DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2023.2011

X 射线检测工艺中的材料等效值及应用研究

汪荣华[1,2],刘文波[1]

(1. 南京航空航天大学,江苏 南京 210000; 2. 国营芜湖机械厂,安徽 芜湖 241000)

摘　要:针对飞机修理射线检测工艺中的不同材料等效系数开展研究,通过对不同材料等效厚度的理论推导得到了材料等效系数与衰减系数的关系,并使用钢与钛合金在不同管电压下进行了等效系数测量实验。结果表明,管电压在 70 kV 和 90 kV 时材料等效系数与衰减系数理论值和实测值能很好的对应,但因为散射线等因素,在 100 kV 以上时材料等效系数与衰减系数实验值与理论值之间有一定偏差。在射线检测中,在一定管电压范围内合理采用等效值应用到实际检测过程中,将有利于射线检测的实施。

关键词:射线检测;工艺;材料;等效系数

中图分类号:TG115.22+1.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2023)03-0298-05

Research on Material Equivalent Value and its Application in X-radiographic Testing Technology

WANG Ronghua[1,2], LIU Wenbo[1]

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210000, China; 2. State-owned Wuhu Machinery Factory, Wuhu 241000, China)

Abstract: The relationship between the material equivalent coefficient and the material attenuation coefficient was obtained through the theoretical derivation of the equivalent thickness of different materials. The equivalent coefficients of steel and titanium alloy were measured under different tube voltages. The results show that the material equivalent coefficient corresponds well with the theoretical and measured values of the attenuation coefficient at 70 kV and 90 kV. However, due to factors such as scattered rays, there is a certain deviation between the experimental and theoretical values of the material equivalent coefficient and attenuation coefficient above 100 kV. In X-ray detection, it is propitious to apply the equivalent value in a certain range of tube voltages to the actual detection process.

Key words: radiographic testing; technology; material; equivalent coefficient

目前，对于 X 射线现场检测的一些等效值问题,研究者们开展了相关研究,给出了多种材料的射线透照等效参数、透照方法及评级[1]。国内学者李衍[2]指出射线照相灵敏度基本公式是评价射线照相影象质量和检测可靠性的重要手段,同时也拟定了探伤工艺条件和制订方法标准的理论依据。郑世才[3]在《对 ASTM E1742 标准射线照相质量级别规定的讨论》中给出了不同像质计灵敏度转换的理论基础。张小海等[4]针对不同厚度的典型工件进行了探究,得到应用胶片特性曲线、曝光曲线,从实验角度测量了厚度宽容度。张栋梁等[5]根据实际情况,使用等效出透照的厚度方法,所摄大厚度差焊接接头底片的黑度和灵敏度均符合标准要求，提高了一次曝光的检测厚度范围,提高了工作效率。

飞机修理现场检测中用的像质计以钢材质为主，但对于其他材质工件仍需要像质计进行胶片灵敏度是否达标判定。因此需要对于不同的材质进行工件材质的等效厚度换算[6]。这些材料如果能够通过理论的推理得到相对于钢材的等效系数，即可通过得到的等效系数将未知的其他材料厚度转换成已知钢材的厚度[7]。这可以在像质计不全的情况下,使检测进度及检测质量得到可靠的保证。以上所述的问题在射线检测中属于常见问题，并且会影响射线检测的参数选择，同时也会影响工件的射线检测灵敏度[8-10],因此开展射线检测的相关等效值的研究对于飞机修理实际检测具有很大的实际意义。本研究

收稿日期:2022-01-09

作者简介:汪荣华,1990 年生,硕士生,工程师.研究方向:飞机维修无损检测技术.电话:15357885145, Email:1376995222@qq.com

引用格式:汪荣华,刘文波.X 射线检测工艺中的材料等效值及应用研究[J].铸造技术,2023,44(3):298-302.

