

# 衍射增强成像技术在粘虫结构形态学研究中的初步应用

黄万霞<sup>1</sup> 葛斯琴<sup>2</sup> 袁清习<sup>1</sup> 朱佩平<sup>1</sup> 王鸾越<sup>1</sup> 刘宜晋<sup>1</sup> 陈博<sup>1</sup> 舒航<sup>1</sup>  
胡天斗<sup>1</sup> 吴白玉<sup>1</sup>

1 (中国科学院高能物理研究所 北京 100049)

2 (中国科学院动物研究所 北京 100080)

**摘要** 本文利用衍射增强峰位成像技术研究全变态类蛹期粘虫的发育,得到了清晰的粘虫蛹的内部结构的衬度图像,清楚地观察到蛹发育的整个过程以及粘虫从幼虫到成虫部分器官、组织内细微结构的形成与演变,成像分辨率可达到5 μm。

**关键词** 衍射增强成像,同步辐射,粘虫蛹

**中图分类号** O572.4, Q969.42

传统的X射线成像术和X射线相位衬度成像的衬度都与折射率有关。X射线与物质的相互作用可用折射率表示: $n(\vec{r})=1-\delta(\vec{r})+i\beta(\vec{r})$ 。其中, $\vec{r}$ 为物体内部的位置矢量, $\delta(\vec{r})$ 为相位项,其作用是使X射线穿过物体后相位发生改变; $\beta(\vec{r})$ 为吸收项,其作用是使X射线穿过物体后光强衰减。

由于不同物质对X射线的吸收不同,传统X射线成像得到基于吸收衬度的像。而X射线穿透物质时,其相位也发生变化,记录X射线穿过物体不同部位的相位改变量,就可获得基于相位衬度的像。若样品厚度为 $t$ ,则吸收和相位的变化分别为 $\mu(t)=4\pi\beta t/\lambda$ 和 $\varphi(t)=2\pi\delta t/\lambda$ 。在硬X射线波段( $\lambda\leq 0.2$  nm),轻元素、中等原子序数元素和重元素的相位项 $\delta$ 分别比吸收项 $\beta$ 大3—6个数量级、2个数量级和1个数量级,如X射线能量为10 keV时, $Z=1,6,12,14,17$ 与26的元素,其 $\delta/\beta$ 值分别为 $1.5\times 10^6$ ,  $10^3$ ,  $10^2$ , 67, 37和11<sup>[1]</sup>。可见,对于轻元素和中等元素,相位衬度比吸收衬度具有更大的差异。对于主要由轻元素组成的生物医学样品,相位衬度成像明显优于传统X射线吸收成像:其灵敏度和分辨率高,可观察到样品内部吸收衬度变化不大的结构细节,更利于物质内部缺陷和结构信息的研究。目前,同步辐射相位衬度成像技术主要有干涉仪法<sup>[2,3]</sup>、衍射增强成像<sup>[4-7]</sup>及同轴相位衬度成像<sup>[8-10]</sup>。

昆虫是最大的动物类群,在生物多样性中占有十分重要的地位。研究昆虫结构形态及生理学,有

助于探索昆虫生理机制的奥妙,也能直接或间接地为利用益虫和控制害虫服务<sup>[11,12]</sup>。本研究旨在用衍射增强成像(Diffraction enhanced imaging, DEI)技术实时观察粘虫蛹的内部结构、器官形成及演变过程。

## 1 实验原理和方法

衍射增强成像的基本光路由两块单晶、样品和探测器构成(图1)。样品前的单晶为单色器,其作用是将由光源发出的同步辐射白光转换成特定能量的单色光,样品后的单晶为分析晶体,调整其角度,可改变X射线穿过样品的透射、折射和小角散射。由此,衍射增强成像有三种衬度产生机制:吸收衬度、折射衬度和滤除小角散射获得的消光衬度。衍射增强成像的特点,是利用其一种衬度、或者结合几种衬度得到图像衬度增强及高空间分辨的样品的内部结构信息,因而获得常规X射线照相术无法观察的低吸收物质的内部结构细节<sup>[13-17]</sup>。

