

文章编号:1000-582X(2005)10-0031-05

康普顿散射在材料无损评价中的应用前景*

李志海¹, 周上祺¹, 刘守平¹, 石泉¹, 邱绍宇², 李聪²

(1. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400030;

2. 中国核动力研究设计院核燃料及材料国家级重点实验室, 四川 成都 610041)

摘要:康普顿散射是X射线(或 γ 射线)与物质发生相互作用时波长变长的散射,也称不相干散射。研究表明,散射线的波长随散射角的变化而有规律的变化,其散射强度和被散射体的原子序数和电子密度有关。介绍了康普顿散射在密度测量、厚度测量方面的应用,讨论了利用康普顿散射成像来进行缺陷检测等方面的问题,同时介绍了康普顿散射在安全检测、医药技术、食品加工等其他领域的应用。展望了康普顿散射在材料无损评价中的应用前景。

关键词:康普顿散射;康普顿散射成像;无损评价

中图分类号:TG115.22

文献标识码:A

X射线(或 γ 射线)与物质相互作用时,会被吸收和散射。散射有2种,一种是瑞利(Rayleigh)散射,也称汤姆生(Thompson)散射、相干散射、弹性散射或经典散射;另一种就是康普顿散射,也称不相干散射或非弹性散射。瑞利散射是X射线衍射(XRD)的基础,已经在众多领域得到了应用,例如可用来测定晶体结构、多晶材料的相结构、晶粒大小、晶粒取向、应力大小、织构等。而康普顿散射的应用价值是近20年来才逐渐被发现的,和瑞利散射一样,康普顿散射也反映了物质内部的一些重要的特征信息,比如原子序数和电子密度等。通过收集分析康普顿散射,也可以对物质内部进行检测和评价,而且具有自己独特的优势。近10年来,康普顿散射在材料无损检测和无损评价中得到了广泛的应用。笔者将对这些应用作简要的介绍。

1 康普顿散射的基本概念

阿瑟·康普顿(Arthur Compton)等在研究X射线通过物质向各方向散射时发现,在散射的X射线中,除了波长与原射线相同的射线外,还有波长较长的射线。在1923年5月的《物理评论》上,康普顿发表了一篇以“X射线被轻元素散射的量子理论”为题的文章。在这篇文章里,康普顿用光量子假说对他发现的效应

做出解释,推出了如下方程^[1-6]:

$$\lambda_{\theta} = \lambda_0 + (2h/mc) \sin^2 \frac{\theta}{2}, \quad (1)$$

其中 λ_0 和 λ_{θ} 分别为X射线在散射前后的波长; θ 为散射角; h 为普朗克常量; m 为电子电荷; c 为真空中的光速。可以看出,散射使X射线波长增加了 $\Delta\lambda$,其值为:

$$\Delta\lambda = \lambda_{\theta} - \lambda_0 = (h/mc)(1 - \cos\theta), \quad (2)$$

把 h, m, c 的值代入式(2),即得

$$\Delta\lambda = \lambda_{\theta} - \lambda_0 = 2.43 \times 10^{-3}(1 - \cos\theta) \text{ (nm)}. \quad (3)$$

由此可见,波长差仅与散射角 θ 有关,与入射线的波长无关。这就是著名的康普顿效应。

康普顿散射过程中会产生散射光子和反冲电子(见图1)。

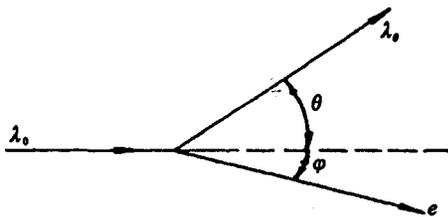


图1 康普顿散射示意图

* 收稿日期:2005-06-12

基金项目:中国核动力研究设计院核燃料及材料国家级重点实验室资助项目(2004-08)

作者简介:李志海(1980-),男,贵州福泉人,重庆大学硕士研究生,从事X射线材料无损检测方法研究。

理论研究指出,在此过程中,入射光子与电子相互作用,其能量转移给散射光子的概率 σ 为^[7]:

$$\sigma = \frac{\pi e^4}{m^2 c^4} \left[\frac{\ln(1+2a)}{a^3} + \frac{2(1+a)(2a^2-2a-1)}{a^2(1+a)^2} + \frac{8a^2}{3(1+2a)^3} \right], \quad (4)$$

式中 e 为电子电荷; m 为电子静止质量; c 为光在真空中的传播速度; $a = hv/mc^2$. 式(4)乘以物质中单位体积的电子数,则得到物质的康普顿散射系数,即在单位长度路径上,入射光子发生康普顿散射的概率. 由此可知,发生康普顿散射的概率,除了与入射光子的能量有关外,还与物质的原子序数和密度有关. 图 2 是康普顿散射的微分截面分布曲线,清楚地显示出,散射光子可以分布在各个方向,但随着入射光子的能量的增大,散射光子更趋向于分布在入射线前进的方向.

