

# 一种新的成象技术

## ——穆斯堡尔成象

李士多良 李文莹<sup>1)</sup>

(中国科学院高能物理研究所)

穆斯堡尔成象技术是 1987 年由美国国家标准局 S. J. Norton 首先提出的<sup>[1]</sup>。它与 X 射线成象(又称为 CT 断层成象)、核磁共振成象(NMR)一样能给出立体图象,虽然现在还不能在医学中应用,但在材料科学研究方面却已显示出广泛的应用前景。

在介绍穆斯堡尔成象之前,先介绍一下 NMR 成象。由于穆斯堡尔成象与 NMR 成象都依赖于原子核共振效应,因此它们具有许多相同的特征。NMR 成象的原理是:由于原子核共振频率正比于局域磁场强度,因此,当施加一个外磁场于自旋体系时,不同频率的信号对应于实验样品内不同的空间位置。用这种方法可以将不同频率的信号转变为空间方面的信号,再利用熟知的成象再生方法,可以得到自旋强度的空间分布,即 NMR 成象。在穆斯堡尔成象中, $\gamma$  射线源与吸收体之间的相对速度与核磁共振中的磁场相似。可以设想施加一个速度梯度于吸收体样品上,类似于 NMR 成象中在实验样品上施加一个外磁场,即在驱动放射源的同时,使吸收体样品也同时转动,使得吸收体样品在不同的空间位置上具有相对于放射源的不同速度,这样可以将共振吸收的分布进行空间分辨。速度梯度的实现可以简单地利用转动吸收体(相对于放射源来说),这样通过吸收体产生了线性多普勒移位,再通过测量  $\gamma$  射线吸收因子的空间分布,然后利用 X 射线成象原理再现。这就为计算机提供了足够的信息去构成一幅图象,以显示出样品内部吸收率如何随位置而改变,因此能给出样品内部一定元素的分布情况。我们知道,一般的穆斯堡尔实验仅

仅测量整个样品共振吸收的体积平均,因此吸收体样品中的空间分布不均性的信息无法得到,而穆斯堡尔成象技术却能给出二维空间分布的变化,在研究材料方面更具有意义。

早期的穆斯堡尔成象方法是利用放置狭缝准直器,使准直的  $\gamma$  射线以一个较大范围的入射角度照射在吸收体样品上,以测量吸收因子。这样的方法与 CT 技术或单光子发射 CT 类似。而目前利用旋转吸收体方法,同时驱动放射源,可以得到同样的结果。

Norton 等人在进行一维穆斯堡尔成象实验时,使用的吸收体样品为  $10 \times 10\text{mm}$  的不锈钢薄带,其厚度为  $12 \mu\text{m}$ ,其中含 91% 的  $^{57}\text{Fe}$ ,使用的放射源为 50 mCi 的  $^{57}\text{Co}(\text{Rh})$ 。吸收体上端用方波驱动,其速度范围在  $\pm 6 \text{mm/s}$  之间,频率为 1.2 Hz。放射源用以等加速度运动的振子驱动,速度范围也为  $\pm 6 \text{mm/s}$ ,频率为 1.6 Hz。多道分析器与放射源同步联接,并用于记录谱,而且不需要放射源和吸收体之间的速度同步。这样在一维穆斯堡尔成象情况下,可以通过不很复杂的断层再现来进行演示,将共振吸收因子看成是位置的函数,即放射源以等加速度沿  $x$  轴运动,吸收体以一固定轴沿垂直方向以一小角度周期摆动。如以  $v_x$  表示吸收体在  $x$  分量的速度,则在点  $y$  处和时间  $t$  时有<sup>[2]</sup>

$$v_x(t, y) = (y/y_{\max})v_x(t, y_{\max}),$$

这里  $v(t, y_{\max})$  是吸收体另一端的速度。若假设一个单线吸收体,共振吸收条件可简写成

1) 现在中国科学院微电子中心工作。

$$v_x(t, y) = v_s(t) + v_i,$$

这里  $v_s$  是放射源的速度,  $v_i$  是同质异能移位。如果吸收体样品以  $z$  轴为轴心旋转, 放射源以速度  $v_s$  沿  $x$  轴方向远离吸收体方向运动 (这里假设放射源与吸收体之间距离较大, 并使  $\gamma$  射线与  $x$  轴近似平行, 还假设吸收样品为二维的), 那么这样的吸收体将处在入射  $\gamma$  射线的辐射平面内。这种几何布置在穆斯堡尔实验中是不常见的, 但比较容易理解穆斯堡尔成象过程。这种基本的几何布置使沿  $z$  轴旋转的吸收体在  $x$  轴方向, 其速度分量  $v_x$  的大小为

