

# 同步辐射 X 射线吸收边辐照技术<sup>1)</sup>

靳 涛

(中国科学院新疆物理研究所, 乌鲁木齐 830011)

**摘要** 介绍了同步辐射 X 射线能量吸收边辐照技术原理和部分应用研究。简要阐述了单能软 X 射线辐射剂量参数的测量和计算方法。

**关键词** 单色 X 射线, 共振吸收, 辐照

长期以来, 由于受辐射源的限制, 人们在利用射线进行辐照效应的研究和应用中, 对被照物体中的各种组分元素只能一视同仁的进行整体辐照。无法人为地侧重其中某一特定组分元素的原子做特定目标的辐照激发。近几年, 随着同步辐射的发展, 运用同步辐射 X 射线吸收边辐照技术, 对物体中某一需要研究的组分元素的原子重点进行选择性的辐照已基本得以实现。

## 1 X 射线吸收边辐照原理

X 射线吸收边辐照技术, 就是利用同步辐射光能量精确可调的特性, 将入射 X 射线能量调到和所研究元素原子某一内壳层电子束缚能相同的位置, 使 X 光子在和原子发生光电效应时产生能量共振吸收, 从内层电离出光电子使原子处于电离激发状态。反映在由该元素组成的物质吸收系数和光子能量关系曲线上, 吸收边能量所对应的吸收系数有突然的陡变, 曲线呈一种不对称的锯齿状, 齿峰上下两处的吸收系数有的相差近一个数量级。

在吸收边辐照技术中, 通常选择入射光子的能量正好等于原子 K 壳层结合能, 使之发生强烈的共振吸收效应。这样做的原因有两点: 一是光子和原子 K 层电子相互作用截面大, 容易使原子电离。当光子能量大于 K 层电子结合能时, 约有 80% 的光电子产生于 K 壳层。二是 K 层电子在最内层, 使 K 层电子电离, 原子吸收的能量最多并导致整个原子处于最高电离状

态, 便于达到辐照的目的。

## 2 应用

### 2.1 在医学和生命科学方面

在细胞 DNA 中, 磷原子在主链中占据着重要位置。选择和 DNA 中磷原子 K 吸收边能量 (2.153keV) 相同的单色 X 射线辐照肿瘤细胞。光子和磷原子发生共振吸收效应, 使磷原子电离引起 DNA 主链在磷原子处断裂。另一方面, 由于磷原子 K 壳层出现一个电子空位, 有时会使多个不同能量的外层电子被击出, 形成俄歇电子级联。这些俄歇电子能量很低, 平均自由程和细胞尺寸相近<sup>[1]</sup>, 极易被细胞 DNA 所吸收, 在磷原子以外造成 DNA 其他原子电离或激发, 同样损伤 DNA 结构。磷原子被外部入射的吸收边 X 光子激发电离, 其直接和间接作用都会造成 DNA 断裂, 最后导致细胞死亡。这种方法是一种潜在治疗皮肤癌的放疗方法<sup>[2]</sup>。如果肿瘤较深, 还可以利用生物技术使肿瘤细胞 DNA 结合上溴原子, 用溴原子吸收边能量 (13.45keV) 的 X 射线辐照。同样可以在肿瘤细胞 DNA 中引发溴原子内部俄歇电子级联, 增加细胞的损伤<sup>[3]</sup>, 提高放疗效果。

在心血管双色减除造影术中, 将低浓度的碘造影剂注入静脉血管。在碘 K 吸收边 (31.16 keV) 上下迅速摄两张心脏血管的单色 X 射线

1) 1995 年 7 月 3 日收到初稿, 8 月 14 日收到修改稿。

片。这两种能量对碘的吸收差别大，对心脏其他组织而言吸收变化不大。所以将两张单色 X 射线片图象数字化处理后再作减除，充满碘造影剂的心血管图象就变得十分明显。便于医生检查出冠状动脉狭窄或闭锁处。这种方法比目前使用普通 X 射线心血管造影术要方便安全得多<sup>[4]</sup>。

软 X 射线显微术，在观察活性生物样品时，不需要象光学和电子显微镜那样对细胞结构染色。为了使所观察的生物结构在细胞里水的背景中突显出来，同步辐射可以适当地选择碳原子吸收附近的一些能量，就可以增加蛋白质中碳原子的吸收而减少细胞中水的氧原子吸收。用波长 24—44 Å 之间的软 X 射线观察活体生物样品，蛋白质的吸收高于水吸收系数 10 倍，结果可以大大提高观察生物结构的衬度<sup>[5]</sup>。另外，利用钠原子的 K 吸收边辐照技术，采用双色减除造影法，从软 X 射线显微图像中可以选出细胞结构中的钠原子微区进行分析研究。

## 2.2 在材料分析和辐照改性方面

在同步辐射计算机断层照相 (CT) 中，利用某种元素原子 K 吸收边前后沿能量的单色 X 射线进行扫描照相。两张 CT 图片图像数值相减的微分正比于该元素原子的浓度，因而能非破坏性地检测出该元素在材料中的空间分布<sup>[6]</sup>。为了研究材料中的微观结构，用某一特定元素原子 K 吸收边单能 X 射线辐照样品。样品中该元素原子将发出光电子，在这个原子周围的原子间隙里运动，这些光电子运动空间和其波长相当，光电子显示出强烈的波动性。这种由吸收原子发出的光电子波和其被邻近原子反射而来的反射波会产生干涉现象，它们的位相可以反映出该吸收原子邻近原子层的信息。例如邻近原子层的距离、层上的原子种类和数量等重要的结构信息。

