

基于组分特性的材料密度工业 X 射线 CT 定量检测

倪培君¹,蔡和平²,任安峰¹,张维国¹

(1. 中国兵器工业集团第五二研究所,宁波 315103;2. 西安交通大学,西安 710049)

摘要:分析了材料组分、密度对射线衰减系数的影响,介绍了基于组分特性的材料密度工业 X 射线 CT 定量无损检测方法——线衰减系数对比法。以铝合金标准样品密度定量检测为例,研究了 X 射线“等效能量”的获取方法,建立了“等效能量”下 CT 值和线衰减系数的对应关系。通过线衰减系数和质量衰减系数实现了对铝合金材料密度的定量检测。试验研究表明,对于密度均匀的铝合金材料,基于组分特性的线衰减系数对比法测试精度明显优于密度对比法。

关键词:材料密度;工业 X 射线 CT;定量;CT 值;线衰减系数;质量衰减系数

中图分类号:TG115.28 文献标志码:A 文章编号:1000-6656(2011)07-0005-06

Quantitative NDT of Materials Density Based on the Composition by Industrial X-Ray Computed Tomography

NI Pei-Jun¹ CAI He-Ping² REN An-Feng¹ ZHANG Wei-Guo¹

(1. No. 52 Research Institute of China North Industries Group Corporation, Ningbo 315103, China;
2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In this paper, the line attenuation coefficient affected by material composition and density was analyzed, the quantitative NDT method of materials density and the line attenuation coefficient comparison method based on materials composition by industrial X-ray computed tomography was described. As examples, the test method for X-ray CT systems equivalent energy measurement for some homogeneous aluminum alloy standard samples was studied, and the correlation of the CT value and the line attenuation coefficient at the equivalent energy was presented. With the help of the line attenuation coefficient and mass attenuation coefficient, the aluminum alloy materials' densities could be determined. The experiment results showed that the measurement accuracy of density with the line attenuation coefficient comparison method based on materials composition characteristics was obviously better than density comparing method.

Keywords: Materials density; Industrial X-ray computed tomography; Quantitative; CT value; Line attenuation coefficient; Mass attenuation coefficient

材料密度的定量检测和表征是军事、石油、材料研究等领域工业 CT 应用关注的重点内容^[1-3]。目前对材料密度的工业 CT 定量检测大多采用密度直接对比法^[3-6],即通过工业 CT 扫描图像测定已知密度(标准密度)标准样品的 CT 值,建立 CT 值和密度之间的线性关系,测定待测试样的 CT 值,求出

待测试样的密度(简称密度对比法)。这种方法在实际应用中取得了较好的效果。存在的主要问题是,在被测材料密度范围变化很小时,定量检测结果会有误差,有时会出现密度高的材料对应的 CT 值反而偏小的情况,在固体材料中尤其如此。Kropas 等人的研究也证实对于多种组分组成的材料,CT 值除了与密度有关外,还有组分有关,不同组分的元素与 X 射线的相互作用规律不同,会给 CT 值的密度之间的对应关系带来影响^[7]。

收稿日期:2010-10-27

作者简介:倪培君(1965—),男,研究员,主要研究方向为工业 CT、数字射线和超声波检测等。

美国 ASTM E 1935—97(2008)标准^[8]中介绍了一种标定和测量材料密度的方法,基本思路是用已知组分和密度的均匀材料建立 CT 值和线衰减系数的关系,然后测试被测材料(均匀材料、组分已知) CT 值,求出线衰减系数,根据被测材料的质量衰减系数和线衰减系数的关系计算密度。笔者将这种方法简称为线衰减系数对比法。该方法中只给出了 9MeV 高能加速器 CT 的试验研究实例,没有给出普通 X 射线 CT 定量检测材料密度的实例。

笔者在分析了材料组分、密度对射线衰减系数影响的基础上,借鉴美国 ASTM 标准的思路,以铝合金标准样品为研究对象,采用了 420kV 的工业 X 射线 CT 系统,研究了基于材料组分特性的材料密度的工业 CT 定量检测方法,并将测量结果和密度对比法进行了比较。结果表明,对于密度均匀的铝合金材料,基于组分特性的线衰减系数对比法测试精度明显优于密度对比法。

