3 796.76	22	3 797.01
3	3 798.10	13	3 795.17	23	3 798.12
4	3 801.57	14	3 796.70	24	3 797.65
5	3 803.53	15	3 796.88	25	3 797.04
6	3 801.71	16	3 797.89	26	3 798.98
7	3 803.94	17	3 797.57	27	3 800.13
8	3 801.41	18	3 796.34	28	3 797.99
9	3 798.63	19	3 796.05		
10	3 799.18	20	3 795.24		

小圆的平均灰度值统计。

28 个小圆总的平均灰度值为 3 798.4。利用表 1 中的数据,计算每一切层上划分的各个圆区域内的平均灰度所服从正态分布的期望与方差分别为:

$$\mu = \bar{\xi} = \sum_{i=1}^n \xi_i \quad (3)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\xi_i - \bar{\xi})^2 \quad (4)$$

求出第 10 层上圆区域内平均灰度服从正态分布 $N_{10}(3 798.4, 2.403 67^2)$ 。

重复上述步骤,对该石墨制品其它 19 层的数据进行统计。统计结果如表 2 所示。

表 2 中正态分布 $N(3 791.02, 3.201 5^2)$ 是通过将这 20 层数据的期望和方差求平均得到的。取与该正态分布相近的一层作为标准层。将其它层与标准层作比对,计算该石墨制品其它层与标准层的期望差值的绝对值是否小于 3σ ,即是否满足公式:

$$P(|\xi_i - \mu| < 3\sigma) = 0.998 65 \quad (5)$$

通过式(5)计算可以确定第 8~20 层均满足 3σ 标准。因此认为在这些层面上的石墨密度趋于均匀。而第 1~7 层都不满足 3σ 标准,它们的期望都

(下转第 192 页)

使用扩大了允许缺陷长度而减少返修,提高了合格率和检验速度,节约了成本;对检验人员无辐射危害;对缺陷定位准确,对于危害性强的未熔合型缺陷具有高检测灵敏度,检测结果直观,可实时显示。在扫查的同时可对焊缝进行分析、评判,也可打印、存盘,实现检测结果的永久性保存。

4 不同检测方法的比较

图 1 和 2 是 Saipem 公司采用不同检测方法得出的检出率实验结果^[1]。图 1 和 2 表明 AUT 方法具有更高的检出率。

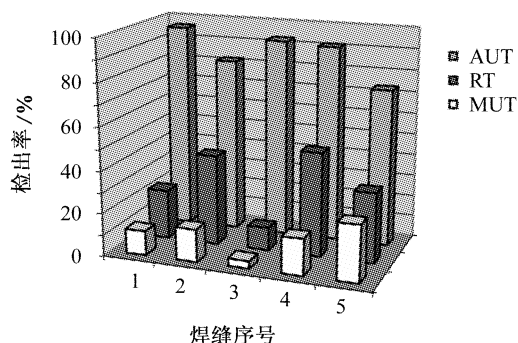


图 1 含有不同缺陷的 5 道焊缝的检测结果的比较

5 AUT 相控阵系统存在的局限及发展方向

AUT 相控阵系统存在的局限性有:受客观因

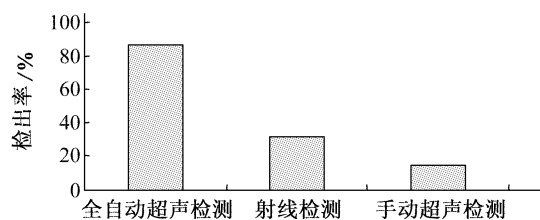


图 2 含有不同缺陷的 5 道焊缝检测结果平均值

素影响大,工件的表面光洁度以及导轨的安装精度都会对检验结果产生影响;对于不同厚度、不同材质的焊缝,需要使用不同的校准试块;焊缝与试块之间的温差要求不超过 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 。

AUT 相控阵技术的发展方向为:声速、壁厚和温度变化的自动补偿;可以检测横向缺陷;热焊区使用扇型扫查;真正实现耦合监测,即利用通道参数的设置来保证探头与耦合剂(如甘油或水)之间的相互作用对超声波束的影响可以有效地加以评估,从而避免采集数据出现大的偏差并保证数据的完整性;使用多种扫查或复合扫查来改善显示;自动进行校准和缺陷分析;多角度 TOFD 技术的研究。

参考文献:

- [1] Ed Ginzel. AUT 设备试验结果[R]. 意大利:Saipem 公司,2001.

(上接第 164 页)

表 2 石墨制品 20 层数据正态分布统计表

序号	正态分布	序号	正态分布
N_1	(3 776.28, 3.583 77 ²)	N_{12}	(3 807.79, 3.634 85 ²)
N_2	(3 768.53, 2.676 49 ²)	N_{13}	(3 808.51, 3.578 73 ²)
N_3	(3 772.43, 2.707 18 ²)	N_{14}	(3 799.17, 3.777 89 ²)
N_4	(3 759.3, 2.964 06 ²)	N_{15}	(3 797.08, 3.533 98 ²)
N_5	(3 775.81, 3.381 91 ²)	N_{16}	(3 801.22, 3.490 02 ²)
N_6	(3 784.81, 3.616 95 ²)	N_{17}	(3 800.09, 3.296 51 ²)
N_7	(3 787.4, 3.457 25 ²)	N_{18}	(3 803.18, 3.585 68 ²)
N_8	(3 798.98, 3.149 98 ²)	N_{19}	(3 798.93, 2.716 26 ²)
N_9	(3 790.77, 2.834 82 ²)	N_{20}	(3 794.92, 2.487 47 ²)
N_{10}	(3 798.40, 2.403 67 ²)	$\bar{N}$	(3 791.02, 3.201 5 ²)
N_{11}	(3 803.15, 3.151 84 ²)		

小于标准层期望值,故可认定这 7 层上的石墨密度存在疏松。

3 结论

针对石墨制品自身结构特点,对其内部密度检

测进行了研究,给出了一种基于 X-ICT 的石墨密度均匀性检测方法,并以工程中常用的 3σ 标准作为评判。通过实验仿真结果可以说明,该方法可有效地求出石墨制品内部密度的均匀性,并对其制品密度的疏松和密集处作出准确判断。文章提出的方法为石墨密度检测的发展和进一步研究提供了重要参考。

参考文献:

- [1] Blanco C, Bermejo J, Marsh H. Chemical and physical properties of carbon as related to brake performance [J]. Wear, 1997, 213(1): 1-12.
- [2] Saleh Wael, Qaddoumi Nasser, A bu-Khousa Mohamed. Preliminary investigation of near-field nondestructive testing of carbon-loaded composites using loaded open-ended waveguides [J]. Composite Structures, 2003, 62(3): 403-407.
- [3] 先 武,李时光.工业 CT 的基本原理与性能[J]. 无损检测, 1996, 18(2): 57-60.