

射线数字成像透照厚度与灰度模型研究

胡景东¹, 梁丽红^{2,3*}, 刘雪梅^{1**}, 代淮北^{2,3}¹山东大学材料科学与工程学院, 山东 济南 250061;²中国特种设备检测研究院, 北京 100029;³国家市场监督管理总局无损检测与评价重点实验室, 北京 100029

摘要 射线检测作为缺陷无损检测的主要技术,在缺陷定性方面有独特优势,但很难测量缺陷沿射线透照方向尺寸,为此,以钢板为研究对象,基于射线成像理论研究图像灰度与透照工艺条件、线衰减系数、透照厚度之间的关系,采用数值积分和曲线拟合方法将线衰减系数转换成管电压和透照厚度表达式,得到最终图像灰度-透照厚度关系模型。利用实验平台获取实验数据,结合软件拟合求得模型当中的未知参数,并采用钢阶梯试块测量模型的精度,比较阶梯试块厚度的实际值与计算值,结果表明,实际厚度和计算厚度比较接近,误差范围为 0.18%~1.49%,实验结果很好地证明了模型的准确性,并且可以根据实际透照条件和图像灰度计算钢材料中缺陷处的透照厚度,得到缺陷沿射线透照方向的尺寸,结合数字成像图像测量垂直于射线方向上缺陷尺寸,对缺陷进行全方位评定。

关键词 X 射线光学;透照厚度;灰度;线衰减系数

中图分类号 O434

文献标志码 A

doi: 10.3788/AOS202141.1034001

Research on Penetrated Thickness and Gray Model of Radiographic Digital Imaging

Hu Jingdong¹, Liang Lihong^{2,3*}, Liu Xuemei^{1**}, Dai Huaibei^{2,3}¹ School of Materials Science & Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250061, China;² China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China;³ Key Laboratory of Nondestructive Testing and Evaluation, State Administration for Market Regulation, Beijing 100029, China

Abstract As the main technology of defect nondestructive testing, radiographic testing has unique advantages in defect characterization, but it is difficult to measure the size of the defects along the X-ray penetration direction. For this reason, taking steel plate as the research object, based on the radiographic imaging theory, the relationship between the image gray and the penetration process conditions, linear attenuation coefficient, and penetration thickness was studied. Numerical integration and curve fitting methods are used to convert the linear attenuation coefficient into tube voltage and penetration thickness expressions. The final image grayscale-penetration thickness relationship model is obtained. By using the experimental platform to obtain the experimental data, the unknown parameters in the model are obtained by software fitting, and the accuracy of the model is measured by the steel step test block, and the actual thickness and the calculated thickness of the step test block are compared. The results show that the actual thickness and the calculated thickness are close, the error range is 0.18%–1.49%. The experimental results prove the accuracy of the model well, and the thickness of the defect in the steel material can be calculated according to the actual penetration conditions and the image gray level, and the size of the defect along the ray penetration direction can be obtained. Combined with the digital imaging image to measure the size of the defect perpendicular to the ray direction, the defect can be evaluated in an all-round way.

收稿日期: 2020-10-29; 修回日期: 2020-11-20; 录用日期: 2020-12-30

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFB1901500)

* E-mail: lianglihong@csei.org.cn; ** E-mail: xuemei_buaa@sdu.edu.cn

Key words X-ray optics; penetrated thickness; gray; linear attenuation coefficient

OCIS codes 340.7440; 340.7480; 120.2830

1 引言

射线检测作为缺陷无损检测手段,是保证工件质量的重要方式。当 X 射线穿透工件时,由于工件可能存在缺陷,导致穿透厚度不一致,表现为射线强度衰减程度不一致,通过成像器件将衰减信息以图像的形式呈现。射线检测具有成像直观、能确定缺陷性质和位置等优点,根据底片或者数字图像可以测量垂直于射线透照方向缺陷尺寸,但不能测量沿射线透照方向缺陷尺寸。对于特检行业不允许存在深孔类缺陷,评定人员只能结合被检工件的厚度、图像黑度或灰度和焊接工艺对缺陷自身高度进行评估^[1-2]。

近年来,有许多学者对缺陷精确测量展开了研究,梁德群等^[3]提出基于点光源的焊缝深度尺寸测量方法,误差为 10% 左右,董应明^[4]以缺陷附近背景为参考点,推导出厚度关系式,误差在 -18.8%~12.2%。Chen 等^[5]基于数字成像提出了材料厚度与图像灰度值之间的多项式映射关系。

