

上海光源先进成像技术及应用

谢红兰 邓彪 杜国浩 彭冠云
付亚楠 郭瀚和 友朱文选 肖体乔

由于 X 射线波长比可见光短得多,用它来进行成像时,在理论上分辨率要比可见光高 2~4 个量级。而且 X 射线的穿透性较强,可对厚样品的内部结构进行无损检测,这是其他各种显微术所不具备的。自从伦琴 1895 年发现 X 射线以来,传统的 X 射线成像技术已有上百年的历史,已成为医学、生物学及材料科学中不可或缺的诊断工具,它们大部分都是以吸收衬度为基础的,图像的衬度是由于样品的密度分布差异、组成以及厚度的不同对 X 射线的吸收不同而引起的。组成样品的元素越重, X 射线的吸收系数就越大,就能够得到吸收衬度很强的图像。然而对于生物体软组织,聚合物及碳纤维等以轻元素为基的材料而言,由于材料对 X 射线几乎没有吸收或者只有很少的吸收,或者不同轻元素之间的吸收差别很小,所以只能记录到很差的图像衬度。比如,在乳房 X 射线照相术中,需要分辨出各种软组织中正常组织与癌变组织,但是因为软组织对 X 射线的吸收本来就小,再者正常组织和癌变组织的密度和成分差异很小,因此,常规的 X 射线成像技术在这种情形下就不能发挥作用。虽然图像的质量可以通过延长曝光时间来提高,但容易对生物样品造成辐射损伤,破坏样品内部原有的结构。因此,要解决这个问题,需要提出另一种衬度机制,用于 X 射线对以轻元素为基的样品成像。

近年来,随着高亮度同步辐射光源及 X 射线激光的迅猛发展,位相衬度成像已经成为国际上成像领域的一个研究热点,在医学诊断、生物和材料研究领域有显著的优越性,极具推广应用的潜力。第三代同步辐射光源以其高通量、高亮度、高准直性、优良的脉冲时间结构、准相干、偏振及波长可调等不可替代的优点使得 X 射线成像技术获得了革命性的发展。利用 X 射线的波动特性,可以将相干光学的成像原理应用于 X 射线成像技术中。同步辐射好的空间相干特性使得 X 射线位相衬度成像成为可能,从而突破了传统吸收衬度成像在低 Z 样品如生物软组织、聚合物材料等微结构分析方面的局限性。

当 X 射线波通过一个样品时,它的振幅因为 X 射线被吸收而减弱,它的位相由于样品不同部分的相速差异而发生偏移。波前因为位相偏移而产生畸变,这意味着光波传播方向的改变取决于样品的位相梯度。把 X 射线吸收与 X 射线相移的相互作用横截面,作为元素的原子序数的函数。X 射线吸收横截面对应于原子的吸收系数 μ , 而 X 射线的相移横截面可以定义为

$$p=r_e\lambda(Z+f_1), \quad (1)$$

其中, r_e , λ , Z 和 f_1 分别为经典电子半径、X 射线波长、原子序数和反常原子散射因子的实数部分。图 1 显示了 μ 和 p 在不同 X 射线能量的曲线。从图 1 可以看到, p 总是比 μ 大得多,值得注意的一点是,对于轻元素, p 比 μ 大一千倍以上。这表明了使用 X 射线位相信息来对生物样品进行成像,具有极端高度的灵敏性,即使在吸收衬度极其微弱不能探测到的情况下,也有可能探测到足够强的物体的位相衬度。

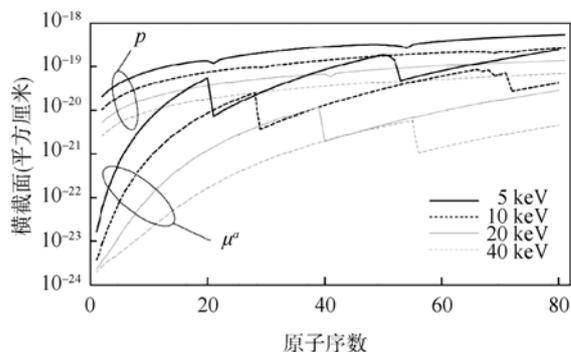


图 1 对于不同原子序数及 X 射线能量, X 射线吸收和相移的相互作用截面的比较

X 射线同轴相衬成像是一种非常简单的、基于菲涅尔衍射的 X 射线位相成像方法,它实质上就是 X 射线同轴伽柏全息记录,亦称之为 X 射线位相衬度直接成像,其图像衬度正比于相移的拉普拉斯算子,在图像上体现为能够勾勒出物体结构的边缘。图 2 为位相衬度形成的原理图。图 2(a)表示采用非相干光源,当波前通过物体后,产生吸收衬度,在

离样品适当的距离将获得清晰的样品吸收衬度图像。若大于这个距离，图像将模糊。如果采用相干光源如图 2(b)所示，当光波通过横截面非均匀的物体时，在样品的厚度或折射率变化处不可避免地产生位相差，即相干（平面或球面）波前发生畸变。当存在吸收时，如果物体足够薄，光波的强度分布在物体外部并不改变；但是当光波进一步传播时，由于横截波前的干涉效应(菲涅尔衍射)，这种畸变波能以可观察的强度变化表现出来，这样代表样品厚度或折射率变化的位相信息就以强度分布的形式被探测到。例如，即使在传播方向上的极小偏转(10 微弧度)并在空气中前进 1 米即足以使位相变化成为可见，也就是说，形成位相衬度。当光波再进一步传播时，这种强度变化差将减弱。因此，要获得位相衬度成像的关键，一是相干 X 光源或照明样品的 X 光具有较高的空间相干性，二是在样品与探测器之间存在一个最佳成像距离,在这个位置上,能获得最佳的位相衬度。

