

压力管道腐蚀深度的数字射线成像检测

赵俊生, 马朝阳, 张心荣

(甘肃省特种设备检验检测研究院, 兰州 730050)

摘要:采用数字射线成像检测技术对压力管道进行定期腐蚀检验和腐蚀深度测量。检测过程中使用了不同工艺参数的透照阶梯试块,考虑到采集到图像的灰度值与透照厚度的关系近似于指数曲线,采用数字射线成像检测测量管道腐蚀位置附近的已知厚度点的灰度,把腐蚀位置的灰度代入指数函数后通过两点拟合指数曲线,计算出腐蚀深度,并进行试验验证。结果表明,计算结果与实测结果误差很小,该结果可为相关研究及工程应用提供参考。

关键词: 腐蚀深度; 灰度; 透照厚度; 线性关系; 缺陷高度

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2021)06-0045-05

Digital radiography inspection of corrosion depth of pressure pipeline

ZHAO Junsheng, MA Chaoyang, ZHANG Xinrong

(Gansu Special Equipment Inspection and Testing Research Institute, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Using digital radiography inspection technology to conduct regular corrosion inspection and corrosion depth measurement on pressure pipelines. Different process parameters are used in the process of the inspection test. Taking into account that the relationship between the gray value of the collected image and the thickness of the transillumination is similar to an exponential curve, digital radiography is used to detect the gray level of the point of the known thickness near the corrosion position of the measurement pipeline. Through two-point fitting exponential curve, after substituting the gray value of the corrosion position into the exponential function, the corrosion depth is calculated, and the test is verified. The result shows that the error between the calculated value and the measured value is very small, and the result provides reference for research and engineering applications.

Key words: corrosion depth; gray; transillumination thickness; linear relationship; defect height

在压力管道定期检验期间,利用数字射线成像技术对管道埋藏缺陷进行检测时,经常在弯头处发现腐蚀坑,有些腐蚀很严重(甚至穿孔),需进行腐蚀深度测量,以评定管道的安全等级。管道全面腐蚀减薄的程度可通过测厚来进行定量,但对于一些局部腐蚀及较深的腐蚀坑,采用测厚的方法很难准确检测腐蚀的位置,而利用数字射线成像技术,可直观准确地测定腐蚀所在位置,并记录射线穿透腐蚀部位时的衰减信息,通过对数字图像进行观察测试,利用已知数据,拟合灰度与对应厚度关系的指数函数,计算出腐蚀深度,并通过试验确定误差范围。

1 数字射线成像技术

数字射线成像技术(DDA)是近几年国内成熟应用的检测新技术,成像系统由射线源、阵列探测器、计算机及专用软件等组成。目前,常用的平板探测器 A/D(模拟/数字)转换器位数为 16,灰度等级很高。DDA 与传统胶片照相技术相比,信息采集介质由胶片转变为平板探测器,实现了信号的数字化。数字射线成像技术主要有以下优势:① 图像的对比度、信噪比大大提高;② 厚度宽容度大,灰度动态范围大;③ 曝光时间短,检测效率高;④ 交互性好,查询、检索、储存方便;⑤ 数字图像评定时观察和测试的功能多,细节识别度高,测量精度高。

DDA 应用在压力管道检测中,需要的射线能量相对较低,曝光量小,透照时间短,可现场出具检测

收稿日期:2020-10-23

作者简介:赵俊生(1973—),男,工程师,主要从事特种设备的检验检测工作

通信作者:赵俊生,13150024566@163.com

结果,能快速方便地解决问题。

2 数字图像灰度值与射线穿透厚度的关系

2.1 检测原理

基于射线穿透物质的衰减规律(宽束多色射线)可以得出

$$I = I_0 e^{-\mu T} (1 + n) \quad (1)$$

式中: μ 为射线穿过单位厚度物质时的衰减系数; n 为散射比; T 为物质的厚度; I 为射线透射后的强度; I_0 为入射射线强度。

对于射线检测来说,确定的射线源、管电流、管电压及射线源与被检物的距离等条件下, I_0 是固定的,衰减系数 μ 与射线的能量、物质的原子序数和密度有关,其随管电压的升高而减小,随穿透厚度的增大而减小。