WANG R H, LIU W B. Research on material equivalent value and its application in X-radiographic testing technology[J]. Foundry Technology, 2023, 44(3): 298-302.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

设计操作简单、节约成本的实验方案，对不同材料的等效值开展研究。得到相关实验结果后，工作中只需要通过理论推导出其他材料相对于钢材料的等效厚度，就可从钢材料的射线检测拓展到其他不同材料的射线检测。

1　材料等效值理论分析

钢铁材料在工业领域应用比较广泛，也是射线检测最常研究的对象[11]，因此通常都是针对钢材制作射线的曝光曲线。若需要检测其他材料，可利用射线透照的等效厚度来修正曝光参数。图 1 为材料等效系数透照示意图。如果在一定条件下，同一射线穿透两种不同材料后的射线强度相同，从而使底片的黑度相同，得到的透照效果一样，对于检测的灵敏度不构成影响，这种现象称为等效，这 2 种材料的厚度之比称为 2 种材料的等效系数[12]。

在考虑射线的散射情况下，宽束多色射线强度衰减公式为[13-14]：

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

若 2 种材料都满足射线检测透照衰减，则由式(1)可知，当得到穿过工件的射线强度一样时，有如下结果：

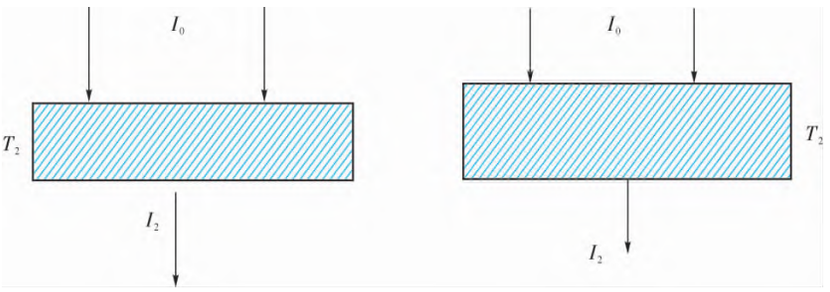


图 1　材料等效系数透照示意图

Fig.1　Transillumination diagram of the material equivalent coefficient

$$I_0(1+n_1)\mathrm{e}^{-\mu_1 T_1}=I_0(1+n_2)\mathrm{e}^{-\mu_2 T_2} \tag{2}$$

对式(2)取对数化简得：

$$\ln(1+n_1)-\mu_1 T_1=\ln(1+n_2)-\mu_2 T_2 \tag{3}$$

若不考虑散射线，材料厚度等效系数：

$$\phi=\frac{T_1}{T_2}=\frac{\mu_1}{\mu_2} \tag{4}$$

连续谱 X 射线在透过材料时是通过材料对射线的吸收和散射 2 种方式进行衰减的[15]，所以线衰减系数应等于线吸收系数和线散射系数之和[16]。在实际情况中，因散射线大量地得到了屏蔽，故散射系数比吸收系数小的多。因此我们常常忽略散射系数，线衰减系数可以近似用吸收系数 μ 表示为[17-20]：

$$\mu\approx K\rho Z^3\lambda^3 \tag{5}$$

式中，K 为一个系数，其在不同的波长范围具有不同的吸收系数；ρ 为材料的密度；Z 为材料的原子系数；λ 为 X 射线的波长；I 为透射射线强度；I_0 为初始射线强度；T 为穿透物质的厚度；n 为散射比。由式(5)得到常见材料的衰减系数，如表 1 所示。同时，利用上式(5)得到几种材料的射线照相等效厚度系数，列于表 2。

2　实验材料与方法

理论分析中得到了关于射线的材料等效系数的理论值。以下实验是对以上理论值进行实验验证。材料的等效系数在理论分析中得到了很多材料的等效系数，由于实验室材料和条件的限制，本次实验验证中使用 1Cr18Ni9Ti 钢材和 TC6 钛合金这两种材料进行探究。图 2 为材料等效系数透照示意图。实

表 1 几种材料的线衰减系数与射线能量的关系

Tab.1 Relationship between the linear attenuation coefficient and ray energy of several materials

射线能量 /Mev	铁	铝	铅	钛	铜
	ρ=7.89 g/cm^3	ρ=2.7 g/cm^3	ρ=11.34 g/cm^3	ρ=4.54 g/cm^3	ρ=8.89 g/cm^3
0.060	9.547	0.729	40.26	3.44	14.05
0.080	4.728	0.540	18.83	1.82	6.80
0.100	2.820	0.444	60.00	1.24	4.10
0.125	1.950	0.388	35.00	0.84	2.76
0.150	1.580	0.362	24.40	0.75	1.98
0.175	1.270	0.336	15.40	0.64	1.65
0.200	1.130	0.323	11.80	0.59	1.39
0.250	0.940	0.296	6.580	0.52	1.15
0.300	0.850	0.278	4.700	0.47	1.01