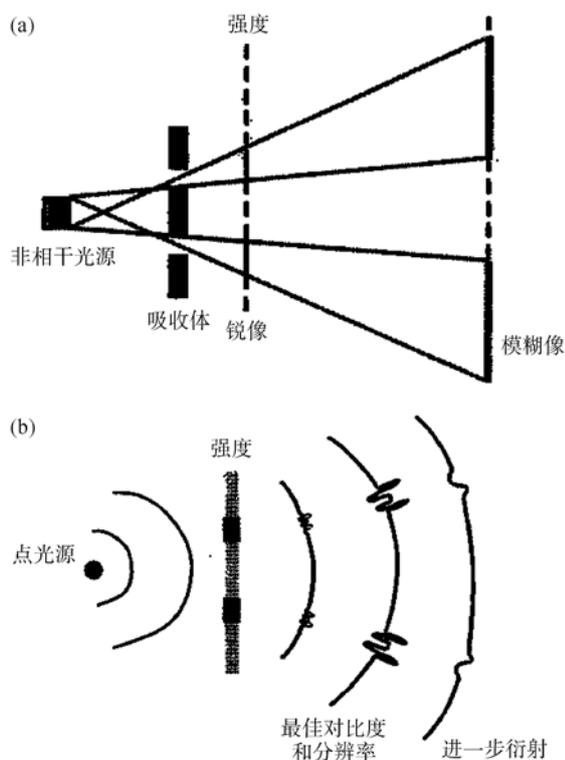


图 2 (a) 非相干光源成像的几何示意图;
(b) 相干光源成像示意图

我国最具规模、世界瞩目的重大科学工程——中国科学院上海应用物理研究所上海同步辐射光源于 2010 年 1 月已通过国家验收。上海光源是一台高 22 卷第 3 期 (总 129 期)

性能的中能第三代同步辐射光源，光源能量位居世界第四，仅次于日本 SPring-8、美国 APS、欧洲 ESRF 三台高能同步辐射光源，是目前世界上性能最好的中能光源之一。上海光源首批线站之一的“X 射线成像及生物医学应用光束线站”以插入件扭摆器为光源，样品距光源为 34m。第三代同步辐射与第二代同步辐射最大的区别就是大量采用插入件作为光源。而插入件扭摆器除了提高输出的特征光子能量外，还可以提高光通量，通量提高倍数与磁极数成正比。对生物医学、显微 CT 应用来说，确保高通量是十分关键的。

如图 3 所示为该线站的布局示意图。对于成像光束线来说，为更好地保存第三代光源良好的相干特性，一个重要的设计原则是减少反射式光学元件的数量。成像光束线通常不需要输出光束具有很好的单色性，因此没有必要在双晶单色器前加准直镜，只需要一个双晶单色器系统来保证光束线的单色光 ($E/\Delta E > 1000$) 输出。对于光子能量 30keV，其光源尺寸为水平方向 $408\mu\text{m}$ ，垂直方向 $23\mu\text{m}$ 。根据横向相干长度的定义 $d_{\text{max}} \approx \frac{R\lambda}{a}$ ，其中 R 为样品到光源点的距离， λ 为波长， a 为光源尺寸。可以得到相干光束的尺寸为水平方向 $3.4\mu\text{m}$ ，垂直方向 $61\mu\text{m}$ 。根据计算可知，虽然在毫米范围，样品得到的是非相干光照明，但在微米范围尤其是垂直方向却是相干光照明。因此，可以利用上海光源成像线站获取微米范围位相衬度差别的图像。X 射线成像及生物医学应用光束线站具备良好的 X 射线相衬显微成像能力，通过 X 射线相位衬度能获得样品内部结构的边缘增强图像，从而可观察到传统 X 射线吸收无法观察到的生物软组织内部微细结构，在生物微观构造无损检测方面已展示出明显优势与巨大应用潜力。

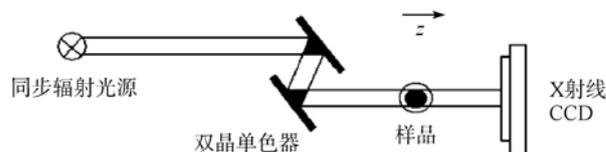


图 3 上海光源 X 射线成像及生物医学应用光束线站布局示意图

动态 X 射线同轴位相衬度成像是近年来发展起来的一种新的成像方法。2002 年的 *Nature* 报道了用相衬成像观察到了电化学反应的动态过程，2003 年

Science 第一次报道了昆虫的呼吸全过程。时间分辨可达几个毫秒到几十个毫秒。上海光源是第三代同步辐射光源,具有高亮度和高相干性的优越性,非常适合于进行高分辨率的动态 X 射线位相衬度成像研究。

另一种成像方式是 X 射线显微断层成像(μ -CT),其三维空间分辨率可达微米量级,在材料、考古、地质、生物等领域有重要应用。显微断层成像(μ -CT)的原理非常简单,如图 4 所示,类似于众所周知的医用 CT。当 μ -CT 应用于物体成像时,通过旋转样品(0~180 度的角度范围),旋转轴垂直于光束方向,记录一系列的投影像(通常 1000 幅以上)。然后通过计算机利用 CT 重构软件对这些图像进行数字重构,就可以得到原始物体的三维像。上海光源 X 射线成像及生物医学应用光束线站采用的插入件扭摆器光源是目前 μ -CT 的理想光源,单色 X 射线的使用还有助于消除彗像,同时减小样品的辐射剂量,这对生物医学样品研究显得尤为重要。 μ -CT 现已成为中能或高能第三代同步辐射装置上的重点发展的技术,甚至还提出了时间分辨 μ -CT 的概念。目前的水平,含图像重构时间在内完成一幅 μ -CT 的时间可达 1 秒,已能用于一些慢过程的三维动态研究,例如用 μ -CT 观测铜的灼烧过程。显微 CT 与其他技术联合还可进一步拓展其应用领域,与位相衬度成像结合可发展用于生物样品的相衬 CT,能够无损得到生物软组织、低 Z 材料、古生物化石的三维内部结构信息;与荧光分析结合可发展用于分析不同元素的空间分布的荧光 CT;与 XANES 结合可用于分析元素化学状态的空间分布;等等。在生物医学、材料科学、考古学、地球物理学及先进制造业等领域有着显著的优越性,极具推广应用的潜力。