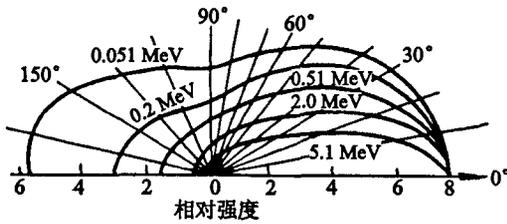


图 2 康普顿散射的微分截面曲线分布图

2 康普顿散射的应用

2.1 康普顿散射成像

康普顿散射成像技术,是近年正在发展的射线照相技术,它利用背散射辐射,能提供被探测物体缺陷的全部深度信息;能同时给予多个不同材料的组合体成像;重建图像的算法比较简单:探测到的背散射光子数进入计算机存储,通过重建公式的计算,求出物体各点的电子密度,再对电子密度进行重排,就可获得整个被探测物体的信息^[8-12]. 图 3 为康普顿散射成像系统的几何配置示意图.

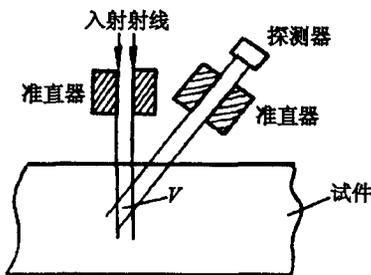


图 3 康普顿散射成像系统几何配置示意图

在此配置中,由两准直器所限定的体积 V 内部可向所有方向散射光子,向着探测器散射的光子数可给出为^[13]:

$$S = \frac{d(e^\sigma)}{d\Omega} \Delta\Omega_n \Delta L N_0, \quad (5)$$

式中 $\frac{d(e^\sigma)}{d\Omega}$ 为碰撞微分截面; $\Delta\Omega$ 为从探测体积 V 的任何一点看探测器的立体角; N_0 为到达 V 中的入射光子数; ΔL 为在体积 V 内主射束的行程长度; n 为材料的电子密度,可给出为 $n = (\rho N_a Z)/A$, 这里 ρ 为试件密度; N_a 为阿伏加德罗常数; Z/A 为原子序数与原子质量之比.

由式(5)也可以看出,探测器测定的康普顿背散射辐射量与散射体积的原子序数和密度有关. 为了分析通过 V 中心的横向截层中不同部位散射量的分布,可使射线源与探测器相对固定,而平移被探测物体;为了分析通过 V 中心的纵向截层中不同部位散射量的分布,可使射线源位置固定而仅平移探测器,或采用探测器阵列.

利用所得图像,很容易判断被检测样品是否存在缺陷. 图 4 为碳纤维层板的康普顿背散射层析图,可清楚看到缺陷和密度不均匀. 图 5 为带铝面板的铝蜂窝结构件的康普顿背散射层析图,可看到有些蜂窝中已经进水^[13].

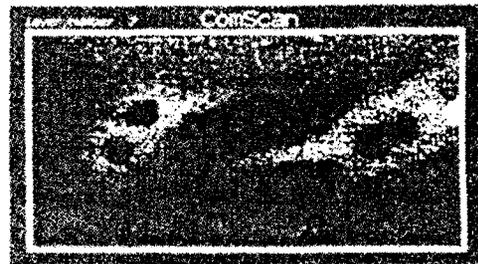


图 4 碳纤维复合材料的康普顿背散射图

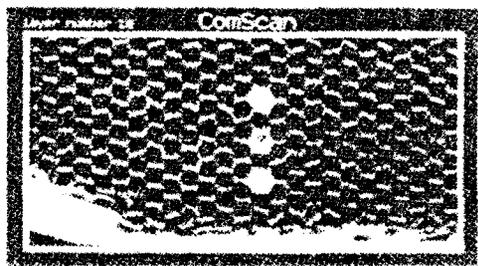


图 5 带铝面板的铝蜂窝结构件的康普顿背散射图

与工业射线 CT 系统相比,康普顿散射成像技术的优点是:

- 1) 可单侧布置. 即射线源与检测器置于受检测物体的同一侧. 而且对所用射线的硬度要求不严格.
 - 2) 可以得到深度信息,具有层析成像能力. 可做垂直于射线方向的断层检查,也可以采用狭缝成像,空间分辨率高. 还可自由选择测量几何结构.
 - 3) 灵敏度高. 理论上,图像的对比度可达 100%. 信噪比高,反差大,特别是对于原子序数低的材料.
- 当然,康普顿散射也有自身的局限性:

1) 对于非均匀试件或复杂形状构件可产生伪像,使解释困难,或可完全遮蔽重要特征.

2) 随检测深度的增大,多重散射影响的产生可使对比度下降.

2.2 密度测量

由式(5)可知,对给定辐射源、准直器和几何条件,被探测的光子数 N 正比于材料的密度 ρ .

在粉末冶金中,密度的测量非常重要,要求快速、自动化,且被检零件形状复杂,只能从单面和在一小表面上测量,而康普顿散射技术在这方面就可以发挥它的优势^[14].图 6 是用粉末冶金法制成的汽车同步环上的密度检测结果^[15].被测的 2 个环(每个环 21 个齿)中,a 环是在正常工艺参数下压制的,从图上可以看出,密度分布比较均匀;b 环压力不均匀,可以看出,有的部分密度较低.

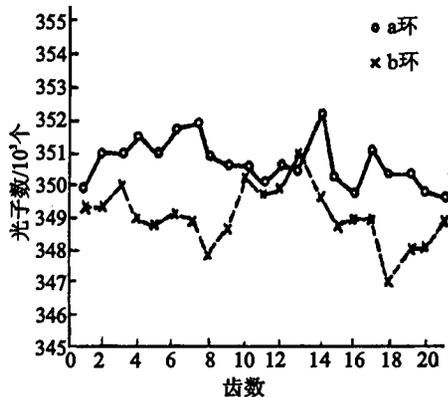


图 6 2 个同步环上齿轮密度变化的康普顿散射

2.3 厚度测量

康普顿散射厚度测定常采用 γ 射线和 β 射线,其检测系统如图 7 所示.

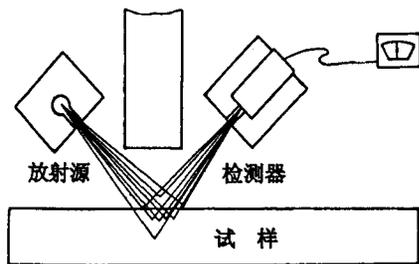


图 7 康普顿散射测厚系统示意图

γ 射线和 β 射线与物质作用产生的散射,用以下经验公式描述^[13]:

$$\frac{I - I_0}{I_s - I_0} = e^{-k\delta}, \quad (6)$$

式中, I 是厚度为 δ 试样的散射强度; I_0 是来自 0 厚度试样的散射线强度; I_s 是来自无限厚试样的散射线强度(在这种厚度下,即使再增加厚度,散射线也不会再增加); k 是经验常数.

背散射测厚系统的主要优点是对于小的厚度变化也有很高的灵敏度,可以进行单侧检测,并能测定镀层、涂层和扩散层的厚度.例如能测定铜上的银镀层和金镀层的厚度,或测定钢材塑料涂层厚度.现已用于测定印刷电路板上铜的厚度,也用于测定橡胶压延机轧辊上胶层厚度等.图 8 为橡胶压延机轧辊上胶层厚度与散射电流关系图.

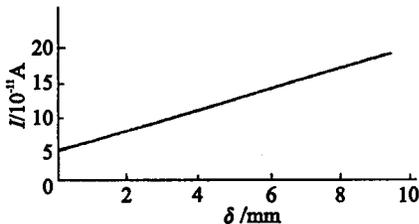


图 8 胶层厚度与散射电流关系图

2.4 其他应用

康普顿散射的应用远不只以上提到的 3 种,在其他领域也有广泛的应用.例如,可以用来检测手提箱中、汽车轮胎或车门夹层中或邮件中隐藏的炸弹或毒品;检测路面厚度、路基密实度和含水量^[16];另外由于康普顿散射也和物质的原子序数有关,也可以用康普顿散射来进行物质鉴别,尤其是对低原子序数材料效果更明显^[17];在农业和食品工程中,可以用来对食品中的杂质进行检测(如检测米饭中的玻璃和石头)^[18],也可以对食品加工进行在线监控.在医学领域,康普顿散射在放射疗法、骨质疏松检测、肺功能检测和心脏测试等方面都得到了应用^[19].