目前胶片照相测量钢材料中沿射线透照方向缺陷尺寸的方法误差较大,随着数字成像检测技术在工业领域得到广泛应用^[6],缺陷准确测量成为可能。本文以数字成像技术为背景,基于理论推导透照条件-透照厚度-灰度模型,通过数值计算和曲线拟合方法求得管电压-透照厚度-线衰减系数的关系,结合实验进行验证,得到最终透照厚度-图像灰度关系模型。

2 透照厚度-灰度模型推导

射线数字成像检测中,图像灰度 G 是工件内部信息的最终反映,影响图像灰度的主要因素有管电流 i 、管电压 V 、射线源到被检工件距离 F 、线衰减系数 μ 、透照工件厚度 t ,即

$$G = f(i, V, F, \mu, t)。 \quad (1)$$

图 1 是 X 射线透照工件示意图,当 X 射线穿透工件时,由 Beer 定律可知,透射射线强度与入射射线强度、线衰减系数、透照工件厚度关系^[7]为

$$I_2 = I_1 \exp(-\mu t), \quad (2)$$

式中: I_1 为入射射线强度; I_2 为透射射线强度。

射线强度与距离满足平方反比定律,其原理是:从一点源发出的辐射,其强度与距离的平方成反比,

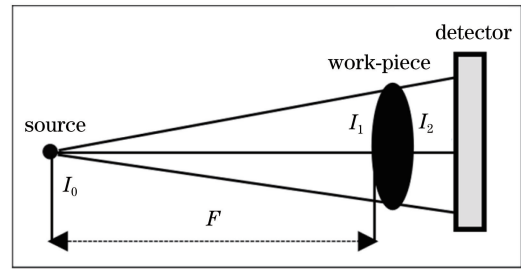


图 1 X 射线透照工件示意图

单位时间内通过的光量子总数是不变的。由于截面积与到点源的距离平方成正比,所以单位面积内的光量子密度(辐射强度)与距离的平方成反比^[8],满足

$$I_1 = I_0 / F^2, \quad (3)$$

式中: I_0 为连续 X 射线总强度。

实验结果表明,连续 X 射线总强度与管电压、管电流以及靶材料原子序数存在以下关系^[8]

$$I_0 = c_1 Z i V^2, \quad (4)$$

式中: Z 为靶材料原子序数; c_1 为比例系数。对于射线数字成像,输入探测器的射线强度(即穿透工件衰减后的射线强度)与计算机输出图像灰度值存在线性关系^[9]

$$G = c_2 I_2, \quad (5)$$

式中: c_2 为比例系数。由(2)~(5)式得到透照厚度与图像灰度的关系表达式为

$$G = \frac{c_3 i V^2}{F^2} \exp(-\mu t), \quad (6)$$

式中: c_3 为 c_1 、 c_2 和 Z 的乘积。其中,管电流和管电压可以直接读取,源到工件距离可以测量,图像灰度也可以通过软件获取,但是线衰减系数无法测量。因此,本文研究重点为线衰减系数与透照参数(管电压和透照厚度)之间的关系。

3 透照参数-线衰减系数

3.1 X 射线相对强度数值计算

透过材料厚度 t 的 X 射线连续谱强度 $I(t)$ ^[10] 为

$$I(t) = \int_{\lambda_{\min}}^{\infty} \frac{1}{\lambda^2} \left(\frac{1}{\lambda_{\min}} - \frac{1}{\lambda} \right) \exp(-k\rho z^3 \lambda^3 t) d\lambda, \quad (7)$$

$$\lambda_{\min} = hc/eV = 12.4/V, \quad (8)$$

式中: λ_{\min} 为 X 连续谱中最短波长; λ 为 X 射线波长; k 为系数; ρ 为透照工件密度; z 为透照工件原子

序数; h 、 c 为普朗克常数、光速; e 为电子电量。

设 $I(0)$ 为 $t=0$ 时 $I(t)$ 的值, 对(7)式积分, 有

$$I(0) = 1 / (2\lambda_{\min}^2) \quad (9)$$

当厚度不为 0 时, (7) 式中的系数 k 在不同的波长范围取值不同^[10]。当 $\lambda \geq \lambda_k$ 时, $k = 0.0009$; 当 $\lambda < \lambda_k$ 时, $k = 0.007$, 其中 λ_k 是材料的吸收限波长。本文主要以钢材料为研究对象, 对于钢材料, 原子序数为 26, $\lambda_k = 1.93 \times 10^{-10}$ m, 密度约为 $7.9 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, 代入(7)式有

$$I(t) = \int_{\lambda_{\min}}^{1.93} \frac{1}{\lambda^2} \left(\frac{1}{\lambda_{\min}} - \frac{1}{\lambda} \right) \exp(-971.95\lambda^3 t) d\lambda + \int_{1.93}^{\infty} \frac{1}{\lambda^2} \left(\frac{1}{\lambda_{\min}} - \frac{1}{\lambda} \right) \exp(-124.96\lambda^3 t) d\lambda \quad (10)$$

