

有效线吸收系数能谱效应综合法研究*

刘进 刘军 李必勇 施将君

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 绵阳 621900)

摘要 利用综合法(照射量传递函数法、剥层法和 MC 数值模拟法)研究了闪光照相中法国实验客体 FTO(French Test Object)中各种材料的有效线吸收系数. 结果表明:在照相过程中,随着 X 光穿透的加深,其能谱不断地向材料最小质量吸收系数对应的能量值演变并窄化. 在这样的能谱效应下,有效线吸收系数随着穿透材料厚度的加深而减小. 铜的平均有效线吸收系数为 $0.299(1 \pm 3.0\%) \text{ cm}^{-1}$, 钨的平均有效线吸收系数为 $0.829(1 \pm 2.7\%) \text{ cm}^{-1}$. 在图像重建中,利用上述的有效线吸收系数能够得到高精度的材料密度分布.

关键词 闪光照相;有效线吸收系数;X 光能谱;综合法

中图分类号 O434.1 R814.3 **文献标识码** A

0 引言

随着科技的发展,闪光照相在多个领域得到快速的发展. 它是一项高技术高难度的工作. 在医学上,CT 这一闪光照相术得到了广泛的应用,并已经成为诊断病情的一种有效手段,这是因为其对人体组织的伤害弱并且准确性非常高. 在工业上,因闪光照相术充分地满足了探伤的非破坏性和高精度定位的要求而占有重要的地位. 在海关、车站、飞机场等交通场所,X 光机检测取代了繁琐而又低效的人工检测,有效地缩短了关检时间. 虽然闪光照相已经如此广泛地应用于许多领域,但是其中仍然有很多问题急待解决. 闪光照相中存在着下列问题:散射对图像品质的影响和扣除;成像中胶片的非线性响应区(趾部和肩部)的信号转换;医学上 CT 数的下凹等. 在诊断中 CT 数的下凹使得反演出的被照组织密度变小,这给正确诊断带来了一定的困难. 在高压闪光照相研究中,有效线吸收系数与医学上的 CT 数相当. 有效线吸收系数同 CT 数一样也有下凹现象. 这种现象由闪光照相中的能谱效应和散射影响所形成^[1]. 有效线吸收系数是光路上能谱下线吸收系数的平均,平均有效线吸收系数是记录面上有效线吸收系数的平均. 在闪光照相中 X 光的能谱特性使得不同能谱下的线吸收系数不同. 在实验中因为散射的存在而不能直接得到实际的线吸收系数,而实验需要利用它重建出材料的密度分布. 下面将对有效线吸收系数的能谱效应进行深入地研究.

1 理论

1.1 能谱效应的物理原因

在闪光照相中,X 光与原子核外的电子以及原子核发生相互作用,其中包括光电效应、电子对生成和康普顿散射^[2]. 不同能量 X 光有各自的光电吸收微观截面 $\sigma_a(E)$ 、康普顿散射微观截面 $\sigma_c(E)$ 和电子对生成微观截面 $\sigma_{pp}(E)$. 如图 1 中的铅材料各种微观截面所示. 能量为 E 的 X 光在材料中的光程 $L(E)$ 与微观总截面 $\sigma_t(E)$ 有下列关系

$$L(E) = \int \mu_t(E) dl = \int \frac{A_0 \sigma_t(E)}{A} \rho dl \quad (1)$$

式中 $\sigma_t(E) = \sigma_a(E) + \sigma_c(E) + \sigma_{pp}(E)$, A 为元素原子量, A_0 为阿佛伽德罗常数.

由于在材料中不同能量 X 光具有各自的光程,即在穿透材料的过程中材料对不同能量 X 光有不同的衰减程度,其使得 X 光能谱发生变化,从而产生吸收系数的能谱效应.

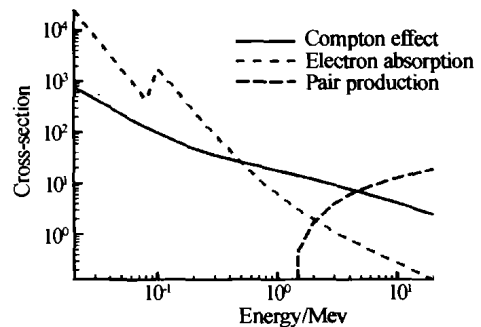


图 1 不同能量下 X 光与铅材料三种作用的微观截面
Fig. 1 The variations of three cross sections with the energy about lead