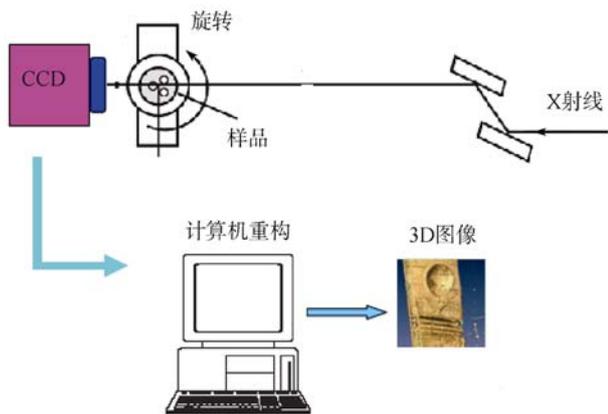


图 4 X 射线显微 CT 成像原理示意图

上海光源 X 射线成像及生物医学应用光束线站主要致力于动态 X 射线同轴相衬成像技术、显微断层成像(μ -CT)和其他新型成像技术的发展和应。根据上海光源 X 射线成像及生物医学应用光束线站的两个实验技术可以得出它有两个突出的优势,一是可以实现二维的原位动态相衬成像,二是可以实现无损的高分辨三维 CT 成像。因此吸引了生物医学、材料科学、古生物学、考古学、植物学等多个研究领域的用户来该线站开展相关实验研究,已取得一批重要的研究成果。下面分主要几个学科领域的应用研究予以简单介绍。

一、上海光源先进成像在生物医学中的应用

同步辐射 X 射线相衬成像方法应用于肿瘤及脑血管疾病的早期发展和微细新生血管形态结构研究,有其独特的优越性。概括起来讲,相对于传统医学成像,同步辐射医学成像具有如下的优势:

- (1) 可获得高质量相衬图像,其衬度、清晰度和分辨率将明显高于传统吸收成像,空间分辨率比常规 X 射线成像高出约 1000 倍,可达到亚微米量级;
- (2) 辐射剂量远小于常规 X 射线成像所需剂量,可减少射线对人体的损害;
- (3) 同步辐射光源的高通量窄脉冲时间结构,十分适合进行活体实时动态成像;
- (4) 通过发展实时双能量减影技术可以得到比传统减影技术分辨率更高的血管或肺的造影图像;
- (5) 通过发展多能量成像技术,可以定量检测与分析组织成分;
- (6) 通过发展同步辐射 X 射线结构与功能荧光融合影像技术,可以定量检测分析组织微量元素。

同步辐射医学影像有可能在提供精确的活体肿瘤、微小血管形态信息的同时,还可以对正常、良性和癌变组织中微量元素的相对含量进行定量分析,以功能研究提高癌症的早期诊断率。但是,同步辐射肿瘤成像术目前还局限于科学研究的早期阶段,尚未达到临床应用。

传统的 X 射线吸收成像无法对生物软组织成清晰像,而上海光源成像线站利用同步辐射的高相干性可实现相衬成像,无需造影剂也可以对生物软组织成清晰像。图 5 显示的是上海交通大学 Med-X 学院徐学敏研究组利用上海光源成像线站对小鼠的脱水、无造影剂的肝脏进行相衬成像的实验结果,

显示即使没有造影剂，利用第三代同步辐射光源成像也能清晰地看到肝脏内部地微血管，分辨率可达微米级别。

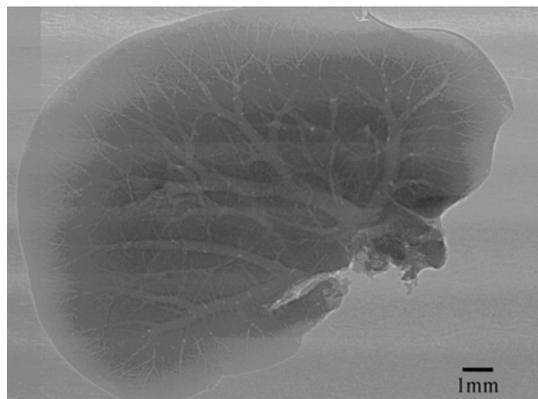


图 5 脱水、无造影剂的小鼠肝脏 X 射线相衬成像

图 6 显示的是上海交通大学 Med-X 学院徐学敏研究组利用上海光源成像线站对裸鼠 Lewis 肺癌原位、无损、无造影剂的 X 射线相衬成像的实验结果，可以看到无需造影剂的情况下，对活体小鼠成像能够清晰地观察到 Lewis 肺癌和正常肺组织的微小结构差异，为早期肿瘤诊断提供新手段。

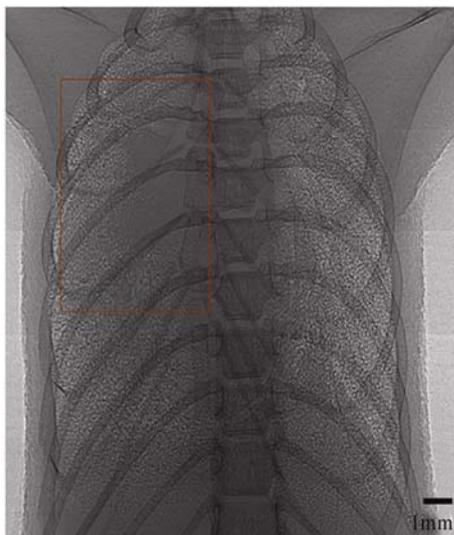


图 6 裸鼠 Lewis 肺癌原位、无造影剂 X 射线相衬成像

肿瘤（包括动脉瘤）在其生长过程中有大量的新生血管生长，肿瘤新生血管的形态和结构比较特殊，与正常血管有明显区别。利用上海光源同步辐射血管造影术可以对肿瘤内部的新生血管和正常血管成清晰像，能对肿瘤早期诊断提供新途径。图 7(a) 显示的是上海交通大学 Med-X 学院徐学敏研究组

