

X 射线显微分析法及其在生物学医学中的应用

徐 伟

(中国科学院生物物理研究所电镜组)

X 射线显微分析法是利用聚焦电子束激发被分析物体产生的特征 X 射线来分析该物体中化学元素的组成和数量的方法。

早在本世纪初, Moseley 等就提出用电子激发物体产生 X 射线, 进行元素鉴定的设想。四十年代 Costaing 等把 X 光谱技术与电子光学技术结合起来, 才实现了这种设想。从 1951 年出现第一台显微分析装置以来, 此项技术得到了很大发展。目前世界上已有数以千计的各种类型 X 射线显微分析装置广泛应用于物理、金属、地质、材料科学、生物学和医学。由于早期显微分析装置的空间分辨率和探测感度很低, 加之生物样品独特的性质, 限制了该技术在生物学领域的应用。六十年代中期以来电镜和显微分析装置有了长足的进步。同时, 生物样品的分析理论和样品制备技术获得了很大发展。使得该技术能以高分辨率高感度定性, 甚至定量描述组织细胞中某些元素或化合物与超结构之间的关系。它已成为研究生物超结构与功能关系的重要技术。

一、X 射线显微分析的基本原理和装置

1. 基本原理

当具有一定能量的电子入射到一物体中时, 入射电子与该物体中原子的核外电子相互作用, 使一内层轨道电子脱离轨道成为二次电子, 而原子变成离子, 这就是电离。电离使处于基态的原子变成能量较高的激发态。这时处于高能阶的外层电子迅速跃迁到内层空位上, 同时将多余能量以电磁波形式释放出来, 这就是 X 光。如图 1 所示, 当原子失去一 K 层电子时,

它就处于能量为 E_K 的 K 激发态。如果一 L 层电子跃迁到 K 层空位, 原子就变成能量较低的 L 激发态, 能量为 E_L 。同时放出 X 光, 其波长 λ 符合下式:

$$E_K - E_L = hc/\lambda_{K\alpha}$$

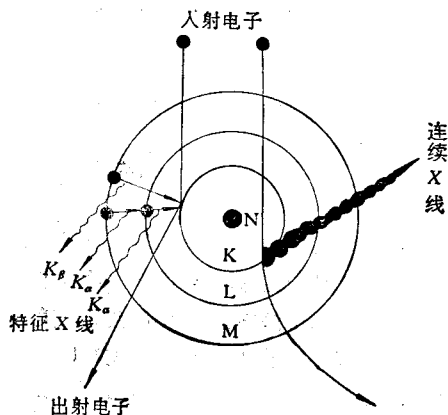


图 1 X 线产生原理

这里 h 是普朗克常数, c 为光速, $\lambda_{K\alpha}$ 是该元素 K_{α} X 线的波长。由于各层轨道的能量是一定的, 所以放出的 X 射线的波长也有特定数值, 称为特征 X 射线。它是不连续的线状光谱。特征 X 射线和原子序数 Z 的关系是:

$$\lambda \sim \frac{1}{(Z - \sigma)^2} \quad \sigma \text{ 为常数}$$

由此得知, 每种元素有特定的 X 射线波长。显然, 根据特征 X 射线波长就可以对元素进行定性分析。而根据 X 射线强度就可以对元素进行定量分析。

如果入射电子在原子核库仑场作用下不但改变方向, 而且不同程度能量损失, 损失的能量也变成 X 射线放出。由于能量损失可能是

小于入射电子初始能量的任何值，所以由此产生的X射线波长是连续变化的，称为连续辐射或韧致辐射。这种X射线不能用于定性分析。而且会叠加在特征X线上，构成背景，影响定性分析的感度。但它可以用来测量薄的和超薄样品的被激发体积的质量，从而可用于进行元素的定量分析计算。

2. X 射线显微分析装置

它是电子显微镜与X射线谱仪相结合发展而成的。电镜可以是透射电镜，也可以是扫描电镜。X射线谱仪则有波长分散型谱仪和能量分散型谱仪两类。电镜与谱仪的相互配置有各种方式，其特点和用途也不尽相同。