1.2 综合法的物理原理

闪光照相中 X 光的传输具有下列性质

$$X = X_0 M \prod_{i=1}^N f_{i,ETF} \quad (2)$$

* 国防科技基础研究基金资助课题

Tel: 0816-2485148 Email: york_liuliu@263.net

收稿日期: 2004-02-11

式中 X_0 和 X 分别为光源和记录的 X 光直穿照射量 (这里的 X 光照射量是经能谱积分后的数值), M 是 X 光传输的立体角效应因子, N 表示照相系统的元件数, $f_{i,ETF}$ 是各元件的照射量传递函数, 它与通常的透射率 T_i 相当. $f_{i,ETF}$ 与各元件的光程 L_i 之间有下列关系

$$f_{i,ETF} = \exp(-L_i) \tag{3}$$

从方程(2)得知:任一元件的光程 L_i 可以通过该元件的照射量传递函数 $f_{i,ETF}$ 得到.

综合法中使用了两个照相模型. 这两个模型的区别在于有无 FTO 客体, 其它的部件和布局完全相同, 并且使用了相同的光源. 由式(2)和(3)得到

$$\exp(-L_{FTO}) = f_{FTO,ETF} = \frac{X_1}{X_2} \tag{4}$$

式中 X_1 、 X_2 分别表示有无 FTO 客体模型在记录面相对应的象素点上直穿照射量.

1.3 综合法的剥层法理论

在光程已知的情况下, 球形客体 FTO 的有效线吸收系数通过剥层法获得. 剥层法使用了一个假定: 当内层和外层的光路上某种材料的厚度相等时, 该种材料的有效线吸收系数相等.

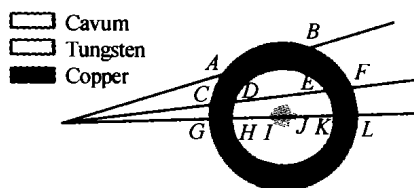


图 2 光路示意图 (FTO 中)
Fig. 2 A view of radiography (through FTO)

每一条光路的光程 L 与有效吸收系数 $\mu_i(l_i)$ 的关系如式(5)所示.

$$L = \sum_{i=1}^n L_i = \sum_{i=1}^n \mu_i(l_i) l_i \tag{5}$$

联立所有光程式(5), 并使用上述的假定得到所有光路上各种材料的有效线吸收系数. 具体的剥层法如下

式(6)、(7)和(8)分别是一系列只通过铜层、通过铜层和钨层和通过所有层的光程方程.

$$L_{AB} = \bar{\mu}_{Cu}(l_{Cu}) l_{Cu}, l_{Cu} = l_{AB} \tag{6}$$

$$L_{CF} = \bar{\mu}_{Cu}(l_{Cu}) l_{Cu} + \bar{\mu}_W(l_W) l_W, l_{Cu} = l_{CD} + l_{EF}, l_W = l_{DE} \tag{7}$$

$$L_{GL} = \bar{\mu}_{Cu}(l_{Cu}) l_{Cu} + \bar{\mu}_W(l_W) l_W + \bar{\mu}_{vac} l_{vac} \tag{8}$$

$$l_{Cu} = l_{GH} + l_{KL}, l_W = l_{HI} + l_{JK}, l_{vac} = l_{IJ}$$

式中 L_{AB} 、 L_{CF} 、 L_{GL} 为总的光程, $\bar{\mu}_{Cu}$ 、 $\bar{\mu}_W$ 、 $\bar{\mu}_{vac}$ 分别为铜材料、钨材料和空腔的有效线吸收系数. l 表示 X 光穿透客体的厚度, 下标大写字母对应具体的端点. 首先求解最外层的式(6), 得到一系列铜的有效线吸收系数 $\bar{\mu}_{Cu}(l_{Cu})$ 和相对应的厚度 l_{Cu} ; 然后利用式(6)中已获得的铜材料有效线吸收系数, 确定出次

外层式(7)中铜材料相等厚度下的有效线吸收系数; 接着求解次外层式(7)时, 得到一系列钨的有效线吸收系数 $\bar{\mu}_W(l_W)$ 和对应的厚度 l_W ; 最后利用与获得次外层方程中材料有效线吸收系数相同的方法, 求出最内层式(8)中一系列空腔的有效线吸收系数 $\bar{\mu}_{vac}(l_{vac})$ 和对应的厚度 l_{vac} . 通过上述步骤得到 FTO 中不同光路上各种材料的有效线吸收系数.