1 理论分析

单能 X 射线在材料中的衰减系数 μ 可表达为^[9]:

$$\mu = \mu_T + \mu_C + \mu_E + \mu_R \quad (1)$$

式中 μ_T —光电效应线衰减系数;

μ_C —Compton 散射线衰减系数;

μ_E —电子对效应线衰减系数;

μ_R —瑞利散射线衰减系数。

理论上常用质量衰减系数 μ_m (单位为 $\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)描述射线的衰减:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (2)$$

对于化合物和混合物,其质量衰减系数表达式如下:

$$\mu_m = \mu \rho = \sum_i w_i \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i \quad (3)$$

式中 w_i 为该元素或组分的重量分数。

μ_m 取决于每个原子对光子作用总截面 σ_a (相当于每个原子对光子散射和吸收的几率)。由于每个原子有 Z 个电子,因此可以用每个电子对光子作用截面 σ_e 来表示总截面^[10]。

$$\mu_m = \sigma_a \cdot \frac{N_A}{A} = \sigma_e \cdot \frac{N_A \cdot Z}{A} \quad (4)$$

式中 N_A —阿伏加德罗常数;

$N_A = 6.022529 \times 10^{23} / \text{mol}$;

A —材料的原子量;

σ_a —原子对光子作用总截面, $\text{barn}(10^{-28} \text{ m}^2)$;

σ_e —电子对光子作用截面, $\text{barn}(10^{-28} \text{ m}^2)$ 。

除了氢元素外,对所有元素, $\frac{N_A \cdot Z}{A} \approx N_A / 2, \mu_m$

与 σ_e 近似成正比。同样, σ_e 也与三种光子和物质的相互作用有关,表示为:

$$\sigma_e = \sigma_T + \sigma_C + \sigma_E \quad (5)$$

由于射线能量在 0.1~1 MeV, Compton 散射是材料主要衰减过程, σ_C 对 σ_e 的贡献最大,对于镁,铝等的低原子序数的材料, σ_e 与 σ_C 近似相等。

Compton 散射中电子对光子作用截面 σ_C (单位 $\text{cm}^2/\text{电子}$)由 Klein-Nishina 公式给出^[11]:

$$\sigma_C = 2\pi r_e^2 \left\{ \frac{1+a}{a^2} \left[\frac{2(1+a)}{(1+2a)} - \frac{\ln(1+2a)}{a} \right] + \frac{\ln(1+2a)}{2a} - \frac{1+3a}{(1+2a)^2} \right\} \quad (6)$$

式中 $a = \frac{h\nu}{m_e c^2}$; ν 为入射光子的频率; r_e 为常数(电子的经典半径)。

由式(6)可以看出,Compton 散射中电子对光子作用截面 σ_C 只与入射光子能量有关,和散射材料无关。入射光子能量确定时, σ_C 为常数。由以上分析可以得到,在 Compton 散射起主要作用的能量范围内,当光子能量一定时,质量衰减系数 μ_m 近似为一个常数,从而线性衰减系数与材料密度成正比,即 $\mu \propto \rho$,此为通过 CT 技术重建线性衰减系数 μ 的分布,实现对材料密度测试和表征的理论基础。

然而,由于 X 射线机发出的都是连续谱 X 射线,在穿过物体过程当中,低能射线将优先吸收,使穿过物体后的射线平均有效能量提高,即产生了所谓的“射束硬化”现象。连续谱 X 射线造成物体线衰减系数的不确定性(不是一个固定值)表现在物体的同一部位,对于不同能量的 X 射线表现出不同的线衰减系数;物体组分和密度完全不同的不同部位,随着 X 射线透照方向和路径的不同,也表现出不同的线衰减系数。