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 2 几种材料的射线照相等效厚度系数
Tab.2 Radiographic equivalent thickness coefficient of several materials

X 射线 /kV	60	80	100	125	150	175	200	250	300
铁	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
铝	0.08	0.12	0.16	0.20	0.23	0.26	0.28	0.31	0.33
钛	0.36	0.38	0.44	0.43	0.47	0.51	0.52	0.53	0.55
铅	1.48	1.44	21.30	18.00	15.50	12.10	10.40	7.00	5.60

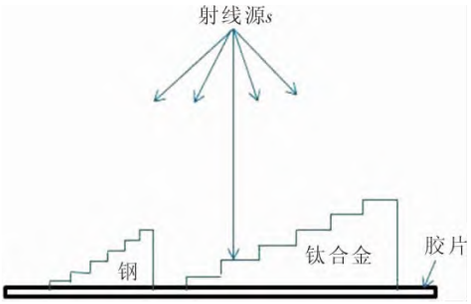


图 2 材料等效系数透照示意图
Fig.2 Transillumination diagram of the material equivalent coefficient

验主要是使用射线照相检测技术，用到的实验设备有型号为 XY-3010 射线机、柯达 AA400 胶片、铅箔增感屏、各种数字的铅字、观片灯、黑度计等。实验材料有 2 种材料的阶梯试块。阶梯试块 1(钢：厚度为 1~10 mm，等值间隔 1 mm 变化)和阶梯试块 2(钛合金：厚度为 1~14 mm，等值间隔 1 mm 变化)。图 3 为材料等效系数实验的实际工件图。



图 3 实际工件图
Fig.3 Actual workpiece drawing

实验的主要步骤如下，首先在射线透照前设置好需要透照的工件的透照参数。实验透照参数有：焦距 1 000 mm，曝光量 30 mA/min(管电流 10 mA，曝光时间 3 min)，管电压 70、90、110 和 130 kV(本次实验是在不同的透照电压下进行透照得到不同的底片黑度值)。其次是启动射线机电源，进行预热并打开冷却循环水对射线机进行散热。把需要的标记和像质计在工件合适的位置摆放，并全部放置到射线机的曝光场内。再启动射线机的高压，调节射线机的管电压和管电流使满足所需的参数值。透照完成后，曝光好的底片进行暗室处理后晾干。将底片在观片灯下观察影响质量是否符合要求。用黑度计测量每个次透照的底片的不同厚度的黑度值。

3 实验结果及讨论

表 3~4 为黑度计测量每个次透照的底片的不同厚度的黑度值。每次不同管电压透照下，可以得到一组关于钢材和钛合金厚度、底片黑度的数据；每组数据都可得到一个材料等效系数。将每组数据通过使用 MATLAB 的多项式进行近似拟合，每组数据都需得到合适的多项式 n 的次数。

表3 钢阶梯试块在不同管电压下的黑度值
Tab.3 Blackness value of the steel stepped test block under different tube voltages

厚度 /mm	70 kV	90 kV	110 kV	130 kV	150 kV
1	4.52	4.53	-	-	-
2	1.97	1.88	-	4.62	-
3	0.85	0.97	4.47	4.41	-
4	0.49	0.60	3.70	3.67	-
5	0.35	0.40	2.73	2.88	4.25
6	0.30	0.31	2.07	2.45	3.81
7	0.29	0.27	1.58	1.96	3.26
8	0.27	0.23	1.19	1.58	2.78
9	-	0.21	0.95	1.23	2.35
10	-	0.22	0.83	1.07	2.02

表 4 钛合金阶梯试块在不同管电压下的黑度值
Tab.4 Blackness value of titanium alloy step test block under different tube voltages

