

同轴法射线相衬成像的数值模拟技术

孙朝明

(中国工程物理研究院机械制造工艺研究所, 绵阳 621900)

摘要:借助于射线传播过程的相位变化特性,射线相衬成像技术得以发展。该技术可解决传统射线照相技术对于弱吸收材料难以有效成像的不足,能够得到高对比度的检测图像。同轴法射线相衬成像技术具有结构简单、便于实现的优点。使用一定相干性的射线源产生射线,穿透物体并在空间自由传播一定距离后经探测器采集,即可获取到相衬图像。针对同轴法射线相衬成像技术,阐述了相衬成像的实现原理、成像技术的种类、应用前景,分析了数值模拟技术的实现方法。

关键词:相衬成像;同轴法;数值模拟

中图分类号: TG115.28

文献标志码: A

文章编号: 1000-6656(2014)12-0002-06

Numerical Simulation Method of in Line Phase Contrast Imaging

SUN Chao-ming

(Institute of Machinery Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: With application of phase change during wave propagation in radiographic testing, phase contrast imaging was developed. The difficulties in traditional radiographic testing of weak absorption materials can be overcome by this imaging method, and high contrast image can be obtained. In line phase contrast imaging method is easy to realize; phase contrast image can be acquired after coherent rays penetrated the object and propagated a certain distance in free space. In this paper, principle of in line phase contrast imaging was investigated, classification and application of the imaging technique were summarized, and the numerical simulation method for in line phase contrast imaging was analyzed.

Keywords: Phase contrast imaging; In line method; Numerical simulation

射线穿过物体后,其强度将根据穿过物质的厚度及其材料特性而减弱,由此将形成检测图像的对比度。传统射线照相法依据射线强度减弱程度的不同而得到对比度差异的影像,从而对被检材料进行内部结构或缺陷情况的判别。为了更好进行物质辨别及缺陷位置判定,双能射线照相、多角度射线照相、CT技术等得到了应用与发展。但是,对于弱吸收材料而言,由于其对射线衰减的作用很弱,即使内部存在结构的不连续差异,也难以有效的反映出来。

借助于射线波动传播中的相位变化这一新思路,X射线相衬成像(X-ray phase contrast imaging,

XPCI)利用X射线经过物体后的相移信息而形成对比度图像,解决了传统射线照相法对于弱吸收材料难以有效成像的不足,并能够显示更清晰、更精细的物体内部结构。X射线相衬成像技术一经报道^[1-2],便成为X射线成像领域里热门的研究方向之一。

射线相衬成像方法包括:干涉法、同轴法、衍射增强法、光栅法。同轴法(in-line PCI,in-line holography或free-space propagation PCI)具有结构简单、便于实现的优点:射线源发出射线穿过物体后在空间自由传播,探测器在特定的位置(Fresnel衍射场)可获取到射线的近似二阶相移信息图像。针对同轴法射线相衬成像技术,分析了其实现原理,综述了检测技术分类、应用情况,并详细分析了数值模拟技术的实现方法。

收稿日期:2014-04-17

作者简介:孙朝明(1977—),男,硕士,高级工程师,主要从事无损检测工作。

1 同轴法射线相衬成像技术原理

1.1 射线传播中的强度与相位变化^[3]

射线是电磁波,具有波动传播的特性。决定波动传播规律的基本参数是射线在介质中的折射率。视射线为横向平面波的表达式为 $\exp[i(\omega t - kr)]$,表达式中 k 为波矢量($k = 2\pi/\lambda$, λ 为射线的波长); r 为波平面上任一点的位置矢量; ω 为波的圆频率,即单位时间的相位变化量。

通过电磁波场方程可推导出射线的折射率,用复数形式描述:

$$n(\omega) = 1 - \frac{n_a r_e \lambda^2}{2\pi} [(f_1^0(\omega) + i f_2^0(\omega))] \quad (1)$$

式中: n_a 为原子的平均密度; r_e 为电子经典半径; $f_1^0(\omega)$ 、 $f_2^0(\omega)$ 为原子的复散射因子的复数分量。

一般式(2)写作 $1 - \delta - i\beta$, β 项对应于射线强度在物质中的衰减, δ 项对应于射线通过物质后产生的相移。由折射率的表达式,可计算射线传播中的相位变化和吸收。