(1) 波长分散型X射线谱仪(WDS)的原理

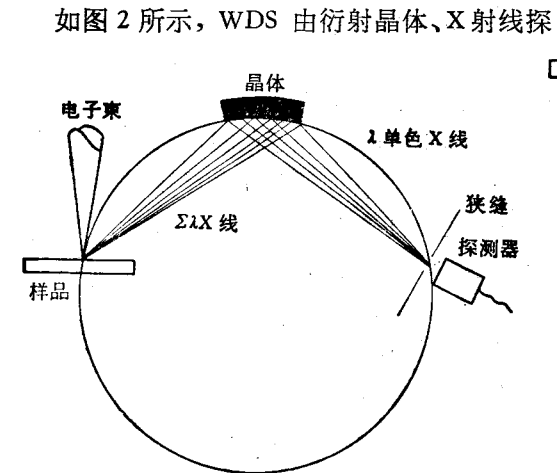


图2 波长分散型X射线谱仪基本原理图

测器及相应的机械、电气系统构成。当入射电子激发样品产生的X射线以一定角度 θ 入射到衍射晶体上时，发生衍射。不同波长的X射线将有不同的衍射角 2θ ，它符合Bragg公式：

$$\lambda = 2d \sin \theta$$

d 为衍射晶体面间距， λ 为特征X射线波长。当一包含多种波长的X光束入射到晶体时，经过弯曲晶体的衍射分光作用，聚焦到探测器狭缝处的是某种单色X射线。如果连续改变晶体对X光源(样品)的相对位置即改变入射角，就会在探测器狭缝处依次获得各种波长特征X射线。通常多采用直进式全聚焦谱仪。其特点是光源的X射线出射角不变，晶体沿此方向做前

后直线运动并转动，探测器也同时转动和移动。然而，X光源、晶体和探测器狭缝必须始终保持在同一圆周上。由于 $\sin \theta < 1$ ，显然分析全部元素的特征X射线（波长约为 $0.5-100 \text{ \AA}$ ）用一种晶体是不能完成的。一般均采用几种晶体接力地完成整个X光波段的分光。探测器多采用气体流动正比计数器。

(2) 能量分散型X射线谱仪(EDS)基本原理

单一波长X射线是由具有同一能量的量子所构成。其能量 E 与波长 λ 的关系是：

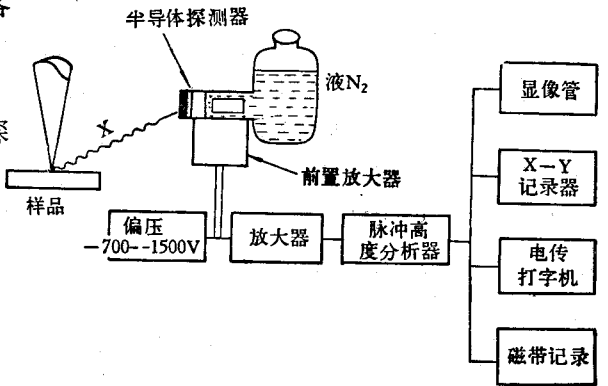


图3 能量分散型X射线谱仪原理图

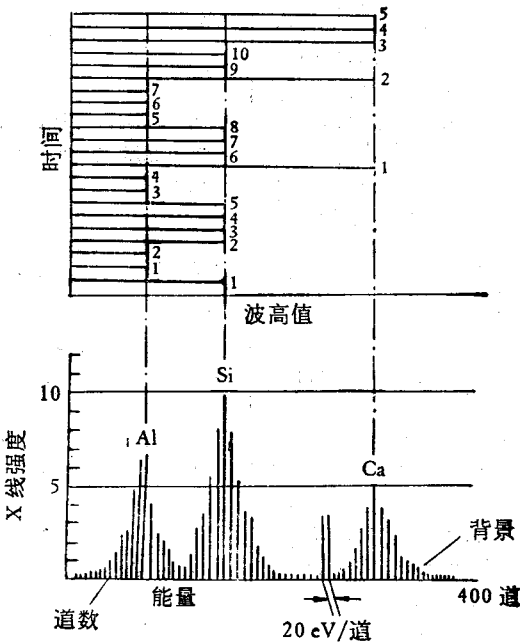


图4 多道脉冲高度分析器原理图

$$E = hc/\lambda = 12.4/\lambda(\text{keV})$$

利用特征X射线的能量不同来展谱的仪器称为能量分散型谱仪。如图3所示,当来自样品的X线通过谱仪窗口进入半导体探测器时,X光子作用于硅探测器晶体产生电子-空穴时,进而在电场作用下放电,产生电脉冲。产生一对电子-空穴需3.8eV能量,则一个能量为E电子伏特的量子产生的电荷数为:

$$Q = (E/3.8) \cdot (1.6 \times 10^{-19}) \text{ 库仑}$$

具有不同能量的X光子产生了不同高度的电脉冲。这些脉冲经过放大器放大后送入多道脉冲高度分析器,按脉冲高度不同加以区分,分别送入不同的计数道,最后在显像管或记录仪上显示出按能量展开的X光谱如图4。图中横坐标道数表示脉冲高度即X光子能量,纵坐标表示脉冲数即X射线强度。

(3) WDS 和 EDS 性能比较

EDS	WDS
a. 体积小,可装在近样品部位,提高了X射线利用率。因而探测感度高。	a. 体积大、机构庞杂。机械系统如重复性不好,易造成分析误差。
b. 探测器收集效率高,故可用较小束流(10^{-10} — 10^{-12} 安),因而容易得到较小束径,提高了空间分辨率,减小了样品污染和辐射损伤。	b. 所需束流大(10^{-7} — 10^{-6} 安),X射线利用率低。对样品的污染和辐射损伤大。
c. 样品对探测器可移动范围大,可达几毫米。允许对表面较粗糙样品进行分析。	c. 样品可移动范围小,只有几微米。只能分析平滑样品。
d. 定性分析速度快,几分钟显示全部元素特征谱。	d. 定性分析速度慢。多元素同时分析需多道谱仪。
e. 能量分辨率低,可达150 eV左右,使一些谱线重叠。	e. 能量分辨率高,可达5—10 eV。
f. 有较高背景噪音,峰(信号)背(噪音)比低,约为100。定量分析困难。	f. 峰背比值高,可达1000。定量分析精度高。
g. 探测器需在低温下工作和保存,需不间断供给液氮。维护困难。	g. 维护简便。
h. 探测元素范围由 Na^{11} — U^{92} 。	h. 探测元素范围大,由 Be^4 — U^{92} 。

两种谱仪各有优缺点,不能互相取代,需按照分析目的和要求选用。以前以应用WDS为主。然而近年随着EDS仪器和分析方法的迅速发展,特别是在它所具有的许多优点表明在生物学研究中的应用有着很大潜力以后,目前EDS在生物学中的应用日益广泛,已成为生物电镜术中非常普遍使用的仪器。

(4) X射线显微分析装置的构成

WDS和EDS可分别或同时与各种类型电镜相配置,构成不同类型显微分析装置。现简介如下:

(a) 电子探针显微分析器(EPMA)

它是最早的显微分析装置。它的空间分辨率和探测感度差。在生物学研究中用途不大。它的主要功能已为扫描电镜代替。

(b) 分析电子显微镜(EMMA)

它是由透射电镜发展而成的。以全聚焦WDS为主的谱仪,使元素探测数量达 10^{-16}g ,它可使超薄切片样品以高分辨率成像(5—10 Å)和进行高效率X射线显微分析。其构造特点是在紧靠样品上方附加一锥形聚光镜,使电子束聚焦到 0.1μ 左右。分析时可在荧光屏见到超薄切片样品的高质量像,因而可精确确定分析部位。只能做静态分析。著名的英国EMMA-4型分析电镜就是这种类型装置,它带有WDS和EDS。

(c) 透射电镜带X射线谱仪(TEM + X-Ray)

目前几乎所有高级电镜都提供显微分析附件。这种装置有两个缺点:①它不能使电子束聚焦得很细,一般只能达 1μ ,因而空间分辨率低。②只能装EDS。只能进行超薄切片样品的静态探针分析。

(d) 扫描电镜带X射线谱仪(SEM + X-Ray)

SEM能产生直径小于 100Å 的探针。可获得高分辨率二次电子像并可获得较高分析空间分辨率。有多种成像方式(二次电子像,反射电子像,吸收电子像等)和多种分析方式(静态探针分析、线扫描和扫描X光像)。适用于厚的

块状样品。

(c) 扫描透射电镜带X射线谱仪(STEM+X-Ray)

STEM可以获得较好的空间分辨率,因为它可以在很小束径内使用较高束流。图像反差高,可以观察不染色生物样品。图像分辨率达 $10\text{ \AA}$ 左右。可观察和分析超薄和薄样品(1μ 左右)。这种装置对于生物学应用方面有广阔前景。