2 模型及计算

在 X 光输运的 MC 模拟中, 使用了是否含有 FTO 客体的两个相同照相系统. 图 3 是含有 FTO 客体的照相系统. 记录系统的像素分辨率是 251 × 251, 记录面的长和宽是 10 cm × 10 cm.

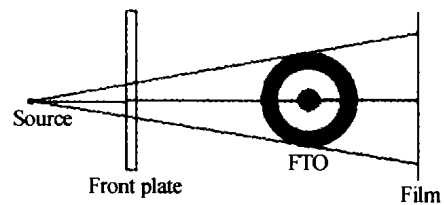


图 3 照相系统简图
Fig. 3 Side view of radiography system

经过 MC 模拟得到了不同像素标号所对应的经过不同光路改造后的 X 光能谱、能谱中光子的平均能量和各种材料的有效线吸收系数 (图 4、图 5 和图 6). 作图使用了记录面上过球心投影点的一条扫描线. 记录面上客体外边界像素标号为 1, 客体中心点像素标号为 126.

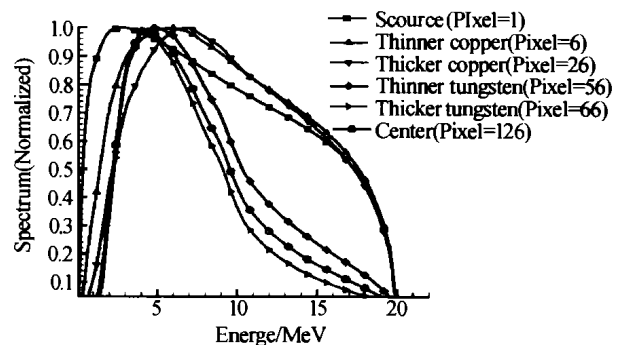


图 4 X 光输运中不同光路上能谱的变化图
Fig. 4 The variation of energy spectrum with the energy at different pixels

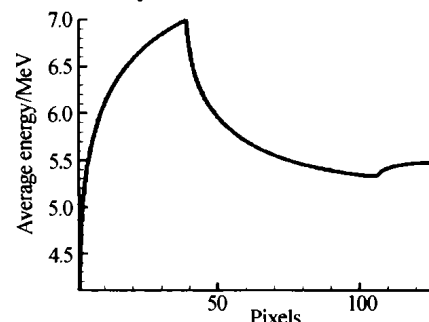


图 5 X 光输运中直穿 X 光平均能量相对于像素点的曲线图
Fig. 5 The variation of average energy at different pixels

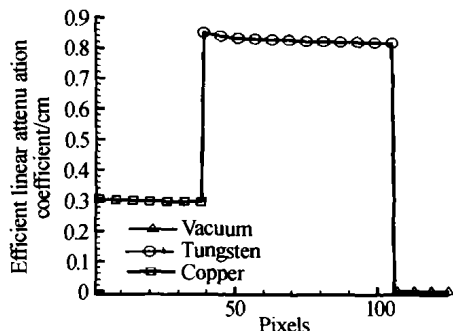


图6 线吸收系数随记录像素点的变化曲线图

Fig. 6 The variation of the efficient linear attenuation coefficient with the pixels

图4中只通过铜区的X光能谱表明:当X光在铜材料中传输时,X光能谱随着穿透厚度的加深而逐步从低能和高能向着铜材料最小的质量吸收系数值所对应的能量区域(8 MeV左右)靠拢(如图4中像素点值分别为1、6和26的曲线之间相对变化所示),即能谱发生了硬化.它与图5中第一个上升段相对应.图5中X光光子平均能量刚上升到7 MeV就开始减小,而未达到理论值8 MeV.这是因为当X光光子平均能量达到7 MeV时光路上铜的厚度就开始减小,并且出现的强吸收钨材料在能谱的改变中占据了主导地位.X光能谱硬化的特性使得铜有效线吸收系数随着X射线穿透厚度加深而减小,这与图6中铜有效线吸收系数的变化相一致.即图6中像在小于40的范围内随着像素标号的增大,对应的X射线穿透铜材料厚度增大,铜有效线吸收系数减小^[3].它体现了有效线吸收系数的能谱效应.