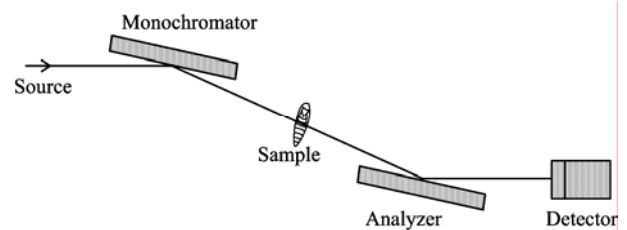


图1 衍射增强成像的实验装置示意图  
Fig.1 Schematic diagram of DEI apparatus

国家自然科学基金(10504033, 10490194)和中国科学院高能物理研究所科技创新经费(O454562U12)资助

第一作者:黄万霞,女,1973年出生,1999年于四川大学获硕士学位

收稿日期:2006-09-22,修回日期:2007-01-23

实验在北京同步辐射装置 (BSRF) 4W1A 束线的形貌站完成。在储存环上, 能量为 2.2 GeV 的电子束通过扭摆器(wiggler)时发出波长连续分布的同步辐射 X 射线(3—22 keV)。光源尺寸  $S_{//} \approx 2.2 \text{ mm}$ ,  $S_{\perp} = 0.8 \text{ mm}$ , 束线全长 43 m。单色器晶体和分析晶体均采用 Si(111)完美单晶, 分别放置在 BEDE300 型双轴衍射仪的两个主轴上。晶体的转轴分别与衍射仪的两个主轴重合, 调节单色器晶体的入射角, 可选择能量不同的单色 X 射线。本实验选取 12 keV 的硬 X 射线。固定单色器晶体的角度, 对分析晶体角度作扫描, 可得到反射强度随入射角变化的曲线(摇摆曲线)。当分析晶体和单色晶体平行时, 可得到滤除小角散射和折射的峰位像; 当分析晶体转角偏离 Bragg 角、处于摇摆曲线腰位时, 获得与样品折射角成正比的折射像。探测器使用 Fuji IX80 胶片, 分辨率为 0.3—0.8  $\mu\text{m}$ 。

## 2 结果与讨论

所取研究对象为粘虫蛹, 由中国科学院动物研究所提供。粘虫属鳞翅目夜蛾科, 是我国乃至亚洲地区的重大迁飞害虫。其成蛹周期约为一星期, 此期间, 蛹的外观毫无变化, 但蛹壳内却发生了由幼虫到成虫的一系列变化, 硬 X 射线 DEI 是观察蛹内变化的非破坏性及活体研究的唯一方法。对化蛹 1—7 d 的蛹拍摄 DEI 峰位像, 得到其内部结构的相衬图像, 可清楚地观察到蛹发育的整个过程, 以及粘虫从幼虫到成虫部分器官、组织的形成与演变, 图 2 为成蛹第一天(图 2a)、第四天(图 2b)和第六天(图 2c)的 DEI 图像。

由图 2 可见, 幼虫(第一天蛹)逐步蜕变为成虫(第六天蛹)。第一天的蛹内幼虫尚未分化出头胸腹, 第四天的蛹可观察到触角的形成, 第六天的蛹观察到足的形成。第六天的成虫已形成完整的昆虫的头部、胸部和腹部。蛹的表皮逐步骨化, 第六天成虫表皮的骨化已非常明显。此外, 由图中还可看到神经系统和消化系统的逐步形成和完善。

利用 DEI 技术对昆虫结构形态及生理学的研究还刚起步。相位衬度成像的空间分辨率可达  $\sim 5 \mu\text{m}$ , 密度分辨率可达  $0.0003\text{—}0.002 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 可用于研究昆虫内部的细微结构, 区别不同组织的形态结构的密度微小变化。此外, 多数的昆虫对环境变化非常敏感, 以粘虫为例, 温度和湿度对粘虫的产卵率、孵化率及其幼虫和蛹的存活率都有很大影响。利用 DEI 技术可对粘虫幼虫和蛹在不同环境条件下的发育过程作动态研究, 以利于寻求更为有效的虫害防治方法。本研究清楚地观察到粘虫蛹的发育过程中