对于数字射线成像检测,图像灰度值与对应穿透厚度的定量关系为^[1]

$$G = KI_0 e^{-\mu T} \quad (2)$$

式中: G 为图像灰度; K 为检测系统灰度转变常数。

对确定的检测系统, K 值随工件材料、结构、穿透厚度、射线能量等因素的变化而动态变化,式(1)的散射比 n 被转化到 K 值中。笔者使用数字 X 射线成像检测系统,设置不同的透照工艺参数并对阶梯试块进行透照,测量各阶梯图像的灰度,在二维坐标中绘制穿透厚度与对应灰度的平滑曲线,观察并分析穿透厚度与灰度之间的定量关系,把这种定量

对应关系用数学函数的方式表达出来。对于不同的数字化成像检测系统,针对阶梯试块,需制定符合标准和实际需要的透照工艺^[2]。

2.2 检测用设备及测试试件

使用俄罗斯史克龙斯 MRCH-250 型射线机,管电压为 130 kV~250 kV,管电流为 0.8 mA,有效焦点尺寸为 ϕ 1.8 mm。

平板探测器型号为 CRV X1012,像素间距为 100 μ m,A/D 转换位数为 16 bit(位),射线能量为 40 kV~330 kV。

测试试件材料为 20 号钢,阶梯试块厚度分别为 4,5,6,8,10,12,14 mm。

2.3 透照工艺参数

(1) 设置透照焦距为 750 mm,单帧曝光时间为 3 s,管电流为 0.8 mA,分别设置管电压为 130,140,150,160,170,180,190,200 kV,以多帧积分的方式各采集一副阶梯试块图像。

(2) 设置透照焦距为 750 mm,单帧曝光时间为 2 s,管电流为 0.8 mA,分别设置管电压为 180,190,200 kV,以多帧积分的方式各采集一副阶梯试块图像^[3]。

2.4 图像的灰度测量

在计算机上对成像结果进行观察、分析处理、测试,灰度测量方法为在阶梯试块阶梯中心区域测量灰度,共测试 3 处,取其平均值为该阶梯的图像灰度。

表 1 图像的灰度数据

透照参数	阶梯厚度/mm						
	4	5	6	8	10	12	14
130 kV, 3 s	21 536	15 376	11 289	6 512	3 953	—	—
140 kV, 3 s	26 586	19 184	14 321	8 309	5 287	3 406	—
150 kV, 3 s	34 269	25 097	18 907	11 299	7 337	4 704	3 595
160 kV, 3 s	40 749	30 249	23 138	14 102	9 235	6 011	4 684
170 kV, 3 s	48 712	36 606	28 226	17 433	11 477	7 584	5 756
180 kV, 3 s	53 652	43 478	34 190	21 542	14 561	9 765	7 626
190 kV, 2 s	53 650	51 184	40 776	26 448	18 139	12 331	9 646
200 kV, 2 s	53 747	51 999	47 417	31 430	22 057	15 228	11 859

2.5 绘制灰度与对应厚度关系曲线

由表 1 可知,用平滑曲线连接灰度与对应阶梯厚度在坐标系中的各点,蓝色曲线为灰度与厚度关系,红色直线为线性关系拟合,黑色曲线为指数关系拟合,不同透照电压所采集图像的灰度-厚度对应关系曲线如图 1 所示。

2.6 灰度与对应厚度关系曲线分析

(1) 观察图 1(a)~(h)的 3 条曲线的趋势,可以看出穿透厚度在一定的范围内,图像的灰度与对应厚度的关系类似指数趋势,与式(2)相吻合(此时 μ 取穿透范围的衰减均值);穿透厚度在局部更小范围内,图像灰度与对应厚度的关系近似于线性,在不同