3. 空间分辨率和探测感度

a) X射线显微分析空间分辨率不仅取决于探针直径而且取决于样品特性(密度、厚度和被分析元素的激发阈值能量)和分析条件(加速电压等)。一般按样品厚度分三种情况(图5)。

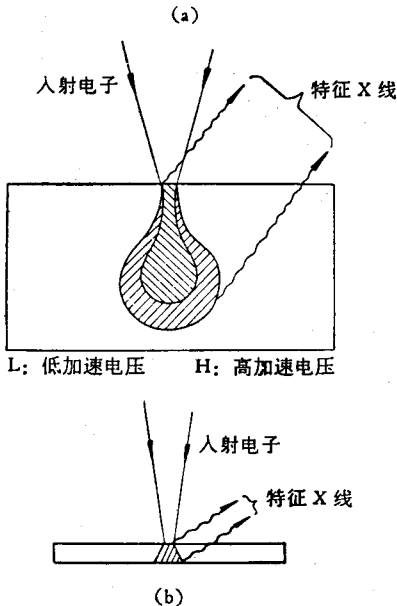


图5 厚样品与薄样品的X线发射体积

- (a) 厚样品中电子散射大,分析空间分辨率大大依赖于束电子能量。
- (b) 薄样品散射极小,空间分辨率依赖于厚度和束径。

厚样品具有加速电子不能穿透的厚度,指扫描电镜中常用的块状样品。入射电子在厚样品中被多次散射而逐步损失能量,直到能量低于特征X射线的激发阈值能量。因此加速电子在样品内形成一个产生X射线的实际体积,称“有效体积”。显然有效体积远大于探针直径,而空间分辨率不会小于有效体积。有效体积大小取决于加速电压和样品密度。加速电压越高,入

射电子能量越大,有效体积就越大,当然空间分辨率也就越差,虽然产生的X射线强度大。样品密度大时,如硬组织,在一定的加速电压下,有效体积小,而密度小的样品如软组织,在相同加速电压下有效体积就较大。前者的空间分辨率好于后者。然而,过低的加速电压会大大降低X线强度;过高的加速电压会产生次级X射线(荧光),影响分析的分辨率和准确性。因此必须根据样品特性和分析要求,适当选择分析条件。

薄样品(厚 $\frac{1}{4}$ — 10μ) 大多数入射电子可

以穿透它,只损失较少能量。因此在探针行进方向上的分辨率等于样品厚度,而横向分辨率取决电子束发散程度。但这种发散已大大低于在样品中的射程。显然,这时空间分辨率要好于厚样品。但X射线强度较小。

超薄样品(厚度小于 $2000\text{ \AA}$),在加速电压大于 30 kV 时,电子完全穿透样品。入射电子在样品中的发散可以忽略。因此空间分辨率大大提高,差不多等于探针直径。而当允许较低X线强度时,可使用较小探针直径。如利用探测感度高的EDS,探针可小到几百埃($\text{\AA}$),因而可以分析很小区域,如线粒体内小颗粒状物。

(2) 探测感度

能否探测出样品中某种元素取决于区别该元素的峰值与背景的能力。这种区别定义为,产生一个高于背景的值至少是谱线背景的标准偏差的两倍以上的峰所需的元素数量。这就是元素的最低可探测数量。

对大多数元素来说,X射线分析可探测的元素浓度低至 0.1 — 0.01% 。各种元素的最低可探测数量也依样品厚度而异。厚样品的总的被分析体积较大,最低可探测数量也较大,为 10^{-14} — 10^{-16} g 。对于薄的和超薄样品,被分析体积小,则达 10^{-18} g 。另外,X射线强度也限制了探测感度。如果采用高亮度电子枪如场发射电子枪,在保证空间分辨率条件下,可以改善探测感度。