为了简化模型,采用了“等效能量”的概念^[8]。如果连续谱 X 射线 CT 系统与一个理论的单能 X 射线 CT 系统在材料中引起相同的测量衰减系数,或者说,引起相同的 CT 值的测量分布,那么,这个理论的单能 X 射线的能量就是连续谱 X 射线 CT 系统的等效能量。有了等效能量,前面单能条件下的讨论结果都可以应用。笔者的目的是通过等效能量的辅助,使得密度的 CT 测量结果尽可能逼近其实际值。

2 检测方法与条件

2.1 检测方法

设计典型的标准试样,用化学法测定其组分,用阿基米德排水法测出其密度(标准密度),通过工业 CT 扫描,测定其 CT 值,对不同能量下的理论线性衰减系数进行计算,用最小二乘法建立 CT 值和材料线衰减系数的关系,采用试样 CT 值和理论线性衰减系数决定系数比较法,求得 X 射线等效能量。建立等效能量下 CT 值和材料线性衰减系数的线性关系,对未知试样材料 CT 值进行测试,求出线性衰减系数,通过质量衰减系数求出密度。

2.2 检测条件

2.2.1 检测设备

检测设备为美国 BIR 公司引进的 ACTIS300 工业 X 射线 CT 检测系统。

2.2.2 对比试样

采用化学分析用的光谱标准铝合金标样。直径为 $\phi 62$ mm,高度为 30 mm。其组分由生产厂家给出,用阿基米德排水法对其密度进行测试,见表 1。

2.2.3 扫描成像方法

采用三代扫描模式,探测器为图像增强器。通过检测工艺试验研究确定最佳扫描工艺参数匹配,得到高质量的 CT 扫描图像,并使 CT 值的标准偏差值最小。对于铝合金试样,测定 $\phi 40$ mm 范围内的平均 CT 值。

3 检测结果与讨论

3.1 铝合金试样质量衰减系数计算

铝合金中除了主量元素 Al 之外,通常包含 Mg, Si, Ti, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, Sn 和 Pb 等元

素,不同元素的质量衰减系数随着 X 射线光子能量的增加而减小。根据 Hubbell 等人的试验数据^[12],给出了铝合金中不同元素质量衰减系数随光子能量的变化规律(图 1)。图中曲线由下到上分别对应元素 Mg, Si, Ti, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Ga, Sn 和 Pb。

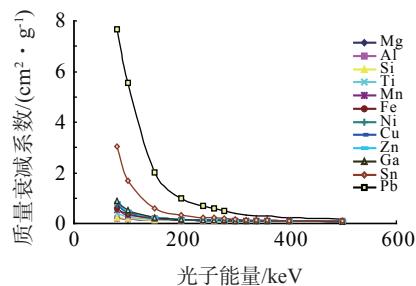


图 1 不同元素质量衰减系数随光子能量的变化

可以看到,在 150 keV 以下,不同元素的质量衰减系数有明显差别,特别是原子序数高的 Pb 和 Sn 元素质量衰减系数明显高于 Mg 和 Al 等轻金属元素。随着光子能量的增加,质量衰减系数差距越来越小。在 300 keV 以上,除了 Pb 和 Sn 外,其余元素的质量衰减系数基本趋于一致。

根据铝合金试样的组分情况(表 1),按照式(3)和文献[12]的数据,利用插值的方法计算出不同能量下各种铝合金试样的质量衰减系数(表 2)。

3.2 衰减系数对比法测定均匀铝合金标准试样密度

对 E411d, E412d, E2141, E2175 和 E2176 五种铝合金标准试样进行 CT 扫描,测定试样 CT 图像上 $\phi 40$ mm 范围内的平均 CT 值。根据标准试样的密度和不同能量下的质量衰减系数,求出在不同能量下的线衰减系数。用最小二乘法分别模拟标准试样 CT 测量值和不同能量下的线衰减系数之间的线性关系,求出决定系数 R^2 。表 3 为标准试样 CT 测