对于半导体光电材料磷化铟晶体，可用磷原子 K 层吸收边 (2.450keV) 单色 X 射线对其表面的磷原子进行重点辐照诱变。最新的结果表明，在同样辐照剂量的情况下，K 吸收边的能量比其他高于或低于 K 吸收边的能量，更容易

削弱磷化铟表面层的绝缘性能，使其表面结构有了改变。用同样的方法，对其他化合物材料中的某一组分元素也可进行人为选择的辐照诱变，以获得新的功能材料。

## 3 辐射剂量的测量和计算

在 X 射线吸收边辐照技术研究和应用中，有一个重要的问题尚待探索更好的解决方法。这就是低能 X 射线辐照剂量的测量和计算问题。众所周知，物质在被辐照过程中都不可避免受到射线的损伤。这种损伤是电离辐射与物质相互作用的结果。辐射剂量参数(照射量、吸收剂量和光子注量)就是这种相互作用的一种物理量度<sup>[7]</sup>。例如在软 X 射线显微术中，曝光时间不足，图像不清楚。曝光太多又使细胞受严重损伤而改变原有的结构和性质。如何能统筹兼顾呢？准确的剂量测量和计算为此提供了可靠的质量保证。

同步辐射 X 射线属低能 X 射线。在光束线真空管内，其能谱分布和强度可以精确计算。但在空气或其他介质中辐射剂量参数的测量就十分困难。主要原因是低能光子和物质相互作用系数很高，X 射线很快被减弱。因此，剂量仪器的结构材料构成的容器能大量地减少到达仪器测量体积的辐射，甚至在一段短的空气路程中的减弱也达到很大的比例。另一方面，同步辐射光束线截面积小(一般为几十 mm<sup>2</sup>)，光子密度高，所以电离电荷复合的也很快，给仪器测量带来困难。

为了测量软 X 射线剂量，我们研制一台测单能软 X 射线照射量的自由空气电离室(以下简称电离室)。用理论计算和实验测量相结合的方法较好地解决了同步辐射实验室软 X 射线线现场剂量测量问题。

该电离室由两个平行金属板组成。上极板分成三部分，中间一个收集电极和外侧两个接地的保护极。整个下极板为高压电极。当 X 射线从电离室入口光阑射入(通常就是辐照样品放置点)，无阻挡地穿过电离室上下极板，正对

收集电极的那部分射线所包括的空气体积就是测量体积。通常仅能测量出该体积中的电离电荷并由此计算出该体积中的平均照射量,无法测量到电离室入射光阑处的照射量,而该点的照射量对实验非常重要。为此,先需从理论上计算出电离室测量体积中心点照射量和测量体积平均照射量间的比例。然后乘上测量体积平均照射量的测量值,这就得到测量体积中心点的照射量测量值。最后再根据电离室光阑到测量体积中心点的距离及软X射线指数衰变公式,反推出电离室光阑点的照射量值。该电离室经过美国国家基准仪器刻度,测量和计算出的照射量数据能满足我国同步辐射实验室工作需要。

随着同步辐射光源技术和探测技术进一步

发展,X射线吸收边辐照技术将不断地完善。不久的将来,人们可以随心所欲地对需要研究的元素原子进行选择和控制辐照。还可以分解或合成化合物各组分元素的辐照效应,为X射线辐照效应的研究应用开辟出新的天地。

### 参 考 文 献

- [1] T. Jin et al., *Appl. Radiat Isot*, **45**(1994), 767.
- [2] K. Kobayashi et al., *Int. J. Radiat. Biol.*, **59**(1991), 643.
- [3] H. Maezawa et al, *Int. J. Radiat. Biol.*, **53**(1988), 301.
- [4] 洗鼎昌,神奇的光——同步辐射,湖南教育出版社,(1994),71.
- [5] 谢行恕,物理学进展,**12**(1992),333.
- [6] 杨传铮等,物理学进展,**12**(1992),139.
- [7] 李士骏,电离辐射剂量学(第二版),原子能出版社,(1986),75.

## 同步辐射在地球科学中的应用<sup>1)</sup>

安 庆 骧

(地质矿产部岩矿测试技术研究所,北京 100037)

沈其韩 尚如湘 李兆乃

(地质矿产部地质研究所,北京 100037)

当今,人类面临着“人口”、“资源”、“环境”这三大严重课题的考验。

现代地球科学研究的重点是:(1)地球动力学和岩石圈的研究;(2)矿产资源及成矿理论的研究;(3)天然矿物材料的开发与应用;(4)环境地质学的研究(包括灾害地质——火山、地震、泥石流,地方病等),而“资源”与“环境”更是重点中的重点,它们与人类的生存发展密切相关。

近10年来,我国地球科学研究已进入一崭新的发展阶段,在现代物理学、现代化学等高科技应用的基础上,其一些重要研究方向已由宏观转向微观观测,为地球科学中有关问题的解决提供科学依据,从广度和深度上加快了地质科学的研究进程。

同步辐射为微观观测研究提供了理想的光源条件。在矿物岩石学、地球化学、地球深部的地球动力学等研究中,同步辐射与现有其他光源相比显示了无与伦比的优越性。

### 1 矿物颗粒成分和分布特征的研究

采用传统方法对天然微小单晶矿物颗粒进行研究,其样品量大,信息量小。而采用同步辐射X荧光光谱(微探针)法,实现了原位、原状、不破坏、简单、灵敏、快速分析,信息量大。对微量级颗粒的研究要求光源尺寸在5 $\mu\text{m}$ 左右,

1) 国家自然科学基金资助项目。

1995年6月30日收到初稿,8月17日收得修改稿。