4. 关于定量分析

定量分析就是测量元素的局部质量分数,

即一种被测元素质量与被分析体积的总质量之比。应当指出,各种元素并不是以同样效率激发的,而且所产生的各种X射线在样品中受到不同的吸收作用。因此所测得的X射线峰值高度比例不能代表元素的量的比例。由于生物系统的复杂性超过非生物材料,所以把已有的关于定量分析的理论和方法应用于生物样品时要十分慎重。简言之,对于三种厚度的样品,测量质量分数的方法也不相同。对于厚样品,一种元素的特征X线峰值强度,在扣除背景之后与一种组成元素已知的标准样品比较,得出该元素质量分数的半定量测量。然后对它再进行原子序数修正、吸收修正和荧光修正等计算,得到准确的定量测量。对薄片生物样品,特征X线峰值强度与样品厚度差不多成正比。而且X射线连续谱的强度与被分析体积的总质量以及平均原子序数成正比。在生物样品中后者通常是比较恒定的。于是,特征X射线峰值强度(扣除背景)与连续辐射强度之比值给出了该元素局部质量分数的测量。但要注意,在样品固定、染色过程中如果引入重元素如钨、铅等,则这种关系就不成立。此外,对超薄样品还应考虑来自塑料支持膜的连续辐射的贡献。

生物样品定量分析均采用计算机进行修正计算。近年来一些作者已编制出生物样品定量分析的计算程序。

二、X 射线显微分析样品制备法

鉴于X射线显微分析方法的特点,对生物样品制备提出了不同于常规电镜生物样品制备方法的特殊要求。在进行一项分析工作之前,必须充分考虑到样品制备程序可能对样品产生的各种影响,例如元素的流失、移位、外来元素的引入,固定剂和染色剂等试剂以及支持膜,格网的选用及其对所分析元素的影响等,选择适当的样品制备方法。这里只简列几种常用的主要制备方法:

1. **一般组织学制备法:** 又称“湿法”。即样品经过固定、脱水、包埋及切片,或许还要经过细胞化学反应和染色。此法只适合于这些步

骤对被分析元素不发生重大影响的样品。

2. **沉淀法:** 在样品固定时,于固定剂中添加某种化学物质,使与被分析元素形成不溶解的复合物,以抗御而后的操作对元素的抽取作用。其它程序与上述方法同。例如用醋酸银或乳酸银沉淀氯离子,用高铈酸钾沉淀钠离子,用硝酸钴沉淀钾离子等方法。

3. **冰冻方法:** 首先将组织快速冰冻,以固定结构和化学成分,然后可将样品进行冰冻干燥,冰冻置换或冰冻切片。这种方法较好地保存了被分析元素;结构保存也可满足分析要求。

4. **干燥方法:** 样品不经固定而直接将水份蒸发。通常使用空气干燥法、热固定法或临界点干燥法。这种方法用于不需切片的薄样品,如血液、精液、腹水等悬液涂片。

5. **特殊样品制备法:** 用于一些特殊的分析工作。例如 Thomas 对分离的细胞器悬液和较厚的塑料包埋切片进行显微灰化处理,以除去样品中有机物,增加不挥发元素的浓度,使之更易于测定。再如 Le-Chénne 在分析肾小管各部位所形成尿液的元素组成以研究尿的形成过程时,采用了一个在显微镜下校准的超微量滴管,从尿细管中吸取微量尿液,把极小的均等尿滴滴在一片铍片上,并冰冻干燥,然后进行定量分析。这种方法灵敏而精确。作者认为它对于体液的化学成分分析有着广阔前途。

三、X 射线显微分析的生物学医学应用简介

X射线显微分析法除了高分辨率,高探测感度的优点之外,还有一些突出的特点。首先,X射线谱比光学光谱简单,容易解释;第二,由于特征X线的波长和发射几率与元素结合状态关系不大,因此可探测各种状态下的元素,包括①无定形或结晶状沉淀(如骨中的钙);②与大分子或其它有机分子共价键结合的元素(如蛋白质中半胱氨酸残基中的硫);③通过离子键或其他非共价键与大分子或有机分子结合的元素(血红素中的铁);④游离的和可溶性状态的元素(如游离于细胞质中的钠钾离子)。这就大大

扩大了它的用途。第三,它属于非破坏性分析,可在组织细胞结构原位进行分析。这是一般化学分析方法达不到的。鉴于这些特点,X射线显微分析法在生物学医学中,有着广泛应用。