利用上海光源成像线站对裸鼠 Lewis 肺癌的血管造影成像的实验结果，小鼠注射的是 BaSO₄ 造影剂。(b)是(a)的肿瘤部分的放大图；(c)是裸鼠 Lewis 肺癌的血管造影 CT 成像的重构结果，可以清楚地分辨出肿瘤新生血管和正常血管，图中箭头所示为 Lewis 肺癌区域。该实现结果已发表在 *Phys. Med. Biol.* **55** (2010) 2399。

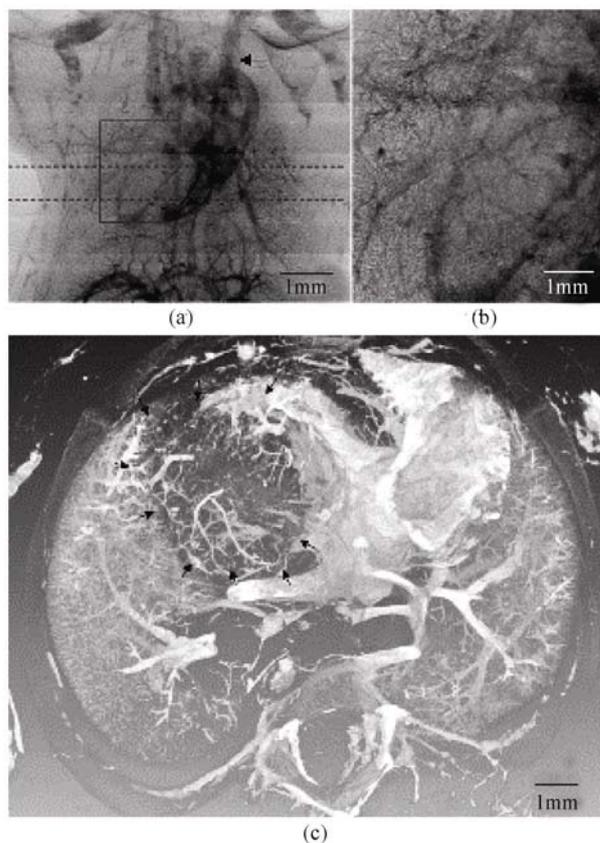


图 7 (a)裸鼠 Lewis 肺癌的血管造影成像的实验结果，小鼠注射的是 BaSO₄ 造影剂。(b)是(a)的肿瘤部分的放大图；(c)是裸鼠 Lewis 肺癌的血管造影 CT 成像的重构结果，图中箭头所示为 Lewis 肺癌区域

除了生物医学应用研究外，上海光源还开展了活体蝗虫动态同轴 X 射线相衬成像（实验用户：中国科学院高能物理研究所黎刚研究组），获得了蝗虫样品活体二维图像（图 8），蝗虫的翅、体表纹理和体内器官与组织分布情况清晰可见，同时获得其呼吸过程中个体器官动态行为，这对研究昆虫形态学、生理学以及活动机能等方面提供了参考。

此外，华东理工大学的刘昌胜、魏杰研究组还在上海光源开展了生物医用材料植入动物体内实验的相衬研究，获得了非常有意义的研究成果。生物

材料是一类用于诊断、治疗或替换人体组织、器官或增进其功能的新型高技术材料，它是研究人工器官和医疗器械的基础，已成为材料学科的重要分支。在生物材料的研制过程中，首先根据临床需求设计、制备具有一定化学组成、物理结构和机械性能的新型材料，然后通过体外细胞培养法及动物体内植入法评价其生物安全性及生物学性能，最后才能进入临床实验。在常用的评价方法中，压汞仪、光学显微镜、扫描电子显微镜（SEM）、透射电子显微镜（TEM）等设备用于分析生物材料的物理结构，组织切片法、医用 X 射线成像技术、SEM 观察等用于评价生物材料在动物体内植入后的生物学性能。近些年同步辐射 X 射线成像技术的出现，则提供了一种新的评价方法，即无损、高分辨率、立体、实时地观察生物材料的结构及其与生物组织的相互作用情况。

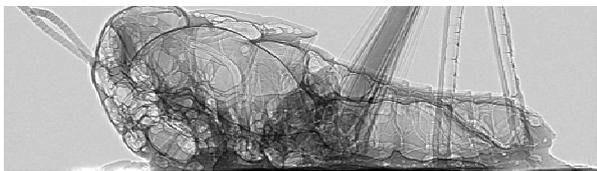


图 8 蝗虫 X 射线动态相衬成像

对于具有复杂内部结构的生物材料，如多孔组织工程支架材料，由于压汞仪法、氮气吸附法均有孔径测量范围限制，测出的孔隙率、孔径分布存在一定误差，抽样拍摄的断面 SEM 照片也难以展现完整的孔隙结构。而利用同步辐射 X 射线显微断层成像技术（SR-micro-CT）可以获得完整的高精度、高分辨率三维孔隙结构数据，通过计算机重构软件能从任意角度观察到所分析材料任意位置的内部结构，包括孔隙的形状和孔隙间的连通性，结合图像处理分析软件更能精确地计算出孔隙率、孔径分布等数据。