表 1 铝合金标样组分及密度

材料 牌号	材料组分/%											标准密度/ (g · cm ⁻³)
	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Ni	Ga	Pb	Sn	
E411d	0.011	0.0069	0.012	0.141	0.178	0.025	0.012	0.011	0.015	0	0	99.588
E412d	0.0048	0.003	0.002	0.055	0.058	0.0041	0.002	0.0061	0.0037	0	0	99.861
E414b	0.05	0.024	0.024	0.345	0.364	0.05	0.025	0.051	0.031	0	0	99.036
E415b	0.026	0.055	0.098	0.595	0.618	0.147	0.082	0.081	0.04	0	0	98.258
E2141	4.64	0.063	0.531	0.166	6.78	0.097	0	0.024	0	0	0	87.699
E2142	4	0.124	0.451	0.443	7.55	0.374	0	0.024	0	0.0059	0.043	86.985
E2143	3.43	0.176	0.337	0.715	8.26	0.7	0	0.287	0	0.017	0.07886	2.7696
E2175	0.66	0.127	0.134	0.673	8.23	8.99	0	0	0	0	0	81.186
E2176	0.408	0.217	0.291	0.409	6.85	11.14	0	0	0	0	0	80.685
E2177	0.203	0.285	0.509	0.223	5.42	12.61	0	0	0	0	0	80.75
												2.9217

表 2 铝合金试样在不同能量下的质量衰减系数

能量 /keV	$\mu_m / (\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1})$									
	E412d	E411d	E414b	E415b	E2141	E2142	E2143	E2175	E2176	E2177
100	0.170 58	0.170 935	0.171 762	0.172 841	0.186 25	0.1868 02	0.1885 19	0.204 343	0.210 192	0.214 207
150	0.1378 55	0.137 962	0.138 21	0.138 531	0.142 623	0.142 847	0.143 432	0.148 045	0.149 727	0.150 863
200	0.122 324	0.122 369	0.122 475	0.122 61	0.124 388	0.124 515	0.124 799	0.126 677	0.127 333	0.127 763
240	0.114 276	0.114 307	0.114 376	0.114 463	0.115 652	0.115 751	0.115 952	0.117 139	0.117 536	0.117 787
260	0.110 653	0.110 677	0.110 731	0.110 800	0.111 747	0.111 834	0.112 001	0.112 906	0.113 197	0.113 377
280	0.107 297	0.107 315	0.107 357	0.107 409	0.108 15	0.108 227	0.108 365	0.109 031	0.109 233	0.109 351
290	0.105 719	0.105 735	0.105 771	0.105 816	0.106 468	0.106 54	0.106 666	0.107 228	0.107 391	0.107 483
300	0.104 207	0.104 221	0.104 252	0.104 291	0.104 862	0.104 93	0.105 045	0.105 514	0.105 642	0.105 710
320	0.101 385	0.101 395	0.101 418	0.101 446	0.101 883	0.101 944	0.102 039	0.102 354	0.102 426	0.102 454
340	0.098 829	0.098 837	0.098 854	0.098 874	0.099 212	0.099 268	0.099 349	0.099 553	0.099 582	0.099 583
360	0.096 964	0.096 973	0.096 991	0.097 013	0.097 372	0.097 427	0.097 51	0.097 746	0.097 789	0.097 800
400	0.092 763	0.092 77	0.092 782	0.092 799	0.093 052	0.093 101	0.093 168	0.093 293	0.093 296	0.093 279

表 3 标准试样 CT 测量值、能量和线衰减系数之间的对应关系

编号	CT 值	线衰减系数/ cm^{-1}									
		100 keV	150 keV	200 keV	240 keV	260 keV	280 keV	300 keV	320 keV	340 keV	400 keV
E412d	2406.15	0.4604	0.3721	0.3302	0.3085	0.2987	0.2896	0.2813	0.2737	0.2668	0.2617
E411d	2407.58	0.462	0.3728	0.3307	0.3089	0.2991	0.2900	0.2817	0.274	0.2671	0.2507
E2141	2506.67	0.5165	0.3955	0.3449	0.3207	0.3099	0.2999	0.2908	0.2825	0.2751	0.2700
E2175	2595.32	0.5816	0.4214	0.3605	0.3334	0.3213	0.3103	0.3003	0.2913	0.2833	0.2782
E2176	2637.9	0.6068	0.4322	0.3676	0.3393	0.3268	0.3153	0.305	0.2957	0.2875	0.2693
R^2		0.9971	0.9978	0.9984	0.9985	0.9986	0.9987	0.9988	0.9988	0.9989	0.9989