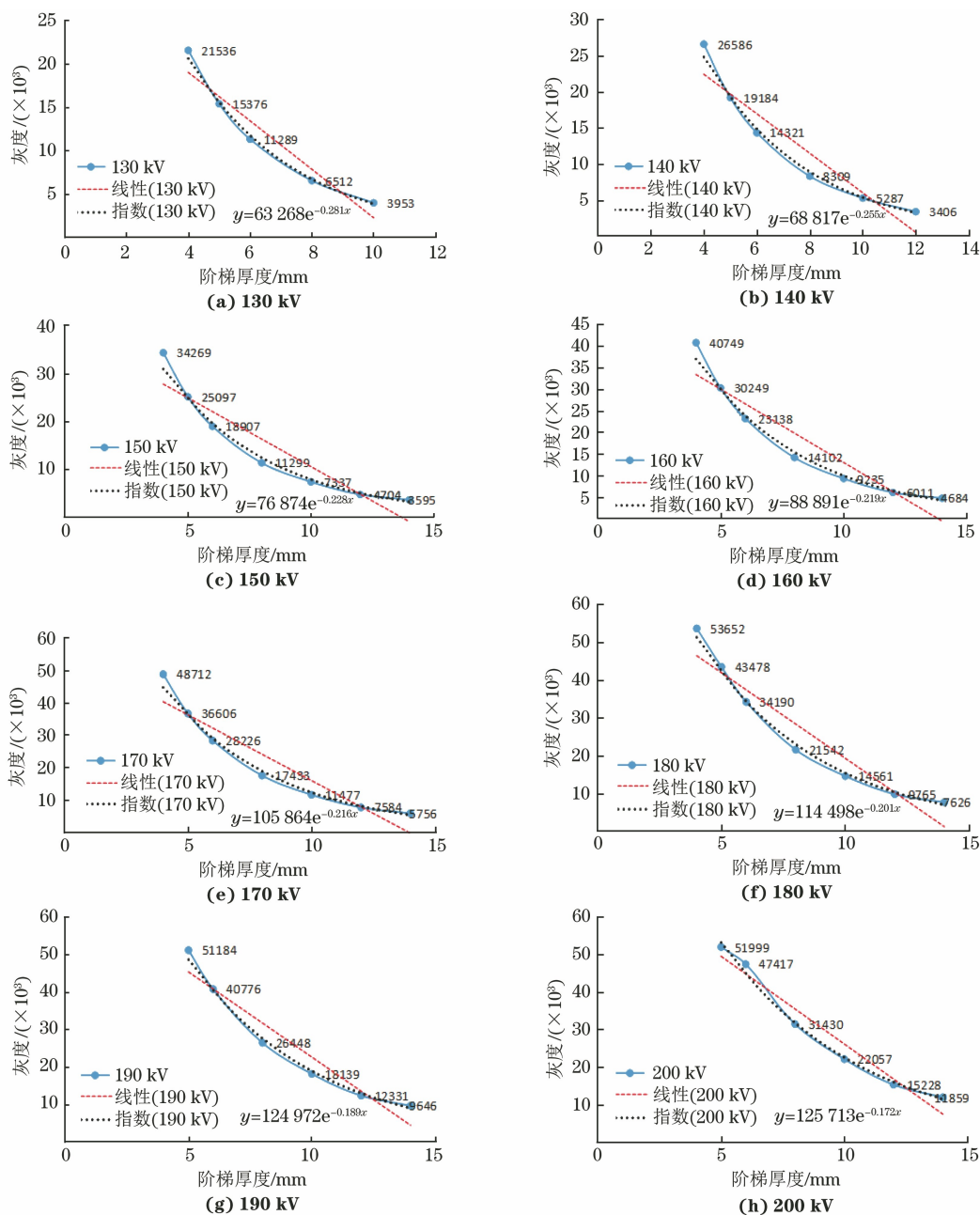


图1 不同透照电压灰度与厚度关系曲线

的范围内梯度(斜率)不同,厚度范围越小,线性程度越高。

(2) 对表1的数据进行两点指数趋势拟合,得到灰度与对应厚度的关系函数,并计算三点厚度[如:4/(5,6)意为测量已知穿透厚度为5,6 mm的灰度,拟合函数关系,代入4 mm的灰度,计算出穿透厚度],计算厚度与穿透厚度差值如表2所示。

(3) 分析表2的数据可知,拟合点与计算点的厚度范围越小,依据灰度计算的厚度与实际穿透厚度差值越小;如果选取适宜的透照工艺参数,将图像灰度控制在平板探测器量程的20%~70%,计算的厚度与

实际穿透厚度差值受电压大小的影响不大;拟合点与计算点的厚度范围参照检测系统测试数据,差值可以控制在基准厚度(拟合点的较小厚度,如管道的母材穿透厚度)的3%以内;拟合点与计算点的厚度范围(参照表2数据,依厚度计算点和基准点灰度变换范围而定)较大时,可以基于表2的数据对计算厚度进行衰减补偿修正,控制差值范围;也可以现场确定腐蚀点位置,使用测厚仪直接测量管壁厚度。