厚度/mm	70 kV	90 kV	110 kV	130 kV	150 kV
1	4.57	4.61	-	-	-
2	4.56	4.39	-	-	-
3	4.37	3.64	-	-	-
4	3.47	2.92	-	-	-
5	2.56	2.28	-	-	-
6	1.76	1.81	-	-	-
7	1.41	1.48	-	-	-
8	1.05	1.15	-	-	-
9	0.86	0.98	4.47	4.38	-
10	0.70	0.83	4.22	4.21	-
11	0.57	0.70	3.88	3.97	-
12	0.49	0.60	3.49	3.66	-
13	0.43	0.51	3.09	3.34	-
14	0.41	0.50	2.87	2.96	4.28

图 4 为钢和钛合金的拟合曲线，在 70~130 kV 的管电压，曝光量为 30 mA/min 下的底片黑度数据通过多项式的拟合得到。钢材的拟合选择是五次多项式的拟合，钛合金的拟合选择是三次多项式的拟合。拟合曲线的横坐标为材料的厚度，纵坐标为透照后的底片的黑度值。图中红色为钢的拟合曲线，蓝色

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

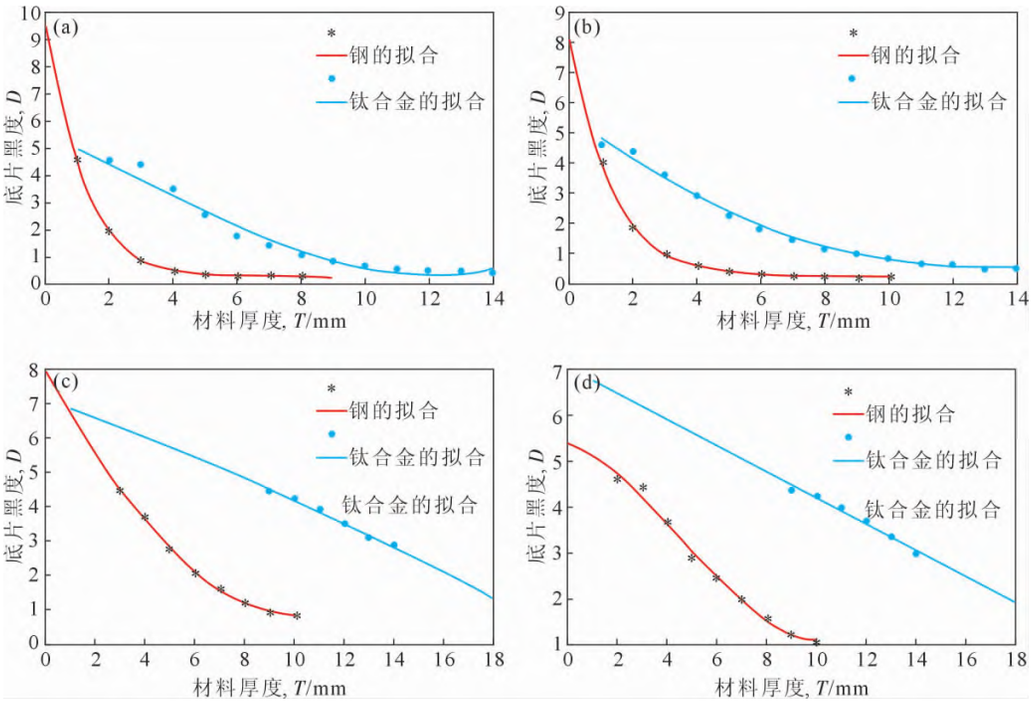


图 4　钢和钛合金的拟合曲线：(a) 70 kV, (b) 90 kV, (c) 110 kV, (d) 130 kV

Fig.4　Fitting curve of steel and titanium alloy: (a) 70 kV, (b) 90 kV, (c) 110 kV, (d) 130 kV

为钛合金的拟合曲线。

在图 4 的拟合曲线中取黑度为 2.0、2.5、3.0、3.5、4.0 时对应的不同材料的厚度值，并计算出相应黑度下的钢与钛合金的等效系数，结果分别列于表 5。管电压为 70 kV 不同黑度值的条件下材料等效系数平均值是 0.352。以下不同管电压下的数据处理同70 kV，均使用 MATLAB 的多项式处理得到如下的曲线拟合。管电压为 90、110 和 130 kV 不同黑度值的条件下材料等效系数平均值分别为 0.374、0.354 和 0.354。