结合(8)式将透照管电压换算成最短波长, 以 $t=1, 2, \dots, 30$ mm 代入(10)式编程计算某一管电压时 $I(t)$ 的值, 再根据(9)式计算 $I(0)$, 将 $\ln[I(t)/I(0)]$ 作为相对强度, 得到某一管电压下 $\ln[I(t)/I(0)]-t$ 曲线。然后改变管电压(50, 70, \dots , 250 kV)重复以上步骤, 得到不同管电压下, 透照厚度对应的相对强度值。

3.2 透照厚度与线衰减系数

基于计算得到的不同管电压下透照厚度对应的相对强度数据, 对透照厚度-相对强度关系选择不同模型拟合, 图 2 是管电压为 190 kV、不同的模型拟合透照厚度-相对强度的结果, 图中正方形散点是计算得到的不同透照厚度对应的相对强度值, 圆形曲线采用幂函数拟合, 上三角曲线采用指数函数拟合, 下三角曲线采用对数函数拟合, 四边形曲线采用 5 阶多项式拟合, 可以看出, 正方形散点和圆形曲线以及四边形曲线很接近, 说明幂函数和五阶多项式函数可以比较合理地表达透照厚度与相对强度的关系。

对所有管电压下(50, 70, \dots , 250 kV), 透照厚度-相对强度数据选择不同的函数模型拟合, 从拟合结果的相关系数平方(以下简称 R^2 , 值越接近 1, 拟合方程对实际情况解释越合理)和均方根误差(以下简称 RMSE, 值越小, 拟合误差越小)来看, 幂函数和五阶多项式拟合结果 R^2 和 RMSE 相差不大, 在保证精度的前提下, 为了尽可能地简化模型, 选择 $y = ax^b + c$ 模型解释透照厚度-相对强度之间的关系。

图 3 是部分管电压下选择 $y = ax^b + c$ 模型得到的透照厚度-相对强度拟合结果, 散点是实际计算值, 曲线是拟合方程, 散点基本上都分布在曲线上,

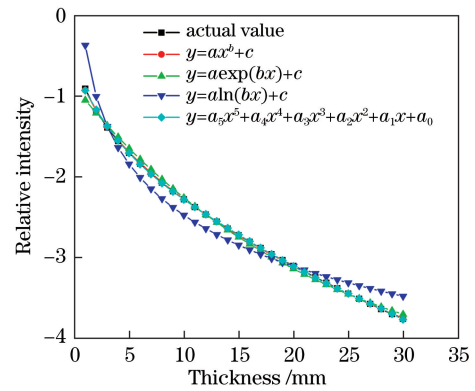


图 2 透照厚度-相对强度不同模型拟合结果

Fig. 2 Fitting results of penetrated thickness-relative intensity with different models

并且所有管电压下, 透照厚度-相对强度拟合结果 R^2 均在 0.9998 以上, 所以幂函数可以比较合理地表示透照厚度-相对强度的关系。

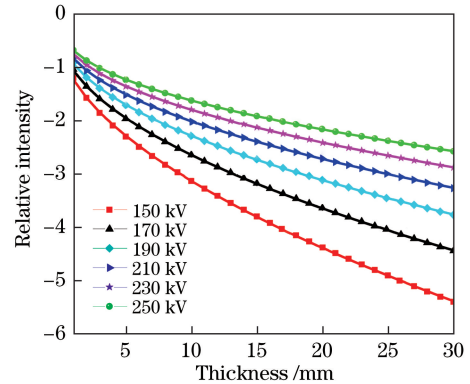


图 3 透照厚度与相对强度

Fig. 3 Penetrated thickness and relative intensity

透照厚度-相对强度关系曲线斜率的相反数即为线衰减系数, 对拟合方程 $y = ax^b + c$ 求导再取相反数, 得到不同管电压下透照厚度-线衰减系数方程, 将 $t=1, 2, \dots, 30$ mm 代入求得不同管电压下, 不同透照厚度对应的线衰减系数值。