(4) 计算厚度修正办法。采用与检测工件形状相似,射线吸收系数相同或是相近的模拟试件,设置与实际检测相同的透照参数,测试采集图像,得到

表 2 计算厚度与穿透厚度差

透照参数	三点厚度/mm							
	4/(5,6)	4/(6,8)	5/(6,8)	5/(8,10)	6/(10,12)	8/(10,12)	8/(10,12,14)	10/(12,14)
130 kV, 3 s	-0.09	-0.35	-0.12	—	—	—	—	—
140 kV, 3 s	-0.11	-0.27	-0.07	—	—	—	—	—
150 kV, 5 s	-0.10	-0.30	-0.09	—	—	—	—	—
160 kV, 5 s	-0.11	-0.29	0.09	-0.61	—	—	—	—
170 kV, 5 s	—	—	-0.09	-0.55	—	—	—	—
180 kV, 5 s	—	—	-0.04	-0.59	-0.28	+0.03	—	—
190 kV, 2 s	—	—	—	—	-0.20	+0.04	-0.54	—
200 kV, 2 s	—	—	—	—	—	+0.09	-0.41	-0.96

表 2 数据,计算差值与基准厚度的比例,并参照这个比例,修正对应的计算厚度。

3 试验验证

设计一件有孔和台阶的管状试件,采用不同的透照工艺参数,采集透照图像,比较计算孔深和实际孔深数据。

3.1 试件结构

试件结构如图 2 所示。

3.2 数据测试和计算

依据表 3 所列的已知数据和测量数据,采用灰度与厚度指数拟合的方法进行拟合,图像灰度测量点计算厚度与实测值差值如表4所示。表4的验证数据与表 2 的数据基本吻合,点蚀腐蚀处射线穿透厚度减小 20%(单边壁厚 40%),计算厚度与穿透厚度差值在穿透厚度的 3%以内,说明对于已知两点,拟合指数趋势函数,依据灰度值来计算穿透厚度的方法可靠有效,误差可控。

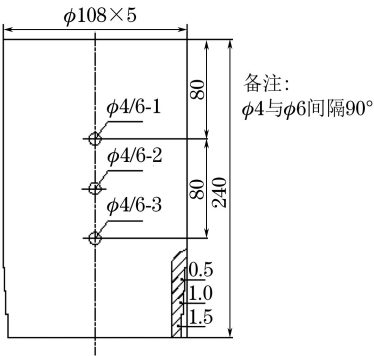


图 2 试件结构示意图

3.3 计算厚度与穿透厚度误差原因分析

(1) 射线衰减系数随穿透厚度的减小而增大,使两点拟合的指数函数产生趋势偏差;两点拟合的精度误差也会使计算结果产生误差。

(2) 平板探测器的元器件老化及性能的稳定性、射线源的老化引起的能谱变化、检测系统的电子噪声、工件及透照环境的散射线等,都会使检测系统的灰度转变常数和灰度产生偏差。

表 3 图像的灰度数据

透照参数	测量位置							
	母材厚度 (5.0 mm)	台阶厚度 (4.5 mm)	φ 4-1	φ 4-2	φ 4-3	φ 6-1	φ 6-2	φ 6-3
180 kV, 3 s	18 723	21 386	21 086	23 842	28 950	—	—	—
190 kV, 3 s	22 616	25 810	25 161	28 500	34 547	—	—	—
200 kV, 3 s	27 803	31 549	31 178	34 503	41 242	—	—	—
200 kV, 2 s	19 411	21 578	—	—	—	22 545	23 965	29 239

表 4 图像灰度测量点厚度的计算值(指数关系)与实测值差值

透照参数	测量位置(孔深)					
	φ 4-1(1.0)	φ 4-2(1.78)	φ 4-3(2.90)	φ 6-1(1.40)	φ 6-2(2.00)	φ 6-3(3.10)
180 kV, 3 s	-0.10	+0.04	+0.38	—	—	—
190 kV, 3 s	-0.20	-0.03	+0.31	—	—	—
200 kV, 3 s	-0.18	+0.28	+0.51	—	—	—
200 kV, 2 s	—	—	—	+0.03	0	+0.78