动物体内植入实验是评价生物材料是否有效的关键步骤，动物模型的特殊性使得实验周期少则数周，多则数年，因而所研究的生物材料能否尽快投入临床应用取决于如何高效地得到真实有效的实验数据。常用的组织切片法和医用 X 射线成像技术都存在着无法消除的缺点，阻碍了快速、准确地获取实验结果。

首先，对于传统的组织切片方法而言，制作组织切片时的固定、脱钙、切割、染色等步骤可能引

起观测部位的位移失真和破坏，观察到的结果也会由于切片位置的选择而具有随机性。利用同步辐射 X 射线成像技术可以实时地观察到活体动物体内完整的生物组织的生长情况及生物材料的形态变化，同时可在同一动物身上完成全周期的观察，降低实验组内统计误差、减少动物使用量、提高实验效率。

其次，对于普通医用 X 射线成像技术而言，X 射线来源的限制约束了分辨率及成像清晰度的提高，特别是其仅能依靠 X 射线吸收衬度成像，难以对除骨骼外的生物组织进行观察。同步辐射 X 射线成像技术具有无法比拟的高分辨率，通过相位衬度成像能对弱吸收性组织清晰成像，极大丰富了实验数据的信息量，如观察血管、韧带、软骨组织的生长情况，或获取种子细胞在多孔组织工程支架材料内的分布状态。

虽然目前利用同步辐射 X 射线成像技术对生物材料进行的研究仍处于起步阶段，其优异的成像性能预示了良好的应用前景。将同步辐射 X 射线成像技术用于研究生物材料的动物体内植入实验是一个重大的改革和突破，对于生物材料的生物学评价方法发展具有重要的意义。

二、上海光源先进成像在材料科学中的应用

上海光源 X 射线成像及生物医学应用光束线站能提供 8~72.5keV 的硬 X 射线，由于硬 X 射线在材料中的穿透深度大，因此硬 X 射线成像技术可以被应用于材料内部结构的无损研究，尤其是其第三代同步辐射光源高通量特性可实现实时观测动态过程，如金属结晶生长，薄膜电沉积中伴随的析氢反应，以及在表征材料的三维结构等方面已表现出明显优势。下面简单介绍上海光源先进成像在材料科学上的几个应用实例。

合金的凝固过程决定其微观结构（以枝晶形貌最为常见），凝固微观结构最大程度影响着合金的机械性能。实验中研究枝晶生长行为的最大障碍是合金的不透明性，很难直接观察到在高温不透明的合金中的凝固过程。为了研究其演变规律，在凝固过程中常常通过试样快淬或熔体倾倒在再附以金相组织观察来得到某一时刻某一截面的凝固结构，但这些都无法对枝晶组织形成过程进行实时连续观察，因此会丢失一些重要的动态信息。研究者们曾尝试利用 X 射线对微观结构形成过程进行观察，但由于普通 X 射线亮度低，穿透力差等原因，使成像的空间

和时间分辨率均较低，难以观察到微米级的枝晶形貌。因此同步辐射 X 射线成像技术几乎是目前唯一可实现实时观察枝晶生长行为的实验手段。

大连理工大学王同敏等进行了 100 μm 以下 Sn-Bi 超薄合金成像实验样品的研制，组建了能严格控制加热温度的微型 Bridgman 定向凝固熔炉，利用电控位移台实现了样品移动速度最低 5 $\mu\text{m/s}$ 。于 2009 年 3 月以来在上海同步辐射光源 X-ray 成像及生物医学应用光束线站 (BL13W1) 成功进行了一系列实验，取得重大突破。动态观察到冷却速率对合金凝固形核率和枝晶形态的影响，随着冷却速率的提高，枝晶以等轴晶形态生长。并验证了二次枝晶的粗化模型，如枝晶臂断裂、枝晶臂重熔以及枝晶臂合并等，这些粗化机制都对最终的二次枝晶形貌产生影响。创新观察到外电场作用下枝晶生长的动态过程，发现电场改变其生长机制，在直流电场的的作用下，枝晶迅速粗化，彼此合并，最终枝晶转化成球状晶。如图 9 所示为 Sn-Bi 合金在不同电流密度的直流电场下的枝晶图像。

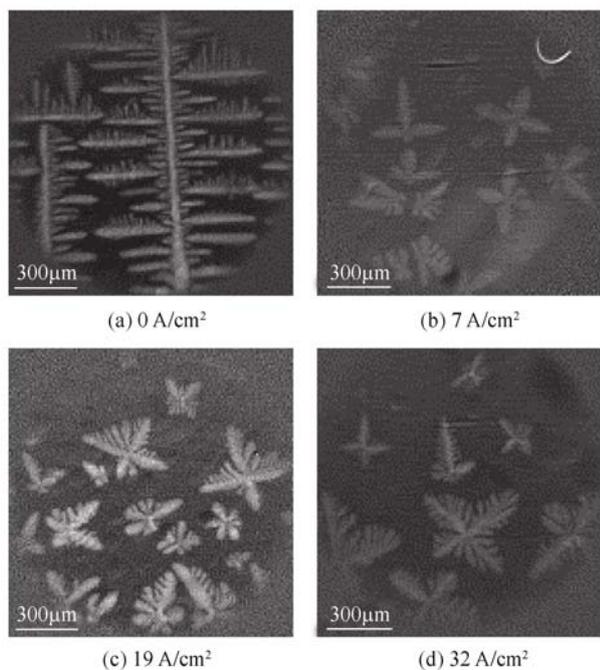


图 9 在不同电流密度的直流电场下的枝晶图像

浙江大学蒋建中研究组利用上海光源 BL13W1 线站的 X 射线原位相衬成像技术研究了非晶合金薄膜材料 PdP 和 NiP 的电沉积生长过程，记录稳定沉积后薄膜表面气泡的形态以及脱离逸出过程，如图 10 所示。利用分形中的标度 (scaling) 思想对薄膜