通过光波平均强度的计算对比,可知宏观上射线对物质的线衰减系数 μ 可表示为:

$$\mu = 4\pi\beta/\lambda \quad (2)$$

若射线通过物质的距离为 Δr ,则对应的相移为:

$$\Delta\Phi = \Delta r(2\pi\delta/\lambda) \quad (3)$$

1.2 相位信息调制

对于弱吸收材料,射线经过物体后的强度变化可以忽略,而光波的波面将随物体截面变化而发生畸变;传播一定距离后,波面将会发生重叠、干涉,从而将相位信息转化为强度调制^[4]。随着物体与探测器间距离的不同,大致分为近场区、菲涅尔衍射区、夫琅和费(Fraunhofer)衍射区、远场区,而相衬成像则主要在菲涅尔衍射区。

1.2.1 射线经过物体的透射函数

在 XYZ 坐标系下,假设薄层物体位于 $z=0$ 平面上,沿 z 向传播的平面波通过物体。沿透射方向通过积分计算射线强度衰减和相位变化,并按指数规律衰减,则透射函数为:

$$q(x, y) = \exp[-\int \mu dz + i \frac{2\pi}{\lambda} \int \delta dz] \quad (4)$$

式(5)近似可得:

$$q(x, y) \approx 1 + i\phi(x, y) - \mu(x, y) \quad (5)$$

1.2.2 菲涅尔近似

透过物体后的光波,又作为新的子波波源向前

传播。依据惠更斯原理并考虑诸子波的干涉作用(即惠更斯-菲涅尔原理),可求出到达探测器平面内每个点所对应的波叠加效果。

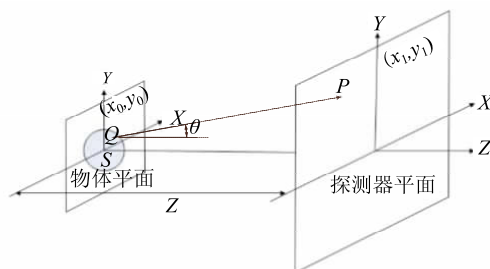


图1 平面波的衍射

如图1所示,在探测器平面上 P 点的复振幅可用下式计算:

$$f(x_1, y_1) = \frac{i}{2\lambda} \int_S f(x_0, y_0) \frac{e^{-ikr}}{r} (1 + \cos\theta) dS \quad (6)$$

式中: θ 为 QP 方向与波前法线的夹角,即衍射角; e^{-ikr}/r 代表从 Q 点的球面波传到 P 点时振幅和相位的变化; S 为积分对象,即图1中所示,物体平面圆形区域 S ,是二维积分。

对于一般的衍射问题, θ 角很小,应用轴旁近似或小角度近似,式(6)可变为:

$$f(x_1, y_1) = \frac{i}{\lambda z} \int_S f(x_0, y_0) e^{ikr} dS \quad (7)$$

利用菲涅尔近似^[5-6],将式(8)中的 r 用 z 表示,可得到:

$$f(x_1, y_1) = \frac{ikz}{\lambda z} \iint f(x_0, y_0) e^{ik[(x_1-x_0)^2 + (y_1-y_0)^2]/(2z)} dx_0 dy_0 \quad (8)$$

1.2.3 光学传递函数

设平面入射波幅值为1,则式(8)中 $f(x_0, y_0)$ 可用 $q(x, y)$ 代替。为简化分析,假定物体为一维分布,则式(8)转化为:

$$f(x_1) = \sqrt{\frac{i}{\lambda z}} e^{-ikz} \int q(x) e^{-ik[(x_1-x_0)^2]/(2z)} dx_0 \quad (9)$$