1. 组织中天然存在元素的测定

生物体内存在某些与生物功能密切相关的特殊元素。测定这些元素的分布和变化对研究这些功能及相关疾病病理提供了资料。例如:很多作者研究了甲状腺中碘、磷和钙等元素的存在及其与甲状腺激素产生的关系;前列腺中锌、钙等元素的分布及与激素产生的关系;用以探讨前列腺疾病的病理及螯合剂疗法的机理;胃壁细胞中氯离子的含量与盐酸生成的关系;人的单个的分裂中期染色体铺片中大量的硫、锌、钙、磷的分布及与其相应的化合物存在的关系等。例如 P. S. Ong 等人研究结果证明,正常的和癌变的甲状腺细胞之间,碘、磷和钙的水平有重大差异。这为甲状腺恶性肿瘤的组织学诊断提供了新的辅助信息。

探测体内元素的存在和变化对于植物学研究同样有着重要意义。例如有的作者经显微分析发现大麦叶绿体中含高浓度氯离子而桉树叶绿体中氯就很低,有的作者分析大麦根尖内皮层细胞的线粒体内颗粒,显示出线粒体在体内条件下可能有积累氯离子的作用;有的分析工作表明,钾离子在叶子气孔的守卫细胞和辅助细胞之间的穿梭机制和钾、氯离子的流动与叶子的有节奏运动有关。

2. 矿质化组织及组织矿质化过程的研究

这方面应用较早也较多,特别是对骨骼、牙齿的研究。此外还应用于动脉矿质化的前期过程等的研究。例如 Andersen 研究幼小鼠的胫骨矿质化过程。胫骨骨髓板的显微分析发现,柱状软骨细胞中含有磷而没有钙。磷表示了核酸的存在。而随着接近钙化区,软骨的磷即核酸含量渐少至消失。作者认为这种消失系软骨基质中存在高浓度碱性磷酸酶,它使有机磷化物分解产生高浓度无机磷酸根,促进了钙化过程。

3. 体内外来元素的测定

(1) X 射线显微分析广泛地应用于化学病

理学研究。例如某些由于外界化学物质进入生物体内造成的职业病和其它中毒症的研究。一些作者分析了矿工中常见的矽肺病、锡尘病患者肺组织中硅、锡、镁、铁等元素的存在方式,对研究此类疾病病理有重要意义。此外,在研究重金属中毒病理方面也有大量工作。如探讨重金属中毒生物的肾组织中元素的积累和中毒机理;汞中毒生物的毛发中汞的分析;服用某些含重金属的药物后,追踪重金属在体内分布和代谢情况等等。例如,Carroll 分析了铅中毒的鼠肾组织,发现了铅颗粒以不同尺寸和形状存在于肾皮质部位,且在同一部位存在磷和钙等元素,由此证实了和假设相符合的结论:铅中毒与形成某种铅-蛋白质复合体有关。再如官泽等对服用某种含银药物十年后,在颈部、面、手、背部的皮肤产生灰黑色色素沉着的所谓银皮症患者的皮组织进行 X 射线分析,发现在患部皮组织的汗腺、汗管等部存在含有硫和银元素的颗粒状物。

② 软组织代谢异常 例如 Goldfischer 等研究了“Wilson”病——一种铜代谢异常疾病。X 线分析发现患者肝细胞中有铜的积累。铜存在于肝细胞中的含有丰富酸性磷酸酶的颗粒——溶酶体中。这给该病的病理学研究提供了新的资料。此外,一些作者利用 X 射线分析法研究了血液病患者血细胞中元素的变化;神经原纤维退化病理等。

③ 示踪元素的探测 例如 Tauton 等使用 Pb-EDTA 做为示踪物来研究水在植物体内的运输路径。还有很多作者使用镭做示踪物研究植物体运输途径。

4. 组织化学和细胞化学应用

把 X 射线显微分析应用于组织化学和细胞化学,是最有希望的一个发展领域。

① 组织化学染色方法与 X 射线分析相结合扩大了组织化学应用。例如 Sims 用大鼠的脊髓做材料制备石蜡切片。然后用 gallo cyanin chrome alum 染色 24 小时。光学显微镜观察证明,染色部位是细胞核、核仁和 Nissl 小体等。X 射线分析证明了元素铬的分布和染色部位完

全一致。如果染料组成是恒定的,则可用X射线分析铬的含量,得出核酸分布量的数据。作者认为这种方法可以发展为探测癌细胞的方法,并开辟了在组织内原位定量测定生物大分子的可能途径。