生长过程中表面的动力学粗化进行量化分析，是研究薄膜生长机理的一个重要手段，对于应用中控制薄膜表面形态有重要的实际意义。通过同步辐射 X 射线成像方法进行原位观察，获得了沉积过程中析氢反应的直观信息，验证了如下理论分析结果，PdP 和 NiP 薄膜表面的粗化生长表现出的不同标度行为：PdP 薄膜为奇异标度，NiP 薄膜为正常标度，是由于 PdP 沉积过程中剧烈的析氢反应 (与 Pd 元素活泼的电化学性质相关) 导致沉积时的扩散不稳定，而 NiP 沉积时的析氢相对平和 (如图 10 所示)，因此为正常标度。

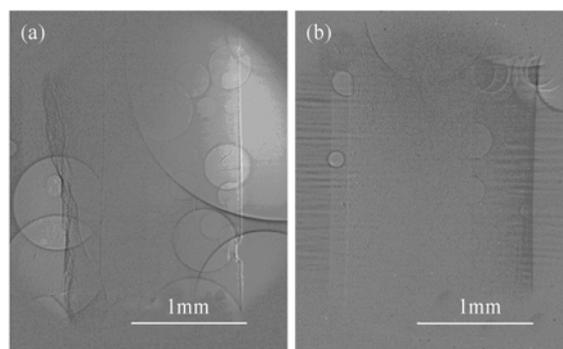


图 10 PdP (a) 和 NiP (b) 薄膜上析氢反应的 X 射线相衬成像，像素尺寸 2.25 μm ，沉积电流密度 12.5 mAcm^{-2}

中科院上海应用物理研究所吴国忠等利用超临界二氧化碳制备了微孔聚合物材料，研究发泡工艺对聚苯乙烯 (PS) / 聚乙烯 (PE) 泡沫材料孔结构的影响。微孔泡沫材料与常规泡沫材料相比，具有更小的泡孔尺寸 ($\leq 10\mu\text{m}$)、更高的泡孔密度 ($\geq 10^9\text{cm}^{-3}$) 和更好的力学性能。这些参数与泡沫材料的孔形貌有直接而密切的关系。首先利用超临界二氧化碳发泡技术处理 PS/PE 高分子共混聚合物，制备出微米级 PS/PE 泡沫材料，提高其力学性能，减少原料消耗。但是由于使用扫描电镜只能观察泡沫的表面结构或泡沫横断面的二维形貌，即使利用基于泡沫三维模型推导出的计算公式，将泡沫的二维结构信息外推，得到的三维结构信息也仅仅是泡沫三维结构的近似结果。而且样品脆断时，断裂面的损伤同样影响泡沫形貌信息的准确性。通过使用上海光源 X 射线相衬成像技术对 PS/PE 聚合物的三维孔形貌进行观察，得到了泡沫材料的三维孔形貌信息，如图 11 所示。实验结果表明此表征手段对 PS/PE 泡沫孔结构有良好的空间分辨， $\mu\text{-CT}$ 照片清晰，三维重构结果完全满足实验表征目的。实验比较了两

个 PS/PE 泡沫样品，一个添加相容剂共聚物 SEBS，另一样品未添加。X-ray 相衬成像结果表明 SEBS 对 PS/PE 泡沫的孔形貌有明显的改善，加入 SEBS 后，PS/PE 泡沫孔密度显著提高，孔径明显减小。该结果为优化发泡工艺，改进泡沫性能提供了直接的依据和指导。

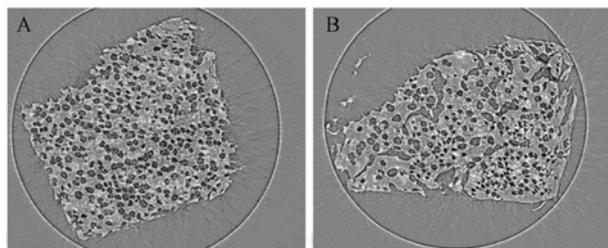


图 11 在 105℃, 25MPa 条件下制备 PS/PE 泡沫的显微 CT 截面照片，像素尺寸 0.74μm：(a) 添加 SEBS；(b) 不添加 SEBS

三、上海光源先进成像在古生物学中的应用

古生物学是研究地质历史时期生物及其演化历史的学科，它的主要研究对象是保存在沉积岩中各式各样的化石。化石按保存方式的不同可以分为实体化石、模铸化石、遗迹化石和分子化石四种。其中实体化石(经石化作用保存了全部或部分生物遗体的化石)在地质历史时期形成的数量最多，加之其保存的生物体结构信息较其他类型化石要丰富，因而研究价值也最大。在研究实体化石的过程中，化石标本成像是不可或缺的研究手段之一。随着古生物学研究的不断深入，人们对实体化石标本的成像技术提出了越来越高的要求。无损成像作为最理想的成像方式颇受古生物学家们的关注。目前在该领域中最受青睐的成像手段是同步辐射硬 X 射线断层显微成像技术。这一技术的出现给古生物学的发展带来了新的增长点，为研究化石，尤其是小型和微体化石的三维结构和超微构造提供了无与伦比的手段。

对于微体化石，工业 CT 往往难以获得有意义的化石内部结构图像。工业 CT 的最高空间分辨率虽然能达到亚微米级，但它的成像基础是吸收衬度成像，只有在化石内部密度差比较大的情况下才能获得较高的成像衬度，如黄铁矿化的化石。然而，微体化石在石化作用过程中，除少量以有机质形式保存外，通常被某一种矿物质(如硅质、钙质、磷酸盐物质等)完全置换，使得化石内部密度差不大。因此，在工业 CT 上难以获得满意的成像衬度，导致