对式(9)进行傅立叶变换,可得

$$F(u) = \exp(-ikz) Q(u) \exp(i\pi\lambda zu^2) \quad (10)$$

对应于式(5),其傅立叶变换为:

$$Q(u) = \delta(u) + i\Phi(u) - m(u) \quad (11)$$

将(11)代入式(10),经计算并近似处理后^[5],可得:

$$F(u) \approx \delta(u) - \Phi(u) \sin(\chi) - m(u) \cos(\chi) \quad (12)$$

式中: $\chi = i\pi\lambda zu^2$ 对应项代表菲涅尔衍射的光学传递函数(OTF),或者更准确的称为对比度传递函数(CTF)。

对 $F(u)$ 进行傅立叶反变换可得到达探测器平面的 $f(x_1)$ 。

1.3 球面波的传播与接收

按菲涅尔-基尔霍夫衍射公式^[7],如图2所示,球面波点源经孔 S (物体平面)传播到探测器上某个接收点 p 的衍射波表达式为:

$$\frac{-i}{2\lambda} \iint_S \frac{e^{\frac{-i2\pi(s_0+s_1)}{\lambda}}}{s_0 s_1} [\cos(n, s_0) - \cos(n, s_1)] dS$$

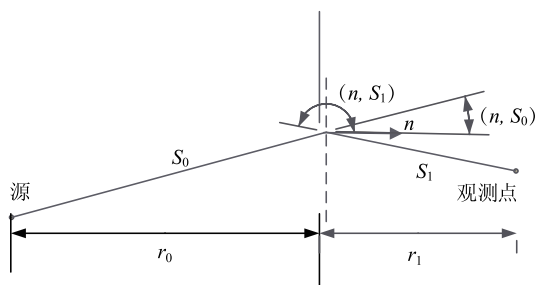


图2 球面波的衍射

图2中, r_0 为射线源与物体平面的垂直距离, r_1 为物体平面与探测器平面的垂直距离。 S_0 为源点与物体平面上某点的距离, S_1 为物体平面上某点到探测器平面上观测点的距离, n 为物体平面的法向矢量, (n, S_0) 、 (n, S_1) 则为对应的夹角。

将式(13)与式(6)进行对比可知,式(7)中的 $f(x_0, y_0)$ 对应于 $e^{\frac{-i\pi S_0}{\lambda}}/S_0$ 项,即射线源到达物体平面时的相位与幅值变化。

2 同轴法相衬成像技术的种类

2.1 相干光的要求

要使光在传输过程中产生干涉、衍射效应,则需要光源在时间相干性、空间相干性方面满足相应的要求。时间相干性(纵向相干性),指光束平行于传播方向的相干性,其物理量是相干长度。空间相干性(横向相干性),指光束垂直于传播方向的相干性,其物理量是相干宽度。

相干长度 L_c 与光源的谱宽 $\Delta\lambda$ 存在关系:

$$L_c = \lambda^2 / (2\Delta\lambda) \quad (13)$$

光源的波面尺寸 d 与光波张角 θ 与光波波长的关系为:

$$d\theta = \lambda(2\pi) \quad (14)$$

要获得长的相干长度,就应缩小光的带宽。要获得大的相干面积,应降低光传播方向的不确定性。对应于式(14),文献[2]指出横向相干宽度取决于 $\lambda l/\sigma$, l 为射线源到探测器的距离, σ 为源的焦点尺寸。

2.2 同轴法相衬成像技术的种类

射线相衬成像的实现很大程度上取决于射线源的品质。根据所使用射线源的不同,同轴法相衬成像技术包括:基于同步辐射光源的相衬成像技术、基于微焦点射线源的相衬成像技术、中子相衬成像技术。

同步辐射光源^[8-9]具有高亮度、高准直性、高空间相干性的突出优点,但应用成本较高,因此会受到很多局限,不适用于常规检测。微焦点射线源具有高的空间相干性,为相衬成像技术的应用提供了一种方便的实现途径。中子射线与物质的作用与X射线不同,它易于穿透某些高吸收材料而难于穿透某些弱吸收材料,因此中子射线检测是X射线检测技术的一个有效补充手段。试验表明,基于同轴法的中子射线相衬成像是可行的^[10]。