3.3 管电压与线衰减系数

线衰减系数与入射射线能量存在经验关系^[11]为

$$\mu = k_1/\epsilon^3 + k_2/\epsilon^2 + k_3/\epsilon + k_4, \quad (11)$$

式中: $k_1 \sim k_4$ 为系数; ϵ 为入射光子能量。在实际的射线透照过程中, 由于滤波片的存在, 经滤波后的 X 射线在光谱中的分布应该从最短波长到最大强度附近处波长之间, 以平均波长 $\bar{\lambda}$ 来简化^[11]为

$$\bar{\lambda} = K\lambda_{\min}, \quad (12)$$

式中: $K \approx 1.3 \sim 1.4$, 波长为 $\bar{\lambda}$ 的 X 射线有效能量约为 $hc/\bar{\lambda}$, 将(12)式代入

$$\epsilon = hc/\bar{\lambda} = hc/K\lambda_{\min}. \quad (13)$$

当射线机管电压一定时,发射出的 X 射线最短波长也一定,满足 $\lambda_{\min} = hc/eV$,代入(13)式得

$$\epsilon = eV/K. \quad (14)$$

将(14)式代入(11)式有

$$\mu = k'_1/V^3 + k'_2/V^2 + k'_3/V + k'_4, \quad (15)$$

式中: $k'_1 \sim k'_4$ 为系数,且 $k'_1 = k_1 K^3/e^3$ 、 $k'_2 = k_2 K^2/e^2$ 、 $k'_3 = k_3 K/e$ 、 $k'_4 = k_4$ 。

由(15)式可知,管电压-线衰减系数满足 $y = k_1/x^3 + k_2/x^2 + k_3/x + k_4$,将所有管电压(50, 70, ..., 250 kV)、不同透照厚度(1, 2, ..., 30 mm)的线衰减系数值汇总,纵向提取,即固定某一厚度,得到不同管电压下线衰减系数值,选择 $y = k_1/x^3 + k_2/x^2 + k_3/x + k_4$ 模型对管电压-线衰减系数关系拟合,图 4 是部分透照厚度下,管电压-线衰减系数拟合结果,散点是计算的线衰减系数值,曲线是拟合方程,可以看出,散点基本上都分布在曲线上,所有透照厚度拟合结果中, R^2 均在 0.9999 以上,这说明模型对管电压-线衰减系数关系解释比较合理。

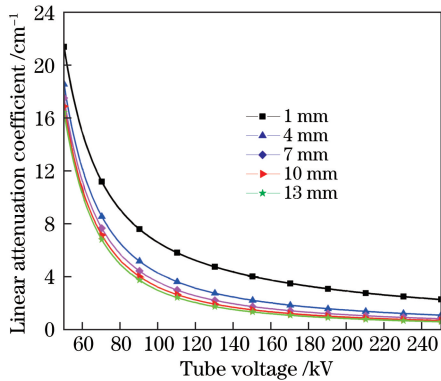


图 4 管电压与线衰减系数

Fig. 4 Tube voltage and linear attenuation coefficient

3.4 线衰减系数最终求解

综上所述,对透照厚度-相对强度关系选用 $y = ax^b + c$ 模型较合理,因为 $y = ax^b + c$ 的导函数为 $y = a_1 x^{b_1}$ 形式,所以对透照厚度-线衰减系数选用 $y = ax^b$ 模型比较合适,对管电压-线衰减系数选用 $y = k_1/x^3 + k_2/x^2 + k_3/x + k_4$ 模型较为合适。

综上,对管电压、透照厚度、线衰减系数三者采用如下模型

$$\mu = \left(\frac{k_1}{V^3} + \frac{k_2}{V^2} + \frac{k_3}{V} + k_4 \right) t^{(k_5)}. \quad (16)$$

利用之前得到的所有计算数据结合软件编程拟合,求得 $R^2 = 0.9771$,说明(16)式可以较合理地解释管电压、透照厚度以及线衰减系数三者的关系。

将(16)式代入(6)式得到

$$G = \frac{c_3 i V^2}{F^2} \exp \left[- \left(\frac{k_1}{V^3} + \frac{k_2}{V^2} + \frac{k_3}{V} + k_4 \right) t^{(k_5+1)} \right]. \quad (17)$$