$$v_x = R\Omega,$$

其中  $R$  为中心到共振吸收线的垂直距离,  $\Omega$  为旋转角速度, 在极坐标系中, 有

$$x = r \sin \Omega t, \quad y = r \cos \Omega t.$$

因此,  $v_x = \dot{x} = R\Omega$ 。

这样通过吸收体的旋转, 使其在  $y$  方向产生了  $x$  分量  $v_x$  的速度梯度 (线性), 其大小为  $\Omega \cdot s^{-1}$ 。当吸收体顺时针方向转动时, 放射源沿  $x$  轴方向以  $v_s$  速度运动。只有当  $v_x = v_s$  (或  $R = v_s/\Omega$ ) 时, 才能发生共振吸收。如果可探测的  $\gamma$  光子数是时间的函数, 很清楚吸收因子线积分可以通过测量得到 (也可以作为时间的函数), 其积分域为半径  $R = v_s/\Omega$  的圆切线。这样通过变化  $v_s$  或  $\Omega$  的值, 可以得到吸收因子的线积分值, 并通过 tomographic 算法可以得到其空间分布 (即成象)<sup>[3]</sup>。但是由于共振吸收或其它原因, 使得  $\gamma$  射线减弱很多, 这样就使共振事件数目沿着线分布是不均匀的, 这可用迭代的 tomographic 算法来计算  $\gamma$  射线减弱造成的影响 (与单光子激发 CT 实验相似)。

在穆斯堡尔成象技术中, 空间分辨率由  $\gamma$  射线的自然线宽与速度梯度  $\Omega$  的比值确定。如果穆斯堡尔  $\gamma$  射线的线宽为  $\Delta\nu$ , 则空间分辨率为  $\Delta\nu/\Omega$ , 这样可以通过增加转数来提高空

(上接第44页)

京职工业余大学等校使用了三年多。使用者对它的技术性能, 测量指标等深感满意, 认为它有独到的特性及广泛的适用性, 很值得推广。北京师范学院物理系用 MTM 改进了原有的力

间分辨率。例如典型的线宽值为  $\Delta\nu = 1\text{mm/s}$ , 如果转数为每秒几百转, 那么空间分辨率可在微米量级之下。在实际中由于信噪比的限制, 测量需要较长的信号积累时间, 这是因为可利用的放射源的相对强度较低, 这种情况可以通过放射源靠近吸收体而得到改善。

穆斯堡尔成象用于对单线峰的样品进行分析是十分简单的, 而对含有许多重叠复杂的谱线的样品来说, 穆斯堡尔成象分析却会变得十分复杂, 这与 NMR 成象技术类似。目前穆斯堡尔成象技术的应用还局限于测量较轻材料和较小的样品, 因为它必须允许足够的  $\gamma$  射线穿过。穆斯堡尔成象还有可能应用于复合材料的研究。在复合材料中, 人们希望用图象显示出固定在一较轻的基体中的穆斯堡尔元素的分布, 即可以得到穆斯堡尔元素嵌于轻元素基体之中的分布图象。另一种应用是表面成象, 这种技术对材料研究和生产都有一定的意义, 例如研究快淬非晶合金薄带纵向成分的变化及其内部应力分布等。此外将成象技术扩展到穆斯堡尔散射方面能够成为一种新的无损检验手段。目前穆斯堡尔成象实验还比较粗糙, 限制了分辨率的提高, 但可以通过增加放射源和吸收体的驱动速度来改善分辨率。即使这样, 一幅简单的穆斯堡尔成象图对材料科学也很有用, 可以研究合金材料截面的成分变化, 来确定截面上特殊元素的分布。

目前世界上从事穆斯堡尔成象技术工作的研究人员正在考虑进行二维穆斯堡尔实验的可能性。可以预计, 穆斯堡尔成象在不久的将来会得到较大的发展。

- [1] S. J. Norton, *Nature*, **330**-6144 (1987), 151.
- [2] U. Atzmony et al., *Nature*, **330**-6144(1987), 153.
- [3] S. J. Norton, *J. Res. Natn. Bur. Stand.*, **92**(1987), 325.

学实验, 并已开发出一批新实验课题。

MTM 不仅可作为通用计时仪的更新换代产品, 在更换相应的传感器后还可测温度、压力等物理量。因此, MTM 也能够广泛应用于科研和工矿企业。