② 酶的组织化学和细胞化学方面的应用可应用于研究和证实一种细胞化学反应系统,并有助于区别真实反应和假像。例如,Ryder等用显微分析法证实了 Gomori 方法证明酸性磷酸酶反应的产物中含有铅和磷。再如 Becuukes等用显微分析法得出钠、钾 ATP 酶在细胞化学反应中,原初反应产物是 KMgPO_4 和 $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ 的混合物。

还可应用于把酶细胞化学和酶组织化学方法,从用在电镜或光学显微镜下可见的金属元素做捕获剂的一般程序,发展到可用电镜或光学显微镜下不可见的元素做捕获剂。例如 Holt 等把X射线分析应用于酯酶的吲哚酚方法,以发现在细胞溶酶体中以一个强的钡峰出现的偶氮吲哚酚的亲钡反应产物。再如 Engle 对用改进的 Gomori 法证明人骨骼肌切片中肌浆球蛋白 ATP 酶的组织化学方法进行实验。通常是将组织切片用含底物 ATP 的介质进行孵育。释放出的 PO_4^{3-} 与介质中钙离子生成光学显微镜下不可见的沉淀。然后用含 CO^{2+} 溶液置换 Ca^{2+} ,再用 S^{2-} 置换 PO_4^{3-} ,从而在酶的作用位区产生光学显微镜下可见的 CoS 沉淀。但如果对切片进行半孵育,使酶反应停止在生成光学显微镜下不可见的 CaHPO_4 阶段。用X射线显微分析法分析 Ca 和 P 的部位和 CoS 沉淀部位一致。这证明应用X射线显微分析可以简化组织化学和细胞化学反应步骤,减少生成假像的机会;扩大了方法的应用范围;并可给定

量组织化学和细胞化学提供条件。

③ 其它细胞化学方面的应用 Andersen 用X射线显微定量分析研究了南美大蛇心脏穿刺取样的红血细胞。根据对细胞中磷、硫、铁、钾、钠等元素定量分析数据,计算出每个细胞的核和胞质中核酸和血红蛋白的平均含量。其结果和用其它方法分析结果类似,同时证实核内存在有血红蛋白。

此外,一些作者使用X射线显微分析于免疫细胞化学反应及甾体化合物研究。例如可通过测定铁蛋白标记抗体中的铁元素等来测定细胞内免疫反应。再如利用特殊元素标记甾体,如用汞标记雌二醇,得到4-汞-17 β -雌二醇标记化合物,用X射线显微分析法研究薄切片样品的亚细胞区域内汞标记的甾体化合物与受体蛋白质的作用。

参 考 文 献

- [1] Chandler, J. A.: *Electron microscopy and Cytochemistry* (ed. by E. Wisse, et al.), North-Holland Publishing Company, 1974.
- [2] Chandler, J. A.: *Practical Methods in electron microscopy* (ed. by Audrey M. Glauret), North-Holland Publishing Company, 1977.
- [3] Hall, T. A.: *Physical Techniques in Biological Research* (ed. by Gerald Osler.), V. I. A, Academic Press, 1971.
- [4] Hall, T. et al.: *Microprobe Analysis as Applied to Cells and Tissues*, Academic Press, 1974.
- [5] James, R. Coleman et al.: *Principles and Techniques of Electron microscopy* (ed. by M. A. Hayat), V. 4, Van Nostrand Reinhold Company, 1975.
- [6] Russ, J. C.: *Electron Microscopy and Cytochemistry* (ed. by E. Wisse et al.), 1974.
- [7] R. F. M. Van Steveninck, et al.: *Electron Microscopy and Cytochemistry of Plant Cells* (ed. by J. L. Hall), Elsevier/North-Holland Biochemical Press, 1978.
- [8] 渡部忠雄、永谷隆: 细胞, V. 10, No. 4, 1978.

[本文于1979年9月20日收到]

(上接第80页)

4. 生物医学信号处理的数学理论、数学模型与工程模型;

5. 光学信息加工技术与其它先进技术在生物医学中的应用;

6. 其它有关的科研专题内容。

请于1981年10月底前将1000字以内的论文摘要

寄北京中关村中国科学院生物物理研究所科技处。文摘经审议后如符合交流范围,再通知寄送全文供审查。

凡已在公开发行人物上发表和在全国性学术会议上宣读通过的,均不接纳。

论文摘要将由会议统一印发。需要在会上散发全文者,请自行打印120份。

会议地点确定后另行通知。