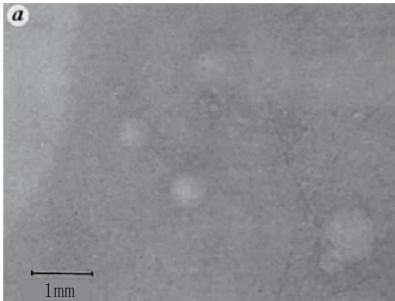
3 同轴法相衬成像技术的应用分析

使用微焦点射线源和X射线胶片, T. J. Davis 等对聚合物胶粘剂、金鱼进行了相衬成像检测试验。试验结果表明,在一定放大倍数下所获取的相衬图像,其细节分辨能力远高于基于射线衰减的图像。相衬图像能够将胶粘剂中气泡、纤维细丝的边缘强化并清晰呈现,如图3所示。金鱼体内脊髓走向、系带等结构在射线衰减图像中难以分辨,而相衬图像中却得以清晰的显现。对应于图3(a),射线源到物体的距离为200 mm,物体到胶片的距离为1 mm,曝光时间为15 s;对应于图3(b),射线源到物体的距离、物体到胶片的距离分别为200、1200 mm,曝光时间为8 min;试验所用的射线电压为60 kV,射线源焦点尺寸约为20 μm 。

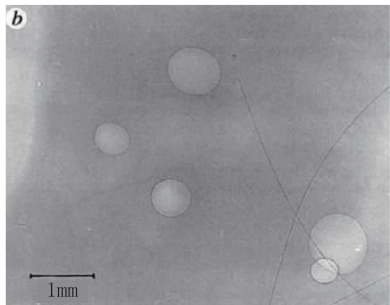
B. Zoofan 等使用数值模拟分析方法并结合实际检测试验,针对金属材料、高分子材料,探讨了利用相衬成像技术进行无损检测的可行性^[11]。使用焦点尺寸5 μm 的射线源,对于1 mm厚的铝试样,试验结果如图4所示。对比可知,相衬图像可得到更清晰的边界,对比度得到明显的提升。

针对材料研究、医学应用中的多种样品, Yogesh, S. Kashyap 利用微焦点射线源和 CCD 成

像器进行了相衬成像检测试验^[12]。检测的物品包括碳纤维复合材料、钻石、带石墨涂层的氧化铝及氧化锆小球、一些生物组织。对于含有多种涂覆层的氧化锆小球,利用相衬成像方法得到的检测图像如图 5 所示,通过相衬图像,可以清晰的观测各层厚度是否均匀、是否满足相应的要求。

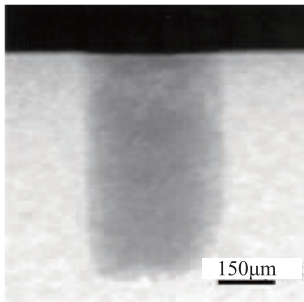


(a) 射线衰减图像

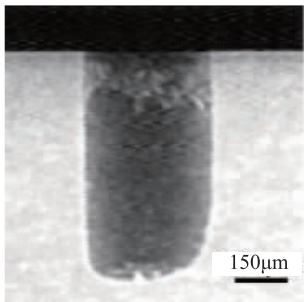


(b) 相衬成像

图 3 胶粘剂的透视图像对比



(a) 传统X射线成像



(b) 相衬成像

图 4 铝试样的透视图像对比

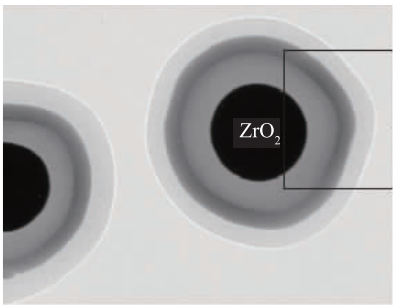


图 5 氧化锆小球的相衬图像

一些材料的折射率参数如表 1^[13]所示。对于弱吸收材料而言,其折射系数中 δ 项远大于 β 项,因此更适用于 X 射线相衬成像。由于检测对象的特性,相衬成像技术在医学上的应用前景较好;对于工业中的特定检测问题,如核燃料小球^[14]、聚变靶球^[15]、轻金属材料等对象的高质量无损检测等,也有较好的应用前景。对于射线吸收差异较小的物质,相衬成像 CT 技术的应用很大程度上提高了可探测能力^[16]。