化石图像反差过小，内部结构难以辨析，无法满足微体化石的高分辨率三维成像的要求。同步辐射 X 射线相位衬度显微断层成像技术的出现才完满地解决了微体化石的无损高分辨率三维显微成像问题。

目前，同步辐射 X 射线相衬显微断层成像技术是公认的可用于化石无损三维显微成像研究的最佳方法。它的空间分辨率可以达到亚微米级，断层扫描的虚拟切片间隔可小至不到 1μm，借助相关计算机图像三维重构软件，可以获得解析度极高的化石图像，而且实现了化石内部结构的三维可视化。同步辐射 X 射线相衬显微断层成像技术应用于化石无损成像研究虽然只有 10 年左右的时间，但成果斐然。在古无脊椎动物学(如不透明琥珀中的昆虫和早期动物胚胎化石等)、古脊椎动物学(如头骨、羽毛和牙齿化石等)和古植物学(如植物生殖器官和种子化石)等研究领域都取得了突破性进展。

中国贵州 5.8 亿年前的瓮安生物群主要由三维立体保存的磷酸盐化微体化石组成。自 1998 年 2 月 *Nature* 和 *Science* 杂志上同时报道了瓮安生物群中动物胚胎化石的发现以来，瓮安生物群就成为国际早期生命研究领域的一大前沿热点，并产生了一门新的交叉学科——化石胚胎学。化石胚胎学的兴起对胚胎化石内部结构的三维图像重建提出了要求，因此在动物胚胎化石发现的第二年，就有专家尝试将同步辐射 X 射线相衬显微断层成像技术引入到这一领域。2006 年，陈均远等人首次采用该技术证实了具极叶构造的螺旋动物胚胎化石在瓮安生物群中的存在，表明两侧对称动物在 5.8 亿年前就已经出现，这一成果将后生动物的起源时间向前推进了近 5 千万年。

中国科学院南京地质古生物研究所的朱茂炎研究组在上海光源 X 射线成像及生物医学应用光束线站利用同步辐射 X 射线相衬显微断层成像技术开展了古生物胚胎化石的成像研究，获得了一些瓮安生物群动物胚胎化石的三维结构图像。如图 12 所示是一颗后生动物卵裂胚胎化石的重构立体图像做透明化处理后的效果图，显示化石是由 4 个卵裂球按四面体构型排列而成，表明该化石是一颗处于四细胞卵裂期的旋转卵裂胚胎。除卵裂沟外，图中还能清晰地分辨出每个卵裂球(细胞)中的细胞核。

同步辐射光源产生的硬 X 射线具有高亮度(高通量密度)、高准直性和高空间相干性等优点，结合

相位衬度成像方法，非常适用于化石（尤其是小型和微体化石）内部结构的无损高分辨率成像和三维重建。同步辐射 X 射线显微 CT 技术的出现弥补了传统化石成像手段和工业 CT 的不足，为古生物学家揭示化石和生物演化奥秘提供了一种全新的技术手段，为古生物学学科的发展带来了新的机遇。

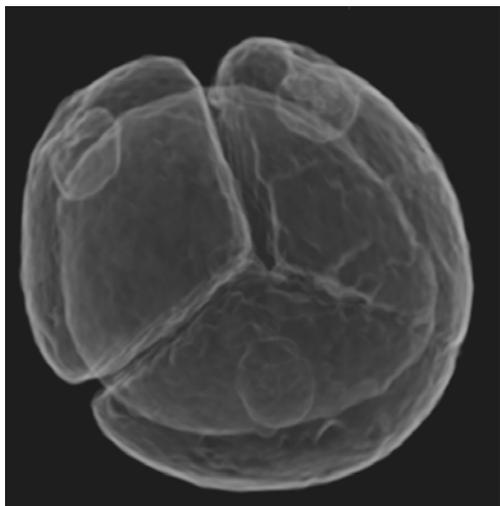


图 12 一颗后生动物卵裂胚胎化石的重构立体图像做透明化处理后的效果图

四、上海光源先进成像在植物学中的应用

上海光源自 2009 年 5 月 6 日向用户开放以来，X 射线成像及生物医学应用光束线站在植物学领域已开展了一系列研究，并已取得一些有重要价值的研究成果。目前成像站在植物学领域的研究目标可分为两类，即形态学和生理学特征检测；在具体图像获取过程中，可根据需要获取二维图像和三维图像。其中形态学研究主要包括：果实、种子结构的 X 射线三维无损检测；基于细胞形态特征的珍贵药材鉴定；木材、竹材维管系统检测；木基复合材料各组分布研究等。已取得主要研究成果有：利用同步辐射显微 CT 技术无损检测到核桃成熟果实内部各组织的三维形态和分布；利用 X 射线相位衬度成像方法开展了中草药鉴定的应用研究，较为系统地研究了西洋参、高丽白参的显微结构，并对二者在草酸钙簇晶、导管、木栓细胞、韧皮部和木质部射线等显微结构方面的异同进行了分析，证实 X 射线相位衬度成像方法在无需对样品进行特殊处理的情况下，能较好地实现西洋参、高丽白参的显微结构鉴定；图 13 和图 14 显示了利用上海光源 X 射线成像线站的 X 射线相衬成像技术获得的园参韧皮部

包括树脂道、射线、裂隙的显微结构，并与手绘图相比较，实验结果表明该技术是可行的，从而为中药材显微鉴定开辟了一条新的途径。此外，通过上海光源 X 射线相衬显微 CT 技术，开展了木材、竹子体内维管束三维结构研究，丰富了木材、竹子解剖学方面的研究成果，开拓了同步辐射技术在木材科学、植物学等领域的方法学研究。在基于上海光源先进成像技术研究植物生理方面，主要开展了原位、动态、非破坏性的水稻叶片导管空穴化机理研究。空穴化由空气接种引起。植物失水、水分张力增加时，微小空气泡穿过纹孔膜上的微孔进入导管或管胞，随即破裂，引发空穴化。在上海光源实现了玉米和水稻叶片所做到的 X 射线显微观察，证实了存在气泡突变引发的空穴化过程。