触角、足、翅以及神经系统和消化系统等演变过程。我们将进一步开展粘虫蛹的更为细微的发育过程研究。

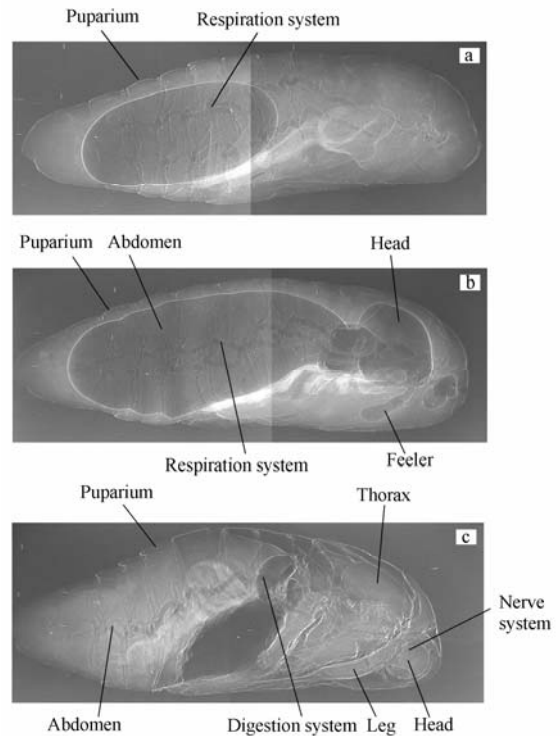


图 2 粘虫蛹发育不同时期的衍射增强峰位像,  $E=12 \text{ keV}$ 。(a) 第一天的蛹 (b) 第四天的蛹 (c) 第六天的蛹  
Fig.2 DEI top-images of the pupa in (a) Day 1, (b) Day 4 and (c) Day 6

## 参考文献

- 1 Attwood D. 1999 Soft X-rays and Extreme Ultraviolet Radiation, Cambridge University Press
- 2 Momose A, Takeda T, Itai Y, et al. J Synchrotron Rad, 1998, 5: 309—314
- 3 Ando M, Chen Junyuan, Hyodo K, et al. Jpn J Appl Phys, 2000, 39: L1009—L1011
- 4 Davis T J, Gao D, Gureyev T E, et al. Nature, 1995, 373: 595—598
- 5 Baruchel J, Hartwig J, Pernot-Rejmankova P. J Synchrotron Rad, 2002, 9: 107—114
- 6 黄万霞, 袁清习, 田玉莲, 等. 物理学报, 2005, 54(2): 677—681  
Huang W X, Yuan Q X, Tian Y L, et al. Acta Phys Sin, 2005, 54(2): 677—681
- 7 袁清习, 田玉莲, 朱佩平, 等. 核技术, 2004, 27: 725—728  
Yuan Q X, Tian Y L, Zhu P P, et al. Nucl Tech, 2004, 27: 725—728
- 8 Wilkins S W, Gureyev T E, Gao D, et al. Nature, 1996,

- 384: 335—338
- 9 Peter Cloetens, Raymond Barrett, Jose Baruchel, *et al.* J Phys D: Appl Phys, 1996, **29**: 133—146
- 10 黄万霞, 田玉莲, 朱佩平, 等. 物理学报, 2002, **51**: 1040—1043  
Huang W X, Tian Y L, Zhu P P, *et al.* Acta Phys Sin, 2002, **51**: 1040—1043
- 11 黄青春, 卓军, 曹松, 等. 昆虫学报, 2006, **49**(2): 189—193  
Huang Q C, Zhuo J, Cao S, *et al.* Acta Entomol Sin, 2006, **49**(2): 189—193
- 12 沈燕, 牵春艳. 植物医生, 2006, **19**(2): 7—8
- Shen Y, Qian C Y. Plant Doctor, 2006, **19**(2): 7—8
- 13 朱佩平, 袁清习, 黄万霞, 等. 物理学报, 2006, **55**(3): 1089—1097  
Zhu P P, Yuan Q X, Huang W X, *et al.* Acta Phys Sin, 2006, **55**(3): 1089—1097
- 14 Chapman D, Thomlinson W. Phys Med Biol, 1997, **42**: 2015
- 15 Zhong Z. Nucl Instrum Methods in Phys Res A, 2000, **450**: 556
- 16 Fitzgerald R. Physics Today, 2000, JULY 23
- 17 Zhu P P, Wang J Y, Yuan Q X, *et al.* Appl Phys Lett, 2005, **87**: 264101

### Structure and morphology of *mythimna* pupa under diffraction enhanced imaging

HUANG Wanxia<sup>1</sup> GE Siqin<sup>2</sup> YUAN Qingxi<sup>1</sup> ZHU Peiping<sup>1</sup> WANG Junyue<sup>1</sup> LIU Yijin<sup>1</sup>  
CHEN Bo<sup>1</sup> SHU Hang<sup>1</sup> HU Tiandou<sup>1</sup> WU Ziyu<sup>1</sup>

*1* (Institute of High Energy Physics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

*2* (Institute of Zoology, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract** As a technique of X-ray phase contrast imaging, the diffraction enhanced imaging (DEI) attracts much interest due to its high resolution and contrast. The top images of DEI were used to study the growth of a complete metamorphic *mythimna* in the period of pupa. Clear images about the pupa structure were obtained. The entire growth process of the pupa was observed, including the evolvement of part of organs and tissues from larva to imago.

**Key words** Diffraction enhanced imaging, Synchrotron radiation, *Mythimna* pupa

**CLC** O572.4, Q969.42