表 5 钢和钛合金的黑度值

Tab.5 Blackness value of steel and titanium alloy

管电压	材料	黑度				
		2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
70 kV	钢 /mm	1.97	1.71	1.50	1.31	1.15
	钛合金 /mm	6.29	5.35	4.44	3.55	2.69
	材料的等效系数	0.31	0.32	0.34	0.37	0.42
90 kV	钢 /mm	1.93	1.64	1.38	1.18	1.00
	钛合金 /mm	5.82	4.75	3.81	2.96	2.20
	材料的等效系数	0.33	0.34	0.36	0.39	0.45
110 kV	钢 /mm	6.19	5.40	4.70	4.10	3.54
	钛合金 /mm	16.10	14.80	13.40	12.00	10.50
	材料的等效系数	0.38	0.36	0.35	0.34	0.34
130 kV	钢 /mm	6.88	5.94	5.08	4.25	3.38
	钛合金 /mm	17.60	15.90	14.10	12.40	10.60
	材料的等效系数	0.34	0.370	0.36	0.34	0.31

表 6 为理论值与实验值的对比表。对比理论值与实验值，发现在管电压在 70 kV 和 90 kV 的材料等效系数能很好对应，基本符合得到等效的要求。但在 100 kV 之后的等效系数中，实验值与理论值之间有一定偏差。

表6 理论值与实验值的对比表

Tab.6 Comparison between theoretical and experimental values

	70 kV	90 kV	110 kV	130 kV
理论值	0.36	0.38	0.44	0.42
实验值	0.352	0.374	0.354	0.354
误差 /%	2.2%	1.6%	19.5%	15.7%

理论分析中没有考虑散射线的影响，但在实际的实验检测中是存在散射的。散射线在透照时会增加底片的曝光量，从而对实验测量的黑度值产生偏差和影响。在理论计算中的线衰减系数是针对单色射线的，但在实际的应用中，射线是连续谱的 X 射线。在实际操作中，暗室处理可能有区别，显影、定影的时间不同，这都可能导致等效系数有一定偏差。

4　结论

(1)管电压在 70 kV 和 90 kV 时材料等效系数的理论值和实验值能很好对应，材料等效系数实验结果基本符合理论计算结果，故在飞机修理过程中可使用不同材料的 X 射线的衰减系数计算出材料等效系数。

(2)管电压在 100 kV 以上时仍存在一些误差，因理论推导中忽略了散射线对底片的影响。理论值推导中 X 射线的线衰减系数是关于单色的射线，实际的射线都是连续谱。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

参考文献：

[1] 蔡闰生，袁生平，任华友. 射线透照等效系数测试方法分析[J]. 宇航材料工艺，2014, 44(4): 86-89.
CAI R S, YUAN S P, REN H Y. Analysis of radiographic equivalent factor test method[J]. Aerospace Materials & Technology, 2014, 44(4): 86-89.

[2] 李衍. 射线照相灵敏度的基本公式及其验证[J]. 无损检测，1994, 16(11): 304-310.
LI Y. Basic formulas for radiographic inspection sensitivities and their verifications[J]. Nondestructive Testing, 1994, 16(11): 304-310.

[3] 郑世才. 对 ASTM E1742—2008 标准射线照相质量级别规定的讨论[J]. 无损检测，2009, 31(9): 731-737.
ZHENG S C. A discussion on the radiographic quality levels specified in ASTM E1742—2008 [J]. Nondestructive Testing, 2009, 31 (9): 731-737.

[4] 张小海，夏平先，李坚. 射线检测厚度宽容度的分析与测定[J]. 南昌航空工业学院学报(自然科学版)，2006, 20(3): 41-44, 49.
ZHANG X H, XIA P X, LI J. Analysis and measurement of the thickness tolerance in radiographic testing[J]. Journal of Nanchang Hangkong University (Natural Sciences), 2006, 20(3): 41-44, 49.

[5] 张栋梁，严岱东，孙韫. 大厚度差焊接接头部分屏蔽法射线检测技术[J]. 无损检测，2010, 32(10): 18-20.
ZHANG D L, YAN D D, SUN Y, et al. Partial shielding ray inspection for welding joint with large thickness difference[J]. Nondestructive Testing, 2010, 32(10): 18-20.