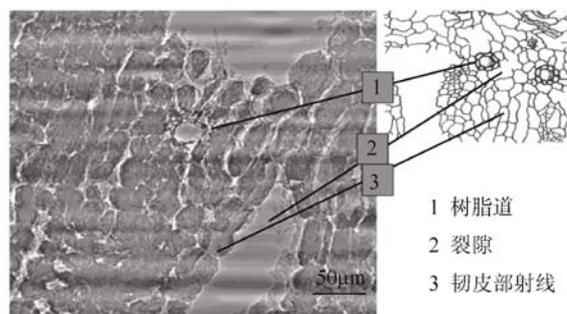


图 13 园参的韧皮部显微结构的 X 射线相衬图与手绘图比较

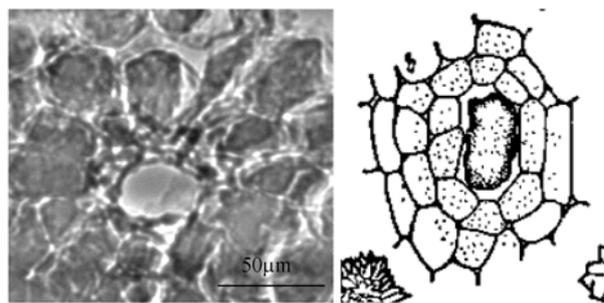


图 14 园参的树脂道的 X 射线相衬图与手绘图比较

据已取得的研究成果来看，结合国外相关研究，不难发现同步辐射 X 射线先进成像技术在植物学领域研究和利用具有巨大的发展潜力。从新一轮用户申请来看，上海光源 X 射线成像及生物医学应用光束线站的植物学领域用户需求也是在逐步增加。上海光源先进成像技术将在研究农林动植物的解剖学、生理学和发育学提供一重要的检测手段。

除了动态同轴相衬成像和显微 CT 成像以外，上海光源 X 射线成像线站还将发展 X 射线荧光 CT 成像。X 射线荧光 CT 成像通过测量元素的特征 X

她用物理的情趣，引我们科苑揽胜；

她用知识的力量，助我们奋起攀登！

欢迎投稿，欢迎订阅

《现代物理知识》杂志隶属于中国物理学会，由中国科学院高能物理研究所主办，是我国物理学领域的中、高级科普性期刊。其前身是创刊于1976年的《高能物理》杂志。该刊以生动活泼的语言介绍现代物理知识、传递科技前沿动态，以深入浅出的形式做到科学性和趣味性并重。适合广大的科学工作者、教育工作者、科学管理干部、大学生、中学生以及其他物理学爱好者阅读。

为进一步提高《现代物理知识》刊物的学术水平，欢迎物理学界的各位专家、学者、教授以及研究生为本刊撰写更多优秀的科普文章。投稿时请将稿件的 Word 文档发送至本刊电子信箱 mp@mail.ihep.ac.cn。投稿时请将联系人姓名、详细地址、邮政编码，以及电话、电子信箱等联系方式附于文章末尾。

《现代物理知识》设有物理知识、物理前沿、科技经纬、教学参考、中学园地、科学源流、科学随

笔和科苑快讯等栏目，并于2009年增加了彩色中心插页。2010年《现代物理知识》，每期定价8元，全年6期48元，欢迎新老读者订阅。

邮局订阅 邮发代号：2-824。

汇款到编辑部 地址：北京市玉泉路19号乙高能物理所《现代物理知识》编辑部；邮编：100049。

需要过去杂志的读者，请按下列价格汇款到编辑部。1992年合订本，18元；1993年合订本，18元；1994年合订本，22元；1994年增刊，8元；1994年附加增刊合订本，36元；1995年合订本，22元；1996年合订本，26元；1996年增刊，15元；1997年合订本，30元；2000年附加增刊合订本，38元；2000年增刊，10元；2001年合订本，48元；2002年合订本，48元；2003年合订本，48元；2004年合订本，48元；2006年仅剩4、5、6期，每期7元；2007~2009年单行本每期8元；2007~2009年合订本每本50元。

射线荧光，结合 CT 重构算法，重构非放射性元素（如钙、铁等）在样品内部的三维分布图像。具有二个突出的优点：利用了硬 X 射线穿透深度大的特性，X 射线荧光 CT 得到是样品内部元素三维分布的图像；简化了样品准备工作，它既不需要对样品进行切片处理也不需要进行真空准备，并且可同时测量样品中多种元素的分布。同步辐射 X 射线荧光 CT 的应用领域很广，仅以近年来开展的研究工作为例，就涉及地球科学、环境科学、材料科学和生物医学等学科领域。限于篇幅，不做详细的应用实例介绍。

目前国际上的成像技术趋向于更高的空间分辨（纳米量级）和更快的时间分辨（1 毫秒或更小）。上海光源作为第三代高性能同步辐射光源，它的 X

射线成像及生物医学应用光束线站也将朝着这些方向努力，为我国的 X 射线成像研究的发展作出自己的贡献。同时还将更多地关注国内外的应用研究前沿，具体研究领域包括生物、医学、药学、考古学和地球物理学、植物和农作物、先进制造业、先进材料（功能性聚合物，制陶业，纳米材料，金属和合金，微电子学和磁性材料，生物样品）等。同步辐射先进成像技术本身也是一个逐渐提高和完善的过程。X 射线成像及生物医学应用光束线站也正根据用户和实验需要，在自主研发的基础上，借鉴国外相关经验，在图像重构、处理、存储等方面开展研究，以更好地发挥大科学装置的应用潜力，以服务 and 促进科技和产业发展。

（中国科学院上海应用物理研究所 201204）