量值、能量和线衰减系数之间的对应表,并给出了决定系数 R^2 计算结果。

由表 3 可见,对于试验用的均匀铝合金标准试样,CT 测量值和线衰减系数在 300~400 keV 之间都具有较好的线性相关性。决定系数 R^2 最大值为 0.9989,出现在 340 和 400 keV 两个能量下。

用最小二乘法对标准试样 CT 测量值、能量和线衰减系数关系进行拟合,如图 2。可以看出,随着能量的增加,线衰减系数减小,拟合的直线左移;且随着能量增加,拟合的直线斜率逐渐增加,也就是说不同标准试样衰减系数差别逐渐减少。

为了便于计算,不妨取 340 keV 为本试验扫描

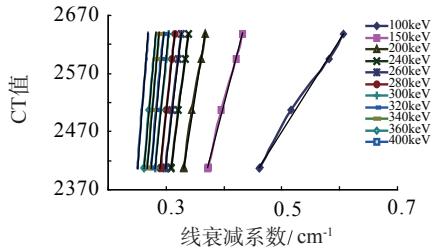


图 2 CT 值、线衰减系数和光子能量之间的对应曲线

条件下对于 $\phi 62$ mm 匀铝合金试样扫描的等效能量。根据图 2 等效能量(340 keV)下标准试样 CT 值和线衰减系数之间的关系,得到 CT 平均值和线衰减系数之间的函数关系:

$$N_{ct} = 11317\mu - 612.24 \quad (7)$$

由式(7)关系和对另外 5 套铝合金试样的 CT 测量值,计算出等效能量下的线衰减系数,根据其质量衰减系数按照式(2)计算出被测试样密度。求出和阿基米德法测试的标准密度的误差和相对误差,结果如表 4。

由表 4 可见,衰减系数对比法对均匀铝合金试样密度的测试,绝对误差最大值 0.0099 g/cm³,相对误差最大值为 0.339%。

3.3 密度对比法测定材料密度

对 E411d, E412d, E2141, E2175 和 E2176 五种铝合金标准试样进行 CT 扫描,用最小二乘法建立密度对比法不需要知道材料的组分和质量衰减 CT 平均值和标准密度之间的线性关系,结果如下:

$$N_{ct} = 1258.2\rho - 989.07 \quad (8)$$

决定系数 $R^2=0.9978$ 。CT 平均值和标准密度

表 4 衰减系数对比法对均匀铝合金试样的测试结果

编 号	标准密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	质量衰减系数 $/(cm^2 \cdot g^{-1})$	线衰减系数 $/cm^{-1}$	CT 平均值 N_{ct}	测量密度/ $(g \cdot cm^{-3})$	绝对误差/ $(g \cdot cm^{-3})$	相对误差 /%
E414b	2.710 6	0.098 854	0.267 953	2 416.73	2.707 5	-0.003 1	0.114
E415b	2.720 1	0.098 874	0.268 946	2 428.74	2.717 7	-0.002 4	0.088
E2142	2.770 3	0.099 268	0.275 001	2 501.80	2.772 0	0.001 7	0.061
E2143	2.769 6	0.099 349	0.275 157	2 503.70	2.771 4	0.001 8	0.065
E2177	2.921 7	0.099 583	0.290 952	2 669.25	2.911 8	-0.009 9	0.339

表 5 五种铝合金试样采用密度对比法的密度测定结果

编 号	标准密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	CT 值 1	CT 值 2	CT 值 3	CT 平均值 N_{ct}	测量密度/ $(g \cdot cm^{-3})$	绝对误差/ $(g \cdot cm^{-3})$	相对误差 /%
E414b	2.7106	2416.43	2416.87	2416.88	2416.73	2.7069	-0.0037	0.137
E415b	2.7201	2428.71	2428.68	2428.82	2428.74	2.7164	-0.0037	0.136
E2142	2.7703	2505.75	2502.06	2497.59	2501.80	2.7745	0.0042	0.152
E2143	2.7696	2503.45	2503.51	2504.15	2503.70	2.7760	0.0064	0.231
E2177	2.9217	2670.32	2669.31	2668.13	2669.25	2.9076	-0.0141	0.483