3 展望

作为一种新兴的无损检测和无损评价手段,康普顿散射具有其独特的特征和优势,而这些特征和优势正逐渐地被人们所利用.

前面提到的 3 个主要应用中,康普顿散射成像的应用范围最广,也最具发展潜力,是目前国内外研究的热点.美国 BIO、荷兰 PHILIPS 已于 20 世纪 80 年代末研制成康普顿散射成像的使用装置^[10],中国研制的首台设备也于 1995 年在苏州问世^[20].但是,到目前为止,这些仪器还没有得到广泛的应用,这主要和仪器的使用价值和仪器的本身的缺陷有关.虽然康普顿散射成像可以应用于很多方面,但其技术还不能成熟到取代其他技术成为必须的检测手段的地步;另外,康普顿散射成像的图像重建算法^[21]、多重散射^[22-23]、图像对比度^[24]等方面都需要进一步的研究和完善.不过,随着研究的深入,相信康普顿散射成像会成为一种简单实用的无损检测和评价手段而被广泛的应用.

除康普顿散射成像外,康普顿散射在其他方面的

应用也具有很大的发展空间. 由于康普顿散射的强度和物质电子密度和原子序数(尤其是低原子序数)有关,所有需要确定材料的密度和原子序数有关的问题,都可以考虑利用康普顿散射来解决. 比如,如果仪器能达到一定的精度,可以通过物质的康普顿散射来分析物质的成分^[25-26],如药品的纯度,合金含量的大小等. 另外,物质的康普顿散射和瑞利散射往往是同时产生的,这就为利用瑞利散射和康普顿散射来对材料进行综合分析创造了有利条件. 比如,可以利用瑞利散射来分析材料的物相,利用康普顿散射来分析材料的密度,而且密度可以帮助确定物相,物相也可以帮助验证其密度. 鉴于此考虑,笔者认为,可以在现有的X射线衍射仪或能谱仪等射线分析设备上加入对康普顿散射的分析功能. 当然,这需要对康普顿散射的具体应用进行更系统的研究.

参考文献:

- [1] COMPTON A H. A Quantum Theory of the Scattering of X-rays by Light Elements [J]. *Physical Review*, 1923, 21(5): 483-502.
- [2] PRATT R H. Tutorial on Fundamentals of Radiation Physics: Interactions of Photons with Matter [J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2004, 70: 595-603.
- [3] ARENDT SZ N V, ESAM M A. Energy-spectral Compton Scatter Imaging-part I: Theory and Mathematics [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1995, 42(6): 2155-2165.
- [4] WANG J H, SAGAR R P, SCHMIDER H, et al. X-ray Elastic and Inelastic Scattering Factors for Neutral Atoms $Z=2-92$ [J]. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 1993, 53: 233-269.
- [5] GOLOSIO B, BRUNETI A, CESAREO R. Algorithmic Techniques for Quantitative Compton Tomography [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2004, 213: 108-111.
- [6] KANE P P. Experimental Studies of Inelastic X-ray and γ -ray Scattering [J]. *Radiat Phys Chem*, 1997, 50(1): 31-62.
- [7] 郑世才. 康普顿散射成像技术试验 [J]. *无损检测*, 1995, 17(11): 301-304.
- [8] ZHU P, DUVAUCHELLE P, PEIX G, et al. X-ray Compton Backscattering Techniques for Process Tomography: Imaging and Characterization of Materials [J]. *Meas Sci Technol*, 1996, 7: 281-286.
- [9] EVANS B L, MARTIN J B, BURGGRAF L W, et al. Non-destructive Inspection Using Compton Scatter Tomography [J]. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 1998, 45(3): 950-956.
- [10] KOSANETZKY J. Compton Back-scatter Tomography of Low Atomic Number Materials with the Comscan System [J]. *NDT*, 1994, 16(9): 264-268.
- [11] HARDING G. Inelastic Photon Scattering: Effects and Application in Biomedical Science and Industry [J]. *Radiat Phys Chem*, 1997, 50(1): 91-111.
- [12] 刘海峰, 杨兴根. 背散射技术在固体发动机无损检测中的应用 [J]. *飞航导弹*, 1999, (9): 32-35.
- [13] 李家伟, 陈积懋. 无损检测手册 [M]. 北京: 中国机械工业出版社, 2002. 123-126.
- [14] SHARAF J M. Practical Aspects of Compton Scatter Densitometry [J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2001, 54: 801-809.
- [15] ZHU P, PEIX G, BABOT D, et al. In-line Density Measurement System Using X-ray Compton Scattering [J]. *NDT & E International*, 1995, 28(1): 3-7.
- [16] 丁厚本. 康普顿背散射技术与产品设计 [J]. *CT理论与应用研究*, 2000, (9): 105-107.
- [17] BULL C R, ZWIGGELAAR R. Discrimination Between Low Atomic Number Materials from Their Characteristic Scattering of X-ray Radiation [J]. *J Agric Eng Res*, 1997, 68: 77-87.
- [18] GRAVES M, SMITH A, BATCHELOR B. Approaches to Foreign Body Detection in Foods [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 1998, 9: 21-27.
- [19] HARDING G, SCHEREIBER B. Coherent X-ray Scatter Imaging and Its Applications in Biomedical Science and Industry [J]. *Radiation Physics Chemistry*, 1999, 56: 229-245.
- [20] 孔凡庚. 从第14届世界无损检测会议看射线检测技术的应用和发展 [J]. *无损检测*, 1997, 19(11): 328-330.
- [21] 王汝贻, 姜宏宇. 材料自散射对低能 γ 射线厚度测量精度的影响 [J]. *核电子学与探测技术*, 1998, 18(2): 106-112.
- [22] BARNEA G, DICK C E, GINZBURG A, et al. A Study of Multiple Scattering Background in Compton Scatter Imaging [J]. *NDT & E International*, 1995, 28(3): 155-162.
- [23] MCFARLANE N J B, BULL C R, TILLET R D, et al. The Potential for Compton Scattered X-rays in Food Inspection: the Effect of Multiple Scatter and Sample Inhomogeneity [J]. *Agric Engng Res*, 2000, 75: 265-274.
- [24] 童利标, 丁厚本. 射线康普顿背散射扫描仪测量的信噪比研究 [J]. *CT理论与应用研究*, 1998, 7(1): 1-8.
- [25] MORGAN H M, SHAKESHAFT J T, LILICRAP S C. Gamma-ray Backscatter for Body Composition Measurement [J]. *J Appl Radiat Isot*, 1998, 49(5-6): 555-557.
- [26] BULL C R, ZWIGGELAAR R, SPELLER R D. Review of Inspection Techniques Based on the Elastic and Inelastic Scattering of X-rays and Their Potential in the Food and Agricultural Industry [J]. *Journal of Food Engineering*, 1997, 33: 167-179.

Review of Application of Compton Scattering to Nondestructive Evaluation of Materials

LI Zhi-hai¹, ZHOU Shang-q¹, LIU Shou-ping¹, SHI Quan¹, QIU Shao-yu², LI Cong²

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. National Key Laboratory for Nuclear Fuel and Materials, Nuclear of Power Institute of China, Chengdu 610041, China)

Abstract: Compton Scattering occurs when the incident x-ray (or γ -ray) photon ejects a electron from an atom and an x-ray photon of longer wavelength is scattered from the atom. It is proved that the scattering wavelength varies with the scattering angle, and the scattering intensity depends on the atomic number and electron density of the scatted volume. The authors introduce the main applications of Compton scattering-density measurement, thickness measurement and flaw detection with Compton scatter imaging and other applications in the field of security testing, medicine technology and food processing. Review of application of Compton scattering to nondestructive evaluation of materials is also given.

Key words: Compton scattering; Compton scatter imaging; nondestructive evaluation

(编辑 李胜春)

(上接第26页)

Study and Application of High Property Die Casting Al Alloy

RAO Jin-song, LI Hua-ji, WANG Cui-ling, XUE Han-song

(College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: A kind of new high property die casting Al alloy is developed by ingredient optimum design and modification treatment on the base of Japanese ADC12 alloy. It is seen from the result of the new alloy experiment of gravity pouring in metal mold that the as-cast mechanics property values of tensile strength (σ_b) 254.9 MPa, elongation (δ_5) 2.925% and hardness (HBS)102 are all better than ZY112Y alloy. The practical production test shows that this kind of die casting Al alloy has good performance of shaping, discharging from mold and machining. It can satisfy the requirements of the industrial production.

Key words: die casting Al alloy; ingredient optimum; RE; modification; mechanical property

(编辑 成孝义)