(3) 图像的灵敏度和分辨率影响观察和测量的位置,灵敏度和分辨率越高,观察和测量的位置越具有代表性,就能更加准确地反应细节位置穿透厚度的变化。

3.4 管道腐蚀点蚀深度计算的注意事项

(1) 数字射线成像检测系统的性能、透照工艺参数、图像质量等必须满足标准 NB/T 47013.11—2015 的要求。

(2) 测试图像的灰度范围为平板探测器量程的 20%~70%。

(3) 测试采用就近比较的原则,对于管件而言,比较的范围(厚度变化)越大,误差越大。

(4) 不同的透照电压,灰度-透照厚度对应关系的指数趋势范围不同。因此,实际检测以指数关系拟合时,应依据灰度计算穿透厚度,灰度-透照厚度对应关系在近似指数趋势范围内。

(5) 母材灰度测量和试件(与母材有厚度差)的灰度测量,均指局部范围内的平均灰度,这样可以避免平板探测器中坏像素点的影响;腐蚀和缺陷自身高度测量值均指其最大灰度。

(6) 该方法适用于碳钢、合金钢、不锈钢等材料,而玻璃钢及 PE(聚乙烯)类材料的管道损伤,可

参照笔者的试验方法,以实际试验数据为基础,分析误差范围,测量损伤深度。

4 结语

采用数字射线成像检测对管道腐蚀状况进行了检测,采集了图像的灰度,并进行两点拟合指数函数运算,依据灰度计算出穿透厚度,即可换算出管道的点蚀腐蚀深度;控制好计算穿透厚度的精度,也就控制了点蚀腐蚀深度的测量误差,缺陷的自身高度也可以使用这种对应关系来计算。

采用参照对比计算的方法对腐蚀深度进行计算,点蚀腐蚀深度在管壁厚度(基准厚度)的 40%以下时,测量误差可控制在基准厚度的 3%以内;采用处理图像的计算机拟合指数函数,方便易行;该方法为管道腐蚀的数字射线成像检测提供了参考。

参考文献:

- [1] 郭文明,陈宇亮. X 射线图像灰度值与透照厚度的定量关系[J]. 无损检测,2016,38(2):14-17.
- [2] 巩德兴,姚力,陈晓辉,等. X 射线数字成像在压力管道检测中的应用[J]. 无损检测,2017,39(11):27-30.
- [3] 陈乐,强天鹏,盛佩军,等. 管电压对射线数字成像检测成像质量的影响[J]. 无损检测,2020,42(2):12-16.
- [4] 潘兵,吴大方,高镇同,等. 1 200 °C 高温热环境下全场变形的非接触光学测量方法研究[J]. 强度与环境,2011,38(1):52-59.
- [5] 黄兴震. 基于 ESPI 和 DIC 技术的混凝土拉伸软化曲线试验研究[D]. 贵阳:贵州大学,2018.
- [6] YAMAGUCHI I. A laser-speckle strain gauge[J]. Journal of Physics E:Scientific Instruments,1981,14(11):1270-1273.
- [7] LU Y L,LI W S,WANG L G,et al. In-situ microscale visualization experiments on microcracking and microdeformation behaviour around a pre-crack tip in a three-point bending sandstone [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2019,114:175-185.
- [8] ZHANG H,FU D H,SONG H P,et al. Damage and fracture investigation of three-point bending notched sandstone beams by DIC and AE techniques[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2015,48(3):1297-1303.
- [9] FARHIDZADEH A,MPALASKAS A C,MATIKAS T E,et al. Fracture mode identification in cementitious materials using supervised pattern recognition of acoustic emission features[J]. Construction and Building Materials,2014,67:129-138.
- [10] WILDEMAN V E,SPASKOVA E V,SHILOVA A I. Research of the damage and failure processes of composite materials based on acoustic emission monitoring and method of digital image correlation [J]. Solid State Phenomena,2015,243:163-170.
- [11] DIAKHATE M, BASTIDAS-ARTEAGA E, MOUTOU PITTI R, et al. Cluster analysis of acoustic emission activity within wood material: towards a real-time monitoring of crack tip propagation [J]. Engineering Fracture Mechanics,2017,180:254-267.
- [12] 纪洪广,张天森,张志勇,等. 无损检测中常用声发射参数的分析与评价[J]. 无损检测,2001,23(7):289-291,294.
- [13] 张昭,肖迎春,王倩,等. TC18 钛合金疲劳断裂过程声发射信号特征分析[J]. 航空工程进展,2015,6(4):502-506.
- [14] 司刚强,李伟,徐海丰,等. 基于 DIC 和声发射的 TC4 合金疲劳损伤状态监测方法[J]. 东北石油大学学报,2020,44(3):119-126,12.

(上接第 23 页)