当光路上有钨材料(未通过空腔)时,X光能谱随着穿透材料厚度的加深而逐渐向着钨材料最小质量吸收系数对应的能量区域(4 MeV左右)集中和窄化(如图4中像素点值分别为26、56和106的曲线之间相对变化所示).因为钨材料最小质量吸收系数对应的能量区域值比铜材料的对应值小,所以X光光子的平均能量逐渐减小.图5中曲线的下降段强有力地证明了能谱改变的这一特征.X光光子平均能量未减小到理论值4 MeV,这是因为当X光光子平均能量降低到5.4 MeV时,随着像素标号(大于106)增大,光路上钨材料厚度减小,X光光子平均能量增大.图6表明像素标号在40到106范围内随着像素标号增大,对应光路上钨材料厚度增大,钨材料有效线吸收系数减小.这与铜材料的现象相一致,也是有效线吸收系数能谱效应的体现.

图4和图5表明通过空腔的X光能谱没有通过很厚钨材料的X光能谱集中和窄化得厉害(如图4中像素点值为106和126的曲线的相对变化所示),并且X光光子平均能量也略有增大(如图5曲线的第二个上升段所示).这是因为通过空腔光路上的铜材料和钨材料厚度都随着像素标号增大而减小.

经MC模拟,得到下列结果:空腔的有效线吸收系数为 $8.65 \times 10^{-4} \text{ cm}^{-1}$,近似为0.这与空腔的理论值0(X光在空腔中未任何发生作用)非常一致.因而剥层法是研究材料有效线吸收系数有效的方法.铜的平均有效线吸收系数为 $0.299(1 \pm 3.0\%) \text{ cm}^{-1}$,钨的平均有效线吸收系数为 $0.829(1 \pm 2.7\%) \text{ cm}^{-1}$.这与吸收片法得到的结果相符合.吸收片法^[4]得到结果为:铜的平均有效线吸收系数为 $0.297(1 \pm 1.3\%) \text{ cm}^{-1}$,钨的平均有效线吸收系数为 $0.836(1 \pm 2.0\%) \text{ cm}^{-1}$.

3 结论

在闪光照相中,能谱随着穿透材料厚度的增加而不断地改变,并且在同一种材料中,能谱向着该种材料最小质量吸收系数对应的能量区域集中和窄化.X光光子平均能量也随之向着趋近该能量值的方向演变.因为不同能谱所对应的线吸收系数不同,所以在闪光照相中能谱的不断改变引起了线吸收系数相对应的改变.能谱效应的规律是:在同一种材料的情况下,有效线吸收系数随着X射线穿透厚度加深而减小,并且逐步趋近于该种材料的最小线吸收系数值.综合法得到了与吸收片法相一致的结果.

参考文献

- 1 Johns P C, Yaffe M. Scattered radiation in fan beam imaging system. *Medical Physics*, 1982, **9**(2): 236 ~ 237
- 2 Cullen D E. A simple model of photon transport. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 1995, 101: 499 ~ 510, CA 94550
- 3 Bjarngard B E, Shackford H. Attenuation in a high-energy X-ray beams. *Medical Physics*, 1994, **21**(7): 1069 ~ 1071
- 4 刘进,刘军,施将君.高能闪光照相中有效吸收系数的蒙特卡罗计算.第八届蒙特卡罗会议文集,2004, March, 云南昆明
Liu J, Liu J, Shi J J. Eighth Monte Carlo Conference, Kunming 2004

Research on Efficient Linear Attenuation Coefficient(ELAC) of Spectrum Effect with Combined Method

Liu Jin, Liu Jun, Li Biyong, Shi Jiangjun

The Institute of Fluid Physics, Mianyang 621900

Received date: 2003-12-16

Abstract The ELACs of all kinds of components in the FTO (French Test Object) are investigated. And the combined method (exposure transmission function , peeling onion, and Monte Carlo method) is used. Many excited results have been worked out. The spectrum is translating and narrowing to the value which is according to the minimal mass attenuation coefficient of the element in the radiography. Because of which, the ELAC decreases while the X-ray goes deeper in the mass. The average efficient linear attenuation coefficient of copper is $0.299(1 \pm 3.0\%) \text{ cm}^{-1}$, while tungsten $0.829(1 \pm 2.7\%) \text{ cm}^{-1}$. With which the high precision density contribution of the components can be got in the reconstruction.

Keywords Radiography; ELAC; X-ray spectrum; Combined method



Liu Jin was born in 1978, graduated from Nanjing University Physics Department in 2001. He is a post-graduate student of IFP, CAEP (The Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics). Working field is radiography.