4 模型实验验证

4.1 实验设置与要求

实验采用的射线数字成像系统由 MG452X 射线机和 Paxscan1313 数字探测器组成。为减少散射对实验结果的影响,在射线机窗口加准直器和滤波板,滤波板会滤除一部分低能射线,这样低能射线强度相较于最短波长到吸收限的射线强度要小得多,可以忽略不计。

为了求得(17)式中的未知参数($c_3, k_1 \sim k_5$)并测量模型的实际计算精度,同时要求实验获得的图像质量均满足 NBT47013. 11 标准 AB 级的要求^[12]。采取如下实验方案:

1) 选择不同厚度的钢板(2, 4, 5, 7, 9, 10, 12, 14, ..., 30 mm),在特定透照参数条件下进行射线数字成像(部分透照工艺条件见表 1),读取钢板数字图像灰度,得到多组关于图像灰度 G 、透照厚度 t 、管电流 i 、管电压 V 、源到工件距离 F 的数据,结合软件求得(17)式中的未知参数。

2) 针对特制的钢阶梯试块,选择合适的透照工艺条件进行射线数字成像,读取数字成像图像上不同阶梯的灰度(图 5),用来测试模型的计算精度。

表 1 透照参数一览表

Table 1 List of penetrated parameters

t / mm	V / kV	i / mA	F / mm
5	115-145	1	800
10	140-190	1	700
15	170-220	1	700
20	190-240	1	600
25	180-230	2	500
30	200-250	2	500

4.2 验证结果

基于不同厚度钢试块实验所获得的数据(约 450 个)结合 1STOPT 软件编写程序,拟合求(17)式当中的未知参数($c_3, k_1 \sim k_5$)。拟合结果 $R^2 = 0.9945$,拟合精度较高,拟合灰度和实际灰度平均差值约为 167,所有数据点灰度范围在 3000~13000 之间,平均灰度差约为灰度范围的 1.28%~5.57%。将(17)式转换成 $t = f(i, V, F, G)$,即

$$t = \left\{ \ln \left(\frac{GF^2}{c_3 i V^2} \right) / \left[- \left(\frac{k_1}{V^3} + \frac{k_2}{V^2} + \frac{k_3}{V} + k_4 \right) \right] \right\}^{1/(k_5+1)}, \quad (18)$$

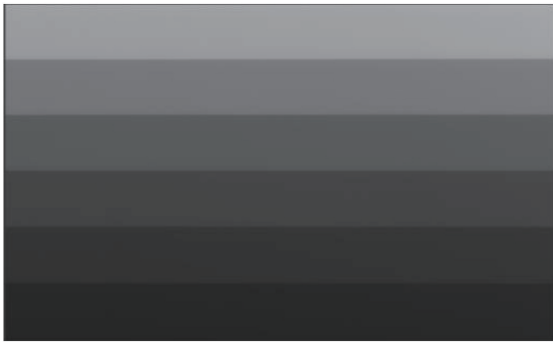


图 5 钢阶梯试块数字成像图像

Fig. 5 Digital radiographic images of steel step test block
式中: $c_3 = 2.84 \times 10^6$; $k_1 = 4.19 \times 10^5$; $k_2 = -2.22 \times 10^3$; $k_3 = 65.01$; $k_4 = 0.27$; $k_5 = -0.34$ 。

将钢阶梯试块的透射工艺条件和图像灰度代入(18)式计算透射厚度,与实际值比对并计算相对误差(RE)。结果如表 2 所示,表中 t' 为实际厚度。由表 2 可知,模型计算得到的透照厚度比较接近实际的透照厚度,不同厚度误差范围在 0.18%~1.49%,说明模型测量精度较高,利用图像灰度和透照工艺条件参数测量缺陷沿射线透照方向尺寸存在可行性。

表 2 钢阶梯试块计算结果

Table 2 Calculation results of steel step test blocks

V /kV	i /mA	F /mm	G	t /mm	t' /mm	RE /%
95	4	800	3295	6.07	6	1.24
95	5	800	4155	6.05	6	0.90
95	6	800	5005	6.05	6	0.75
105	5	800	3968	8.07	8	0.93
105	6	800	4748	8.08	8	1.04
105	7	800	5561	8.02	8	0.30
135	5	700	3616	16.17	16	1.03
135	6	700	4325	16.18	16	1.14
135	7	700	5095	16.13	16	0.82
145	8	700	6322	18.04	18	0.20
145	9	700	7225	17.94	18	0.33
145	10	700	7993	17.97	18	0.18
170	4	600	3480	25.67	26	1.27
170	5	600	4365	25.64	26	1.37
170	6	600	5257	25.61	26	1.49