表 1 材料的折射系数(20 keV)

材料	δ	β	δ/β
聚苯乙烯	5.0×10^{-7}	3.2×10^{-10}	1.6×10^3
玻璃	1.3×10^{-6}	2.9×10^{-9}	4.5×10^2
硅	1.2×10^{-6}	4.9×10^{-9}	2.4×10^2
水	5.8×10^{-7}	6.0×10^{-10}	9.7×10^2
钢	3.8×10^{-6}	9.7×10^{-8}	3.9×10^1

4 同轴法相衬成像的数值模拟技术分析

如果没有深入了解相衬成像技术的相关理论,将很难实现高性能的成像系统,并对成像技术进行优化。要想掌握相衬成像的主要影响因素并相应进行优化处理,或针对具体检测对象探讨检测的可行性,就有必要采取数值模拟技术进行分析。采用数值模拟技术,避免了实际试验时所带来的样品制备、成像系统调试等限制,可以灵活方便的设计检测物体的材料或结构、调整成像中的多个参数进行理论试验分析。

4.1 射线成像的数值模拟技术

通用的射线检测模拟仿真软件如 XRSIM、SINBAD、HADES^[17]等,主要使用射线跟踪方法进行分析。

一个较完整的射线检测模拟仿真流程^[18]如图 6 所示。这里面考虑了射线源多色谱的辐射特征、射

线源焦点大小。射线检测模拟仿真的要素主要包括:射线源、成像介质、工件的建模,某种材料在特定射线能量下的衰减系数 $\mu(m, E)$ 的设定,成像参数的设置,射线穿过工件路径 $x(p)$ 的计算等。

数值模拟的核心为计算射线经过物体后射线强度的衰减量。其表达式可写作:

$$N(E) = N_0(E) \Delta\Omega \exp[\sum_i (-\mu_i(E) x_i)] \quad (15)$$

式中: $N_0(E)$ 为对应特定能量下的光子数; $\Delta\Omega$ 为探测器上某点对应于射线的张角; $\mu_i(E)$ 对应于某材料在特定能量下的线衰减系数; x_i 为射线穿过材料的路径长度; $N(E)$ 为到达探测器的光子数。

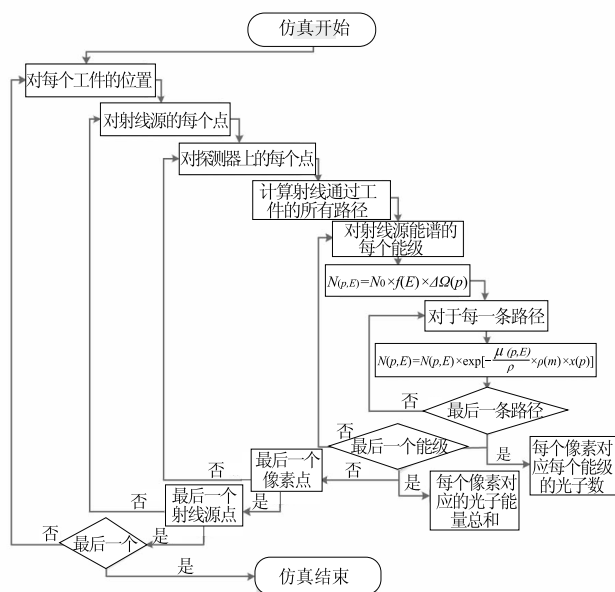


图6 射线检测的模拟仿真流程

4.2 同轴法相衬成像的数值模拟技术

对于射线成像而言,可以使用不同的射线发生装置,也可以采用不同的成像思路。射线成像模拟仿真软件 HADES,不仅可对 X 射线、 γ 射线、质子成像进行模拟,也可实现 X 射线相衬成像的模拟仿真。在 HADES 软件框架内进行相衬成像仿真^[18]时,首先计算出相位(ϕ)路程和吸收(μ)路程,然后构造从物体发出的波,通过 Fresnel 积分法确定传到探测器的波。