之间对应关系曲线(试验曲线)和线性拟合曲线如图 3 所示。

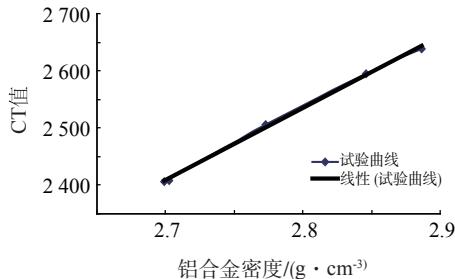


图 3 铝合金 CT 值与密度之间的线性关系

用相同的检测工艺对另外五种铝合金试样进行 CT 扫描,测定试样 CT 图像上 $\phi 40$ mm 范围内的平均 CT 值。根据公式(8)计算出待测试样密度,并计算出测量结果的绝对误差和相对误差。试验结果如表 5 所示。

可以看出,对均匀铝合金试样,用密度对比的方法给出的测试结果与阿基米德排水法的测量结果十分接近,绝对误差最大为 $0.0141\text{ g}/\text{cm}^3$,相对误差最大为 0.483%。

3.4 分析讨论

3.4.1 关于等效能量的确定

基于材料组分特性的线衰减系数对比法测试材料密度,扫描条件下 X 射线“等效能量”的确定是重要环节。美国 ASTM 标准^[8]只给出 9 MeV 高能加速器 CT 等效能量的确定方法,即采用试样 CT 值和理论线性衰减系数最大相关系数比较法,求得射

线等效能量。以上试验研究表明:用普通工业 X 射线 CT 测定均匀铝合金材料密度时,用最大决定系数(相当于最大相关系数)的方法确定 X 射线的等效能量也是适宜的,此时,CT 值和线衰减系数的相关性代表与密度的相关性。对于复杂边界条件物体或非均匀的材料,情况有所不同,有关这方面的工作正在开展。

在射线检测文献[9]中,给出了连续 X 射线在工件探伤中等效能量的波长为最短波长的 1.35~1.4 倍。如 X 射线的管电压为 400 kV,则等效能量范围为 285~296 keV。研究表明:在上述试验条件下,管电压为 400 kV 的 X 射线等效能量为 340~400 keV,显然,在 CT 扫描成像中,用于密度检测时的等效能量确定与常规射线照相有所不同。研究中也发现:在 X 射线等效能量范围内,取任何一个能量作为等效能量,密度测量结果变化不大。

3.4.2 关于两种检测方法的比较

表 6 给出了线衰减系数对比法和密度对比法两种试验方法检测材料密度的比较结果。不难发现:对于均匀铝合金材料的工业 CT 密度测试,线衰减系数法的测试精度明显优于密度对比法。

表 6 两种方法测试结果的比较

测试方法	最大绝对误差 $/(g \cdot cm^{-3})$	最大相对误差 /%	平均相对误差 /%
密度对比法	0.0141	0.483	0.2278
线衰减系数对比法	0.0099	0.339	0.1334

密度对比法不需要知道材料的组分和质量衰减系数,原理相对简单,容易实现。线衰减系数对比法需要知道材料组分和质量衰减系数,技术相对复杂。

4 结论

(1) 基于组分特性的线衰减系数对比法是工业 X 射线 CT 定量检测材料密度的有效方法,检测均匀铝合金材料密度时,其绝对误差最大为 0.009 9 g/cm³,相对误差最大为 0.339%。

(2) 对于均匀铝合金材料的密度检测,线衰减系数对比法测试精度明显优于密度对比法。

(3) 密度对比法无需知道材料的组分和质量衰减系数,原理相对简单,容易实现。线衰减系数对比法需要知道材料组分和质量衰减系数,技术相对复杂。

参考文献:

- [1] Bossi R H, Georgeson G E. The application of X-ray computed tomography to materials development [J]. *JOM*, 1991, 43(9): 723—728.
- [2] London B, Yancey R N, Smith J A. High-resolution X-ray computed tomography of composite materials [J]. *Materials Evaluation*, 1990, 48(5): 604—608.
- [3] 杨文海,何得昌,徐军培,等. γ 射线工业 CT 技术在高能炸药密度检测中的应用[J]. 火炸药学报, 2001, 24

(上接第 4 页)

参考文献:

- [1] 刘增华,何存富,吴斌,等. 利用兰姆波对板状结构中隐蔽腐蚀缺陷的检测[J]. 实验力学, 2005, 20(2): 166—170.
- [2] Benmeddour F, Grondel S, Assaad J. Study of the fundamental Lamb modes interaction with asymmetrical discontinuities[J]. *NDT&E International*, 2008, 41(5): 330—340.
- [3] Benmeddour F, Grondel S, Assaad J. Study of the fundamental Lamb modes interaction with symmetrical notches[J]. *NDT&E International*, 2008, 41(1): 1—9.
- [4] Cawley P, Lowe M, Alleyne D. Practical long range guided wave testing: applications to pipes and rail[J]. *Materials Evaluation*, 2003, 61(1): 66—74.
- [5] Cawley P, Alleyne D. The use of Lamb waves for the long range inspection of large structures[J]. *Ultrasonics*, 1996, 34(2/5): 287—290.
- [6] El-Youbi F, Grondel S, Assaad J. Signal processing for damage detection using two different array transducers[J]. *Ultrasonics*, 2004, 42(1/9): 803—806.

(3): 33—34, 72.

- [4] 王珏,黄苏红,蔡玉芳. 工业 CT 材料密度测量方法研究[J]. *计算机工程与应用*, 2010, 46(2): 203—205.
- [5] 杨雪海,张伟斌,戴斌,等. 含能材料密度的 XCT 自参照测试[J]. *无损检测*, 2010, 32(6): 431—433.
- [6] CHEN Hui-neng, YANG Shu-bing. Study on the density characterization of the CT image[C]. 17th World Conference on Nondestructive Testing, Shanghai, 2008, China.
- [7] Kropas C V, Moran T J, Yancey R N. Effect of composition on density measurement by X-ray computed tomography[J]. *Materials Evaluation*, 1991, 49(4): 487—489.
- [8] ASTM E1935—1997 (2008) Standard Test Method for Calibrating and Measuring CT Density[S].
- [9] 中国机械工程学会无损检测分会编. 射线检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 10—50.
- [10] 美国无损检测学会编. 美国无损检测手册(射线卷)[M]. 《美国无损检测手册》译审委员会译. 上海: 世界图书出版公司, 1992: 90—100.
- [11] 石磊,主编. 探伤用射线防护技术[M]. 北京机械工业出版社, 1990: 78—85.
- [12] Hubbell J H, Seltzer S M. Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients. 2005-2-16. <http://physics.nist.gov/xaamdi>.

- [7] 周正干,冯海伟. 超声导波检测技术的研究进展[J]. 无损检测, 2006, 28(2): 57—63.
- [8] 魏运飞,卢超,张在东. 薄板声-超声检测时兰姆波传播模式的有限元模拟[J]. 无损检测, 2009, 31(7): 520—524.
- [9] Lee B C, Staszewski W J. Lamb wave propagation modelling for damage detection: I. Two-dimensional analysis[J]. *Smart Materials And Structures*, 2007, 16(2): 249—259.
- [10] Lee B C, Staszewski W J. Lamb wave propagation modelling for damage detection: II. Damage monitoring strategy[J]. *Smart Materials And Structures*, 2007, 16(2): 260—274.
- [11] 王秀彦,孙雅欣,刘增华,等. ANSYS 二次开发技术在弯管缺陷超声导波检测数值模拟中的应用[J]. 无损检测, 2006, 28(8): 413—415.
- [12] Rose J L. 固体中的超声波[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
- [13] Alleyne D, Cawley P. The interaction of lamb waves with defects[J]. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1992, 39(3): 381—397.