5 结 论

通过本文的研究,提出了透照厚度-图像灰度关系模型,为缺陷精确测量提供新的方法和手段,结合实验进行验证,并求得模型当中的未知参数,以钢阶梯试块测量模型计算精度。结果表明,模型精度

较高。

在工业数字成像检测时,可以将实际透照工艺(管电流、管电压、源到工件距离)和缺陷处灰度代入(18)式,求得缺陷处的透照厚度,将无缺陷处的完整厚度减去计算的透照厚度值即为缺陷沿射线透照方向尺寸大小。透照厚度-图像灰度模型可以应用于实际射线检测中,有利于实现缺陷更加全面的测量,提高缺陷判定的准确性。

参 考 文 献

- [1] Xiao T Q, Xie H L, Deng B, et al. Progresses of X-ray imaging methodology and its applications at Shanghai synchrotron radiation facility [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0100001.
肖体乔, 谢红兰, 邓彪, 等. 上海光源 X 射线成像及其应用研究进展 [J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0100001.
- [2] Liu B, Wang L M, Su X Y, et al. X-ray radiographic imaging technique with high dynamic range [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2014, 34(4): 1104-1108.
刘宾, 王黎明, 苏新彦, 等. 高动态范围 X 射线成像检测方法 [J]. 光谱学与光谱分析, 2014, 34(4): 1104-1108.
- [3] Liang D Q, Shen S, Yang H J, et al. Measurement of deep sclae on weld defects based on point X-pay source [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2000, 21(3): 5-8.
梁德群, 沈杉, 杨海军, 等. 基于点光源 X 射线焊缝缺陷深度尺寸的测量 [J]. 焊接学报, 2000, 21(3): 5-8.
- [4] Dong Y M. Anovel method for determining dimension of weld defect in thickness direction [J]. Nondestructive Testing Technologing, 1992, 14(12): 333-336, 339.
董应明. 确定焊缝缺陷在厚度方向尺寸的新方法 [J]. 无损检测, 1992, 14(12): 333-336, 339.
- [5] Chen L, Li B, Zhou H, et al. Detection of three-dimensional parameter of defects for gas turbine blades based on two-dimensional digital radiographic projective imaging [J]. Journal of Nondestructive Evaluation, 2019, 38(4): 101-110.
- [6] Feng F, Tian A L, Liu B C, et al. Full-field three-dimensional test for scratch defects using digital holographic scanning imaging system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(4): 0409003.
冯方, 田爱玲, 刘丙才, 等. 基于数字全息扫描成像的划痕缺陷全场三维测试 [J]. 中国激光, 2020, 47(4): 0409003.

- [7] Liu B, Zhao P X, Zhao X, et al. Enhancement algorithm of variable energy X-ray fusion images[J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(18): 1834001.
刘宾, 赵鹏翔, 赵霞, 等. 变能量 X 射线融合图像的增强算法研究 [J]. 光学学报, 2020, 40(18): 1834001.
- [8] Qiang T P. Ray detection[M]. Beijing: China Labor Social Security Press, 2007.
强天鹏. 射线检测[M]. 北京: 中国劳动社会保障出版社, 2007.
- [9] Liu B. Research of high dynamic range X-ray imaging technology and system[D]. Taiyuan: North University of China, 2014.
刘宾. 高动态范围 X 射线成像技术与系统[D]. 太原: 中北大学, 2014.
- [10] Zhang X H, Liu E J. Numerical analysis on X-ray intensity attenuation in radiographic testing [J]. Nondestructive Testing Technology, 2012, 34(6): 1-4, 20.
张小海, 刘二军. 射线照相检验中 X 射线强度衰减的数值分析[J]. 无损检测, 2012, 34(6): 1-4, 20.
- [11] Feng C C, Zhou W. Discussion on relationship between X-ray attenuation coefficient and tube voltage [J]. Nondestructive Testing, 1997, 19(1): 8-10.
冯常春, 周炜. X 射线衰减系数与射线管电压的关系初探[J]. 无损检测, 1997, 19(1): 8-10.
- [12] China Standardization Committee on Boilers and Pressure Vessels. Nondestructive testing of pressure equipments—Part 11: Standard practice for X-ray digital radiography: NB/T47013.11—2015[S]. Beijing: Xinhua Publishing House, 2015.
全国锅炉压力容器标准化技术委员会. 承压设备无损检测—第 11 部分: X 射线数字成像检测: NB/T47013.11—2015[S]. 北京: 新华出版社, 2015.