与此相类似, A. Peterzol 等对射线成像数值模拟软件进行改进,实现了同轴法相衬成像的数值模拟。首先,依据射线跟踪方法,可计算出射线穿过物体后在强度与相位方面的变化 $q(x, y)$ 。然后,引入射线波动传播特性,计算出相位形成的强度。之后,考虑射线为多色谱,重复进行上述计算。最终,

将计算结果与成像系统的点扩散函数 psf 进行卷积运算,得到相衬图像。

考虑射线源为点源,并按球面波方式传播,计算相位强度的主要步骤包括^[19]:

(1) 假设物体平面为有限的,在工件边界外的 $q(x, y)$ 值为 1。可将探测器上某点 $p(x_1, y_1, r_1)$ 接收的球面波表示为:

$$f(x_1, y_1, r_1) = f_0(x_1, y_1, r_1)(1 + c(x_1, y_1, r_1)) \quad (16)$$

$f(x_1, y_1, r_1)$ 表示没有物体存在时,探测器平面上点 $p(x_1, y_1, r_1)$ 所接收到的球面波。

(2) 对应于图 2 所示的透照布置,结合式(12),相衬图像形成因子 $c(x_1, y_1, r_1)$ 可表示为:

$$\frac{-i}{2\lambda} s e^{\frac{-i2\pi s}{\lambda}} \iint_s (q(x, y) - 1) \frac{e^{\frac{-i2\pi(s_0 + s_1)}{\lambda}}}{s_0 s_1} \left(\frac{r_0}{s_0} + \frac{r_1}{s_1} \right) dS \quad (17)$$

式中: s 为射线源位置到探测器上某点的距离。引入小角度近似方法,式(17)可简化为:

$$\frac{M}{i\lambda r_1} e^{\frac{-i\pi}{\lambda} \left[\frac{SP^2}{r_0 + r_1} \right]} \iint_s (q(x, y) - 1) e^{\frac{i\pi SP^2}{\lambda} \left[\frac{1}{r_0} + \frac{1}{r_1} \right]} dS \quad (18)$$

式中: M 为检测时的放大率 $1 + r_1/r_0$; SP 为源到探测器点的距离 $\sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2}$ 。

对式(18)采用傅立叶变换方法,可实现 $c(x_1, y_1)$ 的快速计算。

(3) 得到相位强度 $|1 + c(x_1, y_1)|^2$ 。

5 结语

射线相衬成像技术发展迅速,在弱吸收材料的射线检测方面应用前景良好。随着射线源装置、数字射线探测器在性能方面的不断提升,射线相衬成像技术将会取得更广泛的应用。在依靠射线强度衰减成像的基础上,考虑射线的波动传播特性,将使同轴法射线相衬成像技术与传统射线照相技术形成有效、统一的结合,而同轴法相衬成像数值模拟技术的有效实现正着眼于此。随着射线相衬成像数值模拟技术的不断完善,将会在优化成像参数、探索相衬成像的应用可行性等方面发挥重要的指导作用。

参考文献:

- [1] DAVIS T J, GAO D, GUREYEV T E, et al. Phase-contrast imaging of weakly absorbing materials using hard X-rays[J]. Nature, 1995, 373: 595-598.
- [2] WILKINS S W, GUREYEV T E, GAO D, et al.