[6] 王学芹，王晓宇，武兴华，等. CLF-1 钢 X 数字射线照相等效系数的确定[J]. 宇航材料工艺，2020, 50(2): 80-85.
WANG X Q, WANG X Y, WU X H, et al. Determination of equivalent coefficient of X-ray digital radiographicfor CLF-1 steel[J]. Aerospace Materials & Technology, 2020, 50(2): 80-85.

[7] 李衍. 射线曝光量的系数修正法及管电压的等效修正法[J]. 无损检测，2001, 23(5): 204-208.
LI Y. Discussion on amending exposure by coefficient method and kilovoltage by equivalent method for radiography[J]. Nondestructive Testing, 2001, 23(5): 204-208.

[8] 王长华. 浅谈射线检测透照方式对照相灵敏度的影响[J]. 特种设备安全技术，2013, 38(1): 57-58.
WANG C H. Discussion on the influence of radiographic inspection mode on photographic sensitivity[J]. Safety Technology of Special Equipment, 2013, 38(1): 57-58.

[9] DOROBANTU V. X ray linear attenuation steel. I. thickness dependence[J]. NDT.net, 2004, 12(12): 11-16.

[10] HALMSHAW R. Flaw sensitivity in relation to standards for film radiography[J]. Materials Evaluation, 1992, 50(6): 678-683.

[11] 丁卫良，常华峰，潘龙龙，等. X 射线无损检测的应用及发展趋势[J]. 科技创新与应用，2020(36): 161-162.
DING W L, CHANG H F, PAN L L, et al. Application and development trend of X-ray nondestructive testing[J]. Technology Innovation and Application, 2020(36): 161-162.

[12] 赵付宝，王从科，汤振鹤，等. 陶瓷材料与铝合金数字射线检测等效系数的确定[J]. 无损探伤，2018, 40(7): 39-42.
ZHAO F B, WANG C K, TANG Z H, et al. Determination of equivalent coefficient of digital ray detection for ceramic materials and aluminum alloy[J]. Nondestructive Testing, 2018, 40(7): 39-42.

[13] 杨和庆. X 射线介质识别方法研究[D]. 西安：西安石油大学，2016.
YANG H Q, The research of medium identification method based on X-ray[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2016.

[14] 原培新，牛艳平. 带保温层管道腐蚀状态的 X 射线检测方法研究[J]. CT 理论与应用研究，2017, 16(3): 36-42.
YUAN P X, NIU Y P. Thickness evalution of pipes using X-ray real-time radiographs[J]. Computerized Tomography Theory and Applications, 2017, 16(3): 36-42.

[15] 李进玺，吴伟，来定国，等. 电子束与复合靶作用后辐射特性的数值模拟[J]. 原子能科学技术，2019, 48(3): 506-510.
LI J X, WU W, LAI D G, et al. Numerical simulation on radiation characteristic of composite target[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, 48(3): 506-510.

[16] 王俊峰. 基于 X 射线的强力输送带无损检测系统探测器的研究[D].天津：天津工业大学，2008.
WANG J F. Research of detector for conveyor belt with steel wire ropes nondestructive detection system based on X-ray[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2008.

[17] 屠耀元. 射线检测工艺学[M]. 北京：航空工业出版社，1989.
TU Y Y. Radiographic testing technology[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1989.

[18] 熊秀文. 关于射线透照等效系数[J]. 无损探伤，1997(6): 46-48.
XIONG X W. Radiometric equivalent coefficients[J]. Nondestructive Testing Technology, 1997(6): 46-48.

[19] 李树轩，万诗敏. 射线照相法的缺陷检出灵敏度[J]. 无损检测，2018, 30(11): 853-855.
LI S X, WAN S M. Sensibility of defect detection of ray photography[J]. Nondestructive Testing, 2018, 30(11): 853-855.

[20] 张小海，张维，余海根. 一种基于检测技术级别的射线检测参数优化方法[J]. 无损检测，2008, 30(6): 329-331, 352.
ZHANG X H, ZHANG W, YU H G. An optimization method of radiographic testing parameters based on technique class[J]. Nondestructive Testing, 2008, 30(6): 329-331, 352.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net