- Phase-contrast imaging using polychromatic hard X-rays[J]. Nature, 1996, 384: 335-338.
- [3] 廖延彪. 光学原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
- [4] 陈建文, 高鸿奕, 李儒新, 等. X 射线相衬成像[J]. 物理学进展, 2005, 225(2): 175-794.
- [5] POGANY A, GAO D, WILKINS S W. Contrast and resolution in imaging with a microfocus x-ray source [J]. Rev. Sci. Instrum, 1997, 68(7): 2774-2882.
- [6] YA. I. NESTERETS, S. W. WILKINS, T. E. GUREYEV, et al. On the optimization of experimental parameters for x-ray in-line phase-contrast imaging [J]. Review of scientific instruments, 2005, 76: 093706-1-093706-16.
- [7] (德)玻恩, (美)沃尔夫. 光学原理(第七版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [8] 朱佩平, 唐鄂生, 崔明启. 同步辐射 X 光束空间相干性的物理分析[J]. 光学学报, 1998, 18(2): 176-181.
- [9] 田玉莲, 肖体乔, 朱佩平, 等. 同步辐射 X 射线位相衬度成像—X 射线位相衬度照相术[J]. 核技术, 2004, (27)6: 417-421.
- [10] ALLMAN B E, MCMAHON P J, NUGENT K A, et al. Phase radiography with neutrons[J]. nature, 2000, 408: 158-159.
- [11] B. ZOOFAN, J.-Y. KIM, S. I. ROKHLIN, et al. Phase-contrast x-ray imaging for nondestructive evaluation of materials[J]. Journal of applied physics, 2006, 100: 014502-1-014502-7.
- [12] KASHYAP Yogesh S, YADAV P S, TUSHAR-ROY, et al. Laboratory-based X-ray phase-contrast imaging technique for material and medical science applications[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2008 (66): 1083-1090.
- [13] ATSUSHIMOMOSE. Recent Advances in X-ray Phase Imaging[J], Japanese Journal of Applied Physics, 2005, 44(9A): 6355-6367.
- [14] WOONG KI KIM, Young WOO LEE, MOON SUNG CHO, et al. Nondestructive measurement of the coating thickness for simulated TRISO-coated fuel particles by using phase contrast X-ray radiography [J]. Nuclear Engineering and Design, 2008, 238: 3285-3291.
- [15] 师绍猛, 陈荣昌, 薛艳玲, 等. 激光核聚变靶的 X 射线相衬显微成像研究 [J]. 核技术, 2008, 31 (7): 524-528.
- [16] JOHANN KASTNER, BERNHARD PLANK, GUILLERMO REQUENA. Non-destructive characterisation of polymers and Al-alloys by polychromatic cone-beam phase contrast tomography[J]. Materials characterization, 2012, 64: 79-87.
- [17] AUFDERHEIDE M B, HENDERSON G, A. E. Schach von WITTENAU, et al. HADES, A Code for Simulating a Variety of Radiographic Techniques[C]. 2004 Rome IEEE Medical Imaging Conference Electronic Proceedings.
- [18] PHILIPPE DUVAUCHELLE, NICOLAS FREUD, VALERIE KAFTANDJIAN, et al. A computer code to simulate X-ray imaging techniques[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2000, B170: 245-258.
- [19] PETERZOL A, BERTHIER J, DUVAUCHELLE P, et al. X-ray phase contrast image simulation[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, 2007, 254: 307-318.

专题 (ASME 2013 NDE 规范评析) 征稿启事

2013 版的 ASME 锅炉及压力容器规范已于 2013 年 7 月 1 日发行。现多数规范卷册的中译本已经出版, 为了帮助 ASME 规范用户和相关读者更好地了解和执行新版规范, 提高实际应用水平, 本刊拟于近期推出“ASME 2013 NDE 规范评析”专题, 主要对 ASME 规范(2013)第 V 卷《无损检测》内容进行评析, 现特向锅炉和压力容器等行业内专家、学者、工程检测技术和管理人员征稿。

征稿内容:

- (1) 新规范的主要内容及与旧版本的比较;
 - (2) 对新规范中变化内容(新条款、新方法、新程序、新要求)的理解;
 - (3) 为适应新规范的变化, 实际检测工作中做了哪些工作, 还存在哪些疑问或困难;
 - (4) 对正确执行或实施规范的建议。
- (征稿不只局限于上述内容, 欢迎行业内专家学

者们多多赐稿)

征稿要求:

- (1) 文章请按照本刊已发表论文的格式撰写, 长短不限, 能够表述清楚即可;
 - (2) 请在 2015 年 4 月 30 日前将稿件发送至编辑部邮箱, 并注明“ASME 2013 NDE 规范专题征稿”字样;
 - (3) 对参与讨论的文章, 经审核后择优发表。
- 期待您的来稿!
- 编辑部联系人: 朱绍华; 电话: 021-65559079; Email: ndt@mat-test. com.

《无损检测》编辑部